



MODELOS DE TRANSFORMADORES A ALTAS FRECUENCIAS

Autor: González López, Carlos.

Director: Rouco Rodríguez, Luis.

RESUMEN DEL PROYECTO

Una de las causas del fallo de los transformadores de potencia son las sobretensiones de origen atmosférico (debidas a la caída del rayo).

La protección de los transformadores de potencia frente a sobretensiones atmosféricas se realiza por medio pararrayos (resistencias no lineales de óxido de zinc). La comprobación de la idoneidad de la protección proporcionada por los pararrayos frente a sobretensiones de origen atmosférico requiere la simulación detallada de las instalaciones de alta tensión en la que se encuentran los transformadores de potencia.

Por supuesto, un componente fundamental del modelo de la instalación es el modelo del propio transformador.

La caída del rayo da lugar a sobretensiones de frente rápido (con duración de microsegundos). Ello quiere decir que el modelo del transformador debe representar el comportamiento del mismo para frecuencias de MHz (altas frecuencias).



El modelo del transformador estudiado en los cursos de grado de Máquinas Eléctricas representa de forma precisa el comportamiento del transformador a la frecuencia fundamental (50 Hz). Los componentes del citado modelo son reactancias que representan los flujos de magnetización y de dispersión y las resistencias que representan las pérdidas en el hierro y el cobre.

El modelo del transformador a alta frecuencia incluye, por el contrario, la representación de las capacidades entre arrollamientos y de los arrollamientos a tierra e inductancias propias y mutuas de los arrollamientos.

OBJETIVOS

El objetivo del presente proyecto es el estudio de los modelos de transformadores a alta frecuencia a utilizar en estudios de protección de transformadores de potencia frente a sobretensiones de origen atmosférico.

De forma más precisa, se pretende comparar el modelo simplificado de capacidades concentradas entre arrollamientos y de los arrollamientos a tierra con modelos de capacidades distribuidas entre arrollamientos y de los arrollamientos a tierra e inductancias y la idoneidad del modelo simplificado para estudios de protección de transformadores de potencia frente a sobretensiones de origen atmosférico.

Para ello se dispone de información detallada de transformadores de gran potencia proporcionada por un fabricante nacional. Esta información está disponible merced a un proyecto de investigación desarrollado por el director del proyecto para una gran empresa de distribución de energía eléctrica.



PROCEDIMIENTO

Se procederá a la manipulación de matrices de capacidades e inductancias, aportadas por el fabricante, para la obtención de resultados a través de:

➤ **Repuesta temporal**

Se analizará la respuesta en el tiempo de los arrollamientos ante impulso de frente rápido (tipo rayo) con el fin de detectar las sobretensiones que puedan afectar al aislamiento de la máquina.

➤ **Respuesta en frecuencia**

Analizaremos la respuesta de los arrollamientos a un amplio rango de frecuencia. Con esto obtendremos un modelo reducido de capacidades equivalentes entre arrollamientos y de éstos mismos a tierra haciendo hincapié en los resultados a frecuencia industrial y a altas frecuencias.

Todo ello nos ayudará a obtener un conocimiento y comprensión más profunda sobre el comportamiento de estas máquinas ante fenómenos a altas frecuencias.



TRANSFORMER MODELS IN HIGH FREQUENCIES

SUMMARY

One of the causes of failure in transformers is due to overvoltage produced by atmospheric phenomena such as bolts of lightning.

High voltage surge arresters, made up of non-linear zinc oxide resistors, are responsible for the protection of power transformers during atmospheric overvoltage. Testing the suitability of the protection against these phenomena requires a detailed simulation of the nearby high voltage installation where the power transformer is located.

Of course, a fundamental component of the installation model is the transformer model itself.

In the event of a bolt fall, it provokes a fast overvoltage wave-front (during microseconds). This means that the transformer model must represent its behaviour for MHz frequencies.

The model for transformers studied in the past based in Electric Machines theory represents the transformer behavior for fundamental frequency (50 Hz) accurately. The model is composed of reactances which represent the magnetic and leakage flux and resistors which refer to both iron core and copper losses.



The high frequency transformer model includes however the representation of capacitances between windings and between earth and windings as well as the mutual and self inductances of the windings

TARGETS

The target of the present project is to study the high frequency transformer models to use in analysis of protections and atmospheric overvoltage in power transformers.

In detail, we will try to compare the simplified model of capacitances between windings and between earth and windings, with the distributed capacitances and inductances in the whole transformer and its suitability for the studies of protection and high frequency transients in power transformers.

In order to carry out this project, we have been given detailed information about the transformer by a national manufacturer. This information is available thanks to a research project developed by the project director for a large electrical energy distributor company.

PROCEDURE

We will proceed to manipulate both capacitance and inductance matrix, supplied by the manufacturer to obtain the results via:

- Time response



We will analyze the response in the domain of time of the windings against a fast wave-front impulse in order to detect overvoltage that could damage the machine insulation.

➤ Frequency response

We will study the response of the windings to a wide range of frequencies. By means of this analysis we will obtain a reduced equivalent capacitance model between windings and windings to earth. In addition, we will emphasize in the fundamental frequency and high frequencies.

As a result of this research, we will get know deeper the way a transformer behaves against high frequency phenomena.

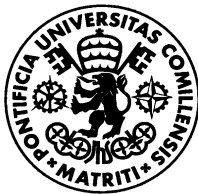


Agradecimientos

Quiero agradecer el apoyo que he recibido por parte de mi familia y de mi novia Carla a lo largo de todas las fases anímicas que he experimentado con este proyecto. Desde el inicio con toda la ilusión del mundo, pasando por fases de bloqueo en las que no sabía por dónde seguir, y con la obtención de resultados poco halagüeños, hasta cuando por fin llegaba a conclusiones que se aproximaban más a la realidad. Por todo ello, este proyecto también debería llevar su firma.

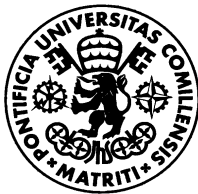
También deseo hacer mención de agradecimiento a mi director Dr. Luis Rouco por su gran aportación en el proyecto al dar luz en fases de oscuridad y desconcierto, gracias a su gran experiencia y sabiduría. Además, agradecerle su disponibilidad en las reuniones periódicas que hemos tenido a lo largo del curso, a pesar de su apretada agenda.

Espero que este proyecto, fruto de todos, sirva para acercarnos cada vez más y mejor al conocimiento de los transformadores.

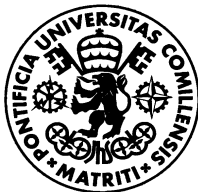


Índice de la memoria

Parte I	MEMORIA	11
Capítulo 1	SOBRETENSIONES	12
1.1	Introducción.....	12
1.2	Sobretensiones temporales.....	14
1.2.1	Sobretensiones debidas a la desconexión de cargas	14
1.2.2	El fenómeno de autoexcitación	15
1.2.3	Efecto Ferranti.....	16
1.2.4	Faltas monofásicas a tierra	18
1.3	Sobretensiones de maniobra.....	20
1.3.1	Despeje de faltas	20
1.3.2	Conexión de baterías de condensadores.....	22
1.3.3	Desconexión de pequeñas corrientes inductivas	23
1.3.4	Conexión de líneas en vacío.....	25
1.4	Sobretensiones atmosféricas	29
Capítulo 2	TRANSFORMADORES	32
2.1	Introducción.....	32
2.2	Transformadores a frecuencia industrial.....	33
2.2.1	Principio de funcionamiento de un transformador ideal	33
2.2.2	Principio de funcionamiento de un transformador real	37
2.2.3	Circuito equivalente de un transformador	38
2.2.4	Ensayos del transformador	40
2.2.4.1	Ensayo de vacío.....	40
2.2.4.2	Ensayo de cortocircuito	41
2.3	Transformadores a altas frecuencias.....	42
Capítulo 3	DETALLES CONSTRUCTIVOS DEL TRANSFORMADOR.....	48



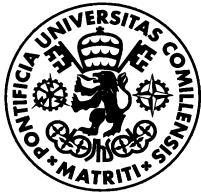
3.1	Forma constructiva de la matriz de inductancias.....	48
3.2	Forma constructiva de la matriz de capacidades	49
3.3	Apariencia y organización de inductancias.....	49
3.4	Apariencia y organización de matriz de capacidades	50
Capítulo 4	RESPUESTA TEMPORAL	53
4.1	Introducción.....	53
4.2	Procedimiento	55
4.3	Resultados	59
4.3.1	Impulso 1,2/50 us de 850 kV de cresta por alta	59
4.3.2	Impulso 1,2/50 us de 125 kV de cresta por baja	63
4.4	Conclusiones.....	67
Capítulo 5	RESPUESTA EN FRECUENCIA.....	68
5.1	Introducción.....	68
5.2	Comportamiento de componentes básicos con la frecuencia.....	74
5.3	Tipos de defectos y deformación de los bobinados por cortocircuitos.....	77
5.4	Método de respuesta en frecuencia por barrido	79
5.4.1	Principales tipos de ensayo FRA.....	79
5.5	Procedimiento	83
5.5.1	Capacidades equivalentes con matriz de capacidades.....	83
5.5.2	Capacidades equivalentes con matriz de inductancias y capacidades	85
5.6	Resultados	87
5.6.1	Capacidades equivalentes con matriz de capacidades.....	87
5.6.1.1	Monofásico.....	87
5.6.1.1.1	Monofásico con arrollamiento de regulación	88
5.6.1.1.2	Monofásico sin arrollamiento de regulación.....	88
5.6.1.2	Trifásico	88
5.6.1.2.1	Capacidades trifásicas con arrollamiento de regulación	89
5.6.1.2.2	Capacidades trifásicas sin arrollamiento de regulación	89



5.6.2 Capacidades equivalentes con matriz de inductancias y capacidades	90
5.6.2.1 Monofásico	90
5.6.2.1.1 Monofásico sin arrollamiento de regulación	90
5.6.2.2 Trifásico	92
.....	92
5.6.3 Respuesta en frecuencia del arrollamiento	94
5.6.3.1 Sin arrollamiento de regulación	94
5.6.3.2 Con arrollamiento de regulación	95
5.7 Conclusiones	96
Capítulo 6 FUTUROS DESARROLLOS	99
Bibliografía	101
Parte II CÓDIGO FUENTE	104
Capítulo 1 Código fuente	105
1.1 Capacidades equivalentes monofásicas con regulación	105
1.2 Capacidades equivalentes monofásicas sin regulación	107
1.3 Capacidades equivalentes trifásicas con regulación	109
1.4 Capacidades equivalentes trifásicas sin regulación	111
1.5 Respuesta temporal impulso de 850 kV por alta	113
1.5.1 Simulación	113
1.5.2 Función	116
1.6 Respuesta temporal impulso de 125 kV por baja	118
1.6.1 Simulación	118
1.6.2 Función	121
1.7 Respuesta en frecuencia sin regulación	123
1.8 Respuesta en frecuencia con regulación	126



Parte I MEMORIA



Capítulo 1 SOBRETENSIONES

1.1 INTRODUCCIÓN

Se denomina sobretensión a una tensión anormal entre dos puntos de una instalación eléctrica, superior al valor máximo que puede existir entre ellos en servicio normal. Las sobretensiones pueden provocar una ruptura dieléctrica, si el elemento afectado es un material aislante interno o un contorno, si se produce una descarga en el aire. Una ruptura dieléctrica también puede ser la causa de nuevas sobretensiones.

Las causas de las sobretensiones pueden externas o internas. Las maniobras son causas internas mientras que los rayos son causas externas.

Las sobretensiones también se pueden clasificar en función del tiempo que permanecen sin extinguirse en tres grandes grupos:

- Temporales.
- De maniobra.
- De origen atmosférico.

Las sobretensiones temporales son sobretensiones de larga duración (hasta varios segundos), poco amortiguadas y de frecuencia similar a la frecuencia fundamental.

Las sobretensiones de maniobra o de frente lento son sobretensiones de corta duración (milisegundos). Como su nombre indica tienen su origen en maniobras de elementos.

Las sobretensiones atmosféricas o de frente rápido son sobretensiones de muy corta duración (microsegundos). Como su nombre indica son debidas a la caída del rayo.

La figura 1 muestra los tipos de sobretensiones en el plano tiempo - tensión.

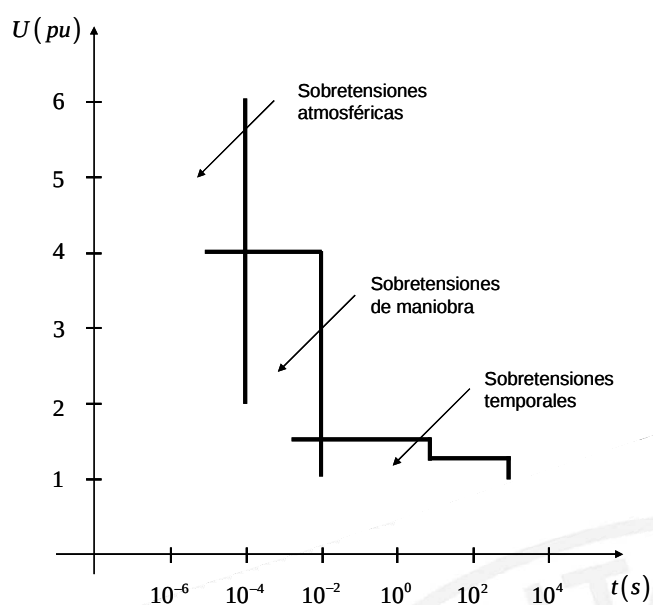


Figura 1

La capacidad de los aislamientos de soportar las diferentes tipos de sobretensiones se comprueba por medio de tres ensayos con ondas normalizadas:

- Tensión normalizada de corta duración (1 minuto) a frecuencia industrial (50 Hz). Asegura la capacidad de los aislamientos de soportar sobretensiones temporales.
- Impulso de tensión tipo de maniobra normalizado es un impulso de tensión con un tiempo de subida hasta el valor de cresta de 250 μ s y un tiempo de cola de



2500 μ s. Asegura la capacidad de los aislamientos de soportar sobretensiones de maniobra.

- Impulso de tensión tipo rayo normalizado es un impulso de tensión con un tiempo de subida hasta el valor de cresta de 1,2 μ s y un tiempo de cola de 50 μ s. Asegura la capacidad de los aislamientos de soportar sobretensiones atmosféricas.

1.2 SOBRETENSIONES TEMPORALES

Existen gran número de fenómenos en las redes eléctricas que pueden dar lugar a sobretensiones temporales. Entre otras merece la pena mencionar, las sobretensiones debidas a:

- la desconexión de cargas,
- el fenómeno de autoexcitación,
- el efecto Ferranti
- la ocurrencia de faltas a tierra.

1.2.1 SOBRETENSIONES DEBIDAS A LA DESCONEXIÓN DE CARGAS

Considérese que un generador alimenta a través de una línea (representada por una inductancia) una carga tal y como se muestra en la figura 2. El consumo de potencia reactiva de la línea es total o parcialmente compensado por un condensador paralelo $Z_C = -jX_C$. Si se desconecta la carga, entonces la relación entre la tensión de la carga V y la tensión del generador E es:

$$\frac{V}{E} = \frac{-X_C}{X_L - X_C} = \frac{1}{1 - \frac{X_L}{X_C}} \quad (1)$$

La relación entre las tensiones de la carga y del generador también se puede expresar en términos de la potencia reactiva del condensador Q_C y la potencia de cortocircuito en el nudo de carga S_{cc} como:

$$\frac{V}{E} = \frac{1}{1 - \frac{Q_C}{S_{cc}}} \quad (2)$$

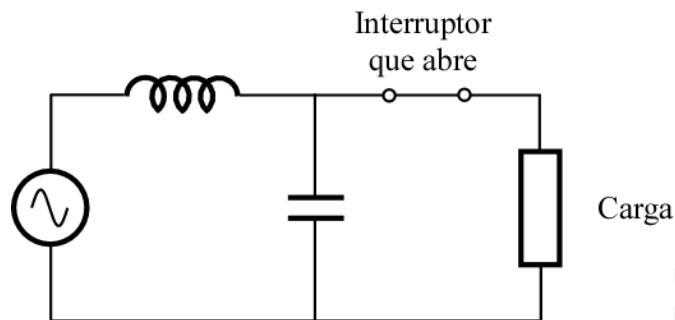


Figura 2

Es interesante hacer un ejemplo numérico. Cuando se pierde la carga en un nudo que tiene una potencia de cortocircuito de 5000 MVA y que tiene una batería de condensadores de 100 Mvar, la tensión en el nudo de carga llega al 102 %.

1.2.2 EL FENÓMENO DE AUTOEXCITACIÓN

En el caso de sobretensiones debidas a la desconexión de cargas del apartado anterior se considera que la frecuencia de la red es constante. Sin embargo, cuando un generador individual se desconecta de la red y pierde la carga, la frecuencia de la red es

precisamente la velocidad del rotor del generador. El fenómeno de autoexcitación se puede producir cuando el generador queda conectado a una línea larga (carga capacitiva) tras producirse la pérdida de carga. La pérdida de carga produce una aceleración del rotor del generador hasta que actúa su regulador de carga - velocidad. El aumento de velocidad se traduce en un aumento de frecuencia y en un aumento de la reactancia capacitiva con la que queda cargado el generador. Ello puede llevar a un crecimiento incontrolado de la tensión pese a que el generador esté equipado con regulador de tensión (ver Figura 3).

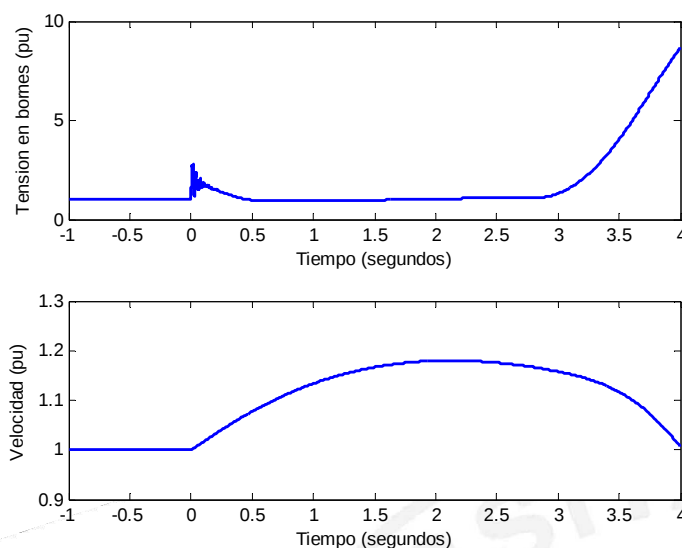


Figura 3

1.2.3 EFECTO FERRANTI

El efecto Ferranti consiste en la elevación de la tensión del extremo receptor de una línea en vacío alimentada desde el extremo emisor por una fuente de tensión.



Las ecuaciones de la línea eléctrica en régimen estacionario senoidal cuando se desprecian las pérdidas permiten calcular la tensión en cualquier punto a partir de la tensión y la corriente al comienzo de la línea:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}(x) \\ \mathbf{I}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta x & -jZ_c \sin \beta x \\ -\frac{j}{Z_c} \sin \beta x & \cos \beta x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{I}(0) \end{bmatrix} \quad (3)$$

La impedancia característica Z_c y la constante de propagación β vienen dadas a las expresiones:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$$
$$\beta = \omega \sqrt{LC}$$

El orden de magnitud de la velocidad de propagación es más conocido que el de la constante de propagación:

$$c = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{\omega}{\beta}$$

La figura 4 muestra la variación de la tensión a lo largo de una línea a 400 kV de 400 km de longitud cuya impedancia característica es de 300Ω y cuya velocidad de propagación 300.000 km/s cuando está en vacío a alimentada en el extremo emisor a la tensión nominal. Debido al efecto Ferranti la tensión en el extremo receptor llega a 109,5%.

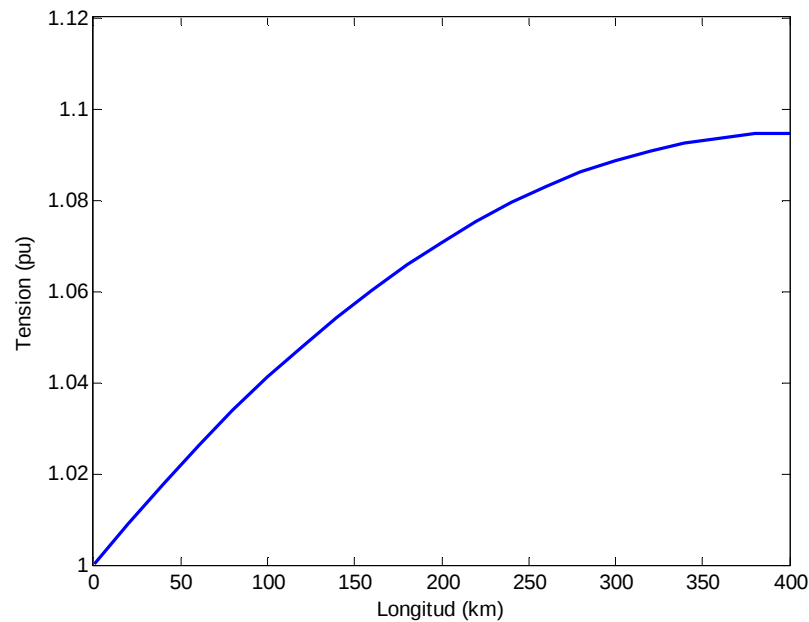


Figura 4

Por supuesto, la relación entre la tensión al final de la línea y la tensión al comienzo de la línea se puede calcular analíticamente como:

$$\frac{V(\ell)}{V(0)} = \frac{1}{\cos \beta \ell}$$

1.2.4 FALTAS MONOFÁSICAS A TIERRA

Las faltas monofásicas a tierra son las faltas más frecuentes en las redes eléctricas. La ocurrencia de una falta monofásica produce una sobretensión en las fases sanas que dependen del estado del neutro. Suponiendo que la falta ocurre en la

fase A, las tensiones en las fases sanas en relación con la tensión simple de la red vienen dadas por las expresiones:

$$\frac{V_B}{E} = a^2 - \frac{Z_0 - Z_1}{2Z_1 + Z_0} \quad (4)$$

$$\frac{V_C}{E} = a - \frac{Z_0 - Z_1}{2Z_1 + Z_0} \quad (5)$$

siendo Z_1 y Z_0 las impedancias de secuencia directa y homopolar de la red vistas desde el punto en falta y

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

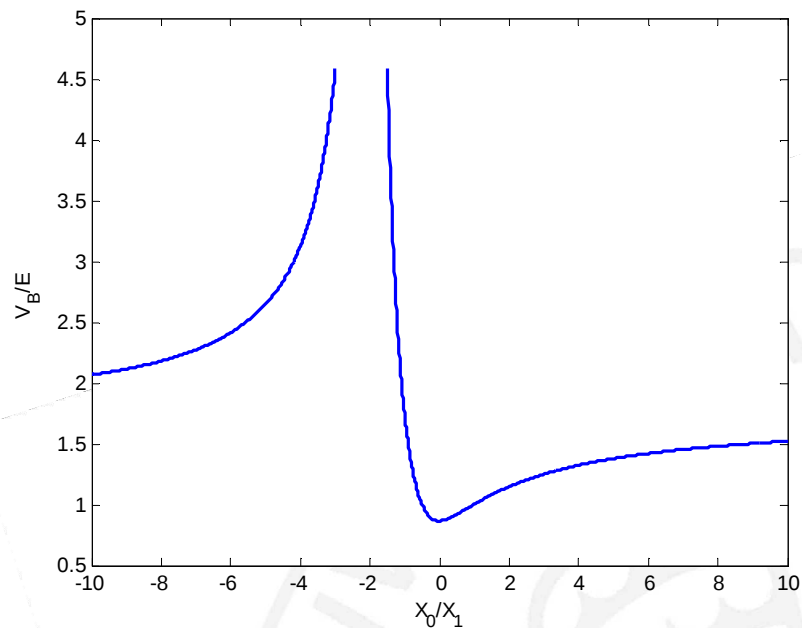


Figura 5

Las redes de transporte tienen el neutro conectado rígidamente a tierra. La impedancia homopolar en este caso está comprendida entre uno y tres veces la impedancia de secuencia directa. La figura 5 muestra como en este caso las sobretensiones en las fases sanas se encuentra alrededor de 1,5 pu (150 %).

1.3 SOBRETENSIONES DE MANIOBRA

También existen gran número de maniobras en las redes eléctricas que pueden dar lugar a sobretensiones de frente lento. Entre otras merece la pena mencionar, las sobretensiones debidas:

- al despeje de faltas
- la conexión de baterías de condensadores
- la desconexión de pequeñas corrientes inductivas
- la conexión de líneas en vacío

1.3.1 DESPEJE DE FALTAS

Cuando se despeja una falta en un circuito como el de la figura 6 por apertura del interruptor, la tensión entre los polos de interruptor una vez abierto es precisamente la tensión del condensador. Si la tensión entre los polos del interruptor es muy elevada y el frente de subida muy abrupto, se puede cebar el arco entre los polos de interruptor abierto resultando entonces fallido el despeje de la falta. La tensión entre los polos del interruptor se conoce como tensión transitoria de restablecimiento.

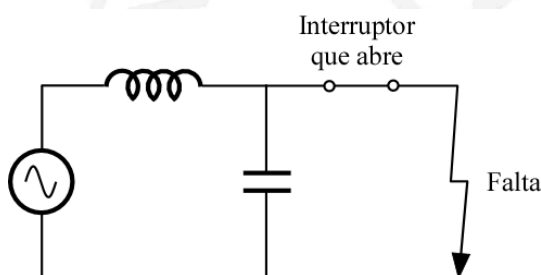


Figura 6

La tensión en el condensador tiene dos componentes alternas, una de la frecuencia fundamental ω y otra de la frecuencia natural del circuito ω_0 .

$$u_c(t) = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} E (\cos \omega t - \cos \omega_0 t)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

La frecuencia natural típica del circuito es del orden de varios kHz. El valor máximo de la tensión es muy próximo a dos veces el valor de pico de la tensión E :

$$u_c(t) \approx E(1 - \cos \omega_0 t)$$

La figura 7 muestra la simulación de la sobretensión debida al despeje de una falta en el secundario de un transformador $220kV/45kV, 40MVA, u_{cc} = 12\%, C = 4nF$. La tensión de pico en el secundario es $E = 36742V$, la inductancia $L = 19.347mH$ y la frecuencia natural del circuito es $f = 18kHz$.

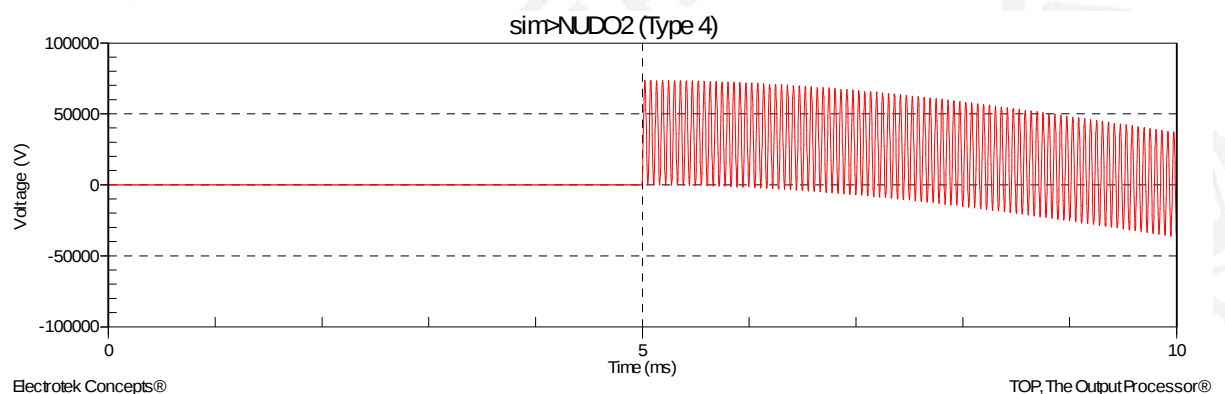


Figura 7

1.3.2 CONEXIÓN DE BATERÍAS DE CONDENSADORES

La conexión de una batería de condensadores, cuando el interruptor cierra en el instante en el que la tensión es máxima, excita la respuesta natural de un circuito RLC serie como el mostrado en la figura 8. Aunque la causa de la excitación de la frecuencia natural y los parámetros del circuito son distintos, la respuesta de este circuito es similar a la del circuito de la figura 7. La frecuencia natural típica del circuito es del orden de

un kHz. El valor máximo de la tensión es también muy próximo a dos veces el valor de pico de la tensión.

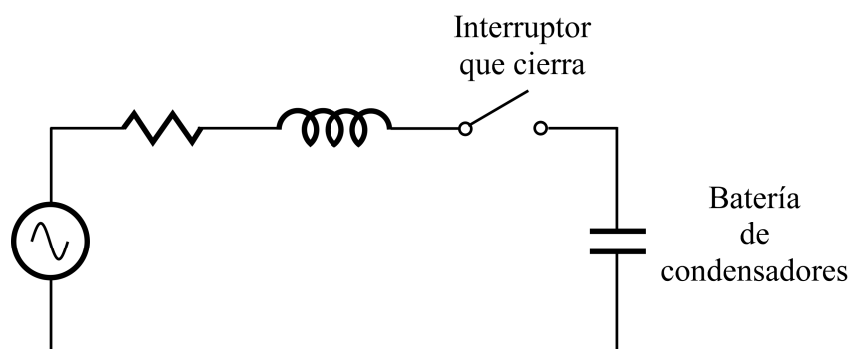


Figura 8

La figura 9 muestra la simulación de la sobretensión debida a la conexión de una batería de condensadores de 2 Mvar a una red de 20 kV de 1000 MVA de potencia de cortocircuito. La curva roja es la tensión de la fuente y la curva verde es la tensión del condensador. Cuando se cierra el interruptor ambas curvas coinciden. La tensión de pico es $E = 16330V$, una inductancia $L = 1.274mH$, una capacidad $C = 15.92\mu F$ y una frecuencia natural del circuito de $f = 1120Hz$.

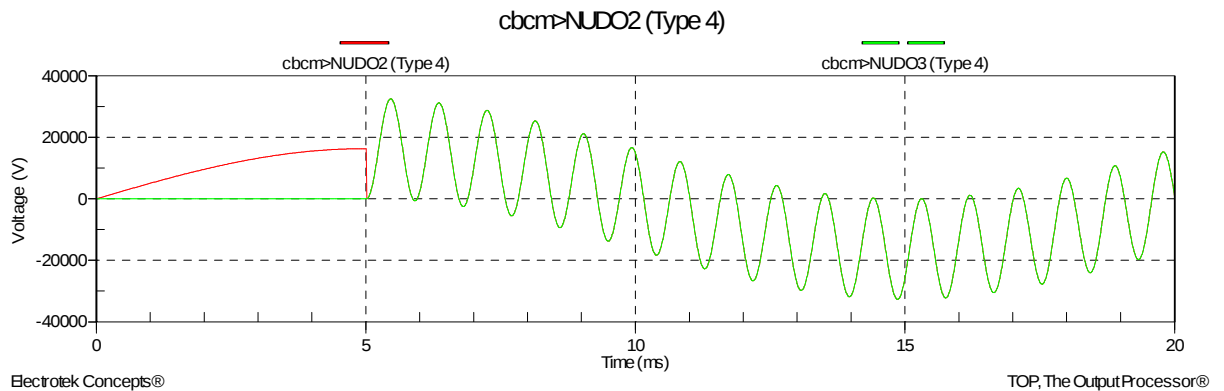


Figura 9

1.3.3 DESCONEXIÓN DE PEQUEÑAS CORRIENTES INDUCTIVAS

En la desconexión de reactancias y transformadores en vacío pueden aparecer sobretensiones muy elevadas si el interruptor abre cuando la corriente no es nula en lugar de abrir en el paso natural de la corriente por cero. Cuando el interruptor abre cuando la corriente no es nula, queda una energía atrapada en la inductancia de magnetización del transformador. Esa energía oscila entre la inductancia de magnetización y el condensador de las capacidades de los arrollamientos del transformador dando a las sobretensiones citadas. La figura 10 muestra el circuito equivalente que permite representar este transitorio.

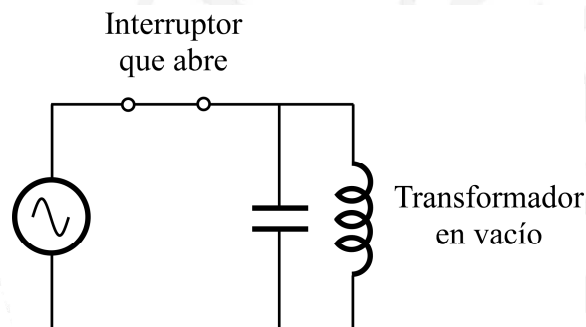


Figura 10

La figura 11 muestra la simulación de la sobretensión debida a la desconexión de un transformador en vacío de 2500 kVA, 20 kV/0,4 kV con una corriente de vacío del 1,2 % y unas pérdidas en vacío de 4,3 kW. La capacidad de los arrollamientos es 5 nF. La interrupción de la corriente se produce cuando la corriente es de 1 A. La tensión de pico es $E = 16330V$. Se aprecia que se alcanza una sobretensión de casi 60 kV. En efecto, se trata de una sobretensión muy elevada.

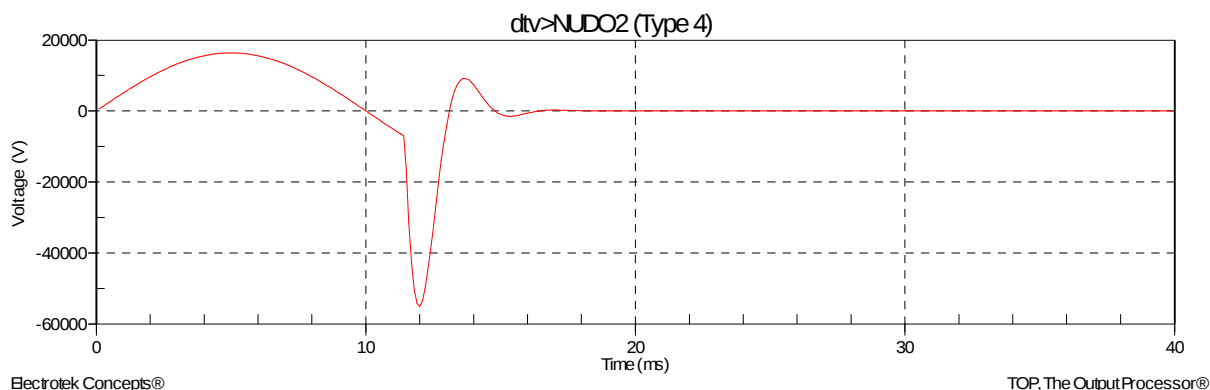


Figura 11

Las sobretensiones se pueden reducir en la medida que se logre que la interrupción de la corriente se produzca en el paso por cero de la misma.

Aunque el ejemplo presentado corresponde a la desconexión de transformador de distribución en vacío, el problema de la desconexión de reactancias de compensación de potencia reactiva situadas en la red de transporte es similar.

1.3.4 CONEXIÓN DE LÍNEAS EN VACÍO

La comprensión de las sobretensiones que aparecen en la conexión de líneas en vacío requiere conocer las ecuaciones que describen el funcionamiento de una línea eléctrica.

La figura 12 muestra el circuito equivalente de una línea eléctrica sin pérdidas por elemento diferencial.

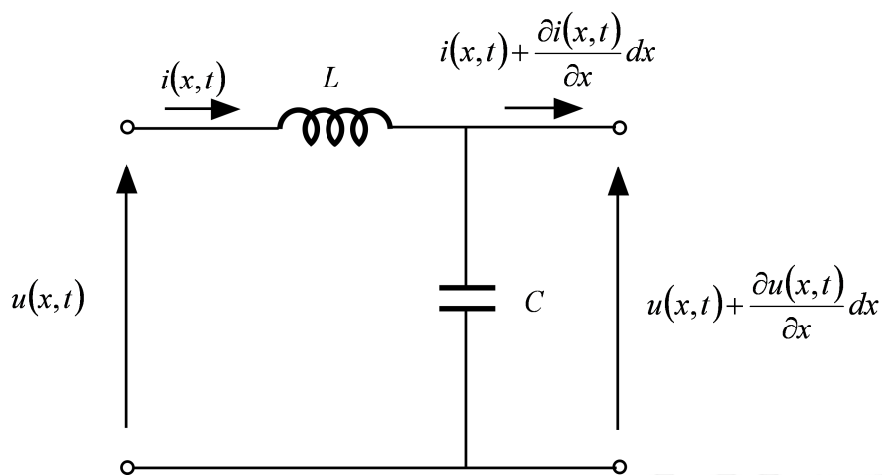


Figura 12

La aplicación de las leyes de Kirchoff a la línea del circuito de la figura 12 resulta en:

$$\begin{aligned}\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} &= -L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} &= -C \frac{\partial v(x,t)}{\partial t}\end{aligned}$$



que tras manipulaciones resultan dos ecuaciones de onda de correspondientes a la variación de la tensión y la corriente en el espacio y el tiempo:

$$\frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2}$$
$$\frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial t^2}$$

donde c es la velocidad de propagación de las citadas ondas:

Las soluciones de las ecuaciones de tensión e intensidad son respectivamente:

$$v(x,t) = f_1(x-ct) + f_2(x+ct)$$
$$i(x,t) = \frac{1}{Z_c} f_1(x-ct) - \frac{1}{Z_c} f_2(x+ct)$$

donde:

Z_c es la impedancia característica de la línea.

f_1 es la onda viajera que avanza a la velocidad c .

f_2 es la onda viajera que retrocede a la velocidad c .

Cuando se conecta una línea en vacío, la tensión que se aplica de forma repentina en un extremo se propaga por la línea y se refleja en el otro extremo, donde la tensión alcanza un valor doble de la aplicada. Se plantea un ejemplo ilustrativo. Se considera la energización de una línea a 400 kV de 300 km de longitud, cuya impedancia característica es 300 Ω y cuya velocidad de propagación es 300.000 km/s

(ver el circuito equivalente de la figura 13). Primero se energiza con una fuente de tensión continua de valor 1 pu. La figura 14 muestra el resultado de la simulación de la tensión en el extremo receptor. La tensión de la fuente llega duplicada al extremo receptor 1 milisegundo después de aplicada la tensión en el extremo emisor. La figura 15 muestra los resultados de simulación cuando la fuente de tensión que energiza la línea es de corriente alterna.

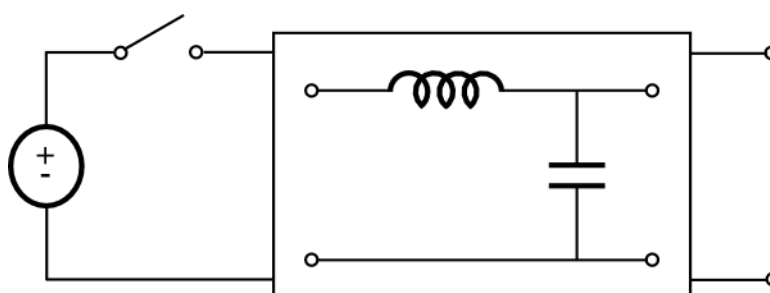


Figura 13

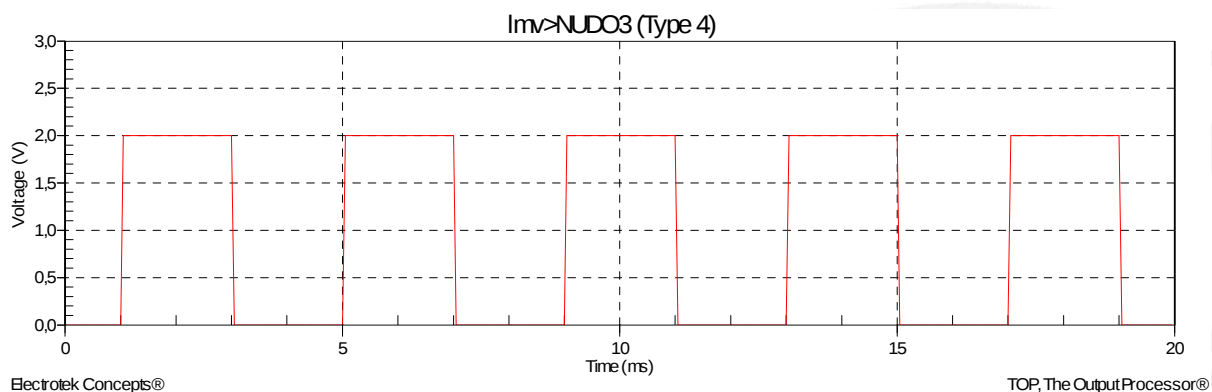


Figura 14

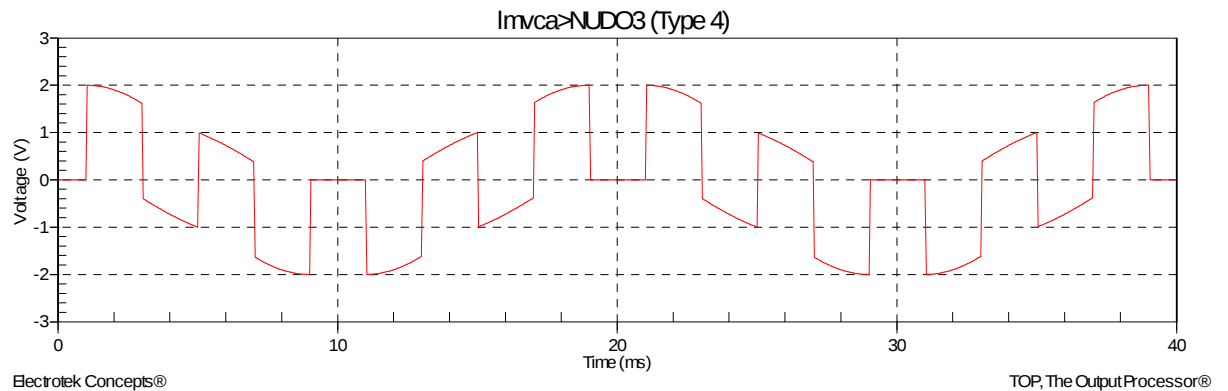


Figura 15

Las sobretensiones debidas a la conexión de líneas en vacío se pueden reducir conectando la línea primero a través una resistencia de presinserción de igual valor a la impedancia característica tal y como se detalla en la figura 16. Por supuesto, una vez que las sobretensiones se han amortiguado, la resistencia de preinserción se cortocircuita.

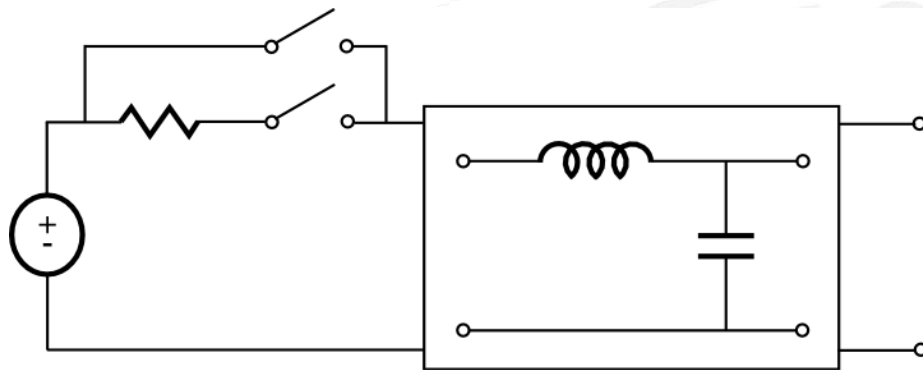
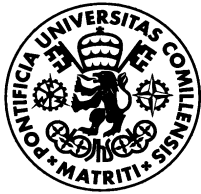


Figura 16



1.4 SOBRETENSIONES ATMOSFÉRICAS

Las sobretensiones atmosféricas se producen por la caída de un rayo en una línea. Son, pues, debidas a causas ajenas al sistema eléctrico.

Las descargas atmosféricas se modelan como pulsos de corriente, en los que la subida desde cero hasta el pico de corriente transcurre en un orden de microsegundos y la bajada de nuevo hasta cero se produce en el orden de las decenas de microsegundos. El valor de cresta del impulso de corriente es del orden de las decenas de kA. La sobretensión provocada por la descarga atmosférica dependerá por tanto del valor de cresta del impulso y de la impedancia característica de la línea donde el rayo incida. Por ejemplo, en caso de la incidencia directa de un rayo de 10 kA (ver figura 17) sobre una

línea de distribución de 15 kV, cuya impedancia característica es 300Ω , produciría una sobretensión de 3000 kV (ver figura 18). Como quiera que esta sobretensión es muy superior a la tensión tipo rayo soportada por las líneas de 15 kV, se produciría una falta por contorneamiento de los aisladores o descarga directa desde los conductores al apoyo. Por supuesto, los transformadores conectados a la línea estarían también en peligro. La protección de los transformadores se realiza por medio de pararrayos instalados en bornes del transformador y puesta a tierra del transformador tal y como se muestra en la figura 19. Los pararrayos son resistencias no lineales. Presentan una resistencia muy elevada a la tensión nominal y una resistencia muy baja en caso de sobretensiones debidas al rayo. En la figura 20 se aprecia como la sobretensión queda limitada en bornes del transformador por medio de los pararrayos.

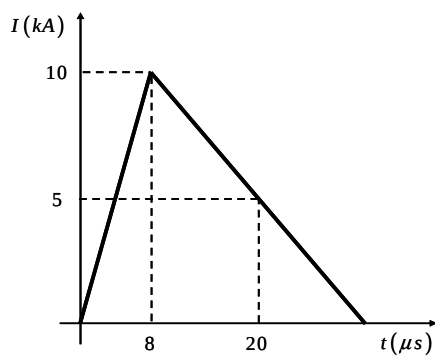


Figura 17

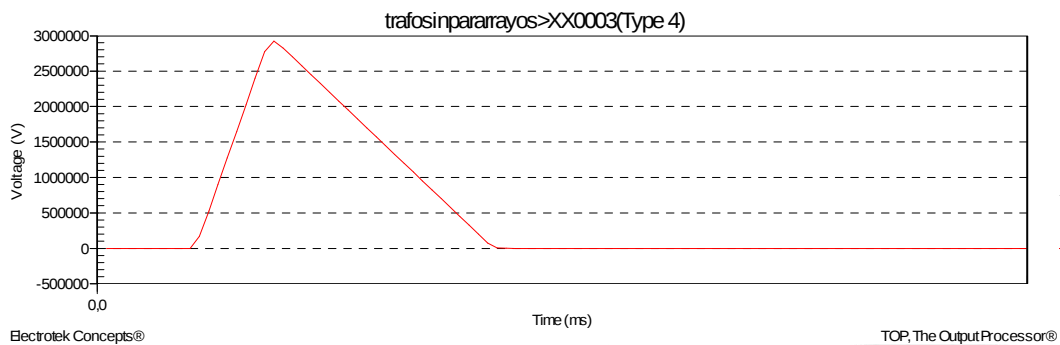


Figura 18

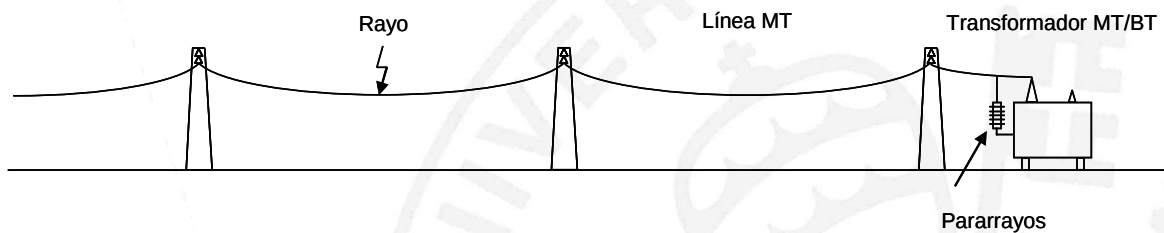


Figura 19

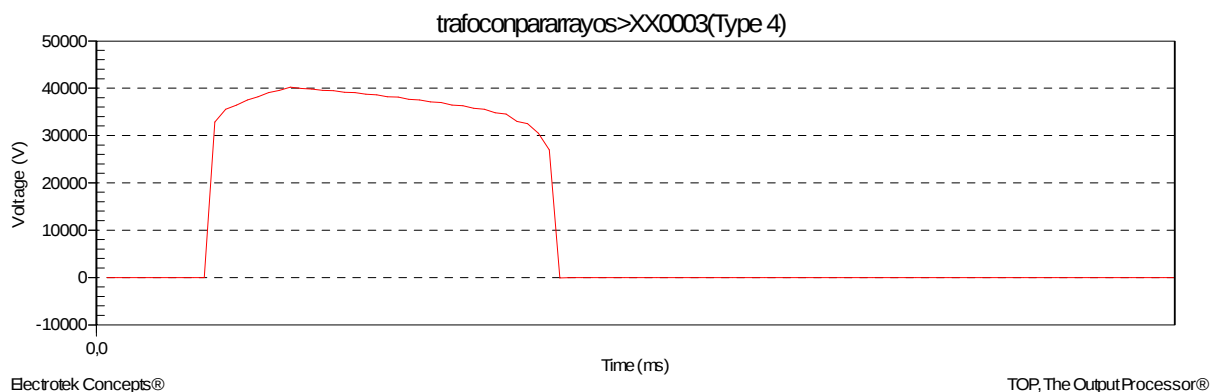
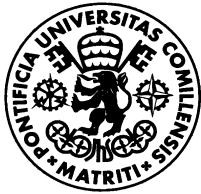
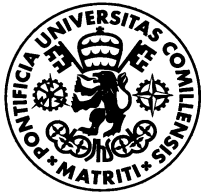


Figura 20

En líneas de muy alta tensión la protección frente al impacto directo del rayo se realiza por medio de los cables de tierra o de guarda. La disposición del cable de guarda se abordará cuando se explique el proyecto de una línea aérea. Por supuesto, los transformadores conectados a las líneas de muy alta tensión deben estar equipados por pararrayos de la misma forma que los transformadores conectados a las líneas de media tensión.



Capítulo 2 TRANSFORMADORES

2.1 INTRODUCCIÓN

El transformador es una máquina eléctrica estática, destinada a funcionar con corriente alterna, constituida por dos arrollamientos primario y secundario, que permite transformar la energía eléctrica con unas magnitudes V-I determinadas, a otras con valores en general diferentes. La importancia de los transformadores se debe a que gracias a ellos ha sido posible el enorme desarrollo en la utilización de la energía eléctrica, haciendo posible la realización práctica y económica del transporte de la energía a grandes distancias. Hemos de tener en cuenta que la transmisión de la energía eléctrica es tanto más económica cuanto más alta es la tensión en las líneas, pues con ello se hace menor la corriente y, en consecuencia, se reduce la sección de los conductores.

En primera instancia, estudiaremos el principio de funcionamiento del transformador ideal con sus relaciones básicas para más tarde, introducir la resistencia y dispersión de los arrollamientos en el transformador real. Posteriormente, se deduce el circuito equivalente y finalmente se comentan los ensayos necesarios para su determinación completa.

Por último, se hará un estudio del comportamiento del transformador a altas frecuencias.

2.2 TRANSFORMADORES A FRECUENCIA INDUSTRIAL

2.2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR IDEAL

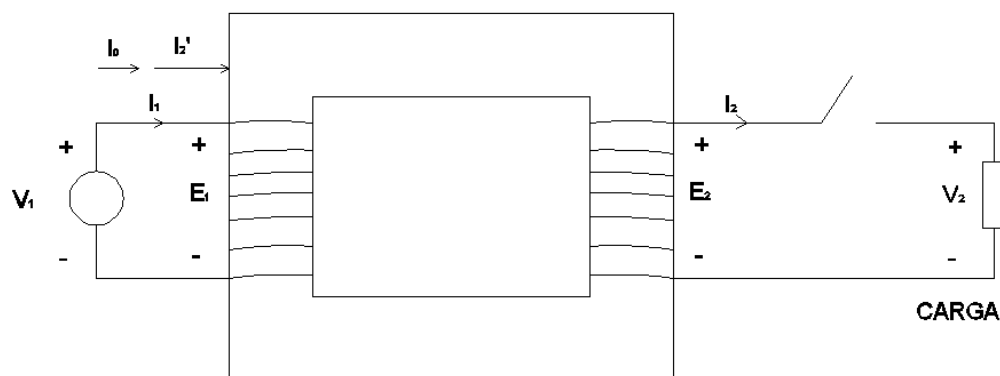
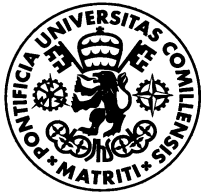


Figura 21

Consideremos el transformador monofásico de la figura 1, constituido por un núcleo magnético real de permeabilidad finita, que presenta unas pérdidas en el hierro P_{fe} y unos arrollamientos primario y secundario con N_1 y N_2 espiras respectivamente. Supongamos que el transformador se alimenta por el lado de tensión más elevada. Las corrientes y tensiones representadas en la figura, corresponden al sentido normal de transferencia de la energía.

- 1) El primario constituye un receptor respecto a la fuente de alimentación (la red), lo que significa que este devanado absorbe una corriente y una potencia y desarrolla una f.c.e.m (fuerza contraelectromotriz). En una máquina real, estas resistencias son pequeñas pero en cualquier caso no nulas.



- 2) El secundario se comporta como un generador respecto a la carga conectada en sus bornes, suministrando una corriente y una potencia, siendo a su vez el asiento de una f.e.m inducida.

Para comprender mejor el funcionamiento del transformador, sin que las imperfecciones reales que tiene la máquina enmascaren los fenómenos físicos que tienen lugar, vamos a suponer que, en un principio, se cumplen las condiciones ideales siguientes:

- a) Los devanados primario y secundario poseen resistencias óhmicas despreciables, lo que significa que no hay pérdidas por efecto Joule y no existen caídas resistivas en el transformador.
- b) No existen flujos de dispersión, lo que significa que todo flujo magnético está confinado en el núcleo y enlaza ambos devanados, primario y secundario. En el caso del real, sí que existen partes del flujo magnético que sólo atraviesan uno de los devanados y cierran el circuito magnético a través del aire.

Al aplicar una tensión alterna en el primario, producirá una corriente alterna, que a su vez generará un flujo alterno en el núcleo cuyo sentido se deriva de la Ley de Ampère para dicho arrollamiento. Debido a la variación en el tiempo de dicho flujo provocarán unas f.e.m.s inducidas en los arrollamientos, que según la Ley de Faraday responderán a las siguientes ecuaciones:

$$E_1 = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

$$E_s = N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}$$



$$\phi = \phi_m \cdot \sin(\omega t) = \phi_m \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$V_1 = E_1 = N_1 \cdot \omega \cdot \phi_m \cdot \cos(\omega t)$$

$$V_2 = E_2 = N_2 \cdot \omega \cdot \phi_m \cdot \cos(\omega t)$$

Las tensiones van adelantadas en 90° con respecto al flujo, siendo sus valores eficaces:

$$V_1 = E_1 = \frac{N_1 \cdot \omega \cdot \phi_m}{\sqrt{2}}$$

$$V_2 = E_2 = \frac{N_2 \cdot \omega \cdot \phi_m}{\sqrt{2}}$$

En cuanto a las corrientes, si el transformador se encuentra en vacío, el primario se comportará como una bobina con núcleo de hierro. En este caso, absorberá una corriente de vacío I_0 desfasada un determinado ángulo φ_0 con la tensión primaria y consumiendo una potencia P_0 igual a las pérdidas en el hierro P_{fe} , cumpliéndose:

$$P_0 = P_{fe} = V_1 \cdot I_0 \cdot \cos\varphi_0$$

Si el transformador se encuentra en carga, aparecerá una intensidad por el secundario que responde a un valor complejo o fasorial:

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{E_2 \angle 0^\circ}{Z_2 \angle \varphi_2} = \frac{E_2}{Z_2} \angle -\varphi_2$$

Esta corriente I_2 , al circular por el devanado secundario, produce una f.m.m $N_2 \cdot I_2$ que se opone a la f.m.m del primario $N_1 \cdot I_0$. Por esta razón, si esta f.m.m no



quedara neutralizada por una corriente adicional que circule por el primario, el flujo en el núcleo se vería reducido y, consecuentemente, las f.e.m.s E_1 y E_2 que son proporcionales a él, lo que romperá el equilibrio entre V_1 y E_1 .

Para que el equilibrio se mantenga, es preciso anular la f.m.m $N_2 \cdot I_2$ del secundario mediante una corriente adicional I_2' por el primario, de tal forma que se cumpla la siguiente igualdad:

$$N_2 \cdot I_2 = N_1 \cdot I_2'$$

De donde se deduce:

$$I_2' = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2$$

De este modo, la corriente total necesaria en el primario I_p será igual a:

$$I_1 = I_0 + I_2' = I_0 + \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 = I_0 + \frac{I_2}{m}$$

A plena carga la corriente I_2' es del orden de veinte veces I_0 , por lo que puede despreciarse en la expresión la corriente de vacío frente a I_2' , que se denomina corriente secundaria reducida. En consecuencia, la expresión se transforma en:

$$I_1 = I_2' = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 = \frac{I_2}{m}$$

2.2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR REAL

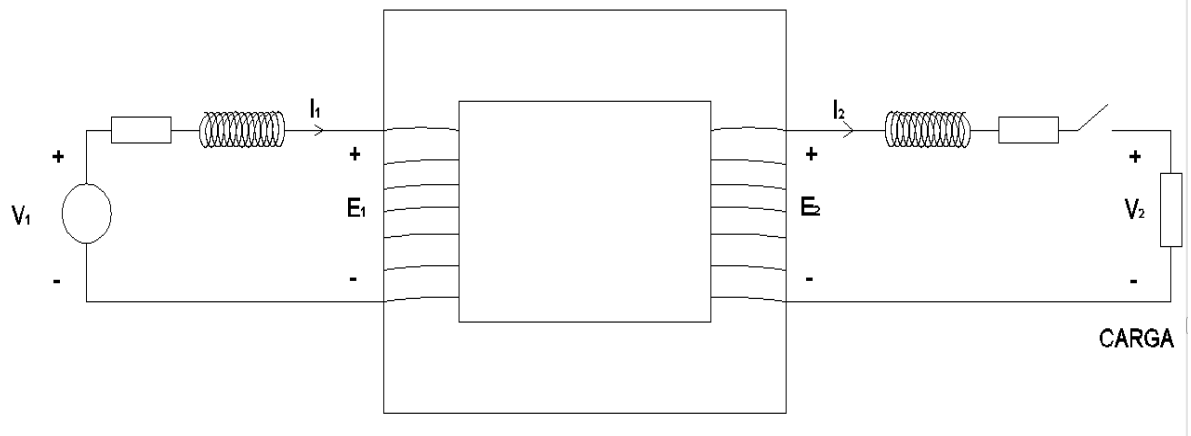


Figura 22

Como se puede apreciar en el estudio de transformadores ideales, hemos obviado la resistencia y los flujos de dispersión en los arrollamientos. En los transformadores reales, ambas cualidades se tienen en cuenta.

Las resistencias R_1 y R_2 de cada uno de los arrollamientos se consideran fuera de la propia bobina. Los flujos de dispersión que aparecen en los devanados, se distribuyen por caminos no magnéticos como el aire. Estos flujos dispersos dan lugar a reactancias de dispersión como se indica a continuación.

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \phi + \phi_{d1} \quad ; \quad \phi_2 = \phi + \phi_{d2} \\ L_{d1} &= N_1 \cdot \frac{d\phi_{d1}}{dt} \quad ; \quad L_{d2} = N_2 \cdot \frac{d\phi_{d2}}{dt} \\ X_1 &= L_{d1} \cdot \omega \quad ; \quad X_2 = L_{d2} \cdot \omega\end{aligned}$$

En los circuitos primario y secundario se cumplirán las siguientes ecuaciones:

$$V_1 = E_1 + R_1 \cdot I_1 + L_{d1} \cdot \frac{dI_1}{dt} \quad ; \quad E_2 = V_2 + R_2 \cdot I_2 + L_{d2} \cdot \frac{dI_2}{dt}$$

$$V_1 = E_1 + R_1 \cdot I_1 + j \cdot X_1 \cdot I_1 \quad ; \quad E_2 = V_2 + R_2 \cdot I_2 + j \cdot X_2 \cdot I_2$$

$$E_1 = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad ; \quad E_2 = N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

En caso de estar el transformador en vacío:

$$V_1 = E_1 + R_1 \cdot I_1 + j \cdot X_1 \cdot I_1 \quad ; \quad E_2 = V_2$$

Y las corrientes:

$$I_1 = I_0 + I_2' = I_0 + \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 = I_0 + \frac{I_2}{m}$$

2.2.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR

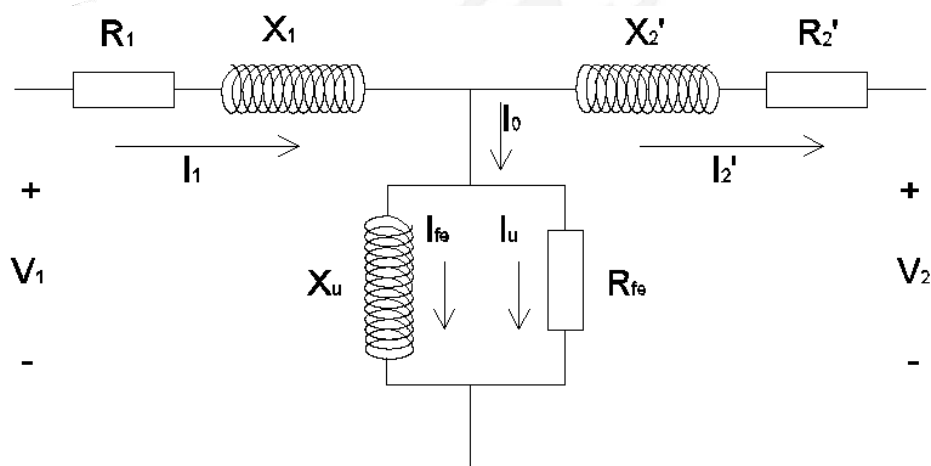


Figura 23



La intención consiste en sustituir el transformador por un circuito equivalente que incorpore los fenómenos físicos que se producen en la máquina real. La ventaja de desarrollar circuitos equivalentes de máquinas eléctricas es poder aplicar todo el potencial de la teoría de redes eléctricas para anticipar el funcionamiento de una máquina ante determinadas condiciones de funcionamiento.

Inicialmente, se parte con la reducción de ambos devanados al mismo número de espiras. Generalmente, esto se hace refiriendo el secundario al primario, es decir, $N'_2 = N_1$. Para que este nuevo transformador sea equivalente se debe conservar la energía, en este caso las potencias.

Las modificaciones se llevan a cabo a las tensiones, corrientes e impedancias.

a) Tensiones

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \rightarrow E_2 = \frac{E_1}{m}$$

$$\frac{E_1}{E'_2} = \frac{N_1}{N'_2} = 1 \rightarrow E'_2 = E_1 = m \cdot E_2$$

Y esto sirve para cualquier tensión del secundario:

$$V'_2 = m \cdot V_2$$

b) Corrientes

$$V_2 \cdot I_2 = V'_2 \cdot I'_2$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{m}$$

c) Impedancias

$$R_2 \cdot I_2^2 = R_2' \cdot I_2'^2$$

$$R_2' = m^2 \cdot R_2$$

Análogamente:

$$Z_2' = m^2 \cdot Z_2$$

Como ya se vio anteriormente, el transformador trabajando en vacío consumía una potencia $P_0 = P_{fe} = V_1 \cdot I_0 \cdot \cos\varphi_0$, dicha I_0 posee una componente activa y otra reactiva, formando R_{fe} y X_μ respectivamente.

Para determinar cada uno de los parámetros que conforman el circuito equivalente, se realizan dos tipos de ensayos: ensayo de vacío y ensayo de cortocircuito.

2.2.4 ENSAYOS DEL TRANSFORMADOR

2.2.4.1 Ensayo de vacío

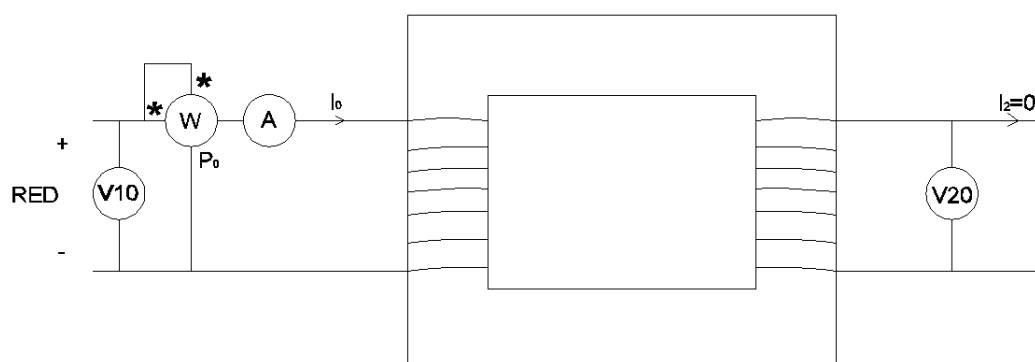


Figura 24

En esta prueba, se debe aplicar al primario del transformador la tensión asignada, estando el secundario en circuito abierto. Al mismo tiempo, se toman medidas de potencia absorbida, corriente de vacío y tensión aplicada en el primario.

En la práctica, el ensayo de vacío se realiza aplicando la tensión asignada desde el lado de baja tensión, entre otras, cosas por las escalas de los aparatos de medida.

Con estas medidas, efectuamos los siguientes cálculos:

$$P_0 = P_{fe} = V_{1n} \cdot I_0 \cdot \cos\varphi_0$$

$$I_{fe} = I_0 \cdot \cos\varphi_0 \quad ; \quad I_\mu = I_0 \cdot \sin\varphi_0$$

$$R_{fe} = \frac{V_{1n}}{I_{fe}} \quad ; \quad R_\mu = \frac{V_{1n}}{I_\mu}$$

2.2.4.2 Ensayo de cortocircuito

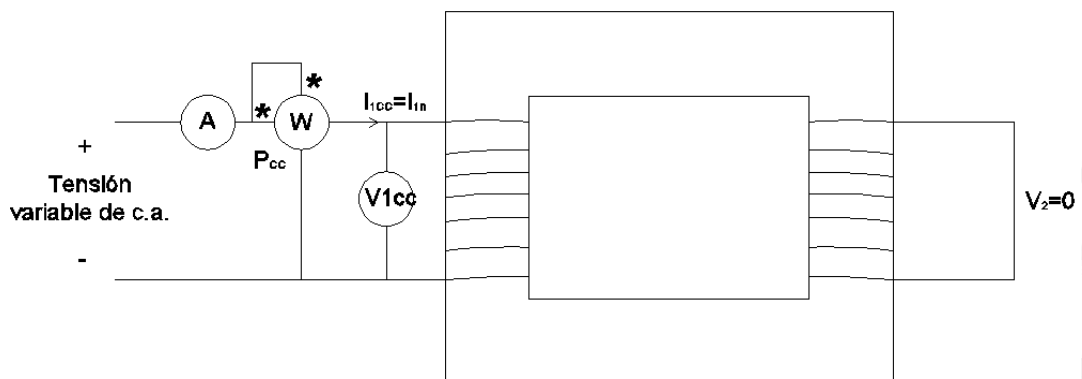


Figura 25

En este ensayo, se cortocircuita el devanado secundario y se aplica al primario una tensión que se va elevando gradualmente desde cero, hasta que circula la corriente asignada de plena carga por los devanados.

La tensión que se aplica varía generalmente entre el 3-10 % de la tensión nominal, por lo que el flujo en el núcleo es pequeño y, por tanto, despreciables las pérdidas en el hierro. La potencia absorbida en cortocircuito coincide con las pérdidas en el cobre al obviar la rama de magnetización en paralelo.



De esta manera, midiendo potencia absorbida, corriente pasante y tensión aplicada, obtenemos los siguientes resultados:

$$P_{cc} = V_{1cc} \cdot I_{1n} \cdot \cos\varphi_{cc}$$
$$R_{cc} = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \cdot \cos\varphi_{cc} ; \quad X_{cc} = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \cdot \sin\varphi_{cc}$$
$$R_{cc} = R_1 + R_2' ; \quad X_{cc} = X_1 + X_2'$$
$$R_1 = R_2' = \frac{R_{cc}}{2} ; \quad X_1 = X_2' = \frac{X_{cc}}{2}$$

2.3 TRANSFORMADORES A ALTAS FRECUENCIAS

Aunque el transformador es un componente de diseño relativamente fácil, ya que no tiene partes rotativas, el desarrollo de modelos adecuados para representar su comportamiento en procesos transitorios, puede ser una tarea muy compleja debido a los siguientes factores:

- Existen muchos diseños de núcleo magnético y de los arrollamientos.
- Algunos parámetros del transformador tiene comportamiento no lineal, mientras que otros, son dependientes de la frecuencia.
- La determinación de algunos parámetros no es fácil y, en algunos casos se trata de una tarea que hasta la fecha, no ha sido resuelta satisfactoriamente.

Para entender la dificultad que comporta la representación de un transformador durante un proceso transitorio, puede ser útil conocer los procesos físicos que se originan durante su activación. Los aspectos más relevante al respecto son los siguientes:



- 1) Inmediatamente después de que el transformador es activado, se empiezan a cargar las capacidades del arrollamiento y a circular corrientes; primero en la estructura dieléctrica, después en el arrollamiento.
- 2) El flujo no habrá penetrado en el núcleo ferromagnético antes de que haya transcurrido $1\mu s$; la inductancia es la de un núcleo de aire, siendo despreciables las pérdidas en el hierro. Las pérdidas en el transformador son debidas fundamentalmente a pérdidas en conductores y dieléctrico.
- 3) A partir de $1\mu s$, el flujo comienza a penetrar en el núcleo, realizándose la circulación de corriente a través de las capacidades.
- 4) Entre $1\mu s$ y $10\mu s$, se produce la transición entre una característica de núcleo de aire a otra característica saturable.
- 5) A los $10\mu s$, el flujo ya habrá penetrado completamente en el núcleo, por lo que la inductancia del arrollamiento corresponderá a la de un núcleo saturable, y la corriente circulará a través de la estructura dieléctrica y el arrollamiento. La influencia de la red capacitiva es todavía muy importante.
- 6) A partir de los $10\mu s$, empieza a estabilizarse el comportamiento del transformador: las pérdidas son ahora originadas en conductores, núcleo ferromagnético, dieléctrico y cuba del transformador. Las pérdidas en los conductores incluyen el efecto pelicular y el de proximidad, y las pérdidas en el núcleo incluyen el efecto de las corrientes parásitas.

De aquí se deduce la importancia de algunos parámetros del transformador en el proceso transitorio, en función de la gama de frecuencias que aparecen en el mismo. En el desarrollo de un modelo preciso, se deberán tener en cuenta los siguientes atributos:



- Configuración del núcleo
- Configuración de los arrollamientos
- Acoplamiento entre arrollamientos
- Flujos de dispersión
- Saturación magnética
- Pérdidas por histéresis y corrientes parásitas
- Capacidades entre espiras y entre arrollamientos

Parámetro/ Efecto	Transitorios de baja frecuencia	Transitorios de frente lento	Transitorios de frente rápido	Transitorios de frente muy rápido
Impedancia de cortocircuito	Muy importante	Muy importante	Importante	Poco importante
Saturación	Muy importante	Importante	Poco importante	Poco importante
Pérdidas en el hierro	Importante	Importante	Poco importante	Poco importante
Corrientes parásitas	Muy importante	Importante	Poco importante	Poco importante
Acoplamiento capacitivo	Poco importante	Importante	Muy importante	Muy importante

Tabla 1

El desarrollo de un modelo correcto de transformador para la simulación de procesos transitorios con cualquier gama de frecuencias, puede ser una tarea compleja. Como hemos señalado anteriormente, la variedad e configuraciones de núcleo magnético y de diseño de arrollamientos, es una de las razones. Puede tener influencia en transitorios de frente rápido o muy rápido, debido al distinto valor de las capacidades



entre los arrollamientos primario y secundario, dependiendo de la disposición y el diseño escogido para los arrollamientos.

La dificultad estriba en el desarrollo de dichos modelos para representar transformadores y las técnicas de obtención del circuito equivalente del mismo para distintos rangos de frecuencias.

Durante los últimos años, ha ganado gran aceptación la aplicación del principio de dualidad magnética-eléctrica. Esta consiste en la elaboración de un circuito magnético a partir de la configuración geométrica del núcleo y de la disposición de los arrollamientos de cada fase para posteriormente, a través de unas equivalencias entre variables magnéticas y eléctricas, convertirlo a un circuito eléctrico.

Sin embargo, en todo esto no hemos incluido las capacidades existentes entre bornes terminales ni entre arrollamientos, las cuales pueden tener una influencia no despreciable en ciertos procesos transitorios. A todo ello, se suma la dificultad de hallar algunos parámetros del circuito equivalente y la ausencia de una norma que contemple esta posibilidad.

El modelo a emplear también depende del proceso transitorio a simular, es decir, en el estudio de dos transitorios bajo el mismo rango de frecuencias. La selección de un modelo depende de la información a obtener con la simulación de cada proceso. Por ejemplo, para el estudio de un proceso transitorio de frente rápido, escogeremos el modelo de la figura a si nos interesa analizar la transferencia de tensiones entre arrollamientos de ambos lados. En cambio, elegiremos el modelo de la figura b cuando el transformador funciona en vacío y no interesa la transferencia de tensiones, sino la interacción del transformador con el resto de la red.

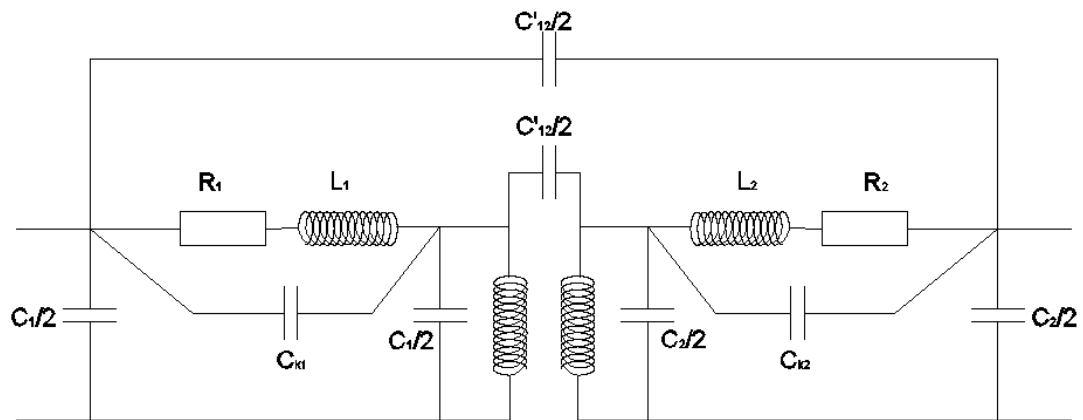


Figura 26

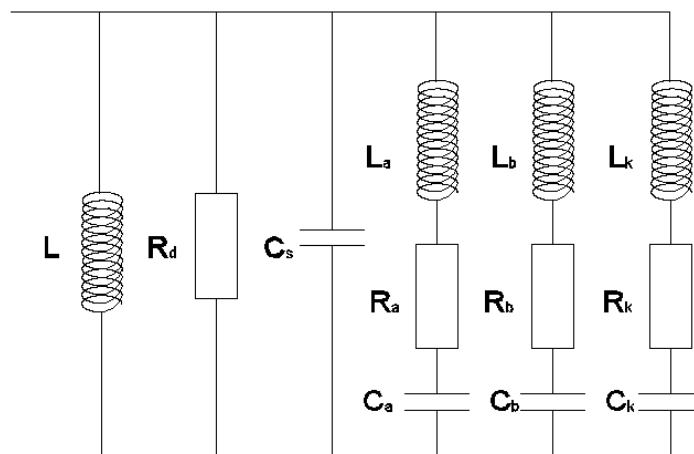
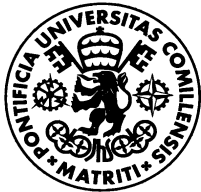


Figura 27

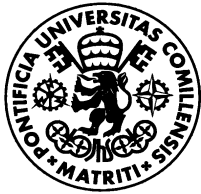


A continuación detallamos una clasificación de la gama de frecuencias:

Grupo	Gama de frecuencias	Designación	Representación principalmente para
I	0,1 Hz - 3 kHz	Oscilaciones de baja frecuencia	Sobretensiones temporales
II	50 Hz - 20 kHz	Ondas de frente lento	Sobretensiones por maniobras
III	10 kHz - 3 MHz	Ondas de frente rápido	Sobretensiones por rayos
IV	100 kHz - 50MHz	Ondas de frente muy rápido	Sobretensiones por recibido en GIS

Tabla 2

Los modelos adecuados para un transformador en el que nos interesa la transferencia de tensiones entre arrollamientos para cada gama de frecuencias, pueden encontrarse más detallados en la página 322 de la referencia bibliográfica [13].



Capítulo 3 DETALLES CONSTRUCTIVOS DEL TRANSFORMADOR

El transformador, objeto de estudio tiene una potencia nominal de 50 MVA y relación de transformación de 20/220kV

Los datos de partida sobre los que están hechos los cálculos de este proyecto, son una matriz de capacidades y una matriz de inductancias.

A continuación, haré una breve descripción de cada una de las matrices y su organización en cada uno de los arrollamientos.

3.1 FORMA CONSTRUCTIVA DE LA MATRIZ DE INDUCTANCIAS

PHASE = 1

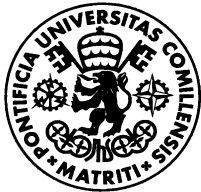
WDG:	1	2	3
TOP 1	1	40	83
BOT 1	39	46	92
TOP 2	0	47	0
BOT 2	0	82	0

PHASE = 2

WDG:	1	2	3
TOP 1	93	132	175
BOT 1	131	138	184
TOP 2	0	139	0
BOT 2	0	174	0

PHASE = 3

WDG:	1	2	3
TOP 1	185	224	267
BOT 1	223	230	276
TOP 2	0	231	0
BOT 2	0	266	0



3.2 *FORMA CONSTRUCTIVA DE LA MATRIZ DE CAPACIDADES*

PHASE = 1					PHASE = 2					PHASE = 3				
WDG:	1	2	3		WDG:	1	2	3		WDG:	1	2	3	
TOP 1	1	41	86		TOP 1	97	137	182		TOP 1	193	233	278	
BOT 1	40	48	96		BOT 1	136	144	192		BOT 1	232	240	288	
TOP 2	0	49	0		TOP 2	0	145	0		TOP 2	0	241	0	
BOT 2	0	85	0		BOT 2	0	181	0		BOT 2	0	277	0	

TÉRMINOS

PHASE 1	FASE R
PHASE 2	FASE S
PHASE 3	FASE T
WINDING (WDG) 1	ARROLLAMIENTO DE BAJA
WINDING (WDG) 2	ARROLLAMIENTO DE ALTA
WINDING (WDG) 3	ARROLLAMIENTO DE REGULACIÓN
MIN1-MAX1	DISC01
MIN2-MAX2	DISC02

3.3 *APARIENCIA Y ORGANIZACIÓN DE INDUCTANCIAS*

Inicialmente la matriz que proporcionaba el fabricante (Fig.1) no era una matriz simétrica, con lo que fue necesario modificarla para que lo fuera y de esta manera se adecuara a nuestro modelo.

La modificación que hicimos en la matriz fue la siguiente:

- 1) $L_{i,j} = -L_{i,j} \quad \forall i \neq j$
- 2) $L_{i,j} = L_{j,i} \quad \forall i \neq j$
- 3) $L_{i,i} = L_{i,i} - \sum_{i \neq j} L_{i,j}$

A continuación, se muestra el aspecto de la matriz de inductancias. La figura de la izquierda representa los elementos del triángulo inferior y la de la derecha, todos los elementos de la matriz

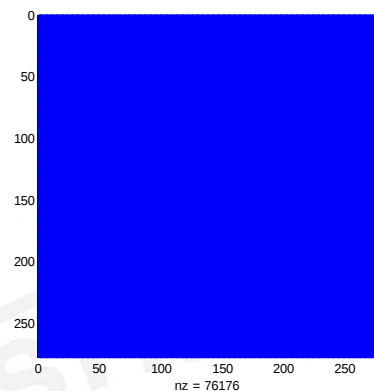
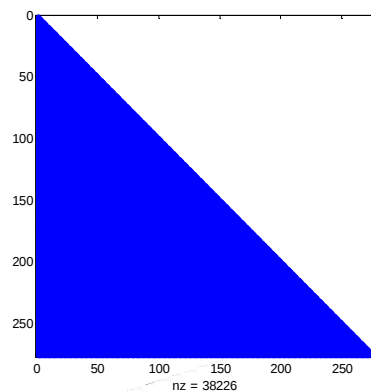


Figura 28

3.4 APARIENCIA Y ORGANIZACIÓN DE MATRIZ DE CAPACIDADES

La matriz de partida de capacidades (Fig.1) tampoco es simétrica. Para modificarla hemos seguidos los mismos pasos que para la matriz de inductancias.

- 1) $C_{i,j} = -C_{i,j} \quad \forall i \neq j$
- 2) $C_{i,j} = C_{j,i} \quad \forall i \neq j$
- 3) $C_{i,i} = C_{i,i} - \sum_{i \neq j} C_{i,j}$

A continuación, se muestra el aspecto del triángulo inferior de la matriz de capacidades, indicando a qué corresponde cada tramo de la matriz en el gráfico de la izquierda. La figura de la derecha, es la representación de la matriz completa.

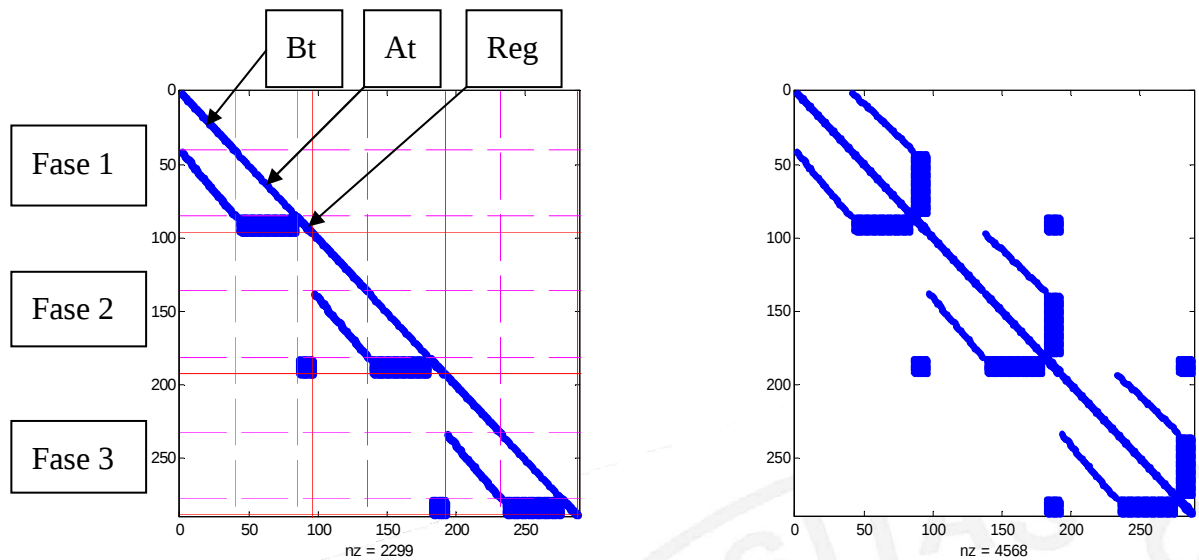


Figura 29

A continuación, un dibujo ilustrativo de cómo están representados los nodos y las mallas en nuestro transformador para cada fase, según su forma constructiva y los datos que aportan las matrices.

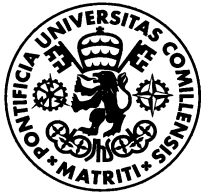


Figura 30



Capítulo 4 RESPUESTA TEMPORAL

4.1 INTRODUCCIÓN

Analizar el comportamiento de los componentes eléctricos y en este caso de los transformadores ante fenómenos propios del funcionamiento del sistema eléctrico o ajeno, es esencial para el diseño de los mismos.

Nuestro objeto de estudio se basan en las sobretensiones de frente rápido o de tipo rayo, llamadas así por ser este fenómenos atmosférico la principal causa de este tipo de sobretensiones.

Los impactos directos de rayos sobre las líneas aéreas producen pérdida de aislamiento del material (reversible o no), contorneando los aisladores y produciendo faltas a tierra que son despejadas, en última instancia, por las protecciones convencionales. La propagación de una sobretensión atmosférica por una línea, tiene lugar a una velocidad próxima a la de la luz; durante este recorrido, tanto el valor cresta como el tiempo de subida, se ven fuertemente amortiguados debido al efecto pelicular y al efecto corona.

Para evitar los efectos de las descargas atmosféricas en los conductores de fase de una línea aérea, se procede al apantallamiento de los mismos, mediante cables de guarda, y a la reducción de la resistencia de puesta a tierra de las torres para disminuir el riesgo de cebado inverso.



En el caso de transformadores, la protección contra este tipo de sobretensiones la aportan los pararrayos, los cuales limitan la tensión, a la tensión residual del pararrayos

para la corriente nominal de descarga. La protección que ofrecen este tipo de dispositivos depende de la amplitud y forma de la sobretensión, la característica de protección del pararrayos, la impedancia y/o capacidad característica del equipo protegido, la amplitud y forma de la corriente a través del pararrayos, la distancia entre pararrayos y el equipo protegido incluyendo conexiones a tierra y número de líneas conectadas con sus respectivas impedancias características. Las corrientes nominales de descarga al uso suelen ser de 5 o 10 kA para la gama I, o de 10 o 20 kA para la gama II

La distancia es un parámetro muy importante a la hora de proteger nuestro equipo, siendo menor la protección, cuanto mayor es la distancia entre pararrayos y equipo.

Este tipo de sobretensiones son de duración muy corta, varios microsegundos, y normalmente llevan asociados picos de tensión varios veces superior a la tensión máxima de operación de red. Para llevar a cabo nuestra simulación, utilizaremos un impulso de tensión tipo rayo normalizado que consiste en un impulso con un tiempo de subida hasta el valor de cresta de 1,2 us y un tiempo de cola de 50 us.

Haremos dos simulaciones, la primera, inyectando una onda 1,2/50 us de 850 kV de cresta desde el lado de alta y la segunda, inyectando el mismo tipo de onda pero con 125 kV de cresta desde el lado de baja. Los valores 850 kV y 125 kV se corresponden con el nivel básico de aislamiento de alta y baja de nuestro transformador, respectivamente. El impulso se inyectará desde alta y baja de la fase R, y mostraremos los resultados correspondientes tanto a la fase R como a la S y T.

4.2 *PROCEDIMIENTO*

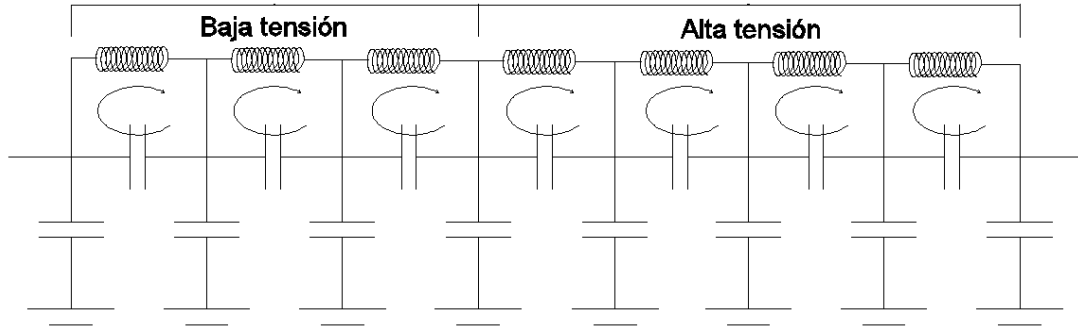


Figura 31

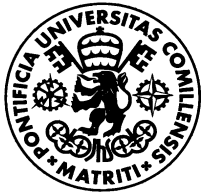
ECUACIONES

$$\frac{d}{dt} \cdot [Unudo] = [C^{-1}] \cdot [Inudo]$$

$$\frac{d}{dt} \cdot \begin{bmatrix} u_{inibt} \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{finbt} \\ u_{iniat} \\ \vdots \\ u_{finat} \end{bmatrix} = [C^{-1}] \cdot \begin{bmatrix} (Int) + -i_1 \\ i_1 - i_2 \\ \vdots \\ i_{finbt-1} \\ (Int) + i_{finbt} - i_{iniat} \\ \vdots \\ i_{finat-1} \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \cdot [Imalla] = [L^{-1}] \cdot [Umalla]$$

$$\frac{d}{dt} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_{finat-1} \end{bmatrix} = [C^{-1}] \cdot \begin{bmatrix} u_1 - u_2 \\ u_2 - u_3 \\ \vdots \\ u_{finat-1} - u_{finat} \end{bmatrix}$$



CONDICIONES

$$U_{entrada} = f(t)$$

$$U_{entrada} = u_{iniat} \text{ ó } u_{inibt}$$

$$Int = f(U_{entrada}, i_1, \dots, i_n)$$

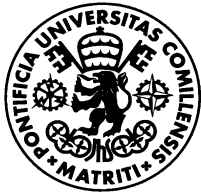
Con la premisa fundamental para nuestro modelo, se debe cumplir:

$$N^{\circ} \text{ nodos} = N^{\circ} \text{ mallas} + 1$$

Sin embargo, como se puede apreciar en los datos aportados por la empresa de transformadores, ésta relación no se cumple, siendo 288 en la matriz de capacidades y 276 en la matriz de inductancias, que representan nodos y mallas, respectivamente.

Para que se ajusten el número de nodos al número de mallas, nos serviremos de ciertos datos que hemos recabado, tales como puentes entre discos en el arrollamiento de alta tensión de las fases y el conexionado de arrollamientos de nuestro transformador. Para el conexionado de arrollamientos, hemos utilizado un triángulo-estrella, para baja y alta por ese orden. Esto se debe, a que es la conexión más adecuada para un transformador que se sitúa entre un grupo de generación y una línea de transporte. Estos ajustes se hacen en la matriz de capacidades

A continuación, haré una breve descripción de cada una de las matrices y su organización en cada uno de los arrollamientos.



FORMA CONSTRUCTIVA DE MATRIZ DE CAPACIDADES

PHASE = 1				PHASE = 2				PHASE = 3			
WDG:	1	2	3	WDG:	1	2	3	WDG:	1	2	3
TOP 1	1	41	86	TOP 1	97	137	182	TOP 1	193	233	278
BOT 1	40	48	96	BOT 1	136	144	192	BOT 1	232	240	288
TOP 2	0	49	0	TOP 2	0	145	0	TOP 2	0	241	0
BOT 2	0	85	0	BOT 2	0	181	0	BOT 2	0	277	0

FORMA CONSTRUCTIVA DE MATRIZ DE INDUCTANCIAS

PHASE = 1				PHASE = 2				PHASE = 3			
WDG:	1	2	3	WDG:	1	2	3	WDG:	1	2	3
TOP 1	1	40	83	TOP 1	93	132	175	TOP 1	185	224	267
BOT 1	39	46	92	BOT 1	131	138	184	BOT 1	223	230	276
TOP 2	0	47	0	TOP 2	0	139	0	TOP 2	0	231	0
BOT 2	0	82	0	BOT 2	0	174	0	BOT 2	0	266	0

UNIONES

- 1) 48-49, 144-145 y 240-241: Fin de disco 1 con comienzo del disco 2 del lado de alta tensión de las fases R, S y T.
- 2) 85-86, 181-182 y 277-278: Fin del arrollamiento de alta tensión y comienzo del arrollamiento de regulación de las fases R, S y T.
- 3) 96-192-288: Unión del final de los arrollamientos de alta tensión de las fases R, S y T para formar el neutro de la estrella.

- 4) 40-97, 136-193 y 1-232: Unión de inicio y fin de arrollamientos de las distintas fases para conformar la conexión en triángulo de baja tensión.

A continuación un dibujo más explicativo.

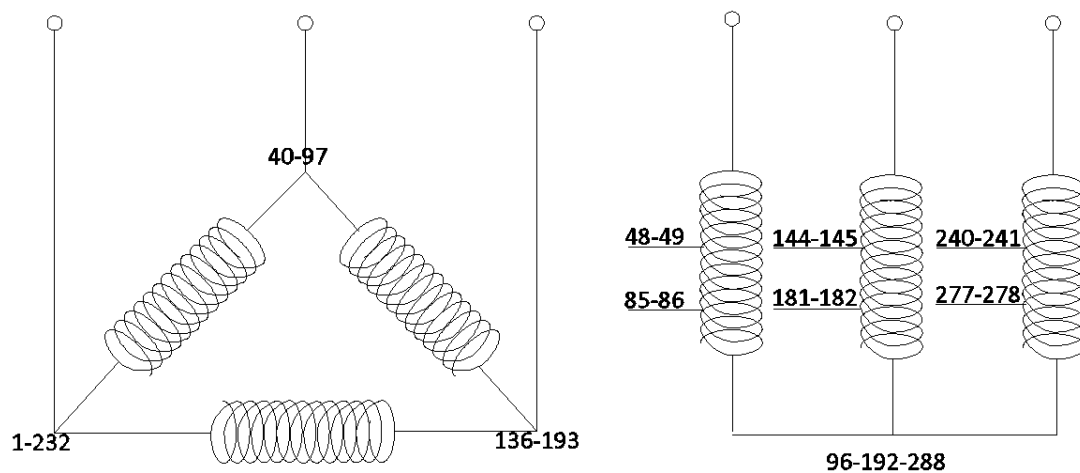
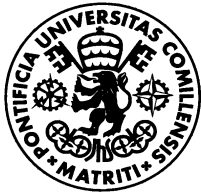


Figura 32



4.3 RESULTADOS

4.3.1 IMPULSO 1,2/50 US DE 850 kV DE CRESTA POR ALTA

- FASE R**

TENSIÓN DE NODOS ARROLLAMIENTO DE ALTA

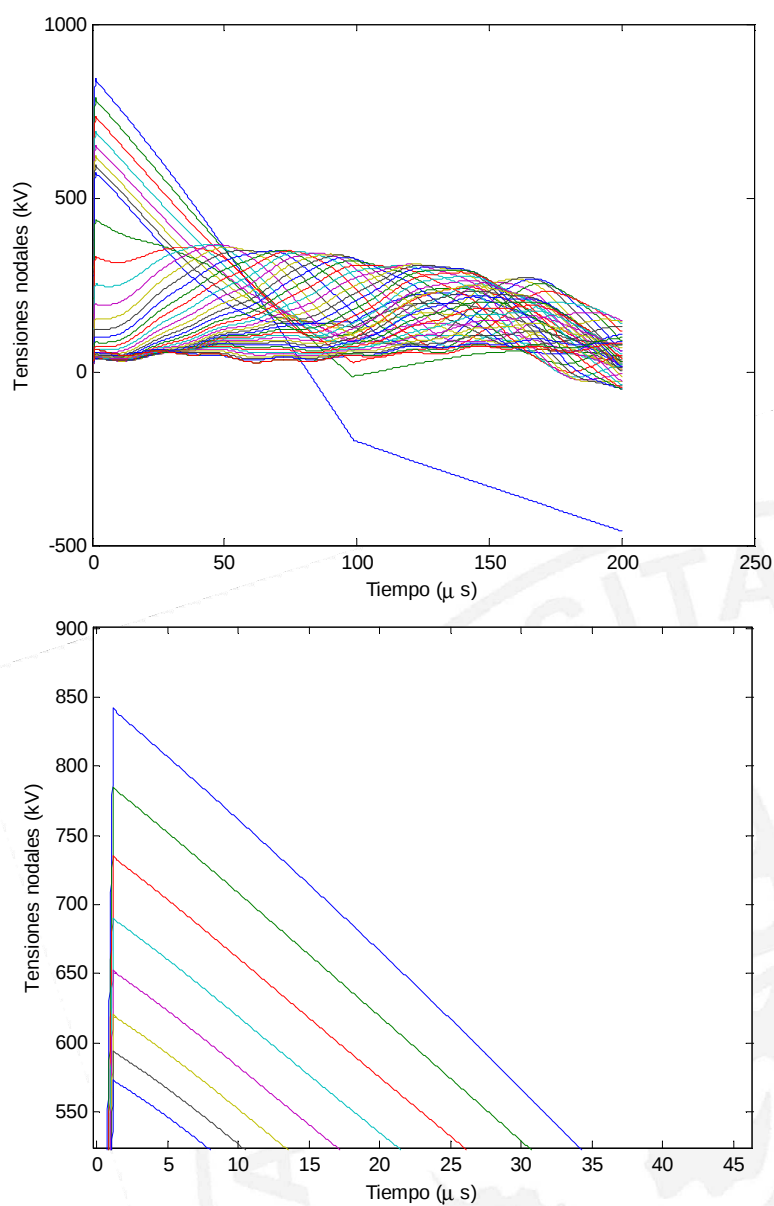
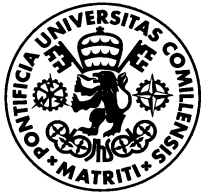


Figura 33



TENSIÓN DE NODOS ARROLLAMIENTO DE BAJA

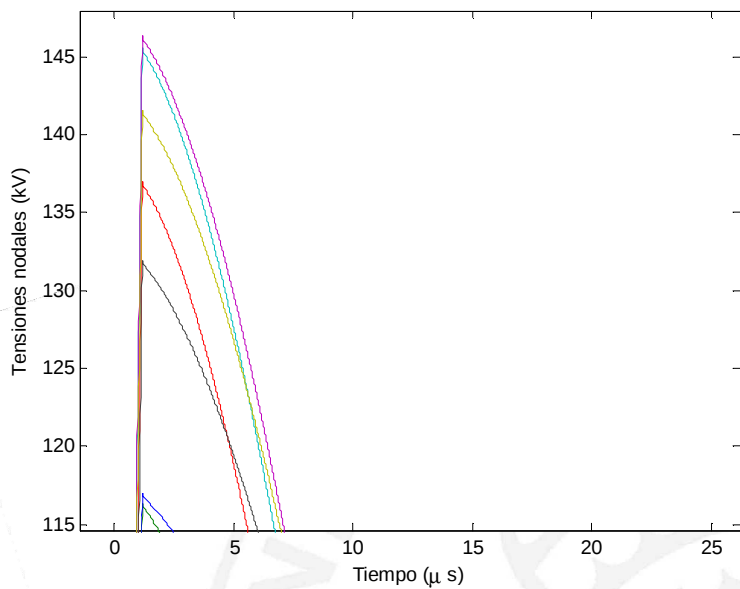
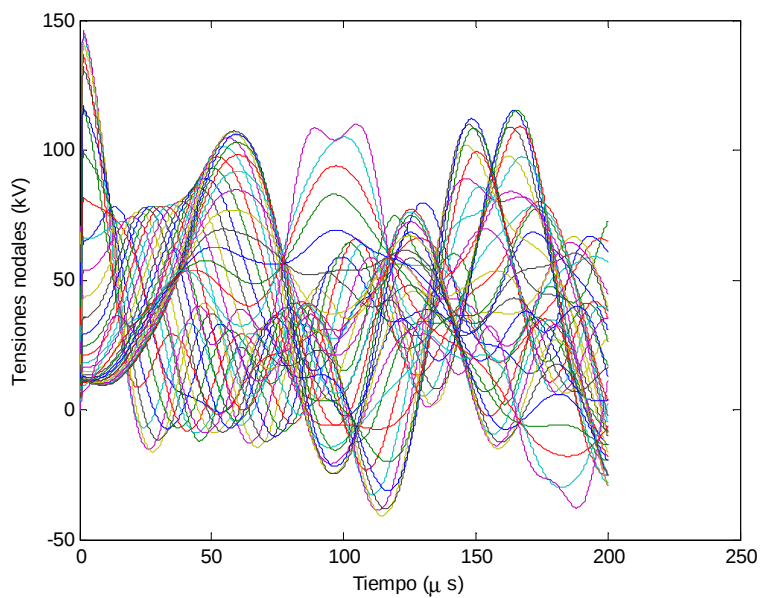


Figura 34

- **FASE S**

TENSIÓN DE NODOS ARROLLAMIENTO DE ALTA

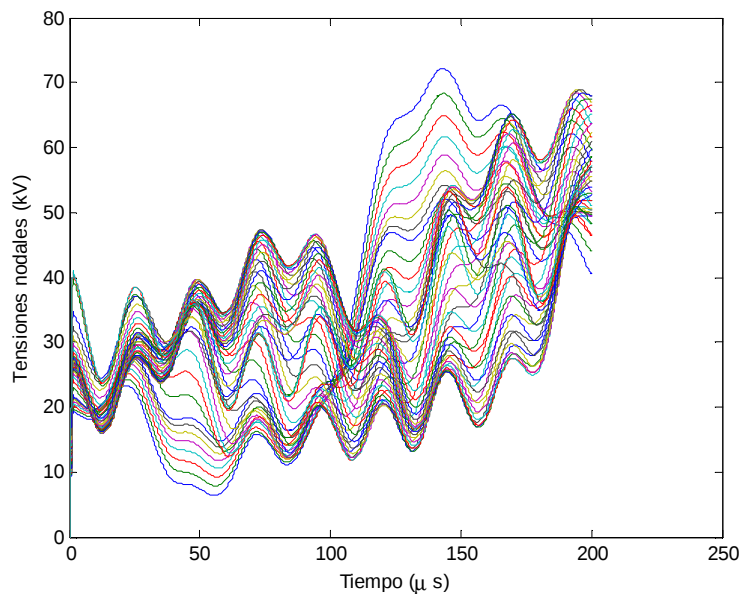


Figura 35

TENSIÓN DE NODOS ARROLLAMIENTO DE BAJA

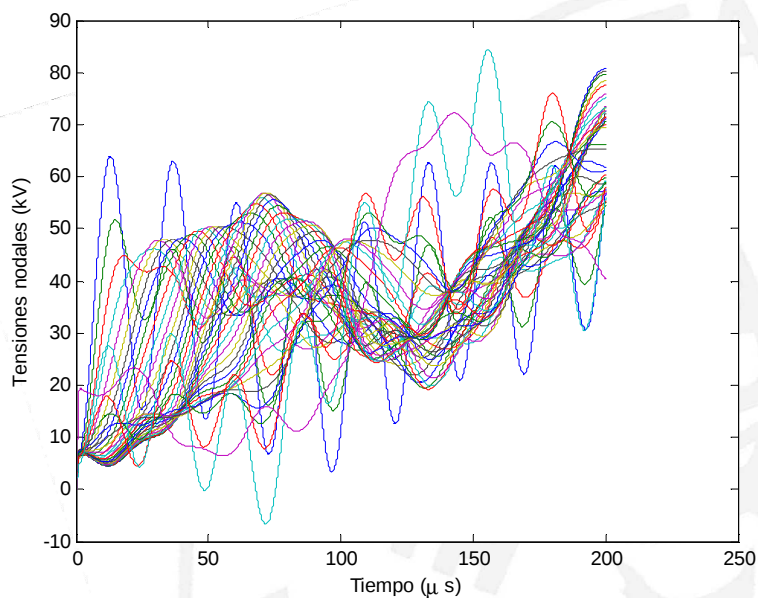


Figura 36

- **FASE T**

TENSIÓN DE NODOS ARROLLAMIENTO DE ALTA

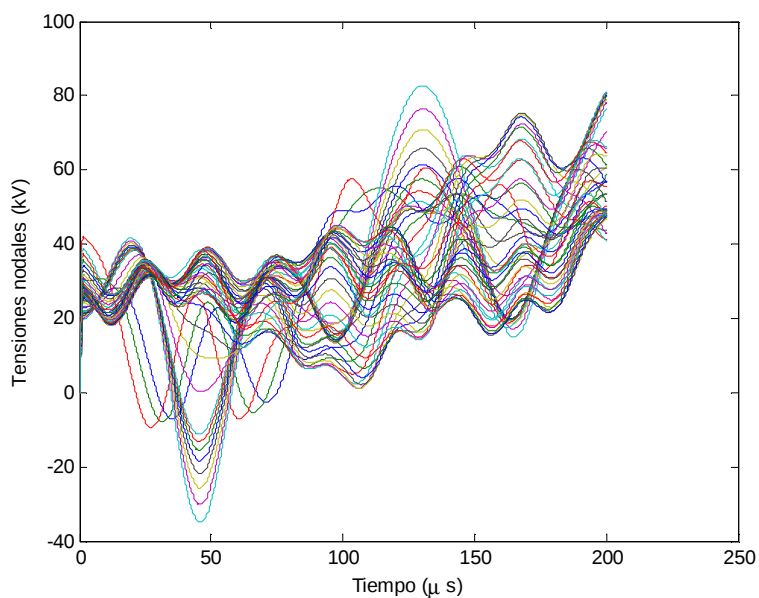


Figura 37

TENSIÓN DE NODOS ARROLLAMIENTO DE BAJA

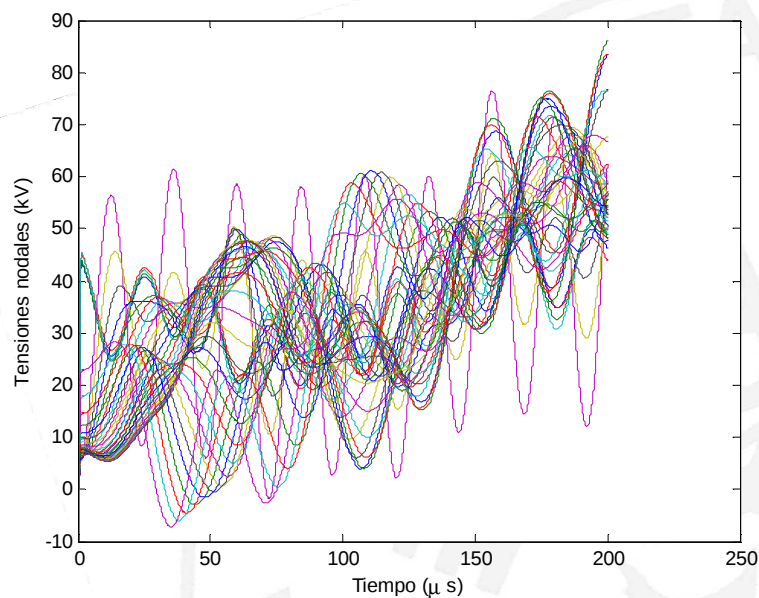


Figura 38

4.3.2 IMPULSO 1,2/50 US DE 125 kV DE CRESTA POR BAJA

- **FASE R**

TENSIÓN DE NODOS ARROLLAMIENTO DE BAJA

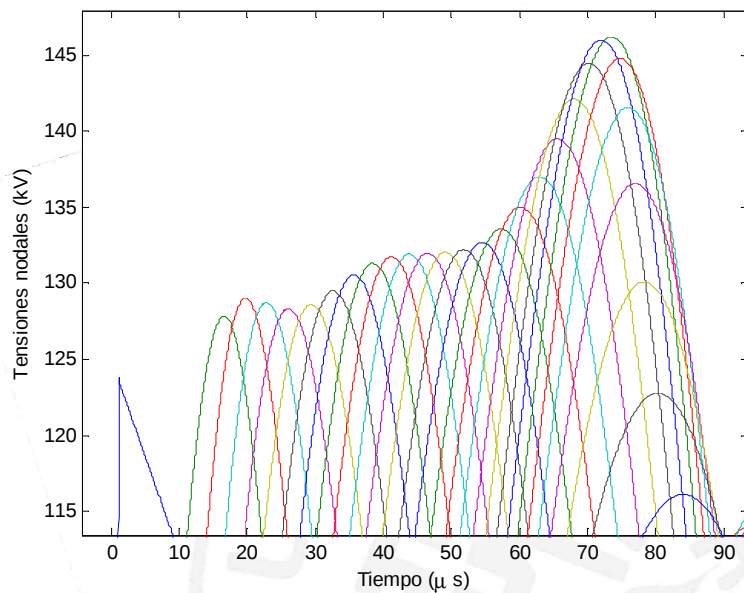
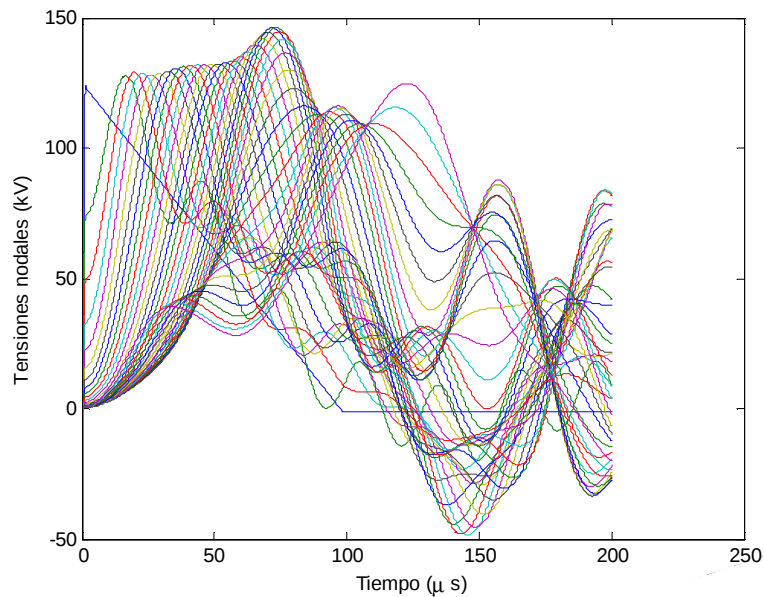
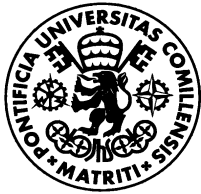


Figura 39



TENSIÓN DE NODOS ARROLLAMIENTO DE ALTA

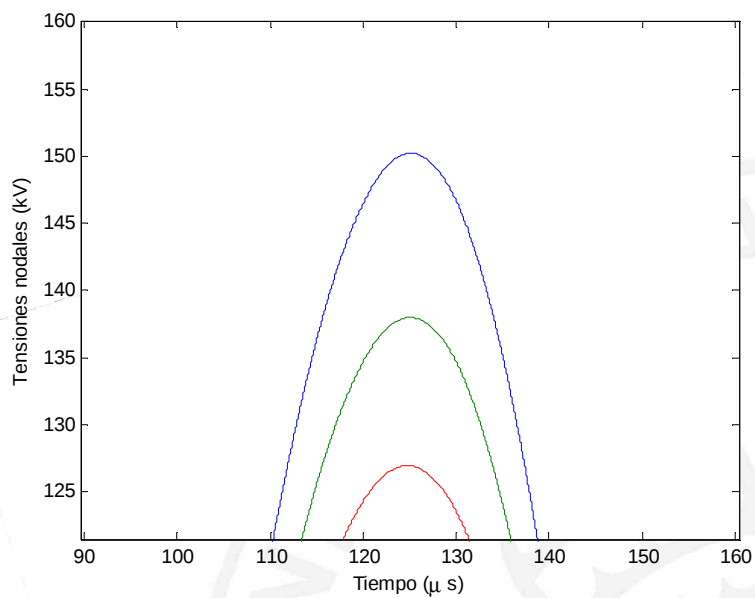
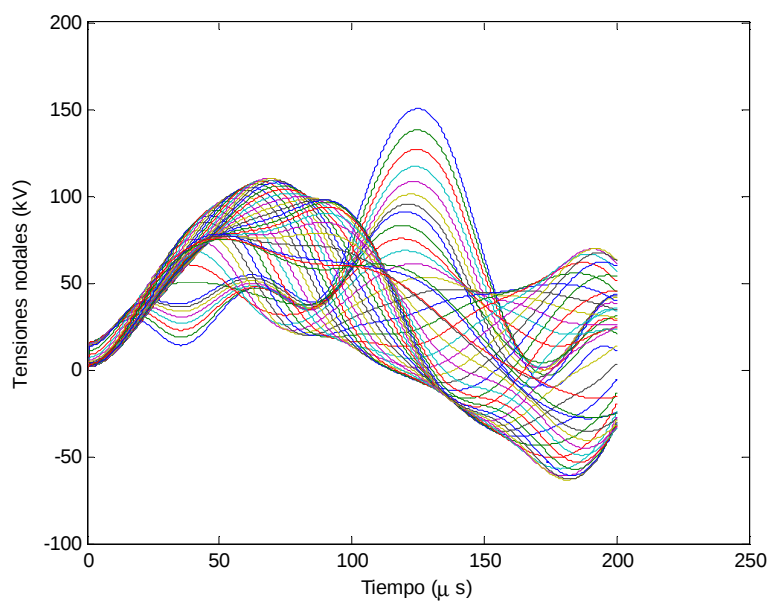


Figura 40

- **FASE S**

TENSIÓN DE NODOS ARROLLAMIENTO DE BAJA

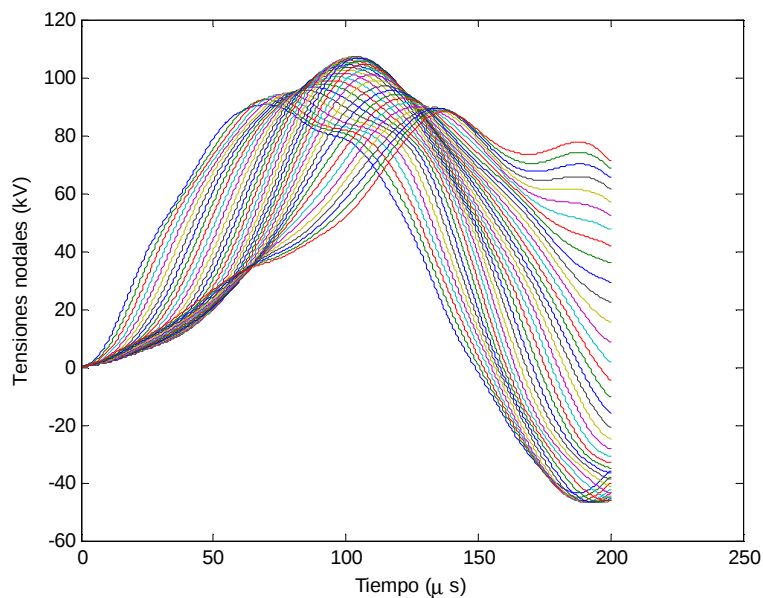


Figura 41

TENSIÓN DE NODOS ARROLLAMIENTO DE ALTA

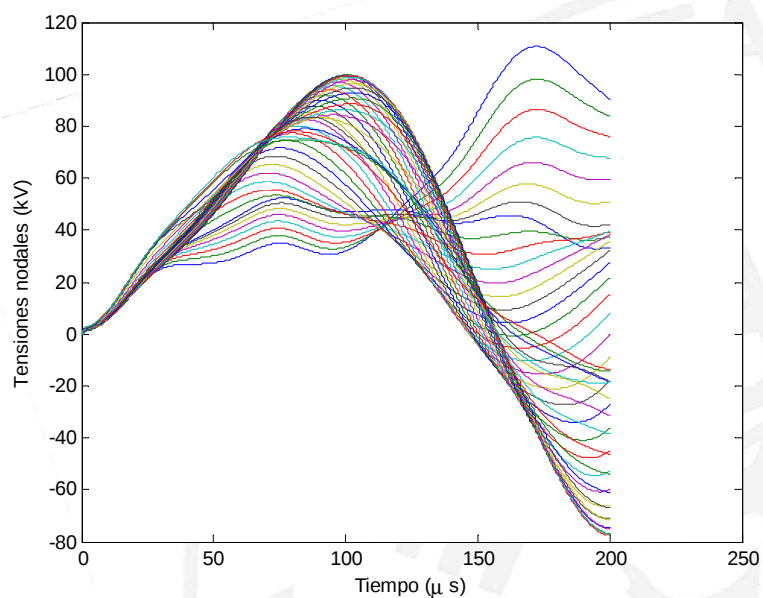


Figura 42

- **FASE T**

TENSIÓN DE NODOS ARROLLAMIENTO DE BAJA

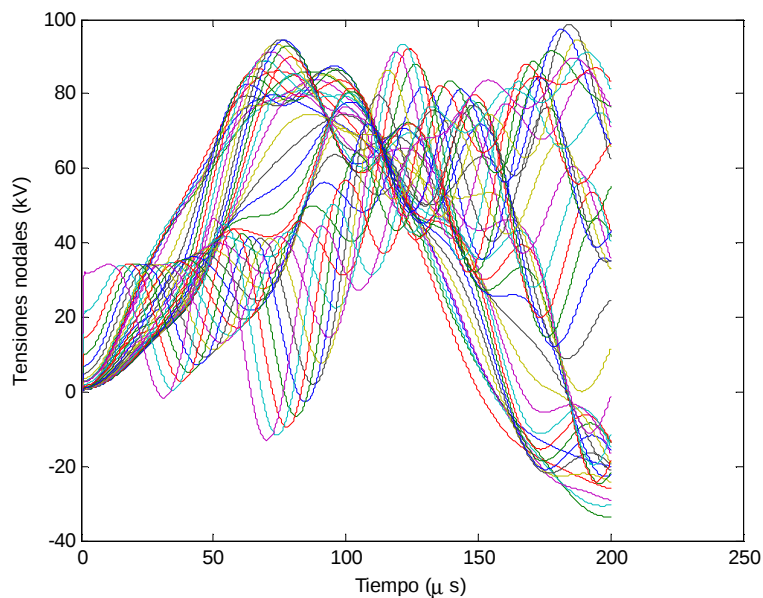


Figura 43

TENSIÓN DE NODOS ARROLLAMIENTO DE ALTA

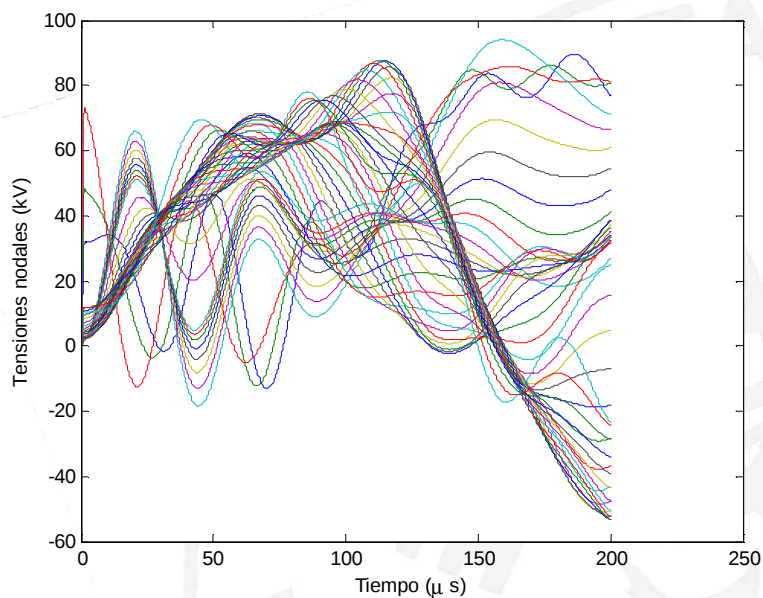
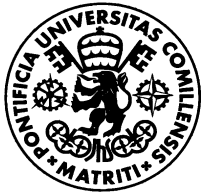


Figura 44

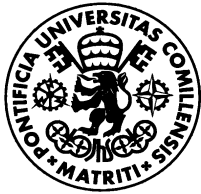


4.4 CONCLUSIONES

Como se puede apreciar en los resultados, al inyectar 850 kV en el lado de alta de la fase R se sobrepasarían los 125 kV de nivel de aislamiento básico en el lado de baja. Alcanzaríamos un valor máximos de aproximadamente 145 kV, un 16% más de lo permitido. Tanto para el lado de alta de la fase R como para el resto de las fases, las sobretensiones no sobrepasan el BIL (Basic Insulation Level).

Por otra parte, al inyectar 125 kV por el lado de baja en la fase R, sobrepasaríamos el BIL en el lado de baja de la fase R, alcanzando un valor entorno a 145 kV, un 16% más sobre el límite marcado por los 125 kV. Para el resto de las fases, no se aprecia niveles de sobretensión peligrosos.

Concluiríamos que, en principio, habría riesgo de ruptura del aislamiento en el lado de baja de la fase por el que se inyecta el impulso, en nuestro caso, la fase R. Este riesgo existe tanto cuando inyectamos 850 kV en alta, como cuando inyectamos 125 kV en baja.

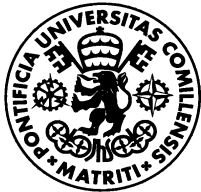


Capítulo 5 RESPUESTA EN FRECUENCIA

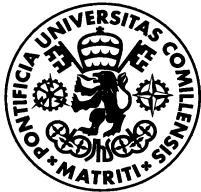
5.1 INTRODUCCIÓN

Existen numerosas técnicas de diagnóstico de transformadores. A continuación adjunto una lista con las más populares:

Prueba	Detecta
Técnicas con el transformador energizado	
Análisis de gases disueltos (DGA).	Arqueo interno, mal contacto eléctrico, puntos calientes, descargas parciales y sobrecalentamiento de conductores, aceite y aislamientos.
Pruebas físicas y químicas del aceite.	Humedad, acidez, tensión superficial, furanos, rigidez dieléctrica y factor de potencia.
Inspección externa física.	Fugas de aceite, partes rotas, operación ruidosa, conexiones flojas, problemas con los ventiladores y refrigeración.

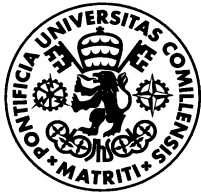


Temperaturas externas del tanque principal y cambiador de derivaciones.	Cambios de temperaturas debidos a cambios en la carga y temperatura ambiente.
Termovisión.	Puntos calientes, corrientes circulantes, bloqueos del enfriamiento, problemas con el cambiador de derivaciones, conexiones flojas.
Análisis acústico (ultrasónico)	Descargas parciales internas, arqueo, blindajes no aterrizados, malas conexiones en boquillas, defectos en contactos del cambiador, problemas de puesta a tierra del núcleo, aislamiento débil que produce efecto corona.
Detección sónica de defectos	Fugas de nitrógeno, fugas de vacío, vibración excesiva de núcleo bobinas, efecto corona en las boquillas, problemas mecánicos en rodamientos de motres y bombas. o



Análisis de vibraciones	Problemas internos de núcleo, bobinas, blindajes, partes flojas y rodamientos defectuosos.
-------------------------	--

Técnicas con el transformador desenergizado	
Pruebas de DOBLE (capacitancia de las boquillas, factor de potencia del aislamiento, corriente de excitación).	Pérdida de la integridad dieléctrica del aislamiento, pérdida la integridad dieléctrica de las boquillas, humedad en los devanados.
Relación de transformación	Devanados en cortocircuito, cortocircuito entre vueltas.
Medición de impedancia de corto circuito (reactancia de dispersión).	Deformación mayor en los devanados
Medición de resistencia de núcleo a tierra	Mala conexión de tierras intencionales del núcleo o existencia de conexiones a tierra no intencionales.



Medición de resistencias de los devanados con corriente directa.	Falsos contactos, cintas rotas, conexiones flojas, falso contacto en cambiadores de derivaciones.
Análisis de respuesta en frecuencia	Movimientos y deformaciones locales en los devanados.
Inspección visual interna	Lodos en el aceite, desplazamiento de devanados y cuñas, falta de apriete en devanados, malas conexiones, calentamientos excesivos, objetos extraños en el equipo.
Grado de polimerización	Condición y tiempo de vida estimada del aislamiento

Tabla 3

El principal interés de las mediciones FRA en transformadores, es la de detectar deformaciones en los bobinados, que puedan haber resultado como consecuencia de las fuerzas electromagnéticas que ocurren dentro del transformador debido a faltas pasantes, faltas en el conmutador bajo carga, defectos de sincronización, etc.



Las deformaciones en los bobinados pueden dar como resultado faltas debido a daños en el aislamiento entre espiras, resultando espiras cortocircuitadas, lo que significa la inmediata finalización de la vida de la máquina.

Se espera que los transformadores sobrevivan un número de cortocircuitos, pero una vez que se produce una deformación significativa de los bobinados, la probabilidad de sobrevivir nuevos cortocircuitos se ver reducida fuertemente debido al incremento de las tensiones electromagnéticas. Aún más, cualquier reducción en la sujeción del bobinado, debido a la reducción del aislamiento causado por el envejecimiento, incrementará la probabilidad de falta.

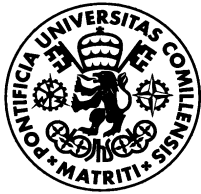
Otra de las aplicaciones de la técnica de medición de FRA, es la de verificar la integridad mecánica de un transformador después del transporte, lo que brinda una herramienta confiable para confirmar que el núcleo y los bobinados no sufrieron ningún daño mecánico debido a las sacudidas durante el transporte.

Teniendo en cuenta que las mediciones de FRA pueden brindar información acerca de la consistencia geométrica de la estructura del bobinado y el núcleo, estos ensayos son utilizados como controles para asegurar la calidad.

Existen algunos conceptos y definiciones entorno a la respuesta en frecuencia, que conviene aclarar y son las siguientes:

- **Análisis de respuesta en frecuencia (FRA – Frequency Response Analysis)**

Se trata de cualquier medición que muestre la dependencia de la frecuencia de los bobinados de un transformador frente a una señal aplicada que sea hecha con la intención de detectar deformaciones de los bobinados a través de los efectos resultantes de los cambios en las inductancias y capacitancias distribuidas.



- **Método de barrido en frecuencia (SFRA – Sweep FRA)**

Es la respuesta en frecuencia medida directamente, debida a la inyección de una señal de frecuencia variable en uno de los terminales y con la medición de la respuesta en el otro terminal.

- **Método de tensión de impulso (LVI – Low Voltage Impulse)**

Es la respuesta en frecuencia medida indirectamente, debida a la inyección de una señal de impulso de una forma particular en un terminal y midiendo la respuesta en el otro terminal, y luego para ver los resultados aplicar la transformación del dominio en el tiempo al dominio de la frecuencia.

- **Amplitud del FRA**

La magnitud de la respuesta relativa a la señal inyectada, se la expresa usualmente en dB calculada como $20 \times \log_{10}(V_{\text{respuesta}} / V_{\text{inyectada}})$

- **Angulo de fase FRA**

Es el desfase de ángulo de la respuesta relativa a la de la señal inyectada

5.2 COMPORTAMIENTO DE COMPONENTES BÁSICOS CON LA FRECUENCIA

Para un mejor entendimiento de la respuesta en frecuencia de las resistencias, inductancias y capacitancias de un transformador, se mostrará a continuación el comportamiento individual simplificado de los mismos.

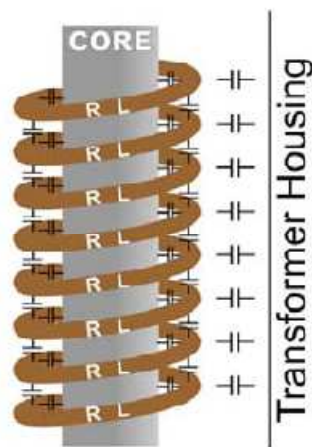


Figura 45

- **Resistencia**

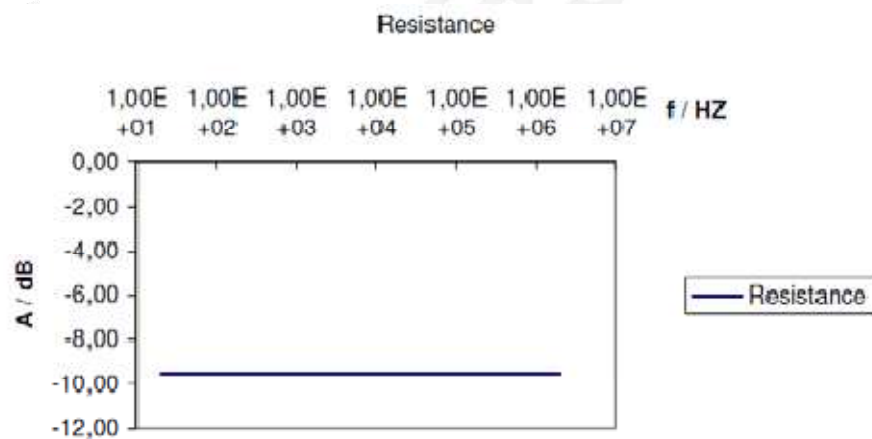


Figura 46

La señal es atenuada debido a la resistencia, pero es independiente de la frecuencia. En un modelo real el resistor mostrará cierta impedancia debido a la construcción física del mismo.

- **Inductancia**

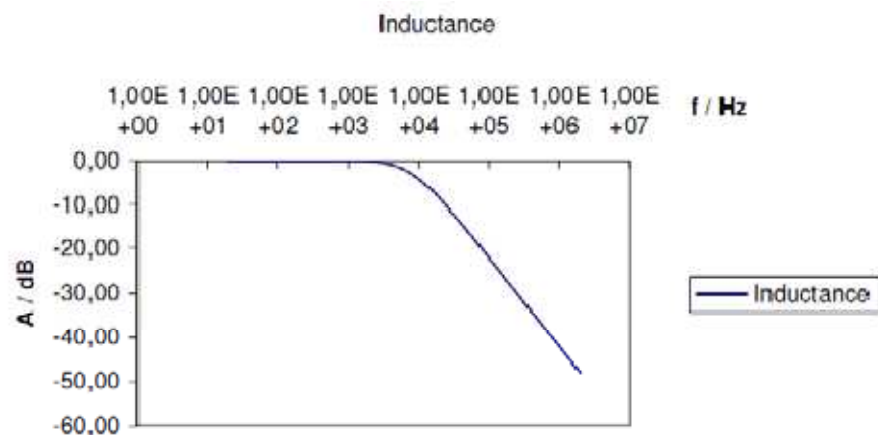


Figura 47

Se observa que no hay atenuación hasta la frecuencia de corte, a partir de ahí la atenuación empieza a caer.

- **Capacitor**

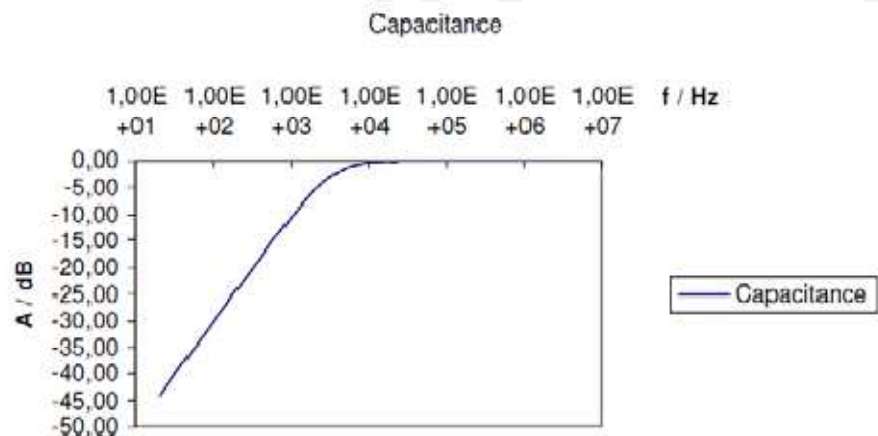


Figura 48

- **Comportamiento real de una bobina de 600 espiras con y sin núcleo**

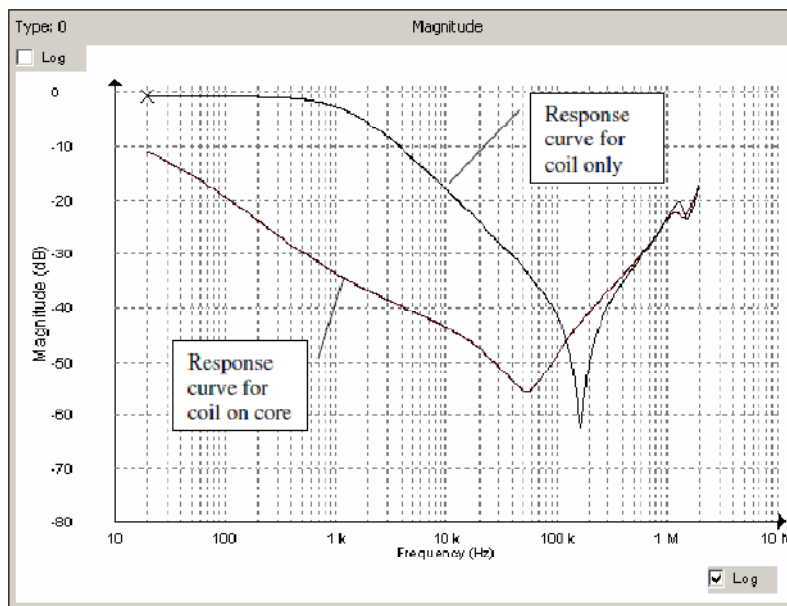


Figura 49

La bobina sin el núcleo, muestra un comportamiento muy similar a la bobina de 1 mH indicada anteriormente, con un primer punto de resonancia a 166 kHz y un segundo punto a 1.55 MHz.

Cuando se inserta el núcleo, la inductancia crece fuertemente y se vuelve fuertemente dependiente de la frecuencia. El primer punto de resonancia ocurre ahora a los 53 kHz y el segundo a 1.42 MHz.

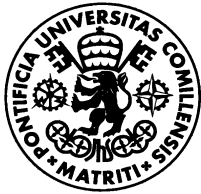


5.3 TIPOS DE DEFECTOS Y DEFORMACIÓN DE LOS BOBINADOS POR CORTOCIRCUITOS

Cuando un transformador está sometido a corto circuitos en la red a la que está conectado, experimenta incrementos considerables en las corrientes que lo atraviesan durante el tiempo de duración de la falta externa. La magnitud de la corriente de defecto pasante resultante es usualmente mucho mayor (hasta 20 veces) que aquellas de servicio normal, ya que no están limitadas por la impedancia de la carga, y puede que estén solo limitadas por la impedancia del transformador. La amplitud de la primera corriente de pico puede alcanzar casi dos veces el valor de la corriente de corto circuito permanente. El cortocircuito puede devenir por la aparición de defectos en otra parte de la red, o como resultado de un transitorio, generado por el sistema o por el medio ambiente; por ejemplo, caída de rayos cercanos, que pueden causar una falta de fase a tierra. Los transformadores que están expuestos a sincronizaciones fuera de fase en una red, experimentarán corrientes de valor similar o mayores que aquellas de faltas pasantes.

Las faltas pasantes en bobinados de transformadores (tal como las corrientes normales de carga), establecen un campo magnético en el espacio entre bobinas. Este es también llamado flujo de pérdida que junto con el flujo magnetizante normal del núcleo, y la reactancia de pérdida resultante o impedancia de cortocircuito es el principal factor limitante de la corriente de cortocircuito y es uno de los principales parámetros especificados en un transformador.

En la mayor parte del alto axial del bobinado del núcleo de un transformador, la interacción entre el flujo axial de pérdida predominante y las corrientes circulares del bobinado producen fuerzas electromagnéticas radiales en los bobinados que tienden a separarlos. Lo más crítico de esto, son las fuerzas hacia adentro de los bobinados interiores que dan como resultado dobladuras o abolladuras del bobinado.



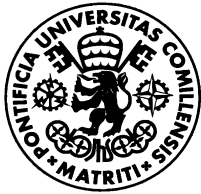
En los finales de los bobinados de un transformador con núcleo, el flujo de pérdida ya no es puramente axial, sino que margina fuera de ambos bobinados. La interacción entre la componente radial de este campo y las corrientes de las bobinas, produce fuerzas electromagnéticas que actúan axialmente y tienden a comprimir los bobinados. Una presión extrema, puede producir la inclinación de los conductores individuales en el bobinado.

En el diseño y construcción de grandes transformadores, se presta una muy especial atención para estar seguros de que ambos bobinados sean simétricos respecto de sus centros electromagnéticos. Si esto no se hace, o hay algún posterior desplazamiento debido a encogimiento del aislamiento, entonces las fuerzas electromagnéticas ya no estarán equilibradas y pueden existir fuerzas axiales netas actuando sobre los bobinados individuales. Debido a que los bobinados de los núcleos no se hacen enteramente circulares, sino que tiene cierto grado de espiralamiento, existirán fuerzas de torsión actuando sobre los bobinados que tenderán a ajustarlos.

Como resultado de las fuerzas radiales y axiales actuando sobre los bobinados, se pueden ver principalmente los siguientes tipos de defecto.

Algunos tipos de defecto que se pueden detectar con FRA son:

- Movimiento del núcleo
- Faltas a tierra del núcleo
- Deformación de los bobinados
- Desplazamiento de los bobinados
- Colapso parcial de los bobinados
- “Hoop buckling” o abollamiento del bobinado
- Estructuras rotas
- Espiras en corto o bobinados abiertos



5.4 **MÉTODO DE RESPUESTA EN FRECUENCIA POR BARRIDO**

Conocido como SFRA (Sweep Frequency Response Analysis), se trata de una técnica de diagnóstico para detectar deformaciones y desplazamientos (entre otras faltas eléctricas y mecánicas) de devanados de transformadores de distribución y de potencia. El SFRA como técnica de diagnóstico, debe integrar las mediciones off-line y la interpretación de los registros para dar una valoración adecuada de la condición de los devanados.

El objetivo principal es detectar desplazamientos luego de sobre corrientes causadas por faltas pasantes, faltas de CBCs, sincronizaciones fallidas, etc. Otras aplicaciones son la verificación de la condición mecánica luego del transporte y la detección de cualquier problema que produzca cambios en la distribución de inductancias o capacidades en transformadores (faltas en el núcleo, problemas en la puesta a tierra del núcleo o pantallas, etc.).

La comparación con otras técnicas de diagnóstico muestran que las ventajas principales del FRA son su sensibilidad ante una gran variedad de faltas de arrollamientos y una menor dependencia de mediciones previas de referencia, pero se hace necesaria una metodología de interpretación sistemática y objetiva.

5.4.1 PRINCIPALES TIPOS DE ENSAYO FRA

Para realizar la medición de FRA, una tensión (sea esta con barrido en frecuencia o con señal de impulso) se inyecta a un terminal del transformador con referencia contra el tanque. La tensión medida en el terminal de entrada, se usa como referencia para el cálculo de FRA. Un segundo parámetro (señal de respuesta) es usualmente la tensión tomada en la impedancia medida a través del un segundo terminal del transformador con referencia al tanque. La respuesta en amplitud del FRA, es la

relación entre la señal de respuesta V_r y la señal de la fuente V_s como una función de la frecuencia (generalmente presentada en dB)

- **Ensayo: Final con final (abierto)**

En este tipo de ensayo la señal, se aplica en una punta del bobinado y la respuesta se mide en la otra punta.

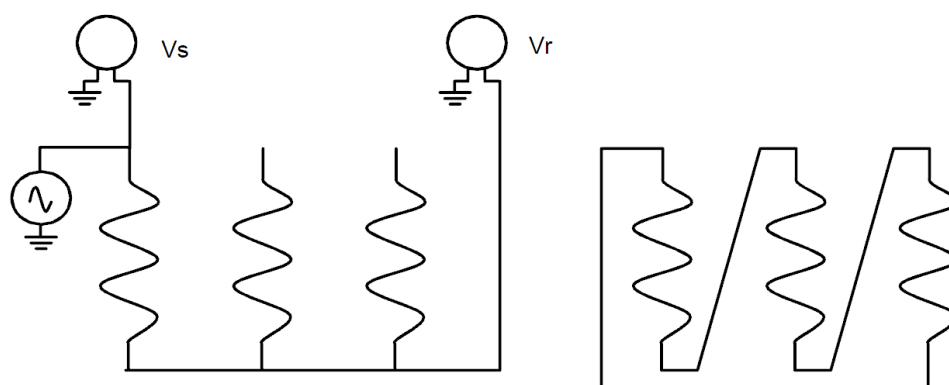


Figura 50

Aquí la impedancia de magnetización del transformador es el parámetro principal, caracterizando la respuesta en baja frecuencia (debajo del primer punto de resonancia). Es el test más usado por su simplicidad y que permite examinar cada bobinado por separado.

- **Ensayo: Final con final (cortocircuitado)**

Este ensayo es similar a anterior, pero con un bobinado en la misma fase cortocircuitado.

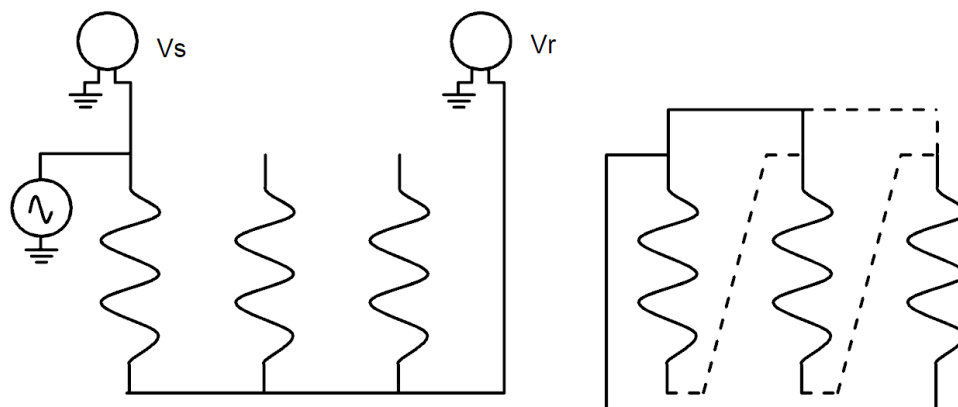


Figura 51

Esta medición permite que la influencia del núcleo se mueva hacia abajo entre 10 y 20 kHz, ya que la respuesta en baja frecuencia se caracteriza por la inductancia de pérdidas en vez de la inductancia de magnetización. La respuesta en altas frecuencias es similar a la obtenida con el método anterior.

Este ensayo es de especial interés cuando se quiere obtener información relacionada con la impedancia de pérdidas a baja frecuencia, o cuando se quiere resolver dudas acerca del análisis de la influencia del núcleo cuando hay presencia de magnetismo residual.

- **Ensayo: Capacitivo entre bobinados**

La señal se aplica a un extremo de un bobinado y la respuesta se mide en el final de otro bobinado en la misma fase. Por definición, este tipo de ensayo no se puede realizar entre los bobinados serie y comunes de los auto transformadores.

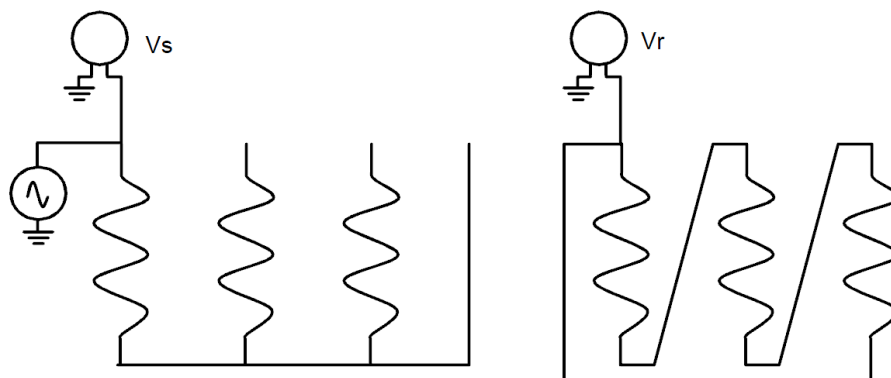


Figura 52

La respuesta en esta conexión es dominada en bajas frecuencias por la capacitancia entre bobinados.

- **Ensayo: Inductivo entre bobinados**

La señal se aplica al terminal del lado de alta tensión y la respuesta se mide en el terminal correspondiente en el lado de baja tensión, con la otra punta de ambos bobinados puestos a tierra.

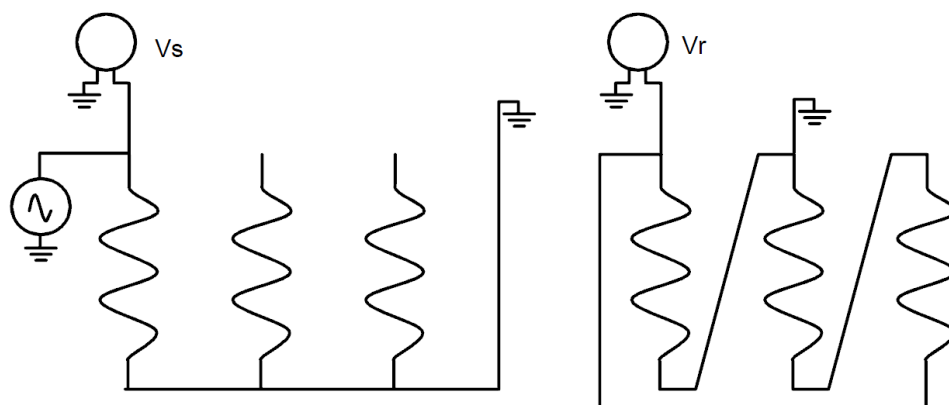


Figura 53



5.5 PROCEDIMIENTO

Según los datos que tenemos, hemos optado por llevar a cabo dos métodos para la obtención de capacidades equivalentes. El primer modo, es exclusivamente mediante la matriz de capacidades. El segundo, se realiza mediante las matrices de inductancias y capacidades.

5.5.1 CAPACIDADES EQUIVALENTES CON MATRIZ DE CAPACIDADES

TENSIONES

Puentes:

$$\begin{pmatrix} u_1' \\ u_2' \\ u_3' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} = [T_1] \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Recolocación:

$$\begin{pmatrix} u_1' \\ u_3' \\ u_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} = [T_2] \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

CORRIENTES

Puentes:

$$\begin{pmatrix} i_1' \\ i_2' \\ i_3' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} = [T_1'] \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix}$$

Recolocación:

$$\begin{pmatrix} i_1' \\ i_3' \\ i_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} = [T_2'] \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix}$$



ECUACIONES

$$j \cdot \omega \cdot [C'] \cdot [U_{nudo}] = [I_{nudo}]$$

$$C_{transformada} = T_2 \cdot T_1' \cdot C \cdot T_1 \cdot T_2^{-1}$$

Mi nueva matriz cuadrada será de $N = N_{fase R}$

Reducción de KRON

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{n-1} \\ I_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1,1} & & \vdots & & C_{1,n} \\ & C_{2,2} & & & \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ & & & C_{n-1,n-1} & \\ C_{n,1} & & \vdots & & C_{n,n} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_{n-1} \\ U_n \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} K \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}$$

$$K = [C_{11} - C_{12} \cdot C_{22}^{-1} \cdot C_{21}] \cdot X$$

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = [C_{11} - C_{12} \cdot C_{22}^{-1} \cdot C_{21}] \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Ceq_{1,1} & Ceq_{1,2} \\ Ceq_{2,1} & Ceq_{2,2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix}$$

$$C_{bt-at} = -Ceq_{1,2}$$

$$C_{bt} = Ceq_{1,1} - C_{bt-at}$$

$$C_{at} = Ceq_{2,2} - C_{bt-at}$$



5.5.2 CAPACIDADES EQUIVALENTES CON MATRIZ DE INDUCTANCIAS Y CAPACIDADES

Para hacer el análisis de respuesta en frecuencia, nos vamos a centrar en una de las fases.

Primeramente, efectuaremos las transformaciones para convertir I_{malla} en I_{nudo} y U_{nudo} en U_{malla} . Como ejemplo, lo representamos para una matriz de 3 nodos y 2 mallas, pero es extrapolable a cualquier magnitud siempre que $n_{\text{mallas}}^{\circ} = n_{\text{nodos}}^{\circ} - 1$.

$$[I_{\text{nudo}}] = [P] \cdot [I_{\text{malla}}]$$

$$\begin{pmatrix} -i_1 \\ i_1 - i_2 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix}$$

$$[U_{\text{malla}}] = [M] \cdot [U_{\text{nudo}}]$$

$$\begin{pmatrix} u_1 - u_2 \\ u_2 - u_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

ECUACIONES

$$j \cdot \omega \cdot [C] \cdot [U_{\text{nudo}}] = [I_{\text{nudo}}]$$

$$j \cdot \omega \cdot [L] \cdot [I_{\text{malla}}] = [U_{\text{malla}}]$$

$$[R] \cdot [I_{\text{malla}}] = [U_{\text{malla}}]$$

$$[U_{\text{malla}}] = [M] \cdot [U_{\text{nudo}}]$$

$$[I_{\text{nudo}}] = [P] \cdot [I_{\text{malla}}]$$



$$j \cdot \omega \cdot [L] \cdot [P]^{-1} \cdot [I_{nudo}] = [M] \cdot [U_{nudo}]$$

$$[R] \cdot [P]^{-1} \cdot [I_{nudo}] = [M] \cdot [U_{nudo}]$$

$$-j \cdot \frac{1}{\omega} \cdot [P] \cdot [L]^{-1} \cdot [M] \cdot [U_{nudo}] = [I_{nudo}]$$

$$j \cdot \omega \cdot [C] \cdot [U_{nudo}] = [I_{nudo}]$$

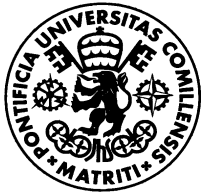
$$[P] \cdot [R]^{-1} \cdot [M] \cdot [U_{nudo}] = [I_{nudo}]$$

$$[Y_1] \cdot [U_{nudo}] = [I_{nudo}]$$

$$[Y_2] \cdot [U_{nudo}] = [I_{nudo}]$$

$$[Y_3] \cdot [U_{nudo}] = [I_{nudo}]$$

$$[Y_1 + Y_2 + Y_3] \cdot [U_{nudo}] = [I_{nudo}]$$



5.6 RESULTADOS

El objetivo al plantear estos dos métodos, es obtener valores que se aproximen razonablemente a las capacidades medidas por el fabricante cuyos datos son los siguientes:

$$C_{bt-at} = 1528,33 \text{ pF}$$

$$C_{bt} = 3258 \text{ pF}$$

$$C_{at} = 1391,73 \text{ pF}$$

A continuación, se muestran los resultados correspondientes a los dos métodos:

5.6.1 CAPACIDADES EQUIVALENTES CON MATRIZ DE CAPACIDADES

5.6.1.1 Monofásico

Calculamos las capacidades equivalentes con y sin arrollamiento de regulación. En el esquema que sigue, se muestran los puentes existentes en el arrollamiento de alta tensión y el mismo con el de regulación.

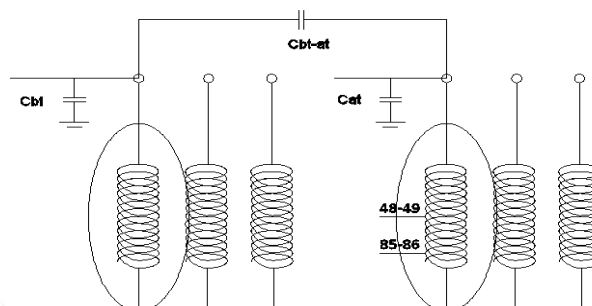


Figura 54



5.6.1.1.1 Monofásico con arrollamiento de regulación

$$C_{bt-at} = 65.1196 \text{ pF}$$

$$C_{bt} = 329.652 \text{ pF}$$

$$C_{at} = 442.078 \text{ pF}$$

5.6.1.1.2 Monofásico sin arrollamiento de regulación

$$C_{bt-at} = 64.2147 \text{ pF}$$

$$C_{bt} = 330.583 \text{ pF}$$

$$C_{at} = 474.303 \text{ pF}$$

5.6.1.2 Trifásico

A continuación, se muestra un gráfico del conexionado para calcular las capacidades trifásicas. Hemos cortocircuitado las bornas de alta y baja

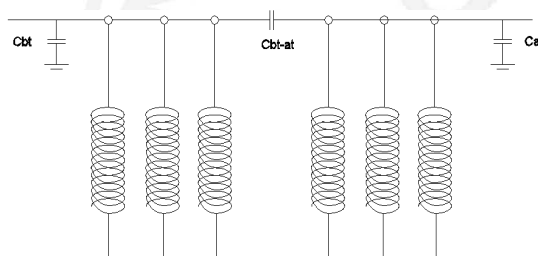


Figura 55



5.6.1.2.1 Capacidades trifásicas con arrollamiento de regulación

$$C_{bt-at} = 196.048 \text{ pF}$$

$$C_{bt} = 988.247 \text{ pF}$$

$$C_{at} = 1301.69 \text{ pF}$$

5.6.1.2.2 Capacidades trifásicas sin arrollamiento de regulación

$$C_{bt-at} = 192.644 \text{ pF}$$

$$C_{bt} = 991.75 \text{ pF}$$

$$C_{at} = 1422.91 \text{ pF}$$

Las capacidades resultantes calculadas, las comparamos con las medidas, cuyos valores son:

$$C_{bt-at} = 1528,33 \text{ pF}$$

$$C_{bt} = 3258 \text{ pF}$$

$$C_{at} = 1391,73 \text{ pF}$$

5.6.2 CAPACIDADES EQUIVALENTES CON MATRIZ DE INDUCTANCIAS Y CAPACIDADES

5.6.2.1 Monofásico

5.6.2.1.1 Monofásico sin arrollamiento de regulación

Hemos aplicado el procedimiento para una fase (en este caso la R). Dado que tenemos la opción de considerar o no el arrollamiento de regulación, hemos optado por ofrecer resultados de las dos alternativas. En ambos casos, la frecuencia de trabajo es 50 Hz.

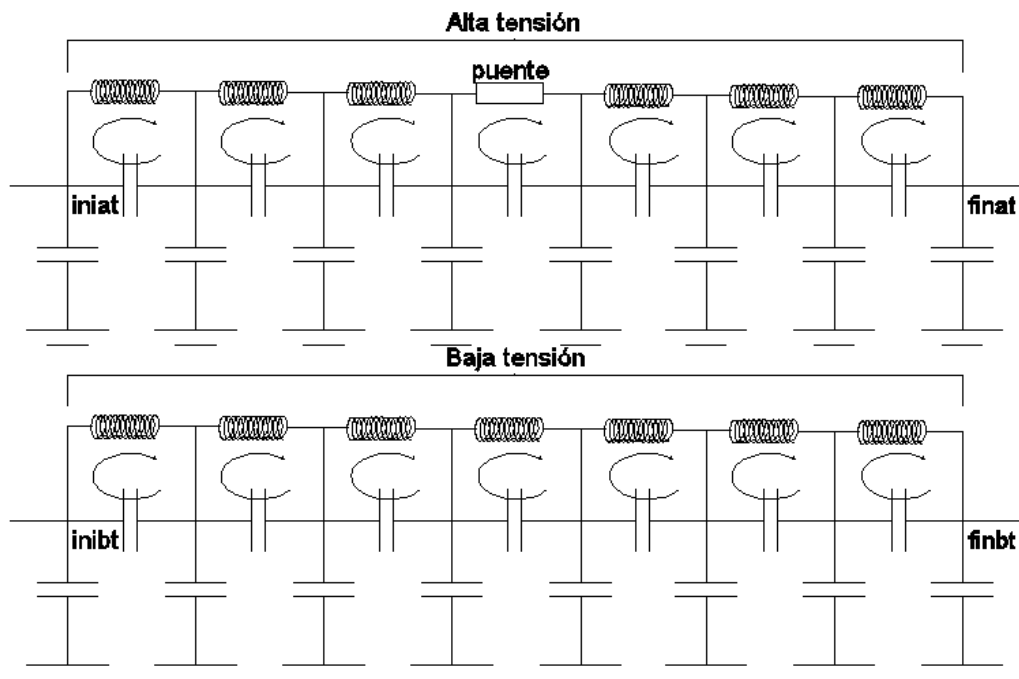


Figura 56

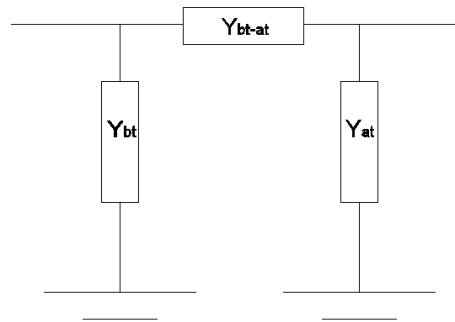


Figura 57

$$Y_{bt-at} = 0,0433 \cdot 10^{-5} \Omega^{-1}$$

$$Y_{at} = 0,0584 \cdot 10^{-5} \Omega^{-1}$$

$$Y_{bt} = 0,1245 \cdot 10^{-5} \Omega^{-1}$$

$$C_{bt-at} = \frac{Y_{bt-at}}{\omega} = \frac{Y_{bt-at}}{2\pi 50} = 1378 \text{ pF}$$

$$C_{at} = \frac{Y_{at}}{\omega} = \frac{Y_{at}}{2\pi 50} = 1854 \text{ pF}$$

$$C_{bt} = \frac{Y_{bt}}{\omega} = \frac{Y_{bt}}{2\pi 50} = 3964 \text{ pF}$$

5.6.2.2 Trifásico

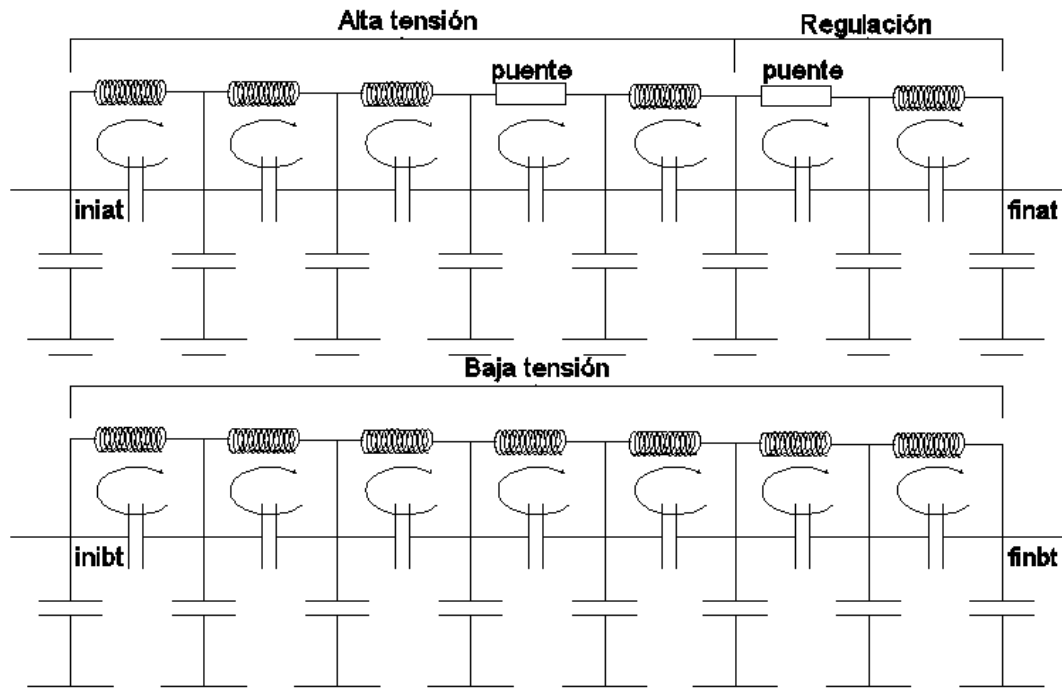


Figura 58

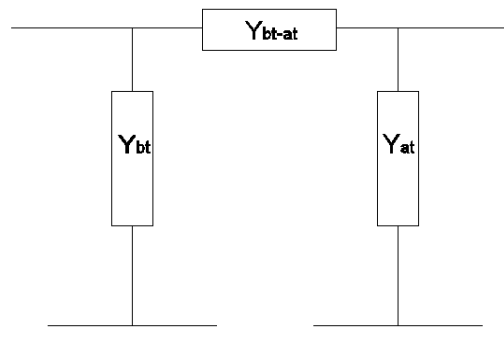
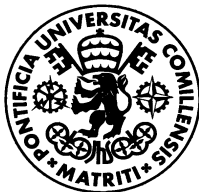


Figura 59

$$Y_{bt-at} = 0,0433 \cdot 10^{-5} \Omega^{-1}$$

$$Y_{at} = 0,0351 \cdot 10^{-5} \Omega^{-1}$$

$$Y_{bt} = 0,1245 \cdot 10^{-5} \Omega^{-1}$$



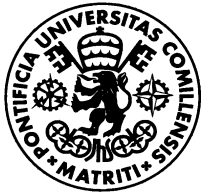
$$C_{bt-at} = \frac{Y_{bt-at}}{\omega} = \frac{Y_{bt-at}}{2\pi 50} = 1378 \text{ pF}$$

$$C_{at} = \frac{Y_{at}}{\omega} = \frac{Y_{at}}{2\pi 50} = 1116 \text{ pF}$$

$$C_{bt} = \frac{Y_{bt}}{\omega} = \frac{Y_{bt}}{2\pi 50} = 3965 \text{ pF}$$

A continuación, exponemos los distintos valores que toman las capacidades a medida que variamos la frecuencia. Para ello aumentaremos la frecuencia en múltiplos de la inicial (50 Hz). Las columnas en las que no se ha tenido en cuenta el arrollamiento de regulación están denotadas como “SIN”. Lo contrario, “CON” considera el arrollamiento de regulación.

Frecuencias	C_{bt-at} (pF)		C_{at} (pF)		C_{bt} (pF)	
	CON	SIN	CON	SIN	CON	SIN
50 Hz	1378	1378	1116	1854	3965	3964
500 Hz	1518	1535	1088	1868	4032	4014
5 kHz	-1106	10239	1847	-14048	3598	35845
50 kHz	99	55	356	466	147	244
500 kHz	65	64	441	474	328	330
5 MHz	65	64	442	474	330	331



5.6.3 RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL ARROLLAMIENTO

A continuación, hacemos el estudio de la respuesta en frecuencia siguiendo el siguiente proceso:

$$V_{salida} = \frac{C_{at}}{C_{bt-at} + C_{at}}$$
$$A_{dB} = 20 \cdot \log \left(\frac{C_{at}}{C_{bt-at} + C_{at}} \right) = 20 \cdot \log (V_{salida})$$

Tomando como tensión de entrada una senoidal de valor eficaz igual a la unidad, obtenemos los siguientes resultados:

5.6.3.1 Sin arrollamiento de regulación

- Frecuencias de 0 a 25 kHz

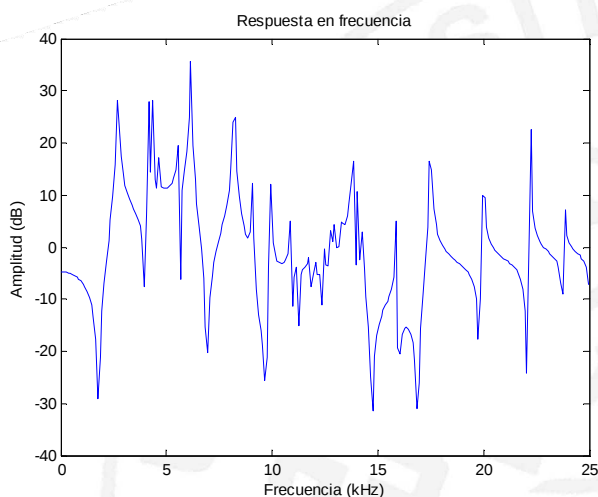


Figura 60

- Frecuencias de 25 a 50 kHz

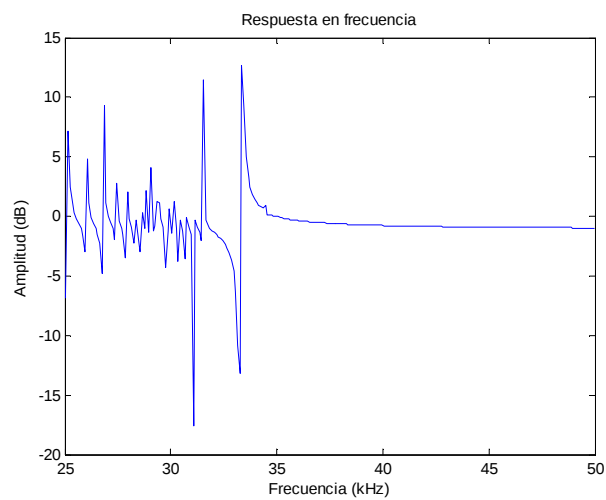


Figura 61

5.6.3.2 Con arrollamiento de regulación

- Frecuencias de 0 a 25 kHz

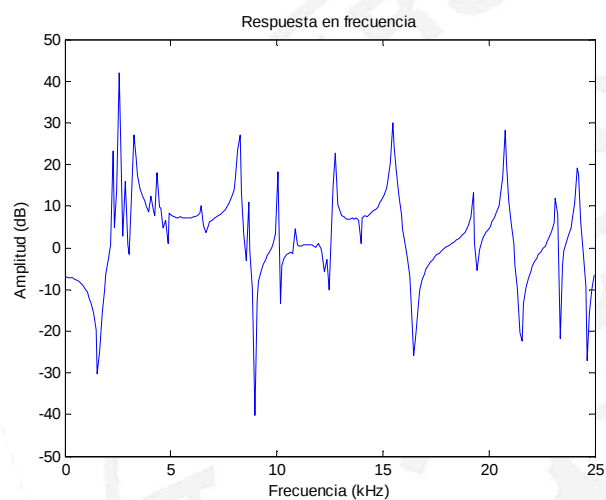


Figura 62

- Frecuencias de 25 a 50 kHz

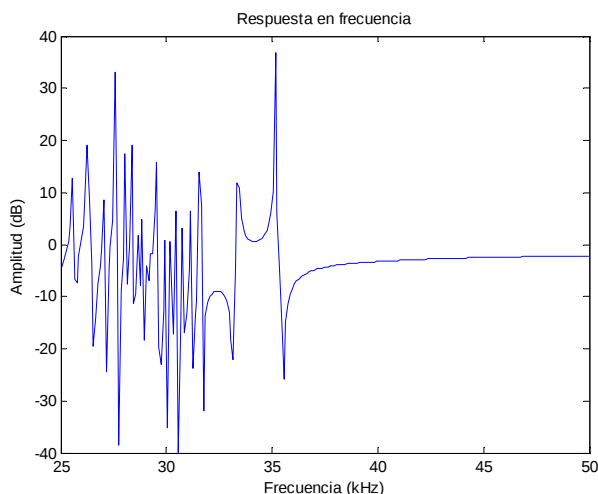
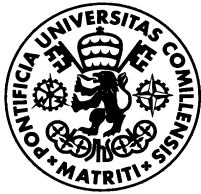


Figura 63

5.7 CONCLUSIONES

Primeramente, cabe destacar la semejanza de valores y magnitudes, con el método de la matriz de inductancias y capacidades, entre las capacidades calculadas a 50 Hz y las capacidades medidas aportadas por el fabricante. En el caso de que tengamos o no en cuenta el arrollamiento de regulación, obtenemos valores distintos, pero en cualquier caso parecidos.

En la tabla siguiente, se muestran los datos denotando mediante “CON” o “SIN” la existencia o no del arrollamiento de regulación en el cálculo.



Método	Inductancias + Capacidades		Medido
	CON	SIN	
$C_{bt-at} (pF)$	1378	1378	1528,33
$C_{at} (pF)$	1859	1116	1391,73
$C_{bt} (pF)$	3964	3965	3258

Tabla 4

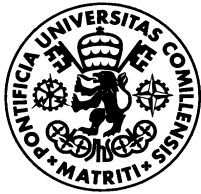
Como se puede apreciar, las capacidades calculadas a partir de 50 kHz tienden a hacerse constantes y casualmente coincide con las capacidades calculadas independientemente a través de la matriz de capacidades exclusivamente.

Esto tiene lógica, pues a altas frecuencias el circuito inductivo se comporta como un circuito abierto, quedando de esta manera sólo el circuito capacitivo.

En la tabla siguiente se muestra la comparativa siguiendo las denotaciones de la anterior tabla.

Método	Inductancias + Capacidades (500 kHz)		Capacidades	
	CON	SIN	CON	SIN
$C_{bt-at} (pF)$	65	64	65.1196	64.2147
$C_{at} (pF)$	328	330	329.652	330.583
$C_{bt} (pF)$	441	474	442.078	474.303

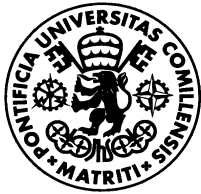
Tabla 5



También se puede comprobar cómo al hallar las capacidades equivalentes trifásicas, guardan relación con las monofásicas, siendo tres veces las mismas. Por otra parte, era lo esperado.

Método	Capacidades Trifásico		Capacidades Monofásico		Ratio	
	CON	SIN	CON	SIN	CON	SIN
$C_{bt-at} (pF)$	196,048	192,644	65,1196	64,2147	3,01	2,99
$C_{at} (pF)$	988,247	991,75	329,652	330,583	2,99	3
$C_{bt} (pF)$	1301,69	1422,91	442,071	474,303	2,94	3

Tabla 6



Capítulo 6 FUTUROS DESARROLLOS

Aún quedan incógnitas por descubrir para llegar a tener una completa y detallada visión de lo que es la correlación de los nodos y mallas entre sí.

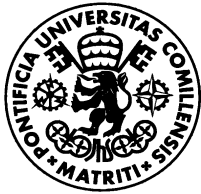
La comprensión de la organización de los nodos y mallas y su acoplamiento sigue siendo una asignatura pendiente.

En el modelo temporal, por ejemplo, ideamos una forma para adaptar la matriz de capacidades al modelo planteado. Fruto de esto, conseguíamos cumplir la premisa de $N^{\circ} \text{ nodos} = N^{\circ} \text{ mallas} + 1$. Sin embargo, este modelo vislumbra debilidades, pues su definición depende de la conexión que se realiza en el transformador.

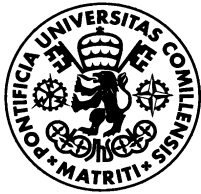
En nuestro caso, era una conexión tipo triángulo en baja tensión y tipo estrella en alta tensión y con ello conseguíamos reducir el número de nodos necesarios para implementar el modelo. Desgraciadamente, esto no hubiera sido aplicable de la misma manera para otro tipo de conexiones como estrella-estrella o triángulo-triángulo.

Creemos que debe haber alguna forma genérica que acople la matriz de capacidades con la de inductancias, es decir, nodos y mallas independientemente de su grupo de conexión.

En la respuesta en frecuencia a 50 Hz, al contrario, parece que sí nos hemos aproximado más a los valores medidos experimentalmente, lo cual augura que puede ser el buen camino.



Haría falta, en su caso, indagar más en el comportamiento del transformador en todos los rangos de frecuencia, que aunque hemos obtenido resultados, no hemos tenido la posibilidad de compararlos con pruebas de ensayo experimentales.

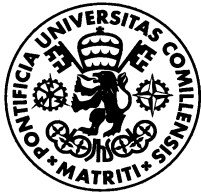


BIBLIOGRAFÍA

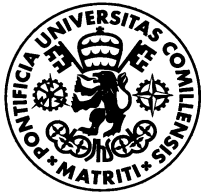
- [1] A. Greenwood, “Electrical Transients in Power Systems”, John Wiley and Sons, 1991.
- [2] J. A. Martínez Velasco (Coordinador), “Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión”, Mc Graw Hill, 2007.
- [3] J. L. Torá Galván, “Transporte de la energía eléctrica”, Universidad Pontificia Comillas, 1997.
- [4] L. F. Blume, A. Boyajian, G. Camilli, T. C. Lenox, S. Minneci, v: M. Monstsinger, “Transformer Engineering”, John Wiley and Sons, 1951.
- [5] A. C. Franklin, D. P. Franklin, “J&P Transformer Book, Eleventh Edition”, Butterworths, 1983.
- [6] IEC, International Standard IEC 71-1: “Insulation Coordination, Part I: Definitions, principles and rules”, 17th Edition, 1993.
- [7] IEC, Technical Report IEC TR 600071-4, “Insulation Coordination, Part 4: Computational guide to insulation coordination and modelling of electrical networks”, First Edition 2004-06.
- [8] P. A. Abetti, F. J. Maginnis, “Natural Frequencies of Coils and Windings Determined by Equivalent Circuit”, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part III, Power Apparatus and Systems, Volume 72, No. 2, January 1953, pp. 495-504.



- [9] P. A. Abetti, F. J. Maginnis, “Fundamental Oscillations of Coils and Windings”, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part III-A, Power Apparatus and Systems, Volume 73, No. 1, January 1954, pp. 1-10.
- [10] P. A. Abetti, F. J. Maginnis, “Correlation of Forced and Free Oscillations of Coils and Windings”, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part III, Power Apparatus and Systems, Volume 78, No. 4, December 1959, pp. 986-994.
- [11] W. J. McNutt, T. J. Blalock, R. A. Hinton, “Response of Transformer Windings to System Transient Voltages”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 458-467.
- [12] F. de León, A. Semlyen, “Complete Transformer Model for Electromagnetic Transients”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, January 1994, pp. 231-239.
- [13] J.A. Martínez Velasco, “Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión”, REE, McGraw Hill, 2008.
- [14] J. Fraile Mora, “Máquinas eléctricas”, McGraw Hill, 5ª Ed.
- [15] CIGRE, “342-Mechanical condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA)” Working Group A2.26, April 2008.
- [16] Claes Bergman, “SFRA – An application that creates customer value?”, The Electrical Engineering Program, spring 2006.
- [17] United States Department of Interior Bureau of Reclamation, “Facilities Instructions, Standards and Techniques”, Volume 3-31, June 2003, p22



- [18] J. Secue, E. Mombello y C.V. Cardozo, “Revisión del análisis de respuesta en frecuencia para evaluación de desplazamientos y deformaciones de devanados en transformadores de potencia”, IEEE Latin American Transactions Vol 5, N°5, September 2007
- [19] The Electric Power Industry Standard of People’s Republic of China, “DL/T 911-2004. Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers”, Diciembre 2004
- [20] Pax Diagnostics Application Guide, “FRA on Power transformers”, December 2005



Parte II CÓDIGO FUENTE



Capítulo 1 CÓDIGO FUENTE

1.1 CAPACIDADES EQUIVALENTES MONOFÁSICAS CON REGULACIÓN

```
clear
close all
format compact

%FASE R
inibt_R = 1; % Inicio arrollamiento BT
finbt_R = 40; % Fin arrollamiento BT y Puente
iniat_R = 41; % Inicio arrollamiento AT
puente1 = 48; %Puente
finat_R = 85; % Fin arrollamiento AT y Puente
inireg_R= 86; %inicio arrollamiento de REG
finreg_R= 96; %fin arrollamiento de REG y puente

%FASE S
inibt_S = 97; % Inicio arrollamiento BT
finbt_S = 136; % Fin arrollamiento BT y Puente
iniat_S = 137; % Inicio arrollamiento AT
puente2 = 144; %Puente
finat_S = 181; % Fin arrollamiento AT y puente
inireg_S= 182; %inicio arrollamiento de REG
finreg_S= 192; %fin arrollamiento de REG y puente

%FASE T
inibt_T = 193; % Inicio arrollamiento BT
finbt_T = 232; % Fin arrollamiento BT y Puente
iniat_T = 233; % Inicio arrollamiento AT
puente3 = 240; %Puente
finat_T = 277; % Fin arrollamiento AT
inireg_T= 278; %inicio arrollamiento de REG
finreg_T= 288; %fin arrollamiento de REG

%Matriz de transformacion para los puentes...

N=finreg_R;
```



```
orden1=[inibt_R:1:finbt_R      iniat_R:1:punte1      punte1
(punte1+2):1:finat_R finat_R (inireg_R+1):1:N];

T1 = zeros(N);

for i = 1:N
    ii = orden1(i);
    T1(i,ii) = 1;
end
spy(T1);
%Matriz de transformacion para poner al final los puentes

orden2=[inibt_R  iniat_R  (inibt_R+1):1:finbt_R  (iniat_R+1):1:punte1
(punte1+2):1:finat_R (inireg_R+1):1:N punte1+1 inireg_R];

T2 = zeros(N);

for i = 1:N
    ii = orden2(i);
    T2(i,ii) = 1;
end
spy(T2);

load C;

CR=T2*T1'*C(1:N,1:N)*T1*inv(T2);
N=N-2;

C11=CR(1:2,1:2);
C12=CR(1:2,3:N);
C21=CR(3:N,1:2);
C22=CR(3:N,3:N);

Ceq=C11-C12*inv(C22)*C21

cbtat = -Ceq(1,2)
cbt = Ceq(1,1)-cbtat
cat = Ceq(2,2)-cbtat

disp('Con el arrollamiento de regulación');
fprintf('          AT-BT      BT      AT\n');
fprintf('          -----\n');
fprintf('          %g pF   %g pF %g pF\n',cbtat/1e-
12,cbt/1e-12,cat/1e-12);
```



1.2 CAPACIDADES EQUIVALENTES MONOFÁSICAS SIN REGULACIÓN

```
clear  
close all  
format compact
```

```
%FASE R  
inibt_R = 1; % Inicio arrollamiento BT  
finbt_R = 40; % Fin arrollamiento BT y Puente  
iniat_R = 41; % Inicio arrollamiento AT  
puente1 = 48; %Puente  
finat_R = 85; % Fin arrollamiento AT y Puente  
inireg_R= 86; %inicio arrollamiento de REG  
finreg_R= 96; %fin arrollamiento de REG y puente
```

```
%FASE S  
inibt_S = 97; % Inicio arrollamiento BT  
finbt_S = 136; % Fin arrollamiento BT y Puente  
iniat_S = 137; % Inicio arrollamiento AT  
puente2 = 144; %Puente  
finat_S = 181; % Fin arrollamiento AT y puente  
inireg_S= 182; %inicio arrollamiento de REG  
finreg_S= 192; %fin arrollamiento de REG y puente
```

```
%FASE T  
inibt_T = 193; % Inicio arrollamiento BT  
finbt_T = 232; % Fin arrollamiento BT y Puente  
iniat_T = 233; % Inicio arrollamiento AT  
puente3 = 240; %Puente  
finat_T = 277; % Fin arrollamiento AT  
inireg_T= 278; %inicio arrollamiento de REG  
finreg_T= 288; %fin arrollamiento de REG
```

```
%Matriz de transformacion para los puentes...
```

```
N=finat_R;
```

```
orden1=[inibt_R:1:finbt_R iniat_R:1:puente1 puente1 (puente1+2):1:N];
```

```
T1 = zeros(N);
```

```
for i = 1:N  
    ii = orden1(i);  
    T1(i,ii) = 1;  
end  
spy(T1);
```



%Matriz de transformacion para poner al final los puentes

```
orden2=[inibt_R iniat_R (inibt_R+1):1:finbt_R (iniat_R+1):1:punte1  
(punte1+2):1:N punte1+1];
```

```
T2 = zeros(N);
```

```
for i = 1:N  
    ii = orden2(i);  
    T2(i,ii) = 1;  
end  
spy(T2);
```

```
load C;
```

```
CR=T2*T1'*C(1:N,1:N)*T1*inv(T2);  
N=N-1;
```

```
C11=CR(1:2,1:2);  
C12=CR(1:2,3:N);  
C21=CR(3:N,1:2);  
C22=CR(3:N,3:N);
```

```
Ceq=C11-C12*inv(C22)*C21
```

```
cbtat = -Ceq(1,2)  
cbt = Ceq(1,1)-cbtat  
cat = Ceq(2,2)-cbtat
```

```
disp('Sin el arrollamiento de regulación');  
fprintf('          AT-BT          BT          AT\n');  
fprintf('          -----  
          %g pF    %g pF %g pF\n',cbtat/1e-  
12,cbt/1e-12,cat/1e-12);
```



1.3 CAPACIDADES EQUIVALENTES TRIFÁSICAS CON REGULACIÓN

```
clear
close all
format compact

%FASE R
inibt_R = 1; % Inicio arrollamiento BT
finbt_R = 40; % Fin arrollamiento BT
iniat_R = 41; % Inicio arrollamiento AT
puente1 = 48; %Puente
finat_R = 85; % Fin arrollamiento AT
inireg_R= 86; %inicio arrollamiento de REG
finreg_R= 96; %fin arrollamiento de REG

%FASE S
inibt_S = 97; % Inicio arrollamiento BT
finbt_S = 136; % Fin arrollamiento BT
iniat_S = 137; % Inicio arrollamiento AT
puente2 = 144; %Puente
finat_S = 181; % Fin arrollamiento AT
inireg_S= 182; %inicio arrollamiento de REG
finreg_S= 192; %fin arrollamiento de REG

%FASE T
inibt_T = 193; % Inicio arrollamiento BT
finbt_T = 232; % Fin arrollamiento BT
iniat_T = 233; % Inicio arrollamiento AT
puente3 = 240; %Puente
finat_T = 277; % Fin arrollamiento AT
inireg_T= 278; %inicio arrollamiento de REG
finreg_T= 288; %fin arrollamiento de REG

% Matriz de capacidades

load C
C_ini=C;
N = size(C_ini,2);

%Cortocircuito bornas R, S y T en baja y alta

orden1=[inibt_R:1:finbt_R      iniat_R:1:puente1      puente1
(puente1+2):1:finat_R finat_R (inireg_R+1):1:finreg_R...
      inibt_R (inibt_S+1):1:finbt_S iniat_R (iniat_S+1):1:puente2
puente2 (puente2+2):1:finat_S finat_S (inireg_S+1):1:finreg_S...
      inibt_R (inibt_T+1):1:finbt_T iniat_R (iniat_T+1):1:puente3
puente3 (puente3+2):1:finat_T finat_T (inireg_T+1):1:finreg_T];
```



```
T1 = zeros(N);

for i = 1:N
    ii = orden1(i);
    T1(i,ii) = 1;
end

orden2=[inibt_R  iniat_R  (inibt_R+1):1:finbt_R  (iniat_R+1):1:punte1
(punte1+2):1:finat_R  (inireg_R+1):1:finreg_R...
        (inibt_S+1):1:finbt_S  (iniat_S+1):1:punte2
(punte2+2):1:finat_S  (inireg_S+1):1:finreg_S...
        (inibt_T+1):1:finbt_T  (iniat_T+1):1:punte3
(punte3+2):1:finat_T  (inireg_T+1):1:finreg_T...
        punte1+1 inireg_R inibt_S iniat_S punte2+1 inireg_S inibt_T
        iniat_T punte3+1 inireg_T];

T2 = zeros(N);

for i = 1:N
    ii = orden2(i);
    T2(i,ii) = 1;
end

C_transformada=T2*T1'*C_ini*T1*inv(T2);
spy(C_transformada)

%elimino puentes
N=N-10;
C_transformada=C_transformada(1:N,1:N);

%KRON

A11=C_transformada(1:2,1:2);
A12=C_transformada(1:2,3:N);
A21=C_transformada(3:N,1:2);
A22=C_transformada(3:N,3:N);

Ceq=A11-A12*inv(A22)*A21;

cbtat = -Ceq(1,2);
cbt = Ceq(1,1)-cbtat;
cat = Ceq(2,2)-cbtat;

fprintf('
fprintf('
\n');
fprintf('
12,cbt/1e-12,cat/1e-12);

AT-BT      BT      AT\n');
-----
%g pF  %g pF %g pF\n',cbtat/1e-
```



1.4 CAPACIDADES EQUIVALENTES TRIFÁSICAS SIN REGULACIÓN

```
clear  
close all  
format compact
```

```
%FASE R  
inibt_R = 1; % Inicio arrollamiento BT  
finbt_R = 40; % Fin arrollamiento BT  
iniat_R = 41; % Inicio arrollamiento AT  
puente1 = 48; %Puente  
finat_R = 85; % Fin arrollamiento AT  
inireg_R= 86; %inicio arrollamiento de REG  
finreg_R= 96; %fin arrollamiento de REG
```

```
%FASE S  
inibt_S = 97; % Inicio arrollamiento BT  
finbt_S = 136; % Fin arrollamiento BT  
iniat_S = 137; % Inicio arrollamiento AT  
puente2 = 144; %Puente  
finat_S = 181; % Fin arrollamiento AT  
inireg_S= 182; %inicio arrollamiento de REG  
finreg_S= 192; %fin arrollamiento de REG
```

```
%FASE T  
inibt_T = 193; % Inicio arrollamiento BT  
finbt_T = 232; % Fin arrollamiento BT  
iniat_T = 233; % Inicio arrollamiento AT  
puente3 = 240; %Puente  
finat_T = 277; % Fin arrollamiento AT  
inireg_T= 278; %inicio arrollamiento de REG  
finreg_T= 288; %fin arrollamiento de REG
```

```
% Matriz de capacidades
```

```
load C
```

```
C_ini=C;  
N = size(C_ini,2);
```

```
%cortocircuito bornas R, S y T en baja y alta
```

```
orden1=[inibt_R:1:finbt_R      iniat_R:1:puente1      puente1  
(puente1+2):1:finat_R inireg_R:1:finreg_R...  
        inibt_R (inibt_S+1):1:finbt_S iniat_R (iniat_S+1):1:puente2  
puente2 (puente2+2):1:finat_S inireg_S:1:finreg_S...  
        inibt_R (inibt_T+1):1:finbt_T iniat_R (iniat_T+1):1:puente3  
puente3 (puente3+2):1:finat_T inireg_T:1:finreg_T];
```



```
T1 = zeros(N);

for i = 1:N
    ii = orden1(i);
    T1(i,ii) = 1;
end

orden2=[inibt_R  iniat_R  (inibt_R+1):1:finbt_R  (iniat_R+1):1:punte1
(punte1+2):1:finat_R...
        (inibt_S+1):1:finbt_S  (iniat_S+1):1:punte2
(punte2+2):1:finat_S...
        (inibt_T+1):1:finbt_T  (iniat_T+1):1:punte3
(punte3+2):1:finat_T...
        punte1+1 inibt_S iniat_S punte2+1 inibt_T iniat_T punte3+1
inireg_R:1:finreg_R inireg_S:1:finreg_S inireg_T:1:finreg_T];

T2 = zeros(N);

for i = 1:N
    ii = orden2(i);
    T2(i,ii) = 1;
end

C_transformada=T2*T1'*C_ini*T1*inv(T2);
spy(C_transformada)

%elimino puentes y regulacion
reg=size(inireg_R:finreg_R,2);
N=N-7-3*reg;
C_transformada=C_transformada(1:N,1:N);

%KRON

A11=C_transformada(1:2,1:2);
A12=C_transformada(1:2,3:N);
A21=C_transformada(3:N,1:2);
A22=C_transformada(3:N,3:N);

Ceq=A11-A12*inv(A22)*A21;

cbtat = -Ceq(1,2);
cbt = Ceq(1,1)-cbtat;
cat = Ceq(2,2)-cbtat;

fprintf('
fprintf('
\n');
fprintf('
12,cbt/1e-12,cat/1e-12);
```

AT-BT BT AT\n');

%g pF %g pF %g pF\n',cbtat/1e-



1.5 RESPUESTA TEMPORAL IMPULSO DE 850 kV POR ALTA

1.5.1 SIMULACIÓN

```
% Modelo de simulacion
% Comprende las tres fases
% Se excita con una fuente de tension 850 kV, 1.2/50 us

clear
close all
format compact

global Cnninv Linv N

%FASE R
inibt_R = 1; % Inicio arrollamiento BT
finbt_R = 40; % Fin arrollamiento BT y Puente
iniat_R = 41; % Inicio arrollamiento AT
puente1 = 48; %Puente
finat_R = 85; % Fin arrollamiento AT y Puente
inireg_R= 86; %inicio arrollamiento de REG
finreg_R= 96; %fin arrollamiento de REG y puente

%FASE S
inibt_S = 97; % Inicio arrollamiento BT
finbt_S = 136; % Fin arrollamiento BT y Puente
iniat_S = 137; % Inicio arrollamiento AT
puente2 = 144; %Puente
finat_S = 181; % Fin arrollamiento AT y puente
inireg_S= 182; %inicio arrollamiento de REG
finreg_S= 192; %fin arrollamiento de REG y puente

%FASE T
inibt_T = 193; % Inicio arrollamiento BT
finbt_T = 232; % Fin arrollamiento BT y Puente
iniat_T = 233; % Inicio arrollamiento AT
puente3 = 240; %Puente
finat_T = 277; % Fin arrollamiento AT
inireg_T= 278; %inicio arrollamiento de REG
finreg_T= 288; %fin arrollamiento de REG

%Matriz de transformacion para los puentes...

N=288;

orden1=[inibt_R:1:finbt_R          iniat_R:1:puente1          puente1
(puente1+2):1:finat_R finat_R (inireg_R+1):1:finreg_R...
```



```
        finbt_R    (inibt_S+1):1:finbt_S    iniat_S:1:puente2    puente2
(puente2+2):1:finat_S finat_S (inireg_S+1):1:(finreg_S-1) finreg_R...
        finbt_S    (inibt_T+1):1:(finbt_T-1)    inibt_R    iniat_T:1:puente3
puente3    (puente3+2):1:finat_T    finat_T    (inireg_T+1):1:(finreg_T-1)
finreg_R    ];

    T1 = zeros(N);

    for i = 1:N
        ii = orden1(i);
        T1(i,ii) = 1;
    end

    figure
    spy(T1);

    %Matriz de transformacion para poner al final los puentes

    orden2=[inibt_R:1:finbt_R    iniat_R:1:puente1    (puente1+2):1:finat_R
    (inireg_R+1):1:finreg_R...
        (inibt_S+1):1:finbt_S    iniat_S:1:puente2    (puente2+2):1:finat_S
    (inireg_S+1):1:(finreg_S-1)...
        (inibt_T+1):1:(finbt_T-1)    iniat_T:1:puente3
    (puente3+2):1:finat_T (inireg_T+1):1:(finreg_T-1)...
        puente1+1 inireg_R inibt_S puente2+1 inireg_S finreg_S inibt_T
    finbt_T puente3+1 inireg_T finreg_T ];

    T2 = zeros(N);

    for i = 1:N
        ii = orden2(i);
        T2(i,ii) = 1;
    end

    figure
    spy(T2);

    load L
    load C;

    C_ini=C;
    C_transformada=T2*T1'*C_ini*T1*inv(T2);
    N=N-11;    %Elimino nodos redundantes que puse al final

    Cnn=C_transformada(1:N,1:N);
    Cnninv = inv(Cnn);

    load L

    Linv=inv(L(1:N-1,1:N-1)); %mallas=nodos-1
```



```
%Condiciones iniciales
x0=zeros(2*N-1,1);

disp('Derivadas en el punto de equilibrio:')

rayo850_iniat_R(-1,x0)

% Simulacion no-lineal

disp('Simulacion no-lineal...')

tstart = 0;
tend = 200e-6;
tstep =0.01e-6;

[t,x]=ode45('rayo850_iniat_R',tstart:tstep:tend,x0);

t1=0:0.1e-6:1.2e-6;
u1=850e+3/1.2e-06.*t1;
tt1=1.2e-6:0.1e-6:(1.2+2*(50-1.2))*1e-06;
uu1=(tt1-1.2e-6)*(0.5-1)*850e+3/((50-1.2)*1e-6) + 850e+3;

figure

plot([t1 tt1]/1e-6,[u1 uu1]/1e+3,'-b',t/1e-6,x(:,iniat_R)/1e+3,'--r')
title('Tensión entrada')
xlabel('Tiempo (\mu s)')
ylabel('Tensiones nodales arrollamientos (kV)')
axis([0 200 -50 900])

figure

plot(t/1e-6,x(:,1:finat_R)/1e+3)
title('Tensión de nodos')
xlabel('Tiempo (\mu s)')
ylabel('Tensiones nodales arrollamientos (kV)')

figure

plot(t/1e-6,x(:,1:finbt_R)/1e+3)
title('Tensión de nodos arrollamiento primario')
xlabel('Tiempo (\mu s)')
ylabel('Tensiones nodales (kV)')

figure

plot(t/1e-6,x(:,iniat_R:finat_R)/1e+3)
title('Tensión de nodos arrollamiento secundario')
xlabel('Tiempo (\mu s)')
ylabel('Tensiones nodales (kV)')
```



```
disp('fin de la simulacion no-lineal.')
```

1.5.2 FUNCIÓN

```
function f=rayo850_iniat_R(t,x)

global Cnninv Linv N

%FASE R
inibt_R = 1; % Inicio arrollamiento BT
finbt_R = 40; % Fin arrollamiento BT y Puente
iniat_R = 41; % Inicio arrollamiento AT
puente1 = 48; %Puente
finat_R = 85; % Fin arrollamiento AT y Puente
inireg_R= 86; %inicio arrollamiento de REG
finreg_R= 96; %fin arrollamiento de REG y puente

%FASE S
inibt_S = 97; % Inicio arrollamiento BT
finbt_S = 136; % Fin arrollamiento BT y Puente
iniat_S = 137; % Inicio arrollamiento AT
puente2 = 144; %Puente
finat_S = 181; % Fin arrollamiento AT y puente
inireg_S= 182; %inicio arrollamiento de REG
finreg_S= 192; %fin arrollamiento de REG y puente

%FASE T
inibt_T = 193; % Inicio arrollamiento BT
finbt_T = 232; % Fin arrollamiento BT y Puente
iniat_T = 233; % Inicio arrollamiento AT
puente3 = 240; %Puente
finat_T = 277; % Fin arrollamiento AT
inireg_T= 278; %inicio arrollamiento de REG
finreg_T= 288; %fin arrollamiento de REG

% Fuente de tension 850 kV 1.2/50 us
cresta=850;
if (t>0 & t<=1.2e-06)
    u=cresta*1e+3/1.2e-06*t;
    duds(iniat_R)=cresta*1e+3/1.2e-06;
elseif (t>1.2e-06 & t<(1.2e-6+2*(50-1.2)*1e-06))
    u=(t-1.2e-6)*(0.5-1)*cresta*1e+3/(50e-6-1.2e-6) + cresta*1e+3;
    duds(iniat_R)=(0.5-1)*cresta*1e+3/(50e-6-1.2e-6);
else
    u=0;
```



```
dudt(iniat_R)=0;
end

%alimentación
x(iniat_R)=u;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

suma1=0;
for j=1:1:N
    if (j==inibt_R||j==iniat_R||j==N)
    else
        k=Cnninv(iniat_R,j)*(x(j+N-1)-x(j+N));
        suma1=suma1+k;
    end
end
suma1=suma1+Cnninv(iniat_R,inibt_R)*(-x(N+1));
suma1=suma1+Cnninv(iniat_R,N)*x(2*N-1);

Int_secundario=(dudt(iniat_R)-
suma1)/Cnninv(iniat_R,iniat_R)+x(N+iniat_R)-x(N+iniat_R-1);

%Creación de vector corrientes de nodo

corrientes(inibt_R)=-x(N+1);
corrientes(iniat_R)=Int_secundario+x(N+finbt_R)-x(N+iniat_R);
corrientes(N)=x(2*N-1);
corrientes(finbt_R)=x(N+finbt_R-1);

for j=1:1:N
    if (j==inibt_R||j==finbt_R||j==iniat_R||j==N)
    else
        corrientes(j)=x(N-1+j)-x(N+j);
    end
end

%Creación de vector tensiones de malla

for j=1:1:N-1
    tensiones(j)=x(j)-x(j+1);
end

tensiones=tensiones';
corrientes=corrientes';

%Ecuaciones de respuesta temporal del modelo

dudt=Cnninv*corrientes;
didt=Linv*tensiones;

f=[dudt;didt];
```



1.6 RESPUESTA TEMPORAL IMPULSO DE 125 kV POR BAJA

1.6.1 SIMULACIÓN

```
% Modelo de simulacion
% Comprende las tres fases
% Se excita con una fuente de tension 125 kV, 1.2/50 us
```

```
clear
close all
format compact
```

```
global Cnninv Linv N
```

```
%FASE R
inibt_R = 1; % Inicio arrollamiento BT
finbt_R = 40; % Fin arrollamiento BT y Puente
iniat_R = 41; % Inicio arrollamiento AT
puente1 = 48; %Puente
finat_R = 85; % Fin arrollamiento AT y Puente
inireg_R= 86; %inicio arrollamiento de REG
finreg_R= 96; %fin arrollamiento de REG y puente
```

```
%FASE S
inibt_S = 97; % Inicio arrollamiento BT
finbt_S = 136; % Fin arrollamiento BT y Puente
iniat_S = 137; % Inicio arrollamiento AT
puente2 = 144; %Puente
finat_S = 181; % Fin arrollamiento AT y puente
inireg_S= 182; %inicio arrollamiento de REG
finreg_S= 192; %fin arrollamiento de REG y puente
```

```
%FASE T
inibt_T = 193; % Inicio arrollamiento BT
finbt_T = 232; % Fin arrollamiento BT y Puente
iniat_T = 233; % Inicio arrollamiento AT
puente3 = 240; %Puente
finat_T = 277; % Fin arrollamiento AT
inireg_T= 278; %inicio arrollamiento de REG
finreg_T= 288; %fin arrollamiento de REG
```

```
%Matriz de transformacion para los puentes...
```

```
N=288;
```



```
orden1=[inibt_R:1:finbt_R      iniat_R:1:punte1      punte1
(punte1+2):1:finat_R finat_R (inireg_R+1):1:finreg_R...
      finbt_R (inibt_S+1):1:finbt_S iniat_S:1:punte2 punte2
(punte2+2):1:finat_S finat_S (inireg_S+1):1:(finreg_S-1) finreg_R...
      finbt_S (inibt_T+1):1:(finbt_T-1) inibt_R iniat_T:1:punte3
punte3 (punte3+2):1:finat_T finat_T (inireg_T+1):1:(finreg_T-1)
finreg_R ];

T1 = zeros(N);

for i = 1:N
    ii = orden1(i);
    T1(i,ii) = 1;
end

figure
spy(T1);

%Matriz de transformacion para poner al final los puentes

orden2=[inibt_R:1:finbt_R      iniat_R:1:punte1      (punte1+2):1:finat_R
(inireg_R+1):1:finreg_R...
      (inibt_S+1):1:finbt_S iniat_S:1:punte2 (punte2+2):1:finat_S
(inireg_S+1):1:(finreg_S-1)...
      (inibt_T+1):1:(finbt_T-1) iniat_T:1:punte3
(punte3+2):1:finat_T (inireg_T+1):1:(finreg_T-1)...
      punte1+1 inireg_R inibt_S punte2+1 inireg_S finreg_S inibt_T
finbt_T punte3+1 inireg_T finreg_T ];

T2 = zeros(N);

for i = 1:N
    ii = orden2(i);
    T2(i,ii) = 1;
end

figure
spy(T2);

load L
load C;

C_ini=C;
C_transformada=T2*T1'*C_ini*T1*inv(T2);
N=N-11; %Elimino nodos redundantes que puse al final

Cnn=C_transformada(1:N,1:N);
Cnninv = inv(Cnn);

load L

Linv=inv(L(1:N-1,1:N-1)); %mallas=nodos-1
```



```
%Condiciones iniciales
x0=zeros(2*N-1,1);

disp('Derivadas en el punto de equilibrio:')

rayo125_iniat_R(-1,x0)

% Simulacion no-lineal

disp('Simulacion no-lineal...')

tstart = 0;
tend = 200e-6;
tstep =0.01e-6;

[t,x]=ode45('rayo125_iniat_R',tstart:tstep:tend,x0);

t1=0:0.1e-6:1.2e-6;
u1=850e+3/1.2e-06.*t1;
tt1=1.2e-6:0.1e-6:(1.2+2*(50-1.2))*1e-06;
uu1=(tt1-1.2e-6)*(0.5-1)*850e+3/((50-1.2)*1e-6) + 850e+3;

figure

plot([t1 tt1]/1e-6,[u1 uu1]/1e+3,'-b',t/1e-6,x(:,iniat_R)/1e+3,'--r')
title('Tensión entrada')
xlabel('Tiempo (\mu s)')
ylabel('Tensiones nodales arrollamientos (kV)')
axis([0 200 -50 900])

figure

plot(t/1e-6,x(:,1:finat_R)/1e+3)
title('Tensión de nodos')
xlabel('Tiempo (\mu s)')
ylabel('Tensiones nodales arrollamientos (kV)')

figure

plot(t/1e-6,x(:,1:finbt_R)/1e+3)
title('Tensión de nodos arrollamiento primario')
xlabel('Tiempo (\mu s)')
ylabel('Tensiones nodales (kV)')

figure

plot(t/1e-6,x(:,iniat_R:finat_R)/1e+3)
title('Tensión de nodos arrollamiento secundario')
xlabel('Tiempo (\mu s)')
ylabel('Tensiones nodales (kV)')
```



```
disp('fin de la simulacion no-lineal.')
```

1.6.2 FUNCIÓN

```
function f=rayo125_iniat_R(t,x)

global Cnninv Linv N

%FASE R
inibt_R = 1; % Inicio arrollamiento BT
finbt_R = 40; % Fin arrollamiento BT y Puente
iniat_R = 41; % Inicio arrollamiento AT
puente1 = 48; %Puente
finat_R = 85; % Fin arrollamiento AT y Puente
inireg_R= 86; %inicio arrollamiento de REG
finreg_R= 96; %fin arrollamiento de REG y puente

%FASE S
inibt_S = 97; % Inicio arrollamiento BT
finbt_S = 136; % Fin arrollamiento BT y Puente
iniat_S = 137; % Inicio arrollamiento AT
puente2 = 144; %Puente
finat_S = 181; % Fin arrollamiento AT y puente
inireg_S= 182; %inicio arrollamiento de REG
finreg_S= 192; %fin arrollamiento de REG y puente

%FASE T
inibt_T = 193; % Inicio arrollamiento BT
finbt_T = 232; % Fin arrollamiento BT y Puente
iniat_T = 233; % Inicio arrollamiento AT
puente3 = 240; %Puente
finat_T = 277; % Fin arrollamiento AT
inireg_T= 278; %inicio arrollamiento de REG
finreg_T= 288; %fin arrollamiento de REG

% Fuente de tension 125 kV 1.2/50 us

cresta=125;
if (t>0 & t<=1.2e-06)
    u=cresta*1e+3/1.2e-06*t;
    duds(inibt_R)=cresta*1e+3/1.2e-06;
elseif (t>1.2e-06 & t<=(1.2e-6+2*(50-1.2)*1e-06))
    u=(t-1.2e-6)*(0.5-1)*cresta*1e+3/(50e-6-1.2e-6) + cresta*1e+3;
    duds(inibt_R)=(0.5-1)*cresta*1e+3/(50e-6-1.2e-6);
else
```



```
u=0;
dudt(inibt_R)=0;
end

%alimentación
x(iniat_R)=u;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

suma1=0;
for j=1:1:N
    if (j==inibt_R||j==N)
    else
        k=Cnninv(inibt_R,j)*(x(j+N-1)-x(j+N));
        suma1=suma1+k;
    end
end
suma1=suma1+Cnninv(inibt_R,N)*x(2*N-1);

Int_primario=(dudt(inibt_R)-
suma1)/Cnninv(inibt_R,inibt_R)+x(N+inibt_R);

%Creación de vector corrientes de nodo

corrientes(inibt_R)=Int_primario-x(N+1);
corrientes(iniat_R)=x(N+finbt_R)-x(N+iniat_R);
corrientes(N)=x(2*N-1);

for j=1:1:N
    if (j==inibt_R||j==iniat_R||j==N)
    else
        corrientes(j)=x(N-1+j)-x(N+j);
    end
end

%Creación de vector tensiones de malla

for j=1:1:N-1
    tensiones(j)=x(j)-x(j+1);
end

tensiones=tensiones';
corrientes=corrientes';

%Ecuaciones de respuesta temporal del modelo

dudt=Cnninv*corrientes;
didt=Linv*tensiones;

f=[dudt;didt];
```



1.7 *RESPUESTA EN FRECUENCIA SIN REGULACIÓN*

```
clear
close all
format compact

% Matriz de capacidades
load C
nn = 85;
C = C(1:nn,1:nn);

% Matriz de inductancias
load L
nm = 82;
L = L(1:nm,1:nm);

inibt = 1;    % Inicio arrollamiento at
finbt = 40;   % Fin arrollamiento at
iniat = 41;   % Inicio arrollamiento REG
finat = 85;   % Fin arrollamiento REG

% Nudos
nudos = [
        1  40
        41 48
        49 85
        ];

% Mallas
mallas = [
        1  39
        40 46
        47 82
        ];

ns = size(mallas,1);

% I_nudos = N * I_mallas
N = zeros(nn,nm);

for i = 1:ns
    N(nudos(i,1),mallas(i,1)) = -1;
    kk = 0;
    for k = nudos(i,1)+1:1:nudos(i,2)-1
        kkk = mallas(i,1) + kk;
        N(k, kkk) = 1;
        N(k, kkk+1) = -1;
```



```
        kk = kk + 1;
    end
    N(nudos(i,2),mallas(i,2)) = 1;
end

% U_mallas = M * U_nudos

M = zeros(nm,nn);

for i = 1:ns
    kk = 0;
    for k = mallas(i,1):1:mallas(i,2)
        kkk = nudos(i,1) + kk;
        M(k, kkk) = 1;
        M(k, kkk+1) = -1;
        kk = kk + 1;
    end
end

% Uniones fase 1

union = [ ...
         48 49 % uniones arrollamiento at
        ];

nu = size(union,1);

H = zeros(nu,nn);
J = zeros(nn,nu);
for i = 1:nu
    k = union(i,1);
    m = union(i,2);
    H(i,k) = 1;
    H(i,m) = -1;
    J(k,i) = -1;
    J(m,i) = 1;
end
R = eye(nu,nu)*0.001;
f1 = 50;
f2 = 50000;
i=1;
for f=f1:100:f2

    Y = (j*2*pi*f*C+J*inv(R)*H-1/j/(2*pi*f)*N*inv(L)*M);
    Z = inv(Y);

    ZR = [Z(iniat, iniat) Z(iniat, inibt)
          Z(inibt, iniat) Z(inibt, inibt)];
    YR = inv(ZR);
    CR = imag(YR)/(2*pi*f);
    catbt = -CR(1,2);
    cat = CR(1,1)-catbt;
    cbt = CR(2,2)-catbt;
```



```
Vsalida(i)=20*log10(cat/(catbt+cat));  
frecuencia=f1:100:f2;  
  
i=i+1;  
  
if(f==f1)  
  
    fprintf('                AT    BT    AT-BT\n')  
    fprintf('                x--x x--x x---x\n')  
    fprintf('Capacidades calculadas a 50 Hz (pf) %4.0f %4.0f  
%5.0f\n',cat/1e-12,cbt/1e-12,catbt/1e-12)  
    end  
  
end  
  
fprintf('                AT    BT    AT-BT\n')  
fprintf('                x--x x--x x---x\n')  
fprintf('Capacidades calculadas a 50kHz (pf) %4.0f %4.0f  
%5.0f\n',cat/1e-12,cbt/1e-12,catbt/1e-12)  
  
figure  
plot(frecuencia(1:250)/1000,Vsalida(1:250))  
title('Respuesta en frecuencia')  
xlabel('Frecuencia (kHz)')  
ylabel('Amplitud (dB)')  
  
figure  
plot(frecuencia(251:500)/1000,Vsalida(251:500))  
title('Respuesta en frecuencia')  
xlabel('Frecuencia (kHz)')  
ylabel('Amplitud (dB)')
```



1.8 **RESPUESTA EN FRECUENCIA CON REGULACIÓN**

```
clear
close all
format compact

% Matriz de capacidades
load C
nn = 96;
C = C(1:nn,1:nn);

% Matriz de inductancias
load L
nm = 92;
L = L(1:nm,1:nm);

inibt = 1; % Inicio arrollamiento at
finbt = 40; % Fin arrollamiento at
iniat = 41; % Inicio arrollamiento REG
finat = 96; % Fin arrollamiento REG

% Nudos
nudos = [
    1 40
    41 48
    49 85
    86 96
];

% Mallas
mallas = [
    1 39
    40 46
    47 82
    83 92
];

ns = size(mallas,1);

% I_nudos = N * I_mallas
N = zeros(nn,nm);

for i = 1:ns
    N(nudos(i,1),mallas(i,1)) = -1;
    kk = 0;
    for k = nudos(i,1)+1:1:nudos(i,2)-1
        kkk = mallas(i,1) + kk;
```



```
N(k, kkk) = 1;
N(k, kkk+1) = -1;
kk = kk + 1;
end
N(nudos(i,2), mallas(i,2)) = 1;
end

% U_mallas = M * U_nudos

M = zeros(nm, nn);

for i = 1:ns
    kk = 0;
    for k = mallas(i,1):1:mallas(i,2)
        kkk = nudos(i,1) + kk;
        M(k, kkk) = 1;
        M(k, kkk+1) = -1;
        kk = kk + 1;
    end
end

% Uniones fase 1

union = [ ...
          48 49 % uniones arrollamiento at
          85 86 % uniones arrollamiento reg
        ];

nu = size(union,1);

H = zeros(nu, nn);
J = zeros(nn, nu);
for i = 1:nu
    k = union(i,1);
    m = union(i,2);
    H(i,k) = 1;
    H(i,m) = -1;
    J(k,i) = -1;
    J(m,i) = 1;
end
R = eye(nu, nu)*0.001;
f1 = 50;
f2 = 50000;
i=1;
for f=f1:100:f2

    Y = (j*2*pi*f*C+J*inv(R)*H-1/j/(2*pi*f)*N*inv(L)*M);
    Z = inv(Y);

    ZR = [Z(iniat, iniat) Z(iniat, inibt)
          Z(inibt, iniat) Z(inibt, inibt)];
    YR = inv(ZR);
    CR = imag(YR)/(2*pi*f);
    catbt = -CR(1,2);
```



```
cat= CR(1,1)-catbt;  
cbt = CR(2,2)-catbt;  
  
Vsalida(i)=20*log10(cat/(catbt+cat));  
frecuencia=f1:100:f2;  
  
i=i+1;  
  
if(f==f1)  
  
    fprintf('                AT    BT    AT-BT\n')  
    fprintf('                x--x x--x x---x\n')  
    fprintf('Capacidades calculadas a 50 Hz (pf) %4.0f %4.0f  
%5.0f\n',cat/1e-12,cbt/1e-12,catbt/1e-12)  
    end  
  
end  
  
fprintf('                AT    BT    AT-BT\n')  
fprintf('                x--x x--x x---x\n')  
fprintf('Capacidades calculadas a 50kHz (pf) %4.0f %4.0f  
%5.0f\n',cat/1e-12,cbt/1e-12,catbt/1e-12)  
  
figure  
plot(frecuencia(1:250)/1000,Vsalida(1:250))  
title('Respuesta en frecuencia')  
xlabel('Frecuencia (kHz)')  
ylabel('Amplitud (dB)')  
  
figure  
plot(frecuencia(251:500)/1000,Vsalida(251:500))  
title('Respuesta en frecuencia')  
xlabel('Frecuencia (kHz)')  
ylabel('Amplitud (dB)')
```