

# Les fiches techniques

55

## La modulation d'énergie Les variateurs de vitesse pour moteur à courant continu



# 55 Variateurs de vitesse pour moteur à courant continu

## 55.1 Structure

La structure et le fonctionnement interne d'un variateur de vitesse dépendent principalement du type de moteur et de la nature de la charge à entraîner.

■ Avantages de la variation électronique de vitesse : contrairement à un variateur de vitesse mécanique (transmission directe à poulies et courroies, ou transmission indirecte par friction), on obtient une grande souplesse d'exploitation. Il est facile d'intervenir sur les paramètres de régulation de vitesse et de courant.

En fonction de l'application, un réducteur de vitesse peut être inséré entre le moteur et la charge à entraîner.

Il faut discerner la variation de vitesse et la régulation de vitesse.

■ Un variateur possède une commande (consigne d'entrée) mais aucun retour d'information de vitesse. C'est un système en boucle ouverte. La grandeur de sortie (ici la vitesse) évolue en fonction des perturbations (charge variable, par exemple).

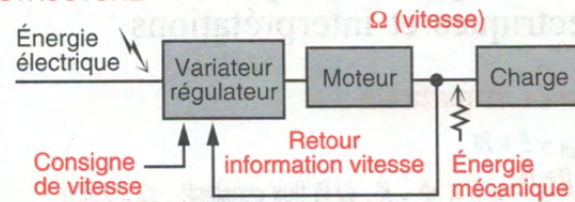
■ Un régulateur est un système asservi. Il possède une commande et un retour d'information. C'est un système en boucle fermée. La grandeur de sortie est asservie à la grandeur d'entrée appelée consigne ou référence. Elle suit l'évolution de cette dernière.

Pour le moteur à courant continu, la variation de vitesse est obtenue :

- par variation du flux d'excitation,
- par variation de la tension d'induit (majorité des applications).

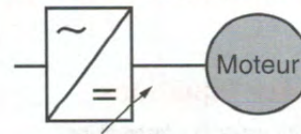
Il faut noter que pour des problèmes de commutation au collecteur, l'emploi d'une machine à courant continu est limité en tension, courant et vitesse (ordre de grandeur 1 200 V, 10 kVA).

### STRUCTURE

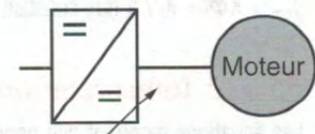


### VARIATION DE LA TENSION D'INDUIT

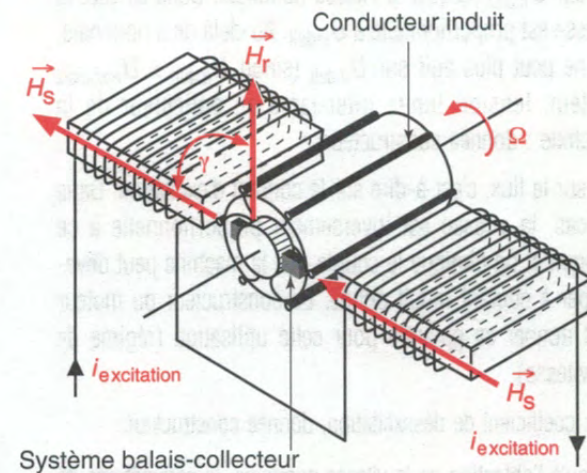
#### Redresseur recommandé



#### Hacheur



### COUPLE ÉLECTROMAGNÉTIQUE



## Couple électromagnétique d'une machine à courant continu

L'interaction du champ magnétique  $H_s$  de direction fixe produit par le circuit inducteur (stator) et du champ magnétique  $H_r$  mobile produit par l'induit (rotor) produit un couple de moment :

$$T_{em} = \text{constante} \times (\vec{H}_r \wedge \vec{H}_s)$$

Sachant que  $H_r$  dépend de l'intensité du courant  $I$  circulant dans l'induit et que  $H_s$  dépend du flux  $\Phi$  créé par le circuit inducteur :

$$T_{em} = k \times (\vec{I} \wedge \vec{\Phi}) \quad \text{avec } k = \text{constante.}$$

Ce produit vectoriel permet d'écrire :

$$|T_{em}| = k \times |\vec{I}| \times |\vec{\Phi}| \times \sin(\angle(\vec{I}, \vec{\Phi}))$$

On peut remarquer que  $T_{em}$  sera maximum si les vecteurs  $\vec{I}$  et  $\vec{\Phi}$  présentent un angle  $\gamma = \pi / 2$ .

## 55.2 Rappel des équations électriques et interprétations

### 55.21 Équations

$$U_{\text{induit}} = E + RI$$

$$E = \frac{p \times N}{a} \times n \times \Phi = K \cdot \Omega \text{ (à flux constant) ; } \Omega = 2\pi \cdot n$$

$$n = \frac{U - RI}{\frac{p}{a} \times N \times \Phi}$$

$$T_{\text{em}} = K\Phi I = K_f I \text{ à flux constant}$$

### 55.22 Interprétations des équations

Les équations montrent que pour faire varier la vitesse d'une machine à courant continu, on peut agir soit :

- sur  $U_{\text{induit}}$  jusqu'à la vitesse nominale. Dans ce cas, la vitesse est proportionnelle à  $U_{\text{induit}}$ . Au-delà de  $n$  nominale, on ne peut plus agir sur  $U_{\text{induit}}$  (sinon  $U_{\text{induit}} > U_{\text{nominale}}$  moteur, tension limite inter-lame au collecteur de la machine : donnée constructeur) ;

- sur le flux, c'est-à-dire sur le courant d'excitation. Dans ce cas, la vitesse est inversement proportionnelle à ce courant et on diminue le couple que la machine peut développer à courant induit donné. Le constructeur du moteur doit donner sa garantie pour cette utilisation (régime de survitesse).

$K_D$  : coefficient de désexcitation, donnée constructeur.

Jusqu'à l'obtention de la vitesse nominale, le paramétrage de réglage est  $U_{\text{induit}}$ . Si  $U_{\text{induit}}$  croît, la puissance  $P$  et la vitesse croissent. Le couple est pratiquement constant.

Au-delà de la vitesse nominale, on travaille à puissance pratiquement constante car la puissance développée pour un courant  $I_{\text{induit}}$  donné est constante (aux pertes près) :

$$P = U \times I = \text{Cte.}$$

#### Caractéristique en charge à flux constant

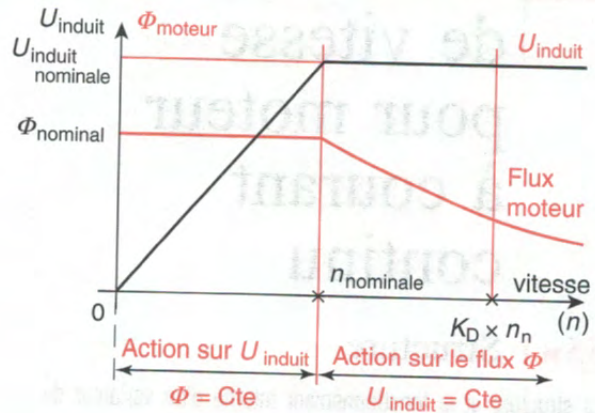
$$T_{\text{em}} = K_f \times \bar{I}_{\text{induit}} \quad \bar{I}_{\text{induit}} = \frac{U - E}{R} = \frac{U - K_e \cdot \Omega}{R}$$

Posons  $K_f = K_e = K$

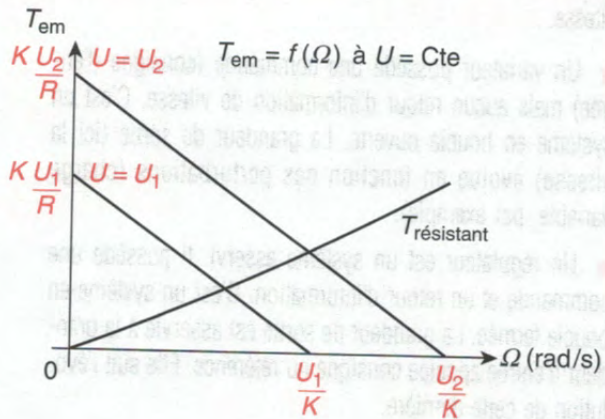
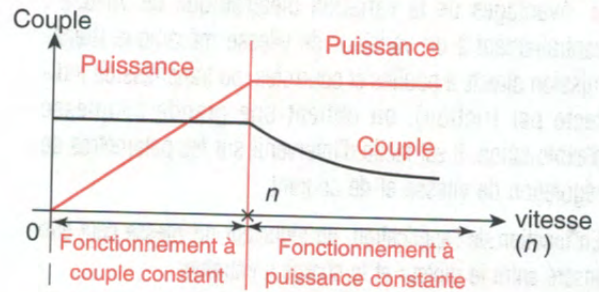
$$\Rightarrow T_{\text{em}} = K \times \frac{U - K\Omega}{R}$$

On constate que pour une valeur  $U_{\text{induit}}$  donnée, si la charge augmente,  $I_{\text{induit}}$  augmente et la vitesse diminue.

#### CARACTÉRISTIQUES $U_{\text{induit}}$ ET FLUX = $f(n)$



#### CARACTÉRISTIQUES COUPLE ET PUISSANCE = $f(n)$



#### REMARQUES :

Par constitution de la machine, l'axe magnétique de l'induit est maintenu fixe et généralement orthogonal par rapport au flux inducteur grâce au dispositif balais-collecteur :  $\gamma = \pi / 2$ .

Le couple maximal est disponible en permanence. On peut donc contrôler sa grandeur.

Il est important de contrôler le couple électromagnétique d'un moteur en régime établi ou durant les régimes transitoires (accélération ou décélération). Ce contrôle est facile à obtenir pour un moteur à courant continu. On verra la difficulté à obtenir un tel résultat pour un moteur asynchrone triphasé.

### 55.3 Types de variateurs

#### 55.31 Variateurs non réversibles ou unidirectionnels

Ils ne permettent le transfert de l'énergie que dans le sens réseau  $\Rightarrow$  moteur - charge.

■ Si la machine présente une faible inertie et que le temps de décélération naturel n'est pas déterminant, l'arrêt du groupe peut se faire en « roue libre ».

L'inversion du sens de rotation (passage du quadrant ① au quadrant ③) est réalisé par contacteurs. Généralement, on inverse les connexions de l'induit.

■ Si le groupe tournant présente une forte inertie empêchant son arrêt rapide, le temps de décélération devient parfois déterminant. Un freinage d'arrêt est réalisé en déconnectant l'induit du réseau et en reliant l'induit sur une résistance qui dissipera l'énergie emmagasinée dans les masses en mouvement.

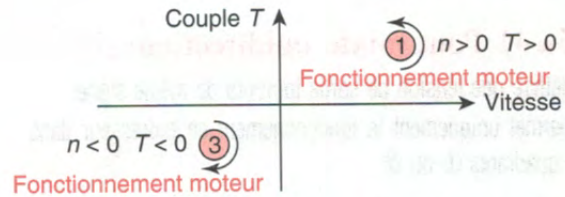
Pour obtenir un freinage efficace, il faut conserver le flux  $\Phi_{nominal}$ .

Lors d'un arrêt « freiné », selon le sens de rotation du moteur, le point de fonctionnement se déplace du quadrant ① vers le quadrant ④ ou du quadrant ③ vers le quadrant ②.

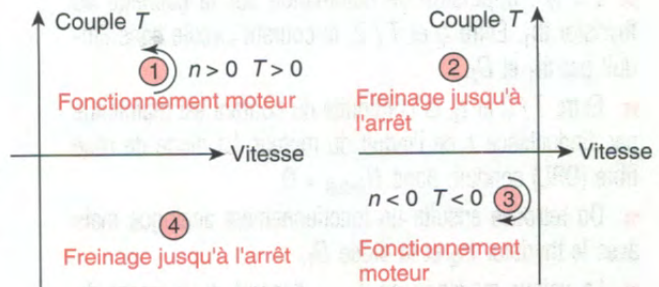
#### ■ Lors du freinage

E ne change pas de signe car les sens de la vitesse et de  $\Phi$  restent inchangés. Le sens de  $I$  s'inverse dans l'induit donc le sens du couple  $T_{em}$  s'inverse.

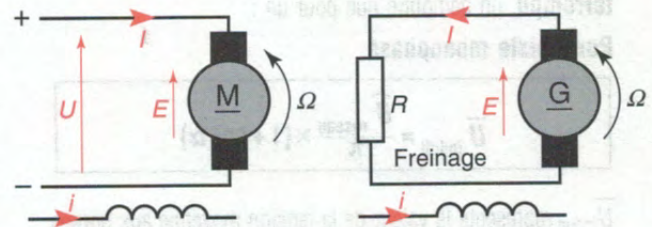
#### ARRÊT NATUREL EN « ROUE LIBRE » - QUADRANTS DE FONCTIONNEMENT



#### ARRÊT « FREINÉ » - QUADRANTS DE FONCTIONNEMENT VARIATEURS UNIDIRECTIONNELS



#### PASSAGE DU FONCTIONNEMENT MOTEUR AU FREINAGE



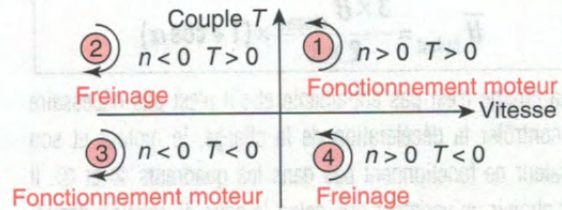
#### 55.32 Variateurs réversibles

Le couple peut être résistant ou entraînant dans le cas d'applications telles que le levage ou la manutention.

Si le fonctionnement impose des phases fréquentes d'accélération ou de décélération, le freinage doit être rapide. Dans ce cas, le freinage électrique est réalisé par renvoi de l'énergie emmagasinée sur le réseau.

Pour inverser rapidement le couple de la machine, il faut inverser le courant induit  $I$  ou le flux inducteur.

#### QUADRANTS DE FONCTIONNEMENT : Variateurs réversibles



### 55.4 Variateurs de vitesse à redresseur commandé

On distingue le pont mixte et le pont complet.

#### 55.41 Pont mixte unidirectionnel

Il délivre une tension de sortie toujours de même signe. Il permet uniquement le fonctionnement en redresseur dans les quadrants ① ou ③.

Ce type de variateur est non réversible en couple.

#### Interprétations des courbes

Soit  $\alpha$  l'angle de retard à l'amorçage des thyristors.

- Entre  $t_1$  et  $t_2$ , le pont est non conducteur,  $I = 0$ ,  $U_{\text{induit}} = E + RI = E = K\Omega$  pour un flux  $\Phi$  constant.
- $t = t_2$  : impulsion de commande sur la gâchette du thyristor  $th_1$ . Entre  $t_2$  et  $T/2$ , le courant circule dans l'induit par  $th_1$  et  $D_2$ .
- Entre  $T/2$  et  $t_3$ , la continuité du courant est maintenue par l'inductance  $L$  de l'induit du moteur. La diode de roue libre (DRL) conduit, donc  $U_{\text{induit}} = 0$ .
- On retrouve ensuite un fonctionnement analogue mais avec le thyristor  $th_2$  et la diode  $D_1$ .
- La valeur moyenne de  $I_{\text{induit}}$  dépend du moment du couple moteur.

Le fait d'insérer une inductance en série avec l'induit du moteur permet d'obtenir une conduction ininterrompue du courant induit. Le même phénomène sans inductance peut être observé pour les faibles valeurs de  $\alpha$ . Dans le cas d'un **courant ininterrompu**, on démontre que pour un :

#### Pont mixte monophasé

$$\bar{U}_{\text{induit}} = \frac{\hat{U}_{\text{réseau}}}{\pi} \times (1 + \cos \alpha)$$

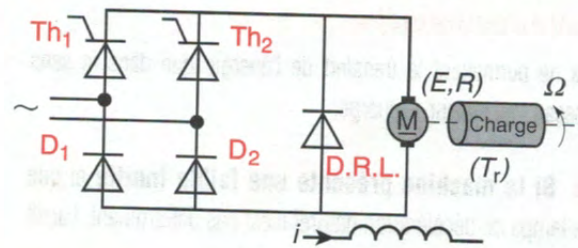
$\bar{U}_{\text{induit}}$  représente la valeur de la tension moyenne aux bornes de l'induit.

#### Pont mixte triphasé

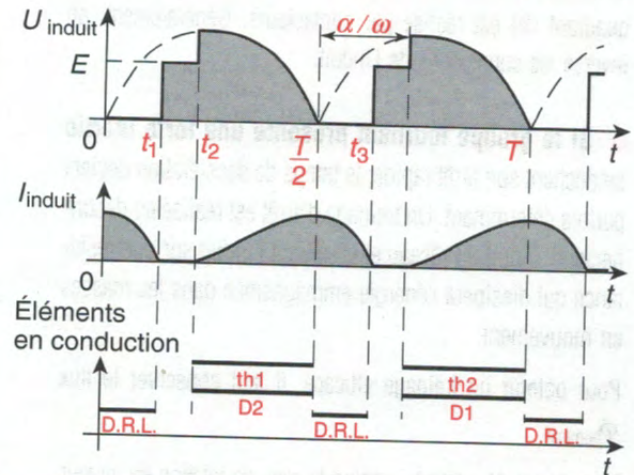
$$\bar{U}_{\text{induit}} = \frac{3 \times \hat{U}_{\text{réseau}}}{2 \times \pi} \times (1 + \cos \alpha)$$

Si la charge n'est pas entraînée et s'il n'est pas nécessaire de contrôler la décélération de la charge, le moteur et son variateur ne fonctionnent pas dans les quadrants ② et ④. Il faut choisir un variateur qui, selon le sens de rotation désiré, fonctionne dans les quadrants ① ou ③.

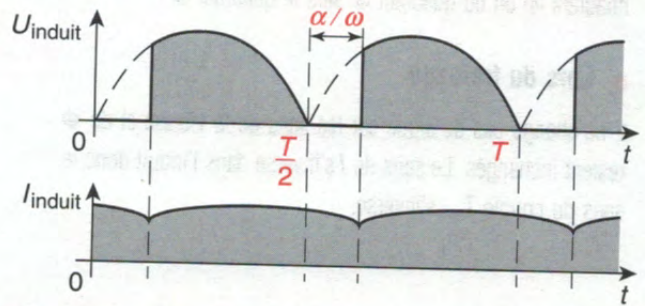
#### PONT MIXTE MONOPHASÉ : SCHÉMA STRUCTUREL (THYRISTORS À CATHODES COMMUNES)



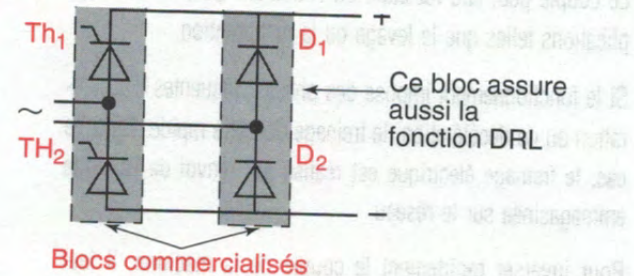
#### COURBES ASSOCIÉES : COURANT INTERROMPU



#### COURBES ASSOCIÉES : COURANT ININTERROMPU



#### AUTRE STRUCTURE INDUSTRIELLE D'UN PONT MIXTE



55 ■ 42

PONT COMPLET

Un tel pont est apte à transmettre l'énergie dans les deux sens. Il permet la récupération d'énergie.

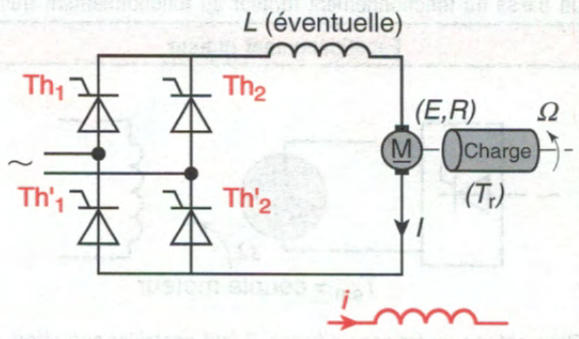
Dans le cas d'un courant ininterrompu, on démontre que :

■ en monophasé :  $\bar{U}_{\text{induit}} = \frac{2 \cdot \hat{U} \cdot \cos \alpha}{\pi}$  ;

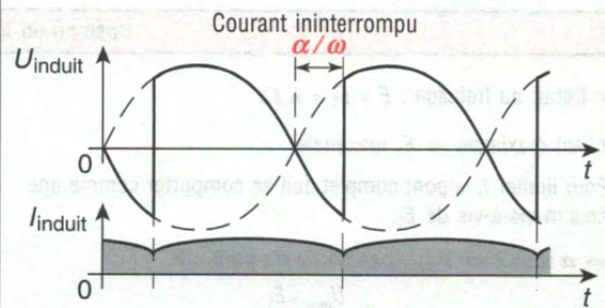
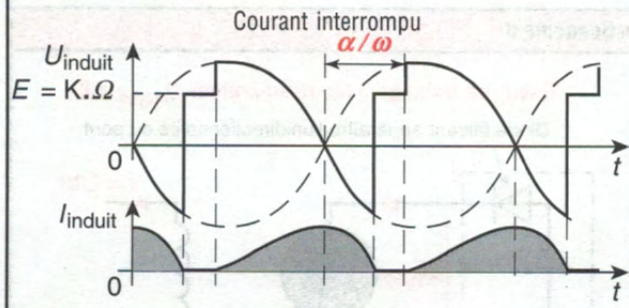
■ en triphasé :  $\bar{U}_{\text{induit}} = \frac{3 \hat{U} \cdot \cos \alpha}{\pi}$  ;

Si  $\alpha > \pi/2$ ,  $\bar{U}_{\text{induit}}$  s'inverse.

Pont complet monophasé : schéma structurel

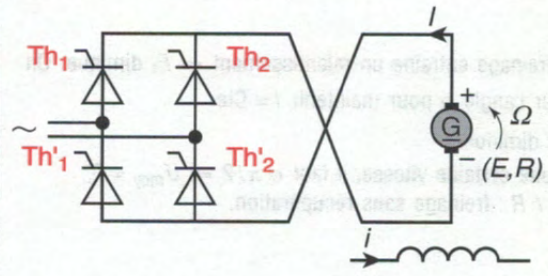


COURBES ASSOCIÉES EN FONCTIONNEMENT MOTEUR

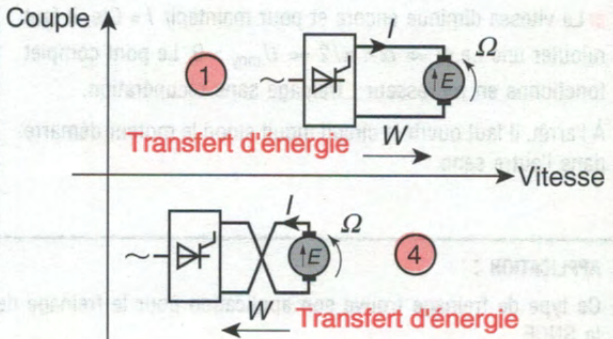
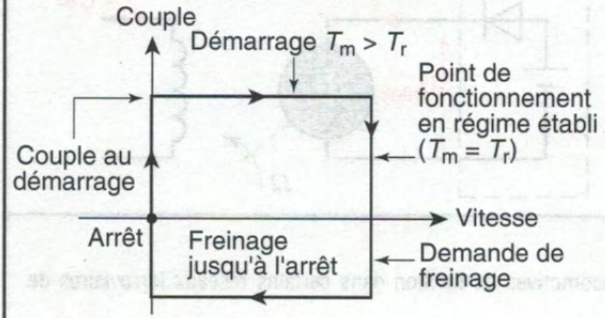


FONCTIONNEMENT EN RÉCUPÉRATION

Le moteur tourne et on inverse les connexions de l'induit.  
 Les polarités de l'induit ne changent pas :  $E = k \cdot \Phi \cdot \Omega$ .  
 Le courant s'inverse dans l'induit : fonctionnement en générateur (quadrant ② ou ④ du plan couple vitesse).  
 $T_m$  : couple moteur  
 $T_r$  : couple résistant

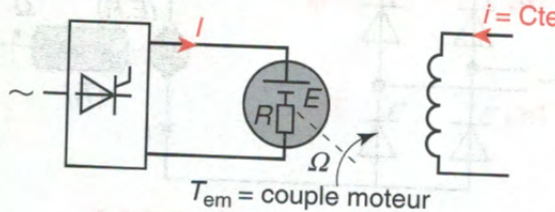
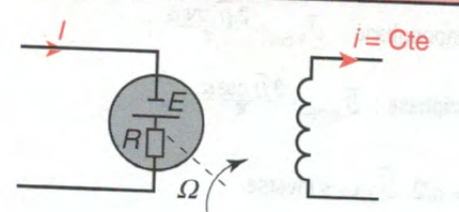


Déplacement du point de fonctionnement pour un seul sens de rotation



## 55 ■ 43 ÉTUDE D'UN PONT COMPLET (utilisation d'une machine à courant continu en frein électrique)

On passe du fonctionnement moteur au fonctionnement frein électrique par inversion du courant d'excitation  $i$ .

Fonctionnement moteur	Fonctionnement frein électrique
 <p><math>T_{em} = \text{couple moteur}</math></p>	 <p>L'inversion du courant d'excitation entraîne l'inversion de <math>E</math> et celle du couple moteur (<math>T_{em} = k \cdot \Phi \cdot I</math>). Le pont est unidirectionnel en courant, <math>I</math> ne peut pas s'inverser.</p>

### Résumé du fonctionnement

■ Début du freinage :  $E = E_1 = K \cdot \Omega$ .

$\Omega$  est maximale  $\Rightarrow E_1$  maximale.

Pour limiter  $I$ , le pont complet doit se comporter comme une f.c.e.m vis-à-vis de  $E_1$ .

$\Rightarrow \alpha > \pi/2 \Rightarrow U_{moyen}$  en sortie du pont  $< 0$ .

$$I = \frac{U_{moy} + E_1}{R}$$

On obtient un freinage avec récupération, le pont fournit une puissance  $U_{moy} \times I < 0$ .

■ Le freinage entraîne un ralentissement  $\Rightarrow E_1$  diminue. On agit sur l'angle  $\alpha$  pour maintenir  $I = Cte$ .

$\alpha$  doit diminuer.

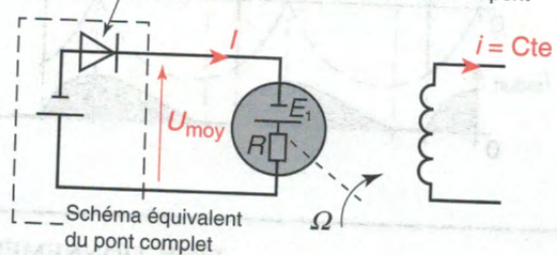
Pour une certaine vitesse, il faut  $\alpha = \pi/2 \Rightarrow U_{moy} = 0$ ,  $I = E_2 / R$  : freinage sans récupération.

■ La vitesse diminue encore et pour maintenir  $I = Cte$ , il faut rajouter une f.e.m  $\Rightarrow \alpha < \pi/2 \Rightarrow U_{moy} > 0$ . Le pont complet fonctionne en redresseur : freinage sans récupération.

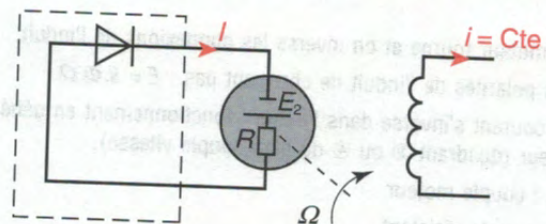
À l'arrêt, il faut ouvrir le circuit induit sinon le moteur démarre dans l'autre sens.

#### Début du freinage avec récupération $U_{moyen} < 0$

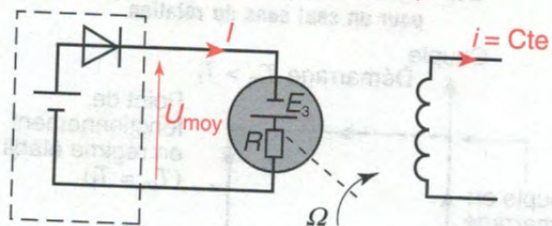
Diode faisant apparaître l'unidirectionnalité du pont



#### Freinage sans récupération, $U_{moyen} = 0$



#### Freinage sans récupération, $U_{moyen} > 0$



#### APPLICATION :

Ce type de freinage trouve son application pour le freinage des locomotives de traction dans certains réseaux ferroviaires de la SNCF.

## 55 ■ 44 Comparaison des performances: pont mixte - pont complet

On montre que vis-à-vis du réseau, les deux ponts ont une influence différente.

Pour dimensionner une installation (section des conducteurs, protections), il faut tenir compte de sa puissance apparente et l'on définit le facteur de puissance  $F_p$  par :

$$F_p = \frac{P}{S}$$

$P$  : puissance active ;  $S$  : puissance apparente.

Cette notion justifie le choix du pont redresseur. La comparaison entre les deux types de pont, débitant le même courant / parfaitement lissé, permet de constater que le pont mixte possède toujours un facteur de puissance  $F_p$  supérieur au pont complet. Donc, à puissance  $P$  identique, le pont mixte consomme une puissance apparente moindre, permet un meilleur dimensionnement de la ligne et limite la consommation de la puissance active.

Dans la pratique, le pont complet n'est utilisé que dans le cas où il doit y avoir récupération de l'énergie.

## 55 ■ 45 Double pont complet à thyristors

Les deux ponts complets sont reliés tête-bêche. Ce montage permet :

- d'obtenir un fonctionnement couple-vitesse dans les quatre quadrants, donc de contrôler la décélération ;
- des inversions de couple très rapides.

Pont 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- fonctionnement moteur marche avant, quadrant ①</li> <li>- freinage marche arrière, quadrant ②</li> </ul>
Pont 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- fonctionnement moteur marche arrière, quadrant ③</li> <li>- freinage marche avant, quadrant ④</li> </ul>

**Précautions :** il faut éviter que les 2 ponts soient commandés en même temps (risque de court-circuit).

La commande des 2 ponts de puissance est associée à une logique de réversibilité qui assure la validation de la commande d'un des deux ponts selon le quadrant de fonctionnement désiré.

## INFLUENCE DU FACTEUR DE FORME

On définit le facteur de forme  $F$  du courant induit par :

$$F = \frac{I_{\text{induit efficace}}}{I_{\text{induit moyen}}}$$

Il est différent selon le type de redressement réalisé.

Le courant traversant le moteur présente une valeur moyenne, une valeur efficace et une valeur de crête.

Le **courant moyen** produit le **couple** ; le **courant efficace** provoque l'**échauffement** ; le **courant de crête** affecte la **commutation** du moteur.

**Courant parfaitement lissé** (cas idéal, L importante)

$$F = 1 \text{ car } I_{\text{eff}} = I_{\text{moyen}}$$

$$T_{\text{em}} = K \cdot I_{\text{moyen}} ; \text{ pertes par effet Joule} = R \cdot I_{\text{eff}}^2$$

**Courant ondulé**

$$F > 1 \text{ car } I_{\text{eff}} > I_{\text{moyen}}$$

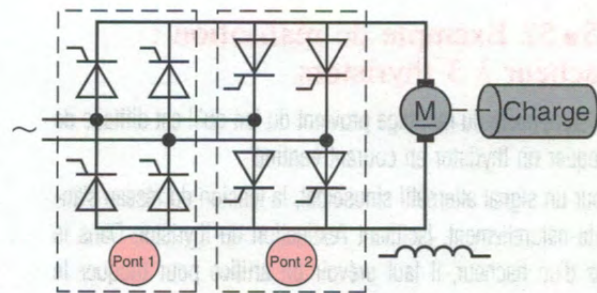
$$T_{\text{em}} = \frac{K \cdot I_{\text{eff}}}{F} ; \text{ pertes par effet Joule} = R \cdot I_{\text{eff}}^2$$

**Constatations :**

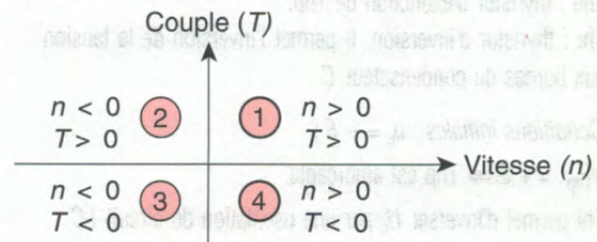
À pertes par effet Joule identiques, le couple disponible sera  $F$  fois plus faible pour un courant ondulé.

⇒ risque de déclassement de la machine.

## DOUBLE PONT COMPLET SCHÉMA STRUCTUREL EN MONOPHASÉ



## DOUBLE PONT COMPLET - QUADRANTS DE FONCTIONNEMENT





## 55.5 Hacheur série

### 55.51 Rôle

Il permet d'obtenir une tension unidirectionnelle de valeur moyenne variable. Le hacheur est un interrupteur statique. Il est commandé par un signal en forme de créneaux.

Dans le cas d'un fonctionnement idéal (temps de commutation et pertes négligées), on remarque que :

- si le signal de commande = 1,  $U_M = E$  et la DRL est bloquée (polarisée en inverse) ;

- si le signal de commande = 0 logique, le hacheur se comporte comme un interrupteur ouvert. La charge étant ici de nature inductive, elle impose un courant ininterrompu. La DRL devient conductrice et  $U_M$  tend vers 0.

La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'induit du moteur est égale à  $\frac{E \times t_1}{T}$  où  $\frac{t_1}{T}$  représente le rapport cyclique.

### Influence de la fréquence de travail

La fréquence de travail ( $f = 1/T$ ) est relativement importante en valeur (plusieurs kHz), de manière à avoir une allure  $I_{moteur} = f(t)$  la moins ondulée possible (réduction des à-coups de couple). La solution à thyristors ne permet pas d'obtenir des fréquences de travail très élevées (temps de désamorçage  $t_q$  du thyristor non négligeable dans ce cas) mais possède une meilleure tenue aux très grandes puissances (contrairement à une solution à transistor).

### 55.52 Exemple de réalisation : hacheur à 3 thyristors

La complexité du montage provient du fait qu'il est difficile de bloquer un thyristor en courant continu.

Pour un signal alternatif sinusoïdal, la tension du réseau s'annule naturellement, facilitant l'extinction du thyristor. Dans le cas d'un hacheur, il faut prévoir un artifice pour bloquer le thyristor principal : nécessité d'un circuit d'extinction auxiliaire.

Solution : hacheur à 3 thyristors (voir montage)

Thp : thyristor principal.

The : thyristor d'extinction de Thp.

Thi : thyristor d'inversion. Il permet l'inversion de la tension aux bornes du condensateur C.

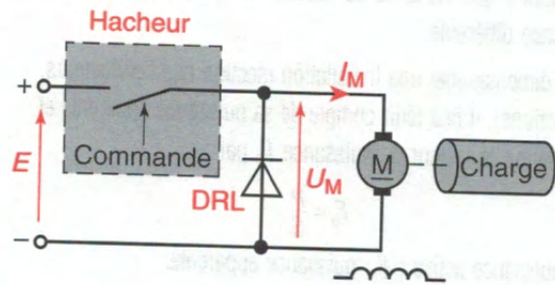
Conditions initiales :  $U_c = -E$  ;

$V_{Thp} = +E \Rightarrow$  Thp est amorçable.

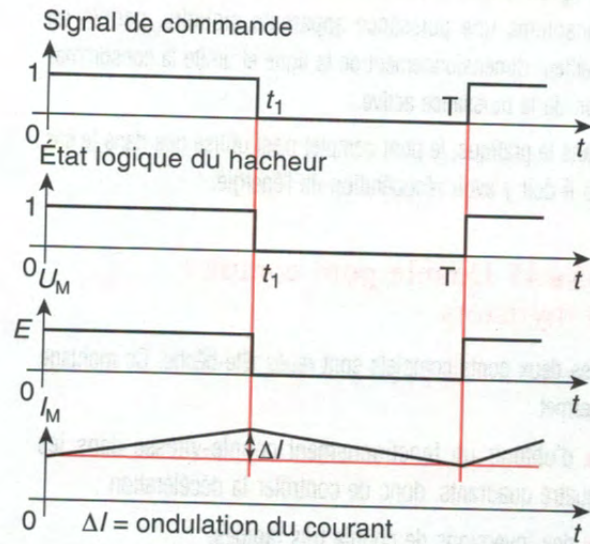
Thi permet d'inverser  $U_c$  par une oscillation du circuit LC.

Il s'amorce si son anode est positive ( $U_c$  inversé).

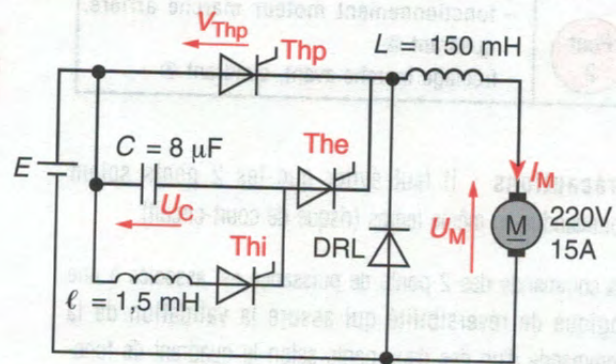
### SCHÉMA DE PRINCIPE



### ALLURES DES GRANDEURS $U_M(t)$ et $I_M(t)$ MOTEUR



### HACHEUR À 3 THYRISTORS - MONTAGE



## 55 ■ 6 Régulation de vitesse

### 55 ■ 61 Rôle de la régulation de vitesse

- Maintenir la vitesse de rotation du moteur à une valeur imposée (consigne), quelle que soit la variation de couple de la machine entraînée.
- S'assurer en permanence que le courant moteur ne dépasse pas une valeur limite (souvent réglée entre 1 et 1,2 fois  $I_{\text{nominale induit}}$ ), même en cas de charge résistante entraînée élevée.

Il faut donc mesurer continuellement la vitesse et l'intensité induit du moteur, puis comparer ces grandeurs à celles désirées. Cela nécessite deux régulateurs : vitesse et courant.

#### Fonctionnement désiré

- Tant que le courant moteur n'a pas atteint la valeur limite préréglée, le régulateur de vitesse est prioritaire : vitesse moteur = vitesse consigne ; la valeur du courant évolue en fonction de la charge imposée.
- La régulation de courant devient prioritaire si  $I_{\text{moteur}}$  atteint  $I_{\text{limite}}$  (cas d'une charge importante ou démarrage). On limite en courant, on ne régle plus la vitesse.

### 55 ■ 62 Analyse de fonctionnement du régulateur de vitesse

Support d'étude : moteur à courant continu, à excitation indépendante, alimenté par un redresseur commandé.

Le régulateur vitesse comporte :

- un **comparateur** qui fournit un signal  $\varepsilon = (V^+) - (V^-)$  ;
- un **correcteur** qui, en fonction du signal  $\varepsilon$ , élabore un signal de commande  $u_c$  de manière à diminuer  $\varepsilon$ , voire de l'annuler. Dans ce cas :

si  $V^+ = V^-$  : vitesse moteur = vitesse consigne.

Le signal  $u_c$  agit sur les impulsions de gâchette des thyristors du redresseur commande. Ce signal permet de régler l'angle  $\alpha$  de retard à l'amorçage des thyristors, donc de régler  $U_M$  induit moteur à une valeur telle que :

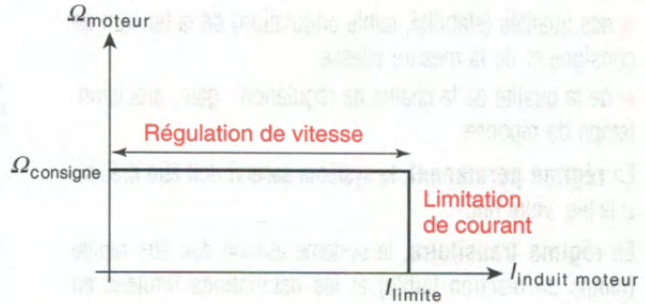
**vitesse moteur = vitesse consigne.**

#### Capteur vitesse

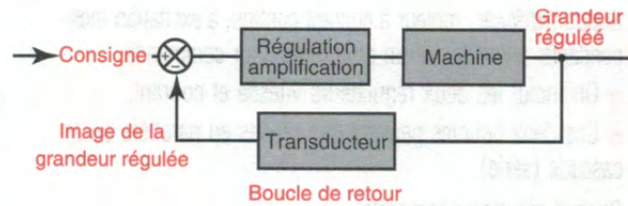
La vitesse est ici mesurée par une dynamo tachymétrique qui fournit une tension proportionnelle à la vitesse :

$U_{DT} = f(\Omega)$  est une fonction affine.

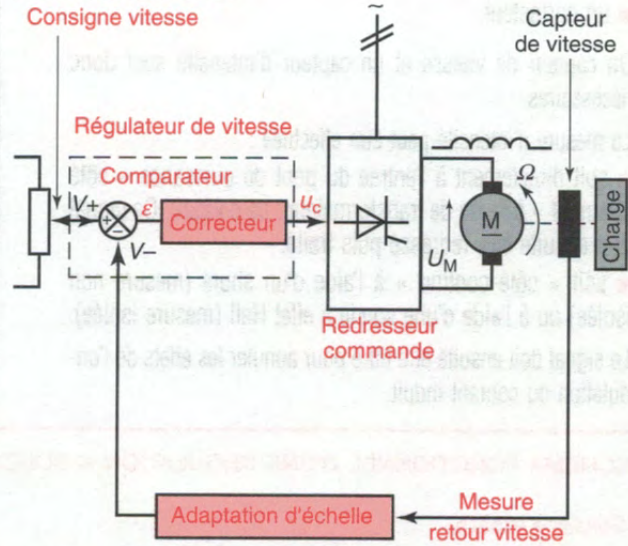
### RÉGULATION DE VITESSE



### RÉGULATION : SCHÉMA FONCTIONNEL GÉNÉRAL

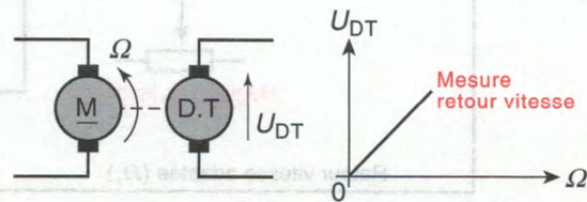


### FONCTIONNEMENT



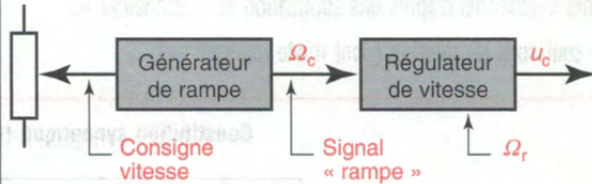
### CAPTEUR VITESSE

Caractéristique d'une dynamo tachymétrique



Les systèmes mécaniques entraînés par un moteur ne peuvent pas subir de trop fortes accélérations ou décélérations car celles-ci entraînent des efforts mécaniques excessifs.

On limite les phases d'accélération ou de décélération par un circuit « générateur de rampe » placé entre le potentiomètre de consigne vitesse et l'entrée du régulateur de vitesse.



Fonctionnement désiré

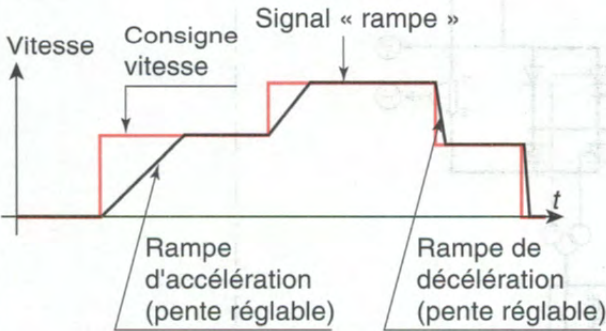
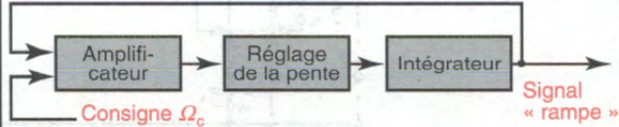
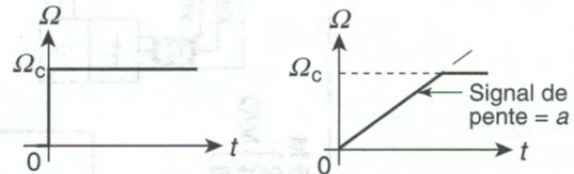


Schéma fonctionnel



L'intégrateur permet de transformer le signal « consigne » de forme  $\Omega_c = \text{constante}$  en un signal  $\Omega = a.t$ .



Analyse du fonctionnement (voir schéma structurel)

Appliquons  $V_1$  à l'entrée du montage.

- L'amplificateur  $A_1$  est utilisé en comparateur et délivre une tension  $V_2 = V_{\text{sat}} (\pm V_{\text{cc}})$ .
- Le signe de cette tension dépend de celui de l'erreur  $\epsilon$  vue des entrées de  $A_1$ .
- On applique à l'entrée du montage intégrateur une fraction de ce signal, soit  $k \times V_2$  avec  $0 < k < 1$ .

$$V_3 = -\frac{1}{R \times C} \int_0^t k \times V_2 \times dt \Rightarrow V_3 = -\frac{k \times V_2}{R \times C} \times t = a \times t$$

$a$  : pente du signal « rampe »

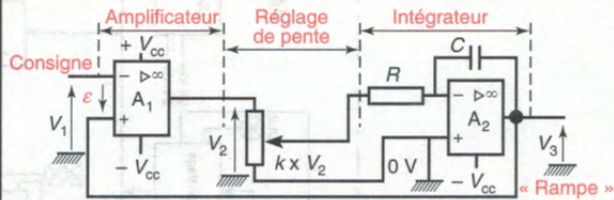
Si  $V_3 = V_1 + \epsilon (\epsilon > 0 : V_3 > V_1)$   
 $V_2 = +V_{\text{sat}}$  et  $V_3$  tend à décroître.

Si  $V_3 = V_1 - \epsilon (\epsilon < 0 : V_3 < V_1)$   
 $V_2 = -V_{\text{sat}}$  et  $V_3$  tend à croître.

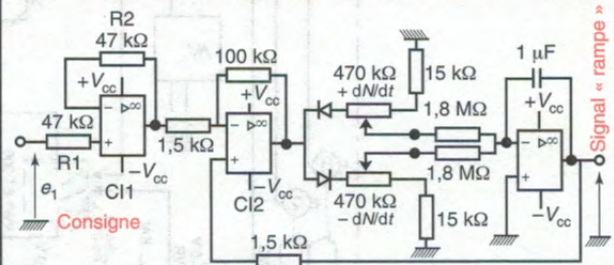
**Conclusion :** à l'équilibre, nous aurons  $V_3 = V_1$ , signal « rampe » = consigne vitesse.

**Nota :** L'action sur le potentiomètre permet de faire varier  $k \times V_2$ , donc de modifier la pente du signal « rampe »  $V_3 = f(t)$ . On peut ainsi régler les temps d'accélération et de décélération à des valeurs désirées qui sont fonction des contraintes d'exploitation du système (moteur + charge).

Schéma structurel de base



Générateur de rampe - Réalisation pratique



$C11$  : montage suiveur adaptateur d'impédance de gain = 1 ( $R_1 = R_2$ ). Le gain de  $C12$  est important.  $V_B = \pm V_{\text{cc}}$  selon le signe de  $\epsilon$ .

Les potentiomètres  $+ dN/dt$  (pente d'accélération) et  $- dN/dt$  (pente de décélération) permettent de régler indépendamment les deux pentes.

## 55 ■ 7 Variateur-régulateur de vitesse

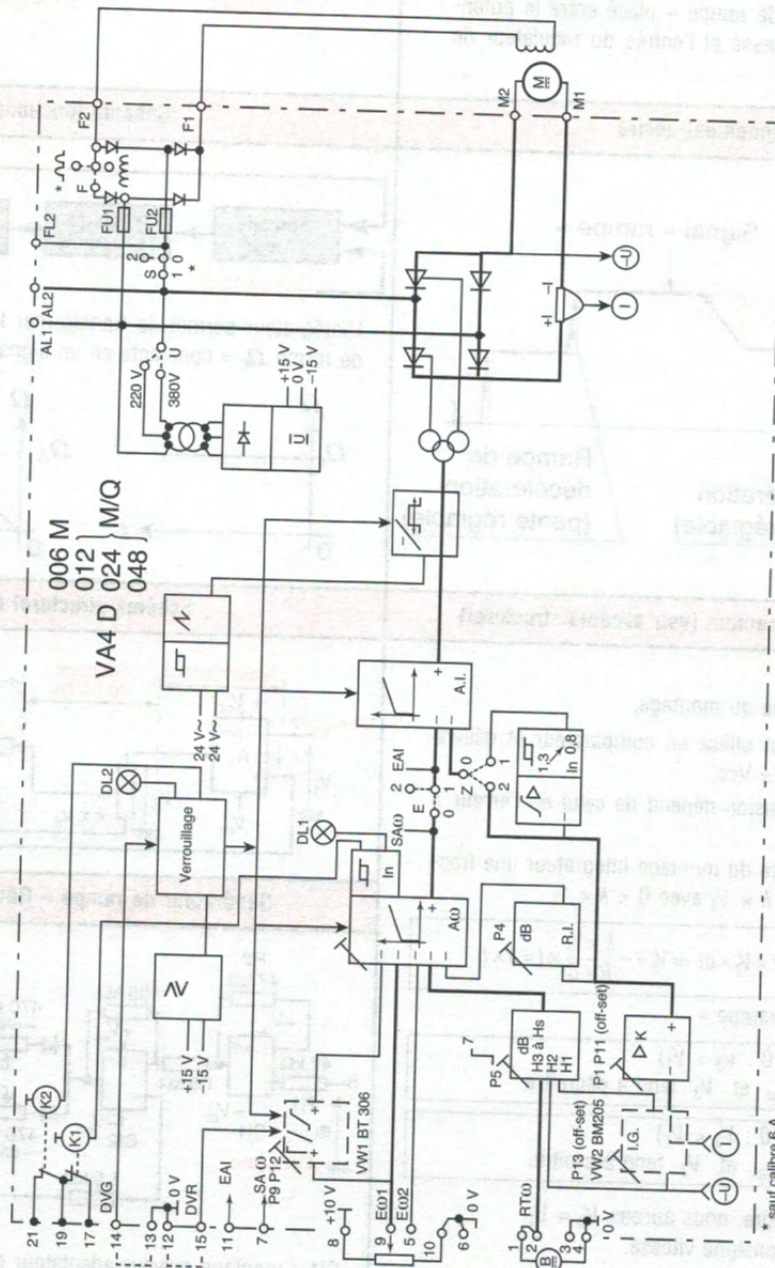
Schéma fonctionnel d'après une application de « Schneider ».

– Un seul sens de rotation (pont mixte monophasé).

– Retour vitesse par dynamo-tachymétrie.

– Consigne vitesse par potentiomètre extérieur.

### Constitution synoptique (d'après le constructeur)



On peut reconnaître :

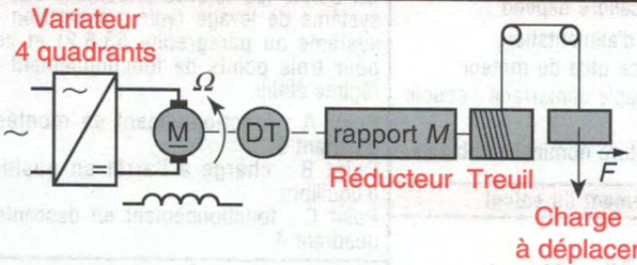
- le pont de puissance mixte monophasé ;
- le circuit inducteur du moteur alimenté à partir du réseau alternatif, par un redresseur monophasé simple ou double alternance en fonction de la tension du réseau et de la tension nominale du circuit inducteur  $\Rightarrow$  configuration du cavalier F ;
- borne 9  $E\omega_1$  : entrée consigne vitesse ;

- borne 2 RT $\omega$  : retour mesure vitesse ;
- blocs fonctionnels  $A\omega$  (régulateur vitesse) et A.I (régulateur courant) ;
- I mesure l'intensité à l'aide d'un shunt en série avec l'induit (mesure courant non isolée) ;
- potentiomètre P1 : réglage de  $I_{limitation}$  ;
- blocs VW1 BT 306 : carte rampe optionnelle avec P9 et P12 (potentiomètres de réglage des pentes d'accélération et de décélération).

55 ■ 72

VARIATEUR VMR MONOPHASÉ RÉVERSIBLE « LEROY-SOMER »

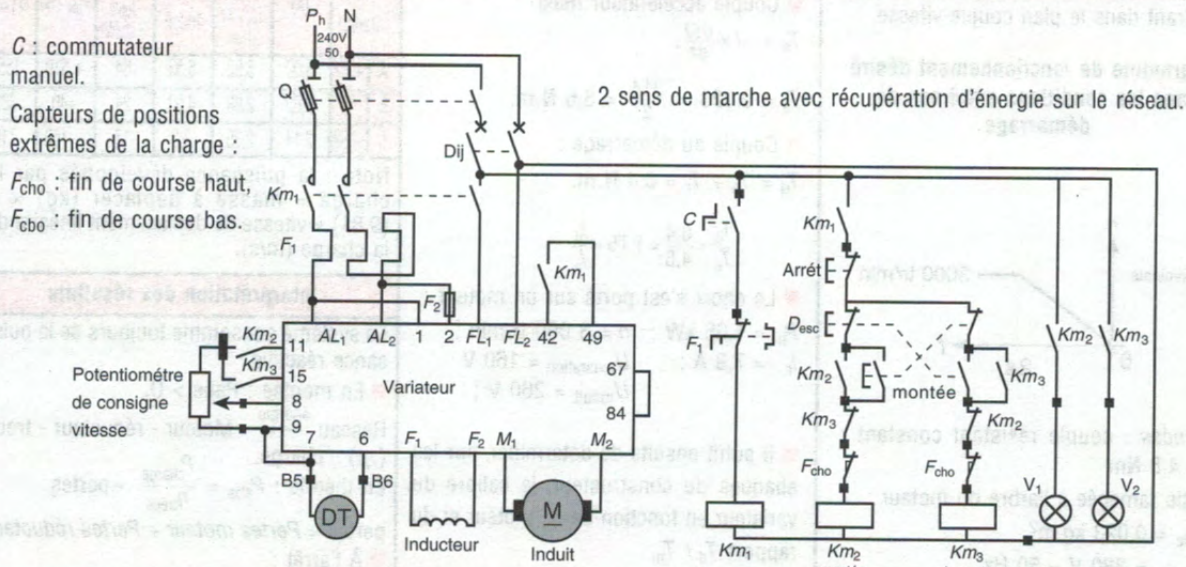
Support d'étude : système de levage



Masse de la charge = 250 kg.  
 Vitesse de déplacement linéaire nominale = 12 m/min.  
 Moteur :  $P_u = 1,3 \text{ kW}$ ,  $n = 1430 \text{ tr/min}$ ,  
 Induit : 150 V ; 10,4 A,  
 Inducteur : 190 V ; 0,55 A

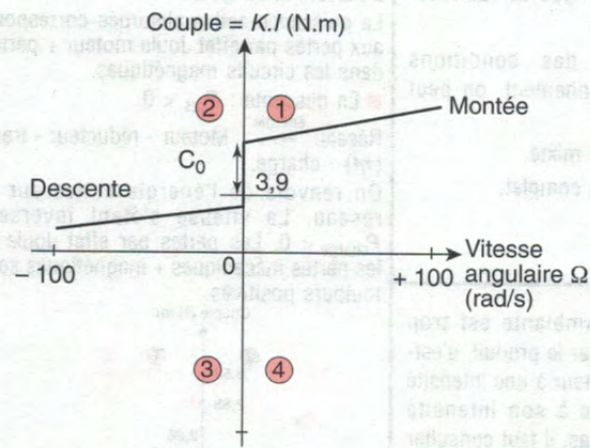
Le pont de puissance du variateur est constitué de 2 ponts complets à thyristors montés tête-bêche.

Schéma de raccordement



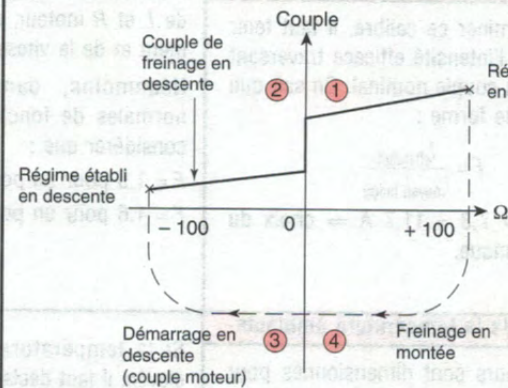
Performances obtenues :

Caractéristique couple - vitesse en régime établi



$C_0 = \text{couple de frottement sec} = 1,2 \text{ N.m}$

Déplacement du point de fonctionnement lors d'un passage instantané de la montée à la descente



Le point de fonctionnement peut se déplacer dans les quadrants ④ et ③ avant d'atteindre, en régime établi, le quadrant ②. Pour obtenir en montée un arrêt rapide, il faut appliquer un couple de freinage. En descente, une accélération rapide nécessite un couple moteur et pour contrôler la descente de la charge, il faut générer un couple de freinage.

55 ■ 8

EXERCICES D'APPLICATION

55 ■ 81 ASSOCIATION : VARIATEUR - RELAIS DE PROTECTION THERMIQUE

Après avoir choisi le type de variateur correspondant au fonctionnement de la machine dans le ou les quadrants du plan couple-vitesse, il faut déterminer le calibre du variateur.

Le choix de ce calibre dépend :

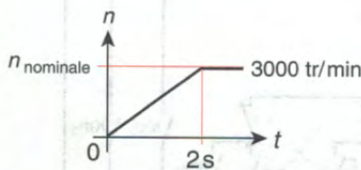
- de la tension d'alimentation,
- de la puissance utile du moteur,
- du rapport couple démarrage / couple nominal,
- de la température nominale ambiante.

Exemple

Une charge est entraînée à une vitesse variable et réglable par l'intermédiaire d'un moteur associé à un variateur de vitesse.

Le fonctionnement nécessite un seul quadrant dans le plan couple-vitesse.

Diagramme de fonctionnement désiré dans les conditions extrêmes de démarrage



Données : couple résistant constant ;  $T_r = 4,8 \text{ Nm}$   
Inertie ramenée à l'arbre du moteur :  $J_{totale} = 0,023 \text{ kg.m}^2$   
 $U_{réseau} = 380 \text{ V} - 50 \text{ Hz}$

Déroulement du calcul

■  $\Omega_{nominale} = \frac{2\pi n}{60} = 314 \text{ rad/s}$   
■  $P_{u\text{moteur}} = T_r \cdot \Omega = 4,8 \times 314 = 1\,500 \text{ W}$

■ Couple accélérateur maxi

$T_a = J \times \frac{d\Omega}{dt}$

$T_a = 0,023 \times \frac{314}{2} = 3,6 \text{ N.m}$

■ Couple au démarrage :

$T_d = T_a + T_r = 8,4 \text{ N.m}$

$\frac{T_d}{T_n} = \frac{8,4}{4,8} = 1,75 = \frac{I_d}{I_n}$

■ Le choix s'est porté sur un moteur :

$P_u = 1,65 \text{ kW}$  ;  $n = 3\,000 \text{ tr/min}$  ;  
 $I_n = 7,8 \text{ A}$  ;  $U_{excitation} = 160 \text{ V}$   
 $U_{induit} = 260 \text{ V}$  ;

■ Il suffit ensuite de déterminer, sur les abaques du constructeur, le calibre du variateur en fonction de  $P_u$  moteur et du rapport  $T_d / T_n$ .

Détermination du calibre du relais de protection thermique

Pour déterminer ce calibre, il faut tenir compte de l'intensité efficace traversant le moteur à couple nominal. On sait que le facteur de forme :

$F = \frac{I_{eff\text{ induit}}}{I_{moyen\text{ induit}}}$

$I_{eff} = 1,5 \times 7,8 = 11,7 \text{ A} \Rightarrow$  choix du relais thermique.

Influence de la température ambiante

Les variateurs sont dimensionnés pour fournir en permanence leur intensité spécifique pour une température ambiante inférieure ou égale généralement à  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Si la température ambiante est trop élevée, il faut déclasser le produit, c'est-à-dire utiliser le variateur à une intensité maximale inférieure à son intensité spécifique. Dans ce cas, il faut consulter les prescriptions des constructeurs.

55 ■ 82 SYSTÈME DE LEVAGE

Étude du transfert de l'énergie

On donne les relevés effectués sur un système de levage (voir présentation du système au paragraphe 53.8.2) et cela pour trois points de fonctionnement en régime établi.

Point A : fonctionnement en montée - quadrant 1.  
Point B : charge à l'arrêt en position d'équilibre.  
Point C : fonctionnement en descente - quadrant 4.

On donne  $K = 1,1$  et  $R_{induit} = 1,5 \text{ } \Omega$

Tableau de relevés :

$\Omega$ (rad/s)	$T_{induit}$ (A)	Couple moteur $T_{m} = K I$ (N.m)	$I_{eff}$ (A) induit	Pertes Joule $R_{induit} I^2$ (W)	$P_{abs}$ (W)	$Q$ (VAR)
A + 62	5,02	5,52	6,53	64	+ 510	1558
B 0	2,62	2,88	4,03	24	+40	883
C - 62	2,14	2,35	3,3	17	-100	710

Nota : la puissance développée par la charge = masse à déplacer (kg)  $\times$  g (9,81)  $\times$  vitesse de déplacement linéaire de la charge (m/s).

Interprétation des résultats

Le système consomme toujours de la puissance réactive.

■ En montée :  $P_{abs} > 0$ .

Réseau  $\xrightarrow{\text{énergie}}$  Moteur - réducteur - treuil ( $\eta_t$ ) - charge.

En théorie :  $P_{abs} = \frac{P_{charge}}{\eta_{treuil}}$  - pertes

pertes = Pertes moteur + Pertes réducteur

■ À l'arrêt :

La puissance développée par la charge est nulle.

Le point de fonctionnement est indéterminé car le couple de pertes mécaniques à l'arrêt est variable.

La puissance active absorbée correspond aux pertes par effet Joule moteur + pertes dans les circuits magnétiques.

■ En descente :  $P_{abs} < 0$ .

Réseau  $\xleftarrow{\text{énergie}}$  Moteur - réducteur - treuil ( $\eta_t$ ) - charge.

On renvoie de l'énergie active sur le réseau. La vitesse s'étant inversée,  $P_{charge} < 0$ . Les pertes par effet Joule et les pertes mécaniques + magnétiques sont toujours positives.

