

4. RESULTATS DE SIMULACIÓ

El sistema global desenvolupat al capítol 3 s'ha implementat en simulació per demostrar inicialment la seva viabilitat sota l'entorn Simulink [Simulink] del programa matemàtic Matlab [Matlab].

El sistema modelat per a la simulació té en compte tots els blocs descrits que conformen el sistema de control i tots els blocs que conformen el hardware de l'accionament.

Blocs implementats en simulació que conformen el sistema de control:

- L'estimador en règim permanent (cap. 3).
- L'estimador en règim transitori (cap. 3).
- El sistema fuzzy de filtratge i promitjat mitjana (cap. 3).
- El regulador PI amb l'estructura modificada presentada al capítol 3 i el sistema *antiwind-up* (cap. 3).
- El control FAM. Totes les equacions del sistema de control i els limitadors oportuns per evitar que la consigna de sortida sigui superior a la que l'inversor pot imposar al motor (cap. 3).
- El model de l'inversor per obtenir la tensió del motor sense necessitat de mesura (cap. 3).
- El modulador vectorial tenint en compte l'algoritme d'arrossegament d'error (cap. 3).

Blocs implementats que conformen el sistema hardware:

- El motor d'inducció (annex I).
- La càrrega mecànica que representa la bancada (annex I).
- El pont inversor trifàsic tenint en compte els temps morts dels IGBT, les caigudes de tensió, etc. (cap. 3, annex I).
- El model dels sensors de corrent i dels filtres corresponents (annex I).

Com que s'ha modelat l'inversor de potència, les tensions que arriben al motor no són sinusoidals pures; és a dir, a part de l'harmònic fonamental hi ha tots els harmònics derivats de la modulació vectorial. Això implica que els corrents del motor tindran soroll. El model del sistema de mesura del corrent implementat en simulació és la funció de transferència dels sensors Hall més el filtre

real. Els algorismes de derivació i integració tenen la mateixa estructura que els que s'empraran en el sistema experimental i el temps d'integració o derivació és el mateix que el que es preveu que serà en el sistema experimental. Com que s'han tingut en compte tots els elements i condicionants d'un sistema real (capítol 5) la resposta del sistema implementat en simulació ha de ser molt propera a la resposta real.

Per validar el sistema s'ha sotmès el model descrit a sis experiments diferents:

- Resposta del sistema a consignes de tipus graó.
- Resposta del sistema a canvis dinàmics de parell.
- Resposta del sistema a canvis bruscos de consigna de velocitat.
- Resposta del sistema a consignes de tipus rampa.
 - Acceleracions i desacceleracions.
- Inversions del sentit de gir.

Per a tots els assaigs s'ha extret l'índex IAE, integral del valor absolut de l'error entre la velocitat real i l'estimada final (Eq. 4-01). Tots els assaigs duren 3 segons, per tant, $T = 3$ s.

$$IAE = \int_0^T |\omega_m - \hat{\omega}_m| dt \quad (\text{Eq. 4-01})$$

4.1 Resultats a consignes graó constants

La primera gràfica mostrada és la resposta del sistema a una consigna propera a la velocitat nominal (140 rad/s). La figura 4-01 mostra la velocitat consigna, la velocitat estimada d'ambdós estimadors (estimador en règim permanent i estimador en règim transitori ja filtrat), la velocitat final estimada i la velocitat real del motor.

A la figura es pot observar com la velocitat estimada amb l'estimador en règim permanent inicialment té un valor poc útil i força distant del real, mentre que la velocitat estimada per l'estimador en règim permanent s'apropa considerablement a la real. El sistema en conjunt aconsegueix controlar la velocitat del motor, sense mesura de la velocitat i amb índex d'error IAE de 6,91 rad. Aquest valor representa un error acumulat de gaire bé 7 radianes en l'estimació de la velocitat respecte als 400 radianes que gira el motor en aquest assaig. La resposta de l'estimador en règim permanent s'aproxima ràpidament al valor de la velocitat real i això és perquè el sistema està sota control gràcies a l'acció de l'estimador en règim transitori en els moments inicials de l'arrencada del motor. Si aquest estimador no hi fos, la resposta única de l'estimador en règim permanent trigaria molt a acostar-se a la velocitat real del motor i això provocaria un retard molt important en el control de la velocitat final del motor.

El temps transcorregut entre l'inici de l'assaig ($t = 0$ s) i l'aplicació de la consigna ($t = 0,1$ s) l'empra el sistema per magnetitzar la màquina imposant un vector de tensió fix.

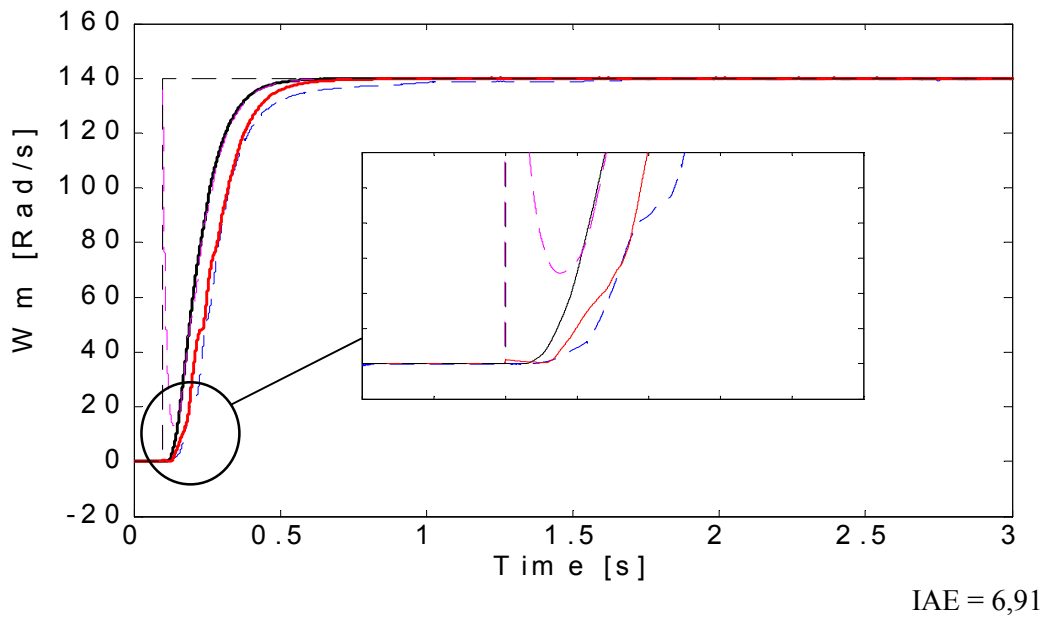


Fig. 4-01. $\omega_m^* = 140$ rad/s — — —, $\hat{\omega}_m$ règ. perm. - - - - ,
 $\hat{\omega}_m$ règ. trans. - - - - , $\hat{\omega}_m$ final — — —, ω_m real — — —.

La figura 4-02 mostra la consigna de parell que ha d'imposar el control FAM, el parell electromagnètic que desenvolupa el motor i el parell mecànic que ofereix la càrrega que hi ha connectada a l'eix del motor (descrita a l'annex I). Per aquesta càrrega en aquest punt de treball el motor treballa gairebé en condicions nominals. Apareix un arrissament en el parell electromagnètic perquè el tipus de tensió aplicada no és sinusoidal pur. La freqüència de l'arrissament és proporcional a la freqüència de commutació del pont inversor.

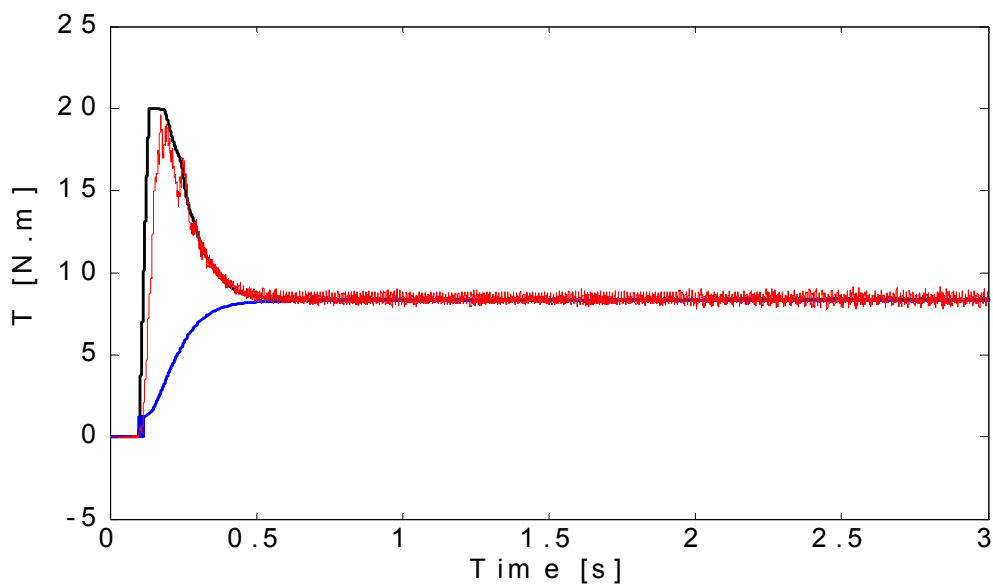


Fig. 4-02. $\omega_m^* = 140$ rad/s, Γ^* — — —, $\Gamma_{electromag}$ — — —, Γ_{mec} - - - - .

La figura 4-03 mostra la resposta per a una consigna de 100 rad/s. Tot i que el motor treballa en un punt diferent a l'anterior, el sistema és capaç d'estimar la velocitat. El sistema funciona en aquest punt d'una manera similar a com funciona en el punt de treball nominal.

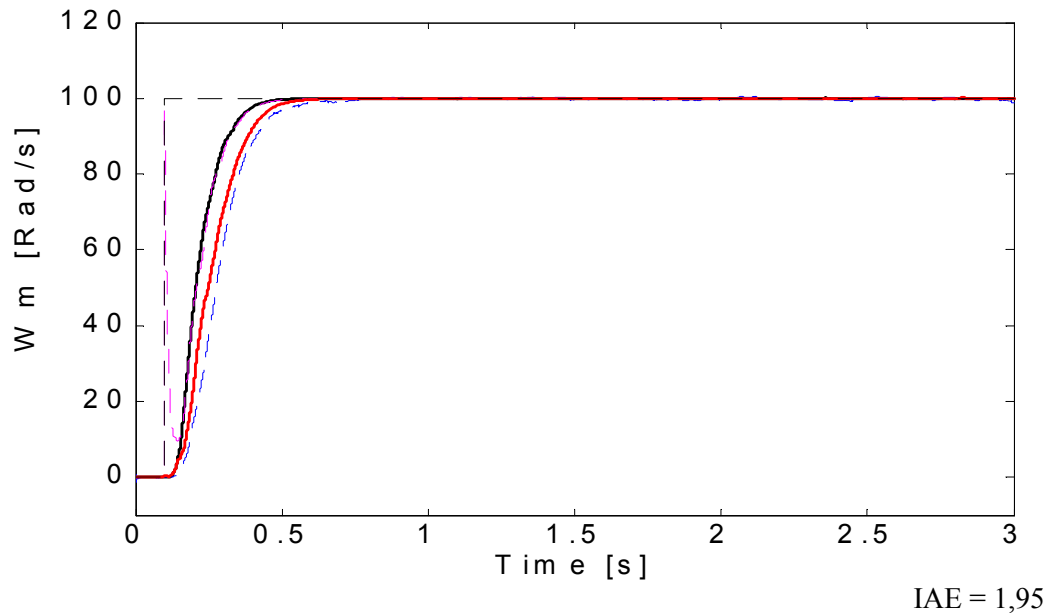


Fig. 4-03. $\omega_m^* = 100 \text{ rad/s}$ — — — —, $\hat{\omega}_m$ règ. perm. - - - - ,
 $\hat{\omega}_m$ règ. trans. - - - - , $\hat{\omega}_m$ final — — — —, ω_m real — — — —.

A la figura 4-04, que és la resposta a una consigna de 50 rad/s, podem observar com el petit retard de la velocitat estimada respecte a la real més l'efecte de la sintonia del regulador PI emprat provoca un sobrepuig. Tot i això, el sistema es manté sota control.

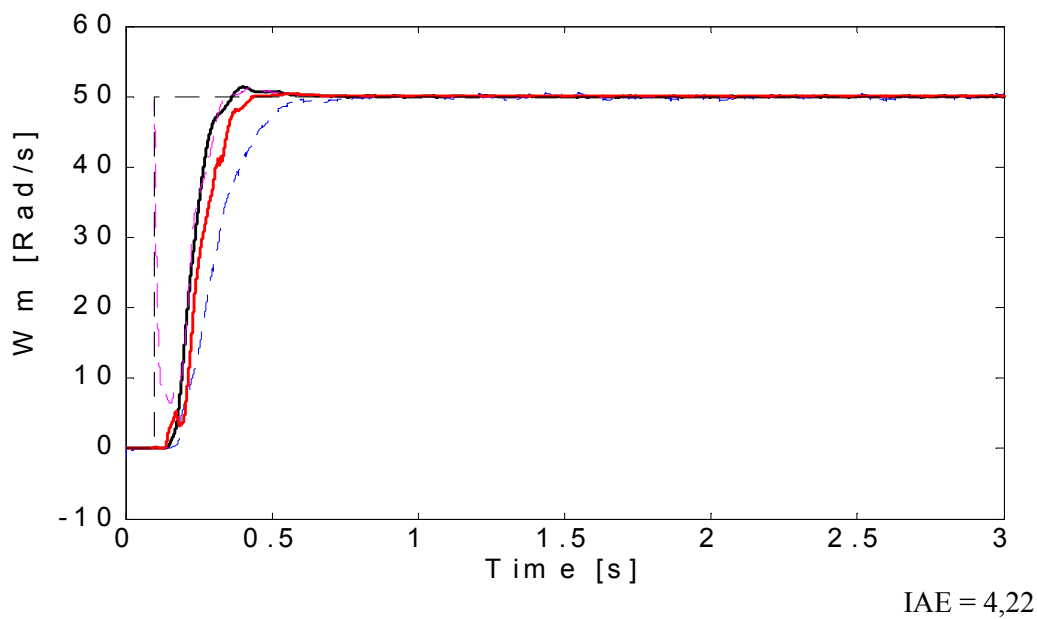


Fig. 4-04. $\omega_m^* = 50 \text{ rad/s}$ — — — —, $\hat{\omega}_m$ règ. perm. - - - - ,
 $\hat{\omega}_m$ règ. trans. - - - - , $\hat{\omega}_m$ final — — — —, ω_m real — — — —.

A la figura 4-05, amb una consigna de velocitat 10 rad/s, es pot observar el principi de disfunció de l'estimador en règim transitori. Per això a baixes velocitats l'estimació en règim permanent té més pes que l'estimació en règim transitori.

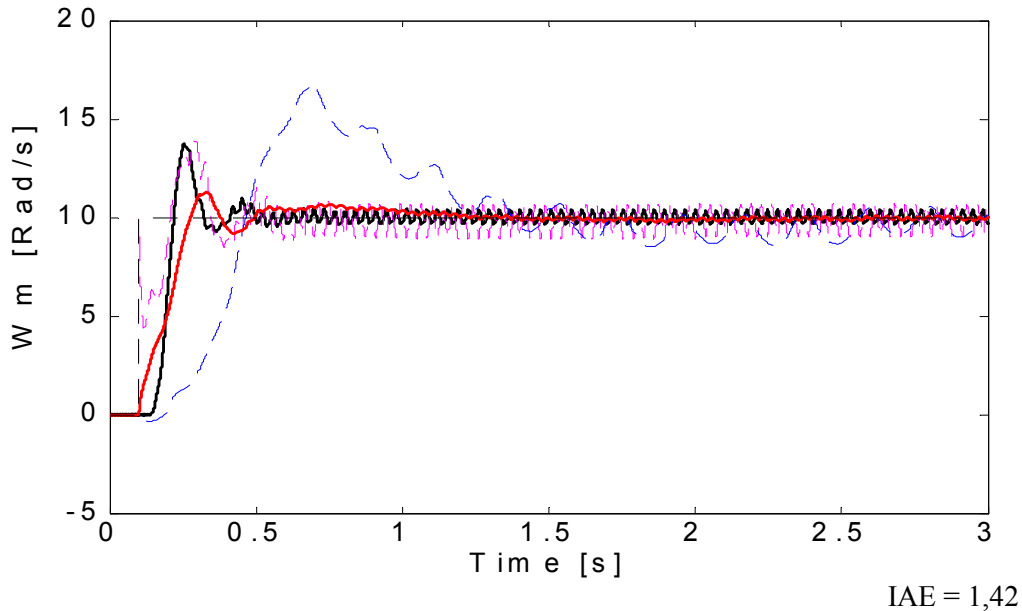


Fig. 4-05. $\omega_m^* = 10$ rad/s — — —, $\hat{\omega}_m$ règ. perm. - - - -, $\hat{\omega}_m$ règ. trans. - - - -, $\hat{\omega}_m$ final — — —, ω_m real — — —.

A la figura 4-06 podem observar la resposta del sistema a una consigna de 5 rad/s (aproximadament el 3% de la velocitat nominal). La velocitat del motor es manté dintre d'un error de 0,5 rad/s. El sistema, a causa de les característiques de la càrrega simulada, en aquest punt està pràcticament treballant en buit. Això implica que els corrents són molts baixos i el sistema es veu molt afectat per soroll introduït a través de la mesura d'aquests corrents.

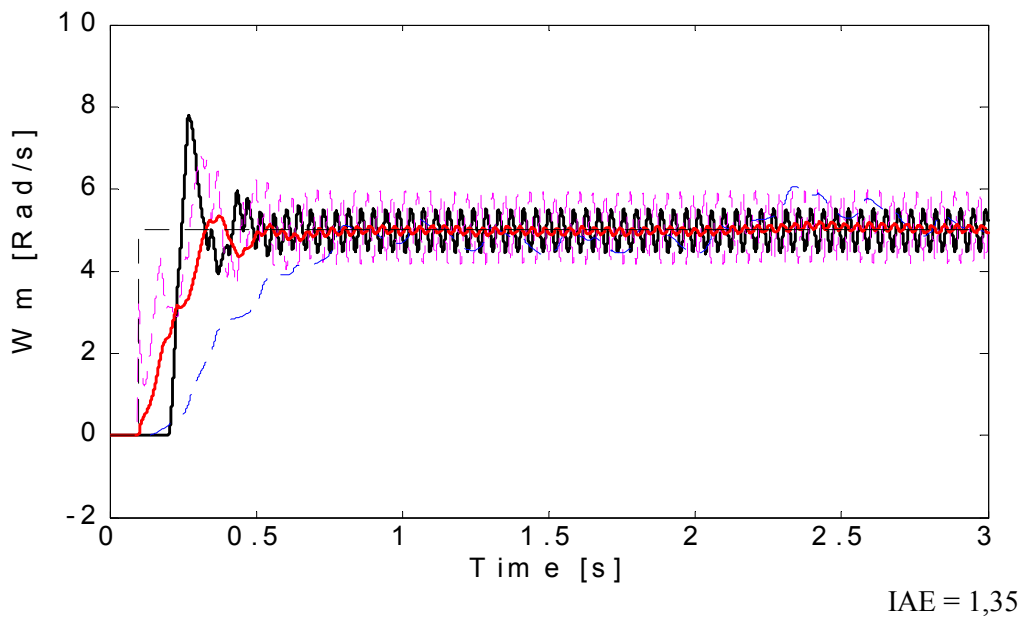


Fig. 4-06. $\omega_m^* = 5$ rad/s — — —, $\hat{\omega}_m$ règ. perm. - - - -, $\hat{\omega}_m$ règ. trans. - - - -, $\hat{\omega}_m$ final — — —, ω_m real — — —.

A la figura 4-07 es mostra el funcionament del sistema per a una velocitat superior a la nominal. El funcionament és similar a la resposta per a la velocitat nominal excepte en l'estimador en règim transitori. Per aquest punt de treball el motor ha entrat en la zona de desexcitació. En el model de simulació no s'ha tingut en compte l'efecte de saturació de les bobines del motor però sí s'ha previst el màxim de la tensió estatòrica per no sobrepassar la potència del motor; així es limita el corrent i s'evita la saturació.

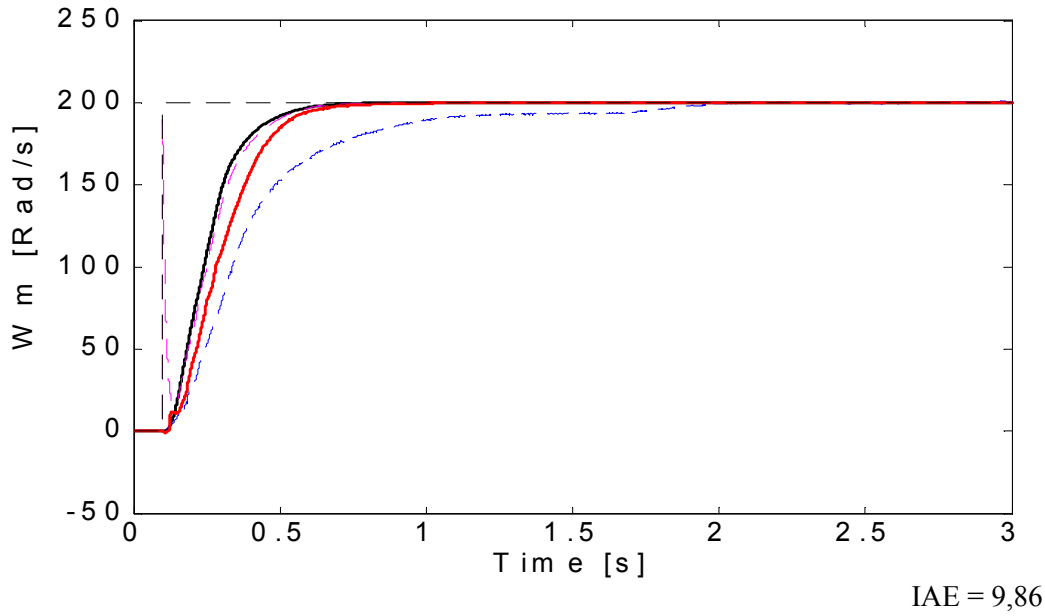


Fig. 4-07. $\omega_m^* = 200$ rad/s — — —, $\hat{\omega}_m$ règ. perm. - - - - ,
 $\hat{\omega}_m$ règ. trans. - - - - , $\hat{\omega}_m$ final — — —, ω_m real — — —.

A la figura 4-08, amb la consigna 300 rad/s, més del doble de la velocitat nominal, s'observa com augmenta la disfunció de l'estimador en règim transitori.

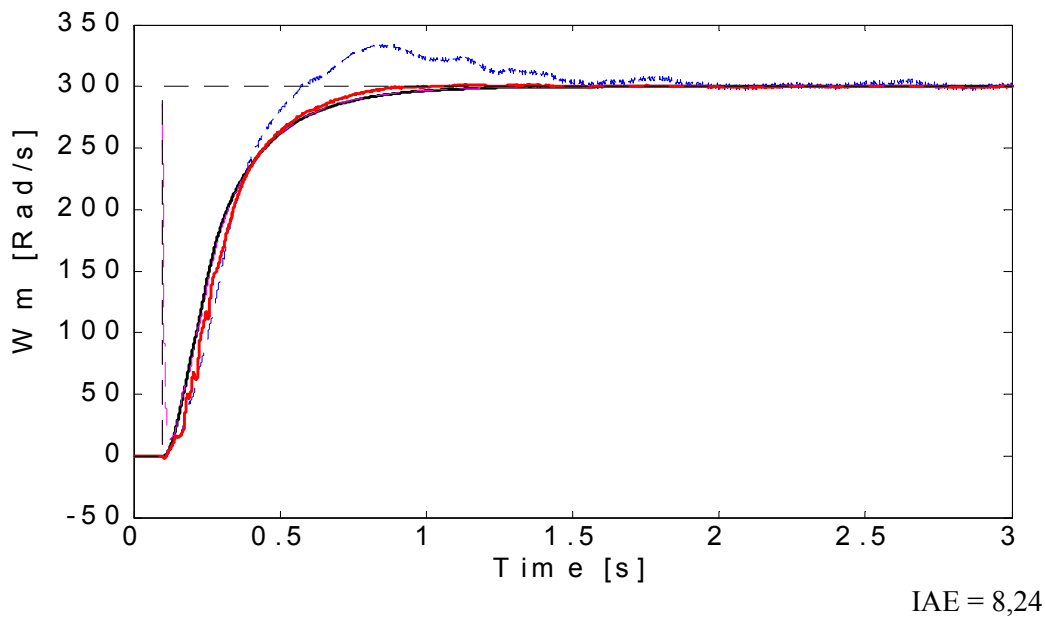


Fig. 4-08. $\omega_m^* = 300$ rad/s — — —, $\hat{\omega}_m$ règ. perm. - - - - ,
 $\hat{\omega}_m$ règ. trans. - - - - , $\hat{\omega}_m$ final — — —, ω_m real — — —.

4.2 Resultats a canvis dinàmics de parell

La viabilitat d'un sistema de control de velocitat no només passa per la resposta a un graó, és a dir el sistema ha de poder reaccionar a canvis sobtats de parell.

La figura 4-09 mostra com el sistema és capaç de controlar la velocitat del sistema quan es modifica el parell de càrrega. El canvi de parell és el pas des 8 N.m (gairebé parell nominal) a 1.5 N.m. (parell de fregament). A la figura ampliada es pot observar com en els moment inicials del canvi de parell l'estimador que ràpidament reacciona és l'estimador en règim transitori. La velocitat estimada final passa a valer el valor estimat per l'estimador en règim transitori i el sistema al torna a estar sota control. L'estimador en règim permanent reacciona al canvi de manera lenta, i a més, quan reacciona és gràcies a que el sistema està sota el control de l'estimador en règim transitori. Passats els instant inicials la resposta final estimada és el promig d'ambdues senyals altre cop i quan s'assoleix de nou el règim permanent (zona posterior a la zona ampliada) la resposta final torna a ser bàsicament la de l'estimador en règim permanent. Resumint, el sistema d'estimació de la velocitat actua ràpidament degut a que quan es produeix el transitori la velocitat final estimada passa de valer pràcticament el valor de l'estimador en règim permanent a emprar la velocitat estimada per l'estimador en règim transitori i quan el sistema retorna al règim permanent es realitza el procés contrari. Si el sistema d'estimació de la velocitat només emprés l'estimador en règim permanent el sistema trigaria molt més a estar altre cop sota control davant d'una pertorbació de parell.

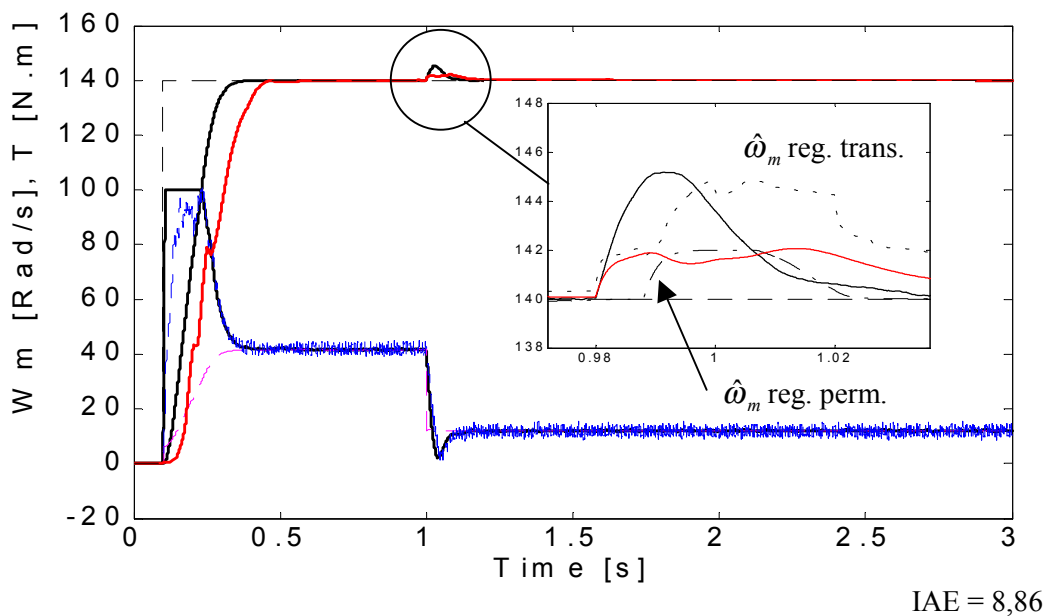


Fig. 4-09. $\omega_m^* = 140 \text{ rad/s}$ - - - -, $\omega_m \text{ real}$ ———, $\hat{\omega}_m \text{ final}$ ———, $5 * \Gamma^*$, $5 * \Gamma_{\text{electromag}}$ - - - - , $5 * \Gamma_{\text{mec}}$ - - - - .

La fig. 4-10 mostra el cas contrari, pas del parell de càrrega de 1.5 N.m a 8 N.m. En aquest cas pot observar-se el mateix efecte que en cas anterior però amb disminució de la velocitat. Gràcies a la ràpida resposta de l'estimador en règim transitori i a que el sistema fuzzy de promitjat passa la responsabilitat de l'estimació de la velocitat final a aquest estimador el sistema respon ràpidament a la pertorbació de parell de càrrega. Gràcies també a que el sistema està sota el control de l'estimador en règim transitori l'estimador en règim permanent reacciona davant la variació de les condicions de càrrega del motor més ràpid del que ho faria si el control depengués únicament d'aquest darrer estimador (règim permanent). Si el sistema d'estimació de velocitat només depengués de l'estimador en règim permanent succeïrien dos efectes.

- La resposta de l'estimador en règim permanent seria més lenta i per tant la velocitat estimada final trigaria més temps a reflexar la variació de la velocitat real.
- Com a conseqüència d'aquest retard en l'estimació també hi hauria un retard en l'acció de control correctora i per tant l'error de velocitat (respecte a la consigna) seria molt més gran.

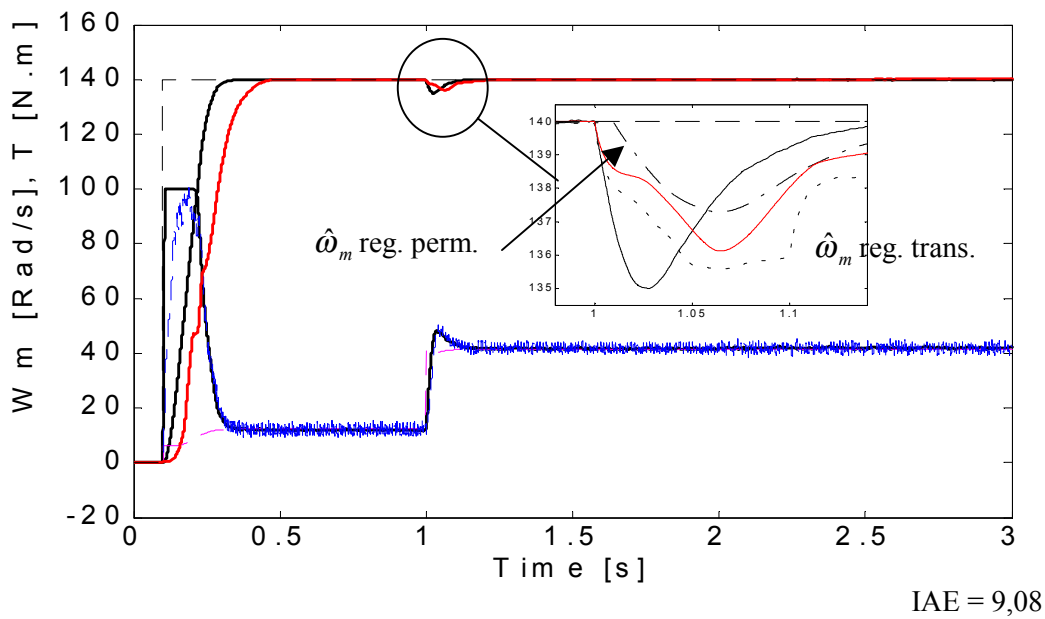


Fig. 4-10. $\omega_m^* = 140 \text{ rad/s}$ — — —, $\omega_m \text{ real}$ ———, $\hat{\omega}_m \text{ final}$ ———, $5 * \Gamma^*$, $5 * \Gamma_{\text{electromag}}$ - - - - , $5 * \Gamma_{\text{mec}}$ - - - - .

4.3 Resultats a canvis de consignes

El sistema és capaç de respondre a modificacions de tipus graó de la velocitat de consigna, inclosa la parada del sistema (2a consigna, 0 rad/s). La figura 4-11 mostra com, després d'arrencar i mantenir la velocitat prop de la nominal (amb parell de càrrega també proper al nominal), el sistema reacciona a un canvi sobtat de la consigna, el pas de 140 rad/s a 0 rad/s. A la figura es pot observar que els efectes produïts en l'arrencada tornen a aparèixer en l'aturada. És a dir, l'estimador en règim transitori es manté proper a la velocitat real del motor malgrat que en règim permanent (interval $0,5 < \text{temps} < 2$ i $2,5 < \text{temps} < 3$) no obté la velocitat estimada més acurada. L'estimador en règim transitori és molt sensible als nivells mínims de tensió i corrent a què s'arriba quan la consigna és zero i fàcilment s'hi poden observar errors de càlcul (a la figura, a l'entorn dels 2,7 s).

L'efecte de la pobra estimació de velocitat de l'estimador en règim permanent durant el transitori s'observa no solament en l'arrencada sinó també en l'aturada. És a dir, en l'arrencada la velocitat de l'estimador en règim permanent té un valor elevat, distant del real, a causa de la manca de sincronisme del seu algoritme d'estimació i de la frenada del motor, i en els instants inicials també es pot observar aquest efecte.

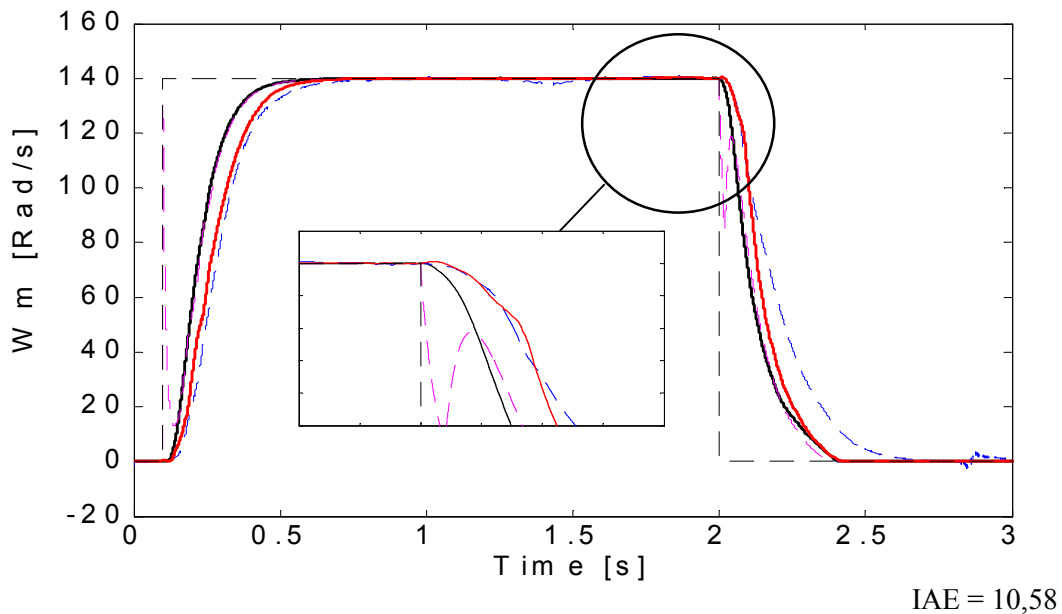


Fig. 4-11. $\omega_{m1}^* = 140$ rad/s, $\omega_{m2}^* = 0$ rad/s — — —, $\hat{\omega}_m$ règ. perm. - - - -, $\hat{\omega}_m$ règ. trans. - - - -, $\hat{\omega}_m$ final — — —, ω_m real — — —.

El sistema, per tant, amb l'obtenció de la velocitat estimada de la mitjana ponderada entre estimadors permet obtenir una velocitat de resposta superior a la d'un sistema que només emprés un estimador de règim permanent i més acurada que si només s'emprés el de règim transitori.

La figura 4-12 mostra la resposta a dues consignes consecutives de tipus graó 1/2 de la velocitat nominal primer i velocitat nominal després. El sistema funciona pel que fa a l'estimació de la velocitat, tot i que queda palesa la necessitat de millorar la resposta del regulador implementat.

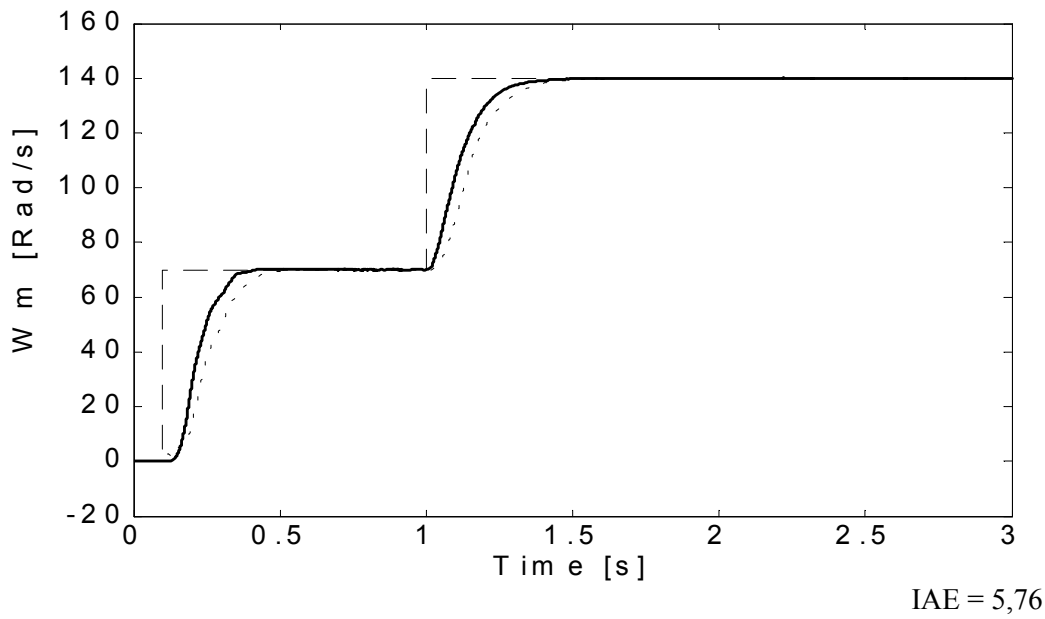


Fig. 4-12. $\omega_{m1}^* = 70 \text{ rad/s}$, $\omega_{m2}^* = 140 \text{ rad/s}$ - - - -,
 $\hat{\omega}_m$ final , ω_m real _____.

La figura 4-13 mostra com el sistema és capaç no solament de parar sinó també de mantenir una velocitat mínima (14 rad/s = 10% de la velocitat nominal) després d'haver assolit la velocitat nominal. Aquesta resposta satisfà el típic requeriment d'entorn industrial que demana que un sistema approximi una màquina eina a una velocitat màxima i realitzi un posicionament posterior a una velocitat lenta.

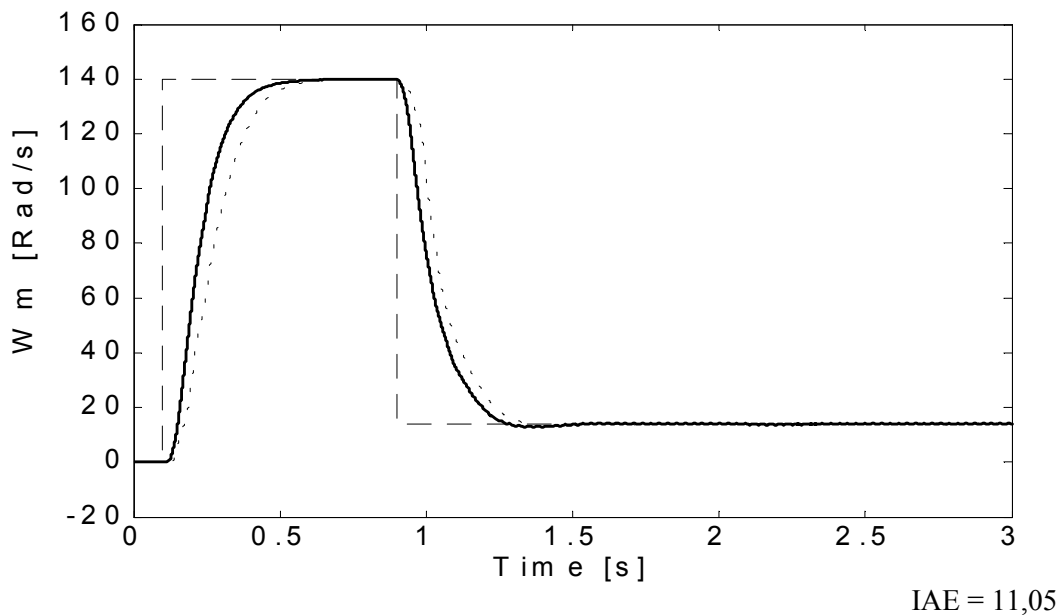


Fig. 4-13. $\omega_{m1}^* = 140 \text{ rad/s}$, $\omega_{m2}^* = 14 \text{ rad/s}$ - - - -,
 $\hat{\omega}_m$ final , ω_m real _____.

4.4 Resultats a consignes de tipus rampa

El sistema implantat també s'ha provat per a consignes de tipus rampa. Per a les consignes finals de 140, 70, 14 i 280 rad/s s'han implementat rampes acceleradores de 1.400, 280, 140 i 70 rad/s².

La figura 4-14 mostra la resposta del sistema per a les quatre rampes d'acceleració corresponents per a una consigna final de 140 rad/s. És mostra la velocitat de consigna, la velocitat real i la velocitat final estimada. És pot observar a les successives subfigures (4-14a, 4-14b, 4-14c i 4-14d) com per a tots els casos el sistema aconsegueix controlar finalment la velocitat del motor i que en el tram accelerador el sistema segueix la consigna amb un error permanent. Per una banda pot observar-se que part de l'endarreriment és degut a l'estructura del regulador (PI) i que per altra banda existeix un error, també permanent entre la velocitat estimada i la real. No obstant l'error en l'estimació es manté constant passat un cert temps transitori. És a dir, s'estableix un període transitori en l'estimació inicial de la velocitat i després l'estimació entra en un règim permanent propi on l'error en la velocitat estimada es manté constant.

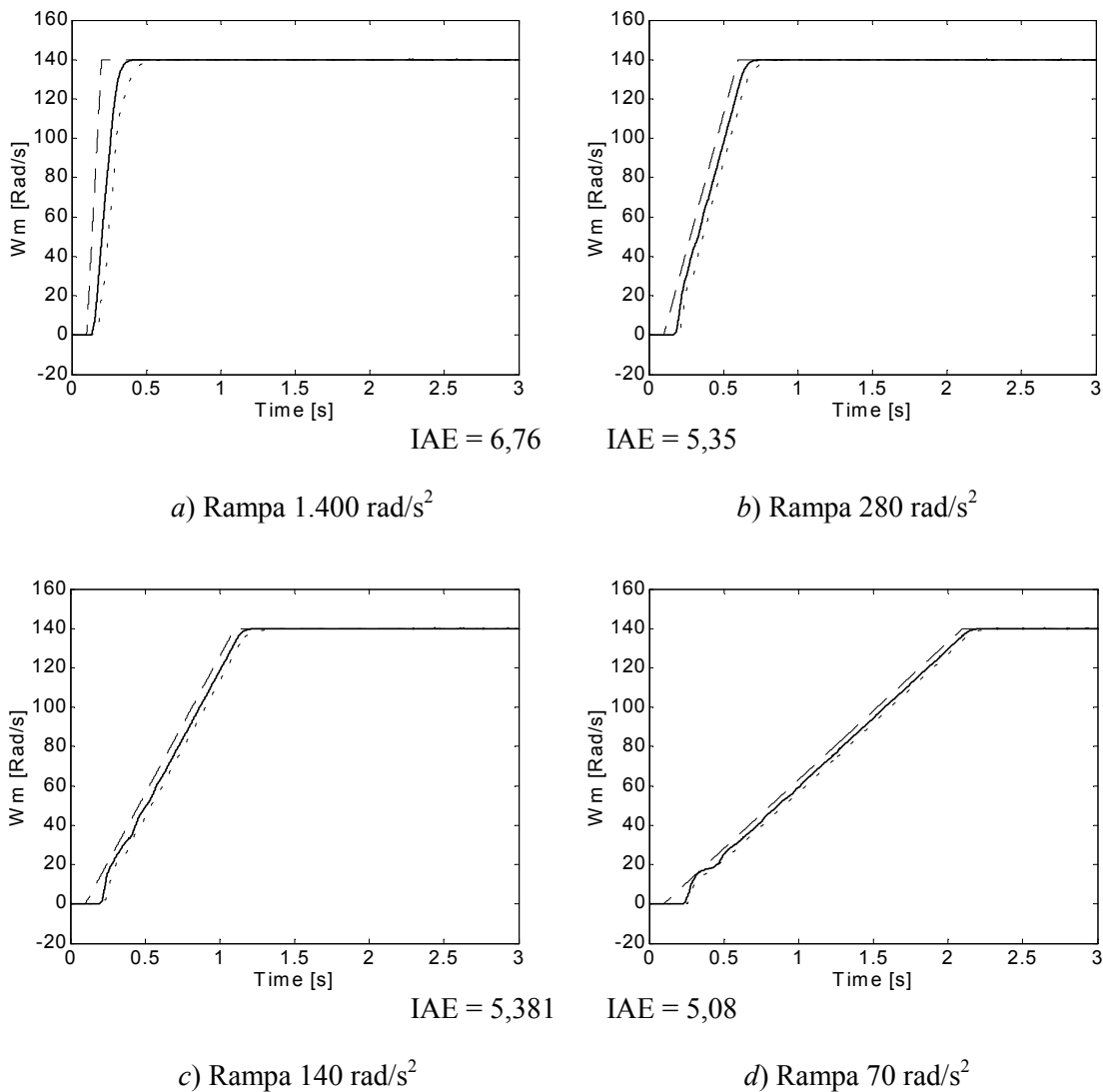


Fig. 4-14. $\omega_m^* = 140$ rad/s, - - - -, $\hat{\omega}_m$ final , ω_m real _____.

La figura 4-15 mostra la resposta del sistema per a les quatre rampes d'acceleració corresponents per a una consigna final de 70 rad/s (50% de la velocitat nominal). Els resultats són força similars als obtinguts en l'anterior conjunt de gràfiques però queda evidenciat que el sistema de control que dona la consigna de parell té problemes per arrencar, tot i que l'estimació de la velocitat és molt precisa. És a dir, l'estimació de la velocitat és correcta però l'estructura del regulador PI o la seva sintonia no ho és. No és objecte d'aquesta tesi, però, l'optimització d'aquest regulador.

Un altre fenomen que es pot observar és que per la primera rampa d'acceleració el sistema no és capaç de seguir la consigna. El problema és que la rampa d'acceleració és superior a l'acceleració màxima que el motor pot assolir amb la màxima consigna de parell per part del control FAM. És a dir, el sistema gairebé respon com si la consigna fos de tipus graó.

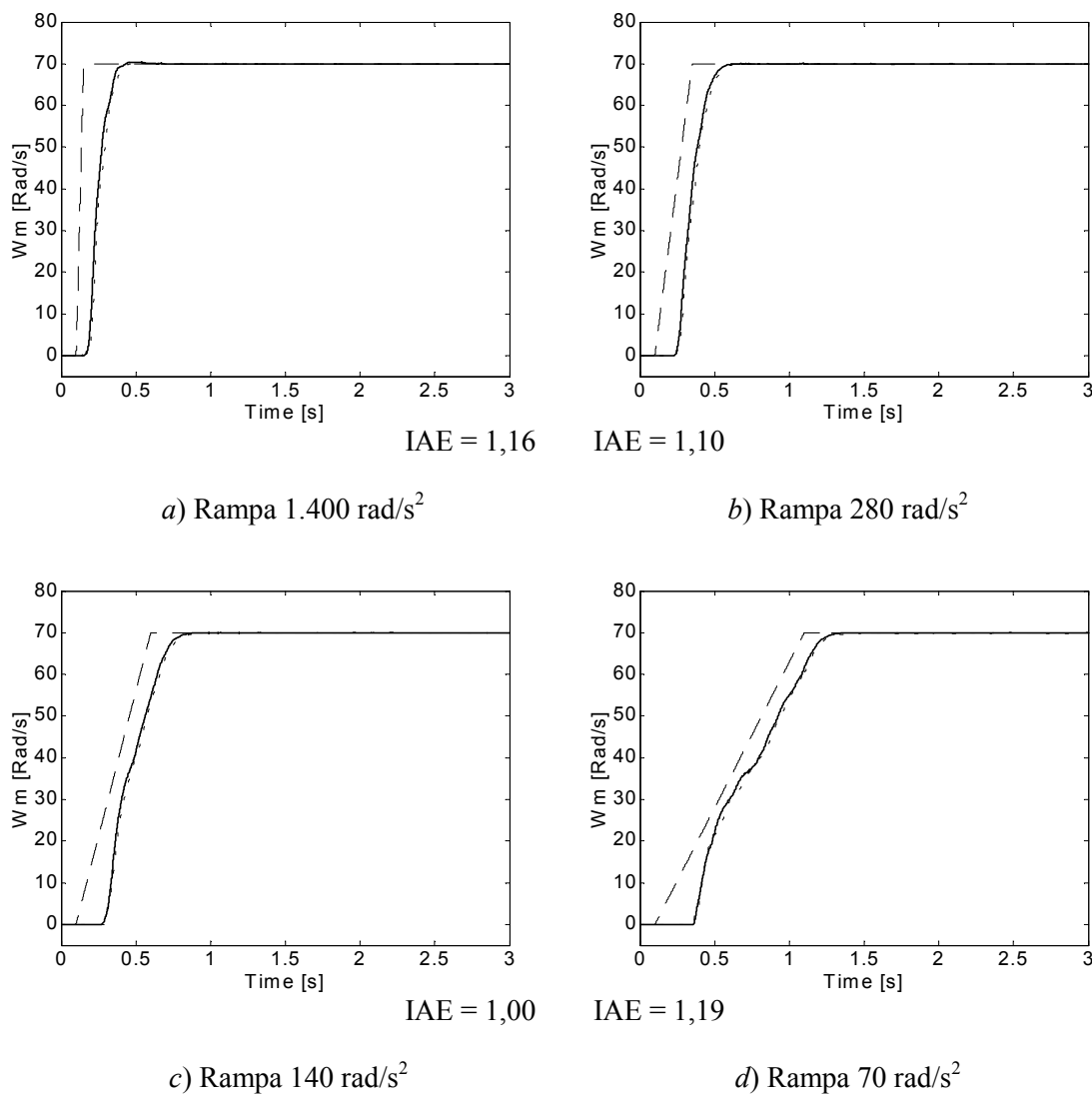


Fig. 4-15. $\omega_m^* = 70$ rad/s, - - - -, $\hat{\omega}_m$ final , ω_m real _____.

La figura 4-16 mostra la resposta del sistema per a les quatre rampes d'acceleració corresponents per a una consigna final de 14 rad/s (10% de la velocitat nominal). En aquestes gràfiques és més evident que existeix un problema amb el regulador, ja que la resposta a les quatre rampes d'acceleració és gairebé la mateixa. Això vol dir que el regulador no integra prou ràpid. Un altre problema pot ser que es necessita un parell important per fer vèncer el parell inicial de càrrega. El regulador PI va integrant l'error incrementant la consigna de parell. Quan el parell desenvolupat pel motor és més gran que l'ofert per la càrrega el motor comença a girar. Conforme el valor de la velocitat s'acosta al valor desitjat el regulador PI hauria de deixar d'incrementar el valor de la seva sortida per evitar el sobrepuig però si aquest regulador ne té una sintonia òptima és massa lent en reaccionar i es produeix el sobrepuig.

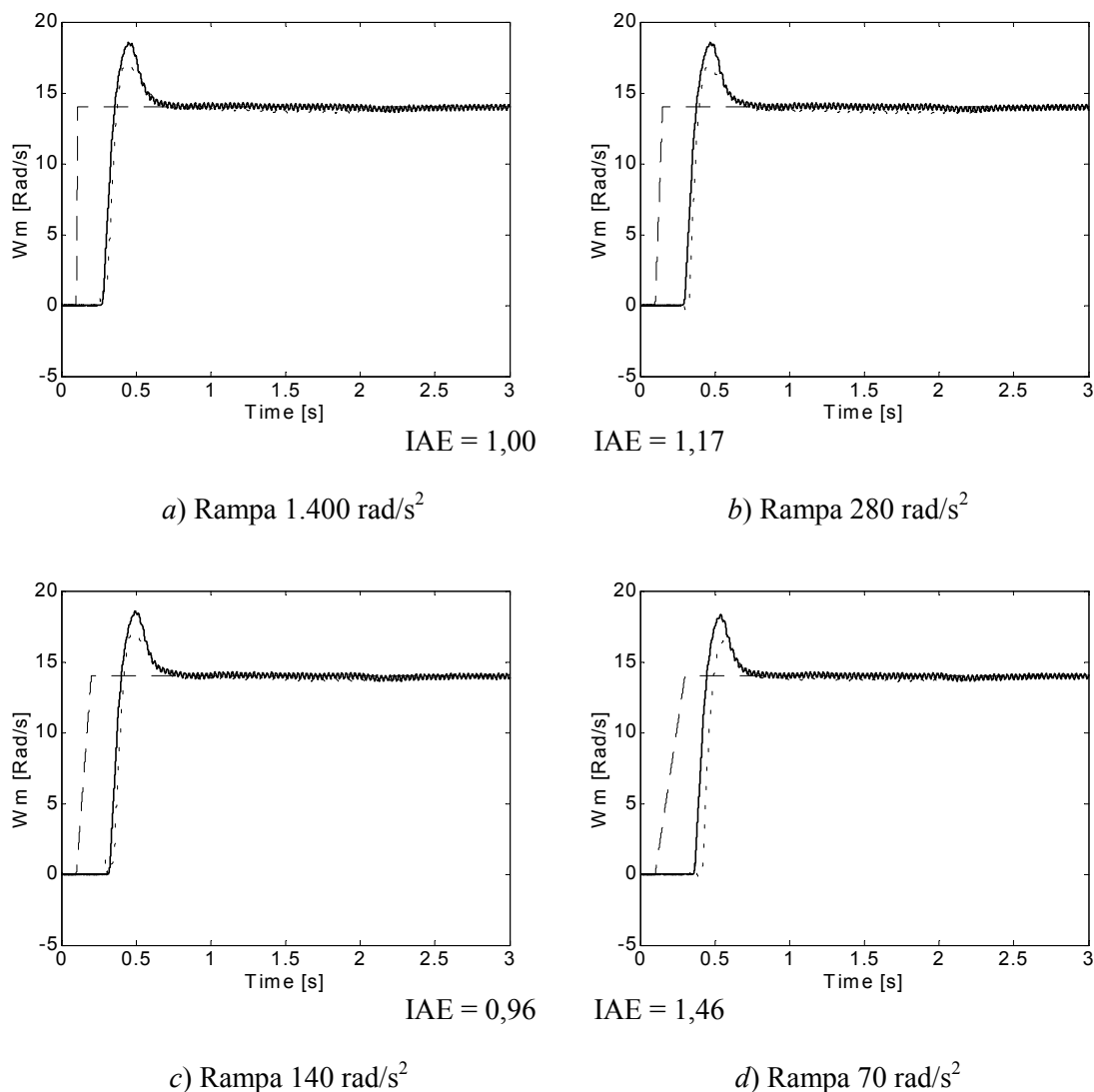


Fig. 4-16. $\omega_m^* = 14$ rad/s, - - - -, $\hat{\omega}_m$ final , ω_m real _____.

La figura 4-17 mostra la resposta del sistema per a les quatre rampes d'acceleració corresponents per a una consigna final de 280 rad/s (200% de la velocitat nominal). Poden observar-se els

mateixos efectes que els comentats per a anteriors figures. Hi ha error constant de velocitat i error constant de velocitat estimada. Pot observar-se, però, un altre efecte: l'error en la velocitat estimada respecte a la real no canvia un cop assolit el règim permanentment accelerat, però l'error entre la consigna i la velocitat, tant real com estimada, és més gran quan se supera la velocitat nominal. Això és conseqüència directa de la desmagnetització del motor per l'augment de la freqüència i el manteniment de la tensió. El fet de treballar en la zona de desmagnetització del motor d'inducció implica una reducció del parell que el motor és capaç d'aplicar a la càrrega i, malgrat que el control de parell està sol·licitant el màxim parell per accelerar, el motor no pot assolir la rampa de velocitat de consigna prefixada.

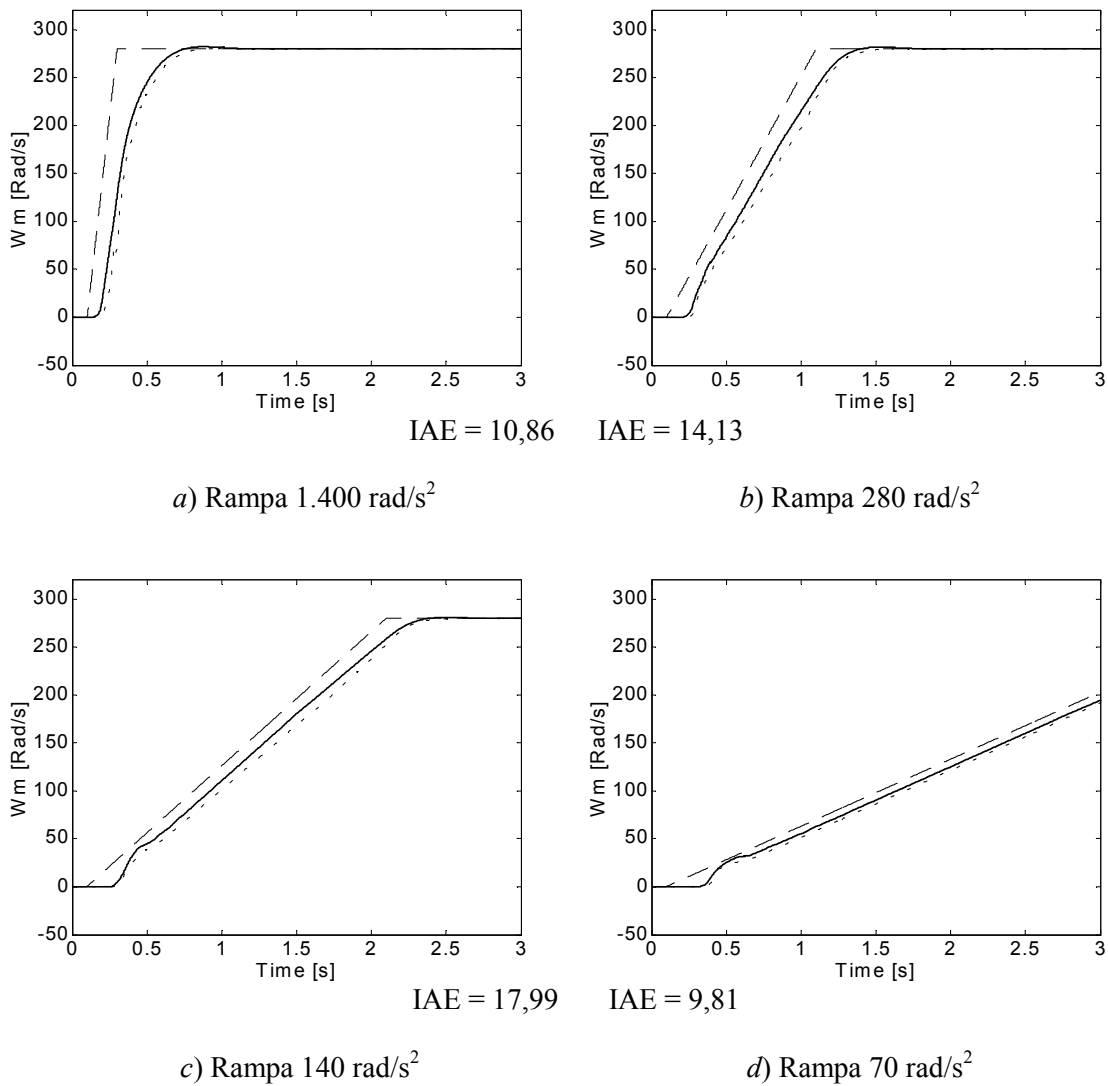


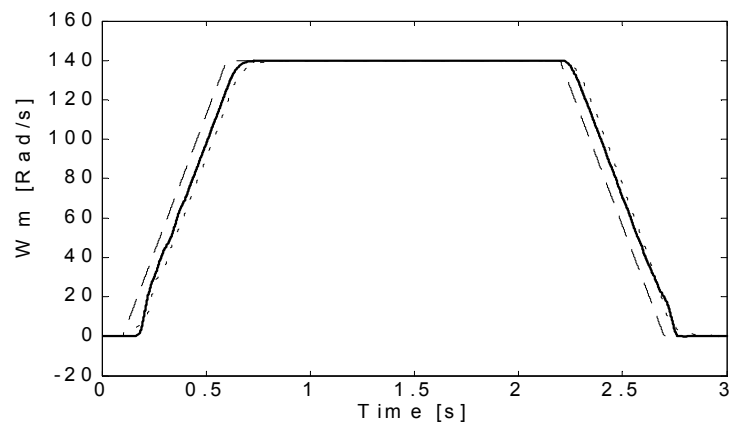
Fig. 4-17. $\omega_m^* = 280 \text{ rad/s}$, - - - -, $\hat{\omega}_m$ final , ω_m real _____.

4.4.1 Rampes acceleradores i desacceleradores

Per a l'aplicació del sistema és tan important una rampa acceleradora com una de desacceleradora. Per tant, el sistema també s'ha provat amb rampes desacceleradores. Les simulacions s'han realitzat amb una seqüència que primer accelera i després desaccelera amb el mateix pendent per poder establir comparatives.

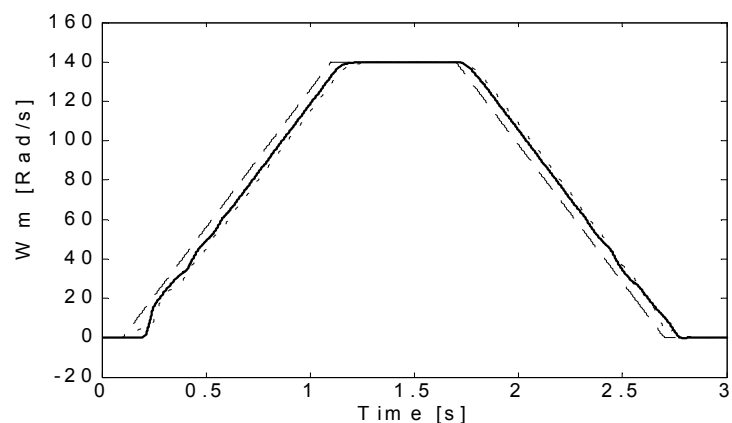
La figura 4-18 mostra la resposta per a consignes de velocitat nominal de rampes de 280 rad/s^2 i 140 rad/s^2 . Es pot observar que hi ha diferències entre les rampes de pujada i les de baixada, sobretot en l'extrem inferior de la rampa de baixada. És a dir, amb una velocitat propera a zero, la velocitat estimada s'apropa més a la real durant la frenada del motor que durant l'acceleració.

Les diferències observades són degudes al tipus de càrrega i al fet que durant el procés de frenada el conjunt en global tendeix a la frenada, és a dir, que el sentit del parell desaccelerador i el mecànic de la càrrega són el mateix.



IAE = 6,50

a) Rampa $+280 \text{ rad/s}^2$, -280 rad/s^2

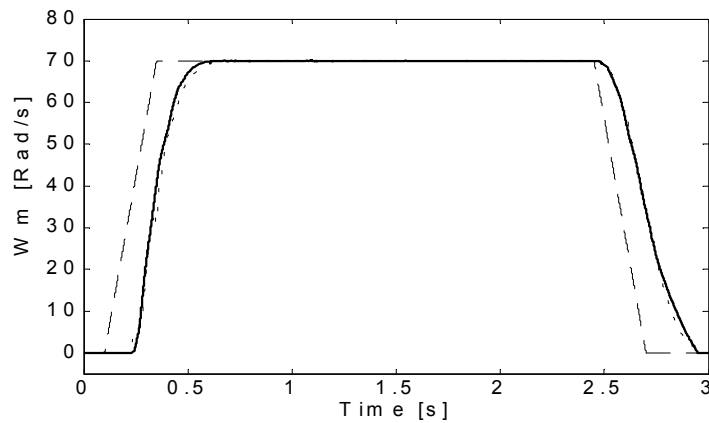


IAE = 6,57

b) Rampa $+140 \text{ rad/s}^2$, -140 rad/s^2

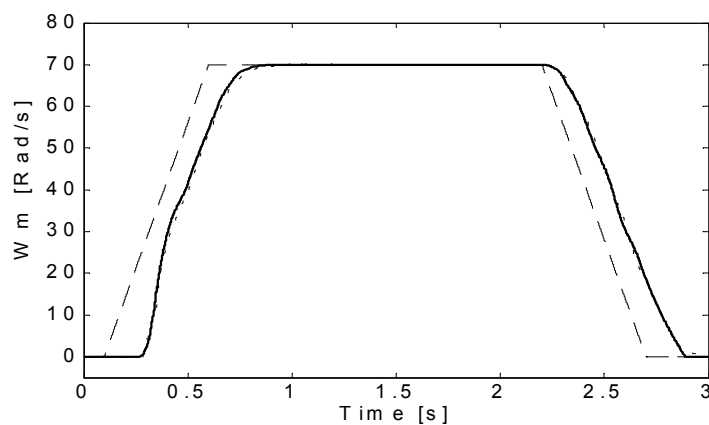
Fig. 4-18. $\omega_m^* = 140 \text{ rad/s}$, - - - -, $\hat{\omega}_m$ final , ω_m real _____.

La figura 4-19 mostra la resposta per a consignes de 70 rad/s de rampes de 280, 140 i 70 rad/s². No es poden observar diferències significatives entre les diverses rampes ni amb les rampes anteriors (fig. 4-18). No obstant això, es pot observar que un altre cop el sistema és capaç d'accelerar, mantenir una velocitat controlada i desaccelerar, sense perdre mai el control de la velocitat del motor, ni tan sols en els valors de velocitat propers a zero.



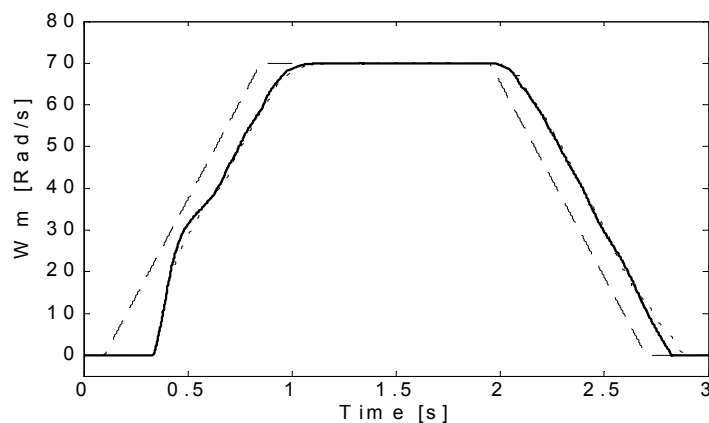
IAE = 1,63

a) Rampa +280 rad/s², -280 rad/s²



IAE = 1,49

b) Rampa +140 rad/s², -140 rad/s²

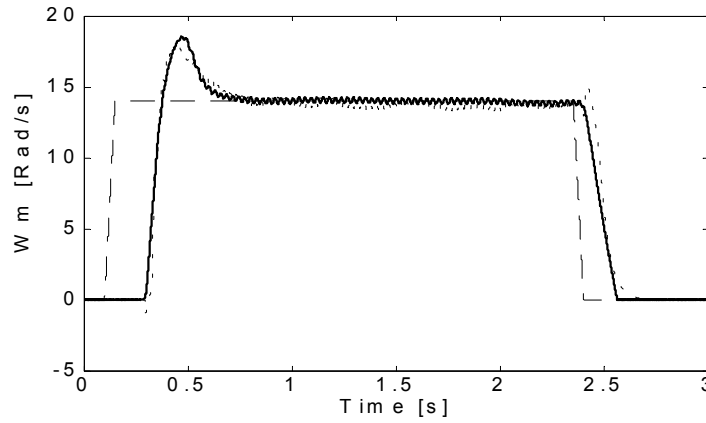


IAE = 2,02

c) Rampa +70 rad/s², -70 rad/s²

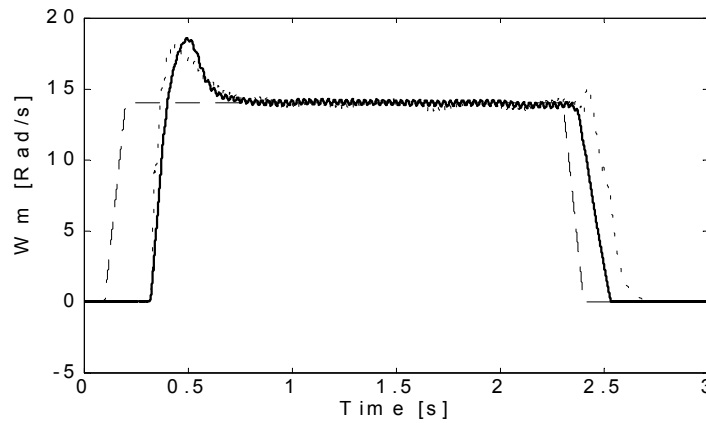
Fig. 4-19. $\omega_m^* = 70$ rad/s, - - - -, $\hat{\omega}_m$ final , ω_m real ———.

A la figura 4-20 es pot observar la resposta del sistema a rampes de 280, 140 i 70 rad/s² per a una consigna de velocitat de 14 rad/s. El sistema està sota control amb els problemes de sintonia de PI ja comentats. No obstant això, aquest efecte és diferent en l'acceleració que en la frenada del motor a causa, bàsicament, del tipus de càrrega que el motor arrossega.



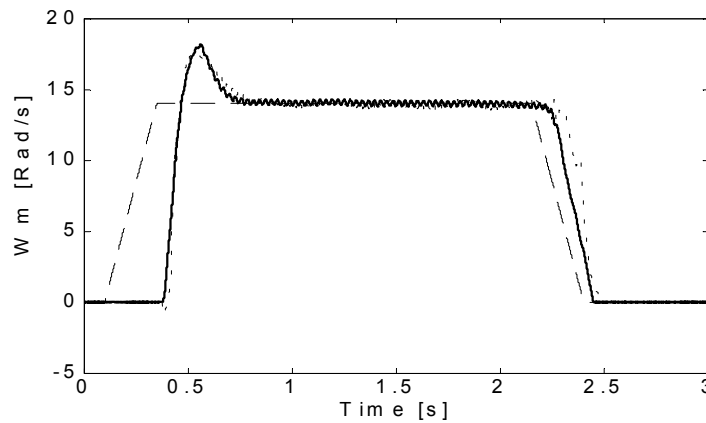
IAE = 1,24

a) Rampa +280 rad/s², -280 rad/s²



IAE = 2,10

b) Rampa +140 rad/s², -140 rad/s²



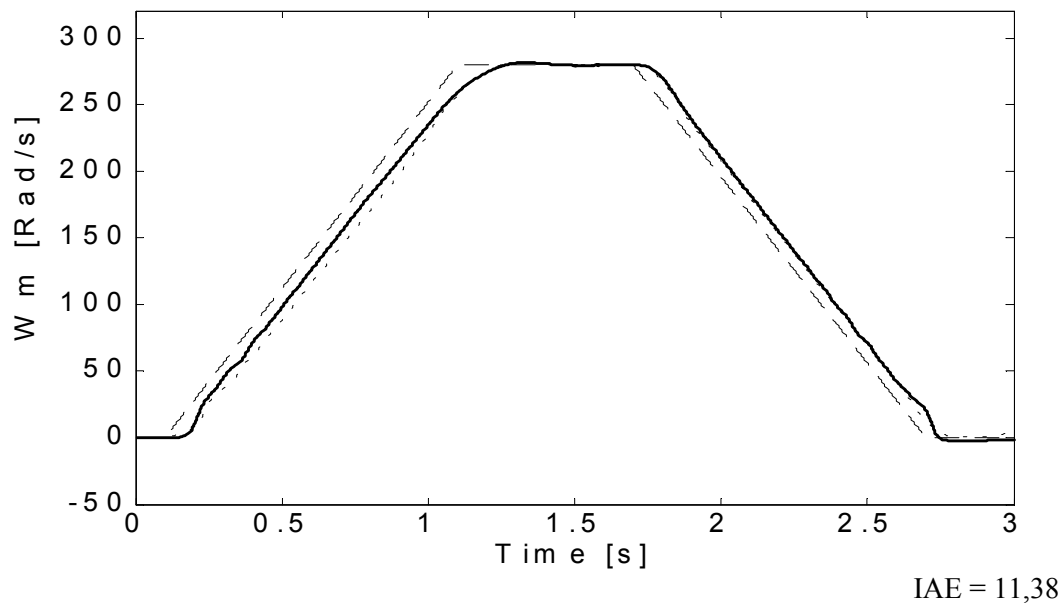
IAE = 1,41

d) Rampa +70 rad/s², -70 rad/s²

Fig. 4-20. $\omega_m^* = 14$ rad/s, - - - -, $\hat{\omega}_m$ final , ω_m real ———.

La figura 4-21 és la resposta del sistema per a una rampa de 280 rad/s^2 per a una consigna de velocitat de 280 rad/s . Es poden observar els mateixos efectes comentats fins ara: defectes en la sintonia del PI, problemes d'acceleració en la zona de desexcitació del motor, etc.

La figura demostra un altre cop que el conjunt funciona bé per a rampes d'acceleració i desacceleració, fins i tot per sobre de la velocitat nominal, i que el sistema és capaç de frenar i imposar una velocitat zero a la càrrega, sempre sota control.



a) Rampa $+280 \text{ rad/s}^2$, -280 rad/s^2

Fig. 4-21. $\omega_m^* = 280 \text{ rad/s}$, - - - -, $\hat{\omega}_m$ final , ω_m real ———.

4.5 Inversions de gir

L'avaluació del conjunt final també s'ha portat al camp de les inversions de gir. Les simulacions dutes a terme s'han centrat en el canvi del sentit de gir per a consignes de velocitat nominal.

Els primers resultats s'han trobat en canvis bruscs de consigna, és a dir, un cop el sistema ha assolit la velocitat nominal en un sentit s'ha aplicat una consigna de velocitat nominal contrària a la del sentit inicial.

A la figura 4-22 es poden observar els resultats. Es mostren de manera superposada la resposta de velocitat i la de parell. L'estimació de velocitat, encara que s'hi aprecien alguns problemes, és capaç de seguir a la velocitat real en tot moment, amb un endarreriment considerable en la zona del pas per zero de la velocitat real. Però el sistema és capaç d'invertir el sentit de gir del motor i establir novament la velocitat a la nova consigna.

Pel que fa a la resposta del parell, el sistema també evidencia certs problemes en el descens de la velocitat i quan la velocitat passa per zero. Com s'ha comentat anteriorment, l'efecte que produeixen els mínims valors de tensió i corrent al motor en alguns punts de treball és important però no decisiu en el resultat final.

A la figura també es pot observar el parell de càrrega i com canvia de sentit quan la velocitat real del motor canvia de sentit.

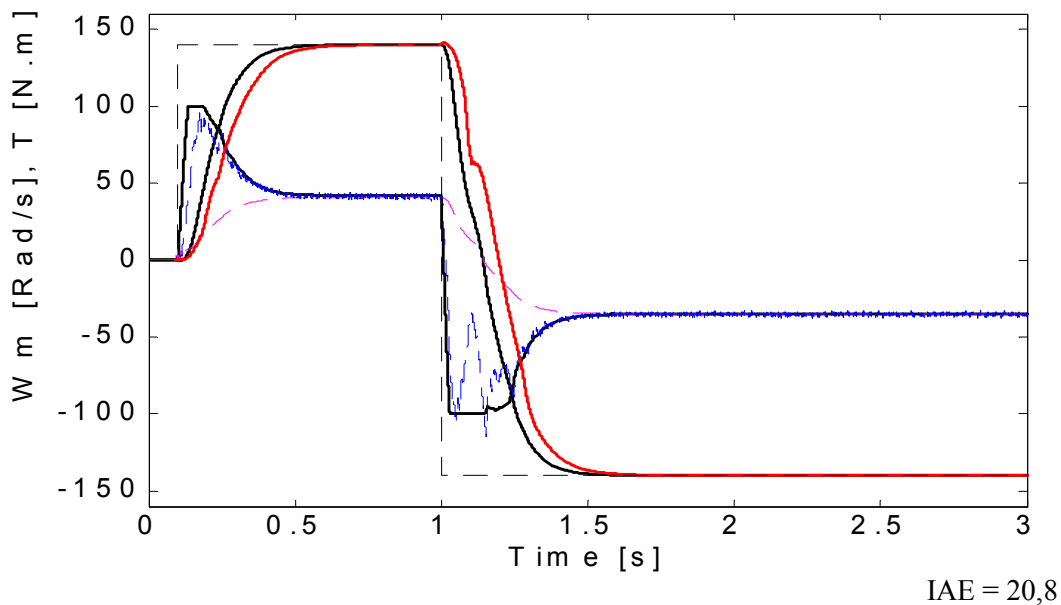


Fig. 4-22. $\omega_m^* = 140 \text{ rad/s}$ - - - $\omega_m \text{ real}$ - - - $\hat{\omega}_m \text{ final}$ - - - ,
 $5 * \Gamma^*$, $5 * \Gamma_{\text{electromag}}$ - - - , $5 * \Gamma_{\text{mec}}$ - - - .

La figura 4-23 mostra una altra inversió del sentit de gir. Aquest cop la consigna és una rampa de desacceleració i posterior acceleració de -140 rad/s^2 . S'observa que la resposta és igual a la que ja s'havia obtingut per als resultats de rampes acceleradores i desacceleradores de l'apartat anterior. Cal destacar que el retard de la velocitat estimada en relació amb la velocitat real del motor és

menor que en el cas de la figura 4-22 perquè el canvi de parell és menys bruscat en la segona gràfica que en la primera. A més, l'efecte del pas per zero de la velocitat del motor i l'efecte produït pels nivells mínims de tensions i corrents en el motor en aquesta zona de treball afecten menys la resposta del sistema.

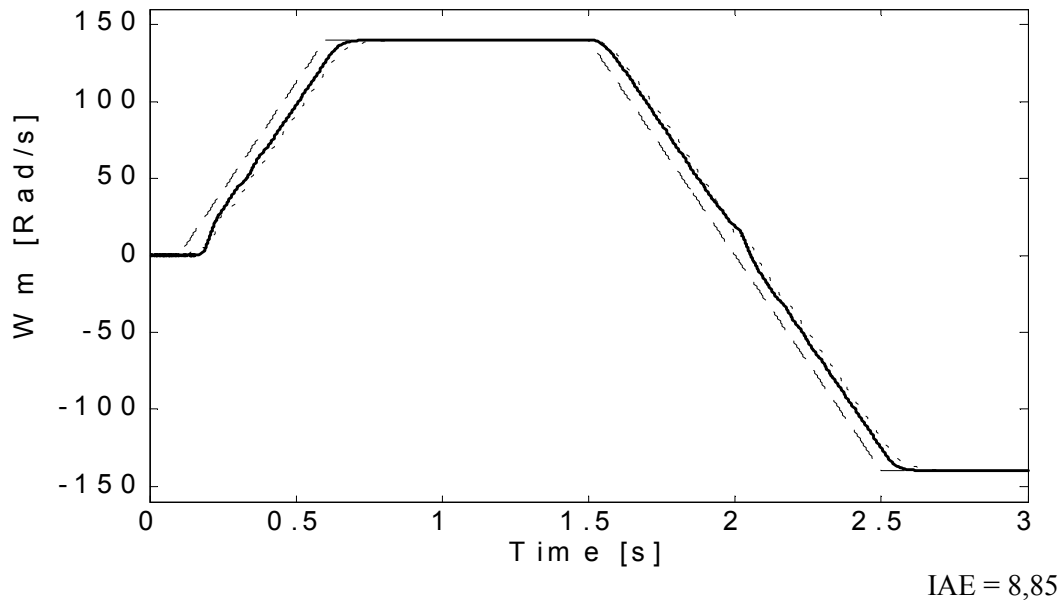


Fig. 4-23. $\omega_{m1}^* = 140 \text{ rad/s}$, $\omega_{m2}^* = -140 \text{ rad/s}$ — — —, $\hat{\omega}_m$ final , ω_m real ———.

4.6 Conclusions

El sistema sintetitzat al capítol anterior s'ha implementat en simulació. Aquest model de simulació té en consideració tots els blocs que s'hauran d'implementar i/o programar a l'entorn experimental i tots els elements hardware, amb les seves no idealitats, del que es disposa en el sistema real.

Els elements implementats són:

- Els estimadors de velocitat i els sistemes de promigat i filtrat fuzzy per l'obtenció de la velocitat final estimada del motor
- El regulador PI tenint en consideració les limitacions del sistema d'accionament
- El control de parell tenint en compte els limitadors oportuns per evitar que la consigna de sortida sigui superior a la que l'inversor pot imposar al motor.
- El model de l'inversor per obtenir la tensió del motor sense necessitat de mesura.
- El modulador vectorial amb estructura modificada per evitar els temps morts dels transistors del l'inversor

- El motor d'inducció.
- La càrrega mecànica que representa la bancada solidària a l'eix del motor.
- El pont inversor trifàsic tenint en compte els temps morts dels IGBT's, les caigudes de tensió, etc.
- Els sensors de corrent i dels filtres corresponents.

A més, totes les equacions han estat introduïdes al model com equacions discretes i durant la simulació treballen amb un temps d'iteració igual al que es preveu que treballaran en el sistema experimental.

En aquest capítol també se n'han extret resultats. S'ha sotmès el sistema de control de velocitat no solament a canvis de consigna sinó també a canvis del parell de càrrega per simular qualsevol procés industrial i comprovar l'eficàcia del sistema. Sobre el model de simulació s'ha incorporat la càrrega física que es disposarà en el sistema experimental per poder fer després una comparació directa entre els resultats de simulació i els experimentals.

Els assaigs als quals s'ha sotmès el sistema han estat:

- Consignes de graó. En tots els casos el sistema ha estat capaç d'assolir la velocitat i mantenir-la sota control. S'ha observat que els problemes principals a l'hora d'estimar i controlar la velocitat són amb velocitats baixes, principalment perquè el tipus de càrrega que hi ha a l'eix del motor implica poc parell a baixes velocitats i desemboca en uns valors de tensió i corrent molt petits. També s'ha observat que, tot i que als instants inicials el valor de la velocitat estimada per l'estimador en règim permanent està lluny del valor real, ràpidament passa a ser el valor real de la velocitat. Això és principalment perquè el sistema en conjunt està sota control gràcies a la velocitat estimada per l'estimador en règim transitori.
- Canvis dinàmics de parell. En l'estimació de la velocitat els canvis del punt de treball poden influir desfavorablement. El sistema implementat ha estat capaç de controlar la velocitat davant un canvi brusc del parell de càrrega. La ràpida actuació davant aquest canvi és perquè la velocitat estimada passa de dependre molt de l'estimació en règim permanent i poc de l'estimació en règim transitori a la situació contrària. És per això que queda validada la suposició de la necessitat que l'estimador en règim transitori continuï estimant la velocitat després de l'arrencada.
- Canvis de consignes. Un canvi de consigna per al control FAM no és més que un canvi en la consigna de parell i, per tant, el sistema ha demostrat la seva eficàcia. En aquest punt s'han fet assaigs a velocitat zero. És a dir, després d'un període de control d'una consigna de velocitat nominal s'ha donat l'ordre de baixar la velocitat a zero. El sistema ha reeixit.
- Canvis de consignes de tipus rampa. S'ha provat el comportament del sistema davant canvis de consignes de tipus rampa, amb acceleració constant. S'ha posat en evidència el problema existent amb l'estructura del regulador emprat (PI). S'han posat a prova tant les

rampes acceleradores com les desacceleradores que fan que el motor de la velocitat consigna desitjada es pari.

- Inversió del sentit de gir. S'ha avaluat el sistema per al canvi de sentit de gir. El sistema ha funcionat però el comportament és crític quan la velocitat del motor real passa per zero. Els efectes dels mínims corrents i els valors de les inductàncies que funcionen a freqüències molt baixes són pitjors en canvis sobtats del sentit de gir que no pas en canvis del sentit de gir en què es fan servir rampes desacceleradores.

Com a conclusió final és pot afirmar que el sistema *sensorless* basat en la idea de la mitjana ponderada entre els estimadors en règim permanent i en règim transitori, aquest darrer filtrat de manera intel·ligent pel mateix sistema fuzzy que realitza la mitja ponderada, funciona en simulació i per tant vàlida en part la proposta de tesi. Cal validar el sistema sobre un entorn experimental real.