1. Introducción a la Electrónica de Potencia

1.1 Clasificación de los Convertidores

Como su nombre lo indica su función es convertir una fuente de una tensión y frecuencia dada a otra de diferentes características, estos pueden clasificarse según su función como se indica a continuación.

1.1.1 Entrada AC/Salida CC

Comúnmente conocidos como rectificadores, son el tipo de convertidores más comunes y transfieren potencia desde una fuente alterna a una continua.

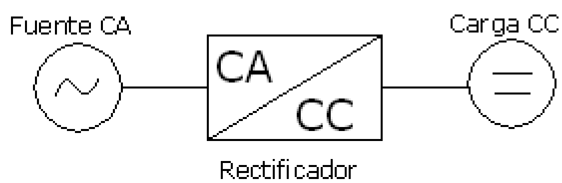

Figura 1.1

1.1.2 Entrada CC/Salida CA

Los inversores cumplen la función contraria de los rectificadores, es decir la potencia va desde una fuente de continua a una carga alterna.

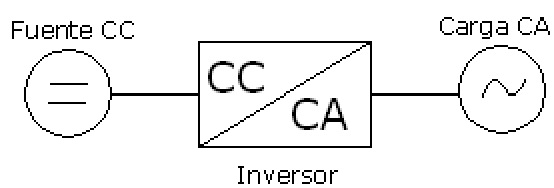

Figura 1.2

1.1.3 Entrada CC/ Salida CC

Este tipo de conversor es útil cuando se necesita una tensión diferente a la de la fuente o una fuente regulada de tensión. Comúnmente se utiliza para control de motores de CC.

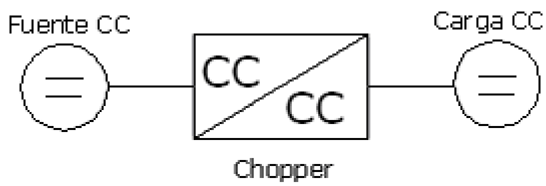

Figura 1.3

1.1.4 Entrada CA/ Salida CA

Se utiliza para modificar la tensión y la frecuencia de una fuente alterna o para poder regularla a las necesidades de la carga.

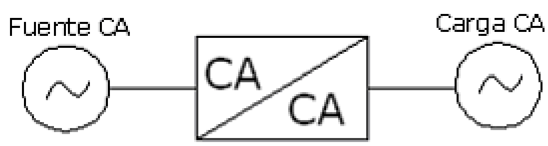

figura 1.4

1.2 Definición de conceptos

Para tener una relación entre las magnitudes de las componentes alternas y continuas de una señal se utilizan varios parámetros, por medio de los cuales se puede evaluar los diferentes tipos de conversores. A continuación se definen los más importantes.

1.2.1 Potencia

La potencia en un elemento se calcula por medio de la tensión y la corriente que la atraviesa.

1.2.2 Potencia instantánea

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \text{ ....(1.1)}$$

1.2.3 Potencia media

Cuando se tengan formas de tensión y corriente periódicas, se obtendrá también una señal de potencia de este tipo, el promedio de esta en un período es la potencia media, conocida normalmente como potencia activa o real.

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} p(t)\partial t = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} v(t) \cdot i(t)\partial t \text{ ....(1.2)}$$

1.2.4 Valor eficaz o RMS

Un voltaje continuo disipa una potencia media en una resistencia dado por

$$P = \frac{Vcc^2}{R} \text{ ....(1.3)}$$

En el caso de una señal periódica la potencia media puede calcularse con el Vrms

$$P = \frac{Vrms^2}{R} \text{ ....(1.4)}$$

Es decir el valor eficaz o RMS (root mean square) se basa en la potencia media que entrega a una carga resistiva un voltaje continuo.

Desarrollando las ecuaciones de potencia media

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t) \partial t = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(t) \cdot i(t) \partial t = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \frac{v(t)^2}{R} \partial(t)$$

$$\frac{1}{R} \cdot \left[\frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(t)^2 \partial(t) \right]$$

Igualando las expresiones y despejando para Vrms

$$P = \frac{Vrms^2}{R} = \frac{1}{R} \cdot \left[\frac{1}{T} \cdot \int_0^T v^2(t) \, \partial(t) \right] \text{..............(1.5)}$$

$$Vrms = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T v^2(t) \, \partial(t)} \text{..........................(1.6)}$$

En el caso de la corriente RMS se tiene que la potencia media es:

$$P = Irms^2 \cdot R \text{..........................(1.7)}$$

Desarrollando las ecuaciones igual que en el caso del Vrms se tiene que

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t) \partial t = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(t) \cdot i(t) \partial t = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2(t) \cdot R \partial(t)$$

$$P = \quad Irms^2 \cdot R \quad = \left[\frac{R}{T} \cdot \int_0^T i^2(t) \; \partial(t) \right] \text{.......................(1.7)}$$

$$Irms \quad = \quad \sqrt{\left[\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2(t) \; \partial(t) \right]} \text{...................................(1.8)}$$

Estos valores son muy útiles pues nos permiten calcular la potencia eficaz, potencia aparente, etc. que consume una carga.

1.2.5 Potencia aparente

La potencia aparente es el producto entre de las magnitudes de voltaje y corriente eficaces.

$$S = Vrms \cdot Irms \text{ ....(1.9)}$$

1.2.6 Factor de potencia

En forma general es el cuociente entre la potencia media y la potencia aparente, en el caso de señales de voltaje y corriente sinusoidales es el coseno del ángulo entre la tensión y la corriente.

$$FP \quad = \quad \frac{P}{S} \quad = \quad \frac{P}{Vrms \cdot Irms} \quad \text{.................(1.10)}$$

$$P_n = V_n \cdot I_n \cdot \cos(\phi_n) \text{ ....(1.11)}$$

1.3 Ondas periódicas no sinusoidales

Como sabemos una onda periódica no sinusoidal puede representarse por una sumatoria de señales sinusoidales de diferente magnitud y de frecuencias que son múltiplo de una fundamental por medio de una serie de Fourier, estas señales pueden ser de corriente o voltaje.

$$f(t) \quad = \quad a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cdot \cos(n\omega_0 t) + b_n \cdot sen(n\omega_0 t) \right] \text{......................(1.12)}$$

Siendo a_0, a_n y b_n respectivamente:

$$a_0 = \frac{1}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \partial t \text{ ....(1.13)} \qquad a_n = \frac{2}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot \cos(n\omega t) \partial t \text{ ....(1.14)}$$

$$b_n = \frac{2}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot sen(n\omega t) \partial t \text{ ....(1.15)}$$

Se puede expresar la función f(t) solamente por senos o cosenos reemplazando los términos que se muestran a continuación.

$$Cn = \sqrt{a_n + b_n} \text{ ....(1.16)} \qquad \theta n = \tan^{-1}\left(\frac{-b_n}{a_n} \right) \text{..................(1.17)}$$

En función de coseno

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[c_n \cdot \cos(n\omega_0 t + \theta_n) \right] \text{.....................(1.18)}$$

Para expresarla en función de senos se debe calcular el ángulo θ de la siguiente forma

$$\theta n = \tan^{-1}\left(\frac{a_n}{b_n} \right) \text{ ....(1.19)}$$ Y se obtiene

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}\left[c_n \cdot sen(n\omega_0 t + \theta_n)\right] \text{.........................(1.20)}$$

El valor eficaz o RMS de una función representada de esta forma se puede calcular también a partir de la serie de Fourier.

$$F_{rms} = \sqrt{a_0{}^2 + \sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{c_n}{\sqrt{2}}\right)^2} \text{ ....(1.21)}$$

Para calcular la potencia media a través de Fourier debemos tomar en cuenta que:

La potencia de la parte continua se calcula como:

$$P_0 = V_0 \cdot I_0 \text{ ....(1.22)}$$

Y en una señal sinusoidal se calcula:

$$P_n = V_n \cdot I_n \cdot \cos(\phi_n) \text{ ....(1.23)}$$

Por lo tanto la potencia total nos resulta una sumatoria

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} P_n = V_0 \cdot I_0 + \sum_{n=1}^{\infty}\left[V_n rms \cdot I_n rms \cdot \cos(\theta_n - \phi_n)\right] \text{..............(1.24)}$$

Supongamos ahora una fuente de voltaje sinusoidal alimentando una carga no lineal y representemos la corriente por medio de una serie de Fourier.

$$v(t) = V_1 sen(n\omega_0 t + \theta_1) \text{ ......(1.25)} \qquad i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty}\left[I_n \cdot sen(n\omega_0 t + \phi_n)\right] \text{.......(1.26)}$$

La potencia absorbida por la carga se calcula de la siguiente forma

$$P = V_0 \cdot I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[V_n rms \cdot I_n rms \cdot \cos(\theta_n - \phi_n) \right] \text{.................} (1.27)$$

Como existe una sola fuente de voltaje a una frecuencia (V1) los demás términos de la sumatoria son cero con lo cual la potencia absorbida resulta

$$P = 0 \cdot I_0 + \left[V_1 rms \cdot I_1 rms \cdot \cos(\theta_1 - \phi_1) \right] + \left[0 \cdot I_n rms \cdot \cos(\theta_n - \phi_n) \right] + \ldots =$$

$$P = V_1 rms \cdot I_1 rms \cdot \cos(\theta_1 - \phi_1) \text{........................} (1.28)$$

Como se dijo al comienzo el factor de potencia se calcula en forma general como el cuociente entre la potencia media y la potencia aparente.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{Vrms \cdot Irms} \text{............................} (1.29)$$

Sustituyendo el término de la potencia media y considerando que para este caso Vrms es igual al V1rms se obtiene.

$$FP = \frac{V_1 rms \cdot I_1 rms \cdot \cos(\theta_1 - \phi_1)}{V_1 rms \cdot I\ rms} = \left(\frac{I_1 rms}{I\ rms} \right) \cdot \cos(\theta_1 - \phi_1) \text{........} (1.30)$$

El término entre paréntesis corresponde al factor de potencia de distorsión (FD) debido a la no linealidad de la carga, el otro es el factor de potencia de desplazamiento producto de cargas inductivas o capacitivas.

$$FD = \left(\frac{I_1 rms}{I\ rms}\right) \Rightarrow \qquad FP = FD \cdot \cos(\theta_1 - \phi_1) \text{ ....(1.31)}$$

1.4 Índices usados en señales con distorsión

Uno de los términos mas usados para cuantificar el carácter sinusoidal de una señal es el THD (Total Harmonic Distortion) que es una relación entre el valor eficaz de los componentes armónicos y el valor eficaz de la fundamental.

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n\neq 1}^{\infty} I_n^2 rms}{I_1^2 rms}} = \frac{\sqrt{\sum_{n\neq 1}^{\infty} I_n^2 rms}}{I_1\ rms} \text{ ....(1.32)}$$

El THD también es posible expresarlo de otra forma, como así también el factor de distorsión (FD).

$$THD = \sqrt{\frac{I^2 rms - I_1^2 rms}{I_1^2}} \text{ ....(1.33)} \qquad FD = \sqrt{\frac{1}{1 + THD^2}} \text{ ....(1.34)}$$

Al igual que en el caso de la potencia activa, la potencia reactiva se puede calcular como el producto de los armónicos, siendo el único diferente de cero el fundamental pues no existen armónicos de voltaje.

$$Q = V_1 rms \cdot I_1 rms \cdot Sen(\theta_1 - \phi_1) \text{ ....(1.35)}$$

Para definir S se debe incluir un termino que tenga en cuenta el producto de las corrientes armonicas con el votaje fundamental el cual se ha definido como “ volt-amperes de distorsión” o D.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \text{ ....(1.36)} \quad \text{Con}$$

$$D = V_{1RMS} \cdot \sqrt{\sum_{n\neq 1}^{\infty} I_n^2 rms} = \frac{\hat{V}_1}{2} \cdot \sqrt{\sum_{n\neq 1}^{\infty} \hat{I}_n^2} \text{ ....(1.37)}$$

Otros términos utilizados para caracterizar señales no sinusoidales son el factor de forma (FF), el factor de rizado (RF), el factor de cresta (CF) y el rendimiento de rectificación.

$$FF = \frac{Vrms}{Vdc} \quad \text{........................(1.38)}$$

Es la relación entre el valor eficaz y el valor medio de una señal

El factor de rizado representa la relación entre el Voltaje eficaz de la parte alterna de la señal y el Voltaje medio.

$$Vrms^2 = Vdc^2 + Vac^2 \longrightarrow Vac = \sqrt{Vrms^2 - Vdc^2} \quad \text{................(1.39)}$$

$$RF = \frac{Vac}{Vdc} = \sqrt{\left[\frac{Vrms}{Vdc}\right]^2 - 1} = \sqrt{FF^2 - 1} \quad \text{.....................(1.40)}$$

Factor de cresta es la relación entre la corriente máxima y la corriente RMS

$$CF = \frac{\mathrm{Im}\,ax}{Irms} \quad \text{.......................(1.41)}$$

Rendimiento de rectificación

$$\eta = \frac{Pdc}{Pac} \quad \text{..............................(1.42)}$$