

## **CAPÍTULO 2. ESTUDIO DEL MEDIO DE PROPAGACIÓN**

El objetivo de este Capítulo es encontrar unos circuitos equivalentes de parámetros concentrados que modelen el comportamiento de las impedancias dominantes en el circuito bajo estudio. En primer lugar se presenta el método de medida de impedancias utilizado, para después mostrar los resultados de las medidas y los circuitos equivalentes que intentan dar cuenta del comportamiento observado.

### **2.1.- MÉTODO DE MEDIDA DE IMPEDANCIAS**

El analizador de espectros es en el campo frecuencial lo mismo que el osciloscopio en el campo temporal. Es un instrumento que se utiliza “a pie de prototipo”, de forma análoga al osciloscopio: nos permite comprobar de forma rápida e inmediata cuales son los resultados de los cambios o modificaciones llevadas a cabo sobre el prototipo bajo estudio.

Por otra parte, en los estudios de compatibilidad electromagnética, es necesario conocer el comportamiento de los diferentes dispositivos utilizados a alta frecuencia. También es importante el conocimiento de las impedancias parásitas del sistema contra el retorno, puesto que constituyen el camino de circulación de las corrientes en modo común. Todas estas impedancias se pueden medir con un analizador de impedancias. Sin embargo, éste es un instrumento “singular”, que no se utiliza con la misma frecuencia, facilidad ni rapidez que el analizador de espectros. Por lo tanto parece adecuado y práctico desarrollar un método de medida de impedancias basado en el analizador de espectros que permita obtener:

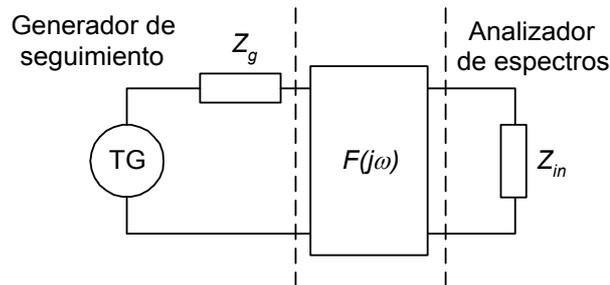
- la función  $Z(j\omega)$  de cualquier componente pasivo
- las impedancias parásitas entre las partes activas del sistema contra el retorno (masa) o entre partes activas entre sí.

A partir de los resultados de las medidas obtenidas se podrá asociar a cada impedancia, ya sea de un componente pasivo o parásita, un circuito equivalente. Estos circuitos equivalentes serán los utilizados en el modelo teórico para obtener por simulación los valores de las perturbaciones generadas por los convertidores. Precisamente a esta tarea se dedica el Apartado 2.2. Con el Capítulo 2 se desarrolla una de las aportaciones de la Tesis a las que se hace mención en el Apartado 1.2.

Por supuesto, tal como se mencionó en el Apartado 1.2.2.3, el método de medida de impedancias basado en el analizador de espectros es alternativo a la utilización de un analizador de impedancias. Éste último ofrece la ventaja de proporcionar la lectura de la fase de la impedancia, lo que facilita la posterior determinación de los circuitos equivalentes.

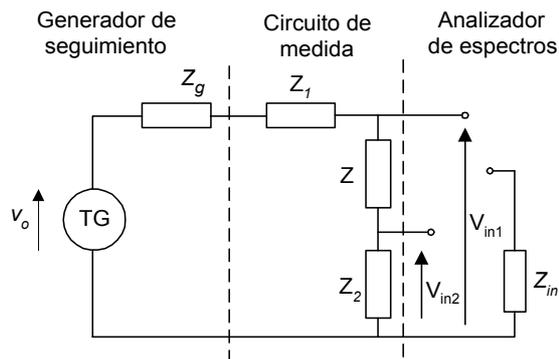
### 2.1.1.- Desarrollo teórico

Junto con el analizador de espectros es necesario la utilización de un generador de seguimiento TG (Tracking Generator). Este generador es una fuente de tensión senoidal de frecuencia variable y sincronizada con la frecuencia de barrido del analizador de espectros, de forma que, en todo momento, el generador de seguimiento y el analizador de espectros están trabajando a la misma frecuencia. Gracias a esto, el conjunto analizador de espectros y generador de seguimiento puede ser utilizado como medidor de funciones de transferencia  $F(j\omega)$ , tal como ilustra la Figura 2.1.



**Fig. 2.1** Utilización del analizador de espectros y del generador de seguimiento como medidor de funciones de transferencia

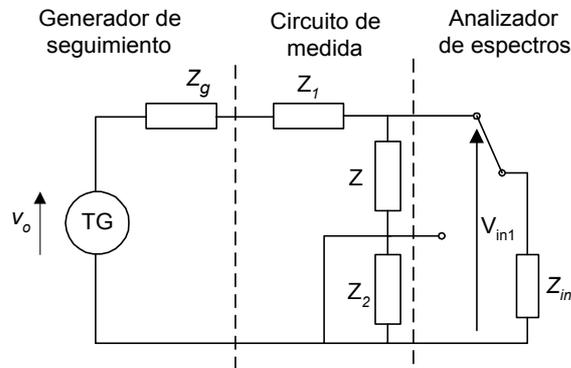
Para realizar las medidas de impedancia con el analizador de espectros y el generador de seguimiento se ha utilizado el circuito auxiliar de la Figura 2.2. Como se puede observar, el circuito de medida de impedancias se basa en la misma configuración que la presentada en la Figura 2.1. Basta sustituir la función de transferencia incógnita  $F(j\omega)$  por la red que aparece en la Figura 2.2.



**Fig. 2.2** Circuito de medida de impedancias

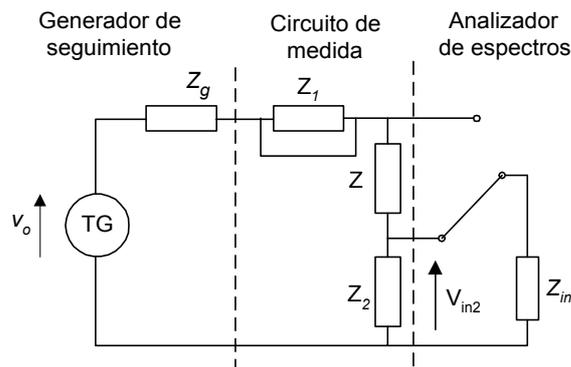
La impedancia de salida del generador de seguimiento es  $Z_g$  y la impedancia de entrada del analizador de espectros es  $Z_{in}$ . La impedancia incógnita es  $Z$ , mientras que las impedancias  $Z_1$  y  $Z_2$  son impedancias conocidas.

La tensión generada por el generador de seguimiento es  $v_o$ . Con el analizador de espectros se realizan dos medidas de tensión  $v_{in1}$  y  $v_{in2}$  con dos disposiciones diferentes del circuito. La primera de ellas,  $v_{in1}$ , se realiza cortocircuitando la impedancia  $Z_2$  y midiendo la tensión en bornes de la impedancia incógnita  $Z$ , tal como muestra la Figura 2.3.



**Fig. 2.3** Medida de  $v_{in1}$

La segunda medida,  $v_{in2}$ , se realiza cortocircuitando la impedancia  $Z_1$  y midiendo la tensión en bornes de la impedancia  $Z_2$ , tal como muestra la Figura 2.4.



**Fig. 2.4** Medida de  $v_{in2}$

A partir de los circuitos mostrados en las Figuras 2.3 y 2.4 se pueden encontrar las expresiones de las tensiones  $v_{in1}$  y  $v_{in2}$  :

$$v_{in1} = \frac{(Z // Z_{in})}{Z_g + Z_1 + (Z // Z_{in})} v_o \quad (2.1)$$

$$v_{in2} = \frac{(Z_2 // Z_{in})}{Z_g + Z + (Z_2 // Z_{in})} v_o \quad (2.2)$$

La única incógnita de las dos anteriores expresiones es la impedancia desconocida  $Z$ . Manipulando estas ecuaciones se puede llegar a una expresión en la que la impedancia incógnita  $Z$  se expresa en función de las tensiones  $v_{in1}$  y  $v_{in2}$ . Se debe tener en cuenta que tanto las tensiones  $v_{in1}$  y  $v_{in2}$  y la impedancia  $Z$  son magnitudes complejas, definidas por su módulo y su argumento. Sin embargo el analizador de espectros sólo es capaz de medir el módulo de estas magnitudes. Por esta razón, a partir de ahora se trabajará con el módulo de las anteriores expresiones. En el instrumento empleado se conoce que:

$$Z_{in}=Z_g=50\Omega \quad (2.3)$$

En estas condiciones, si se cumple que

$$|Z_1| \gg 50\Omega \quad (2.4)$$

la expresión del módulo de  $v_{in1}$  será

$$|v_{in1}| \cong \frac{50|Z|}{50 + |Z|} |v_o| \quad (2.5)$$

Por otra parte, si se cumple que

$$|Z_2| \ll 50\Omega \quad (2.6)$$

la expresión del módulo de  $v_{in2}$  será

$$|v_{in2}| \cong \frac{|Z_2|}{50 + |Z|} |v_o| \quad (2.7)$$

Haciendo el cociente de las expresiones aproximadas de  $v_{in1}$  y  $v_{in2}$  se obtiene:

$$\frac{|v_{in1}|}{|v_{in2}|} = \frac{50|Z|}{|Z_2|(50 + |Z_1|)} \quad (2.8)$$

Como se puede observar, es posible obtener el valor del módulo de la impedancia incógnita  $Z$  a partir de las medidas del módulo de  $v_{in1}$  y  $v_{in2}$ .

### 2.1.2.- Realización práctica

El circuito auxiliar de medida que se ha montado se ha realizado en un circuito impreso con plano de masa y componentes SMD. La placa tiene tres conectores: uno para conectar el generador de seguimiento y otros dos para realizar las medidas con el analizador de espectros. Se puede observar una fotografía del equipo construido en el Anexo Fotográfico.

Las impedancias  $Z_1$  y  $Z_2$  son resistencias de valores  $Z_1=1k\Omega$  y  $Z_2=3,9\Omega$ . Estos valores cumplen los requisitos expuestos en el apartado 2.4.1. Los valores adoptados estaban condicionados por la disponibilidad de resistencias en encapsulado SMD. Por otra parte se conoce que

$Z_{in}=Z_g=50\Omega$ . Sustituyendo estos valores en las ecuaciones deducidas en el apartado 2.1.1 se obtiene:

$$|v_{in1}| = \frac{|Z|}{22(|Z| + 47,72)} |v_o| \cong \frac{|Z|}{22(|Z| + 50)} |v_o| \quad (2.9)$$

$$|v_{in2}| = \frac{3,6}{|Z| + 53,6} |v_o| \cong \frac{3,6}{|Z| + 50} |v_o| \quad (2.10)$$

Realizando el cociente entre las dos expresiones anteriores se puede encontrar el valor del módulo de la impedancia incógnita Z:

$$\left| \frac{v_{in1}}{v_{in2}} \right| \cong \frac{|Z|}{79,2} = 0,0126|Z| \quad (2.11)$$

Puesto que el analizador de espectros representa las tensiones  $v_{in1}$  y  $v_{in2}$  en escala logarítmica, normalmente en  $\text{dB}\mu\text{V}$ , el valor de la impedancia incógnita Z expresada en  $\text{dB}\Omega$  será:

$$|Z|_{\text{dB}} = |v_{in1}|_{\text{dB}} - |v_{in2}|_{\text{dB}} + 38\text{dB} \quad (2.12)$$

Es decir, el valor de la impedancia incógnita Z expresada en  $\text{dB}\Omega$  se obtiene fácilmente restando los espectros de  $v_{in1}$  y  $v_{in2}$ .

El analizador de espectros utilizado para realizar las medidas de impedancia está dotado de un generador de seguimiento que da 500mV de amplitud máxima. Por otra parte, el analizador es capaz de medir tensiones de 28 $\mu\text{V}$  como mínimo. Por lo tanto, con los valores de resistencia empleados se pueden medir módulos de impedancias Z dentro del rango:

$$55\text{m}\Omega \leq |Z| \leq 64\text{k}\Omega \quad (2.13)$$

O si se prefiere expresado en  $\text{dB}\Omega$ :

$$-25\text{dB}\Omega \leq |Z| \leq 96\text{dB}\Omega \quad (2.14)$$

Este rango de valores se considera suficiente para las necesidades del trabajo a desarrollar. Para realizar el cálculo de las impedancias se ha programado un soft que permite, mediante el uso del bus GPIB, el volcado de los datos recogidos por el analizador a un fichero ASCII, que es posteriormente tratado con MATLAB.

### 2.1.3.- Ejemplos de aplicación

Como ejemplos de aplicación del método de medida de impedancias propuesto se presentan a continuación los siguientes casos:

Caso 1: determinación de la impedancia de un condensador

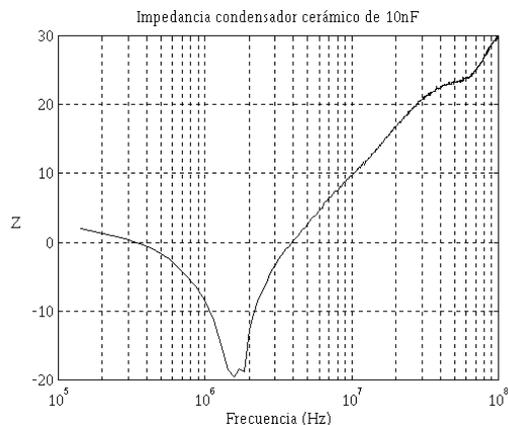
Caso 2: determinación de la impedancia parásita en MC de un motor de inducción

Caso 3: determinación de la impedancia parásita del encapsulado de un circuito integrado

#### Caso 1

Un modelo de alta frecuencia válido para un condensador es la asociación en serie de una resistencia, una bobina y un condensador. En este modelo  $R$  es la resistencia óhmica de los terminales y de las armaduras,  $L$  la inductancia parásita del condensador y  $C$  la capacidad. La asociación en serie de la bobina y el condensador dan lugar a una frecuencia de resonancia, de forma que para frecuencias superiores a ésta el condensador tiene un comportamiento inductivo. Si el condensador va a ser utilizado como condensador de desacoplo es de vital importancia el conocimiento de esta frecuencia de resonancia.

El ensayo se ha realizado con un condensador cerámico de lenteja de 10nF. En la Figura 2.5 se ve el resultado obtenido.

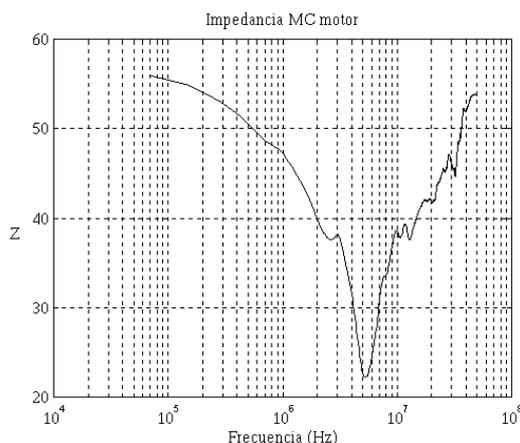


**Fig. 2.5** Impedancia de un condensador  
(Escala vertical: dBΩ)

#### Caso 2

En este caso se trata de determinar la impedancia de acoplamiento entre los devanados de estator y la carcasa de un motor de inducción trifásico. El conocimiento de esta impedancia es fundamental para la obtención de un modelo del motor para alta frecuencia. Esta impedancia es precisamente el principal camino de propagación de las corrientes en modo común en los accionamientos de velocidad variable.

Para ello se han conectado los terminales del medidor de impedancias uno a los devanados del estátor y el otro a la borna de tierra del motor. Los devanados del estátor se hallaban conectados en estrella. El resultado obtenido aparece en la Figura 2.6.

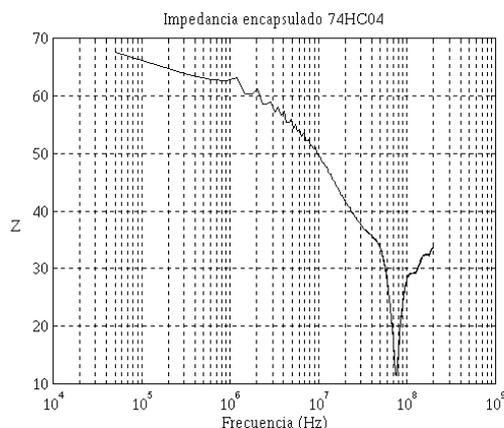


**Fig. 2.6** Impedancia en modo común de un motor trifásico  
(Escala vertical: dBΩ)

Se observó que el resultado de la medida era independiente de la posición del rotor y del punto de la carcasa elegido como borna de tierra. Precisamente esta impedancia se tendrá en cuenta en el Capítulo 5 a la hora de plantear un modelo de cálculo de la corriente en MC que se propaga hacia el lado de la carga en un accionamiento con un inversor trifásico.

### Caso 3

Otra aplicación práctica interesante es obtener las impedancias parásitas de los encapsulados de los circuitos integrados. En este caso se mide la impedancia entre los terminales de alimentación y masa de un inversor 74HC04. El valor de dicha impedancia es importante para determinar el condensador de desacoplo necesario para minimizar la EMI producida en las líneas de alimentación de PCB [57]. El resultado obtenido se muestra en la Figura 2.7.



**Fig. 2.7** Impedancia del encapsulado de inversor 74HC04  
(Escala vertical: dBΩ)

