

Màquines rotatives de corrent continu

Miquel-Joan Pallarès Viña

Màquines elèctriques

Índex

Introducció	5
Resultats d'aprenentatge	7
1 Principis de màquines de corrent continu	9
1.1 Elaboració de documentació tècnica de màquines elèctriques rotatives de corrent continu	9
1.1.1 Simbologia normalitzada i convencionalismes de representació en la reparació de màquines elèctriques rotatives de corrent continu	9
1.1.2 Esquemes de màquines de corrent continu	10
1.2 Aplicació de programari informàtic de dibuix tècnic i càlcul d'instal·lacions	11
1.3 Generalitats, topologia i constitució de màquines de CC	14
1.3.1 Circuits elèctrics i magnètics	14
1.3.2 Placa de borns d'una màquina de CC	17
1.4 Valors característics de les màquines de CC	18
1.5 Corbes característiques de les màquines elèctriques rotatives de corrent continu	19
1.5.1 Excitació independent i excitació en paral·lel	19
1.5.2 Excitació en sèrie	21
1.5.3 Excitació composta	23
1.6 Bobinatges d'induit	24
1.6.1 Representació gràfica de bobinatges	25
1.6.2 Càlcul de bobinatges de màquines de CC	29
1.7 Processos de muntatge i desmuntatge de màquines elèctriques de corrent continu	33
2 Assajos normalitzats i manteniment de les màquines elèctriques rotatives de corrent continu	35
2.1 Assajos a la màquina d'excitació independent o excitació en paral·lel	35
2.1.1 Assaig de buit d'una màquina d'excitació independent	35
2.1.2 Assaig de regulació de velocitat del motor de CC. Excitació en paral·lel o independent	37
2.1.3 Assaig d'una màquina d'excitació independent en càrrega	38
2.2 Elaboració de plans de manteniment	39
2.2.1 Elements comuns que cal inspeccionar	40
2.2.2 Documentació en el manteniment de màquines elèctriques de CC	42
2.2.3 Canvi de bobinatge	42
2.2.4 Eines per al manteniment preventiu	43
2.2.5 Tècniques de manteniment de màquines elèctriques rotatives de corrent continu	45
2.2.6 Avaries més importants en les màquines de CC	47
2.3 Normativa i reglamentació	51
2.3.1 Normativa bàsica	51
2.3.2 Normes generals	52
3 Maniobres en els motors de corrent continu	55
3.1 Arrencada dels motors de CC	55
3.2 Regulació de generadors de CC rotatius	57
3.2.1 Generadors d'excitació independent	58
3.3 Regulació dels motors de CC	60

3.3.1	Regulació de velocitat en els motors de CC	61
3.4	Utilització dels mètodes de variació de la velocitat	71
3.5	Sistema Ward Leonard	72

Introducció

Les màquines elèctriques són motors que transformen energia elèctrica en mecànica o generadors que transformen energia mecànica en elèctrica. En algunes d'aquestes màquines l'energia elèctrica està en forma de corrent continu. Són les màquines de corrent continu o, abreviadament, màquines de cc.

Les màquines de cc es caracteritzen per la seva versatilitat. Els seus dos bobinats es poden connectar en sèrie, en paral·lel i de forma independent, donant lloc a diferents característiques tensió-intensitat i parell-velocitat. Donada la seva facilitat de regulació, s'utilitzen en aplicacions on es necessita variació de la velocitat o control de la potència. L'avenç de l'electrònica de potència ha fet que actualment aquestes màquines no s'utilitzin pràcticament mai com a generadors de cc, en el seu lloc s'utilitzen rectificadors i en moltes aplicacions de regulació de velocitat han estat substituïdes per un conjunt de màquina asíncrona i ondulator. Tot i això encara es continuen utilitzant com a motors degut a la seva flexibilitat i la simplicitat dels seus sistemes de control, si els comparem amb els de les màquines de corrent altern.

Tot plegat fa que les màquines de corrent continu estiguin presents en multitud de sistemes que ens envolten, des de joguines fins a electrodomèstics, passant per automoció, aeronàutica o molts altres camps d'aplicació.

Hem dividit aquesta unitat en tres apartats que enfoquen la màquina de cc des de tres punts de vista diferents.

En l'apartat "Principis de màquines de corrent continu" veureu la constitució i funcionament, on veiem les diferents parts de la màquina, les seves corbes característiques i els càlculs que es solen fer amb les màquines de cc.

L'apartat "Assajos normalitzats i manteniment de les màquines elèctriques rotatives de corrent continu" està enfocat en els assajos, muntatge, manteniment i reparació de les màquines de corrent continu, on analitzem els aspectes a tenir en compte per disposar de la màquina en òptimes condicions operatives.

L'apartat "Maniobres en els motors de corrent continu" està dedicat a les consideracions relatives a l' explotació de les màquines de cc. Estudiareu els circuits associats per obtenir operacions d'arrencada i regulació ajustades al reglament i a les necessitats de la producció, així com les normes de seguretat personal i mediambiental que disposen els reglaments vigents.

Resultats d'aprenentatge

En finalitzar aquesta unitat, l'alumne/a:

1. Elabora documentació tècnica de màquines elèctriques rotatives de corrent continu relacionant símbols normalitzats i representant gràficament elements i procediments.
 - Dibuixa croquis i plànols de les màquines elèctriques rotatives de corrent continu i els seus bobinats.
 - Dibuixa esquemes de plaques de borns, connexions i debanats segons normes.
 - Realitza esquemes de maniobres i assaigs de màquines elèctriques rotatives de corrent continu.
 - Utilitza programari informàtic de disseny per realitzar esquemes.
 - Utilitza simbologia normalitzada.
 - Redacta diferent documentació tècnica.
 - Analitza documents convencionals utilitzats en el manteniment de màquines elèctriques rotatives de corrent continu .
 - Realitza un informe de treball tipus.
 - Realitza un pla de muntatge i un de manteniment de màquines elèctriques rotatives de corrent continu.
 - Respecta els temps previstos en els dissenys.
 - Respecta els criteris de qualitat establerts.
2. Munta màquines elèctriques rotatives de corrent continu, acoblant els seus elements i verificant el seu funcionament.
 - Selecciona el material de muntatge, les eines i els equips.
 - Identifica cada peça de la màquina i el seu acoblament.
 - Utilitza les eines i equips característics d'un taller de bobinat.
 - Realitza bobines de la màquina rotativa de corrent continu.
 - Acobla bobines i altres elements de les màquines de corrent continu.
 - Connecta els bobinats rotòric i estatòric.
 - Munta les escobretes i el col·lector connectant-los als seus borns.
 - Prova el seu funcionament realitzant assaigs habituals.
 - Compleix les normes de prevenció de riscos laborals (incloses les de seguretat enfront el risc elèctric) i de protecció ambiental.
 - Respecta els temps previstos en els processos.
 - Utilitza catàlegs de fabricants per a la selecció del material.

- Respecta criteris de qualitat.
 - Organitza les diferents fases del treball en les operacions de muntatge de màquines elèctriques rotatives de corrent continu.
 - Manté l'àrea de treball, les eines, utensilis i equips amb el grau apropiat d'ordre, conservació i netedat.
 - Col·labora amb l'equip de treball amb actitud responsable, respectuosa i tolerant.
3. Manté i repara màquines elèctriques rotatives de corrent continu realitzant comprovacions i ajusts per a la posada en servei.
- Classifica avaries característiques i els seus símptomes en màquines elèctriques rotatives de corrent continu.
 - Utilitza mitjans i equips de localització d'avaries.
 - Localitza l'avaria i proposa possibles solucions.
 - Desenvolupa un pla de treball per a la reparació d'avaries.
 - Realitza mesures elèctriques per a la localització d'avaries.
 - Repara l'avaria.
 - Verifica el funcionament de la màquina mitjançant assaigs.
 - Substitueix escombretes, coixinets, entre d'altres.
 - Compleix les normes de prevenció de riscos laborals (incloses les de seguretat enfront el risc elèctric) i de protecció ambiental.
 - Respecta els temps previstos en els processos.
 - Respecta criteris de qualitat.
 - Mostra autonomia i resol satisfactòriament els problemes que es presenten.
4. Realitza maniobres característiques en màquines elèctriques rotatives de corrent continu, interpretant esquemes i aplicant tècniques de muntatge.
- Prepara eines i equips.
 - Acobla mecànicament les màquines de corrent continu.
 - Munta circuits de comandament i força, per a les maniobres d'arrencada, inversió, entre d'altres.
 - Connecta les màquines de corrent continu als diferents circuits.
 - Mesura magnituds elèctriques.
 - Analitza resultats de paràmetres mesurats.
 - Té en compte la documentació tècnica.
 - Compleix les normes de prevenció de riscos laborals (incloses les de seguretat enfront el risc elèctric) i de protecció ambiental.
 - Respecta els temps previstos en els processos.
 - Respecta criteris de qualitat.
 - Elabora un informe de les activitats realitzades i resultats obtinguts.
 - Organitza les diferents fases del treball en la realització de maniobres de màquines elèctriques rotatives de corrent continu.

1. Principis de màquines de corrent continu

Totes les màquines estan formades per un conjunt de peces acoblades entre elles amb la finalitat d'efectuar una transformació d'energia. L'estudi de cada una d'aquestes parts i la documentació tècnica que acompanya la màquina és important per tenir-ne una visió global del funcionament.

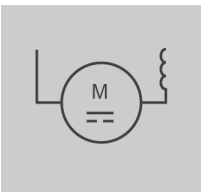
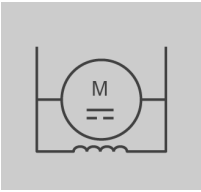
1.1 Elaboració de documentació tècnica de màquines elèctriques rotatives de corrent continu

Com la resta d'elements d'un circuit, la documentació tècnica que inclou màquines de corrent continu s'ha d'ajustar a les normes dictades pels diferents organismes estandarditzadors nacionals i internacionals. Aquesta estandardització de la simbologia ens ha de permetre interpretar els diferents esquemes de maniobres i la potència de màquines elèctriques de CC independentment de la seva procedència.

1.1.1 Simbologia normalitzada i convencionalismes de representació en la reparació de màquines elèctriques rotatives de corrent continu

Per representar les màquines de corrent continu s'utilitzen els símbols normalitzats de la taula 1.1. Aquests símbols estan extrets de la norma EN-60617, que especifica els símbols, colors, estructura de la informació, numeració de borns, etc., de la documentació electrotècnica.

TAULA 1.1. Símbols per a màquines de CC

Símbol	Descripció
	Motor CC excitació sèrie
	Motor CC excitació derivació (<i>shunt</i>)

1.2 Aplicació de programari informàtic de dibuix tècnic i càlcul d'instal·lacions

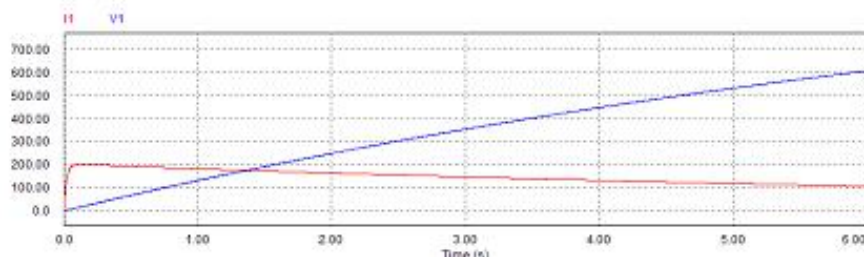
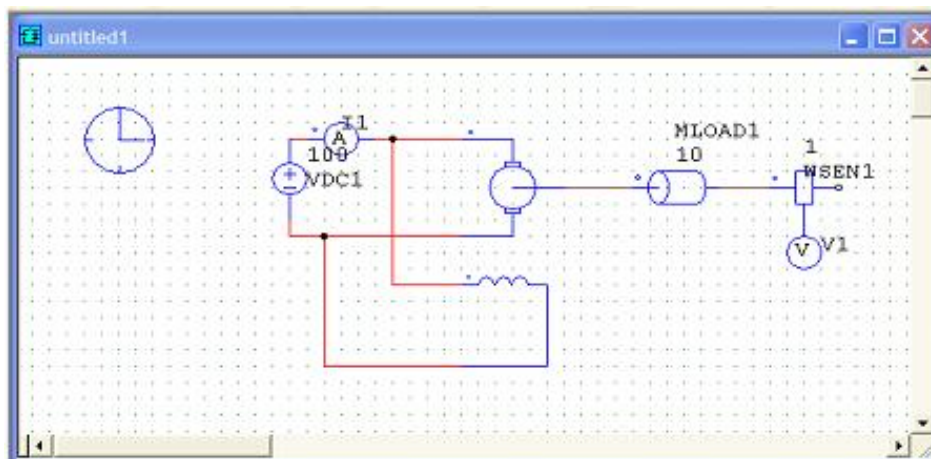
Es poden trobar una gran varietat de programes per a la representació d'esquemes amb màquines de corrent continu i el càlcul de magnituds elèctriques i mecàniques. En general els podem dividir en programes de propietat i lliures.

Els programaris de propietat són aquells que pertanyen a una empresa determinada que cobra per utilitzar-lo, i l'usuari no pot accedir al codi per modificar-lo.

El programari lliure és aquell en què el seu creador publica el codi i les biblioteques perquè es puguin utilitzar i modificar. A més a més, en la majoria de casos sol ser gratuït.

Entre els programaris de propietat, un dels més utilitzats per a representació gràfica és l'**Autocad**, que, utilitzant una biblioteca elèctrica, permet fer tot tipus d'esquemes elèctrics amb grans prestacions. És un programa de propòsit general que es pot aplicar a esquemes elèctrics.

FIGURA 1.2. Simulació d'un motor de corrent continu amb una càrrega mecànica i resultat de la simulació



Podem veure la intensitat consumida i la velocitat del motor.

Elcad és un altre programa de propietat especialitzat en la representació d'esquemes elèctrics utilitzat a escala industrial per moltes empreses del sector, amb grans prestacions i una bona biblioteca de material elèctric i electropneumàtic.

Actualment tots els càlculs amb màquines elèctriques se solen fer paral·lelament de manera analítica i amb el suport d'un programa d'elements finits que simuli el circuit.

Per al càlcul de màquines elèctriques es pot trobar programari lliure de bona qualitat.

Tant el Pspice o la seva versió de demostració Design Lab eval 8 permeten la simulació de màquines elèctriques, però utilitzar-lo és difícil: cal conèixer detalls de la màquina que es poden mesurar o induir a escala acadèmica, però de què normalment no es disposa a escala industrial.

Entre el programari lliure podem destacar el **Psim**, que permet simular màquines elèctriques en general, inclosa l'etapa transitòria.

Com a exemple d'utilització del programa Psim podeu veure a la figura 1.2 una simulació d'un motor de corrent continu amb una càrrega mecànica i el resultat de la simulació.

A la màquina de corrent continu del Psim es poden parametritzar les variables següents:

- R_A (*armature*). Resistència d'armadura, en ohms
- L_A (*armature*). Inductància d'armadura, en H
- R_F (*field*). Resistència de camp, en ohms
- L_F (*field*). Inductància de camp, en H
- *Moment of inertia*. Moment d'inèrcia J, en kg·m·m
- V_T (*rated*). Voltatge nominal, en V
- I_A (*rated*). Corrent nominal, en A
- n (*rated*). Velocitat nominal, en rpm
- I_F (*rated*). Corrent nominal de camp, en A
- *Torque flag*. Indicador de sortida del parell (0 o 1)

Les equacions que descriuen el funcionament són les següents:

$$\bullet V_T = E_A + L_A \cdot \frac{dI_A}{dt} + I_A \cdot R_A$$

$$\bullet V_F = I_F \cdot R_F + L_F \cdot \frac{dI_F}{dt}$$

$$\bullet E_A = L_{AF} \cdot I_F \cdot \omega_m$$

$$\bullet \tau = L_{AF} \cdot I_F \cdot I_A$$

$$\bullet J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = \tau_{em} - \tau_{load}$$

en què:

- V_T = voltatge en bornes de l'induit
- V_F = voltatge en bornes de l'inductor
- E_A = força contraelectromotriu del rotor
- I_A = corrent del rotor
- I_F = corrent de camp
- ω_m = velocitat mecànica, en rad/s
- L_{AF} = inductància mútua entre bobinatges de camp i del rotor
- τ_{em} = Parell motor
- τ_{load} = Parell a la càrrega

Observeu que el fet d'usar equacions diferencials és per obtenir la resposta transitària de les magnituds que es volen mesurar. O sigui, que podem saber com varia la velocitat, la tensió o la intensitat en funció del temps. Per conèixer el valor final, cal fer la simulació durant un període de temps llarg per deixar que el sistema arribi a un valor estabilitzat.

Es poden parametritzar els valors següents de la càrrega mecànica:

- T_c . Parell, en N·m
- K_1 (*coefficient*). Coeficient per al terme lineal
- K_2 (*coefficient*). Coeficient per al terme quadràtic
- K_3 (*coefficient*). Coeficient per al terme cúbic
- *Moment of inertia*. Moment d'inèrcia J, en kg·m·m

Una càrrega mecànica resistiva es pot expressar com:

$$T_{load} = \text{sign}(\omega_m)(T_c + K_1 \cdot |\omega_m| + K_2 \cdot |\omega_m|^2 + K_3 \cdot |\omega_m|^3)$$

en què:

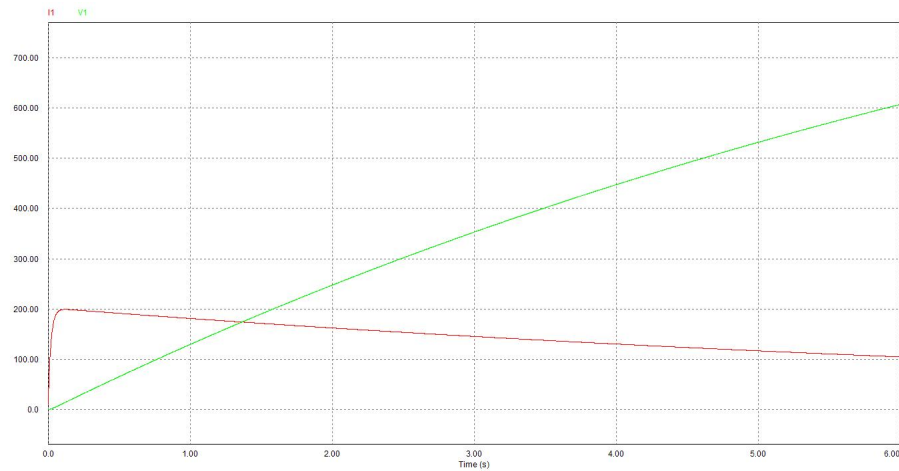
- ω_m = velocitat mecànica en rad/s
- $\text{sign}(\omega)$ = signe de la velocitat mecànica

Triant correctament els coeficients de la càrrega es poden modelitzar diversos tipus de càrregues reals com:

- Transportadors: $T_{Load} = K_1 \cdot \omega_m$
- Ventiladors i compressors: $T_{Load} = K_2 \cdot \omega_m^2$

A la figura 1.3 podeu veure el resultat de la simulació, en la qual hem mesurat la intensitat d'entrada al motor (A1) i la velocitat de sortida amb un sensor de velocitat que transforma la velocitat en tensió (V1).

FIGURA 1.3. Resultat de la simulació en el Psim del circuit de la :figure:Figure2:

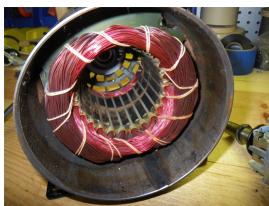


1.3 Generalitats, topologia i constitució de màquines de CC

Com totes les màquines giratòries, la màquina de CC està constituïda per una part fixa, denominada pel seu nom mecànic, *estator*, o pel nom elèctric, *inductor* i una part que gira, el rotor, també denominat *induit* o *armadura*.

A la màquina de CC podem trobar dos circuits elèctrics, situats a l'estator i al rotor (algunes màquines en tenen un tercer, el de commutació) i un circuit magnètic, a més de dielèctrics i parts mecàniques, i altres parts que proveeixen ventilació, nanses per al transport, etc.

1.3.1 Circuits elèctrics i magnètics



Estator bobinat d'una màquina de CC
(imatge: Barbour a <http://goo.gl/c0WJc>)

Els materials elèctrics (bobines de coure) i magnètics (xapes magnètiques), formen la part essencial de la màquina de CC, però necessiten suports, fixacions, ventilació, rodaments, etc., que els permetin fer la seva funció. La figura 1.4 mostra les parts essencials de la màquina. Els bobinatges d'excitació, situats sobre els pols principals, generen un camp magnètic que és simètric respecte a la línia que passa pel centre dels dos pols. Aquesta línia s'anomena *eix de camp* o *eix directe*. L'eix perpendicular a l'eix de camp és l'eix de quadratura.

A la figura 1.4 es pot apreciar un detall esquemàtic dels pols d'una màquina de CC.

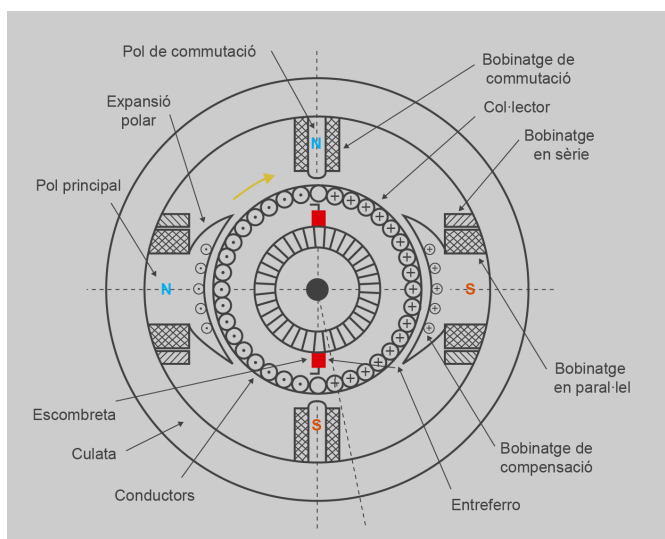
Des del punt de vista mecànic, podem distingir dues parts ben diferenciades a la màquina de CC:

- Estator, que es la part estàtica de la màquina.
- Rotor, que es la part de la màquina que gira.

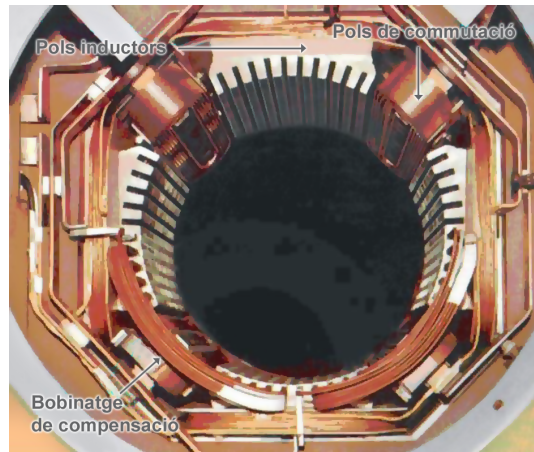
En una màquina de CC podem distingir diversos circuits. Els més importants són el circuit elèctric i el magnètic, formats per les següents parts:

- **Culata**, que és la peça base a la qual s'hi subjecten la resta de peces de la màquina (apreciable en la figura 1.4). Com el flux és aproximadament constant, sol estar feta de ferro dolç.

FIGURA 1.4. Parts d'una màquina de CC

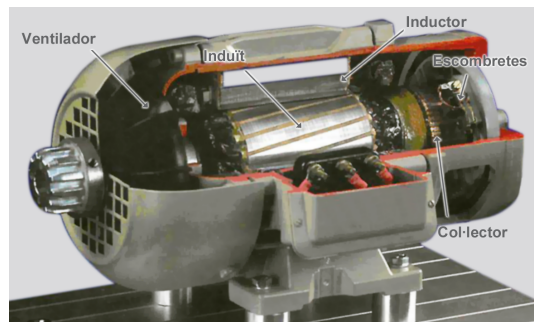


- **Pols principals**, on estan situades les bobines d'excitació, que són les que generen el flux de l'estator de la màquina (figura 1.5).
- **Entreferro**, que és l'espai entre l'estator i el rotor. Ha de ser el més petit possible, però suficientment gran per permetre que el rotor giri sense tocar l'estator, tenint en compte les toleràncies de fabricació i el desgast dels coixinets (apreciable a la figura 1.4).

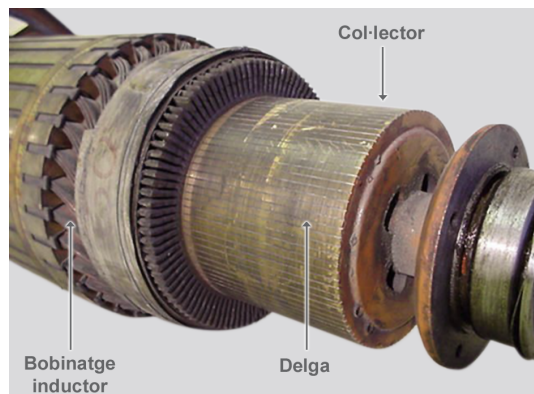
FIGURA 1.5. Peces polars d'una màquina de CC

Imatge cortesia de <http://www.tuveras.com/>

- **Nucli rotòric**, que és el cilindre de xapes magnètiques subjectat a l'eix on se situa el bobinatge rotòric. En girar, està sotmès a un camp magnètic variable, i per tant, ha de ser de xapa magnètica per reduir les pèrdues de Foucault (figura 1.6). Al nucli rotòric va collat el rotor i el col·lector de delgues, al qual van connectades les delgues del col·lector (figura 1.7).

FIGURA 1.6. Nucli rotòric a l'interior d'una màquina de CC

Imatge cortesia de <http://www.tuveras.com/>

FIGURA 1.7. Col·lector de delgues

Imatge cortesia de <http://www.tuveras.com/>

- **Bobinatge inductor**, constituït per tantes bobines com polos principals té la

màquina. La seva funció és crear un camp magnètic dintre de la màquina que concateni les bobines del rotor i s'hi generi força electromotriu en girar. La polaritat és tal que estan alternats pols oposats, un de nord i un de sud. Algunes màquines petites tenen imants permanents en lloc d'electroimants a l'estator.

- **Pols i bobinatges de commutació i de compensació**, situats a l'estator. A l'estator hi ha, intercalats amb els pols principals, uns altres pols que generen un camp magnètic per millorar el funcionament de la màquina: són els pols de commutació, sobre els quals es bobina un debanatge auxiliar que serveix per millorar la commutació de la màquina; es connecten en sèrie amb el circuit inductor amb polaritat igual que el pol anterior en el sentit de gir de la màquina. El bobinatge de compensació està situat a l'extrem dels pols principals i serveix per compensar el flux magnètic creat per bobinatge del rotor de la màquina.
- **Escombretes**, que són peces de carbó que serveixen per introduir el corrent elèctric als bobinatges del rotor. Penseu que s'han de fer passar corrent elèctric pels bobinatges del rotor, que giren contínuament. Les escombretes fixades sobre la culata, freguen sobre el col·lector de delgues situat al rotor. D'aquesta manera s'aconsegueix un contacte elèctric constant entre la part fixa i la que gira de la màquina.
- **Col·lector de delgues**, que està situat en el rotor de la màquina. Sobre ell freguen les escombretes que li entreguen el corrent elèctric per alimentar el bobinatge del rotor.

1.3.2 Placa de borns d'una màquina de CC

Els bobinatges de la màquina de CC tenen els terminals a la placa de connexions, on es connecten els bobinatges entre ells i a l'alimentació del motor. La taula 1.2 indica els noms normalitzats dels bobinatges.

TAULA 1.2. Noms dels bobinatges

Bobinatge	Denominació antiga	Denominació nova
Induït	A-B	A1-A2
Inductor en paral·lel	C-D	E1-E2
Inductor en sèrie	E-F	D1-D2
Inductor independent	J-K	F1-F2
Inductor de commutació	G-H	B1-B2

1.4 Valors característics de les màquines de CC

Cavalls i watts

En moltes màquines es dona la potència mecànica en CV (cavalls de vapor). És una mesura anglesa i la seva equivalència al sistema internacional és de 1 CV = 736 W.

A la **placa de característiques** d'una màquina de CC hi podeu trobar tots els valor per als quals la màquina ha estat construïda.

FIGURA 1.8. Placa de característiques d'una màquina de CC

ABB									
Type ①		Year: ⑦①		No. ②		⑤⑤			
Standard: ③				IM: ④		⑦②			
Therm.class/Temp.rise: ⑤		Weight: ⑥		kg		Cooling and protection IC: ⑤⑥ Encl./IP ⑤⑦			
Supply: ⑦		Branch: ⑬		Duty: ⑩		Ambient: ⑤⑧ Altitude: ⑦③			
Application: ⑪						Cooling air intake at: ⑤⑨ –end			
						Cooling air: ⑥⑩ m ³ /s ⑥① Pa			
⑨		No. of brushes: ⑫		/arm		Balanced with: ⑥② key			
kW	HP	V	A	r/min		Balancing class: ⑥③ (ISO 2373)			
⑭	⑦④	⑮	⑯	⑰		Standstill heater: ⑥④ phase ⑥⑤ V ⑥⑥ W			
⑱	⑦⑤	⑲	⑳	㉑		Brushes including grounding brush (if provided) must be regularly inspected and substituted when worn out.			
㉒	⑦⑥	㉓	㉔	㉕		LUBRICATE at min 300 r/min, using ball bearing grease.			
㉖	⑦⑦	㉗	㉘	㉙		Lubrication interval: ⑥⑦h, max 12 month.			
Excitation: ③⑩ V				③① A		Grease quantity: ⑥⑧ g per bearing.			
③②						Bearing at D –end: ⑥⑨			
③④		Duty: ③③				Bearing at N –end: ⑦⑩			
③⑥		No. of brushes: ③⑤		/arm		⑧②			
kW	HP	V	A	r/min		IMPORTANT safety instructions and maintenance instruction: 3BSM 003045-1			
③⑦	⑦⑧	③⑧	③⑨	④①		http://www.abb.com/motors&drives			
④②	⑦⑨	④③	④④	④⑤					
④⑥	⑧①	④⑦	④⑧	④⑨					
④⑩	⑧②	④⑩	④⑪	④⑫					
Excitation: ⑤③ V				⑤④ A					
⑧③ MADE IN EU CE									

1	Tipus de motor	53	Tensió d'excitació del camp, funcionament alternatiu
2	Número de motor (especific per a cada motor)	54	Intensitat d'excitació del camp, funcionament alternatiu
3	Especificacions i característiques estàndard	55	Casella lliure
4	Disposició del muntatge	56	Mètode de refrigeració
5	Classe tèrmica / augment de temperatura	57	Grau de protecció
6	Pes del motor (sense dispositiu de refrigeració)	58	Rang de temperatura vàlid de funcionament
7	Convertidor i/o dades de xarxa CA	59	Extrem del motor per a l'entrada d'aire de refrigeració
9	Tipus de màquina	60	Volum d'aire de refrigeració (per a la dissipació de calor)
10	Cicle de servei	61	Caiguda de pressió d'aire estàtica
11	Aplicació	62	Tipus de claveta utilitzada per a l'equilibratge
12	Nre. d'escombretes / braç al portaescombretes	63	Classe d'equilibrat
13	Segment	64	Nre. de fases connectades a la resistència calefactora en repòs
14, 18, 22, 26	Potència mecànica (CV)	65	Tensió de la resistència calefactora en repòs
15, 19, 23, 27	Tensió d'induit CC	66	Potència de la resistència calefactora en repòs
16, 20, 24, 28	Intensitat d'induit CC	67	Intervals de lubricació
17, 21, 25, 29	Velocitat (rpm)	68	Quantitat de greix
30	Tensió d'excitació del camp	69	Tipus de coixinet a l'extrem D
31	Intensitat d'excitació del camp	70	Tipus de coixinet a l'extrem N
32	Núm. de catàleg	71	Any de fabricació
33	Cicle de servei alternatiu	72	Casella lliure
34	Casella lliure	73	Altitud vàlida per al funcionament del motor
35	Nre. d'escombretes / braç al portaescombretes, funcionament alternatiu	74, 75, 76, 77	Potència mecànica (CV)
36	Tipus de màquina alternativa	78, 79, 80, 81	Potència mecànica (CV), funcionament alternatiu
37, 41, 45, 49	Potència mecànica (kW), funcionament alternatiu	82	Casella lliure
38, 42, 46, 50	Tensió d'induit CC, funcionament alternatiu	83	Logotip CSA (si està aprovat)
39, 43, 47, 51	Intensitat d'induit CC, funcionament alternatiu		
40, 44, 48, 52	Velocitat (rpm), funcionament alternatiu		

Imatge cortesia de <http://www.abb.com/>

Els valors informats en la placa de característiques d'una màquina no s'han de sobrepassar en el funcionament habitual de la màquina.

A la figura 1.8 podeu observar una placa de característiques d'un motor de la marca ABB, molt completa, on, a més de les seves característiques elèctriques, podeu veure detalls del manteniment o de refrigeració.

1.5 Corbes característiques de les màquines elèctriques rotatives de corrent continu

Les corbes característiques mostren el funcionament de les màquines elèctriques. Com hi tenim energia elèctrica i mecànica, hi podem trobar relacions entre corrents, tensions, parells i velocitats. Les relacions entre aquestes no sempre són lineals, i per facilitar la interpretació, en lloc d'equacions s'usen preferentment mètodes gràfics, o sigui, corbes característiques per explicar el funcionament de les màquines elèctriques.

No obstant això, conèixer les equacions que relacionen les variables elèctriques i mecàniques proporciona un mètode molt potent per explicar el funcionament de la màquina sempre que suposem que treballa en zona lineal.

Les equacions que ens permeten explicar el funcionament de la màquina i que expliquen la forma de les corbes característiques són:

- Primera llei de Kirchhoff: $\sum I = 0$
- Segona llei de Kirchhoff: $\sum V = R \cdot I$
- $E = k \cdot \Phi \cdot \omega_m$
- $\tau_{ind} = k \cdot \Phi \cdot I_A$

Les equacions de Kirchhoff relacionen tensions i corrents al dispositiu. La segona equació relaciona la tensió que es genera al bobinatge del rotor del motor amb el flux de la màquina i la velocitat a la qual gira, i la tercera relaciona el parell que genera el motor amb el flux i la intensitat que passa pel rotor del motor.

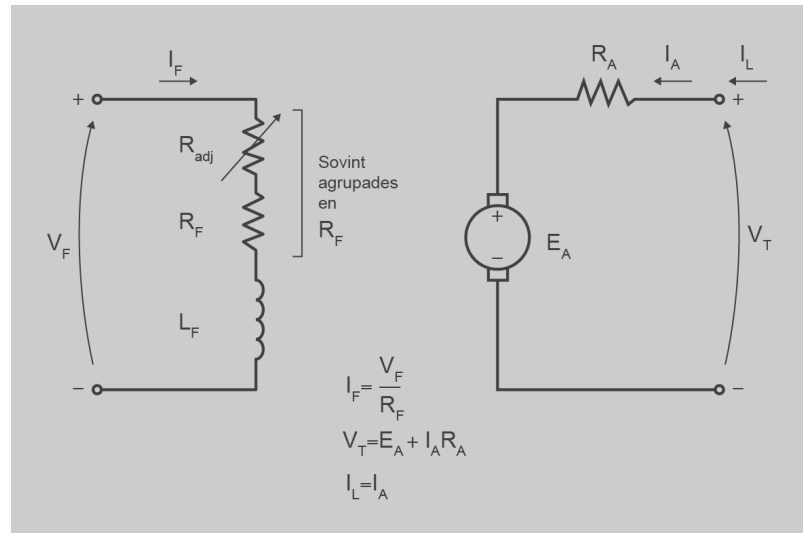
Els bobinatges inductor (estator) i induït (rotor) es poden connectar independentment cadascun a una font de tensió, però també es poden connectar a la mateixa font de tensió en sèrie o en paral·lel. En cada cas tenim una màquina de característiques diferents.

1.5.1 Excitació independent i excitació en paral·lel

En el cas d'**excitació independent** hi ha dues fonts de tensió, una per a l'inductor i una per a l'induí. Es poden variar de manera independent i permet una gran varietat de regulació (figura 1.9).

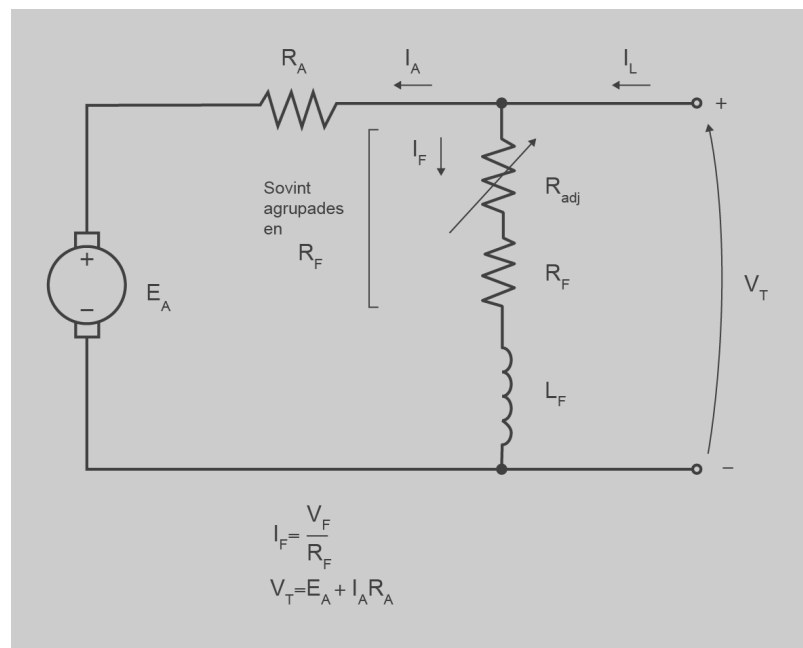
Els motors de CC permeten un gran marge de variació de velocitat de manera molt simple. Això els ha popularitzat molt en gran varietat d'aplicacions.

FIGURA 1.9. Esquema elèctric equivalent del motor de CC d'excitació independent



En el cas d'**excitació en paral·lel** es connecten inductor i induït a la mateixa font de tensió. Les equacions són les mateixes, però queda restringit al cas que la tensió nominal de tots dos bobinatges és la mateixa (figura 1.10).

FIGURA 1.10. Esquema elèctric equivalent del motor de CC d'excitació en paral·lel



Les connexions de la màquina de corrent continu independent i en paral·lel tenen un comportament similar i es poden analitzar de manera conjunta.

A partir de l'esquema del circuit equivalent podem trobar les equacions del motor:

- $V_T = E_A + R_A \cdot I_A$
- $V_T = K \cdot \phi \cdot \omega_m + R_A \cdot I_A$

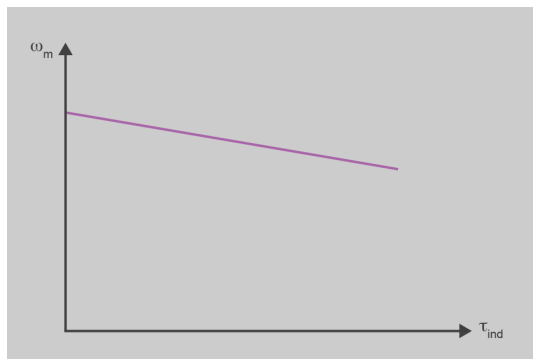
- $I_A = \frac{\tau_{ind}}{K \cdot \phi}$
- $V_T = K \cdot \phi \cdot \omega_m + \frac{\tau_{ind}}{K \cdot \phi} \cdot I_A$
- $\omega = \frac{V_T}{K \cdot \phi} - \frac{R_A}{(K \cdot \phi)^2} \cdot \tau_{ind}$

en què:

- V_T = tensió a la qual connectem la màquina
- K = constant de la màquina
- ϕ = flux magnètic dintre de la màquina
- R_A = resistència del bobinatge induït
- τ_{ind} = parell induït

Per a una màquina ja construïda, les magnituds K i R_A són constants de la màquina, que ja no les podem modificar, i per tant, podem dir que si mantenim constant la V_T , a mesura que s'incrementa el parell resistent la velocitat del motor disminueix. A la figura 1.11 podeu veure aquest efecte.

FIGURA 1.11. Característica parell-velocitat d'un motor de CC



La caiguda de velocitat no és gaire pronunciada, i per tant el motor de corrent continu d'excitació en paral·lel s'utilitzarà en aquelles aplicacions que requereixin poca variació de velocitat encara que variï la càrrega.

1.5.2 Excitació en sèrie

En els motors d'excitació en sèrie els dos bobinatges es connecten en sèrie i hi passa el mateix corrent (figura 1.12). El bobinatge d'excitació és de poques espirs i del mateix gruix.

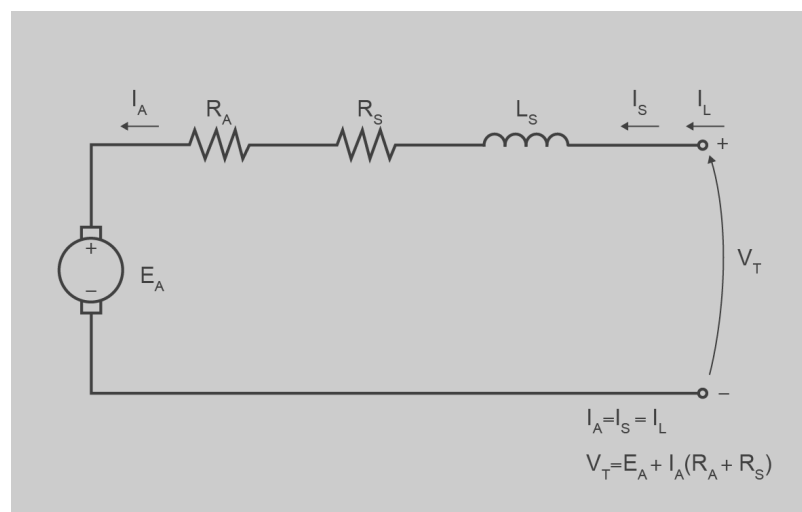
En aquest cas, si suposem que la relació entre la intensitat i el flux és constant, o sigui, que la màquina no treballa saturada, s'obté l'expressió per a la velocitat del motor següent:

$$\omega_m = \frac{V_T}{\sqrt{K \cdot c}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\tau_{ind}}} - \frac{R_A + R_S}{K \cdot c}$$

en què:

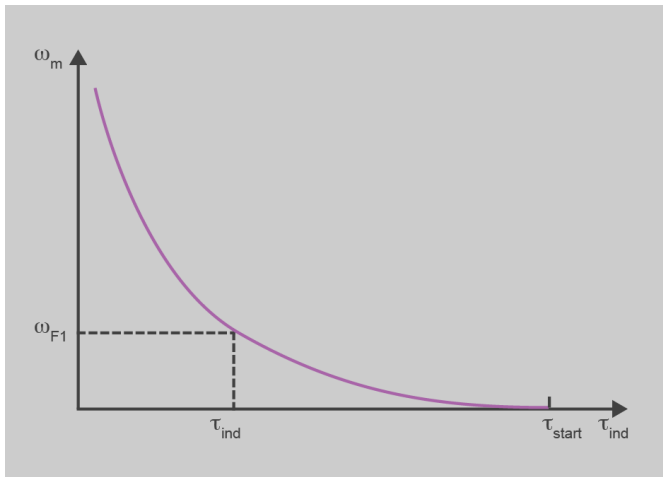
- ω = velocitat angular, en rad/s
- V_T = tensió a la qual connectem la màquina
- K = constant de la màquina
- Φ = flux magnètic dins la màquina
- R_A = resistència del bobinatge induït
- R_S = resistència del bobinatge inductor
- τ_{ind} = parell induït

FIGURA 1.12. Esquema equivalent del motor de CC d'excitació en sèrie



En aquest cas podem veure com la velocitat del motor depèn inversament de l'arrel quadrada del parell motor. És una relació complexa que es pot graficar com es mostra en la figura 1.13.

FIGURA 1.13. Característica parell-velocitat del motor de CC d'excitació en sèrie



Com podeu observar, en els motors de corrent continu d'excitació en sèrie hi ha una forta caiguda de velocitat a mesura que s'incrementa el parell de la càrrega, però el producte del parell per la velocitat roman pràcticament constant. O sigui, que la potència consumida no varia amb la càrrega. Això els fa especialment atractius en aplicacions de sistemes de transport, ja que la potència que transporta la línia d'alimentació és pràcticament constant.

El motor d'excitació en sèrie no pot quedar en buit (sense càrrega), perquè la velocitat s'incrementa excessivament. Per tant, en totes aquelles aplicacions en què la transmissió de potència es faci amb corretges o un altre sistema que es pugui trencar fàcilment, s'ha de tenir cura de protegir el motor.

1.5.3 Excitació composta

En una màquina d'excitació composta hi ha els dos tipus de bobinatges a l'inductor: un per connectar-lo en sèrie amb l'induït i un altre per connectar-lo en paral·lel.

Cadascun té les característiques dels bobinatges en sèrie i en derivació, respectivament.

A la figura 1.14 podem veure dues possibles variacions del motor d'excitació composta de CC. La primera es diu excitació composta de **connexió llarga**, i la segona, de **connexió curta**. El funcionament en tots dos casos és molt similar. Els bobinatges s'han de posar de manera que els camps magnètics de tots dos vagin en el mateix sentit i, per tant, se sumin. Es diu *excitació composta acumulativa*.

La figura 1.15 mostra la corba parell-velocitat del motor d'excitació composta comparada amb les d'excitació en sèrie i en paral·lel, en què podem observar que el comportament és una mitjana de totes dues. Té un parell d'arrencada més gran que la d'excitació en paral·lel i no s'incrementa tant la velocitat sense càrrega com en el motor en sèrie.

Un motor de CC d'excitació en sèrie no s'ha de quedar mai sense corrent al bobinatge d'excitació. Si això passes, la velocitat i el corrent del rotor s'incrementarien fins que saltessin les proteccions del motor o fins a la seva destrucció.

Excitació composta

Un motor d'excitació composta té unes característiques mitjanes entre les d'excitació en sèrie i en paral·lel. No s'embala sense càrrega i té un bon parell d'arrencada.

FIGURA 1.14. Connexions d'una màquina de CC d'excitació composta

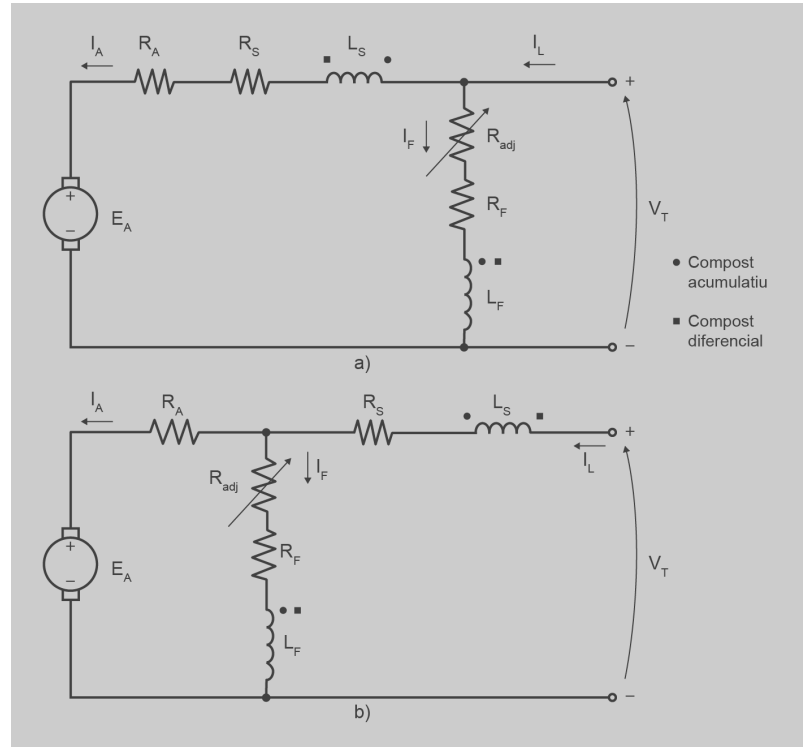
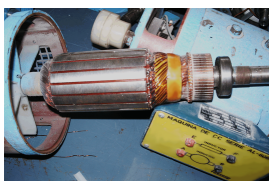
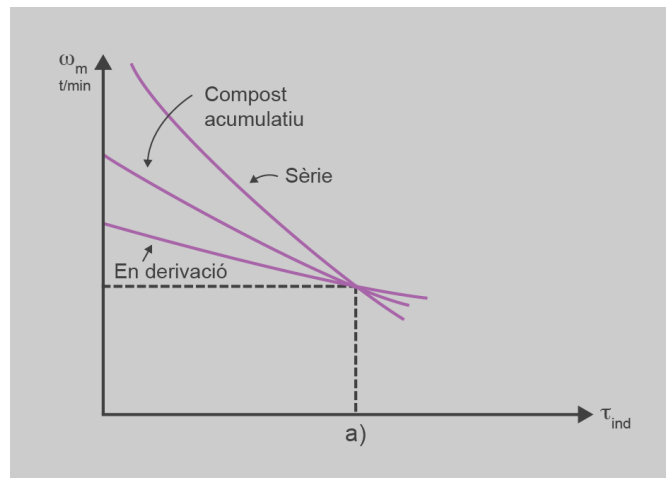


FIGURA 1.15. Característica parell-velocitat del motor de corrent continu d'excitació composta comparada amb les d'excitació en sèrie i en paral·lel



Rotor amb ranures i col·lector de delgues

1.6 Bobinatges d'induit

El rotor d'una màquina de CC és un cilindre format per xapes magnètiques apilades i aïllades. A la superfície s'han encunyat unes ranures en les quals s'introdueix el bobinatge de l'induit.

Pràcticament tots els bobinatges són de doble capa. Això vol dir que a cada ranura hi ha un costat d'una bobina i a sota el costat d'una altra (bobinatges imbricats).

Un costat de la bobina entra per una ranura i surt per una altra ranura. La primera condició que ha de complir un bobinatge és que l'amplada de la bobina ha de

En la figura 1.17 podeu veure, de manera esquemàtica, el bobinatge de doble capa.

ser igual que l'amplada polar o molt semblant, perquè la tensió induïda a cada costat de la bobina sigui del mateix valor, però de sentit contrari en passar sota pols diferents. Una bobina pot estar formada per una sola volta de fil o espira o per moltes voltes de fil, però sempre té un inici i un final que van soldats a les delgues del col·lector. Els bobinatges de màquines de CC queden tancats sobre ells mateixos, sense connexions a l'exterior.

1.6.1 Representació gràfica de bobinatges

Els bobinatges estan situats a la perifèria del rotor i, per tant, tenen una distribució cilíndrica. Per representar-los en dues dimensions es fa com si es tingués un paper imaginari a la superfície del cilindre, s'hi fes un tall longitudinal i es desplegués fins a tenir-lo pla. D'alguna manera es tractaria de posar plana la superfície corbada del cilindre (eliminant els cercles de les bases) format per les plaques de fora del rotor i les delgues del col·lector, obtenint un rectangle pla, amb les delgues del col·lector a baix, mostrant-hi les connexions dels successius debanats i la seva imbricació, si n'hi ha.

Passos de bobinatge

Per definir un bobinatge cal indicar el nombre de bobines que el formaran i on anirà col·locada cada bobina dintre les ranures de l'estator, és a dir, a quina ranura se situarà el costat d'anada i a quina altra el de tornada de cada bobina. Per això es defineixen els passos de bobinatge.

Nombre de bobines

Com cada bobina té dos costats i a cada ranura també hi ha un costat d'anada i un de tornada (bobinatge de doble capa) tenim que:

$$B = k$$

en què:

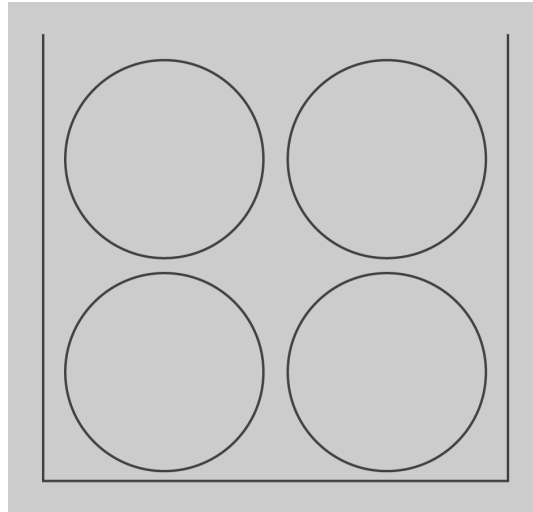
- B = nombre de bobines
- k = nombre de ranures

En algunes màquines es posen diversos costats de bobina per ranura i capa. Si aquest nombre és u , tenim que:

$$B = k \cdot u$$

A la figura 1.16 hi ha l'esquema d'una ranura amb $u = 2$.

FIGURA 1.16. Ranura amb dos costats actius per capa ($u = 2$)



Com cada bobina té el seu origen en una delga i el seu final en una altra delga del col·lector i, mitjançant les diferents delgues, estan connectades en sèrie formant un circuit tancat, s'ha de complir que:

$$B = C$$

en què:

- C = nombre de delgues del col·lector

Si tenim més d'un parell de pols, les bobines es poden connectar retrocedint, per connectar en sèrie bobines situades sota el mateix parell de pols (**bobinatges imbricats**) o avançant per connectar en sèrie bobines situades sota parells de pols diferents, però en posicions similars (**bobinatges ondulats**).

Tots dos tipus de bobinatges han de ser tancats i s'ha de generar la major tensió possible. Per definir-ne la col·locació a les ranures del col·lector s'han definit els passos de bobinatge. Aquests passos de bobinatge estan comptats en costats actius de bobina, és a dir, el nombre de conductors de la capa superior.

Pas de bobina Y_1

Es coneix com a Y_1 la distància entre els costats d'anada i tornada d'una mateixa bobina, o amplada de la bobina. Com l'amplada de la bobina ha de ser semblant a l'amplada polar, tenim:

$$Y_1 = \frac{B}{2 \cdot p}$$

en què:

- p = parells de pols (o sigui, que $2 \cdot p$ = nombre total de pols principals)

El que diferencia un bobinatge d'un altre és la manera com es connecten les bobines entre si per formar el circuit tancat. Exceptuant les màquines més petites que tenen un parell de pols, la majoria tenen 3, 4 o més parells de pols.

Y_1 es pot fer una mica més petit que l'amplada polar. En aquest cas es diu *escurçat*. Si es fa més gran que el pas polar es diu *allargat*.

Pas de connexió Y_2

Y_2 és la distància entre el costat de tornada d'una bobina i el d'anada de la següent connectada en sèrie.

Pas de bobinatge Y

Y és la distància entre els costats d'anada d'una bobina i el d'anada de la següent connectada en sèrie.

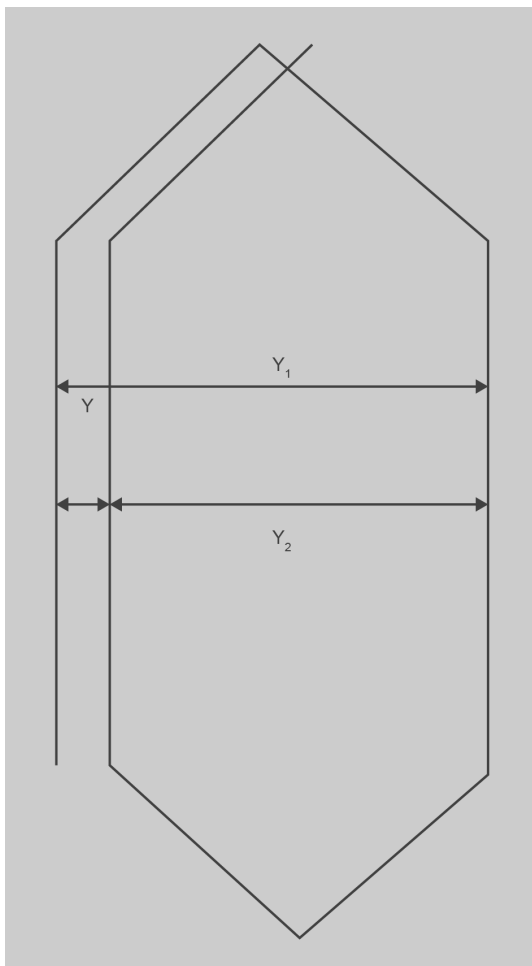
Bobinatges imbricats

En els bobinatges imbricats Y pot valer 1, 2, 3... Si $|Y| > 1$ tenim un **bobinatge imbricat múltiple** i si $|Y| = 1$ es tractarà d'un **bobinatge imbricat simple**. A més a més si Y és positiu, el bobinatge és **no creuat**, i si és negatiu, es tractarà d'un **bobinatge creuat**. En posar les escobretes al col·lector de delgues, quedaran $a = (2 \cdot Y)$ circuits en paral·lel.

Valor absolut

Quan posem un nombre o una variable entre barres verticals (com en $|Y|$) n'estem extraient el valor absolut, que és el valor numèric sense tenir en compte el signe.

FIGURA 1.17. Passos d'un bobinatge imbricat



En un bobinatge imbricat (figura 1.17) es posen escombretes d'una amplada que curtcircuiti tantes delgues del col·lector com el valor de Y . La relació entre els passos de bobinatge és:

$$Y = Y_1 - Y_2$$

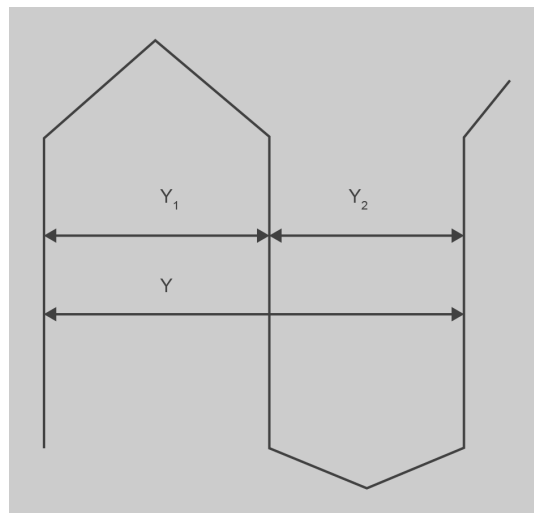
Bobinatges ondulats

En el cas dels bobinatges ondulats (figura 1.18) podem tenir **bobinatges ondulats simples**, si en fer la volta al rotor anem a parar al costat actiu següent o anterior al d'inici, o **bobinatges ondulats múltiples**, si anem a parar dos o més costats actius abans o després del d'inici.

La relació entre els passos de bobinatge és:

$$Y = Y_1 - Y_2$$

FIGURA 1.18. Passos de bobinatge ondulat



Cada cop que avancem una bobina o Y costats actius hem avançat un parell de pols, i per tant, en avançar tots els parells de pols que tingui la màquina hem d'anar a parar a $Y + 1$ si és creuat o a $Y - 1$ si és no creuat.

$$P \cdot Y = B \pm 1$$

Per tant,

$$Y = \frac{B \pm 1}{P}$$

Perquè es pugui fer aquest bobinatge, Y ha de ser un nombre enter.

En un bobinatge múltiple, en lloc d'anar a parar al costat següent o anterior al d'inici, s'anirà a parar a m costats abans o després del d'inici, i per tant tenim que:

$$P \cdot Y = B \pm m$$

En els bobinatges ondulats simples només cal posar dues escombretes perquè només tindrem dues branques en paral·lel.

Per tant,

$$Y = \frac{B \pm m}{P}$$

1.6.2 Càlcul de bobinatges de màquines de CC

Per calcular els passos d'un bobinatge partireu de les dades següents:

- K = nombre de ranures de la màquina
- u = nombre de costats actius per ranura i capa
- p = nombre de parells de pols de la màquina
- Tipus de bobinatge:
 - Imbricat u ondulat
 - Simple o múltiple (en el darrer cas, grau de multiplicitat)
 - Creuat o no creuat

Amb aquestes dades ja es poden calcular els passos del bobinatge i dibuixar-ne l'esquema.

Exemple de càlcul de bobinatge imbricat simple

Calculeu el bobinatge d'una màquina de CC amb les característiques següents:

1. Nombre de ranures $k = 16$
2. Nombre de costats actius per ranura i capa $u = 1$
3. Parells de pols $p = 2$
4. Pas de bobinatge $Y = 1$

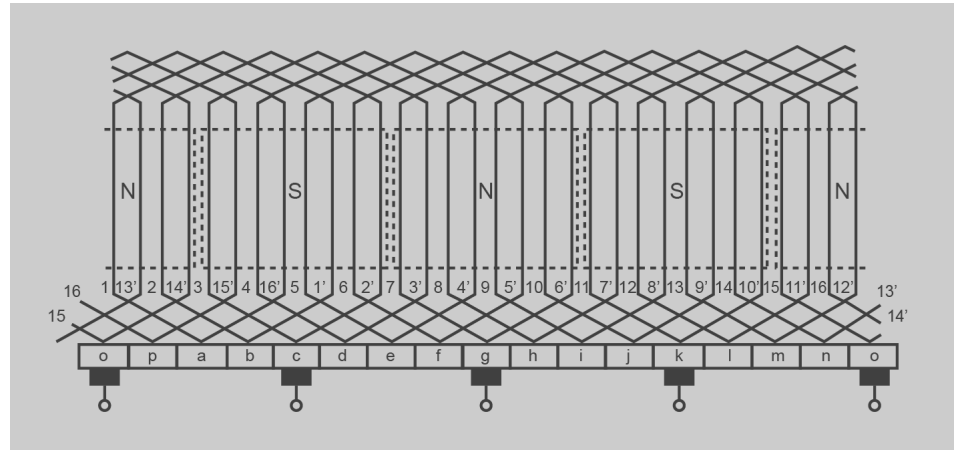
Solució

De les dades podem deduir:

- Nombre de bobines: $B = K \cdot u = 16 \cdot 1 = 16$ bobines
- Pas de bobina: $Y_1 = \frac{B}{2 \cdot p} = \frac{16}{2 \cdot 2} = 4$ costats actius
- Pas de connexió: $Y_2 = Y_1 - Y = 4 - 1 = 3$ costats actius

Amb aquestes dades podem dibuixar el bobinatge com es mostra a la figura 1.19.

FIGURA 1.19. Bobinatge imbricat



Exemple de càlcul de bobinatge ondulat simple

Calculeu el bobinatge d'una màquina de CC amb les característiques següents:

1. Nombre de ranures $k = 15$
2. Nombre de costats actius per ranura i capa $u = 1$
3. Parells de pols $p = 2$
4. Pas de bobinatge. $Y = 1$

Solució

De les dades podem deduir:

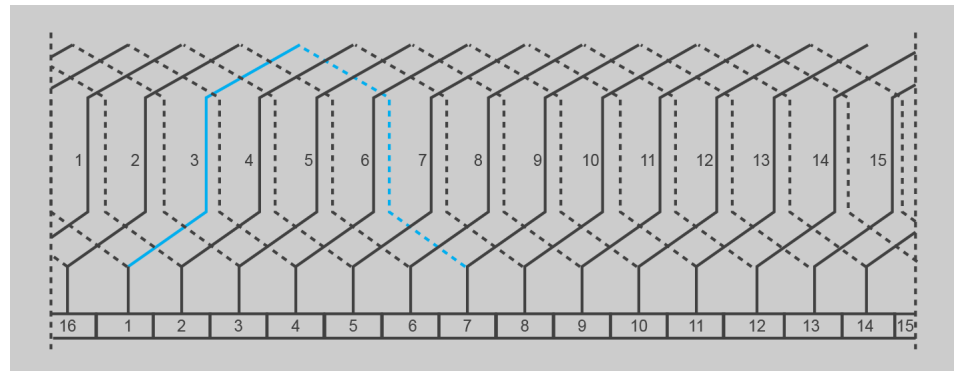
- Nombre de bobines: $B = K \cdot u = 15 \cdot 1 = 15$ bobines
- Pas de bobina: $Y_1 = \frac{B}{2 \cdot p} = \frac{15}{4} = 3,75$ costats actius

Agafarem $Y_1 = 4$ costats actius

- Pas de bobinatge: $Y = \frac{B - 1}{2} = \frac{15 - 1}{2} = 7$ costats actius
- Pas de connexió: $Y_2 = Y - Y_1 = 4 - 1 = 3$ costats actius

Amb aquests càlculs el dibuix del bobinatge queda de la manera que es mostra a la figura 1.20.

FIGURA 1.20. Bobinatge ondulat simple



En el cas de bobinatges imbricats múltiples es dona a Y un valor superior a 1. El grau de multiplicitat s'anomena m i pot tenir qualsevol valor entre 2 i 4, encara que normalment no passa de 2. Això vol dir que en retornar al mateix parell de pols per connectar bobines en sèrie no connectarem el que hi ha al costat del primer, sinó que en deixarem un de lliure abans d'arribar-hi (bobinatge no creuat) o el sobrepassarem (bobinatge creuat).

Si el nombre de bobines és múltiple de Y , es tancarà el bobinatge i n'hauré de fer un altre amb les bobines que han quedat sense connectar. En canvi, si B no és múltiple de Y , en fer la volta al rotor anirem a parar dos connectors abans o després d'on hem començat. En aquest cas seguirem tancant bobines fins que en fer la segona volta, quedi tancat del tot el bobinatge.

En el cas de bobinatges imbricats múltiples es posen escombretes d'un gruix tal que toquin simultàniament un nombre de delgues igual que l'ordre de multiplicitat m , i així quedaran $2 \cdot m$ circuits en paral·lel.

En un bobinatge imbricat múltiple denominarem:

- m = ordre de multiplicitat
- a = nombre de circuits en paral·lel

i així tindrem

- $Y = m$
- $a = 2 \cdot m$ circuits en paral·lel

Exemple de càlcul de bobinatge imbricat múltiple

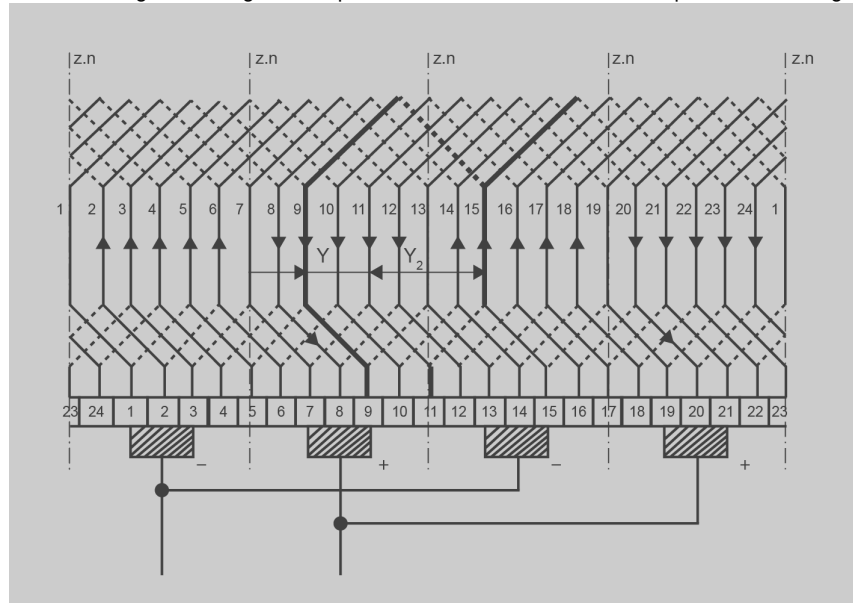
Calculeu un bobinatge imbricat doble per a un induït de:

- $2 \cdot p = 4$
- $k = 24$
- $u = 1$
- No creuat
- $m = 2$

Solució

- Nombre de bobines: $B = k \cdot u = 24 \cdot 1 = 24$ bobines
- Delgues al col·lector: $C = 24$ delgues
- Pas de bobinatge: $Y = 2$ costats actius
- Pas de bobina: $Y_1 = \frac{B}{2 \cdot p} = \frac{24}{4} = 6$ costats actius
- Pas de connexió: $Y_2 = Y - Y_1 = 2 - 6 = -4$ costats actius

A la figura següent podem veure dibuixat aquest bobinatge:



Nombres primers entre ells

Es considera que dos nombres són primers entre ells si, tot i no ser nombres primers, no comparteixen cap divisor. És el cas, per exemple, del 33 i el 35, que no són primers (33 = 3·11 i 35 = 5·7) però que no tenen cap divisor comú.

Els bobinatges ondulats dobles poden ser **simplement** o **doblement** tancats. Si totes les bobines queden connectades en sèrie, és **simplement tancat**. Això es dona si Y i B són primers entre ells.

En canvi, si Y i B tenen un divisor comú, tindrem un bobinatge de tancaments múltiples.

Les escobretes han d'ocupar tantes delgues com parells de branques hi hagi al circuit.

Exemple de càlcul de bobinatge ondulat doble

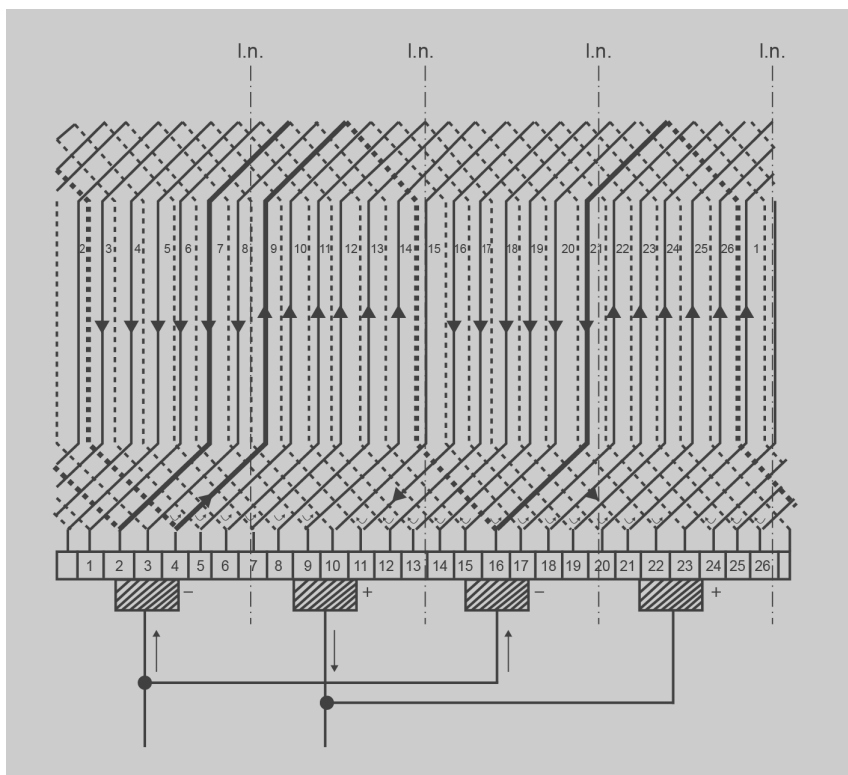
Calculeu un bobinatge ondulat doble per a un induït de:

- $2 \cdot p = 4$ pols
- $k = 26$
- $u = 1$
- No creuat
- $a = 2$ (4 circuits derivats)

Solució

- Nombre de bobines: $B = k \cdot u = 26 \cdot 1 = 26$ bobines
- Delgues al col·lector: $C = 26$ delgues
- Pas de bobinatge: $Y = \frac{B - a}{2} = \frac{26 - 2}{2} = 12$ costats actius
- Pas de bobina: $Y_1 = \frac{B}{2 \cdot p} = \frac{26}{4} = 6$ costats actius
- Pas de connexió: $Y_2 = Y - Y_1 = 12 - 6 = 6$ costats actius

En la figura següent podem veure dibuixat aquest bobinatge:



1.7 Processos de muntatge i desmuntatge de màquines elèctriques de corrent continu

Tant en el procés de fabricació com en les diverses intervencions de manteniment cal muntar i desmuntar parts de les màquines elèctriques de corrent continu. En el cas de desmuntatge, cal tenir l'esquema d'espejament per poder tornar-lo a muntar o anotar on va cada peça que es treu i l'ordre d'extracció.

Per al desmuntatge d'una màquina de CC cal seguir les instruccions del fabricant.

Tot i que cada cas pot ser diferent, segons els complements i la complexitat de la màquina, en general es pot seguir un procediment com l'indicat tot seguit:

1. Assegurar-se que tots els circuits elèctrics estan sense tensió.
2. Desconnectar totes les connexions elèctriques i mecàniques de l'exterior i treure la màquina de la bancada.
3. Desconnectar els connectors de l'interior de la caixa de connexions a l'estator si s'ha de retirar la caixa de connexions.
4. Desconnectar els connectors de la corona portaescombretes a l'estator.
5. Retirar les escombretes i embolicar el col·lector amb un aïllant.

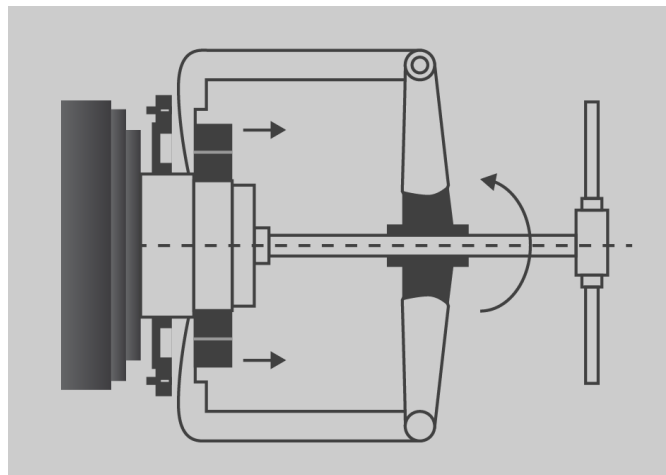
6. Extreure la coberta externa dels coixinets d'un extrem.
7. Col·locar un material aïllant entre l'estator i el rotor.
8. Retirar l'escut on és recolzat el rotor sencer d'una part.
9. Fixar bé l'aïllant entre estator i rotor, i extreure l'escut que suporta el coixinet de l'altra part.
10. Retirar el rotor si és necessari.

Un cop desmuntada la màquina es pot dur a terme la intervenció de manteniment adient. Els coixinets s'han de mantenir amb greix per protegir-los de la contaminació, i abans de muntar de nou el motor, eliminar el greix que sobra.

Per al muntatge de la màquina s'han de portar a terme les operacions contràries a les indicades, tenint en compte el parell d'estrenyiment recomanat pel fabricant per a cada peça que ho requereixi.

Per fer el manteniment calen les eines habituals i algunes d'especialitzades com l'**extractor de rodaments**, que podeu veure a la figura 1.21. Com els coixinets entren a pressió, cal una eina que permeti fer la força suficient per poder extraure'ls de la màquina.

FIGURA 1.21. Extractor de rodaments disposat sobre la màquina



Com es pot veure a la figura 24, l'extractor té una peça que enganxa els coixinets, va roscada sobre el cos de l'eina mateixa i es recolza en l'eix de la màquina. Girant la maneta es desplaça sobre el seu eix propi aplicant força entre l'eix de la màquina de CC i el coixinet, per extreure el coixinet del seu lloc.

2. Assajos normalitzats i manteniment de les màquines elèctriques rotatives de corrent continu

Les dades de les màquines de corrent continu s'obtenen mitjançant assajos. Per poder-los comparar, aquests assajos han d'estar normalitzats i s'ha de disposar del material adient. Un cop fet l'assaig s'han de documentar els resultats i treure'n conclusions.

A més, durant tota la vida de la màquina se li ha de fer el manteniment recomanat pel fabricant i adaptat a les característiques del lloc de treball per mantenir la màquina en bones condicions de funcionament.

2.1 Assajos a la màquina d'excitació independent o excitació en paral·lel

Les màquines d'excitació independent i d'excitació en paral·lel es comporten de manera similar. En el cas de motors d'excitació independent es disposa de dues fonts de tensió, una per a cada bobinatge, i es poden regular de manera independent.

Habitualment tots dos bobinatges es construeixen amb la mateixa tensió nominal, i per això es poden connectar a la mateixa font de tensió. En aquest cas es diu que la màquina és d'excitació en paral·lel. Per regular la tensió d'un sense variar l'altre es posa un regulador en sèrie amb el bobinatge que es vol regular i es deixa l'altre bobinatge amb la tensió original.

2.1.1 Assaig de buit d'una màquina d'excitació independent

Aquest assaig ens proporcionarà la corba de buit, o sigui, la tensió que es genera en borns de la màquina quan gira a una velocitat constant, en funció de la intensitat del bobinatge de camp.

Quan la màquina de CC gira, els seus conductors es mouen dintre del camp magnètic generat per l'estator, i per tant s'indueix una tensió a cadascun. En estar tots connectats entre ells, entre les escobretes tenim una tensió que és proporcional a la velocitat de gir i al camp magnètic establert dintre de la màquina:

$$E = k \cdot \Phi \cdot \omega_m$$

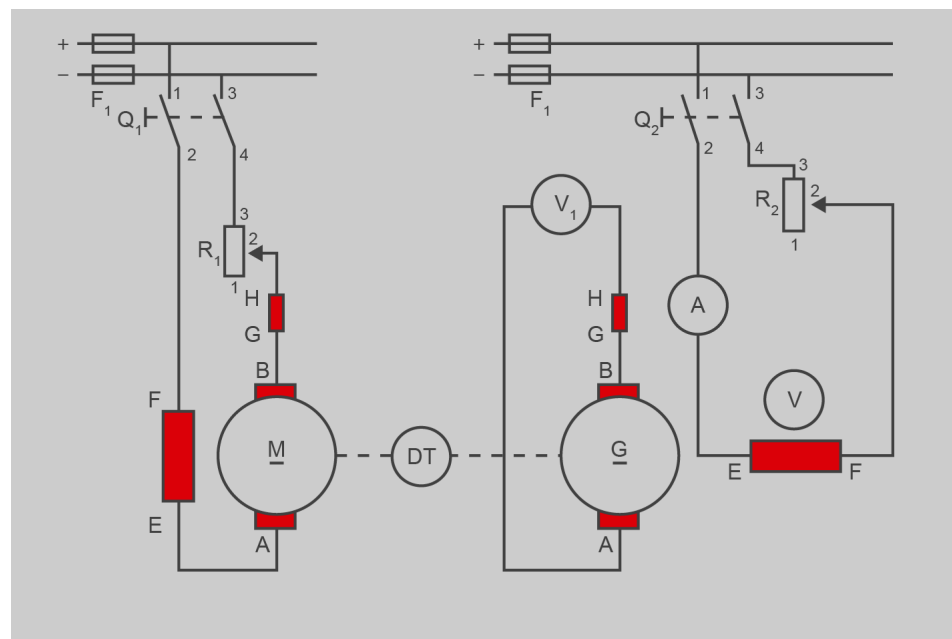
en què:

- K = constant que depèn de la màquina (nombre de connectors i connexions entre ells)
- Φ = flux magnètic establert dintre de la màquina
- ω_m = velocitat de gir de la màquina

Com el flux intern de la màquina depèn de la intensitat d'excitació I_{ex} , podem dir que la tensió generada a la màquina depèn de la I_F i la velocitat a la qual gira la màquina. La corba no és lineal perquè el material ferromagnètic del qual està fet el motor se satura i té histèresi.

El circuit per efectuar l'assaig és el que es mostra a la figura 2.1.

FIGURA 2.1. Circuit de potència per fer l'assaig de buit d'una màquina d'excitació independent



S'acoba l'eix de la màquina de CC al d'un motor d'inducció o una altra màquina de CC i a una dinamo tacomètrica per mesurar la velocitat. En connectar la màquina d'inducció a la xarxa, el conjunt gira a una velocitat determinada. Es comença amb un valor de la tensió $V_F = 0$ i es va incrementant. Es fan diverses lectures dels valors de V i I_F i es grafien en una taula de doble entrada.

Per efectuar l'assaig necessitem:

1. Motor de CC que volem assajar
2. Motor asíncron
3. Voltímetre
4. Dinamo tacomètrica
5. Amperímetre
6. Autotransformador o resistència variable
7. Contactors per muntar el circuit de maniobra

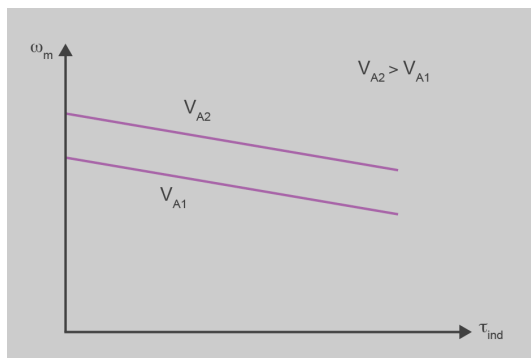
2.1.2 Assaig de regulació de velocitat del motor de CC. Excitació en paral·lel o independent

L'assaig de regulació de velocitat del motor de CC ens proporcionarà la variació de velocitat del motor en funció de la tensió als borns del rotor.

La velocitat d'un motor de CC es pot posar aproximadament com:

$$N = \frac{V_T - R \cdot I_A}{k \cdot \Phi} - \frac{R_A}{k^2 \cdot \Phi^2}$$

FIGURA 2.2. Característica exterior d'una màquina de CC d'excitació independent



Aquesta és l'equació d'una recta, que podeu veure representada a la figura 2.2 per a dues tensions d'entrada diferents.

Per tant, si mantenim el motor en buit, la I_A es manté constant i si V_T no varia, el flux es manté també constant, i per tant, la velocitat depèn de la tensió.

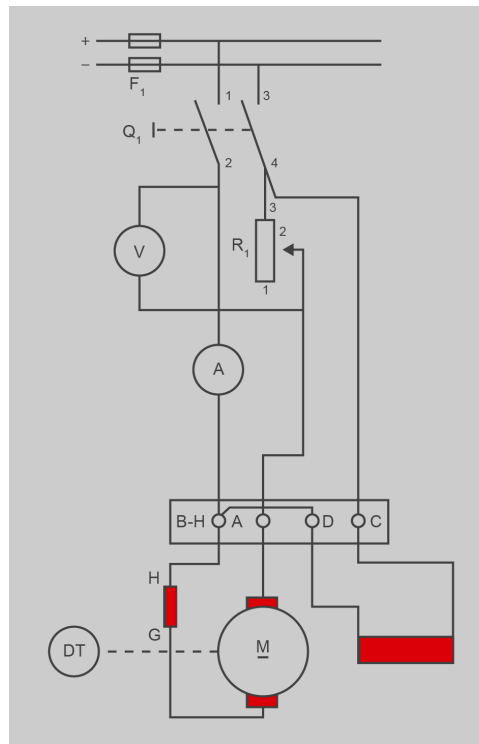
El circuit per efectuar l'assaig és el que es mostra a la figura 2.3.

S'acobra l'eix de la màquina de CC a una dinamo tacomètrica per mesurar la velocitat i es va modificant la tensió del rotor amb un reòstat o un autotransformador. El bobinatge de camp s'ha de mantenir a la mateixa tensió durant tot l'assaig. S'efectuen diverses lectures regulars de la tensió en borns i la velocitat que marca la dinamo tacomètrica i amb els valors trobats es pot dibuixar la corba.

Per efectuar aquest assaig es necessiten els materials següents:

1. Motor de CC que volem assajar
2. Voltímetre
3. Dinamo tacomètrica
4. Autotransformador o resistència variable
5. Contactors per muntar el circuit de maniobra

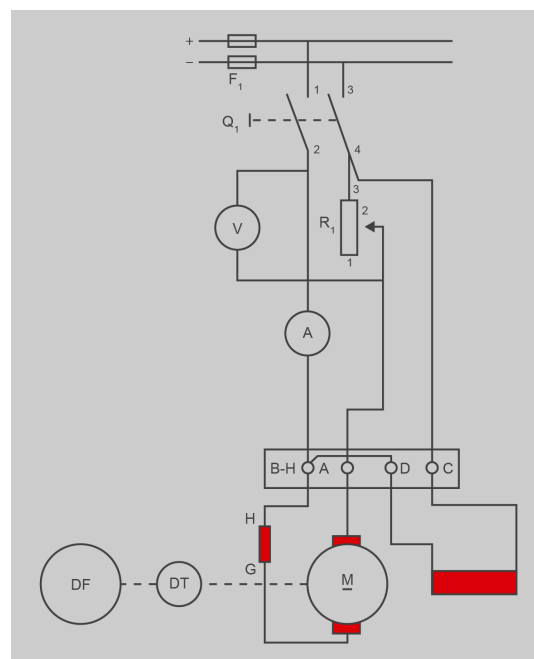
FIGURA 2.3. Circuit de potència per fer l'assaig de regulació de velocitat d'una màquina d'excitació independent



2.1.3 Assaig d'una màquina d'excitació independent en càrrega

L'assaig d'una màquina d'excitació independent en càrrega ens proporcionarà la corba de sortida, o sigui, la velocitat del motor en funció del parell carregat a l'eix. Aquest parell es pot aconseguir amb una *dinamo fre* connectada a l'eix del motor.

FIGURA 2.4. Circuit de potència per fer l'assaig en càrrega d'una màquina d'excitació independent

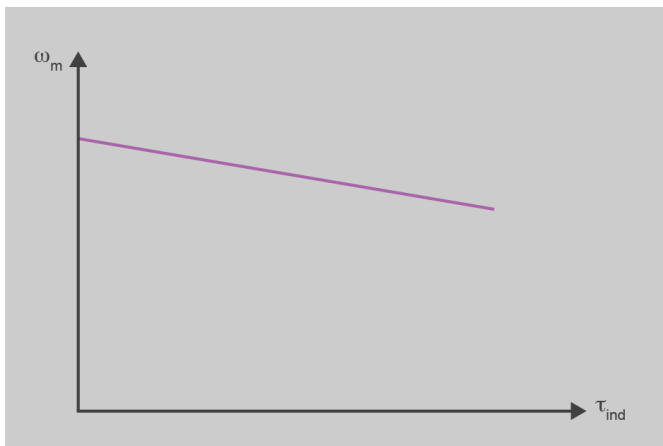


Hi ha diferents tipus de dinamo fre, però totes permeten regular el parell a l'eix i proporcionen una mesura d'aquest parell.

El circuit per efectuar l'assaig és el que es mostra a la figura 2.4.

S'acobra l'eix de la màquina a una dinamo tacomètrica per mesurar la velocitat i a la dinamo fre. Es connecta el motor a la xarxa i es va variant el parell a l'eix. Es fan diverses lectures dels valors del parell i la velocitat que dóna la dinamo tacomètrica i es grafien en una taula de doble entrada. En la figura 2.5 podeu veure una representació de les dades obtingudes.

FIGURA 2.5. Variació de la velocitat de sortida d'un motor de CC d'excitació en paral·lel en funció del parell a l'eix



Per efectuar l'assaig necessitem:

1. Motor de CC que volem assajar
2. Motor asíncron
3. Voltímetre
4. Dinamo tacomètrica
5. Amperímetre
6. Autotransformador o resistència variable
7. Contactors per muntar el circuit de maniobra

2.2 Elaboració de plans de manteniment

La periodicitat del manteniment sol estar marcada per les dades del fabricant i per les condicions d'utilització o el règim de treball de la màquina. Es fixa entre 1.000 i 3.000 hores de treball.

Com en la resta de màquines, el manteniment ha de ser preferentment preventiu, abans que es presenti una avaria en la màquina. L'objectiu és assegurar la continuïtat i la qualitat de la producció.

2.2.1 Elements comuns que cal inspeccionar

Tot i que cada màquina té les seves pròpies necessitats de manteniment, es pot generalitzar un conjunt d'actuacions que cal portar a terme en la revisió de les màquines de CC:

1. Inspecció externa i presa de dades de la placa de característiques
 - Comprovar visualment l'estat de la pintura, zones recremades, conductors, etc.
2. Control de la connexió de la placa de borns
 - Comprovar visualment les connexions per veure defectes com un aïllant recremat, connexions soltes, etc.
3. Comprovació de vibracions
 - Si la màquina fa soroll excessiu en girar, sol ser a causa dels coixinets desgastats o a les fixacions a la bancada. Amb la màquina parada es pot forçar l'eix amb les mans alternativament cap a un costat o cap a l'altre i en sentit ascendent i descendent. Si es mou, vol dir que s'han de canviar els coixinets. Si veiem que es mou l'encolatge, s'han de collar les fixacions a la bancada.
4. Comprovació de l'estat de les escombretes i els portaescombretes
 - Es fa de manera visual. Es comprova que les escombretes no estiguin excessivament gastades i els portaescombretes ben fixats. Si en mesurar la resistència del rotor dóna un valor excessiu, pot ser degut al mal contacte d'una de les escombretes.
5. Control de les parts mecàniques del motor, com el xaveter, l'eix, etc.
 - Es fa de manera visual en una primera aproximació. Si la màquina vibra pot ser a causa dels rodaments, les fixacions o el desalineament de l'eix. En aquest darrer cas s'ha de desmuntar la màquina per reparar-la al taller.
6. Verificació de continuïtat i aïllament dels bobinatges de l'estator i del rotor
 - Es pot usar un òhmmetre per comprovar la continuïtat dels bobinatges. S'ha de comprovar cada bobinatge per separat tenint en compte que els bobinatges d'excitació independent i en paral·lel tenen una resistència superior als d'excitació en sèrie i rotor. En algunes màquines el

bobinatge en paral·lel i independent poden tenir uns cents d'ohms, mentre que el bobinatge en sèrie i del rotor poden tenir de 0,2 a 20 ohms. Si es troba una discontinuïtat s'han de comprovar prèviament les escombretes i les soldadures.

- Es pot utilitzar un megòhmetre per comprovar els aïllaments a massa de cada bobinatge i entre totes les parelles de bobinatges. La falla d'un aïllant es pot trobar per inspecció visual. Si no es veu cap part de l'aïllant deteriorada s'ha de desmuntar el bobinatge sencer i bobinar-lo de nou. És una de les fallades més difícils de localitzar.

7. Verificació de curtcircuits a les bobines de l'estator, rotor i col·lector de delgues

- Un curtcircuit al rotor fa que la màquina giri lentament o no giri. A més, s'observa un increment del corrent. Si es desmunta en calent, es pot observar on és el curtcircuit per la diferència de color a la bobina en curtcircuit respecte de les altres. Si la mesurem amb l'òhmmetre, podem observar una resistència menor que a la resta de bobines.
- Un curtcircuit a l'estator fa que hi hagi una disminució del flux, i la màquina reacciona incrementant molt la seva velocitat. La intensitat s'incrementa excessivament fins i tot en buit, i es poden observar guspises a les escombretes. La bobina en curtcircuit presenta una resistència menor i es pot observar, encara que no sempre, la diferència de color sobre el bobinatge que produeix l'escalfament degut al curtcircuit.
- Si el curtcircuit es produeix al col·lector de delgues, els símptomes seran semblants als del curtcircuit del rotor, i es pot observar la diferència de color a les delgues curtcircuitades.

8. Tornejament del col·lector

- Si el col·lector de delgues està gastat o lleugerament deformat, es pot passar per un torn per deixar-lo totalment cilíndric. Acabat de tornejat, s'han de comprovar els aïllaments entre delgues.

9. Impregnació amb vernís antiarc dels bobinatges

10. Neteja de totes les parts del motor

11. Canvi de rodaments i juntes

- Per al canvi de rodaments s'usa una eina especial extractora de rodaments, ja que entren a pressió. Un cop canviats, cal engrèixar-los.

12. Muntatge del motor

És evident que moltes de les operacions habituals de manteniment s'han de fer amb el motor parat i en alguns casos significa que s'ha de parar la línia de producció. Els costos poden ser grans. És, per tant, important calibrar correctament el nombre de tècnics que han de fer les operacions de manteniment i el seu grau d'especialització.

L'hàbit del treball en equip és una eina imprescindible per obtenir una bona intervenció de manteniment. Una bona planificació ha d'estudiar acuradament totes aquelles operacions que es poden fer amb la màquina en funcionament per tal de parar la producció el menor temps possible.

Mesures com tensions i intensitats, velocitat, anàlisi de vibracions, rodaments i tacodinamo es poden fer normalment amb la màquina en marxa. En aquests casos s'han d'extremar totes les mesures de seguretat.

2.2.2 Documentació en el manteniment de màquines elèctriques de CC

En el manteniment d'un motor de CC es poden fer servir molts tipus de formularis. Un de genèric pot ser el de la figura 2.6.

FIGURA 2.6. Formulari de manteniment d'una màquina de CC

Empresa:	Revisió manteniment màquina cc:
Data:	Marca màquina:
Referència:	Fabricant:
Potència:	Placa de borns:
Temps:	
Inductor:	Induit:
Tensió:	Tensió:
Intensitat:	Intensitat:
Temperatura: A	Temperatura:
Aïllament:	Rodaments:
Inductor:	
Induit:	Vibració:
Fixacions:	Elements a substituir:
Escombretes:	
Col·lector:	
Xavetes:	
Eix:	
Estat del vernís:	
Estator:	
Rotor:	
Observacions:	Data:
	Signatura:
	Nom del tècnic responsable:

2.2.3 Canvi de bobinatge

Abans de treure un bobinatge de la màquina de CC cal prendre'n les dades per a què es pugui reproduir amb fidelitat.

Com a norma habitual, es tria una bobina qualsevol i es marca sobre el rotor la ranura on comença i la ranura on acaba, i també les delgues del col·lector on va soldada. S'ha de determinar quin tipus de bobinatge té la màquina, imbricat o ondulat, i el nombre d'espises de cada bobina. Amb un peu de rei es mesura el diàmetre del fil de coure i s'anota el tipus d'aïllant de la ranura. Un formulari per a això pot ser el que es mostra a la figura 2.7.

Si les bobines són emmotllades, cal extreure'n una per prendre les dimensions i fer un motlle per confeccionar les bobines que s'hagin de canviar.

S'ha d'anotar la classe i el tipus d'aïllament de la ranura. Si està deteriorat s'ha de canviar per un de les mateixes característiques que l'original. Si el motor és petit, aquest aïllant ha de sobresortir uns mil·límetres per sobre de la ranura per poder, un cop introduïda la bobina, tancar amb l'aïllant per sobre, envoltant tota la bobina. També s'ha d'aïllar l'eix i les cares frontals del nucli amb paper o cinta aïllant.

FIGURA 2.7. Formulari de dades d'un bobinatge d'una màquina de CC

Empresa:		Bobinat màquina cc:	
Data:		Marca màquina:	
Referència:		Fabricant:	
Placa de borns:			
Potència:			
U_{1n} :			
I_{1n} :			
Bobinat inductor:			
Nombre ranures, $K =$		Espises/Bobina:	
Costats actius per capa, $u =$		Bobines = $K \cdot U =$	
Imbricat	Ondulat		
$y =$			
$y_1 =$			
$y_2 =$			
Aïllant:			
Diàmetre cable:			
Observacions:	Esquema simplificat:	Data:	Signatura:
			Nom del tècnic responsable:

2.2.4 Eines per al manteniment preventiu

Habitualment les eines s'han de traslladar al lloc on és la màquina. Per això s'han de seleccionar les imprescindibles. Un equipament mínim pot constar del següent:

- Tacòmetre per mesurar la velocitat (figura 2.8).
- Megaòhmetre per mesurar l'aïllament (figura 2.8).
- Multímetre d'escala adient a les tensions i intensitats de la màquina i comprovador de continuïtat (figura 2.9).
- Joc de tornavisos de dimensions adients.
- Joc de claus de dimensions adients.
- Eines per reparar les connexions elèctriques.
- Material aïllant.

FIGURA 2.8. Tacòmetre digital i Megòhmetre digital (amb multímetre).



Imatges: Gordon Cornell a <http://goo.gl/nWlh2> i cortesia de <http://www.pce-iberica.es/>

FIGURA 2.9. Multímetre Digital.



Imatge: Curious_Gregor a <http://goo.gl/CzN7l>

- Estany i soldador.
- Equip de greixar.

Si es troba una avaria molt greu, per efectuar la reparació corresponent caldrà desmuntar la màquina i portar-la al taller, on es disposa de més eines i de cavallets i grues per a la manipulació de les parts més pesants.

2.2.5 Tècniques de manteniment de màquines elèctriques rotatives de corrent continu

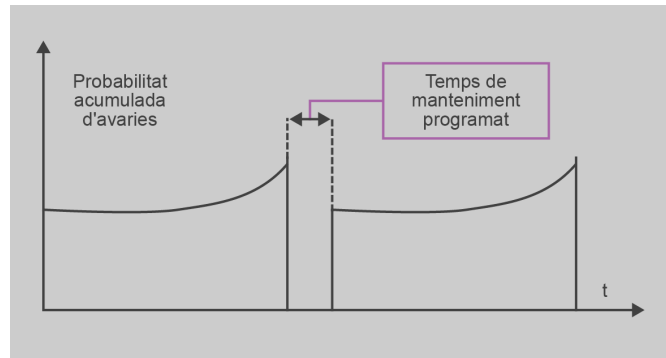
El manteniment de les màquines de CC s'ha de fer de manera preventiva, abans que aparegui una avaria que obligui a l'aturada no programada de la producció i, sovint, a reparacions difícils i cares. Sovint en la documentació entregada pel fabricant s'indica la periodicitat del manteniment i les operacions que s'han de fer. Si la màquina ha de treballar amb un règim dur de funcionament, com poden ser sobrecàrregues, aturades i arrencades freqüents o atmosferes contaminades, cal ajustar la periodicitat i el nivell de les intervencions per assegurar-ne un bon manteniment.

Segons la finalitat del manteniment, aquest pot ser:

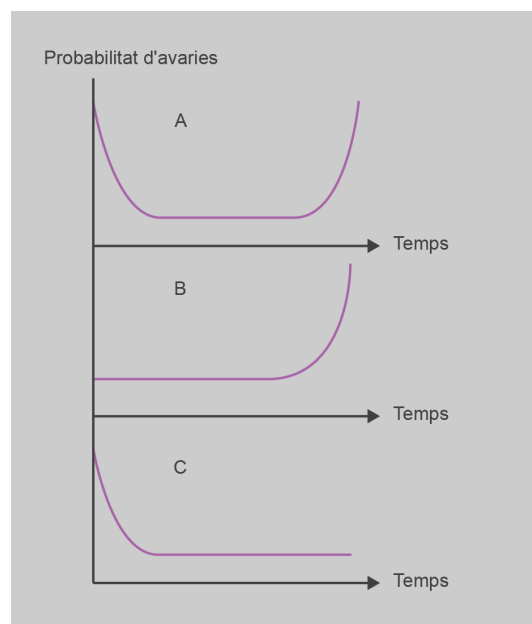
- **Correctiu**, per retornar la màquina al seu estat normal després d'una avaria.
- **Preventiu**, per evitar l'avaria en una màquina.

El manteniment preventiu sol ser planificat i periòdic, mentre que el correctiu acostuma ser un manteniment no planificat, i s'ha de portar a terme en el moment que es produeix l'avaria de la màquina. Sovint es tracta d'una intervenció d'emergència, sota la pressió de reduir el temps de caiguda de la producció. Es tracta de substituir els elements espatllats i retornar la màquina a l'estat de funcionament el més aviat possible. En certs casos es pot, a més de substituir les peces defectuoses, eliminar la causa que ha produït l'avaria.

En el manteniment preventiu, concebut per a màquines complexes sotmeses a fortes variacions de les condicions de càrrega, els fabricants recomanen periodicitats òptimes de manteniment basades sobretot en mostres estadístics fets sobre els seus productes. A la figura 2.10 podeu veure que el moment òptim per efectuar l'operació de manteniment és quan comença a incrementar-se la probabilitat d'una avaria a la màquina.

FIGURA 2.10. Probabilitat acumulada d'avaries en màquines petites

La idea és que una màquina, després d'efectuada la intervenció de manteniment, torni al mateix estat que quan es va adquirir i, per tant, comença un nou cicle de la mateixa durada que l'anterior. Aquest model funciona correctament per a màquines relativament petites com màquines eina, màquines per a compressors, etc., però no en sistemes complexos en què la probabilitat que apareguin avaries pot dependre d'altres factors i pot tenir diverses formes.

FIGURA 2.11. Probabilitat acumulada d'avaries en màquines complexes

Per exemple, a la figura 2.11 la corba A mostra un sistema en què la probabilitat d'avaries és més alta al principi, quan el sistema encara és nou i no està perfectament acoblat, baixa durant un període gran de temps i es torna a incrementar quan la màquina comença a esgotar el seu cicle vital.

En el cas B no hi ha el període inicial d'adaptació i les avaries es comencen a incrementar al final de la vida de la màquina, i en el cas C només hi ha una gran probabilitat d'avaries en el període d'adaptació, i en la resta, fins a completar el període de vida de la màquina, la probabilitat d'avaries és molt petita. Es poden tenir altres perfils de probabilitats d'avaries segons les circumstàncies concretes de cada instal·lació.

El **manteniment predictiu** es pot definir com el seguiment organitzat amb mesurament periòdic de les variables d'estat del sistema i la comparació amb patrons establerts per conèixer el moment en què s'ha d'efectuar el manteniment. O sigui, que es tracta d'un manteniment preventiu però basat en mètodes estadístics que determinen períodes d'intervenció que poden variar segons el perfil de la corba de probabilitat d'avaries-temps.

2.2.6 Avaries més importants en les màquines de CC

Les màquines de CC presenten una tipologia d'avaries semblant a les altres màquines rotatòries en les parts comunes com els bobinatges o els rodaments. No obstant això, s'han de tenir en compte les parts que són específiques d'aquestes màquines, com per exemple les escombretes.

Deteriorament dels coixinets

Els rotors de les màquines de CC es recolzen sobre rodaments que en faciliten el moviment rotatori (figura 2.12). Aquests rodaments estan sotmesos a fricció i vibracions produïdes en el funcionament normal de la màquina, per defectes de la màquina o algun agent extern. Com són components amb una taxa de fallades molt elevada, s'han desenvolupat diferents tècniques per analitzar-los i diagnosticar-les.

FIGURA 2.12. Rodament de boles com els utilitzats en màquines de CC

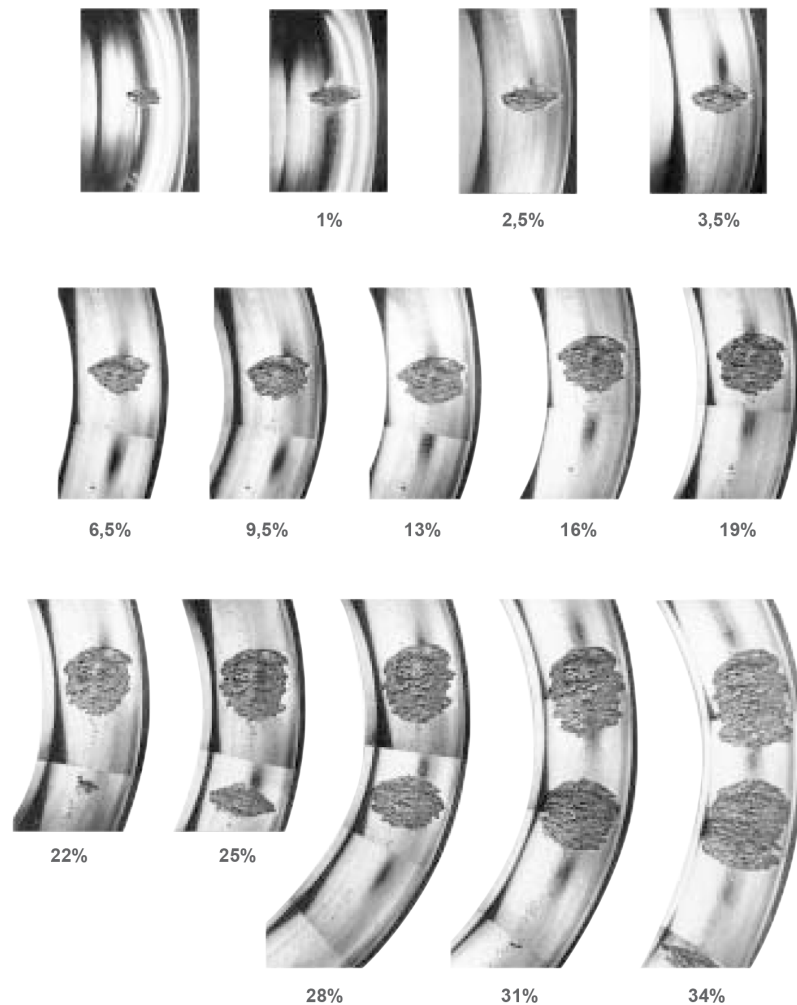


Imatge: patrickd a <http://goo.gl/baLfp>

Els rodaments de boles són els més utilitzats en motors de petita i mitjana potència. Aquest tipus de rodaments generen una sèrie de vibracions que són característiques de la seva geometria, el nombre de boles i la velocitat de gir de la màquina. Típicament produeixen vibracions de freqüències compreses entre la freqüència de pas de l'element rodant (nombre de cops que l'element rodant passa per un punt de la pista interior o exterior) i 7 cops aquesta freqüència. En els rodaments nous també es produeixen aquestes vibracions, encara que d'amplitud molt petita. Si es produeix una fallada en el rodament, l'amplitud de la vibració s'incrementa, més com més severa sigui la fallada del rodament. De l'estudi de les vibracions es pot

determinar no solament quan s'ha de canviar el rodament, sinó la part que ha fallat. La figura 2.13 mostra l'evolució d'una avaria en l'arc interior d'un rodament.

FIGURA 2.13. Evolució dels danys causats per fatiga de l'arc interior d'un rodament



Les vibracions relacionades amb la fallada del rotor se situen en un rang de freqüències comprès entre 0,25 i 3 cops la velocitat de gir del motor. Moltes fallades dels rodaments estan relacionades amb el desequilibri o la desalineació mecànica del rotor.

El 90% de les fallades dels rodaments estan relacionades amb esquerdes que es produeixen en les pistes dels rodaments mateixos i que estan dintre del rang de freqüències mencionat.

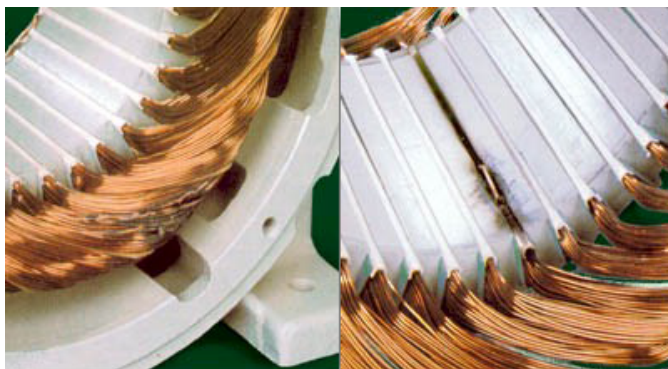
Els rodaments tenen un temps de vida limitat sobretot per la fatiga dels elements que el constitueixen. Malauradament, en moltes instal·lacions industrials els rodaments treballen en condicions extremes i es pot produir una ruptura prematura abans d'arribar al límit de la seva vida útil. A la figura 2.14 podem veure una mostra de les avaries típiques de rodaments i les causes que les produeixen.

FIGURA 2.14. Avaries en els rodaments i causes que les produeixen

Característica	Causes típiques de danys als rodaments									
	Sol·licitacions durant el servei			Influències de l'entorn				Lubricació		
	Càrrega excessiva o insuficient	Vibracions	Velocitats de rotació elevades	Pols, brutícia	Medis agressius, aigua	Calor externa	Pas de corrent	Lubricant inadequat	Manca de lubricant	Lubricació excessiva
a) Comportament de servei irregular										
Funcionament irregular		■		■	■		■	■		
Soroll no habitual	■	■		■	■		■	■	■	
Comportament alterat de la temperatura	■		■			■		■	■	■
b) Aspecte dels components del rodament desmuntat										
1 Impressions de cossos estranys				■						
2 Danys causats per fatiga	■			■		■		■	■	
3 Marques produïdes a les aturades		■								
4 Cràters de fusió i estries							■			
5 Danys per lliscament	■								■	
6 Impressions produïdes per cossos rodants / estries longitudinals	■									
7 Gripatge	■		■					■	■	
8 Danys per desgastament				■				■	■	
9 Danys per corrosió					■			■		
10 Danys per escalfament			■			■		■	■	■
11 Trencaments										
12 Danys per oxidació de contacte (<i>fals brinelling</i>)		■								

Manteniment del bobinatge de les màquines de CC

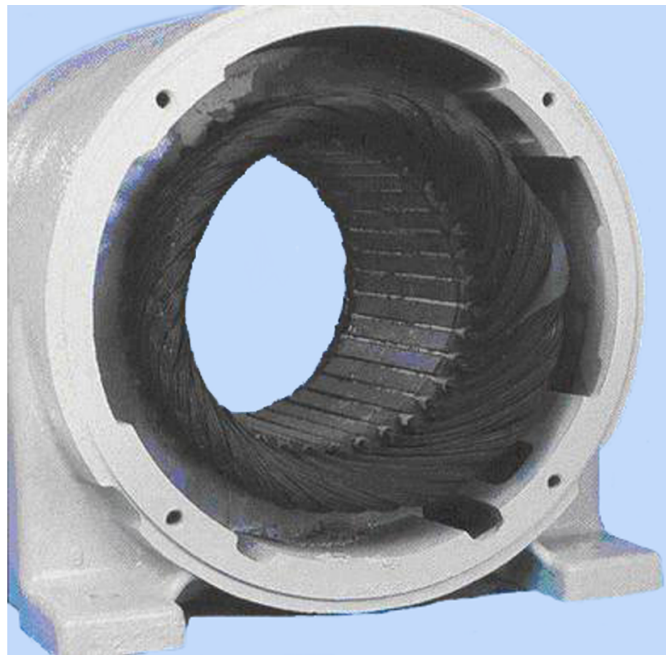
Tot i que els rodaments i les escobretes són les parts de la màquina que causen més intervencions de manteniment, el bobinatge és una part fonamental de la màquina que cal tenir en bon estat, ja que substituir-lo és una operació que requereix molt temps i implica una forta despesa econòmica.

FIGURA 2.15. Deteriorament d'una part del bobinatge

El bobinatge envelleix i es deteriora en el funcionament normal de la màquina, per haver patit un accident o per defecte de fabricació. Les principals causes són:

- En funcionament normal: la humitat s'acumula al dielèctric del bobinatge, i en el moment de la posada en marxa, l'evaporació ràpida amb el calor provoca desprendiments de part de l'aïllant: descamació (figura 2.15 esquerra).
- Durant la marxa: sobretot a causa de l'acumulació de greixos i contaminants. A temperatures altes els greixos llisquen més fàcilment per sobre dels conductors, fixen els contaminants i provoquen el deteriorament de l'aïllant (figura 2.15 dreta).
- Causes accidentals: degudes a sobreescalfaments, per un funcionament defectuós de la ventilació o sobrecàrregues prolongades (figura 2.16). Les sobretensions i els esforços per arrencades successives.
- Defectes de disseny: desgast de l'aïllament dintre de la ranura, per fenòmens de ressonància de la reacció d'induit.

FIGURA 2.16. Bobinatge cremat completament pel bloqueig del rotor



En les màquines elèctriques, l'augment de la temperatura en incrementar la transformació de potència és una de les causes d'avaries pel deteriorament de l'aïllant. Aquest increment de la temperatura es pot modificar en funció de les classes de servei, que poden ser:

- **S1:** servei continu. La màquina treballa a règim constant, o sigui, que arriba a una temperatura constant.
- **S2:** servei temporal o de curta duració. La màquina treballa a règim constant un període de temps breu, o sigui, que no arriba a establitzar la temperatura.

- **S3, S4, S5:** serveis intermitents. Sèrie contínua dels mateixos cicles compostos de períodes de càrrega constant (**S3**), incloent-hi el període d'arrencada (**S4**) i arrencades i parades (**S5**). Mai no s'arriba a una temperatura constant.
- **S6, S7 i S8.** Iguals que els anteriors, però amb períodes de repòs interposats.

L'aïllament és el material que separa les parts de la màquina que estan a diferent potencial. És una de les parts més sensibles de la màquina, ja que es deteriora més fàcilment que els conductors.

Es defineixen els aïllaments en funció de la temperatura màxima que poden suportar de manera permanent, com es pot veure a la taula 2.1.

TAULA 2.1. Classes d'aïllament i temperatura màxima que suporten

Classe d'aïllament	Y	A	E	B	F	H	C
T _{màx} [°C]	90	105	120	130	155	180	>180

Així, en funció de la classe d'aïllament que tingui la màquina i del tipus de servei a què estigui sotmesa, es tindrà una necessitat de manteniment diferent. Aquest manteniment estarà en funció de la complexitat de la màquina, i per tant del perfil de la corba de probabilitat d'aparició d'avaries en funció del temps.

2.3 Normativa i reglamentació

Les màquines elèctriques tenen parts giratòries i que poden estar sotmeses a tensió. A més, algunes parts es poden escalfar a temperatures que poden superar els 100 °C. Per això totes les operacions de transport, posada en marxa i manteniment han d'estar fetes per personal amb la qualificació tècnica adient i respectant les indicacions del fabricant, així com tota la normativa vigent en el moment de dur-se a terme l'operació.

2.3.1 Normativa bàsica

Com a norma general s'han de complir les normes del **Reglament Electrotècnic per a Baixa Tensió** que afectin la instal·lació i, en particular, les **ITC BT 47 i 48** que especifiquen com s'ha de fer la instal·lació de màquines elèctriques en general i totes les directives de seguretat de baixa tensió com la **73/23/EEC**.

Per a cada situació s'han de tenir en compte les normes nacionals, locals i específiques de la instal·lació. La manipulació indeguda pot ocasionar danys

personals, deteriorar la màquina o les instal·lacions on es connecti (**EN 60034; EN 50110-1/VDE 0105**).

Les màquines estan dissenyades per utilitzar-les en instal·lacions industrials i comercials, però dintre d'aquestes hi pot haver zones perilloses o amb atmosfera explosiva. En aquest cas s'han d'utilitzar màquines especialment dissenyades per a aquesta circumstància. En locals de concurrència pública, han de complir requisits més estrictes, com disposar d'envoltants que evitin la possibilitat de contactes amb els dits dels nens.

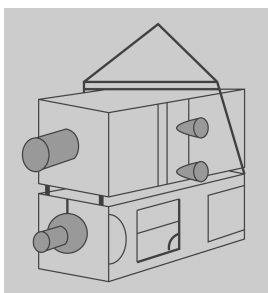
S'ha de respectar sempre la temperatura de magatzematge i la d'utilització (habitualment entre -5 i 40 °C), i també l'altitud de l'emplaçament (habitualment per sota de 1.000 m sobre el nivell del mar). Algunes d'aquestes circumstàncies no estan especificades a la placa de característiques, però el fabricant les sol tenir publicades en paper o a Internet. Fins que no s'hagi comprovat la conformitat amb totes les directives de seguretat (Directiva de maquinària **89/392/EEC**, **EN 60 204-1** i Directiva de baixa tensió **73/23/EEC**), no s'ha de posar en marxa la instal·lació de la màquina.

Respecte a la compatibilitat electromagnètica, s'ha de complir tota la reglamentació que afecti el lloc on es munta i en general la Directiva 89/336/EEC. El muntador de la instal·lació ha de cuidar de detalls com la separació de línies de dades o control, la utilització de cables apantallats i tenir en compte les instruccions del fabricant dels aparells electrònics de control.

2.3.2 Normes generals

Tot i la normativa bàsica que ha de complir tota instal·lació de màquines elèctriques de CC, hi ha unes situacions comunes de les màquines que solen tenir requisits similars, com són el transport, la situació en el lloc de treball i la posada en marxa.

Transport de màquines elèctriques



Màquina preparada per transportar-la

Abans d'iniciar qualsevol transport de la màquina s'ha d'assegurar que les parts mecàniques que la suporten estan en bones condicions, amb els cargols collats al parell indicat pel fabricant, les parts mòbils ancorades acuradament i cap peça solta que es pugui desprendre. També s'ha de comprovar que el pes de la màquina no superi el que pot suportar el mitjà de transport que s'utilitza.

Per al transport de les màquines s'han d'utilitzar exclusivament les nanses d'elevació destinades a aquesta finalitat.

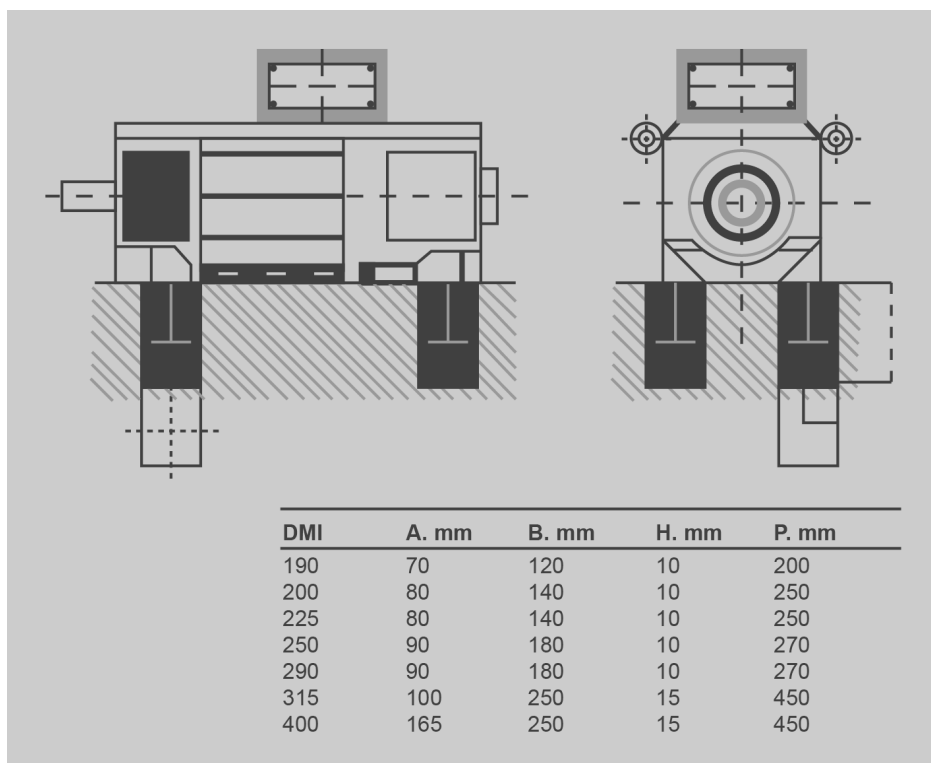
Emmagatzematge i instal·lació de màquines elèctriques

Durant el període d'emmagatzematge les màquines s'han de mantenir en un lloc sec, sense pols i sense vibracions que puguin deteriorar els rodaments.

En el lloc de treball, la màquina s'ha d'instal·lar amb la posició indicada pel fabricant, ancorada sobre una base sòlida i ben alineada. Una bona pràctica és fer girar el motor manualment i escoltar algun soroll anormal després del muntatge i l'alineació. Si la transmissió és amb corretja, s'ha d'evitar una tensió excessiva.

En la figura 2.17 podeu veure les fixacions d'una màquina a la bancada, recomanades pel fabricant.

FIGURA 2.17. Detall de la fixació d'una màquina



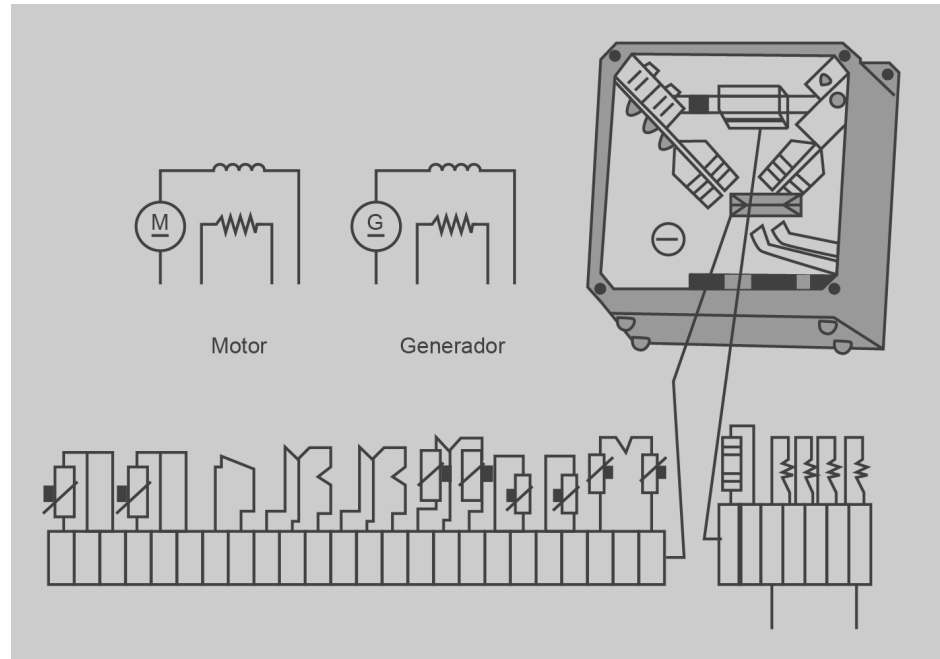
Una màquina mal fixada produeix sorolls i vibracions que n'afecten el funcionament i produeixen un desgast prematur. Es redueix el temps entre manteniments i s'incrementa la despesa.

Posada en marxa de màquines elèctriques de CC

Abans de la posada en marxa, s'ha d'assegurar que la màquina estigui ben equilibrada mecànicament i que les entrades i sortides d'aire de ventilació no estiguin obstruïdes. S'ha d'evitar que li toqui directament la sortida d'aire de la ventilació d'altres aparells pròxims. Si l'aire del lloc d'utilització de la màquina està contaminat químicament, pot afectar negativament la commutació i la duració de les escobretes.

Les màquines de CC tenen una caixa de terminals on es connecta l'alimentació per al funcionament. Totes les connexions elèctriques s'han de fer dintre d'aquesta caixa, collades amb el parell indicat pel fabricant. En funcionament normal, aquesta caixa ha d'estar tancada i, si és el cas, complir amb el grau d'estanquitat que indiqui el fabricant (figura 2.18).

FIGURA 2.18. Caixa de connexions d'una màquina de CC



Abans de la posada en marxa s'ha de tenir en compte que tot estigui en perfecte estat, sobretot que s'hagi retirat l'ancoratge de les peces mòbils per al transport, les preses a terra connectades, les parts mòbils ben equilibrades i els rodaments plens de greix. Tot l'equip de protecció ha d'estar operatiu, en especial les evolvents ben posades i les connexions elèctriques inaccessibles si no s'han de fer mesures.

Durant la posada en marxa s'ha de comprovar que la temperatura dels rodaments no pugi excessivament (ha d'estar per sota de 80 °C), que no s'escoltin sorolls anormals. També s'ha de comprovar que els instruments elèctrics mesurin valors normals i que no hi hagi un nivell excessiu de vibracions. El fabricant acostuma a indicar els valors que es poden considerar dins la normalitat.

3. Maniobres en els motors de corrent continu

Les maniobres més importants d'un motor de CC són l'arrencada i la variació de velocitat. Segons les classes de servei, aquestes maniobres es poden repetir molts cops i posen el motor en un règim transitori que dura més o menys en funció de les característiques elèctriques del motor i mecàniques de la càrrega. Sovint en aquest estat transitori es produeixen intensitats i parells molt grans que poden distorsionar el sistema elèctric o mecànic, i s'han de limitar els seus efectes. Per exemple, el reglament elèctric de baixa tensió limita la relació de la intensitat d'arrencada respecte a la nominal del motors en funció de la seva potència, amb la finalitat de no distorsionar excessivament les línies d'alimentació durant la maniobra. És responsabilitat de l'instal·lador disposar de circuits d'arrencada que compleixin aquesta limitació.

3.1 Arrencada dels motors de CC

En el moment d'arrencar un motor de CC es poden produir grans intensitats pel fet que en partir del repòs ($\omega_m = 0$), la força contraelectromotriu $E_A = 0$, i per tant la intensitat està únicament limitada per la R_A , la resistència del bobinatge del rotor, que sol ser molt petita.

Considerem un motor de $V_T = 300$ V, amb $R_A = 0,2 \Omega$. En el moment d'arrencar hi passarà una intensitat.

$$I_{arr} = \frac{V_T - E_A}{R_A} = \frac{300 - 0}{0,2} = 1.500 \text{ A}$$

El reglament de baixa tensió limita les intensitats d'arrencada dels motors per l'efecte que poden tenir a la xarxa elèctrica. Per altra banda, els motors de CC s'han de protegir de possibles eventualitats que puguin fer malbé el motor o la instal·lació a la qual es connecten. En particular s'han de protegir contra el següent:

1. Danys produïts per curtcircuits o rotor parat
2. Danys per sobrecàrregues prolongades
3. Danys per I_{arr} excessives

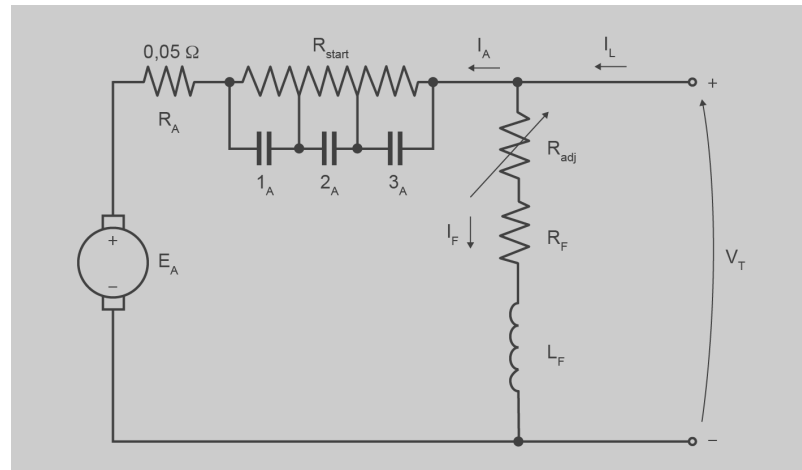
Una possibilitat per disminuir I_{arr} és interposar una resistència en sèrie amb el bobinatge per limitar aquesta intensitat al valor desitjat fins que el motor comenci a girar i faci que E_A sigui suficientment gran per limitar la I_{arr} al valor desitjat.

Aquesta resistència consumirà una potència elevada i, per tant, només s'ha de connectar al moment de l'arrencada i després s'ha de treure del circuit; per tant,

no s'ha d'utilitzar com un mètode de regulació de velocitat en el cas de motors amb potències grans, pel seu cost econòmic.

Habitualment aquesta resistència està formada per una sèrie de trams que es van curtcircuitant a mesura que el motor va adquirint més velocitat. D'aquesta manera s'optimitza el temps d'arrencada d'un motor. La figura 3.1 mostra aquestes resistències.

FIGURA 3.1. Resistències en sèrie amb l'induït i comptades per controlar l'arrencada



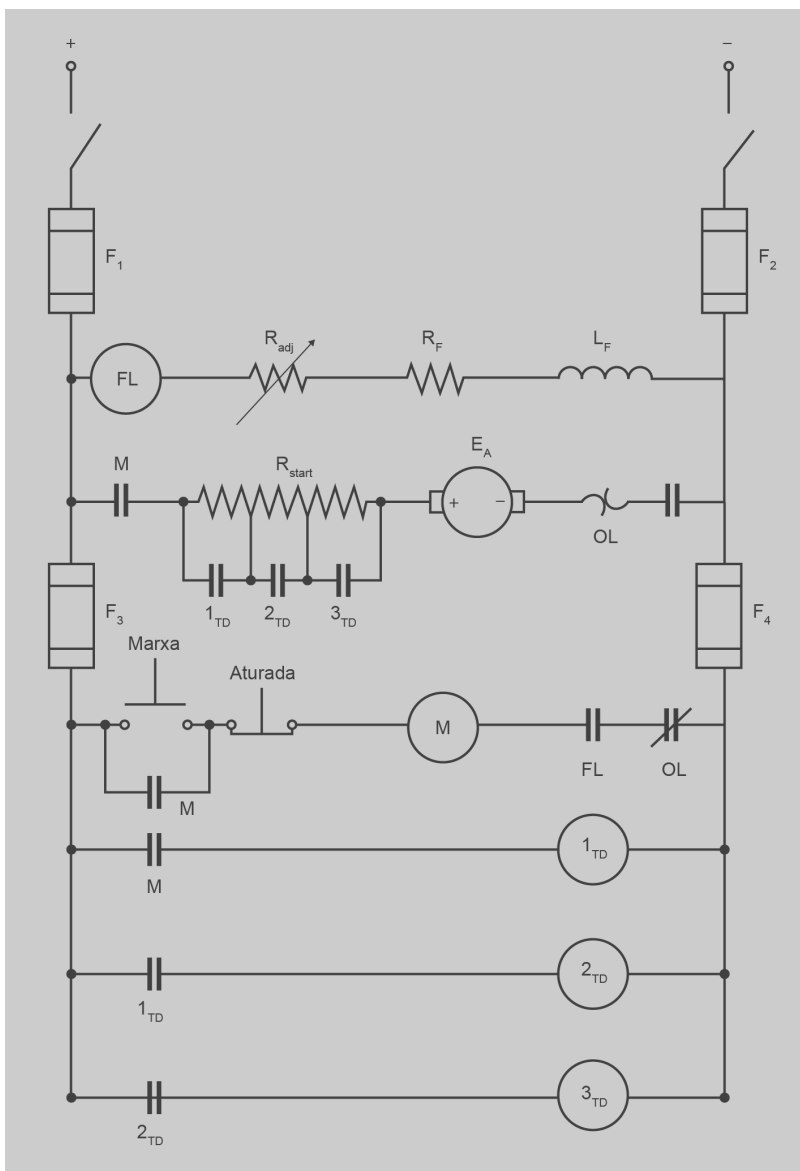
El control del circuit d'arrencada que faci que es tanquin els contactes 1_A , 2_A i 3_A pot ser un PLC (autòmat programable) o un circuit amb contactors i temporitzadors clàssic. A la figura 3.2 es mostra un possible circuit amb contactors.

Com podeu observar a la figura 3.2, el circuit sencer està protegit amb dos fusibles F_1 i F_2 . Les dues primeres línies horitzontals representen el motor de CC. En el circuit de camp podem veure el cercle marcat amb FL que representa un contactor de pèrdua de camp. Un contacte d'aquest contactor el podem veure en sèrie amb el motor de CC, de manera que si s'obre el circuit d'excitació, es talla el subministrament d'energia al motor, ja que si no, s'embarcaria excessivament. També hi podem veure un relé OL de sobrecàrrega, que es dispara (obre el circuit) si detecta una sobrecàrrega prolongada en el circuit.

El circuit de maniobra està protegit per dos fusibles més, F_3 i F_4 , i consta d'un circuit d'engegada-aturada clàssic. Si es prem el pulsador de marxa, s'engega el motor i es realimenta amb el contacte M, de manera que ja podem deixar de pulsar la marxa i el motor queda funcionant.

A partir del moment que el motor es posa en marxa, comença a temporitzar l' 1_{TD} . Acabada la temporització, tanca el contacte 1_{TD} curtcircuitant el primer tram de la resistència d'arrencada. En aquest instant comença la segona temporització, que tancarà el contacte 2_{TD} , i el mateix amb la tercera. Un cop acabades les tres temporitzacions, observeu que el motor queda connectat a la tensió d'alimentació i ja queden desconnectats tots els trams de resistència d'arrencada.

FIGURA 3.2. Circuit amb contactors i temporitzadors per al control de l'arrencada del motor de CC



Una versió millorada d'aquest esquema substitueix els temporitzadors per sensors de la velocitat del motor. Això fa que els trams de resistència connectats en sèrie amb el bobinatge del rotor vagin sortint del circuit a mesura que la velocitat del motor vagi arribant al punt exacte que permeti l'extracció del tram corresponent i sigui independent de la velocitat d'acceleració del motor.

3.2 Regulació de generadors de CC rotatius

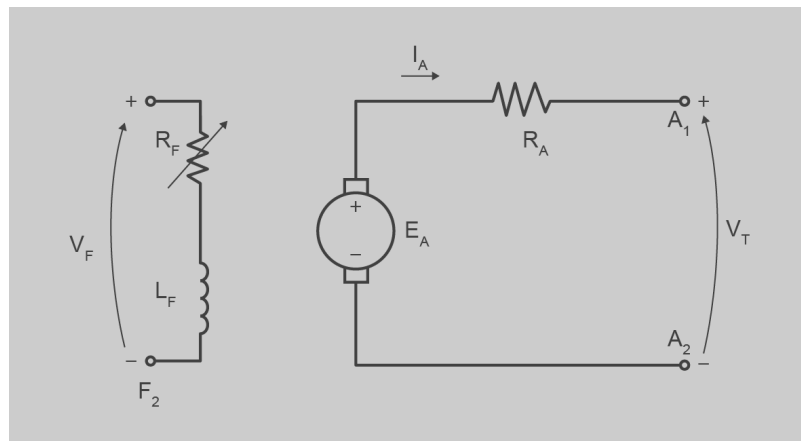
Els generadors de CC són màquines de CC que s'utilitzen com a generadors. Actualment no se solen utilitzar les màquines de CC per subministrar energia elèctrica en forma de CC. Si es necessita aquest tipus d'energia elèctrica en forma de CC se solen utilitzar rectificadors d'estat sòlid per obtenir-la. No obstant això, la màquina elèctrica és reversible, o sigui, que si l'energia s'absorbeix

pels bobinatges en forma d'energia elèctrica i se subministra per l'eix en forma d'energia mecànica tenim un motor, però si fa el camí invers, tenim un generador. És per això que un tramvia que puja un pendent empès per un motor de CC utilitza la màquina com a motor, però quan arriba una baixada, la mateixa màquina es converteix en un generador de CC i ara es pot emmagatzemar l'energia elèctrica que produeix. Per tant, és important conèixer com es comporta i com es pot regular per utilitzar convenientment aquesta energia.

3.2.1 Generadors d'excitació independent

El generadors d'excitació independent són aquells en què els bobinatges inductor i induït estan alimentats per fonts de CC independents.

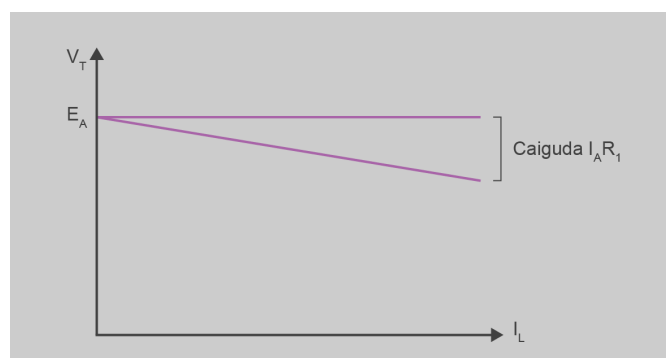
FIGURA 3.3. Generador d'excitació independent



La figura 3.3 mostra el circuit equivalent d'un generador d'excitació independent, d'on es poden deduir les equacions següents:

- $V_T = E_A - R_A \cdot I_A$
- $V_F = I_F \cdot R_F + L_F \cdot \frac{dI_F}{dt}$

FIGURA 3.4. Variació de la V_T amb la I_L



Si es posa càrrega al generador hi passa una $I_L = I_A$ que produeix una caiguda de tensió a la resistència R_A , i disminueix la tensió de sortida. A la figura 3.4 podem veure aquest efecte.

El voltatge en els terminals de sortida es pot modificar variant la E_A , o sigui, el voltatge que subministra el generador en buit.

Atès que $E_A = K \cdot \Phi \cdot \omega_m$, podem variar aquesta tensió modificant la I_F (el Φ) o variar la velocitat ω_m .

La I_F es pot variar modificant la tensió del bobinatge de camp, o modificant el valor del reòstat situat en sèrie amb el circuit d'excitació R_F .

Si disminuïm R_F s'incrementa la I_F :

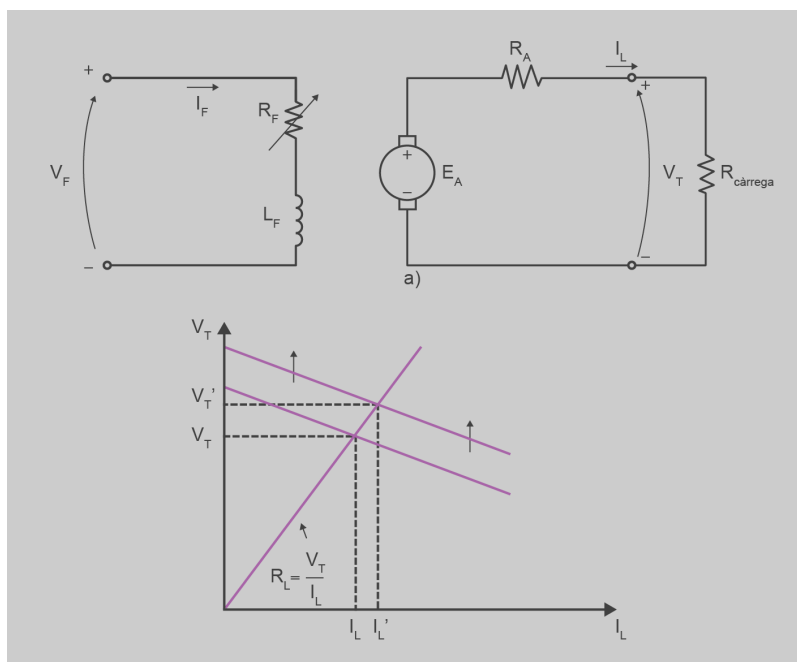
$$I_F \uparrow = \frac{V_T}{R_F \downarrow}$$

Això provoca un increment de E_A , i finalment, un increment de V_T :

$$V_T \uparrow = E_A \uparrow - R_A \cdot I_A$$

La figura 3.5 mostra com s'incrementa el voltatge terminal V_T en incrementar la E_A . Observeu que en incrementar-se la E_A , la recta es desplaça cap amunt i, per tant, la tensió de la càrrega passa de V_T a V'_T .

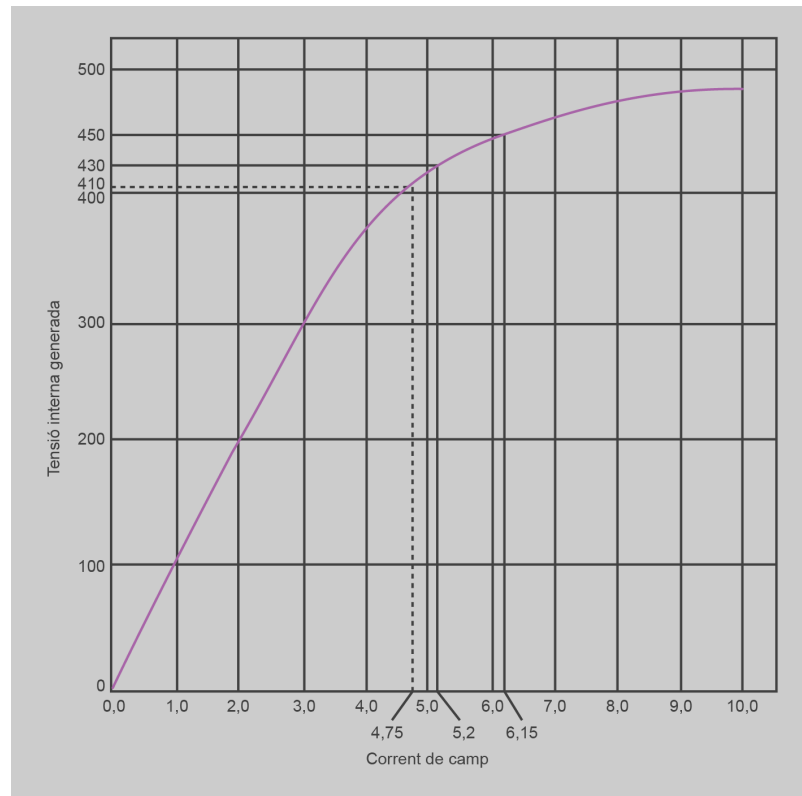
FIGURA 3.5. Variació de la V_T en variar la E_A



Aquesta variació de la E_A es pot considerar lineal mentre la màquina no se satura. Si l'excitació és tal que va més enllà del colze de saturació, veiem que en incrementar I_F es produeix un increment del flux magnètic menor i, per tant, una variació menor de la tensió E_A . Per tant, aquesta regulació només és una regulació lineal en el tram lineal de la corba de saturació. A la figura 3.6 podem veure aquest efecte.

En les aplicacions habituals, l'element que fa girar l'eix del generador de CC no admet gaire regulació de velocitat, i per això la regulació de la tensió en borns mitjançant la variació de velocitat no s'utilitza gaire. No obstant això, com la tensió en buit del generador E_A és proporcional a la velocitat, també la tensió en borns del generador V_T variarà en variar la velocitat de l'eix.

FIGURA 3.6. Corba de magnetització d'una màquina de CC



3.3 Regulació dels motors de CC

En un motor de CC entra energia elèctrica pels bobinatges i surt energia mecànica per l'eix, que podem utilitzar per moure càrregues, posicionar eines, etc. En l'energia mecànica tenim dues magnituds fonamentals que ens interessa conèixer. Són el parell, que simbolitzarem amb la lletra grega τ (tau minúscula), i la velocitat de gir, que simbolitzarem amb la lletra grega ω (omega minúscula). Com el parell és una força per una distància, s'expressa en **N·m** (newtons metre) i la velocitat angular en **rad/s** (radians per segon), tot i que encara és molt utilitzada la unitat de voltes per minut o revolucions per minut. La relació entre les dues unitats de velocitat de rotació és:

$$1 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ volta}}{2 \cdot \pi \text{ rad}} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = \frac{60}{2 \cdot \pi} \text{ rpm}$$

Exemple de conversió d'unitats

Si un motor gira a 1.500 voltes per minut, calculeu la velocitat angular en radians per segon.

Solució

$$1.500 \text{ rpm} \cdot 1 \text{ min}/60 \text{ s} \cdot 2\pi \text{ rad}/1 \text{ volta} = 157,07 \text{ rad/s}$$

Exemple de conversió d'unitats

Si un motor gira a 120 rad/s, calculeu la velocitat en voltes per minut.

Solució

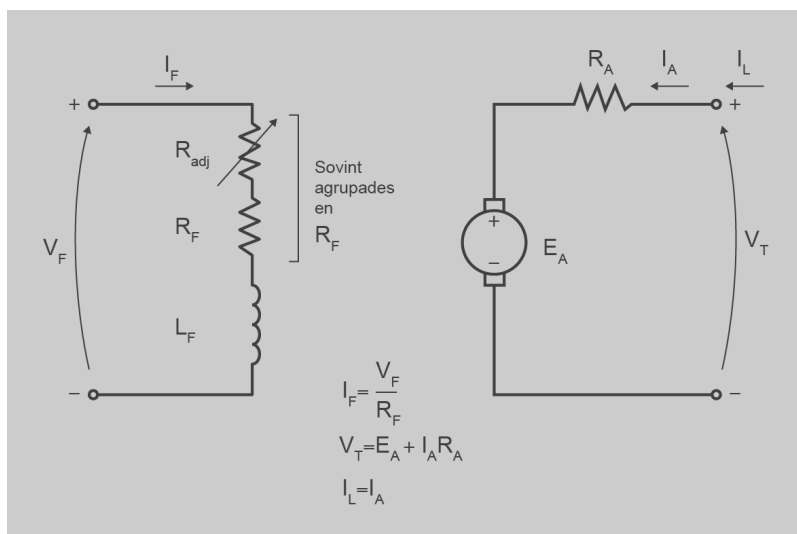
$$120 \text{ rad/s} \cdot 1 \text{ volta}/2\pi \text{ rad} \cdot 60 \text{ s}/1 \text{ min} = 1.145,91 \text{ rpm}$$

3.3.1 Regulació de velocitat en els motors de CC

Habitualment el parell en l'eix del motor està determinat per la càrrega que li posem. En canvi, podem modificar la velocitat de gir de diverses maneres.

Els motors d'excitació independent i d'excitació en paral·lel es comporten de manera similar respecte a la variació de velocitat. En aquest cas ens centrarem en els motors d'excitació independent. A la figura 3.7 podem veure l'esquema equivalent d'aquest motor.

FIGURA 3.7. Circuit equivalent d'un motor de CC d'excitació independent



Per veure com es pot modificar la velocitat, ho fem relacionant les fórmules que descriuen el comportament del motor:

$$V_T = E_A + R_A \cdot I_A$$

Com que:

$$E_A = K \cdot \Phi \cdot \omega_m$$

Podem escriure que:

$$V_T = K \cdot \Phi \cdot \omega_m + R_A \cdot I_A$$

En el cas del motor d'excitació independent, el parell és:

$$\tau_{ind} = K \cdot \Phi \cdot I_A$$

D'on podem extreure el corrent I_A :

$$I_A = \frac{\tau_{ind}}{K \cdot \Phi}$$

Així, en total tenim:

$$V_T = K \cdot \Phi \cdot \omega_m + \frac{\tau_{ind}}{K \cdot \Phi} \cdot R_A$$

d'on podem obtenir una expressió per a la velocitat de gir:

$$\omega_m = \frac{V_T}{K \cdot \Phi} - \frac{R_A}{K \cdot \Phi} \cdot \tau_{ind}$$

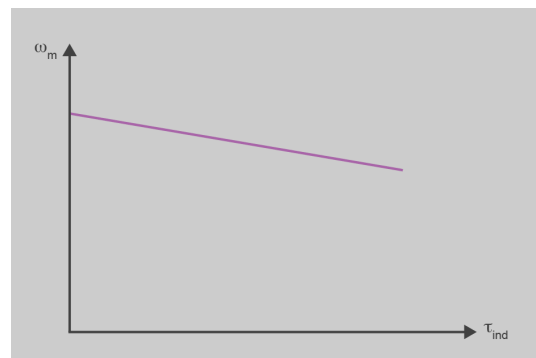
Aquesta darrera equació ens mostra la relació entre la velocitat angular i les variables de les quals depèn. Per tant, podem deduir que per variar la velocitat angular podem modificar els valors de V_T , Φ (o sigui, I_F i R_F) i R_A .

Com R_F és la resistència dels bobinatges del rotor, no es pot modificar directament, però sí que es pot posar una resistència exterior en sèrie. Variant cada una d'aquestes magnituds, tenim una regulació de característiques diferents. La variació de R_A només es pot fer en motors de poca potència o en una regulació molt limitada en el temps.

Variació de la velocitat del motor de CC en variar el parell de càrrega

Si mantenim constant tant la I_F com la V_T , la relació entre la velocitat i el parell és una línia recta. A la figura 3.8 podem veure representada aquesta relació.

FIGURA 3.8. Variació de la velocitat del motor de CC en variar el parell de la càrrega



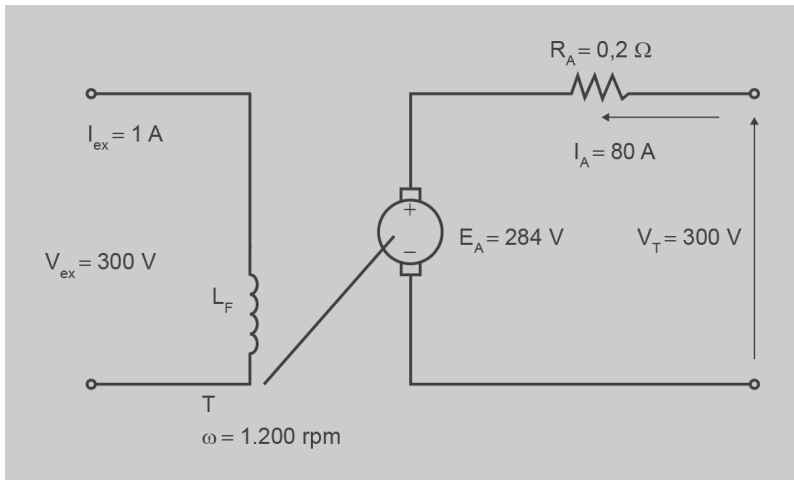
En realitat la velocitat no varia gaire amb el parell. Es diu que els motors de CC d'excitació independent i en paral·lel tenen una característica de velocitat *dura*, perquè la velocitat en càrrega és semblant a la de buit.

Exemple de càlcul de la variació de la velocitat d'un motor de CC d'excitació independent en variar el parell carregat a l'eix

Es disposa d'un motor de CC d'excitació independent amb un $R_A = 0,15 \Omega$. S'alimenta a una tensió $V_T = 300 \text{ V}$ que es manté constant, i en el circuit d'excitació tenim una $V_F = 300 \text{ V}$ mentre gira a 1.200 rpm. El motor consumeix una $I_A = 80 \text{ A}$ i una $I_F = 1 \text{ A}$. Si el parell de càrrega s'incrementa un 30%, calculeu la nova velocitat.

Solució

La situació inicial es mostra a la figura següent:



Podem calcular la $E_A = 300 - 0,2 \cdot 80 = 284 \text{ V}$

Com el parell de càrrega s'incrementa un 30% tenim una nova I_A' :

$$\frac{\tau_i n d}{\tau_i' n d} = \frac{\tau_i n d}{1,3 \cdot \tau_i n d} = \frac{K \cdot \Phi \cdot I_A}{K \cdot \Phi \cdot I_A'} = \frac{I_A}{I_A'}$$

$$\frac{1}{1,3} = \frac{I_A}{I_A'}$$

D'on podem trobar:

$$I_A' = 1,3 \cdot I_A = 1,3 \cdot 80 = 104 \text{ A}$$

I la nova $E_A' = 300 - 104 \cdot 0,2 = 279,2 \text{ V}$

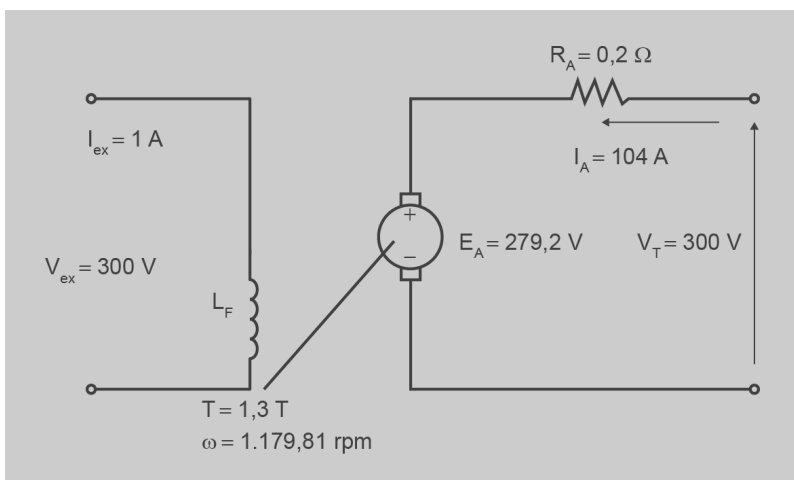
Ara, comparant les forces contraelectromotrius:

$$\frac{E_A}{E_A'} = \frac{K \cdot \Phi \cdot \omega_m}{K \cdot \Phi \cdot \omega_m'}$$

D'on:

$$\omega_m' = \omega \cdot \frac{E_A'}{E_A} = 1.200 \cdot \frac{279,2}{284} = 1.179,81 \text{ rpm}$$

A la figura següent hi ha la situació final del problema:



Per tant, en incrementar el parell un 30% hem obtingut una disminució de la velocitat del motor fins a 1.179,81 rpm. Podem observar que un fort increment del parell produeix un decrement relativament petit de la velocitat del motor. Per això es diu que el motor de CC d'excitació independent o en paral·lel tenen una característica *dura*.

Variació de la velocitat variant el corrent d'excitació

Hi ha dues maneres de variar la I_F i, per tant, el flux de la màquina:

1. Modificant la tensió del bobinatge d'excitació: com més tensió, més intensitat i , per tant, més flux.
2. Posant en sèrie amb el bobinatge un reòstat R_F variable: en modificar el seu valor, també fem variar la I_F .

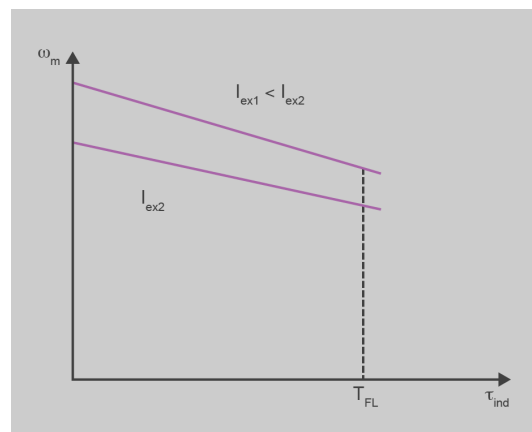
Partim de l'expressió de la velocitat:

$$\omega_m = \frac{V_T}{K \cdot \Phi} - \frac{R_A}{K \cdot \Phi} \cdot \tau_{ind}$$

Veiem que si disminuïm el flux, el primer terme de la velocitat s'incrementa, i també el segon i, per tant, la recta es desplaça cap amunt i té un pendent més gran. A la figura 3.9 podeu veure aquest efecte. Per a un mateix parell de càrrega, en disminuir la I_F , la velocitat s'incrementa.

Com podeu veure, en aquest tipus de control podem incrementar la tensió del bobinatge inductor (increment de I_F i de flux) per disminuir la velocitat del motor o decrementar-la (decrement de I_F i de flux) per incrementar la velocitat. En aquest darrer cas, podem reflexionar sobre els efectes de portar el control al límit, o sigui, disminuir la V_F i per tant la I_F i el flux associat. En aquest cas podem deduir que quan la E_A es fa com més va més petita, la I_A s'incrementa. El dubte sorgeix en considerar si el parell, que depèn de la I_A i el flux ($\tau_{ind} = k \cdot \Phi \cdot I_A$), s'incrementa o disminueix. Hem de dir que amb els valors habituals de la R_A i la corba d'histèresi del motor, la combinació descrita causa un increment important del parell. Així doncs, el parell i, per tant, la velocitat del motor, s'incrementen en disminuir la V_F .

FIGURA 3.9. Variació de la velocitat d'un motor de CC d'excitació en derivació o independent en variar la I_F



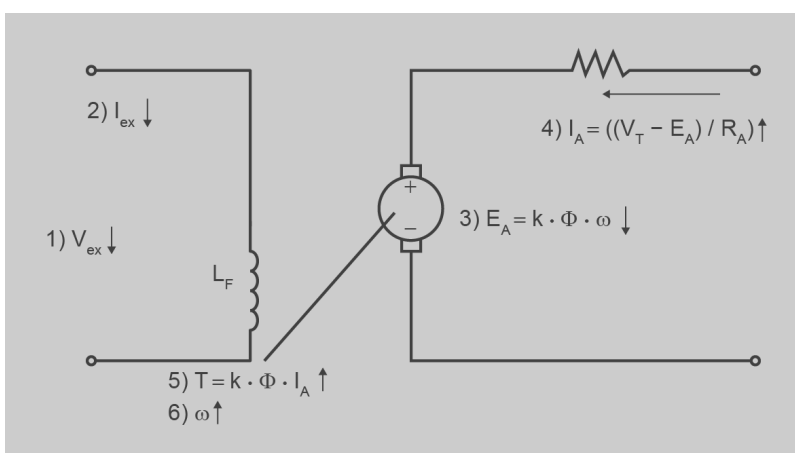
Podríem posar la concatenació d'efectes següent:

1. $V_T \downarrow$
2. $I_F \downarrow$
3. $E_A \downarrow = K \cdot \Phi \cdot \omega$
4. $I_A \uparrow$
5. $\tau_{ind} \uparrow = K \cdot \Phi \cdot I_A$
6. $\omega_m \uparrow$

A la figura 3.10 podeu veure aquesta concatenació d'efectes en un esquema del circuit.

Si aquesta reducció es porta el límit, o sigui, que es deixa el motor sense flux ($I_F = 0$), podem tenir una velocitat de buit molt gran que, si no salten les proteccions del motor, en poden produir la destrucció. És per aquest motiu que els motors d'excitació en sèrie o en paral·lel s'han de protegir amb un relé de pèrdua de camp.

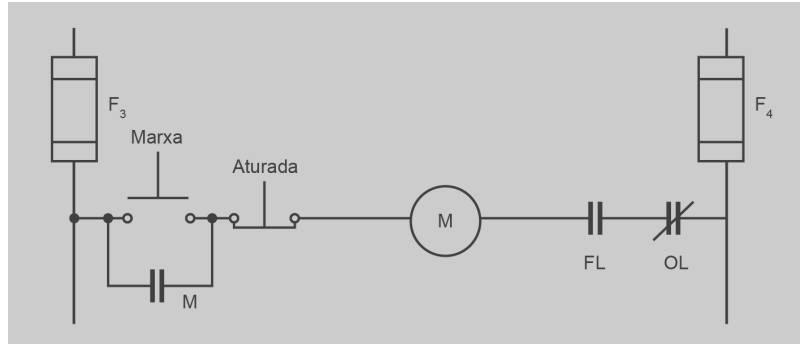
FIGURA 3.10. Concatenació d'efectes en decrementar VF



L'efecte de pèrdua de camp es pot donar per una regulació inapropiada, però també per accident o si es protegeix el circuit de camp amb un fusible d'un calibre inferior al nominal.

És aconsellable que el circuit de control del motor porti sempre un contacte que n'impedeixi l'alimentació si no hi ha intensitat I_F , o sigui, si prèviament no s'ha excitat el motor. La figura 3.11 mostra part del circuit de control d'arrencada d'un motor de CC, on s'ha inclòs el contacte del relé FL que assegura que el motor només estarà alimentat si prèviament hi ha intensitat al bobinatge de camp.

FIGURA 3.11. Contacte del relé FL de pèrdua de camp en sèrie amb el bobinatge del rotor del motor de CC d'excitació en paral·lel o independent



Per tant, en el moment d'arrencada d'un motor, l'ordre d'operacions ha de ser:

1. Excitació del bobinatge inductor o de l'estator
2. Excitació del bobinatge induït o del rotor, condicionat que s'hagi fet l'operació anterior.

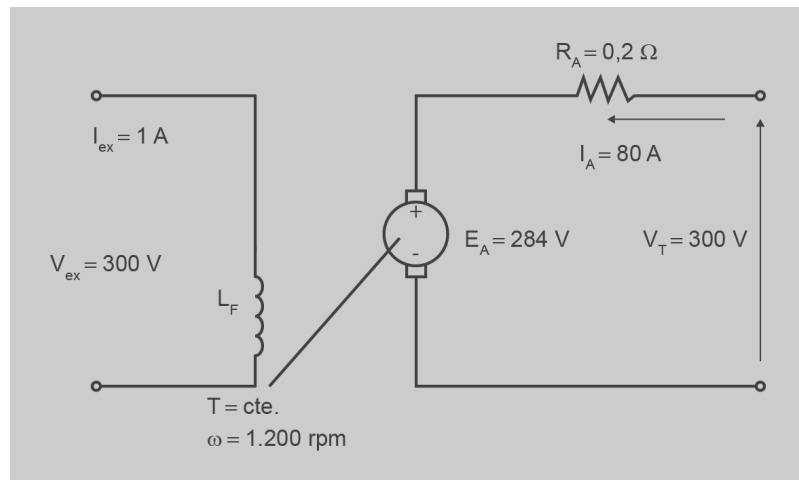
En el cas de motors d'excitació en sèrie o composta, no hi trobem habitualment el problema de pèrdua de camp, perquè en estar tots dos bobinatges en sèrie, sempre que hi hagi alimentació a l'induït, hi haurà corrent per l'inductor i, per tant, flux a la màquina.

Exemple de càlcul de la velocitat d'un motor de CC d'excitació independent en variar la tensió d'excitació

Es disposa d'un motor de CC excitació independent amb un $R_A = 0,2 \Omega$. S'alimenta a una tensió $V_T = 300 \text{ V}$ que es manté constant, i en el circuit d'excitació tenim una $V_{ex} = 300 \text{ V}$ mentre gira a 1.200 rpm i consumeix una $I_A = 80 \text{ A}$ i una $I_F = 1 \text{ A}$. Si el parell de càrrega es manté constant, calculeu la nova velocitat si disminuïm la V_F fins a 250 V .

Solució

La situació inicial es mostra a la figura següent:



Podem calcular la $E_A = 300 - 0,2 \cdot 80 = 284 \text{ V}$.

Com el parell de càrrega és constant, la nova I_A' val:

$$K \cdot \Phi \cdot I_A = K \cdot \Phi' \cdot I_A'$$

Considerem que el motor treballa en zona lineal, i per tant el flux és proporcional a la V_F , i per tant tenim:

- $\Phi = C \cdot 300$
- $\Phi' = C \cdot 250$

I ara:

$$K \cdot C \cdot 300 \cdot I_A = K \cdot C \cdot 250 \cdot I'_A$$

D'on podem extreure el valor del corrent I'_A : $I'_A = 96 \text{ A}$.

I la nova $E'_A = 300 - 96 \cdot 0,2 = 280 \text{ V}$

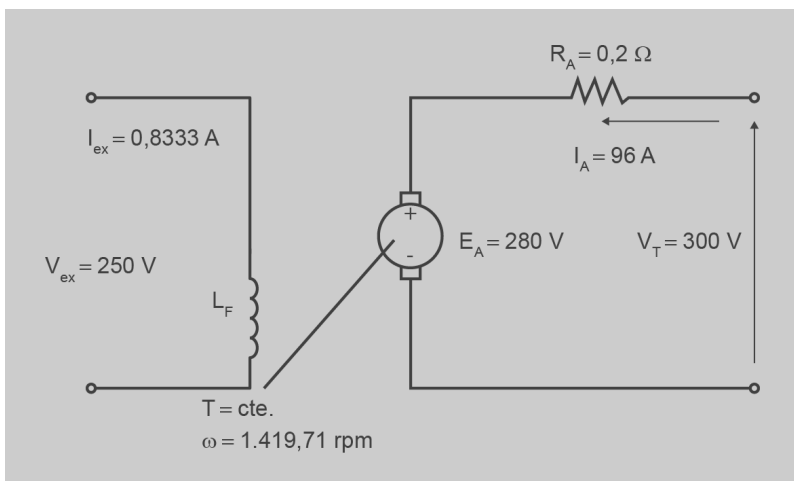
Ara, comparant les E_A :

$$\frac{E_A}{E'_A} = \frac{284}{280} = \frac{K \cdot \Phi \cdot \omega_m}{K \cdot \Phi' \cdot \omega'_m} = \frac{K \cdot C \cdot 300 \cdot 1.200}{K \cdot C \cdot 250 \cdot \omega'_m}$$

D'on:

$$\omega'_m = \frac{300 \cdot 1.200 \cdot 280}{250 \cdot 284} = 1.419,71 \text{ rpm}$$

A la figura següent es veu la situació final del problema:



Per tant, en disminuir el flux hem incrementat la velocitat del motor de 1.200 a 1.419,71 rpm.

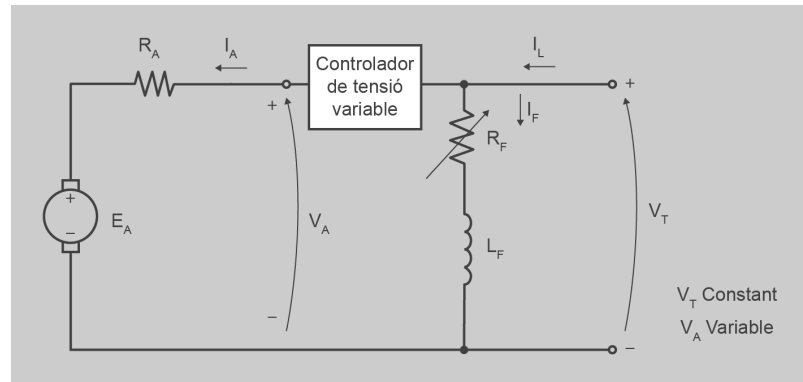
Variació de la velocitat variant la tensió en borns

Observeu l'expressió de la velocitat del motor:

$$\omega_m = \frac{V_T}{K \cdot \Phi} - \frac{R_A}{K \cdot \Phi} \cdot T_{ind}$$

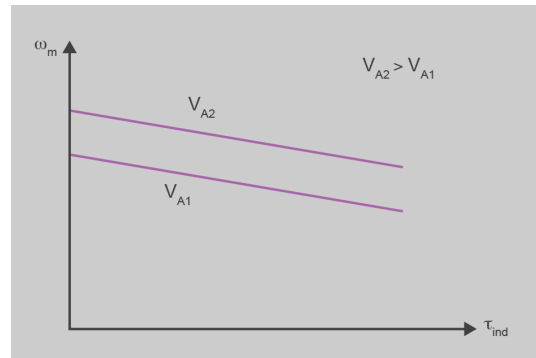
Hi podeu veure que si incrementem o decremtem V_T , la recta es desplaçarà cap a dalt o cap a baix i, per tant, modificarem la velocitat final del motor per a un parell de càrrega determinat. Per aconseguir aquesta variació sense modificar la tensió de l'estator ($I_F = \text{constant}$), es connecta el bobinatge d'excitació a la tensió V_T sense regular, i amb una font controlada de tensió modifiquem només el valor de la tensió al rotor de la màquina. A la figura 3.12 podeu veure el circuit per aconseguir-ho.

FIGURA 3.12. Circuit per variar la tensió de l'induit sense modificar la tensió de l'inductor



La figura 3.13 mostra la variació de velocitat de la màquina de CC en variar V_T .

FIGURA 3.13. Desplaçament de la corba de velocitat del motor de CC en variar V_T , mantenint constant la I_F

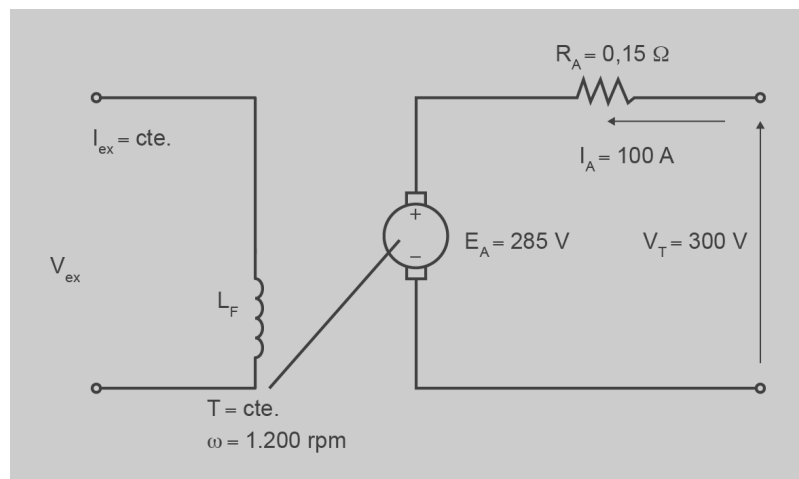


Exemple de càlcul de la velocitat d'un motor de CC d'excitació independent en variar la tensió V_T

Es disposa d'un motor de CC d'excitació independent amb una $R_A = 0,15 \Omega$. La tensió del bobinatge de camp V_F es manté constant. S'alimenta a una tensió de $V_T = 300 \text{ V}$ i gira a 1.200 rpm, mentre consumeix una $I_A = 100 \text{ A}$. Calculeu la nova velocitat si es disminueix la V_T fins a 250 V.

Solució

La situació inicial es mostra a la figura següent:



Podem calcular la $E_A = 300 - 0,15 \cdot 100 = 285 \text{ V}$

Com més va més s'utilitzen programes d'elements finits per dissenyar i o analitzar tota mena de dissenys. L'anàlisi de circuits elèctrics no és una excepció. Aquí podreu veure la simulació d'aquest exemple, que utilitzarem com a comprovació del càlcul analític de la situació inicial i la final del problema.

Si tenim en compte que $E_A = K \cdot \Phi \cdot \omega_m$ i que amb la nova situació, $E'_A = K' \cdot \Phi' \cdot \omega'_m$, podem dir que:

$$\frac{E_A}{E'_A} = \frac{\omega_m}{\omega'_m}$$

I d'aquí:

$$\omega'_m = \omega_m \cdot \frac{E'_A}{E_A}$$

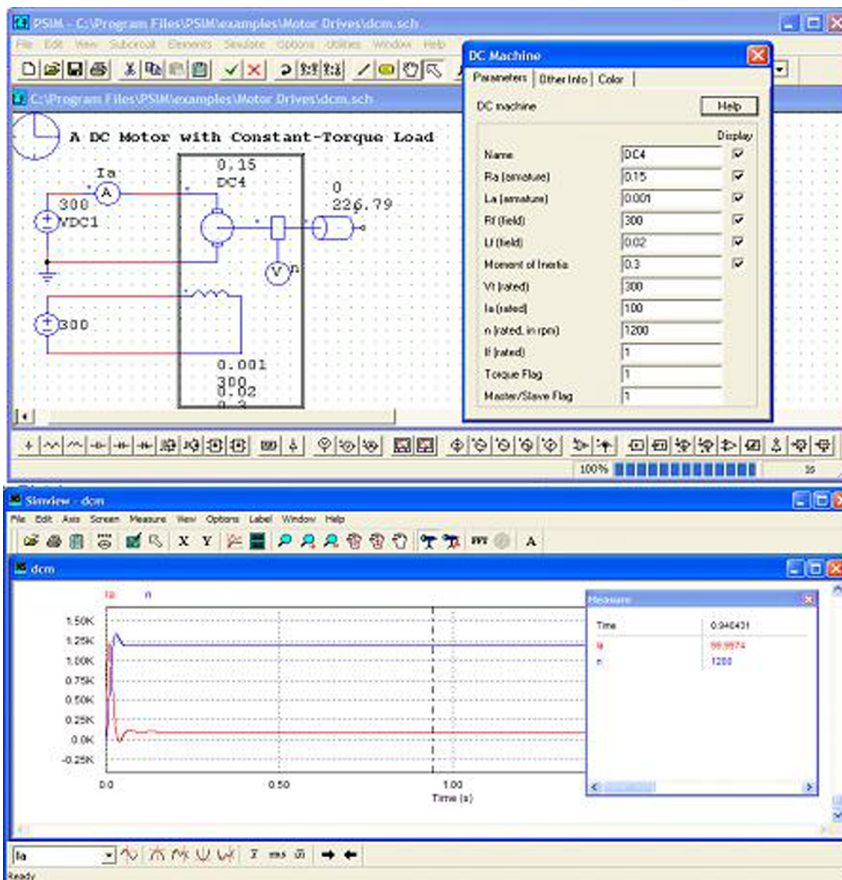
Per trobar la nova E'_A considerarem que si el parell es manté constant, vol dir que la I_A també es manté constant a 100 A, i per tant la nova força contraelectromotriu serà:

$$E'_A = V_T - I_A \cdot R_A = 250 - 0,15 \cdot 100 = 235 \text{ V}$$

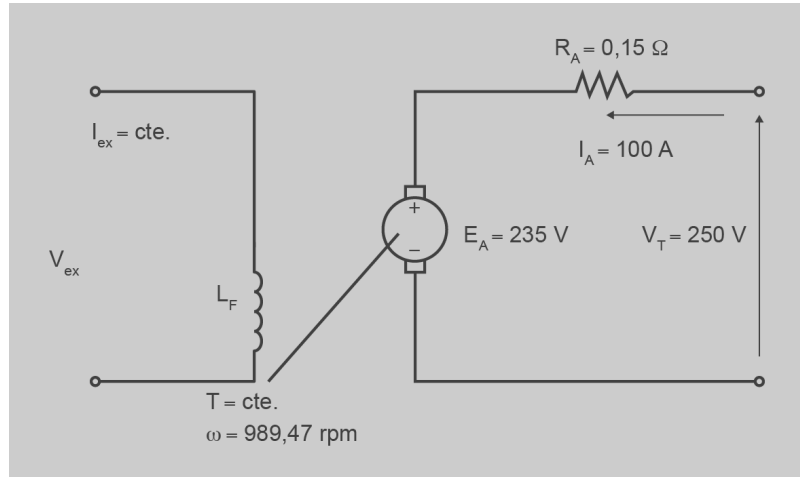
Així:

$$\omega'_m = 1.200 \cdot \frac{235}{285} = 989,47 \text{ rpm}$$

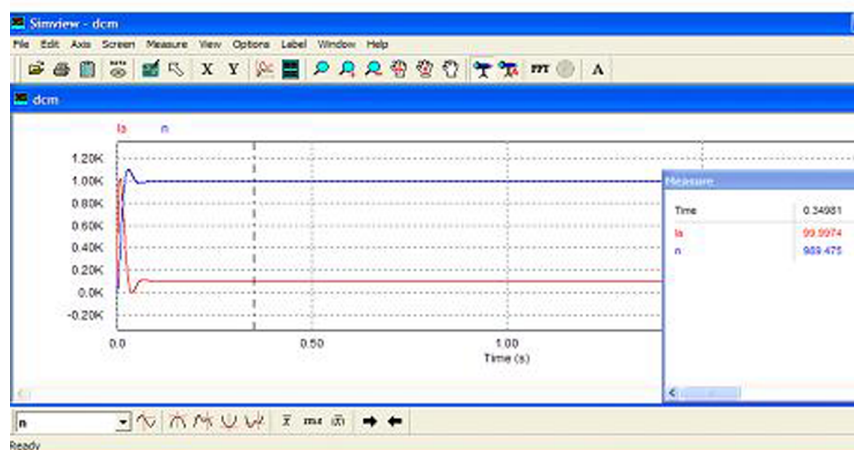
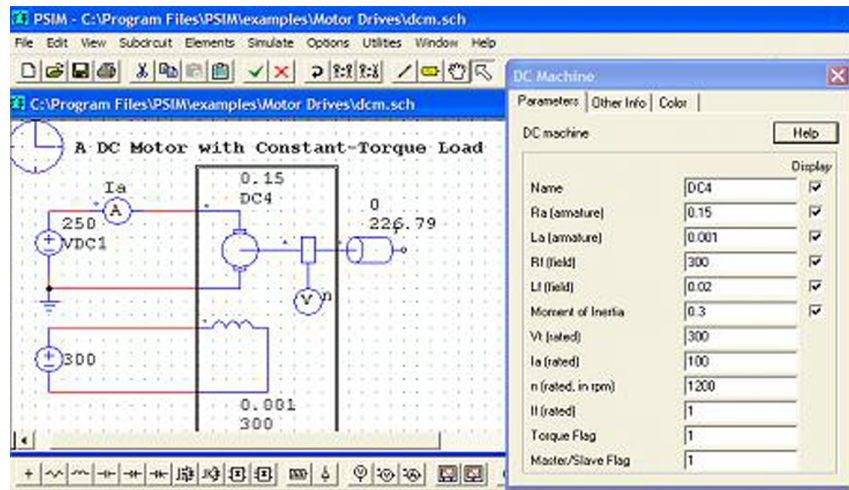
A la figura següent podeu veure la simulació d'aquest motor amb el programari lliure PSim i el resultat d'aquesta simulació. Observeu els valors del motor i el parell e resistent a l'eix:



La figura següent mostra la situació final del problema:



Per tant, hem disminuït la velocitat de 1.200 a 989,47 rpm. En la figura següent podeu veure els nous valors simulats amb el programari PSim:

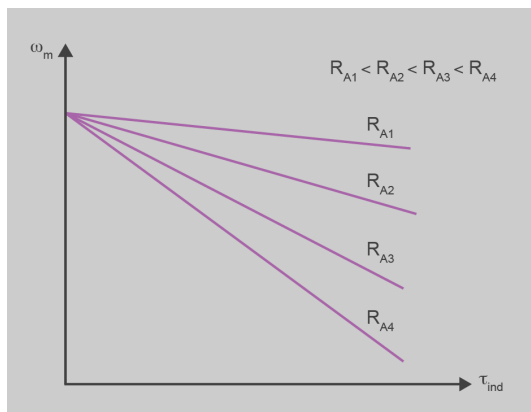


Variació de la velocitat del motor de CC variant la resistència dels bobinatges

Realment la R_A , la resistència dels bobinatges del rotor, no es pot modificar un cop ja feta la màquina, però sí que es pot posar una resistència en sèrie amb l'induït, i per tant, incrementar el valor de la resistència equivalent.

L'efecte sobre la corba de la velocitat del motor és incrementar el pendent de la corba de la velocitat, mentre que el punt de tall amb l'eix y, que representa la velocitat sense parell de càrrega, o sigui, en buit, no es modifica. La figura 3.14 mostra aquest efecte.

FIGURA 3.14. Variació del pendent de la corba de la velocitat del motor de CC en variar la RA



Modificació de la R dels bobinatges

En termes generals, la regulació de velocitat modificant R_A només se sol fer per a motors de molt poca potència o per a regulacions de curta durada, ja que el consum d'energia en la resistència és molt gran. Típicament hi hem de posar un reòstat de la potència adient.

3.4 Utilització dels mètodes de variació de la velocitat

Atès que tenim tres mètodes per variar la velocitat del motor de CC, interessa saber quan s'utilitza cada un i en quines condicions es pot aplicar. El límit sempre els posen els valors nominals del motor, que no s'han de sobrepassar de manera permanent. Ja que la regulació per increment de R_A només s'ha de fer de manera ocasional o en petites potències, ens limitarem al control per I_{ex} i V_T .

En el cas de variació de V_T , es modifica la velocitat de la manera següent:

- Si volem incrementar la velocitat ($\omega \uparrow$) s'ha d'incrementar la V_T ($V_T \uparrow$)
- Si volem decrementar la velocitat ($\omega \downarrow$) s'ha de decrementar la V_T ($V_T \downarrow$)

Sempre hi ha un límit superior a la V_T , que és la V_T **nominal**. Per tant, podem usar aquesta regulació per a velocitats que variïn entre 0 i la velocitat nominal.

En el cas de variació de I_{ex} , es modifica la velocitat de la manera següent:

- Si volem incrementar la velocitat ($\omega \uparrow$) s'ha de decrementar la I_{ex} ($V_{ex} \downarrow$)

- Si volem decrementar la velocitat, ($\omega \downarrow$) s'ha d'incrementar la I_{ex} ($V_{ex} \uparrow$)

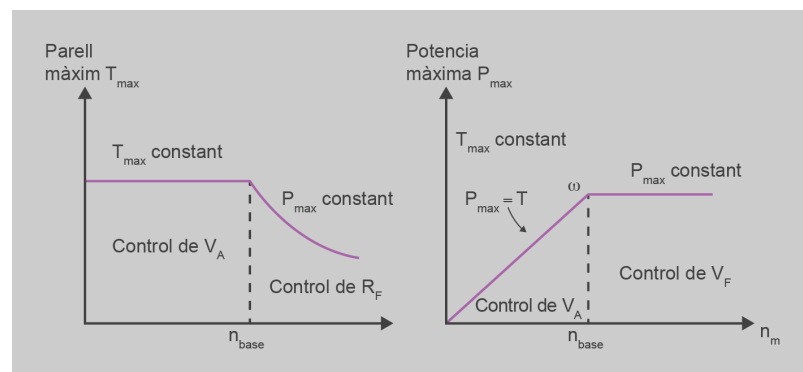
Sempre hi ha un límit superior a la V_{ex} , que és la V_{ex} **nominal**. Per tant, no podem usar aquesta regulació per a velocitats inferiors a la nominal, ja que caldria una I_{ex} , i per tant una V_{ex} superior a la nominal. Usarem aquest control per a rangs de velocitat **superiors** a la nominal.

La velocitat del motor no es pot mantenir per sobre de la nominal de manera permanent, però si de manera temporal. El límit sol ser mecànic. Coixinets i forces centrífugues solen limitar aquesta velocitat superior a la nominal.

Per a velocitats inferiors a la nominal, regulades amb la V_T , el parell es pot mantenir al seu valor nominal, i com la potència és el producte de la velocitat pel parell, tenim una potència que s'incrementa a mesura que la velocitat s'incrementa.

Per a velocitats superiors a la nominal, regulades amb la I_{ex} , no es pot mantenint el parell nominal, ja que la potència seria superior a la nominal, i això produiria un sobreescalfament del motor. En canvi, per mantenir la potència constant, el parell s'ha de decrementar a mesura que la velocitat es fa més gran. La figura 3.15 mostra com han de ser el parell i la potència per a aquestes regulacions.

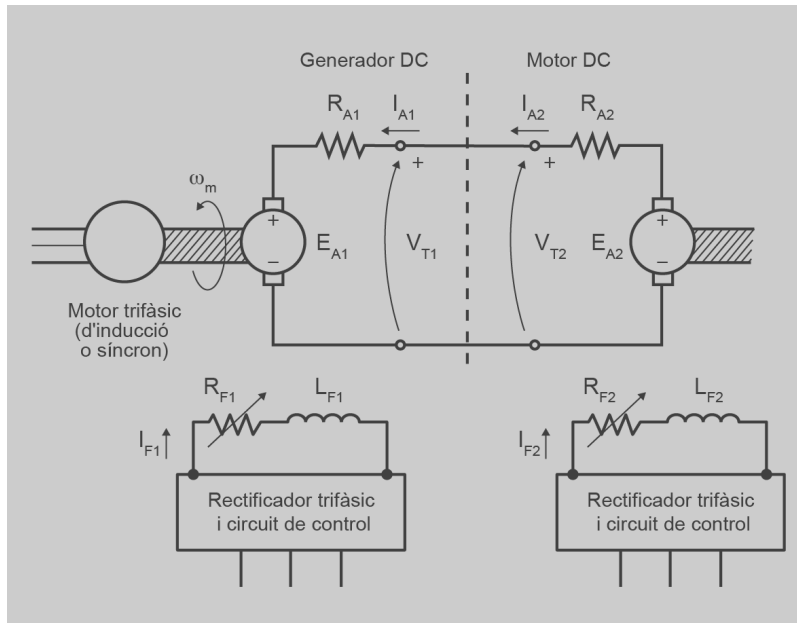
FIGURA 3.15. Formes del parell i la potència per a regulacions de velocitat per sobre i per sota de la velocitat nominal



3.5 Sistema Ward Leonard

Fa uns anys, quan encara no es disposaven de components d'electrònica de potència amb les característiques dels actuals, es van idear diversos sistemes per controlar la velocitat dels motors de CC. Un d'aquests, molt versàtil, és el denominat **Ward Leonard**.

Aquest sistema consisteix en dues màquines de CC d'excitació independent, una treballant com a generador i l'altra com a motor. A la figura 3.16 podem veure aquesta disposició.

FIGURA 3.16. Sistema Ward Leonard per al control de la velocitat d'un motor de CC

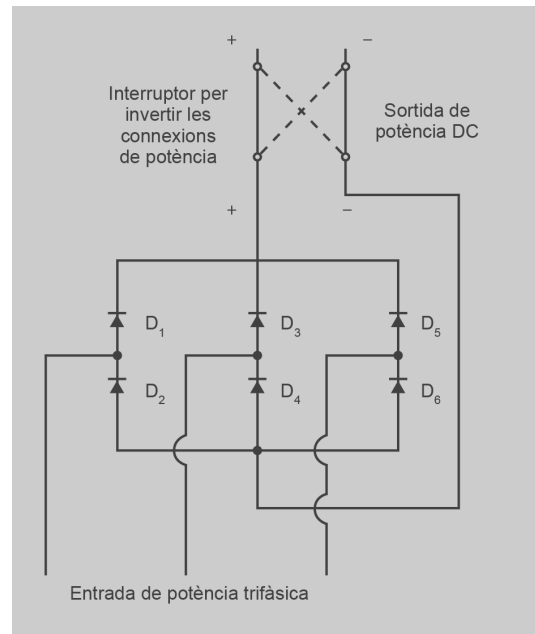
El generador gira mogut per una màquina d'inducció acoblada al mateix eix que la màquina que treballa com a motor. La variació de V_T i, per tant, de la velocitat del motor de CC, s'aconsegueix variant la R_F i la R_{F2} .

Com la màquina d'inducció varia poc la seva velocitat en variar la càrrega, podem considerar que treballa a velocitat constant i, per tant, la tensió en borns del generador de CC $V_{T1} = V_{T2}$ depèn del seu corrent d'excitació. Modificant aquest corrent, cosa que podem aconseguir variant la R_{F1} , podem modificar la V_T del motor de CC des de 0 fins a la tensió nominal, i per tant controlar la velocitat.

Amb la variació de R_{F2} es pot controlar la velocitat del motor de CC per sobre de la velocitat nominal. O sigui, que amb R_{F1} i R_{F2} podem controlar la velocitat del motor des de 0 fins a una velocitat superior a la nominal.

A la figura 3.17 podeu veure al circuit rectificador per a la tensió dels bobinatges de les màquines de CC. Aquest circuit inclou un contactor que ens permet fer girar la màquina en sentit contrari, invertint el corrent al circuit d'excitació del generador.

FIGURA 3.17. Rectificador per alimentar cada un dels bobinatges inductors de les màquines de CC del sistema Ward Leonard



Regeneració d'energia

El sistema Ward Leonard pot regenerar energia. Si es puja una càrrega es lliura energia al sistema mecànic, però si es deixa baixar la càrrega fent girar el motor en sentit contrari, la màquina que feia de motor passa a ser generador i la que feia de generador passa a ser motor, arrossega la màquina síncrona i retorna energia a la xarxa.

Com a resum, es pot dir que el sistema Ward Leonard pot controlar la velocitat del motor de CC des de 0 fins una velocitat superior a la nominal, en totes dues direccions, i que, a més a més, pot retornar energia a la xarxa.

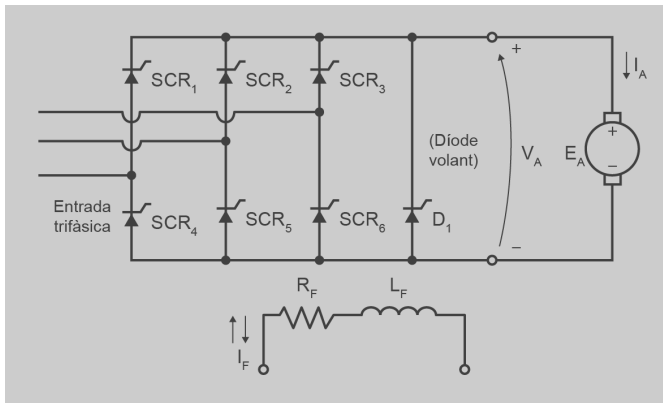
L'inconvenient del sistema és que per aconseguir aquest enorme ventall de control de velocitat cal adquirir tres màquines d'una potència similar:

- Una màquina asíncrona
- Dues de corrent continu

Per tant, és un sistema car i que ocupa molt espai.

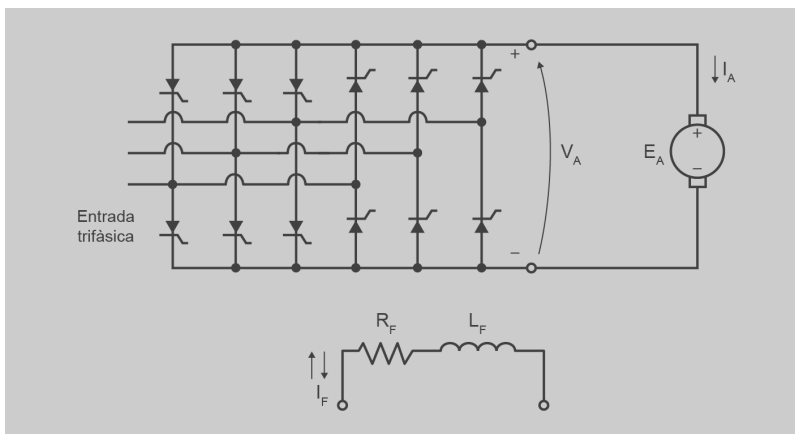
Actualment es disposa de components estàtics d'electrònica de potència robusts i fiables, que permeten aconseguir tensions variables de manera més còmoda i econòmica, amb menys espai i soroll i pràcticament lliures de manteniment.

El descobriment del tiristor i les millores posteriors de les seves característiques han permès aquest control. A la figura 3.18 podem veure un rectificador trifàsic amb 6 tiristors totalment controlat.

FIGURA 3.18. Circuit de control de la VT d'una màquina de CC amb tiristors

Aquests 6 tiristors substitueixen el motor d'inducció i una màquina de CC del sistema Ward Leonard, però no permeten retornar energia a la xarxa. El valor mitjà de la tensió en borns V_A depèn de l'angle de disparament dels tiristors.

Si es vol un circuit que permeti retornar energia a la xarxa, s'ha de posar un rectificador doble com el que es mostra a la figura 3.19.

FIGURA 3.19. Circuit de control amb doble pont de tiristors que permet retornar energia a la xarxa

La figura no inclou el circuit de control dels tiristors, però actualment ja es disposa de circuits integrats que permeten aconseguir aquest control de manera molt fàcil.