

# Machines Électriques et Convertisseurs Électroniques

Alejandro Ospina Vargas– Enseignant-Chercheur UTC

Université de Technologie de Compiègne

## 1. Types d'association Convertisseurs - Machines

## 2. Convertisseurs - Machines CC

- Rappels – Machines C.C.
- Les hacheurs
  - Hacheur série
  - Hacheur parallèle
  - Hacheur à deux quadrants
  - Hacheur à quatre quadrants

## 3. Convertisseurs - Machines CA

## Types de convertisseurs pour les MCC

---

CC

- CC/CC (Hacheurs)
- 

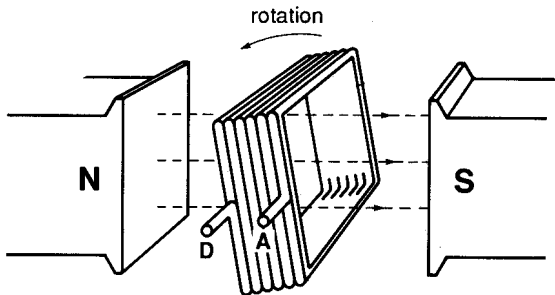
---

CA

- monophasée CA/CC
  - triphasée CA/CC
-

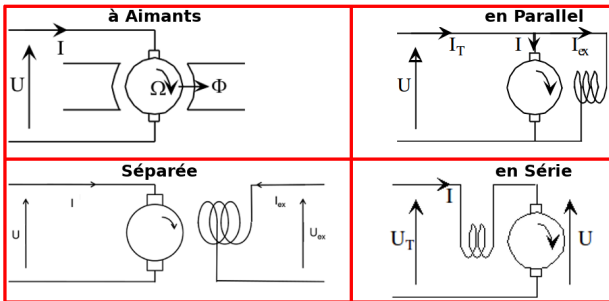
## Machine à courant continu : principe de fonctionnement

Bobinage tournant dans un champ magnétique fixe...

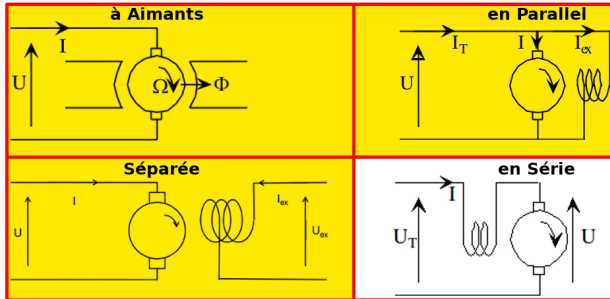


Bobinage en rotation (rotor) : induit, armature  
Source de champ magnétique (stator) : inducteur, excitation

## Machine à courant continu : types d'excitation



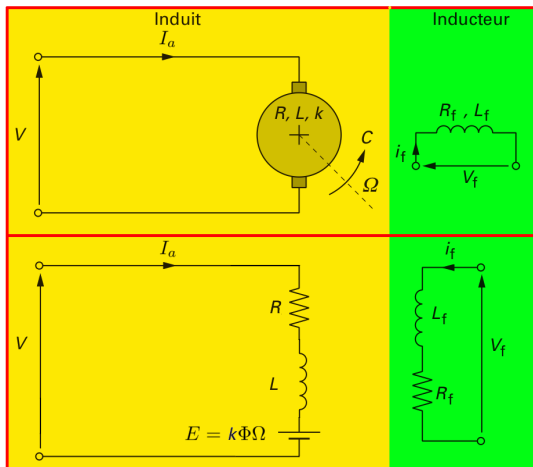
## Machine à courant continu : types d'excitation



Les machines CC à excitation à aimants, séparée et dérivation produisent des comportements équivalents (Couple et vitesse).

## Machine à courant continu : Excitation Séparée

Deux sources d'alimentation : courant d'armature (rotor)  $I_a$ , courant d'excitation (stator)  $i_f$ .



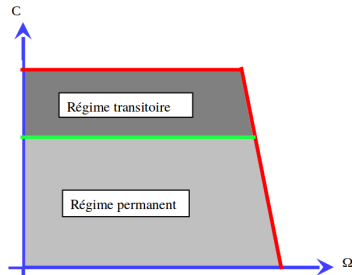
## Machine à courant continu : Excitation Séparée

Équations - machine CC :

$$E = k\Phi\Omega$$

$$U = E + RI_a + L_a \frac{dI_a}{dt}$$

$$C = k\Phi I_a$$





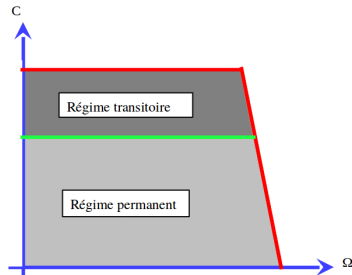
## Machine à courant continu : Excitation Séparée

Équations - machine CC : régime permanent

$$E = k\Phi\Omega$$

$$U = E + RI_a + L_a \frac{dI_a}{dt} \approx E + RI_a$$

$$C = k\Phi I_a$$



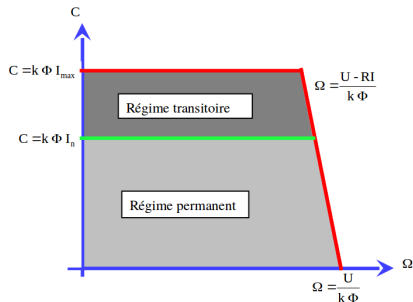
## Machine à courant continu : Excitation Séparée

Équations - machine CC : régime permanent  
 commande de la vitesse  $\Omega$

$$E = k\Phi\Omega \Rightarrow \Omega = \frac{E}{k\Phi}$$

$$U = E + RI_a + L_a \frac{dI_a}{dt} \approx E + RI_a$$

$$C = k\Phi I_a$$



## Machine à courant continu : Excitation Séparée

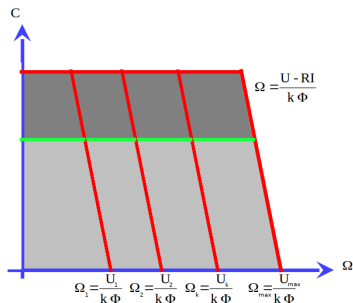
Équations - machine CC : régime permanent  
 commande de la vitesse  $\Omega$

$$E = k\Phi\Omega \Rightarrow \Omega = \frac{E}{k\Phi}$$

$$U = E + RI_a + L_a \frac{dI_a}{dt} \approx E + RI_a$$

$$C = k\Phi I_a$$

À flux constant ( $\Phi \approx cte \Rightarrow i_f \approx cte$ ), la vitesse varie proportionnellement à la tension d'armature  $U$  ( $U_1 < U_2 < U_k \dots < U_{max}$ ).



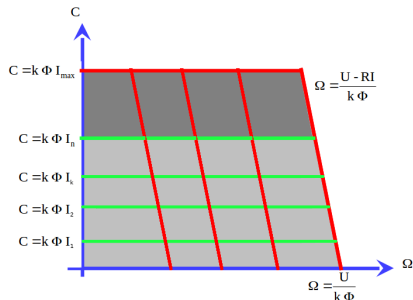
## Machine à courant continu : Excitation Séparée

Équations - machine CC : régime permanent  
 commande de la vitesse  $\Omega$   
 commande du couple  $C$

$$E = k\Phi\Omega \Rightarrow \Omega = \frac{E}{k\Phi}$$

$$U = E + RI_a + L_a \frac{dI_a}{dt} \approx E + RI_a$$

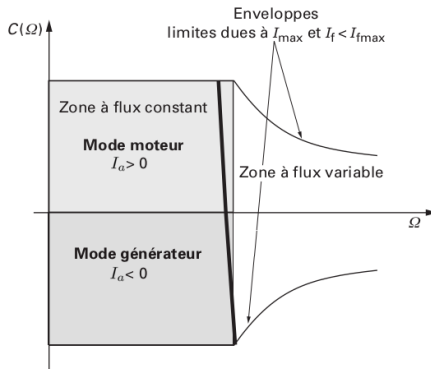
$$C = k\Phi I_a$$



À flux constant ( $\Phi \approx cte \Rightarrow i_f \approx cte$ ), la vitesse varie proportionnellement à la tension d'armature  $U$  ( $U_1 < U_2 < U_k \dots < U_{max}$ ).

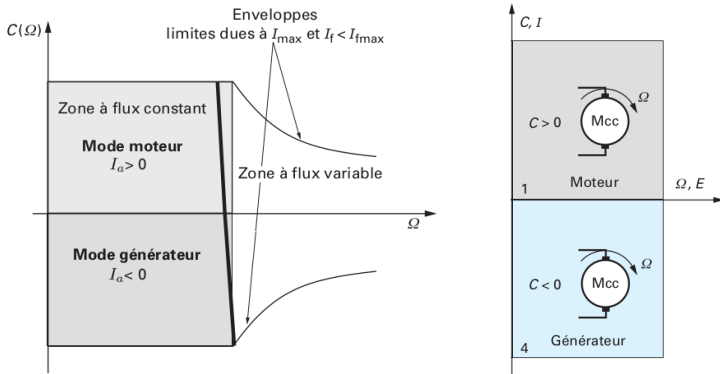
Le couple varie proportionnellement au courant d'armature  $I_a$  ( $I_1 < I_2 < I_k \dots < I_n < I_{max}$ ).

## Machine à courant continu : modes de fonctionnement



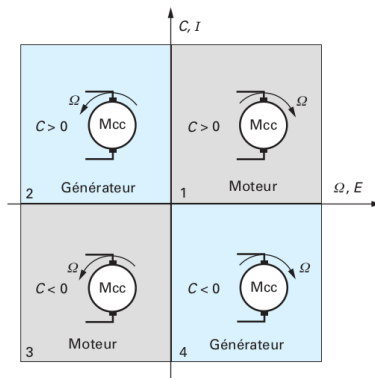
Le couple s'inverse, le moteur passe du mode moteur  $C > 0$  au mode générateur  $C < 0$  (la vitesse est toujours dans la même direction).

## Machine à courant continu : modes de fonctionnement



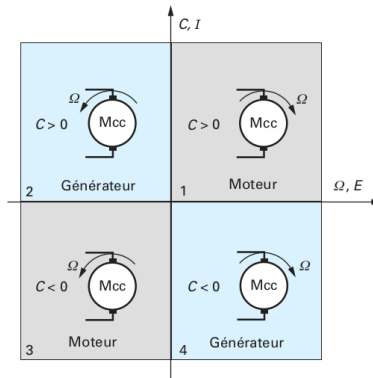
Le couple s'inverse, le moteur passe du mode moteur  $C > 0$  au mode générateur  $C < 0$  (la vitesse est toujours dans la même direction).  
 Le moteur inverse la direction du courant d'armature  $I_a$ .

## Machine à courant continu : modes de fonctionnement



Changement de la direction de rotation  $\Omega < 0 \Rightarrow$  Inversion de la polarité de la tension d'armature  $U \equiv E$ .

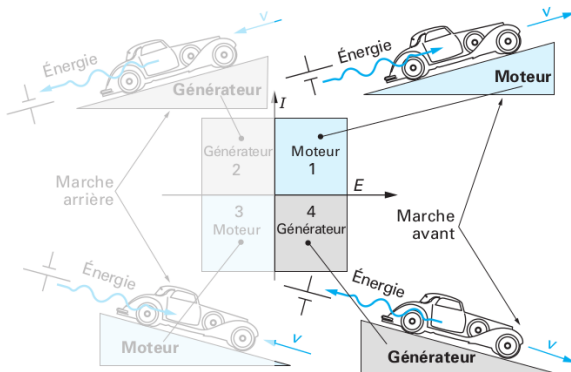
## Machine à courant continu : modes de fonctionnement



La charge (résistante ou entraînante) impose le passage vertical d'un quadrant à un autre sans changement du signe de la vitesse. Les transitions horizontales entre quadrants seront obtenues par une inversion de la tension de l'alimentation  $U$  (ou du courant d'excitation  $I_f$ ).

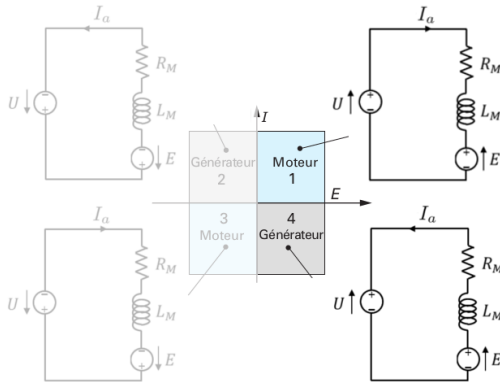


## Machine à courant continu : modes de fonctionnement



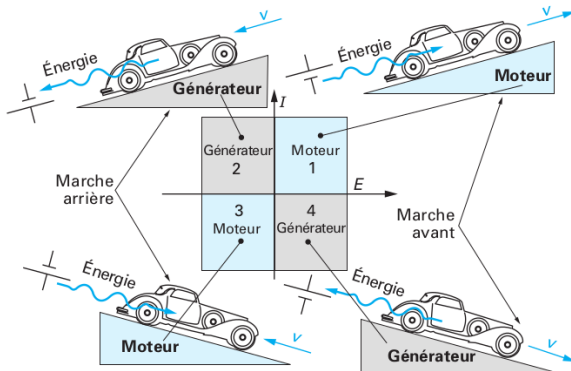
Avance de la voiture à vitesse  $v$  constante : en côte (mode moteur), en descente (mode générateur). Une alimentation à deux quadrants suffit.

## Machine à courant continu : modes de fonctionnement



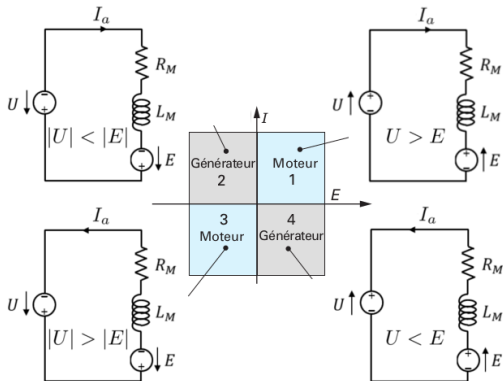
Avance de la voiture à vitesse  $v$  constante : en côte (mode moteur), en descente (mode générateur). Une alimentation à deux quadrants suffit.  
 Les deux autres quadrants, s'il y a inversion de la tension de l'alimentation  $U$  ou du flux magnétique (courant d'excitation).

## Machine à courant continu : modes de fonctionnement



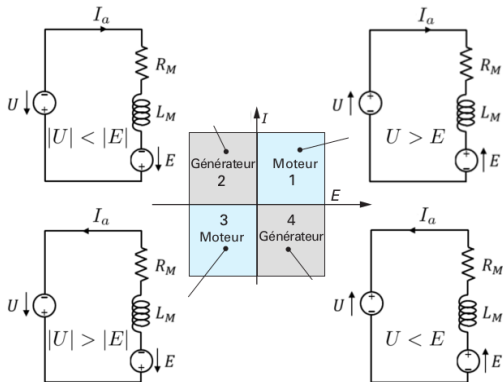
Les deux autres quadrants : la voiture recule en sens inverse dans une côte (mode générateur), la voiture monte en sens inverse une descente (mode moteur).

## Machine à courant continu : modes de fonctionnement



Les deux autres quadrants : la voiture recule en sens inverse dans une côte (mode générateur), la voiture monte en sens inverse une descente (mode moteur).  
 Pour les quadrants 2 et 3, il y a inversion de la tension d'alimentation  $U$ .

## Machine à courant continu : modes de fonctionnement



Nécessité d'adapter l'alimentation aux fonctionnement (quadrants) du système d'entraînement  $\Rightarrow$  Utilisation des convertisseurs.

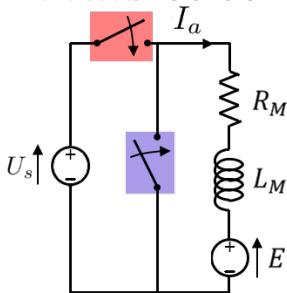
## 1. Types d'association Convertisseurs - Machines

## 2. Convertisseurs - Machines CC

- Rappels – Machines C.C.
- Les hacheurs
  - Hacheur série
  - Hacheur parallèle
  - Hacheur à deux quadrants
  - Hacheur à quatre quadrants

## 3. Convertisseurs - Machines CA

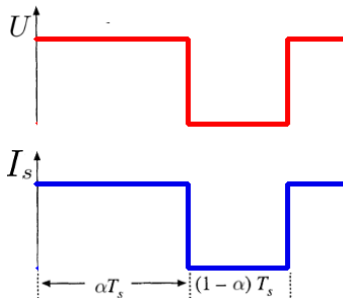
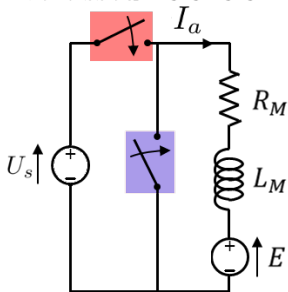
## Convertisseur CC-CC – hacheur série



Deux conditions :

- (i) sans court-circuiter la source de tension (circulation d'un courant infini).
- (ii) sans ouvrir le circuit auquel est connecté la MCC (risque de tension induite importante lors d'ouverture et donc risque de claquage des interrupteurs).

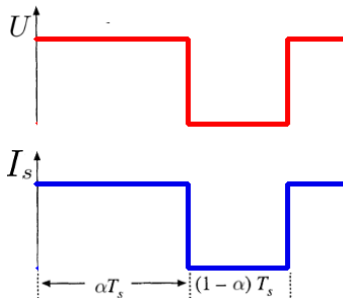
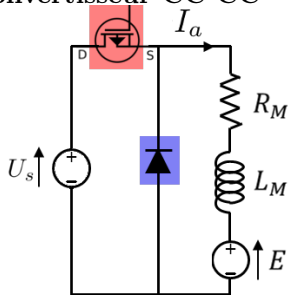
## Convertisseur CC-CC – hacheur série



$\alpha$  : rapport cyclique



## Convertisseur CC-CC – hacheur série

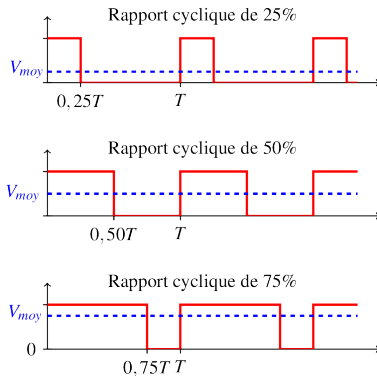
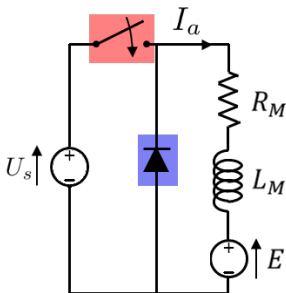


$\alpha$  : rapport cyclique

## Convertisseur CC-CC – hacheur série

Mode moteur - variation de la vitesse

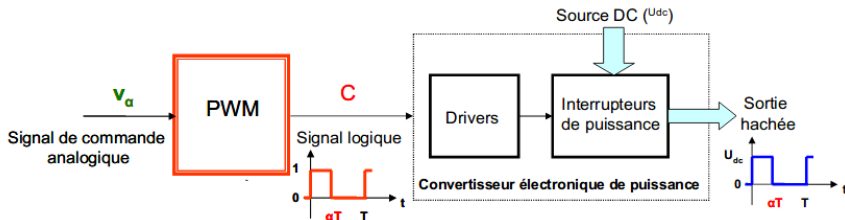
- Faire varier la vitesse en faisant varier la tension d'alimentation – rapport cyclique.



## Convertisseur CC-CC – hacheur série

Mode moteur - variation de la vitesse

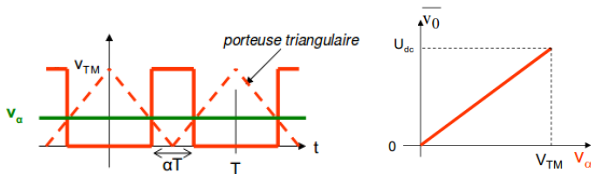
- Faire varier la vitesse en faisant varier la tension d'alimentation – rapport cyclique.
  - Rapport cyclique  $\alpha$  proportionnel à une tension de commande :  
modulation de la largeur d'impulsion avec signal triangulaire (porteuse)



## Convertisseur CC-CC – hacheur série

Mode moteur - variation de la vitesse

- Faire varier la vitesse en faisant varier la tension d'alimentation – rapport cyclique.
- Rapport cyclique  $\alpha$  proportionnel à une tension de commande :  
 modulation de la largeur d'impulsion avec signal triangulaire (porteuse)



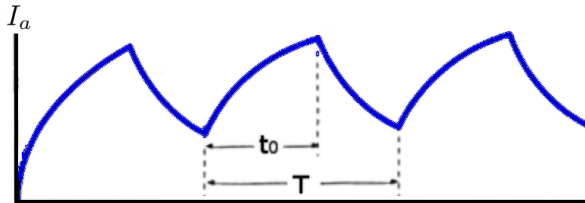
$$\alpha = v_{\alpha} / V_{TM}$$

$$\overline{V_0} = \alpha U_{dc} = \frac{U_{dc}}{V_{TM}} v_{\alpha}$$

## Convertisseur CC-CC – hacheur série

Mode moteur - variation de la vitesse

- Faire varier le couple en faisant varier le courant  $I_a$ .
  - Si la constante de temps  $\tau_e \approx T$  le courant est variable.

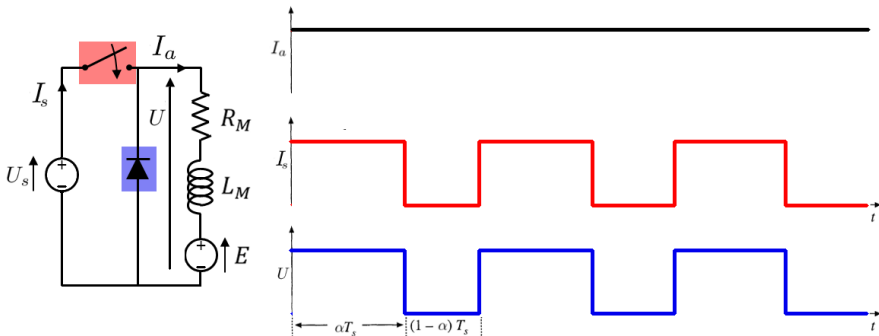


$$E < U_s$$

## Convertisseur CC-CC – hacheur série

Mode moteur - variation de la vitesse

- Faire varier le couple en faisant varier le courant  $I_a$ .
  - Si l'inductance est élevée  $\tau_e \gg T$  le courant est continue.



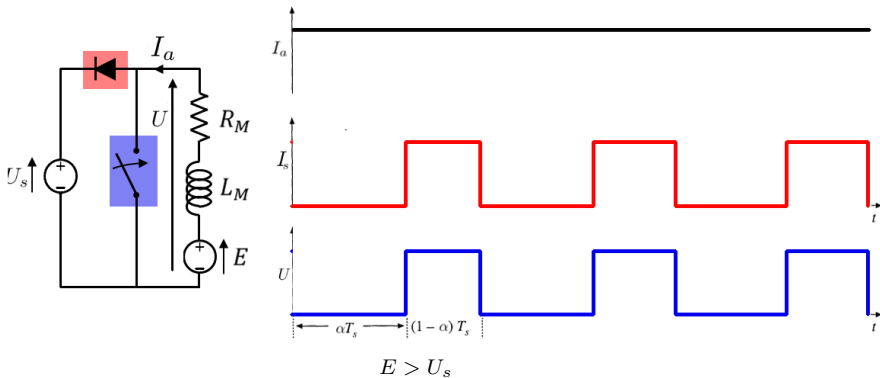
$$E < U_s$$

Tension moyenne d'armature :  $U = \alpha U_s$

Courant dans la source :  $I_s = \alpha I_a$

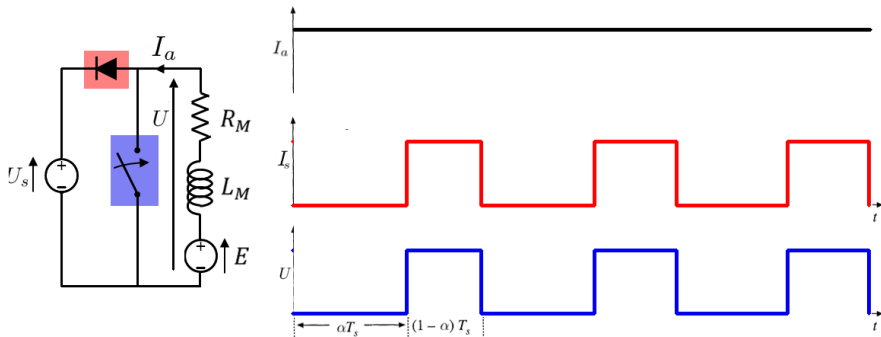
## Convertisseur CC-CC – hacheur parallèle

Mode frein - deuxième quadrant



## Convertisseur CC-CC – hacheur parallèle

Mode frein - deuxième quadrant



$$E > U_s$$

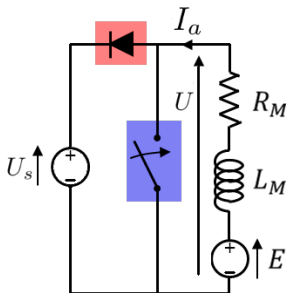
Tension moyenne d'armature :  $U = (1 - \alpha)U_s$

Courant dans la source :  $I_s = (1 - \alpha)I_a$



## Convertisseur CC-CC – hacheur parallèle

Mode frein - deuxième quadrant



$$E = k\Phi\Omega$$

Diode passante :

$$E = U_s + R_M I_a$$

Le transfert d'énergie est possible si

$$0 \leq E - R_M I_a \leq U_s$$

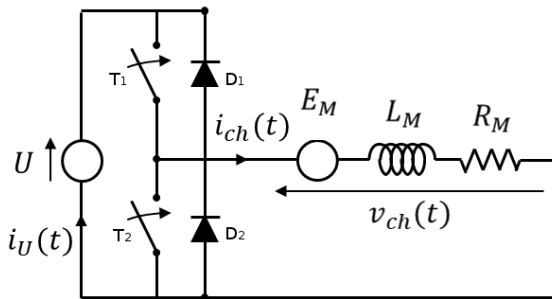
D'où un intervalle de vitesse pour le

freinage régénératif :

$$\frac{R_M I_a}{k\Phi} \leq \Omega \leq \frac{1}{k\Phi} (U_s + R_M I_a)$$

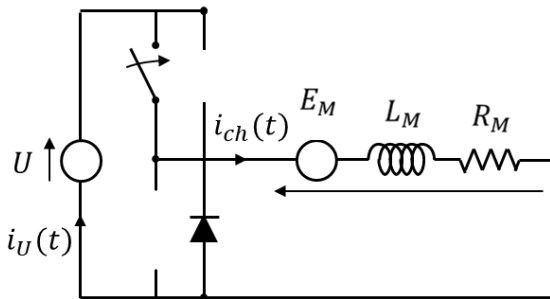
## Convertisseur CC-CC – hacheur à deux quadrants réversible en courant

Inversion du sens du courant



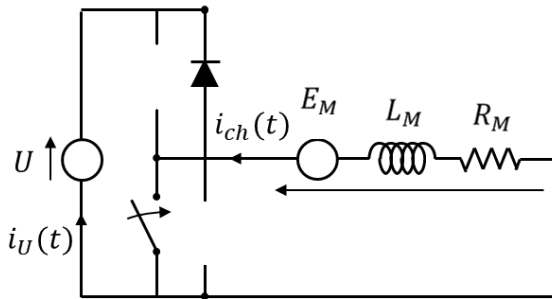
## Convertisseur CC-CC – hacheur à deux quadrants réversible en courant

Inversion du sens du courant



## Convertisseur CC-CC – hacheur à deux quadrants réversible en courant

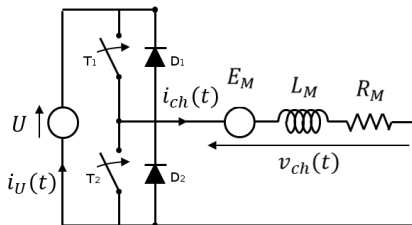
Inversion du sens du courant



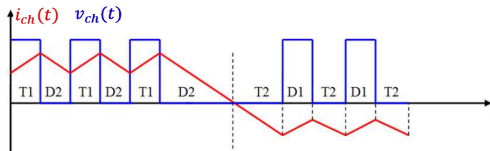
## Convertisseur CC-CC – hacheur à deux quadrants réversible en courant

Inversion du sens du courant

Mode de fonctionnement alterné (transistors unidirectionnels)



Si l'on détecte le passage du courant par zéro, la commande bascule d'un interrupteur à l'autre



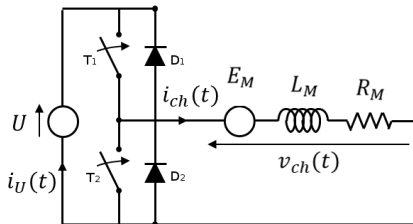
## Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CC

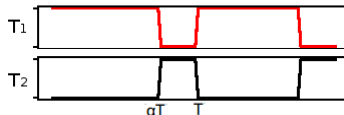
Deux cadrants : mode moteur - mode frein (génératrice)

Inversion du sens du courant

Mode de fonctionnement symétrique



L'interrupteur  $T_1$  est fermé de 0 à  $\alpha T$  et l'interrupteur  $T_2$  de  $\alpha T$  à  $T$ . Le passage du mode de fonctionnement moteur à frein se fait de manière automatique.

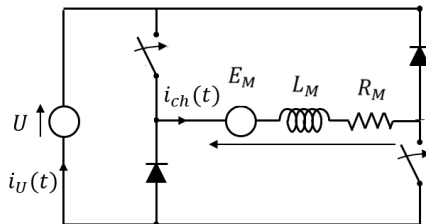


## Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CC

Deux quadrants : mode moteur - mode frein (génératrice)

Inversion de la tension



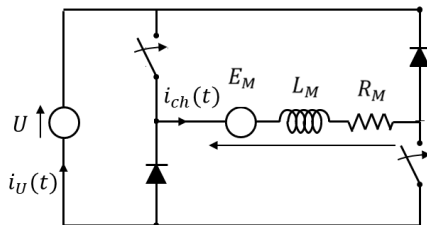
- Les interrupteurs  $T_1$  et  $T_2$  sont fermés de 0 à  $\alpha T$ , les diodes sont bloquées  
⇒ tension  $v_{ch}$  positive.
- Les interrupteurs  $T_1$  et  $T_2$  sont ouverts de  $\alpha T$  à  $T$ , les diodes sont passantes  
⇒ tension  $v_{ch}$  négative.

## Introduction à l'association Machine-Convertisseur

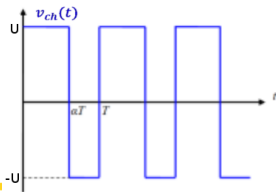
Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CC

Deux cadrants : mode moteur - mode frein (génératrice)

Inversion de la tension



La tension de sortie oscille entre  $U$  et  $-U$



Valeur moyenne de la tension sur la charge :

$$\overline{v_{ch}} = \frac{1}{T} \int_0^T U dt \quad (1)$$

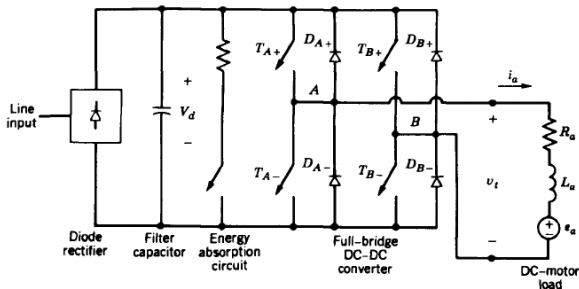
$$\overline{v_{ch}} = (2\alpha - 1)U$$



## Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CC

Convertisseur pour machine CC (hacheur - 4 quadrants) :

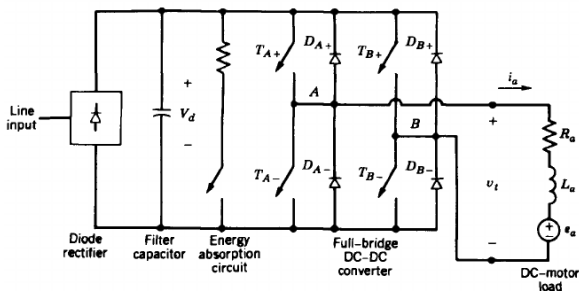


- Les interrupteurs  $T_{A+}$  et  $T_{B-}$  sont fermés de 0 à  $\alpha T$   
 $\Rightarrow$  tension  $v_t$  positive.
- Les interrupteurs  $T_{A-}$  et  $T_{B+}$  sont fermés de  $\alpha T$  à  $T$   
 $\Rightarrow$  tension  $v_t$  négative.

## Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CC

Convertisseur pour machine CC (hacheur - 4 quadrants) :



Valeur moyenne de la tension sur la charge :

$$\overline{v_{ch}} = \frac{1}{T} \int_0^T U dt \quad (3)$$

$$\overline{v_{ch}} = (2\alpha - 1)U$$

## 1. Types d'association Convertisseurs - Machines

## 2. Convertisseurs - Machines CC

- Rappels – Machines C.C.
- Les hacheurs
  - Hacheur série
  - Hacheur parallèle
  - Hacheur à deux quadrants
  - Hacheur à quatre quadrants

## 3. Convertisseurs - Machines CA

## Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CA

Équations de la machine CA  
 asynchrone (simplifiées) :

$$E \propto \Omega$$

$$U \approx E$$

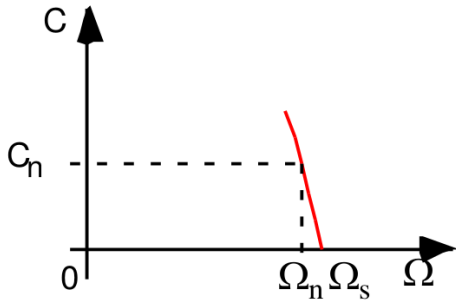
$$I \propto C$$

Eq. proches de celles de la machine  
 CC.

Il faut rajouter une relation sur la fréquence :

$$f \propto \Omega \quad \text{avec} \quad f = \frac{p}{2\pi} \Omega \pm \text{glissement}$$

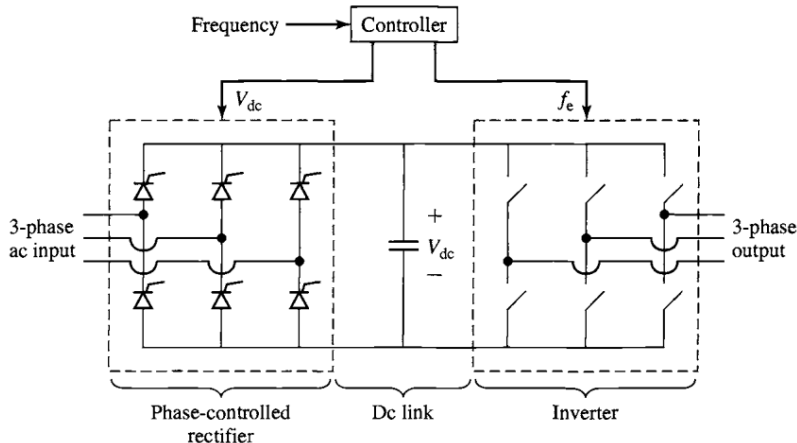
Si nous voulons pouvoir contrôler la vitesse, il faut à la fois faire varier la valeur de la tension et la fréquence.



## Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CA

Association redresseur - onduleur :

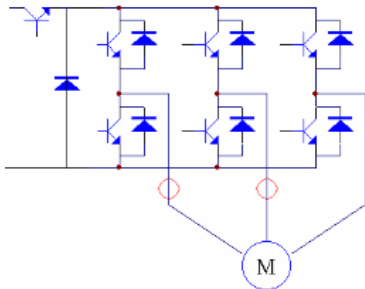


## Introduction à l'association Machine-Convertisseur

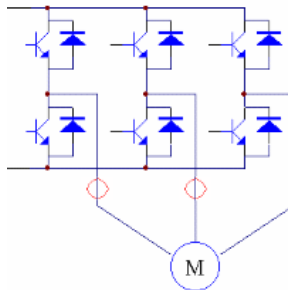
Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CA

Convertisseur pour machine CA (onduleur) :

Onduleur à motif



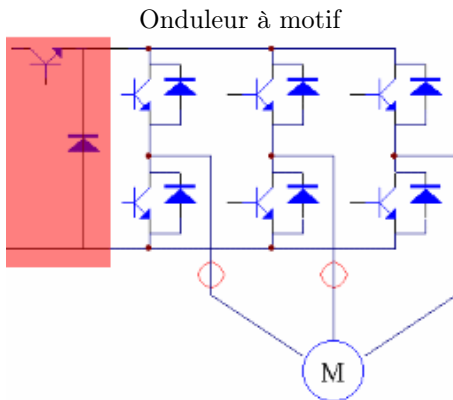
Onduleur MLI (PWM)



## Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CA

Convertisseur pour machine CA (onduleur) :

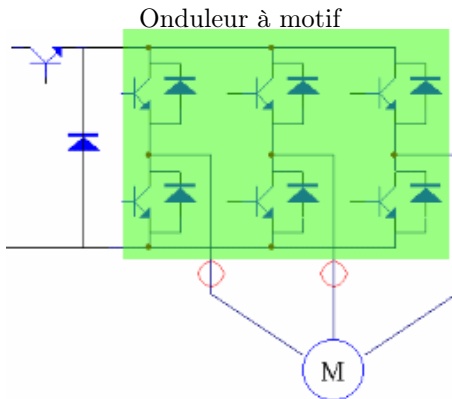


Le hacheur contrôle le niveau de tension

## Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CA  
asynchrone

Convertisseur pour machine CA asynchrone (onduleur) :



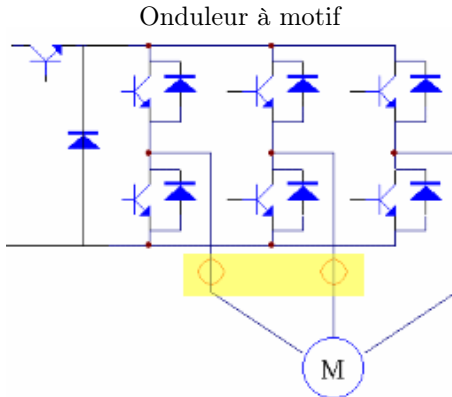
L'onduleur impose un motif et règle la fréquence des signaux de sortie.



## Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CA

Convertisseur pour machine CA (onduleur) :

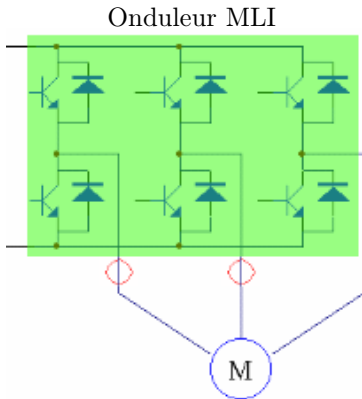


La mesure des courants agit sur le hacheur et l'onduleur pour limiter la valeur des courants.

## Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CA

Convertisseur pour machine CA (onduleur) :

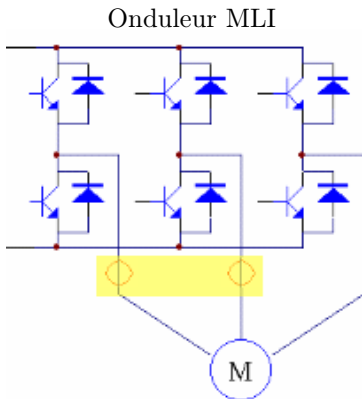


Les commutations de l'onduleur permettent le suivi d'une consigne imposant la fréquence et l'amplitude des signaux de sortie.

## Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CA

Convertisseur pour machine CA (onduleur) :



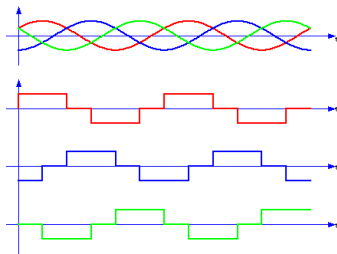
La mesure des courants modifie la consigne pour limiter leurs valeurs.

## Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CA

Convertisseur pour machine CA (onduleur à motif) :

Pour simplifier l'élaboration des ordres de commutations au lieu de suivre une consigne sinusoïdale, il est intéressant de suivre une consigne en créneaux.



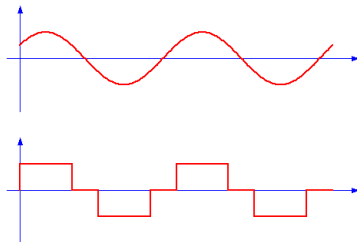
La connaissance de 3 positions du rotor de la machine suffit à l'élaboration des signaux, alors qu'il faut précisément la connaître dans le cas d'une alimentation sinusoïdale.

## Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CA

Convertisseur pour machine CA (onduleur à motif) :

Pour une même valeur maximum des grandeurs (ici courants), la valeur efficace d'un signal en créneau est plus importante qu'un signal sinusoïdal.



Pour le cas sinusoïdal :  $1/\sqrt{2} I_{max} = 0.707 I_{max}$

Pour le cas en créneaux :  $\sqrt{2/3} I_{max} = 0.816 I_{max}$

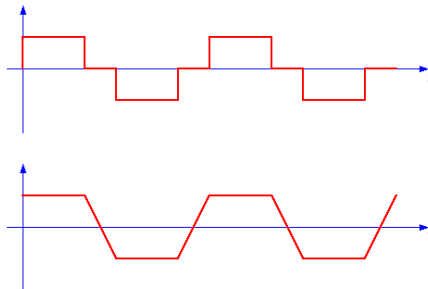
Une valeur maximum identique nous permet d'utiliser les mêmes composants de puissance, mais dans le cas des signaux en créneaux, la puissance portée par le signal est 33% plus élevée.

## Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CA

Convertisseur pour machine CA (onduleur à motif) :

Il faut que les tensions et les f.e.m. soient aussi en créneaux. En fait, cela est difficile pour les f.e.m., et la solution choisie est des f.e.m. trapézoïdales.



## Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CA

Convertisseur pour machine CA (onduleur à motif) :

Une machine fonctionnant avec des impulsions trapézoïdales :

- un capteur de position simple (capteur à effet Hall),
- un convertisseur associé réalisé avec des composants de puissance identiques,
- une puissance plus grande (comparé avec un onduleur sinusoïdal),
- alimentation par une source à courant continu.

Le fonctionnement de cette machine est (presque) identique à une machine à courant continu, mais sans balais (ni collecteur), c'est ce type de machine qui est appelé «brushless ».

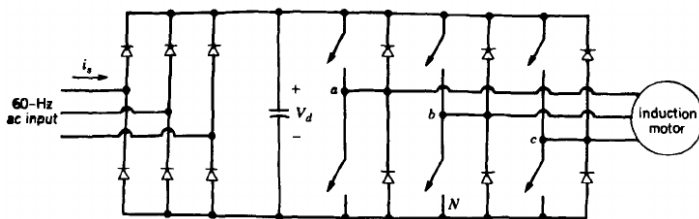
Une machine Brushless est une machine synchrone à fem trapézoïdale.

## Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CA

Convertisseur pour machine CA (onduleur MLI) :

Un onduleur MLI commande la fréquence et la magnitude de la tension de sortie :



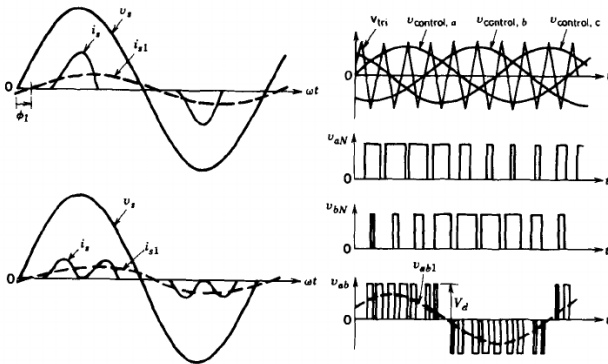


## Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CA

Convertisseur pour machine CA (onduleur MLI) :

Le signal MLI est construit par modulation avec un signal triangulaire :



## Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CA

Convertisseur pour machine CA (onduleur MLI) :

Une machine CA fonctionnant avec un onduleur MLI :

- le flux magnétique dans l'entrefer est sinusoïdal et tourne à la vitesse  $\Omega_s = 2\pi f/p$ .
- adapté pour les machines CA asynchrones
  - la vitesse sera contrôlé par variation de la fréquence statorique
  - le flux magnétique sera constant si le rapport  $V/f$  est constant, à cette condition, le machine donne son couple nominal.
- adapté pour les machines CA synchrones
  - il faut mesurer précisément la position du rotor
  - l'amplitude du courant est déterminée selon le besoin en couple

{ Moteur  $\oplus$  Variateur } = solutions étroitement dépendantes

Caractéristiques du variateur =

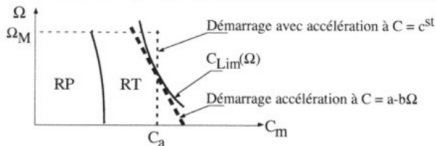
- $I_{vn}$  = courant nominal (= courant R.P.)
- $I_{vMax}$  = courant Maxi (généralement 3 à 4  $I_n$ )
- $V_{vMax}$  = tension maxi nécessaire pour réguler  $I_{vMax}$  pour accélérations à  $\Omega$  élevée  
 peut nécessiter 1 transfo d'adaptation

Ex : MCC - Brushless

$$\left\{ \begin{array}{l} \bullet E = K_e \Omega \\ \bullet V_{vMax} \geq E_{\Omega_{Max}} + R I_{Max} + L_a \frac{dI_a}{dt} (+ \Delta U_b) \\ \rightarrow \text{capacité de régulation de } I_{Max} = C_{Max}/K_c (\leftrightarrow \gamma_a^*) \text{ à } \Omega_{Max} \\ = \text{préservée si : } L_a \frac{dI_a}{dt} \approx V_{vMax} - K_c \Omega \geq 0 \end{array} \right.$$

- Options : fonctions complémentaires

Ex : accélération à  $C = a - b\Omega \leftrightarrow$  adaptation de la cmd à la courbe  $C_{Lim}(\Omega)$



## Règles de choix

### • Choix $I_{vn}$

Adaptation moteur - variateur  $\rightarrow$  règle générale  $I_{vn} = I_{Theq} \leftrightarrow C_{Theq} = K_c I_{Theq}$  du moteur

Précaution : cf les recommandations du constructeur variateur :  $I_{vn} = f(\text{cycle})$

### • Choix $I_{vMax}$

Adaptation moteur - variateur  $\rightarrow I_{vMax} \geq I_{mMax}$  (3 à 4  $I_{vn}$ )

### • Exemple

1 Application  $\rightarrow C_{Theq} = 10.4 \text{ Nm} \oplus K_c = 1.04 \leftrightarrow I_{Theq} = C_{Theq}/K_c = 10A$

Tolérances de fabrication  $\rightarrow K_c \text{ à } \pm 10\% \rightarrow \text{prévoir } I_{vn} \geq \frac{10}{0.9} = 11A$

Accélération  $\rightarrow C_{ac} = 35Nm \rightarrow I_{ac} = \frac{C_{ac}}{K_c * 0.9} = \frac{35}{1.04 * 0.9} = 38A$

Catalogue variateur  $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ 1ère solution : } \begin{cases} I_{vn} = 15A \\ I_{vMax} = 35A \end{cases} \\ \bullet \text{ 2ème solution : } \begin{cases} I_{vn} = 20A \\ I_{vMax} = 60A \end{cases} \end{array} \right. \rightarrow \text{choix de la 2ème solution}$