Javier Pereda
Profesor
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Pontificia Universidad Católica de Chile



IEE 2213
Máquinas Eléctricas

10. Accionamientos *(Motor Drives)*

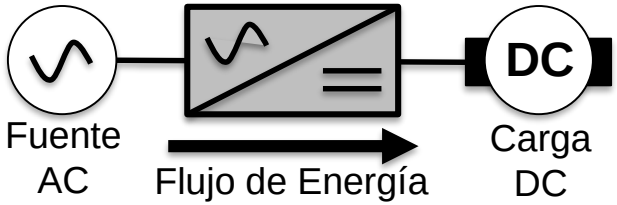
Clasificación de conversores; chopper buck, boost y buck-boost; puente H; rectificadores tiristorizados; el cicloconversor; el inversor convencional fuente de voltaje; el inversor convencional fuente de corriente; ejemplo de aplicaciones en generadores y motores; controles básicos de conversores y máquinas.

V.2018

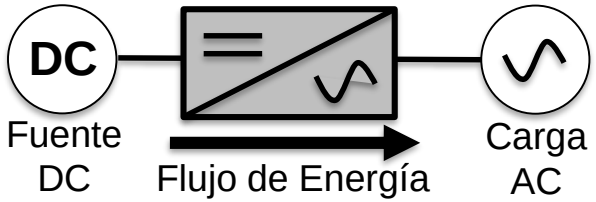
Conversores de Potencia

Clasificación

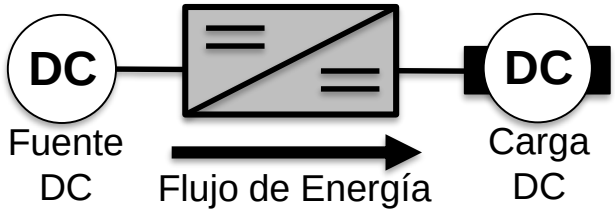
Conversor AC-DC: Rectificador



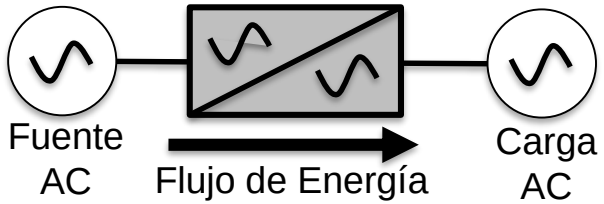
Conversor DC-AC: Inversor



Conversor DC-DC: Pulsador (Chopper)

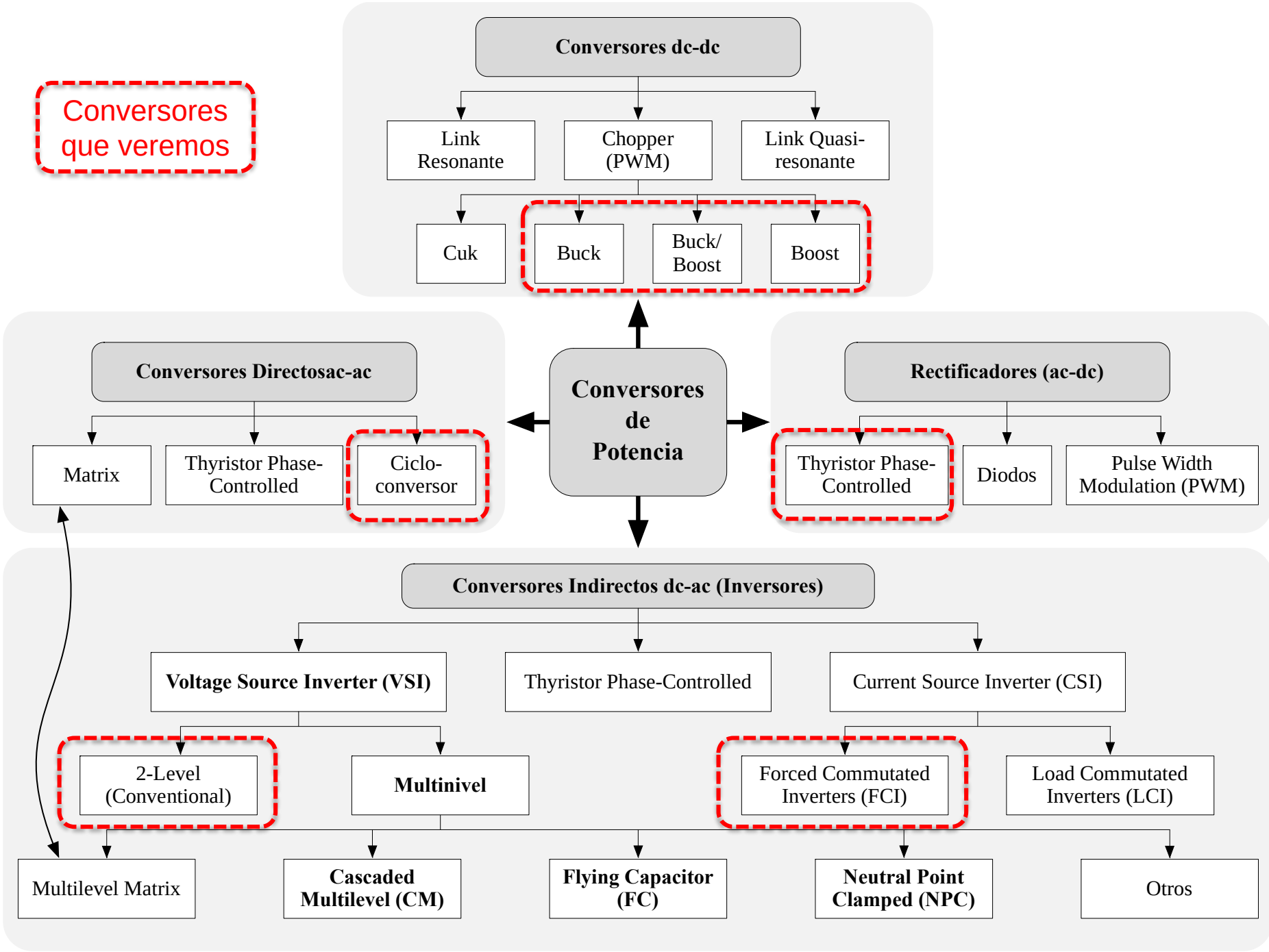


Conversor AC-AC: Cicloconversor

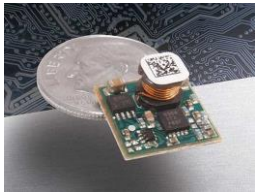


**Hay conversores que pueden invertir el flujo de energía y operar como distintos tipos de conversores (e.g. Inversor-rectificador).*

Conversores que veremos



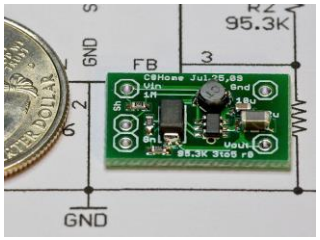
Conversores DC-DC
Chopper (Pulsadores)

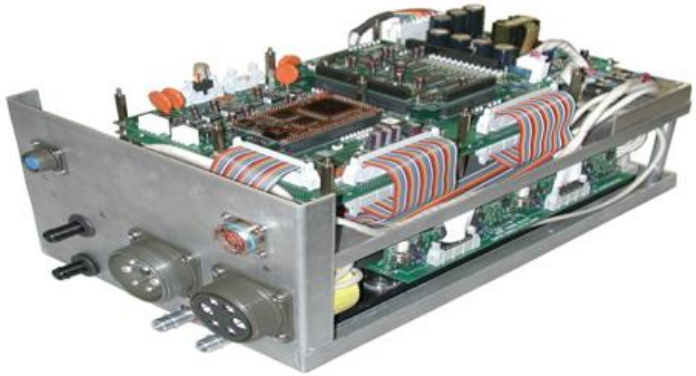








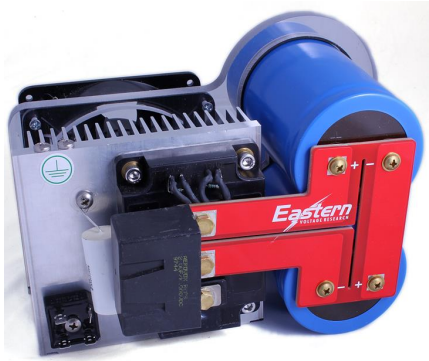














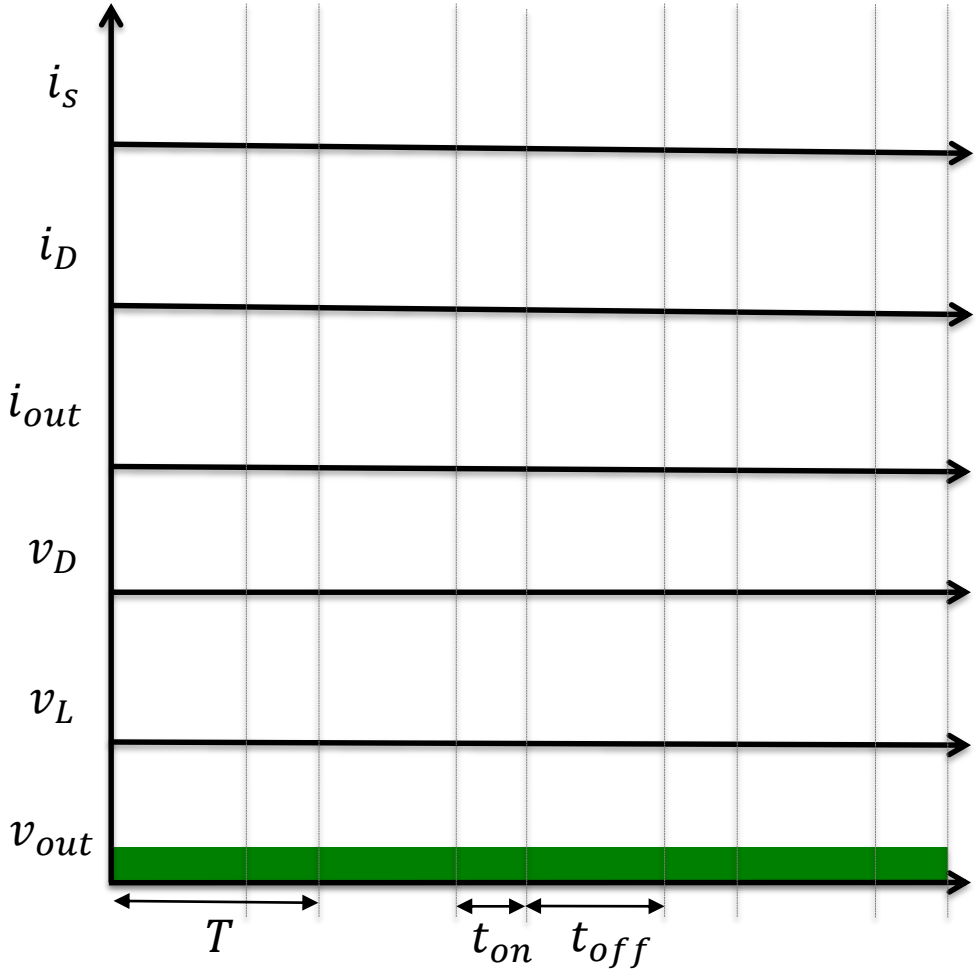


Buck Converter
(step-down)

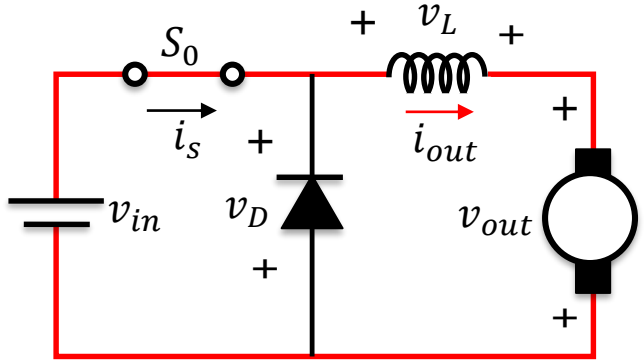


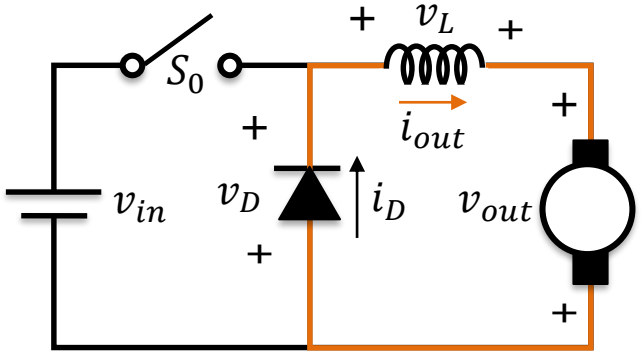
Buck (step-down) converter
Normal Operation

El Chopper Buck entrega un voltaje en la carga igual o menor al de la fuente y de igual polaridad.



*Operación en modo continuo

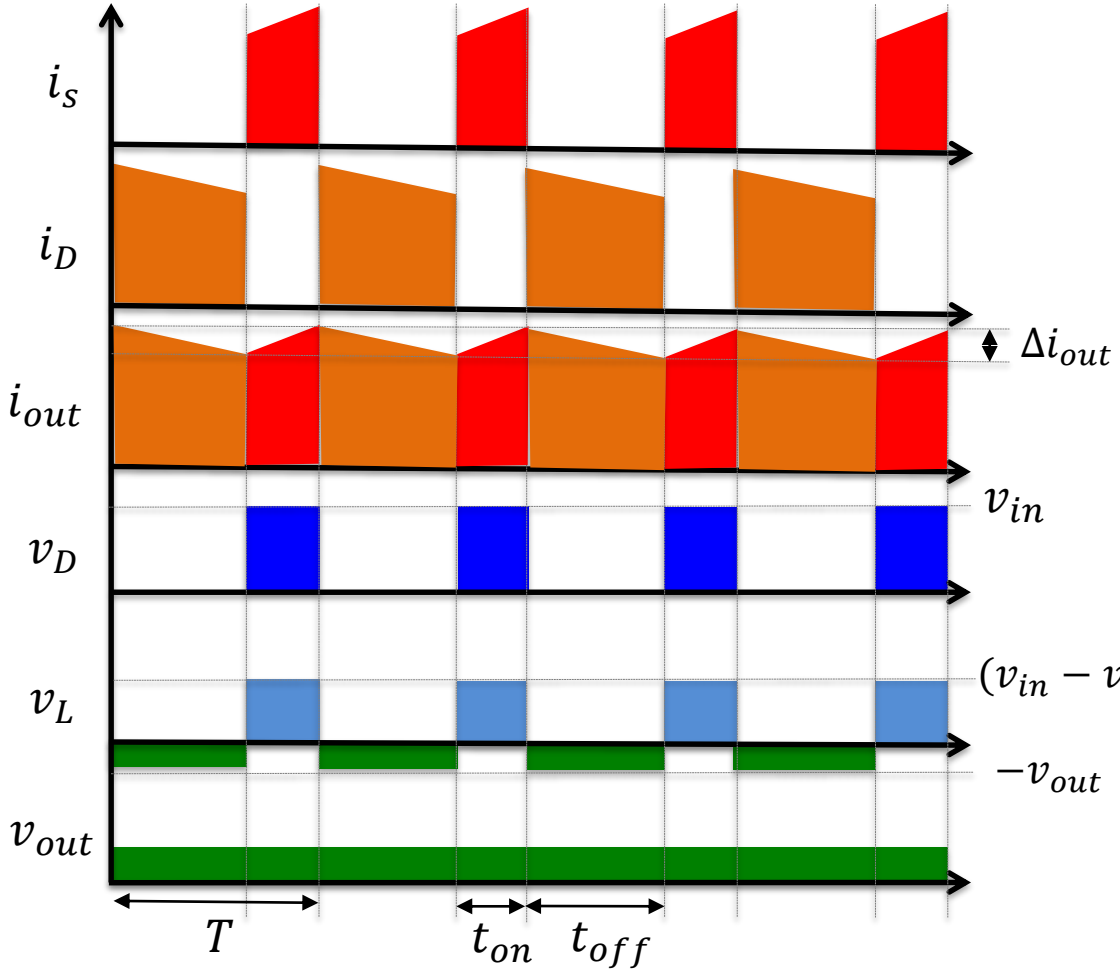


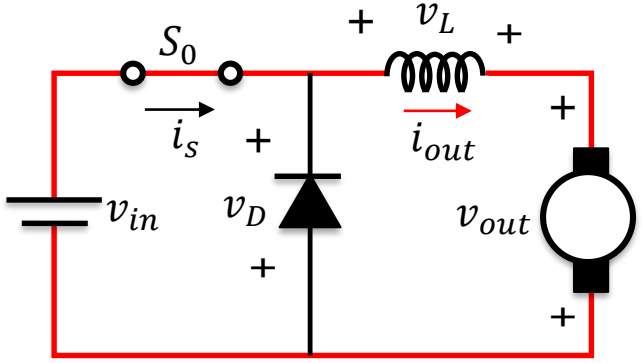


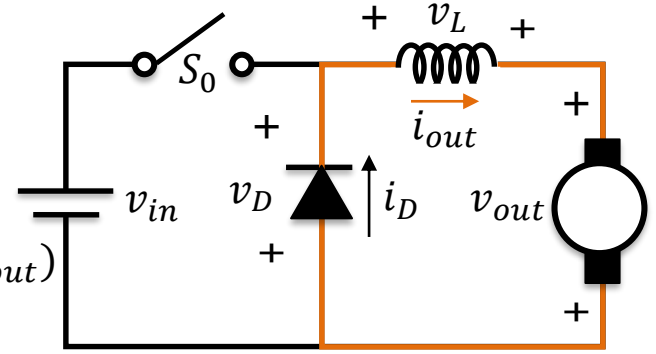
¿Dónde iría la máquina DC si funcionase como generador?

Buck (step-down) converter
Normal Operation

El Chopper Buck entrega un voltaje en la carga igual o menor al de la fuente y de igual polaridad.





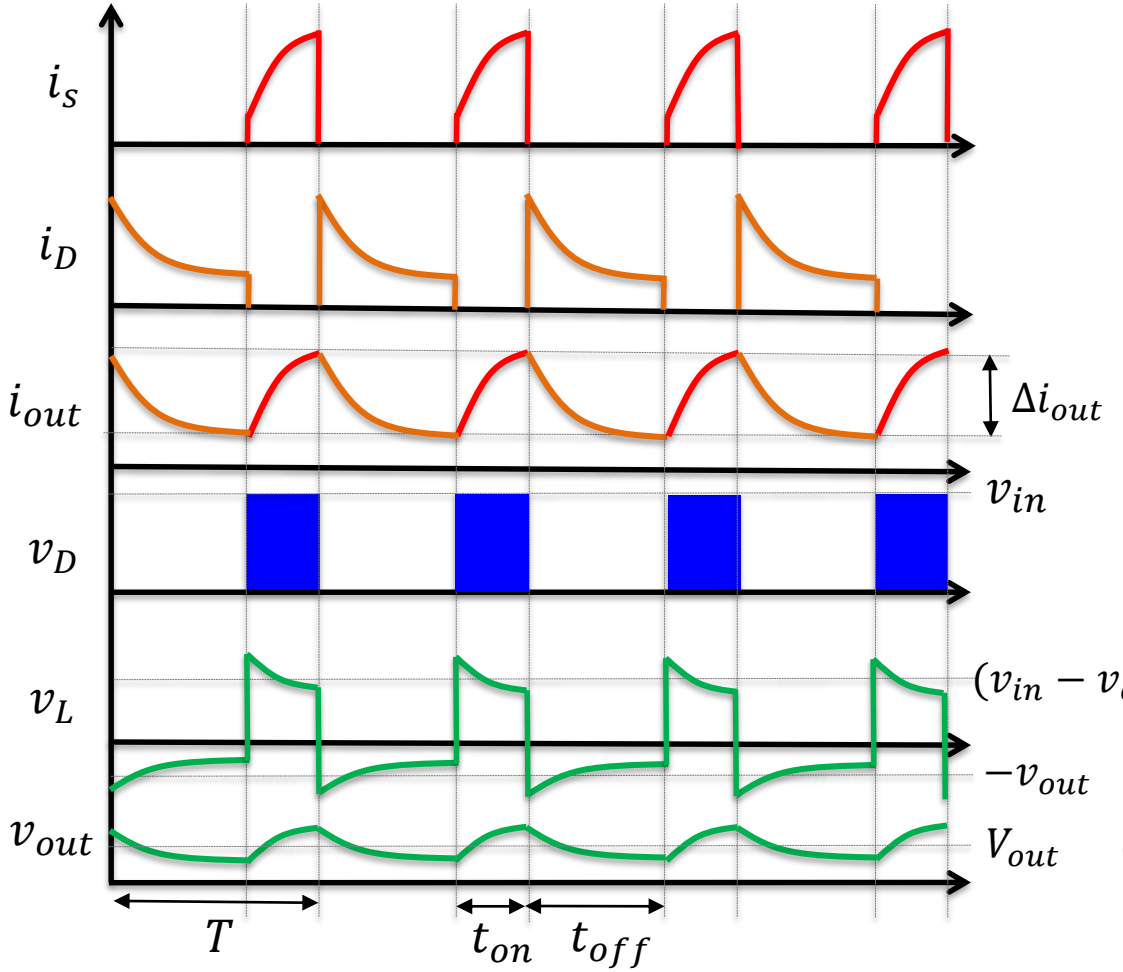


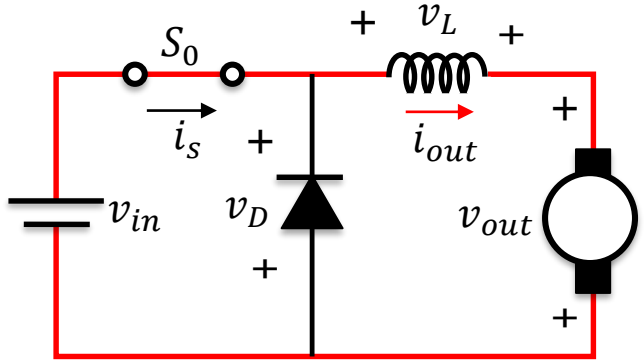
¿Dónde iría la máquina DC si funcionase como generador?

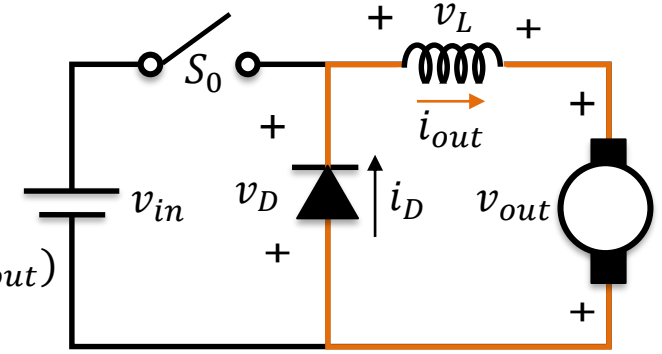
*Operación en modo continuo

Buck (step-down) converter
Normal Operation

Si suponemos que el inductor y la frecuencia no son suficientemente grandes.







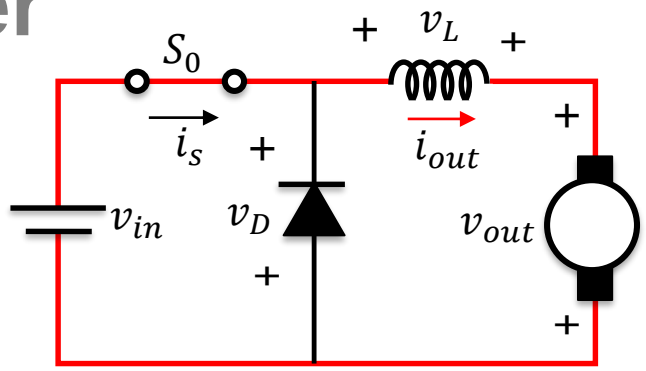
¿Dónde iría la máquina DC si funcionase como generador?

*Operación en modo continuo

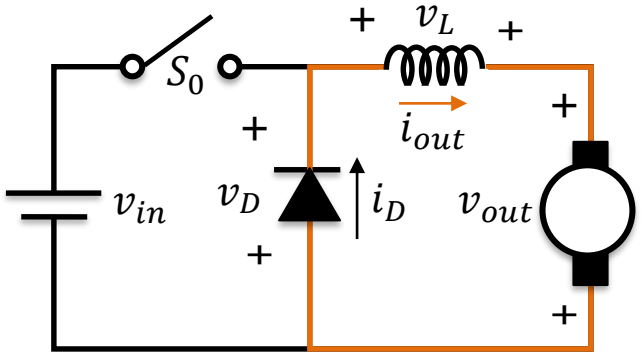
Buck (step-down) converter

Voltage ratio

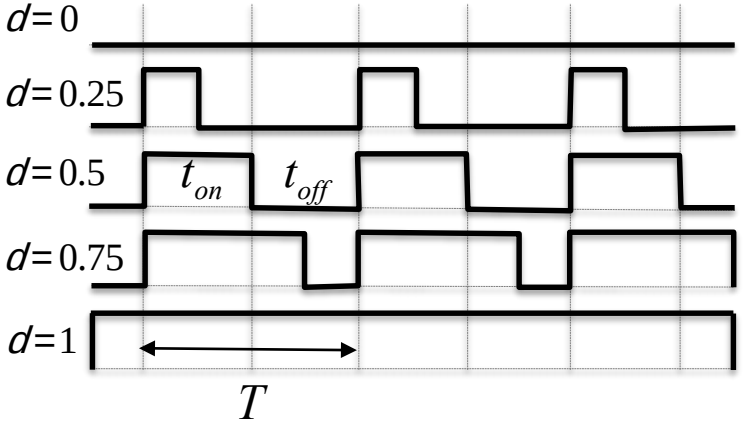
Calculemos la relación de voltajes:



Suponemos operación en régimen estacionario:



δ se llama ciclo de trabajo (Duty Cycle)



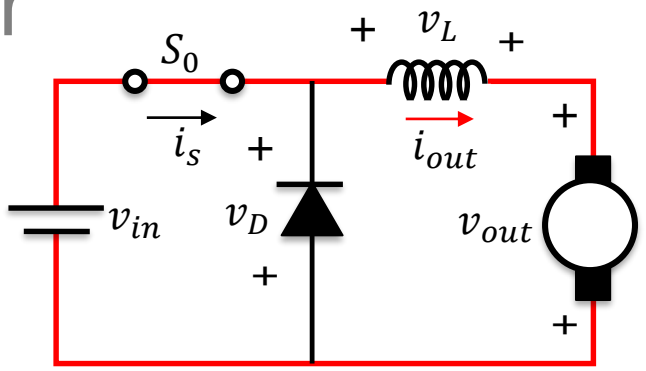
*Operación en modo continuo

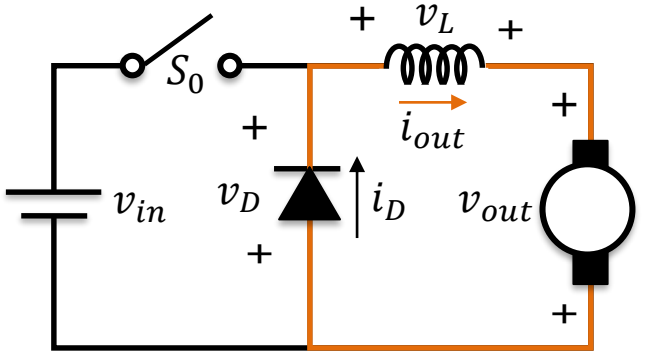
Buck (step-down) converter

Voltage ratio

Calculemos la relación de voltajes:

$$v_L = L\frac{di_{out}}{dt} \quad \begin{cases} \Delta i_{out}^{on} = \int_0^{t_{on}} \frac{v_L}{L}dt = \frac{v_{in} - v_{out}}{L}t_{on} \\ \Delta i_{out}^{off} = \int_{t_{on}}^{T} \frac{v_L}{L}dt = \frac{-v_{out}}{L}t_{off} \end{cases}$$





Suponemos operación en régimen estacionario:

$$E(t) = E(t+T) = \frac{1}{2}L \cdot {i_{out}}^2(t) \Rightarrow \Delta i_{out}^{on} = -\Delta i_{out}^{off}$$

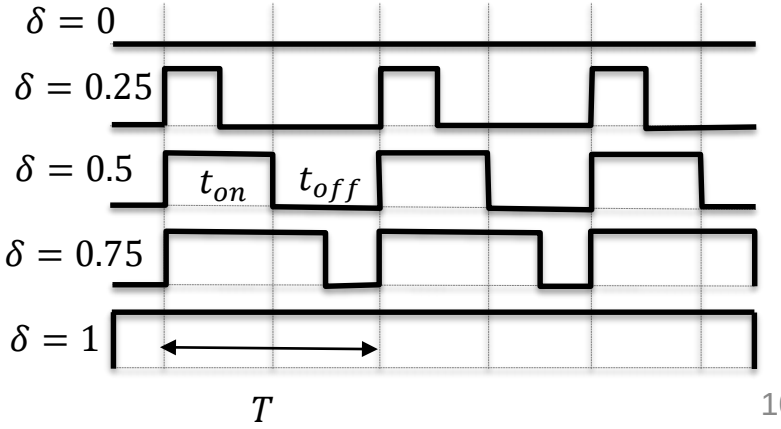
$$\frac{v_{in} - v_{out}}{L}t_{on} = \frac{v_{out}}{L}t_{off}$$

$$0 \le \delta \le 1$$

$$V_{out} \in [0, V_{in}]$$

$$v_{out} = \frac{t_{on}}{T} \cdot v_{in} = \delta \cdot v_{in}$$

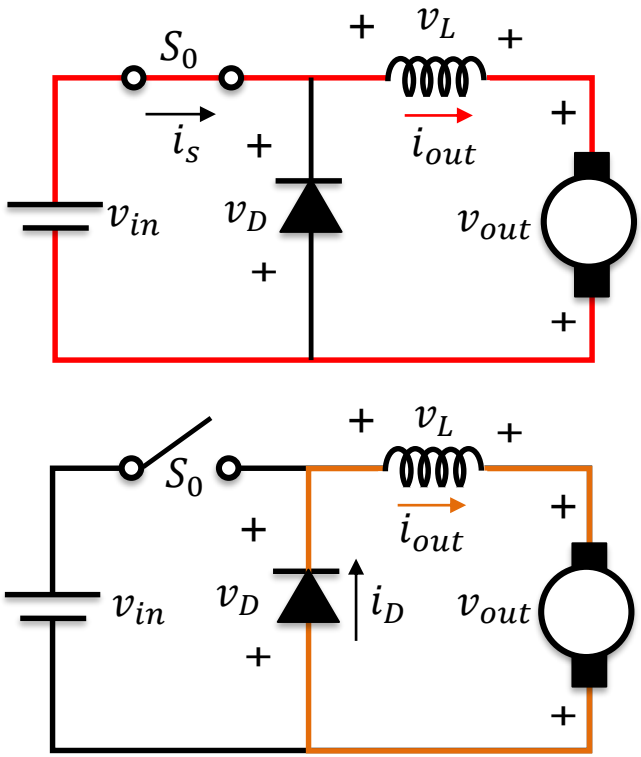
δ se llama ciclo de trabajo (Duty Cycle)



*Operación en modo continuo

Buck (step-down) converter
Current ripple

La pendiente de la corriente será:



*Operación en modo continuo

Buck (step-down) converter
Current ripple

BUCK

La pendiente de la corriente será:

$$v_D = R_a \cdot i_{out} + (L_a + L)\frac{di_{out}}{dt} + E_g$$

$$\frac{di_{out}}{dt} = \frac{v_D - (E_g + R_a \cdot i_{out} + L_a \cdot di_{out}/dt)}{L}$$

Sabemos que $v_{out} = E_g + R_a \cdot i_{out} + L_a \cdot di_{out}/dt$

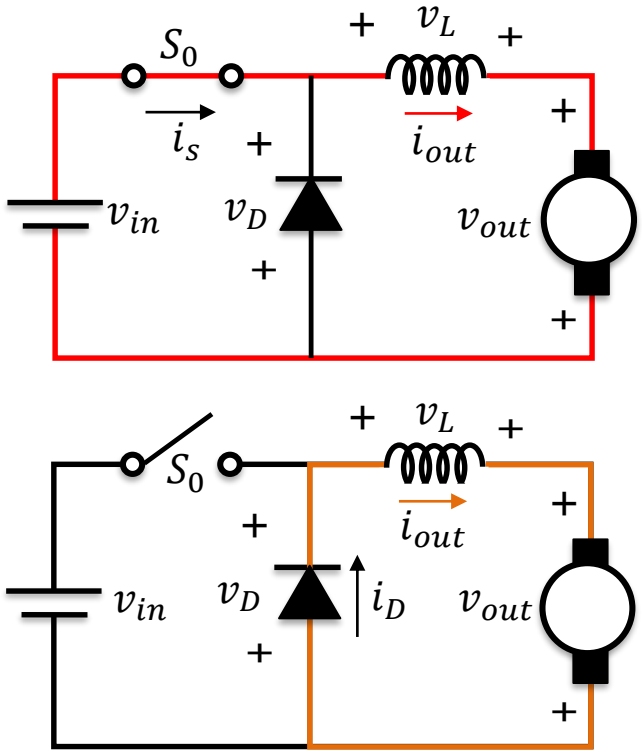
$$t_{on} \rightarrow \frac{di_{out}}{dt} = \frac{V_{in} - v_{out}}{L} = \frac{\Delta i_{out}}{t_{on}}$$

$$t_{off} \rightarrow \frac{di_{out}}{dt} = -\frac{v_{out}}{L} = -\frac{\Delta i_{out}}{T - t_{on}}$$

Entonces con cualquier ecuación:

$$\Delta i_{out} = \frac{v_{in}}{f \cdot L}\delta \cdot (1 - \delta)$$

Δi_{out} es inversamente proporcional a la frecuencia de conmutación f y a la inductancia L



*Operación en modo continuo

Buck (step-down) converter
Current ripple

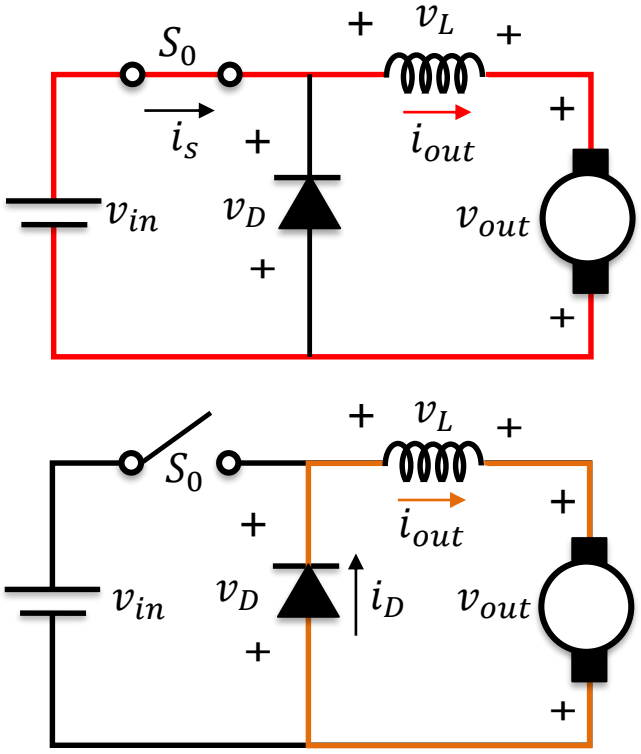
El máximo rizado se produce en δ=0.5 :

$$\Delta i_{out}^{max} = \frac{v_{in}}{4 \cdot f \cdot L}$$

El rizado no es deseable porque puede producir efectos degradantes en el sistema alimentado. Por ejemplo, un rizado de corriente en un motor DC generará un torque pulsante, lo que degrada la operación y causa daños en los rodamientos.

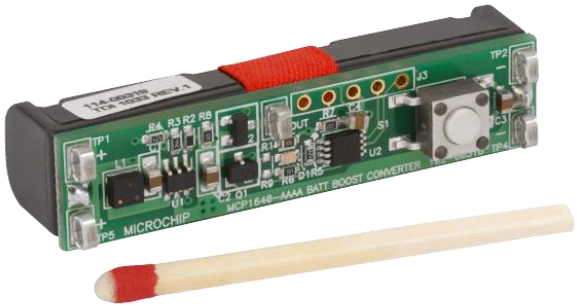
$$\Delta T_e = G \cdot i_c \cdot \Delta i_a$$

El rizado se puede reducir aumentando la **frecuencia de conmutación** pero esto aumenta las pérdidas en el semiconductor (se requiere disipador) y está limitada por el tipo semiconductor utilizado y la potencia requerida. Otra posibilidad es aumentar la **inductancia**, pero esto aumenta el volumen y peso. En motores pequeños se puede utilizar altísima ***f*** y eliminar la inductancia ***L*** (basta con L_a).



*Operación en modo continuo

Boost Converter
(step-up)





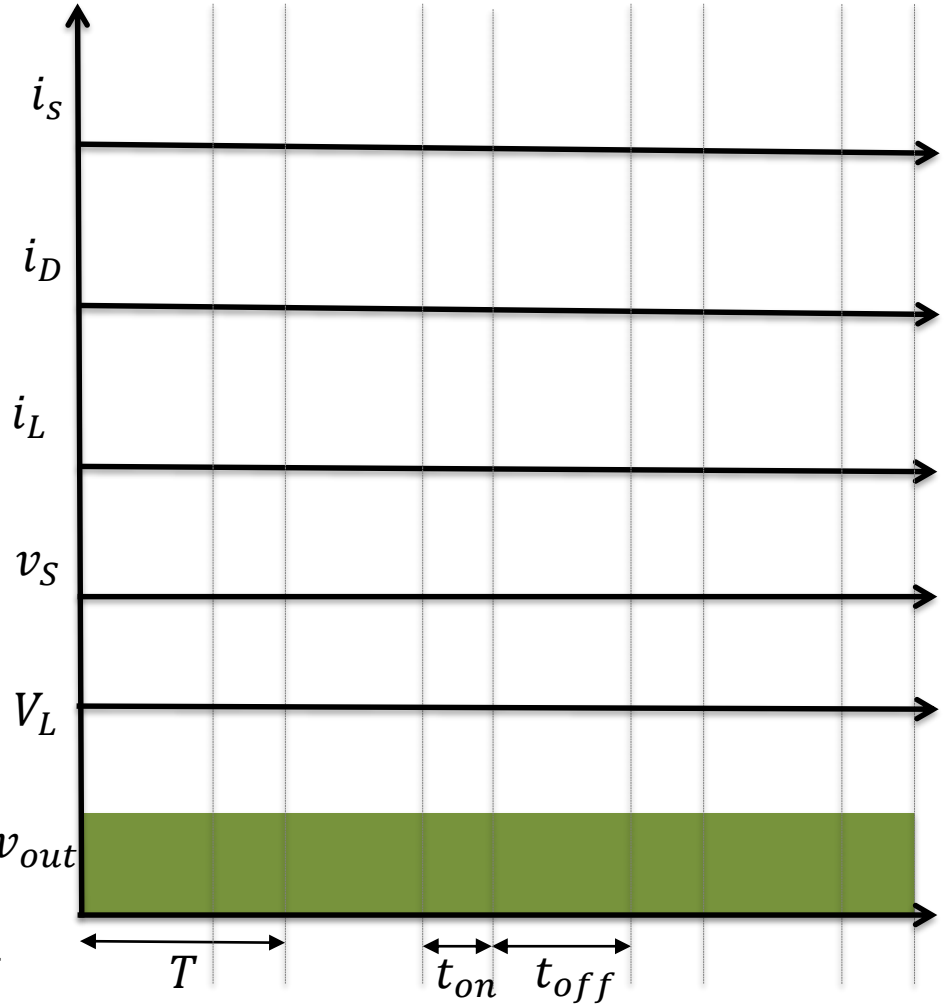
DC-DC Converters

Previous analysis: Step-up converter?

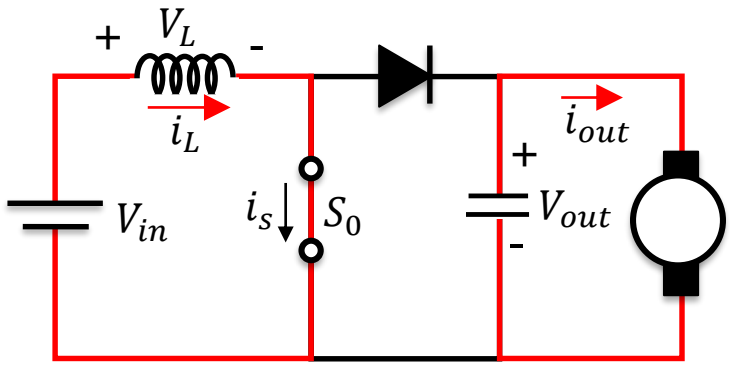
Using only a switch:

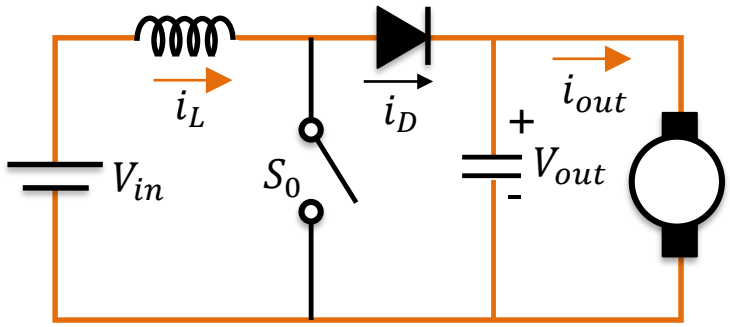
Boost (step-up) converter
Normal Operation

El Chopper Boost entrega un voltaje en la carga igual o mayor al de la fuente y de igual polaridad.



*Operación en modo continuo

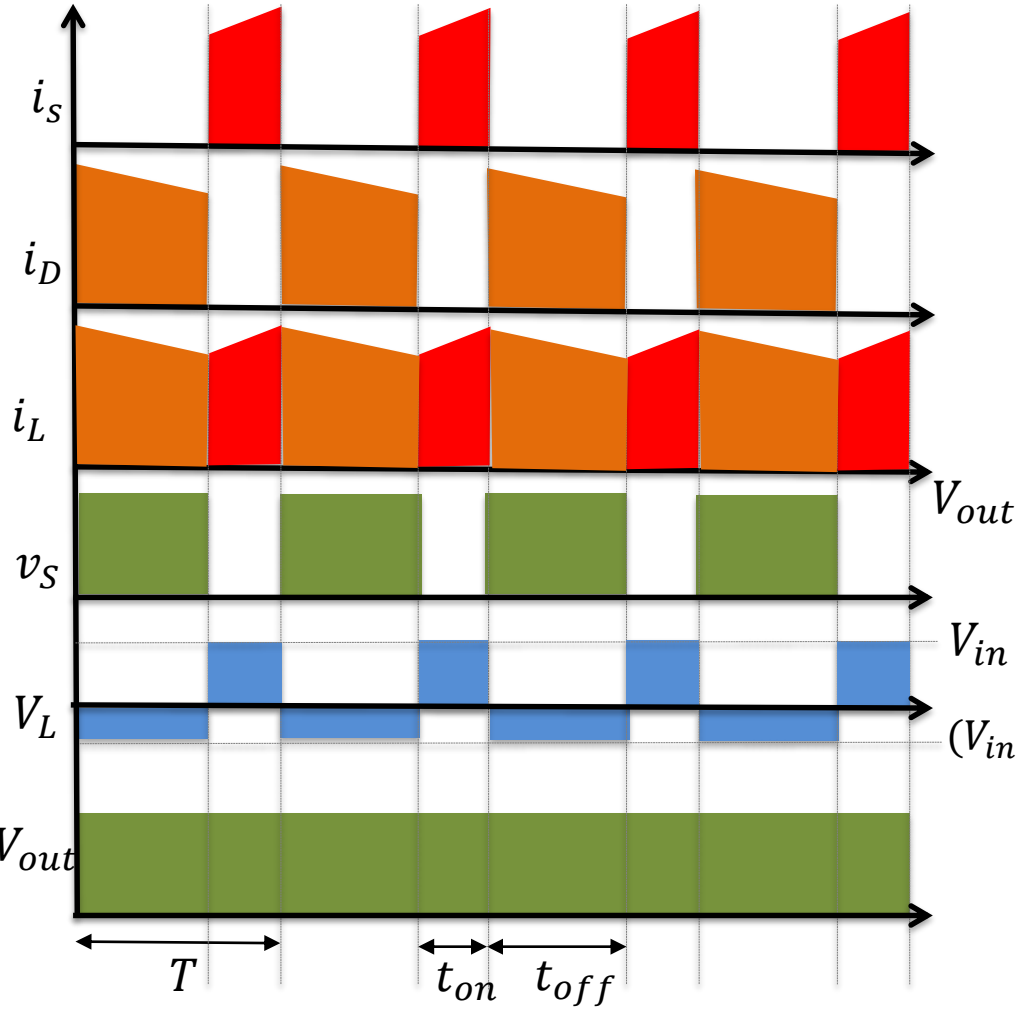


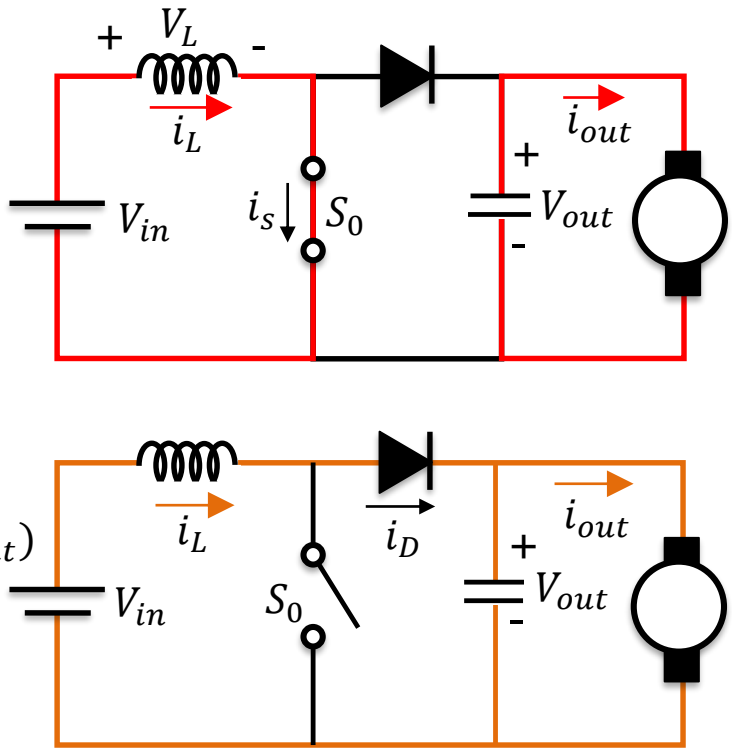


Boost (step-up) converter

Normal Operation

Si suponemos que el condensador es grande y la operación se realiza a muy alta frecuencia.



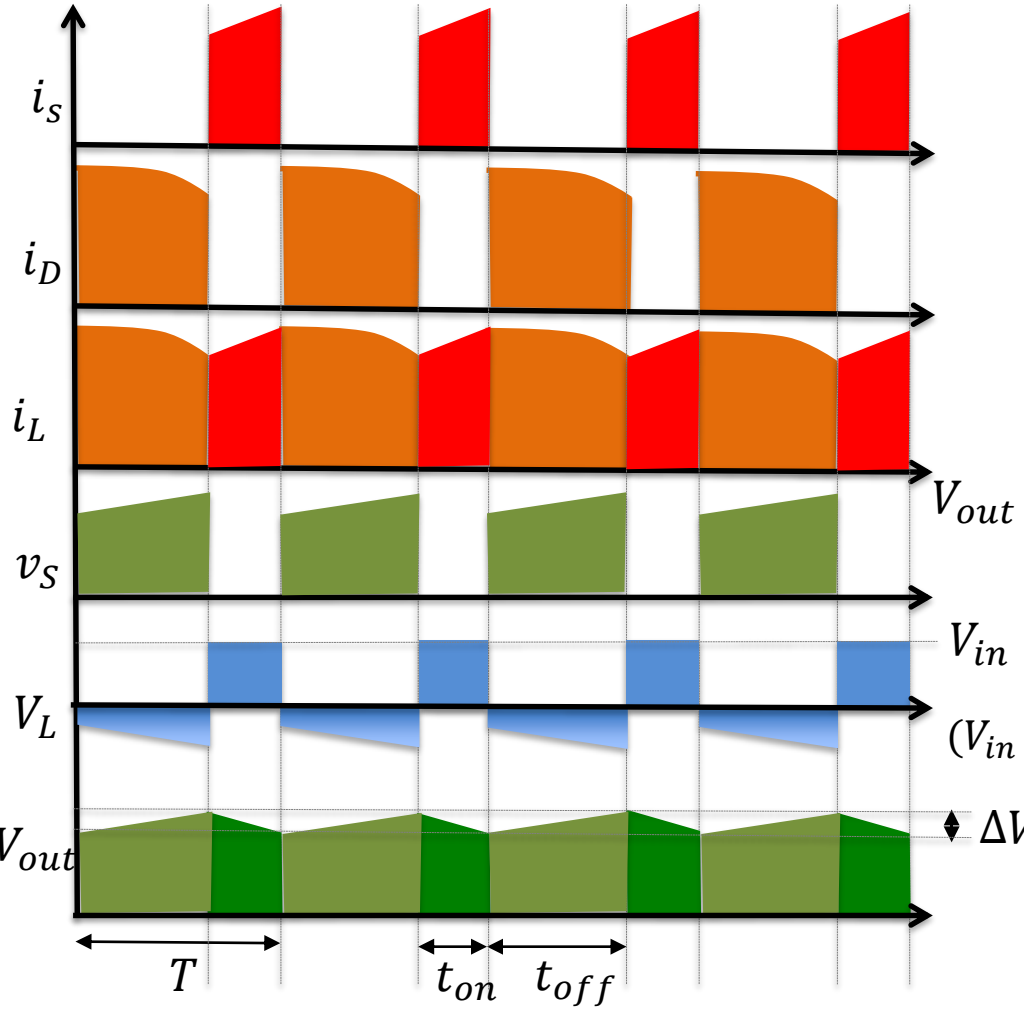


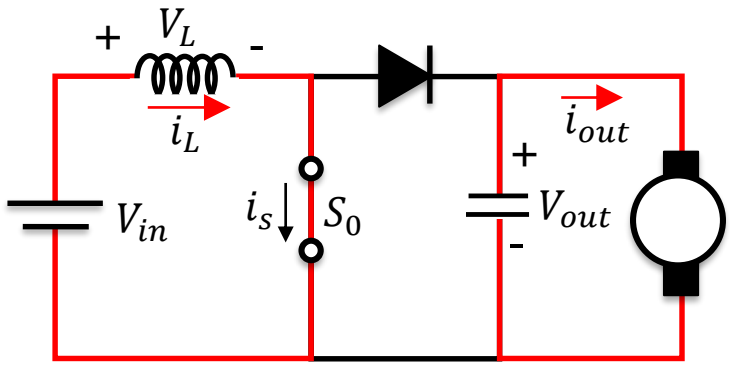
*Operación en modo continuo

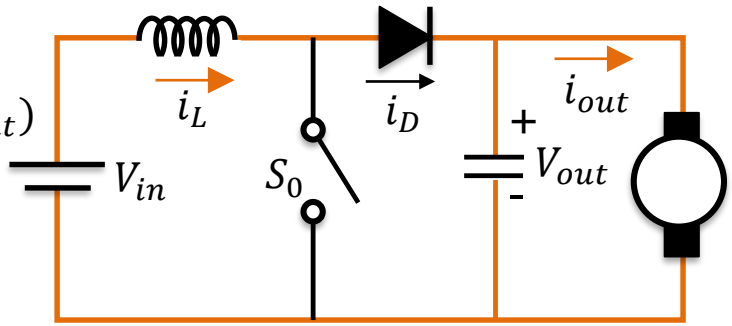
Boost (step-up) converter

Normal Operation

Si suponemos que el condensador y la frecuencia no son suficientemente grandes.







*Operación en modo continuo

Boost (step-up) converter

Voltage ratio

Calculemos la relación de voltajes despreciando el rizado del voltaje de salida (o viendo V_{out} promedio):

$$V_L = L\frac{di_L}{dt} \quad \begin{cases} \Delta i_L^{on} = \int_0^{t_{on}} \frac{V_L}{L}dt = \frac{V_{in}}{L}\delta \cdot T \\ \Delta i_{out}^{off} = \int_{t_{on}}^{T} \frac{V_{in}-V_{out}}{L}dt = \frac{V_{in}-V_{out}}{L}(1-\delta)\cdot T \end{cases}$$

Suponemos operación en régimen estacionario:

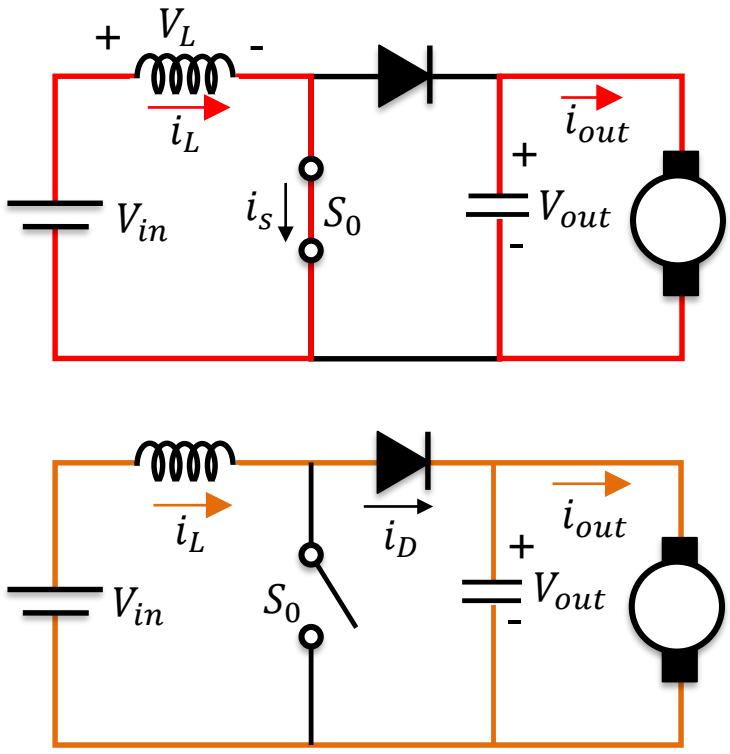
$$E(t) = E(t+T) = \frac{1}{2}L \cdot i_L(t)^2 \Rightarrow \Delta i_L^{on} = -\Delta i_L^{off}$$

$$\frac{V_{in}}{L}\delta \cdot T = -\frac{V_{in}-V_{out}}{L}(1-\delta)\cdot T$$

$$0 \le \delta \le 1$$

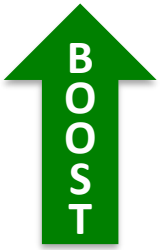
$$V_{out} \in [V_{in}, \infty]$$

$$V_{out} = \frac{1}{1-\delta}\cdot V_{in}$$



*Operación en modo continuo

Boost (step-up) converter
Real voltage ratio



Lamentablemente los componentes tienen pérdidas y elementos parásitos que distan de la teoría cuando el ciclo de trabajo es mayor a 50% aprox.:

$$0 \leq \delta \leq 1$$

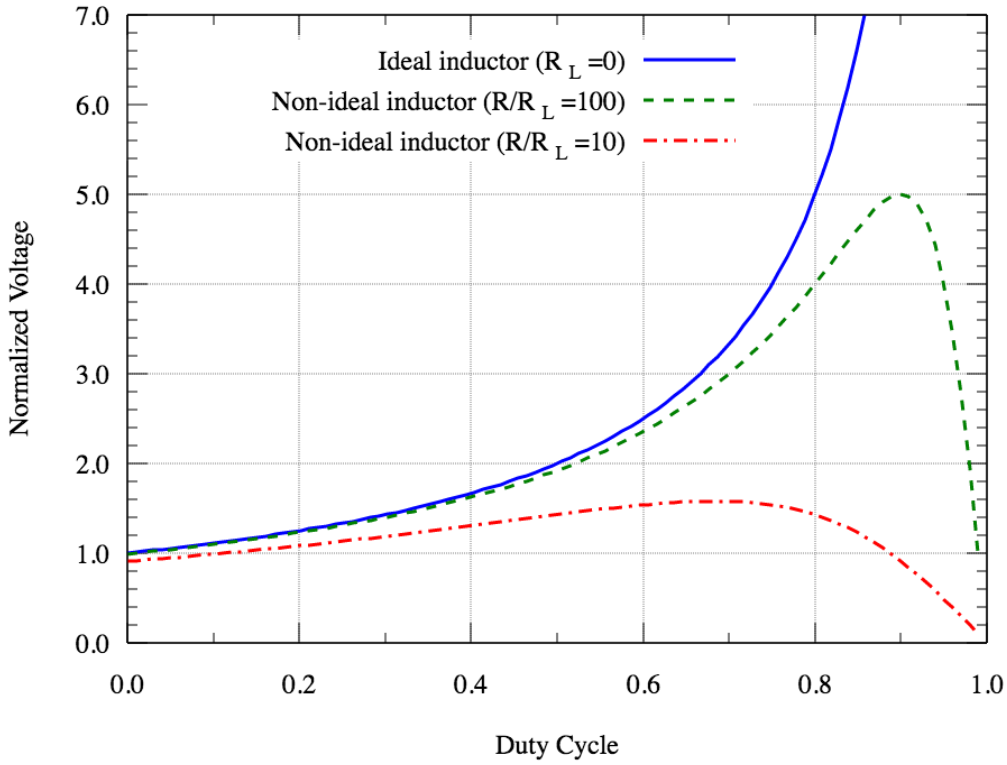
$$V_{out} \in [V_{in}, \infty]$$

$$V_{out} = \frac{1}{1-\delta} \cdot V_{in}$$

$R_L \neq 0$:

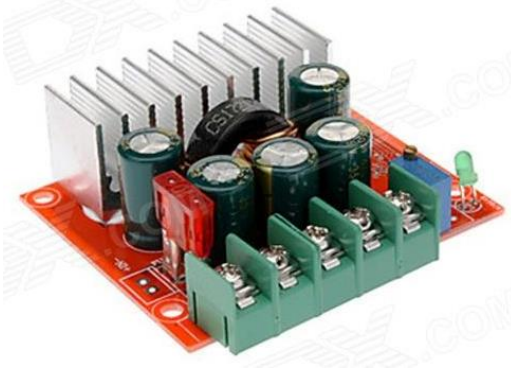
$$V_{out} = \frac{1}{\frac{R_L}{R \cdot (1-\delta)} + (1-\delta)} \cdot V_{in}$$

Un V_{out}/V_{in} realista puede ser 5



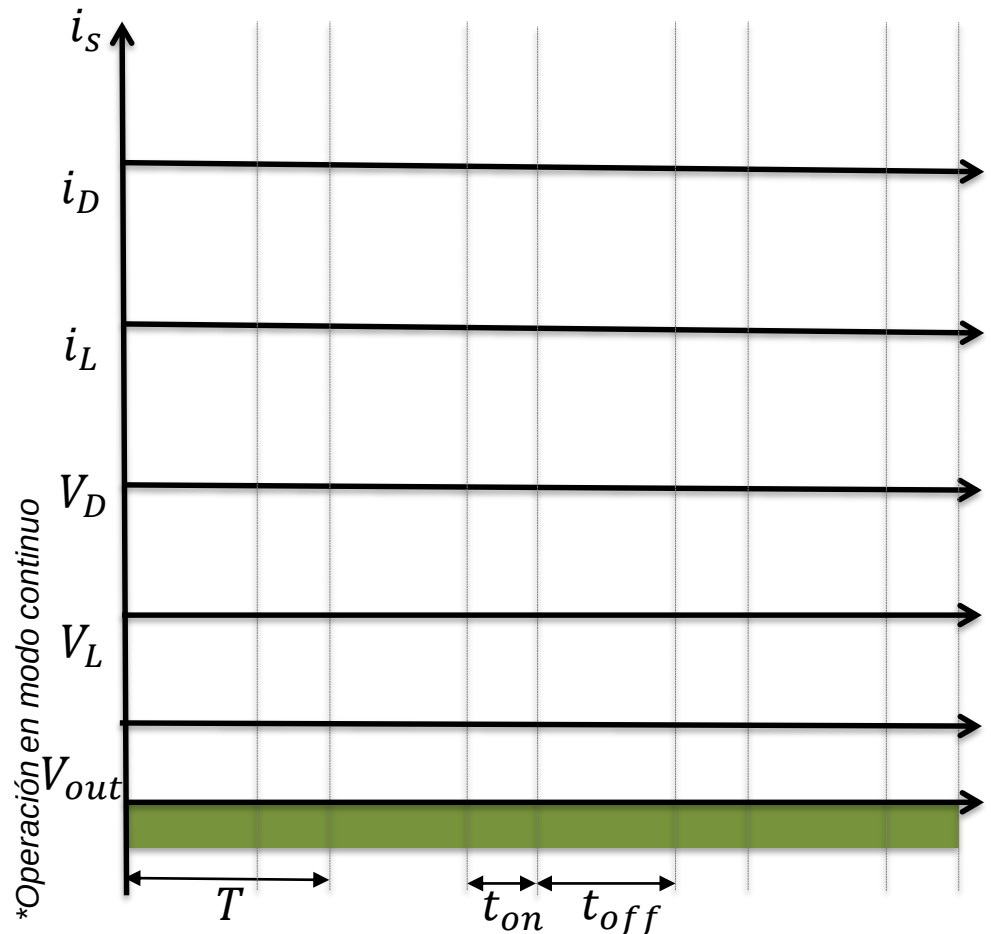
*Operación en modo continuo

Buck-Boost Converter

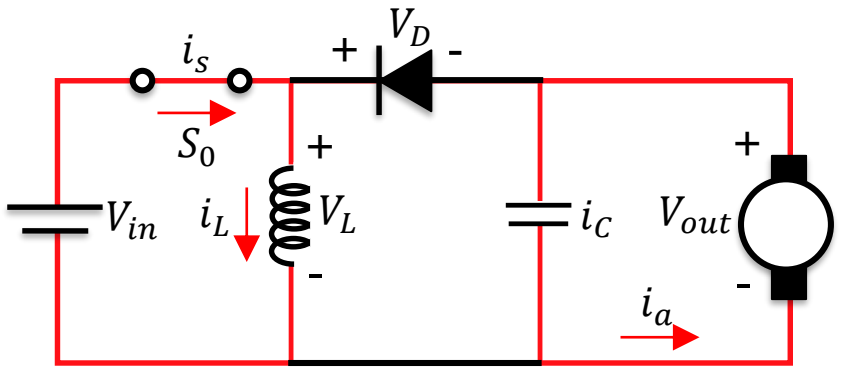


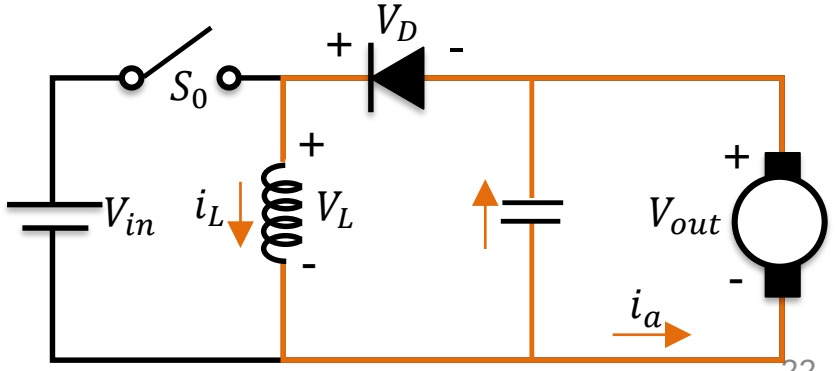
Buck-boost converter
Normal Operation

El Chopper Buck-Boost entrega un voltaje en la carga menor, igual o mayor al de la fuente pero de polaridad inversa.



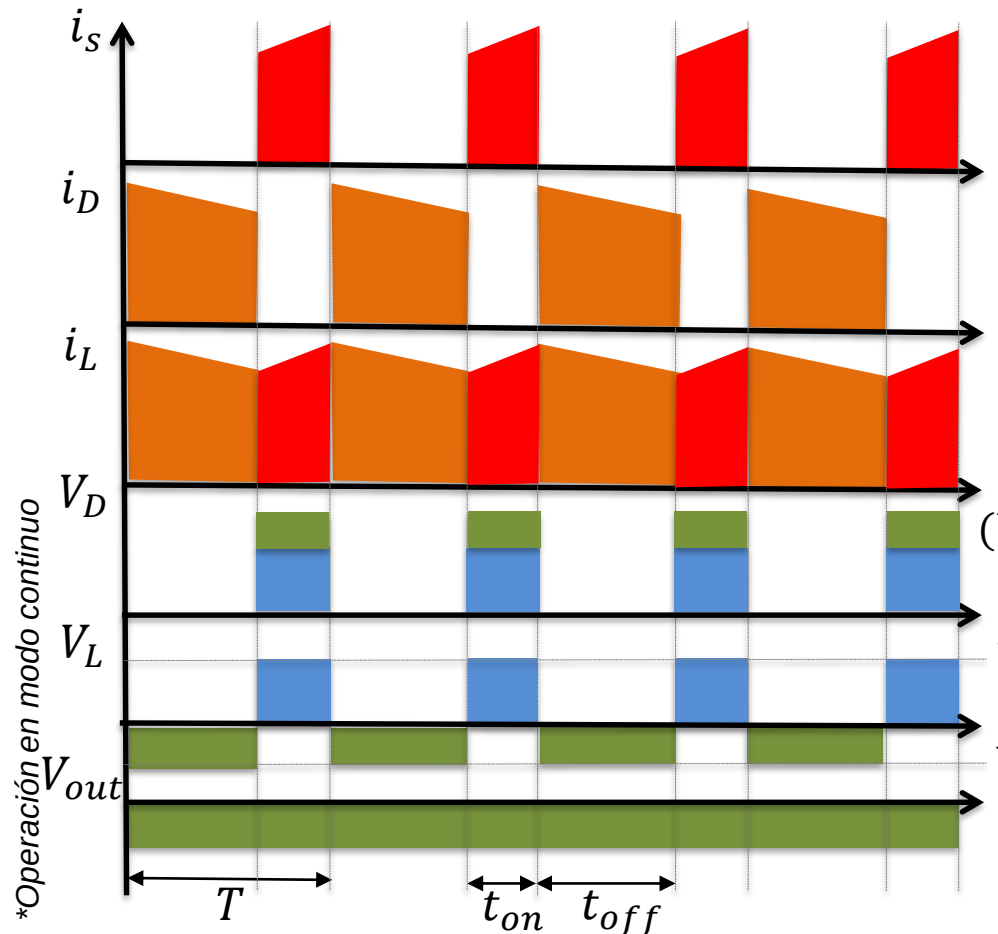
*Operación en modo continuo

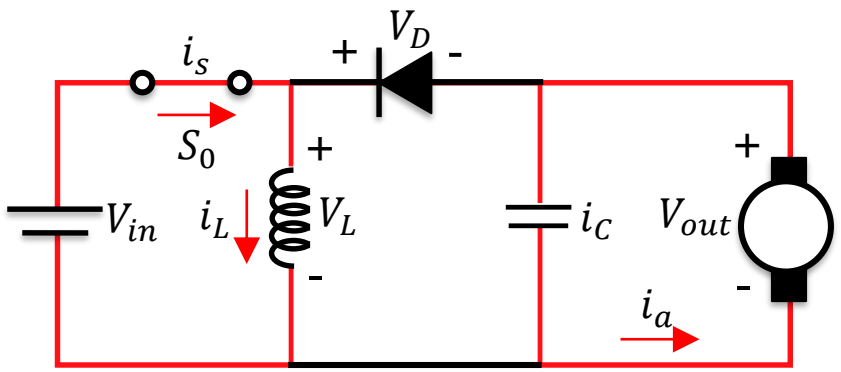




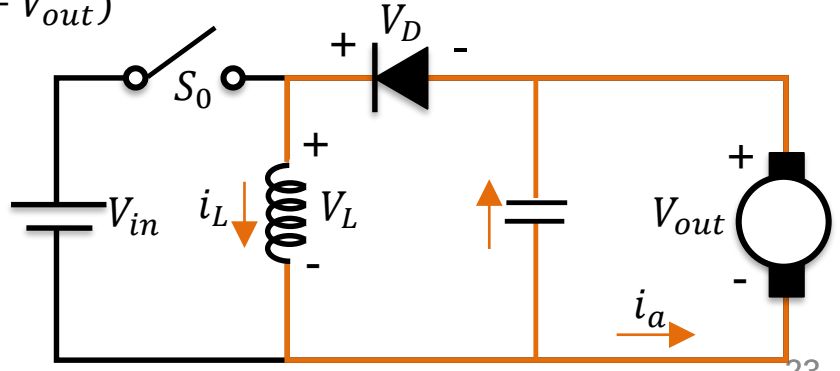
Buck-boost converter
Normal Operation

El Chopper Buck-Boost entrega un voltaje en la carga menor, igual o mayor al de la fuente pero de polaridad inversa.
Si suponemos C grande y operación a muy alta frecuencia:





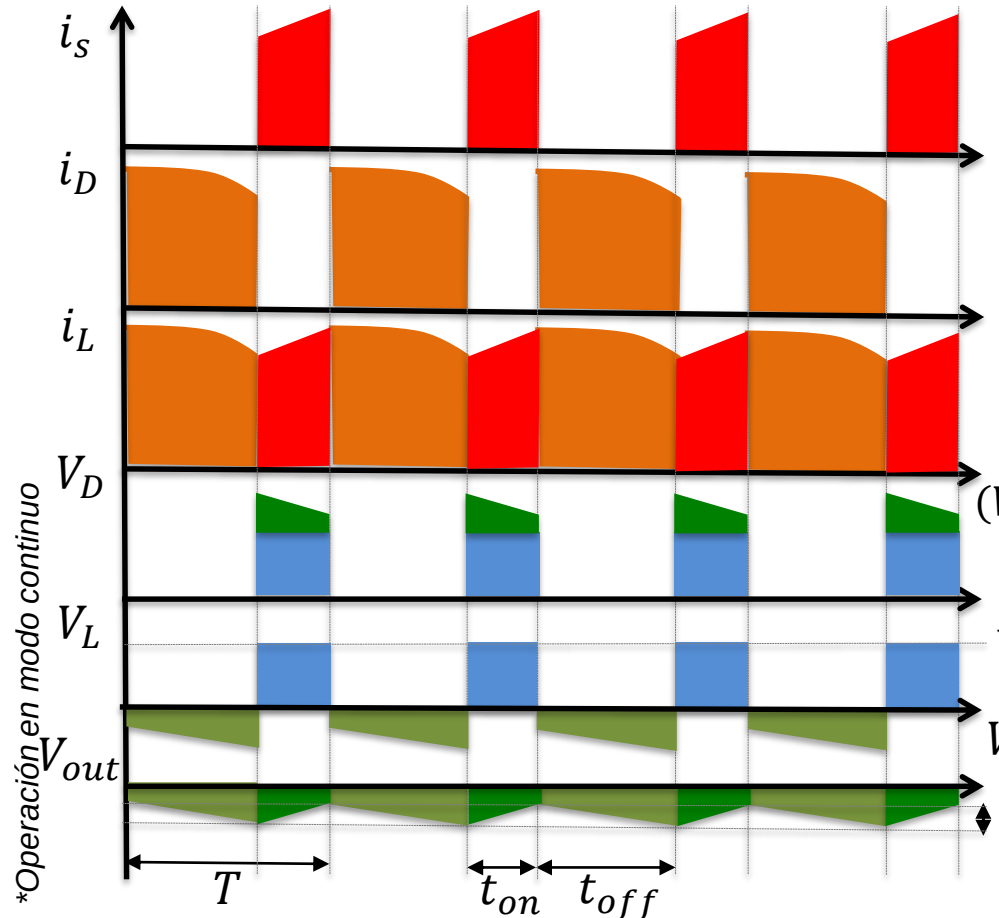
Siempre positivo porque $V_{out} \leq 0$

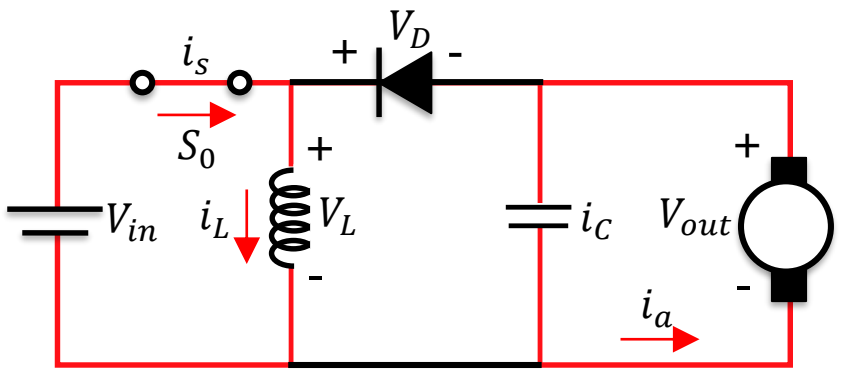


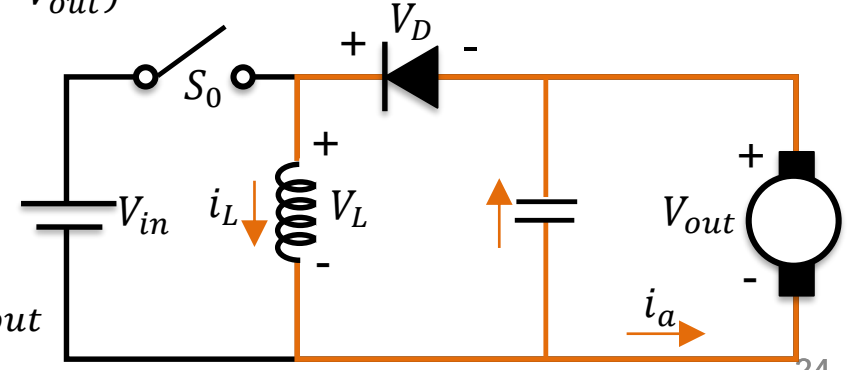
*Operación en modo continuo

Buck-boost converter
Normal Operation

Si suponemos C y frecuencia no suficientemente alta:



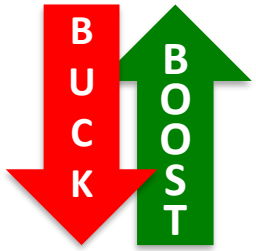




*Operación en modo continuo

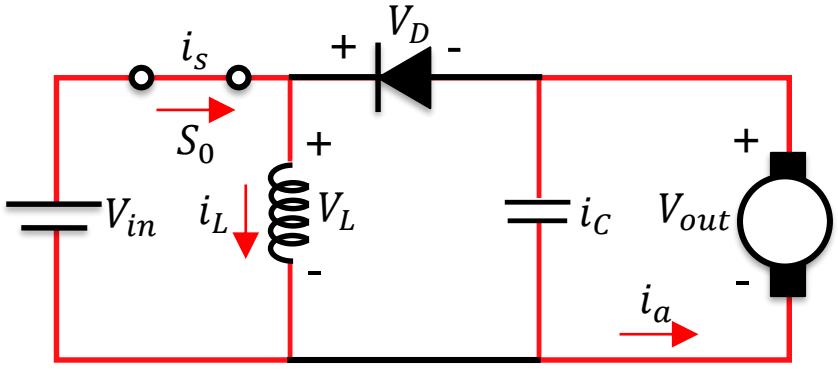
Buck-boost converter

Voltage ratio



Calculemos la relación de voltajes despreciando el rizado del voltaje de salida (o viendo V_{out} promedio):

$$V_L = L\frac{di_L}{dt} \begin{cases} \Delta i_L^{on} = \int_0^{t_{on}} \frac{V_{in}}{L}\,dt = \frac{V_{in}}{L}\delta \cdot T \\ \Delta i_{out}^{off} = \int_{t_{on}}^{T} \frac{V_{out}}{L}\,dt = \frac{V_{out}}{L}(1-\delta) \cdot T \end{cases}$$



Suponemos operación en régimen estacionario:

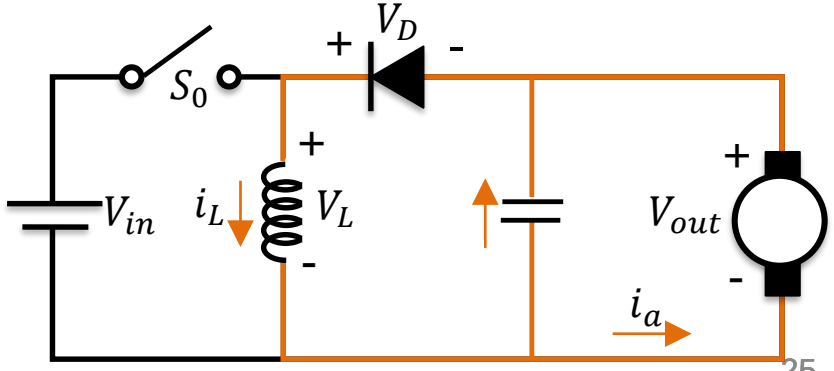
$$E(t) = E(t+T) = \frac{1}{2}L \cdot i_L(t)^2 \quad \Rightarrow \quad \Delta i_L^{on} = -\Delta i_L^{off}$$

$$\frac{V_{in}}{L}\delta \cdot T = \frac{V_{out}}{L}(1-\delta) \cdot T$$

$$0 \le \delta \le 1$$

$$V_{out} \in [0, -\infty]$$

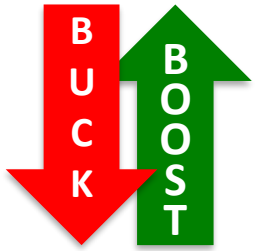
$$V_{out} = -\frac{\delta}{1-\delta} \cdot V_{in}$$



*Operación en modo continuo

Buck-boost converter

Real voltage ratio



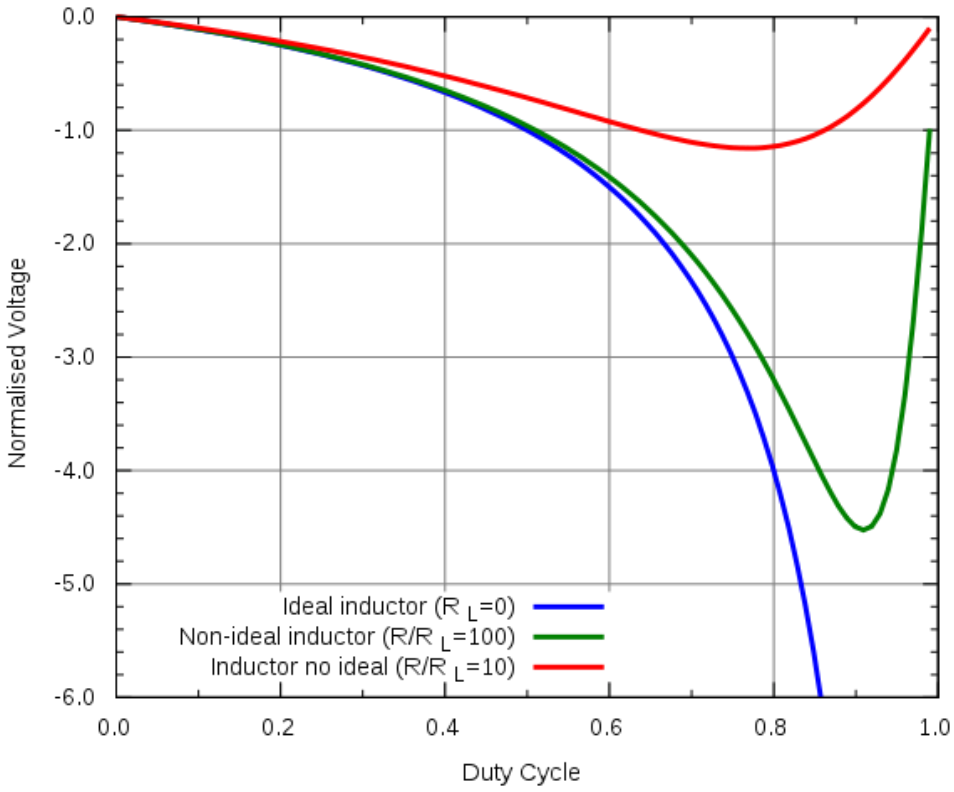
Similar al Boost:
Lamentablemente los componentes tienen pérdidas y elementos parásitos que distan de la teoría cuando el ciclo de trabajo es mayor a 50% aprox:

$$0 \leq \delta \leq 1$$
$$V_{out} \in [0, -\infty]$$

$$V_{out} = -\frac{\delta}{1-\delta} \cdot V_{in}$$

$R_L \neq 0$:

$$V_{out} = \frac{-\delta}{\frac{R_L}{R \cdot (1-\delta)} + (1-\delta)} \cdot V_{in}$$

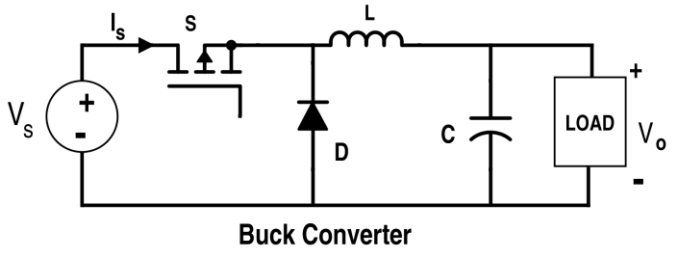


Un Vout/Vin realista puede ser 5 veces

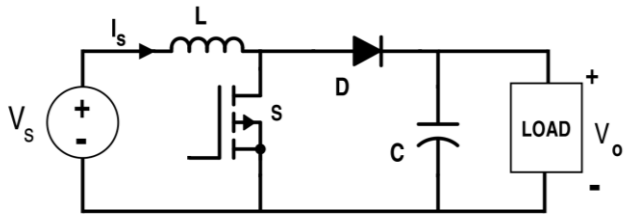
*Operación en modo continuo

The 4 Canonical Cells

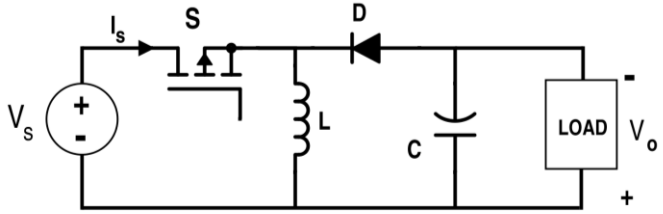
Buck, Boost, Buck-boost and Boost-buck (cúk)



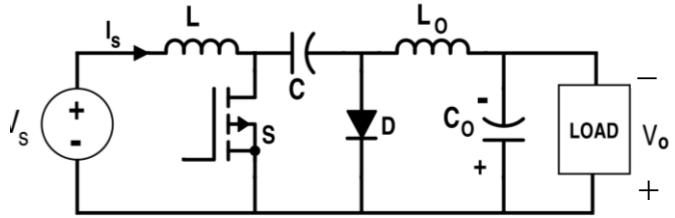
Buck Converter



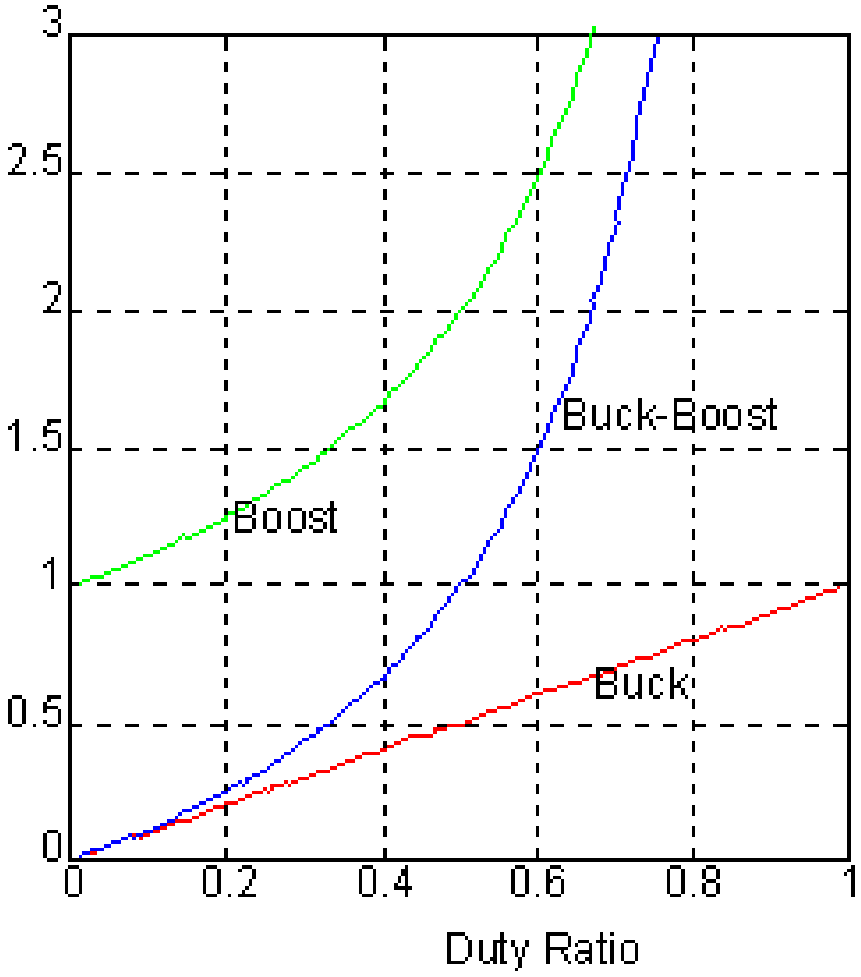
Boost Converter



Buck-Boost Converter

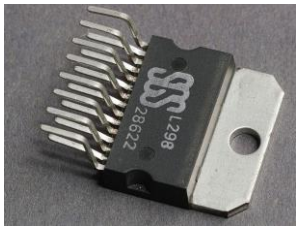


Cuk Converter



*Operación en modo continuo

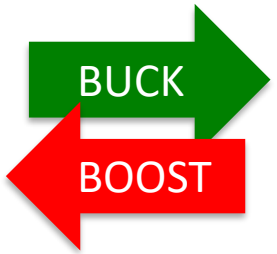
Half-bridge Converter (Buck-boost)*







Half-bridge converter
Normal Operation



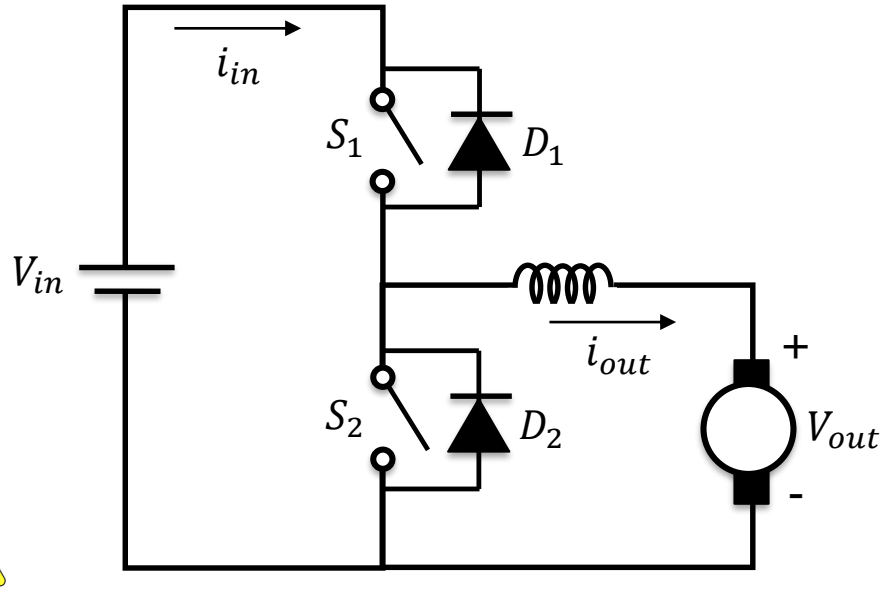
This half-bridge converter (also called buck-boost*) is designed to operate with $v_{out} \leq v_{in}$ and the same polarity.

If $v_{out} > v_{in}$, the system will operate as a rectifier with diode D1 and without control.

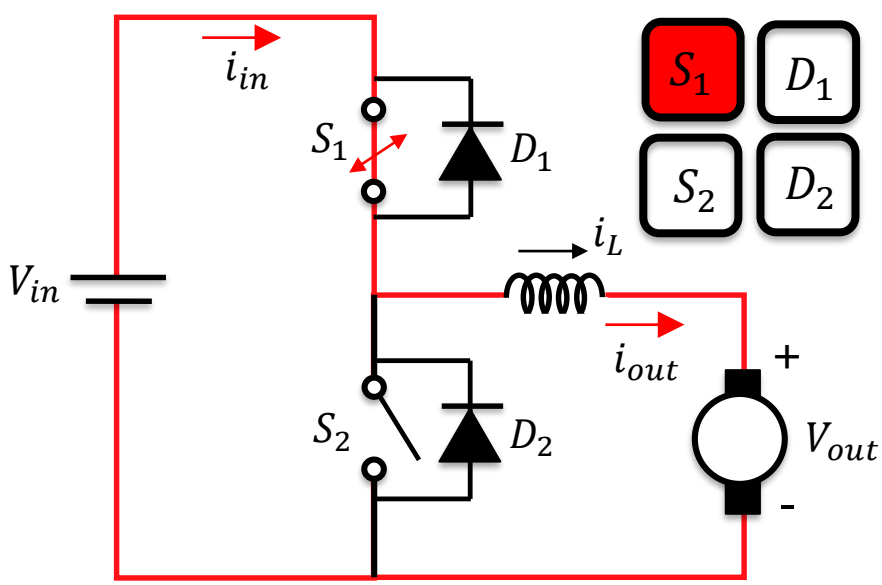
Buck operation: i_{in} > 0 and the switching is made in s_1 (PWM s_1).

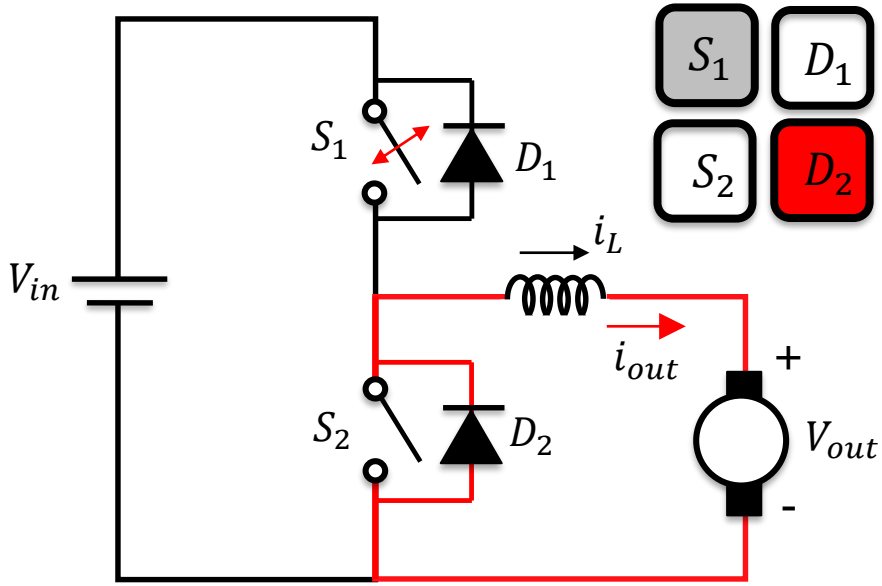
Boost operation: i_{in} < 0 and the switching is made in s_2 (PWM s_2). The load becomes a generator.

Note: Both switches are never activated at the same time (short circuit in the input source!)

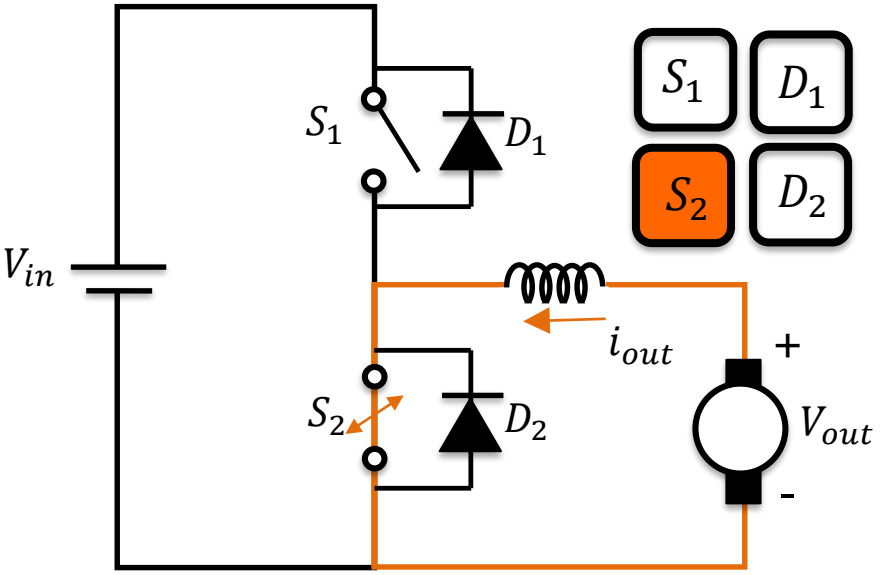


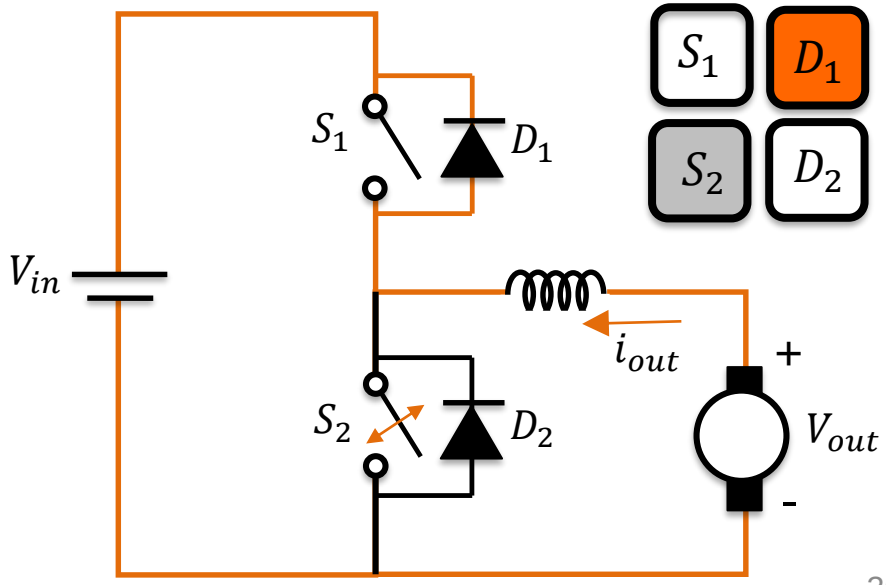
Buck operation ($V_{in} \geq V_{out}$)



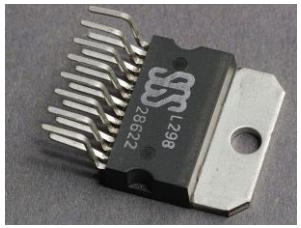


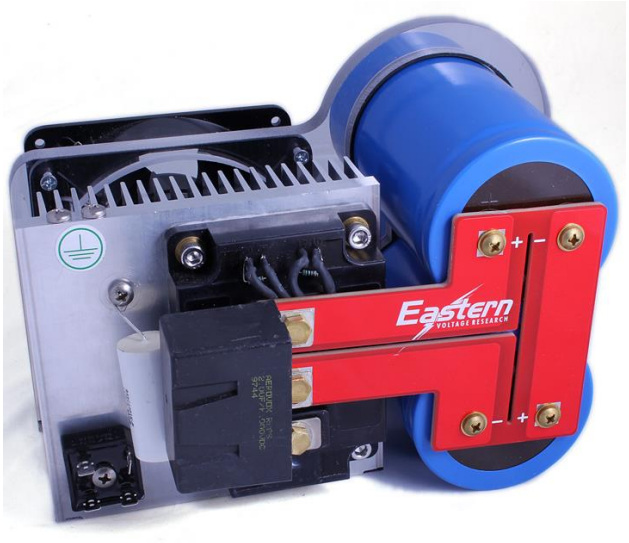
Boost operation ($V_{in} \geq V_{out}$)



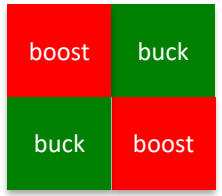


Full-bridge Converter (4 quadrants)





Full-bridge converter
Normal Operation

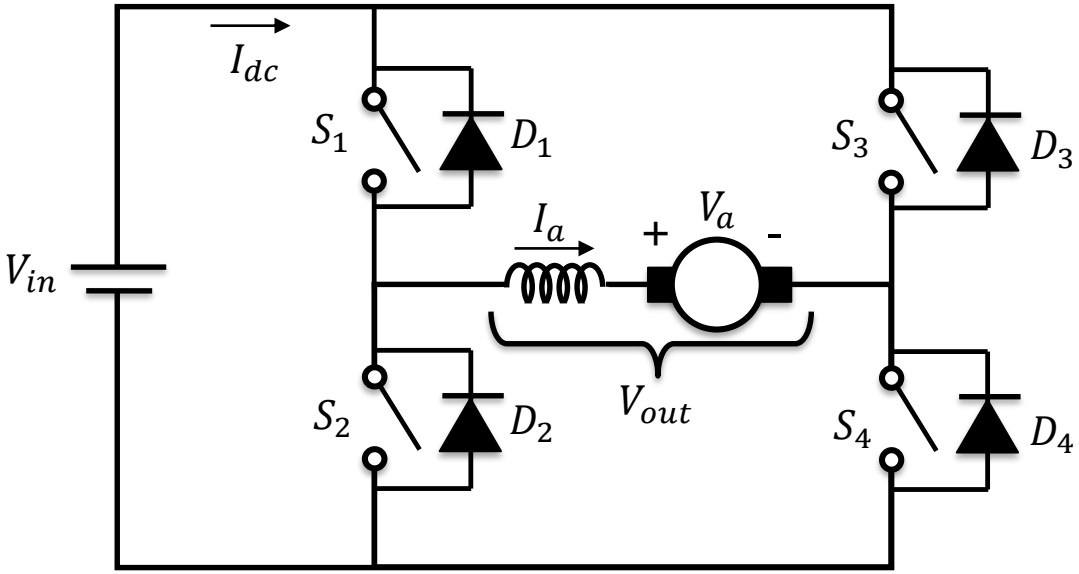


We use two half-bridges to get **positive and negative** output voltage polarity, and it is also designed to operate with $|V_{out}| \leq V_{in}$

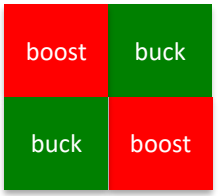
This converter is a 4 quadrants converter.

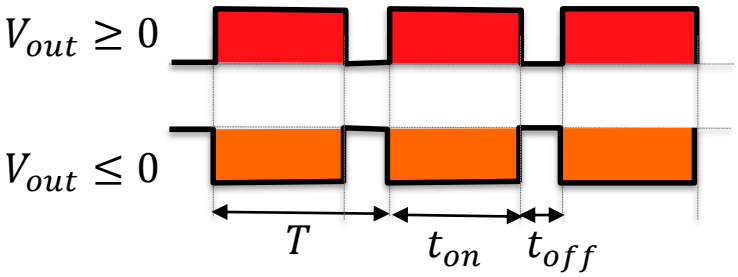
Therefore it can also be operated as a single-phase **inverter** (AC output voltage).

This converter is the most flexible to operate a DC motor.

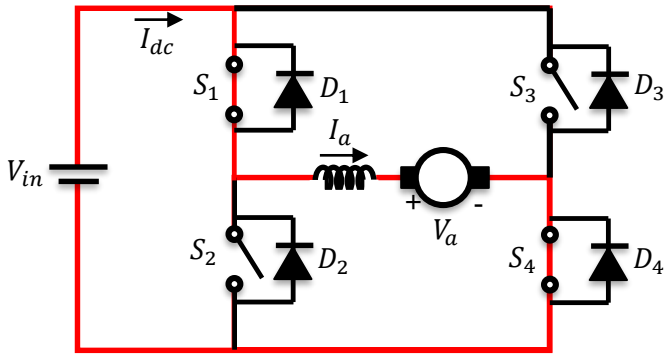


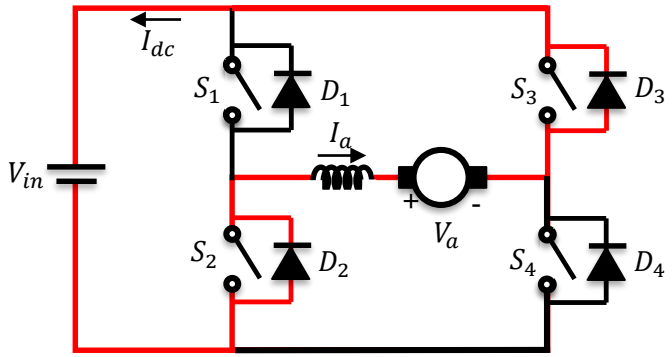
Full-bridge converter
Normal Operation



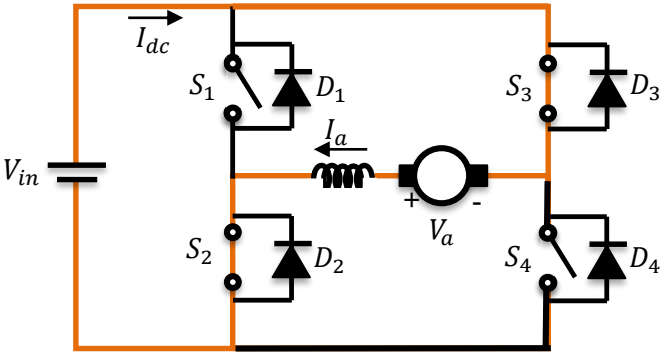


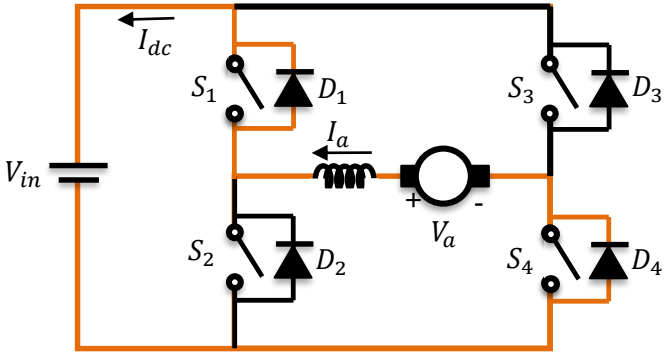
Positive polarity:
The magnitude of output current and voltage can be controlled with PWM in s_1 y s_4.





Negative polarity:
The magnitude of output current and voltage can be controlled with PWM in s_2 y s_3.

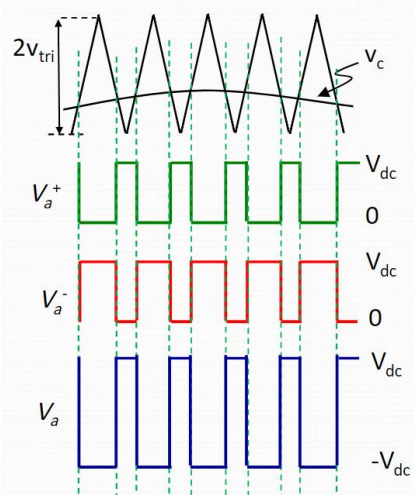




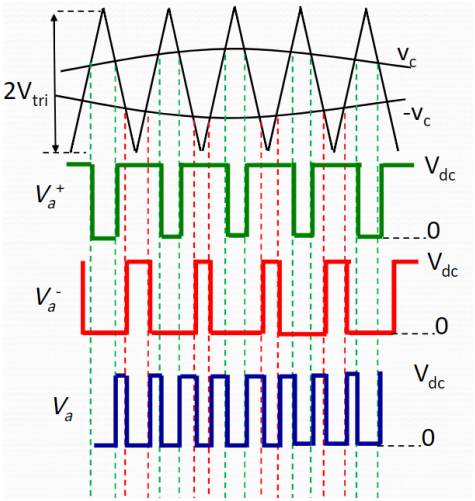
Full-bridge converter

Bipolar and Unipolar Modulation

Bipolar:
The signals of both legs are negated.



Unipolar:
The modulated signal is negated and used in the second leg. Double the output frequency using the same switching frequency of bipolar, so reduce the output ripple



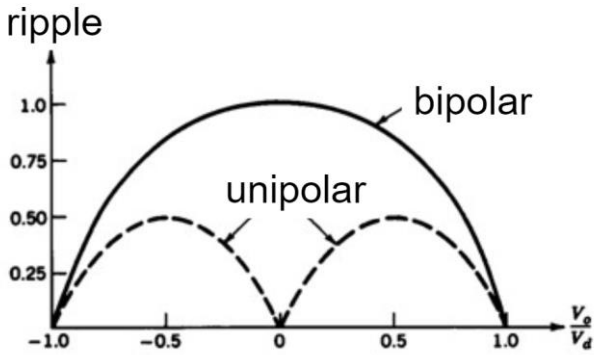
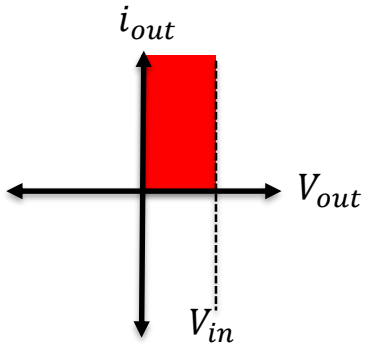


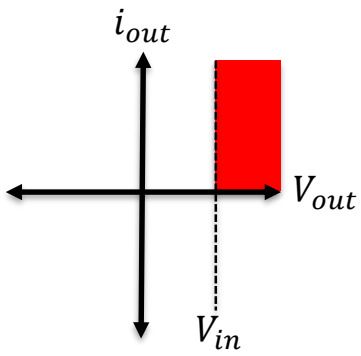
Figure 7-30 $V_{o,rms}$ in a full-bridge converter using PWM: (*a*) with bipolar voltage switching; (*b*) with unipolar voltage switching.

dc-dc Converters
Summary

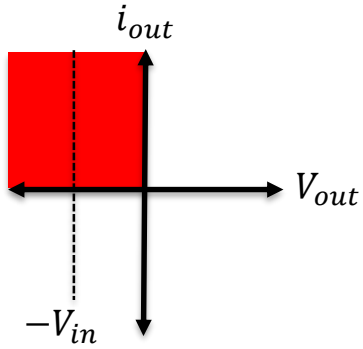
Buck



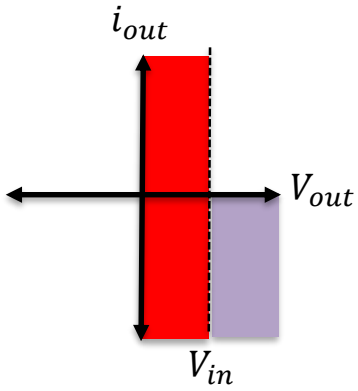
Boost



Buck-Boost / Cuk



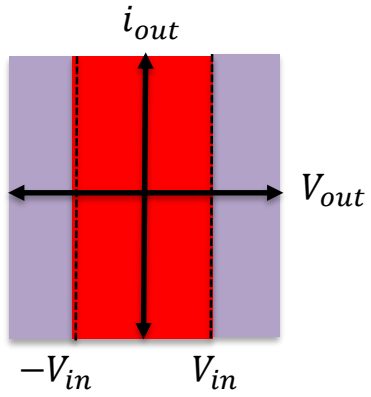
Half-bridge



Note: *It works as a buck if i_{in}>0 and as boost if i_{in}<0.*

If V_{out}> V_{in} works as a rectifier without control.

Full-bridge

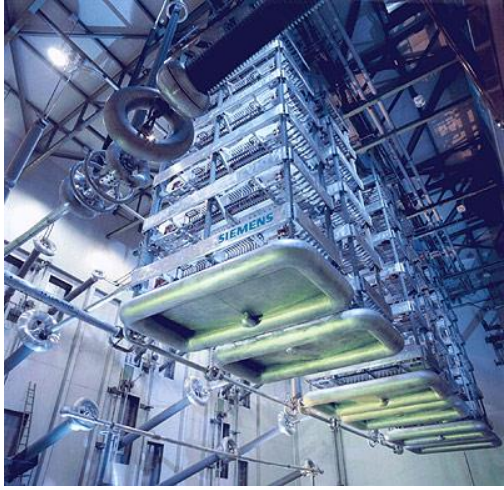


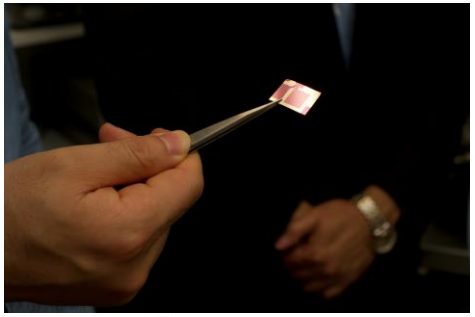
Conversores DC-AC

Inversores













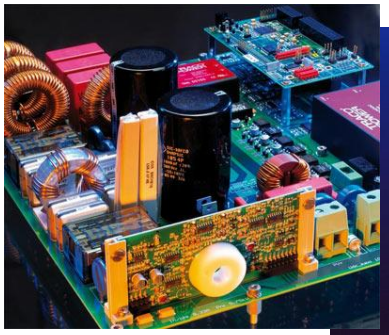


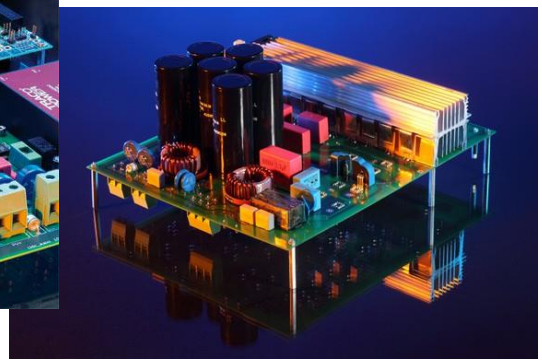






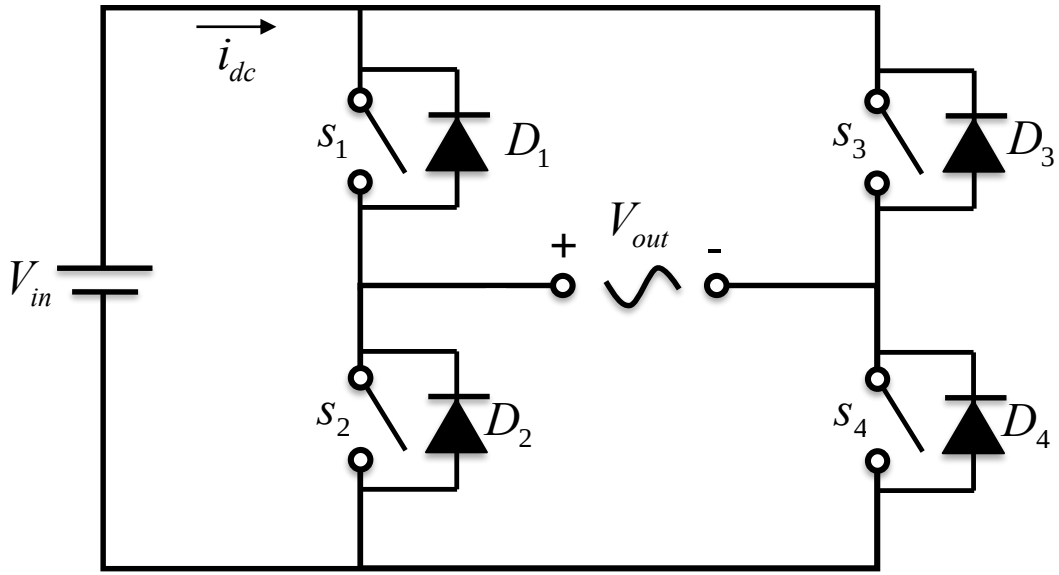
Conversores DC-AC
Inversor monofásico (Puente H)





Es exactamente el mismo puente H de cuatro cuadrantes utilizado en el motor DC pero esta vez se realiza una modulación PWM con una señal de referencia alterna de corriente (generalmente sinusoidal: SPWM).

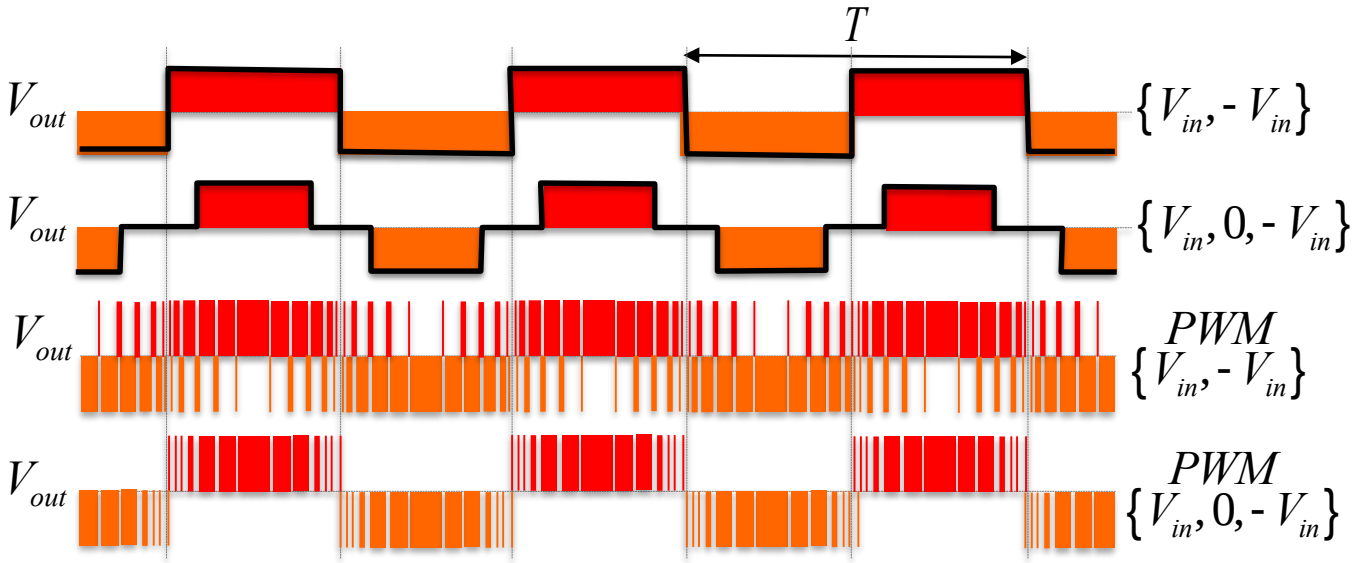
En la máquina DC se buscaba un PWM fijo para obtener un voltaje continuo, pero acá se controla la corriente para que tenga una forma sinusoidal.



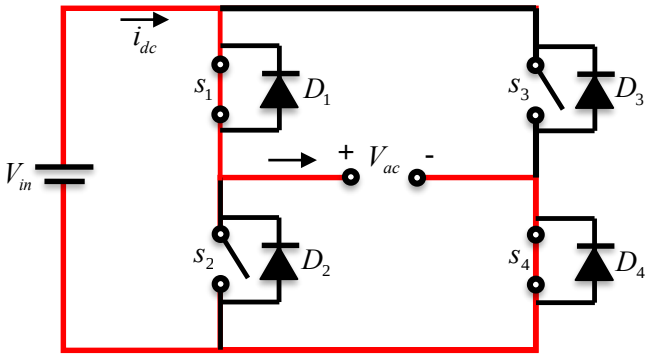
Inversor 1Φ

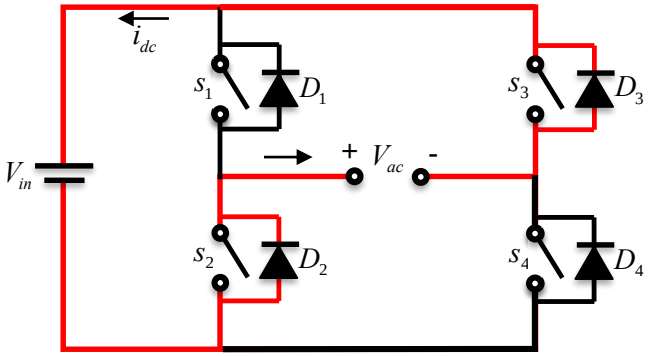
Puente H

Hay varias formas de lograr una salida AC, pero la mejor corriente sinusoidal se obtiene con la PWM.

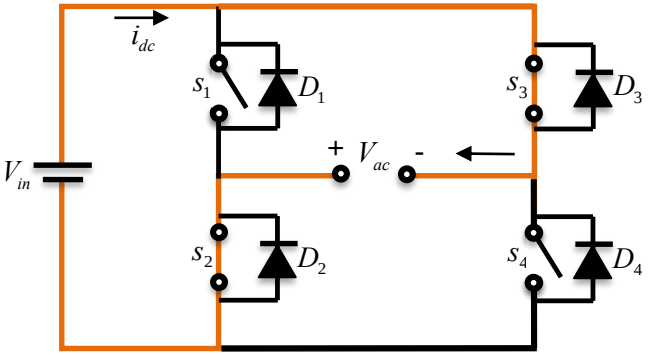


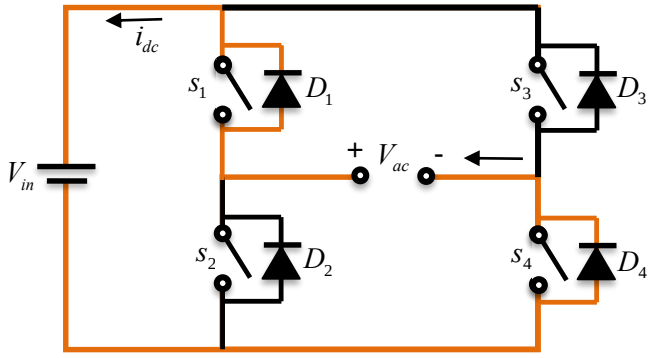
Polaridad Positiva:
Durante el ciclo positivo se realiza modulación PWM en s_1 y s_4 para obtener una forma sinusoidal.





Polaridad Negativa:
Durante el ciclo negativo se realiza modulación PWM en s_2 y s_3 para obtener una forma sinusoidal.



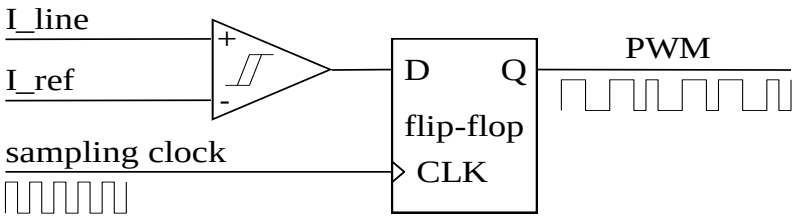


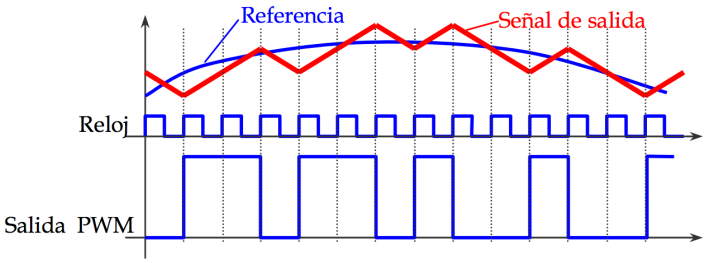
Conversores DC-AC

Puente H

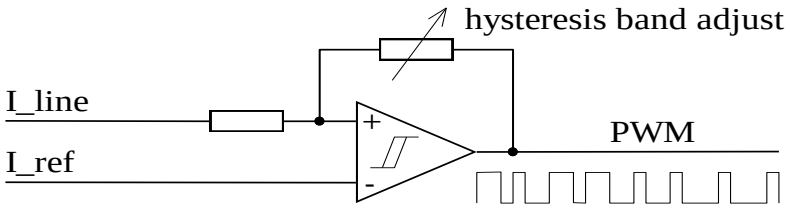
Hay 3 formas clásicas de lograr una señal PWM sinusoidal (SPWM) de corriente mediante una señal de referencia sinusoidal de frecuencia y amplitud variable.

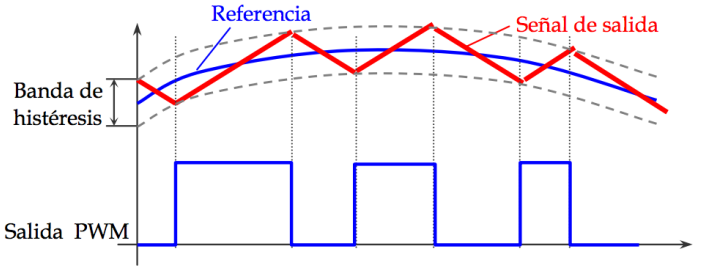
Muestreo Periódico



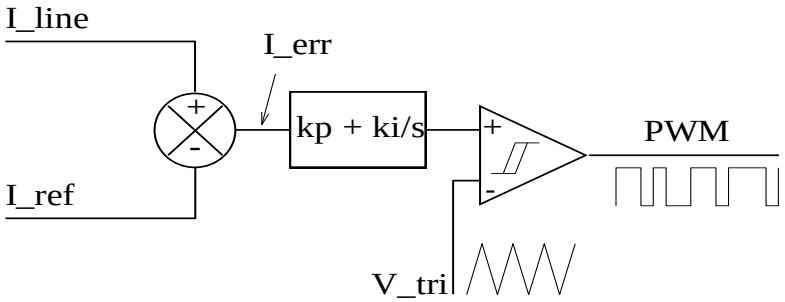


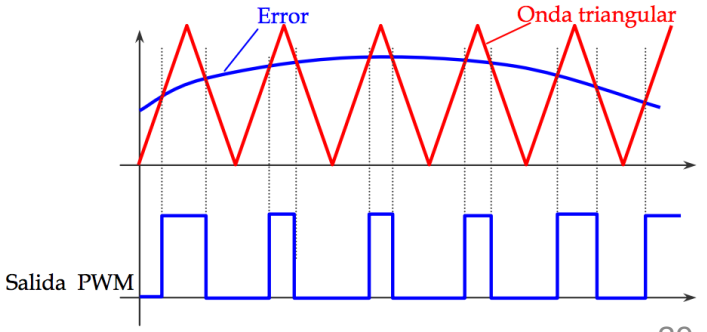
Banda de Histéresis





Portadora Triangular



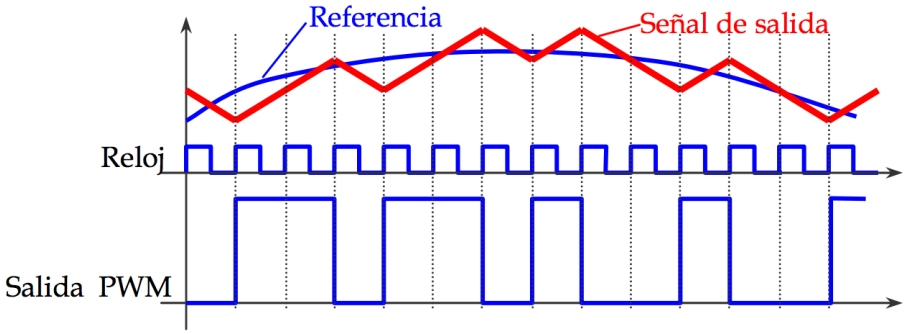


Conversores DC-AC

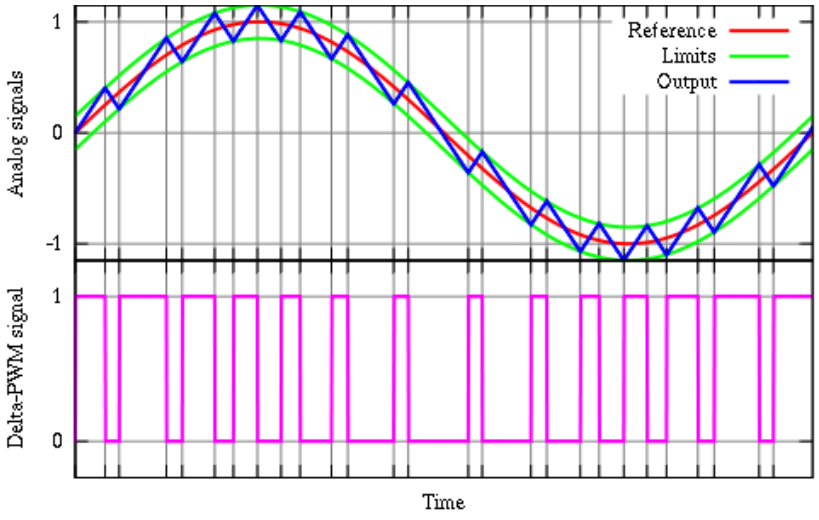
Puente H

Hay 3 formas clásicas de lograr una señal PWM sinusoidal (SPWM) de corriente mediante una señal de referencia sinusoidal de frecuencia y amplitud variable.

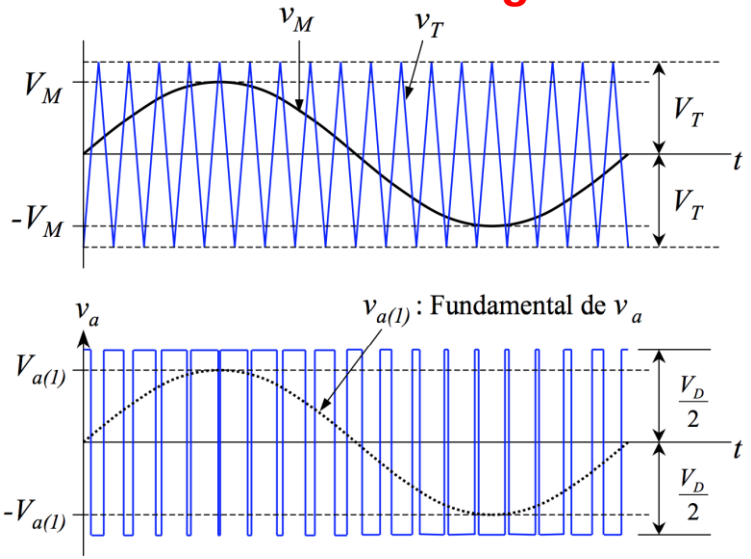
Muestreo Periódico



Banda de Histéresis



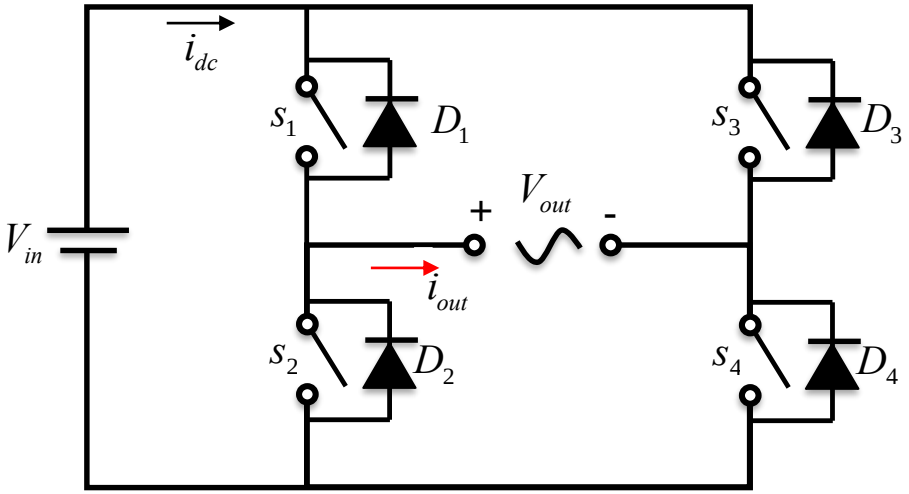
Portadora Triangular

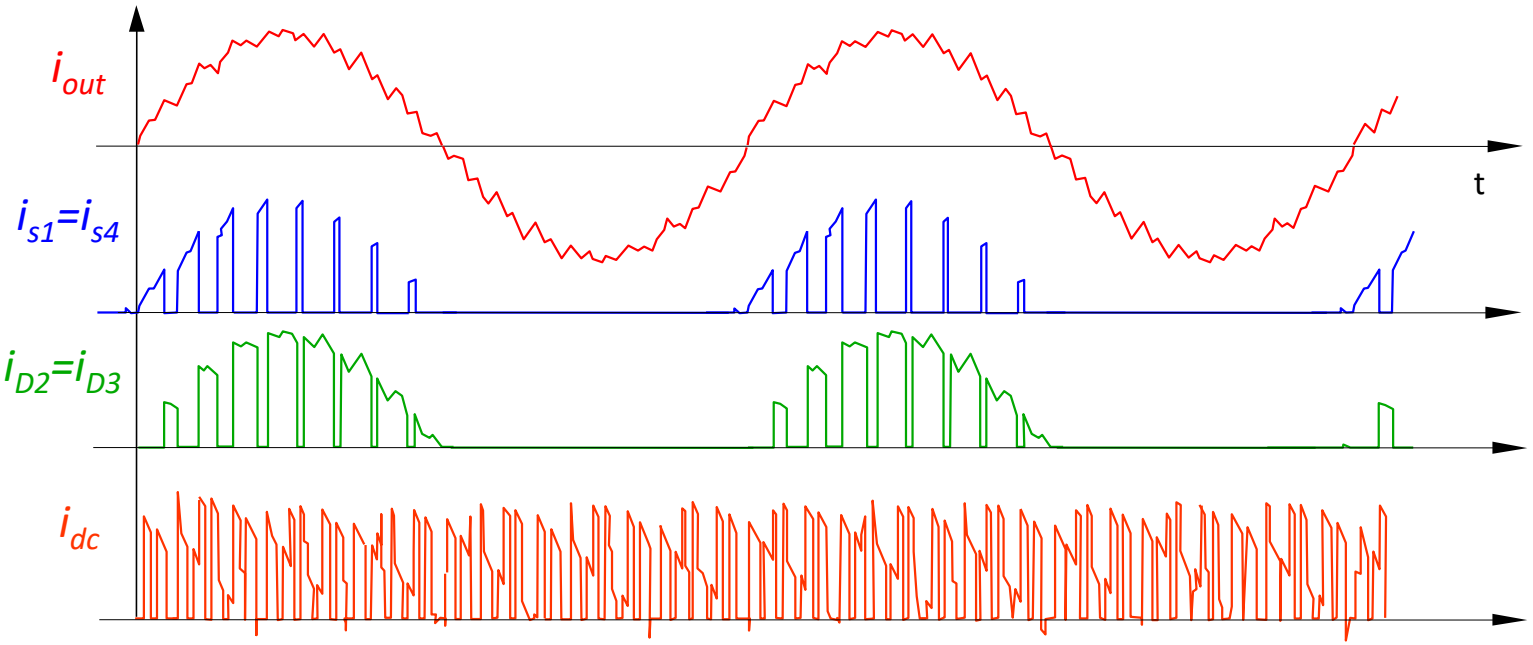


Conversores DC-AC

Inversor monofásico (Puente H)

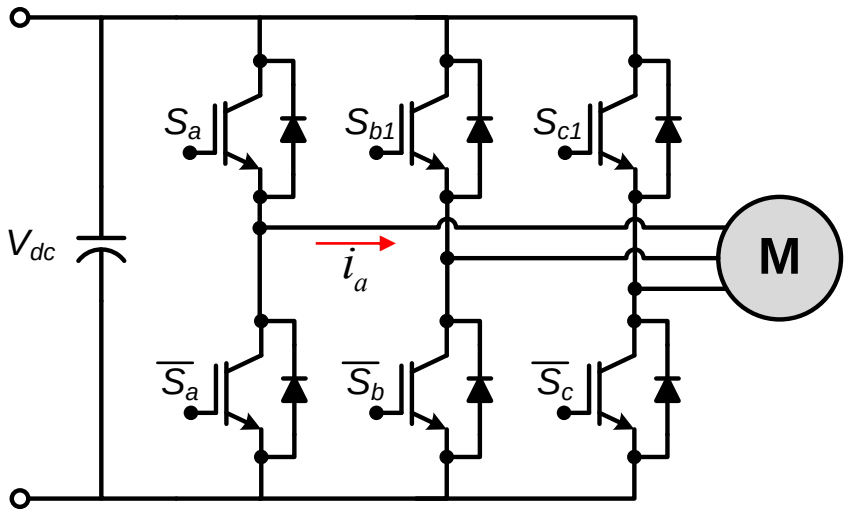
En el gráfico inferior se puede apreciar la corriente sinusoidal obtenida en la carga (se agrega un L o la carga debe ser inductiva) y las corrientes en cada componente.

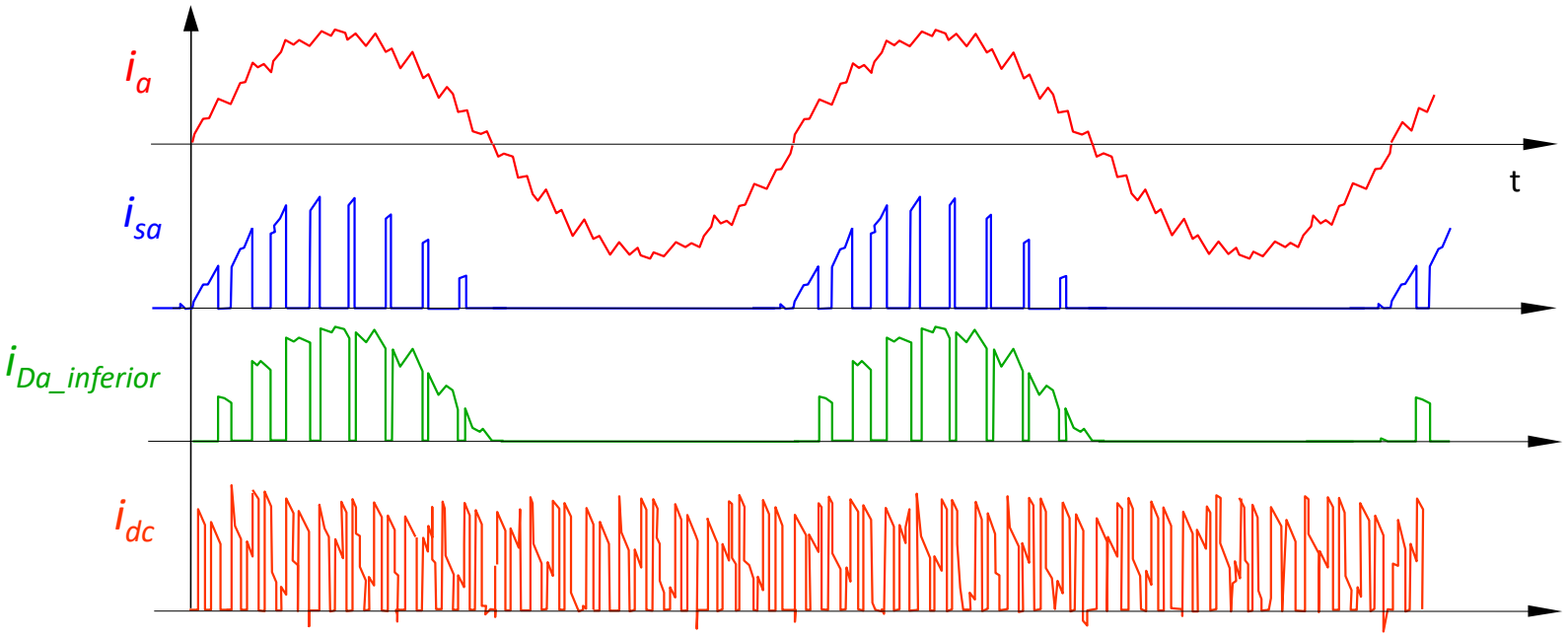




Conversores DC-AC
Inversor Trifásico

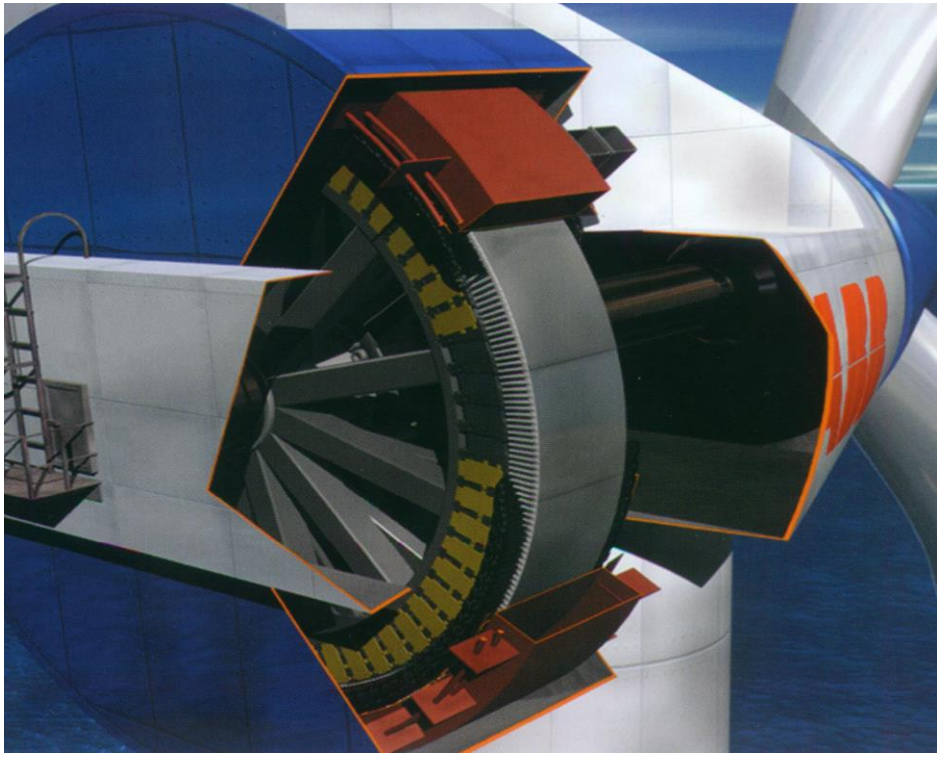
El sistema es exactamente el mismo que el puente H, pero ahora se debe agregar una tercera “pierna” y se requiere una señal PWM por fase (3). El puente-H se puede apreciar al ver la carga fase-fase.





Ejemplo aplicación: Generación Eólica Inversor Trifásico

Generador Eólico ABB del tipo síncrono de imanes permanentes, de velocidad variable y conexión directa.

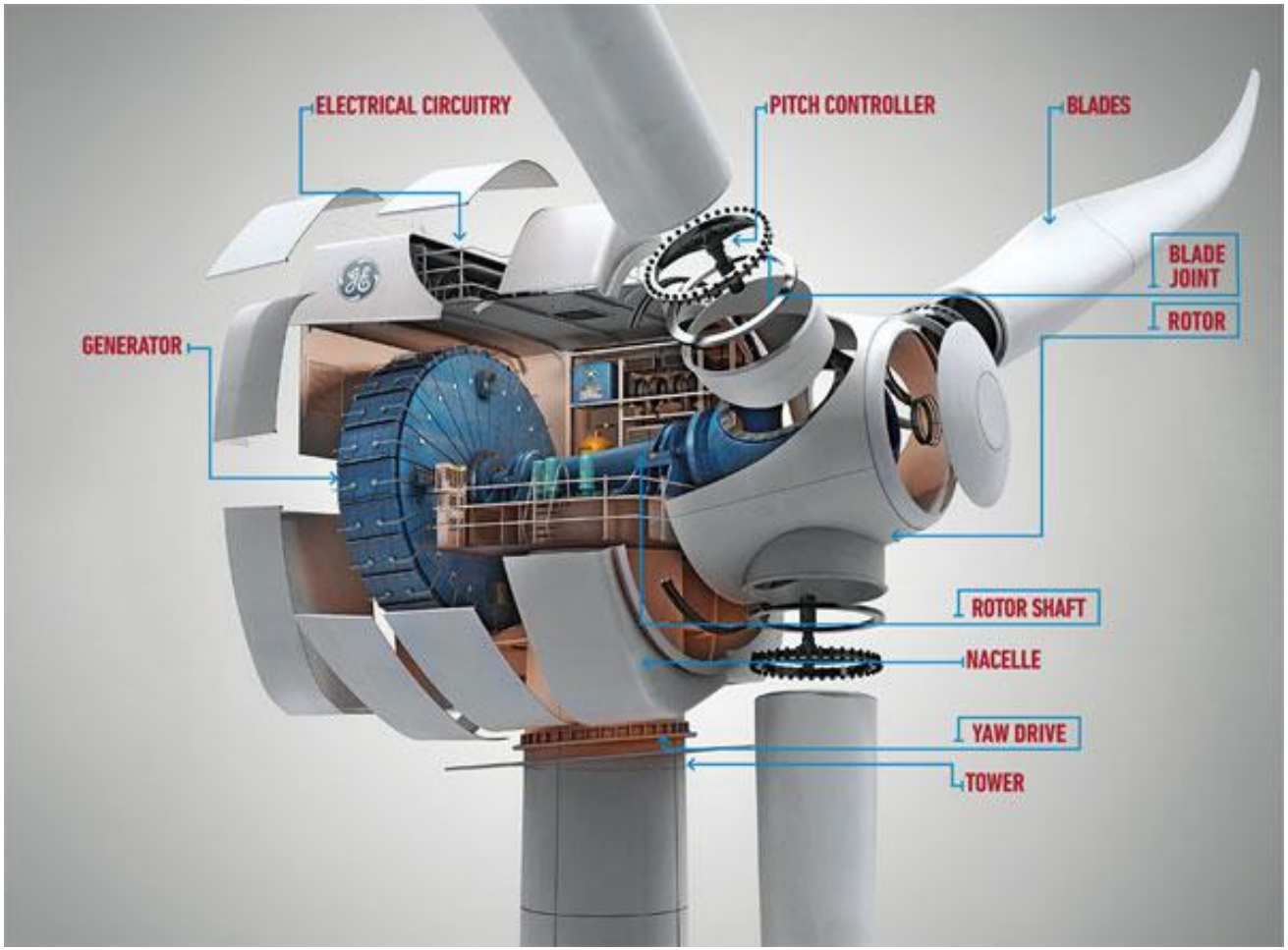


Generador Eólico Siemens del tipo síncrono de imanes permanentes, de velocidad variable y conexión directa (3MW, 50% menos de piezas y más liviano: 73 Ton.)

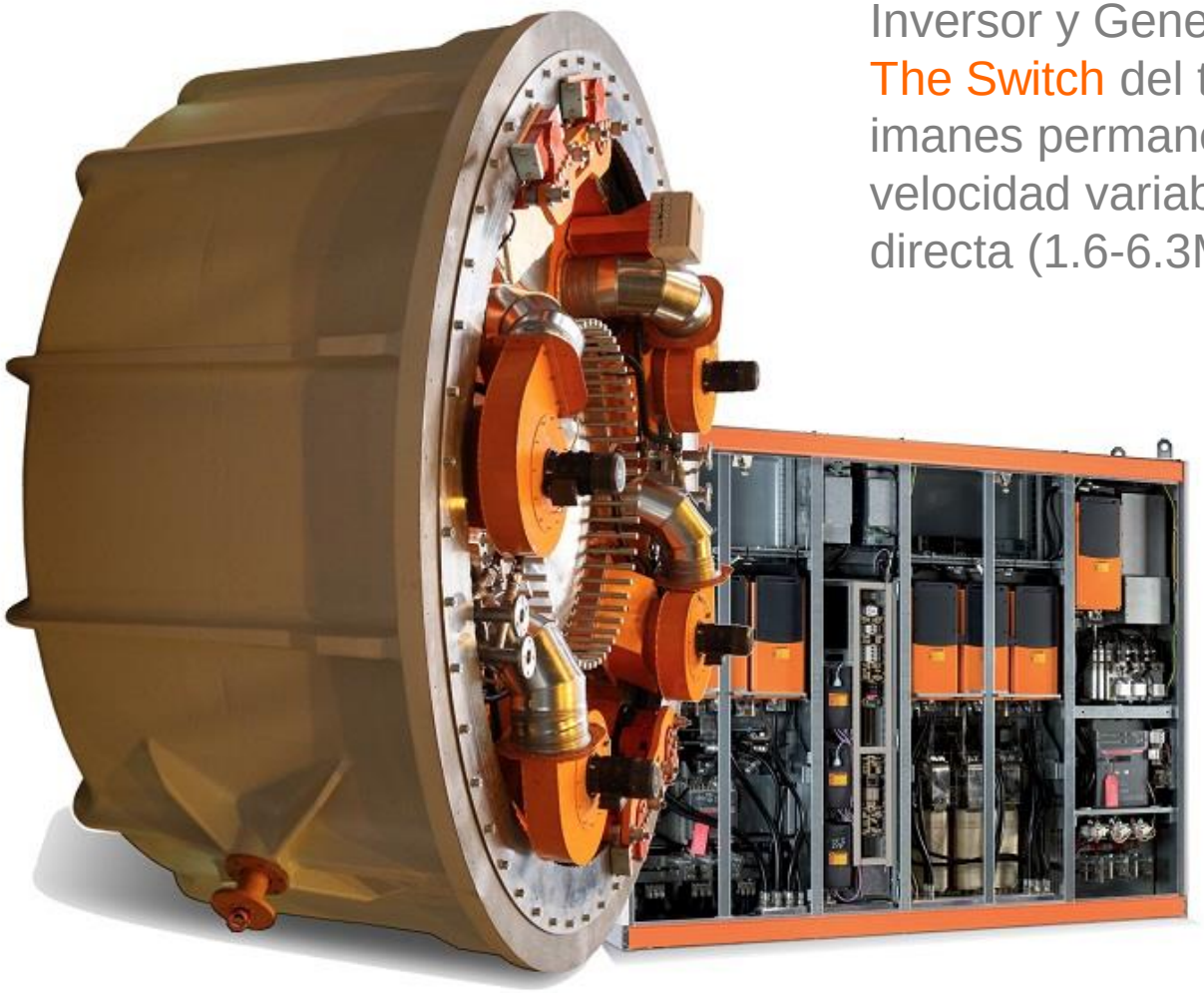


Ejemplo aplicación: Generación Eólica Inversor Trifásico

Inversor y Generador Eólico General Electric del tipo síncrono de imanes permanentes, conexión directa y altísima eficiencia (4MW, 25% más eficiente).



Ejemplo aplicación: Generación Eólica
Inversor Trifásico



Inversor y Generador Eólico The Switch del tipo síncrono de imanes permanentes, de velocidad variable y conexión directa (1.6-6.3MW, 11-17rpm).

Ejemplo aplicación: Generación Eólica Inversor Trifásico

Generador Eólico The Switch del tipo síncrono de imanes permanentes, de conexión mediante *gearbox* de 1-2 estaciones (1.6-6.4MW, 136-414rpm).



Generador Eólico The Switch del tipo síncrono de imanes permanentes, de conexión mediante *gearbox* de 2-3 estaciones (0.5-5.8MW, 1000-1500rpm).



Ejemplo aplicación: Generación Eólica Inversor Trifásico

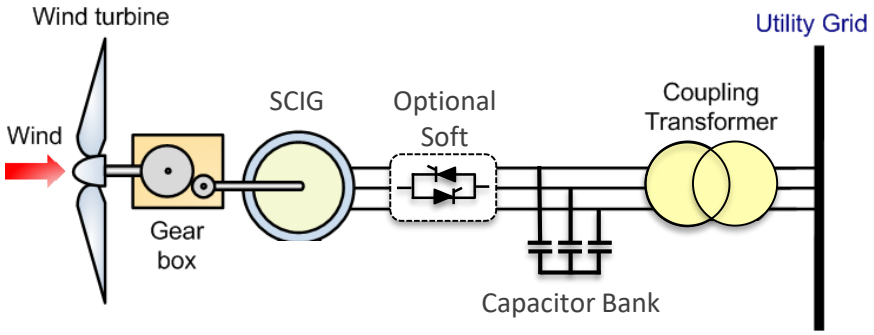
La caja multiplicadora (Gearbox) es el sistema que requiere mayor mantenimiento y aceite, además de introducir volumen y peso adicional considerable.

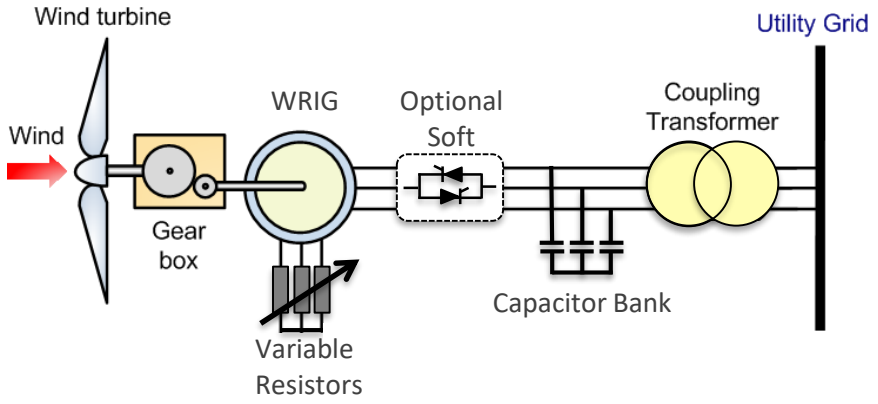


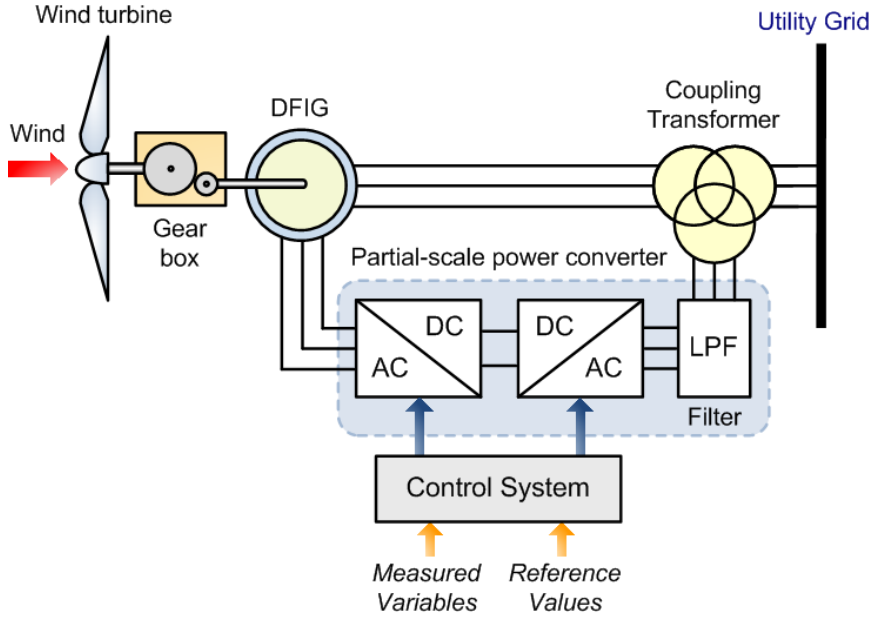


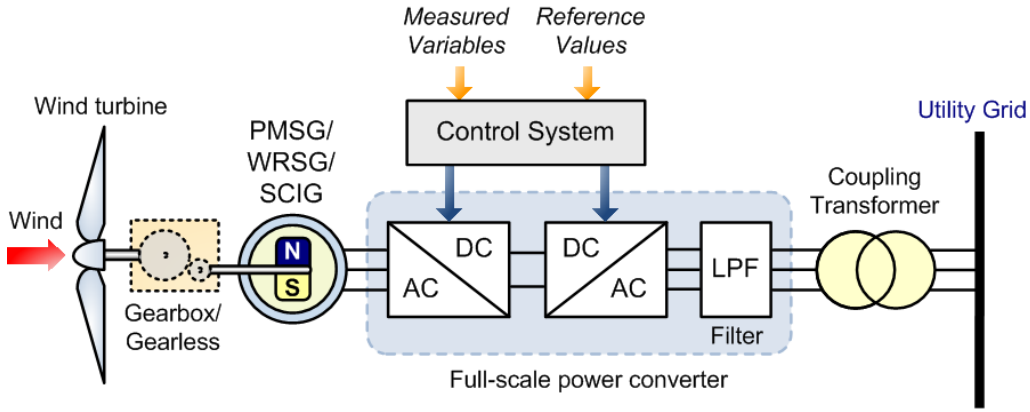


Ejemplo aplicación: Generación Eólica
Inversor Trifásico



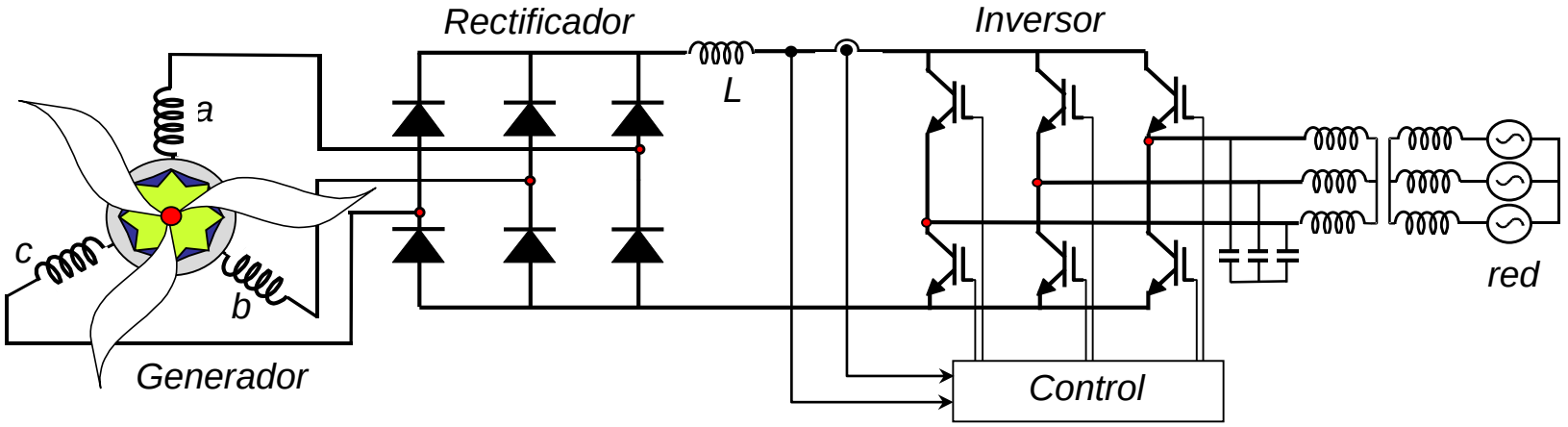






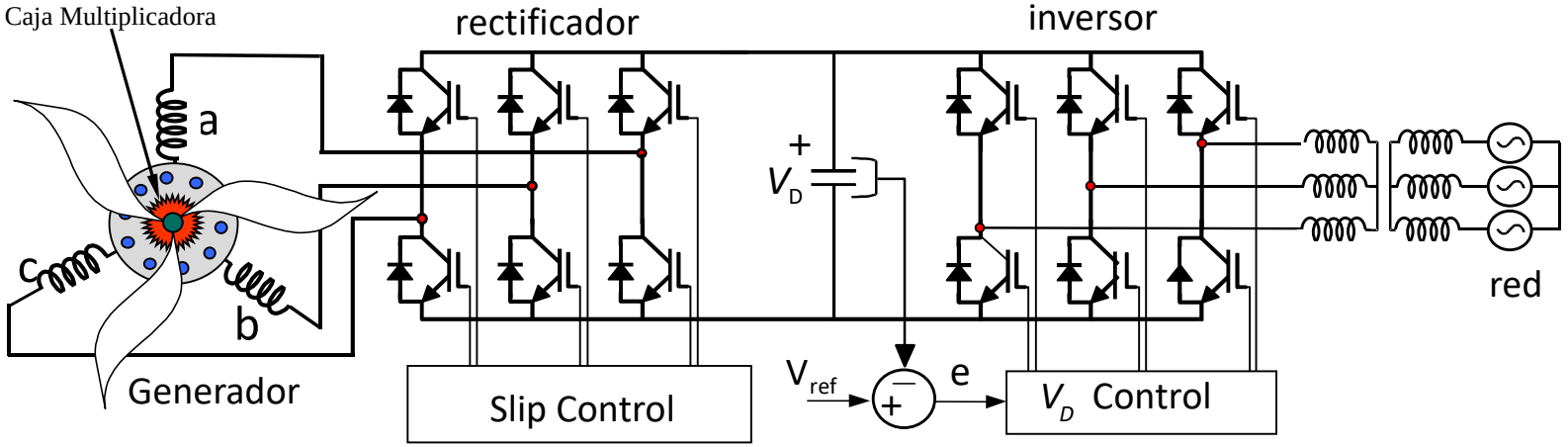
Ejemplo aplicación: Generación Eólica

Full-scaled power converter



Inversor Fuente de Corriente

Generador Síncrono de Imanes Permanentes (PMSG) Gearless

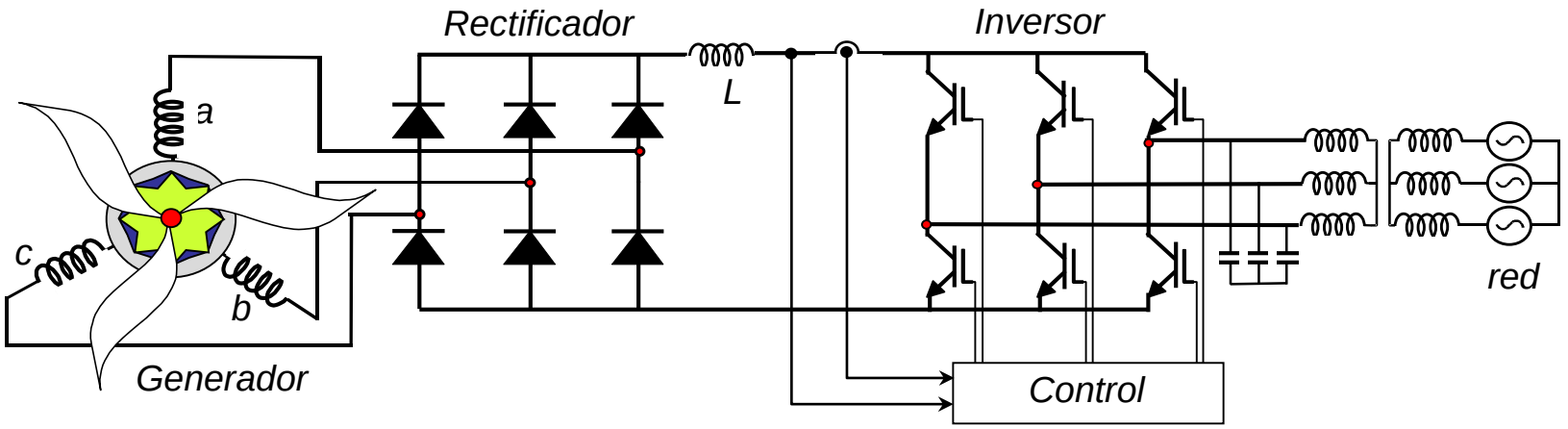


Inversor Fuente de Voltaje

Generador de Inducción Jaula de ardilla (SCIG)

Ejemplo aplicación: Generación Eólica

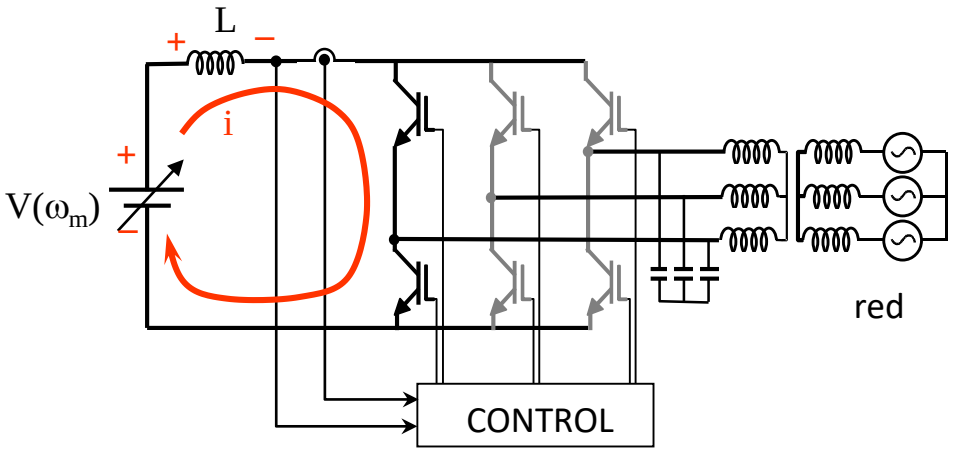
Full-scaled power converter

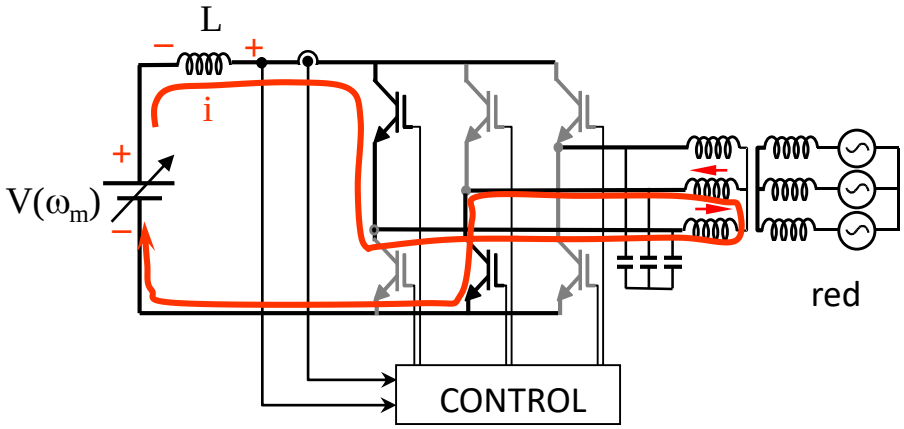


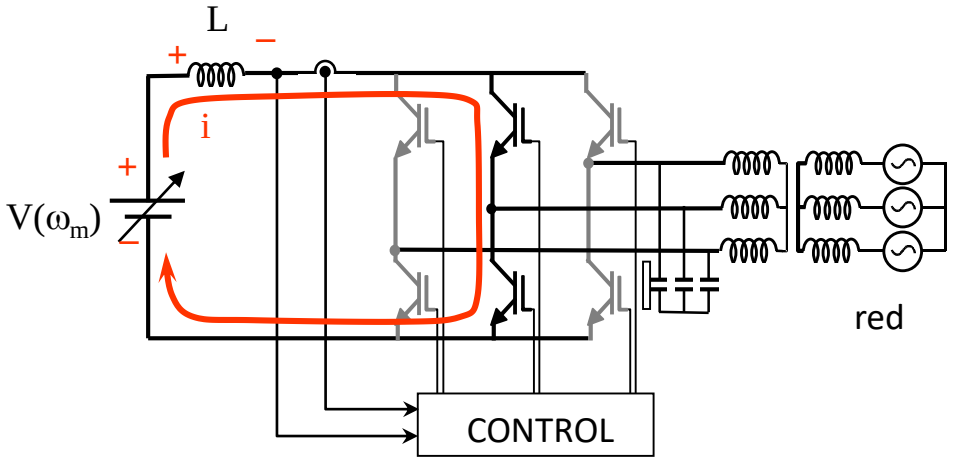
1. El giro del rotor genera tensión trifásica de frecuencia y voltaje proporcionales a la velocidad.
2. El rectificador entrega un voltaje DC “desligado” de la frecuencia (pero proporcional a está).
3. El voltaje DC es transformado por el inversor en una tensión de frecuencia y amplitud fijos, pero de corriente variable. Además, el ángulo de la corriente puede controlarse electrónicamente.
4. El banco de condensadores filtra las armónicas de tensión y mantiene la continuidad de corriente en el transformador que eleva la tensión para transferir la potencia generada a la red.
5. Como la tensión del rectificador está siempre mas baja que la tensión efectiva en el primario del transformador, es necesario elevarla, para lo cual se utiliza el inductor L. Este inductor, además de filtrar, almacena energía cuando los dos transistores de una misma fase del inversor son encendidos simultáneamente, actuando de forma similar a un chopper boost.
6. El control es el encargado de ejecutar estas operaciones con los transistores para cumplir con los requerimientos de tensión, fase y potencia transferida a la red).

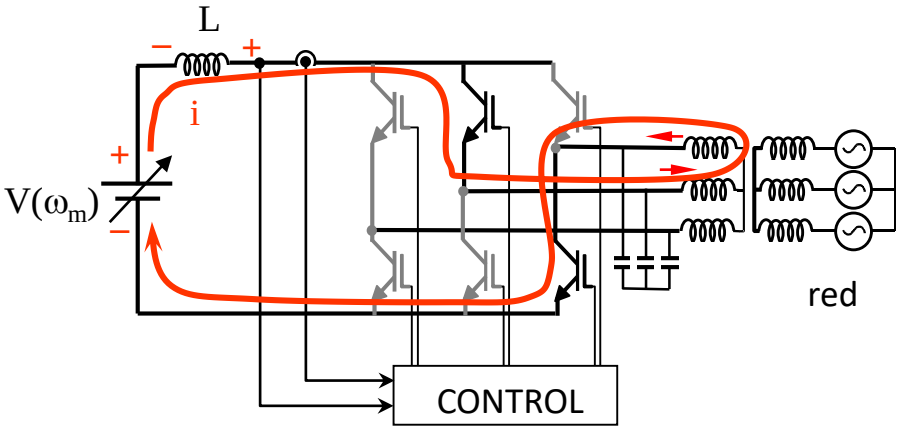
Ejemplo aplicación: Generación Eólica

Full-scaled power converter



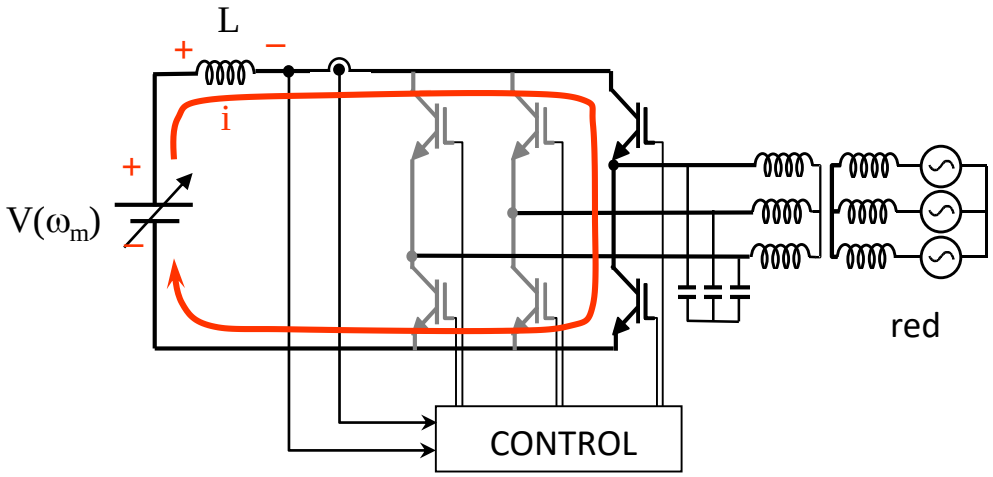


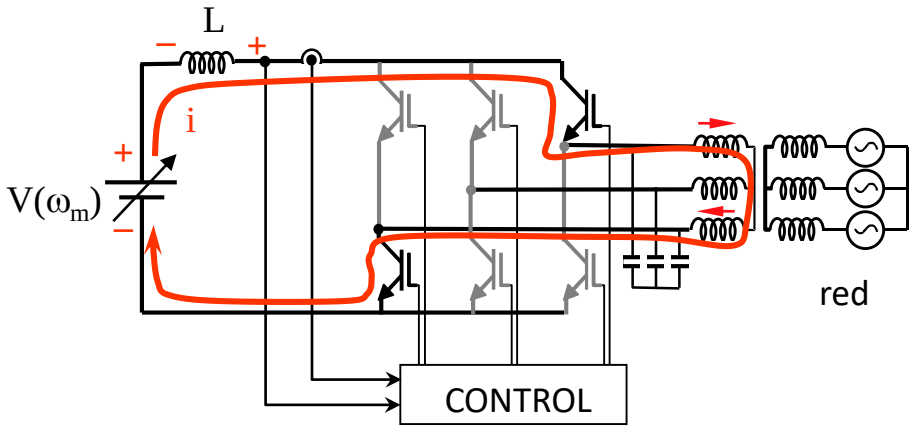


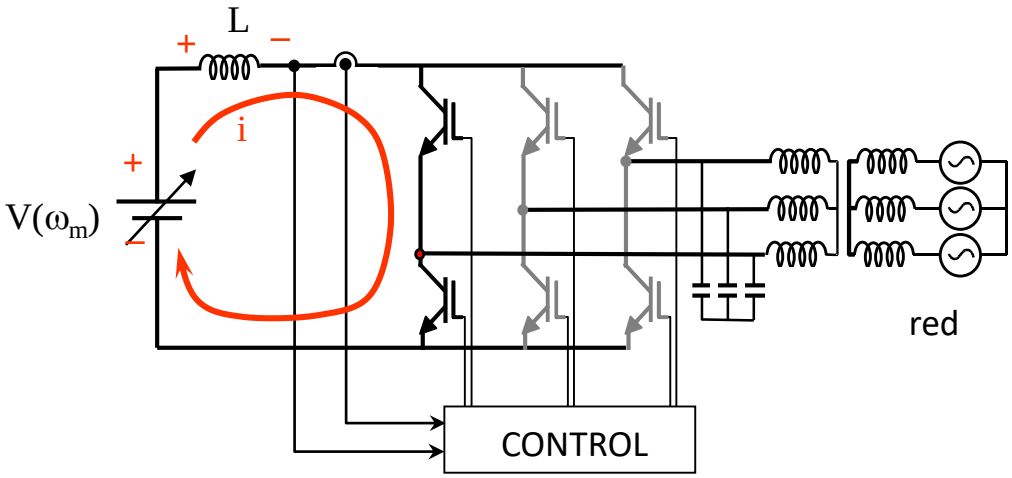


Ejemplo aplicación: Generación Eólica

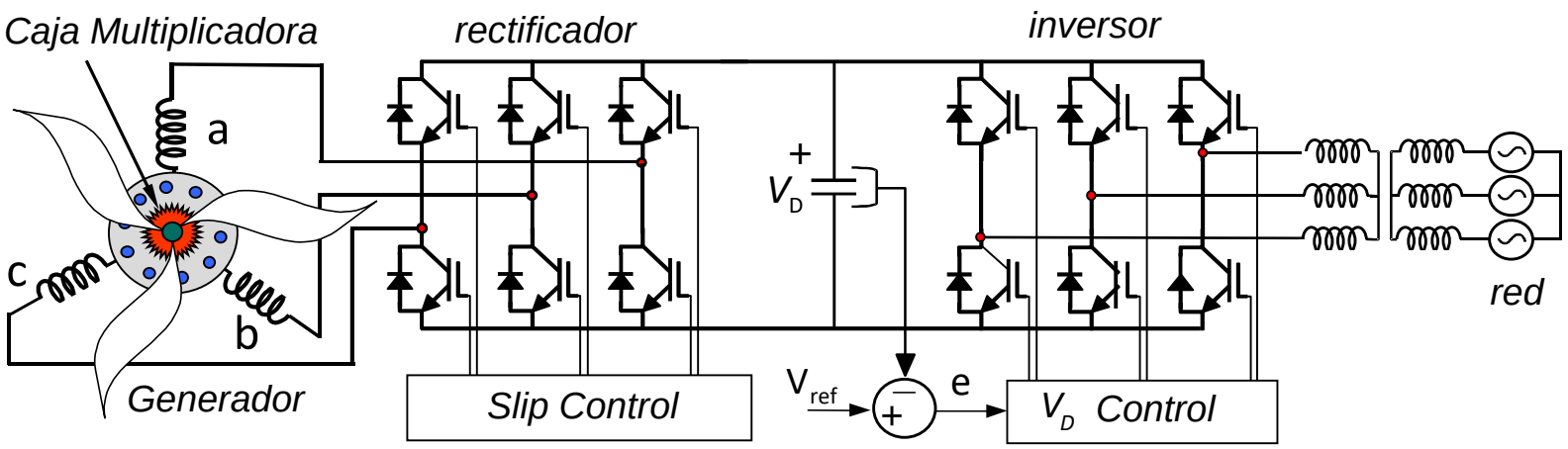
Full-scaled power converter







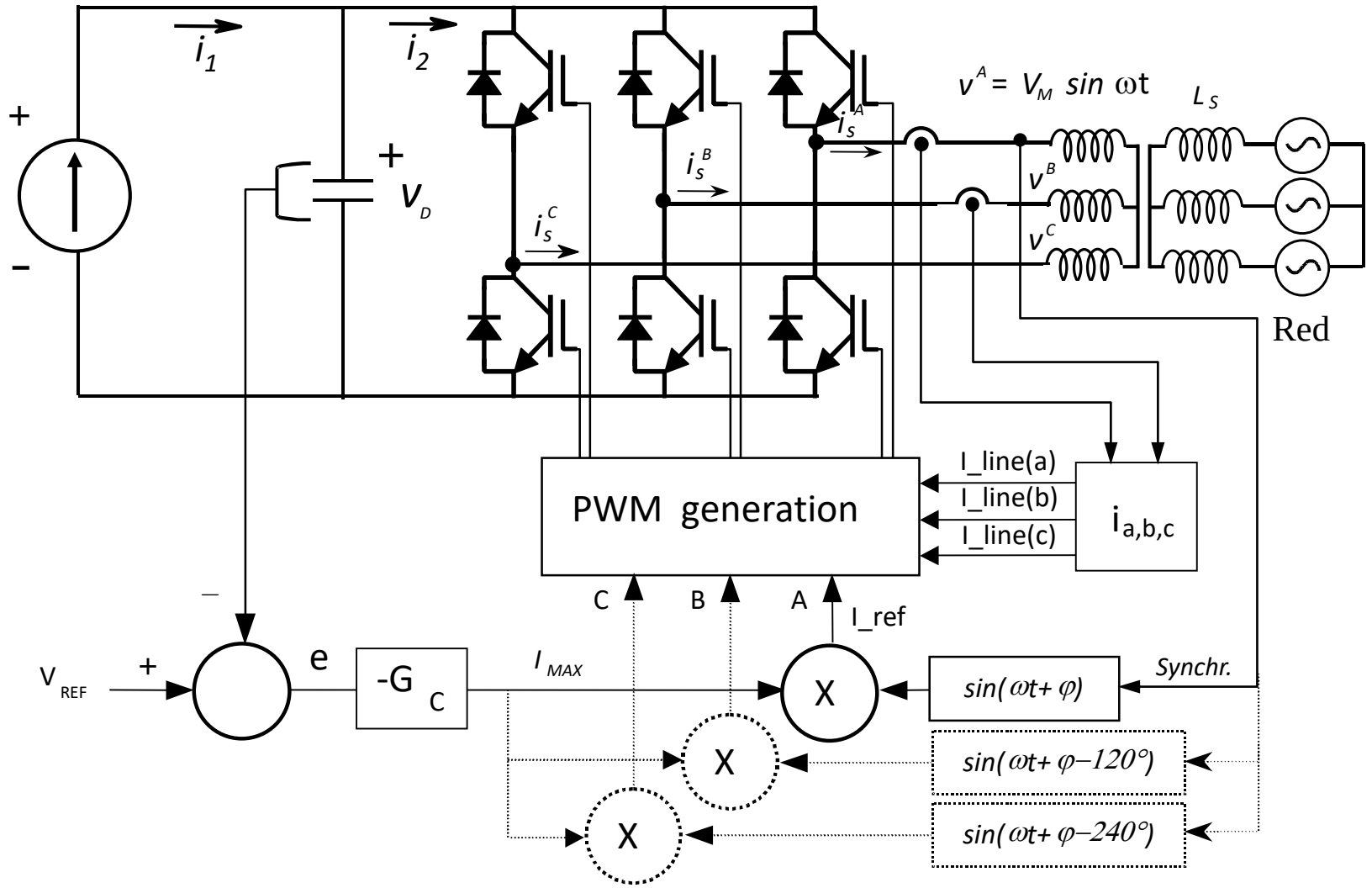
Ejemplo aplicación: Generación Eólica
Full-scaled power converter



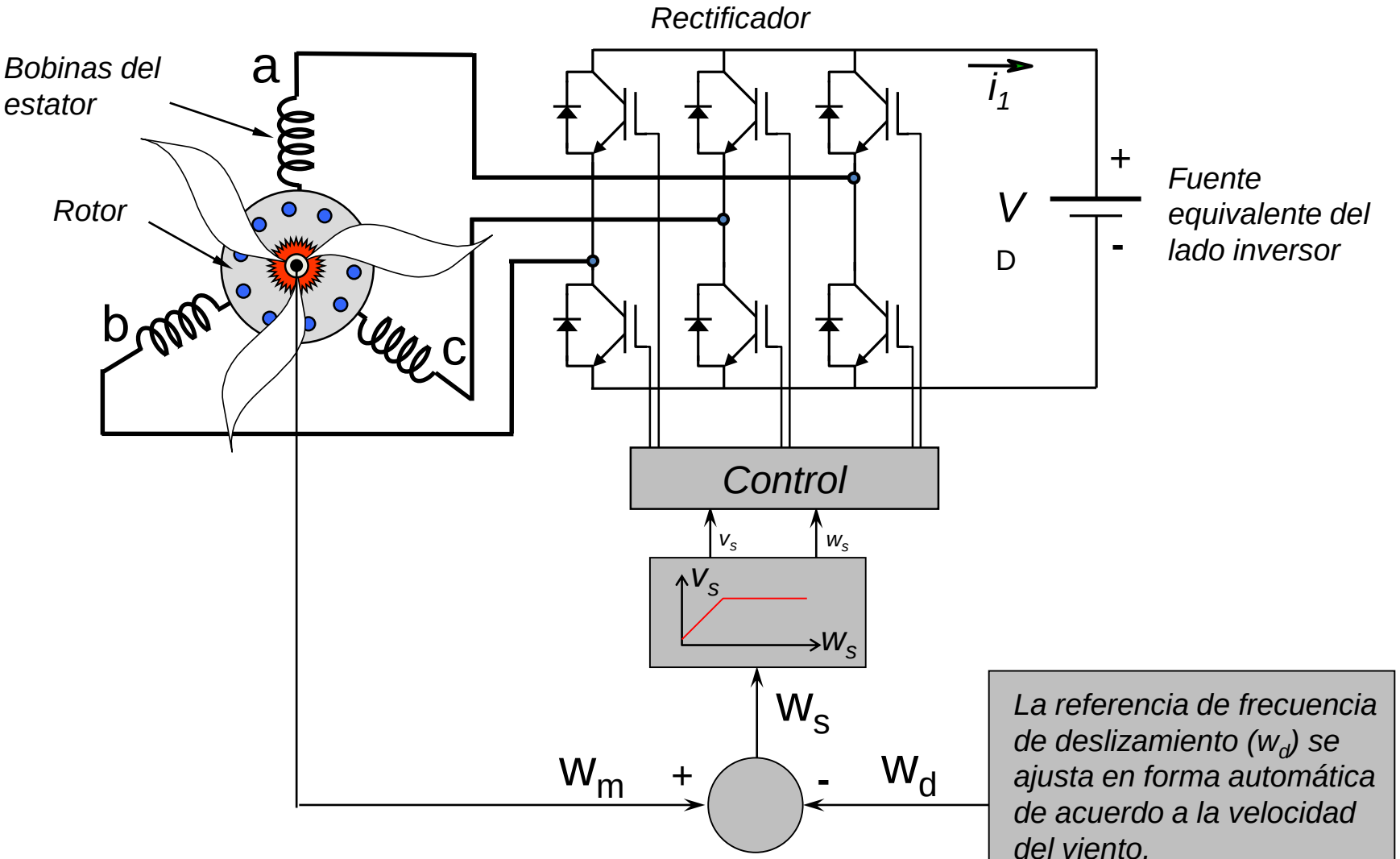
1. En este caso el rectificador es de conmutación forzada porque no puede ser un puente de diodos debido a que el generador de inducción necesita absorver potencia reactiva para generar.
2. El inversor ajusta el factor de potencia en la salida (atraso, en fase o en adelanto) y mantiene el voltaje V_D controlado a través de un lazo de control y una referencia V_{ref} prefijada.
3. De esta forma, el rectificador vé el sistema como una fuente de voltaje V_D. Para el control del generador se fija una frecuencia de deslizamiento de referencia (de valor negativo), lo cual implica tener que medir la velocidad angular de la máquina.
4. Como V_D es constante, la inyección de potencia se mide por la corriente DC del rectificador.
5. La referencia de deslizamiento se ajusta automáticamente según el viento.
6. Existes otros métodos de control mucho más complicados pero más efectivos.

Ejemplo aplicación: Generación Eólica

Full-scaled power converter



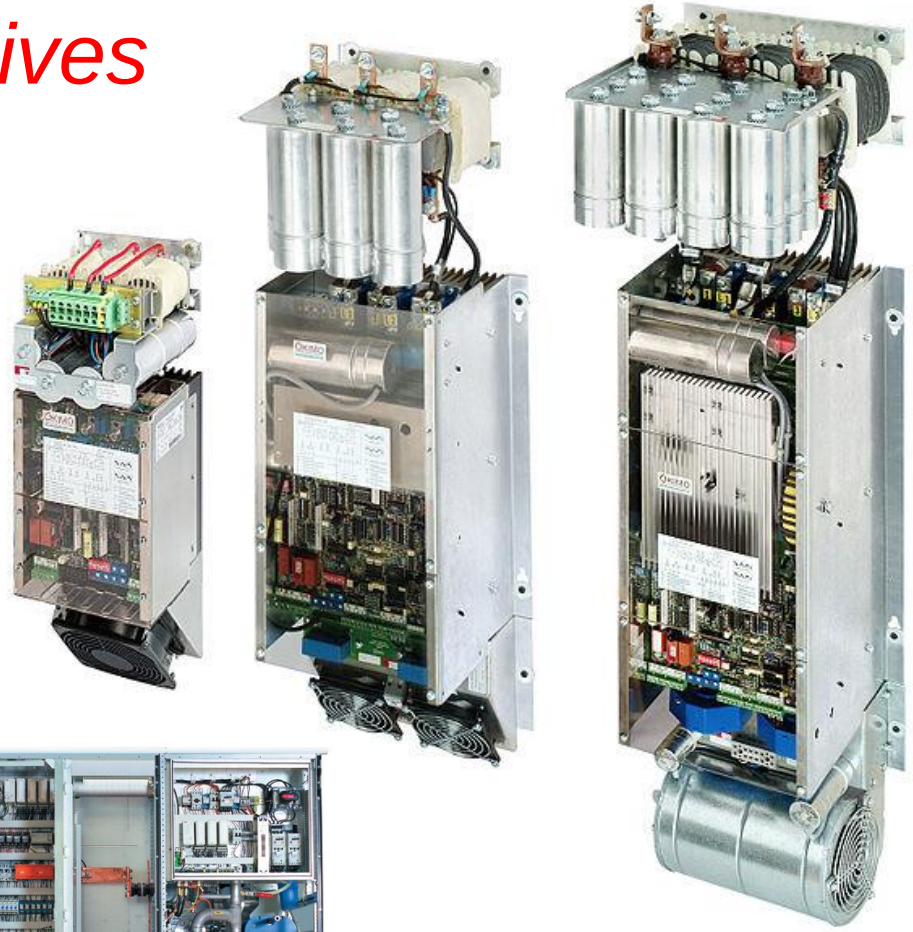
Ejemplo aplicación: Generación Eólica
Full-scaled power converter

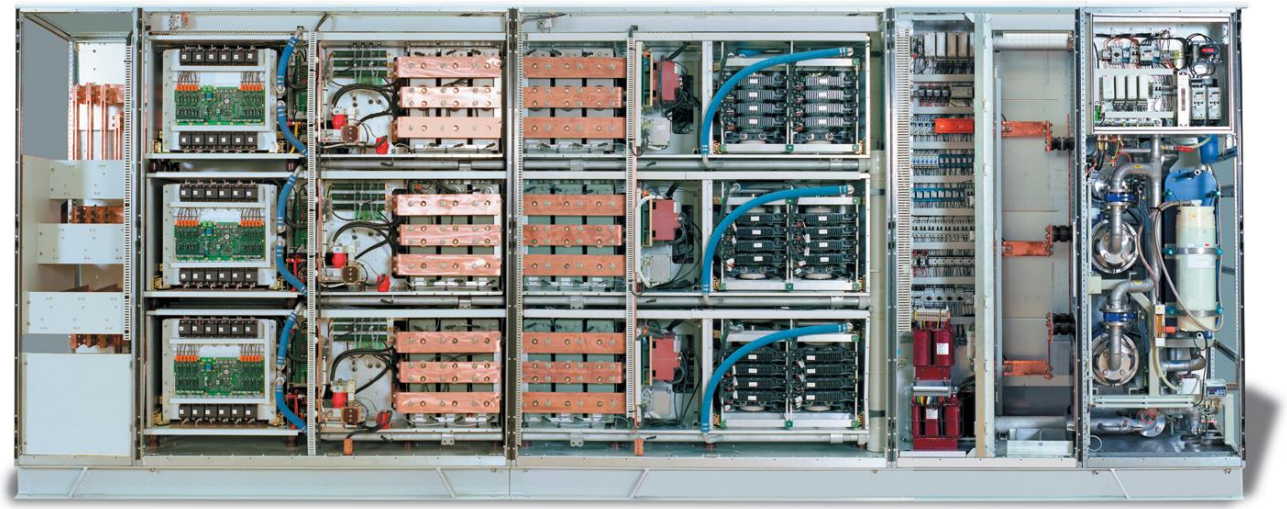


La referencia de frecuencia de deslizamiento (w_d) se ajusta en forma automática de acuerdo a la velocidad del viento.

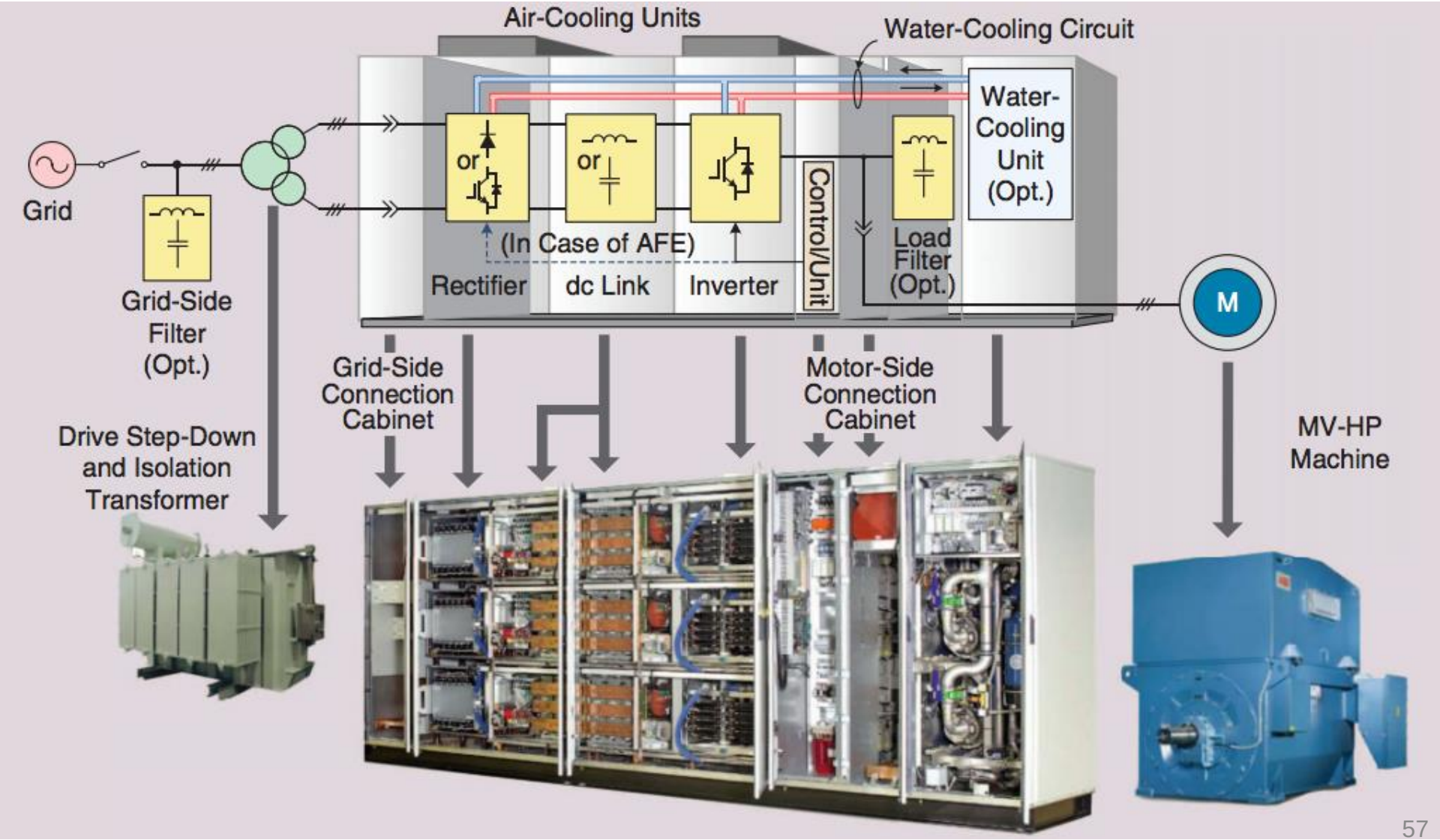
Ejemplo aplicación: Motores Industriales *Variable-frequency Drives*







Ejemplo aplicación: Motores Industriales *Variable-frequency Drives*



Ejemplo aplicación: Vehículos Eléctricos *Variable-frequency Drives*



Mercedes-Benz SLS AMG E-CELL

4xMotors=392kW
400V Li-ion
48kWh

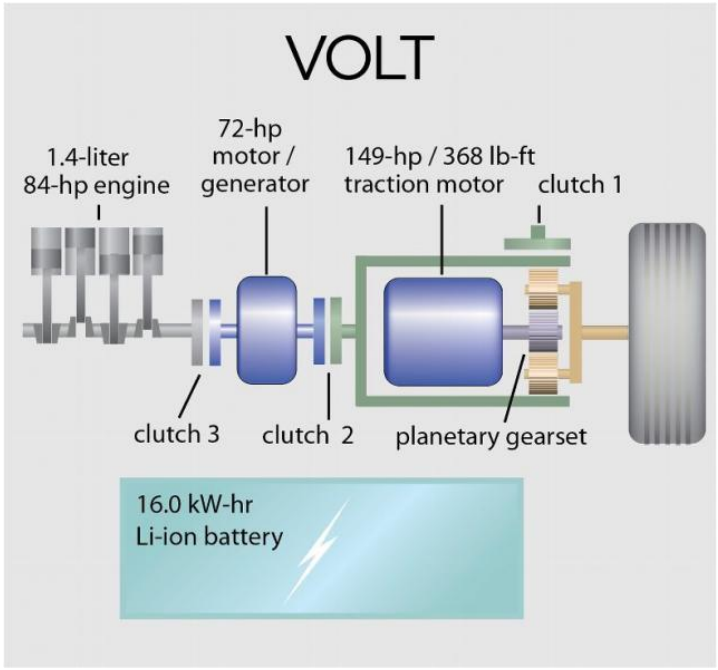
High-voltage batteries

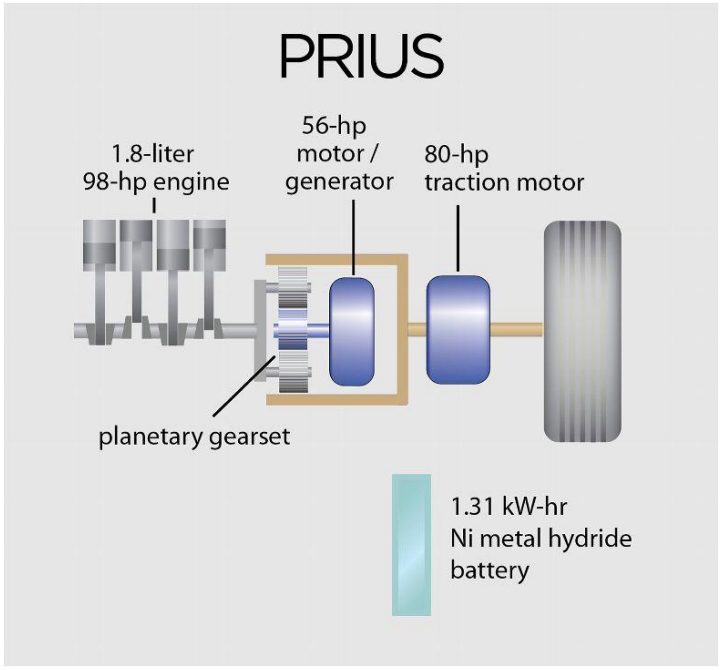
Power electronics

Gearbox

Single wheel drive,
2 electric motors
per axle

Ejemplo aplicación: Vehículos Híbridos *Variable-frequency Drive*



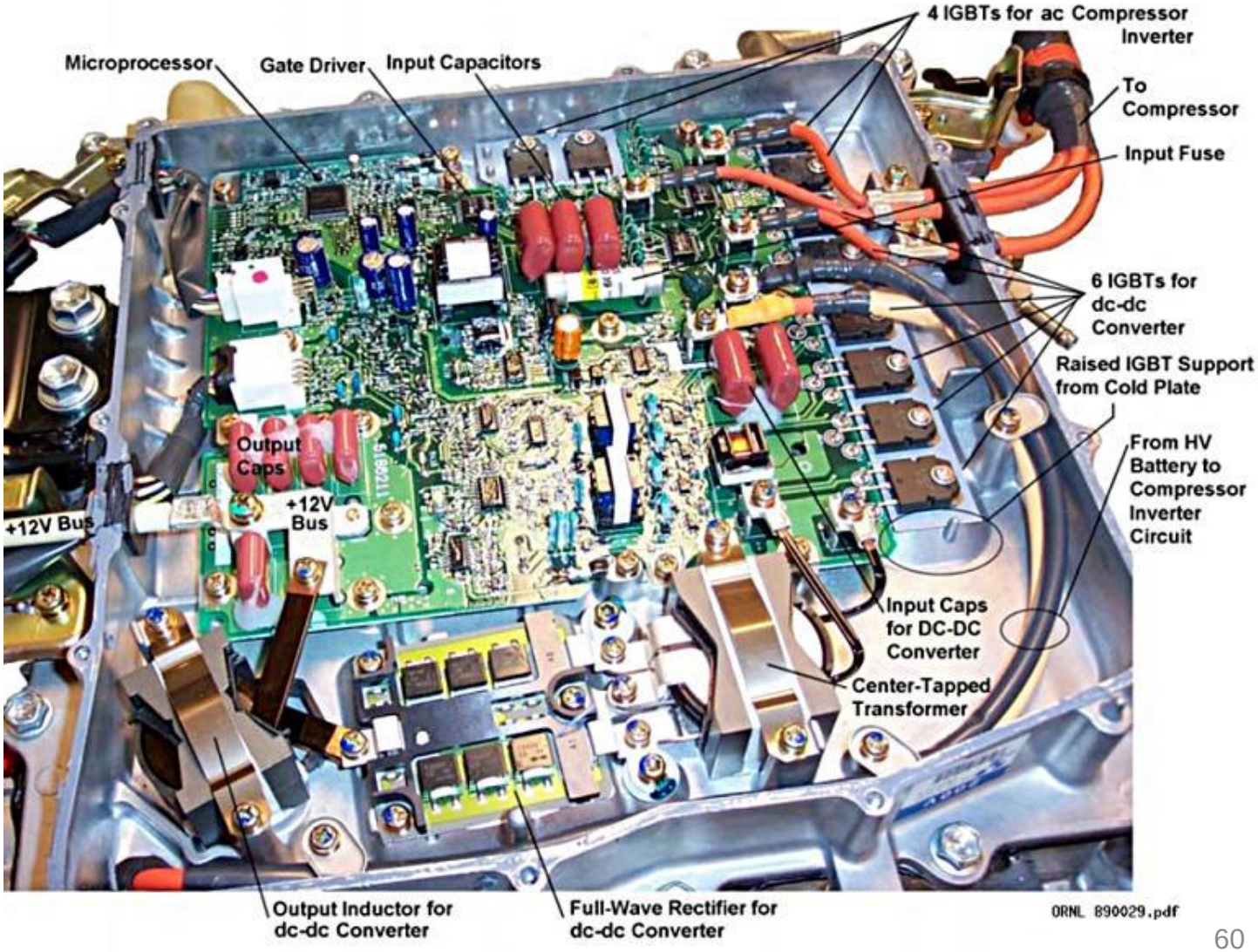






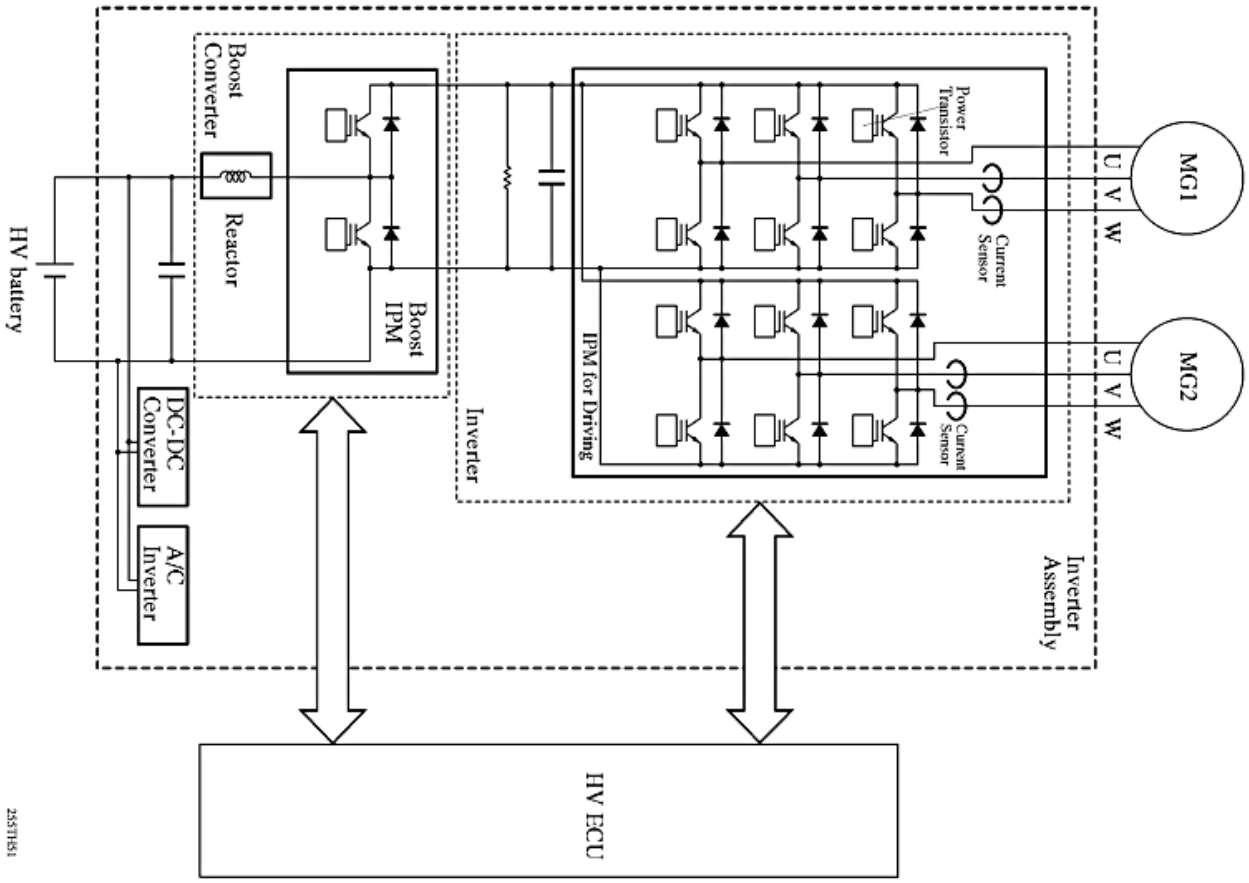
Ejemplo aplicación: Vehículos Híbridos *Variable-frequency Drive*

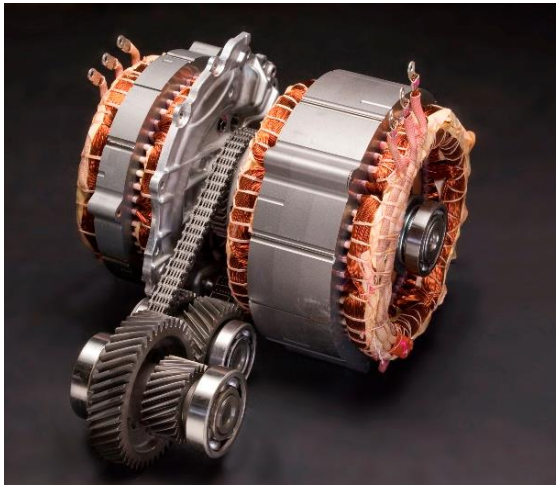
Toyota Prius:
DC-DC Converter and A/C Control

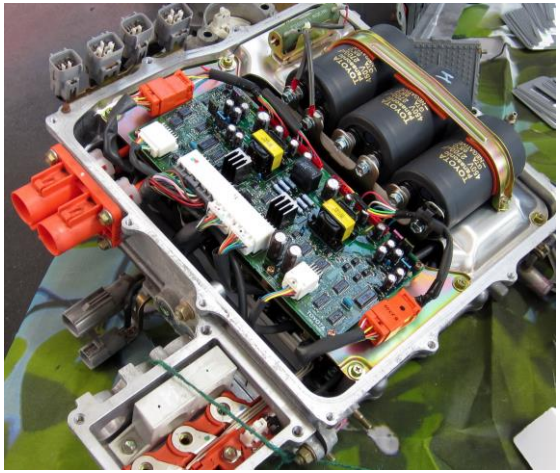


Ejemplo aplicación: Vehículos Híbridos *Variable-frequency Drive*

Toyota Prius: Inversores principales

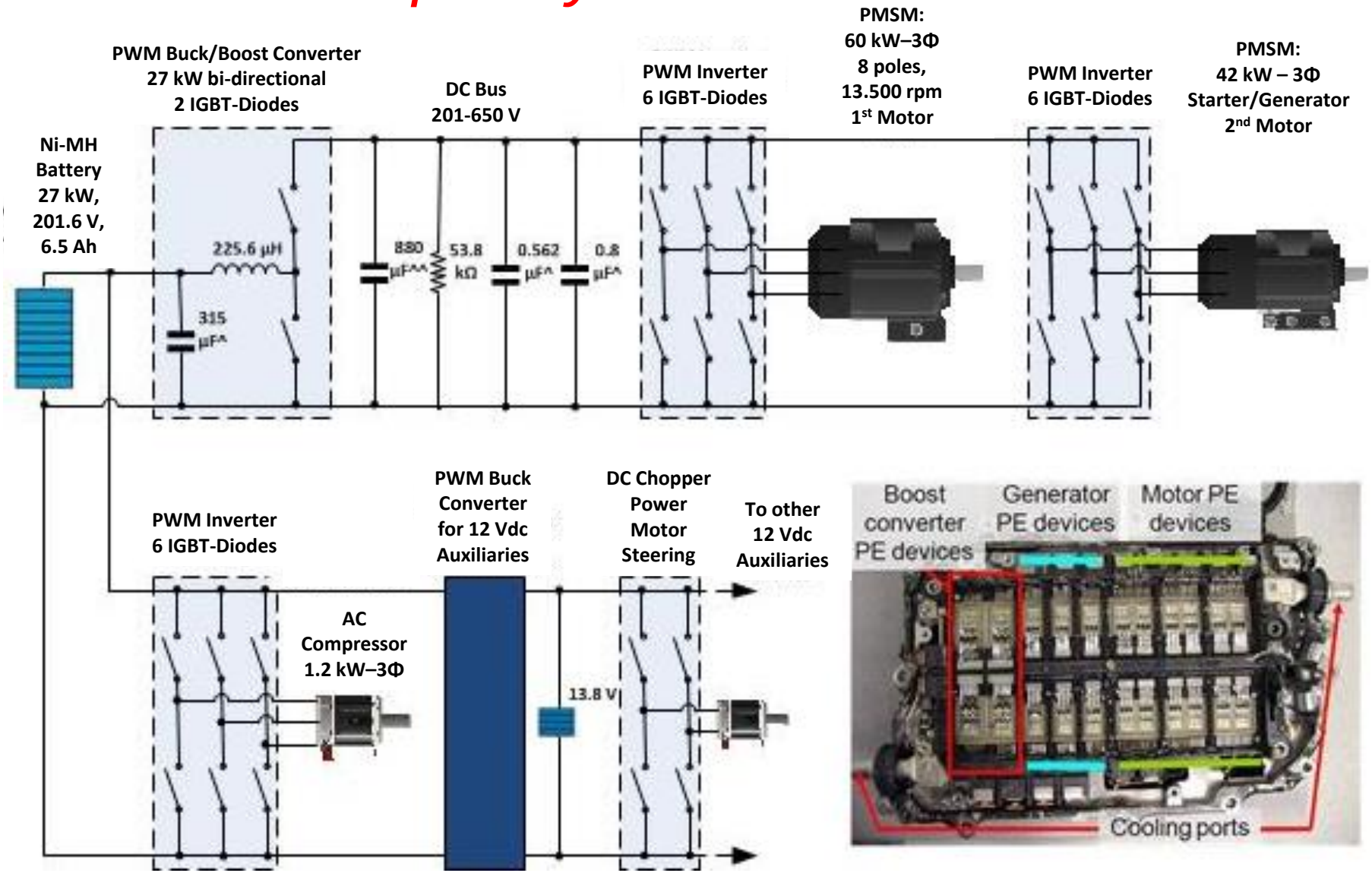






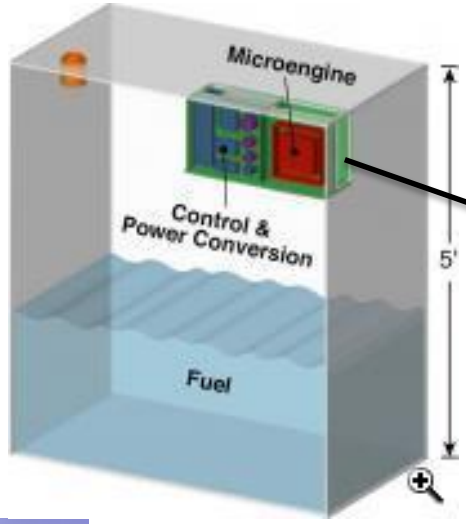
Ejemplo aplicación: Vehículos Híbridos

Variable-frequency Drive

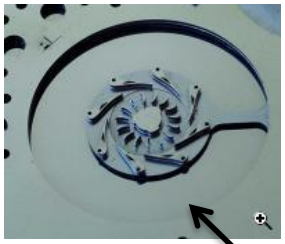


Ejemplo aplicación: Microturbina Generadora *Variable-frequency Drive*

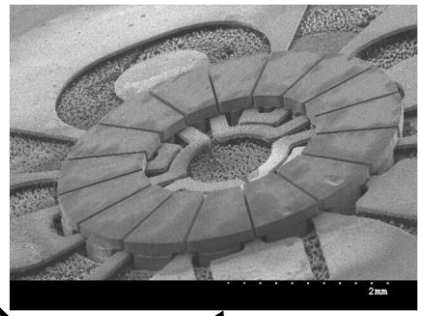


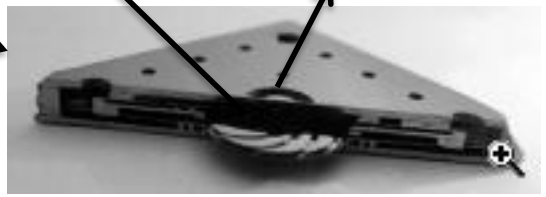


Micro-micro turbine



4mm Magnet Generator



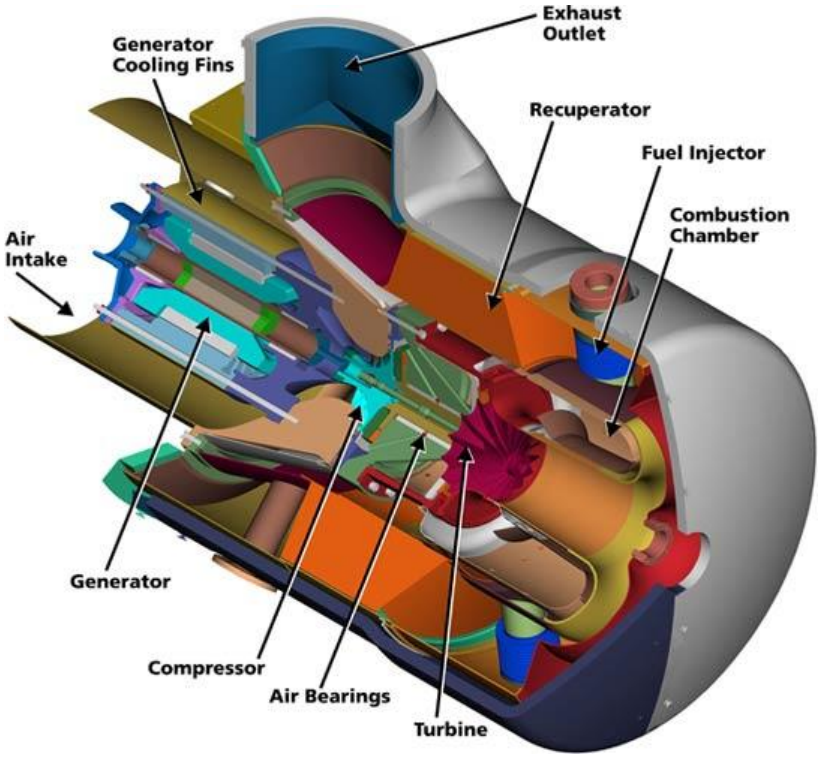


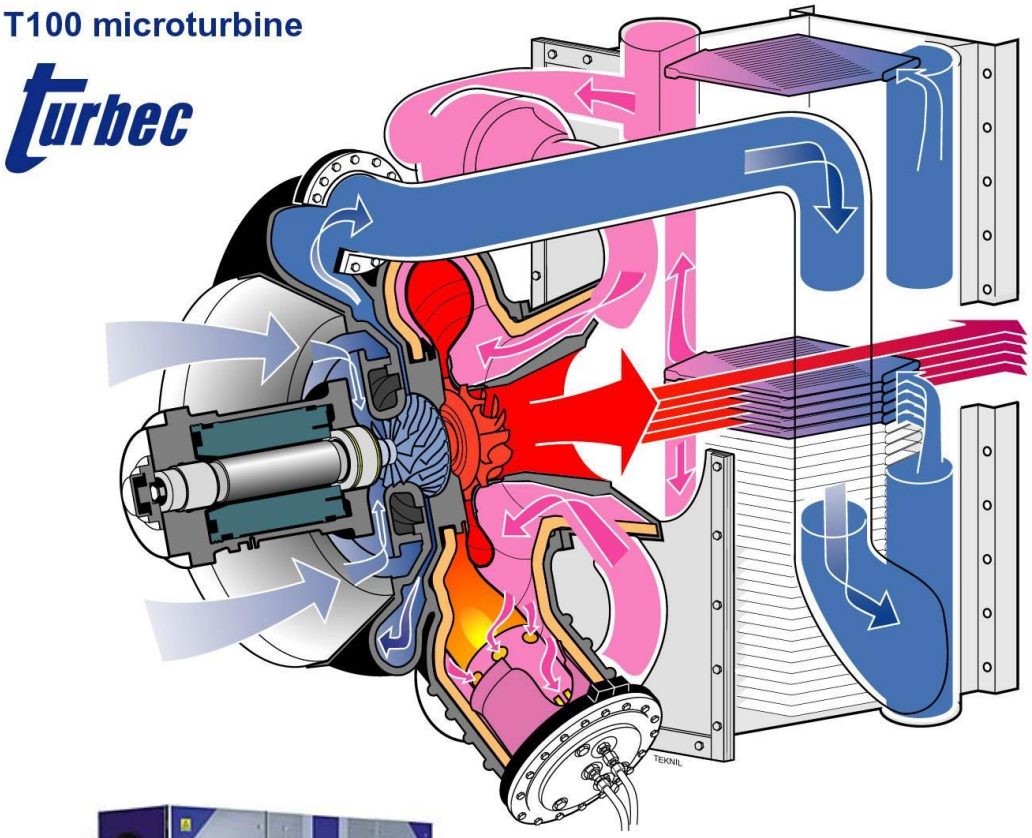






Ejemplo aplicación: Microturbina Generadora *Variable-frequency Drive*





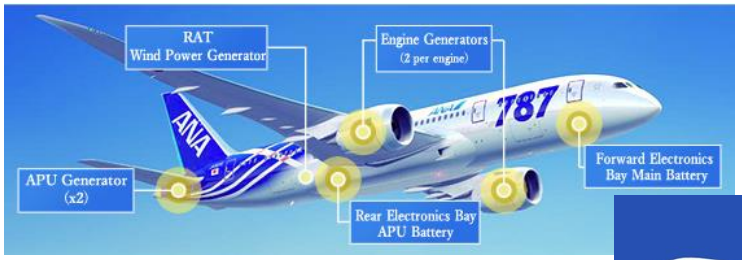


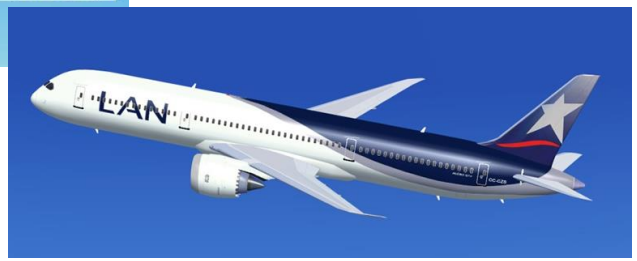
Rotor del generador síncrono de imanes permanentes (70.000 rpm)



100kW eléctricos y 155kW térmicos (eficiencia de 80%)

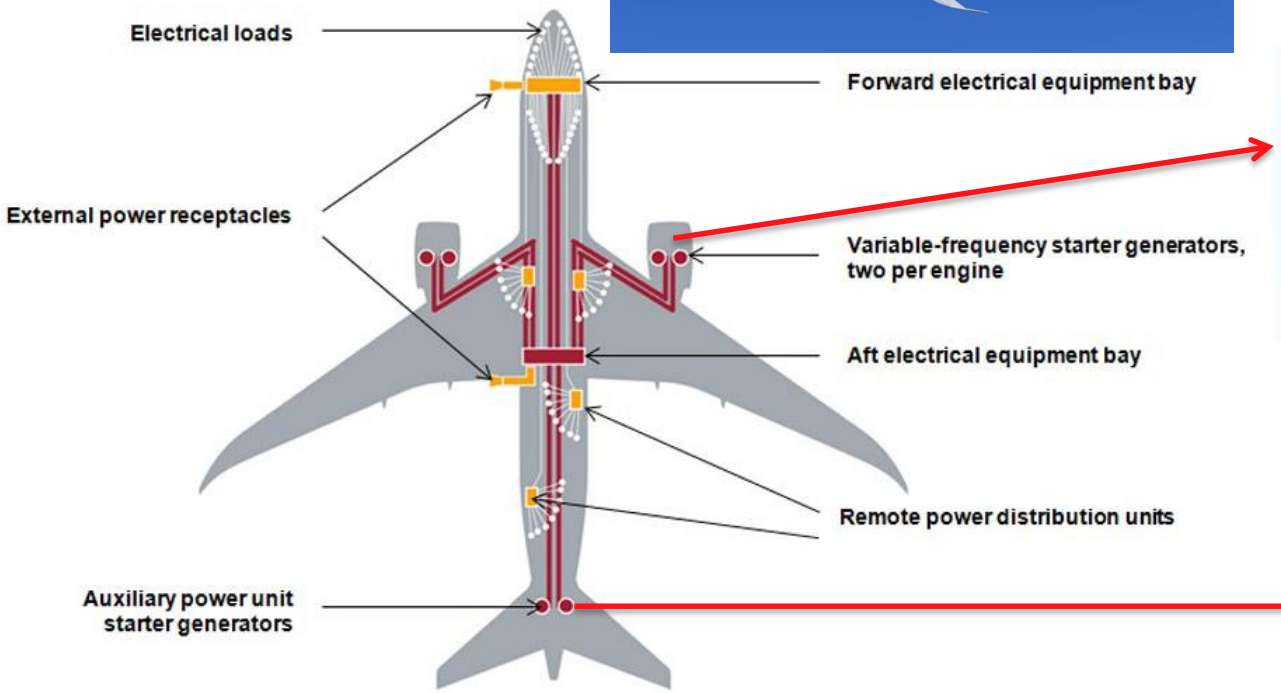
Ejemplo aplicación: Turbinas Generadoras *Variable-frequency Starter & Generator*

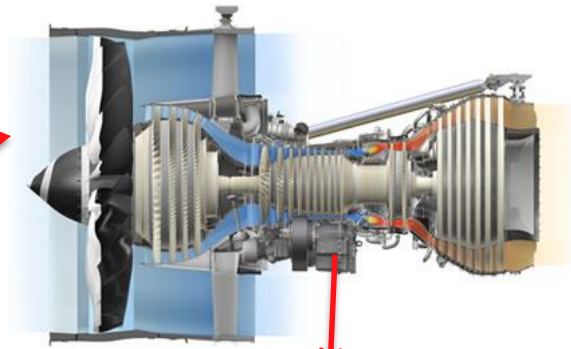






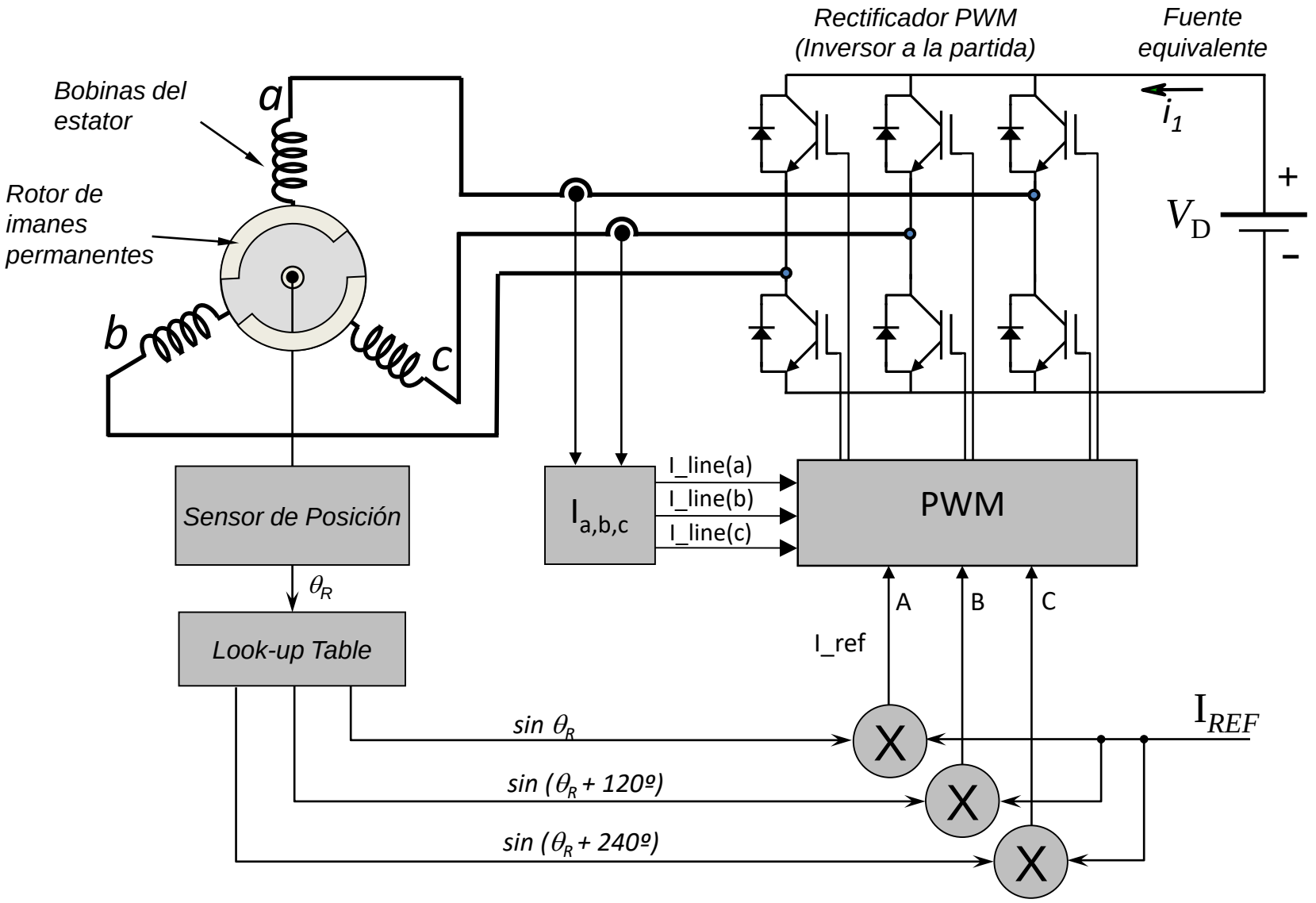
Boeing 787



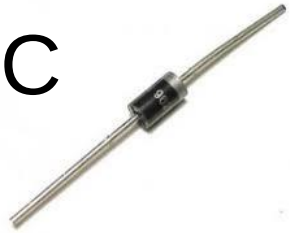




Ejemplo aplicación: Microturbina Generadora *Variable-frequency Drive*



Conversores AC-DC
Rectificadores



Diodo



Puente de Graetz 1Φ



Puente de Graetz 3Φ



Tiristor







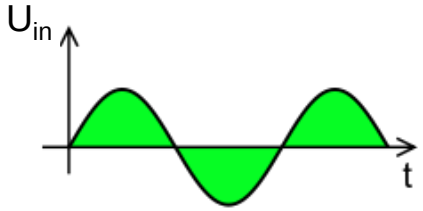




Estación con más de 5000 IGBTs



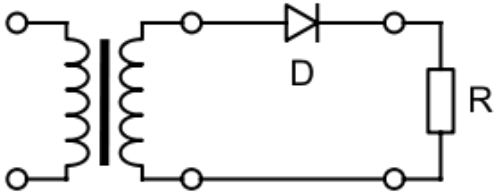
Conversores AC-DC
Rectificadores Básicos 1Φ

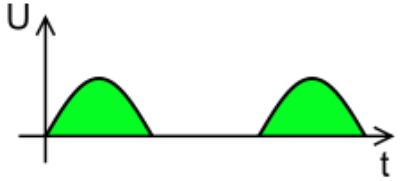


Rectificador de Media Onda

$$V_{out}^{rms} = \frac{V_{in}^{rms}}{\sqrt{2}} = 0.71 \times V_{in}^{rms}$$

$$V_{out}^{dc} = 0.45 \times V_{in}^{rms}$$

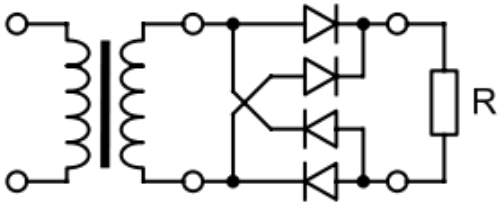


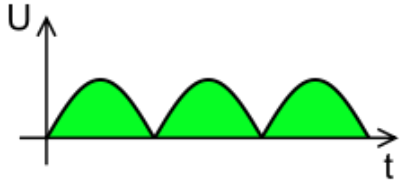


Rectificador de Onda Completa

$$V_{out}^{rms} = V_{in}^{rms}$$

$$V_{out}^{dc} = 0.9 \times V_{in}^{rms}$$

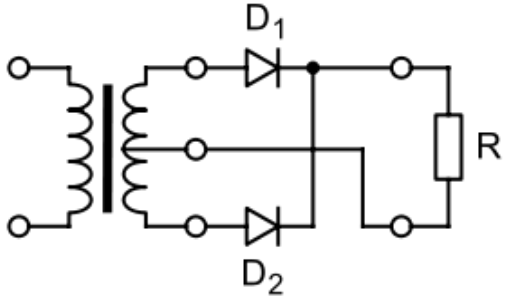


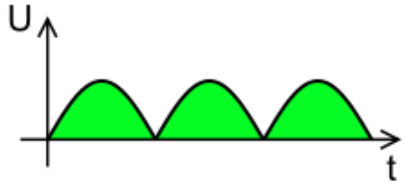


Rectificador de Onda Completa con punto medio

$$V_{out}^{rms} = V_{in}^{rms}$$

$$V_{out}^{dc} = 0.9 \times V_{in}^{rms}$$

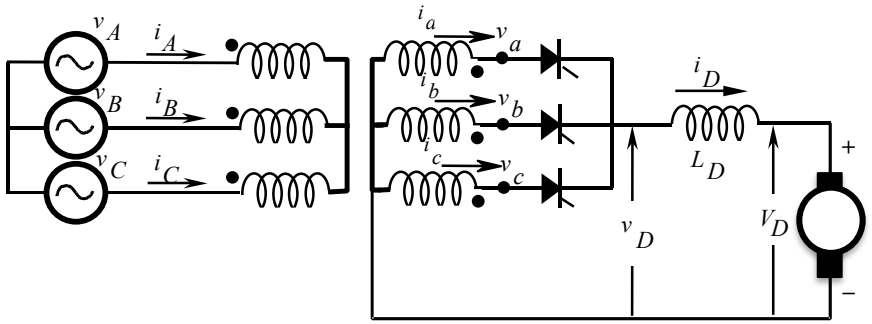




Conversores AC-DC

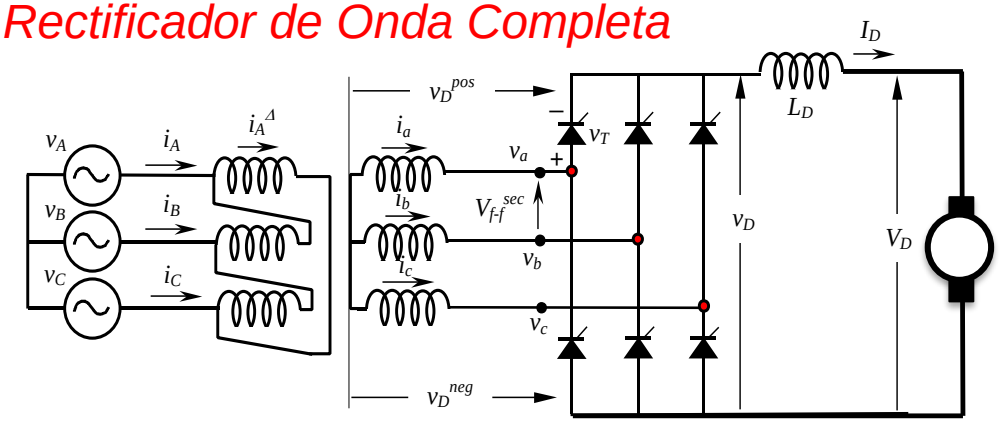
Rectificadores Básicos 3Φ

Rectificador de Media Onda

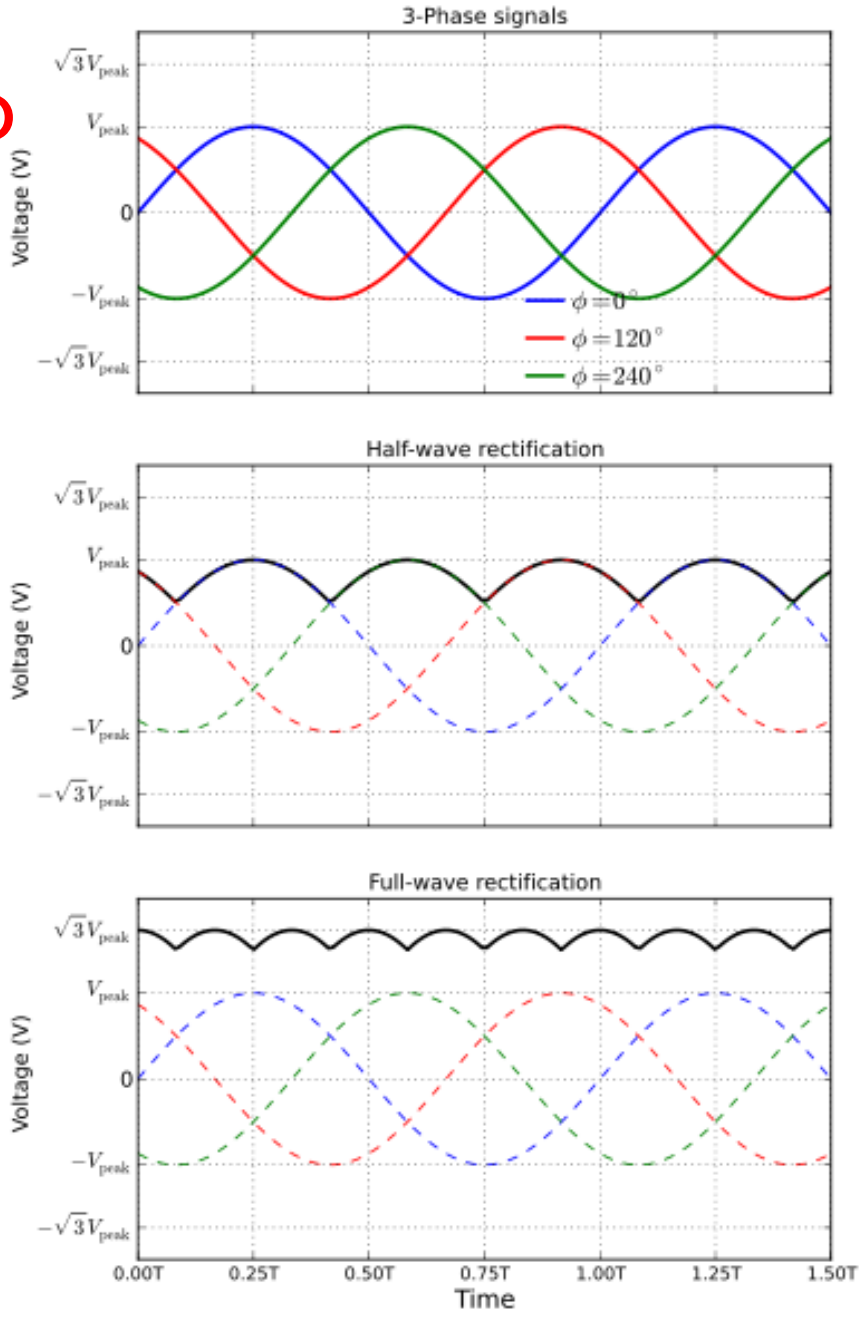


$$V_D \approx 1.17 \times V_{f\text{-}N}^{rms} \times \cos a$$

Rectificador de Onda Completa



$$V_D \approx 2.34 \times V_{f\text{-}N}^{rms} \times \cos a$$

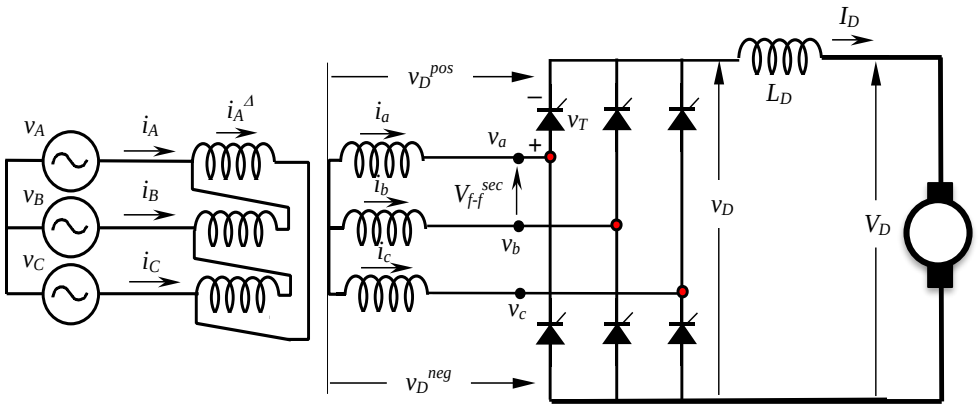


Conversores AC-DC
Rectificador Tiristorizado

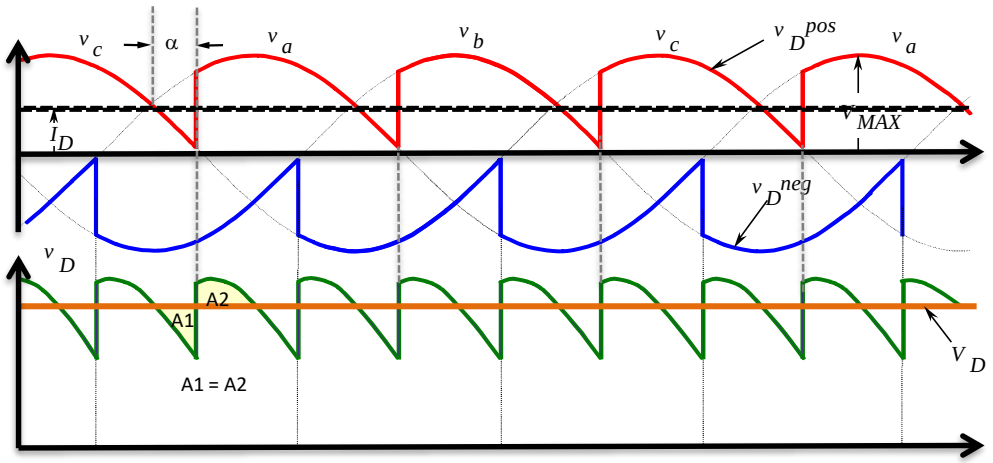
Rectificador Controlado de 6 pulsos:

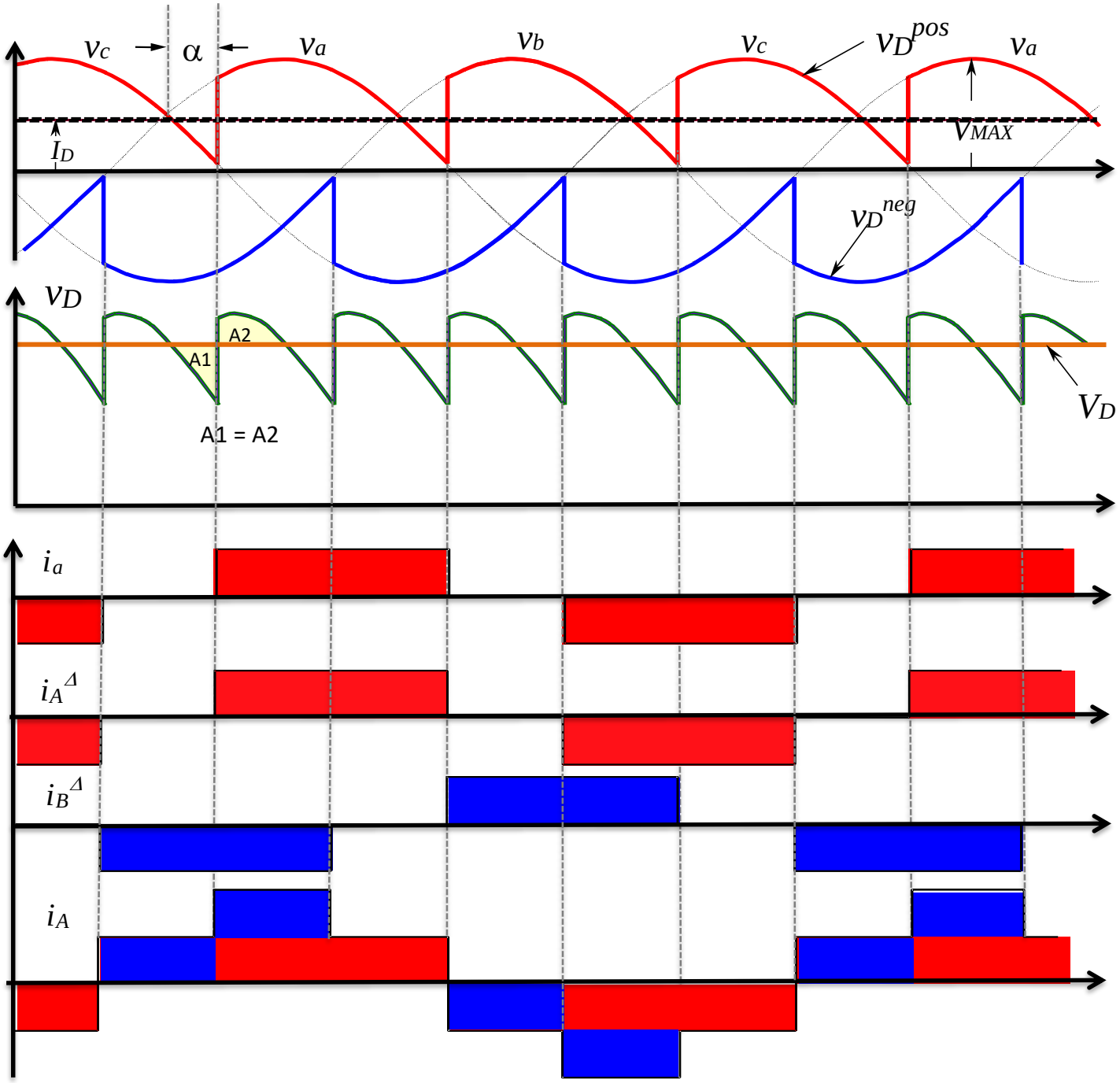
Rectifica la onda completa de los voltajes trifásicos fase-fase mediante el uso de tiristores (semiconductor que funciona como el diodo pero tienen un control de encendido, seleccionando el ángulo α=0-180º en el cual comienza a conducir). Nota: el tiristor no tiene control de apagado, deja de conducir bajo las mismas condiciones del diodo.

Permite que la carga (e.g. motor) trabaje en los dos cuadrantes de voltaje sin cambiar el sentido de la corriente (el motor puede generar pero invirtiendo el voltaje). Este sistema siempre absorbe potencia reactiva desde la red.



$$V_D \approx 2.34 \times V_{f\text{-}N}^{rms} \times \cos a$$

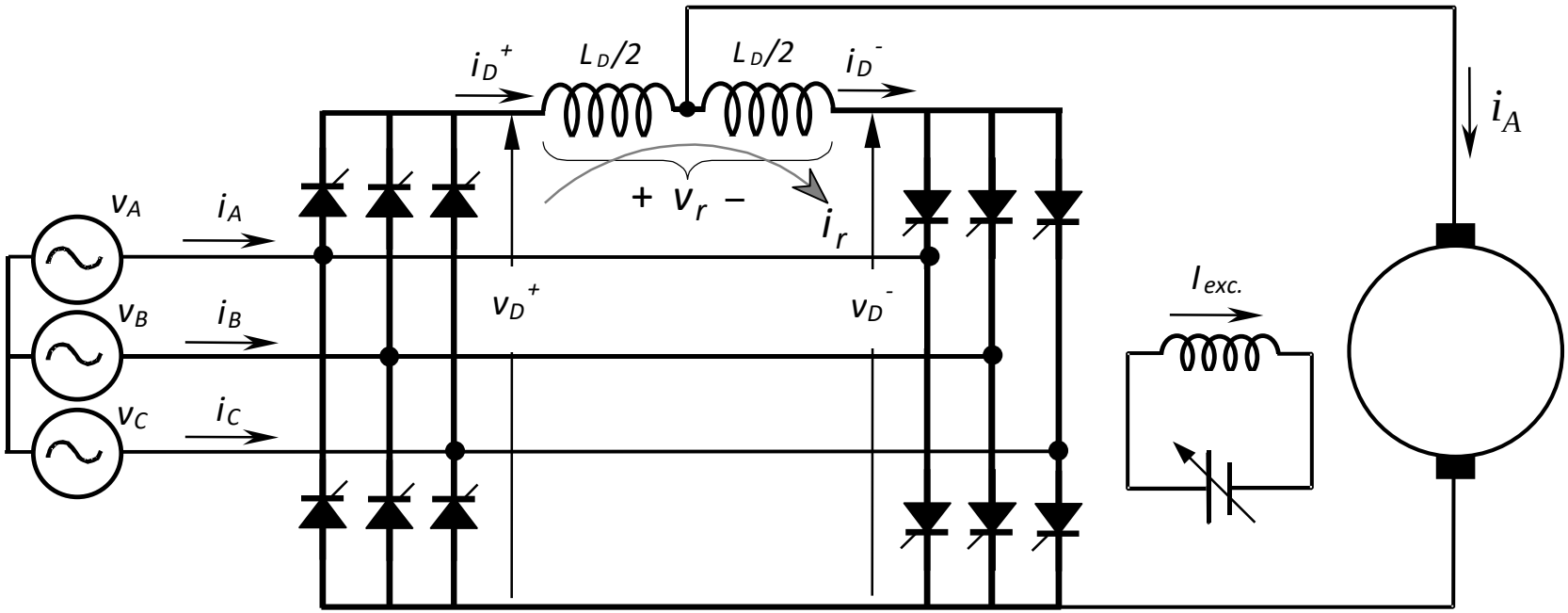



v_c
α
v_a
v_b
v_c
v_D^{pos}
v_a
I_D
V_{MAX}
v_D^{neg}
v_D
A2
A1
A1 = A2
V_D
i_a
i_A^{Δ}
i_B^{Δ}
i_A

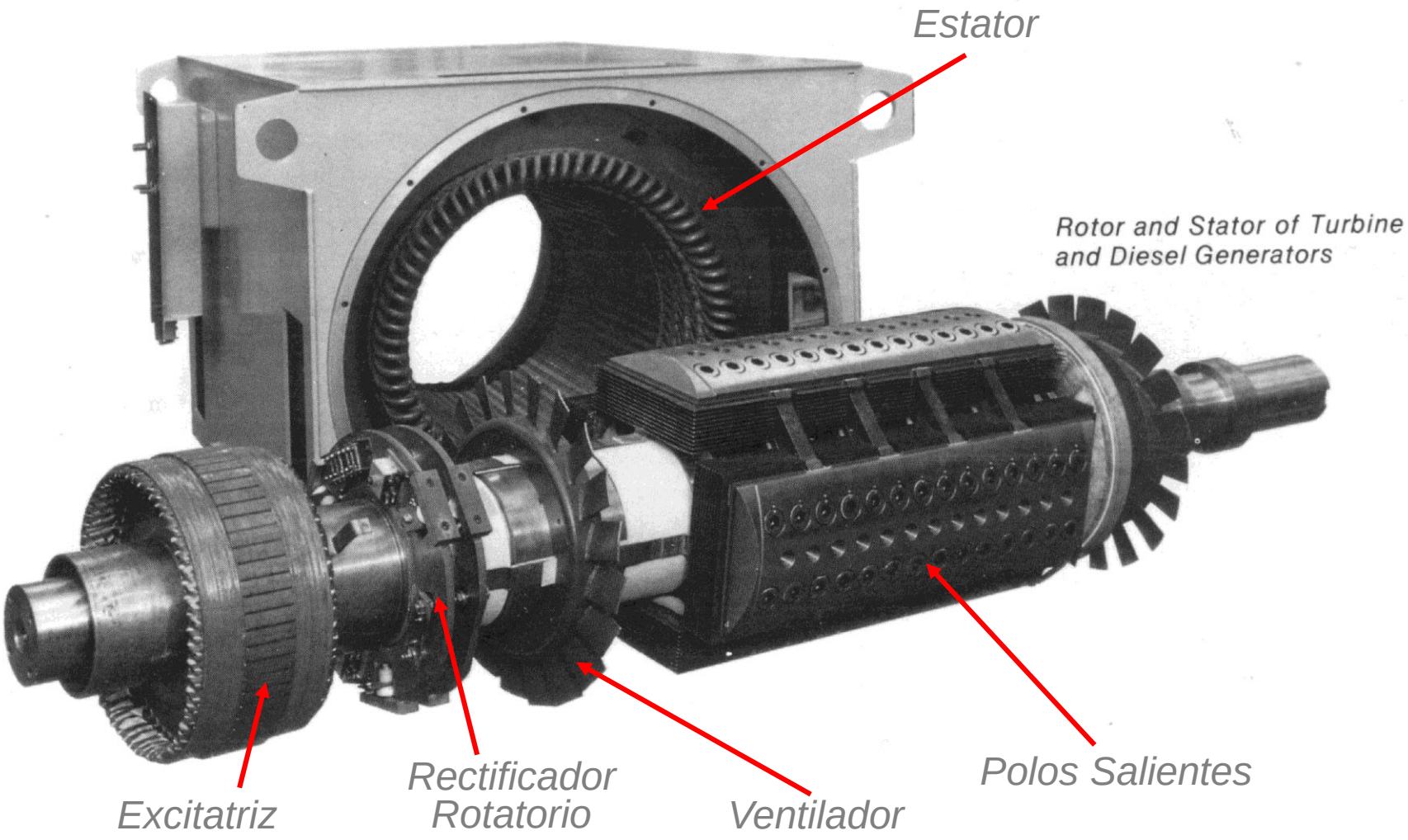
Conversores AC-DC
Rectificador Tiristorizado

Conversor Dual con corriente circulante:

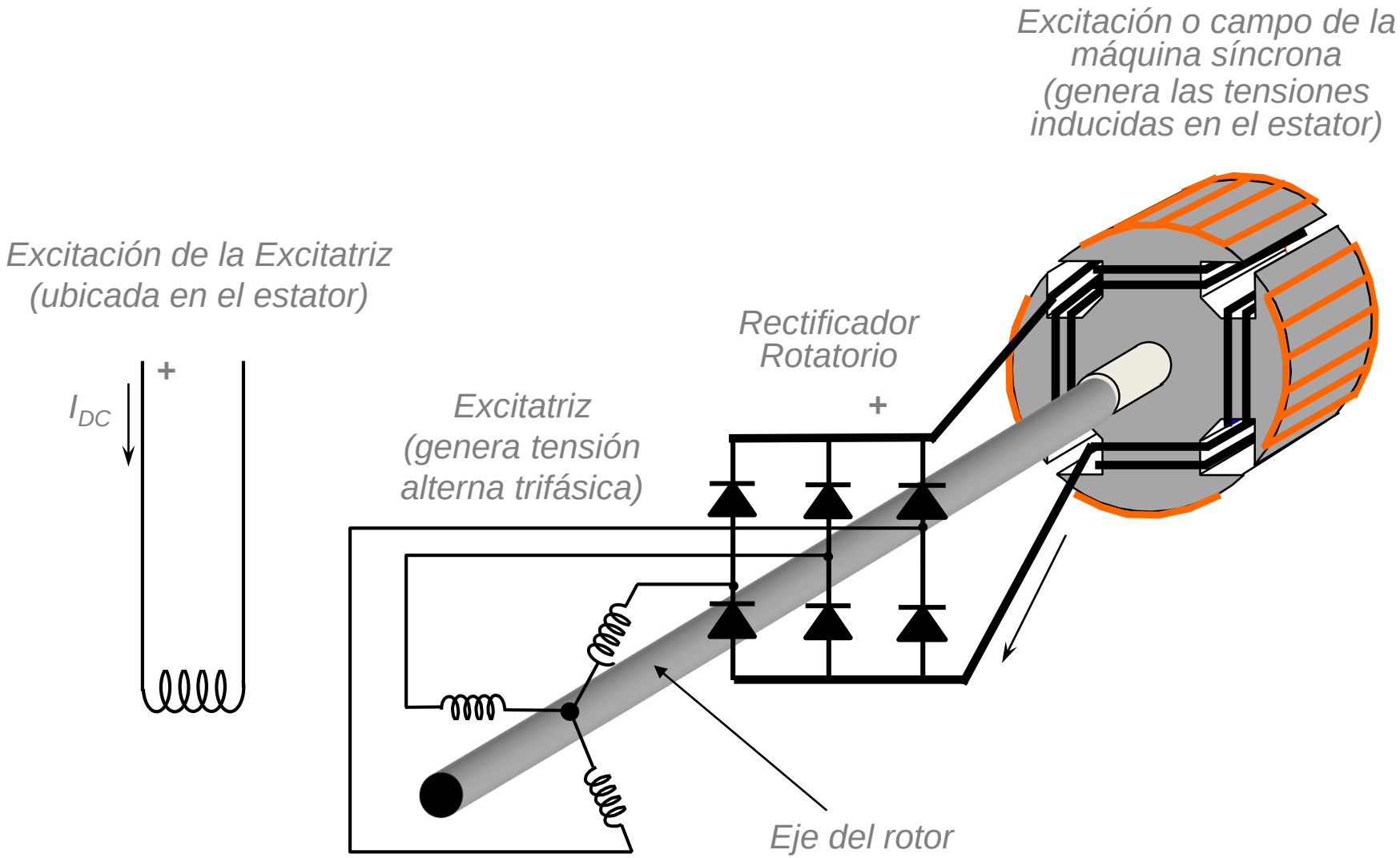
Con esta topología también se puede invertir la corriente continua y de esta forma operar en los cuatro cuadrantes de voltaje y corriente (lado DC). En el lado AC sólo se puede trabajar en los dos cuadrantes de potencia activa, ya que este conversor siempre consume potencia reactiva. Los dos rectificadores operan de forma complementaria (el derecho opera con α y el derecho con 180º-α).



Ejemplo de una aplicación: Rectificador Excitatriz Sin Escobillas



Ejemplo de una aplicación: Rectificador
Excitatriz Sin Escobillas



Conversores AC-AC
Cicloconversores





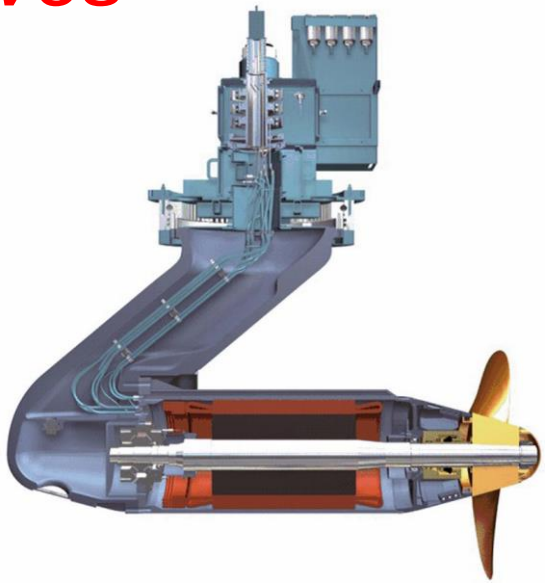




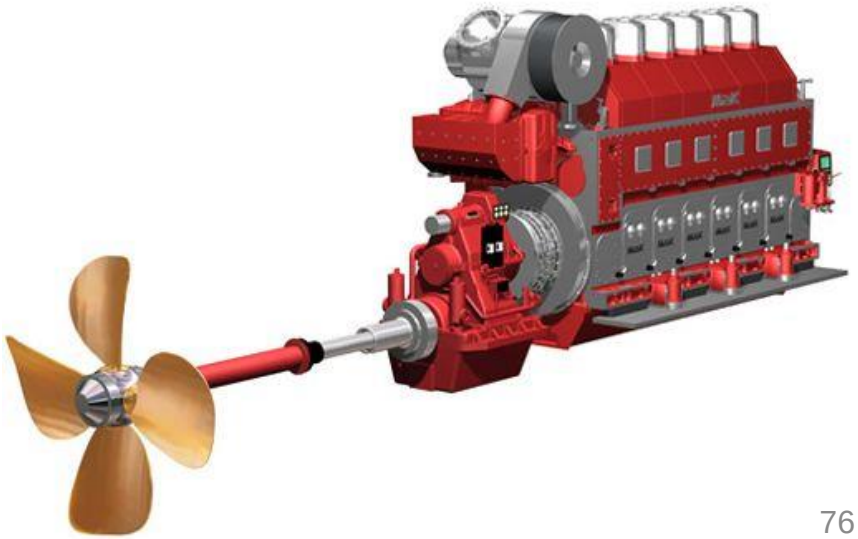
Ejemplo aplicación: Vehículos Eléctricos

Low Speed Variable-frequency Drives



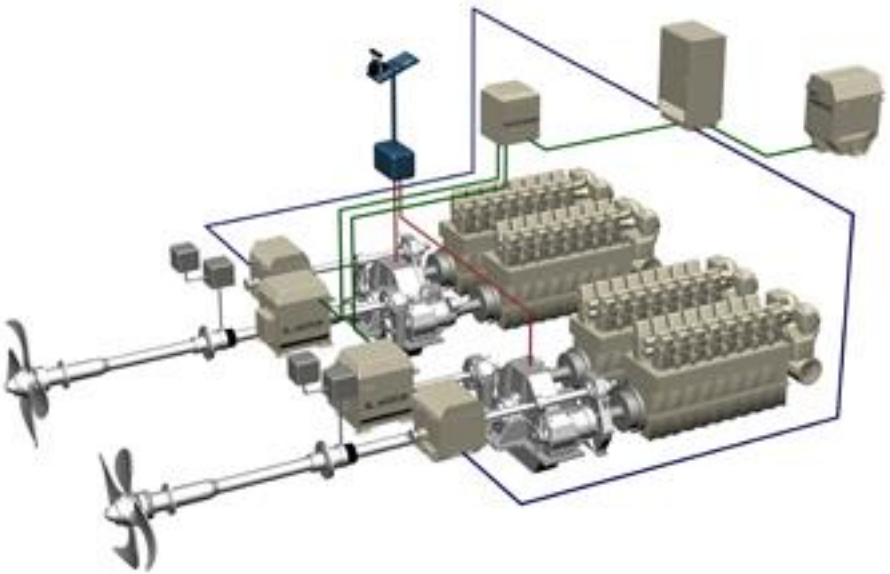


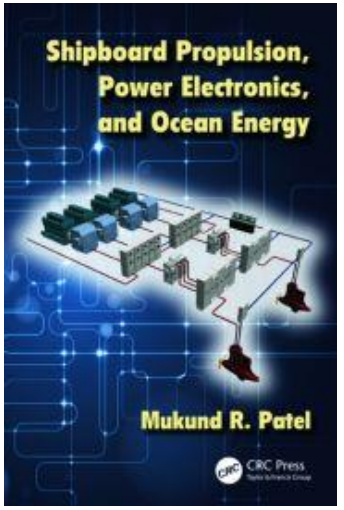


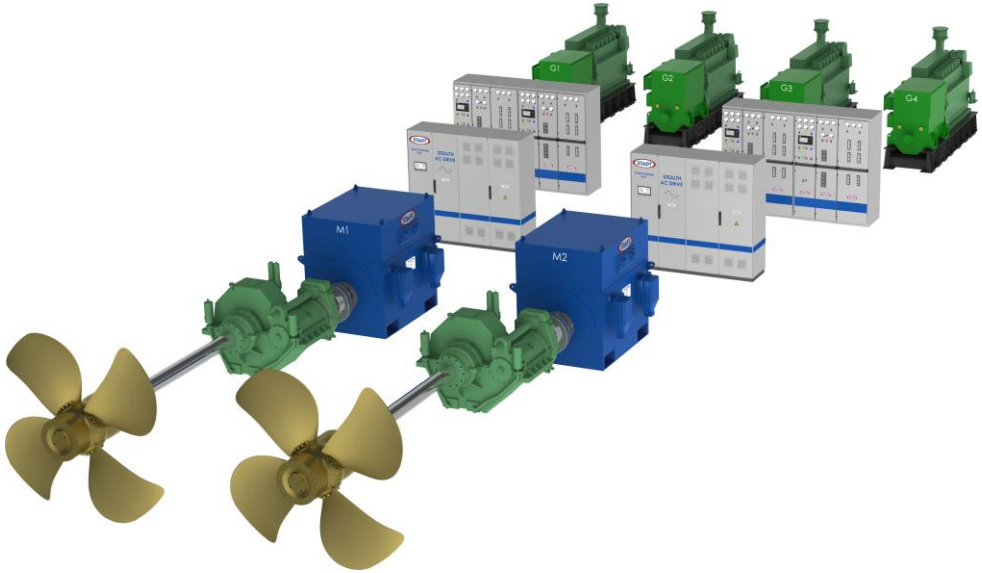


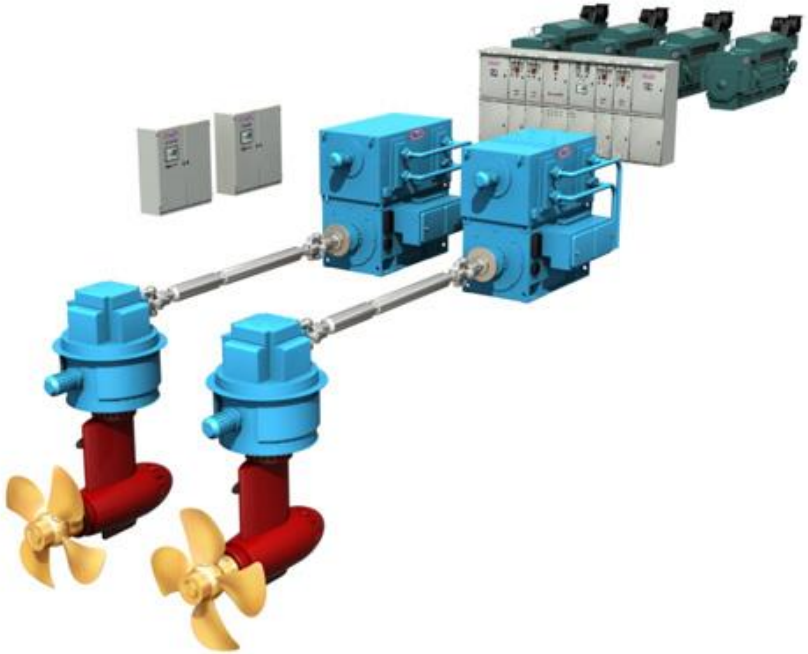
Ejemplo aplicación: Vehículos Eléctricos

Low Speed Variable-frequency Drives



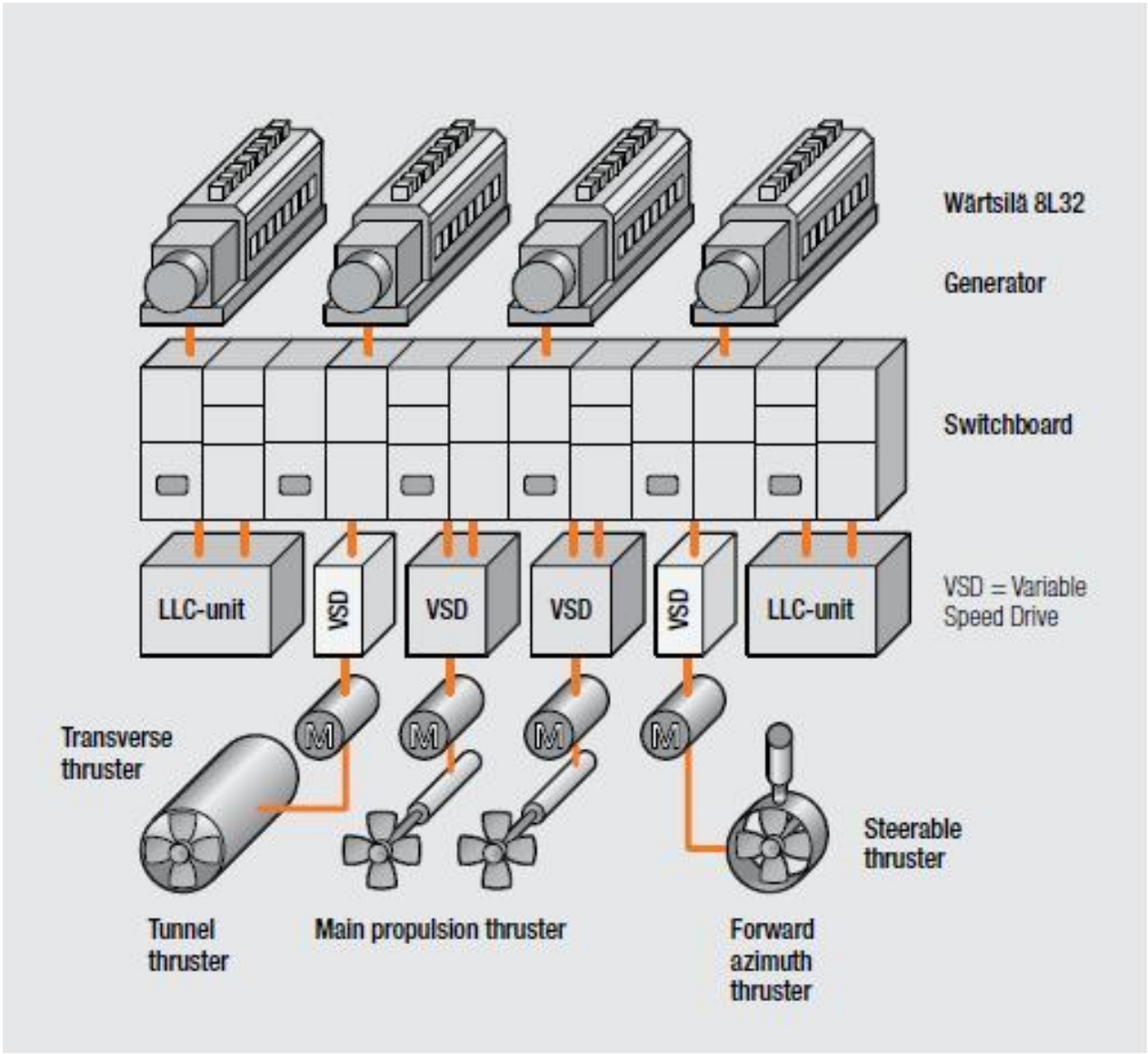






Ejemplo aplicación: Vehículos Eléctricos

Low Speed Variable-frequency Drives

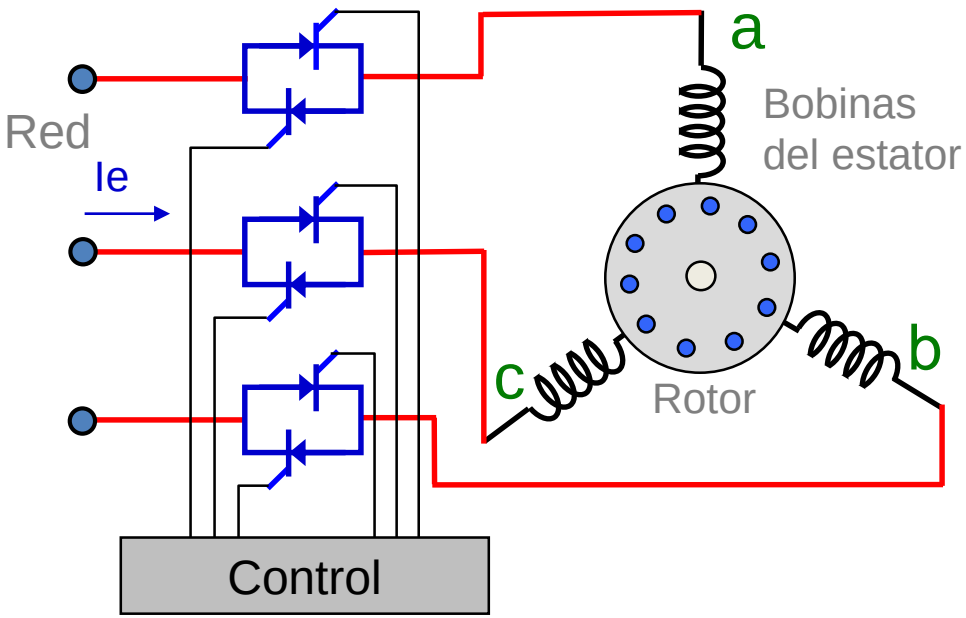


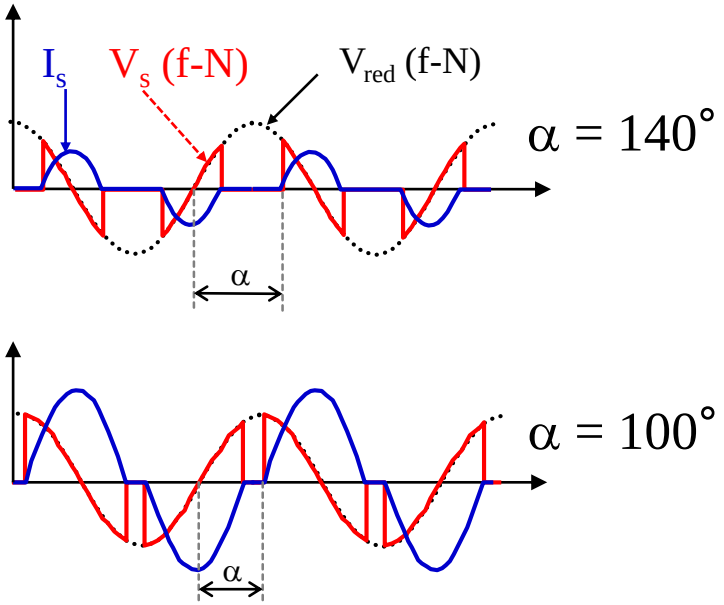


Conversor AC-AC

Soft starter

Este método permite un control de la corriente del estator mediante tiristores (semiconductor de alta potencia) mediante la activación de este en el ángulo α (α=0º cuando el voltaje AK pasa a ser positivo y se podría conducir). Con α=180º la corriente es nula y con α cercano a 80º o menos es máxima (motor inductivo).





Tiristor: es un semiconductor de muy alta potencia y eficiencia que se activa con una señal de control y deja de conducir con un voltaje AK negativo (no hay control de apagado).

Cicloconversor

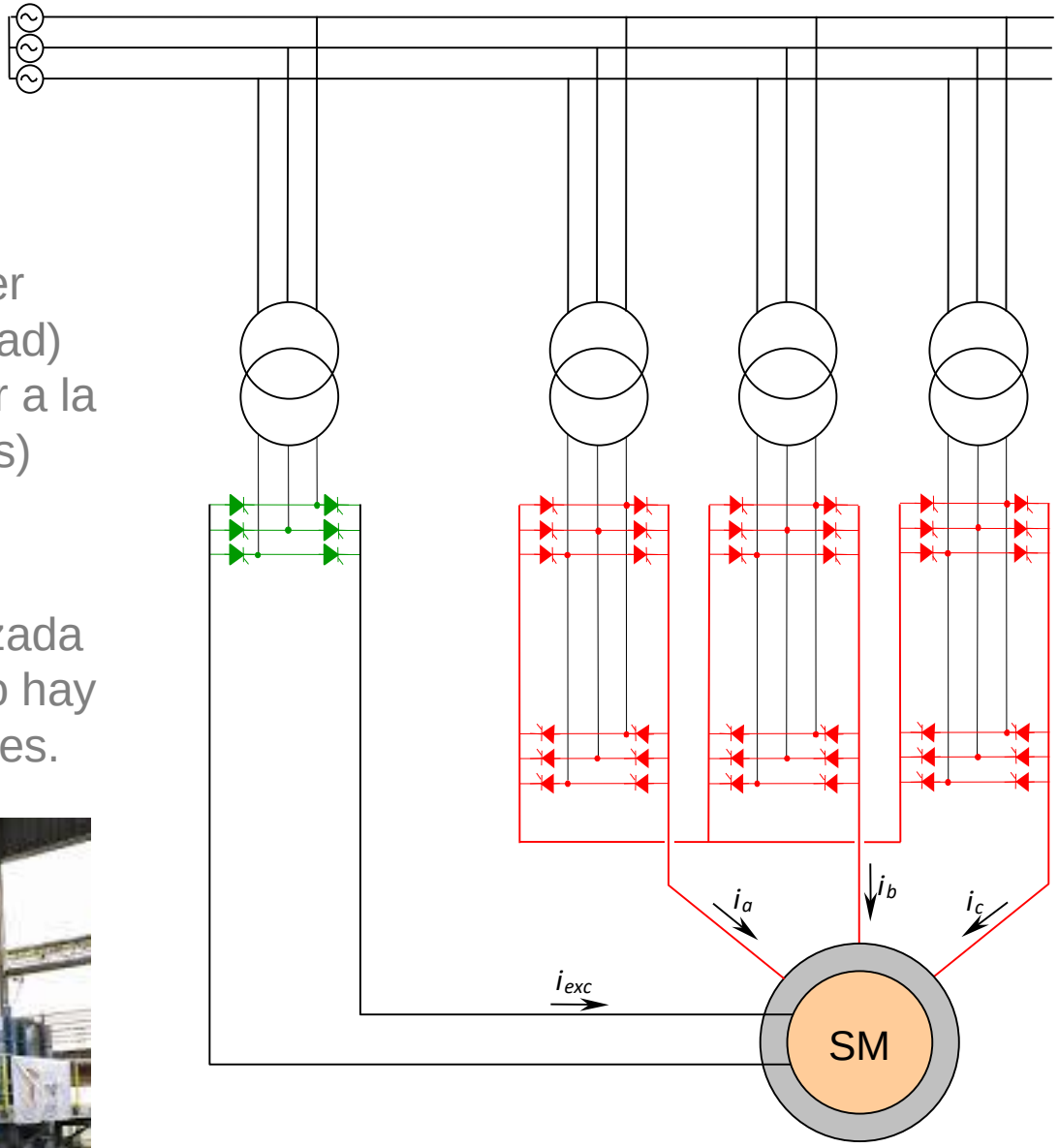
Máquina Síncrona

Molinos SAG:

El cicloconversor permite imponer una frecuencia del CMR (velocidad) pero esta debe ser mucho menor a la frecuencia de la red (1/3 o menos) para conseguir un voltaje relativamente “limpio”.

Notar que la conmutación es forzada por la carga (máquina) ya que no hay control de apagado en los tiristores.





Cicloconversor

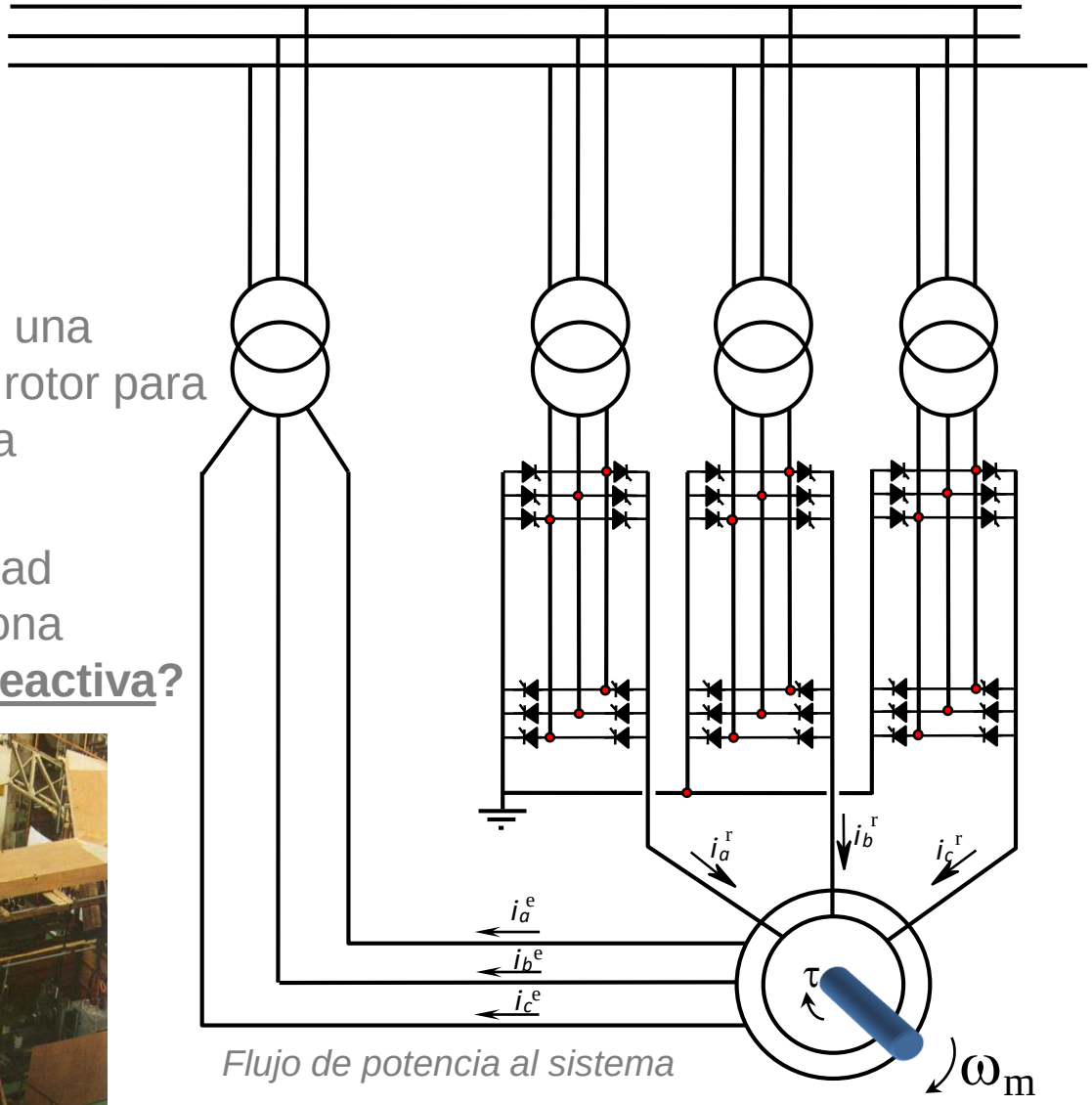
M. Inducción R.B

Generador Hidráulico:

El cicloconversor permite imponer una frecuencia de deslizamiento en el rotor para obtener un control de la frecuencia generada muy preciso.

El sistema puede operar a velocidad subsíncrona (motor) o supersíncrona (generador) y **generar potencia reactiva?**

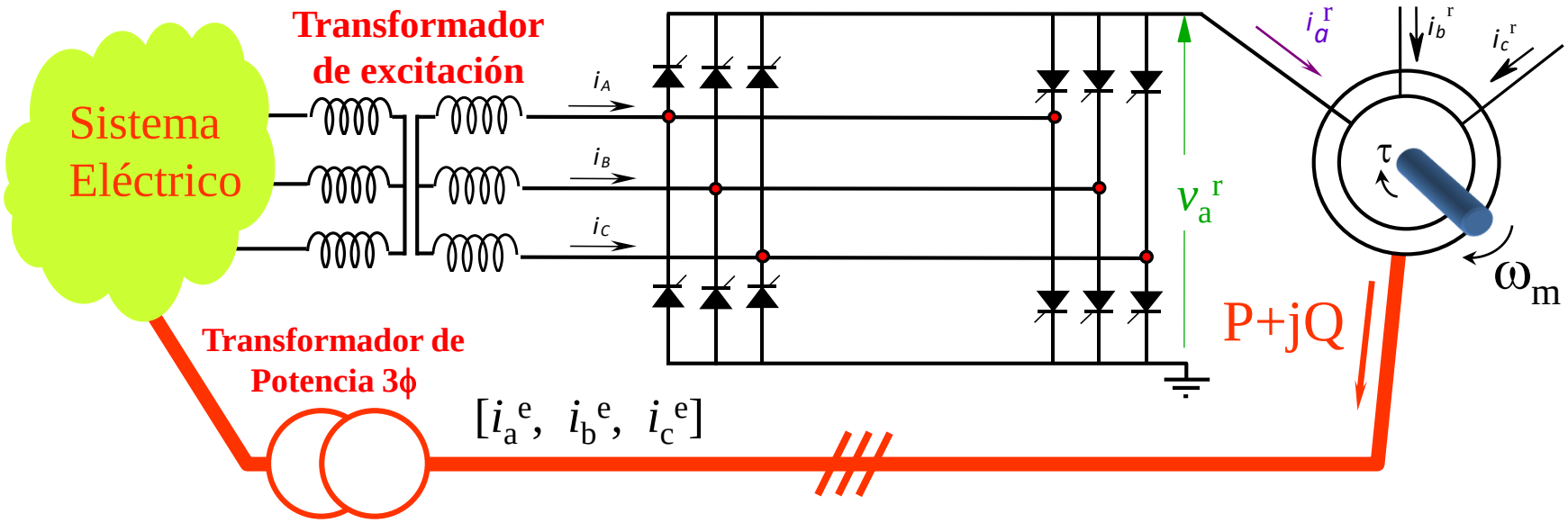


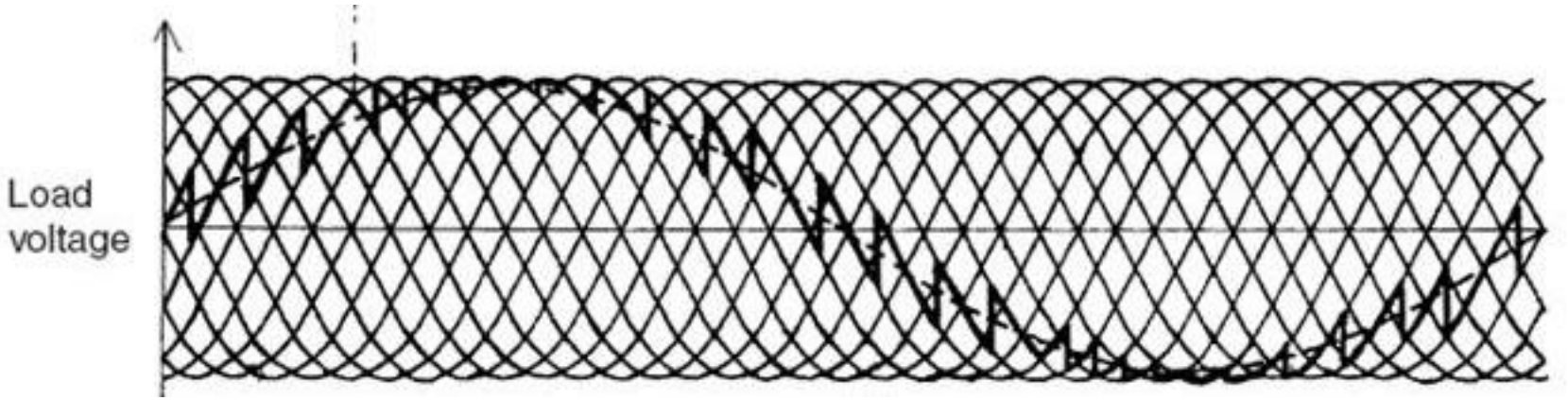


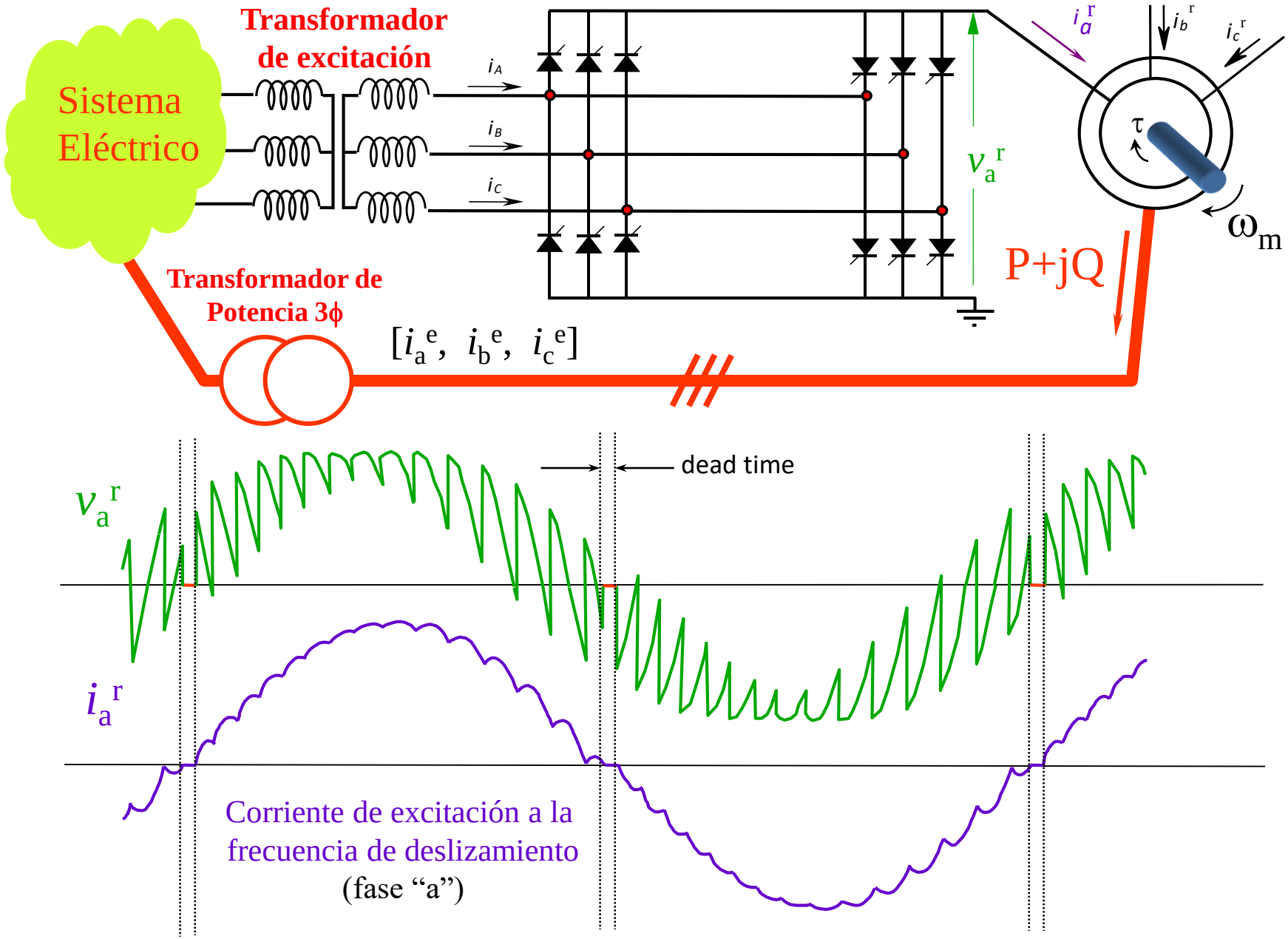
Flujo de potencia al sistema

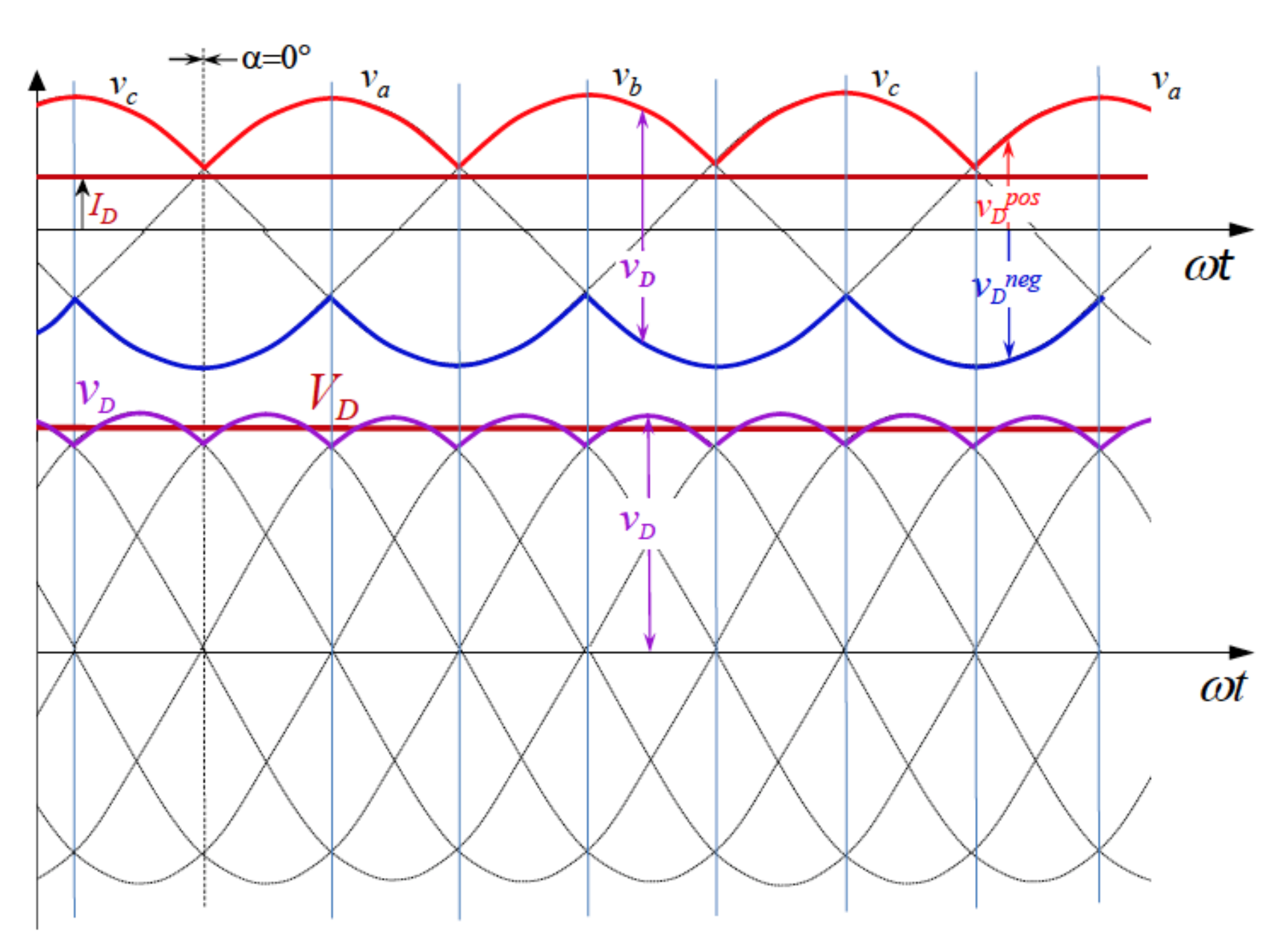
Cicloconversor

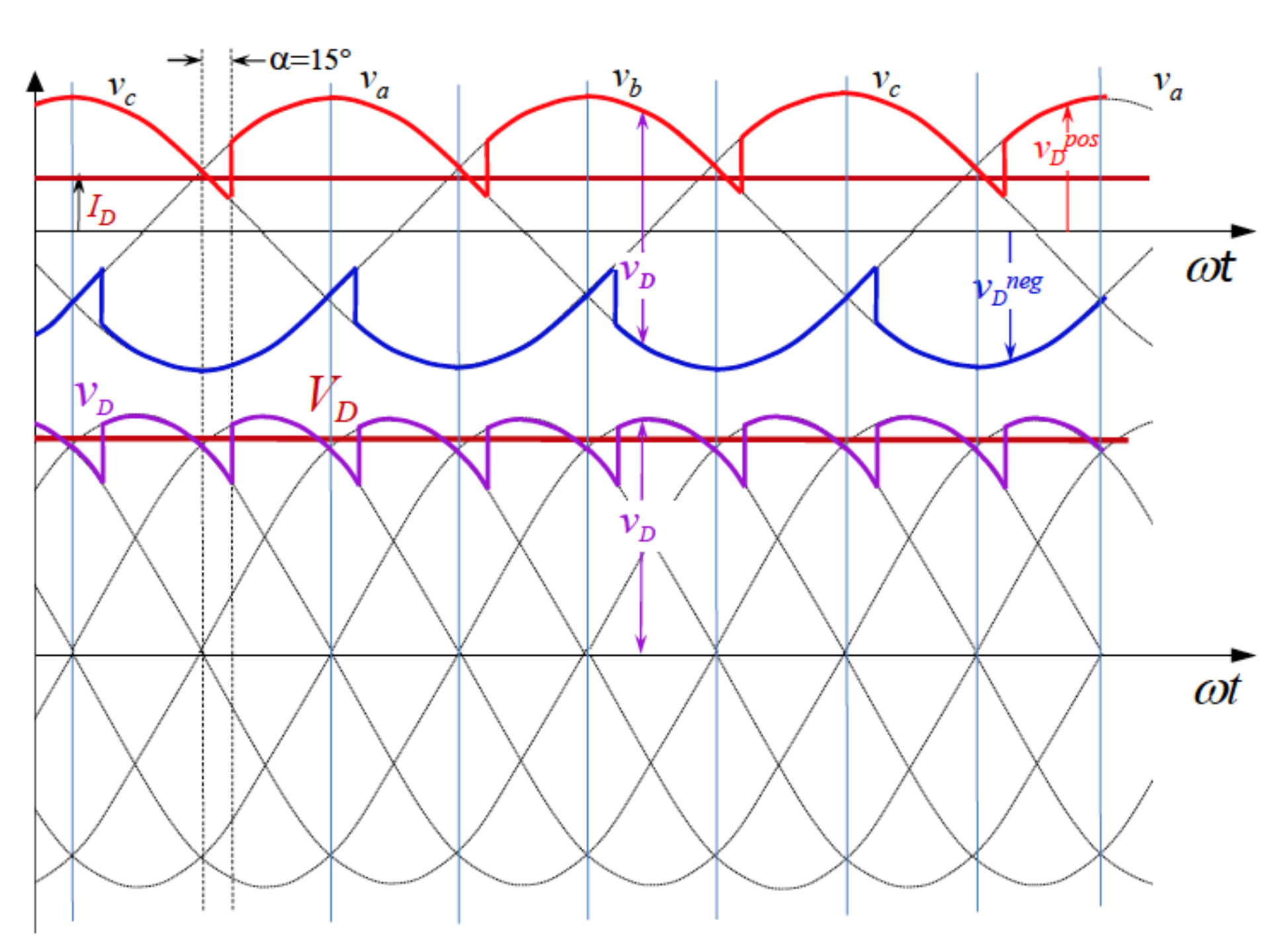
Opera con alpha variable

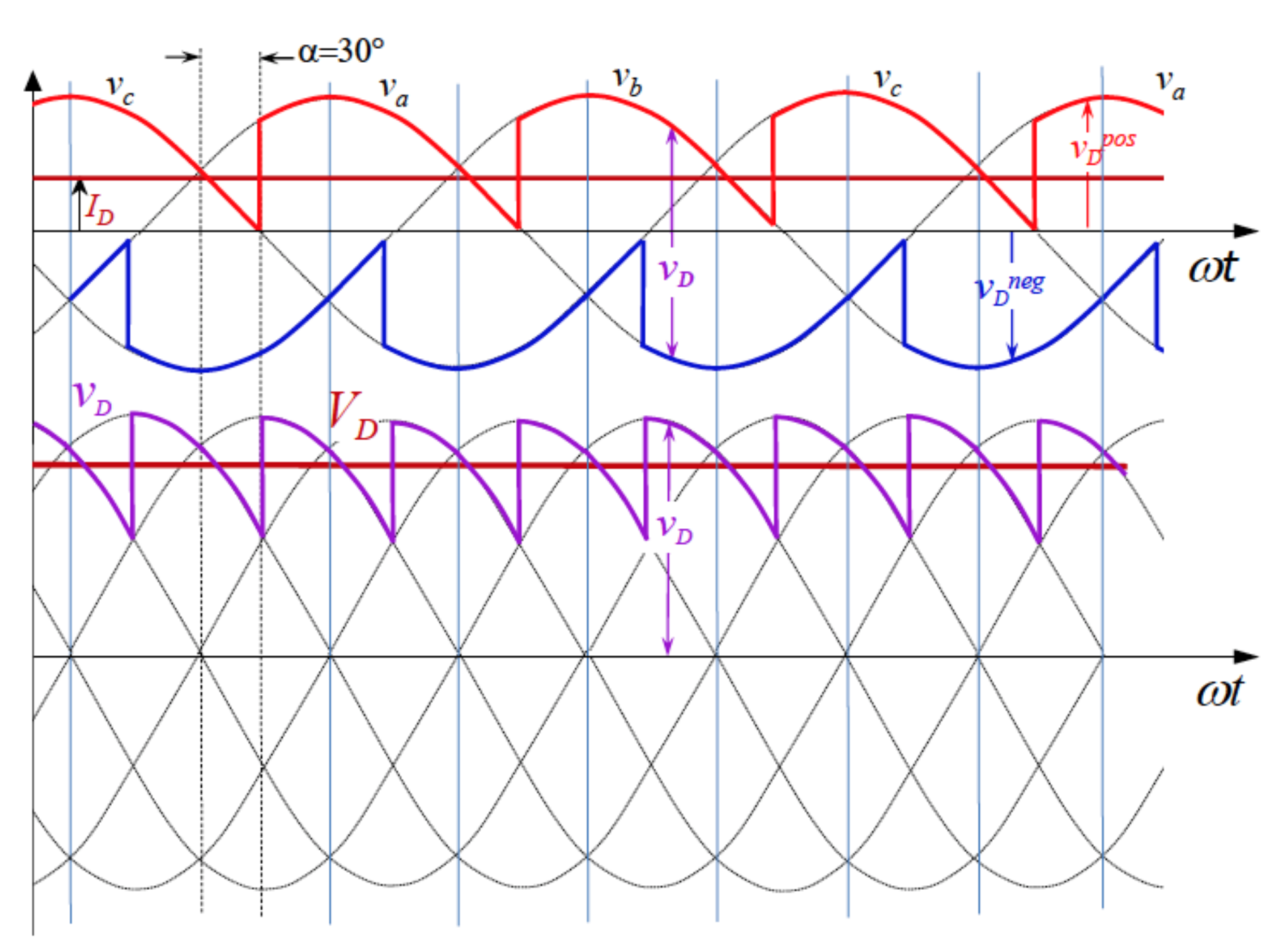


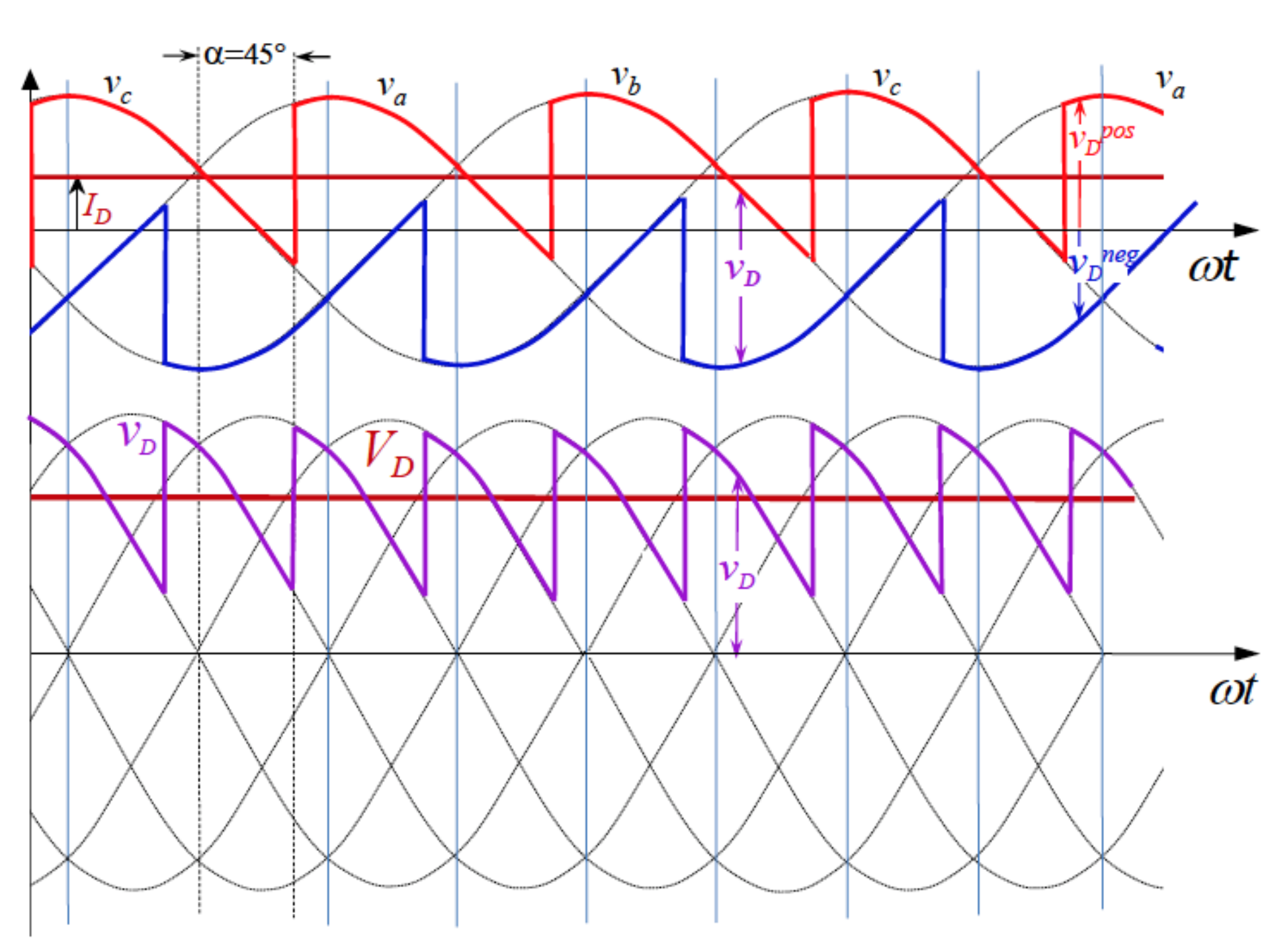


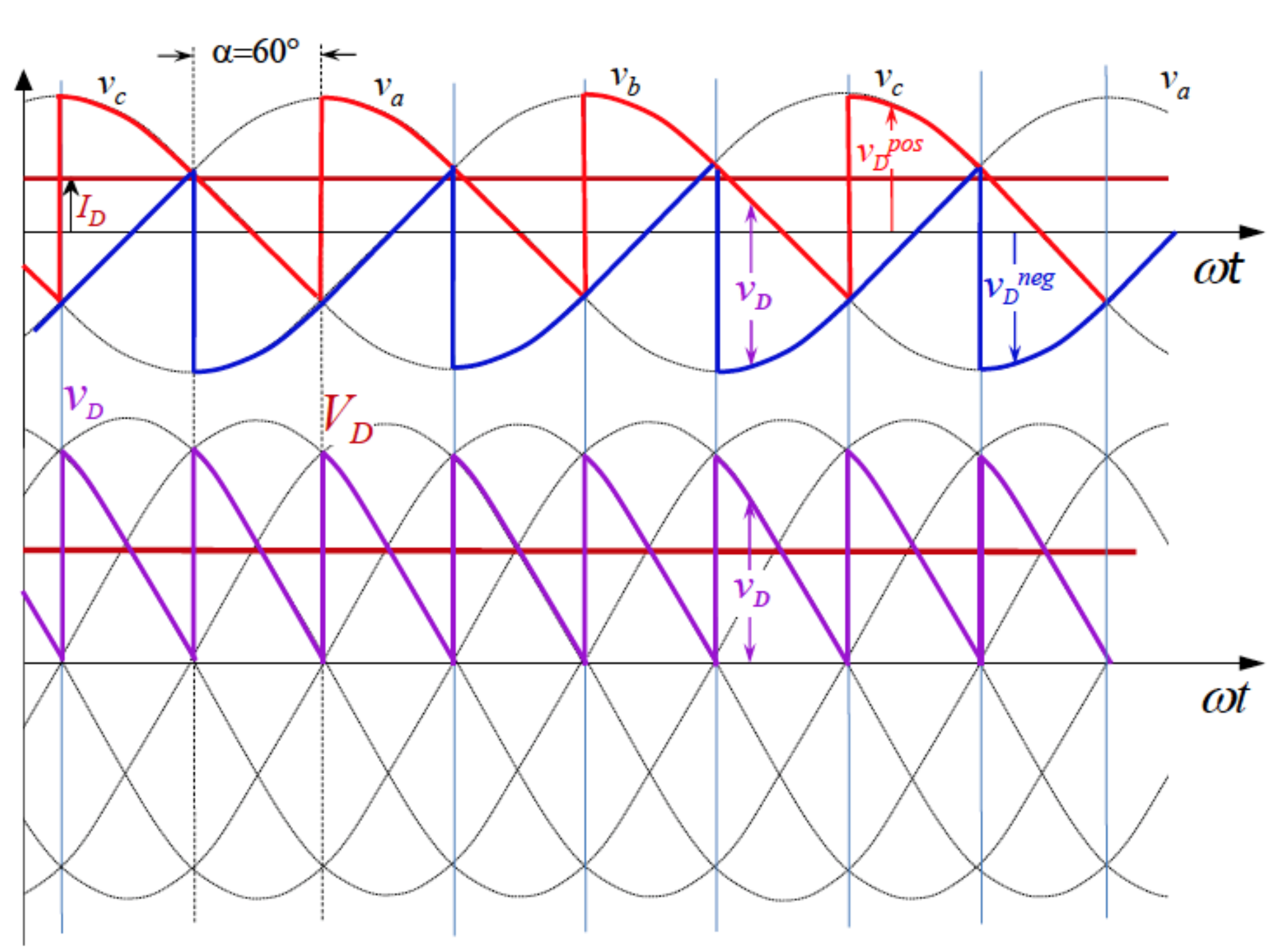

Transformador
de excitación
Sistema
Eléctrico
i_A
i_B
i_C
i_a^r
i_b^r
i_c^r
v_a^r
τ
ω_m
P+jQ
Transformador de
Potencia 3ϕ
$[i_a^e,\ i_b^e,\ i_c^e]$
dead time
v_a^r
i_a^r
Corriente de excitación a la
frecuencia de deslizamiento
(fase "a")

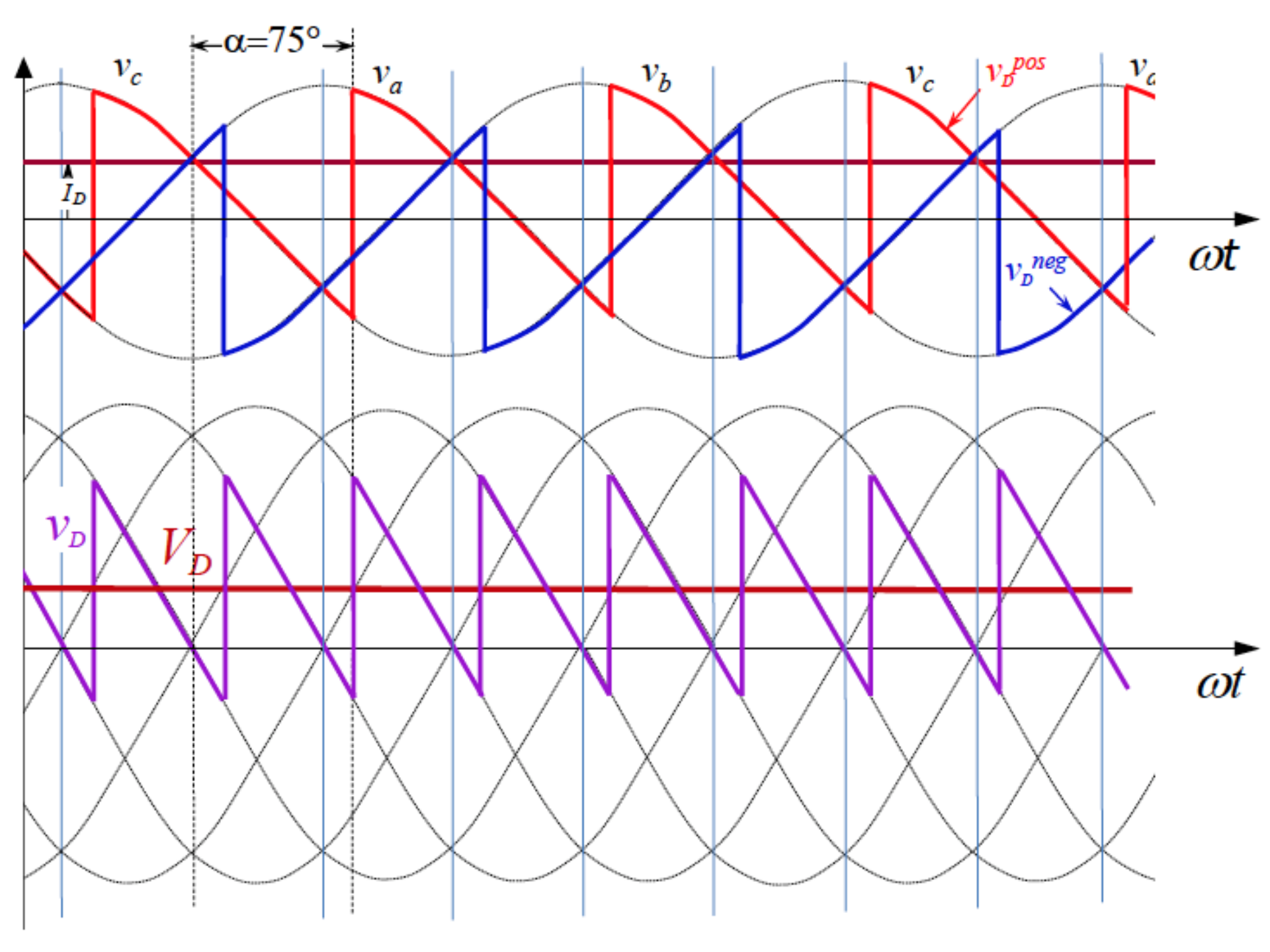

α=0°
v_c
v_a
v_b
v_c
v_a
I_D
v_D^{pos}
v_D
v_D^{neg}
ωt
v_D
V_D
v_D
ωt

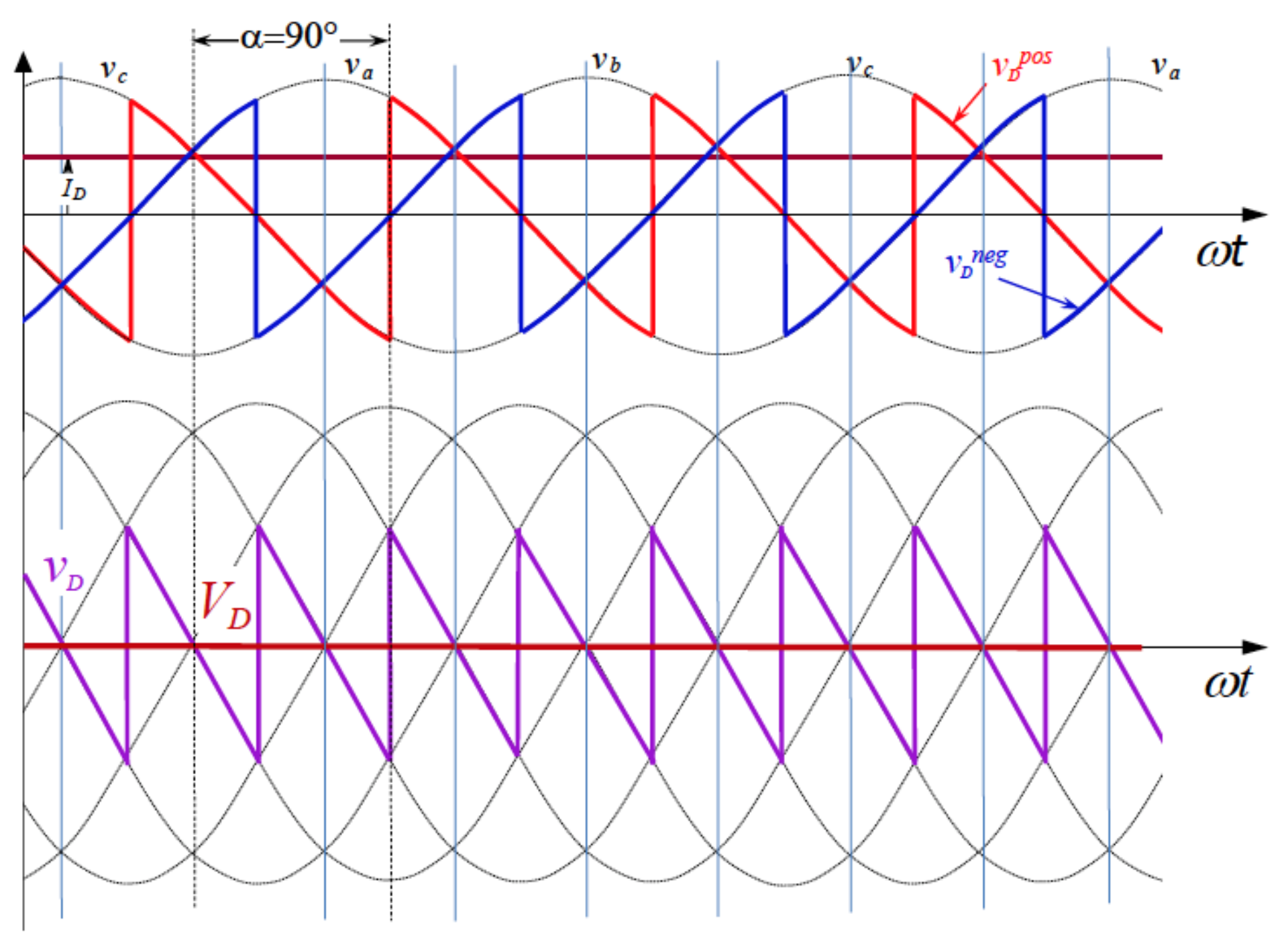

α=15°
v_c
v_a
v_b
v_c
v_a
v_D^{pos}
I_D
v_D
v_D^{neg}
ωt
v_D
V_D
v_D
ωt

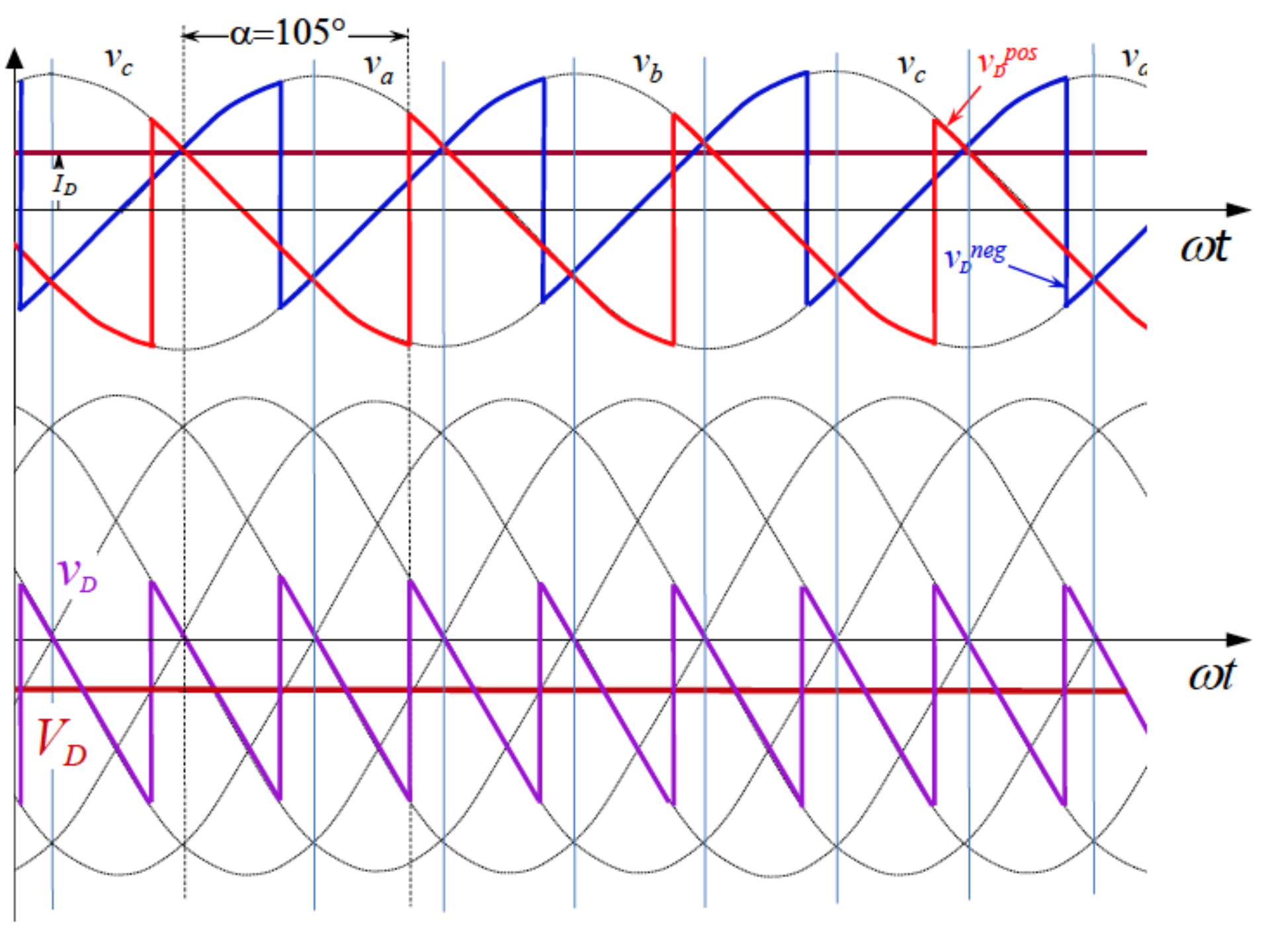

α=30°
v_c
v_a
v_b
v_c
v_a
v_D^{pos}
I_D
v_D
v_D^{neg}
ωt
v_D
V_D
v_D
ωt

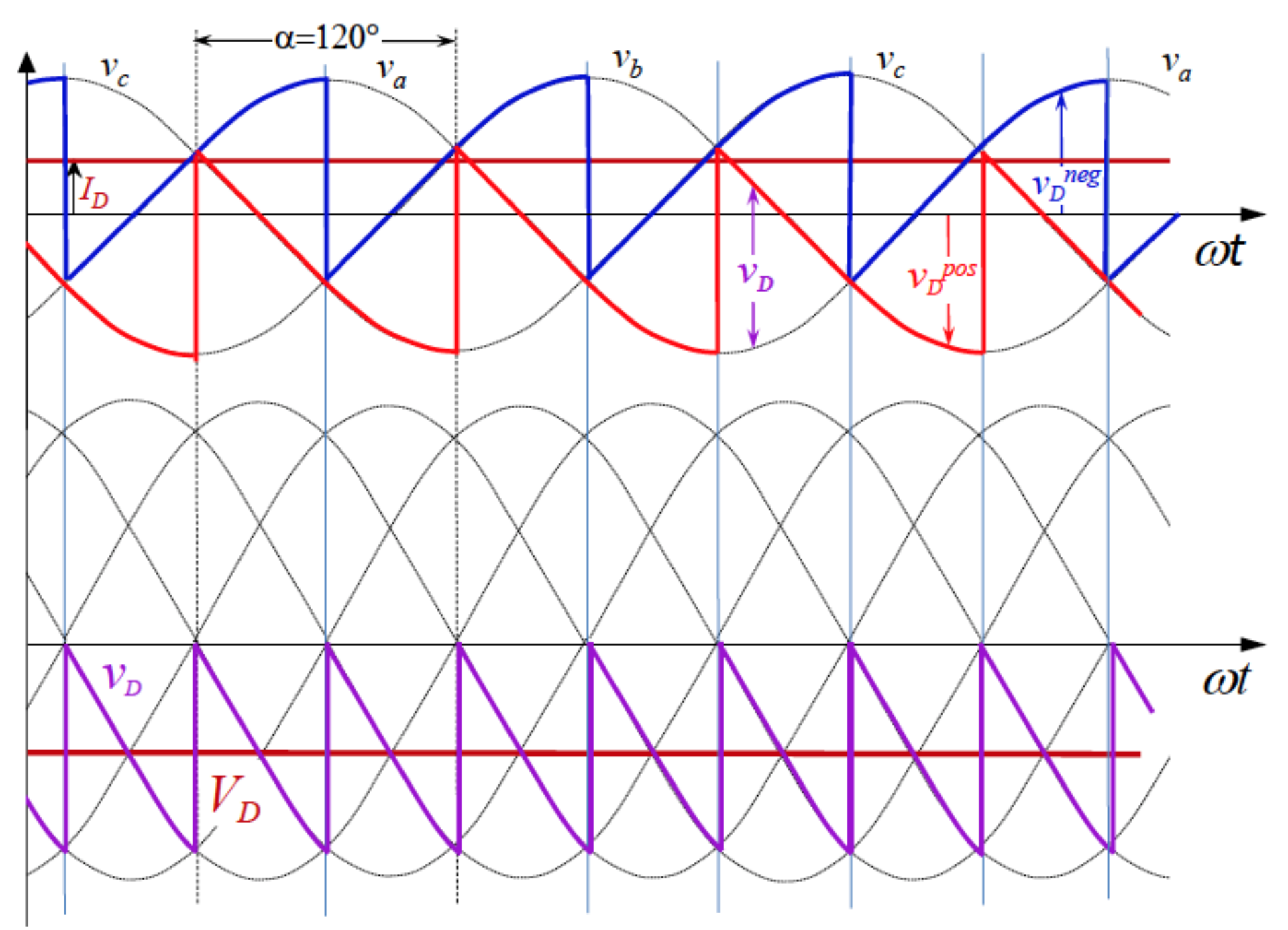

α=45°
v_c
v_a
v_b
v_c
v_a
v_D^{pos}
I_D
v_D
v_D^{neg}
ωt
v_D
V_D
v_D
ωt

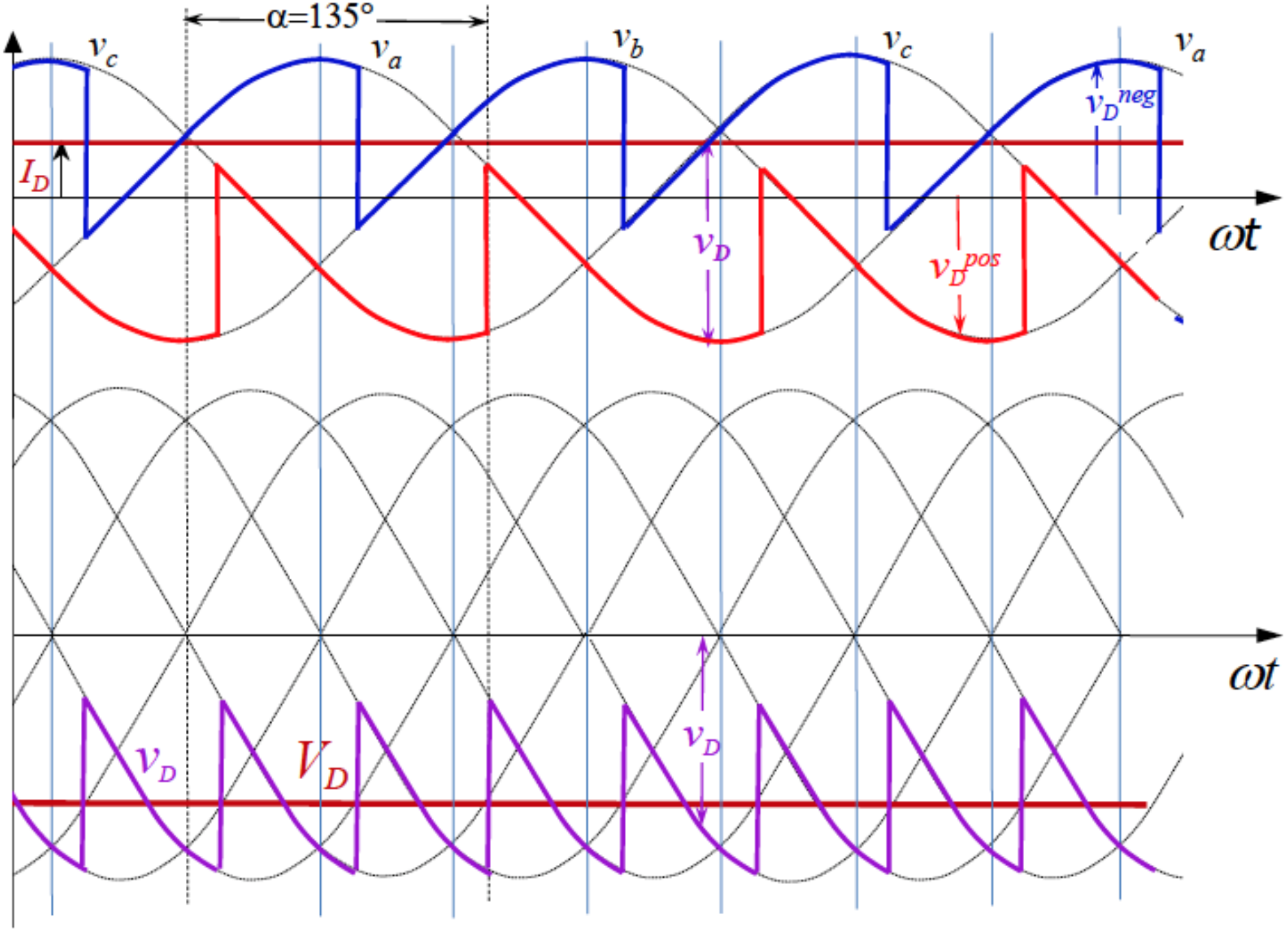

α=60°
v_c
v_a
v_b
v_c
v_a
v_D^{pos}
I_D
v_D
v_D^{neg}
ωt
v_D
V_D
v_D
ωt

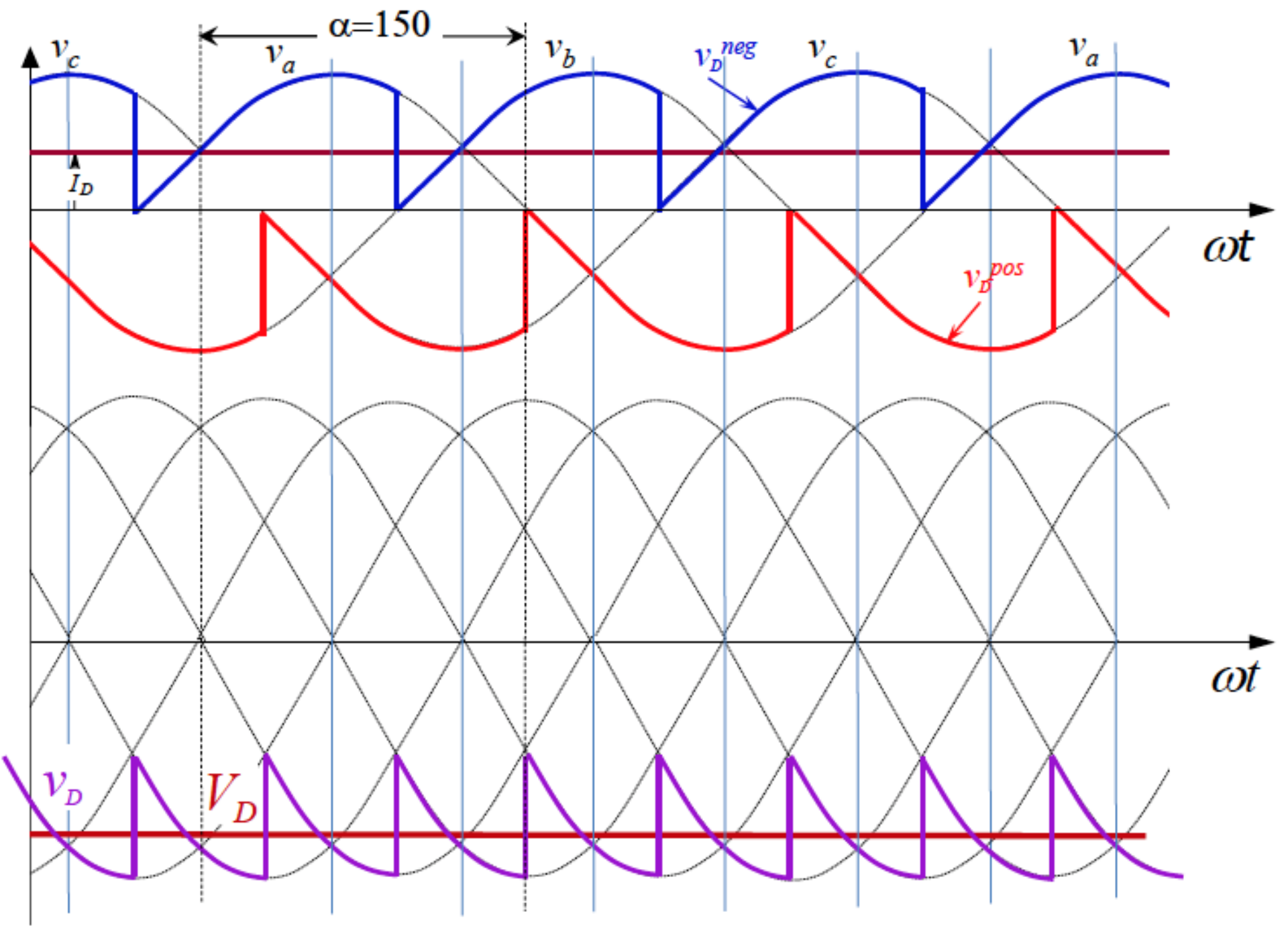

α=75°
v_c
v_a
v_b
v_c
v_D^{pos}
v_a
I_D
ωt
v_D^{neg}
v_D
V_D
ωt

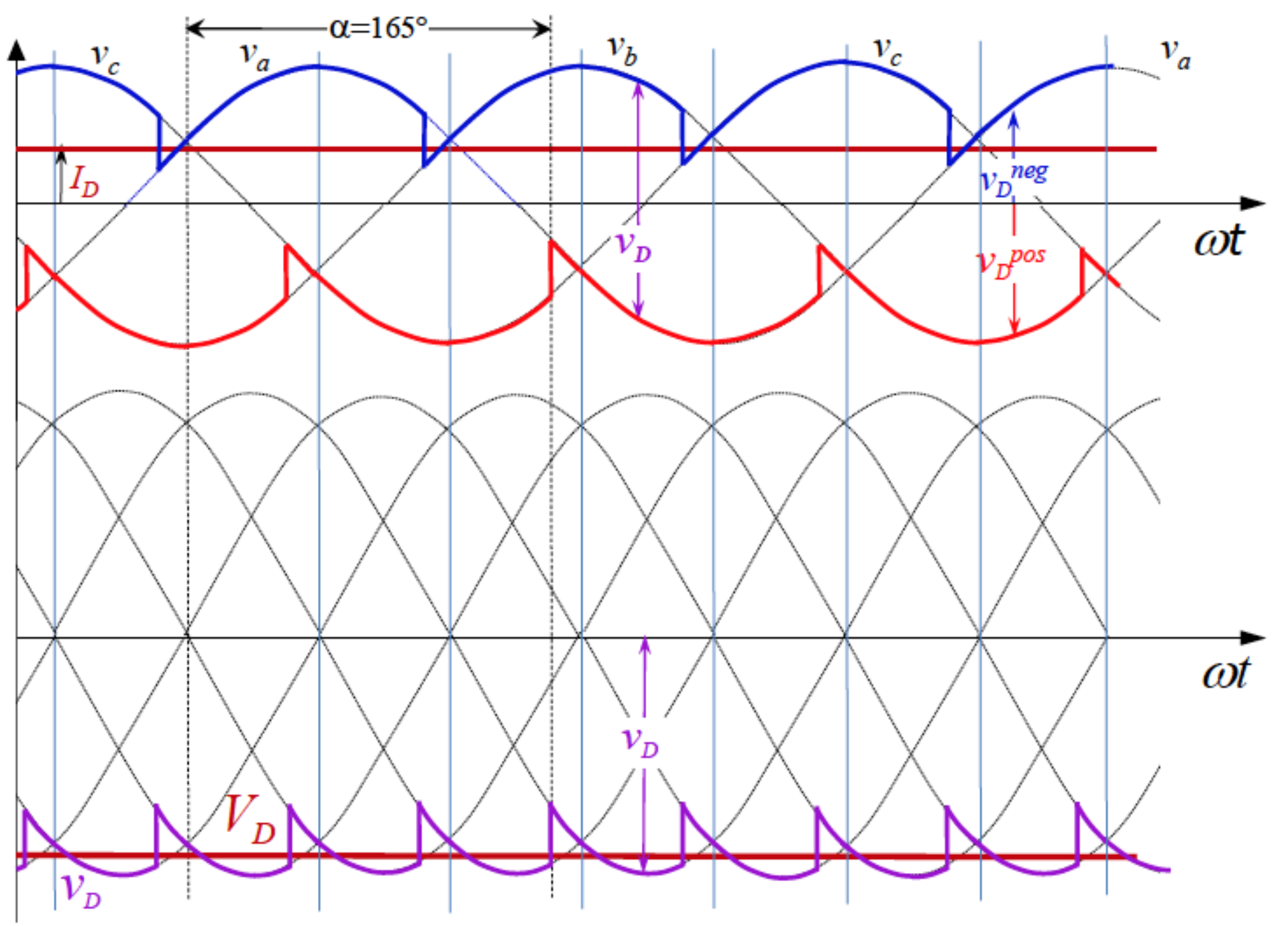

α=90°
v_c
v_a
v_b
v_c
v_D^{pos}
v_a
I_D
ωt
v_D^{neg}
v_D
V_D
ωt

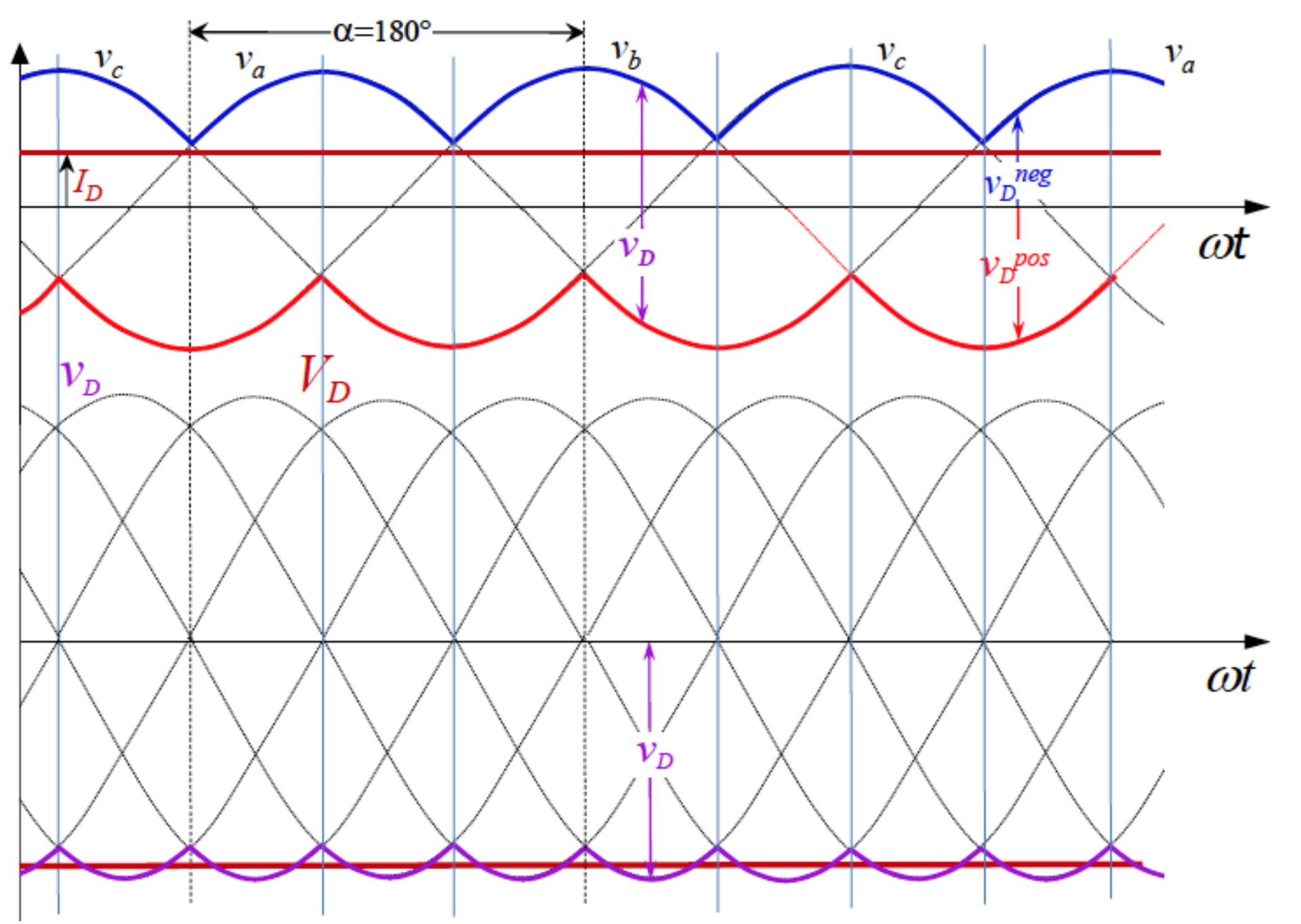

α=105°
v_c
v_a
v_b
v_c
v_D^{pos}
v_a
I_D
ωt
v_D^{neg}
v_D
ωt
V_D

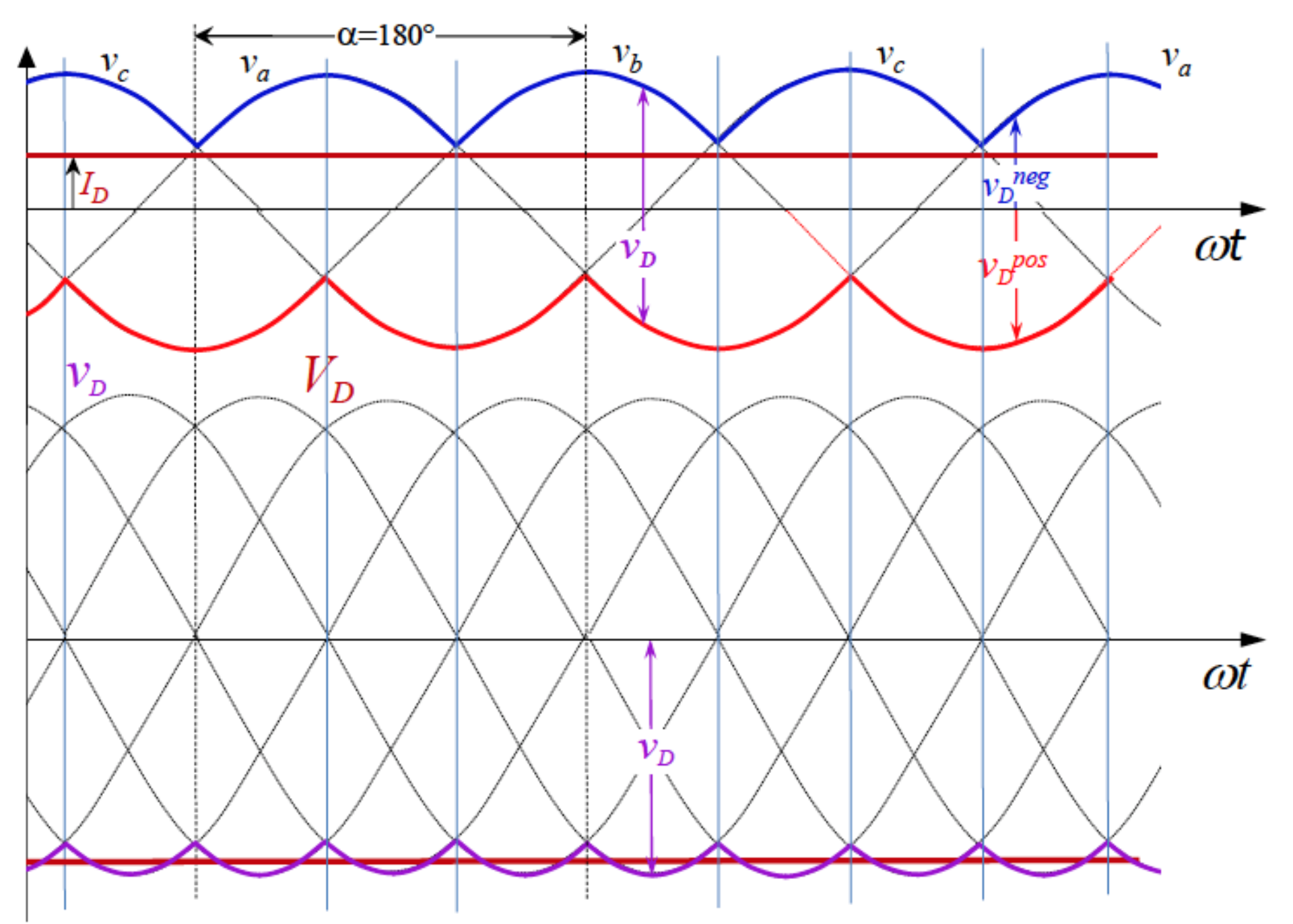

α=120°
v_c
v_a
v_b
v_c
v_a
I_D
v_D^{neg}
v_D
v_D^{pos}
ωt
v_D
V_D
ωt


α=135°
v_c
v_a
v_b
v_c
v_a
v_D^{neg}
I_D
v_D
v_D^{pos}
ωt
v_D
V_D
v_D
ωt


α=150
v_c
v_a
v_b
v_D^{neg}
v_c
v_a
I_D
ωt
v_D^{pos}
ωt
v_D
V_D


α=165°
v_c
v_a
v_b
v_c
v_a
I_D
v_D^{neg}
v_D
v_D^{pos}
ωt
v_D
V_D
v_D
ωt


α=180°
v_c
v_a
v_b
v_c
v_a
I_D
v_D^{neg}
v_D
v_D^{pos}
ωt
v_D
V_D
v_D
ωt


α=180°
v_c
v_a
v_b
v_c
v_a
I_D
v_D^{neg}
v_D
v_D^{pos}
ωt
v_D
V_D
v_D
ωt

Fin Lectura 10



Conclusiones

Lectura 10: Accionamientos

Características y clasificación

Los accionamientos electrónicos son fundamentales para la conversión de energía tanto a escalas microscópicas como en sistemas de muy alta potencia. Estos conversores permiten manipular la corriente y voltaje entregados o generados por un sistema (en este caso una máquina) de forma muy controlada y flexible. Se puede clasificar en conversores DC-DC, DC-AC, AC-DC y DC-DC, y existen tantas topologías como uno pueda imaginar.

Aplicaciones

Se aplican prácticamente en todo (computadores, celulares, vehículos híbridos y eléctricos, generación eólica, fotovoltaica, aviones, barcos, trenes, robótica, generación térmica, transmisión HVDC, industria, minería, filtros, *energy harvesting*, *MEMs*, etc.)

Control

Existen controles muy simples como los vistos acá y otros muy sofisticados, ya que permiten integrar todas las técnicas más avanzadas de control automático (predictivo, adaptivo, inteligente, vectorial, etc.)

Desafíos futuros

El desarrollo futuro de está tecnología está enfocado en nuevos semi-conductores que permitan operar a mayor voltaje, corriente y frecuencia, superconductores, nuevas topologías, métodos de modulación de señales, control avanzado de sistemas

Fin del Curso

¿Qué cursos del área tomar a futuro?