Energía, potencia, distorsión y factor de potencia. Consideraciones generales.

Potencia instantánea en cualquier elemento:

$$p(t) = v(t)i(t)$$

Energía en un elemento (acumulada o disipada)

$$E = \int_{t_1}^{t_2} p(\tau)d\tau$$

Los componentes resistivos puros solo disipan energía eléctrica.

La potencia instantánea disipada en una resistencia es:

$$p_R(t) = i_R^2(t)R = \frac{v_R^2(t)}{R}$$

Los componentes reactivos puros, inductancias o condensadores, no disipan energía eléctrica, solo la almacenan.

La energía almacenada en un componente reactivo es conservativa, esto es, tiende a mantener constante el valor de la variable que la define, respectivamente la corriente circulante en la inductancia y la carga eléctrica acumulada en las placas del condensador.

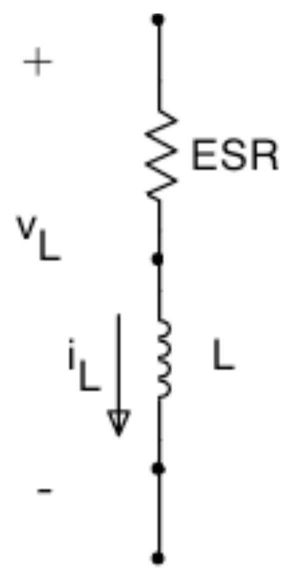
La energía eléctrica E_L, almacenada en el campo magnético de una bobina de inductancia L, es función de la corriente que produce el campo magnético:

$$E_L = \frac{1}{2} L i_L^2$$

Esta energía conservativa tiende a mantener constante el valor de la corriente que circula por la inductancia.

En teoría si se cortocircuitan los terminales de una inductancia ideal que conduzca una corriente inicial, la corriente seguirá circulando sin cambios hasta que se modifique el circuito.

En la práctica los conductores que forman las inductancias reales tienen una resistencia no nula, luego toda inductancia real tiene un compnente resitivo en serie, y por lo tanto no esta libre de pérdidas.



La afirmación anterior no se aplica a las bobinas construidas con materiales superconductores, que estén operando por debajo de la temperatura crítica de superconductividad, pero estos elementos están aún en la fase experimental.

La energía eléctrica E_C, almacenada en el campo eléctrico de un condensador de capacitancia C, es función de la carga Q acumulada en las placas:

$$E_C = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$$

como:

$$V_C = \frac{Q}{C}$$

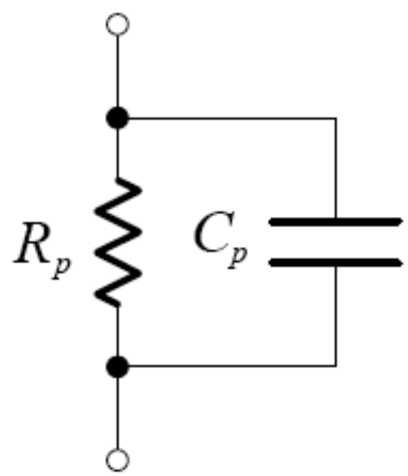
Resulta:

$$E_C = \frac{1}{2} C V^2$$

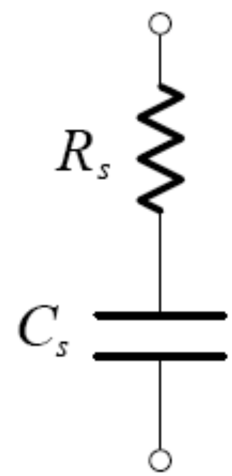
Esta energía conservativa tiende a mantener constante el valor de la tensión entre los terminales del condensador.

En teoría un condensador ideal cargado y dejado en circuito abierto, esto es, con una impedancia infinita entre sus terminales debería mantener indefinidamente su carga, y el mismo componente no debería ofrecer ninguna resistencia a la circulación de corriente.

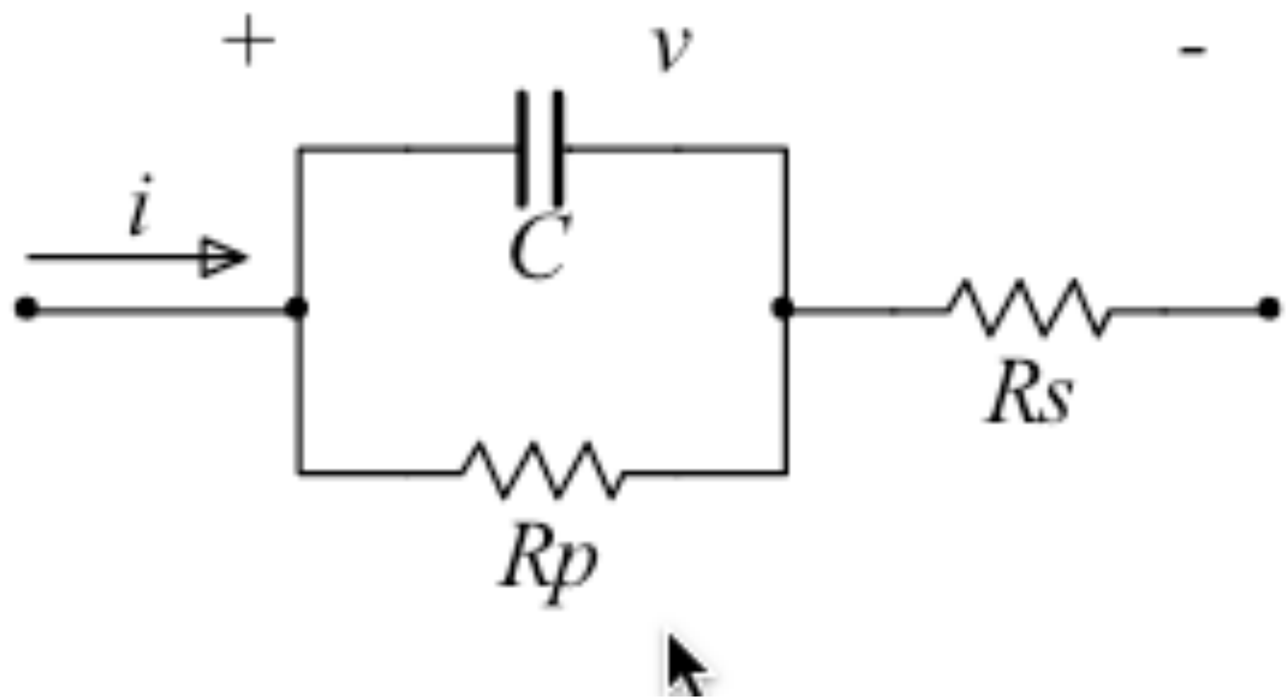
En la práctica los materiales dieléctricos presentan fugas, que pueden ser modeladas como una resistencia equivalente en paralelo, EPR (por "equivalent parallel resistance"), con el condensador ideal, que tiende a descargarlo.



Adicionalmente, todo conductor tiene resistencia, así que todo condensador real presenta una resistenca equivalente, ESR (por "Equivalent Series Resistance"), en serie con el condensador ideal que produce pérdidas cuando circula la corriente de carga o descarga.



El modelo equivalente completo, considerando las dos resistencias equivalentes resulta:



En primera aproximación los componentes parásitos pueden ser ignorados y las inductancias, condensadores y resistencias pueden ser considerados componentes ideales, pero es posible que usar modelos completos sea necesario si se requiere gran precisión en los resultados, y/o alcanzar altos niveles de rendimiento en una aplicación determinada.

En una carga genérica, la potencia entregada por la fuente es:

$$P = V_s I_s \cos\phi$$

y el factor de potencia (PF) se define como:

$$PF = \frac{P}{V_s I_s} = \cos\phi$$

En la carga genérica, la corriente rms tomada de la fuente, I_s, se puede calcular como:

$$I_s = \frac{P}{V_s PF}$$

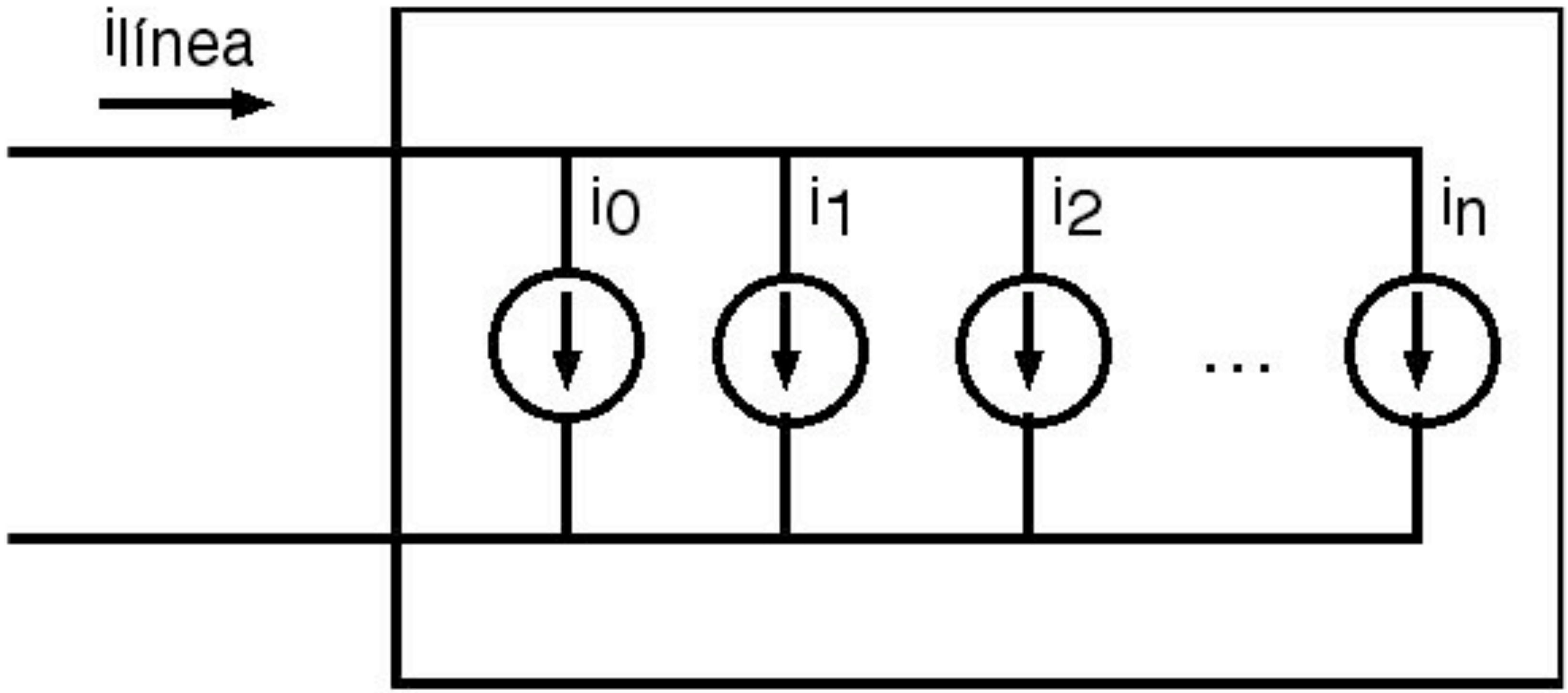
Por lo tanto el valor rms de la corriente en el sistema de alimentación es inversamente proporcional al factor de potencia de la carga, si la potencia eficaz y la tensión permanecen constantes.

Dado que las pérdidas de distribución son función del valor rms de la corriente de carga las compañías eléctricas penalizan a los consumidores cuyo factor de potencia es bajo por mal uso de la capacidad instalada.

Mantener el factor de potencia del equipo lo mas cerca posible del factor de potencia unitario ideal es por lo tanto otro objetivo implícito en el diseño de un conversor electrónico de potencia.

Los dispositivos electrónicos de control de potencia que operan en corte/saturación introducen discontinuidades no lineales tanto en la forma de onda de la corriente que circula en el lazo fuente primaria de energía-conversor-carga como en la forma de onda de tensión aplicada a la carga.

Este efecto puede modelarse como la generación en el conversor de componentes armónicos de corriente y de voltaje.



Modelo genérico del conversor de potencia como inyector de corrientes armónicas en la línea.

Las armónicas de corriente son emitidas por el conversor, y circulan por todo el sistema, lo que puede contaminar la forma de onda de la fuente principal de energía y afectar a otros usuarios, por lo que las normativas incluyen límites a la inyección de armónicas en las líneas AC de alimentación.

La necesidad de cumplir con estas normativas obliga a determinar el contenido armónico generado y, si se supera el límite, incluir en el conversor de potencia filtros que eliminen el exceso.

Análisis de la distorsión de corriente.

En una onda arbitraria $i_s(t)$, se define el "componente de distorsión", $i_d(t)$ como:

$$i_d(t) = i_s(t) - i_{s1}(t)$$

donde $i_{s1}(t)$ es el componente de frecuencia fundamental de la señal $i_s(t)$ e $i_d(t)$ contiene todas las armónicas no deseadas (ruido o distorsión).

Si se trabaja en un sistema que debería ser DC, la "componente fundamental" es por definición la "armónica 0" del análisis de Fourier de la onda.

Si se trabaja en un sistema que debería ser mono-frecuencial (la "línea AC"), la "componente fundamental" es por definición la componente de la frecuencia nominal de la línea (60Hz en Venezuela).

En aplicaciones AC, la no linealidad del sistema conversor puede a veces generar componentes armónicos de frecuencia inferior a la "fundamental", adicionales al componente DC; estos componentes suelen llamarse "sub-armónicas".

El valor rms de la señal $i_s(t)$, I_s, es:

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{T}\int_T i_s^2(\tau)d\tau}$$

donde:

$$i_s^2(t) = i_1^2(t) + i_d^2(t) + 2i_1(t)id(t)$$

pero:

$$\int_T f_{h1}(\tau) f_{h2}(\tau) = 0 \quad \text{si } h_1 \neq h_2$$

luego:

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{T}\int_T i_{s1}^2(\tau)d\tau + \frac{1}{T}\int_T i_d^2(\tau)d\tau}$$

esto es:

$$I_s = \sqrt{I_{s1} + I_d}$$

donde la componente rms fundamental, I_{s1}, es:

$$I_{s1} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_T i_{s1}^2(\tau)d\tau}$$

y la componente rms de distorsión, I_d, es:

$$I_d = \sqrt{\frac{1}{T}\int_T i_d^2(\tau)d\tau}$$

En base a esto se puede definir el índice de distorsión harmónica total en porcentaje (%THD) como:

$$\%THD = 100\,\frac{I_d}{I_{s1}}$$

ó también:

$$\%THD = 100\,\frac{\sqrt{I_s^2 - I_{s1}^2}}{I_{s1}}$$

por supuesto el valor de la componente rms de distorsión, I_d, también es:

$$I_d = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{sh}^2}$$

donde los componentes I_{sh} son los valores rms de componentes harmónicos calculados descomponiendo en serie de Fourier la señal $i_s(t)$.

En la práctica este valor puede ser aproximado tomando en cuenta los componentes más importantes (los de mayor amplitud) de la serie.

Componente de distorsión de voltaje.

En una onda arbitraria $v_s(t)$, se define el "componente de distorsión", $v_d(t)$ como:

$$v_d(t) = v_s(t) - v_{s1}(t)$$

donde $v_{s1}(t)$ es el componente de frecuencia fundamental de la señal $v_s(t)$

todas las ecuaciones desarrolladas en el análisis de la distorsión de corriente tienen su dual si lo que se considera es la distorsión de voltaje.

Dada la naturaleza no lineal de los dispositivos electrónicos de control de potencia, y el estado actual de la tecnología lo usual es que se considere una alimentación de voltaje proporcionada por una fuente ideal que, en teoría, debe tener 0 impedancia de salida (impedancia de Thevenin).

El factor de desplazamiento (DF).

Suponiendo que la alimentación, $v_s(t)$, es una sinusoide ideal de voltaje, con un valor rms de V y una frecuencia f_s, la potencia tomada por la carga es:

$$P = \frac{1}{T_s}\int_{T_s} v_s(\tau) i_s(\tau) d\tau = \frac{1}{T_s}\int_{T_s} v_s(\tau) i_{s1}(\tau) d\tau$$

esto es:

$$P = V_s I_{s1} \cos\phi_1$$

Por analogía con el caso monofrecuencial, si en el caso multifrecuencial en corriente se define el "factor de potencia de desplazamiento" (DF) como:

$$DF = \cos\phi_1$$

entonces la potencia P tomada por la carga se puede escribir como:

$$P = V_s I_{s1}(DF)$$

Nótese que la definición fundamental del factor de potencia (PF) debe seguir siendo cierta en el caso multifrecuencial, luego se cumple:

$$PF = \frac{P}{V_s I_s}$$

y por lo tanto:

$$PF = \frac{I_{s1}}{I_s}(DF)$$

Por supuesto, en el caso mono-frecuencial (solo elementos lineales en el circuito) se cumple necesariamente que:

$$\frac{I_{s1}}{I_s} = 1$$

y por lo tanto:

$$PF = DF$$

En el caso multi-frecuencial en corriente (elementos no lineales en el circuito que distorsionan la forma de onda de corriente) se tiene que:

$$\frac{I_{s1}}{I_s} > 1$$

y por lo tanto siempre que hay distorsión se cumple que:

$$PF < DPF$$

Si en el caso multi-frecuencial en corriente se define el "factor de potencia de distorsión" (DiPF) como:

$$\frac{I_{s1}}{I_s} = DiF$$

entonces se puede escribir:

$$PF = (DF)(DiF)$$

Dado que:

$$\frac{I_{s1}}{I_s} = \frac{1}{\sqrt{1+\left[\frac{\%THD}{100}\right]^2}} = DiF$$

entonces se cumple también que:

$$\boxed{PF = \frac{DF}{\sqrt{1+\left[\frac{\%THD}{100}\right]^2}}}$$