Risposta al disturbo additivo (Presa di carico)

Autore: elettrix01

Il controllo deve essere il più insensibile possibile ai disturbi additivi (il principale disturbo additivo è la coppia di carico o resistente T_r).
Un gradino di Tr comporta un transitorio che causa una variazione della velocità del sistema. Il controllo deve far si che al termine del transitorio la velocità sia quella voluta.
Studiamo cosa questo comporta in termini di regolatore.

Regolatore Proporzionale

Lo schema di controllo risulta essere il seguente:

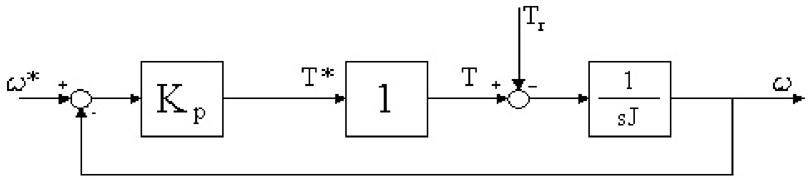

Figura 1

Ponendo ω* = 0 si ottiene il seguente schema:

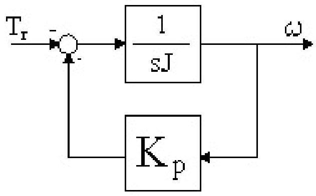

Figura 2

La funzione di trasferimento risulta essere:

$$\frac{\omega}{T_r} = -\frac{\frac{1}{Js}}{1+\frac{K_p}{Js}} = -\frac{1}{K_p}\frac{1}{s\frac{J}{K_p}+1} = -\frac{1}{K_p}\frac{\omega}{\omega^*}$$

Dall'equazione risulta che se viene dato un gradino di coppia resistente positiva, la velocità del sistema si riduce di un valore pari a $\Delta\omega = T_r / K_p$. Ne risulta che per minimizzare l'effetto di T_r è necessario avere K_p il più elevato possibile. Ricordiamo che K_p è strettamente legato a J per quanto riguarda la banda dell'anello di velocità. Per ovviare a questi effetti si può utilizzare un regolatore proporzionale-integrale.

Regolatore Proporzionale integrale

Lo schema di controllo è uguale al precedente a meno del fattore Ki/s nel regolatore:

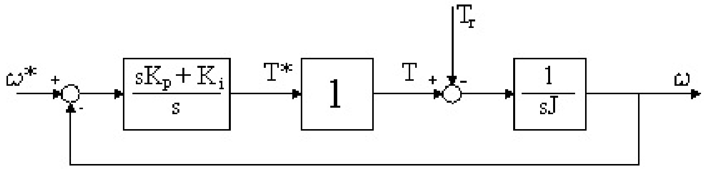

Figura 3

Ponendo ω* = 0 si ottiene il seguente schema:

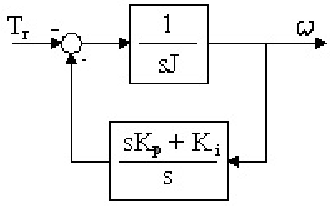

Figura 4

La funzione di trasferimento risulta essere:

$$\frac{\omega}{T_r} = -\frac{\dfrac{1}{Js}}{1+\dfrac{sK_p+K_i}{Js}} = -\frac{s}{sK_p+K_i}\,\frac{1}{s\dfrac{J}{sK_p+K_i}+1} = -\frac{s}{sK_p+K_i}\,\frac{\omega}{\omega^*}$$

A regime:

$$\lim_{s\to 0}\frac{\omega}{T_r} = \lim_{s\to 0}\left(-\frac{s}{sK_p+K_i}1\right) = 0$$,

cioè a regime l'errore di velocità dovuto alla coppia resistente è nullo. Tuttavia è bene notare che transitariamente si ha un errore di velocità. L'andamento della risposta alla presa di carico (supponendo $\omega^* = 0$ e T_r a gradino) sarà:

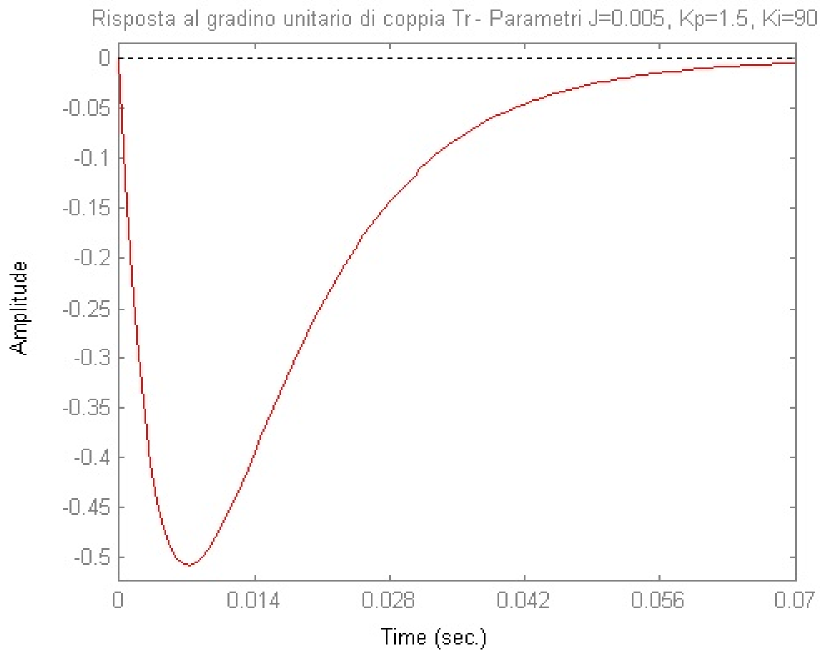

Figura 5

Il diagramma di bode della funzione di trasferimento T_r / ω è:

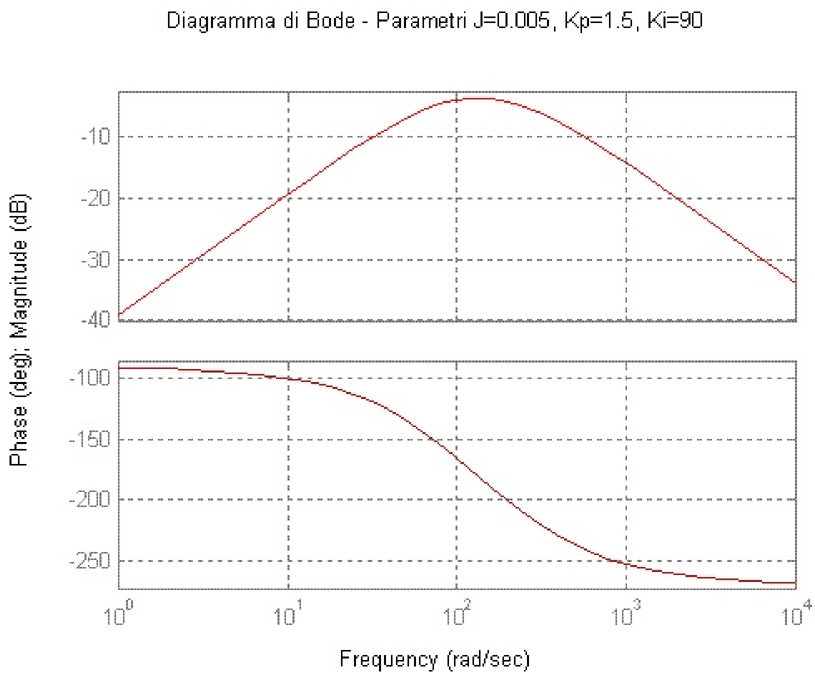

Figura 6

Come si può notare il regolatore proporzionale-integrale annulla l'errore a regime dovuto alla presa di carico. Il massimo errore è pari a $-T_r / K_p$.

Wind-up

Il wind-up è un fenomeno non lineare che nasce dalla presenza di un regolatore proporzionale integrale e della saturazione di coppia dovuta ai limiti di corrente del convertitore.
Quando ci troviamo in saturazione di coppia ($T = T_{max}$) la velocità cresce linearmente e il termine integrale del regolatore accumula un errore che dovrà essere smaltito nel momento in cui la velocità raggiungerà il valore prefissato. Per eliminare questo errore occorre del tempo in cui si avrà un velocità maggiore di quella voluta.

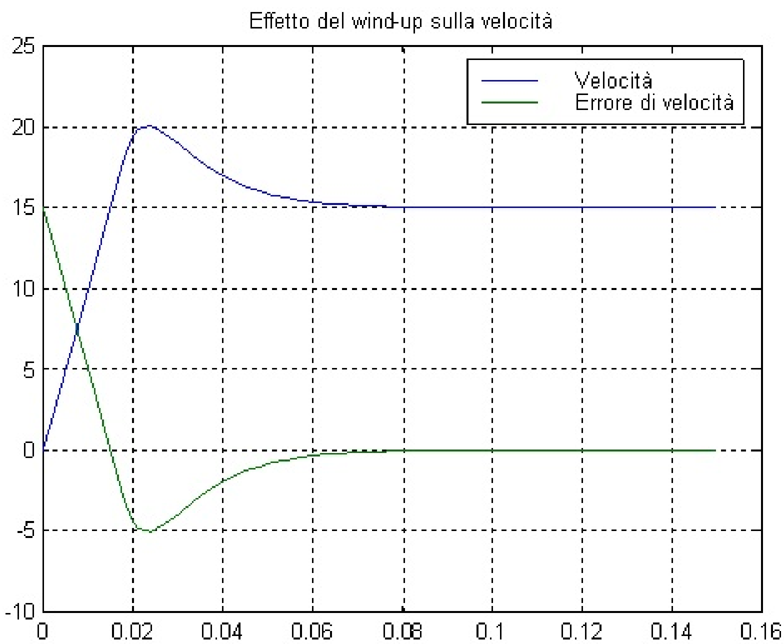

Figura 7

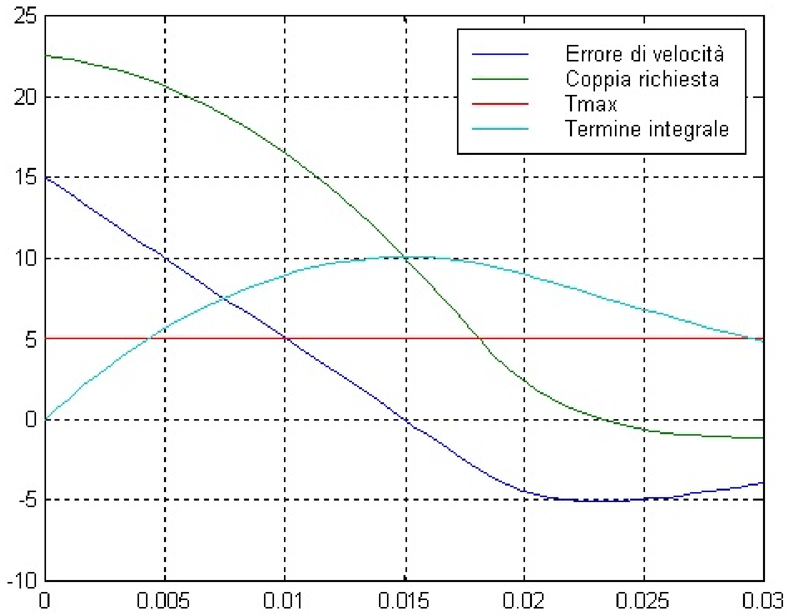

Figura 8

Come si nota nelle figure 7 e 8 finchè l'errore non è stato riassorbito si rimane in saturazione di coppia. Nel momento in cui T diventa minore di T_{max} il sistema torna in linearità e si ricomincia a seguire il riferimento ω*.
Poichè il wind-up è causato dal termine integrale è necessario cercare di limitare il coefficiente K_i. In particolare si vuole che nell'esatto momento in cui l'errore si annulla si ritorni a regolare in linearità. Pertanto imponiamo che:

$$K_i \int e dt = T_{sat}$$

Poichè l'andamento dell'errore di velocità è lineare con il tempo l'integrale dell'errore nel tempo può essere scritto come:

$$\int e dt = \frac{1}{2}(\omega^*)t_1$$

Con t_1 il tempo impiegato dal sistema a raggiungere la velocità ω*. Inoltre dalla fisica sappiamo che:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_{sat}}{J} \quad \Rightarrow \quad \omega^* = \frac{d\omega}{dt} t_1 \quad \Rightarrow \quad t_1 = \frac{J\omega^*}{T_{sat}}$$

Da cui si ottiene che:

$$K_i \int e dt = \frac{1}{2}(\omega^*)^2 \frac{J}{T_{sat}} K_i = T_{sat} \quad \Rightarrow \quad K_i = \frac{2T_{sat}{}^2}{J(\omega^*)^2} \quad (*)$$

Se il valore di K_i è minore del valore trovato con la (*) allora non si ha wind-up in quanto il termine integrale non raggiunge la massima coppia erogabile. Altrimenti è necessario introdurre nel controllo dei provvedimenti antiwind-up. Nei controlli di tipo analogico è previsto un apposito circuito antiwind-up che satura l'integratore. Nei controlli di tipo digitale viene limitato il K_i via software. È importante notare che se si riduce semplicemente il coefficiente K_i si elimina il wind-up, ma si rallenta il recupero alla presa di carico.

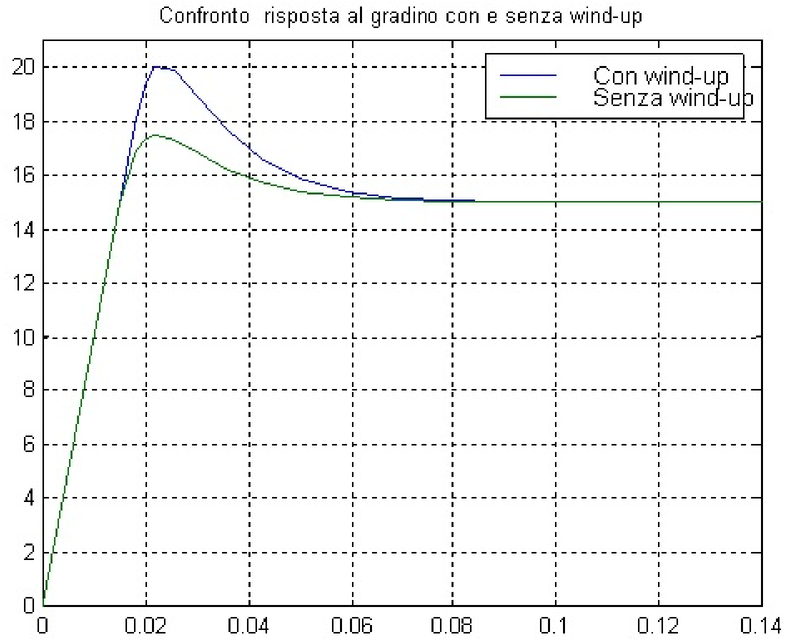

Figura 9

Un'ultima considerazione è che il wind-up è presente negli anelli di velocità di un controllo, ma è praticamente impossibile che si verifichi negli anelli di corrente. Inoltre è bene tenere presente che il wind-up non è un fenomeno sistematico, ma dipende notevolmente dalle variazioni di velocità richieste al sistema.
Concludiamo la trattazione del wind-up con due esempi numerici per la verifica della presenza o meno di questo fenomeno negli anelli di velocità e di corrente.

Esempio 1

Supponiamo di avere un motore avente i seguenti dati: $J = 5*10^{-3}$ kg*m^2, T_{max}=20 N*m e la massima variazione di velocità sia $\Delta\omega_{max}$ = 600rad/s. Immaginiamo di volere controllare in velocità il motore con una banda ω_b = 300 rad/s.

Poiché $\omega_b = K_p / J$ allora $K_p = \omega_b * J = 300 * 5 * 10^{-3} = 1,5$.

Posizioniamo lo zero del regolatore proporzionale integrale circa una decade prima della pulsazione di banda per non avere problemi di fase: $\omega_z = K_i / K_p$ = 30 rad/s. Si ottine che $K_i = 45$.

Ora ricaviamo il valore di K_i che ci consente di non avere il fenomeno del Wind-up utilizzando la formula (*): $K_i = 2 * T_{max}^2 / (J * \Delta\omega_{max}^2) = 0,44$. Come si può facilmente notare con un K_i di 45 si avrà certamente il fenomeno del wind-up.

Esempio 2

Supponiamo di voler controllare in corrente il motore dell'esempio 1. In questo caso i parametri da considerare saranno:

- $L = 5 * 10^{-3}$ H (corrispondente a J nell'esempio precedente);
- ω_b = 6000 rad/s;
- V_{max} = 400 V (corrispondente a T_{max} nell'esempio precedente);
- I_{max} = 25 A (corrispondente a $\Delta\omega_{max}$ nell'esempio precedente);

Poiché $\omega_b = K_p / L$ allora $K_p = \omega_b * L = 6000 * 5 * 10^{-3} = 30$.

Posizioniamo lo zero del regolatore proporzionale integrale circa una decade prima della pulsazione di banda per non avere problemi di fase: $\omega_z = K_i / K_p$ = 600 rad/s. Si ottine che $K_i = 18000$.

Ora ricaviamo il valore di K_i che ci consente di non avere il fenomeno del Wind-up utilizzando la formula (*): $K_i = 2 * V_{max}^2 / (L * I_{max}^2) = 102400$. Come si può facilmente notare con un K_i di 18000 non si avrà il fenomeno del wind-up.