

Chapitre 3. Moteur à courant alternatif :

- Principe, structure et caractéristiques - Variation de vitesse.

Étant donné la bonne performance des systèmes d'entraînement des machines à C.C., on peut se demander pourquoi on emploie aussi les machines à courant alternatif. En voici les principales raisons :

- 1- Les machines à C.A n'ont pas de collecteur ; par conséquent, elles nécessitent moins d'entretien
- 2- Pour une puissance et une vitesse données, les machines à C.A. sont moins chères et moins lourdes que celles à C.C .
- 3- Les machines à C.A sont plus robustes et travaillent mieux dans un environnement difficile
- 4- A cause du collecteur, la tension des machines à C.C est limitée à environ 1500 V. Par contre, la tension des machines à C.A . peut atteindre plusieurs milliers de volts, ce qui permet, pour les grosses puissances, une diminution importante du courant
- 5- La puissance des machines à C.A peut dépasser 50 000 kW, alors que celle des machines à c.c. est limitée à 2000 kW environ

La vitesse des moteurs à C.A peut atteindre 100 000 r/min tandis que celle des moteurs à c.c., à cause de la commutation, est limitée à environ 3000 r/min

3.1 Branchement des moteurs asynchrones triphasés :

Le stator d'un moteur asynchrone triphasé comporte trois enroulements identiques, qui sont couplés

- soit en étoile (Y)
- soit en triangle (Δ)

Le choix du couplage dépend des tensions du réseau et des indications portées sur la plaque signalétique .Celle-ci donne les conditions normales de fonctionnement (on dit aussi nominales)

L'utilisateur choisit le couplage qui convient par l'intermédiaire de la plaque à bornes. Elle comporte six bornes auxquelles sont reliées les entrées et les sorties des trois enroulements selon le schéma ci-contre.

3.1.1 Normalisation des bornes

Entrées U1, V1 et W1

Sorties U2, V2 et W2

3.2. Principe

* Les bobinages statoriques, alimentés par des courants triphasés de pulsation ω , créent un champ magnétique \vec{B} tournant (**théorème de Ferraris**) à la vitesse $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$ où p est le nombre de paires de pôles au stator.

Ce champ (donc ce flux) tournant balaie le bobinage rotorique et y induit des forces électromotrices (fém) d'après la loi de Lenz. Le bobinage rotorique étant en court-circuit, ces fém y produisent des courants induits.

C'est l'action du champ tournant \vec{B} sur les courants induits qui crée le couple moteur. Ce dernier tend à réduire la cause qui a donné naissance aux courants, c'est à dire la rotation relative du champ tournant par rapport au rotor. Le rotor va donc avoir tendance à suivre ce champ.

Le rotor tourne forcément à une vitesse $\Omega < \Omega_s$ (d'où le terme asynchrone). En effet, s'il tournait à la même vitesse Ω_s que le champ tournant, il n'y aurait plus, ni de fém, ni de courants induits, donc plus de couple moteur.

Pour changer le signe de Ω_s (donc le sens de rotation), il suffit de permuter deux fils de phase.

a. Symboles

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

b • Vitesse de synchronisme : $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$ ou $n_s = \frac{f}{p}$ (en tr/s)

$f=50\text{Hz}$; $p=1 \rightarrow n_s = 3000 \text{ tr/min}$; $p=2 \rightarrow n_s = 1500 \text{ tr/min}$

• **Glissement:** $g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$

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

Exemple: Valeur du glissement g_n au point nominal du moteur suivant ($p = 3$).

FLS 160 L Δ 230 /Y 400 V - 7,5 kW - 965 tr/min $\cos\phi = 0,81$ $\eta = 0,865$.

$$g_n = \frac{1000 - 965}{1000} = \frac{35}{1000} = 3,5\%$$

Fréquence f_R des courants rotoriques :

La vitesse relative à laquelle le champ tournant balaie les conducteurs du rotor vaut (n_s), la pulsation ω_R des courants induits est égale à :

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

soit $\omega_R = g \omega$ ou $f_R = g f$

- Elle varie donc avec le glissement. A l'arrêt ($\Omega = 0$), $f_R = f$ ($g = 1$).
- En marche normale, elle est très faible (car g est très petit).

3.2.1 Schéma monophasé équivalent

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 r_n , dont le secondaire supposé sans résistance, alimenterait une charge 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). Même définition que dans le transformateur.

R_1 : Résistance d'une phase du stator

R_2 : Résistance d'une phase du rotor

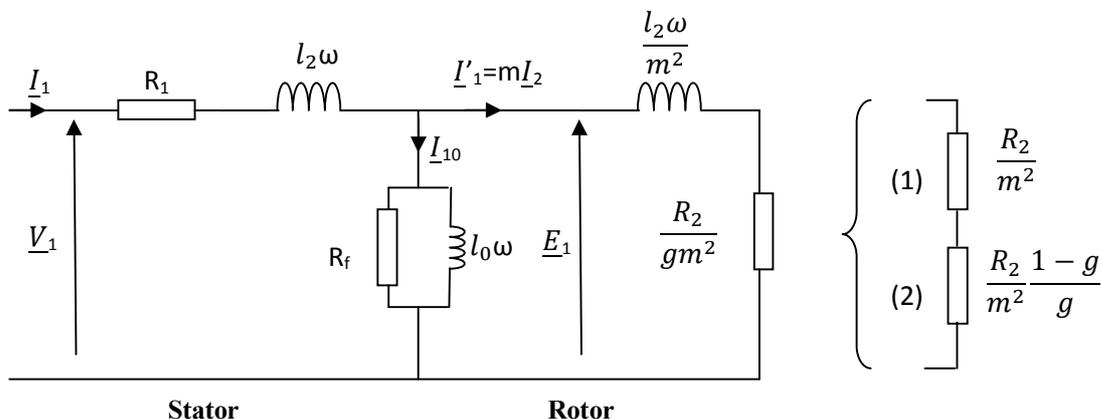
l_1 : Inductance de fuites au stator

l_2 : Inductance de fuites au rotor

L_0 : Inductance de magnétisation

R_f : Résistance modélisant les pertes ferromagnétiques

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



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

Figure 3.1 Schéma monophasé équivalent d'une MAS

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 ($R_2 / g m^2$ et R_f) n'ont pas de signification physique. Lorsque le moteur est alimenté à tension et fréquence variables ce schéma ne sera pas utilisable, surtout aux très basses fréquences.

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.

3.2.2 Moteur triphasé alimenté à tension et fréquence constantes

3.2.2.1 Définitions des puissances (actives)

- *Puissance active absorbée par le moteur*: $P_a = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi$ (indépendant de couplage)
- *Pertes Joules au stator*: $P_{js} = 3 R_1 I_1^2 \cos \varphi$ (j_1 au lieu de I_1 si le couplage est Δ)
- *Pertes fer au stator*: $P_{fs} = 3 \frac{E_1^2}{R_1}$
- *Puissance transmise du stator au rotor*: $P_{TR} = P_a - P_{js} - P_{fs} = 3 \frac{R_2}{g m^2} I_1^2$

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*: $P_{JR} = 3 R_2 I_2^2 = 3 \frac{R_2}{g m^2} I_1^2$ car $I'_1 = m I_2$
- (relation très utilisée): $P_{JR} = g P_{TR}$
- *Puissance mécanique sur le rotor*: $P_{méca} = P_{TR} - P_{JR} = (1 - g) P_{TR}$

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

$$\text{Puissance mécanique utile : } P_u = P_{méca} - P_{pm} = (1 - g) P_{TR} \rightarrow C_u = C_{em} - C_p$$

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.

3.2.2.2 Bilan des puissances en fonctionnement moteur et rendement

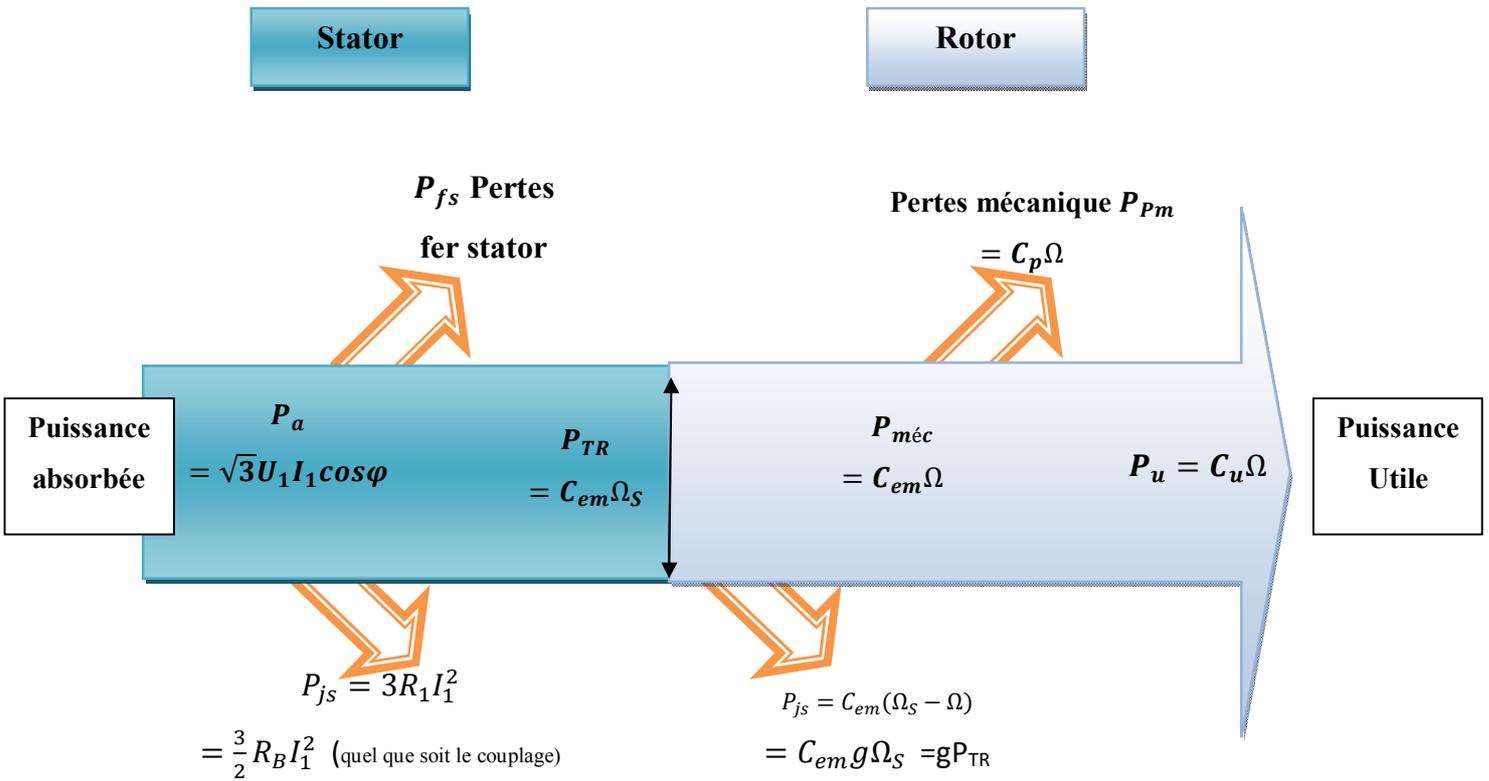


Figure 3.2 Bilan des puissances en fonctionnement moteur

R_B Résistance mesurée entre deux bornes statoriques du moteur, quel que soit le couplage.

($R_B = 2R_1$ pour un couplage Y et $R_B = 2/3 R_1$ pour un couplage Δ)

3.2.2.3 Expression du couple électromagnétique C_{em} (ou C)

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: $C_u = C_{em} - C_p = C_{em}$

En posant $R = R_2 / m^2$ et $X = l_2 \omega / m^2$, on obtient schéma équivalent simplifié suivant:

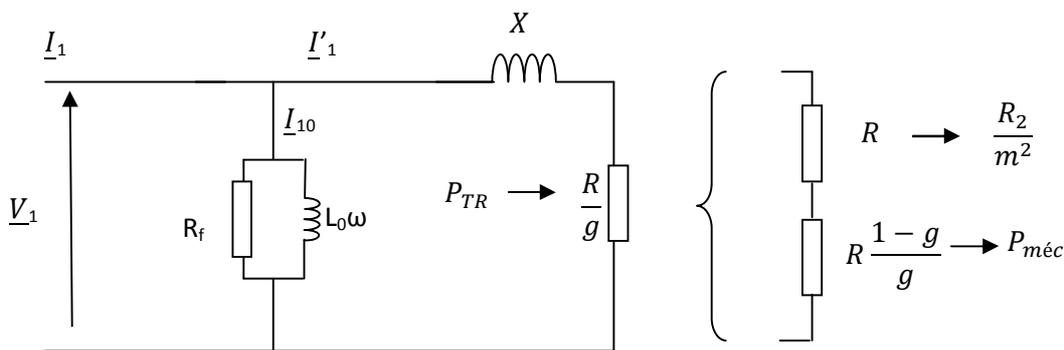


Figure 3.3 Schéma équivalent monophasé simplifié

On peut écrire $I_1' = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R}{g}\right)^2 + X^2}}$ et il en découle que : $C_{ém} = \frac{P_{TR}}{\Omega_s} = \frac{3 \frac{R}{g} I_1'^2}{w/p}$

D'où l'on tire l'expression du couple électromagnétique $C_{em} : C_{ém} = \frac{P}{w} = \frac{3V_1^2 \frac{R}{g}}{\left(\frac{R}{g}\right)^2 + X^2}$

3.2.3 Caractéristique mécanique $C_{ém} = f(\Omega)$ de la machine asynchrone

3.2.3.1 Fonctionnement en génératrice et en moteur

$-1 < g < 0$	$0 < g < 1$
$P_{JR} > 0$	$P_{JR} > 0$
$P_{TR} = P_{JR} / g < 0$	$P_{TR} = P_{JR} / g > 0$
$P_{méc} = (1 - g) \cdot P_{TR} < 0$	$P_{méc} = (1 - g) \cdot P_{TR} > 0$
Fonctionnement en génératrice asynchrone	Fonctionnement en moteur asynchrone

Le fonctionnement en génératrice asynchrone a lieu, en particulier, toutes les fois où la charge devient entraînant et que $\Omega > \Omega_s$

3.3 Courbes caractéristiques

Les caractéristiques tracées en fonction de P_u / P_{un} présentent les allures suivantes:

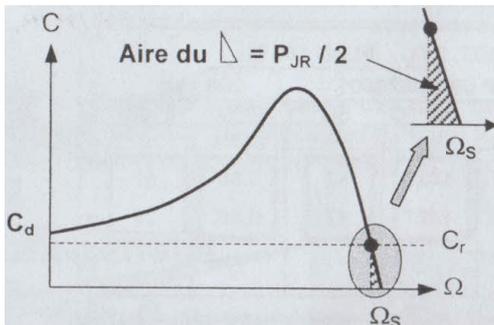
- Le facteur de puissance $\cos \phi$ part d'une valeur faible (de l'ordre de 0,1). Pour le fonctionnement nominal, il est de 0,7 à 0,95 suivant la puissance du moteur.
- Le rendement η nul à vide ($P_u = 0$), prend rapidement une valeur proche de son rendement nominal (0,7 à 0,9 suivant la puissance du moteur).
- Le courant absorbé I_1 , part d'une valeur I_{10} relativement forte (30 à 50 % de I_{1n} suivant la puissance du moteur) puis augmente presque linéairement.

Le couple utile C_u est à peu près proportionnel à P_u puisque $C_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{P_u}{(1-g)\Omega_s}$

et très faible dans la partie utile de $C(\Omega)$, où l'on trace cette caractéristique

3.4 Différents types de moteurs asynchrones

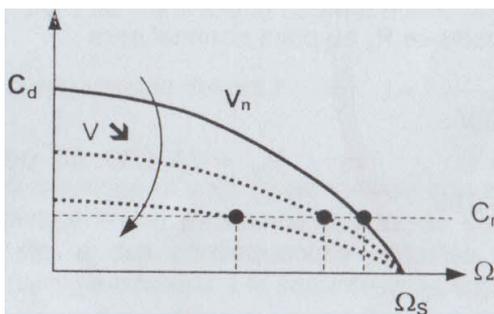
3.4.1 Moteur asynchrone à cage normale



- Technologie robuste et éconornique
- La cage du moteur est de faible résistance pour que le glissement en marche normale soit faible, ce qui donne un bon "rendement"
- Le couple de démarrage C_d est faible

Figure 3.4 Caractéristique mécanique du moteur asynchrone à cage normale

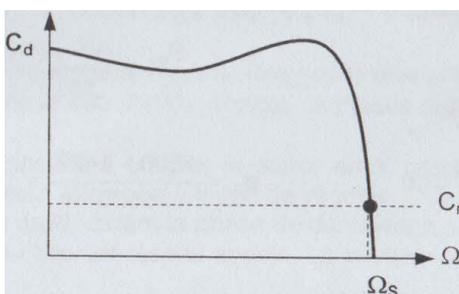
3.4.2 Moteur asynchrone à cage résistante



- Fort couple au démarrage
- Variation de vitesse par action sur la tension statorique tout en conservant un couple de démarrage satisfaisant;
- Le glissement est élevé ce qui conduit à un faible rendement.

Figure 3.5 Caractéristique mécanique du moteur asynchrone à cage résistante

3.4.3. Moteur asynchrone à double cage ou à encoches profondes



- Fort couple au démarrage;
- Appel de courant au démarrage inférieur à un moteur à cage normale;
- Plus gros et plus chers que les moteurs à cage normale
- Ils sont de plus en plus utilisés aujourd'hui.

Figure 3.6 Caractéristique mécanique du moteur asynchrone à double cage

3.5 Démarrage

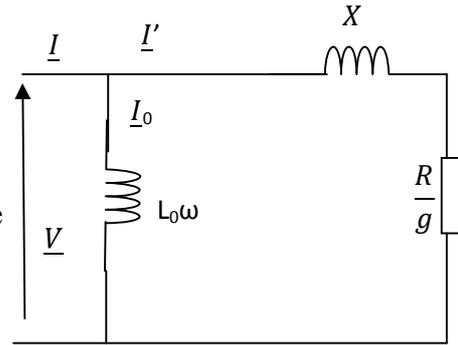
3.5.1. Position de problème : démarrage direct

C'est le procédé le plus simple mais aussi le plus brutal.

Il est réservé aux moteurs de petite puissance ($P < 3 \text{ kW}$).

Au démarrage du moteur ($g = 1$), la pointe d'intensité est de l'ordre de 4 à 8 fois le courant nominal I_n :

$$I_0 \text{ négligeable devant } I' \rightarrow I \approx I' = \frac{V}{\sqrt{R^2 + X^2}} \gg I_n$$



Ceci provoque une chute de tension non négligeable au niveau du réseau d'alimentation et sollicite la fourniture d'une puissance apparente élevée. De plus, le couple d'accélération important, qui en résulte, a des conséquences néfastes sur les systèmes mécaniques entraînés: usure rapide, démarrage inadapté à la sécurité et au confort (escalier mécanique par exemple).

Pour résoudre ces problèmes, il existe deux grandes familles de solutions:

- augmenter R ;
- réduire la valeur efficace V (ce qui revient à diminuer la tension efficace U entre phases)

3.5.2 .Démarrage étoile (Y) – Triangle (Δ)

Ce procédé n'est envisageable que si le moteur a été conçu pour fonctionner en Δ Sur un réseau triphasé 400 V entre phases, la plaque signalétique du moteur doit indiquer 400 V /690 V.

Il consiste à coupler le stator en Y pendant le démarrage, puis à rétablir le couplage Δ quand le moteur atteint sa vitesse de régime. Chaque enroulement est ainsi soumis à la tension simple V au lieu de U , durant la phase de démarrage, ce qui entraîne une réduction du tiers du couple et du courant réseau appelé. La mise en œuvre de ce procédé est simple

Ce démarrage convient aux moteurs de puissances moyennes ($P < 50 \text{ kW}$) démarrant à vide ou avec des couples résistants (C_r) très faibles. Si le couple résistant est élevé, les pointes de courant et de couple restent importantes au moment du changement de couplage.

3.5.3 . Démarreur – ralentisseur progressif électronique :

Pour varier la valeur efficace de la tension de sortie et fixer la fréquence de sortie, on alimente la MAS avec un gradateur .

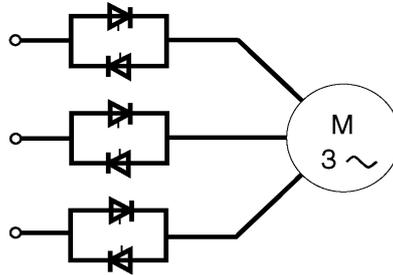


Figure 3.7 Machine asynchrone alimentée par un gradateur

L'utilisation du démarreur-ralentisseur est recommandée lorsqu'il est nécessaire de :

- réduire les pointes de courant et diminuer les chutes de tension en ligne.
- réduire les couples au démarrage pour protéger la mécanique,
- accélérer, décélérer ou freiner en douceur, pour la sécurité des personnes ou des objets transportés,
- démarrer progressivement les machines en particulier celles à fortes inerties,
- adapter facilement le démarreur aux machines spéciales,
- protéger le moteur avec une protection très élaborée

Ces dispositifs contrôlent aussi l'arrêt des machines , qui peut être ainsi progressif ou naturel Mais , les perturbations qu'ils génèrent sur le réseau (pollution harmonique) en limitent l'utilisation . On leur préfère les convertisseurs de fréquence pouvant eux aussi assurer la fonction de démarrage.

3.6 Variation de vitesse

3.6.1. Position du problème

La vitesse Ω du moteur asynchrone est égale $\Omega = \Omega_s - (1 - g) = \frac{\omega}{p}(1 - g)$

Le point de fonctionnement (C, Ω) dans le quadrant I en régime établi de l'ensemble machine plus charge se situe à l'intersection des caractéristiques $C_{em} = f(\Omega)$ du moteur et $C_r = f(\Omega)$ de la charge. Le réglage de la vitesse de la machine asynchrone est donc obtenu en agissant sur le couple qu'elle produit, soit, si l'on se réfère à son expression ci-dessus : le nombre de paires de pôles, la tension d'alimentation de la machine, le glissement ou la fréquence d'alimentation de la machine.

A. Réglage par variation du nombre de paires de pôles

Ceci donnant une variation non continue (discontinu) de la vitesse ce mode n'est donc pas envisagé pour un réglage fin du point de fonctionnement désiré.

B. Réglage par variation de tension

Le couple électromagnétique de la machine asynchrone est proportionnel au carré de la tension d'alimentation statorique. Il est donc possible d'envisager un ajustement de la vitesse au-dessous de la vitesse nominale en modifiant la tension d'alimentation statorique avec un **gradateur triphasé**. Cette solution est le plus souvent utilisée pour le démarrage de charges à caractéristique de couple quadratique ($C_r = k\Omega^2$).

C. Réglage par action sur le glissement

L'utilisation de résistances rotoriques permet un réglage de la vitesse au-dessous de la vitesse nominale mais avec un rendement déplorable. On essaiera donc de récupérer cette énergie transmise au rotor : c'est la cascade hyposynchrone réservée à la très forte puissance pour des machines à rotor bobiné.

3.6.2 Modification de la vitesse par action sur le nombre de pôles

a .Moteur à enroulements statoriques séparés

Le moteur comporte deux enroulements statoriques indépendants permettant d'obtenir deux vitesses dans un rapport quelconque.

Exemple : moteur deux vitesses 1000 / 3000 tr/mn.

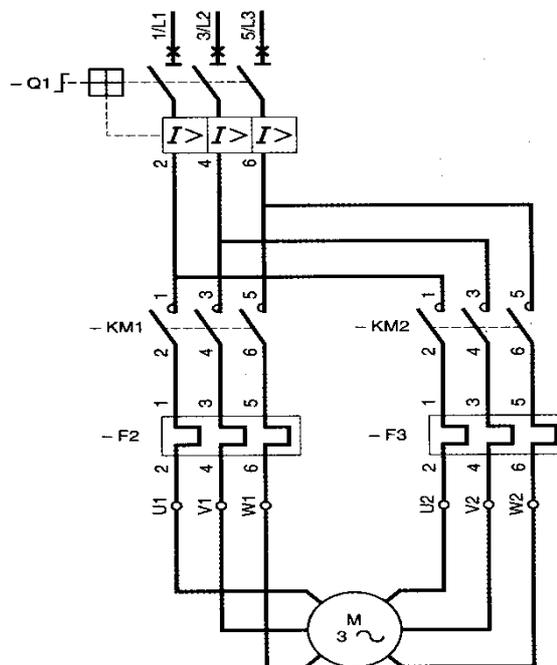


Figure 3.8 Circuit de puissance de variation de vitesse

Remarque : Les puissances absorbées en GV et PV sont souvent très différentes, ce qui nécessite un relais de protection thermique par vitesse.

b. Moteur à couplage de pôles (montage DAHLANDER)

Le rapport des vitesses est de 1 à 2. Ce couplage fournit une puissance en grande vitesse P_{GV} deux fois supérieure à la puissance en petite vitesse P_{PV} . Le couple utile est donc constant quelle que soit la vitesse utilisée.

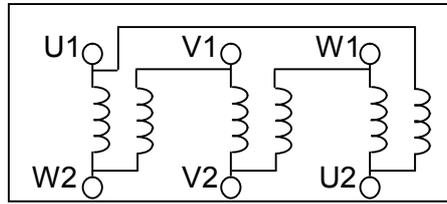
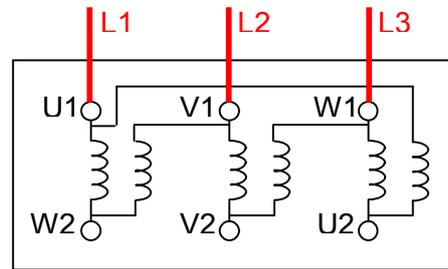
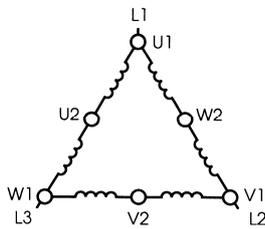


Figure 3.9 Plaque à bornes

Deux couplages sont possibles :

- Couplage TRIANGLE-SERIE pour la petite vitesse (PV)



- Couplage ETOILE PARALLELE pour la grande vitesse (GV)

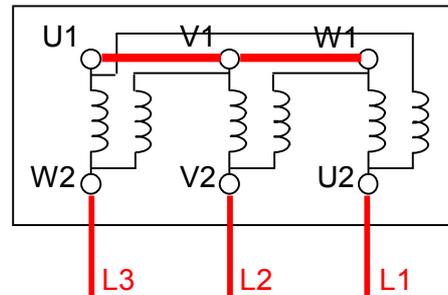
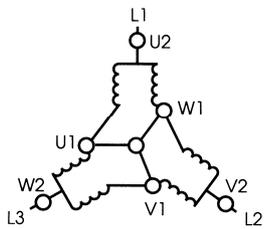


Figure 3.10 Schéma de principe

3.6.3 Modification du glissement des moteurs asynchrones a rotor bobinés

La formule générale du couple électromagnétique moteur étant la suivante :

$$C_{ém} = \frac{3m^2 V_1^2}{\Omega_s} \times \frac{\frac{R_R}{g}}{\left(\frac{R_R}{g}\right)^2 + X_2^2}$$

V_1 : tension simple statorique

m : Rapport de transformation moteur

Ω_s : vitesse angulaire de synchronisme

R_R : Résistance globale du rotor

X_2 : Réactance du rotor

g : glissement

Le couple du moteur asynchrone ne dépend à tension et fréquence du stator fixée, que de la variable R_R/g .

Lorsque $R_R/g \gg X_2$ la formule se simplifie.

$$C_{ém} = \frac{3m^2 V_1^2}{\Omega_s} \times \frac{g}{R_R} = K \frac{g}{R_R}$$

En insérant des résistances en série avec les enroulements rotoriques, il est possible d'obtenir plusieurs points de fonctionnement.

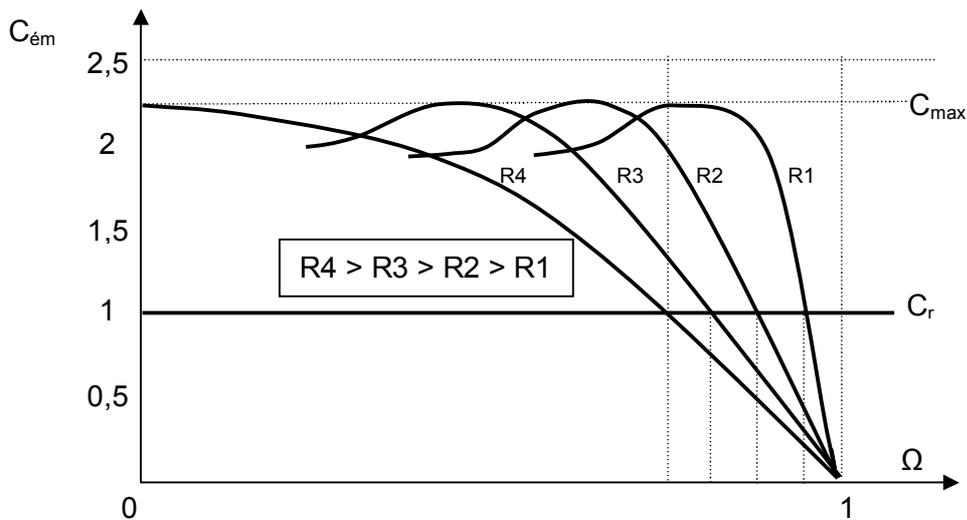


Figure 3.11 Variation de vitesse par action sur les enroulements rotoriques

3.6.4. Variation de la vitesse par action sur la fréquence

3.6.4.1. Principe

La variation de vitesse s'obtient en faisant varier la fréquence à l'aide d'un onduleur. Généralement, la tension continue est obtenue en utilisant un pont redresseur associé à un condensateur de filtrage. Afin d'obtenir un **couple constant** le convertisseur de fréquence (ensemble **redresseur + onduleur**) fonctionne à $U/f = cte$

Schéma fonctionnel complet :

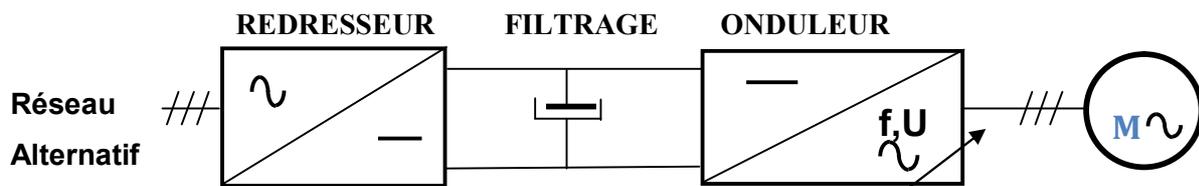


Figure 3.12 : Synoptique d'un convertisseur continu-alternatif

Pour différentes vitesses de synchronismes, la partie linéaire des caractéristique couple/vitesse se déplacent parallèlement.

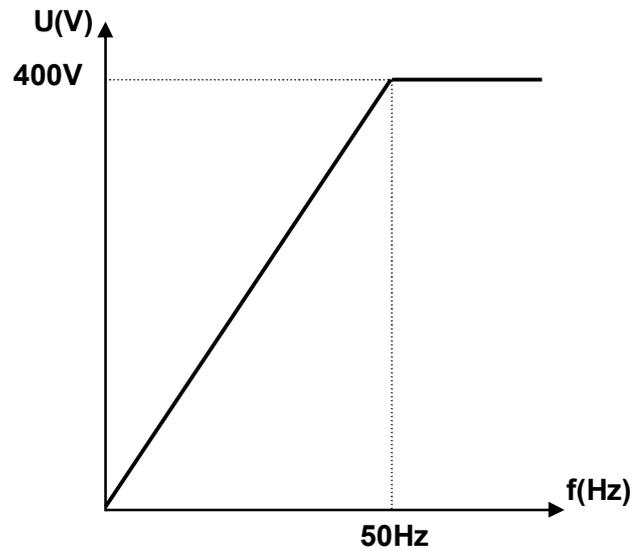


Figure 3.13 Loi tension /fréquence

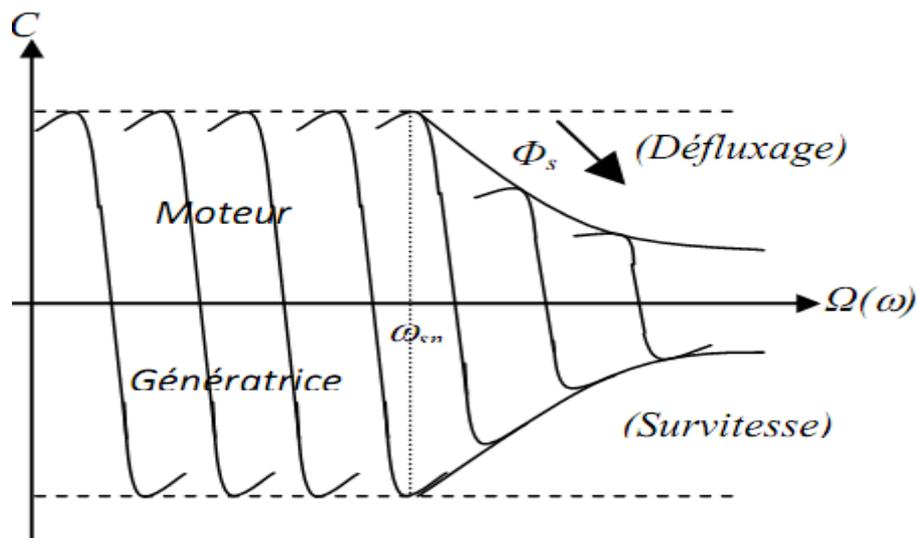


Figure 3.14 Caractéristiques de réglage par variation de la fréquence d'alimentation d'une machine asynchrone

Le convertisseur de fréquence utilise le principe de la modulation de largeur d'impulsion (MLI).

Quelle que soit la fréquence le découpage MLI permet à la forme du courant d'être proche d'une sinusoïde. Le découpage de la tension permet l'élimination des certaines harmoniques de rangs faibles. Le courant obtenu est plus proche d'une sinusoïde et le couple plus régulier à basse vitesse. L'échauffement du moteur est moindre.

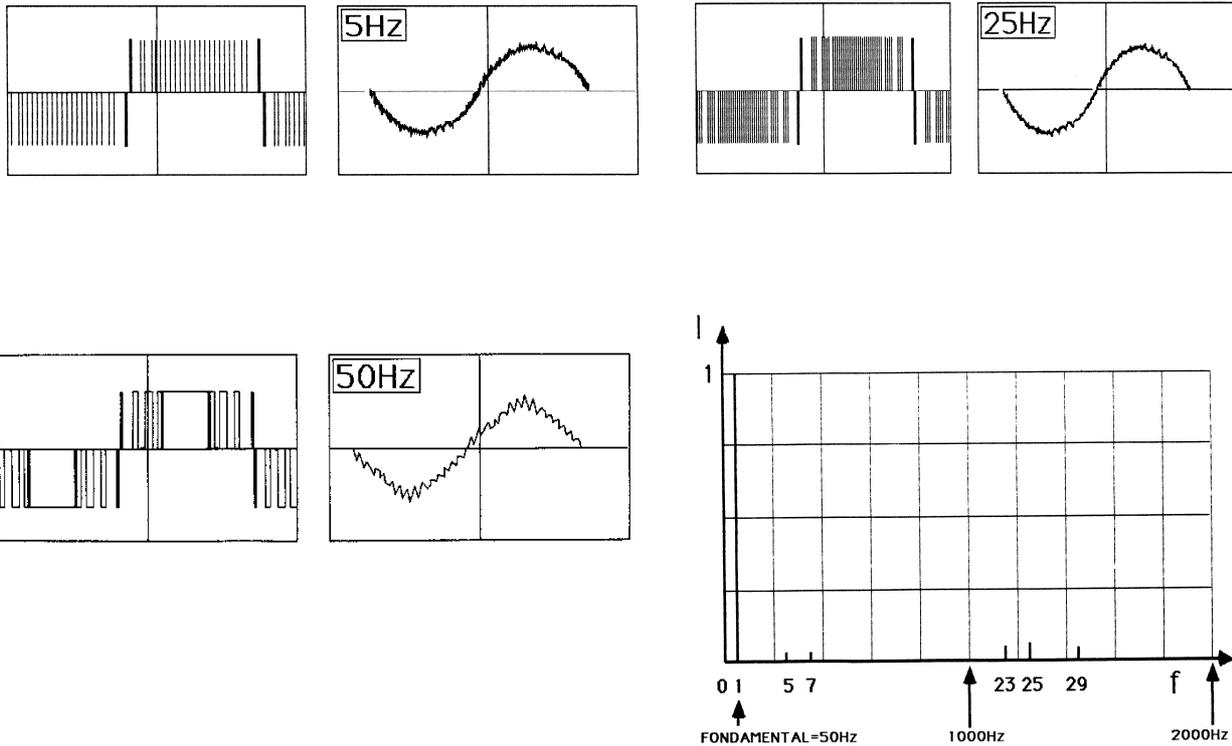


Figure 3.15 Tension et courant d'onduleur MLI pour différentes fréquences et leur décomposition harmonique du courant à 50 Hz.

3.6.4.2 Fonctionnement dans les 4 quadrants

Fonctionnement dans les quadrants 1 et 3.

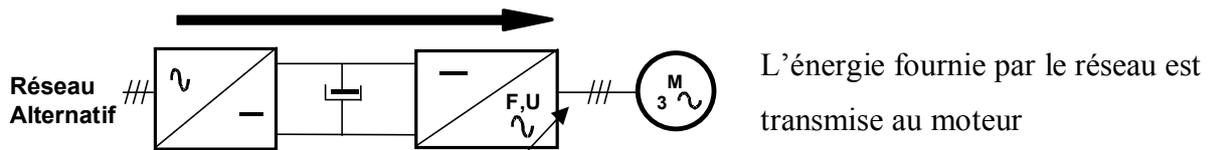


Figure 3.16 Fonctionnement dans les quadrants 1 et 3

Fonctionnement dans les quadrants 2 et 4.

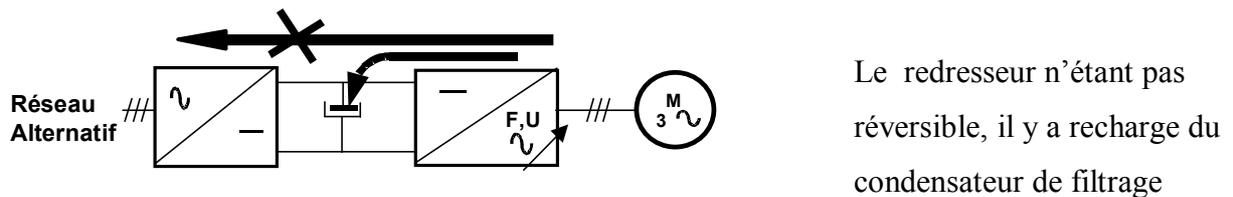
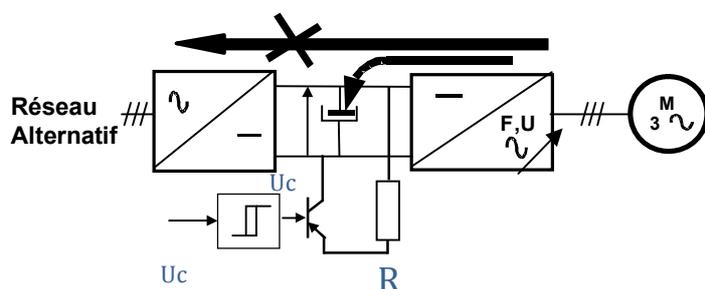


Figure 3.17 Fonctionnement dans les quadrants 2 et 4

Freinage de ralentissement (quadrants 2 et 4).



Au delà d'une certaine tension (U_c) aux bornes du condensateur de filtrage, l'énergie fournie par le moteur est dissipée dans une résistance (option freinage)

Figure 3.18 Freinage de ralentissement dans les quadrants 2 et 4

3.7 MACHINE SYNCHRONE

La machine synchrone est réversible, elle peut fonctionner soit en génératrice, soit en moteur. Lors de son fonctionnement en génératrice, il y a transformation d'énergie mécanique en énergie électrique, elle prend alors le nom d'alternateur.

3.7.1 Fonctionnement en génératrice - Alternateurs autonomes

3.7.1.1. Fonctionnement

Inducteur (roue polaire) : c'est le rotor. Il est alimenté en continu. Il possède p paires de pôles. Il crée dans l'entrefer un champ tournant à répartition spatiale sinusoïdale présentant $2p$ pôles. Il peut être à pôles lisses, la reluctance du circuit magnétique est alors considérée comme constante ou à pôles saillants.

Induit: c'est le stator. Il est monophasé ou triphasé. Il comporte N conducteurs actifs par enroulements. En alternateur, lorsque la roue polaire est entraînée à la vitesse n_s , les enroulements de l'induit sont le siège de f.é.m. induites qui forment un système de tensions triphasées équilibrées de fréquence $f = n_s p$ (p nombre de paires de pôles; n_s fréquence de rotation).

3.7.1.2. Expression de la valeur efficace de la f.e.m. induite E par phase

L'expression de la valeur efficace de la f.e.m. induite E est:

$$E = K f N \hat{\Phi}$$

K : coefficient de Kapp ;

f : fréquence du réseau en Hz ;

N : nombre de conducteurs actifs par enroulement (par phase) ;

$\hat{\Phi}$: flux maximal embrasse par une spire en Wb.

On distingue 3 zones. Dans la première, la machine n'est pas saturée, E , donc le flux d'excitation est proportionnel au courant d'excitation. La deuxième correspond au coude de saturation. Dans la troisième zone, la machine est saturée. Le point nominal se situe dans le coude de saturation.

Remarque : en réalité il y a un léger hystérésis dû à la nature ferromagnétique du matériau constituant la machine. On approxime le plus souvent la courbe à la courbe milieu.

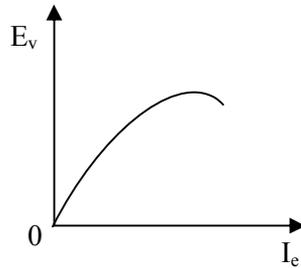


Figure 3.19 f.é.m à vide en fonction du courant d'excitation

3.7.1.3 Caractéristique en charge

C'est la caractéristique $V = f(I)$ (tension simple en fonction du courant de ligne) à excitation et vitesse fixée ce qui correspond à maintenir la f.é.m E à vide constante.

Remarque : La chute de tension n'est pas la même dans le cas d'une charge inductive, résistive ou capacitive. Les modèles équivalents établis suivant des hypothèses plus ou moins justifiées permettront de prendre en compte ce phénomène par la présence d'une (ou plusieurs) inductance(s) dans le schéma équivalent à une phase.

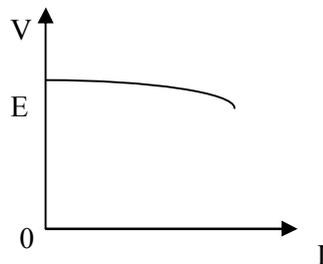


Figure 3.20 Caractéristique en charge

3.7.1.4. Caractéristique de réglage

Il s'agit de tracer $I = f(I_e)$ à vitesse fixée à la vitesse de synchronisme et à tension simple ou composée imposée

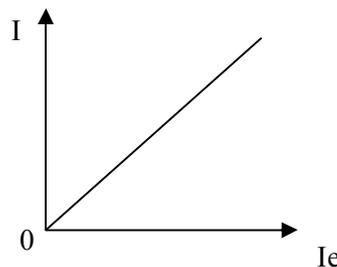


Figure 3.21 Caractéristique de réglage

Cette courbe est utile pour la régulation de la tension de sortie de l'alternateur. En effet l'alternateur est une source de tension triphasée. L'amplitude de la tension et la fréquence doivent être maintenues constantes.

3.7.1.5 Schéma équivalent à un enroulement

Il existe en fait 4 schémas équivalent pour une phase, qui correspondent aux cas suivants:

- machine non saturée et à pôles lisses (modèle synchrone dit de Behn Eschenburg) ;
- machine saturée et à pôles lisses;
- machine non saturée à pôles saillants;
- machine saturée et à pôles saillants.

Nous développerons essentiellement le premier modèle, qui, même s'il est imprécis quantitativement permet une description qualitative acceptable de la machine synchrone.

3.7.1.6 Modèle de Behn Eschenburg

Hypothèses: machine à pôles lisses, non saturée

a. Diagramme synchrone dit de Behn Eschenburg

E_e : valeur efficace de la f.é.m. induite à vide;

$X = L\omega$, réactance synchrone

r : résistance d'un enroulement de l'induit.

L'équation du schéma équivalent est:

$$\underline{V} = \underline{E}_e - r\underline{I} - jX_s\underline{I}$$

On peut utiliser le même schéma équivalent et les mêmes formules en couplage triangle en remplaçant le courant de ligne par le courant de phase J et V par la tension composée U .

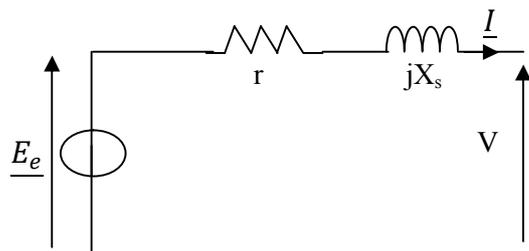


Figure 3.23 Schéma équivalent monophasé

b) Détermination des éléments du modèle

L'alternateur n'est pas saturé: on admet que la f.é.m. synchrone E_e est donnée par la caractéristique à vide linéarisée.

La résistance r d'un enroulement se détermine par la mesure. Il faut cependant tenir compte du

couplage des enroulements de l'induit:

- pour un couplage étoile: $r = \frac{R_{mesurée}}{2}$

- pour un couplage triangle: $r = \frac{3}{2}R_{mesurée}$

• L'impédance synchrone $Z = \sqrt{r^2 + X_s^2}$ se détermine par un essai en court-circuit:

$$Z = \frac{E_V}{I_{cc}} = \sqrt{r^2 + X_s^2}$$

c) Diagramme synchrone

Il s'agit d'un diagramme vectoriel où la tension V est la référence des phases. Ce diagramme se justifie lorsque la machine synchrone est couplée au réseau car celui-ci impose alors la tension.

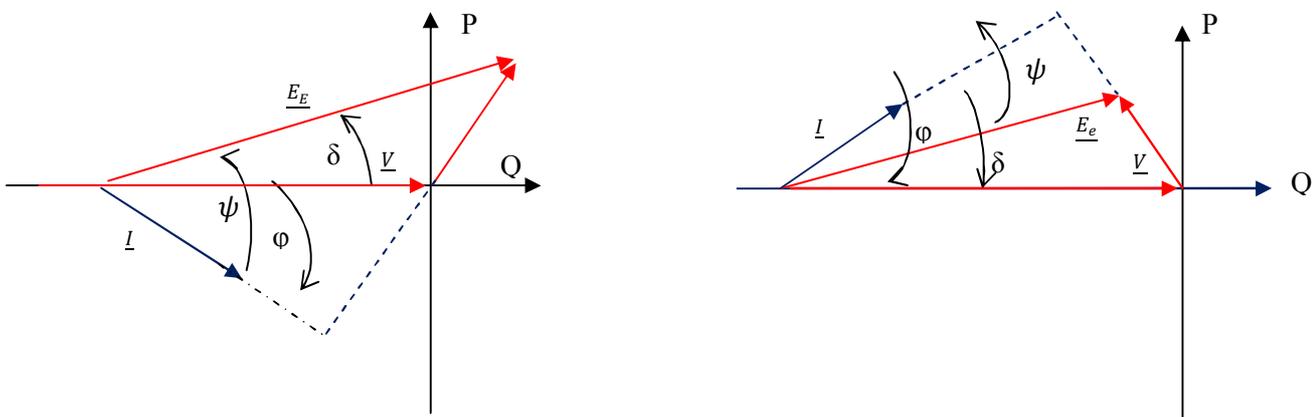


Figure 3.24 a) Cas d'une charge inductive $\varphi > 0$ b) Cas d'une charge capacitive $\varphi < 0$

Remarques :

- δ caractérise la position du rotor par rapport au stator.

- Les relations trigonométriques impliquent:

$$X_s I \cos \varphi = E_e \sin \delta \quad ; \quad V \cos \varphi = E_e \cos \psi \quad X_s I \sin \varphi = E_e \cos \delta$$

3.7.1.9 Bilan des puissances

a) Puissance absorbée

Le moteur d'entraînement fournit à l'alternateur un couple de moment C_M . La puissance absorbée est de type mécanique pour l'induit et électrique pour l'inducteur (éventuellement) :

$$P_a = C_M \Omega + (U_e i_e)$$

Avec U_e tension aux bornes de l'inducteur et i_e courant d'excitation dans l'induit.

b) Puissance utile

$P_u = Vj \cos \varphi$ pour le cas monophasé

$P_u = \sqrt{3} UI \cos \varphi = 3Vj \cos \varphi$ pour le cas triphasé

C) Pertes

-les pertes constantes: elles correspondent aux pertes dans le fer et aux pertes mécaniques et ne dépendent pas de la charge: $P_c = P_f + P_m$

-les pertes par effet Joule dans l'inducteur: $P_{je} = U_e i_e$

Alternateur monophasé:

$P_j = rj^2$ (r résistance d'un enroulement).

Alternateur triphasé:

$P_j = \frac{3}{2} RI^2 = 3rj^2$ (R mesurée résistance entre deux bornes).

d) Rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{UI\sqrt{3} \cos \varphi}{C_m \Omega} = \frac{UI\sqrt{3} \cos \varphi}{UI\sqrt{3} \cos \varphi + P_c + P_{je} + P_j}$$

Alternateur auto-excité

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{UI\sqrt{3} \cos \varphi}{C_m \Omega + U_e i_e} = \frac{UI\sqrt{3} \cos \varphi}{UI\sqrt{3} \cos \varphi + P_c + P_{je} + P_j}$$

Alternateur non auto-excité

e) Représentation des puissances

On supposera les pertes négligeable

La puissance active s'écrit: $P = 3VI \cos \varphi = \frac{3V}{X_s} E_e \sin \delta = 3EI \cos \psi$. L'expression $E_e \sin \delta$ est la projection de E_e sur l'axe vertical. Ce segment est proportionnel à P.

La puissance réactive s'écrit: $Q = 3VI \sin \varphi = \frac{3V}{X_s} E_e \cos \delta$

L'expression $E_e \cos \delta$ est la projection de E_e sur l'axe horizontal. Ce segment est proportionnel à Q.

Si les puissances P et Q sont de même signe alors la machine renvoie de la puissance active et réactive, elle est sur excitée (figure 3.22). Q est de signe opposé à P, la machine absorbe de la puissance réactive, elle est sous excitée.

On constate que l'on peut renvoyer de la puissance réactive si le courant d'excitation dépasse une

certaine valeur appelée excitation optimale.

3.7.2 Machine synchrone couplée sur le réseau: réversibilité

3.7.2.1 Couplage sur le réseau - démarrage du moteur synchrone

Le couplage sur le réseau se pose lors du démarrage de la machine synchrone et lorsque l'on veut renvoyer de l'énergie vers le réseau via un alternateur. Il faut dans ces deux cas réaliser le couplage sur le réseau.

Conditions de réalisation: il s'agit de créer un champ tournant statorique ayant les mêmes caractéristiques que celui du réseau à savoir, même vitesse et même sens de rotation, afin de pouvoir les accrocher l'un à l'autre.

Pour ceci, il faut dans un premier temps faire fonctionner la machine synchrone en alternateur autonome. Elle est entraînée par un moteur auxiliaire. Une fois la vitesse de synchronisme et le bon sens de rotation atteint, un réseau de tension triphasé apparaît aux bornes de l'induit. Si on veut le connecter au réseau, il nous faut alors respecter une 3^{ème} condition: même valeur efficace pour les tensions statoriques et les tensions du réseau. Dans la pratique, on utilise le système de la figure suivante .

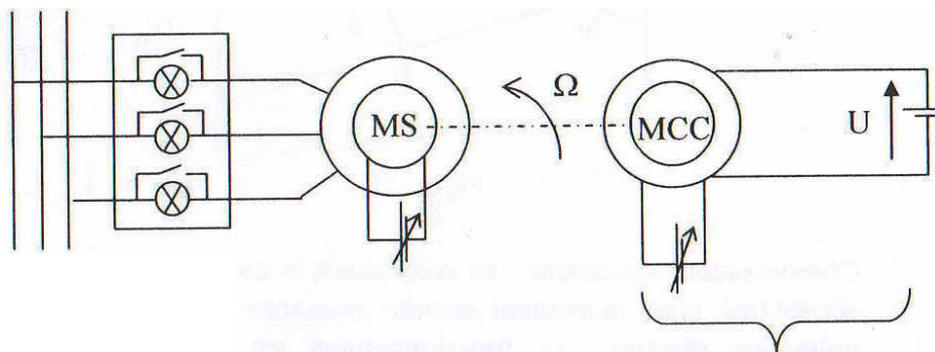
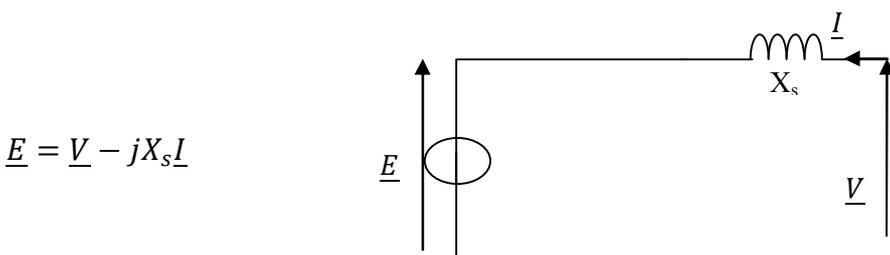


Figure 3.26 Couplage d'une machine synchrone sur le réseau

3.7.2.2 Moteur d'entraînement

Remarque: la machine fonctionne tout d'abord en alternateur autonome, puis une fois le couplage réalisé, en alternateur couplé sur le réseau. Si le moteur auxiliaire lui fournit de la puissance mécanique, la machine synchrone fournira de la puissance électrique au réseau. Si on remplace le moteur auxiliaire par une charge mécanique, la machine synchrone fonctionnera en moteur et absorbera de la puissance électrique pour fournir de la puissance mécanique à la charge.



$$\underline{E} = \underline{V} - jX_s \underline{I}$$

Figure 3.27 Schéma équivalent en moteur

et le diagramme synchrone en fonctionnement moteur est présenté par :

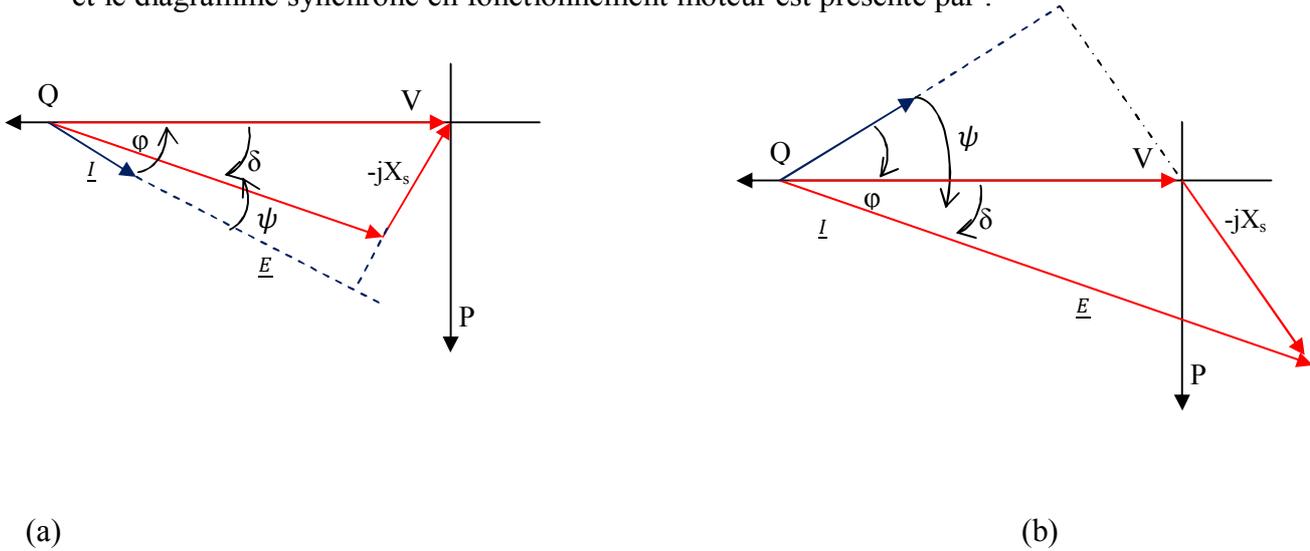
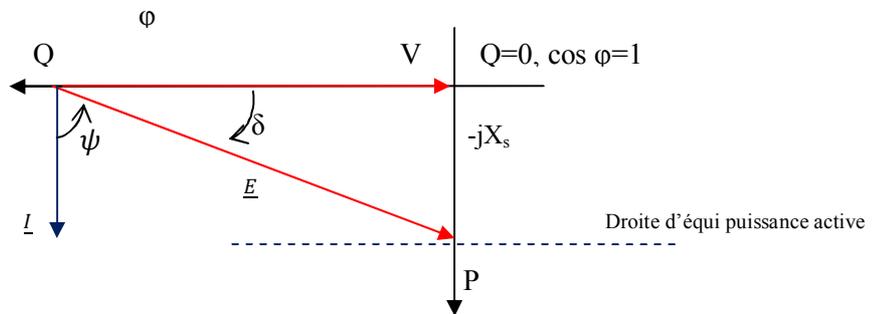


Figure 3.28

- a) Cas d'une charge inductive $\varphi > 0$. Le moteur est sous excité, il absorbe de la puissance réactive
- b) Cas d'une charge capacitive $\varphi < 0$. Le moteur est sur excité, il renvoie de la puissance réactive

Excitation optimal pour une puissance active fixée, cette excitation correspond à une puissance réactive nulle et le courant d'induit minimum.



Compensateur synchrone: en surexcitant le moteur synchrone fonctionnant à vide (il ne consomme alors quasiment aucune puissance active), on peut lui faire renvoyer de la puissance réactive: ce fonctionnement est appelé compensateur synchrone. Cela correspond à un minimum pour le courant absorbé.

En utilisant les différentes relations de trigonométrie, on obtient pour la puissance active trois expressions:

$$P = 3VI\cos\varphi = \frac{3V}{X_s}I\sin\delta = 3VE\cos\psi.$$

D'où trois expressions du couple électromagnétique:

$$C_e = \frac{3VI}{\Omega_s} \cos\varphi = \frac{3V}{\Omega_s X_s} I \sin\delta = \frac{3VE}{\Omega_s} \cos\psi.$$

Le moteur synchrone décroche lorsque la charge entraînée oppose un couple résistant trop important, ce qui correspond à un angle δ de 90° .

Pour le bilan de puissances, il s'agit de parcourir celui de l'alternateur dans le sens inverse.

Récapitulatif: on peut faire l'équivalent d'un schéma 4 quadrants pour la MS.

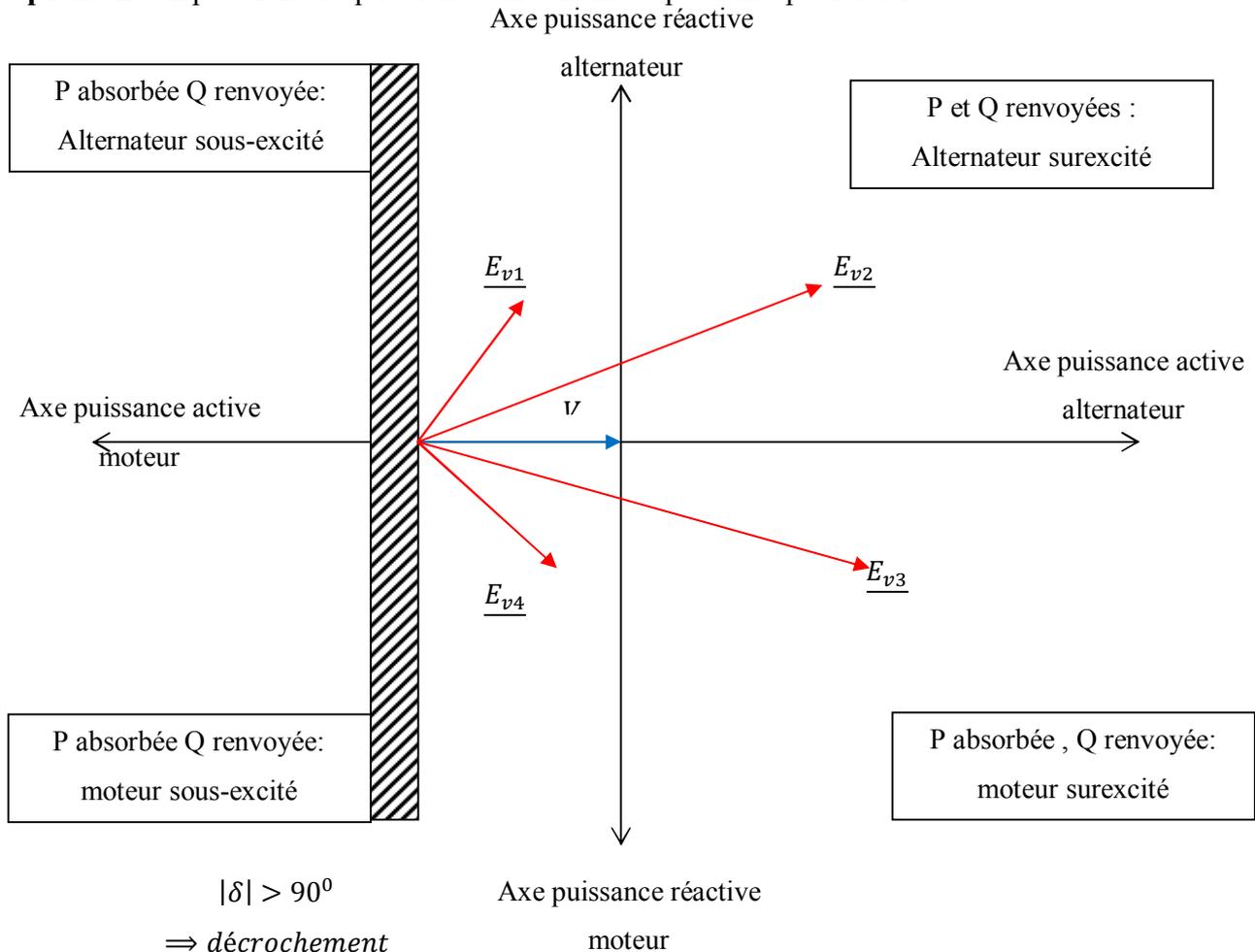


Figure 3.29 Schéma équivalent quatre quadrants pour la machine synchrone

la valeur de la puissance active, le facteur limitant sera le courant d'induit, le courant d'excitation ou l'angle interne.

3.8 Machine synchrone autopiloté

Pour faire varier la vitesse d'un moteur synchrone il faut faire varier la fréquence de son réseau d'alimentation. Le principe de l'autopilotage repose sur une alimentation particulière des phases de l'induit.

En effet, si l'on alimente le rotor et l'une des phases du stator en courant continu, chaque enroulement va créer une induction B continue et le rotor va tendre à s'aligner dans l'axe du champ statorique (position d'équilibre). Pour éviter cela, il faut alimenter une autre phase à ce moment là, et le rotor se remettra en rotation.

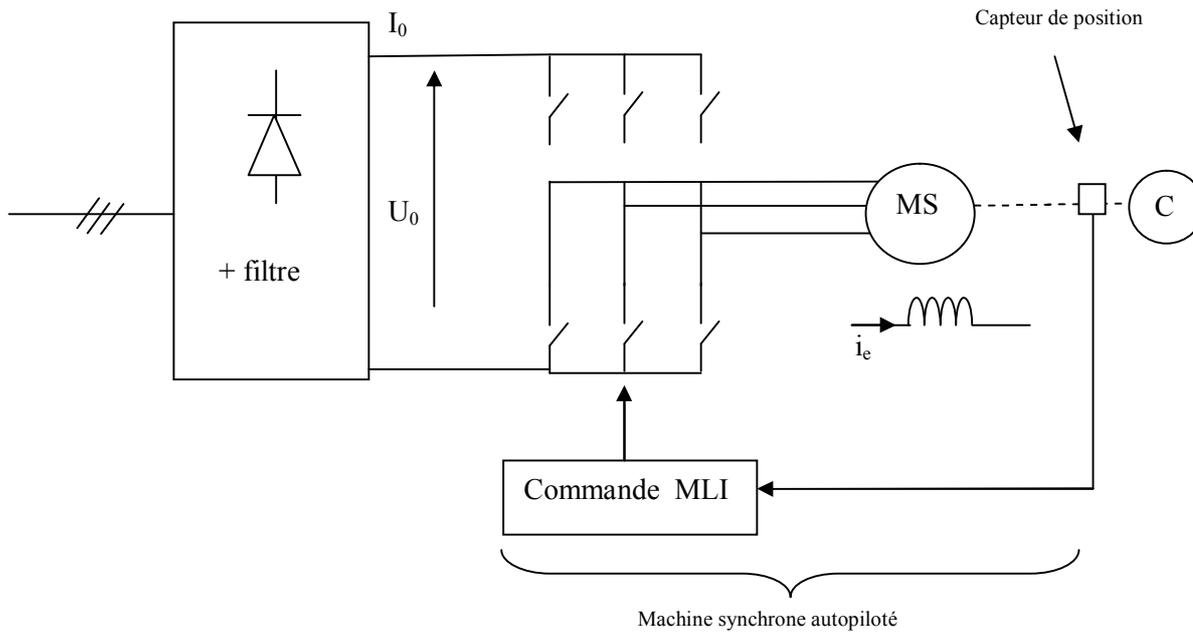


Figure 3.30 Machine synchrone autopilotée

A l'aide d'un capteur de position d'un onduleur et de sa commande, on peut alimenter à tout moment les phases statoriques de façon à maintenir le rotor en rotation. On peut également maintenir ainsi l'angle ψ , et suivant l'expression du couple électromagnétique, on obtient un couple proportionnel au courant d'induit. L'onduleur est autonome, on pourra donc faire varier la vitesse de la machine en faisant varier la fréquence. L'ensemble onduleur, machine synchrone, capteur de position est donc vu de l'extérieur comme une machine à courant continu, on l'appelle machine synchrone autopilotée ou encore machine à courant continu sans balais (brushless motor). L'ensemble se commande ensuite classiquement par un hacheur ou un onduleur. On utilisera un onduleur de courant dans le cas de charge de forte inertie, et un onduleur de tension avec commande MLI (de façon à diminuer les harmoniques de couple) pour les charges de faible inertie.