

9. FILTROS DE ARMÓNICOS

La denominación genérica *filtros de armónicos* se emplea en este capítulo para aquellos dispositivos que como función principal permiten absorber o compensar los armónicos dominantes de la red,¹⁸⁸ provocados por las cargas no lineales conectadas a la misma y cuya finalidad es la de reducir la distorsión armónica con el propósito de cumplir con los límites de emisión impuestos por las normas [1] o evitar perturbaciones en la propia red del usuario.

Existe una tecnología que utiliza componentes pasivos como resistencias, condensadores e inductancias que comprende los filtros pasivos (FP) junto con otra que utiliza componentes activos, principalmente semiconductores, y que corresponde a los denominados filtros activos (FA).

Como veremos, ambas tecnologías tienen sus ventajas e inconvenientes aunque la principal diferencia entre ambas es la del coste que hoy por hoy se inclina claramente a favor de los FP, sobre todo cuando el filtro no solo se utiliza para la compensación de armónicos sino también para la compensación de energía reactiva. En cuanto a las pérdidas, los FA superan a los FP por las relativamente elevadas pérdidas de conmutación de los primeros.

Una ventaja de los FA, por lo general poco resaltada, es la de la simplicidad que supone su instalación al no necesitar prácticamente ningún estudio previo de la red ni diseño de los mismos, como sucede con los FP.

9.1 Filtros pasivos característicos

Los montajes más utilizados para absorción de armónicos son los mostrados en la figura 9.1-1 para conexión en paralelo a la red.

En primer lugar merece destacarse el filtro (a) de la figura 9.1-1 denominado filtro resonante, simple sintonizado o pasa banda. Se trata de un filtro de segundo orden¹⁸⁹ que presenta una impedancia mínima a la frecuencia de sintonización,

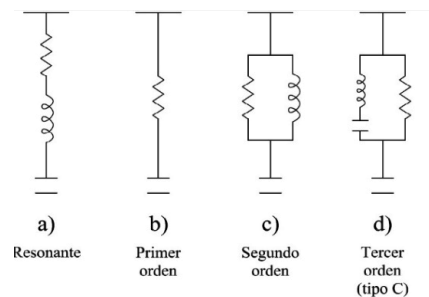


Figura 9.1-1
Filtros de armónicos más comunes.

188. Los filtros para convertidores se tratan en el capítulo 3 (convertidores electrónicos).

189. El orden de un filtro coincide, en general, con el número total de inductancias y condensadores en su circuito.

ya que aquella se limita generalmente a la propia resistencia de la inductancia. Es el más utilizado en el filtrado de armónicos especialmente en baja tensión. A la frecuencia de sintonización elegida absorbe los armónicos de corriente correspondientes a esa frecuencia así como una banda entorno a ella cuya amplitud depende del factor de calidad del filtro, como se comentará a continuación.

El resto de filtros representados en la figura 9.1-1 se denominan pasa altos, puesto que presentan impedancias bajas a frecuencias altas, es decir, absorben con preferencia los armónicos de mayor frecuencia.

El filtro de primer orden amortiguado de la figura 9.1-1b se compone de un condensador y una resistencia para limitar los efectos de las posibles resonancias al conectarse en redes inductivas. Si el valor de la resistencia es pequeño se comporta como un condensador con bajas pérdidas pero con elevado riesgo de amplificación de armónicos y si el valor es alto el problema son las elevadas pérdidas a la frecuencia fundamental, motivo por el que es muy poco utilizado.

El filtro representado en (c) permite filtrar armónicos a partir de la frecuencia de sintonización elegida comportándose como un filtro resonante por debajo de esta frecuencia y de forma similar al de primer orden a frecuencias altas, ya que a bajas frecuencias la corriente circula con preferencia por la inductancia y a altas por la resistencia.

El filtro tipo C de tercer orden representado en (d) tiene un comportamiento similar al anterior con la ventaja de que no produce apenas pérdidas a la frecuencia fundamental, ya que la rama serie L-C está sintonizada a la frecuencia de red. La inductancia más los dos condensadores se comportan como un filtro resonante con una resistencia de amortiguamiento en paralelo. A frecuencias altas la corriente circula por la rama resistiva comportándose como el filtro de primer orden. Se utiliza frecuentemente en hornos de arco para evitar la amplificación de armónicos e interarmónicos.

9.1.1 Influencia de la red

Los filtros pasivos interfieren con la red de tal forma que sus prestaciones difieren notablemente según las características de la misma. Para comprender el fenómeno repararemos en la figura 9.1.1-1, donde un filtro pasivo F se conecta a una red con un transformador T que alimenta a una carga no lineal, representada por una fuente de corriente, junto a cargas lineales.

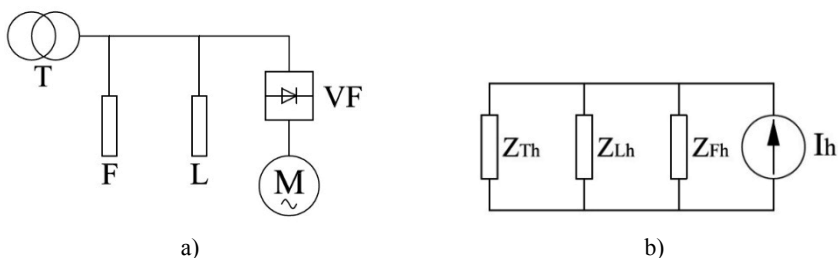


Figura 9.1.1-1 Esquema unifilar (a) y circuito equivalente para armónicos (b).

Si para simplificar suponemos una carga despreciable, es decir, $Z_L \gg Z_{Th}$, la corriente absorbida por el filtro para el armónico de orden h sería:

$$I_{fh} = I_h \frac{\frac{Z_{Fh} \cdot Z_{Th}}{Z_{Fh} + Z_{Th}}}{Z_{Fh}} = I_h \frac{1}{1 + \frac{Z_{Fh}}{Z_{Th}}}$$

Para la frecuencia de sintonización del filtro la corriente I_h del VF debería ser totalmente absorbida por el filtro. Sin embargo, esta circunstancia no se da ya que el filtro siempre ofrece una impedancia no nula y, por tanto, el cociente Z_{Fh}/Z_{Th} no es nulo, con lo que parte de corriente I_h del VF será inyectada a la red. En caso de considerar la carga lineal también esta absorbería, si bien en menor medida, parte de la corriente I_h . Por tanto, la corriente absorbida por el filtro no solo depende de la fuente de corriente y de las características del filtro sino también de las características de la red y las cargas a ella conectadas, lo cual exige que para el diseño de un FP sea necesario el análisis de la red con el filtro incorporado. Además, deben considerarse los armónicos preexistentes o importados de la red de AT.

9.1.2 Diseño de filtros resonantes

Este tipo de filtros se utilizan donde junto con la compensación de la energía reactiva conviene reducir alguno de los armónicos dominantes en una proporción que depende del grado de sintonización del filtro.

En numerosas ocasiones la principal pretensión es compensar la energía reactiva en redes poco perturbadas pero donde si se conectara una batería de condensadores se podría producir una resonancia cercana a los armónicos de mayor amplitud, por ejemplo el 5º, con lo cual la amplificación de las tensiones y corrientes armónicas podría resultar inadmisibles. En estos casos se recurre a *filtros resonantes de rechazo*. Se trata de filtros sintonizados a una frecuencia netamente inferior al armónico de menor orden con amplitud significativa en la red. En redes con armónicos característicos de orden 5, 7, 11, 13... la frecuencia elegida suele estar comprendida entre el 75 % y 90 % de la frecuencia del armónico de orden 5. Los valores típicos de sintonización para redes de 50 Hz corresponden a las frecuencias de 189 Hz y 215 Hz.¹⁹⁰ Con ello se consigue evitar el riesgo de resonancia así como absorber un 5º armónico aunque sea en un porcentaje reducido. En los *filtros sintonizados o de absorción* la frecuencia de resonancia del filtro se elige ligeramente por debajo de la correspondiente al armónico a absorber, por ejemplo, 235 Hz para el armónico de 250 Hz. El motivo de esta práctica se debe en gran medida a la influencia de la tolerancia de los componentes del filtro.

190. En caso de redes con armónicos significativos de orden inferior, por ejemplo con un tercer armónico en sistemas desequilibrados, o bien en redes con telemando a frecuencias bajas, los valores de sintonización pueden ser distintos.

Para la tolerancia típica citada en¹⁹¹ el filtro de 235 Hz ($h_r = 4,7$) podría quedar sintonizado entre 4,42 y 4,90 del orden del 5º armónico. Además, también deben considerarse otras tolerancias como la de la frecuencia de red sin descartar la pérdida de la capacidad con la temperatura¹⁹² o por envejecimiento, variaciones más reducidas pero no insignificantes. La razón que justifica la mencionada sintonización del filtro es la posibilidad de que este quede realmente sintonizado por encima de 250 Hz y pueda provocar una resonancia serie con la red cercana a esta frecuencia (anexo A9.1), lo cual supondría amplificar peligrosamente el 5º armónico preexistente.

9.1.2.1 Procedimiento de cálculo

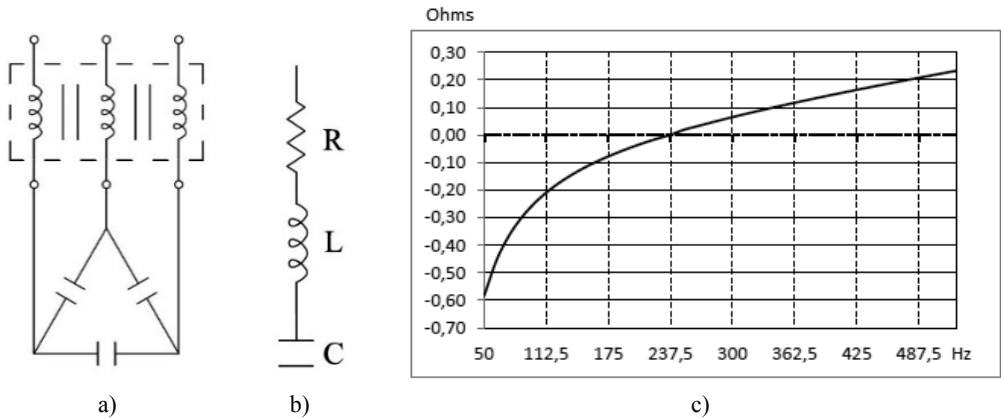


Figura 9.1.2.1-1 Filtro resonante. a) Esquema eléctrico. b) Circuito monofásico. c) Impedancia en función de la frecuencia de un filtro sintonizado a $h_r = 4,75$ ($f_r = 237,5$ Hz), para $Q_c = 250$ kvar y $R = 0$.

La impedancia del circuito de la figura 9.1.2.1-1b es $Z = R + j(X_L - X_C)$ con $X_L = 2\pi fL$ y

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

191. Los componentes que constituyen el filtro tienen tolerancias que es necesario considerar para evitar desintonías que alteran el comportamiento previsto del filtro. La capacidad de los condensadores y la inductancia de la reactancia son los componentes con tolerancias más acusadas, -5 % a +10 % según normas para condensadores [2] y ± 3 % como valor típico para las inductancias.

Teniendo en cuenta que para el armónico en resonancia h_r se cumple que: $h_r L = \frac{1}{h_r C}$

$$\text{Se deduce: } h'_r = h_r \sqrt{\frac{L}{L'} \cdot \frac{C}{C'}} = h_r \cdot \frac{1}{\sqrt{(1 + \Delta L)(1 + \Delta C)}}$$

Donde las variables con tilde corresponden al valor real y sin al valor previsto o calculado. ΔL e ΔC son valores relativos en p.u.

192. En grandes baterías de MT de intemperie, se da la circunstancia de diferencias de capacidad entre condensadores por efecto de la diferencia en la radiación solar recibida por una parte y otra de la batería.

Este circuito presenta una resonancia a aquella frecuencia que anula la parte imaginaria de Z , es decir, cuando $h_r X_L = \frac{X_C}{h_r}$ siendo h_r el orden del armónico en resonancia.

La curva de Z en función de la frecuencia se representa en la figura 9.1.2.1-1c, la reactancia ($X_L - X_C$) es negativa por debajo de la frecuencia de sintonización, es decir, el filtro se comporta como un condensador, para pasar a ser positiva a partir de la misma, comportándose como una reactancia inductiva, por lo que el filtro no puede resonar por encima de su frecuencia de sintonización .

$$\text{De la expresión anterior se deduce: } h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

Suponiendo como es habitual que la capacidad C esté determinada por la potencia nominal de los condensadores Q_{CN} para compensar la red, X_C será:

$$X_C = \frac{U_{CN}^2}{Q_{CN}}$$

Siendo U_{CN} la tensión nominal de la batería por lo general superior a la tensión de red U_N .¹⁹³

La inductancia se determina por:

$$L = \frac{1}{2\pi f h_r^2} \cdot \frac{U_{CN}^2}{Q_{CN}}$$

Y si se utiliza el factor de inductancia $p = \frac{1}{h_r^2}$,¹⁹⁴

$$L = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{U_{CN}^2}{Q_{CN}} p$$

En esta expresión es necesario advertir que U_{CN} y Q_{CN} corresponden a la tensión y la potencia nominal del condensador.

La potencia reactiva neta Q_C entregada por el condensador a la red se calcula por:

$$Q_C = Q_{CN} \left(\frac{U_N}{U_{CN}} \right)^2 \cdot \frac{1}{(1-p)^2}$$

Expresión que contempla tanto el sobredimensionado en tensión del condensador como la potencia reactiva absorbida por la reactancia X_L .

El factor de calidad del filtro para la frecuencia de resonancia se determina por:

$$Q = \frac{X_{Lr}}{R} = \frac{X_{Cr}}{R}$$

193. La tensión U_C en bornes del condensador resulta superior a la tensión de red U_N debido a la influencia de la inductancia L . Se calcula por $U_C = U_N/(1-p)$ con $p = 1/h_r^2$.

194. Este factor equivale también a la relación entre la reactancia inductiva y la capacitiva y se suele expresar en %. Así un filtro de $p = 7$ está sintonizado a $h_r = 1/\sqrt{0,07} = 3,78$ con $f_r = 3,78 \cdot 50 = 189$ Hz.