

Índex

1. Introducció i Objectius	Pàg. 1-01
2. Models matemàtics del Motor d'Inducció i dels Sistemes <i>Sensorless</i>	2-01
2.1. Model del motor d'inducció	2-01
2.1.1. Sistemes de referència i transformacions vectorials	2-01
2.1.2. Model en règim transitori	2-05
2.1.3. Model en règim permanent	2-12
2.2. Estat de l'art dels sistemes de regulació de velocitat " <i>Sensorless</i> "	2-16
2.2.1. Mètodes basats en el model del motor	2-20
2.2.2. Estimador en règim permanent	2-28
2.2.3. Estimador en règim transitori	2-31
2.3. Conclusions	2-24
3. Estimador proposat basat en lògica Fuzzy	3-01
3.1. Sistema de filtrat de l'estimador en règim transitori	3-03
3.1.1. Estructura del sistema de filtrat fuzzy	3-03
3.1.2. Sintonia del sistema de filtrat fuzzy	3-08
3.2. Sistema de promitjat Fuzzy entre estimadors	3-09
3.2.1. Estructura del sistema promitjat fuzzy	3-09
3.2.2. Sintonia del sistema promitjat fuzzy	3-15
3.3. Control del Motor	3-16
3.3.1. Introducció i classificació	3-16
3.3.2. Control vectorial sense desacoblament d'eixos	3-19
3.3.3. Control vectorial per desacoblament d'eixos	3-20
3.3.4. Control pel Mètode d'Acceleració de Camp (FAM) (PI)	3-22
3.4. Model de l'inversor	3-27
3.4.1. Introducció	3-27
3.4.2. Estudi de les influències	3-29
3.4.3. Efectes sobre el sistema <i>sensorless</i>	3-33
3.5. Estructura del Sistema Complert	3-35
3.6. Conclusions	3-37
4. Resultats de simulació	4-01
4.1. Resultats a consignes graó constants	4-02
4.2. Resultats a canvis dinàmics de parell	4-07
4.3. Resultats a canvis de consignes	4-09
4.4. Resultats a consignes tipus rampa	4-11
4.4.1. Rampes acceleradores i desacceleradores.	4-15
4.5. Inversió del sentit de gir	4-19
4.6. Conclusions	4-20
5. El sistema experimental	5-01
5.1. Introducció i parts	5-01
5.2. Solució adoptada	5-03
5.3. Programa sobre el DSP	5-05
5.3.1. Implementació del mod. vectorial i gestió de l'estat de l'inversor	5-06
5.3.2. Adquisició de mesures	5-07
5.4. Programa sobre el PC	5-07

5.4.1. Temps real del llaç de control	5-10
5.4.2. Implementació de les equacions de l'estimador	5-12
5.4.3. Implementació de les equacions del control de parell	5-16
5.5. Dependència dels paràmetres	5-18
5.5.1. Influència dels paràmetres a l'estimador en règim permanent	5-18
5.5.2. Influència dels paràmetres a l'estimador en règim transitori	5-19
5.5.3. Influència dels paràmetres sobre el sistema de control (FAM)	5-21
5.6. Conclusions	5-22
6. Resultats experimentals	6-01
6.1. Resultats a consignes graó constants	6-01
6.2. Resultats a canvis dinàmics de parell	6-09
6.3. Resultats a canvis de consignes	6-10
6.4. Resultats a consignes tipus rampa	6-12
6.4.1. Rampes acceleradores i desacceleradores.	6-18
6.5. Inversió del sentit de gir	6-22
6.7. Conclusions	6-26
7. Conclusions de la tesi i línies de treball futures	7-01
7.1. Conclusions de la tesi	7-01
7.2. Línies de treball futures	7-06
8. Referències i Bibliografia	8-01
8.1. Referències	8-01
8.2. Bibliografia	8-07

Annexos

Annex I Característiques de l'Equip experimental

	Pag.
I.1. Arquitectura del sistema d'accionament	I-1
I.1.1 Sistema de mesura del corrent	I-4
I.1.2 Sistema de mesura de la velocitat	I-9
I.1.3 Pont inversor trifàsic i les seves proteccions hardware	I-11
I.1.4 El PC	I-19
I.2 Descripció de la bancada emprada per a l'experimentació	I-22
I.2.1 Motor asíncron	I-22
I.2.2 Servomotor de contínua	I-23
I.2.3 Dinamo tacomètrica	I-24
I.2.4 Banc de resistències del servomotor de contínua	I-24
I.2.5 Parell resistent de la bancada	I-24
I.2.6 Parell resistent del servomotor de contínua	I-25
I.2.7 Parell resistent total	I-25

Annex II Llistat dels programes. del sist. experimental al PC i el DSP

II.1. Programa "Sensor1.c"	II-3
II.2 Programa "Rampes.c"	II-23
II.3 Programa "Graons.c"	II-63
II.4 Programa "Modul.c"	II-87

Annex III Fotografies de l'entorn experimental

Fotografia 1. Bancada experimental.	III-1
Fotografia 2. Motor d'inducció.	III-1
Fotografia 3. Servomotor de contínua.	III-2
Fotografia 4. Resistències de càrrega.	III-2
Fotografia 5. Pont inversor de potència.	III-3
Fotografia 6. Entorn de desenvolupament i mesures del sistema experimental.	III-3

Glossari de símbols

Sistemes de coordenades

I, II, III	Sistema de coordenades fix trifàsiques genèric
$0, i, ii$	Sistema de coordenades fix ortonormals genèric
A, B, C	Sistema de coordenades fix trifàsiques elèctriques
a, b, c	Sistema de coordenades giratori trifàsiques elèctriques
ra, rb, rc	Subíndex de variables rotòriques en referència A, B, C
sa, sb, sc	Subíndexs de variables estatòriques en referència S_A, S_B, S_C
$0, D, Q$	Sistema de coordenades ortonormals fix de variables estatòriques
sD, sQ	Subíndexs de variables estatòriques en referència 0, D, Q
$0, d, q$	Sistema de coordenades ortonormals fix de variables rotòriques
rd, rq	Subíndexs de variables rotòriques en referència 0, d, q
$0, x, y$	Sistema de coordenades ortonormals giratori de variables referides a l'estator
g	Sistema de referència genèric

Angles

α, θ	: Angles arbitraris
θ_s	Angle de posició del sistema de referència respecte a l'observador extern
θ_r	Angle entre el sistema de referència i el rotor
θ_m	Angle de posició del rotor respecte l'observador extern

Constants

$c = \sqrt{\frac{2}{3}}$	Formulació de potència com a invariant
P	Parell de pols
τ_r	Constant de temps rotòrica (L_r / R_r)
D	Coefficient de fregament viscos
J	Inèrcia

Corrents

i	Corrent instantani genèric
i_a, i_b, i_c	: Corrents trifàsics
$[i_s]$	Vector de corrents trifàsics de l'estator
$[i_r]$	Vector de corrents trifàsics del rotor
i_{sg}, i_{rg}	Corrent estatòric i rotòric en eixos transformats genèrics
i_{sD}, i_{sQ}	Corrent de l'estator en eixos en quadratura fixos referits a l'estator
i_{rd}, i_{rq}	Corrent del rotor en eixos en quadratura fixos referits a l'estator
i_{sx}, i_{sy}	Corrent de l'estator en eixos en quadratura giratoris solidaris al fasor de tensió estatòrica referits a l'estator

i_{rx}, i_{rq}	Corrent del rotor en eixos en quadratura giratoris solidaris al fasor de tensió estatòrica referits a l'estator
i_m	Corrent magnetitzant genèric
i_{mx}	Corrent magnetitzant en eixos giratoris solidaris al fasor de tensió estatòrica referits a l'estator
\bar{I}_1	Corrent estatòric en règim permanent ω_1
\bar{I}_2	Corrent rotòric en règim permanent ω_1
\bar{I}_2^a	Corrent rotòric transformat amb l'operador a'

Filtre

K_c	Constant de tall de filtratge
ω_c	Pulsació de tall de filtratge

Fluxos

$\bar{\Psi}_r$	Flux al rotor genèric
$\bar{\Psi}_s$	Flux a l'estator genèric
$\bar{\Psi}_m$	Flux magnetitzant
$\bar{\Psi}_{sg}, \bar{\Psi}_{rg}$	Flux estatòric i rotòric en eixos transformats genèrics
Ψ_{sD}, Ψ_{sQ}	Flux estatòric en eixos fixos en quadratura referits a l'estator
Ψ_{rd}, Ψ_{rq}	Flux rotòric en eixos fixos en quadratura referits a l'estator

Inductàncies

L_s	Inductància de l'estator total per fase
L_1	Inductància de l'estator en règim permanent
l_s	Inductància de dispersió de l'estator
l_1	Inductància de dispersió de l'estator en règim permanent
L_r	Inductància del rotor total per fase
L_2	Inductància del rotor en règim permanent
l_r	Inductància de dispersió del rotor
l_2	Inductància de dispersió del rotor en règim permanent
M	Inductància d'excitació de cada una de les fases (la que crea el flux concatenat) i també el valor màxim d'inductància mútua entre estator i rotor
$L_m = 3/2M$	Inductància cíclica magnetitzant
$L_s = 3/2M' + l_s = M + l_s$	Inductància cíclica estator
$L_r = 3/2M' + l_r = M + l_r$	Inductància cíclica rotor
$[M(\theta)]$	Matriu d'acoblements magnètics
$[M_{rr}]$	Matriu d'acoblements rotor-rotor

$[M_{rs}]$	Matriu d'acoblements rotor-estator
$[M_{sr}]$	Matriu d'acoblements estator-rotor
$[M_{ss}]$	Matriu d'acoblements estator-estator

Lliscament

s	Lliscament
-----	------------

Modulador

T_{PWM}, T_Z	Temps d'imposició del triplet calculat a la sortida
$T_{Z\min}$	Temps mínim de permanència en un estat de cada branca

Operadors

$a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$	Operador complex espacial
p	Operador que significa $\frac{d}{dt}$
\times	Producte escalar
a'	Constant genèrica a multiplicar per tensions i/o corrents
$\alpha_2 = \frac{l_1 + L_m}{L_m}$	Operador per transformar models del motor en règim permanent
j	Operador complex ($\sqrt{-1}$)
z^{-1}	Retard pur

Parell:

Γ	Parell electromagnètic genèric en règim permanent
Γ_{elec}	Parell electromagnètic desenvolupat per la màquina
Γ_{mec}	Parell mecànic
Γ_3	Parell electr. en règim permanent calculat a partir del circuit equivalent T2

Promitjat

R	Factor de promitjat
-----	---------------------

Reguladors

u	Sortida del regulador
u_p	Sortida de l'acció proporcional del regulador
u_i	Sortida de l'acció integral de regulador
e, ε	Error
K_p	Constant proporcional genèrica
K_I	Constant integral genèrica
a	Ponderació de la consigna en reguladors PI modificats

b	Ponderació de la variable mesurada en reguladors PI modificats
BP	Banda Proporcional
T_i	Temps Integral

Reactàncies

x_1	Reactància de dispersió d'estator per ω_1
x_2	Reactància de dispersió del rotor per ω_1
X_m	Reactància magnetitzant per ω_1
X_1	Reactància d'estator total per fase per ω_1
X_2	Reactància del rotor total per fase per ω_1

Resistències

$[R_s]$	Matriu de resistències d'estator
$[R_r]$	Matriu de resistències del rotor
R_s	Resistència estatòrica
R_r	Resistència rotòrica
R_1	Resistència estatòrica en règim permanent
R_2	Resistència rotòrica en règim permanent

Sistemes

u_i	Entrada genèrica en un sistema que depèn del temps
u_o	Sortida genèrica en un sistema que depèn del temps
T_s, T_m	Temps de mostreig

Tensions

u, v	Tensió instantània genèrica
u_a, u_b, u_c	Tensions trifàsiques
$[v_s]$	Vector de tensions d'estator
$[v_r]$	Vector de tensions del rotor
v_{sD}, v_{sQ}	Tensions d'estator en eixos en quadratura fixos referits a l'estator
v_{rd}, v_{rq}	Tensions del rotor en eixos en quadratura fixos referits a l'estator
e_r	Força electromotriu induïda al rotor

Transformades

$[P(\alpha)]$	Transformada genèrica de Park
$[P(\alpha)]^{-1}$	Transformada inversa genèrica de Park

Variables

X^*	Indica que la variable X és consigna
\bar{x}	Fasor genèric
X^{α_2}	Variable transformada amb l'operador α_2
\hat{X}	Variable estimada

Velocitats

ω	Pulsació angular genèrica
ω_s	Pulsació angular de les variables de l'estator
ω_m	Pulsació angular del rotor, velocitat mecànica del rotor
ω_r	Pulsació angular de les variables del rotor
ω_1	Pulsació sincrònica
$s\omega_s, \omega_{sl}$	Pulsació de lliscament