

Electric Drives  
Laboratory  
DII - UniPD

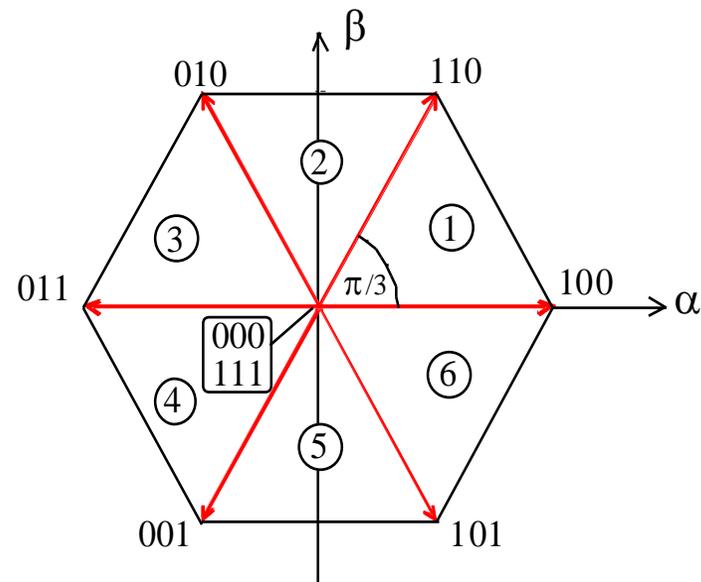
# Azionamenti Elettrici

Lezioni a.a. 2020-2021

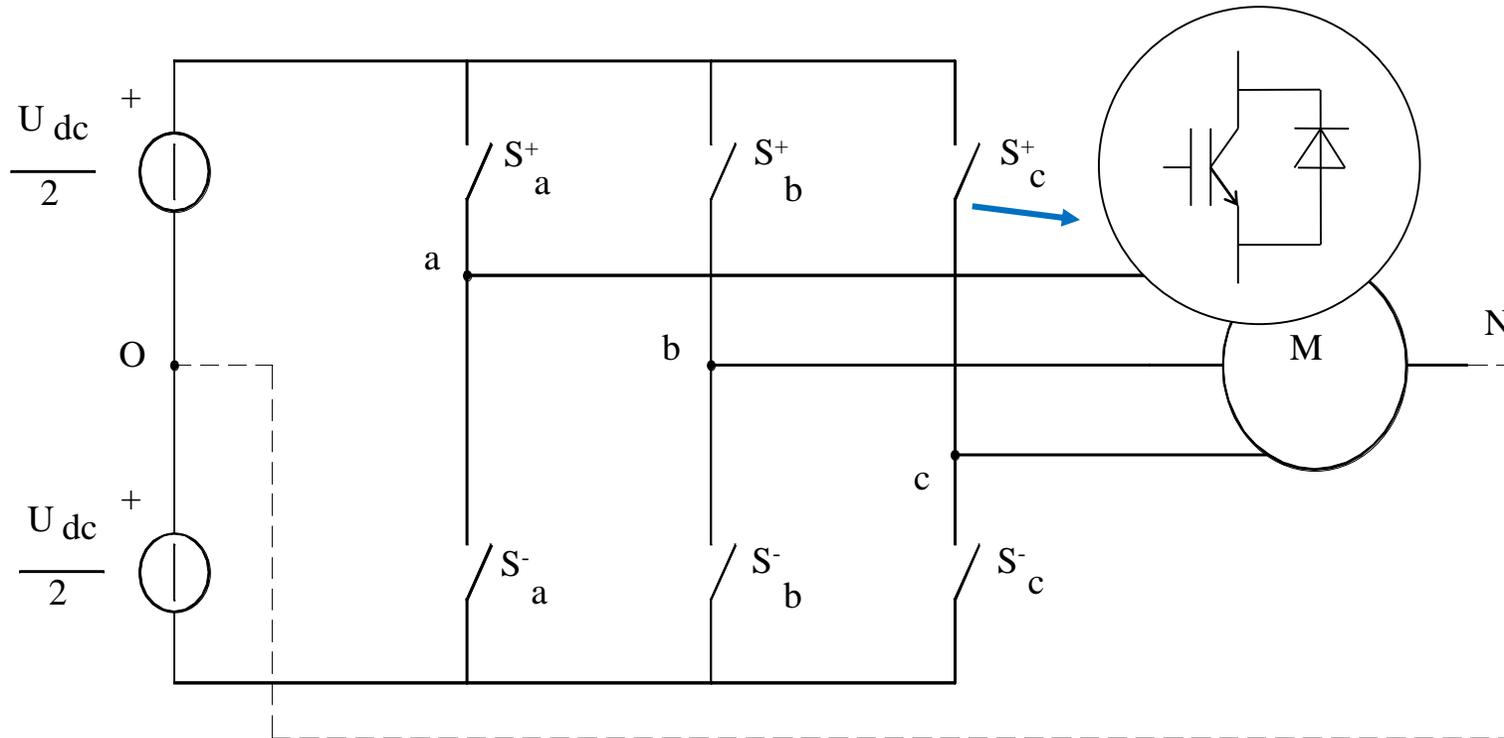
prof. Silverio Bolognani

PARTE II

# Invertitore trifase di tensione

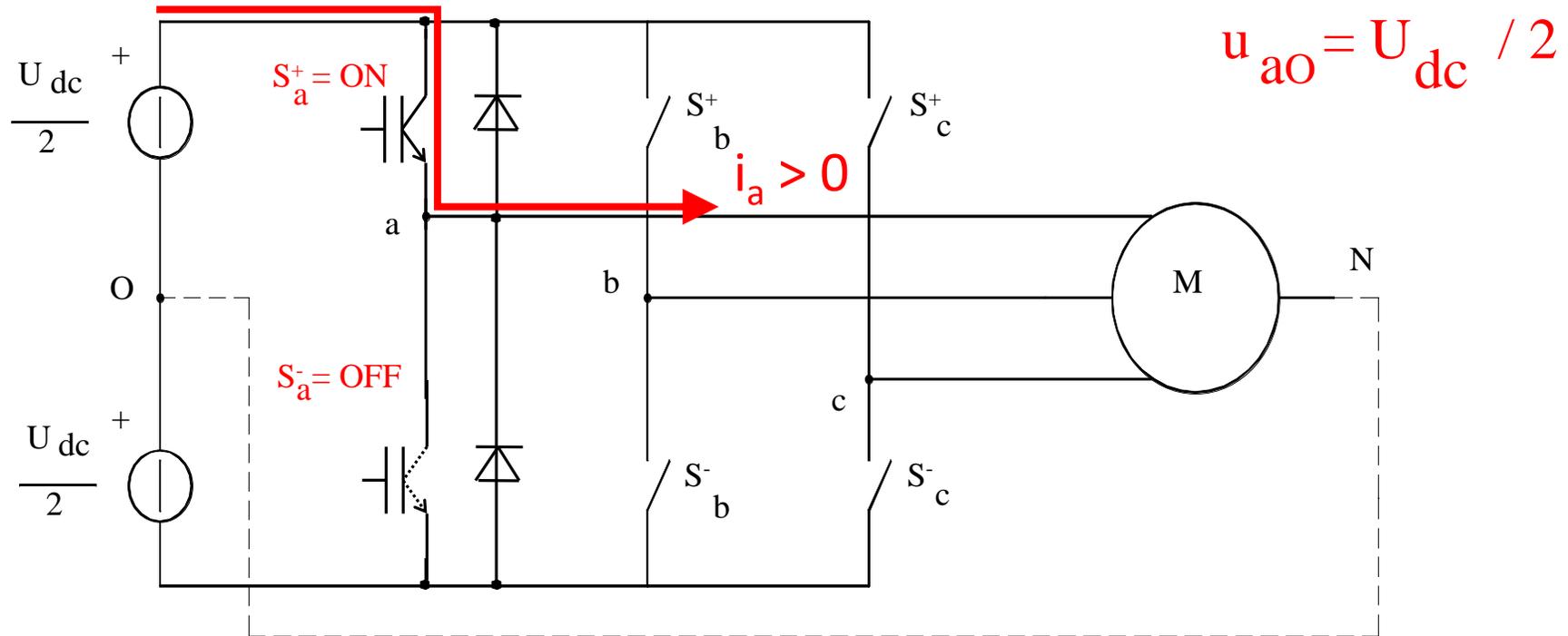


## 4.1 - L'invertitore trifase di tensione



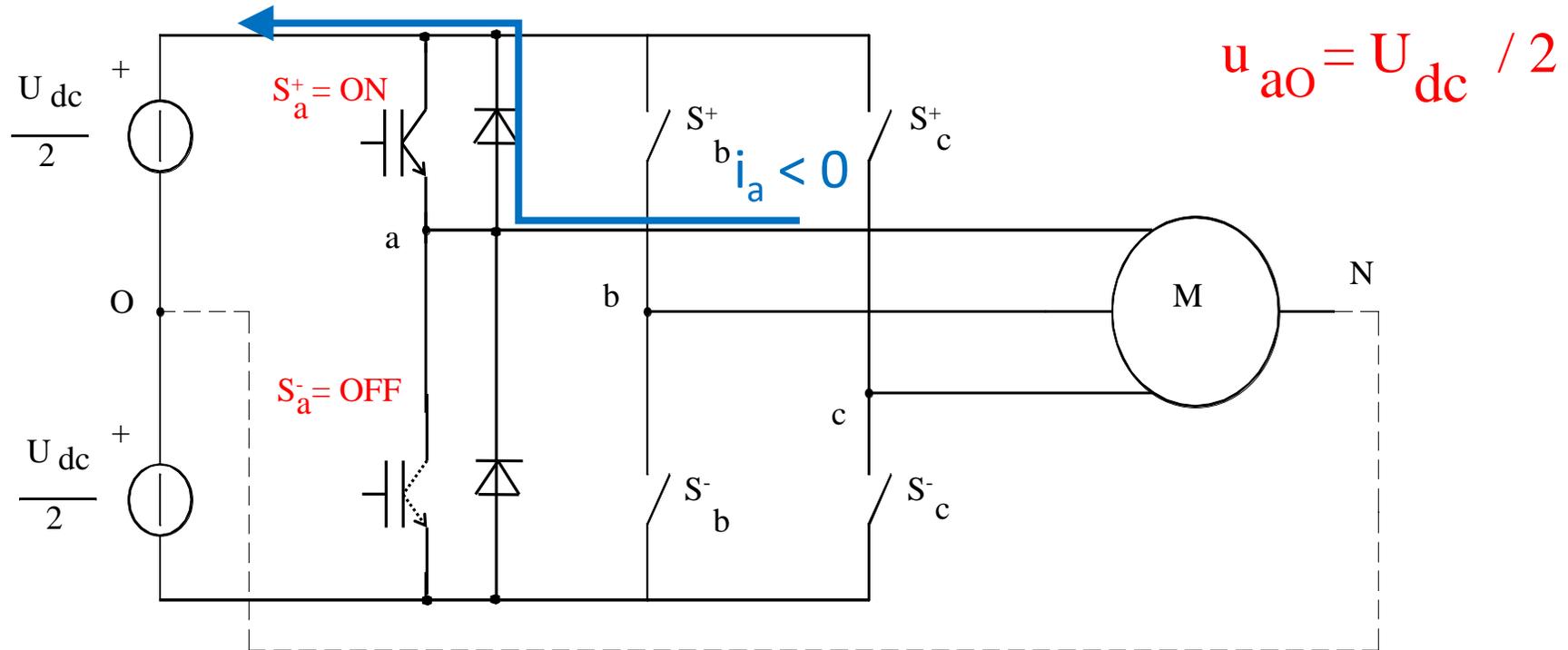
Rappresentazione schematica di un invertitore di tensione trifase

## Percorso della corrente di fase «a» positiva



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

## Percorso della corrente di fase «a» negativa



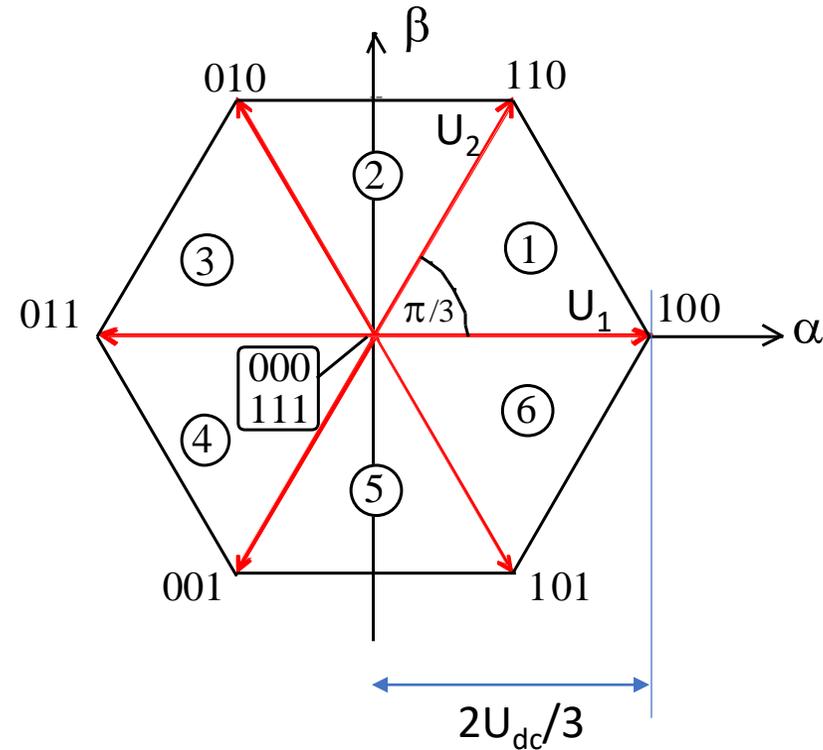
Con  $S_a^+ = ON$  si ottiene ANCORA  $u_{aO} > 0$

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

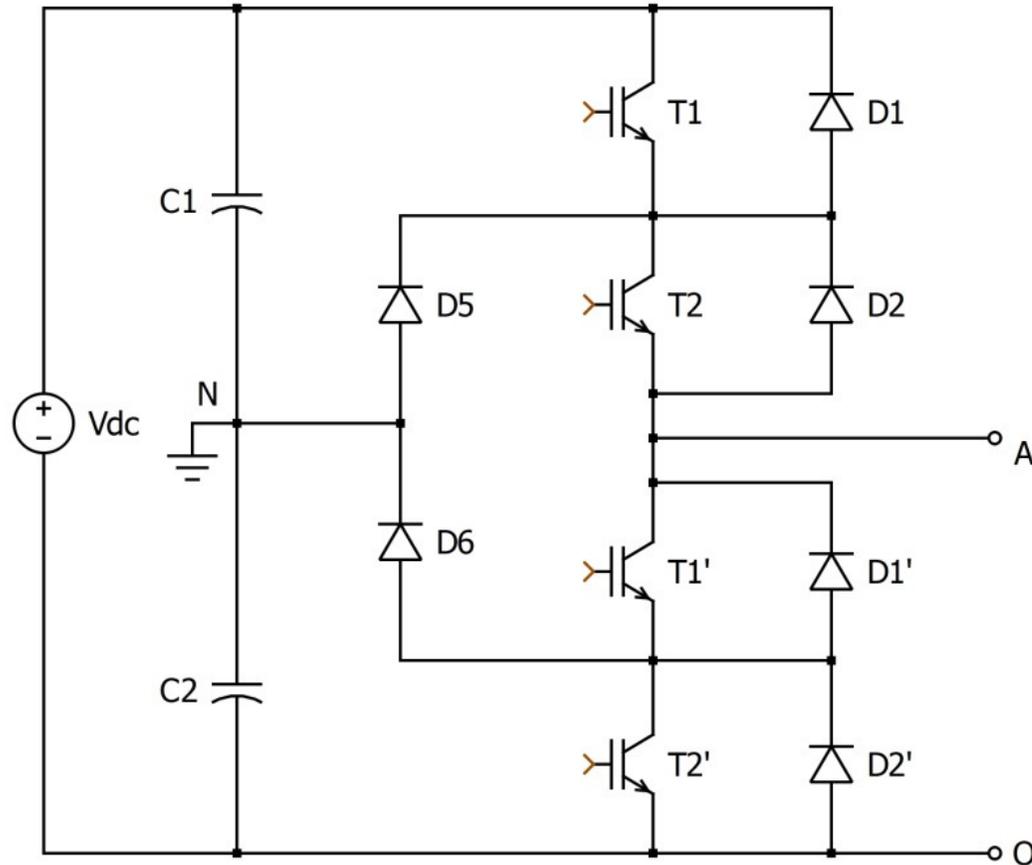
## Vettori spaziali relativi agli 8 stati dell'inverter

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

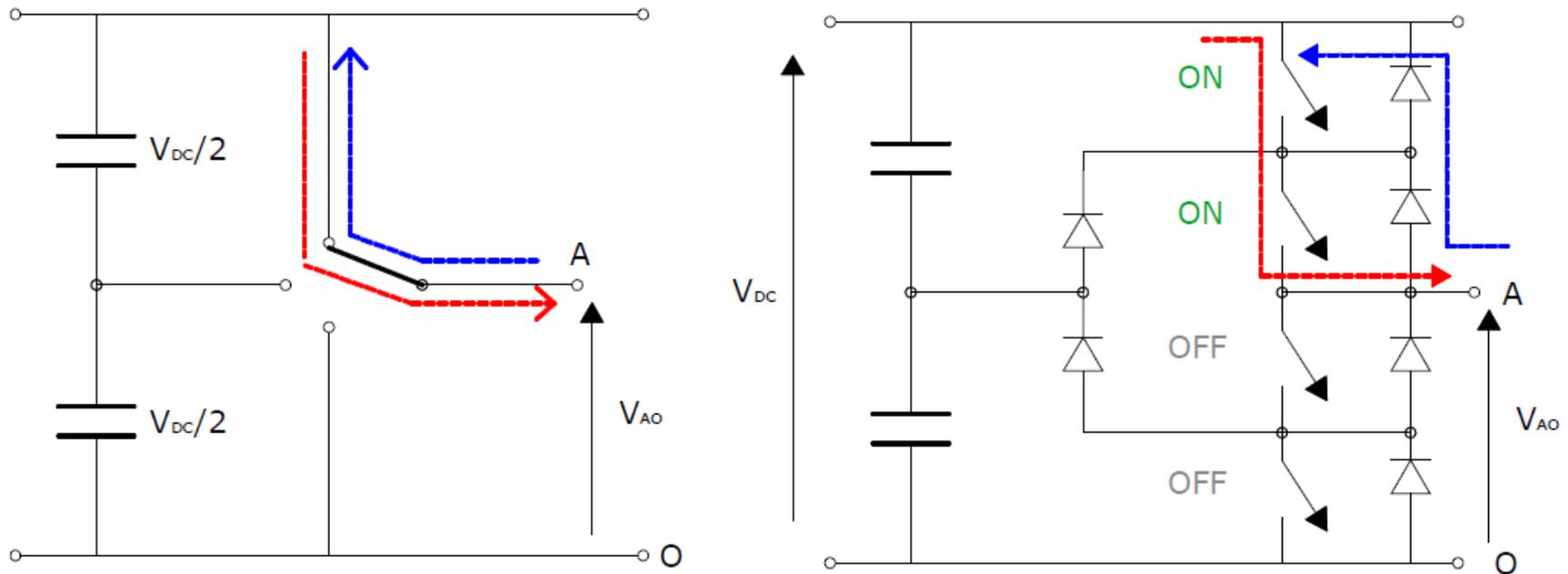
Tabella 1.1: Relazione fra gli stati degli interruttori del ramo di un inverter 3-livelli diode-clamped e le tensioni d'uscita.

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

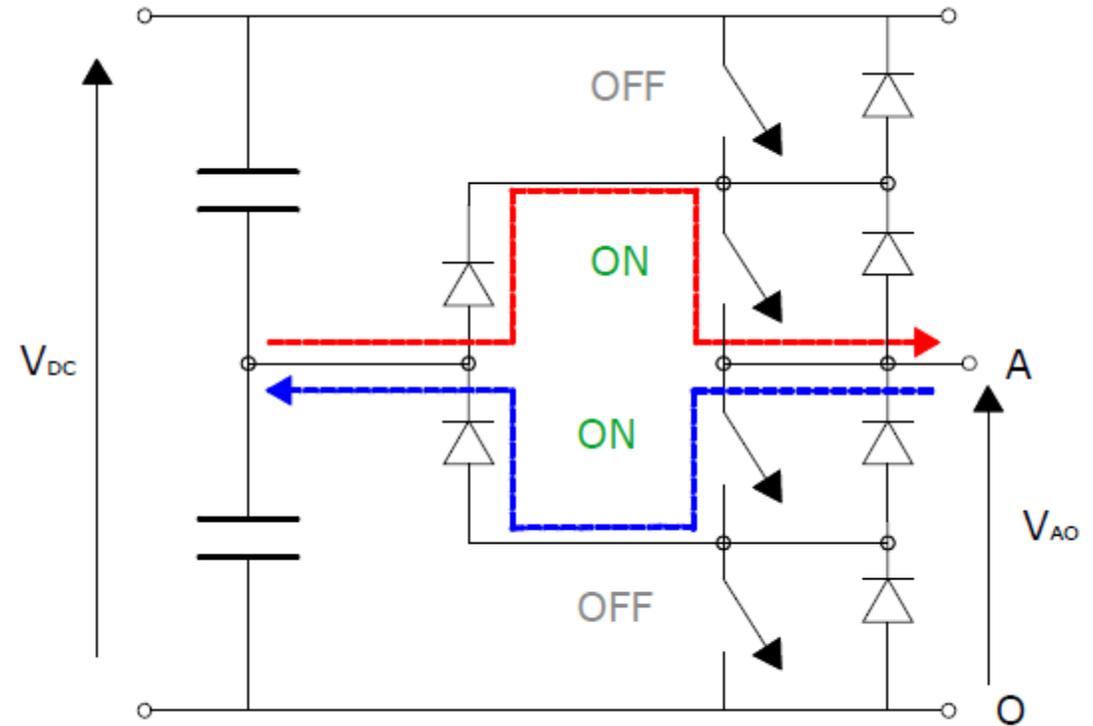
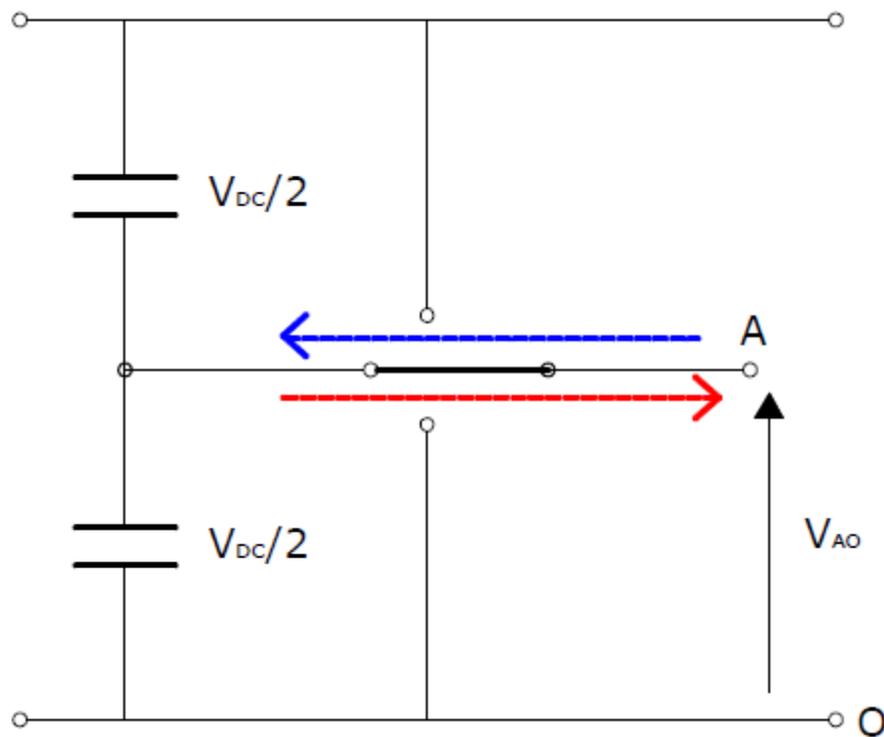
Ci sono 4 transistor e 6 diodi per ogni fase!

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

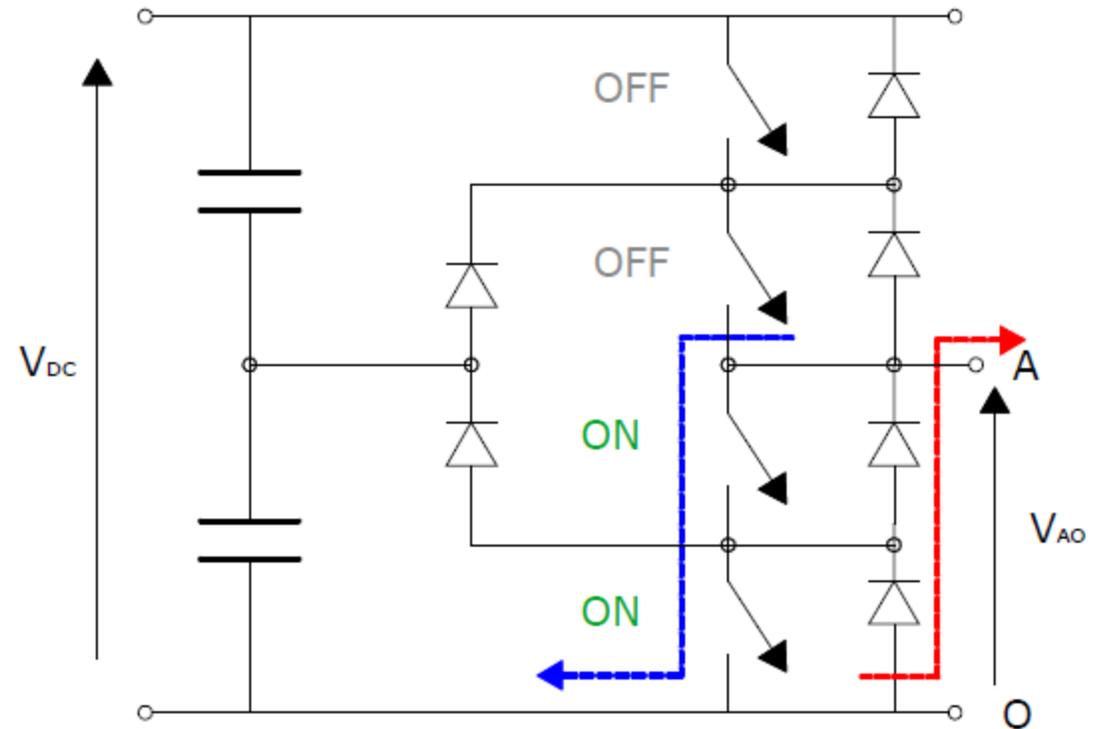
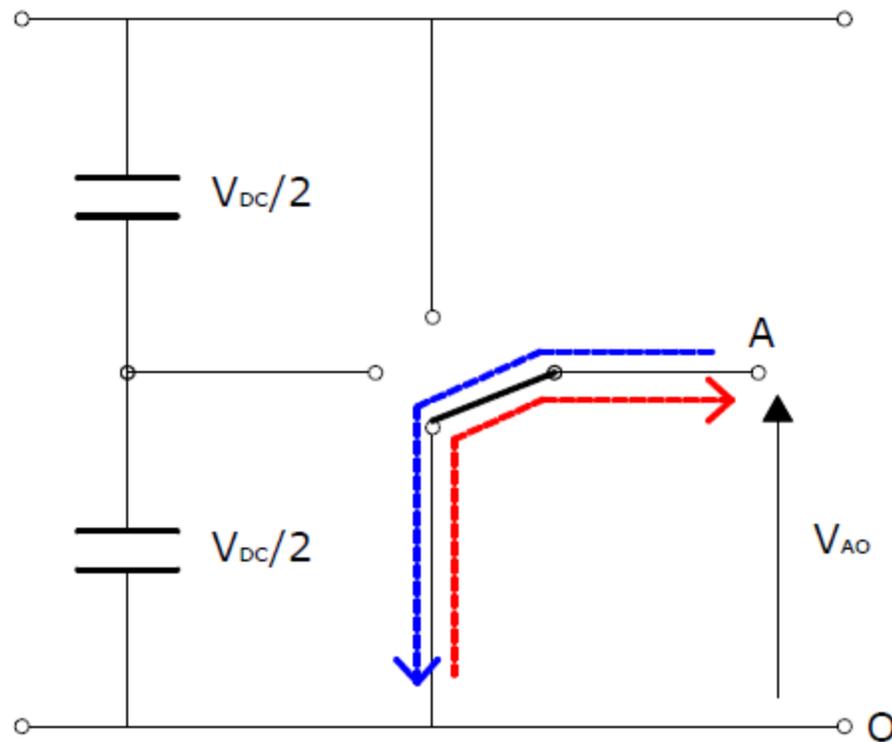
## Configurazione per tensione di uscita positiva



## 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

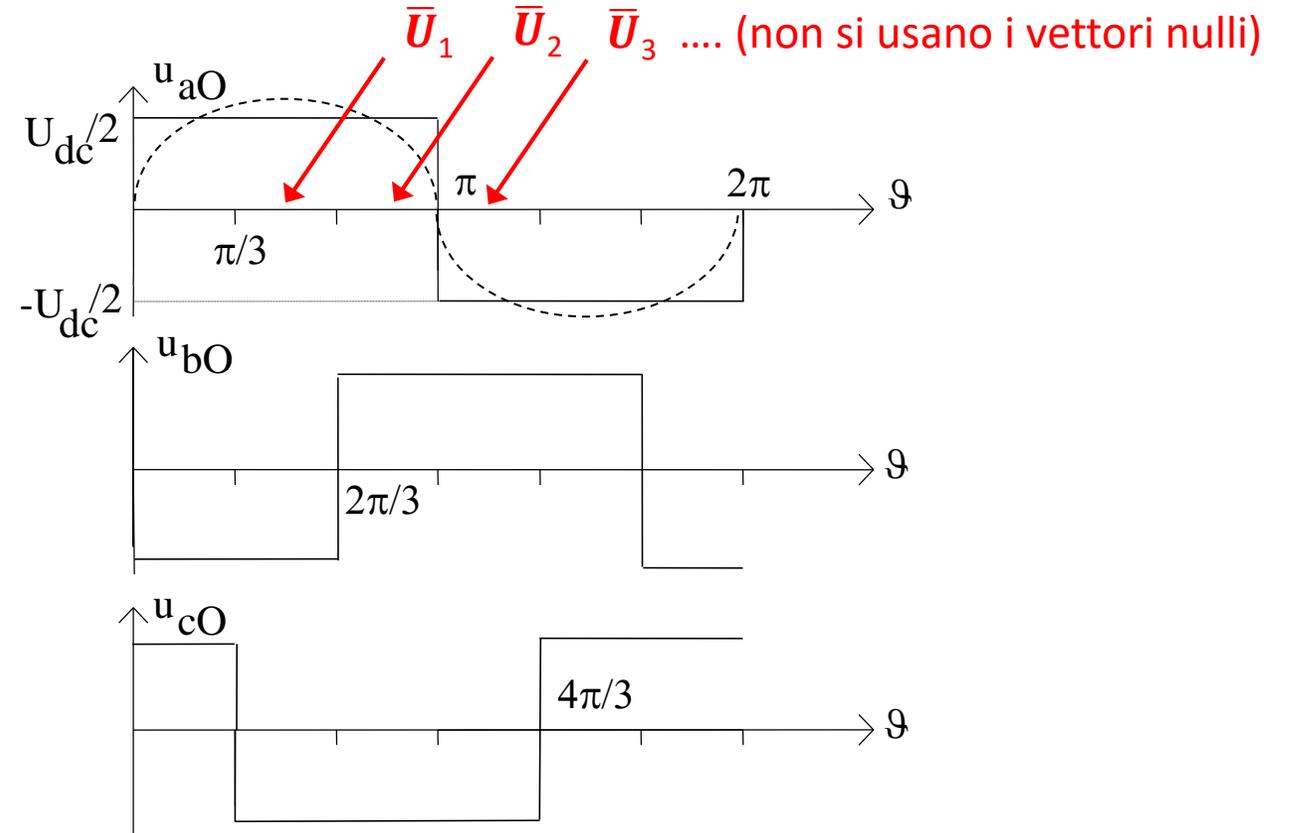
$$U_{aO,1} = \frac{4}{\pi} \frac{U_{dc}}{2} \approx 0.6366 U_{dc}$$

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)*

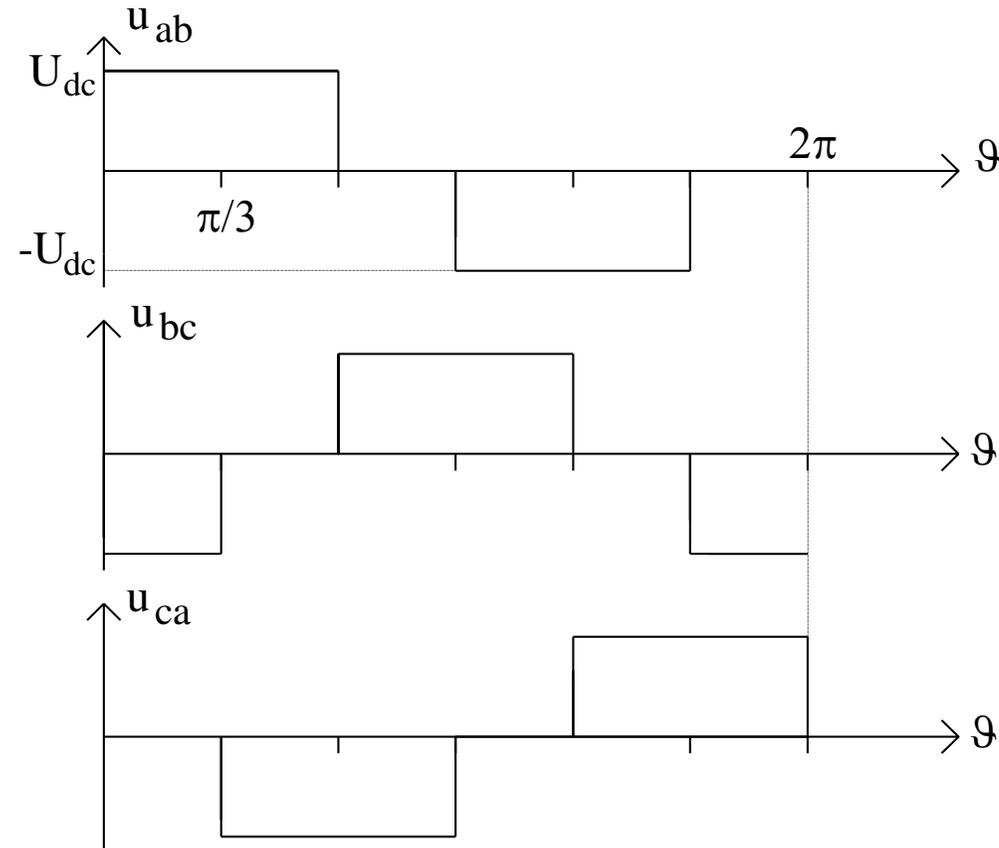
Componente fondamentale

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

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)

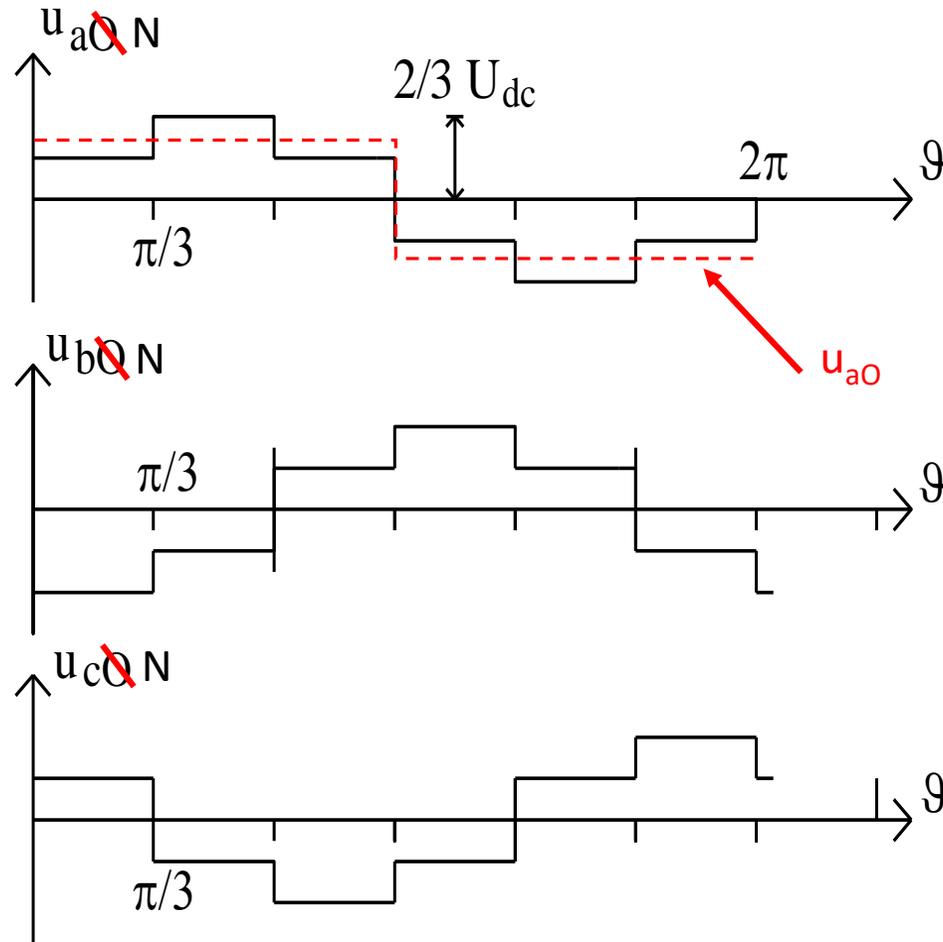
Componente fondamentale

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

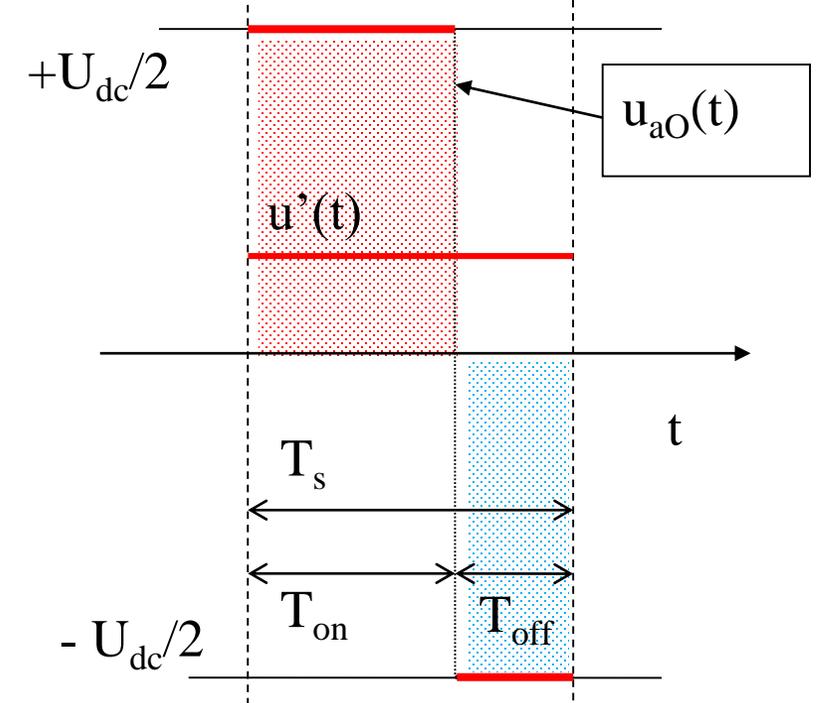
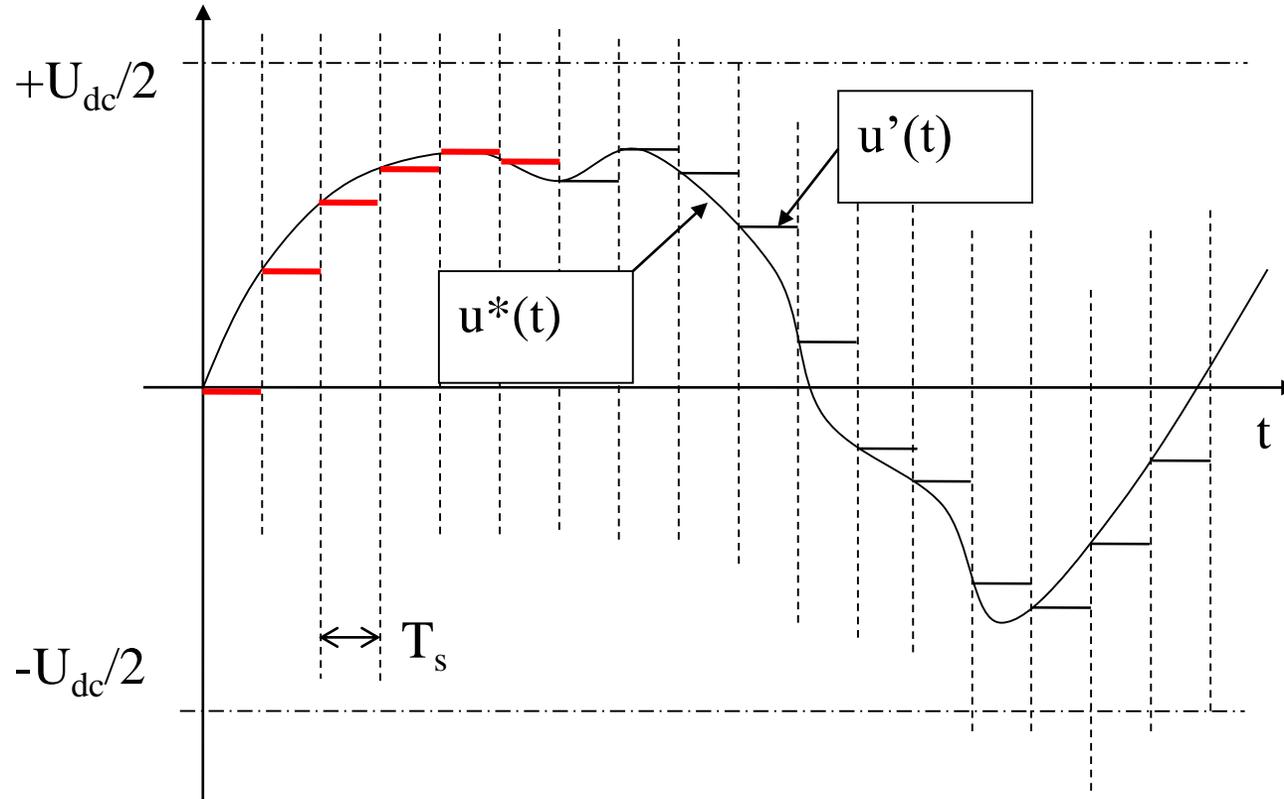
Componenti armoniche:  $n=6k\pm 1$

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

(valori di picco)

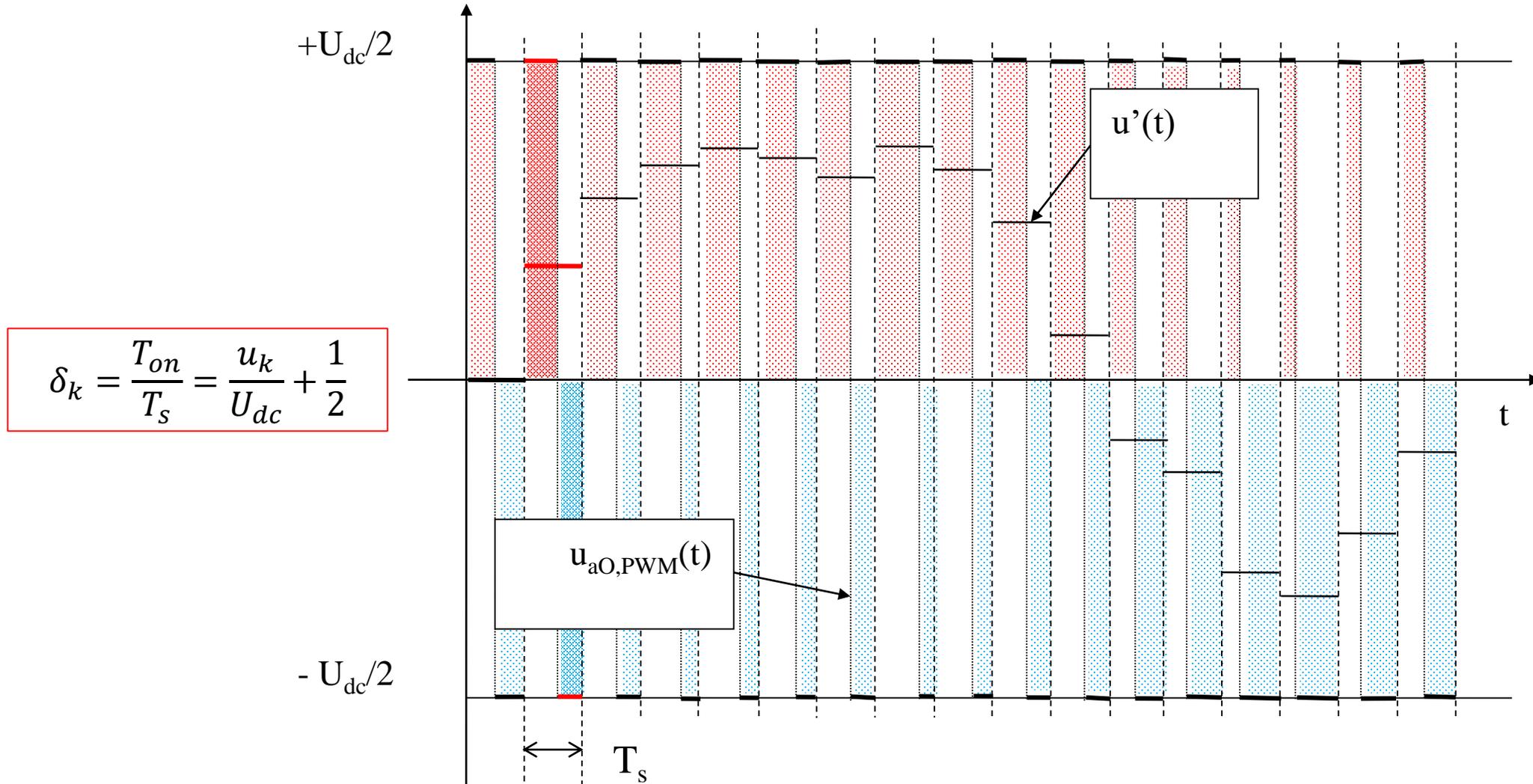


## 4.3 – Principio generale della PWM scalare



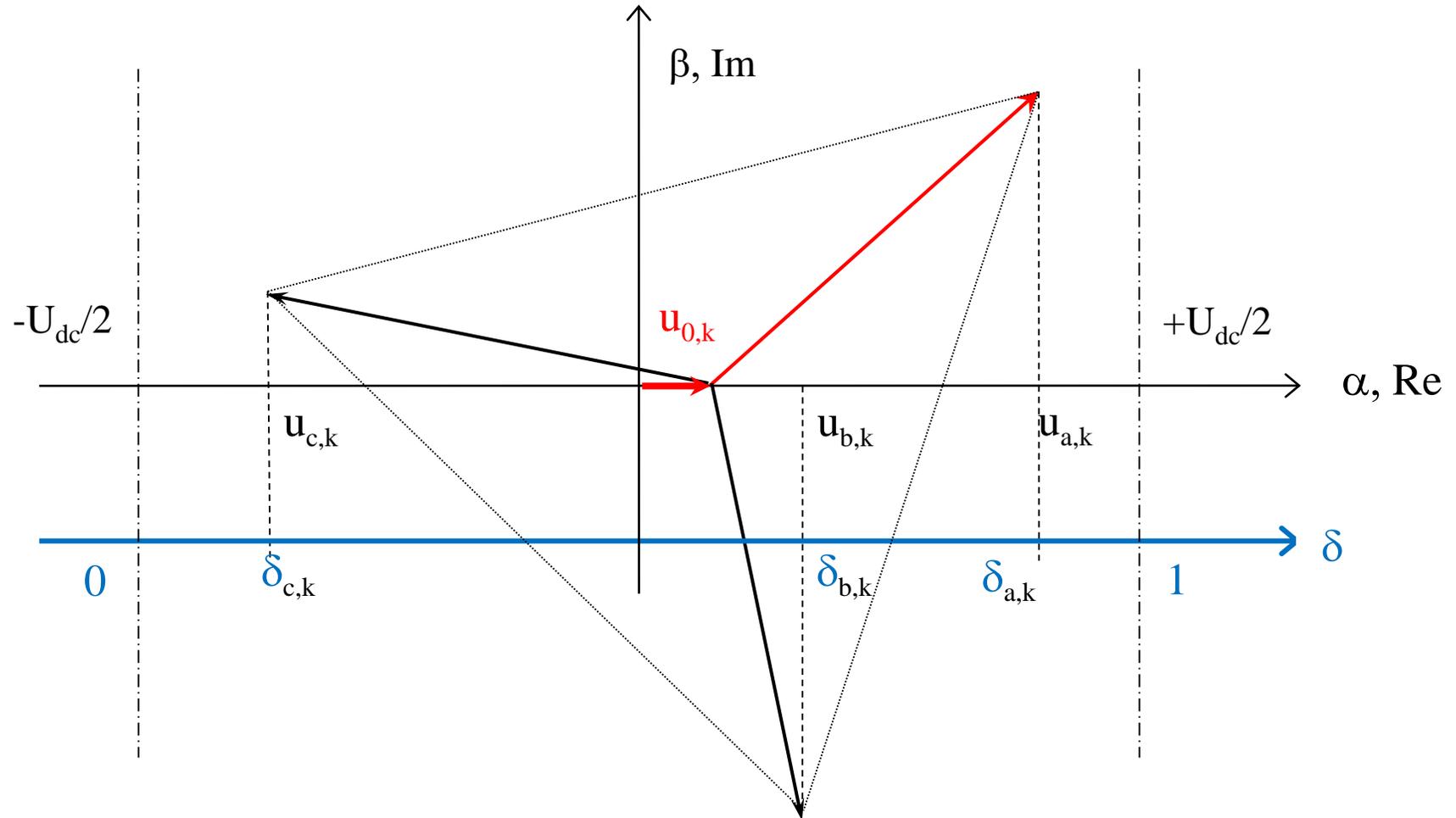
$$u'(t) = \frac{U_{dc}}{2} \frac{T_{on} - T_{off}}{T_s} = \frac{U_{dc}}{2} \frac{T_{on} - (T_s - T_{on})}{T_s} = \frac{U_{dc}}{2} \left( 2 \frac{T_{on}}{T_s} - 1 \right) = U_{dc} \left( \delta - \frac{1}{2} \right)$$

## (cont.) - Principio generale della PWM scalare





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



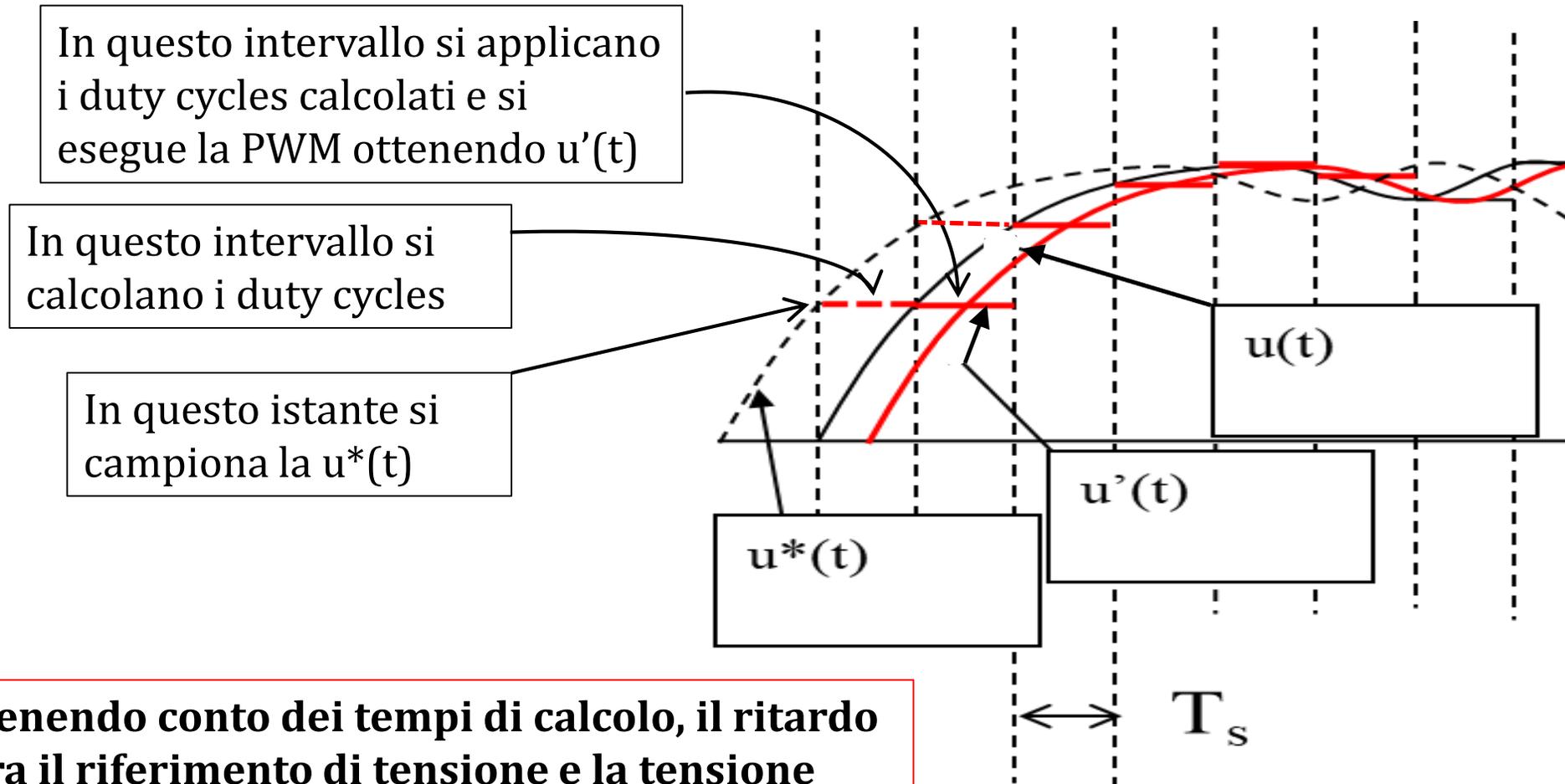
## Confronto fra le diverse tecniche di PWM

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

$u_{\alpha}^*$

$u_{\beta}^*$

«(Inverter a PWM)<sup>-1</sup>»

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

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

Inverter a PWM

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

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