



Document libre

Médiathèque e-



PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DE LA VARIATION DE VITESSE DES MACHINES ÉLECTRIQUES

par C. GLAIZE



Université
Montpellier II

Université Montpellier II
Laboratoire d'Électrotechnique de Montpellier

Localisation : Campus Saint-Priest – Bâtiment 2 - porte 139
860 Rue de Saint-Priest – MONTPELLIER

Adresse postale :
LEM – UM2 - CC 079 / Place Eugène Bataillon / F 34095 MONTPELLIER CEDEX 5
Tél : 04 67 14 34 17 - Fax : 04 67 04 21 30 - E-mail : glaize@univ-montp2.fr



IUT de Nîmes
Département GEII

AVANT-PROPOS

Le texte qui suit n'est pas un polycopié de cours destiné à des étudiants.

Ce sont plutôt les notes de cours d'un enseignant qui désire faire passer sa connaissance à ses étudiants et qui note l'articulation des parties entre-elles.

De plus, l'auteur sait le temps que l'on passe à dessiner des illustrations et écrire des formules.

Il propose de partager ce travail avec ses collègues.

C'est ainsi que, dans le cadre de la mutualisation des enseignements mis en place par la Médiathèque e-EEA du Club EEA, je serais très heureux que des collègues me fassent part de leurs remarques voire actualisent et améliorent ce texte qui deviendrait ainsi une œuvre collective.

Pour cela, je peux envoyer les sources du texte et des objets sur simple demande à glaize@univ-montp2.fr.

Ce cours se fait raisonnablement en 1h30.

SOMMAIRE

I. Intérêts de la variation de vitesse par convertisseur statique	4	VII. Modes de fonctionnement	13
I.1. Exemple illustratif : pompe pour débit variable	4	VII.1. Modes de fonctionnement 1 quadrant (non réversible)	13
I.2. Avantages	5	VII.1.a. Mode de fonctionnement 1 quadrant moteur	13
I.2.a. Au niveau de la machine	5	VII.1.b. Mode de fonctionnement 1 quadrant générateur	14
I.2.b. Au niveau de la charge	5	VII.2. Modes de fonctionnement 2 quadrants	15
II. Autres exemples d'utilisation	5	VII.2.a. Mode de fonctionnement 2 quadrants I + III (non réversible)	15
III. Le marché la variation de vitesse par convertisseur statique	6	VII.2.b. Mode de fonctionnement 2 quadrants I + II (réversible, type treuil ou levage)	16
IV. Architecture d'un variateur de vitesse	7	VII.2.c. Mode de fonctionnement 2 quadrants I + IV (réversible, type laminoir)	17
V. Modèle de la machine	8	VII.3. Mode de fonctionnement 4 quadrants (réversible)	18
VI. Plan couple-vitesse	9	VIII. Modes de freinage	19
VI.1. Description	9	VIII.1. Freinage mécanique	19
VI.2. Utilisation	10	VIII.2. Freinage électrique dissipatif	19
Exemple : Machine asynchrone	10	VIII.3. Freinage électrique récupératif	20
VI.3. Réversibilité	10	IX. Contrôles et limitations de grandeurs	21
VI.4. Point de fonctionnement	11		
VI.5. Stabilité du point de fonctionnement	12		
VI.6. Exemples	Erreur ! Signet non défini.		

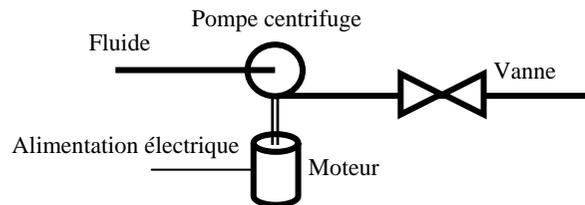
PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DE LA VARIATION DE VITESSE DES MACHINES ÉLECTRIQUES

L'objet de ce chapitre est de présenter les notions générales communes à toutes les machines utilisées en moteur et/ou en génératrice en vitesse variable.

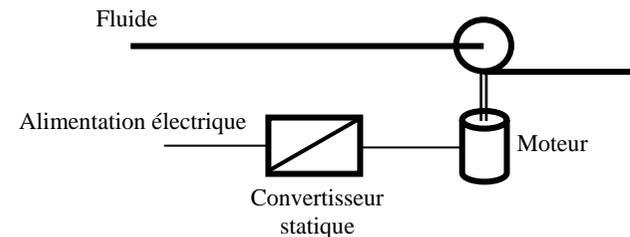
I. Intérêts de la variation de vitesse par convertisseur statique¹

Les machines électriques sont de plus en plus souvent utilisées en vitesse variable.

I.1. Exemple illustratif : pompe pour débit variable



Débit variable avec pertes de charge



Débit variable avec variateur de vitesse

¹ Pour compléter ce paragraphe, on pourra lire avec profit les pages 4 à 7 du livre de J. Bonal "Entraînements à vitesse variable, volume 1 édité en 1997 par TecDoc Lavoisier.

Dans un autre domaine, on pourrait parler de mettre le chauffage à fond et de réguler la température en ouvrant les fenêtres => gaspillage d'énergie.

I.2. Avantages

I.2.a. Au niveau de la machine

Initialement proposée pour faire des **économies d'énergie** (**diminution des pertes** propres, **élimination des systèmes de dissipation d'énergie** et des pertes associées),
la variation de vitesse des machines électriques permet aussi de **supprimer les surintensités de démarrage**,
de **faciliter le démarrage des charges à forte inertie** d'**obtenir un couple de démarrage supérieur au couple minimal sans avoir à surdimensionner le moteur en vue des seuls démarrage d'allonger la durée de vie du moteur** (par **élimination des démarrages brutaux**, **diminution de la vitesse de fonctionnement**, pertes plus faibles à couple et/ou vitesse réduits,...),
de **diminuer le bruit acoustique**,... (exemple de la pénétration de la vitesse variable en froid et climatisation : climatiseurs, réfrigérateurs, congélateurs (?),...)

I.2.b. Au niveau de la charge

Au niveau de la charge entraînée, l'intérêt est tout aussi important :
meilleure adaptation de la vitesse au travail à effectuer (par exemple, vitesse de coupe),
modification rapide de la vitesse et/ou du couple en fonction de la conduite du process,
suppression des à-coups de couple au démarrage ou en cas de défaut momentané du réseau.

II. Autres exemples d'utilisation

La variation de vitesse "continue" (par opposition au réglage discontinu de la vitesse comme, par exemple, le changement du nombre de paire de pôles d'une machine asynchrone) permet de régler aisément le débit d'une pompe ou d'un ventilateur, la vitesse de défilement d'une "feuille" de papier, d'une "tôle", d'un film plastique, la pression d'un gaz à la sortie d'un compresseur,...

III. Le marché la variation de vitesse par convertisseur statique²

En 1999, le marché français du variateur "pèse" 2 195 millions de F (335 millions d'euros). Au niveau européen, le marché est estimé à 8 360 MF (1 275 M€) et, au niveau mondial, à 25 080 MF (3 823 M€).

Ont été vendues par 31 entreprises (représentant 87% de ce marché) :

190 000 de variateurs de vitesse pour machines à courant alternatif dont 170 000 unités de $P < 10$ kW et 247 de $P > 300$ kW.

8 400 variateurs de vitesse pour machines à courant continu dont 4 300 unités de $P < 10$ kW et 220 de $P > 300$ kW.

La répartition des ventes entre les différents types de variateurs de vitesse et assimilés s'établit ainsi :

convertisseurs à courant alternatifs : 50% ;

contrôle de mouvement : 40 % ;

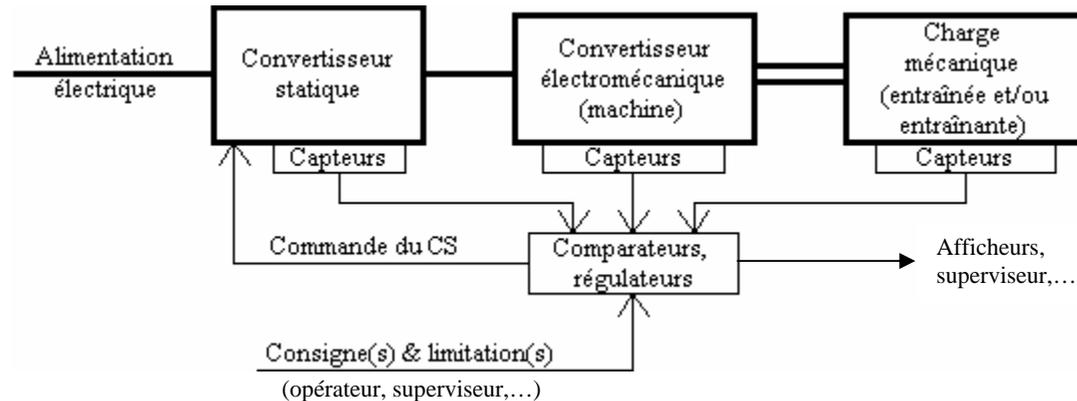
démarrateurs : 6% ;

convertisseurs à courant continu : 4%.

² Source : Gimelec (Groupement des industries de matériels d'équipement électrique et de l'électronique industrielle associée) dans J3E n°703 8/9.2000, pp. 8 et 9.

IV. Architecture d'un variateur de vitesse

Un variateur de vitesse fait intervenir une machine électrique, son alimentation électronique à partir d'une source d'alimentation, des capteurs, une régulation,...



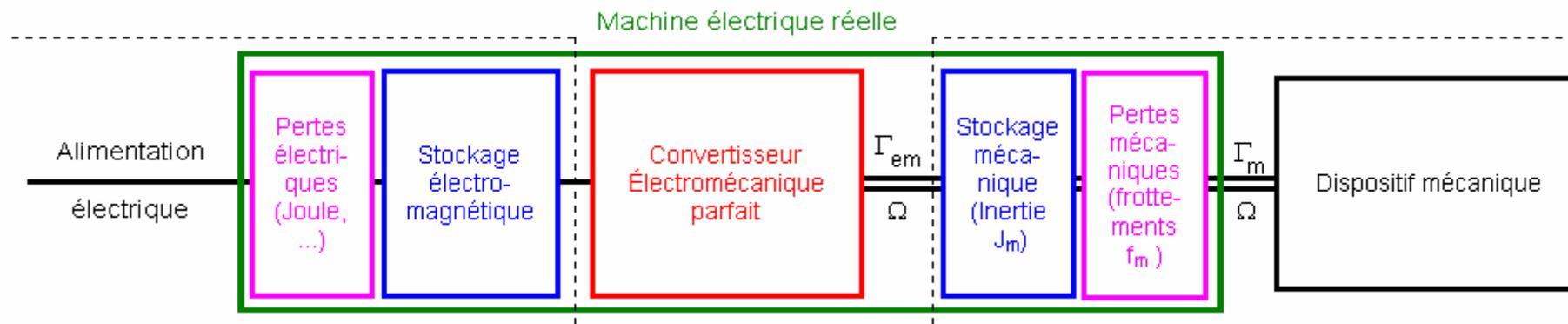
Remarque sur la présentation : contrairement à une représentation d'automaticien qui indique en entrée (à gauche) la consigne, ici, c'est la source d'énergie électrique qui est l'entrée.

Remarque sur l'étude présente : on **étudie ici essentiellement l'ensemble convertisseur-machine**. La machine elle-même a déjà été étudiée dans le cours sur les machines ; le convertisseur statique a déjà été étudié dans le cours d'électronique de puissance ; la boucle de régulation dans le cours d'automatique.

Cependant, il faut dire un mot de **l'agencement des différentes boucles** puisque, en général, on a plusieurs grandeurs à contrôler comme par exemple : courant(s), tension(s), vitesse de rotation, débit, pression, température,...

V. Modèle de la machine

Machine : terme générique pour moteur et génératrice.



Machine idéale + pertes reportées sur alimentation et charge.

Hypothèse : toutes les parties tournantes tournent à la même vitesse. Il y a une seule ligne d'arbre. Il n'y a ni (dé)multiplicateur, ni BV (boîte de vitesse).

Cela revient à reporter vers la charge l'inertie et les frottements propres (pertes mécaniques) à la machine.

- Rappeler :
- 1/ Convertisseur électromécanique parfait : $p_e = p_m$.
 - 2/ $p_m = \Gamma_m \cdot \Omega$.
 - 3/ $p_{em} = \Gamma_{em} \cdot \Omega$.

VI. Plan couple-vitesse

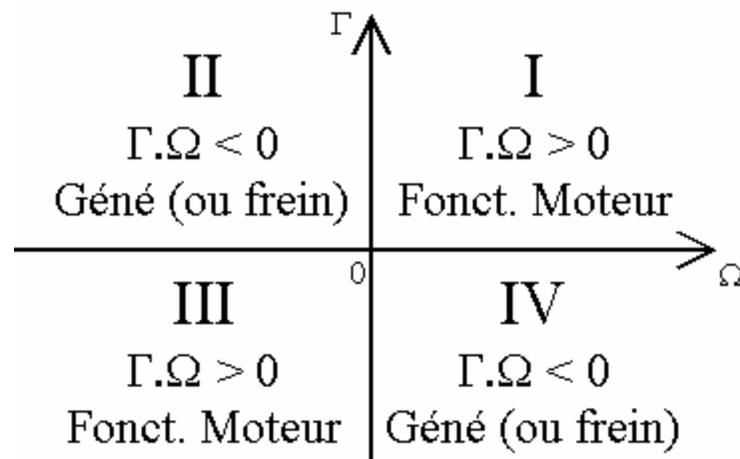
VI.1. Description

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.

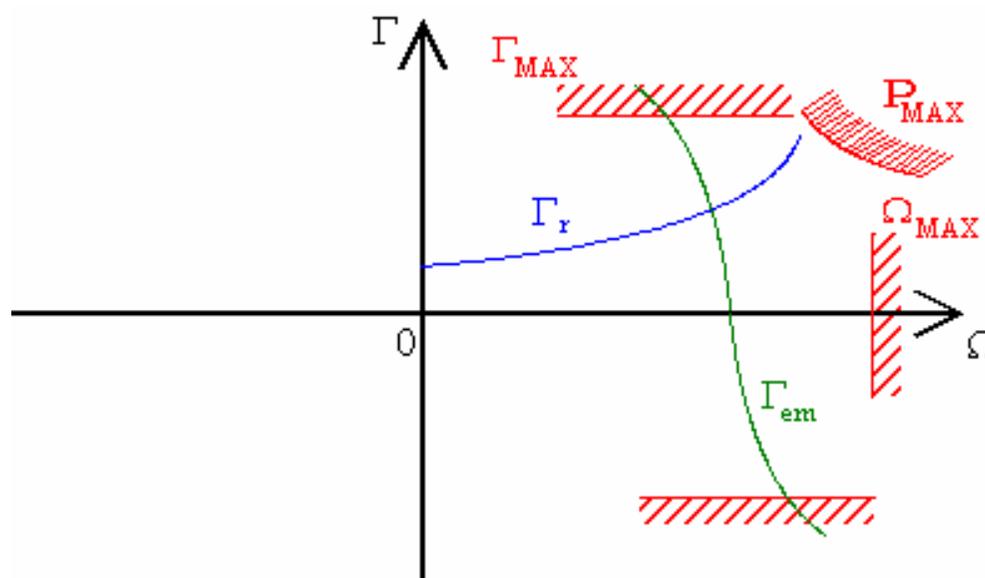
Les quadrants II et IV correspondent à une puissance reçue par la machine. Elle fonctionne alors en frein pour la charge (ex : machine asynchrone tournant en sens inverse du champ tournant). Elle peut aussi renvoyer l'énergie au réseau. C'est le fonctionnement en génératrice (ex la même machine fonctionnant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



VI.2. Utilisation

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.

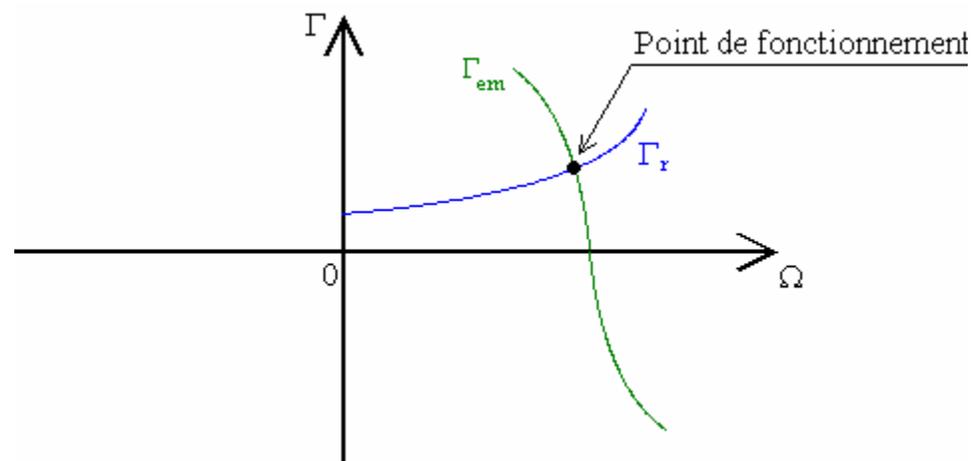
La machine asynchrone fonctionne en génératrice hypersynchrone. Elle transforme l'énergie mécanique en énergie électrique qu'elle renvoie au réseau.

VI.3. Réversibilité

VI.4. 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.*

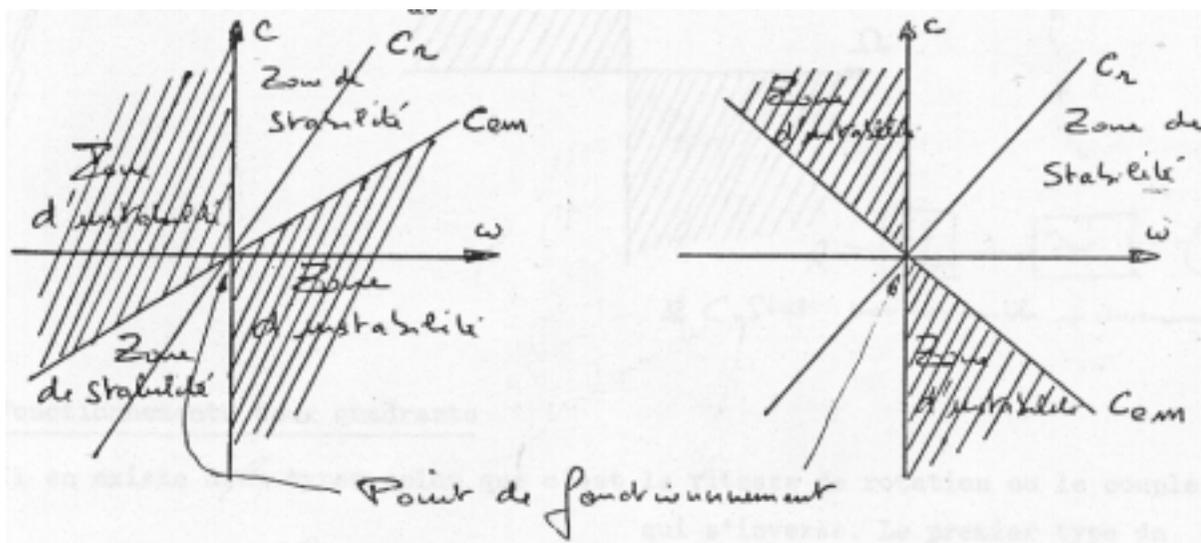
VI.5. Stabilité du point de fonctionnement

Il faut ensuite déterminer si le point de fonctionnement trouvé est stable ou instable. Parler d'équilibres stable et instable (exemple de la craie, meilleur que le stylo car elle peut rester en position instable).

Pour que le point de fonctionnement soit stable, il faut et il suffit que la pente du couple résistant par rapport à la vitesse soit plus grande que la pente du couple moteur par rapport à la vitesse. À une augmentation de la vitesse correspondra alors un $J \frac{d\Omega}{dt}$ négatif, donc une diminution de la vitesse de rotation et un retour à l'équilibre.

La stabilité sera d'autant meilleure (à inertie donnée) que l'écart entre les pentes sera plus important.

Les 4 cas. Insister sur le fait que l'on est autour d'un point de fonctionnement. Bof.



VII. 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.

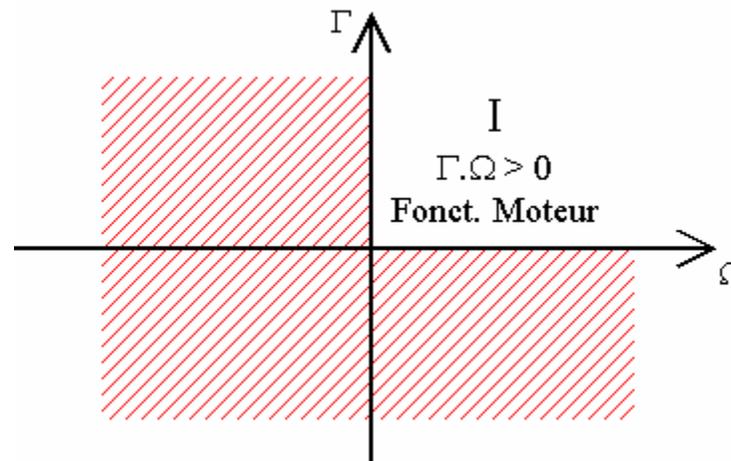
Suivant la nature de l'entraînement, on peut désirer ou non que la machine puisse freiner la charge et/ou inverse le sens de marche. Ce sont les fonctionnements 1, 2 ou 4 quadrants.

VII.1. Modes de fonctionnement 1 quadrant (non réversible)

VII.1.a. 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.

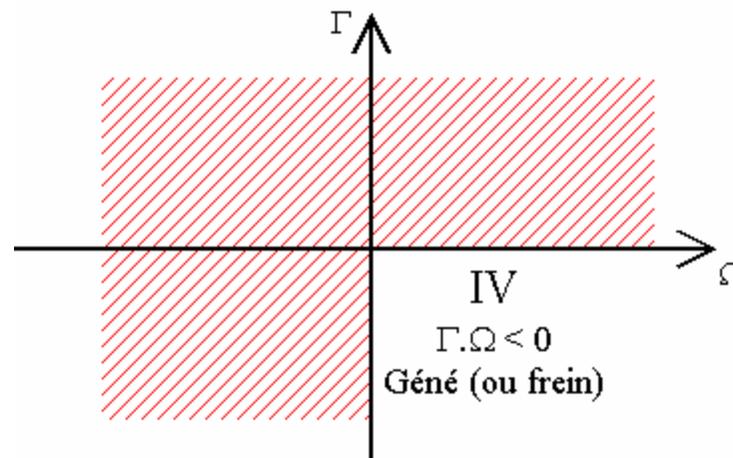
Ce type de variateur utilise un convertisseur non-réversible.



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

VII.1.b. Mode de fonctionnement 1 quadrant générateur

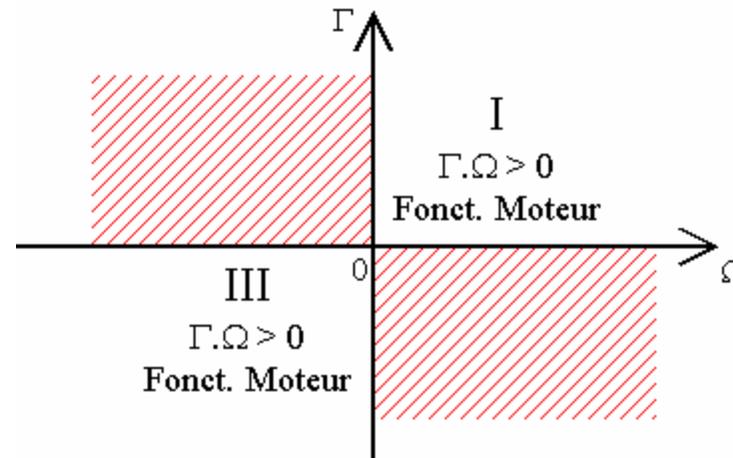
Seul le fonctionnement en génératrice de la machine est ici possible. La machine ne peut démarrer de manière électrique. Elle doit être entraînée par le côté mécanique depuis la vitesse nulle (problème avec certaines éoliennes).



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),...

VII.2. Modes de fonctionnement 2 quadrants**VII.2.a. 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.

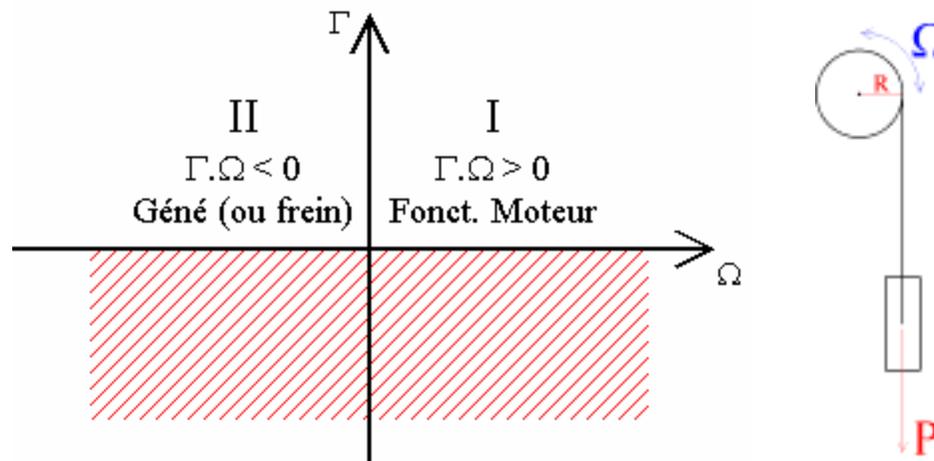


Applications : visseuse-dévisseuse électrique, lève-vitre électrique et réglage de rétroviseur d'automobile, volets roulants, enrouleur-dérouleur de store, portail électrique,... Note : sur un lave-linge ou un sèche-linge, le tambour tourne bien dans les deux sens mais il n'y a pas à proprement parler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

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

Ce type de variateur utilise un convertisseur réversible 2 quadrants.

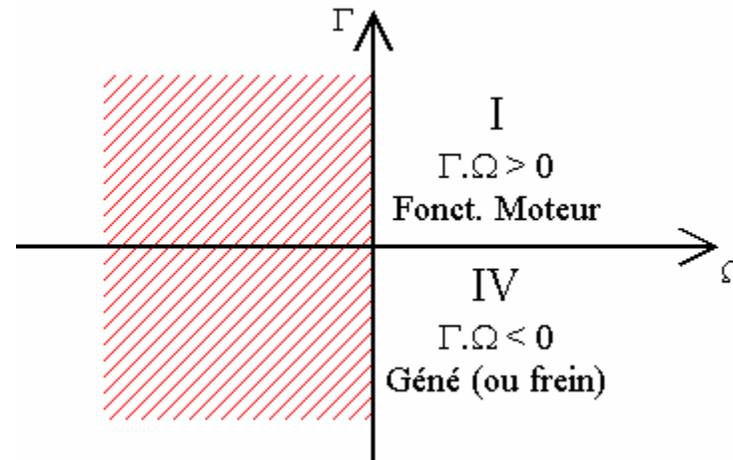
À l'arrêt, le couple résistant peut ne pas être nul (ex : MCC alimentée à flux et courant d'induit unidirectionnel mais avec inversion de tension d'induit).



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

VII.2.c. 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.**



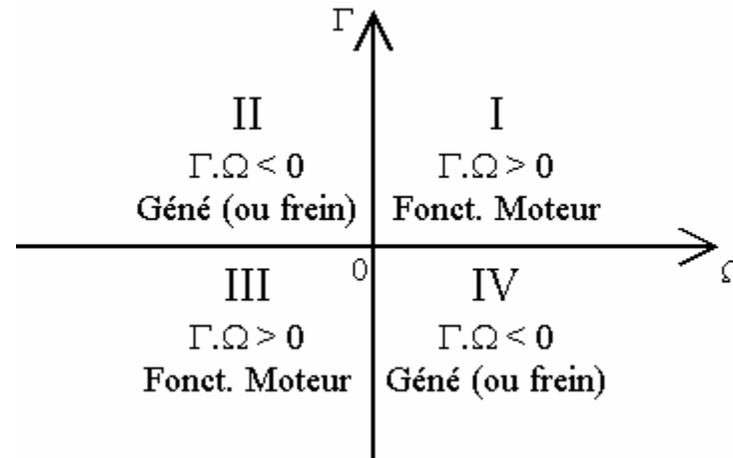
Applications : **scooter électrique**, **laminoir**, **dériveuse**, **transport hectométrique**,...

VII.3. 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,...

VIII. Modes de freinage

VIII.1. 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.

VIII.2. 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.

Si on utilise une cascade redresseur à diodes (non-réversible) – convertisseur réversible, la récupération sur l'alimentation est impossible. On utilise une résistance commutée quand U_- dépasse un seuil. Cette tension de seuil est choisie au-delà de la tension maximale fournie par le pont de diodes afin qu'il se déconnecte automatiquement. Le condensateur évite une montée trop brutale de la tension.

Le convertisseur permet de doser finement la puissance de freinage.

VIII.3. 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.

Si redresseur à diodes (suivi d'un convertisseur réversible) et une seule machine, voir cas précédent (freinage dissipatif).

Si redresseur à diodes et **plusieurs machines** : une seule source non-réversible et un seul bus de puissance pour l'ensemble (faire schéma). Application en robotique, en traction électrique (métro, tramway,...).

On utilise conjointement le dispositif dissipatif au cas où la production d'énergie serait plus forte que la demande ou qu'elle risque d'être défailante. Remarque la commande doit être secourue. La batterie correspondante ne peut pas emmagasiner l'énergie de la partie puissance.

Remarque :

En cas de coupure de l'alimentation générale sur une ligne de process utilisant des moteurs synchronisés³ (train de papeterie ou trains de laminoir, par exemple), on peut utiliser l'énergie de l'ensemble des inerties de rotation ($\sum \frac{1}{2} J \cdot \Omega^2$) pour obtenir un ralentissement synchrone de l'ensemble des machines de la ligne et ainsi éviter les dégâts et le nettoyage correspondant, générateur d'arrêt de production et de coût d'immobilisation.

IX. Contrôles et limitations de grandeurs

Cependant, il faut dire un mot de l'agencement des différentes boucles puisque, en général, on a plusieurs grandeurs à contrôler (à asservir ou à limiter) comme par exemple : courant(s), tension(s), vitesse de rotation, couple, débit, pression, température,...

Introduire et représenter les boucles en cascade, boucles en parallèle.

³ Tous les moteurs ne tournent pas à la même vitesse et/ou n'entraînent pas tous la même inertie mais ils sont liés par une vitesse linéaire et/ou par des relations de couple.