

7. CONCLUSIONS DE LA TESI I LÍNIES DE TREBALL FUTURES

7.1 Conclusions de la tesi

Respecte als models del motor

S'han plantejat les equacions generals que descriuen el motor asíncron d'inducció. Les equacions en règim transitori s'han obtingut per dos sistemes de referència. Per una banda, el model del motor s'ha obtingut en coordenades fixes en referència estator. Per altra banda, s'han obtingut, partint del model general en règim transitori, les equacions transformades en eixos giratoris referides al sincronisme fixant el fasor de tensió a l'eix de referència.

També s'han obtingut les equacions en règim permanent del motor d'inducció, de les quals s'ha plantejat un esquema equivalent general i s'ha desenvolupat un esquema equivalent alternatiu reagrupant paràmetres per obtenir un model en el qual es basa el control de parell FAM.

Respecte a l'estat de l'art dels sistemes *sensorless*

Hi ha moltes varietats de sistemes d'estimació de la velocitat del motor d'inducció. N'hi ha que empren els efectes esdevinguts per les no-idealitats del motor i d'altres es basen en el model matemàtic del motor. Aquesta tesi es basa en el segon grup. Dels sistemes que empren el model del motor també hi ha diverses classificacions. De l'estudi d'aquestes estimadors de velocitat es poden treure diverses conclusions.

- Els sistemes amb més resolució són més complexos i més difícils d'implementar i són industrialment menys viables.
- Els sistemes complexos necessiten un coneixement exacte dels paràmetres del motor i són molt influenciables per les seves variacions; per això necessiten rutines d'estimació de paràmetres.
- Els sistemes més simples són fàcils d'implementar però tenen una pitjor resposta dinàmica.

S'han desenvolupat les equacions de dos estimadors, que, basant-se ambdós en el model del motor en equacions diferencials, obtenen la velocitat del motor d'una manera simple. Tanmateix, aquests sistemes d'estimació, senzills, tenen problemes de filtratge (estimadors en règim transitori) i de zones de treball no útils (estimadors en règim permanent).

Respecte a la proposta de tesi i control de velocitat del motor d'inducció

En aquesta tesi es proposa implementar un sistema de control de la velocitat d'un motor d'inducció sense sensor de velocitat (sistema *sensorless*) de baix cost. Per estimar la velocitat es proposa la idea de millorar la resposta dinàmica d'un estimador de velocitat en règim permanent.

Per a l'estimació de velocitat:

- S'implementen dos estimadors de velocitat treballant en paral·lel: l'estimador en règim permanent i l'estimador en règim transitori.

Per obtenir el bo i millor d'ambdós estimadors:

- Es fa un promig intel·ligent de les dues velocitats estimades mitjançant un sistema basat en lògica "fuzzy". Aquest sistema "fuzzy", intel·ligent, és capaç d'obtenir la relació òptima de promitjat entre les dues estimacions en funció del punt de treball del motor, punt de treball que és determinat per la velocitat del motor i el nivell o grau de règim permanent.

Per tancar el llaç de control de la velocitat amb la velocitat estimada:

- Es proposa utilitzar un sistema de control de parell FAM i un regulador PI. S'ha fet un repàs dels diversos sistemes de control del motor d'inducció i s'ha optat per escollir un control vectorial sense desacoblament d'eixos per "tancar" el llaç de velocitat.

Per solucionar el problema de filtratge de la resposta de l'estimador en règim transitori:

- Es proposa un sistema de filtratge intel·ligent per filtrar de manera òptima la resposta d'aquest estimador. L'estimador en règim transitori ofereix una velocitat estimada que difícilment es pot fer servir a causa del soroll que conté, si no es realitza un procés de filtratge. Aquest soroll és conseqüència dels derivadors i la divisió que incorpora l'algorisme d'estimació i del soroll provinent del corrent del motor. S'ha dissenyat un filtre adaptatiu (*fuzzy*) que, en funció del punt de treball del motor, varia la seva freqüència de tall òptima. Així, s'estableix un equilibri entre el retard a causa d'un filtratge fort i l'excés d'arissada que implica un filtratge massa suau. Les variables que proporcionen la informació del punt de treball per seleccionar la freqüència de tall són la mateixa velocitat estimada i la derivada del "corrent de parell" i_{sy} (obtingut amb l'algorisme de l'estimador en règim permanent); és a dir, el nivell de règim permanent.

A més, s'ha dissenyat un model de l'inversor que s'ha d'implementar per estalviar la mesura directa de la tensió del motor.

Finalment, es presenta l'estructura completa del sistema que controlarà la velocitat del motor d'inducció sense mesura directa de la velocitat. És a dir, es mostra l'estructura de l'accionament *sensorless* final dissenyat.

Respecte al model i els resultats de simulació

El model en simulació que s'ha fet servir té en consideració tots els blocs que s'implementaran i/o es programaran en l'entorn experimental i tots els elements de hardware, amb les seves no-idealitats, de què es disposa en el sistema real. Totes les equacions han estat introduïdes al model com a equacions discretes i durant la simulació treballen amb un temps d'iteració igual al que es preveu que treballaran en el sistema experimental.

Els blocs implementats en simulació destacables són:

- Els estimadors de velocitat i el sistema de promitjat i filtratge fuzzy per a l'obtenció de la velocitat final estimada del motor.
- 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 juntament amb el regulador PI.
- El modulador vectorial amb estructura modificada per evitar els temps morts dels transistors de l'inversor i el pont inversor trifàsic tenint en compte totes les seves no-idealitats (temps morts dels IGBT, caigudes de tensió, etc.).
- El model de l'inversor que serà necessari a la pràctica per obtenir la tensió del motor sense necessitat de mesurar-la.
- La càrrega mecànica que representa la bancada solidària a l'eix del motor.
- Els sensors de corrent i els filtres corresponents.

Els assaigs a què s'ha sotmès el model de simulació 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 causats a baixes velocitats 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. Aquest problema és degut al fet que, per a valors baixos de velocitat, la relació senyal/soroll dels corrents on s'apliquen els algorismes d'estimació és més desfavorable. També s'ha observat que, malgrat els instants inicials en què el valor de la velocitat estimada per l'estimador en règim permanent està lluny de la velocitat real, ambdós valors ràpidament passen a convergir. Això és degut principalment al fet que 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 dissortadament. El sistema implementat ha estat capaç de controlar la velocitat davant un canvi bruscat del parell de càrrega. La ràpida actuació davant aquest canvi és deguda al fet que la velocitat estimada passa de dependre molt de l'estimació en règim permanent i poc de l'estimació en règim transitori. 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 controlant 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, acceleració constant. S'ha posat en evidència el problema existent amb l'estructura del regulador emprat (PI). També s'ha posat a prova el sistema a desacceleradores que porten el motor de la velocitat consigna desitjada a aturar-se.
- 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'ha establert com a crític quan la velocitat del motor real ha passat per zero. Els efectes dels mínims corrents i els valors de les inductàncies funcionant a freqüències mot baixes és pitjor per a canvis sobtats del sentit de gir més que no pas per a canvis dels sentit de gir emprant rampes desacceleradores.

Com a conclusió final, es 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 difús que fa la mitjana ponderada, funciona en simulació i, per tant, vàlida en part la proposta de tesi.

Respecte a la implementació de la proposta de tesi

S'ha plantejat la implementació de l'accionament del motor d'inducció *sensorless* i s'ha mostrat l'estructura final del sistema i com queda configurat l'entorn on s'implementa l'accionament sobre l'estructura de hardware del sistema experimental (annex I).

S'han atribuït les tasques que ha de desenvolupar cada processador del sistema experimental que treballa en paral·lel i el pas de paràmetres que s'estableix. L'atribució de tasques no ha estat definida amb una idea de viabilitat industrial, sinó d'establir una plataforma d'assaigs per validar experimentalment els objectius i les propostes d'aquesta tesi i poder realitzar una recerca futura sobre aquest entorn. Els dos processadors han de treballar en temps real, un perquè és l'encarregat de controlar l'inversor, adquirir els valors de les magnituds que s'han de mesurar i imposar la tensió apropiada al motor (DSP) i l'altre (Pentium) perquè és l'encarregat de resoldre els algoritmes d'estimació de la velocitat i de tancar el llaç de velocitat amb el control de parell.

S'ha fet un estudi de l'efecte que sobre els estimadors i sobre el sistema de control FAM tindrà la variació dels paràmetres del motor en l'entorn experimental i s'han proposat algunes solucions.

Respecte als resultats experimentals

La proposta de tesi s'ha implementat sobre un sistema físic experimental i s'han extret resultats. S'ha sotmès el sistema als mateixos assaigs que els realitzats 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 amb què el motor s'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 la seva eficàcia. 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 triga menys a accelerar que en la simulació, cosa que 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 seu comportament s'ha establert com a crític quan la velocitat del motor real ha passat 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 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 els dos sistemes estimadors de velocitat. S'ha implementat el sistema difús 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.

Com a conclusió final, es pot afirmar que els resultats experimentals demostren la bondat dels algoritmes desenvolupats i validen les propostes d'aquesta tesi.

7.2 Línies de treball futures

Com a proposta de treballs futurs se suggereixen les línies de recerca següents:

1) Incorporar algoritmes d'estimació de paràmetres dins l'estructura del sistema d'estimació de la velocitat per fer que el sistema final sigui més robust davant les variacions dels paràmetres del motor.

S'ha comentat diverses vegades la influència dels paràmetres del motor en l'estimació de la velocitat i en el llaç de control de parell. Es poden implementar algoritmes d'estimació dels paràmetres en temps real. Pot decidir-se per una estimació d'aquests paràmetres tenint en compte en quin punt de treball l'estimació d'aquests paràmetres es més decisiva sobre el sistema complet.

2) Millorar el regulador que tanca el llaç de control de parell amb la velocitat estimada per poder controlar de manera més acurada velocitats més baixes.

S'ha evidenciat al llarg de la tesi i en els resultats que una estructura de regulador de tipus PI té certes mancances per a velocitats molt baixes. Es proposa l'estudi de reguladors adaptatius que, tenint en compte l'estructura de l'estimador, que determina el punt de treball del motor, l'empri per a una autosintonia en pro de la millora de la resposta del sistema davant el control de la velocitat final.

3) Validar l'estimador de velocitat per a estructures de control vectorial amb desacoblament d'eixos o sistemes DTC.

El sistema d'estimació de velocitat proposat en aquesta tesi pot ser validat per tancar el llaç d'estimació de la velocitat amb sistema de control de parell complex com poden ser els controls vectorials amb desacoblament d'eixos o els sistemes DTC.