

# CONTROL DE MOTORS DE CORRENT CONTINU

El motor de c.c. era fins fa poc temps el motor més utilitzat per accionaments en els que era necessari variar o regular la velocitat. Encara que avui hi ha moltes més alternatives vàlides, el motor de c.c. es continua aplicant en determinats casos. A més existeixen molts accionaments instal·lats funcionant amb motors de c.c. Tot això justifica la importància d'aquest tema i els punts que en el es desenvolupen.

En tot el desenvolupament del tema considerarem que treballem amb excitació independent o bé amb motors d'ímants permanents.

Aquest tema es desenvoluparà seguint els següents apartats:

- Convertidors per alimentar els motors de c.c.
  - Classificació dels convertidors per l'alimentació de motors de c.c.
  - Rectificació controlada, generalitats.
  - Ponts rectificadors totalment controlats
  - Trossejadors o "choppers".
- Regulació de velocitat del motor de c.c.
  - Treball de la màquina de c.c. a parell màxim constant i a potència màxima constant.
  - Principis bàsics de la regulació de velocitat.
  - Estudi de la regulació de velocitat en cascada.
  - El regulador real de velocitat de motors de c.c. en cascada.
  - Regulació de velocitat per debilitament de flux.
- Estructures dels accionaments a quatre quadrants amb rectificació controlada
  - Generalitats.
  - Accionament a quatre quadrants amb inversió de la intensitat d'excitació.
  - Accionament a quatre quadrants amb inversió de la intensitat d'induit mitjançant contactors.
  - Accionament a quatre quadrants amb convertidor en muntatge en antiparal·lel ( doble pont ) sense corrent circulant.
  - Accionament a quatre quadrants amb convertidor en muntatge en antiparal·lel ( doble pont ) amb corrent circulant.
- Estructures dels accionaments a quatre quadrants amb trossejadors en muntatge en H.
  - Generalitats.
  - Accionament de quatre quadrants amb un pont en H treballant una diagonal.
  - Accionament de quatre quadrants amb un pont en H treballant les dues diagonals.
- Anàlisis de diversa documentació tècnica.

---

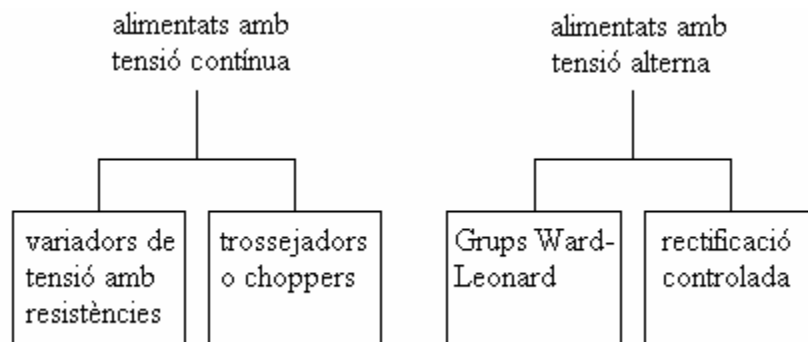
## CONVERTIDORS PER ALIMENTAR ELS MOTORS DE C.C.

---

Començarem el tema de control del motor de c.c. amb un repàs de diferents aspectes relacionats amb els convertidors de potència per l'alimentació d'aquest tipus de motors. Bàsicament aquests aspectes han estat ja desenvolupats en l'assignatura d'electrònica de potència, per això no s'explicaran específicament a classe, o bé només es comentaran de forma resumida.

### CLASSIFICACIÓ DELS CONVERTIDORS PER L'ALIMENTACIÓ DE MOTORS DE C.C.

Els convertidors per l'alimentació a tensió variable dels motors de c.c. poden classificar-se en dos grups en funció de que la font d'alimentació sigui alterna o contínua.

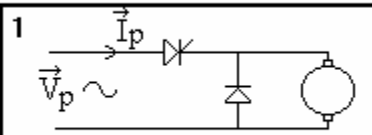
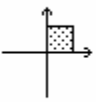
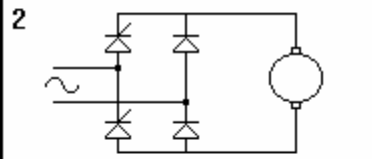
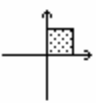
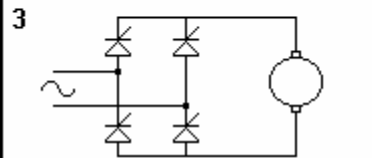
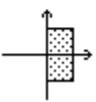
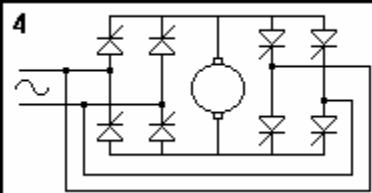
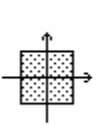


Actualment només tenen vigència els "trossejadors o choppers" i els sistemes amb "rectificació controlada". Aquests seran els dos tipus de convertidors que seran revisats en aquest tema.

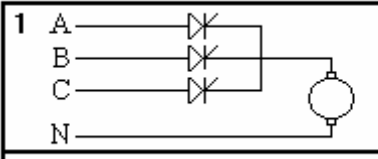
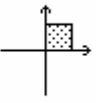
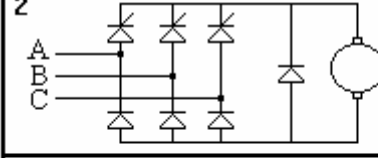
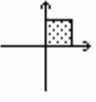
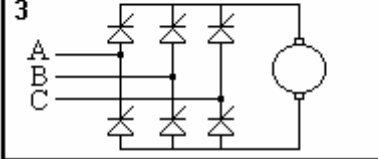
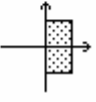
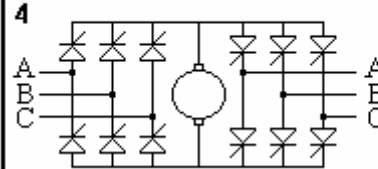
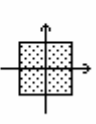
## RECTIFICACIÓ CONTROLADA, GENERALITATS

### Quadrants de treball en funció de les diferents configuracions:

*Rectificació controlada monofàsica:*

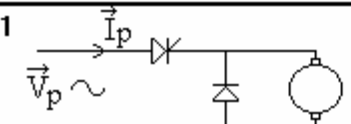
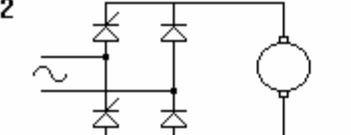
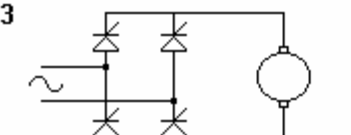
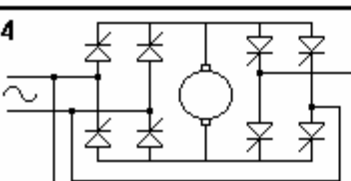
	Tipus	Quadrant
<b>1</b> 	mitja ona	
<b>2</b> 	semicontrolat	
<b>3</b> 	totalment controlat	
<b>4</b> 	doble pont totalment controlat	

*Rectificació controlada trifàsica:*

	Tipus	Quadrant
<b>1</b> 	mitja ona	
<b>2</b> 	semicontrolat	
<b>3</b> 	totalment controlat	
<b>4</b> 	doble pont totalment controlat	

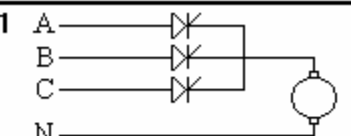
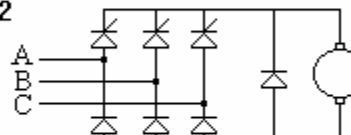
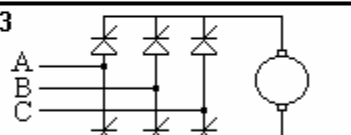
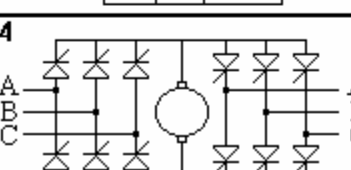
## Màxima tensió en la càrrega i valor de la tensió en funció de l'angle de disparament

*Rectificació controlada monofàsica:*

	Tipus	Màxima tensió en la càrrega	Tensió en funció de $\alpha$
1 	mitja ona	$\bar{v}_{a\_max} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_p}{\pi}$	$\bar{v}_a = \frac{\bar{v}_{a\_max}}{2} (1 + \cos \alpha)$
2 	semicontrolat	$\bar{v}_{a\_max} = \frac{2\sqrt{2} \cdot V_p}{\pi}$	$\bar{v}_a = \frac{\bar{v}_{a\_max}}{2} (1 + \cos \alpha)$
3 	totalment controlat	$\bar{v}_{a\_max} = \frac{2\sqrt{2} \cdot V_p}{\pi}$	$\bar{v}_a = \bar{v}_{a\_max} \cos \alpha$
4 	doble pont totalment controlat	$\bar{v}_{a\_max} = \frac{2\sqrt{2} \cdot V_p}{\pi}$	$\bar{v}_a = \bar{v}_{a\_max} \cos \alpha$

[  $V_p$ : valor eficaç de la tensió de línia ]

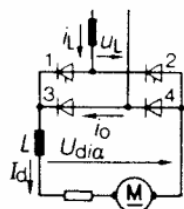
*Rectificació controlada trifàsica:*

	Tipus	Màxima tensió en la càrrega	Tensió en funció de $\alpha$
1 	mitja ona	$\bar{v}_{a\_max} = \frac{3\sqrt{2} \cdot V_p}{2\pi}$	$\bar{v}_a = \frac{\bar{v}_{a\_max}}{2} (1 + \cos \alpha)$
2 	semicontrolat	$\bar{v}_{a\_max} = \frac{3\sqrt{2} \cdot V_p}{\pi}$	$\bar{v}_a = \frac{\bar{v}_{a\_max}}{2} (1 + \cos \alpha)$
3 	totalment controlat	$\bar{v}_{a\_max} = \frac{3\sqrt{2} \cdot V_p}{\pi}$	$\bar{v}_a = \bar{v}_{a\_max} \cos \alpha$
4 	doble pont totalment controlat	$\bar{v}_{a\_max} = \frac{3\sqrt{2} \cdot V_p}{\pi}$	$\bar{v}_a = \bar{v}_{a\_max} \cos \alpha$

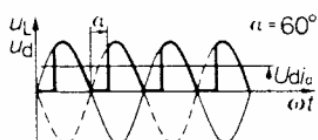
[  $V_p$ : valor eficaç de la tensió de línia ]

## Altres dades referents als principals muntatges en pont:

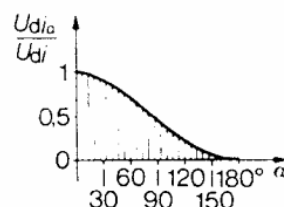
Completem aquest apartat amb més dades referents als principals muntatges en pont utilitzats per alimentar motors de c.c. Els muntatges convertidors en pont es caracteritzen perquè en els seus terminals d'entrada circula un corrent altern. Els muntatges en pont no necessiten neutre i poden operar connectats directament a la xarxa sense necessitat de transformador



Esquema elèctric

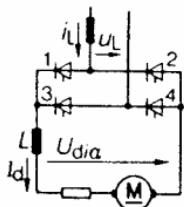


Curva de tensió

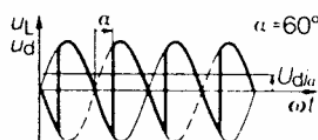


Característica de control

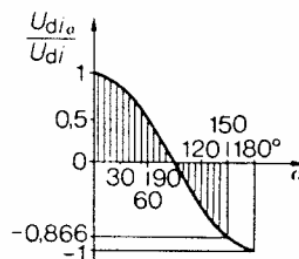
### Montaje B2 semicontrolado (B2HZ)



Esquema elèctric

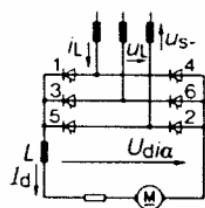


Curva de tensió

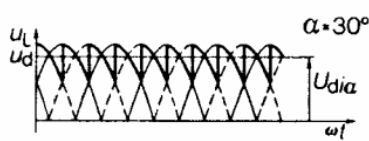


Característica de control

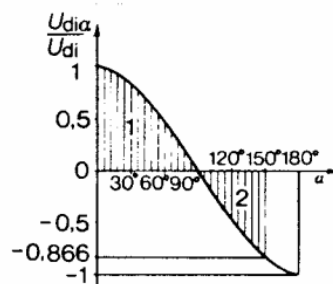
### Montaje B2 controlado (B2C)



Esquema elèctric

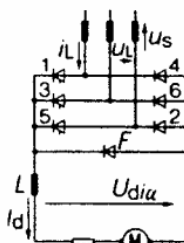


Curva de tensió

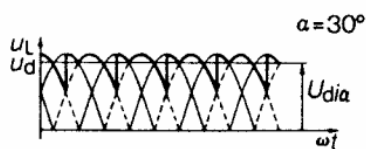


Característica de control

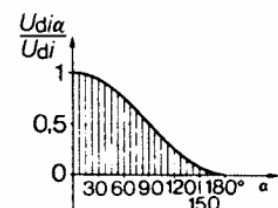
### Montaje B6 controlado (B6C)



Esquema elèctric



Curva de tensió

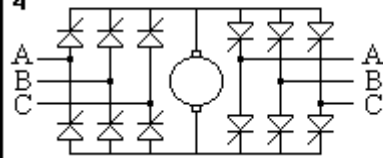


Característica de control

### Montaje B6 controlado con rama de vía libre (B6HF)

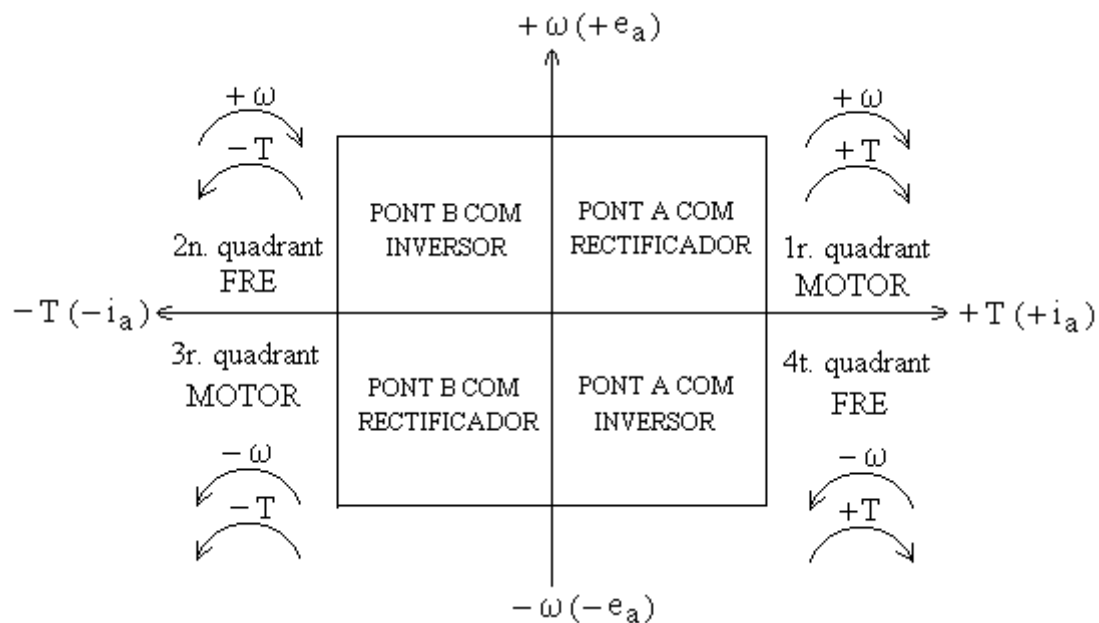
**Doble pont de tiristors trifàsic totalment controlat, característica de control en funció de l'angle i en funció de la tensió de control:**

Recordem algunes dades referents a un doble pont de tiristors totalment controlat:

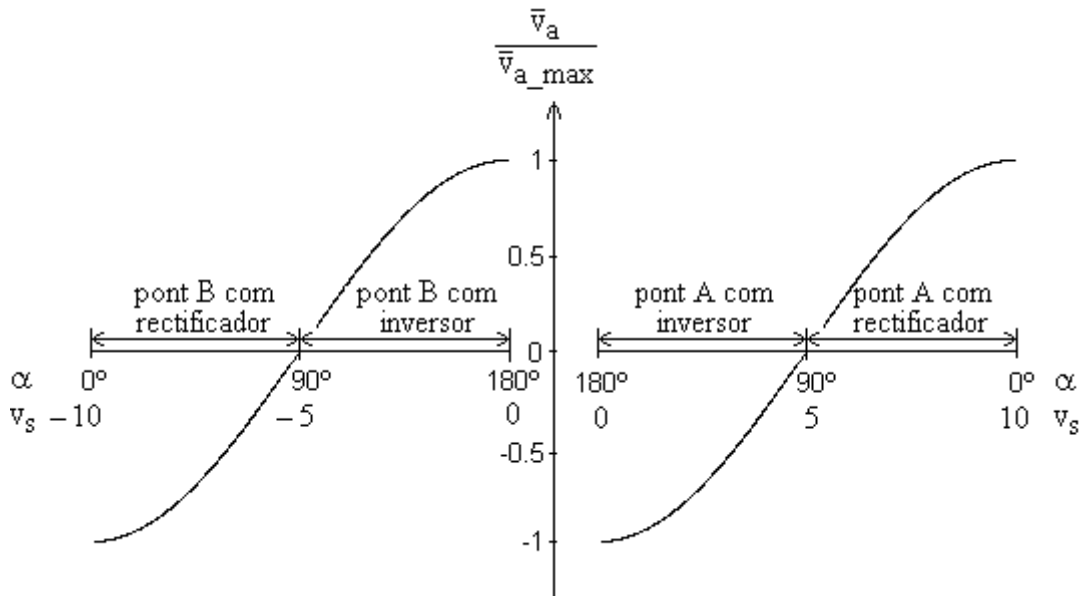
	Tipus	Màxima tensió en la càrrega	Tensió en funció de $\alpha$
<b>4</b> 	doble pont totalment controlat	$\bar{v}_{a\_max} = \frac{3\sqrt{2} \cdot V_p}{\pi}$	$\bar{v}_a = \bar{v}_{a\_max} \cos \alpha$

[ essent  $V_p$  el valor eficaç de la tensió de línia ]

Per altra part, recordem que si tenim un muntatge en doble pont trifàsic de tiristors sense corrent circulant, el pont A treballarà en el primer i quart quadrant, i el pont B treballarà en el tercer i segon quadrant:



Revisant la relació  $\bar{v}_a = \bar{v}_{a\_max} \cdot \cos\alpha$  entre l'angle d'encebat i la tensió en la càrrega, observem que no és lineal. Per exemple:



#### PONT A:

<p>1r. Quadrant:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• màquina cc: motor</li> <li>• tiristors: rectificador</li> <li>• angles: 90° a 0°</li> <li>• tensió de control: 5 a 10 Volts</li> </ul>	<p>4t. Quadrant:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• màquina cc: generador o fre</li> <li>• tiristors: inversor</li> <li>• angles: 180° a 90°</li> <li>• tensió de control: 0 a 5 Volts</li> </ul>
--	---

#### PONT B:

<p>3r. Quadrant:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• màquina cc: motor</li> <li>• tiristors: rectificador</li> <li>• angles: 90° a 0°</li> <li>• tensió de control: -5 a -10 Volts</li> </ul>	<p>2n. Quadrant:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• màquina cc: generador o fre</li> <li>• tiristors: inversor</li> <li>• angles: 180° a 90°</li> <li>• tensió de control: 0 a -5 Volts</li> </ul>
--	--

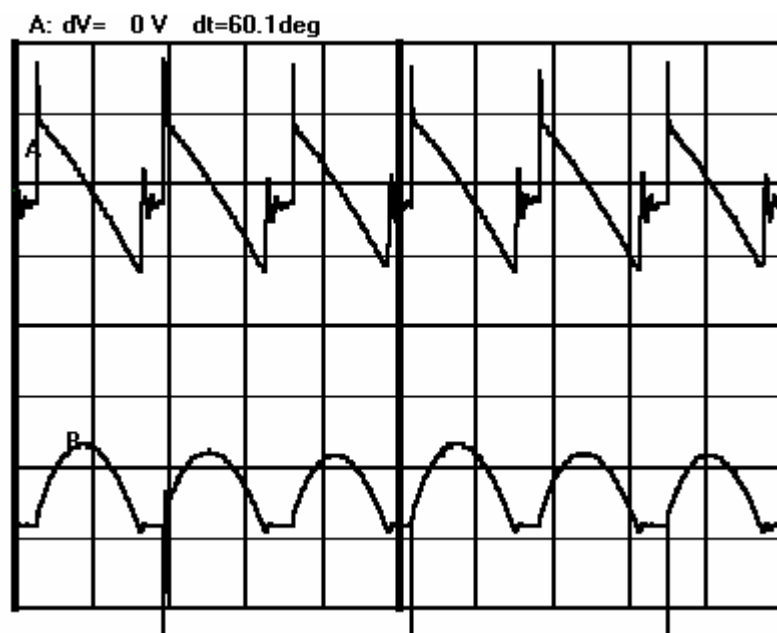
## PONTS RECTIFICADORS TOTALMENT CONTROLATS

### Conducció contínua i conducció discontinua:

#### Conducció discontinua en ponts trifàsics totalment controlats :

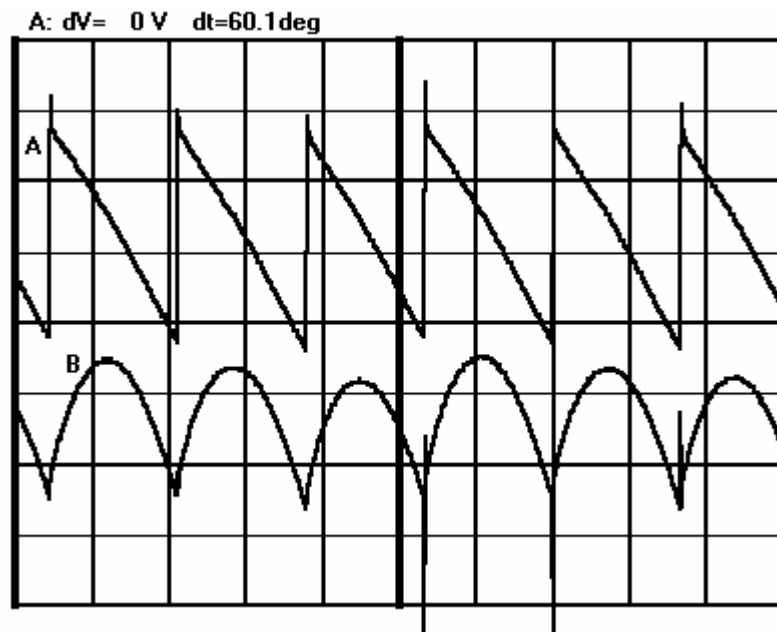
En el marge de treball d'un motor de c.c. accionat per un pont de tiristors sempre hi ha una zona de conducció discontinua i el nivell del corrent crític, o punt de pas de conducció contínua a conducció discontinua, be determinat per la constant de temps de l'induït del motor i per el nombre d'impulsos del convertidors de tiristors. Per això el fenomen de la conducció discontinua disminueix en ponts controlats trifàsics. Tot i això, quan utilitzem ponts trifàsics totalment controlats apareixen també zones de funcionament amb conducció discontinua com podem veure en els següents oscil.logrames visualitzats en el laboratori:

Exemple de conducció discontinua per un angle de disparament de  $60^\circ$  quant la càrrega mecànica exigeix poc parell i per tant el valor mitjà d'intensitat és baix. En el canal A es visualitza la tensió, en el canal B la intensitat:





Exemple de conducció contínua per un angle de disparament de 60° ara amb més demanda de parell i per tant un valor més elevat d'intensitat d'induït. En el canal A es visualitza la tensió, en el canal B la intensitat:



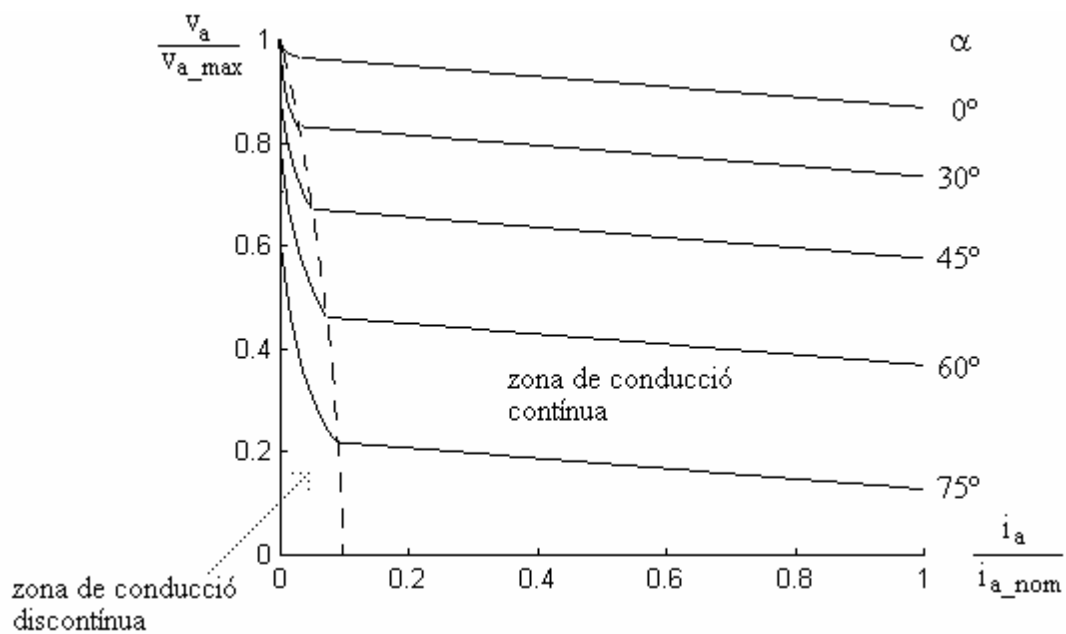
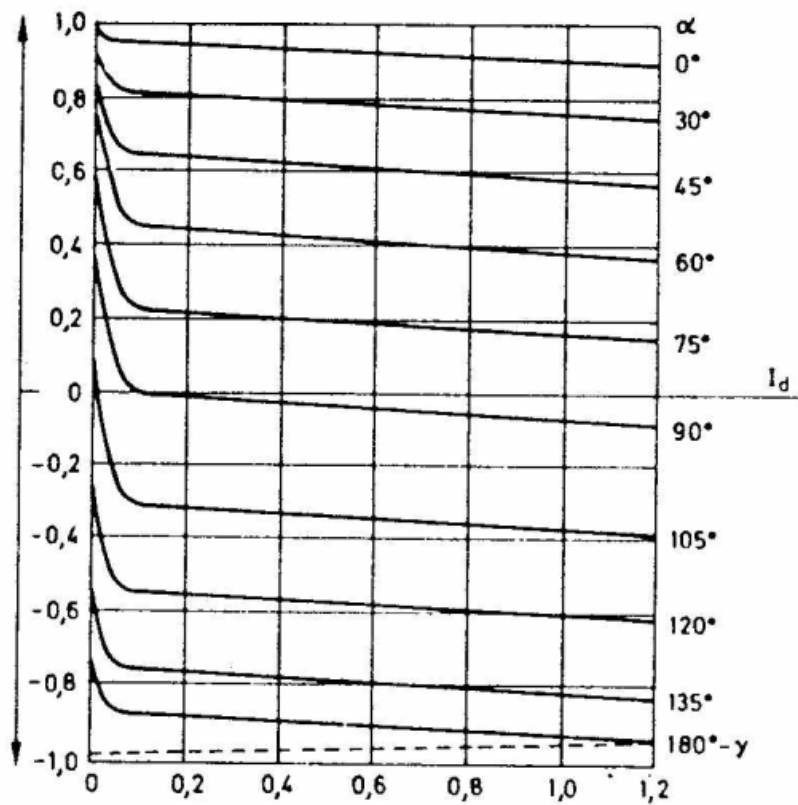
#### **Tensió de sortida en funció de l'angle $\alpha$ i de la intensitat de càrrega:**

De forma aproximada, la tensió de sortida d'un pont de tiristors totalment controlat amb una càrrega amb component inductiva i considerant que els tiristors tenen una resistència directa menyspreable ( ideals ) be donada per conducció contínua per la següent expressió:

$$\overline{V}_a = V_{a\_max} \cos \alpha$$

En la realitat, el valor mitjà de la tensió de sortida del pont depèn del corrent de càrrega degut a les caigudes de tensió dels tiristors i altres elements que poden estar present en el circuit, per exemple degut a la presència d'inductàncies en el circuit d'alterna.

La següent figura representa les característiques reals de tensió de sortida en un pont rectificador totalment controlat en funció de l'angle de disparament  $\alpha$  i del corrent de càrrega:



Quant estudiem la regulació del motor de c.c. alimentat amb un pont de tiristors totalment controlat, veurem que el llaç de corrent presenta un resposta diferent a la entrada d'un graó en cas de conducció contínua i en cas de conducció discontinua. Això ocasiona retards en la resposta de la regulació quan la conducció és discontinua.

### Forma d'ona de la tensió de sortida d'un pont trifàsic totalment controlat amb càrrega inductiva:

Pel seu interès mostrem la forma d'ona de la tensió de sortida d'un pont rectificador trifàsic de sis tiristors ( totalment controlat ) per carrega amb component inductiva i per diferents angles de disparament:

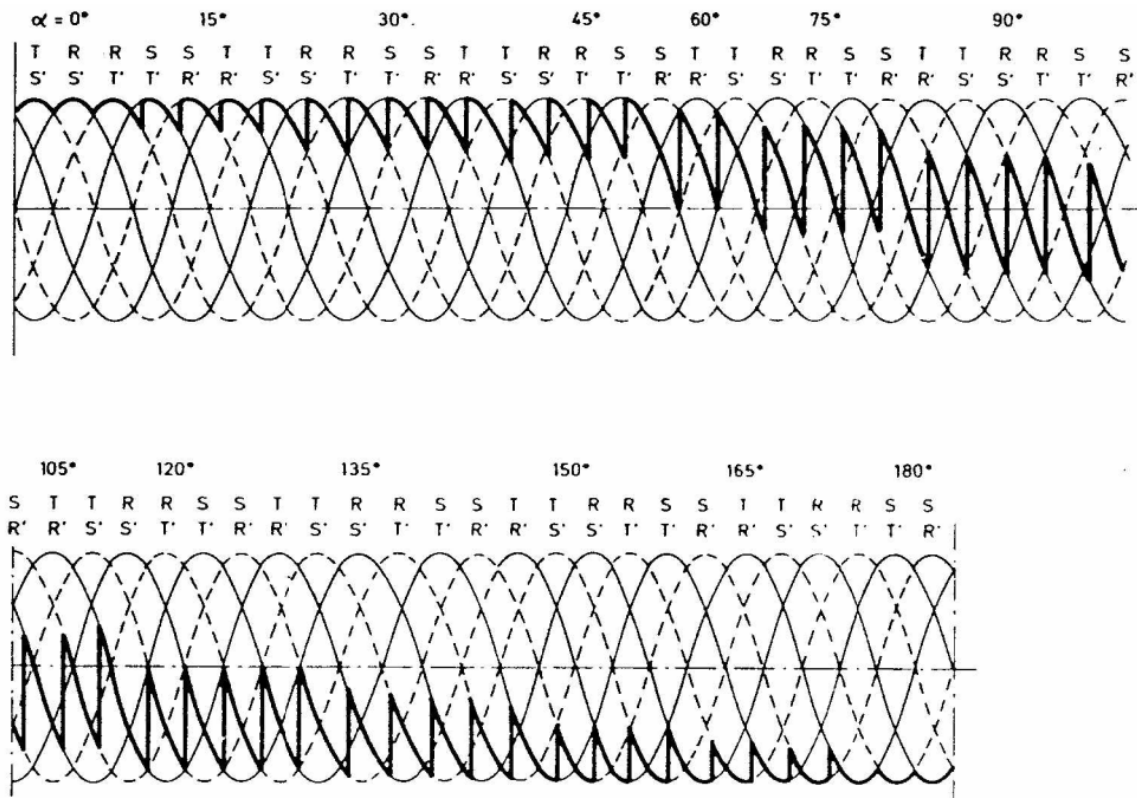


Fig. 2.15d) Tensió de salida de un puente rectificador trifásico de seis tiristores.

## TROSSEJADORS O "CHOPPERS"

Quadrants de treball en funció de les diferents configuracions:

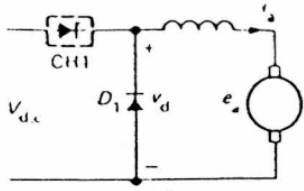
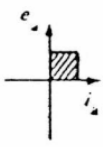
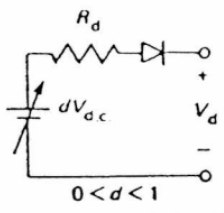
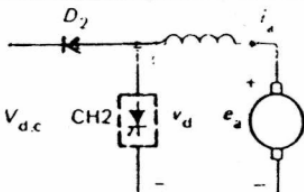

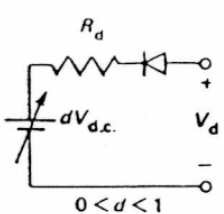
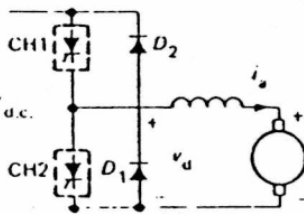
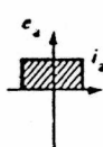
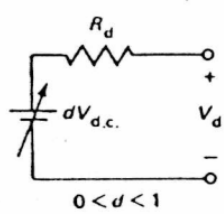
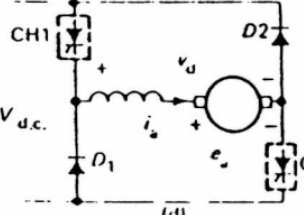
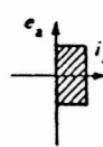
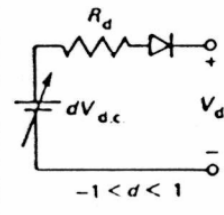
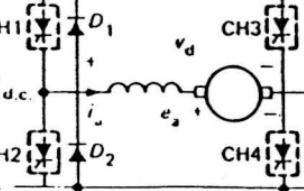
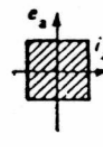
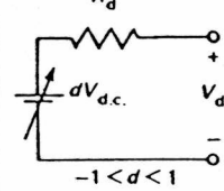
Chopper configuration	$e_a - I_a$ characteristics	Equivalent circuit
 <p>(a)</p>		 <p><math>0 &lt; d &lt; 1</math></p>
 <p>(b)</p>		 <p><math>0 &lt; d &lt; 1</math></p>
 <p>(c)</p>		 <p><math>0 &lt; d &lt; 1</math></p>
 <p>(d)</p>		 <p><math>-1 &lt; d &lt; 1</math></p>
 <p>(e)</p>		 <p><math>-1 &lt; d &lt; 1</math></p>

Figure 4.23 Direct current chopper configurations and their quadrants of operation. (a) First-quadrant chopper. (b) Second-quadrant chopper. (c) Two-quadrant type 1 chopper. (d) Two-quadrant type 2 chopper. (e) Four-quadrant chopper

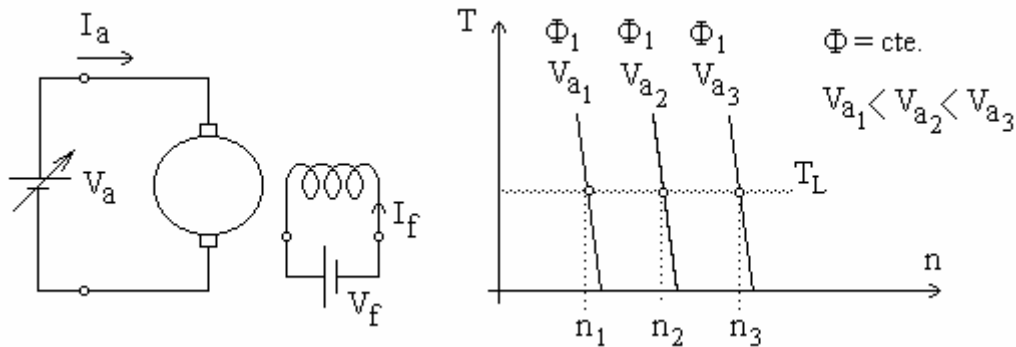
## REGULACIÓ DE VELOCITAT DEL MOTOR DE CC

----- REPÀS MÀQUINES ELÈCTRIQUES -----

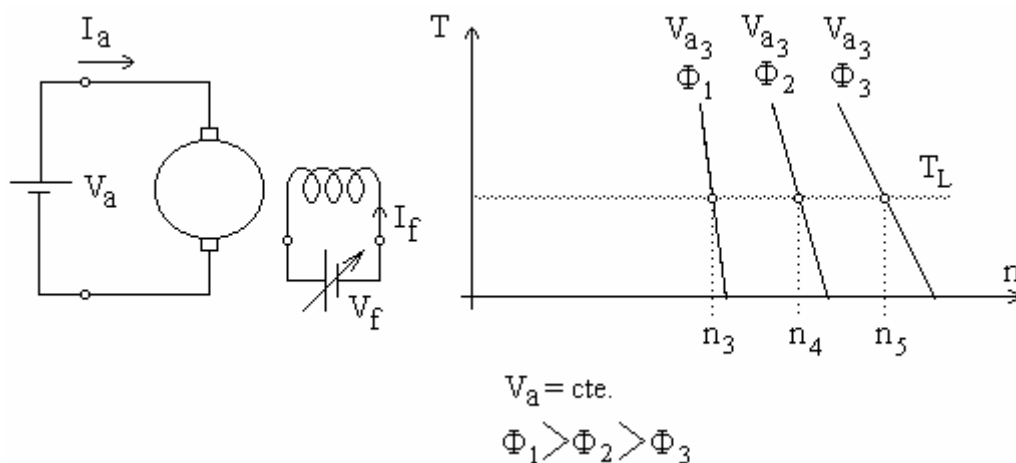
### Variació de velocitat

Per estudiar com podem variar la velocitat de la màquina de c.c. treballant com a motor amb excitació independent, cal prèviament revisar les corbes parell-velocitat. En les següents figures veiem els diferents punts de funcionament considerant que la càrrega mecànica exigeix un parell constant (podria tractar-se per exemple d'un aparell muntacàrregues ).

- *Corba parell-velocitat*
  - $\Phi \Rightarrow \text{constant}$  (o sigui intensitat d'excitació constant:  $I_f = I_{fN}$ )
  - $V_a \Rightarrow \text{variable}$



- *Corba parell-velocitat*
  - $\Phi \Rightarrow \text{variable}$  (o sigui intensitat d'excitació variable:  $I_f < I_{fN}$ )
  - $V_a \Rightarrow \text{constant}$ .



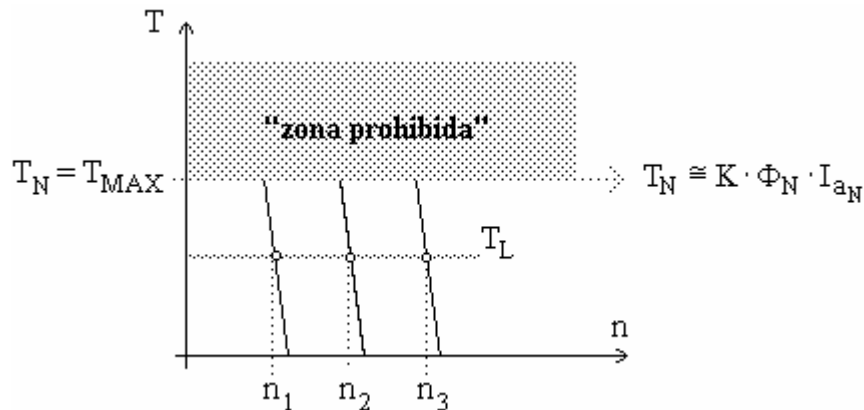
Observem que podem modificar la velocitat del motor de c.c. dues formes:

- 1) Treball a flux constant, normalment a flux nominal (amb intensitat d'excitació nominal)

Mantenint constant el flux (màquines de c.c. d'ímants permanents o màquines de c.c. amb intensitat d'excitació constant), i variant la tensió d'alimentació del debanat d'induït o armadura. (en el rotor):

- *Corba parell-velocitat*
  - $\Phi \Rightarrow \text{constant}$  (o sigui intensitat d'excitació constant:  $I_f = I_{fN}$ )
  - $V_a \Rightarrow \text{variable}$

Treballant a flux nominal (o sigui amb  $I_{fN}$ ), el parell màxim que pot subministrar el motor de c.c. en règim permanent be limitat pel valor de la intensitat nominal del debanat d'induït o armadura.

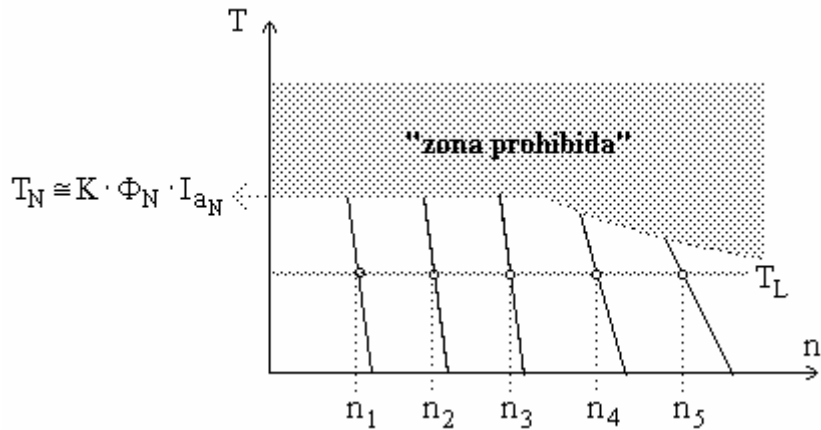
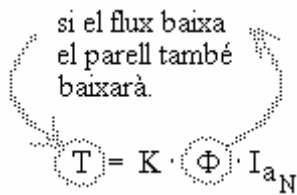


- 2) Treball amb debilitament de flux.

Si hem assolit el valor màxim de la tensió d'induït,  $V_{a_{max}}$ , podem si es necessari augmentar més la velocitat disminuint el valor del flux, baixant la tensió del debanat de camp o d'excitació.

- *Corba parell-velocitat*
  - $\Phi \Rightarrow \text{variable}$  (o sigui intensitat d'excitació variable:  $I_f < I_{fN}$ )
  - $V_a \Rightarrow \text{constant}$ .

Treballant amb debilitament de flux, amb valors de flux per sota del flux nominal, el parell màxim que podem subministrar és inferior al parell nominal. En efecte, l'efecte de disminuir el flux és que amb la intensitat nominal d'induït aconseguim menys parell:



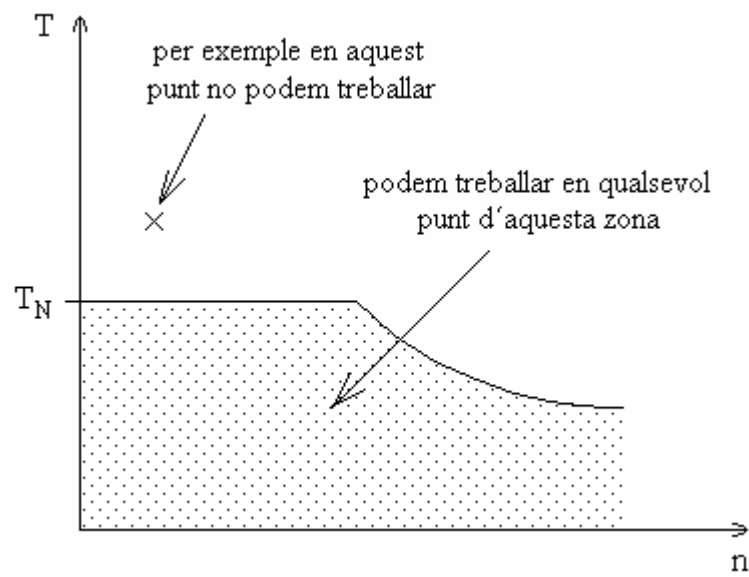
Un altre inconvenient del treball per debilitament de flux és que la característica parell-velocitat perd les seves propietats de característica "dura" i va disminuint la seva pendent cada vegada més a mesura que disminuïm la intensitat d'excitació.

Aquestes limitacions del control de velocitat per debilitament de flux justifiquen que aquest sistema per variar la velocitat sigui utilitzat en poques aplicacions. Per exemple s'utilitza en ocasions quan es desitja regular la velocitat d'accionaments de potència constant (ex.: bobinadores) donat que aquest tipus de càrregues a mesura que augmenta la velocitat la càrrega demana menys parell i per tant s'adapten bé a aquest sistema de variació de velocitat.

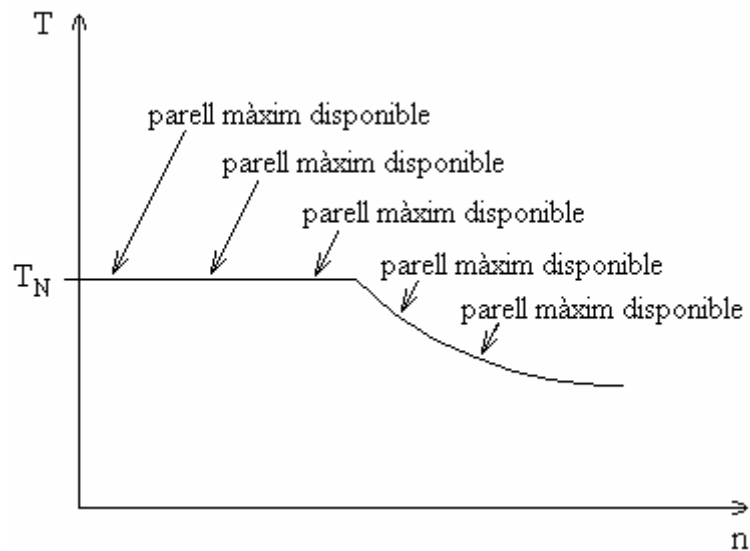
### Corbes límit parell-velocitat en règim permanent. Zona de parell màxim constant i zona de potència màxima

Encara que les corbes que hem anomenat parell-velocitat  $T = f(n)$  siguin importants per conèixer el comportament d'una màquina elèctrica especialment si aquesta treballa com a motor, també és interessant conèixer els límits de funcionament de la màquina en règim permanent. En el cas d'un motor elèctric aquestes corbes límit ens indiquen quin és el parell màxim que pot subministrar el motor en règim permanent en funció de la velocitat. Naturalment el parell màxim en règim permanent correspon al parell disponible quan circula la intensitat d'induit nominal  $I_{a_N}$ .

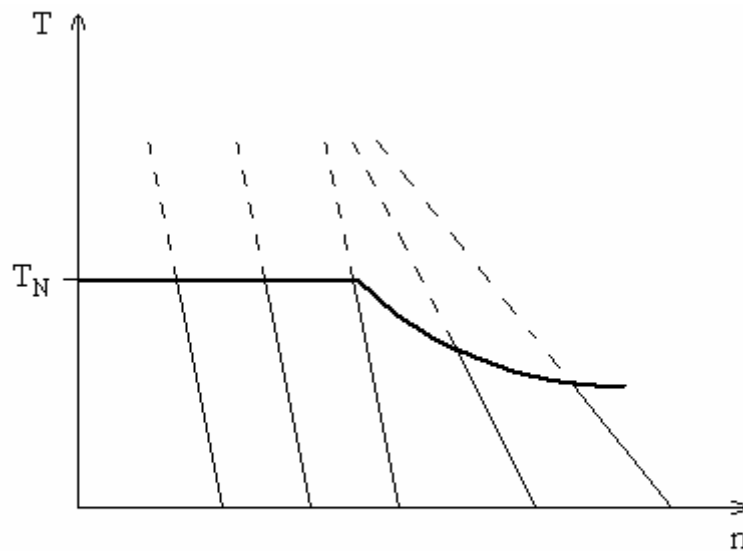
En l'anterior apartat ja s'ha marcat el que hem anomenat "zona prohibida" en règim permanent. Així la corba límit típica del motor de c.c. tindrà la següent forma:



La següents figures complementen l'explicació sobre el significat d'aquesta corba límit:





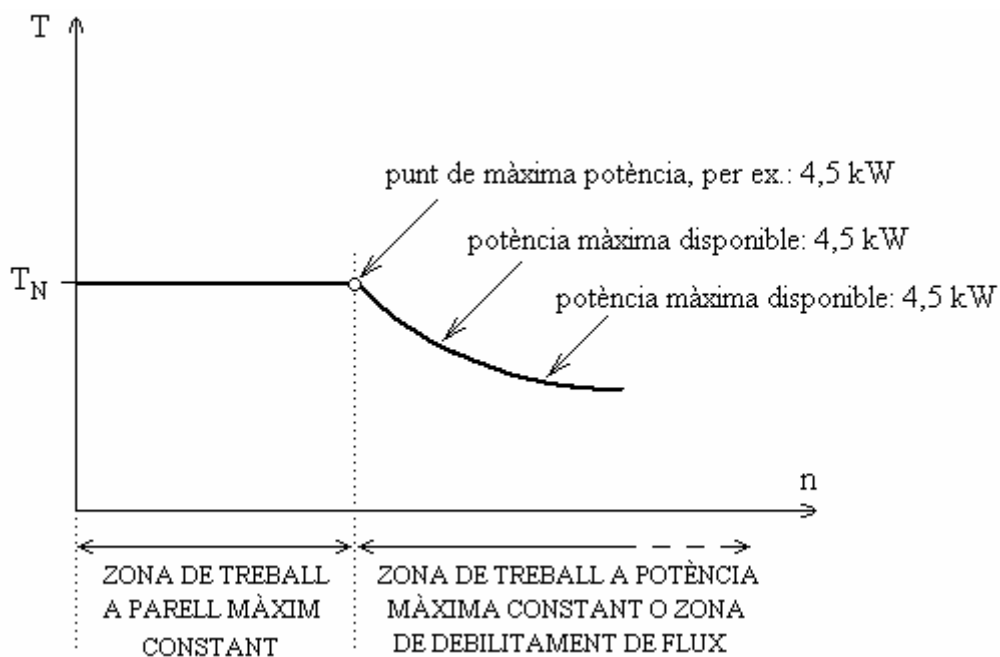


s'ha marcat amb línia discontinua la part de les corbes parell-velocitat del motor a on no es pot treballar en règim permanent

Aquesta corba límit ens marca clarament dues zones de treball:

- Zona de treball a parell màxim constant
- Zona de treball a potència màxima constant o zona de debilitament de flux.

Queda clar que estem parlem de límits. No vol dir que en la zona de parell màxim constant el motor treballi sempre amb el mateix parell, el motor de c.c. per cada tensió d'alimentació de l'induït lliurarà el parell que l'hi demani la càrrega mecànica en funció de la corba parell-velocitat del motor per aquesta tensió d'alimentació.



Quan debilem el flux i treballem amb intensitats d'excitació per sota de la nominal, el parell màxim disponible en règim permanent ja no és el parell nominal, sinó que el parell màxim disponible baixa. Així en aquesta zona podem augmentar la velocitat però a costa de que el parell disponible a la intensitat nominal disminueixi, tenint en el límit que la potència màxima disponible és constant.

### Límits de funcionament

Hem parlat en l'anterior apartat de límits de parell màxim disponible en règim permanent, entenent que en règim permanent el parell màxim disponible correspon al valor del parell quan circula la intensitat nominal d'induït o d'armadura  $I_{a_N}$ .

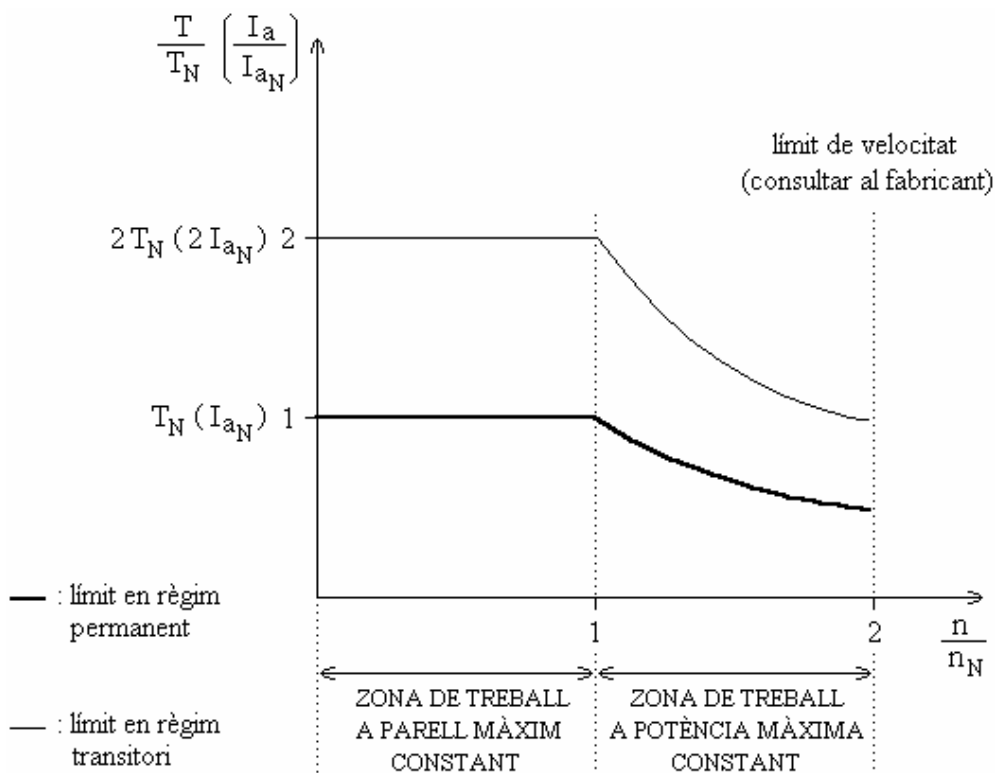
Ara ampliarem aquests aspectes parlant també de límits de parell màxim disponible en règim transitori i de límits de velocitat.

El límits que indiquem són orientatius i corresponen a valors límits per la majoria de motors de c.c. En tot cas serà el fabricant el que podrà subministrar dades més concretes per cada tipus concret de motor.

Com que estem parlant en general, representarem els valors en les gràfiques en tant per 1 respecte al respectiu valor nominal. Donat que una vegada fixat el flux el parell és proporcional a la intensitat d'induït és indistint parlar de valor límit de parell en tant per

$$1 \left[ \frac{T}{T_N} \right] \text{ que de valor límit d'intensitat d'induït o d'armadura en tant per } 1 \left[ \frac{I_a}{I_{a_N}} \right]$$

Estudiarem tots aquests aspectes a partir del motor de c.c. amb excitació independent, donat que aquest tipus de connexió és la més utilitzada.

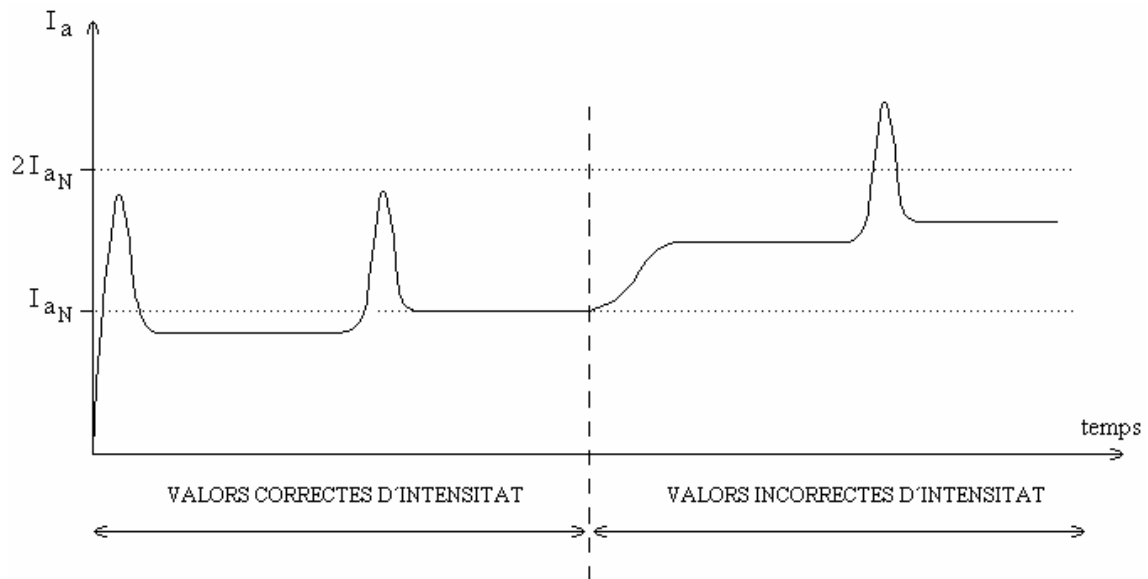


En règim permanent el límit de parell el fixa la intensitat nominal d'induït  $I_{a_N}$  de tal manera que el parell màxim disponible és el parell que obtenim quan circula la intensitat nominal d'induït. Si circula de forma permanent una intensitat superior a la nominal és deteriora l'aïllant del debanat i aquest acaba destruint-se. Naturalment aquest efecte tèrmic no és instantani, per tant s'ha de protegir la màquina de c.c. mitjançant una protecció retardada basada en el concepte de "imatge tèrmica" com per exemple un relè tèrmic.

En règim transitori el límit de parell depèn del màxim valor d'intensitat d'induït que és capaç de suportar transitòriament el conjunt col·lector de delgues - escombretes. Normalment aquest límit transitori es fixa a dues vegades la intensitat nominal d'induït:  $2 \cdot I_{a_N}$ . Donat que habitualment el motor de c.c. s'utilitza en aplicacions en les que fa falta regular la velocitat, serà el propi sistema de regulació de velocitat el que limitarà la intensitat d'induït o d'armadura perquè no sigui superior a dues vegades el seu valor nominal.

Normalment els períodes transitoris corresponen a quan es vol accelerar o desaccelerar el motor. El límit transitori de la màquina de c.c. de  $2 \cdot I_{a_N}$  és relativament baix en comparació a altres tipus de motors com per exemple el motor d'inducció. Al quedar limitada en règim transitori la intensitat a dues vegades el valor nominal, vol dir que el parell màxim disponible quan volen accelerar és de  $2 \cdot T_N$  això fa que l'accionament acceleri més lentament. Aquesta limitació és important quan es tracta de servomotors de c.c. (Un servomotor es un motor elèctric preparat per tenir un òptim comportament dinàmic).

El concepte transitori és relatiu, en tot cas serà el fabricant del motor de c.c. qui ens pot indicar més concretament quin temps pot suportar el conjunt col·lector de delgues - escombretes un valor d'intensitat  $2 \cdot I_{a_N}$ . De totes maneres el següent gràfic intenta representar aquests conceptes:



La velocitat de gir serà un límit absolut. Les forces centrífugues que suporten debanats i col·lector augmenten quadràticament amb la velocitat, per velocitats superiors al doble de la velocitat nominal, aquestes forces són el suficientment importants com per comprometre la integritat mecànica de la màquina. Veiem també que alguns fabricants indiquen un límit de velocitat màxima més petit que dues vegades la velocitat nominal

----- FI DEL REPÀS MÀQUINES ELÈCTRIQUES -----

## ZONES DE FUNCIONAMENT DE LA MÀQUINA DE C.C. AMB EXCITACIÓ INDEPENDENT. ELS 4 QUADRANTS

El concepte dels "4 quadrants" de funcionament d'una màquina elèctrica rotativa s'aplica a diferents tipus de màquines elèctriques rotatives. La màquina de c.c. és la que ens permet introduir aquest important concepte.

Desenvolupem en la figura el concepte dels "4 quadrants" a partir d'un exemple d'accionament en el que podríem fer treballar la màquina de c.c. en els 4 quadrants. Es tracta de l'atracció de fires anomenada "nube".

En el següent gràfic suposem que el *sentit de la intensitat d'excitació no canvia*, o sigui que en els 4 quadrants el flux tindrà sempre la mateixa polaritat, per exemple  $+ \Phi$ . És en aquest cas que és indistint assenyalar :

$$+ n \text{ ó } + E_a$$

$$- n \text{ ó } - E_a$$

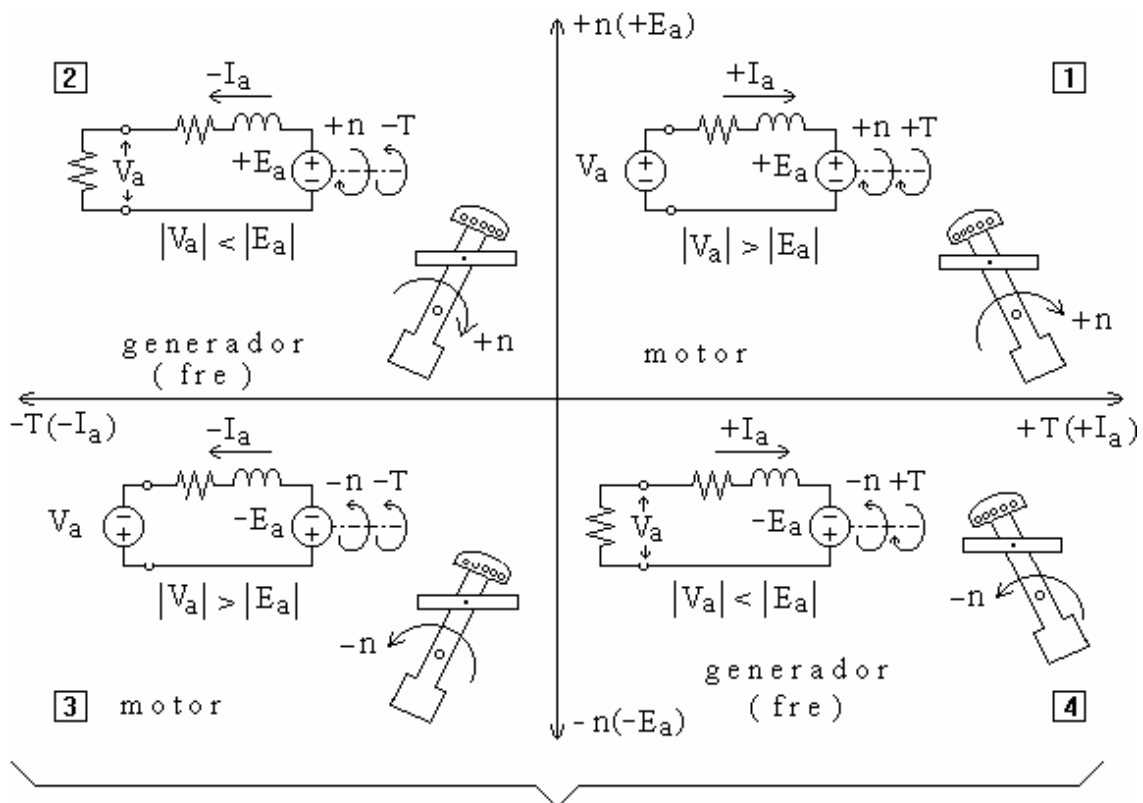
$$+ T \text{ ó } + I_a$$

$$- T \text{ ó } - I_a$$

en efecte, tenint en compte els signes de les variables en les expressions de la f.e.m. interna i del parell tenim:

$$+E_a = 0,1047 \cdot K \cdot (+\Phi) \cdot (+n); \quad -E_a = 0,1047 \cdot K \cdot (+\Phi) \cdot (-n)$$

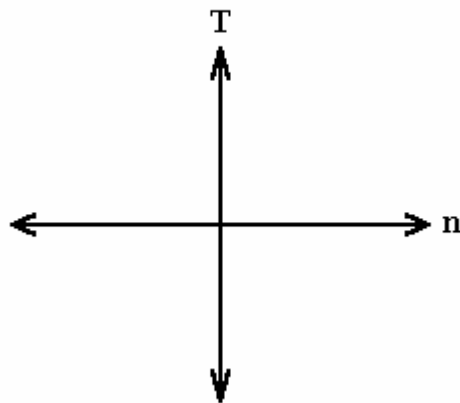
$$+T = K \cdot (+\Phi) \cdot (+I_a); \quad -T = K \cdot (+\Phi) \cdot (-I_a)$$



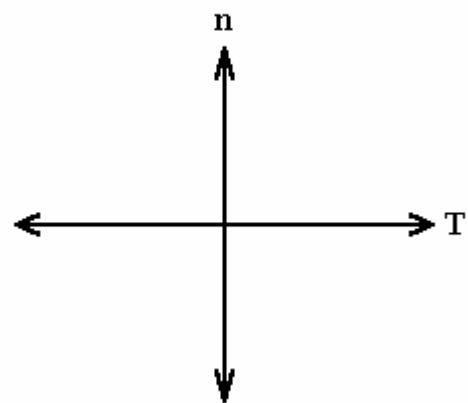
IMPORTANT: ELS PARÈNTESIS NOMÉS SÓN VÀLIDS SI NO VARIEM EL SENTIT DEL FLUX  
(O SIGUI SI NO VARIEM EL SENTIT DE LA INTENSITAT D'EXCITACIÓ)

És important observar que quan es representen les zones de funcionament amb els quatre quadrants els eixos són contraris a les típiques representacions de les corbes parell-velocitat  $T = f(n)$

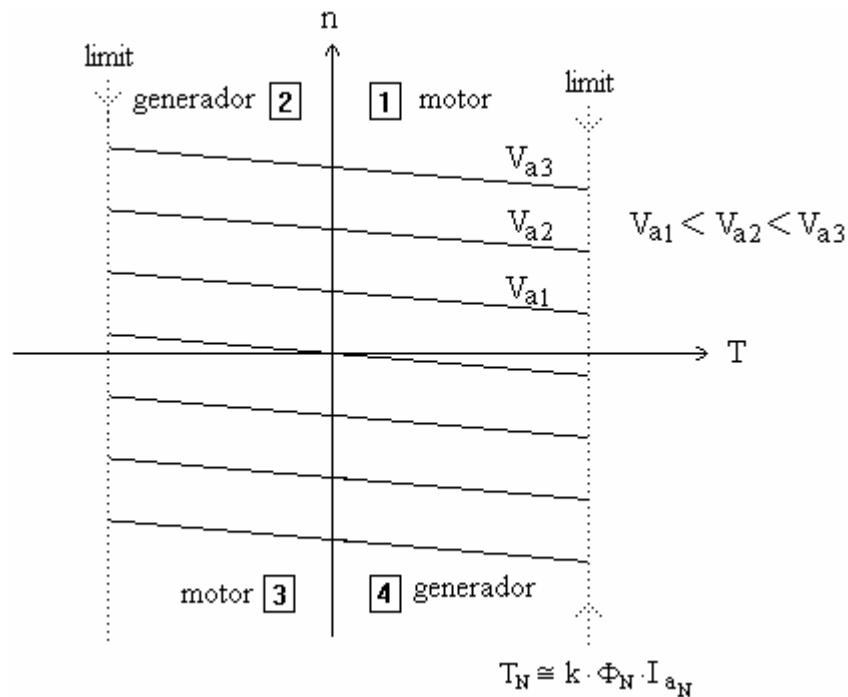
CORBES PARELL-VELOCITAT  
 $T = f(n)$



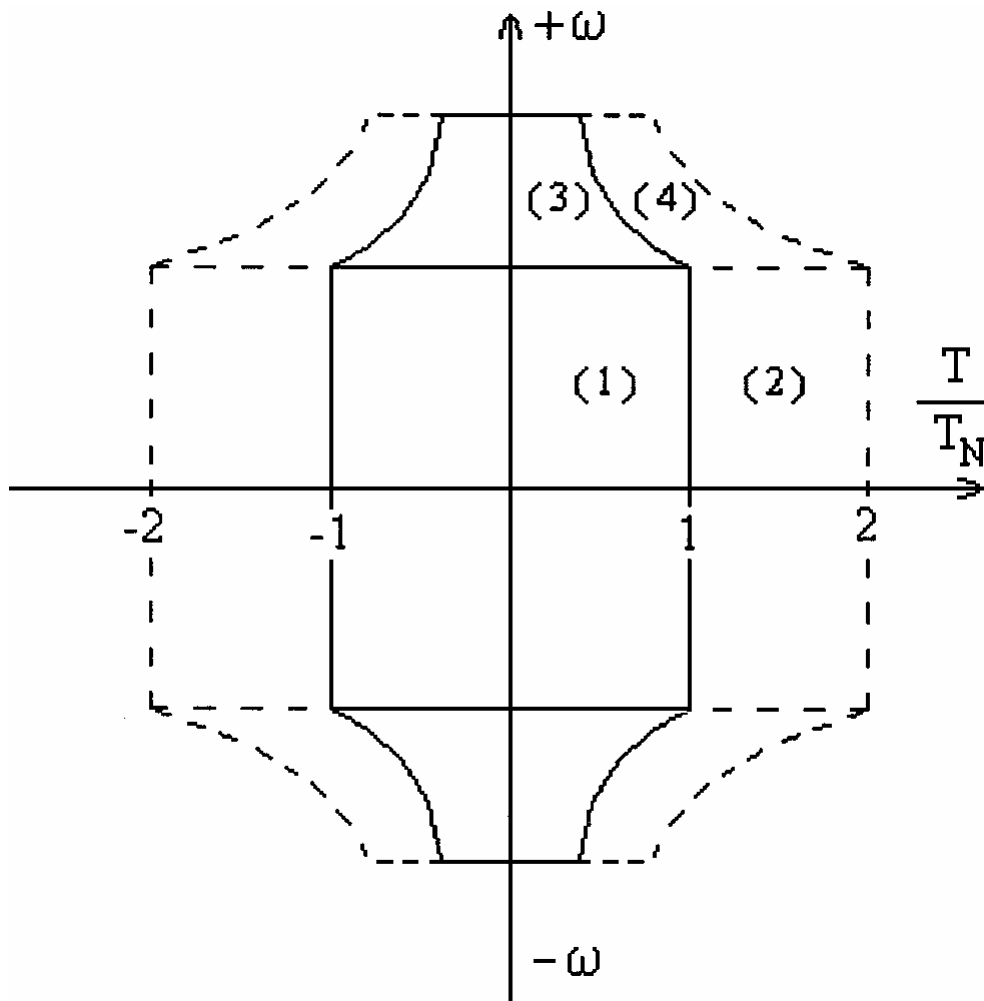
4 QUADRANTS



En aquesta altra figura mostrem les corbes velocitat-parell [ $n = f(T)$ ] representades en els quatre quadrants. Observar que en règim permanent el parell està limitat en funció de la intensitat nominal d'induït o d'armadura:



Podem representar gràfiques de corbes límit amb les dues zones: zona de parell màxim constant i zona de potència màxima constant (o de debilitament de flux) associades al concepte de 4 quadrants:

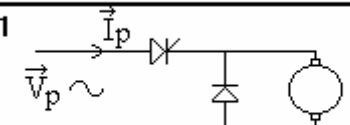
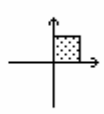
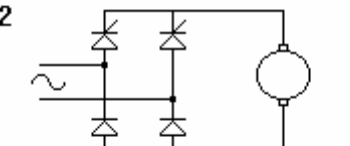
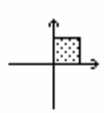
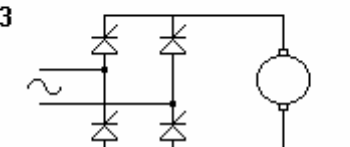
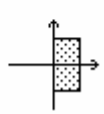
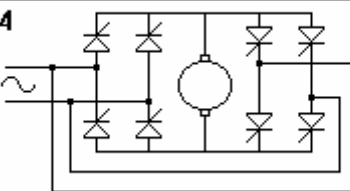
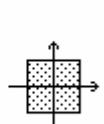


- ( 1 ) Zona de treball a parell màxim constant per a règim permanent
- ( 2 ) Zona permissible en règim transitori a parell màxim constant
- ( 3 ) Zona de treball a potència màxima constant per a règim permanent
- ( 4 ) Zona permissible en règim transitori a potència màxima constant

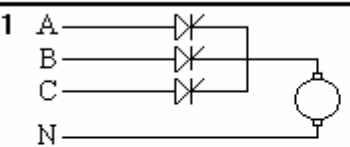
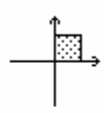
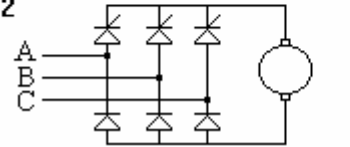
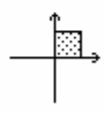
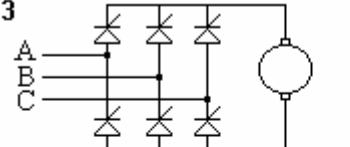
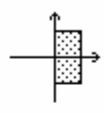
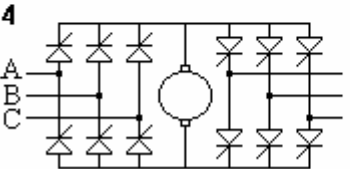
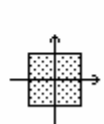
Els motors de c.c. s'utilitzen habitualment en aplicacions en les que es precisa velocitat variable. Per tal de poder subministrar al motor de c.c. una tensió variable d'induït o d'armadura  $V_a$  cal utilitzar sistemes electrònics de potència.

En les següents figures mostrem el tipus de convertidors ac-cc [ rectificadors ] o cc-cc [ trossejadors ( "choppers" ) ] que fa falta instal·lar en funció dels quadrants que volem treballar:

- Convertidors ac-cc amb rectificació monofàsica:

	Potència típica	Quadrant
<b>1</b> 	fins a 0,75 kW	
<b>2</b> 	fins a 15 kW (75 en tracció)	
<b>3</b> 	fins a 15 kW (75 en tracció)	
<b>4</b> 	fins a 15 kW	

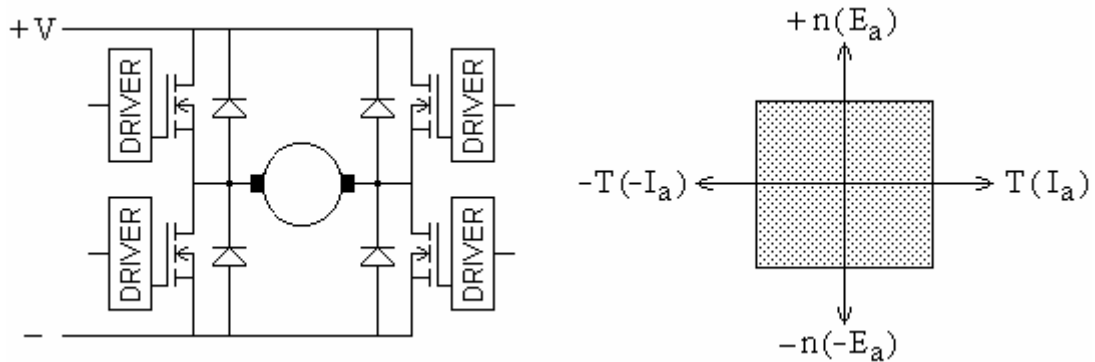
- Convertidors ac-cc amb rectificació trifàsica:

	Potència típica	Quadrant
<b>1</b> 	7,5 - 37 kW	
<b>2</b> 	11 - 150 kW	
<b>3</b> 	75 - 150 kW	
<b>4</b> 	150 - 1500 kW	

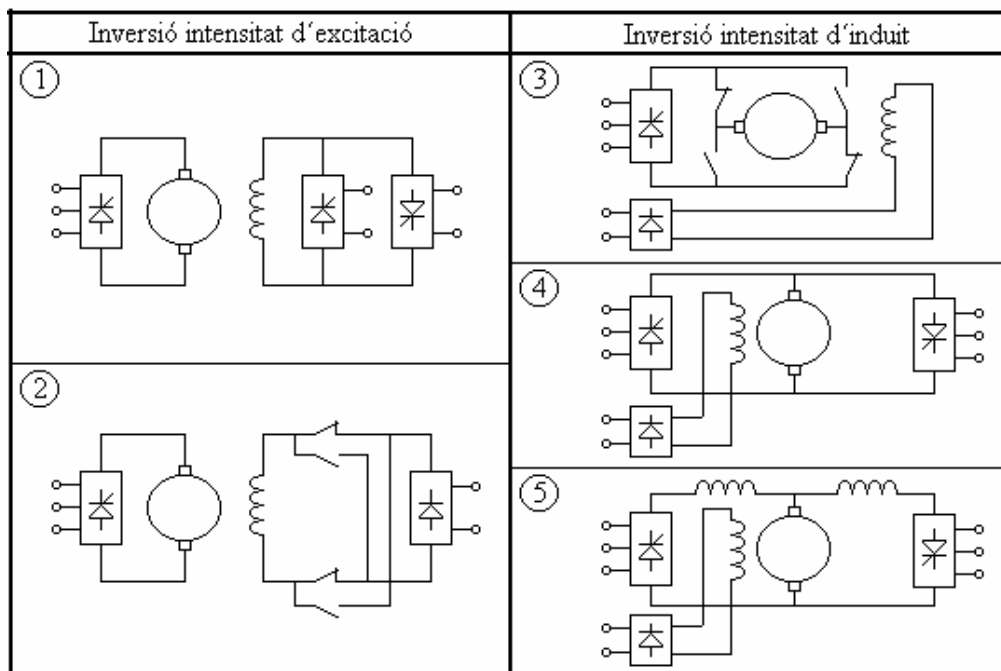


- *Convertidors cc-cc amb trossejadors o “choppers”:*

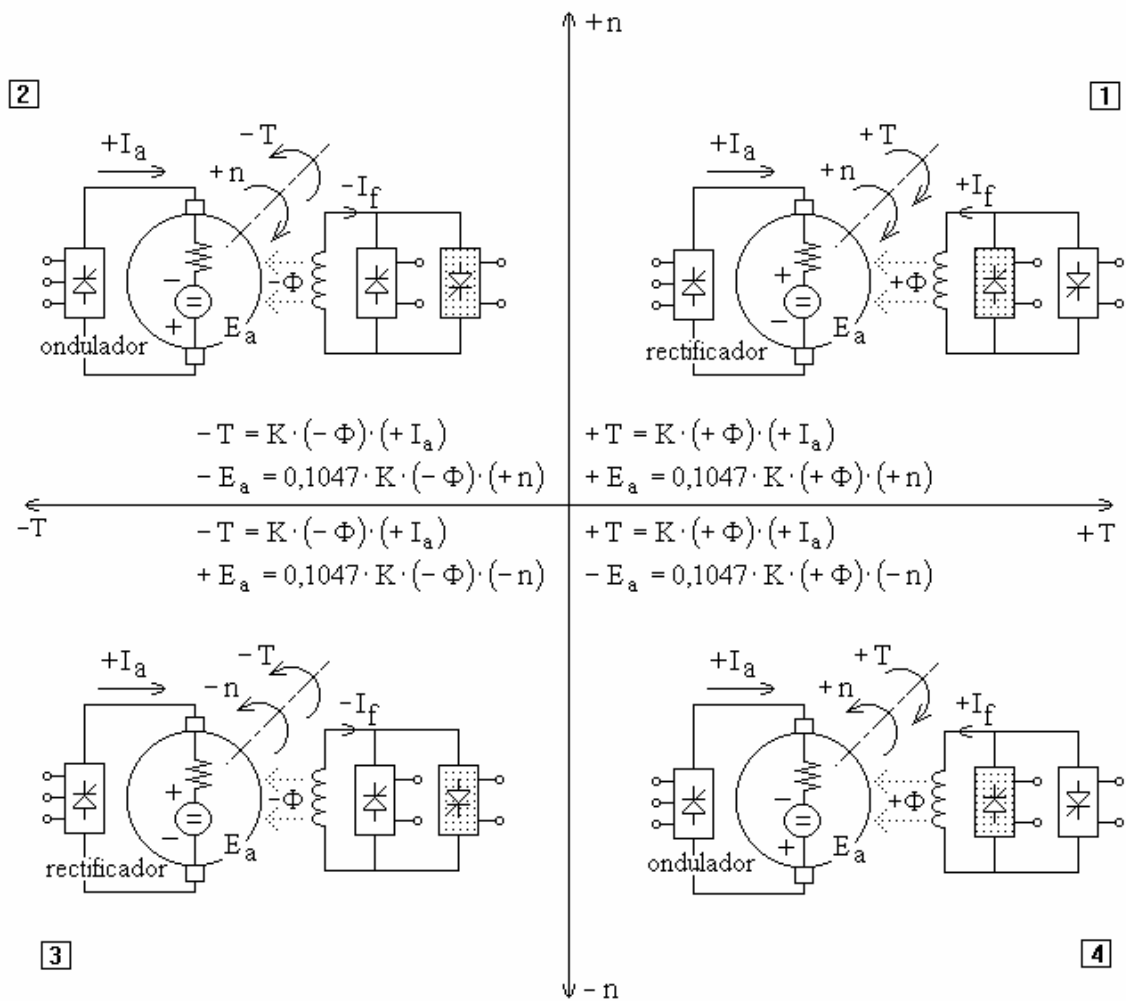
Hi ha diferents muntatges i topologies de convertidors cc-cc, però per alimentar a tensió variable motors de c.c. s'utilitzen habitualment els anomenats muntatges en H en les seves diferents variants. Aquest tipus de muntatges permeten que la màquina de c.c. treballi en els 4 quadrants:



- *Diferents possibilitats per treballar en els 4 quadrants amb rectificació controlada:*

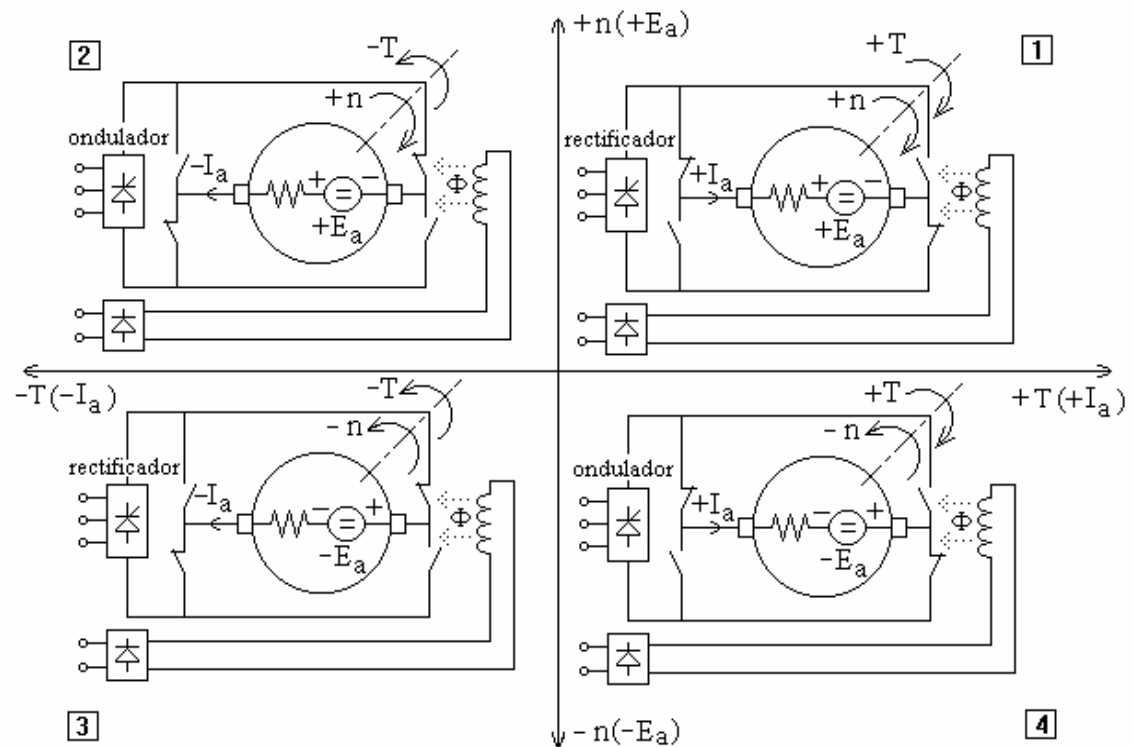


(1) Inversió de la intensitat d'excitació mitjançant 2 ponts totalment controlats:

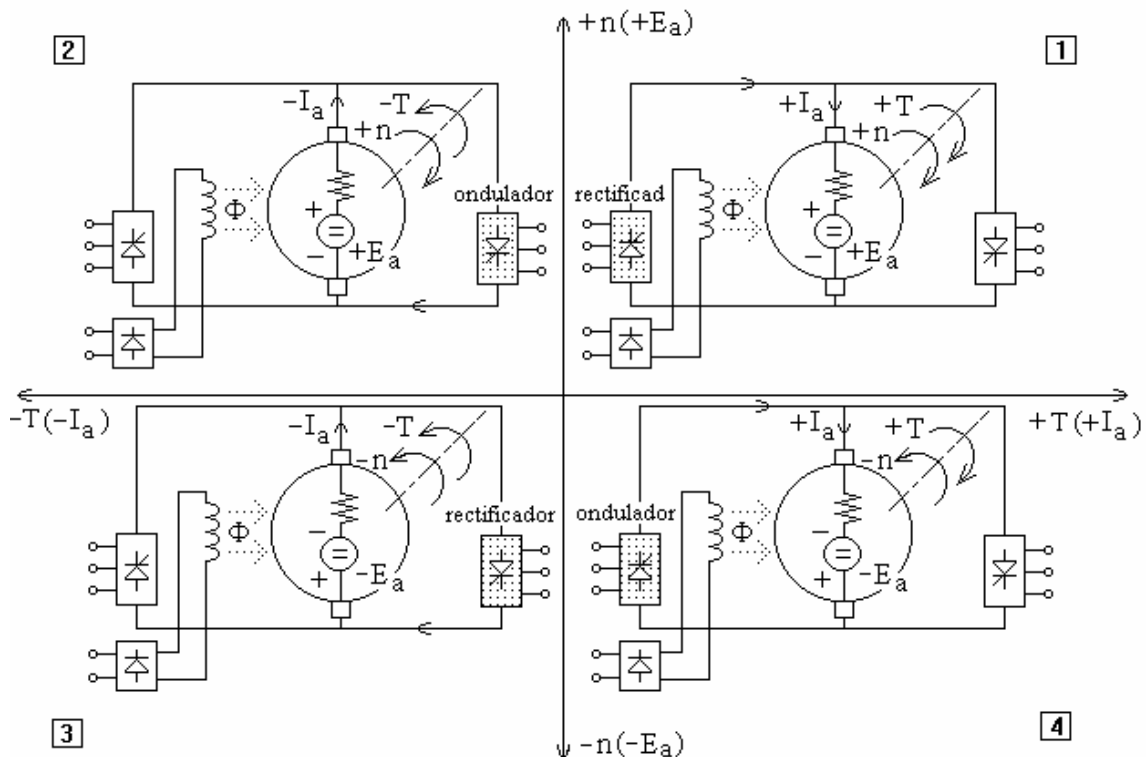


(2) Inversió de la intensitat d'excitació mitjançant reles o contactors de corrent continu:  
El funcionament és idèntic al de la possibilitat (1) .

(3) Inversió de la intensitat d'induït mitjançant contactors de corrent continu:



(4) Inversió de la intensitat d'induït mitjançant dos ponts totalment controlats sense corrent de circulació:



## INTRODUCCIÓ AL COMPORTAMENT EN RÈGIM TRANSITORI

A efectes pràctics fins ara ens hem referit a la velocitat expressant-la en r.p.m. En alguns apartats d'aquest tema expressarem la velocitat en *radians/segon* ( $\omega$ ) perquè és com s'expressa habitualment en els textos que parlen del comportament de màquines elèctriques en règim transitori. Recordem que l'expressió de la f.e.m. interna  $E_a$  si la velocitat està expressada en radians/segon és:  $E_a = K \cdot \Phi \cdot \omega$

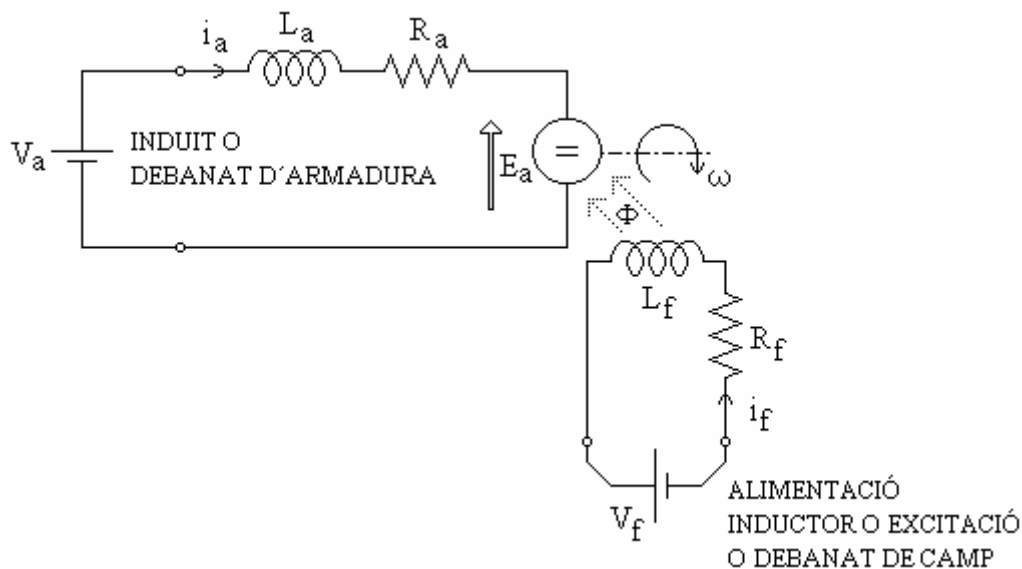
- Efectes transitoris de tipus elèctric:

En contínua, sabem que una bobina ideal és equivalent a un curt-circuit donat que la tensió en una bobina ideal depèn de les variacions d'intensitat, i en contínua en règim permanent o estable no tenim variacions d'intensitat. Però hi ha períodes en els que:

- Variem la tensió d'alimentació de l'induït i això pot provocar variacions de la intensitat d'induït.
- Varia el parell sol·licitat per la càrrega mecànica i per tant haurà de variar la intensitat d'induït.

En aquests dos casos, l'efecte inductiu del debanat d'induït o armadura farà que la intensitat no variï de forma brusca, i tindrem un període transitori.

Així en l'esquema equivalent en règim transitori de la màquina de c.c. hem de representar en el debanat d'induït o armadura i en el debanat de camp o excitació dues bobines amb uns coeficients d'autoinducció  $L_a$  i  $L_f$  respectivament. En la figura següent mostrem l'esquema equivalent del motor de c.c. en règim transitori:



Per avaluar la influència de la inductància del debanat d'induït i del debanat d'excitació, els fabricants ens donen o bé el valor dels coeficients d'autoinducció  $L_a$  i  $L_f$  o bé la

constant de temps  $\left[ \tau = \frac{L}{R} \right]$  del debanats d'induït i del debanat d'excitació (la constant de temps ens dona una idea del temps de resposta). Perquè un motor de c.c. respongui de forma ràpida ha de tenir els coeficients  $L_a$  i  $L_f$  baixos o les constants de temps baixes.

Cal indicar que el debanat de camp o d'excitació té un efecte molt inductiu amb una constant de temps elevada.

Les equacions elèctriques que defineixen el comportament del circuit de debanat d'induït o d'armadura i del circuit de debanat d'excitació en règim transitori del motor de c.c. són:

$$V_a = E_a + i_a R_a + L_a \frac{d i_a}{d t}$$

$$V_f = i_f R_f + L_f \frac{d i_f}{d t}$$

- Efectes transitoris de tipus mecànic:

La inèrcia mecànica del conjunt motor-càrrega influirà en la resposta del motor. Des de punt de vista del motor, respondrà de forma més ràpida el motor que tingui un moment d'inèrcia  $J$  més baix.

En l'apartat 2.2 del tema 2 s'indicava que l'equació mecànica que defineix el comportament del conjunt motor elèctric - càrrega mecànica en règim transitori és:

$$a = \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (T - T_L)$$

$a$  : Acceleració del sistema.

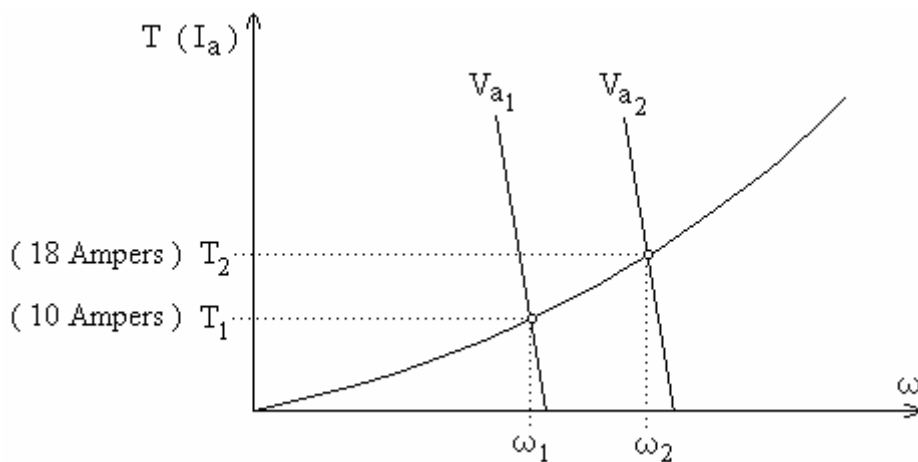
- Si  $a < 0$  (acceleració negativa) el sistema mecànic perd velocitat, o sigui tenim desacceleració.
- Si  $a = 0$  el sistema mecànic té velocitat constant.
- Si  $a > 0$  (acceleració positiva) el sistema guanya velocitat, o sigui que accelera.

$J$  : Moment d'inèrcia del conjunt motor-càrrega mecànica. La inèrcia depèn de les dimensions, forma i pes de les parts mòbils.

$T$ : Parell motor: és el parell subministrat pel motor en aquest instant.

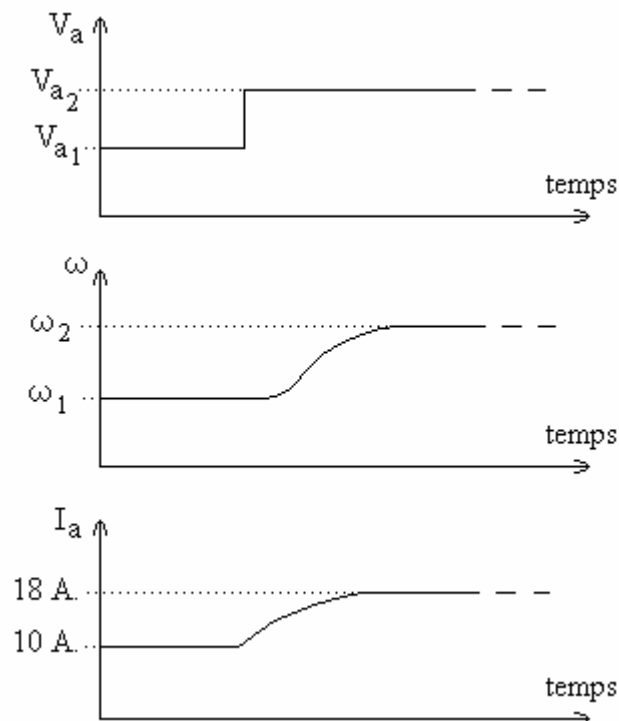
$T_L$  : Parell de la càrrega o parell resistiu: és el parell sol·licitat per la càrrega en aquest instant.

Com exemple observem quina serà l'evolució de la intensitat si modifiquem la tensió d'alimentació d'un motor de c.c. amb excitació independents que acciona una bomba centrífuga:

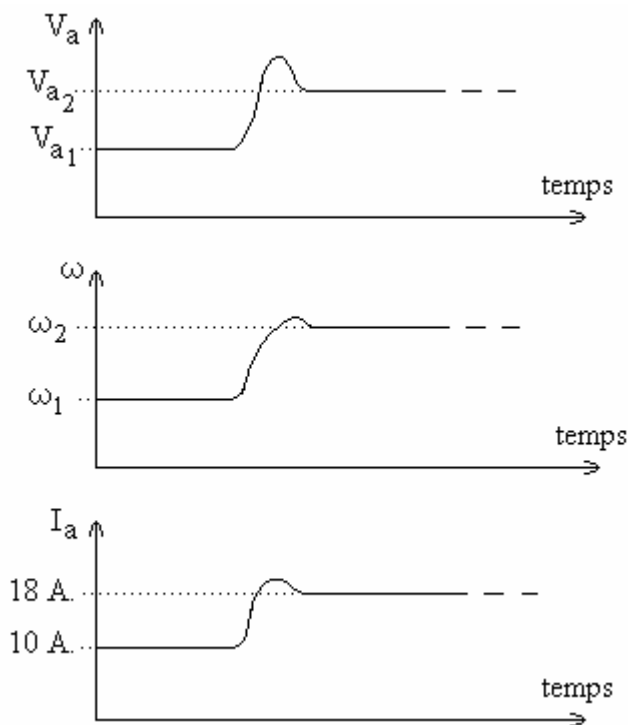


Al variar la tensió d'alimentació de l'induït de  $V_{a1}$  a  $V_{a2}$  el motor passarà d'una velocitat  $\omega_1$  a  $\omega_2$ . La demanda de parell passa de  $T_1$  a  $T_2$  que correspon a intensitats d'induït de 10 Ampers a 18 Ampers (recordem que el parell és proporcional a la intensitat d'induït)

La figura següent mostra la resposta del motor:



Per aconseguir una resposta dinàmica més ràpida, si volem anar d'una velocitat  $\omega_1$  a  $\omega_2$ , el que fa el regulador de velocitat es alimentar amb una tensió superior durant uns breus instants per aconseguir una pujada més ràpida de la intensitat i també transitòriament un valor superior d'intensitat (sobreparell) i per tant major acceleració:



## INTRODUCCIÓ A LA REGULACIÓ DE VELOCITAT DE MOTORS DE C.C.

Quan tenim un sistema en el que és modifica el valor una variable, hem de distingir entre variació i regulació. Introduïm aquest concepte a partir d'un exemple en el que canvia el valor de la temperatura:

La majoria d'automòbils tenen calefacció i aire acondicionat i per tant és possible **variar** la temperatura actuant manualment sobre els comandaments que permeten augmentar o disminuir l'acció de la calefacció o de l'aire acondicionat. En aquest cas no es fa cap mesura de temperatura i és el propi conductor el que ha d'anar corregint la posició dels comandament fins a trobar la temperatura de confort desitjada. En aquest cas tenim un sistema de **variació** de temperatura (també es diu que tenim un llaç obert)

Altres automòbils tenen climatitzador. El sistema climatitzador disposa d'un o varis sensors de temperatura. En aquest cas el conductor fixa la temperatura desitjada (temperatura de consigna) i és el sistema climatitzador que **regula** la temperatura fent una comparació de la temperatura de consigna amb la temperatura desitjada i fent les correccions necessàries actuant sobre el control de la calefacció o de l'aire acondicionat segons convingui. En aquest cas tenim un sistema de **regulació** de temperatura. (tenim un llaç de regulació de temperatura tancat).

En el cas dels accionaments (conjunt de màquina motriu + màquina accionada) tenim molts casos en els que es necessari modificar la velocitat. Hem de distingir però entre:

- Variació de velocitat
- Regulació de velocitat.

Tenim variació de velocitat quan de forma manual s'actua sobre la màquina motriu.

Tenim regulació de velocitat si de forma automàtica el propi sistema de regulació a partir d'un valor de velocitat desitjat (consigna de velocitat) i d'una mesura de la

velocitat real fa les actuacions convenientes sobre la màquina motriu perquè aproximadament la velocitat sigui en cada moment igual a la velocitat de consigna.

Sabem que habitualment per variar la velocitat d'un motor de c.c. amb excitació independent o amb imants permanents és modifica el valor de la tensió d'alimentació del debanat d'induït o d'armadura  $V_a$ .

Naturalment quan es regula la velocitat d'un motor de c.c. s'actua també sobre  $V_a$ . En aquest cas però encara que finalment acabem modificant el valor de  $V_a$ , per aconseguir una bona resposta dinàmica (precisió i rapidesa) cal regular el parell.

Per justificar la necessitat de regular el parell quan fem regulació de velocitat hem de partir de l'equació mecànica que defineix el comportament del conjunt motor elèctric - càrrega mecànica en règim transitori:

$$a = \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (T - T_L)$$

Ens podem trobar en tres casos:

*Període transitori d'acceleració:*

Si  $a > 0$  (acceleració positiva) o sigui el sistema guanya velocitat, o accelera. Això es compleix si el parell motor  $T$  és superior al parell de la càrrega:

$$T > T_L$$

*Període transitori de desacceleració:*

Si  $a < 0$  (acceleració negativa) o sigui el sistema mecànic perd velocitat, o desaccelera. Això es compleix si el parell motor  $T$  és inferior al parell de la càrrega:

$$T < T_L$$

*Període de règim permanent o estable:*

Si  $a = 0$  o sigui el sistema mecànic té velocitat constant. Això es compleix si el parell motor és igual al parell de la càrrega:

$$T = T_L$$



Acció que cal fer sobre el parell si la velocitat mesurada ( $\omega$ ) és inferior a la velocitat de consigna ( $\omega^*$ ):

$$\omega < \omega^* \Rightarrow necessitem a > 0 \Rightarrow necessitem T > T_L \Rightarrow necessitem \mathbf{T} \uparrow$$

Acció que cal fer sobre el parell si la velocitat mesurada ( $\omega$ ) és superior a la velocitat de consigna ( $\omega^*$ ):

$$\omega > \omega^* \Rightarrow necessitem a < 0 \Rightarrow necessitem T < T_L \Rightarrow necessitem \mathbf{T} \downarrow$$

Així per qualsevol accionament amb motor elèctric, es farà una bona de regulació de velocitat si el sistema de regulació regula el parell.

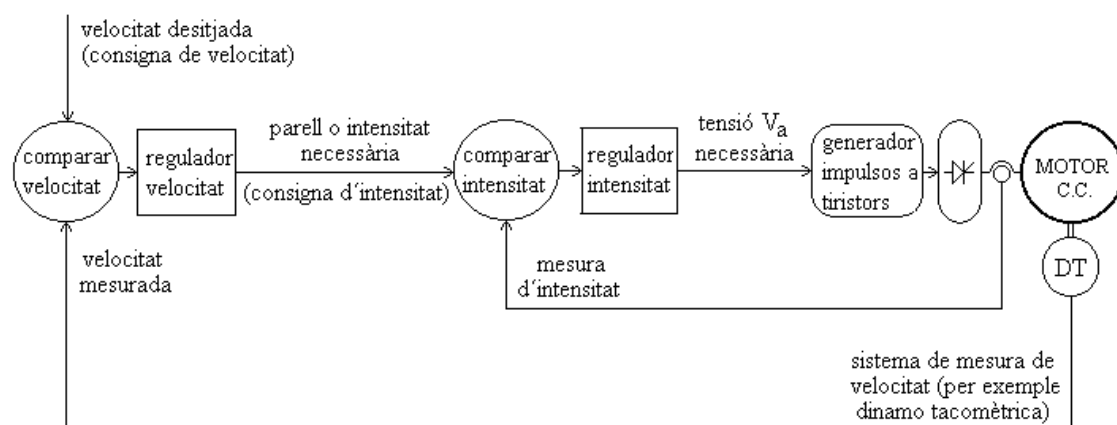
En el cas del motor de c.c. amb excitació independent o amb imants permanents regular el parell implica regular la intensitat del debanat d'induït o d'armadura donat que el parell és proporcional a  $I_a$ .

Així regulant el parell o la intensitat d'induït es podrà fer una bona regulació de velocitat. Però a més així es podrà limitar fàcilment el valor màxim transitori d'intensitat d'induït o d'armadura (habitualment  $2 \times I_a$ ).

Aquest sistema de regulació de velocitat es denomina regulació de *velocitat en cascada* donat que te dos llaços de regulació:

- Un llaç intern de regulació d'intensitat (o parell)
- Un llaç extern de regulació de velocitat

L'estructura és la mostrada en la figura:



Cal dir que encara que hem introduït aquests conceptes pel cas del motor de c.c., aquesta estructura de regulació en cascada amb un llaç intern de regulació de parell i un llaç intern de regulació de velocitat és d'aplicació general en la regulació de velocitat de motors elèctrics rotatius.

Encara que la majoria de les vegades, els accionaments necessiten exclusivament un control de velocitat, en determinades ocasions fa falta controlar la posició o controlar el parell.

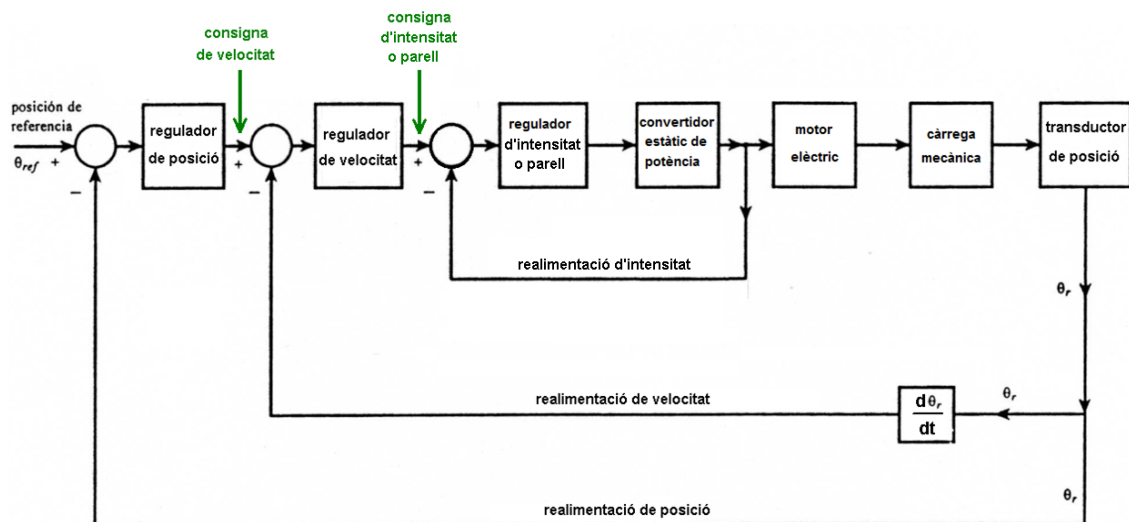
La següent figura mostra un diagrama general d'un sistema de control de motors elèctrics rotatius. En aquest esquema general s'observen 3 controladors o reguladors:

- Controlador de parell
- Controlador de velocitat
- Controlador de posició

El control de posició que es requereix en determinades aplicacions com en robòtica, té tres reguladors: de parell, velocitat i posició.

El controlador de la velocitat, que és el que s'utilitza en la majoria d'accionaments, necessita només els reguladors de velocitat i de parell.

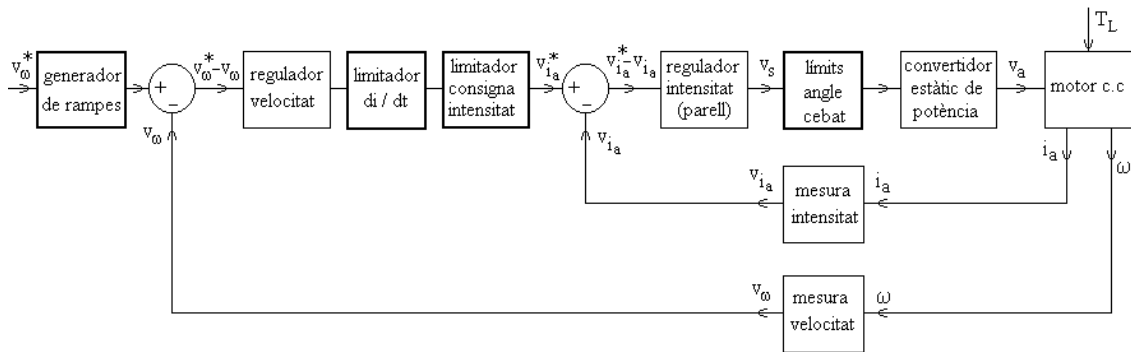
El control de parell que necessiten determinats accionaments en especial en indústries tèxtils i papereres, necessita només un regulador de parell.



## EL REGULADOR REAL DE VELOCITAT DE MOTORS DE CC EN CASCADA

### Elements a afegir al diagrama de blocs:

En la pràctica cal afegir nous elements als diagrames de la regulació de velocitat en cascada que hem vist fins ara. Aquests elements venen determinats per limitacions que cal incloure per no malmetre els elements del convertidor de potència o el propi motor, o limitacions imposades per les característiques del propi accionament



#### - Circuit de rampa de consigna de velocitat:

Una variació de la consigna de velocitat en forma de graó, només té sentit en simulació, o en un sistema real, com a graó de prova per analitzar la resposta del control. Per exemple les instruccions d'ajustament i posta en marxa dels convertidors analògics per alimentar motors de cc fan referència a introduir un graó, normalment de no massa amplitud, per analitzar la resposta, sempre en determinades condicions, com per exemple amb el limitador d'intensitat ajustat prèviament.

En servei normal, habitualment s'evitaran variacions brusques de la consigna de velocitat, per tal de protegir el motor i els elements de l'electrònica de potència.

La consigna de velocitat pot venir donada per un potenciòmetre. En aquest cas, normalment és impossible que tinguem una variació de la tensió de consigna excessivament brusca. En determinats casos però, tot el sistema de regulació de velocitat en cascada forma part com a llaç intern d'un sistema de regulació de determinada variable de procés: posició, cabal, pressió ... En aquest últim cas és possible que la sortida del llaç exterior, que és entrada de consigna del nostre control de velocitat en cascada, pugui presentar variacions brusques. Per això, cal instal·lar abans de l'entrada del regulador de velocitat en cascada, un circuit de rampa. Aquest circuit de rampa pot portar ajustaments diferenciats per controlar de forma diferenciada les acceleracions i les desacceleracions.

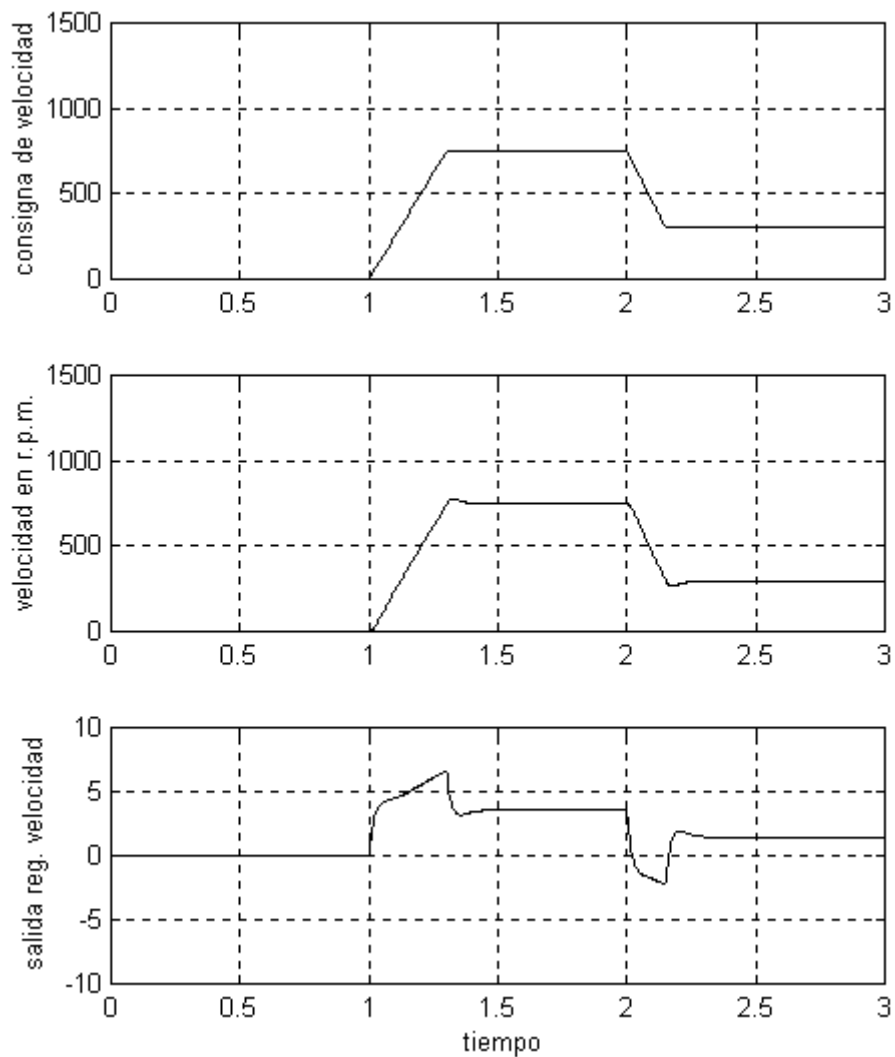
#### - Limitador de $di_a/dt$ :

Té la funció d'evitar que la consigna de corrent augmenti de forma molt sobtada i pugui malmetre elements del convertidor de potència o el propi motor.

- Limitador de consigna d'intensitat:

Normalment és limita el valor màxim de la intensitat admissible pel debanat d'induït en règim transitori a dues vegades el seu valor nominal mitjançant el limitador de consigna d'intensitat

Podeu observar els resultats de la simulació de la pàgina 75 que corresponen a un canvi de consigna de 0-5-2 Volts, que correspon a 0-750-300 r.p.m., però amb limitació de consigna d'intensitat ( $\pm 30$  Ampers: el doble de la intensitat nominal) i amb rampes d'acceleració i desacceleració:



S'observa que el control de velocitat en cascada funciona correctament, doncs la velocitat quasi segueix perfectament l'evolució de la rampa de consigna. A més la intensitat no supera el valor límit de 30 Ampers, o sigui que no ha d'actuar el limitador. El breu període de temps en que tenim intensitat negativa, correspon a una acció de frenat en el segon quadrant.

### **Problemàtica del fenomen de conducció discontinua:**

Ja s'ha comentat en un apartat anterior el fenomen de la conducció discontinua. El fenomen de conducció discontinua varia la resposta del convertidor estàtic de potència, que es tradueix en una reducció del seu guany i un augment de la seva resistència interna, fent que la resposta del sistema sigui força més lenta. Això implica una marcada no linealitat en el sistema i pot donar lloc a oscil·lacions en el motor, especialment en règim de baixes càrregues. Aquest penduleix consisteix en un canvi cíclic entre una suau desacceleració dels elements mecànics accionats pel motor i una ràpida acceleració.

Amb convertidors a base de tiristors, amb baixa càrrega mecànica, la conducció discontinua és casi inevitable. Per evitar aquest desigual comportament del llaç de corrent, amb conducció contínua i discontinua, es poden adoptar varies solucions:

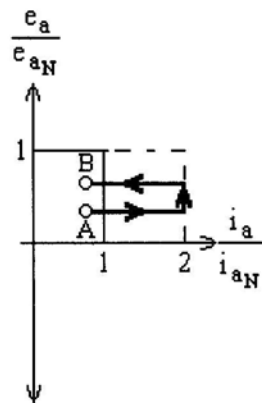
- Afegint una inductància en sèrie amb l'alimentació del debanat d'induït o d'armadura. Això naturalment afectarà al càlcul de la constant elèctrica del motor.
- Fer un control adaptatiu, fent que el llaç de regulació de velocitat vagi augmentant el guany i reduint la seva constant de temps a mesura que la intensitat es va fent cada vegada més discontinua. El dispositiu per mesurar la discontinuïtat pot ser un detector de nivell d'intensitat zero, i quan més temps estigui a zero la intensitat, més discontinua serà aquesta. El senyal de sortida d'aquest detector de nivell és el que incideix directament sobre el canvi de guany del regulador PI d'intensitat.
- La utilització de convertidors estàtics de potència a base de choppers o trossejadors minimitza aquest problema, doncs hi ha menys possibilitats que tinguem conducció discontinua.

### **Resposta del convertidor de regulació en cascada en funció dels quadrants a que pot treballar el convertidor:**

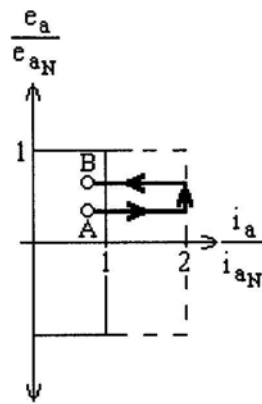
Comparem el comportament de convertidors, d'un, dos, i quatre quadrants treballant a flux constant (intensitat d'excitació constant).

En la figura que segueix es mostra el procés seguit pel sistema de regulació, quan augmenta la consigna de velocitat, partint d'un punt determinat de treball A, per passar a un altre punt B. Donat que hem d'augmentar la velocitat, la regulació en cascada no "demana" cap acció de frenat. Treballem doncs només en el primer quadrant i el comportament resulta idèntic en els tres casos. Donat que la f.e.m.  $e_a$  és proporcional a la velocitat, i la intensitat d'induït  $i_a$  proporcional al parell, representem els quatre quadrants de treball mitjançant una gràfica  $e_a - i_a$ . S'ha considerat un cas extrem en que la intensitat evoluciona fins al seu valor màxim admissible en règim transitori, o sigui dues vegades la intensitat nominal.

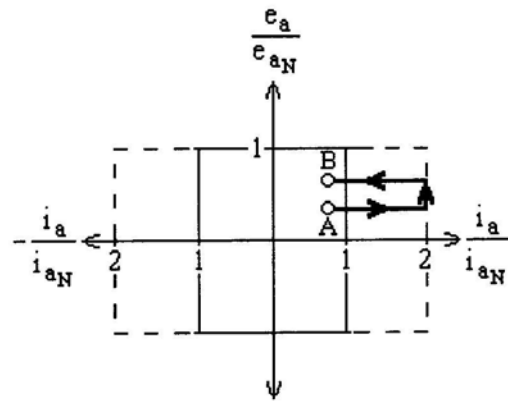
EL CONVERTIDOR  
POT TREBALLAR  
NOMÉS EN EL 1r.  
QUADRANT:



EL CONVERTIDOR POT  
TREBALLAR EN EL 1r.  
I 4t. QUADRANT:

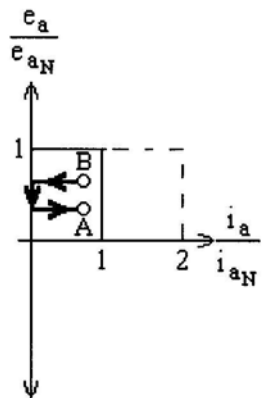


EL CONVERTIDOR POT  
TREBALLAR EN ELS  
QUATRE QUADRANTS:

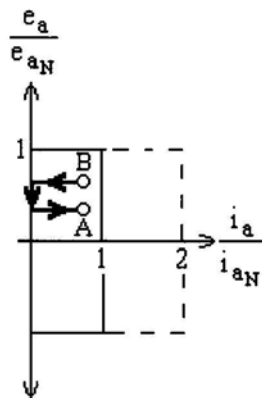


En la següent figura, es mostra el procés seguit pel sistema, quan es disminueix la consigna de velocitat, passant del règim permanent B al règim permanent A. Al igual que abans, s'ha considerat un cas extrem en que la intensitat evoluciona fins al seu valor màxim admissible en règim transitori, o sigui dues vegades la intensitat nominal.

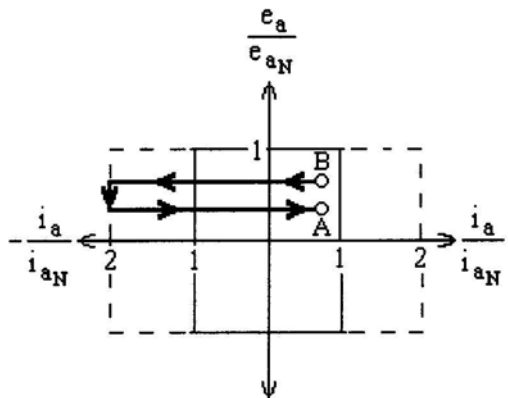
EL CONVERTIDOR  
POT TREBALLAR  
NOMÉS EN EL 1r.  
QUADRANT:



EL CONVERTIDOR POT  
TREBALLAR EN EL 1r.  
I 4t. QUADRANT:

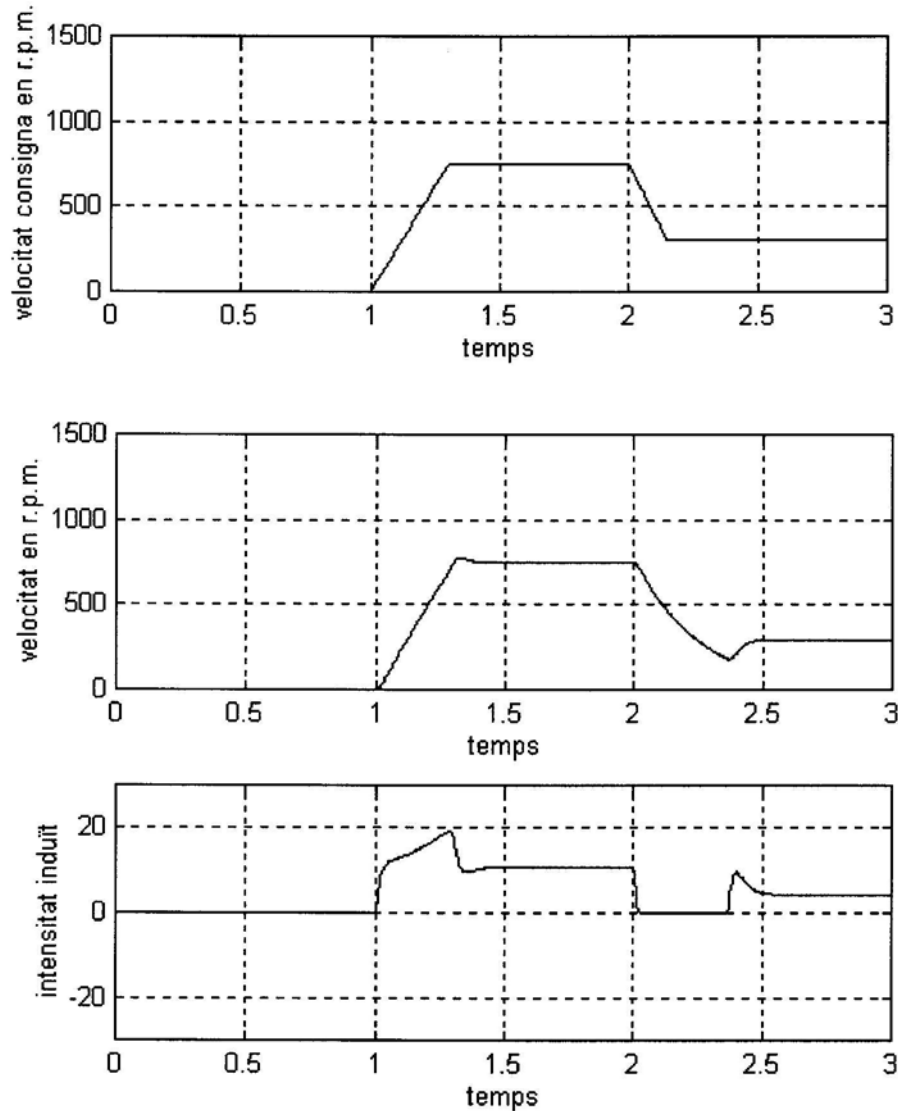


EL CONVERTIDOR POT  
TREBALLAR EN ELS  
QUATRE QUADRANTS:



Com s'aprecia, el comportament és idèntic en els dos primers casos, donat que el convertidor no pot treballar en el 2n. quadrant. En els dos casos, el regulador de velocitat "demana" una acció de frenat i per tant dona com a sortida una tensió de consigna negativa pel llaç tancat de regulació d'intensitat. L'estructura del convertidor no permet la inversió d'intensitat (no respon a tensions de referència negatives) i la intensitat adopta el seu mínim valor, o sigui es torna zero. Amb intensitat zero, la màquina de cc no dona parell elèctric de frenat, i la reducció de velocitat depèn dels parells de càrrega i els fregaments, i la inèrcia. Amb grans inèrcies, o amb el motor en buit, la reducció de velocitat és lenta.

En la següent figura, es mostra la resposta de la simulació de l'exemple desenvolupat, però considerant que es treballa només amb un simple pont totalment controlat que no permet la circulació d'intensitats negatives. Apliquem els mateixos canvis de consigna de velocitat que abans, amb les mateixes rampes d'acceleració i desacceleració:

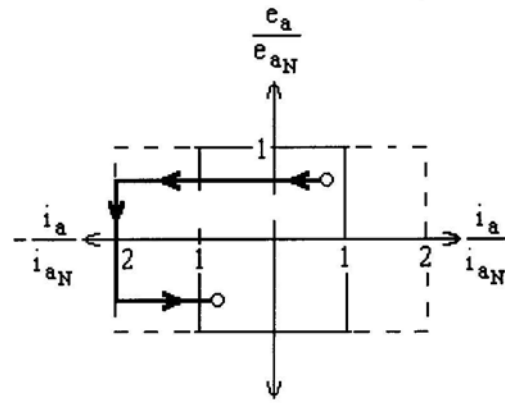


Observem que al passar la tensió de consigna de 5 a 2 volts, que correspon a un canvi de velocitat de 750 r.p.m. a 300 r.p.m., no hi ha frenat elèctric i la velocitat baixa molt lentament.

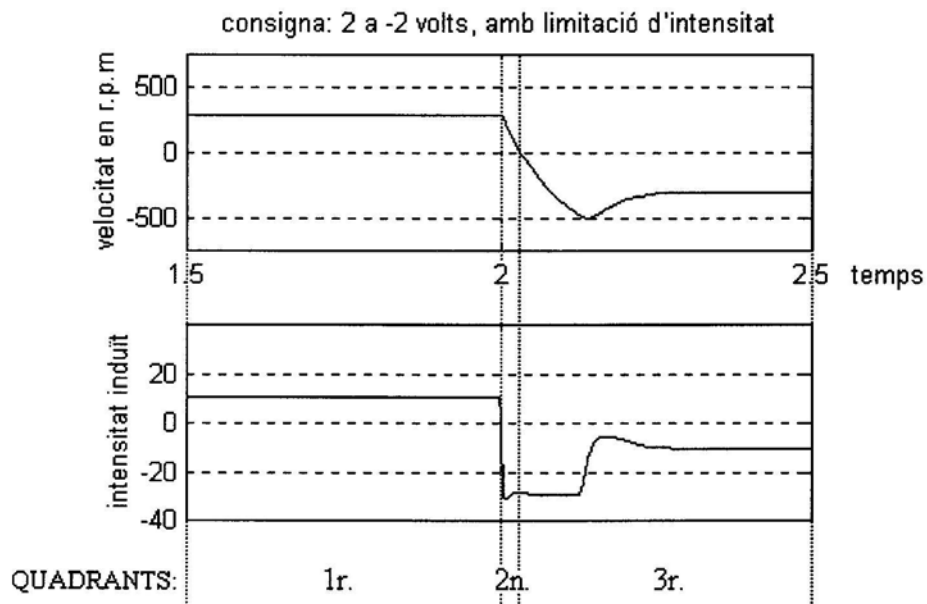
### Interval sense parell en accionaments de varis quadrants:

Analitzem com s'hauria d'executar idealment una inversió de sentit de gir, suposem que desitgem passar de funcionar en el 1r. quadrant a 1000 r.p.m. a funcionar en el 3r. quadrant a -1000 r.p.m.

El control de velocitat en cascada naturalment demana inversió de parell o d'intensitat i té lloc primer una acció de frenat en el 2n. quadrant abans de passar al 3r. quadrant i accelerar fins a la velocitat de -1000 r.p.m. S'ha considerat també un cas extrem en que la intensitat evoluciona fins al seu valor màxim admissible en règim transitori, o sigui dues vegades la intensitat nominal



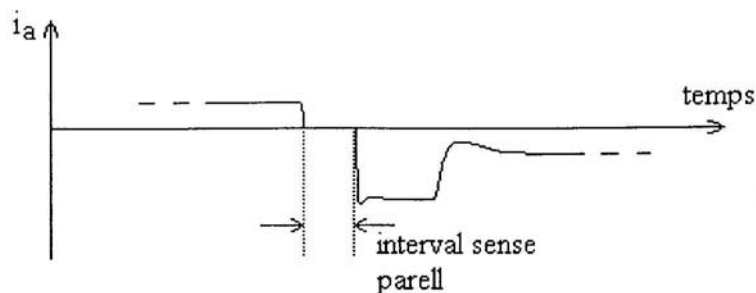
La següent gràfica de simulació il.lustra un procés d'inversió, amb un canvi de tensió de consigna, en aquest cas un graó, de 2 a -2 volts, que correspon a un canvi de consigna de velocitat de +300 a -300 r.p.m.:



Podem observar el pas per tres quadrants. A més, veiem que un canvi sobtat de la consigna en forma de graó, obliga a treballar al limitador d'intensitat ajustat a  $\pm 30$  Ampers.

Determinats convertidors estàtics de potència no poden invertir el sentit del corrent, o sigui passar del 1r. al 2n. quadrant, o del 3r. al 4t. De forma instantània. Podem definir *l'interval sense parell* per un accionament reversible com el període de temps durant el qual tenen lloc totes les maniobres electròniques i electromecàniques en alguns casos, necessàries per invertir el sentit de gir. Durant aquest interval no circula corrent pel motor i no es genera per tant parell. La intensitat en una inversió de sentit de gir amb un convertidor amb interval sense parell seria de la forma:





En un proper apartat veurem quins són els temps d'interval sense parell típics pels diferents tipus d'accionaments amb ponts de tiristors

## ESQUEMA DE BLOCS D'IMPLEMENTACIÓ D'UN ACCIONAMENT DE 4 QUADRANTS AMB UN MUNTATGE DE DOBLE PONT DE TIRISTORS SENSE CORRENT CIRCULANT

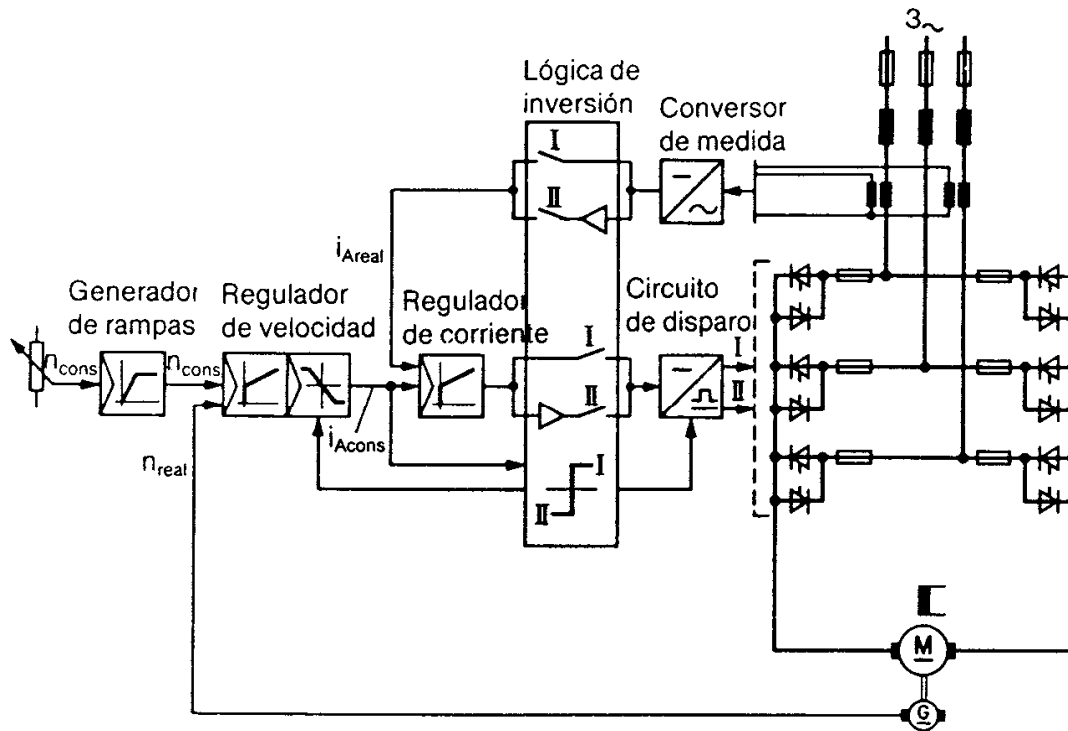
Ja hem revisat anteriorment els possibles quadrants de treball per diferents topologies dels convertidors de potència amb tiristors i més concretament quins muntatges ens permeten treballar en els 4 quadrants.

La següent figura ens serveix per a repassar una vegada més aquests conceptes:

Accionamientos de un cuadrante		Accionamientos de varios cuadrantes			
con convertidor simple		con convertidor simple		con convertidor doble	
semicontrolado	controlado	Inversión del circuito de inducido	Inversión del circuito de campo	Montaje en anti-paralelo sin corriente circulante	Montaje en cruz con corriente circulante
  Margen de potencias 1 ~ hasta 10 kW 3 ~ hasta 100 kW	  Margen de potencias 1 ~ hasta 10 kW 3 ~ hasta 10 MW Es posible invertir el sentido de giro manteniendo el mismo sentido del par.	  Margen de potencias 1 ~ hasta 10 kW 3 ~ hasta 300 kW Intervalo sin par: 0,1 a 0,2 s	  Margen de potencias 1 ~ hasta 10 kW 3 ~ hasta 10 MW Intervalo sin par: 0,5 a 2 s	  Margen de potencias 1 ~ hasta 10 kW 3 ~ hasta 10 MW Intervalo sin par: 2 a 10 ms	  Margen de potencias 1 ~ hasta 10 kW 3 ~ hasta 10 MW Intervalo sin par: ninguno

Hem ressaltat el muntatge de dos pont de tiristors en l'induït en antiparalel sense corrent circulant per ser un dels més utilitzats i per ser l'estructura que s'utilitza en la pràctica 2. En aquest apartat veurem l'esquema de blocs d'implementació d'aquest tipus d'accionament.

Quan s'opera sense corrent circulant només es controla un dels convertidors, bloquejant-se els impulsos de disparament corresponent a l'altre. Al passar del 1r. al 2n. quadrant o del 3r. al 4t., la lògica d'inversió ha de detectar amb gran precisió el pas per zero del corrent del convertidor que deixa d'actuar i controlar el seu bloqueig, així com l'alliberació de l'altre convertidor. Durant aquesta maniobra es presenta un breu interval sense intensitat  $i$ , per tant, també sense parell.



**Accionamiento de varios cuadrantes con convertidor en montaje en antiparalelo sin corriente circulante**

La següent figura mostra en forma d'esquema de blocs com funciona el mateix tipus d'accionament però implementat amb un sistema microprocessat:

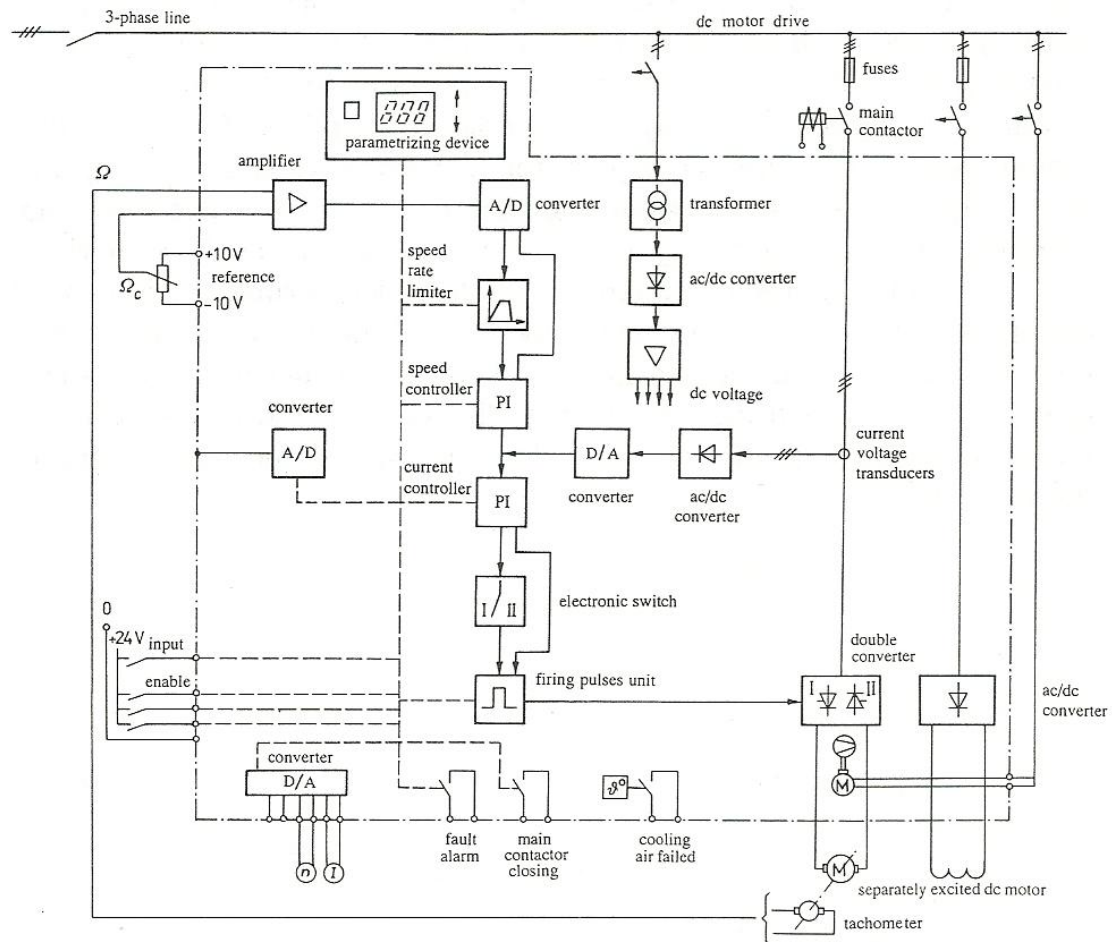
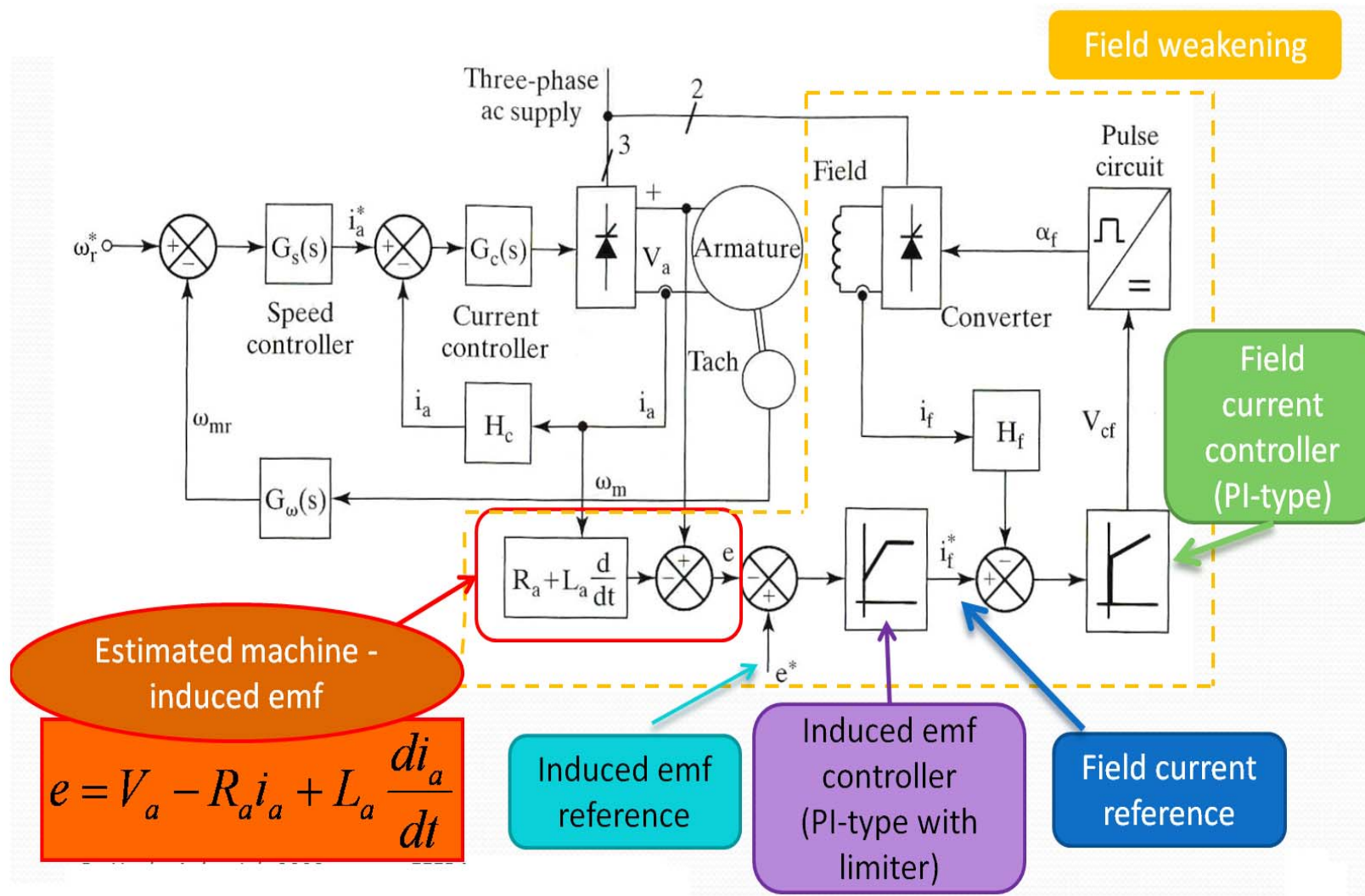


Fig. 11.2. Simplified diagram of a microcomputer speed control system for dc motor drive

## INTRODUCCIÓ AL CONTROL DEL MOTOR DE CORRENT CONTINU AMB DEBILITAMENT DE FLUX

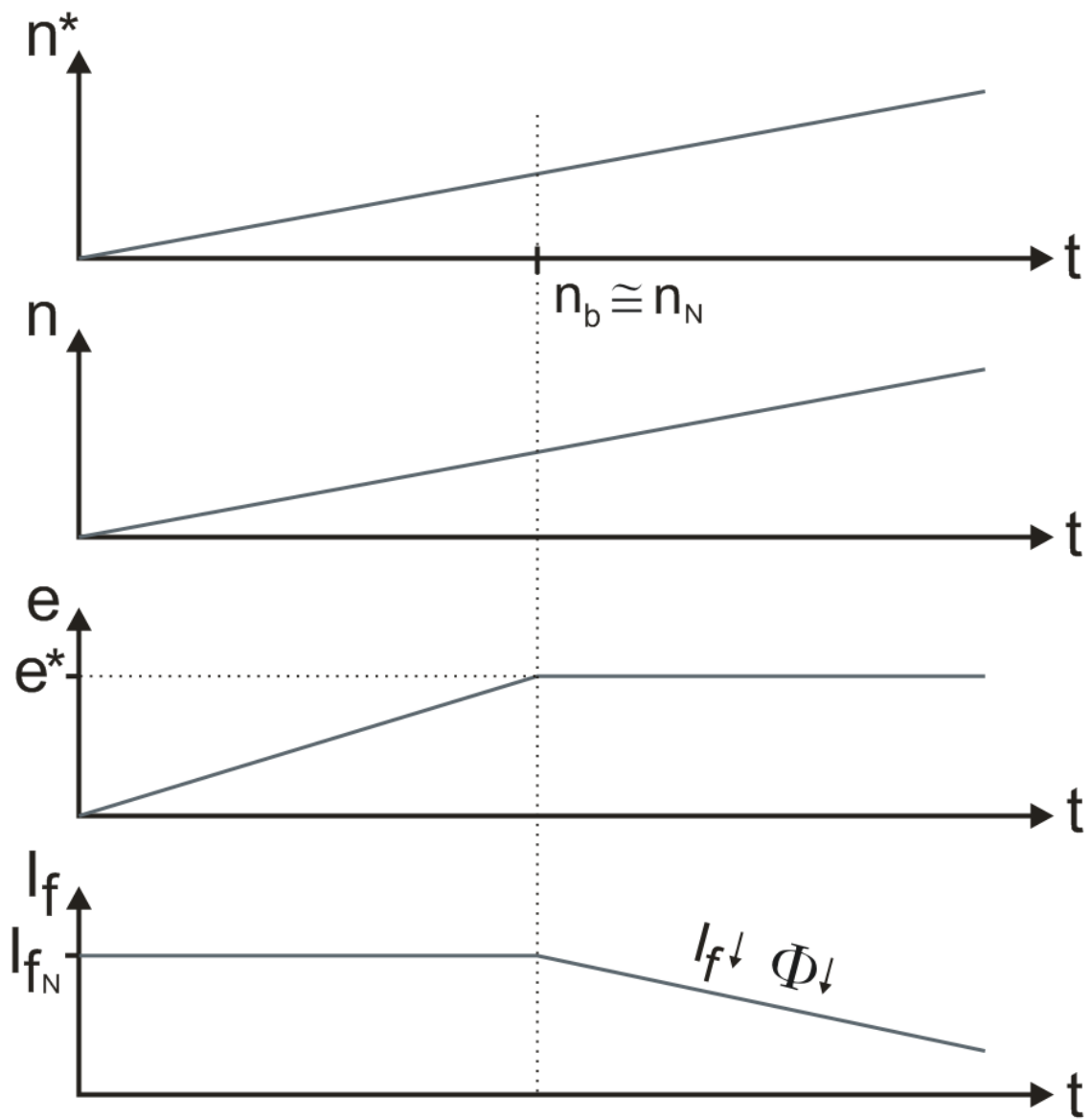


- The **estimated machine-induced emf** is obtained from:

$$e = V_a - R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt}$$

(the estimated emf is **machine-parameter sensitive** and must be adaptive)

- The reference induced emf  $e^*$  is compared to  $e$  to obtain the induced emf error signal (for speed above base speed,  $e^*$  kept constant at rated emf value so that  $\phi \propto 1/\omega$ )
- The **induced emf (PI) controller** processes the error and **produces the field current reference  $i_f^*$**
- $i_f^*$  is **limited** by the limiter to keep within the safe field current limits
- $i_f^*$  is compared to actual field current  $i_f$  to obtain a current error signal
- The **field current (PI) controller** processes the error to **alter the control signal  $v_{cf}$**  (similar to armature current  $i_a$  control loop)
- $v_{cf}$  **modifies the firing angle  $\alpha_f$**  to be sent to the converter to obtain the motor field voltage for the desired motor field flux



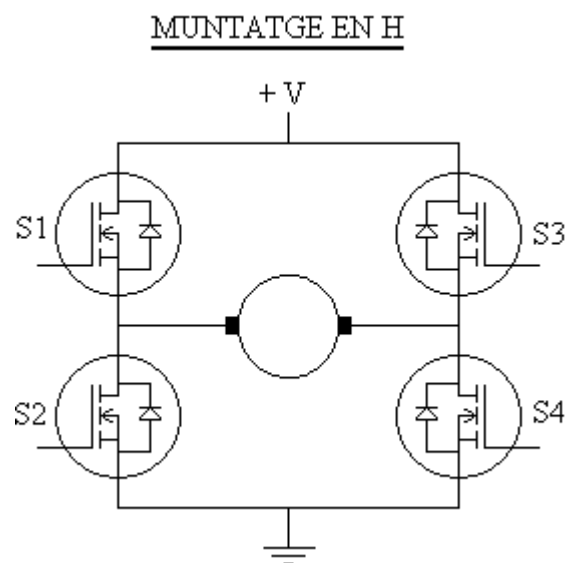
---

## ESTRUCTURES DELS ACCIONAMENTS A QUATRE QUADRANTS AMB TROSSEJADORS AMB MUNTATGE DE PONT EN H

---

### GENERALITATS

Pel control d'un motor de c.c. amb convertidor estàtic de potència amb trossejadors o choppers en els quatre quadrants es necessita una excitació en pont capaç de permetre la circulació d'intensitat pel motor en els dos sentits. Per això normalment s'utilitza un pont en H com es mostra en la figura:



Hem de distingir dos tipus de funcionament en funció de com treballa el pont quant la màquina de cc fa de motor o sigui en el 1r i 3r quadrant

- ACCIONAMENT AMB UN PONT EN H AMB UNA DIAGONAL BLOQUEJADA I L'ALTRE TREBALLANT

En el 1r quadrant només “treballa” una diagonal” i en el 3r quadrant només “treballa” una diagonal. Per exemple

- Diagonal A: semiconductors S1 i S2 >> motor girant per exemple a dretes
- Diagonal B: semiconductors S3 i S4 >> motor girant a esquerres

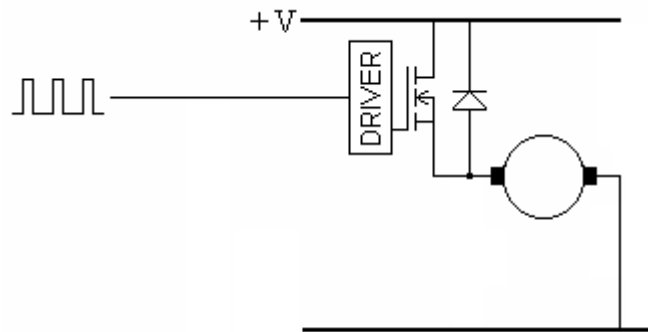
- ACCIONAMENT AMB PONT EN H TREBALLANT ALTERNATIVAMENT LES DUES DIAGONALS

## ACCIONAMENT AMB PONT EN H, AMB UNA DIAGONAL BLOQUEJADA I L'ALTRE TREBALLANT

### Introducció

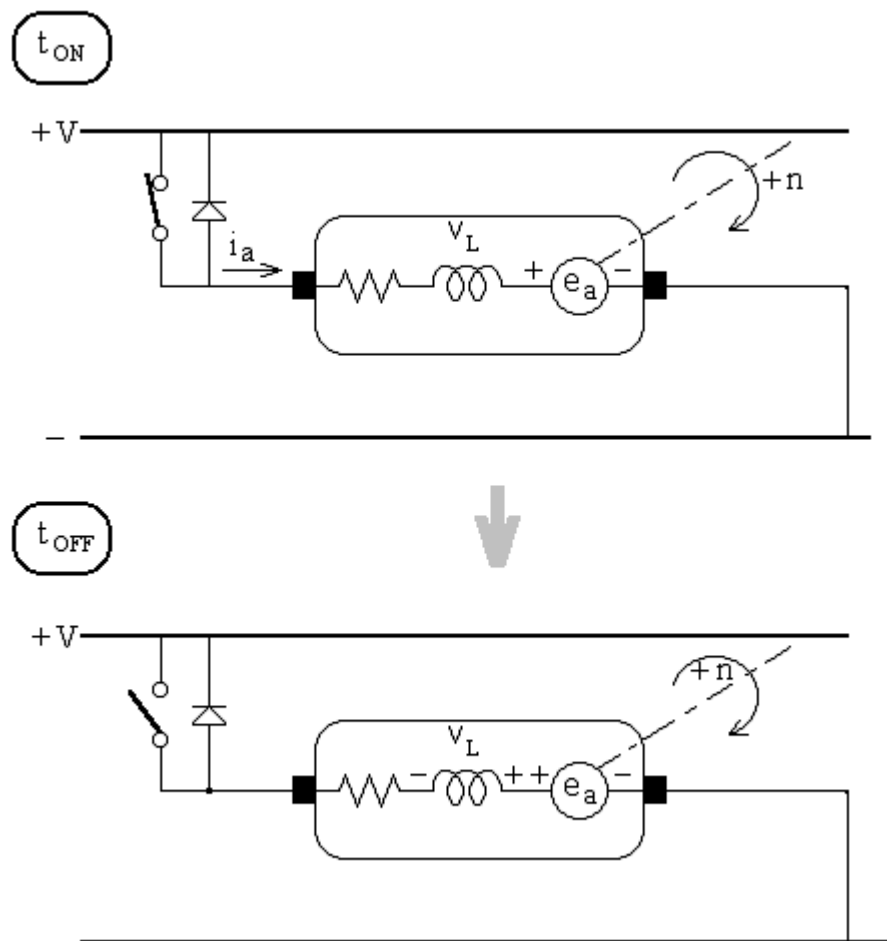
- Necessitat de diode volant quant es treballa en el 1r o 3r quadrant

Analitzem el següent muntatge simple de “chopper” pensat en principi per a poder treballar només en el 1r quadrant:



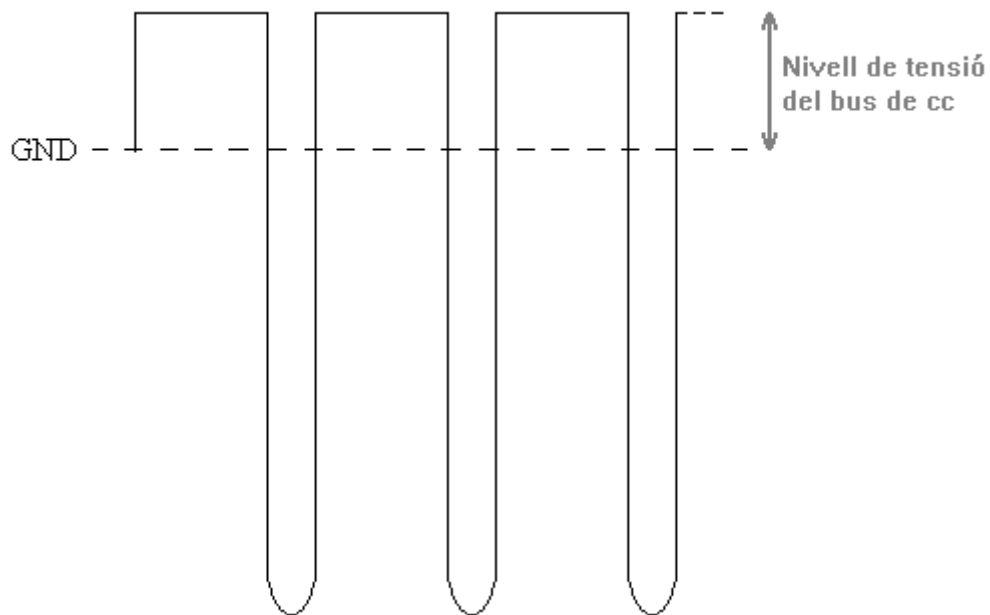
Què passaria amb l'efecte d'autoinducció del debanat d'induït?

Ho podem analitzar en la següent figura:

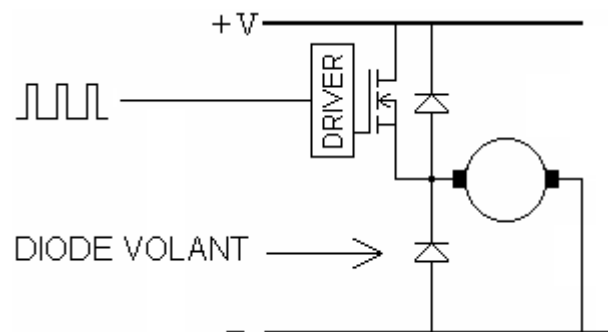


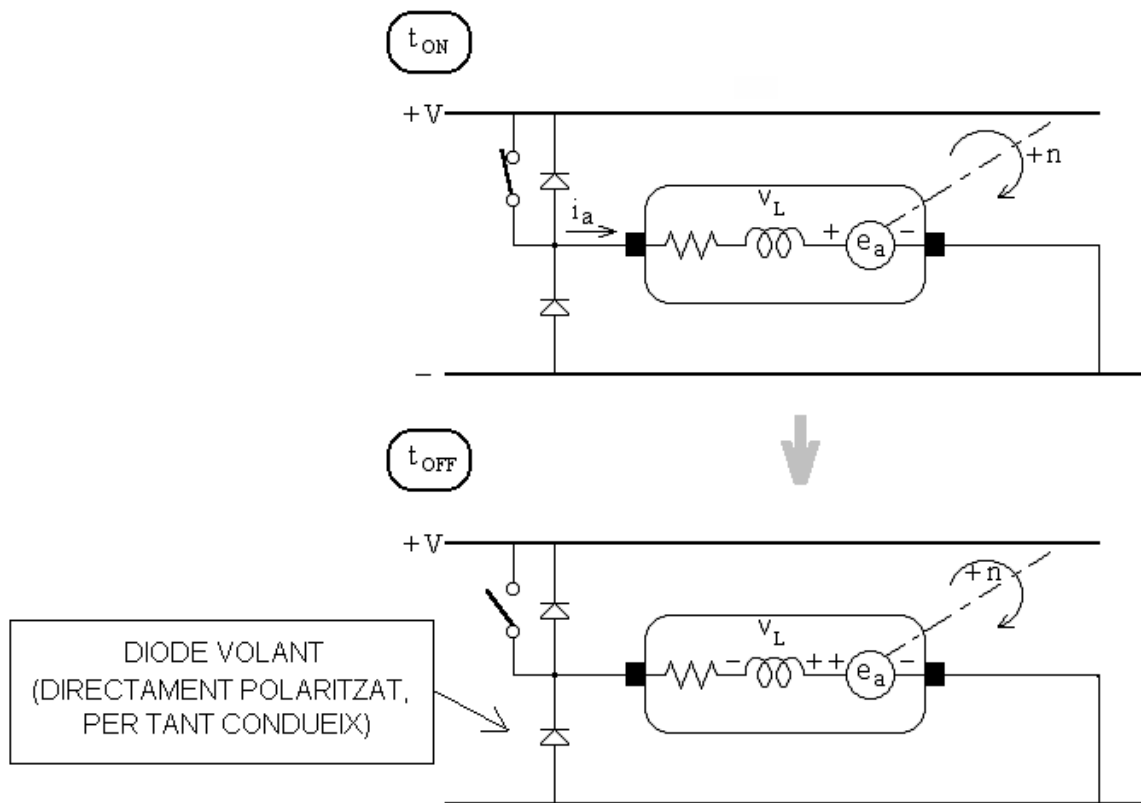


La tensió  $V_L$  és superior a  $e_a$  i apareix en el temps  $t_{OFF}$  una tensió negativa en borns del motor. Oscil.lograma de la forma d'ona de la tensió en borns del motor:

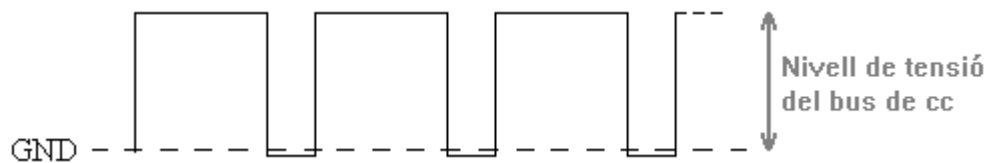


Per evitar això cal un diode que en el temps  $t_{OFF}$  faci de diode volant:





Oscil.lograma de la forma d'ona de la tensió en borns del motor:



En la següent figura es pot veure també la forma d'ona de la intensitat d'induit:

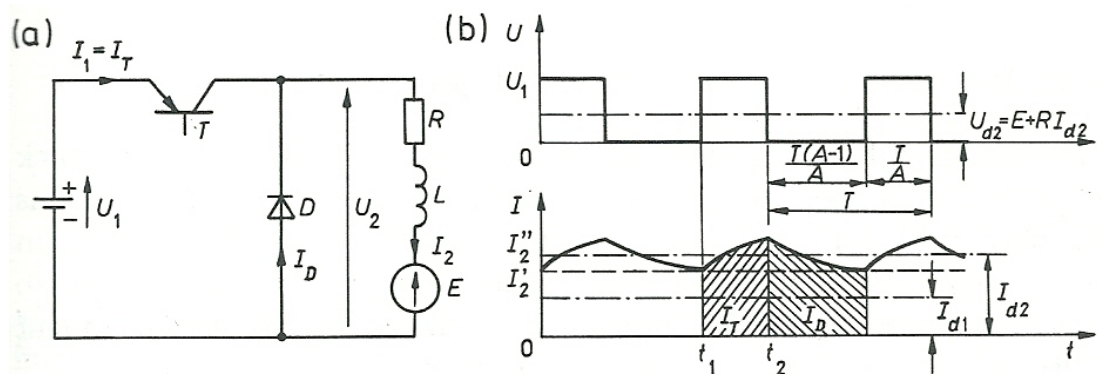
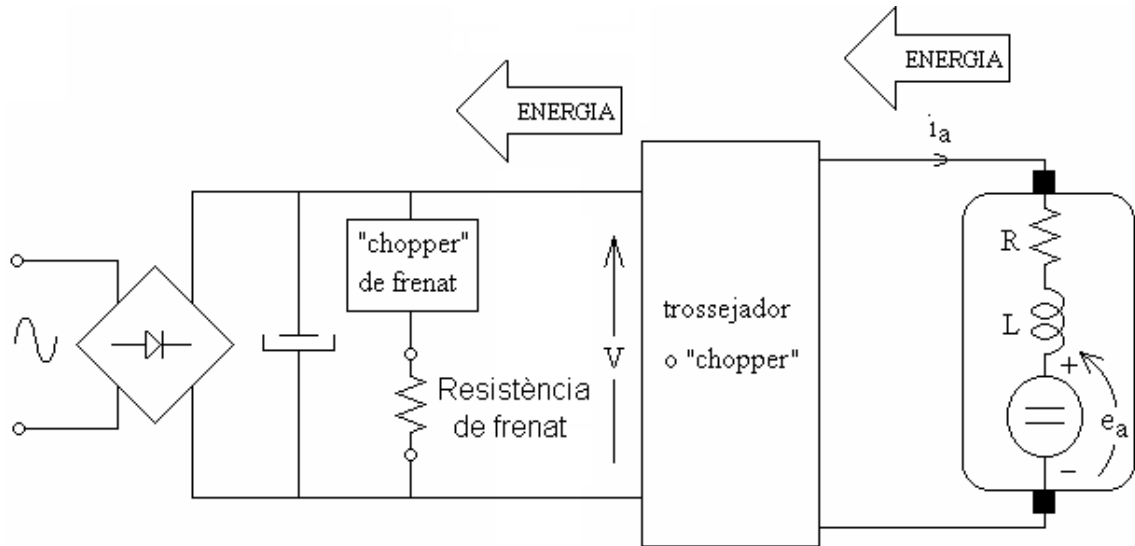


Fig. 5.66. Transistor voltage-sourced dc-to-dc converter loaded by a dc machine: (a) schematic representation of the circuit, (b) waveforms illustrating the converter operation

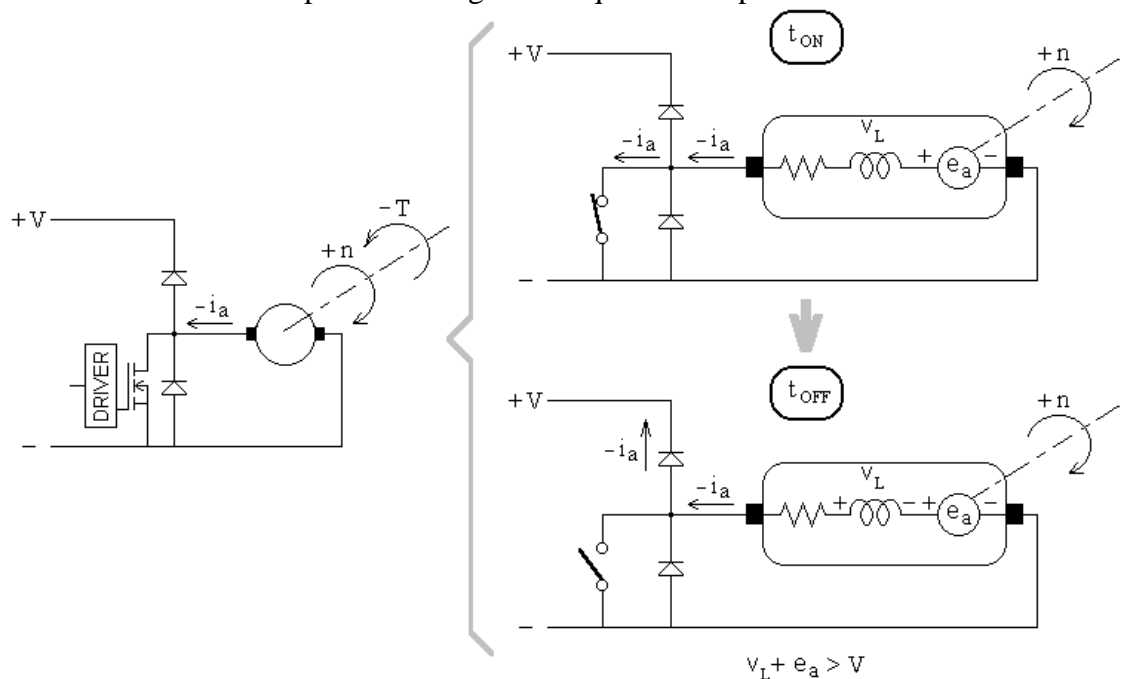
- Anàlisi del treball en el 2n quadrant. Efecte sobre el nivell de tensió en el bus de cc

En determinades ocasions, quan el motor ha de frenar (2n i 4rt quadrant) es necessita la transferència d'energia des de la font de tensió  $e_a$  (f.e.m. interna de la màquina de c.c.) a la font de tensió contínua  $V$ , essent  $e_a < V$ .



Perquè el flux d'energia sigui en el sentit marcat, el valor mitjà de la intensitat  $\bar{i}_a$  ha de ser negatiu. Els troscejadors anomenats troscejadors elevadors o "step-up choppers" permeten aquest flux d'energia doncs la inductància  $L$  emmagatzema energia i en  $t_{OFF}$  queda polaritzada de tal forma que la seva tensió  $V_L$  més la  $e_a$  és superior a  $V$  permetent la circulació d'intensitat vers la font en cas de disposar d'un sistema de "chopper de frenat".

Revisem el funcionament a partir dels següents esquemes simples:



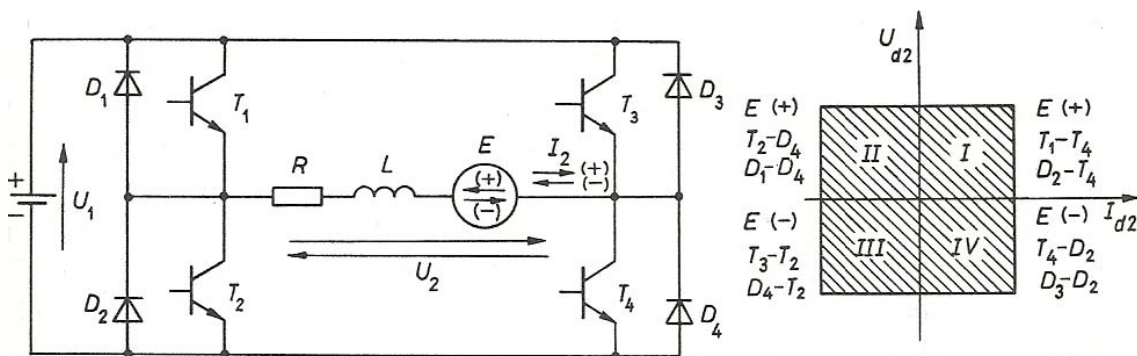
Cal remarcar que degut a aquesta transferència d'energia, la tensió en borns del condensador del bus de corrent continu pot pujar considerablement. De fet, des del punt de vista energètic, es té una energia mecànica en el eix que al frenar es transfereix al bus de corrent continu donat que el pont rectificador d'entrada no permet retornar aquesta energia a la xarxa. Per tal d'evitar que la tensió en el bus de corrent continu pugi exageradament, es pot instal·lar un "chopper" de frenat que a partir de determinat valor de tensió, descarregui l'energia de frenat sobre una resistència.

### Explicació del funcionament d'un pont en H en que en el 1r i 3r quadrant tenim una diagonal bloquejada i l'altra treballant

Pel que s'ha vist en la introducció d'aquest apartat tenim:

- Perquè la màquina de cc treballi com a motor (1r i 3r quadrant) s'ha d'assegurar que per  $t_{OFF}$  hi hagi un diode que faci de diode volant
- Perquè la màquina de cc treballi com a generador (2n i 4rt quadrant) s'ha d'obtenir en  $t_{ON}$  un circuit tancat en borns de la màquina de cc que permeti la circulació d'intensitat suministrada per  $e_a$

Hi ha diverses maneres de treballar en els 4 quadrants amb un pont en H de manera que en el 1r i 3r quadrant treballi només una diagonal, a manera d'exemple presentem una de les opcions (d'aquesta opció és la que he trobat més referències en llibres i a internet)



- 1r quadrant [diagonal \ ]

$T_1$  senyal PWM,  $T_4$  conduït de forma permanent

Quant el PWM de  $T_1$  està a  $t_{OFF}$   $D_2$  fa de diode volant (circuit tancat  $D_2$ - $T_4$ )

- 2n quadrant:

$T_2$  senyal PWM

Quant el PWM de  $T_2$  està a  $t_{ON}$  els borns de l'induit de la màquina de cc queden pràcticament en curt-circuit doncs  $T_2$  condueix i també  $D_4$  perquè queda polaritzat en conducció directa

Quant el PWM de  $T_2$  està en  $t_{OFF}$  la tensió de L supera la del bus de cc i  $D_1$  i  $D_4$  queden polaritzats directament i condueixen

- 3r quadrant [diagonal  $\nearrow$ ]

$T_3$  senyal PWM,  $T_2$  conduït de forma permanent,

Quant el PWM de  $T_3$  està a  $t_{OFF}$   $D_4$  fa de diode volant (circuit tancat  $D_4$ - $T_2$ )

- 4r quadrant:

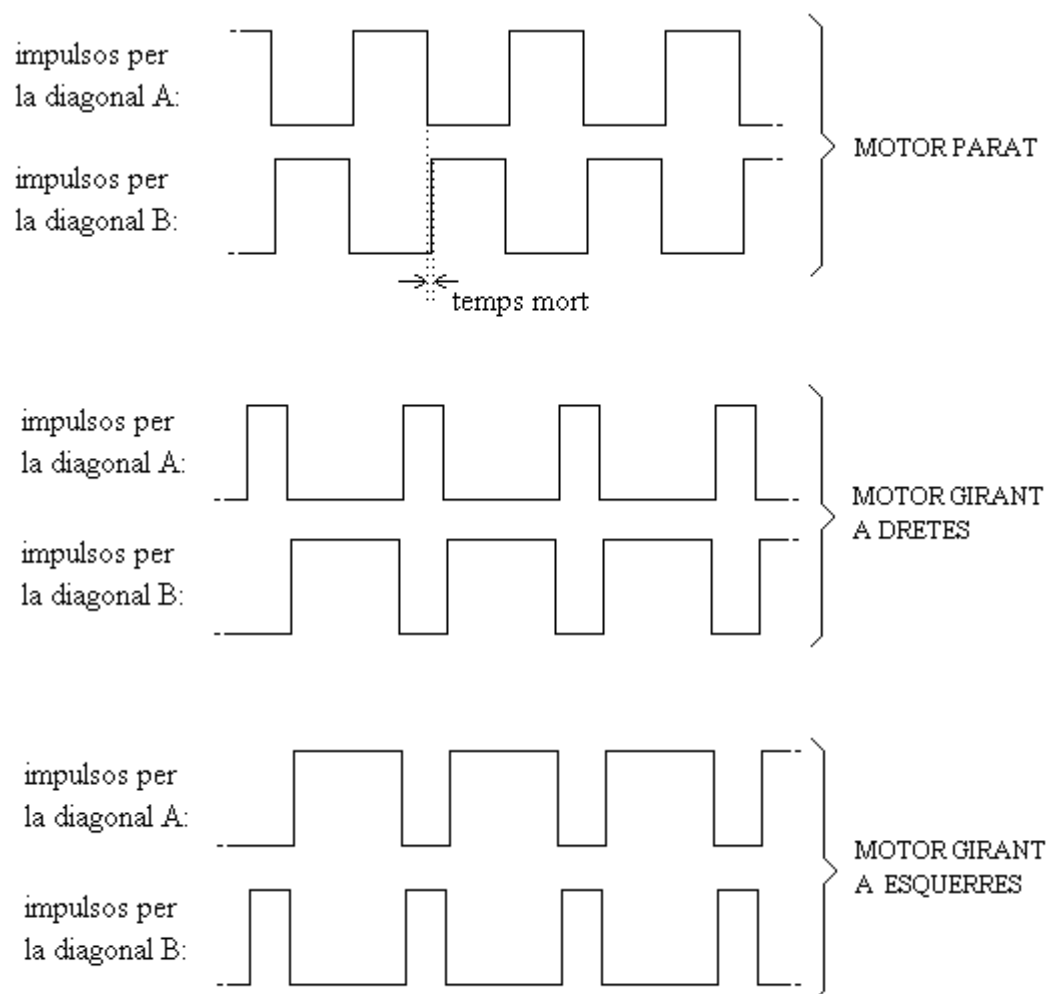
$T_4$  senyal PWM

Quant el PWM de  $T_4$  està a  $t_{ON}$  els borns de l'induit de la màquina de cc queden pràcticament en curt-circuit doncs  $T_4$  condueix i també  $D_2$  perquè queda polaritzat en conducció directa

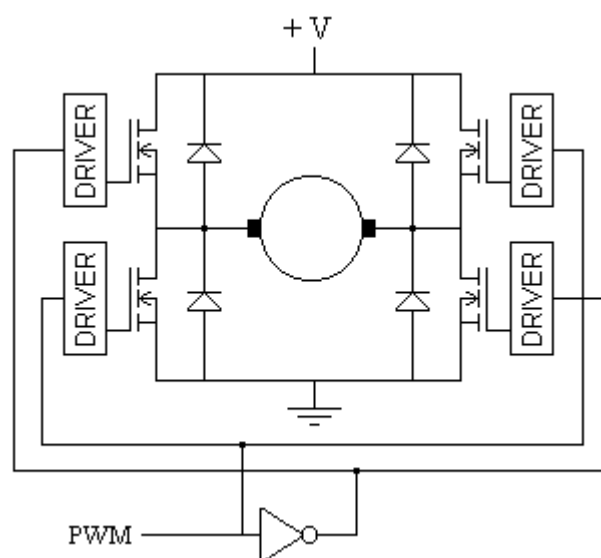
Quant el PWM de  $T_4$  està en  $t_{OFF}$  la tensió de L supera la del bus de cc i  $D_2$  i  $D_3$  queden polaritzats directament i condueixen

## **ACCIONAMENT AMB PONT EN H TREBALLANT ALTERNATIVAMENT LES DUES DIAGONALS**

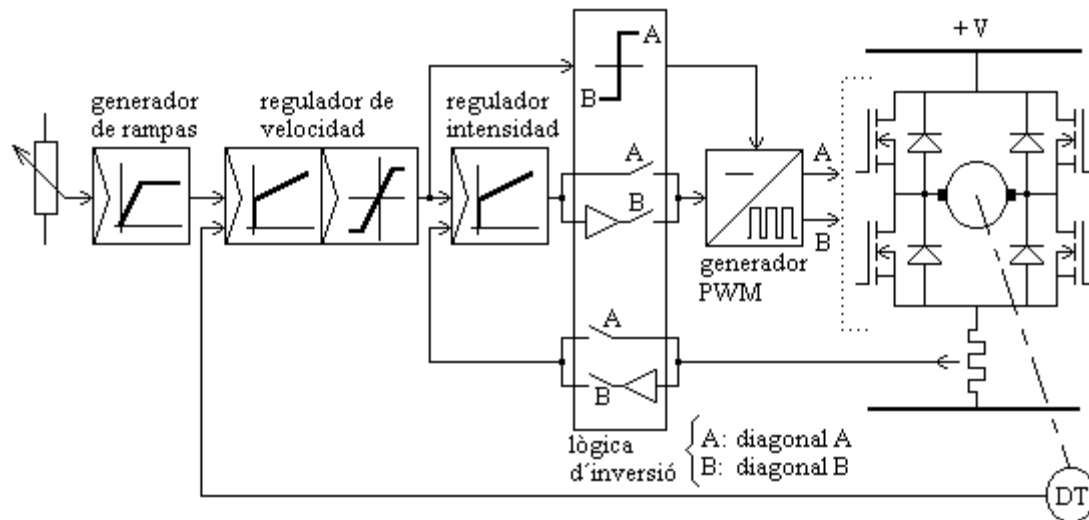
- Una alternativa, molt interessant en controls dinàmics, consisteix en commutar permanentment d'una diagonal a l'altra, de forma que l'estat ( alt o baix ) del senyal PWM determina quina diagonal està activa en cada moment. D'aquesta forma, un cicle de treball del 50 % implicaria que el motor estigues parat, cicles de treball per sobre determinen un sentit de gir, i cicles de treball per sota del 50 % corresponen al sentit de gir contrari.



En la figura següent és mostra l'esquema de principi d'aquests tipus d'excitació:



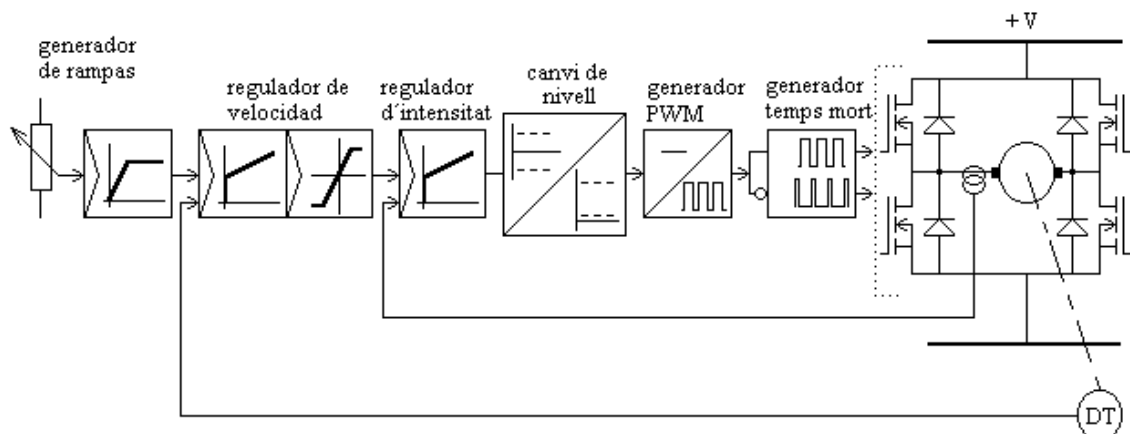
## ACCIONAMENT DE QUATRE QUADRANTS AMB UN PONT EN H TREBALLANT UNA DIAGONAL



Independent del sentit de la intensitat d'induit, la mesura d'intensitat que es fa en el muntatge de la figura té sempre la mateixa polaritat. Si la mesura es fes en borns del motor mitjançant una resistència shunt o un transformador amb cèl·lules Hall, la mesura canviaria de polaritat i podria aplicar-se directament al regulador d'intensitat.

## ACCIONAMENT DE QUATRE QUADRANTS AMB UN PONT EN H TREBALLANT ALTERNATIVAMENT LES DUES DIAGONALS

En aquest cas considerem que la mesura d'intensitat es realitza mitjançant un transformador amb cèl·lules Hall, capaç de mesurar valors instantanis d'intensitat. Aquesta mesura varia de polaritat al variar el sentit de la intensitat d'induit:



---

## BIBLIOGRAFIA

---

" Electric Machines and Drives "

Gordon R. Slemon

( Editorial Addison Wesley )

" Convertidores alterna-continua con tiristores "

Joan Peracaula Roura

( Editorial Marcombo )

" ABC de accionamientos "

( Editat per SIEMENS )

" Ingenieria de control moderna "

Katsuhiko Ogata

( Editorial Prentice Hall, 1997



## **ANÀLISIS DE DIVERSA DOCUMENTACIÓ TÈCNICA**

Hem analitzat parcialment les instruccions d'una sèrie de variadors amb rectificació controlada per accionaments de c.c. Es tracta d'equip moderns, amb tecnologia digital, i que mostren el grau de sofisticació i possibilitats de configuració que tenen aquests equips actualment.

### **INSTRUCCIONS D'OPERACIÓ DELS CONTROLADORS DE C.C. DE LA SERIE 4800 / 4900 DE LENZE**

Aquestes instruccions han estat analitzades amb més detall. En ressaltarem les següents característiques:

- Varies possibilitats per obtenir el valor actual de realimentació de velocitat:
  - Mitjançant l'estimació del valor de la f.e.m. interna  $E_a$ . Amb aquest sistema es pot tenir un control de velocitat sense sensor ( "sensorless" ).
  - Per dinamo tacomètrica.
  - Per resolver.
  - Per encoder incremental.
- Controlador de velocitat PID.
- Possibilitat d'acció adaptativa sobre el valor del guany del controlador de velocitat.
- Acció limitadora sobre el pendent de la consigna d'intensitat.
- Possibilitat de control de parell amb limitació de velocitat.
- Possibilitat de realitzar una limitació del parell màxim mitjançant un senyal analògic d'entrada.
- Possibilitat de parada ràpida amb rampa de desacceleració.
- Possibilitat de treball amb debilitament de camp. Per això s'alimenta el debanat d'excitació mitjançant un pont de tiristors.
- ...

### **MANUAL DE DESCRIPCIÓ DELS EQUIPS DE LA SERIE DCS 500B DE ABB**

La sèrie DCS 500 està formada per convertidors de potència amb tiristors, amb una gamma de 25 a 5150 Ampers, o de 6 a 4900 kW.

D'aquest manual només en ressaltarem les diferents opcions d'alimentació de l'excitació, i el fet de que en aquesta sèrie existeixen convertidors amb simple pont trifàsic de tiristors que treballa en els quatre quadrants mitjançant inversió del sentit de la intensitat d'excitació. Per realitzar aquesta funció es disposa de mòduls d'alimentació de la excitació amb dos ponts de tiristors totalment controlats.

## Operating Instructions

### Planning

The DC controllers described in these Operating Instructions are designed for driving DC motors with brushes and external excitation. The series comprise DC controllers with an output of 6.7 kW to 420 kW in a compact design. The devices of the 48XX series are 2Q DC controllers with fully controlled B6 thyristor bridges. The devices of the 49XX series are 4Q DC controllers with two antiparallel B6 thyristor bridges.

## 1 Features

### Drive and system features

- the same control electronics and system software for 48XX and 49XX
- digital speed feedback with resolver or incremental encoder
- digital frequency coupling for uniform set-values for all slaves, set-value cascade for angle synchronizing, speed-synchronous running or speed-ratio synchronizing
- angle control for drift-free positioning
- process controllers for dancer position controls or tensile force controls
- less than 0.05% speed error at 100% load change with resolver feedback or incremental encoder
- 1:1000 speed setting range at constant load with resolver feedback or incremental encoder
- torque control with superimposed speed monitoring for winding drives
- best possible response control performance due to short sampling cycles of the microcontroller.
- 1:300 current setting range due to discontinuous current adaptation and bridge modulation
- I-t-function with 120% to max. 180% overload capacity
- motor overload protection (I<sup>2</sup>t-function)
- field current control integration, offering a larger speed setting range
- non-volatile memory for permanent parameter storing
- 4 customer-specific parameter sets to be saved, selectable via terminals
- change from 4Q to 2Q for the 4900 series

### Operation

- easy parameter setting and diagnosis using keypad and two-line LCD display
- control parameters can be changed ON-LINE
- fault indications with fault display in plain text
- plain text available in German, English and French

### **Speed feedback systems**

- resolver feedback and encoder simulation for superimposed systems (synchronization systems, positioning controls etc.)
- incremental encoder feedback
- speed control using DC tacho generator
- armature voltage feedback (internal)

### **Digital inputs**

- 8 isolated digital inputs 24 V PLC-level
- serial interface RS485 or RS232 with selectable baud rate (1200 - 9600 baud)

### **Digital outputs**

- 8 isolated digital outputs 24V PLC-level
- 1 digital frequency output  
(2 tracks, with zero track for positioning systems)
- 1 relay output

### **Analog inputs**

- 4 analog inputs,  $V_{\text{digital}}$  ( $I_{\text{master}}$ ),  $M_{\text{max}}$ ,  $Z_{\text{set}}$ ,  $n_{\text{act}}$  ...  
(13 bit resolution)

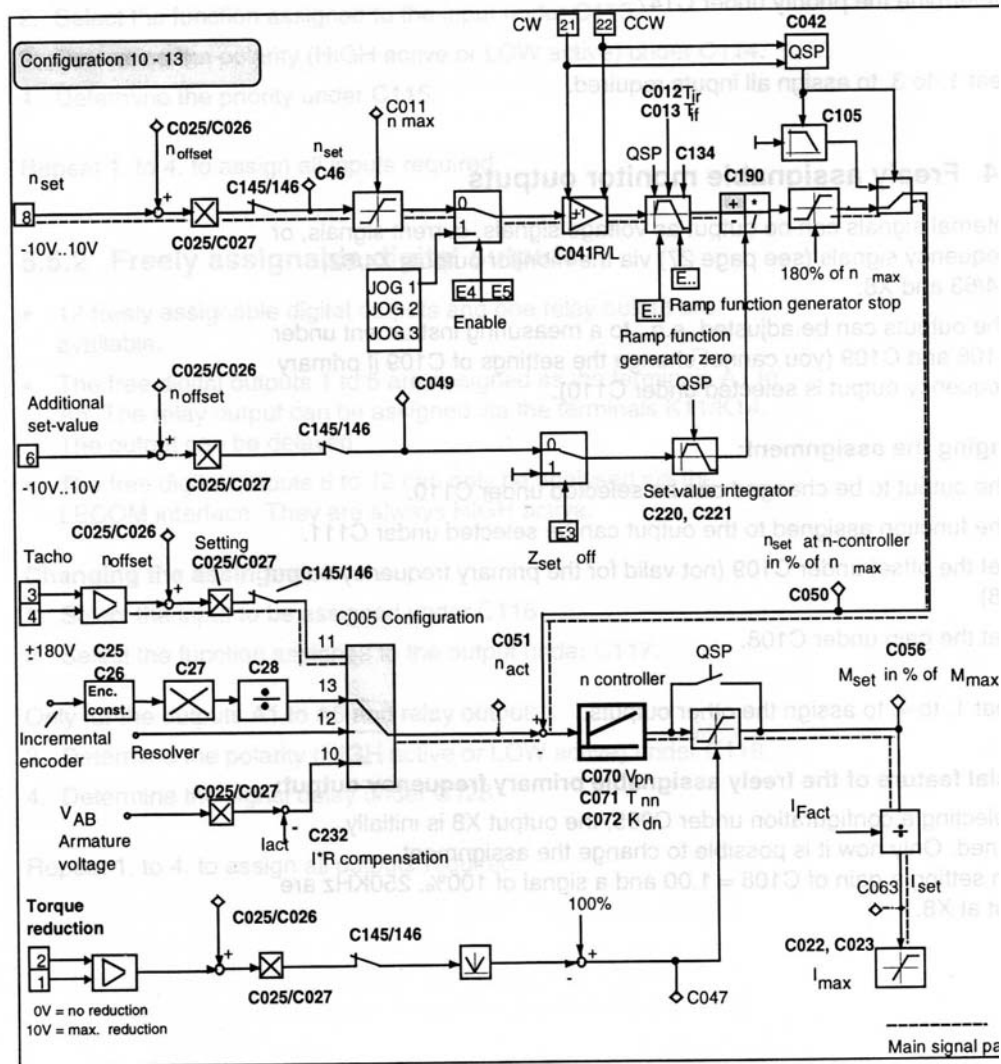
### **Analog outputs**

- 2 reference voltages,  $\pm 10\text{V}$ , 7mA
- 1 monitor output, assigned to  $I_{\text{act}}$ ,  $\pm 5\text{V}$
- 2 monitor outputs, freely assignable  
(36 different signals with 11 bit resolution possible)

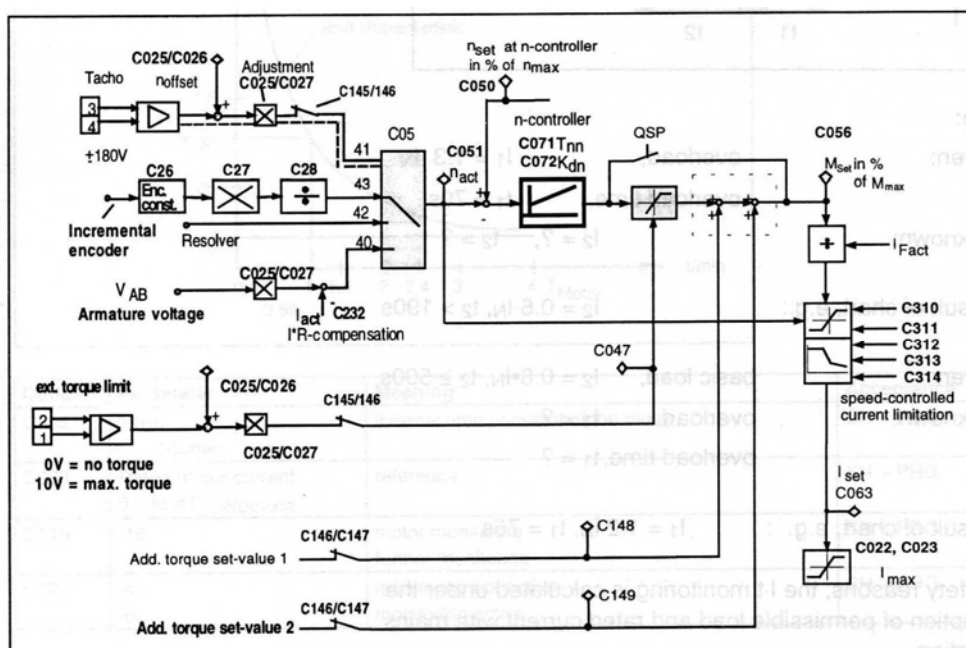
### **Monitoring functions**

- monitoring functions of the system and drive components
- monitoring of the mains voltage/frequency,
- self synchronization for 50/60Hz mains,
- operation is ensured due to CW or CCW field mains supply
- monitoring of the actual value feedback, etc.
- display of the controller inhibit sources to facilitate the commissioning via codes
- monitoring can be classified (TRIP or message can be selected).
- monitoring of the cooling airflow  
(only for 4808 - 4812 and 4908 - 4912)
- monitoring of the semiconductor fuses  
(only for 4911 and 4912)

### Speed-controlled operation



### Torque control with speed limitation:





**DCS 500 thyristor power converter**  
for DC drive systems  
25 to 5150 A  
6 to 4900 kW

**System Description**  
**DCS 500B**



**ABB**

# 1 DCS 500 - a new generation of power converters

- ❖ state-of-the-art technology
- ❖ flexible design
- ❖ user-friendliness

ABB's long years of experience with variable-speed DC drives, plus use of the latest state-of-the-art technologies, have combined to create this new product. The DCS 500 constitutes a complete program for ratings between 25 A and 5150 A as a power converter module (for 12-pulse parallel connection, approx. 10,000 A), suitable for all commonly used three-phase systems.

Our products of course have **CE approvals**, and also comply with the stipulations laid down in the DIN EN ISO 9001 quality management system.

DCS 500 Drives are approved according to CSA (Canadian Standards Association) and NRTL /C.

DCS 500 converter units are suitable for both, standard drive applications as well as demanding applications.

Appropriate **PC programs** ensure that the drives are human-engineered for user-friendly operator control.

## Unit range

The range comprises of 4 sizes, C1, C2, C3 and C4. We can deliver both modules and standard cubicles.

## Basic hardware complements

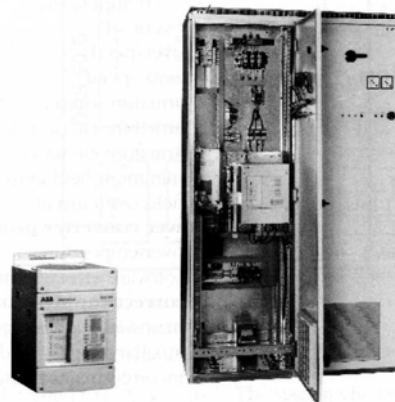
- \* Thyristor bridge(s) (from 900 A with leg fuses installed)
- \* Temperature monitor for the thyristor bridge(s)
- \* Fan
- \* Power supply for the electronics
- \* Microprocessor board

## Additional components for integration in the module

- \* Field power converter
  - uncontrolled full wave diode bridge, 6A or
  - half-controlled diode/thyristor bridge, 16A
- \* Communication board
- \* Control panel

## Moreover, the accessories listed below can be used to individually customize the drive package in accordance with the application intended

- \* External field supply units
- \* Additional I/O boards
- \* Interface modules for various communication protocol
- \* EMC filter(s)
- \* Application software packages
- \* PC programs



C1 - Module

Switchgear cubicle

## Basic functions

All units are provided with the same digital control board and software. The software can be modified in an infinite number of ways by means of appropriate PC based "tools" to meet the requirements of the application.

The standard software includes 300 function blocks for programming specialized solutions for various applications.

### The basic software includes the following options:

- Processing the speed reference value with speed ramp generator (S-ramp capability, 2 sets of accel/decel)
- Processing the speed feedback
- Speed controller
- Torque / current reference processing
- External torque limitation
- Current regulator
- Selectable field weakening for constant kW-applications
- Automatic/manual field reversal
- Automatic adjustment for armature-circuit controller
- Speed monitor
- Drive control logic
- Remote/local operation
- Emergency stop
- Electronic circuits are not sensitive to line phase sequence
- Electrical and mechanical brake control
- Motor overload sensing
- Dual field supply software
- Internal motor potentiometer for speed reference
- Programmable analogue outputs

## Controlling and operating

via **I/O terminals**

analogue and digital inputs and outputs

via **communication data bus**

e.g.: Profibus, Modbus, CS31 bus, etc.

via **MMI** (man-machine interface)

Outputting:

Alarms

Errors

Status information

Parameter setting

Controlling the drive

Altering the software structure

## Design and commissioning tool

### CMT (Commissioning and Maintenance Tool)

Commissioning and maintenance program

PC program under Windows® 3.1 or 3.11 platform for:

Parameter setting

Error detection

Trending - capability of all signals

Programming of software structures

Data logger

Fault logger

### GAD (Graphical Application Designer)

PC program under Windows® 3.1 or 3.11 platform for:

Drawing, altering and creating software functions by means of function blocks, plus documenting circuit diagrams

**CDP 312** removable control and display panel with plaintext display for:

Parameter setting

Error detection

Altering software structures

Software uploading and downloading

Local operation

## Monitoring functions

### Self-test

### Non-volatile fault memory

### Motor protection

In the event of:

- speed feedback error
- overtemperature
- overload
- overspeed
- zero speed
- armature-circuit overcurrent
- armature-circuit ripples
- armature-circuit overvoltage
- minimum field current
- field overcurrent

### Power converter protection

- overtemperature
- software errors (watchdog function)

### Incorrect supply protection

- mains interruption
- auxiliary supply undervoltage
- incorrect mains phase sequence (only inform.)



## 2 DCS 500 Components Overview

The DCS 500 power converter range is a system of components and complete standard switch-gear cubicles for controlling DC power motors as single-motor or multi-motor drives. It comprises a system of individual components, based on the

DCS 500 power converter modules.

This chapter provides a brief description of the DCS 500 components available for matching the drive to the conditions on site.

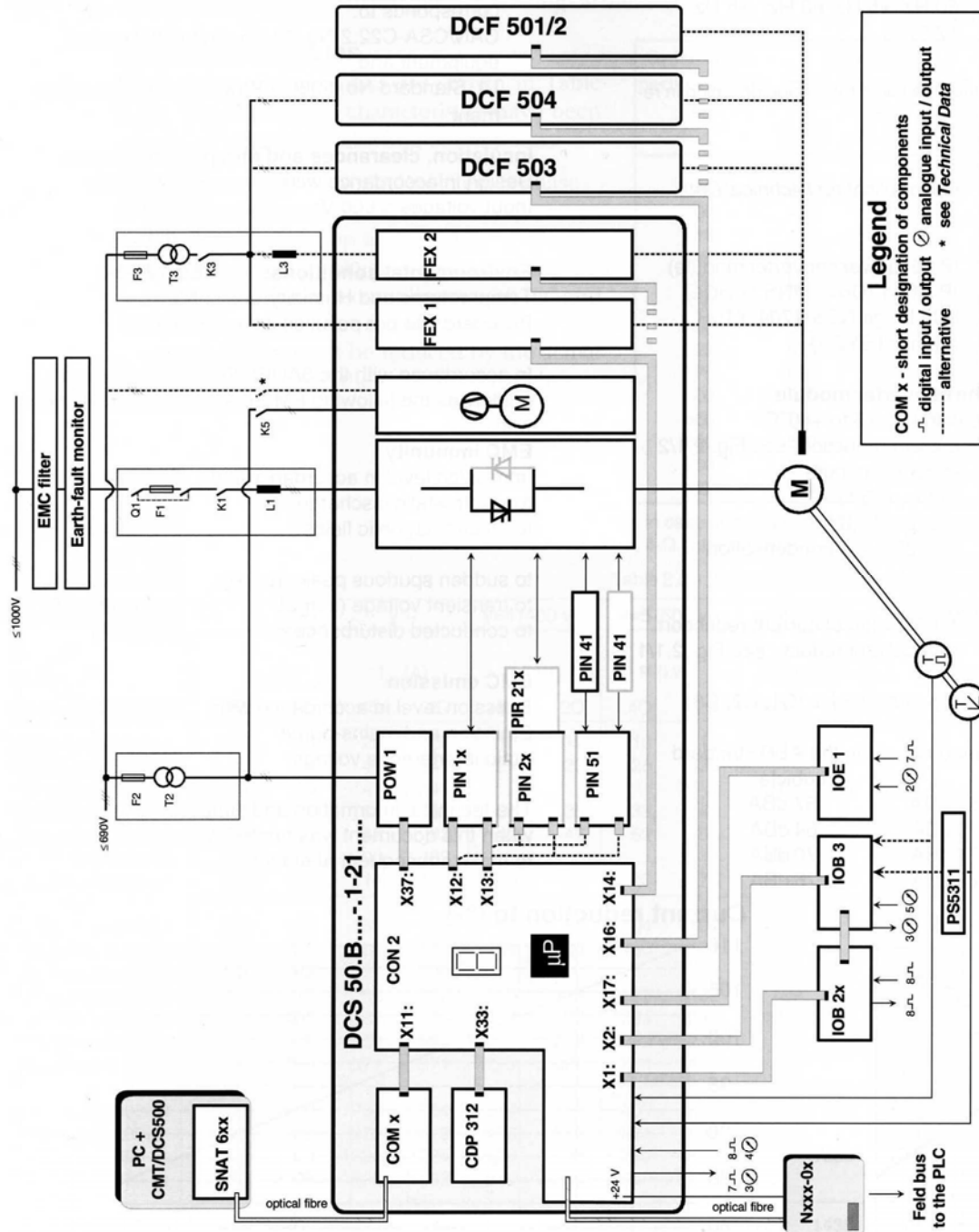


Fig. 2/1: DCS 500 Components overview

This overview has been designed to help you to familiarize yourself with the system; its main components are shown in the diagram above.

The system's heart is the DCS 500 power converter module.

## Field power converter types

### SDCS-FEX-1

- Diode bridge
- 6 A rated current
- Internal minimum field current monitor, requiring no adjustment.
- Construction and components have been designed for an insulation voltage of 600 V AC.
- Output voltage  $U_A$ :

$$U_A = U_V \cdot \left( \frac{100\% + TOL}{100\%} \right) \cdot 0,9$$

TOL = tolerance of line voltage in %

- Recommendation:  
Field voltage  $\sim 0,9 \cdot U_V$



### SDCS-FEX-2

- Half-controlled thyristor/diode bridge (1-Q)
- Microprocessor control, with the electronic system being supplied by the armature-circuit converter.
- Construction and components have been designed for an insulation voltage of 600 V AC.
- Output voltage  $U_A$ :  
see SDCS-FEX-1
- Recommendation:  
Field voltage 0.6 to 0.8  $\cdot U_V$



### DCF 503

- Half-controlled thyristor/diode bridge (1-Q)
- Microprocessor control with the control electronics being supplied separately (115/230 V/1-ph).
- Construction and components have been designed for an insulation voltage of 690 V AC.

### DCF 504

- like DCF 503, but
- fully-controlled antiparallel thyristor bridges (4-Q)
- Output voltage/Recommendation:  
see SDCS-FEX-2

This unit provides an option for field reversal and fast-response excitation. In the steady-state condition, the fully-controlled bridge runs in half-controlled mode so as to keep the voltage ripple as low as possible. With a quickly alternating field current, the bridge runs in fully-controlled mode.



### DCF 500

This field power converter is used mainly for armature-circuit converters with rated currents of 2050 to 5150 A. It consists of a modified armature-circuit converter (with different software). The rated currents are the same as with the DCS 500-0025/0520 A units with 500 and 600 V3-ph supply voltage.

- Output voltage  $U_A$  respectively  $U_{d0}$ :  
see table 2.2/1
- Recommendation:  
Field voltage 0.5 to 1.1  $\cdot U_V$

