

## I.1 INTRODUCTION

A cause de la facilité de son alimentation, la simplicité de sa construction, sa robustesse, son entretien limité et aussi son prix intéressant, la machine asynchrone ou machine à induction, couvre la plupart des applications tant industrielles qu'avec usage domestique couvrant, une large gamme de puissance qui peut s'étendre de quelques centaines de Watts à quelques méga-Watts [1].

Les machines asynchrones, à la différence des machines synchrones, sont utilisées surtout comme moteur, elles peuvent fonctionner en génératrice quand le rotor est entraîné dans le sens du champ tournant à une vitesse supérieure à celle du synchronisme. Le moteur asynchrone est le type le plus répandu des moteurs électriques, sa prépondérance par rapport aux autres moteurs est due aux inconvénients présentés par ses dernières, on peut citer :

- Pur le moteur synchrone classique, la nécessité de l'accrochage sur le réseau.
- Pour le moteur à collecteurs, le prix et la fragilité relative des collecteurs.
- Le moteur asynchrone dans sa solution à cage est le moins cher et le plus robuste.

La double alimentation (DFAM : *double feed asynchronous motor*) concerne les machines à courant alternatif ayant des enroulements statoriques et rotorique biphasés ou triphasés. On utilise généralement le moteur asynchrone à rotor bobiné, lorsqu'on alimente le stator et le rotor d'un moteur asynchrone à partir d'un même réseau, simultanément le courant statorique  $I_s$  va créer un champ magnétique qui tourne à la vitesse,  $n_2 = (+/-)n_1$  le signe  $(+/-)$  indique le sens de rotation du champ magnétique rotorique par rapport au champ statorique. Dans ce cas, le moteur à double alimentation tourne à la vitesse  $n_2 = (+/-)n_1$  ; donc la machine peut fonctionner à une vitesse double synchronisme à vide. En charge le moteur envoie alors un réseau des courants à la fréquence de glissement qui influe sur la qualité de l'énergie du réseau [2].

Une technologie qui permet de faire varier la vitesse d'une machine asynchrone, alimentée au stator par un réseau fixe de 50Hz et au rotor par des sources de tension, consiste à utiliser le système de Scherbius dans lequel un cycloconvertisseur commande l'écoulement d'énergie dans le circuit rotorique.

## I.2 CONSTITUTION GENERALE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE

On classe les différentes pièces rencontrées dans toute machine tournante selon les trois grandes fonctions réalisées.

### I.2.1 Organes électriques

- Enroulements statoriques
- Conducteurs rotoriques

### I.2.2 Organes magnétiques

- Circuit magnétique fixe
- Circuit magnétique mobile

### I.2.3 Organes mécaniques

- Carcasse avec fixation ou stator
- Ventilateur
- Rotor avec l'arbre
- Capot de ventilateur
- Tige de montage
- Plaque à borne
- Roulements à billes
- Flasques

### I.2.4 Le stator

C'est la partie fixe du moteur. Il est constitué d'une carcasse sur laquelle est fixée une couronne de tôles d'acier de qualité spéciale munies d'encoches. Des bobinages de section appropriée sont répartis dans ces dernières et forment un ensemble d'enroulements qui comporte autant de circuits qu'il y a des phases sur le réseau d'alimentation

### I.2.5 Le rotor

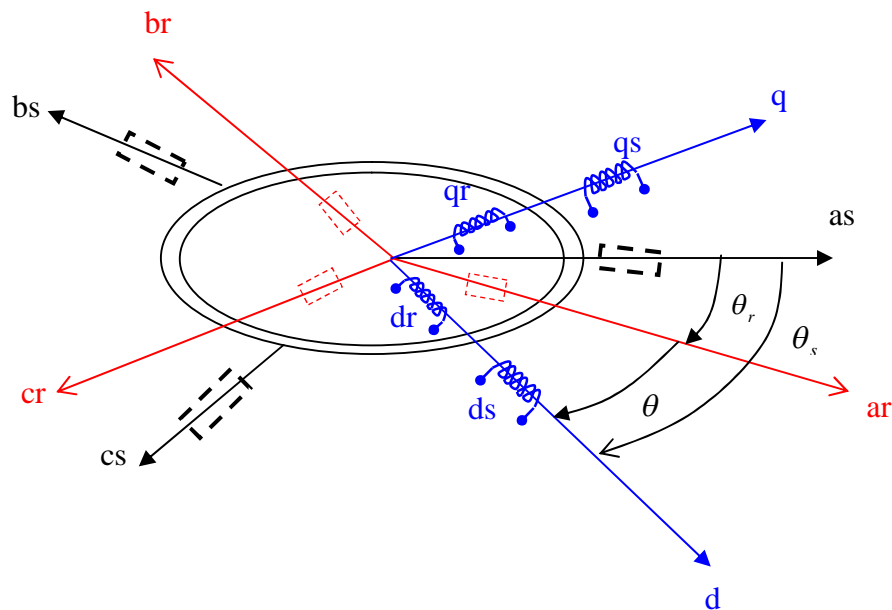
Mobile du moteur ; il est placé à l'intérieur du stator, et constitué d'un empilage de tôles d'acier formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Il tourne à une vitesse inférieure à

la vitesse du champ tournant. Il est placé dans un champ tournant par rapport à lui. Il doit être feuilleté pour réduire les pertes par courant de Foucault [3].

### I.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Une machine asynchrone triphasée comporte trois bobines statoriques ( $a_s; b_s; c_s$ ) décalées entre elles par un angle de  $2\pi/3$  et alimentées par un système de courants triphasés équilibrés. Ces deux conditions sont nécessaires pour la création d'un champ tournant au sein de la machine (théorème de FERRARIS).

Trois autres bobines identiques de répartition similaire à celles du stator sont placées dans l'armature rotorique et subissent l'action du champ tournant. Ces dernières sont montées en étoile et sont accessibles par la plaque à bornes et mises en court-circuit pendant le régime permanent [4].



**Fig. (I.1) :** Représentation Simplifiée de la Machine Asynchrone Triphasée.

#### I.3.1 Création d'un champ tournant

Le fonctionnement d'un moteur asynchrone s'explique par la loi de **LENZ**. Un champ tournant produit la rotation d'un disque de cuivre ce disque tourne à une vitesse inférieure à celle du champ tournant. Si on alimente trois bobines, identiques placées à  $120^\circ$  par une tension alternative Triphasée:

- Une aiguille aimantée, est placée au centre entraînée en rotation ; il y a donc bien création d'un champ tournant
- Un disque métallique en aluminium ou en cuivre est entraîné dans le même sens que l'aiguille aimantée.
- En inversant deux des trois fils de l'alimentation triphasée, l'aiguille ou le disque tourne en sens inverse.

### I.3.2 Relation d'électromécanique

Le moteur asynchrone est une machine transformant l'énergie électrique en énergie mécanique. Il est caractérisé par des grandeurs d'entrée qui sont électriques et par des grandeurs de sortie qui sont mécaniques [3].

#### I.3.2.1 Grandeurs d'entrée (en triphasé)

- $U$  : tension entre phases (V)
- $I$  : courant absorbé (A)
- $\phi$  : cosinus de l'angle entre le courant et la tension, il peut varier de 0,1 à 0,2 à vide et jusqu'à 0.9 en pleine charge.

#### I.3.2.2 Grandeurs de sortie

- $P = \Gamma \omega = C \omega$
- $P$  : puissance mécanique (W)
- $\Gamma$  : couple moteur (Nm)
- $\omega$  : vitesse angulaire (rd/s)

## I.4 METHODES DE VARIATION DE LA VITESSE DE ROTATION

La variation de la vitesse des moteurs asynchrones est assez difficile mais avec l'apparition de l'électronique de puissance, celle-ci est devenue plus facile. Les méthodes de variation de la vitesse agissant sur Le stator et Le rotor.

### **I.4.1 Coté stator**

#### **I.4.1.1 Par modification du nombre de paires de pôles P**

En utilisant la relation  $(\omega/P)$  on modifie le nombre de paires de pôles P par commutation sans modifier l'implantation des bobinages, la commutation du nombre de paires de pôles du stator peut être assurée de la façon suivante :

- Monter dans le stator un seul enroulement et changer le nombre de paires de pôles par commutation correspondante des parties de cet enroulement.
- Monter dans le stator deux enroulements indépendants l'un de l'autre.
- Monter dans le stator deux enroulements avec commutation du nombre de pôles de chacun d'eux.

Si le rotor est à cage, on se limite à une division ou à une multiplication par la vitesse, si le moteur est à rotor bobiné, il faut changer le nombre de paires de pôles simultanément dans le stator et dans le rotor, ce qui rend la construction du rotor compliquée. Cette méthode n'a pas beaucoup d'intérêt, car la variation est brusque.

#### **I.4.1.2 Changement de la tension appliquée au moteur**

On sait que le couple est proportionnel au carré de la tension, ceci implique une variation de la vitesse, cette dernière par variation de la tension primaire a une importance secondaire car elle ne permet pas d'assurer le réglage dans une large plage et puis elle n'est pas économique.

#### **I.4.1.3 Changement de la fréquence du réseau**

Quel que soit la charge, la vitesse d'un moteur dépend fortement de la fréquence du réseau d'alimentation. On distingue deux méthodes d'action sur fréquence :

##### **I.4.1.3.1 Variation de la fréquence à tension fixe**

La diminution du flux et la saturation des machines électriques sont des problèmes liés aux variations de la fréquence. Lorsque la fréquence  $f_s$  augmente, le flux diminue et entraîne une diminution du couple maximale.

##### **I.4.1.3.2 Variation de fréquence à $V_s / f_s$ constante**

Dans les régimes des sous vitesses il faut maintenir le flux constant pour cette raison on utilise la loi à  $V_s / f_s$ . Ce mode de variation de vitesse n'est possible que lorsque le moteur est

est alimenté par une installation spéciale

## I.4.2 Coté rotor

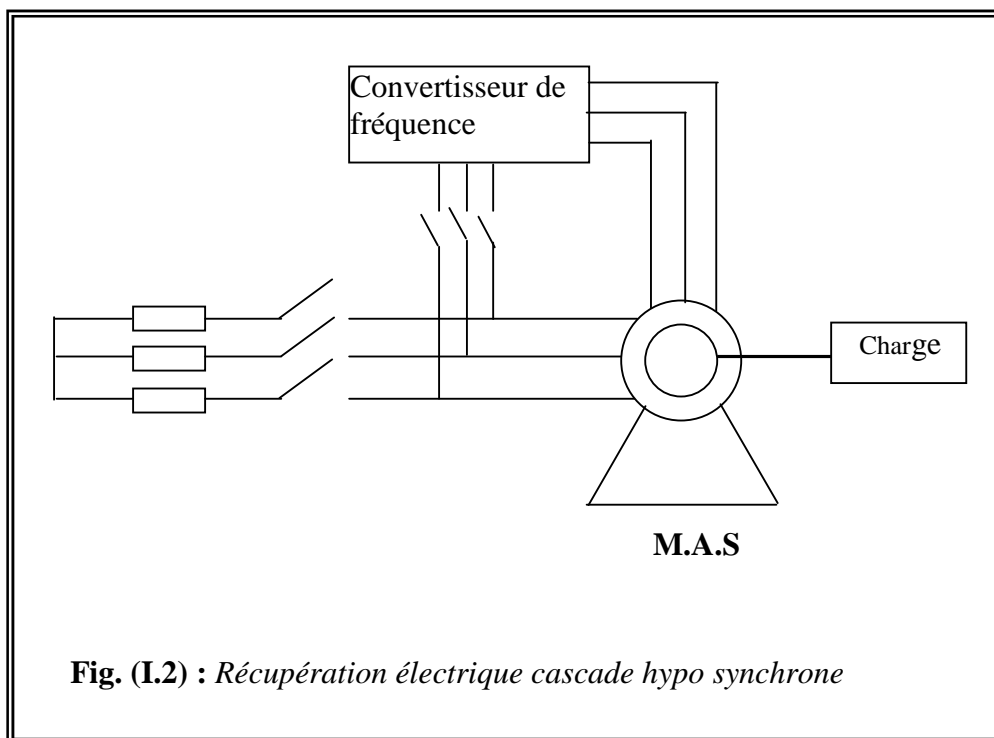
### I.4.2.1 Variation de vitesse par variation des résistances rotoriques

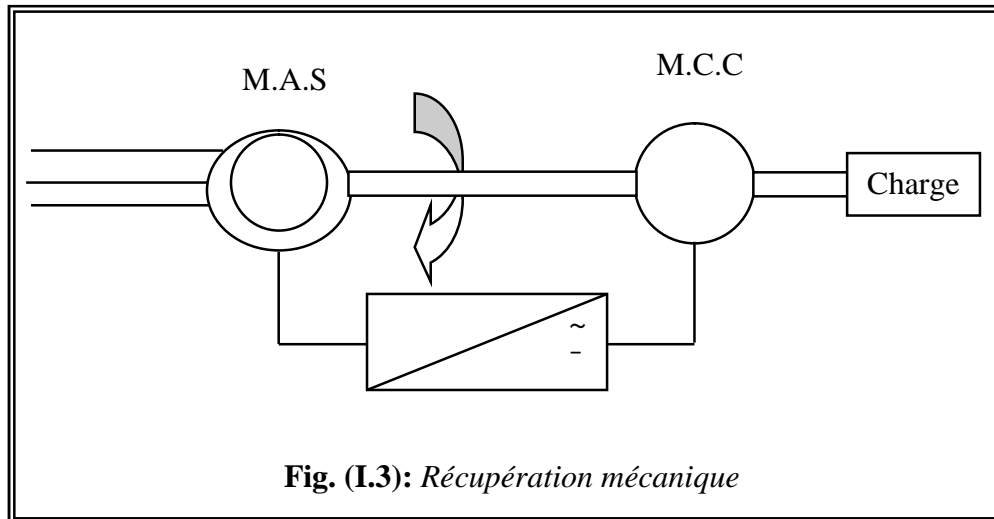
L'insertion d'un rhéostat au circuit rotorique nous permet de varier la résistance rotorique. Ceci entraîne une variation de vitesse cette variation est possible lorsqu'il s'agit des moteurs à bagues

### I.4.2.2 Les cascades

Avec un moteur à rotor bobiné, on a la possibilité de faire varier le glissement en modifiant la résistance rotorique, si l'on utilise pour cela un rhéostat, on dissipe en pur perte de l'énergie active et on abaisse d'une façon inacceptable le rendement, pour que le procédé soit fiable il faut faire appel à un circuit actif qui permet la récupération de l'énergie correspondante en la réinjectant dans le réseau. [2]

- Sur le rotor du moteur asynchrone à rotor bobiné par l'intermédiaire d'un moteur à courant continu (récupération mécanique), représenté par la Fig. (I.2)
- Au réseau à l'aide d'un convertisseur de fréquence, (Cascade hypo synchrone ou système de KRAMER), représenté par la Fig. (I.3)





### I.4.2.3 Double alimentation

L'une des solutions associant le convertisseur statique et la machine pour obtenir des vitesses variables est la machine asynchrone double alimentée (*double feed asynchronous motor: DFAM*), où le stator est connecté au réseau (50 HZ) et le rotor est alimenté à travers un convertisseur de fréquence. Elle apparaît comme une solution intéressante. Le système est réversible en vitesse et en couple, dans tout les cas les vitesses hypo synchrones et hyper synchrones sont possibles et le système peut être utilisé dans le fonctionnement moteur et générateur. Ces caractéristiques favorisent l'utilisation de cette machine dans les processus industriels spécieux demandant une haute performance dynamique. Elle a été déjà utilisée dans les applications générales de haute puissance comme les laminoirs d'acier ou de fer où elle a donné des résultats satisfaisantes [5].

## I.5 MACHINE DOUBLE ALIMENTEE

Lorsqu'on alimente directement le rotor d'un moteur asynchrone à rotor bobiné avec un courant continu, et que son stator est relié au secteur à fréquence constante, le moteur présente les caractéristiques d'une machine synchrone.

Cependant la suite est différente si l'excitation du rotor est réalisée à partir d'une tension sinusoïdale, dans ce cas le courant statorique  $I_s$  va créer un champ qui tourne à la vitesse  $N_s = f_s / P$ , et celui du rotor  $I_r$ , un champ tournant à la vitesse  $N_r = (+/-)N_s$ , le signe (-) indique que les deux champs tournent dans des sens opposés et (+) dans le même sens [5].

### I.5.1 Principe de fonctionnement de la MADA

La MADA est une machine asynchrone à rotor bobiné avec l'enroulement du stator connecté directement au réseau. Le rotor a des enroulements triphasés reliés à un convertisseur de puissance bidirectionnel avec un système ballast bague [6]. Pour le fonctionnement de la machine en régime établi, il est nécessaire que les vecteurs forces magnétomotrices (f.m.m) du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Du moment que le vecteur résultant de la F.m.m de l'enroulement statorique tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire, et que le rotor tourne à la vitesse  $\omega_r$ , par conséquent, pour satisfaire à cette condition, il faut que le vecteur F.m.m de l'enroulement rotorique tourne par rapport au rotor avec la vitesse :

$$\omega_s = \omega_{0s} - \omega_r = \omega_{0s} - \omega_{0s}(1 - g) = \omega_{0s}g \quad (I.1)$$

Si la vitesse du moteur est inférieure à la vitesse synchronisme, les sens de rotation sont identiques ; dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à celle du synchronisme, les sens seront opposés. Pour que la rotation du vecteur F.m.m par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence  $f_r$ , définie à partir de  $\omega_{0s}.g = 2\pi f_r$  ; c'est à dire :

$$f_r = f_s \cdot g \quad (I.2)$$

Dans les machines synchrones dont l'excitation est assurée par une source continue, le courant dans l'enroulement possède une fréquence  $f_r = 0$ . A partir de (I.1) et (I.2), on voit qu'il n'y a qu'une seule vitesse synchrone  $\omega_{0s}, (g = 0)$  [2]. Le stator désigné par "S" et le rotor par "R", et par " $n_p$ " le nombre de paires de pôles de la machine, défini par la relation entre la fréquence du stator et du rotor, comme suit :

$$f_s = f_r + n_p f_m \quad (I.3)$$

Avec  $f_m$  : la fréquence de rotation du rotor.

Le glissement  $g$  est défini par :

$$g = f_r / f_s = (n_s - n_m) / n_s \quad (I.4)$$

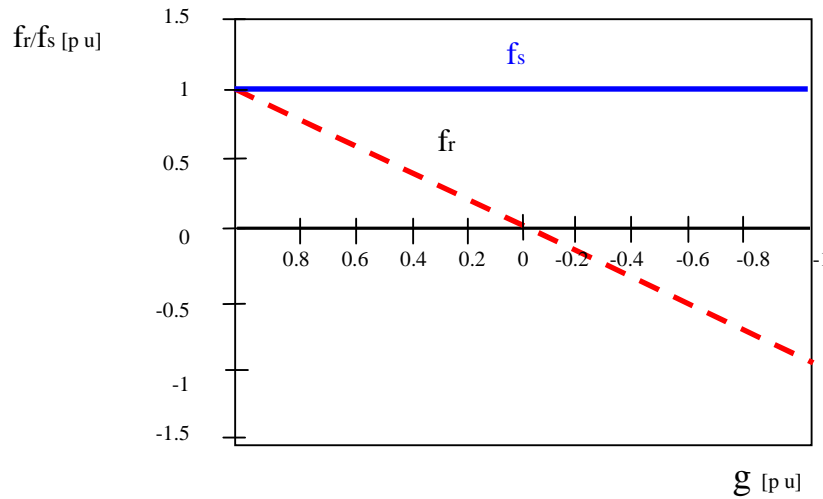
$n_m$  : est la vitesse mécanique du rotor et  $n_s$  la vitesse de synchronisme de la MADA donnée par :

$$n_s = 60 \cdot f_s / n_p \quad (I.5)$$

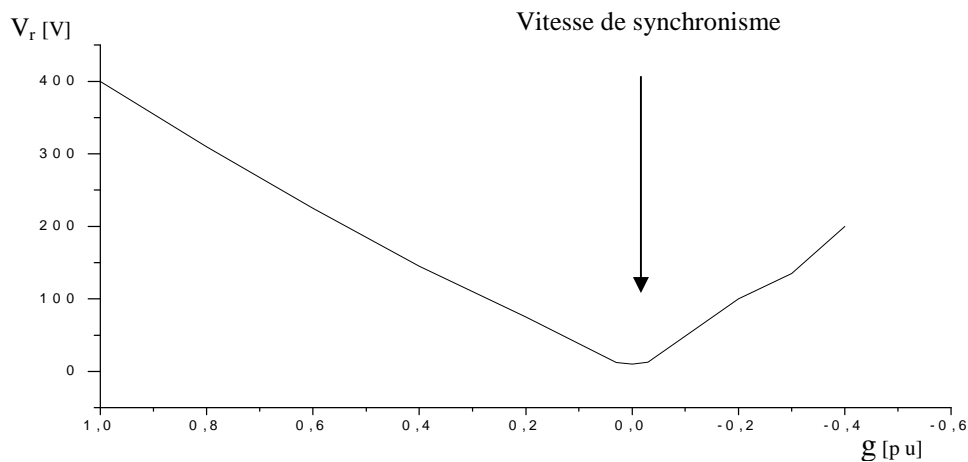
Les figures (I.4) et (I.5) représentent l'évolution de la fréquence et de la tension du rotor en fonction du glissement, où le circuit du stator est alimenté directement par le réseau et



le rotor en circuit ouvert, ces grandeurs dépendent de la vitesse opérationnelle de la machine [8].



**Fig. (I.4) :** Fréquences de la MADA en fonction de glissement



**Fig. (I.5) :** Tension mesurée du rotor de la MADA en fonction de glissement.

Les différents régimes de fonctionnement de la MADA, peut être divisés en fonction de glissement comme suit :

- **Stationnaire ( $g = 1$ ) :** Le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence  $f_s$ . Par conséquent, le rotor est le siège d'une F.e.m induite avec une fréquence  $f_r$  identique à  $f_s$ . Dans ce cas là, la MADA se comporte simplement comme un transformateur

- **Hypo synchrone ( $0 < g < 1$ )** : En tournant le rotor dans la direction de flux du stator, la fréquence  $f_r$  du rotor commence à décroître (Fig. (I.4)). Plus la vitesse du rotor approche de celle du synchrone, plus  $f_r$  tend vers 0, plus la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible qui correspond à la vitesse du synchronisme.
- **Synchrone ( $g = 0$ )** : C'est le point, où la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence  $f_r$  du rotor s'annule. Autrement dit, le rotor tourne avec la même vitesse que celle du flux statorique; donc le rotor ne voit aucun mouvement relatif par rapport à ce dernier, par conséquent il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor.
- **Hyper synchrone ( $g < 0$ )** : Par d'avantage d'accélération, le flux rotorique rattrape le flux statorique et la fréquence du rotor devient négative selon les équations (I.3) et (I.4). Cette valeur négative signifie que l'ordre de phase du rotor " $(a_r; b_r; c_r)$ " s'inverse. L'augmentation de la vitesse relative du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor.

## I.5.2 Régimes de fonctionnement de la MADA

Dans le moteur à double alimentation, l'enroulement rotorique est couplé à une source de tension de fréquence variable. En fonction de type de régulation de fréquence on distingue deux régimes de fonctionnement : synchrone et asynchrone.

### I.5.2.1 Régime de fonctionnement synchrone

Pour ce régime, la fréquence du glissement est donnée indépendamment de la vitesse angulaire. Alors à chaque signal de commande correspond une fréquence déterminée  $f_r$  et une vitesse de fonctionnement  $\omega_r$  qui ne dépend pas de la charge. En faisant varier la fréquence  $f_r$ , on peut varier la vitesse. En régime synchrone, le moteur à double alimentation fonctionne comme une machine synchrone. Dans ce régime, on peut réguler la vitesse. Cependant il est difficile de maintenir la stabilité du régime pour les variations rapides de vitesses, de charges brusques, etc....

### I.5.2.2 Régime de fonctionnement asynchrone

Pour ce régime de fonctionnement, la fréquence et la tension du réseau appliquée à l'enroulement rotorique de la machine à travers un système de régulation est toujours maintenue égale à la fréquence de glissement  $f_s \cdot g$ . Dans ce cas, on ne régule que la valeur et la phase de la tension du réseau [5].

Le moteur à double alimentation fonctionne toujours comme un moteur asynchrone même pour,  $\omega_r = \omega_{0s}$ , ie le glissement du moteur varie avec la variation de la charge.

Dans la MADA, il y a toujours deux sources de même fréquence dans les enroulements rotoriques  $f_s \cdot g$  :

- La f.e.m du rotor  $E_{2cc} \cdot g$  (f.e.m de court circuit).
- La tension externe d'alimentation du coté rotorique  $U_r$ .

### I.5.3 Connexion au réseau

Contrairement à certaines machines synchrones, qui ont des convertisseurs qui sont traversés par 100% de la puissance nominale, les convertisseurs associés à la MADA sont dimensionnés pour traiter seulement 25 à 30% de la puissance nominale. Ils coûtent moins chers et sont moins encombrants. Ils permettent de piloter la MADA par le rotor en réglant sa vitesse de rotation autour de celle de synchronisme.

Nous allons étudier dans le paragraphe suivant les convertisseurs de puissance sont directement reliés au réseau. Statique qui relie le rotor de La MADA avec le réseau. Ainsi que, les enroulements triphasés du stator.

Le convertisseur statique se compose d'un redresseur, un bus continu et un onduleur. Il est réversible en courant puisque la puissance rotorique ( $P_r$ ) transitée par le convertisseur dans un sens.

Pour un fonctionnement hyper synchrone, et dans le sens opposer pour un fonctionnement hypo synchrone. L'onduleur devient redresseur et le redresseur devient onduleur. Sachant que ( $P_r = gP_s$ ), et que généralement, la valeur absolue du glissement 'g' est très inférieur à 1,  $P_r$  est seulement une fraction de la puissance statorique  $P_s$ . Le signe de  $P_r$  change avec le glissement g.

### I.5.4 Domaine d'application de la MADA

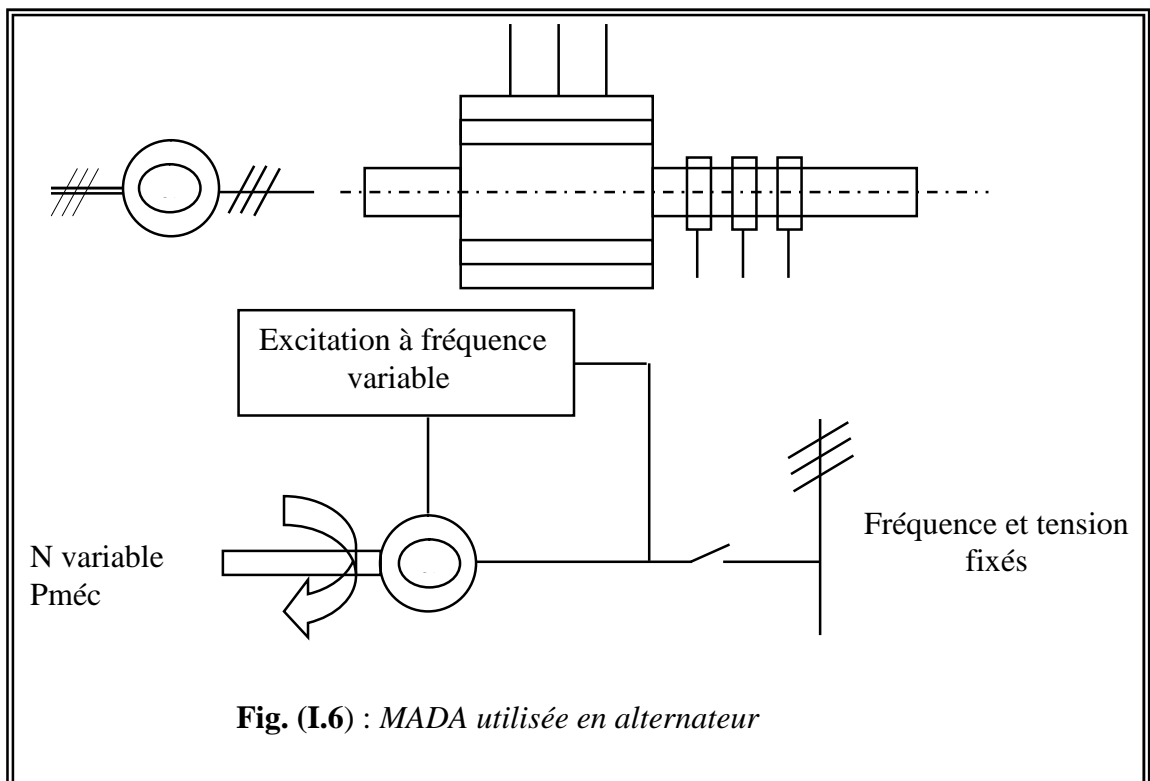
La machine asynchrone à double alimentation offre des nombreux avantages par rapport à la machine asynchrone et synchrone et surtout en ce qui concerne la gamme de vitesse opérationnelle et de la puissance d'entraînement ou bien la puissance générée par cette dernière en mode génératrice. De plus, elle a un comportement souple à la commande, ce qui lui permet de trouver un domaine d'application très vaste. La MADA peut être utilisé dans des applications spécifiques avec une vitesse variable et à fréquence constante (VVFC), comme dans les systèmes de génération de l'énergie électrique à partir des puissances éoliennes et hydraulique, ainsi que dans les applications aérospatiales et navales, l'entraînement des ventilateurs et des pompes d'eau [6].

La machine à double alimentation est une machine à rotor bobiné possédant des enroulements triphasés au stator et au rotor. Cette machine a fait l'objet de trois variantes de fonctionnement:

- La première fonctionne en alternateur.
- La seconde fonctionne en moteur, et elle est alimentée par un seul convertisseur.
- La troisième fonctionne aussi en moteur mais elle est alimentée par deux convertisseurs

#### I.5.4.1 Fonctionnement en alternateur

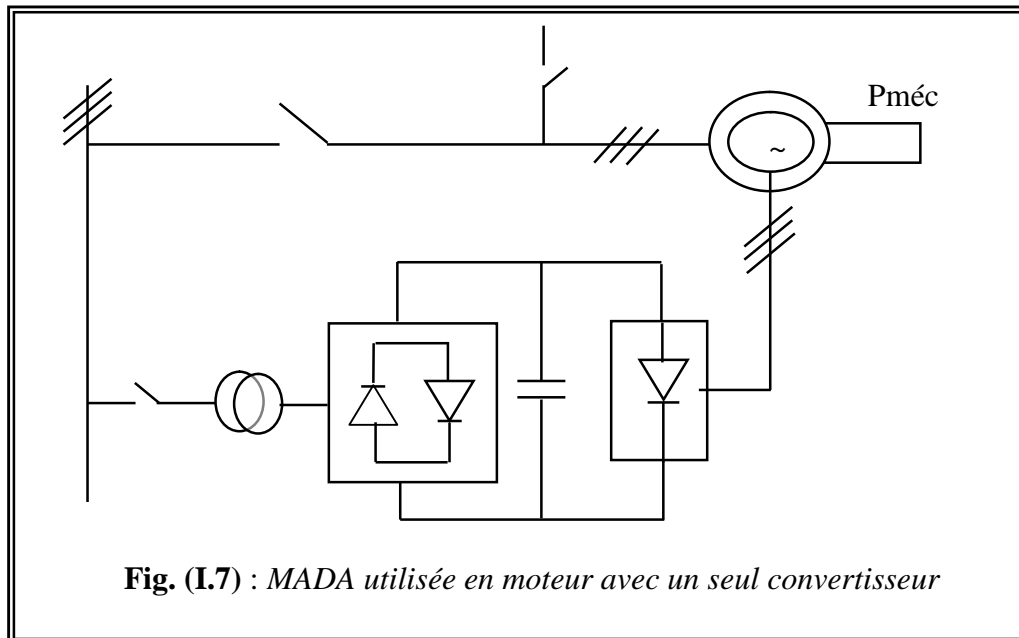
Dans ce type de fonctionnement, le stator est relié au réseau et un convertisseur



alimente le rotor comme nous le montre la fig. (I.6). Cette solution permet de fournir une tension et une fréquence fixe même lors d'une fluctuation de la vitesse

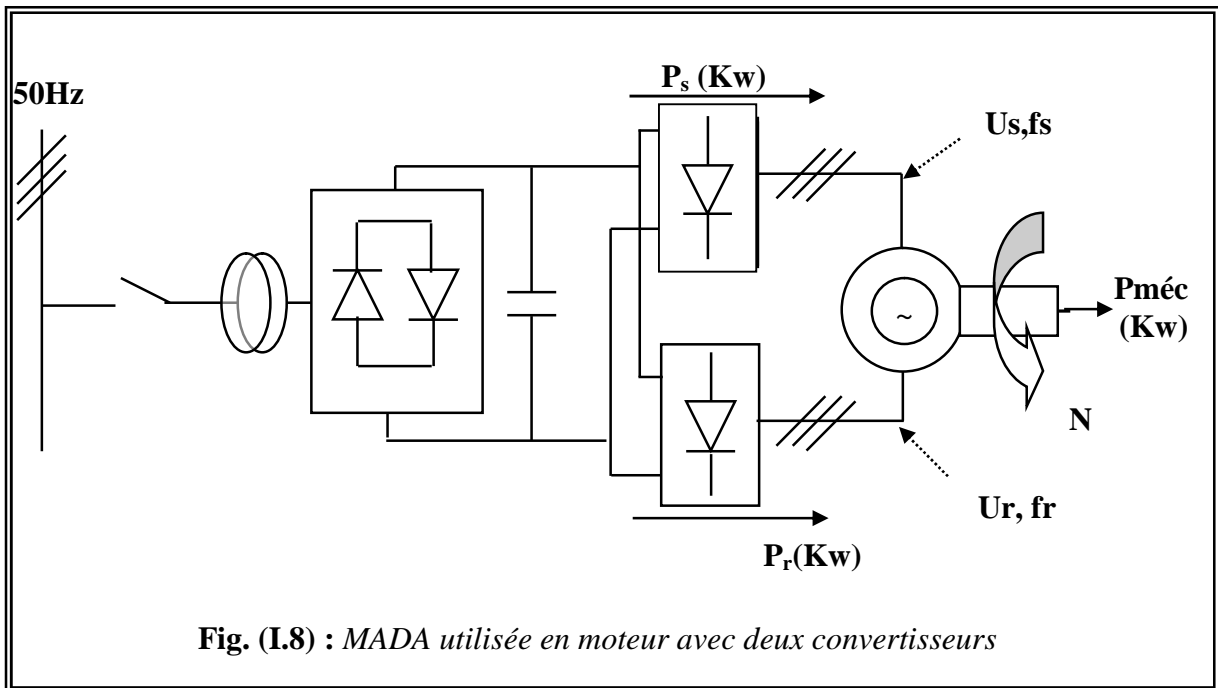
#### I.5.4.2 Fonctionnement en moteur avec un convertisseur

Dans ce type de fonctionnement fig. (I.7), le stator est relié au réseau à fréquence et tension constantes, par contre le rotor est alimenté par un convertisseur qui peut être un cycloconvertisseur ou un onduleur. Cette solution permet de réduire fortement la puissance du convertisseur à condition que le système à entraîner tolère une interruption de couple à une certaine vitesse.



#### I.5.4.3 Fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs

Ce type de fonctionnement est dit « synchro-duo », qui est une machine asynchrone bobinée au stator et au rotor et alimentée par deux convertisseurs fig. (I.8), ces deux convertisseurs seront toutefois identiques mais peuvent être de puissances différentes. L'originalité de ce principe est aussi d'optimiser la charge conférée aux deux convertisseurs dans ce cas, le rapport de transformation de la machine sera de 1 et la machine sera alimentée de façon symétrique par son stator et son rotor même valeur de tension, de courant et de fréquence. Cette solution permet une variation de la vitesse, elle permet en outre un fonctionnement à couple constant et un fonctionnement à puissance constante.



## I.6 CONCLUSION

La machine à double alimentation offre des avantages remarquables, ce qui permet à cette dernière de trouver un domaine d'application très vaste.

Dans ce chapitre un aperçu général sur les machines asynchrones à double alimentations et leurs application ont été donnés ainsi que les différents types de fonctionnement. De même que le principe et les régimes de fonctionnement de cette dernière.

La maîtrise et la compréhension du comportement de ce type des machines passe obligatoirement par une étude modélisation, qui est l'objectif du chapitre suivant.