

Convertitori AC/DC bidirezionali con interruttori statici

Altre denominazioni:

Raddrizzatori PWM

Active front-end

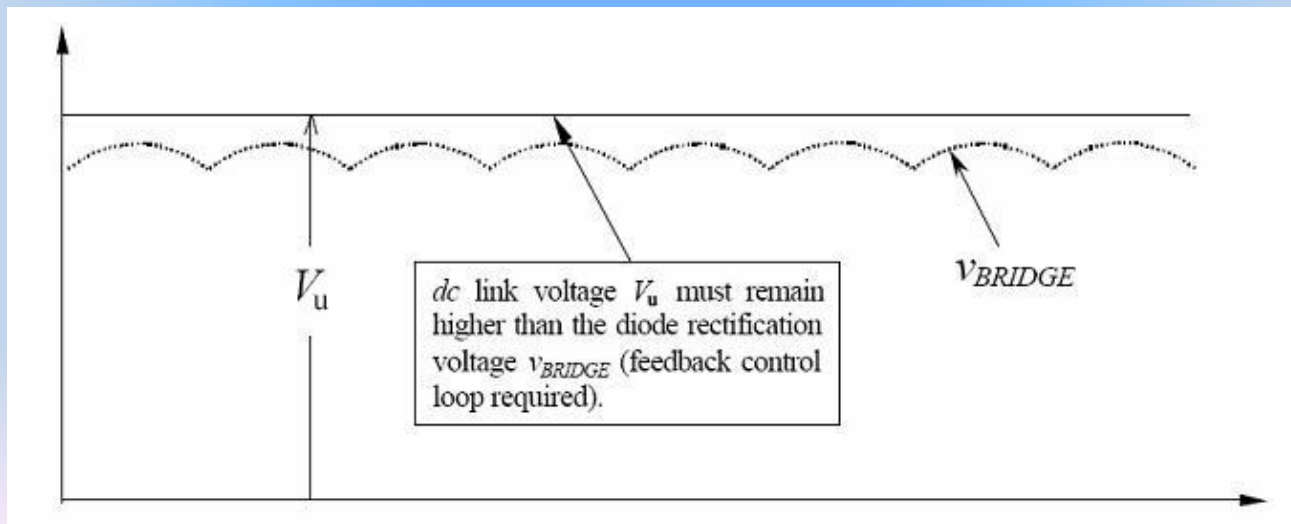
- Convertitore AC/DC monofase bidirezionale (ponte ad H)
- Convertitore AC/DC trifase bidirezionale

Convertitori bidirezionali con interruttori statici

Il convertitore c.a.-c.c. bidirezionale con interruttori statici, è basato sull'impiego di un convertitore bidirezionale a quattro quadranti; il valore medio della tensione continua di uscita deve essere superiore a quella che si sarebbe ottenuta raddrizzando la tensione di rete con un convertitore a Diodi cioè:

$$\bar{V}_u > \frac{2}{\pi} E_a \text{ nel caso di rete monofase;}$$

$$\bar{V}_u > \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_a \text{ nel caso di rete trifase.}$$



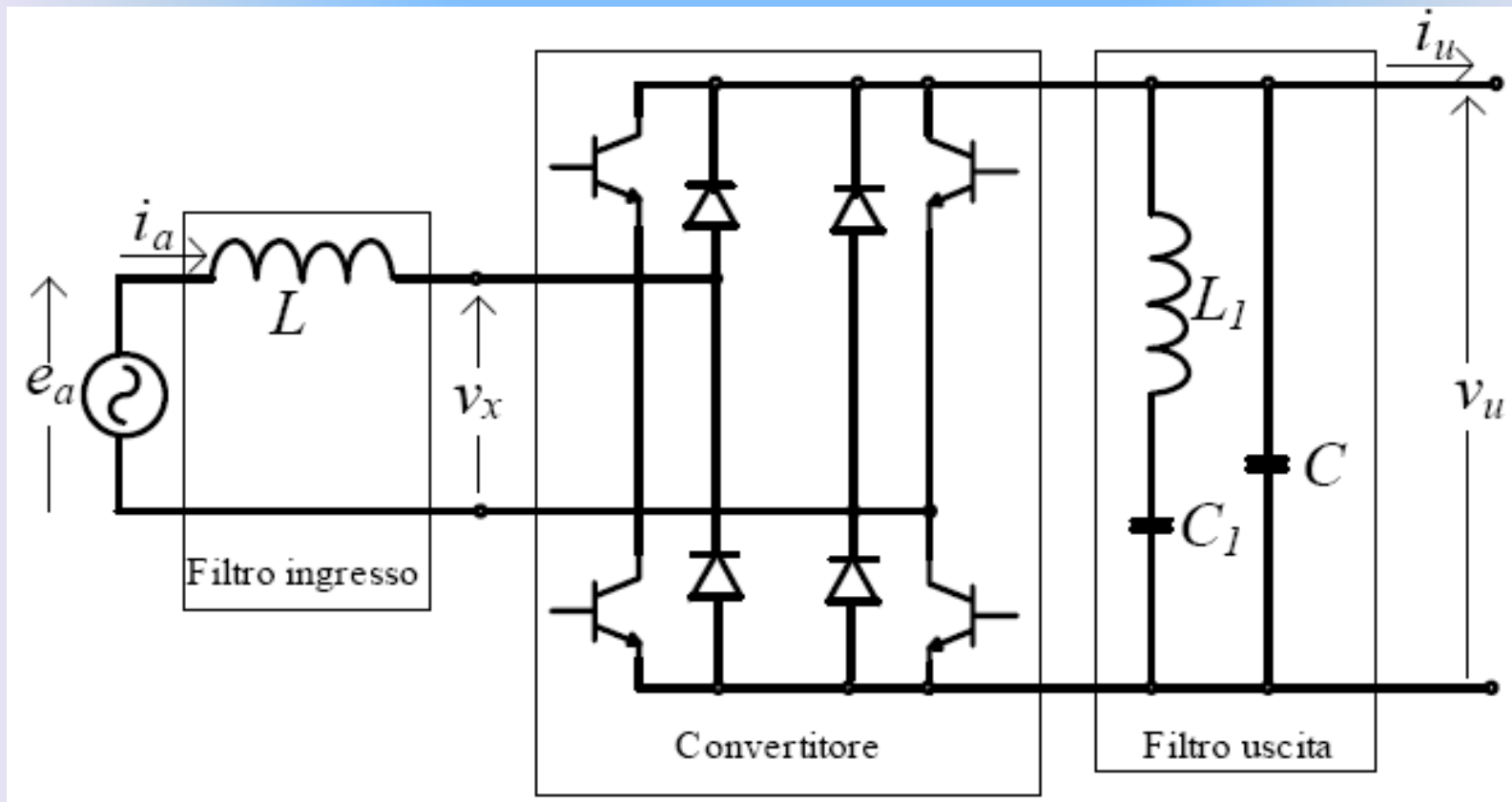
Convertitori bidirezionali con interruttori statici

Come sarà chiarito in seguito, questo convertitore trova un utile impiego come stadio di ingresso di un convertitore bistadio con circuito intermedio a tensione impressa, in quanto consente sia di prelevare energia dalla sorgente di alimentazione con elevati fattori di potenza sia di ottenere una tensione continua stabilizzata.

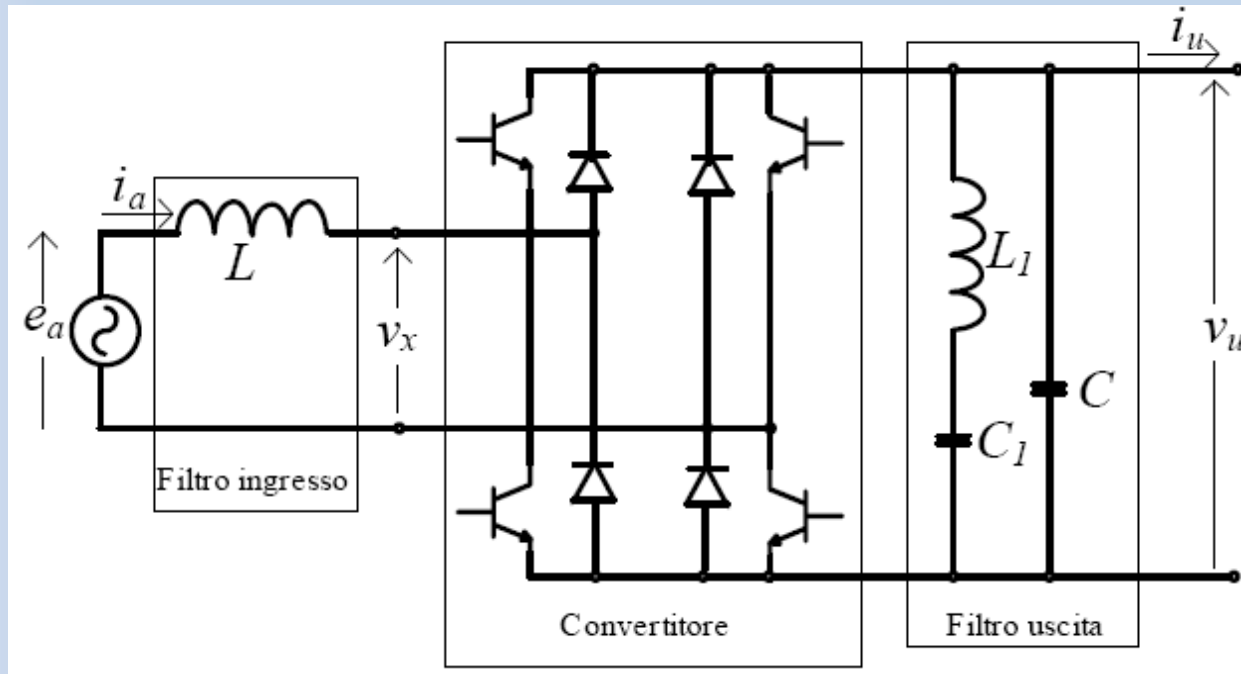
Non è, infine, da trascurare l'impiego che questo tipo di convertitore può avere come circuito di rifasamento (ad esempio per generare la potenza reattiva assorbita da un convertitore c.a.-c.c. a commutazione naturale) e/o come circuito atto a ricondizionare una rete sottoposta a carichi che producono un elevato contenuto armonico.

Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)

Da un punto di vista funzionale, il convertitore bidirezionale a quattro quadranti è composto da tre blocchi posti in cascata.



Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)



Il primo blocco è costituito da un filtro induttivo, che permette di ridurre le armoniche della corrente assorbita dalla rete di alimentazione, il secondo blocco effettua la conversione c.a. - c.c., il terzo blocco ha lo scopo di ridurre le armoniche della tensione di uscita.

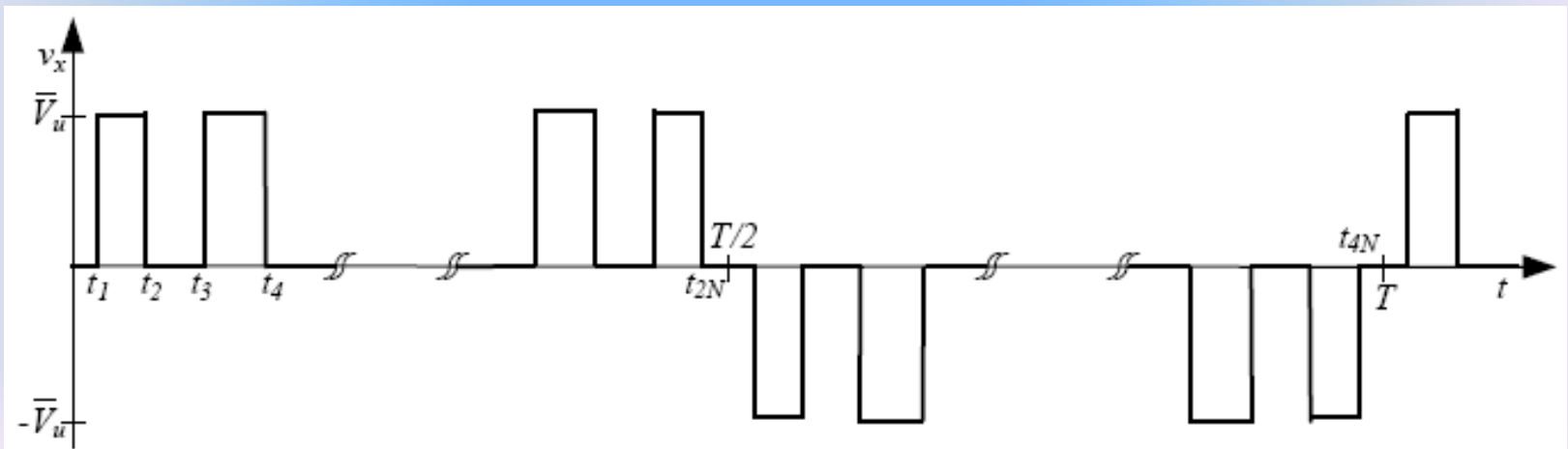
Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)

La scelta del filtro di ingresso (induttanza L) deve essere effettuata sulla base del contenuto armonico accettabile per la corrente assorbita dal convertitore. Per quanto concerne il filtro di uscita, occorre osservare che la corrente i_2 fornita dal convertitore risulta ripetitiva con un periodo pari alla metà di quello della rete di alimentazione e che la sua prima armonica (a frequenza $2f$) risulta in genere alquanto elevata. Pertanto il filtro risonante L_1C_1 deve essere accordato sulla frequenza $2f$ in modo da ridurre le ondulations della tensione di uscita dovute alla prima armonica della corrente, mentre la capacità C serve a ridurre le armoniche di tensione di ordine superiore.

Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)

L'analisi del funzionamento del convertitore verrà effettuata supponendo che il filtro di uscita sia dimensionato in maniera tale da poter trascurare le armoniche presenti sulla tensione di uscita.

In tale ipotesi, se il convertitore viene fatto funzionare in sincronismo con la rete di alimentazione e con una modulazione a tre livelli, la tensione v_x ai morsetti di ingresso del convertitore assume l'andamento illustrato in figura.



Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)

La prima armonica della tensione v_x è isofrequenziale con la tensione di alimentazione ed è caratterizzata da una ampiezza V_{x1} pari a:

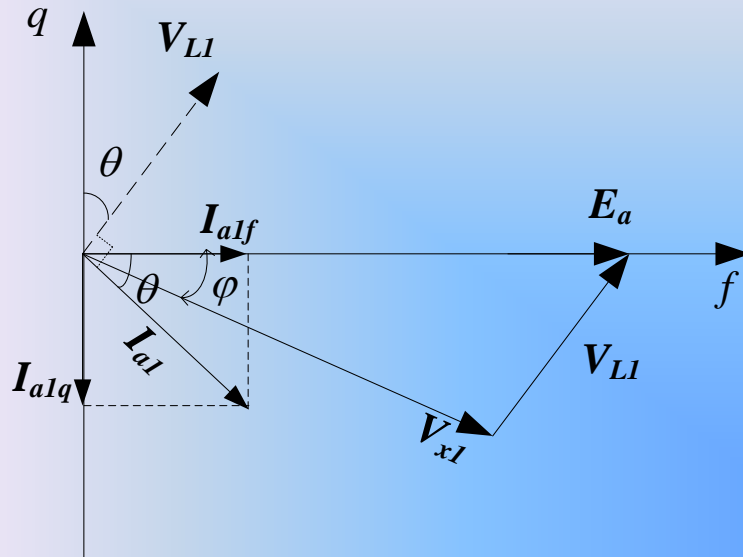
$$V_{x1} = \frac{4k}{\pi} \bar{V}_u$$

in cui k rappresenta il rapporto di modulazione (minore di 1)

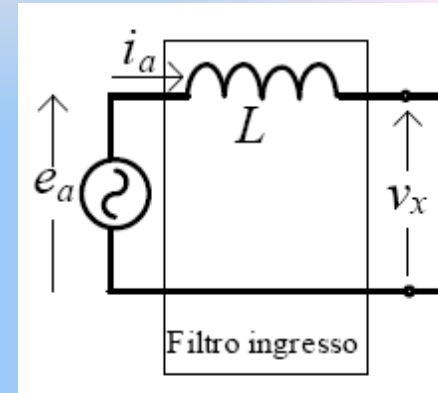
$$k = \sum_{i=1}^N \left[(-1)^{i-1} \cos(\omega t_i) \right]$$

essendo N il numero di commutazioni che si verificano in ogni quarto di periodo.

Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)



φ indica la fase della prima armonica della tensione v_x rispetto alla e_a ;
 θ è l'angolo di sfasamento della prima armonica di corrente rispetto alla e_a .



Considerando le sole componenti a frequenza fondamentale e scegliendo il fasore E_a in fase con l'asse f :

$$E_a - V_{L1} - V_{x1} = 0$$

$$E_a - V_{L1} \sin \theta - V_{x1} \cos \varphi = 0 \quad \text{Proiezione sull'asse } f$$

$$-V_{L1} \cos \theta + V_{x1} \sin \varphi = 0 \quad \text{Proiezione sull'asse } q$$

Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)

Pertanto le ampiezze I_f e I_q delle due componenti della prima armonica della corrente assorbita dalla rete di alimentazione, rispettivamente in fase ed in quadratura con la tensione di alimentazione, risultano pari a:

$$I_f = I_{a1} \cos \theta = \frac{V_{L1}}{\omega L} \cos \theta = \frac{V_{x1} \sin \varphi}{\omega L}$$

$$I_q = -I_{a1} \sin \theta = -\frac{V_{L1}}{\omega L} \sin \theta = \frac{V_{x1} \cos \varphi - E_a}{\omega L}$$

essendo

$$V_{x1} = \frac{4k}{\pi} \bar{V}_u$$

Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)

Eguagliando il valore della potenza fornita al carico

$$P_u = \bar{V}_u \bar{I}_u = \frac{\bar{V}_u^2}{R}$$

essendo R la resistenza equivalente del carico, a quello della potenza assorbita:

$$P_a = \frac{E_a I_f}{2}$$

si ottiene una seconda espressione di I_f

$$I_f = \frac{2\bar{V}_u \bar{I}_u}{E_a} = \frac{2\bar{V}_u^2}{R E_a}$$

Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)

Eguagliando le due espressioni di I_f

$$I_f = \frac{4\bar{V}_u k \sin(\varphi)}{\pi\omega L}$$

$$I_f = \frac{2\bar{V}_u \bar{I}_u}{E_a} = \frac{2\bar{V}_u^2}{RE_a}$$

si ricava la seguente espressione della tensione di uscita:

$$\bar{V}_u = \frac{2E_a R k \sin \varphi}{\pi\omega L}$$

E', infine, possibile, ottenere la seguente espressione della potenza reattiva di prima armonica:

$$Q = \frac{E_a I_q}{2} = \frac{4E_a \bar{V}_u k \cos \frac{\varphi}{\pi} - E_a^2}{2\omega L}.$$

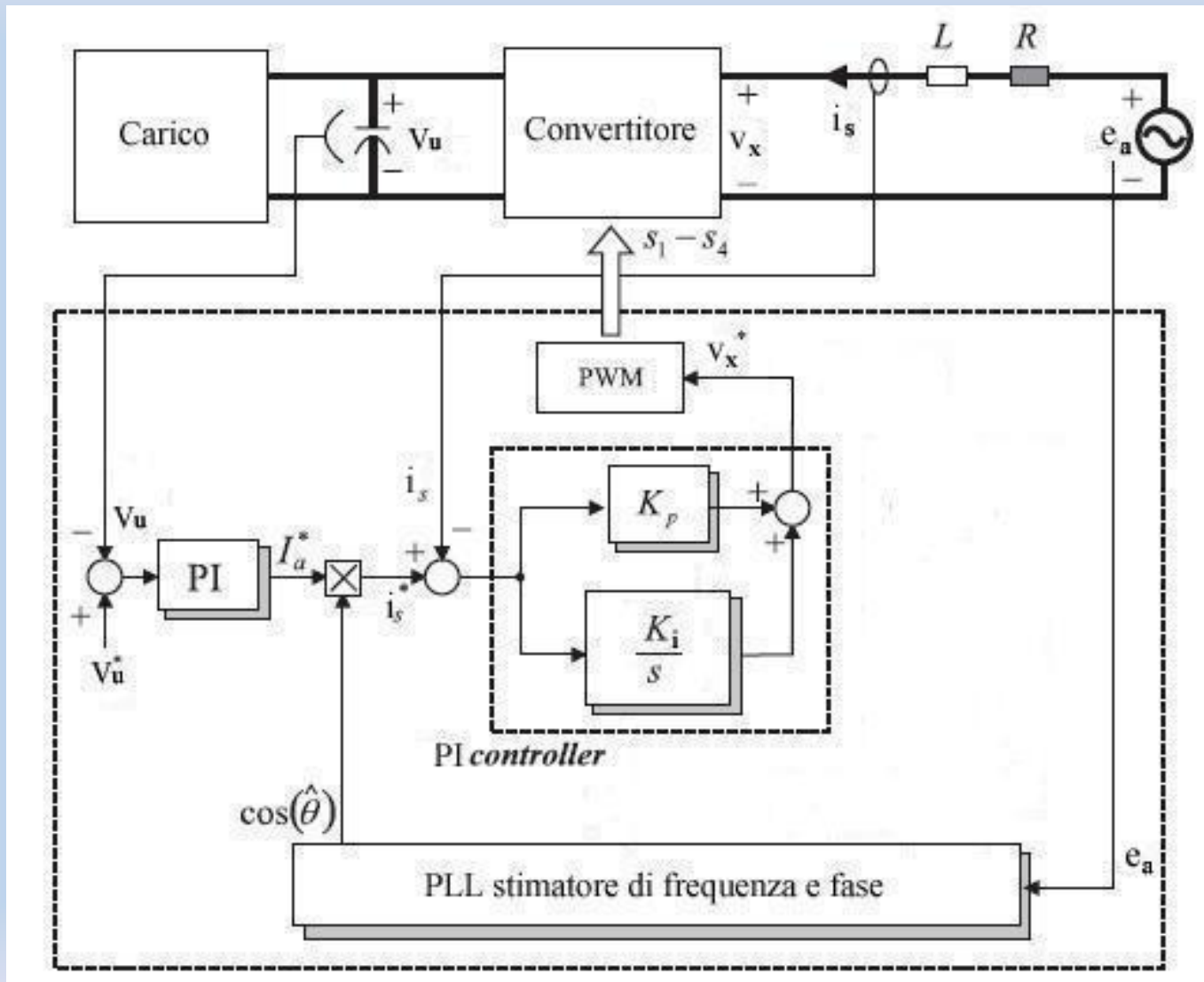
Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)

Il controllo del convertitore può essere effettuato scegliendo i valori di φ e di k imponendo, nelle precedenti equazioni, il valore medio di tensione desiderato e $Q=0$.

Attualmente si preferisce, invece, impiegare un controllo a catena chiusa della corrente, scegliendo per quest'ultima un riferimento in fase con la tensione di alimentazione e di ampiezza tale da fornire il valore desiderato della tensione di uscita.

Un controllo a catena chiusa anche della tensione in uscita è necessario per assicurare la regolazione della tensione sul carico. I due anelli di controllo sono strutturati in cascata.

Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)



Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)

CONTROLLO DI TENSIONE

L'anello di controllo della tensione continua di uscita è realizzato con un regolatore proporzionale integrale che assicura un errore a regime nullo.

L'uscita del regolatore PI rappresenta il riferimento di ampiezza della corrente di ingresso al convertitore. Questo valore viene moltiplicato per un template sinusoidale di ampiezza unitaria isofrequenziale ed in fase con la tensione di alimentazione (per assicurare fattore di potenza unitario) ricostruito a partire dalla stima di frequenza e fase del PLL, ottenendo il riferimento per l'anello di corrente:

$$I_s^* = I_a^* \cos(\hat{\omega}t + \hat{\theta})$$

Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)

CONTROLLO DI CORRENTE

Anche l'anello di corrente usa in questo caso un regolatore proporzionale integrale. L'uscita del regolatore rappresenta la tensione di riferimento per il modulatore PWM.

E' da notare che il riferimento di corrente e', a regime, un segnale AC sinusoidale alla frequenza di alimentazione (50Hz) per cui la larghezza di banda del controllo di corrente deve essere sufficientemente ampia da assicurare l'inseguimento del riferimento.

In pratica pero' ci sono da considerare gli effetti del campionamento e i ritardi del controllo e del PWM. Inoltre guadagni troppo elevati possono provocare instabilita`. Per cui anche un progetto con una ampia larghezza di banda provoca spesso sfasamenti ed attenuazioni e dunque un inseguimento imperfetto.

Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)

PROGETTO DELL'ANELLO DI CORRENTE

Data la struttura del controllo in cascata, il loop di corrente deve essere più veloce del loop di tensione. È buona pratica assicurare che la larghezza di banda del controllo di corrente sia almeno 10 volte quella del controllo di tensione.

Il plant del loop di corrente può essere derivato applicando la legge di Kirchoff delle tensioni al circuito di ingresso:

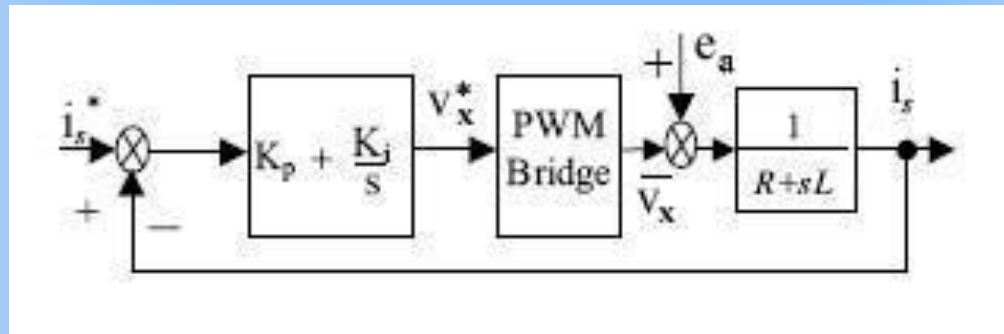
$$L \frac{di_s}{dt} + Ri_s = e_a - v_x$$

Quindi la corrente di ingresso può essere regolata controllando la tensione PWM all'uscita del convertitore.

Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)

PROGETTO DELL'ANELLO DI CORRENTE

Lo schema semplificato dell'anello di corrente ai fini del progetto è:



Trascurando i ritardi e le non-linearità caratteristiche del convertitore, in una situazione ideale a regime la tensione di Uscita V_x eguagliera il riferimento, per cui il convertitore può essere considerato come un blocco a guadagno unitario.

In una modellazione più accurata, se i ritardi introdotti dal convertitore sono stimati in un tempo T , il blocco relativo al convertitore può essere rappresentato:

$$e^{-sT}$$

Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)

PROGETTO DELL'ANELLO DI CORRENTE

I parametri del PI possono essere calcolati usando i metodi classici:

- Trial and error
- Zigler Nichols
- Luogo delle radici
- Diagramma di Bode (risposta in frequenza)
-

L'uso di un regolatore PI non è vincolante. Qualunque tipo e ordine di controllore può essere utilizzato, sempre tenendo a mente che un errore a regime nullo non potrà in questo caso mai essere raggiunto, ma lo si può solo cercare di ridurre elevando, per quanto possibile, la larghezza di banda dell'anello.

Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)

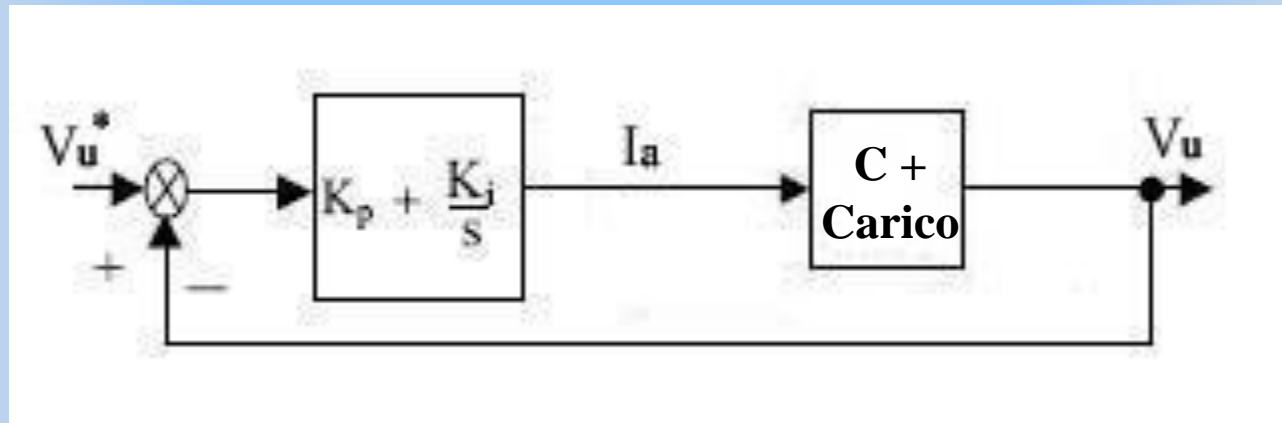
PROGETTO DELL'ANELLO DI TENSIONE

Nel determinare il plant per il progetto del controllo di tensione e` da considerare che essendo la dinamica dell'anello di corrente molto piu` veloce, lo si puo` trascurare, dato che i suoi effetti transitori sulla tensione si esauriscono molto velocemente. Per cui si puo` supporre che in prima approssimazione la corrente (dc) nel circuito di uscita insegue a regime il riferimento I_a^* all'uscita del PI di tensione.

Considerando inoltre per semplicita` che il filtro LC di uscita sia assente, il plant dell'anello di tensione e` dato solo dal condensatore piu` il carico. Per cui, lo schema semplificato da usare per il progetto risulta:

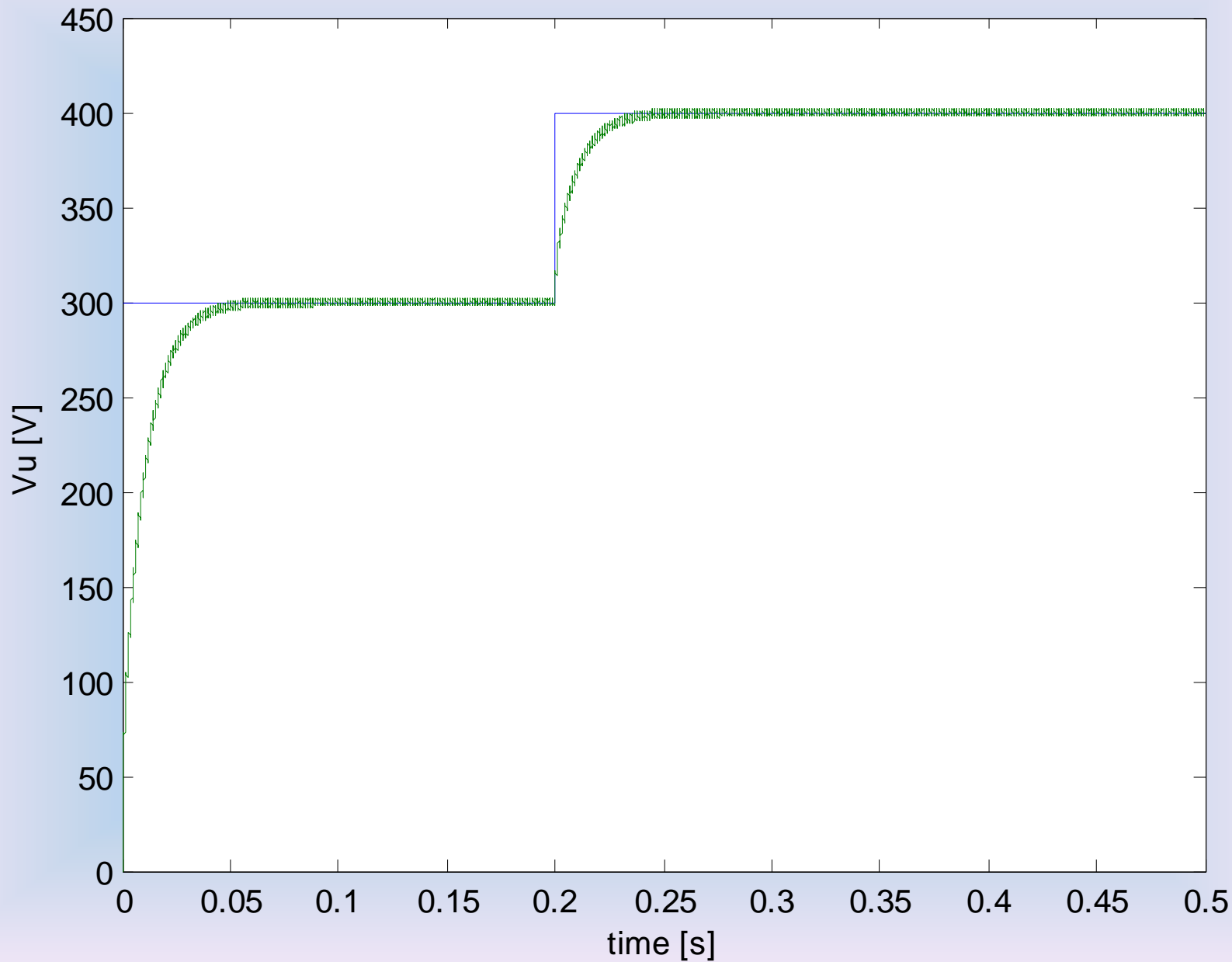
Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)

PROGETTO DELL'ANELLO DI TENSIONE

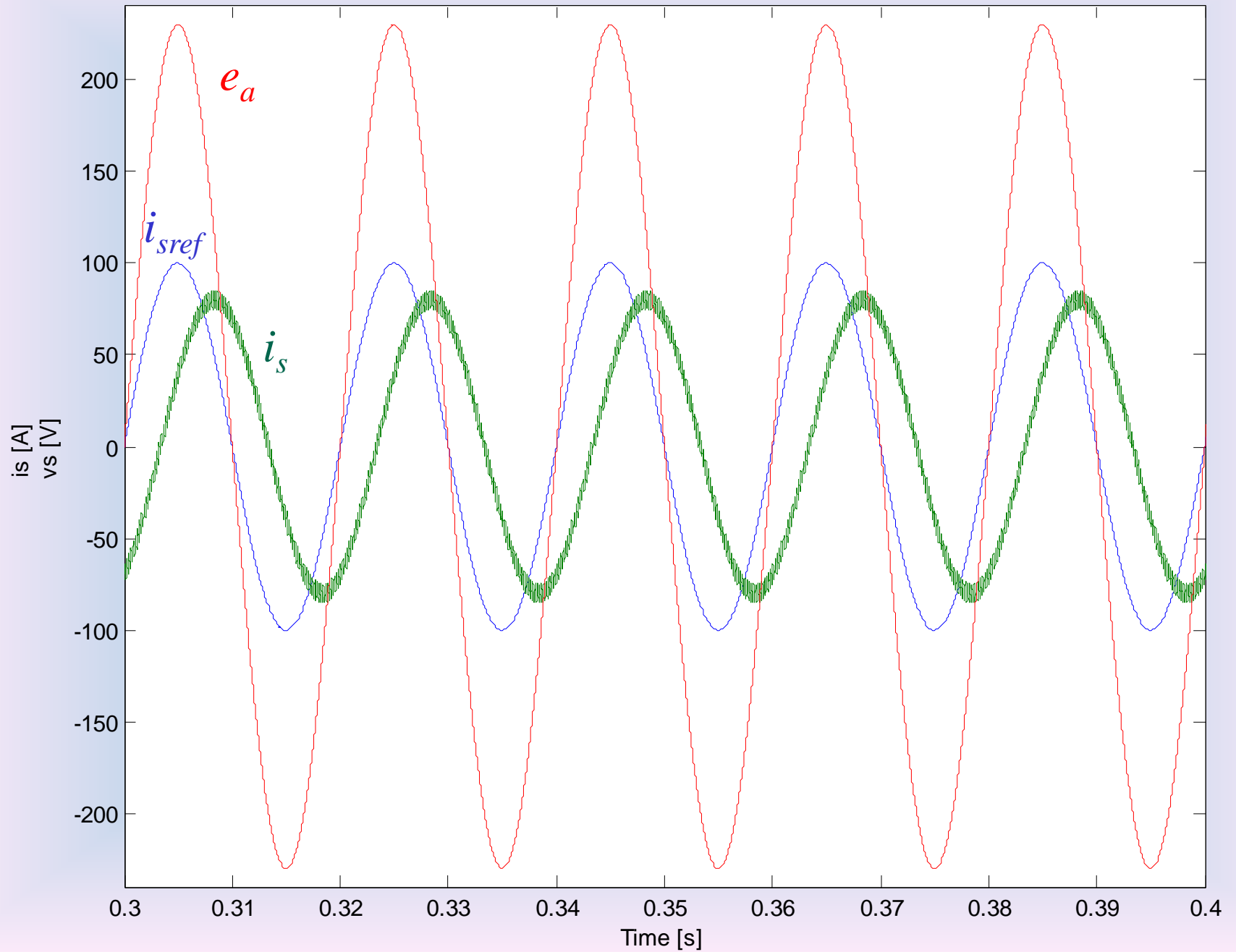


In questo caso, essendo il controllo in dc, l'uso di un regolatore proporzionale-integrale o di un'altra struttura contenente un integratore risulta necessaria per assicurare che l'errore a regime sulla tensione regolata di uscita sia nullo

Transitorio di tensione lato DC



Forme d'onda lato AC



Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)

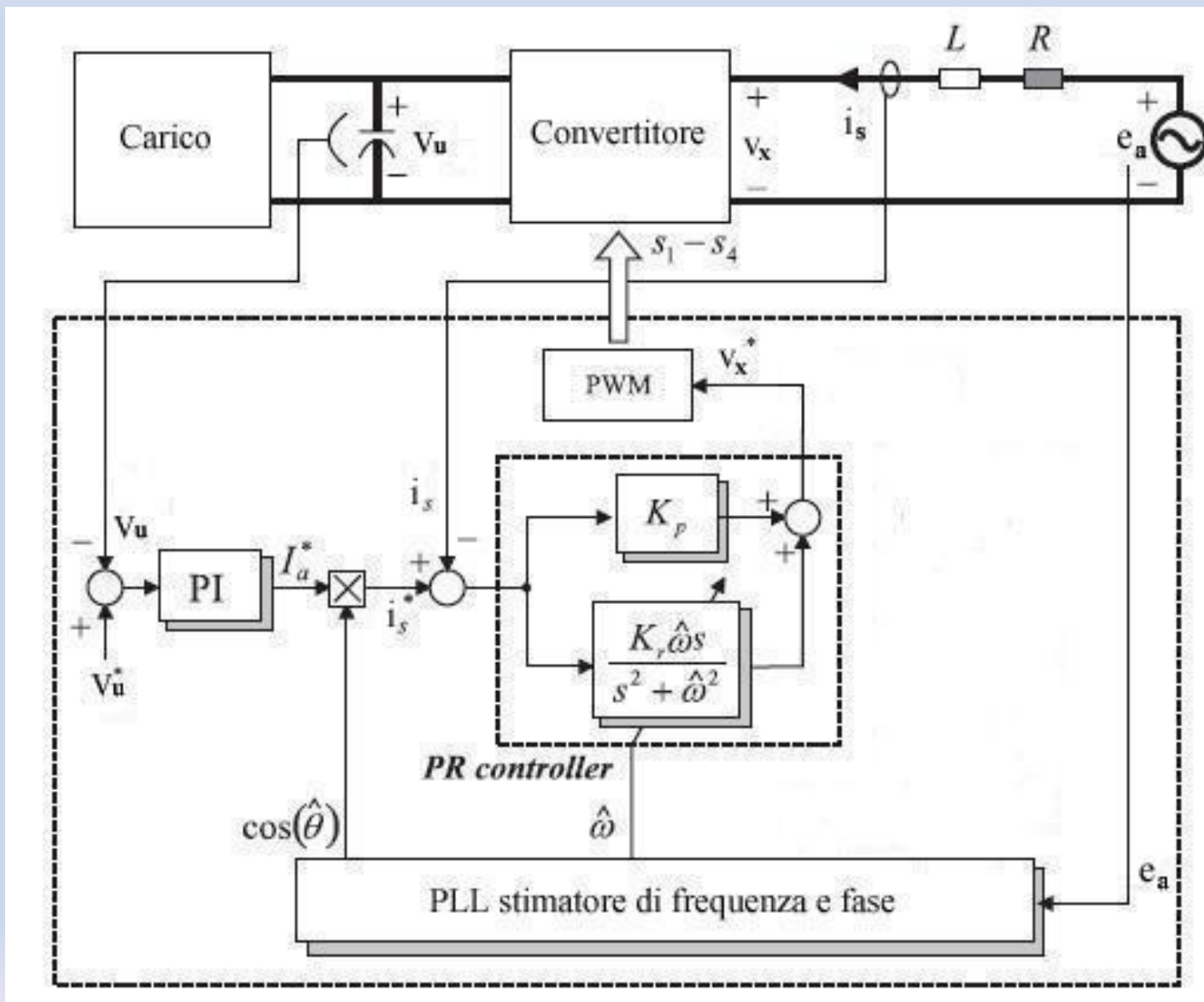
CONTROLLO DI CORRENTE CON COMPENSATORI RISONANTI

Per un accurato controllo alla frequenza della fondamentale di alimentazione con cancellazione di tutte le altre frequenze ed ottenere un errore a regime nullo o comunque molto basso emulando il comportamento di un integratore per grandezze continue si puo` usare un controllore Proporzionale risonante.

$$C_{p+res}(s) = K_p + \frac{K_r \omega s}{s^2 + \omega^2}$$

K_p e` il guadagno proporzionale, K_r e` il guadagno del termine risonante e ω e` la pulsazione di risonanza che in questo caso ($f=50\text{Hz}$) e` $\omega=2\pi 50$.

Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)



Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)

Con questa struttura il guadagno alla frequenza di risonanza è infinito e teoricamente l'errore a regime è nullo per segnali a quella frequenza.

Un guadagno troppo alto può causare problemi al controllo riducendo il margine di fase del sistema e la sua robustezza.

Tuttavia il guadagno del termine risonante deve essere sufficientemente alto da ottenere un errore a regime nullo o quasi nullo.

Si introduce il Fattore di Qualità`

$$Q = \frac{f}{f_H - f_L}$$

f_H and f_L sono le frequenze superiore ed inferiore a cui il guadagno si è ridotto a 0.707 del valore alla frequenza di risonanza.

Convertitore bidirezionale monofase (ponte ad H)

$$C(s) = K_p + \frac{K_r \omega s}{s^2 + (\omega / Q)s + \omega^2}$$

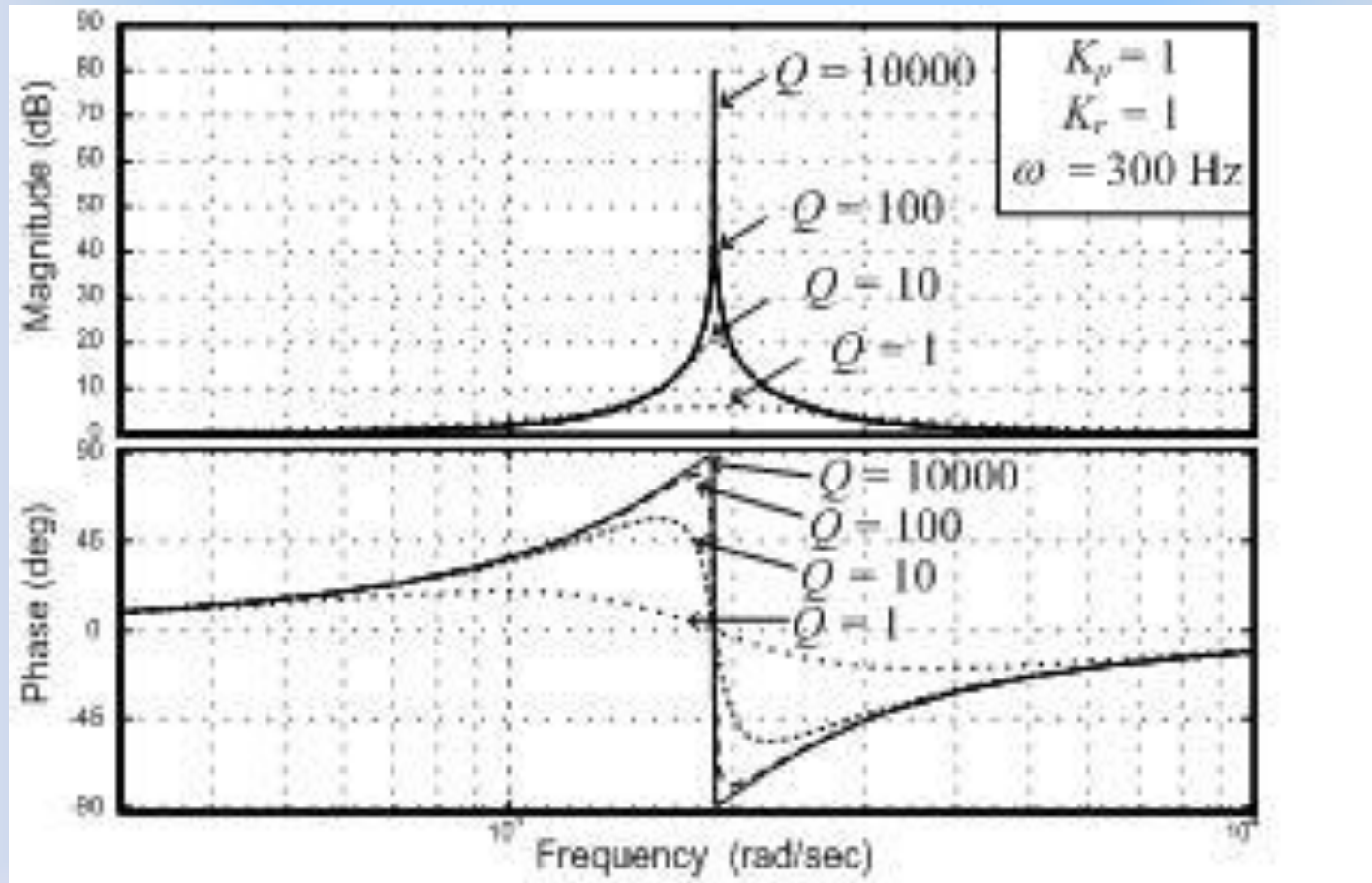
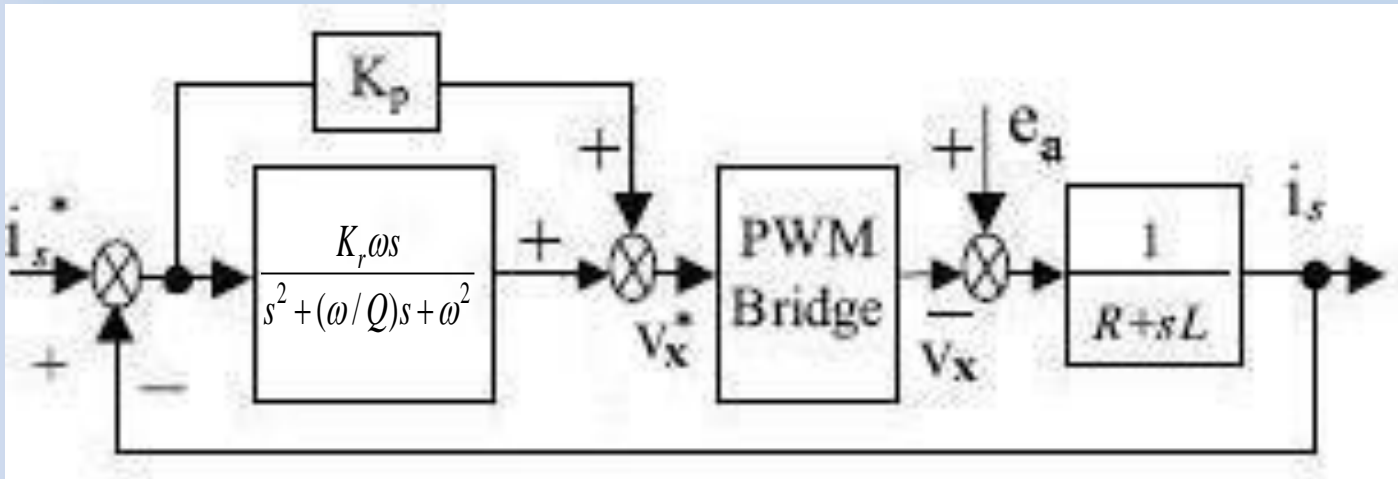


Diagramma di Bode di $C(s)$ al variare di Q

Convertitore bidirezionale con interruttori statici



Considerando il convertitore come un guadagno unitario ideale la funzione di trasferimento del sistema in anello chiuso risulta:

$$G(s) = \frac{I_s}{I_s^*} = \frac{- \left[\frac{K_r \omega s}{s^2 + (\omega/Q)s + \omega^2} + K_p \right] \frac{1}{R + sL}}{1 - \left[\frac{K_r \omega s}{s^2 + (\omega/Q)s + \omega^2} + K_p \right] \frac{1}{R + sL}}$$

Convertitore bidirezionale con interruttori statici

Elaborando:

$$G(s) = \frac{I_s}{I_s^*} = \frac{K_r \omega s + K_p \left[s^2 + (\omega / Q)s + \omega^2 \right]}{K_r \omega s + K_p \left[s^2 + (\omega / Q)s + \omega^2 \right] - \left[s^2 + (\omega / Q)s + \omega^2 \right] (R + sL)}$$

Nel caso ideale quando $Q \rightarrow \infty$ si ha:

$$G(s) = \frac{I_s}{I_s^*} = \frac{K_r \omega s + K_p \left[s^2 + \omega^2 \right]}{K_r \omega s + K_p \left[s^2 + \omega^2 \right] - \left[s^2 + \omega^2 \right] (R + sL)}$$

Se il segnale di riferimento è alla frequenza di risonanza, $s = -j\omega$:

$$G(s) = \frac{I_s}{I_s^*} = \frac{K_r \omega s}{K_r \omega s} = 1$$

A regime l'uscita seguirà quindi il riferimento con errore nullo.

Convertitore bidirezionale con interruttori statici

Come si comporta il controllore risonante rispetto al disturbo rappresentato dalla tensione di alimentazione?

$$G_D(s) = \frac{I_s}{E_a} = \frac{\frac{1}{R + sL}}{1 - \left[\frac{K_r \omega s}{s^2 + (\omega / Q)s + \omega^2} + K_p \right] \frac{1}{R + sL}}$$

Per grandezze alla frequenza di risonanza ($s = -j\omega$) e nel caso ideale ($Q \rightarrow \infty$):

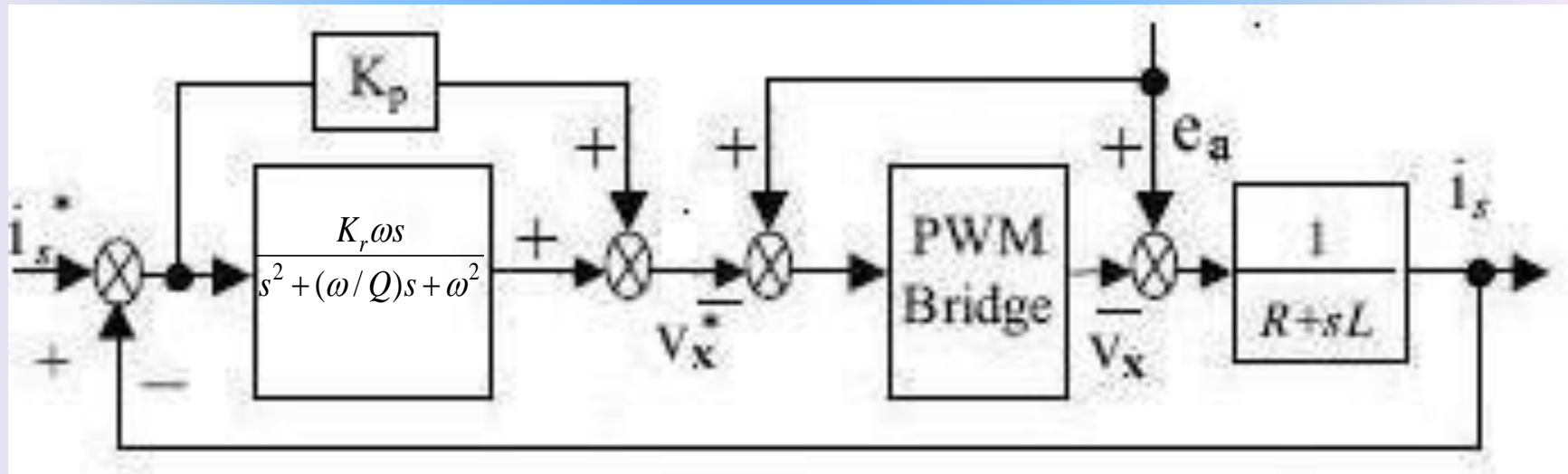
$$G_D(s) = \frac{I_s}{E_a} = \frac{0}{-K_r \omega^2} = 0$$

Quindi la tensione di alimentazione non provoca alcun disturbo sul controllo. Errore a regime nullo e annullamento degli effetti del disturbo per segnali alla frequenza di risonanza viene ottenuto indipendentemente dal valore dei guadagni K_p e K_r e dai valori del plant R e L , assicurando la teorica robustezza del controllo.

Convertitore bidirezionale con interruttori statici

Spesso la tensione di alimentazione è però distorta e quindi contiene armoniche a frequenza diversa da quella di risonanza che possono ridurre l'efficacia del controllo.

Un modo per risolvere questo problema è di aggiungere al segnale di riferimento per il convertitore un termine in feedforward rappresentato dalla tensione di alimentazione. In questa maniera la sua influenza nell'anello di corrente è annullata.



Convertitore bidirezionale con interruttori statici

PROGETTO DEL COMPENSATORE RISONANTE

Il progetto di Q è una scelta di compromesso:

Alti valori di Q provocano un più alto guadagno alla frequenza di risonanza ed una più stretta banda passante intorno a questa frequenza.

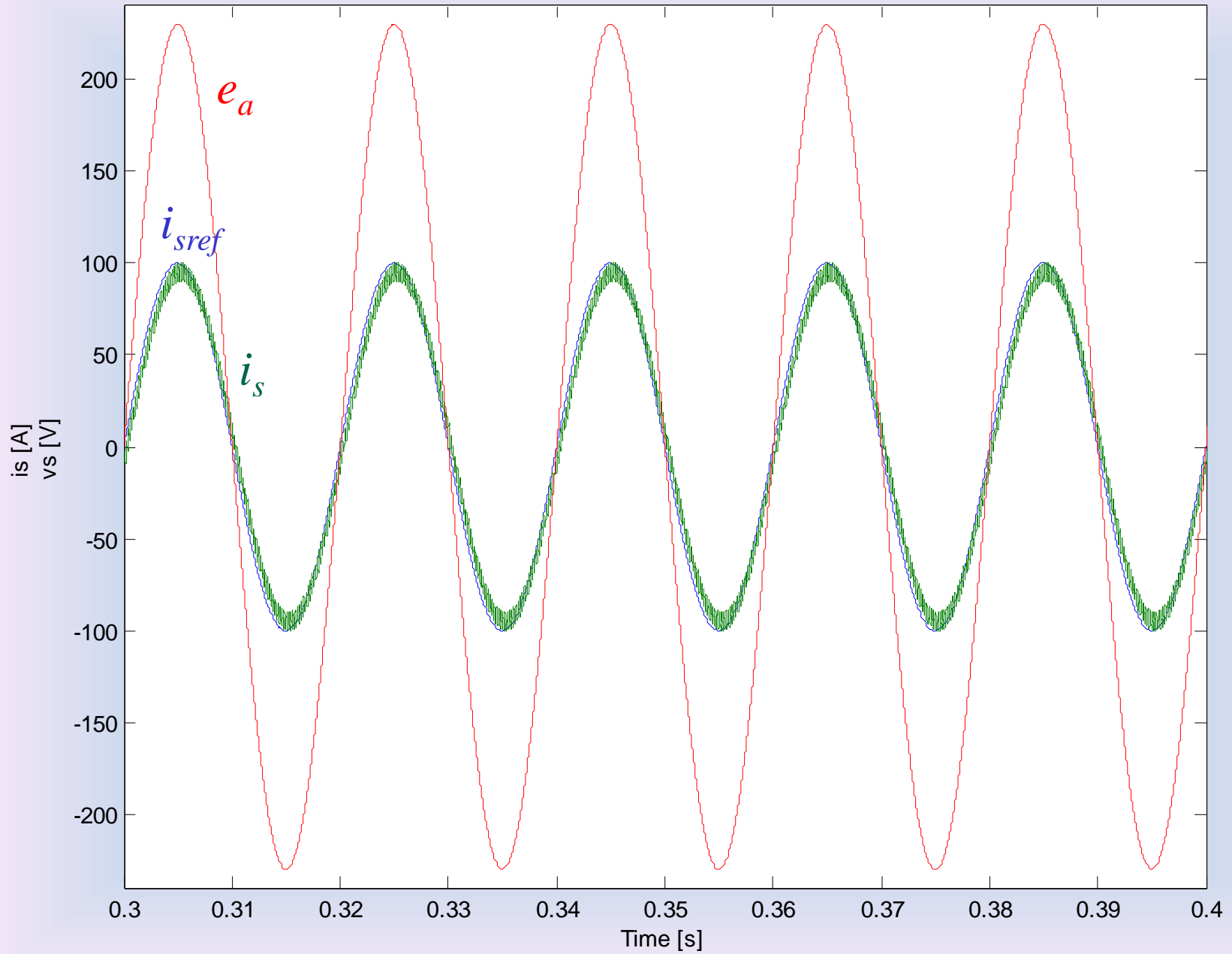
- Vantaggi: Ridotto errore a regime e maggiore selettività del controllo.
- Svantaggi: Alta sensibilità al rumore e tendenza all'instabilità.

Considerazioni duali possono essere fatte per bassi valori di Q

Il termine risonante ha solo un guadagno molto basso al di fuori della sua banda passante, per cui la risposta al transitorio desiderata deve essere ottenuta con un oculato progetto di K_p

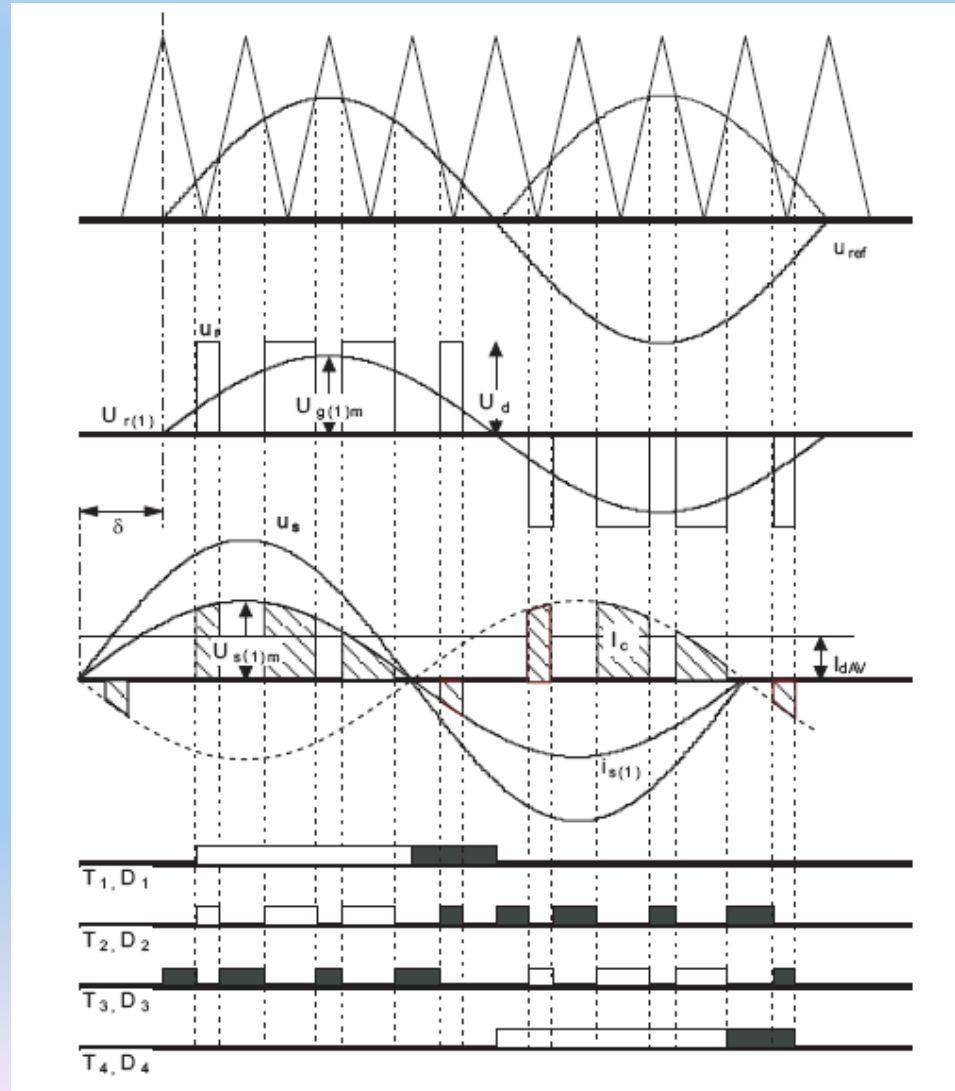
Il termine K_r viene invece scelto per migliorare la stabilità del sistema posizionando gli zeri in modo tale da spingere i poli in anello chiuso verso posizioni più stabili

Forme d'onda lato AC



Convertitore bidirezionale con interruttori statici

MODULAZIONE PWM



Convertitore bidirezionale con interruttori statici

Le stesse tecniche di controllo possono essere impiegate nei sistemi per la produzione di energia da fonti rinnovabili (fotovoltaico, fuel cells,...). In queste applicazioni, di solito, si utilizza un primo stadio di conversione (dc-dc) per massimizzare l'energia prodotta mentre l'inverter è impiegato per lo scambio energetico con la rete e per regolare la tensione sul DC bus.

