

## 6. RESULTATS EXPERIMENTALS

El sistema global desenvolupat al capítol 3 s'ha implementat experimentalment com es descriu al capítol 5. Per validar el sistema s'han experimentat els mateixos assaigs que ja s'han fet en simulació.

- 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.

No obstant això, el sistema experimental s'ha validat per a un nombre més alt de consignes de tipus rampa més lentes (minuts de durada), que en simulació resulten impracticables. A més, s'ha experimentat amb valors de consigna de velocitat inferiors als que s'havien fet per simulació.

Les figures que apareixen en aquest capítol tenen dos formats diferents. Per una banda, hi ha les gràfiques extretes a partir de les dades enregistrades pel programa que conté el sistema de control (capítol 5), i per l'altra, gràfiques obtingudes de la mesura amb instruments.

Per a tots els assaigs on el temps és comparable (3s) s'ha extret l'índex IAE, integral del valor absolut de l'error entre la velocitat real i l'estimada final (eq. 6-01).

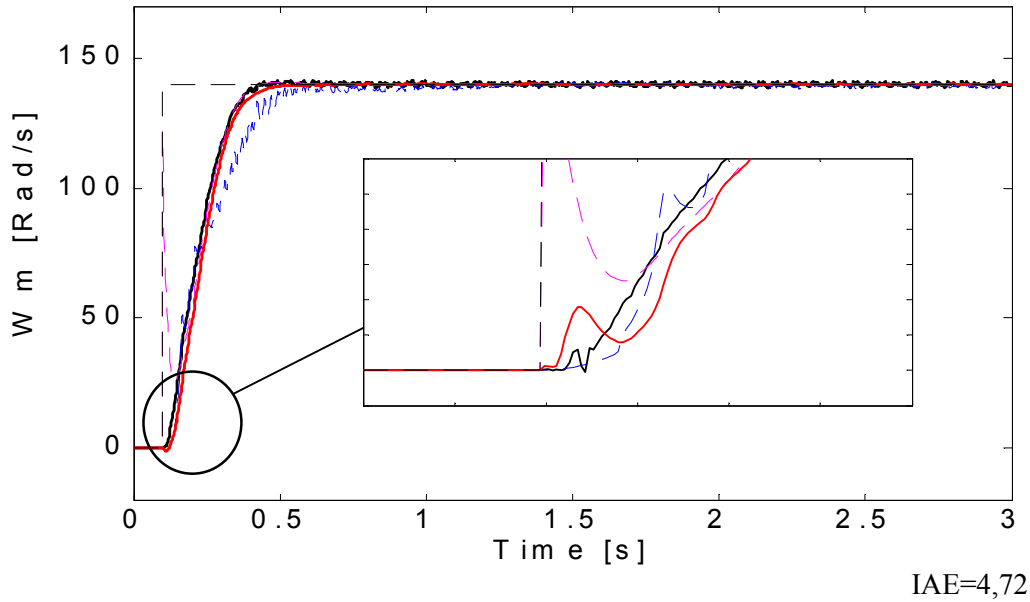
$$IAE = \int_0^3 |\omega_m - \hat{\omega}_m| dt \quad (\text{Eq. 6-01})$$

### 6.1 Resultats a consignes de graó constants

El primer grup d'experiments són respostes a consignes de tipus graó. En totes les gràfiques es pot observar un primer període de magnetització de la màquina (0,1 s) i la posterior consigna de velocitat.

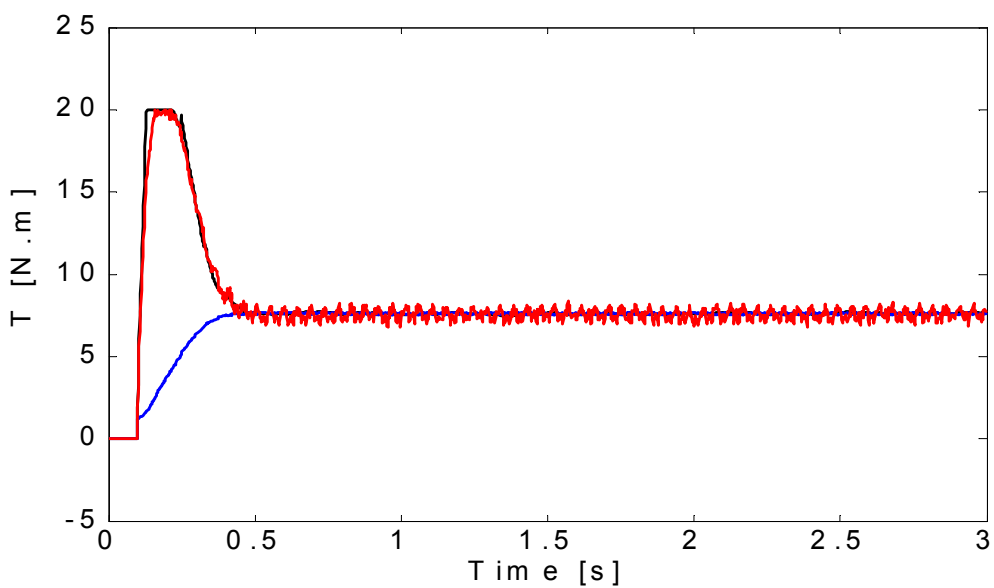
A la figura 6-01, per a un 6a consigna de 140 rad/s (velocitat propera a la nominal), es pot observar que el sistema és capaç d'estimar la velocitat i tancar el llaç amb aquesta velocitat estabilitzant-la al

valor de referència. Es mostren també les velocitats estimades d'ambdós estimadors. Es veu que en el moment inicial l'estimador en règim permanent ofereix un valor erroni de velocitat estimada i és gràcies a l'estimador en règim transitori que el motor arrenca correctament. Posteriorment la velocitat final estimada és majoritàriament el valor de la velocitat de l'estimador en règim permanent.



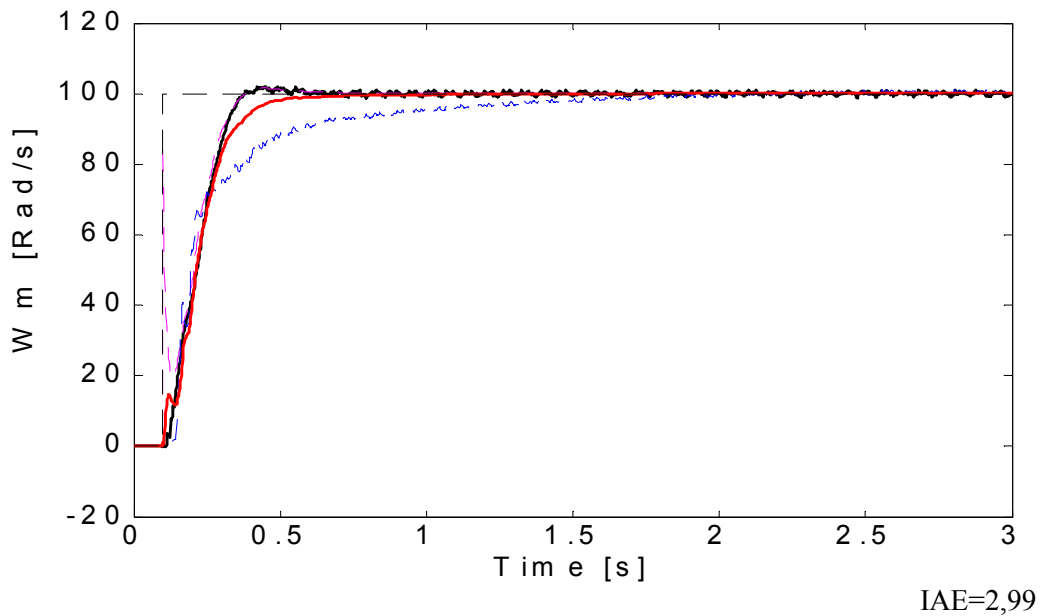
**Fig. 6-01.**  $\omega_m^* = 140 \text{ rad/s}$  — — —,  $\hat{\omega}_m$  règ. perm. — — —,  $\hat{\omega}_m$  règ. trans. — — —,  $\hat{\omega}_m$  final — — —,  $\omega_m$  real — — —

La figura 6-02 mostra la consigna de parell imposada al control FAM, el parell electromagnètic observat al motor i el parell mecànic ofert per la càrrega.



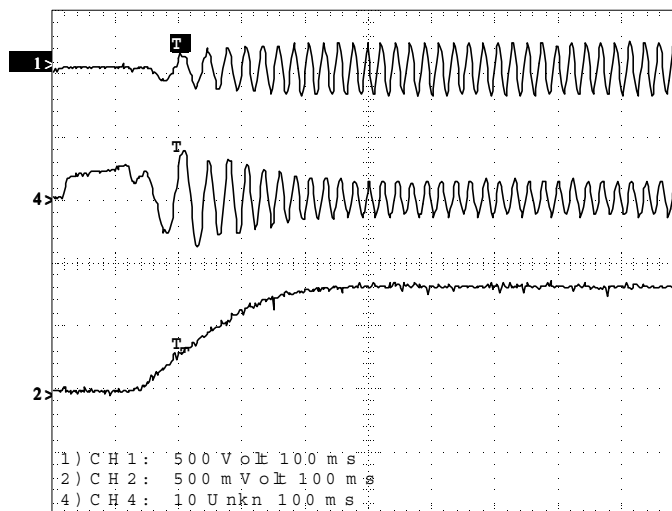
**Fig. 6-02.**  $\omega_m^* = 140 \text{ rad/s}$ ,  $\Gamma^*$  — — —,  $\Gamma_{\text{electromag}}$  — — —,  $\Gamma_{\text{mec}}$  — — —

A la figura 6-03 s'observa la resposta del sistema per a una consigna de velocitat de 100 rad/s. L'efecte de l'endarreriment causat pel filtratge sobre la resposta de l'estimador en règim permanent és corregit pel promitjat fuzzy, ja que la resposta final en la zona de més endarreriment és predominantment la de l'estimador en règim permanent.



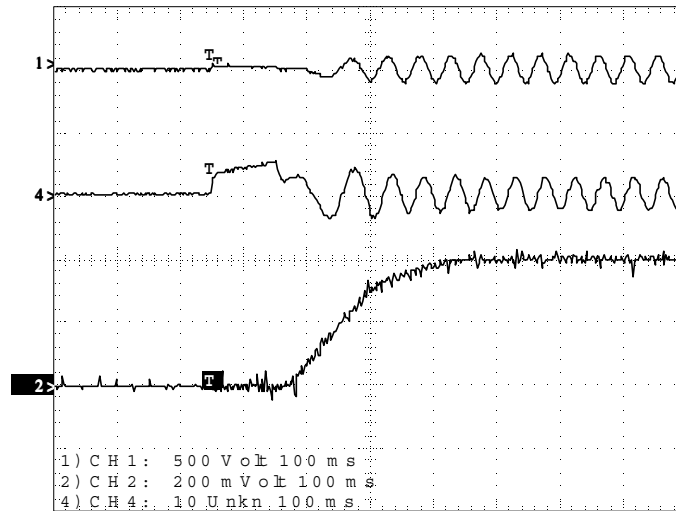
**Fig. 6-03.**  $\omega_m^* = 100 \text{ rad/s}$  — — —,  $\hat{\omega}_m$  règ. perm. - - - -,  $\hat{\omega}_m$  règ. trans. - - - -,  $\hat{\omega}_m$  final — — —,  $\omega_m$  real — — —

La figura 6-04 és la captura per l'oscil·loscopi de la tensió de la fase *a* (filtrada), el corrent de la mateixa fase i la resposta de velocitat per a una consigna de velocitat de 100 rad/s. A les gràfiques de la tensió (Ch1) i el corrent (Ch4) es pot observar un primer període en què la tensió té un valor continu i el corrent puja fins a assolir el valor nominal. A partir d'aquest punt, la màquina està magnetitzada i s'aplica consigna de velocitat al sistema de control. Això provoca l'aparició de tensions i corrents alterns sinusoidals i fa que la velocitat del motor (Ch2) augmenti.



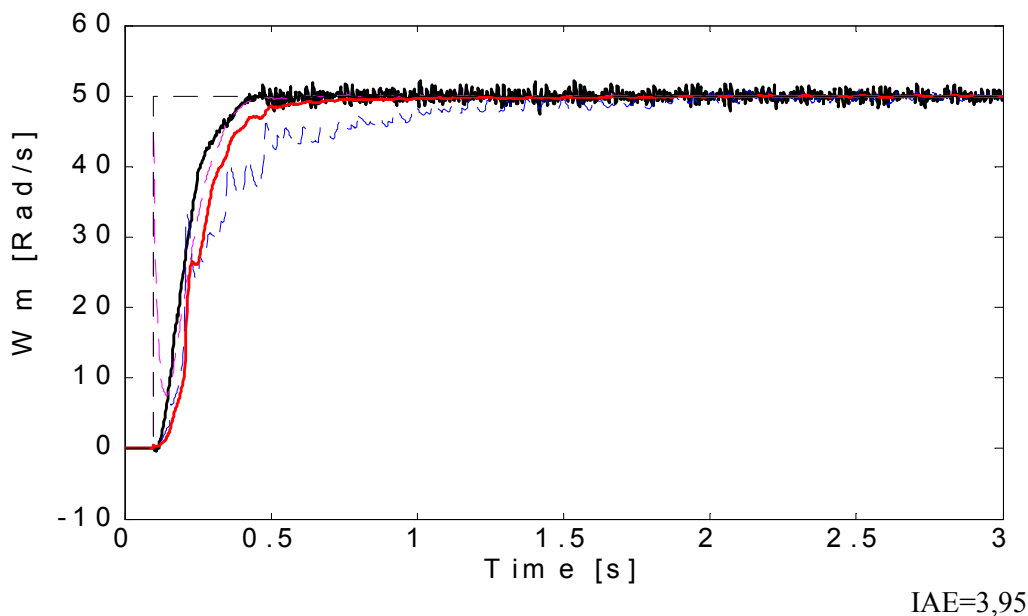
**Fig. 6-04.**  $\omega_m^* = 100 \text{ rad/s}$ .  $u_a$  : Ch1(500V/div);  $i_a$  : Ch4 (10 A/div),  $\omega_m$  : Ch2 (78 (rad/s)/div)

La figura 6-05 mostra de la mateixa manera les magnituds per a un assaig amb consigna 70 rad/s.



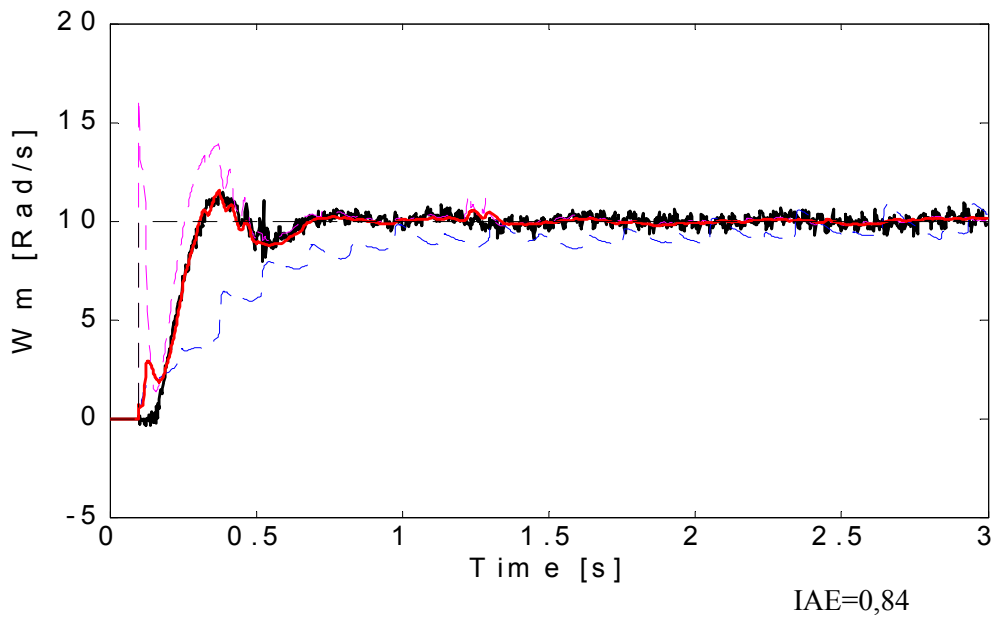
**Fig. 6-05.**  $\omega_m^* = 70$  rad/s  $u_a$  : Ch1(500V/div);  $i_a$  : Ch4 (10 A/div),  $\omega_m$  : Ch2 (34 (rad/s)/div)

La figura 6-06 és la resposta a una consigna de velocitat de 50 rad/s. El comportament del sistema és igual que en assaigs anteriors, però cal fer esment de l'arribada de la velocitat real. El valor d'aquesta arribada és degut en gran part al sistema d'adquisició de velocitat (dynamo tacomètrica, annex I) i del seu filtratge. Com més baixa és la velocitat, més desfavorable és la relació senyal-soroll.



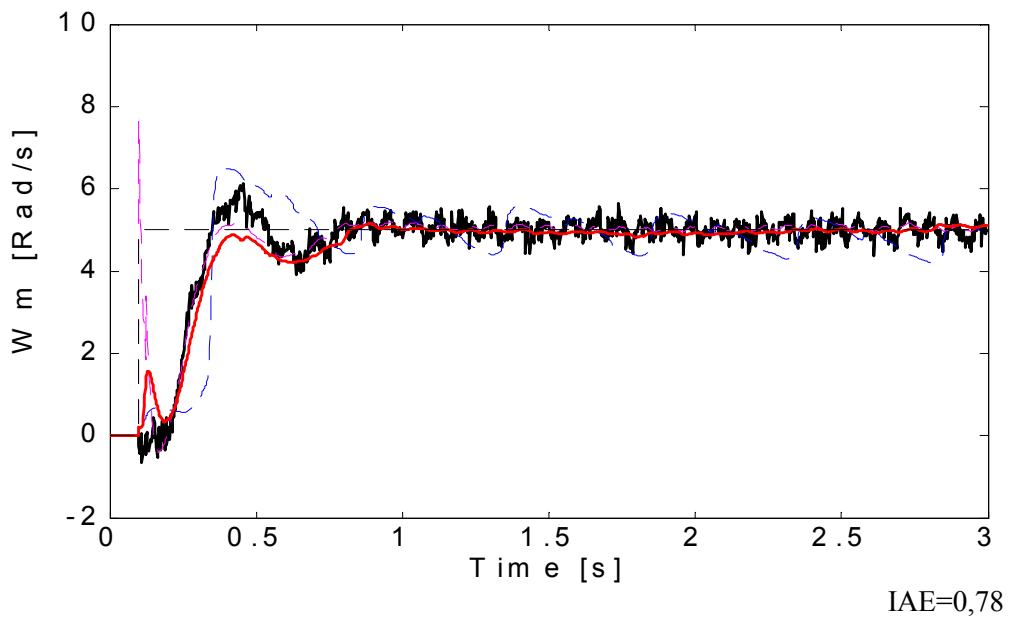
**Fig. 6-06.**  $\omega_m^* = 50$  rad/s — — —,  $\hat{\omega}_m$  règ. perm. - - - - ,  
 $\hat{\omega}_m$  règ. trans. - - - - ,  $\hat{\omega}_m$  final ———,  $\omega_m$  real ———

La figura 6-07 ensenya la resposta del sistema per a una consigna de 10 rad/s. El sistema estima i estabiliza la velocitat tot i que s'observen problemes de sobrepuigs. El sistema queda afectat per la sintonia i la mateixa estructura del regulador (problemes ja comentats al capítol 4).



**Fig. 6-07.**  $\omega_m^* = 10 \text{ rad/s}$  — — — —,  $\hat{\omega}_m$  règ. perm. — — — —,  $\hat{\omega}_m$  règ. trans. — — — —,  $\hat{\omega}_m$  final — — — —,  $\omega_m$  real — — — —

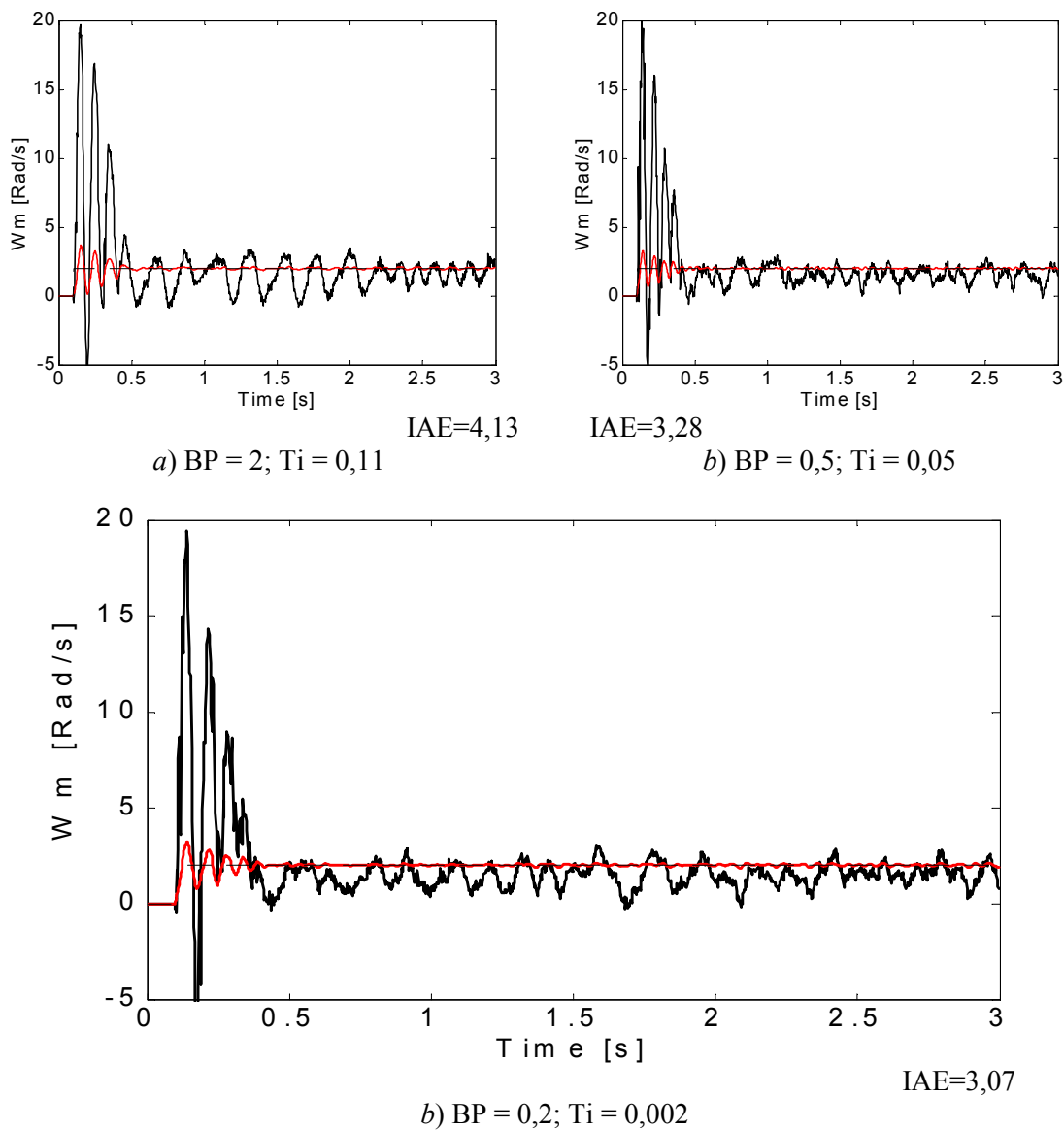
El valor de la velocitat estimada per l'estimador en règim transitori és més ineficaç com més disminueix el valor de la consigna. L'arribada de la velocitat estimada per l'estimador en règim transitori en relació amb la mateixa velocitat és massa elevada, tot i el filtratge important que se li aplica, perquè el valor final de la velocitat estimada depengui àmpliament d'aquest estimador. La figura 6-08 mostra la resposta per a una consigna de 5 rad/s (aprox. el 3% de la velocitat nominal), on la freqüència aproximada sobre el motor és d'1,64 Hz.



**Fig. 6-08.**  $\omega_m^* = 5 \text{ rad/s}$  — — — —,  $\hat{\omega}_m$  règ. perm. — — — —,  $\hat{\omega}_m$  règ. trans. — — — —,  $\hat{\omega}_m$  final — — — —,  $\omega_m$  real — — — —

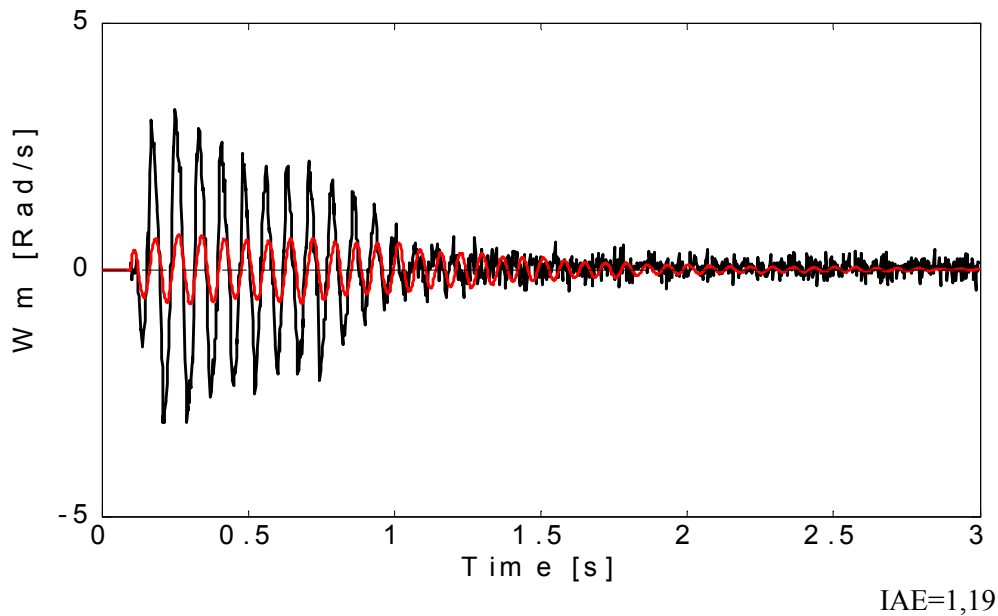
A partir del valor de la gràfica anterior, el sistema no és perfectament estable i entren a influir en la resposta final tots els aspectes del conjunt. La resposta del conjunt PI + control FAM no és la més adequada. Ja s'ha comentat amb anterioritat la necessitat de modificar no solament l'estructura del regulador, sinó la seva sintonia. A més, la velocitat estimada final per a aquestes velocitats, tot i tenir la tendència de la consigna la forma de la velocitat real té un error d'1 rad/s. A altes velocitats aquest error pot no ser significatiu, però amb una consigna de velocitat de 2 rad/s és del 50%. Una altra influència és el punt de treball del motor (proper a la velocitat nul·la) amb corrent i tensions molt petits i de tots els efectes de variació de paràmetres, etc. A més, també hi influirà el tipus de parell que ofereix la càrrega. La precisió del modulador vectorial també influirà en la resposta del sistema.

La figura 6-09 mostra tres respostes per a una consigna de 2 rad/s (1,4% de la velocitat nominal). La freqüència dels corrents i tensions al motor és aproximadament de 0,66 Hz. Pot observar-se l'efecte sobre l'índex d'error de la resintonia del regulador PI sobre aquest punt.

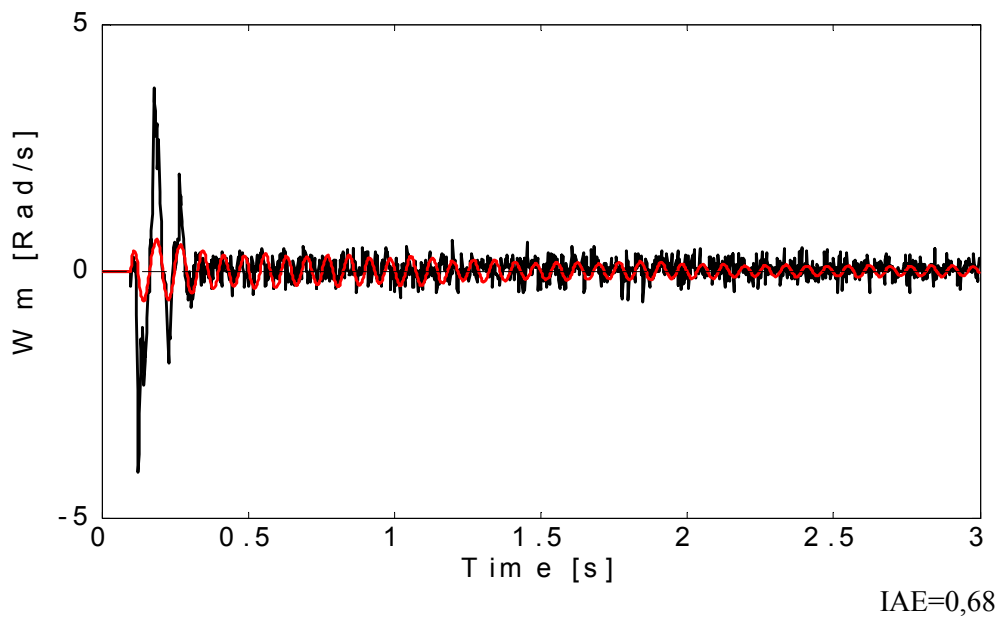


**Fig. 6-09.**  $\omega_m^* = 2$  rad/s — — —,  $\hat{\omega}_m$  final ———,  $\omega_m$  real ———

El sistema també s'ha provat per a consignes de velocitat 0. La figura 6-10 mostra la resposta del conjunt per a dues situacions diferents. La figura 6-10a s'obté a rotor lliure, és a dir, el valor de la càrrega és exclusivament el parell inicial de la bancada. El comportament indica l'estabilitat del sistema en règim permanent però amb un problema inicial amb l'estabilització de la velocitat. La figura 6-10b mostra la resposta del sistema quan sobre l'eix es força un parell proper al valor de parell nominal. En el segon cas, amb valors de corrent superiors als del primer, el sistema és capaç d'estabilitzar-se més ràpid.



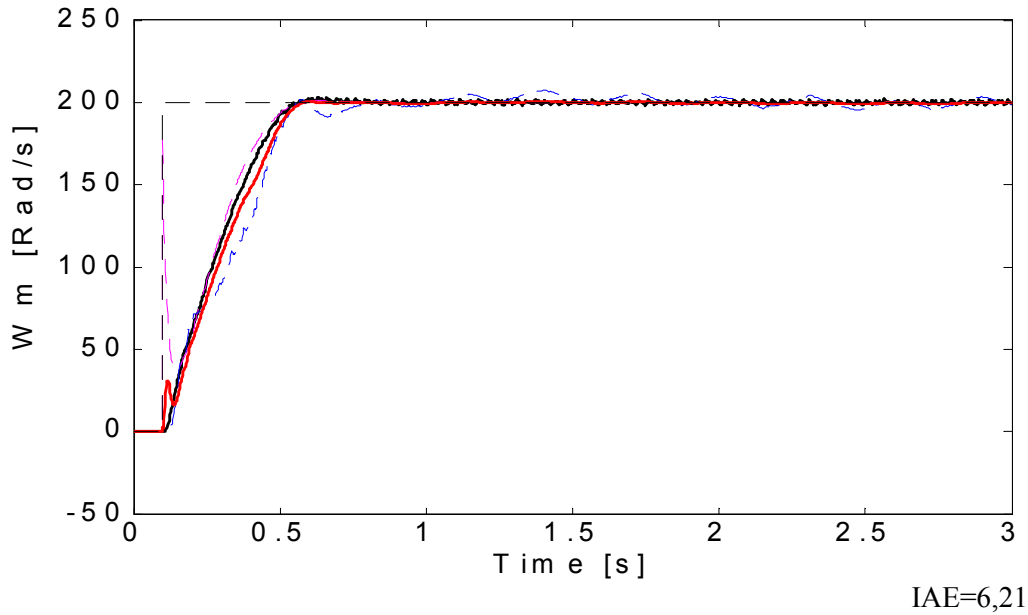
a) Sense càrrega al rotor,  $\Gamma_{mec} = 1Nm$



b) Amb càrrega al rotor,  $\Gamma_{mec} = 8Nm$

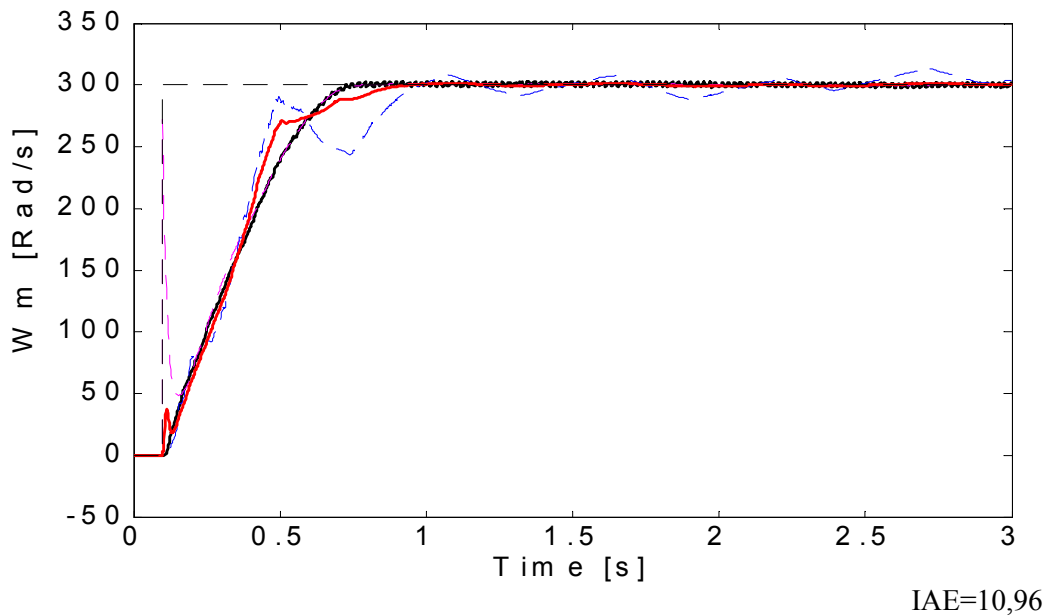
**Fig. 6-10.**  $\omega_m^* = 0$  rad/s — — —,  $\hat{\omega}_m$  final ———,  $\omega_m$  real ———

El sistema també s'ha provat per a velocitats superiors a la nominal. A la figura 6-11 es pot observar que ambdós estimadors funcionen com s'espera. El punt de treball del motor, desexcitació, etc., afecten sobretot l'estimador en règim transitori, i la velocitat en règim permanent estimada per aquest estimador té una arrissada important.



**Fig. 6-11.**  $\omega_m^*=200$  rad/s — — —,  $\hat{\omega}_m$  règ. perm. - - - - ,  
 $\hat{\omega}_m$  règ. trans. - - - - ,  $\hat{\omega}_m$  final ———,  $\omega_m$  real ———

La figura 6-12 mostra que l'estimador en règim transitori té molts problemes per estimar qualsevol velocitat per sobre de la velocitat nominal del motor i és l'estimador en règim permanent el que manté l'estimació de velocitat final sota control.

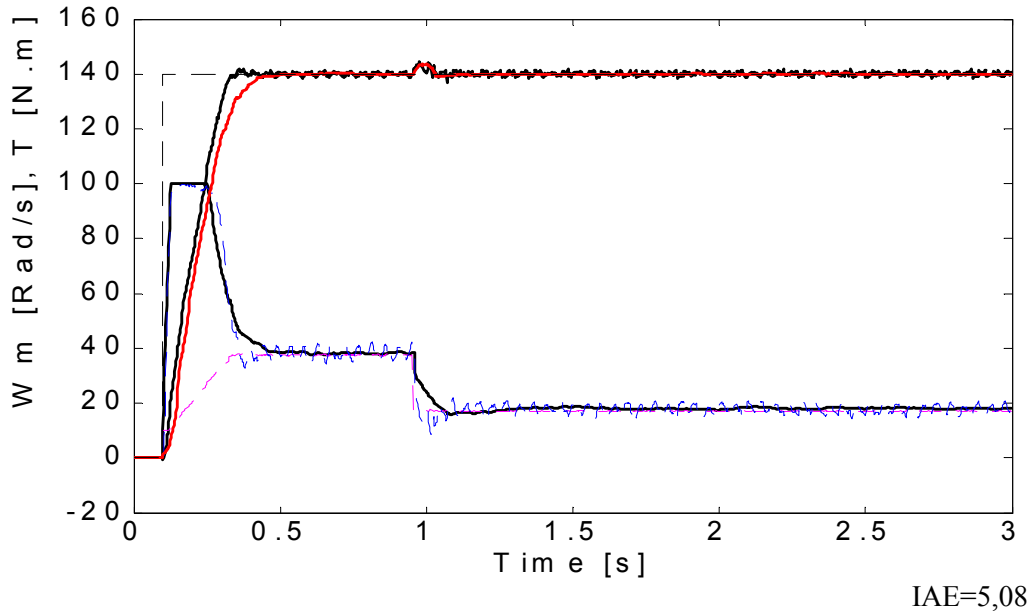


**Fig. 6-12.**  $\omega_m^*=300$  rad/s — — —,  $\hat{\omega}_m$  règ. perm. - - - - ,  
 $\hat{\omega}_m$  règ. trans. - - - - ,  $\hat{\omega}_m$  final ———,  $\omega_m$  real ———



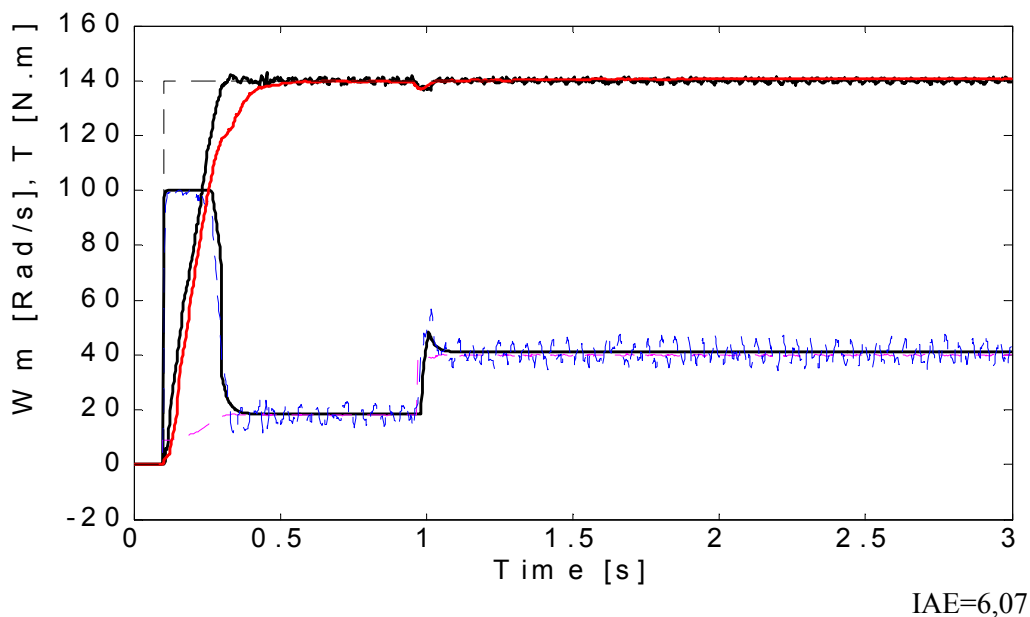
## 6.2 Resultats a canvis dinàmics de parell

El sistema també s'ha provat amb canvis bruscos de parell, tant per imposició de parell com per disminució. La figura 6-13 mostra que, un cop disminuït el parell inicial, el sistema manté sota control la velocitat prefixada.



**Fig. 6-13.**  $\omega_m^* = 140 \text{ rad/s}$  — — —,  $\omega_m \text{ real}$  ———,  $\hat{\omega}_m \text{ final}$  ———,  $5 * \Gamma^*$  ..... ,  $5 * \Gamma_{\text{electromag}}$  - - - - ,  $5 * \Gamma_{\text{mec}}$  - - - -

A la figura 6-14 s'observa que amb l'efecte contrari (augment sobtat del parell) el sistema també és capaç de mantenir la velocitat.



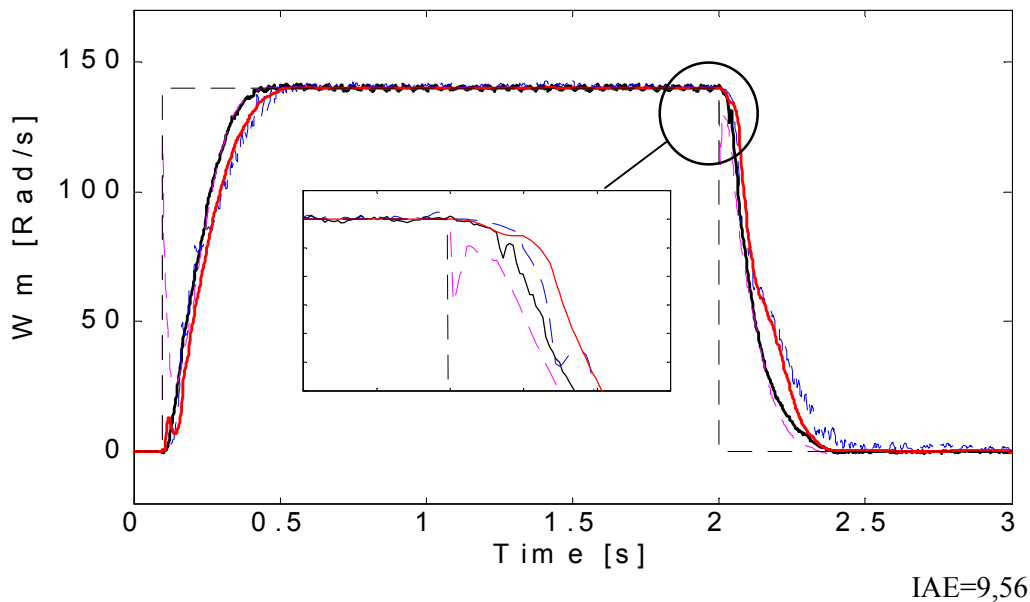
**Fig. 6-14**  $\omega_m^* = 140 \text{ rad/s}$  — — —,  $\omega_m \text{ real}$  ———,  $\hat{\omega}_m \text{ final}$  ———,  $5 * \Gamma^*$  ..... ,  $5 * \Gamma_{\text{electromag}}$  - - - - ,  $5 * \Gamma_{\text{mec}}$  - - - -

### 6.3 Resultats a canvis de consignes

En aquest apartat es valida el sistema per a canvis bruscos de consigna de velocitat, fet que en definitiva valida el sistema per a canvis bruscos de parell consigna donat el sistema experimental proposat.

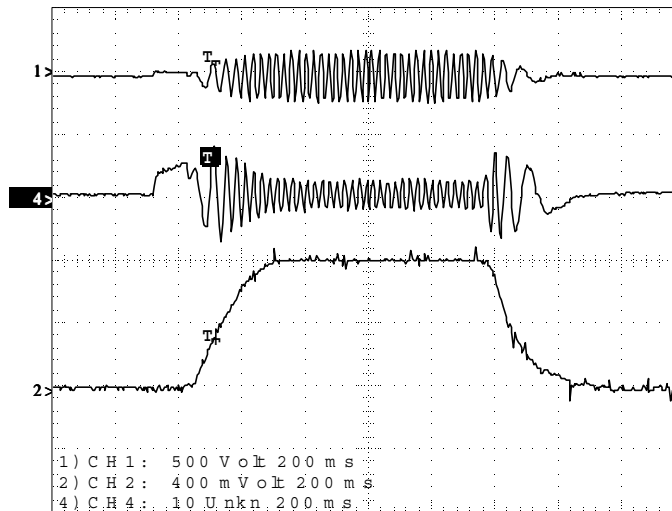
La figura 6-15 mostra diversos efectes. Per una banda, en el moment crític del canvi de consigna, el motor passa de treballar en un règim permanent a un règim transitori. Com a conseqüència d'això, l'estimador en règim permanent es perd. El sistema de promitjat fuzzy varia la seva sortida i agafa el valor de la velocitat estimada per l'estimador en règim transitori, que no s'ha perdut, i menysté el valor de la velocitat estimada per l'estimador en règim permanent. Com que la velocitat estimada final continua sent propera a la real, gràcies a l'estimador en règim transitori, el sistema de control del parell no es perd i el sistema de control en conjunt continua funcionant correctament. A causa d'això la velocitat estimada per l'estimador en règim permanent pot valer ràpidament un altre cop la velocitat real. Si durant el transitori no s'emprés la velocitat estimada per l'estimador en règim transitori, la resposta en conjunt del sistema seria molt més lenta.

Per altra banda, com que la segona consigna és 0 rad/s, es pot veure que el sistema frena fins a la velocitat zero i aquesta es manté. No obstant això, en aquesta darrera zona de treball es pot observar que l'estimador en règim transitori no és l'element que s'ha de seguir i és l'estimador en règim permanent, poc afectat pels baixos valors de corrent al motor, el que ofereix el millor valor de velocitat estimada.



**Fig. 6-15.**  $\omega_{m1}^* = 140 \text{ rad/s}$ ,  $\omega_{m2}^* = 0 \text{ rad/s}$  — — —,  $\hat{\omega}_m$  règ. perm. - - - -,  $\hat{\omega}_m$  règ. trans. - - - -,  $\hat{\omega}_m$  final — — —,  $\omega_m$  real — — —

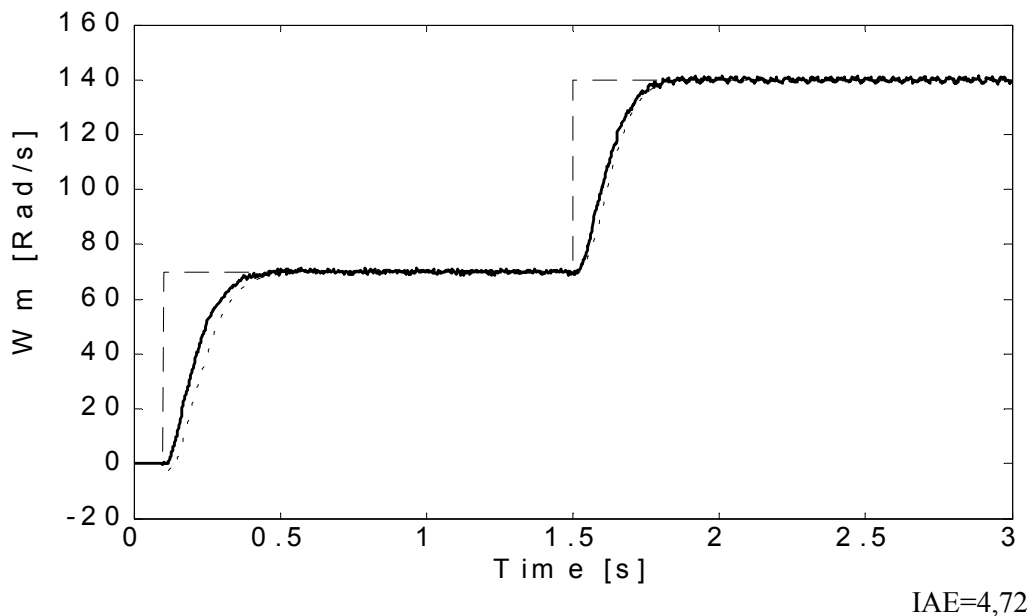
La figura 6-16 correspon al mateix assaig i mostra el valor de la velocitat real, la tensió a la fase *a* i el corrent de la fase *a*. Es pot observar que, quan el motor està parat, per les característiques de la càrrega, el valor de la tensió i el corrent del motor són molt propers a zero.



**Fig. 6-16.**  $\omega_{m1}^* = 140 \text{ rad/s}$ ,  $\omega_{m2}^* = 0 \text{ rad/s}$

$u_a$  : Ch1(500V/div);  $i_a$  : Ch4 (10 A/div),  $\omega_m$  : Ch2 (78 (rad/s)/div)

La figura 6-17 mostra que el sistema respon a un canvi de consigna superior quan ja ha estabilitzat la primera. No s'observen diferències importants entre la resposta real i la simulació. S'observa l'endarreriment de la velocitat estimada respecte a la real.



**Fig. 6-17.**  $\omega_{m1}^* = 70 \text{ rad/s}$ ,  $\omega_{m2}^* = 140 \text{ rad/s}$  - - - -,  
 $\hat{\omega}_m$  final ..... ,  $\omega_m$  real ———

La figura següent (fig. 6-18) mostra que la planta està sota control amb canvis molt importants de consigna de velocitat i que aquesta és controlada quan el valor de consigna passa del 100% de la velocitat nominal a tan sols el 10%. L'assaig respon a la demanda industrial que un sistema respongui a velocitats d'apropament de la màquina eina i velocitat de posicionament final.

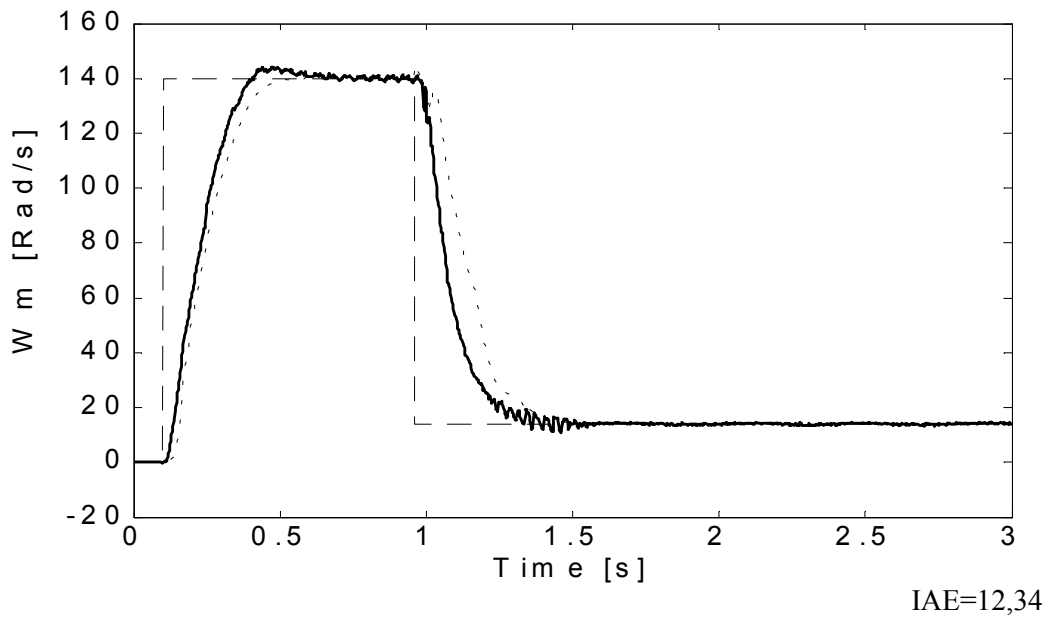


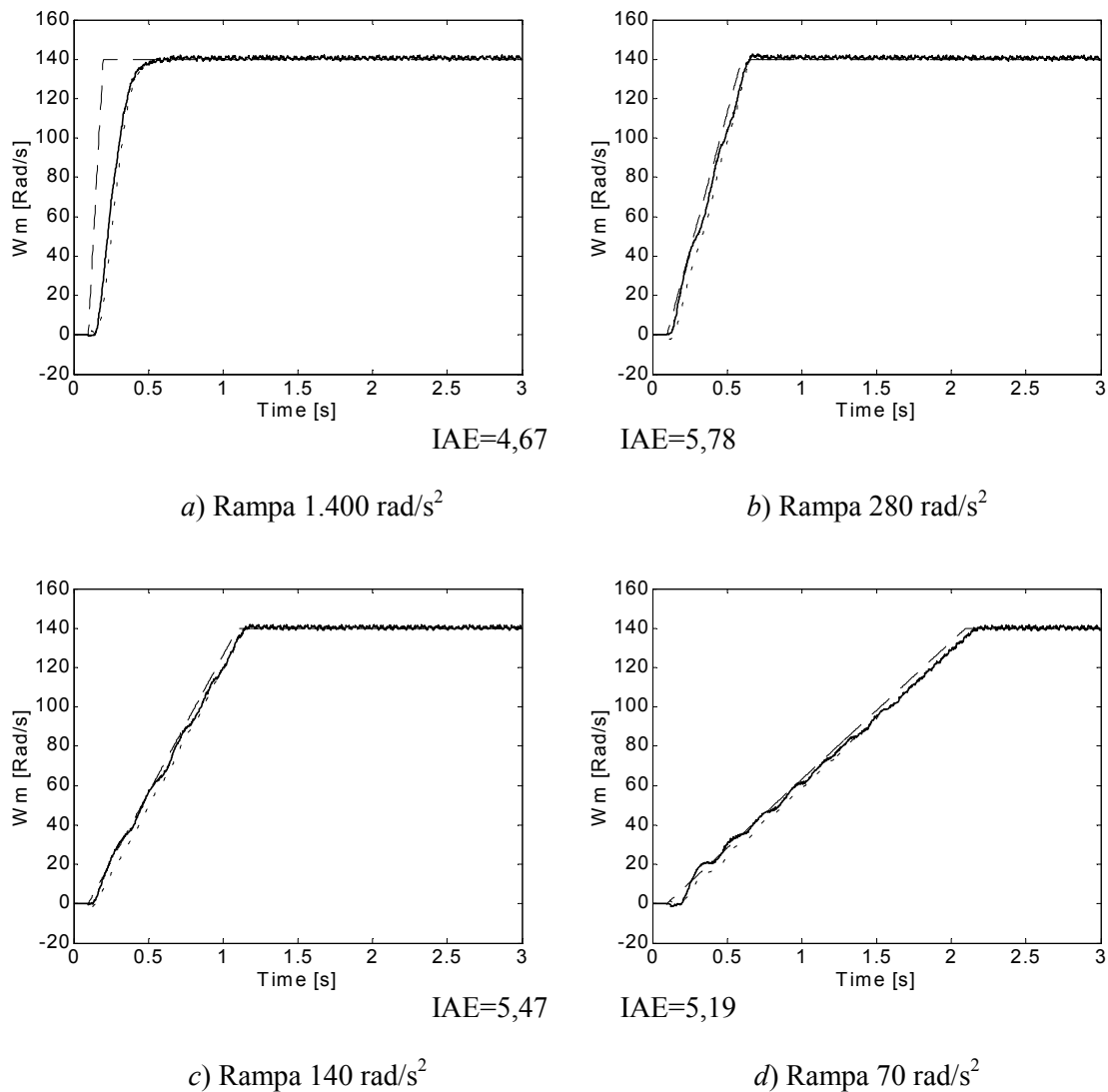
Fig. 6-18.  $\omega_{m1}^* = 70$  rad/s,  $\omega_{m2}^* = 140$  rad/s — — — — ,  
 $\hat{\omega}_m$  final ..... ,  $\omega_m$  real ———

## 6.4 Resultats a consignes de tipus rampa

En aquest bloc de resultats experimentals, com ja s'havia fet en simulació, es prova el sistema davant consignes de tipus rampa. Les rampes aplicades a la primera part han estat de  $1.400 \text{ rad/s}^2$ ,  $280 \text{ rad/s}^2$ ,  $140 \text{ rad/s}^2$  i  $70 \text{ rad/s}^2$  en assaigs de 3 s de durada com a la resta d'experiments. També s'han fet experiments amb rampes negatives, per validar l'accionament en qualsevol dels dos quadrants (1r i 3r). Posteriorment s'ha avaluat la resposta del sistema a rampes d'acceleració o desacceleració molt inferiors als valors que hem esmentat abans. Com que aquestes rampes canvien el sentit de gir, es mostraran i es comentaran a l'apartat corresponent.

A la figura 6-19 s'observen les respostes per a les quatre rampes que hem esmentat abans. A la primera figura, 6-19a, s'observa que el sistema no és capaç de seguir la rampa fixada. El problema principal no és el sistema d'estimació de la velocitat, sinó el parell màxim que s'ha establert al sistema de control FAM. La velocitat es manté sota control dins de les possibilitats que el conjunt estimador-control FAM té.

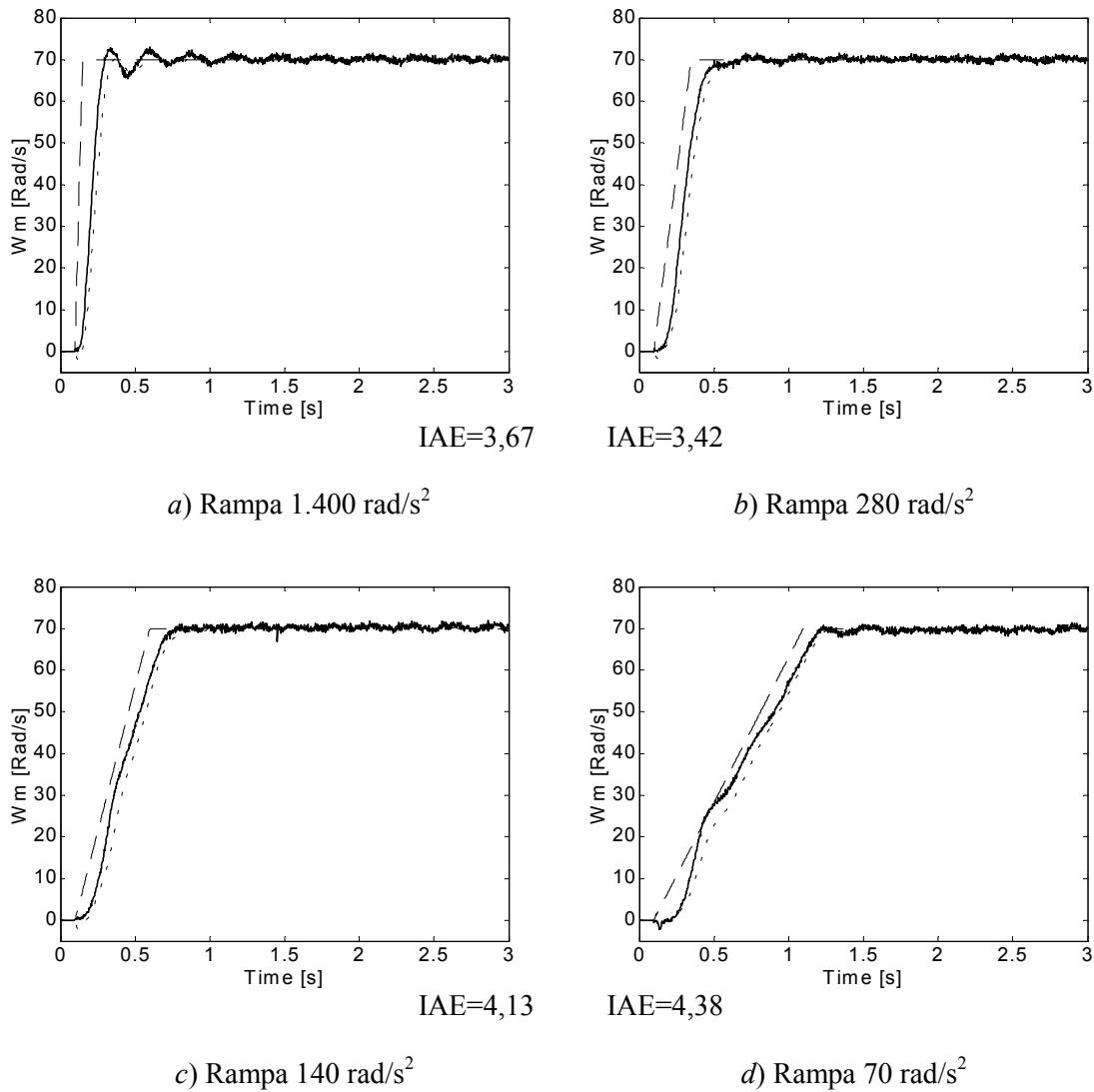
A la resta de figures es pot observar que, a partir d'una zona inicial d'establiment del règim permanent d'acceleració, la velocitat estimada passa d'estar endarrerida a tenir gairebé el mateix valor que la real. Es posa de manifest un altre cop que l'estructura del regulador PI no és capaç de reduir l'error quan es manté una consigna en rampa, si bé es recorda que l'estructura del regulador no és objecte d'aquesta tesi.



**Fig. 6-19.**  $\omega_m^* = 140$  rad/s, - - - -,  $\hat{\omega}_m$  final ..... ,  $\omega_m$  real \_\_\_\_\_

La figura 6-20 mostra la resposta a les mateixes acceleracions que en l'anterior però a una consigna inferior, 70 rad/s (aproximadament 1/2 de la velocitat nominal). Es pot observar a la figura 6-20a que torna a aparèixer l'efecte comentat en la figura anterior i se li afegeix un problema de sintonia del regulador.

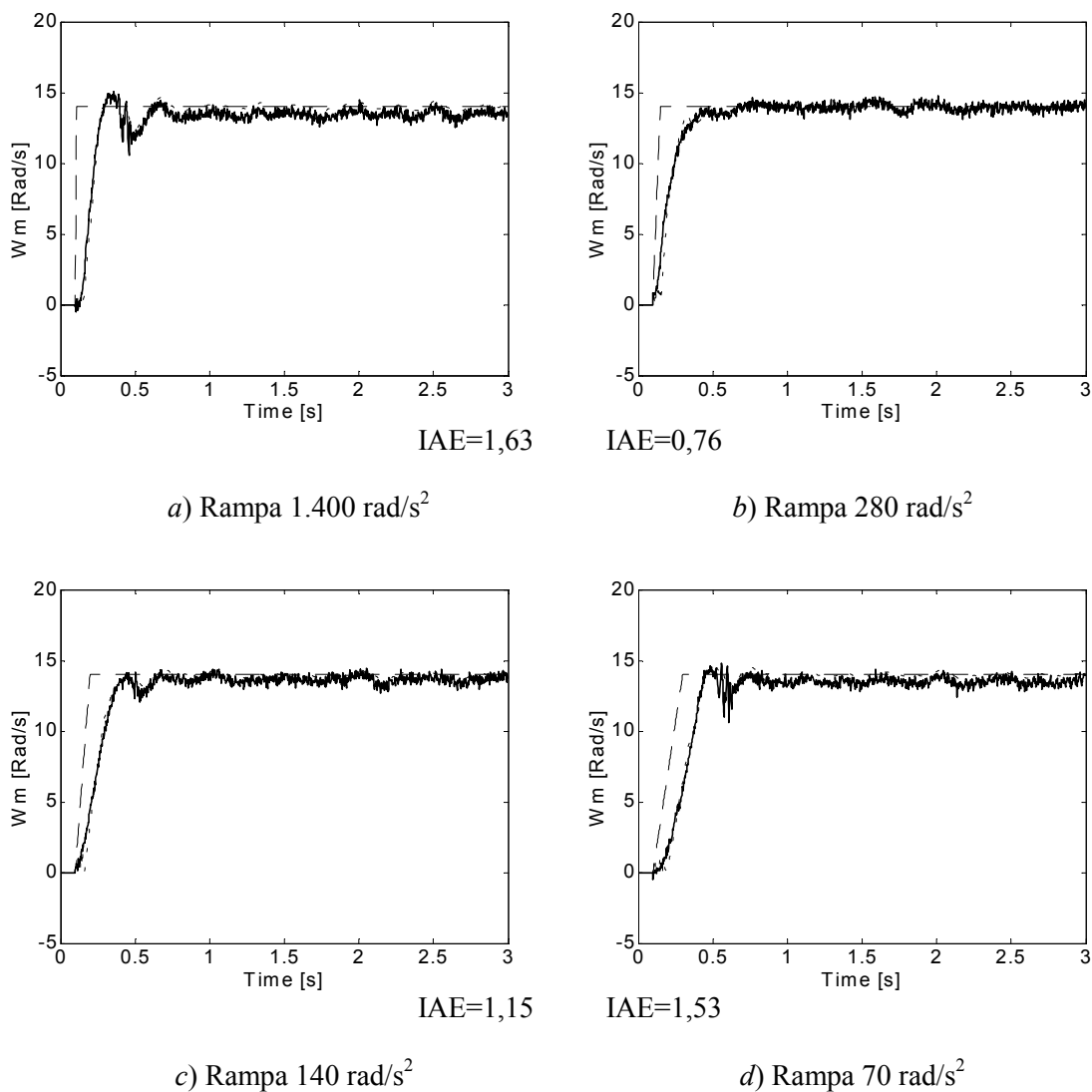
A la resta de figures es poden observar algunes diferències respecte a les anteriors. La velocitat estimada té un lleuger endarreriment respecte a la real pràcticament en tota la rampa de pujada de la velocitat consigna. Tot i això, la velocitat està controlada en tot moment. Aquest endarreriment és més alt en els instants inicials i s'empitjora per a rampes més lentes.



**Fig. 6-20.**  $\omega_m^* = 70$  rad/s, - - - -,  $\hat{\omega}_m$  final ..... ,  $\omega_m$  real \_\_\_\_\_

La figura 6-21 mostra la resposta amb les mateixes rampes però per a una velocitat de 14 rad/s final. El més destacable de les quatre figures és la diferència entre la velocitat real i la velocitat estimada. En aquest cas s'observa que el sistema respon correctament a la consigna de velocitat, però en règim permanent s'observa un error mantingut de la velocitat estimada i la velocitat real (0,3 rad/s de mitjana anant malament). L'explicació s'ha de buscar en el fet que el sistema no incorpora cap estimador de paràmetres i, per tant, l'afecten les variacions dels paràmetres del motor (capítol 5).

Observem una altra diferència destacable amb la comparació amb les gràfiques extretes de simulació. A les gràfiques experimentals es pot observar que el motor comença a girar abans que en el de la simulació. Aquest efecte no té influència sobre l'estimació de la velocitat, objecte d'aquesta tesi, però sí en el temps d'assoliment de la consigna. La conclusió és que caldria revisar el model de la càrrega que s'empra en simulació.



**Fig. 6-21.**  $\omega_m^* = 14$  rad/s, - - - -,  $\hat{\omega}_m$  final ..... ,  $\omega_m$  real \_\_\_\_\_

A la figura 6-22 es mostren els resultats experimentals per a les rampes de velocitat establertes quan la velocitat final ha d'arribar als 280 rad/s. Es podrien esperar problemes d'assoliment d'aquesta velocitat perquè el motor ha d'acabar treballant en una zona de desexcitació. No obstant això, el sistema funciona principalment per dos aspectes:

- El primer és que el sistema de control FAM ha estat dissenyat perquè el màxim valor del vector tensió a imposar sigui el màxim que el motor pot suportar i el màxim que l'inversor pot oferir, amb la qual cosa el sistema FAM es manté funcionant correctament fins i tot dins la zona de desmagnetització.
- Per altra banda, com ja s'ha comentat anteriorment, l'estimador en règim transitori no funciona perfectament en aquesta zona de treball. Un cop assolit el règim permanentment accelerat, és com si el sistema entrés en un règim permanent i, per tant, la velocitat estimada és primordialment la velocitat provinent de l'estimador en règim permanent.

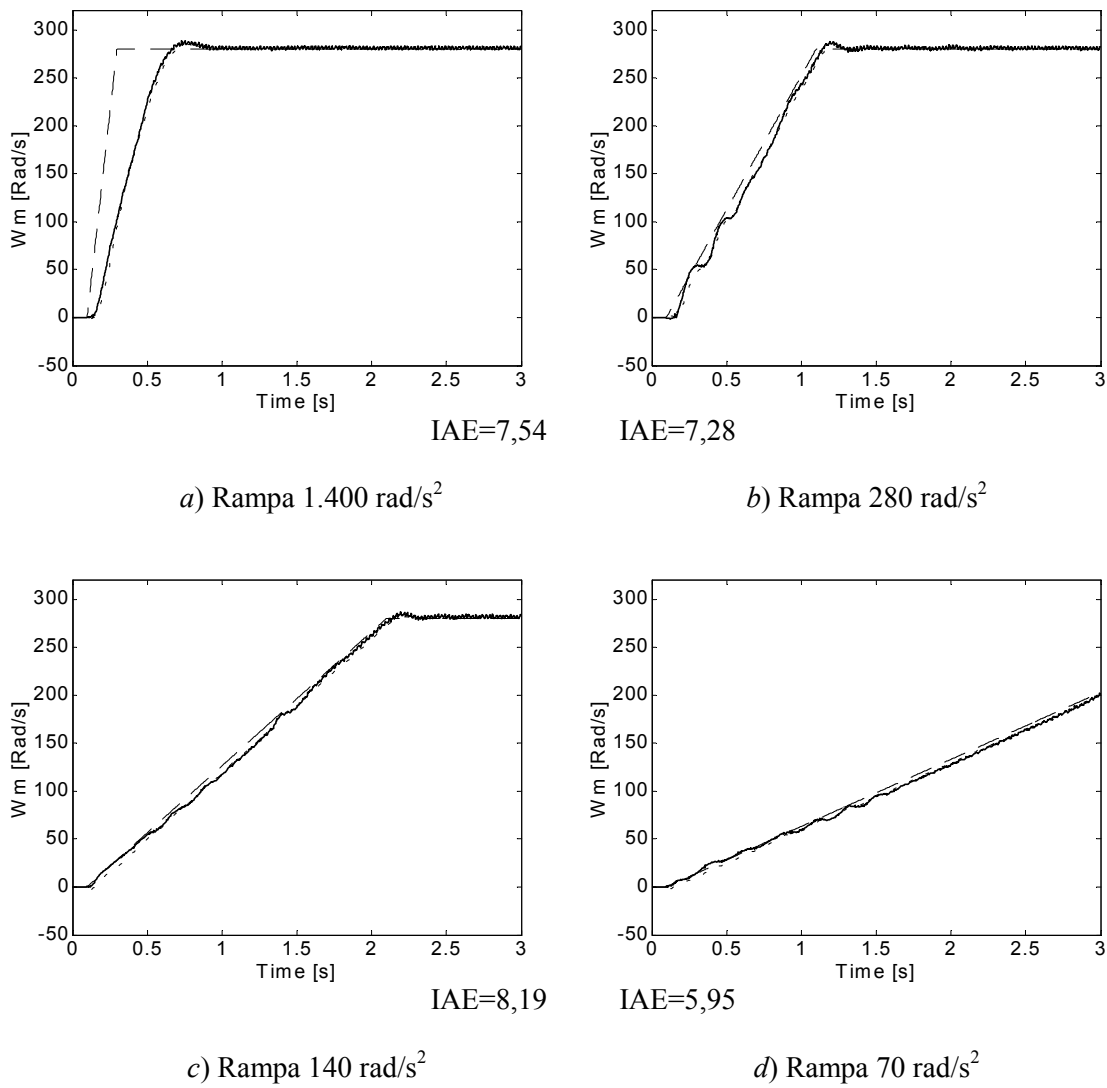


Fig. 6-22.  $\omega_m^* = 280 \text{ rad/s}$ , - - - -,  $\hat{\omega}_m$  final ..... ,  $\omega_m$  real \_\_\_\_\_

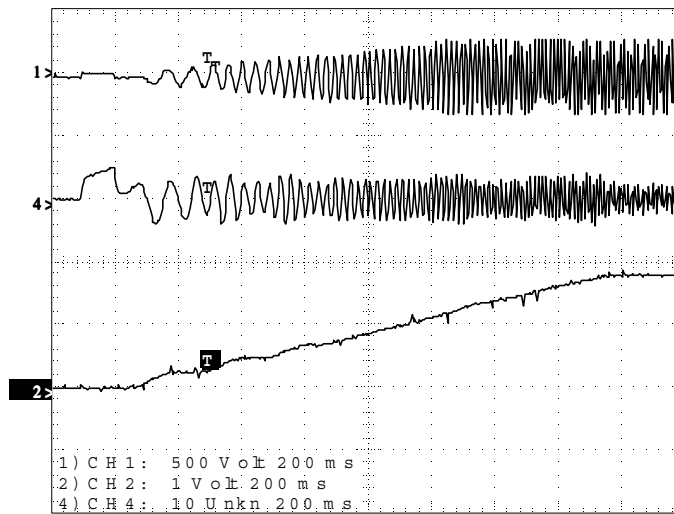


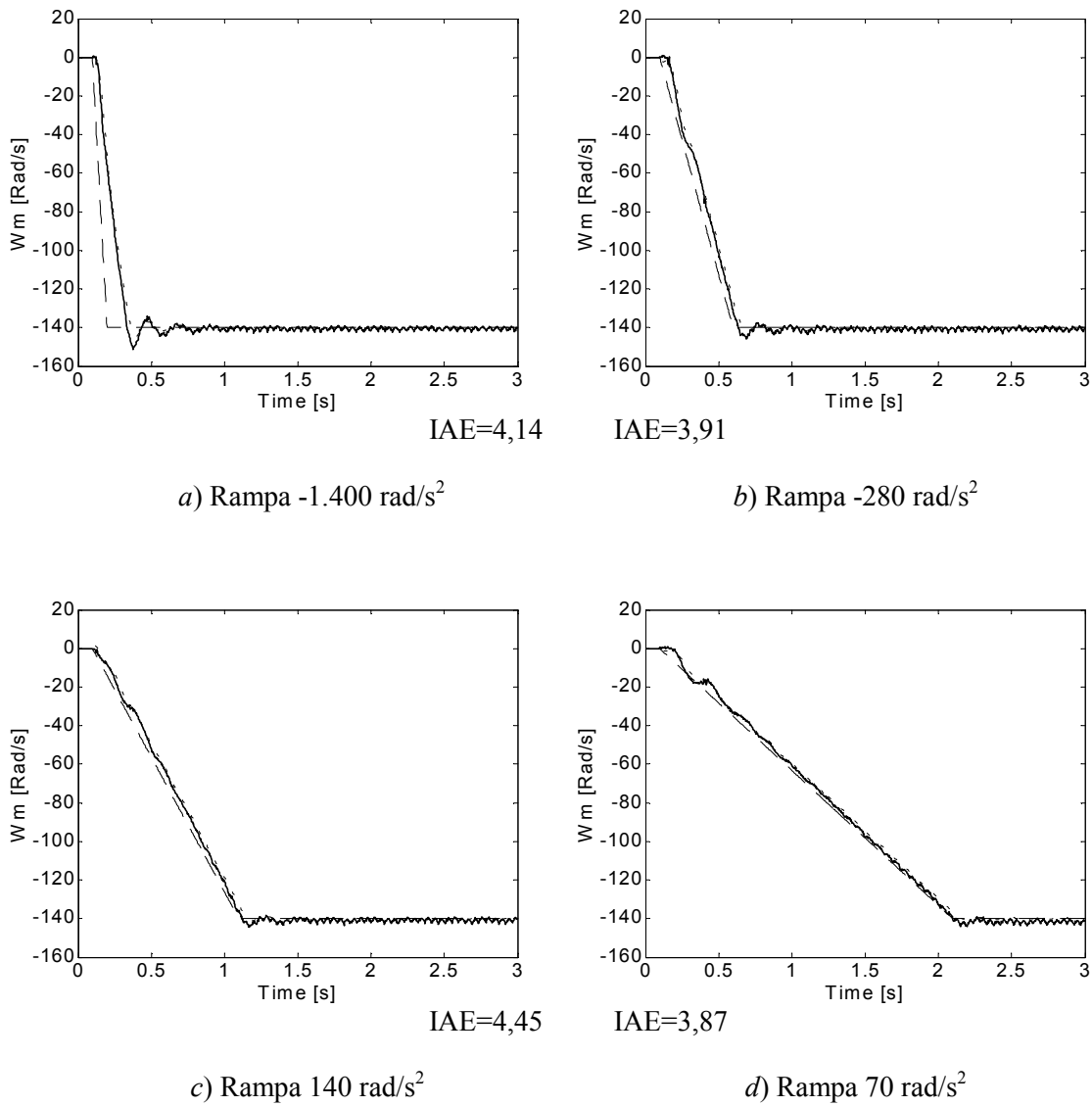
Fig. 6-23.  $\omega_m^* = 280 \text{ rad/s}$ , rampa 200 rad/s<sup>2</sup>

$u_a$  : Ch1(500V/div);  $i_a$  : Ch4 (10 A/div),  $\omega_m$  : Ch2 (156 (rad/s)/div)



La figura 6-23 mostra la tensió i el corrent de la fase *a* i la velocitat real del sistema per a una consigna de 280 rad/s i una rampa de 200 rad/s<sup>2</sup>.

Finalment, la figura 6-24 mostra la resposta a consignes de tipus rampa per a velocitats negatives. Les diferències que s'observen entre aquestes rampes i les seves homòlogues en positiu són degudes principalment a la diferència entre el parell mecànic que ofereix la càrrega en simulació i a la planta real.



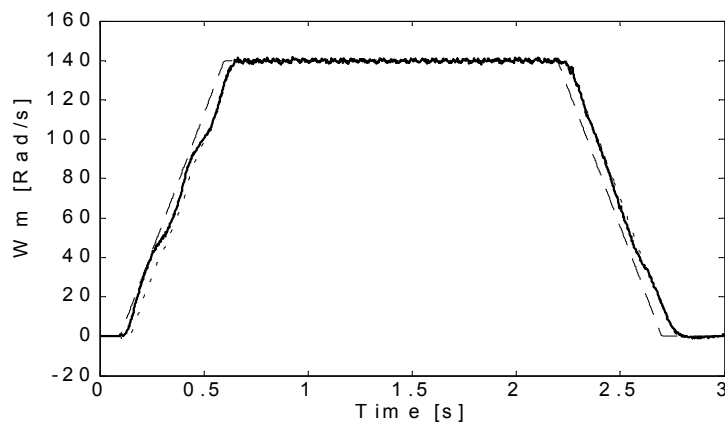
**Fig. 6-24.**  $\omega_m^* = 140$  rad/s, - - -,  $\hat{\omega}_m$  final ..... ,  $\omega_m$  real ———

### 6.4.1 Rampes acceleradores i desacceleradores

El següent conjunt de gràfiques pretén demostrar que el sistema és capaç de controlar no solament el procés de posada en marxa del motor, sinó també el de frenada.

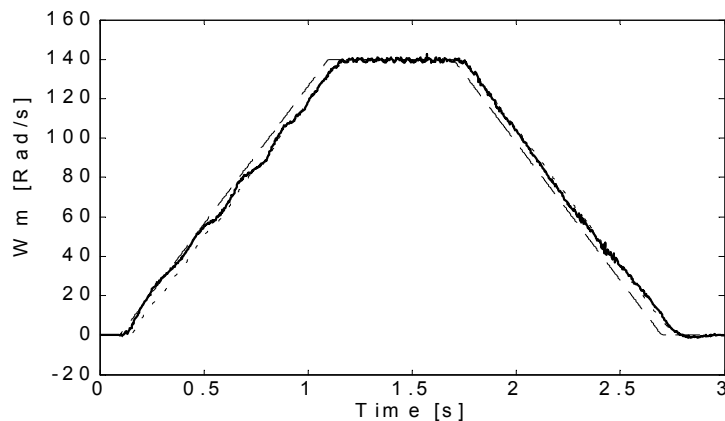
La figura 6-25 mostra la resposta del sistema per a una consigna de 140 rad/s i per a rampes d'acceleració i desacceleració de 280 rad/s<sup>2</sup> (6-25a) i 140 rad/s<sup>2</sup> (6-25b), respectivament.

Tant a la primera figura, 6-25a, com a la segona, 6-25b, es pot observar que el sistema frena sota control i la velocitat estimada pràcticament té el mateix valor que la velocitat real. El sistema és capaç de parar el motor i mantenir una velocitat nul·la sobre aquest.



IAE=5,12

a) Rampa +280 rad/s<sup>2</sup>, -280 rad/s<sup>2</sup>

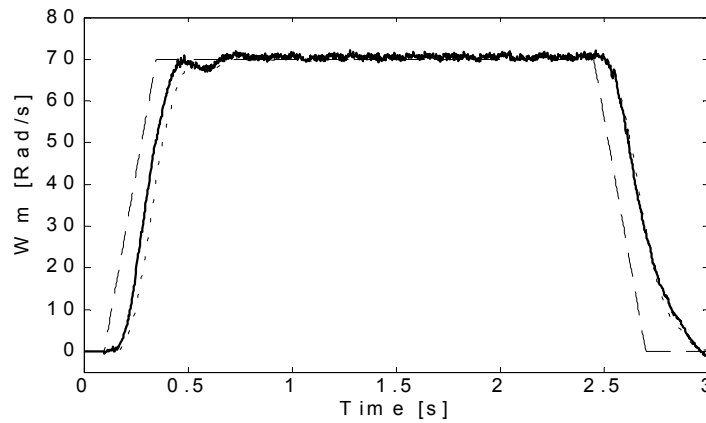


IAE=5,51

b) Rampa +140 rad/s<sup>2</sup>, -140 rad/s<sup>2</sup>

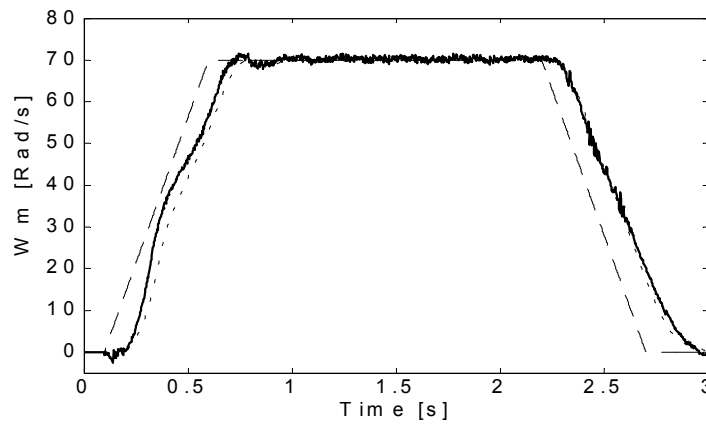
Fig. 6-25.  $\omega_m^* = 140$  rad/s, - - - -,  $\hat{\omega}_m$  final ..... ,  $\omega_m$  real ———

La figura 6-26 mostra la resposta del sistema per a una consigna de 70 rad/s i per a rampes d'acceleració i desacceleració de 280 rad/s<sup>2</sup>, 140 rad/s<sup>2</sup> i 70 rad/s<sup>2</sup>, respectivament. En tots els casos el sistema és capaç d'imposar la rampa d'acceleració i desacceleració desitjada tot i els efectes constants de la influència de la no-sintonia òptima del regulador PI.



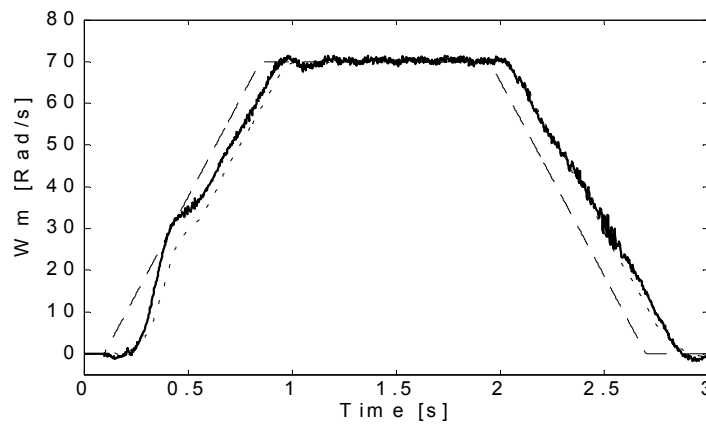
IAE=4,42

a) Rampa +280 rad/s<sup>2</sup>, -280 rad/s<sup>2</sup>



IAE=4,60

b) Rampa +140 rad/s<sup>2</sup>, -140 rad/s<sup>2</sup>

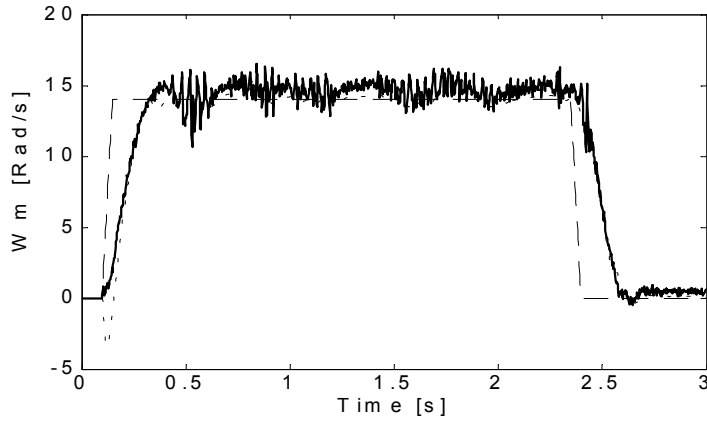


IAE=5,31

c) Rampa +70 rad/s<sup>2</sup>, -70 rad/s<sup>2</sup>

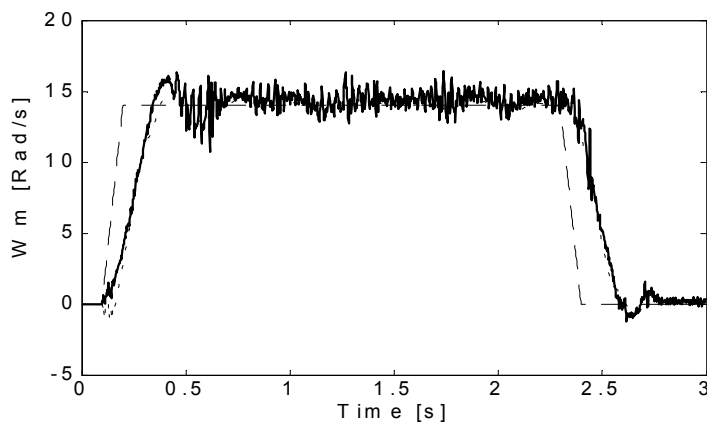
**Fig. 6-26.**  $\omega_m^* = 140$  rad/s, - - - -,  $\hat{\omega}_m$  final ..... ,  $\omega_m$  real ———

La figura 6-27 mostra la resposta del sistema per a una consigna de 14 rad/s i per a rampes d'acceleració i desacceleració de 280 rad/s<sup>2</sup>, 140 rad/s<sup>2</sup> i 70 rad/s<sup>2</sup>, respectivament. Es pot observar en aquestes gràfiques que existeix un soroll important sobre la velocitat mesurada, a causa de la relació desfavorable senyal/soroll.



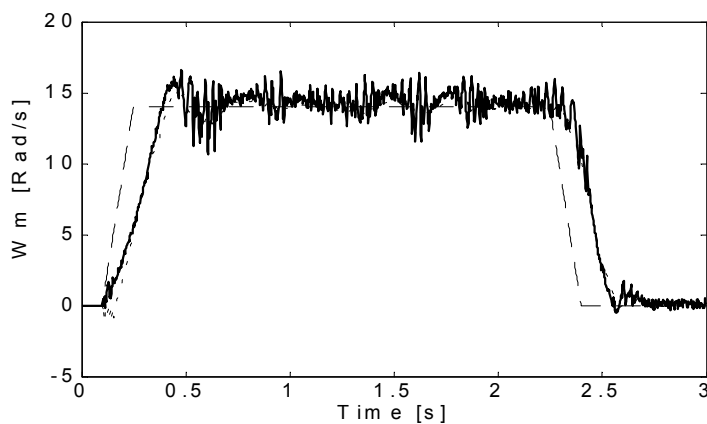
IAE=2,20

a) Rampa +280 rad/s<sup>2</sup>, -280 rad/s<sup>2</sup>



IAE=1,78

b) Rampa +140 rad/s<sup>2</sup>, -140 rad/s<sup>2</sup>

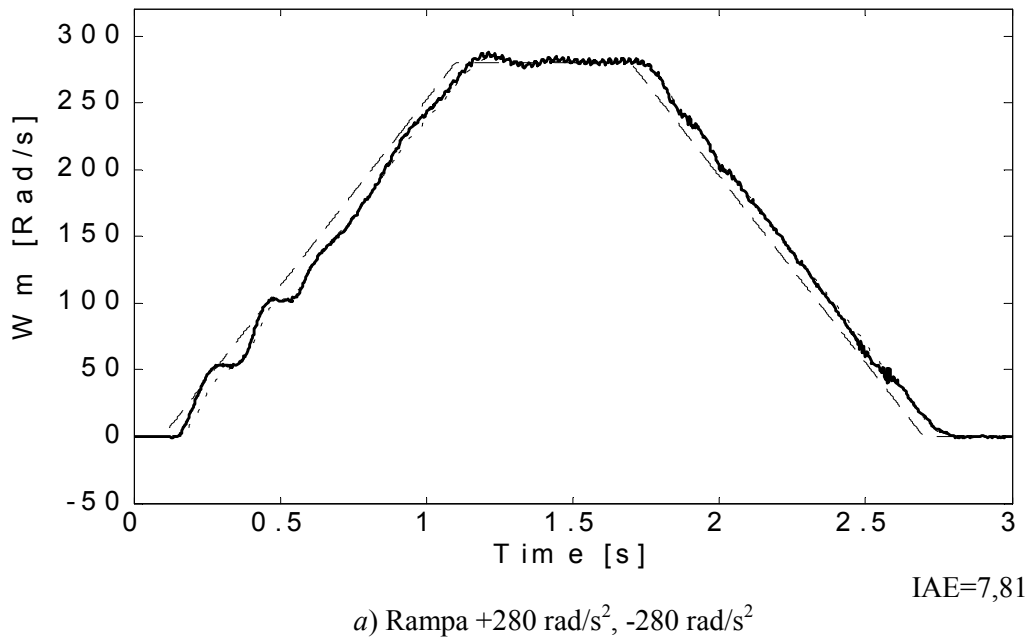


IAE=1,67

c) Rampa +70 rad/s<sup>2</sup>, -70 rad/s<sup>2</sup>

Fig. 6-27.  $\omega_m^* = 140$  rad/s, - - - -,  $\hat{\omega}_m$  final ..... ,  $\omega_m$  real ———

La figura 6-28 mostra el darrer experiment d'aquest grup. Per a una consigna de 280 rad/s s'han imposat unes rampes d'acceleració i desacceleració de 280 rad/s<sup>2</sup>. La diferència entre la velocitat real i l'estimada és mínima, el sistema controla la rampa ascendent de velocitat i la descendent sense problemes i, a més, és capaç de mantenir i controlar la velocitat en la zona de desmagnetització del motor.



**Fig. 6-28.**  $\omega_m^* = 140$  rad/s, — — — —,  $\hat{\omega}_m$  final ..... ,  $\omega_m$  real ———

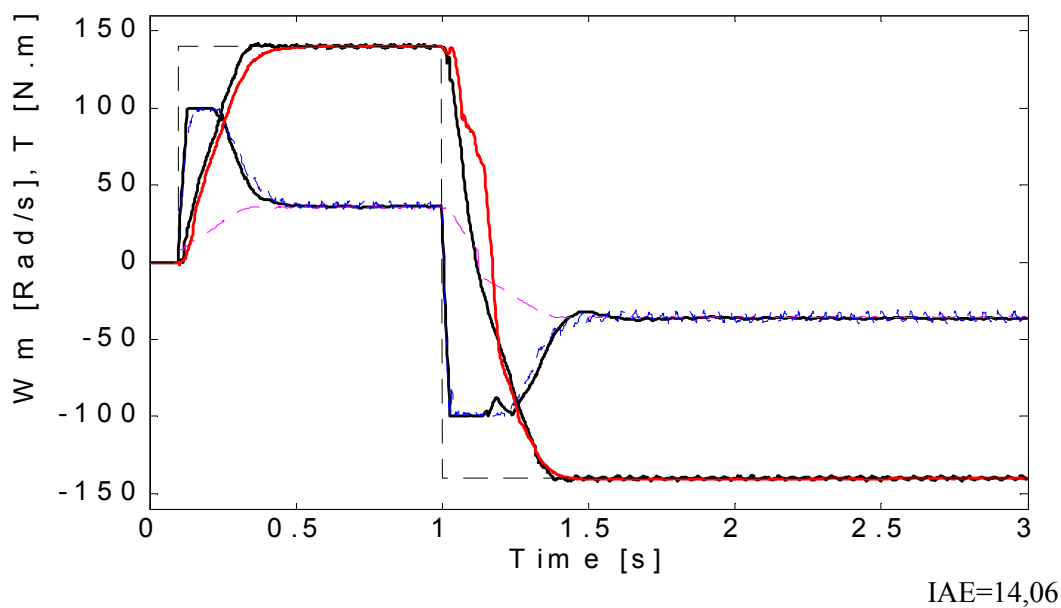
## 6.5 Inversió del sentit de gir

L'avaluació del conjunt final també s'ha portat al camp de les inversions de gir. Els primers resultats s'han trobat per canvi brusc 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.

Els resultats es poden observar a la figura 6-29. Es mostren de manera superposada la resposta de velocitat i de parell. L'estimació de velocitat, encara que s'observen 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, com ja succeïa en simulació. Però el sistema és capaç d'invertir el sentit de gir del motor i establir novament la velocitat a la nova consigna.

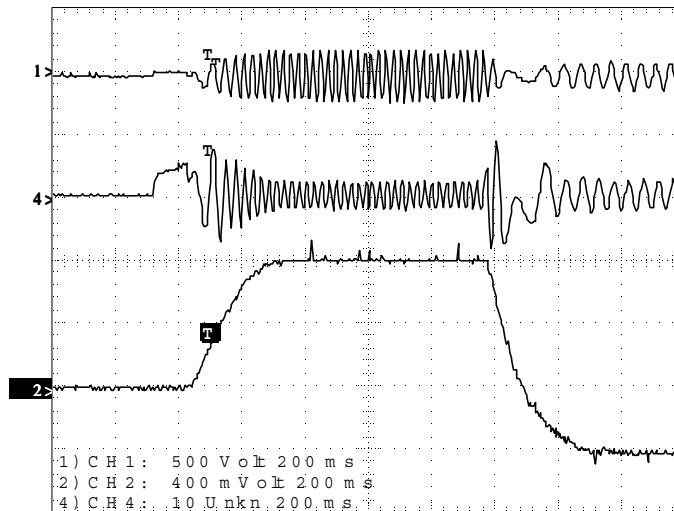
Pel que fa a la resposta del parell, el sistema també evidencia certs problemes en el descens de la velocitat i quan aquesta passa per zero. Com s'ha comentat anteriorment, l'efecte que produeixen els mínims valors de tensió i corrent al motor en alguns punts de treball és important però no decisiu en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

A la figura també es pot observar el parell de càrrega, i que aquest canvia de sentit en canviar de sentit la velocitat real del motor.



**Fig. 6-29.**  $\omega_m^* = 140$  rad/s — — —,  $\hat{\omega}_m$  final ———,  $\omega_m$  real ———.  
 $5 * \Gamma^*$  ..... ,  $5 * \Gamma_{electromag}$  — — —,  $5 * \Gamma_{mec}$  — — —

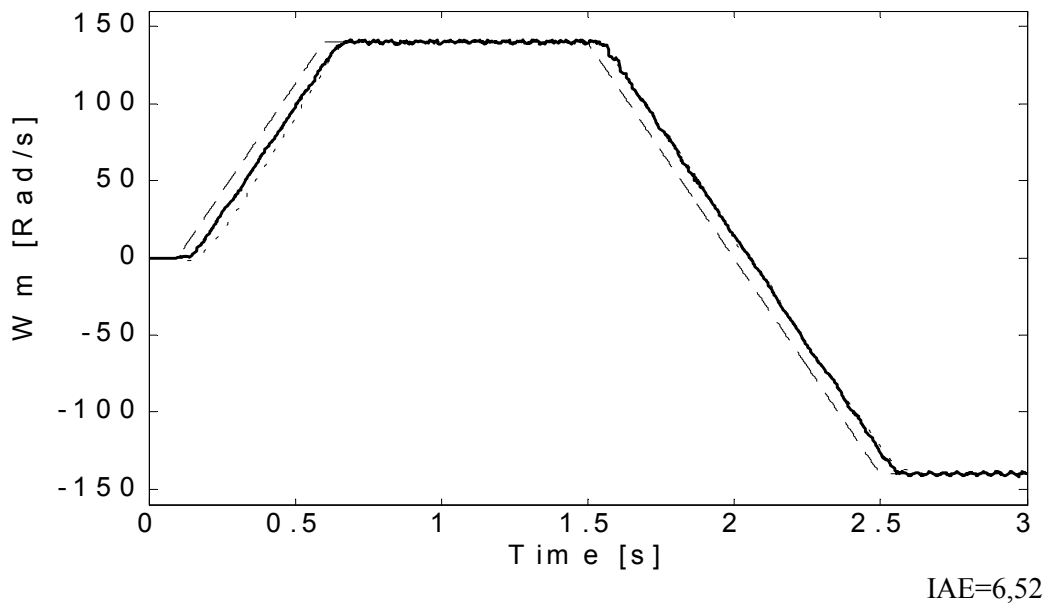
La figura 6-30 mostra la tensió i el corrent de la fase *a* per l'assaig similar a l'anterior, però amb una primera consigna de 140 rad/s i posteriorment una consigna de -70 rad/s. En el corrent de la fase *a* es pot observar que es produeix el canvi fase del corrent que provoca el canvi de sentit de gir del motor.



**Fig. 6-30.**  $\omega_{m1}^* = 140 \text{ rad/s}$ ,  $\omega_{m2}^* = -70 \text{ rad/s}$

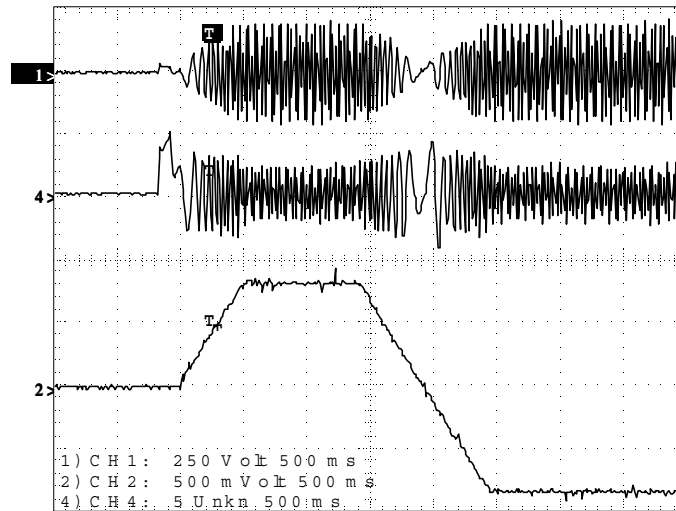
$u_a$  : Ch1(500V/div);  $i_a$  : Ch4 (10 A/div),  $\omega_m$  : Ch2 (78 (rad/s)/div)

La figura 6-31 mostra una altra inversió del sentit de gir. Aquest cop la consigna és una rampa de desacceleració i posterior acceleració de  $-140 \text{ rad/s}^2$ . 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 respecte a la velocitat real del motor és menor que en el cas de la figura 6-30. Això és degut bàsicament al fet que el canvi en la consigna de parell també és molt menor en el segon cas que en el primer. A més, l'efecte del pas per zero de la velocitat del motor i l'efecte produït pels mínims nivells de tensions i corrents en el motor en aquesta zona de treball afecten menys la resposta del sistema.



**Fig. 6-31.**  $\omega_{m1}^* = 140 \text{ rad/s}$ ,  $+280 \text{ rad/s}^2$ ,  $\omega_{m2}^* = -140 \text{ rad/s}$ ,  $-280 \text{ rad/s}^2$  - - - - ,  
 $\hat{\omega}_m$  Final ..... ,  $\omega_m$  real ———

La figura 6-33 mostra la tensió i el corrent i la velocitat real de la figura anterior. També es pot observar clarament sobre aquest gràfic el canvi de fase del corrent que provoca la inversió del sentit de gir. El fet que hi hagi un canvi en el sentit de gir del corrent però que es mantingui una continuïtat de fase garanteix el bon funcionament del sistema en general.



**Fig. 6-32.**  $\omega_{m1}^* = 140 \text{ rad/s}$ ,  $+280 \text{ rad/s}^2$ ,  $\omega_{m2}^* = -140 \text{ rad/s}$ ,  $-280 \text{ rad/s}^2$   
 $u_a$ : Ch1(250V/div);  $i_a$ : Ch4 (5 A/div),  $\omega_m$ : Ch2 (78 (rad/s)/div)

La figura 6.33 mostra la resposta del sistema per a diferents rampes d'acceleració. En aquesta gràfica es demostra que el sistema està controlat fins i tot quan el canvi de sentit de gir del motor dura minuts. El problema en aquests casos és que la zona en la qual els nivells de tensió i corrent tenen valors molt petits és molt àmplia. Aquest aspecte pot provocar que el sistema en conjunt es perdi i no aconsegueixi controlar el descens de la velocitat.

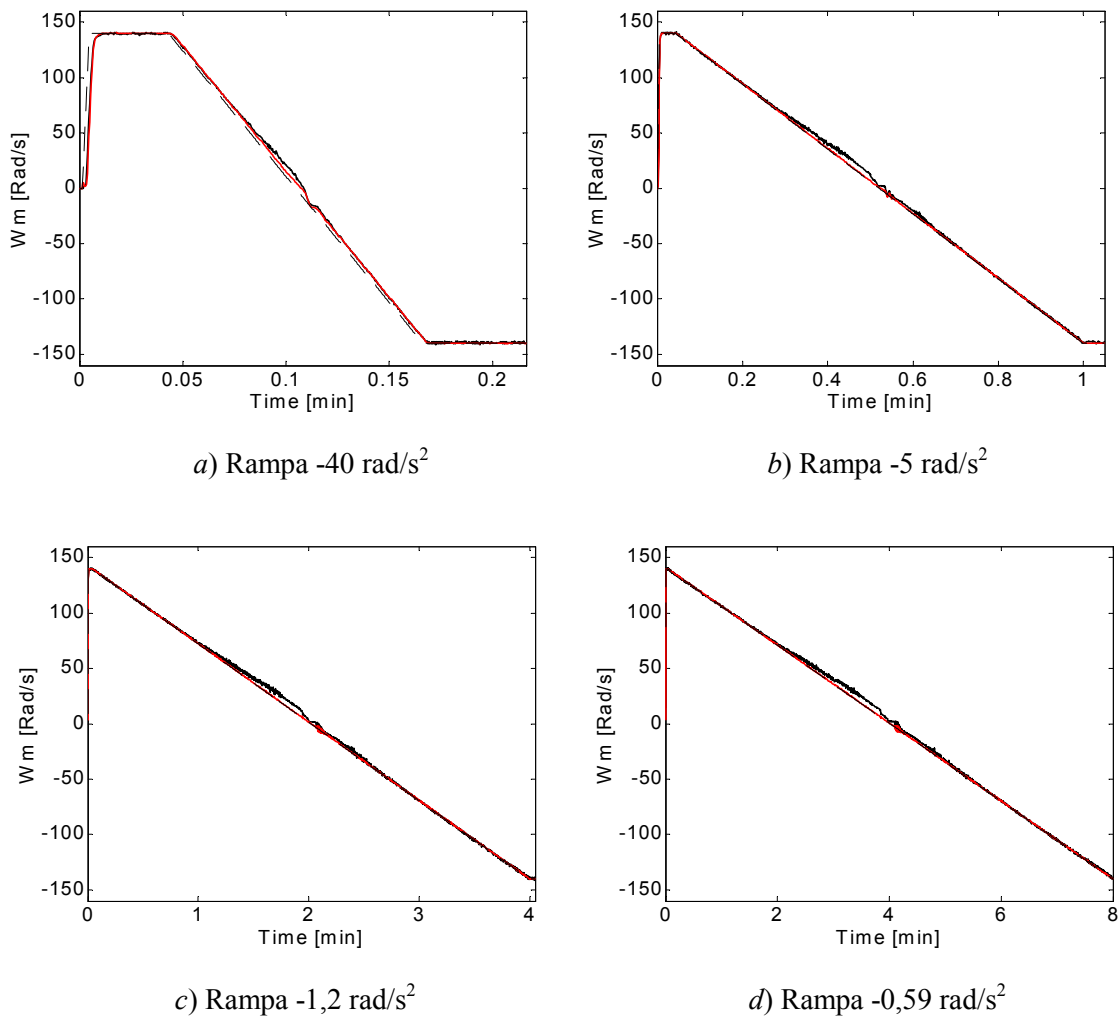
A la figura es poden observar diversos aspectes. Com a comentari general, es pot afirmar que el sistema és capaç de canviar el sentit de gir per a qualsevol rampa de desacceleració. El problema existent en la zona del pas per zero de la velocitat del motor s'accentua com més temps dura aquest pas. Per a rampes tan lentes la influència de l'estructura del regulador, tants cops comentada, és mínima i inapreciable.

Per altra banda, mantenint tensions i freqüències tan baixes durant tant temps (consignes de velocitat) properes al zero, és lògic que hi hagi una diferència entre el valor de la velocitat estimada i la velocitat real. Malgrat això, el sistema controla la velocitat i aconsegueix canviar el sentit de gir sense cap més problema que un error de velocitat quan aquesta és propera al zero.

Per a rampes tan lentes la velocitat estimada és principalment l'estimada per l'estimador en règim permanent i l'error en l'estimació és provocat principalment per dos aspectes:

- Donades les característiques de la càrrega, el valor del corrent  $i_{sy}$  és mínim.
- El poc pes que té  $i_{sy}$  en l'equació que estima la velocitat de l'estimador en règim permanent si per a velocitats properes a zero no hi ha un parell important de càrrega.



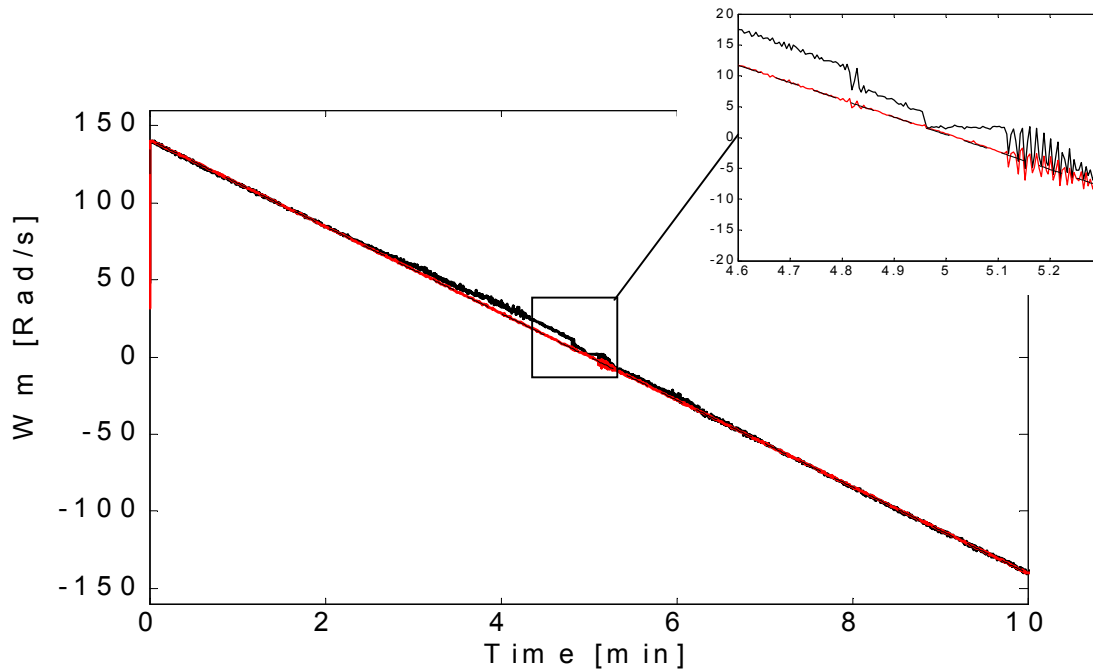


**Fig. 6-33.**  $\omega_{m1}^* = 140 \text{ rad/s}$ ,  $+1400 \text{ rad/s}^2$ ,  $\omega_{m2}^* = -140 \text{ rad/s}$ , — — — —,  $\hat{\omega}_m$  final ———,  $\omega_m$  real ———

La figura 6.34 mostra la resposta del sistema per a un pendent menor que el dels gràfics anteriors,  $0,47 \text{ rad/s}$ . Aquesta rampa implica que el pas de la velocitat nominal a la velocitat nominal negativa es fa en  $600 \text{ s}$ , és a dir,  $10 \text{ minuts}$ .

A la figura ampliada es pot observar que, a la zona de màxim error, el sistema fa intents per aproximar el valor de la velocitat estimada a la velocitat real. En aquesta zona també es pot observar que el tram més problemàtic del treball a baixa velocitat són els valors immediatament superiors a la velocitat zero i quan el motor realment està parat.

Per altra banda, quan el motor ha superat la zona de velocitat zero i comença a girar en sentit contrari, el sistema controla sense problemes la velocitat i a més el valor de la velocitat estimada i el real són pràcticament iguals.



**Fig. 6-34.**  $\omega_{m1}^* = 140 \text{ rad/s}, +1400 \text{ rad/s}^2$ ,  $\omega_{m2}^* = -140 \text{ rad/s}, -0.47 \text{ rad/s}^2$ , - - - -,  $\hat{\omega}_m$  final ———,  $\omega_m$  real ———

## 6.6 Conclusions

El sistema sintetitzat al capítol 5 s'ha implementat i se n'han extret resultats. S'ha sotmès el sistema als mateixos assaigs que els que s'han fet per simulació.

Els assaigs a què 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. Per sota d'una velocitat de 5 rad/s (1,6 Hz), el sistema té certs problemes per mantenir la velocitat. Per a velocitats properes a zero, la influència del regulador és important i s'han fet experiments resintonitzant el regulador amb millores sobre la resposta. S'ha provat el sistema també a velocitat zero i el seu comportament ha resultat diferent en funció del tipus de càrrega que el motor ha trobat a l'eix (el comportament és millor amb parells nominals que en buit).
- Canvis dinàmics de parell. El sistema implementat ha estat capaç de controlar la velocitat davant un canvi bruscat del parell de càrrega. S'han validat, per tant, les hipòtesis de funcionament per variacions de parell.
- Canvis de consignes: el sistema ha demostrat que és eficaç. El sistema també s'ha mostrat capaç de frenar el motor fins a velocitat zero i mantenir-la.

- Canvis de consignes de tipus rampa: s'ha provat el comportament del sistema davant canvis de consignes de tipus rampa, acceleració constant. El sistema en tot moment ha estat capaç d'estimar la velocitat del motor. No obstant això, s'ha posat de manifest que un regulador PI no és capaç d'anul·lar l'error d'una consigna de tipus rampa; aquest problema no és conseqüència dels algorismes d'estimació de velocitat o del sistema de control, sinó de l'estructura del mateix regulador, si bé es recorda que no és l'objecte d'aquesta tesi. S'ha observat que per a algunes respostes el sistema real tarda menys a accelerar que en la simulació, la qual cosa porta a la conclusió que cal ajustar lleugerament el model de càrrega de què es disposa. Finalment, s'han posat a prova les rampes acceleradores i desacceleradores que porten el motor de la velocitat consigna desitjada a parar-se. El sistema ha reeixit.
- Inversió del sentit de gir. S'ha avaluat el sistema per al canvi de sentit de gir. El sistema ha funcionat, però el comportament s'estableix com a crític quan la velocitat del motor real passa per zero. S'han fet altres experiments de canvi de sentit de gir amb rampes desacceleradores molt lentes (de minuts de durada) per validar el sistema davant d'aquest tipus de consigna. Es posa de manifest que el punt més crític dels resultats és en la zona de frenada, amb velocitat de consigna propera al zero. El sistema no es perd i aconsegueix seguir la consigna de velocitat, però és en aquests assaigs en què es pot observar l'error de velocitat més gran, malgrat els esforços que fa el sistema per controlar la velocitat.

Sobre el sistema experimental s'han implementat dos sistemes estimadors de velocitat. S'ha implementat un sistema fuzzy que filtra la resposta d'un dels estimadors i fa un promitjat intel·ligent entre les dues respostes per obtenir un valor final de velocitat estimada. Els dos estimadors treballant conjuntament amb el sistema de filtratge i promitjat fuzzy proposat en aquesta tesi són capaços d'oferir una velocitat estimada millor que la que podria oferir cada estimador per separat. La velocitat obtinguda ha servit per tancar el llaç de velocitat a través d'un regulador PI i un control de parell FAM i controlar així la velocitat d'un motor d'inducció sense mesura directa d'aquesta magnitud.

En la implementació d'aquest sistema d'accionament i en l'extracció de dades experimentals no s'han observat influències remarcables respecte a la variació dels paràmetres del motor per efecte de la temperatura o la saturació més enllà del que s'ha previst i comentat en els capítols 3 i 5.

Com a conclusió, es pot afirmar que els resultats experimentals demostren la bondat dels algorismes desenvolupats i validen les suposicions fixades en la tesi.