

Capítulo 4

Control de Fase

4.1 Conceptos Teóricos

En este capítulo se presentará el método de control de fase para convertidores AC/DC conmutados por línea, comúnmente conocidos como rectificadores controlados. Se tratará el tema en forma general, considerando un sistema polifásico (p generadores de tensión).

Considérese un sistema equilibrado p -fásico, en el cual el desplazamiento angular entre dos fases consecutivas es, por definición, igual a $2\pi/p$. Tomando v_1 , v_2 y v_3 , de un conjunto de p tensiones senoidales, las ecuaciones que representan al sistema se pueden escribir como,

$$\begin{aligned}v_1 &= E_{MAX} \text{sen}(\omega t + 2\pi/p + \phi_i) \\v_2 &= E_{MAX} \text{sen}(\omega t + \phi_i) \\v_3 &= E_{MAX} \text{sen}(\omega t - 2\pi/p + \phi_i)\end{aligned}\tag{4.1}$$

donde E_{MAX} es la tensión pico de los generadores. Se tomará como referencia al generador v_2 , con lo cual $\phi_i = 0$. En la figura 4.1(b) se grafican las tensiones v_1 , v_2 y v_3 en función de ωt . por razones que se comprenderán a posteriori, es conveniente hallar ϕ , el mínimo argumento ωt correspondiente a la condición $v_1 = v_2$. Operando:

$$v_2 = v_1\tag{4.2}$$

$$E_{MAX} \text{sen} \phi = E_{MAX} \text{sen}(\phi + 2\pi/p)\tag{4.3}$$

$$\text{sen} \phi = \text{sen}(\phi + 2\pi/p)\tag{4.4}$$

Dado que $2\pi/p \leq \pi$ si $p > 2$ también se verifica que:

$$\text{sen} \phi = \text{sen}(\phi + 2\pi/p) = \text{sen}(\pi - \phi - 2\pi/p)\tag{4.5}$$

luego:

$$\phi + 2\pi/p = \pi - \phi - 2\pi/p\tag{4.6}$$

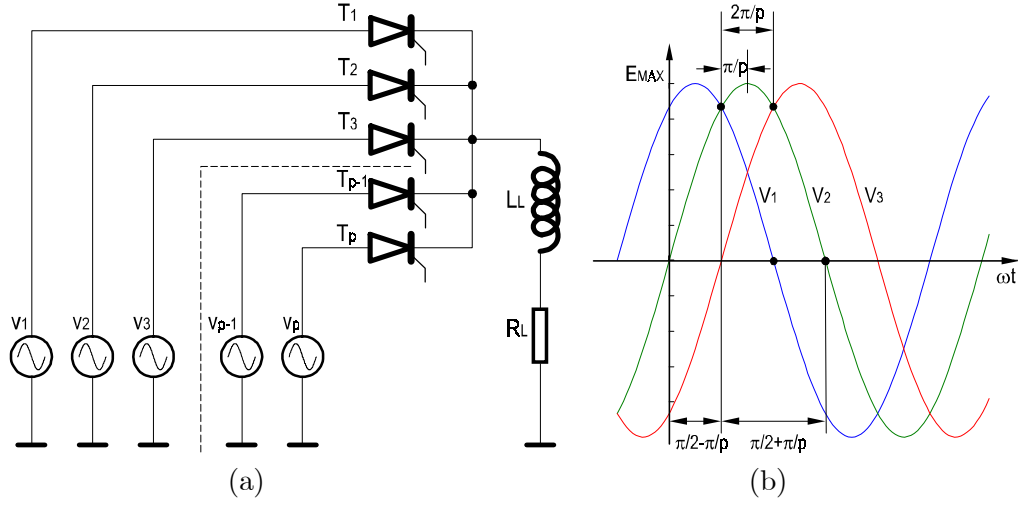


Figura 4.1: (a) Convertidor a tiristores; (b) v_1, v_2 y v_3 como función de ωt

o simplificando:

$$\phi = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{p} \quad (4.7)$$

La relación entre dichos ángulos puede verse en la figura 4.2(a) y los diferentes valores de ϕ para sistemas polifásicos típicos son los que se indican:

$$\begin{aligned} p = 2 & \quad \phi_2 = 0^\circ \\ p = 3 & \quad \phi_3 = 30^\circ \\ p = 6 & \quad \phi_6 = 60^\circ \\ p = 12 & \quad \phi_{12} = 75^\circ \\ p = 24 & \quad \phi_{24} = 82.5^\circ \end{aligned}$$

Llamando θ al ángulo correspondiente a la segunda intersección entre v_1 y v_2 , se tiene:

$$v_2 = v_1 \quad (4.8)$$

$$E_{MAX} \text{sen } \theta = E_{MAX} \text{sen } (\theta + 2\pi/p) \quad (4.9)$$

$$\text{sen } \theta = \text{sen } (\theta + 2\pi/p) \quad (4.10)$$

En este caso $\theta > \pi$, y $2\pi/p < \pi/2$ para $p > 2$ por lo tanto, de (4.10) se observa que satisface también:

$$\text{sen}(\theta) = \text{sen}(\theta + 2\pi/p) = -\text{sen}(2\pi - \theta - 2\pi/p) = \text{sen}(3\pi - \theta - 2\pi/p) \quad (4.11)$$

Esto implica que $\theta + 2\pi/p = 3\pi - \theta - 2\pi/p$ y entonces

$$\theta = \frac{3\pi}{2} - \frac{2\pi}{p} = \phi + \pi \quad (4.12)$$

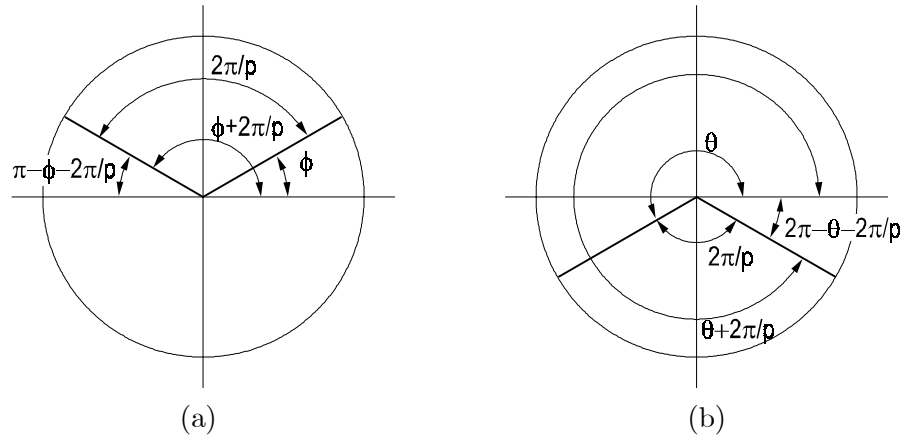


Figura 4.2: Relaciones de fase

donde la relación entre dichos ángulos puede verse en la figura 4.2(b). De la figura 4.1(b) se puede ver que para $\phi < \omega t < \pi + \phi$ se tiene $v_2 > v_1$. Por lo tanto, en este intervalo angular el tiristor **TH2** asociado a la fase 2 está en condiciones de ser disparado.

Definiendo el ángulo de disparo α a partir de ϕ , el control de la tensión promedio de salida V_2 se logra variando α entre 0 y 180° . figura 4.1(b).

4.1.1 Conducción continua

Evaluación de la tensión media como función de α

Cuando la carga es inductiva con condiciones de conducción continua (CCM), el valor de la tensión rectificadora E_D , promediado en el intervalo de conducción $2\pi/p$, es (ver figura 4.3).

$$E_D = \frac{p}{2\pi} \int_{\phi+\alpha}^{\phi+\alpha+2\pi/p} E_{MAX} \text{sen}(\omega t) d\omega t = \frac{p}{\pi} E_{MAX} \text{sen}\left(\frac{\pi}{p}\right) \cos(\alpha) \quad (4.13)$$

El valor máximo corresponde a $\alpha = 0^\circ$ y entonces

$$E_{D MAX} = E_{D0} = \frac{p}{\pi} E_{MAX} \text{sen}\left(\frac{\pi}{p}\right) \quad (4.14)$$

esto es

$$E_D = E_{D0} \cos(\alpha) \quad (4.15)$$

$$\frac{E_D}{E_{D0}} = \cos(\alpha) \quad (4.16)$$

En la figura 4.4 se grafica la tensión rectificadora (normalizada a E_{D0}) como función de α .

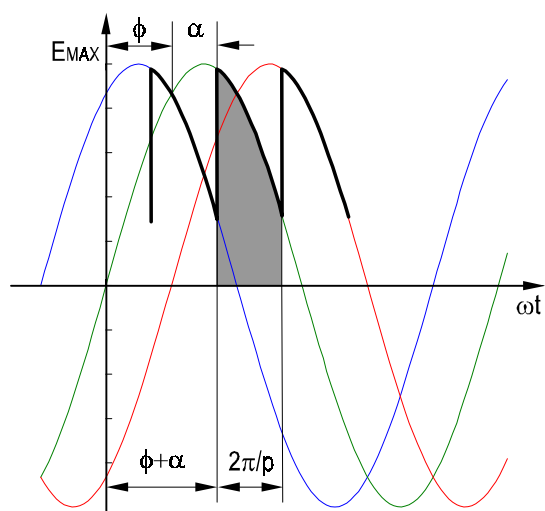


Figura 4.3: Tensión de salida de un convertidor.

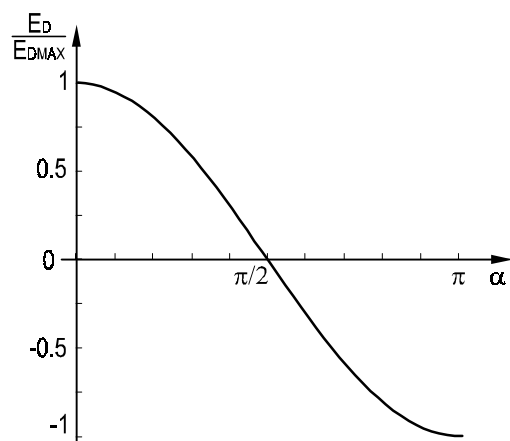


Figura 4.4: Tensión de salida normalizada en función de α para modo CCM.

Evaluación del ripple de salida (pico a pico)

El presente caso corresponde al de conducción continua con carga inductiva. Si el disparo se realiza con un ángulo α , el ángulo de final de conducción de esa fase será:

$$\alpha_F = \alpha + \frac{2\pi}{p} \quad (4.17)$$

Pueden darse tres casos para este *ripple*:

1. $\boxed{0 \leq \alpha \leq \pi/p}$

El valor máximo de la tensión de salida coincidirá con E_{MAX} (figura 4.5) y el valor pico a pico del *ripple* esta dado por:

$$E_{pp} = E_{MAX} - E_{MAX} [\text{sen}(\phi + \alpha_F)] \quad (4.18)$$

reemplazando α_F de la ecuación (4.17) en (4.18) esto es,

$$\frac{E_{pp}}{E_{MAX}} = 1 - \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{p} + \alpha + \frac{2\pi}{p}\right) \quad (4.19)$$

o

$$\boxed{\frac{E_{pp}}{E_{MAX}} = 1 - \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{p}\right)} \quad (4.20)$$

ver figura 4.5

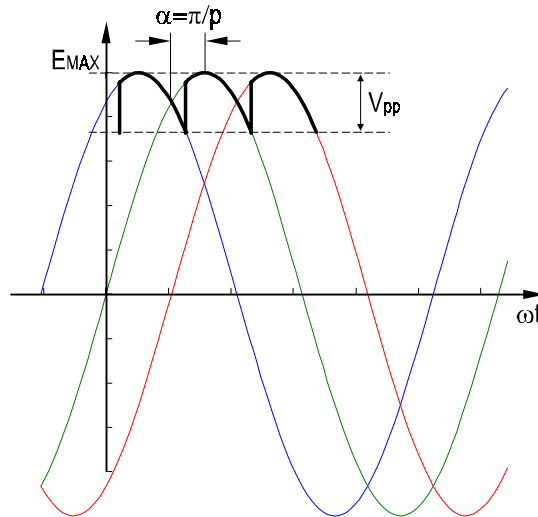


Figura 4.5: Evaluación del ripple de salida (pico a pico) para $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{p}$ (Caso 1).

$$2. \quad \boxed{\frac{\pi}{p} \leq \alpha \leq \pi - \frac{\pi}{p}}$$

$$\begin{aligned} v_2(\phi + \alpha) &= v_1(\phi + \alpha_F) \\ E_{pp} &= E_{MAX} \operatorname{sen}(\phi + \alpha) - E_{MAX} \operatorname{sen}(\phi + \alpha_F) \\ \frac{E_{pp}}{E_{MAX}} &= \operatorname{sen}(\pi/2 - \pi/p + \alpha) - \operatorname{sen}(\pi/2 - \pi/p + \alpha + 2\pi/p) \end{aligned}$$

recordando que $\operatorname{sen}(\pi/2 + \alpha) = \cos \alpha$ y $\operatorname{cos}(\pi/2 + \alpha) = -\operatorname{sen} \alpha$ se simplifica a:

$$\frac{E_{pp}}{E_{MAX}} = \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{p}\right) - \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{p}\right) \quad (4.22)$$

y utilizando la identidad trigonométrica $\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta) = 2 \operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \beta$ queda finalmente:

$$\boxed{\frac{E_{pp}}{E_{MAX}} = 2 \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{p}\right) \operatorname{sen}(\alpha)} \quad (4.23)$$

ver figura 4.6

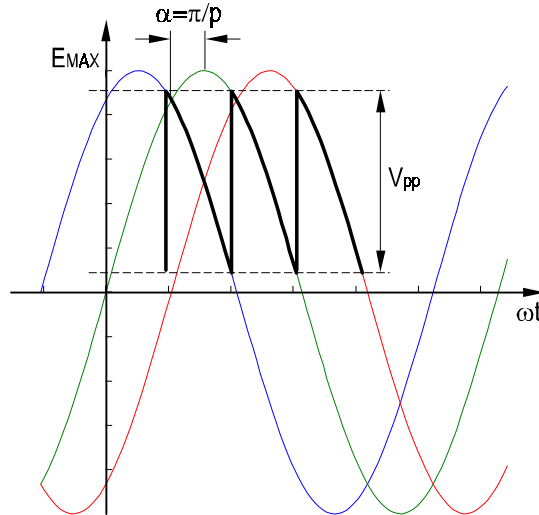


Figura 4.6: Evaluación del ripple de salida (pico a pico) para $\frac{\pi}{p} \leq \alpha \leq \pi - \frac{\pi}{p}$ (Caso 2).

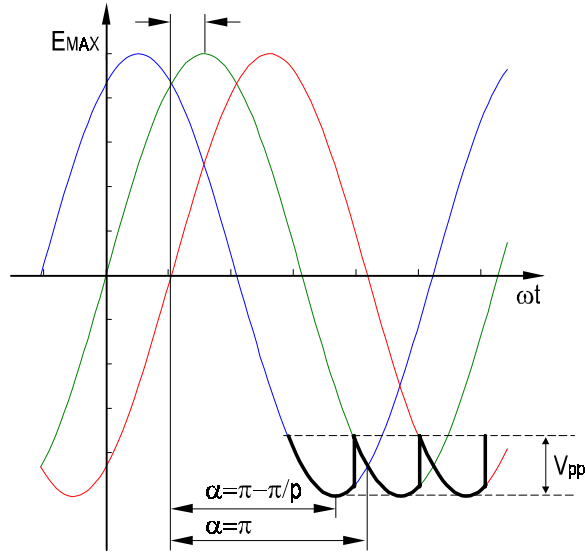


Figura 4.7: Evaluación del ripple de salida (pico a pico) para $\pi - \frac{\pi}{p} \leq \alpha \leq \pi$ (Caso 3).

3. $\pi - \frac{\pi}{p} \leq \alpha \leq \pi$

$$\begin{aligned}
 E_{pp} &= -(v_1 - v_2) \\
 E_{pp} &= -[-E_{MAX} - E_{MAX} \text{sen}(\phi + \alpha)] \\
 \frac{E_{pp}}{E_{MAX}} &= 1 + \text{sen}(\phi + \alpha) \\
 \frac{E_{pp}}{E_{MAX}} &= 1 + \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{p} + \alpha\right) \\
 \frac{E_{pp}}{E_{MAX}} &= 1 + \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{p}\right) \tag{4.24}
 \end{aligned}$$

El valor máximo de ripple en modo CCM se obtiene para $\alpha = 90^\circ$ que corresponde con el caso 2. Su valor resulta:

$$\left. \frac{E_{pp}}{E_{MAX}} \right|_{MAX} = 2 \text{sen}\left(\frac{\pi}{p}\right) = K \tag{4.25}$$

$$\begin{aligned}
 K &= 1.73 \quad \text{para } p = 3 \\
 K &= 1 \quad \text{para } p = 6 \\
 K &= 0.52 \quad \text{para } p = 12
 \end{aligned}$$

En la figura 4.8 se muestra el ripple de salida pico a pico normalizado para diferente cantidad de pulsos en Conducción Continua.

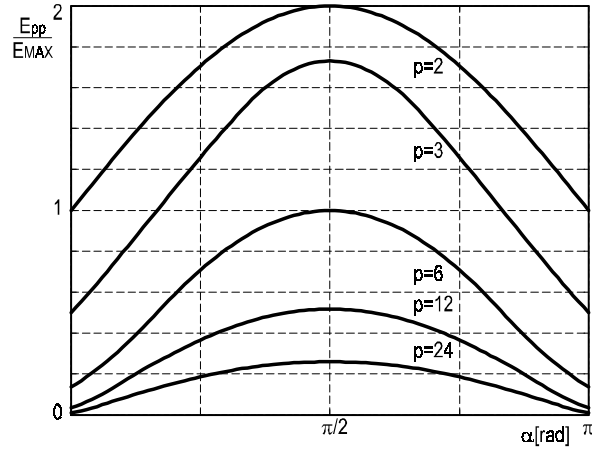


Figura 4.8: Ripple de salida pico a pico normalizado para diferente cantidad de pulsos en Conducción Continua.

4.1.2 Caso de carga con “diodo de rueda libre” (*free-wheel diode*). Modo CCM

En este caso particular, para poder disparar un tiristor debe ocurrir que $0 \leq \alpha \leq \pi/2 + \pi/p$, dado que la tensión de salida no puede tomar valores negativos a causa del diodo.

Evaluación de la tensión media como función de α

Aquí se pueden presentar dos casos:

1. $0 \leq \alpha \leq \pi/2 - \pi/p$

El sistema está en conducción continua y coincide con el primer caso discutido anteriormente (ecuación (4.15)),

$$E_D = E_{D0} \cos(\alpha) \quad (4.26)$$

2. $\pi/2 - \pi/p \leq \alpha \leq \pi/2 + \pi/p$

Para este caso la tensión media de salida valdrá:

$$E_D = \frac{p}{2\pi} \int_{\alpha + \pi/2 - \pi/p}^{\pi} E_{MAX} \sin(\omega t) d\omega t \quad (4.27)$$

$$E_D = \frac{p}{2\pi} E_{MAX} (-\cos \omega t) \Big|_{\alpha + \pi/2 - \pi/p}^{\pi} = \frac{p}{2\pi} E_{MAX} [1 + \cos(\alpha + \pi/2 - \pi/p)] \quad (4.28)$$

recordando la identidad trigonométrica:

$$\cos(\pi/2 + \alpha) = \sin(-\alpha) = -\sin(\alpha)$$

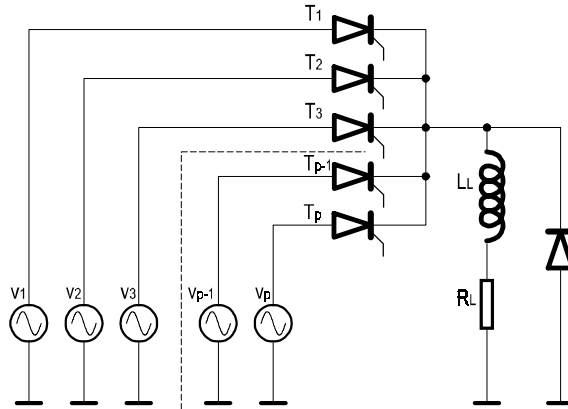


Figura 4.9: Convertidor a tiristores con diodo de rueda libre.

y reemplazando en (4.28)

$$E_D = E_{MAX} \frac{p}{2\pi} \left[1 - \text{sen} \left(\alpha - \frac{\pi}{p} \right) \right] \quad (4.29)$$

El valor de E_{MAX} se obtiene a partir de (4.14) y se reemplaza en (4.29) normalizando con respecto a E_{D0}

$$\boxed{\frac{E_D}{E_{D0}} = \frac{\left[1 - \text{sen} \left(\alpha - \frac{\pi}{p} \right) \right]}{2 \text{sen} \left(\frac{\pi}{p} \right)}} \quad (4.30)$$

En la figura 4.10 se muestra la tensión media de salida en función de α

Evaluación del ripple de salida (pico a pico)

Los casos posibles son tres:

1. $\alpha \leq \pi/2 - \pi/p$

A su vez este caso puede dividirse en dos más

(a) $0 \leq \alpha \leq \pi/p$ (válido para $p > 4$)

El ripple es el mismo que para conducción continua sin diodo de rueda libre (ecuación (4.20)),

$$\frac{E_{pp}}{E_{MAX}} = 1 - \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{p} \right) \quad (4.31)$$

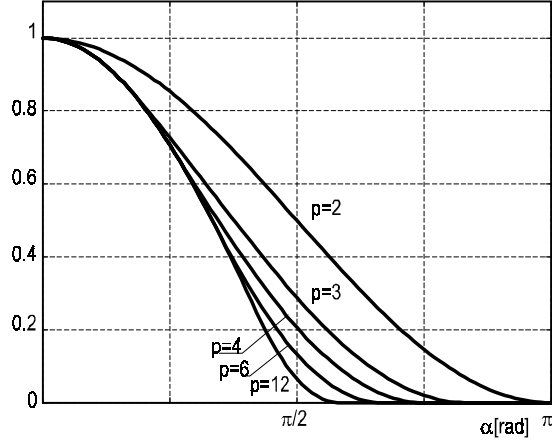


Figura 4.10: Tensión media de salida en función de α para diferente cantidad de pulsos.

- (b) $\pi/p < \alpha < \pi/2 - \pi/p$ (válido para $p > 5$)

En este caso se puede calcular, dentro de los límites impuestos, la tensión de ripple igual que en el caso de la ecuación (4.22),

$$E_{pp} = E_{MAX} \sin(\phi + \alpha) - E_{MAX} \sin(\phi + \alpha_F) \quad (4.32)$$

$$\frac{E_{pp}}{E_{MAX}} = \sin(\pi/2 - \pi/p + \alpha) - \sin(\pi/2 - \pi/p + \alpha + 2\pi/p) \quad (4.33)$$

$$\frac{E_{pp}}{E_{MAX}} = \cos(\alpha - \pi/p) - \cos(\alpha + \pi/p) \quad (4.34)$$

recordando que $\cos(\pi/2 + \alpha) = -\sin \alpha$

$$\frac{E_{pp}}{E_{MAX}} = 2 \sin\left(\frac{\pi}{p}\right) \sin(\alpha) \quad (4.35)$$

2. $\pi/2 - \pi/p \leq \alpha \leq \pi/p$ (válido para $p = 2$ y $p = 3$)

esta zona es válida para. En este caso y teniendo en cuenta que la tensión de salida no puede invertirse se obtiene.

$$\frac{E_{pp}}{E_{MAX}} = 1 \quad (4.36)$$

3. $\pi/p \leq \alpha \leq \pi/2 + \pi/p$ (válido para $p > 2$)

esta zona es válida para más de tres fases

$$\frac{V_{pp}}{V_{MAX}} = \sin(\alpha + \phi) = \cos(\alpha - \pi/p) \quad (4.37)$$

En la figura 4.11 se muestra el ripple de salida normalizado a V_{MAX} como función de α ($0 \leq \alpha \leq \pi$) para $p = 6, 12, 24$ sin diodo de rueda libre.

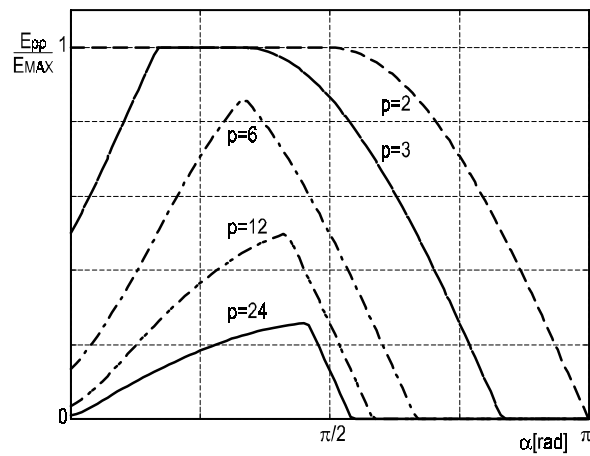


Figura 4.11: Ripple normalizado de salida en función de α .

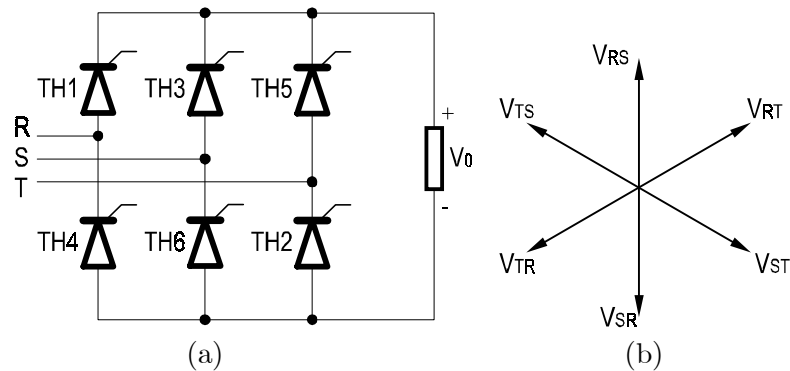


Figura 4.12: (a) Puente de 6 pulsos ($p = 6$); (b) Diagrama fasorial de tensiones

4.2 Topologías más usuales de Rectificadores Controlados

En la figura 4.12(a) se presenta un puente de 6 pulsos. En la figura 4.12(b), en conjunto con las fases que alimentan al convertidor se puede observar una secuencia de disparo con $\alpha = 0^\circ$ para este puente. Aunque solo se indica el nuevo tiristor que se debe disparar, un sistema de disparo debe generar pulsos adicionales que son necesarios cuando se inicia la secuencia o cuando la corriente que circula por ellos es muy pequeña. Para $p = 6$ se generan dos pulsos simultáneamente. Por ejemplo la secuencia sería: **TH6-TH1**, **TH1-TH2**, **TH2-TH3**, **TH3-TH4**, **TH4-TH5**, **TH5-TH6**. En condiciones en las que la corriente que circula por los tiristores es pequeña, los mismos deben ser redispados para que puedan mantenerse en conducción. La cantidad de pulsos de disparo que se deben generar está relacionada con la topología; para $p = 6$ se generan 2 pulsos de disparo, si $p = 12$, se deben generar 4 pulsos, y 8 pulsos con $p = 24$ en configuraciones puente.

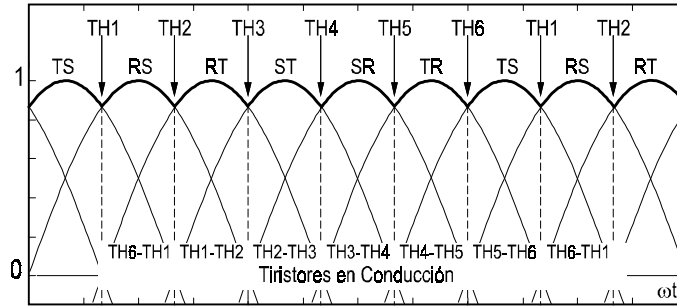


Figura 4.13: Conducción de los tiristores para $\alpha = 0^\circ$.

4.2.1 Topología serie, $p = 12$

Para obtener, a partir de la red trifásica, una tensión rectificadora variable de índice de pulsación igual a 12, se utiliza normalmente la conexión en serie de dos puentes completos con seis tiristores cada uno cada uno, cuyas formas de tensión rectificadora están decaladas $\frac{\pi}{6}$.

En la figura 4.14, se ha dibujado, a partir de las tensiones V_{RS} , V_{ST} , V_{TR} y V_{UV} , V_{VW} , V_{WU} , el diagrama de conducción de los doce tiristores. Las tensiones restantes se obtienen a partir de las negadas de las anteriores, tal como se indica en la figura 4.12(a). Se observa la forma de onda de la tensión rectificadora V_D . En la misma figura se puede observar la secuencia de disparo de los tiristores T_{ij} .

4.2.2 Topología paralelo con reactor de interfase

Una buena utilización de topologías de convertidores puede ser obtenida colocando dos puentes de 6 pulsos en paralelo con un reactor de interfase. Esta configuración permite, frente a una topología paralelo convencional, la capacidad de poseer un mayor ángulo de conducción debido a que cada puente conduce independientemente del otro.

La ventaja de esta topología radica en la tensión compuesta que se obtiene con los dos puentes conduciendo $p/3$ por tiristor en lugar de $p/6$, lo que conduce a un mejor factor de forma de la corriente de línea. Pero debe tenerse en cuenta que la corriente de carga no debe ser menor que la corriente magnetizante del reactor de interfase. Si esto ocurre, la tensión de salida aumenta un 15%. Por eso con “cargas livianas” pueden existir problemas de inestabilidad en un lazo de control.

La extensión de estas topologías a otras que utilicen un mayor número de pulsos resulta sencilla. La diferencia se encuentra en la placa que controla la secuencia de disparo de los tiristores y en el sistema que genera las fases que alimentan a los convertidores.

Para una topología serie, con $p = 24$, la placa generadora de pulsos de disparo debe estar capacitada para enviar 8 pulsos de disparo, en vez de los 4 pulsos correspondientes para un sistema con $p = 12$. Finalmente, la cantidad de pulsos de disparo que se requieren depende preponderantemente de la topología utilizada.

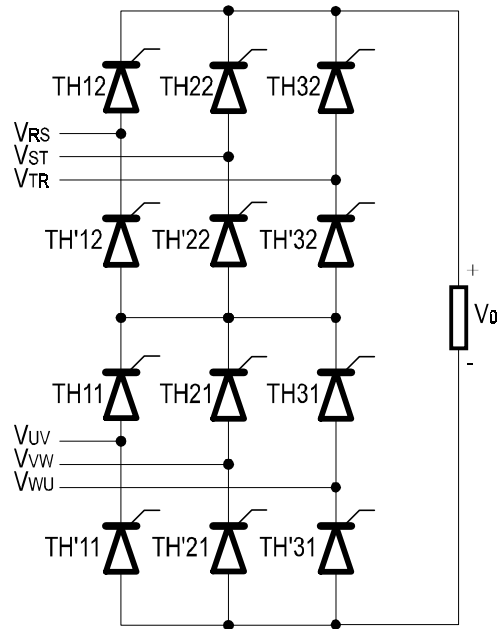


Figura 4.14: Topología serie, 12 pulsos

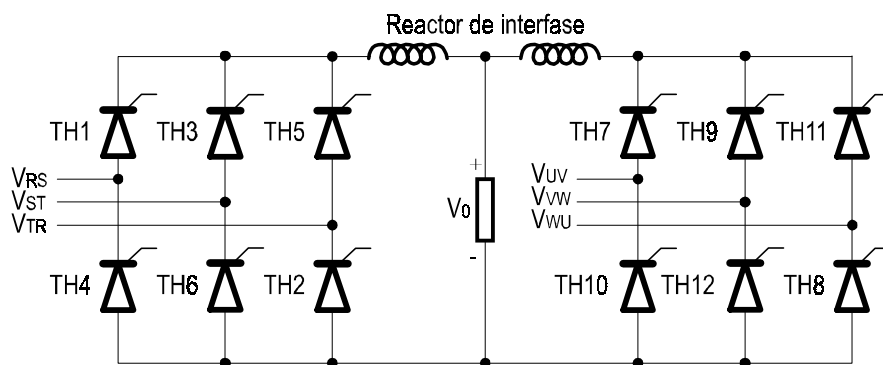


Figura 4.15: Arreglo paralelo con reactor de interfase.

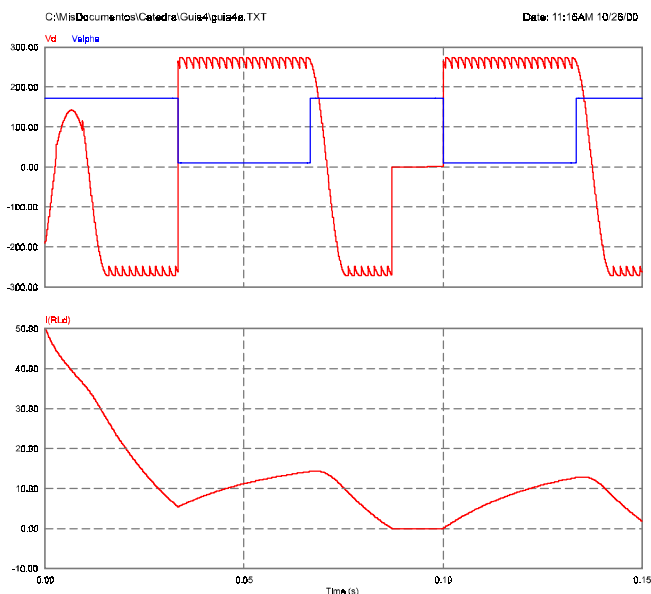
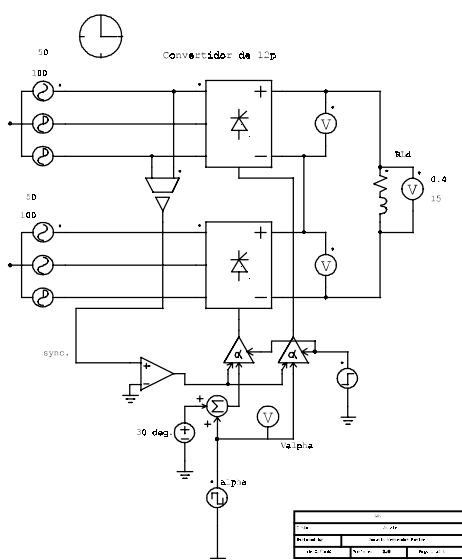
Conclusiones

- La tensión media de salida de los convertidores controlados depende del ángulo de disparo de los tiristores, y es una función no lineal del mismo: $E_D = E_{D0} \cos(\alpha)$ (CCM).
- El ripple de salida es función del ángulo de disparo y su frecuencia depende del número de pulsos ($\omega_R = p\omega_L$). (ver figura 4.11)
- Ante el caso de conducción con diodo de rueda libre, el ángulo de disparo está limitado a $0 < \alpha < \pi/2 + \pi/p$.
- La cantidad de pulsos de disparo está íntimamente relacionada con las topologías de conexión de los puentes de tiristores y con el número de fases .
- La secuencia de disparo de los tiristores debe estar en sincronismo con las fases que alimentan a los mismos.
- Por razones de seguridad, debido al solapamiento y a la no extinción de los tiristores en forma inmediata, hay que acotar en todos los casos el ángulo de disparo a valores inferiores a los límites teóricos.

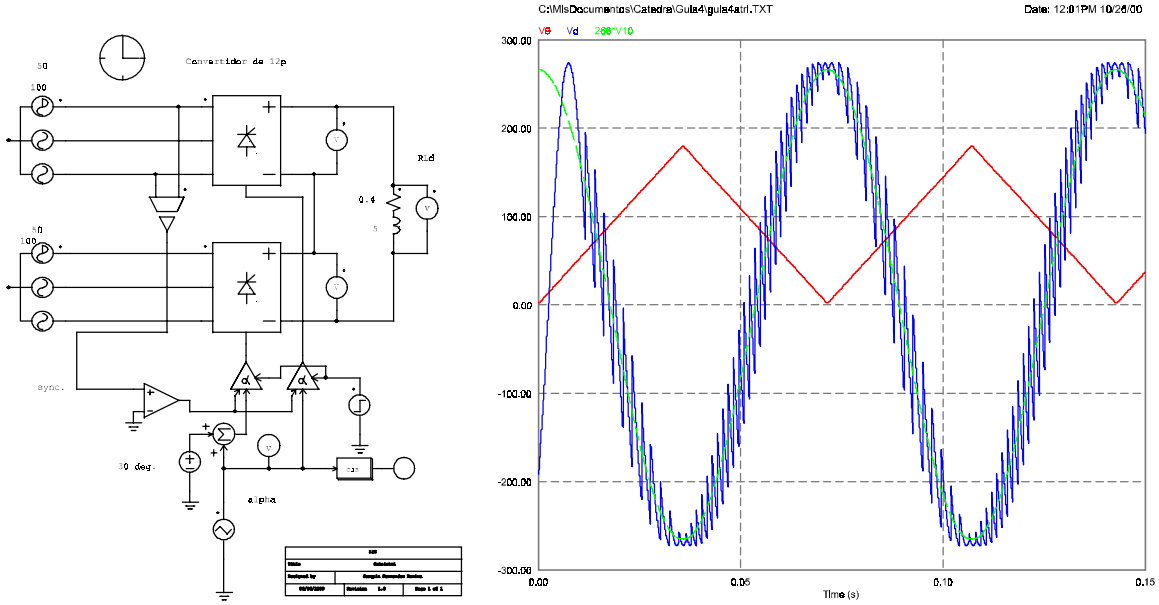
4.3 Ejercicios de Simulación

A continuación se muestran los esquemas y los resultados de diferentes simulaciones propuestas para que los alumnos se familiaricen con herramientas de simulación y afirmen los conceptos explicados.

1. Convertidor de 12 pulsos. La referencia cambia cíclicamente entre $\alpha = 0$ y $\alpha = 180^\circ$



2. Convertidor de 12 pulsos. La referencia es una triangular (rampa lineal). La salida es cosenoidal, siguiendo la relación descrita en la ecuación (4.16)



3. Convertidor de 12 pulsos. La referencia es una triangular (rampa lineal). La misma fue predistorsionada con la función $\arg \cos$ para obtener una relación lineal de entrada-salida.

