

Chapitre 2 : Moteur à courant continu

Principe- structure et caractéristiques - Variation de vitesse

2.1 Fonctionnement et réversibilité

En déplaçant un conducteur fermé dans un champ magnétique, on engendre un courant (cas de la génératrice). Inversement, ce même conducteur, parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique, est soumis à une force électromagnétique (cas du moteur). Ces deux principes sont présents dans

une machine à courant continu « C.C », qui est donc réversible. On a deux parties principales, séparées par un entrefer :

- un inducteur qui crée le champ magnétique (excitation) ;
- un induit dont le but est de produire le courant (génératrice), ou d'alimenter les conducteurs en courant électrique (fonctionnement en moteur).

2.2 Constitution

- L'inducteur, au stator, est la partie fixe, parfois c'est un aimant permanent, pour les petites puissances, mais en général c'est un électroaimant constitué de deux bobines en série qui, alimentées en courant continu, créent un pôle nord et un pôle sud (Figure 2.1). Le champ magnétique dans l'entrefer est maximal dans l'axe des pôles, et nul dans la direction perpendiculaire à cet axe, appelée ligne neutre.

- L'induit au rotor, est la partie tournante. C'est un cylindre ferromagnétique feuilleté constitué d'encoches dans lesquelles sont répartis des conducteurs.

C'est un enroulement fermé sur lui-même. Calé sur le rotor se trouve le collecteur, constitué de lamelles conductrices isolées entre elles. Le courant est acheminé dans le cas du moteur, ou récupéré dans le cas de la génératrice, grâce à deux balais en carbone frottant sur le collecteur.

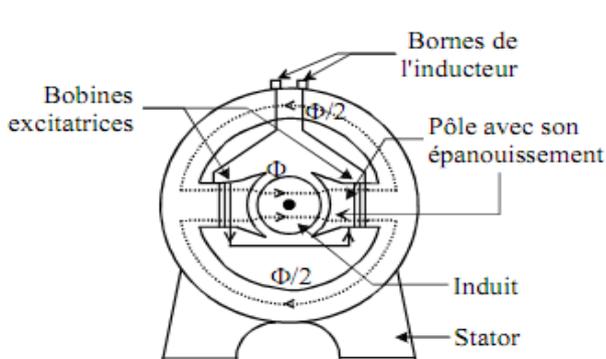


Figure 2.1 . Machine bipolaire

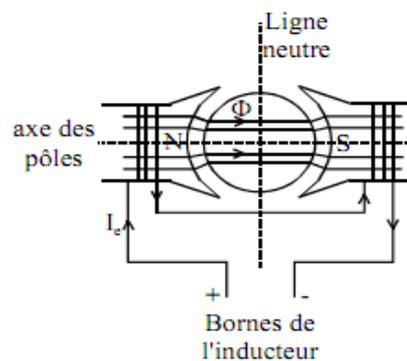


Figure 2.2. Inducteur

• **Rôle du collecteur.** Il change le sens du courant (commutation) dans les conducteurs lors du franchissement de la ligne neutre, permettant ainsi aux forces d'agir dans le même sens (Fig.2.3)

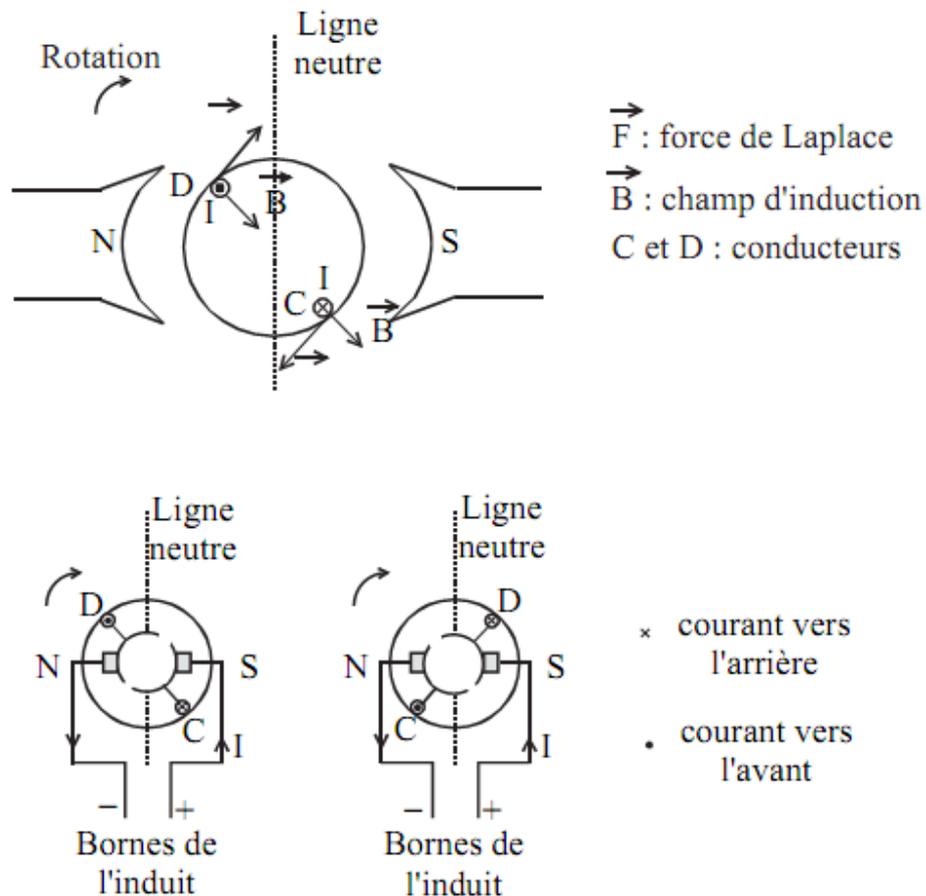


Figure2.3. Rôle du collecteur

Remarques :

- Le collecteur et les balais sont les points faibles d'une machine à CC.
- Une machine bipolaire comporte deux voies d'enroulement en parallèle, une voie d'enroulement étant l'ensemble des conducteurs entre les balais. Chaque voie est traversée par la moitié du courant d'induit.

Symbole et conventions (Figure 2.4).

La plaque signalétique indique les valeurs nominales des grandeurs de l'induit et de l'inducteur, le mode d'excitation, la vitesse nominale et la puissance mécanique utile dans le cas du moteur.

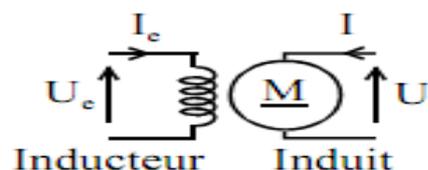


Figure (2.4) Symbole et conventions

On peut écrire en régime permanent

$$U_e = r i_e \quad , \quad U = E + R I \text{ (appelée équation de l'induit)}$$

Et en régime transitoire :

$$U = E + RI + L \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

R : Résistance de l'induit , E : fém (V) , r : Résistance de l'inducteur , i_c : Courant d'inducteur

I : Courant d'induit , L : L'inductance d'induit .

Expression de la fém : L'induit étant en rotation, les conducteurs coupent le flux magnétique inducteur et sont le siège d'une tension induite alternative. Le collecteur redresse cette tension ; le nombre d'encoches étant important, la fém E entre les balais est quasiment continue.

$$E = \frac{p}{a} N n \Phi \text{ ou } E = K \Phi \Omega \text{ avec } K = N/2\pi$$

E : fém (V) ; N : nombre de conducteurs actifs de l'induit ; Φ : flux sous un pôle de l'inducteur (Wb) ; n et Ω : vitesse de rotation (n en tr/s, et Ω en rad/s). p : nombre paire de pole, a : nombre de voie .

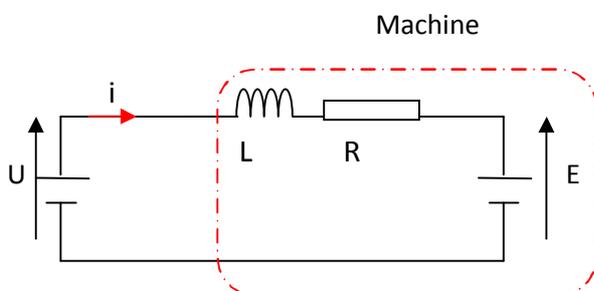
Remarques :

- Le collecteur est un redresseur de tension tournant.
- Si le flux est constant (cas fréquent), E = kV est directement proportionnelle à la vitesse.
- Le courant dans l'induit provoque un champ magnétique qui modifie la fém: c'est la réaction magnétique d'induit, qu'on atténue en disposant des enroulements supplémentaires au rotor.

2.3 Schémas équivalents de la machine, fonctionnements en moteur et en génératrice

Le schéma équivalent de la machine à courant continu est commun à tous les régimes de fonctionnement, à la convention de représentation du courant près. On représente ce schéma, les diverses conventions et les équation caractéristiques de la machine sur la figure 2.5. On retiendra tout particulièrement sur cette figure , les relations reliant les grandeurs électriques et mécaniques.

a .fonctionnement en moteur



Equation électrique :

$$U = R.I + L \frac{di}{dt} + E \quad (2.2)$$

Equation mécanique :

$$\Sigma \text{ couples} = C - C_r = j \frac{d\Omega}{dt} \quad (2.3)$$

Figure (2.5) : Schéma équivalent en fonctionnement moteur

b .fonctionnement en génératrice

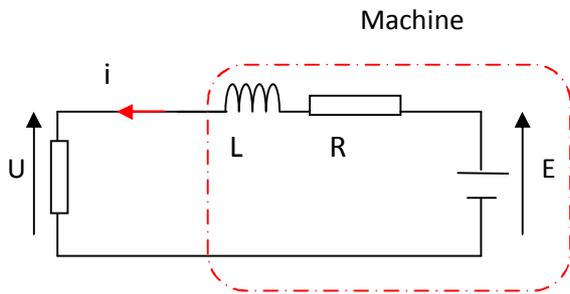


Figure (2.6) : Schéma équivalent en Fonctionnement génératrice

Equation électrique :

$$E = R \cdot I + L \frac{di}{dt} + U \tag{2.4}$$

Equation mécanique :

$$\Sigma \text{ couples} = C_{\text{moteur}} - C = j \frac{d\Omega}{dt} \tag{2.5}$$

Dans tous les cas, on retiendra les relations :

$$C = K\Phi I \text{ et } E = K\Phi\Omega \tag{2.6}$$

Ou en fonction du courant d'inducteur

$$C = K' I_e I \text{ et } E = K' I_e \Omega \tag{2.7}$$

Remarques importantes :

➤ Le bobinage inducteur, traversé par un courant continu, représente une résistance R_e non représentée sur les schémas. Il se produit ainsi les pertes Joules $R_e \cdot I_e^2$ dans ce bobinage.

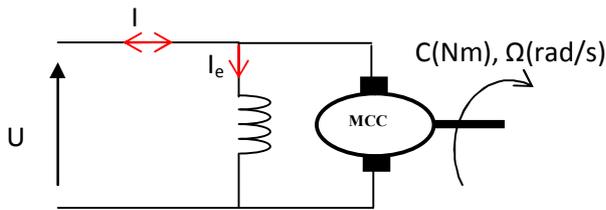
➤ L'inductance représentée sur les schémas équivalents est sans effet dès lorsqu'on s'intéresse à un régime permanent. En effet dans ce cas le courant qui la traverse est constant et la tension à ses bornes nulle.

Les deux formules apparaissant sur les deux figures (2.5) et (2.6) sont fondées sur l'identification de la puissance électrique ($E \cdot I$) avec la puissance mécanique ($C\Omega$). C'est le cas si on considère le couple de pertes mécaniques comme faisant partie intégrante du couple de charge de la machine.

2.4 Montages série et parallèle (shunt)

Les montages série et parallèle consistent à se servir de la source de tension alimentant l'induit pour alimenter, en série ou parallèle avec ce dernier, le bobinage inducteur. On représente dans la figure 2.6 les schémas électriques correspondants ainsi que les considérations à retenir.

Moteur ou génératrice « Série »

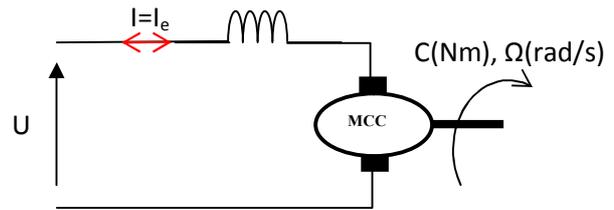


$$C = K I_e I \text{ et } E = K I_e \Omega$$

Soit

$$C = K I^2 \text{ et } E = K I \Omega$$

Moteur ou génératrice « Shunt »



$$C = K I_e I \text{ et } E = K I_e \Omega$$

Soit

$$C = \frac{K I U}{R_e} \text{ et } E = \frac{K \Omega U}{R_e}$$

Figure 2.6 : Montages du moteur série et parallèle

Remarques :

➤ En montage série, le bobinage inducteur doit pouvoir supporter le courant d'induit et ne présenter donc qu'une faible résistance pour représenter une faible chute de tension et ne pas nuire au rendement.

➤ En montage parallèle, le bobinage inducteur doit pouvoir supporter la pleine tension d'induit, et donc présenter une résistance assez grande.

➤ Les formules mises en évidence sur la figure 2.6 montrent que le moteur série a tendance à s'emballer s'il n'est pas chargé, c'est-à-dire si le moteur consomme peu de courant. En réalité lors d'une absence de charge il accélère fortement ce qui diminue considérablement le courant mais aussi le couple, l'emballement est ainsi finalement assez rare. Par contre, il développe un couple proportionnel au carré du courant I, c'est en conséquence un montage très utilisé en traction électrique.

➤ Les formules mises en évidence sur la figure 2.6 montrent que le moteur shunt a tendance à consommer un courant très fort sous faible tension.

➤ La génératrice série est très peu utilisée étant donné que la tension produite est très faible à vide, le moteur étant alors très peu excité (uniquement par le champ rémanent en réalité).

➤ La génératrice shunt s'auto-amorçe à partir du champ rémanent dans le matériau du circuit magnétique. Pour favoriser ce phénomène, on démarre la machine à vide avant de connecter les charges lorsque la tension s'est stabilisée.

2.5 Bilans de puissance dans la machine à courant continu et rendement

Il est important d'identifier les divers éléments du schéma équivalent en terme de puissance. Il est également important de porter une attention particulière à l'expression du rendement de la machine en fonction de son régime de fonctionnement (moteur ou génératrice). On représente sur la figure 2.7 l'écoulement des puissances au sein de la machine dans les deux types de fonctionnement, ainsi que l'expression des rendements correspondants.

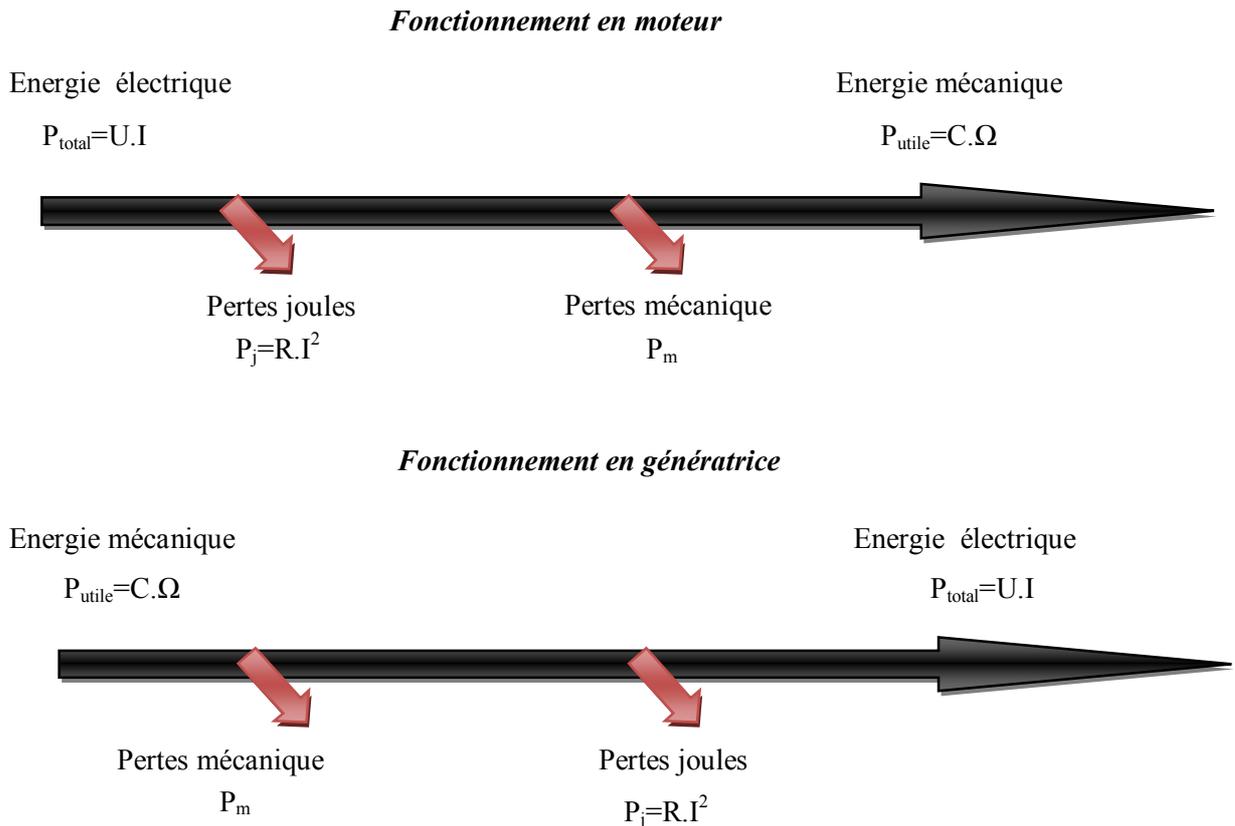


Figure 2.7 Écoulement des puissances et rendement.

2.6 Marche industrielle de la machine à courant continu

2.6.1 Procédés de réglage de vitesse

En posant $E = K \cdot \Phi \cdot \Omega$ et $C_m = K \cdot \Phi \cdot I$ on démontre que : $C_m = \frac{K\Phi}{R} U - \frac{(K\Phi)^2}{R} \Omega$

pour une machine à courant continu à excitation indépendante

Dans ces conditions, on constate qu'il y a 3 paramètres sur lesquels on peut agir :

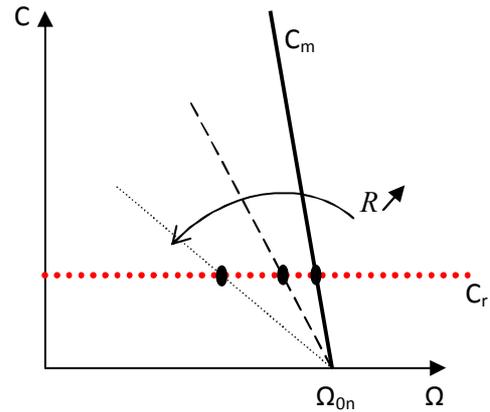
2.6.1.a Action sur R

Vitesse à vide : $\Omega_{0n} = \frac{U_n}{K\Phi_n}$

On modifie R de l'induit en insérant un rhéostat série ($U_n = U$, $\Phi = \Phi_n$)

- Pertes par effet joule ↗
- Le rendement ↘

Pratiquement plus utilisé



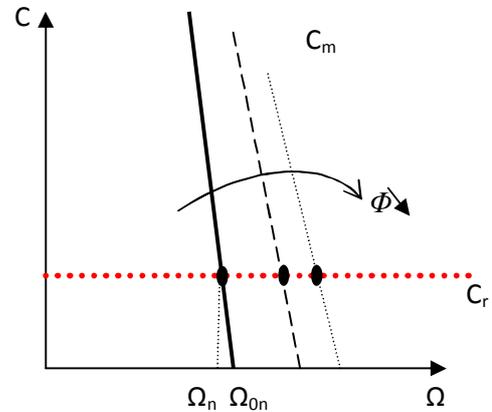
2.6.1.b Action sur Φ : $U_n = U$, $R = C^{ste}$

Φ ne peut être augmenté au delà de Φ_n (saturation)

- Permet d'accroître Ω au delà Ω_n ($\leq 3 \Omega_n$)

On parle de défluxage

- Perte de couple car : $C_m = K\Phi I$ et $\Phi \leq \Phi_n$



2.6.1.c Action sur U : $\Phi = \Phi_n$, $R = C^{ste}$

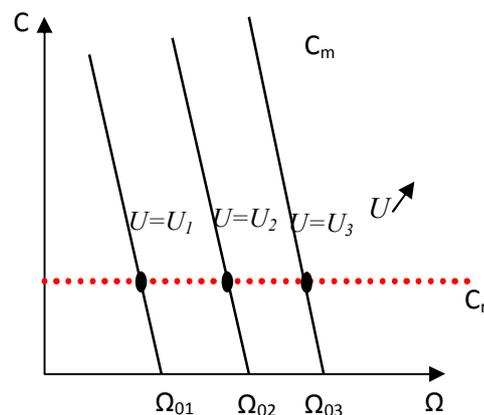
Le développement de l'électronique de puissance a permis la réalisation de sources de tension continu de valeur réglable (redresseurs commandés ou hacheurs) permettant de commander les moteurs à courant continu dans une large gamme de vitesses

On a : $\Omega_0 = \frac{U}{K\Phi}$

D'où $\frac{\Omega_{01}}{U_1} = \frac{\Omega_{02}}{U_2} = \frac{\Omega_{03}}{U_3}$

La caractéristique se déplace parallèlement à elle-même Ses avantages :

- Qualités de stabilité conservées
- Pas de pertes accrues
- Couple maintenu



2.6.2 Moteur travaillant dans les quatre quadrants

Dans certain équipements on veut :

- Travailler dans les deux sens de rotation
- Passer rapidement d'un sens à l'autre

On démarre rapidement :

- Trajet ABM_1 U passe de U_d à U_1

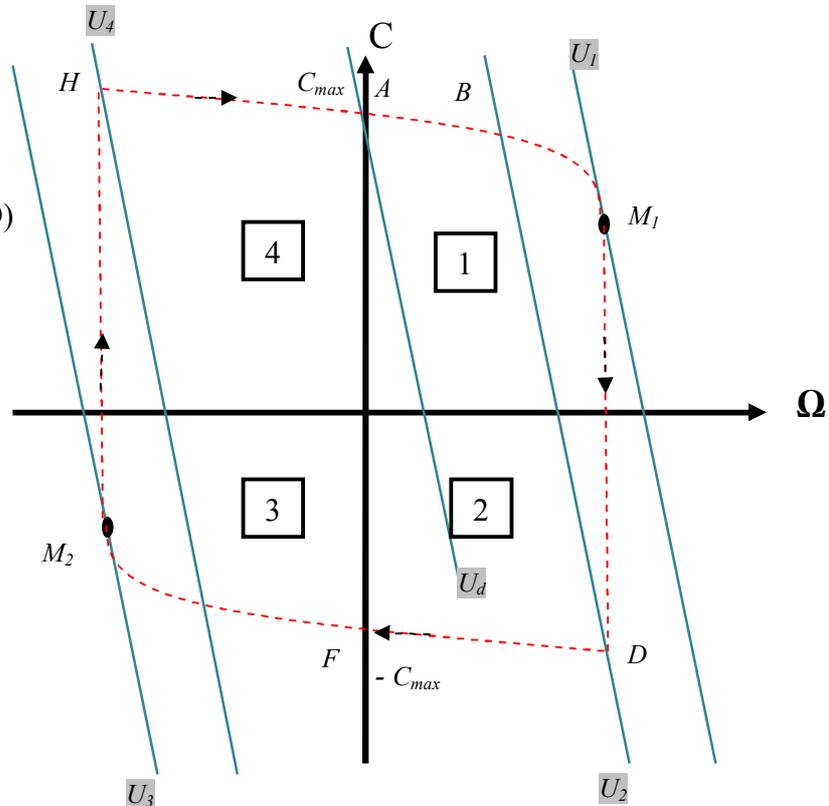
On inverse le couple en réduisant brusquement la tension U à U_2 (point D) puis on freine à Couple maximum

($-C_{max}$) et on démarre en sens inverse (trajet DFM_2) Sous U_3 on inverse très

Rapidement le couple on passant

De U_3 à U_4 (point H) puis on augmente

U pour décrire le trajet $HABM_1$



Le moteur travaille dans les quatre quadrants

Le variateur de vitesse doit donc être réversible en tension et en courant

2.7 Principales structures des variateurs de vitesse pour MCC

Le variateur impose la tension moyenne $\langle u \rangle$ aux bornes de l'induit, donc la vitesse Ω . La charge impose le courant d'induit $\langle i \rangle$ on supposera que le régime de conduction continue est atteint le courant d'induit i ne s'annule jamais, on se limite aux structures suivantes.

Les machines synchrones, asynchrones et à courant continu sont naturellement réversibles. Pour bénéficier de cette propriété, il faut que le convertisseur et la source soient également réversibles. Si la source ne l'est pas on ne peut pas récupérer l'énergie lors d'une phase de freinage de la machine mais on peut la dissiper dans des rhéostats (réversibilité dissipatrice). Le choix d'une structure convertisseur/machine 1, 2 ou 4 quadrants repose exclusivement sur le cahier des charges.

- Quadrant I seul : la machine ne tourne que dans un seul sens de rotation, le couple est positif ou nul (accélérations contrôlées et décélération non contrôlées)
- 2 Quadrants (I et II) : la machine ne tourne que dans un seul sens de rotation, le couple est positif ou négatif (accélérations et décélération contrôlées)
- 3 Quadrants (I et IV) : la machine tourne dans les deux sens de rotation (pour le sens inverse la charge est nécessairement entraînée), le couple est toujours positif (accélérations contrôlées)

et décélération non contrôlées)

- 4 Quadrants (I à IV) : la machine tourne dans les deux sens de rotation quelque soit la charge entraînée le couple est positif ou négatif (accélérations et décélération contrôlées)

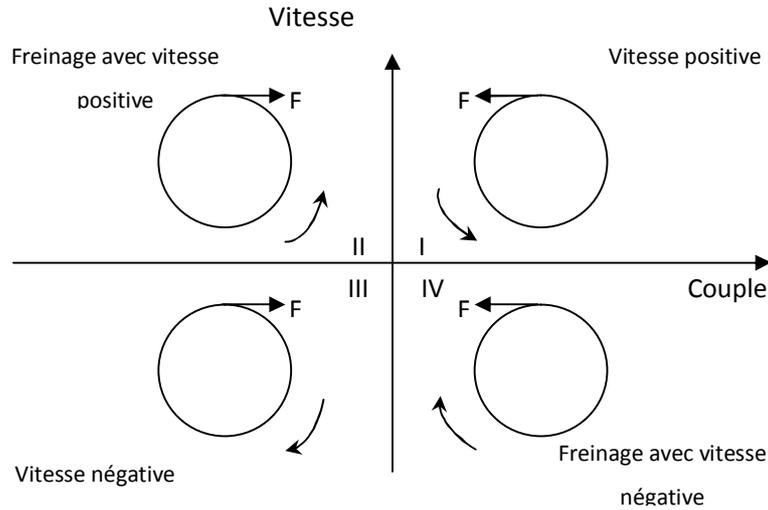


Figure 2.8 Quadrants de fonctionnement

2.8.1 Variateurs de vitesse alimentée en alternatif (réseau monophasé)

2.8.1.1 Pont mixte symétrique

Pour varier la vitesse du moteur shunt à C.C, l'induit est alimenté par un pont mixte symétrique

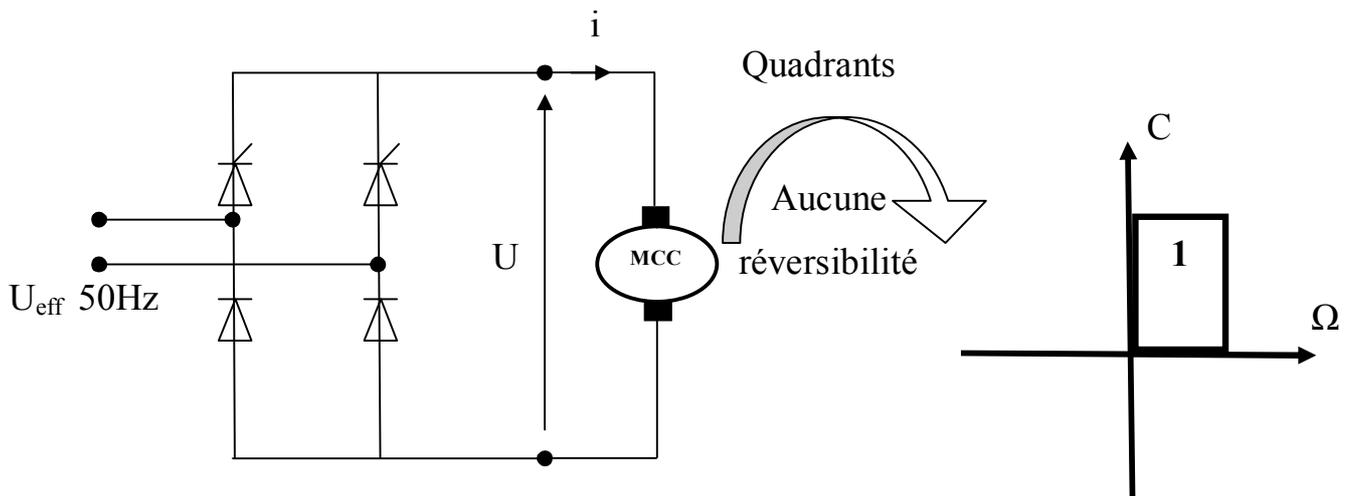


Figure 2.8 : Variation de la vitesse du MCC en utilisant pont mixte symétrique

2.8.1.2 Pont tout thyristors :

Pour la variation de vitesse de MCC en utilisant pont tout thyristors :

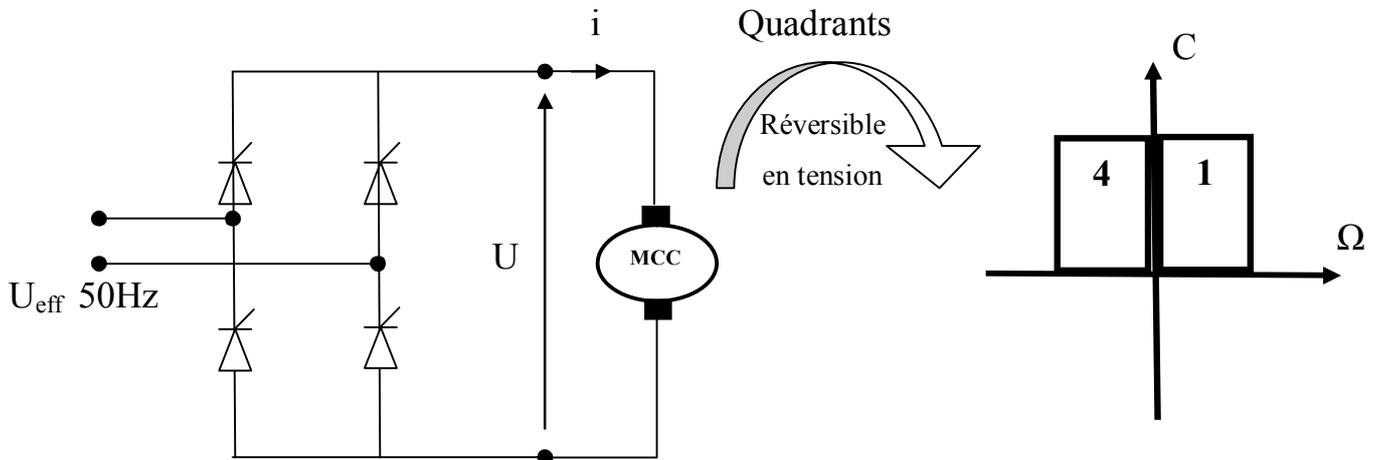
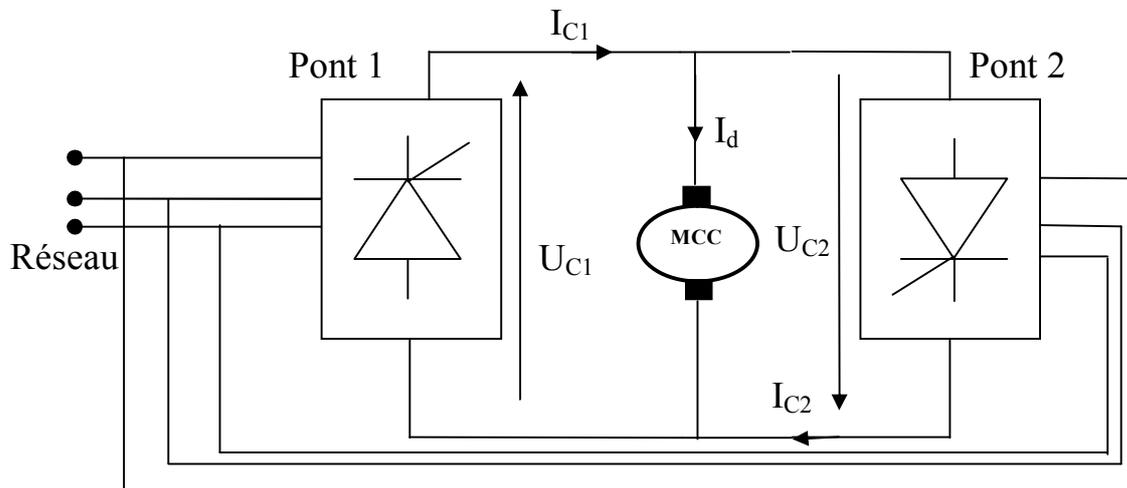


Figure 2.9 : Variation de la vitesse du MCC en utilisant pont tout thyristors

2.8.1.3 Montage réversible (tête-bêche)

Pour pouvoir fonctionner dans les quatre quadrants et obtenir des inversions de couple très rapides , il faut utiliser deux ponts tout thyristors montés tête bêche .

Pour assurer des inversions très rapides (5 à 20 ms) avec un équipement totalement statique, on doit utiliser deux montages redresseurs principaux tout thyristors montés en tête-bêche aux bornes d l'induit ; l'un fournit au moteur le courant I_d positif, l'autre le courant I_d négatif.



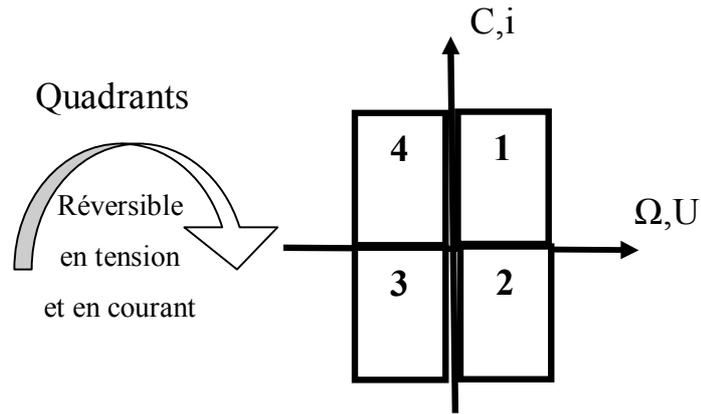


Figure 2.10 : Commande du couple et de la vitesse d'un moteur shunt à C . C . en utilisant deux pont thyristors en tête bêche

Le pont 1 assure le fonctionnement dans les quadrants 1 et 4, le pont 2 dans les quadrants 3 et 2. Suivant le mode de commande des redresseurs des deux ponts, on distingue les variateurs avec courant de circulation et sans courant de circulation.

2.9.1 Variateurs de vitesse alimentée en continu

2.9.1.1 Hacheur série

On emploie le hacheur série lorsque le moteur ne doit travailler que dans le quadrant 1

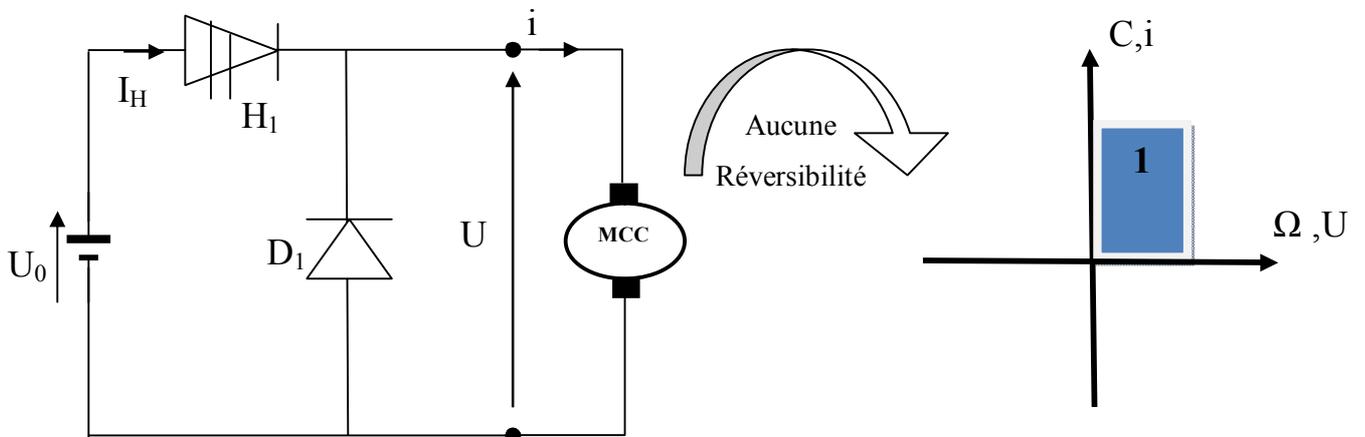


Figure 2.10 : Variation de vitesse par un hacheur série

2.9.1.2 Hacheur réversible en courant

Le hacheur à deux interrupteurs réversible en courant est utilisé lorsque le moteur doit travailler dans les quadrants 1 et 2

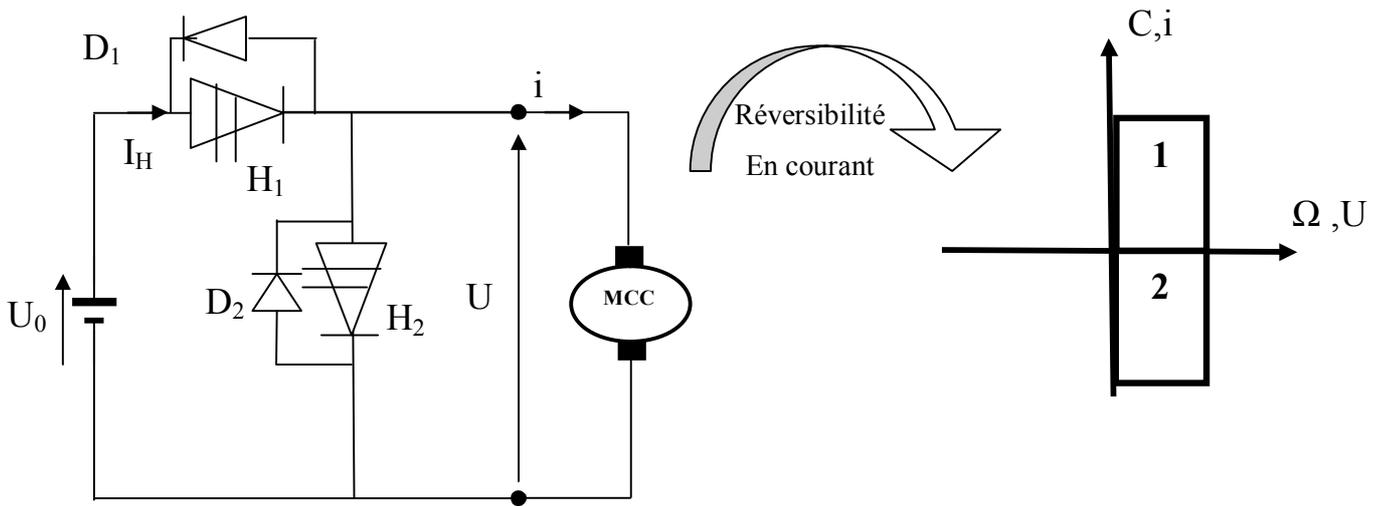


Figure 2.11 : Variation de vitesse par un hacheur réversible en courant

2.7.1.3 Hacheur réversible en tension (2 quadrants)

La structure recherchée doit permettre une réversibilité en tension de la source de courant qui reste unidirectionnelle en courant.

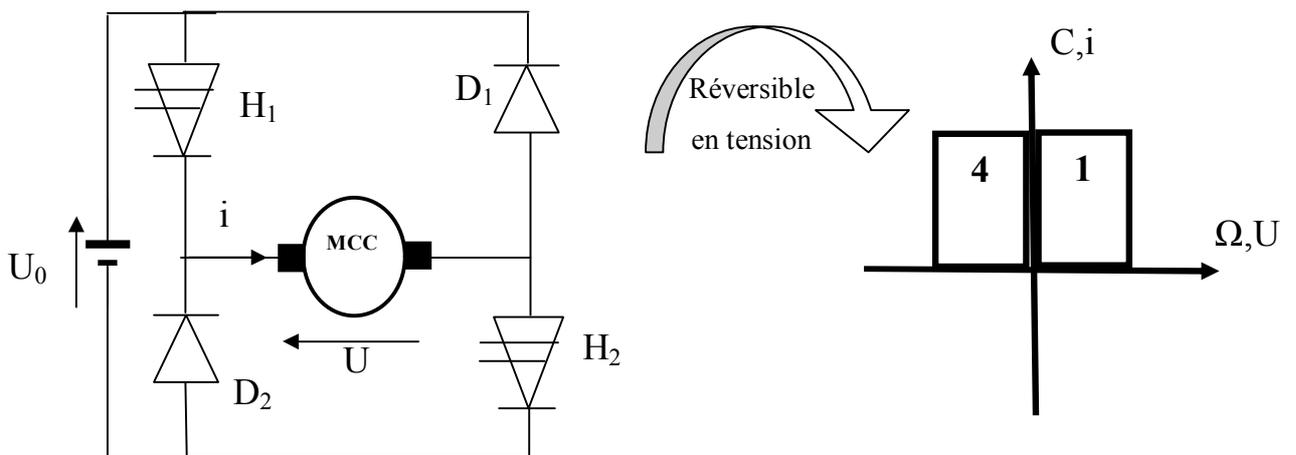


Figure 2.12 Association hacheur (2 quadrants)-MCC

2.9.1.4 Hacheur en pont ou 4 quadrants

Lorsque le fonctionnement a lieu dans les quatre quadrants, on a recours au hacheur en pont réversible en courant et en tension.

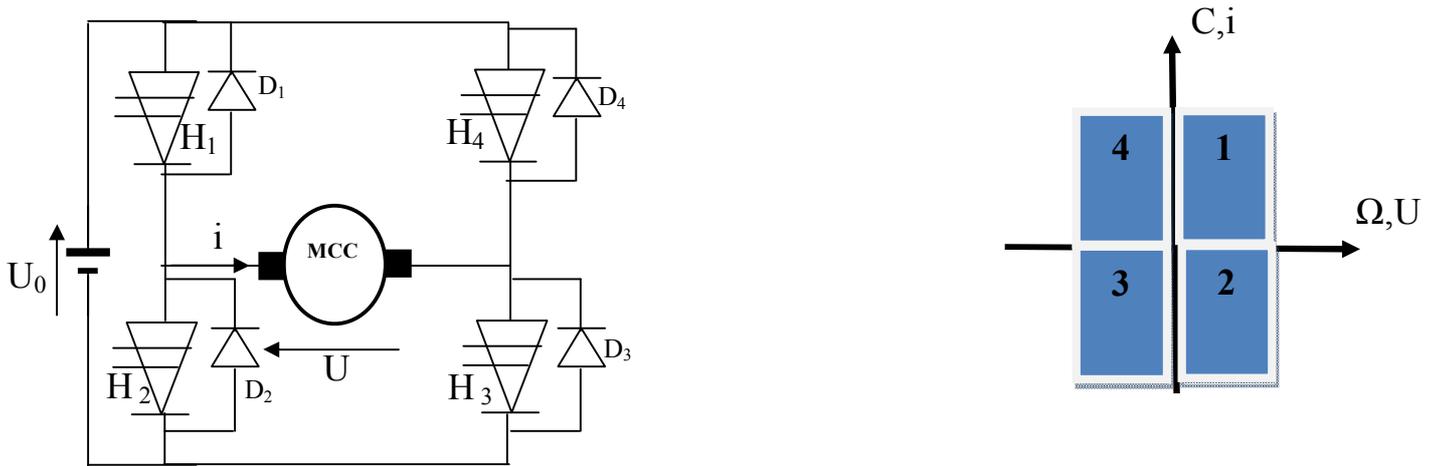


Figure 2.13 Association hacheur en pont (4 quadrants)-MCC

2.10 Régulation de vitesse des MCC

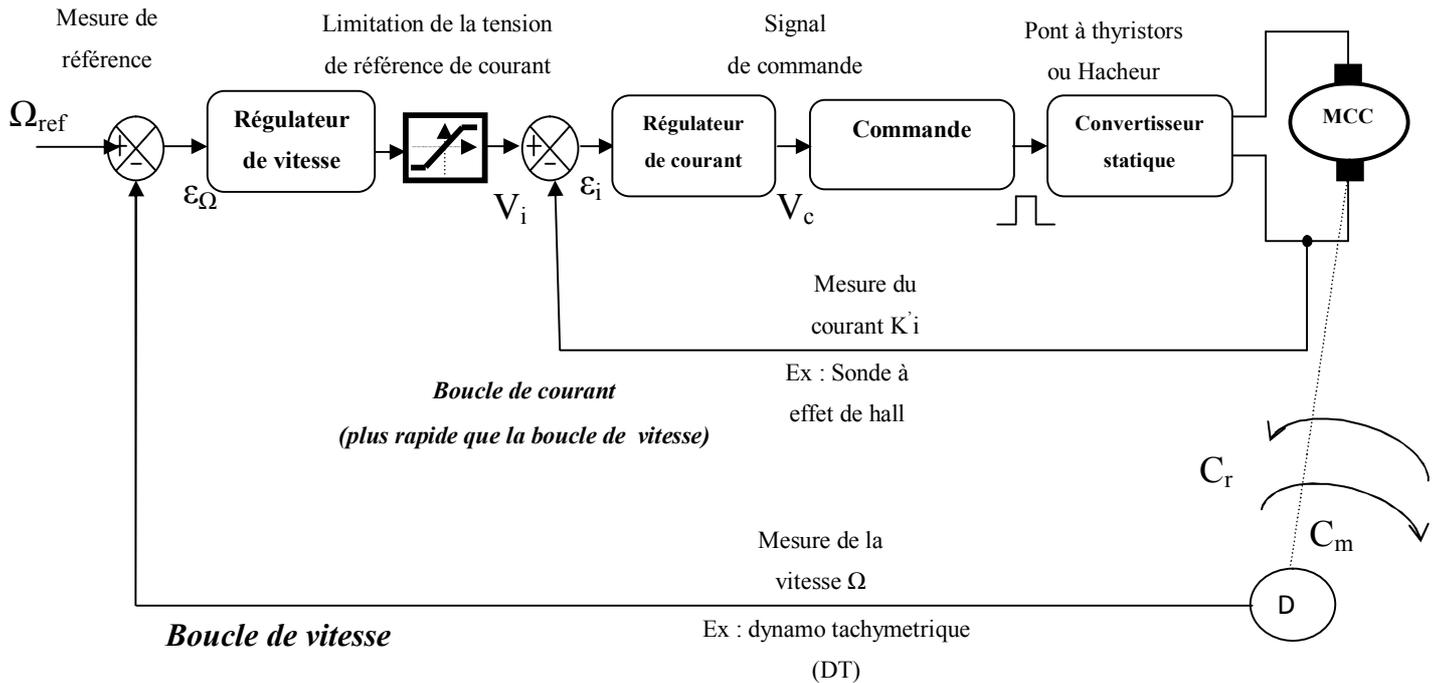
Les structures précédentes permettent de faire varier la vitesse d'une MCC sans garantir la stabilité dans le temps . En effet , en cours de fonctionnement, des éléments peuvent varier

Le couple résistant	}	<i>Perturbations</i>
La tension du réseau		
La température		

Et provoquer une modification de la vitesse réelle par rapport à celle désirée . Ainsi dans un variateur de vitesse pour MCC , on trouve très souvent un circuit de puissance associé à un dispositif de régulation . Son rôle est de piloter le variateur de façon que la MCC impose à la charge les conditions mécaniques (couple ou vitesse ou encore position) exigées par le processus industriel.

La régulation doit être double on doit agir sur la vitesse mais aussi sur le courant pour le maintenir dans des limites acceptables lors des situations suivantes : Démarrage rapide , variation brusque brutale du couple résistant, freinage brusque ou accroissement très rapide de la consigne vitesse .

La structure d'un variateur de vitesse pour MCC comporte donc généralement deux boucles de régulation en cascade .



La grandeur principale à contrôler est la vitesse Ω Elle fait l'objet de la boucle externe. Celle-ci compare la tension $K\Omega$ correspondant à la vitesse réelle Ω . Avec la tension de référence de vitesse Ω_{ref} image de la vitesse désirée Ω_0 (laquelle peut être évolutive) Elle fournit une tension de référence de courant V_i à la boucle de courant , laquelle contrôle la durée de conduction des interrupteurs statique (thyristor , transistor) du convertisseur.

Si la grandeur V_i est limitée , le système fonctionne alors en **régulation de courant**

$$i \text{ limité} \rightarrow C_m \text{ limité} \rightarrow \frac{d\Omega}{dt} \text{ limité}$$

Si la grandeur V_i n'est pas limitée , le système fonctionne alors en régulation de vitesse il est possible d'avoir une régulation simultanée de vitesse et de courant .

Les avantages essentiels d'une régulation en cascade sont :

- Performances de régulation globalement meilleurs qu'avec une seule boucle
- Régime transitoires plus rapide
- Effet des perturbations du processus intermédiaire moins sensible sur la boucle à principale

* Le moteur MCC peut facilement changer de sens de rotation , il suffit d'inverser U ou Φ , il suffit de permuter les polarités de la tension d'alimentation de l'induit ou de l'inducteur .

* Ce moteur ne peut pas démarrer sous sa tension nominale (sauf moteur de faible puissance) il faut limiter la tension au moment du démarrage .sinon le courant absorbé serait excessif . En effet

$$U = E + RI \text{ donc } I = \frac{U-E}{R} \text{ mais au démarrage (E=0 car } \Omega=0) \text{ donc } I_d = \frac{U}{R}$$