

# Apéndice A

## Promediado de variables

### A.1. Operador de promediado

El promediado de los modelos de los convertidores en el espacio de estado se realiza con el objetivo de aplicar las técnicas de control para sistemas continuos [104][106][223].

En un convertidor CC/CC conmutando con modulación de ancho de pulso y trabajando en modo de conducción continuo, el modelo en el espacio de estado es

$$\frac{d}{dt}x = (1 - s(t)) \cdot f_0(x) + s(t) \cdot f_1(x) \quad (\text{A.1})$$

donde  $s(t)$  es la función de conmutación. En régimen permanente, el convertidor cambia regularmente entre dos configuraciones diferentes  $f_0(x)$  y  $f_1(x)$ , siendo el comportamiento del convertidor variable en el tiempo y periódico, con un periodo igual al de conmutación  $T_s$ .

Aplicando el operador de promediado (A.2) sobre el periodo de conmutación  $T_s$  a la ecuación (A.1), se obtiene (A.3).

$$\bar{z}(t) = \frac{1}{T_s} \cdot \int_{t-T_s}^t z(\tau) d\tau \quad (\text{A.2})$$

$$\overline{\frac{d}{dt}x} = \overline{(1 - s(t)) \cdot f_0(x) + s(t) \cdot f_1(x)} \quad (\text{A.3})$$

En la expresión (A.3), el valor promediado de la derivada se puede ver como una aproximación de la derivada del valor promediado, si el periodo de conmutación  $T_s$  es suficientemente pequeño (A.4).

$$\overline{\frac{d}{dt}x} = \frac{1}{T_s} \cdot \int_{t-T_s}^t \frac{d}{d\tau}x(\tau) \cdot d\tau = \frac{x(t) - x(t-T_s)}{T_s} \approx \frac{d}{dt}\bar{x} \quad (\text{A.4})$$

Considerando que las funciones  $f_0$  y  $f_1$  son continuas y que el rizado de la variable  $x$  es suficientemente pequeño, se extraen (A.5) y (A.6).

$$\overline{(1-s(t)) \cdot f_0(x)} \approx (1-\bar{s}) \cdot \overline{f_0(x)} \approx (1-d) \cdot f_0(\bar{x}) \quad (\text{A.5})$$

$$\overline{s(t) \cdot f_1(x)} \approx \bar{s} \cdot \overline{f_1(x)} \approx d \cdot f_1(\bar{x}) \quad (\text{A.6})$$

En régimen permanente, los valores promediados son constantes y no dependen del tiempo. En consecuencia, se obtiene el modelo promediado en el espacio de estado, invariante en el tiempo (A.7).

$$\frac{d}{dt}\bar{x} = (1-d) \cdot f_0(\bar{x}) + d \cdot f_1(\bar{x}) \quad (\text{A.7})$$

## A.2. Aplicación sobre convertidores de alterna

El proceso de promediado se puede considerar equivalente a aplicar el operador de promediado a cada rama del convertidor, sustituyendo el circuito real por el circuito promediado. En general, los componentes del circuito promediado suelen ser los mismos que los del circuito real, con excepción de los semiconductores y de los elementos resistivos no lineales con discontinuidad en las formas de onda de tensión y corriente [106]. Por tanto, el proceso de promediado suele reducirse a aplicar el operador de promediado sobre las ecuaciones de conmutación, siendo el resto del circuito promediado igual que el circuito original.

En los convertidores trifásicos, los valores promediados de las variables (lado de continua, lado de alterna, funciones de conmutación) son variables en el tiempo, incluso en régimen permanente. En consecuencia, debe asegurarse que la relación entre la frecuencia de conmutación y la frecuencia de la línea sea suficientemente elevada. En caso contrario, las variables promediadas incorporan contenidos armónicos de alta frecuencia relativamente significativos sumados a la frecuencia fundamental, incluso en régimen permanente, y se tienen rizados indeseados.

Una estimación indica que el error en el proceso de promediado permanece por debajo del 5% si la frecuencia de conmutación es superior a 50 veces la frecuencia de línea [106].