

7 COMPORTAMENT MECÀNIC DE LA MÀQUINA ELÈCTRICA DE CORRENT CONTINU

Per a aquesta aplicació s'ha escollit un motor de corrent continu d'imants permanents principalment per la seva facilitat de regulació i control. L'amplia gamma de motors d'aquest tipus disponible al mercat ha permès seleccionar un model comercial de motor que, adaptant-se al nivell de potència requerit, ofereix una bona relació entre la potència i la massa del motor, a la vegada que també un bon rendiment.

El rendiment d'un motor de corrent continu d'imants permanents no és constant sinó que depèn de les condicions mecàniques de funcionament del motor: el parell exercit sobre el rotor i la velocitat de gir d'aquest. En aquest capítol s'analitza en detall el comportament del motor en el mode de funcionament més habitual, com a element de conversió de potència elèctrica en mecànica, i el rendiment d'aquesta conversió.

També s'analitza el funcionament d'aquest element quan se li transmet potència mecànica en lloc d'extreure'n, en els modes de funcionament com a fre i com a generador. Per això es parla del concepte més general de màquina elèctrica.

7.1 Principi de funcionament d'una màquina elèctrica de corrent continu d'imants permanents

El funcionament d'una màquina elèctrica de corrent continu d'imants permanents es basa en el fenomen d'interacció electromagnètica entre els imants de l'estator i els debanats del rotor. Aquest fenomen permet la conversió de potència elèctrica en mecànica i viceversa.

A la Figura 7.1 es mostra l'esquema d'una màquina elèctrica de corrent continu d'imants permanents amb les principals magnituds que intervenen en el seu funcionament.

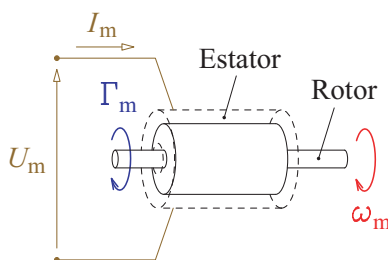


Fig. 7.1. Esquema d'una màquina elèctrica de corrent continu d'imants permanents

7.1.1 Parell electromagnètic entre estator i rotor

En una màquina elèctrica de corrent continu d'imants permanents es demostra que el parell T_m que apareix entre estator i rotor, com a conseqüència del fenomen d'interacció electromagnètica a la màquina, és proporcional al corrent I_m que circula pels debanats del rotor. La relació entre aquestes dues magnituds queda definida per l'Equació (7.1), on C_T és un paràmetre característic de cada motor que s'anomena constant de parell.

$$T_m = C_T \cdot I_m \quad (7.1)$$

7.1.2 Tensió induïda als debanats del rotor

En una màquina elèctrica de corrent continu d'imants permanents, quan el rotor gira es produeix una tensió induïda E als seus debanats que també és conseqüència de la interacció electromagnètica. El valor d'aquesta tensió és proporcional a la velocitat de rotació ω_m i es pot avaluar amb l'Equació (7.2), on C_ω és la constant de velocitat del motor. El signe negatiu en aquesta equació indica que la tensió induïda E , quan la màquina funciona com a motor, s'oposa a la tensió d'alimentació U_m .

$$E = -C_\omega \cdot \omega_m \quad (7.2)$$

Les constants de parell i de velocitat són la mateixa, ja que descriuen la mateixa realitat física que depèn de les característiques constructives de cada màquina. Es demostra que aquestes constants són dimensionalment idèntiques i iguals en valor per a cada màquina.

7.1.3 Esquema elèctric equivalent

A la Figura 7.2 es presenta l'esquema elèctric equivalent d'una màquina elèctrica de corrent continu d'imants permanents. Les variables que intervenen en aquest esquema són les següents:

- U_m : tensió d'alimentació en borns del rotor
- I_m : corrent d'alimentació del motor
- R : resistència elèctrica equivalent en borns del rotor, resultat de la resistència dels cables dels debanats, de les escombretes i del contacte entre escombretes i col·lector
- L : inductància equivalent dels debanats del rotor
- E : tensió induïda al rotor quan aquest gira a una certa velocitat angular

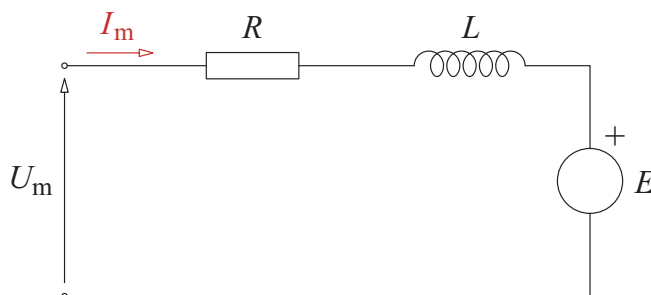


Fig. 7.2. Esquema elèctric equivalent d'una màquina de corrent continu d'imants permanents

De l'anàlisi del circuit elèctric de la Figura 7.2 en resulta l'Equació (7.3), on es veu que la tensió d'alimentació en borns del rotor és igual a la suma de caigudes de tensió que es donen a la resta d'elements del circuit.

$$U_m = R \cdot I_m + L \cdot \frac{dI_m}{dt} + E \quad (7.3)$$

7.1.4 Relació entre l'alimentació elèctrica del motor i les condicions de funcionament mecànic

Si es substitueixen les expressions de la relació entre intensitat d'alimentació i parell motor (Equació (7.1)) i de la relació entre la velocitat angular i la tensió induïda al rotor (Equació 7.2)) a l'Equació (7.3), s'obté l'Equació (7.4) en la que es té la tensió d'alimentació en funció de les condicions mecàniques de funcionament del motor: el parell electromagnètic entre rotor i estator, Γ_m , i la velocitat de rotació del rotor, ω_m .

$$U_m = \frac{R}{C_F} \cdot \Gamma_m + \frac{L}{C_F} \cdot \frac{d\Gamma_m}{dt} + C_F \cdot \omega_m \quad (7.4)$$

7.1.5 Característiques del model de motor escollit per a l'accionament

Les característiques del model de motor elèctric escollit per a l'accionament dissenyat es mostren a la Taula 7.1. El motor és de la gamma *RE* de la marca *MAXON*[®]. Aquesta gamma de motors ofereix una elevada relació entre prestacions i massa del motor. Dins d'aquesta gamma s'ha escollit el model *RE-40 148867* perquè s'adapta als requeriments de l'accionament i tant la relació entre prestacions i massa del motor com el rendiment màxim, segons el fabricant, són dels millors que es poden trobar en motors comercials.

La tensió d'alimentació nominal del motor és de 24 V, i aquest també ha estat un factor que s'ha tingut en compte, doncs altres models alternatius tenen una tensió

nominal de 48 V que queda fora del rang de les fonts d'alimentació disponibles al laboratori per tal de portar a terme els experiments.

Taula 7.1. Dades característiques del motor *MAXON RE-40 148867*

U_{nom} [V]	24
R [Ω]	0,316
L [mH]	0,08
C_r [mNm/A]	30,2

Comprovació de la constant de parell del motor

A la 3a sèrie d'experiments, descrits al capítol 5, per a cada condició de funcionament assajada, s'han obtingut les dades de corrent d'alimentació del motor i de moment axial d'enllaç entre estator i el seu suport. A partir d'aquest moment d'enllaç es pot determinar el parell electromagnètic entre estator i rotor.

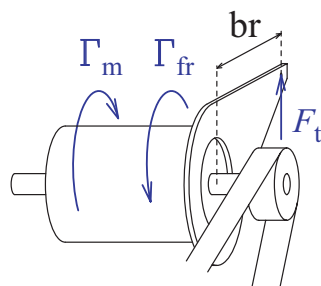


Fig. 7.3. Accions sobre l'estator que provoquen moments respecte al seu eix a la 3a sèrie d'experiments

A l'esquema de la Figura 7.3 es representen les accions sobre el conjunt de l'estator que provoquen moments respecte al seu eix. Aquestes accions són el parell electromagnètic entre rotor i estator, Γ_m , el parell de fregament Γ_{fr} , que representa les resistències passives entre les pistes interiors i exteriors dels rodaments de suport de l'estator, i la força F_t del tirant que impedeix la rotació de l'estator.

La força F_t del tirant sobre l'extrem del braç, combinada amb la longitud d'aquest, br , provoca un moment axial sobre l'estator M_{br} . El seu valor es pot calcular amb l'Equació (7.5).

$$M_{br} = F_t \cdot br \quad (7.5)$$

Els resultats experimentals d'aquest moment d'enllaç per a diferents condicions de funcionament de l'accionament es representen a la Figura 7.4.

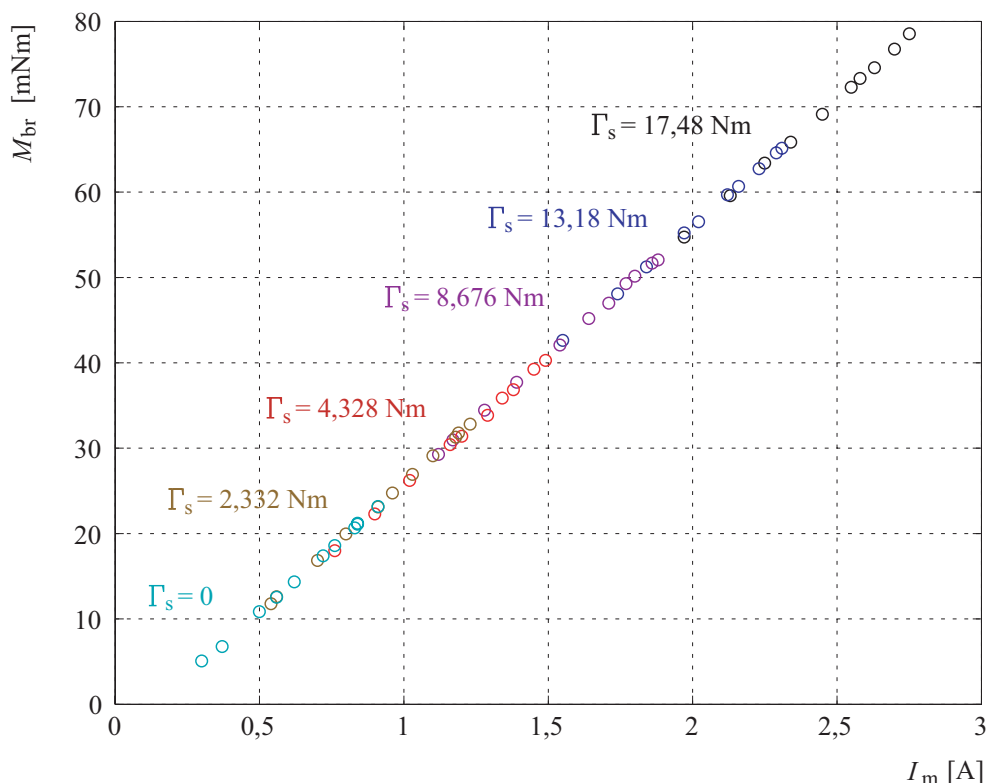


Fig. 7.4. Moment axial d'enllaç sobre l'estator en funció del corrent d'alimentació del motor i per a diferents condicions de funcionament assajades

Plantejant l'equilibri de moments, doncs el conjunt de l'estator es manté fix sense girar, s'obté l'Equació (7.6).

$$\Gamma_m = \Gamma_{fr} + M_{br} \quad (7.6)$$

El parell electromagnètic entre rotor i estator, Γ_m , és proporcional a la intensitat d'alimentació, segons l'Equació (7.1). Llavors aïllant el moment axial d'enllaç es té l'Equació (7.7).

$$M_{br} = \Gamma_m - \Gamma_{fr} = C_\Gamma \cdot I_m - \Gamma_{fr} \quad (7.7)$$

Quan es porta a terme qualsevol dels experiments realitzats, el parell de fregament Γ_{fr} és el màxim que poden arribar a provocar les resistències passives dels rodaments, encara que no es produeixi el moviment relatiu entre les pistes interiors i exteriors. Això és així perquè els rodaments es troben en una situació de moviment immediat, que no es produeix per l'efecte de la força del tirant.

Aquest parell de fregament es considera que és igual en tots els experiments realitzats, doncs les càrregues a que estan sotmesos els rodaments són pràcticament constants al dependre únicament de la tensió als dos trams de la corretja. Llavors calculant una regressió lineal a partir de les dades del gràfic de la Figura 7.4, es

determinen els paràmetres de constant de parell del motor i parell de fregament als rodaments. Els resultats es mostren a la Taula 7.2.

Taula 7.2. Resultats experimentals de constant de parell del motor i parell de fregament als rodaments de suport

C_T [mNm/A]	30,05
Γ_{fr} [mNm]	4,26

La discrepància percentual entre el valor de la constant de parell proporcionat pel fabricant i el valor obtingut experimentalment és del 0,5 %. Així s'ha considerat com a correcte el valor que proporciona el fabricant del motor.

En base a la constant de parell del motor, i en funció de la mesura del corrent d'alimentació, es determina en cada cas el parell electromagnètic entre rotor i estator segons l'Equació (7.1). S'ha de tenir en compte que a la 1a i a la 2a sèrie d'experiments no és possible mesurar el parell axial d'enllaç sobre l'estator, i per tant l'única forma de determinar el parell motor és a partir del corrent d'alimentació. Una altra raó que justifica aquest procediment per obtenir el parell electromecànic entre rotor i estator és que el corrent d'alimentació té menys soroll que la força al tirant, ja que aquesta es veu afectada per les vibracions del banc d'assaig.

7.2 Prestacions i rendiment en funcionament normal com a motor

S'analitza en aquest apartat el comportament de la màquina elèctrica de corrent continu d'imants permanents en el seu mode de funcionament més habitual, com a motor. És a dir, s'analitzen aquelles situacions en que es subministra a la màquina potència elèctrica i aquesta proporciona potència mecànica en forma de parell sobre el rotor i velocitat de gir d'aquest.

7.2.1 Corba característica del motor

Per tal de determinar la corba característica del motor, es considera el funcionament d'aquest en règim estacionari, a velocitat i parell constants. Si Γ_m i ω_m són constants, l'Equació (7.4), que relaciona les condicions de funcionament mecànic amb la tensió d'alimentació, es transforma en l'Equació (7.8).

$$U_m = \frac{R}{C_T} \cdot \Gamma_m + C_T \cdot \omega_m \quad (7.8)$$

Aïllant el parell motor es té l'Equació (7.9) que defineix la corba característica del motor per a una determinada tensió d'alimentació.

$$\Gamma_m = \frac{C_\Gamma}{R} \cdot U_m - \frac{C_\Gamma^2}{R} \cdot \omega_m \quad (7.9)$$

A la Figura 7.5 es representa el parell motor, Γ_m , en funció de la velocitat de rotació del rotor, ω_m , per a una tensió d'alimentació U_m constant. En aquesta figura es representa només el 1r quadrant d'aquest gràfic. Tots els punts d'aquest quadrant corresponen a potències mecàniques, proporcionades pel motor, positives, doncs són positius els dos paràmetres ω_m i Γ_m , i per tant la màquina funciona com a motor.

Mantenint constant la tensió d'alimentació, la corba que defineix el parell motor en funció de la velocitat de gir és una recta de pendent negatiu. El parell és màxim quan la velocitat és nul·la, i el seu valor, Γ_{arr} , es determina amb l'Equació (7.10).

$$\Gamma_{arr} = \frac{C_\Gamma}{R} \cdot U_m \quad (7.10)$$

Al augmentar la velocitat de rotació, el parell motor disminueix linealment fins arribar a ser nul. En aquest punt es té la velocitat de rotació en buit del motor ω_o , que es pot calcular amb l'Equació (7.11).

$$\omega_o = \frac{U_m}{C_\Gamma} \quad (7.11)$$

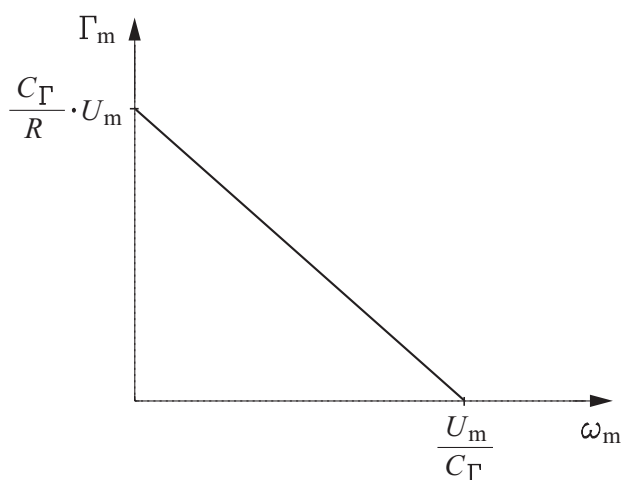


Fig. 7.5. Corba característica d'un motor de corrent continu d'imants permanents

Normalment els motors comercials d'aquest tipus només poden treballar en continu molt per sota del teòric parell d'arrancada a tensió nominal, doncs es té una limitació en el corrent que passa pels debanats del rotor, imposada per la temperatura màxima de treball de l'aïllament entre els cables del debanat.

A la Figura 7.6 es mostra la corba característica del motor *MAXON*[®] *RE-40 148867* per a diferents tensions d'alimentació, essent la tensió nominal d'aquest motor 24 V. Amb línia contínua es mostra el rang de treball permès en continu, amb un corrent màxim en continu de 6 A, al que correspon un parell de 181 mNm. Amb línia discontinua es representa part de la zona on únicament es pot operar en intervals curts de temps.

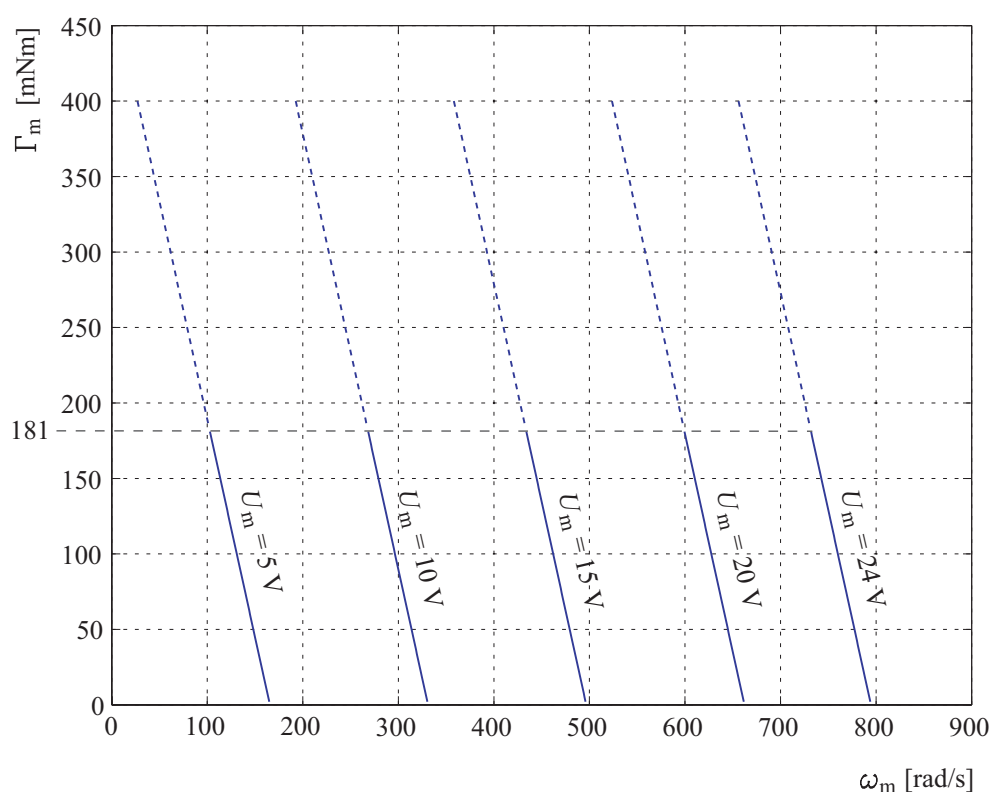


Fig. 7.6. Corba característica del motor *MAXON RE-40 148867* per a diferents tensions d'alimentació

7.2.2 Rendiment del motor

Rendiment electromecànic

Es defineix com a rendiment electromecànic del motor, η_{em} , el rendiment de la conversió de potència elèctrica subministrada al motor, P_{ele} , en potència mecànica, P_{mec} . La potència mecànica obtinguda és el producte del parell electromagnètic entre el rotor i l'estator per la velocitat de gir del rotor. Per tant aquest rendiment es calcula segons l'Equació (7.12).

$$\eta_{em} = \frac{P_{mec}}{P_{ele}} = \frac{\Gamma_m \cdot \omega_m}{U_m \cdot I_m} \quad (7.12)$$

Tenint en compte la relació entre parell motor i intensitat d'alimentació, el rendiment electromecànic es pot expressar segons l'Equació (7.13). S'aprecia clarament que, si es manté constant la tensió d'alimentació, aquest rendiment és directament proporcional a la velocitat de rotació del motor.

$$\eta_{em} = \frac{C_\Gamma \cdot I_m \cdot \omega_m}{U_m \cdot I_m} = \frac{C_\Gamma}{U_m} \cdot \omega_m \quad (7.13)$$

Substituint l'Equació (7.8) a l'Equació (7.13) s'obté l'Equació (7.14), en la que es té el rendiment electromecànic en funció de les condicions mecàniques de funcionament.

$$\eta_{em} = \frac{C_\Gamma \cdot \omega_m}{\frac{R}{C_\Gamma} \cdot \Gamma_m + C_\Gamma \cdot \omega_m} \quad (7.14)$$

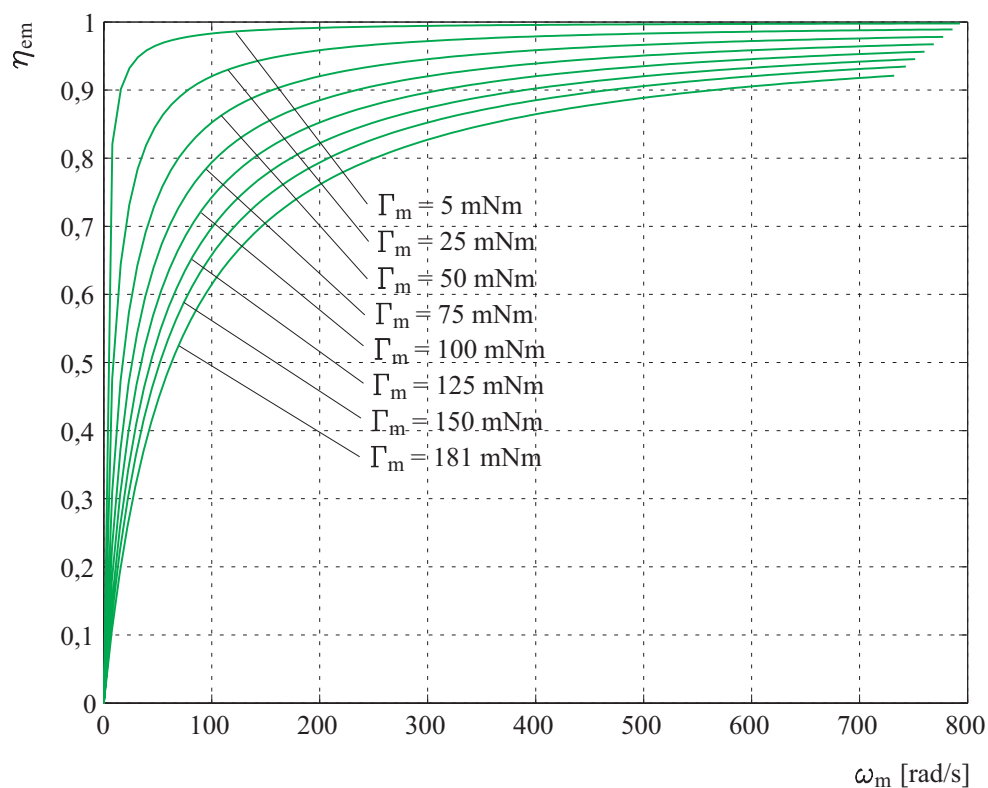


Fig. 7.7. Rendiment electromecànic del motor *MAXON RE-40 148867* en funció de la velocitat de gir i per a diferents valors del parell motor

El gràfic de la Figura 7.7 representa el rendiment electromecànic del motor *MAXON*[®] *RE-40 148867* en funció de la velocitat de gir i per a diferents valors del parell motor. Aquest rendiment és bastant elevat per a velocitats de gir altes, però disminueix dràsticament quan la velocitat de gir és pròxima a zero. Per a una mateixa velocitat de gir, el rendiment electromecànic disminueix al augmentar el parell motor, doncs llavors augmenta el corrent pels debanats del rotor i les pèrdues per efecte Joule.

Rendiment total

Es defineix el rendiment total del motor, η_{tot} , com la relació entre la potència útil obtinguda a la sortida del motor, P_{util} , i la potència elèctrica que cal subministrar-li, P_{ele} (veure l'Equació (7.15)).

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{P_{\text{util}}}{P_{\text{ele}}} \quad (7.15)$$

Per tal de determinar la potència útil a la sortida del motor cal restar a la potència mecànica obtinguda de la conversió des de potència elèctrica, P_{mec} , la potència dissipada per les resistències passives associades al moviment del rotor, P_{RP} , que es suposa que provenen només del moviment del rotor respecte a l'estator. Les resistències passives es suposen representades per un parell de fregament $\Gamma_{\text{f-m}}$ entre rotor i estator. Llavors la potència útil, P_{util} , es pot determinar segons l'Equació (7.16), on Γ_{res} és el parell que es té a la sortida del motor després de restar al parell motor el parell de fregament intern.

$$P_{\text{util}} = P_{\text{mec}} - P_{\text{RP}} = \Gamma_{\text{m}} \cdot \omega_{\text{m}} - \Gamma_{\text{f-m}} \cdot \omega_{\text{m}} = \Gamma_{\text{res}} \cdot \omega_{\text{m}} \quad (7.16)$$

El parell de fregament entre rotor i estator pot dependre de la velocitat de rotació del motor i de les accions d'enllaç entre ells. A partir de les dades experimentals de la 1a sèrie d'experiments descrita al capítol 5, al capítol 6 s'ha determinat un model que representa aquest parell de fregament en el cas particular en que el rotor únicament està sotmès a una càrrega de moment axial, a part del propi pes. Segons aquest model el parell de fregament entre rotor i estator consta d'una part constant i una part proporcional a la velocitat de rotació del motor, segons l'Equació (6.2). Llavors el rendiment total del motor en aquest cas particular es calcula segons l'Equació (7.17).

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{(\Gamma_{\text{m}} - \Gamma_{\text{f-m}}) \cdot \omega_{\text{m}}}{U_{\text{m}} \cdot I_{\text{m}}} = \frac{[\Gamma_{\text{m}} - (\Gamma_{\text{o}} + c \cdot \omega_{\text{m}})] \cdot \omega_{\text{m}}}{U_{\text{m}} \cdot I_{\text{m}}} \quad (7.17)$$

El resultat d'aplicar l'Equació (7.17) al motor *MAXON*[®] *RE-40 148867*, quan el rotor només està sotmès a un parell torsor resistent Γ_{res} , es representa a la Figura 7.8. Per a

parells resistents elevats aquest gràfic és similar al que es té pel rendiment electromagnètic a la Figura 7.7. Per a parells resistents baixos el rendiment total és clarament inferior al rendiment electromagnètic, doncs llavors la importància relativa de la potència dissipada per les resistències passives és major.

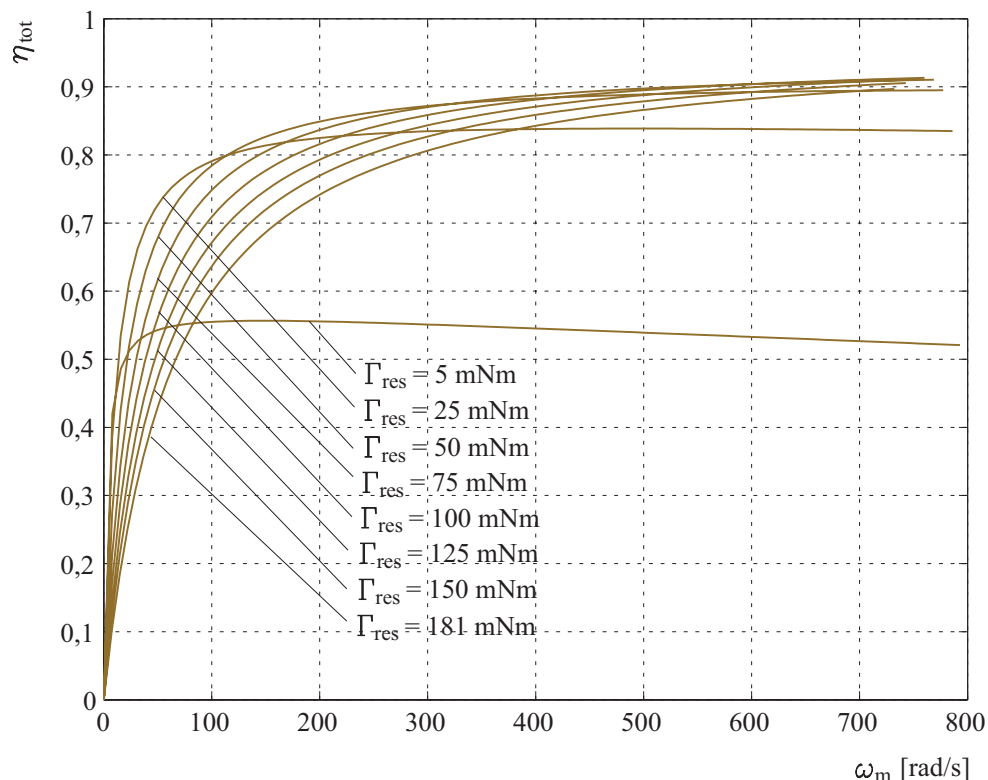


Fig. 7.8. Rendiment total del motor *MAXON RE-40 148867* en funció de la velocitat de gir i per a diferents valors del parell resistent a la sortida del motor

A la Figura 7.9 es representen les corbes de rendiment electromecànic i rendiment total, del motor *MAXON[®] RE-40 148867*, en el cas particular de que l'única càrrega sobre el rotor és un parell torsor. En aquest gràfic el rendiment es representa en funció de la velocitat de gir del rotor i per a diferents tensions d'alimentació.

A la zona on només es permet el funcionament de forma intermitent (representat amb línia discontinua a la Figura 7.9), si es manté constant la tensió d'alimentació i es disminueix la velocitat de rotació, ambdós rendiments tendeixen a igualar-se. En aquesta zona les pèrdues provocades per les resistències passives associades al moviment del rotor són negligibles en front de les pèrdues per efecte Joule com a conseqüència de la resistència elèctrica equivalent del motor.

S'observa una important diferència entre el rendiment total i el rendiment electromagnètic del motor: el primer decau ràpidament al apropar-se la velocitat de rotació a la velocitat de gir en buit. El motiu és que en aquestes situacions la major

part de la poca potència mecànica obtinguda es destina a compensar la potència dissipada per les resistències passives.

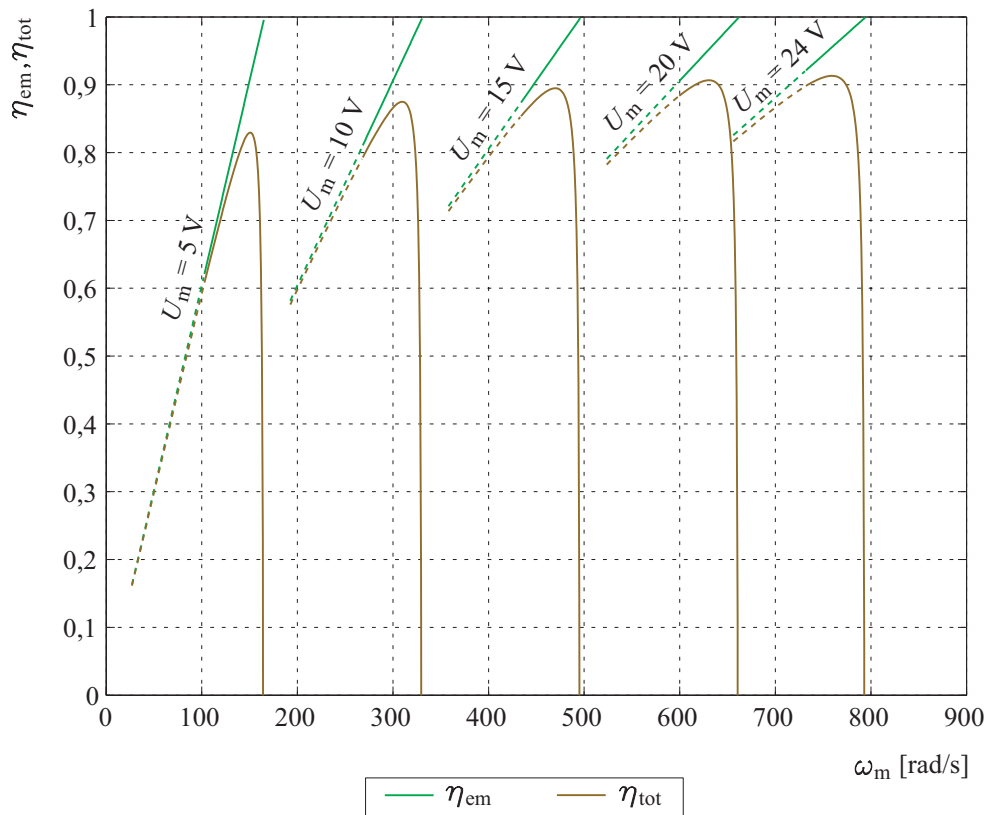


Fig. 7.9. Rendiment del motor *MAXON RE-40 148867* en funció de la velocitat del rotor i per a diferents tensions d'alimentació

7.2.3 Funcionament del motor en règim no estacionari

Per estudiar el moviment de rotació del rotor a velocitat variable cal tenir en compte el moment d'inèrcia del rotor respecte al seu eix, J_m . A l'esquema de la Figura 7.10 es representen les variables mecàniques que intervien a la dinàmica de rotació del rotor: el parell electromagnètic entre estator i rotor, Γ_m , el parell de fregament Γ_{f-m} que representa les resistències passives, el parell resistent Γ_{res} que exerceix la càrrega externa sobre el rotor, la velocitat de rotació ω_m i el moment d'inèrcia J_m . El parell electromagnètic, Γ_m , es calcula segons l'Equació (7.18).

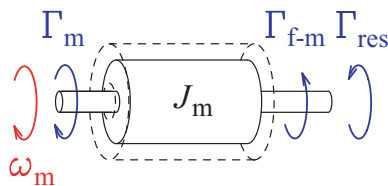


Fig. 7.10. Esquema del rotor del motor i variables mecàniques que hi intervien

$$\Gamma_m = \Gamma_{\text{res}} + \Gamma_{\text{f-m}} + J_m \cdot \frac{d\omega_m}{dt} \quad (7.18)$$

Quan el parell que exerceix el motor, Γ_m , és variable en el temps, la tensió d'alimentació requerida s'obté de l'Equació (7.4), en la que hi intervé la derivada temporal del parell motor.

7.3 Funcionament de la màquina als quatre quadrants: motor, generador i fre

7.3.1 Corba característica de la màquina

L'Equació (7.9) que relaciona ω_m amb Γ_m es representa a la Figura 7.11 per a diferents tensions d'alimentació, que són sempre positives en aquest gràfic. Quan el punt definit per ω_m i Γ_m es troba al 1r quadrant la màquina proporciona potència mecànica a partir de la potència elèctrica que se li subministra, per tant funciona com a motor.

Quan el punt de funcionament es troba al 4t quadrant, per a ω_m positives i Γ_m negatius, cal subministrar potència mecànica al rotor per tal de que aquest giri. Per tant, des d'un punt de vista mecànic, la màquina actua com a fre, essent la potència mecànica proporcionada per aquesta negativa. El corrent d'alimentació és negatiu, doncs aquest és proporcional al parell motor. En aquesta situació la màquina funciona com a generador, doncs se li subministra potència mecànica i proporciona potència elèctrica.

Al 2n quadrant, per a ω_m negatives i Γ_m positius, també cal subministrar potència mecànica al rotor per tal de que aquest giri. El corrent d'alimentació en aquest cas és positiu i per tant també se li subministra potència elèctrica. En aquesta situació la màquina funciona com a fre, dissipant potència mecànica i a la vegada consumint potència elèctrica.

Per a tensions d'alimentació negatives es tenen les situacions simètriques de motor i fre-generador, girant en sentit negatiu, i fre, girant en sentit positiu. Al gràfic de la Figura 7.12 es mostren les zones corresponents als 6 modes de funcionament possibles en una màquina elèctrica de corrent continu d'imants permanents.

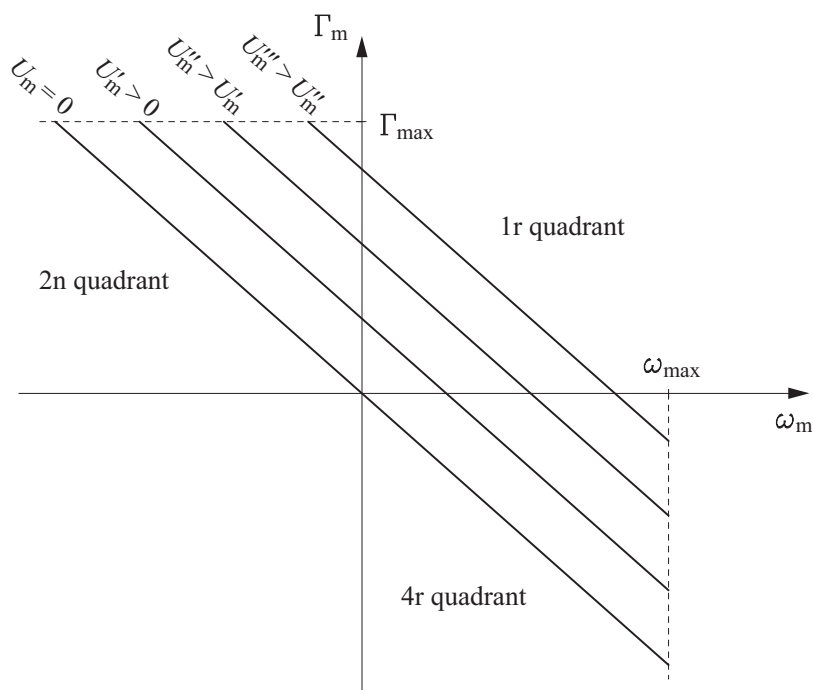


Fig. 7.11. Corba característica de la màquina elèctrica de corrent continu d'imants permanents per a diferents tensions d'alimentació positives

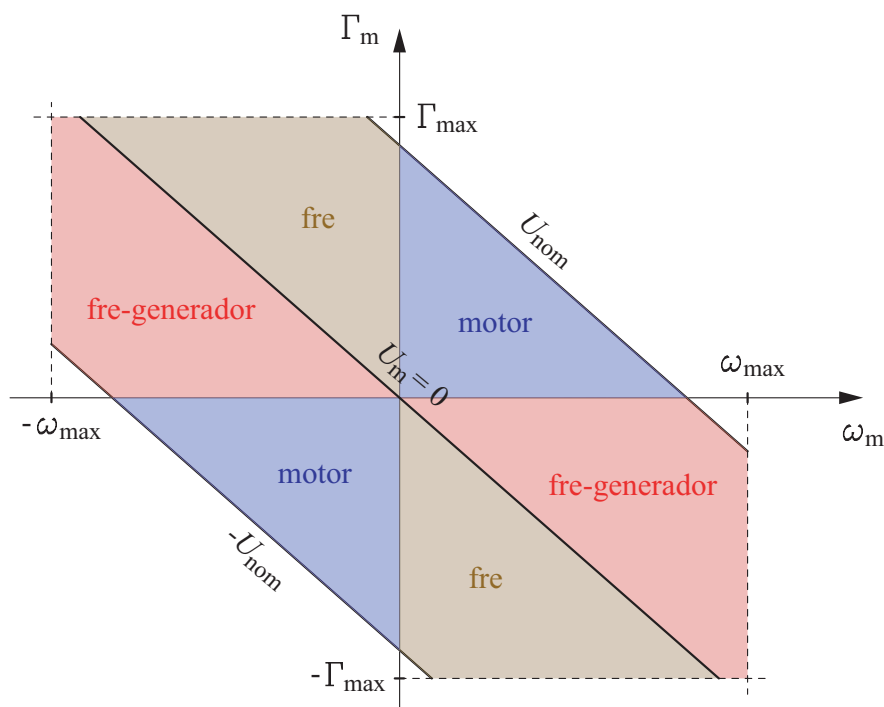


Fig. 7.12. Modes de funcionament de la màquina de corrent continu d'imants permanents

A la Figura 7.13 es representen les corbes característiques del motor *MAXON® RE-40 148867* per a diferents tensions d'alimentació. En aquesta figura es mostren els 4 quadrants del gràfic, diferenciant entre els 6 modes de funcionament de la màquina. Amb línia contínua es representen les zones de possible funcionament en continu, fins

a $\Gamma_m = \pm 181 \text{ mNm}$, i amb línia discontinua part de les zones de possible funcionament intermitent.

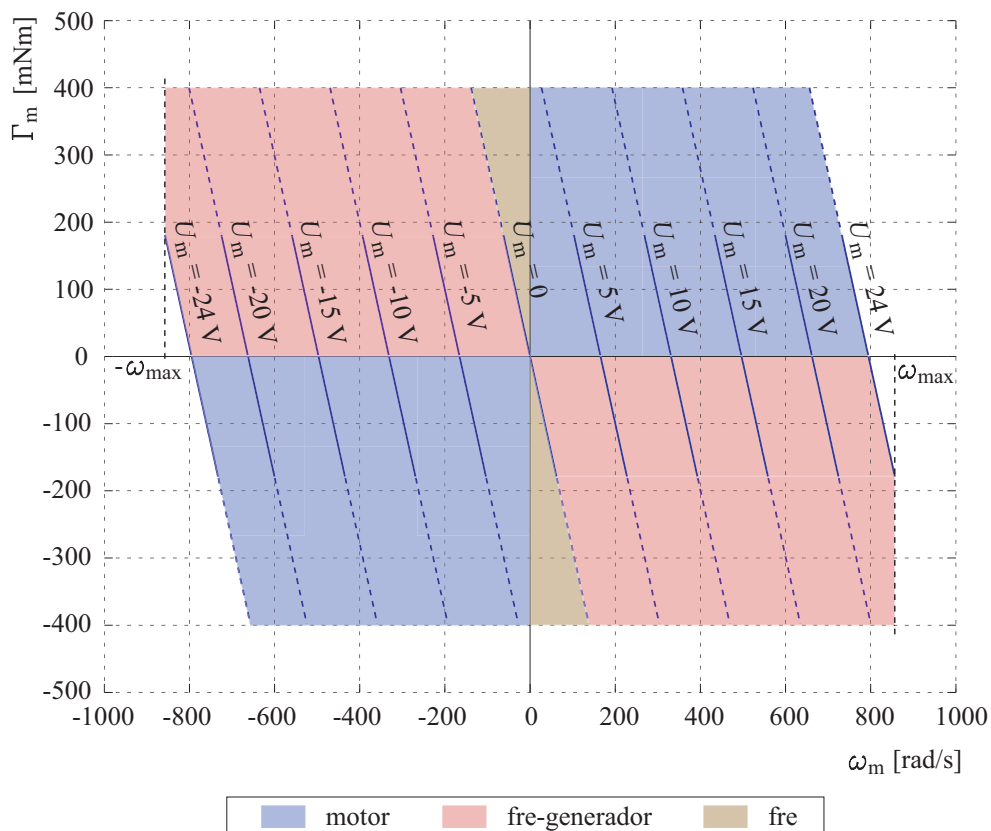


Fig. 7.13. Corbes característiques del motor *MAXON RE-40 148867* per a diferents tensions d'alimentació i en diferents modes de funcionament als 4 quadrants

7.3.2 Balanç de potències a la màquina

A l'apartat anterior s'ha analitzat en detall el rendiment de la màquina quan aquesta actua com a motor. El rendiment quantifica la potència mecànica, o la potència útil, que proporciona la màquina per cada unitat de potència elèctrica que se li subministra.

Al analitzar el funcionament de la màquina en els 4 quadrants, per poder comparar de manera gràfica les potències mecànica i elèctrica involucrades en els 6 modes de funcionament, s'ha realitzat el gràfic de la Figura 7.14. En aquest gràfic es representen les potències que intervenen en el motor *MAXON® RE-40 148867* en funció de les condicions mecàniques de funcionament.

La potència mecànica proporcionada per la màquina es representa amb línia contínua. El signe negatiu correspon a situacions en les que la màquina absorbeix potència mecànica. Cada corba de nivell és una hipèrbola, i representa aquells punts en els que el producte de la velocitat angular pel parell motor és constant. La potència mecànica

proporcionada per la màquina és positiva a qualsevol punt del 1r i del 3r quadrant i negativa a tots els punts del 2n i del 4t quadrant.

La potència elèctrica que cal subministrar a la màquina es representa al gràfic de la Figura 7.14 amb línia discontinua. Quan el signe és negatiu vol dir que la màquina proporciona potència elèctrica. La potència elèctrica subministrada a la màquina és positiva en tot el 1r i tot el 3r quadrant. Però també és positiva en dues petites zones triangulars, corresponents a velocitats pròximes a zero, en els quadrants 2n i 4t. En aquestes zones la màquina absorbeix potència mecànica i a més consumeix potència elèctrica. Per tant actua com a fre mecànic però sense generar potència elèctrica.

A la resta dels quadrants 2n i 4t la màquina funciona com a generador i per tant la potència elèctrica té el sentit negatiu, de sortida de la màquina.

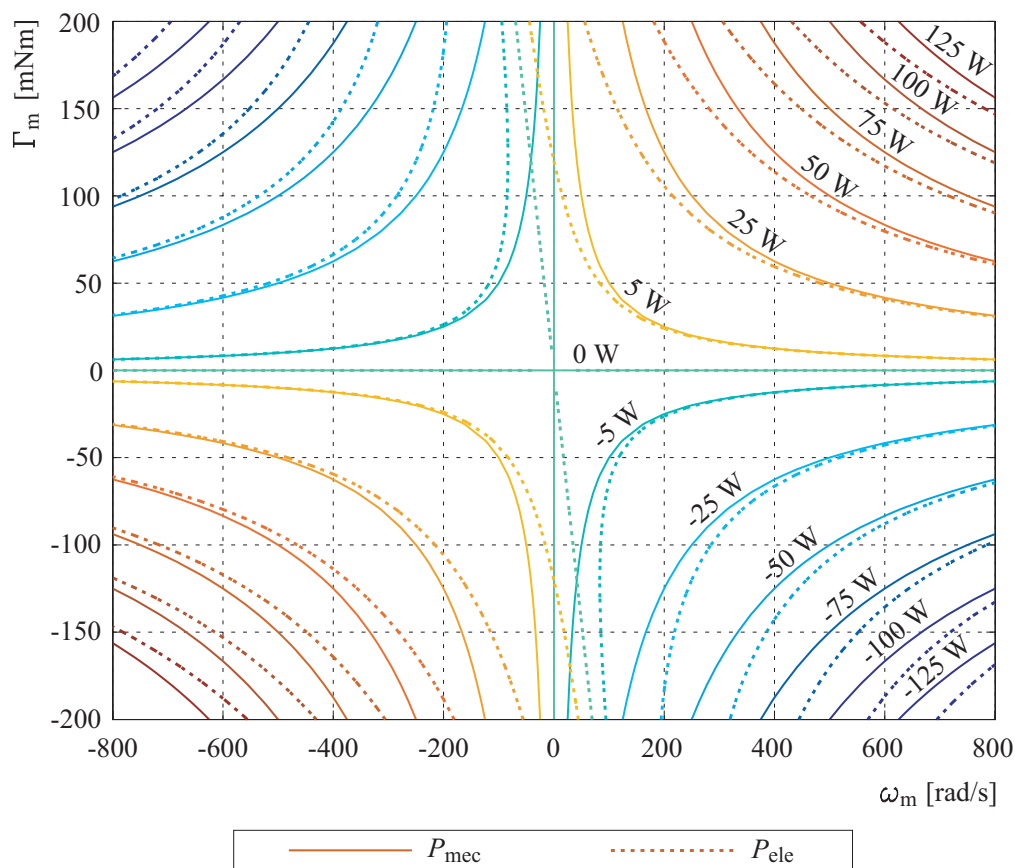


Fig. 7.14. Potències mecànica, P_{mec} , i elèctrica, P_{ele} , que intervenen en el motor *MAXON RE-40 148867* en funció de les condicions mecàniques de funcionament