

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRTE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOD MAMMERI DE TIZI OUZOU



Faculté Génie Electrique et Informatique
Département d'Electrotechnique
Master : Entraînements Electriques

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER Académique
En Entraînements Electriques

Thème

Contribution à l'étude des performances
d'un entraînement électrique
d'une machine de forage

Proposé et dirigé par :

Pr. R.CHAIBI

Réalisé par :

M^{elle} : BENNABI Nacera

Promotion 2011-2012

REMERCIEMENTS

Nous rendons grâce à ALLAH et exprimons nos remerciements les plus sincères à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidés, soutenus, et encouragé, bref, tous ceux qui ont cru en nous dans la réalisation de ce travail. J'exprime ma profonde reconnaissance à mon promoteur Monsieur R.CHAIBI, pour m'avoir encadré et en particulier pour son soutien, ses conseils et sa patience, son expérience et sa connaissance ont contribué à ma formation scientifique.

Nous profitons de cette occasion pour remercier nos enseignants que nous avons eu la chance de rencontrer durant notre parcours, nous n'oublions surtout pas nos camarades de la promotion 2011-2012

Nous remercions également Monsieur le président et Messieurs les membres de jury qui ont voulu accepter d'apporter leurs réflexions et leurs critiques le jour de notre soutenance.

DEDICACE

À...

La mémoire de mon très cher père que son âme repose en paix.

Ma chère mère ma source d'encouragement et de réussite ; pour son aide et son soutien.

Mes sœurs : YAMINA, MALIKA et NADIA pour leurs soutiens et leurs encouragements que vous trouviez en ce travail le fruit d'un amour fraternel.

Mon très cher frère : TAHAR que je ne cesserai jamais de remercier pour tous ce qu'il m'a donné et mon cousin LOUNES.

Son oublier mes amies NASSIMA, OUISA, LYNDA, GHANIA et AMEL pour leurs soutiens.

Tous ceux à toutes celles dont les acronymes n'apparaissent pas sur cette page, ils sont nombreux qu'ils demeurent convaincus, que nous ne les avons point oubliés et qu'ils soient assurés de notre profonde gratitude

BENNABI NACERA

Introduction générale

L'importance considérable de l'énergie pétrolière au plan économique justifie la rude concurrence actuelle et la recherche constante d'innovation dans ce secteur d'activité, qui permettent d'optimiser les procédures de production, d'extraction et de transport de cette source [1]. Par ailleurs, la croissance des besoins en énergie pétrolière en raison des évolutions sociales, démographiques et des progressions technologiques conduit à mener des investigations poussées afin de satisfaire cette demande [17].

C'est dans cette optique, que les principales sociétés d'ingénierie se sont lancées dans des programmes de recherche en vue de développer des processus de forage plus performants et extraire le maximum d'eau et de pétrole [2].

Le système de forage rotary est la base du processus d'extraction du pétrole et d'eau [8]. La compréhension des phénomènes physiques régis par les processus de forage a nécessité le développement de modèles décrivant leurs comportements [4].

La disponibilité des outils statistiques et des calculateurs performants combinés aux modèles et aux systèmes de transmission représente un tremplin pour l'automatisation voire l'optimisation des processus de forage [17].

Le besoin continu d'augmenter les performances des procédés technologiques tel que le forage a permis aux actionneurs électriques, tels que les moteurs, de se trouver à l'un des premiers rangs de l'industrie. La conduite du procédé dépend du type de moteur utilisé et surtout du système de commande adopté [31].

Le moteur asynchrone ou moteur à induction est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie [32]. Cela en raison de sa réputation de solidité et de robustesse ainsi que de son coût de revient relativement modéré.

La fréquence de rotation de la machine étant au glissement près proportionnel à la fréquence d'alimentation des enroulements statoriques, cela nous conduit à envisager une technique de

Introduction générale

pilotage de la vitesse par variation de la fréquence et cela par l'insertion d'un variateur de fréquence [18].

Les performances de ce variateur de fréquence dépendent fortement des caractéristiques des semi-conducteurs qu'ils utilisent. Les composants électroniques présent sur le marché permettent de répondre à la presque totalité des besoins industriels, tant sur le plan technique que sur le plan économique [29].

L'objectif principal de notre travail vise précisément la contribution à l'étude des performances d'un entraînement électrique d'une machine de forage. Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres.

Le premier chapitre, présente les différentes techniques de forage les plus répandues dans l'industrie ainsi que les différents organes entrant dans la construction du forage rotary. Ensuite, nous exposant les différents entraînements qui sont envisageables pour une optimisation et une amélioration des performances du processus.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude du système d'entraînement électrique précisément variateur de fréquence - moteur asynchrone et l'influence de la variation de la fréquence sur les différentes grandeurs du moteur et cela en utilisant la méthode analytico-empirique.

A fin de comprendre au mieux le comportement de la machine en régime transitoire, nous nous intéresserons dans le chapitre trois à la description de la commande scalaire : son principe de fonctionnement et les paramètres entrant dans sa construction.

La simulation est un moyen efficace et économique, utilisé pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes, c'est pour cette raison que le quatrième chapitre est consacré à l'application et résultats de simulation de la commande « variateur de fréquence-moteur asynchrone ».

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

I.1) Introduction

Pour satisfaire une demande mondiale de plus en plus forte et face à l'épuisement des gisements connus, des recherches des nappes dans des milieux profonds et hostiles s'imposent [3]. Ces milieux à explorer nécessitent la mise en place des processus de forage performants [2].

Le forage est devenu un outil très important dans le développement des gisements. Il s'agit de prélever (ou d'extraire) l'énergie accumulée dans la terre, qu'elle soit stockée dans l'eau ou directement dans les terrains, pour l'amener à la surface. Plusieurs procédés existent et ils ont tendance à se diversifier [4].

La production des hydrocarbures et d'eaux passent par le fonctionnement d'un processus de forage dont le plus répandu dans l'industrie se nomme : système de forage rotary [1].

Dans ce qui suit on va s'intéresser à décrire ce système de forage rotary : son principe, les éléments qui le composent ainsi que ses caractéristiques.

I.2) Description du mécanisme de l'installation de forage

I.2.1) Définition

On appelle forage l'ensemble des opérations permettant le creusement de trous généralement verticaux [2].

L'utilisation principale des forages est la reconnaissance et l'exploitation des gisements de pétrole ou de gaz naturel. Les autres utilisations, qui sont nombreuses, comprennent notamment : les forages géologiques ou géophysiques pour la reconnaissance des gisements de minerais.

I.3) Différentes techniques d'installation de forage

En fonction de la géologie, ou de la profondeur à atteindre, plusieurs méthodes de forage peuvent être envisagées [4].

I.3.1) Le forage par percussion ou par battage

Ø Définition

Le forage par percussion est la technique de forage manuelle la plus ancienne et date de l'an 1100 avant Jésus Christ. L'origine du nom percussion repose sur le mouvement du trépan actionné de haut en bas qui brise les roches et le sol au fond du trou [5]. Cette technique se décline en plusieurs versions. Toutes ces versions reposent sur le même principe

: un trépan est soulevé et laissé tomber au fond du trou pour couper la terre ou briser la roche a fin que les morceaux ou débris puissent être remontés à la surface [6].

Ø Avantages et inconvénients

a. Avantages [12]

- Procédé simple et relativement peu coûteux (investissement généralement plus faible que pour les autres procédés de foration) ;
- Pas de fluide de forage (la boue) pas de risque de pollution des nappes;
- Une méthode bien adaptée pour les forages de moyenne profondeur ;
- Les résultats sont très bons dans les terrains fissurés (faible perte).

b. Inconvénients [12]

- Vitesse d'avancement assez faible ;
- Il est impérative de remonter l'outil régulièrement afin de nettoyer le trou (pertes du temps).

I.3.2) Le forage dirigé

Le forage dirigé est une technique de forage dans laquelle on fait dévier la tige de forage selon un tracé courbé au fur et à mesure que le trou grandit. Il est utilisé pour atteindre des gisements inaccessibles par forage vertical [6].L'aptitude à diriger un forage dans n'importe quelle direction choisie peut être extrêmement utile [5].

Il permet également de réduire les coûts, car on peut forer plusieurs puits dans différentes directions depuis une seule plate-forme. Le forage à longue distance permet d'exploiter depuis les côtes des réservoirs sous-marins. Nombre de ces techniques sont possibles grâce à l'utilisation d'ordinateurs pour diriger des machines de forage automatiques [13].

I.3.3) Le forage rotary

Ø Définition

Le forage rotary est le procédé le plus couramment utilisé, il a notamment fait ses preuves dans le domaine de la recherche pétrolière [4].

Il consiste à mettre en rotation un outil sur lequel s'applique une force orientée dans la direction d'avancement. La rotation, générée depuis la surface par la table de rotation, est transmise jusqu'au fond du puits par l'intermédiaire du train de tiges [8].

Les copeaux générés au fond du trou suite à la destruction de la roche par l'outil remontent en continu à la surface grâce à la circulation du fluide de forage qui est généralement une boue à base d'eau ou d'huile. Ce fluide est pompé depuis la surface vers l'intérieur des tiges de forage pour être injecté au travers de l'outil sur le front de coupe. La boue remonte ensuite dans l'espace annulaire entre les tiges et les parois du puits et entraîne ainsi les copeaux de roche vers la surface [2].

Ø Avantages et inconvénients

a. Avantages [4]

- La profondeur atteinte peut être considérable (plusieurs milliers de mètres en recherche pétrolière) ;
- La vitesse d'avancement en terrains tendres est importantes et peut atteindre 100 m à 150 m par jour ;
- Le forage rotary entraîne une consolidation des parois en terrains meubles par dépôts d'un cake.

b. Inconvénients

- Nécessité d'un fluide de forage, donc un approvisionnement du chantier en aux ;
- Nécessité de bien suivre la formation, puis l'évacuation du cake ;
- Risques d'éboulement en cas d'arrêt de foration sans nettoyage du trou.

I.4) Composition de la plate forme d'une installation de forage

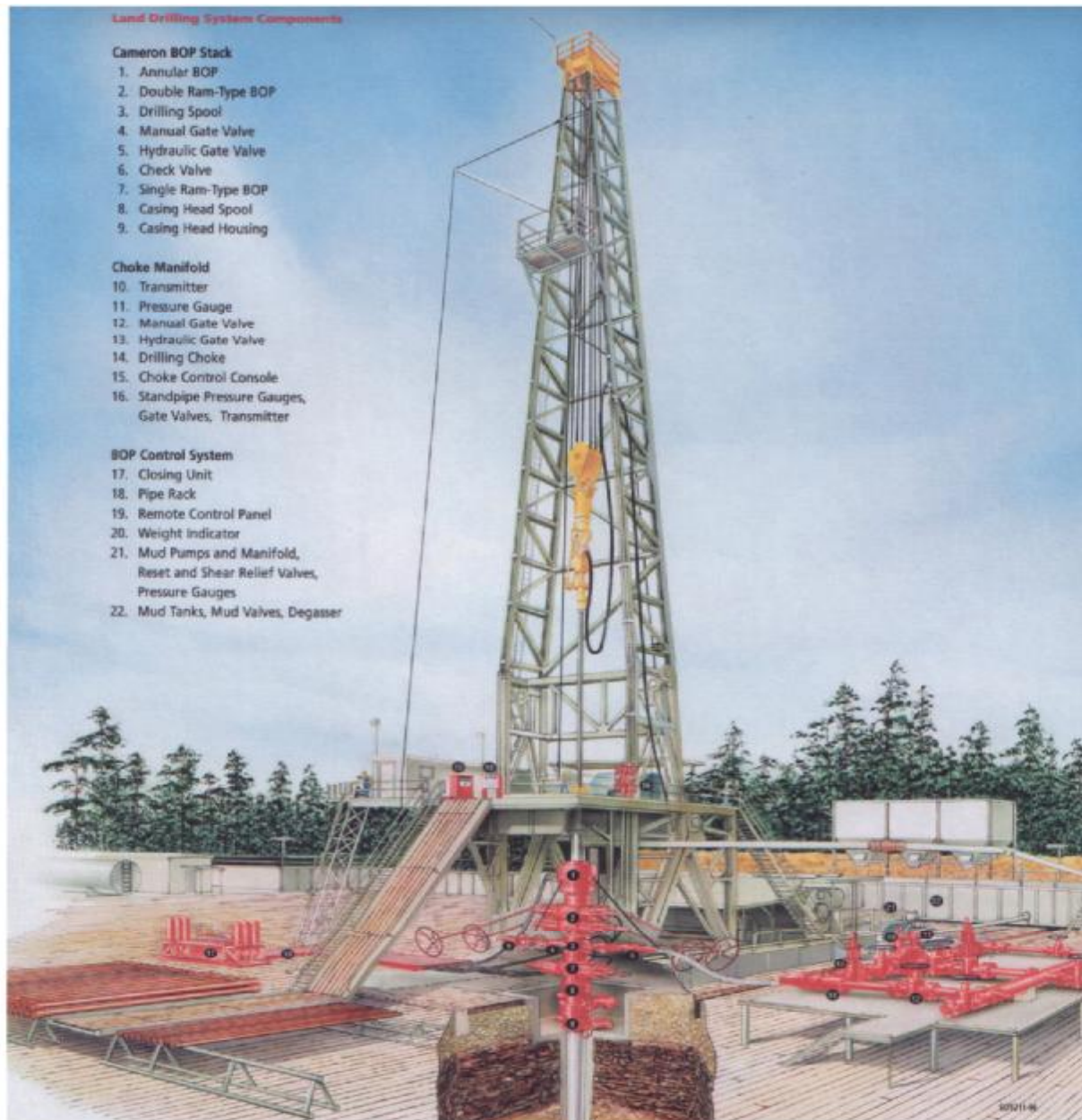


Figure. I.1): Composition de la plate-forme d'une installation de forage

I.5) Caractéristiques techniques et d'exploitations du mécanisme de forage

Le forage rotary est la technique la plus répandue et adaptée aux forages d'eau et de pétrole. Certaines machines rotary sont de taille très importante et peuvent forer jusqu'à plusieurs centaines de mètres.

I.5.1) Historique sur le forage rotary

Lorsque le colonel Drake forait son premier puits de pétrole en 1859, près de Titus ville (Pennsylvanie), il employa le système de forage par battage au câble. Ce procédé, dont le principe est connu depuis la plus haute antiquité, a servi pendant la deuxième moitié du XIX^e siècle à forer la quasi-totalité des puits de Pennsylvanie. Il a acquis la forme sous laquelle il est encore utilisé maintenant, d'où son nom de « système Pennsylvanie ». Et il est resté sans rival tant que l'on s'est cantonné dans ces régions où les terrains étaient relativement durs et consolidés [14].

Mais il en alla autrement lorsque les chercheurs s'attaquèrent à d'autres régions. Où ils découvrirent des argiles collantes ou des sables meubles qui gênèrent considérablement l'avancement de leurs foreuses. C'est ainsi que germa l'idée du rotary.

Les premières tentatives dans ce sens semblent avoir été faites sur le champ de Corsicana (Texas), au début de ce siècle. La nouvelle méthode vit sa popularité se développer d'une manière fulgurante, à la suite de découverte, en 1901 par un certain J.F. Lucas du champ de Spindletop près de beau Mont (Texas) au moyen d'un appareil rotary.

Depuis cette date, grâce à d'incessants perfectionnements et au développement de la puissance de l'industrie pétrolière, le rotary n'a cessé de se développer. Ainsi, en 1952 sur 46000 puits forés aux USA, 38000 l'étaient au rotary 8000 au câble alors qu'en 1945, sur 26000 puits, 18000 avaient été forés au rotary 8000 au câble.

Donc en sept ans l'activité du rotary avait plus que doublé, alors que le battage au câble rétrogradait [17].

I.5.2) Définition

Un processus de forage rotary est un dispositif qui assure l'extraction de la matière pour réaliser un puits. Cette tâche se déroule via la contribution de plusieurs organes qui se composent de deux groupes : L'installation de forage se situe à la surface et sert de support aux instruments nécessaires au pilotage de la garniture. La garniture représente la partie opérative dans le puits [1].

I.5.3) Description du système de forage

Un appareil de forage doit accomplir dans les meilleures conditions techniques et de sécurité, la réalisation d'un puits reliant un gisement à la surface. Le chantier de forage est un ensemble de machines, d'équipements technologiques, énergétiques et auxiliaires [17].

La figure I. 2 présente les différents constituants d'un processus de forage rotary

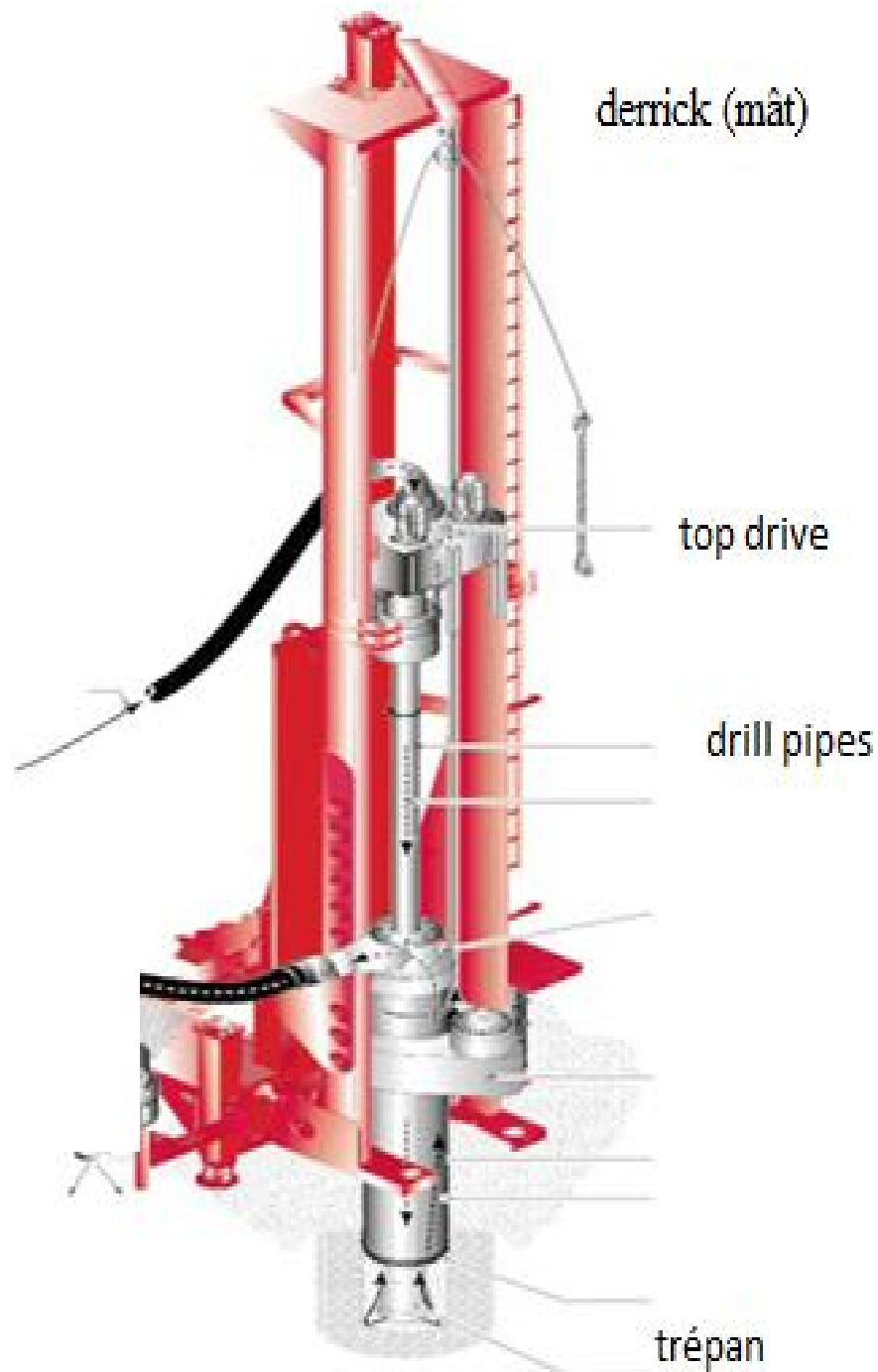


Figure. I.2) : Processus de forage rotary

I.5.3.1) Installation de forage

L'installation de forage possède plusieurs modules : le système hydraulique (pompe et bac à boue), le système d'alimentation (moteurs), la table de rotation, les réserves des tiges de forage ainsi que le système de suspension qui renferme le derrick.

1. Système hydraulique

Il assure la circulation de la boue de forage, il est associé à une station de pompage servant au traitement du fluide de forage : la boue est en effet un mélange d'eau, d'argile et d'additifs. Une injection continue de boue dans le puits s'effectue pendant toute la durée de forage.

Les pompes à boue aspirent la boue des bassins par l'intermédiaire d'un tuyau flexible placé à l'intérieur du train de tiges et remontant par l'espace annulaire compris entre les tiges et le puits. La circulation de la boue contribue à la lubrification des pièces en mouvement, à leur refroidissement et l'évacuation vers la surface des fragments de roches arrachés par trépan [3].

2. Système d'alimentation

L'énergie est produite par des moteurs électriques ou hydraulique .Elle est transmise sous forme électrique ou mécanique vers les différents systèmes de l'installation : la pompe de circulation, le treuil et la table de rotation [2].

3. Système de rotation

Il est constitué d'une table de rotation (rotary table), d'une tige d'entraînement à section carré ainsi que d'une tête d'injection [21].

4. Système de suspension

La tâche dédiée au système de suspension réside dans les déplacements du processus de forage (montée, descente) et dans le contrôle du poids appliqué sur l'outil. Il dispose d'un derrick, pouvant présenter une hauteur de plus de 80 mètres, un crochet et un treuil motorisé. Le derrick (mât) représente le point culminant de la plateforme. C'est une tour métallique qui soutient une tige au bout de laquelle se situe le trépan. La tige est rallongée au fur et à mesure que le trépan opère [1].

I.5.3.2) Garniture de forage

La garniture désignée aussi par arbre de forage, en raison de la mécanique de liaison qu'elle établit entre la motorisation rotative en surface (table de forage) et le trépan, correspond à la partie opérative dans le puits.

Elle est constituée essentiellement des trains de tiges (Drill Pipes), des masses de tiges (Drill Collars) et l'outil de forage [17].

1. Trains de tiges (Drill Pipes)

C'est la partie la plus longue de la garniture ; elle est constituée d'une série importante de tubes minces d'acier qui s'étendent jusqu'à la surface et dont le rôle est de transmettre le couple vers l'outil et de soutenir plus ou moins le train de masses tiges [17].

Elles permettent de :

- Transmettre la rotation à l'outil de forage ;
- Mettre du poids sur l'outil pour détruire la roche ;
- Circuler le fluide de forage pour remonter à la surface les morceaux de roches détruit par l'outil.

2. Masses tiges (Drill Collars)

Des tubes en acier se situant au-dessus des trains de tiges d'une grande section permettant d'exercer du poids sur le trépan. Les diamètres de ces tiges peuvent varier selon les puits, de 6 à 8 cm pour le diamètre intérieur et de 10 à 25 cm pour le diamètre extérieur pour une épaisseur de 6 à 16 cm, ce qui lui confère une bonne rigidité en torsion et en compression.

Le rôle des masses-tiges est essentiel dans la garniture car elles conditionnent la bonne utilisation de l'outil de forage.

Elles permettent de :

- Appliquer du poids sur l'outil de forage, donc une partie des masses-tiges travaille en compression. L'ordre de grandeur des poids appliqués sur l'outil est de 0.5 à 4 tonnes par pouce de diamètre d'outil suivant la dureté de la formation à forer et le type d'outil utilisé ;
- Guider et contrôler la trajectoire de l'outil afin d'atteindre l'objectif prévu et d'obtenir un trou permettant la descente du tubage.

3. Un outil de forage

Extrémité basse de la garniture, l'outil est entraîné en rotation et permet la progression de la garniture par son action directe sur le front de taille [2].

I.5.3.3 Assemblage de fond BHA (Bottom Hole Assembly)

C'est la partie inférieure de la garniture de forage est communément appelée la BHA. Elle est principalement constituée de l'outil de forage, des masses-tiges et des stabilisateurs [7].

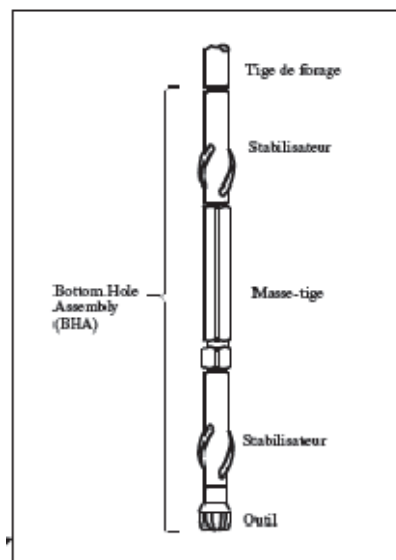


Figure. I.3) : Assemblage de fond BHA [2]

1. Stabilisateur

Ils sont incorporés au niveau des masses-tiges afin de garder et contrôler la trajectoire de l'outil, qu'elle soit verticale ou inclinée. Leurs formes et constructions sont multiples. Suivant la trajectoire désirée, les stabilisateurs seront placés en différents points de la garniture de fond. Leur diamètre est également un facteur important dans le contrôle de la trajectoire.



Figure. I.4) : Exemple de quelques éléments de la garniture de forage

I.5.4) Eléments principale de forage

Le forage est un processus graduel combinant plusieurs phases. Lors de chaque phase, l'assemblage de fond est remonté à la surface pour la maintenance du processus, pour le tubage et la cimentation de la partie forée.

Ø Tubage

L'un des facteurs les plus importants dans le forage est de pouvoir disposer d'une réserve de tubages d'acier adaptés aux profondeurs. Il ya normalement jusqu'à quatre tubages concentriques dans un seul puits, toutes en acier de haute qualité. Ces tubes sont fixés de façon rigide au moyen de ciment à la roche et sont assemblés les uns aux autres au moyen de raccord vissés [4,5].

Ø Cimentation [4]

Cette méthode consiste à remplir, par un mélange à base de ciment, tout ou partie de la hauteur de l'espace annulaire entre un tubage et les parois du trou. La cimentation est utilisée notamment dans les cas suivant :

- Pour colmater une cavité ou des grosses fissures qui engendrent de fortes pertes de boue lors de la foration ;
- Pour rendre étanche l'espace annulaire ;
- Pour fixer les colonnes de tubage au terrain et le protéger ainsi contre les attaques corrosives.

1. Le trépan

Le trépan est monté à l'extrémité d'un train de tiges. C'est un outil qui sert à tailler et détruire la roche. Il existe différents types de trépan, chaque type étant choisit pour une opération de forage spécifique, en fonction de la nature de la formation (plus ou moins dure) et de la résistance des terrains [3].

Ø Trépan tricônes

Les trépan tricônes disposent de trois cônes rotatifs (molettes libres). Ils peuvent être en acier, en carbure de tungstène ou en diamant. L'arrachage de la roche s'effectue lorsque les cônes effectuent des rotations autour du trépan. Le principal mode de destruction de la roche, par les taillants fixés sur les molettes, est le poinçonnement. Il se déroule par la pénétration verticale du taillant dans la roche sous l'effet d'un effort normal créant un champ de contraintes au voisinage du taillant.

Lorsque les limites à la rupture sont atteintes un déblai se produit. Ce type de trépan est particulièrement adapté lorsque les roches à forer présentent une forte dureté [7].

Ø Trépan monobloc

La rotation du train de tiges entraîne celle du trépan. Ces trépan se composent de diamant naturel ou synthétique brasé sur du carbure de tungstène. Ils sont connus sous le nom PDC et détruisent la roche par cisaillement. Le cisaillement caractérise l'opération durant laquelle les taillants pénètrent la roche dans un mouvement parallèle à la surface de la roche et un déblai est obtenu dès que les limites à la rupture sont atteintes [1].



Figure.I.5): Différents types de trépan

2. La table de rotation

Au cours de forage, la table de rotation transmet le mouvement de rotation à la garniture de forage, par l'intermédiaire de tige d'entraînement, et au cours de manœuvre, elle permet de supporter le poids de la garniture de forage, par l'intermédiaire de coins de retenue [17].

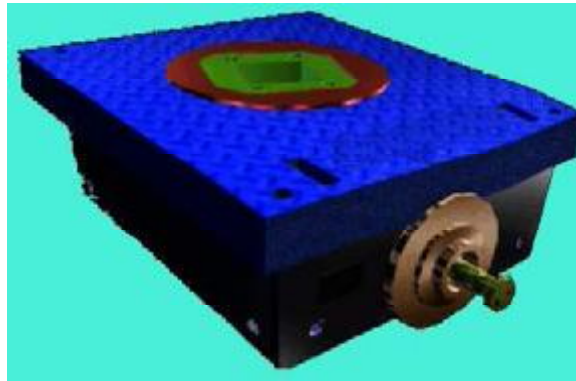


Figure. I.6) : La table de rotation

3. Tête d'injection

Dans une installation de forage, la tête d'injection supporte la garniture de forage et permet d'y injecter la boue en rotation ou à l'arrêt. Elle est suspendue d'un côté au crochet de levage et de l'autre côté vissé à la tige carrée.

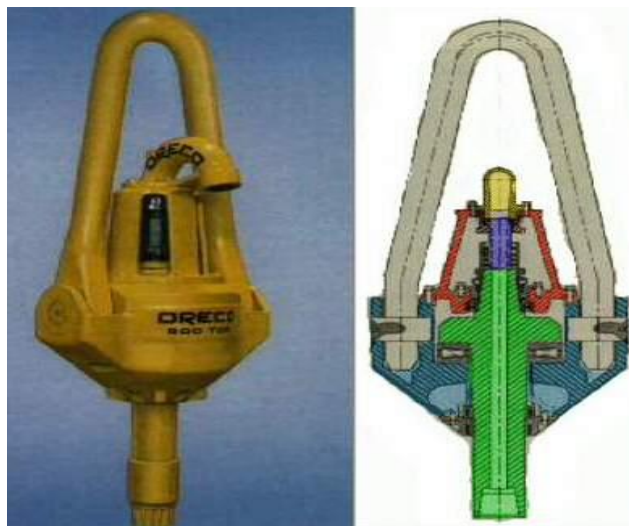


Figure. I.7) : La tête d'injection

Désormais, la table de rotation et la tête d'injection sont devenues conventionnelles face à l'une des importantes avancées dans la technologie de forage à savoir: le top drive.

Le top drive est une tête d'injection motorisée qui, en plus de l'injection, assure la rotation de la garniture de forage.

Ainsi, on n'a besoin ni de la tige d'entraînement ni de la table de rotation pour faire tourner la garniture, c'est le top drive qui s'en charge.

Le top drive peut exécuter plusieurs fonctions de forage simultanément :

- Fait tourner les tiges de forage;
- Sert de passage pour la boue de forage ;
- Supporte le poids des tiges de forage dans le puits.

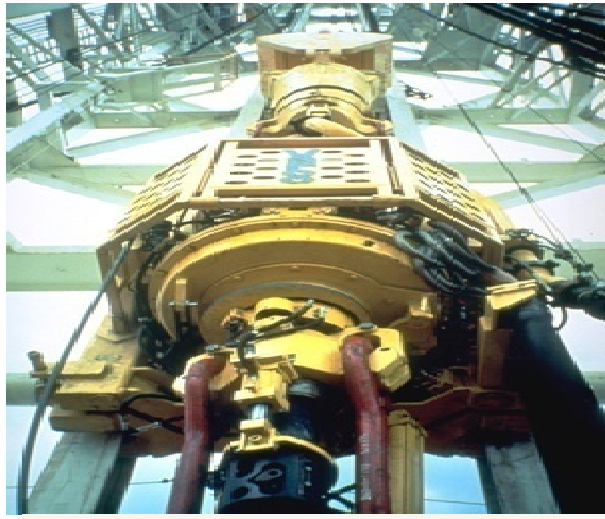


Figure. I.8): Le top drive

4. La tige d'entraînement [17]

C'est la liaison entre la table de rotation et la garniture de forage. Elle permet de supporter la charge totale de garniture. Ces principales fonctions sont donc de :

- relier la tête d'injection et la dernière tige de forage ;
- transmettre le couple de rotation à la garniture de forage ;
- permettre le mouvement longitudinal de la garniture en forage tout en maintenant la rotation ;
- conduire le fluide de forage de la tête d'injection à l'intérieur de la garniture.

La tige d'entraînement peut être de section carrée ou hexagonale. On visse sur la connexion supérieure une vanne de sécurité appelée « upper kelly cock » qui permet de fermer l'intérieur de la garniture en cas d'éruption. Une vanne inférieure manuelle joue le

même rôle et permet également pendant un ajout de tige d'empêcher la boue de s'écouler sur le plancher.



Figure. I.9) : La tige carrée

5. Le mât

Le mât est une structure soudée ou boulonnée en forme de « A », il sert aux manœuvres des garnitures de forage ou des tubages. Il a remplacé la tour (derrick) grâce à la rapidité de son montage et démontage. Il peut être du type qui ne se démonte pas pour le déménagement, ou de celui qui se démonte en un petit nombre d'éléments. Il est dressé tout monté sur la plateforme de forage.

6. Fluide de forage

Le fluide de forage, appelé aussi boue de forage, est un système composé de différents constituants liquides (eau, huile) et/ou gazeux (air ou gaz naturel) contenant en suspension d'autres additifs minéraux et organiques (argiles, polymères, ...) .Le fluide est préparé dans des bacs à boues, il est injecté à l'intérieur des tiges jusqu'à l'outil d'où il remonte dans l'annulaire, chargé des déblais formés au front de taille. A la sortie du puits, il subit différents traitements, tamisage, ajout de produits, de façon à éliminer les déblais transportés et à réajuster ses caractéristiques physico-chimiques à leurs valeurs initiales [10].

7. Pompe à boue

La pompe à boue alimente le circuit hydraulique avec un débit constant et une charge nécessaire pour que la boue parcoure tout le circuit. C'est une pompe à piston, entraînée par des moteurs électriques. Ce type de pompe est largement utilisé dans le forage.

L'installation de forage possède deux pompes de même puissance, pour des raisons de sécurité, ce qui permet de réparer ou d'entretenir l'une d'elles pendant que l'autre est en service.

8. Le treuil de forage

Le treuil de forage est l'équipement essentiel de tout appareil de forage. Sa capacité de levage et sa vitesse de manœuvre conditionnent pour une large part l'efficacité de la sonde. Sa

capacité de levage indique la classe de profondeur que l'on pourra effectuer. Parfois, le chantier est désigné selon le type de treuil.



Figure. I.10) : Treuil de forage

9. Matériel de production l'énergie

Depuis longtemps, la machine à vapeur a été remplacée par le moteur diesel comme source initiale d'énergie, mais on peut rencontrer également sur les plateformes de production l'utilisation de puissance fournie par des turbines à gaz et aussi les chantiers de forage raccorder au réseau de distribution électrique présentant des avantages majeurs tels qu'une énergie peu coûteuse et silencieuse [17].

Dans l'emplacement de forage les groupes de moteurs assurent la rotation du forage, actionnant le derrick et entraînant les pompes, le compresseur à air, etc. [4,5]

I.5.5) Paramètres de forage

Les paramètres de forage sont les différents facteurs sur lesquels le foreur peut agir et qui conditionnent les performances d'un forage.

- Les paramètres mécaniques qui concernent le poids, la vitesse de rotation et le couple exercé sur l'outil.
- Les paramètres hydrauliques qui sont le débit, la pression et la nature du fluide de forage.

I.5.5.1) Facteurs mécaniques

1. Le poids sur l'outil

Il correspond à la force appliquée par la garniture sur l'outil de forage suivant son axe de révolution pour qu'il puisse pénétrer la roche [7].

D'après des études en laboratoire et des essais effectués sur les chantiers, il a été constaté que si, à vitesse de rotation constante, on augmente le poids appliqué sur l'outil, on enregistre une augmentation de la vitesse d'avancement. Cette augmentation varie à peu près en proportion directe du poids sur l'outil si le nettoyage de l'outil par la boue est suffisant [17].

Toutefois, la vitesse d'avancement peut atteindre un maximum si le poids appliqué à l'outil éteint la charge limite. Au-delà de cette charge limite, tout poids supplémentaires est supporté par le corps du cône et il en résulte une diminution de la vie du roulement sans augmentation correspondante de la vitesse d'avancement.

2. La vitesse de rotation

Le poids sur l'outil est étroitement lié à la vitesse de rotation. On ne peut augmenter indéfiniment et simultanément ces deux paramètres sans provoquer un travail extrêmement dur pour le train de sonde et l'outil de forage.

D'après les études, il ressort que la vitesse de pénétration croît en proportion directe de la vitesse de rotation dans les terrains tendres, mais pas dans les terrains durs. Pour ces derniers, il existe une vitesse optimum au-delà de laquelle la vitesse d'avancement n'augmente plus [17].

Cette vitesse maximale de rotation décroît à mesure que la dureté de la formation augmente et la vitesse optimale de rotation décroît quand on augmente le poids sur l'outil.

La vitesse de rotation peut être limitée également :

- Par les vibrations du train de tiges (phénomène de résonance qui peut être la cause de fatigues et de ruptures) ;
- Par certains types d'outils comme à picots ou le facteur poids est plus important; une vitesse de rotation excessive entraînerait une diminution de la vitesse d'avancement ainsi que la détérioration des pastilles.
- Par les frottements en forage dévié.

Exemple : [17]

- Outil tricône à dents aciers pour terrain tendre : 150 à 250 tr/min

- Outil picot : 50 à 100 tr/ min.

3. Le couple exercé sur l'outil

Ce paramètre correspond au couple transmis par la garniture au trépan suivant son axe de révolution. Compte tenu des frottements de train de tiges contre la paroi du puits, ce couple est nettement inférieur à celui mesuré en surface [1].

I.5.5.2) Facteurs hydrauliques

1. Le type de la boue et sa densité

On entend par type de la boue, les caractéristiques physico-chimiques du fluide de forage et sa densité.

- On distingue généralement trois types de boue : des boues à base d'eau, des boues à base d'huile et des boues synthétiques .Le choix de la boue influence directement sur le coefficient de frottement garniture-parois de puits [10].
- Enfin, la densité de la boue permet de contrôler la pression du fluide de forage sur les parois et le fond du puits [10].

2. Le débit et la pression d'injection

Ces deux paramètres doivent permettre d'une part d'assurer un écoulement suffisant sur l'outil pour refroidir les éléments de coupe pendant le forage et d'autre part un régime de circulation de la boue permettant un nettoyage efficace du puits afin d'éviter que les débris s'accumulent par gravité sur la partie basse du trou notamment dans le cas de forage hautement dévié [7].

I.5.6) Méthodes de transmission des données

Plusieurs méthodes permettant la transmission des données durant l'exploitation des gisements existent. Parmi ces méthodes on note la méthode de trains de tiges câblées et la méthode télémétrie par modulation de boue qui sont les plus utilisées.

I.5.6.1) Trains de tiges câblées

Cette instruments de transmission de mesures utilise des câbles électriques logés dans les différents modules des trains de tiges et transportent un signal électrique à la surface.

L'avantage de ces systèmes vient de leurs capacités à présenter un taux de transmission de données important par rapport aux autres systèmes téléométriques [1].

I.5.6.2) Télémétrie par modulation de boue

Son fonctionnement nécessite l'exploitation d'une valve modulant le débit de la boue de forage. La modulation de boue s'effectue en fonction de la donnée à transmettre et crée une fluctuation de pression représentant l'information à délivrer. Ces fluctuations se propagent dans le fluide de forage vers la surface où elles sont recueillies par des capteurs de pression. Enfin, elles sont traitées par des calculateurs pour reconstruire l'information transmise [1].

I.6) Analyse par comparaison des différents systèmes d'entraînement électrique utilisés

Tous les moteurs conçus pour une alimentation à courant alternatif peuvent fonctionner à vitesse variable à condition qu'une alimentation à fréquence variable soit disponible. Par le passé, ceci était possible en mettant en œuvre un alternateur à vitesse variable entraîné par un moteur DC alimenté par un générateur DC tournant à vitesse constante. Aujourd'hui, la disponibilité de composants d'électronique de puissance permet de réaliser des convertisseurs statiques très compacts et surtout avec un rendement bien supérieur.

I.6.1) Entraînement par moteur asynchrone

I.6.1.1) Principes fondamentaux

L'alimentation du stator par un système de courant triphasé crée un champ magnétique tournant dans l'entrefer. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques. C'est-à-dire que la vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme.

L'enroulement du rotor est donc soumis à des variations de flux (du champ magnétique) une force électromotrice induite apparaît qui crée des courants rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation du flux (loi de Lenz). Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique à une vitesse de rotation ω_r inférieur à celle de synchronisme.

Cette différence de vitesse du rotor par rapport à celle du champ tournant, nous ramène à définir un paramètre qui caractérise les machines asynchrones, qu'on appelle le glissement [25].

$$\text{-----} \quad (I.1)$$

$$\text{D'ou : } \text{-----} \quad (I.2)$$

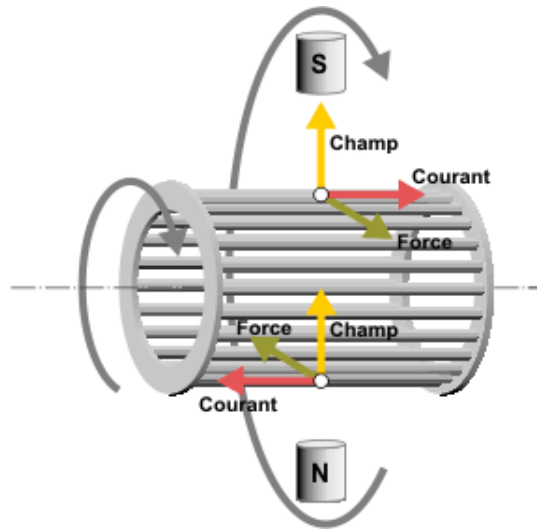


Figure .I.11) : Schéma de fonctionnement du moteur asynchrone à cage

I.6.1.2) Commande et variation de la vitesse de la machine asynchrone

Il existe plusieurs méthodes de commande de la vitesse d'une machine asynchrone la plus couramment utilisé est réglage par variation de fréquence.

Les convertisseurs de fréquence convertissent le réseau alternatif triphasé avec tension et fréquence constantes en un nouveau réseau triphasé avec tension et fréquence variables. Cette commande de tension/fréquence autorise une régulation en continu de la vitesse des moteurs triphasés [23].

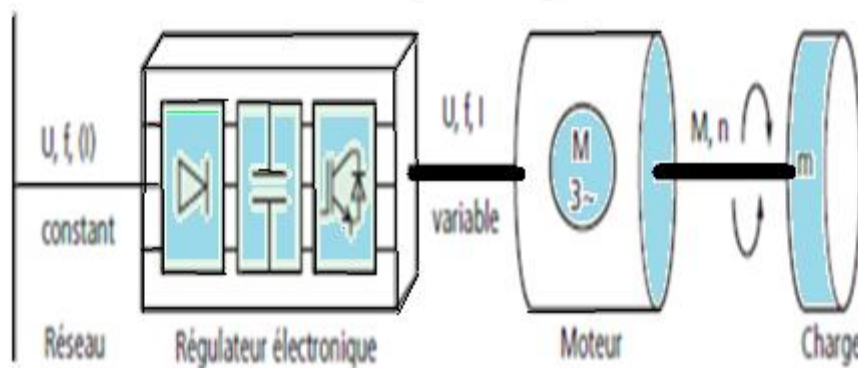


Figure. I.12):Schéma d'entraînement par MAS et variateur de fréquence [23]

Les convertisseurs DC/AC ont essentiellement des structures en pont constituées d'interrupteurs électroniques tel que les transistors de puissance (IGBT) ou thyristors.

Les trois principaux éléments qui constituent un variateur de fréquence sont les suivants [12] :

- ü Source de tension continue : tension à la sortie du redresseur qui délivre une tension redressé de valeur moyenne V_{moy} ;
- ü Filtre: le filtre est composé d'une inductance L et d'une capacité C qui permet d'avoir une tension de même valeur moyenne que celle délivrée par le redresseur mais d'ondulation négligeable ;
- ü Convertisseur DC/AC: un onduleur triphasé constitué de six intercepteurs commandé à la fermeture et à l'ouverture.

Le moteur triphasé piloté par convertisseur de fréquence constitue aujourd'hui un élément standard de la variation de vitesse et de couple ; économique et peu gourmand en énergie [19].

Ce système électronique appelé aussi changeur de fréquence est la solution idéale pour entraîner des moteurs asynchrones dans les cas spéciaux.

En effet il permet [20] :

- Une grande plage de variation de vitesse ;
- Rendement élevé et amélioration du facteur de puissance.

I.6.2) Entraînement par moteur synchrone

I.6.2.1) Principes fondamentaux

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant [22].

L'enroulement statorique, parcourue par un système triphasé équilibré de courants de pulsation ω , crée un champ magnétique tournant dans l'entrefer à la vitesse de synchrone Ω_s , soit p nombre de paires de pôles :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{I.3})$$

Le champ magnétique engendré par l'enroulement inducteur ou les aimants est fixe par rapport au rotor. L'interaction entre le champ tournant du stator et le champ fixe du rotor crée un couple dont le moment a une valeur moyenne nulle. Quand le rotor est entraîné à la vitesse synchrone, l'interaction entre les champs tournants du stator et du rotor crée un couple dont le moment a une valeur moyenne non nulle. La vitesse d'un moteur synchrone est imposée par la fréquence de son alimentation [15].

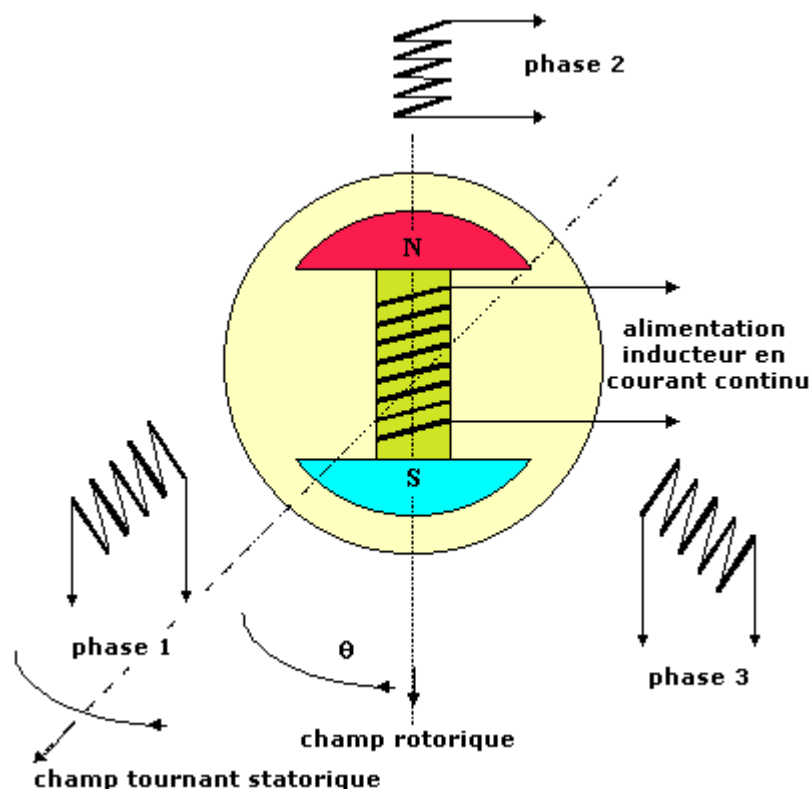


Figure I.13) : Schéma de fonctionnement de la machine synchrone

I.6.2.2) Commande et variation de la vitesse du moteur synchrone

Le moteur synchrone ne produit un couple qu'à la vitesse de synchronisme, proportionnelle à la pulsation des grandeurs du stator. La seule façon de faire varier sa vitesse de rotation est donc de régler la fréquence de l'alimentation de l'enroulement statorique.

Comme dans le cas de la machine asynchrone, l'alimentation à fréquence variable des machines synchrones se fait à l'aide d'un convertisseur de fréquence. En sortie du convertisseur, on contrôle l'amplitude des tensions ou des courants statoriques ainsi que leur fréquence f_s proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine [26].

I.6.3) Entraînement par générateur moteur

Aujourd'hui, avec l'électronique, on dispose de variateurs de fréquence, qui permettent d'alimenter à fréquence variable un moteur, et donc de pouvoir faire varier sa vitesse dans une très grande gamme.

Dans le passé, ces variateurs n'existent pas, des solutions avaient été trouvées avec un générateur ou groupe Ward Leonard.

Le principe est de transformer l'énergie du réseau alternatif en énergie à courant continu, pour obtenir un réseau de puissance continu qui alimentera le moteur à courant continu de la machine concernée.

Et on travaillera à tension continue variable, en faisant varier l'excitation de celle-ci. On commandera donc la vitesse du moteur continu par réglage de l'excitation, y compris en inversant celle-ci pour inverser la tension, donc le sens de rotation du moteur.

Ce type d'entraînement est très utilisé dans le passé avec un rendement très petit mais l'apparition de l'électronique de puissance a rendu leur utilisation minime.

I.7) Comparaison entre les différents systèmes d'entraînement

L'évolution des entraînements à courant alternatif résulte, en partie, de la volonté d'obtenir des performances comparables à celles des entraînements à courant continu, en termes de temps de réponse en régulation de couple et de précision en régulation de vitesse, en utilisant les avantages des moteurs à courant alternatif standard [23].

Dans l'alimentation on trouve en courant alternatif les moteurs synchrones et asynchrones qui sont les plus utilisés.

Les moteurs synchrones ont une vitesse strictement constante mais peuvent décrocher par surcharge, ils nécessitent un moteur auxiliaire de démarage. De plus, leur rotor doit être

alimenté par un courant continu, rarement disponible sur place. Ils ont un bon rendement mais leurs prix sont élevés.

La machine asynchrone (MAS) constitue plus de 95% des moteurs utilisés dans l'industrie pétrochimique et cela revient à sa construction simple, sa sûreté de fonctionnement, leur démarrage qui est généralement simple, sa robustesse, et surtout sa maintenance simple et économique. Ils présentent un bon rendement optimum qui varie de 0.6 à 0.95 selon la puissance du moteur.

A partir de ces considérations analogiques, elle est de plus en plus utilisée pour des commandes dans les milieux industriels comme les installations de forage.

L'association du moteur asynchrone avec un variateur de fréquence permet de gagner en rentabilité énergétique [27].

I.8) Conclusion

Nous avons présenté dans ce présent chapitre les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système de forage, qui sont quelque peu primaires, mais suffisantes à l'introduction du modèle, ainsi aux différents entraînements électriques qui peuvent être envisagés dont le plus utilisé sera présenté dans le chapitre suivant.

II.1) Introduction

Réussir le forage d'un puits le plus rapidement possible, à moindre coût et avec un fonctionnement continu est devenu un défi continu pour les professionnels du secteur. Pour relever ce défi, un bon dimensionnement des installations de forage s'impose [7].

A l'heure actuelle, l'évolution des matériels industriels et d'électronique de puissance a permis de faire évoluer les systèmes d'entraînements et les commandes des moteurs électriques en offrant un peu plus de performances et de précision [4].

La commande de la vitesse de rotation du système de forage doit être très performante, vu la complexité et l'apparition des défauts, qui altèrent le fonctionnement du processus et augmentent les coûts de production à cause des arrêts. Cela nécessite un bon indice technico-économique avec des méthodes de régulation de vitesse fiables et performantes [1].

II.2) Fondement du choix du système d'entraînement électrique

Les variateurs de fréquence qui permettent de faire varier la vitesse des moteurs asynchrones ont fortement évolué. Ils sont désormais d'une grande fiabilité. Par ailleurs, avec l'évolution de l'électronique de puissance, on retrouve désormais la machine asynchrone dans une gamme de puissance très étendue et dans de très nombreux domaines d'applications comme les installations de forage ou le moteur asynchrone à cage qui est connu pour sa robustesse intrinsèquement grande, son prix de revient inférieur et son entretien facile.

Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie des moteurs asynchrones actuellement en service [18].

La machine asynchrone constitue plus de 95% des moteurs utilisés dans l'industrie pétrochimique.

II.2.1) Schéma de fonctionnement du moteur asynchrone à cage

La machine asynchrone est constituée principalement de deux composantes l'une fixe appelée stator, l'autre mobile appelée rotor [16].

1. Stator

Il est constitué d'un cylindre ferromagnétique entaillé d'encoches permettant d'y loger trois bobinages décalés de $2\pi/3$ dans l'espace. Ce cylindre est constitué d'un empilement de plaques de tôles afin de limiter les courants de Foucault.

2. rotor

Il est constitué de conducteurs en court circuit qui sont parcourus par des courants induits, le champ magnétique est créé par les courants statoriques.

On distingue essentiellement plusieurs types de construction de rotor.

- **Rotor bobiné**

Le rotor à bague comprend un bobinage triphasé, semblable à celui du stator, placé dans les encoches. Ces enroulements peuvent être couplés en étoile ou en triangle, leurs extrémités sont réunies à trois bagues sur lesquelles frottent des balais [15].

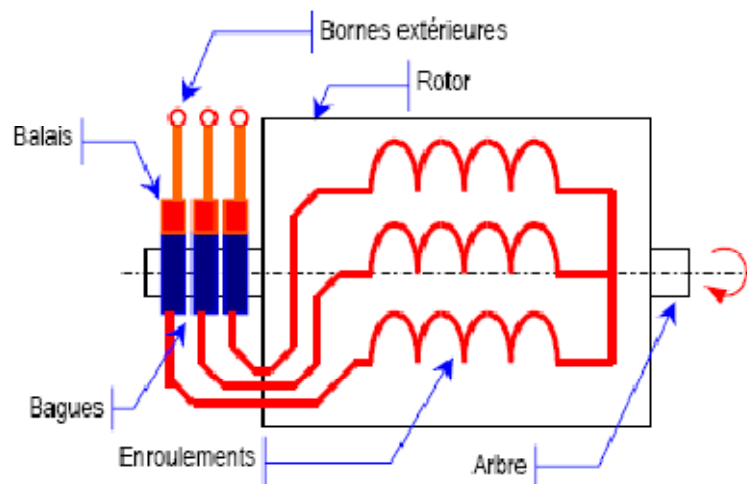


Figure .II.1) : Rotor bobiné

- **Rotor à cage d'écureuil**

Le rotor à cage est constitué de barres de cuivre nues introduites dans des encoches. De chaque côté, les extrémités de ces barres sont réunies entre elles par des couronnes métalliques. L'ensemble forme donc une cage, appelée cage d'écureuil [14].

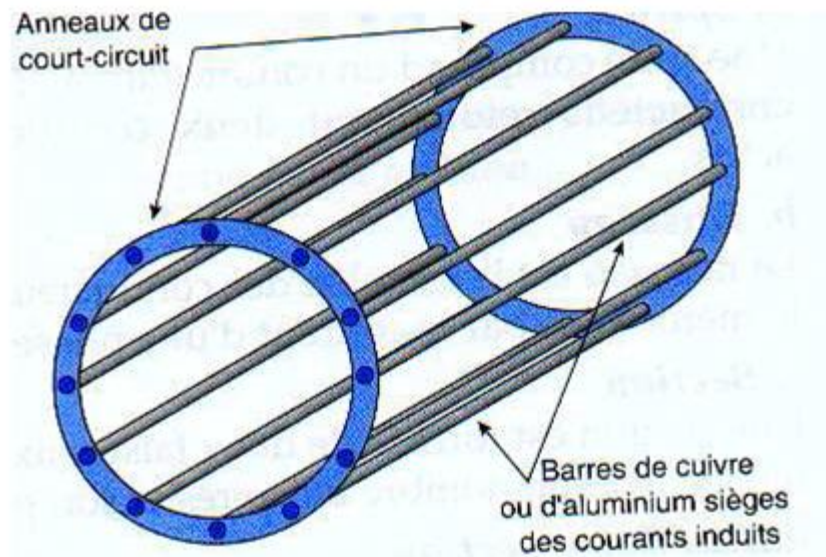


Figure .II.2) : Rotor à cage d'écureuil

La figure ci-dessus présente le schéma de fonctionnement du moteur à cage constitué de trois phases, chaque phase comprend une résistance auxiliaire.

Ce schéma du moteur asynchrone avec ce type d'enroulement ne comprend pas de bornes de sorties.

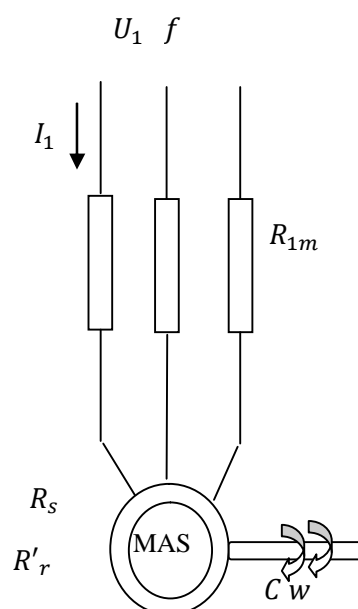


Figure. II.3) : Schéma de fonctionnement du moteur asynchrone à cage [13]

Avec :

$$R_1 = R_s + R_{1m} \quad (\text{II.1})$$

R_1 : Résistance active totale statorique ;

R_s : Résistance active de phase de l'enroulement statorique ;

R_{1m} : Résistance auxiliaire placées dans les phases statorique du moteur ;

I_1 : Courant statorique ;

R'_r : Résistance active rotorique ramenée à l'enroulement statorique.

Pour l'obtention des expressions des caractéristiques électromécanique et mécanique de la machine asynchrone, on utilise son schéma équivalent dans lequel les circuits statorique et rotorique représentent leurs résistances actives et leurs réactances inductives.

II.2.2) Choix du système

La figure (II.4) représente le schéma de puissance de la commande moteur asynchrone- variateur de fréquence.

Il comprend :

- Un sectionneur Q d'isolement avec fusibles qui permet de déconnecter le moteur du réseau pour des opérations de maintenance. Il protège également le dispositif en aval contre les risques de court circuit grâce aux fusibles.
- Un variateur de fréquence qui permet de faire varier la fréquence et par conséquence la vitesse de rotation et le couple du moteur.
- Un contacteur Km capable d'établir ou d'interrompre le passage de l'énergie électrique vers le moteur avec une commande manuelle ou automatique.
- Un relais thermique F qui permet de protéger contre les surcharges. Une surcharge est une élévation anormale du courant consommé par le trépan de forage dans des proportions raisonnables (1 à 3 In). Cette élévation faible du courant mais prolongée dans le temps va entraîner un échauffement de l'installation pouvant aller jusqu'à sa destruction.

Ce relais permet d'optimiser la durée de vie du moteur en interdisant son fonctionnement dans des conditions anormales d'échauffement, tout en assurant au maximum la continuité de marche de la machine entraînée ou de l'installation en évitant des arrêts intempestifs.

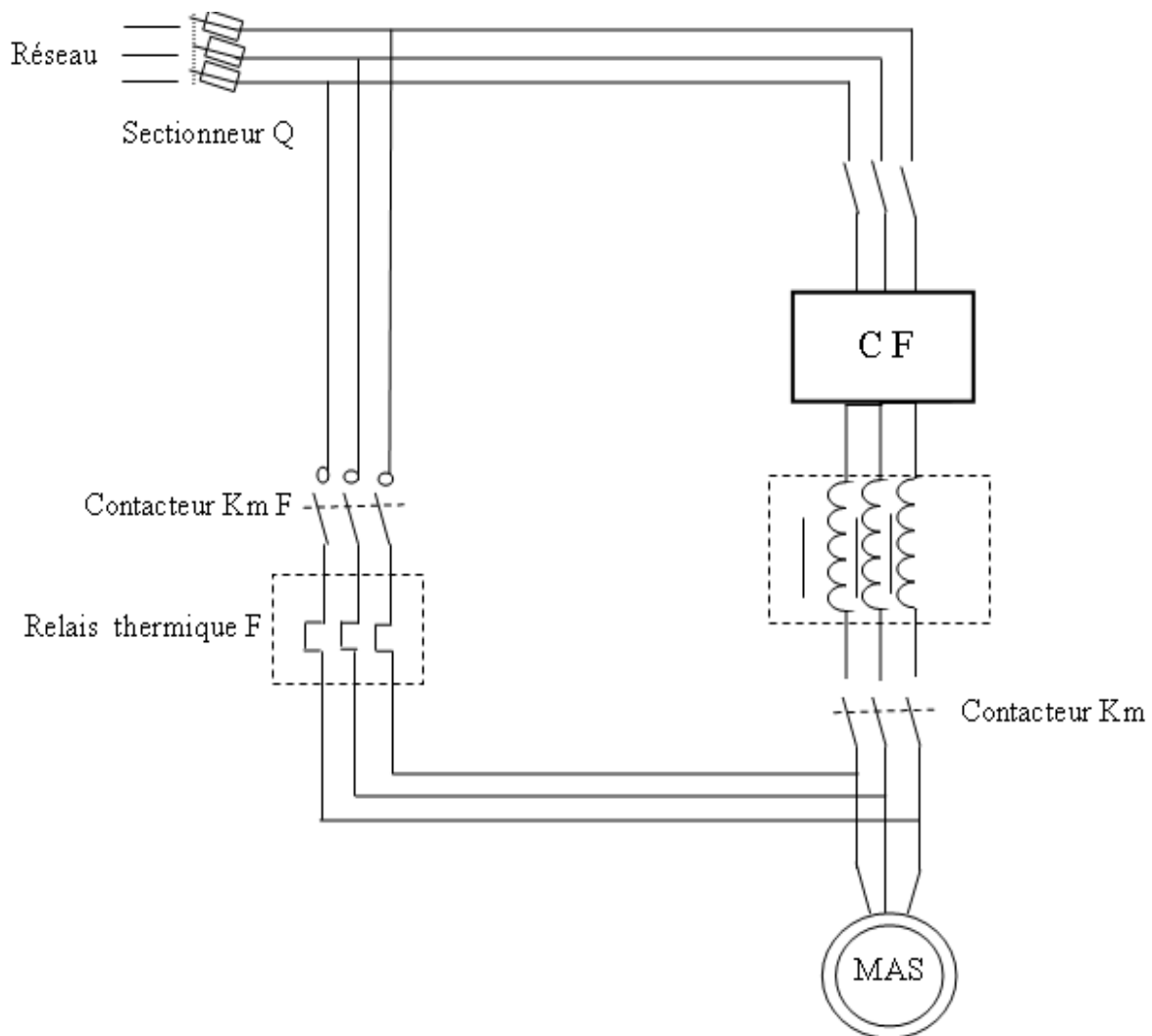


Figure. II.4) : Schéma de puissance du commande du moteur asynchrone-variateur de fréquence

II.3) Choix du variateur de fréquence

Le choix d'un variateur de fréquence étant intimement lié à la nature de la charge entraînée et aux performances visées, toute définition et recherche d'un variateur de vitesse doivent passer par une analyse des exigences fonctionnelles de l'équipement puis des performances requises pour le moteur lui-même.

Les variateurs de fréquence HELMKE permettent une régulation de vitesse linéaire des moteurs triphasés grâce à une commande continue du rapport tension/fréquence.

Les variateurs de fréquence NSFU-V40-019 permettent une régulation de vitesse en continu des moteurs triphasés à cage. Ils conviennent tout particulièrement aux applications exigeant une grande simplicité d'utilisation et un haut niveau de rentabilité.

Tension nominale de sortie	(380 + 10%)
Rendement nominal	0.97
Facteur de puissance nominal	0.95
Fréquence du réseau	(50 ± 5%)Hz
Puissance nominale	7.5kW
Courant nominal	(18 ± 10%)A
Gamme de régulation de vitesse	(0 ÷ 380)

Tableau II.1) : Cahier de charge du variateur de fréquence

II.4) Caractéristiques des régimes de fonctionnement du système d'entraînement électrique

II.4.1) Schéma équivalent du moteur asynchrone

La particularité de ce schéma équivalent du moteur asynchrone représenté dans la figure (II.5) et que le courant, la f.e.m et les paramètres du circuit rotorique sont ramenés au circuit statorique ce qui nous permet de représenter ces deux circuits par un schéma de couplage électrique, quoique on réalité la liaison entre eux s'effectue à travers le champ magnétique [13].

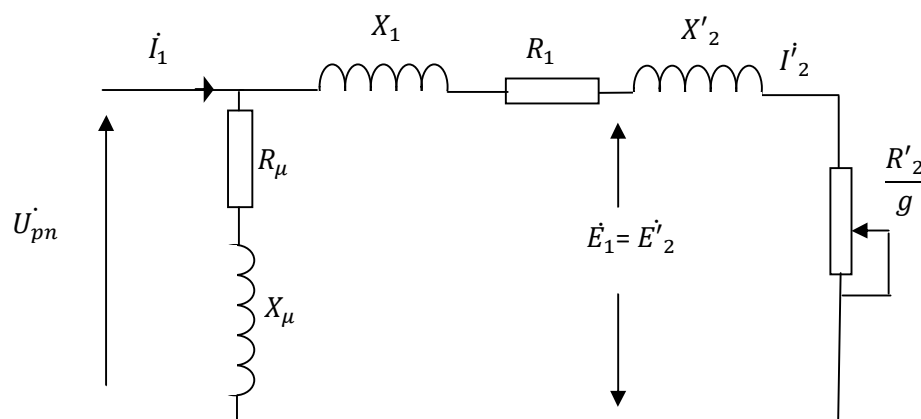


Figure. II.5) : Schéma équivalent du moteur asynchrone

Avec :

R'_r : Résistance active rotorique ramenée à l'enroulement statorique (Ω) ;

U_{pn} : Tension complexe de phase du réseau (V) ;

I_1 ; I_μ ; I'_2 : Respectivement courants complexes statorique, d'aimantation et rotorique réduites (A) ;

X_1 ; X_μ ; X'_2 : Réactances inductives statorique, du contour d'aimantation et rotorique ramenée au circuit statorique (Ω) ;

g : Glissement ;

E_1 ; E'_2 : f. e. m complexes statorique et rotorique ramenée au circuit statorique (V) ;

$X_{cc} = X_1 + X'_2$: Réactance inductive de phase du court circuit (Ω) .

II.4.2) Calcul des paramètres complémentaires

Ø Le glissement

$$g_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} \quad (\text{II.2})$$

Ø Le couple nominal

$$P_n = C_n \cdot \omega_n \quad (\text{II.3})$$

Ø Le couple de démarrage

$$\frac{C_d}{C_n} = 1.4$$

Ø Le couple résistant

$$\frac{C_{cr}}{C_n} = 2.2 \quad (\text{II.4})$$

Ø Le glissement maximal

$$g_{cr} = g_n (C_{cr}^* + \sqrt{C_{cr}^* - 1}) \quad (\text{II.5})$$

Ø La réactance du court circuit

$$g_{cr} = \frac{R'_2}{\sqrt{X_{cc}^2 + R_1^2}} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

P_n : Puissance nominale du moteur (W) ;

g_n : Glissement nominal ;

g_{cr} : Glissement critique (maximal);

C_n : Couple nominal du moteur ($N.m$) ;

ω_n : Vitesse de rotation nominale du moteur (rd/s) ;

C_d : Couple de démarrage du moteur ($N.m$) ;

C_{cr} : Couple critique du moteur ($N.m$) .

g_n	0.03
C_n	73.87 $N.m$
C_d	103.42 $N.m$
C_{cr}	162.51 $N.m$
g_{cr}	0.12
X_{cc}	4.19 Ω

Tableau. II.2) : Résultats de calcul des paramètres complémentaires

II.5) Calcul des caractéristiques électromécanique de la machine asynchrone

La caractéristique électromécanique est décrite par l'expression (II.7):

$$I'_2 = \frac{U_{ph}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{g}\right)^2 + X_{cc}^2}} \quad (\text{II.7})$$

La transmission de $I'_2 = f(g)$ vers $\omega = f(I'_2)$ s'effectue à l'aide de l'expression suivante :

$$\omega = \omega_0(1 - g) \quad (\text{II.8})$$

Pour construire la caractéristique électromécanique du moteur asynchrone, on analyse les points caractéristiques de la relation (II.8) on se basant sur la sur le formule (II.7) pour obtenir l'asymptote, en donnant différentes valeurs du glissement g .

$$g = 0 \Rightarrow \omega = \omega_0 \Rightarrow I'_2 = 0 \Rightarrow \text{point du vide idéale}$$

$$g = 1 \Rightarrow \omega = 0 \Rightarrow I'_2 = I_{cc} = \frac{U_{ph}}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + X_{cc}^2}} \Rightarrow \text{point du court circuit}$$

Avec :

U_{ph} : Tension nominal simple appliqué au moteur.

On variant la fréquence on obtient l'expression suivante :

$$I'_2 = \frac{U_{ph}(f)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{g(f)}\right)^2 + X_{cc}^2(f)}} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$$g(f) = \frac{\omega_{0n} \cdot f^* - \omega}{\omega_{0n} \cdot f^*} \quad (\text{II.10})$$

On aura enfin :

$$I_2' = \frac{U_{ph}(f)}{\sqrt{\left[\left(R_1 + \frac{R_2' \cdot \omega_{0n} \cdot f^*}{\omega_{0n} \cdot f^* - \omega} \right)^2 + (x_c \cdot f^*)^2 \right]}} \quad (\text{II.11})$$

$$f^* = \frac{f_i}{f} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

f^* : Fréquence réduite ;

f : Fréquence donnée ;

f_i :Fréquence variable.

Le travail effectuer dans cette partie, est basé sur la variation de la vitesse de rotation du moteur asynchrone allant de 0 jusqu'à la vitesse de synchronisme, et cela pour différentes valeurs de fréquences des tensions statoriques(50 Hz, 40 Hz, 30 Hz, 20 Hz et 10Hz).

Le tableau II.3 regroupe les différentes valeurs du courant rotorique (expression II.11) pour différentes valeurs de fréquences et vitesse de rotation du moteur.

50	ω ,rd/s	0	15	30	45	60	75	85	95	104
Hz	I_2' ,A	51.03	50.79	50.42	49.82	48.68	46.11	41.88	30.64	4.08
40	ω ,rd/s	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Hz	I_2' ,A	62.82	62.22	61.95	61.21	60.07	58.11	54.27	45.06	18.88
30	ω ,rd/s	0	10	20	30	40	45	50	55	60
Hz	I_2' ,A	81.15	80.05	78.36	75.47	69.78	64.80	56.60	42.68	19.42
20	ω ,rd/s	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Hz	I_2' ,A	116.3	110.26	107.55	103.8	98.45	90.39	77.44	55.52	19.50
10	ω ,rd/s	0	4	8	10	12	14	16	18	20
Hz	I_2' ,A	167.24	156.06	140.12	126.53	116.34	99.84	78.91	52.4	19.66

Tableau. II.3) : Valeurs du courant rotorique et vitesse de rotation pour différentes fréquences

Ø Représentation des caractéristiques électromécaniques statiques

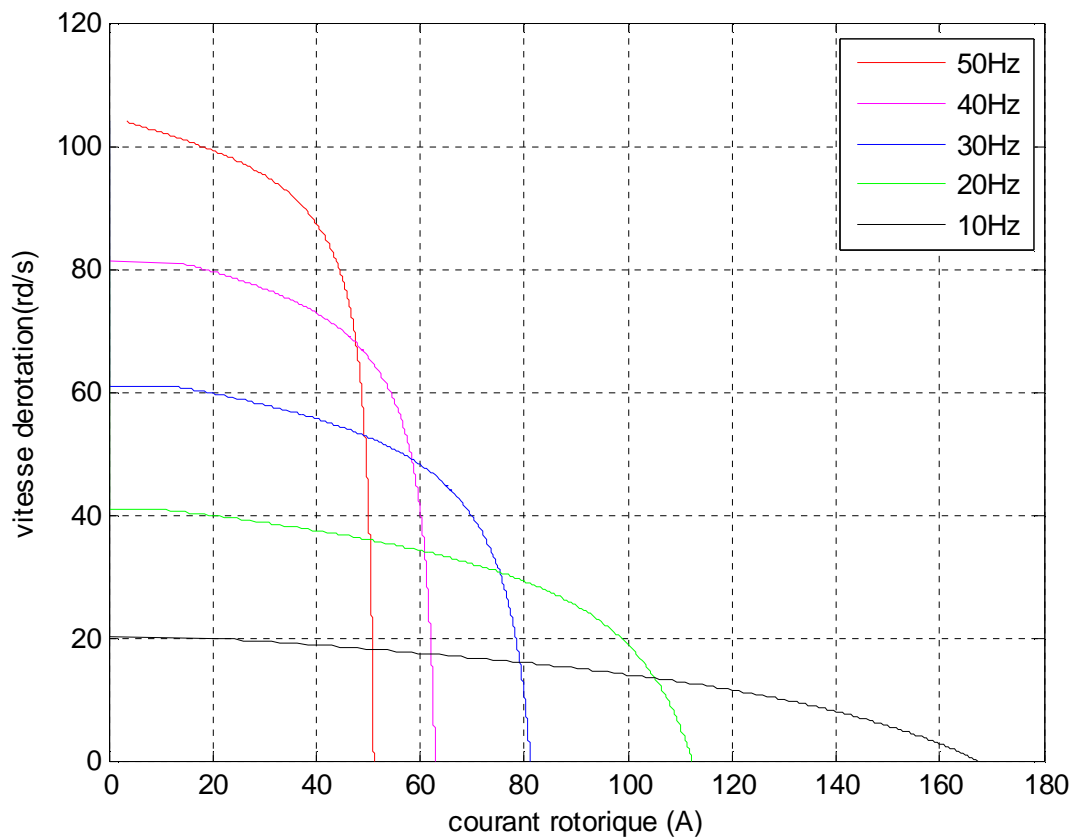


Figure II.6) : Les caractéristiques électromécaniques

Ø Interprétation des courbes

L'équation (II.11) nous a permis de tracer les différentes caractéristiques électromécaniques de la machine asynchrone pour différentes fréquences et vitesses.

Chaque courbe de la figure (II.6) présente deux points principaux. L'un est obtenu à une valeur de vitesse nulle, appelé courant du court circuit ou courant de démarrage. L'autre point traduisant la vitesse de rotation à vide (vitesse de synchronisme).

Au démarrage $\omega = 0$, le moteur produit un fort courant qui est d'autant plus grand lorsque la fréquence est faible.

On s'approchant de la vitesse de synchronisme le courant diminue pour s'annuler on l'atteignant. Cette dernière est proportionnelle à la fréquence de la tension statorique ($\omega_0 = 2\pi f/p$).

II.6) Calcul des caractéristiques mécaniques

Les pertes dans le circuit électrique de la machine asynchrone sont souvent appelées pertes par glissement elles sont exprimées à travers les coordonnées mécaniques du moteur représentant la différence entre la puissance électromagnétique et la puissance mécanique de la machine asynchrone comme suit :

$$\Delta P_2 = C \cdot g \cdot \omega_0$$

Les pertes joules dans le circuit rotorique peuvent être exprimées à travers les grandeurs électriques comme suit :

$$\Delta P_2 = 3I_2'^2 R_2'$$

Mettons à égalités les expressions :

$$C = \frac{3 \cdot U_{ph}^2 R_2'}{g_n \omega_{n0} \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{g_n} \right)^2 + X_{cc}^2 \right]} \quad (\text{II.14})$$

On variant la fréquence on obtient l'expression suivante :

$$C = \frac{3 \cdot U_p^2(f) R_2'}{g(f) \omega_{n0} \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{g(f)} \right)^2 + X_{cc}^2(f) \right]} \quad (\text{II.15})$$

Après transformation on obtient :

$$C = \frac{3 \cdot (U_{ph.n} \cdot \sqrt{f^*})^2 \cdot \frac{R_2' \cdot \omega_{on} \cdot f^*}{\omega_{0H} \cdot f^* - \omega}}{\omega_{on} \cdot f^* \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2' \cdot \omega_{on} \cdot f^*}{\omega_{on} \cdot f^* - \omega} \right)^2 + (X_{cc} \cdot f^*)^2 \right]} \quad (\text{II.16})$$

Le travail effectuer dans cette partie, est basé sur la variation de la vitesse de rotation du moteur asynchrone allant de 0 jusqu'à la vitesse de synchronisme, et cela pour différentes valeurs de fréquences des tensions statoriques (50 Hz, 40 Hz, 30 Hz, 20 Hz et 10Hz).

Le tableau II.4 regroupe les différentes valeurs de couple électromagnétique (expression II.16) pour les différentes valeurs de fréquences et vitesse de rotation du moteur.

50	ω , rd/s	0	15	30	45	60	75	85	95	104
Hz	C,N.m	37.72	43.59	51.56	62.91	80.14	107.80	133.37	142.8	25.33
40	ω , r d/s	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Hz	C,N.m	57.31	64.14	72.97	84.44	99.80	120.85	149.25	176.51	108.54
30	ω , rd/s	0	10	20	30	40	45	50	55	60
Hz	C,N.m	95.66	110.7	130.79	158.2	194.6	213.9	225.6	207.82	112.62
20	ω , rd/s	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Hz	C,N.m	183.2	199.93	220	243	268.5	293.4	306.9	272.3	115.72
10	ω , rd/s	0	4	8	10	12	14	16	18	20
Hz	C,N.m	406.24	435.95	460.29	465.13	459.74	436.82	384.66	286.11	117.67

Tableau. II.4) : Valeurs de couple et vitesse de rotation pour différentes fréquences

Ø Représentation des caractéristiques mécaniques

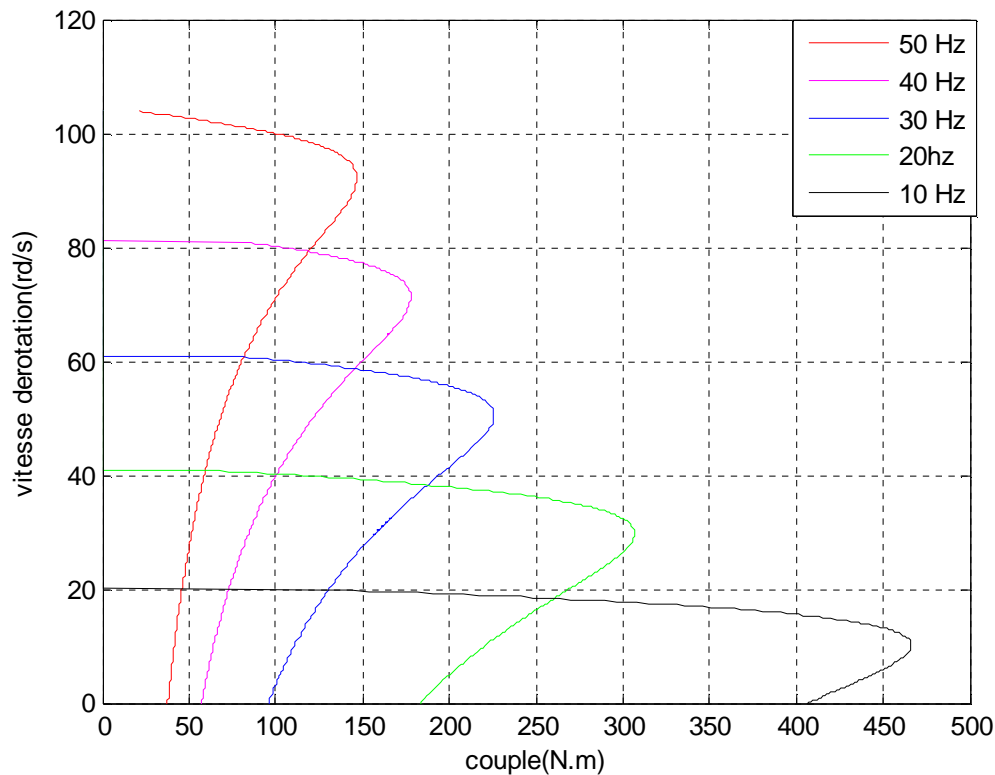


Figure II.7) : Les caractéristiques mécaniques

Ø Interprétation des courbes

La figure (II.7) illustre les caractéristiques mécaniques de la machine asynchrone pour différentes fréquences.

La machine asynchrone développe un couple variant entre zéro et le couple de court circuit, entre ces deux limites, la courbe donnant le couple en fonction de la vitesse est essentiellement une ligne droite. La rigidité de cette dernière dépend essentiellement de la valeur de la résistance rotorique. Plus la résistance est grande, plus la rigidité est faible.

A vitesse de rotation nulle, le moteur développe un couple appelé couple de démarrage, il est inversement proportionnelle à la fréquence de la tension statorique.

L'augmentation progressive de la vitesse de rotation du moteur provoque une augmentation du couple pour atteindre le couple maximal, au delà de cette valeur le couple

diminue pour s'annuler à la vitesse de synchronisme. Cette vitesse de synchronisme proportionnelle à la fréquence.

II.7) Caractéristique énergétique de l'EE

Le bilan des puissances décline toutes les puissances, depuis la puissance absorbée d'origine électrique jusqu'à la puissance utile de nature mécanique. Le bilan est résumé à l'aide du schéma suivant.

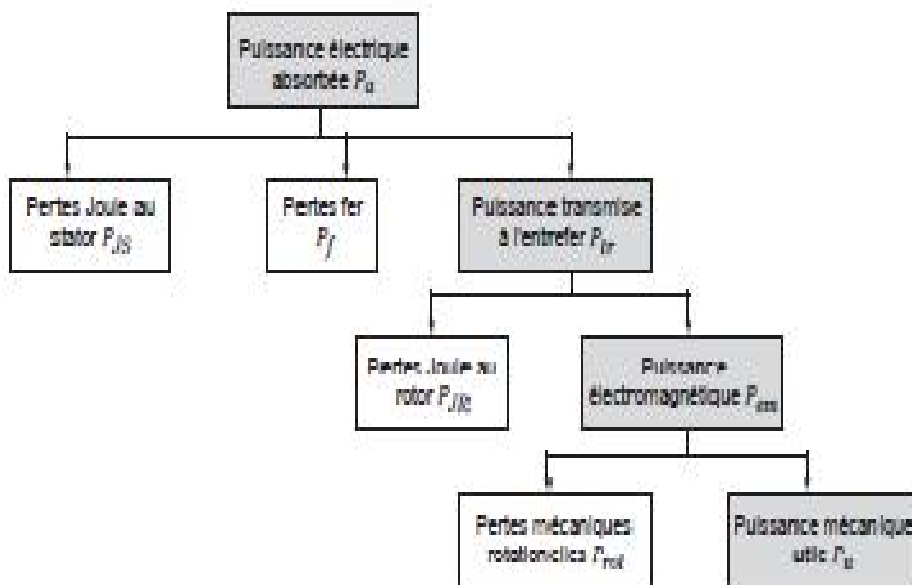


Figure. II.8) : Bilan de puissances d'un moteur asynchrone

II.7.1) Evaluation des pertes

Les pertes dans la machine asynchrone peuvent être divisées en trois parties:

- Les pertes par effet Joule ou pertes dans le cuivre ;
- Les pertes dans le fer (Hystérésis, courant de Foucault) ;
- Les pertes par frottement et ventilation, qui sont relativement faibles par rapport aux autres pertes.

1. Pertes joules

Ce sont les pertes par effet joule dans les enroulements, et plus généralement dans toutes les parties conductrices d'une machine traversée par un courant. Ces pertes sont proportionnelles au carré du courant.

2. Pertes magnétiques

Elles sont appelées aussi pertes dans le fer du fait que les matériaux utilisés par ce circuit sont, habituellement, à base de fer [29].

Les principales sources des pertes fer sont les pertes par hystérésis et courants de Foucault.

- Pertes fer au stator p_{fs}
- Pertes fer au rotor : Ces pertes sont souvent négligées devant les autres, la fréquence des courants étant très faible.

3. Pertes Mécaniques

Ces pertes prennent en compte tous les frottements dus à la rotation de la partie mobile de la machine.

On écrit :

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{const}} + \Delta P_{\text{var}} \quad (\text{II.19})$$

D'où :

$$\Delta P_{\text{const}} = 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot R_1 + 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \quad (\text{II.20})$$

$$\Delta P_{\text{variab}} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot R_2' + K_{\text{méc}} \cdot P_n \cdot \frac{1 - \frac{\omega_0 \cdot f^* - \omega}{\omega_0 \cdot f^*}}{1 - g_n} + \Delta P_{\text{fs}} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$\Delta P_{\text{fs}} = K \cdot V^2 \cdot f^* = \Delta P_{\text{fsn}} \cdot f^* \quad (\text{II.22})$$

$$\Delta P_{\text{méc}} = \Delta P_{\text{méc.n}} \cdot \left(\frac{W}{W_n} \right)^2 = k_{\text{méc}} \cdot P_n \cdot \frac{1 - g(f)}{1 - g_n} = 0,015 \cdot 7500 \cdot \frac{1 - \frac{W_0 \cdot f^* - W}{W_0 \cdot f^*}}{1 - g_n} \quad (\text{II.23})$$

$$\Delta P_{\text{lm}} = 3 \cdot I_m^2 \cdot R_1 \quad (\text{II.24})$$

$$\Delta P_{jr} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot R_2 = C \cdot \omega_0 \cdot g(f) \quad (\text{II.26})$$

Avec :

$\Delta P_{méc}$: Pertes mécaniques ;

$\Delta P_{1\mu}$: Pertes dans le cuivre du stator dues au courant d'aimantation ;

ΔP_{fs} : Perte fer au stator ;

ΔP_{js} : Perte joule au stator ;

ΔP_{jr} : Perte joule au rotor ;

ΔP_{variab} : Présente les pertes variables qui sont liées à la fréquence du réseau.

ΔP_{const} : Présente les pertes constantes.

II.7.2) Rendement de l'entraînement électrique

Le rendement est un indice qui quantifie la performance de la conversion d'énergie dans la machine, il est défini par le rapport entre la puissance mécanique P_m fournie à la charge et la puissance électrique fournie au moteur P_a .

$$\eta = \frac{P_{utile}}{P_{absorbée}} = \frac{P_u}{P_u + \sum P_{pertes}} \quad (\text{II.26})$$

Avec :

$$P_u = P_m - \Delta P_{mec} \quad (\text{II.27})$$

Alors :

$$P_u = C \cdot \omega - \Delta P_{mec} \quad (\text{II.28})$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + \Delta P_{\Sigma}} \quad (\text{II.29})$$

Le travail effectuer dans cette partie, est basé sur la variation de la vitesse de rotation du moteur asynchrone allant de 0 jusqu'à la vitesse de synchronisme, et cela pour différentes valeurs de fréquences des tensions statoriques (50 Hz, 40 Hz, 30 Hz, 20 Hz et 10Hz).

Le tableau II.5 regroupe les différentes valeurs de rendement (expression II.29) pour et les différentes valeurs de fréquences et vitesse de rotation du moteur.

50	$\omega, \text{rd/s}$	0	15	30	45	60	75	85	95	104
Hz	H	0	0.11	0.26	0.39	0.51	0.68	0.79	0.87	0.81
40	$\omega, \text{rd/s}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Hz	H	0	0.10	0.20	0.33	0.45	0.54	0.66	0.78	0.86
30	$\omega, \text{rd/s}$	0	10	20	30	40	45	50	55	60
Hz	H	0	0.14	0.28	0.43	0.59	0.67	0.74	0.84	0.85
20	$\omega, \text{rd/s}$	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Hz	H	0	0.11	0.21	0.33	0.43	0.54	0.66	0.76	0.80
10	$\omega, \text{rd/s}$	0	4	8	10	12	14	16	18	20
Hz	H	0	0.17	0.42	0.44	0.55	0.62	0.69	0.77	0.78

Tableau. II.5) : Valeurs du rendement et la vitesse de rotation pour différentes fréquences

Ø Représenter des caractéristiques $\omega = f(\eta)$

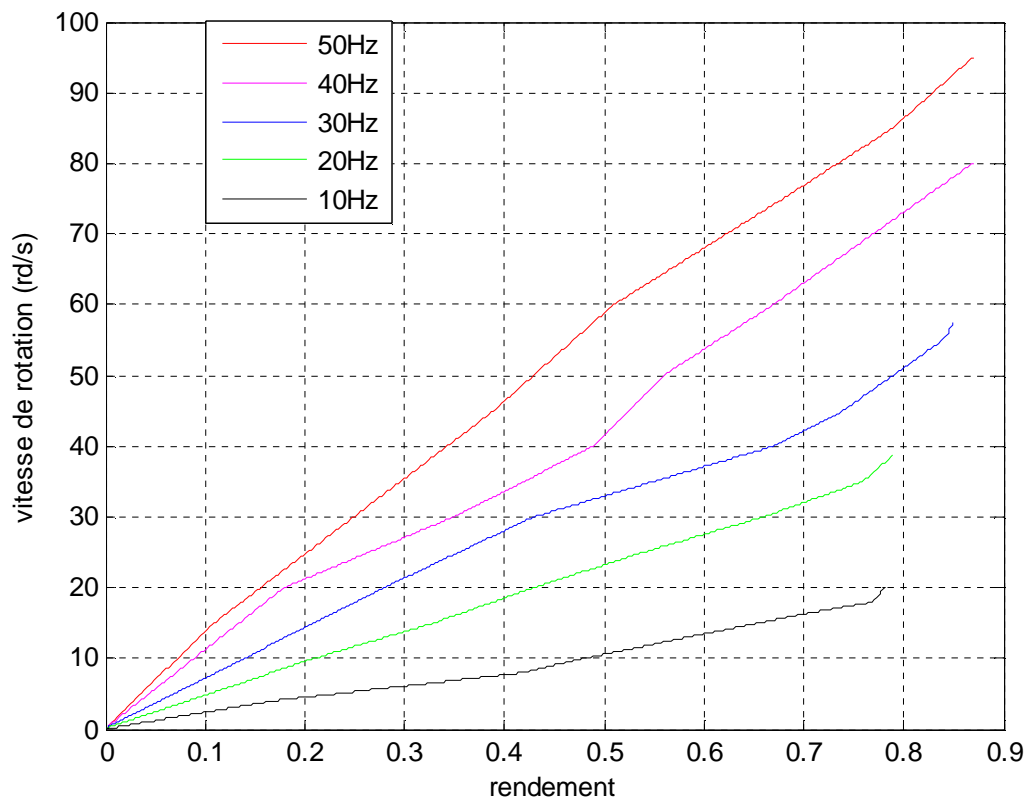


Figure II.9) : Les caractéristiques vitesses rendement pour différents fréquences

Ø Interprétation des résultats

La figure (II.9) représente les caractéristiques énergiques du moteur asynchrone pour différentes fréquences.

Comme on peut le voir, l'augmentation de la vitesse de rotation engendre une l'augmentation du rendement, cela revient essentiellement à la diminution des pertes dans la machine.

La diminution de la fréquence conduit à une augmentation du courant rotorique et par conséquence le couple moteur y compris le couple au démarrage. Cette augmentation du courant provoque l'accroissement des pertes et par voie de conséquence une dégradation du rendement et des performances du moteur.

II.8) Conclusion

La méthode analytico-empirique présentée dans ce chapitre nous a permis de construire les différentes caractéristiques électromécaniques, mécaniques et énergétique du moteur asynchrone par variation de la fréquence et de la vitesse de rotation.

Cette technique de calcul nous a permis de mieux comprendre le comportement du moteur asynchrone face à ces variations et la dégradation du rendement et par conséquent de ces performances du moteur.

III.1) Introduction

A l'origine, les entraînements à vitesse variables n'étaient possibles qu'avec des moteurs à courant continu car ils permettaient un contrôle souple du couple ainsi que de la vitesse.

L'inconvénient majeur de ces entraînements étant lié au principe de ces machines. Aujourd'hui, grâce au développement considérable de l'électronique de puissance à commutation rapide, il est possible de réaliser ces entraînements avec d'autres machines (asynchrone ou synchrone) [19].

La machine asynchrone à cage, vu sa simplicité est la plus utilisée actuellement dans les entraînements à vitesses variables. Pour réaliser ces entraînements différentes stratégies de commandes sont élaborées dont la commande scalaire.

Dans ce chapitre nous présenterons les techniques de commande de vitesse du moteur asynchrone.

Dans la première partie, nous élaborons le modèle mathématique qui permet de décrire le comportement de la machine en régime transitoire.

Dans la seconde partie, nous allons nous intéresser à la variation de la vitesse du moteur asynchrone par la commande scalaire.

III.2) Etude du système en régimes dynamiques

III.2.1) Elaboration du Modèle mathématique

Un système complet d'équation d'un régime transitoire est décrit par l'ensemble d'équations électriques, magnétiques et mécaniques couplées entre elles [27].

1. Equation du mouvement

Pour avoir un modèle complet de la machine, il est nécessaire d'introduire les paramètres mécaniques (couple, vitesse ...).

L'expression décrivant la dynamique de la partie mobile de la machine est exprimée par l'équation du mouvement suivante :

$$C - C_r = J \frac{d\omega}{dt} + f \cdot \omega \quad (\text{III.1})$$

L'équation caractéristique est :

$$T_M T_e p^2 + T_e p + 1 = 0 \quad (\text{III.2})$$

$$T_M = J \frac{w_0}{C_{max}} \quad (III.3)$$

$$T_e = \frac{1}{\Omega g_{cr}} \quad (III.4)$$

Donc :

$$J \frac{w_0}{C_{max} \cdot \Omega \cdot g_{cr}} \frac{d^2 C}{dt} + \frac{1}{\Omega g_{cr}} \frac{dC}{dt} + C = C_r \quad (III.5)$$

Avec :

T_e : Constante électromagnétique de temps (s) ;

T_M : Constante mécanique de temps (s) ;

J : Moment d'inertie sommaire (kg.m²) ;

C : Couple moteur (N.m) ;

C_r : Couple résistant ramené à l'arbre du moteur (N.m) ;

Ø Caractère du déroulement des régimes transitoires

$$T_M = J \frac{w_0}{C_{max}} = 0.098 \text{ s}$$

$$T_e = \frac{1}{\Omega g_{cr}} = 0.0265 \text{ s}$$

$$4T_e = 0.106 \text{ s}$$

$$T_M < 4 T_e \quad \text{est Vérifier}$$

On peut conclure que :

Les régimes transitoires du système doivent avoir un caractère oscillatoire.

III.3) Réglage de la vitesse du moteur asynchrone

Le pilotage de la vitesse de rotation du moteur asynchrone est essentiel pour beaucoup d'applications. Différentes techniques de pilotages existes.

1. Action sur la résistance rotorique

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

Le couple maximal est constant (indépendant de la résistance rotorique), par contre d'après l'équation (II.6) le glissement augmente en fonction de la croissance de la résistance rotorique.

Cette technique est généralement utilisée pour le démarrage.

2. Action sur le nombre de paires de pôles

C'est une solution simple pour obtenir un moteur à deux vitesses. L'exemple le plus connu est le couplage Dahlander. Deux bobines successives peuvent créer quatre pôles si elles sont montées en série, et deux pôles si elles sont montées en parallèle [31].

Comme la vitesse de rotation du moteur est inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles, sa valeur varie dans un rapport de deux lors du changement de connexion.

Le moteur possède une petite vitesse ω_g et une grande vitesse ω tel que :

$$\omega = \omega_g \cdot 2$$

3. Action sur le glissement

L'utilisation de résistances rotoriques permet un réglage de la vitesse au-dessous de la vitesse nominale mais avec un rendement déplorable. On essaiera donc de récupérer cette énergie transmise au rotor : c'est la cascade hypo synchrone réservée à la très forte puissance pour des machines à rotor bobiné [31].

4. Action sur la tension statorique

Le couple électromagnétique de la machine asynchrone est proportionnel au carré de la tension d'alimentation statorique. Il est donc possible d'envisager un ajustement de la vitesse au-dessous de la vitesse nominale en modifiant la tension d'alimentation statorique.

La plage de réglage obtenue est assez limitée. Cette méthode est peu performante et elle ne convient que pour des charges présentant un couple résistant croissant avec la vitesse (pompage, ventilation..).

La variation de la tension peut être obtenue par un autotransformateur à rapport de transformation réglable.

Les tensions obtenues sont pratiquement sinusoïdales, mais le coût et l'encombrement de l'autotransformateur rendent cette solution peu intéressante [15].

5. Action sur la fréquence de la tension d'alimentation statorique

Quelque soit la charge, la vitesse d'un moteur dépend fortement de la fréquence du réseau d'alimentation.

Le réglage de la vitesse d'un moteur asynchrone à cage n'est réalisable dans de bonnes conditions qu'en faisant varier la fréquence des tensions appliquées. Cette solution exige des convertisseurs électroniques et une commande élaborés, ce qui a limité son emploi pendant longtemps.

Les progrès récents dans le domaine de l'électronique de puissance et surtout l'électronique de commande font que ce procédé est devenu une excellente solution pour la plupart des entraînements à vitesse variable [30].

III.4) Autopilotage de la machine asynchrone par variation de la fréquence

Il a fallu attendre l'avènement des convertisseurs statiques, dans les années 1970, pour réaliser des alimentations à fréquence variable opérationnelles.

Au préalable, des essais avaient permis de constater l'intérêt de l'alimentation à fréquence variable pour les machines synchrones et asynchrones; mais les dispositifs pour obtenir cette alimentation, étaient trop complexes pour être opérationnels [32].

Il existe autant de commandes possibles que d'association « réseau-convertisseur-moteur-charge » différentes. Dans chaque cas, de nombreux montages permettent des performances très différentes.

Pour maîtriser le couple des moteurs à courant alternatifs et pour éviter que l'ensemble « réseau-convertisseur-moteur-charge » n'oscille spontanément plusieurs contrôles existent.

Les machines électriques alternatives étant multivariées, non linéaires, à paramètres non constants et souvent non mesurables, les contrôles en boucle fermée et l'ensemble de la commande se font en électronique en faisant appel aux outils de l'automatique.

Les commandes les plus fréquentes sont la commande scalaire et la commande vectorielle.

III.4.1) Commande vectorielle

La commande vectorielle est un terme générique désignant l'ensemble des commandes tenant compte en temps réel des équations du système de commande. Cette appellation vient du fait que les relations finales sont vectorielles à la différence des commandes scalaires. Les relations ainsi obtenues sont plus complexes que celles des commandes scalaires [32].

La grande différence entre une commande scalaire et une commande vectorielle vient du modèle représentant la machine que l'on veut commander.

Un modèle scalaire n'utilisant qu'une seule phase, ne permet pas de connaître le module et l'orientation du champ magnétique [34].

Afin que ces derniers soient exploités, les commandes vectorielles font appel au modèle vectoriel établi en se reposant sur les relations de base des trois enroulements de la machine asynchrone. Et pour simplifier le calcul, on utilise une transformation mathématique qui permet de ramener ce modèle triphasé à un modèle biphasé [32].

III.4.2) Commande scalaire

La commande scalaire, la plus ancienne, et la plus utilisée dans les entraînements électriques à vitesse variable. De nombreux variateurs équipés de ce mode de contrôle sont utilisés, en particulier pour des applications industrielles de pompage, climatisation, ventilation, forage...etc. [30].

III.5) Commande scalaire

III.5.1) Principe de la commande scalaire

Le principe de cette commande est fondé sur la modélisation en régime permanent de la machine asynchrone. En cherchant à maximiser les capacités du couple, le flux doit être maintenu, dans une large plage, égal à sa valeur nominale correspondant au maintien du rapport tension fréquence V/f constant.

III.5.2) Différentes techniques de la commande scalaire

Plusieurs commandes scalaires existent selon qu'on agit sur le courant ou la tension. Elles dépendent surtout de la topologie de l'actionneur utilisé (onduleur de tension ou de courant).

III.5.2.2) Commande par tension

L'expression du couple électromagnétique est :

$$C = \frac{3.U_p^2 R'_{2}}{g_n \omega_0 \left[\left(R_1 + \frac{R'_{2}}{g_n} \right)^2 + X_{cc}^2 \right]} \quad (\text{III.6})$$

L'expression du couple maximal est :

(III.7)

Le couple moteur est proportionnel à la tension d'alimentation et inversement proportionnel à la fréquence.

Pour maintenir le couple maximal fourni par le moteur asynchrone constant il faut donc que le rapport tension/fréquence et donc U/f reste constant.

Ø Principe de la commande scalaire en tension

Si la fréquence des courants statoriques varie, alors la vitesse ω_0 du champ tournant et la vitesse de rotation varient comme suit: $[\omega_0 = 2.\pi. f / p ; \omega = \omega_0 (1-g)]$.

Le variateur devra donc faire varier simultanément la valeur efficace et la fréquence de la tension statorique pour que ω varie sans modification des performances mécaniques de la machine.

Pour garder ses performances en couple, le variateur doit satisfaire la condition $U/f = \text{Cont.}$

Le variateur fait varier la fréquence et la tension proportionnellement tant que la tension est inférieure à la tension nominale, puis maintient celle-ci constante alors que f continue d'augmenter jusqu'à sa valeur maximale [33].

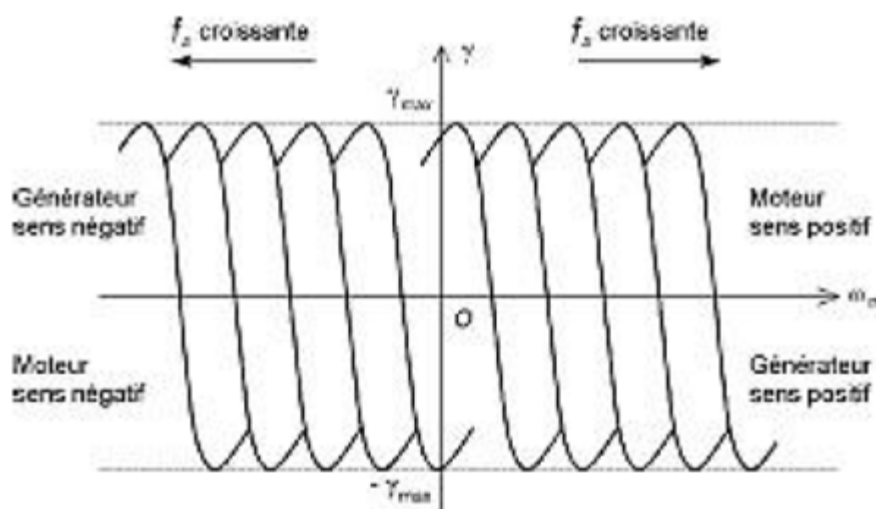


Figure .III.1 : Réseau des caractéristiques mécaniques paramétré par la fréquence statorique [15]

Les différentes courbes se traduisent l'une de l'autre par translation le long de l'axe des vitesses.

Ø Différentes structure de la commande scalaire en tension

Les structures de commande scalaire en tension sont en nombre de trois.

1. Commande scalaire avec contrôle de la fréquence statorique

Le schéma de principe de cette commande est représenté par la figure III.2

La machine asynchrone est alimentée par un onduleur à commande forcée. Le dispositif de commande fixe la fréquence à partir de l'erreur de vitesse et la tension à partir d'une loi en $U/f = \text{Cont}$.

Une seconde boucle interne assure la limitation de courant.

L'onduleur peut effectué à la fois le réglage de fréquence et de tension .Dans ce cas le redresseur est un pont en diodes [33,32].

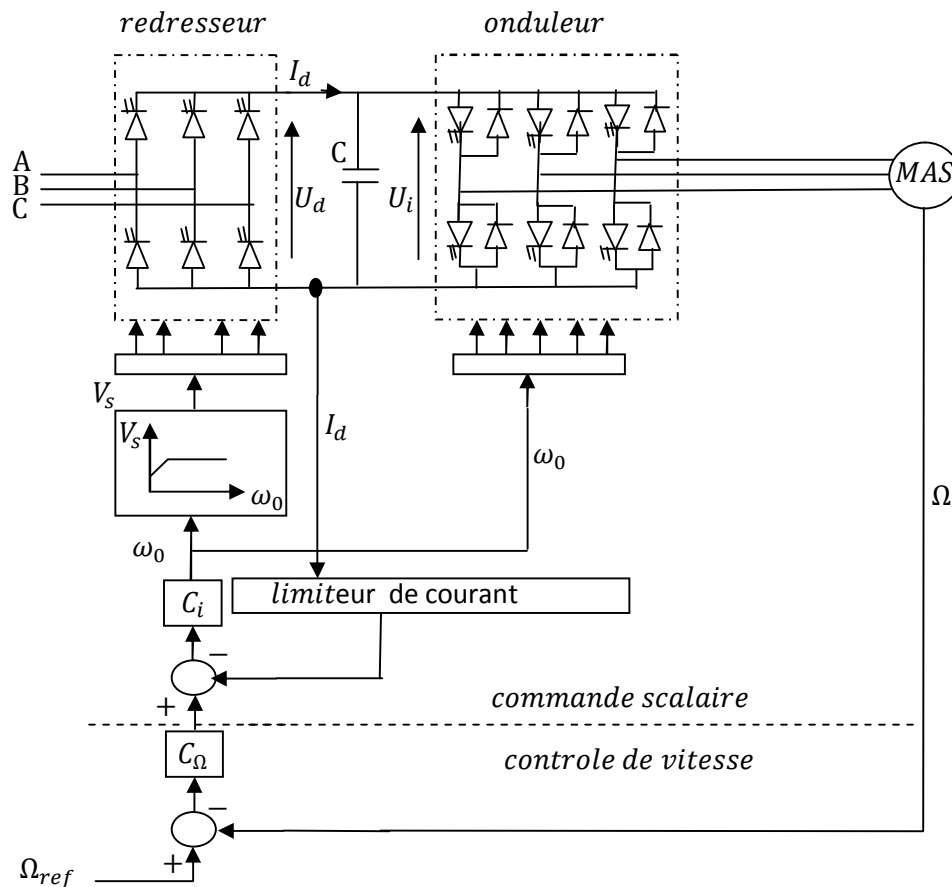


Figure III.2) : Contrôle scalaire de la tension [33]

2. Commande scalaire avec autopilotage et contrôle de fréquence rotorique

La variation de vitesse est obtenue par une variation de ω_0 directement liée au couple comme le montrent les équations développées (III.6).

Il s'agit donc d'un contrôle indirect du couple. Le régulateur C_Ω élabore ω à partir de l'erreur de vitesse.

La fréquence statorique est obtenue par la loi d'autopilotage $\omega_0 = \omega_m + \omega$. Son réglage est confié à l'onduleur. L'autopilotage nécessite une mesure précise de vitesse.

La tension est donnée par la loi en « V/f ». Elle est fixée soit par le pont redresseur (dans le cas d'un redresseur commandé) soit par l'onduleur (dans le cas d'un pont redresseur non commandé) [33].

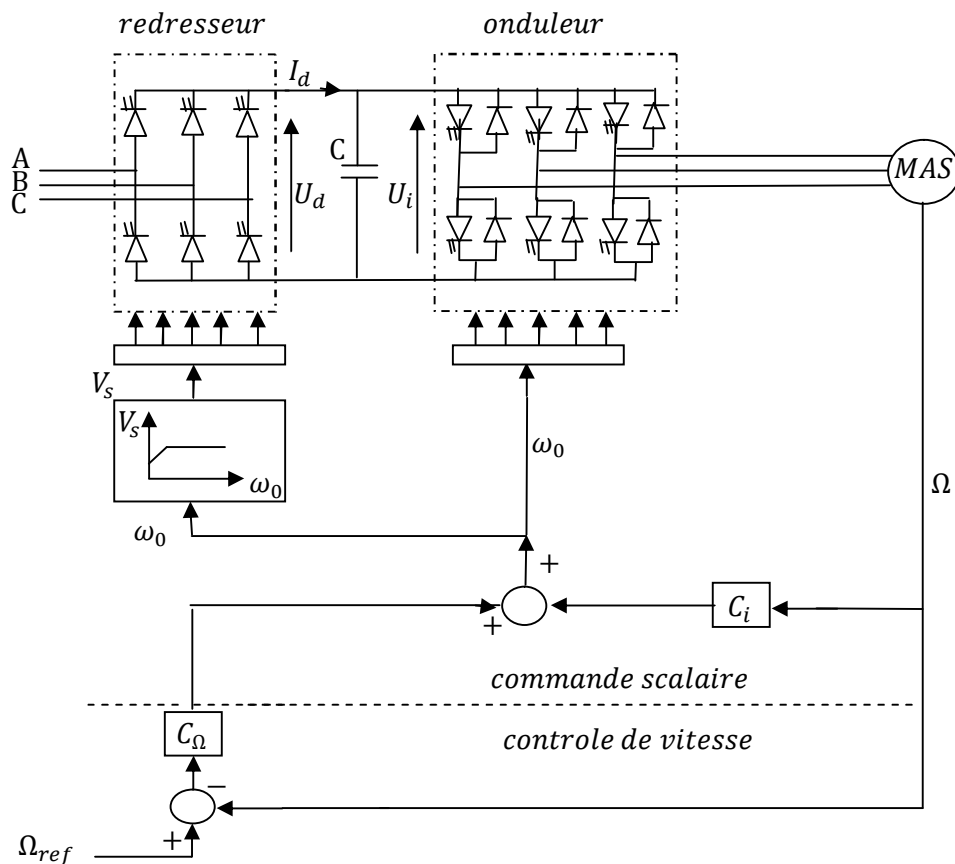


Figure .III.3) : Commande scalaire avec contrôle de la de la fréquence rotorique [33].

Lorsque l'ensemble variateur – machine fonctionne en génératrice (phase de récupération, freinage), un dispositif doit assurer la réversibilité de la source.

On utilise alors une résistance ou un dispositif de récupération monté en parallèle sur le condensateur ou un pont de Graëtz réversible en courant dans le cas des dispositifs de grandes puissances.

Si la source continue est une batterie (en traction électrique automobile...), ce problème est automatiquement résolu.

Cette commande nécessite la connaissance des paramètres de la machine pour obtenir un calage optimal des régulateurs.

3. Commande scalaire avec autopilotage et régulation de flux et de couple

Dans le cas précédent, une variation des paramètres de la machine en cours de fonctionnement provoque une dérive de flux. Une augmentation de flux peut entraîner la saturation de la machine. Un affaiblissement du flux est compensé par un accroissement du glissement (pour un couple donné). Le couple maximum disponible diminue. Un contrôle direct du flux et de couple évite cela.

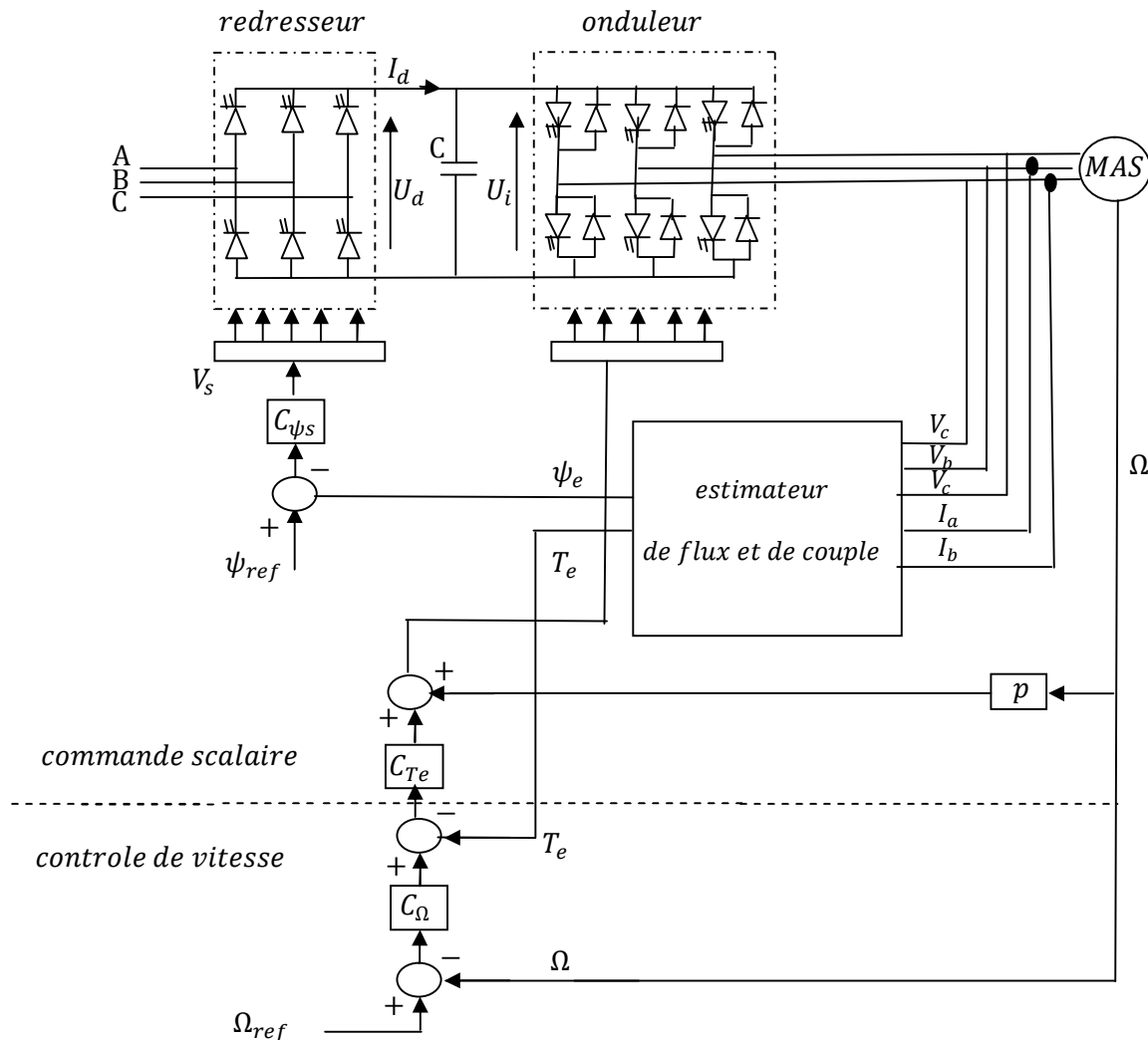


Figure .III.4) : Commande scalaire avec régulation de flux et de couple [33]

III.3.2.1) Commande par courant

La différence avec la commande précédente, c'est que c'est un onduleur (un commutateur) de courant qui est utilisé.

On impose directement les courants dans les phases de la machine .La fréquence fondamentale est calculée de la même manière que la précédente.

La valeur du courant de plateau (courant continu) égale à une constante près à de la valeur efficace du courant commandé. Elle est imposée par régulation à l'aide d'un pont redresseur contrôlé.

Le dispositif est plus complexe qu'un contrôle scalaire de tension.

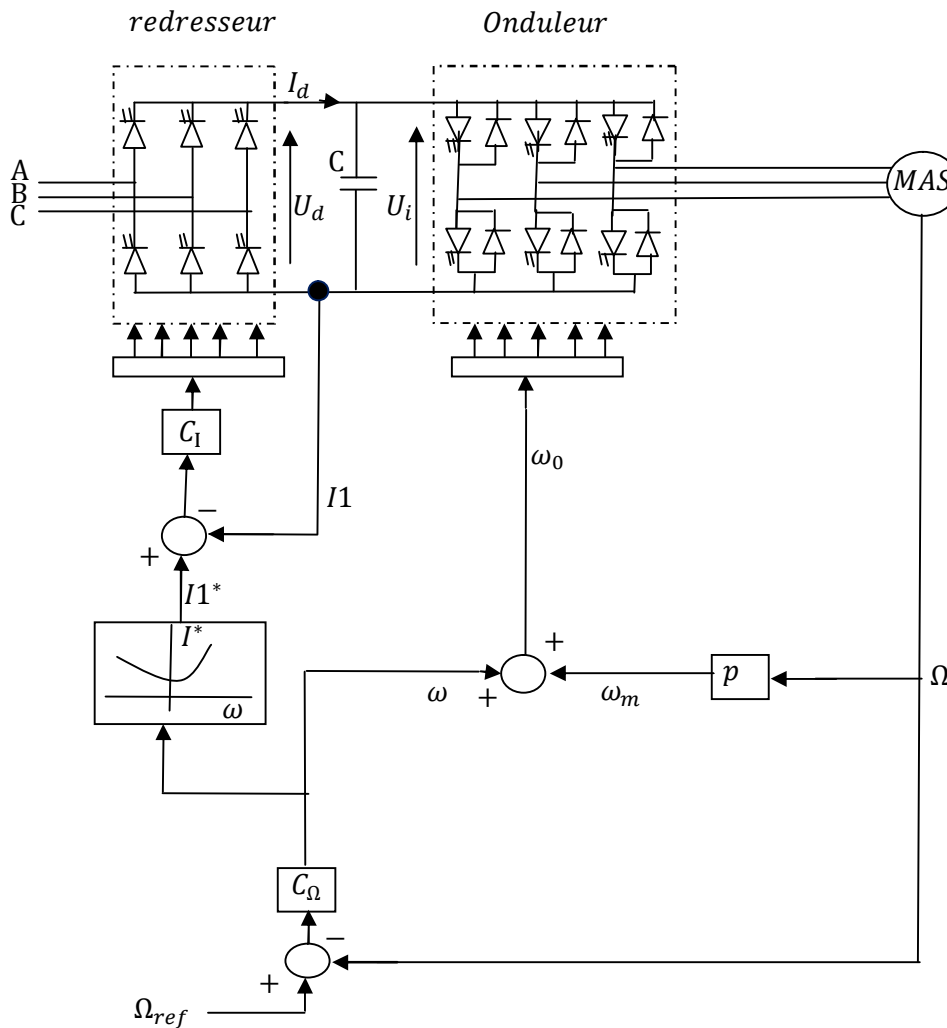


Figure. III.6) : Autopilotage et commande scalaire avec alimentation en courant [33]

La machine est alimentée à travers un onduleur contrôlé en courant. Connaissant l'amplitude du courant statorique I_s^* et les courants i_{sa}^* , i_{sb}^* et i_{sc}^* sont issues des relations (III.8).

$$\begin{cases} i_{1a}^* = \sqrt{2}I_1^* \sin(w_s^* t) \\ i_{1b}^* = \sqrt{2}I_1^* \sin(w_s^* t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_{1c}^* = \sqrt{2}I_1^* \sin(w_s^* t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (III.8)$$

Après la génération des courants, ils sont comparés aux courants statoriques mesurés de la machine, la sortie de cette comparaison est l'entrée des régulateurs à hystérésis, ces derniers appliquent les impulsions de commande à l'onduleur.

1. Constitution de la commande scalaire

La commande scalaire comprend un correcteur, généralement de type PI, permet d'estimer la pulsation rotorique. On varie ω jusqu'à ce que la vitesse mesurée égale la vitesse de référence.

Pour maintenir la constance du flux statorique, on utilise un générateur de fonction qui à partir de ω_0 définit la valeur des courants qu'on demande à l'onduleur de générer.

On impose directement des courants dans les phases de la machine. La valeur du courant de plateau (courant continu) égale a une constante pré à la valeur efficace du courant statorique.

Dans la technique de régulation de courant, les références triphasées des courants sont comparées aux valeurs instantanées des courants de la machine, l'erreur est l'entrée des régulateurs et du bloc logique de la MLI. L'amplitude des courants de référence est obtenue à partir du générateur de fonction.

III.6) Extension de la plage de vitesse

Dans un fonctionnement à flux constant, il est impossible d'augmenter la vitesse lorsque la valeur efficace de la tension statorique a atteint sa valeur nominale. Pour dépasser cette limite, il faut diminuer le flux, mais le moment maximal du couple décroît : c'est le fonctionnement en survitesse.

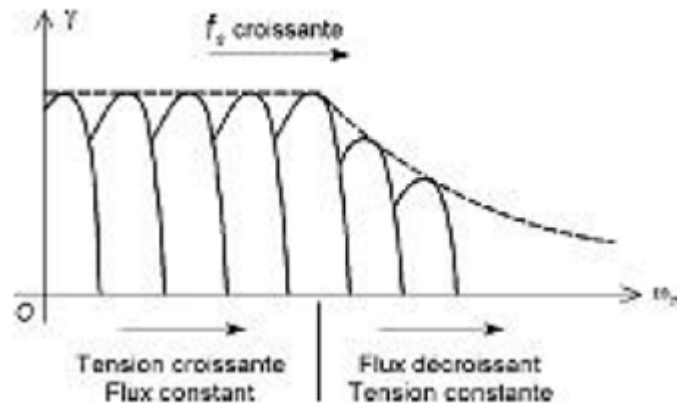


Figure.III.7) : Fonctionnement en survitesse

III.7) Conclusion

Le modèle mathématique de la machine, nous a permis d'avoir une meilleure idée et de bien interpréter le comportement du moteur asynchrone dans les régimes transitoires. L'élaboration et l'étude de la commande scalaire, qui occupe une place non négligeable nous a permis de comprendre au mieux son principe de fonctionnement et les paramètres qui entrent dans sa construction, ces informations nous ont été très utiles pour la construction du schéma de simulation qui nous a permis de présenter l'évolution de quelques variables fondamentales de la machine asynchrone qui sauront le principe de notre prochain chapitre.

III.1) Introduction

A l'origine, les entraînements à vitesse variables n'étaient possibles qu'avec des moteurs à courant continu car ils permettaient un contrôle souple du couple ainsi que de la vitesse.

L'inconvénient majeur de ces entraînements étant lié au principe de ces machines. Aujourd'hui, grâce au développement considérable de l'électronique de puissance à commutation rapide, il est possible de réaliser ces entraînements avec d'autres machines (asynchrone ou synchrone) [19].

La machine asynchrone à cage, vu sa simplicité est la plus utilisée actuellement dans les entraînements à vitesses variables. Pour réaliser ces entraînements différentes stratégies de commandes sont élaborées dont la commande scalaire.

Dans ce chapitre nous présenterons les techniques de commande de vitesse du moteur asynchrone.

Dans la première partie, nous élaborons le modèle mathématique qui permet de décrire le comportement de la machine en régime transitoire.

Dans la deuxième partie, nous allons nous intéresser à la variation de la vitesse du moteur asynchrone par la commande scalaire.

III.2) Etude du système en régimes dynamiques

III.2.1) Elaboration du Modèle mathématique

Un système complet d'équation d'un régime transitoire est décrit par l'ensemble d'équations électriques, magnétiques et mécaniques couplées entre elles [27].

1. Equation du mouvement

Pour avoir un modèle complet de la machine, il est nécessaire d'introduire les paramètres mécaniques (couple, vitesse ...).

L'expression décrivant la dynamique de la partie mobile de la machine est exprimée par l'équation du mouvement suivante :

$$C - C_r = J \frac{d\omega}{dt} + f \cdot \omega \quad (\text{III.1})$$

L'équation caractéristique est :

$$T_M T_e p^2 + T_e p + 1 = 0 \quad (\text{III.2})$$

$$T_M = J \frac{w_0}{C_{max}} \quad (III.3)$$

$$T_e = \frac{1}{\Omega g_{cr}} \quad (III.4)$$

Donc :

$$J \frac{w_0}{C_{max} \cdot \Omega \cdot g_{cr}} \frac{d^2 C}{dt} + \frac{1}{\Omega g_{cr}} \frac{dC}{dt} + C = C_r \quad (III.5)$$

Avec :

T_e : Constante électromagnétique de temps (s) ;

T_M : Constante mécanique de temps (s) ;

J : Moment d'inertie sommaire (kg.m²) ;

C : Couple moteur (N.m) ;

C_r : Couple résistant ramené à l'arbre du moteur (N.m) ;

Ø Caractère du déroulement des régimes transitoires

$$T_M = J \frac{w_0}{C_{max}} = 0.098 \text{ s}$$

$$T_e = \frac{1}{\Omega g_{cr}} = 0.0265 \text{ s}$$

$$4T_e = 0.106 \text{ s}$$

$$T_M < 4 T_e \quad \text{est Vérifiée}$$

On peut conclure que :

Les régimes transitoires du système doivent avoir un caractère oscillatoire.

III.3) Réglage de la vitesse du moteur asynchrone

Le pilotage de la vitesse de rotation du moteur asynchrone est essentiel pour beaucoup d'applications. Différentes techniques de pilotages existent.

1. Action sur la résistance rotorique

L'insertion d'un rhéostat au circuit rotorique nous permet de varier celui-ci. Ceci entraîne une variation de vitesse, cette technique de pilotage est possible lorsqu'il s'agit des moteurs à bagues.

Le couple maximale est constant (indépendant de la résistance rotorique), par contre d'après l'équation (II.6) le glissement augmente en fonction de la croissance de la résistance rotorique.

Cette technique est généralement utilisée pour le démarrage.

2. Action sur le nombre de paires de pôles

C'est une solution simple pour obtenir un moteur à deux vitesses. L'exemple le plus connu est le couplage Dahlander. Deux bobines successives peuvent créer quatre pôles si elles sont montées en série, et deux pôles si elles sont montées en parallèle [31].

Comme la vitesse de rotation du moteur est inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles, sa valeur varie dans un rapport de deux lors du changement de connexion.

Le moteur possède une petite vitesse ω_g et une grande vitesse ω tel que :

$$\omega = \omega_g \cdot 2$$

3. Action sur le glissement

L'utilisation de résistances rotorique permet un réglage de la vitesse au dessous de la vitesse nominale mais avec un rendement déplorable. On essaiera donc de récupérer cette énergie transmise au rotor : c'est la cascade hypo synchrone réservée à la très forte puissance pour des machines à rotor bobiné [31].

4. Action sur la tension statorique

Le couple électromagnétique de la machine asynchrone est proportionnel au carré de la tension d'alimentation statorique. Il est donc possible d'envisager un ajustement de la vitesse au-dessous de la vitesse nominale en modifiant la tension d'alimentation statorique.

La plage de réglage obtenue est assez limitée. Cette méthode est peu performante et elle ne convient que pour des charges présentant un couple résistant croissant avec la vitesse (pompage, ventilation..).

La variation de la tension peut être obtenue par un autotransformateur à rapport de transformation réglable.

Les tensions obtenues sont pratiquement sinusoïdales, mais le coût et l'encombrement de l'autotransformateur rendent cette solution peu intéressante [15].

5. Action sur la fréquence de la tension d'alimentation statorique

Quelque soit la charge, la vitesse d'un moteur dépend fortement de la fréquence du réseau d'alimentation.

Le réglage de la vitesse d'un moteur asynchrone à cage n'est réalisable dans de bonnes conditions qu'en faisant varier la fréquence des tensions appliquées. Cette solution exige des convertisseurs électroniques et une commande élaborés, ce qui a limité son emploi pendant longtemps.

Les progrès récents dans le domaine de l'électronique de puissance et surtout l'électronique de commande font que ce procédé est devenu une excellente solution pour la plupart des entraînements à vitesse variable [30].

III.4) Autopilotage de la machine asynchrone par variation de la fréquence

Il a fallu attendre l'avènement des convertisseurs statiques, dans les années 1970, pour réaliser des alimentations à fréquence variable opérationnelles.

Au préalable, des essais avaient permis de constater l'intérêt de l'alimentation à fréquence variable pour les machines synchrones et asynchrones; mais les dispositifs pour obtenir cette alimentation, étaient trop complexes pour être opérationnels [32].

Il existe autant de commandes possibles que d'association « réseau-convertisseur-moteur-charge » différentes. Dans chaque cas, de nombreux montages permettent des performances très différentes.

Pour maîtriser le couple des moteurs à courant alternatifs et pour éviter que l'ensemble « réseau-convertisseur-moteur-charge » n'oscille spontanément plusieurs contrôles existent.

Les machines électriques alternatives étant multivariables, non linéaires, à paramètres non constants et souvent non mesurables, les contrôles en boucle fermée et l'ensemble de la commande se font en électronique en faisant appel aux outils de l'automatique.

Les commandes les plus fréquentes sont la commande scalaire et la commande vectorielle.

III.4.1) Commande vectorielle

La commande vectorielle est un terme générique désignant l'ensemble des commandes tenant compte en temps réel des équations du système de commande. Cette appellation vient du fait que les relations finales sont vectorielles à la différence des commandes scalaires. Les relations ainsi obtenues sont plus complexes que celles des commandes scalaires [32].

La grande différence entre une commande scalaire et une commande vectorielle vient du modèle représentant la machine que l'on veut commander.

Un modèle scalaire n'utilisant qu'une seule phase, ne permet pas de connaître le module et l'orientation du champ magnétique [34].

Afin que ces derniers soient exploités, les commandes vectorielles font appel au modèle vectoriel établi en se reposant sur les relations de base des trois enroulements de la machine asynchrone. Et pour simplifier le calcul, on utilise une transformation mathématique qui permet de ramener ce modèle triphasé à un modèle biphasé [32].

III.4.2) Commande scalaire

La commande scalaire, la plus ancienne, et la plus utilisée dans les entraînements électriques à vitesse variable. De nombreux variateurs équipés de ce mode de contrôle sont utilisés, en particulier pour des applications industrielles de pompage, climatisation, ventilation, forage...etc. [30].

III.5) Commande scalaire

III.5.1) Principe de la commande scalaire

Le principe de cette commande est fondé sur la modélisation en régime permanent de la machine asynchrone. En cherchant à maximiser les capacités du couple, le flux doit être maintenu, dans une large plage, égal à sa valeur nominale correspondant au maintien du rapport tension fréquence V/f constant.

III.5.2) Différentes techniques de la commande scalaire

Plusieurs commandes scalaires existent selon qu'on agit sur le courant ou la tension. Elles dépendent surtout de la topologie de l'actionneur utilisé (onduleur de tension ou de courant).

III.5.2.2) Commande par tension

L'expression du couple électromagnétique est :

$$C = \frac{3.U_p^2 R'_{2}}{g_n \omega_0 \left[\left(R_1 + \frac{R'_{2}}{g_n} \right)^2 + X_{cc}^2 \right]} \quad (\text{III.6})$$

Le couple moteur est proportionnel à la tension d'alimentation et inversement proportionnel à la fréquence.

Pour maintenir le couple maximal fourni par le moteur asynchrone constant il faut donc que le rapport tension/fréquence et donc U/f reste constant.

Ø Principe de la commande scalaire en tension

Si la fréquence f des courants statoriques varie, alors la vitesse ω_0 du champ tournant et la vitesse de rotation ω varient comme suit : $[\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f/p \quad \omega = \omega_0 (1-g)]$.

Le variateur devra donc faire varier simultanément la valeur efficace et la fréquence de la tension statorique pour que ω varie sans modification des performances mécaniques de la machine.

Pour garder ses performances en couple, le variateur doit satisfaire la condition $U/f = \text{Cont.}$

Le variateur fait varier la fréquence et la tension proportionnellement tant que la tension est inférieure à la tension nominale, puis maintient celle-ci constante alors que f continue d'augmenter jusqu'à sa valeur maximale [33].

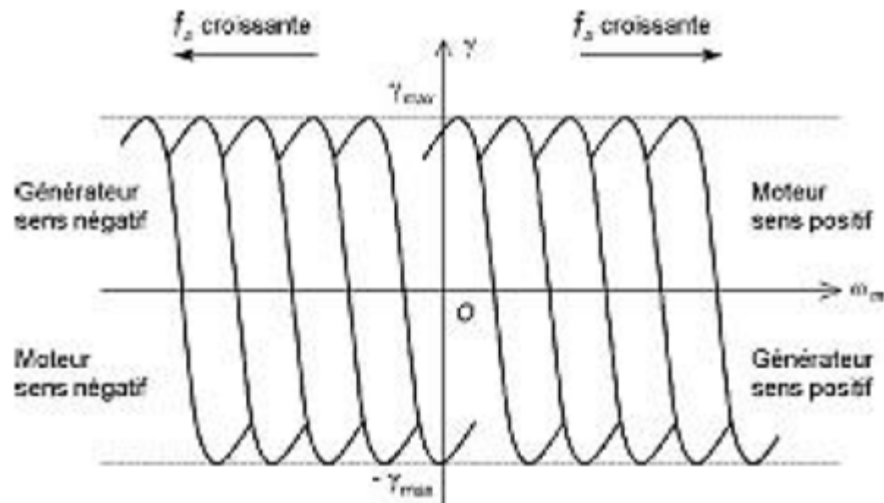


Figure .III.1 : Réseau des caractéristiques mécaniques paramétré par la fréquence statorique [15]

Les différentes courbes se traduisent l'une de l'autre par translation le long de l'axe des vitesses.

Ø Différentes structure de la commande scalaire en tension

Les structures de commande scalaire en tension sont en nombre de trois.

1. Commande scalaire avec contrôle de la fréquence statorique

Le schéma de principe de cette commande est représenté par la figure III.2

La machine asynchrone est alimentée par un onduleur à commande forcée. Le dispositif de commande fixe la fréquence à partir de l'erreur de vitesse et la tension à partir d'une loi en $U/f = \text{Cont.}$

Une seconde boucle interne assure la limitation de courant.

L'onduleur peut effectuer à la fois le réglage de fréquence et de tension .Dans ce cas le redresseur est un pont en diodes [33,32].

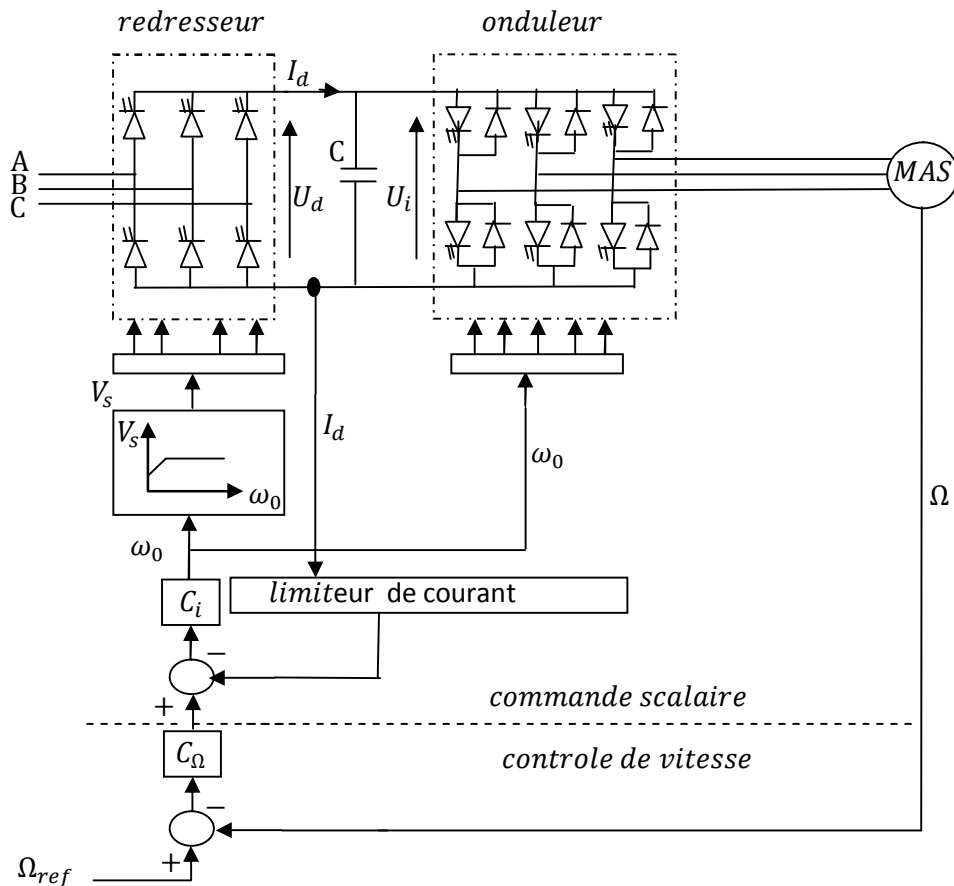


Figure III.2) : Contrôle scalaire de la tension [33]

2. Commande scalaire avec autopilotage et contrôle de fréquence rotorique

La variation de vitesse est obtenue par une variation de ω_0 directement liée au couple comme le montrent les équations développées (III.6).

Il s'agit donc d'un contrôle indirect du couple. Le régulateur C_Ω élabore ω à partir de l'erreur de vitesse.

La fréquence statorique est obtenue par la loi d'autopilotage $\omega_0 = \omega_m + \omega$. Son réglage est confié à l'onduleur. L'autopilotage nécessite une mesure précise de vitesse.

La tension est donnée par la loi en «U/f». Elle est fixée soit par le pont redresseur (dans le cas d'un redresseur commandé) soit par l'onduleur (dans le cas d'un pont redresseur non commandé) [33].

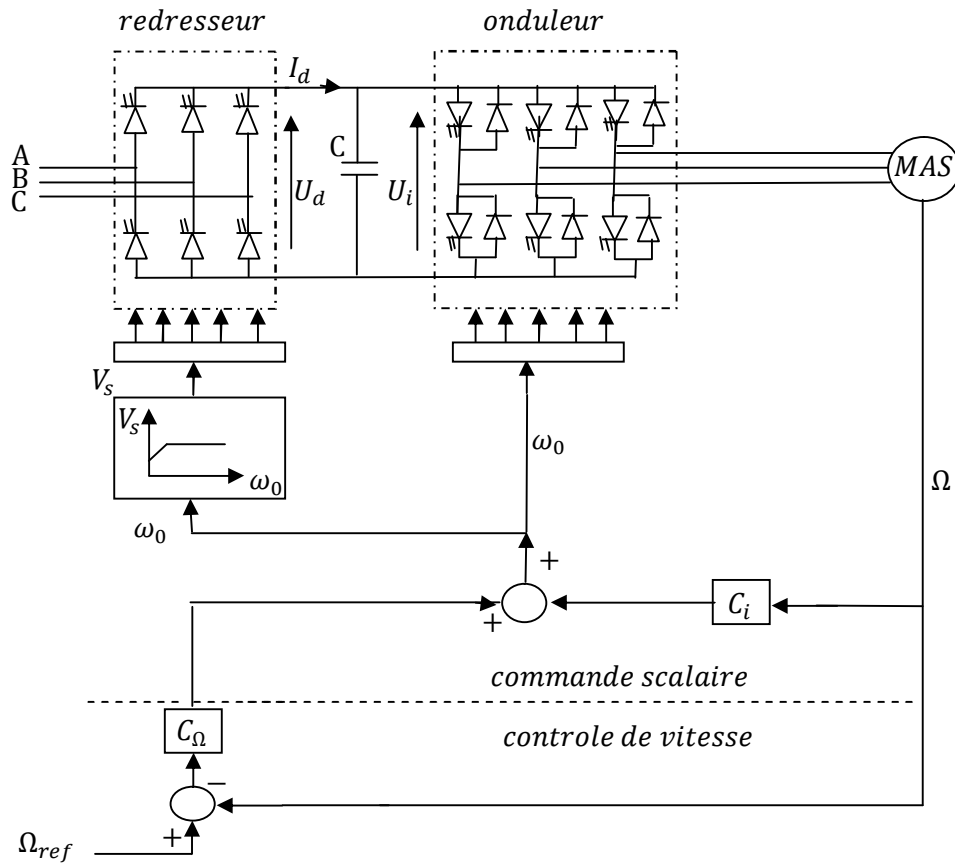


Figure .III.3) : Commande scalaire avec contrôle de la de la fréquence rotorique [33].

Lorsque l'ensemble variateur – machine fonctionne en génératrice (phase de récupération, freinage), un dispositif doit assurer la réversibilité de la source.

On utilise alors une résistance ou un dispositif de récupération monté en parallèle sur le condensateur ou un pont de Graëtz réversible en courant dans le cas des dispositifs de grandes puissances.

Si la source continue est une batterie (en traction électrique automobile...), ce problème est automatiquement résolu.

Cette commande nécessite la connaissance des paramètres de la machine pour obtenir un calage optimal des régulateurs.

3. Commande scalaire avec autopilotage et régulation de flux et de couple

Dans le cas précédent, une variation des paramètres de la machine en cours de fonctionnement provoque une dérive de flux. Une augmentation de flux peut entraîner la saturation de la machine. Un affaiblissement du flux est compensé par un accroissement du

glissement (pour un couple donné). Le couple maximum disponible diminue. Un contrôle direct du flux et de couple évite cela.

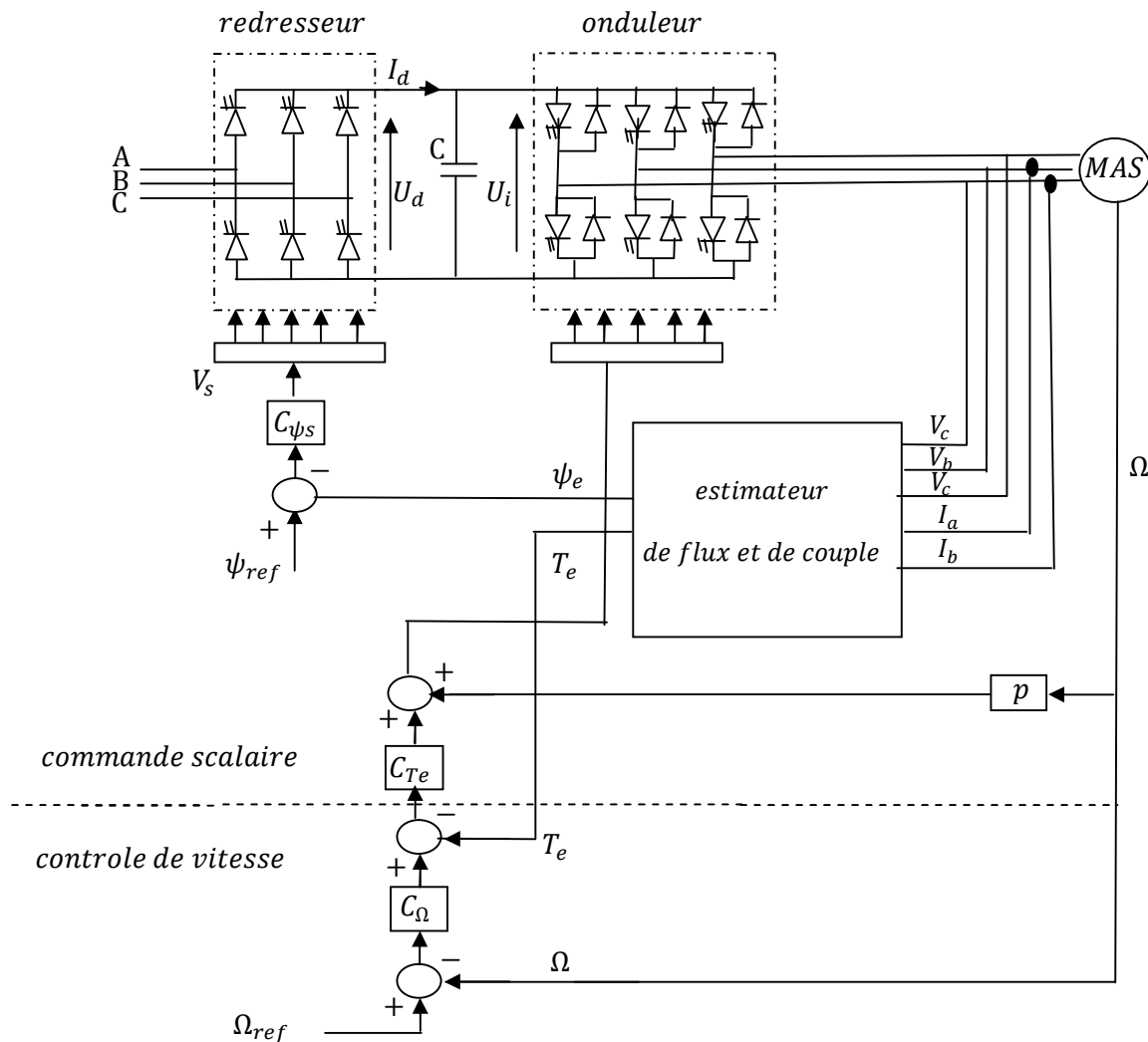


Figure .III.4) : Commande scalaire avec régulation de flux et de couple [33]

III.3.2.1) Commande par courant

La différence avec la commande précédente, c'est que c'est un onduleur (un commutateur) de courant qui est utilisé.

On impose directement les courants dans les phases de la machine .La fréquence fondamentale est calculée de la même manière que la précédente.

La valeur du courant de plateau (courant continu) égale à une constante près à de la valeur efficace du courant. Elle est imposée par régulation à l'aide d'un pond redresseur contrôlé.

Le dispositif est plus complexe qu'un contrôle scalaire de tension.

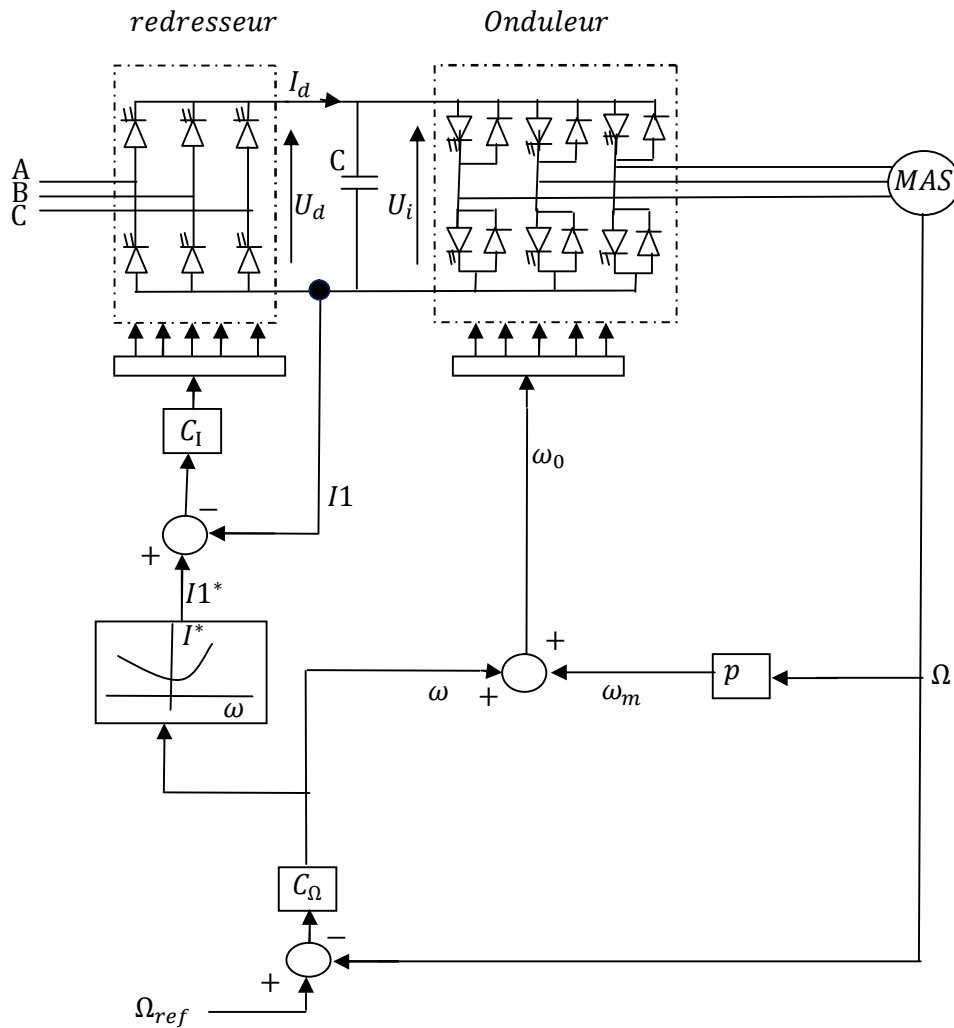


Figure. III.6) : Autopilotage et commande scalaire avec alimentation en courant [33]

La machine est alimentée à travers un onduleur contrôlé en courant. Connaissant l’amplitude du courant statorique I_s^* et les courants i_{sa}^* , i_{sb}^* et i_{sc}^* sont issues des relations (III.7).

$$\begin{cases} i_{1a}^* = \sqrt{2}I_1^* \sin(w_s^* t) \\ i_{1b}^* = \sqrt{2}I_1^* \sin(w_s^* t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_{1c}^* = \sqrt{2}I_1^* \sin(w_s^* t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (III.7)$$

Après la génération des courants, ils sont comparés aux courants statoriques mesurés de la machine, la sortie de cette comparaison est l’entrée des régulateurs à hystérésis, ces derniers appliquent les impulsions de commande à l’onduleur.

1. Constitution de la commande scalaire

La commande scalaire comprend un correcteur, généralement de type PI, permet d'estimer la pulsation rotorique. On varie ω jusqu'à ce que la vitesse mesurée égale la vitesse de référence.

Pour maintenir la constance du flux statorique, on utilise un générateur de fonction qui à partir de ω_0 définit la valeur des courants qu'on demande à l'onduleur de générer.

On impose directement des courants dans les phases de la machine. La valeur du courant de plateau (courant continu) égale à une constante pré à la valeur efficace du courant statorique.

Dans la technique de régulation de courant, les références triphasées des courants sont comparées aux valeurs instantanées des courants de la machine, l'erreur est l'entrée des régulateurs et du bloc logique de la MLI. L'amplitude des courants de référence est obtenue à partir du générateur de fonction.

III.6) Extension de la plage de vitesse

Dans un fonctionnement à flux constant, il est impossible d'augmenter la vitesse lorsque la valeur efficace de la tension statorique a atteint sa valeur nominale. Pour dépasser cette limite, il faut diminuer le flux, mais le moment maximal du couple décroît : c'est le fonctionnement en survitesse.

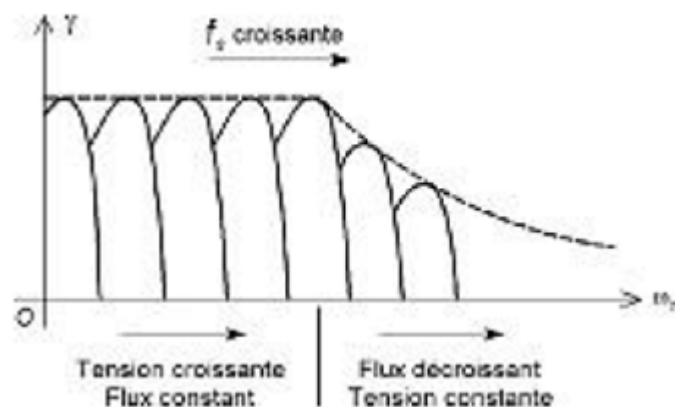


Figure.III.7) : Fonctionnement en survitesse

III.7) Conclusion

Le modèle mathématique de la machine, nous a permis d'avoir une meilleure idée et sur le comportement du moteur asynchrone dans les régimes transitoires. L'élaboration et l'étude de la commande scalaire, qui occupe une place non négligeable nous a permis de comprendre au mieux son principe de fonctionnement et les paramètres qui entrent dans sa construction, ces informations nous ont été très utiles pour la construction du schéma de simulation qui nous a permis de présenter l'évolution de quelques variables fondamentales de la machine asynchrone.

IV.1) Introduction

De nombreux avantages en permet à la machine asynchrone, d'occuper une place primordiale dans les entraînements électrique à vitesse variable, grâce a l'évolution aussi de l'électronique de puissance.

En effet, la commande scalaire était la première commande introduite dans l'industrie, très répandue pour sa simplicité et son coût réduit, elle occupe une grande partie dans les applications industrielles à vitesses variables.

L'étude de la machine asynchrone a nécessité une mise en équation, cela nous a permet de simuler le comportement de ce système face aux différentes sollicitations et d'appréhender ainsi les mécanismes régissant a son fonctionnement.

Le travail présenté dans ce chapitre s'inscrit dans le cadre de l'application et résultats de simulation de la commande scalaire du moteur asynchrone.

IV.2) Modèle du régime transitoire

La figure (IV.1) représente le schéma de simulation de la machine asynchrone.

Le schéma de simulation comprend :

- Une source de tension triphasée alternative Source de la bibliothèque Power System Blocset / Extras/ Electric Sources ;
- Un bloc de mesure de la tension et du courant triphasés Three-Phase V-1 Measurement de la bibliothèque Power System Blocset / Extras/ Measurement ;
- Une machine asynchrone triphasée Asynchronous Machine de la bibliothèque Power System Blocset / Machines;
- Un bloc Machines Measurement de la bibliothèque Power System Blocset / machines
- Un bloc to workspace pour l'affiche des valeurs du moment électromagnétique (Nm) et de la vitesse (rad/s) de la machine (bibliothèque principale Simulink / Sinks).

Ø Montage N°01

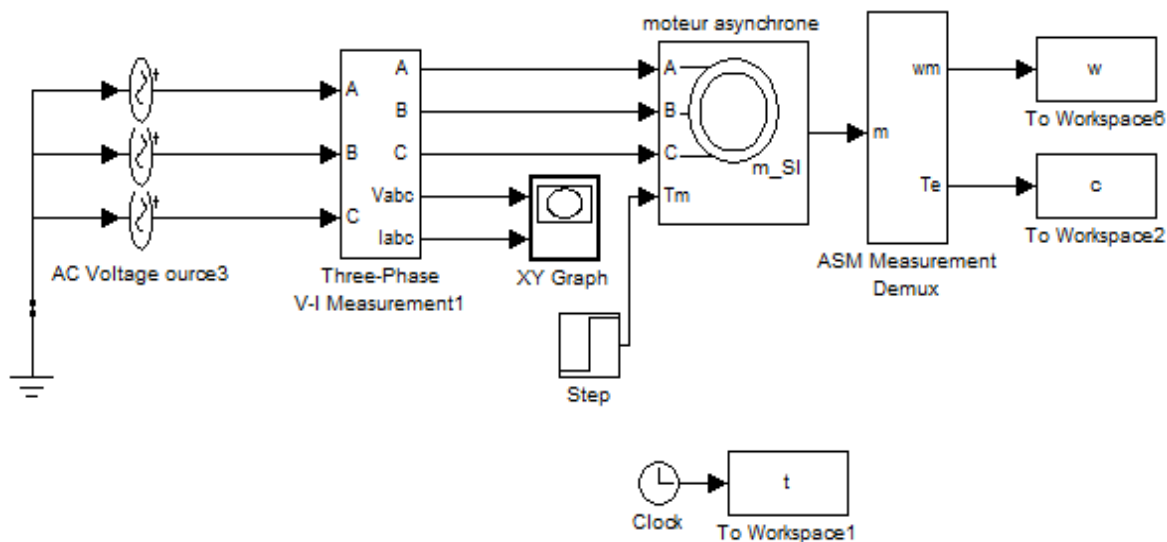


Figure .IV.1) : Schéma de simulation de la machine asynchrone

Ø Montage N°2

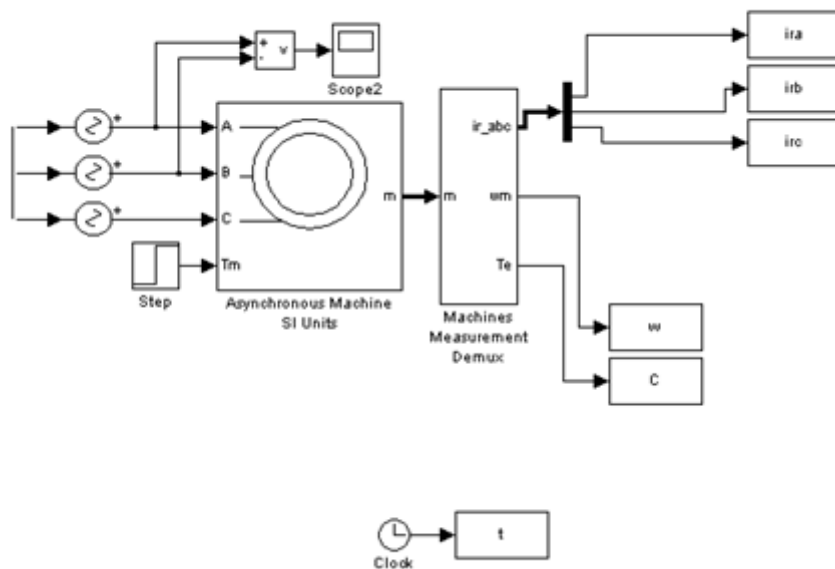


Figure IV.2) : Alimentation direct moteur asynchrone réseau

IV.2.1) Résultat de la simulation

Les figures (IV.3, IV.4, IV.5) représentent l'évolution temporelle du couple, de la vitesse de rotation du moteur et du courant rotorique.

Ø Courbe du couple

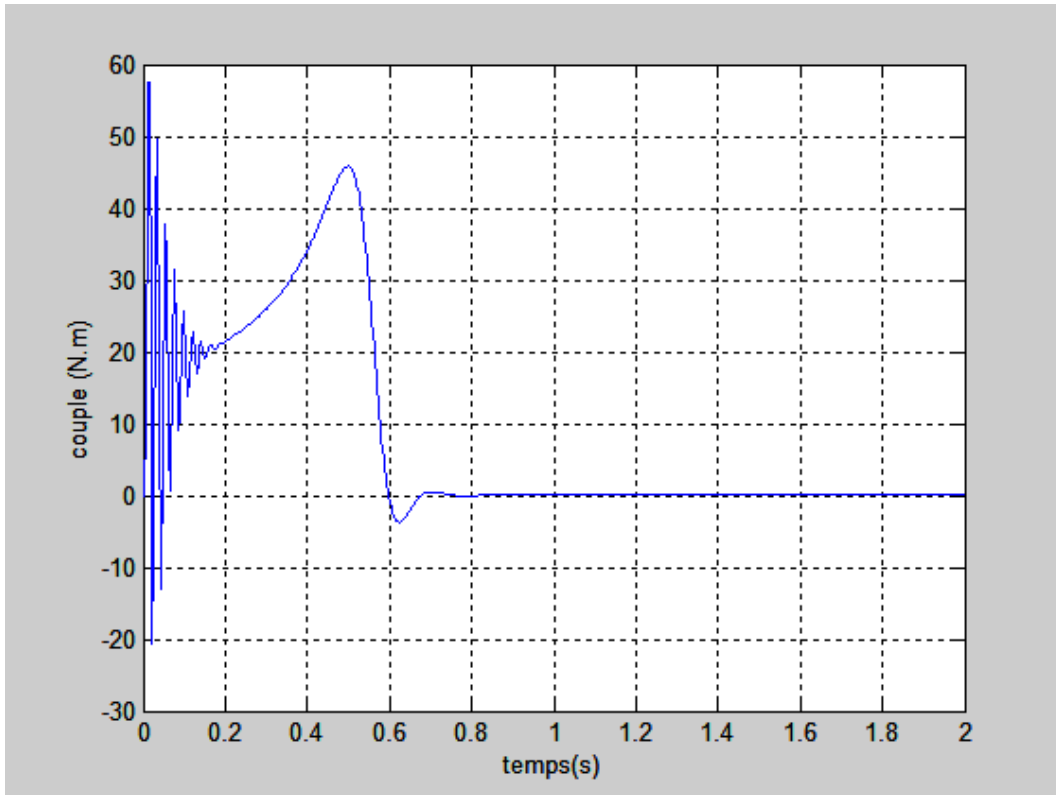


Figure .IV.3) : Evolution temporelle du couple électromagnétique

Ø Courbe de vitesse

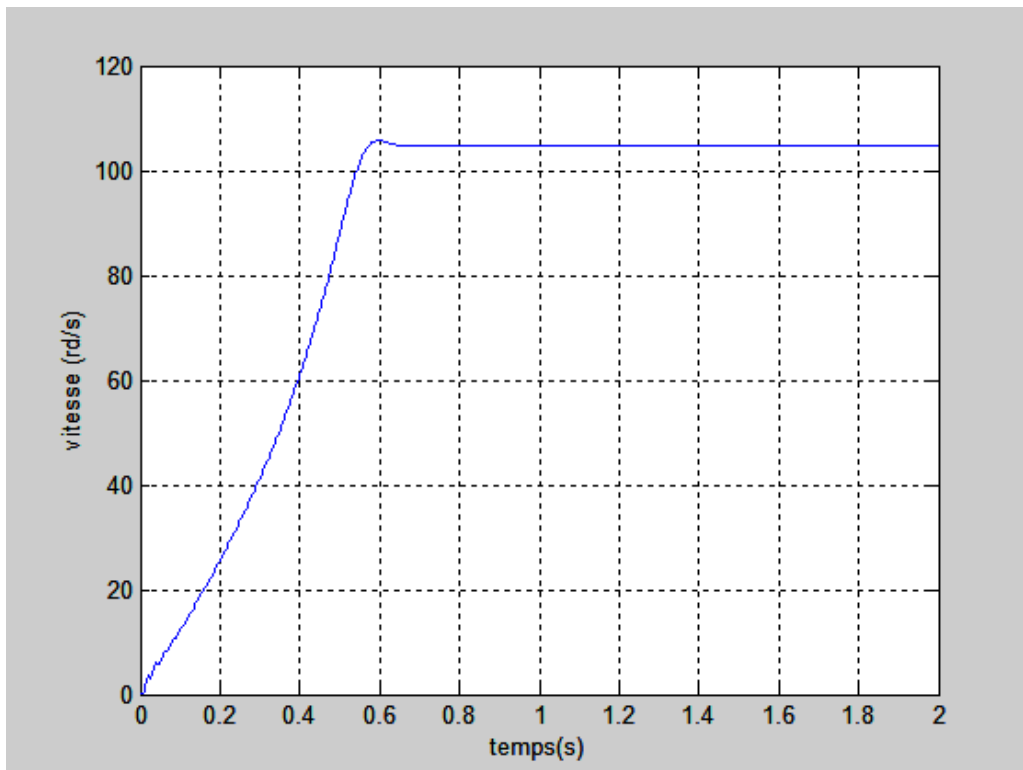


Figure. IV.4) : Evolution temporelle de la vitesse de rotation

Ø Courbe du courant rotorique

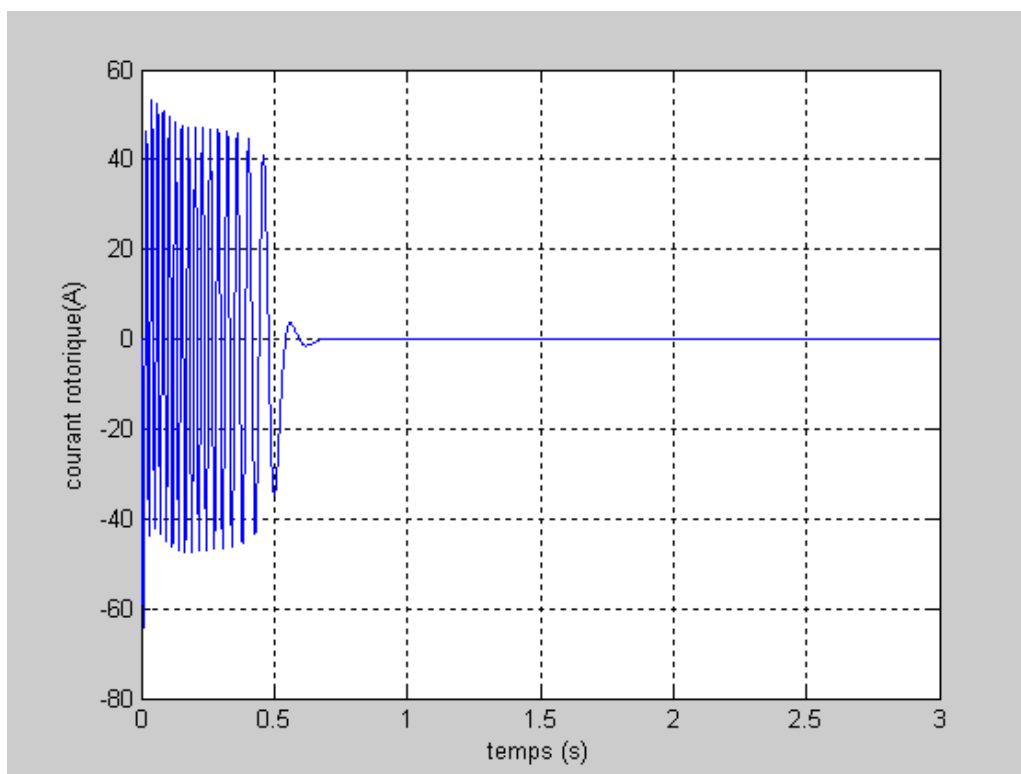


Figure. IV.5) : Evolution temporelle du courant rotorique

IV.2.2) Interprétation des résultats

- **Courbe du couple**

L'oscillation du couple est l'élément marquant de la courbe de la figure (IV.3), le couple atteint la valeur de 55 N.m. Après la disparition (au bout de 0.7s) du régime transitoire, le couple tend vers zéro puisque le couple résistant est nul.

- **Courbe de vitesse**

La courbe de la figure (IV.4) donnant la variation temporelle de la vitesse. La montée de la vitesse est presque linéaire au début du démarrage avec un faible pic. Au bout de 0.7 s le régime permanent est atteint, la vitesse se stabilise à une valeur très proche de la vitesse de synchronisme.

- **Courbe du courant**

Au démarrage de la machine asynchrone, on note un appel excessif de courant 50 A lors de la mise sous tension du moteur en régime transitoire qui se stabilise au bout de 0.7s.

IV.4) Schéma de simulation de la commande scalaire

La commande scalaire du moteur asynchrone a été préalablement implémentée sous Simulink, nous n'avons donc plus qu'à vérifier notre commande scalaire et finalement contrôlée que notre modèle a bien le même comportement que le moteur.

La figure (IV.6) nous permet de procéder à la simulation en utilisant le logiciel Simulink Power System Brackset.

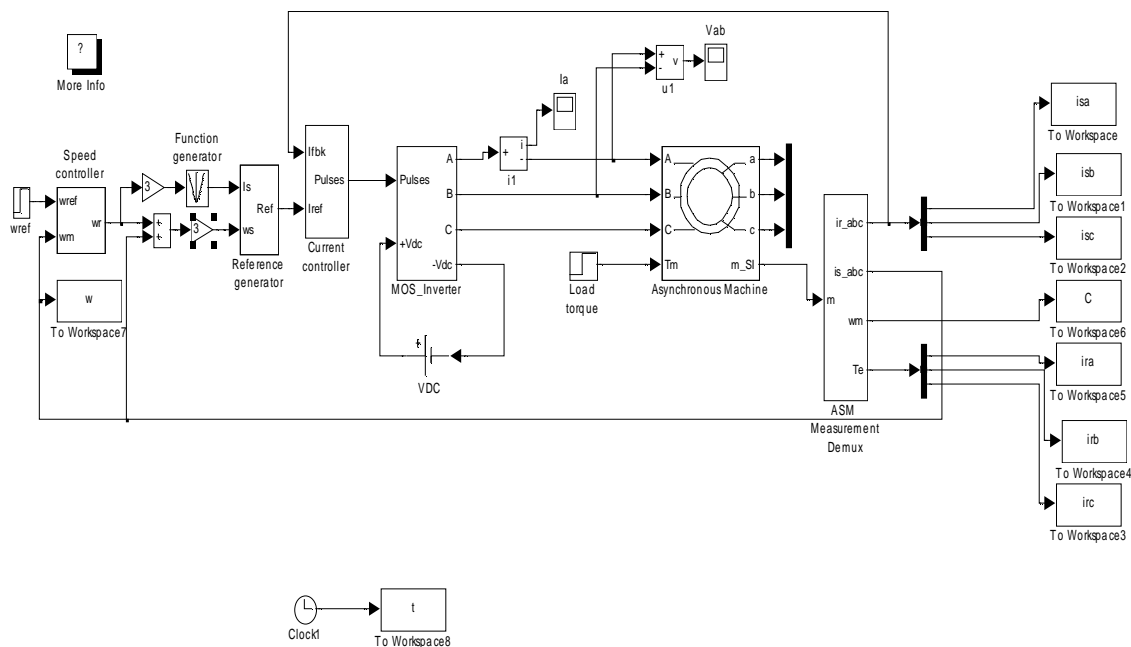


Figure IV.6) : Schéma de simulation variateur - moteur asynchrone

IV.4) Résultats de simulation variateur moteur asynchrone

Les courbes ci-dessous représentent l'évolution de quelques variables fondamentales de la machine asynchrone, à savoir le courant de phase statorique, le courant de phase rotorique le couple électromagnétique et la vitesse de rotation du moteur.

1) Fréquence de 50Hz

Ø Evolution du courant statorique

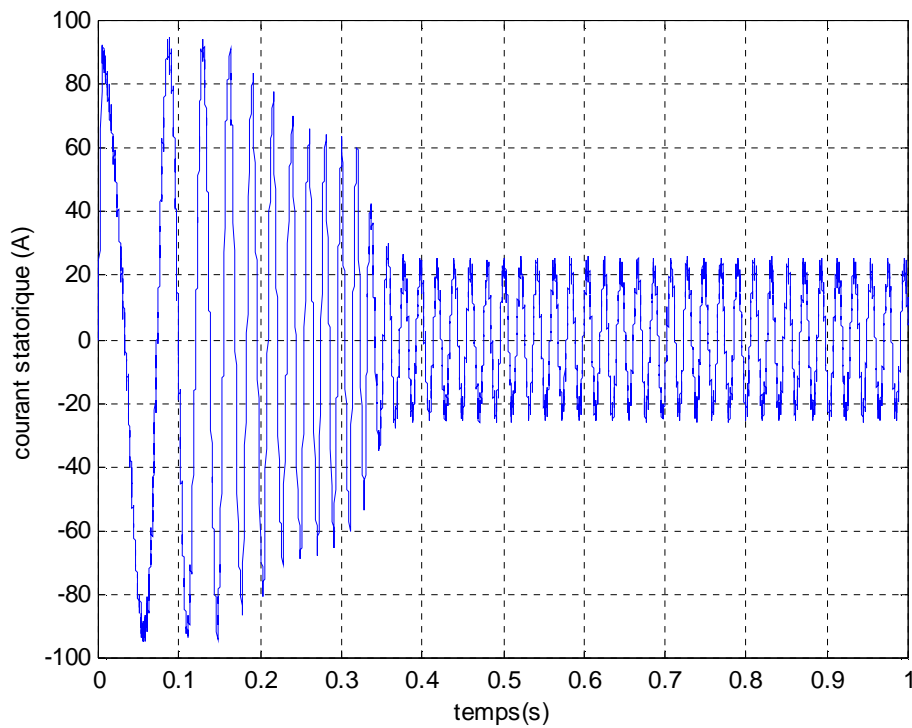


Figure IV.7) : Variation temporelle du courant statorique

Ø Evolution du courant rotorique

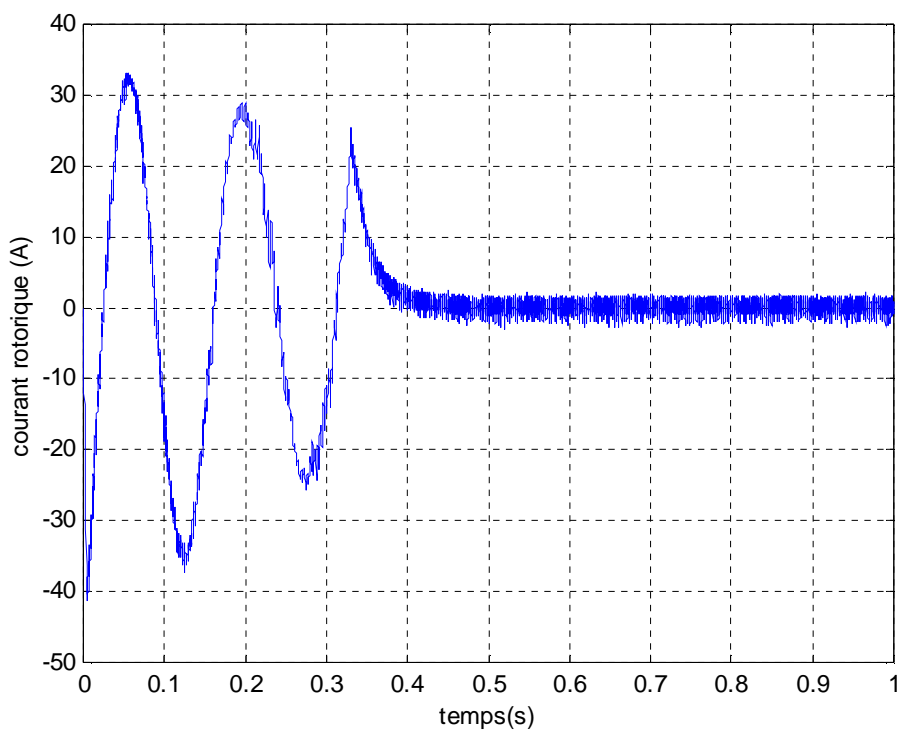
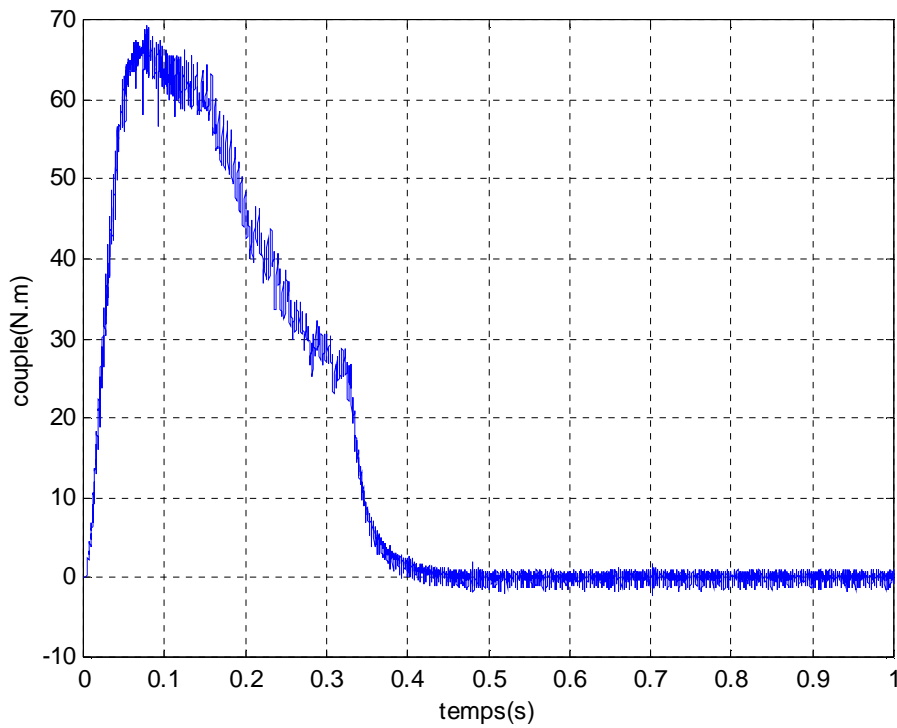
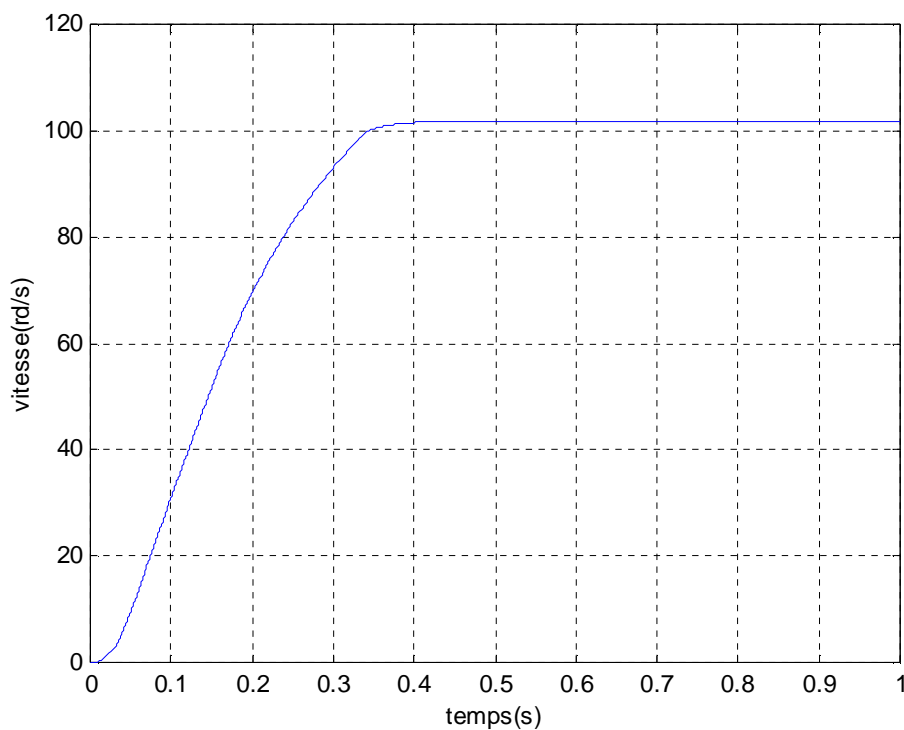
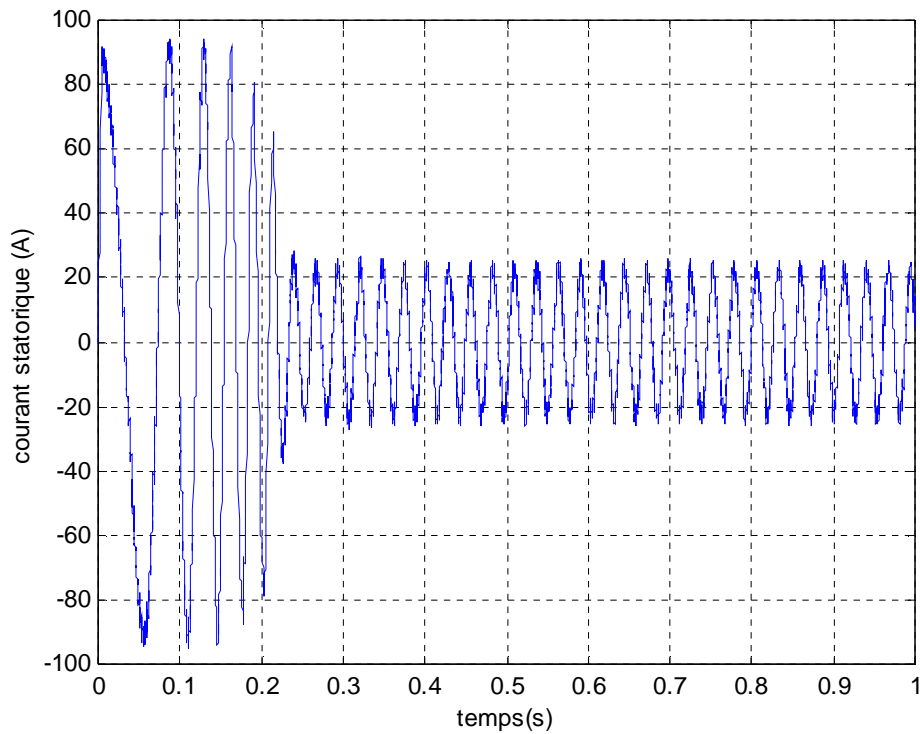
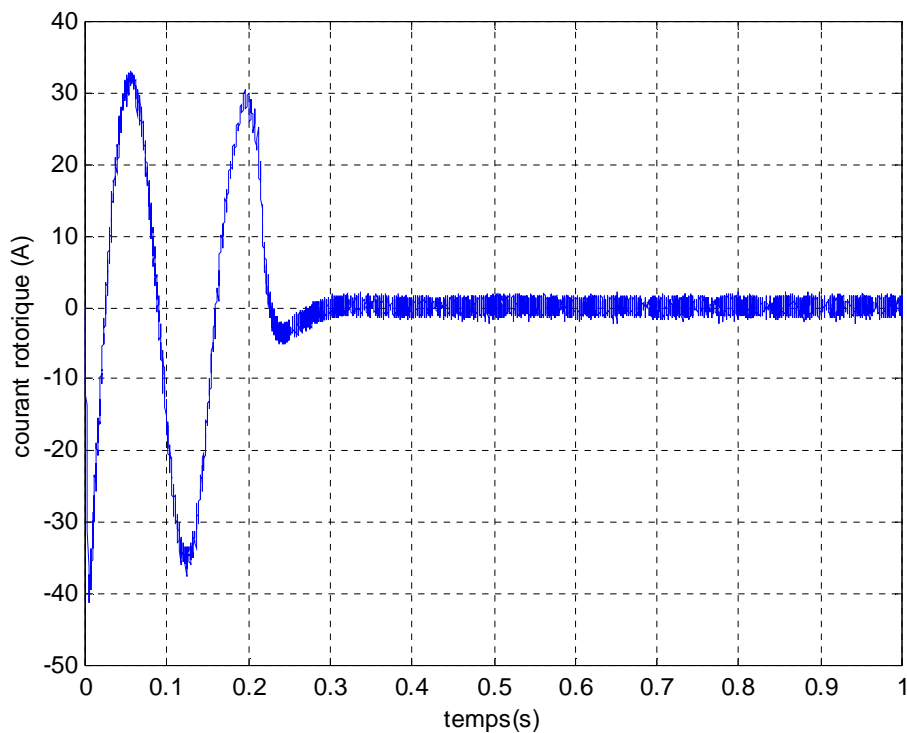
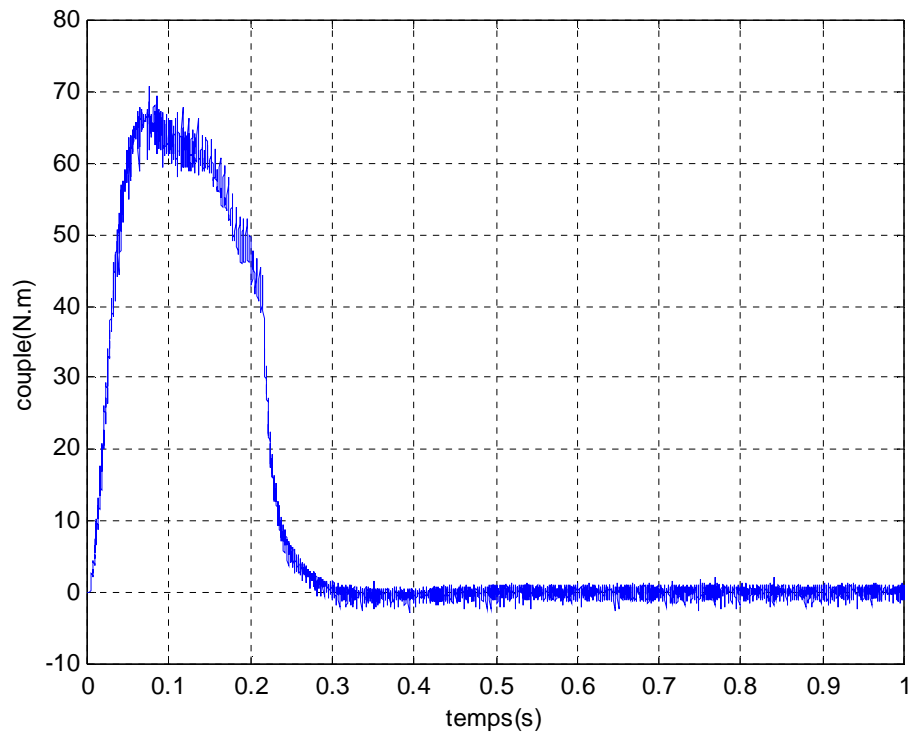
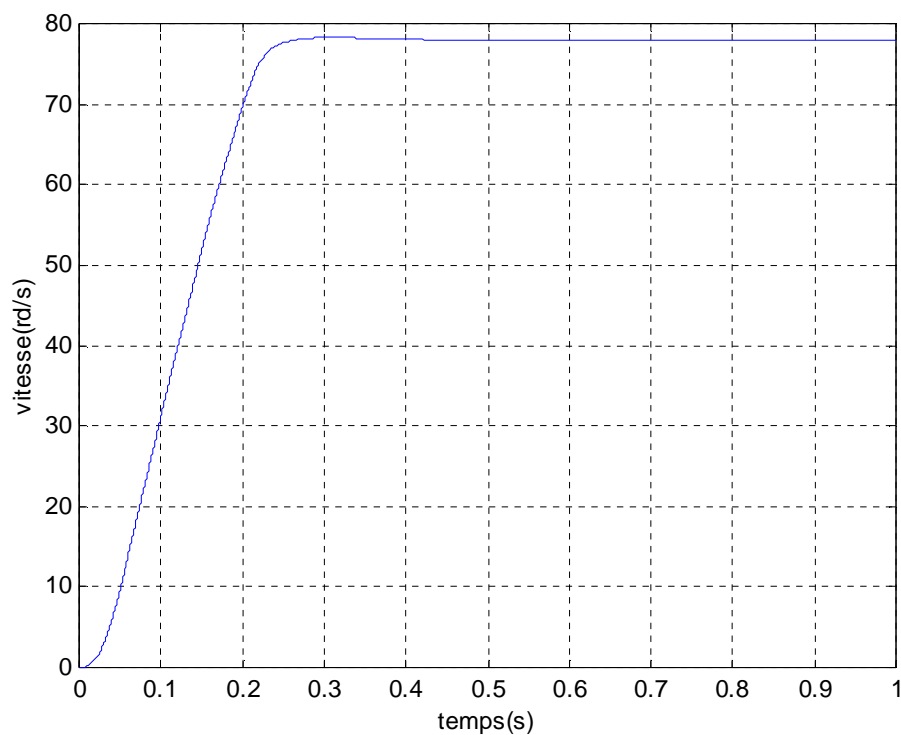


Figure IV.8) : Variation temporelle du courant rotorique

Ø Evolution du couple moteur**Figure IV.9) : Variation temporelle du couple moteur****Ø Evolution de la vitesse****Figure IV.10) : Variation temporelle de la vitesse de rotation****2) Fréquence de 37 Hz**

Ø Evolution du courant statorique**Figure IV.11) : Variation temporelle du courant statorique****Ø Evolution du courant rotorique****Figure IV.12) : Variation temporelle du courant rotorique**

Ø Evolution du couple moteur**Figure IV.13) : Variation temporelle du couple moteur****Ø Evolution de la vitesse****Figure IV.14) : Variation temporelle de la vitesse de rotation**

3) Fréquence de 25Hz

Ø Evolution du courant statorique

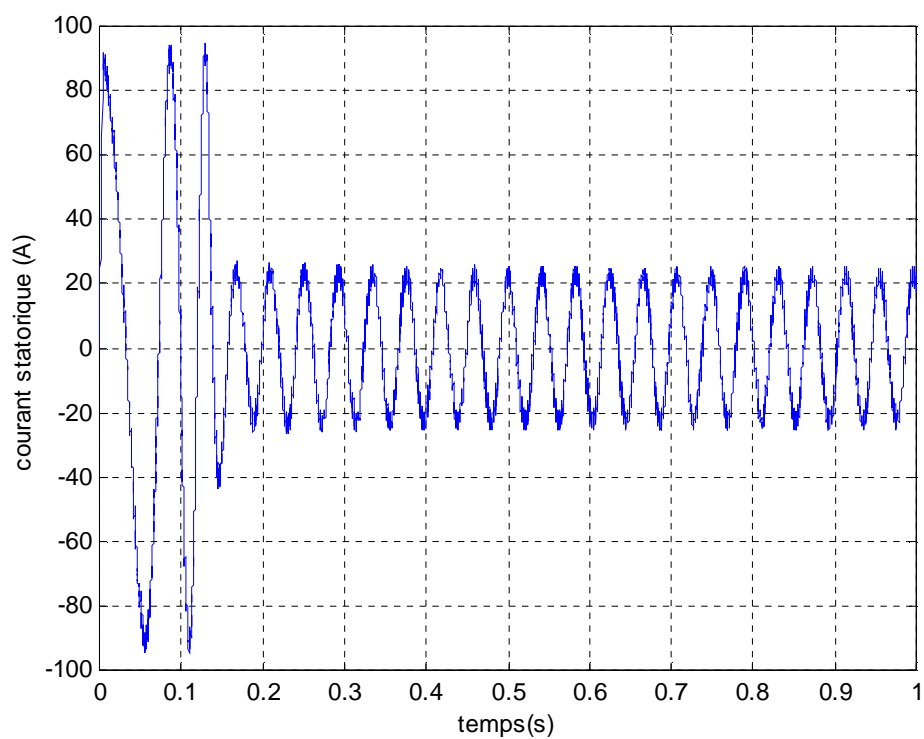


Figure. III.15) : Variation temporelle du courant statorique

Ø Evolution du courant rotorique

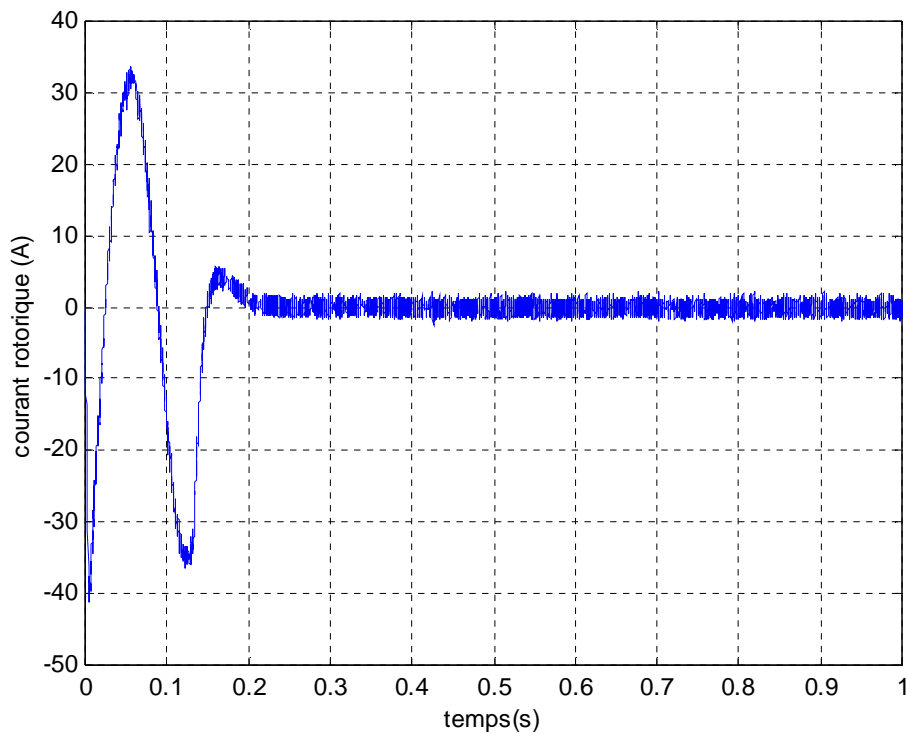


Figure IV.16) : Variation temporelle du courant rotorique

Ü Evolution du couple moteur

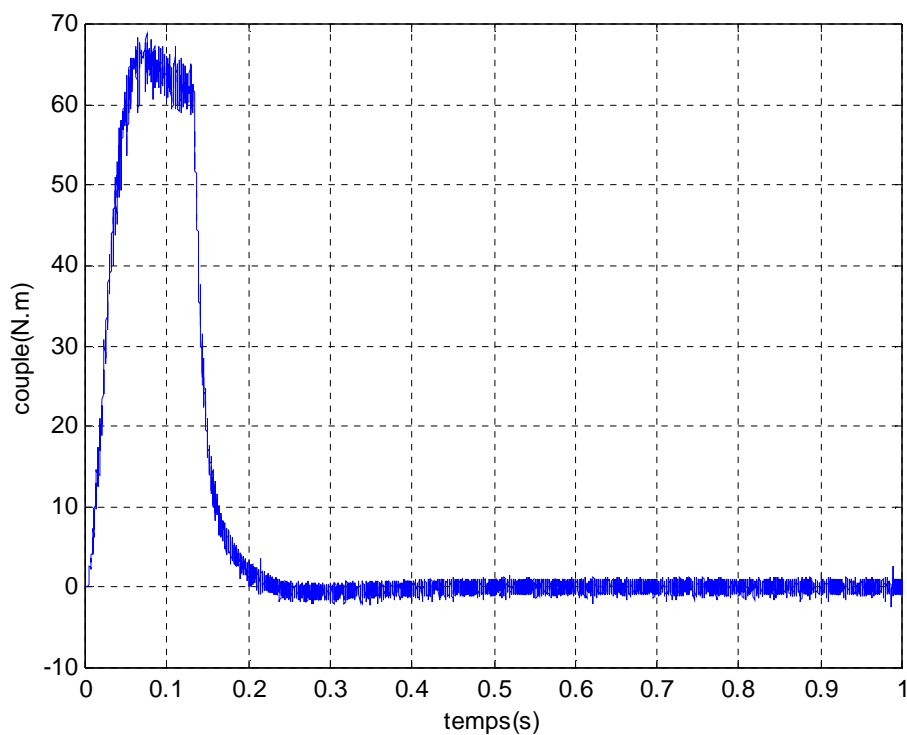


Figure IV.17) : Variation temporelle du couple moteur

Ø Evolution de la vitesse

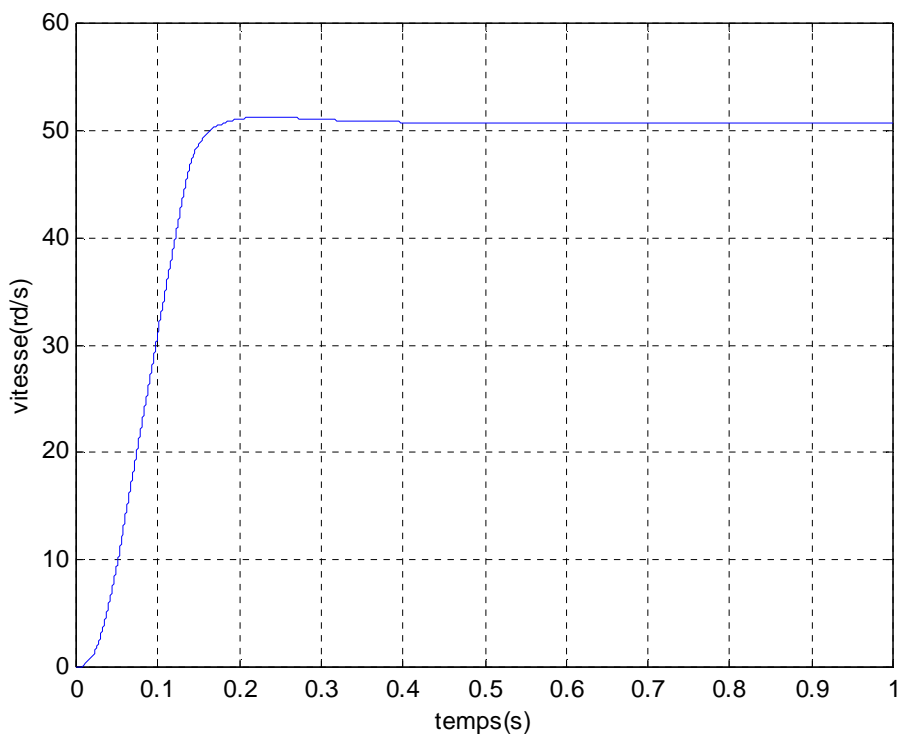


Figure IV.18) : Variation temporelle de la vitesse de rotation

IV.5) Interprétation des résultats

- **Le courant statorique**

Au démarrage, le courant statorique présente des oscillations successives autour de zéro avec un fort appel pic important allant jusqu' à 90A ; car le moteur doit absorber du réseau un courant important pendant son démarrage, pour lui permettre de porter toutes les masses à sa vitesse nominale.

Ces dépassements excessifs de courant disparaissent au bout de 0.35 s pour donner lieu à une forme sinusoïdale d'amplitude constante.

La valeur du temps de réponse diminue avec la diminution de la fréquence, elle est de 0.25 s pour une fréquence de 37 Hz et de 0.15s pour une fréquence de 25Hz.

- **Le courant rotorique**

Lors du démarrage, on reconnaît le classique appel de courant rotorique (valeur instantanée maximale de 30 A environ). Après sa disparition, le régime permanent est atteint le courant se stabilise a une valeur qui correspondant au comportement du moteur à vide.

Le temps de réponse diminue avec la diminution de la fréquence de la tension d'alimentation des enroulements statorique.

- **La vitesse**

La montée en vitesse est quasi linéaire au début du démarrage. La durée de mise en vitesse est déterminée par l'inertie totale autour de l'arbre de rotation, le moteur n'étant pas chargé, la vitesse atteinte est proche de la vitesse de synchronisme.

La valeur finale de la vitesse en régime permanent diminue avec la diminution de la fréquence de la tension d'alimentation des enroulements statoriques.

- **Le couple**

L'évolution de la courbe du couple est semblable à celle du courant, avec la même dynamique. Elle présente un pic au démarrage, le moteur a besoin d'un couple important pour combattre tous les couples (masse, charge), puis se stabilise au bout de 0.35 s (pour une fréquence de 50 Hz) pour atteindre le régime permanent.

On peut conclure également que l'insertion d'une commande scalaire nous a permis d'améliorer les performances du régime transitoire du moteur asynchrone, et cela par une amélioration du temps de réponse et la diminution des valeurs d'appel du courant lors du démarrage qui est très néfaste pour la machine.

IV.6) Conclusion

D'après les résultats, on peut constater l'intérêt de l'insertion de la commande scalaire sur les performances du moteur asynchrone et l'amélioration évidente soit en ce qui concerne le temps de réponse, soit en termes de limitation d'appel de courant au démarrage.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire est la contribution à l'étude des performances d'un entraînement électrique d'une machine de forage. Il s'agit de développer une commande machine asynchrone – convertisseur de fréquence pour la variation de la vitesse du système.

Pour ce faire, nous avons présenté brièvement, les différentes techniques existantes d'installations de forage en s'intéressant particulièrement à la description d'une installation de forage rotary. De plus nous avons exposé les différents entraînements électriques, permettant d'obtenir une optimisation et une amélioration des performances du processus afin de comprendre au mieux l'entraînement électrique utilisé et les avantages justifiant le choix de la machine asynchrone.

Au court de notre travail, nous nous sommes intéressés à l'étude du comportement de la machine asynchrone face à la variation de fréquence et de la vitesse de rotation, on utilisant la technique analytico-empirique pour la construction des différentes caractéristiques électromécaniques, mécaniques et énergétiques du moteur. Ce qui a permis d'aboutir aux différentes courbes (II.6, II.7, II.9), décrivant les évolutions du courant, du couple et du rendement à travers ces variations.

La diminution de la fréquence conduit à une augmentation du courant rotorique et par conséquent le couple moteur y compris le couple au démarrage. Cette augmentation du courant provoque l'accroissement des pertes et par voie de conséquence une dégradation du rendement et des performances du moteur.

A partir de cette méthode, nous avons pu estimer son intérêt pour le discernement des différents mécanismes régissant dans la machine asynchrone et les résultats obtenus peuvent être qualifiés de bons.

Dans le but d'améliorer les performances du système nous nous sommes également intéressés à l'étude de la commande scalaire, et cela par la description de son principe de

Conclusion générale

fonctionnement et les différentes constructions existantes. Ces informations nous a été très utile pour la construction du schéma de simulation.

L'application et la simulation de cette commande, nous a permet de comprendre aux mieux le comportement du moteur asynchrone et l'influence de la commande scalaire sur les régimes transitoires ce qui a permet au système d'obtenir une bonne performance en terme de temps de réponse et des forts appels de courant lors du démarrage.

Le travail effectué nous a permis non seulement d'avoir des réponses aux questions posées, mais également d'ouvrir des perspective au niveau de la commande de la vitesse du trépan du système de forage par moteur asynchrone - variateur de fréquence.

Comme perspectives à cette étude, on peut envisager :

- ü Prise en compte de la partie mécanique pour la modélisation du système de forage dans sa globalité.
- ü Approfondir la partie électronique de puissance et cela en s'intéressant aux variateurs de fréquence, leurs compositions et leurs commandes.
- ü Valider cette technique de commande sur la base d'un système de forage réel.

Liste des figures

Figure. I.1) : Composition de la plate-forme d'une installation de forage	6
Figure. I.2) : Processus de forage.....	8
Figure. I.3) : Assemblage de fond BHA.....	11
Figure. I.4) : Exemple de quelques éléments de la garniture de forage.....	11
Figure. I.5) : le trépan.....	13
Figure. I.6) : La table de rotation.....	13
Figure. I.7) : La tête d'injection.....	14
Figure. I.8) : Le top drive.....	15
Figure. I.9) : La tige carrée	15
Figure. I.10) : Treuil de forage.....	16
Figure. I.11) : Schéma de fonctionnement du moteur asynchrone à cage	21
Figure. I.12) : Schéma d'entraînement par MAS –variateur	23
Figure. I.13) : Schéma de fonctionnement de la machine synchrone	24
Figure. I.14) : Entraînement par générateur moteur	27
Figure. II.1) : Rotor bobiné	28
Figure. II.2) : Rotor à cage d'écureuil	28
Figure. II.3) : Schéma de fonctionnement du moteur asynchrone à cage.....	
Figure. II.4) : Schéma de puissance de commande du moteur à cage variateur de ²⁹ fréquence.....	30
Figure. II.5) : Schéma équivalent du moteur asynchrone.....	31
Figure. II.6) : Les caractéristiques électromécaniques	36
Figure. II.7) : Les caractéristiques mécaniques.....	39
Figure. II.8) : Les caractéristiques vitesses rendement	44
Figure. III.1) : Réseau des caractéristiques mécaniques paramétré par la fréquence statorique	52
Figure. III.2) : Contrôle scalaire de la tension.....	53

Liste des figures

Figure .III.3) : Commande scalaire avec contrôle de la vitesse ω	54
Figure .III.4) : Commande scalaire avec régulation de flux et de couple.....	55
Figure. III.6) : Autopilotage et commande scalaire avec alimentation en courant.....	56
Figure.III.7) : Fonctionnement en survitesse.....	57
Figure .IV.1) : Schéma de simulation de la machine asynchrone.....	60
Figure IV.2) : Alimentation direct moteur asynchrone réseau.....	60
Figure .IV.3) : Evolution temporelle du couple électromagnétique	61
Figure. IV.4) : Evolution temporelle de la vitesse de rotation	61
Figure. IV.5) : Evolution temporelle du courant rotorique.....	62
Figure IV.6) : Schéma de simulation variateur moteur asynchrone.....	63
Figure IV.7) : Variation temporelle du courant statorique.....	64
Figure IV.8) : Variation temporelle du courant rotorique	64
Figure IV.9) : Variation temporelle du couple moteur	65
Figure IV.10) : Variation temporelle de la vitesse de rotation.....	65
Figure IV.11) : Variation temporelle du courant statorique.....	66
Figure VI.12) : Variation temporelle du courant rotorique	66
Figure IV.13) : Variation temporelle du couple moteur	67
Figure IV.14) : Variation temporelle de la vitesse de rotation.....	67
Figure IV.15) : Variation temporelle du courant statorique.....	68
Figure IV.16) : Variation temporelle du courant rotorique.....	69
Figure IV.17) : Variation temporelle du couple moteur	69
Figure IV.18) : Variation temporelle de la vitesse de rotation.....	70

Liste des tableaux

Tableau II.1) : Cahier de charge du variateur de fréquence.....	30
Tableau II.2) : Résultats de calcul des paramètres complémentaires	32
Tableau. II.3) : Valeurs de courant rotorique et vitesse de rotation pour différentes valeurs de fréquences.....	33
Tableau. II.4) : Valeurs de couple et vitesse de rotation pour différentes valeurs de fréquences.....	35
Tableau. II.5) : Valeurs du rendement et la vitesse de rotation pour différentes valeurs de fréquences.....	40

Bibliographies

- [1] Ab. Amadou ; « Contribution à la surveillance d'un processus de forage pétrolier ». Thèse de Doctorat l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Paris Tech, 2010.
- [2] L. Tibelghait, Y. Tikhemirine ; « Conception et réalisation d'une chaîne d'acquisition de données relatives aux paramètres de forage à base d'un microcontrôleur 16F877 ». Mémoire d'ingénieur, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2005-2006.
- [3] F. Abdlgalil ; « Commande non linéaire dans les systèmes de forage pétrolier : contribution a la suppression du phénomène de 'stick-slip' ».Thèse de Doctorat, Université Paris XI, février 2006.
- [4] M. Detay ; « Le forage d'eau ».Edition Masson, Paris 1993.
- [5] H. Christopher, H. Armstead ; « La géothermie ».Edition Moniteur, Paris, 1981.
- [6] Fondation PRACTICA - Série forage Manuel, « forage à la percussion ».
- [7] A. Belaid ; « Modélisation tridimensionnelle du comportement mécanique de la garniture de forage dans les puits a trajectoires complexe : Application a la prédiction des frottements garniture-puits ».Thèse de Doctorat, Ecole des mine de Paris, Septembre 2005.
- [8] Z. El Marzouki ; « Etude du comportement dynamique des trains de tiges de forage pétrolier».Rapport d'option, REF : O071219ZELM, Université de Paris, Janvier 2005.
- [9] Note technique DNEMT n°2 ; « Les techniques de forage utilisées en eaux minérale ». Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie, Novembre 1995.
- [10] M. Khodja ; « Les fluides de forage : Etude des performances et considération environnementales ».Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Février 2008.
- [12] N. Bennabi, N. Aissaoui, K. Boughris ; «Diagnostic des structures assurant le transfert d'énergie photovoltaïque avec une meilleure efficacité énergétique» .Mémoire d'ingénieur, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2011.
- [13] R. Chaibi ; « Commande électrique ».Cours de DEUA 2006.
- [14] B. Fornel ; « Alimentation de la machine asynchrone ». Technique d'ingénieur,
- [15] P. Mayé ; « Aide-mémoire Electrotechnique ». Edition DUNOD, Paris, 2006.
- [16] R. Chauprad, F. Milsant ; « Entraînement a vitesse variable ». Edition DUNOD, Paris, 1984.
- [17] J.P.Nguyen ; « Techniques d'exploitation pétrolière, Le forage » .Edition TECHNIP, Parie, 1993.
- [18] N. Benameur ; « Introduction a la commande des machines électriques ». Centre de Publication Universitaire Manouba Tunis, 2010.

Bibliographies

- [19] V. Koliméev ; « Machines électriques » .Edition Mir, Moscou ,1983.
- [20] <http://pagesperso-orange.fr/fabrice.sincere/> machine asynchrone.
- [21] J.F. Maillard; « Forages et sondages». Technique d'ingénieur
- [22]M. Marty, D. Dixneuf, D. G. Gilabert; « Principes d'Electrotechnique ». Edition DUNOD, Paris, 2005.
- [23] Schémas électriques Moeller ; « Démarreurs-moteur électroniques et variation de vitesse » ,2008.
- [24] G. Gakel, S. Ousmane ;« Régulation de la vitesse d'un moteur asynchrone par commande vectorielle».Mémoire d'Ingénieur, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2009.
- [25] N. Belehcel ; « Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil pourvue de calculs ferromagnétique ».Mémoire d'Ingénieur, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou ,2010.
- [26] P. Ladoux ; « Variation de vitesse des machines à courant alternatif ». Réseau National de Ressources en Electrotechnique.
- [27] N. Benyahia, K. Srairi, S. M. Mimoune ; « Commande de la machine asynchrone par orientation du flux rotorique ». Université Mohamed Khider – Biskra, Courrier du Savoir – N°06, Juin 2005, pp.147-150 .Article PDF.
- [28] A. Fezzani; « Commande robuste de la machine à induction par adaptation paramétrique».Mémoire d'Ingénieur, Université de Batna ,2009.
- [29] M. Abdellatif ; « Continuité de service des entraînements électriques pour une machine à induction alimentée par le stator et le rotor en présence de défauts capteurs ». Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Avril 2010
- [30] A. Boukhelifa ; «Les éléments d'optimisation du pilotage d'une machine asynchrone en vue d'un contrôle vectoriel». Thèse de magistère, Ecole nationale polytechnique, Décembre 2007.
- [31]T. Wildi, G. Sybille ; «Electrotechnique 4^{ème} édition» .Edition de boeck, Paris 2005.
- [32] N. Ezziani ; «Commande adaptative floue backstepping d'une machine asynchrone avec et sans capteur mécanique » .Thèse de Doctorat, Université de Reims, Avril 2010.
- [33] G. Guy, C. Guy ; « Actionneurs électriques Principe/Modèle/ Commande ». Edition Eyrolles, Paris, 2000.
- [34] S.E.Rezgui ; « Application à la machine asynchrone : Commande vectorielle sans capteurs mécaniques SVPWM, mode glissant, MRAS».Thèse de Magistère, Université Mentouri de Constantine, 2009.

A.1 Paramètres de la machine asynchrone

A.1.1 Grandeurs nominales

P_n	7.5Kw
n_0	1000tr/min
n_n	970tr/min
U_n	380V
f	50Hz
I_{1n}	15.5 A
$\cos\varphi_n$	0.91
η_n	0.86

A.1.2 Paramètres de la machine

R_1	0.507 Ω
L_1	6.67 mH
I_μ	7.3A
J	0.15
I_d/I_n	5.5
C_d/I_n	1.4
C_{max}/C_n	2.2
$K_{méc}$	0.015
R'_2	0.507 Ω

Pour satisfaire une demande mondiale de plus en plus forte et face à l'épuisement des gisements connus, des recherches des nappes dans des milieux profonds et hostiles s'imposent. Ces milieux à explorer nécessitent la mise en place des processus de forage performants.

Le forage est devenu un outil très important dans le développement des gisements. Il s'agit de prélever (ou d'extraire) l'énergie accumulée dans la terre, qu'elle soit stockée dans l'eau ou directement dans les terrains, pour l'amener à la surface. Plusieurs procédés existent et ils ont tendance à se diversifier.

La production des hydrocarbures et d'eaux passent par le fonctionnement d'un processus de forage dont le plus répandu dans l'industrie se nomme : système de forage rotary.

L'objectif principal de ce mémoire est la contribution à l'étude des performances d'un entraînement électrique d'une machine de forage. Il s'agit de développer une commande machine asynchrone – convertisseur de fréquence pour la variation de la vitesse du système.

Au court de notre travail, nous nous sommes intéressés à l'étude du comportement de la machine asynchrone face à la variation de fréquence et de la vitesse de rotation, on utilisant la technique analytico-empirique pour la construction des différentes caractéristiques du moteur.

Dans le but d'améliorer les performances du système nous nous sommes également intéressés à l'étude de la commande scalaire, et cela par la description de son principe de fonctionnement et les différentes constructions existantes. Ces informations nous ont été très utiles pour la construction du schéma de simulation.

L'application et la simulation de cette commande, nous ont permis de comprendre mieux le comportement du moteur asynchrone et l'influence de la commande scalaire sur les régimes transitoires ce qui a permis au système d'obtenir une bonne performance en terme de temps de réponse et des forts appels de courant lors du démarrage.