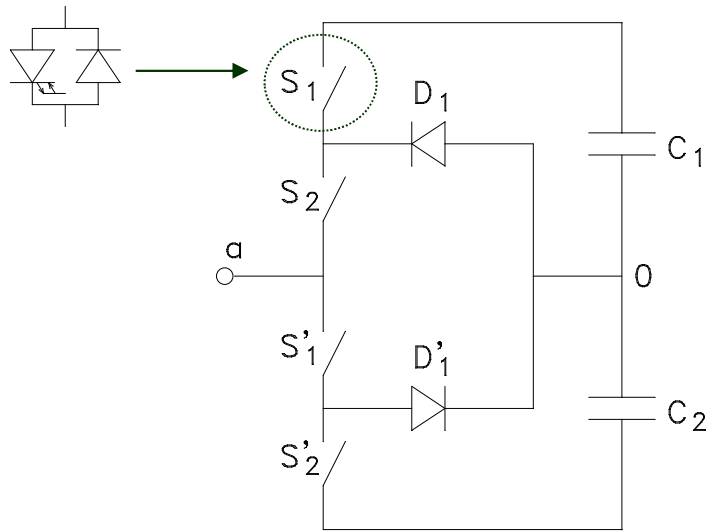


CONVERTITORI NPC

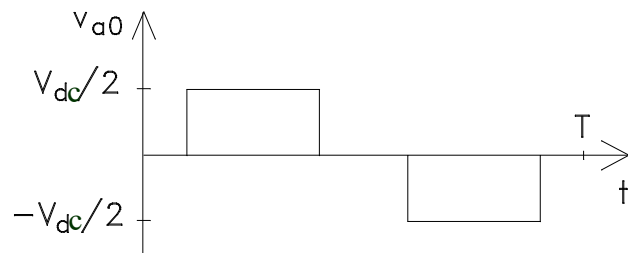
Prof. Simone CASTELLAN

- [1] B.Wu, *High-power converters and AC drives*, IEEE Press – Wiley Interscience, 2006.
- [2] D.G. Holmes and T.A.Lipo, *Pulse width modulation for power converters – Principles and practice*, IEEE Press – Wiley Interscience, 2003.

CONVERTITORI NPC (NEUTRAL POINT CLAMPED)



Ramo di convertitore NPC



Tensione di fase a tre livelli.

Il punto O che divide in due l'alimentazione è detto punto neutro.

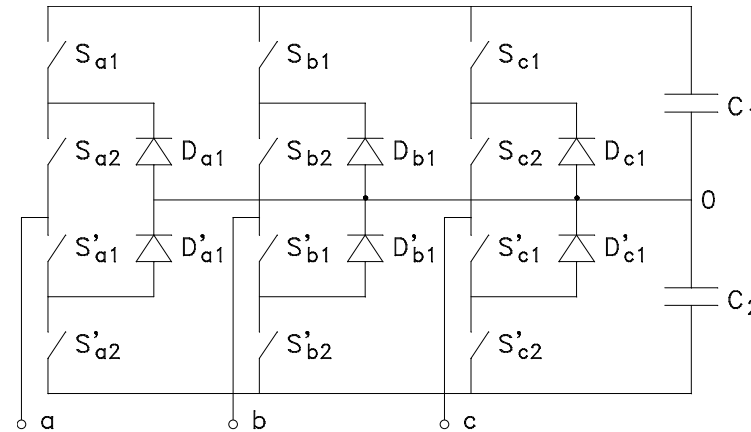
Il ramo presenta tre configurazioni diverse per gli interruttori e in corrispondenza si hanno tre livelli diversi di tensione tra "a" e "O" (che viene chiamata tensione di *fase del convertitore*). Si può definire la funzione di commutazione del ramo S_a (che coincide con quella della fase).

- 1) Quando gli interruttori S_1 e S_2 sono ON si ottiene il livello $V_{dc}/2$ e la funz. di com. $S_a=+1$
- 2) Quando gli interruttori S_1' , S_2' sono ON si ottiene il livello $-V_{dc}/2$ e la funz. di com. $S_a=-1$
- 3) Quando gli interruttori S_2 , S_1' sono ON si ottiene il livello 0 e la funz. di com. $S_a=0$

USCITA	STATO DEGLI INTERRUTTORI			
V_{a0}	S_1	S_2	S_1'	S_2'
$V_3=V_{dc}/2$	ON	ON	OFF	OFF
$V_2=0$	OFF	ON	ON	OFF
$V_1=-V_{dc}/2$	OFF	OFF	ON	ON

V_{dc} = tensione nel lato in continua; V_c = tensione su ciascun condensatore del lato in continua.

CONVERTITORI NPC TRIFASE



$$S'_{ij} = \bar{S}_{ij}$$
$$i = a, b, c$$
$$j = 1, 2$$

L'invertitore a tre livelli trifase è costituito da tre rami identici.

Ciascun ramo ha tre configurazioni di interruttori per cui complessivamente l'invertitore ha 27 diverse configurazioni di interruttori. Ogni configurazione produce una terna di tensioni in uscita.

Grazie a ciò ci sono molte possibili modalità di comando degli interruttori.

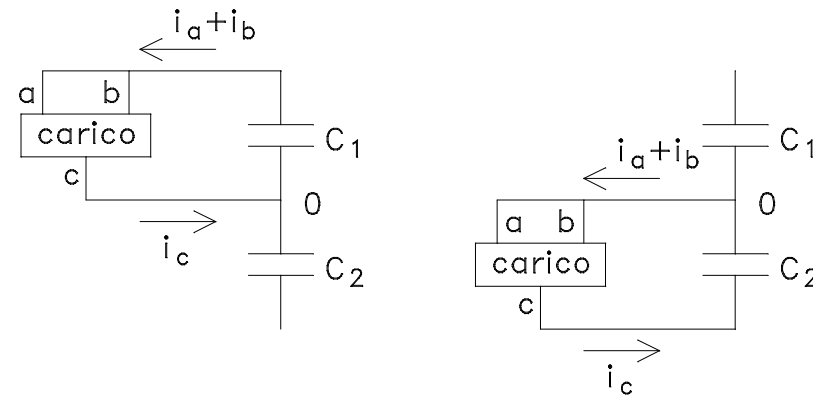
Analogamente agli invertitori a due livelli le principali sono il comando ad onda quadra e il comando PWM, quest'ultimo comprendente la tecnica PWM a sottoscillazione e quella vettoriale.

SBILANCIAMENTO DELLE TENSIONI DI C_1 E C_2

Quando l'uscita di una delle tre fasi è collegata al punto O in esso fluisce corrente e le tensioni di C_1 e C_2 si sbilanciano.

Per mantenere a zero la tensione v_o nel punto O ci si avvale del fatto che esistono diverse configurazioni degli interruttori che danno lo stesso valore della tensione concatenata.

Esempio di due configurazioni che danno la stessa tensione di uscita del convertitore ma provocano effetti contrari sulla tensione del punto O .

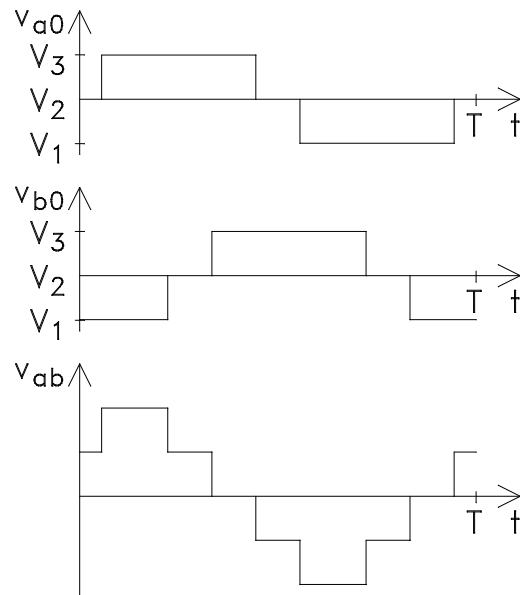


Un sistema di controllo, dopo aver rilevato il valore di v_o e il segno di i_c , deciderà quale delle due combinazioni scegliere per dare a v_o la variazione desiderata in modo da mantenere uguali le tensioni di C_1 e C_2 .

COMANDO AD ONDA QUADRA

Si supponga che il potenziale del punto O coincida sempre con quello del centro dell'alimentazione; allora

$$v_{jO} = S_j \frac{V_{dc}}{2} \quad \text{con } j = a, b, c$$

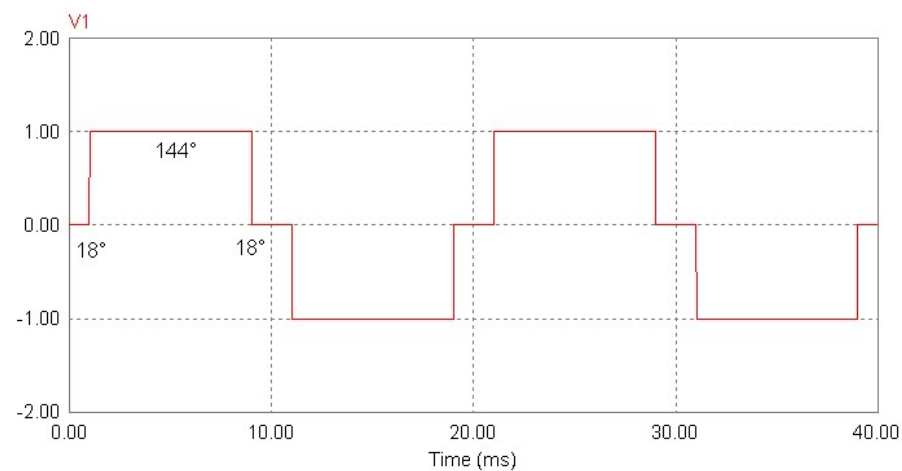


USCITA	STATO DEGLI INTERRUTTORI			
V_{ab}	S_{a1}	S_{a2}	S_{b1}	S_{b2}
V_{dc}	ON	ON	OFF	OFF
$V_{dc}/2$	OFF	ON	OFF	OFF
$V_{dc}/2$	ON	ON	OFF	ON
0	ON	ON	ON	ON
0	OFF	ON	OFF	ON
0	OFF	OFF	OFF	OFF
$-V_{dc}/2$	OFF	ON	ON	ON
$-V_{dc}/2$	OFF	OFF	OFF	ON
$-V_{dc}$	OFF	OFF	ON	ON

Poiché la tensione V_{jO} può assumere tre livelli la temporizzazione della funzione di commutazione può essere scelta in base alla forma d'onda che si vuole far assumere alla tensione. Essa non è più semplicemente un'onda quadra, ma può assumere degli andamenti tali da soddisfare certe esigenze quali l'assenza di certe armoniche.

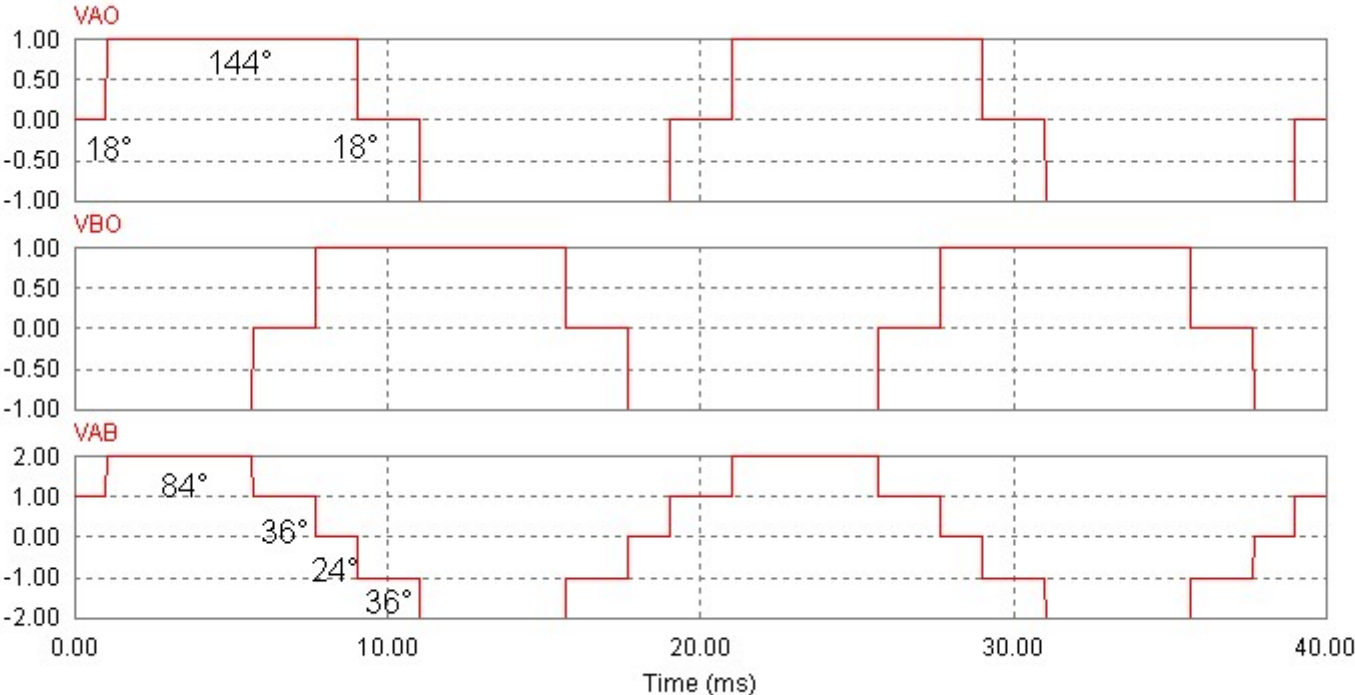
COMANDO AD ONDA QUADRA

Per esempio se si volesse eliminare la quinta armonica dalla V_{AO} si dovrebbe realizzare una forma d'onda del tipo

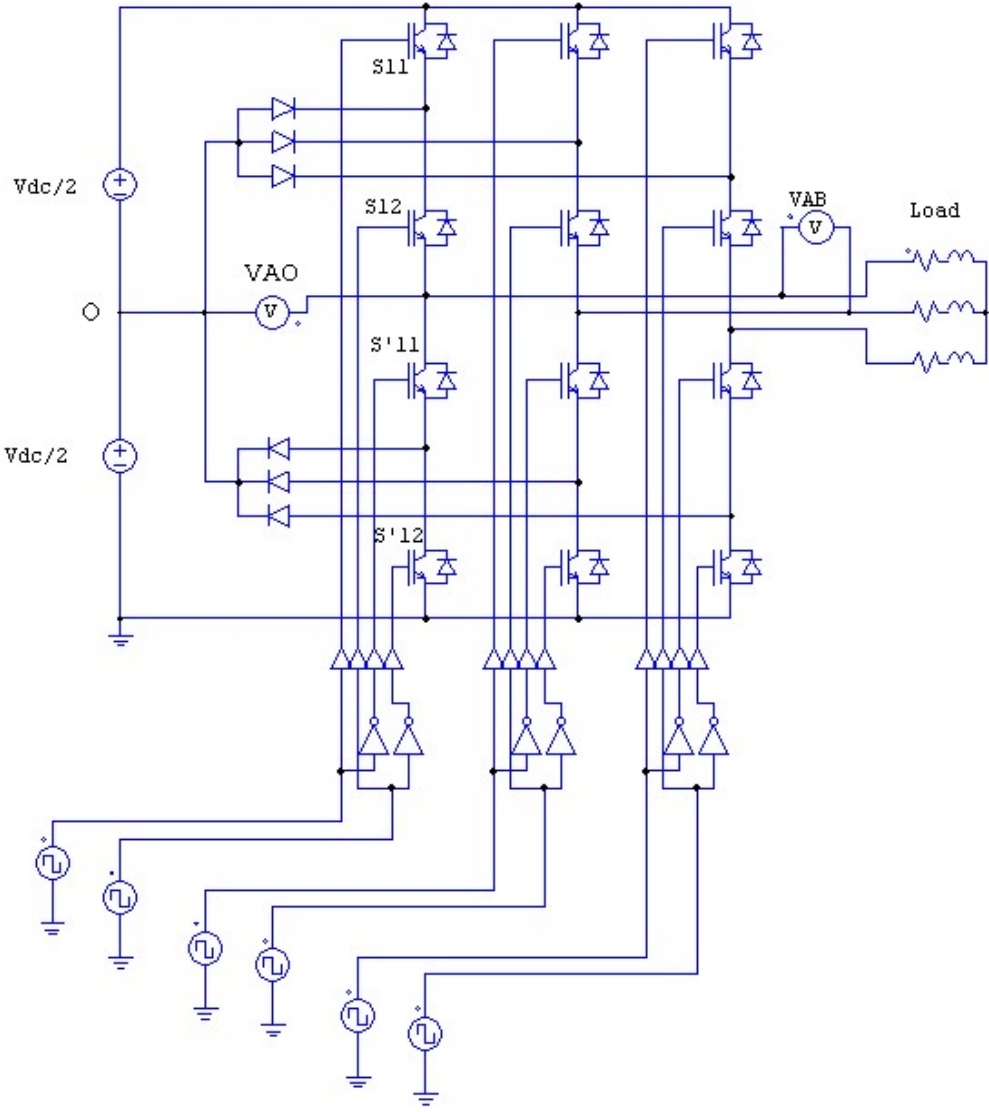


Naturalmente le altre due fasi dovrebbero avere delle forme analoghe solo sfasate di 120°.

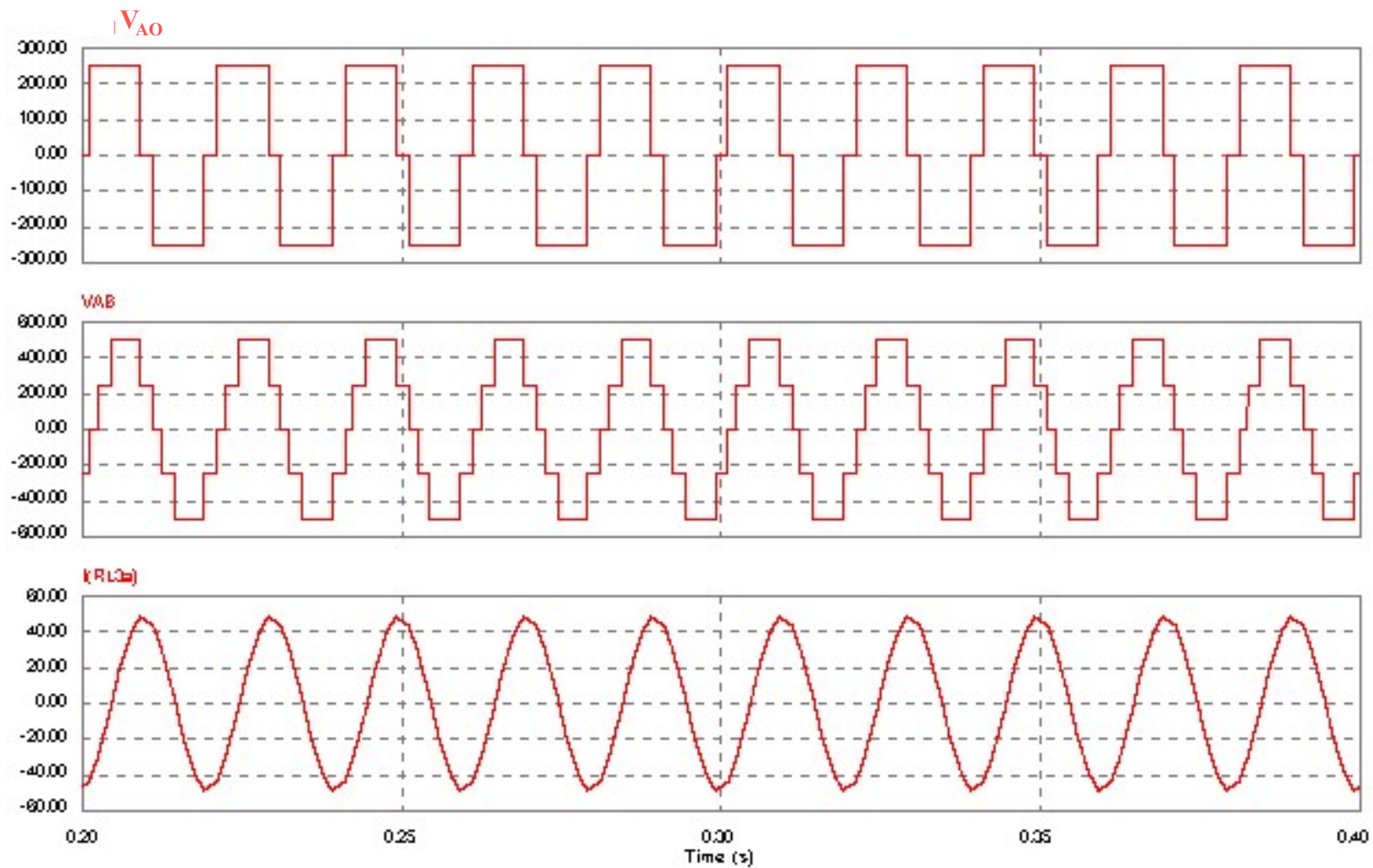
COMANDO AD ONDA QUADRA



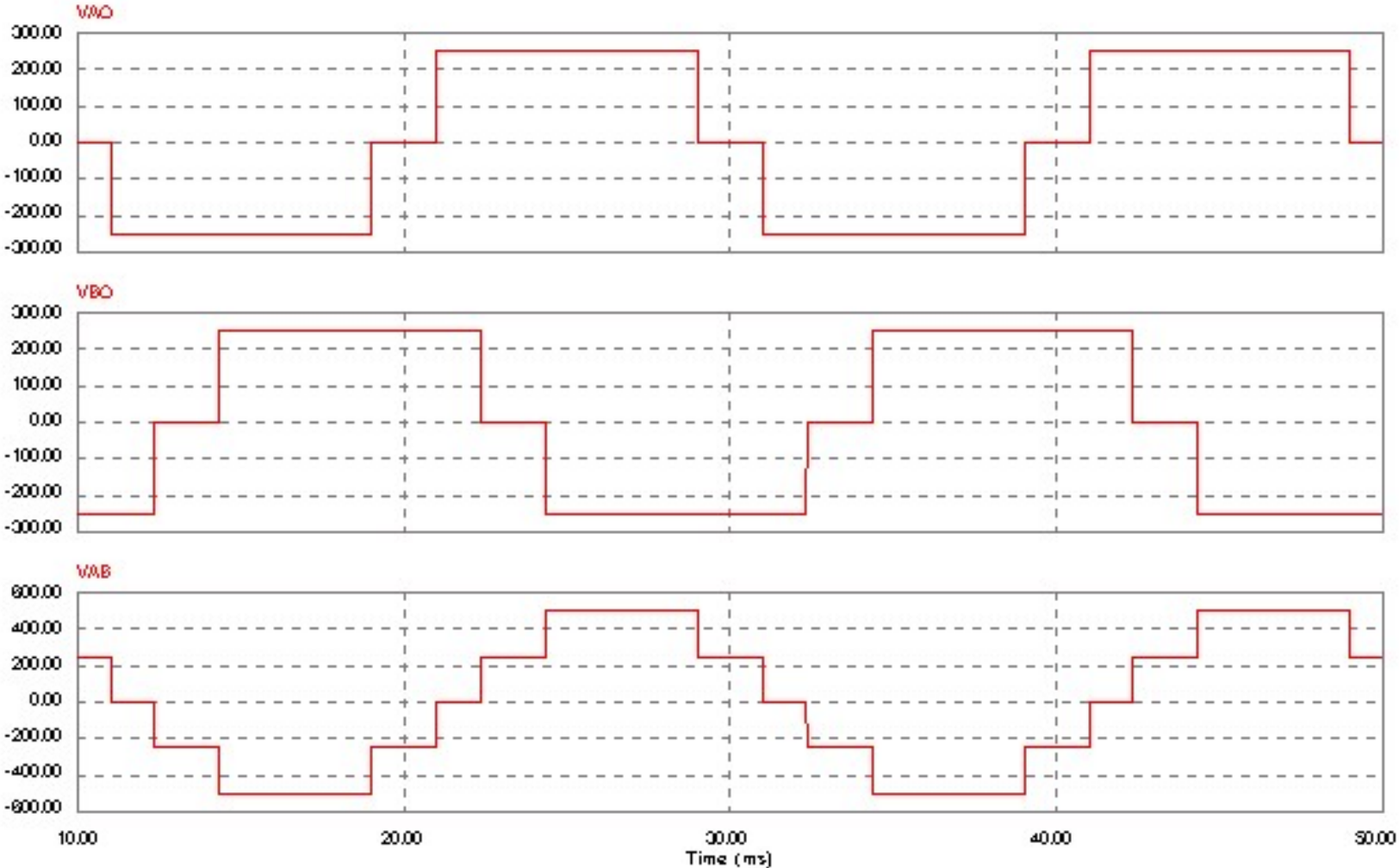
COMANDO AD ONDA QUADRA



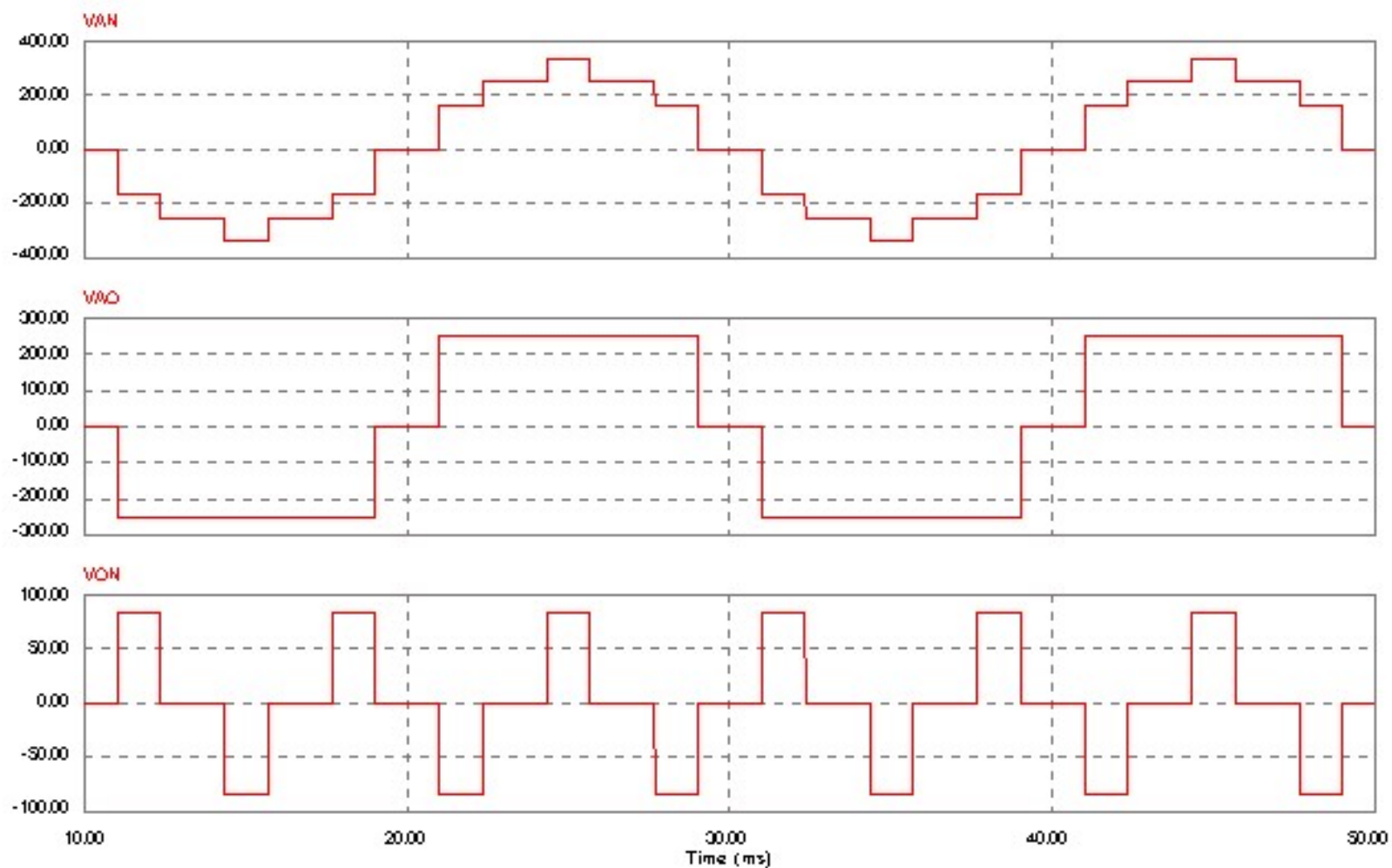
COMANDO AD ONDA QUADRA



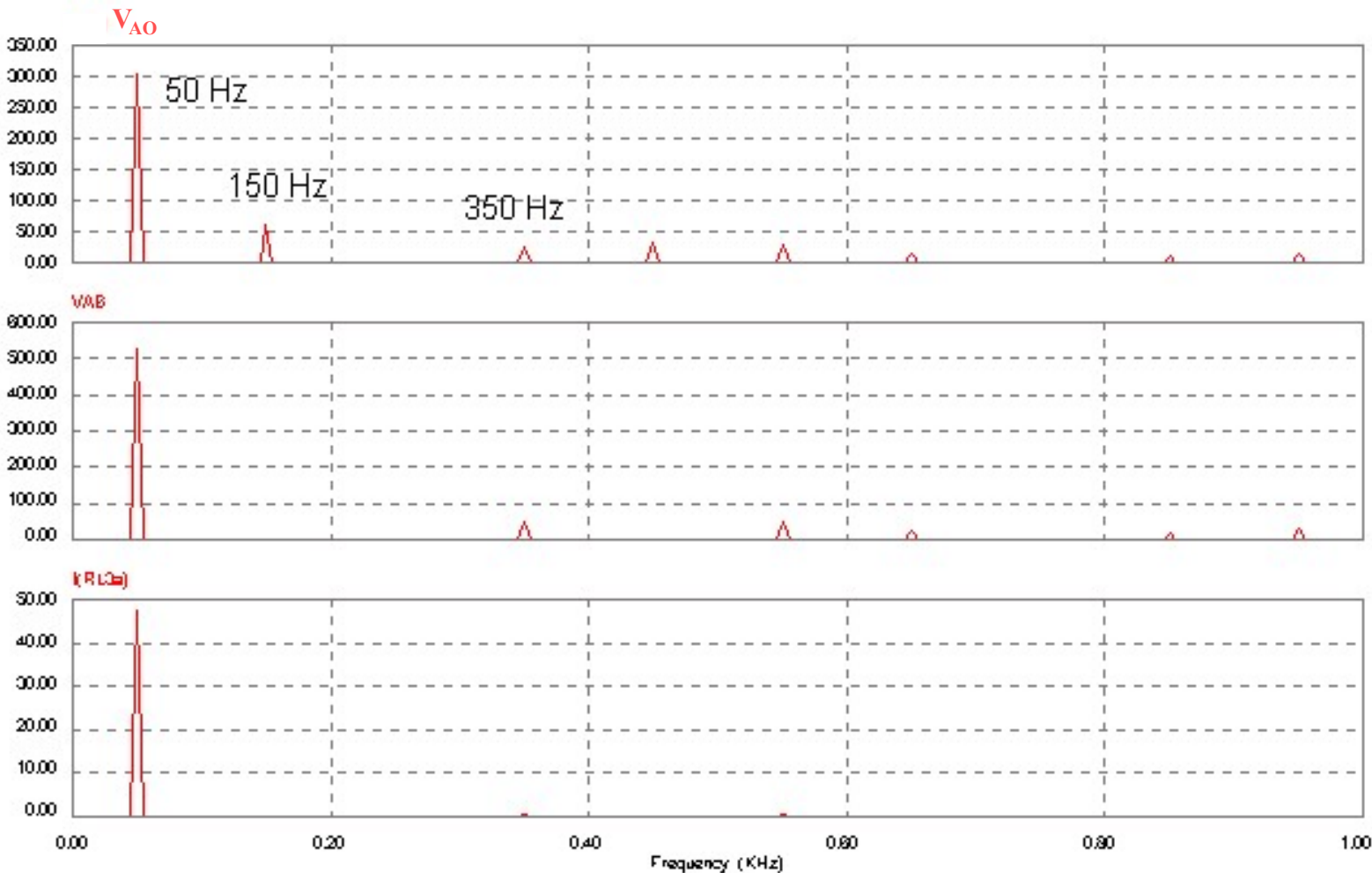
COMANDO AD ONDA QUADRA



COMANDO AD ONDA QUADRA



COMANDO AD ONDA QUADRA



PWM A SOTTOOSCILLAZIONE

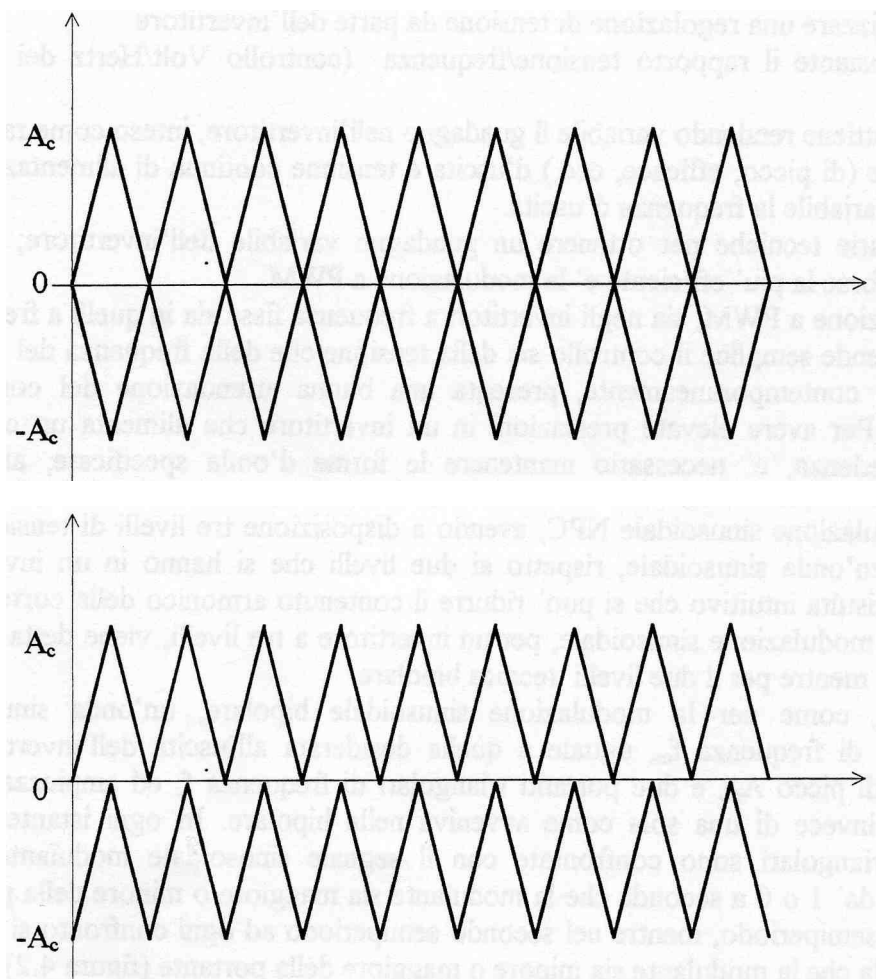
La PWM a sottoscillazione sinusoidale è applicata agli invertitori multilivello confrontando uno o più segnali modulanti di ampiezza V_m con una o più portanti di ampiezza V_p . A seconda che le portanti e le modulanti siano una o più di una si hanno due metodi di modulazione: a modulanti multiple e a portanti multiple. I più diffusi sono i metodi a portanti multiple.

In generale con il metodo a portanti multiple la modulazione di un invertitore a m livelli viene eseguita impiegando $m-1$ portanti formate da triangoli aventi stesse ampiezza e frequenza.

Nel caso a tre livelli si usano due portanti disposte secondo due possibili modalità:

- 1) le due portanti sono disposte da parti opposte rispetto l'asse delle ascisse (dei tempi) e in *opposizione di fase* tra loro,
- 2) le due portanti sono disposte da parti opposte rispetto l'asse delle ascisse (dei tempi) e *in fase* tra loro.

PWM A SOTTOOSCILLAZIONE



I segnali di commutazione per un ramo si ottengono confrontando il sistema di portanti con la modulante e usando le seguenti regole.

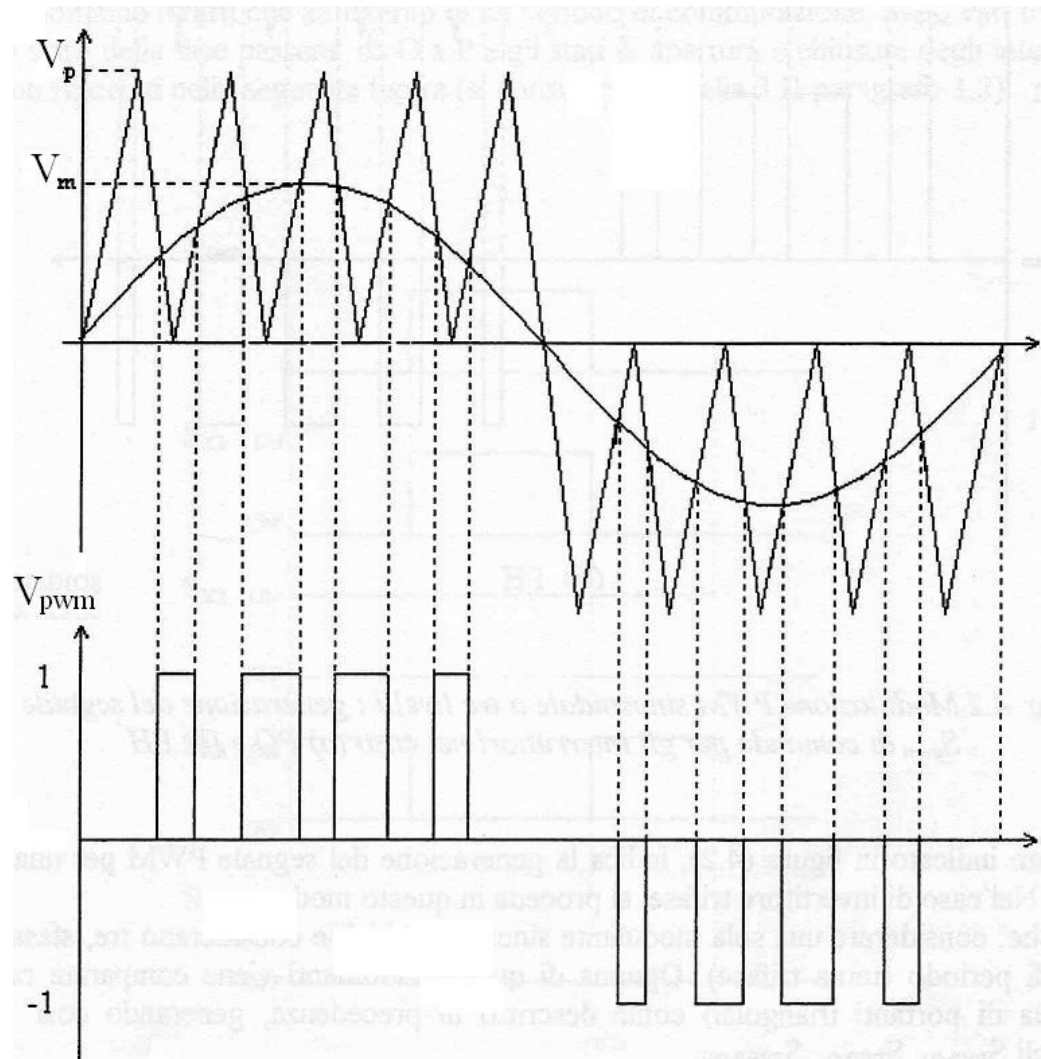
-modulante positiva $v_m > 0$

$$v_{pwm} = \begin{cases} 1 & \text{se } v_m > v_p \\ 0 & \text{se } v_m < v_p \end{cases}$$

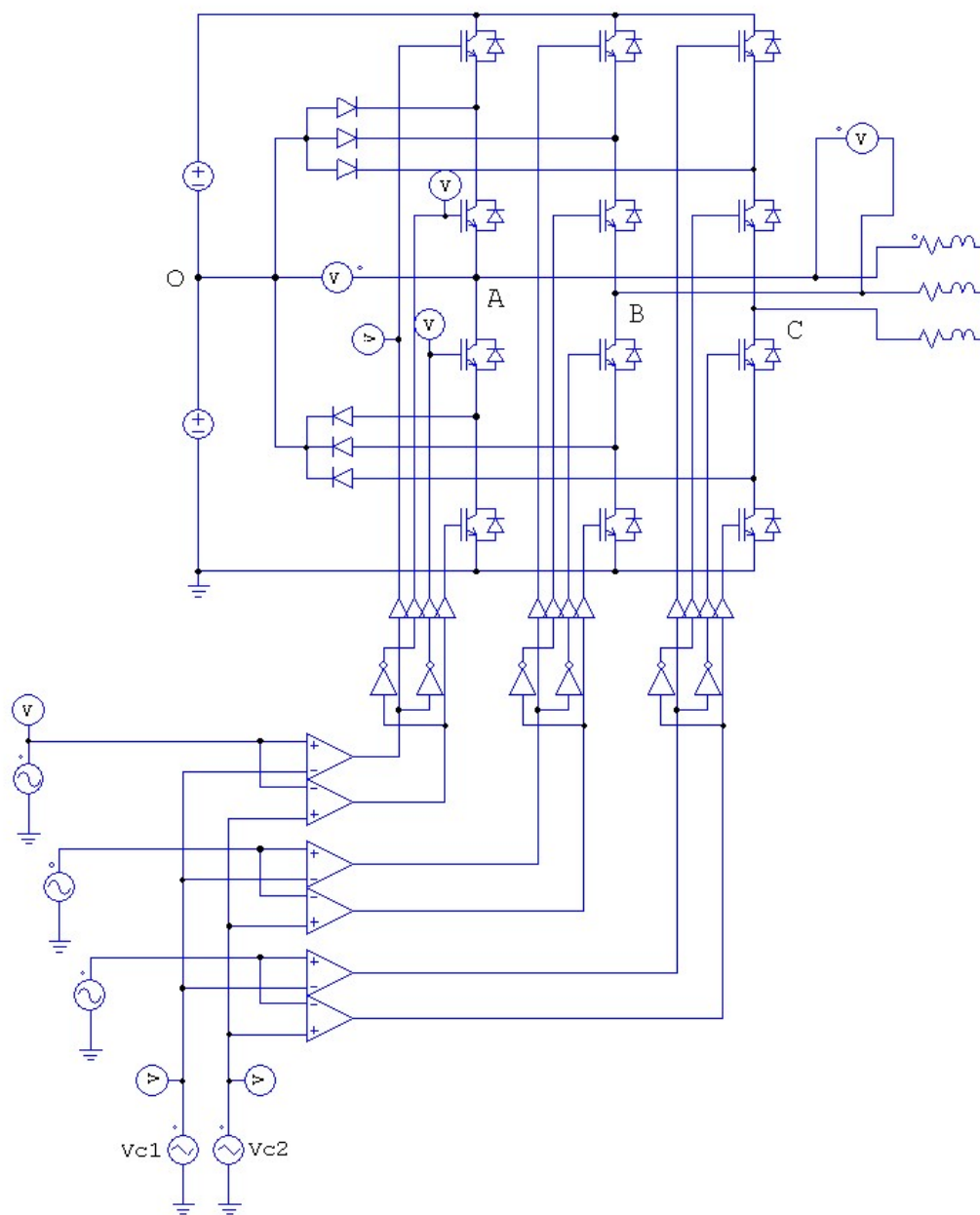
-modulante negativa $v_m < 0$

$$v_{pwm} = \begin{cases} 0 & \text{se } v_m > v_p \\ -1 & \text{se } v_m < v_p \end{cases}$$

PWM A SOTTOOSCILLAZIONE

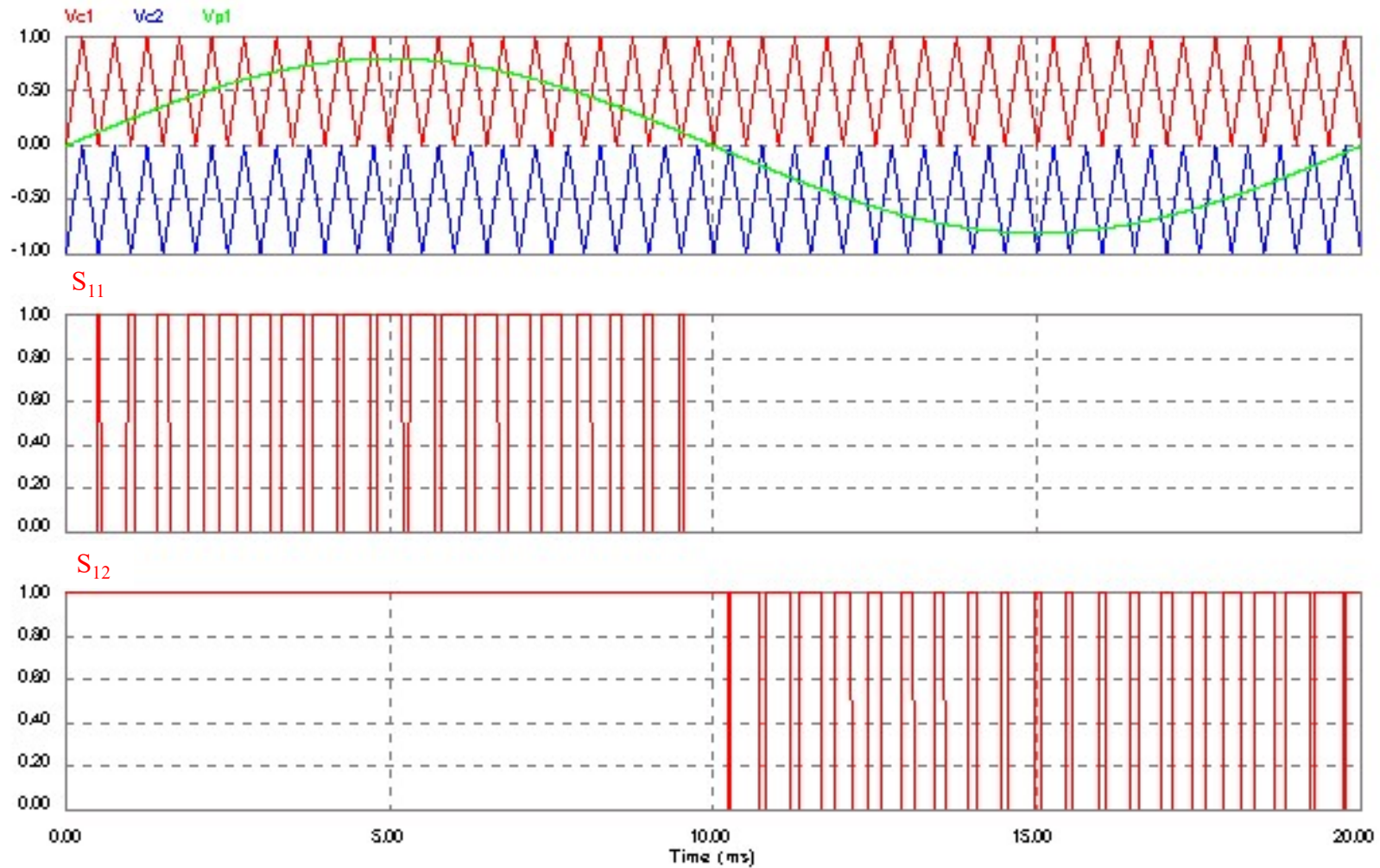


PWM A SOTTOOSCILLAZIONE



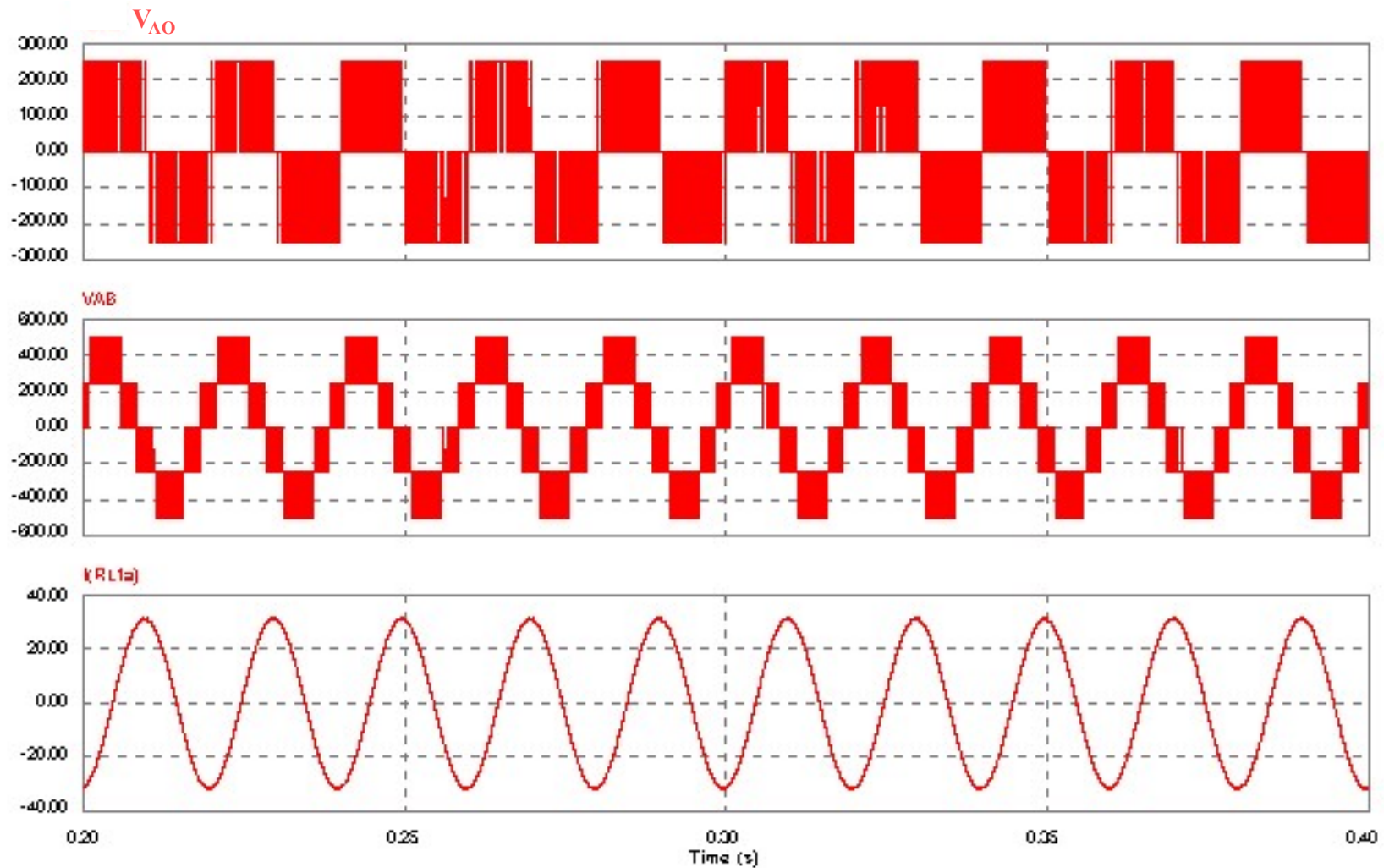
PWM A SOTTOOSCILLAZIONE

Portante 5 kHz, modulante 50Hz



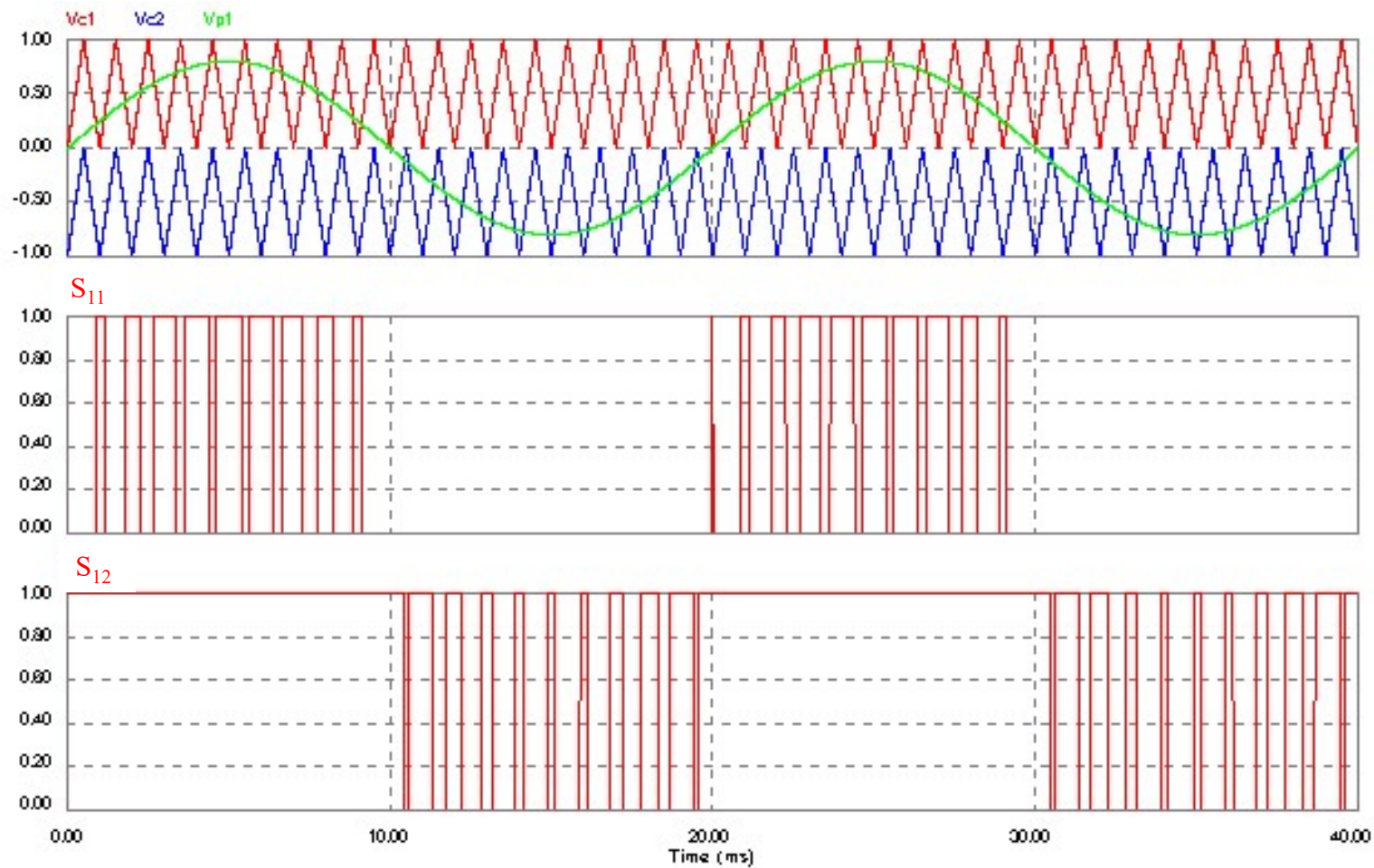
PWM A SOTTOOSCILLAZIONE

Portante 5 kHz, modulante 50Hz



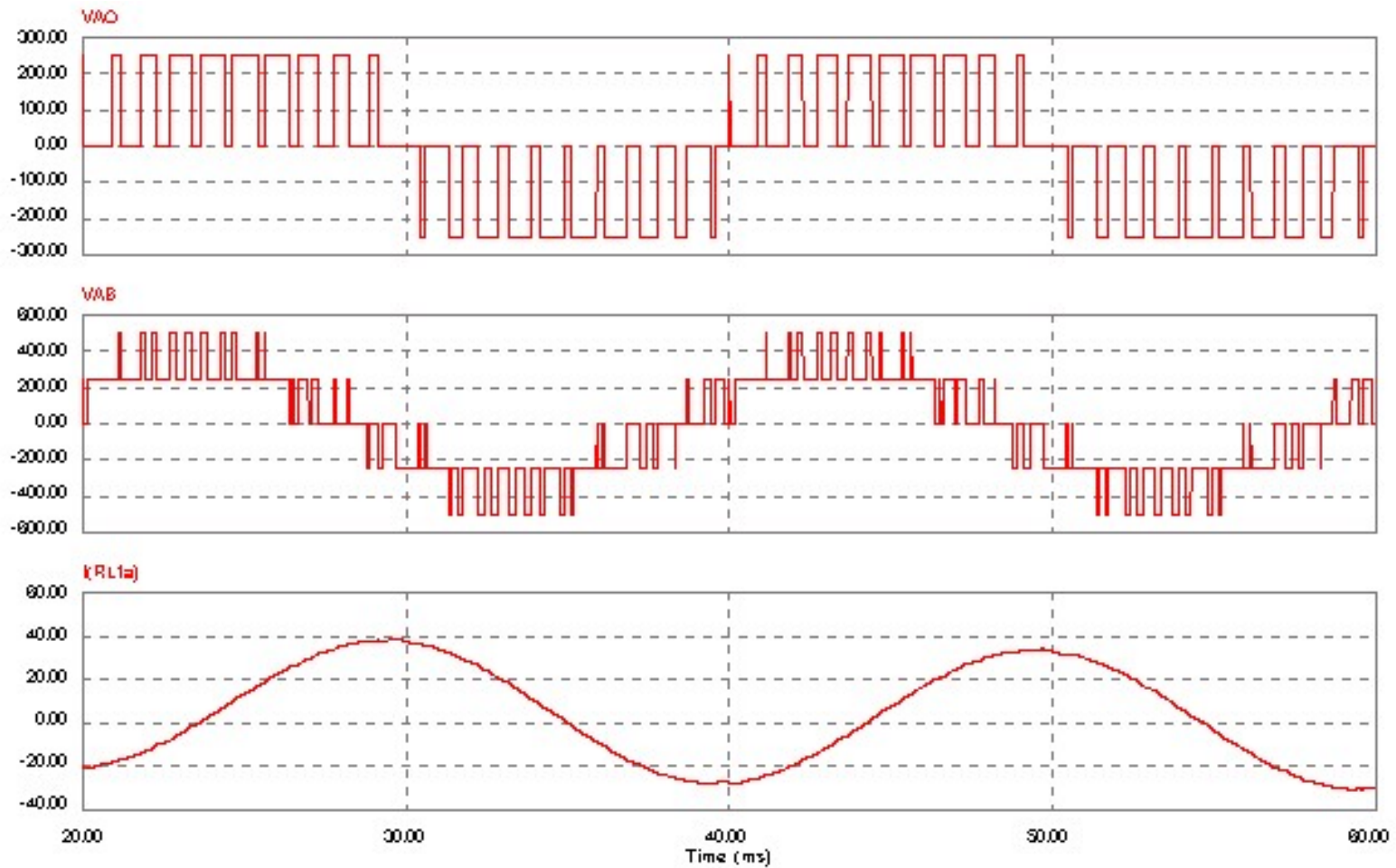
PWM A SOTTOOSCILLAZIONE

Portante 1 kHz, modulante 50Hz



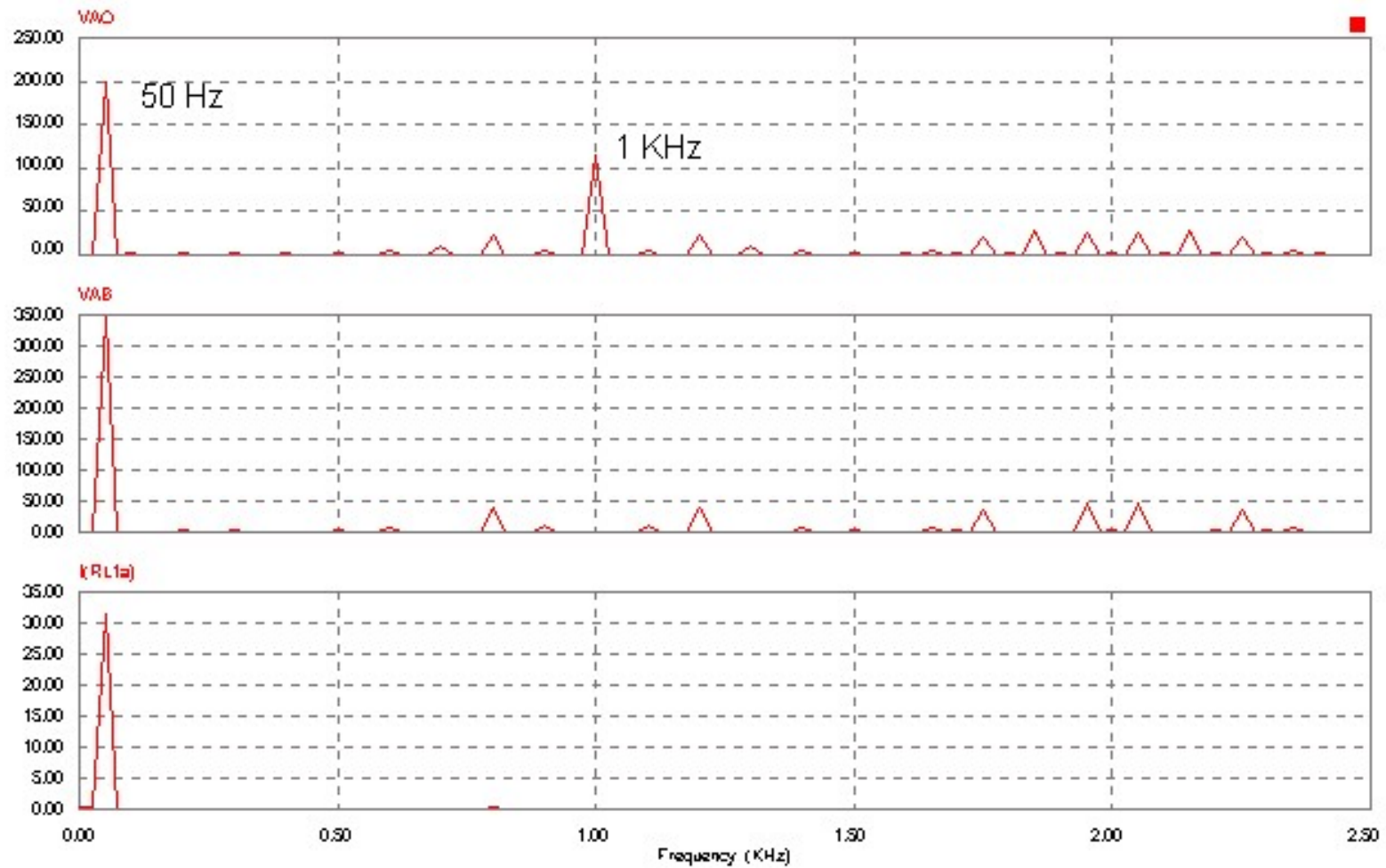
PWM A SOTTOOSCILLAZIONE

Portante 1 kHz, modulante 50Hz



PWM A SOTTOOSCILLAZIONE

Portante 1 kHz, modulante 50Hz



TENSIONI GENERABILI DA UN CONVERTITORE A 3 LIVELLI

Riferimento (a,b,c)			Riferimento (α,β)		Stato trifase
v_a	v_b	v_c	v_α	v_β	
$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$2V_{dc}/3$	0	1 -1 -1
$V_{dc}/2$	0	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2\sqrt{3}$	1 0 -1
$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/\sqrt{3}$	1 1 -1
0	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	0	$V_{dc}/\sqrt{3}$	0 1 -1
$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/3$	$V_{dc}/\sqrt{3}$	-1 1 -1
$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	0	$-V_{dc}/6$	$V_{dc}/2\sqrt{3}$	-1 1 0
$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-2V_{dc}/3$	0	-1 1 1
$-V_{dc}/2$	0	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2\sqrt{3}$	-1 0 1
$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/\sqrt{3}$	-1 -1 1
0	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	0	$-V_{dc}/\sqrt{3}$	0 -1 1
$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/3$	$-V_{dc}/\sqrt{3}$	1 -1 1
$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	0	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2\sqrt{3}$	1 -1 0
$V_{dc}/2$	0	0	$V_{dc}/3$	0	1 0 0
0	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/3$	0	0 -1 -1
$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	0	$V_{dc}/6$	$V_{dc}/2\sqrt{3}$	1 1 0
0	0	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/6$	$V_{dc}/2\sqrt{3}$	0 0 -1
0	$V_{dc}/2$	0	$-V_{dc}/6$	$V_{dc}/2\sqrt{3}$	0 1 0
$-V_{dc}/2$	0	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/6$	$V_{dc}/2\sqrt{3}$	-1 0 -1
0	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/3$	0	0 1 1
$-V_{dc}/2$	0	0	$-V_{dc}/3$	0	-1 0 0
0	0	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/6$	$-V_{dc}/2\sqrt{3}$	0 0 1
$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	0	$-V_{dc}/6$	$-V_{dc}/2\sqrt{3}$	-1 -1 0
$V_{dc}/2$	0	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/6$	$-V_{dc}/2\sqrt{3}$	1 0 1
0	$-V_{dc}/2$	0	$V_{dc}/6$	$-V_{dc}/2\sqrt{3}$	0 -1 0
$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	0	0	1 1 1
0	0	0	0	0	0 0 0
$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	0	0	-1 -1 -1

$$v_{AB} = \frac{V_{dc}}{2} (S_A - S_B)$$

$$v_{BC} = \frac{V_{dc}}{2} (S_B - S_C)$$

$$v_{CA} = \frac{V_{dc}}{2} (S_C - S_A)$$

$$v_{AN} = \frac{V_{dc}}{6} (2S_A - S_B - S_C)$$

$$v_{BN} = \frac{V_{dc}}{6} (-S_A + 2S_B - S_C)$$

$$v_{CN} = \frac{V_{dc}}{6} (-S_A - S_B + 2S_C)$$

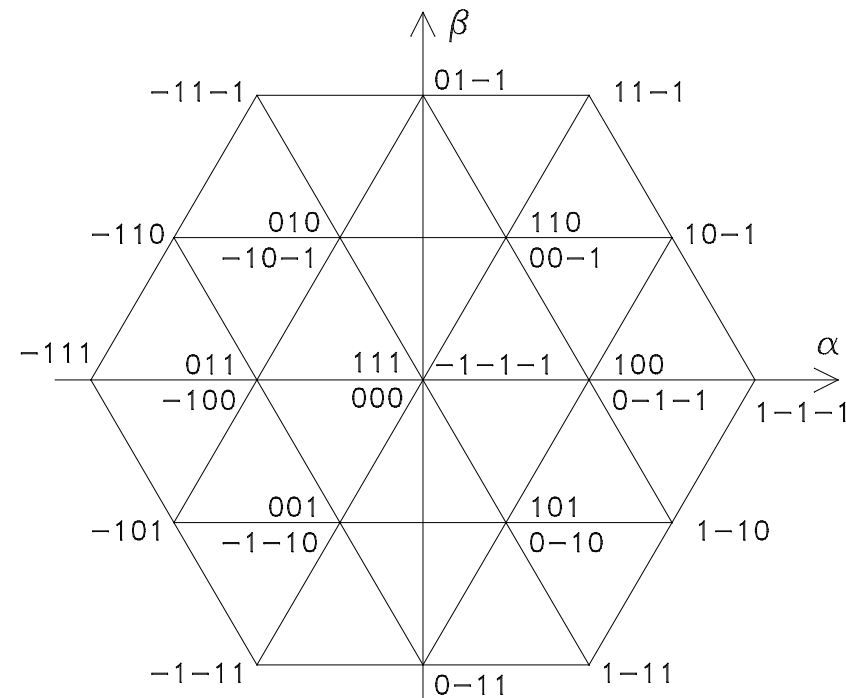
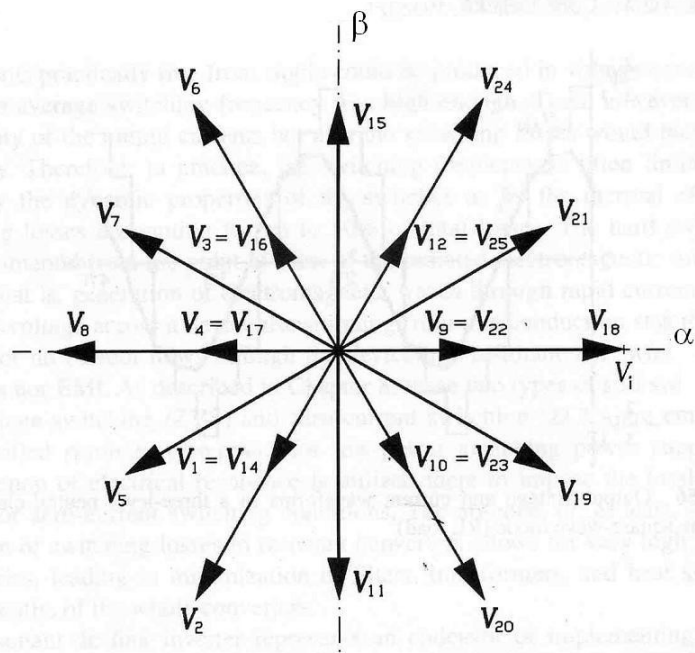
$$v_{ON} = -\frac{1}{3} \frac{V_{dc}}{2} (S_A + S_B + S_C)$$

VETTORI SPAZIALI DELLA TENSIONE DI USCITA

La tensione di ciascuna fase può assumere i valori $+V_{dc}/2$, 0 , $-V_{dc}/2$, corrispondenti a tre diversi stati, indicati rispettivamente con 1, 0, -1.

Dalla loro combinazione sulle tre fasi di un convertitore trifase risultano 27 possibili diversi stati trifase.

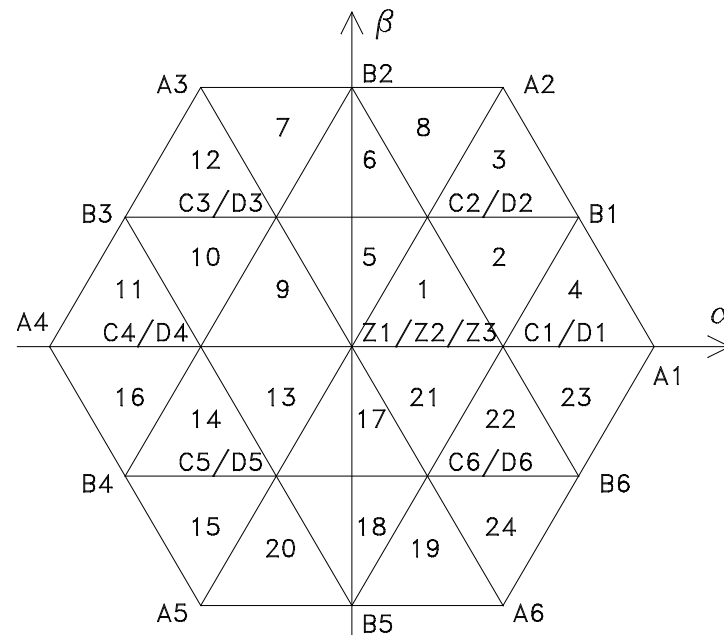
I 27 stati trifase degli interruttori producono 19 vettori spaziali, in quanto alcuni stati producono lo stesso vettore.



VETTORI SPAZIALI DELLA TENSIONE DI USCITA

I vettori possono essere suddivisi in base all'ampiezza in 4 gruppi:

- gruppo A (vettori di ampiezza maggiore, $2V_{dc}/3$)
- gruppo B (vettori di ampiezza intermedia, $V_{dc}/\sqrt{3}$)
- gruppi C e D (vettori di ampiezza minore, $V_{dc}/3$)
- gruppo Z (vettori nulli)



Le punte dei vettori costituiscono i vertici di triangoli equilateri. Le aree dei triangoli sono dette *zone* e vengono numerate.

VETTORI SPAZIALI DELLA TENSIONE DI USCITA

I vettori del gruppo A sono dati dalla combinazione di due stati uguali e non includono lo stato 0.

I vettori del gruppo B sono dati dalla combinazione di tre stati diversi e includono lo stato 0.

I vettori del gruppo C e D sono dati dalla combinazione di due stati uguali e includono lo stato 0.

I vettori del gruppo Z sono dati dalla combinazione di tre stati uguali.

I quattro gruppi hanno le seguenti proprietà:

- nel gruppo A nessuna delle tre fasi è collegata al punto O (punto neutro) e quindi non si ha variazione del suo potenziale;

- nel gruppo B una delle tre fasi è collegata al punto neutro, esso quindi è interessato da una corrente non nulla che provoca una variazione del suo potenziale;

- nel gruppo C (e D) le fasi sono collegate alla sbarra positiva (negativa) e al punto neutro, anche in questo caso si ha una variazione del potenziale del punto neutro;

- nel gruppo Z le tre fasi sono cortocircuitate e quindi il potenziale del punto neutro non si modifica.

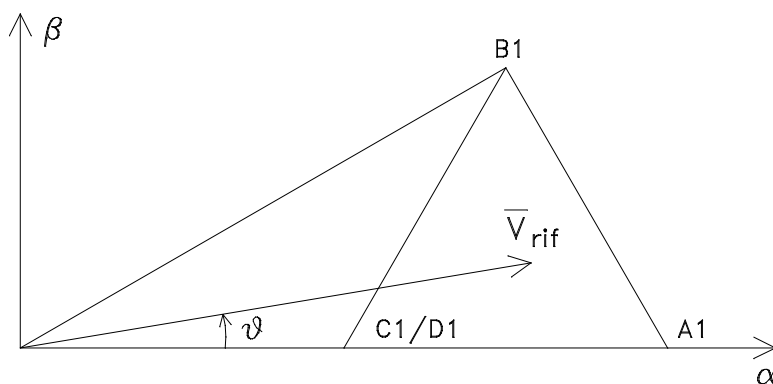
I vettori appartenenti al gruppo C sono gli stessi del gruppo D, se ne differenziano per gli stati trifase degli interruttori con i quali vengono ottenuti.

PWM VETTORIALE A TRE LIVELLI

Si voglia ricostruire (in media temporale all'interno di un periodo di modulazione) un certo vettore \vec{v}_{rif} . Si supponga che il suo vertice si trovi all'interno della *zona 4*.

Dato un vettore spaziale \vec{V}_{rif} da ricostruire, la PWM vettoriale calcola i tempi T_1, T_2, T_3 di applicazione dei tre vettori spaziali che hanno i vertici coincidenti con quelli del triangolo che delimita la zona in cui si trova il vertice del vettore da ricostruire.

Esempio:



$$\vec{V}_{rif(\alpha,\beta)} = T \cdot \vec{V}_{rif(a,b,c)}$$

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

$$\vec{V}_{rif} = \frac{T_1 \cdot A1 + T_2 \cdot B1 + T_3 \cdot (C1/D1)}{T_c}$$

$$T_1 + T_2 + T_3 = T_c$$

$$V_{rif\alpha} = V_{rif} \cos \vartheta$$

$$A1_\alpha = 2V_{dc}/3 \quad B1_\alpha = V_{dc}/2 \quad C1/D1_\alpha = V_{dc}/3$$

$$V_{rif\beta} = V_{rif} \sin \vartheta$$

$$A1_\beta = 0 \quad B1_\beta = V_{dc}/2\sqrt{3} \quad C1/D1_\beta = 0$$

PWM VETTORIALE A TRE LIVELLI

$$\begin{cases} V_{rif} \cos \theta \cdot T_c = \frac{2}{3} V_{dc} \cdot T_1 + \frac{1}{2} V_{dc} \cdot T_2 + \frac{1}{3} V_{dc} \cdot T_3 \\ V_{rif} \sin \theta \cdot T_c = \frac{1}{2\sqrt{3}} V_{dc} \cdot T_2 \\ T_1 + T_2 + T_3 = T_c \end{cases}$$

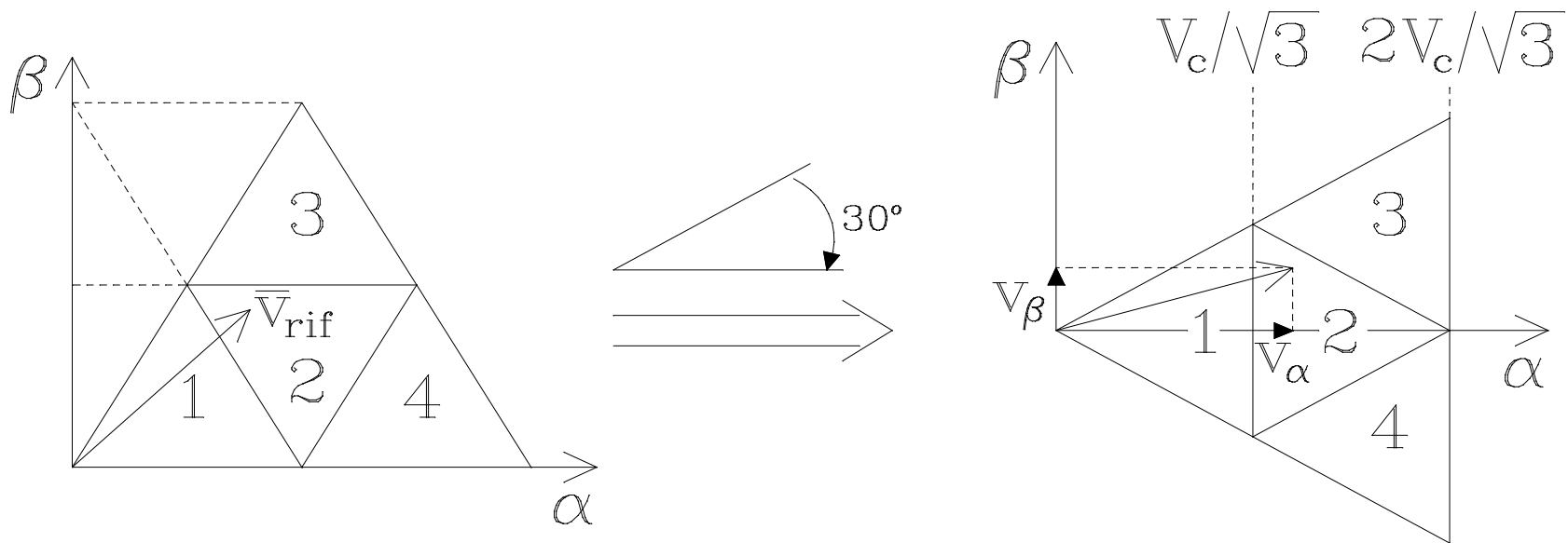
$$T_1 = \left[-1 + \sqrt{3} \frac{V_{rif}}{V_{dc}} (\sqrt{3} \cos \theta - \sin \theta) \right] T_c$$

$$T_2 = 2\sqrt{3} \frac{V_{rif}}{V_{dc}} \sin \theta \cdot T_c$$

$$T_3 = \left[2 - \sqrt{3} \frac{V_{rif}}{V_{dc}} (\sqrt{3} \cos \theta + \sin \theta) \right] T_c$$

DETERMINAZIONE DELLA ZONA

Si consideri il settore dell'esagono formato dai triangoli 1, 2, 3, 4; ruotandolo in senso orario di 30° ci si trova ad operare nell'intervallo $-\pi/6 \leq \theta' \leq \pi/6$ e per la determinazione della zona si può sfruttare il valore di V_α e il segno di V_β .



Tensione su ciascun condensatore del lato in continua: $V_c = V_{dc}/2$.

DETERMINAZIONE DELLA ZONA

$$V_\alpha \leq \frac{V_c}{\sqrt{3}} \quad \Rightarrow \text{la punta del vettore di riferimento si trova nella zona 1.}$$

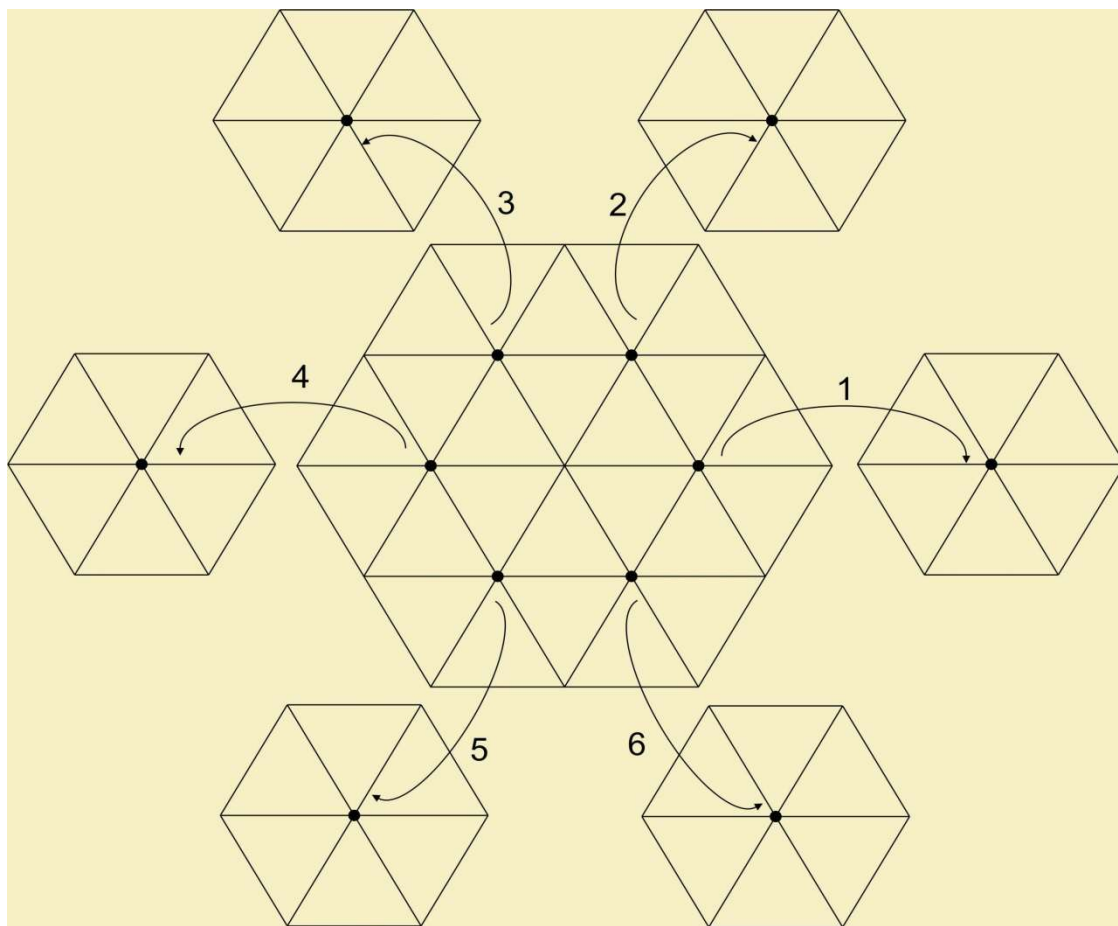
$$\begin{cases} V_\alpha \geq \frac{V_c}{\sqrt{3}} \\ |V_\beta| \leq \left| \frac{2V_c}{3} - \frac{V_\alpha}{\sqrt{3}} \right| \end{cases} \quad \Rightarrow \text{la punta del vettore di riferimento si trova nella zona 2.}$$

$$\begin{cases} V_\alpha \geq \frac{V_c}{\sqrt{3}} \\ |V_\beta| \geq \left| \frac{2V_c}{3} - \frac{V_\alpha}{\sqrt{3}} \right| \end{cases} \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} V_\beta \geq 0 &\Rightarrow \text{la punta del vettore di riferimento si trova nella zona 3} \\ V_\beta \leq 0 &\Rightarrow \text{la punta del vettore di riferimento si trova nella zona 4} \end{aligned}$$

Se $|\theta'| > \pi/6$ si sottrae la quantità $\pi/3$ per m volte finché si ottiene la condizione $-\pi/6 \leq \theta' \leq \pi/6$. Si determina quindi la zona di appartenenza 1, 2, 3, 4 secondo la procedura vista e poi si somma ad essa il valore $4m$ per ottenere la zona effettiva (ad esempio alla zona 1 del primo settore di 4 zone corrispondono rispettivamente le zone 5, 9, 13, 17, 21 nei cinque settori successivi).

TECNICA DI SCOMPOSIZIONE

La procedura di calcolo dei tempi T_1 , T_2 , T_3 viene notevolmente semplificata scomponendo “l’esagono a tre livelli” in sei “esagoni a due livelli”.



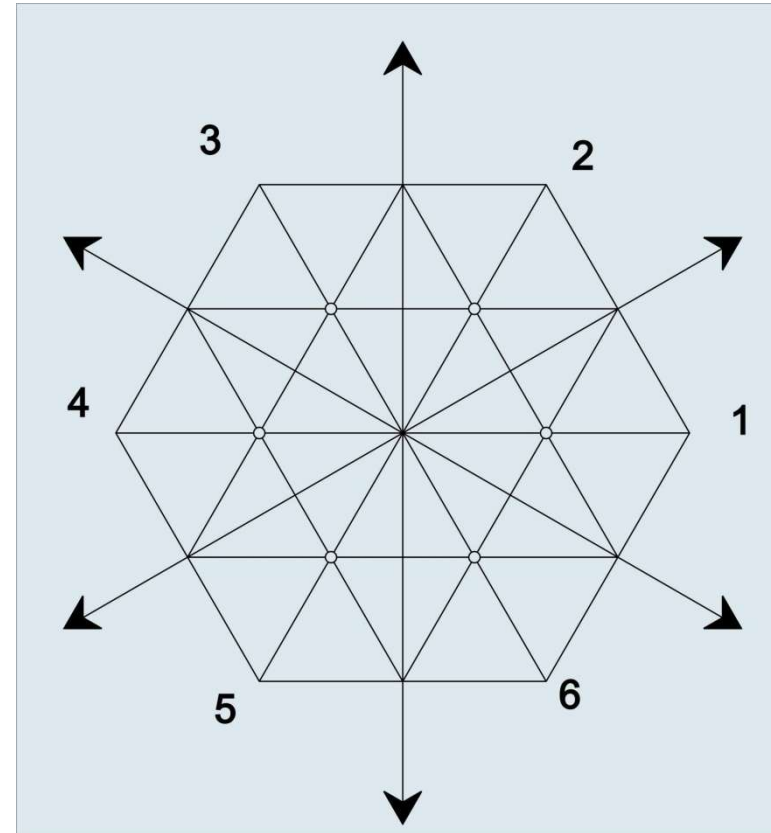
Il centro di ciascun esagono a due livelli coincide con i vertici dell'esagono interno dell'esagono a tre livelli (cioè quello individuato dai vertici dei vettori dei gruppi C e D). In questo modo l'origine di ciascun esagono a due livelli è traslata di $V_{dc}/3$ rispetto all'origine dell'esagono a tre livelli.

TECNICA DI SCOMPOSIZIONE

Questa tecnica viene eseguita in due passi.

1) *Selezione dell'esagono a due livelli.* Viene eseguita suddividendo il piano in 6 settori. Il numero dell'esagono da selezionare coincide con il numero del settore in cui si trova il vettore di riferimento.

2) *Calcolo dei tempi di applicazione dei vettori.* Si sottrae al vettore di riferimento il vettore che unisce l'origine dell'esagono a tre livelli con quella dell'esagono a due livelli selezionato. Questa operazione consente di eseguire il calcolo dei tempi nello stesso modo dei convertitori a due livelli, con il vantaggio quindi di semplificare i calcoli.



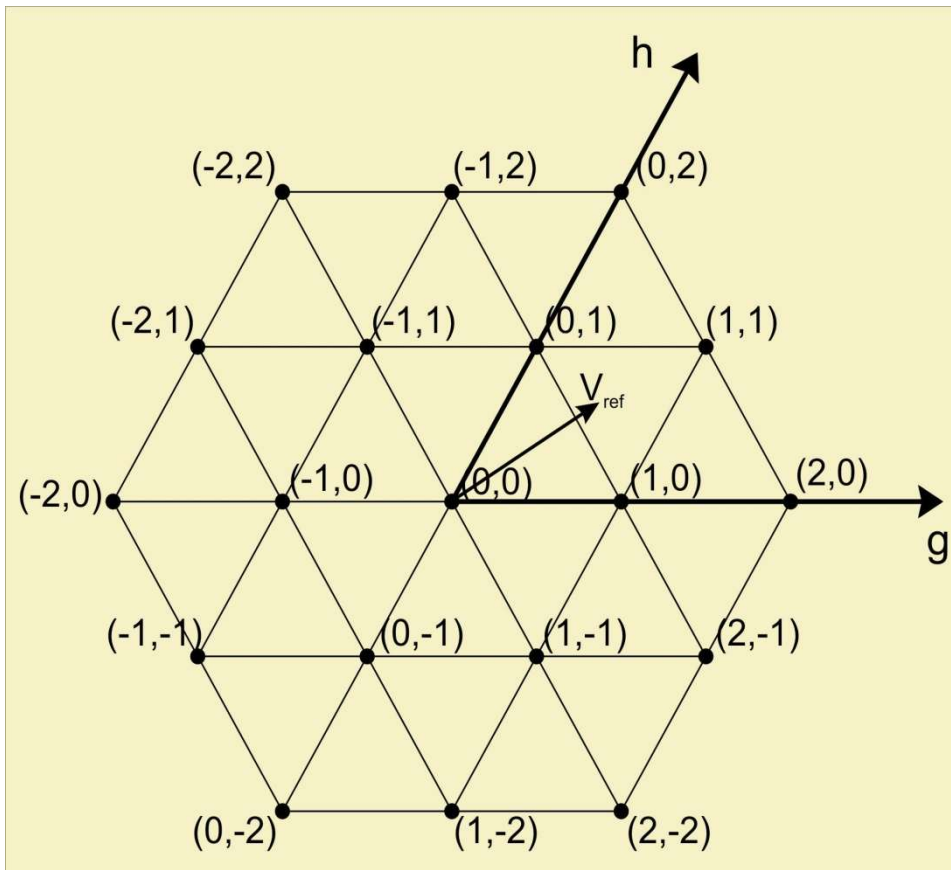
$$\begin{cases} T_c V_\alpha = T_1 V_{\Delta 1\alpha} + T_2 V_{\Delta 2\alpha} + \cancel{T_3 V_{\Delta 3\alpha}} \\ T_c V_\beta = T_1 V_{\Delta 1\beta} + T_2 V_{\Delta 2\beta} + \cancel{T_3 V_{\Delta 3\beta}} \\ T_c = T_1 + T_2 + T_3 \end{cases}$$

TECNICA DELLE COORDINATE ESAGONALI

La complessità dei calcoli diminuisce in maniera notevole se si adotta il sistema di coordinate non ortogonale (g, h).

$$\vec{V}_{rif}(g,h) = T \cdot \vec{V}_{rif}(\alpha,\beta)$$

$$T = \frac{3}{V_{dc}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ 0 & \frac{2}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}$$



Con questa trasformazione la terna delle tensioni di riferimento viene normalizzata rispetto a $V_{dc}/3$ dividendo la matrice T per $V_{dc}/3$. In questo modo tutti gli stati del convertitore nel nuovo sistema di riferimento (g, h) hanno coordinate con valori interi compresi tra 0 e 2. Questo accorgimento rappresenta il principale salto di qualità rispetto alle altre tecniche: i quattro vettori più vicini al vettore di riferimento possono essere identificati semplicemente come i vettori le cui coordinate sono combinazioni degli arrotondamenti, per difetto o per eccesso, delle coordinate del vettore di riferimento.

TECNICA DELLE COORDINATE ESAGONALI

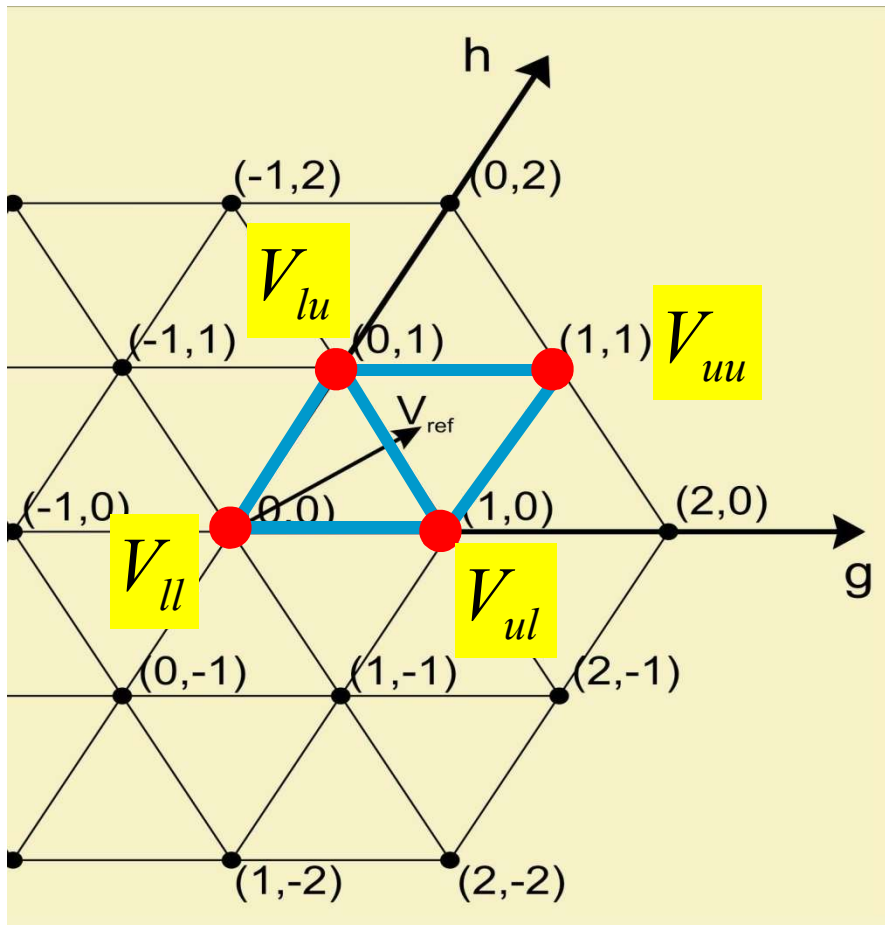
Arrotondando le coordinate del vettore di riferimento per eccesso ($u \equiv \lceil up \rceil$) o per difetto ($l \equiv \lfloor low \rfloor$) si ottengono i quattro vettori più vicini al vettore di riferimento.

$$\vec{V}_{ul} = \begin{bmatrix} \lceil V_{rif,g} \rceil \\ \lfloor V_{rif,h} \rfloor \end{bmatrix}$$

$$\vec{V}_{lu} = \begin{bmatrix} \lfloor V_{rif,g} \rfloor \\ \lceil V_{rif,h} \rceil \end{bmatrix}$$

$$\vec{V}_{uu} = \begin{bmatrix} \lceil V_{rif,g} \rceil \\ \lceil V_{rif,h} \rceil \end{bmatrix}$$

$$\vec{V}_{ll} = \begin{bmatrix} \lfloor V_{rif,g} \rfloor \\ \lfloor V_{rif,h} \rfloor \end{bmatrix}$$



Unendo le punte dei quattro vettori individuati si ottiene un parallelogramma avente i lati uguali, che viene suddiviso in due triangoli equilateri dalla diagonale che collega \vec{V}_{ul} con \vec{V}_{lu} . \vec{V}_{ul} e \vec{V}_{lu} fanno sempre parte dei tre vettori più vicini a \vec{V}_{rif} . Il terzo vettore che gode di tale proprietà va cercato fra \vec{V}_{ll} e \vec{V}_{uu} ed è quello collocato dalla stessa parte della diagonale in cui giace \vec{V}_{rif} , individuata dalla funzione nelle variabili g ed h :

$$g + h = V_{ul,g} + V_{ul,h} = V_{lu,g} + V_{lu,h}$$

Il terzo vettore più vicino può essere identificato valutando il segno della seguente espressione:

$$V_{rif,g} + V_{rif,h} - (V_{ul,g} + V_{ul,h})$$

Se il segno è positivo il terzo vettore è \vec{V}_{uu} , se il segno è negativo è \vec{V}_{ll} .

TECNICA DELLE COORDINATE ESAGONALI

Identificati i tre vettori più vicini a \vec{V}_{rif} i tempi di applicazione di ciascun vettore possono essere determinati analogamente alle precedenti tecniche risolvendo il seguente sistema:

$$\begin{cases} \vec{V}_{rif} = \frac{T_1}{T_c} \vec{V}_{ul} + \frac{T_2}{T_c} \vec{V}_{lu} + \frac{T_3}{T_c} \vec{V}_3 \\ T_1 + T_2 + T_3 = T_c \end{cases} \quad \vec{V}_3 = \vec{V}_{ll} \quad \text{oppure} \quad \vec{V}_3 = \vec{V}_{uu}$$

Poiché però tutti i vettori corrispondenti ai diversi stati del convertitore hanno coordinate intere, si dimostra che le soluzioni del sistema corrispondono alla frazione delle coordinate di \vec{V}_{rif} . Quindi

se $\vec{V}_3 = \vec{V}_{ll}$ si ottiene

$$\begin{cases} \frac{T_1}{T_c} = V_{rif,g} - V_{ll,g} \\ \frac{T_2}{T_c} = V_{rif,h} - V_{ll,h} \\ \frac{T_3}{T_c} = 1 - \frac{T_1}{T_c} - \frac{T_2}{T_c} \end{cases}$$

se $\vec{V}_3 = \vec{V}_{uu}$ si ottiene

$$\begin{cases} \frac{T_1}{T_c} = -(V_{rif,h} - V_{uu,h}) \\ \frac{T_2}{T_c} = -(V_{rif,g} - V_{uu,g}) \\ \frac{T_3}{T_c} = 1 - \frac{T_1}{T_c} - \frac{T_2}{T_c} \end{cases}$$

TECNICA DELLE COORDINATE ESAGONALI

L'ultimo passo dell'algoritmo consiste nello scegliere la sequenza degli stati trifase da applicare. In generale non esiste un'unica soluzione a questo problema, in quanto esistono più strategie di scelta.

Fissato uno stato S , tutti gli stati trifase relativi ad un vettore soddisfano la relazione:

$$\begin{bmatrix} S \\ S-g \\ S-g-h \end{bmatrix} \quad S, S-g, S-g-h \in [-1, 0, 1]$$

Ad esempio se i tre vettori più vicini al vettore di riferimento, espressi nelle coordinate (g, h) , sono $(1, 0)$, $(0, 1)$ e $(1, 1)$ si ottengono le seguenti possibili scelte degli stati trifase:

$$(1,0) \rightarrow \begin{bmatrix} S \\ S-1 \\ S-1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} S=0 \rightarrow (0,-1,-1) \\ S=1 \rightarrow (1,0,0) \end{cases}$$

$$(0,1) \rightarrow \begin{bmatrix} S \\ S \\ S-1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} S=0 \rightarrow (0,0,-1) \\ S=1 \rightarrow (1,1,0) \end{cases}$$

$$(1,1) \rightarrow \begin{bmatrix} S \\ S-1 \\ S-2 \end{bmatrix} \rightarrow S=1 \rightarrow (1,0,-1)$$

POTENZIALE DEL PUNTO NEUTRO

In certe condizioni il potenziale del punto neutro può fluttuare in modo significativo o addirittura variare in modo lento e continuo e portarsi a valori di regime diversi da zero.

La prima conseguenza diretta di tale fenomeno è la differente tensione a cui sarebbero sottoposti i diversi interruttori del convertitore, la cui conseguenza limite potrebbe essere il danneggiamento di alcuni di essi.

Lo sbilanciamento del punto neutro comporta anche l'aumento del contenuto armonico della tensione di uscita ed in particolare fa comparire nello spettro la seconda armonica.

La deriva del potenziale del punto neutro si verifica nei transitori, ma anche a regime a causa delle non idealità del convertitore e del suo sistema di controllo (i componenti non sono perfettamente uguali e le perdite non sono perfettamente omogenee).

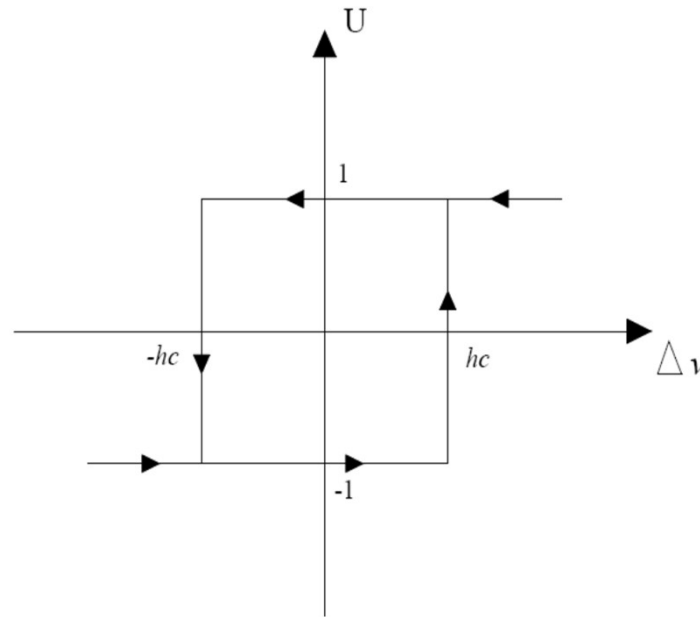
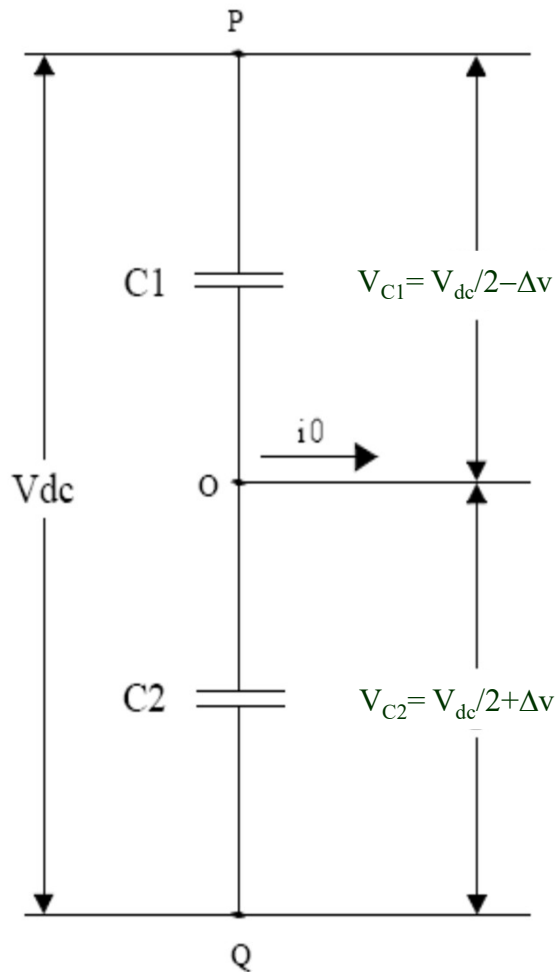
Per il *controllo del potenziale del punto neutro* si possono individuare tre differenti approcci fondamentali.

- *controllo passivo*: si basa unicamente nello selezionare alternativamente i vettori ridondanti. Tale metodo può essere adottato solo in condizioni di bilanciamento perfetto della modulazione e del carico, ma questo è difficile che avvenga in pratica.

- *controllo attivo*: si basa sul controllo della corrente del punto neutro mediante la determinazione degli intervalli di applicazione degli stati ridondanti. Il beneficio principale è che si riesce ad ottenere un bilanciamento molto preciso. Per contro però questa tecnica implica un aumento del numero di commutazioni.

- *controllo ad isteresi*: è probabilmente il più diffuso perché è un metodo semplice e robusto. Richiede la conoscenza del verso delle correnti di ciascuna fase, in base al quale viene stabilita la combinazione degli stati da applicare.

POTENZIALE DEL PUNTO NEUTRO



Controllo ad isteresi

Relazione ingresso-uscita del controllore

$\Delta v = V_o$ (potenziale del punto neutro O)

	Condizione generativa	Condizione rigenerativa
$\Delta v > h_c$	Gruppo D	Gruppo C
$\Delta v < -h_c$	Gruppo C	Gruppo D

Tabella per la scelta degli stati trifase da applicare

In condizioni generative quando viene applicato uno stato trifase del gruppo C il carico viene collegato ai punti P e O e quindi Δv aumenta e v_{C1} diminuisce. Se invece viene applicato un stato trifase del gruppo D il carico viene collegato ai punti Q e O, provocando così una diminuzione di Δv e quindi una diminuzione di v_{C2} . In condizioni di carico rigenerativo, dato che la corrente nel lato in continua fluisce nel verso opposto, l'effetto è opposto.

SEQUENZA DELLE COMMUTAZIONI

La sequenza delle commutazioni non dipende dalla tecnica utilizzata per determinare la zona in cui si trova il vettore di riferimento ed i tempi di applicazione dei vettori corrispondenti agli stati trifase del convertitore.

In generale, per un convertitore ad m livelli, la sequenza dei vettori da applicare dipende dalla zona in cui viene localizzato il vettore di riferimento. In base a tale zona si verificano due alternative per la sequenza:

- 1) selezionare due vettori con ridondanza pari ed un vettore con ridondanza dispari (ad es. 100/0-1-1, 110/00-1, 10-1);
- 2) selezionare un vettore con ridondanza pari e due vettori con ridondanza dispari (ad es. 100/0-1-1, 1-1-1, 10-1).

Si osserva che per un convertitore a due livelli è possibile solo la seconda alternativa, dato che il vettore nullo è l'unico con ridondanza pari (000/111).

Per il convertitore a tre livelli la sequenza dei vettori spaziali da applicare dipende dalla zona in cui si trova il vettore di riferimento e dall'appartenenza di tale zona all'esagono interno oppure a quello esterno. Per le zone dell'esagono interno la sequenza è costituita da un vettore con ridondanza dispari e due vettori con ridondanza pari. Per le zone appartenenti all'esagono esterno la sequenza è costituita da due vettori con ridondanza dispari e un vettore con ridondanza pari oppure un vettore con ridondanza dispari e due vettori con ridondanza pari.

SEQUENZA DELLE COMMUTAZIONI

Se il vettore di riferimento giace in una delle zone 1, 5, 9, 13, 17 o 21 si trova nell'esagono interno, che coincide con l'esagono di un invertitore a due livelli. Però per ogni settore di un convertitore a due livelli sono disponibili quattro stati trifase, mentre per ogni zona dell'esagono interno di un convertitore a tre livelli sono disponibili sette stati trifase (ad esempio per la zona 1 si hanno gli stati 111, 000, -1-1-1, 100, 0-1-1, 110, 00-1).

Il primo e l'ultimo vettore applicato coincide sempre con il vettore nullo; in questo modo se nel successivo periodo di commutazione la zona selezionata è un'altra il passaggio da una zona all'altra avviene in maniera facilitata.

Avendo a disposizione sette stati, è possibile applicarli tutti per realizzare una modulazione di tipo simmetrico. Ad es. per la zona 1 si può applicare la sequenza riportata nella tabella a fianco.

Questa tecnica tuttavia non consente il bilanciamento del potenziale del punto neutro (a meno che non si utilizzi il controllo attivo per frazionare i tempi T_1 e T_2 in maniera non uniforme) e comporta un numero elevato di commutazioni.

Una sequenza che consente il bilanciamento del punto neutro e comporta un ridotto numero di commutazioni è riportata nella tabella sottostante.

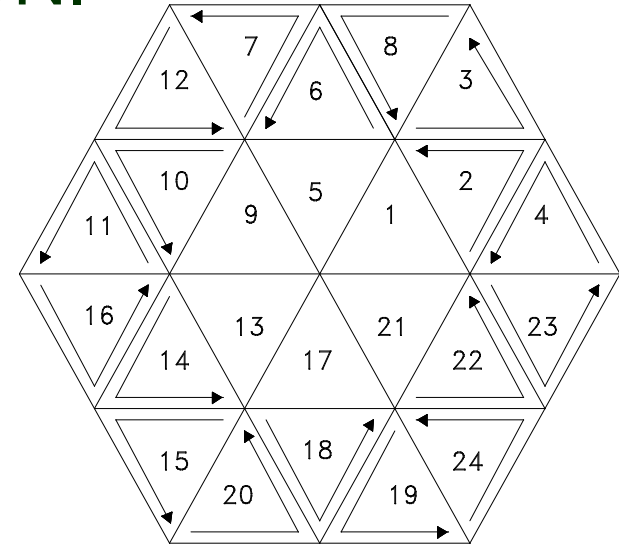
000	$2T_0/7$
100	$T_1/4$
110	$T_2/4$
111	$T_0/7$
110	$T_2/4$
100	$T_1/4$
000	$T_0/7$
00-1	$T_2/4$
0-1-1	$T_1/4$
-1-1-1	$T_0/7$
0-1-1	$T_1/4$
00-1	$T_2/4$
000	$2T_0/7$

Sequenza tempi	$T_{3/2}$	T_1		T_2		$T_{3/2}$	Numero massimo di commutazioni
Stati di commutazione	000	$V_o > h_c$ 0-1-1	$V_o < -h_c$ 100	$V_o > h_c$ 00-1	$V_o < -h_c$ 110	000	7

SEQUENZA DELLE COMMUTAZIONI

Per le zone appartenenti all'esagono esterno la sequenza dei vettori applicati dovrà essere tale da far sì che l'ultimo vettore di una zona coincida con il primo della zona successiva (come illustrato in figura), per evitare commutazioni inutili quando il vettore di riferimento passa da una zona a quella adiacente.

Ad es. per la zone 2, 3 e 4 si possono applicare le sequenze riportate nelle tabelle sottostanti.



Sequenza tempi	T ₁		T ₃	T ₂		Numero massimo di commutazioni
Stati di commutazione	V _o >h _c	V _o <-h _c	10-1	V _o >h _c	V _o <-h _c	4
	0-1-1	100		00-1	110	

Zona
2

Sequenza tempi	T ₃		T ₁	T ₂	Numero massimo di commutazioni
Stati di commutazione	V _o >h _c	V _o <-h _c	10-1	11-1	3
	00-1	110			

Zona
3

Sequenza tempi	T ₁	T ₂	T ₃		Numero massimo di commutazioni
Stati di commutazione	1-1-1	10-1	V _o >h _c	V _o <-h _c	3
			0-1-1	100	

Zona
4