



Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'état en Electrotechnique

Option : Machines Electriques

THEME

Réglage de vitesse en boucle ouverte d'un moteur à induction à bagues par hacheur rotorique

Proposé et encadré par : Mr Harmim

Réalisé par :

- **Hocine Samir**
- **Si Ahmed Abderrahmane**
- **Hocine Ferhat**

**Promotion
2011/2012**

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre promoteur M^r HARMIM.S qui nous a orienté et soutenu et qui, par sa collaboration effective et par ses judicieux conseils a rendu possible l'élaboration de ce travail.

Nos remerciements vont également à tous ceux et toutes celles qui nous ont apporté leur aide de près ou de loin.

Que monsieur le président et les membres du jury trouvent ici l'expression de notre gratitude pour nous avoir fait l'honneur de juger ce modeste travail.

Trinôme :

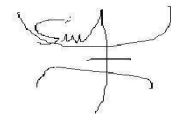
- **Hocine Samir**
- **Si Ahmed Abderrahmane**
- **Hocine Ferhat**

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- *A toute ma famille.*
- *A mes camarades et amis H.Samir et H.Ferhat.*
- *A mes amis Y. Salah, S. Djamel, S. Marzouk , M.Idir, A.Athmane et H. Farida.*

Si Ahmed Abderrahmane



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- *A toute ma famille.*
- *A mes camarades et amis H.Samir et S.Abderrahmene.*
- *A mes amis.*

Hocine Ferhat

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- *A toute ma famille.*
- *A mes camarades et amis S.Abderrahmane et H.Ferhat.*
- *A mes amis.*

Hocine Samir

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES MACHINES ASYNCHRONES

I.1 Introduction.....	5
I.2 Définition.....	5
I.3 Constitution.....	5
I.4 Principe de fonctionnement	8
I.5 Couplage des machines asynchrones.....	9
I.6 Conclusion.....	10

CHAPITRE II : EQUATIONS-SCHEMA EQUIVALENT-EXPRESSION DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE ET CARACTERISTIQUES MECANIQUES DE LA MACHINE ASYNCHRONE

II.1 Introduction.....	12
II.2 Equations de la machine asynchrone.....	12
II.3 Schémas équivalents.....	13
II.4 Bilan de puissances.....	15
II.5 Expression du couple électromagnétique.....	17
II.6 Caractéristiques mécaniques.....	19
II.7 Conclusion.....	25

CHAPITRE III : METHODES DE REGLAGE DE VITESSE DES MOTEURS ASYNCHRONES

III.1 Introduction	27
III.2 Méthodes de réglage de vitesse.....	27
III.2.1 Changement du nombre de paire de pôles.....	27
III.2.2 Action sur le glissement.....	28
III.2.3 Action sur la fréquence d'alimentation.....	33
III.3 Conclusion.....	36

SOMMAIRE

CHAPITRE IV : REGLAGE DE VITESSE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE A BAGUES PAR HACHEUR ROTORIQUE

IV.1 Introduction.....	38
IV.2 Le logiciel MATLAB.....	39
IV.2.1 Simulink.....	39
IV.2.2 Le logiciel Sim Power Systems.....	39
IV.3 Identification des paramètres du moteur asynchrone étudié.....	40
IV.3.1 Identification des paramètres électriques.....	40
IV.3.1.1 Essai à vide.....	40
IV.3.1.2 Essai en court-circuit à rotor bloqué.....	43
IV.3.2 Identification des paramètres mécaniques.....	45
IV.4 Réglage de vitesse par variation manuelle de la résistance rotorique.....	46
IV.4.1 Principe de fonctionnement.....	46
IV.4.2 Schéma du modèle de simulation.....	48
IV.4.3 Résultats de la simulation.....	50
IV.5 Réglage de vitesse par hacheur rotorique.....	55
IV.5.1 Principe de fonctionnement.....	55
IV.5.2 Schéma du modèle de simulation.....	56
IV.5.3 Résultats de la simulation.....	57
IV.6 Comparaison entre les deux méthodes.....	64
IV.7 Conclusion.....	66
CONCLUSION GENERALE.....	67

BIBLIOGRAPHIE

Notations

R_1, R_2 : Résistances par phase statorique et par phase rotorique en Ω .

l_1, l_2 : Inductances de fuites au stator et au rotor en *Henry* .

L : Inductance de fuites totalisées en *Henry* .

X_1, X_2 : Réactances de fuites au stator et au rotor en Ω .

X'_2, R'_2 : Réactance et résistance ramenées au stator en Ω .

X_m : Réactance magnétisante en Ω .

R_f : Représente les pertes fer à vide en Ω .

N_s, Ω_s : Vitesse de synchronisme respectivement en *tr / mn* et *rd / s* .

N, Ω : Vitesse de rotation du rotor respectivement en *tr / mn* et *rd / s* .

N_r, Ω_r : Vitesses relatives, respectivement en *tr / mn* et *rd / s*

ω_s : Pulsation des courants statoriques en *rd / s* .

ω : Pulsation des courants rotoriques en *rd / s* .

ω_r : Pulsation relative en *rd / s* .

U_1 : Tension composée entre deux phases statoriques en *Volt* .

U_{1cc} : Tension entre deux phases statoriques en court-circuit en *Volt* .

V_1 : Tension de phase statorique en *Volt* .

I_1 : Courant d'une phase statorique en *A*.

I_2 : Courant d'une phase rotorique en *A*.

I'_2 : Courant rotorique ramené en *A*.

I_{10} : Courant statorique à vide en *A*.

I_{1cc} : Courant statorique en court-circuit en *A*.

I_m : Courant magnétisant en *A*.

I_{ma}, I_{mr} : Courants actif et réactif de la branche magnétisante en A .

P_0 : Puissance active à vide en W .

P_{1cc} : Puissance active en court-circuit en W .

Q_{1cc} : Puissance réactive en court-circuit en VAR .

$\cos(\varphi_0)$: Facteur de puissance à vide.

f_s, f_r, f : Fréquences statorique, relative et rotorique en Hz .

E_1, E_2 : F.E.M induites dans le stator et dans le rotor en $Volt$.

E'_2 : F.E.M rotorique ramenée en $volt$.

Kb_1, Kb_2 : Coefficients de bobinage des enroulements statoriques et rotoriques.

n_1, n_2 : Nombre de spires d'une phase statorique et d'une phase rotorique.

ϕ_e : Flux résultant des flux statorique et rotorique dans l'entrefer en Wb .

p : Nombre de paires de pôles.

g : Le glissement.

$T_e, T_{e_{max}}, T_d$: Couples électromagnétique, maximal et de démarrage du moteur en $N.m$.

T_m : Couple résistant de la charge en $N.m$.

f_0 : Coefficient de frottement en $N.m.s / rd$.

J : Moment d'inertie en $kg.m^2$.

Introduction générale

Les machines électriques tournantes sont de nos jours, à l'exception des dispositifs d'éclairages, les récepteurs les plus utilisés dans l'industrie et les installations tertiaires, leur fonction, de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique lorsqu'elles sont utilisées en moteur, leur donne une importance économique toute particulière, qui fait qu'aucun concepteur, aucun installateur et aucun exploitant ne peut les ignorer. Parmi les machines électriques existantes on peut distinguer : les machines électriques à courant alternatif (synchrones et asynchrones) et les machines à courant continu.

Le concept de machine asynchrone d'induction a plus de 120 ans. Depuis, elle s'est imposée dans l'industrie. En effet, elle est de loin la machine la plus utilisée dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son bon rendement et de son excellente fiabilité. On distingue les machines asynchrones monophasées, diphasées et triphasées. Les machines triphasées, alimentées directement sur le réseau, représentent la grande majorité des applications.

Comme le moteur asynchrone est, en raison de son principe de fonctionnement, un moteur à vitesse unique. Pendant longtemps, certaines applications lui ont été refusées malgré la recherche de solutions technologiques parfois innovantes. Parmi ces applications, la variation de vitesse et les asservissements mécaniques.

Les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, notamment le développement des semi conducteurs de puissance qui autorisait la mise au point de convertisseurs statiques et permettant d'alimenter les machines à fréquence variable, allaient effectivement s'appliquer dans le domaine des entraînements à vitesse variable des machines électriques tournantes.

Les entraînements à vitesse variable utilisant des moteurs à courants alternatif alimentés par des convertisseurs statiques ont atteint le stade des applications industrielles à la fin des années 1970. Jusque là, les entraînements à vitesse variable utilisaient des moteurs à courant continu. Le moteur à courant continu présente des avantages (couple élevé même aux faibles vitesses, bon rendement), mais aussi des inconvénients provenant du collecteur et des balais (entretien, coût, limitation en vitesse, inaptitude à fonctionner en milieu corrosif, usure). Par rapport à ce dernier les avantages décisifs, apportés par l'utilisation de la machine asynchrone, en particulier à cage d'écureuil, sont liés surtout à sa fabrication simple et peu coûteuse, sa robustesse, sa bonne tenue en vitesse et en température, sa puissance considérable et un entretien minime. Par contre sa commande est plus complexe que celle d'une machine synchrone ou d'une machine à courant continu du fait qu'il est difficile d'obtenir le découplage effectif des deux grandeurs de commande qui sont le flux magnétique et le couple électromagnétique.

L'arrivée du moteur asynchrone à rotor bobiné permettant un accès au secondaire pour autoriser un démarrage progressif et une petite variation de la vitesse, a ouvert la voie à de nouvelles possibilités et techniques de réglage de vitesse.

Dans ce présent mémoire, nous étudions deux méthodes classiques de réglage de vitesse des moteurs asynchrones à rotor bobiné. En l'occurrence, la méthode de réglage de vitesse par variation manuelle de la résistance rotorique et la méthode de réglage de vitesse par hacheur rotorique.

Dans le premier chapitre, nous rappelons quelques principes de bases des machines asynchrones sous forme de généralités sur leur construction et leur fonctionnement.

Le second chapitre sera consacré à la présentation des équations en régime permanent de la machine asynchrone pour les représenter ensuite par un schéma monophasé équivalent. A partir de ce schéma, nous déduisons l'expression du couple électromagnétique et les caractéristiques mécaniques du moteur. Nous verrons aussi, l'influence de certains paramètres sur ces caractéristiques.

Dans le troisième chapitre, nous exposons sommairement quelques méthodes de réglage de vitesse des moteurs asynchrones à cage et à rotor bobiné.

Le quatrième et dernier chapitre, fera l'objet d'une étude par simulation sous Matlab/Simulink/Simpowersystems des deux modes de réglage de vitesse d'un moteur asynchrone à rotor bobiné. Nous présentons leurs modèles de simulation et leurs résultats respectifs, qui nous permettent de faire une comparaison entre ces deux méthodes, en constatant les avantages et les inconvénients de chacune d'elles.

On terminera par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I
Généralités sur les machines
asynchrones

I.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous rappelons succinctement quelques concepts de base de la machine asynchrone, comme sa constitution et son principe de fonctionnement.

I.2 Définition :

Le moteur asynchrone est un convertisseur électromécanique, dans lequel la création d'un couple sur l'arbre du rotor est possible, seulement sous une différence de vitesse de rotation du rotor et du champ magnétique statorique, tournant à une vitesse :

$$N_s = \frac{60f_s}{p} \quad (tr / mn)$$

Symboles :

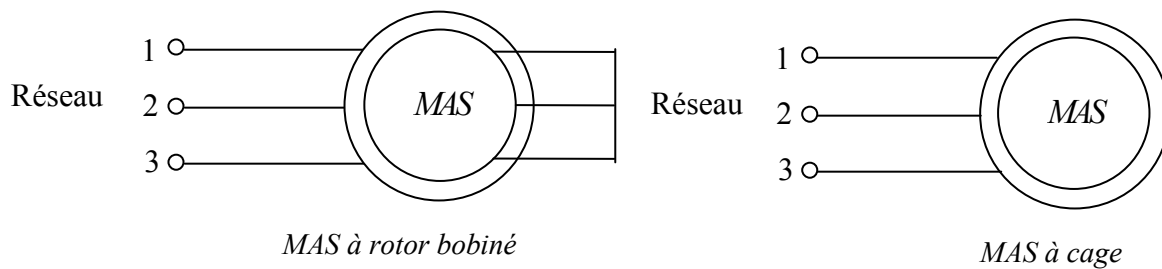


Fig. I.1 : Moteurs à cage d'écureuil et à rotor bobiné.

I.3 Constitution :

Un moteur asynchrone est constitué de deux parties principales, l'une fixe appelée stator et l'autre mobile appelée rotor. La figure ci-dessous montre les différentes parties constituant un moteur asynchrone à rotor bobiné :

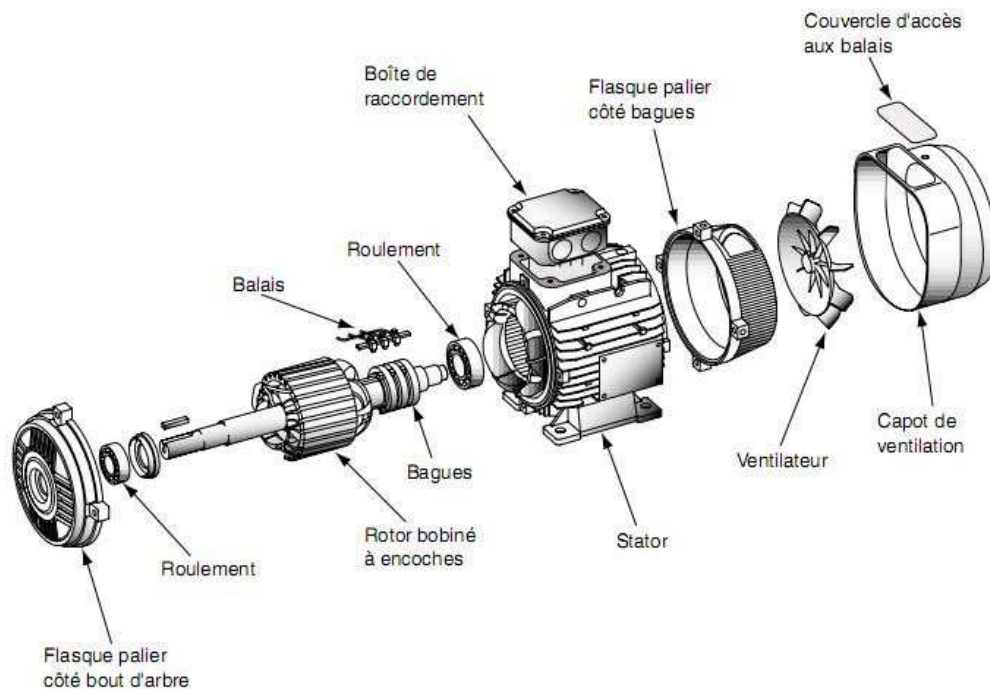


Fig. I.2 : Eclaté d'un moteur asynchrone à bagues.

I.3.1 Le stator :

Appelé aussi inducteur, c'est une carcasse en fonte ou en alliage léger qui renferme une couronne de tôles minces en acier au silicium, les tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par vernis isolant. Le feuilletage du circuit magnétique réduit les pertes par effet Joule. Elles sont munies d'encoches dans lesquelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant (3 enroulements dans le cas triphasé). Chaque enroulement est constitué de plusieurs bobines.

I.3.2 Le rotor :

Appelé aussi induit, il n'est lié électriquement à aucune source d'énergie, ce qui simplifie beaucoup sa construction. De par sa technologie de construction, on peut distinguer deux types de rotors. Donc, deux types de moteurs asynchrones, ceux dont le rotor est dit « à cage d'écureuil » et ceux dont le rotor est bobiné dit « à bagues ».

I.3.2.1 Le rotor à cage d'écureuil :

Il est constitué de barres conductrices très souvent en aluminium. Les extrémités de ces barres sont réunies par deux couronnes également conductrices. On dit que le rotor est en court circuit, sa résistance électrique est très faible. Le moteur à cage est très répandu dans le domaine industriel.

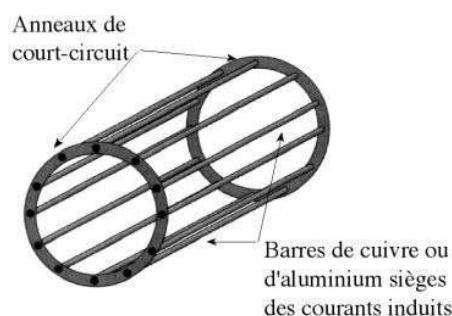


Fig. I.3 : Schéma de principe d'un rotor à cage d'écureuil.

Plusieurs types de rotors à cage existent, on peut citer :

Rotor à simple cage :

Dans des encoches disposées sur le contour du rotor, à l'extérieur du cylindre constitué par l'empilage de tôles, sont placés des conducteurs reliés à chaque extrémité par une couronne métallique et sur lesquels vient s'exercer le couple moteur généré par le champ tournant statorique.

Rotor à double cage :

Il comporte deux cages concentriques, l'une extérieure, de faible section et assez résistante; l'autre intérieure, de section plus grande et de faible résistance.

Rotor à encoches profondes :

C'est la réalisation standard. Les conducteurs rotoriques sont moulés dans les encoches du rotor qui sont de forme trapézoïdale dont le petit coté du trapèze se situe à l'extérieur du rotor.

I.3.2.2 Le rotor bobiné (à bagues) :

Dans des encoches pratiquées à la périphérie du rotor sont logées des enroulements identiques à ceux du stator, généralement le rotor est triphasé. Une extrémité de chaque enroulement est reliée à un point commun, le neutre (couplage étoile). Les extrémités libres peuvent être raccordées sur un coupleur centrifuge ou sur trois bagues en cuivre, isolées et solidaires du rotor. Sur ces bagues viennent frotter des balais à base de graphite raccordés au dispositif de démarrage. Grâce à ce système de bagues-balais, le bobinage rotorique devient accessible de l'extérieur, ce qui permet soit de le court-circuiter, soit de le relier à un circuit permettant d'agir sur les caractéristiques de la machine dans certains fonctionnements.

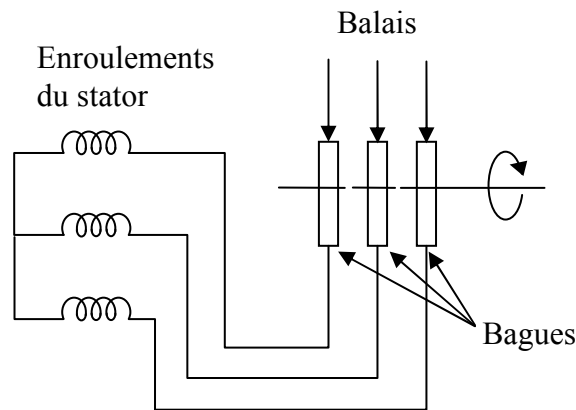


Fig. I.4 : Schéma de principe d'un rotor à bagues.

I.4 Principe de fonctionnement :

I.4.1 Création du champ tournant :

Les bobinages statoriques, alimentés par des courants triphasés de pulsation ω_s , créent un champ magnétique tournant à la vitesse $N_s = \frac{\omega_s}{p}$ tel que p est le nombre de paires de pôles au stator. Ce champ tournant balaie le bobinage rotorique et y induit des forces électromotrices (F.E.M) suivant la loi de Lenz, ces F.E.M produisent au rotor des courants induits, l'action du champ tournant sur ces courants 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 par rapport au rotor. Le rotor va donc avoir tendance à suivre ce champ. Le rotor tourne à une vitesse N inférieure à la vitesse du synchronisme N_s , d'où l'appellation asynchrone du moteur. On dit dans ce cas que le rotor glisse par rapport au champ tournant.

I.4.2 Notion de glissement :

Le glissement défini par : $g = \frac{N_s - N}{N_s}$ est le rapport entre les grandeurs relatives et les

grandeurs statoriques : $g = \frac{N_r}{N_s} = \frac{\Omega_r}{\Omega_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s} = \frac{f_r}{f_s}$

En pratique, le glissement varie de 2% dans les grosses machines à 6% dans les petites machines.

$(1-g)$ est le rapport entre les grandeurs du rotor et celles du stator :

$$1-g = \frac{N}{N_s} = \frac{\Omega}{\Omega_s} = \frac{f}{f_s} = \frac{p \cdot N}{f_s} = \frac{\omega}{\omega_s} = \frac{p \cdot \Omega}{\omega_s} \implies \Omega = \frac{\omega_s}{p} (1-g)$$

Avec une alimentation à fréquence constante, la machine asynchrone peut fonctionner en moteur ou en génératrice selon que le glissement g est inférieur ou supérieur à 0.

I.4.3 Fonctionnement en génératrice :

La machine asynchrone alimentée à fréquence constante ne peut fonctionner en génératrice, qu'au voisinage de la vitesse synchrone.

La génératrice asynchrone est beaucoup plus rare que l'alternateur, mais on la trouve dans quelques applications de puissance limitée comme les microcentrales hydrauliques. Elle occupe surtout la plus grande part du marché des éoliennes, le plus souvent avec des machines à cage d'écureuil pour les puissances moyennes, mais aussi avec des machines à rotor bobiné pour les installations plus importantes.

I.5 Couplage des moteurs asynchrones :

La plaque à bornes située au niveau de la carcasse statorique et qui comporte 3 enroulements identiques sert à brancher le moteur au réseau et au couplage des enroulements statoriques. Le choix des couplages étoile ou triangle dépend :

- Des tensions du réseau.
- Des indications portées sur la plaque signalétique du moteur qui donne les conditions normales de fonctionnement (valeurs nominales).

On effectue le couplage qui convient par l'intermédiaire de la plaque à bornes qui comporte six bornes auxquelles sont reliées les entrées et sorties de l'enroulement statorique réparties comme indiqué sur la figure ci-dessous :

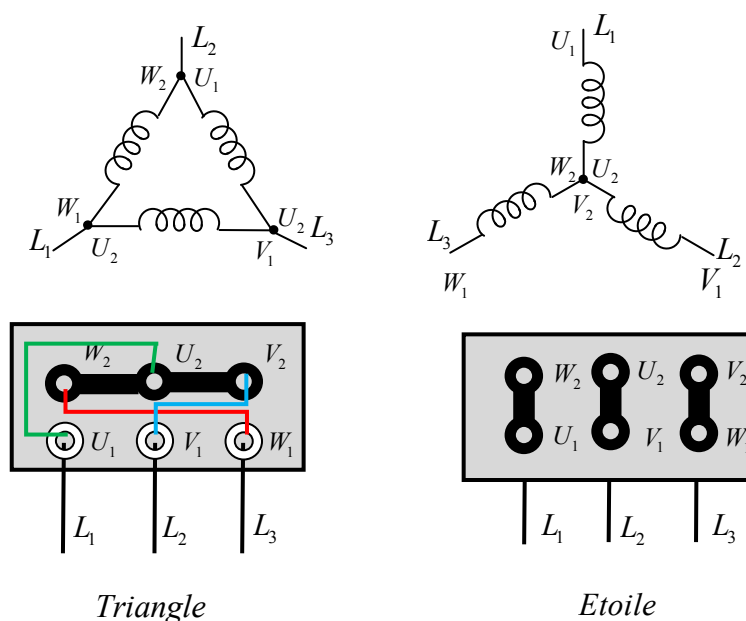


Fig. I.5: Plaque à bornes d'un moteur asynchrone et modes de couplages.

Pour le couplage, on utilise des barrettes de couplage qui peuvent être remplacées, au besoin par les pôles d'un contacteur.

Le couplage des enroulements est déterminé comme suit :

- Si la plus petite tension de la plaque signalétique du moteur correspond à la tension entre phases (tension composée) du réseau d'alimentation, on choisit le couplage triangle (Δ).
- Si la plus grande tension de la plaque signalétique du moteur correspond à la tension entre phases du réseau, on choisit le couplage étoile (Y).

Le tableau ci-dessous montre deux exemples de couplages :

Réseau d'alimentation		Plaque signalétique		Couplage adéquat
220 V	380 V	220 V	380 V	ETOILE
220 V	380 V	380 V	660 V	TRIANGLE
Tension simple	Tension composée	Tension d'un enroulement	Tension de deux enroulements	

Tableau I.1 : Exemple de couplage des enroulements d'un moteur asynchrone.

I.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelques notions relatives à la machine asynchrone, ce qui nous a permis d'avoir une idée globale sur sa construction, son principe de fonctionnement, ses modes de couplage ainsi que sur la notion du glissement.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation des équations du moteur asynchrone en régime permanent, le schéma équivalent, l'expression du couple électromagnétique et les caractéristiques mécaniques.

Chapitre II

Equations –Schémas équivalents-

Expression du couple électromagnétique

et caractéristiques mécaniques de la

machine asynchrone

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les équations de fonctionnement de la machine asynchrone en régime permanent qui nous permettent de les représenter par un schéma monophasé équivalent et de ce fait, établir l'expression du couple électromagnétique et les caractéristiques mécaniques qui régissent les différents modes de fonctionnement de la machine. Nous verrons aussi, l'influence de certains paramètres comme la résistance rotorique, la tension d'alimentation, la fréquence et le nombre de paires de pôles sur la caractéristique mécanique.

II.2 Equations de la Machine Asynchrone :

Les équations régissant le comportement magnéto-électrique d'une machine asynchrone triphasée dans tous ses modes de fonctionnement sont similaires aux équations du transformateur triphasé.

Pour simplifier, on suppose que les enroulements statoriques et rotoriques sont triphasés et les grandeurs sont alternatives et sinusoïdales.

On suppose que ϕ_e , le flux résultant des flux statorique et rotorique dans l'entrefer, est à répartition sinusoïdale.

II.2.1 Equation d'une phase statorique :

- Au stator, ϕ_e crée une F.E.M E_1 de pulsation ω_s , qui avec les chutes de tension dans la résistance statorique R_1 et l'inductance statorique l_1 équilibre la tension appliquée. On peut écrire E_1 comme suit :

$$E_1 = \pi\sqrt{2}k_{b1}n_1f_s\phi_e = 4,44k_{b1}n_1f_s\phi_e \quad \text{II-1}$$

Avec :

k_{b1} : Coefficient de bobinage de l'enroulement statorique.

n_1 : Nombre de spires d'une phase au stator.

Donc, l'équation des tensions d'une phase statorique s'écrit :

$$\bar{V}_1 = (R_1 + j l_1 \omega_s) \bar{I}_1 + \bar{E}_1 \quad \text{II-2}$$

II.2.2 Equation d'une phase rotorique :

- Au rotor, ϕ_e crée une F.E.M E_2 de pulsation $g\omega_s$, qui fait circuler un courant I_2 dans le rotor, elle a pour expression :

$$E_2 = \pi\sqrt{2}k_{b2}n_2f\phi_e = 4,44k_{b2}n_2gf_s\phi_e \quad \text{II-3}$$

Avec : k_{b2} : Coefficient de bobinage de l'enroulement rotorique.

n_2 : Nombre de spires d'une phase rotorique.

Donc, l'équation des tensions rotoriques pour une phase rotorique court-circuitée s'écrit :

$$\bar{E}_2 = (R_2 + jl_2g\omega_s)\bar{I}_2 \quad \text{II-4}$$

II.3 Schémas équivalents :

Toutes les grandeurs rotoriques sont de pulsation $g\omega_s$. Pour pouvoir les représenter sur le même diagramme vectoriel que les grandeurs statoriques et développer pour le moteur un schéma équivalent, on ramène les tensions rotoriques à la pulsation statorique ω_s , pour ce faire, on divise l'équation rotorique (II-4) par g :

$$\frac{\bar{E}_2}{g} = \left(\frac{R_2}{g} + jl_2\omega_s\right)\bar{I}_2 \quad \text{II-5}$$

Comme les équations de la machine asynchrone sont similaires à celles du transformateur triphasé court-circuité. On en déduit, que leur schéma équivalent représenté sur la figure (II.1), est le même :

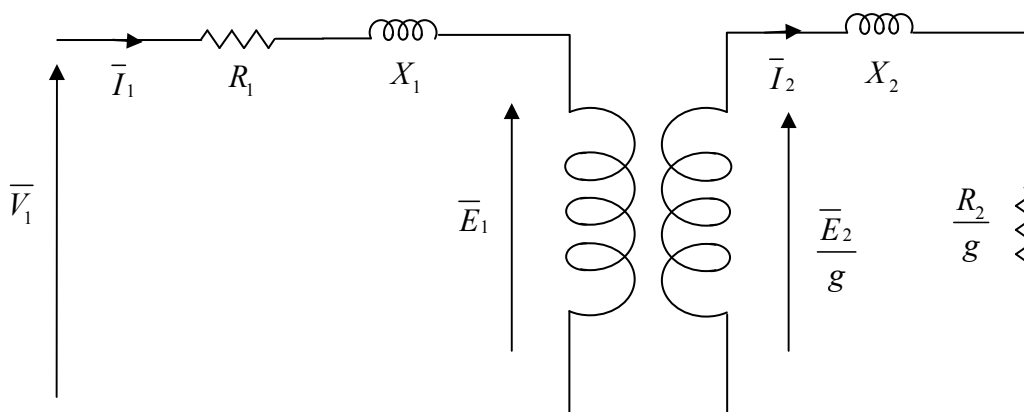


Fig. II.1 : Schéma équivalent général d'une machine asynchrone.

En ramenant les paramètres du secondaire (rotor) au primaire (stator), on aura le schéma équivalent de la (Fig.II.2) suivante :

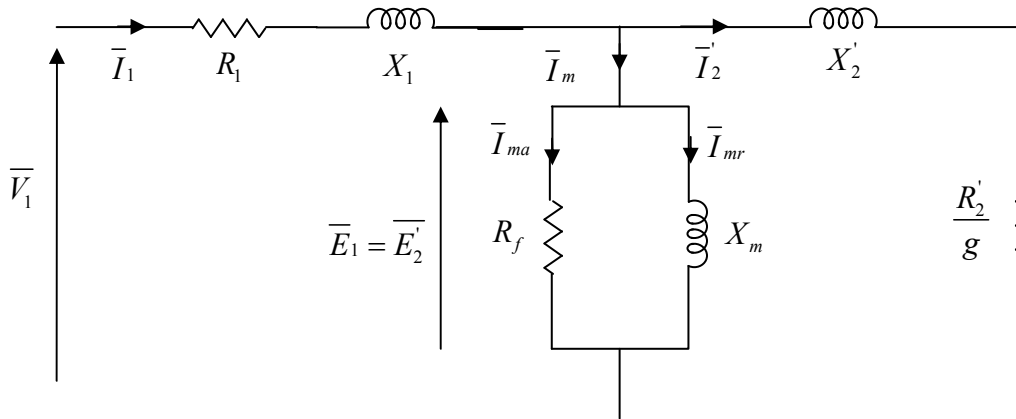


Fig. II.2 : Schéma équivalent d'une phase d'un moteur asynchrone en ramenant les paramètres du secondaire au primaire.

Pour simplifier les calculs, on met la branche magnétisante (R_f, X_m) à l'entrée du schéma équivalent. C'est à dire on suppose que $\bar{V}_1 = \bar{E}_1 = \bar{E}_2'$

On obtient le schéma équivalent simplifié de la figure suivante :

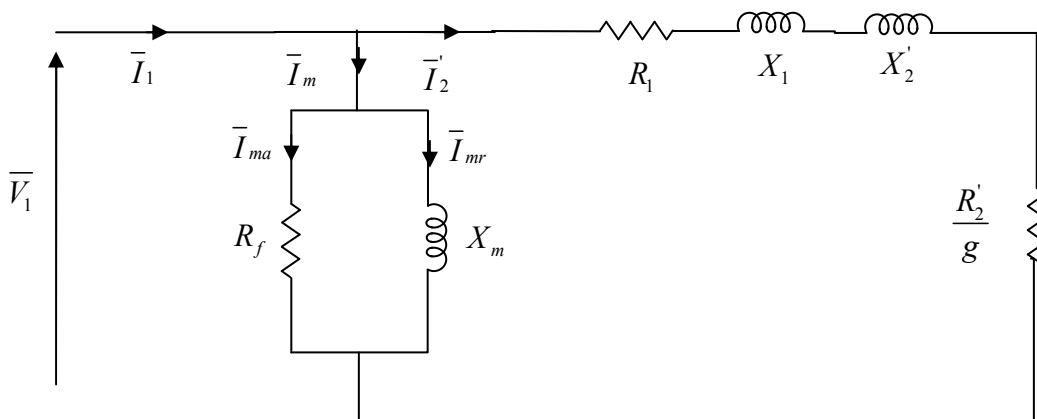


Fig. II.3 : Schéma équivalent simplifié de la machine asynchrone

II.4 Bilan des puissances :

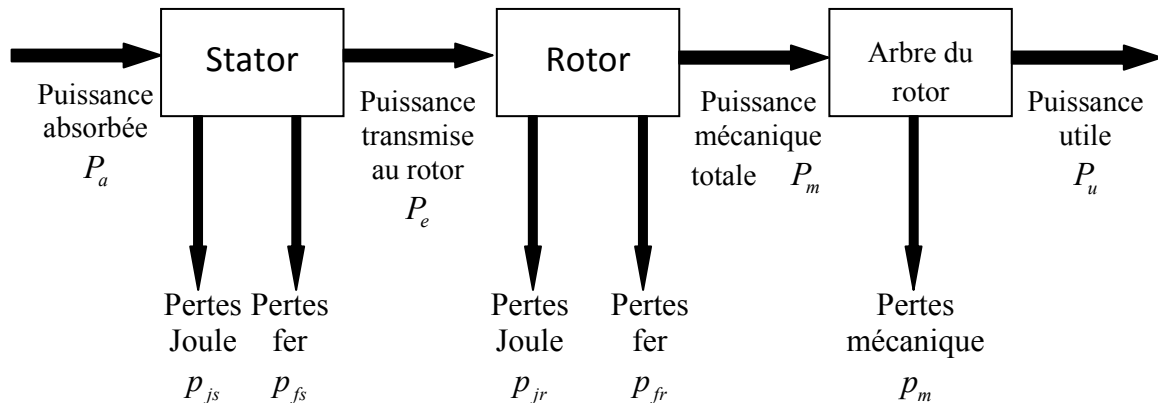


Fig. II.4 : Diagramme des puissances.

II.4.1 Puissance électrique absorbée :

$$P_a = \sqrt{3}UI \cos \varphi$$

II-6

U : Tension entre deux bornes du moteur.

I : Courant de ligne.

II.4.2 les différentes pertes :

Les sources principales des pertes sont le champ magnétique et le courant électrique. Ces pertes ont une influence directe sur le rendement et le facteur de puissance de la machine.

II.4.2.1 Les pertes fer :

C'est la somme des pertes par hystérésis qui résultent de la transformation de l'organisation de la matière sous l'effet de la variation en intensité et en direction de champ magnétique appliqué et les pertes par courant de Foucault qui sont dûes au courant créé dans la tôle par la F.E.M induite par l'alimentation alternative.

II.4.2.1.1 Les pertes fer statorique :

Elles ne dépendent que de la tension U et de la fréquence f_s et sont donc constantes si le moteur est couplé au réseau.

II.4.2.1.2 Les pertes fer rotorique :

Elles sont négligeables à cause des faibles fréquences rotoriques.

II.4.2.2 les pertes électriques :

Elles sont constituées par les pertes Joule statorique et les pertes Joule rotorique.

II.4.2.2.1 Pertes Joule statoriques :

$$P_{js} = 3R_1 I_1^2 \quad \text{II-7}$$

II.4.2.2.2 Pertes Joule rotorique :

$$P_{jr} = 3R_2 I_2^2 = 3R_2' I_2'^2 \quad \text{II-8}$$

II.4.2.3 Les pertes mécaniques:

Elles comportent les pertes par frottement et les pertes par ventilation.

$$P_m = P_u - P_m \quad \text{II-9}$$

II.4.3 Puissance transmise au rotor :

$$P_e = P_a - P_{js} - P_{fs} \quad \text{II-10}$$

II.4.4 Puissance mécanique totale :

Le couple électromagnétique T_e entraîne le rotor à la vitesse Ω . Il lui communique donc la puissance mécanique totale.

$$P_m = T_e \Omega \quad \text{II-11}$$

Soit :

$$P_m = T_e \Omega = P_e (\Omega / \Omega_s)$$

$$\Rightarrow P_m = P_e (1 - g) \quad \text{II-12}$$

II.4.5 Puissance utile P_u :

$$P_u = P_m - p_m \quad \text{II-13}$$

II.4.6 Le rendement :

II.4.6.1 Le rendement du rotor :

C'est le rendement de la transformation électromagnétique d'énergie.

$$\eta = \frac{P_m}{P_e}$$

II.4.6.2 Le rendement industriel :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad \text{II-14}$$

Pour avoir un bon rendement, le moteur asynchrone doit fonctionner à pleine charge.

II.4.7 Puissance réactive :

La puissance réactive appelée par le moteur au réseau est :

$$Q = 3V_1 I_1 \sin \varphi \quad \text{II-15}$$

Elle est la somme de la puissance réactive Q_m consommé pour l'aimantation du circuit magnétique principal et les puissances réactives nécessaires pour les circuits magnétiques de fuites :

$$Q = Q_m + 3l_1 \omega_s I_1^2 + 3l_2 \omega_s I_2^2 \quad \text{II-16}$$

Les trois termes de la somme étant positifs, nous constatons qu'une machine asynchrone consomme toujours de l'énergie réactive, quel que soit son type de fonctionnement.

II.5 Expression du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique c'est le quotient de la puissance électromagnétique par la vitesse de synchronisme. Son expression est donnée par :

$$T_e = \frac{P_e}{\Omega_s} = \frac{3R_2' I_2'^2}{g \Omega_s} \quad \text{II-17}$$

A partir du schéma équivalent simplifié (*fig. II.3*), on aura :

$$\bar{I}_2' = \frac{\bar{V}_1}{(R_1 + \frac{R_2'}{g}) + j(X_1 + X_2')}$$

$$I_2' = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{g})^2 + L^2 \omega_s^2}} \quad \text{II-18}$$

Avec :

$$X_1 = l_1 \omega_s$$

$$X_2' = l_2' \omega_s$$

$$L \omega_s = l_1 \omega_s + l_2' \omega_s$$

On remplace I_2' dans l'expression (II-17) on trouve :

$$T_e = \frac{3R_2' I_2'^2}{g \Omega_s} = \frac{3R_2' V_1^2}{g \Omega_s} \cdot \frac{1}{\left[(R_1 + \frac{R_2'}{g})^2 + L^2 \omega_s^2 \right]}$$

$$T_e = \frac{3R_2' V_1^2}{g \Omega_s} \cdot \frac{g^2}{\left[(gR_1 + R_2')^2 + g^2 L^2 \omega_s^2 \right]}$$

$$T_e = \frac{3R_2' V_1^2}{\Omega_s} \cdot \frac{g}{\left[(gR_1 + R_2')^2 + g^2 L^2 \omega_s^2 \right]} \quad \text{II-19}$$

II.5.1 Le couple maximal :

Lorsque g augmente la caractéristique $T_e = f(g)$ s'incurve, passe par un maximum puis diminue, pour trouver le maximum de T_e , on cherche la valeur g_m du glissement qui annule la dérivée du couple électromagnétique par rapport au glissement $\frac{dT_e}{dg} = 0$

$$\begin{aligned} \frac{dT_e}{dg} &= \frac{3R_2' V_1^2}{\Omega_s} \cdot \frac{(gR_1 + R_2')^2 + g^2 L^2 \omega_s^2 - g(2g L^2 \omega_s^2 + 2gR_1^2 + 2R_1 R_2')}{\left[(gR_1 + R_2')^2 + g^2 L^2 \omega_s^2 \right]^2} \\ &= \frac{3R_2' V_1^2}{\Omega_s} \cdot \frac{(gR_1 + R_2')^2 + g^2 L^2 \omega_s^2 - 2g^2 L^2 \omega_s^2 - 2g^2 R_1^2 - 2gR_1 R_2'}{\left[(gR_1 + R_2')^2 + g^2 L^2 \omega_s^2 \right]^2} \end{aligned}$$

$$\frac{dT_e}{dg} = 0 \Rightarrow \text{Le numérateur est égal à } 0$$

$$\Rightarrow (gR_1 + R_2')^2 + g^2 L^2 \omega_s^2 - 2g^2 L^2 \omega_s^2 - 2g^2 R_1^2 - 2gR_1 R_2' = 0$$

$$\Rightarrow g^2 R_1^2 + 2gR_1 R_2' + R_2'^2 + g^2 L^2 \omega_s^2 - 2g^2 L^2 \omega_s^2 - 2g^2 R_1^2 - 2gR_1 R_2' = 0$$

$$\Rightarrow R_2'^2 - g^2 L^2 \omega_s^2 - g^2 R_1^2 = 0$$

$$\Rightarrow g = \frac{R_2'}{\sqrt{(L^2 \omega_s^2) + R_1^2}} = g_m \quad \text{II-20}$$

Pour cette valeur de glissement $R_2'^2 - g^2 R_1^2 = g^2 L^2 \omega_s^2$. En remplaçant dans l'expression du couple électromagnétique, on obtient :

$$T_{e\max} = \frac{3V_1^2}{\Omega_s} \frac{gR_2'}{g^2 R_1'^2 + 2gR_1R_2' + R_2'^2 + R_2'^2 - g^2 R_1'^2} = \frac{3V_1^2}{\Omega_s} \frac{1}{2R_1 + \frac{2R_2'}{g}}$$

Où, on remplace g par sa valeur,

$$T_{e\max} = \frac{3V_1^2}{2\Omega_s} \frac{1}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + L^2\omega_s^2}} \tag{II-21}$$

II.5.2 Le couple de démarrage :

Au démarrage, la vitesse de rotation du rotor $N=0$, ce qui donne un glissement $g = \frac{N_s - N}{N_s} = 1$. Donc, le couple de démarrage est obtenu pour un glissement $g = 1$, d'où :

$$T_d = \frac{3R_2'V_1^2}{\Omega_s} \frac{1}{(R_1 + R_2')^2 + L^2\omega_s^2} \tag{II-22}$$

II.6 Caractéristiques mécaniques :

Ce sont les courbes qui donnent le couple électromagnétique en fonction du glissement ou de la vitesse de rotation. On représente la caractéristique $T_e = f(g)$, puis on déduit la caractéristique $T_e = f(N)$ sachant que le glissement est une fonction linéaire de la vitesse de rotation.

II.6.1. Caractéristique couple-glissement :

L'expression (II-19) permet de tracer la courbe du couple électromagnétique en fonction du glissement, celui-ci étant compris entre 0 et 1 pour un fonctionnement en moteur :

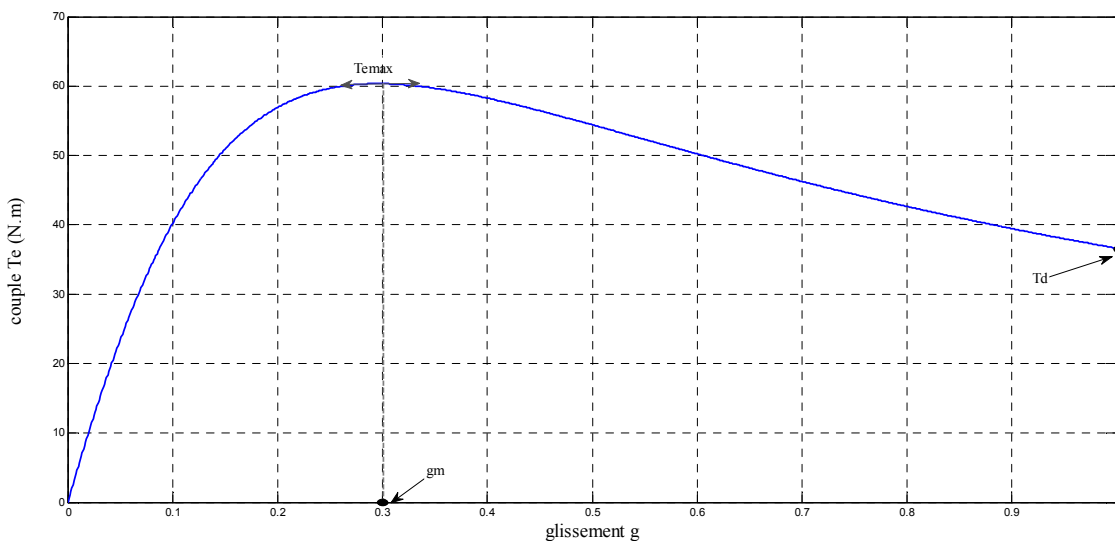


Fig. II.5 : Caractéristique mécanique couple-glissement.

On constate de cette caractéristique que pour un glissement nul, c'est-à-dire $N = N_s$, le couple électromagnétique est nul. Et pour un glissement $g = 1$, qui correspond au démarrage du moteur, le couple électromagnétique $T_e = T_d$

g_m est la valeur du glissement qui donne le couple maximal.

II.6.2 Caractéristique couple-vitesse :

C'est la courbe donnant le couple électromagnétique en fonction de la vitesse. Sachant que $N = N_s(1-g)$, cette caractéristique peut être facilement déduite de la caractéristique $T_e = f(g)$ précédente. Nous avons représenté ci-dessous, la caractéristique mécanique d'un moteur asynchrone et la caractéristique de charge avec un couple résistant T_m constant.

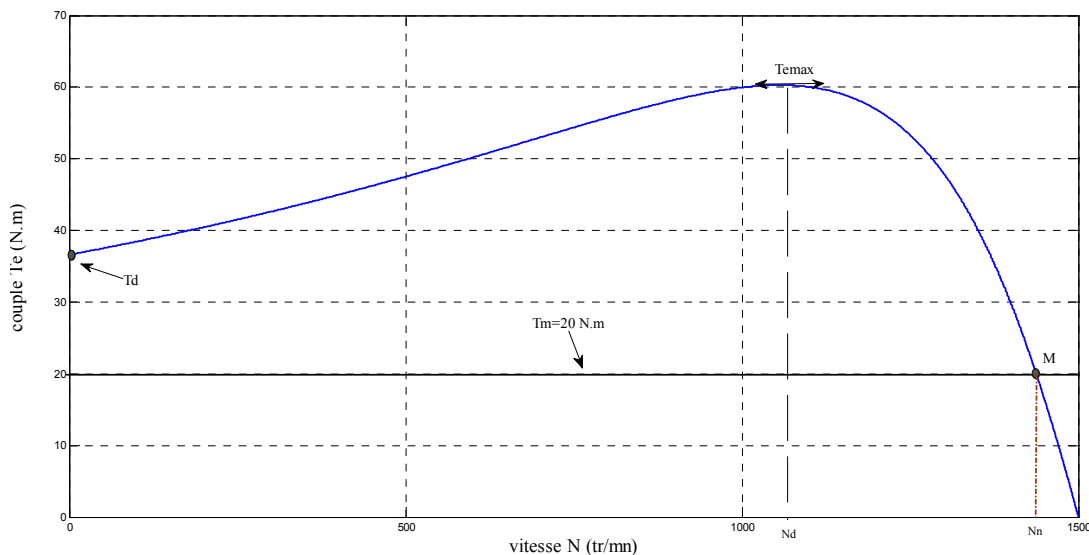


Fig. II.6 : Caractéristique mécanique couple-vitesse.

La caractéristique mécanique est très importante, vu que son intersection avec la caractéristique mécanique $T_m(N)$ de la charge nous donne le point de fonctionnement de la machine (M). Le couple maximal est appelé aussi couple de décrochage, auquel correspond N_d , la vitesse de décrochage. Si au cours de fonctionnement, le couple résistant dépasse le couple maximal $T_m > T_{emax}$, le moteur décroche. Pour éviter ce phénomène et obtenir une marge de sécurité suffisante, le couple nominal doit être 2 à 2.5 fois plus faible que le couple de décrochage.

Si le moteur est entraîné à une vitesse supérieure à la vitesse du synchronisme, le glissement, ainsi que le couple deviennent négatifs, dans ce cas, la machine renvoie de l'énergie au réseau, la machine fonctionne donc en génératrice.

II.6.3 Influence de la résistance rotorique sur la caractéristique mécanique:

Pour un moteur asynchrone à rotor bobiné, on peut insérer entre les bornes rotoriques une résistance rotorique additionnelle r_2 . Pour diverses valeurs de celle-ci, on fait varier la résistance par phase du rotor.

Sachant que l'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$T_e = \frac{3V_1^2}{\Omega_s} \cdot \frac{\frac{R_2'}{g}}{(R_1 + \frac{R_2'}{g})^2 + L^2 \omega_s^2}$$

Cette expression montre que pour des valeurs fixées de V_1, ω_s, R_1, L et Ω_s , le couple n'est fonction que de $\frac{R_2'}{g}$. Si on augmente la résistance rotorique de R_2' à $R_2' + r_2$, le couple qui était obtenu pour un glissement g sera obtenu pour un glissement g' , tel que :

$$g' = g \frac{R_2' + r_2}{R_2'}$$

Cette relation montre comment, à couple résistant donné, le glissement augmente au fur et à mesure que la résistance par phase rotorique augmente.

Suivant les valeurs de la résistance rotorique additionnelle, on trace les caractéristiques mécaniques $T_e(N)$ pour diverses valeurs de la résistance équivalente vu entre les bornes du rotor $R_{eq} = R_2' + r_2$ comme montré sur la figure suivante :

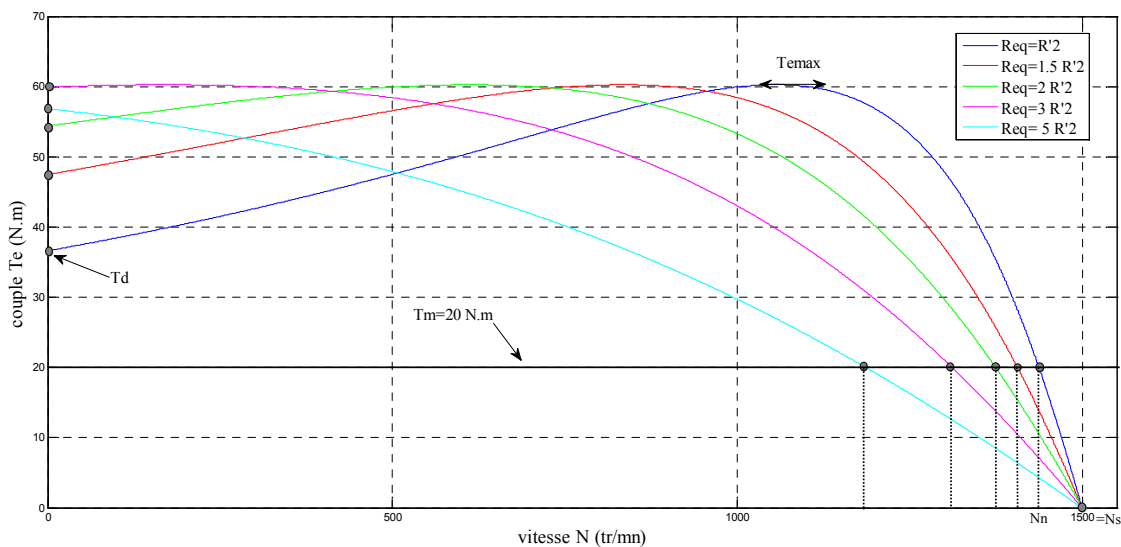


Fig. II.7 : Caractéristique couple-vitesse pour différentes valeurs de la résistance rotorique équivalente.

On constate de la figure (II.7), que si on augmente la résistance du rotor sans effectuer aucun autre changement, la courbe du couple en fonction de la vitesse change et se déplace vers la gauche. Le couple maximal reste constant, mais il est développé à des vitesses plus basses. La vitesse du régime permanent (nominale) décroît, le couple de démarrage augmente jusqu'à atteindre la valeur du couple maximal puis, il commence à décroître.

On peut conclure qu'une résistance rotorique relativement élevée, donne un bon couple de démarrage. Par contre, en régime nominal, la résistance doit être petite, car la vitesse demeure plus stable lorsque la charge varie, aussi les pertes Joule rotoriques sont moins élevées et le rendement du moteur est meilleur.

II.6.4 Influence de la tension d'alimentation sur la caractéristique mécanique:

Nous savons que le couple électromagnétique évolue comme le carré de la tension d'alimentation V_1 (expression II-19). Ci-dessous, on a relevé les caractéristiques couple-vitesse pour différentes valeurs de la tension d'alimentation :

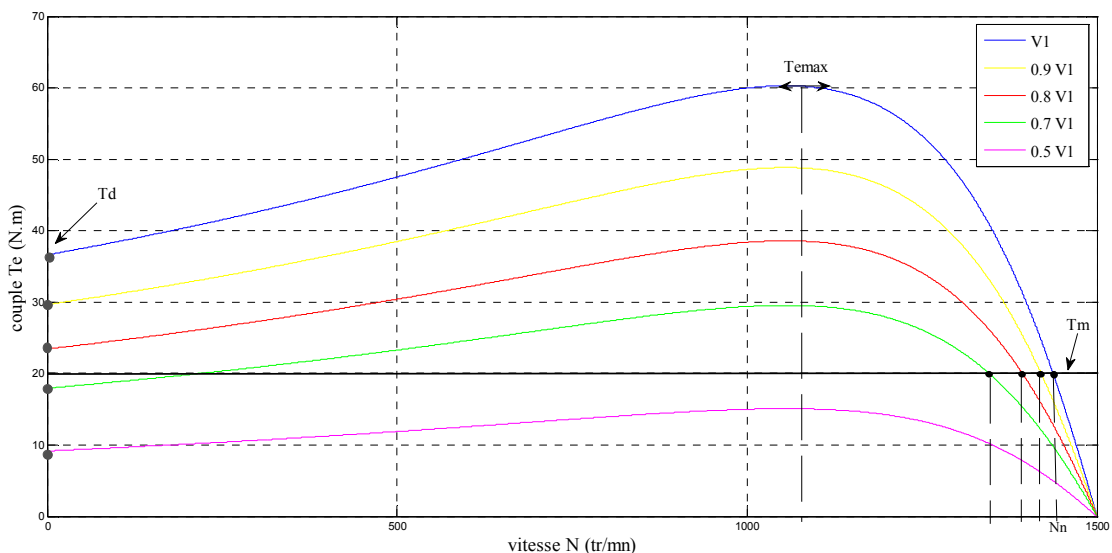


Fig. II.8 : Caractéristique couple-vitesse pour différentes valeurs de la tension d'alimentation.

A partir de la figure ci-dessus, nous pouvons constater que la diminution de la tension apporte des modifications sur la caractéristique mécanique $T_e(N)$, à savoir :

- A couple résistant T_m constant, la diminution de la tension statorique peut faire baisser légèrement la vitesse de rotation.
- La stabilité du point de fonctionnement (intersection de la caractéristique du moteur avec le couple résistant) diminue. Il peut basculer dans la zone de fonctionnement instable. Ceci explique le problème de démarrage du moteur asynchrone en basse tension.

- Le couple de démarrage décroît avec la tension. En abaissant la tension par exemple de moitié, le couple de démarrage est divisé par quatre.
- Le couple maximal décroît avec la tension mais il est développé à la même vitesse de rotation, donc la valeur du glissement qui correspond au couple maximal ne varie pas. On remarque aussi que pour une certaine valeur de la tension, on aura $T_m > T_{e\max}$. Ce qui veut dire, que pour cette valeur, on ne peut plus faire démarrer le moteur en charge.

II.6.5 Influence de la fréquence sur la caractéristique mécanique:

Ci-dessous, on a relevé la caractéristique mécanique $T_e(N)$ pour différentes fréquences d'alimentation :

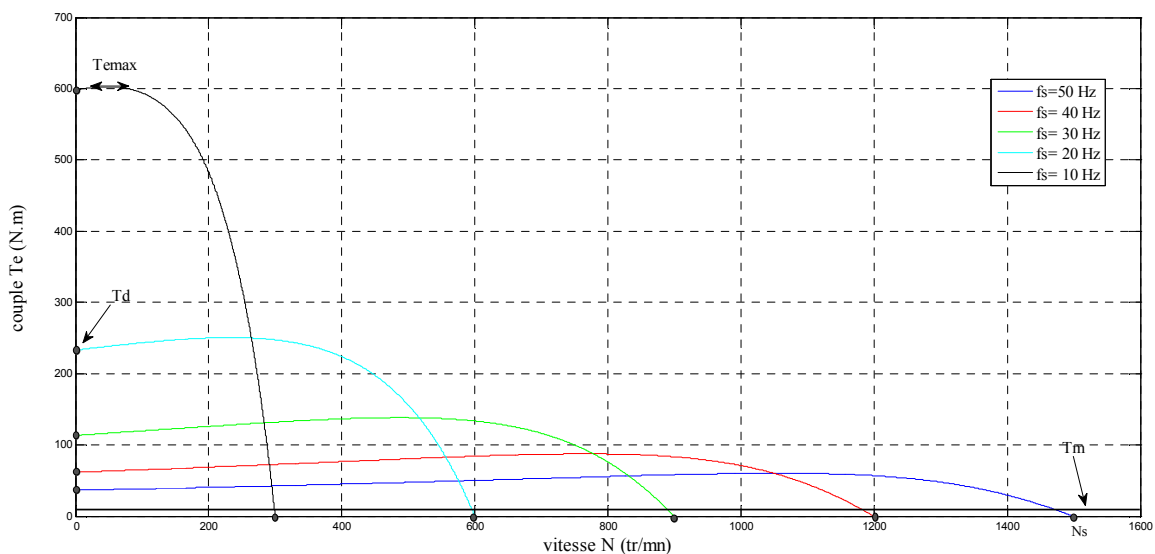


Fig. II.9 : Caractéristique couple-vitesse pour différentes fréquences du réseau.

La figure ci-dessus illustre bien l'influence de la fréquence d'alimentation sur la caractéristique mécanique. On remarque qu'en diminuant la fréquence :

- Les différentes caractéristiques ne sont pas concourantes, ce qui implique une modification de la vitesse de synchronisme ainsi que le point de fonctionnement et la vitesse de rotation du moteur.
- Le couple de démarrage augmente.
- Le couple maximal augmente.

On peut noter aussi, qu'à couple résistant constant, la variation de la fréquence offre une marge importante de réglage de la vitesse. Mais ne convient pas au niveau du courant magnétisant qui est trop élevé aux faibles vitesses. En effet, à partir du schéma équivalent simplifié de la figure (II.3) et en négligeant la résistance R_f , on aura :

$$I_m = \frac{V_1}{X_m} = \frac{V_1}{L_m \omega_s} = \frac{V_1}{L_m 2\pi f_s}$$

Quand la fréquence est très faible, le courant magnétisant sera très grand ce qui provoque la saturation du circuit magnétique. La solution à ce problème, consiste à réduire la tension d'alimentation en même temps que la fréquence, cela est réalisé grâce à une commande appelée : commande à $\frac{V_1}{f_s} = cte$

II.6.6 Influence du nombre de paires de pôles sur la caractéristique mécanique :

La figure suivante représente la caractéristique d'une machine asynchrone pour différentes valeurs du nombre de paire de pôles :

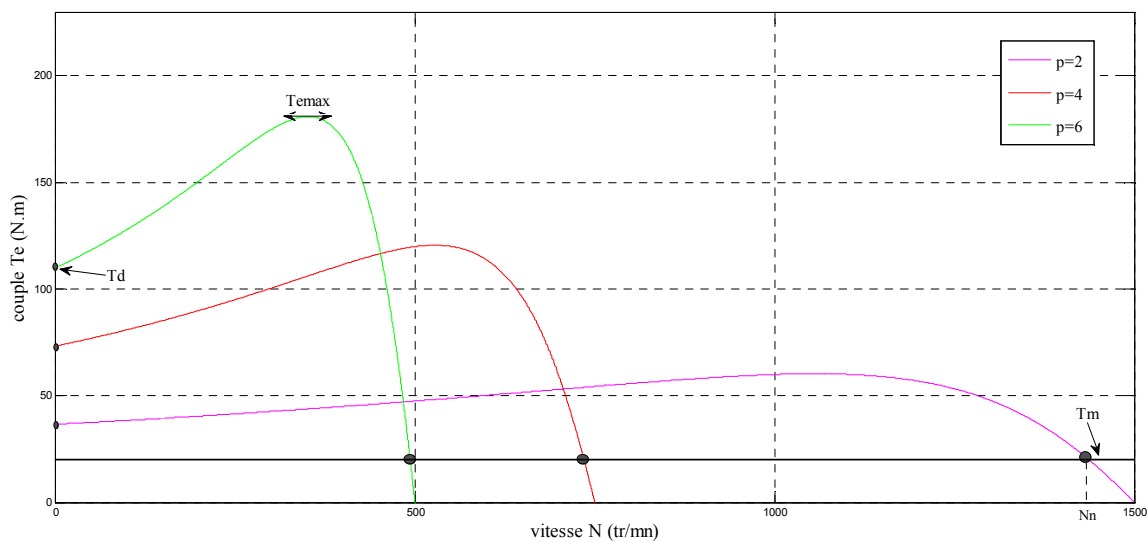


Fig. II.10 : Caractéristique couple-vitesse pour différentes valeurs du nombre de paires de pôles.

On remarque à partir de ces caractéristiques que la modification du nombre de paires de pôles de la machine modifie la vitesse de synchronisme. A couple résistant constant, le point de fonctionnement ainsi que la vitesse de rotation seront modifiés. Aussi, en augmentant le nombre de paires de pôles, le couple de démarrage et le couple maximal augmentent. Ce mode de réglage offre des possibilités très restreintes de réglage de vitesse, en général deux vitesses.

II.7 Conclusion :

Le travail présenté dans ce chapitre concerne les équations en régime permanent, le schéma équivalent et les caractéristiques mécaniques de la machine asynchrone.

En premier lieu, nous avons rappelé les équations de la machine et on les a représentées par un schéma équivalent, qui a permis d'établir l'expression du couple électromagnétique.

Puis, nous avons étudié l'influence de certains paramètres sur la caractéristique mécanique. Nous avons constaté qu'il est possible d'agir sur le couple électromagnétique de la machine asynchrone en modifiant ces paramètres et par conséquent, régler la vitesse de rotation de cette dernière.

Dans le prochain chapitre, nous allons voir quelques méthodes de réglage de vitesse des moteurs asynchrones.

Chapitre III

Méthodes de réglage de vitesse des moteurs asynchrones

III.1 Introduction :

Pendant longtemps, les possibilités de réglage de vitesse des moteurs asynchrones ont été très réduites. Les moteurs à cage étaient, la plupart du temps utilisés à leurs vitesses nominales. Avec l'avènement de l'électronique de puissance et l'apparition des convertisseurs de fréquence, les moteurs asynchrones sont aujourd'hui couramment commandés en vitesse variable, et peuvent ainsi être employés dans des applications jusqu'alors réservés aux moteurs à courant continu.

Dans ce chapitre, nous verrons quelques méthodes qui permettent le réglage de vitesse des moteurs asynchrones.

III.2 Méthodes de réglage de vitesse :

Les méthodes de réglage de vitesse des moteurs asynchrones peuvent être classées en trois groupes. Sachant que la vitesse du moteur s'exprime par : $N = (1 - g) \cdot \frac{f_s}{p}$. Donc, pour la faire varier on peut :

- Soit agir sur le nombre de paires de pôles p .
- Soit agir sur le glissement g .
- Soit agir sur la fréquence d'alimentation f_s .

III.2.1 Changement du nombre de paires de pôles :

Ce procédé est simple à réaliser mais très limité car il donne des vitesses discrètes (généralement 02 vitesses). Les moteurs pour lesquels est appliqué ce procédé peuvent être classés en deux groupes :

- Moteurs à plusieurs enroulements.
- Moteurs à couplage de pôles (Dahlander).

III.2.1.1 Moteurs à plusieurs enroulements :

Ces moteurs ont deux stators pour un seul rotor, le nombre de paire de pôles est différent pour chaque stator. Les deux stators sont couplés en étoile et on les alimente indépendamment. Le rapport des vitesses est fonction des enroulements.

III.2.1.2 Couplage Dahlander :

C'est une solution simple pour obtenir un moteur à deux vitesses, le couplage Dahlander est représenté sur la figure suivante :

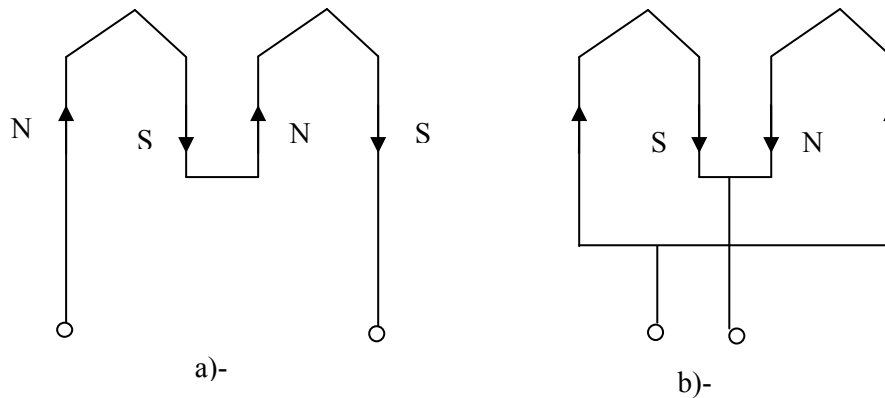


Fig. III.1 : Principe du couplage Dahlander.

Deux bobines successives peuvent créer quatre pôles si elles sont montées en série (Fig.III.1-a) et deux pôles si elles sont montées en parallèle (Fig.III.1-b). Comme la vitesse de rotation est inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles, sa valeur variera dans un rapport de 2 lorsqu'on change les connexions des bobines. On obtient ainsi pour le moteur deux vitesses, une petite vitesse N_p , et une grande vitesse N_G , tel que : $N_G = 2N_p$. Pour faire fonctionner le moteur dans de bonnes conditions pour les deux vitesses, deux configurations peuvent se présenter pour les connexions des enroulements :

- Couplage en étoile avec des bobines en série pour la petite vitesse, et en étoile avec des bobines en parallèle pour la grande vitesse. Cette solution est utilisée pour des charges ayant un couple résistant constant (treuil, engins de levage).
- Couplage en triangle avec des bobines connectées en série pour la petite vitesse, et étoile avec une connexion parallèle des bobines pour la grande vitesse. Cette solution convient pour des charges fonctionnant à puissance constante.

III.2.2 Action sur le glissement :

Pour faire varier le glissement d'une machine asynchrone alimentée à fréquence constante, on peut soit :

- Réduire la tension d'alimentation du moteur.
- Augmenter la résistance rotorique en ajoutant un rhéostat.
- Prélever la puissance dissipée entre les bagues du rotor et récupérer cette puissance.

III.2.2.1 Réduction de la tension d'alimentation :

Il est possible de régler la tension statorique d'un moteur asynchrone à cage, ce qui permet d'ajuster le couple électromagnétique et obtenir ainsi le réglage de vitesse.

La mise en œuvre de ce procédé consiste à interposer entre le réseau d'alimentation et le stator du moteur un convertisseur statique. Le convertisseur le plus simple pour réaliser un tel montage est de type gradateur. Un gradateur est un convertisseur statique composé de deux thyristors montés en tête-bêche (*Fig.III.2*).

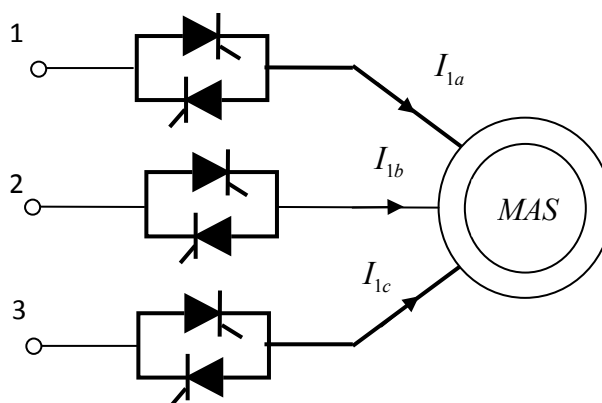


Fig. III.2 : Alimentation de la machine asynchrone par un gradateur triphasé.

On sait qu'à glissement donné, le couple électromagnétique du moteur est proportionnel au carré de la tension d'alimentation. Cette méthode n'est utilisée que pour l'entraînement de charges ayant un couple de charge quadratique $T_m = KN^2$.

Avantages :

- Ce procédé de variation de vitesse présente l'avantage de pouvoir être utilisé sur le moteur à cage.
- D'autre part il est très facile à mettre en œuvre. On fait varier la tension en interposant entre le réseau et le stator un gradateur, c'est-à-dire un des convertisseurs statiques les plus simples. Chaque phase du gradateur est formé de deux thyristors montés en parallèle inverse (*Fig.III.2*) ou, en faible puissance, un simple triac. Pour réduire la tension d'alimentation, on diminue la durée de l'intervalle ou, pendant chaque alternance, on laisse passer le courant.
- Ce procédé présente, de par son principe même, une limitation quant à son domaine d'applications. Il ne peut être utilisé que si le couple de la charge entraînée est

négligeable à l'arrêt et augmente très vite avec la vitesse. On l'utilise pour l'entraînement de pompes ou de ventilateurs dont le couple est sensiblement proportionnel au carré de la vitesse.

Inconvénients :

- La réduction de vitesse se fait au détriment du rendement puisqu'elle est obtenue par augmentation de glissement. Si le moteur glisse de 50%, les pertes Joule rotoriques à elles seules représentent 50% de la puissance traversant l'entrefer. Si l'on ajoute toutes les autres pertes, on obtient un rendement nettement inférieur à 50%.
- L'augmentation des pertes Joule rotoriques quand on réduit la tension pose le problème de l'échauffement du moteur. Comme il s'agit le plus souvent de moteurs auto-ventilés, en réduisant la tension, on accroît les pertes à évacuer et on diminue l'efficacité de leur évacuation, il faut déclasser le moteur.
- Le gradateur est un convertisseur très polluant. Les courants pris au réseau et fournis au moteur ont un taux d'harmoniques très important. Ces harmoniques perturbent le réseau et diminuent encore les performances de moteur.

Ce procédé est réservé aux entraînements de faible et moyenne puissances.

III.2.2.2 Augmentation de la résistance rotorique :

Cette solution s'applique à des moteurs asynchrones à rotor bobiné. Ce procédé consiste à augmenter la résistance des enroulements rotoriques en leur ajoutant des rhéostats en série. On peut utiliser des contacteurs mécaniques pour court-circuiter des portions du rhéostat additionnel quand on veut augmenter la vitesse ou les insérer quand on veut la diminuer. La figure suivante montre bien ce principe :

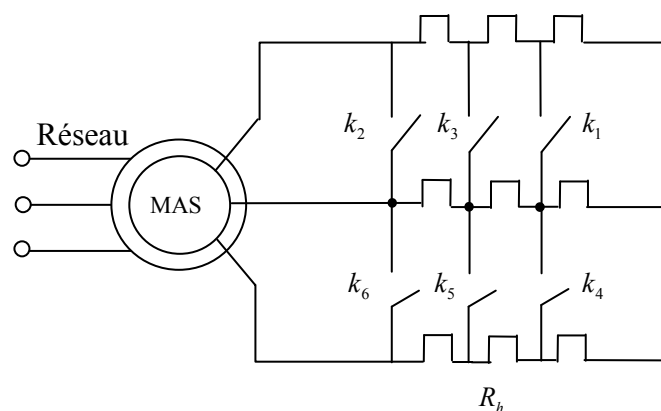


Fig. III.3 : Réglage de vitesse par rhéostat rotorique.

Souvent aussi, on place un gradateur à la formation du point neutre secondaire, il n'est utilisé que pour les petites vitesses et pour des positionnements précis (Fig. III.4).

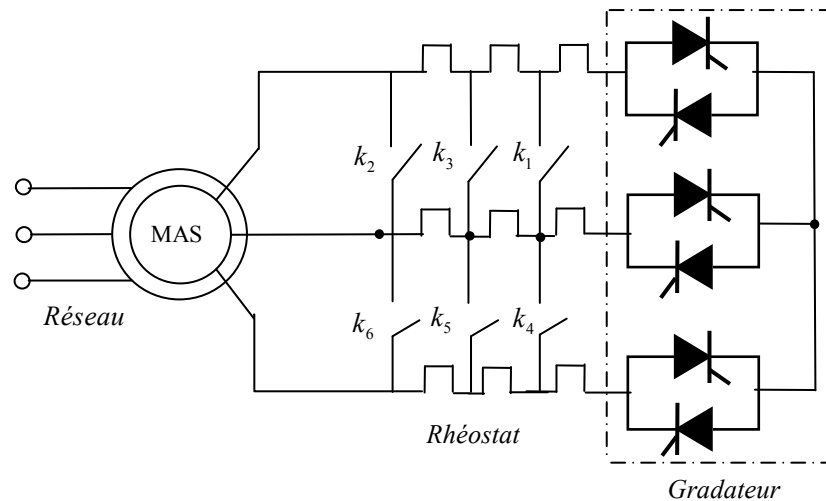


Fig. III.4 : Réglage de vitesse par rhéostat rotorique couplé à un gradateur triphasé.

Une autre façon de faire varier la résistance rotorique sans contact mécanique. Entre les balais du rotor, on monte un redresseur à six diodes. La tension redressée sera appliquée à la résistance R à travers une inductance de lissage de courant. Un semi conducteur commandé à la fermeture et à l'ouverture T court-circuite pour une durée plus au moins longue, qui dépend de ses périodes de fonctionnement, la résistance R . (Fig. III.5).

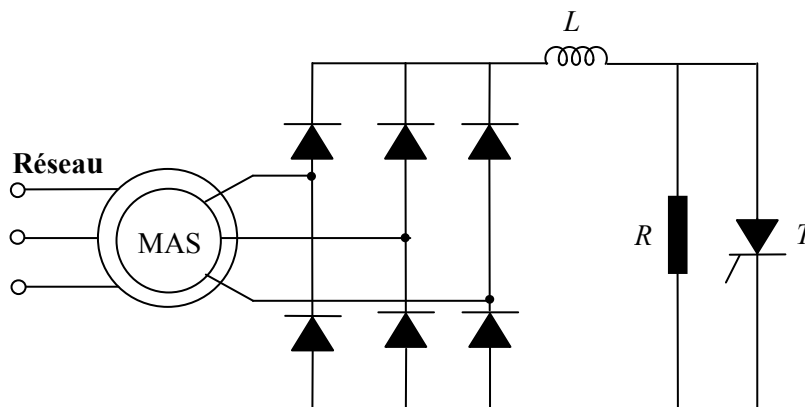


Fig. III.5 : Schéma de réglage de vitesse par hacheur rotorique

Par action sur la durée de conduction du transistor T , on fait varier la valeur de la résistance équivalente vue par le pont redresseur.

Avantages et inconvénients :

La méthode de variation de vitesse par résistance rotorique présente des inconvénients par rapport à la méthode de réduction de la valeur de la tension d'alimentation :

- Ce n'est pas une vraie variation de vitesse, on peut régler la vitesse à vide qui reste voisine de la vitesse synchrone. C'est une variation de la chute de vitesse en charge.
- En augmentant le glissement, les pertes joules dues aux courants rotoriques augmentent ($p_{jr} = gP_e$) et le rendement diminue.

Mais, par rapport à la variation de vitesse par la méthode de réduction de la tension d'alimentation, elle présente quelques avantages :

- Elle est utilisable quelle que soit la charge entraînée puisque l'on reste toujours sur la partie stable des caractéristiques mécaniques.
- Les pertes joules dues à l'augmentation du glissement sont dissipées dans le rhéostat et non dans le rotor lui-même.
- Les perturbations causées par les harmoniques du courant absorbé par le moteur disparaissent ou sont fortement diminuées si on associe un convertisseur statique à la variation de la résistance rotorique.

III.2.2.3 Récupération de la puissance de glissement :

Le procédé de réglage de vitesse par résistance rotorique peut être amélioré et étendu aux fortes puissances, cela suppose la récupération de l'énergie perdue par effet Joule sous forme de chaleur dans les résistances rotoriques de réglage.

Avant, on utilisait des machines à courant continu ou alternatif. Ces machines renvoient la puissance récupérée entre les bagues du rotor vers le réseau et ajoutent leurs couples à celui du moteur asynchrone, du fait qu'elles sont montées sur le même arbre que celui-ci. De nos jours, on effectue cette récupération de puissance de manière entièrement statique, grâce à un montage appelé cascade hyposynchrone représenté sur la figure suivante :

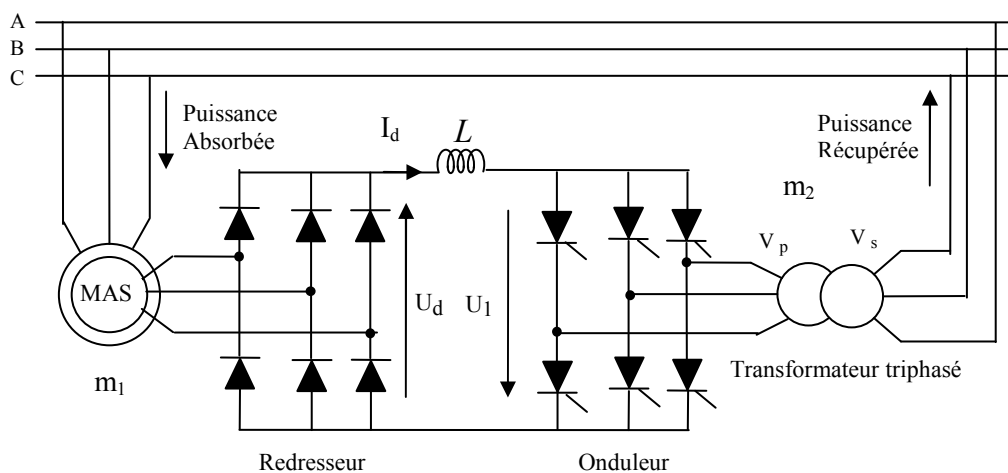


Fig. III.6 : Réglage de vitesse par cascade hyposynchrone.

Comme la pulsation des tensions rotoriques $g\omega_s$ est différente de celle des tensions du réseau ω_s , pour récupérer l'énergie dissipée au rotor et la renvoyer au réseau, on procède par deux étapes :

- Conversion de tension.
- Conversion de fréquence.

La conversion de tension est assurée par un redresseur triphasé, formé d'un pont de six diodes qui transforme la tension rotorique en tension continue. Quand à la conversion de fréquence, elle est obtenue par onduleur formé d'un deuxième pont à thyristors qui transforme la tension continue en tension triphasée alternative de fréquence égale à la fréquence du réseau f_s . A ces deux convertisseurs, il faut ajouter une inductance de lissage pour améliorer la qualité du courant continu et un transformateur triphasé qui permet d'adapter la tension à la sortie de l'onduleur à celle du réseau avec le meilleur facteur de puissance possible.

Avantages et Inconvénients :

- Ce procédé permet une vraie variation de vitesse puisqu'il admet le réglage de vitesse même à vide.
- Il nécessite, outre un moteur à rotor bobiné, un redresseur, un onduleur et un transformateur dans le circuit de récupération. L'onduleur est très simple car il s'agit d'un onduleur non autonome dont les commutations sont assurées par le réseau.
- Ce procédé est intéressant quand on veut se contenter d'une variation de vitesse réduite.

III.2.3 Action sur la fréquence d'alimentation :

Pour obtenir à partir du réseau à tension et fréquence constantes, la tension de valeur et de fréquence variables, on peut utiliser :

- Soit la conversion directe qui consiste à construire les tensions appliquées à la machine par un échantillonnage des tensions du réseau, c'est la technique des cycloconvertisseurs.
- Soit la conversion indirecte avec passage par l'intermédiaire du continu ; on redresse les tensions du réseau puis on ondule la tension redressée de façon à obtenir les tensions alternatives voulues. L'onduleur peut être :
 - Un onduleur de courant.
 - Un onduleur de tension.

III.2.3.1 Alimentation à flux constant :

En même temps que la fréquence, on fait varier la valeur de la tension d'alimentation. Pour avoir le même couple à toutes les fréquences, on travaille à flux dans l'entrefer constant. Un fonctionnement à couple maximal sur toute la plage de vitesse nécessite l'alimentation de la machine par une source de tension à fréquence et à amplitude variables ce qui nécessite de maintenir le rapport $\frac{V_1}{f_s}$ constant jusqu'à la fréquence de défluxage f_d . Au-delà de cette fréquence, la tension est maintenue constante et la machine fonctionne à flux décroissant (on dit aussi fonctionnement en sous-excité ou bien à puissance constante).

Quand le moteur est sous-excité, il faut s'assurer que le couple demandé est compatible avec le couple de décrochage.

III.2.3.2 Technique des cycloconvertisseurs :

Un cycloconvertisseur est un convertisseur de fréquence dont la fréquence de sortie est faible devant celle du réseau d'alimentation ($2/3$ maximum). Le montage complet avec la machine asynchrone nécessite 36 thyristors pour une machine triphasée. Le schéma ci-dessous représente le montage pour une phase du moteur :

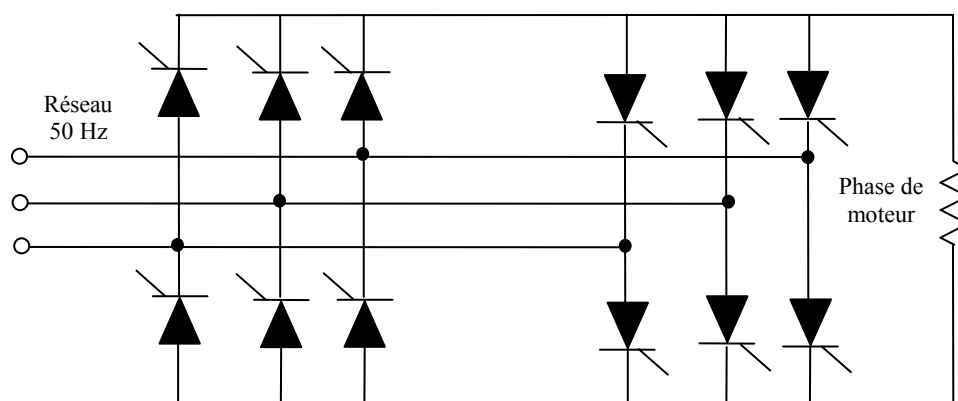


Fig. III.7 : Alimentation par cycloconvertisseur.

III.2.3.3 Alimentation par onduleur de courant :

Le passage par l'intermédiaire du continu dans les variateurs de vitesse alimentés par le réseau triphasé rend la fréquence des courants et des tensions appliquées à la machine indépendante de la fréquence du réseau. La figure (III-6) montre le principe d'un variateur de vitesse avec onduleur de courant.

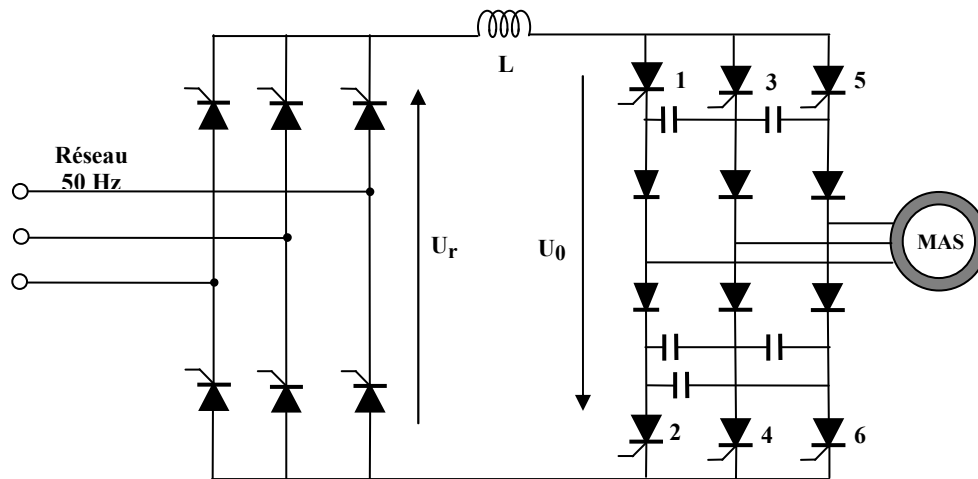


Fig. III.8 : Alimentation par onduleur de courant

Le Redresseur fait varier la valeur moyenne de la tension U_r . L'onduleur change la fréquence de la tension statorique. Les condensateurs assurent le blocage forcé des thyristors. Les diodes évitent la décharge des condensateurs dans les phases du moteur. L'inversion de la séquence de commande des thyristors permet l'inversion du sens de rotation du moteur. Le freinage par récupération a lieu lorsque la fréquence de rotation du moteur est supérieure à la fréquence de synchronisme : l'onduleur fonctionne alors en redresseur et le redresseur en onduleur assisté.

III.2.3.4 Alimentation par onduleur de tension :

La figure suivante montre le schéma de principe d'un variateur de vitesse avec onduleur de tension alimenté à partir du réseau triphasé.

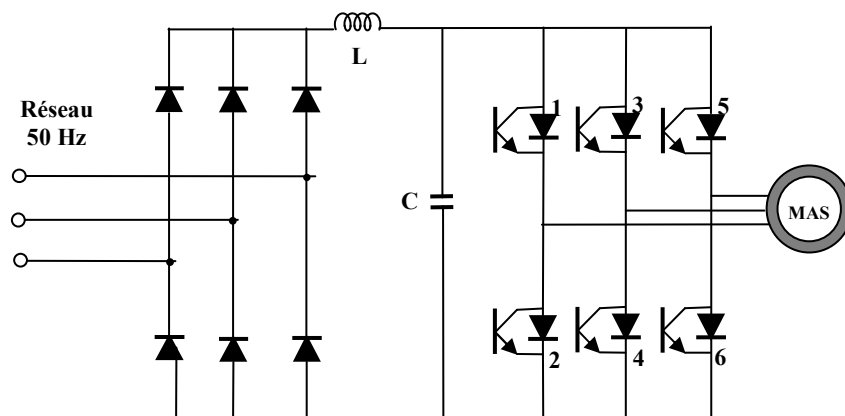


Fig. III.9 : Alimentation par onduleur de tension

Le filtre L-C, associé au pont redresseur à diodes constitue une source de tension. L'onduleur à transistors génère une succession d'impulsions de tension, de largeurs variables (M.L.I). Le moteur, inductif par nature, lisse le courant. Ce dernier est pratiquement sinusoïdal.

III.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons vu quelques méthodes de réglage de vitesse des moteurs asynchrones. Nous avons constaté que chacune d'elles présentent des avantages et des inconvénients. Donc, utilisées dans des domaines industriels bien précis et pour l'entraînement de charges bien définies.

Dans le chapitre qui suit, nous nous proposons d'étudier l'une de ces méthodes, en l'occurrence, la méthode de réglage de vitesse d'un moteur asynchrone à bagues par variation de la résistance rotorique.

Chapitre IV

Réglage de vitesse du moteur

asynchrone à rotor bobiné par hacheur

rotorique

IV.1 Introduction :

En pratique, deux cas peuvent se présenter pour commander en vitesse un moteur asynchrone :

- Cas où, la pulsation ω des courants rotoriques est forcée, dans le but d'imposer le couple. Il est alors nécessaire de connaître à tout instant la vitesse Ω du moteur. Dans ce cas, la pulsation ω_s des courants statoriques est imposée par la relation $\omega_s = \omega + p\Omega$. La commande du moteur en vitesse est en boucle fermée et son alimentation se fait nécessairement par l'intermédiaire d'un onduleur.
- Cas où, la pulsation ω des courants rotoriques n'est pas imposée, ni électriquement, ni par une commande. C'est à dire sa valeur est la conséquence de l'induction dans les conducteurs du rotor, de la vitesse relative de celui-ci par rapport au champ tournant statorique et dépend principalement du couple résistant. Dans ce cas la pulsation ω_s des courants statoriques peut être constante, généralement c'est celle du réseau ; ou réglable (alimentation par onduleur). La commande du moteur en vitesse est en boucle ouverte. Un tel procédé nécessite souvent une boucle de régulation pour limiter le courant.

Commander un moteur en boucle ouverte revient à agir à partir de ses caractéristiques établies et mesurées en laissant aux capteurs uniquement leur rôle de protection.

Cette manière de commander un moteur ou n'importe quel autre système est néanmoins, possible et fiable, si l'utilisateur connaît bien les évolutions possibles de son système et s'il a prévu des moyens de protection comme par exemple des fusibles pour le protéger en cas de surintensité ou de surtension, voir de dépassement de puissance.

Il faut aussi, effectuer au préalable des essais classiques, à l'arrêt, à vide et en charge sur la machine à commander. Dans ce cas, on peut déduire un intervalle de fonctionnement possible, c'est-à-dire un domaine de variation des grandeurs physiques concernées.

En ingénierie, la simulation est un moyen efficace et économique, couramment utilisé pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade de conception qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes. Actuellement, plusieurs outils de simulation, parmi lesquels MATLAB/SIMULINK/SIMPOWERSYSTEMS, sont utilisés dans l'industrie et dans les milieux universitaires.

Dans ce présent chapitre, nous présentons un modèle de simulation de réglage de vitesse du moteur asynchrone à bagues, commandé en vitesse en boucle ouverte par un hacheur. Cette méthode est appelée : réglage de vitesse par hacheur rotorique. Mais avant, nous nous intéressons à une autre méthode plus classique, qui consiste en réglage de vitesse avec variation manuelle de la résistance rotorique.

Le travail comprendra les sections suivantes :

- La présentation sommaire du logiciel MATLAB et de la plate forme SimPowerSystems intégrée à l'environnement SIMULINK.
- Identification des paramètres électriques et mécaniques du moteur asynchrone à rotor bobiné étudié.
- Etude du modèle de simulation de réglage de vitesse du moteur par la méthode de variation manuelle de la résistance rotorique.
- Etude du modèle de simulation de réglage de la vitesse du moteur par la méthode du hacheur rotorique.
- Comparaison entre les deux méthodes.
- Conclusion

IV.2 MATLAB :

MATLAB est un logiciel interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destiné aux ingénieurs et scientifiques. Il possède un langage de programmation à la fois puissant et simple d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'une façon aisée, contrairement à d'autres langages de programmation. Il intègre des fonctions d'analyse numérique, de calcul matriciel, de traitement de signal et de visualisation graphique 2D et 3D...etc. Il peut être utilisé de façon interactive ou en mode programmation. MATLAB est conforté par une multitude de boîtes à outils (toolboxes) spécifiques à des domaines variés.

IV.2.1 Simulink:

SIMULINK est un programme pour la simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires, une extension de MATLAB dans laquelle la définition des modèles se fait par schémas blocs (diagramme structurel).

IV.2.2 SimPowerSystems :

SimPowerSystems (SPS) est un logiciel de modélisation et de simulation de circuits électriques de puissance et des réseaux électriques complexes. Intégré à l'environnement Simulink, il offre de nombreuses fonctions pour la modélisation de la production, du transport et de la distribution de l'électricité, notamment à l'étape de la conception des systèmes de contrôle et de commande associés. Il s'intègre parfaitement aux référentiels multi domaines de Simulink. En couplant les modèles électriques du logiciel avec des modèles de commande de Simulink ou des modèles mécaniques, hydrauliques ou thermiques des autres produits MATLAB, l'utilisateur peut rapidement modéliser et simuler des réseaux complexes, et étudier les interactions entre réseaux de commande et réseaux électriques.

SimPowerSystems contient plus de 150 modèles regroupés sous plusieurs catégories :

- Sources électriques : sources de tension et de courant
- Éléments : transformateurs, branches RLC, charges, lignes de transport,... etc.
- Machines : moteurs à courant alternatif et à courant continu, génératrices, turbines et régulateurs.
- Electronique de puissance : interrupteurs de puissance (Diodes, thyristors, GTO, IGBT,...etc.)
- Mécanismes de mesure : de tension, de courant et d'impédance.

Il offre également des modèles pour la simulation de turbines, de parcs d'éoliennes, ainsi que des modèles d'entraînement électrique de moteurs à courant alternatif et courant continu.

IV.3 Identification des paramètres du moteur asynchrone étudié :

Le modèle de simulation de réglage de vitesse étudié dans ce chapitre, nécessite l'identification préalable des paramètres électriques et mécaniques du moteur.

La machine asynchrone est caractérisée par des paramètres électriques et mécaniques. L'identification de ces paramètres permet de construire un modèle fidèle à la machine réelle.

Deux types de paramètres sont à identifier :

- Les paramètres électriques.
- Les paramètres mécaniques.

IV.3.1 Identification des paramètres électriques :

Pour identifier ces paramètres on réalise deux essais sur le moteur : Un essai à vide et un essai en court-circuit à rotor bloqué.

IV.3.1.1 Essai à vide :

En fonctionnement à vide, c'est-à-dire lorsqu'aucun couple de charge n'est appliqué sur l'arbre du moteur, le glissement est presque nul, par conséquent l'impédance rotorique est infinie. Donc la branche rotorique est ouverte. Le schéma équivalent général du moteur vu au chapitre II (*Fig. II.2*) devient :

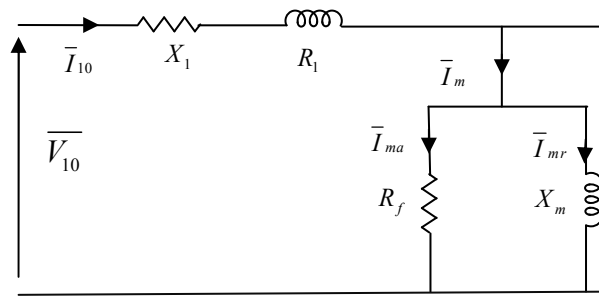


Fig.IV.1 : Schéma électrique équivalent par phase à vide.

Si de plus, on néglige l'impédance statorique, alors le schéma électrique équivalent par phase à vide, se simplifie et sera représenté finalement comme ci-dessous :

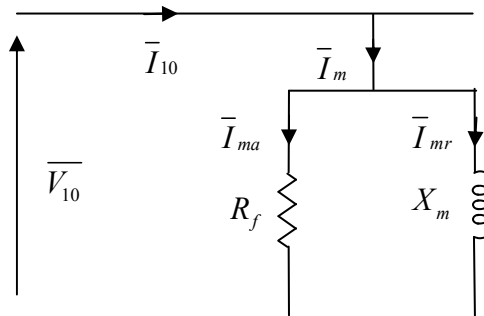


Fig.IV.2 : Schéma électrique équivalent simplifié par phase à vide.

Schéma de montage :

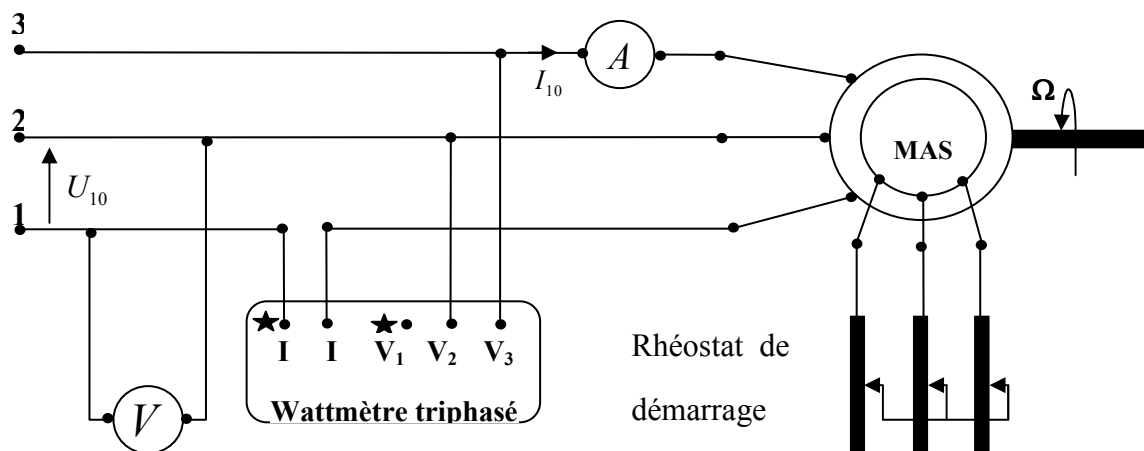


Fig.IV.3 : Schéma de montage de l'essai à vide.

Après avoir réalisé le montage ci-dessus, on couple le stator du moteur en étoile et on met le rhéostat de démarrage à sa valeur maximale.

On ferme l'interrupteur de la source d'alimentation. Le moteur démarre jusqu'à atteindre sa vitesse à vide, on court-circuite le rhéostat de démarrage, laissant le moteur tourner quelques minutes. On relève les indications des différents appareils de mesure et on mesure à l'aide d'un tachymètre la vitesse de rotation du moteur.

Les grandeurs mesurées sont représentées dans le tableau suivant :

$U_{10} (v)$	$P_{10} (w)$	$I_{10} (A)$	$N(tr / mn)$
390	468	4	1494

Tableau IV.1 : Résultats de l'essai à vide.

On calcule les paramètres R_f et X_m :

On a les relations suivantes :

$$\bar{V}_{10} = R_f \bar{I}_{ma} \quad \text{IV-1}$$

$$\bar{V}_{10} = jX_m \bar{I}_{mr} \quad \text{IV-2}$$

$$\bar{I}_m = \bar{I}_{10} \quad \text{IV-3}$$

$$\bar{I}_m = \bar{I}_{ma} + \bar{I}_{mr} \quad \text{IV-4}$$

$$P_{10} = \sqrt{3} U_{10} I_{10} \cos \varphi_0 \quad \text{IV-5}$$

$$I_{ma} = I_{10} \cos \varphi_0 \quad \text{IV-6}$$

$$I_{mr} = I_{10} \sin \varphi_0 \quad \text{IV-7}$$

$$(VI-1) \Rightarrow R_f = \frac{U_{10}}{\sqrt{3} I_{ma}} = \frac{U_{10}}{\sqrt{3} I_{10} \cos \varphi_0} \quad \text{IV-8}$$

$$(VI-2) \Rightarrow X_m = \frac{U_{10}}{\sqrt{3} I_{mr}} = \frac{U_{10}}{\sqrt{3} I_{10} \sin \varphi_0} \quad \text{IV-9}$$

$$(VI-5) \Rightarrow \cos \varphi_0 = \frac{P_{10}}{\sqrt{3} U_{10} I_{10}} \quad \text{IV-10}$$

On trouve :

$$R_f = 325.38\Omega$$

$$X_m = 57.15\Omega$$

IV.3.1.2 Essai en court-circuit à rotor bloqué :

En fonctionnement en court-circuit à rotor bloqué, le glissement est égal à 1. La machine à induction se comporte, dans ce cas, exactement comme un transformateur dont le secondaire est court-circuité. A fin de limiter le courant statorique pour qu'il ne dépasse pas sa valeur nominale, la tension d'alimentation est fortement réduite, par conséquent le courant magnétisant est, lui aussi, très réduit. On peut donc ouvrir la branche magnétisante. Le schéma équivalent général du moteur vu au chapitre II (*Fig. II.2*) devient :

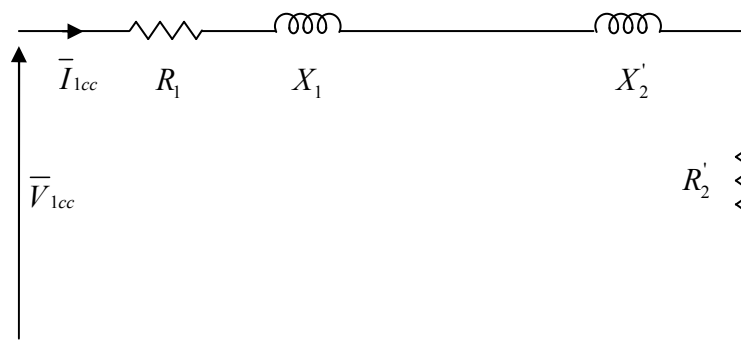


Fig.IV.4 : Schéma électrique équivalent par phase en court-circuit à rotor bloqué.

Lors de l'essai en court-circuit à rotor bloqué, la puissance active absorbée est dissipée dans les résistances statoriques et rotoriques alors que la puissance réactive est consommée par les inductances de fuites statoriques et rotoriques.

Schéma de montage :

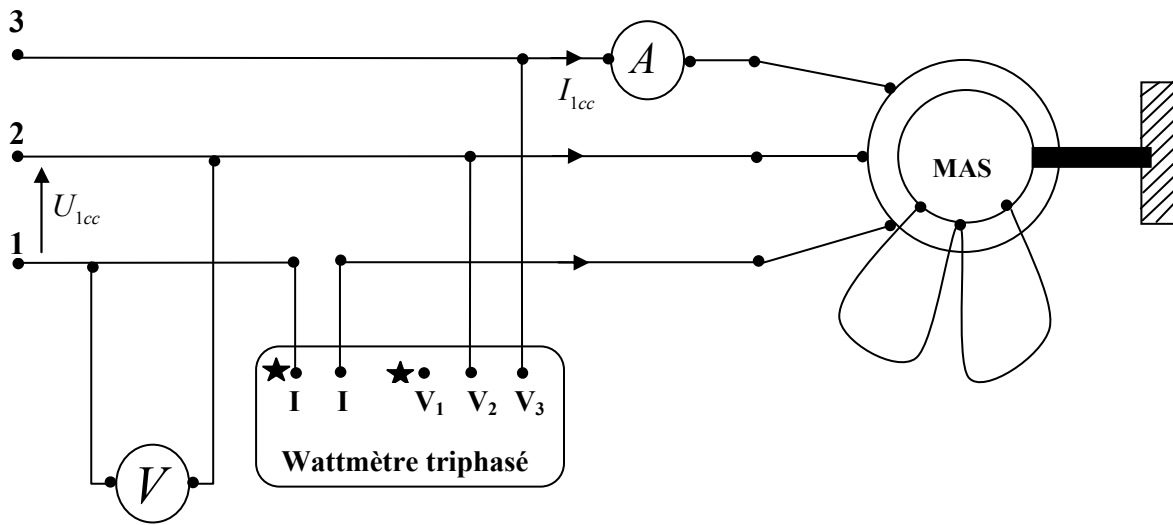


Fig.IV.5 : Schéma de montage de l'essai en court-circuit à rotor bloqué.

Après avoir réalisé le montage donné par la figure précédente, nous nous assurons que le curseur rotatif de l'autotransformateur associé à la source d'alimentation est sur la position 0, c'est-à-dire la tension est nulle.

On ferme l'interrupteur de la source d'alimentation et on augmente graduellement la tension d'alimentation jusqu'à atteindre un courant de court-circuit $I_{1cc} = 5 \text{ A}$.

Après avoir choisi le meilleur calibre tension du wattmètre, relevons les indications des différents appareils de mesure.

Les résultats relevés sont représentés dans le tableau suivant :

$U_{1cc} \text{ (v)}$	$P_{1cc} \text{ (w)}$	$I_{1cc} \text{ (A)}$
58	262.5	5

Tableau IV.2 : Résultats de l'essai en court-circuit.

On calcule les paramètres R_1, R_2', X_1, X_2'

On a les relations suivantes :

$$P_{1cc} = 3(R_1 + R_2')I_{1cc}^2 \tag{IV-11}$$

$$Q_{1cc} = 3(X_1 + X_2')I_{1cc}^2 \tag{IV-12}$$

$$Q_{1cc} = \sqrt{(\sqrt{3}U_{1cc}I_{1cc})^2 - P_{1cc}^2} \quad \text{IV-13}$$

$$(VI-11) \Rightarrow R_1 + R_2' = \frac{P_{1cc}}{I_{1cc}^2} \quad \text{IV-14}$$

$$(VI-12) \text{ et } (VI-13) \Rightarrow X_1 + X_2' = \frac{\sqrt{(\sqrt{3}U_{1cc}I_{1cc})^2 + P_{1cc}^2}}{3I_{1cc}^2} \quad \text{IV-15}$$

On négligeant l'impédance magnétisante et en supposant que $R_1=R_2'$ et $X_1=X_2'$, c'est-à-dire :

$$R_1 = R_2' = \frac{P_{1cc}}{2 * 3I_{1cc}^2} \quad \text{IV-16}$$

$$X_1 = X_2' = \frac{\sqrt{(\sqrt{3}U_{1cc}I_{1cc})^2 + P_{1cc}^2}}{2 * 3I_{1cc}^2} \quad \text{IV-17}$$

Les résultats trouvés sont représentés dans le tableau suivant :

R_1	1.75Ω
R_2'	1.75Ω
X_1	2.85Ω
X_2'	2.85Ω

Tableau IV.3 : Valeurs des paramètres électriques calculés.

IV.3.2 Identification des paramètres mécaniques :

En plus des paramètres électriques, les paramètres mécaniques tels que le coefficient de frottement f_0 et le moment d'inertie J doivent être identifiés.

N'ayant pas eu suffisamment de temps pour effectuer nous-mêmes ces essais, car le laboratoire de machines électriques est constamment occupé par les travaux pratiques pédagogiques, nous avons décidé de prendre ces paramètres mécaniques à partir d'un mémoire de fin d'études car les étudiants ayant réalisé ce mémoire, ont identifié les paramètres d'une machine asynchrone identique à la nôtre, quasiment de même puissance et surtout de même taille.

Plaque signalétique du moteur étudié :

Puissance nominale : $P_n = 3.5 \text{ KW}$

Tensions et courants :

- Couplage étoile : 380 volts ; 7.8 A.
- Couplage triangle : 220 volts ; 13.5 A.

Vitesse nominale : $N_n = 1420 \text{ tr / mn}$.

Nombre de paire de pôles : $p = 2$

Plaque signalétique du moteur de référence :

Puissance nominale : $P_n = 3 \text{ KW}$

Tensions et courants :

- Couplage étoile : 400 volts ; 6.3 A.
- Couplage triangle : 230 volt ; 11 A.

Vitesse nominale : $N_n = 1415 \text{ tr / mn}$.

Nombre de paire de pôles : $p = 2$.

A partir des données des plaques signalétiques des deux moteurs, on constate qu'ils ont presque la même puissance nominale. Les tensions et les courants sont approximativement les mêmes ainsi que la vitesse de rotation et le nombre de paire de pôles. Donc, on peut affirmer qu'ils ont des paramètres mécaniques quasiment identiques. Les valeurs de ces paramètres trouvées sont les suivantes :

$$f_0 = 0,00247(N.m.s / rd)$$

$$J = 0.049(kg.m^2)$$

IV.4 Réglage de vitesse par variation manuelle de la résistance rotorique:

IV.4.1 Principe de fonctionnement :

Le stator est directement relié au réseau, on peut insérer plusieurs résistances aux bornes du rotor à travers un pont redresseur triphasé à diodes. Dans notre cas, on prend trois résistances de valeurs $R_1 = 15\Omega$ et $R_2 = R_3 = 10\Omega$. On utilise des contacteurs mécaniques k_1, k_2 et k_3 pour pouvoir insérer ou court-circuiter les résistances selon les besoins du réglage.

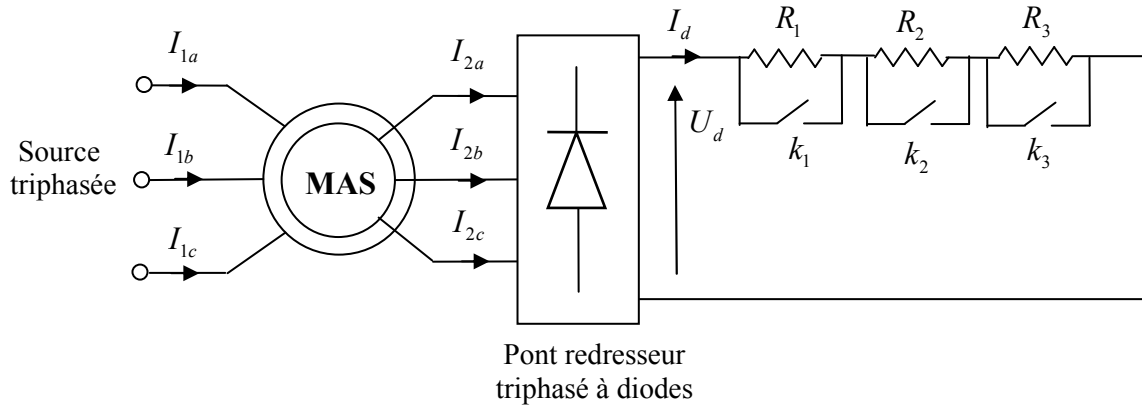


Fig. IV.6 : Schéma de réglage de vitesse par variation manuelle de la résistance rotorique.

Au départ, k_1, k_2 et k_3 sont fermés. Les trois résistances sont court-circuitées. Le montage est équivalent à un moteur asynchrone ayant les phases rotoriques en court-circuit.

A $t_0 = 0$, on applique la pleine tension et on démarre le moteur en charge avec un couple de charge $T_m = 20N.m$. Après un bref régime transitoire, le moteur atteint sa vitesse nominale.

A l'instant $t_1 = 0.5s$, on ouvre l'interrupteur k_1 , et on laisse les interrupteurs k_2 et k_3 fermés. Dans ce cas, la résistance équivalente vue du côté continu sera $R_{eq} = R_1 = 15\Omega$. On aura une résistance additionnelle ajoutée à chaque phase rotorique, d'où l'augmentation de la résistance rotorique par phase. Nous avons vu dans le chapitre II (paragraphe II.6.3), que l'augmentation de la résistance rotorique engendre la diminution de la vitesse. Donc, la vitesse descend jusqu'à une certaine valeur N_1 , définie par la caractéristique mécanique et les différents paramètres du moteur. Cette vitesse se stabilise à cette valeur et si on n'agit sur aucun paramètre, elle reste constante.

A l'instant $t_2 = 1s$, on ouvre l'interrupteur k_2 , l'interrupteur k_1 étant toujours ouvert et on laisse l'interrupteur k_3 fermé. Là aussi, on aura une résistance équivalente vue entre les bornes rotoriques $R_{eq} = R_1 + R_2 = 25\Omega$, d'où l'augmentation de la résistance par phase du rotor. La vitesse de rotation diminue jusqu'à une valeur $N_2 < N_1$.

A l'instant $t_3 = 1.8s$, on ouvre l'interrupteur k_3 sachant que les interrupteurs k_1 et k_2 sont toujours ouverts. On obtient une résistance équivalente $R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 = 35\Omega$ et une augmentation de la résistance par phase du rotor, ce qui implique une diminution de la vitesse de rotation du rotor jusqu'à la valeur $N_3 < N_2$.

A l'instant $t_4 = 2.8s$, on ferme à nouveau les trois interrupteurs. Les bornes rotoriques seront court-circuitées et la vitesse de rotation revient à sa valeur nominale.

IV.4.2 Modèle de simulation :

Le modèle de simulation de réglage de vitesse par variation manuelle de la résistance rotorique sous Matlab /Simulink/Simpowersystems est représenté sur la figure suivante :

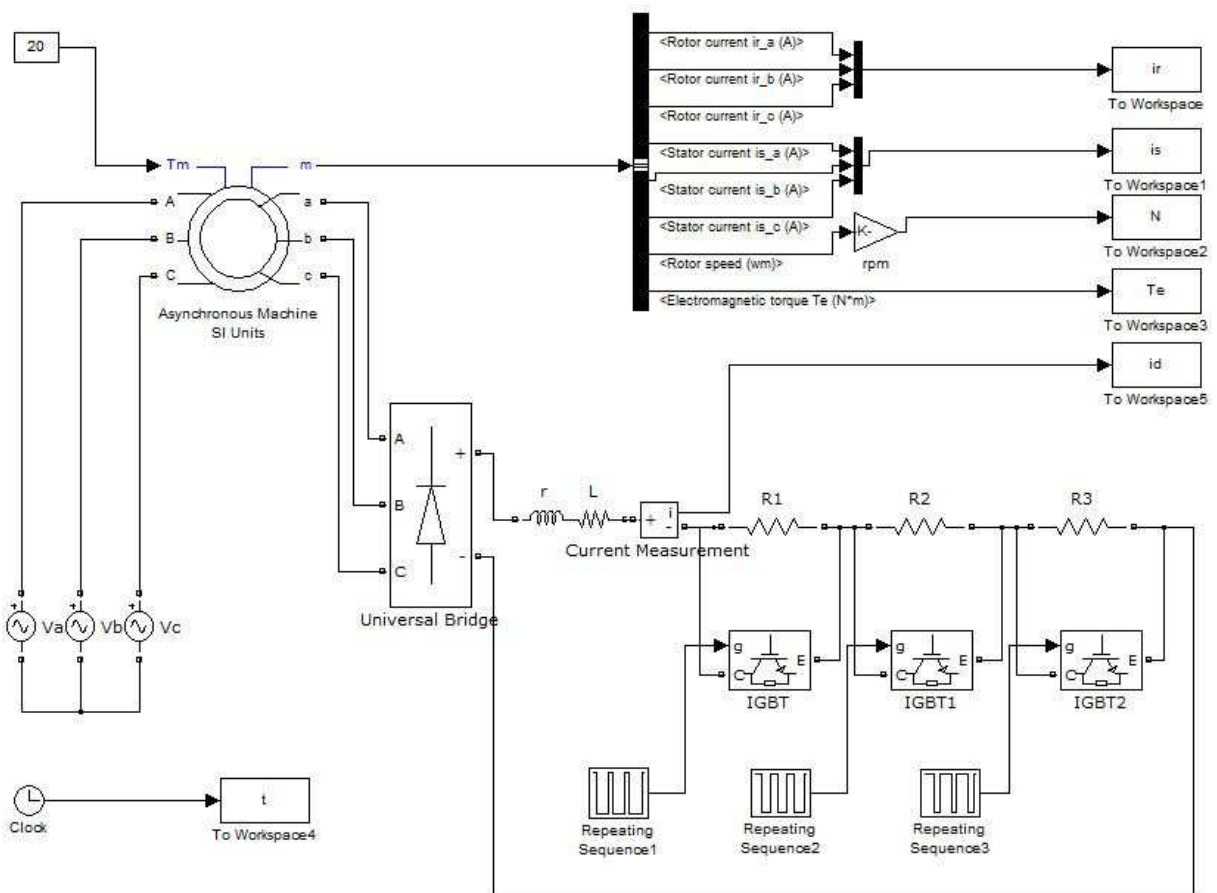


Fig. IV.7 : Modèle de simulation de réglage de vitesse par variation manuelle de la résistance rotorique.

Ce modèle comprend :

- Une source de tension triphasée alternative, source de la bibliothèque Sim Power System.
- Un redresseur triphasé en pont à diodes de la bibliothèque Sim Power System.
- Des transistors IGBT fonctionnant comme interrupteurs, pour insérer ou court-circuiter les résistances R_1 , R_2 et R_3 , source de la bibliothèque Sim Power System.
- Un bloc pour la mesure et la représentation des différentes grandeurs à savoir, les courants statorique et rotorique, la vitesse de rotation et le couple électromagnétique du moteur.
- Un bloc machine asynchrone triphasée à rotor bobiné de la bibliothèque Sim Power System. La fenêtre de réglage des paramètres du moteur est donnée sur la figure IV.8 :

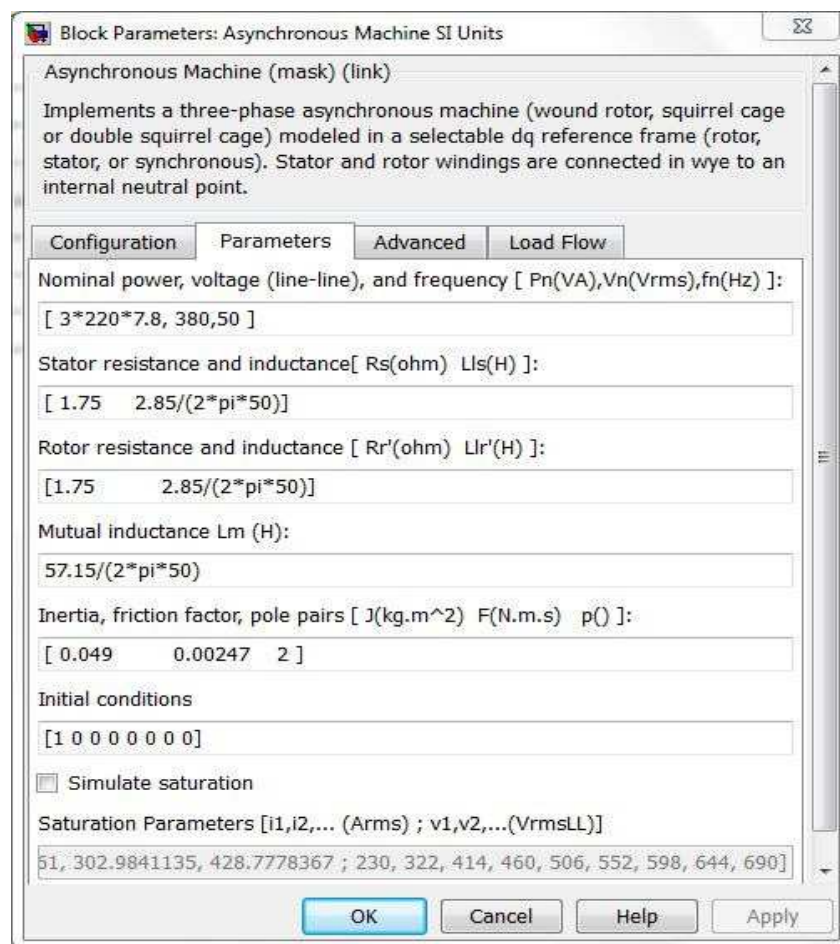


Fig. IV.8 : Fenêtre de réglage des paramètres du moteur asynchrone.

Dans cette fenêtre, on donne successivement :

- Le type de rotor (rotor type), à cage d'écureuil ou bobiné.
- Le système de repère au cours de l'analyse (référence frame).
- La puissance nominale, la tension entre phases et la fréquence.
- Les paramètres d'une phase statorique : la résistance et l'inductance par phase.
- La résistance et l'inductance rotoriques ramenées au primaire.
- L'inductance mutuelle de la branche de magnétisation.
- Le moment d'inertie, le coefficient de frottement et le nombre de paire de pôles.
- Les conditions initiales du fonctionnement (initial conditions), respectivement, le glissement, la position du rotor, les courants statoriques et leur phases initiales.

Après avoir introduit les paramètres pour les différents blocs du modèle, on configure les paramètres de simulation et de résolution du problème, comme le temps de simulation, le type de variable,...etc. On lance la simulation.

IV.4.3 Résultats de la simulation :

Les figures ci-dessous représentent respectivement les courbes de la vitesse, du couple électromagnétique, du couple en fonction de la vitesse, du courant rotorique, du courant statorique et du courant redressé du modèle de simulation de réglage de vitesse du moteur par variation manuelle de la résistance rotorique :

Evolution de la vitesse :

Lors du démarrage, la vitesse de rotation est nulle, le couple de démarrage est égal à $T_d = 36.57 N.m$, le moteur accélère, la vitesse augmente passant par un régime transitoire d'une durée de $0.36s$ jusqu'à atteindre sa valeur nominale $N_n = 1429 tr/mn$. Au delà de $t = 0.36s$, la vitesse se stabilise et elle garde la même valeur, à $t_1 = 0.5s$, on insère la résistance $R_1 = 15\Omega$ aux bornes du redresseur, la vitesse de rotation diminue jusqu'à atteindre une vitesse $N = 1070 tr/mn$ et elle tend à se stabiliser. A $t_2 = 1s$, on ajoute une autre résistance $R_2 = 10\Omega$ en série avec R_1 , ce qui nous donnera une résistance équivalente vue entre les bornes du redresseur égale à $R_{eq} = 25\Omega$, la vitesse de rotation diminue encore jusqu'à atteindre la valeur $N = 805 tr/mn$, la vitesse se stabilise. A $t_3 = 1.8s$, on ajoute la troisième résistance $R_3 = 10\Omega$, la résistance équivalente vue entre les bornes du redresseur devient $R_{eq} = 35\Omega$, la vitesse diminue jusqu'à $N = 555 tr/mn$ qui correspond à $t = 2.6s$, puis la vitesse de rotation tend à se stabiliser. A $t_4 = 2.8s$ on court-circuite toutes les résistances, la vitesse revient à sa valeur nominale $N_n = 1429 tr/mn$.

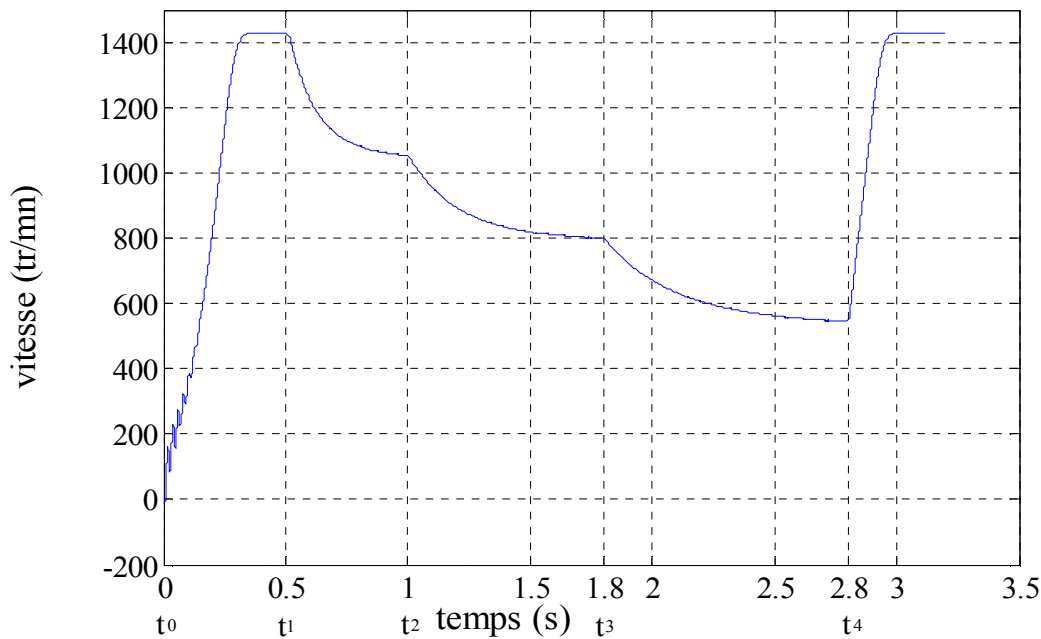


Fig. IV.9 : Evolution de la vitesse en fonction du temps.

Evolution du couple électromagnétique instantané :

Au démarrage et pendant le régime transitoire, le couple oscille. Ces fortes oscillations qui engendrent un bruit mécanique lors du démarrage du moteur, débutent autour de 142N.m et -45N.m , puis s'amortissent, après le couple passe par un maximum qui est égal à 54N.m . A la fin du régime transitoire on obtient un couple qui est égal au couple de charge. A $t_1 = 0.5\text{s}$, on aura un autre régime transitoire dû à l'augmentation de la résistance équivalente vue aux bornes du redresseur. Après quelques oscillations, le couple se stabilise autour du couple de charge. A $t_2 = 1\text{s}$, on aura un autre régime transitoire causé par changement de la résistance vue aux bornes du redresseur qui se termine à $t = 1.3\text{s}$, passant à un régime permanent qui se termine à $t_3 = 1.8\text{s}$, ensuite il y aura un autre changement de la résistance qui va engendrer un régime transitoire. A $t_4 = 2.8\text{s}$, quand on court-circuite toutes les résistances, le couple augmente et repasse par le maximum, pour enfin se stabiliser autour du couple résistant.

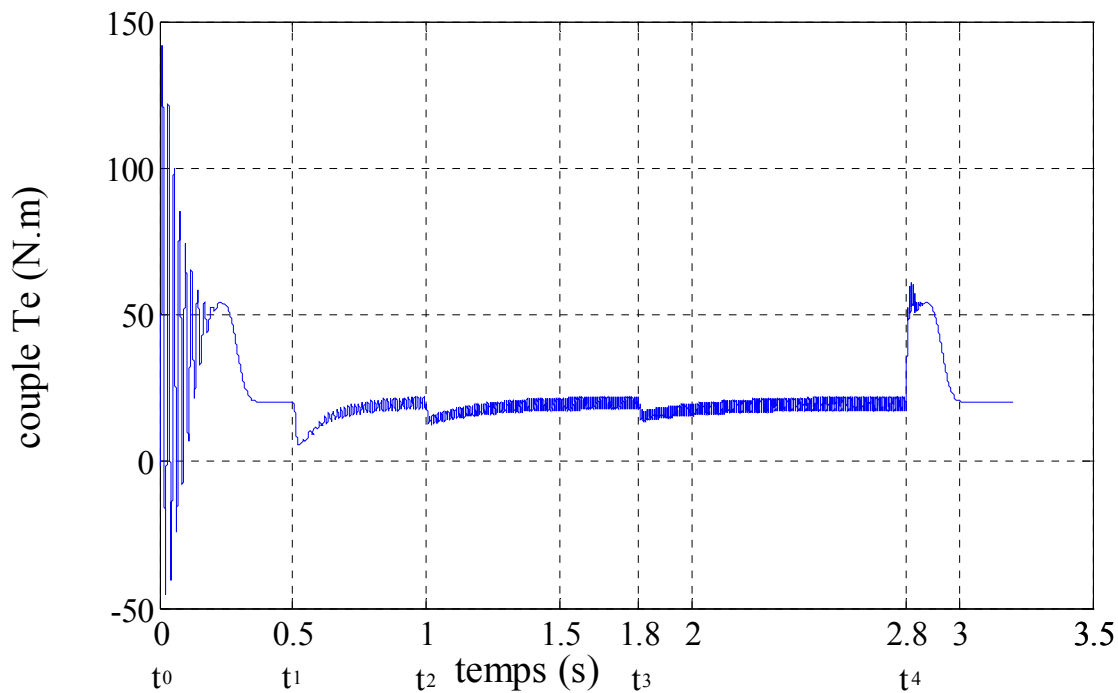


Fig. IV.10 : Courbe du couple électromagnétique en fonction du temps.

Evolution instantanée du couple électromagnétique en fonction de la vitesse :

La durée du régime transitoire est caractérisée par de fortes ondulations qui s'atténuent au fur et à mesure que la vitesse augmente. A partir de $N = 780 \text{tr} / \text{mn}$, le couple prend une allure linéaire, s'incurve et passe par un maximum $T_{e\text{max}} = 54 \text{N.m}$ qui correspond à $N = 1000 \text{tr} / \text{mn}$, puis diminue pour rejoindre le couple de charge quand la vitesse nominale $N = 1429 \text{tr} / \text{mn}$ est atteinte. A l'instant $t_1 = 0.5 \text{s}$ qui correspond à l'insertion de la résistance R_1 (l'ouverture de l'interrupteur k_1), la vitesse diminue et le couple diminue sensiblement en passant par un régime transitoire et tend à nouveau à rattraper le couple de charge. A l'instant $t_2 = 1 \text{s}$ qui correspond à l'insertion de la résistance R_2 (l'ouverture de l'interrupteur k_2) et en sachant que l'interrupteur k_1 est toujours ouvert, le couple repasse par un nouveau régime transitoire, puis rejoint le couple de charge $T_m = 20 \text{N.m}$. A l'instant $t_3 = 1,8 \text{s}$, il y aura un autre régime transitoire dû à l'insertion de la résistance R_3 (l'ouverture de l'interrupteur k_3), puis le couple se stabilise autour du couple de charge. A $t_4 = 2.8 \text{s}$, on court-circuite toutes les résistances, le couple augmente sensiblement avec la vitesse, passe par un régime transitoire et tend ensuite à se superposer sur son allure du régime établi, pour finir à se stabiliser autour de la valeur du couple de charge.

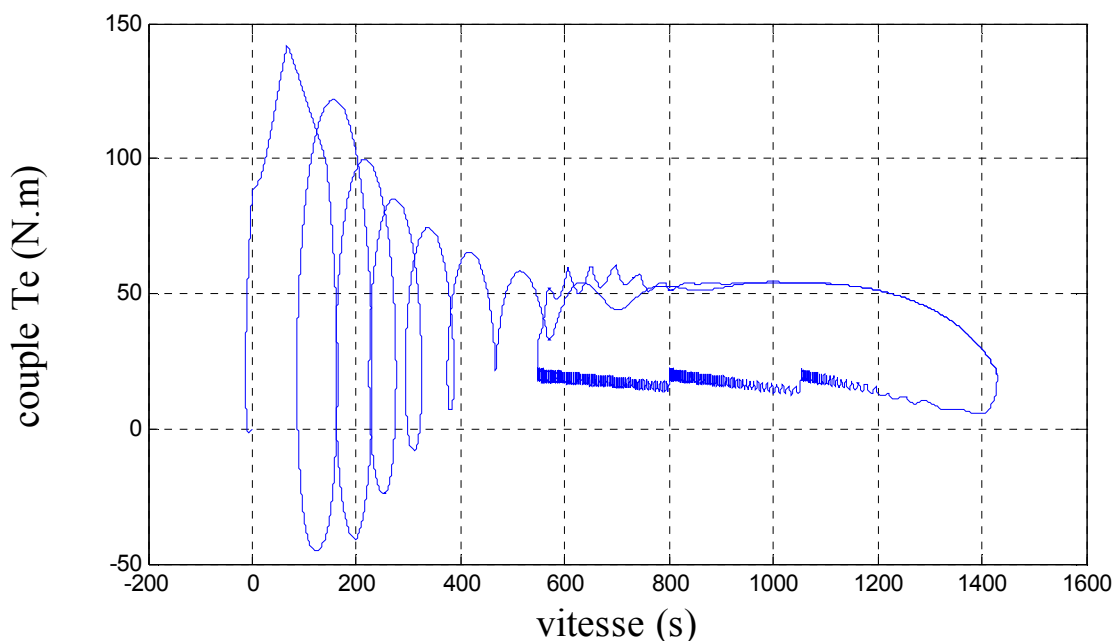


Fig. IV.11 : Courbe du couple électromagnétique en fonction de la vitesse.

Evolution du courant statorique en fonction du temps :

Dans la figure ci-dessous, on remarque le fort appel de courant au démarrage qui est égal à environ 5 fois le courant nominal. Après un régime transitoire, d'environ $\Delta t = 0.36s$, le régime permanent est atteint et il reste le courant alternatif correspondant au comportement inductif du moteur. Il faut noter aussi, qu'à chaque augmentation de la résistance équivalente vue aux bornes du redresseur, le courant statorique passe par un bref régime transitoire en diminuant, puis reprend son allure normale. Sa valeur efficace reste sensiblement égale à sa valeur nominale $I_n = 7.8A$.

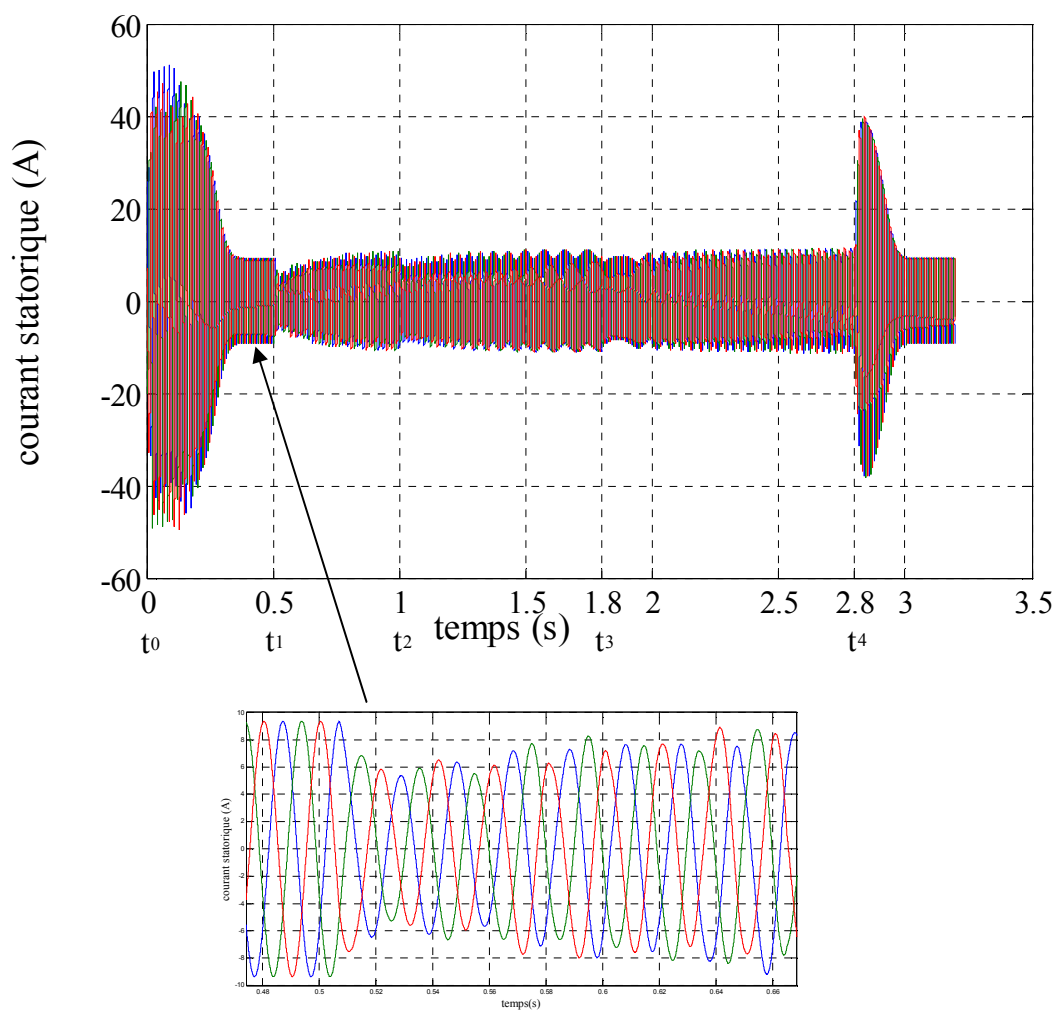


Fig. IV.12 : Evolution du courant statorique en fonction du temps.

Evolution du courant rotorique en fonction du temps :

Au démarrage, le courant dans le rotor présente de fortes ondulations dues à l'appel de courant de ligne élevé exigé par le moteur. Durant le régime permanent, le courant dans le rotor se compose des trois courants alternatifs d'impulsions approximativement carrées des trois phases rotoriques. Cette forme est due à la réactance de fuites dans les enroulements rotoriques et les commutations de courant dans les diodes du redresseur. A chaque fois qu'on insère une résistance rotorique, le courant rotorique diminue et passe par un court régime transitoire puis reprend son allure initiale. Sa valeur maximale reste sensiblement égale à $I_r = 7.3A$, cela vient du fait qu'on travaille à couple constant.

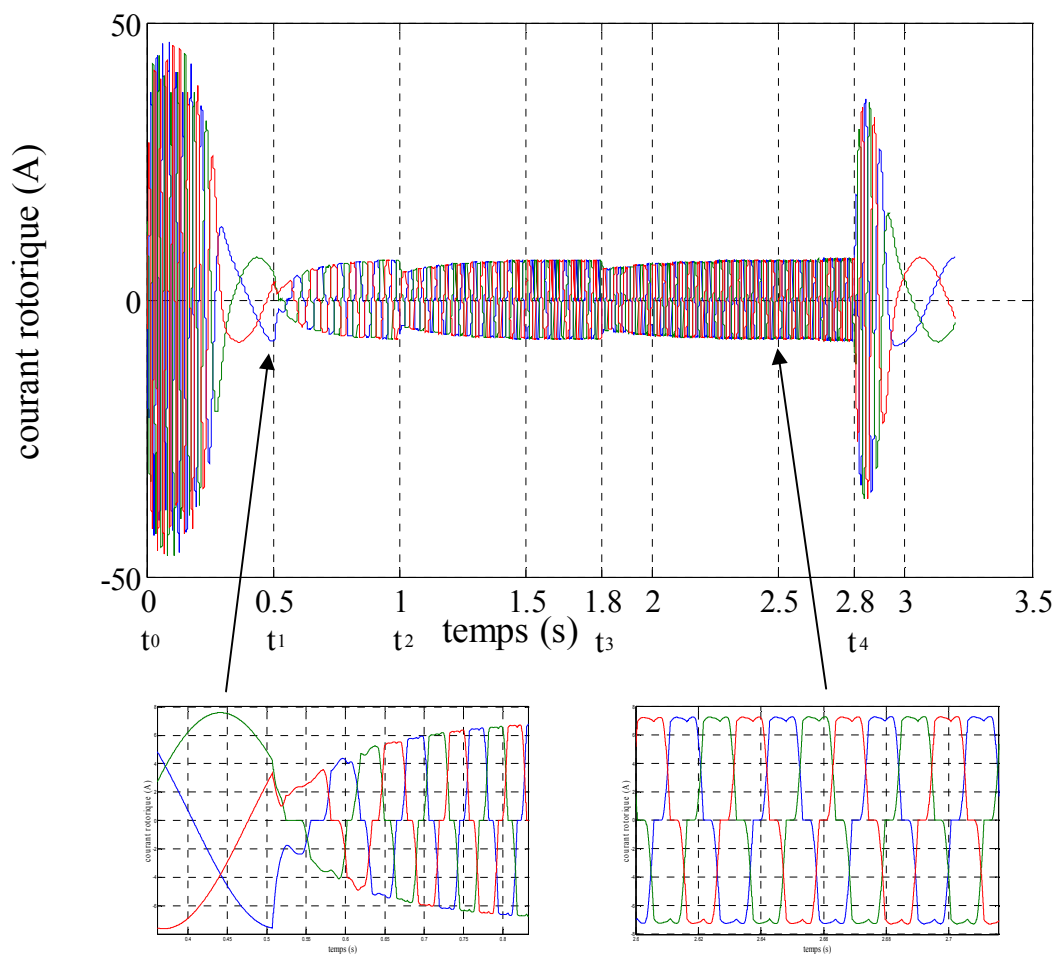


Fig. IV.13 : Courbe du courant rotorique en fonction du temps.

Evolution du courant redressé en fonction du temps :

Au démarrage, le courant redressé prend une valeur importante à cause du régime transitoire du courant rotorique. Après la disparition de ce régime, il prend une forme continue et il tend à se stabiliser. A l'instant $t_1 = 0.5s$, on insère la résistance R_1 aux bornes du redresseur, le courant redressé passe par un bref régime transitoire, puis se stabilise. Il faut noter aussi, qu'à chaque augmentation de la résistance équivalente aux bornes du redresseur, le courant redressé passe par un bref régime transitoire en diminuant, puis il se stabilise autour de la valeur $I_d = 7.1A$.

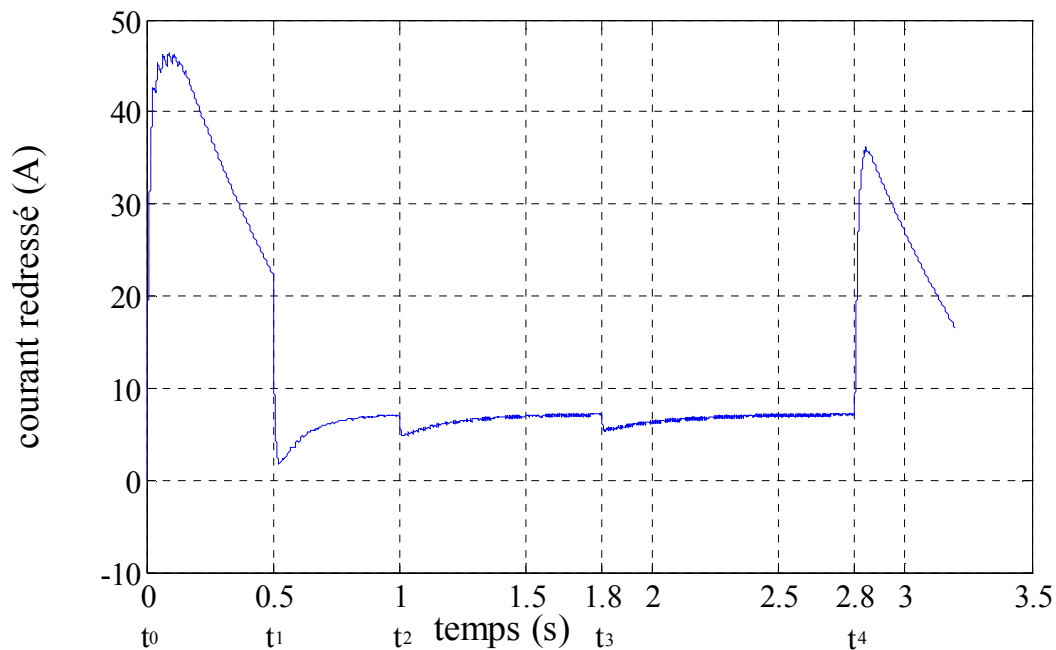


Fig. IV.14 : Allure du courant redressé.

IV.5 Réglage de vitesse par hacheur rotorique :

IV.5.1 Principe de fonctionnement :

On peut remplacer les résistances rotoriques par un ensemble redresseur triphasé à diodes-hacheur-rhéostat de charge (*Fig.IV.15*). Ce type de montage qui permet le réglage de vitesse en agissant sur le rapport cyclique α du hacheur, est appelé réglage de vitesse par hacheur rotorique :

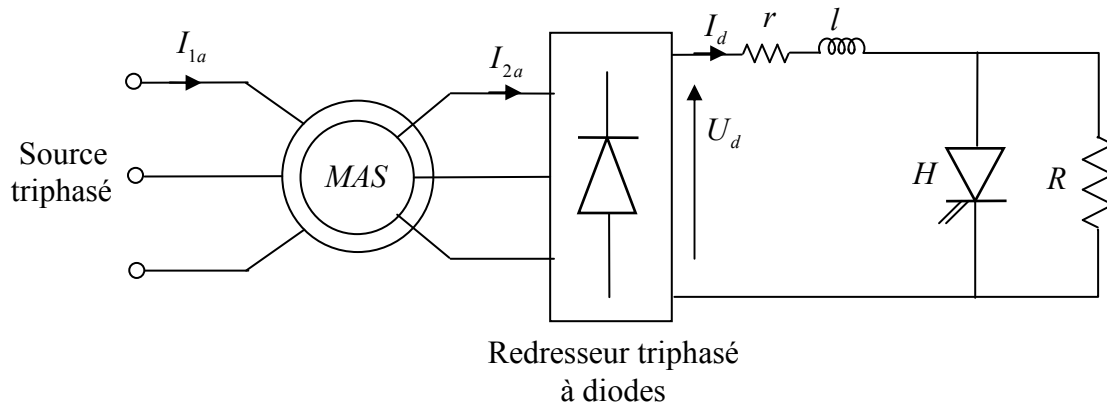


Fig. IV.15 : Schéma de réglage de vitesse par hacheur rotorique.

Durant chaque période de fonctionnement du hacheur, on aura une résistance apparente R_{eq} vue entre les bornes du pont redresseur, qui s'exprime par la relation : $R_{eq} = \alpha R$. α étant compris dans l'intervalle $[0,1]$.

Lorsque le hacheur conduit, la résistance R est court-circuitée et la résistance équivalente vue du côté continu du redresseur est $R_{eq} = 0$ (r est très faible). Lorsque le hacheur est bloqué, la résistance équivalente devient : $R_{eq} = R$. Mais si le hacheur est périodiquement commandé de sorte qu'à chaque période de hachage T_h , il est fermé pour une certaine durée et ouvert le reste du temps. Il est possible d'obtenir une variation de la résistance apparente vue du côté continu du redresseur comprise entre 0 et R .

Si αT_h est la durée de conduction du hacheur, sachant que $T_h = \frac{1}{f_h}$ est la période de fonctionnement du hacheur. On peut alors, conclure que l'action sur le rapport cyclique modifie la valeur de la résistance équivalente. Donc, la résistance par phase rotorique augmente, ce qui engendre une diminution de la vitesse.

IV.5.2 Schéma du modèle de simulation avec hacheur rotorique :

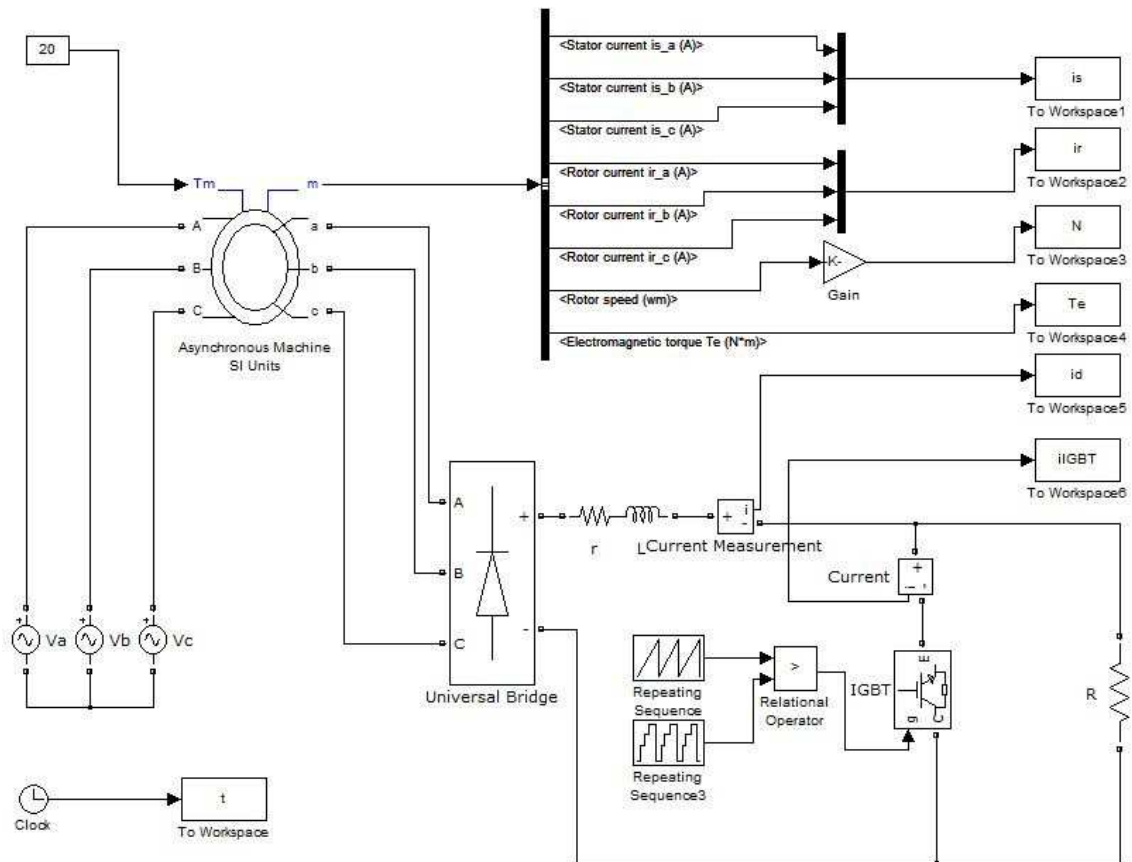


Fig. IV.16 : Modèle de simulation de réglage de vitesse par hacheur rotorique.

Ce modèle contient :

- Une source de tension triphasée alternative, de la bibliothèque Sim Power System.
- Un redresseur triphasé en pont à diodes de la bibliothèque Sim Power System.
- Un transistor IGBT fonctionnant en hacheur, source de la bibliothèque Sim Power System.
- La commande du hacheur composée de deux blocs de répétition de séquence (repeating sequence), l'un pour déterminer la fréquence de hachage, fixée dans notre cas à $f_h = 5\text{KHz}$ et l'autre bloc sert à contrôler le rapport cyclique qui définit les durées de conductions du hacheur.
- Un bloc pour la mesure et la représentation graphique des différentes grandeurs à savoir, les courants statorique et rotorique, la vitesse de rotation et le couple électromagnétique du moteur.
- Un bloc machine asynchrone triphasée à rotor bobiné de la bibliothèque Sim Power System, décrit dans le paragraphe (IV.4.2).

La résistance R en parallèle avec le transistor IGBT est choisie de façon à ce qu'elle puisse supporter la puissance transmise au côté continu du pont redresseur. Elle a une valeur $R = 50\Omega$. L'inductance l sert à lisser le courant redressé i_d , on prend $l = 0.1H$. La résistance r sert à éviter le court-circuit direct des bornes du redresseur durant les durées de conductions du hacheur. Sa valeur est très petite et vaut $r = 0.1\Omega$.

La commande du rapport cyclique qui détermine les durées de conduction du hacheur est réalisée comme suit :

$\Delta t(s)$	$0 \rightarrow 0.5$	$0.5 \rightarrow 1$	$1 \rightarrow 1.8$	$1.8 \rightarrow 2.8$	$2.8 \rightarrow 3.2$
α	0	0.3	0.5	0.7	0

Tableau IV.4 : Commande du rapport cyclique.

Où, sous forme d'un graphe comme présenté ci-dessous :

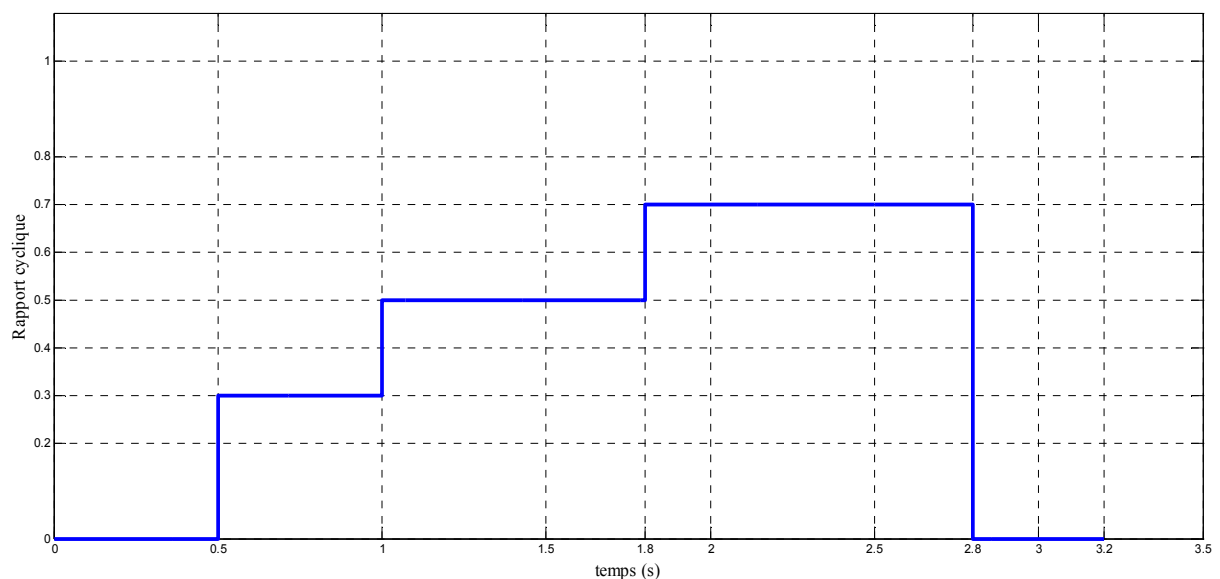


Fig. IV.17 : Graphe de la commande du rapport cyclique.

IV.5.3 Résultats de la simulation :

Les figures suivantes montrent les résultats de simulation du réglage de vitesse avec hacheur rotorique :

Evolution de la vitesse :

Au du démarrage, le rapport cyclique est nul $\alpha = 0$. La vitesse de rotation est nulle. A $t_0 = 0$, on applique la pleine tension sur le moteur, celui-ci accélère en passant par un régime transitoire pour atteindre sa vitesse nominale $N_n = 1429 \text{tr/mn}$ en un temps $t = 0.36 \text{s}$. La vitesse se stabilise et elle garde la même valeur. A $t_1 = 0.5 \text{s}$, l'action sur la commande du hacheur fait varier le rapport cyclique. Pour une valeur de $\alpha = 0.3$, la résistance équivalente vue aux bornes du redresseur sera $R_{eq} = \alpha R = 0.3.50 = 15\Omega$. La vitesse diminue jusqu'à atteindre la valeur $N = 1078 \text{tr/mn}$ et tend à se stabiliser. A $t_2 = 1 \text{s}$, on fait varier de nouveau le rapport cyclique en lui donnant une valeur $\alpha = 0.5$, la résistance équivalente augmente et devient $R_{eq} = \alpha R = 0.5.50 = 25\Omega$. La vitesse diminue encore jusqu'à la valeur $N = 811 \text{tr/mn}$ qui correspond à $t = 1.7 \text{s}$, la vitesse se stabilise. A $t_3 = 1.8 \text{s}$, et pour une valeur de $\alpha = 0.7$, la résistance équivalente sera $R_{eq} = \alpha R = 0.7.50 = 35\Omega$. La vitesse continue de diminuer jusqu'à $N = 568 \text{tr/mn}$ qui correspond à $t = 2.6 \text{s}$ et se stabilise. A $t_4 = 2.8 \text{s}$, on remet le rapport cyclique à zéro, le hacheur conduit presque en permanence et la vitesse augmente et revient à sa valeur nominale.

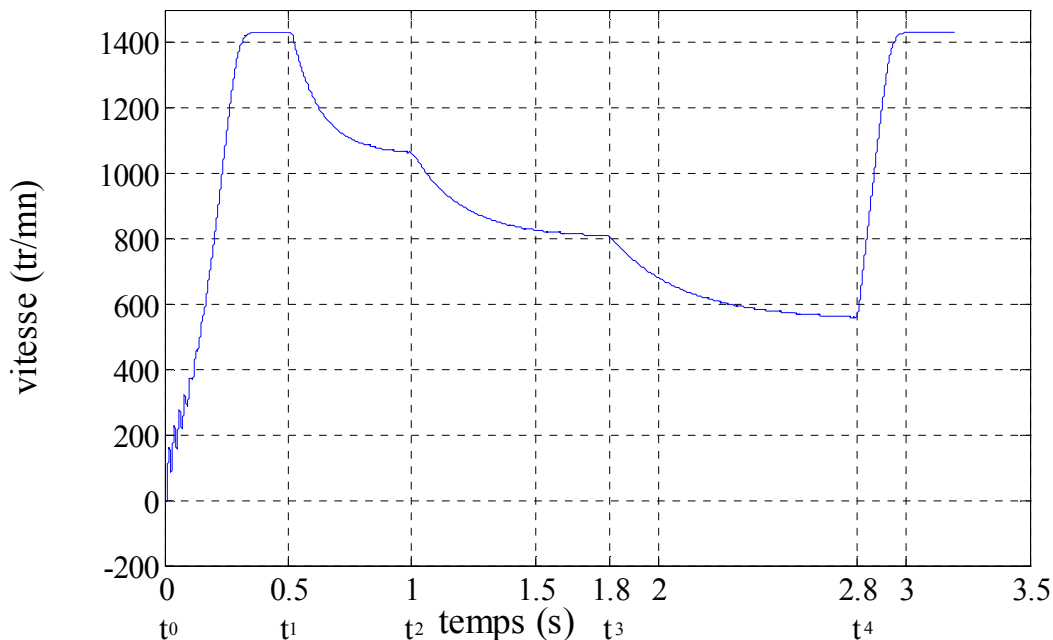


Fig. IV.18 : Evolution de la vitesse en fonction du temps.

Evolution du couple instantané :

Au démarrage et pendant le régime transitoire, le couple présente de fortes oscillations qui s'amortissent au fur et à mesure que le régime établi s'installe. Le couple passe par un maximum qui est égal à $T_{e_{\max}} = 54 N.m$ et tend à se stabiliser autour du couple de charge $T_m = 20 N.m$. A $t_1 = 0.5s$, en variant le rapport cyclique pour une valeur de $\alpha = 0.3$, le couple diminue, passe par un bref régime transitoire et revient à sa valeur précédente. Ce phénomène se répète à $t_2 = 1s$ pour la valeur de $\alpha = 0.5$ et à $t_3 = 1.8s$ pour une autre valeur de $\alpha = 0.7$.

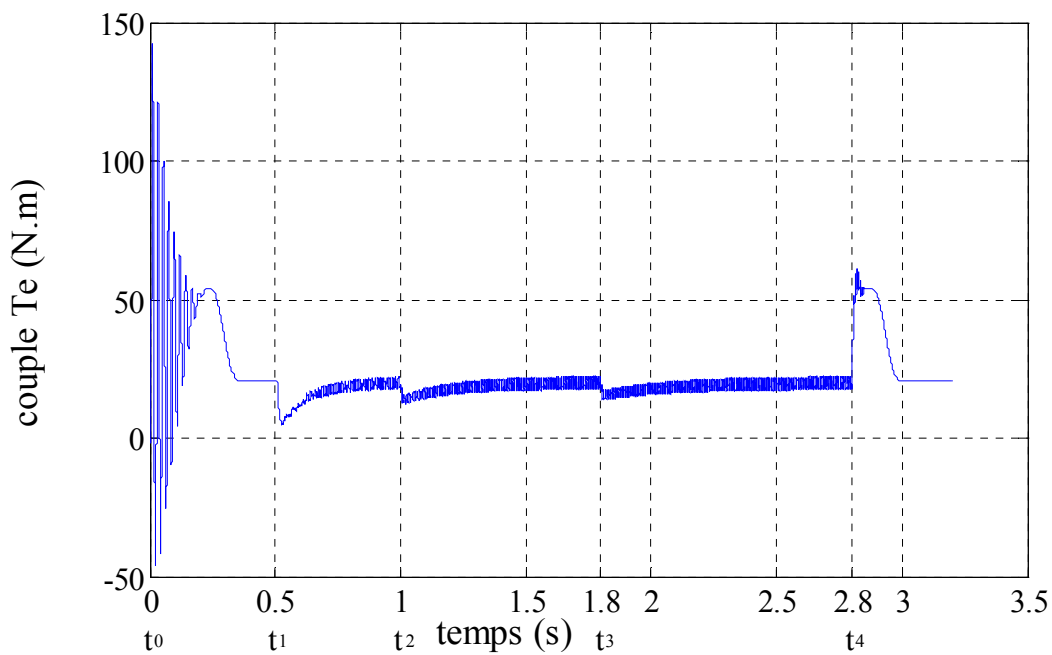


Fig. IV.19 : Courbe du couple électromagnétique en fonction du temps.

Evolution instantanée du couple en fonction de la vitesse :

Durant le régime transitoire, l'allure présente de fortes ondulations qui s'atténuent progressivement à mesure que la vitesse augmente. A partir de $N = 780 \text{tr} / \text{mn}$, le couple prend une allure linéaire, s'incurve et passe par un maximum $T_{e\text{max}} = 54 \text{N.m}$ qui correspond à $N = 983 \text{tr} / \text{mn}$, puis diminue pour rejoindre le couple de charge quand la vitesse nominale $N = 1429 \text{tr} / \text{mn}$ est atteinte. A l'instant $t_1 = 0.5 \text{s}$, on modifie la valeur de $\alpha = 0$ à $\alpha = 0.3$, la vitesse chute et le couple diminue sensiblement, passant par un court régime transitoire et tend à se stabiliser autour du couple de charge. On aura le même phénomène à $t_2 = 1 \text{s}$ et $t_3 = 1.8 \text{s}$ pour des valeurs de $\alpha = 0.5$ et $\alpha = 0.7$ respectivement. A $t_4 = 2.8 \text{s}$, le hacheur est commandé à conduire en permanence en remettant le rapport cyclique à zéro, le couple augmente sensiblement avec la vitesse, passe par un régime transitoire et tend à s'aligner sur son allure du régime établi, pour enfin, se stabiliser autour de la valeur du couple de charge $T_m = 20 \text{N.m}$.

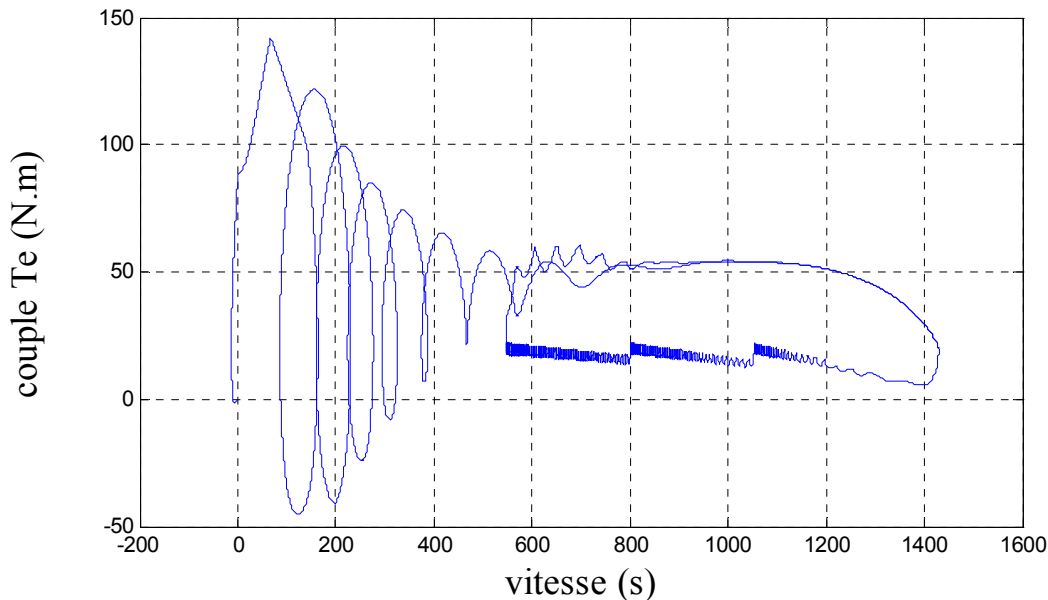


Fig. IV.20 : Courbe du couple électromagnétique en fonction de la vitesse.

Evolution du courant statorique :

Le courant statorique au démarrage est trop élevé, il est dû au fort appel de puissance exigé pour pouvoir démarrer le moteur. Les ondulations qu'il présente disparaissent à la fin du régime transitoire pour donner une forme relativement sinusoïdale d'amplitude constante. Notons aussi, qu'à chaque fois qu'on impose le rapport cyclique aux instants $t_1 = 0.5s$, $t_2 = 1s$ et $t_3 = 1.8s$, le courant statorique diminue momentanément, passe par un bref régime transitoire, puis reprend sa forme initiale. Sa valeur efficace reste sensiblement constante et égale à sa valeur nominale $I_n = 7.8A$ et ce, quelque soit la vitesse.

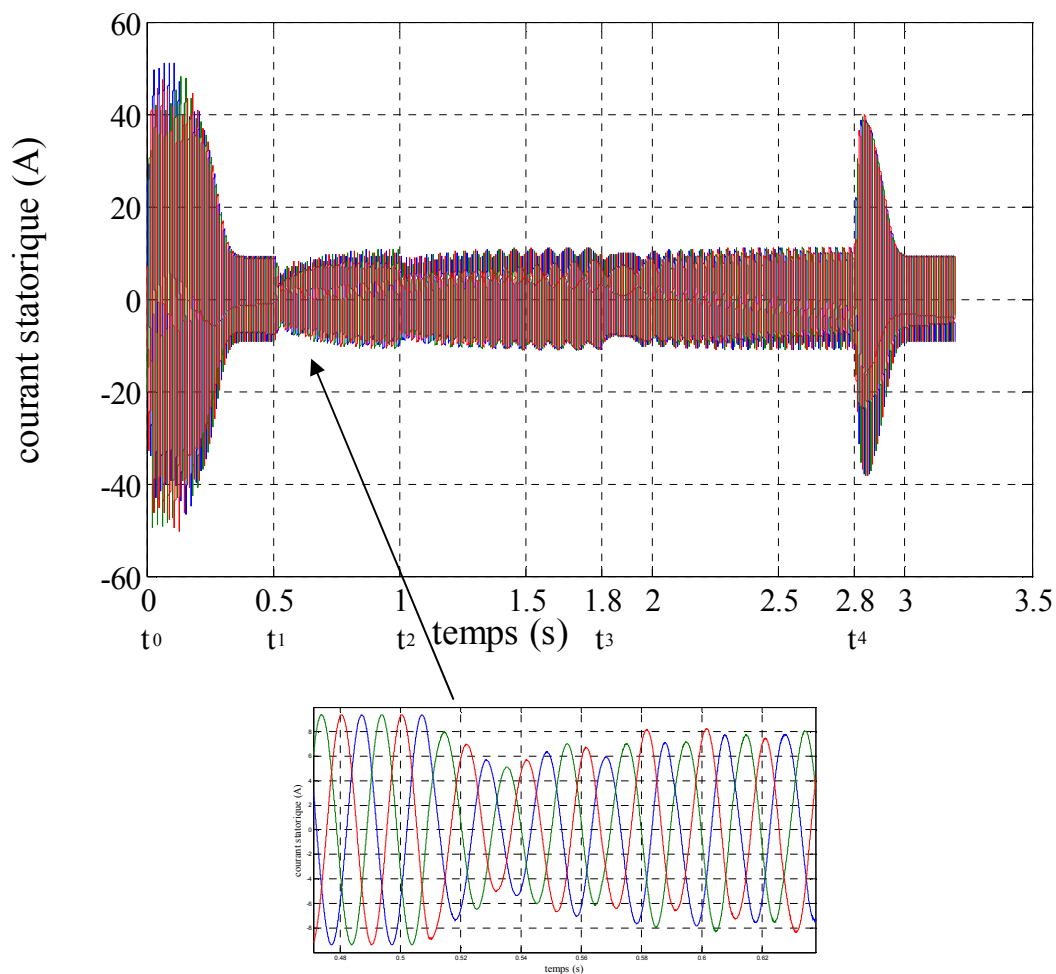


Fig. IV.21 : Evolution du courant statorique en fonction du temps.

Evolution du courant rotorique avec le temps :

Le courant rotorique au démarrage se caractérise par d'importantes ondulations dues à l'appel élevé de courant de ligne demandé par le moteur. Durant le régime permanent, le courant dans le rotor se compose des trois courants des phases rotoriques, alternatifs et de formes carrées. Ces formes sont dues à la réactance de fuites dans les enroulements rotoriques et les commutations de courant dans le pont redresseur. A l'instant $t_1 = 0.5s$, on fait varier la valeur de α , de $\alpha = 0$ à $\alpha = 0.3$, le courant diminue, passe par un court régime transitoire puis reprend son allure initiale. La même chose se produit aux instants $t_2 = 1s$ pour $\alpha = 0.5$ et $t_3 = 1.8s$ pour $\alpha = 0.7$. La même chose se produit aux instants $t_4 = 2.5s$ pour $\alpha = 0.9$.

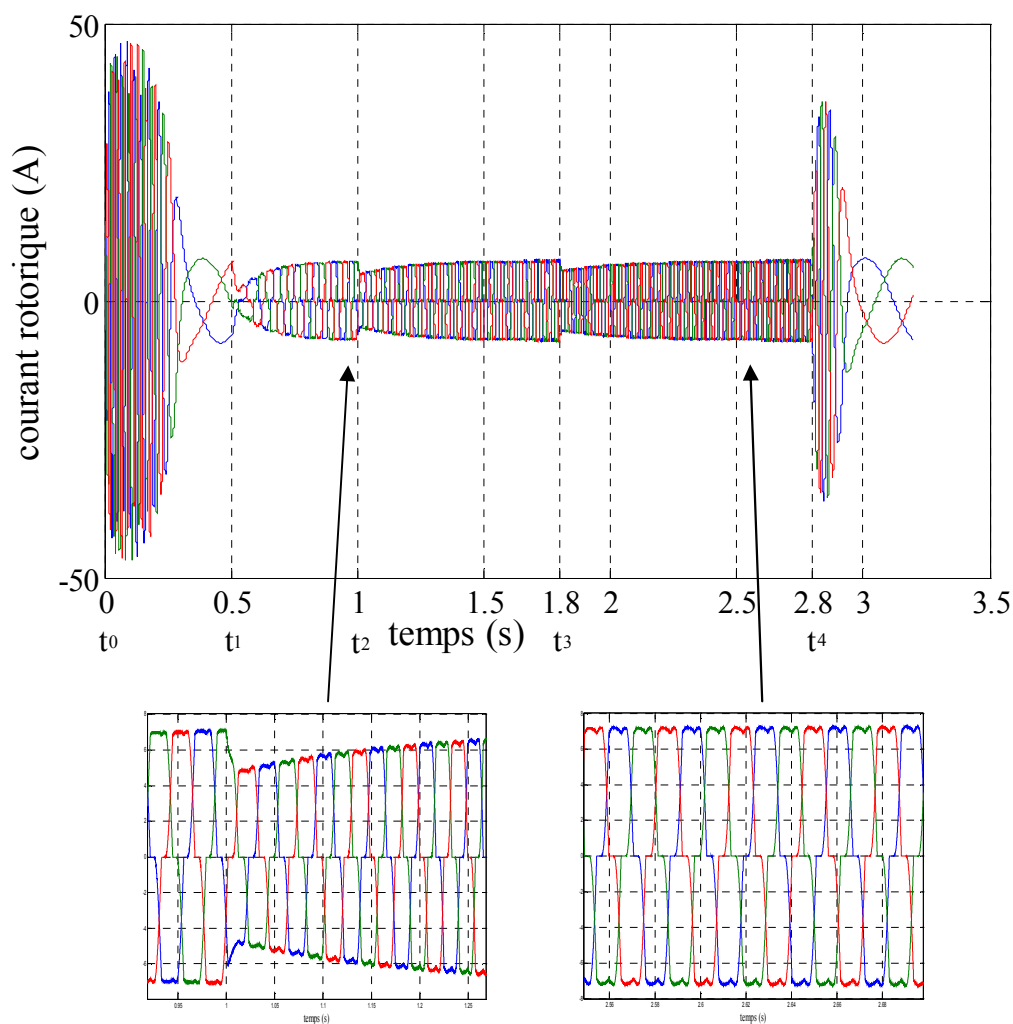


Fig. IV.22 : Courbe du courant rotorique en fonction du temps.

Evolution du courant redressé :

Au démarrage le courant redressé passe brusquement de 0 à une valeur très importante, cela est dû à la grande valeur du courant rotorique durant le régime transitoire. Après la disparition de ce régime, il prend une forme continue et il tend à se stabiliser. A l'instant $t_1 = 0.5s$ où l'on règle le rapport cyclique à $\alpha = 0.3$, il passe par un régime transitoire et se stabilise autour de sa valeur continue. Remarquons aussi, qu'à chaque modification de la valeur du rapport cyclique, aux instants $t_2 = 1s$ et $t_3 = 1.8s$ correspondants aux valeurs du rapport cyclique $\alpha = 0.5$ et $\alpha = 0.7$, l'allure du courant passe par un régime transitoire et tend à se maintenir à sa valeur initiale qui est égale à $I_d = 7.1A$.

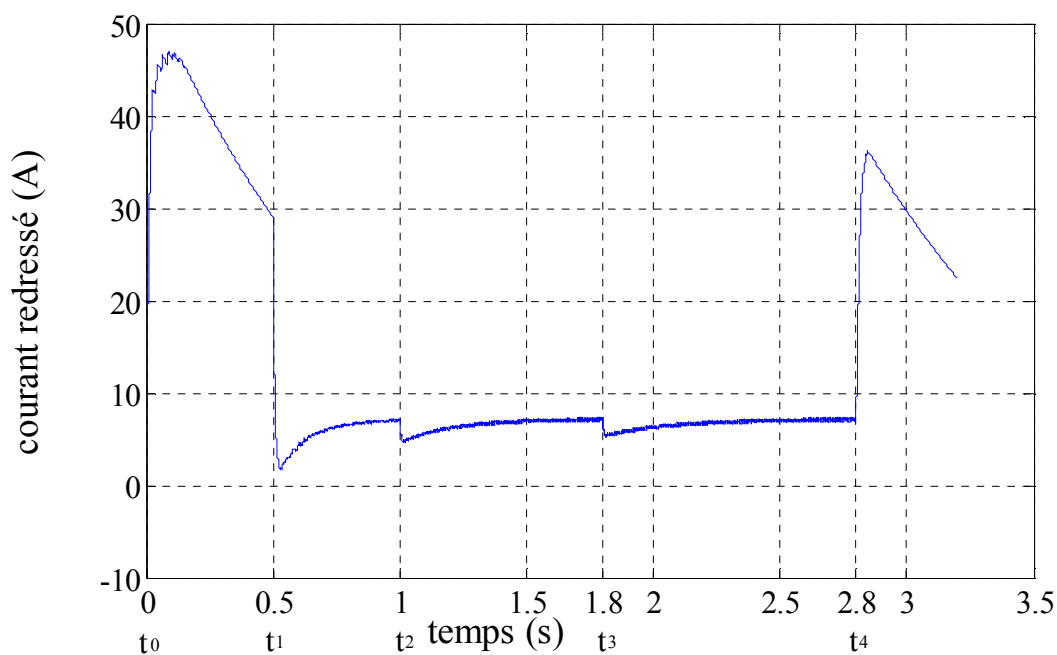


Fig. IV.23 : Allure du courant redressé.

Evolution du courant dans le hacheur :

Au démarrage, le courant dans le transistor IGBT est très grand, cela est dû à l'appel de courant élevé demandé par le moteur. À la fin du régime transitoire, il diminue, puis prend une forme périodique, de période égale à la période de fonctionnement du hacheur $T_h = \frac{1}{f_h}$. Quand le hacheur conduit, le courant est égal au courant redressé i_d , nul quand il est bloqué. On remarque aussi, qu'à chaque fois qu'on change la valeur du rapport cyclique aux instants $t_1 = 0.5s$, $t_2 = 1s$ et $t_3 = 1.8s$, le courant dans le transistor diminue et passe par un bref régime transitoire, puis reprend sa forme initiale. Sur le zoom de la (Fig.IV.24), on remarque bien le changement des temps de conduction du transistor durant les différentes phases de réglage.

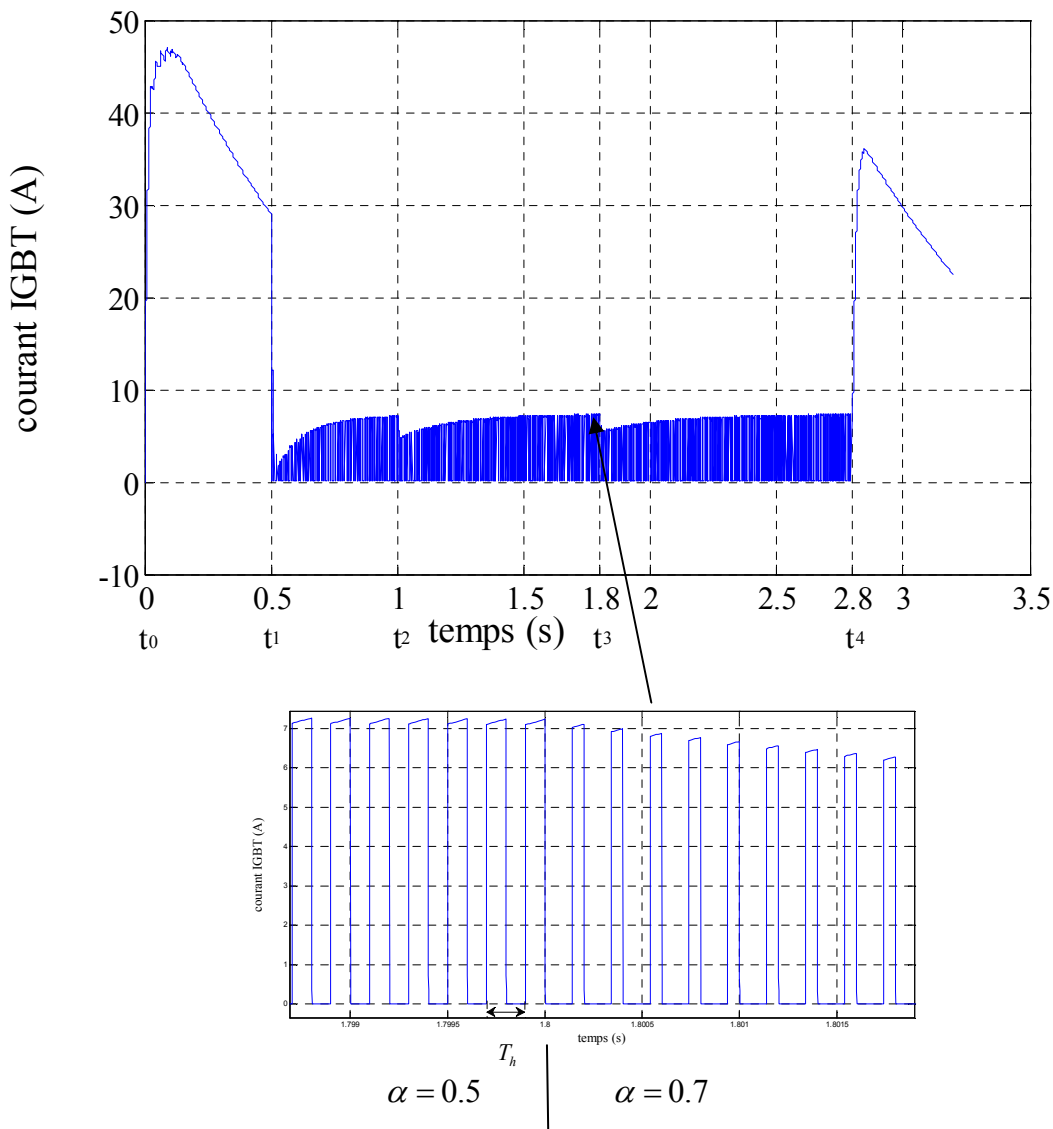


Fig. IV.24 : Allure du courant du hacheur.

IV.6 Comparaison entre les deux méthodes de réglage de vitesse :

Après avoir étudié la méthode de réglage manuel de la résistance rotorique et la méthode de réglage par hacheur rotorique, on se propose de faire une étude comparative déduite des résultats des modèles de simulation des deux méthodes. Ci-dessous, on a représenté sur un même graphe, les courbes d'évolution de la vitesse pour les deux méthodes :

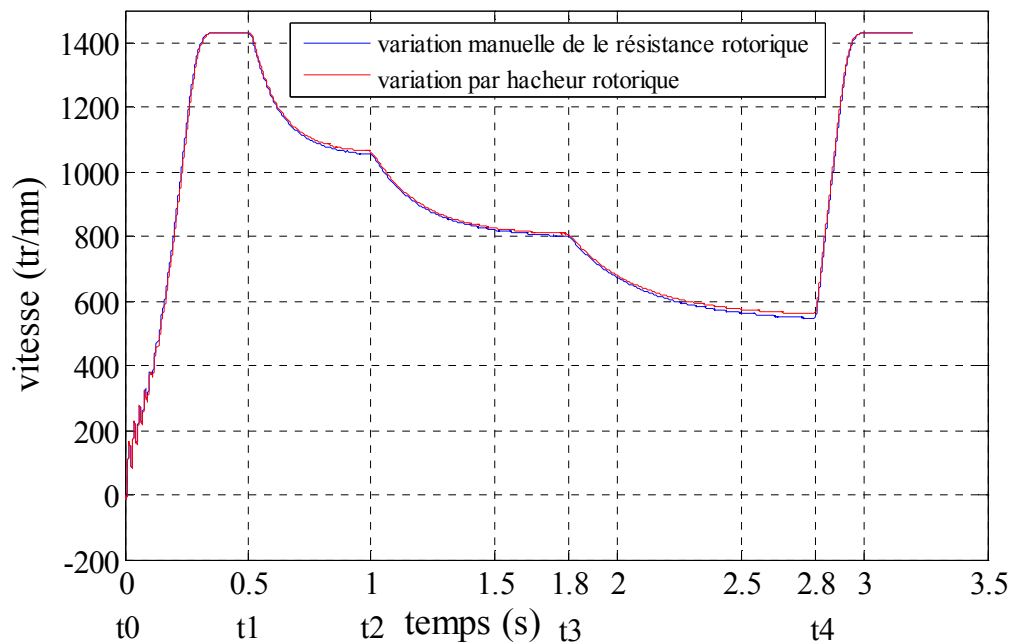


Fig. IV.25 : Evolution de la vitesse pour les deux méthodes de réglage.

On constate, à partir de la figure ci-dessus, que les allures des deux vitesses présentent de très légères différences, la vitesse obtenue à partir de la méthode de réglage manuel de la résistance rotorique, présente une chute de vitesse allant de $6tr/mn$ à $20tr/mn$ par rapport à celle obtenue avec le hacheur.

Ajoutons à cela les inconvénients et avantages que présentent chacune de ces méthodes. Le tableau ci-dessous résume ces inconvénients et ces avantages :

Réglage manuel de la vitesse	Réglage de vitesse par hacheur rotorique
<ul style="list-style-type: none"> - Faible plage de réglage de la vitesse. - Très encombrant. - C'est un réglage par plots. - Donne des vitesses discrètes et limitées. - Dimensionnement de plusieurs résistances. - Réglage contraignant. 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible plage de réglage de la vitesse. - Faiblement encombrant. - Réglage continu. - Donne toutes les vitesses possibles dans la plage déterminée. - Dimensionnement d'une seule résistance. - Réglage simple.

Tableau IV.5 : Inconvénients et avantages des deux méthodes de réglage de vitesse.

IV.7 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié deux méthodes de réglage de vitesse du moteur asynchrone à rotor bobiné. La méthode de réglage manuel de la vitesse et la méthode de réglage par hacheur rotorique.

Nous avons proposé leurs modèles de simulation sous Matlab/Simulink/Simpowersystems et on a comparé les résultats obtenus en constatant les inconvénients et les avantages de chacune des deux méthodes.

Conclusion générale

Ce travail que nous avons réalisé nous a permis d'étudier l'une des méthodes classiques de réglage de vitesse des moteurs asynchrones à rotor bobiné. En l'occurrence, le réglage de vitesse par variation de la résistance rotorique.

Malgré le développement des technologies et l'apparition de nouvelles techniques de réglage de vitesse des moteurs asynchrones, plus sophistiquées et plus performantes, utilisées essentiellement dans des domaines bien définis et pour des applications qui exigent un niveau de précision élevé. Les méthodes classiques, dont les deux méthodes étudiées dans ce mémoire, restent toujours d'usage dans des entraînements à vitesse variable rudimentaires ou pas très exigeants.

La méthode de réglage de vitesse par insertion et court-circuitage manuel des résistances rotoriques, semble très lourde puisqu'elle exige la manipulation de contacteurs mécaniques souvent source de pollution, surtout dans les endroits poussiéreux et explosifs. Elle nécessite aussi le dimensionnement de plusieurs résistances si on veut obtenir plusieurs vitesses dans la plage de vitesse déterminée.

La solution apportée par la méthode de réglage de vitesse par hacheur rotorique aux problèmes rencontrés dans la méthode par réglage manuel, reste très appréciable puisqu'elle permet de réduire l'encombrement du matériel utilisé. Elle permet d'obtenir toutes les vitesses possibles dans la plage de réglage permise et ne nécessite que le dimensionnement d'une seule résistance. Le réglage se fait de manière plus simple vu que le transistor IGBT (hacheur), utilise une commande électronique du rapport cyclique α , qui pourrait même être programmée à l'aide d'un ordinateur.

Cependant, cette méthode, comme d'ailleurs la méthode de réglage par variation manuelle de la résistance rotorique, présentent un inconvénient majeur, celui des pertes d'énergie par effet Joule sous forme de chaleur dans les résistances rotoriques.

En perspective, il serait souhaitable de continuer dans le même cadre, en explorant par simulation le renvoi de l'énergie de récupération sur le réseau d'alimentation, à savoir, la méthode connue sous le nom de cascade hyposynchrone.

Le travail que nous avons réalisé en si peu de temps, nous a permis de simuler ces deux modes de réglage de vitesse d'un moteur asynchrone à bagues et de constater leurs avantages et leurs inconvénients. Il nous a aussi permis d'acquérir plusieurs connaissances sur les machines asynchrones, sur le logiciel Matlab/Simulink/Simpowersystems et sur les machines tournantes en général.

Pour terminer, nous espérons que notre modeste travail contribuera à une meilleure compréhension du thème traité dans ce mémoire et aussi à servir, d'outil de consultation, pour les personnes désireuses de compléter cette initiative.

Références bibliographiques

- [1] T.Wildi et G.Sybille. « Electrotechnique » Edition de Boeck. 4^{ème} édition 2005.
- [2] G.SEGUIER et F.NOTELET « Electrotechnique Industrielle» Edition Lavoisier Tec & Doc. 2^{ème} édition 1996.
- [3] Michel Pinard « Commande électronique des moteurs électriques» Edition DUNOD. 2^{ème} édition juin 2007.
- [4] Guide technique du groupe Schneider « Les techniques de commande du moteur asynchrone » Edition INTERSECTIONS. Juin 1998.
- [5] E.Gaucheron « les moteurs électriques, pour mieux les piloter et les protéger » cahier technique n°207. Edition Schneider Electric, 2004.
- [6] A.Bouayd et H.Zadoud, mémoire de fin d'études « Identification des paramètres d'une machine asynchrone à cage » Université Mouloud Mammeri, département électrotechnique. Promotion 2006.
- [7] Pierre Mayé « Aide-mémoire Electrotechnique » Edition DUNOD, 2006.
- [8] Jean Bonal « Entraînements électriques à vitesse variable. Volume1 ». Edition Lavoisier Tec & Doc 1997.