

V.1. Discussió dels resultats experimentals.

En aquest treball s'ha efectuat un estudi comparatiu entre dos SRM un amb estructura 12/8 i l'altre amb 8/6, tan amb sensors de posició com sense, per aplicacions que precisin petites potències i tensions reduïdes, utilitzant un accionament amb angles de commutació constants i amb la mateixa estructura general de l'accionament pels dos SRM. És important assenyalar que les estructures electromagnètiques dels dos motors no estan optimitzades, el que suposa que encara que encara que el volum prismàtic de les dues màquines sigui pràcticament el mateix, el parell per unitat de corrent derivat de les corbes de magnetització sigui molt més favorable per l'estructura 12/8 SRM.

De l'anàlisi de la figura 5.1. es pot deduir que l'estructura 8/6 SRM pot proporcionar un determinat de parell a velocitat més elevada que l'estructura 12/8 SRM, però per fer-ho requereix un corrent molt més alt.

El convertidor de potència de l'estructura 8/6 SRM té en contra la necessitat d'un major nombre d'interruptors del convertidor estàtic, inconvenient que pot ser salvat utilitzant un convertidor tipus Oulton amb un sol interruptor per fase. En el cas d'utilitzar sensors de posició l'estructura 8/6 SRM també ha de afegir un opto-interruptor més en el captador de posició. En el cas de no utilitzar sensors de posició només caldria un interruptor addicional en el convertidor.

Els enrotllaments de les dues estructures estan pensats per tensions comuns de 24 V però corrents força diferents, tal com mostra la taula IV-II. No ha d'estranyar doncs que la inductància de fase sigui més sensible al nivell de corrent pel cas del SRM 8/6 (veure figures 4.7. i 4.8.).

Els valors obtinguts en el cas d'emprar un control per inductància de fase amb angles de commutació fixos, absència de regulació de velocitat i sense sensors de posició són sorprenents en positiu. A priori s'esperava una disminució de prestacions per l'eliminació dels sensors. El fet de comparar els resultats sobre la mateixa estructura electromagnètica afegeix un plus de confiança als valors obtinguts, conferint un menor grau d'error.

El mètode basat en el càlcul de la pseudoinductància de fase dona uns resultats finals bastant decebedors, figura 5.1. , tan en valors de parell com en rang de velocitats. Presenta un comportament menys satisfactori del que calia preveure.

En el cas d'accionaments de velocitat variable a parell constant, figura 5.2., s'observa un millor comportament en parell motor pel cas sense sensors, però en contra el rang de velocitat obtingut és lleugerament inferior.

Considerem, atesos els resultats experimentals obtinguts, que el comportament global de SRM sense sensors de posició per petites potències i tensions reduïdes es molt satisfactori.

V.2. Comparació del comportament del SRM amb sensors i sense sensors.

Els resultats obtinguts sobre els mateixos motors, ja sigui utilitzant sensors [BEC93], o prescindint d'ells [CAS98], es poden contrastar de forma gràfica, tal i com es mostra en les figures 5.1. i 5.2. En el cas de prescindir dels sensors de posició, l'opció basada en el càlcul de la pseudoinductància de fase els resultats són clarament inferiors tan en valors de parell com en rang de velocitat. Si s'utilitza el mètode de la inductància de fase els resultats son semblants a les prestacions del SRM amb sensors de posició.

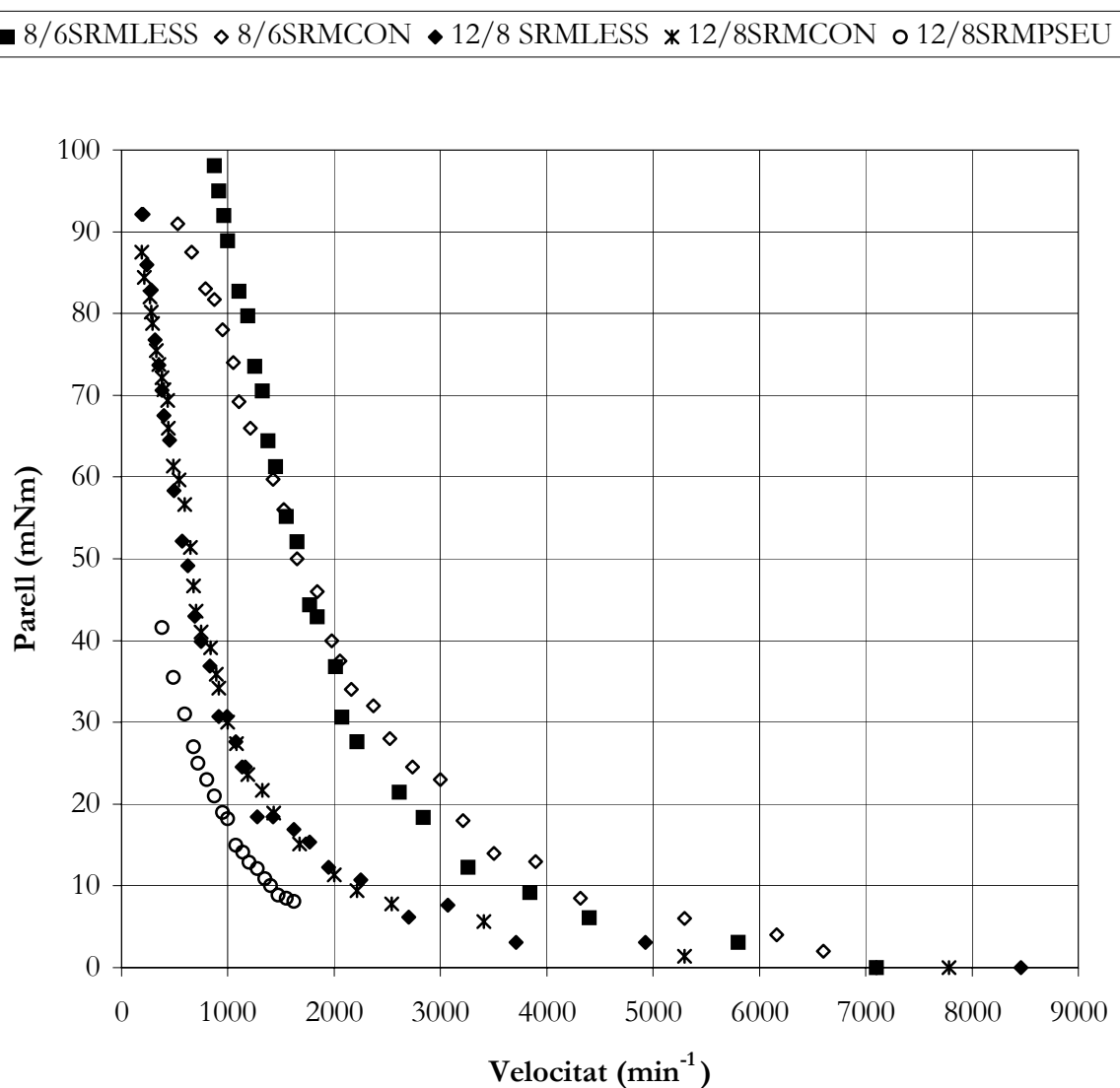


Figura 5.1. SRM12/8 i SRM 8/6. Comparació entre control convencional i sense sensors de posició. Convertidor Unipolar.

El terme 12/8SRMCON és referenciat a una estructura doblement reluctant de 12 pols estatòrics i 8 pols rotòrics amb sensors de posició (convencional). El terme 8/6SRMLESS és referenciat a una estructura doblement reluctant de 8 pols estatòrics i 6 pols rotòrics sense sensors de posició.

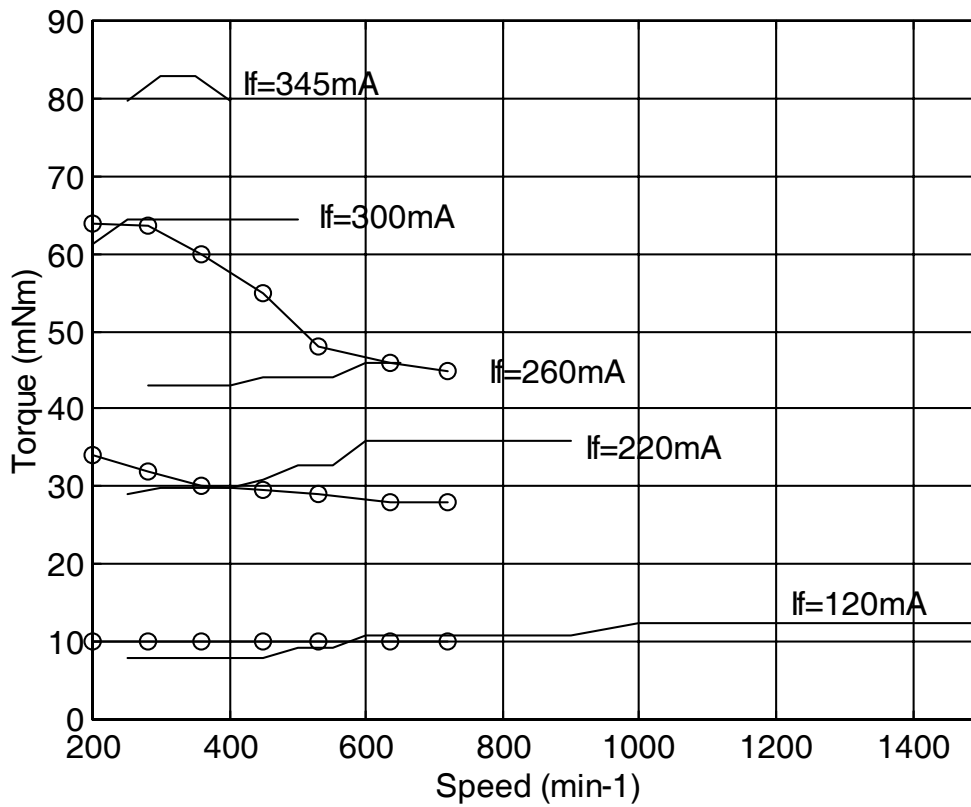


Figura 5.2. SRM12/8. Comparació entre control convencional (o) i sense sensors de posició. Convertidor Miller. 40MHz

En el cas d'un accionament de velocitat regulable l'eliminació de sensors redueix lleugerament el rang de velocitat però millora el parell en el tram de alt de velocitats, especialment per a corrents elevats.

V.3. Comparació econòmica.

Les taules V-1 i V-2 resumeixen el cost dels materials emprats en la fabricació dels accionaments SRM 8/6 i 12/8 respectivament, amb o sense sensors de posició. En ambdós casos l'estructura electromagnètica i el convertidor estàtic son elements comuns, invariants a la presència o absència dels sensors de posició. En aquestes taules s'utilitza el terme convencional per a referir-se al SRM amb sensors.

L'etapa de potència més costosa correspon al convertidor Miller (permet la regulació de velocitat o parell) degut al major nombre d'interruptors d'estat sòlid que requereix. Per l'alimentació del convertidor s'ha considerat una bateria o un bus de 24 V CC. Els dispositius de potència s'han dimensionat per a motors fins a 50 W (l'estructura electromagnètica pot ser varies vegades superior, en aquest cas s'ha fixat a 250 VA).

Tot i que en la realització del prototipus s'han emprat dos suports mecànics pels components electrònics (un per l'etapa de control i un altre per l'etapa de potència) en el cas de fabricar-los a gran escala es poden integrar en un únic suport (PCB).

El preu utilitzat per a la valoració dels components correspon al preu aplicat pels minoristes en el cas de poques unitats. S'ha adoptat com a unitat de valoració de referència el cost de l'element a eliminar (opto-interruptor), 1 p.u. = 1.2 EUR = 1.3 \$.

La comparació de cost dels accionaments està basada principalment en els últims treballs publicats [AND99, AND98a, AND98b, AND98c, AND96, CAS98, CAS97].

De l'observació del valor total de les taules V-1 i V-2 es dedueix que el cost total d'implementació l'accionament sensorless és prop d'un 3% superior al cost del accionament amb sensors en el cas de fabricar-ne poques unitats. Si es fabrica en grans quantitats la implementació del control sense sensors encara té menys incidència degut a la mecanització dels processos.

La valoració econòmica efectuada no té en compte la reducció de la mida de l'accionament i la millor adaptació a ambients hostils que s'aconsegueix amb la solució sense sensors.

Es important remarcar també la disminució del cost de fabricació que introdueix el SRM sensorless deguda a l'eliminació de la mà d'obra associada a la col·locació i ajust del sensor de posició. Si es produeix en grans quantitats les despeses de fabricació poden ser molt inferiors a les del SRM amb sensors doncs en aquests sempre és present el cost lligat al mecanitzat i el muntatge, especialment del disc ranurat i del suport dels opto-interruptors.

| 8/6 SRM (4 fases) | | |
|--|---|--|
| Bloc | CONVENCIONAL | SENSORLESS |
| Sensor de posició | <ul style="list-style-type: none"> • 3 Opto-interruptors H22A1 3.00 pu • 6 Resistències ½ W 0.03 pu • 1 Connector 0.13 pu • Acoblament entre el disc ranurat i l'eix 2.00 pu • Disc ranurat d'alumini 3.00 pu • Fixació dels Opto-interruptors a la tapa del motor 1.50 pu • PCB "optos" 3.00 pu | |
| Mesura i condicionament del corrent | | <ul style="list-style-type: none"> • Amplificador d'instrumentació. INA114AP 6.40 pu • 1 Potentiometre 0.60 pu • Resistències i condensadors 0.11 pu • ADC 8bits-1µs semiflash MAX153 6.66 pu • 1 connector 0.13 pu |
| Control | <ul style="list-style-type: none"> • PALCE 22V10 3.80 pu • Resistències i condensadors 0.30 pu • Connector 0.13 pu • PCB 3.00 pu | <ul style="list-style-type: none"> • SAP-C501-L40N 1.37 pu • EPROM 4.24 pu • Oscil·lador 20Mhz 2.47 pu • Resistències i condensadors 0.30 pu • 1 connector 0.13 pu • PCB (mesura del corrent, acondicionament i control) 4.00 pu |
| Etape de potència | <ul style="list-style-type: none"> • 5 Transistors BUZ10 + dissipador 3.80 pu • 5 Díodes BY299 0.72 pu • 1 Díode 1N2986BR 2.65 pu • 1 Drive ULN2003A + aïllament TRT H. 6.00 pu | <ul style="list-style-type: none"> • 5 Transistors BUZ10 + dissipador 3.80 pu • 5 Díodes BY299 0.72 pu • 1 Díode 1N2986BR 2.65 pu • 1 Drive ULN2003A + aïllament TRT H. 6.00 pu |
| Motor | <ul style="list-style-type: none"> • 4 fases, 15° per pas 180.0 pu | <ul style="list-style-type: none"> • 4 fases, 15° per pas 180.00 pu |
| Muntatge | 15.0 pu | 15.0 pu |
| TOTAL | 228.1 pu | 234.6 pu |

Taula V-1. Comparació del cost del SRM 8/6 convencional i sensorless.

| 12/8 SRM (3 fases) | | |
|--|---|--|
| Bloc | CONVENCIONAL | SENSORLESS |
| Sensor de posició | <ul style="list-style-type: none"> • 3 Opto-interruptors H22A1 3.00 pu • 6 Resistències ½ W 0.03 pu • 1 Connector 0.13 pu • Acoblament entre el disc ranurat i l'eix 2.00 pu • Disc ranurat d'alumini 3.00 pu • Fixació dels Opto-interruptors a la tapa del motor 1.50 pu • PCB "optos" 3.00 pu | |
| Mesura i condicionament del corrent | | <ul style="list-style-type: none"> • Amplificador d'instrumentació. INA114AP 6.40 pu • 1 Potentiometre 0.60 pu • Resistències i condensadors 0.11 pu • ADC 8bits-1µs semiflash MAX153 6.66 pu • 1 connector 0.13 pu |
| Control | <ul style="list-style-type: none"> • PALCE 22V10 3.80 pu • Resistències i condensadors 0.30 pu • Connector 0.13 pu • PCB 3.00 pu | <ul style="list-style-type: none"> • SAP-C501-L40N 1.37 pu • EPROM 4.24 pu • Oscil·lador 20Mhz 2.47 pu • Resistències i condensadors 0.30 pu • 1 connector 0.13 pu • PCB (mesura del corrent, acondicionament i control) 4.00 pu |
| Etapa de potència | <ul style="list-style-type: none"> • 4 Transistors BUZ10 + dissipador 3.04 pu • 4 Díodes BY299 0.58 pu • 1 Díode 1N2986BR 2.65 pu • 1 Drive ULN2003A + aïllament TRT H. 6.00 pu | <ul style="list-style-type: none"> • 4 Transistors BUZ10 + dissipador 3.80 pu • 4 Díodes BY299 0.72 pu • 1 Díode 1N2986BR 2.65 pu • 1 Drive ULN2003A + aïllament TRT H. 6.00 pu |
| Motor | • 3 fases, 15° per pas 150.0 pu | • 3 fases, 15° per pas 150.0 pu |
| Muntatge | 15.0 pu | 15.0 pu |
| TOTAL | 197.2 pu | 203.7 pu |

Taula V-2. Comparació del cost del SRM 12/8 convencional i sensorless.

En la taula V-3 es compara el preu de venda, per a poques unitats, d'altres accionaments amb regulació de velocitat i potència semblant a la dels prototipus utilitzats en aquest treball. S'ha de remarcar que el preu de l'accionament SRM està donat sense tenir en compte els costos estructurals i el marge de benefici empresarial a més de calcular el cost dels materials pel cas de petites quantitats de compra.

| Tipus d'accionament | Valoració del cost (p.u.) |
|--|---------------------------|
| AC Inducció trifàsic (motor 240V/60W, convertidor 200 VA)* | 330 pu |
| Brushless DC (motor 40W, convertidor 200VA)* | 324 pu |
| DC amb escombretes (motor 24V/50W; convertidor 300VA)* | 270 pu |
| 8/6 SRM sensorless (motor 50W, convertidor 250VA)** | 235 pu |

Taula V-3. Preu de venda d'accionaments amb velocitat regulable, segment de petita potència (1 pu = 1,2 EUR = 1.3 \$)

*Preus, sense IVA, extrets del catàleg RS Amidata SA. (actualització Octubre 1998).

** Valoració dels materials i muntatge, sense comptar els costos estructurals i el marge empresarial.

V.4. Possibilitats de millora.

S'està treballant per millorar els resultats obtinguts i intentar transferir-los al món industrial. Les expectatives de millora es basen en la disponibilitat de microcalculadors amb un joc d'instruccions que requereixi menys cicles de rellotge i velocitats de treball més elevades, concretament 40 MHz en lloc dels 20 MHz utilitzats. Fet que permetrà ampliar el rang de velocitats, sobretot en el cas de requerir regulació de velocitat.

V.5. Aportacions.

El SRM, tot i disposar d'un rendiment i un ratio parell/volum inferior en el rang de petita potència i tensions reduïdes al dels motors de C.C., amb escombretes i sense escombretes, excitats amb imants permanents, pot representar una alternativa a aquests en el rang de petita potència i tensions reduïdes gràcies a una construcció mecànica més senzilla i robusta i a la simplicitat del seu control.

Amb l'objectiu d'aconseguir un accionament el mes senzill i econòmic possible s'ha desenvolupat primer un SRM amb sensors de posició i angles de commutació fixes, considerant dos casos: aplicacions de petita potència i tensions reduïdes que no requereixen regulació de velocitat i aplicacions de petita potència i tensions reduïdes que si en requereixen.

El convertidor utilitzat és diferent en cada cas. S'utilitza un convertidor Unipolar quan no s'ha de regular la velocitat i un convertidor Miller si es necessària regular la velocitat. En el convertidor Unipolar el nombre d'interruptors d'estat sòlid és mínim i igual al nombre de fases, mentre que en el convertidor Miller incorpora un interruptor més per controlar el parell i la velocitat.

Com l'eliminació dels sensors de posició pot representar un atractiu addicional en la utilització del SRM ja que suposa una reducció de la mida del accionament, una reducció de les possibles falles i una millor adaptació als ambients hostils, s'ha estudiat els diferents mètodes que actualment existeixen per a la substitució del sensor de posició.

L'estudi compren la classificació i descripció dels diferents mètodes de control sense sensors de posició utilitzant un criteri innovador basat en l'equació elèctrica del motor (tensió de fase).

D'entre els mètodes estudiats s'ha escollit l'estimació del flux magnètic en temps real com a millor opció per ser aplicada al cas d'accionaments de petita potència i tensions reduïdes. És un mètode de detecció passiva que a priori no incrementa de forma importat la complexitat i el cost de l'accionament.

S'han construït accionaments SRM sense sensors de posició utilitzant una variació novedosa de l'estimació de flux magnètic en temps real, tan per motors de 3 com de 4 fases. S'ha mantingut la mateixa estructura electromagnètica i el mateix tipus de convertidor, canviant únicament el sistema de control i atenent als mateixos criteris que en el cas d'accionaments amb sensors.

El control de l'accionament sensorless s'ha realitzat utilitzant un microcalculador econòmic de només 8 bits, tan per aplicacions que no requereixen regulació de velocitat com per aplicacions que si la requereixen, amb l'objectiu de mantenir la senzillesa i minimitzar el cost.

S'han sotmès els prototipus a proves experimentals exhaustives tan per l'estructura electromecànica com pels convertidors, considerant els dos tipus de control: amb sensors i sense sensors.

Dels assaigs comparatius efectuats s'ha demostrat el bon comportament del SRM especialment en les aplicacions que no requereixen regulació de velocitat. En les aplicacions de petita potència i tensió reduïda que requereixen regulació de velocitat, els resultats no han estat tan bons.

Per a la realització d'aquesta tesi s'han efectuat treballs complementaris que han estat de molta utilitat a l'hora de construir el prototipus. S'ha de destacar la tasca duta a terme en el camp de la simulació, amb models que han donat resultats previs molt semblants als després obtinguts experimentalment (Annex 2). També s'ha de fer constar el glossari de terminologia en anglès, català i castellà sobre els accionaments elèctrics en general i els SRM en particular, amb prop de 700 vocables (Glossari 2), el recull bibliogràfic de més de 300 articles, disponibles i ordenats cronològicament des de 1970 fins 1999, consultats durant la realització d'aquest treball (base de dades bibliogràfica), així com les 13 comunicacions presentades a congressos internacionals i nacionals (ICEM98/95, JHLIE97/95, SAEI98/97/96/95, ESPC98, WESIC98, XVIII Jornades d'Automàtica) i una publicació divulgativa en la que ha participat l'autor (Thecknos).

V.6. Conclusions

Queda palesa la situació actual del mercat d'accionament elèctrics en el sentit de millorar l'oferta en el segment del baix cost i les petites potències, una de les àrees de més fort creixement a curt termini.

Queda demostrada la alternativa que suposa la utilització dels SRM, amb l'atractiu addicional de l'eliminació del sensor de posició, tot plegat sense penalitzar la senzillesa i el cost de l'accionament.

Queden classificats i especificats els mètodes disponibles actualment per a eliminar el sensor de posició.

Queda provada l'eficàcia dels mètodes basats en l'estimació del flux en temps real implementats sota la forma del càlcul de la inductància de fase. Queda descartat l'alternativa del càlcul de la pseudoinductància de fase, tan per les pobres prestacions obtingudes com per la disponibilitat de prou capacitat de càlcul per abordar directament la inductància de fase.

Queda constatada la suficiència d'un microcontrolador econòmic de només 8 bits per al control del accionament, tan pel cas de velocitat no regulable com pel cas de velocitat regulable.

Queden reflectits els resultats experimentals que mostren un comportament satisfactori tot i eliminar el sensor de posició.

Per tant es pot afirmar que el *Motor de Reluctància Autocommutat sense sensors de posició* queda plenament justificat per aplicacions de petita potència i reduïda tensió, tan per requeriments de velocitat regulable com, especialment, per velocitat no regulable.

V.7. Futures línies de treball

Actualment s'estan investigant noves tècniques de detecció indirecta de la posició per un rang de potències i tensions superior.

Seria recomanable disposar d'estructures electromagnètiques més optimitzades que les utilitzades en aquest treball. Aquestes podrien abastar un ventall de velocitat i potències més gran.

En un futur proper s'espera proposar els accionaments SRM com una alternativa als motors d'inducció monofàsics, amb diferents tècniques d'arranc i pel segment de potències fraccionàries. Es podrien introduir canvis en la filosofia de control, utilitzant angles de commutació variables.

Respecte de la implementació del control s'ha abordat extensament les opcions derivades del microcalculador i dels circuits PLD. Un altre alternativa, sempre dins de la filosofia de no encarir el cost de l'accionament, seria la utilització d'elements de càlcul basats en el concepte de xarxa neuronal (neurocontroladors), o també sense deixar el microcomputador, implementar criteris de lògica difusa.

Referències.

- [AND99]** P. ANDRADA, F. CASTELLANA, E. MARTINEZ, J.I. PERAT, J.A. SANCHEZ, M. TORRENT, B. BLANQUEZ. “Accionamientos de reluctancia autoconmutados para aplicaciones de pequeña potencia y tensiones reducidas”. 9ª Reunión anual de grupos de investigación en Ingeniería Eléctrica. UPC. Departament d’Enginyeria Elèctrica, Barcelona del 28 al 30 de gener 1999.
- [AND98a]** P. ANDRADA, F. CASTELLANA, E. MARTINEZ, J.I. PERAT, J.A. SANCHEZ, M. TORRENT, B. BLANQUEZ. “Switched Reluctance Drives for low power and low voltage applications”. Workshop on European Scientific and Industrial Collaboration on promoting Advanced Technologies in Manufacturing (WESIC’98). Institut de Informàtica i Aplicacions. Girona, 10-12 juny 1998.
- [AND98b]** P. ANDRADA, F. CASTELLANA, E. MARTINEZ, J.I. PERAT. “Sensorless 12/8 Switched Reluctance Drives for low power and low voltage applications. ICEM-98 Istanbul, 2-4 Setembre 1998.
- [AND98c]** P. ANDRADA, F. CASTELLANA, E. MARTINEZ, J.I. PERAT. “Estudio comparativo de motores de reluctancia autoconmutados con estructuras 12/8 y 8/6.. Seminario anual de Automática y Electrónica Industrial. Pamplona (SAAEI-98), 16-18 Setiembre 1998.
- [AND96]** P. ANDRADA, F. CASTELLANA, E. MARTINEZ, J.I. PERAT, J.A. SÁNCHEZ I M. TORRENT. “12/8 Switched Reluctance Drives for low cost and low voltage applications.” ICEM-96 Vigo, 10-12 Setiembre 1996.
- [CAS98]** F. CASTELLANA, P. ANDRADA, , E. MARTINEZ, J.I. PERAT. “Sensorless control of Switched Reluctance Drives for low power and low voltage applications”. 5th European Space Power Conference (ESPC-98) Tarragona, 21-25 Setembre 1998.
- [BEC93]** R.C. BECERRA, M. EHSANI, T.J.E. MILLER. "Commutation of SR motors". IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 8, N° 3, July 1993, pp. 257-263.
- [CAS97]** F. CASTELLANA, P. ANDRADA, , E. MARTINEZ, J.I. PERAT, J.A. SÁNCHEZ I M. TORRENT. “Accionamiento de reluctancia autoconmutado sin sensores de posición para pequeñas potencias”. 5as Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica. Salamanca 3-5 Julio 1997, pp. 57-64.