

**Corso di**  
**ELETRONICA INDUSTRIALE**

***MODULAZIONE VETTORIALE.***  
***CONTROLLO DI CORRENTE DI INVERTITORI A***  
***TENSIONE IMPRESSA***

# Modulazione vettoriale e controllo di corrente di invertitori a tensione impressa

# Modulazione vettoriale e controllo di corrente di invertitori a tensione impressa

- Rappresentazione vettoriale

# Modulazione vettoriale e controllo di corrente di invertitori a tensione impressa

- Rappresentazione vettoriale
- Trasformazioni diretta ed inversa

# Modulazione vettoriale e controllo di corrente di invertitori a tensione impressa

- Rappresentazione vettoriale
- Trasformazioni diretta ed inversa
- **Controllo vettoriale trifase di tensione**

# Modulazione vettoriale e controllo di corrente di invertitori a tensione impressa

- Rappresentazione vettoriale
- Trasformazioni diretta ed inversa
- Controllo vettoriale trifase di tensione
- Controlli di corrente monofase di invertitori di tensione

# Modulazione vettoriale e controllo di corrente di invertitori a tensione impressa

- Rappresentazione vettoriale
- Trasformazioni diretta ed inversa
- Controllo vettoriale trifase di tensione
- Controlli di corrente monofase di invertitori di tensione
- **Controlli di corrente trifase**

# Modulazione vettoriale e controllo di corrente di invertitori a tensione impressa

- Rappresentazione vettoriale
- Trasformazioni diretta ed inversa
- Controllo vettoriale trifase di tensione
- Controlli di corrente monofase di invertitori di tensione
- Controlli di corrente trifase
- **Controllo di corrente digitale predittivo**



# Modulazione Vettoriale di Tensione

L'invertitore trifase può generare tre tensioni di fase indipendenti a due livelli

# Modulazione Vettoriale di Tensione

L'invertitore trifase può generare tre tensioni di fase indipendenti a due livelli

Sono possibili otto combinazioni (stati) indipendenti

# Modulazione Vettoriale di Tensione

L'invertitore trifase può generare tre tensioni di fase indipendenti a due livelli

Sono possibili otto combinazioni (stati) indipendenti

Con opportuna modulazione è possibile generare una qualsiasi terna di valori medi  $V_{1med}$ ,  $V_{2med}$ ,  $V_{3med}$  compresi fra  $+E$  e  $-E$

# Modulazione Vettoriale di Tensione

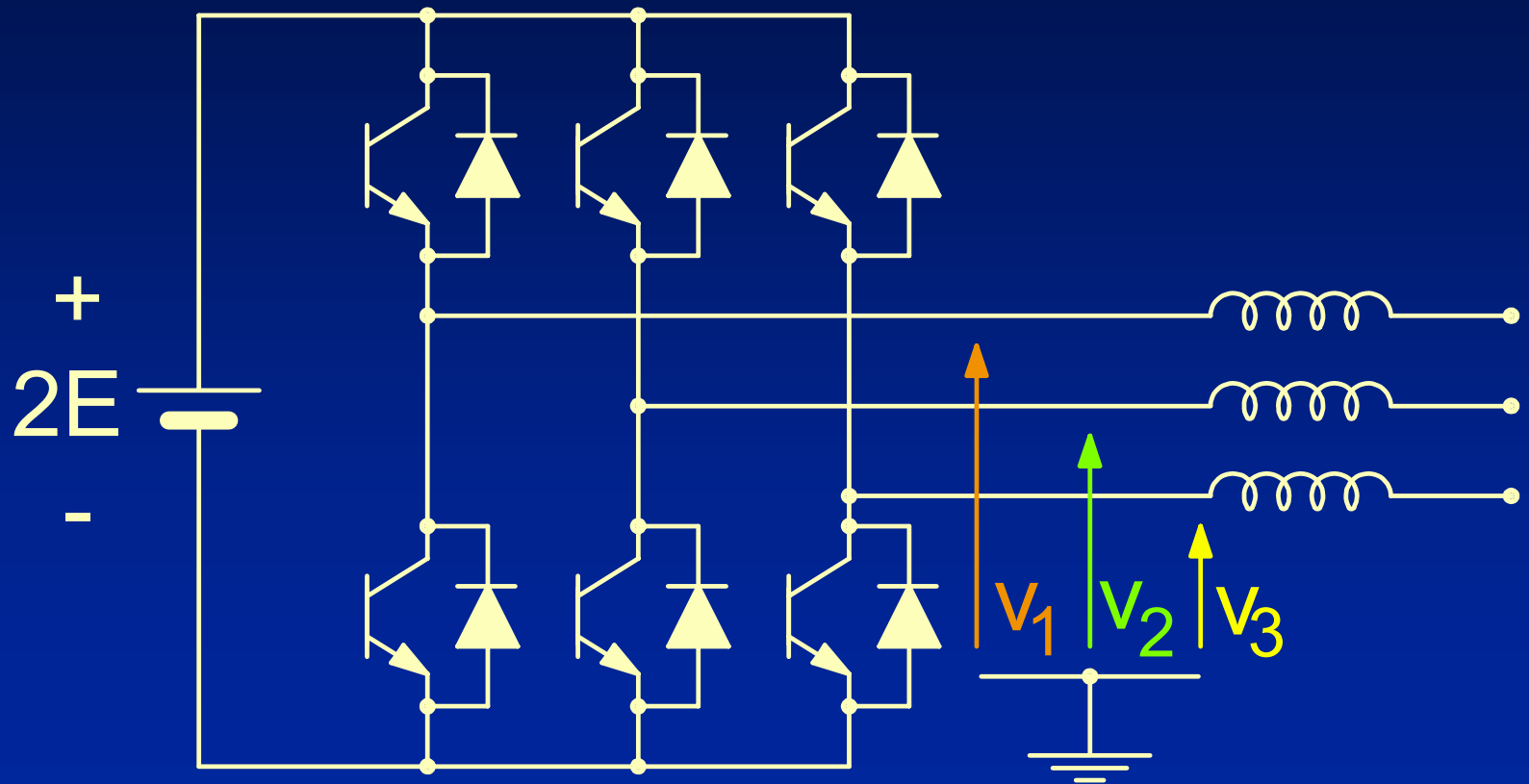
Un carico con centro stella isolato è sensibile solo alle tensioni concatenate, e non al valore della tensione di centro stella

# Modulazione Vettoriale di Tensione

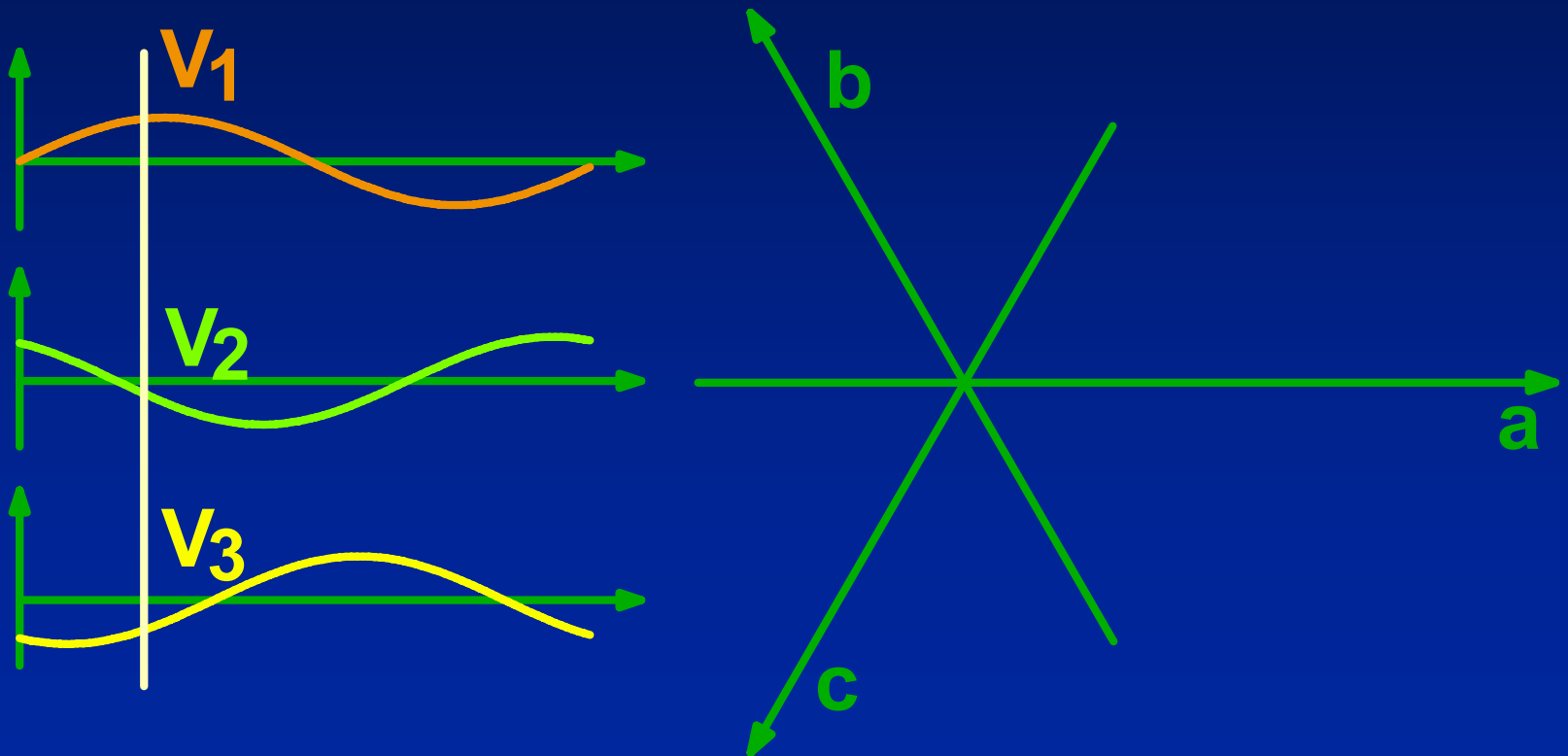
Un carico con centro stella isolato è sensibile solo alle tensioni concatenate, e non al valore della tensione di centro stella

Una terna qualsiasi di tensioni può essere rappresentata con un vettore in un piano, a meno dell'informazione del valore della tensione di centro stella

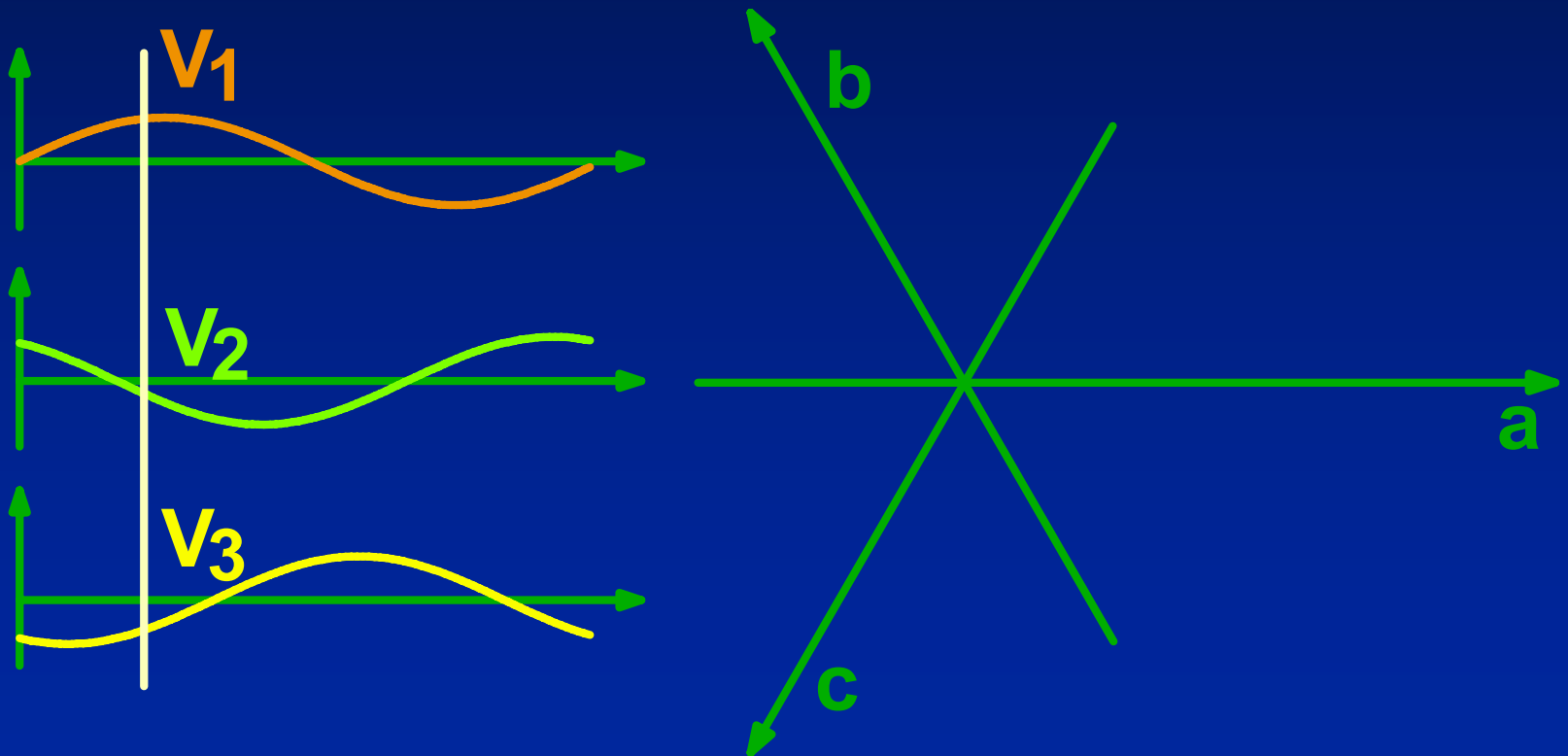
# Modulazione Vettoriale di Tensione



# Rappresentazione vettoriale di una terna di tensioni

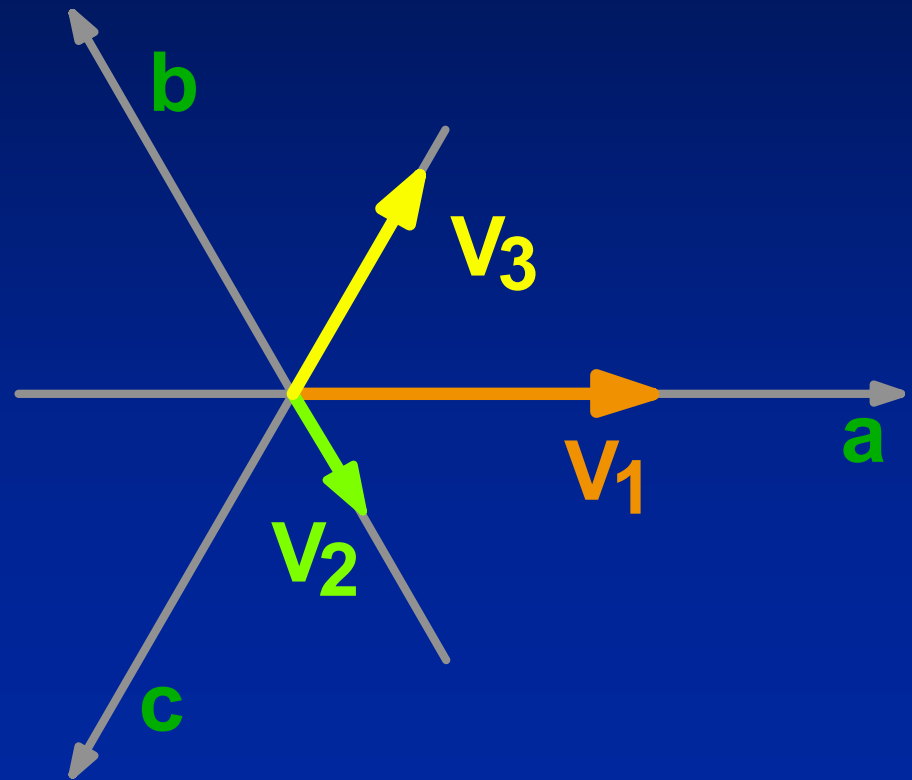
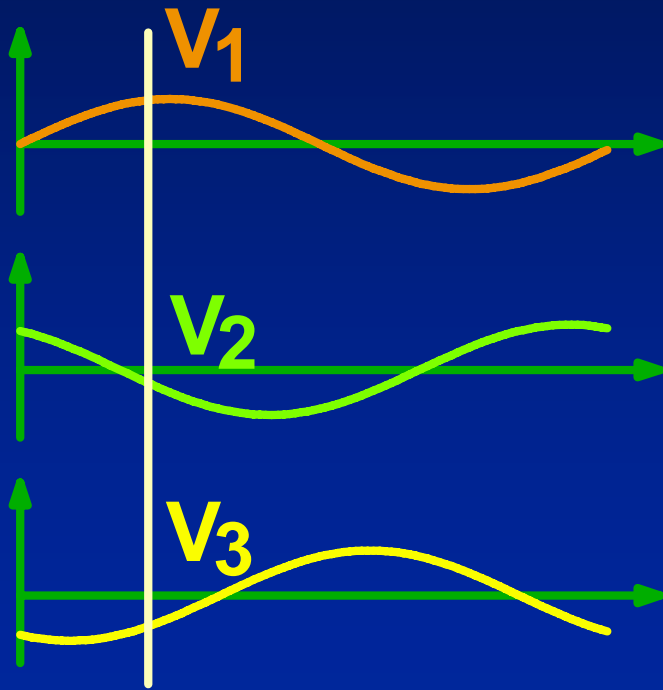


# Rappresentazione vettoriale di una terna di tensioni

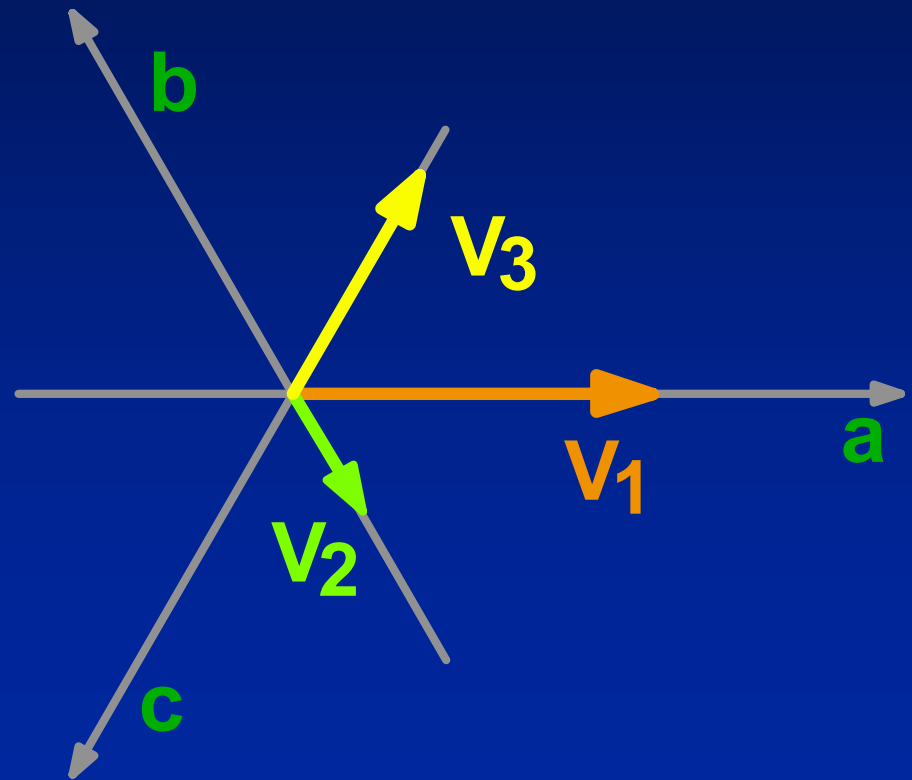
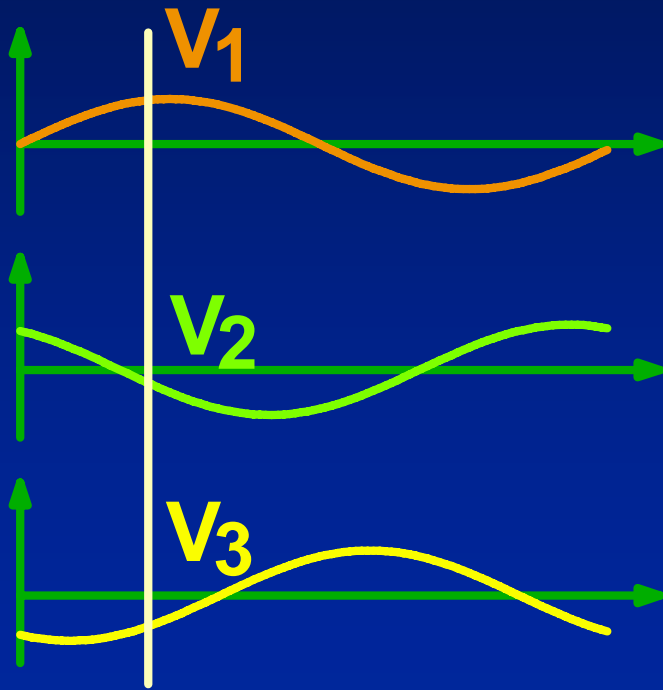




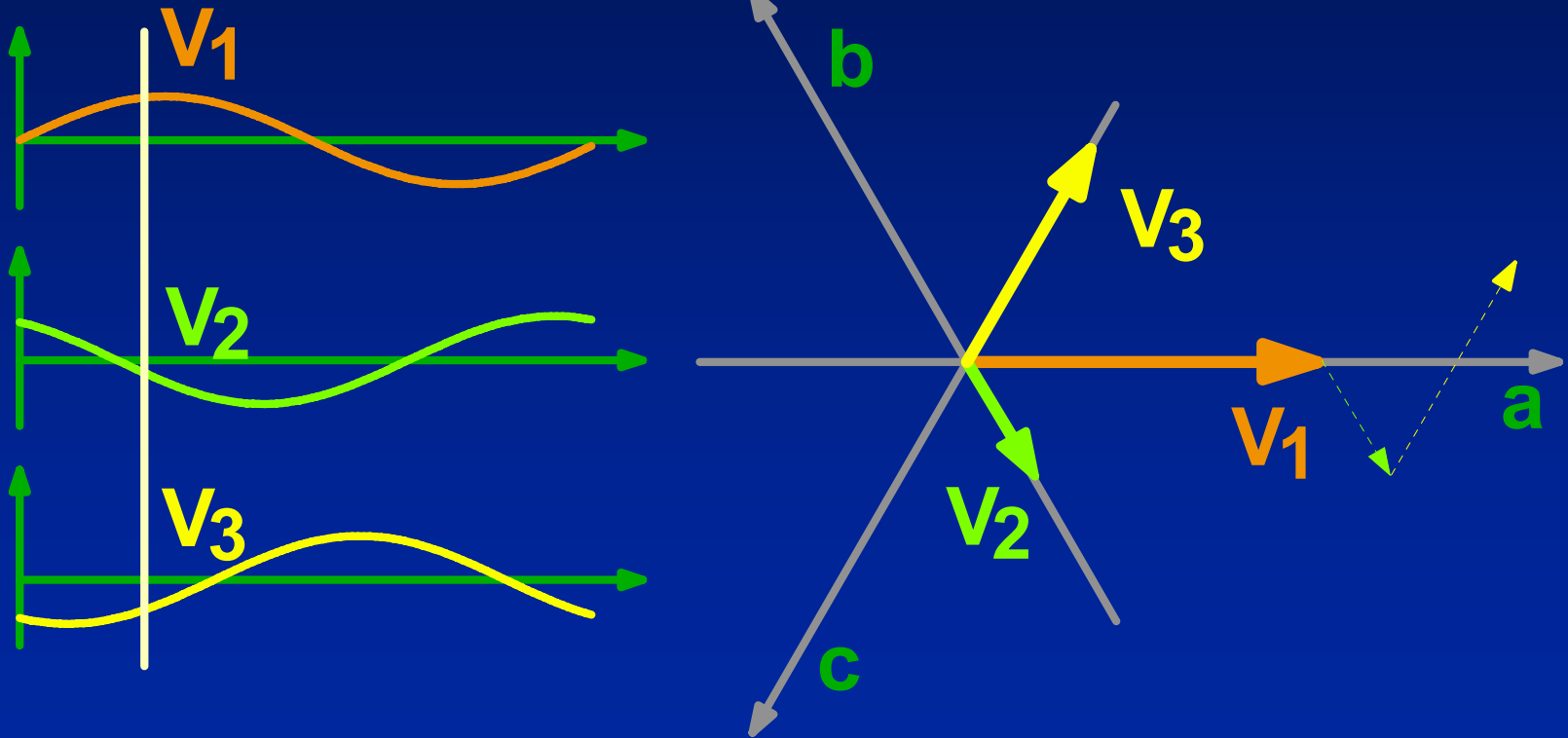
# Rappresentazione vettoriale di una terna di tensioni



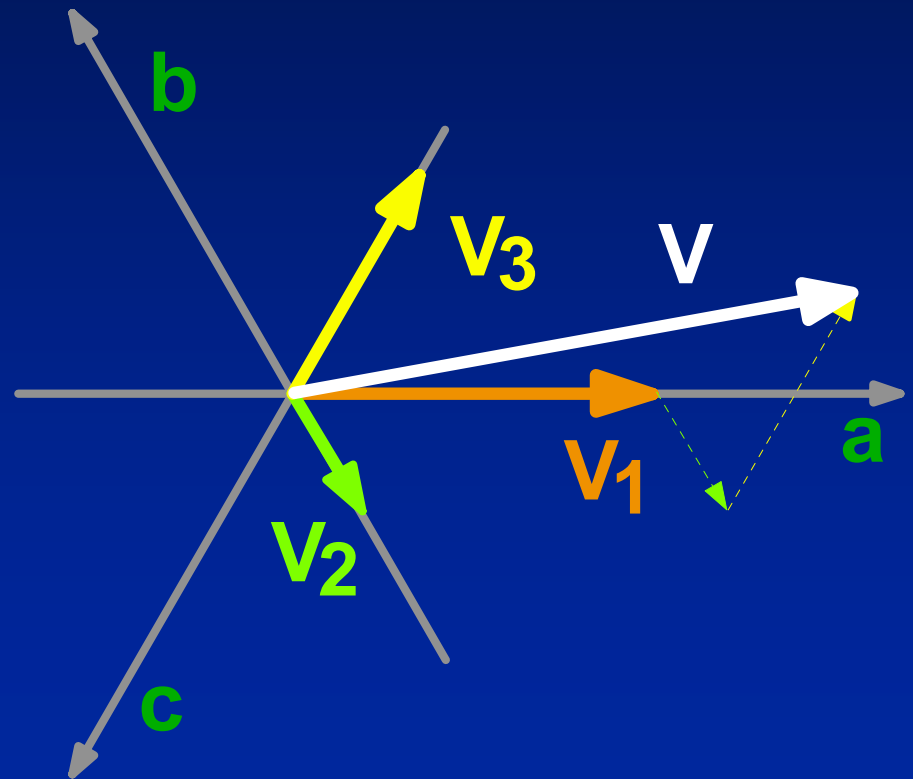
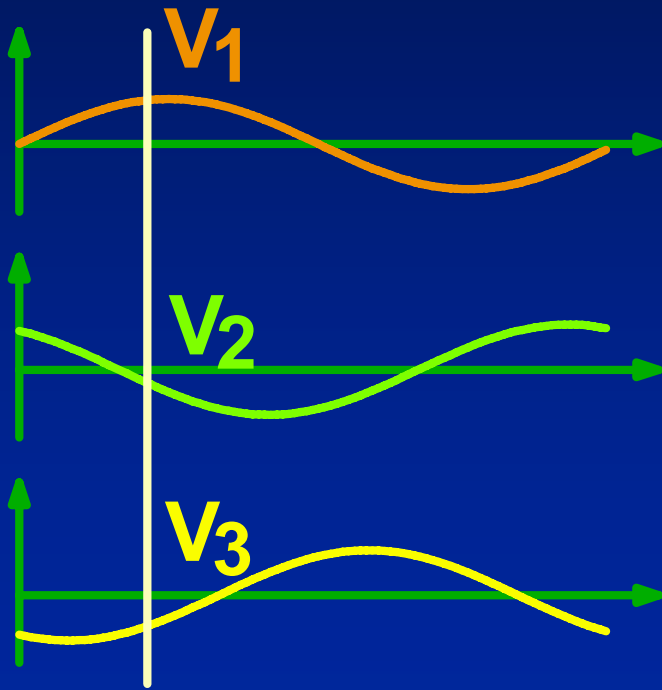
# Rappresentazione vettoriale di una terna di tensioni



# Rappresentazione vettoriale di una terna di tensioni



# Rappresentazione vettoriale di una terna di tensioni



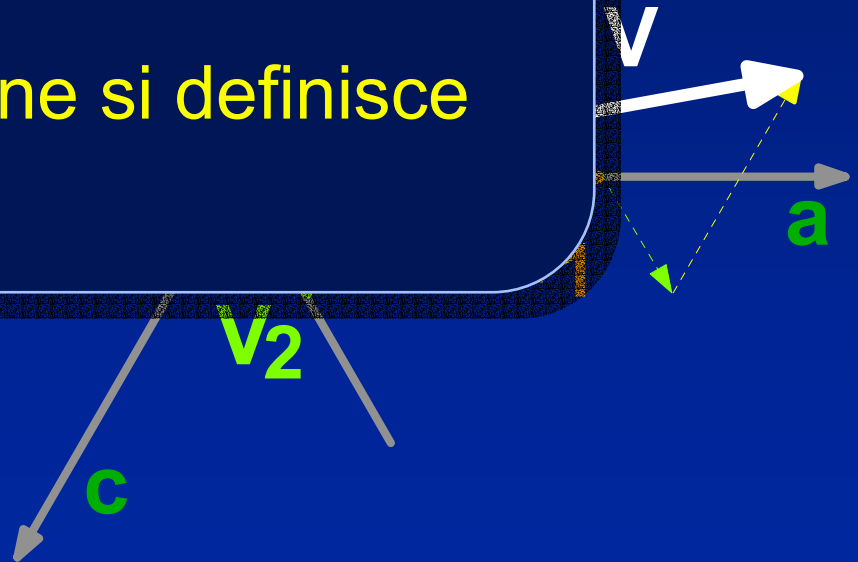
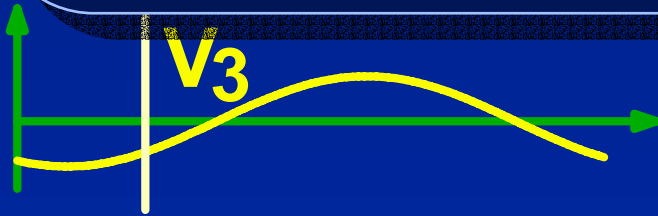
di

Si ha così una

## Trasformazione Vettoriale Diretta

tra la terna di tensioni  $v_1, v_2, v_3$ , e il vettore  $V$ .

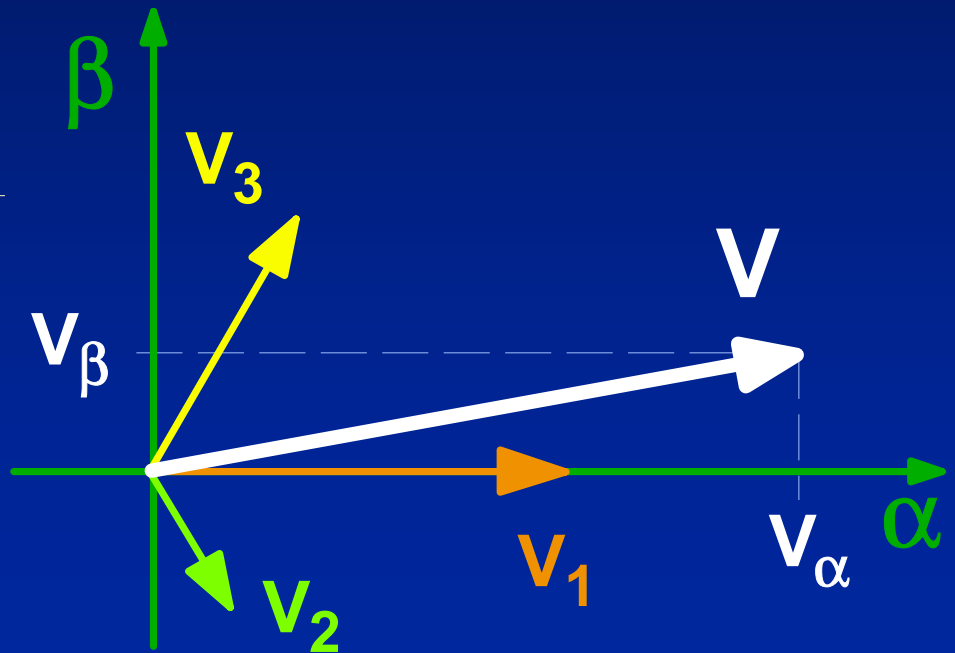
Analoga trasformazione si definisce per le correnti



# Rappresentazione vettoriale di una terna di tensioni

$$V_{\alpha} = V_1 - \frac{V_2}{2} - \frac{V_3}{2}$$

$$V_{\beta} = \frac{\sqrt{3}}{2} (V_2 - V_3)$$

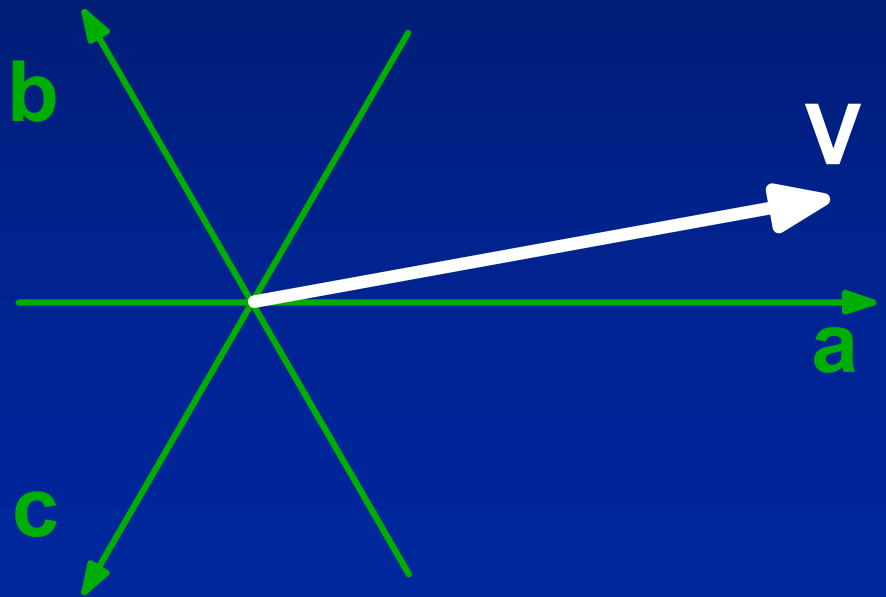


# Trasformazione vettoriale inversa

$$V_1 = \frac{2}{3} V_\alpha$$

$$V_2 = \frac{2}{3} \left( -V_\beta - \frac{V_\alpha}{2} \right)$$

$$V_3 = \frac{2}{3} \left( V_\beta - \frac{V_\alpha}{2} \right)$$

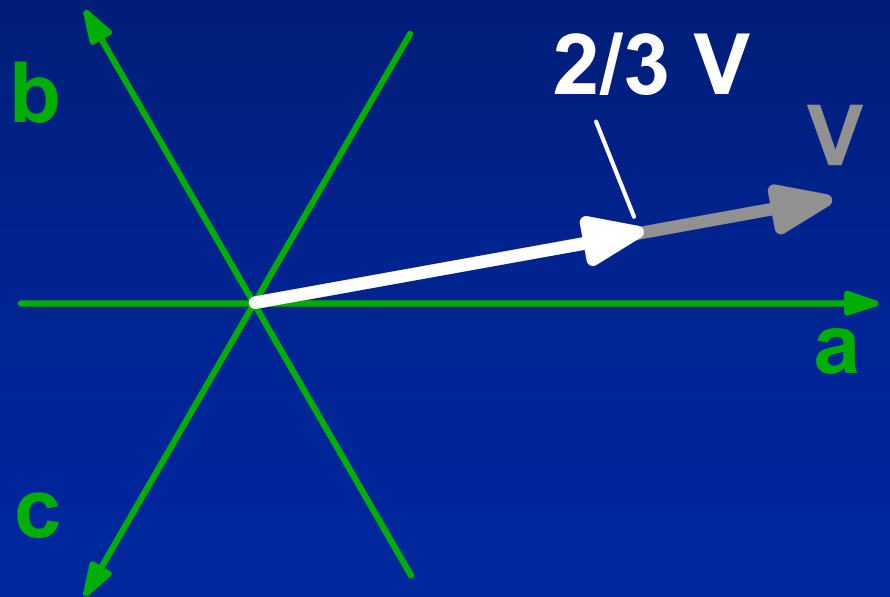


# Trasformazione vettoriale inversa

$$V_1 = \frac{2}{3} V_\alpha$$

$$V_2 = \frac{2}{3} \left( -V_\beta - \frac{V_\alpha}{2} \right)$$

$$V_3 = \frac{2}{3} \left( V_\beta - \frac{V_\alpha}{2} \right)$$



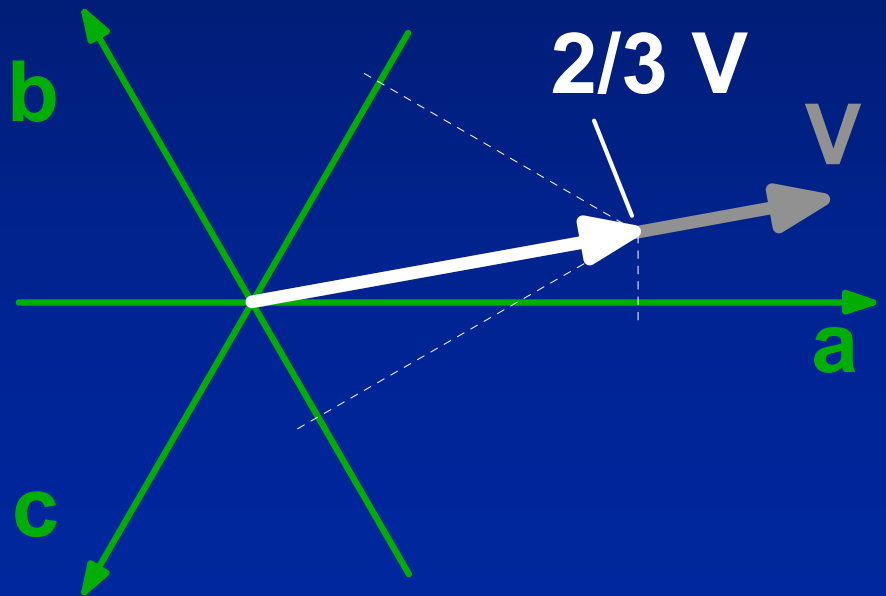


# Trasformazione vettoriale inversa

$$V_1 = \frac{2}{3} V_\alpha$$

$$V_2 = \frac{2}{3} \left( -V_\beta - \frac{V_\alpha}{2} \right)$$

$$V_3 = \frac{2}{3} \left( V_\beta - \frac{V_\alpha}{2} \right)$$

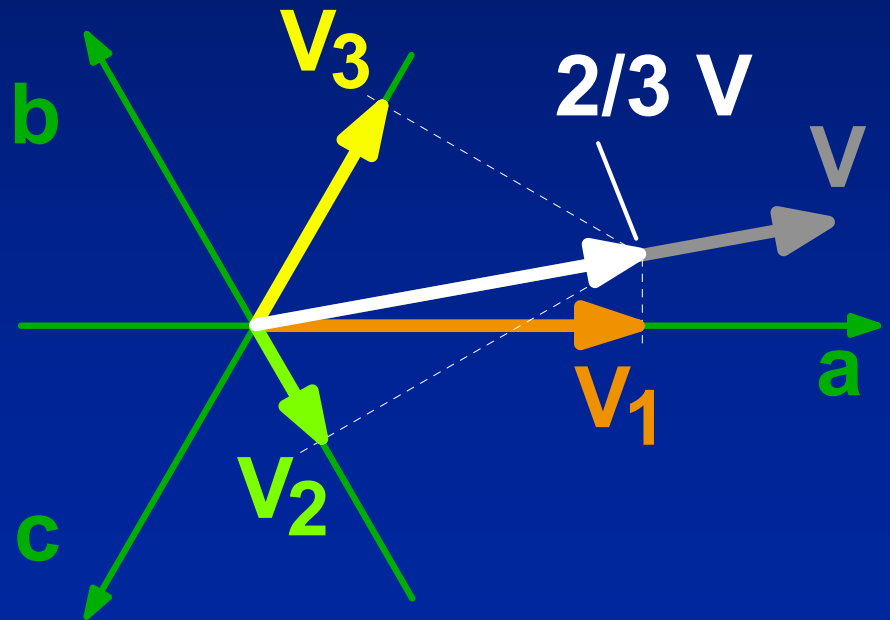


# Trasformazione vettoriale inversa

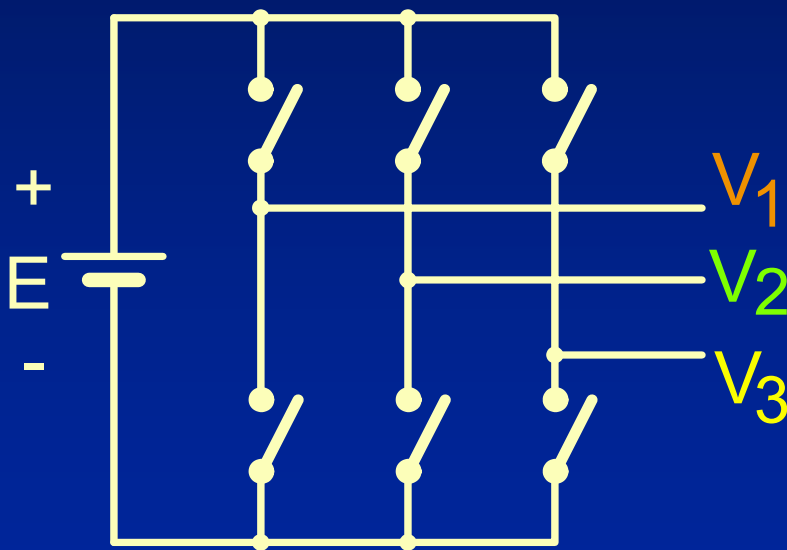
$$V_1 = \frac{2}{3} V_\alpha$$

$$V_2 = \frac{2}{3} \left( -V_\beta - \frac{V_\alpha}{2} \right)$$

$$V_3 = \frac{2}{3} \left( V_\beta - \frac{V_\alpha}{2} \right)$$



# Rappresentazione vettoriale degli stati di un invertitore trifase di tensione



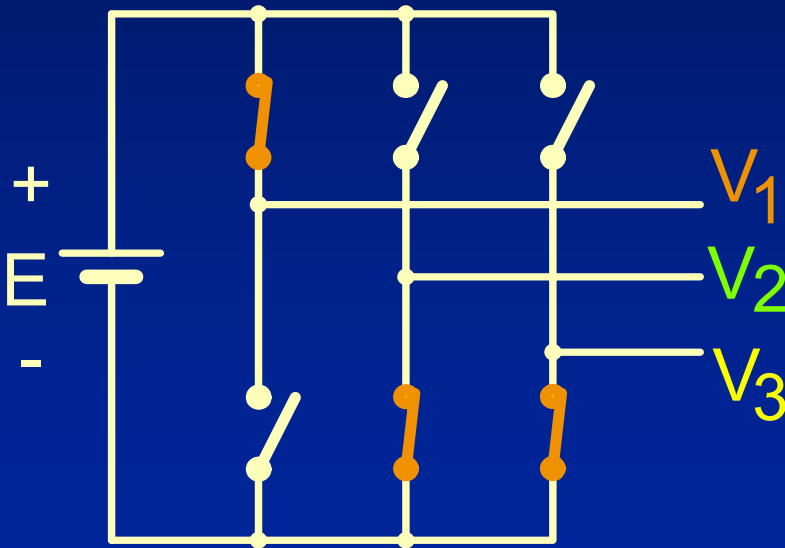
Ad ogni stato dell'invertitore corrisponde una terna di tensioni di uscita che può essere rappresentata da un vettore di stato

# Rappresentazione vettoriale degli stati

Stato 100:

$$V_1 = E \quad V_2 = 0 \quad V_3 = 0$$

e

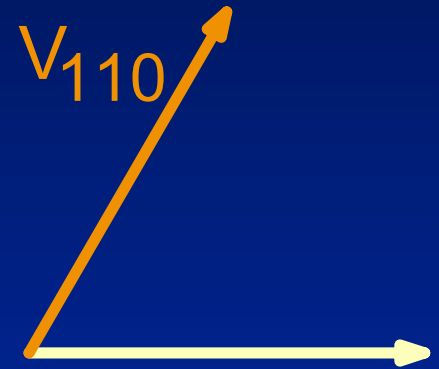
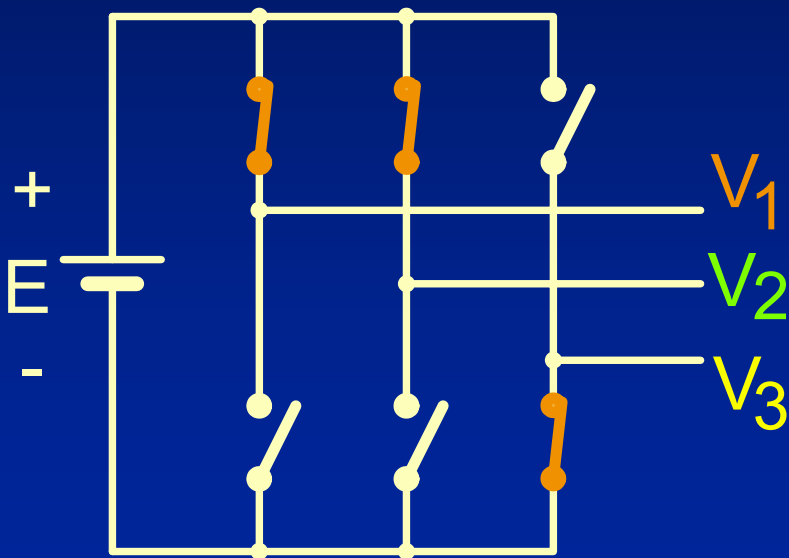


# Rappresentazione vettoriale degli stati

Stato 110:

$$V_1 = E \quad V_2 = E \quad V_3 = 0$$

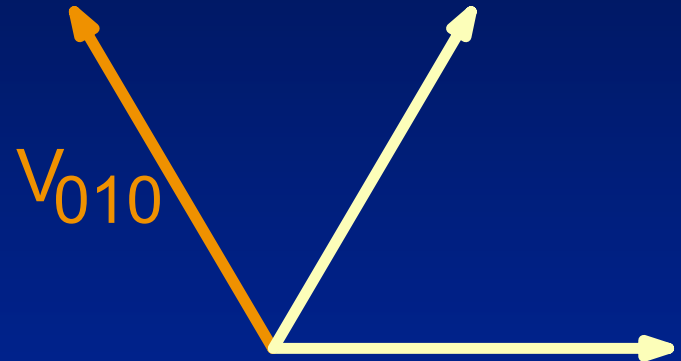
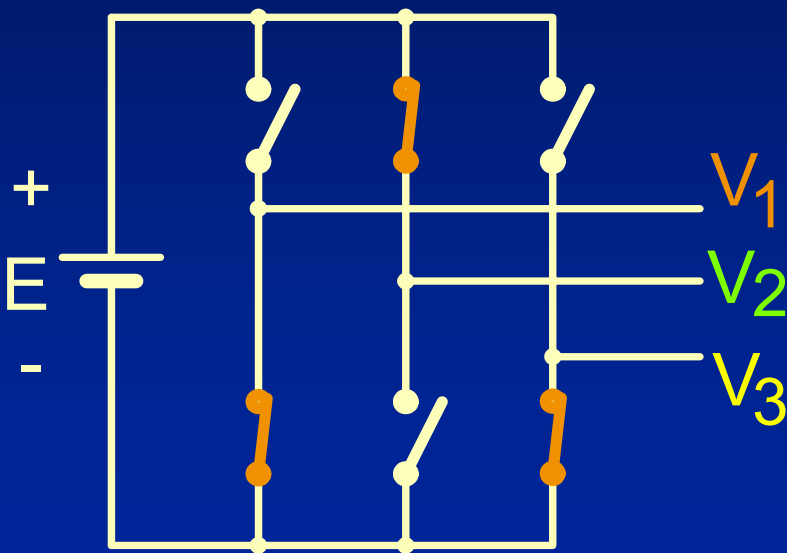
e



# Rappresentazione vettoriale degli stati

Stato 010:  $V_1=0$   $V_2=E$   $V_3=0$

e

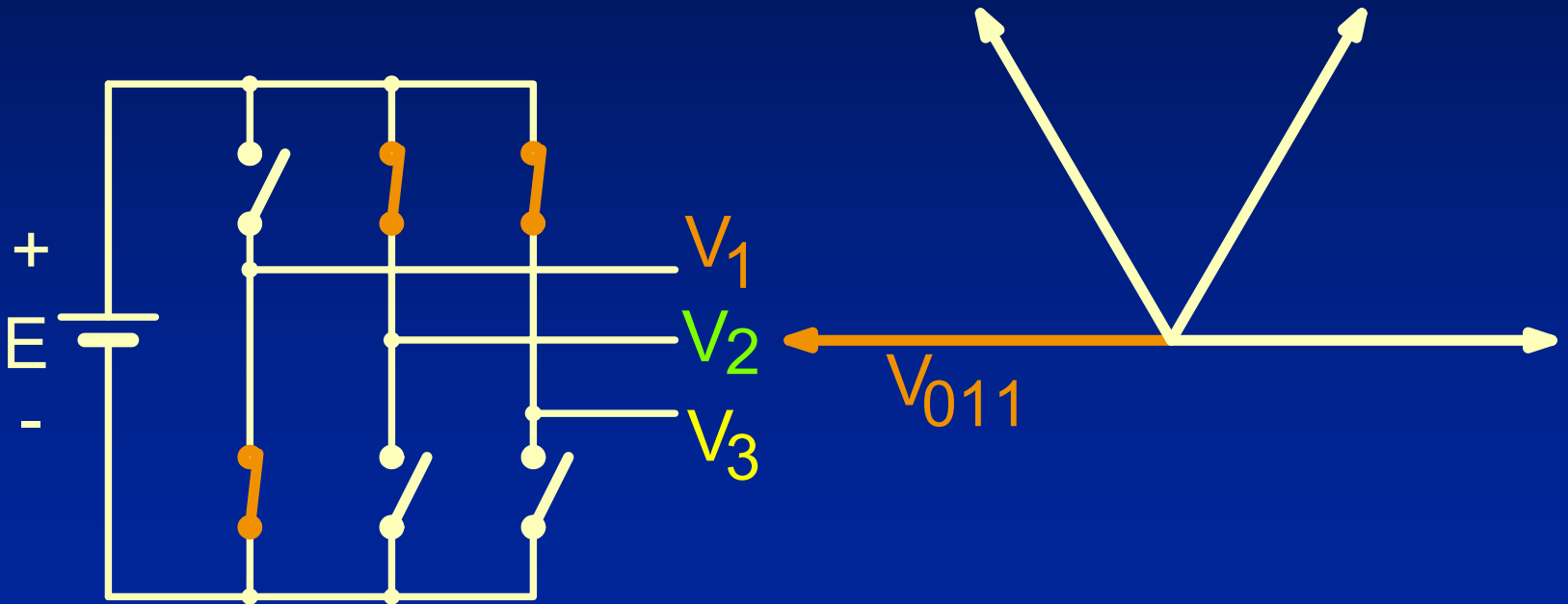


# Rappresentazione vettoriale degli stati

Stato 011:

$$V_1=0 \quad V_2=E \quad V_3=E$$

e

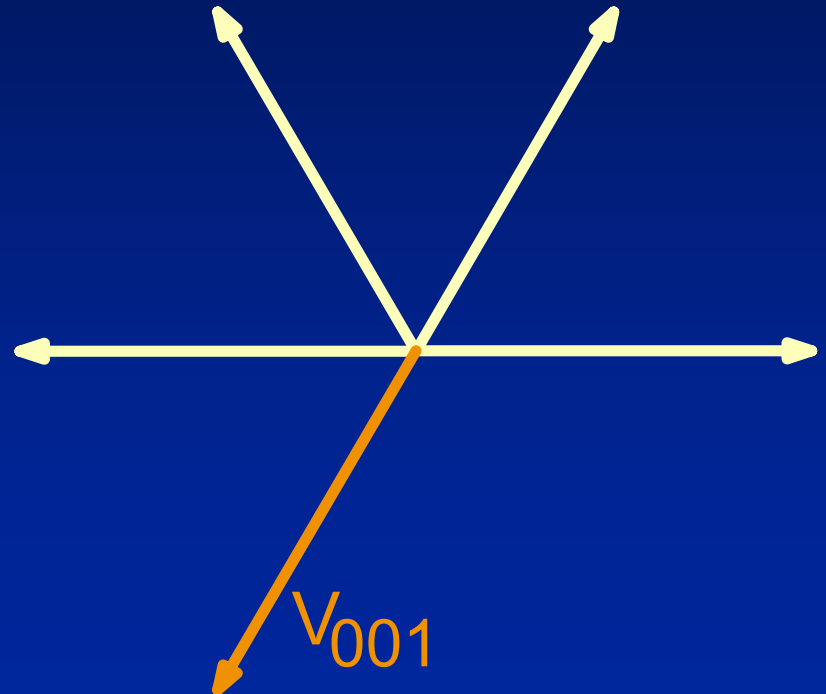
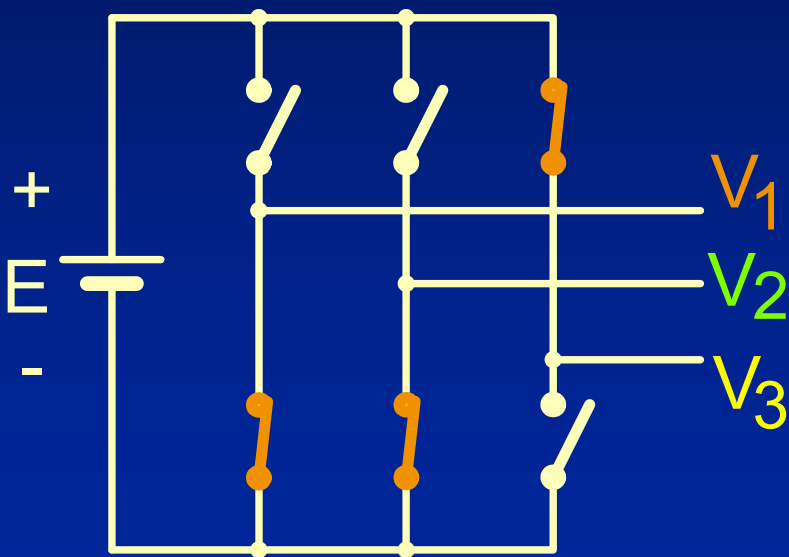


# Rappresentazione vettoriale degli stati

Stato 001:

$$V_1=0 \quad V_2=0 \quad V_3=E$$

e



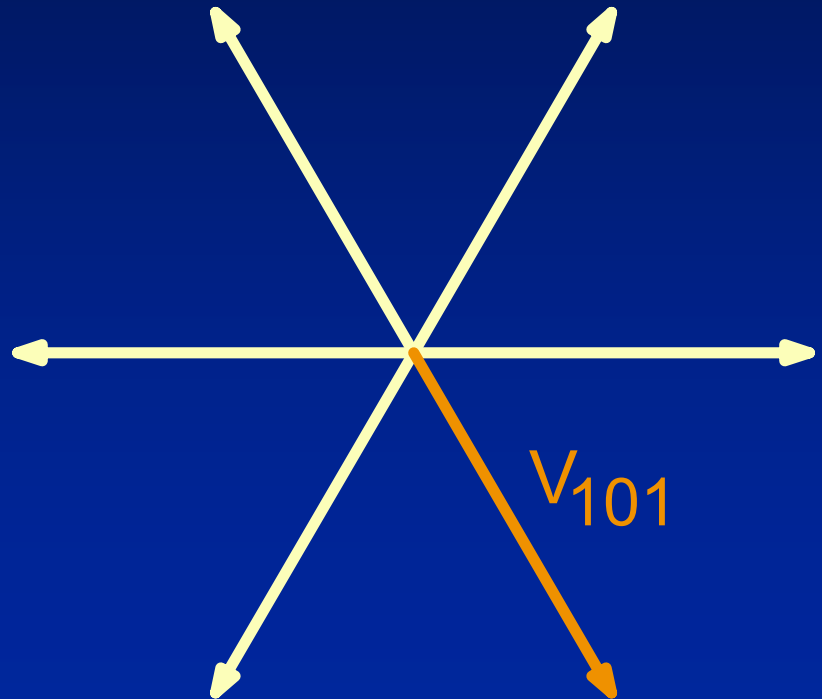
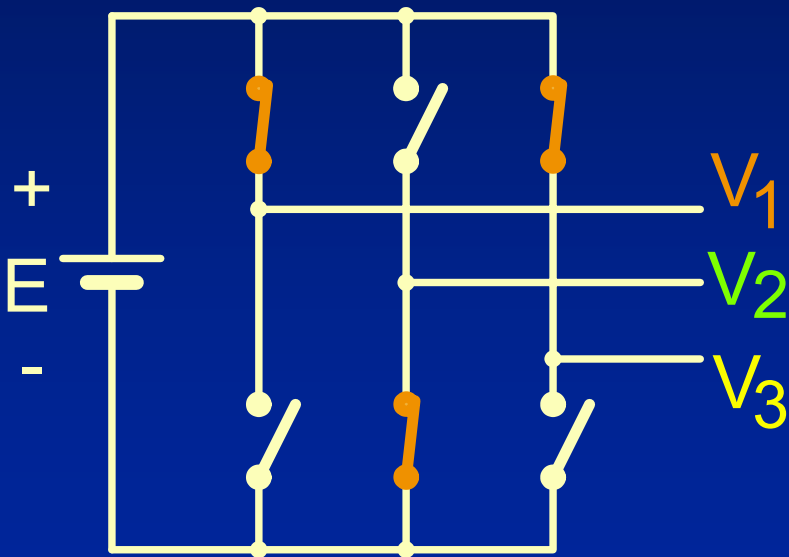


# Rappresentazione vettoriale degli stati

Stato 101:

$$V_1 = E \quad V_2 = 0 \quad V_3 = E$$

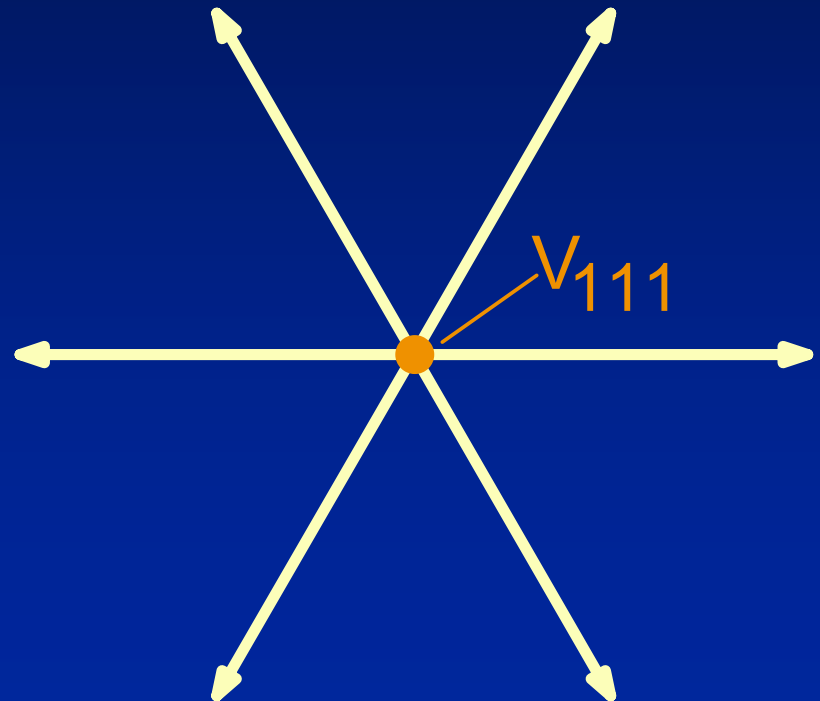
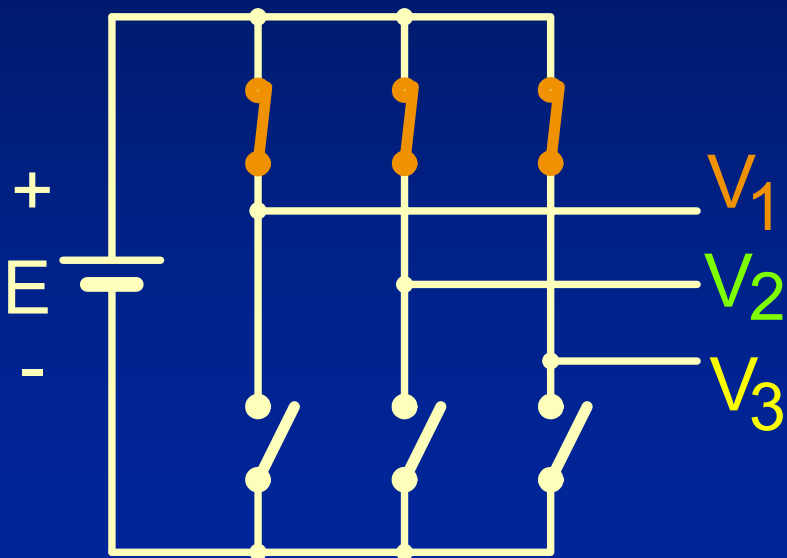
e



# Rappresentazione vettoriale degli stati

Stato 111:  $V_1=E$   $V_2=E$   $V_3=E$

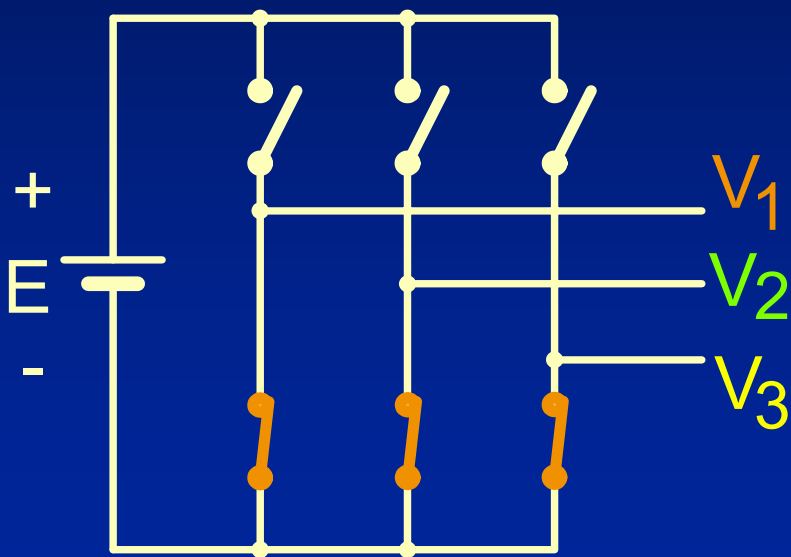
e



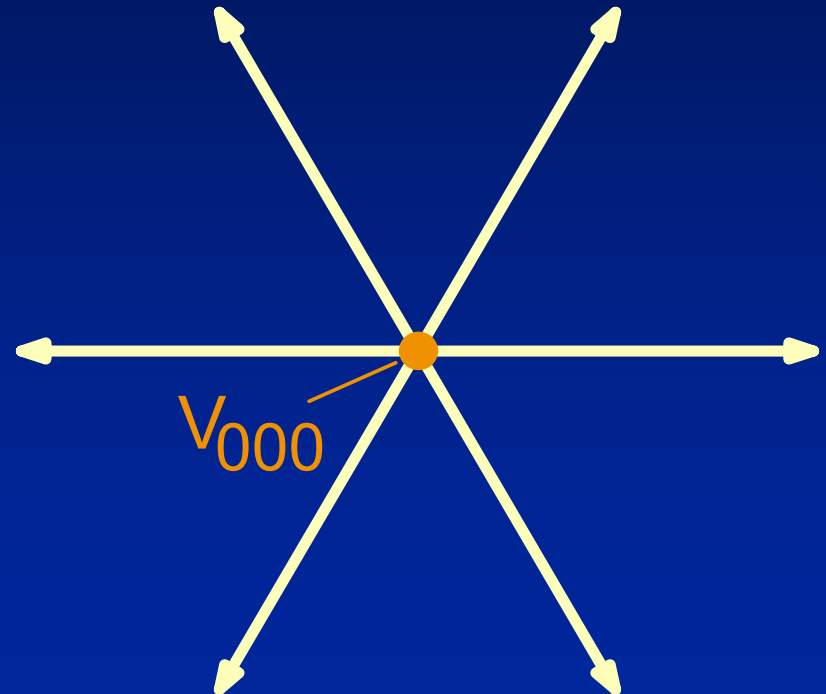
# Rappresentazione vettoriale degli stati

Stato 000:  $V_1=0$   $V_2=0$   $V_3=0$

e



STATO NULLO



# Modulazione Vettoriale di Tensione

La modulazione vettoriale consiste nell'applicare in successione nel periodo stati diversi dell'invertitore

# Modulazione Vettoriale di Tensione

La **modulazione vettoriale** consiste nell'applicare in successione nel periodo stati diversi dell'invertitore

Per ogni periodo di modulazione, normalmente si impiegano tre stati, di cui uno nullo

# Modulazione Vettoriale di Tensione

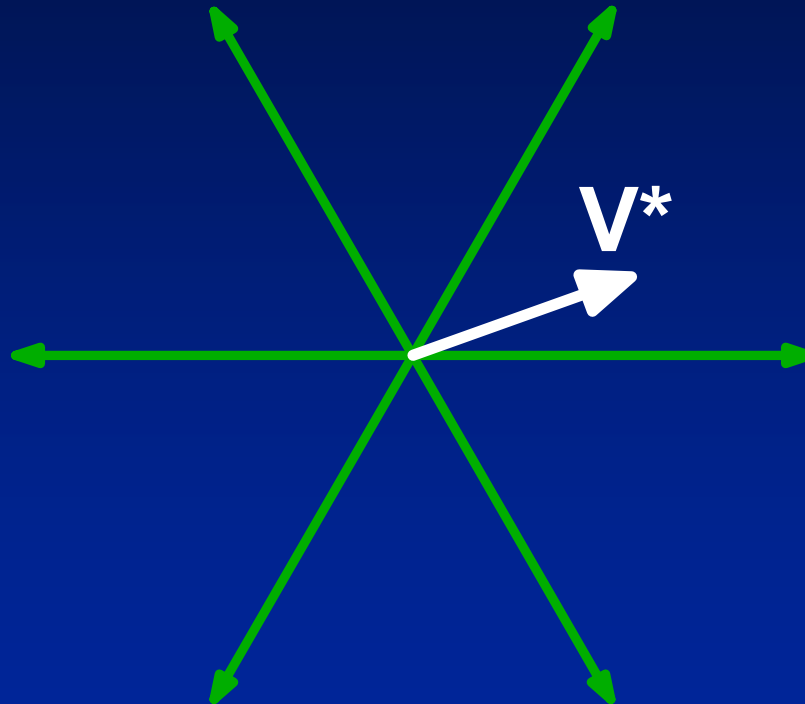
La **modulazione vettoriale** consiste nell'applicare in successione nel periodo stati diversi dell'invertitore

Per ogni periodo di modulazione, normalmente si impiegano tre stati, di cui uno nullo

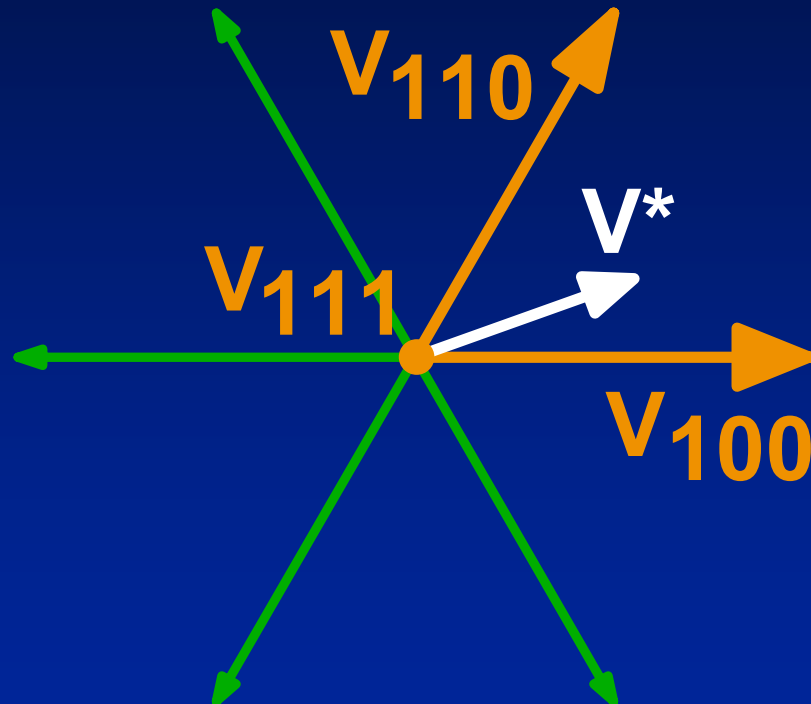
Le durate di applicazione dei tre stati devono essere tali che:

$$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 1$$

# Modulazione Vettoriale di Tensione

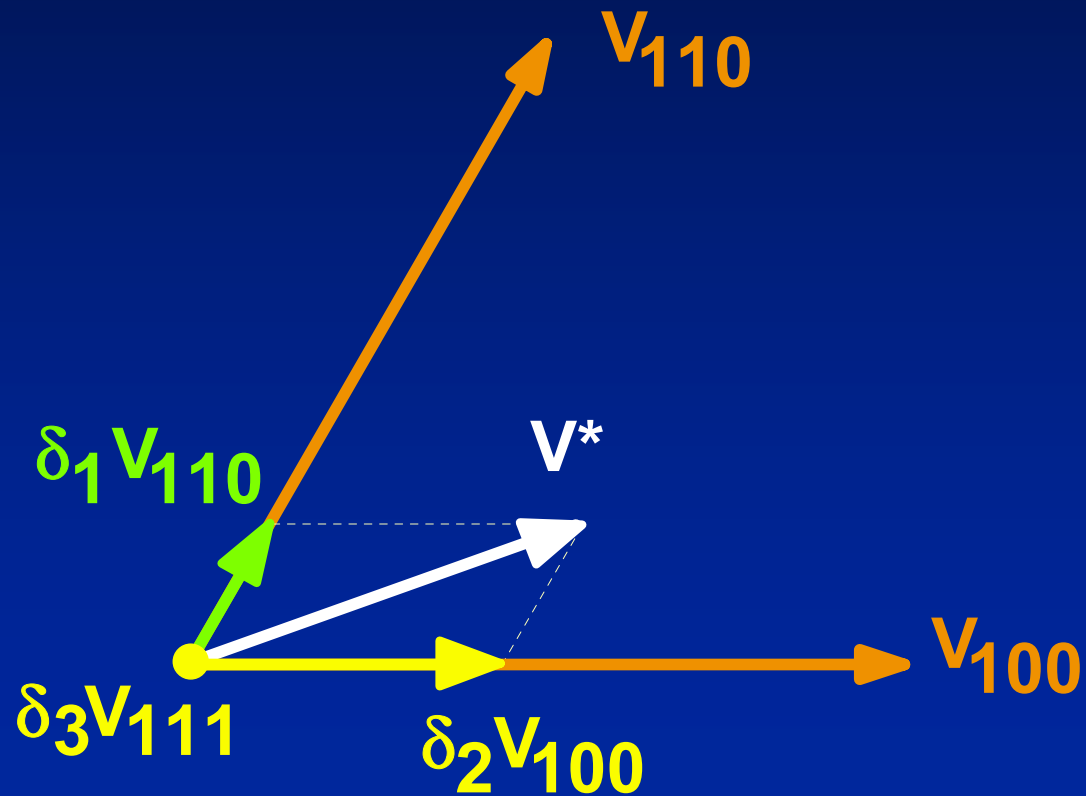


# Modulazione Vettoriale di Tensione

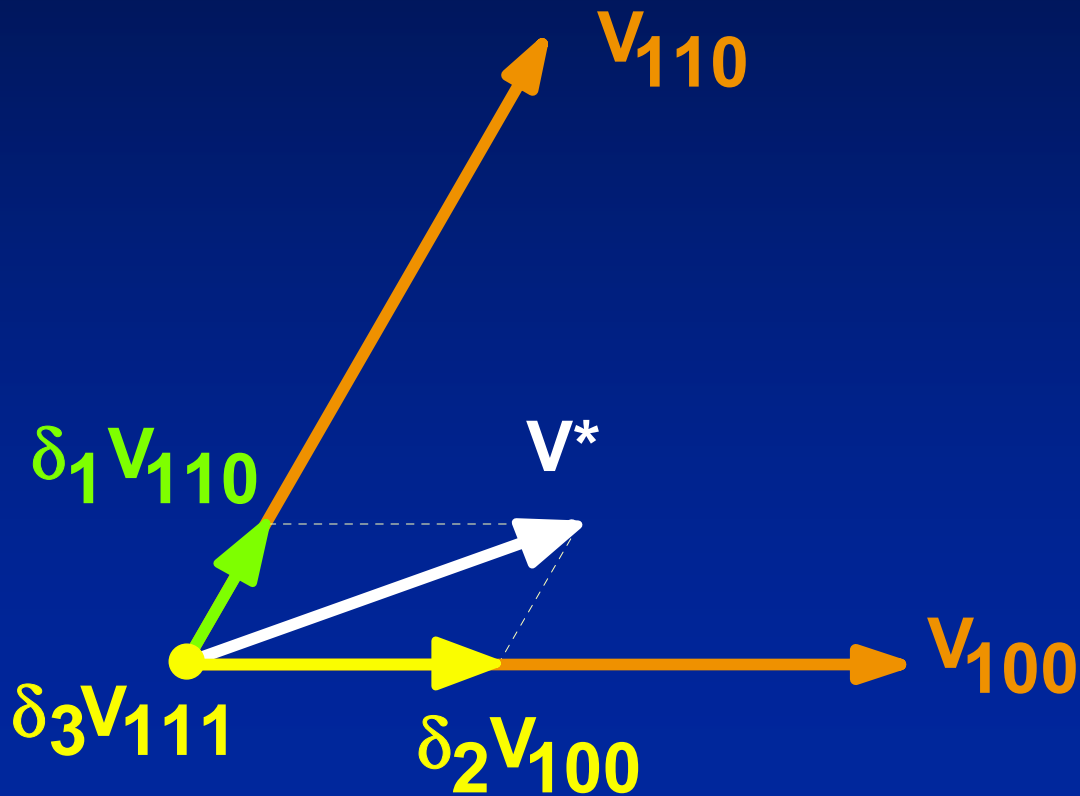




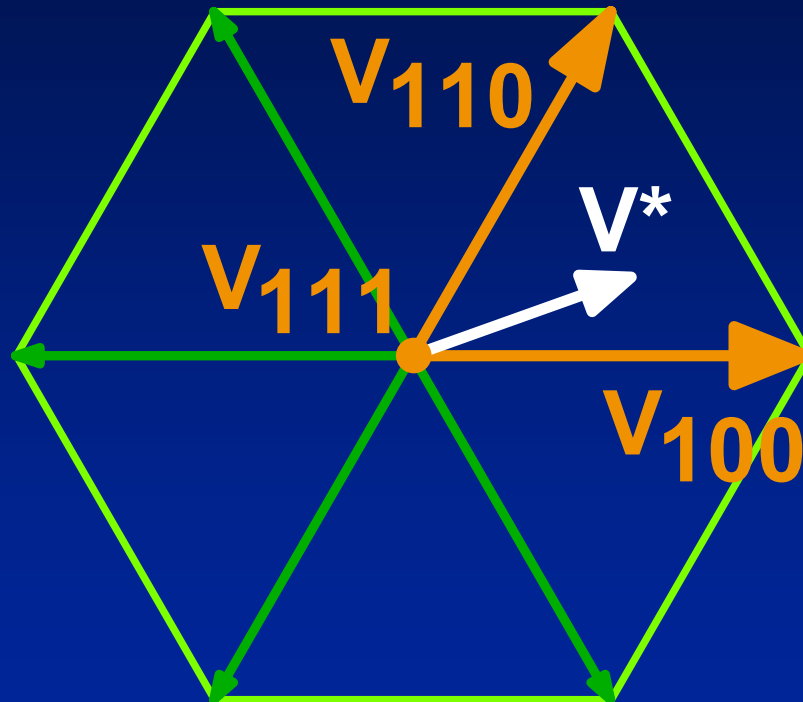
# Modulazione Vettoriale di Tensione



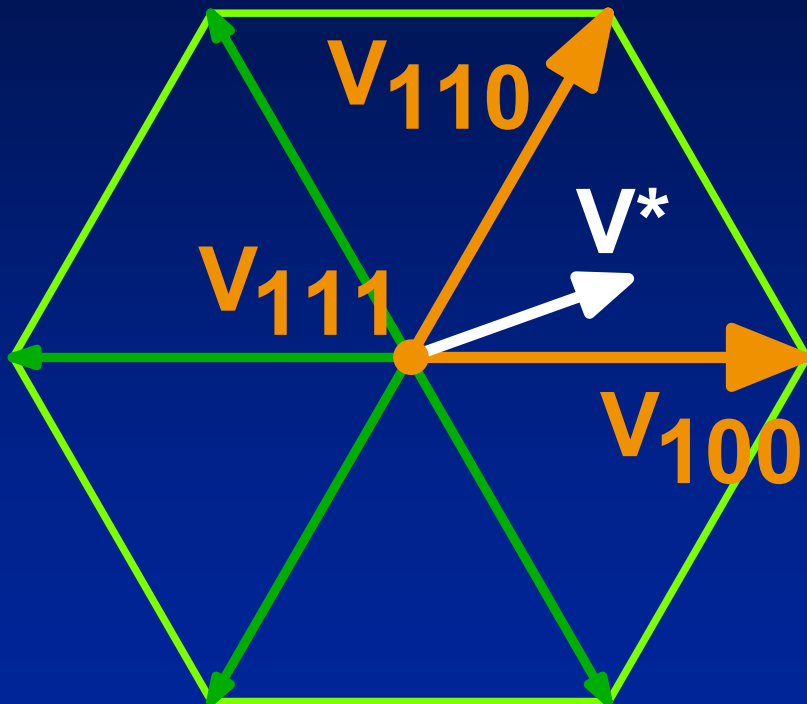
# Modulazione Vettoriale di Tensione



# Modulazione Vettoriale di Tensione

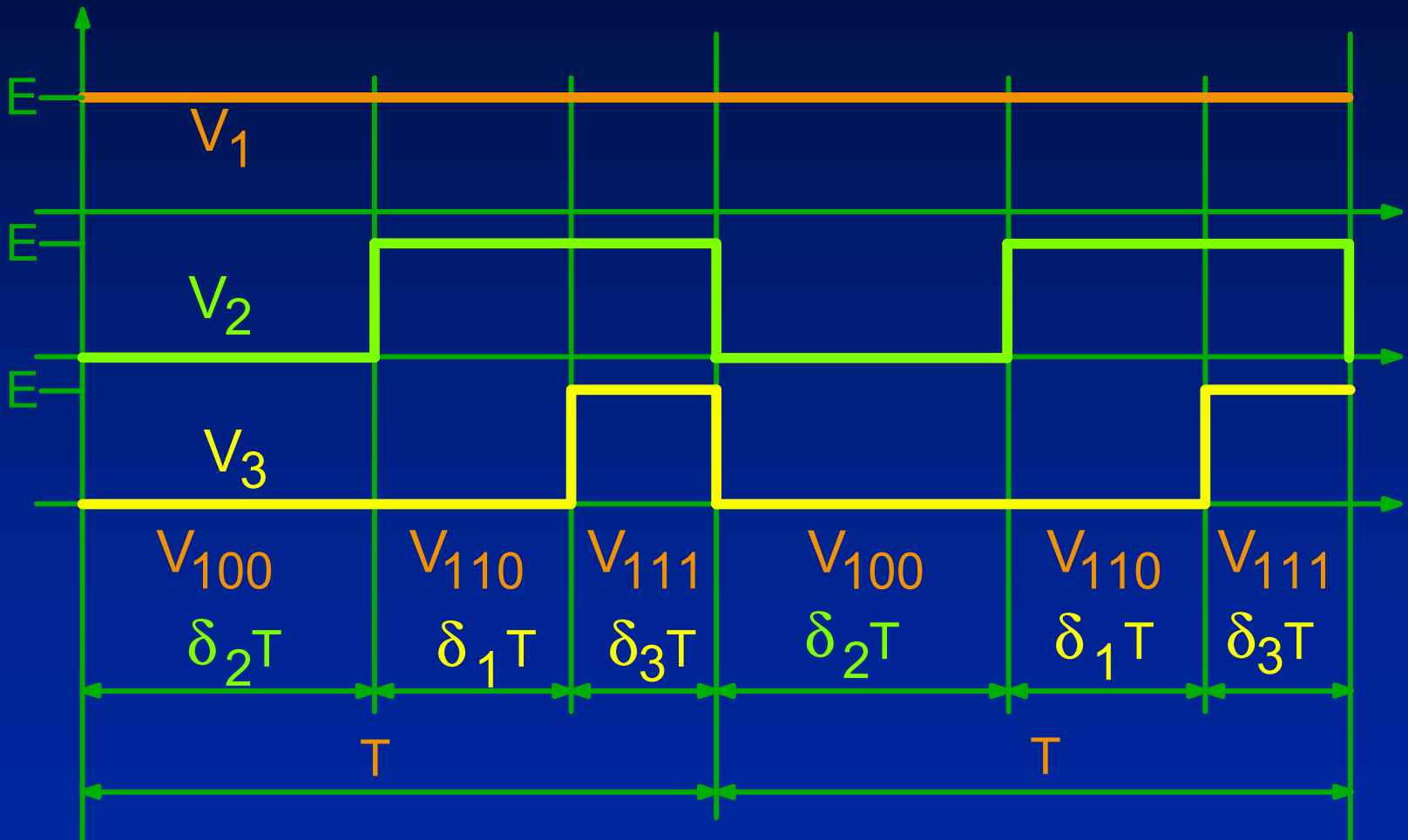


# Modulazione Vettoriale di Tensione

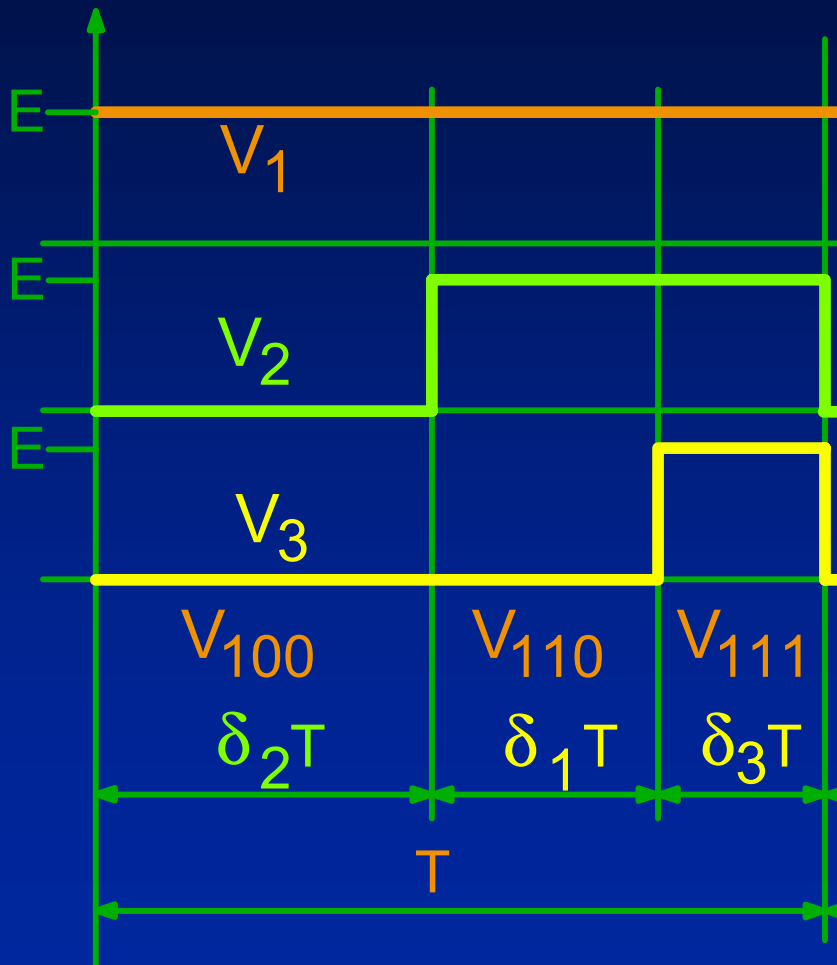


L'ordine di applicazione degli stati nel periodo può essere scelto in base a criteri diversi

# Modulazione Vettoriale di Tensione

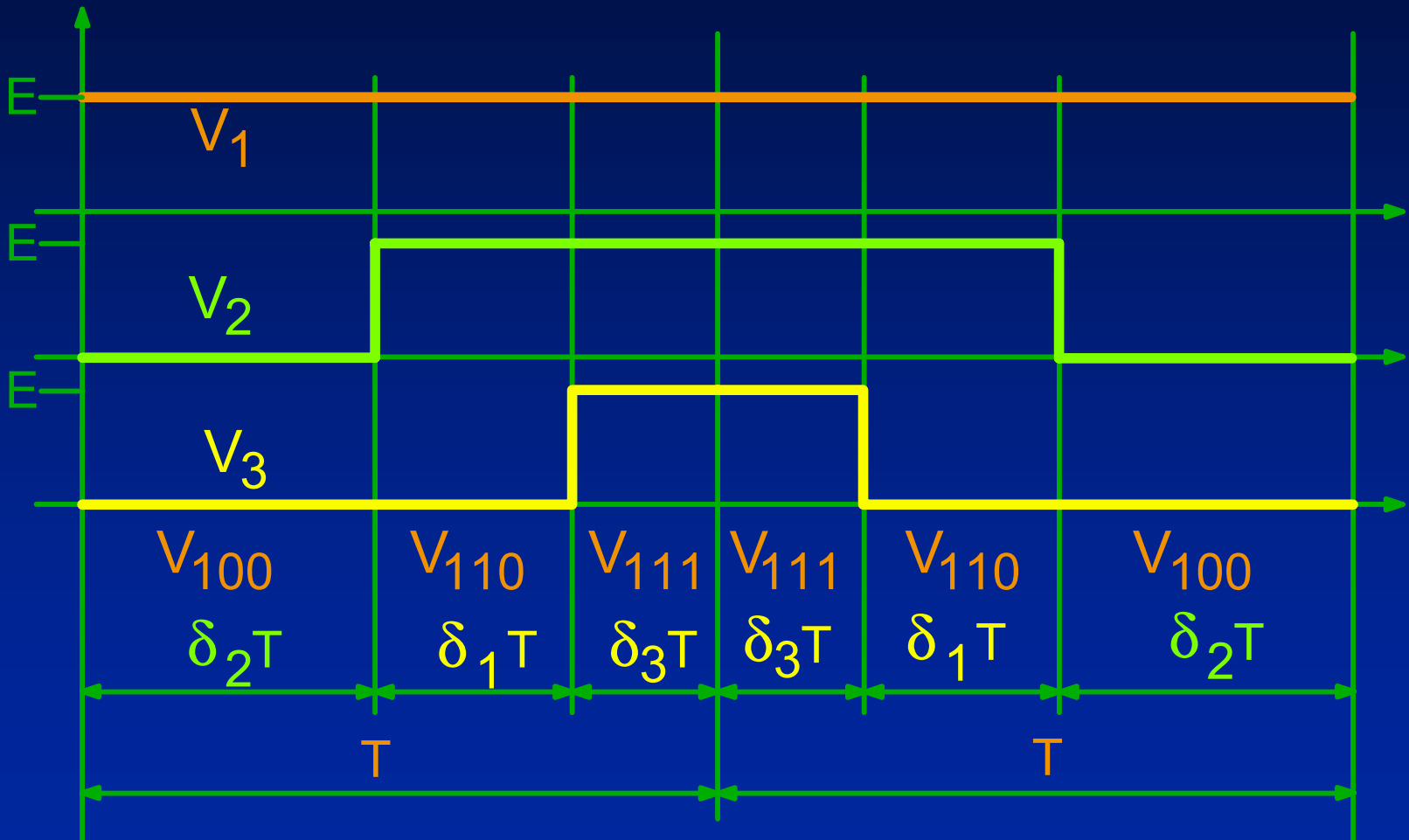


# Modulazione Vettoriale

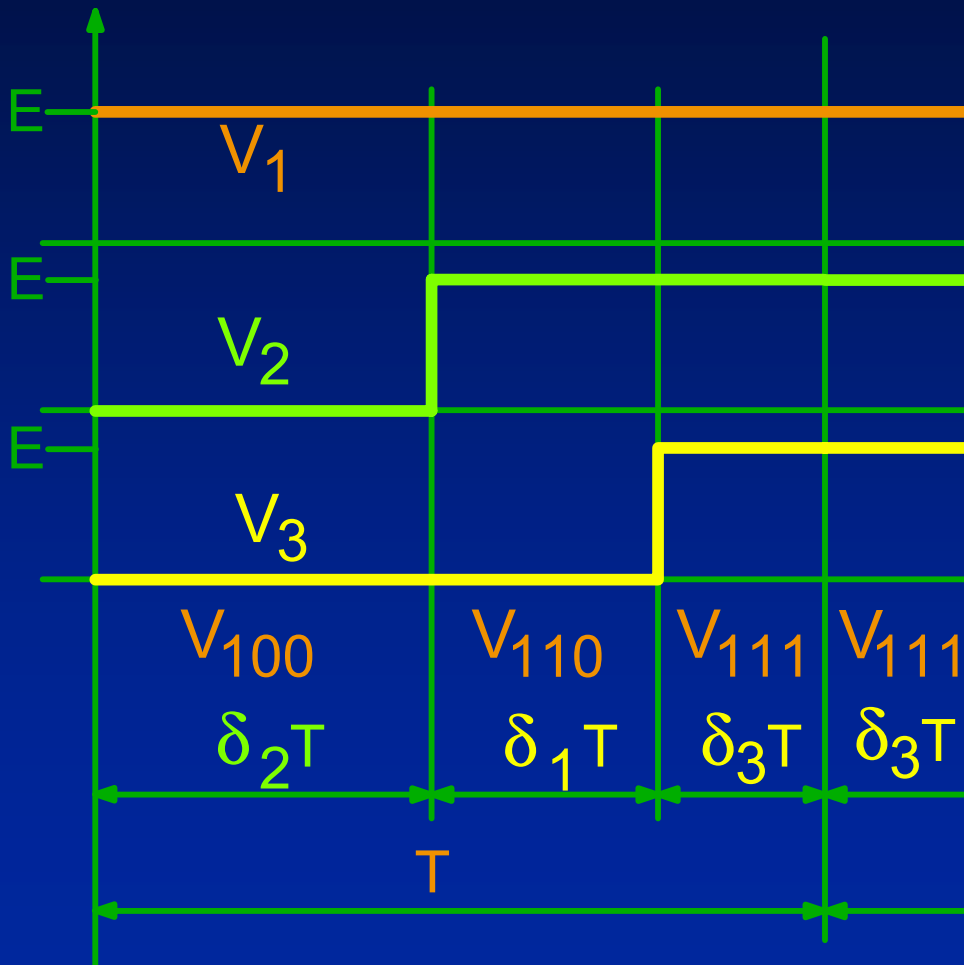


Un criterio molto usato corrisponde ad avere una commutazione in una sola fase per ogni di stato. Questo criterio condiziona la scelta dello stato nullo

# Modulazione Vettoriale di Tensione



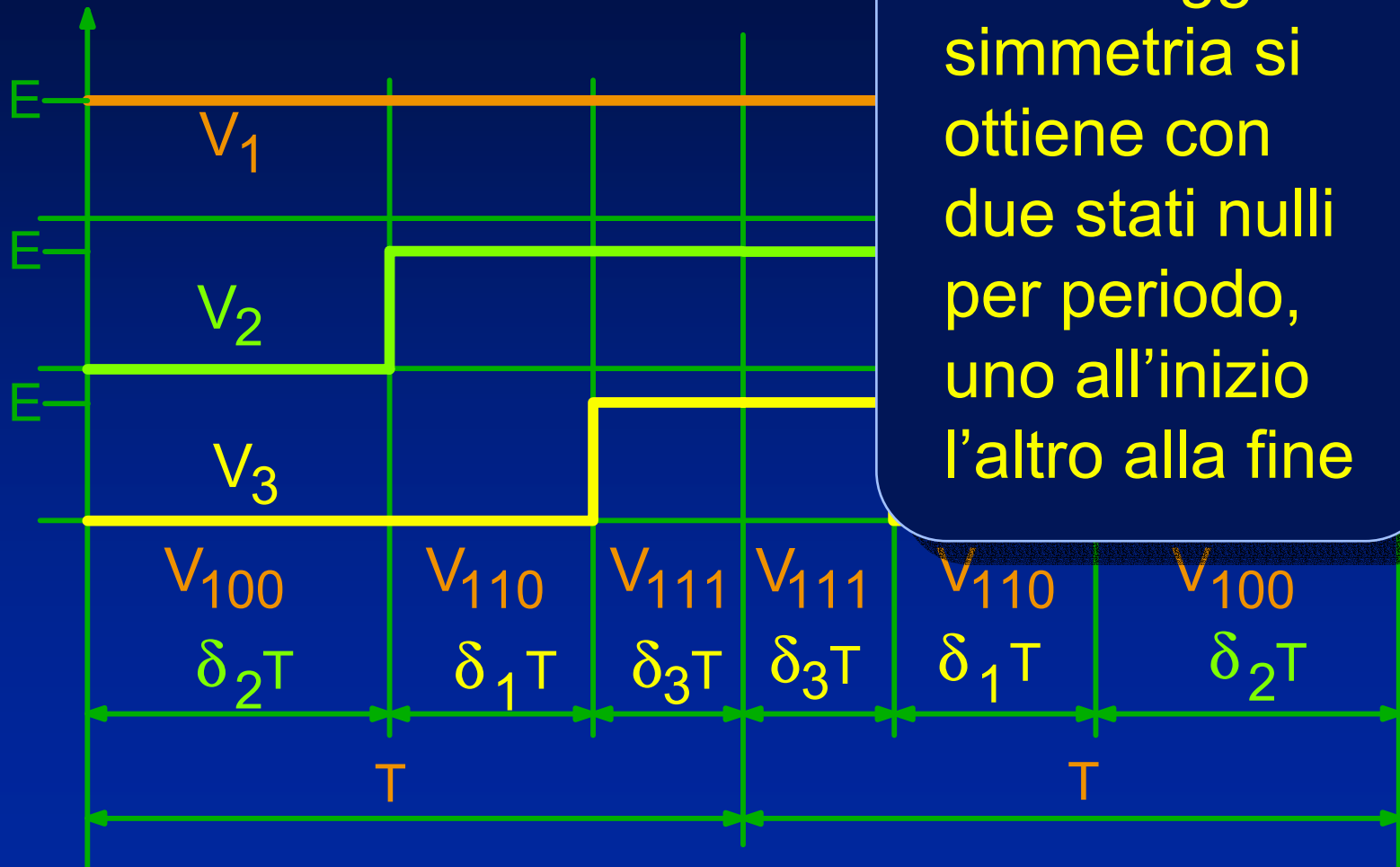
# Modulazione Vettoriale



Per soddisfare il criterio si inverte l'ordine di applicazione degli stati in due periodi successivi

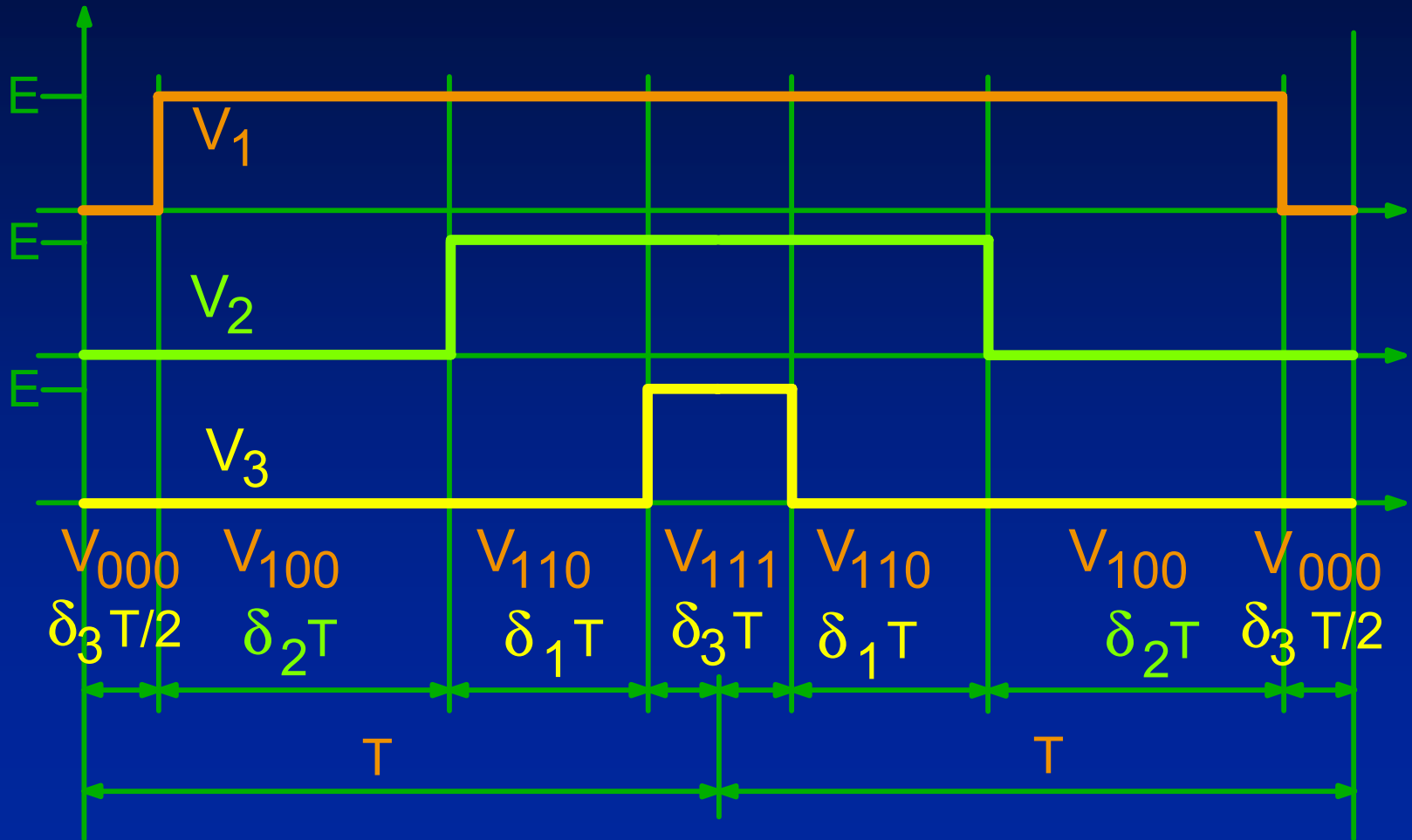


# Modulazione Vettoriale

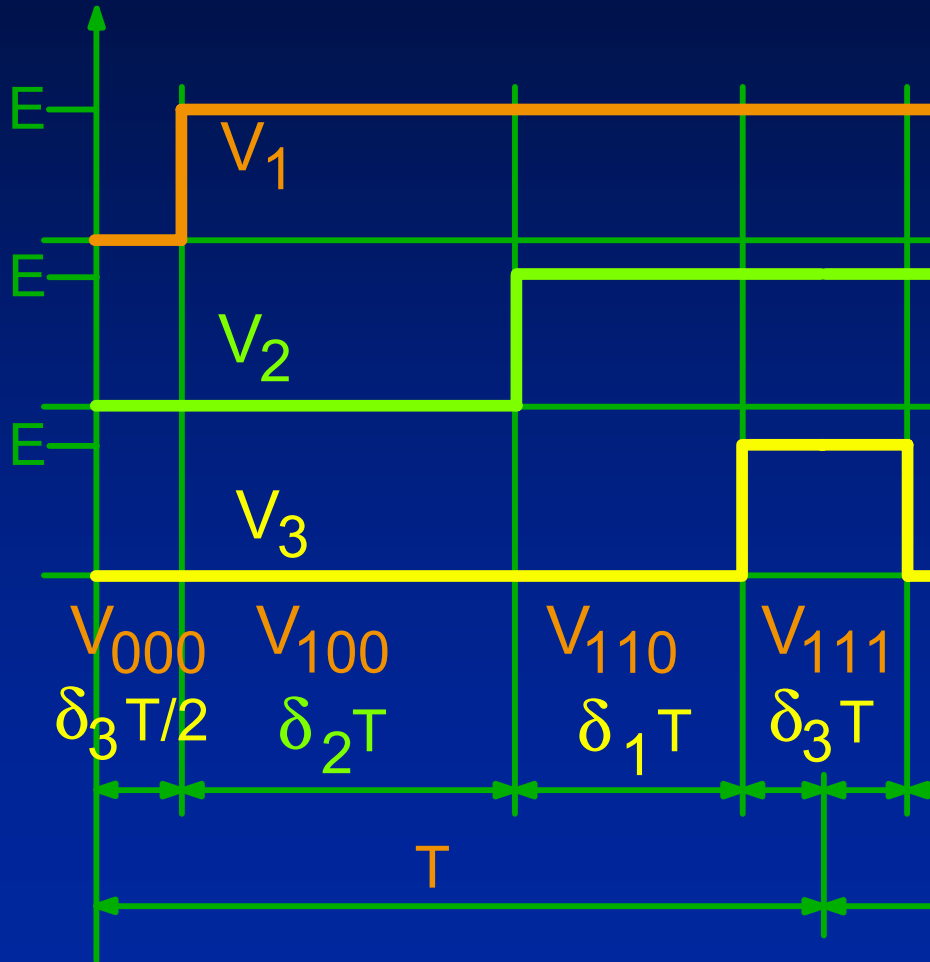


Una maggiore simmetria si ottiene con due stati nulli per periodo, uno all'inizio l'altro alla fine

# Modulazione Vettoriale di Tensione



# Modulazione Vettoriale



L'andamento istantaneo ottenuto è lo stesso di quello che risulta da una PWM con portante triangolare di periodo  $2T$

# Modulazione Vettoriale di Tensione

I calcoli relativi alla modulazione vettoriale sono vantaggiosamente svolti dai sistemi di controllo digitale

# Modulazione Vettoriale di Tensione

I calcoli relativi alla modulazione vettoriale sono vantaggiosamente svolti dai sistemi di controllo digitale

Data la diffusione dei sistemi di controllo digitale, la modulazione vettoriale è attualmente uno dei metodi di modulazione più usati negli azionamenti

# Controllo monofase di corrente

Gli invertitori di tensione possono essere controllati, in modo da dare sul carico una corrente con forma d'onda secondo un riferimento  $I^*$

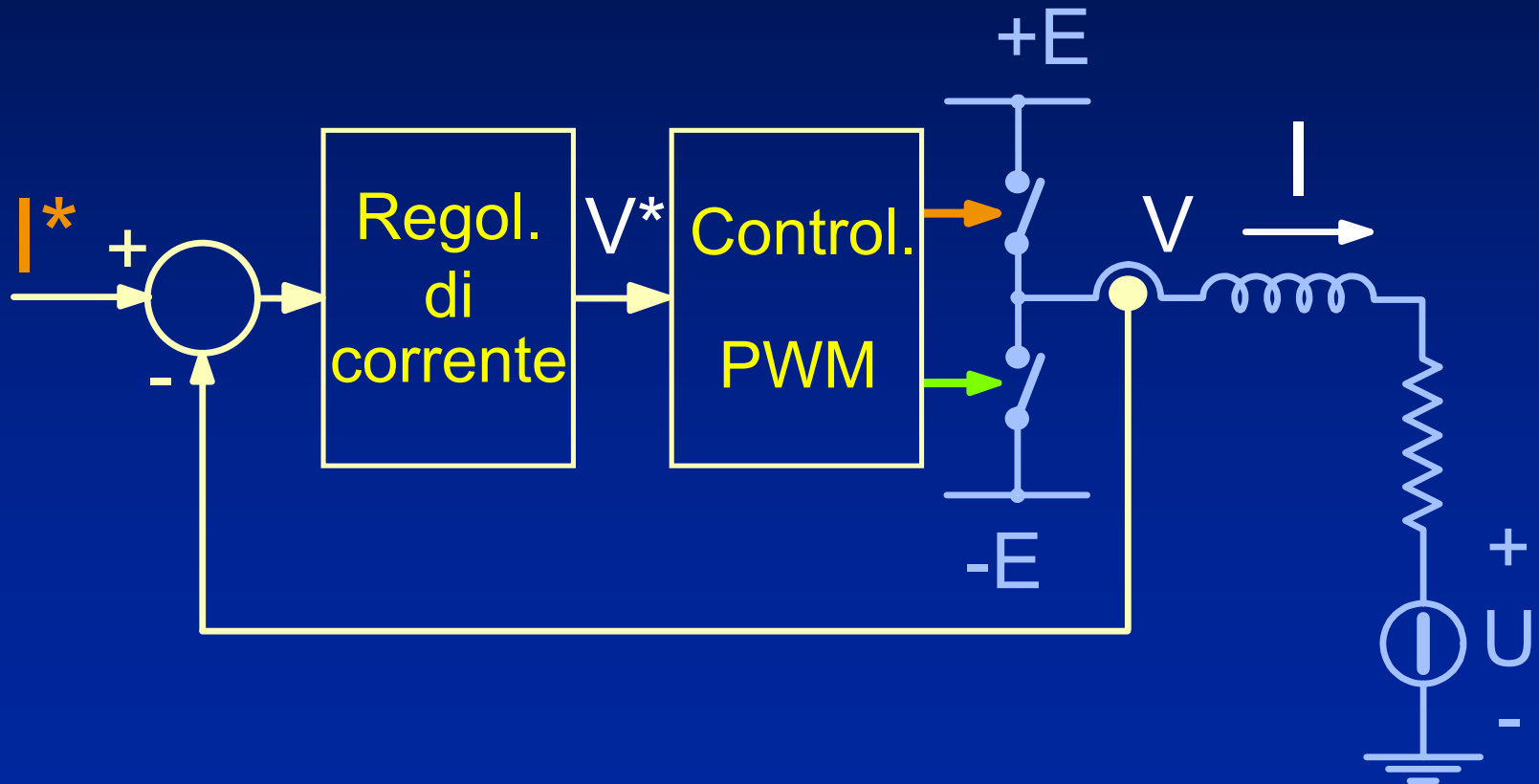
# Controllo monofase di corrente

Gli invertitori di tensione possono essere controllati, in modo da dare sul carico una corrente con forma d'onda secondo un riferimento  $I^*$

A tale scopo è necessario usare un controllo a controreazione, che genera opportuni riferimenti per i controlli di tensione già esaminati

# Controllo monofase di corrente

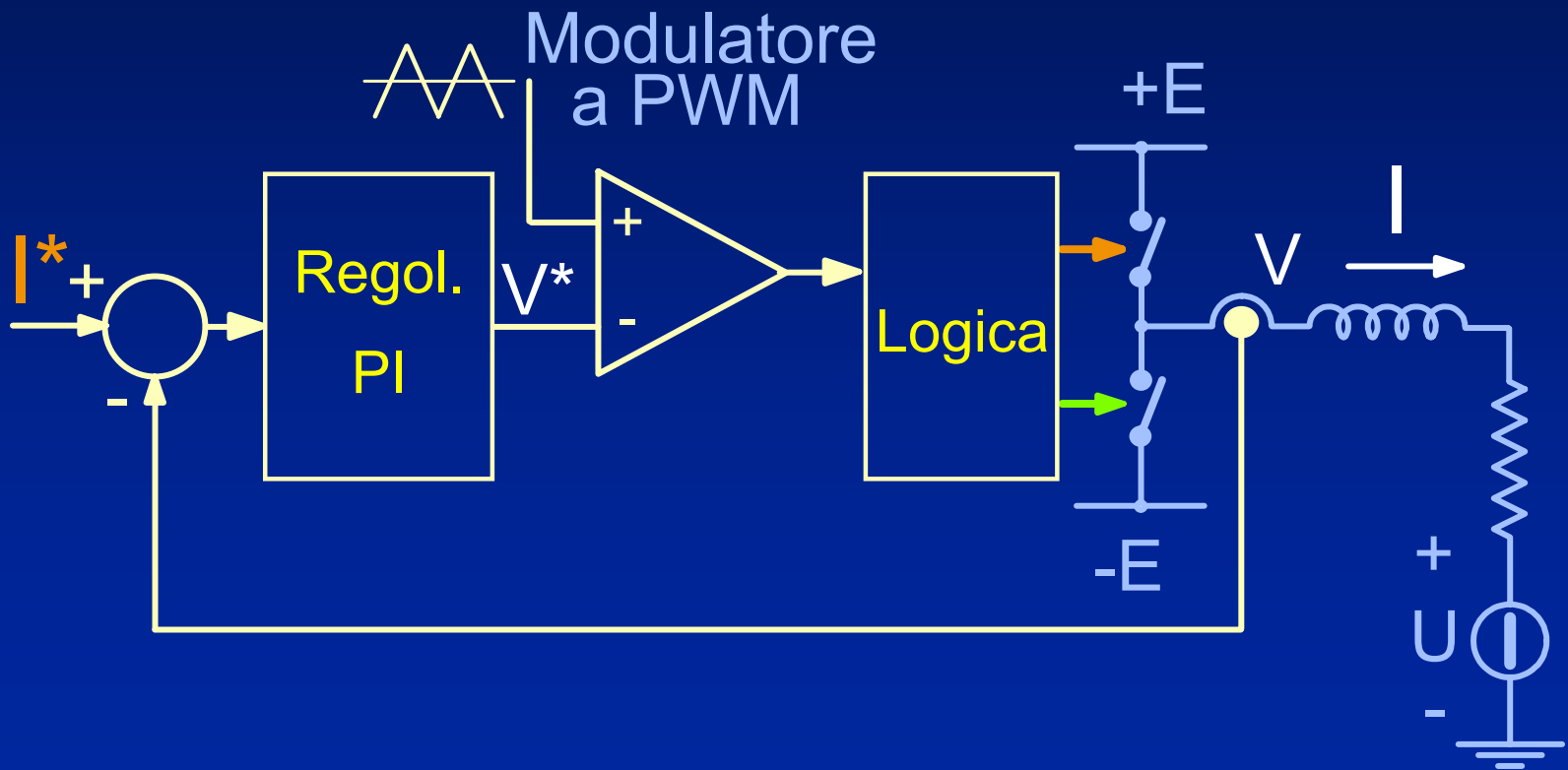
Invertitore di tensione controllato in corrente





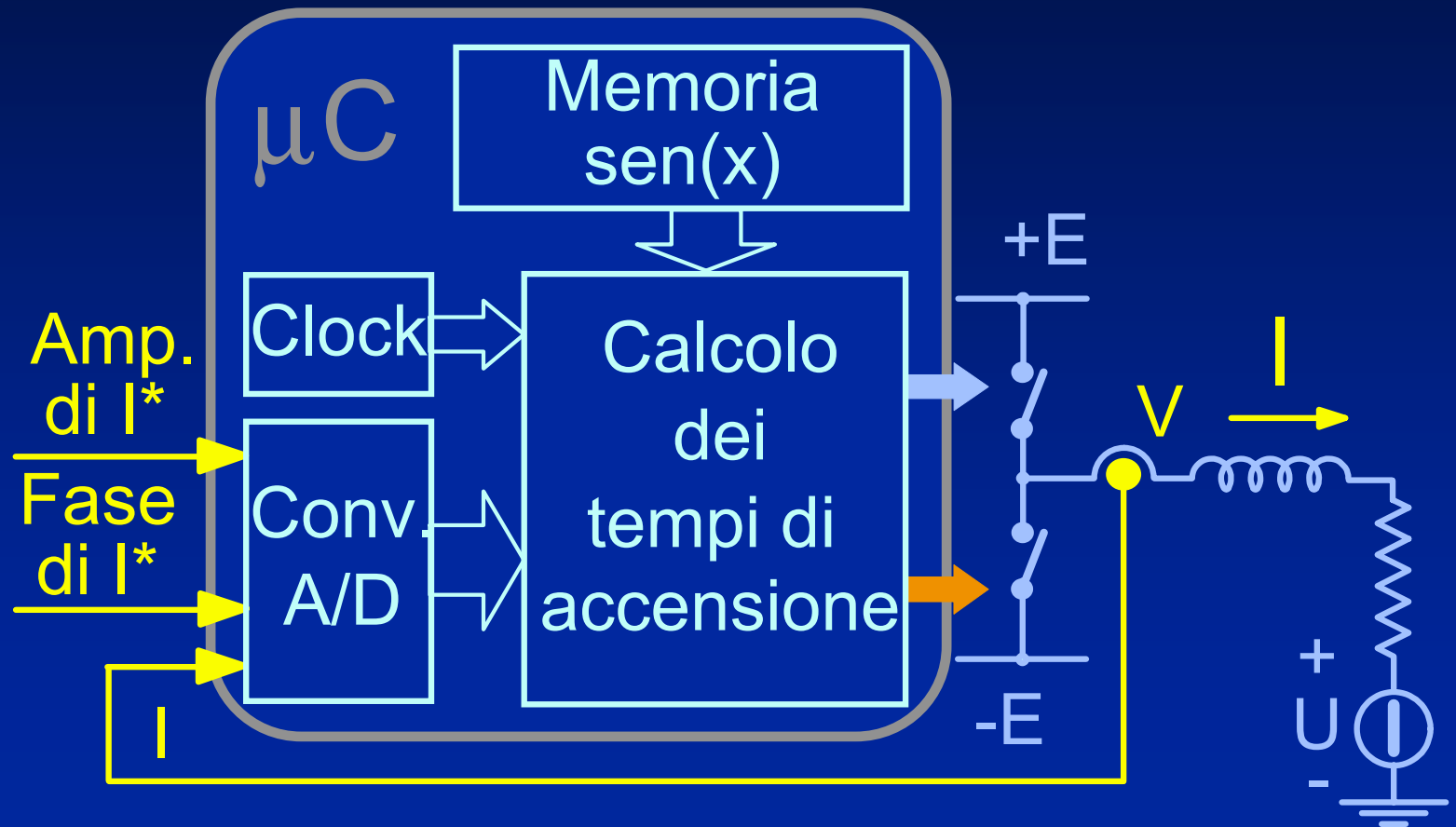
# Controllo monofase di corrente

## Controllo di corrente analogico

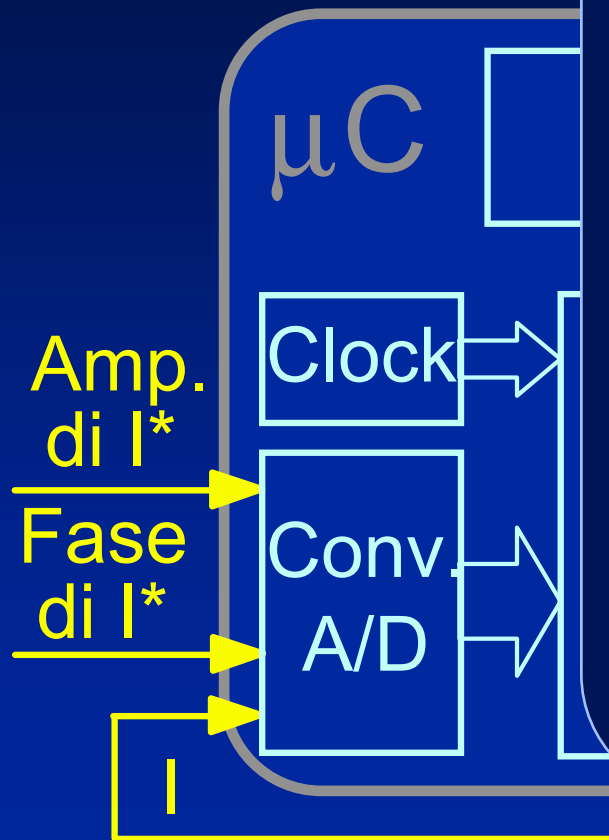


# Controllo monofase di corrente

## Realizzazione digitale a microcontrollore



# Controllo m Realizzazione



Il controllo digitale di corrente adotta componenti simili a quello di tensione. Esso utilizza tecniche di modulazione di diversa complessità, compresi metodi predittivi, a seconda delle prestazioni desiderate



# Controllo trifase di corrente

Il controllo trifase di corrente, con centro stella del carico isolato, ha il vincolo che la somma delle tre correnti istantanee di fase è nulla

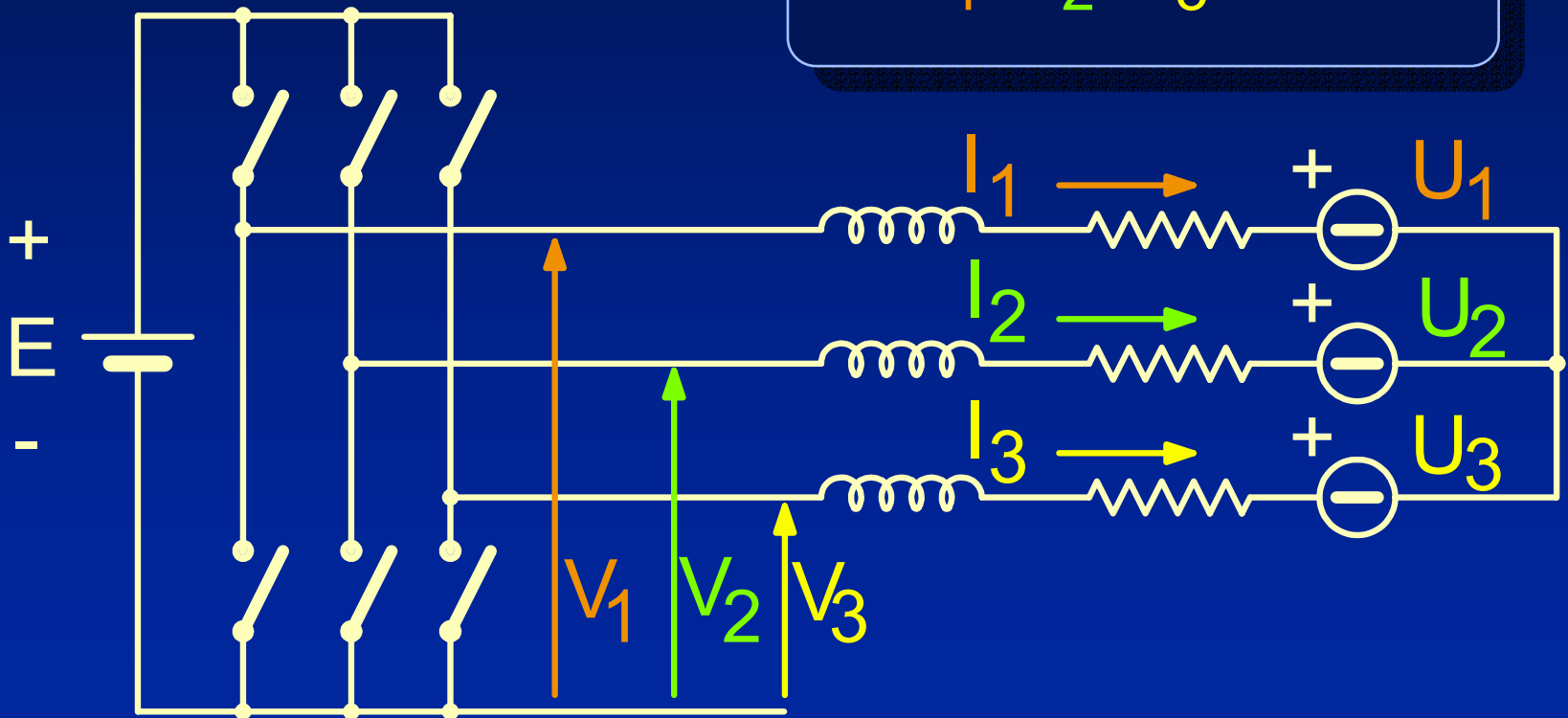
# Controllo trifase di corrente

Il controllo trifase di corrente, con centro stella del carico isolato, ha il vincolo che la somma delle tre correnti istantanee di fase è nulla

Tale vincolo produce interazioni tra le  
ondulazioni di corrente risultanti nelle tre fasi

# Controllo trifase di corrente

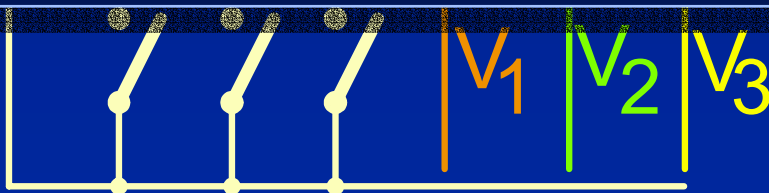
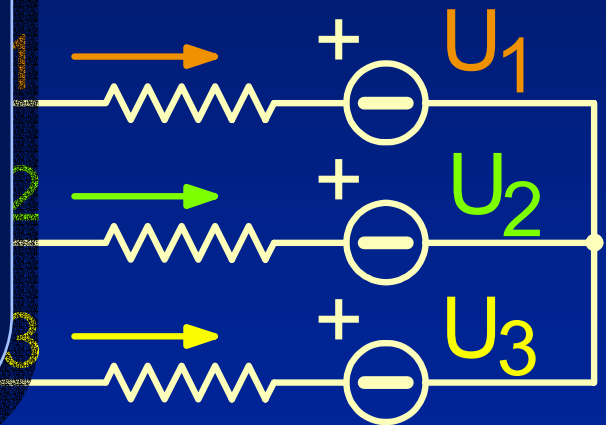
$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$



corrente

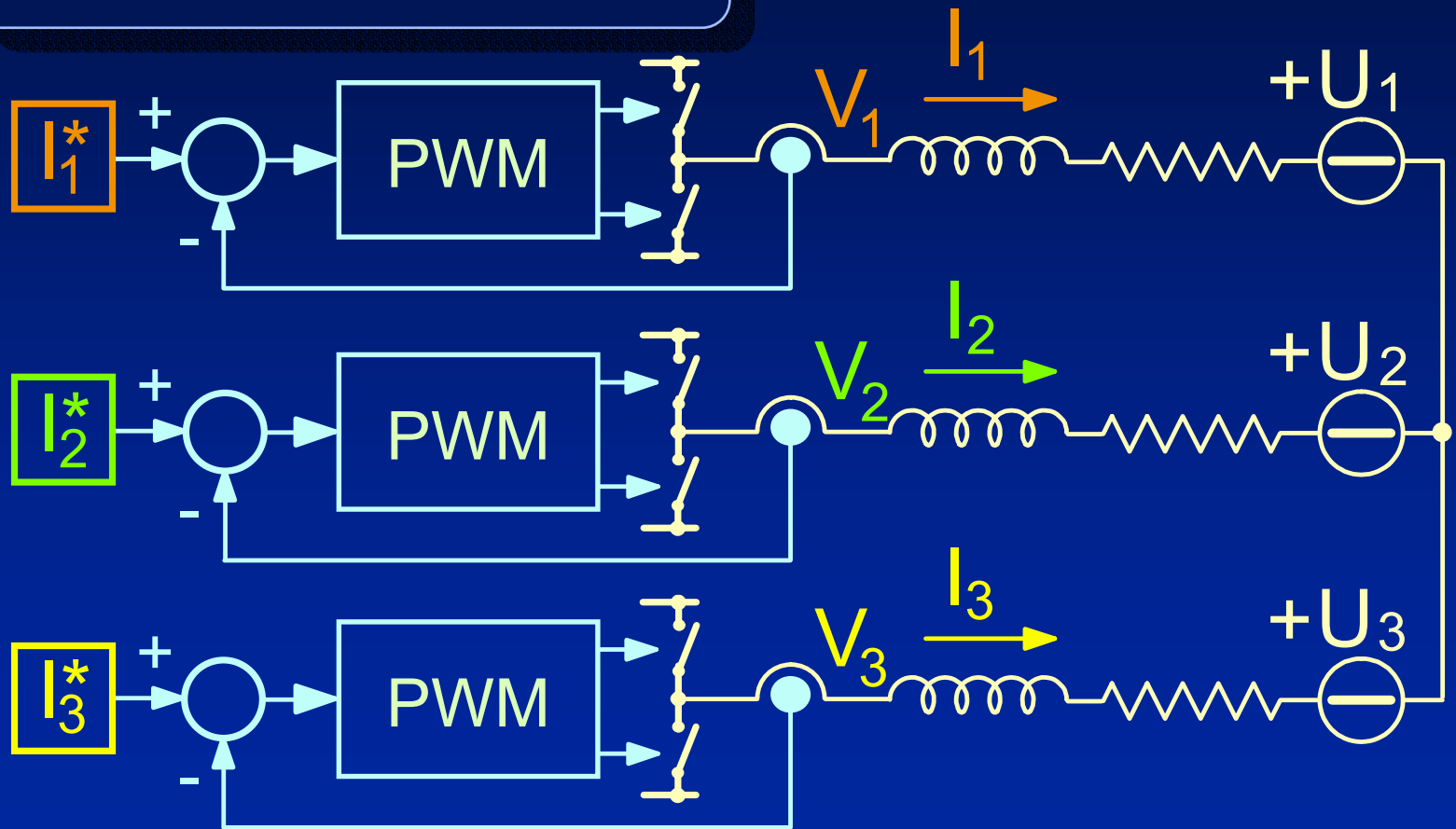
Il controllo di corrente si può realizzare, in linea di principio, controllando separatamente le tre fasi, con tre controllori monofasi, purchè le tre correnti di riferimento  $I_1^*$ ,  $I_2^*$  e  $I_3^*$  diano somma nulla

$$+I_2 + I_3 = 0$$



se di corrente

$$I_1^* + I_2^* + I_3^* = 0$$





$$I_1^* + I_2^* + I_3^* = 0 \quad \text{se di corrente}$$

Il controllo di corrente digitale predittivo genera il vettore di riferimento  $V^*$  per il periodo successivo, a partire dal vettore di errore della corrente  $\Delta I$

$$V_{n+1}^* = V_n^* + \Delta V^* = V_n^* + L \frac{\Delta I}{T}$$



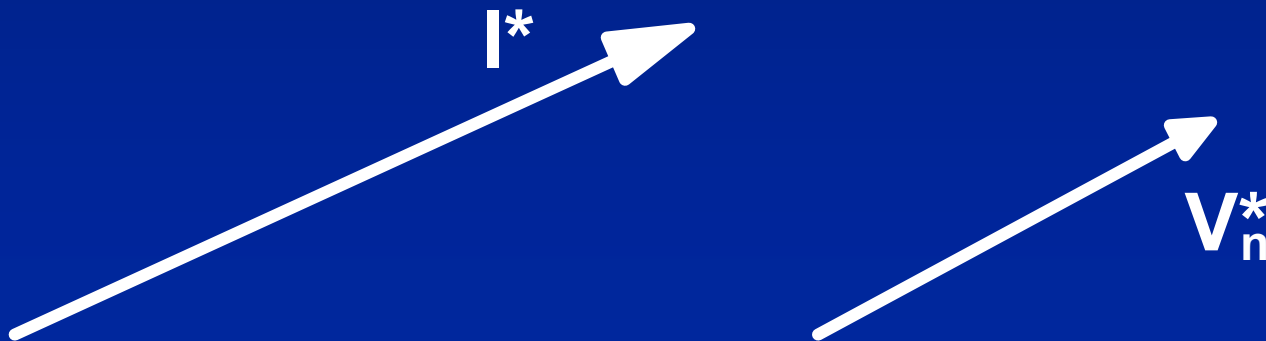
$$I_1^*$$

$$I_2^*$$

$$I_3^*$$

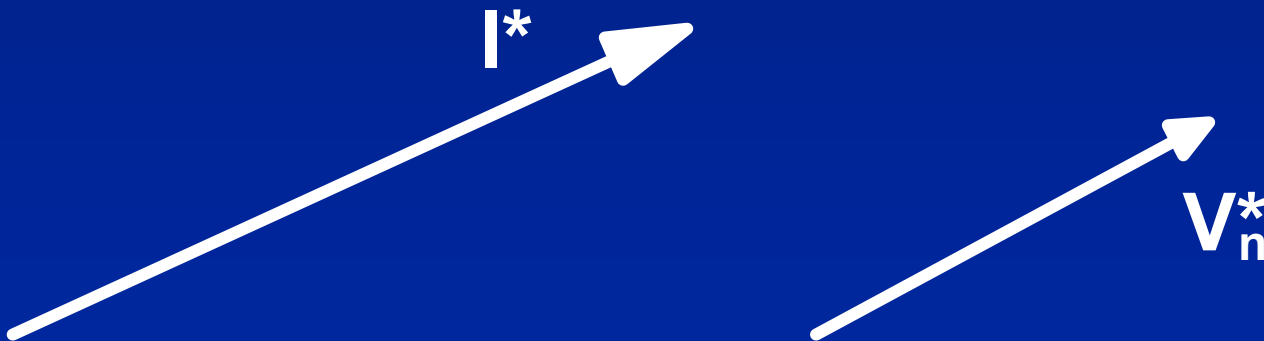
# Controllo predittivo trifase di corrente

Generazione del riferimento di tensione  $V^*$   
per il successivo periodo di modulazione



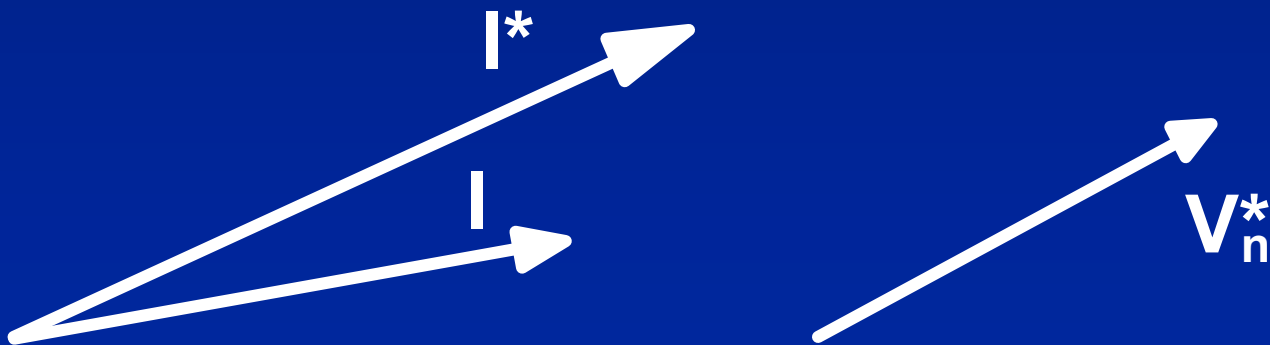
# Controllo predittivo trifase di corrente

L'assegnazione di  $I^*$  in forma vettoriale  
assicura che i riferimenti delle tre correnti  
di fase abbiano somma nulla



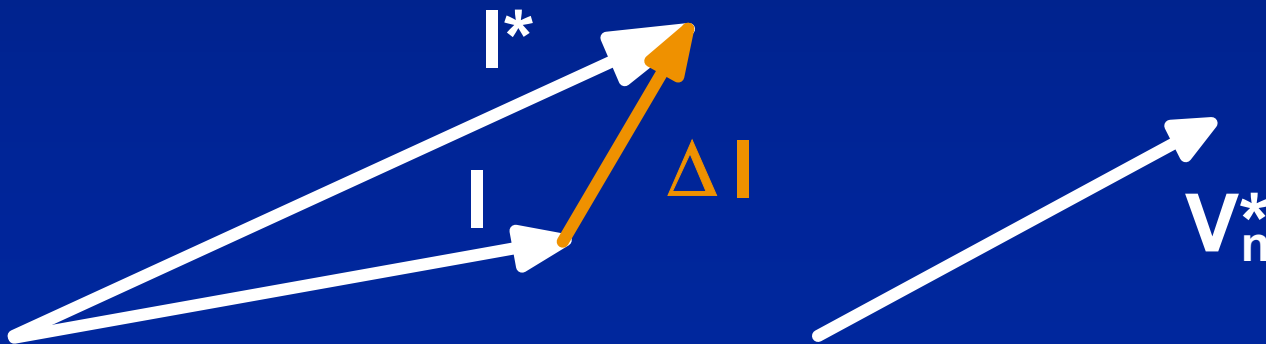
# Controllo predittivo trifase di corrente

Generazione del riferimento di tensione  $V^*$   
per il successivo periodo di modulazione



# Controllo predittivo trifase di corrente

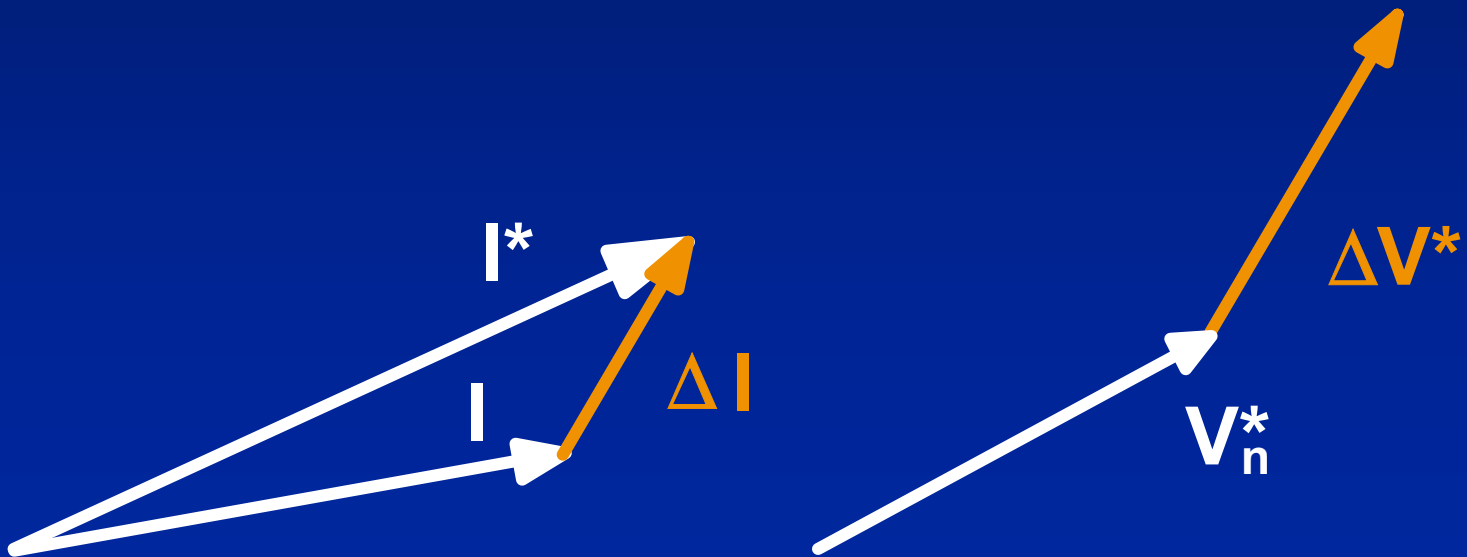
## Generazione del riferimento di tensione $V^*$ per il successivo periodo di modulazione



# Controllo predittivo trifase di corrente

## Generazione del riferimento di tensione $V^*$ per il successivo periodo di modulazione

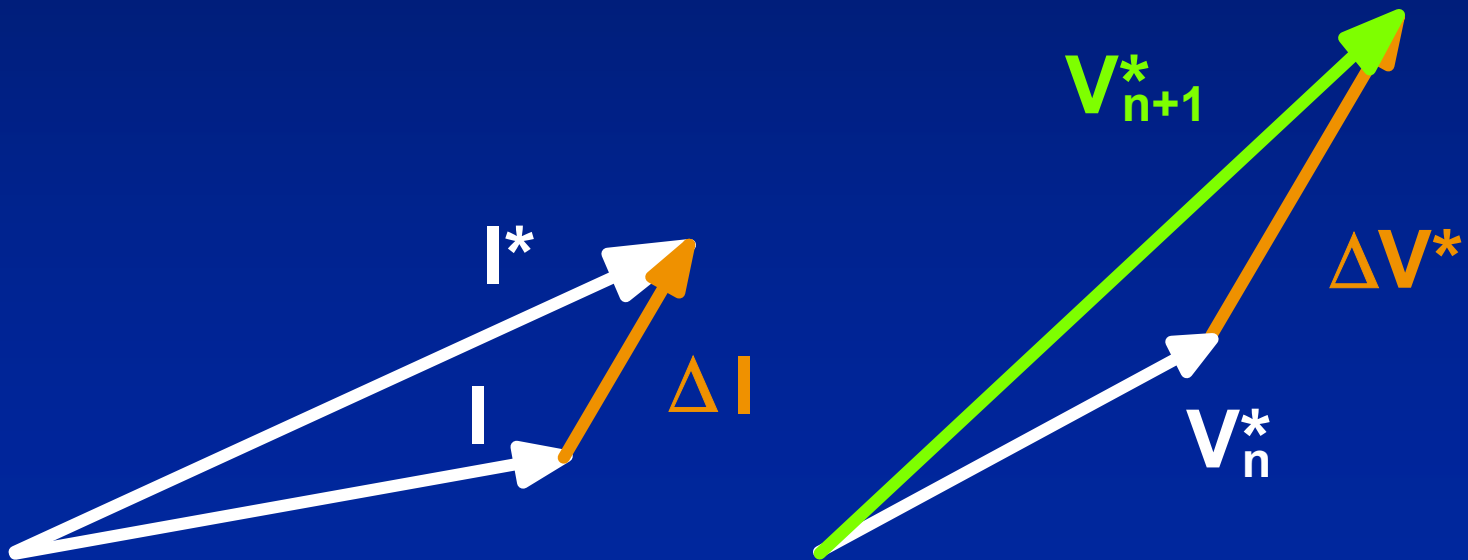
$$V_{n+1}^* = V_n^* + \Delta V^* = V_n^* + L \frac{\Delta I}{T}$$



# Controllo predittivo trifase di corrente

## Generazione del riferimento di tensione $V^*$ per il successivo periodo di modulazione

$$V_{n+1}^* = V_n^* + \Delta V^* = V_n^* + L \frac{\Delta I}{T}$$

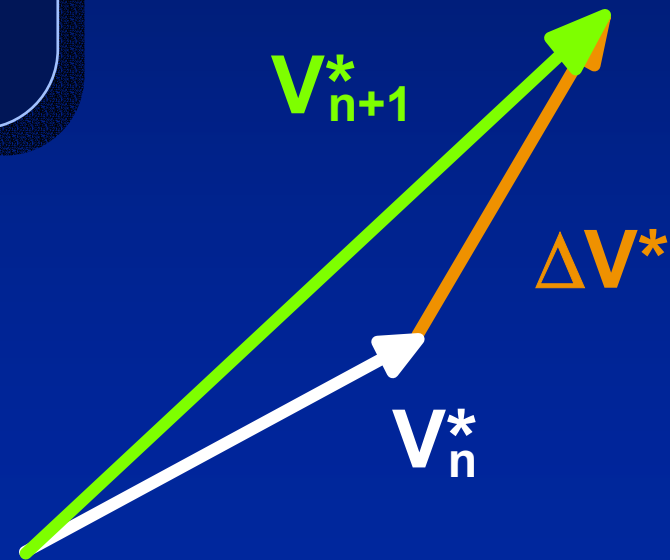
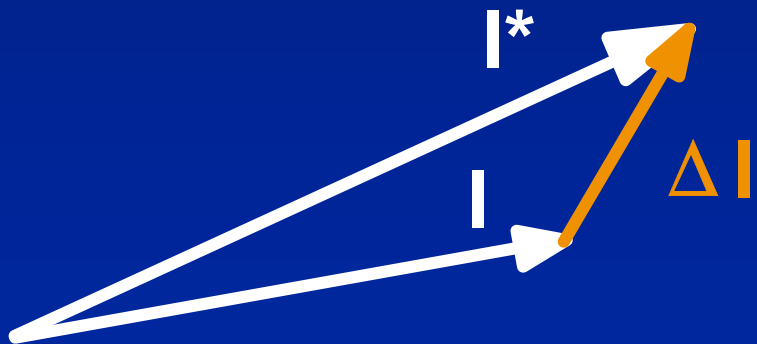


trifase di corrente

mento di tensione  $V^*$   
o di modulazione

$$= V_n^* + L \frac{\Delta I}{T}$$

Il vettore  $V_{n+1}^*$  così  
ottenuto costituisce il  
riferimento per un  
sistema di modulazione  
vettoriale di tensione





## Controllo di corrente più sofisticato

Sono stati sviluppati anche altri sistemi digitali di controllo di corrente più sofisticati che, a partire da una più precisa conoscenza dei parametri del sistema, consentono precisioni e velocità di risposta migliori

