

Electric Drives
Laboratory
DII - UniPD

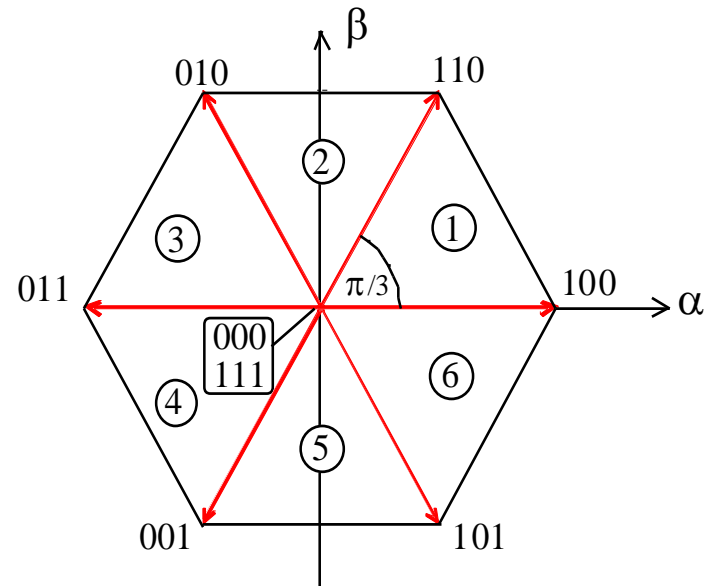
Azionamenti Elettrici

Lezioni a.a. 2020-2021

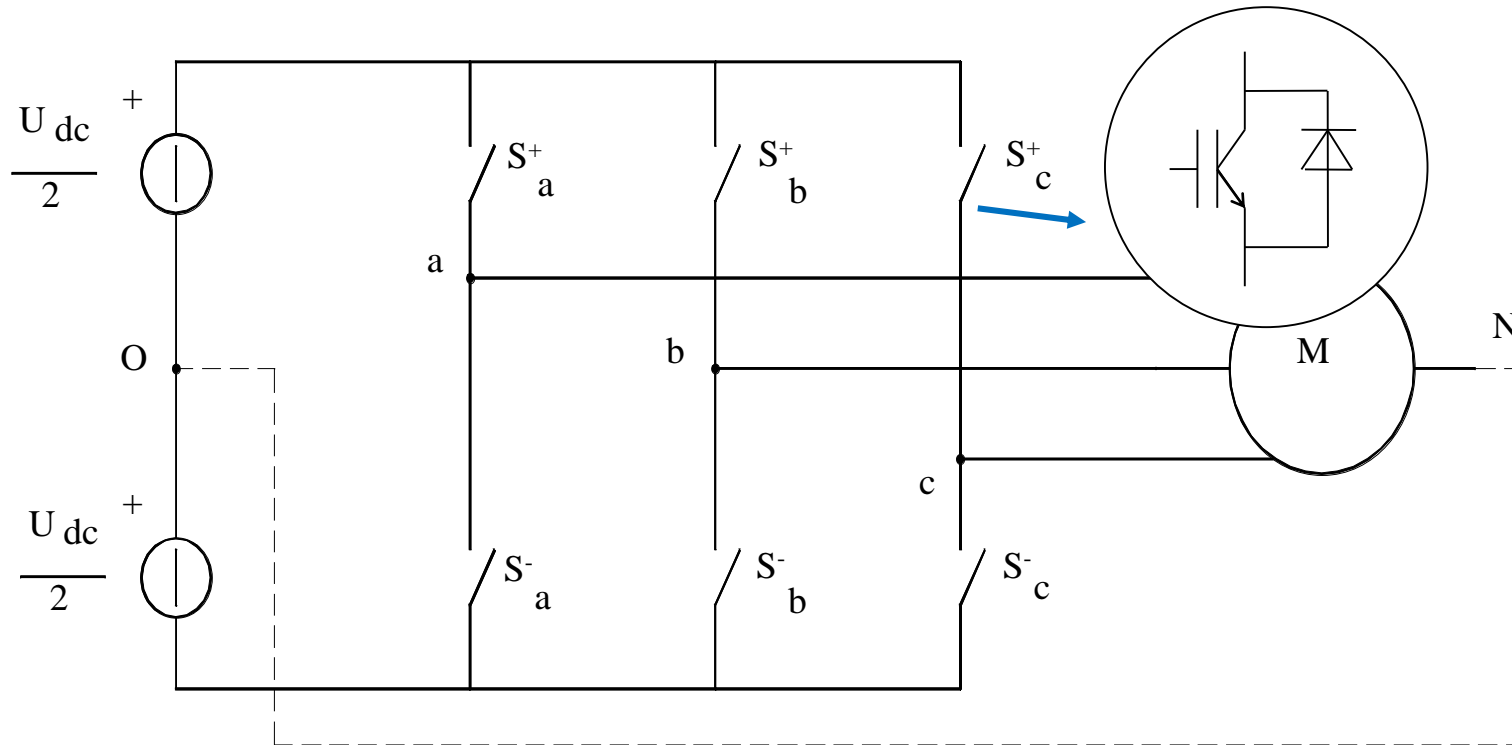
prof. Silverio Bolognani

PARTE II

Invertitore trifase di tensione

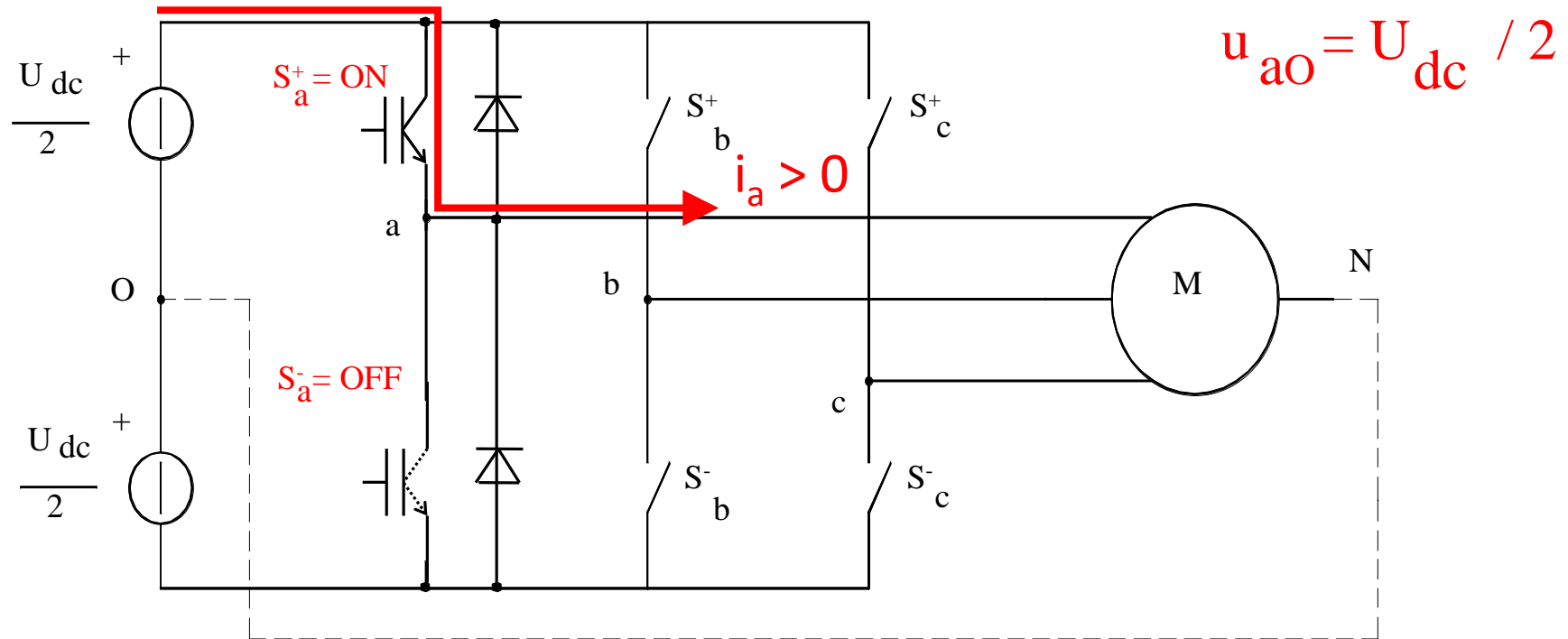


4.1 - L'invertitore trifase di tensione



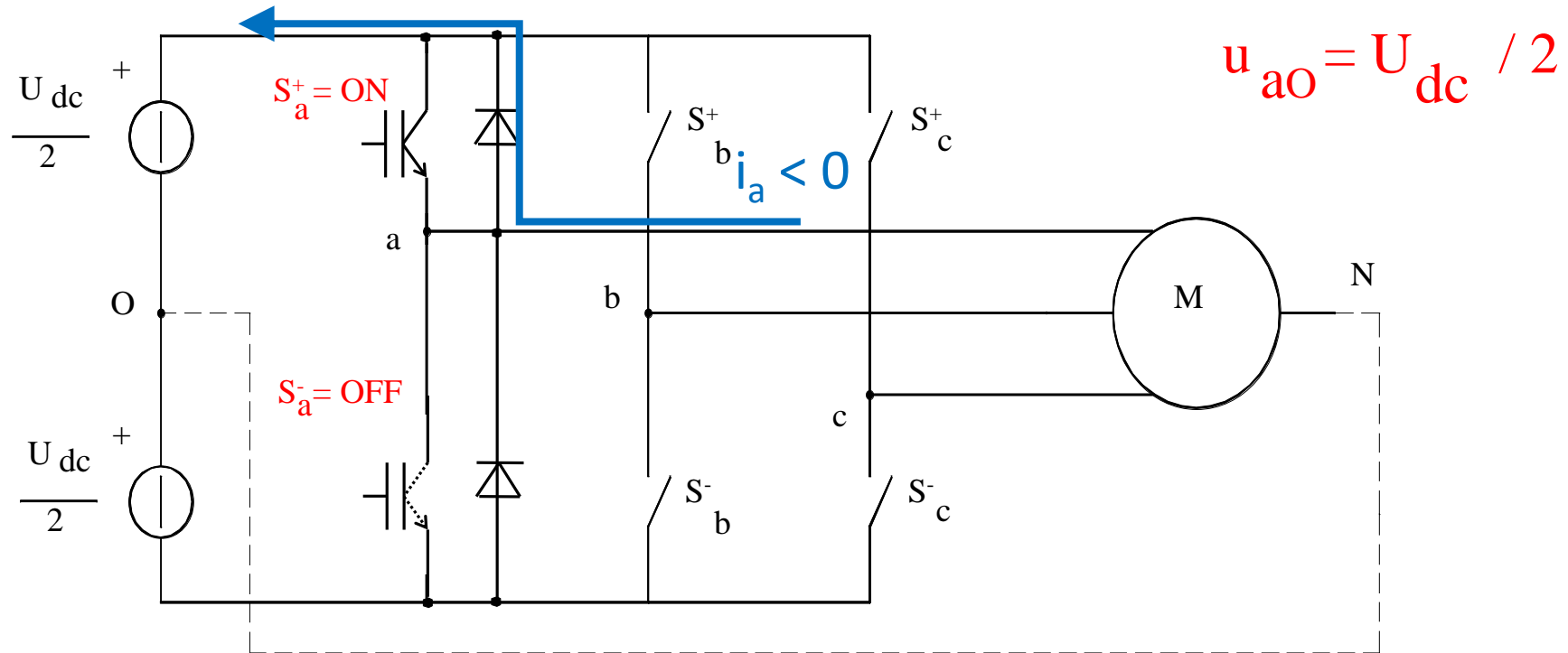
Rappresentazione schematica di un invertitore di tensione trifase

Percorso della corrente di fase «a» positiva



Con $S_a^+ = \text{ON}$ si ottiene $u_{aO} > 0$

Percorso della corrente di fase «a» negativa



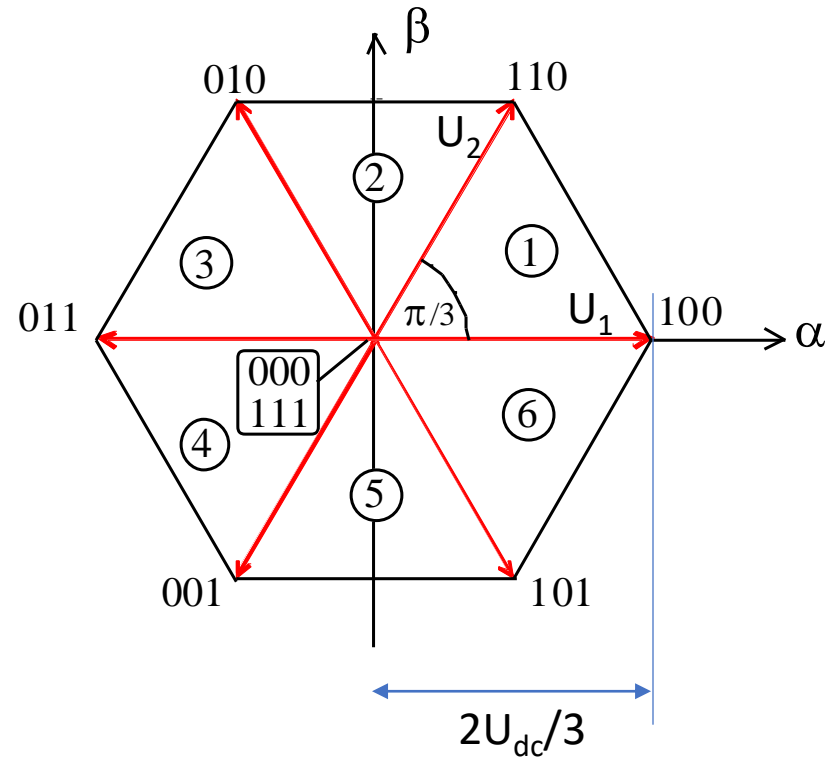
Con $S_a^+ = \text{ON}$ si ottiene ANCORA $u_{aO} > 0$

Il comando degli interruttori statici fissa la polarità della tensione di uscita

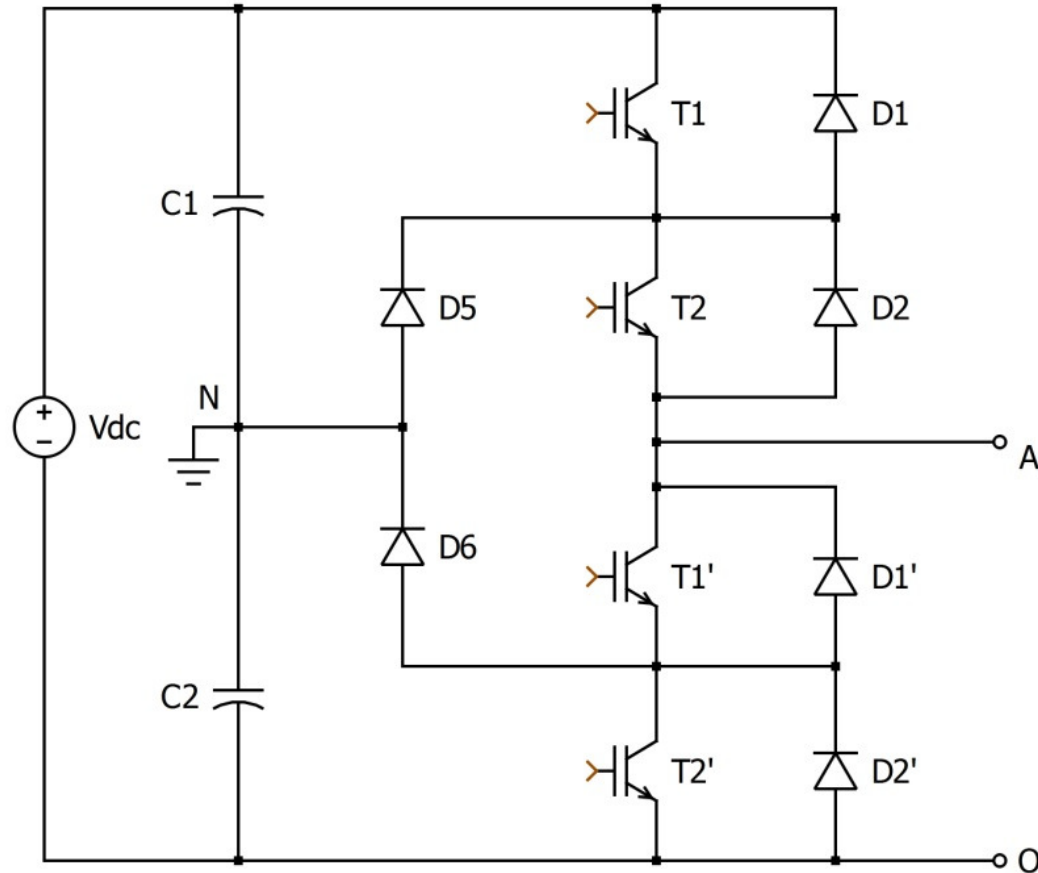
Vettori spaziali relativi agli 8 stati dell'inverter

Ognuna delle 3 fasi ha 2 diversi stati

In totale ci sono $2^3 = 8$ diversi stati dell'invertitore (assetti dell'invertitore)



Configurazione (1 gamba) di un inverter a tre livelli



T1	T2	T1'	T2'	V_{AN}	V_{AO}
1	1	0	0	$V_{dc}/2$	V_{dc}
0	1	1	0	0	$V_{dc}/2$
0	0	1	1	$-V_{dc}/2$	0

1
0
-1

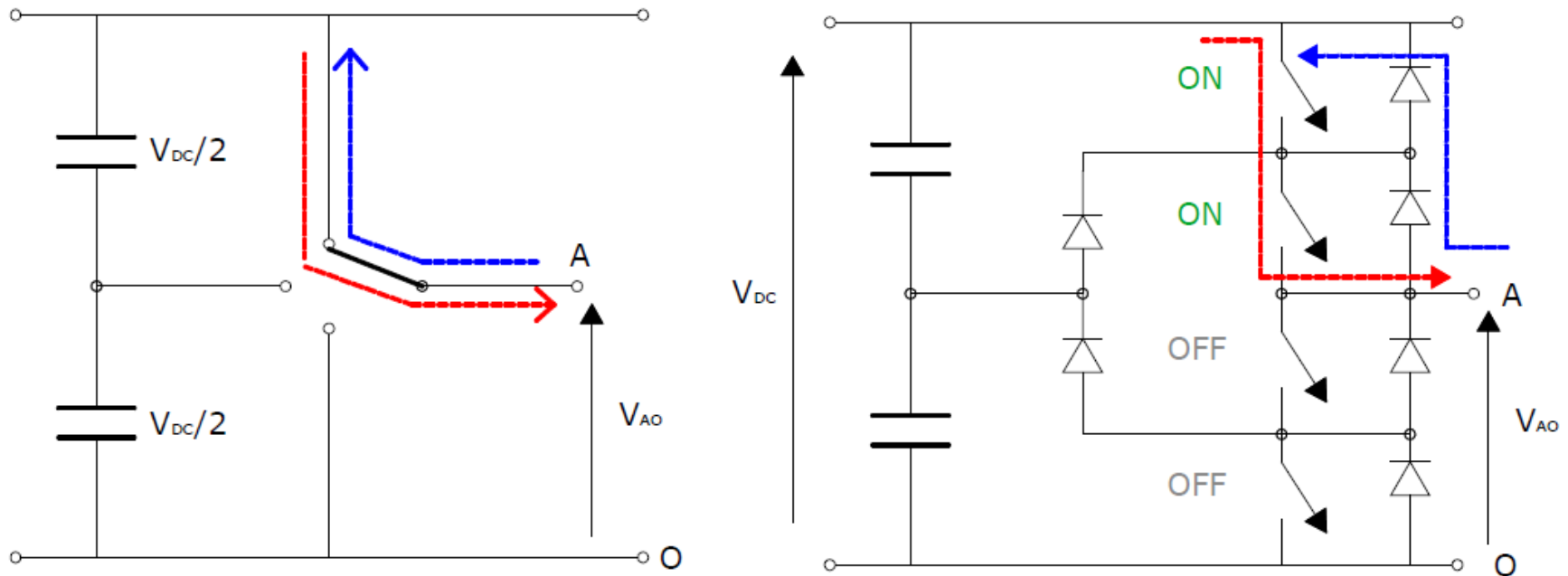
Tabella 1.1: Relazione fra gli stati degli interruttori del ramo di un inverter 3-livelli diode-clamped e le tensioni d'uscita.

NB La mezzaria dell'alimentazione è indicata con N; il bus negativo con O.

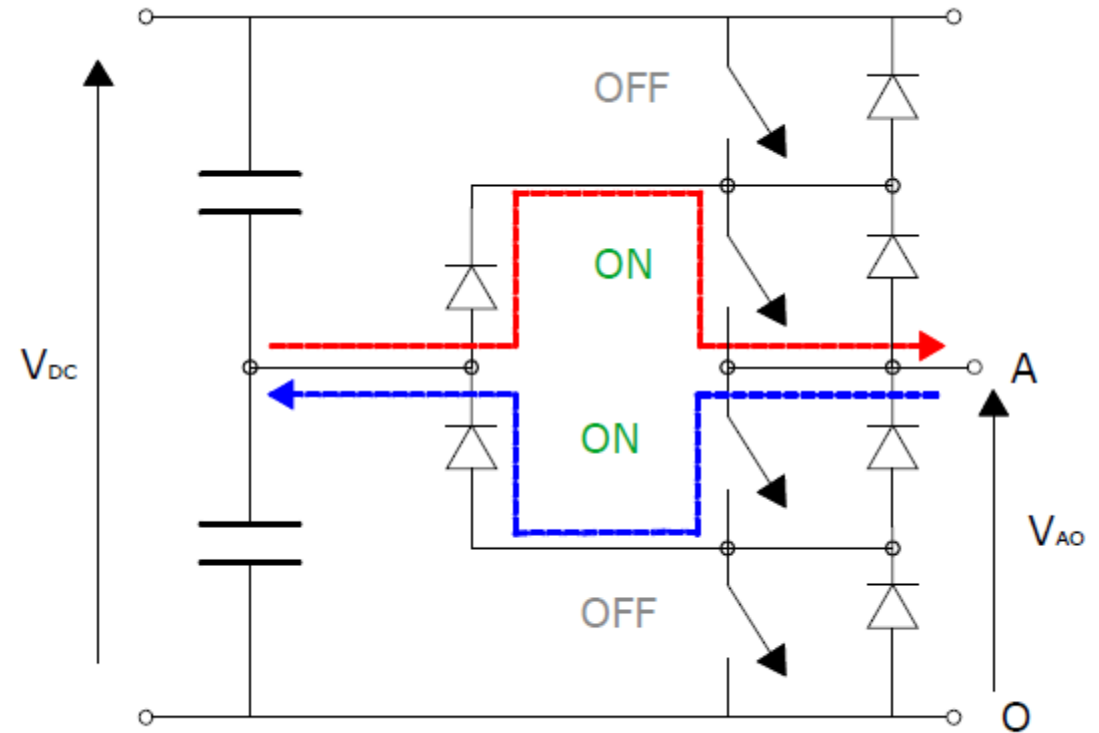
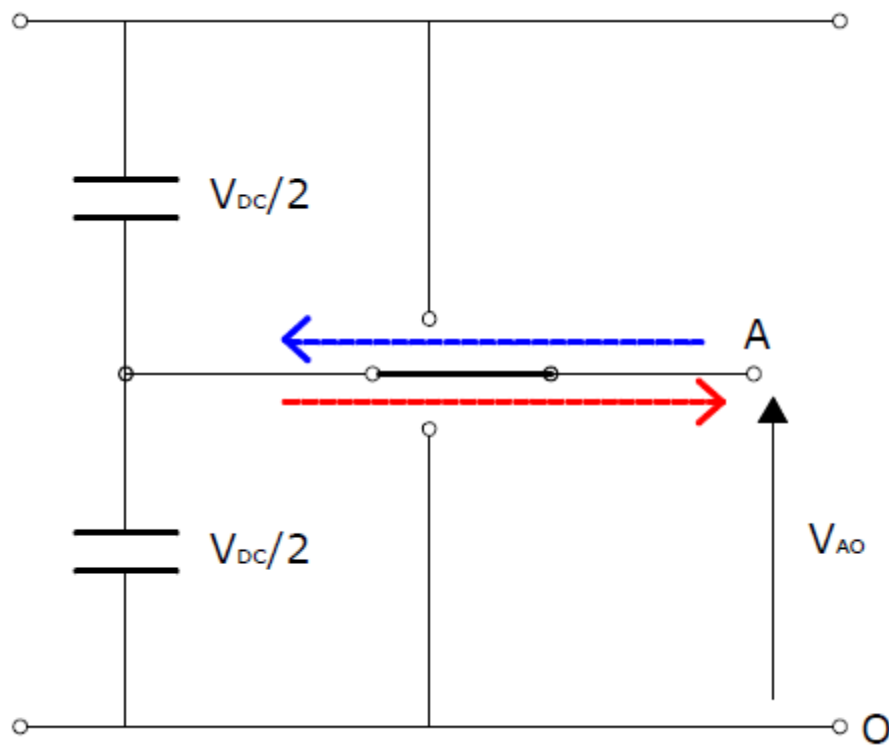
Ci sono 4 transistor e 6 diodi per ogni fase!

Ci sono $3^3 = 27$ configurazioni (24 vettori attivi (18 diversi) e 3 nulli)

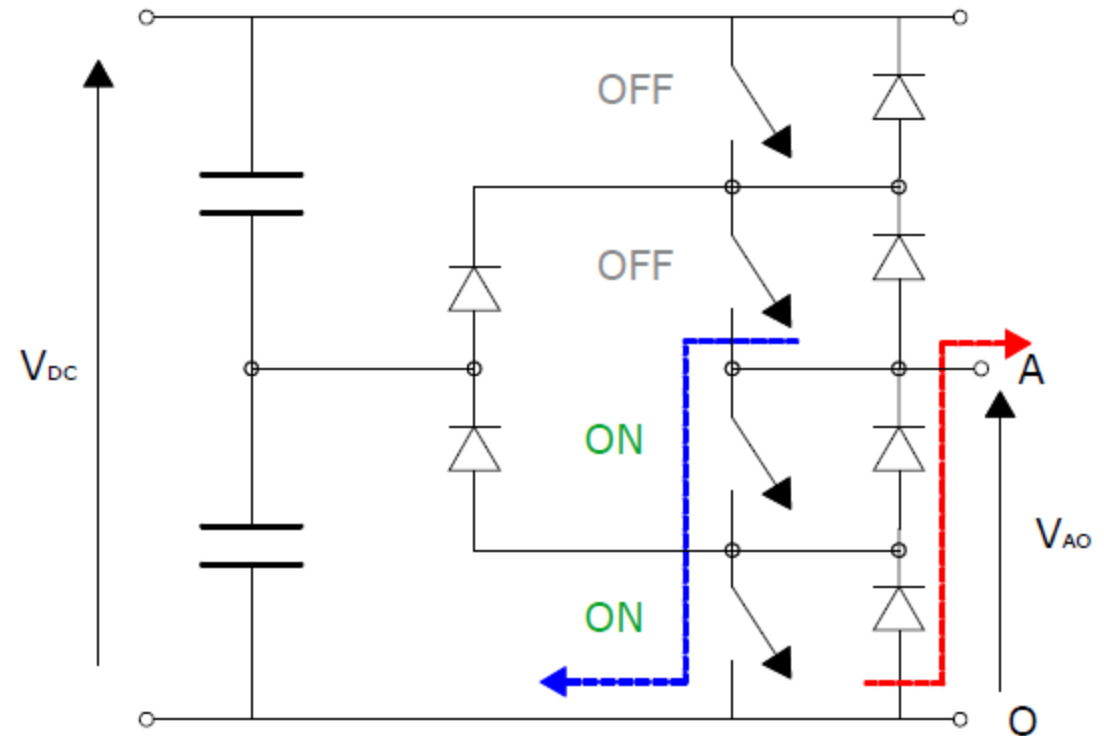
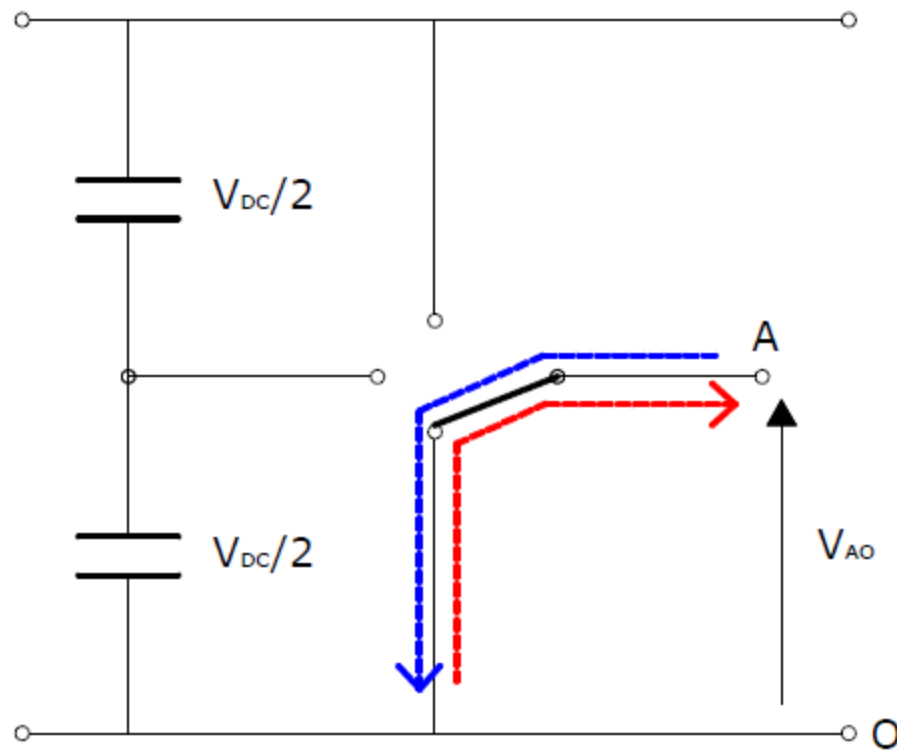
Configurazione per tensione di uscita positiva



Configurazione per tensione di uscita nulla



Configurazione per tensione di uscita negativa



Funzionamento in onda quadra: tensioni di fase dell'invertitore (a due livelli)

Componente fondamentale

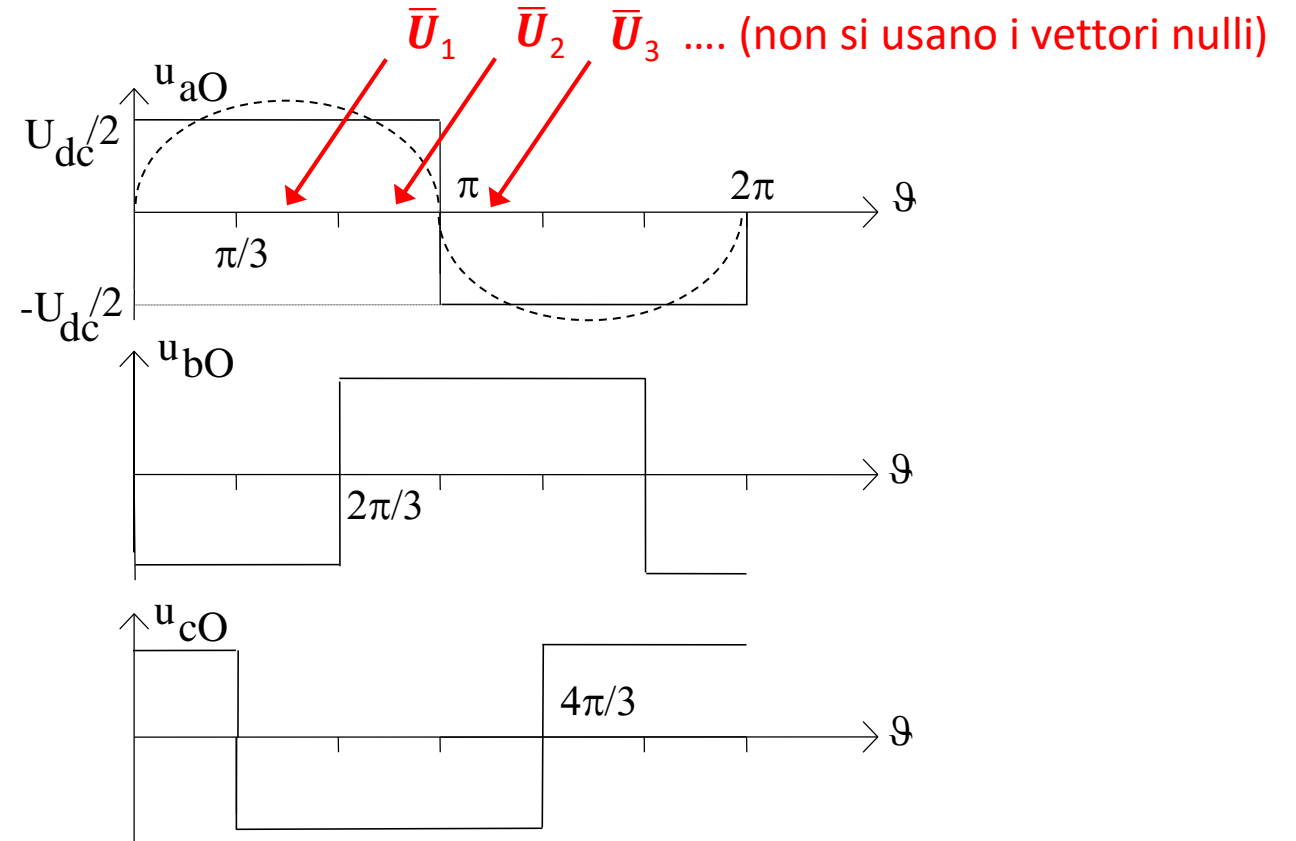
$$U_{aO,1} = \frac{4}{\pi} \frac{U_{dc}}{2} \approx 0.6366 U_{dc}$$

1.27

Componenti armoniche: $n=2k+1$

$$U_{aO,n} = \frac{4}{n\pi} \frac{U_{dc}}{2} = \frac{U_{aO,1}}{n}$$

(valori di picco)



Funzionamento in onda quadra: tensioni concatenate (quasi-quadre)

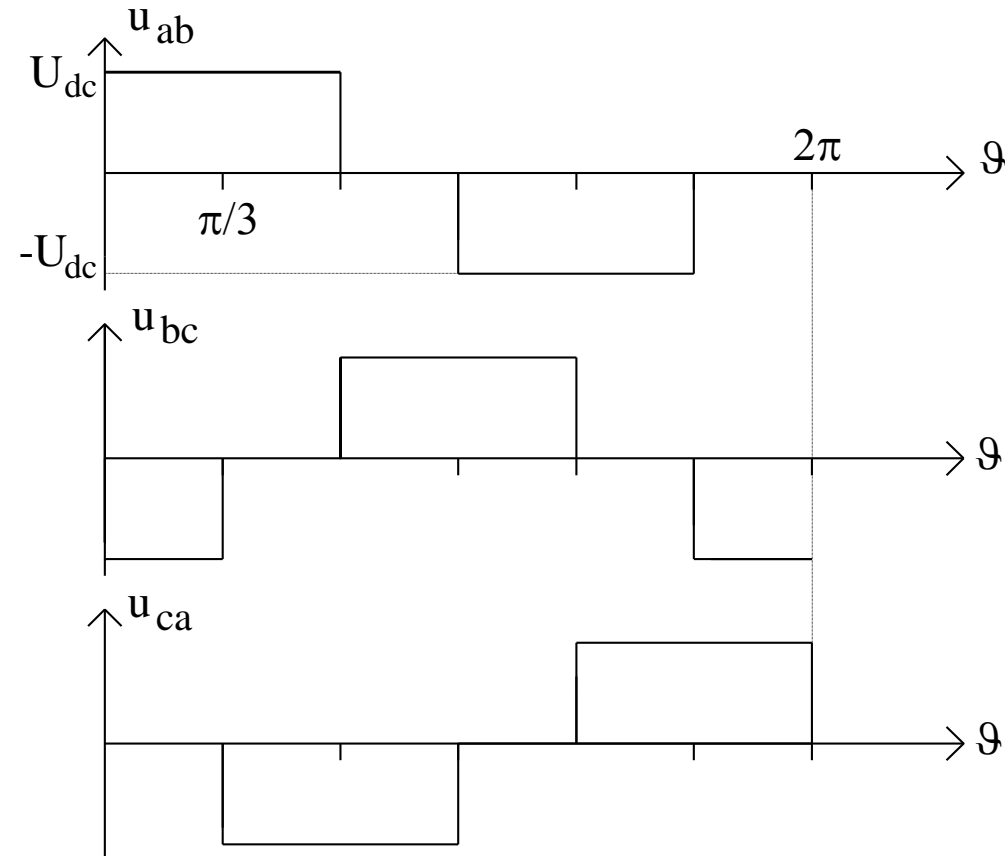
Componente fondamentale

$$U_{ab,1} = \sqrt{3} U_{a0,1}$$

Componenti armoniche: $n=6k\pm 1$

$$U_{ab,n} = \sqrt{3} U_{a0,n} = U_{ab,1} / n$$

(valori di picco)



Funzionamento in onda quadra: tensioni di fase del carico (6-gradini)

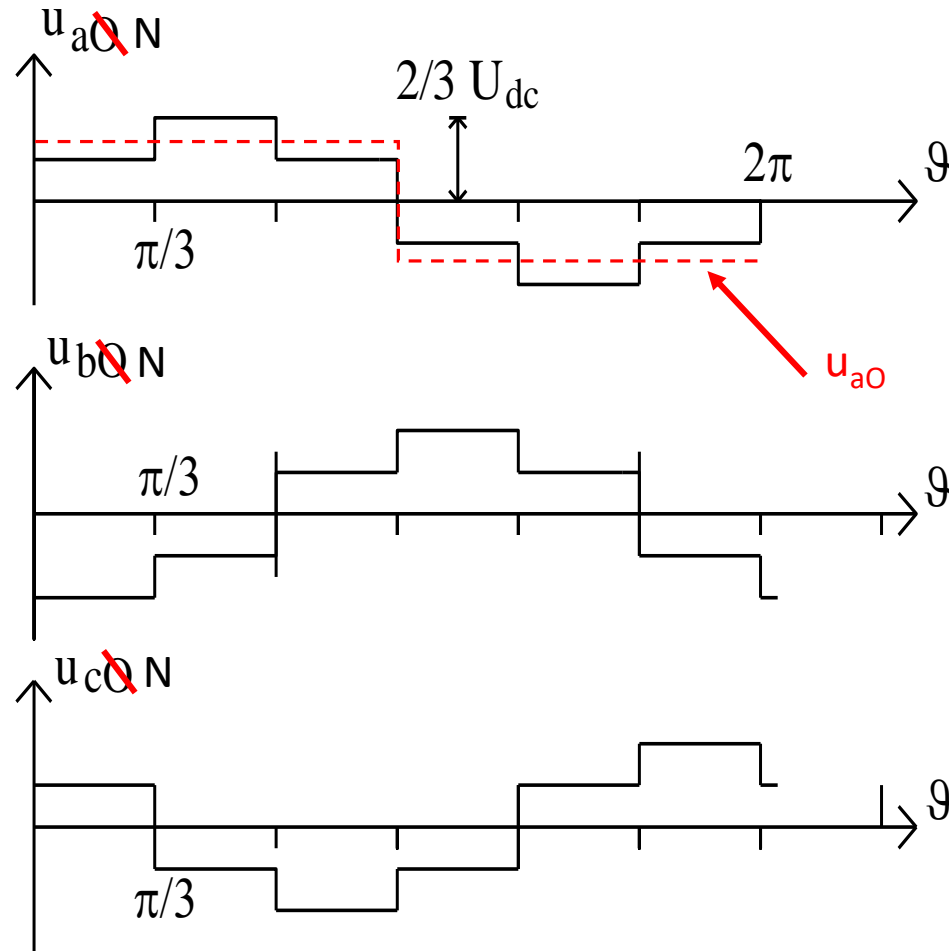
Componente fondamentale

$$U_{aN,1} = U_{aO,1} = \frac{4}{\pi} \frac{U_{dc}}{2} \approx 0.6366 U_{dc}$$

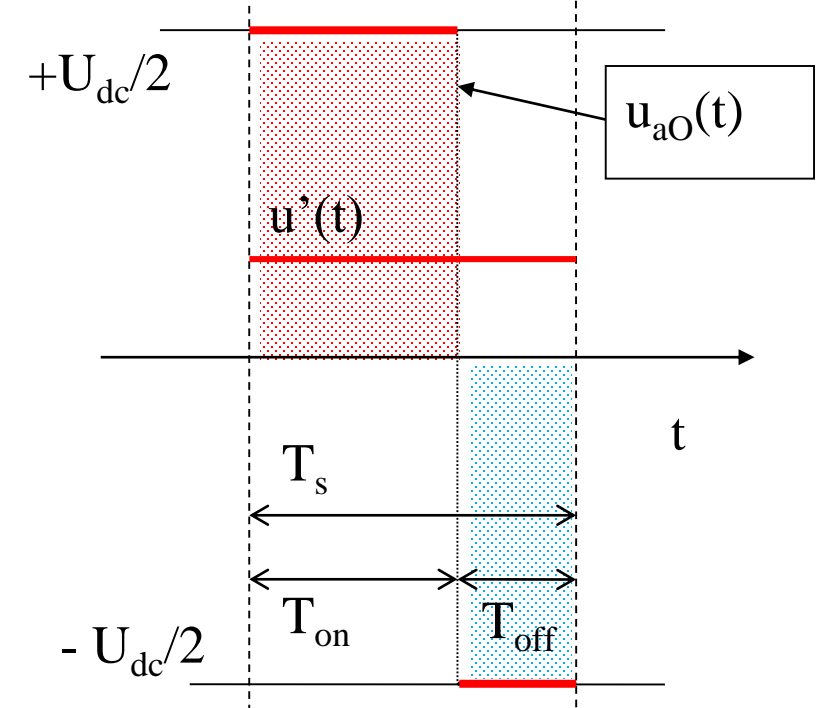
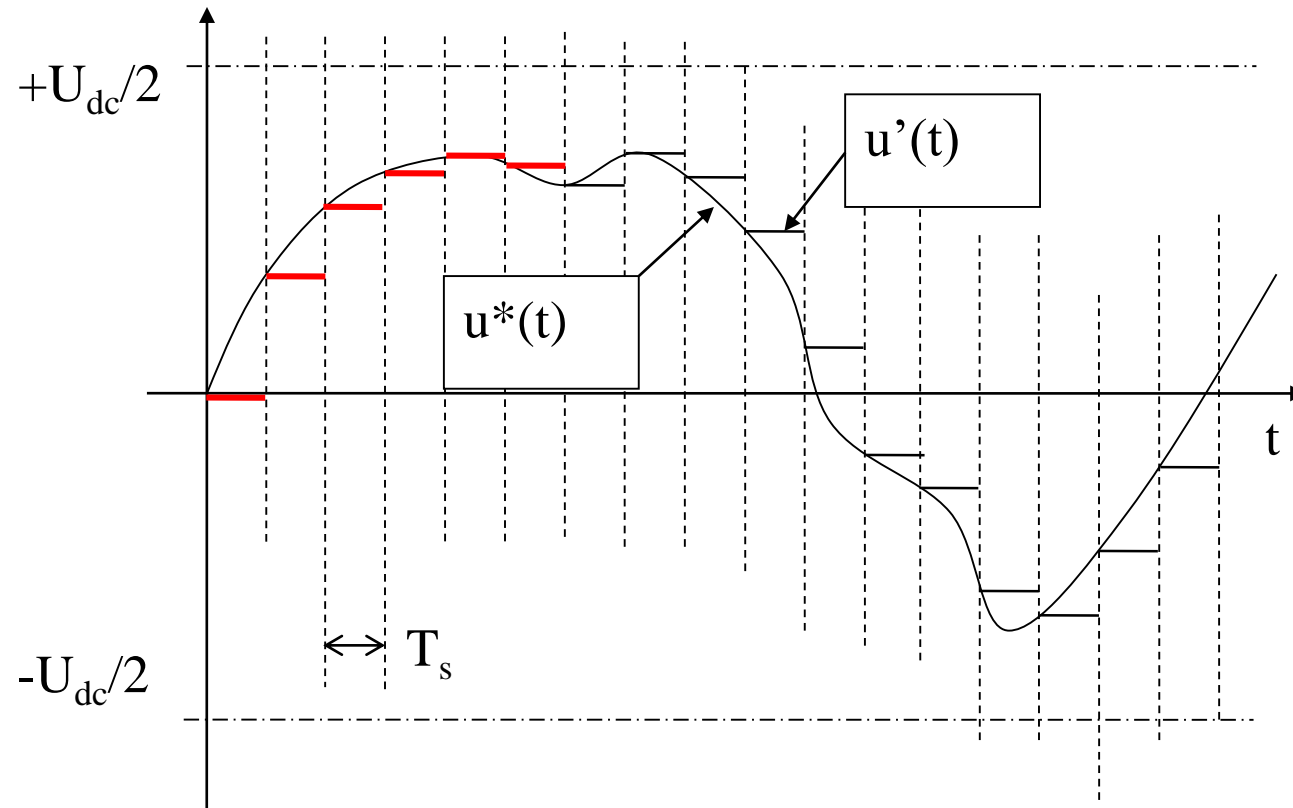
Componenti armoniche: $n=6k\pm 1$

$$U_{aN,n} = U_{aO,n} = \frac{4}{n\pi} \frac{U_{dc}}{2} = \frac{U_{aO,1}}{n}$$

(valori di picco)

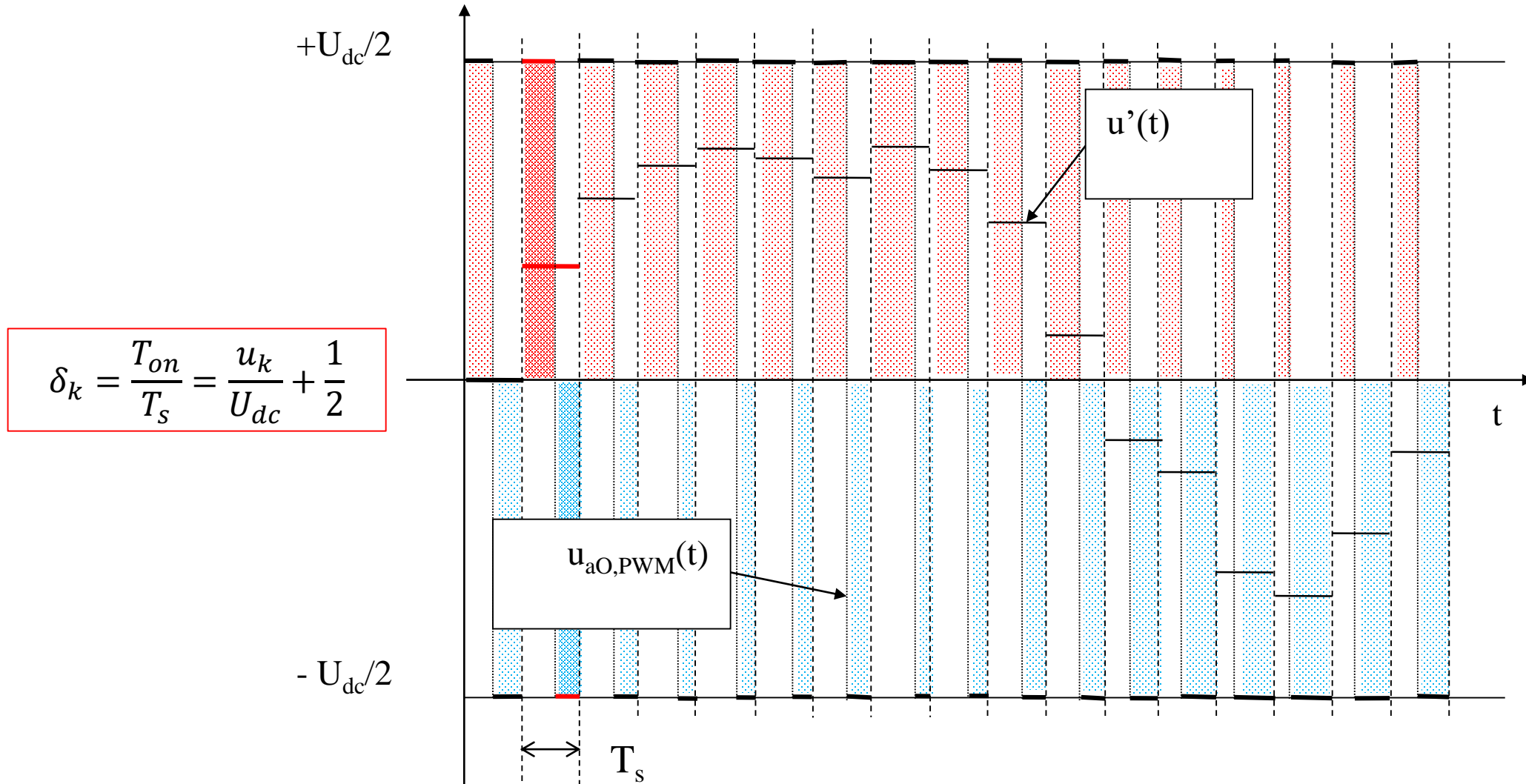


4.3 – Principio generale della PWM scalare

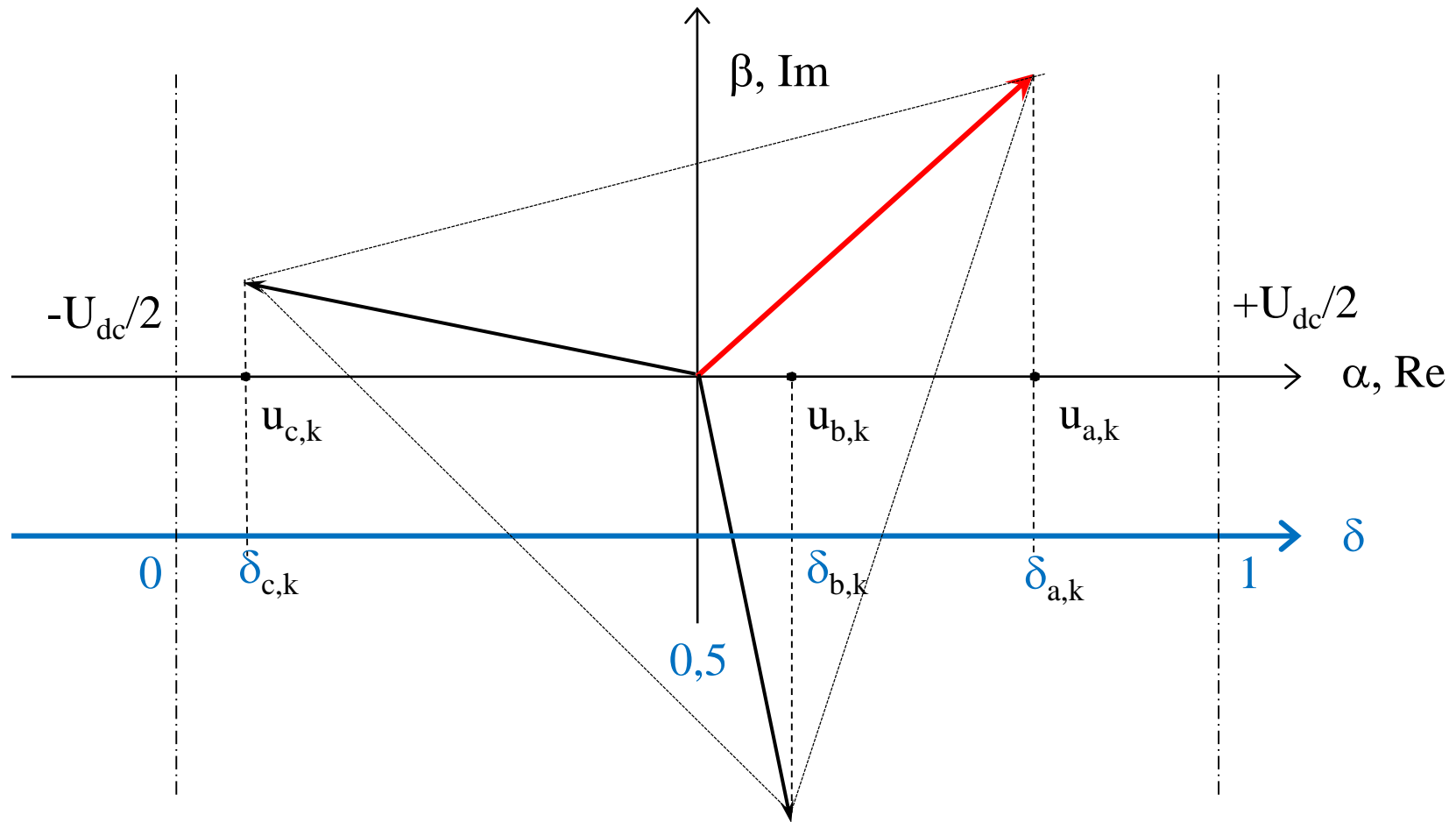


$$u'(t) = \frac{U_{dc}}{2} \frac{T_{on} - T_{off}}{T_s} = \frac{U_{dc}}{2} \frac{T_{on} - (T_s - T_{on})}{T_s} = \frac{U_{dc}}{2} \left(2 \frac{T_{on}}{T_s} - 1 \right) = U_{dc} \left(\delta - \frac{1}{2} \right)$$

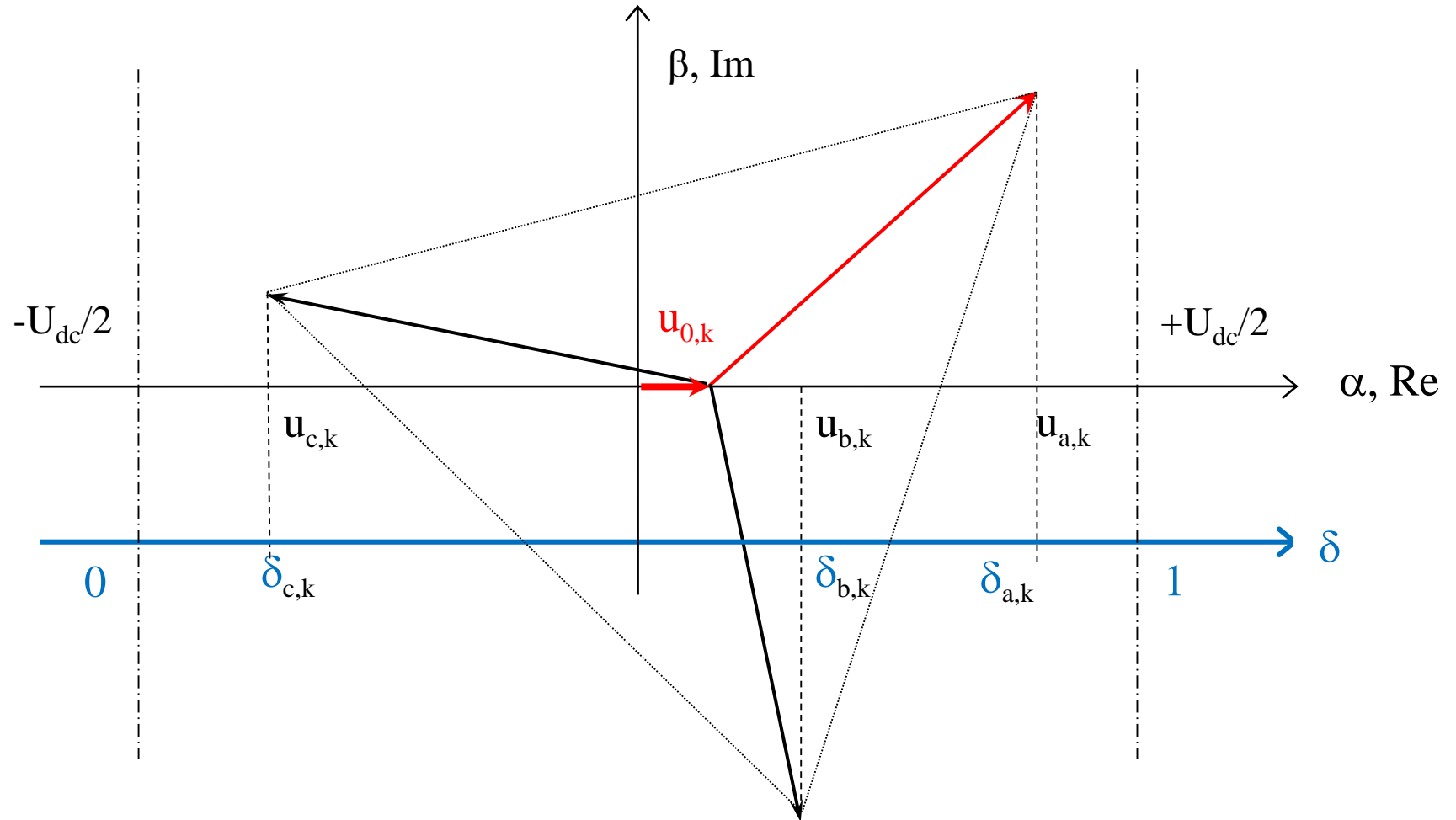
(cont.) - Principio generale della PWM scalare



4.3.1 - PWM trifase sinusoidale



(cont.) - PWM trifase sinusoidale (con iniezione di omopolare)



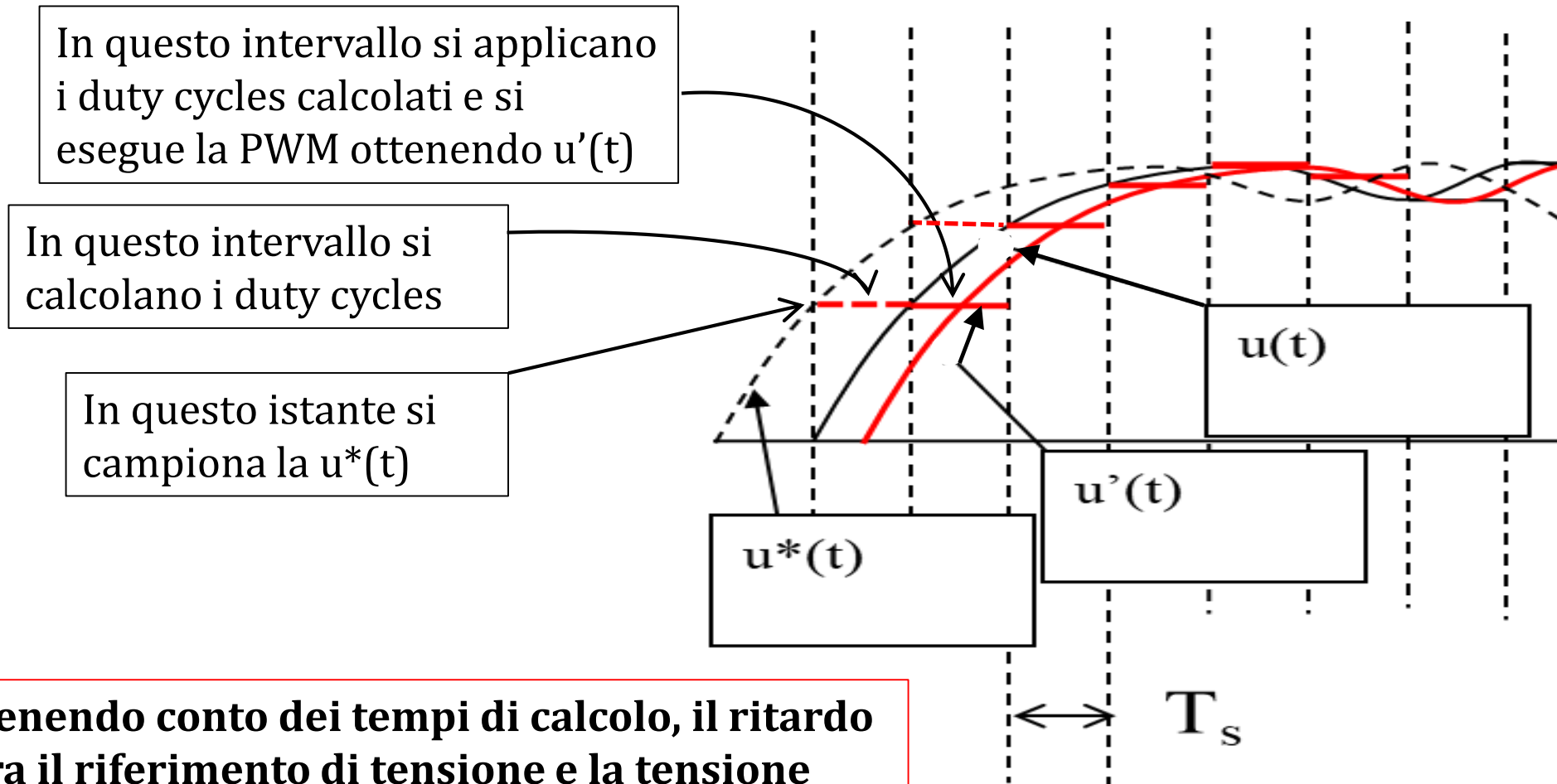
Confronto fra le diverse tecniche di PWM

Sono riportati i valori massimi (M) ed efficaci (rms) delle tensioni fondamentali (prima armonica) concatenate e di fase

Strategia di PWM	$U_{M,conc,1}$	$U_{rms,conc,1}$	$U_{M,fase,1}$	$U_{rms,fase,1}$
(senza PWM) Onda quadra	$\sqrt{3} \cdot 2/\pi U_{dc}$ (1,10 U_{dc})	$\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}/\pi U_{dc}$ (0,78 U_{dc})	$2/\pi U_{dc}$ (0,64 U_{dc})	$\sqrt{2}/\pi U_{dc}$ (0,45 U_{dc})
PWM scalare senza omopolare <i>(da 0 fino a)</i>	$\sqrt{3}/2 U_{dc}$ (0,87 U_{dc})	$\sqrt{3}/\sqrt{2} U_{dc}$ (0,61 U_{dc})	$1/2 U_{dc}$ (0,50 U_{dc})	$1/(2\sqrt{2}) U_{dc}$ (0,35 U_{dc})
PWM scalare con omopolare (oppure PWM vettoriale) <i>(da 0 fino a)</i>	U_{dc} (1,00 U_{dc})	$1/\sqrt{2} U_{dc}$ (0,71 U_{dc})	$1/\sqrt{3} U_{dc}$ (0,58 U_{dc})	$1/(\sqrt{3}\sqrt{2}) U_{dc}$ (0,41 U_{dc})

NB: la tensione U_{dc} è ottenuta dalla rete trifase con un ponte trifase a diodi: $U_{dc} = 1.35 U_{rms,conc,rete}$. Per esempio raddrizzando la tensione trifase di rete di 400V si ottiene $U_{dc} = 540 V$ (rapporto $U_{rms,conc,rete}/U_{dc} = 0.74$).

Funzione di trasferimento del controllo di tensione a PWM



Tenendo conto dei tempi di calcolo, il ritardo fra il riferimento di tensione e la tensione prodotta è pari a $3T_s/2 = 1.5T_s$

(cont.) - Funzione di trasferimento del controllo di tensione a PWM

Tenendo conto dei tempi di calcolo, il ritardo fra il riferimento di tensione e la tensione prodotta è pari a $3T_s/2 = 1.5T_s$ e pertanto

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{U^*(s)} = e^{-s(1.5T_s)} \cong \frac{1}{1 + s(1.5T_s)}$$

Il polo è alla pulsazione (frequenza angolare) $\nu_c = 1/(1.5T_s) = f_s/1.5$ [rad/s]

In termini di frequenza, il polo è alla frequenza $f_c = \nu_c/(2\pi) = f_s/(1.5 \cdot 2\pi) \cong f_s/10$ [Hz]

Misure delle correnti e delle tensioni di fase

Misura delle correnti

0	1	1	1	1	1	0
0	0	1	1	1	0	0
0	0	0	1	0	0	0

Tensioni di fase dell'inverter

$i(t)$

100

100

Corrente «media»

Istanti di campionamento (filtraggio sincrono)

«Misura» delle tensioni

Usati al posto delle misure di tensione

u_{α}^*

u_{β}^*

«(Inverter a PWM)⁻¹»

u_{α}^{**}

u_{β}^{**}

Inverter a PWM

$u_{\alpha} = u_{\alpha}^*$

$u_{\beta} = u_{\beta}^*$