

3. ELECTRÓNICA DE POTENCIA

La *electrónica de potencia* (EP) se asocia con el control de la energía eléctrica actuando como medio o interfaz entre la fuente de energía y los receptores.

Sería difícil citar una fecha para considerar la expansión de la EP, pero a principios de los 70 su uso empezó a resultar común en la industria. En las últimas décadas las aplicaciones de la EP han aumentado de forma exponencial hasta el extremo que en la actualidad no se concibe ninguna vivienda ni industria sin aparatos o equipos maniobrados o controlados por Electrónica de Potencia. Las energías alternativas tampoco se libran de la EP, así es el caso de los generadores eólicos o de las plantas solares.

Los *rectificadores* constituyen el clásico y mejor ejemplo de la aplicación de la EP. Estos convierten corriente alterna en continua (c.a.-c.c) y junto con el resto de convertidores como el *inversor* (c.c.-c.a.) constituyen la mayor parte de las aplicaciones de la EP, desde las fuentes de alimentación o los variadores de velocidad para motores o la transmisión en c.c. de la energía eléctrica.

Pero al mismo tiempo la EP es en la actualidad la principal causante del deterioro del Factor de Potencia (FP), por lo que resulta necesario estudiar los principales dispositivos y equipos responsables del mismo.

En los siguientes apartados se tratan los rectificadores así como los inversores y en particular los variadores de velocidad, para motores de c.c. y principalmente de c.a.

En síntesis, la pretensión de este capítulo es la de comprender la forma en que los equipos mencionados perturban la red generando armónicos y en consecuencia empeorando el FP de las instalaciones y redes eléctricas.

3.1 Convertidores c.a.-c.c.

Comúnmente denominados rectificadores. Se trata de convertidores con *conmutación natural o conmutación por red*. Ambos términos provienen del hecho de que un diodo conduce cuando la tensión aplicada al ánodo es positiva y así permite la circulación de corriente en el sentido de conducción, dejando de conducir cuando la tensión de red invierte su sentido. Por tanto, es la red la que provoca la conmutación del estado de conducción, motivo por el que a los rectificadores a diodos se les denomina comúnmente *rectificadores no controlados*. Por el contrario, en los *rectificadores controlados* los semiconductores que componen el rectificador poseen la propiedad de ponerse en conducción cuando su puerta recibe un impulso de disparo, caso, por ejemplo, de rectificadores a tiristores, siempre suponiendo que la tensión de red aplicada al ánodo, al igual

que en el caso de un diodo, sea positiva. El tiristor abre el circuito, análogamente al diodo, cuando se invierte la tensión de polarización.

De entre los numerosos montajes posibles de rectificadores solo se van a contemplar aquellos de mayor interés en cuanto a su extensión y a los problemas de distorsión armónica ocasionados. Así pues analizaremos los armónicos generados, el factor de potencia y la forma de corrección del mismo.

De los numerosos circuitos rectificadores contemplaremos entre los monofásicos el rectificador puente de onda completa y entre los trifásicos el también puente o de 6 pulsos así como una breve ampliación a más de 6 pulsos.

3.1.1 Rectificador puente monofásico

Principio de funcionamiento

En el semiciclo positivo de U_s (figura 3.1.1-2a), conducen los diodos D1-D2, mientras que D3-D4 permanecen bloqueados al quedar polarizados en sentido inverso. Mientras que en el semiciclo negativo de U_s conducen D3-D4 y permanecen bloqueados D1-D2.

En la figura 3.1.1-2 se muestran las formas de onda de tensión y corriente.

En la figura 3.1.1-2e se aprecia la forma de onda para una carga R-L. Cuando L es suficientemente grande la onda resulta rectangular, según muestra la línea de trazo continuo.

El rectificador descrito no resulta operativo por el gran rizado de la tensión U_{dc} a pesar de que la corriente de alterna i_s con carga resistiva resulte carente de distorsión o con carga R-L con baja distorsión.

Por este motivo se incorpora un condensador de filtro o alisado en el circuito de continua, según muestra la figura 3.1.1-3. En el circuito de c.a. se puede incorporar también una reactancia de línea X_s para reducir el contenido armónico de la corriente, como se describe más adelante.

Cuanto mayor es la capacidad del condensador menor resulta el rizado, pero, sin embargo, la corriente alterna i_s solicitada a la fuente presentará pulsos más pronuncia-

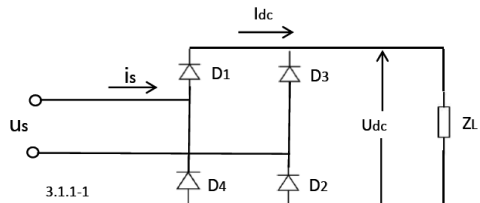


Figura 3.1.1-1 Rectificador puente con una carga representada por una impedancia Z_L .

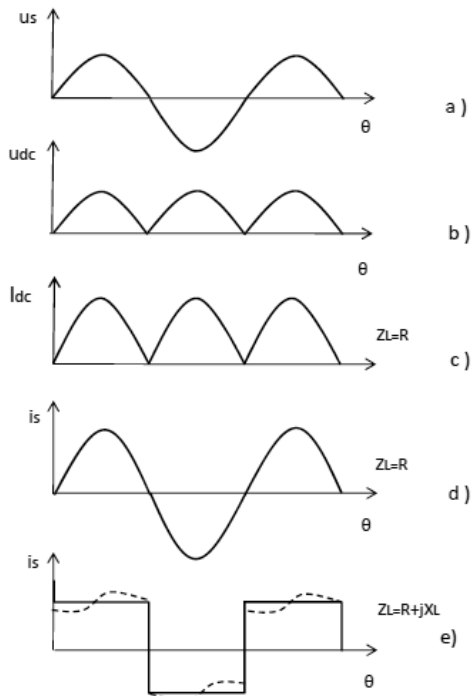


Figura 3.1.1-2 Formas de onda del rectificador de la figura 3.1.1-1 para diferentes tipos de cargas.

dos, lo que provoca un aumento de la distorsión armónica y, por consiguiente, un empeoramiento del factor de potencia.

Factor de potencia y armónicos generados

El desarrollo de Fourier de la onda rectangular o aproximadamente rectangular de la figura 3.1.1-2e permite comprobar que los armónicos generados por este modelo de rectificador con carga inductiva son de orden impar,

$$h = 2k + 1 = \{3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 \dots\},$$

para $k = \{1, 2, 3, \dots\}$

y sus amplitudes,

$$I_h = \frac{1}{h} = \{1/3, 1/5, 1/7, 1/9 \dots\}$$

El FP será,⁴³

$$FP = FD = \frac{I_{S1}}{I_s} = 0,9$$

Y, por tanto, el factor de distorsión será:

$$THDi = 100 \sqrt{\left[\frac{I_s}{I_{S1}} \right]^2 - 1} = 48,3\%$$

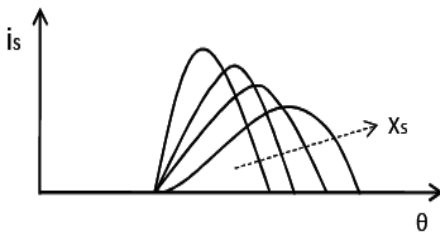


Figura 3.1.1-5 Formas de onda de corriente para reactancias de línea comprendidas entre el 0.5 % y 4 %.

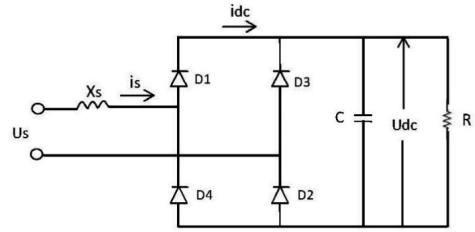


Figura 3.1.1-3 Rectificador puente incorporando un condensador C en el circuito de continua.

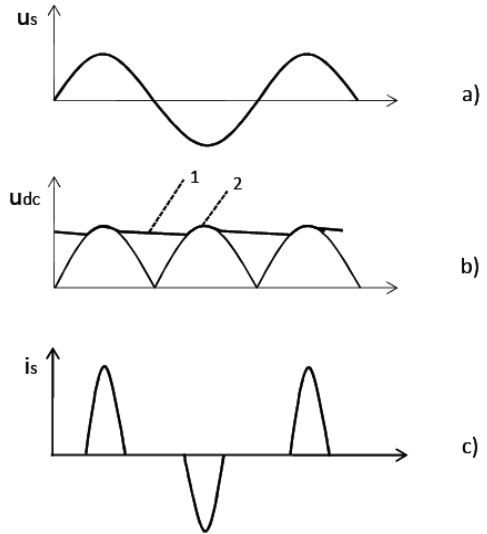


Figura 3.1.1-4 Formas de onda del rectificador de la figura 3.1.1-3: curva 1, con condensador C; curva 2, sin condensador C.

Orden del armónico							
Xs(%)	3	5	7	9	11	13	THD
0.5	85	60	35	10	8	7	111
1	80	50	25	8	7	6	98
2	75	40	15	7	6	4	87
4	70	30	10	8	4	4	78

Corrientes armónicas I_h/I_1 (%)⁴⁴

43. Ver apartado 2.4d.

44. Valores extraídos de CT159 de Schneider Electric.

Si se incorpora el condensador de filtro C (figura 3.1.1-3) aumenta la distorsión de la corriente de línea, al reducir la anchura del pulso de la corriente i_s (figura 3.1.1-4), mientras la reactancia de línea X_s contribuye a reducirla al ensanchar y reducir el valor máximo del pulso de corriente, como puede apreciarse en la figura 3.1.1-5. De hecho la reactancia de línea es una de las formas más simple y comúnmente utilizada de mejorar el FP, reduciendo los armónicos y, por tanto, la THDi. Sin embargo, como se aprecia en la tabla anterior, la distorsión alcanza valores elevados a pesar de valores relativamente altos de la reactancia de línea.⁴⁵ Por otra parte, un valor elevado de X_s acentúa la distorsión armónica de la tensión U_s a la entrada del rectificador y provoca un aplastamiento de la senoide. Este fenómeno puede reducir de forma apreciable la potencia de las fuentes de c.c. con este tipo de rectificador, los cuales se usan en numerosos equipos domésticos o de oficinas como los PC y cuya versión más extendida es la *fente de alimentación conmutada* de la figura 3.1.1-6.⁴⁶

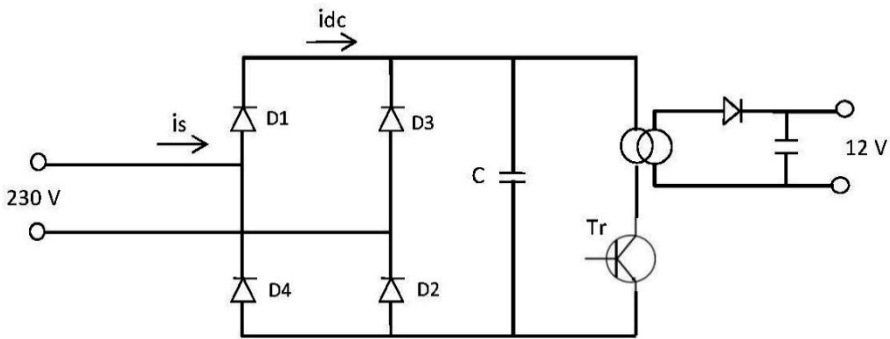


Figura 3.1.1-6 Fuente de alimentación conmutada.

3.1.2 Rectificador puente trifásico

Este rectificador también denominado de 6 pulsos, por el número de pulsaciones en c.c. por periodo de c.a., tiene su aplicación más importante como primera etapa en los *Variadores de Frecuencia* (VF) para motores asíncronos.

El valor medio de la tensión rectificadora U_{dc} vale:

$$U_{dc} = 1,35 U$$

Siendo U el valor eficaz de la tensión compuesta de la red de c.a.

45. La reactancia de línea prácticamente coincidente con la impedancia, por el pequeño valor de la resistencia y se expresa en % de la impedancia $Z = U/I$, con U = tensión eficaz de red e I = corriente eficaz nominal del rectificador, valor que coincide con el % de la caída de tensión en X_s , como habitualmente se expresa.

46. Cuyo nombre deriva de utilizar un conmutador cuya función realiza un transistor de potencia, que conmuta periódicamente a una frecuencia de 40 a 200 kHz. Este método permite utilizar un transformador de AF de dimensiones mucho más reducidas que el requerido por una fuente lineal clásica, constituyendo este el principal motivo del uso de este tipo de fuentes.

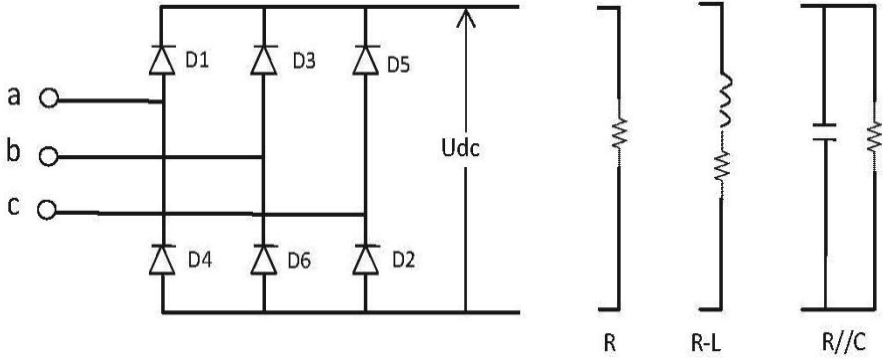


Figura 3.1.2-1 Rectificador puente trifásico con diferentes tipos de cargas.

Principio de funcionamiento. Como un diodo solo conduce en un sentido, para que circule corriente en el circuito de c.c. deben conducir dos diodos, uno de la rama superior y otro de la inferior de la figura 3.1.2-1. Además, estos conducen durante el tiempo en que la tensión alterna aplicada entre ambos diodos es superior a las restantes. Así por ejemplo, entre 30° y 90° , según se aprecia en la figura 3.1.1-2b la tensión máxima corresponde a U_{ab} , luego, conducirán los diodos D1 y D6, mientras que para el intervalo comprendido entre 90° y 150° la tensión máxima corresponde a U_{ac} y, por tanto, conducirán D1 y D2.

Así pues D1 conduce 120° por periodo como corresponde por la simetría del circuito, ya que si deben conducir simultáneamente dos diodos en un periodo de 360° y hay tres pares, el periodo de conducción de cada par debe ser de 120° . Con carga capacitiva el ángulo de conducción es inferior por lo mencionado a continuación (caso carga R-C). Por lo expuesto anteriormente el orden temporal de conducción de los diodos, partiendo de $\omega t = 0^\circ$, es: D5-D6, D1-D6, D1-D2, D3-D2, D3-D4, D5-D4 y nuevamente D5-D6 para cerrar la secuencia periódica. Por consiguiente, la tensión de salida está compuesta de seis segmentos senoidales o pulsos, como se muestra en la figura 3.1.2-2c.

En cuanto a la corriente tanto en continua como en alterna, su forma de onda depende del tipo de carga como se expone a continuación.

1. Carga resistiva. La corriente I_{dc} muestra la misma forma que la tensión U_{dc} , ya que $I_{dc} = U_{dc}/R$.

En la línea de alterna adopta la misma forma pulsante, tal como se muestra en la figura 3.1.2-2c para la corriente i_a , con valor positivo cuando conduce D1, negativo cuando conduce D4 y nulo cuando no conduce ninguno de los dos diodos. La línea a puntos refleja la influencia de la reactancia de c.a.