

Commande des machines électriques
LP IE 2019-2020
Y. Ounejjar



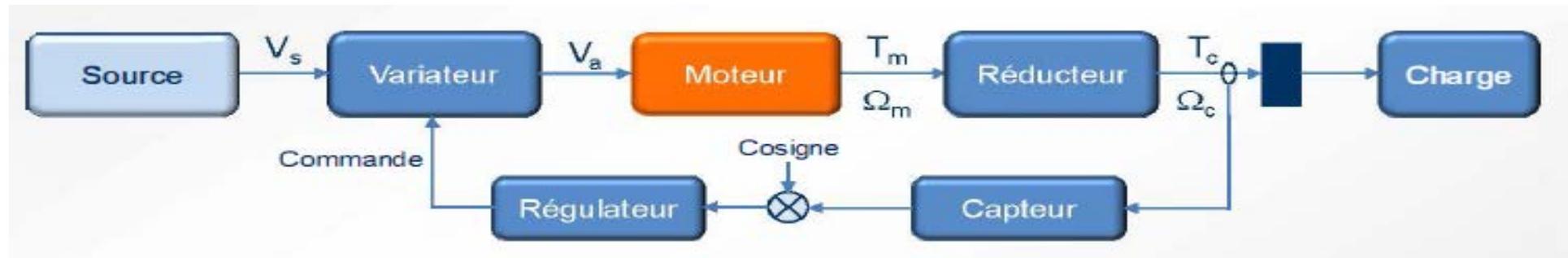
Commande des machines électriques

Commande des machines électriques
LP IE 2019-2020
Y. Ounejjar



Chaîne de commande d'une machine CC

Schéma synoptique d'un système d'entraînement électromécanique:



Équation fondamentale de mouvement:

$$T_{em} - T_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega$$

T_{em} : couple électromagnétique

T_r : couple résistant (charge mécanique)

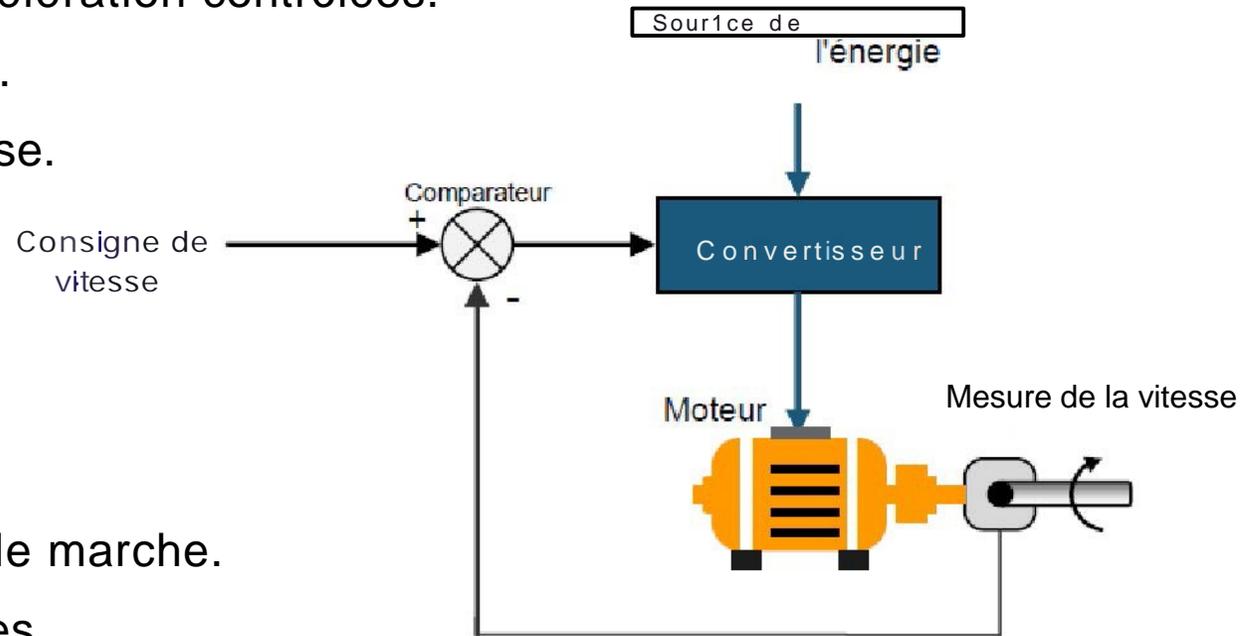
J : inertie

f : frottement

Ω : vitesse de rotation

Fonctions d'un variateur de vitesse

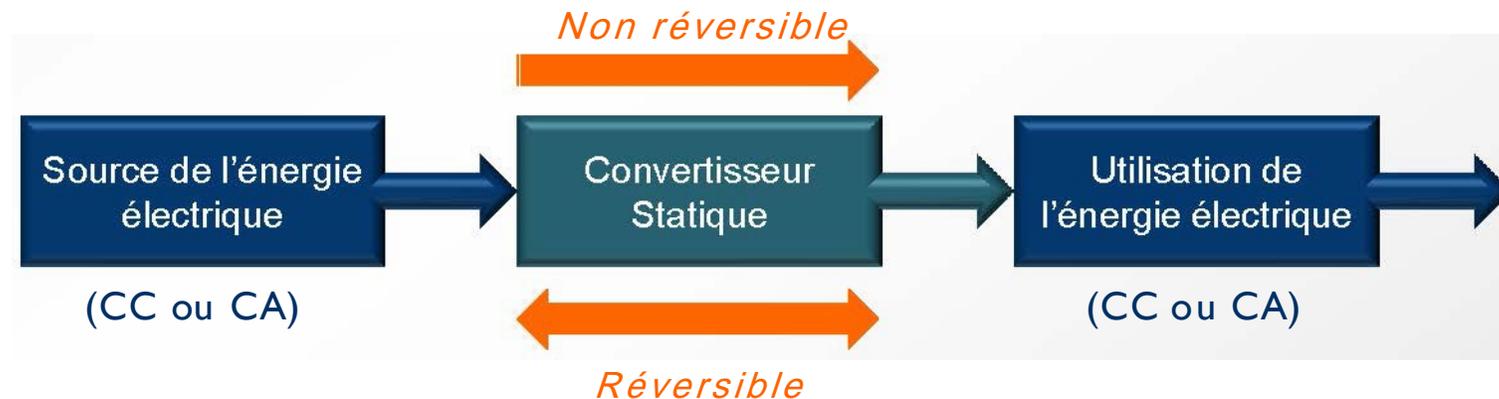
- . Accélération et décélération contrôlées.
- . Variation de vitesse.
- . Régulation de vitesse.



- . Inversion du sens de marche.
- . Protections intégrées.
- . État du moteur (courant, tension, couple, vitesse, température)

Fonctions des convertisseurs

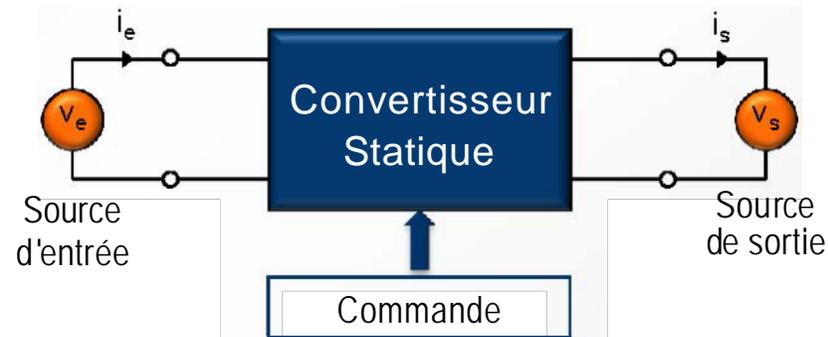
- Modifier la nature des grandeurs électrique (CC-CA).
- Régler la puissance d'un système électrique.
- Assurer conjointement, en cas de besoin, la modification de la nature et le réglage de la puissance électrique.

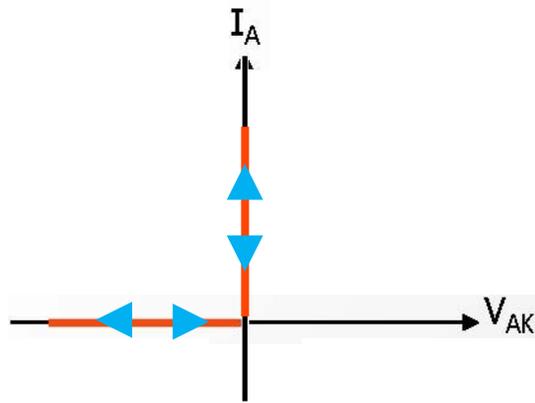


Structure des convertisseurs statiques

Un convertisseur statique comporte essentiellement:

- Des interrupteurs électroniques fonctionnant, de manière périodique, en régime de commutation (tout ou rien).
- Des éléments réactifs (inductances et/ou condensateurs) permettant le stockage intermédiaire de l'énergie électrique.

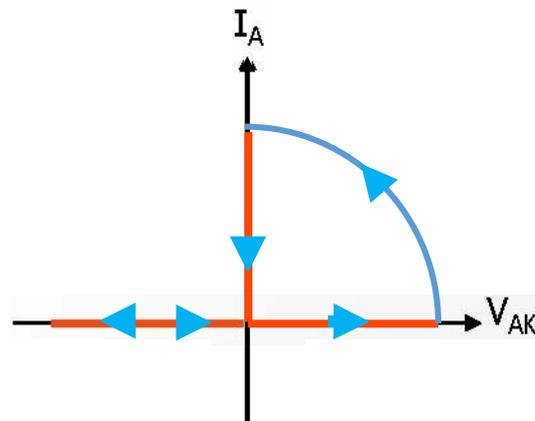




Caractéristique
statique et dynamique

Pas de pertes ni à l'amorçage
ni au blocage

Non commandable

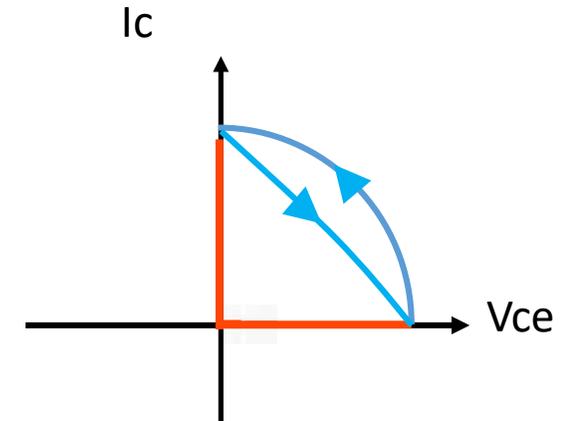


Caractéristique
statique et dynamique

Pas de pertes au blocage

Le composant est commandable
à l'amorçage

Il y'a des pertes à l'amorçage



Caractéristique
statique et dynamique

Le composant est commandable à
l'amorçage et au blocage

Il y'a des pertes à l'amorçage et
au blocage

Caractérisation des sources

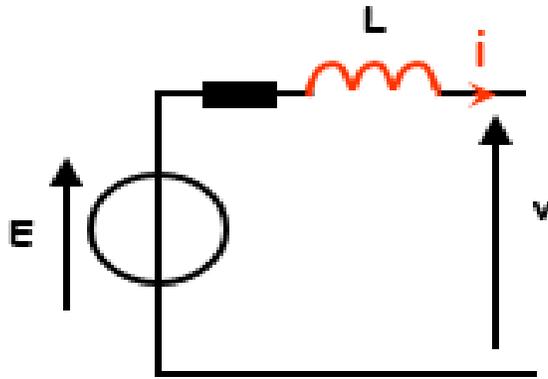
- ① La mise en parallèle d'un condensateur avec tout circuit est considérée comme une source de tension
- ② La mise en série d'une inductance avec tout circuit est considérée comme une source de courant

Règles d'interconnexion des sources

Le convertisseur statique connecte deux sources par l'intermédiaire des interrupteurs électroniques.

Les règles d'interconnexion des sources sont:

1. Une source de tension ne doit jamais être court-circuitée, mais elle peut être ouverte.
2. Une source de courant ne doit jamais être ouverte, mais elle peut être court-circuitée.
3. Ne jamais connecter entre elles deux sources de même nature.
4. On ne peut connecter directement que deux sources de natures différentes.

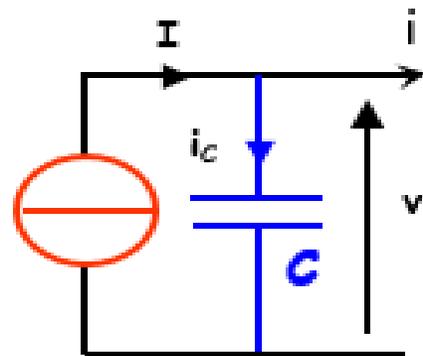


$$u_L = L \cdot di/dt = E - v$$

$$di/dt = (E - v)/L$$

Si L grand alors :

$$di/dt = 0 \text{ soit } i = \text{constante}$$



$$i_c = C \cdot dv/dt = I - i$$

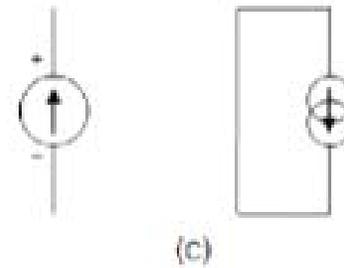
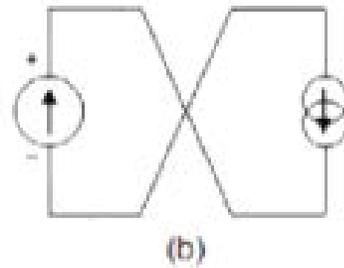
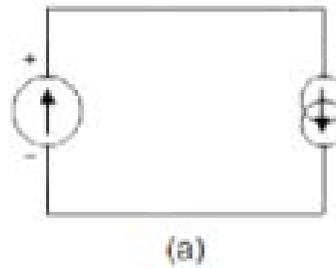
$$dv/dt = (I - i)/C$$

Si C grand alors :

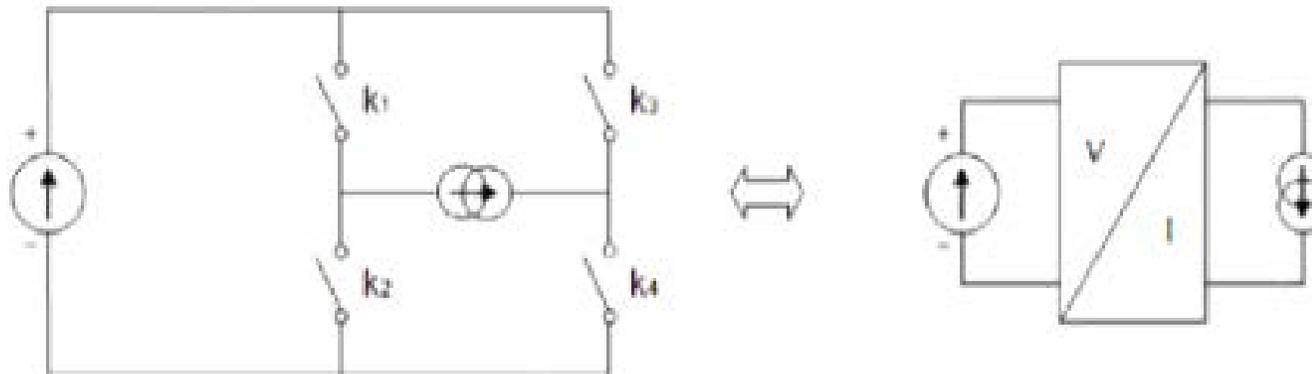
$$dv/dt = 0 \text{ soit } v = \text{constante}$$

Conception des convertisseurs

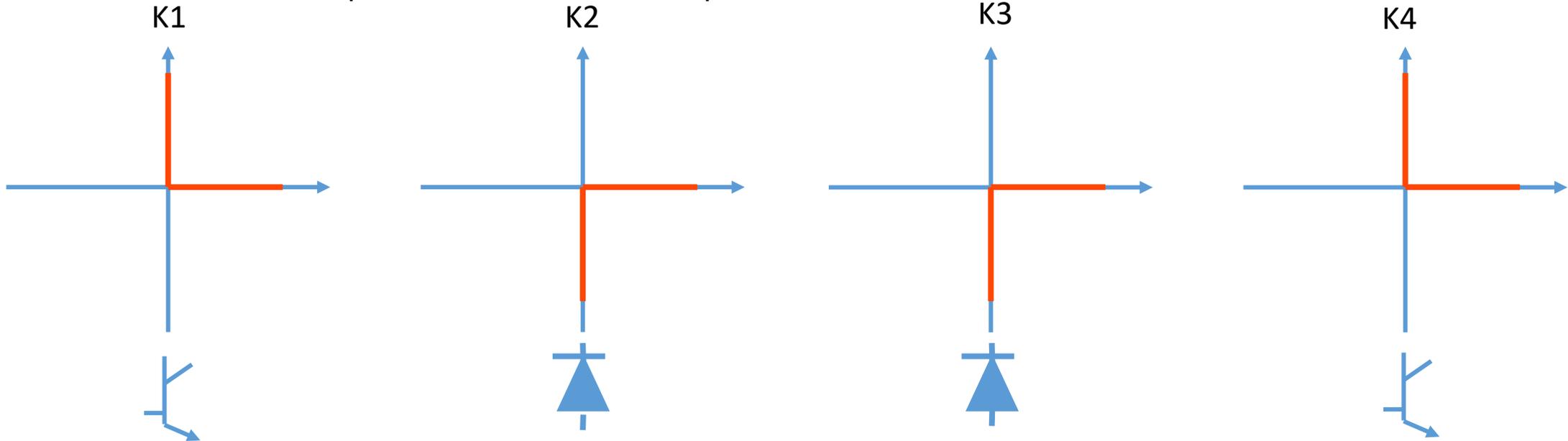
Séquences



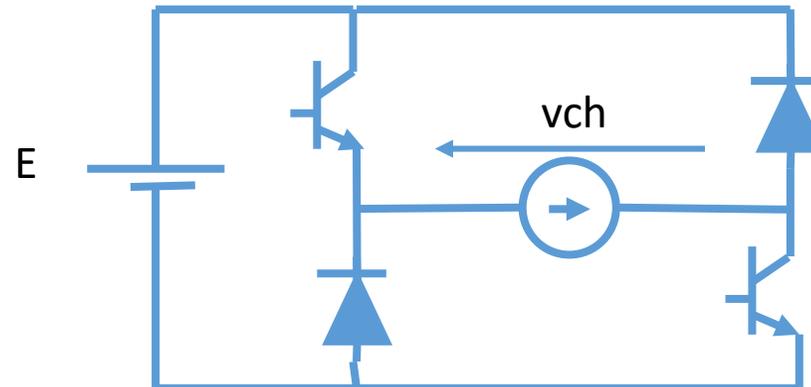
Configuration de base



Détermination des composants du convertisseur permettant le fonctionnement demandé

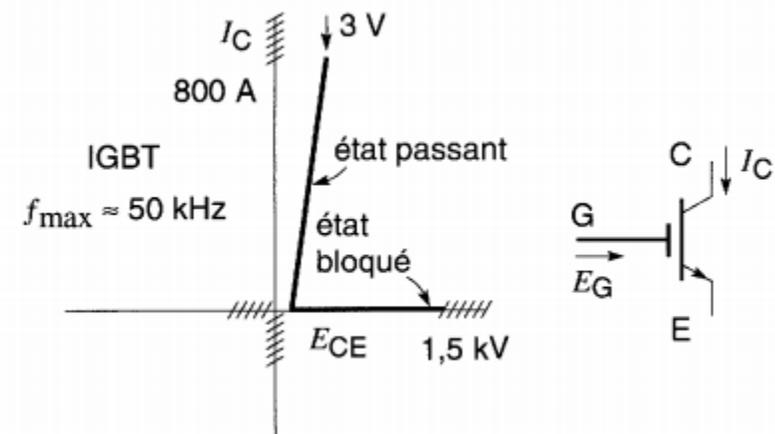
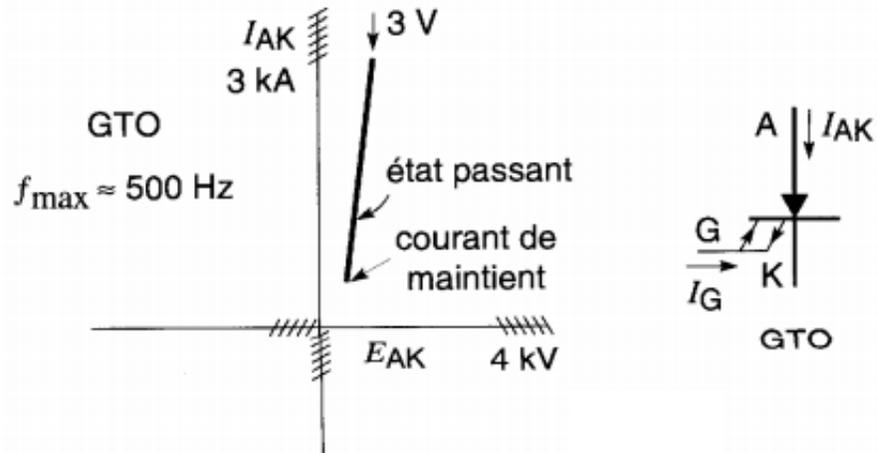
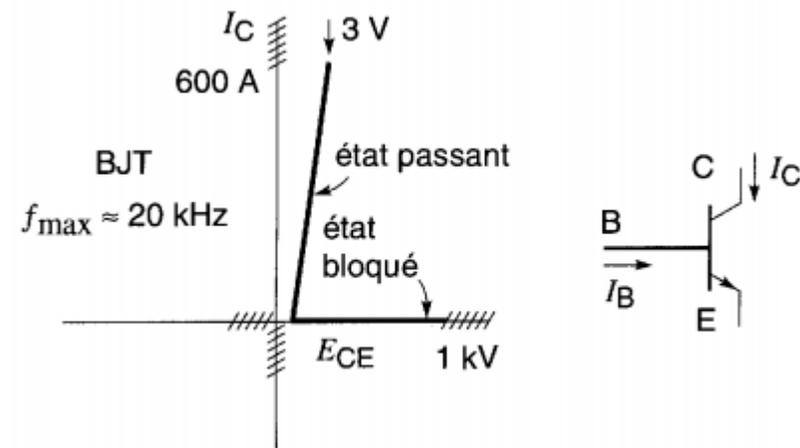
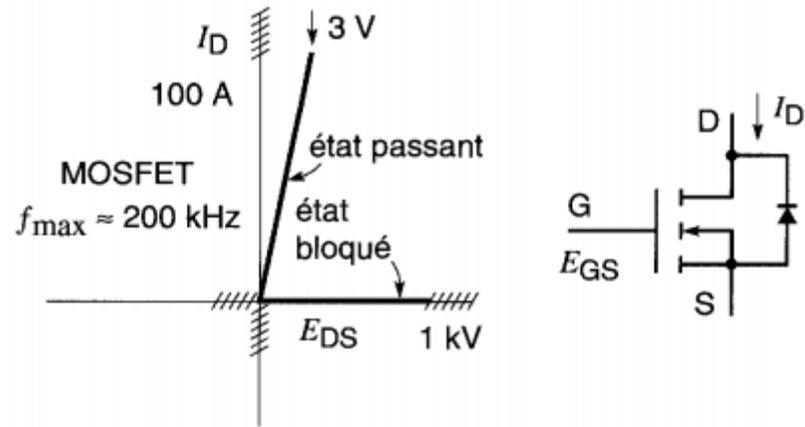


Le convertisseur permettant le fonctionnement demandé

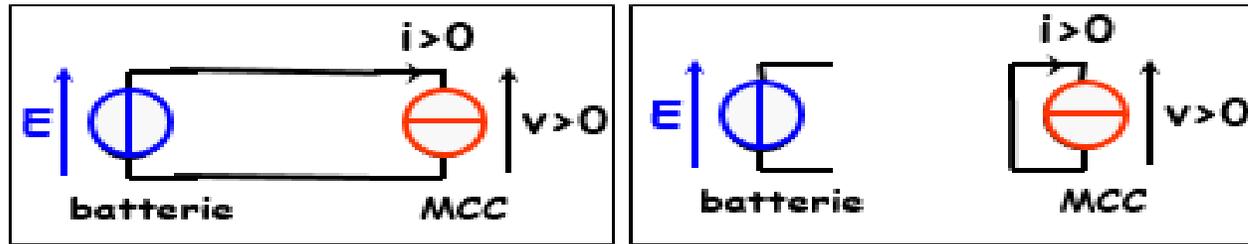


$$V_{ch} = (2\alpha - 1)E$$

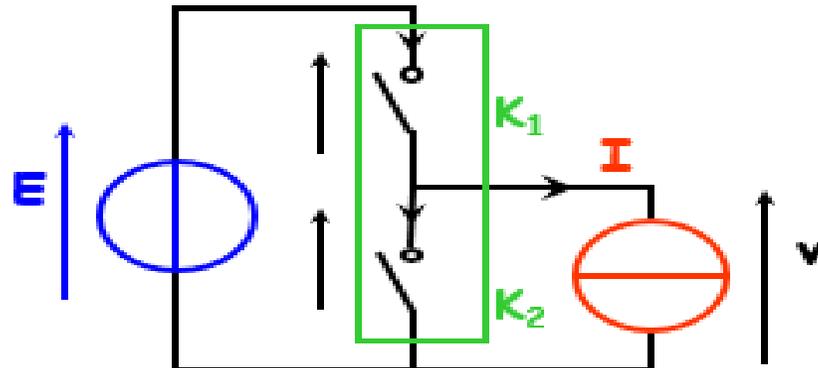
Le choix des composants K2 et K3 dépend de la puissance et de la fréquence de modulation



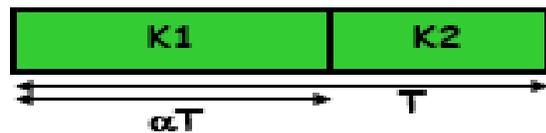
Vélo à assistance au pédalage



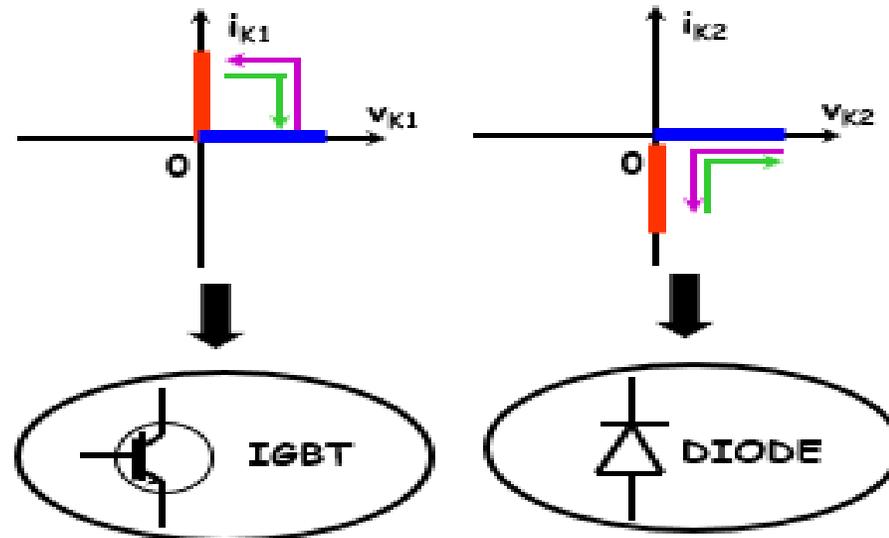
Structure



Commande des interrupteurs



Choix des interrupteurs



Étape 1 : Identifier la nature des sources d'entrée et de sortie. En déduire la structure de base du convertisseur statique.

Étape 2 : Déduire du cahier des charges les réversibilités en tension et en courant des sources d'entrée et de sortie.

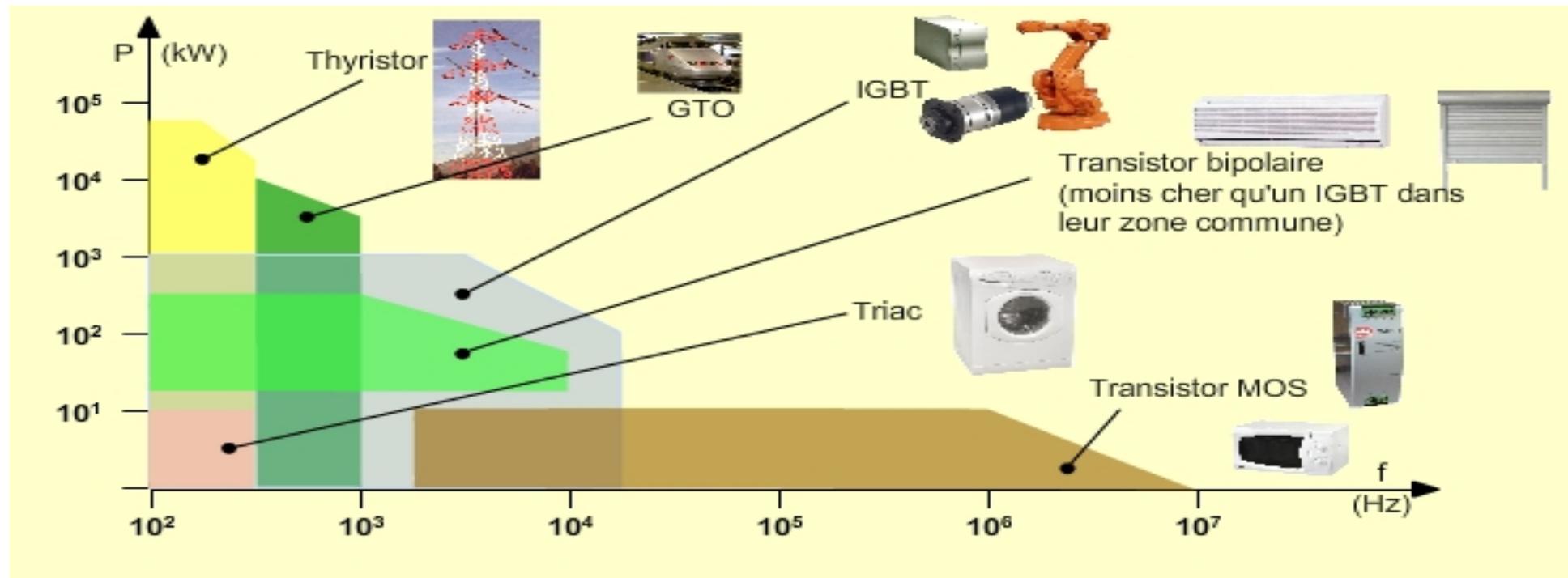
Étape 3 : Identifier sur la structure de base, les séquences de fonctionnement nécessaires, compte tenu des réversibilités souhaitées et des contrôles d'énergie souhaitée. Effectuer les simplifications si nécessaire. En déduire le montage de base du convertisseur statique.

Étape 4 : Pour les différentes séquences déterminées à l'étape 3, observer le sens du courant dans les interrupteurs passants, et le signe de la tension à leurs bornes lorsque ceux-ci sont bloqués. En déduire la caractéristique $i_K=f(v_K)$ de chaque interrupteur.

Étape 5 : Déduire d'une étude approfondie du cahier des charges, l'enchaînement des séquences déterminées à l'étape 3 afin d'obtenir les formes d'ondes des signaux de sortie désirées. En déduire le type de commutation dynamique. (commandée ou spontanée)

Étape 6 : Connaissant les caractéristiques statiques et dynamiques des interrupteurs, on peut déterminer les types d'interrupteurs à utiliser.

Le choix de l'un ou l'autre des interrupteurs électroniques dépend de la gamme de puissance ainsi que de la fréquence de commutation nécessaire. Dans un second temps, les caractéristiques électriques et thermiques permettront de choisir correctement l'interrupteur dans la gamme proposée. Actuellement, le convertisseur statique le plus employé (notamment dans les variateurs de vitesse) est le transistor IGBT, qui combine les avantages du MOS en entrée (commande en tension) et du transistor bipolaire en sortie (VCEsat presque nulle) et permet des plages d'utilisation en puissance et en fréquence élevées.



Performances des différents composants de puissance

Commande des machines électriques
LP IE 2019-2020
Y. Ounejjar



Variation de la vitesse de la machine CC

Équations simplifiés :

Expression de la vitesse :
$$\Omega = \frac{V_a - R_a I_a}{K\phi} = \frac{V_a}{K\phi} - \frac{R_a}{(K\phi)^2} T_{em} = \Omega_v - m T_{em}$$

Caractéristique mécanique :
$$\Omega = \Omega_v - m T_{em} \quad \Omega_v = \frac{V_a}{K\phi} \quad m = \frac{R_a}{(K\phi)^2}$$

Variation de la vitesse par modification de la caractéristique du couple $T_{em}(\Omega)$.

Paramètres de variation de la vitesse :

- Résistance d'induit : R_a
- Flux inducteur : ϕ
- Tension d'alimentation : V_a

Action sur la résistance

Procédure :

Placer une résistance R_v en série avec l'induit.

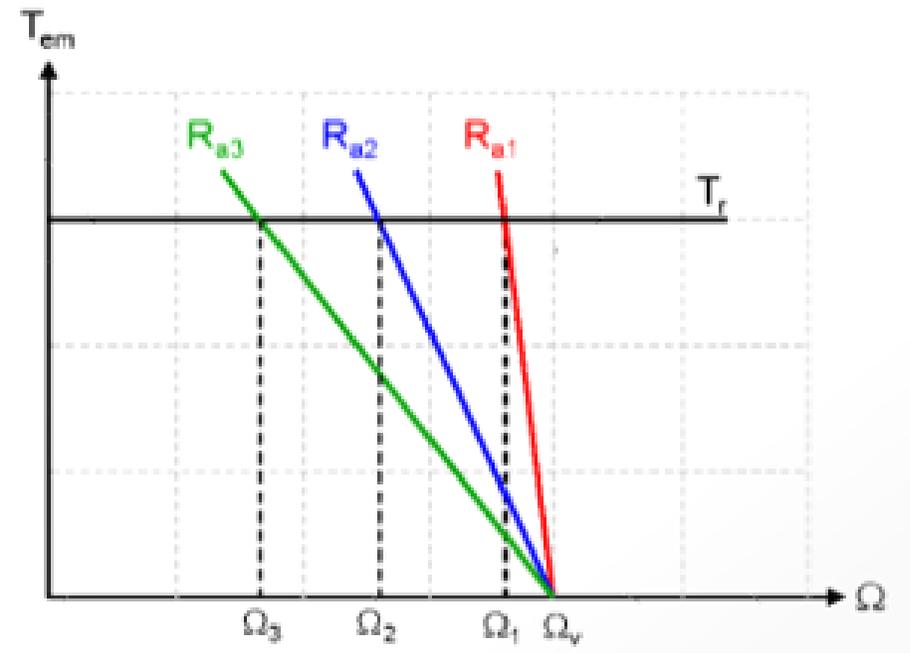
$$\Omega_v = \frac{V_a}{K\phi}$$

$$m = \frac{R_a + R_v}{(K\phi)^2}$$

Mode de variation :

- Vitesse à vide Ω_v inchangée.
- Modification de la pente m de la caractéristique mécanique.

Entraînement à couple résistant constant



Action sur le flux

Procédure :

Varié le courant inducteur I_e d'excitation.

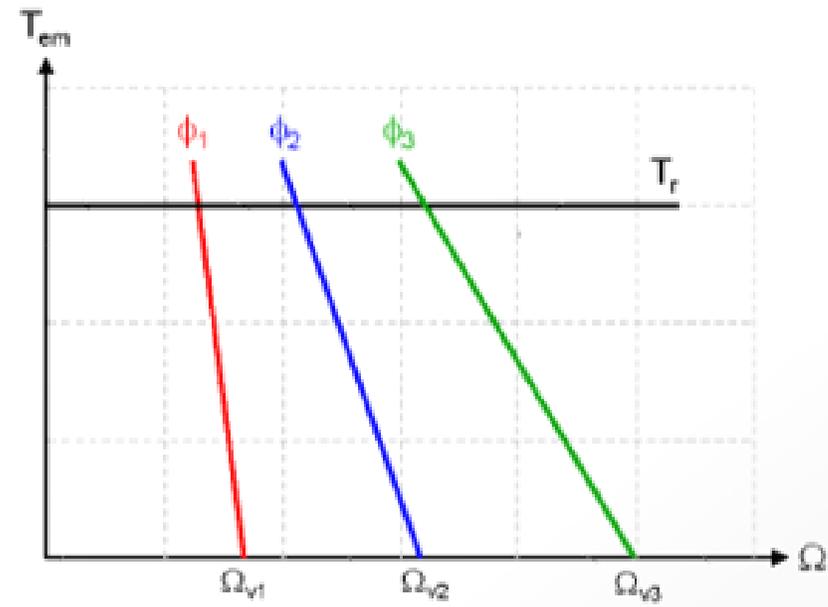
$$\Omega_v = \frac{V_a}{K\phi}$$

$$m = \frac{R_a}{(K\phi)^2}$$

Mode de variation :

- Modification de la vitesse à vide Ω_{v}
- Modification de la pente m de la caractéristique mécanique.

Entraînement à couple résistant constant



Action sur la tension

Procédure :

Variation de la tension V_a d'alimentation de l'induit.

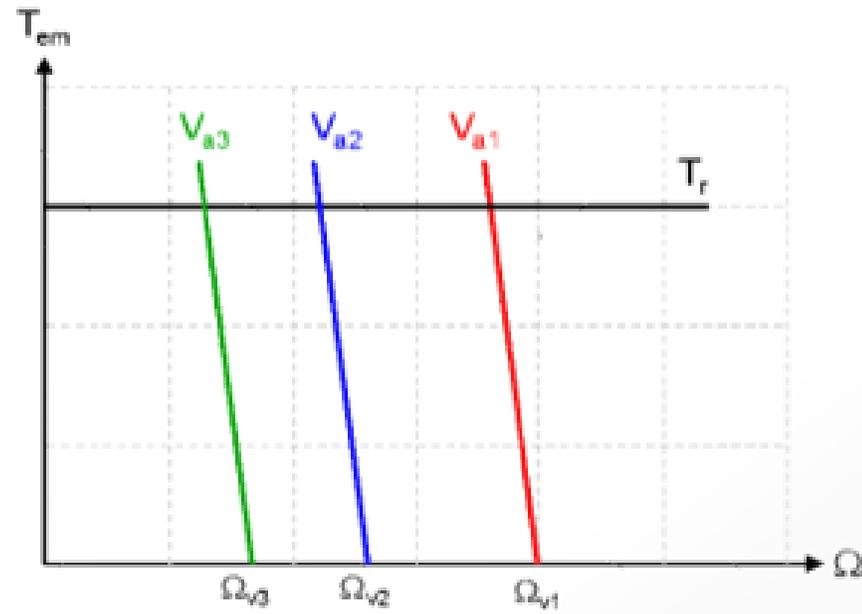
$$\Omega_v = \frac{V_a}{K\phi}$$

$$m = \frac{R_a}{(K\phi)^2}$$

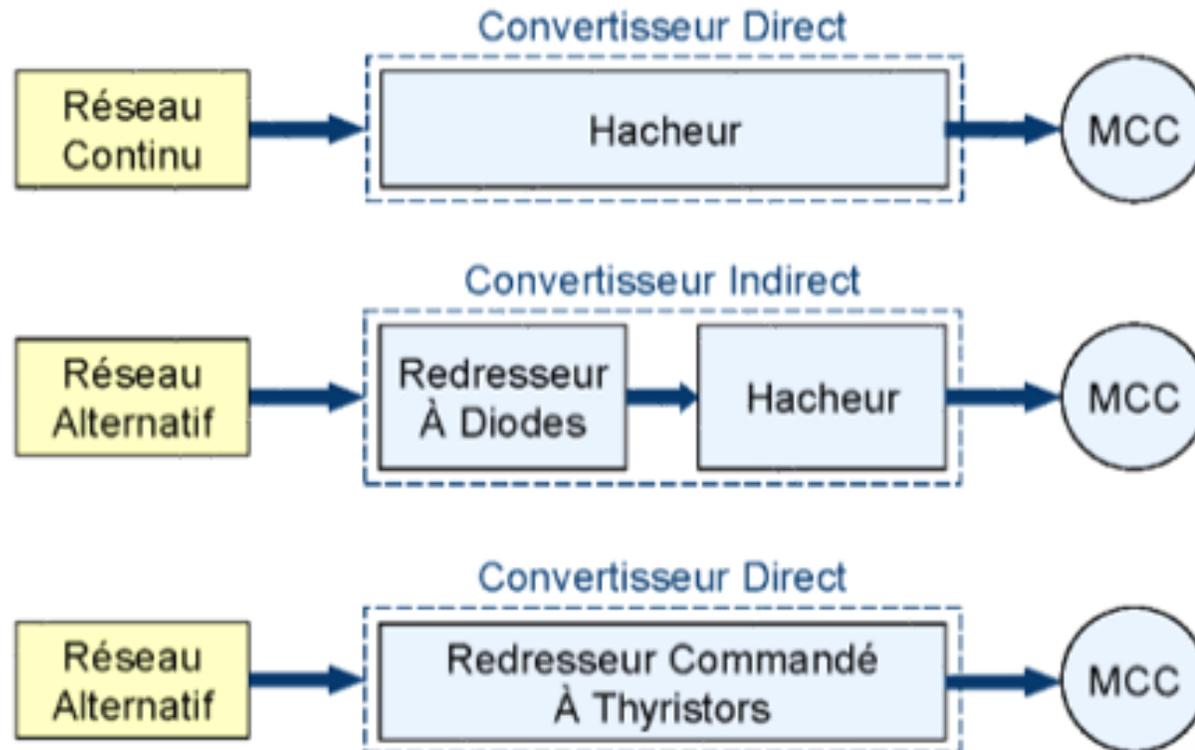
Mode de variation :

- Vitesse à vide Ω_v déplacée.
- Pente m de la caractéristique mécanique reste inchangée.

Entraînement à couple résistant constant



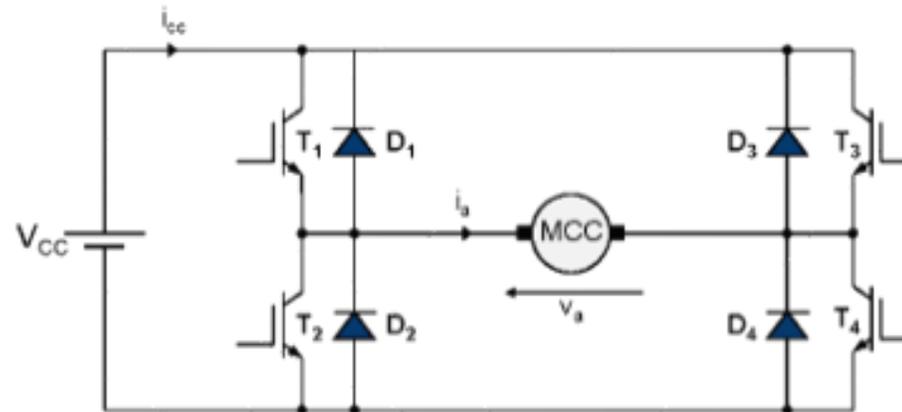
Différents types de variateurs de vitesse de la machine CC



Mode de variation de la tension

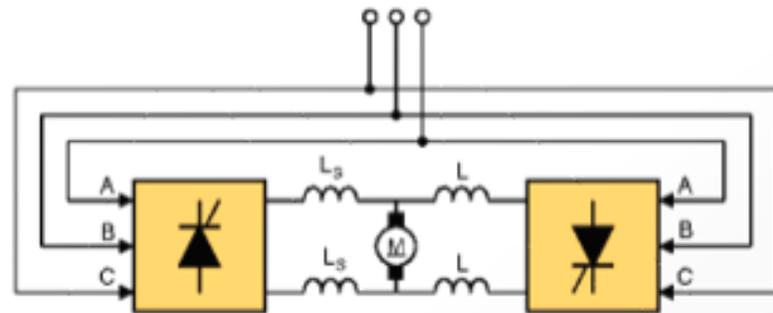
Hacheur 4 quadrants

Pont en H réversible en courant et en tension.

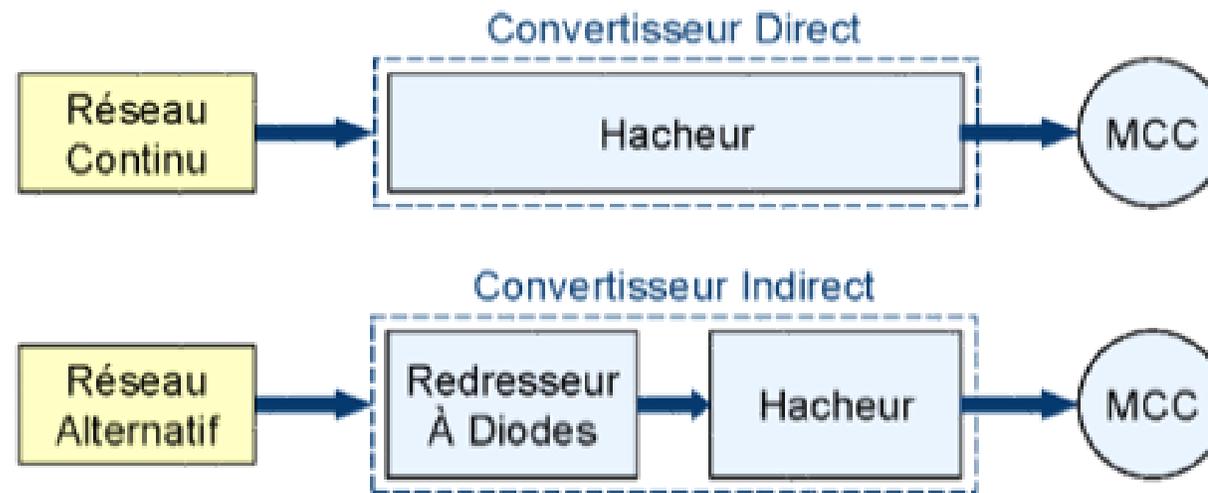


Double pont redresseur SCR

Redresseurs à thyristors réversibles montés en inverse.



Alimentation par source continue



Le réseau continu provient :

- soit de batteries
- soit d'un redresseur à diode

Plan couple-vitesse

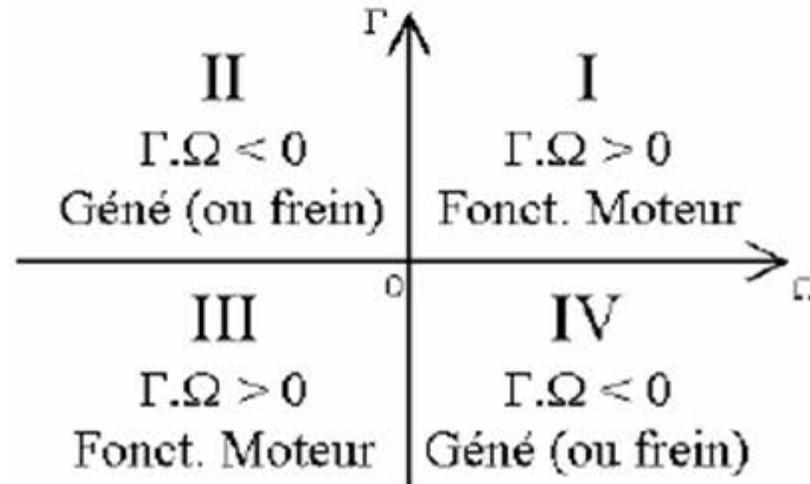
Description

Les caractéristiques des entraînements sont décrits dans le **plan couple(s)-vitesse** $\Gamma(\Omega)$.

On porte sur un diagramme le couple électromagnétique Γ_{em} de la machine électrique en fonction de la vitesse de rotation Ω .

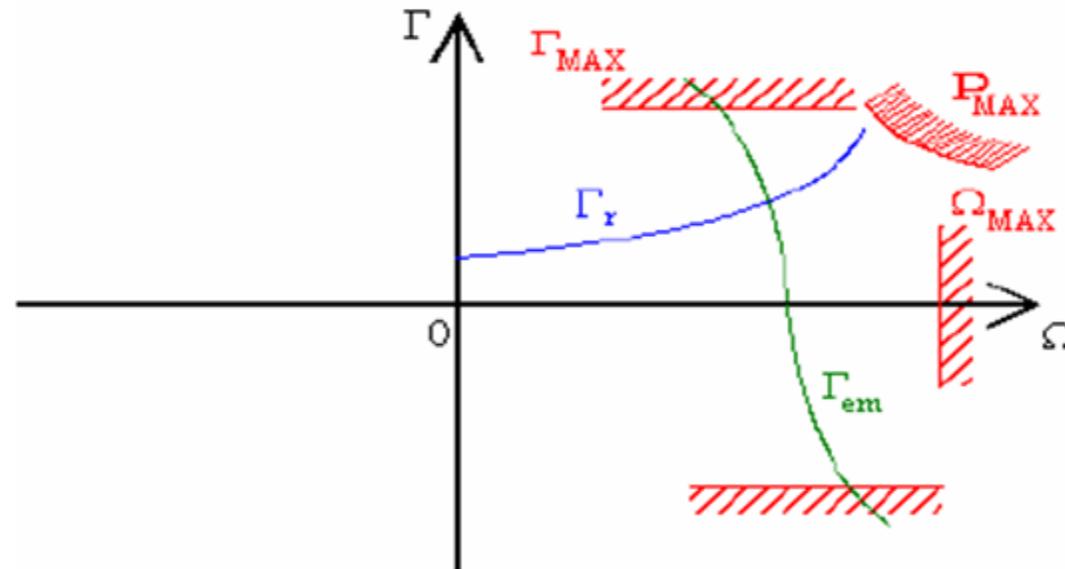
Les **couples et vitesses** sont des grandeurs **algébriques**. Par **convention**, on choisit un sens positif pour ces grandeurs tel que le produit du couple électromagnétique par la vitesse (la puissance fournie par la machine) donne un fonctionnement en moteur dans le quadrant I et donc aussi dans le quadrant III.

Les quadrants II et IV correspondent à une puissance reçue par la machine. Elle fonctionne alors en frein pour la charge (ex : machine asynchrone tournant en sens inverse du champ tournant). Elle peut aussi renvoyer l'énergie au réseau. C'est le fonctionnement en génératrice (ex la même machine fonctionnant en hypersynchronisme).



On trace dans ce diagramme :

- les lieux de fonctionnement de la machine sous certaines conditions (ex : moteur à courant continu alimenté à tension d'induit constante et à flux constant),
- la caractéristique électromécanique de la charge,
- les limites de fonctionnement (ex : courant maximal, vitesse maximale, puissance maximale). (Voir variation de vitesse des machines à courant continu).



Exemple : Machine asynchrone

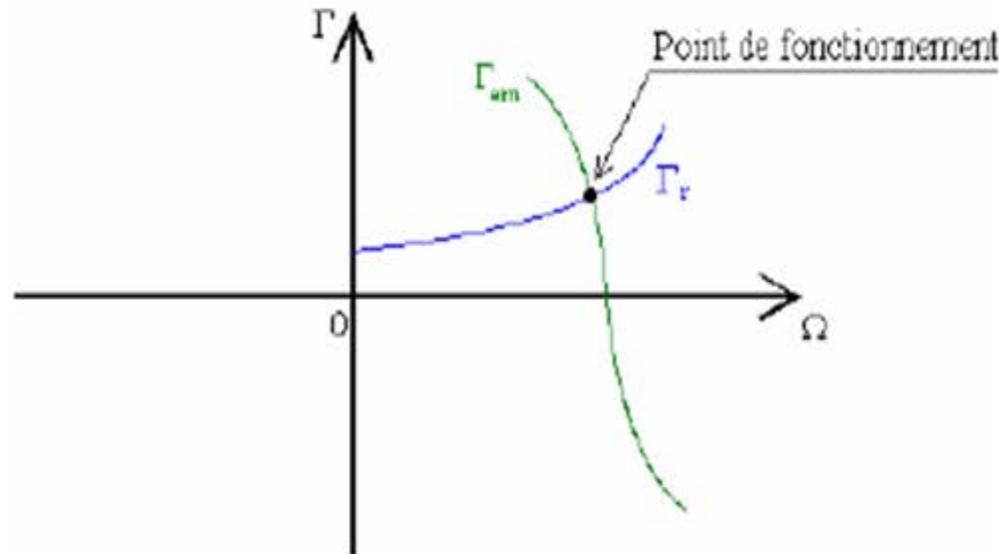
La machine asynchrone fonctionne en frein. Elle reçoit de l'énergie sous formes électrique et mécanique.

La machine asynchrone fonctionne en moteur.

La machine asynchrone fonctionne en génératrice hypersynchrone. Elle transforme l'énergie mécanique en énergie électrique qu'elle renvoie au réseau.

Point de fonctionnement

Le point d'intersection de la caractéristique de la machine et de la caractéristique de la charge donne le point de fonctionnement en régime établi puisque (1er principe de la dynamique en rotation) : $J \frac{d\Omega}{dt} = \sum \Gamma = \Gamma_{em} - \Gamma_r$, (équivalent de $F = m \cdot \gamma$ en translation) = 0 donc Ω est constant.



*Faire de la variation de vitesse,
c'est modifier le point de fonctionnement donc,
à courbe de couple résistant donné Γ_r ,
c'est agir sur la courbe $\Gamma_{em}(\Omega)$ de la machine électrique.*

Modes de fonctionnement

Ce sont les convertisseurs d'alimentation qui limitent le nombre de quadrants utilisables par la machine qui, elle, est quasiment toujours quatre quadrants.

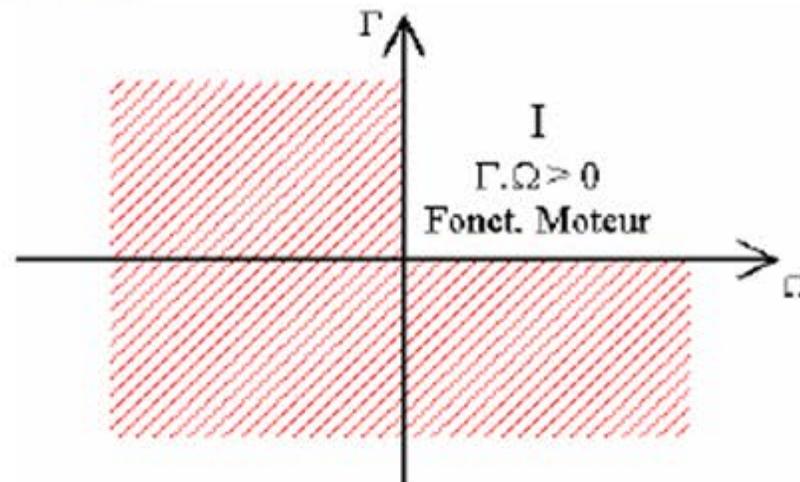
Suivant la nature de l'entraînement, on peut désirer ou non que la machine puisse freiner la charge et/ou inverse le sens de marche. Ce sont les fonctionnements 1, 2 ou 4 quadrants.

Modes de fonctionnement 1 quadrant (non réversible)

Mode de fonctionnement 1 quadrant moteur

Seul le fonctionnement moteur est ici possible. Le ralentissement ne peut avoir lieu que par dissipation de l'énergie cinétique de rotation dans la charge. Dans ce mode de fonctionnement, on peut contrôler l'accélération mais non le ralentissement. On adjoint parfois un frein au moteur.

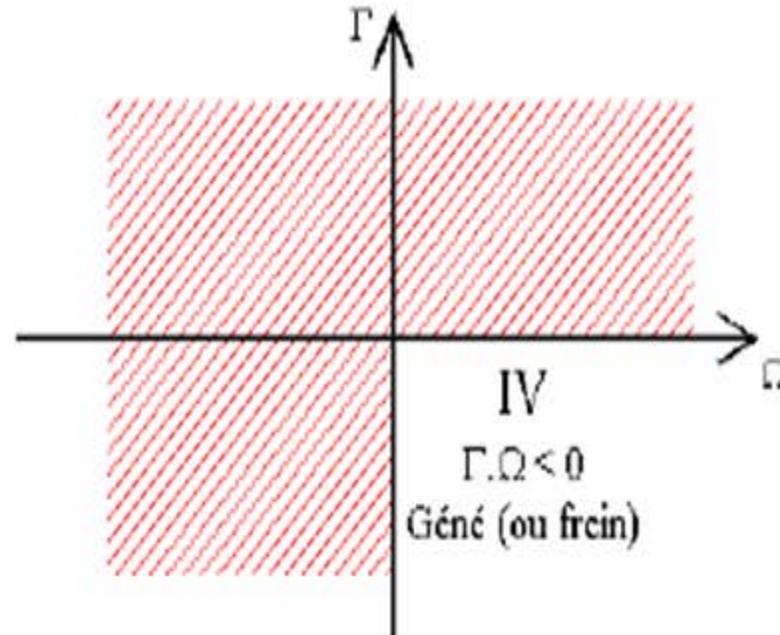
Ce type de variateur utilise un convertisseur non-réversible.



Applications : **perceuse électrique à variateur, aspirateur, pompage, ventilation**, essorage de machine à laver (c'est plutôt du Q I + III),...

Mode de fonctionnement 1 quadrant générateur

Seul le fonctionnement en génératrice de la machine est ici possible. La machine ne peut démarrer de manière électrique. Elle doit être entraînée par le côté mécanique depuis la vitesse nulle (problème avec certaines éoliennes).

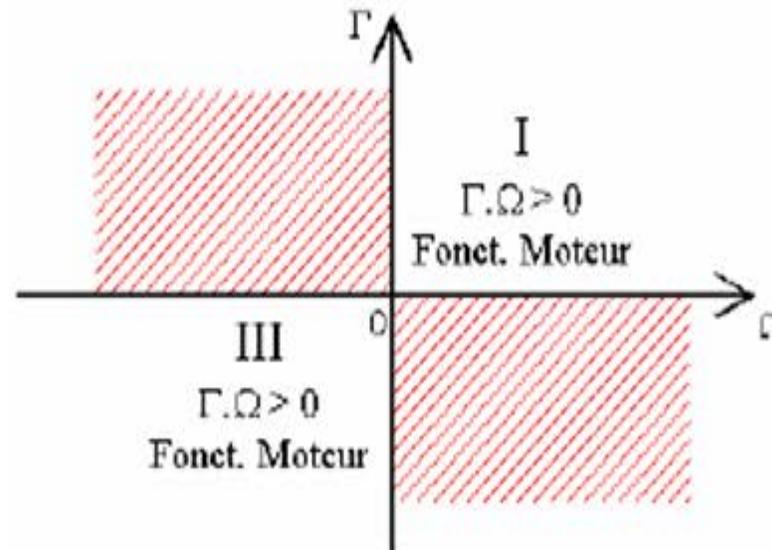


Applications : **éolienne** (si génératrice utilisée en vitesse variable : machine asynchrone à double alimentation ou alternateur), **génération d'énergie sur mobiles (alternateurs de vélo, de voiture, d'avion, de bateau, de train à traction diesel,...)** mais pas l'alternateur de centrale de production électrique car il tourne vitesse constante),...

Modes de fonctionnement 2 quadrants

Mode de fonctionnement 2 quadrants I + III (non réversible)

Avec convertisseur non-réversible, il est possible, en passant par l'arrêt, d'obtenir une inversion du couple et de la vitesse de rotation. On obtient alors un fonctionnement deux quadrants moteur (ex : inversion de flux ou de connections d'induit sur MCC ; inverseur mécanique) \Rightarrow I + inversion mécanique ou électrique.

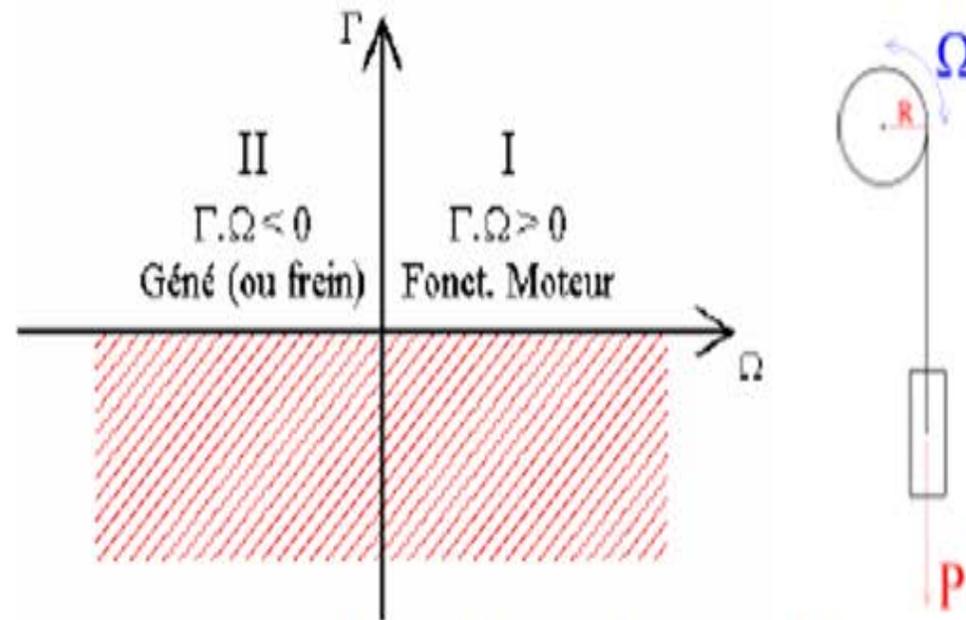


Applications : visseuse-dévisseuse électrique, lève-vitre électrique et réglage de rétroviseur d'automobile, volets roulants, enrouleur-dérouleur de store, portail électrique, ... Note : sur un lave-linge ou un sèche-linge, le tambour tourne bien dans les deux sens mais il n'y a pas à proprement parler variation de vitesse.

Mode de fonctionnement 2 quadrants I + II (réversible, type treuil ou levage)

Ce type de variateur utilise un convertisseur réversible 2 quadrants.

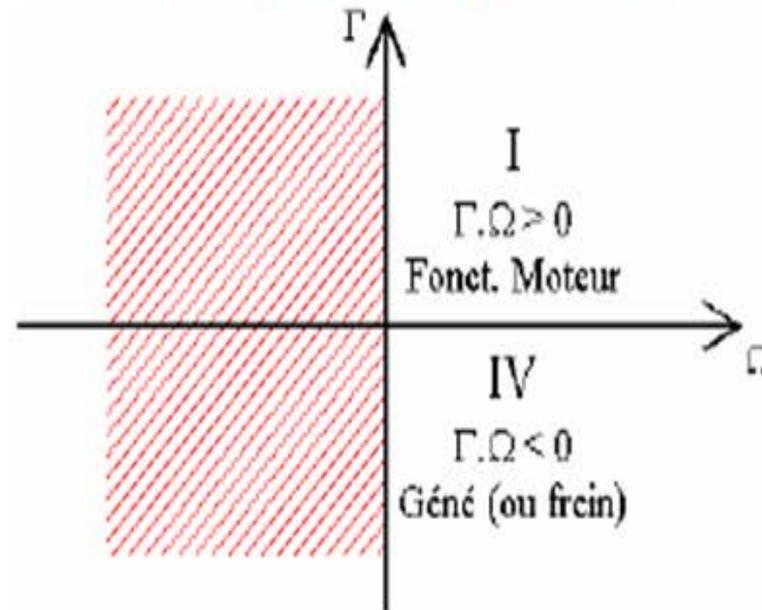
À l'arrêt, le couple résistant peut ne pas être nul (ex : MCC alimentée à flux et courant d'induit unidirectionnel mais avec inversion de tension d'induit).



Applications : **treuil, levage**,... On peut aussi parler du pompage-turbinage de l'eau pour le stockage (le plus souvent inter-saisonnier) de l'électricité.

Mode de fonctionnement 2 quadrants I + IV (réversible, type laminoir)

Ce type de fonctionnement correspond par exemple à l'entraînement d'un véhicule (transport unidirectionnel : **scooter électrique**, transport hectométrique unidirectionnel) par moteur électrique. Il faut pouvoir accélérer le véhicule puis le freiner électriquement. (ex : MCC alimentée à flux à tension unidirectionnel, le courant d'induit s'inversant comme le couple). **Je préfère l'exemple du laminoir.**



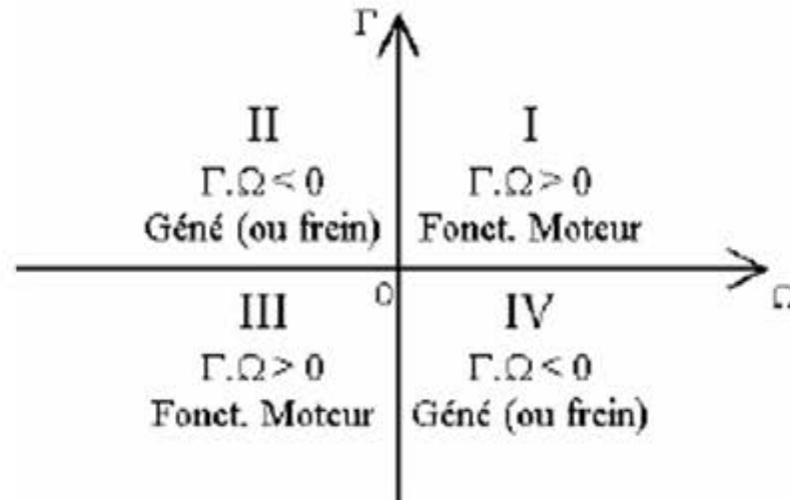
Applications : **scooter électrique, laminoir, dérouleuse, transport hectométrique,...**

Mode de fonctionnement 4 quadrants (réversible)

Mis à part l'inversion de signe des deux grandeurs couple et vitesse (en général à l'arrêt) des fonctionnements deux quadrants, on doit parfois choisir une véritable solution quatre quadrants où le passage d'un quadrant à l'autre peut avoir lieu n'importe où.

⇒ 1 quadrant + inversion mécanique ou électrique + frein mécanique ou
2 quadrants réversible + inversion mécanique ou électrique ou
4 quadrants pur.

C'est la solution la plus performante mais souvent la plus onéreuse.



Applications : **traction, robotique**,...

Modes de freinage

Freinage mécanique

Utilisation

- avec un convertisseur (ou une chaîne de convertisseurs) non-réversible(s) 1 quadrant ou 2 quadrants type I+III et un frein mécanique.
- pour des raisons de sécurité (freinage en l'absence d'alimentation)

 : usure (il faut changer les garnitures de freins, poussière)

 : pertes

 : échauffement (pertes à évacuer)

 : bruit acoustique.

 : dispositif peu onéreux mais il faut rajouter ce dispositif,

 : permet d'obtenir l'arrêt complet,

 : peut fonctionner même en l'absence d'alimentation.

Modes de freinage

Freinage électrique dissipatif

La machine fonctionne en génératrice sur résistance avec convertisseur de réglage (sur le côté puissance et/ou sur l'excitation s'il y a lieu).

Demande un convertisseur (ou une chaîne de convertisseurs) réversible(s).

Fonctionnellement identique au frein à courants de Foucault (mais c'est un autre dispositif).



: pertes



: échauffement (pertes à évacuer),



: freinage à l'arrêt impossible.



: dispositif peu onéreux (la machine existe, il y a une résistance à ajouter + son contrôle (contacteur, convertisseur,...)).



: pas d'usure,



: pas de bruit acoustique,



: réglage fin possible du freinage grâce à la commande électronique.

Modes de freinage

Freinage électrique récupératif

La machine fonctionne en génératrice. Le convertisseur (réversible) renvoie l'énergie à la source d'alimentation.

Demande un convertisseur (ou une chaîne de convertisseurs) totalement réversible(s).

☹️ : dispositif plus onéreux (globalement, c'est de passer de 1 ou 2 quadrants à 4 quadrants qui coûte, pas le freinage en lui-même puisque le convertisseur réversible existe déjà) mais fonctionnalités accrues,

☹️ : freinage à l'arrêt possible si alimentation électrique présente.

😊 : pas de pertes

😊 : pas d'usure,

😊 : pas de bruit acoustique,

😊 : réglage fin possible du freinage grâce à la commande électronique.

Exemple : chaîne "batterie d'accumulateurs - convertisseur statique réversible – machine (par exemple véhicule électrique autonome).

Modèle de la machine CC

Equations électriques

$$\begin{cases} E = k_{\max} \cdot \Omega \\ C_e = k_{\max} \cdot I_a \end{cases} \text{ Avec } k_{\max} = k \times \Phi_{\max} = cte$$

La tension V_a aux bornes de l'induit serait :

$$V_a = E + R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt}$$

Appliquons la transformée de Laplace sur ces équations :

$$\begin{cases} E(p) = k_{\max} \cdot \Omega(p) \\ C_e(p) = k_{\max} \cdot I_a(p) \\ V_a(p) = (R_a + L_a p) \cdot I_a(p) + E(p) \end{cases}$$

Equation mécanique

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega$$

Modèle de la machine CC

