

SUMARI

**Aportacions al desenvolupament dels motors de reluctància
autocommutats sense sensors de posició.
(Per aplicacions de petita potència i tensions reduïdes)**

Pròleg.

Índex genèric.

Capítol I: ACCIONAMENTS ELÈCTRICS PER APLICACIONS DE PETITA POTÈNCIA I TENSIONS REDUÏDES.

Capítol II: SRM: UNA ALTERNATIVA ALS ACCIONAMENTS ELÈCTRICS DE C.C. PER APLICACIONS DE PETITA POTÈNCIA I TENSIONS REDUÏDES.

Capítol III: SRM SENSE SENSORS DE POSICIÓ.

Capítol IV: RESULTATS EXPERIMENTALS.

Capítol V: DISCUSSIÓ DELS RESULTATS EXPERIMENTALS, APORTACIONS I CONCLUSIONS.

Annex 1: PROGRAMA PER A LA CARACTERITZACIÓ ELECTROMAGNÈTICA DELS PROTOTIPUS.

Annex 2: SIMULACIÓ DE L'ACCIONAMENT.

Annex 3: CRITERIS BÀSICS PEL DIMENSIONAMENT DEL SRM.

Annex 4: LLISTAT DELS PROGRAMES DE CONTROL.

Glossari 1: SIGLES I ACRÒNIMS.

Glossari 2: VOCABULARI.

Referències generals:

BASE DE DADES BIBLIOGRÀFICA (1970-1999).
COMUNICACIONS PRESENTADES PER L'AUTOR.

ÍNDIX DE CAPÍTOLS

PRÒLEG	vii
---------------------	-----

Capítol I: ACCIONAMENTS ELÈCTRICS PER APLICACIONS DE PETITA POTÈNCIA I TENSIONS REDUÏDES.

I.1. El present de l'Enginyeria Electromecànica.....	I-1
I.2. Accionaments: Perspectiva.....	I-2
I.3. L'Accionament: Generalitats	I-3
A. Components.....	I-3
B. Requeriments.....	I-5
C. Contribució de les noves tecnologies.....	I-6
D. Condicionaments introduïts pel tipus de motors.....	I-6
I.4. Accionaments elèctrics per aplicacions de petita potència i tensions reduïdes.....	I-10
Referències	I-12

Capítol II: SRM: UNA ALTERNATIVA ALS ACCIONAMENTS ELÈCTRICS DE C.C. PER APLICACIONS DE PETITA POTÈNCIA I TENSIONS REDUÏDES.

II.1. Història prèvia.....	II-1
II.2. Caracterització del SRM.....	II-4
II.2.1. Morfologia.....	II-4
II.2.2. Diferenciació respecte de motors semblants.....	II-5
II.2.3. Principi de funcionament.....	II-5
II.2.4. Producció del parell.....	II-11
II.2.5. Consideracions sobre el nombre de pols i fases.....	II-12
II.2.6. Característica parell-velocitat	II-13
A. Característica natural.....	II-14
B. Característica de parell constant.....	II-14
C. Característica de potència constant.....	II-14
II.2.7. Primeres consideracions sobre el control.....	II-15
II.2.8. Avantatges i inconvenients	II-16
II.2.9. Aplicacions.....	II-16
II.2.10. Importància de la saturació.....	II-18
II.3. El convertidor electromecànic.....	II-18
A. Estructura electromagnètica.....	II-18
B. Corbes de magnetització.....	II-18
C. Càlcul del parell mig.....	II-22
II.4. El convertidor estàtic.....	II-24
II.5. Captadors de posició.....	II-27
II.6. SRM: Estat actual.....	II-27
II.7. El SRM en aplicacions de petita potència i tensions	

reduïdes.....II-29

II.8. Accionament amb captador de posició per a petita potència i tensions reduïdes.....	II-32
A. Estructures electromagnètiques utilitzades.....	II-32
B. Diagrama de blocs.....	II-34
C. Sensor de posició.....	II-35
D. Etapa de potència.....	II-39
E. Seqüència de commutació.....	II-40
Referències	II-44

Capítol III: SRM SENSE SENSORS DE POSICIÓ.

III.1. Importància i necessitat prescindir del sensor de posició.....	III-1
III.2. Classificació i descripció dels diferents mètodes.....	III-1
III.3. Mètodes de control en laç obert (control síncron).....	III-3
III.4. Mètodes basats en l'equació elèctrica.....	III-4
III.4.1. Trossejat a un nivell de corrent prefixat.....	III-4
III.4.2. Derivada (tensió o corrent de fase).....	III-6
III.4.3. Estimació del flux en temps real.....	III-7
III.4.4. Injecció de polsos de diagnòstic.....	III-7
III.4.5. Modulació.....	III-10
III.4.6. Aprofitament de la força contraelectromotriu.....	III-11
III.4.7. Observació tensió induïda per acoblament	III-11
III.5. Mètodes que utilitzen observadors d'estat.....	III-11
III.6. Altres mètodes.....	III-12
III.6.1. Pèrdues magnètiques en el rotor.....	III-12
III.6.2. Utilització de bobines auxiliars.....	III-13
III.6.3. Modificació de la geometria d'un pol.....	III-13
III.7. Avantatges i inconvenients dels diferents mètodes.....	III-13
III.8. SRM sense sensors de posició per aplicacions de petita potència i tensions reduïdes.....	III-15
III.8.1. Mètode emprat: Consideracions generals.....	III-15
III.8.2. El paper del microcontrolador	III-17
III.8.3. Treball en temps discret.....	III-20
A. Conversió A/D.....	III-21
B. Funció de transferència en Z.....	III-22
C. Resposta temporal.....	III-24
III.8.4. Càlcul de la inductància de fase en el cas de no precisar regulació de velocitat (convertidor unipolar)....	III-24
A. Aspectes qualitatius.....	III-24
B. Descripció de l'accionament.....	III-25
C. Plantejament de l'algorisme.....	III-27
D. Implementació del programa: diagrama de flux.....	III-31
III.8.5. Pseudoinductància de fase.....	III-38
III.8.6. Càlcul de la inductància de fase en el cas de requerir regulació de velocitat (convertidor Miller)	III-39
Referències	III-43

Capítol IV : RESULTATS EXPERIMENTALS.

IV.1. Introducció.....	IV-1
IV.2. Estructures electromagnètiques.	IV-1
IV.3. Caracterització magnètica.	IV-4
IV.4. Determinació experimental de les formes d'ona de tensió i corrent en el SRM.....	IV-5
IV.5. Construcció del sensor de posició.....	IV-10
IV.6. Determinació experimental de la corba característica parell-velocitat.....	IV-10
IV.7. SRM amb sensors de posició. Resultats experimentals.....	IV-13
IV.7.1. SRM per aplicacions en las que la regulació de velocitat no és necessària (convertidor Unipolar)..	IV-13
IV.7.1.1. Formes d'ona dels corrents i les tensions...IV-13	
A. SRM 8/6	IV-13
B. SRM 12/8	IV-16
IV.7.1.2. Corbes parell-velocitat.	IV-17
A. SRM 8/6	IV-17
B. SRM 12/8	IV-18
IV.7.2. SRM per aplicacions en las que la regulació de velocitat és necessària (convertidor Miller).	IV-19
IV.7.2.1. Formes d'ona dels corrents i les tensions...IV-19	
A. SRM 8/6	IV-19
B. SRM 12/8.....	IV-20
IV.7.2.2. Corbes parell-velocitat.	IV-21
A. SRM 8/6	IV-21
B. SRM 12/8.....	IV-21
IV.8. SRM sense sensors de posició. Resultats experimentals.....	IV-22
IV.8.1. SRM per aplicacions en les que la regulació de velocitat no és necessària (convertidor Unipolar).....	IV-22
A. SRM 8/6	IV-22
B. SRM 12/8.....	IV-23
IV.8.2. SRM per aplicacions en les que és necessària la regulació de velocitat (convertidor Miller	IV-24
IV.8.3. Dependència dels paràmetres pseudoinductància i inductància de fases respecte la posició rotòrica.....	IV-25
Referències.....	IV-28

Capítol V : DISCUSSIÓ DELS RESULTATS EXPERIMENTALS,
APORTACIONS I CONCLUSIONS.

V.1. Discussió dels resultats experimentals	V-1
V.2. Comparació del comportament del SRM amb sensors i sense sensors	V-2
V.3. Comparació econòmica	V-4
V.4. Possibilitats de millora	V-7
V.5. Aportacions	V-7
V.6. Conclusions.....	V-9
V.7. Futures línies de treball	V-9
Referències.....	V-10

ANNEXES.

Annex 1: PROGRAMA PER A LA CHARACTERITZACIÓ ELECTROMAGNÈTICA DELS PROTOTIPUS.

Caracterització electromagnètica amb l'ajut d'un programa de càlcul assistit per ordinador	A1-1
Referències	A1-4

Annex 2: SIMULACIÓ DELS ACCIONAMENTS.....A2-1

A2.1. Avantatges i inconvenients d'utilitzar Pspice i Simulink en l'anàlisi dels SRM.	A2-1
A2.2. Modelització de l'accionament SR 12/8.....	A2-3
A2.3. Modelització de l'accionament unipolar SR12/8 en l'entorn Pspice.....	A2-4
A2.3.1. Convertidor estàtic.....	A2-6
A2.3.2. Estructura magnètica reluctant.....	A2-7
A2.3.3. Sensor de posició.....	A2-7
A2.3.4. Estimador de velocitat	A2-8
A2.3.5. Llaç de velocitat.....	A2-9
A2.3.6. Llei de control.....	A2-9
A2.3.7. Resultats.....	A2-10
A2.3.8. Resultats experimentals.....	A2-11
A2.4. Modelització de l'accionament unipolar SR12/8 en l'entorn Matlab-Simulink.....	A2-12
A2.4.1. Programa srmsenso.m.....	A2-15
A2.4.2. Resultats de la simulació.....	A2-17
A2.5. Modelització de l'accionament Miller SR 12/8 en l'entorn Pspice	A2-23
A2.5.1. Esquema de blocs.....	A2-23
A2.5.2 Alimentació.....	A2-24
A2.5.3. Convertidor estàtic	A2-24
A2.5.4 Modelització completa del SRM	A2-25
A2.5.5. Equació electromagnètica.....	A2-25
A2.5.6. Equació mecànica.....	A2-27
A2.5.7. Saturació magnètica.....	A2-27
A2.5.8. Model de càrrega.....	A2-28
A2.5.9. Sensor de posició	A2-28
A2.5.10. Regulació de la velocitat	A2-29
A2.5.11. Drivers.....	A2-29
A2.5.12.. Resultats de la simulació	A2-30
Referències	A2-34

Annex 3: CRITERIS BÀSICS PEL DIMENSIONAMENT DEL SRM	A3-1
A. Principis de càlcul.....	A3-1
B. Dimensionament preliminar.....	A3-3
C. Determinació del nombre d'espises.....	A3-4
D. Consideracions per a un disseny definitiu.....	A3-6
Referències	A3-6

Annex 4: LLISTAT DELS PROGRAMES DE CONTROL.

A4.1. Accionaments que no requereixen velocitat regulable	A4-1
A4.1.1. SRM 12/8 (3 fases i convertidor Unipolar). UNIPOLAR .	
A. Mètode Pseudoinductància de fase (velocitat de treball 12 MHz).....	A4-1
B. Mètode inductància de fase (20 MHz).....	A4-3
A4.1.2. SRM 8/6 (4 fases i convertidor Unipolar).	
Mètode inductància de fase (40 MHz).....	A4-9
A4.2. Accionaments que requereixen velocitat regulable	
SRM 12/8 (3 fases i convertidor Miller	
Mètode inductància de fase (40 MHz).....	A4-11

GLOSSARIS.

Sigles i Acrònims.....	G1-1
Vocabulari.....	G2-1

REFERÈNCIES GENERALS

Base de dades bibliogràfica, 1970-1999	B-1
Comunicacions presentades per l'autor.....	C-1

ÍNDIX DE FIGURES

Figura	Títol	Pàgina
1.1.	Participació del silici en els accionaments elèctrics. (A : Díodes rectificadors, <i>BUS DC</i> ; B : Mòdul de transistors de Potència, <i>configuració de l'estructura del convertidor</i> ; C : Circuits de govern dels transistors, <i>Drivers</i> ; D : Circuit de control, <i>ASIC, CPLD, μC, DSP ...</i>).	I-1
1.2.	Motor de reluctància autocommutat, despeçament.	I-2
1.3.	Diagrama de blocs d'un accionament elèctric.	I-4
1.4.	$\frac{1}{4}$ Motor de corrent altern asíncron (o d'inducció).	I-6
1.5.	$\frac{1}{2}$ Motor de corrent continu amb excitació a base d'imants permanents.	I-7
1.6.	$\frac{1}{2}$ Motor síncron amb imants exteriors.	I-8
1.7.	$\frac{1}{2}$ Motor síncron de reluctància amb laminació axial (ALA).	I-9
1.8.	Motor de reluctància autocommutat (SRM) de 4 fases.	I-9
1.9.	Classificació dels accionaments elèctrics de petita potència (< 1kW).	I-11
2.1.	Cartell anunciador d'una exposició de ginys Electromagnètics per Davidson al <i>Egyptian Hall</i> de Londres (1939).	II-2
2.2.	Dibuix en el que es pot veure, de forma simplificada, el principi de funcionament de la <i>Locomotive</i> de Davidson.	II-2
2.3.	Detall del motor de Davidson .	II-3
2.4.	Motor de reluctància autocommutat tipus 6/4 (<i>Switched Reluctance Motor SRM</i>). Convertidor estàtic amb dos interruptors per fase.	II-6
2.5.a	Commutació de les fases de estator en funció de la posició del rotor. Convertidor tipus Miller.	II-7
2.5.b	Commutació de les fases de estator en funció de la posició del rotor. Convertidor tipus Miller.	II-7
2.5.c	Commutació de les fases de estator en funció de la posició del rotor. Convertidor tipus Miller.	II-8
2.5.d	Commutació de les fases de estator en funció de la posició del rotor. Convertidor tipus Miller.	II-8
2.6.	Evolució de les inductàncies de fase, seqüència de commutació i distribució dels corrents. Convertidor Miller.	II-10
2.7.	Evolució del corrent de fase segons l'avanç o retràs de la commutació.	II-11
2.8.	Producció de parell motor ($M > 0$) o generador ($M < 0$) a corrent constant.	II-12
2.9.	Forma d'ona ideal del corrent de fase.	II-13
2.10.	Comportament parell velocitat.	II-14
2.11.	Modes de treball: a) Pols únic, b) Trossejat.	II-15
2.12.	$\frac{1}{2}$ Estructura SRM 6/4.	II-18
2.13a.	Línies de camp per a la posició d'alineament.	II-19
2.13b.	Mapa d'inducció per a la posició d'alineament.	II-19
2.13c.	Línies de camp per a la posició de desalineament.	II-20

Figura	Títol	Pàgina
2.13d.	Mapa d'inducció per a la posició de desalineament.	II-20
2.14.	Corbes de magnetització, estructura SRM 6/4.	II-21
2.15.	Inductància vs. posició rotòrica per a diferents valors del corrent.	II-22
2.16.	Cicle de treball.	II-23
2.17.	Convertidor clàssic (2 interruptors per fase). Fases independents.	II-24
2.18.	Convertidor Miller.	II-25
2.19.	Convertidor Unipolar.	II-25
2.20.	Circuits de desexcitació per a convertidors Unipolars.	II-26
2.21.	SRM 1HP. Magna Physics Division (Tridelta Industries, Inc.).	II-29
2.22.	Rendiment (considerant solament pèrdues en el coure) en funció de la potència. Línia fina: motor de CC amb imants permanents. Línia gruixuda: SRM.	II-31
2.23.	Parell/Volum prismàtic, en funció de la potència. Línia fina: motor de CC amb imants permanents. Línia gruixuda: SRM.	II-32
2.24.	Estructura electromagnètica usual del SRM de 4 fases (8/6 pols).	II-33
2.25.	Estructures electromagnètiques usuals del SRM de 3 fases.	II-33
2.26.	Diagrama de blocs de l'accionament per a un motor amb connexió estrella (N).	II-34
2.27.	SRM 8/6. Sensor de posició per a motors de 4 fases. (SRM 8/6). Posició del disc ranurat respecte els opto-interruptors: a) Vista en planta. b) Vista en perfil: 1≡opto interruptors, 2≡resistències de polarització, 3≡circuit imprès, 4≡disc ranurat. c) Conjunt (suport motor + sensor).	II-35
2.28.	Emplaçament dels opto-interruptors SRM 8/6 (veure taula II-2).	II-36
2.29.	Polarització dels opto-interruptors.	II-36
2.30.	SRM 8/6. a) Inductància de fase idealitzada, b) Senyals dels sensors optoelectrònics, c) Funcionament normal en sentit horari (avançament conducció 3,75° i durada 15°), d) Funcionament normal sentit antihorari, e) Funcionament com a fre (sentit horari), f) Funcionament amb avançament de fase de 7,5° (sentit horari), g) Funcionament amb avançament de fase i allargament de l'angle de conducció fins a 22,5° (sentit horari).	II-37
2.31.	SRM 12/8. a) Inductància de fase idealitzada, b) Senyals dels sensors optoelectrònics, c) Funcionament normal en sentit horari (avançament conducció 3,75° i durada 15°), d) Funcionament normal sentit antihorari, e) Funcionament com a fre (sentit horari), f) Funcionament amb avançament de fase de 7,5° (sentit horari), g) Funcionament amb avançament de fase i allargament de l'angle de conducció fins a 22,5° (sentit horari).	II-38
2.32.	Convertidor estàtic configurable de 4 fases. Amb un únic circuit es poden implementar dues topologies: Miller o Unipolar.	II-39
2.33.	SRM 8/6. Lògica de commutació per implementar els modes de funcionament de la figura 2.24.	II-41
2.34.	Tacòmetre (OTA LM13700).	II-42

Figura	Títol	Pàgina
2.35.	Blocs funcionals de l'accionament SRM 8/6 amb sensors de posició.	II-43
3.1.	Prototipus SRM 12/8 amb sensors de posició.	III-1
3.2.	Diagrama de blocs del control síncron.	III-3
3.3.	Trossejat a un nivell de corrent prefixat.	III-5
3.4.	Gradient del corrent de fase (control per tensió, mode pols únic).	III-6
3.5.	Variació de l'amplitud del corrent mitjançant la tècnica de la injecció de polsos de diagnòstic.	III-8
3.6.	Injecció de polsos de diagnòstic.	III-9
3.7.	Tècniques basades en la modulació.	III-10
3.8.	Sistema de control utilitzant observadors d'estat.	III-12
3.9.	Corba de magnetització.	III-16
3.10.	Mostrejador tipus PAM.	III-21
3.11.	Mostreig i manteniment d'ordre zero en el domini s.	III-21
3.12.	Convertidor A/D.	III-22
3.13.	Funció de transferència per calcular el flux magnètic	III-23
3.14.	Esquema de conjunt de l'accionament.	III-25
3.15.	Convertidor unipolar: ubicació de la resistència sensora R_s .	III-26
3.16.	a) Adquisició del corrent real I_t , b) Condicionament de I_t (V_e), c) Tensió de fase.	III-27
3.17.	Evolució del corrent I_t en les condicions de la taula III-4.	III-29
3.18.	Representació de l'evolució de la inductància de fase simulada en la taula III-4.	III-29
3.19.	Dependència respecte el temps de mostreig i la velocitat de gir de la inductància de fase calculada per a les mateixes condicions de commutació.	III-30
3.20.	Simplificació en la commutació de les fases en el cas d'utilitzar un avançament de conducció de 5° i una durada de l'excitació de 15° (SRM12/8).	III-30
3.21.	Diagrama de blocs del programa (I).	III-31
3.22.	Diagrama de blocs del programa (II).	III-32
3.23.	Diagrama de blocs del programa (III).	III-33
3.24.	Llei de control, ambdós sentits de gir.	III-34
3.25.	Necessitat de commutació tipus arrancada (NCAR).	III-35
3.26.	Finalització dels cicles d'arrancada en sentit antihorari, FCA. (una volta del motor requereix 8 seqüències de commutació.	III-36
3.27.	Finalització dels cicles d'arrancada en sentit horari, FCH.	III-36
3.28.	Necessitat de commutació tipus òptim (NCOP).	III-37
3.29.	Simulació del comportament del paràmetre pseudoinductància de fase. Motor SRM 12/8, amb avançament de conducció 5° i durada de la conducció 15° (velocitats de gir entre 500 i 3000 s^{-1}).	III-39
3.30.	Diagrama general de l'accionament de velocitat regulable proposat.	III-39
3.31.	Convertidor Miller.	III-40
3.32.	Diagrama de blocs detallat.	III-40
3.33.	Diagrama de blocs del programa pel cas de velocitat regulable.	III-41

Figura	Títol	Pàgina
4.1.	Estructures electromagnètiques SRM.	IV-1
4.2.	12/8SRM. Estator.	IV-2
4.3.	12/8SRM. Rotor.	IV-2
4.4.	8/6 SRM.	IV-3
4.5.	8/6 SRM. Sensor de posició.	IV-3
4.6.	Diagrama de blocs de l'equip per a la mesura d'inductàncies	IV-4
4.7.	SRM 12/8 Inductàncies de fase per a diferents posicions i corrents de fase.	IV-5
4.8.	SRM 8/6 Inductància de fase respecte la posició del rotor per diferents valors de corrent de fase.	IV-5
4.9.	SRM 12/8 Flux concatenat respecte del corrent de fase i la posició del rotor.	IV-6
4.10.	SRM 8/6. Flux concatenat respecte del corrent de fase per diferents posicions del rotor (compreses entre la posició alineada i la posició no alineada).	IV-6
4.11.	Obtenció formes d'ona. (1): Font CC d'alimentació. (2): Motor + Sensor de posició. (3): Paca convertidor estàtic. (4): Placa de control.	IV-7
4.12.	<i>Hardware</i> : Placa de control.	IV-7
4.13.	<i>Hardware</i> . Placa convertidor Unipolar de 4 fases, SRM 8/6.	IV-8
4.14.	<i>Hardware</i> . Paca convertidor Miller per 3 fases, SRM 12/8.	IV-8
4.15.	Obtenció formes d'ona.	IV-9
4.16.	Formes d'ona: a) Convertidor Unipolar, b) Convertidor Miller.	IV-9
4.17.	Detall del captador de posició del rotor. Plaques de circuit imprès que realitza el connexionat els opto-interruptos i disc ranurat.	IV-10
4.18.	Conjunt SRM acoblat a un generador CC. com a fre.	IV-10
4.19.	Muntatge per extreure les corbes característiques parell-velocitat. (1) SRM, (2) Acoblament flexible (desalineaments), (3) Encoder, (4) Generador amb resistència de descàrrega variable.	IV-11
4.20.	Resistència de pèrdues (R_p) en funció de la velocitat de gir.	IV-11
4.21.	Sistema de mesura del parell per mitjà de 2 dinamòmetres.	IV-12
4.22.	Politja utilitzada per a la mesura del parell motor.	IV-13
4.23.	SRM 8/6. Diferents posicions relatives rotor-disc ranurat (sensor de posició).	IV-14
4.24.	SRM 8/6 Unipolar. Corrent de fase (canal 1, 100 mA/div) i la tensió en borns dels interruptors estàtics (canal 2, 20 V/div).	IV-15
4.25.	Forma d'ona del corrent de fase SRM 8/6 alimentat amb convertidor unipolar. Escala: 1 ms/div , 0.2 A/div Punt de funcionament: 2000 min ⁻¹ , 40 mNm (representat en la figura 4.27. com a punt P).	IV-15
4.26.	SRM 12/8, convertidor unipolar (a) Forma d'ona del corrent (fase A) N= 2101 min ⁻¹ , Rd = 47 Ω . (b) Tensió en borns de l'interruptor (fase A) N = 2101min ⁻¹ . (c) Forma d'ona del corrent (fase A) N= 2105 min ⁻¹ , Rd = 100 Ω . (d) Tensió en borns de l'interruptor (fase A) N = 2105min ⁻¹ . (e) Forma d'ona del corrent (fase A) N= 2098 min ⁻¹ , Zener 30 V. (f) Tensió borns interruptor (fase A) N = 2098min ⁻¹ ., Zener 30 V.	IV-16

Figura	Títol	Pàgina
4.27.	Característica natural del SRM 8/6 (convertidor unipolar, $V_{cc}=24V$, $V_z=24V$, $R_d=5,6 \Omega$). Calat del disc ranurat en la posició normal (sense avançament de fase i amb una durada de la conducció igual a l'angle de pas). La forma d'ona del corrent en el punt de funcionament P correspon a la figura 4.25.	IV-17
4.28.	Característica parell-velocitat per a un accionament SRM 12/8 amb convertidor unipolar alimentat a 24 V i díode zener de supressió $V_z= 24V$. Calat del disc ranurat en la posició normal (sense avançament de fase i amb una durada de la conducció igual a l'angle de pas).	IV-18
4.29.	SRM 8/6 amb Convertidor Miller. Corrent de fase per a) 180 min ⁻¹ , b) 318 min ⁻¹ , c) 640 min ⁻¹ , d) 986 min ⁻¹ , b) e) 1595 min ⁻¹ .	IV-19
4.30.	SRM 12/8. Cconvertidor Miller. Formes d'ona del corrent.	IV-20
4.31.	SRM 8/6. Corba característica parell-velocitat per diferents valors del corrent de fase. Treball a parell constant.	IV-21
4.32.	Característica parell-velocitat per a un accionament SRM 12/8 amb convertidor Miller.	IV-21
4.33.	Corba característica parell-velocitat sense sensors SRM 8/6.	IV-22
4.34.	Corbes característiques parell-velocitat sense sensors i amb dos mètodes diferents (Inductància de fase; Pseudoinductància de fase) SRM 12/8.	IV-23
4.35.	Regulació de velocitat a parell constant per SRM 12/8.	IV-24
4.36.	Utilització del paràmetre Pseudoinductància (μC treballant amb rellotge de 12 MHz; temps de cicle 55 μs) a) 787 m ⁻¹ , b) 1330 m ⁻¹ , c) 2880 m ⁻¹ .	IV-25
4.37.	Utilització de la inductància de fase. Representació del flux magnètic i el corrent de fase (μC treballant amb rellotge de 20 MHz, temps de cicle 75 μs). a) 650 m ⁻¹ , b) 1500 m ⁻¹ , c) 3000 m ⁻¹ .	IV-26
5.1.	SRM12/8 i SRM8/6. Comparació entre control convencional i sense sensors de posició. Convertidor Unipolar.	V-2
5.2.	SRM12/8 . Convertidor Miller. Comparació entre control convencional o sense sensors de posició.	V-3

Figura	Títol	Pàgina
A1.1.	Estructures electromagnètiques SRM.	A1-1
A1.2.	Dimensions de l'estator (mm.).	A1-2
A1.3.	Dimensions del rotor (mm.).	A1-2
A1.4.	12/8 SRM.	A1-3
A1.5a.	Estator 12/8 SRM.	A1-3
A1.5b.	Rotor.12/8 SRM.	A1-3
A1.6.	Connexionat de les fases (estrella) i de les bobines sobre els 4 pols per fase (sèrie).	A1-4
A1.7.	Diagrama de blocs de l'equip per a la mesura d'inductàncies.	A1-5
A1-8.	Inductància de fase respecte la posició del rotor per diferents valors de corrent de fase.	A1-6
A1-9	Flux concatenat respecte del corrent de fase per diferents posicions del rotor, compreses entre la posició alineada i la posició no alineada.	A1-7
A1.10.	SRM 12/8. Evolució de les inductàncies de fase.	A1-8
A1.11.	Menú programa de càlcul i anàlisi assistit per ordinador per SRM.	A1-9
A1.12.	Geometria representada pel programa de càlcul.	A1-10
A1.13.	Corba de magnetització SRM 12/8 .	A1-10
A1.14.	Cicle complert. Recorregut sobre la corba de magnetització SRM 12/8 .	A1-11
A1.15.	Llistats del programa de càlcul del SRM (1).	A1-11
A1.16.	Llistats del programa de càlcul del SRM (2).	A1-12
A1.17.	Obtenció formes d'ona.	A1-12
A1.18.	Detall del captador de posició del motor.	A1-13
A1.19.	Muntatge per extreure les corbes característiques parell-velocitat.	A1-14
A1.20.	Resistència de pèrdues en funció de la velocitat de gir.	A1-15
A2.1.	Diagrama de blocs de l'accionament unipolar.	A2-3
A2.2.	Diagrama de blocs de l'accionament Miller.	A2-4
A2.3.	Convertidor Unipolar (connexió estrella).	A2-5
A2.4.	Angle d'encesa variable (Ton) amb angle de conducció constant (20°).	A2-5
A2.5.	Esquema general de la implementació de l'accionament.	A2-6
A2.6.	Convertidor unipolar modelat amb Pspice.	A2-6
A2.7.	Plantejament de les equacions elèctriques.	A2-7
A2.8.	Obtenció de la posició rotòrica.	A2-8
A2.9.	Equació mecànica. Càlcul de la velocitat.	A2-8
A2.10.	Simulació fase A (SRM 12/8).	A2-10
A2.11.	Fase A. Resultats experimentals.	A2-11
A2.12.	Modelització amb captadors (Simulink).	A2-12
A2.13.	Modelització sense sensors de posició (Simulink).	A2-13
A2.14.	Corrent de la fase A (2100 s ⁻¹).	A2-14
A2.15.	Diagrama general de blocs.	A2-15
A2.16.	Convertidor estàtic + estructura electromagnètica (fase A).	A2-15

Figura	Títol	Pàgina
A2.17.	Convertidor estàtic + estructura electromagnètica (fase B).	A2-16
A2.18.	Convertidor estàtic + estructura electromagnètica (fase C).	A2-16
A2.19.	Inductància de fase a partir de mesures experimentals ajustades.	A2-17
A2.20.	Inductància d'una fase.	A2-17
A2.21.	Equacions mecàniques. Obtenció de velocitat i posició.	A2-18
A2.22.	Càlcul del parell motor.	A2-18
A2.23.	Càlcul del parell motor generat per la fase A.	A2-18
A2.24.	Càlcul del parell motor generat per la fase B.	A2-19
A2.25.	Càlcul del parell motor generat per la fase C.	A2-19
A2.26.	Captador de posició.	A2-19
A2.27.	Model del captador de posició.	A2-20
A2.28.	Detall de la taula del model de captador de posició.	A2-20
A2.29.	Comportament del SRM alimentat amb un convertidor unipolar.	A2-21
A2.30.	Corrent de fase, tensió de fase i inductància de fase (en les condicions de la figura A2.29.)	A2-21
A2.31.	Velocitat angular i parell resistent intermitent.	A2-22
A2.32.	Velocitat angular i parell resistent constant.	A2-22
A2.33.	Esquema general de blocs.	A2-23
A2.34.	Inicialitzacions.	A2-23
A2.35.	Font d'alimentació CC.	A2-24
A2.36.	Convertidor Miller amb sensor de corrent.	A2-24
A2.37.	Model complet SRM 12/8 .	A2-25
A2.38.	Equació electromagnètica SRM 12/8 (1 ^a part).	A2-25
A2.39.	Equació electromagnètica SRM 12/8 (2 ^a part).	A2-26
A2.40.	Equació electromagnètica SRM 12/8 (3 ^a part).	A2-26
A2.41.	Equació mecànica.	A2-27
A2.42.	Efectes de la saturació.	A2-27
A2.43.	Càrrega depenen de la velocitat de gir (quadràtica).	A2-28
A2.44.	Captador de la posició rotòrica.	A2-28
A2.45.	Regulador.	A2-29
A2.46.	Drivers.	A2-29
A2.47.	Flux concatenat en funció del corrent de fase.	A2-30
A2.48.	Inductància i corrent per cada una de les fases.	A2-30
A2.49.	Inductància i corrent per la fase B.	A2-31
A2.50.	Tensió i corrent de la fase B.	A2-31
A2.51.	Senyals de control per a la commutació de les fases (S2, S3, S1). Regulació del corrent de fase (S4,H), corrent de referència i corrent resultant.	A2-32
A2.52.	Corrent de les tres fases durant l'arrancada.	A2-32
A2.53.	Corrent d'acceleració i velocitat de gir.	A2-33
A2.54.	Corrent, velocitat de gir i parell resistent (canvi sobtats en graó).	A2-33
A3.1.	Geometria SRM 6/4.	A3-2

ÍNDIX DE TAULES

Taula	Títol	Pàgina
I-1	Mercat Europeu d'accionaments de velocitat variables (valor %). Període 1995-2002, font Frost & Sullivan (1996).	I-4
I-2	Valor i volum del mercat mundial d'accionaments elèctrics. Font Vas & Drury.	I-5
I-3	Requeriments desitjables en els accionaments.	I-5
II-1	Diferències significatives entre el SRM i el motor síncron de reluctància.	II-5
II-2	Avantatges i Inconvenients dels SRM.	II-16
II-3	Posicionament dels opto-interruptors per a un funcionament bidireccional.	II-35
II-4	Taula de veritat per a 8/6 SRM (4 fases).	II-40
II-5	Taula de veritat per a un 12/8 SRM (3 fases).	II-41
III-1	Comparació dels diferents mètodes de control sense sensors de posició.	III-13
III-2	Principals avantatges i inconvenients del control analògic i del control digital.	
III-18		
III-3	Resolució dels sistemes de processament digital.	III-19
III-4	Simulació del càlcul de la inductància de fase.	III-28
IV-1	Dimensions principals de les estructures 12/8 i 8/6.	IV-1
IV-2	Resistència de fase i tensió d'alimentació.	IV-2
V-1	Comparació del cost del SRM 8/6 convencional i sensorless.	V-5
V-2	Comparació del cost del SRM 12/8 convencional i sensorless.	V-6
V-3	Preu de venda d'accionaments de velocitat regulable, segment de petita potència.	V-7
A1-I	Dimensions principals de les estructures SRM 12/8 i SRM 8/6.	A1-1
A1-II	Resistència de fase SRM 12/8 i 8/6.	A1-1
A2-I	Avantatges i inconvenients d'utilitzar Pspice i Simulink per l'anàlisi dels SRM.	A2-1
A2-II	Paràmetres motor SRM 12/8.	A2-9

GLOSSARI DE SÍMBOLS UTILITZATS EN LA REDACCIÓ

A	Extrem superior del debanament motor, Fase A.
A'	Extrem inferior del debanament motor, Fase A.
A _v	Àrea de finestra.
B	Extrem superior del debanament motor, Fase B.
B'	Extrem inferior del debanament motor, Fase B.
B	Inducció.
b _s	Amplada dels pols de l'estator.
b _r	Amplada dels pols del rotor.
C	Extrem superior del debanament motor, Fase C.
C'	Extrem inferior del debanament motor, Fase C.
C	Coefficient (o factor) d'utilització.
cdt	Caiguda de tensió dels interruptors d'estat sòlid.
d	Angle de conducció (<i>dwell</i>).
D	Diàmetre de l'induït.
D ₁	Diàmetre interior d'estator.
D _y	Diàmetre exterior de l'estator.
D _{eix}	Diàmetre de l'eix.
D	Fase D.
d	“dwell” (angle de conducció).
E	Estator.
E _ω	Força electromotriu originada pel gir del motor.
f	Freqüència.
h _y	Gruix del jou.
h _n	Gruix corona rotòrica.
i	Corrent instantani.
i _A	Corrent instantani de la fase A.
i _B	Corrent instantani de la fase B.
i _C	Corrent instantani de la fase C.
i _D	Corrent instantani de la fase D.
i _f	Corrent instantani de fase.
I	Corrent eficaç.
I*	Corrent expressat en temps discret.
I _d	Corrent continu (de “Bus”).
I _p	Amplitud del corrent aplicat.
k	Constant.
K	Constant.
K _α	Coefficient de ventilació.
K _v	Coefficient d'utilització de la finestra.
l	Inductància incremental ($\partial L / \partial \theta$).
l	Factor d'escala .
L	Inductància.
L	Llargada de l'induït.
L _A	Inductància en la posició de màxim alineament.
L _{em}	Longitud de la espira mitja.
L _{NA}	Inductància en la posició de màxim desalineament.
L _f	Inductància de fase.
M	Parell motor.
M1	Interruptor d'estat sòlid associat a la fase 1, part superior del convertidor clàssic.

M1'	Interruptor d'estat sòlid associat a la fase 1, part inferior del convertidor clàssic.
M2	Interruptor d'estat sòlid associat a la fase 2, part superior del convertidor clàssic.
M2'	Interruptor d'estat sòlid associat a la fase 2, part inferior del convertidor clàssic.
M3	Interruptor d'estat sòlid associat a la fase 3, part superior del convertidor clàssic.
M3'	Interruptor d'estat sòlid associat a la fase 3, part inferior del convertidor clàssic.
M _{AV}	Valor mig del parell motor.
M _b	Parell motor aparent.
m	Nombre de fases.
N	Nombre d'espines per pol.
N	Velocitat del motor (min ⁻¹).
N	Punt comú de tots els debanaments de l'estator (Neutre).
N _e	Nombre de pols de l'estator.
N _r	Nombre de pols del rotor.
p	Nombre de parell de pols.
P	Potència elèctrica (valor mig).
P _{CU}	Pèrdues en el coure.
P _j	Pèrdues Joule (pèrdues en el coure).
P _m	Pèrdues mecàniques.
Q1	Interruptor d'estat sòlid associat al neutre del connexionat dels debanaments del motor, part superior del convertidor (Unipolar o Miller).
Q1'	Interruptor d'estat sòlid associat a la fase 1, part inferior del convertidor (Unipolar o Miller).
Q2'	Interruptor d'estat sòlid associat a la fase 2, part inferior del convertidor (Unipolar o Miller).
Q3'	Interruptor d'estat sòlid associat a la fase 3, part inferior del convertidor (Unipolar o Miller).
Q4'	Interruptor d'estat sòlid associat a la fase 4, part inferior del convertidor (Unipolar o Miller).
q	Càrrega lineal específic.
R	Resistència.
R	Rotor.
R	Energia emprada en la magnetització.
R _f	Resistència per fase.
r	Factor d'energia.
r	Relació d'inductàncies (L _{na} /L _a).
S1	Senyal de sortida del sensor de posició optoelectrònic N° 1.
S2	Senyal de sortida del sensor de posició optoelectrònic N° 2.
S3	Senyal de sortida del sensor de posició optoelectrònic N° 3.
S4	Senyal de sortida del sensor de posició optoelectrònic N° 4.
S _α	Secció de ventilació.
S _C	Secció del fil conductor.
s	Transformada de Laplace.
T	Duració del pols.
T _f	Temps de baixada.
T _r	Temps de pujada.
T _m	Constant de temps de mostreig.
U	Tensió .
U _{cc}	Tensió d'alimentació.
U _p	Amplitud de la tensió aplicada.
V	Tensió.
V _{DC}	Tensió d'alimentació.

W	Energia transformada en un cicle de treball (pas).
z	Transformada discreta.
Δ	Densitat de corrent eficaç.
ΔI	Increment de corrent.
ΔL	Variació de la inductància.
Δt	Increment de temps.
Σ	Sumador o restador (error).
ΔT	Increment de temperatura.
ΔT_{\max}	Increment de temperatura màxim.
Ψ	Flux concatenat per un conjunt d'espines.
Φ_C	Diàmetre conductor un.
β_r	Arc polar rotòric .
ε	Angle de pas. Error.
ϕ	Flux magnètic.
ϕ	Angle.
γ	Cicle d'operació.
η	Rendiment.
μ_o	Permeabilitat del buit.
μC	Microcontrolador.
μP	Microprocessador.
v	Nombre de fases que condueixen simultàniament.
ρ	Resistivitat del fil elèctric conductor.
θ	Posició angular.
θ_{on}	Angle de connexió.
θ_{off}	Angle de desconnexió.
θ_c	Angle de conducció
ω	Velocitat angular (s^{-1}).
ω_b	Velocitat angular (s^{-1}) de base.
ω_c	Velocitat angular (s^{-1}) crítica.
τ	Pas polar rotòric.
Ω	Velocitat de rotació (s^{-1}).