

1 luglio 2023

2 Anti-windup

2.1 Descrizione

Usando un controllore con azione integrale, può verificarsi un fenomeno chiamato windup. Questo avviene quando il segnale di errore e è tale che il segnale di controllo u_c generato dal controllore porta l'attuatore in saturazione. Il controllore continua ad integrare e , incrementando quindi u_c , senza che questo abbia una reale conseguenza sul processo. Quando e diventa nullo, l'attuatore è ancora in saturazione, dato che l'integratore ha accumulato un grande errore di inseguimento nella fase iniziale. Per poter tornare nella regione di funzionamento lineare, e deve assumere un valore negativo per un certo periodo di tempo, allontanandosi dal riferimento dato e dando origine a un importante fenomeno di sovraelongazione.

2.2 Analisi della saturazione nel modello

Nel sistema in analisi ci sono due elementi che possono dare origine a saturazione. Il primo è il convertitore digitale-analogico (DAC), che converte il segnale di controllo in uscita dal controllore alla tensione corrispondente. Questo elemento può produrre una tensione tra $-V_{sat_DAC}$ e V_{sat_DAC} , con $V_{sat_DAC} = 10V$. L'altro elemento è il driver di tensione, che va in saturazione per tensioni in uscita maggiori in modulo di $V_{sat_DRV} = 12V$. Questo componente ha un guadagno di tensione pari a $k_{drv} = 0.6V$ e il suo ingresso è collegato all'uscita del DAC. Dunque, se il DAC è in saturazione, l'uscita del driver è pari a $V_{max} = k_{drv} V_{sat_DAC} = 6V$, al di sotto della soglia di saturazione dello stesso. L'unico elemento di cui bisogna tenere conto è quindi il DAC.

2.3 Schema anti-windup

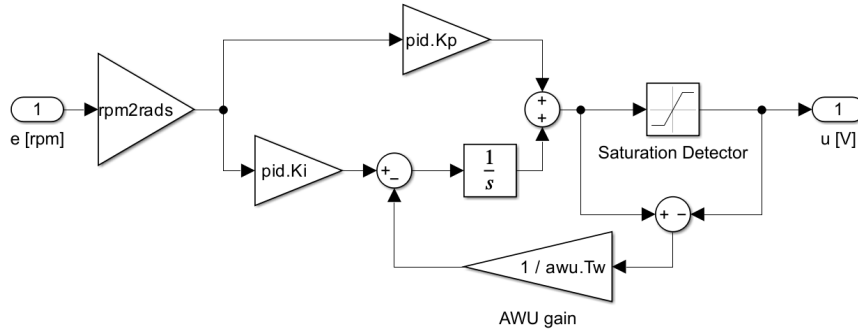


Figura 2: Schema del sistema anti-windup

Per mitigare questo fenomeno, si è modificato il controllore PI, aggiungendo un sistema di rilevazione e correzione del windup (figura 2). Il blocco Simulink di saturazione è impostato in modo che la regione lineare si trovi tra $-V_{sat_DAC}$ e V_{sat_DAC} , in modo da inviare al DAC un segnale nei suoi limiti di saturazione. Se la differenza tra il segnale di ingresso e quello di uscita non è nulla, è presente saturazione. Per correggerla, si compensa l'ingresso della componente integrale con un segnale proporzionale al valore di saturazione presente. Il guadagno è stato scelto pari a $K_w = 1/T_w$, dove abbiamo scelto di usare $T_w = 0.03s \approx t_{s,5\%}/5$. Questo valore non è però necessariamente il migliore possibile per questa applicazione. Si rende quindi necessario effettuare più esperimenti, in modo da tararlo più finemente.

2.4 Risultati sperimentali

In laboratorio si è confrontata la risposta al gradino del sistema, prima disabilitando l'anti-windup e poi abilitandolo. Si riportano di seguito i dati ottenuti con un segnale a gradino di ampiezza $450rpm$ che agisce a $t_0 = 1s$.

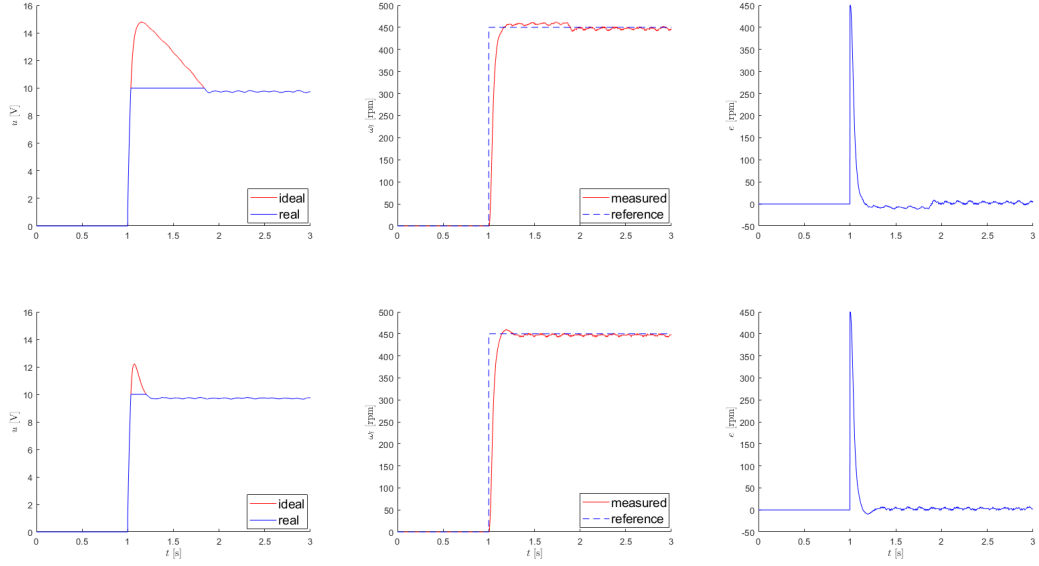


Figura 3: Risposta al gradino

La prima riga si riferisce al controllore privo di anti-windup, mentre la seconda è riferita al sistema compreso di anti-windup.

2.5 Conclusioni

Dai risultati sperimentali ottenuti si può dedurre che il controllore dotato di uno schema anti-windup impiega meno tempo ad assestarsi sul riferimento costante, con una sovraelongazione minore rispetto all'altro. A questa conclusione si può giungere anche confrontando i grafici dell'ultima colonna della figura 3, dove è rappresentato l'andamento dell'errore nel tempo. Nel caso del sistema privo di anti-windup, l'errore rimane per più tempo negativo, dovendo il sistema ritornare nella regione di funzionamento lineare dell'attuatore. Confrontando il valore delle tensioni di controllo nei due casi, è evidente come l'anti-windup porti a un picco minore di tensione richiesto e riduca notevolmente l'intervallo di tempo in cui il sistema si trova in saturazione. Lo schema anti-windup utilizzato migliora quindi le prestazioni del controllore.

3 Feedforward

3.1 Descrizione

Uno schema di controllo in feedback permette di stabilizzare processi instabili e inseguire con errore nullo a regime il riferimento assegnato. Per migliorare la velocità di risposta è possibile ricorrere a uno schema feedforward, tramite il quale, pre-filtrando il segnale di riferimento, è possibile far variare istantaneamente l'uscita portandola al valore di riferimento e mantenendola poi tramite un controllo in feedback. Questo schema di controllo permette anche di eliminare il disturbo costante dovuto all'attrito del motore.

3.2 Schema feedforward con anti-windup

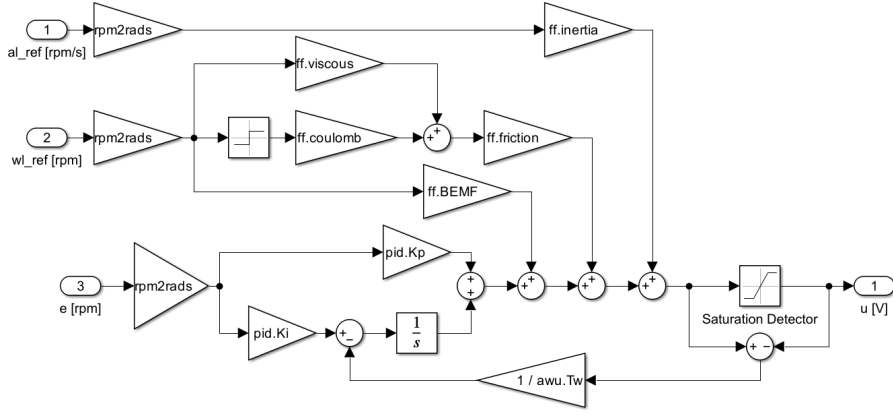


Figura 4: Schema del controllore con feedforward e anti-windup

Si è modellato il motore elettrico con una funzione di trasferimento del primo ordine $P(s)$ priva di zeri. L'azione compensatrice risulta essere descritta dalla funzione di trasferimento $H_1(s) = 1/P(s) = \frac{N}{k_m}(T_ms + 1)$, non propria. Per poter dunque usare questo schema è necessario conoscere in anticipo la derivata del segnale di riferimento imposto. Per eliminare il disturbo dovuto all'attrito, si è riportata l'azione del momento di attrito all'ingresso del driver. In questo modo, la funzione di trasferimento per compensare questo disturbo risulta essere $H_2(s) = \frac{R_{eq}}{k_{drv}K_tN}\tau_{sf}\text{sign}(\omega_{l_{ref}})$. Chiamando u_1 l'azione compensatrice di $P(s)$ e u_2 l'azione compensatrice del momento di attrito, si ottiene che l'azione complessiva, applicata all'uscita del controllore prima dell'azione di anti-windup, è data da

$$u_{ff} = u_1 + u_2 = \frac{NR_{eq}J_{eq}}{k_{drv}K_t} \frac{d\omega_{l_{ref}}}{dt} + \frac{R_{eq}}{k_{drv}K_tN} (N^2B_{eq}\omega_{l_{ref}} + \tau_{sf}\text{sign}(\omega_{l_{ref}})) + \frac{NK_e}{k_{drv}}\omega_{l_{ref}} \quad (2)$$

con $\omega_{l_{ref}}$ riferimento di velocità al carico.

3.3 Risultati sperimentali

Per poter ottenere un risultato soddisfacente, è necessario che i valori usati siano quanto più vicini possibili a quelli reali. In particolare, è stato necessario stimare i valori di B_{eq} , J_{eq} e τ_{sf} , che sono risultati essere $\hat{B}_{eq} = 1.11221 \cdot 10^{-6} \frac{Nm}{rad/s}$, $\hat{J}_{eq} = 5.7419 \cdot 10^{-7} kg \cdot m^2$ e $\hat{\tau}_{sf} = 9.6 \cdot 10^{-3} Nm$. Sono state effettuate due prove, disabilitando il feedforward nella prima e abilitandolo nella seconda. In entrambi i casi si è usato l'anti-windup, con $T_w = 0.03s$.

Si riportano di seguito i dati ricavati, utilizzando un riferimento di accelerazione costante a tratti definito in un periodo come

$$a_{l_{ref}}(t) = \begin{cases} 900rpm/s & \text{if } 0 \leq t < 0.5s \\ 0 & \text{if } 0.5s \leq t < 1s \\ -900rpm/s & \text{if } 1s \leq t < 2s \\ 0 & \text{if } 2s \leq t < 2.5s \\ 900rpm/s & \text{if } 2.5s \leq t < 3s \end{cases} \quad (3)$$

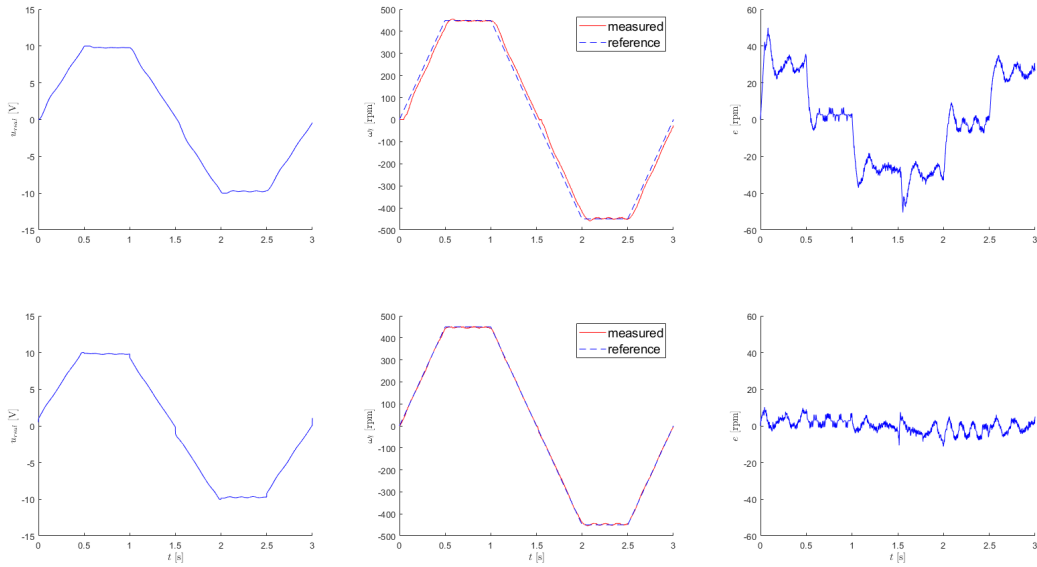


Figura 5: Risposta al segnale

La prima riga si riferisce al controllore privo di feedforward, mentre la seconda è riferita al sistema compreso di feedforward.

3.4 Conclusioni

Nella seconda colonna della figura 5 sono riportate le velocità misurate nei due casi, confrontate con il riferimento dato. Si nota come l'azione di feedforward permetta al sistema di reagire in maniera più veloce alle variazioni di ingresso, aiutando il sistema a mantenersi vicino al riferimento anche per basse velocità. Al contrario, nel sistema privo di questo schema la velocità misurata presenta, nei tratti di accelerazione e decelerazione, un ritardo nell'assestamento. Come riportato nei grafici dell'ultima colonna, su cui è rappresentato l'errore rispetto al riferimento di velocità nei due casi, l'assenza del feedforward causa grandi variazioni nell'errore a seconda del tratto considerato, con picchi nei tratti in cui la velocità varia. Usandolo, invece, è possibile mantenere l'errore in una regione ridotta, senza grandi variazioni.

4 Considerazioni finali

Un controllore PI permette di inseguire un segnale costante con errore nullo a regime, ma, come si è potuto osservare nelle due esperienze qui descritte, presenta delle limitazioni dovute alle non idealità del processo da controllare, come la saturazione. In questo caso, un sistema di anti-windup permette di ridurre notevolmente il periodo di tempo necessario al controllore per assestarsi sul riferimento, riducendo anche la tensione di picco richiesta. Come si è visto successivamente, aggiungendo anche uno schema feedforward è possibile ridurre ulteriormente il tempo richiesto al sistema per raggiungere il riferimento, permettendo anche di ridurre l'errore rispetto ad esso. Il sistema implementato, però, richiede una perfetta conoscenza della derivata del segnale di riferimento, non sempre ottenibile. Una possibile modifica, per rendere lo schema compatibile con situazioni in cui la derivata non è nota a priori, è quella di calcolare la derivata del riferimento tramite un filtro del secondo ordine, con la stessa struttura del filtro $H(s)$ usato per misurare la velocità dall'angolo misurato.