

Cycle 5: Etude et modélisation des chaînes de conversion électromécanique

Chapitre 3 : Machines asynchrones (moteur et génératrice) Freinage des moteurs



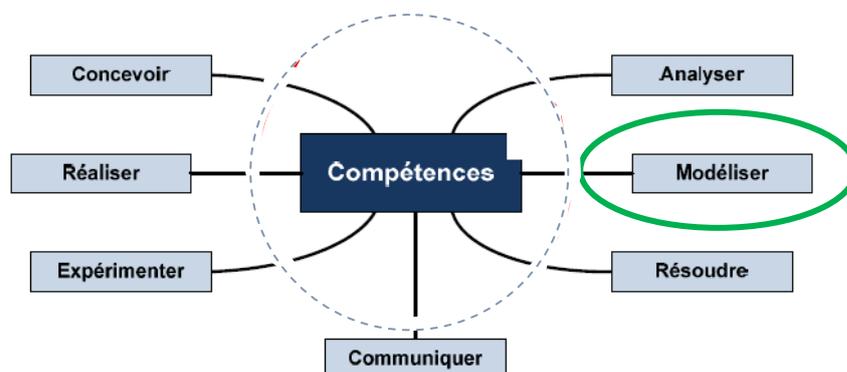
Problématique

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 asynchrone

1. Le moteur asynchrone

Le **moteur asynchrone** est de beaucoup le moteur le plus utilisé (**80% des machines**) dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa **facilité de mise en oeuvre**, de son et de son **excellente** (moteur plateau Indexa, moteur barrière Sympact)

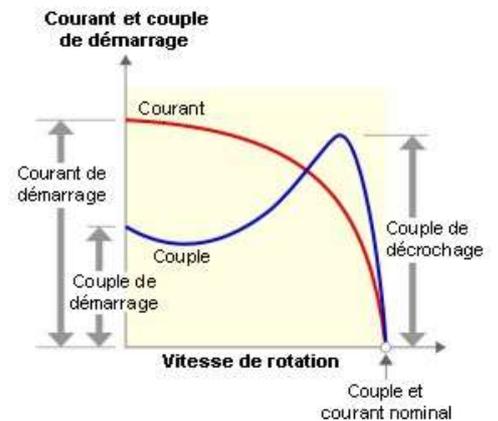


Ce moteur peut, selon sa construction, être relié par son circuit inducteur à un **réseau électrique** **monophasé** ou Les moteurs triphasés présentent pour une masse donnée des performances jusqu'à 50 % supérieures à leurs homologues monophasés.

L'entretien du moteur asynchrone est plus simple que dans le cas d'un moteur à courant continu, car **il n'a ni collecteur, ni balais**.

Inconvénient :

Son seul point noir est **l'énergie**, toujours consommée pour magnétiser l'entrefer. Les **caractéristiques** de courant absorbé et de couple de cette machine sont bien connues (voir courbes types ci joint). Elles font apparaître très clairement une de 5 à 10 fois I_n ainsi qu'un au démarrage. La **pointe d'intensité** est nuisible pour le réseau d'alimentation et il sera quelquefois nécessaire de la réduire. L'**à-coup de couple** est gênant pour la mécanique entraînée et peut même avoir des conséquences destructives voir solutions plus tard...



Gamme de puissances :

La gamme de puissance couverte par les machines asynchrones est très étendue : de **quelques watts pour des moteurs synchrones monophasés** aux **36,8 MW des moteurs à cage d'écurieil des futurs porte-avions britannique de la classe «HMS Queen Elisabeth»**.



Propulsion intégrée tout-électrique (IFEP) développée par Converteam dotée de deux lignes d'arbres, entraînées chacune par deux moteurs asynchrones d'un poids de 110 tonnes environ !!

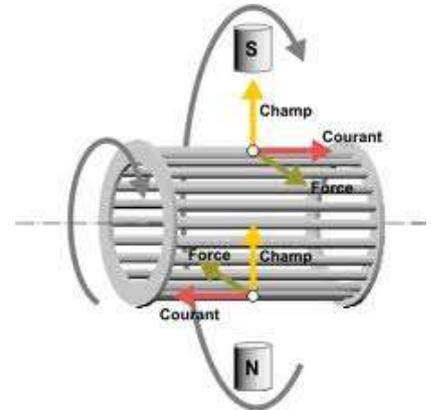


2. Structure du MAS

Un moteur asynchrone a le **même type de stator qu'un moteur synchrone** (triphase, éventuellement monophasé) et on a un **champ tournant créé par le**

Seul le **rotor** diffère (**fonctionnement par**) :

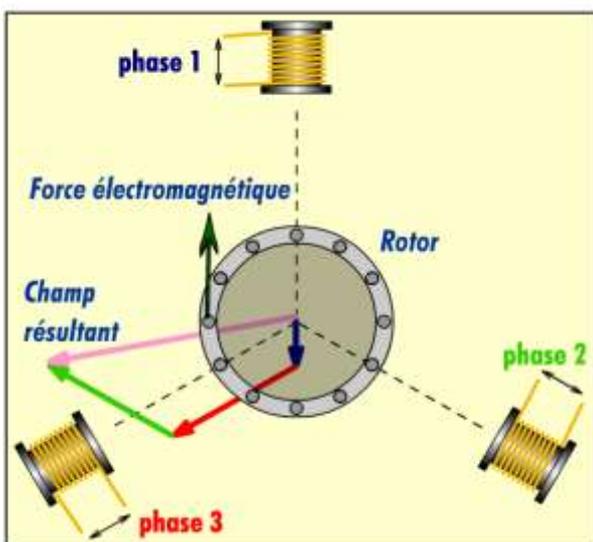
- circuits conducteurs refermés sur eux-mêmes
- champ tournant / cage → f.é.m. d'induction dans la cage
- courant induits dans la cage → dans la cage
- couple stator sur rotor



- ✓ rotor "à cage d'écureuil" = barres conductrices en aluminium en "court circuit" (pas de collecteur pour alimenter le rotor → pas d'usure) ; bobinage de grosse section (faible résistance) → Faible puissance



Fonctionnement:



Trois bobines placées à 120° et alimentées par un réseau triphasé, créent un champ magnétique B tournant. La cage en aluminium qui forme le rotor est placée à l'intérieur du champ B défini précédemment. Le champ B étant tournant, chaque barre de la cage voit un champ variable qui le traverse. Chaque barre est donc soumise à un flux magnétique variable ($\Phi = B \cdot S$). Cette variation de flux magnétique $d\phi$ dans chaque barre va créer une fem e ($e = -d\phi/dt$ loi de Lenz).

La cage étant constituée d'aluminium (matériau conducteur), la fem e donnera naissance à un courant I dans chaque barre.

Ce courant I dans la barre soumise au champ magnétique originel B créera une force électromagnétique F (de Laplace) sur le conducteur, c'est à dire la barre ($F = B \wedge I$).

Chaque force F ainsi exercée sur chaque barre contribuera à la mise en rotation de la cage. La cage guidée en rotation et reliée à l'arbre du moteur fournira le couple utile à la charge.



Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur asynchrone

Rappels et définitions :

- f, ω : fréquence et pulsation des courants statoriques
- p : nombre de paires de pôles au stator (et au rotor)
- Ω_s : vitesse angulaire du champ statorique ou vitesse de synchronisme
- Ω : vitesse angulaire du rotor

- :



$f = 50 \text{ Hz} ; p = 1 \Rightarrow n_s = 50 \text{ tr/s} = 3000 \text{ tr/min} ; p = 2 \Rightarrow n_s = 25 \text{ tr/s} = 1500 \text{ tr/min} \dots$

- :



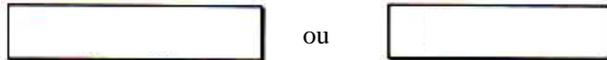
Ce paramètre caractérise la diminution relative de vitesse en fonctionnement. On l'exprime très souvent en pourcentage.

- f_R des courants rotoriques :

La vitesse relative à laquelle le champ tournant balaye les conducteurs du rotor vaut ($\Omega_s - \Omega$), la pulsation ω_R des courants induits est égale à :

$$\omega_R = p \cdot (\Omega_s - \Omega) = \omega \cdot \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

Elle varie donc avec le glissement. A l'arrêt ($\Omega = 0$), $f_R = f$ ($g = 1$).



Attention :

Si le rotor atteint la vitesse de rotation du champ statorique n_s , alors chaque barre composant le rotor est soumise à un champ B invariant. Il n'y a donc plus de variation de flux magnétique ($d\phi / dt = 0$), donc plus de fem, et par conséquent plus de courant I circulant dans les barres. La force exercée sur chaque barre devient nulle, le couple moteur est inexistant

Cette constatation implique qu'en fonctionnement moteur le MAS **tournera toujours ende sa vitesse de synchronisme (moteur asynchrone)**. La différence entre la vitesse de rotation du champ statorique et le rotor est définie par le

3. Symboles

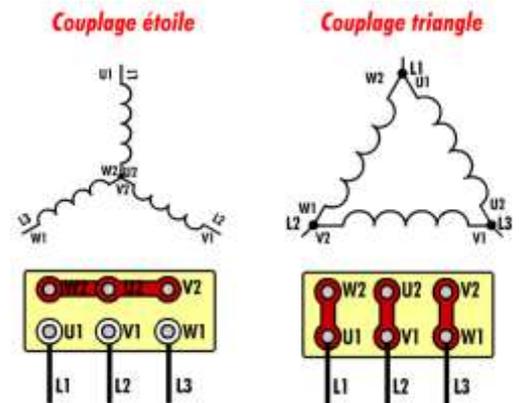
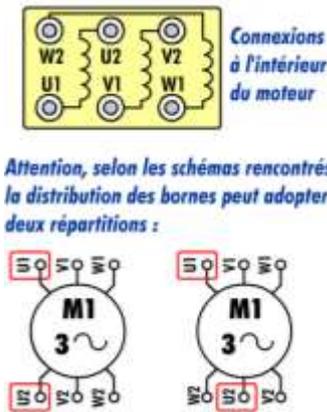




Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur asynchrone

4. Raccordement au réseau – plaque à bornes

Les constructeurs indiquent en général deux tensions sur la plaque signalétique du moteur. La **plaque à bornes** permet d'accéder à la connexion des 6 bornes correspondant aux extrémités des 3 enroulements du MAS afin de les alimenter et de les coupler.



Il existe plusieurs possibilités pour raccorder les enroulements d'un MAS au réseau triphasé, les principales sont:

- Le couplage étoile
- Le couplage triangle

Le choix du couplage sera déterminé par le type de réseau, le type de démarrage, mais surtout par **la tension maximale à ne pas dépasser sur un enroulement**. Il est fait en usine ou réalisé sur la plaque à bornes à l'aide de barrettes par l'utilisateur.



- **Type** : (LS90Lz) référence propre au constructeur
- **Puissance** : (1,5Kw) puissance utile délivrée sur l'arbre du moteur.
- **Facteur de puissance ou cos phi** : (0,78) permet le calcul de la puissance réactive consommée.
- **rendement** (78%) : permet de connaître la puissance électrique consommée ou absorbée
- **Tensions** : (230v/400v) la première indique la valeur nominale de la tension aux bornes d'un enroulement. Elle détermine le **couplage (étoile ou triangle)** à effectuer en fonction de la tension du réseau d'alimentation.
- **Intensités** : (6,65A/3,84A) Elles représentent l'intensité en ligne (dans chaque phase) pour chacun des couplages.
- **vitesse** : (1440 Tr/min) Indique la vitesse nominale du rotor. On dit aussi vitesse réelle. On connaît alors La vitesse de synchronisme **ns** du moteur (ici 1500 tr/min)
- **classe d'isolement** : (non indiquée)
- **Température ambiante** : (40°C) utilisation recommandée maximum
- **Fréquence** : (50Hz) fréquence du réseau d'alimentation.
- **Nombre de phases** : (Ph 3) moteur triphasé
- **service** : (S1) utilisation en marche continue, intermittente...
- **Indice de protection IP** : (non indiquée) défini par trois chiffres le degré de protection du moteur à la poussière, à l'eau et aux chocs mécaniques.

5. Notion de d'un moteur électrique (Cth)

Le couple thermique (Cth) est le couple efficace qui correspond au service donné. Il représente **du moteur pour réaliser le cycle demandé.**

Pourquoi déterminer Cth ? Pour valider le choix d'une motorisation par rapport à son utilisation.

Calcul sur une période :





Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur asynchrone

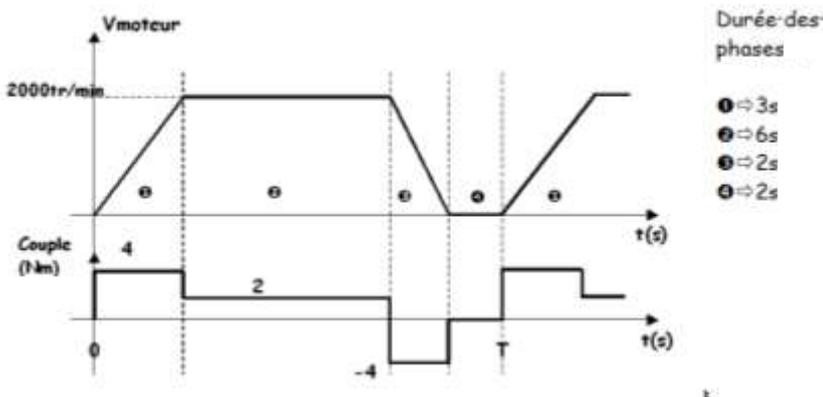
Conditions de validité :

Les conditions pour valider le choix du moteur sont :

- les couples max du cycle < au couple max ou impulsif du moteur
- les vitesses du cycle sont atteignables par le moteur
- le $C_{th} < C_n$ ou **permanent ou couple en service S1**

Exemple :

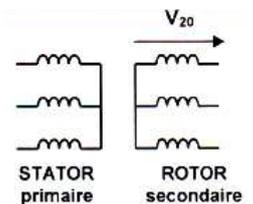
Le cycle périodique ci-dessous correspond aux contraintes appliquées à une motorisation d'un système de transfert de tapis roulant.



$$C_{th} = \frac{4^2 \cdot 3 + 2^2 \cdot 6 + (-4)^2 \cdot 2}{3 + 6 + 2 + 2} = 3,83 Nm$$

6.

La machine asynchrone se comporte en fait comme un **transformateur triphasé** à l'arrêt. Par contre, en marche normale, étant donné que $f_R \neq f$, ceci n'est plus vrai. Néanmoins, grâce à un artifice de calcul, on montre qu'une machine asynchrone est équivalente à un transformateur statique de rapport de transformation **m**, dont le secondaire supposé sans résistance, alimenterait une **charge résistive R_2 / g** .



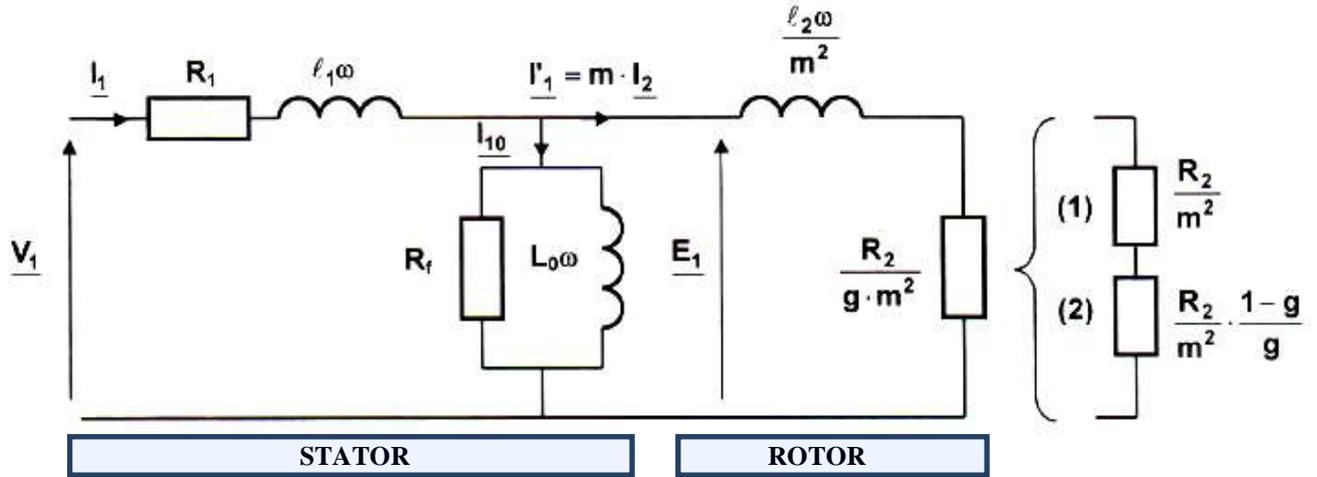
Notations :

- V_1 : Tension efficace aux bornes d'une phase du stator
- I_1 : Courant efficace dans une phase du stator
- I_2 : Courant efficace dans une phase du rotor
- m** : Rapport de transformation stator / rotor défini par $m = V_{20} / V_1$
- V_{20} est la tension que l'on obtiendrait aux bornes d'une bobine rotorique si celle-ci était ouverte (rotor immobile).
- R_1 : Résistance d'une phase du stator
- R_2 : Résistance d'une phase du rotor
- L_1 : Inductance de fuites au stator
- L_2 : Inductance de fuites au rotor
- L_0 : Inductance de magnétisation
- R_f : Résistance modélisant les pertes ferromagnétiques



Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur asynchrone

En ramenant au primaire les éléments du secondaire, on aboutit au schéma équivalent :



- (1) la puissance "dissipée" dans cet élément représente les
- (2) la puissance "dissipée" dans cet élément représente la **sur le rotor**

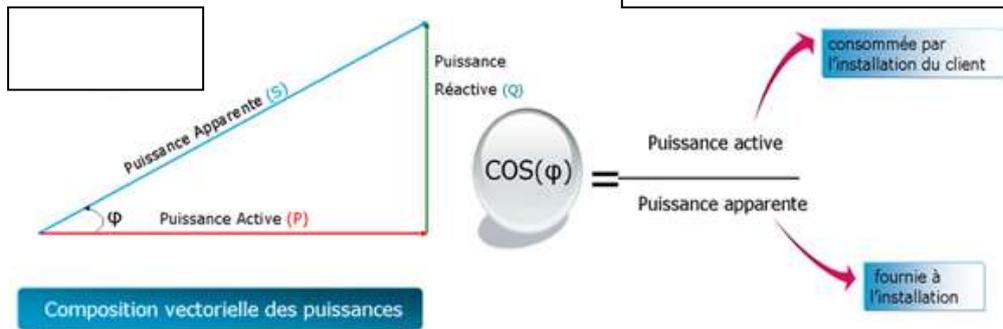
Ce schéma monophasé n'est qu'une **représentation mathématique** du fonctionnement en régime permanent du moteur, alimenté par le réseau à tension et fréquence constantes. En effet, deux des trois résistances ($R_2 / g \cdot m^2$ et R_f) n'ont pas de signification physique.

La détermination des éléments du schéma équivalent s'effectue à partir d'une **mesure en courant continu** de la résistance du stator, d'un **essai à vide** et d'un **essai à rotor bloqué**.

7. Bilan des puissances

7.1. Notion de

Le facteur "..... s'appelle ".....". Nous avons vu qu'il était indiqué sur la plaquette électrique de la plupart des machines électriques.



7.2. Les puissances sur la machine asynchrone

La puissance par le stator, diminuée des pertes joules dans le stator et des pertes fer dues aux champs tournants, est transmise au rotor. Cette puissance est appelée P_e ou P_{TR} (puissance ou puissance transmise).

Une partie de P_{TR} est dans les enroulements rotoriques. P_{jr} : les pertes fer rotoriques sont négligeables devant les autres puissances (le glissement et donc la fréquence des champs rotoriques étant faibles). Le reste est transformé en puissance mécanique.

• **Puissance active absorbée par le moteur :**

ou



Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur asynchrone

• Pertes Joules au stator :

• Pertes fer au stator :

• Puissance transmise du stator au rotor :

Elle est aussi appelée puissance électromagnétique P_{em} ou puissance transmise à travers l'entrefer.

On notera la différence entre $P_{em} = C_{em} \cdot \Omega$ pour la MCC et $P_{em} = P_{TR} = C_{em} \cdot \Omega_s$ pour la MAS car c'est le champ tournant Ω_s qui est à l'origine de cette puissance !

• Pertes Joules au rotor : $P_{JR} = 3R_2 I_2^2 = 3 \frac{R_2}{m^2} I_1^2$ car $I_1 = m \cdot I_2$

(Relation très utilisée)

• Puissance mécanique sur le rotor :

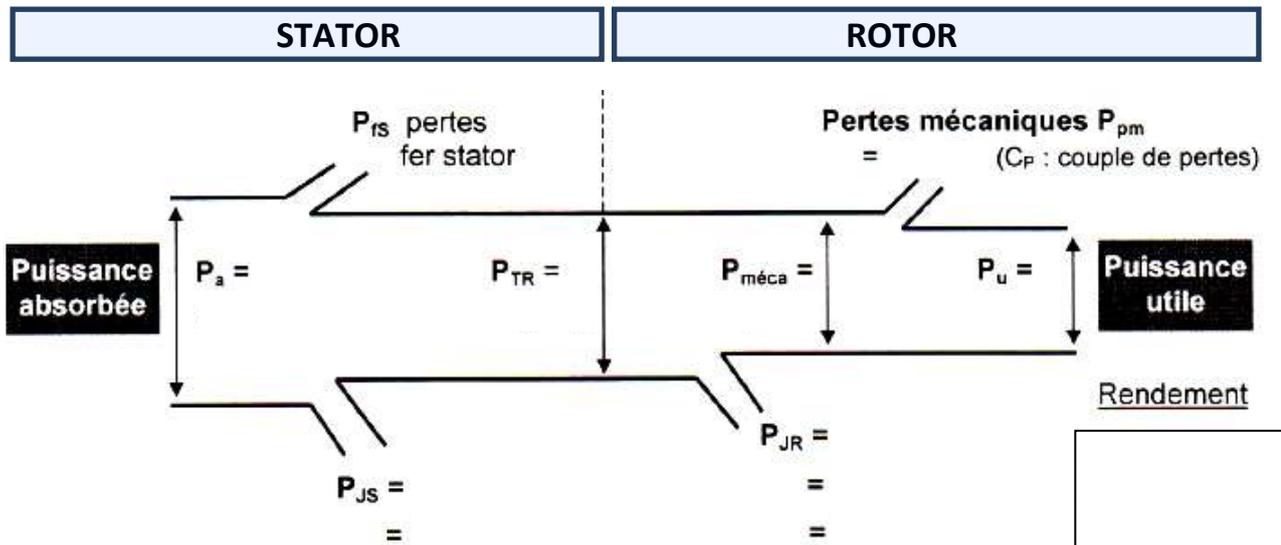
La quantité $(1 - g)$ est souvent appelée "rendement du rotor"

• Puissance mécanique utile :

$\Rightarrow C_u = C_{em} - C_p$

Avec P_{pm} puissance de pertes mécaniques

En marche normale, on néglige les pertes dans le fer du rotor car elles sont proportionnelles à la fréquence $f_R = g \cdot f$ très faible des courants rotoriques.



R_B Résistance mesurée entre deux bornes statoriques du moteur, quel que soit le couplage.
 ($R_B = 2 R_1$ pour un couplage Y et $R_B = 2/3 R_1$ pour un couplage Δ).



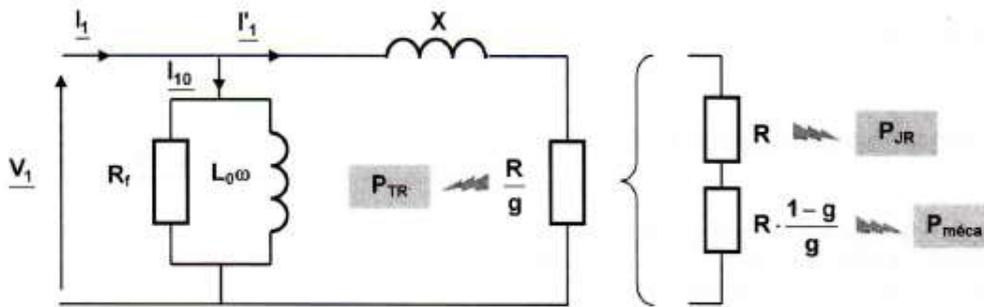
Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur asynchrone

8. Expression du

Dans la pratique, on néglige la chute de tension aux bornes de la résistance R_1 et de l'inductance de fuites L_1 au stator. Ceci n'est plus vrai à des fréquences et des tensions faibles.

Si de plus, on néglige les pertes mécaniques : $C_u = C_{em} - C_p = C_{em} = C$

En posant et, on obtient le schéma équivalent simplifié suivant :



On peut écrire :

et il en découle que :

Module impédance complexe

D'où l'on tire l'expression du couple électromagnétique C_{em} :

Recherche du couple maximal:

L'expression générale du couple peut encore s'écrire :

A tension constante, le numérateur est constant.

Le couple est maximal pour la valeur g_M de g qui rend minimale la somme $R^2 / g + X^2 g$. Or, le produit de ces deux termes est constant et vaut

Par conséquent, cette somme est minimale quand les deux termes sont égaux.

Dans ces conditions, le couple est maximal pour un glissement g_M satisfaisant :

$$\frac{R^2}{g_M} = X^2 g_M \Rightarrow \boxed{\dots} \Rightarrow \boxed{\dots}$$

D'où :

$$C_{max} = \frac{p}{\omega} \cdot \frac{3V_1^2}{2 \frac{\ell_2 \omega}{m^2}} = \frac{3pm^2}{2\ell_2} \cdot \frac{V_1^2}{\omega^2} \quad \omega = 2\pi f \Rightarrow \boxed{\dots}$$

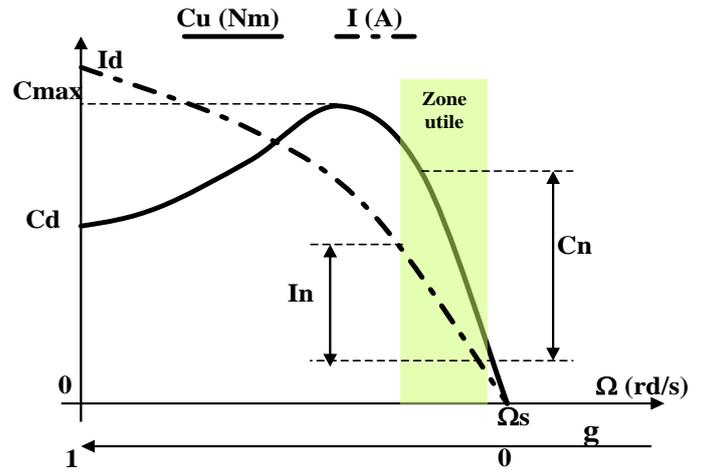
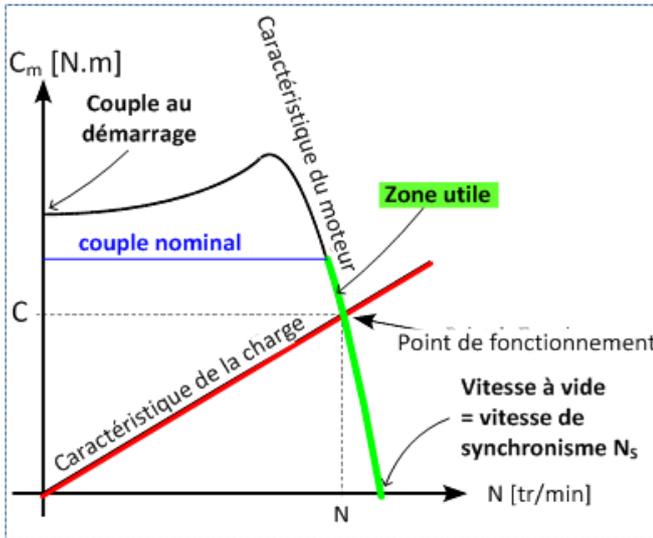


Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur asynchrone

Pour avoir un couple maximal au démarrage, il faut que :

$\Rightarrow R_2 = f_2 \omega$

9. Caractéristiques



Les caractéristiques $C(\Omega)$ et $I(\Omega)$ traduisent trois propriétés importantes :

- le
- durant le **fonctionnement normal** (zone utile), la vitesse reste très voisine de la ($g=0$) et le couple est proportionnel au glissement

$g \ll g_M \Rightarrow \left(\frac{R}{g}\right)^2 \gg X^2 \Rightarrow$

- le courant de démarrage par rapport au courant nominal

Nous retiendrons simplement en 1^{ère} approximation, que le couple C_{em} (ou C) est **proportionnel au carré de la tension d'alimentation** si la fréquence f est constante.

Si f constante :



Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur asynchrone

10. Méthode de d'une MAS

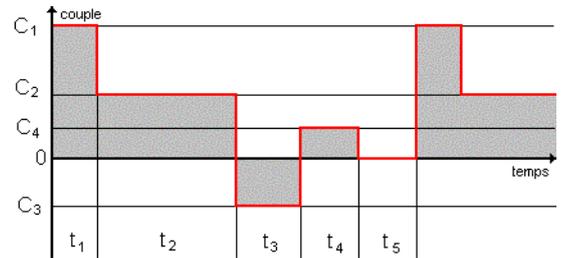
Le choix d'un MAS seul doit permettre l'entraînement de la machine accouplée avec les performances imposées par le cahier des charges, à savoir :

- *Le nombre de de fonctionnement*
- *Le sur toute la plage de vitesse ($C=f(\Omega)$)*
- *La désirée*
- *L'accélération et la décélération souhaitées*



Et le respect des normes pour le réseau d'alimentation énergétique :

- *La puissance de*
- *La*

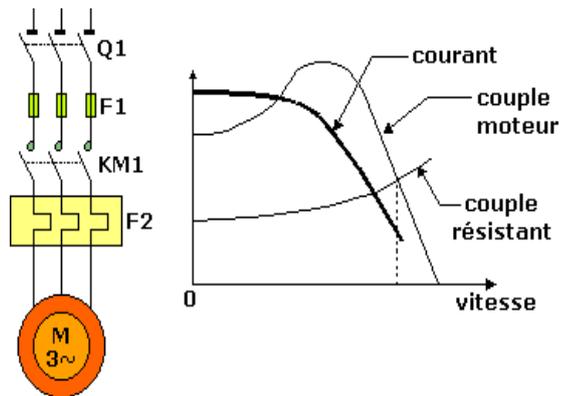


11. du MAS

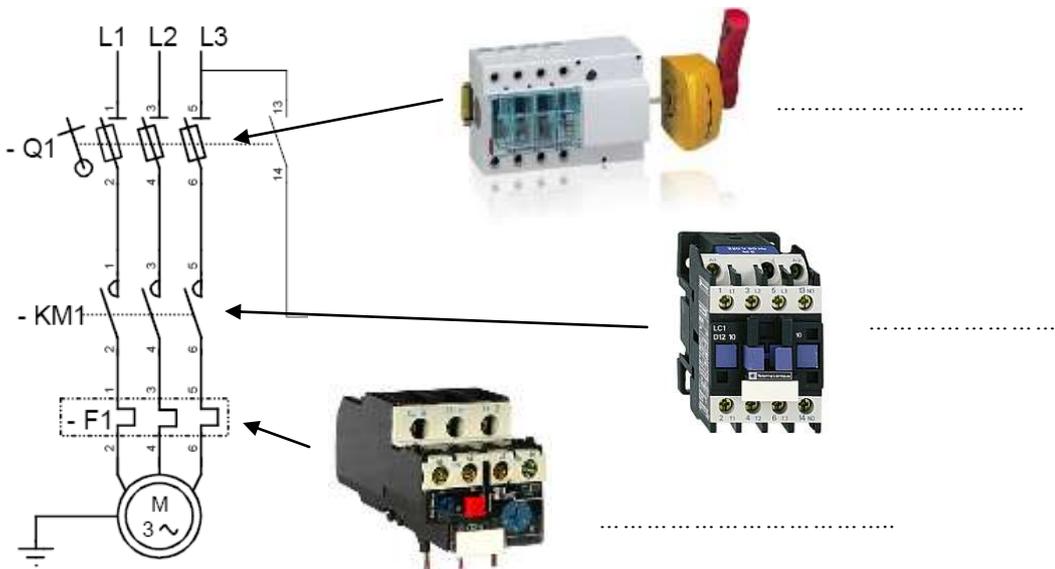
11.1. Démarrage

C'est un procédé de démarrage simple obtenu en un seul temps, le stator du moteur est couplé directement sur le réseau. Le moteur démarre sur ses caractéristiques naturelles avec une forte pointe d'intensité qui va provoquer une chute de tension.

Ce dispositif permet de **démarrer des machines même à pleine charge. Risque à coups** au démarrage. Il est particulièrement indiqué pour des machines de petite et moyenne puissance: **P < 6 KW**



Les composants utilisés :



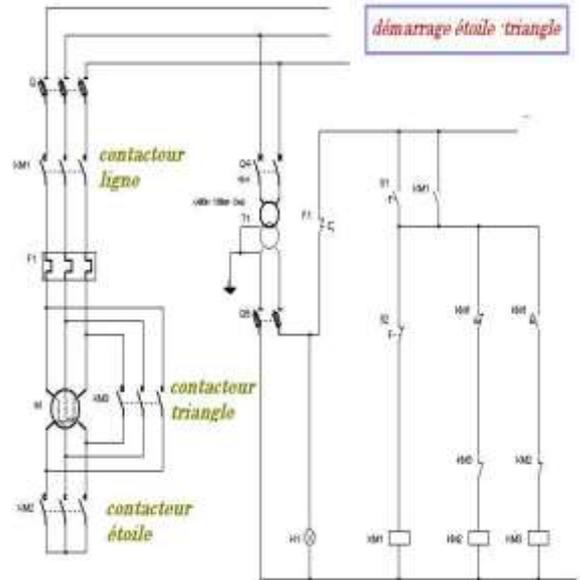


Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur asynchrone

11.2. Démarrage

Ce type de démarrage est réservé aux **machines démarrant à vide** ou dont le couple résistant est faible. Le démarrage E/T est conçu pour **limiter le courant de ligne au démarrage**.

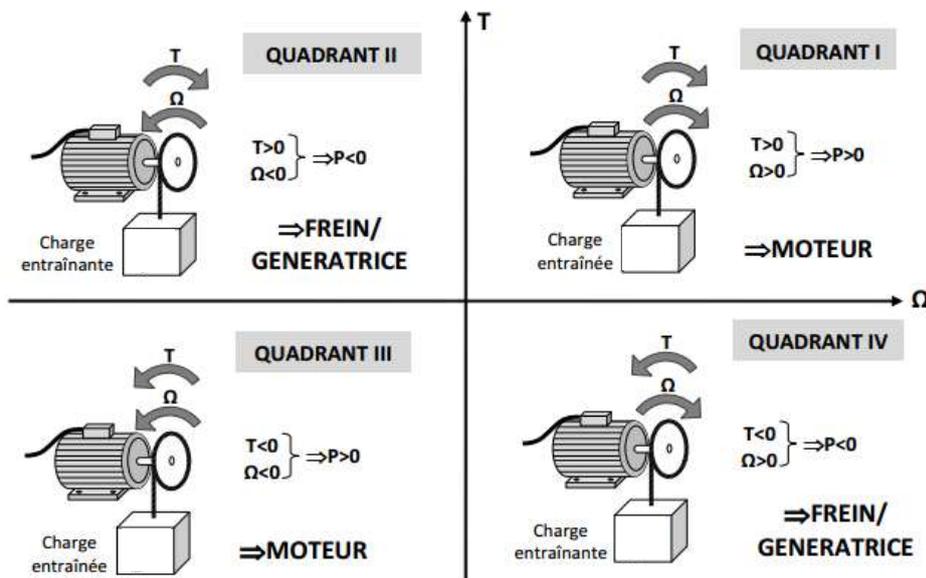
Ce démarrage s'effectue en 2 temps : le MAS est alimenté sous tension réduite (étoile) puis sous pleine tension (triangle).



12. Un convertisseur réversible ... fonctionnement en génératrice -

Deux paramètres définissent le fonctionnement des systèmes donc des moteurs : le **signe de la vitesse dépend du**, le **..... qui peut être entraînée ou entraînant**.

Les quadrants définissent les zones de fonctionnement :



Les machines électriques sont Soit le variateur et la source sont également réversibles et l'énergie est récupérée sur le réseau lors d'une phase de freinage soit la source ne l'est pas et dans ce cas l'énergie est dissipée dans une résistance de freinage.

Le **choix d'une structure convertisseur/machine 1, 2 ou 4 quadrants** repose exclusivement sur le **cahier des charges du système**.



Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur asynchrone

Exemple de problématique (CDC)

Lorsque la sécurité l'exige, le freinage doit permettre d'obtenir un temps d'arrêt plus court que celui obtenu par un simple appui sur le bouton d'arrêt (décret n°93 - 40 du 11 janvier 1993 relatif aux machines-outils).

Ainsi, prenons l'exemple d'une scie circulaire, machine réputée dangereuse.

Le freinage doit être immédiat lors de l'appui sur AU

A.U. (Appui Urgent) : Arrêt : Marche :

Hors dispositifs électroniques
On dispose de quatre procédés de freinage : deux procédés mécaniques et deux procédés électriques.

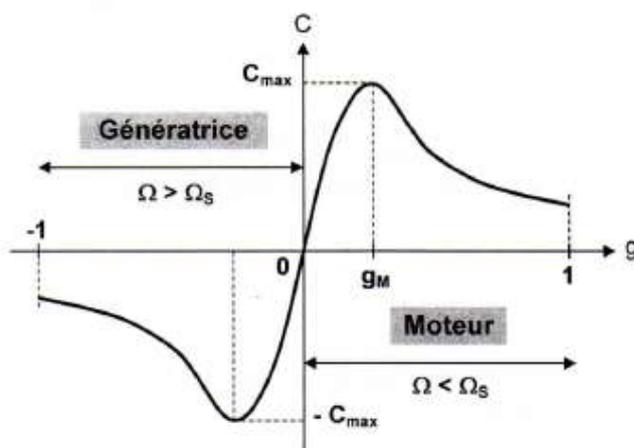
Moteur frein

- FREIN A APPEL DE COURANT
- FREIN A MANQUE DE COURANT
- Freinage hyper synchrone
- Freinage en contre-courant

Diverses méthodes sont utilisables pour un moteur asynchrone :

- le freinage avec
- le freinage en par

12.1. Freinage hyper synchrone



Le fonctionnement en génératrice asynchrone a lieu, en particulier, toutes les fois où la charge devient entraînante à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme, et que la machine est reliée au réseau.

Exemples d'utilisations de la génératrice asynchrone :

- Turbine, éolienne.
- Freinage contrôlé (à vitesse constante) lors du mouvement de descente d'un crochet de grue.



Le fonctionnement en génératrice asynchrone assure le freinage par récupération à vitesse sensiblement constante si $f = Cste$



On ne peut pas arrêter la charge !!



Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur asynchrone

12.2. Freinage par contre-courant

Le principe consiste, après avoir isolé le moteur du réseau alors qu'il tourne encore, à le C'est un mode de **freinage très efficace** qui doit être arrêté suffisamment tôt pour éviter que le moteur ne reparte en sens inverse.

Divers dispositifs automatiques sont employés pour commander l'arrêt dès que la vitesse approche de zéro pour éviter la mèche en sens inverse: détecteurs d'arrêt à friction, détecteurs d'arrêt centrifuges, dispositifs chronométriques, etc.

