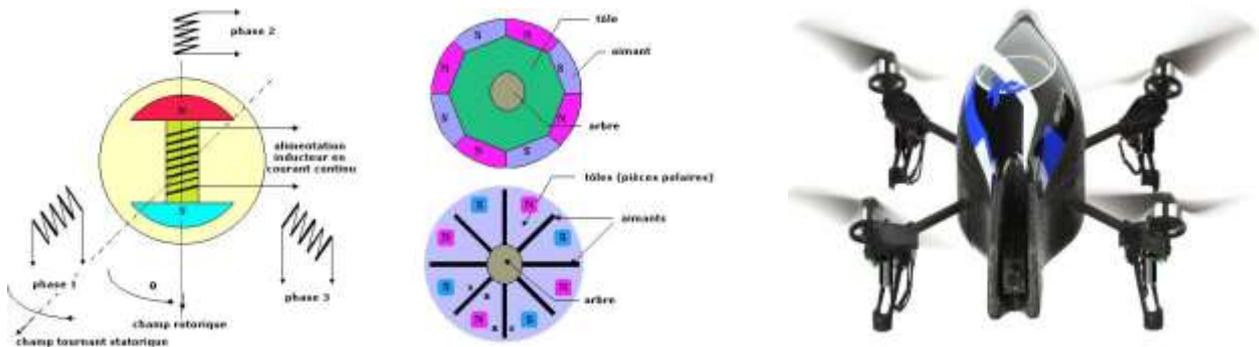


Cycle 5: Etude et modélisation des chaînes de conversion électromécanique

Chapitre 2 : Moteurs synchrones Variateurs de vitesse (onduleurs)



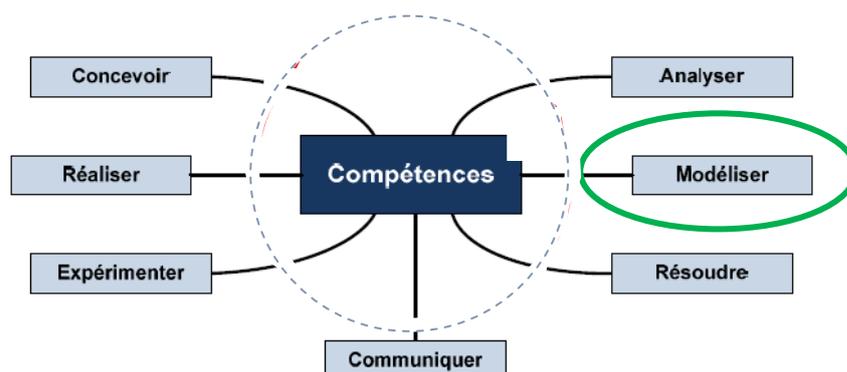
Problématique

Au sein d'un système complexe pluri-technologique, l'ingénieur doit être capable de caractériser l'association convertisseur statique et machine en vue de sa modélisation puis sa conception. Quels sont les modèles des machines CC, **synchrone** et asynchrone ? Comment piloter ces machines en couple et en vitesse ?

Savoir

B. Modéliser

- Caractériser le comportement de l'association convertisseur-machine et charge
- Caractériser la réversibilité de la chaîne d'énergie
- Identifier les quadrants de fonctionnement d'une chaîne d'énergie
- Définir les modèles de connaissance et comportement des machines à CC, asynchrone et **synchrone**



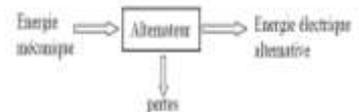
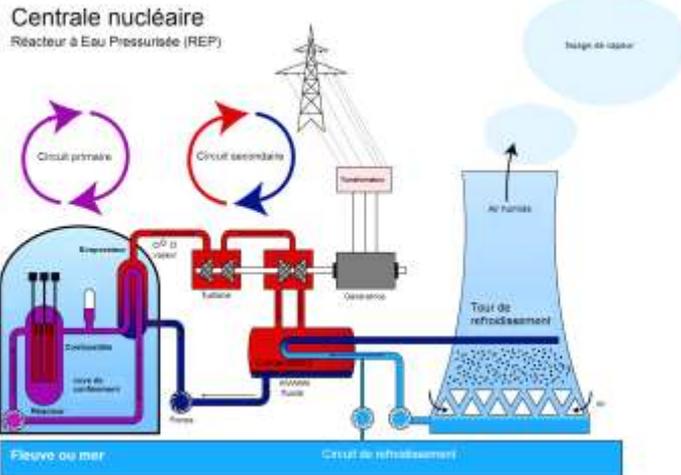


Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur synchrone

1. Machines synchrones : ne pas confondre moteur et alternateur ...

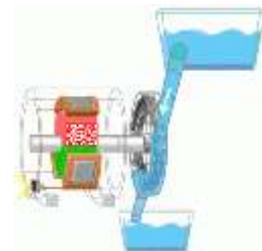
Une **machine synchrone** est une machine électrique qui peut :

- soit **produire un** dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation du rotor : c'est un fonctionnement en « **génératrice** ». L'.....est un exemple de machine synchrone utilisée en génératrice.



Alternateur centrale thermique 200MW

L'alternateur est aussi présent dans les groupes électrogènes, sous capot voiture, dans avions, barrages...



- ou de **produire un** dont les valeurs dépendent du champ magnétique tournant et donc du pilotage de la machine. C'est un



Moteur synchrone Mitsubishi IEMV



Moteur synchrone 5W lecteur DVD



TGV Atlantique : 8 moteurs autopilotés de 1100KW par rame



Toyota Prius : moteur triphasé synchrone 50kW



En CPGE PT seul le moteur synchrone est au programme, pas l'alternateur.

2. Moteurs synchrones : les avantages et inconvénients

Au-delà de quelques kilowatts, les machines synchrones sont généralement des machines ... Les avantages et inconvénients du moteur synchrone sont repris ci-dessous :

(+)

- la vitesse du moteur est constante quelle que soit la charge
pas de glissement = synchrone
rendement >90%, fiable
très adapté aux motorisations embarquées car pas rotor bobiné donc léger (bon rapport poids/puissance)

- Excellente
Excellent (> 90%).
Faible niveau sonore.
Couple à l'arrêt (utilisation en positionnement).

(-)

- s'il n'est pas associé à un variateur de vitesse (onduleur), il a des
il peut décrocher en cas de forte charge (pas intéressant au niveau des ascenseurs nécessitant un couple fort).
ils sont couteux

Les puissances installées pour les moteurs synchrones dépassent rarement quelques dizaines de MW.

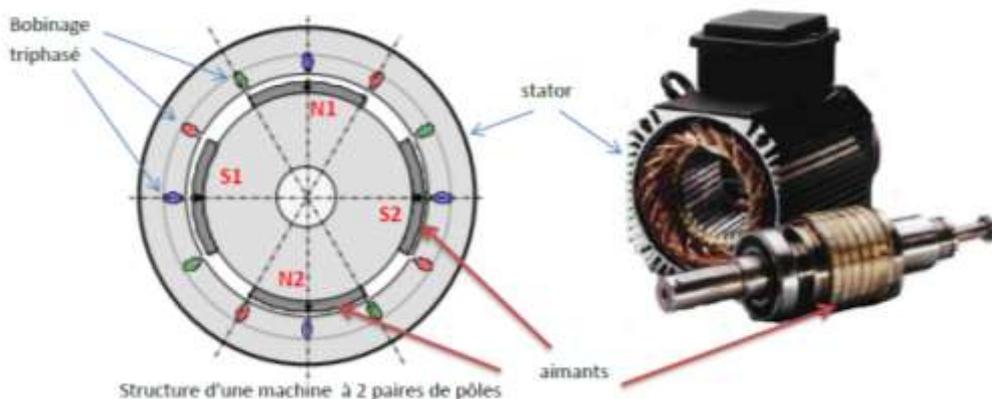
Pendant longtemps, ce moteur fût relativement peu utilisé en raison de sa difficulté à réguler sa vitesse. Ce problème est maintenant résolu grâce au progrès de l'électronique de puissance et des ... qui lui sont associés.

Les moteurs synchrones sont très souvent employés en ... (ou on peut les appeler ...) : ... et dans les machines à commande numérique lorsqu'il est nécessaire de contrôler précisément leur vitesse de rotation. Ils prennent la place des moteurs à courant continu car leur réalisation est plus simple.

3. Structure des MS

- Le stator :

Le stator est habituellement l'induit (siège de la transformation de puissance). Le stator est constitué d'un ... découpé en ...



- Le rotor :

Le rotor est souvent constitué ... (sans balais) qui créent le champ magnétique. S'il n'y a pas d'aimants, alors le rotor est bobiné et alimenté (ex : ZOE de Renault)



Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur synchrone

2 champs sont en présence :

a) le champ..... produit par le **stator alimenté en courant alternatif triphasé** est un champ, dont les caractéristiques sont les suivantes :

$$\Omega_{S/O} = \frac{\omega}{p} = \Omega_{R/O} \text{ en rd/s}$$

$$n_{S/O} = \frac{f}{p} = n_{R/O} \text{ en tr/s}$$

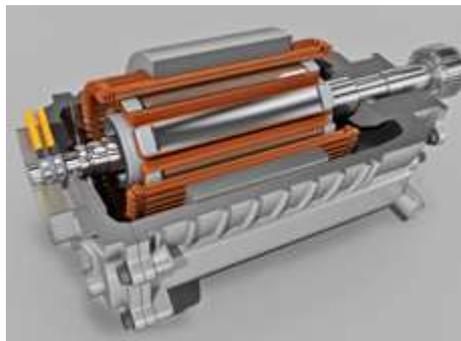
$$\omega = 2\pi \cdot f \quad / \quad \omega = 2\pi \cdot p \cdot n_s$$

f [Hz] = fréquence du courant ; p = nb de paires de pôles ;

b) le champ ... produit par les p aimants du rotor. Celui-ci va alors s'aligner avec le champ tournant. Le rotor tourne ainsi à la même vitesse que le champ tournant.



Le des champs magnétiques induit et inducteur impose une procédure spécifique de démarrage. Un moteur synchrone ne peut démarrer directement à pleine tension depuis le réseau de fréquence 50Hz (*car le rotor a une vitesse nulle au démarrage*). Pour une alimentation directe en 50 Hz, la solution consiste à utiliser un **onduleur** (système électronique recréant un système de tension triphasé de fréquence et d'amplitude voulu) .



Moteur synchrone à rotor bobiné Renault Zoé – 70kW

4. Symboles





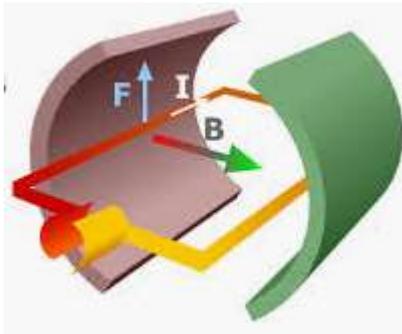
Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur synchrone

5. Quelques rappels

.....: le flux magnétique sur une section est la somme du champ B sur la surface S de la section :



..... : la force de Laplace est la force électromagnétique qu'exerce un champ magnétique sur un conducteur parcouru par un courant. Elle s'exerce donc lorsqu'un aimant et un objet traversé par un courant électrique sont mis en relation.



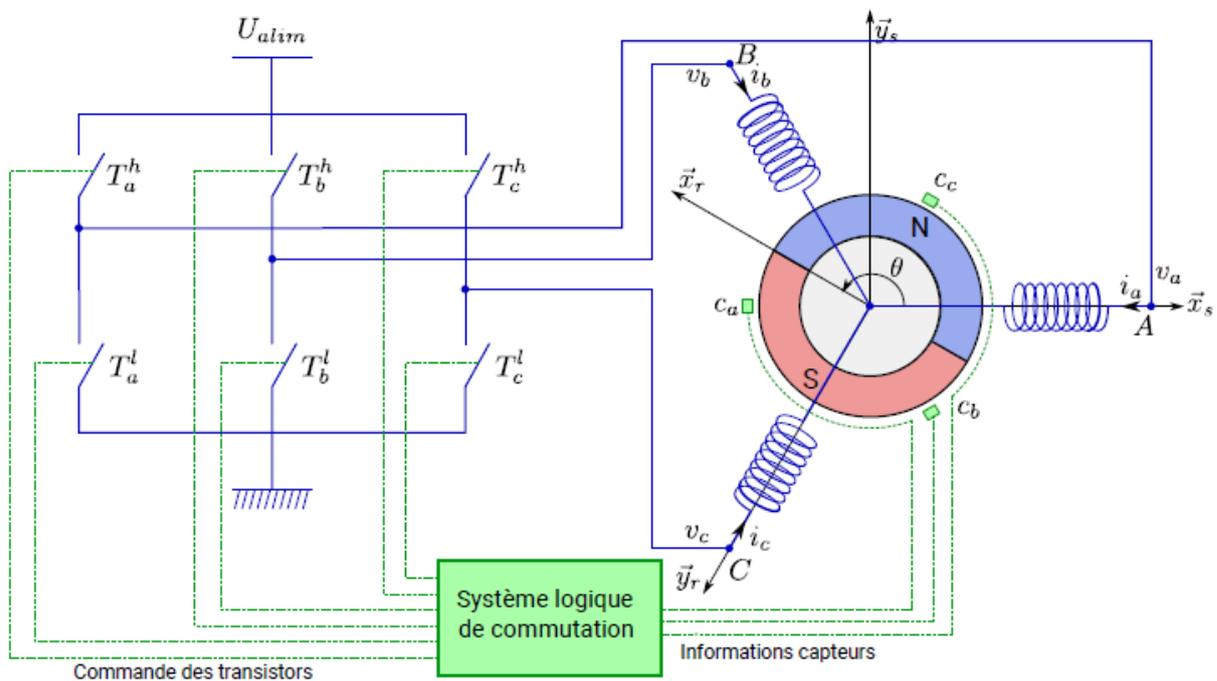
..... : c'est la force induite dans un bobinage fermé placé dans un champ magnétique. Elle est proportionnelle à la variation au cours du temps du flux magnétique qui entre dans le circuit (loi de Faraday).



Chaque bobine (du stator) est soumise à un flux magnétique variable. Une tension alternative sinusoïdale $e(t)$ (*fem induite*) est créée aux bornes de chaque enroulement de N spires du stator.

6. Principe de fonctionnement du moteur synchrone

Le **moteur synchrone (sans balais)** fonctionne à partir de **trois sources de tensions**, fournies par un onduleur, et permettant de générer un champ magnétique tournant. Le rotor, généralement équipé d'un aimant permanent, tend à suivre le champ magnétique tournant. Voici **l'architecture du moteur et de son onduleur**.

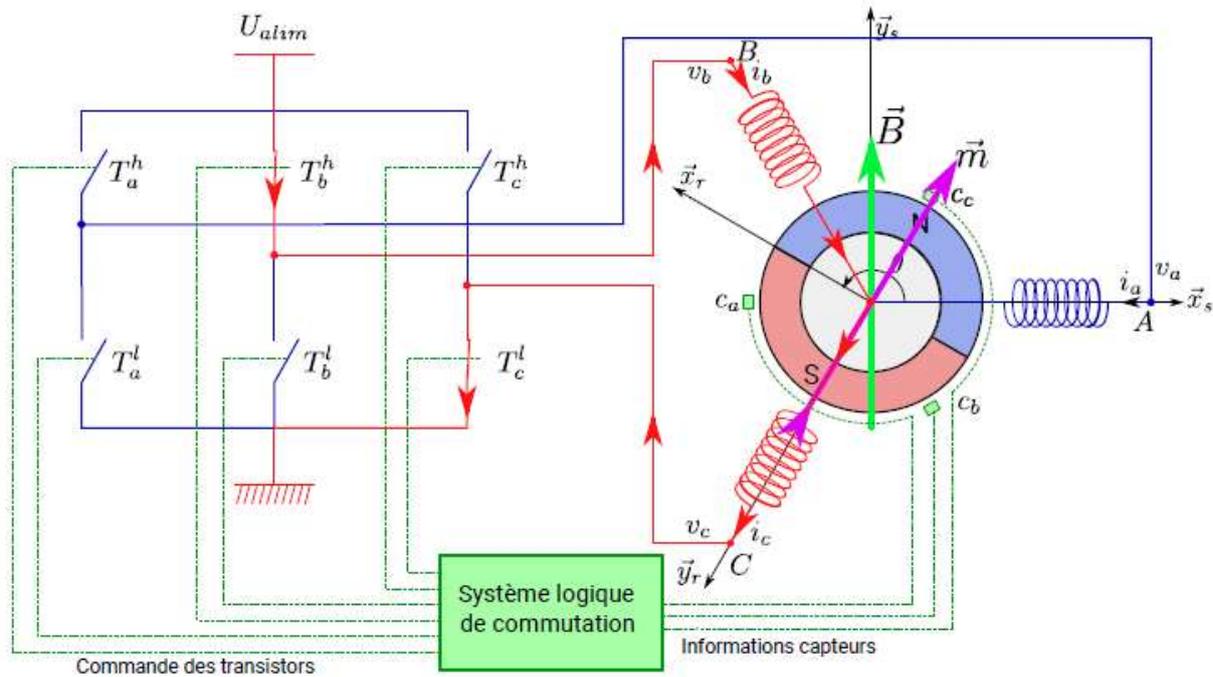




Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur synchrone

Dans le cas simple du moteur synchrone, sont reliées respectivement à la, et une phase n'est pas connectée.

Prenons l'exemple de la figure ci-après, la phase A n'est pas reliée, la phase B est reliée à la tension d'alimentation et la phase C est reliée à la masse. Un courant parcourt les bobines de B vers C et génère un champ magnétique statorique \vec{B} dans le moteur dirigé suivant y_s . Le rotor supporte un aimant dont le moment magnétique \vec{m} , orienté du sud vers le nord, tend à s'aligner avec le champ magnétique statorique en tournant dans le sens trigonométrique.



Dès que le rotor s'approche de y_s , la commutation sera modifiée pour faire circuler le courant de B vers A, le champ magnétique statorique \vec{B} tourne de, de façon à attirer le rotor et poursuivre la rotation dans le sens trigonométrique.

L'angle ζ entre \vec{m} et \vec{B} conduit à un :

Le couple est maxi lorsque les 2 champs (ζ) sont à 90° . Si la charge entraînée oppose un couple résistant supérieur, le moteur

Remarque sur l'onduleur :

Pour commander le moteur de façon progressive, par exemple pour réaliser un asservissement, il faut pouvoir régler le niveau de tension. Cette opération est classiquement réalisée par un onduleur commandé par une modulation à largeur d'impulsion (MLI ou PWM) via les 3 ponts (cf dernier chapitre)

Alimentation triphasée en étoile:

L'alimentation triphasée consiste en trois tensions sinusoïdales de même amplitude, de même fréquence et déphasées les unes par rapport aux autres.

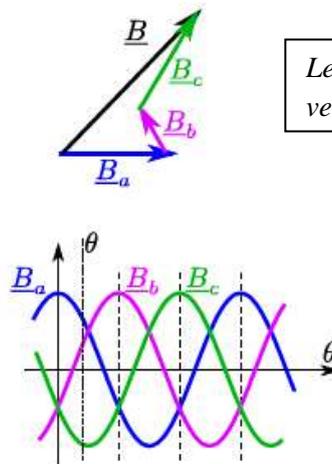
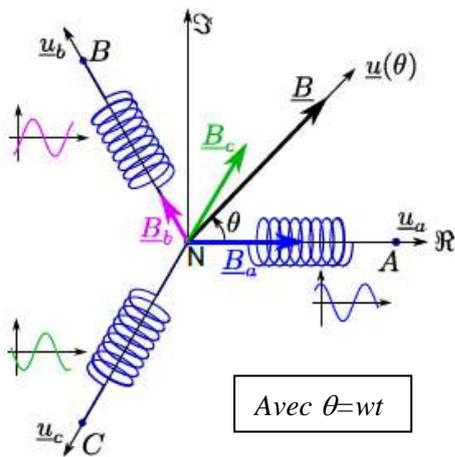
Les trois bobines (en triphasé) sont réparties à 120° et génèrent trois champs magnétiques sinusoïdaux :



$$B_a(t) = B_0 \cos \omega t$$

$$B_b(t) = B_0 \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$B_c(t) = B_0 \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$$



Le champ B total est égal à la somme vectorielle des 3 champs Bi

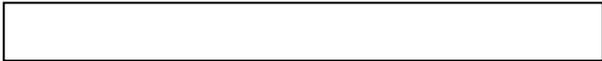
7. Schéma monophasé équivalent ramené au stator

Le modèle s'applique aux machines à aimants en surface et à celles à rotor bobiné à pôles lisses. Les pertes joules et ferromagnétiques sont négligées, toutes les grandeurs sont supposées sinusoïdales.

7.1. Expression de la par phase

Un enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une f.é.m. $e(t)$ de La valeur efficace d'une tension alternative, symbolisée par V_{eff} , est une valeur équivalente à une tension continue qui produit la même quantité de puissance ($V_{eff} = \dots$)

- E: f.é.m. induite (V)
- K: coefficient de Kapp (caractéristique de la machine)
- N: nombre de conducteurs d'une phase de la machine (1 spire = 2 conducteurs)
- ϕ : flux maximum à travers un enroulement (Wb)
- f: fréquence du courant statorique
- p: nombre de paires de pôles
- n_s : vitesse de rotation ($tr.s^{-1}$)

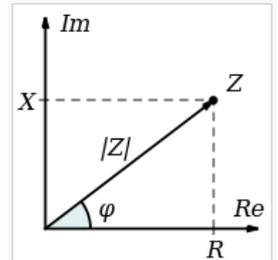


En triphasé, le stator comporte trois enroulements ou phases. On obtient trois f.é.m. $e_1(t)$, $e_2(t)$ et $e_3(t)$ de même valeur efficace E et déphasées de $2\pi/3$.



Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur synchrone

Dans le cas d'un **moteur Brushless**, ou d'un moteur synchrone à aimants permanents, le flux Φ est constant, la fém induite sera donc proportionnelle à la vitesse de rotation :

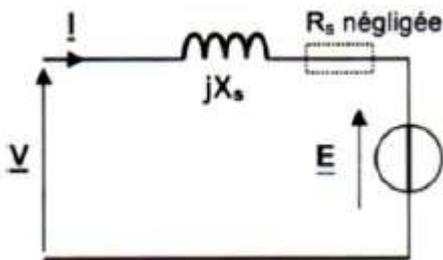


Représentation graphique, dans le plan complexe, de l'impédance Z, la résistance R et la réactance X

7.2. Modèle équivalent et diagramme de

On néglige souvent la résistance du stator. est appelé la (en ohm).
La réactance d'un circuit électrique est la partie imaginaire de son impédance induite par la présence d'une inductance.
L'impédance électrique mesure l'opposition d'un circuit électrique au passage d'un courant alternatif sinusoïdal.

sa valeur est importante car elle représente tout le flux créé par la machine. w : pulsation des courants statoriques (rad/s),

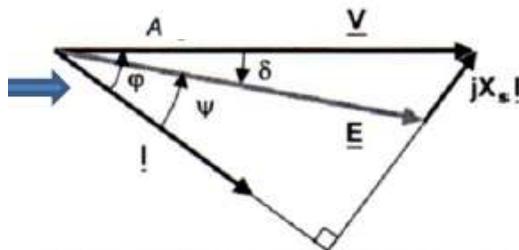


w : pulsation des courants statoriques (rad/s)
 Ω_s : vitesse angulaire du champ statorique
 L_s : inductance synchrone qui traduit la chute de tension dû à réaction magnétique d'induit

On a par la loi des mailles :

Et :

Dans le plan complexe de, pour pouvoir résoudre les circuits alternatifs complexes sans trop de difficultés, on représente tensions et courants par des vecteurs tournants. Cela donne le diagramme suivant :



$\varphi = (I, V)$: déphasage entre courant et tension.

$\Psi = (I, E)$: angle d'autopilotage ($\xi = \pi/2 - \Psi$)

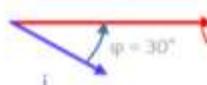
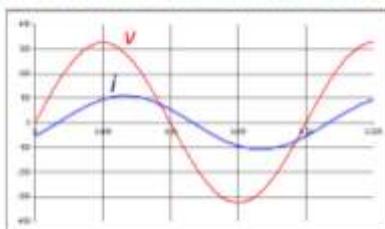
$\delta = (V, E)$: appelé angle interne

$P = VI \cos \varphi$ (puissance active alternatif)

Onduleur (MLI)

Rappels sur les puissances en alternatif:

La figure ci-dessous montre un exemple d'une charge partiellement résistive et inductive où le courant est en retard sur la tension d'un angle égal à 30° :



Puissance active (W):

Figure 4 - Exemple d'une charge inductive avec un déphasage du courant



Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur synchrone

Caractéristiques mécaniques :

On constate sur le diagramme de Fresnel que

remarque :

La puissance absorbée au stator ou puiss. électromagnétique (pertes négligées) est :

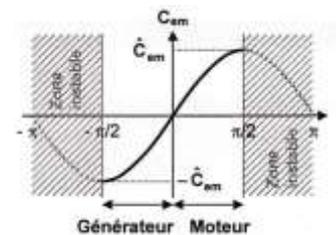
remarque : Le **signe**

- si $\cos \varphi > 0$ soit $\varphi < \frac{\pi}{2}$, alors $P > 0$, la machine de la puissance

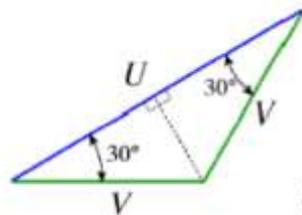
- si $\cos \varphi < 0$ soit $\varphi > \frac{\pi}{2}$, alors $P < 0$, la machine de la puissance ...on peut recharger une batterie (cf Prius, Segway)

Le couple électromagnétique est donc : $C_{em} =$ soit $C_{em} =$

Donc : ou comme $\zeta = \pi/2 - \psi$:



Remarque : dans un couplage triphasé étoile comme dans le moteur synchrone, voici, la relation $V(\text{phase})$:



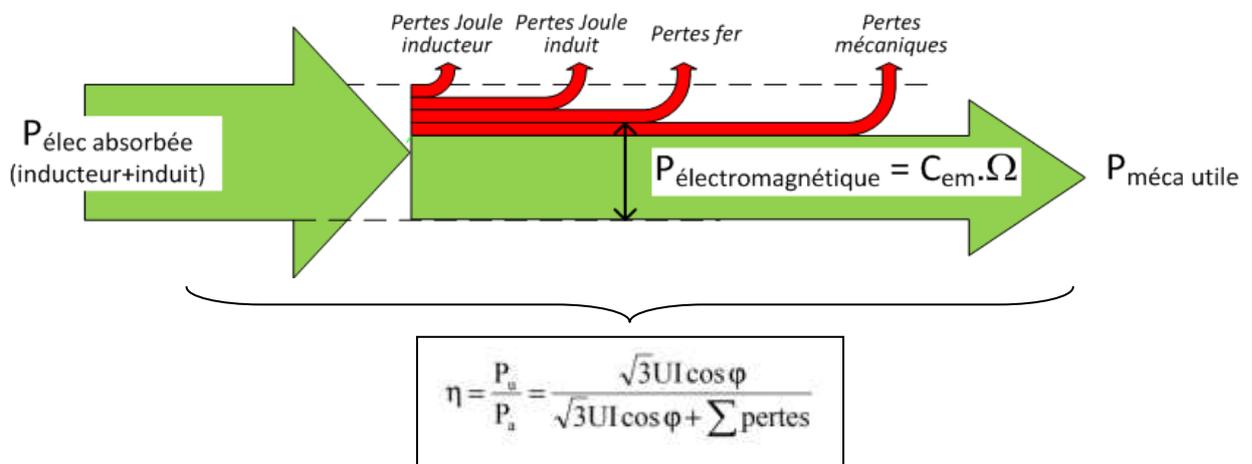
On a donc :

$$\frac{U}{2} = V \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)$$

Soit :

$$\frac{U}{2} = V \frac{\sqrt{3}}{2} \longrightarrow \boxed{U = \sqrt{3}V} \quad \text{Donc } 3V = \sqrt{3}U$$

8. Bilan des puissances et rendement





Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur synchrone

9. Variation de vitesse :

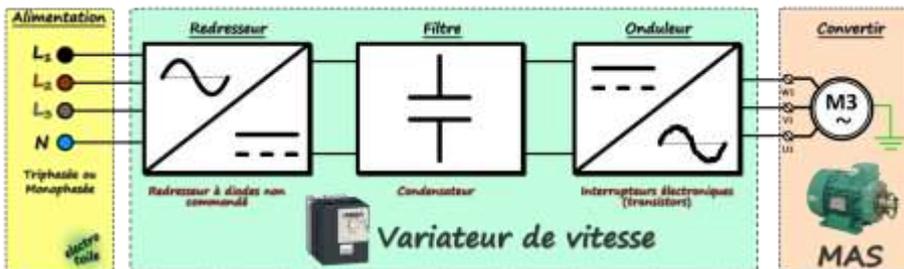
Le variateur de vitesse des moteurs alternatifs permet de moduler la, deprogressivement la charge, d'inverser le sens de rotation...



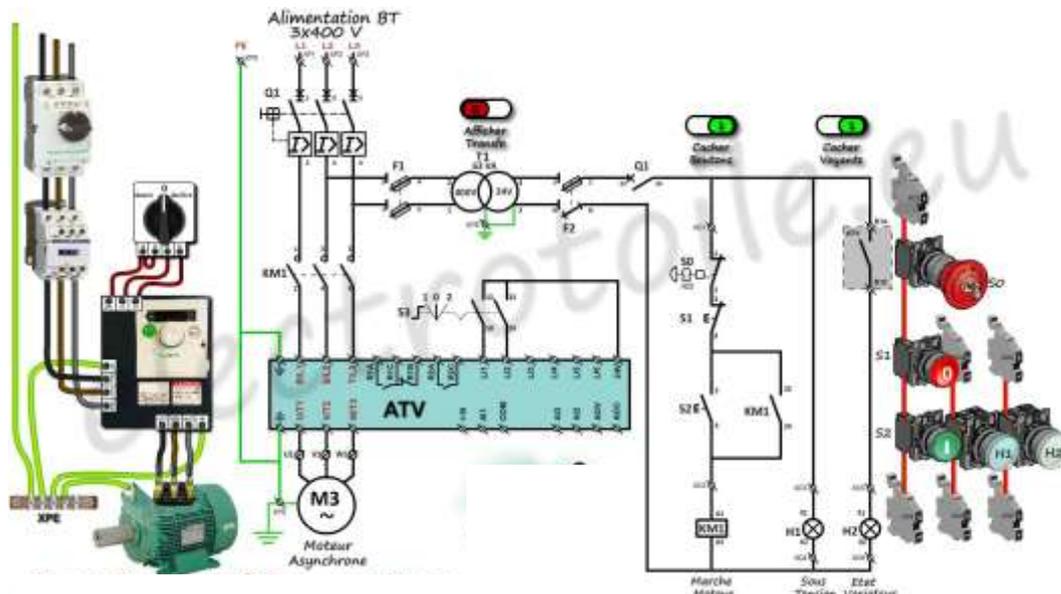
Comme la vitesse de rotation du moteur dépend du champ tournant, lui-même dépendant de la fréquence (Hz), le variateur va agir sur

Le variateur de vitesse peut être divisé en 2 parties :

- La partie commande qui est un gérant les entrées/sorties et la commande de la partie puissance
- La partie puissance composée d'un



L'onduleur est équipé (transistors) il permet de **convertir** une tension continue en une tension alternative de fréquence variable (MLI Modulation à Largeur d'Impulsion).





Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur synchrone

Particularité du moteur synchrone :

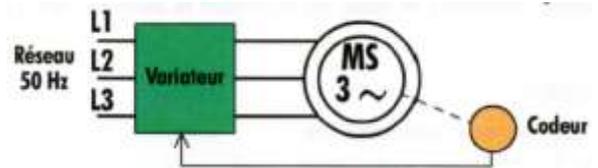
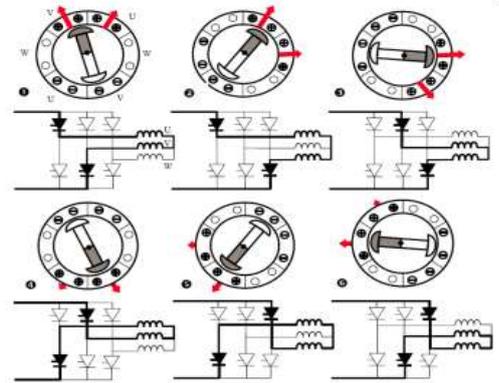
Le principal inconvénient des moteurs synchrones vient de la **difficulté de** En effet, ces moteurs ne possèdent **pas de couple de démarrage** et le champ statorique tournant qui s'établit à la mise sous tension du moteur à une vitesse de rotation bien trop grande pour que le champ magnétique du rotor s'y accroche.

La méthode actuelle permettant de pallier ce problème :
..... (ou **moteur autosynchrone**
ou **moteur**)

L'autopiloteage est une réponse apportée au problème de démarrage :

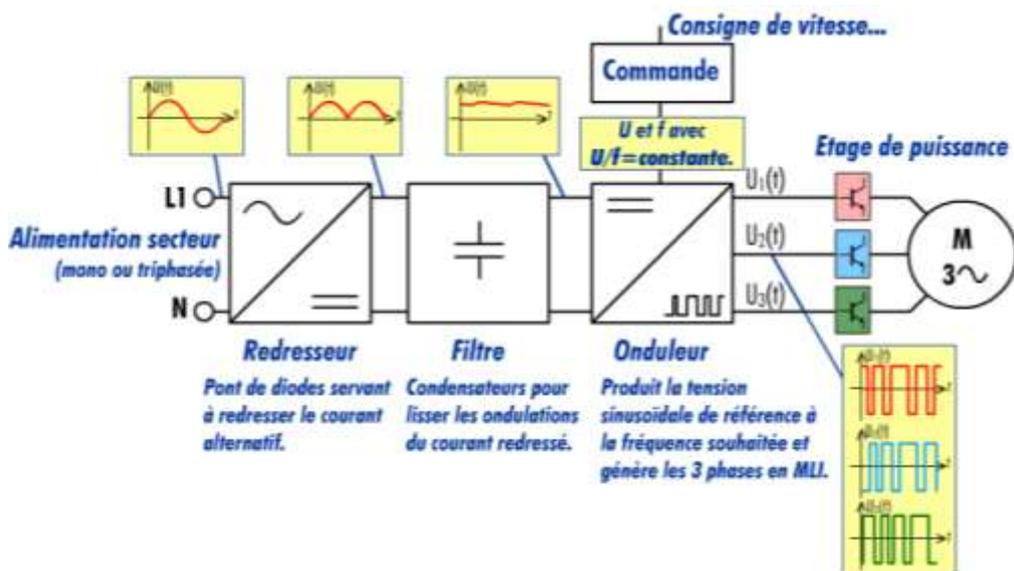
Un (**résolver** ou **codeur numérique**) est associé au moteur. Il transmet à tout moment la **position exacte du rotor** au **variateur électronique** qui alimente en courant le stator de façon optimale en commutant les interrupteurs au bon moment.

Bien souvent les codeurs sont directement intégrés au stator du MS à la construction de celui-ci.



Zoom sur l'onduleur :

Le variateur fait varier la vitesse du moteur synchrone ou asynchrone, en faisant du stator en fabriquant un



Variateur de vitesse

La tension continue fournie par le redresseur est **découpée par un onduleur** de tension pour fournir au stator un système de tensions, dont les composantes fondamentales (.....) forment un système triphasé équilibré. Il s'agit d'un onduleur fondé sur le principe de la modulation de largeur d'impulsion (**MLI**). L'ajustement de la largeur des impulsions et leur répétition, permettent d'obtenir une **fréquence variable**.



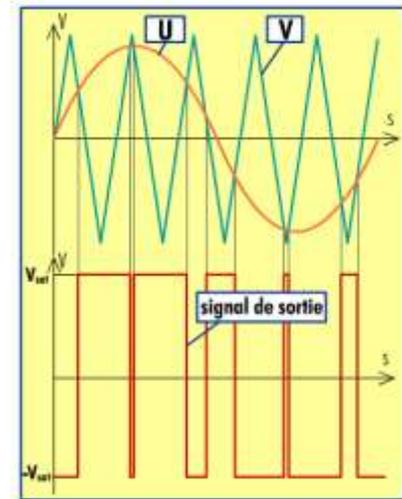
Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur synchrone

Principe et mise en œuvre de la MLI dans la commande d'un moteur

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) est une technique pour
 Une tension sinusoïdale de référence (U), et de fréquence définie (fu) est haute fréquence (fv).



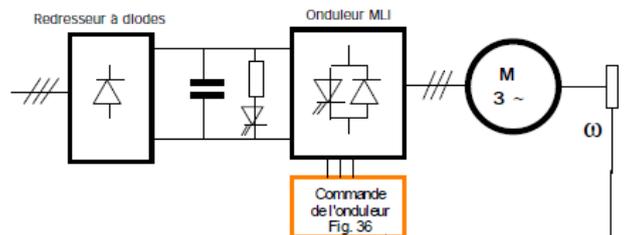
Le résultat de la comparaison donne dont la largeur de chaque créneau est modulée en rapport avec le signal sinusoïdal (MLI sinus). Ce traitement peut être aussi réalisé en numérique (MLI calculée).



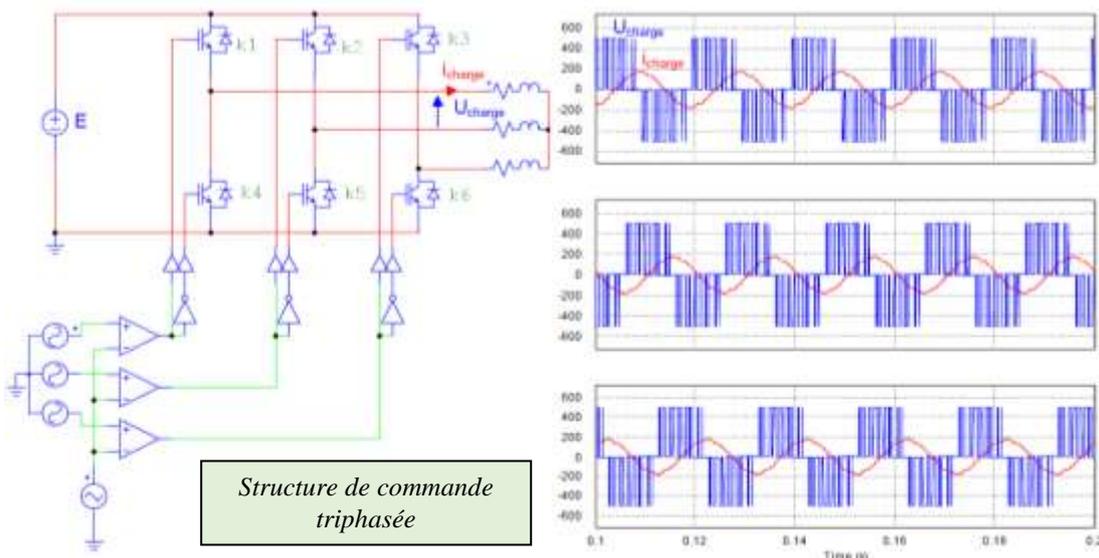
Le signal modulé, résultant de la comparaison, permet avec l'aide de

La structure électrique d'un onduleur est **identique à celle du** et la commande se fait avec le rapport cyclique

La structure électrique est toujours la même (**pont à 4 ou 6 transistors et 4 ou 6 diodes** : 6 si triphasé)



La commande est plus complexe et présente un **grand nombre de commutations par période** avec des ouvertures et des fermetures d'interrupteurs de durées modulées. La tension de sortie présente alors des "impulsions" de largeurs variables (**Modulation de Largeur d'Impulsion**). Leur valeur efficace doit être réglée de façon à maintenir le **flux statorique constant** pour ne pas déclasser en couple la machine.



Structure de commande triphasée



10. Comparaison MCC et moteur synchrone

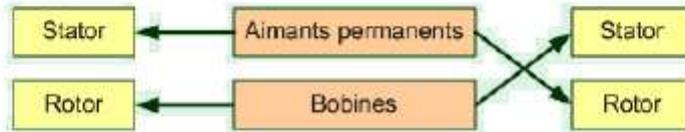
La différence fondamentale entre un moteur à courant continu et un moteur synchrone encore appelé moteur à courant continu sans balais (moteur Brushless), c'est la **commutation** qui est mécanique pour la MCC et électronique pour le synchrone.



Moteur à courant continu (commutation mécanique)



Moteur Brushless (commutation électrique)



Avantage du moteur Brushless :			Inconvénients du moteur Brushless
Pas de balais d'où :	Rotor plus léger :	Bobines reportées au stator d'où :	Absence de balais d'où :
<ul style="list-style-type: none"> • plus grande durée de vie • pas de maintenance • moins de parasite électriques (étincelles). 	<ul style="list-style-type: none"> • meilleure dynamique • couple plus important pour le même échauffement 	<ul style="list-style-type: none"> • refroidissement plus facile • couple plus important pour le même échauffement 	<ul style="list-style-type: none"> • électronique complexe pour la commutation • produit cher