

Chapitre 5:
Autopilotage de la MS
Moteurs Brushless
Moteurs monophasés

A. AZYAT

ENSAT

Département MI

Bibliographie

- **Principes d'électrotechnique**, Max Marty et al.
- **Alimentation des machines synchrones**, Michel LAJOIE-MAZENC et Philippe VIAROUGE.
- **Variation de vitesse des machines à courant alternatif**, Philippe Ladoux

Objectifs

- Comprendre la nécessité de l'autopilotage,

et le principe de la commande de vitesse des machines autopilotées à commutation électronique.

- Avoir un regard sur les moteurs brushless et monophasés

Alimentations par convertisseur statique

Réglage de vitesse des machines à CA par fréquence variable

- les convertisseurs statiques permettaient d'alimenter à fréquence variable des machines à courant alternatif,

de toutes les machines, qu'elles soient:

- synchrones
- ou asynchrones

pour obtenir une variation de vitesse par une solution élégante et contrairement aux machines à courant continu, sans limitation de principe sur les puissances et vitesses de rotation.

- Ces convertisseurs statiques à fréquence variable devaient s'adapter d'une part:
 - aux sources d'énergie électrique disponibles,
 - et d'autre part aux alimentations des machines à courant alternatif.

Alimentations par convertisseur statique

Réglage de vitesse des machines à CA par fréquence variable

Alimentation des machines à courants alternatifs

Elles sont habituellement alimentées de deux manières distinctes :

- l'alimentation «**en tension**» pour laquelle des tensions sinusoïdales sont imposées aux bornes de la machine;
- l'alimentation «**en courant**» pour laquelle des courants sinusoïdaux sont imposés au niveau des enroulements.

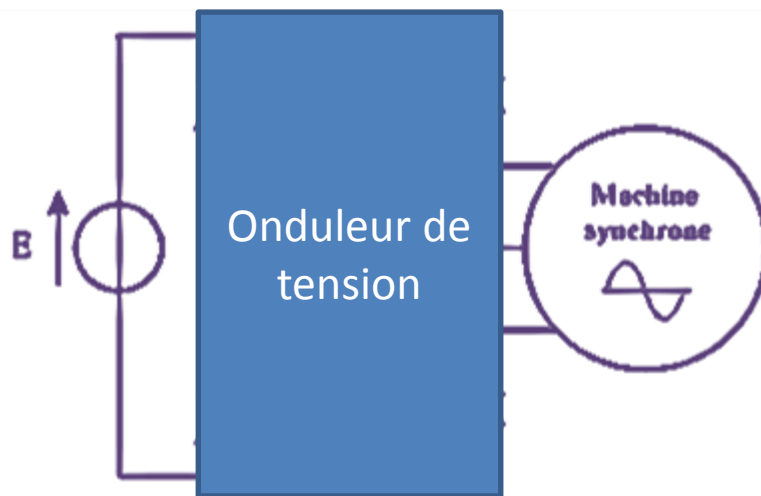
Alimentations par convertisseur statique

Réglage de vitesse des machines à CA par fréquence variable

Alimentation par une tension continue

•- elle se fait par un onduleur:

Convertisseur directe continu-alternatif

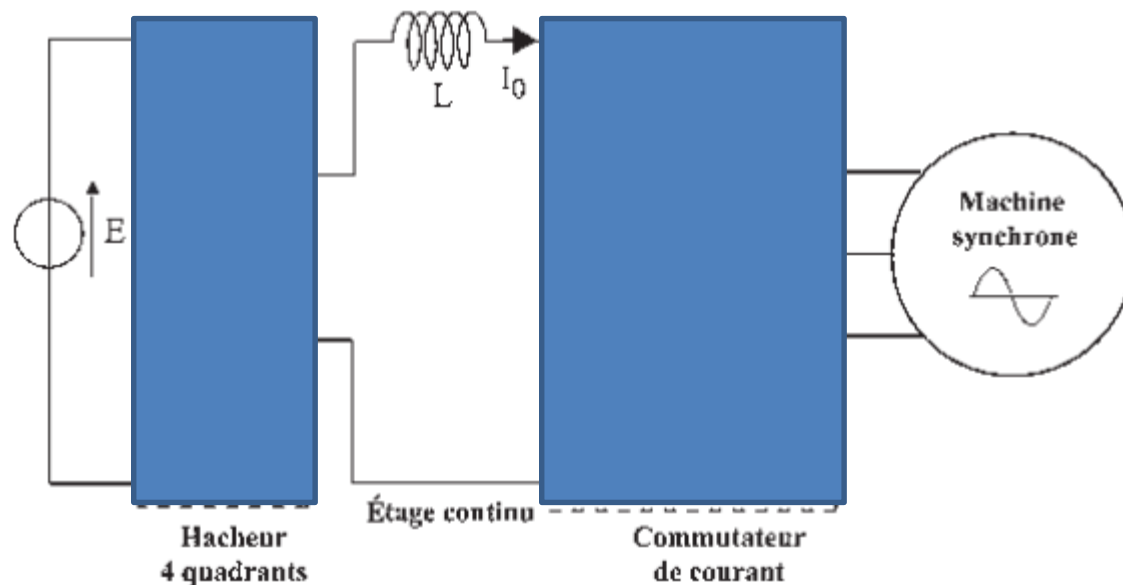


Alimentations par convertisseur statique

Réglage de vitesse des machines à CA par fréquence variable

Alimentation par une tension continue

b- elle se fait par une alimentation en courant par commutateur de courant: **convertisseur indirecte continu-continu-alternatif**

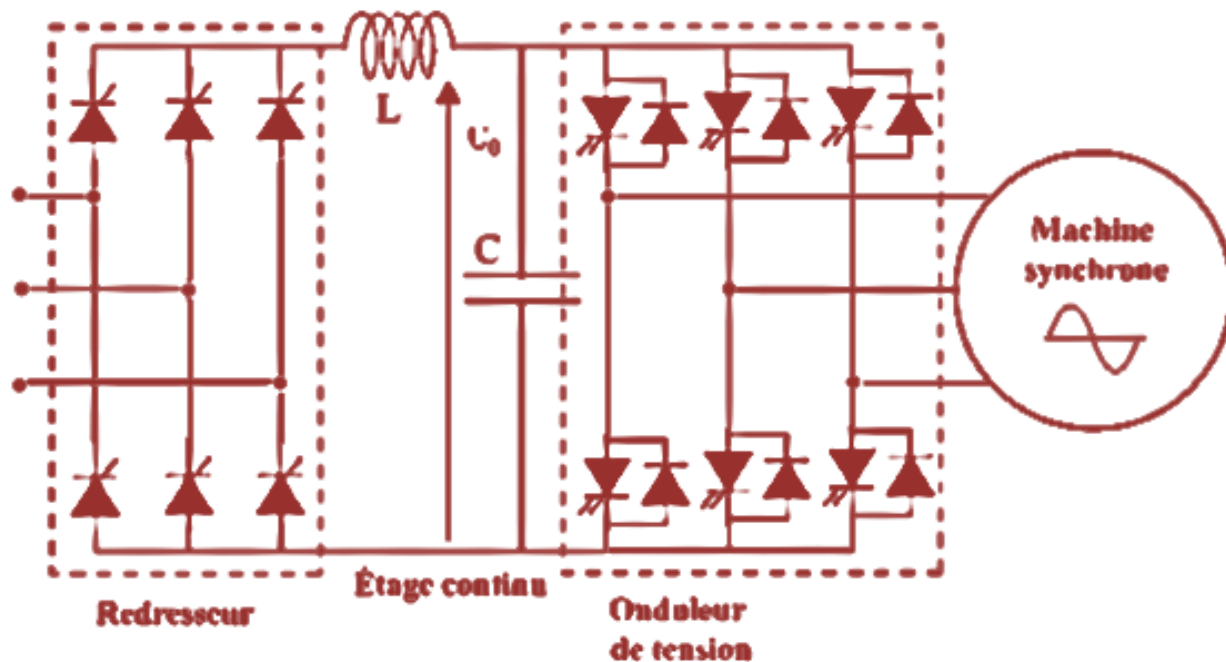


Alimentations par convertisseur statique

Réglage de vitesse des machines à CA par fréquence variable

Alimentation par une tension alternative de fréquence fixe

Conversion indirect alternatif-continu-alternatif:



Alimentations par convertisseur statique

Réglage de vitesse des machines à CA par fréquence variable

Alimentation par une tension alternative de fréquence fixe

- par conversion directe en transformant les tensions alternatives de fréquence fixe:
 - en tensions alternatives de fréquence variable par l'utilisation d'un cycloconvertisseur pour l'alimentation « en tension »;
 - en *courant alternatif de fréquence variable* par l'utilisation d'un cyclocommutateur pour l'alimentation en « courant ».

Alimentations par convertisseur statique

Réglage de vitesse des machines à CA par fréquence variable

Conclusion:

- À l'aide de convertisseurs statiques, il est donc possible, dans tous les cas, d'élaborer avec la précision désirée des alimentations sinusoïdales, *En tension ou en courant* : triphasées, directes ou indirectes, de fréquence, amplitude et phase réglables.
- Ces alimentations sinusoïdales, réglables, permettent d'obtenir avec les machines à CA des fonctionnements en moteur à vitesse variable.

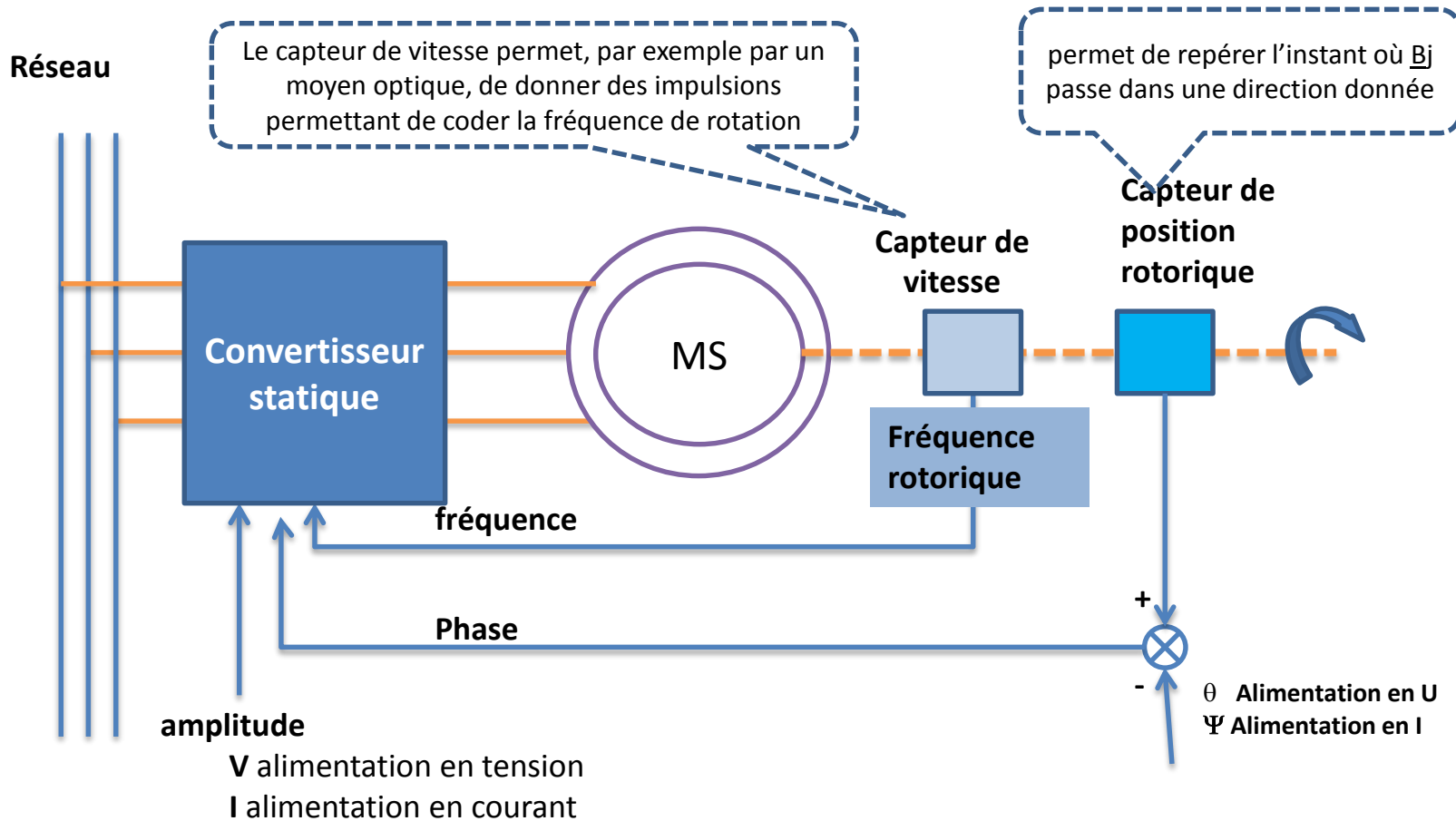
Autopilotages des MS par commutation électronique

- L'autopilotage consiste à imposer la fréquence d'alimentation de la machine pour qu'elle soit toujours égale à la fréquence de rotation de la roue polaire.
- En conséquence, il ne peut plus y avoir de décrochage mais le réglage de la fréquence *n'est plus disponible pour l'opérateur*.
- L'autopilotage de la fréquence est un asservissement particulier.

Autopilotages des MS par commutation électronique

- Proposer un schéma synoptique pour l'autopilotage en indiquant la disposition d'un convertisseur statique et les capteurs

Principe d'autopilotage



Principe d'autopilotage

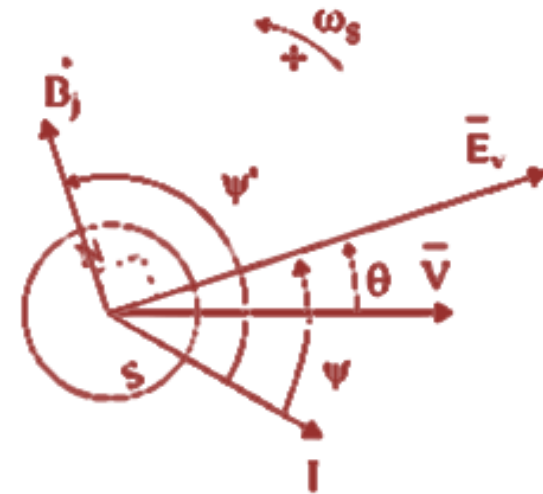
- Réglage de la fréquence

Il se fait par l'autopilotage sans intervention de l'opérateur.

Principe d'autopilotage

Réglage de la phase

- Il imposera le type de fonctionnement.
- ❖ Pour une alimentation en tension, la tension imposée aux bornes de la machine sera déphasée AR par rapport à \underline{B}_j , d'un angle électrique $\theta + \pi/2$;
- ❖ pour une alimentation en courant, le courant I imposé aux enroulements sera déphasé AR par rapport à \underline{B}_j , d'un angle électrique $\Psi' = \Psi + \pi/2$
- Pour chaque point de fonctionnement en régime permanent, l'opérateur imposera θ dans une alimentation en tension, et Ψ' dans une alimentation en courant.



Principe d'autopilotage

Réglage de l'amplitude

- Ce réglage impose le moment du couple;

- Alimentation en tension

$$C = -(3/\sqrt{2} \cdot MJ/L\omega_s) \mathbf{V} \sin\theta,$$

- Alimentation en courant

$$C_{em} = -3/\sqrt{2} \cdot M \cdot J \cdot \mathbf{I} \cdot \sin\Psi',$$

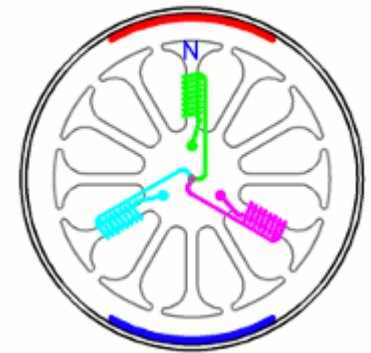
Moteurs brushless

- C'est un moteur synchrone autopiloté à commutation électronique.
- alimenté en courant dont le rotor est constitué d'aimants permanents.
- Le flux rotorique ϕ_j est d'amplitude constante.
Par la commutation électronique avec $\Psi=\pi$, \underline{i} est toujours en AV de $\pi/2$ par rapport à $\underline{\phi}_j$.
- Le couple est toujours maximal, proportionnel à I .
Comme le moteur à courant continu, le moteur Brushless est un **moteur synchrone autopiloté alimenté en courant**.
- La première différence provient de la commutation. Ce moteur comparé à un moteur à courant continu n'aurait que quelques lames au collecteur.

- **Défaut principal des moteurs à courant continu est la présence des balais,**
 - engendrent des frottements,
 - des parasites,
 - et limitent la durée de vie du moteur par leur usure.
- **Pour éviter tous ces problèmes on utilise des moteurs brushless, ou moteurs sans balais.**

Composition du moteur brushless

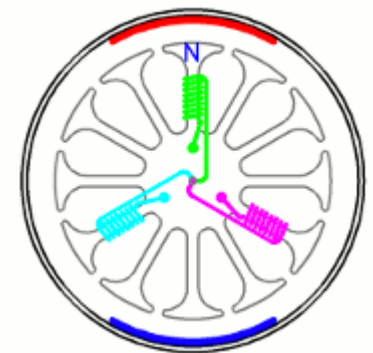
- Un moteur brushless comporte les mêmes éléments qu'un moteur à courant continu, excepté le collecteur, mais l'emplacement des bobines et des aimants permanents sont inversés.



- Le rotor est composé d'un ou plusieurs aimants permanents, et le stator de plusieurs bobinages.

Fonctionnement du moteur brushless

- Les bobines sont alimentées de façon séquentielle.
- Cela crée un champ magnétique tournant à la même fréquence que les tensions d'alimentation.
- L'aimant permanent du rotor cherche à chaque instant à s'orienter dans le sens du champ.
- Pour que le moteur brushless tourne, les tensions d'alimentation doivent être adaptées continuellement pour que le champ reste en avance sur la p rotor, et ainsi créer un couple moteur.



Les différents types de moteurs brushless

- Selon les applications, il existe une grande variété de moteurs brushless avec des caractéristiques de couples, vitesses, inertie différentes en fonction de leurs constitutions.
- **Moteurs brushless outrunner**
- **Moteurs brushless inrunner**

Les différents types de moteurs brushless

Moteurs brushless outrunner

- le rotor est autour du stator.
- Cette configuration est intéressante en termes de couple moteur, car les aimants sont disposés sur un diamètre important, ce qui crée un bras de levier très intéressant.
- De plus, cette disposition permet de placer facilement plusieurs séries d'aimants (jusqu'à 32 pôles sur certains moteurs brushless outrunners) et de bobines.
- Les bobines sont toujours câblées par groupes de 3, et les aimants sont soit collés par groupes de 2



Les différents types de moteurs brushless

Moteurs brushless outrunner

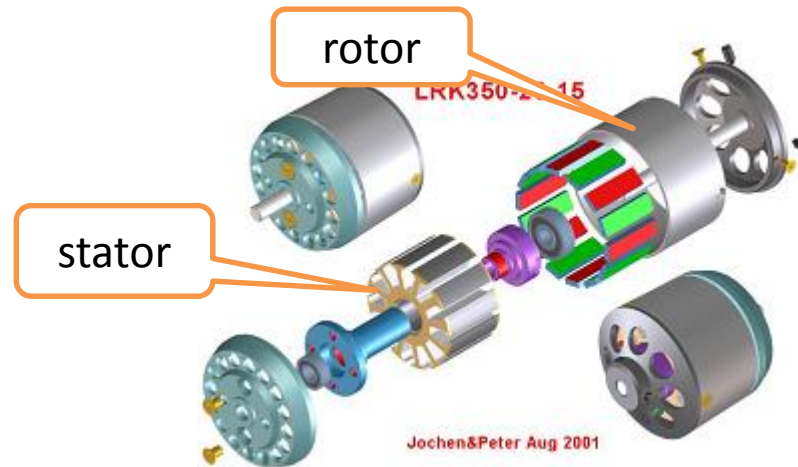
- Comme pour un moteur pas à pas, les moteurs brushless outrunners comprenant plus de 3 bobines et 2 pôles ne font qu'une fraction de tour lorsque le champ a tourné de 180° .
- Leur fréquence de rotation est donc plus faible mais le couple très élevé.
- Les principales applications des moteurs brushless outrunners sont les suivantes : ventilateurs,
 - moteurs de disques durs,
 - CD-ROM,
 - moteurs de vélos électriques,
 - bateaux ou avions radio commandés...



Les différents types de moteurs brushless

Moteurs brushless outrunner

- Exemple



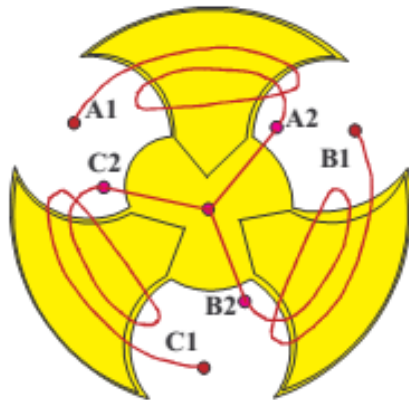
Le stator, matériau à haute perméabilité magnétique, souvent formé de 9 ou 12 dents porte les bobines.



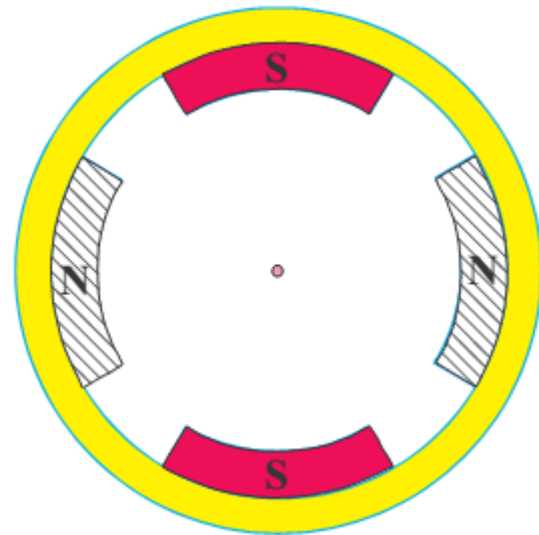
- Les fils de cuivres sur les dents sont reliés en série pour ne former que 3 bobines.
- Par exemple, dans le cas de 9 enroulements sur 9 dents:
Enroulements 1, 4, 7 forment la bobines L1
Enroulements 2, 5, 8 forment la bobines L2 .
Enroulements 3, 6, 9 forment la bobines L3

Les différents types de moteurs brushless

- Moteurs brushless outrunner



Un stator à trois dents et 3 bobines connectées en étoile.



Un rotor à 4 aimants

Moteurs brushless inrunner

- Contrairement au type précédent, les moteurs brushless inrunners ont le rotor à l'intérieur du stator.
- Ils n'ont généralement qu'une seule paire de pôles sur le rotor, et 3 bobines au stator.
- les vitesses atteintes par ce type de moteur sont beaucoup plus élevées , jusqu'à 7700tr/min/



Moteurs brushless inrunner

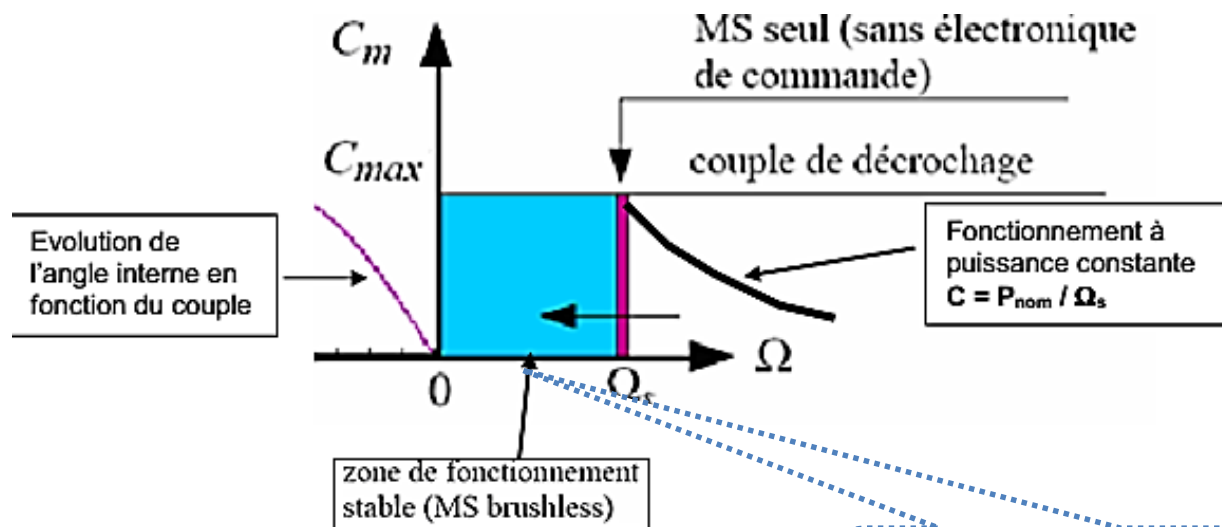
- La gestion électronique de la commutation est plus simple car le rotor tourne à la même fréquence que le champ magnétique.
- Le couple des moteurs brushless inrunners est plus faible que pour un outrunner car les aimants sont sur un diamètre plus petit à taille de moteur égale.
- Ce type de moteur brushless est très utilisé dans l'industrie car il se rapproche beaucoup d'un moteur à courant continu à balais et collecteur.



Caractéristique électromécanique $C = f(\Omega)$

- **IMPORTANT :**
 - Une machine synchrone ne peut être raccordée directement sur le réseau 50 Hz sans dispositif de démarrage.
 - Soit il est nécessaire de mettre une machine entraînant son rotor pour la synchroniser en augmentant la vitesse mécanique Ω ,
 - soit un onduleur avec autopilotage permet la montée progressive de f donc de $\Omega = 2\pi f/p = \omega/p$

- L'usage d'une électronique complète (MS autopilotée) permet le démarrage et le fonctionnement dans un large domaine de couple et vitesse en mode moteur ou générateur.



Lorsque le couple résistant augmente (plus de puissance mécanique demandée en moteur, ou plus de puissance électrique débitée en générateur), l'angle interne θ augmente également.

De 0 à Ω_s , la vitesse est ajustée par la fréquence, le couple par l'angle interne

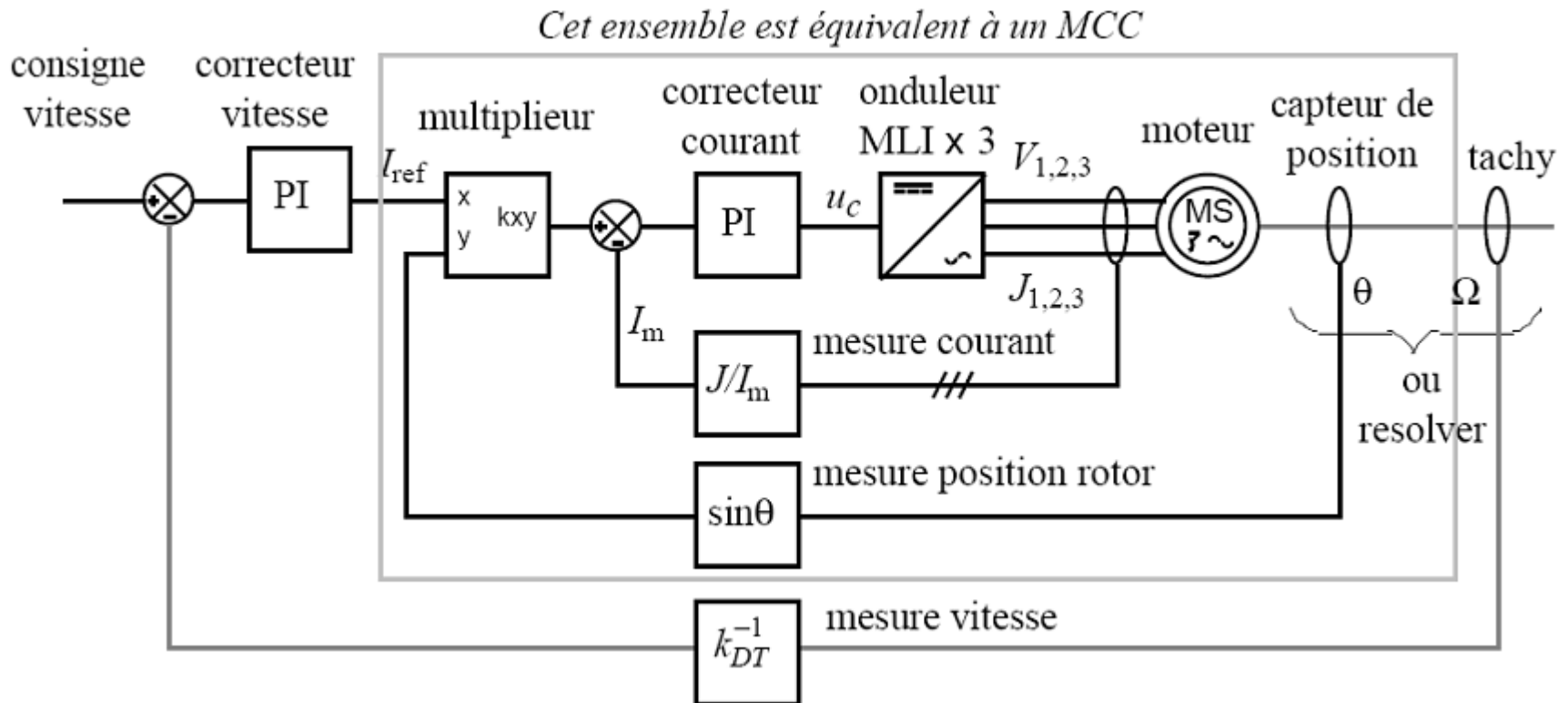
Au-delà de Ω_s , la vitesse peut augmenter, mais la puissance demeure constante à P nominale.

DEVELOPPEMENTS DE LA COMMANDE

- Un même ensemble (commande + machine synchrone) peut désormais assurer :
 - Un pilotage en vitesse;
 - Un pilotage en position;
 - Un comportement pas à pas (positionnement boucle ouverte);
 - Un comportement boîte de vitesse électrique;

DEVELOPPEMENTS DE LA COMMANDE

- L'ajout d'une régulation de vitesse, donne une précision améliorée vis-à-vis d'une MCC, grâce aux propriétés du MS.



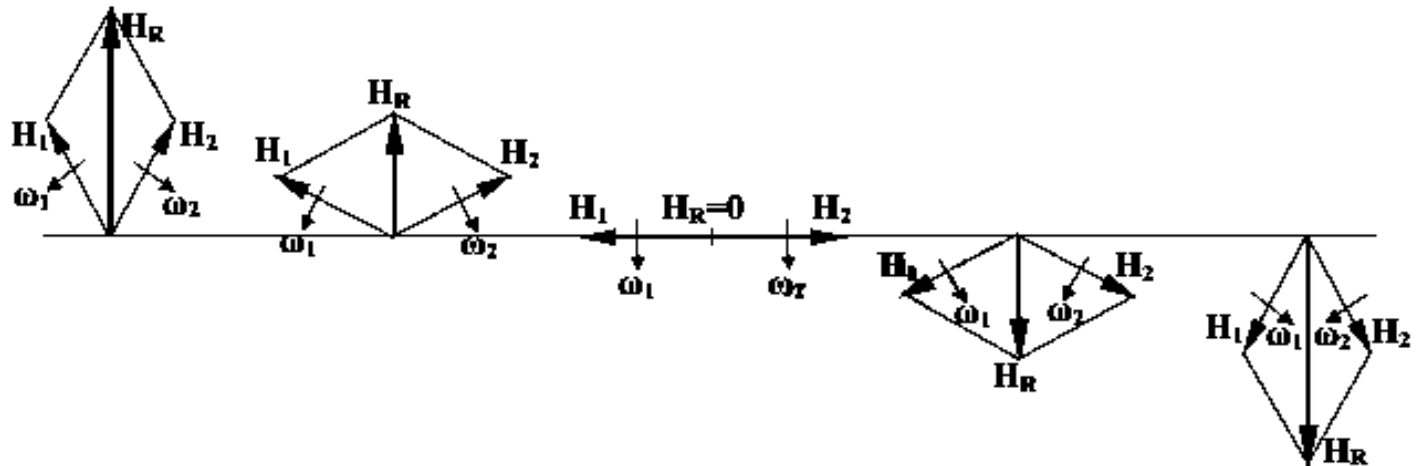
MOTEURS MONOPHASES

- Moteur asynchrone monophasé
- Nécessité:
 - Moteur d'usage domestique ou petit industriel en l'absence de triphasé.
- Principe:
 - Le stator à 3 bobinages du moteur asynchrone triphasé produit un champ tournant.
 - Par contre un stator monophasé produit un champ alternatif, c'est-à-dire de direction constante mais variant en grandeur et en sens.

MOTEURS MONOPHASES

Moteur asynchrone monophasé

- Ce champ alternatif peut se décomposer en deux champs tournants en sens inverse l'un de l'autre.
- La démonstration est plus simple : nous partons de 2 champs tournants en sens inverses et en les additionnant à chaque instant, la figure ci-dessous démontre qu'ils sont équivalents à un champ alternatif non tournant (fixe).

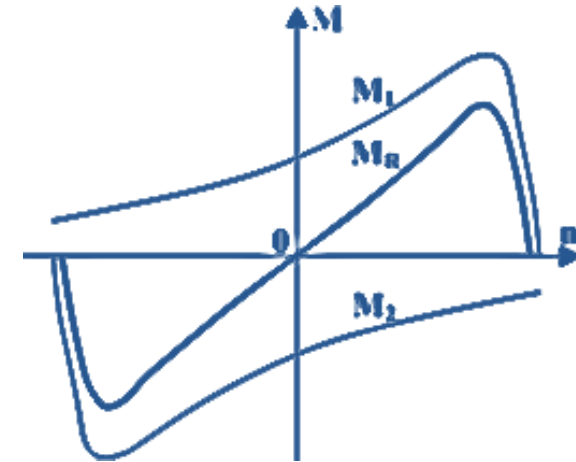


MOTEURS MONOPHASES

Moteur asynchrone monophasé

Graphes du couple en fonction du glissement

- Nous connaissons l'allure $M = f(g)$ d'un rotor soumis à un champ tournant (moteur triphasé).
- Ici, nous avons 2 champs tournants et donc 2 caractéristiques: $M_1 = f(n)$ et $M_2 = f(n)$ qui est la même image mais inversée (Couple et vitesse négatifs).
Composons graphiquement ces 2 caractéristiques pour obtenir l'allure donnée par le champ alternatif fixe.



- *Le couple résultant est nul à vitesse nulle c'est à dire au démarrage. Le moteur ne peut démarrer seul.*
- *Par contre, si nous lançons le moteur dans un sens ou dans l'autre, on trouve un couple moteur qui permet le démarrage dans ce sens.*
- *Il faut donc lancer ce moteur suffisamment que pour obtenir un couple moteur supérieur au couple résistant de la machine entraînée.*
- *Si le moteur ne démarre pas et qu'il est mal protégé, il risque de brûler.*

MOTEURS MONOPHASES

Démarrage automatique-Phase auxiliaire

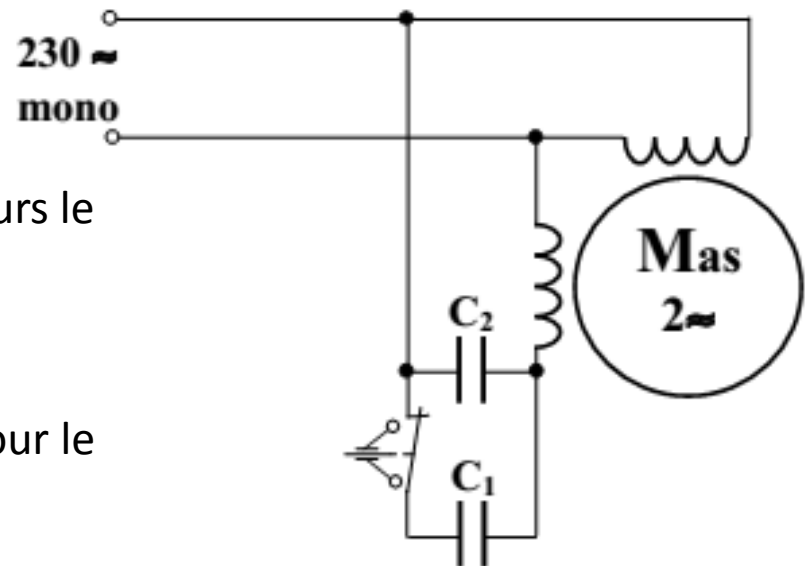
- Un enroulement supplémentaire (auxiliaire) est placé de telle manière qu'il produise un champ déphasé électriquement et géométriquement de 90° .
- Pour cela, le courant est déphasé par un condensateur de démarrage, ce qui renforce l'un des champs tournants et déforce l'autre.
- Le champ résultant donne un couple au démarrage

MOTEURS MONOPHASES

Démarrage automatique-Phase auxiliaire

- Dès que le moteur atteint sa vitesse ,un interrupteur centrifuge débranche la phase auxiliaire car le condensateur n'est pas prévu pour un régime permanent.
- L'inversion de sens de marche est obtenue en permutant les connexions principales ou auxiliaires s'elles sont sorties;

Puisque la phase auxiliaire améliore toujours le couple et le $\cos\varphi$ (condensateur) ,nous pouvons envisager de la laisser insérée en permanence (C2) avec toutefois un gros condensateur en supplément (C1) juste pour le démarrage



MOTEURS MONOPHASES

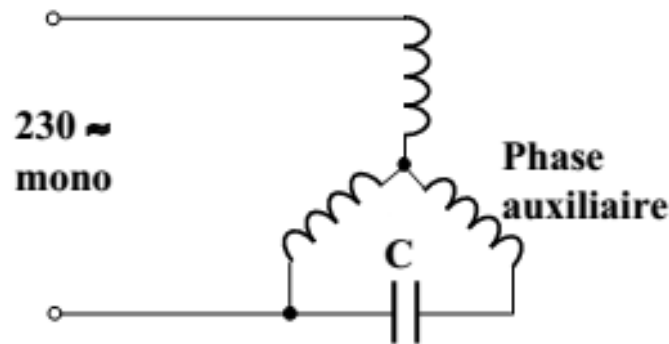
moteur asynchrone triphasé alimenté en monophasé

- **Est-ce qu'il est possible de démarrer un moteur 3~ en monophasé?**
- **Si oui, proposer un montage**

MOTEURS MONOPHASES

moteur asynchrone triphasé alimenté en monophasé

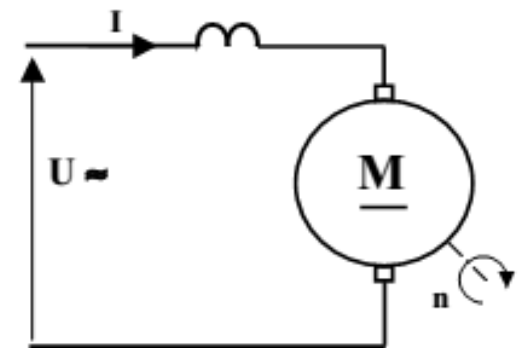
- Au départ, il s'agit d'un moteur triphasé, deux des enroulements sont pris comme principaux, le troisième servant de phase auxiliaire.
- Les déphasages géométriques (120°) ne correspondent pas tout à fait aux déphasages électriques, mais le fonctionnement en est satisfaisant.
- Par contre, ils peuvent être remis être remis sans frais en triphasé lorsque le client disposera de cette tension.



MOTEURS MONOPHASES

MOTEUR UNIVERSEL (série monophasé)

- C'est un moteur à courant continu à inducteur série, mais alimenté en alternatif.
- Alimenté en alternatif, un moteur série devrait tourner, mais les pertes fer sont telles qu'il tourne très mal (mauvais couple, rendement et facteur de puissance),
- **Modifications tendant à améliorer le rendement:**
 - Feuilletter le stator car le champ alternatif provoque des pertes par courant de Foucault.
 - Diminuer le nombre de spires de l'inducteur et augmenter le nombre de conducteurs de l'induit de manière à diminuer la valeur de la réactance $L\omega$ tout en maintenant la force ($F = \beta \cdot I \cdot I$)
 - En effet, en alternatif, si la réactance du bobinage induit est élevée, le courant et le couple diminuent ($M = k \cdot \Phi \cdot I$).
 - De même la valeur de ces réactances donne un mauvais facteur de puissance.



MOTEURS MONOPHASES

MOTEUR UNIVERSEL (série monophasé)

Moteur série monophasé compensé

- Le grand nombre de conducteurs de l'induit (rotor) est la cause d'une grande réaction transversale d'induit et d'une mauvaise commutation (voir moteur à courant continu).
- Il est donc utile de placer un enroulement de compensation logé dans les encoches de l'inducteur comme pour un moteur à courant continu. Cet enroulement est alimenté en série ou mis en court-circuit.

MOTEURS MONOPHASES

MOTEUR UNIVERSEL (série monophasé)

Emploi

- **Non compensés**, ces moteurs sont limités à environ 500W dans des applications où le rendement est peu important (chignole -appareils électroménagers etc.)
- **Compensés**, ils peuvent être de plus grande puissance et sont appliqués lorsqu'un grand couple est nécessaire au démarrage ou lorsqu'un réglage simple de vitesse est nécessaire (variation de la tension).
 - Exemple: traction -tondeuse à gazon etc.