

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

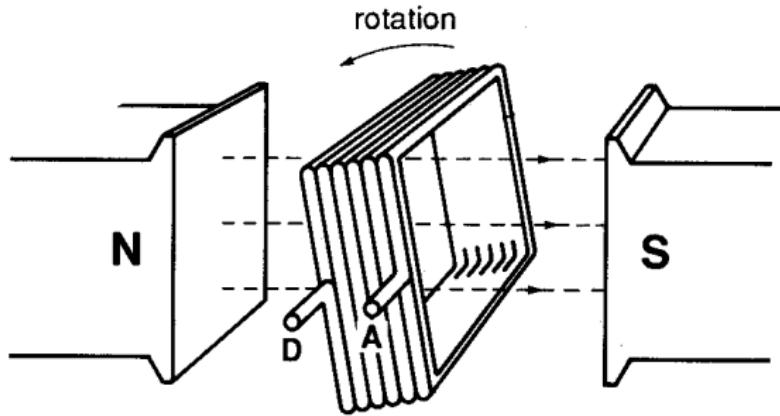
- CC/CC (Hacheurs)
-

CA

- monophasée CA/CC
 - triphasée CA/CC
-

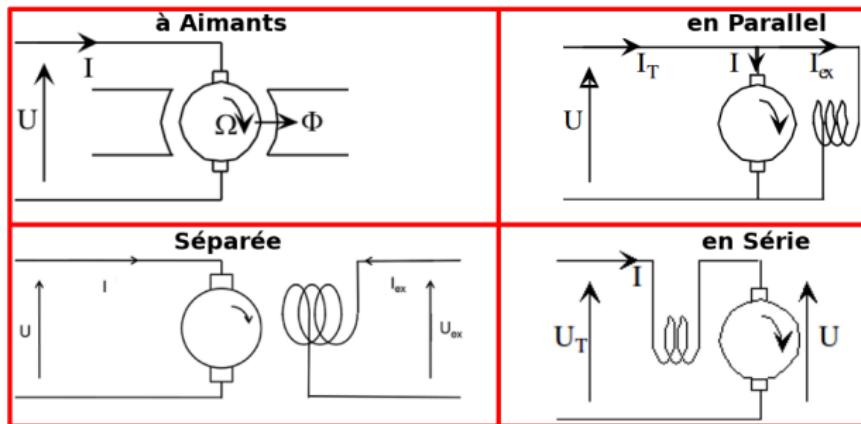
Machine à courant continu : principe de fonctionnement

Bobinage tournant dans un champ magnétique fixe...

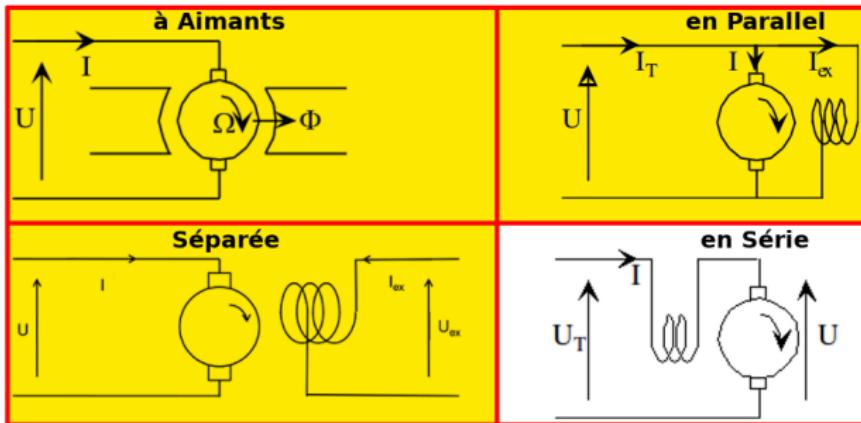


Bobinage en rotation (rotor) : induit, armature
Source de champ magnétique (stator) : inducteur, excitation

Machine à courant continu : types d'excitation



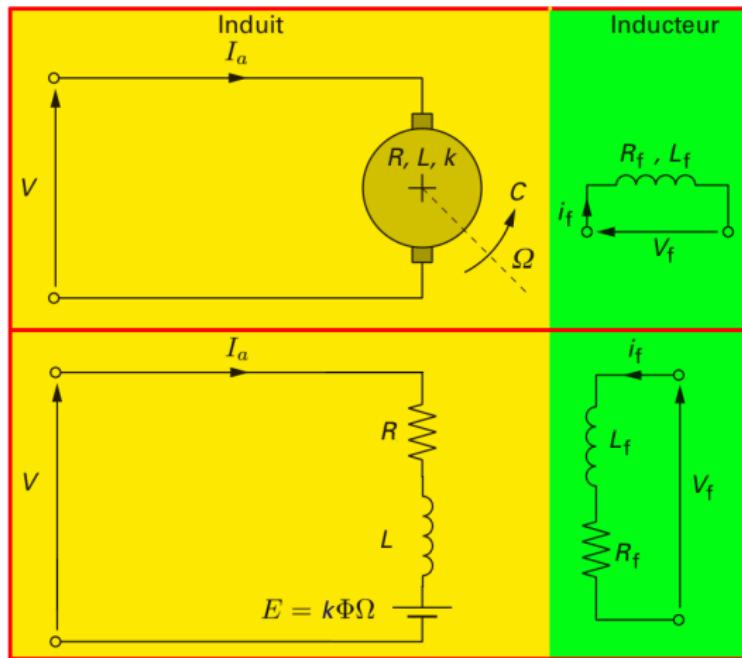
Machine à courant continu : types d'excitation



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 .



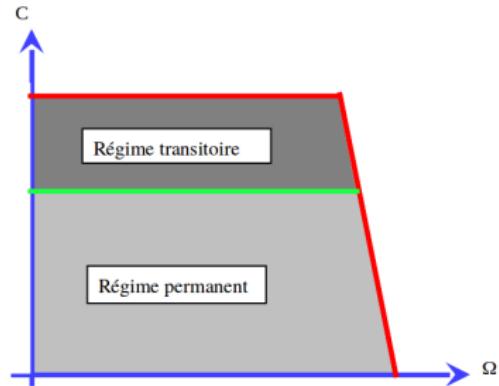
Machine à courant continu : Excitation Séparée

Équations - machine CC :

$$E = k\Phi\Omega$$

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

$$C = k\Phi I_a$$



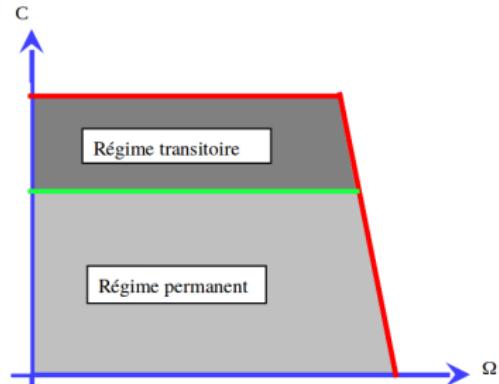
Machine à courant continu : Excitation Séparée

Équations - machine CC : **régime permanent**

$$E = k\Phi\Omega$$

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

$$C = k\Phi I_a$$



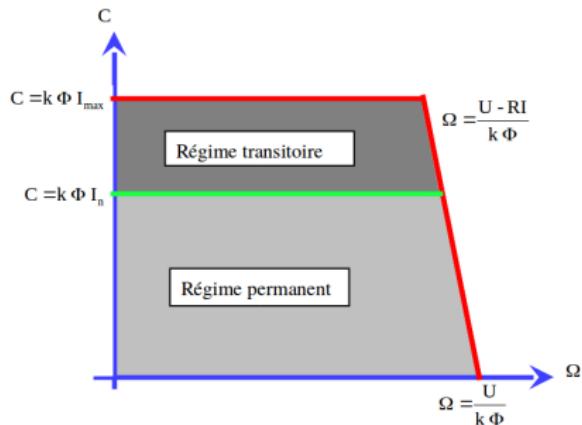
Machine à courant continu : Excitation Séparée

Équations - machine CC : **régime permanent**
commande de la vitesse Ω

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

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

$$C = k\Phi I_a$$



Machine à courant continu : Excitation Séparée

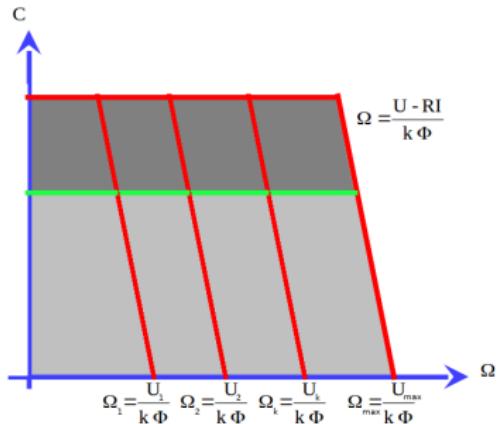
Équations - machine CC : **régime permanent**
commande de la vitesse Ω

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

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

$$C = k\Phi I_a$$

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



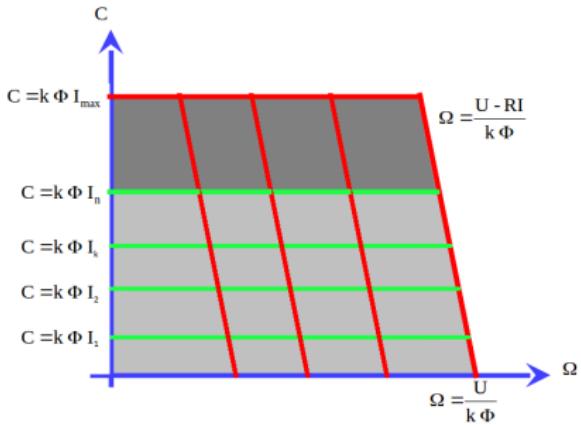
Machine à courant continu : Excitation Séparée

Équations - machine CC : **régime permanent**
commande de la vitesse Ω
commande du couple C

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

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

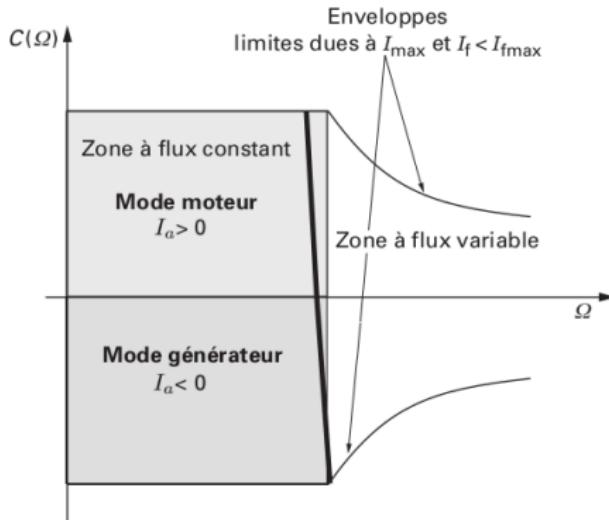
$$C = k\Phi I_a$$



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

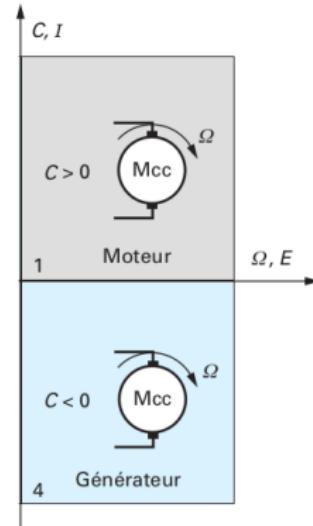
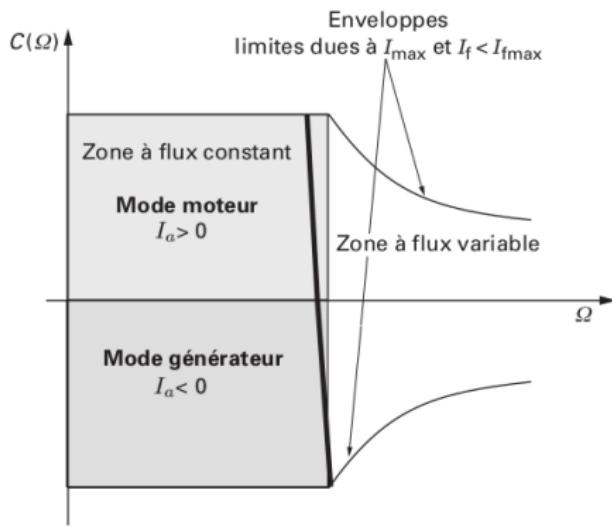
Le couple varie proportionnellement au courant d'armature I_a
($I_1 < I_2 < I_k \dots < I_n < I_{max}$).

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).

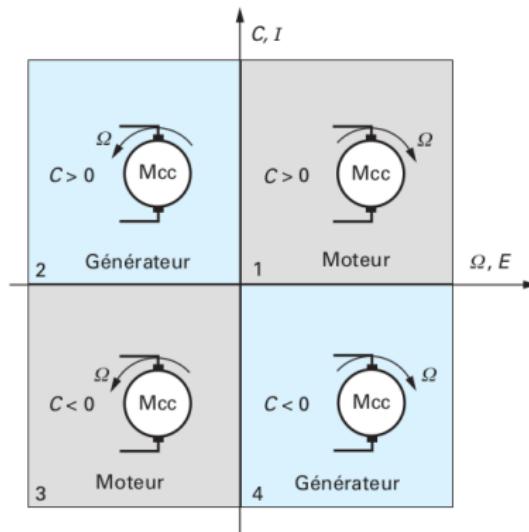
Machine à courant continu : modes de fonctionnement



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).

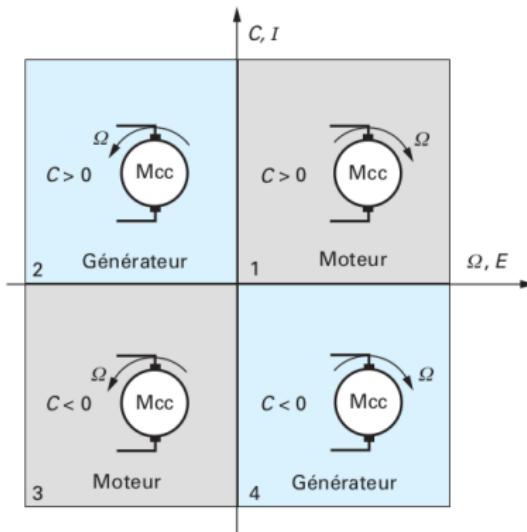
Le moteur inverse la direction du courant d'armature I_a .

Machine à courant continu : modes de fonctionnement



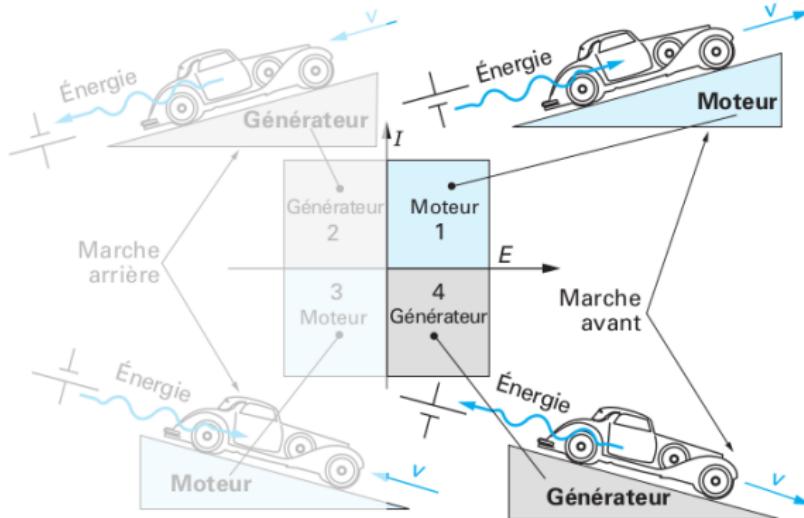
Changement de la direction de rotation $\Omega < 0 \Rightarrow$ Inversion de la polarité de la tension d'armature $U \equiv E$.

Machine à courant continu : modes de fonctionnement



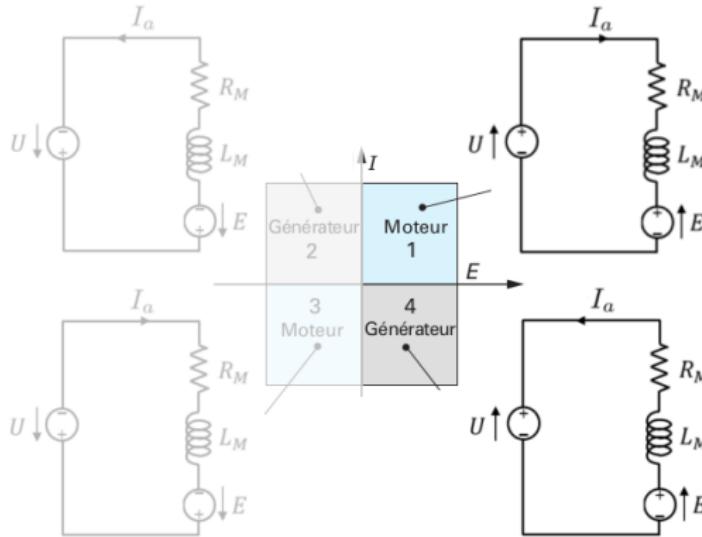
La charge (résistante ou entraînante) impose le passage vertical d'un quadrant à un autre sans changement du signe de la vitesse. Les transitions horizontales entre quadrants seront obtenues par une inversion de la tension de l'alimentation U (ou du courant d'excitation I_f).

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.

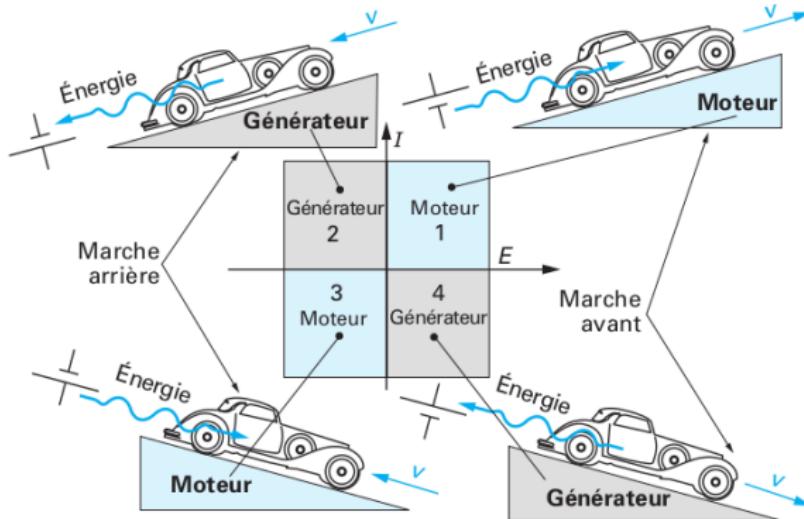
Machine à courant continu : modes de fonctionnement



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

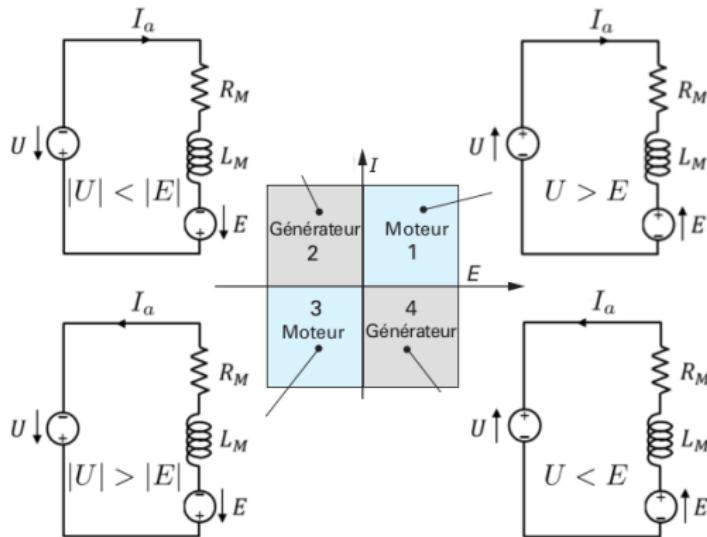
Les deux autres quadrants, s'il y a inversion de la tension de l'alimentation U ou du flux magnétique (courant d'excitation).

Machine à courant continu : modes de fonctionnement



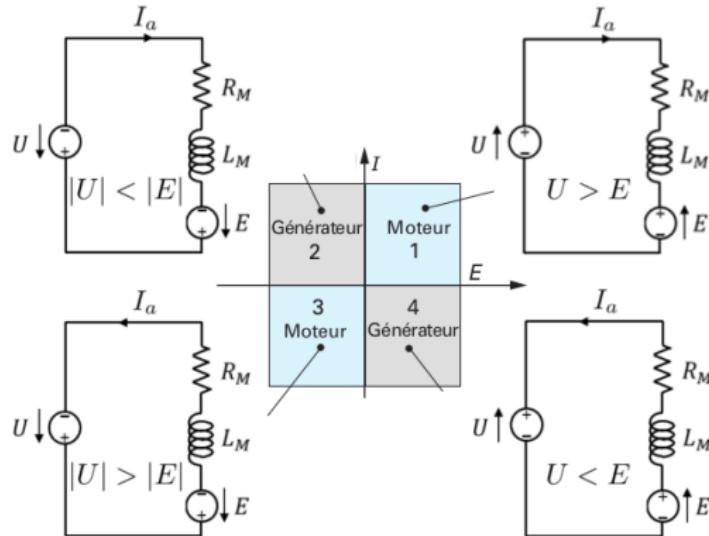
Les deux autres quadrants : la voiture recule en sens inverse dans une côte (mode générateur), la voiture monte en sens inverse une descente (mode moteur).

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.

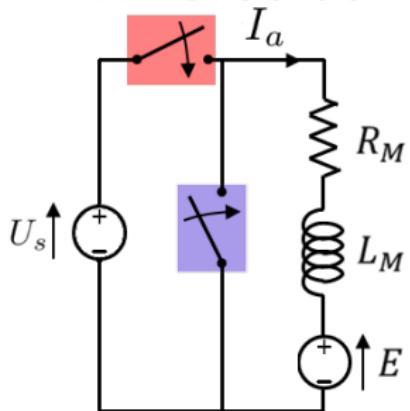
1. Types d'association Convertisseurs - Machines

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

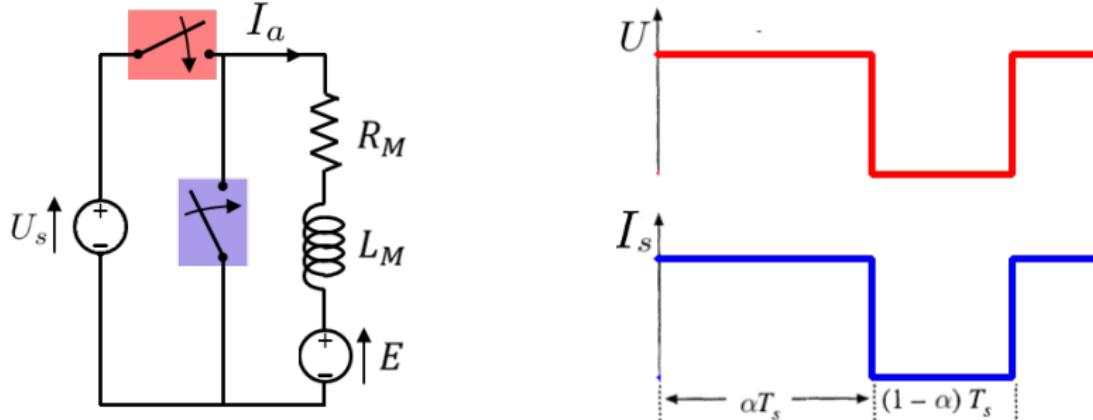
Convertisseur CC-CC – hacheur série



Deux conditions :

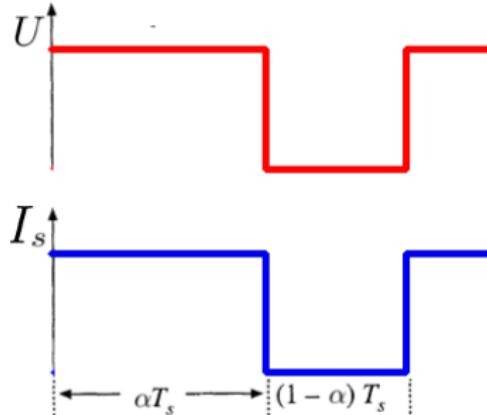
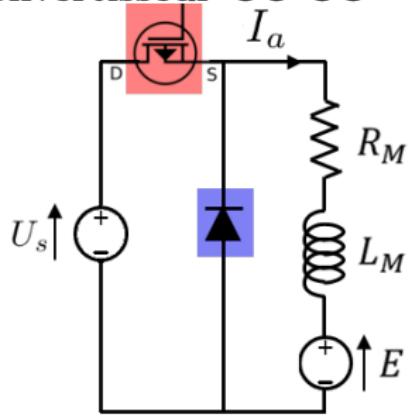
- (i) sans court-circuiter la source de tension (circulation d'un courant infini).
- (ii) sans ouvrir le circuit auquel est connecté la MCC (risque de tension induite importante lors d'ouverture et donc risque de claquage des interrupteurs).

Convertisseur CC-CC – hacheur série



α : rapport cyclique

Convertisseur CC-CC – hacheur série

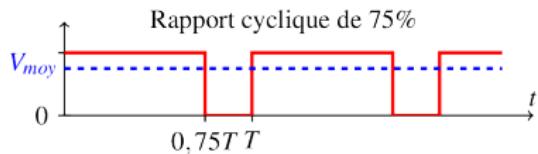
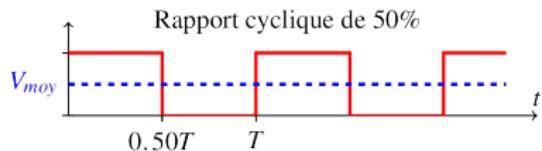
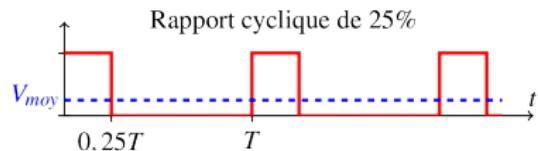
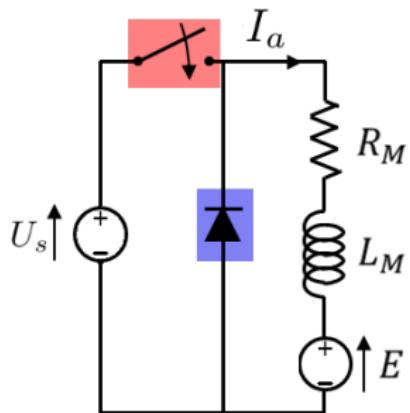


α : rapport cyclique

Convertisseur CC-CC – hacheur série

Mode moteur - variation de la vitesse

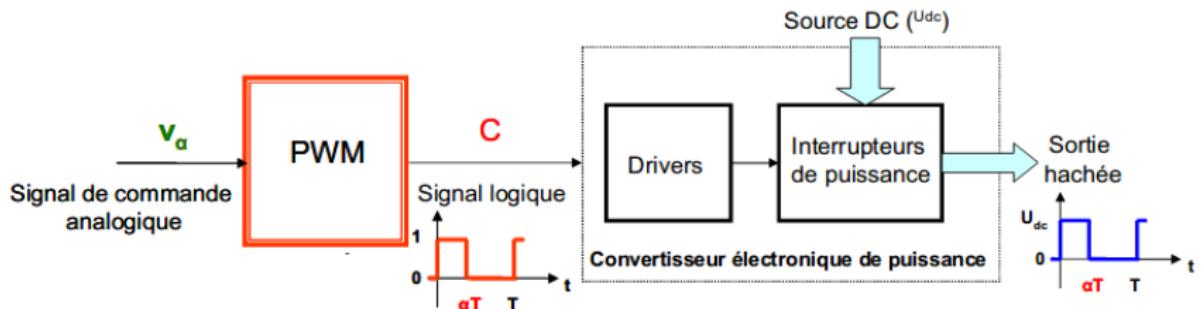
- Faire varier la vitesse en faisant varier la tension d'alimentation – rapport cyclique.



Convertisseur CC-CC – hacheur série

Mode moteur - variation de la vitesse

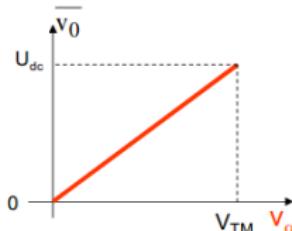
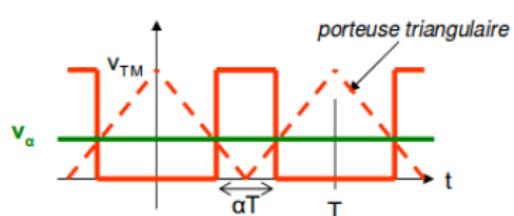
- Faire varier la vitesse en faisant varier la tension d'alimentation – rapport cyclique.
 - Rapport cyclique α proportionnel à une tension de commande : modulation de la largeur d'impulsion avec signal triangulaire (porteuse)



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 α proportionnel à une tension de commande : modulation de la largeur d'impulsion avec signal triangulaire (porteuse)



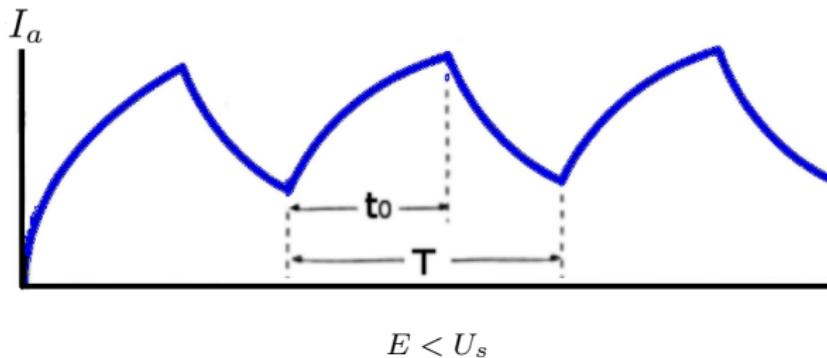
$$\alpha = v_\alpha / V_{TM}$$

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

Convertisseur CC-CC – hacheur série

Mode moteur - variation de la vitesse

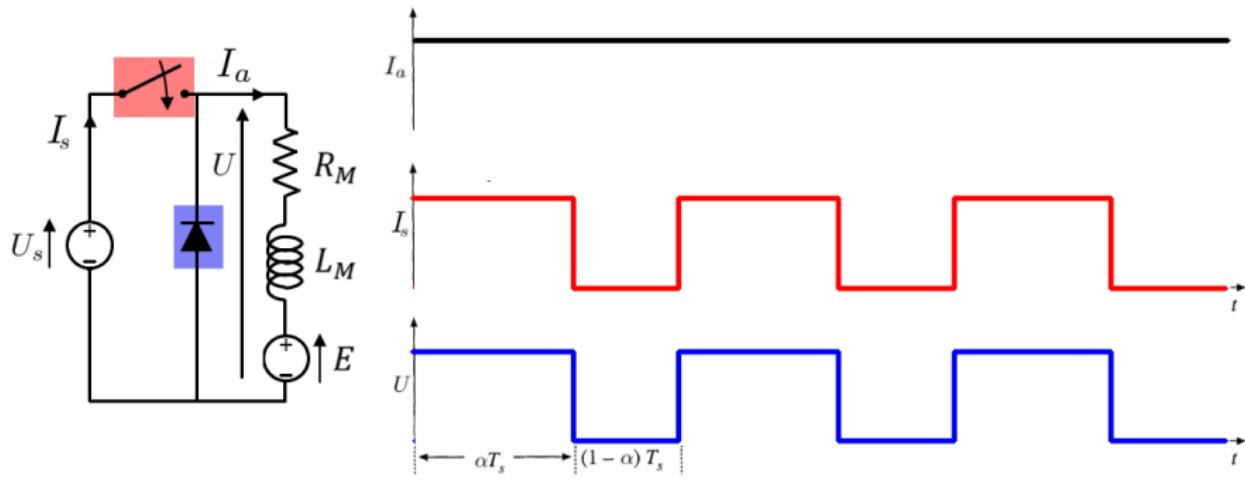
- Faire varier le couple en faisant varier le courant I_a .
 - Si la constante de temps $\tau_e \approx T$ le courant est variable.



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 continu.

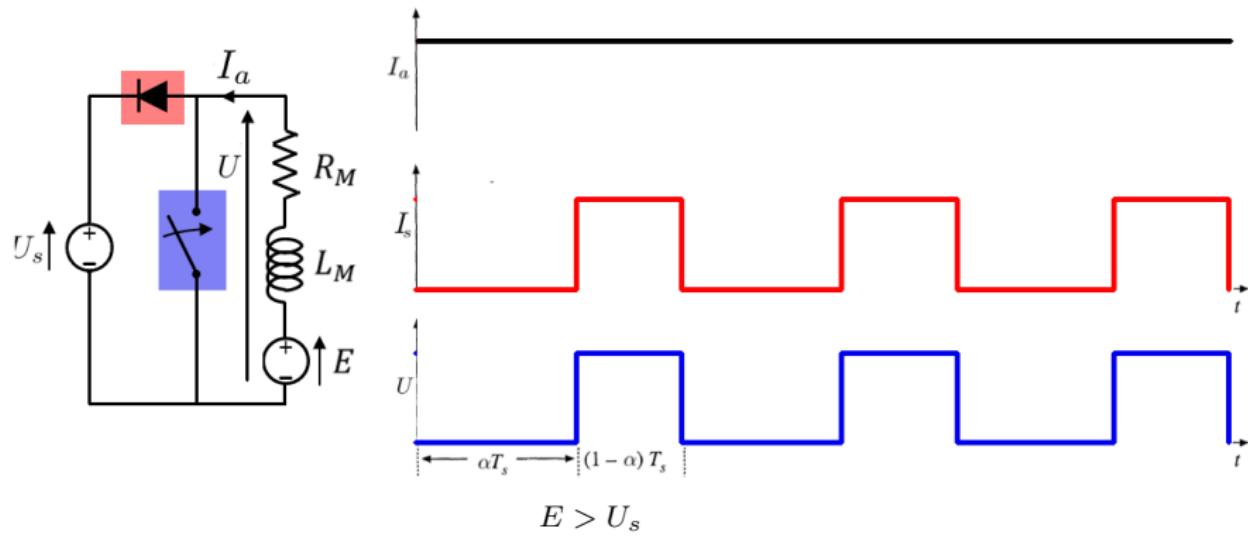


$$E < U_s$$

Tension moyenne d'armature : $U = \alpha U_s$
Courant dans la source : $I_s = \alpha I_a$

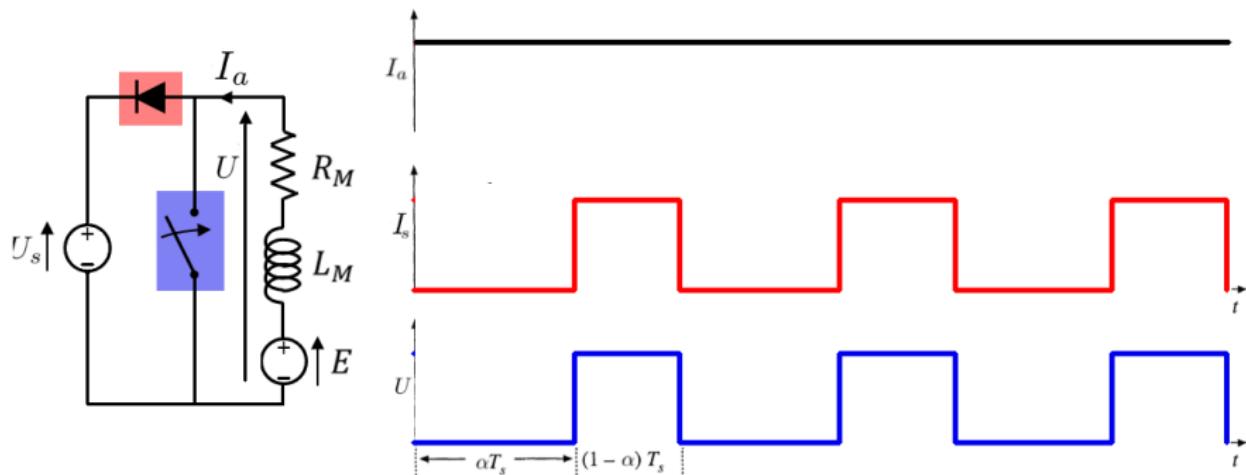
Convertisseur CC-CC – hacheur parallèle

Mode frein - deuxième quadrant



Convertisseur CC-CC – hacheur parallèle

Mode frein - deuxième quadrant



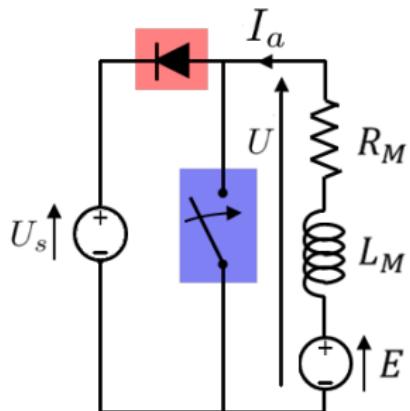
$$E > U_s$$

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 :

$$E = U_s + R_M I_a$$

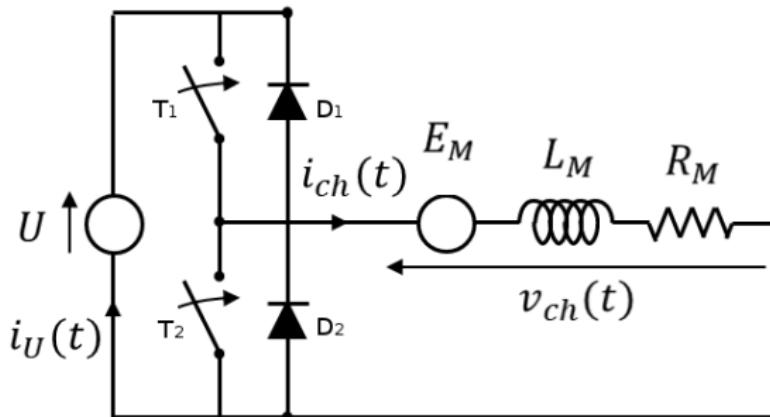
Le transfert d'énergie est possible si
 $0 \leq E - R_M I_a \leq U_s$

D'où un intervalle de vitesse pour le
freinage régénératif :

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

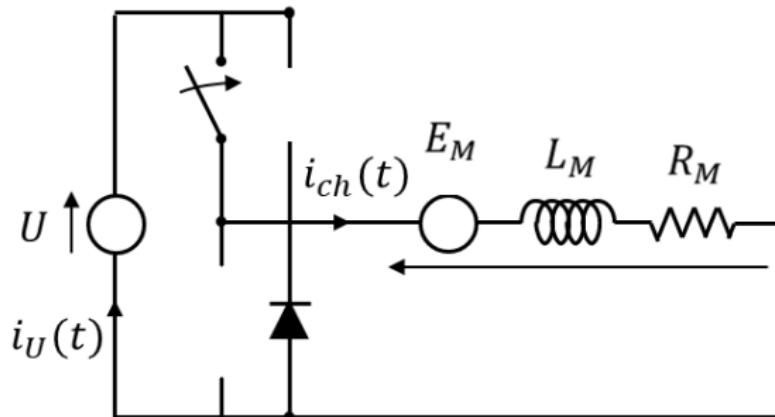
Convertisseur CC-CC – hacheur à deux quadrants réversible en courant

Inversion du sens du courant



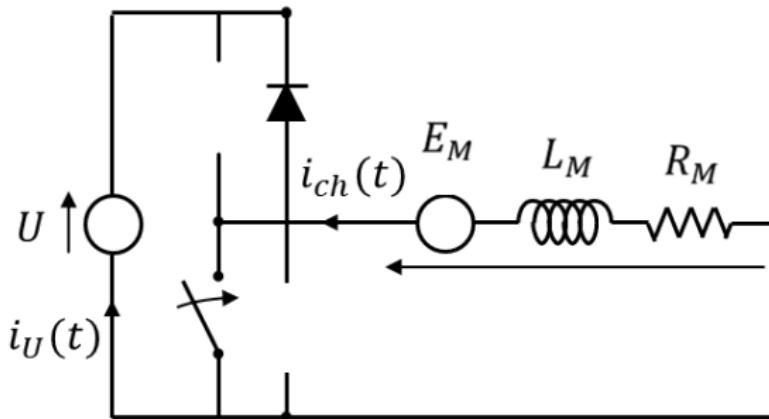
Convertisseur CC-CC – hacheur à deux quadrants réversible en courant

Inversion du sens du courant



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

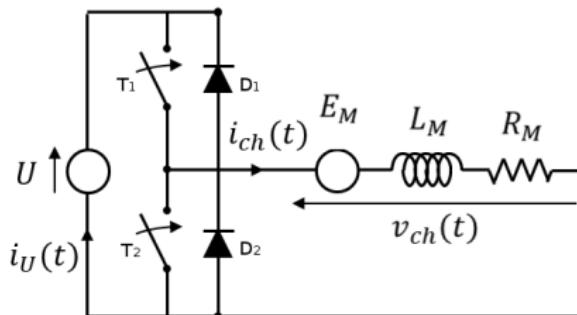
Inversion du sens du courant



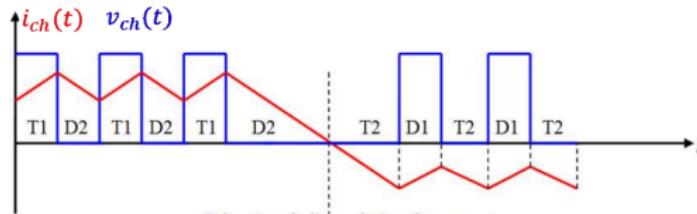
Convertisseur CC-CC – hacheur à deux quadrants réversible en courant

Inversion du sens du courant

Mode de fonctionnement alterné (transistors unidirectionnels)



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



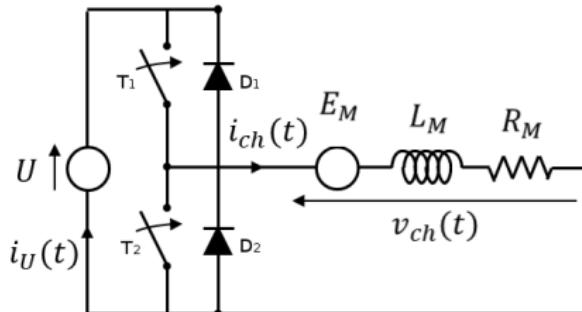
Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CC

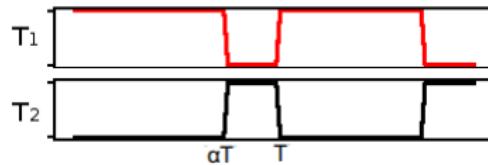
Deux cadrants : mode moteur - mode frein (génératrice)

Inversion du sens du courant

Mode de fonctionnement symétrique



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

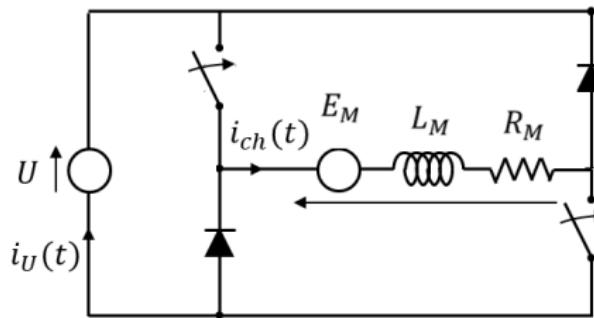


Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CC

Deux quadrants : mode moteur - mode frein (génératrice)

Inversion de la tension



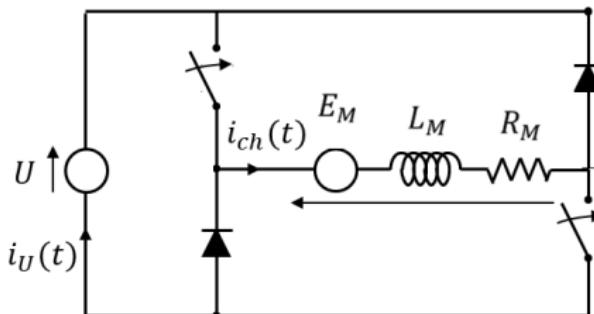
- Les interrupteurs T_1 et T_2 sont fermés de 0 à αT , les diodes sont bloquées
⇒ tension v_{ch} positive.
- Les interrupteurs T_1 et T_2 sont ouverts de αT à T , les diodes sont passantes
⇒ tension v_{ch} négative.

Introduction à l'association Machine-Convertisseur

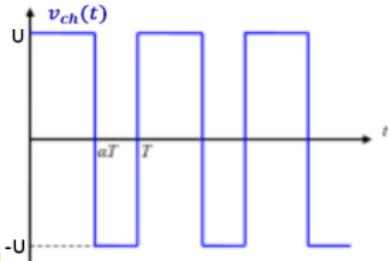
Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CC

Deux cadrants : mode moteur - mode frein (génératrice)

Inversion de la tension



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



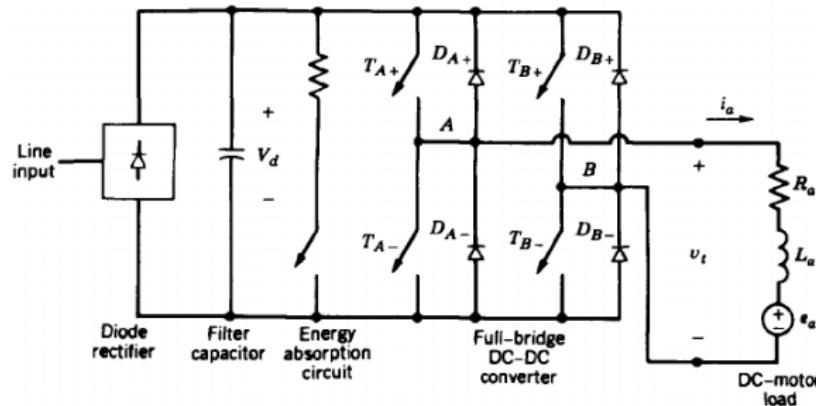
Valeur moyenne de la tension sur la charge :

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

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

Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CC
Convertisseur pour machine CC (hacheur - 4 quadrants) :

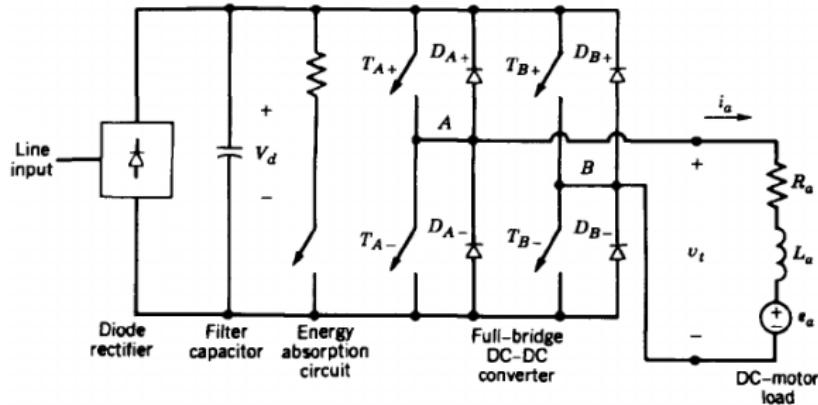


- Les interrupteurs T_{A+} et T_{B-} sont fermés de 0 à αT
⇒ tension v_t positive.
- Les interrupteurs T_{A-} et T_{B+} sont fermés de αT à T
⇒ tension v_t négative.

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) :

$$E \propto \Omega$$

$$U \approx E$$

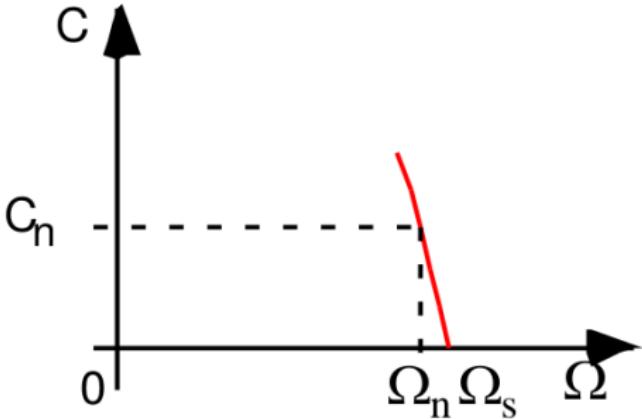
$$I \propto C$$

Eq. proches de celles de la machine
CC.

Il faut rajouter une relation sur la fréquence :

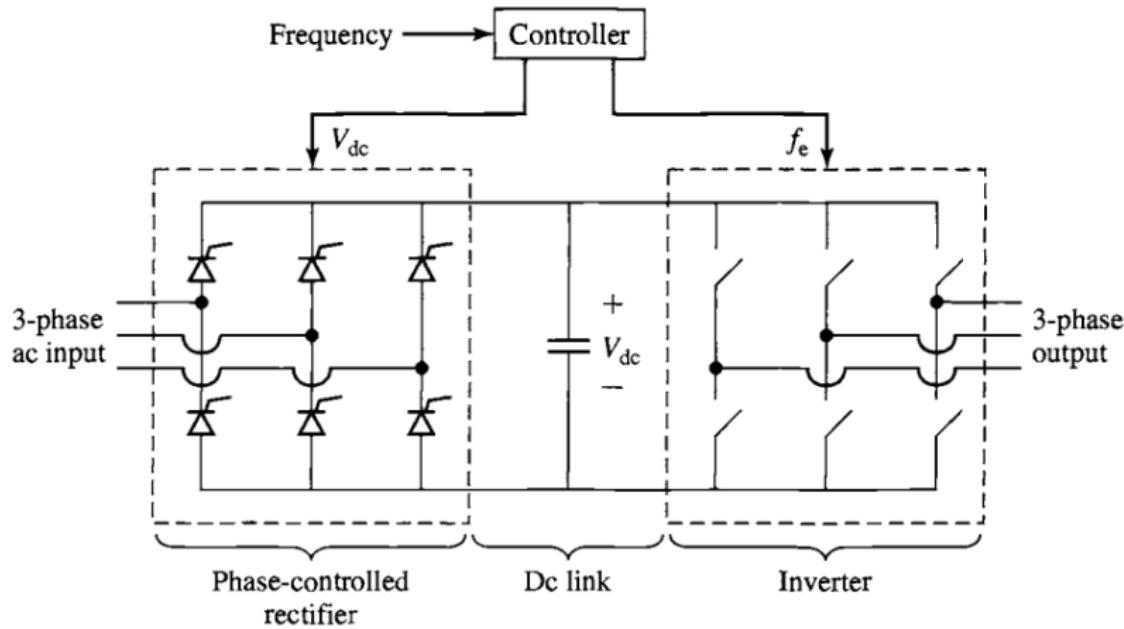
$$f \propto \Omega \quad \text{avec} \quad f = \frac{p}{2\pi} \Omega \pm \text{glissement}$$

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 :

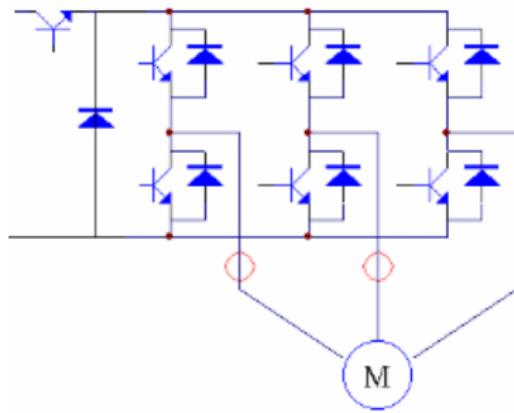


Introduction à l'association Machine-Convertisseur

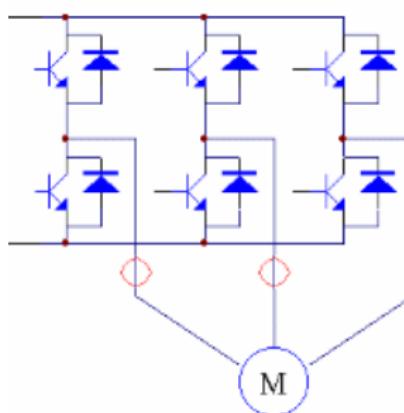
Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CA

Convertisseur pour machine CA (onduleur) :

Onduleur à motif

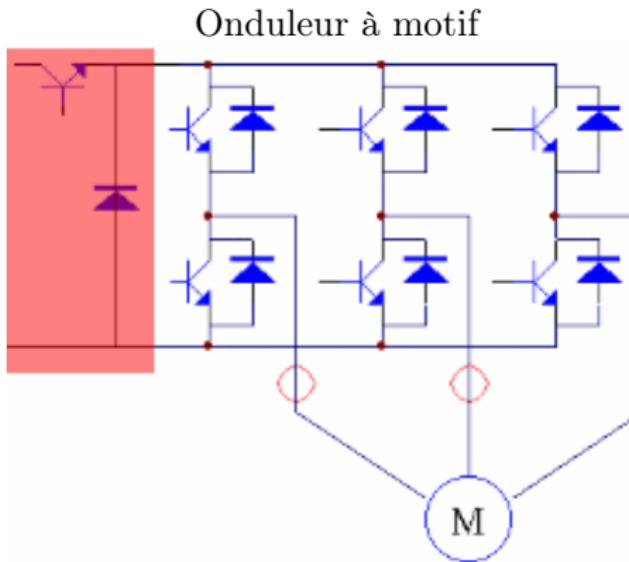


Onduleur MLI (PWM)



Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CA
Convertisseur pour machine CA (onduleur) :

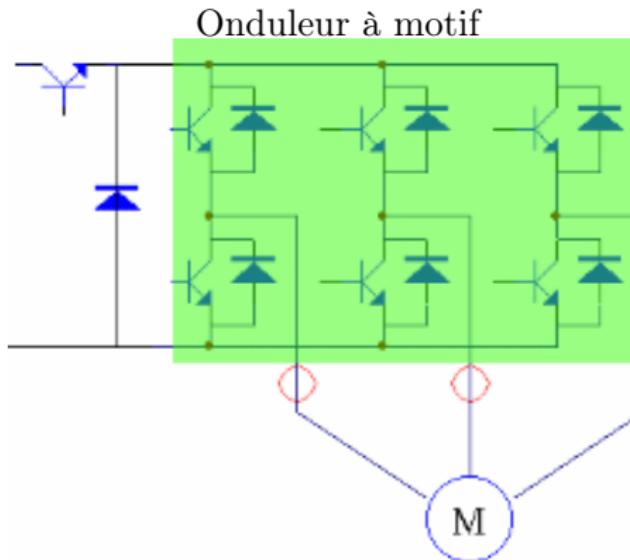


Le hacheur contrôle le niveau de tension

Introduction à l'association Machine-Convertisseur

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

Convertisseur pour machine CA asynchrone (onduleur) :

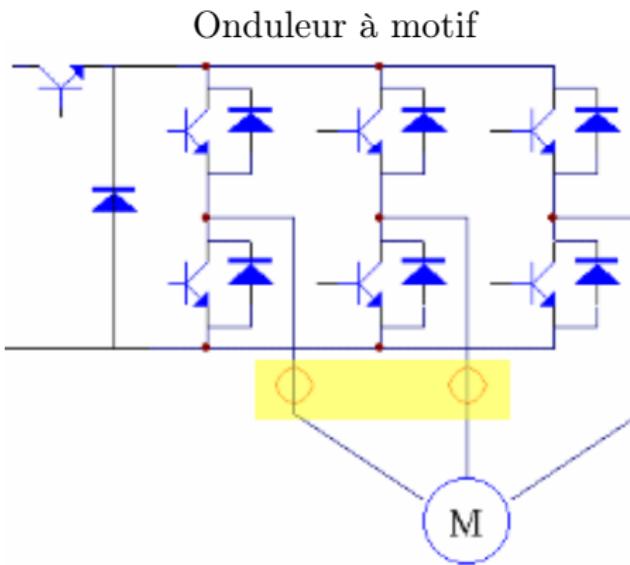


L'onduleur impose un motif et règle la fréquence des signaux de sortie

Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CA

Convertisseur pour machine CA (onduleur) :



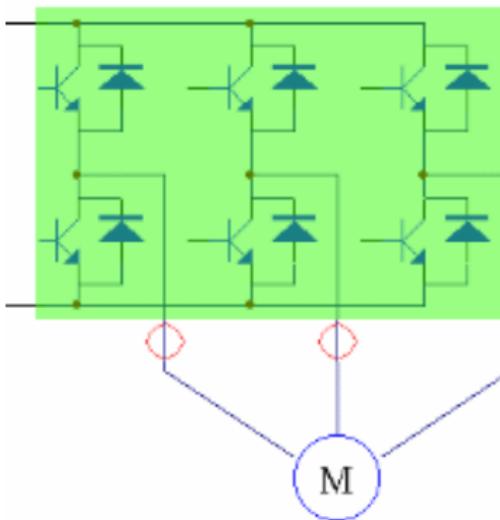
La mesure des courants agit sur le hacheur et l'onduleur pour limiter la valeur des courants.

Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CA

Convertisseur pour machine CA (onduleur) :

Onduleur MLI

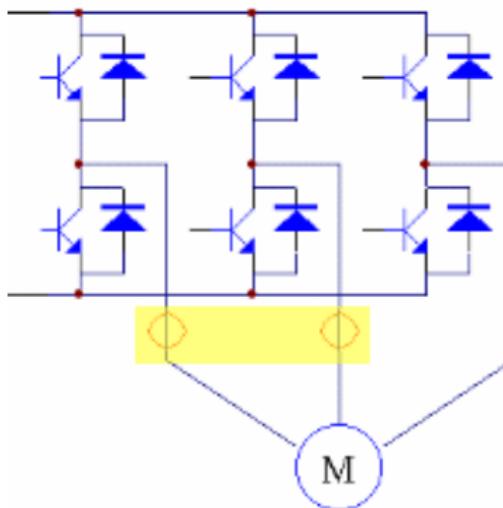


Les commutations de l'onduleur permettent le suivi d'une consigne imposant la fréquence et l'amplitude des signaux de sortie.

Introduction à l'association Machine-Convertisseur

Quel convertisseur pour quel type de moteur ? - Machines CA
Convertisseur pour machine CA (onduleur) :

Onduleur MLI



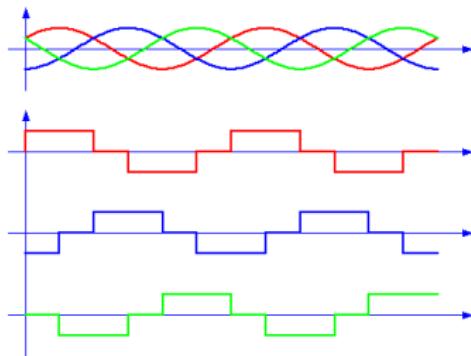
La mesure des courants modifie la consigne pour limiter leurs valeurs.

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.

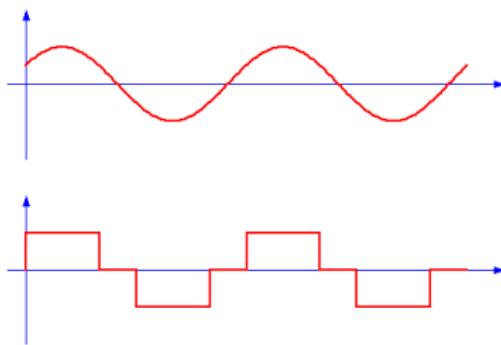


La connaissance de 3 positions du rotor de la machine suffit à l'élaboration des signaux, alors qu'il faut précisément la connaître dans le cas d'une alimentation sinusoïdale.

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 : $1/\sqrt{2} I_{max} = 0.707 I_{max}$

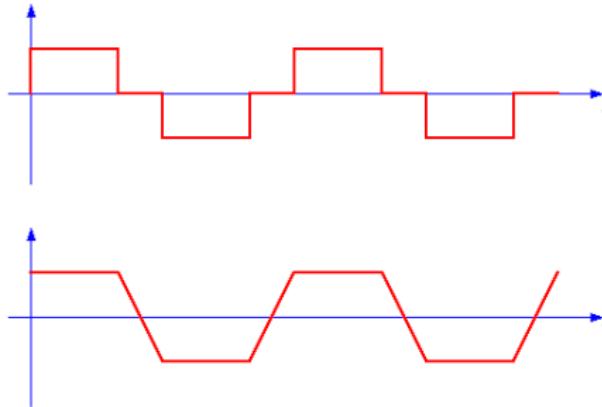
Pour le cas en créneaux : $\sqrt{2/3} I_{max} = 0.816 I_{max}$

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».

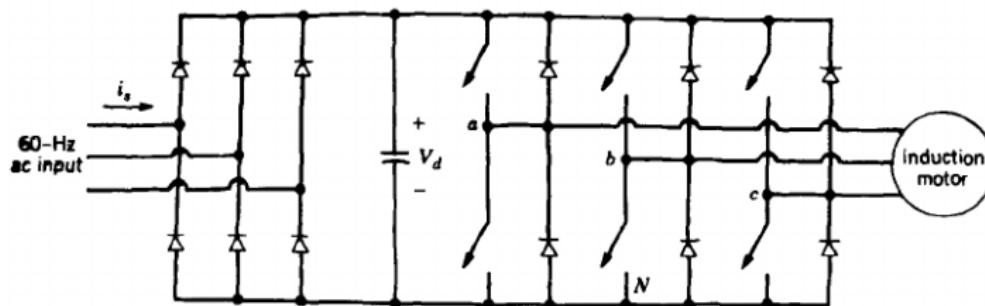
Une machine Brushless est une machine synchrone à fem trapézoïdale.

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 :

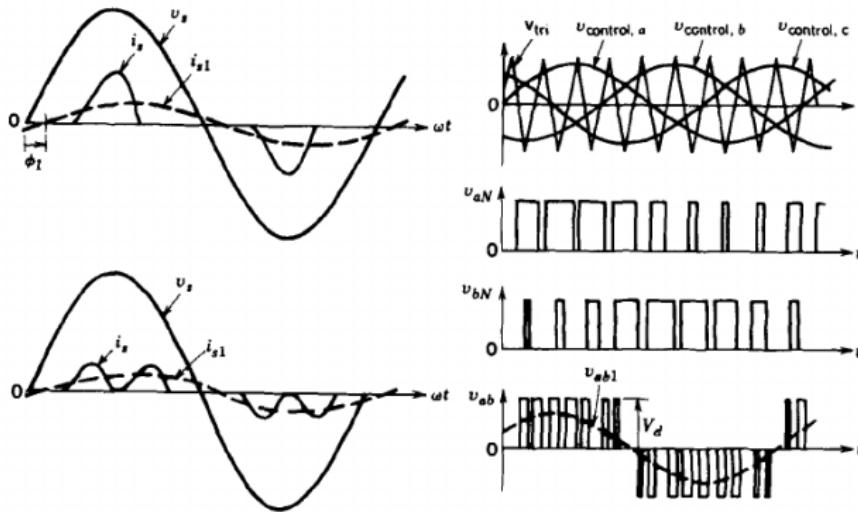


Introduction à l'association Machine-Convertisseur

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, la 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 =

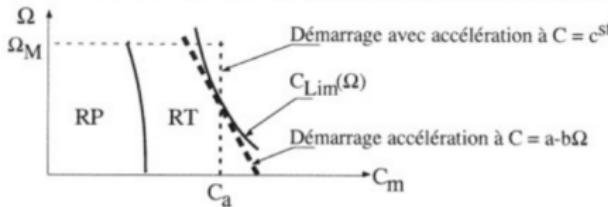
- I_{vn} = courant nominal (= courant R.P.)
- I_{vMax} = courant Maxi (généralement 3 à 4 I_n)
- V_{vMax} = tension maxi nécessaire pour réguler I_{vMax} pour accélérations à Ω élevée
 peut nécessiter 1 transfo d'adaptation

Ex : MCC - Brushless

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

- 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 $K_c = 1.04$ $\leftrightarrow I_{Theq} = C_{Theq}/K_c = 10 \text{ A}$

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

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

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