

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



جامعة ابن خلدون – تيارت  
Université Ibn Khaldoun de Tiaret (U.I.K.T)

كلية العلوم التطبيقية  
Faculté des Sciences Appliquées  
قسم الهندسة الكهربائية  
Département de Génie Electrique



**POLYCOPIE DE COURS AVEC EXERCICES CORRIGES**  
**COMMANDE DES MACHINES ELECTRIQUES**

Spécialité : Electrotechnique

Promotion : 3<sup>ème</sup> Année

Semestre : 6

Préparé par :

Dr. BELABBAS Belkacem

Maître de Conférences A

Expertisé par :

Nom et prénoms	Grade	Université
ALLAOUI Tayeb	Pr	Ibn Khaldoun -Tiaret
SAFA Ahmed	MCA	Ibn Khaldoun -Tiaret

## Avant-propos

Nous avons le plaisir de vous proposer notre polycopié de cours avec exercices corrigés destiné aux étudiants de troisième année en électrotechnique.

Ce document a été élaboré dans le but d'offrir aux étudiants une ressource complète pour approfondir et consolider leurs connaissances dans ce domaine.

Ce polycopié est divisé en plusieurs chapitres, chacun étant consacré à une thématique précise de l'électrotechnique. Chaque chapitre commence par une présentation théorique détaillée, accompagnée d'exemples concrets pour faciliter la compréhension des concepts abordés. Des exercices corrigés sont également inclus à la fin de chaque chapitre, permettant aux étudiants de mettre en pratique les notions apprises et de s'assurer de leur compréhension.

Notre polycopié de cours a été conçu pour être facile à utiliser et à comprendre. Nous avons fait en sorte que les explications soient claires et accessibles, tout en étant rigoureuses et précises. Nous avons également veillé à ce que les exercices proposés soient progressifs, afin que les étudiants puissent avancer à leur rythme et acquérir des compétences solides dans chaque domaine.

Nous espérons que ce polycopié de cours sera un outil précieux pour les étudiants de troisième année en électrotechnique. Nous sommes convaincus qu'il leur permettra de consolider leurs connaissances et de progresser dans leur formation.

Introduction générale .....	2
<b>Chapitre I : Introduction à la commande des machines électriques</b>	
I.1. Généralités.....	4
I.2. Différents types des machines électriques.....	4
I.3. Entraînements Electriques .....	5
I.3.a. Définition .....	5
I.3.b. Constitution d'un système d'entraînement électrique à vitesse variable.....	5
I.3.c. Choix d'un système d'entraînement.....	5
I.3.d. Caractéristiques de l'entraînement .....	6
I.3.e. Avantages d'un système d'entraînement.....	6
I.4. Asservissement des machines électriques.....	7
I.4.a. Commande en boucle ouverte.....	7
I.4.b. Commande en boucle fermée .....	7
I.5. Avantage de la commande des machines électriques.....	7
I.6. Point de fonctionnement.....	8
I.7. Conclusion.....	8
<b>Chapitre II : Commande des convertisseurs statiques (Technique MLI)</b>	
II.1. Introduction .....	10
II.2. Onduleur de tension triphasé.....	10
II.2.a. Structure de l'onduleur de tension triphasé .....	10
II.2.b. Modélisation de l'onduleur de tension.....	11
II.3. Technique MLI .....	12
II.3.a. Principe de base de la technique de MLI .....	12
II.3.b. Caractéristiques de la technique MLI.....	13
II.3.c. Simulation de la technique de MLI sinus-triangle .....	13
II.4. Conclusion.....	16
<b>Chapitre III : Réglage de la vitesse des moteurs à courant continu</b>	
III.1. Introduction .....	18
III.2. Rappels sur les machines à courant continu.....	18
III.2.a. Constitution.....	18
III.2.b. Principe de fonctionnement.....	19
III.2.c. Equations et Schéma électrique équivalent.....	19
III.2.d. Différents types de machines à courant continu.....	20
III.2.e. Bilan de puissance.....	20
III.3. Mise en rotation et l'arrêt du moteur .....	22
III.4. Caractéristique électromécanique et mécaniques des machines à courant continu .....	23

III.4.a. Caractéristique électromécanique de vitesse $\Omega = fIa$ .....	23
III.4.b. Caractéristique électromécanique du couple $Cem = fIa$ .....	24
III.4.c. Caractéristique mécanique $Cem = f\Omega$ .....	24
III.5. Caractéristiques mécaniques des charges entraînées .....	25
III.5.a. Fonctionnement à couple constant .....	25
III.5.b. Fonctionnement à puissance constante.....	26
III.6. Caractéristique d'un groupe moteur-charge entraînée .....	27
III.6.a. Démarrage.....	27
III.6.b. Point de fonctionnement.....	27
III.6.c. Stabilité.....	28
III.6.d. Freinage électrique.....	28
III.7. Méthode de réglage de la vitesse d'un moteur à courant continu .....	28
III.7.a. Réglage rhéostatique.....	28
III.7.b. Réglage par le flux.....	30
III.7.c. Réglage par la tension d'induit .....	31
III.8. Principe de dispositifs d'alimentations .....	32
III.9. Les convertisseurs associés à la machine à courant continu .....	34
III.9.a. Deux redresseurs réversibles montés en tête-bêche.....	34
III.9.b. Hacheur en pont .....	35
III.10. Asservissement de vitesse d'un moteur à courant continu .....	37
III.11. Exercices .....	41
III.12. Solutions .....	46
III.13. Conclusion.....	55
<b>Chapitre IV : Variation de vitesse des moteurs asynchrones</b>	
IV.1. Généralités.....	57
IV.1.a. Définition .....	57
IV.1.b. Constitution du moteur asynchrone.....	57
IV.1.c. Principe de fonctionnement.....	57
IV.1.d. Glissement.....	57
IV.2. Schéma équivalent par phase de la machine asynchrone réelle .....	58
IV.2.a. Rapport de transformation .....	58
IV.2.b. Modélisation de la puissance active.....	60
IV.3. Bilan énergétique d'un moteur asynchrone .....	62
IV.3.a. Puissance.....	62
IV.3.b. Rendement .....	63
IV.4. Couple électromagnétique .....	63
IV.5. Réglage de vitesse des moteurs asynchrones.....	65

IV.5.a. Action sur la tension d'alimentation .....	66
IV.5.b. Action sur la fréquence d'alimentation .....	67
IV.5.c. Action simultanée de la tension et la fréquence d'alimentation .....	68
IV.5.d. Action sur la résistance du rotor.....	69
IV.5.e. Action par cascade hypo-synchrone.....	70
IV.6. Association machines asynchrones avec convertisseurs.....	72
IV.7. Démarrage du moteur asynchrone.....	72
IV.8. Exercices .....	74
IV.9. Correction.....	80
IV.10. Conclusion.....	92
<b>Chapitre V : Réglage de la vitesse et autopilotage des moteurs synchrones</b>	
V.1. Généralités.....	94
V.1.a. Définition .....	94
V.1.b. Constitution.....	94
V.1.c. Principe de fonctionnement.....	95
V.2. Modèle électrique.....	95
V.3. Expressions du couple .....	97
V.4. Différents modes de fonctionnement de la machine synchrone.....	97
V.5. Bilan de puissance de la machine synchrone .....	100
V.5.a. Puissance reçue .....	100
V.5.b. Pertes par effet joule dans le stator .....	100
V.5.c. Pertes par effet joule dans le rotor.....	100
V.5.d. Pertes collectives .....	100
V.5.e. Puissance utile.....	101
V.5.f. Rendement .....	101
V.6. Association MS avec des convertisseurs statiques.....	101
V.6.a. Principe de la variation de vitesse du moteur synchrone.....	101
V.6.b. Principe de l'autopilotage des moteurs synchrones.....	102
V.6.c. Réglage de vitesse de la MS autopilotée alimentée par un commutateur de courant .....	104
V.6.d. Réglage de vitesse de la MS autopilotée alimentée par un onduleur de tension MLI .....	106
V.7. Exercices .....	107
V.8. Solutions .....	109
V.9. Conclusion.....	111
Conclusion générale .....	112
Références bibliographiques .....	114

*Chapitre 2*

<b>Figure II. 1.</b> Schéma simplifié de l'onduleur triphasé.....	10
<b>Figure II. 2.</b> Schéma synoptique de la MLI.....	12
<b>Figure II. 3.</b> Schéma bloc Simulink de technique MLI sinus-triangle.....	14
<b>Figure II. 4.</b> Différents signaux de la technique de MLI sinus-triangle à une seule porteuse.....	15
<b>Figure II. 5.</b> Tension de sortie de l'onduleur triphasé à deux niveaux.....	16

*Chapitre 3*

<b>Figure III. 1.</b> Constitution d'un moteur à courant continu.....	18
<b>Figure III. 2.</b> Schéma électrique équivalent d'un moteur à courant continu.....	19
<b>Figure III. 3.</b> Bilan de puissance.....	22
<b>Figure III. 4.</b> Caractéristique électromécanique de vitesse.....	23
<b>Figure III. 5.</b> Caractéristique électromécanique du couple.....	24
<b>Figure III. 6.</b> Caractéristique électromécanique du couple.....	25
<b>Figure III. 7.</b> Fonctionnement à couple résistant constant ; (a) courbe $C = f(\Omega)$ , (b) courbe $P = f(\Omega)$ .....	26
<b>Figure III. 8.</b> Fonctionnement à puissance constante ; (a) courbe $P = f(\Omega)$ , (b) courbe $C = f(\Omega)$ .....	26
<b>Figure III. 9.</b> Point de fonctionnement d'un groupe (moteur – charge entraînée).....	27
<b>Figure III. 10.</b> Caractéristique de réglage rhéostatique.....	29
<b>Figure III. 11.</b> Caractéristique de réglage par le flux.....	31
<b>Figure III. 12.</b> Caractéristique de réglage par la tension d'induit.....	32
<b>Figure III. 13.</b> Fonctionnement dans les quatre quadrants de la machine à courant continu.....	33
<b>Figure III. 14.</b> Deux redresseurs réversible (tout thyristors) montés en tête-bêche.....	35
<b>Figure III. 15.</b> Hacheur en pont.....	36
<b>Figure III. 16.</b> Schéma de principe de base d'une commande asservie.....	37
<b>Figure III. 17.</b> Schéma bloc d'un moteur à courant continu.....	38
<b>Figure III. 18.</b> Allure de la vitesse d'un moteur à courant continu en boucle ouverte.....	39
<b>Figure III. 19.</b> Allure de la vitesse d'un moteur à courant continu en boucle fermée.....	40

*Chapitre 4*

<b>Figure IV. 1.</b> Tension, courant et rapport de transformation.....	58
<b>Figure IV. 2.</b> Schéma électrique équivalent de la MAS réelle pour une phase.....	59
<b>Figure IV. 3.</b> Schéma équivalent complet de la MAS (partie secondaire).....	61
<b>Figure IV. 4.</b> Schéma équivalent complet de la MAS (partie secondaire).....	62
<b>Figure IV. 5.</b> Caractéristique du couple électromagnétique.....	65
<b>Figure IV. 6.</b> Variation de la tension d'alimentation.....	66
<b>Figure IV. 7.</b> Variation de la fréquence d'alimentation.....	67
<b>Figure IV. 8.</b> Variation simultanée de de la tension et la fréquence d'alimentation.....	69
<b>Figure IV. 9.</b> Variation de la résistance du rotor.....	70
<b>Figure IV. 10.</b> Variation de la résistance du rotor.....	71

## Listes des figures

---

**Figure IV. 11.** Variation de la résistance du rotor..... 72

### *Chapitre 5*

**Figure V. 1.** Schéma équivalent de Behn Eschenbourg..... 95

**Figure V. 2.** Diagramme de Behn-Eschenbourg..... 96

**Figure V. 3.** Représentation du fonctionnement dans les quatre quadrants..... 99

**Figure V. 4.** Représentation de la structure de l'association de la MS avec les convertisseurs  
statiques. .... 102

**Figure V. 5.** Représentation de la structure de l'association de la MS avec les convertisseurs  
statiques. .... 103

**Figure V. 6.** Asservissement de la vitesse du moteur synchrone autopiloté alimenté par un onduleur  
de courant. .... 105

**Figure V. 7.** Schéma structurel de l'asservissement de vitesse d'un moteur synchrone autopiloté  
alimenté par un onduleur de tension..... 106

*Chapitre 1*

**Tableau I. 1** Fonctionnement des différents types des machines électriques..... 4

**Tableau I. 2.** Caractéristique couple/vitesse..... 6

*Chapitre 2*

**Tableau II. 1.** Paramètres de la technique MLI sinus-triangle..... 14

*Chapitre 3*

**Tableau III. 1.** Configurations de Hacheur en pont. .... 36

# **Introduction Générale**

Ce support de cours sur la commande des machines électriques s'adresse aux étudiants de troisième année en électrotechnique et est divisé en cinq chapitres.

Le premier chapitre, Introduction à la commande des machines électriques, pose les bases de l'entraînement des machines électriques. Vous apprendrez l'avantage de la commande des différentes machines électriques ainsi que les différents types des machines électriques utilisées pour les contrôler.

Le deuxième chapitre, Commande des convertisseurs statiques (Technique MLI), aborde les différentes techniques de commande des convertisseurs statiques. Vous étudierez notamment la technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) qui permet de contrôler la tension et le courant fournis aux machines électriques alternatives.

Le chapitre trois porte sur la régulation de la vitesse des moteurs à courant continu. Il se concentre sur l'examen des caractéristiques des machines à courant continu à excitation séparée et shunt, et explique comment ajuster la vitesse de ces moteurs en utilisant les paramètres du moteur. Le chapitre couvre également les différentes configurations possibles pour associer les convertisseurs statiques avec le moteur afin de permettre la variation de vitesse selon la source d'alimentation, ainsi que l'asservissement de vitesse d'un moteur à courant continu.

Le chapitre quatre est consacré à la variation de vitesse des moteurs asynchrones. Il traite de la modélisation du bilan de puissance d'un moteur asynchrone et explique comment ajuster la vitesse de ces moteurs en utilisant des techniques de contrôle de la fréquence et de la tension d'alimentation. De plus, le chapitre étudie les différentes configurations possibles pour associer les convertisseurs statiques avec le moteur afin de permettre la variation de vitesse.

Enfin, le cinquième chapitre, Variation de vitesse des moteurs synchrones, explore la commande des moteurs synchrones. Vous étudierez comment varier la vitesse de ces moteurs en utilisant la technique de l'autopilotage.

Chaque chapitre est accompagné d'exercices corrigés pour vous permettre de mettre en pratique les connaissances acquises.

Nous espérons que ce support de cours vous aidera à comprendre les principes de base de la commande des machines électriques et à développer vos compétences en la matière.

# Chapitre I

## Chapitre I. Introduction à la commande des machines électriques

### I.1. Généralités

L'évolution des technologies conduit à utiliser des machines électriques nécessitant des vitesses de rotation précises et variable.

Les machines électriques sont employées dans un grand nombre de domaines de l'industrie, en particulier pour la conversion d'énergie. Celle-ci prend généralement la forme d'une conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique ou inversement. La machine électrique est dite **Réversible**.

- Conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique : développement d'un couple mécanique dans un entraînement à vitesse constante ou variable
- Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique : production d'une tension alternative ou continue à l'aide d'un groupe moteur génératrice, ou freinage électrique d'un moteur fonctionnant en Génératrice

La réalisation de cette conversion peut se faire :

- En boucle ouverte, sans vérification du résultat obtenu,
- En boucle fermée, avec vérification et ajustement du résultat en fonction des perturbations internes ou externes au système.

### I.2. Différents types des machines électriques

Le tableau I.1 présente le fonctionnement des différents types des machines électriques.

**Tableau I. 1** Fonctionnement des différents types des machines électriques

Machine	Moteur	Génératrice
Courant Continu	À Courant Continu	Dynamo
Machine Asynchrone	Asynchrone (MAS)	Hypo synchrone
Machine Synchrone	Synchrone (MS)	Alternateur

### I.3. Entraînements Electriques

#### I.3.a. Définition

L'entraînement utiliser par la machine électrique pour produire des mouvements s'appelle : *Entrainement électrique* et celle qui nécessite la variation de vitesse s'appelle : *Entrainement électrique à vitesse variable*.

#### I.3.b. Constitution d'un système d'entraînement électrique à vitesse variable

Un système d'entraînement électrique à vitesse variable est un ensemble de dispositif technique constituant par :

- Source d'alimentation alternative ou continue ;
- Convertisseurs statiques (redresseur, hacheur, onduleur) ;
- Machine électrique à courant continu ou alternatif ;
- Capteur de vitesse ou de position.
- Régulateur, dans le cas des systèmes fonctionnant en boucle fermée, permettant de régler certaines variables de l'entraînement, le plus souvent le courant et la vitesse.

#### I.3.c. Choix d'un système d'entraînement

Le choix d'un système d'entraînement à caractéristiques et conditions d'emploi

- Nature de la source d'énergie (continue ou alternative).
- Puissance maximale.
- Vitesse maximale.
- Plage de réglage de la vitesse.
- Caractéristique du couple résistant /vitesse.
- Performances dynamiques
- Synchronisation avec d'autres machines
- Conditions d'environnement, possibilités d'entretien.
- Conditions provenant du réseau d'alimentation.
- Coût d'investissement et d'exploitation.

- 1 ou 2 sens de rotation.
- Charge entraînant ou non.
- Freinage naturel ou forcé.

### I.3.d. Caractéristiques de l'entraînement

La caractéristique couple/vitesse de la charge entraînée joue un rôle essentiel. On distinguera les charges caractérisées par un couple selon quatre catégories présentées dans le tableau I.2 :

Tableau I. 2. Caractéristique couple/vitesse

Catégories	Couple	Puissance	Exemple
Proportionnel au carré de la vitesse	$C = KN^2$	$P = KN^3$	<ul style="list-style-type: none"><li>• Turbopompes</li><li>• Ventilateurs</li></ul>
Proportionnel à la vitesse	$C = KN$	$P = KN^2$	<ul style="list-style-type: none"><li>• Presses</li></ul>
Constant	$C = K$	$P = KN$	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pompes</li><li>• Engins</li></ul>
Inversement proportionnel à la vitesse	$C = K/N$	$C = K$	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bobineuses</li></ul>

### I.3.e. Avantages d'un système d'entraînement

L'importance des économies réalisables par l'utilisation des entraînements à vitesse variable dépend de plusieurs facteurs :

- Le temps de fonctionnement de l'installation ;
- Le temps d'utilisation à charge partielle ;
- Les caractéristiques de la charge entraînée ;
- Le rendement des divers appareils ;
- Le coût de l'énergie électrique.

## **I.4. Asservissement des machines électriques**

### **I.4.a. Commande en boucle ouverte**

Le réglage d'une machine électrique peut se faire simplement en ajustant la variable de commande de son alimentation, ce qui fixe le point d'opération de la machine. Un tel contrôle est défini comme une commande en boucle ouverte.

Malgré sa simplicité, les inconvénients d'une telle commande sont multiples :

- Les perturbations externes : variations de la charge, variations de température, variation des paramètres de la machine.
- Les perturbations internes : échauffements, les modifications et dérives de caractéristiques, en fonction de la puissance fournie.

### **I.4.b. Commande en boucle fermée**

Les inconvénients d'une commande en boucle ouverte peuvent être en grande partie éliminés par l'emploi de la rétroaction, il en résulte une commande en boucle fermée.

Un signal proportionnel à la variable à régler (vitesse, tension...), est prélevé et comparé à une référence, ou valeur désirée de la variable à régler. L'erreur amplifiée est traitée par un régulateur sert de variable de commande à l'alimentation de la machine.

## **I.5. Avantage de la commande des machines électriques**

- Variation de la vitesse
- L'économie d'énergie.
- Réduire les surintensités aux démarrages.
- Faciliter le démarrage des charges fortement inertielles.
- Allonger la durée de vie de la machine électrique.
- Réduction de la maintenance.
- Démarrer, Arrêter, accélérer et inverser le sens de rotation de la machine électrique.

### I.6. Point de fonctionnement

Chaque machine fonctionne dans le point de fonctionnement. Ce point est déterminé à partir de l'intersection de couple électromagnétique avec le couple résistant pour avoir une vitesse de rotation constante suivant le premier principe de la dynamique en rotation déterminé par l'équation suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r$$

- Si  $C_{em} - C_r = 0 \Rightarrow \Omega = \text{Constante}$  : Fonctionnement stable.
- Si  $C_{em} - C_r < 0 \Rightarrow \Omega < 0$ : Décélération. Il faut augmenter la puissance électromagnétique.
- Si  $C_{em} - C_r > 0 \Rightarrow \Omega > 0$ : Accélération. Il faut diminuer la puissance électromagnétique.

### I.7. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de comprendre l'importance des entraînements électriques à vitesse variable, de la constitution d'un système adapté, des caractéristiques clés de l'entraînement, des avantages des systèmes d'entraînement, de l'asservissement des machines électriques et de la commande des machines électriques. Ces connaissances sont essentielles pour le développement de systèmes électriques modernes et ouvrent la voie à des applications prometteuses dans divers domaines.

# Chapitre II

## Chapitre II. Commande des convertisseurs statiques (Technique MLI)

### II.1.Introduction

Les onduleurs de tension constituent principalement par les composants à semi-conducteurs totalement commandables. Ils sont présents dans des domaines d'application les plus variés, dont le plus connu est celui de la variation de vitesse des machines à courants alternatif.

Pour des fréquences élevées, la technique MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) est largement utilisée pour piloter ce type d'onduleur pour l'intérêt d'avoir une tension de sortie proche de la sinusoïde et permettre aussi de régler à la fois l'amplitude et la fréquence de la tension de sortie en gardant la source de tension continue constante.

### II.2.Onduleur de tension triphasé

#### II.2.a. Structure de l'onduleur de tension triphasé

La figure (II.1) représente un onduleur de tension triphasé à deux niveaux formés de trois demi ponts monophasés.

Chaque demi pont comprend un Thyristor (ou un Transistor) et une diode. On obtient l'onduleur triphasé à six interrupteurs  $T_1, T_2, T_3, T'_1, T'_2, T'_3$ . La tension totale du bus continu vaut  $E$ .

Les interrupteurs  $T_1$  et  $T'_1, T_2$  et  $T'_2, T_3$  et  $T'_3$ , doivent être complémentaires deux à deux pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif  $I_a, I_b$  et  $I_c$ .

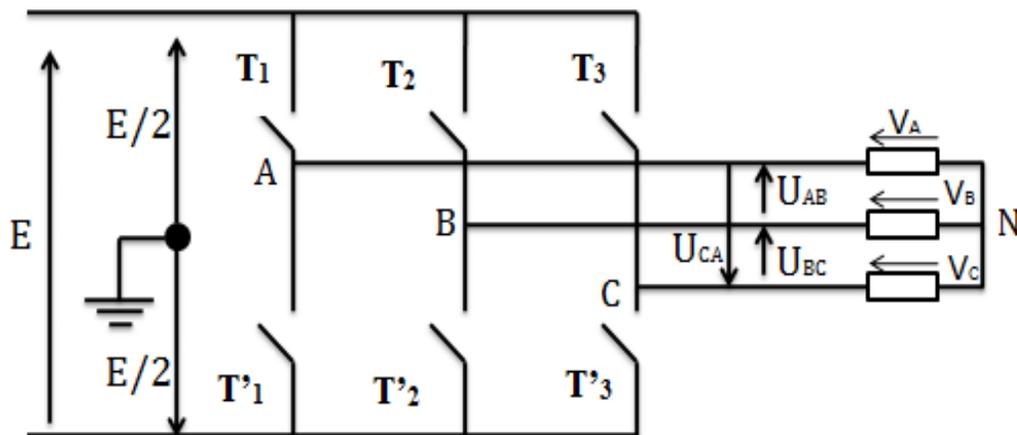


Figure II. 1. Schéma simplifié de l'onduleur triphasé.

### II.2.b. Modélisation de l'onduleur de tension

Il est à noter que les interrupteurs d'un même bras ne doivent jamais être fermés simultanément. Chaque interrupteur n'est donc enclenché qu'une seule fois par période, c'est à dire que :

- Si  $S_i = 1$ , alors  $T_i$  est fermée et  $T_i'$  est ouvert,
- Si  $S_i = 0$ , alors  $T_i$  est ouvert et  $T_i'$  est ferme.

Avec  $i = 1, 2, 3$ .

Pour un système équilibré, la somme des trois tensions est nulle

$$V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} = 0 \quad (\text{II.1})$$

On peut écrire :

$$(V_{A0} + V_{0N}) + (V_{B0} + V_{0N}) + (V_{C0} + V_{0N}) = 0 \quad (\text{II.2})$$

$$V_{0N} = -\frac{1}{3}(V_{A0} + V_{B0} + V_{C0}) \quad (\text{II.3})$$

$$V_{N0} = \frac{1}{3}(V_{A0} + V_{B0} + V_{C0}) \quad (\text{II.4})$$

On peut aussi écrire les tensions entre les points A, B et C et le point 0 fictif :

$$\begin{cases} V_{A0} = V_{AN} + V_{N0} \\ V_{B0} = V_{BN} + V_{N0} \\ V_{C0} = V_{CN} + V_{N0} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

En substituant (II.4) dans (II.5) et en simplifiant :

$$\begin{cases} V_{AN} = V_{A0} - V_{N0} = \frac{2}{3}V_{A0} - \frac{1}{3}V_{B0} - \frac{1}{3}V_{C0} \\ V_{BN} = V_{B0} - V_{N0} = -\frac{1}{3}V_{A0} + \frac{2}{3}V_{B0} - \frac{1}{3}V_{C0} \\ V_{CN} = V_{C0} - V_{N0} = -\frac{1}{3}V_{A0} - \frac{1}{3}V_{B0} + \frac{2}{3}V_{C0} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Sachant que les tensions entre les points A, B, et C et le point 0 peuvent être représentés par rapport aux états de commutation

$$\begin{cases} V_{A0} = S_1 \cdot E \\ V_{B0} = S_2 \cdot E \\ V_{C0} = S_3 \cdot E \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

En substituant (II.7) sur (II.6), on obtient :

$$\begin{cases} V_{AN} = E. \left( \frac{2}{3}S_1 - \frac{1}{3}S_2 - \frac{1}{3}S_3 \right) \\ V_{BN} = E. \left( -\frac{1}{3}S_1 + \frac{2}{3}S_2 - \frac{1}{3}S_3 \right) \\ V_{CN} = E. \left( -\frac{1}{3}S_1 - \frac{1}{3}S_2 + \frac{2}{3}S_3 \right) \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Les trois tensions générées par l'onduleur sont données par la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

### II.3. Technique MLI

#### II.3.a. Principe de base de la technique de MLI

La Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) est réalisée par la comparaison d'une tension de référence sinusoïdale à faible fréquence (modulante) avec une porteuse à haute fréquence de forme triangulaire illustrée dans la figure II.2.

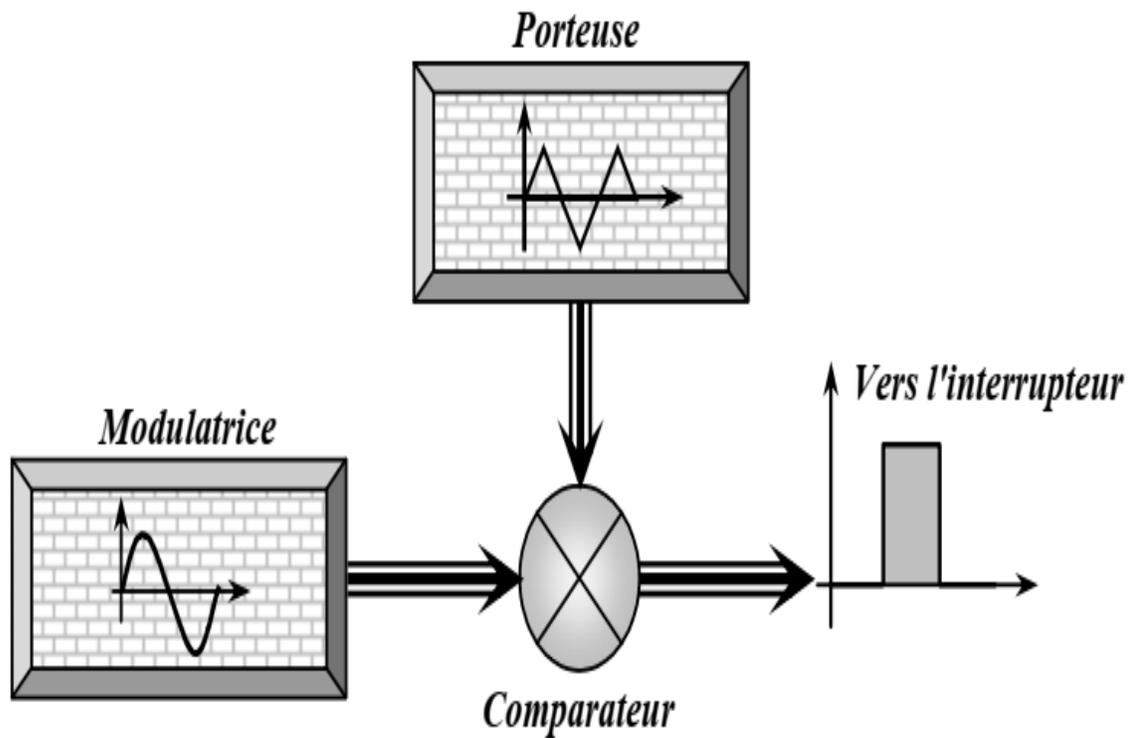


Figure II. 2. Schéma synoptique de la MLI.

La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse.

À la sortie de l'onduleur, la tension n'est pas purement sinusoïdale, elle comporte des harmoniques. Cette technique sert à remédier ce problème et elle a les avantages suivants :

- Variation de la fréquence de la tension de sortie.
- Elimination de certaines harmoniques de tension.

### II.3.b. Caractéristiques de la technique MLI

La technique de la MLI se caractérise par deux grandeurs :

- *Coefficient de réglage*

Il est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulante ( $A_r$ ) à celle de l'onde porteuse ( $A_p$ ).

$$r = \frac{A_r}{A_p} \quad (\text{II.10})$$

- *Indice de modulation*

Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse ( $f_p$ ) à celle de l'onde modulante ( $f_r$ ).

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (\text{II.11})$$

Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersections entre la porteuse et la modulante qui peut être résumé par l'algorithme suivant :

$$\begin{cases} \text{Si } A_r \geq A_p \Rightarrow S_i = 1 \\ \text{Si non } S_i = 0 \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Avec :  $i = [1, 2, 3]$

### II.3.c. Simulation de la technique de MLI sinus-triangle

La simulation du fonctionnement de l'onduleur à deux niveaux a été réalisée par le logiciel Matlab/Simulink pendant une durée de 0.02s.

Pour générer les impulsions de commande MLI sinus-triangle de l'onduleur de tensions, une porteuse triangulaire est comparée au signal de référence sinusoïdale.

Le schéma bloc de Simulink correspondant à cette technique est donné par la figure II.3.

Les paramètres de simulation illustrés dans le tableau II.1.

Tableau II. 1. Paramètres de la technique MLI sinus-triangle.

$f_r$	50 Hz
$m$	21
$A_r$	$220.\sqrt{2}$
$r$	0.8

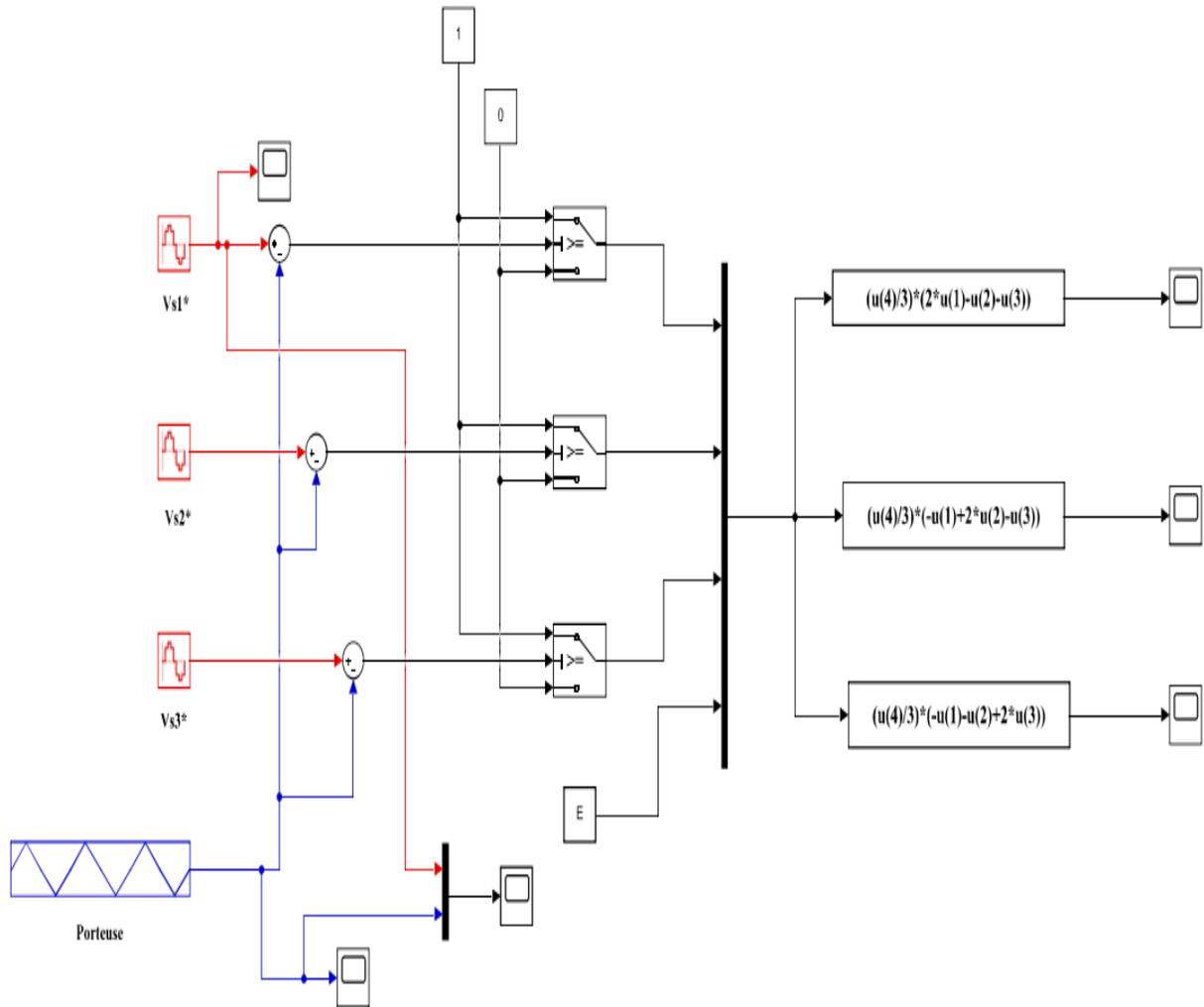
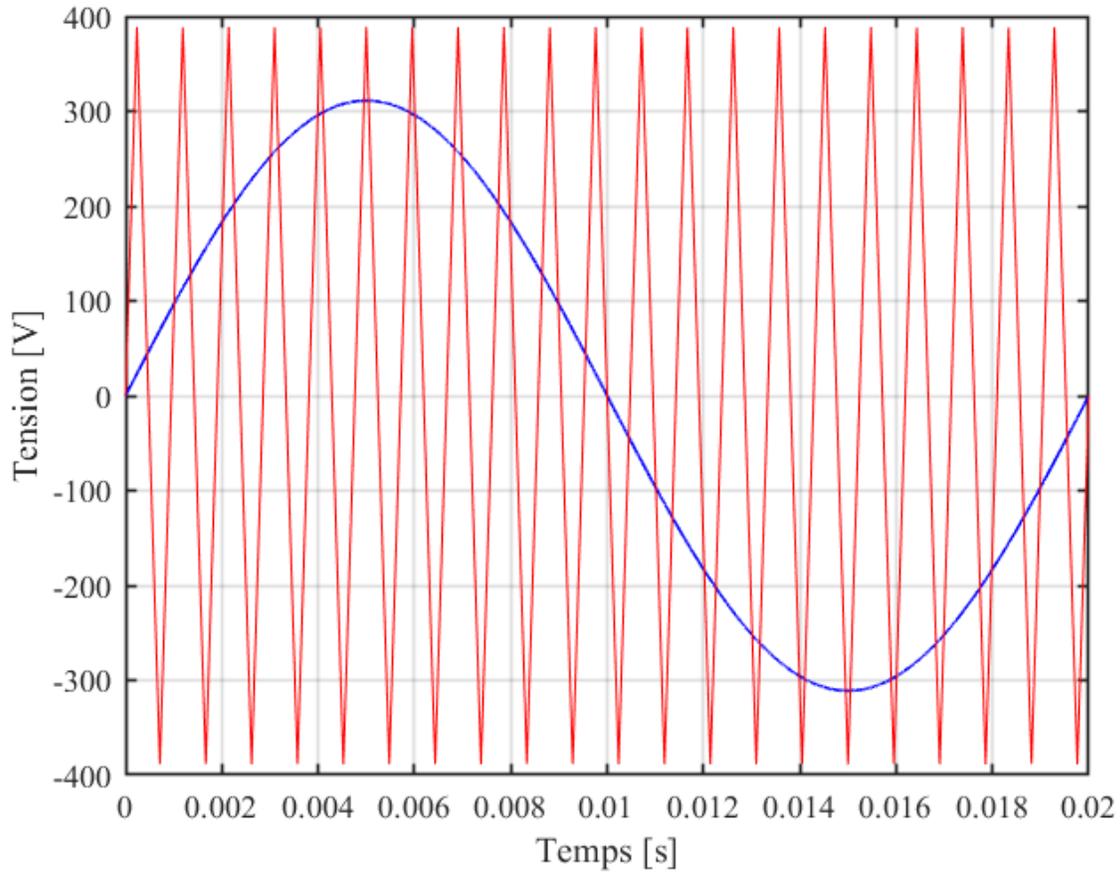


Figure II. 3. Schéma bloc Simulink de technique MLI sinus-triangle.

La figure II.4 représente les différents signaux de la technique de MLI sinus-triangle à une seule porteuse de l'onduleur triphasé à deux niveaux.



**Figure II. 4.** Différents signaux de la technique de MLI sinus-triangle à une seule porteuse.

La figure II.5 représente la tension de sortie de l'onduleur à deux niveaux. On constate que l'allure de tension de sortie de l'onduleur prend la forme presque sinusoïdale mais il contient des perturbations ou des déchets dus aux harmoniques engendrées par les interrupteurs statiques.

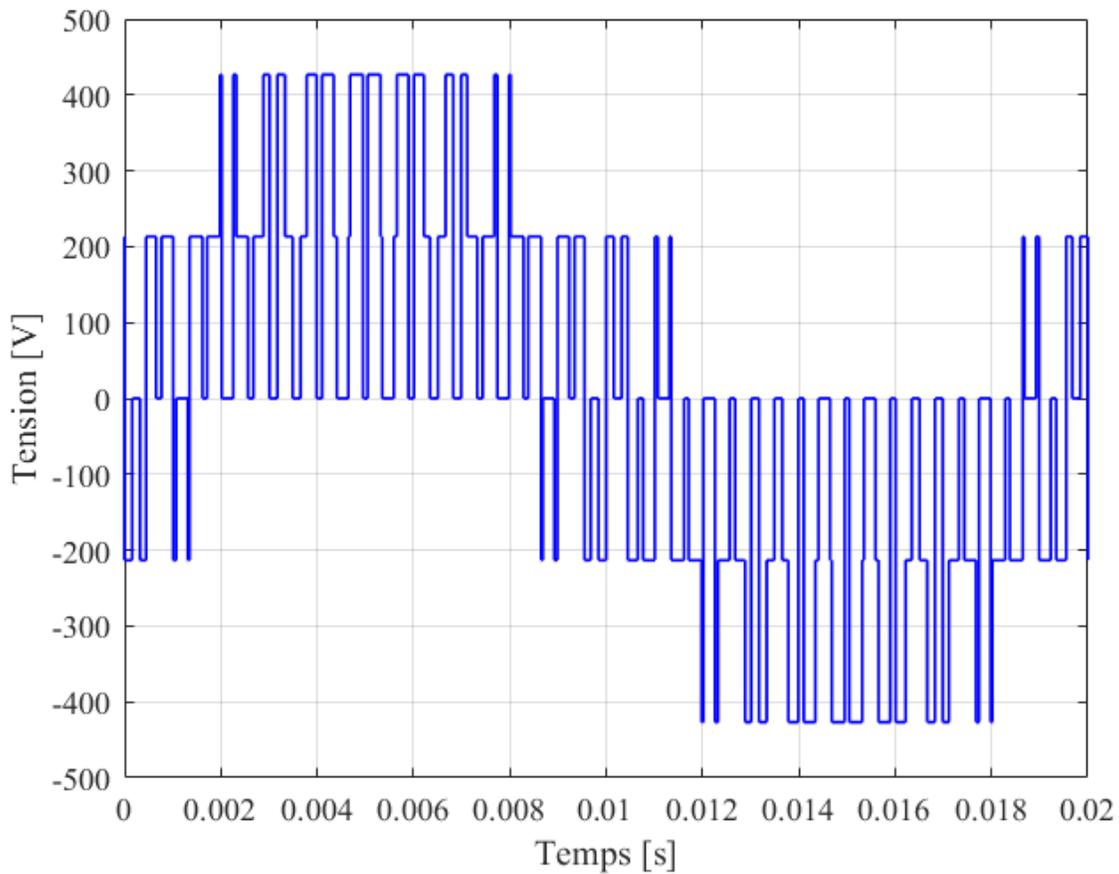


Figure II. 5. Tension de sortie de l'onduleur triphasé à deux niveaux

#### II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons consacré notre étude à la modélisation d'un onduleur à deux niveaux, en mettant l'accent sur les différentes techniques de commande utilisées. Ensuite, nous nous sommes concentrés spécifiquement sur la technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) et avons procédé à sa modélisation. Enfin, nous avons présenté les résultats de simulation qui démontrent l'efficacité de l'application de la technique de MLI pour la commande de l'onduleur à deux niveaux.

# Chapitre III

## Chapitre III. Réglage de la vitesse des moteurs à courant continu

### III.1. Introduction

La Machine à Courant Continu (MCC) est un convertisseur d'énergie, totalement réversible, elle peut fonctionner soit en moteur, convertissant de l'énergie électrique en énergie mécanique, soit en génératrice, convertissant de l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle s'agit d'un convertisseur électromécanique.

### III.2. Rappels sur les machines à courant continu

#### III.2.a. Constitution

Les machines à courant continu sont essentiellement composées :

1. D'un circuit électrique :
  - L'inducteur porté par le stator, pour créer un flux magnétique.
  - L'induit porté par le rotor, pour créer un courant ou une force selon le mode de fonctionnement de la machine.
2. D'un circuit magnétique pour canaliser le flux magnétique.
3. Les balais et le collecteur pour distribuer le courant électrique au circuit inducteur.

La figure III.1 présente les différentes parties constituant la machine à courant continu.

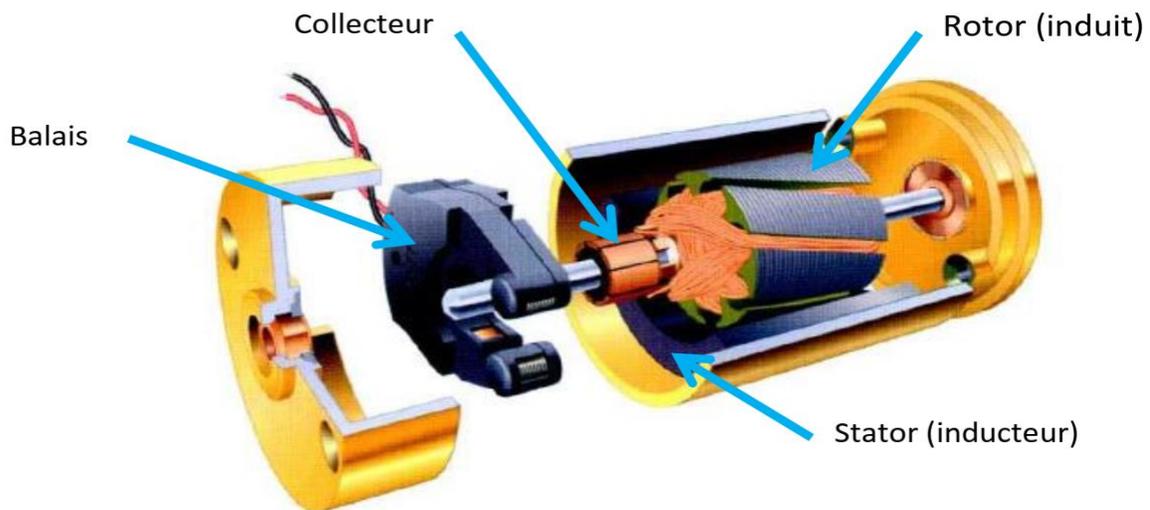


Figure III. 1. Constitution d'un moteur à courant continu.

### III.2.b.Principe de fonctionnement

L'inducteur est alimenté par un courant continu afin de créer un champ magnétique (flux d'excitation). Ce flux est orienté du pôle nord vers le pôle sud.

Grace au dispositif balais/collecteur qui permet de répartir les courants dans les conducteurs de l'induit. En conséquence, après la loi de Laplace ( $\vec{F} = I \cdot \vec{L} \wedge \vec{B}$ ) l'action du champ magnétique sur un courant produit une force qui se traduit par un couple qui fait tourner le moteur.

### III.2.c. Equations et Schéma électrique équivalent

Le schéma électrique équivalent d'un moteur à courant continu est présenté dans la figure III.2.

L'induit est constitué d'une force électromotrice (*f. e. m*) notée  $E$ , proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur, d'une résistance  $R_a$  (résistance de l'induit) et d'une inductance  $L_a$ .

L'inducteur est constitué d'une résistance  $R_e$  (résistance de l'inducteur) et d'une inductance  $L_e$  pour créer un champ magnétique  $\phi_e$ .

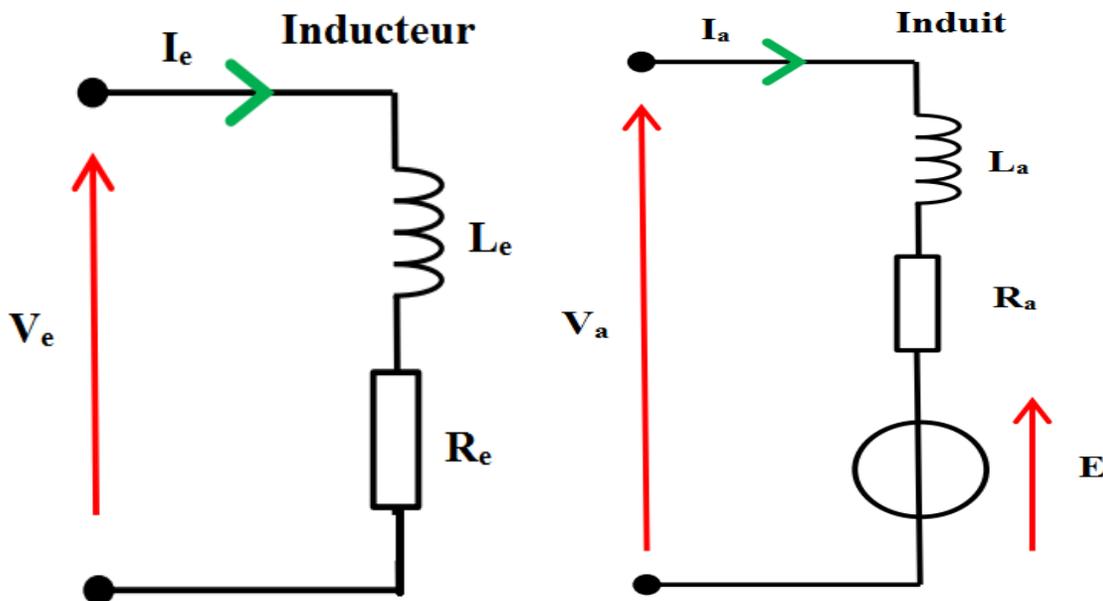


Figure III. 2. Schéma électrique équivalent d'un moteur à courant continu.

La loi des mailles appliquée au modèle électrique d'un MCC :

$$\text{Inducteur : } V_e = R_e \cdot I_e + L_e \cdot \frac{dI_e}{dt} \quad (\text{III.1})$$

$$\text{Induit : } V_a = R_a \cdot I_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} + E \quad (\text{III.2})$$

Soit en régime permanent :

$$\text{Inducteur : } V_e = R_e \cdot I_e \quad (\text{III.3})$$

$$\text{Induit : } V_a = R_a \cdot I_a + E \quad (\text{III.4})$$

$$\text{Le flux d'excitation : } \phi_e = k' \cdot I_e \quad (\text{III.5})$$

$$E = k \cdot \phi_e \cdot \Omega = K_e \cdot \Omega \quad (\text{III.6})$$

$K_e$  est appelée **constante électrique** du moteur.

Equation mécanique :

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f \cdot \Omega \quad (\text{III.7})$$

$$C_{em} = K_c \cdot I_a \quad (\text{III.8})$$

$K_c$  est appelée **constante mécanique** du moteur.

Très fréquemment, on adoptera  $K_e = K_c = K$

### III.2.d. Différents types de machines à courant continu

Il existe quatre types d'excitation (manière d'alimenter l'induit et l'inducteur) :

1. MCC à excitation séparée (indépendante)
2. MCC à excitation shunt.
3. MCC à excitation série.
4. MCC à excitation composée.

### III.2.e. Bilan de puissance

Le bilan de puissance prend en compte les différentes puissances mises en jeu lors du fonctionnement moteur.

Puissance consommée par l'induit :

$$P_a = V_a \cdot I_a$$

Puissance consommée par l'inducteur :

$$P_e = V_e \cdot I_e$$

Puissance consommée par le moteur :

$$P_{am} = P_a + P_e = V_a \cdot I_a + V_e \cdot I_e = P'_{ja} + P'_{je} + P_{em}$$

Les pertes électriques par effet joule sont :

L'induit :

$$P'_{ja} = R_a \cdot I_a^2$$

L'inducteur :

$$P'_{je} = R_e \cdot I_e^2 = V_e \cdot I_e$$

La puissance qui passe de la forme électrique à la forme mécanique est  $P_{em}$  (Puissance électromagnétique). Exprimons cette puissance :

$$P_{em} = P_u + P'_C = E \cdot I_a = C_{em} \cdot \Omega$$

Avec :

$P'_C$  : Pertes collectives sont les pertes mécaniques et magnétiques.

$P_u$  : La puissance utile est égale à la puissance absorbée diminuée de l'ensemble des pertes :

$$P_u = P_{em} - P'_C = P_{am} - P'_{ja} - P'_{je} - P'_C = V_a \cdot I_a + V_e \cdot I_e - P'_{ja} - P'_{je} - P'_C = V_a \cdot I_a - P'_{ja} - P'_C$$

Rendement :

Le rendement du moteur est défini comme le rapport de la puissance utile sur la puissance absorbée.

$$\eta = \frac{P_u}{P_{am}}$$

Le bilan de puissance illustré dans la figure III.3

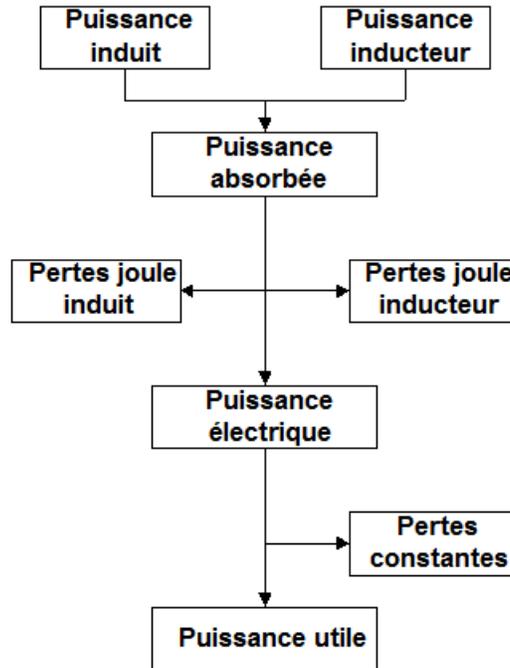


Figure III. 3. Bilan de puissance.

### III.3. Mise en rotation et l'arrêt du moteur

Il est important de respecter le mode opératoire suivant :

- Mise en rotation : l'alimentation de l'induit étant à l'arrêt, on alimente l'inducteur jusqu'à l'obtention de l'intensité  $I_e$  indiquée sur la plaque signalétique.  
La tension de l'induit étant initialement à 0, on l'augmente progressivement jusqu'à l'obtention soit de la vitesse souhaitée pour le moteur, soit de la tension d'induit désirée.
- Arrêt du moteur : il faut diminuer d'abord la tension de l'induit jusqu'à l'arrêt du moteur avant de couper l'alimentation de l'inducteur.

Il y a emballement du moteur si l'on coupe l'excitation de la machine alors que l'induit est sous tension.

Il faut bien retenir la règle suivante : ne jamais couper l'alimentation de l'inducteur du moteur à courant continu à excitation indépendante tant que l'induit est sous tension.

### III.4. Caractéristique électromécanique et mécaniques des machines à courant continu

#### III.4.a. Caractéristique électromécanique de vitesse $\Omega = f(I_a)$

On considère que :  $V_a = V_{an} = Constante$  et  $\phi_e = \phi_{en} = Constante$

$$V_a = R_a \cdot I_a + E = R_a \cdot I_a + K \cdot \Omega$$

$$\Omega = \frac{V_a - R_a \cdot I_a}{K} = \frac{V_a}{K} - \frac{R_a \cdot I_a}{K}$$

Pour le fonctionnement à vide le courant d'induit est nul ( $I_a = 0$ ).

La vitesse de rotation est donnée par l'expression suivante :

$$\Omega_0 = \frac{V_a}{K}$$

La caractéristique électromécanique de vitesse est donnée par la figure III.4.

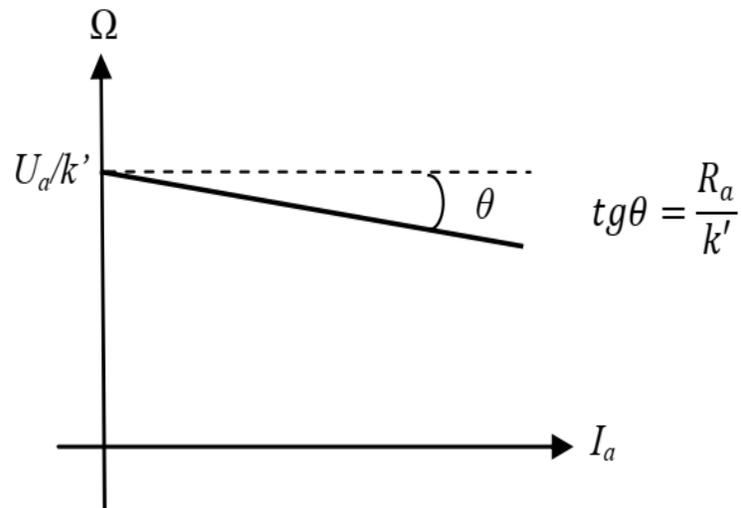


Figure III. 4. Caractéristique électromécanique de vitesse.

### III.4.b. Caractéristique électromécanique du couple $C_{em} = f(I_a)$

On considère que :  $V_a = V_{an} = Constante$  et  $\phi_e = \phi_{en} = Constante$

L'expression du couple est :  $C_{em} = K \cdot I_a$

Pour le fonctionnement à vide le courant d'induit est nul ( $I_a = 0$ ), le couple électromagnétique est nul  $C_{em} = 0 Nm$ .

La caractéristique électromécanique du couple est donnée par la figure III.5.

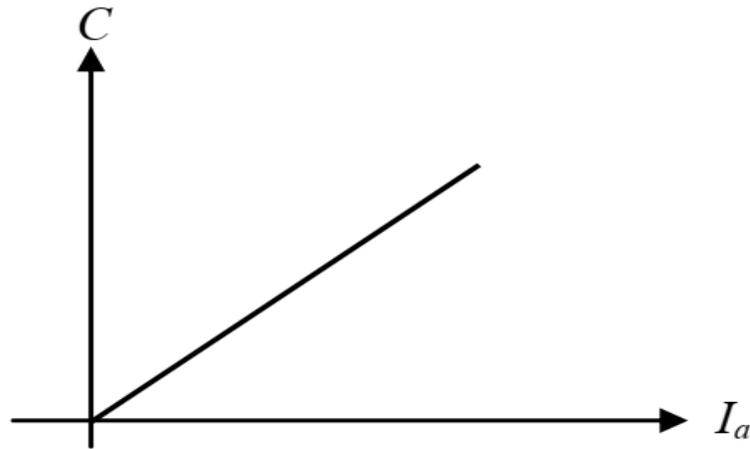


Figure III. 5. Caractéristique électromécanique du couple.

### III.4.c. Caractéristique mécanique $C_{em} = f(\Omega)$

On considère que :  $V_a = V_{an} = Constante$  et  $\phi_e = \phi_{en} = Constante$

$$\begin{cases} V_a = R_a \cdot I_a + E = R_a \cdot I_a + K \cdot \Omega \\ C_{em} = K \cdot I_a \end{cases}$$

$$I_a = \frac{V_a - K \cdot \Omega}{R_a} = \frac{V_a}{R_a} - \frac{K \cdot \Omega}{R_a}$$

$$C_{em} = K \cdot \frac{V_a}{R_a} - \frac{K^2 \cdot \Omega}{R_a}$$

Pour le fonctionnement à vide le courant d'induit est nul ( $I_a = 0$ ), le couple électromagnétique est nul  $C_{em} = 0 Nm$ . La vitesse de rotation est donnée par l'expression suivante :

$$\Omega_0 = \frac{V_a}{K}$$

La caractéristique mécanique est donnée par la figure III.6. C'est une droite descendante presque parallèle à l'axe des couples.

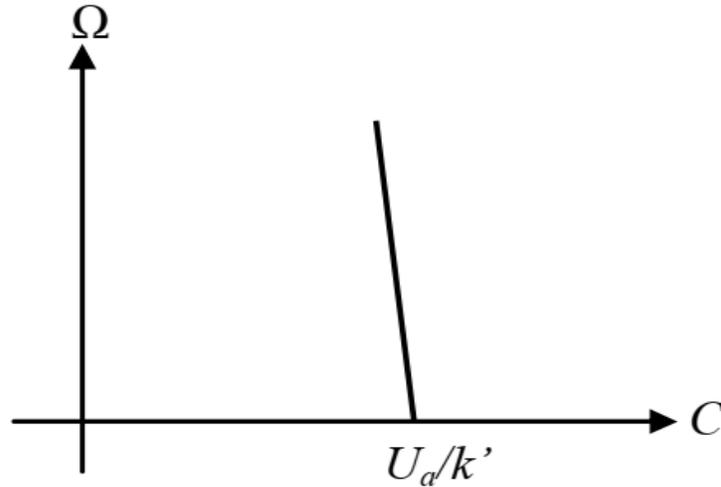


Figure III. 6. Caractéristique électromécanique du couple.

### III.5. Caractéristiques mécaniques des charges entraînées

La caractéristique mécanique de la charge entraînée est souvent compliquée. En pratique, on se réfère habituellement à l'un ou l'autre des deux modes de fonctionnement suivants :

#### III.5.a. Fonctionnement à couple constant

Les figures du fonctionnement à couple résistant constant sont illustrées dans les figures III.7.

Le couple est indépendant de la vitesse, tandis que la puissance est proportionnelle à la vitesse. Ce fonctionnement est applicable à l'ensemble des engins.

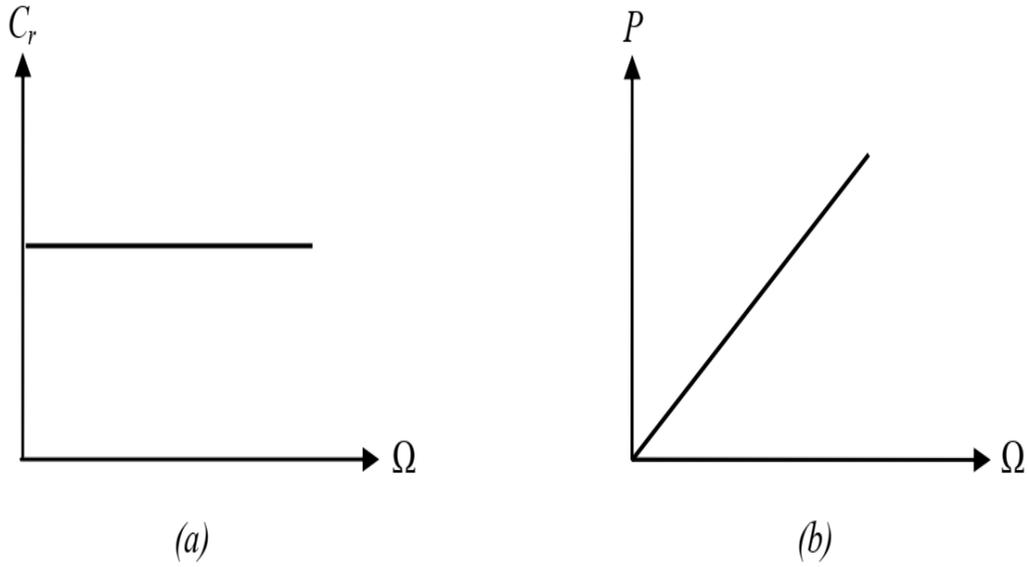


Figure III. 7. Fonctionnement à couple résistant constant ; (a) courbe  $C = f(\Omega)$ , (b) courbe  $P = f(\Omega)$ .

### III.5.b.Fonctionnement à puissance constante

Les figures du fonctionnement à puissance constante sont illustrées dans les figures III.8. Le couple ( $C = P/\Omega = K/\Omega$ ) est-il inversement proportionnel à la vitesse. Ce fonctionnement est applicable à l'ensemble des engins.

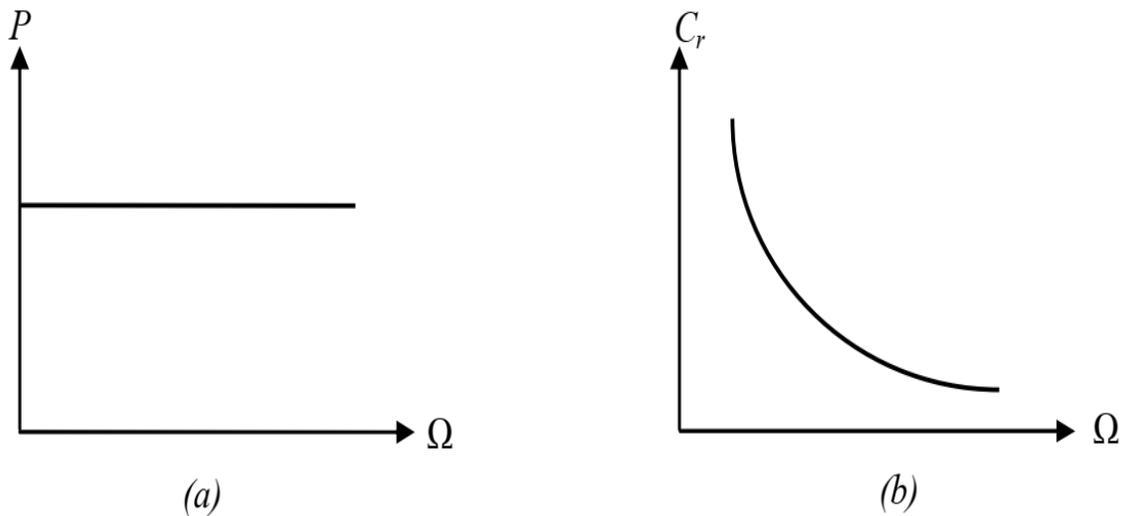


Figure III. 8. Fonctionnement à puissance constante ; (a) courbe  $P = f(\Omega)$ , (b) courbe  $C = f(\Omega)$ .

### III.6. Caractéristique d'un groupe moteur-charge entraînée

#### III.6.a. Démarrage

Lors de démarrage la vitesse est nulle  $\Omega_d = 0$  donc la force électromotrice) est aussi nulle ( $E = 0$ ). Après l'équation électrique de l'induit, le courant de démarrage sera très important est son équation est donné comme suit :

$$I_d = \frac{V_a}{R_a}$$

Afin de réduire le courant de démarrage pour le but de protégé le moteur contre les surintensités. Un Rhéostat de démarrage ( $R_{hd}$ )est inséré en série avec la résistance d'induit qui il est :

- Maximal à l'instant de démarrage.
- Nul lorsque le moteur atteint sa vitesse maximale.

$$I_d = \frac{V_a}{R_a + R_{hd}}$$

#### III.6.b. Point de fonctionnement

Le point d'intersection des deux courbes  $C_{em} = f(\Omega)$  et  $C_r = f(\Omega)$  donne le point de fonctionnement comme illustré dans la figure III.9. A ce point on détermine le couple nominal ( $C_{em}$ ) et la vitesse nominale ( $\Omega$ ) du groupe.

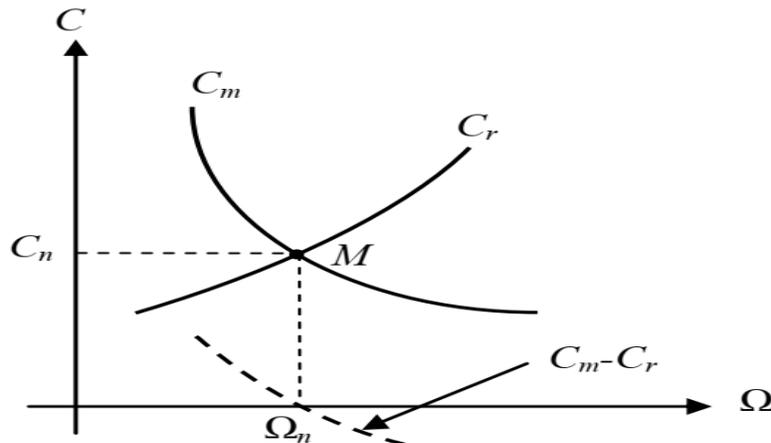


Figure III. 9. Point de fonctionnement d'un groupe (moteur – charge entraînée).

### III.6.c. Stabilité

Le groupe moteur-charge entraînée est stable si le couple moteur est égal au couple résistant.

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r = 0$$

### III.6.d. Freinage électrique

Le freinage électrique se fait par action sur la tension d'alimentation par association d'un Rhéostat.

### III.7. Méthode de réglage de la vitesse d'un moteur à courant continu

La relation de la vitesse d'un moteur à courant continu (à excitation shunt ou séparée) est donnée par :

$$\Omega = \frac{V_a - R_a \cdot I_a}{K} = \frac{V_a - R_a \cdot I_a}{k \cdot \phi_e}$$

En explorant cette relation, il apparaît clairement trois possibilités pour le réglage de la vitesse :

- Action sur  $R_a$  (réglage rhéostatique) ;
- Action sur  $\phi_e$  (réglage par le flux) ;
- Action sur  $V_a$  (réglage par la tension).

#### III.7.a. Réglage rhéostatique

La tension et le flux étant fixés à leur valeur nominale, on peut réduire la vitesse en augmentant la résistance de l'induit à l'aide d'un rhéostat ( $R_h$ ) branché en série avec l'induit.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega = \frac{V_a - (R_a + R_h) \cdot I_a}{K} \\ C_{em} = K \cdot I_a \end{array} \right.$$

Pour le fonctionnement à vide le courant d'induit est nul ( $I_a = 0$ ), le couple électromagnétique est nul  $C_{em} = 0 \text{ Nm}$ . La vitesse de rotation est donnée par l'expression suivante :

$$\Omega_0 = \frac{V_a}{K}$$

Cette vitesse ne dépend pas de ( $R_h$ ).

Au démarrage, la vitesse étant nul et le courant d'induit est donnée par l'expression suivante :

$$I_d = \frac{V_a}{R_a + R_{hd}}$$

Donc le couple est donné par l'expression suivante :

$$C_{em} = K \cdot \frac{V_a}{R_a + R_{hd}}$$

Lorsqu'on augmente ( $R_h$ ), le couple diminue.

La figure III.10 présente caractéristique de réglage rhéostatique. Ce réglage est mauvais à la fois sur le plan technique parce qu'un bon réglage doit entraîner un déplacement des caractéristiques parallèlement à la caractéristique d'origine et sur le plan économique car la consommation d'énergie dans le Rhéostat est revient plus importante que la chute de vitesse.

Ce procédé de réglage est utilisé pour le démarrage ou le freinage.

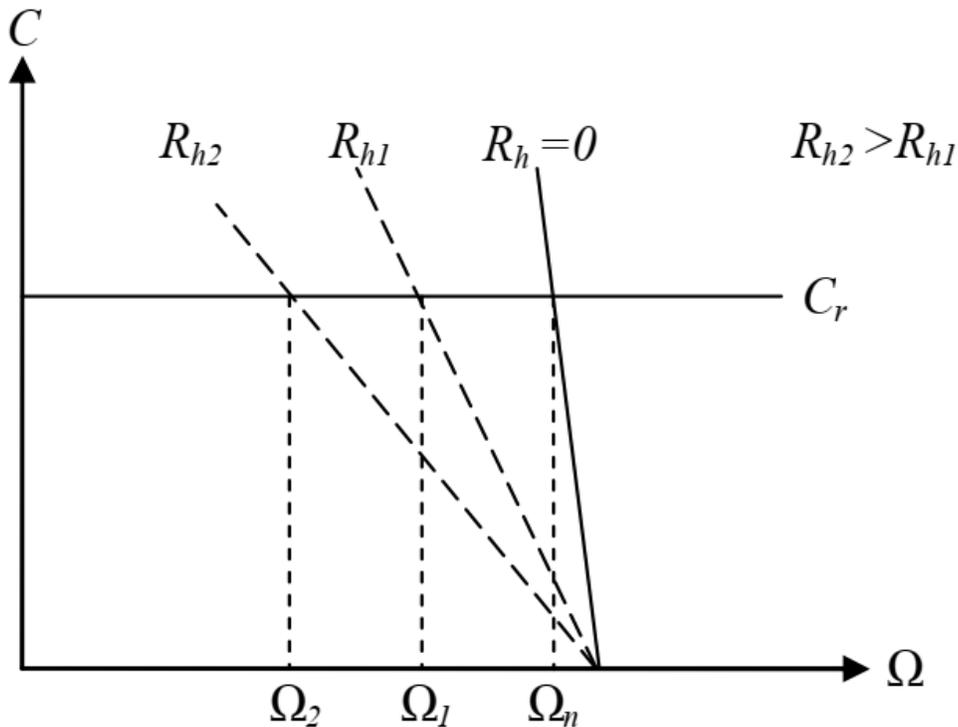


Figure III. 10. Caractéristique de réglage rhéostatique.

### III.7.b. Réglage par le flux

On a toujours intérêt à appliquer le flux maximal lors du démarrage pour permettre au moteur de porter à la vitesse nominale. Par ailleurs, du fait de la saturation du fer de la machine, cette valeur du flux ne peut pas être augmentée davantage.

Le réglage est obtenu par augmentation de la vitesse par rapport à la vitesse nominale en réduisant la valeur du flux (courant d'excitation). Cela se réalise par l'introduction d'un rhéostat de champ dans le circuit d'excitation.

$$\begin{cases} \Omega = \frac{V_a - (R_a + R_h) \cdot I_a}{K} \\ C_{em} = K \cdot I_a \end{cases} = \begin{cases} \Omega = \frac{V_a - (R_a + R_h) \cdot I_a}{k \cdot \phi_e} \\ C_{em} = k \cdot \phi_e \cdot I_a \end{cases}$$

Pour le fonctionnement à vide le courant d'induit est nul ( $I_a = 0$ ), le couple électromagnétique est nul  $C_{em} = 0 \text{ Nm}$ . La vitesse de rotation est donnée par l'expression suivante :

$$\Omega_0 = \frac{V_a}{K} = \frac{V_a}{k \cdot \phi_e}$$

Lorsqu'on réduit la valeur de  $\phi_e$ , la vitesse augmente.

Au démarrage, la vitesse étant nul et le courant d'induit est donnée par l'expression suivante :

$$I_d = \frac{V_a}{R_a}$$

Donc le couple est donné par l'expression suivante :

$$C_{em} = K \cdot \frac{V_a}{R_a} = k \cdot \phi_e \cdot \frac{V_a}{R_a}$$

Lorsqu'on réduit la valeur de  $\phi_e$ , le couple diminue.

La figure III.11 présente caractéristique de réglage par le flux. Ce réglage est mauvais du point de vue technique parce qu'un bon réglage doit entraîner un déplacement des caractéristiques parallèlement à la caractéristique d'origine.

Il est bon du point de vue économique car la puissance dissipée dans l'inducteur étant très faible par rapport à la puissance absorbée ; le rendement du moteur ne sera pas modifié.

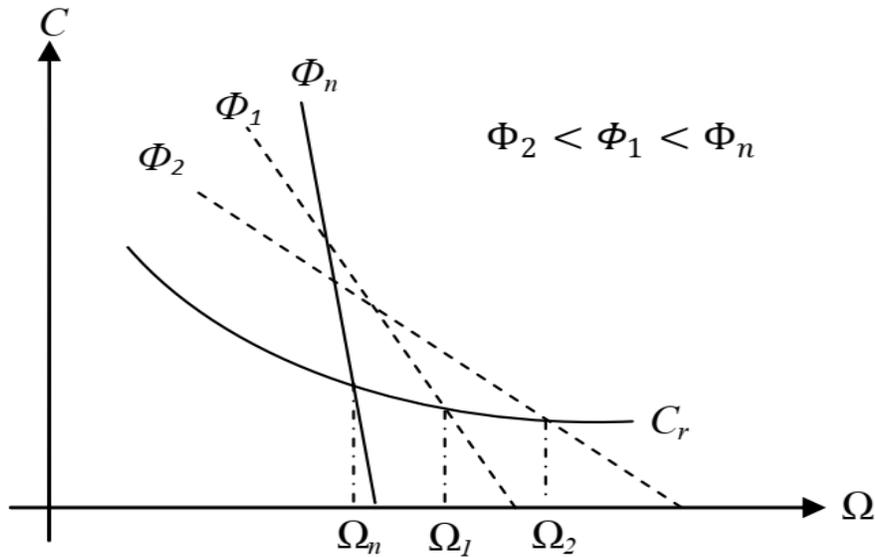


Figure III. 11. Caractéristique de réglage par le flux.

### III.7.c. Réglage par la tension d'induit

Le flux d'excitation étant fixé à sa valeur nominale, le réglage est obtenu par réduction de la vitesse par rapport à la vitesse nominale en réduisant la valeur de la tension d'alimentation.

$$\begin{cases} \Omega = \frac{V_a - (R_a + R_h) \cdot I_a}{K} \\ C_{em} = K \cdot I_a \end{cases}$$

Pour le fonctionnement à vide le courant d'induit est nul ( $I_a = 0$ ), le couple électromagnétique est nul  $C_{em} = 0 \text{ Nm}$ . La vitesse de rotation est donnée par l'expression suivante :

$$\Omega_0 = \frac{V_a}{K}$$

Lorsqu'on réduit la valeur de la tension d'induit ( $V_a$ ), la vitesse diminue.

Au démarrage, la vitesse étant nul et le courant d'induit est donnée par l'expression suivante :

$$I_d = \frac{V_a}{R_a}$$

Donc le couple est donné par l'expression suivante :

$$C_{em} = K \cdot \frac{V_a}{R_a}$$

Lorsqu'on réduit la valeur de la tension d'induit ( $V_a$ ), le couple diminue.

La figure III.12 présente caractéristique de réglage par la tension d'induit. Ce mode de réglage est excellent du point de vue technique car les caractéristiques ne sont pas déformées (l'allure shunt est conservée), d'autre part du point de vue économique, aucune énergie n'est gaspillée et le rendement reste élevé.

Cependant, cette solution nécessite l'emploi d'un variateur de vitesse. Ceci a constitué pendant de longues années un réel problème, mais avec le développement de l'électronique de puissance, les convertisseurs électroniques assurent parfaitement ce type de réglage.

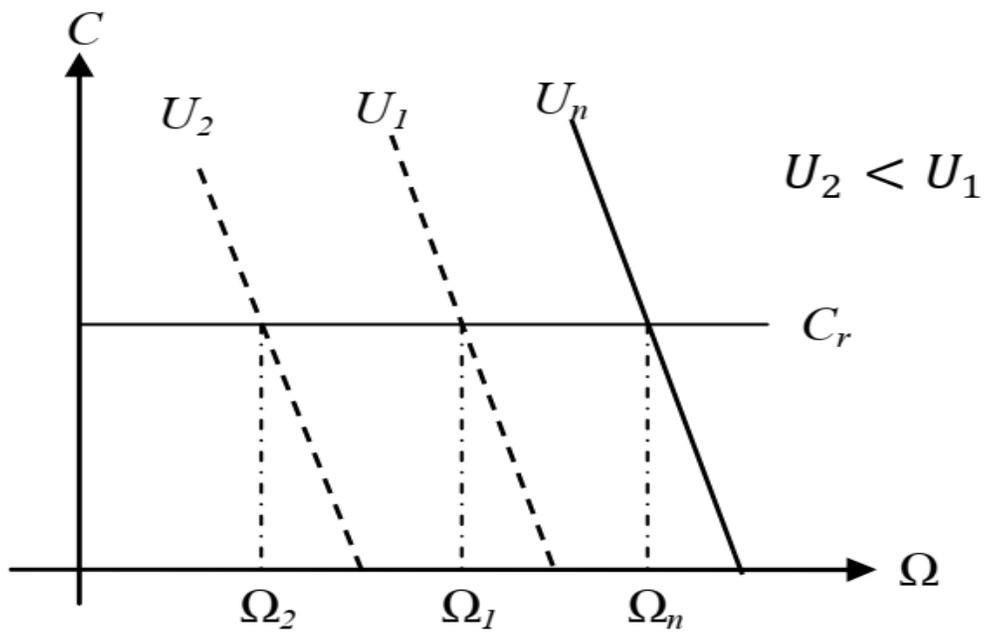


Figure III. 12. Caractéristique de réglage par la tension d'induit.

### III.8. Principe de dispositifs d'alimentations

La machine électrique fonctionne en quatre quadrants suivant le dispositif d'alimentation présenter dans la figure III.13.

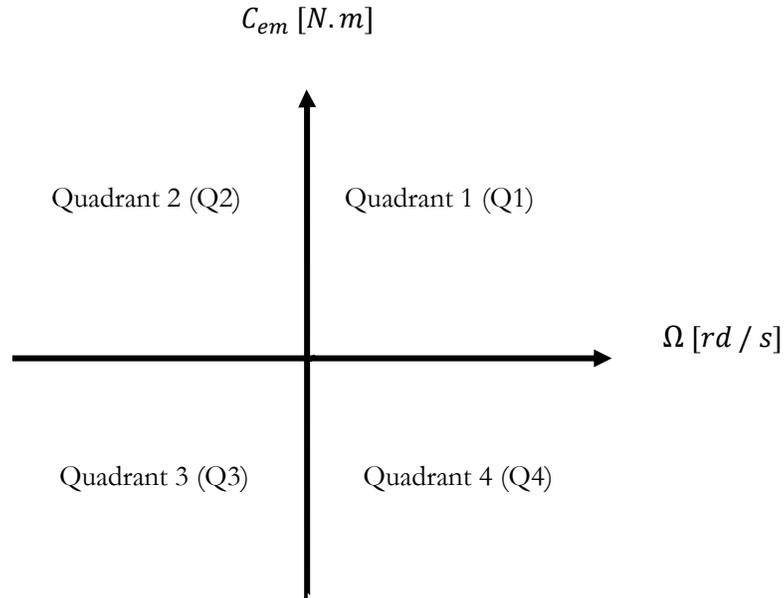


Figure III. 13. Fonctionnement dans les quatre quadrants de la machine à courant continu.

**Quadrant 1 :**

$$\begin{cases} V_a > 0 \\ I_a > 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Omega > 0 \\ C_{em} > 0 \end{cases} \Rightarrow C_{em} \times \Omega = P_{em} > 0$$

Le dispositif d'alimentation fournit une puissance électrique à la machine à courant continu. La machine fonctionne en moteur dans le sens direct.

**Quadrant 2 :**

$$\begin{cases} V_a < 0 \\ I_a > 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Omega < 0 \\ C_{em} > 0 \end{cases} \Rightarrow C_{em} \times \Omega = P_{em} < 0$$

Le dispositif d'alimentation recevoir une puissance électrique à partir de la machine à courant continu. La machine fonctionne en génératrice inverse.

**Quadrant 3 :**

$$\begin{cases} V_a < 0 \\ I_a < 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Omega < 0 \\ C_{em} < 0 \end{cases} \Rightarrow C_{em} \times \Omega = P_{em} > 0$$

Le dispositif d'alimentation fournit une puissance électrique à la machine à courant continu. La machine fonctionne en moteur dans le sens inverse.

**Quadrant 4 :**

$$\begin{cases} V_a > 0 \\ I_a < 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Omega > 0 \\ C_{em} < 0 \end{cases} \Rightarrow C_{em} \times \Omega = P_{em} < 0$$

Le dispositif d'alimentation recevoir une puissance électrique à partir de la machine à courant continu. La machine fonctionne en génératrice dans le sens direct.

Pour passer des quadrants Q1 vers Q4 ou Q4 vers Q1 et des quadrants Q2 vers Q3 ou Q3 vers Q2. Le dispositif d'alimentation devra être réversible en courant.

Pour passer des quadrants Q1 vers Q2 ou Q2 vers Q1 et des quadrants Q2 vers Q4 ou Q4 vers Q2. Le dispositif d'alimentation devra être réversible en tension.

### III.9. Les convertisseurs associant à la machine à courant continu

On utilise deux types des convertisseurs selon la nature de la source d'alimentation.

- Source d'alimentation alternative : Deux redresseurs réversible (tout thyristors) montés en tête-bêche.
- Source d'alimentation continue : Hacheur en pont complet.

#### III.9.a. Deux redresseurs réversible montés en tête-bêche

Pour assurer le fonctionnement dans les quatre quadrants à partir d'une alimentation alternative, on doit utiliser deux montages redresseurs principaux tout thyristors montés en tête-bêche aux bornes d'induit illustré dans la figure III.14, l'un fournit au moteur le courant  $I_d$  positif, l'autre le courant  $I_d$  négatif.

Afin de garantir le fonctionnement dans les quatre quadrants à partir d'une source d'alimentation alternative, il est nécessaire d'adopter une configuration comportant deux montages redresseurs principaux à thyristors, montés en tête-bêche aux bornes de l'induit du moteur. Cette configuration est présentée dans la figure III.X et permet de fournir au moteur un courant  $I_d$  positif et un courant  $I_d$  négatif.

Le pont 1 assure le fonctionnement dans les quadrants 1 et 4.

Le pont 2 assure le fonctionnement dans les quadrants 2 et 3.

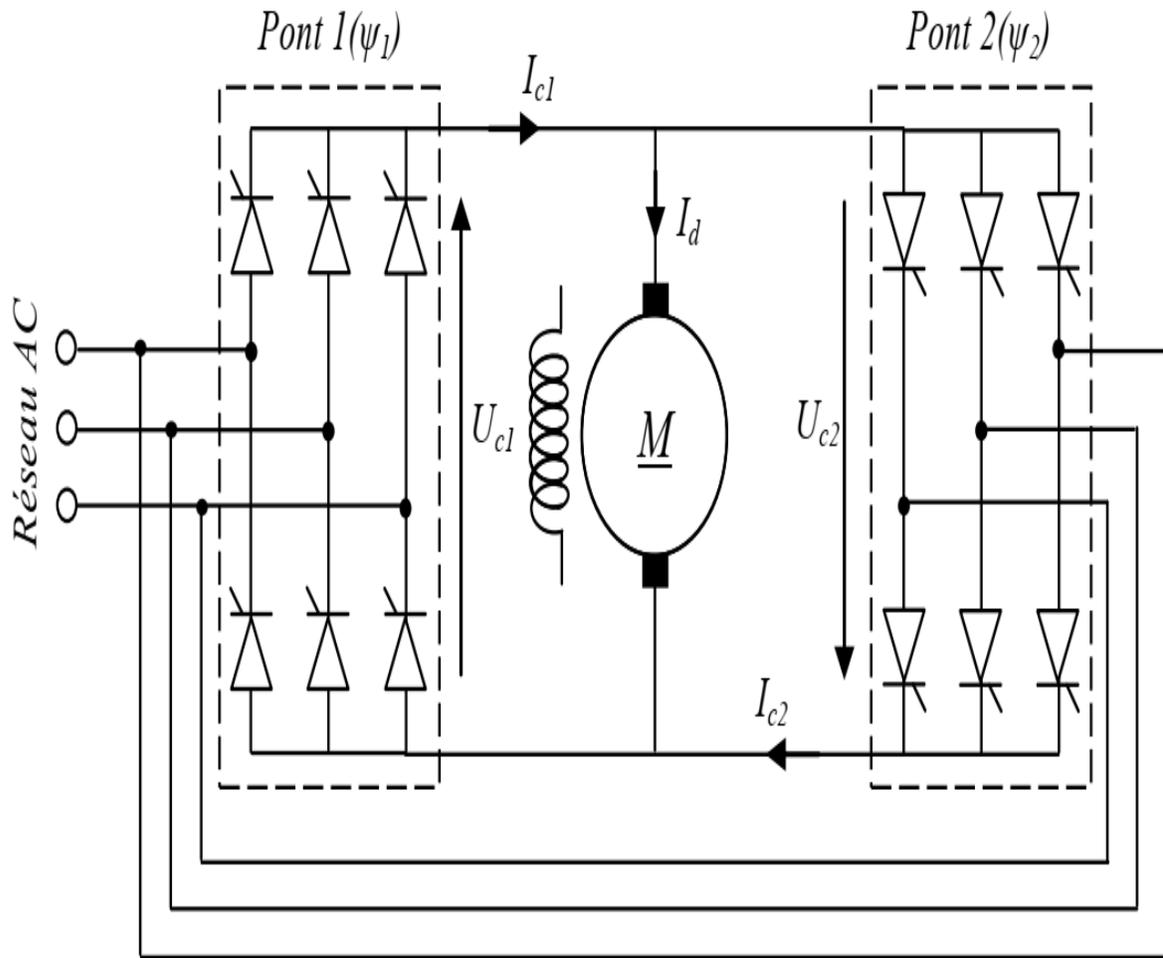


Figure III. 14. Deux redresseurs réversible (tout thyristors) montés en tête-bêche.

### III.9.b. Hacheur en pont

Lorsque la machine à courant continu fonctionne dans les quatre quadrants, il est nécessaire d'utiliser un hacheur en pont réversible en courant et en tension illustrée dans la figure III.15.

Toutefois, pour opérer dans les quadrants 2 et 3, la source qui alimente le hacheur doit être capable de changer de courant.

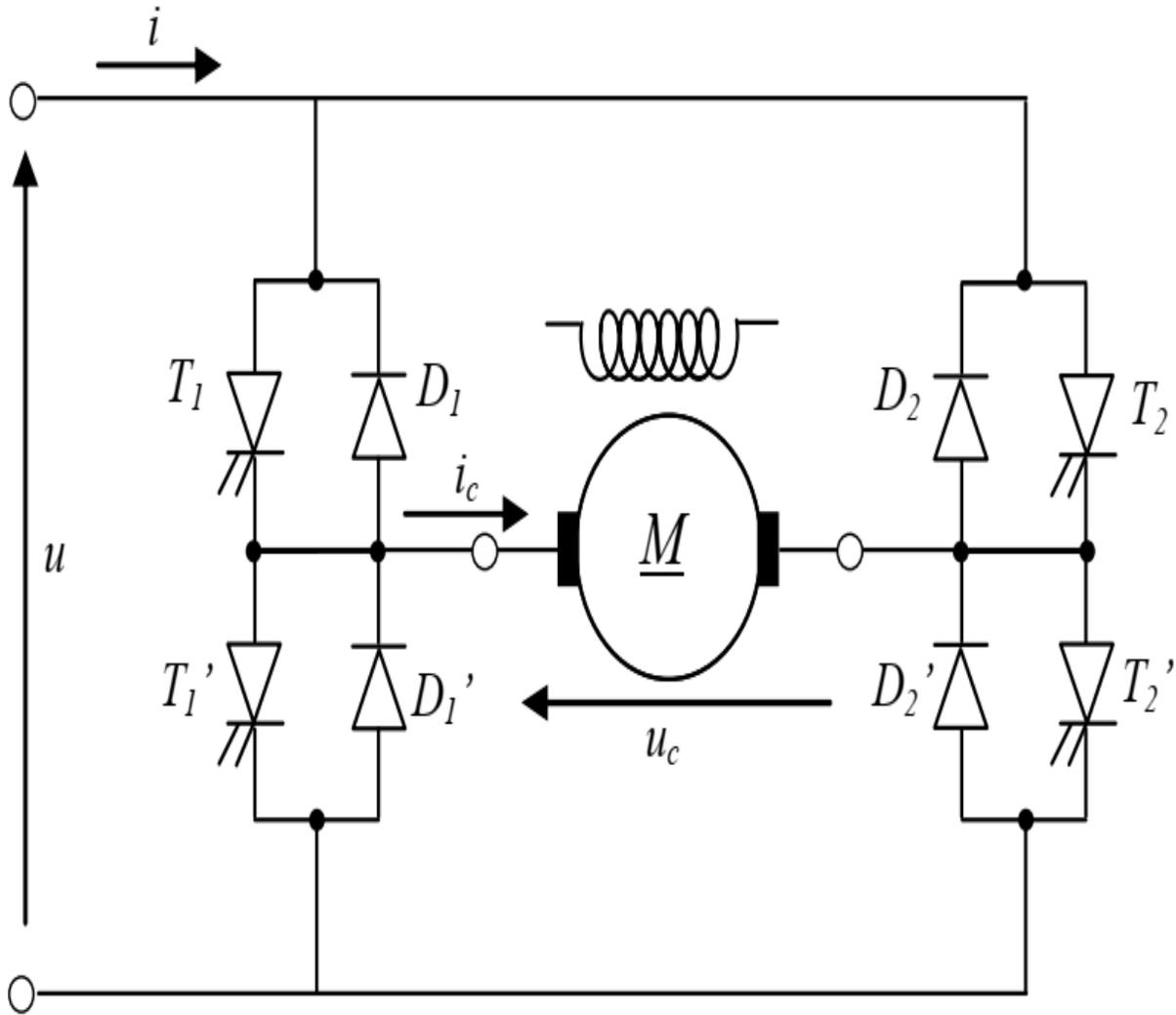


Figure III. 15. Hacheur en pont.

Le tableau III.1 illustre les diverses configurations possibles de l'hacheur en pont.

Tableau III. 1. Configurations de Hacheur en pont.

Configuration	$T_1, T_2'$	$T_1, T_2$	$D_1, D_2'$	$D_1, D_2$	Fonctionnement
1	Fermés	Ouverts	Ouvertes	Ouvertes	Moteur
2	Ouverts	Ouverts	Ouvertes	Fermées	Génératrice
3	Ouverts	Fermés	Ouvertes	Ouvertes	Moteur
4	Ouverts	Ouverts	Fermées	Ouvertes	Génératrice

### III.10. Asservissement de vitesse d'un moteur à courant continu

La figure III.16 illustre le schéma de principe utilisé pour le réglage de la vitesse d'un moteur à courant continu.

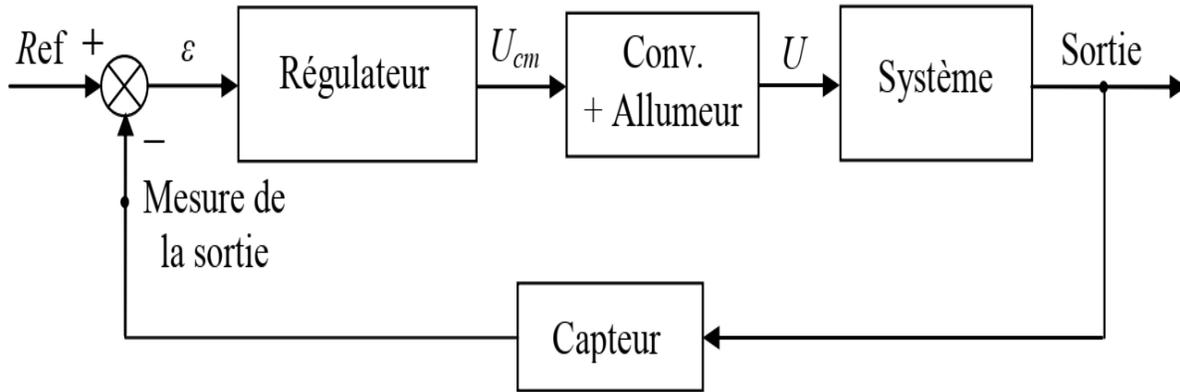


Figure III. 16. Schéma de principe de base d'une commande asservie.

Le moteur peut se mettre sous la forme de deux équations différentielles non linéaires suivantes :

- *Equation électrique*

$$V_a = R_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + E_a$$

- *Equation mécanique*

$$J \frac{d\Omega(t)}{dt} = C_{em} - C_r + f\Omega(t)$$

Avec :

$$E_a = K_a \Omega(t); C_{em} = K_a I_a(t)$$

Pour déterminer la fonction de transfert d'un moteur à courant continu, on utilise la transformée de Laplace des équations différentielles.

La fonction de transfert d'un moteur à courant continu est déterminée de la façon suivante :

- *Equation électrique*

$$V_a = R_a I_a(S) + L_a S I_a(S) + K \Omega(S)$$

- *Equation mécanique*

$$J S \Omega(S) = K I_a(S) - C_r + f \Omega(S)$$

$$I_a(S) = \frac{V_a - K \Omega(S)}{R_a + L_a S}$$

$$\Omega(S) = \frac{K I_a(S) - C_r}{f + JS}$$

La figure III.17 présente le schéma bloc d'un moteur à courant continu.

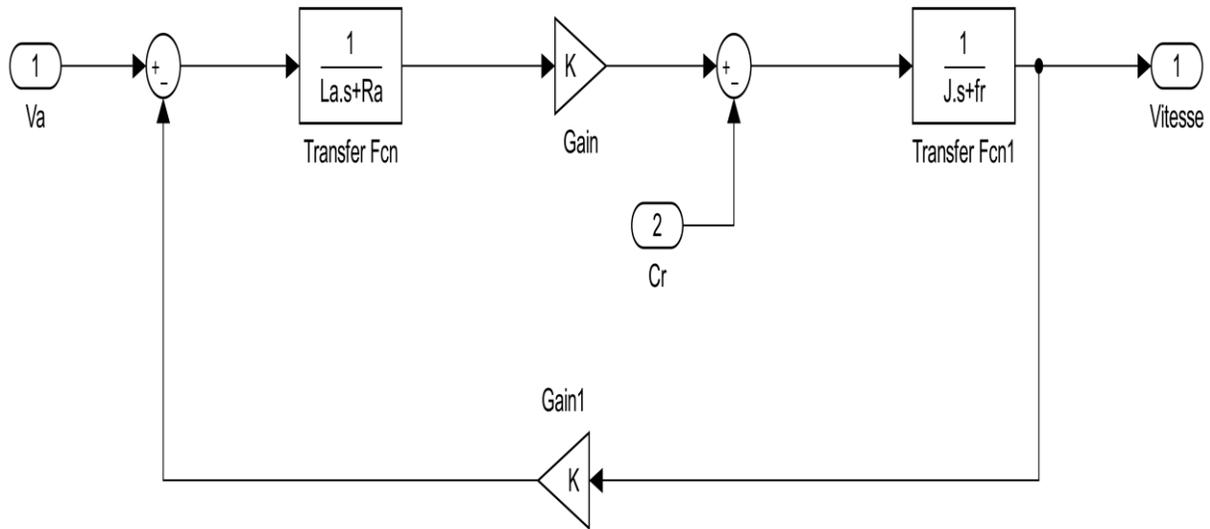


Figure III. 17. Schéma bloc d'un moteur à courant continu.

La fonction de transfert en boucle ouverte est :

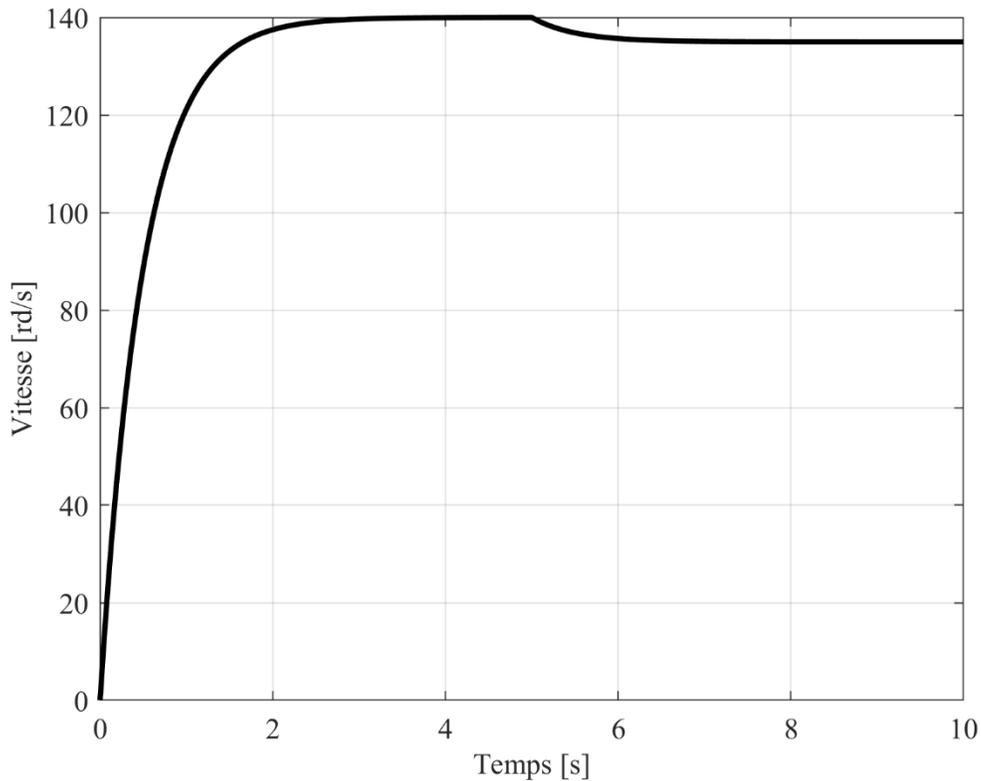
$$G_{BO}(S) = \frac{1}{R_a + L_a S} \cdot K \cdot \frac{1}{f + JS} = \frac{K}{(R_a + L_a S) \cdot (f + JS)} = \frac{K}{L_a JS^2 + (R_a J + L_a f)S + R_a f}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$G_{BF}(S) = \frac{G_{BO}(S)}{1 + K \cdot G_{BO}(S)} = \frac{K}{L_a JS^2 + (R_a J + L_a f)S + (R_a f + K^2)}$$

$$G_{BF}(S) = \frac{(K/L_a J)}{S^2 + \left(\frac{1}{L_a J}\right) (R_a J + L_a f)S + (R_a f + K^2)}$$

En examinant la figure III.18, qui présente la simulation de la vitesse d'un moteur à courant continu pendant une période de 10 secondes réalisée à l'aide du logiciel MATLAB, on peut voir que la vitesse diminue à partir de sa valeur initiale lorsqu'un couple résistant est appliqué.



**Figure III. 18.** Allure de la vitesse d'un moteur à courant continu en boucle ouverte.

Pour remédier à cette situation, une boucle de régulation de type PI (Proportionnel Intégral) est requise pour contrôler la vitesse du moteur à courant continu.

Si on suppose que les fonctions de transfert de convertisseur et celle de capteur est égal à 1.

$$G_{Conv}(S) = 1$$

$$G_{Capt}(S) = 1$$

Le régulateur PI est souvent utilisé dans les systèmes de contrôle de processus industriels qui sera utilisé pour contrôler la vitesse d'un moteur à courant continu.

$$G_{PI}(S) = K_P + \left(\frac{K_I}{S}\right) = \left(\frac{K_P}{S}\right)\left(S + \frac{K_I}{K_P}\right)$$

Après la détermination des gains de régulateurs PI, le résultat de simulation de la vitesse en boucle fermée est présenté dans la figure III.19.

Après cette figure on constate clairement que le bon choix des gains des régulateurs rendre le fonctionnement de moteur efficace et la vitesse de rotation suit sa référence avec succès et la vitesse revient a sa valeur de référence lors l'application de la charge résistant.

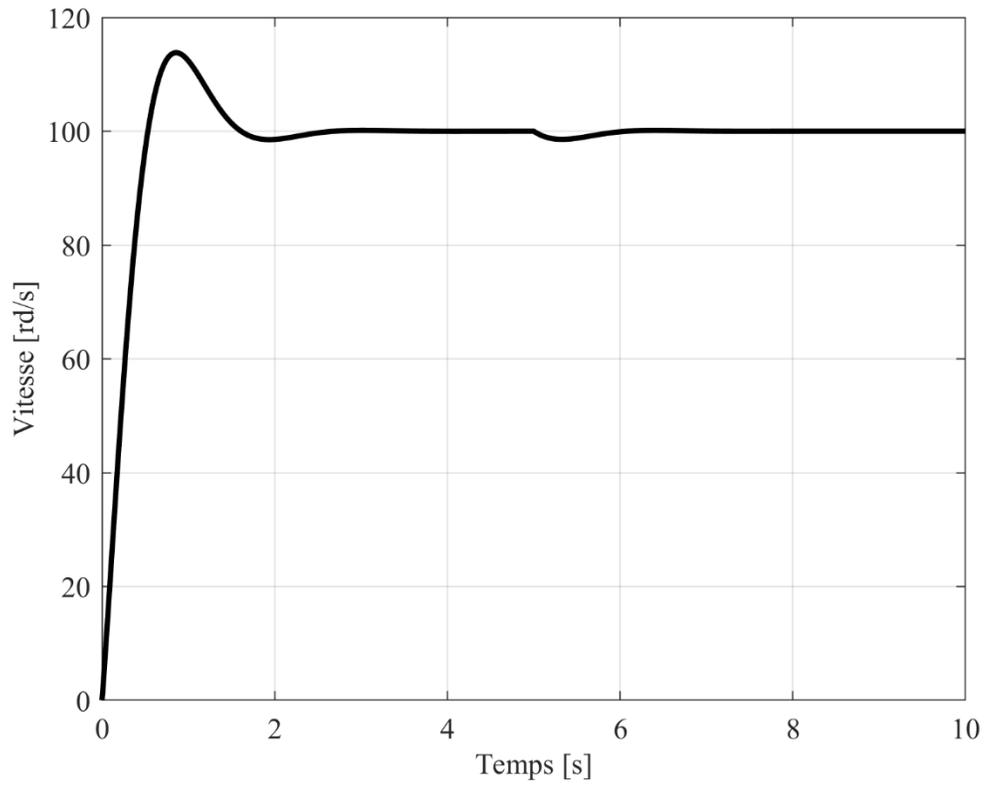


Figure III. 19. Allure de la vitesse d'un moteur à courant continu en boucle fermée.

### III.11. Exercices

#### Exercice 1

Un moteur à courant continu à excitation indépendante (séparée). Il a une résistance  $R_a = 0.2 \Omega$ . Il est alimenté sous une tension constante  $V_a = 38$ . On suppose que le moteur fonctionne avec un flux d'excitation nominal et constant.

- I. A charge nominale, l'induit est parcouru par un courant  $I_a = 5A$  et il tourne à la vitesse de rotation de 1000 tr/min
  1. Calculer la force électromotrice  $E_a$  de l'induit.
  2. Calculer le couple électromagnétique ( $C_{em}$ ).
  3. Montrer que l'on peut exprimer ( $E_a$ ) en fonction de la vitesse de rotation ( $n$ ) suivant la relation :  $E_a = K.n$ .
- II. Par suite d'une variation de l'état de charge, l'intensité à travers l'induit devient  $I'_a = 3,8A$ , calculer :
  1. Le nouveau couple électromagnétique ( $C'_{em}$ ).
  2. La nouvelle vitesse de rotation ( $n'$ ).

#### Exercice 2

On se propose d'étudier un moteur de traction à courant continu à excitation indépendante (séparée) dont les caractéristiques nominales sont :

$$P_u = 165 \text{ KW}; V_a = 375V; n = 3000\text{tr/min}; R_a = 0.05 \Omega; R_e = 16 \Omega.$$

Un essai en moteur alimenté sous sa tension nominale a permis de mesurer un courant d'induit  $I_a = 440 A$  et un courant d'inducteur  $I_e = 25 A$  pour une vitesse de rotation de  $n = 2000\text{tr/min}$ .

1. Calculer pour ce fonctionnement le couple électromagnétique ( $C_{em}$ ) ainsi que la force contre électromotrice ( $E_a$ ).
2. Le couple utile mesurée sur l'arbre du moteur a pour valeur  $C_u = 710 \text{ N.m}$ . Déduire la valeur du couple de pertes ( $C_p$ ) ainsi que le rendement du moteur ( $\eta$ ).

#### Exercice 3

Les caractéristiques nominales d'un moteur à excitation indépendante (séparée) sont :

$$V_a = 100V; I_a = 8A; R_a = 1.25 \Omega; n = 1500\text{tr/min}; V_e = 200V; R_e = 400 \Omega.$$

Le flux inducteur est supposé constant. A partir des données nominales

1. Calculer la puissance absorbée par le moteur ( $P_{at}$ ).
2. Calculer la force électromotrice nominale ( $E_a$ ).
3. Les pertes par effet joule dans l'induit ( $P'_{ja}$ ).
4. La puissance utile sachant que l'ensemble des pertes collectives valent 80W.
5. Le rendement du moteur ( $\eta$ ).
6. L'intensité du courant induit est égale à 8A, le moteur tourne à une vitesse  $n' = 1000\text{tr/min}$ , déterminer la nouvelle tension ( $V'_a$ ) à appliquer aux bornes de l'induit.

#### Exercice 4

Un moteur à excitation dérivée (shunt) est alimenté sous une tension constante de 200 V. Il absorbe un courant  $I = 22\text{ A}$ . La résistance de l'inducteur est  $R_e = 100\ \Omega$ , celle de l'induit  $R_a = 0.5\ \Omega$ . Les pertes constantes sont de  $P'_c = 200\text{ W}$ .

1. Calculer les deux courants d'excitation ( $I_e$ ) et de l'induit ( $I_a$ ).
2. Calculer la force électromotrice ( $E_a$ ).
3. Calculer les pertes par effet Joule dans l'inducteur ( $P'_{je}$ ) et dans l'induit ( $P'_{ja}$ ).
4. Calculer la puissance absorbée ( $P_a$ ), la puissance utile ( $P_u$ ) et le rendement global ( $\eta$ ).
5. On veut limiter à 30 A l'intensité dans l'induit au démarrage. Calculer la valeur de la résistance du rhéostat de démarrage ( $R_h$ ).

#### Exercice 5

Un moteur à excitation dérivée (shunt) possède les caractéristiques suivantes :

Résistance de l'inducteur  $R_e = 110\ \Omega$  ; Résistance de l'induit  $R_a = 0.2\ \Omega$  ; Tension d'alimentation  $V = 220\text{ V}$  et Pertes constantes  $P'_c = 700\text{ W}$ .

1. Le moteur tourne à une vitesse de rotation de 1500 tr/mn quand l'induit absorbe un courant de  $I_a = 75\text{ A}$ . Calculer:
  - a) La force électromotrice ( $E_a$ ).
  - b) La puissance absorbée ( $P_a$ ).
  - c) La puissance utile ( $P_u$ ).
  - d) Le rendement ( $\eta$ ) et le couple utile ( $C_u$ ).
2. Déterminer la résistance du rhéostat du démarrage ( $R_h$ ) pour que l'intensité au démarrage soit de  $I_d = 160\text{ A}$ .

- Calculer la vitesse de rotation lorsque le courant induit est  $I_a = 45 \text{ A}$ , puis lorsque le moteur fonction à vide  $I_a = 0 \text{ A}$  (dans ce cas on néglige les pertes joule devant les pertes collective).

### Exercice 6

Une machine d'extraction est entraînée par un moteur à courant continu à excitation indépendante (séparée). L'inducteur est alimenté par une tension  $V_e = 600\text{V}$  et parcouru par un courant d'excitation  $I_e = 30 \text{ A}$ . L'induit de résistance  $R_a = 1.2 \times 10^{-2} \Omega$  est alimenté par une source fournissant une tension réglable entre  $0 \text{ V}$  et  $800 \text{ V}$ .

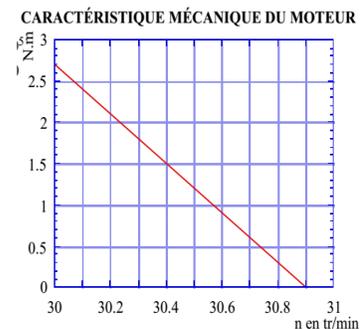
- Un essai en charge a donné les résultats suivants pour l'induit :  $V_a = 600 \text{ V}$ ,  $I_a = 1500 \text{ A}$ ,  $n = 30 \text{ tr/min}$ .
- Un essai à vide pour la même tension a donné :  $V_{a0} = 600 \text{ V}$ ,  $I_{a0} = 41.7 \text{ A}$ .

#### I. Pour l'essai en charge :

- Calculez la force électromotrice de ce moteur ( $E_a$ ).
- Montrez que les pertes par effet joule dans l'induit sont de  $P'_{ja} = 2.7 \times 10^4 \text{ W}$ .
- Montrez que les pertes collectives (constantes) sont de  $P'_C = 2.5 \times 10^4 \text{ W}$ .
- Calculez la puissance absorbée par l'induit du moteur ( $P_a$ ).
- Calculez la puissance totale ( $P_{at}$ ) absorbée par le moteur.
- Calculez la puissance électromagnétique ( $P_{em}$ ) de l'induit.
- Montrez que la puissance utile de ce moteur est de  $P_u = 8.48 \times 10^5 \text{ W}$ .
- Calculez le moment du couple utile ( $C_u$ ) de ce moteur.
- Calculez le rendement ( $\eta$ ) de ce moteur.

- #### II. Si $V_e = 600\text{V}$ , $I_e = 30 \text{ A}$ et $V_a = 600 \text{ V}$ , la caractéristique mécanique du moteur est donnée par la figure suivante.

Ce moteur est couplé à une charge dont le moment du couple résistant ( $C_r$ ) est constant quelle que soit la vitesse de rotation et a pour valeur  $C_r = 1.5 \times 10^5 \text{ N.m}$ .



- Quelle est la relation existante entre le couple utile ( $C_u$ ) et le couple résistant ( $C_r$ ) lorsque la vitesse du moteur est constante ?
- Déterminez graphiquement à quelle vitesse ( $n'$ ) tournera le moteur lorsqu'il entraînera la charge ?

**Exercice 7**

Soit un moteur à courant continu à excitation indépendante (séparée) parfaitement compensé. Sa résistance d'induit est :  $R_a = 0.3 \Omega$ . Les pertes constantes ( $P_C$ ) seront supposées nulles.

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques de la force électromotrice ( $E'_a$ ) en fonction du courant d'excitation ( $I'_e$ ) pour une vitesse de  $n' = 1200$  tr/min.

$I'_e$ [A]	0.5	1	1.5	2	2.5
$E'_a$ [V]	156	258	308	328	338

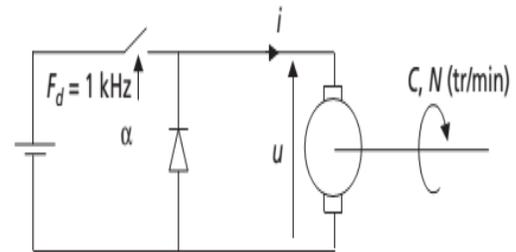
1. Le moteur fonction à vide et le courant d'excitation étant de  $I'_e = 1.5$  A, on alimente le rotor par une source de tension, supposée idéale de  $V_a = 400$  V. Calculer la vitesse du rotor en tr/min.
2. Le moteur absorbe un courant de  $I_a = 40$  A, le courant inducteur est de  $I'_e = 2.5$  A et la tension d'alimentation de  $V_a = 300$  V. Calculer la vitesse du rotor en tr/min.
3. Le rotor est entraîné par un moteur thermique à la vitesse de 1000 tr/min, le courant d'excitation est de  $I'_e = 2$  A. Calculer la force électromotrice de ce moteur ( $E_{a0}$ ) à vide.

**Exercice 8**

On considère un moteur à courant continu à excitation indépendante (séparée) est alimenté par l'intermédiaire d'un hacheur abaisseur (Buck). Les caractéristiques de moteur sont :

Résistance de l'induit  $R_a = 0.5 \Omega$ , inductance d'induit  $L_a = 13.7$  mH, courant d'induit nominal :  $I_{an} = 17$  A, tension nominale :  $V_{an} = 100$  V.

La fréquence de découpage d'un hacheur est :  $F_d = 1$  KHz.



1. Exprimer la relation reliant la valeur moyenne de la sortie d'un hacheur ( $u$ ) à la tension de source ( $V$ ).
2. Exprimer l'équation de maille qui relie les grandeurs de l'induit de la machine.
3. Comparer la constante de temps électrique ( $\tau$ ) de l'induit à la période de découpage ( $T_d$ ).  
Conclure ?
- a. En régime permanent, en supposant que le moteur entraîne une charge absorbant un courant nominal. Exprimer l'expression de la valeur moyenne du courant ( $I_{moy}$ ) en fonction de la tension ( $u$ ), la force électromotrice ( $E_a$ ) et la résistance d'induit ( $R_a$ ).

4. Calculer l'ondulation du courant  $\Delta i = I_{\max} - I_{\min} = \left(\frac{R_a}{L_a}\right) \cdot (V - E_a) \cdot \alpha T_d$  pour  $\alpha = 0,5$ .
5. Quel élément faut-il rajouter afin d'imposer une ondulation maximale de 3 % du courant nominal. Préciser alors la valeur de cet élément.

**Exercice 9**

Soit un moteur à courant continu à excitation indépendante (séparée) dont on a mesuré au préalable la valeur de la force électromotrice ( $E'_a$ ) en fonction du courant d'excitation ( $I'_e$ ) pour une vitesse de rotation  $n' = 1500$  tr/min qui sont reportées dans le tableau ci-dessous.

$I'_e$ [A]	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
$E'_a$ [V]	0	24	46	68	87	104	114	121	130	139	143

Les caractéristiques nominales du moteur sont :

La résistance d'induit :  $R_a = 0.1 \Omega$ . La puissance nominale :  $P_n = 18$  kW et son rendement nominal vaut  $\eta = 0,8$ . La tension d'induit  $V_a = 110$  V. La tension d'inducteur  $V_e = 100$  V. Courant d'inducteur  $I_e = 1.2$  A.

1. À vide, pour un courant d'excitation  $I'_e = 1.2$  A, la machine consomme un courant  $I_{a0} = 16.3$  A.
  - a. Justifier la présence de ce courant d'induit à vide.
  - b. Calculer la valeur de la force électromotrice ( $E_{a0}$ ) du moteur.
2. Calculer alors la valeur de la vitesse à vide ( $n_0$ ) du moteur.
3. Calculer les pertes collectives (constantes) ( $P'_c$ ).
4. Le moteur fonctionne à sa charge nominale, la puissance utile fournie par le moteur est :  $P_u = 16$  kW. Calculer la puissance totale consommée par le moteur ( $P_{at}$ ).
5. En faisant un bilan de puissances, déterminer les pertes par effet joule perdue dans la résistance d'induit ( $P'_{ja}$ ) et calculer le courant d'induit nominal ( $I_{an}$ ) (Les pertes collectives sont considérées constantes).
6. Calculer la force électromotrice ( $E_a$ ).
7. En déduire la vitesse de rotation du moteur ( $n$ ).
8. Quel courant d'excitation faudrait-il choisir pour fournir la même puissance à la charge mais à la vitesse de 1500 tr/min ? (On supposera dans cette question que le rendement du moteur est égal à 0,8).

### III.12. Solutions

#### Exercice 1

$$R_a = 0.2 \Omega. V_a = 38 \text{ V} . \Phi_e = \Phi_{en} = \text{Constant}$$

I. A charge nominale,  $I_a = 5 \text{ A}$  ;  $n = 1000 \text{ tr/min}$

1. Calculer la force électromotrice  $E_a$  de l'induit.

$$E_a = V_a - R_a \times I_a = 38 - 0.2 \times 5 = 37 \text{ V}$$

2. Calculer le couple électromagnétique ( $C_{em}$ ).

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{E_a \times I_a}{\Omega} = \frac{37 \times 5}{1000 \times \left(\frac{2\pi}{60}\right)} = 1.76 \text{ N.m}$$

3. Montrer que l'on peut exprimer ( $E_a$ ) en fonction de la vitesse de rotation ( $n$ ) suivant la relation

$$: E_a = K \times n.$$

La relation de la force électromotrice est la suivante :  $E_a = k \times \Phi_e \times n$

Tant que le flux l'excitation à une valeur nominale et constante donc :  $k \times \Phi_e = K$

L'équation de la force électromotrice devient :  $E_a = K \times n$

II.  $I'_a = 3.8 \text{ A}$ , calculer :

1. Le nouveau couple électromagnétique ( $C'_{em}$ ).

$$C_{em} = K \times I_a$$

$$C'_{em} = K \times I'_a$$

Le moteur fonction avec un flux d'excitation constant, le nouveau couple électromagnétique est calculé comme suit :

$$\frac{C'_{em}}{C_{em}} = \frac{I'_a}{I_a} \Rightarrow C'_{em} = C_{em} \times \frac{I'_a}{I_a} = 1.76 \times \frac{3.8}{5} = 1.33 \text{ N.m}$$

2. La nouvelle vitesse de rotation ( $n'$ ).

$$E_a = K \times n$$

$$E'_a = K \times n'$$

Le moteur fonction avec un flux d'excitation constant

$$\frac{E'_a}{E_a} = \frac{n'}{n} \Rightarrow n' = n \times \frac{E'_a}{E_a} = n \times \frac{V_a - R_a \times I'_a}{E_a} = 1000 \times \frac{38 - 0.2 \times 3.8}{37} = 1007 \text{ (tr/min)}$$

#### Exercice 2

$$P_u = 165 \text{ KW}; V_a = 375 \text{ V}; n = 3000 \text{ tr/min}; R_a = 0.05 \Omega; R_e = 16 \Omega.$$

$$I_a = 440 \text{ A}; I_e = 25 \text{ A}; n = 2000 \text{ tr/min}.$$

1. Calculer pour ce fonctionnement le couple électromagnétique ( $C_{em}$ ) ainsi que la force contre électromotrice ( $E_a$ ).

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega}$$

$$P_{em} = P_a - P'_{ja}$$

$$P_a = V_a \times I_a = 375 \times 440 = 165000 \text{ W}$$

$$P'_{ja} = R_a \times I_a^2 = 0.05 \times 440^2 = 9680 \text{ W}$$

$$P_{em} = P_a - P'_{ja} = 165000 - 9680 = 155320 \text{ W}$$

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{155320}{2000 \times \left(\frac{2\pi}{60}\right)} = 741 \text{ N.m}$$

$$E_a = V_a - R_a \times I_a = 375 - 0.05 \times 440 = 353 \text{ V}$$

2.  $C_u = 710 \text{ N.m}$ .

Déduire la valeur du couple de pertes ( $C_p$ )

$$C_p = C_{em} - C_u = 741 - 710 = 31 \text{ N.m}$$

Le rendement du moteur ( $\eta$ ).

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

$$P_{at} = V_a \times I_a + V_e \times I_e = V_a \times I_a + R_e \times I_e^2 = 375 \times 440 + 16 \times 25^2 = 175000 \text{ W}$$

$$P_u = C_u \times \Omega = 710 \times 2000 \times \left(\frac{2\pi}{60}\right) = 148626.66 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_{at}} = \frac{148626.66}{175000} = 84.92 \%$$

### Exercice 3

$V_a = 100\text{V}$ ;  $I_a = 8\text{A}$ ;  $R_a = 1.25 \Omega$ ;  $n = 1500\text{tr/min}$ ;  $V_e = 200\text{V}$ ;  $R_e = 400 \Omega$ ;  $\Phi_e = \Phi_{en} =$   
Constant

1. Calculer la puissance absorbée par le moteur ( $P_{at}$ ).

$$P_{at} = P_a + P_e$$

$$P_a = V_a \times I_a = 100 \times 8 = 800 \text{ W}$$

$$P_e = V_e \times I_e = V_e \times \frac{V_e}{R_e} = \frac{V_e^2}{R_e} = \frac{200^2}{400} = 100 \text{ W}$$

$$P_{at} = P_a + P_e = 800 + 100 = 900 \text{ W}$$

2. Calculer la force électromotrice nominale ( $E_a$ ).

$$E_a = V_a - R_a \times I_a = 100 - 1.25 \times 8 = 90 \text{ V}$$

3. Les pertes par effet joule dans l'induit ( $P'_{ja}$ ).

$$P'_{ja} = R_a \times I_a^2 = 1.25 \times 8^2 = 80 \text{ W}$$

4. La puissance utile sachant que l'ensemble des pertes collectives valent  $P'_C = 80 \text{ W}$ .

$$P_u = P_{em} - P'_C = E_a \times I_a - P'_C = 90 \times 8 - 80 = 640 \text{ W}$$

5. Le rendement du moteur ( $\eta$ ).

$$\eta = \frac{P_u}{P_{at}} = \frac{640}{900} = 71.11 \%$$

6.  $I_a = 8 \text{ A}$ ,  $n' = 1000 \text{ tr/min}$ .

Déterminer la nouvelle tension ( $V'_a$ ) à appliquer aux bornes de l'induit.

$$V'_a = E'_a + R_a \times I_a$$

$$\frac{E'_a}{E_a} = \frac{n'}{n} \Rightarrow E'_a = E_a \times \frac{n'}{n} = 90 \times \frac{1000}{1500} = 60 \text{ V}$$

$$V'_a = E'_a + R_a \times I_a = 60 + 1.25 \times 8 = 70 \text{ V}$$

#### Exercice 4

$$V = 200 \text{ V}. I = 22 \text{ A}. R_e = 100 \Omega. R_a = 0.5 \Omega. P'_C = 200 \text{ W}.$$

1. Calculer les deux courants d'excitation ( $I_e$ ) et de l'induit ( $I_a$ ).

$$I_e = \frac{V}{R_e} = \frac{200}{100} = 2 \text{ A}$$

On applique la loi des nœuds :

$$I = I_a + I_e \Rightarrow I_a = I - I_e = 22 - 2 = 20 \text{ A}$$

2. Calculer la force électromotrice ( $E_a$ ).

$$E_a = V - R_a \times I_a = 200 - 0.5 \times 20 = 190 \text{ V}$$

3. Calculer les pertes par effet Joule dans l'inducteur ( $P'_{je}$ ) et dans l'induit ( $P'_{ja}$ ).

$$P'_{je} = R_e \times I_e^2 = 100 \times 2^2 = 400 \text{ W}$$

$$P'_{ja} = R_a \times I_a^2 = 0.5 \times 20^2 = 200 \text{ W}$$

4. Calculer la puissance absorbée ( $P_a$ ), la puissance utile ( $P_u$ ) et le rendement global ( $\eta$ ).

$$P_a = V \times I = 200 \times 22 = 4400 \text{ W}$$

$$P_u = P_{em} - P'_C = E_a \times I_a - P'_C = 190 \times 20 - 200 = 3600 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_{at}} = \frac{3600}{4400} = 82 \%$$

5. On veut limiter à  $30 \text{ A}$  l'intensité dans l'induit au démarrage. Calculer la valeur de la résistance du rhéostat de démarrage ( $R_h$ ).

$$R_h = \frac{V}{I_{ad}} - R_a = \frac{200}{30} - 0.5 = 6.16 \Omega$$

**Exercice 5**

$$R_e = 110 \Omega ; R_a = 0.2 \Omega ; V = 220 V ; P'_C = 700 W.$$

1. Le moteur tourne à une vitesse de rotation de 1500 tr/mn quand l'induit absorbe un courant de  $I_a = 75A$ . Calculer:

- a) La force électromotrice ( $E_a$ ).

$$E_a = V - R_a \times I_a = 220 - 0.2 \times 75 = 205 V$$

- b) La puissance absorbée ( $P_a$ ).

$$P_a = V \times I$$

$$I = I_a + I_e$$

$$I_e = \frac{V}{R_e} = \frac{220}{110} = 2 A$$

$$I = I_a + I_e = 75 + 2 = 77 A$$

$$P_a = V \times I = 220 \times 77 = 16940 W$$

- c) La puissance utile ( $P_u$ ).

$$P_u = P_{em} - P'_C = E_a \times I_a - P'_C = 205 \times 75 - 700 = 14675 W$$

- d) Le rendement ( $\eta$ ) et le couple utile ( $C_u$ ).

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{14675}{16940} = 86.6 \%$$

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{14675}{1500 \times \left(\frac{2\pi}{60}\right)} = 93.42 N.m$$

2. Déterminer la résistance du rhéostat du démarrage ( $R_h$ ) pour que l'intensité au démarrage soit de  $I_d = 160 A$ .

$$R_h = \frac{V}{I_{ad}} - R_a = \frac{220}{160} - 0.2 = 1.175 \Omega$$

3. Calculer la vitesse de rotation lorsque le courant induit est  $I_a = 45 A$ , puis lorsque le moteur fonction à vide  $I_a = 0 A$  (dans ce cas on néglige les pertes joule devant les pertes collective).

$$\frac{E'_a}{E_a} = \frac{n'}{n} \Rightarrow n' = n \times \frac{E'_a}{E_a}$$

$$\text{Lorsque } I_a = 45 A$$

$$E'_a = V - R_a \times I_a = 220 - 0.2 \times 45 = 211 V$$

$$n' = 1500 \times \frac{211}{205} = 1543.9 \text{ (tr/min)}$$

Lorsque  $I_a = 0 \text{ A}$

$$E'_a = V - R_a \times I_a = 220 - 0.2 \times 0 = 220 \text{ V}$$

$$n' = 1500 \times \frac{220}{205} = 1609.75 \text{ (tr/min)}$$

### Exercice 6

$$V_e = 600 \text{ V} . I_e = 30 \text{ A} . R_a = 1.2 \times 10^{-2} \Omega . V_a = [0 \text{ } 800] \text{ V} .$$

- Un essai en charge a donné les résultats suivants pour l'induit :  $V_a = 600 \text{ V}$ ,  $I_a = 1500 \text{ A}$ ,  $n = 30 \text{ tr/min}$ .
- Un essai à vide pour la même tension a donné :  $V_{a0} = 600 \text{ V}$ ,  $I_{a0} = 41.7 \text{ A}$ .

I. Pour l'essai en charge :

1. Calculez la force électromotrice de ce moteur ( $E_a$ ).

$$E_a = V_a - R_a \times I_a = 600 - 1.2 \times 10^{-2} \times 1500 = 582 \text{ V}$$

2. Montrez que les pertes par effet joule dans l'induit sont de  $P'_{ja} = 2.7 \times 10^4 \text{ W}$ .

$$P'_{ja} = R_a \times I_a^2 = 1.2 \times 10^{-2} \times 1500^2 = 27000 \text{ W}$$

3. Montrez que les pertes collectives (constantes) sont de  $P'_C = 2.5 \times 10^4 \text{ W}$ .

$$P'_C = P_{em} - P_u$$

Cette perte est déterminée à partir d'un essai à vide ( $P_u = 0$ )

$$P'_C = P_{em} = P_{a0} - P'_{ja0}$$

$$P_{a0} = V_{a0} \times I_{a0} = 600 \times 41.7 = 25020 \text{ W}$$

$$P'_{ja0} = R_a \times I_{a0}^2 = 1.2 \times 10^{-2} \times 41.7^2 = 20.86 \text{ W}$$

$$P'_C = P_{em} = P_{a0} - P'_{ja0} = 25020 - 20.86 \approx 25000 \text{ W}$$

4. Calculez la puissance absorbée par l'induit du moteur ( $P_a$ ).

$$P_a = V_a \times I_a = 600 \times 1500 = 900000 \text{ W}$$

5. Calculez la puissance totale ( $P_{at}$ ) absorbée par le moteur.

$$P_{at} = P_a + P_e$$

$$P_e = V_e \times I_e = 600 \times 30 = 18000 \text{ W}$$

$$P_{at} = P_a + P_e = 900000 + 18000 = 918000 \text{ W}$$

6. Calculez la puissance électromagnétique ( $P_{em}$ ) de l'induit.

$$P_{em} = E_a \times I_a = 582 \times 1500 = 873000 \text{ W}$$

7. Montrez que la puissance utile de ce moteur est de  $P_u = 8.48 \times 10^5 W$ .

$$P_u = P_{em} - P'_C = E_a \times I_a - P'_C = 582 \times 1500 - 25000 = 848000 W$$

8. Calculez le moment du couple utile ( $C_u$ ) de ce moteur.

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{848000}{30 \times \left(\frac{2\pi}{60}\right)} = 270063.7 N.m$$

9. Calculez le rendement ( $\eta$ ) de ce moteur.

$$\eta = \frac{P_u}{P_{at}} = \frac{848000}{918000} = 92.37 \%$$

II. Si  $V_e = 600V$ ,  $I_e = 30 A$  et  $V_a = 600 V$ ,  $C_r = 1.5 \times 10^5 N.m$ .

1. Quelle est la relation existante entre le couple utile ( $C_u$ ) et le couple résistant ( $C_r$ ) lorsque la vitesse du moteur est constante ?

$$C_u = C_r$$

2. Déterminez graphiquement à quelle vitesse ( $n'$ ) tournera le moteur lorsqu'il entraînera la charge ?

En se basant sur le graphique, le couple  $C_u = 270063.7 N.m$  correspond à une vitesse de rotation  $n' = 30.4$  (tr/min).

### Exercice 7

$$R_a = 0.3 \Omega. P'_C = 0 W.$$

Pour une vitesse de  $n' = 1200$  tr/min.

$I'_e$ [A]	0.5	1	1.5	2	2.5
$E'_a$ [V]	156	258	308	328	338

1. Le moteur fonction à vide et le courant d'excitation étant de  $I'_e = 1.5 A$ , on alimente le rotor par une source de tension, supposée idéale de  $V_a = 400 V$ . Calculer la vitesse du rotor en tr/min.

$$\frac{E'_a}{E_a} = \frac{n'}{n}$$

$$\text{A partir du tableau : } I'_e = 1.5 A \Rightarrow E'_a = 308 V$$

$$\text{A vide : } I_a = 0 A$$

$$E_a = V_a - R_a \times I_a = 400 - 0.3 \times 0 = 400 V$$

$$n = n' \times \frac{E_a}{E'_a} = 1200 \times \frac{400}{308} = 1558.44 \text{ (tr/min)}$$

2. Le moteur absorbe un courant de  $I_a = 40 \text{ A}$ , le courant inducteur est de  $I'_e = 2.5 \text{ A}$  et la tension d'alimentation de  $V_a = 300 \text{ V}$ . Calculer la vitesse du rotor en tr/min.

$$\frac{E'_a}{E_a} = \frac{n'}{n}$$

A partir du tableau :  $I'_e = 2.5 \text{ A} \Rightarrow E'_a = 338 \text{ V}$

Pour  $I_a = 40 \text{ A}$

$$E_a = V_a - R_a \times I_a = 300 - 0.3 \times 40 = 288 \text{ V}$$

$$n = n' \times \frac{E_a}{E'_a} = 1200 \times \frac{288}{338} = 1022.48 \text{ (tr/min)}$$

3. Le rotor est entraîné par un moteur thermique à la vitesse de  $1000 \text{ tr/min}$ , le courant d'excitation est de  $I'_e = 2 \text{ A}$ . Calculer la force électromotrice de ce moteur ( $E_{a0}$ ) à vide.

$$\frac{E'_a}{E_{a0}} = \frac{n'}{n_0}$$

A partir du tableau :  $I'_e = 2 \text{ A} \Rightarrow E'_a = 328 \text{ V}$

$$E_{a0} = E'_a \times \frac{n_0}{n'} = 328 \times \frac{1000}{1200} = 273.33 \text{ V}$$

### Exercice 8

$R_a = 0.5 \Omega$ ,  $L_a = 13.7 \text{ mH}$ ,  $I_{an} = 17 \text{ A}$ ,  $V_{an} = 100 \text{ V}$ ;  $F_d = 1 \text{ KHz}$ .

1. Exprimer la relation reliant la valeur moyenne de la sortie d'un hacheur ( $u$ ) à la tension de source ( $V$ ).

$$u = \alpha \times V$$

2. Exprimer l'équation de maille qui relie les grandeurs de l'induit de la machine.

$$u = V_a = R_a \times I_a + L_a \times \frac{dI_a}{dt} + E_a$$

3. Comparer la constante de temps électrique ( $\tau$ ) de l'induit à la période de découpage ( $T_d$ ).

Conclure ?

$$\tau = \frac{L_a}{R_a} = \frac{13.7 \times 10^{-3}}{0.5} = 0.0274 \text{ s}$$

$$T_d = \frac{1}{F_d} = \frac{1}{10^3} = 0.001 \text{ s}$$

Conclusion :  $T_d \ll \tau$

Afin d'assurer un bon fonctionnement d'un moteur à courant continu associé à un hacheur abaisseur de tension, il est essentiel de choisir une période de découpage nettement inférieure à la constante de temps électrique.

- a. En régime permanent, en supposant que le moteur entraîne une charge absorbant un courant nominal. Exprimer l'expression de la valeur moyenne du courant ( $I_{\text{moy}}$ ) en fonction de la tension ( $u$ ), la force électromotrice ( $E_a$ ) et la résistance d'induit ( $R_a$ ).

$$I_{\text{moy}} = \frac{V_a - E_a}{R_a}$$

4. Calculer l'ondulation du courant  $\Delta_i = I_{\text{max}} - I_{\text{min}} = \left(\frac{R_a}{L_a}\right) \cdot (V - E_a) \cdot \alpha T_d$  pour  $\alpha = 0,5$ .

$$\Delta_i = I_{\text{max}} - I_{\text{min}} = \left(\frac{R_a}{L_a}\right) \cdot (V - E_a) \cdot \alpha T_d$$

$$E_a = V_a - R_a \times I_a = 100 - 0,5 \times 17 = 91,5 \text{ V}$$

$$\Delta_i = \left(\frac{0,5}{13,7 \times 10^{-3}}\right) \times (100 - 91,5) \times 0,5 \times 0,001 = 1,067 \text{ A}$$

5. Quel élément faut-il rajouter afin d'imposer une ondulation maximale de 3 % du courant nominal. Préciser alors la valeur de cet élément.

Afin de limiter le courant de l'ondulation, il suffit d'ajouter une inductance de lissage ( $L_L$ ).

$$\Delta'_i = \frac{3}{100} \times 17 = 0,51 \text{ A}$$

$$\Delta'_i = \left(\frac{R_a}{L_a + L_L}\right) \cdot (V - E_a) \cdot \alpha T_d$$

$$L_L = \left(\frac{R_a}{\Delta'_i}\right) \cdot (V - E_a) \cdot \alpha T_d - L_a = \left(\frac{0,5}{0,51}\right) \times (100 - 91,5) \cdot 0,5 \times 0,001 - 3,7 \times 10^{-3}$$

$$L_L = 15 \text{ mH}$$

### Exercice 9

Pour une vitesse de  $n' = 1500 \text{ tr/min}$ .

$I'_e$ [A]	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
$E'_a$ [V]	0	24	46	68	87	104	114	121	130	139	143

$R_a = 0,1 \Omega$ .  $P_n = 18 \text{ kW}$ .  $\eta = 0,8$ .  $V_a = 110 \text{ V}$ .  $V_e = 100 \text{ V}$ .  $I_e = 1,2 \text{ A}$ .

1. À vide, pour un courant d'excitation  $I'_e = 1,2 \text{ A}$ , la machine consomme un courant  $I_{a0} = 16,3 \text{ A}$ .

- a. Justifier la présence de ce courant d'induit à vide.

Lorsqu'un moteur à courant continu fonctionne à vide, la présence du courant d'induit indique la présence de pertes collectives. De plus, ce type de moteur est identifié par la présence d'un coefficient de frottement.

- b. Calculer la valeur de la force électromotrice ( $E_{a0}$ ) du moteur.

$$E_{a0} = V_a - R_a \times I_{a0} = 110 - 0.1 \times 16.3 = 108.37 \text{ V}$$

2. Calculer alors la valeur de la vitesse à vide ( $n_0$ ) du moteur.

$$\frac{E'_a}{E_{a0}} = \frac{n'}{n_0}$$

A partir du tableau :  $I'_e = 1.2 \text{ A} \Rightarrow E'_a = 114 \text{ V}$

$$n_0 = n' \times \frac{E_{a0}}{E'_a} = 1500 \times \frac{108.37}{114} = 1426 \text{ (tr/min)}$$

3. Calculer les pertes collectives (constantes) ( $P'_C$ ).

$$P'_C = P_{em} = P_{a0} - P'_{ja0}$$

$$P_{a0} = V_a \times I_{a0} = 110 \times 16.3 = 1793 \text{ W}$$

$$P'_{ja0} = R_a \times I_{a0}^2 = 0.1 \times 16.3^2 = 26.57 \text{ W}$$

$$P'_C = P_{em} = P_{a0} - P'_{ja0} = 1793 - 26.57 = 1766.43 \text{ W}$$

4. Le moteur fonctionne à sa charge nominale, la puissance utile fournie par le moteur est :  $P_u = 16 \text{ kW}$ . Calculer la puissance totale consommée par le moteur ( $P_{at}$ ).

$$\eta = \frac{P_u}{P_{at}} \Rightarrow P_{at} = \frac{P_u}{\eta} = \frac{16000}{0.8} = 20000 \text{ W}$$

5. En faisant un bilan de puissances, déterminer les pertes par effet joule perdue dans la résistance d'induit ( $P'_{ja}$ ) et calculer le courant d'induit nominal ( $I_{an}$ ) (Les pertes collectives sont considérées constantes).

$$P'_{ja} = P_a - P_{em} = P_a - P_u - P'_C$$

$$P_{at} = P_a + P_e$$

$$P_e = V_e \times I_e = 100 \times 1.2 = 120 \text{ W} = P'_{je}$$

$$P_a = P_{at} - P_e = 20000 - 120 = 19880 \text{ W}$$

$$P'_{ja} = P_a - P_u - P'_C = 19880 - 16000 - 1766.43 = 2113.57 \text{ W}$$

$$P_a = V_a \times I_a \Rightarrow I_a = \frac{P_a}{V_a} = \frac{19880}{110} = 180.72 \text{ W}$$

6. Calculer la force électromotrice ( $E_a$ ).

$$E_a = V_a - R_a \times I_a = 110 - 0.1 \times 180.72 = 92 \text{ V}$$

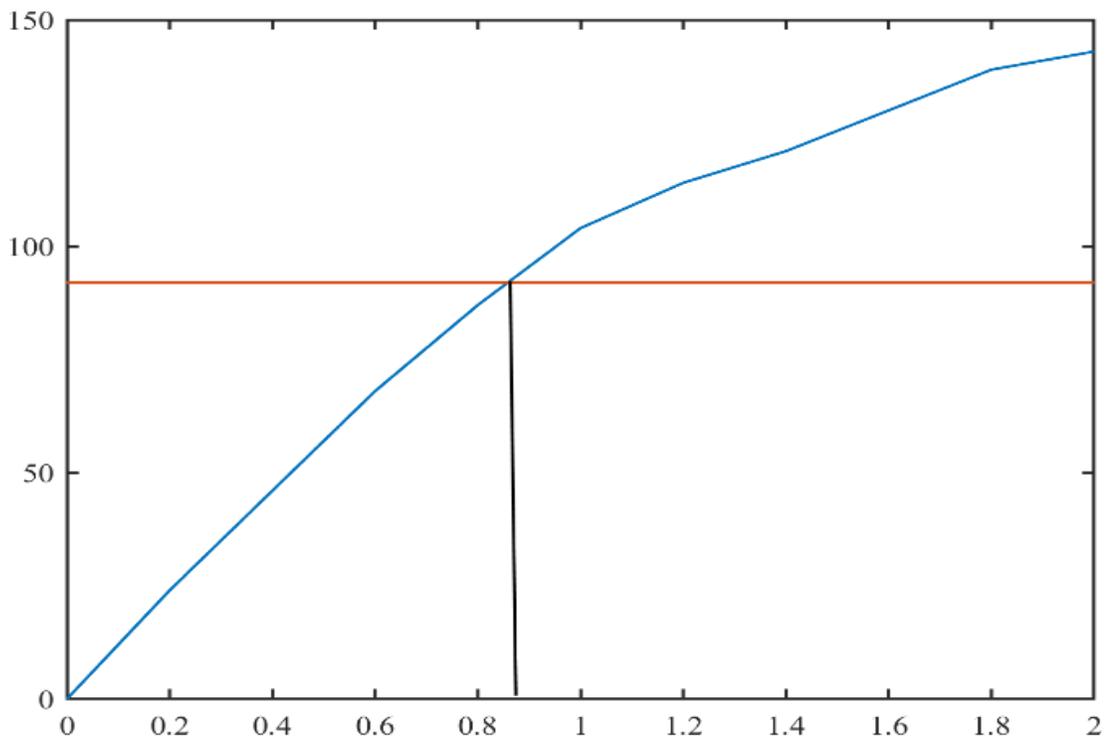
7. En déduire la vitesse de rotation du moteur ( $n$ ).

A partir du tableau :  $I'_e = 1.2 \text{ A} \Rightarrow E'_a = 114 \text{ V}$

$$n = n' \times \frac{E_a}{E'_a} = 1500 \times \frac{92}{114} = 1210.52 \text{ (tr/min)}$$

8. Quel courant d'excitation faudrait-il choisir pour fournir la même puissance à la charge mais à la vitesse de 1500 tr/min ? (On supposera dans cette question que le rendement du moteur est égal à 0,8)

Pour augmenter la vitesse d'un moteur à courant continu sans changer la charge, il suffit de réduire le courant d'excitation à sa valeur nominale. Cela permettra au moteur de fournir la même puissance à la charge. En traçant les caractéristiques de la force électromotrice en fonction du courant d'excitation pour une vitesse de 1500 tr/min, on peut déterminer la valeur du courant d'excitation qui correspond à une force électromotrice de 92V. D'après la figure, cette valeur de courant d'excitation est de 0,84 A.



### III.13. Conclusion

L'étude du réglage de la vitesse des MCC a été abordée de manière approfondie, en incluant des exercices et leurs solutions correspondantes. Cette exploration nous a permis de mieux comprendre les différentes méthodes utilisées pour varier la vitesse de ces moteurs. Grâce aux exercices, nous avons pu mettre en pratique les concepts théoriques et développer notre compréhension des principaux paramètres et variables influençant la vitesse du MCC. Les solutions fournies ont démontré comment ajuster ces paramètres pour obtenir le réglage de vitesse souhaité, en utilisant des techniques telles que le réglage de la tension d'alimentation, le flux d'excitation et la résistance d'induit.

# Chapitre IV

## Chapitre IV. Variation de vitesse des moteurs asynchrones

### IV.1. Généralités

#### IV.1.a. Définition

Le Moteur Asynchrone (MAS) est largement utilisé dans l'industrie, sa simplicité de construction en fait un matériel très fiable et qui demande peu d'entretien.

#### IV.1.b. Constitution du moteur asynchrone

Il est constitué d'une partie fixe, le stator qui comporte le bobinage qui est relié à la source d'alimentation, et d'une partie mobile, le rotor est mis en court-circuit et n'est pas lié à aucune source électrique extérieure. On distingue deux types de rotor:

- Rotor à bagues (rotor bobiné)
- Rotor à cage d'écureuil (rotor en court-circuit)

#### IV.1.c. Principe de fonctionnement

L'enroulement statorique reçoit de l'énergie électrique du réseau de pulsation  $\omega$ , ce qui crée un champ tournant à la vitesse angulaire synchrone  $\Omega = \frac{\omega}{p}$ ; ce champ va balayer les enroulements rotoriques et induit des f.é.m. (courants), car les spires sont fermées sur elles-mêmes. Ces courants induits produiront à leur tour un champ qui sera de sens opposé au champ du stator (Loi de Lenz : la f.é.m. induite tend à s'opposer à la cause qui l'a produite).

La réaction du courant secondaire sur le champ primaire provoque un couple moteur qui entraîne la mise en mouvement du rotor dans les sens du champ tournant primaire.

Lorsque le rotor augmente sa vitesse de rotation  $\omega$ , la différence entre la vitesse angulaire du champ tournant  $\omega_s$  et la vitesse angulaire du rotor diminue  $\omega_r$  :  $\omega_r = \omega_s - \omega$ .

#### IV.1.d. Glissement

Soit  $N_s$  : la vitesse de rotation du champ tournant ou vitesse de synchronisme :  $N_s = \frac{60f}{p}$

$N$  : la vitesse de rotation du rotor (mécanique), le glissement est défini par :  $g = \frac{N_s - N}{N_s}$

On distingue trois modes de fonctionnement de la machine asynchrone suivant la valeur de glissement :

- $0 < g < 1$  : Fonctionnement en moteur.
- $g < 0$  : Fonctionnement génératrice.
- $g \geq 1$  : Fonctionnement en frein électrique.

## IV.2. Schéma équivalent par phase de la machine asynchrone réelle

### IV.2.a. Rapport de transformation

A l'arrêt un moteur asynchrone se comporte exactement comme un transformateur et peut prendre la forme synthétique de la figure 1.

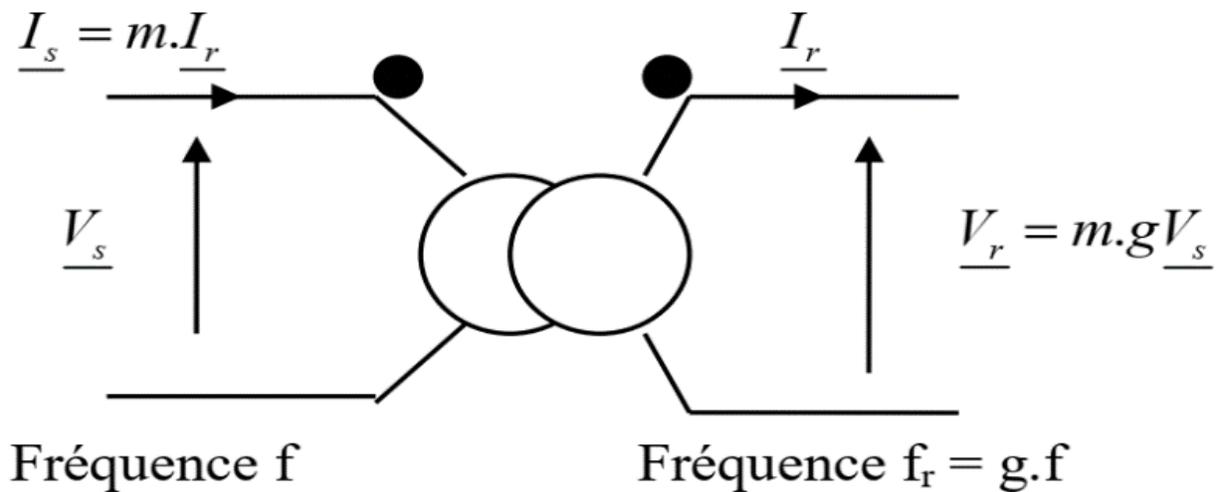


Figure IV. 1. Tension, courant et rapport de transformation.

On distingue trois rapports de transformation de transformateur :

- Rapport de transformation en tension :  $\frac{V_r}{V_s} = g \frac{N_r}{N_s} = gm$
- Rapport de transformation en fréquence :  $\frac{f_r}{f_s} = g$
- Rapport de transformation en courant :  $\frac{I_s}{I_r} = \frac{N_r}{N_s}$

Avec :  $m = \frac{N_r}{N_s}$

$m$  : Rapport de transformation ;  $N_s$  : Nombre de spires dans les enroulements statoriques ;  $N_r$  : Nombre de spires dans les enroulements rotoriques ;  $V_s$  : Tension dans l'enroulement statoriques ;  $V_r$  : Tension dans l'enroulement rotorique ;  $f_s$  : fréquence des courants statoriques ;  $f_r$  : fréquence des courants rotoriques ;  $I_s$  : Courant dans l'enroulement statoriques ;  $I_r$  : Courant dans l'enroulement rotorique ;

Le schéma équivalent électrique de la MAS réelle présenté à la figure IV.2. Le courant à vide  $I_{1\mu}$  se divise en 2 branches, l'une  $R_\mu$  absorbe la composante active qui est due aux pertes dans le fer ; l'autre  $L_\mu$  absorbe la composante réactive qui est nécessaire pour entretenir le flux.

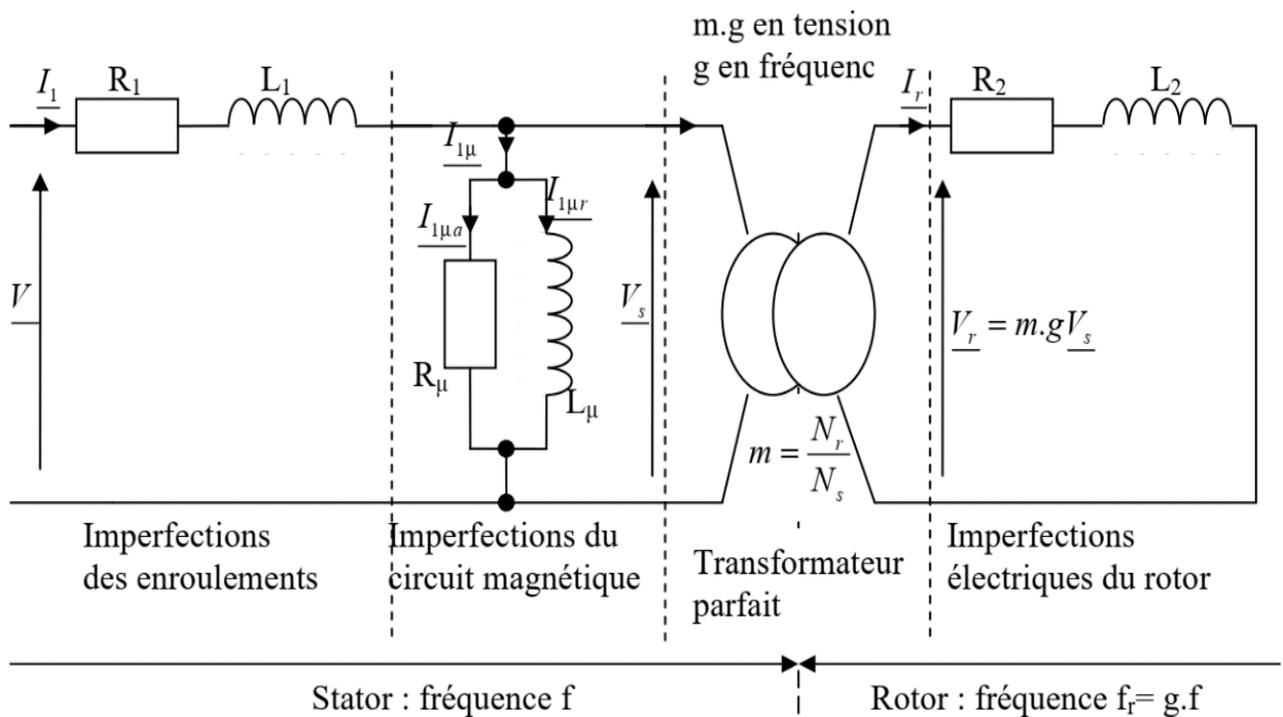


Figure IV. 2. Schéma électrique équivalent de la MAS réelle pour une phase.

Avec:

- La résistance  $R_\mu$  symbolise les pertes fer dans le rotor de la MAS.
- L'inductance  $L_\mu$  est l'inductance magnétisante du circuit magnétique.
- La résistance  $R_1$  est celle propre à chacun des enroulements statoriques.
- L'inductance  $L_1$  est celle des fuites des enroulements statoriques.
- La résistance  $R_2$  est celle du circuit rotorique.
- L'inductance  $L_2$  est celle des fuites magnétiques du circuit rotorique.

### IV.2.b. Modélisation de la puissance active

La puissance fournie par le stator, nommée aussi puissance transmise au rotor :

$$P_{tr} = 3 \cdot V_s \cdot I_1 \cdot \cos \theta \quad (IV.1)$$

Au rotor, la puissance active (dû à l'effet Joule dans  $R_2$ ) est :

$$P'_{jr} = 3 \cdot V_r \cdot I_2 \cdot \cos \theta = 3 \cdot m \cdot V_s \cdot \frac{I_1}{m} \cdot \cos \theta = g \cdot 3 \cdot V_s \cdot I_1 \cdot \cos \theta = g \cdot P_{tr} \quad (IV.2)$$

La différence entre la puissance au stator et celle au rotor traduit le déséquilibre du bilan des puissances.

Cette différence est la puissance électromagnétique celle qui anime mécaniquement le rotor et la charge.

$$P_{em} = P_{tr} - P'_{jr} = (1 - g)P_{tr} \quad (IV.3)$$

Le schéma équivalent de la figure IV.2 ne peut modéliser le transfert en puissance car aucun élément électrique ne lui correspond. Il faut donc modifier la localisation des puissances pour traduire les transferts.

Puisque les puissances mises en jeu sont actives, elles seront représentées par des résistances parcourues par le courant  $I_2$  :  $R_2$  pour  $P'_{jr}$  et  $R_{em}$  pour  $P_{tr}$ .

Les relations sur les puissances permettent d'exprimer  $R_{em}$  :

$$\left. \begin{array}{l} P_{em} = 3 \cdot R_{em} \cdot I_2^2 = (1 - g) \cdot P_{tr} \\ P'_{jr} = 3 \cdot R_2 \cdot I_2^2 = g \cdot P_{tr} \end{array} \right\} \text{ donc } R_{em} = \frac{1-g}{g} \cdot R_2 \quad (IV.4)$$

Ceci conduit au nouveau schéma équivalent de la partie secondaire de la MAS représenté à la figure IV.3.

On remarque alors que la résistance équivalente au secondaire représente toute la  $\frac{R_2}{g}$  puissance active secondaire.

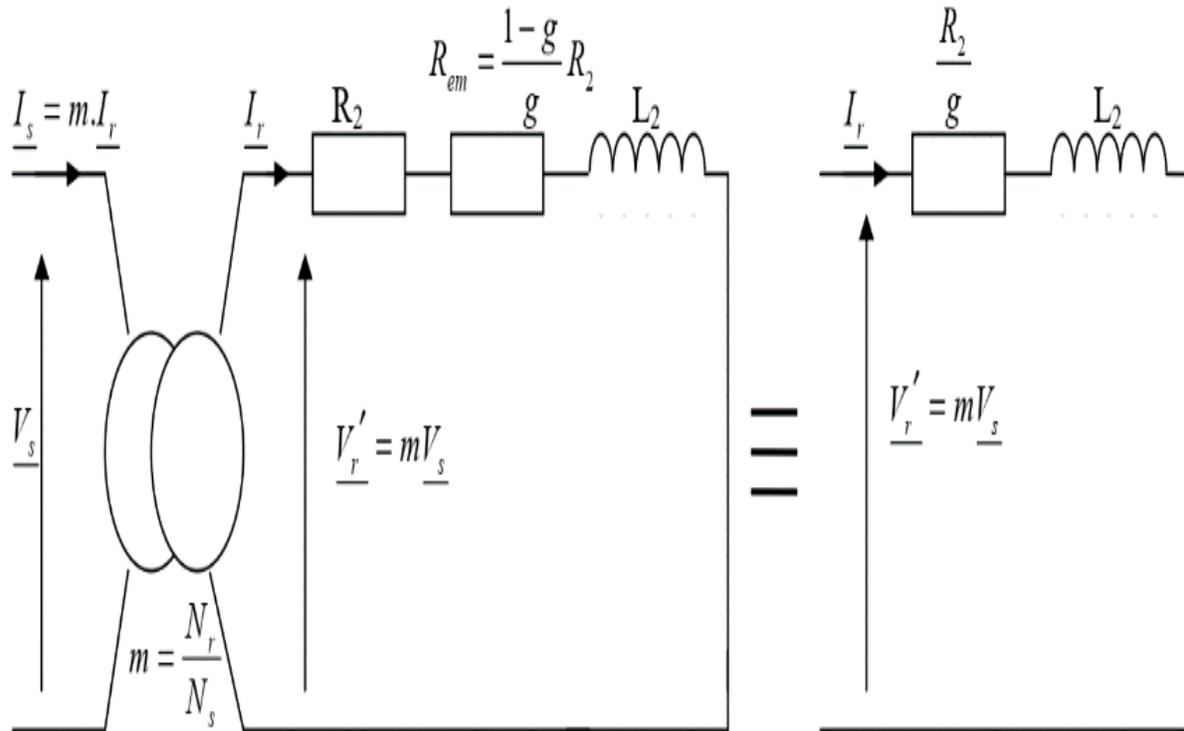


Figure IV. 3. Schéma équivalent complet de la MAS (partie secondaire).

Comme pour un transformateur, pour passer au primaire, l'impédance secondaire est divisée par le carré du rapport de transformation en courant  $m$ , donc :

$$\begin{cases} R'_2 = \frac{R_2}{m^2} \\ L'_2 = \frac{L_2}{m^2} \end{cases} \quad (IV.5)$$

Ce résultat permet de présenter à la figure IV.4 le nouveau schéma équivalent sans transformateur. C'est aussi l'occasion de préciser la localisation des différentes puissances actives dans la machine.

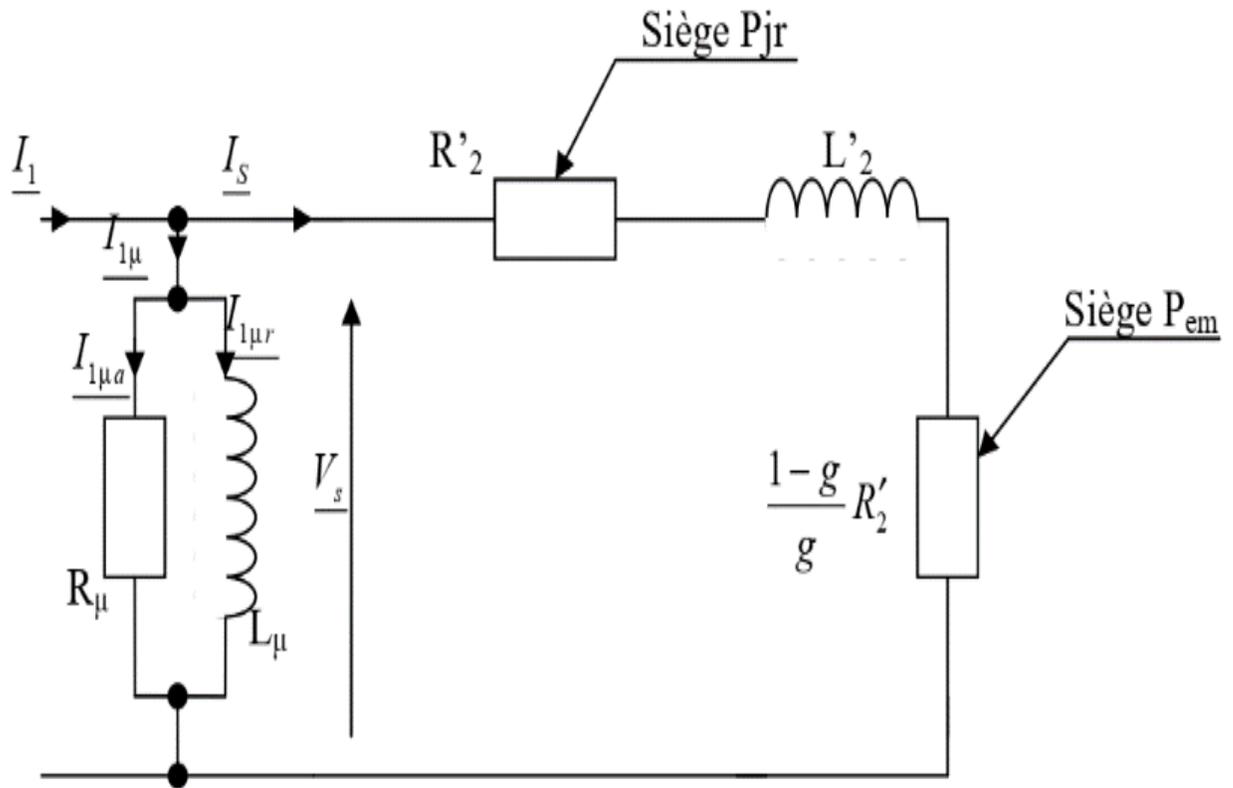


Figure IV. 4. Schéma équivalent complet de la MAS (partie secondaire).

### IV.3. Bilan énergétique d'un moteur asynchrone

#### IV.3.a. Puissance

Le moteur absorbe du réseau électrique une puissance ( $P_a$ ) à travers les bornes statoriques. Une partie de cette puissance (1 à 2 %) est perdue dans le stator sous forme de pertes fer (pertes magnétiques) ( $P'_{fs}$ ) et de pertes dans le cuivre due à l'effet joules ( $P'_{js}$ ).

$$P_a = 3 \cdot V_s \cdot I_1 \cdot \cos \theta \quad (IV. 6)$$

$$P'_{fs} = 3 \cdot R_\mu \cdot I_{1\mu a}^2 = 3 \cdot R_\mu \cdot \frac{V_s^2}{R_\mu^2} = 3 \cdot \frac{V_s^2}{R_\mu} \quad (IV. 7)$$

$$P'_{js} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (IV. 8)$$

La puissance restante est alors transmise ( $P_{tr}$ ) au rotor par le champ tournant sous forme de puissance électromagnétique ( $P_{em}$ ). Une partie de cette puissance électromagnétique est gaspillée sous

forme de pertes par effet joules rotoriques ( $P'_{jr}$ ) et l'autre partie se retrouve sous forme de puissance mécanique ( $P_{mec}$ ), qu'on appelle puissance utile ( $P_u$ ) disponible à l'arbre du moteur.

On peut négliger d'une part, les pertes fer rotoriques ( $P'_{fr}$ ) car elles dépendent de la fréquence rotorique qui est très faible et d'autres part les pertes mécaniques ( $P'_{mec}$ ).

$$P_a = P'_{js} + P'_{fs} + P_{tr} \quad (IV. 9)$$

$$P_{em} = P_{tr} = C_{em} \cdot \Omega_s \quad (IV. 10)$$

$$P_{tr} = P_{mec} + P'_{jr} \quad (IV. 11)$$

$$P_{mec} = P_u + P'_{mec} \quad (IV. 12)$$

#### IV.3.b. Rendement

Le rendement global de la MAS est donné par l'équation suivante :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (IV. 13)$$

Si les pertes statoriques sont négligeables, le rendement de la MAS au niveau de circuit de rotor est donné par l'équation suivante :

$$\eta_r = \frac{P_u}{P_{tr}} = \frac{P_{tr} - P'_{jr}}{P_{tr}} = \frac{P_{tr} - g P_{tr}}{P_{tr}} = 1 - g \quad (IV. 14)$$

#### IV.4. Couple électromagnétique

La puissance électromagnétique est dissipée par la résistance  $R'_{em}$  parcourue par le courant  $I_2$  :

$$P_{em} = 3 \cdot R'_{em} \cdot I_1^2 = 3 \cdot \frac{1-g}{g} \cdot R'_2 \cdot I_1^2 = C_{em} \cdot \Omega_s \quad (IV. 15)$$

Avec:  $\Omega_s = (1 - g) \cdot \Omega$

$$I_1^2 = \frac{V_s^2}{\left(\frac{R'_2}{g}\right)^2 + (L'_2 \cdot \omega)^2} \quad (IV. 16)$$

On obtient l'expression finale du couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{3}{\Omega_s} \cdot \frac{1-g}{g} \cdot R'_2 \cdot I_1^2 = \frac{3}{\Omega_s} \cdot \frac{1-g}{g} \cdot R'_2 \cdot \frac{V_s^2}{\left(\frac{R'_2}{g}\right)^2 + (L'_2 \cdot \omega)^2} =$$

$$C_{em} = 3 \cdot \frac{V_s^2}{\Omega_s^2} \frac{\left(\frac{R'_2}{g}\right)}{\left(\frac{R'_2}{g}\right)^2 + (L'_2 \cdot \omega)^2} \quad (IV.17)$$

D'après la relation (IV.17), on voit que le couple électromagnétique ( $C_{em}$ ) varie en fonction du glissement  $g$  et la caractéristique mécanique sera  $C_{em} = f(g)$

Au démarrage  $N = 0$  donc :  $g = 1$ , le couple de démarrage ( $C_d$ ) ou de décollage peut être calculé par :

$$C_d = 3 \cdot \frac{V_s^2}{\Omega_s^2} \frac{R'_2}{\left[\left(\frac{R'_2}{1}\right)^2 + (L'_2 \cdot \omega)^2\right]} = \text{Constante} \quad (IV.17)$$

On peut calculer le couple maximal ( $C_M$ ) par :  $\left(\frac{dC_{em}}{dg} = 0\right)$ , ce qui donne :

$$g_{max} = \frac{R'_2}{\left[(L'_2 \cdot \omega)^2\right]} \quad (IV.18)$$

Le couple maximal sera alors :

$$C_M = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_s^2}{\Omega_s^2} \frac{1}{(L'_2 \cdot \omega)} \quad (IV.19)$$

La caractéristique du couple électromagnétique est illustrée dans la figure IV.5.

Elle présente 2 branches, l'une stable comprise entre  $g = 0$  et  $g_{max}$  ; l'autre partie est instable  $g_{max} \leq g \leq 1$ . Et si le couple dépasse  $C_M$  ; le moteur s'arrête (il décroche).

Puisque  $C_M$  est indépendant de la résistance  $R'_2$ , on peut augmenter  $g_{max}$  en augmentant la résistance  $R'_2$  sans faire changer ce couple maximal  $C_M$ . Le couple  $C_M$  est proportionnel directement à la tension d'alimentation.

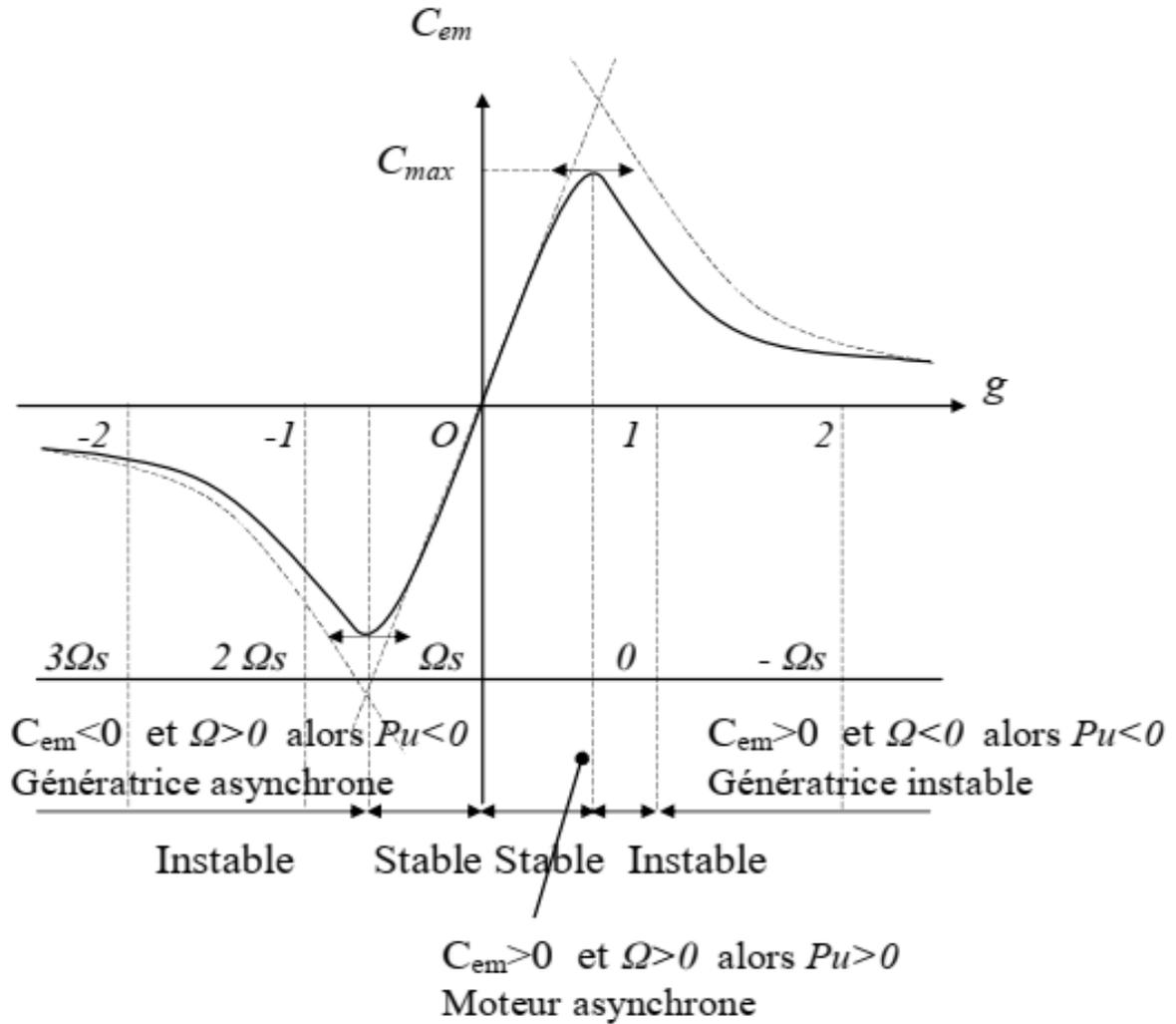


Figure IV. 5. Caractéristique du couple électromagnétique.

#### IV.5. Réglage de vitesse des moteurs asynchrones

Nous étudions ici les méthodes simples permettant de régler la vitesse de la machine pour une charge donnée, en agissant sur le réseau et sur les paramètres de la machine.

Les paramètres de réglage sont :

- La tension d'alimentation.
- La fréquence d'alimentation.
- La résistance du rotor qui peut être modifiée seulement pour les machines à rotor bobiné.

IV.5.a. Action sur la tension d'alimentation

Par la variation de la tension efficace d'alimentation :

- Le couple maximal est proportionnel au carré de la tension.
- Le glissement correspondant est indépendant de la tension.

La figure IV.6 donne un exemple sur les caractéristiques mécaniques pour plusieurs valeurs de la tension d'alimentation.

Pour ce type de réglage, on peut uniquement diminuer la vitesse par rapport à celle de synchronisme donc augmenter le glissement.

L'inconvénient de ce mode de réglage est la diminution du rendement avec la vitesse.

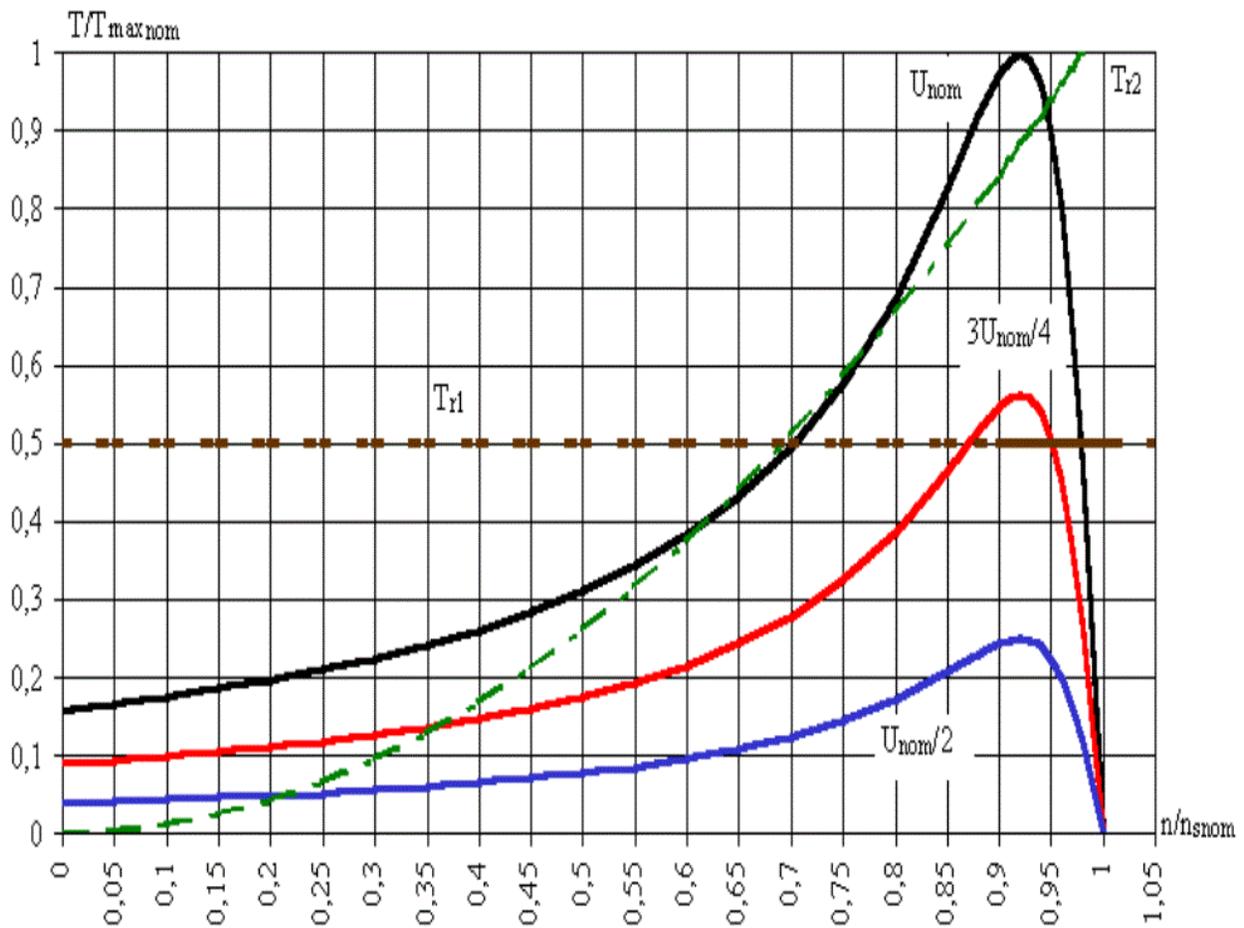


Figure IV. 6. Variation de la tension d'alimentation.

### IV.5.b. Action sur la fréquence d'alimentation

A tension d'alimentation constante, la variation de la fréquence agit sur :

- La vitesse de synchronisme.
- Le couple maximal.
- Le glissement maximal.

La figure IV.7 représente les caractéristiques mécaniques pour plusieurs valeurs de la fréquence.

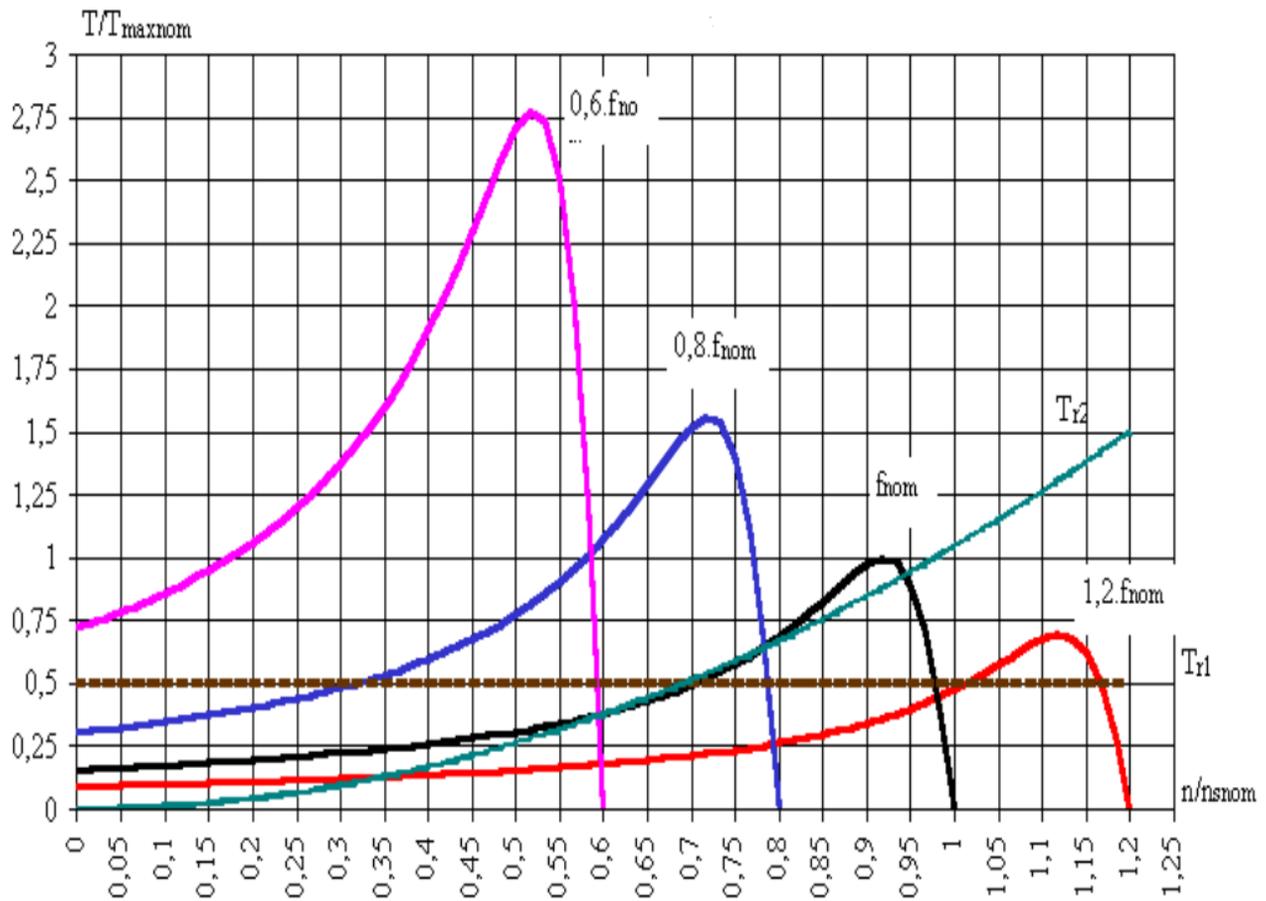


Figure IV. 7. Variation de la fréquence d'alimentation.

Pour ce type de réglage, nous constatons :

- Une large gamme de vitesses quelle que soit la forme du couple résistant
- Un faible glissement donc un bon rendement à toutes les fréquences
- Un risque de décrochage aux fréquences supérieures à la fréquence nominale.

L'inconvénient de ce mode de réglage est la variation du flux avec la fréquence, nous savons que :

$$V_s = R_1 \cdot I_1 + j \cdot \omega_s \cdot \phi_s \quad (IV.20)$$

$$\text{Si } (R_1 \cdot I_1 \ll j \cdot \omega_s \cdot \phi_s) \Rightarrow V_s = j \cdot \omega_s \cdot \phi_s$$

$$\text{En module : } V_s = \omega_s \cdot \phi_s \Rightarrow \phi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$$

Lorsque la fréquence diminue à tension constante, le flux augmente. La machine étant calculée pour être légèrement saturée à fréquence nominale, en basses fréquences, la machine sera très saturée et le courant magnétisant très élevé.

#### IV.5.c. Action simultanée de la tension et la fréquence d'alimentation

La vitesse étant pratiquement proportionnelle à la fréquence et dépendant peu de la tension d'alimentation.

Pour éviter l'inconvénient de la variation de vitesse par action sur la fréquence d'alimentation, il suffit de faire varier simultanément la tension et la fréquence en maintenant le rapport  $\frac{V_s}{f_s} = \text{cte}$  pour garder un flux constant.

Dans ce cas, le couple maximal est constant et le glissement maximal est varié inversement proportionnellement à la fréquence.

La figure IV.8 donne les caractéristiques mécaniques de la MAS pour ce type de réglage. Nous constatons un réglage de la vitesse dans une large gamme, quelle que soit la forme du couple résistant.

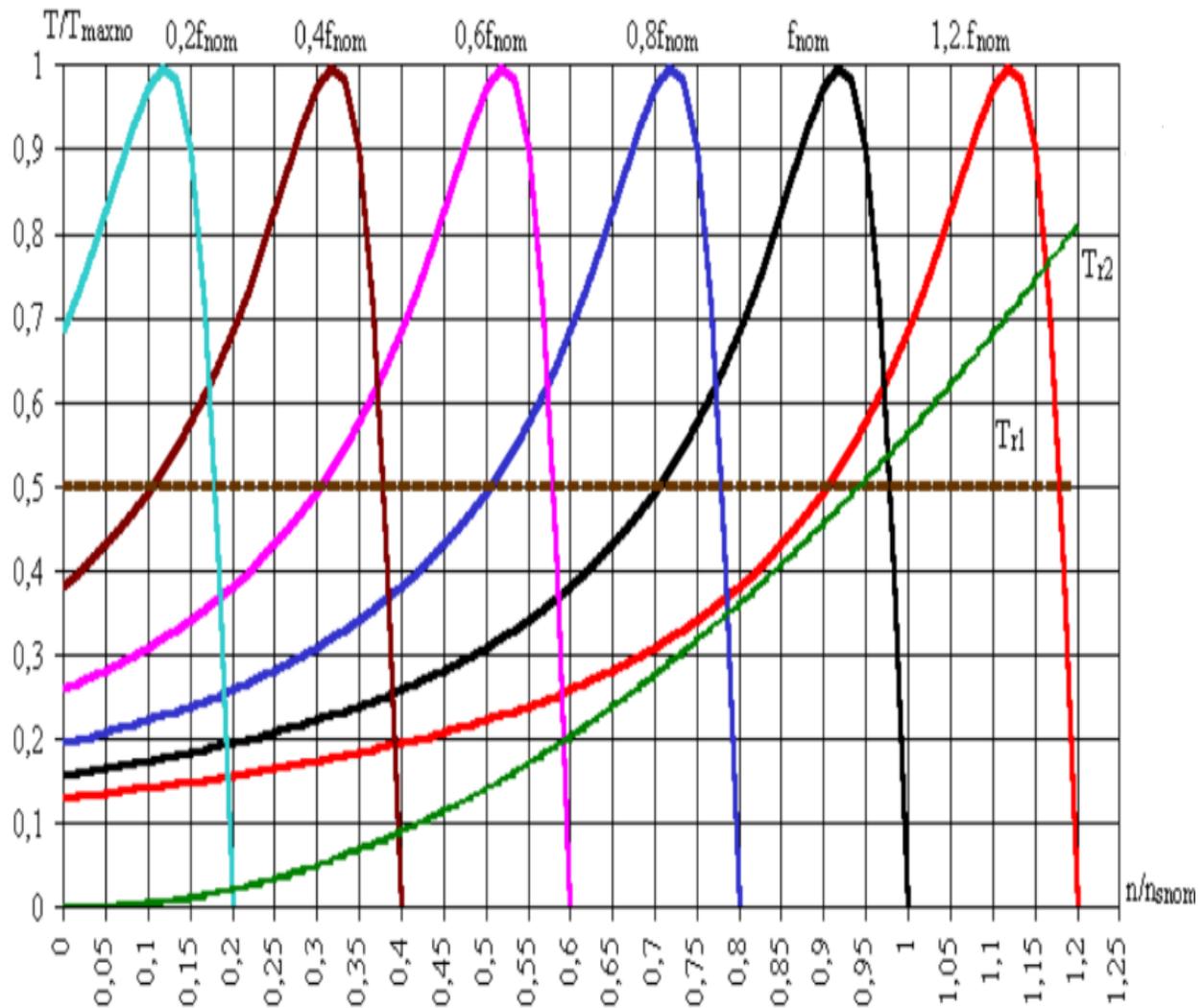


Figure IV. 8. Variation simultanée de de la tension et la fréquence d'alimentation.

#### IV.5.d. Action sur la résistance du rotor

Pour les machines à rotor bobiné, nous pouvons augmenter la résistance rotorique en branchant un rhéostat triphasé sur les bagues.

- Le couple maximal est indépendant à la résistance du rotor.
- Le glissement maximal est proportionnel à la résistance du rotor.

La figure IV.9 représente les caractéristiques mécaniques pour plusieurs valeurs du rhéostat.

On remarque avec la variation de la résistance du rotor que :

- La vitesse diminuée.

- Augmentation du glissement.
- Le rendement diminue.

Les pertes par effet Joule dans le rotor et le rhéostat sont proportionnelles au glissement. Le courant étant le même dans le rotor et le rhéostat. Pour les faibles vitesses, ces pertes seront très élevées et le rhéostat devra être très volumineux.

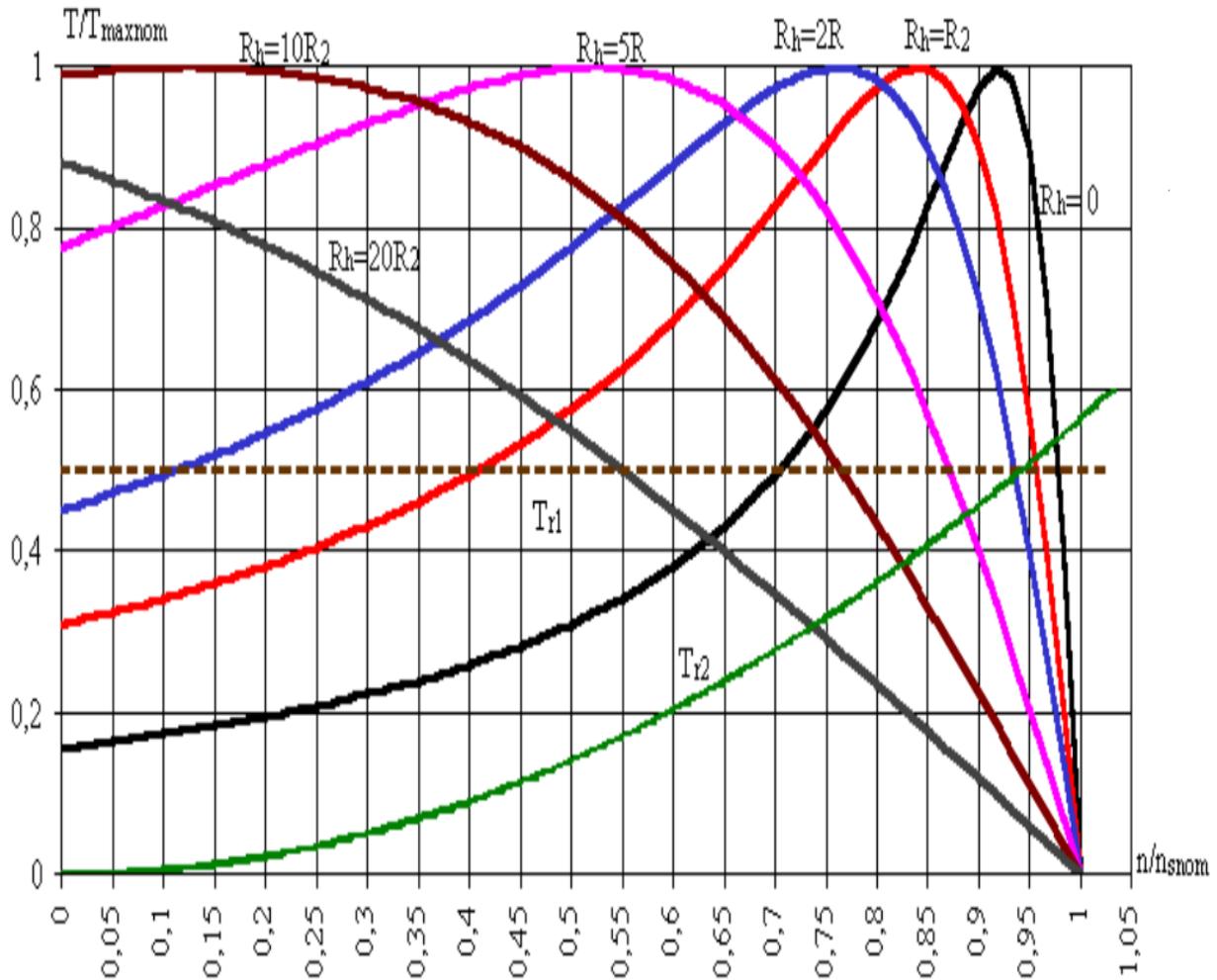


Figure IV. 9. Variation de la résistance du rotor.

#### IV.5.e. Action par cascade hypo-synchrone

Pour récupérer l'énergie prélevée au rotor au lieu de la dissiper dans un rhéostat dans la méthode précédente. La fréquence rotorique  $g \cdot f_s$  étant variable avec la vitesse. Nous devons utiliser un convertisseur de fréquence pour pouvoir restituer l'énergie rotorique au réseau statorique. La figure IV.10 donne le montage utilisé.

La tension du rotor est redressée et filtrée par l'inductance puis un onduleur assisté à thyristors restitue l'énergie au réseau à travers le transformateur réalisant l'adaptation des tensions. Aux pertes près, l'énergie est restituée au réseau.

Le montage permettant uniquement de diminuer la vitesse, il porte le nom de cascade hypo synchrone.

Le réglage de vitesse est obtenu en modifiant l'angle de retard à l'amorçage du redresseur et de l'onduleur.

Il permet de régler la vitesse dans une plage assez large tout en gardant un bon rendement.

La consommation de puissance réactive du transformateur et de l'onduleur, donne un facteur de puissance faible.

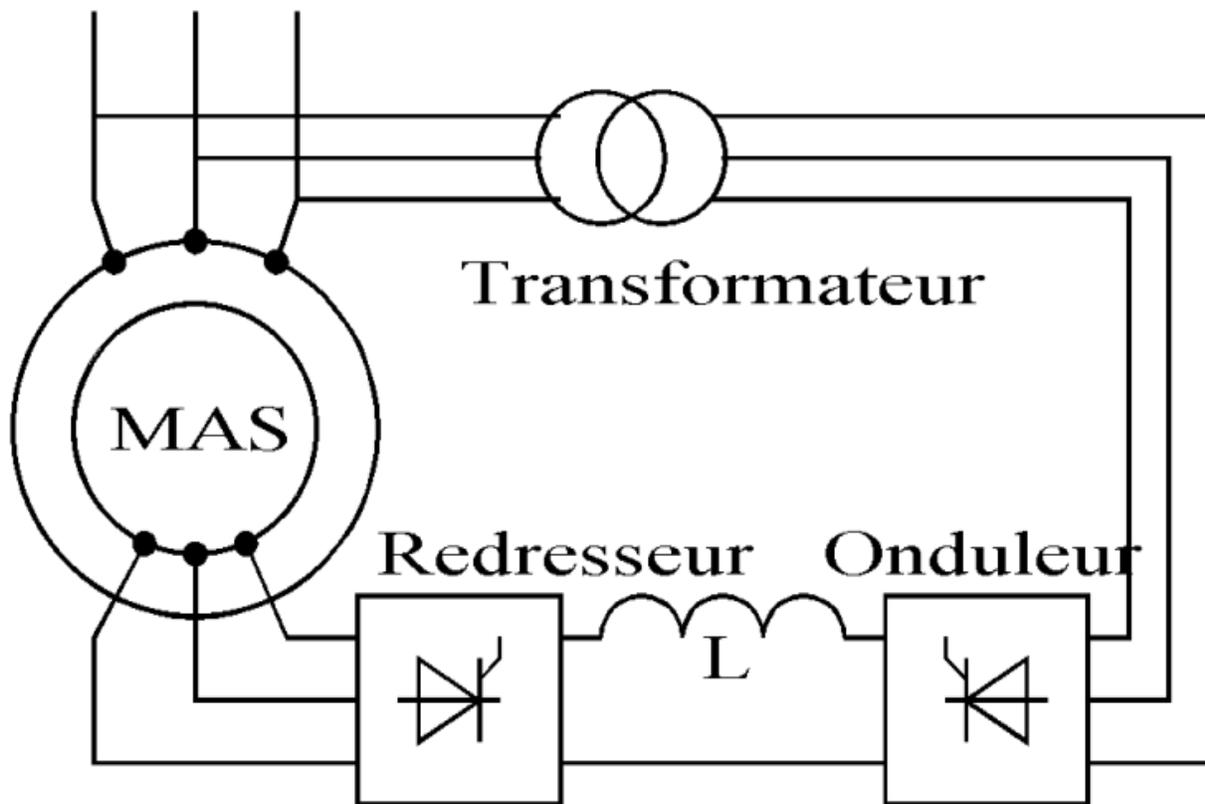


Figure IV. 10. Variation de la résistance du rotor.

#### IV.6. Association machines asynchrones avec convertisseurs

La figure IV.11 illustre un schéma global des convertisseurs statiques utilisés pour varier la vitesse de la MAS comportent principalement les éléments suivants :

- Un Redresseur (monophasé ou triphasé) permettant d'élaborer une source de tension continue.
- Un circuit de Filtrage (permettant l'obtention d'un signal pratiquement continu).
- Un Onduleur (monophasé ou triphasé) qui recrée à partir de la tension continue fixe un réseau de tension alternative de fréquence et de tension variable.

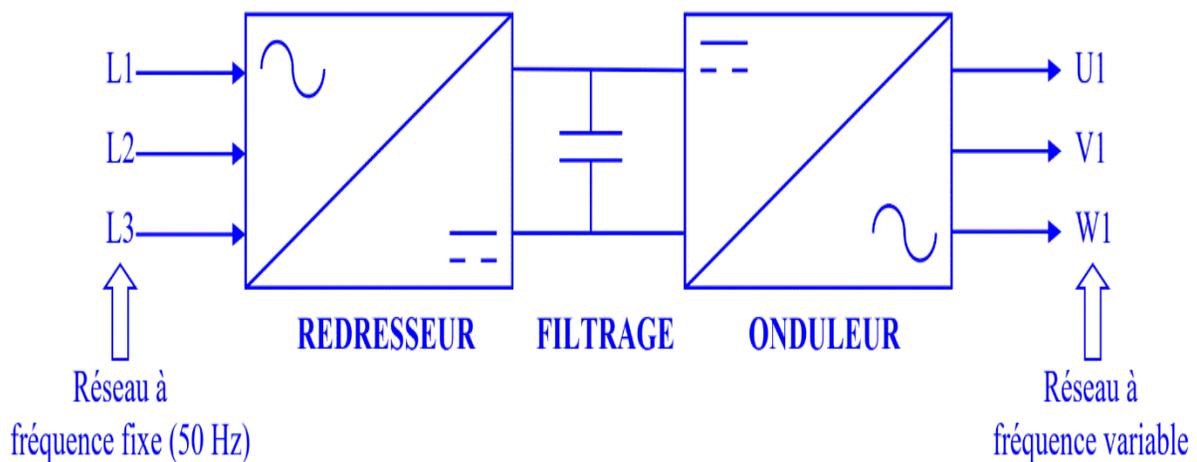


Figure IV. 11. Variation de la résistance du rotor.

#### IV.7. Démarrage du moteur asynchrone

Dans les conditions nominales au stator, le couple de démarrage est généralement inférieur au couple nominal et le moteur ne peut pas démarrer en charge nominale.

Le glissement étant égal à 1 au démarrage, le courant de démarrage peut atteindre 7 à 8 fois le courant nominal et faire déclencher les protections du moteur.

Pour obtenir des bonnes conditions de démarrage, il faut :

- Un couple de démarrage doit être plus élevé par rapport au couple résistant pour avoir un démarrage rapide

- La demande de courant doit être faible pour ne pas faire déclencher les protections de la machine.

Pour rendre le démarrage possible, nous cherchons en priorité à réduire le courant de démarrage. Après l'équation (IV.16), pour réduire le courant au démarrage, on peut réduire la tension d'alimentation. Dans ce cas :

- Le courant est réduit proportionnellement à la tension d'alimentation
- Le couple est réduit proportionnellement au carré de la tension d'alimentation.

Les moyens utilisés pour réduire la tension sont :

- Placer une impédance en série avec le stator.
- Alimenter le moteur par un gradateur triphasé.
- Alimenter le moteur par un autotransformateur.
- Utiliser un coupleur étoile-triangle.

## IV.8. Exercices

### Exercice 1

Sur la plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écuriel, on lit les indications suivantes :  $(220 / 380) \text{ V} ; 50 \text{ Hz} ; \cos(\varphi) = 0.86 ; n = 725 \text{ tr/min}$ .

Sachant que la résistance d'un enroulement du stator est  $R_s = 0.15 \Omega$ , que les pertes fer du stator sont de  $P'_{fs} = 500 \text{ W}$ , les pertes mécaniques sont négligeables ( $P'_{méc} = 0 \text{ W}$ ) et que la tension du réseau entre phases est de  $U_s = 380 \text{ V}$ , déterminer :

1. Le mode de couplage des enroulements du stator.
2. La vitesse de synchronisme ( $N_s$ ) et le nombre de paires de pôles ( $P$ ).
3. Les pertes par effet joule du stator ( $P'_{js}$ ).
4. Le glissement ( $g$ ).
5. Les pertes par effet joule dans le rotor ( $P'_{jr}$ ).
6. Le rendement du moteur ( $\eta$ ).

### Exercice 2

La plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé porte les indications suivantes :

$(220 / 380) \text{ V} ; 50 \text{ Hz} ; \cos(\varphi) = 0.85 ; P_u = 3600 \text{ W} ; n = 1460 \text{ tr/min}$ .

- I. Le moteur est alimenté par un réseau triphasé  $(127 / 220) \text{ V} ; 50 \text{ Hz}$ .
  1. Quel est le couplage des enroulements statoriques.
  2. Sachant que la vitesse de synchronisme est  $1500 \text{ tr/min}$ , calculer le nombre des pôles ( $P$ ).
  3. Calculer le glissement ( $g$ ).
- II. Dans un essai à vide, le moteur tourne à la vitesse de synchronisme, on a mesuré :
  - Puissance absorbée  $P_{a0} = 300 \text{ W}$ .
  - Courant à vide  $J_0 = 4 \text{ A}$ .
  - Les pertes mécaniques ( $P'_{méc} = 150 \text{ W}$ ).
  - Résistance d'un enroulement statorique  $R_s = 0.5 \Omega$ .

On suppose que les pertes joules rotoriques sont nulles ( $P'_{jr} = 0 \text{ W}$ )

1. Déterminer les pertes fer statoriques ( $P'_{fs}$ )
- III. Pour le fonctionnement nominal, le rendement du moteur est égal à  $\eta = 0.9$ .

1. Calculer la puissance absorbée par le moteur ( $P_a$ ).
  2. En déduire le courant de ligne ( $I_s$ ).
  3. Déterminer les pertes par effet joule au stator ( $P'_{js}$ ).
  4. Déterminer les pertes par effet joule au rotor ( $P'_{jr}$ ).
  5. Calculer le couple utile ( $C_u$ ).
- IV. Le moteur entraîne un ventilateur dont le couple résistant  $C_r = 0.01 \times n$ . Entre le fonctionnement à vide et le fonctionnement nominal, la caractéristique mécanique du moteur  $C_u = f(n)$  est proche à un segment de droite.
1. Donner l'expression numérique du couple utile ( $C_u$ ) en fonction de ( $n$ )
  2. Calculer la vitesse de groupe (moteur + ventilateur)
  3. Déterminer la puissance fournie par le moteur ( $P_u$ ) au ventilateur.

### Exercice 3

Un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné et à bague est alimenté par un réseau triphasé ( $f = 50$  Hz) dont la tension entre phases est  $U_s = 380$  V. Les enroulements du stator et du rotor sont en étoile.

La résistance mesurée à chaud entre deux bornes de phases du stator est  $R_{pps} = 0,2\Omega$ , celle mesurée à chaud entre deux bagues du rotor est  $R_{ppr} = 0,08\Omega$ .

A vide, le moteur tourne pratiquement à une vitesse de synchronisme 1500 tr/min.

La méthode de mesure de la puissance consiste à utiliser deux wattmètres, ce qui permet d'obtenir :  $P_1 = 900$  W;  $P_2 = -410$  W

1. Calculer le nombre de pôles du stator ( $P$ ).
2. Le facteur de puissance ( $\cos(\varphi)$ ) et l'intensité en ligne à vide ( $I_{s0}$ ).
3. Les pertes mécaniques sont constantes et égales à ( $P'_{méc} = 100$  W). Calculer les pertes dans le fer du stator ( $P'_{fs}$ ). Ces pertes seront considérées comme constantes.
4. Lors d'un essai en charge, on obtient :  $n = 1440$  tr/min ;  $P_1 = 4500$ W ;  $P_2 = 2000$  W.
  - a. Calculer le glissement ( $g$ ).
  - b. Le facteur de puissance ( $\cos(\varphi)$ ).
  - c. Le courant au stator ( $I_s$ ).
  - d. Le rendement ( $\eta$ ).
  - e. Le moment du couple utile ( $C_u$ ).

5. Le moteur entraîne une machine dont la caractéristique mécanique est une droite d'équation :  
( $C_r = 20 + 0.01 \times n$ ).
- Calculer la vitesse de rotation du groupe ( $n$ ).
  - La puissance utile du moteur ( $P_u$ ).
  - Quelle résistance doit-on mettre en série avec chacun des enroulements du rotor pour que la vitesse du groupe devienne 1410 tr/min.

#### Exercice 4

Un moteur asynchrone à cage est alimenté par un réseau triphasé de fréquence 50 Hz, de tensions entre phases égales à 380 V. Il a été soumis aux essais suivants :

- A vide : Puissance absorbée :  $P_{a0} = 360 \text{ W}$  ; Intensité du courant de ligne :  $I_{s0} = 3,6 \text{ A}$  ;  
Vitesse de rotation :  $N_0 = 2995 \text{ tr/min}$ .
- En charge : Puissance absorbée :  $P_a = 4560 \text{ W}$  ; Intensité du courant de ligne :  $I_s = 8,1 \text{ A}$  ;  
Fréquence de rotation :  $N = 2880 \text{ tr/min}$ .

Les enroulements du stator sont couplés en étoile ; la résistance de chacun d'eux vaut 0,75  $\Omega$ . Les pertes fer du stator sont évaluées à 130 W.

1. Quelle est la vitesse de synchronisme ? En déduire le glissement en charge.
2. Pour le fonctionnement à vide :
  - a. Calculer les pertes Joule au stator.
  - b. Justifier que les pertes Joule au rotor sont négligeables.
  - c. En déduire les pertes mécaniques.
3. Calculer pour le fonctionnement en charge :
  - a. Les pertes Joule au stator et au rotor.
  - b. La puissance utile et le moment du couple utile.
  - c. Le rendement du moteur.
4. Le moteur entraîne une pompe dont le moment du couple résistant est proportionnel à la vitesse de rotation et vaut  $C_r = 0.006 n$ . Dans sa partie utile, la caractéristique mécanique  $C_u = f(n)$  du moteur peut être assimilée à une droite.
  - a. Déterminer la vitesse de rotation du groupe moteur-pompe.

### Exercice 5

Un moteur asynchrone triphasé tétrapolaire  $220 V / 380 V$  à cage est alimenté par un réseau  $380 V$  entre phases,  $50 Hz$ .

Un essai à vide à une vitesse de rotation très proche du synchronisme a donné pour la puissance absorbée  $P_{s0} = 500 W$  et le facteur de puissance :  $\cos \varphi = 0.157$ .

Un essai en charge a donné : Intensité du courant absorbé :  $I_s = 12,2 A$  ; Glissement :  $g = 0.06$  ; Puissance absorbée :  $P_a = 3340 W$ .

La résistance d'un enroulement statorique est  $R_s = 1,0 \Omega$ .

1. Quelle est le couplage du stator sur le réseau.
2. Pour le fonctionnement à vide, calculer :
  - a. La vitesse de rotation supposée égale à la vitesse de synchronisme.
  - b. L'intensité du courant en ligne  $I_{s0}$ .
  - c. La valeur des pertes Joule dans le stator.
3. La valeur des pertes dans le fer du stator, supposées égales aux pertes mécaniques. Pour le fonctionnement en charge, calculer :
  - a. La vitesse de rotation (en  $tr/min$ ).
  - b. La puissance transmise au rotor.
  - c. La puissance utile et le rendement.
  - d. Le moment du couple utile.
4. Le moteur entraîne une machine dont le moment du couple résistant est proportionnel à la vitesse de rotation et vaut  $9 Nm$  à  $1500 tr/min$ . La partie utile de la caractéristique mécanique du moteur est assimilée à une droite.
  - a. Déterminer la vitesse de rotation du groupe.
  - b. Calculer la puissance utile du moteur.

### Exercice 6

Un moteur asynchrone triphasé hexapolaire ( $2p = 6$ ) est alimenté par un réseau triphasé :  $230/400 V - 50 Hz$ . La résistance mesurée à chaud entre deux bornes du stator couplé en étoile est  $R_{pp} = 0,8 \Omega$ .

L'essai nominal a donné les résultats suivants :  $g = 6 \%$ ,  $P_a = 12,3 KW$  et  $Q = 8,83 KVAR$ .

Sachant que les pertes statoriques dans le fer et les pertes mécaniques sont égales et valent  $550 W$ .

I. Déterminer :

1. Le facteur de puissance.
2. L'intensité efficace du courant en ligne.
3. Les pertes statoriques par effet Joule.
4. La vitesse de rotation.
5. Les pertes par effet Joule rotoriques.
6. La puissance utile et le moment du couple utile.
7. Le rendement.

II. Le moteur entraîne une charge mécanique dont la caractéristique peut être assimilée à une droite passant par les points  $(690 \text{ tr/min} ; 60 \text{ Nm})$  et  $(1000 \text{ tr/min} ; 40 \text{ Nm})$ .

On assimilera la partie utile de la caractéristique du moteur à une droite passant par les points  $(n' = n ; C_u = 0)$  et  $(n = n_N ; C_u = C_{uN})$

1. Déterminer l'équation de couple de charge.
2. Déterminer l'équation de couple utile.
3. Déterminer la vitesse de rotation du groupe moteur et charge.
4. Déterminer la valeur du couple utile.
5. Calculer la puissance utile développée par le moteur.

### Exercice 7

La plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné porte les indications suivantes :  $(230 / 400) V ; 50 \text{ Hz} ; n = 1440 \text{ tr/min} ; I = (\Delta/Y) 11,5 A / 6,5 A ; \cos \varphi = 0,94$ .

La résistance mesurée à chaud entre deux bornes de phases du stator est  $R_{PPS} = 0,6 \Omega$ , celle mesurée à chaud entre deux bagues du rotor est  $R_{ppr} = 0,12 \Omega$ .

Sachant que les pertes fer du stator sont de  $60W$  et les pertes mécaniques sont négligeables.

1. Citer les moyens utilisés pour réduire la tension de la MAS au démarrage.
2. Quelle est la vitesse de synchronisme  $Ns (\text{tr/min})$ .
3. Quel est le nombre de pôles du moteur.
4. Quelle est la tension maximale que doit supporter un enroulement du stator ?
  - a. Pour un couplage étoile, quel réseau utiliser :  $(133 / 230) V ; 230 / 400 V ; (400 / 690) V$ .

- b. Pour un couplage triangle, quel réseau utiliser :  $(133 / 230) V$  ;  $230 / 400 V$  ;  $(400 / 690) V$ .
5. En couplage étoile, quel est le courant nominal en ligne ?
  6. Quelle est la puissance apparente du moteur ?
  7. Calculer le glissement.
  8. Calculer les pertes par effet joule au stator.
  9. Calculer la puissance absorbée par le moteur.
  10. Calculer les pertes joule du rotor.
  11. Calculer la puissance utile et le couple utile.
  12. Calculer le rendement du rotor.
  13. Calculer la fréquence des courants rotoriques ?
  14. Quelle résistance doit-on mettre en série avec chacun des enroulements du rotor pour que la vitesse du moteur devienne  $1380 \text{ tr}/\text{min}$ .

### IV.9. Correction

#### Exercice 1

$(220 / 380) \text{ V} ; 50 \text{ Hz} ; \cos(\varphi) = 0.86 ; n = 725 \text{ tr/min.}$

$R_s = 0.15 \Omega ; P'_{fs} = 500 \text{ W} ; P'_{méc} = 0 \text{ W} ; U_s = 380 \text{ V.}$

1. Le mode de couplage des enroulements du stator.

Le couplage est en étoile lorsque la tension du réseau électrique est égale à la tension de la MAS.

2. La vitesse de synchronisme ( $N_s$ ) et le nombre de paires de pôles ( $P$ ).

Il est nécessaire de comparer la vitesse de synchronisation avec la vitesse mécanique, puis de sélectionner la valeur la plus proche.

$$N_s = 750 \text{ tr/min}$$

$$N_s = \frac{60 \times f_s}{P} \Rightarrow P = \frac{60 \times f_s}{N_s} = \frac{60 \times 50}{750} = 4$$

3. Les pertes par effet joule du stator ( $P'_{js}$ ).

$$P'_{js} = 3 \times R_s \times I_s^2 = 3 \times (0.15) \times (40)^2 = 720 \text{ W}$$

4. Le glissement ( $g$ ).

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{750 - 725}{750} = 0.033$$

5. Les pertes par effet joule dans le rotor ( $P'_{jr}$ ).

$$P'_{jr} = g \times P_{tr}$$

$$P_a = P'_{js} + P'_{fer} + P_{tr} \Rightarrow P_{tr} = P_a - (P'_{js} + P'_{fer})$$

$$P_a = 3 \times V_s \times I_s \times \cos(\varphi) = 3 \times 220 \times 40 \times 0.86 = 22704 \text{ W}$$

$$P_{tr} = 22704 - (720 + 500) = 21484 \text{ W}$$

$$P'_{jr} = 0.033 \times 21484 = 709 \text{ W}$$

6. Le rendement du moteur ( $\eta$ ).

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

$$P_{méc} = P_u + P'_{méc}$$

Les pertes mécaniques sont négligeables :  $P'_{méc} = 0 \Rightarrow P_{méc} = P_u$

$$P_{tr} = P_{méc} + P'_{jr} = P_u + P'_{jr} \Rightarrow P_u = P_{tr} - P'_{jr} = 21484 - 709 = 20775 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{20775}{22704} = 91.5 \%$$

**Exercice 2**

(220 / 380) V ; 50 Hz ;  $\cos(\varphi) = 0.85$  ;  $P_u = 3600$  W ;  $n = 1460$  tr/min.

**I.** Le moteur est alimenté par un réseau triphasé (127 / 220) V ; 50 Hz.

1. Quel est le couplage des enroulements statoriques.

Le couplage des enroulements statoriques est en triangle lorsque la tension composée du réseau électrique est égale à la tension simple de la MAS.

2. Sachant que la vitesse de synchronisme est 1500 tr/min, calculer le nombre des pôles (P).

$$N_s = 1500 \text{ tr/min}$$

$$P = \frac{60 \times f_s}{N_s} = \frac{60 \times 50}{1500} = 2 \Rightarrow 2P = 4$$

Ce moteur contient 4 pôles.

3. Calculer le glissement (g).

$$g = \frac{1500 - 1460}{1500} = 0.026$$

**II.** Dans un essai à vide :  $N_s = 1500$  tr/min ;  $P_{a0} = 300$  W ;  $J_0 = 4$  A ; ( $P'_{méc} = 150$  W) ;  $R_s = 0.5 \Omega$  ;  $P'_{js} = 0$  W.

1. Déterminer les pertes fer statoriques ( $P'_{fs}$ )

Pour le fonctionnement à vide :

$$P_u = 0 \text{ \& } P'_{jr} = 0 \Rightarrow P_{méc} = P'_{méc} \Rightarrow P_{tr} = P'_{méc}$$

$$P_{a0} = P'_{js0} + P'_{fer} + P_{tr} = P'_{js0} + P'_{fer} + P'_{méc} \Rightarrow P'_{fer} = P_{a0} - (P'_{js0} + P'_{méc})$$

$$P'_{js0} = 3 \times R_s \times I_0^2 = 3 \times (0.5) \times (4 \times \sqrt{3})^2 = 72 \text{ W}$$

$$P'_{fer} = 300 - (72 + 150) = 78 \text{ W}$$

**III.** Pour le fonctionnement nominal :  $\eta = 0.9$ .

1. Calculer la puissance absorbée par le moteur ( $P_a$ ).

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \Rightarrow P_a = \frac{P_u}{\eta} = \frac{3600}{0.9} = 4000 \text{ W}$$

2. En déduire le courant de ligne ( $I_s$ ).

$$P_a = \sqrt{3} \times U_s \times I_s \times \cos(\varphi) \Rightarrow I_s = \frac{P_a}{\sqrt{3} \times U_s \times \cos(\varphi)} = \frac{4000}{\sqrt{3} \times 220 \times (0.85)} = 12.35 \text{ A}$$

3. Déterminer les pertes par effet joule au stator ( $P'_{js}$ ).

$$P'_{js} = 3 \times R_s \times I_s^2 = 3 \times (0.5) \times (12.35)^2 = 228.78 \text{ W}$$

4. Déterminer les pertes par effet joule au rotor ( $P'_{jr}$ ).

$$P'_{jr} = g \times P_{tr} = g \times (P_a - (P'_{js} + P'_{fer}))$$

$$P'_{jr} = 0.026 \times (4000 - (228.78 + 78)) = 96 \text{ W}$$

5. Calculer le couple utile ( $C_u$ ).

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{3600}{1460 \times \frac{2 \cdot \pi}{60}} = 23.56 \text{ Nm}$$

IV.  $C_r = 0.01 \times n$ .

1. Donner l'expression numérique du couple utile ( $C_u$ ) en fonction de ( $n$ ).

$$C_u = f(n) = a \times n + b$$

$$\text{À vide : } 0 = a \times 1500 + b$$

$$\text{En charge : } 23.56 = a \times 1460 + b$$

$$C_u = -(0.589) \times n + 883.5$$

2. Calculer la vitesse de groupe (moteur +ventilateur).

$$C_u = C_r$$

$$-(0.589) \times n + 883.5 = (0.01) \times n \Rightarrow n = 1475 \text{ tr/min}$$

3. Déterminer la puissance fournie par le moteur ( $P_u$ ) au ventilateur.

$$P_u = C_u \times \Omega = (-(0.589) \times n + 883.5) \times \Omega$$

$$P_u = (-(0.589) \times 1475 + 883.5) \times (1475) \times \frac{2 \times \pi}{60}$$

$$P_u = 2273.3 \text{ W}$$

### Exercice 3

Réseau triphasé :  $f = 50 \text{ Hz}$  ;  $U_s = 380 \text{ V}$ .

Couplage : étoile.

$$R_{pps} = 0,2\Omega ; R_{ppr} = 0,08\Omega.$$

À vide,  $N_s = N = 1500 \text{ tr/min}$  ;  $P_1 = 900 \text{ W}$  ;  $P_2 = -410 \text{ W}$ .

1. Calculer le nombre de pôles du stator ( $P$ ).

$$P = \frac{60 \times f}{N_s} = \frac{60 \times 50}{1500} = 2 \Rightarrow 2P = 4$$

2. Le facteur de puissance ( $\cos(\varphi)$ ) et l'intensité en ligne à vide ( $I_{s0}$ ).

$$\cos(\varphi) = \frac{P_0}{S_0} = \frac{P_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}}$$

$$P_0 = P_1 + P_2 = 900 - 410 = 490 \text{ W}$$

$$Q_0 = \sqrt{3} \times (P_1 - P_2) = \sqrt{3} \times (900 + 410) = 2269 \text{ Var}$$

$$\cos(\varphi) = \frac{490}{\sqrt{490^2 + 2269^2}} = 0.21$$

$$I_{s0} = \frac{P_0}{\sqrt{3} \times U_s \times \cos(\varphi)} = \frac{490}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.21} = 3.53 \text{ A}$$

3.  $P'_{\text{méc}} = 100 \text{ W}$ . Calculer les pertes dans le fer du stator ( $P'_{\text{fs}}$ ). Ces pertes seront considérées comme constantes.

$$P'_{\text{méc}} = 100 \text{ W}$$

$$P'_{\text{fer}} = P_0 - (P'_{\text{js}} + P'_{\text{méc}})$$

$$P'_{\text{js}} = 3 \times R_s \times I_s^2 = 3 \times \left(\frac{0.2}{2}\right) \times (3.53)^2 = 3.73 \text{ W}$$

$$P'_{\text{fer}} = 490 - (3.73 + 100) = 386.26 \text{ W}$$

4. Lors d'un essai en charge, on obtient :  $n = 1440 \text{ tr/min}$  ;  $P_1 = 4500 \text{ W}$  ;  $P_2 = 2000 \text{ W}$ .

- a. Calculer le glissement ( $g$ ).

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0.04$$

- b. Le facteur de puissance ( $\cos(\varphi)$ ).

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

$$P = P_1 + P_2 = 4500 + 2000 = 6500 \text{ W}$$

$$Q = \sqrt{3} \times (P_1 - P_2) = \sqrt{3} \times (4500 - 2000) = 4330.12 \text{ Var}$$

$$\cos(\varphi) = \frac{6500}{\sqrt{6500^2 + 4330.12^2}} = 0.83$$

- c. Le courant au stator ( $I_s$ ).

$$I_s = \frac{P_s}{\sqrt{3} \times U_s \times \cos(\varphi)} = \frac{6500}{\sqrt{3} \times 380 \times (0.83)} = 11.86 \text{ A}$$

d. Le rendement ( $\eta$ ).

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

$$P_u = P_{méc} - P'_{méc} = P_{tr} - P'_{jr} - P'_{méc} = (1 - g) \times P_{tr} - P'_{méc}$$

$$P_u = (1 - g) \times (P_a - P'_{js} - P'_{fer}) - P'_{méc}$$

$$P_u = (1 - 0.04) \times (6500 - 18.28 - 386.26) - 100 = 5751.64 \text{ W}$$

$$P'_{js} = 3 \times R_s \times I_s^2 = 3 \times \left(\frac{0.2}{2}\right) \times (11.86)^2 = 18.28 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{5751.64}{6500} = 88.48\%$$

e. Le moment du couple utile ( $C_u$ ).

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{5751.64}{(1440) \times \frac{2 \times \pi}{60}} = 38.16 \text{ Nm}$$

5.  $C_r = 20 + 0.01 \times n$ .

a. Calculer la vitesse de rotation du groupe ( $n$ ).

$$C_u = f(N) = a \times N + b$$

$$\text{\AA vide : } 0 = a \times 1500 + b$$

$$\text{En charge : } 38.16 = a \times 1440 + b$$

$$C_u = -(0.63) \times N + 945$$

$$\text{Vitesse de groupe (moteur + ventilateur) : } C_u = C_r$$

$$-(0.63) \times N + 945 = 20 + 0.01 \times N \Rightarrow N = 1445.3 \text{ tr/min}$$

b. La puissance utile du moteur ( $P_u$ ).

$$P_u = C_u \times \Omega = (-(0.63) \times N + 945) \times \Omega = (-(0.63) \times 1445.3 + 945) \times (1445.3) \times \frac{2 \cdot \pi}{60}$$

$$P_u = 5213 \text{ W}$$

c. Quelle résistance doit-on mettre en série avec chacun des enroulements du rotor pour que la vitesse du groupe devienne 1410 tr/min.

$$N' = 1410 \text{ tr/min}$$

$$g' = \frac{N_s - N'}{N_s} = \frac{1500 - 1410}{1500} = 0.06$$

$$g = 0.04 \Rightarrow N = 1440 \text{ tr/min} \Rightarrow R_r = 0.04 \Omega$$

$$g' = 0.06 \Rightarrow N' = 1410 \text{ tr/min} \Rightarrow R_T = R_r + R_{Th}$$

Par l'utilisation de la règle de trois on trouve que :

$$R_T = \frac{R_r \times g'}{g} = \frac{0.04 \times 0.06}{0.04} = 0.06 \Omega = R_r + R_{Th} \Rightarrow R_{Th} = 0.06 - R_r$$

$$R_{Th} = 0.06 - 0.04 = 0.02 \Omega$$

#### Exercice 4

Un moteur asynchrone à cage :  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $U = 380 \text{ V}$ .

- A vide :  $P_{a0} = 360 \text{ W}$  ;  $I_{s0} = 3,6 \text{ A}$  ;  $N_0 = 2\,995 \text{ tr/min}$ .
- En charge :  $P_a = 4\,560 \text{ W}$  ;  $I_s = 8,1 \text{ A}$  ;  $N = 2\,880 \text{ tr/min}$ .

$$R_s = 0,75 \Omega. P'_{fers} = 130 \text{ W}.$$

1. Quelle est la vitesse de synchronisme ? En déduire le glissement en charge.

$$N_s = \frac{60 \times f_s}{P} \Rightarrow 3000 \text{ tr/min}$$

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{3000 - 2880}{3000} = 0.04$$

2. Pour le fonctionnement à vide :

- a. Calculer les pertes Joule au stator.

$$P'_{s0} = 3 \times R_s \times I_{s0}^2 = 3 \times (0.75) \times (3.6)^2 = 29.16 \text{ W}$$

- b. Justifier que les pertes Joule au rotor sont négligeables.

$$\text{A vide : } g = 0 \Rightarrow P'_{jr0} = g \times P_{tr} = 0 \text{ W}$$

- c. En déduire les pertes mécaniques.

$$P_{s0} = P'_{s0} + P'_{méc} + P'_{fer}$$

$$P'_{méc} = P_{s0} - (P'_{s0} + P'_{fer}) = 360 - 29.16 - 130 = 200.84 \text{ W}$$

3. Calculer pour le fonctionnement en charge :

- a. Les pertes Joule au stator et au rotor.

$$P'_{js} = 3 \times R_s \times I_s^2 = 3 \times (0.75) \times (8.1)^2 = 147.62 \text{ W}$$

$$P'_{jr} = g \times P_{tr} = g \times (P_a - (P'_{js} + P'_{fer})) = 0.04 \times (4560 - (147.62 + 130)) = 171.29 \text{ W}$$

- b. La puissance utile et le moment du couple utile.

$$P_u = P_{méc} - P'_{méc} = P_{tr} - P'_{jr} - P'_{méc} = (1 - g) \times P_{tr} - P'_{méc}$$

$$P_u = (1 - g) \times (P_a - P'_{js} - P'_{fer}) - P'_{méc}$$

$$P_u = [(1 - 0.04) \times (4560 - 147.62 - 130)] - 200.84 = 3910.25 \text{ W}$$

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{3910.25}{(2880) \times \frac{2 \times \pi}{60}} = 13 \text{ Nm}$$

c. Le rendement du moteur.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{3910.25}{4560} = 85.75 \%$$

4.  $C_r = 0.006 n$ .

a. Déterminer la vitesse de rotation du groupe moteur-pompe.

$$C_u = f(N) = a \times N + b$$

$$\text{\AA vide : } 0 = a \times 2995 + b$$

$$\text{En charge : } 38.16 = a \times 2880 + b$$

$$C_u = -(0.11) \times N + 329.45$$

$$C_u = C_r$$

$$-(0.11) \times N + 329.45 = 0.006 N \Rightarrow N = 2840 \text{ tr/min}$$

### Exercice 5

$$2P = 4 ; 220 \text{ V} / 380 \text{ V} ; U = 380 \text{ V} ; 50 \text{ Hz.}$$

$$\text{Un essai \AA vide : } P_{s0} = 500 \text{ W} ; \cos \varphi = 0.157.$$

$$\text{Un essai en charge a donn\u00e9 : } I_s = 12,2 \text{ A} ; g = 0.06 ; P_a = 3340 \text{ W.}$$

$$R_s = 1,0 \Omega.$$

1. Quelle est le couplage du stator sur le r\u00e9seau.

Couplage \u00e9toile.

2. Pour le fonctionnement \AA vide, calculer :

a. La vitesse de rotation suppos\u00e9e \u00e9gale \u00e0 la vitesse de synchronisme.

$$N_s = \frac{60 \times f_s}{P} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ tr/min}$$

b. L'intensit\u00e9 du courant en ligne  $I_{s0}$ .

$$I_{s0} = \frac{P_{s0}}{3 \times V_s \times \cos \varphi} = \frac{500}{3 \times 220 \times 0.157} = 4.82 \text{ A}$$

c. La valeur des pertes Joule dans le stator.

$$P'_{js0} = 3 \times R_s \times I_{s0}^2 = 3 \times (1) \times (4.82)^2 = 69.69 \text{ W}$$

d. La valeur des pertes dans le fer du stator, suppos\u00e9es \u00e9gales aux pertes m\u00e9caniques.

$$P_{s0} = P'_{js0} + P'_{méc} + P'_{fer} = P'_{js0} + 2 \times P'_{méc}$$

$$P'_{méc} = P'_{fer} = \frac{P_{s0} - P'_{js0}}{2} = \frac{500 - 69.69}{2} = 215.15 \text{ W}$$

3. Pour le fonctionnement en charge, calculer :

a. La vitesse de rotation (en tr/min).

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \Rightarrow N = (1 - g) \times N_s = (1 - 0.06) \times 1500 = 1410 \text{ tr/min}$$

b. La puissance transmise au rotor.

$$P_{tr} = P_a - P'_{js} - P'_{fer}$$

$$P'_{js} = 3 \times R_s \times I_s^2 = 3 \times (1) \times (12.2)^2 = 446.52 \text{ W}$$

$$P_{tr} = 3340 - 446.52 - 215.15 = 2678.33 \text{ W}$$

c. La puissance utile et le rendement.

$$P_u = P_{méc} - P'_{méc} = P_{tr} - P'_{jr} - P'_{méc} = (1 - g) \times P_{tr} - P'_{méc}$$

$$P_u = (1 - 0.06) \times 2678.33 - 215.15 = 2302.48 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{2302.48}{3340} = 68.93 \%$$

d. Le moment du couple utile.

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{2302.48}{(1410) \times \frac{2 \times \pi}{60}} = 15.6 \text{ Nm}$$

4. Le moteur entraîne une machine dont le moment du couple résistant est proportionnel à la vitesse de rotation et vaut  $9 \text{ Nm}$  à  $1500 \text{ tr/min}$ . La partie utile de la caractéristique mécanique du moteur est assimilée à une droite.

a. Déterminer la vitesse de rotation du groupe.

$$C_r = 0.006 n.$$

$$C_u = f(N) = a \times N + b$$

$$\text{À vide : } 0 = a \times 1500 + b$$

$$\text{En charge : } 15.6 = a \times 1410 + b$$

$$C_u = -(0.17) \times N + 255$$

$$\text{Vitesse de groupe (moteur + ventilateur) : } C_u = C_r$$

$$-(0.17) \times N + 255 = 0.006 N \Rightarrow N = 1448.86 \text{ tr/min}$$

b. Calculer la puissance utile du moteur.

$$P_u = C_u \times \Omega = (-0.17) \times N + 255) \times \Omega$$

$$P_u = (-0.17) \times 1448.86 + 255) \times (1448.86) \times \frac{2 \cdot \pi}{60} = 1312.10 \text{ W}$$

### Exercice 6

$$2p = 6 ; 230/400 \text{ V} - 50 \text{ Hz. } R_{pps} = 0,8 \Omega.$$

L'essai nominal a donné les résultats suivants :  $g = 6 \%$ ,  $P_a = 12,3 \text{ KW}$  et  $Q = 8,83 \text{ KVAR}$ .

$$P'_{fers} = P'_{méc} = 550 \text{ W}.$$

I. Déterminer :

1. Le facteur de puissance.

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{12.3 \times 10^3}{\sqrt{(12.3 \times 10^3)^2 + (8.83 \times 10^3)^2}} = 0.81$$

2. L'intensité efficace du courant en ligne.

$$I = \frac{P}{3 \times V \times \cos(\varphi)} = \frac{12.3 \times 10^3}{3 \times 220 \times (0.81)} = 23 \text{ A}$$

3. Les pertes statoriques par effet Joule.

$$P'_{js} = \frac{3}{2} \times R_{bb} \times I_s^2 = \frac{3}{2} \times (0.8) \times (23)^2 = 634.8 \text{ W}$$

4. La vitesse de rotation.

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \Rightarrow N = (1 - g) \times N_s$$

$$N_s = \frac{60 \cdot f_s}{P} = \frac{60 \times 50}{3}$$

$$N_s = 1000 \text{ tr/min}$$

$$N = (1 - 0.06) \times 1000 = 940 \text{ tr/min}$$

5. Les pertes par effet Joule rotoriques.

$$P'_{jr} = g \cdot P_{tr} = g \times (P_a - (P'_{js} + P'_{fer})) = 0.06 \times (12300 - (634.8 + 550)) = 667 \text{ W}$$

6. La puissance utile et le moment du couple utile.

$$P_u = P_{méc} - P'_{méc} = P_{tr} - P'_{jr} - P'_{méc} = P_a - (P'_{js} + P'_{fer}) - P'_{jr} - P'_{méc}$$

$$P_u = 12300 - (634.8 + 550) - 667 - 550 = 9898.2 \text{ W}$$

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{9898.2}{(940) \times \frac{2 \cdot \pi}{60}} = 100.6 Nm$$

7. Le rendement.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{9898.2}{12300} = 80.47\%$$

II. Le moteur entraîne une charge mécanique dont la caractéristique peut être assimilée à une droite passant par les points (690 *tr/min* ; 60 *Nm*) et (1000 *tr/min* ; 40 *Nm*).

On assimilera la partie utile de la caractéristique du moteur à une droite passant par les points ( $n' = n$ ;  $C_u = 0$ ) et ( $n = n_N$  ;  $C_u = C_{uN}$ )

1. Déterminer l'équation de couple de charge.

$$C_r = a \times n + b$$

$$\begin{cases} 60 = a \times 690 + b \dots (1) \\ 40 = a \times 1000 + b \dots (2) \end{cases}$$

$$(1) \Leftrightarrow b = 60 - a \times 690$$

$$(2) \Leftrightarrow 40 = a \times 1000 + 60 - a \times 690 \Rightarrow a = -0.064$$

$$b = 60 - (-0.064) \times 690 = 104.16$$

$$C_r = -0.064 \times n + 104.16$$

2. Déterminer l'équation de couple utile.

$$C_u = a \times n + b$$

$$\begin{cases} \text{A vide: } 0 = a \times 1000 + b \dots (1) \\ \text{En charge: } 100.6 = a \times 940 + b \dots (2) \end{cases}$$

$$(1) \Leftrightarrow b = -a \times 1000$$

$$(2) \Leftrightarrow 100.6 = a \times 940 - a \times 1000 \Rightarrow a = -1.6766$$

$$b = -(-1.6766) \times 1000 = 1676.6$$

$$C_u = -1.6766 \times n + 1676.6$$

3. Déterminer la vitesse de rotation du groupe moteur et charge.

$$C_u = C_r \Leftrightarrow -0.064 \times n + 104.16 = -1.6766 \times n + 1676.6 \Rightarrow n = 975.46 \text{ tr/min}$$

4. Déterminer la valeur du couple utile.

$$C_u = -1.6766 \times 975.46 + 1676.6 = 41.73 Nm$$

5. Calculer la puissance utile développée par le moteur.

$$P_u = C_u \times \Omega = 41.73 \times (975.46) \times \frac{2 \cdot \pi}{60} = 4260.55 W$$

**Exercice 7**

$(230 / 400) V$ ;  $50 \text{ Hz}$ ;  $n = 1440 \text{ tr/min}$ ;  $I = (\Delta/Y) 11,5 A / 6,5 A$ ;  $\cos \varphi = 0,94$ .

$$R_{PPS} = 0,6 \Omega, R_{ppr} = 0,12 \Omega.$$

$$P'_{\text{fers}} = 60 \text{ W}; P'_{\text{méc}} = 0 \text{ W}.$$

1. Citer les moyens utilisés pour réduire la tension de la MAS au démarrage.
  - Placer une impédance en série avec le stator.
  - Alimenter le moteur par un gradateur triphasé.
  - Alimenter le moteur par un autotransformateur.
  - Utiliser un coupleur étoile-triangle

2. Quelle est la vitesse de synchronisme.

$$N_s = \frac{60 \cdot f_s}{P} = \frac{60 \times 50}{P}$$

$$P = 1 \Rightarrow N_s = \frac{60 \times 50}{1} = 3000 \text{ tr/min}$$

$$P = 2 \Rightarrow N_s = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ tr/min}$$

3. Quel est le nombre de pôles du moteur.

$$P = 2 \Rightarrow 2P = 4$$

4. Quelle est la tension maximale que doit supporter un enroulement du stator ?

- a. Pour un couplage étoile, quel réseau utiliser :  $(133 / 230) V$ ;  $230 / 400 V$ ;  $(400 / 690) V$ .  
 $230 / 400 V$
- b. Pour un couplage triangle, quel réseau utiliser :  $(133 / 230) V$ ;  $230 / 400 V$ ;  $(400 / 690) V$ .  
 $(133 / 230) V$

5. En couplage étoile, quel est le courant nominal en ligne ?

$$I = 6,5 A$$

6. Quelle est la puissance apparente du moteur ?

$$S = 3 \times V \times I = 3 \times 230 \times 6,5 = 4485 W$$

7. Calculer le glissement.

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0,04$$

8. Calculer les pertes par effet joule au stator.

$$P'_{J_s} = \frac{3}{2} \cdot R_s \cdot I_s^2 = \frac{3}{2} \times (0,6) \times (6,5)^2 = 38 W$$

9. Calculer la puissance absorbée par le moteur.

$$P_a = S \cdot \cos\varphi = 4485 \times 0.94 = 4215.9W$$

10. Calculer les pertes joule du rotor.

$$P'_{jr} = g \cdot P_{tr}$$

$$P_{tr} = P_a - (P'_{js} + P'_{fer}) = 4215.9 - (38 + 60) = 4117.9W$$

$$P'_{jr} = 0.04 \times 4117.9 = 164.71W$$

11. Calculer la puissance utile et le couple utile.

$$P_u = P_{méc} - P'_{méc} = P_{tr} - P'_{jr} - P'_{méc} = P_a - (P'_{js} + P'_{fer}) - P'_{jr} - P'_{méc}$$

$$P_u = 4215.9 - (38 + 60) - 164.71 - 0 = 3953.19W$$

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{3953.19}{(1440) \times \frac{2 \cdot \pi}{60}} = 26,22Nm$$

12. Calculer le rendement du rotor.

$$\eta = 1 - g = 1 - 0,04 = 96\%$$

13. Calculer la fréquence des courants rotoriques ?

$$f_r = g \times f_s = 0.04 \times 50 = 2Hz$$

14. Quelle résistance doit-on mettre en série avec chacun des enroulements du rotor pour que la vitesse du moteur devienne 1380 *tr/min*.

$$N' = 1380 \text{ tr/min}$$

$$g' = \frac{N_s - N'}{N_s} = \frac{1500 - 1380}{1500} = 0.08$$

$$g = 0.04 \rightarrow N = 1440 \text{ tr/min} \rightarrow R_r = 0.06 \Omega$$

$$g' = 0.08 \rightarrow N' = 1410 \text{ tr/min} \rightarrow R_T = R_r + R_{Th}$$

Par l'utilisation de la règle de trois on trouve que:

$$R_T = \frac{R_r \cdot g'}{g} = \frac{0.08 \cdot 0.06}{0.04} = 0.12 \Omega = R_r + R_{Th} \Rightarrow R_{Th} = 0.12 - R_r$$

$$R_{Th} = 0.12 - 0.06 = 0.06 \Omega$$

#### **IV.10. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons développé le modèle d'une phase d'un Moteur Asynchrone (MAS) et déterminé les équations de bilan de puissance nécessaires. Ensuite, nous avons étudié les caractéristiques de la variation de vitesse d'un MAS en utilisant différentes méthodes de réglage telles que la variation de la tension d'alimentation, l'action sur la fréquence, l'action sur la résistance d'induit et la commande scalaire qui implique l'action simultanée sur la tension et la fréquence.

Par la suite, nous avons abordé la structure de l'association d'un MAS avec des convertisseurs statiques afin de permettre la variation de vitesse par le biais de la commande scalaire. Cette approche offre une meilleure flexibilité et un contrôle plus précis de la vitesse du MAS.

Enfin, pour une meilleure compréhension, nous avons inclus des exercices pratiques accompagnés de leurs corrections. Ces exercices nous ont permis d'appliquer les concepts théoriques étudiés et de consolider notre compréhension des différents aspects du réglage de la vitesse du MAS.

# Chapitre V

## Chapitre V. Réglage de la vitesse et autopilotage des moteurs synchrones

### V.1. Généralités

#### V.1.a. Définition

La Machine Synchrone (MS) est une machine réversible de conversion électromécanique. Elle est principalement utilisée dans le domaine de production d'énergie électrique à partir d'énergie mécanique.

Elle porte le nom d'alternateur lorsque sa vitesse est fixe (centrale thermique, hydraulique, nucléaire) et elle dite génératrice synchrone lorsque sa vitesse est variable (centrale éolienne).

Le développement de l'électronique de puissance permette aujourd'hui d'employer les MS en tant que moteurs dans une large gamme de puissance (chaîne de traction des TGV). La machine synchrone dans la très grande majorité des cas est utilisée en triphasé.

#### V.1.b. Constitution

Comme tout moteur, la MS est constituée d'une partie mobile le rotor et d'une partie fixe le stator.

Le stator est constitué d'un bobinage triphasé généralement couplé en étoile, découpé en  $p$  paire de pôles.

Le rotor sert à créer le champ magnétique qui va balayer les conducteurs de l'induit. Ce champ magnétique est créé par des aimants permanents (brushless sans balais) ou par des bobinages.

Lorsque l'inducteur est bobiné, il est nécessaire de conserver des balais afin de l'alimenter par un courant continu.

Les rotors bobinés peuvent être classés en deux catégories :

- Rotor à pôles saillants : ce rotor est utilisé dans les machines à faibles vitesses ( $p > 2$ ).
- Rotor à pôles lisses : ce rotor concerne les machines à grandes vitesses ( $p = 1, 2$ ).

### V.1.c. Principe de fonctionnement

Les courants de fréquence ( $f$ ) fournis par la source triphasée créent dans l'entrefer une force magnétomotrice tournant ( $f.m.m$ ) à la fréquence synchrone  $n_s$  définie par :  $\Omega = \frac{f}{p}$  [tr/s].

Cette  $f.m.m$ . tirent les pôles du rotor et font entraîner celui-ci à la vitesse synchrone. D'où le nom du moteur synchrone donné à cette machine.

Le synchronisme des champs magnétiques induit et inducteur impose une procédure spécifique de démarrage (de couplage au réseau en mode alternateur) :

- En mode moteur : un MS ne peut démarrer directement à pleine tension depuis le réseau de fréquence 50Hz (Car le rotor a une vitesse nulle au démarrage). Pour une alimentation directe en 50 Hz, il faudrait donc au préalable amener la charge à la vitesse nominale par un moteur auxiliaire puis connecter l'alimentation.
- Pour les moteurs brushless : la solution consiste à utiliser un onduleur pour reconstituer un système de tension triphasé de fréquence et d'amplitude voulu.
- En mode alternateur : avant de connecter la MS au réseau, il faut lancer le rotor à la vitesse de synchronisme par un moteur auxiliaire.

### V.2. Modèle électrique

Afin d'étudier les différents fonctionnements possibles d'une MS en régime sinusoïdal La figure V.1 représente le schéma équivalent par phase le plus simple possible, en négligeant toutes les pertes ainsi que les phénomènes de saturation.

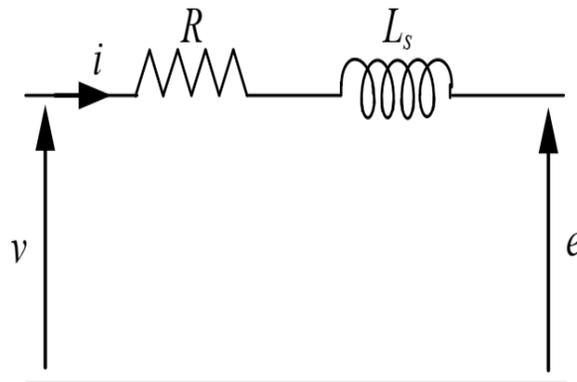


Figure V. 1. Schéma équivalent de Behn Eschenbourg.

Avec :

$i(t)$  : Le courant de phase circulant dans les enroulements statoriques.

$v(t)$  : La tension simple aux bornes d'un enroulement.

$e(t)$  : La force électro motrice à vide de la machine.

$X_s = L_s \cdot \omega$  : La réactance synchrone,  $R$  la résistance d'un enroulement.

Le schéma équivalent de la figure V.1 peut être traduit par la relation suivante :

$$\underline{V} = R \cdot \underline{I} + j \cdot X_s \cdot \underline{I} + \underline{E} \quad (V.1)$$

Pour  $R = 0$ , la relation devient :

$$\underline{V} = j \cdot X_s \cdot \underline{I} + \underline{E} \quad (V.2)$$

Cette relation peut être traduite par le diagramme vectoriel suivant :

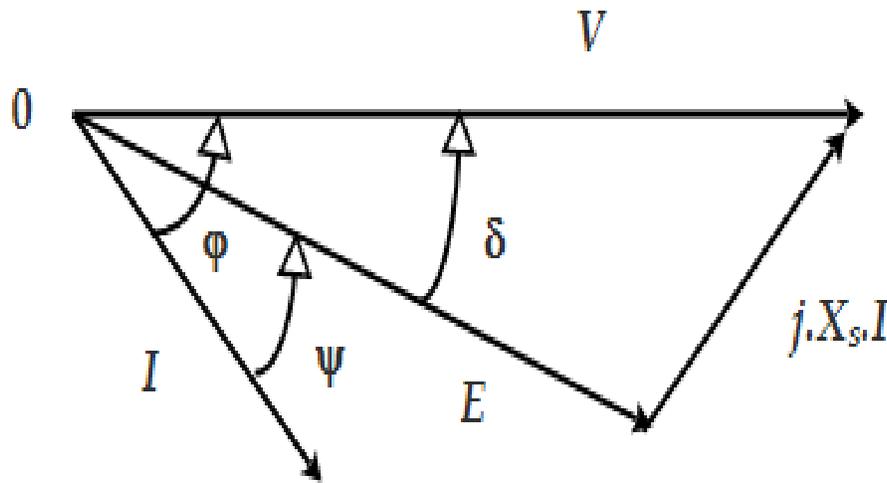


Figure V. 2. Diagramme de Behn-Eschenbourg.

Sur le diagramme, on peut lire trois angles :

$\varphi$  : déphasage de  $\underline{I}$  par rapport à  $\underline{V}$ .

$\delta$  : déphasage entre  $\underline{E}$  et  $\underline{V}$  appelé angle de décalage interne.

$\psi$  : déphasage de  $\underline{I}$  par rapport à  $\underline{E}$  permettant de repérer la position des pôles du rotor par rapport au champ du stator.

### V.3. Expressions du couple

La puissance électrique absorbée par le moteur est donnée par :

$$P_a = 3.V.I.\cos\varphi \quad (V.3)$$

Si nous négligeons les pertes joule et fer, cette puissance est intégralement transmise au rotor :

$$P_a = P_{em} = 3.V.I.\cos\varphi \quad (V.4)$$

De plus, si nous négligeons les pertes mécaniques, la puissance électromagnétique est complètement transformée en puissance mécanique :

$$P_{em} = P_{mec} = 3.V.I.\cos\varphi = C_{em} \cdot \Omega_s = C_{mec} \cdot \Omega_s \quad (V.5)$$

Ce qui donne :

$$C_{em} = C_{mec} = \frac{3.V.I.\cos\varphi}{\Omega_s} \quad (V.6)$$

Les projections des vecteurs  $\underline{E}$  et  $\underline{V}$  sur la direction du courant  $\underline{I}$  donnent :

$$V.\cos\varphi = E.\cos\psi \quad (V.7)$$

Ce qui donne :

$$C_{em} = C_{mec} = \frac{3.E.I.\cos\psi}{\Omega_s} \quad (V.8)$$

Avec :

$$E = k.\Omega_s.\phi_f \quad (V.9)$$

Le couple s'écrit alors :

$$C = C_{em} = C_{mec} = 3.k.\phi_f.I.\cos\psi \quad (V.10)$$

### V.4. Différents modes de fonctionnement de la machine synchrone

Une des propriétés de la MS est sa capacité à fonctionner dans les quatre quadrants électriques. Il est en effet possible de rendre à volonté la machine inductive ou capacitive, que ce soit en fonctionnement moteur ou générateur.

Il suffit pour cela de jouer sur l'amplitude de  $E$ , c'est à dire sur le courant d'excitation rotorique.

On obtient alors les diagrammes de Behn Eschenbourg représentés dans la figure V.3.

**Machine capacitive :**

Le courant est déphasé **en avance** par rapport à la tension.  $E > V$  et  $Q < 0$ .

**Machine inductive :**

Le courant est déphasé **en retard** par rapport à la tension.  $E < V$  et  $Q > 0$ .

**Quadrant 1 :**

$$\begin{cases} P > 0 \\ Q > 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \cos \varphi > 0 \\ \sin \varphi > 0 \end{cases} \Leftrightarrow \varphi \in \left[0 \quad \frac{\pi}{2}\right] \quad (V.11)$$

La MS fournit la puissance active désignant qu'elle fonctionne comme alternateur. En plus, elle consomme de la puissance réactive.

**Quadrant 2 :**

$$\begin{cases} P > 0 \\ Q < 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \cos \varphi > 0 \\ \sin \varphi < 0 \end{cases} \Leftrightarrow \varphi \in \left[-\frac{\pi}{2} \quad 0\right] \quad (V.12)$$

La MS fournit la puissance active désignant qu'elle fonctionne comme alternateur. En plus, elle fournit de la puissance réactive.

**Quadrant 3 :**

$$\begin{cases} P < 0 \\ Q < 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \cos \varphi < 0 \\ \sin \varphi < 0 \end{cases} \Leftrightarrow \varphi \in \left[-\frac{\pi}{2} \quad -\pi\right] \quad (V.13)$$

La MS absorbe la puissance active désignant qu'elle fonctionne comme moteur. En plus, elle fournit de la puissance réactive.

**Quadrant 4 :**

$$\begin{cases} P < 0 \\ Q > 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \cos \varphi < 0 \\ \sin \varphi > 0 \end{cases} \Leftrightarrow \varphi \in \left[\frac{\pi}{2} \quad \pi\right] \quad (V.14)$$

La MS absorbe la puissance active désignant qu'elle fonctionne comme moteur. En plus, elle fournit de la puissance réactive.

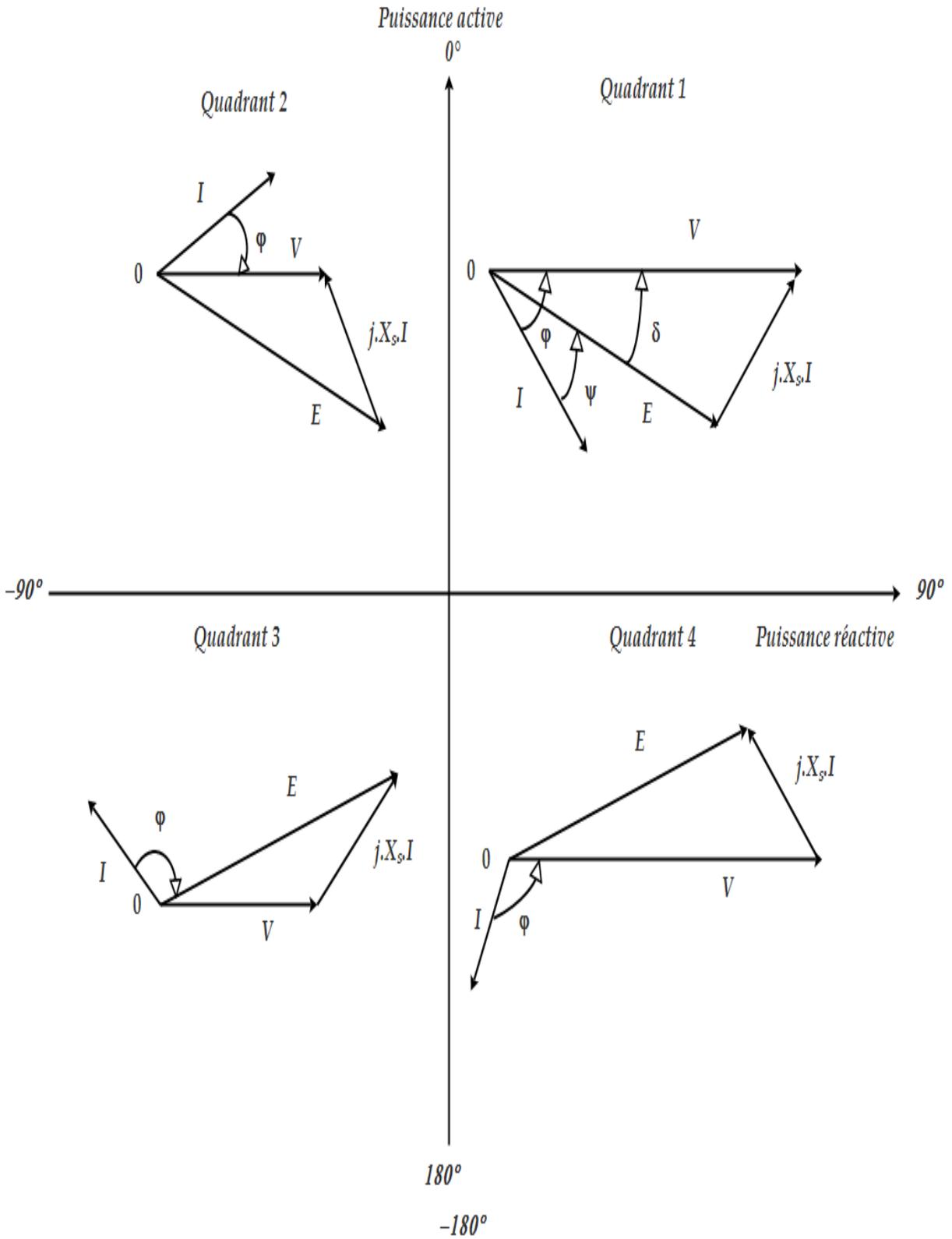


Figure V. 3. Représentation du fonctionnement dans les quatre quadrants.

## V.5. Bilan de puissance de la machine synchrone

### V.5.a. Puissance reçue

#### A. Fonctionnement moteur

Le moteur reçoit une puissance électrique du réseau. Si le rotor est bobiné, le circuit inducteur reçoit une puissance de son alimentation continue. La figure V.4 montre le diagramme des puissances

$$P_a = 3.V.I.\cos\varphi \quad (V.15)$$

#### B. Fonctionnement alternateur

L'alternateur reçoit une puissance mécanique de la turbine ou du moteur qui l'entraîne.

$$P_a = C_{mec}.\Omega_s \quad (V.16)$$

### V.5.b. Pertes par effet joule dans le stator

$$P'_{js} = 3.R.I^2 \quad (V.17)$$

### V.5.c. Pertes par effet joule dans le rotor

Si le rotor de la MS est bobiné, le circuit inducteur reçoit une puissance de son alimentation continue.

$$P_{ex} = P'_{jr} = 3.R_{ex}.I_{ex}^2 = V_{ex}.I_{ex} \quad (V.18)$$

### V.5.d. Pertes collectives

Ce sont des pertes mécaniques ( $P'_{mec}$ ), qui ne dépendent que de la fréquence de rotation et les pertes dans le fer ( $P'_{fer}$ ), qui ne dépendent que de la fréquence et de la valeur maximale du flux.

Ces pertes seront mesurées au cours d'un essai à vide dans lequel la machine tourne à la fréquence de rotation nominale, sous une tension égale à la tension qu'elle aurait en charge. En effet, l'égalité des tensions efficaces entraîne celle des flux.

$$P'_C = P'_{mec} + P'_{fer} \quad (V.19)$$

**V.5.e. Puissance utile**

**A. Fonctionnement moteur**

$$P_u = 3.V.I.\cos\varphi - \sum P_{ertes} = C_u.\Omega_s \quad (V.20)$$

**B. Fonctionnement alternateur**

$$P_u = 3.V.I.\cos\varphi \quad (V.21)$$

**V.5.f. Rendement**

**A. Fonctionnement moteur**

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{3.V.I.\cos\varphi - \sum P_{ertes}}{3.V.I.\cos\varphi} = \frac{C_u.\Omega_s}{3.V.I.\cos\varphi} \quad (V.22)$$

**B. Fonctionnement alternateur**

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{3.V.I.\cos\varphi}{3.V.I.\cos\varphi + \sum P_{ertes}} = \frac{3.V.I.\cos\varphi}{C_{mec}.\Omega_s} \quad (V.23)$$

**V.6. Association MS avec des convertisseurs statiques**

**V.6.a. Principe de la variation de vitesse du moteur synchrone**

Pour assurer un fonctionnement à vitesse variable de la MS, il est nécessaire d'alimenter cette machine à fréquence variable. Ceci est possible avec l'utilisation des convertisseurs statiques généralement (Redresseur-filtre-onduleur).

La figure V.4 représente la structure de l'association de la MS avec les convertisseurs statiques pour le but de varier la vitesse.

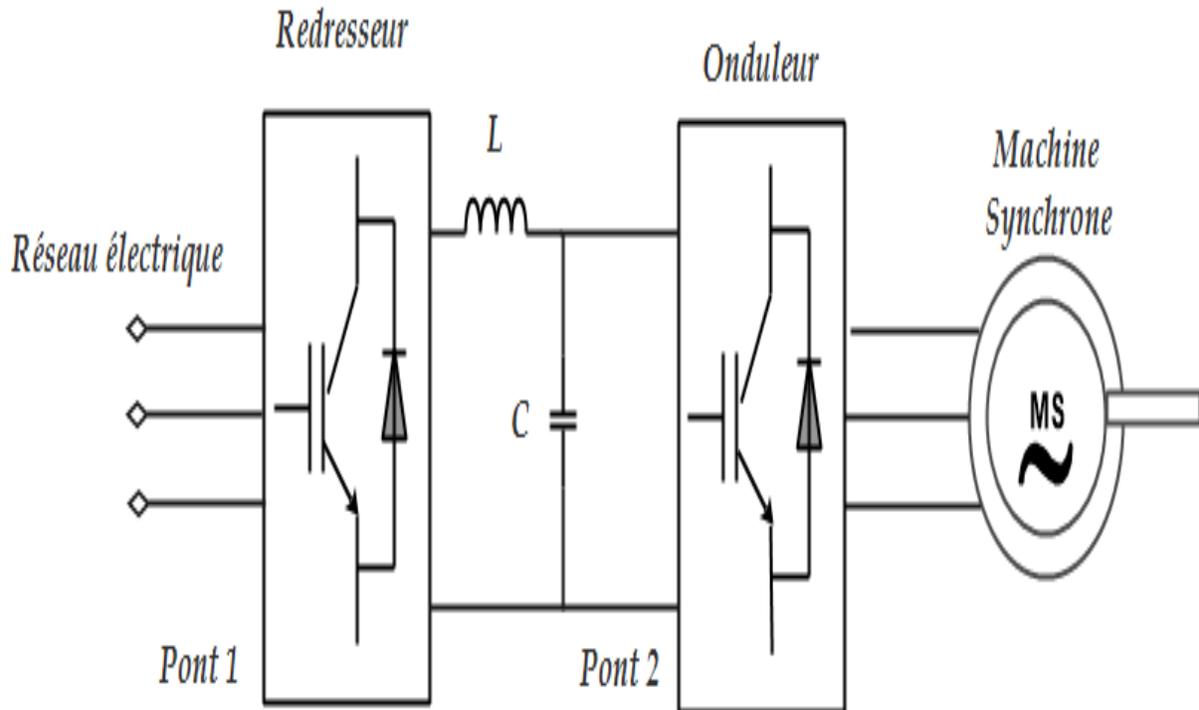


Figure V. 4. Représentation de la structure de l'association de la MS avec les convertisseurs statiques.

## V.6.b. Principe de l'autopilotage des moteurs synchrones

### V.6.b.1. Problématique

Le champ statorique tourne à la vitesse imposée par la fréquence d'alimentation, le champ rotorique (excitation ou aimants) est accroché au champ du stator.

Toutefois les dynamiques des deux champs sont très différentes. Le champ statorique est déterminé par les constantes de temps électriques de la source à fréquence variable, est plus rapide que la dynamique du champ rotorique liée aux performances des parties tournantes (constantes de temps mécanique).

Une variation brusque de la pulsation d'alimentation entraîne une variation tout aussi rapide de la vitesse du champ statorique. Le champ rotorique n'augmente pas aussi vite à cause de l'inertie des parties tournantes. Cela aura pour conséquence de générer un **décalage** trop important entre les deux champs et de faire **décrocher** la machine.

**V.6.b.2. Solution**

Pour résoudre ce problème, l'idée essentielle est d'asservir la position du champ rotorique par rapport à celle du champ statorique. On impose, un angle constant entre les deux champs. Cet angle s'appelle angle **d'autopilotage**.

**V.6.b.3. Principe de l'autopilotage**

Le principe d'autopilotage d'une MS consiste à maintenir la perpendicularité du flux magnétique statorique par rapport au flux magnétique du rotor.

Pour résoudre ce problème, l'idée essentielle est d'asservir la position du champ rotorique par rapport à celle du champ statorique. On impose, ainsi, le décalage angulaire entre les deux champs. Cela constitue le mode de fonctionnement dit autopiloté.

Pour pouvoir piloter correctement le champ magnétique, la position réelle du rotor est relevée par un capteur de position comme illustrée dans la figure V.5, elle permet de calculer les courants à appliquer aux enroulements pour choisir la position du champ statorique. On choisit l'angle interne pour que la machine fonctionne à son couple maximal.

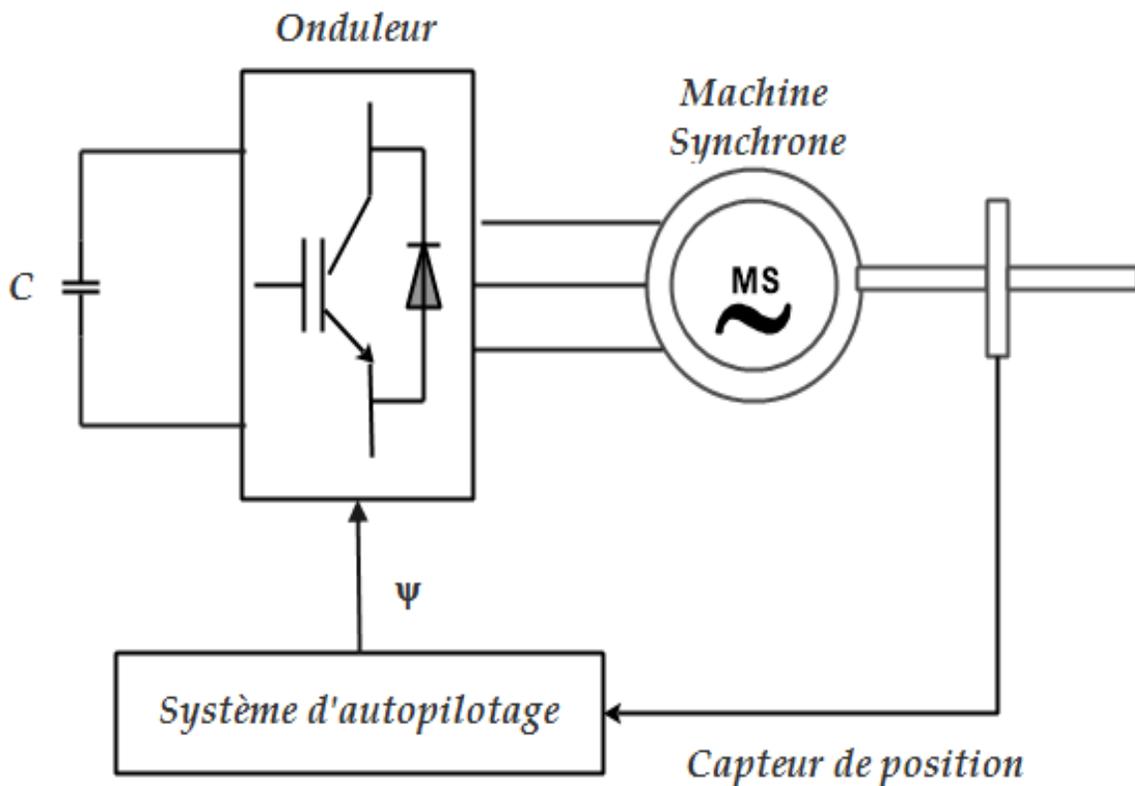


Figure V. 5. Représentation de la structure de l'association de la MS avec les convertisseurs statiques.

Dans la machine autopilotée l'onduleur et sa commande doivent créer au stator un champ de même nature que le rotor. Pour réaliser l'autopilotage, on peut utiliser deux types de commandes :

- Par commutateur de courant.
- Par un onduleur de tension MLI.

#### **V.6.c. Réglage de vitesse de la MS autopilotée alimentée par un commutateur de courant**

Pour réaliser cette technique de commande, on utilise généralement deux ponts de Graetz à thyristors en cascade.

Un pont n°1 connecté au réseau alternatif et associé à une bobine de lissage du courant. La machine synchrone est alimentée par un pont n°2 conformément à la figure V.6.

Lorsque la machine synchrone fonctionne en moteur, le pont n°2 fonctionne en onduleur tandis que le pont n°1 fonctionne en redresseur et absorbe de la puissance sur le réseau d'alimentation.

Lorsque la machine synchrone fonctionne en générateur, le pont n°2 fonctionne en redresseur tandis que le pont n°1 fonctionne en onduleur et renvoie de la puissance au réseau d'alimentation.

La commande des thyristors de pont n°1 est asservie de façon à ce que le courant en sortie du pont suive la valeur de consigne.

La commande du pont n°2 est élaborée en fonction de la position du rotor de la machine synchrone.

Le dispositif de cette figure permis de contrôler le couple électromagnétique de la machine synchrone et d'asservir la vitesse de rotation.

On va généralement procéder comme pour une machine à courant continu en réalisant une régulation en cascade.

Une boucle interne pour le contrôle du couple et une boucle externe pour le réglage de la vitesse.

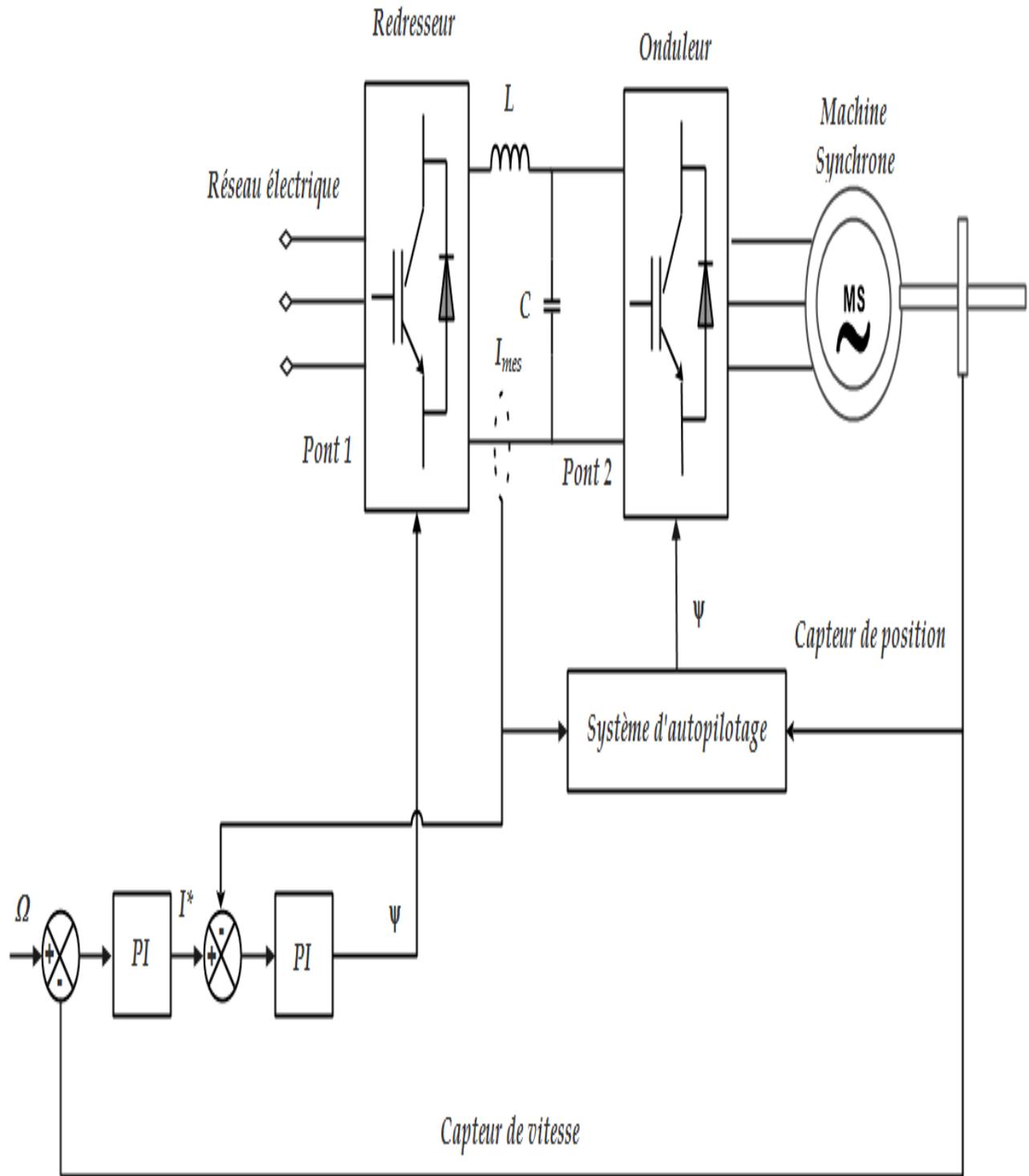


Figure V. 6. Asservissement de la vitesse du moteur synchrone autopiloté alimenté par un onduleur de courant.

V.6.d. Réglage de vitesse de la MS autopilotée alimentée par un onduleur de tension

MLI

Le principe de cette commande est assez proche de celui de la commande par un commutateur de courant. Le schéma de principe de l'asservissement de vitesse par cette technique est donné à la figure III.7.

Un capteur de position numérique fournit les grandeurs  $\sin \theta$  et  $\sin(\theta - \frac{2\pi}{3})$ . Par multiplication par la grandeur de courant de référence ( $I_{ref}$ ) fournie par la sortie du régulateur de vitesse, on obtient les deux consignes de courant ( $I_{ref1}, I_{ref2}$ ) et par suite ( $I_{ref3}$ ) puisque ( $I_{ref1} + I_{ref2} + I_{ref3} = 0$ ).

Tant que les courants statoriques sont quasi-sinusoidaux, les ondulations du couple sont de ce fait éliminées. L'inconvénient majeur de cette structure est ça la complexité du circuit de commande.

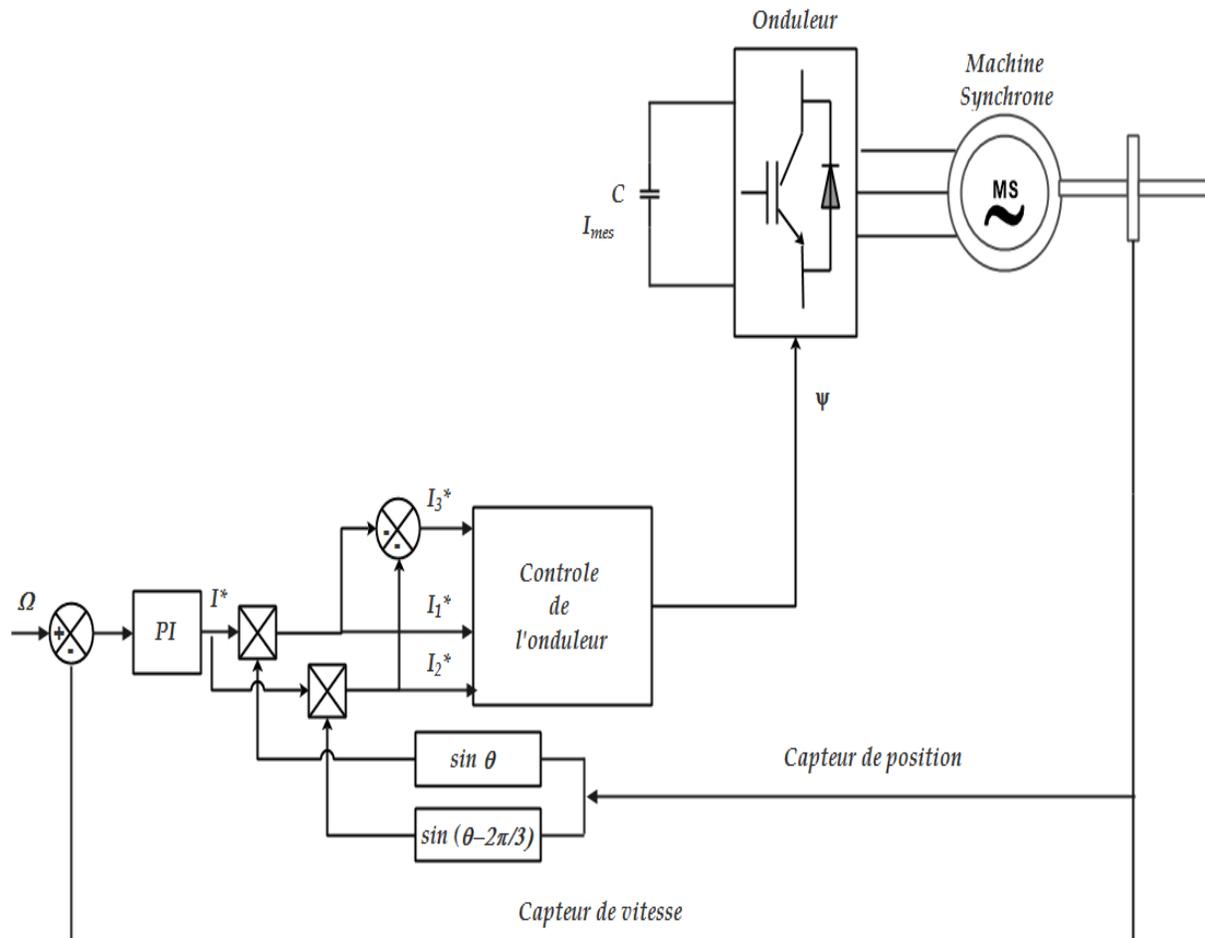


Figure V. 7. Schéma structurel de l'asservissement de vitesse d'un moteur synchrone autopiloté alimenté par un onduleur de tension.

## V.7. Exercices

### Exercice 1

On admet que la réactance synchrone d'un alternateur triphasé, tétrapolaire, est égale à  $49\Omega$  et qu'elle est constante. Les enroulements statoriques sont couplés en étoile.

A la fréquence de rotation nominale, dans sa zone utile, la caractéristique à vide  $E = f(I_e)$  est assimilable à une droite passant par l'origine et le point  $I_e = 20\text{ A}$ ,  $E = 15\text{ kV}$ .

Avec :

$I_e$  : intensité du courant d'excitation.

$E$  : tension efficace mesurée entre deux bornes).

La résistance de stator est négligeable.

1. Quelle est la vitesse de rotation si la fréquence du courant débité par le stator est égale à 50 Hz.
2. L'alternateur débite dans une charge triphasée résistive. Les tensions entre phases sont équilibrées et chacune d'elles est égale à 10 kV. La f.é.m. synchrone ( $E$ ) par phase a pour valeur efficace 6,35 kV.
  - a. Calculer l'intensité efficace du courant en ligne ( $I$ ).
  - b. Quelle est la puissance utile de l'alternateur ( $P_u$ ) ?
3. Dans un autre essai l'alternateur fournit une puissance de 1 MW. Les tensions entre phases sont équilibrées et chacune d'elles est encore égalé à 10 kV. L'intensité du courant dans une phase est en retard de  $45^\circ$ .
  - a. Quelle est la f.e.m. ( $E$ ) synchrone de l'alternateur.
  - b. Déterminer l'intensité du courant d'excitation ( $I_e$ ).
4. Calculer le rendement de la machine ( $\eta$ ) pour les conditions de fonctionnement de la question 3, sachant que la puissance de l'excitation est égale à  $P'_r = 1\text{ kW}$  et que la puissance fournie par le moteur d'entraînement est de  $P'_c = 20\text{ kW}$  quand l'alternateur tourne à vide.

### Exercice 2

La plaque signalétique d'un alternateur triphasé porte les indications suivantes :

$U = 5500V$ ;  $S = 110KVA$ ;  $n = 1000 \text{ tr/min}$ ;  $2p = 6$ , couplage étoile; Résistance mesurée entre deux bornes est  $(R_{pps}) = 4 \Omega$ .

La caractéristique à vide est une droite d'équation :  $E_0 = 115 \times I_e$ , celle en court circuit est  $I_{cc} = 1.1 \times I_e$ .

1. Calculer :
  - a. La fréquence (f).
  - b. La résistance d'une phase du stator ( $R_s$ ).
  - c. L'intensité efficace de courant de ligne ( $I_s$ ).
  - d. La réactance synchrone ( $X_s$ ).
2. L'alternateur débite son courant nominal sous une tension  $U = 5500V$  dans une charge triphasé de facteur de puissance 0.8.
  - a. Calculer la puissance active (P).
  - b. Calculer la puissance réactive (Q).
  - c. Tracer le diagramme de Fresnel ( on néglige R devant  $X_s$ ).
  - d. Donner la valeur de  $E_0$ , d'eduire le courant d'excitation ( $I_e$ ).

V.8. Solutions

Exercice 1

$$2P = 4; X_L = 49 \Omega; I_e = 20 \text{ A}; E = 15 \text{ kV}; R = 0 \Omega.$$

1. Quelle est la vitesse de rotation si la fréquence du courant débité par le stator est égale à 50 Hz.

$$N = N_s = \frac{60 \times f_s}{P} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ tr/min}$$

2.  $U = 10 \text{ kV}; E = 6.35 \text{ kV}$

- a. Calculer l'intensité efficace du courant en ligne (I).

$$U = 10 \text{ kV} \Rightarrow V = \frac{U}{\sqrt{3}} = 5.77 \text{ KV}$$

$$E = V + R \times I + j \times X_L \times I$$

$$E = V + j \times X_L \times I \Rightarrow I = \frac{\sqrt{E^2 - V^2}}{X_L} = \frac{\sqrt{(15 \times 10^3)^2 - (5.77 \times 10^3)^2}}{X_L} = 54.1 \text{ A}$$

- b. Quelle est la puissance utile de l'alternateur ( $P_u$ ) ?

$$P_u = 3 \times V \times I \times \cos(\varphi) = 3 \times (5.77 \times 10^3) \times (54.1) \times 1 = 936471 \text{ W}$$

3.  $P_u = 1 \text{ MW}; U = 10 \text{ kV}; \varphi = 45^\circ$ .

- a. Quelle est la f.e.m. (E) synchrone de l'alternateur.

$$E = V + j \times X_L \times I$$

$$P_u = 3 \times V \times I \times \cos(\varphi) \Rightarrow I = \frac{P_u}{3 \times V \times \cos(\varphi)} = \frac{10^6}{3 \times (5.77 \times 10^3) \times \cos(45)} = 81.71 \text{ A}$$

$$E = \sqrt{V^2 + X_L^2 \times I^2} = 7022.8 \text{ V}$$

- b. Déterminer l'intensité du courant d'excitation ( $I_e$ ).

$$E = 15 \text{ kV} \rightarrow I_e = 20 \text{ A}$$

$$E = 7022.8 \text{ kV} \rightarrow I_e = ?$$

Par l'utilisation de la règle de trois on trouve que :

$$I_e = \frac{7022 \times 8. (20)}{15 \times 10^3} = 9.33 \text{ A}$$

4.  $P_u = 1 \text{ MW}; P'_{jr} = 1 \text{ kW}; P'_c = 20 \text{ kW}$ .

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

$$P_a = P_u + P'_r + P'_c = 10^6 + 10^3 + 20 \times 10^3 = 1.021 \text{ MW}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{10^6}{1.021 \cdot (10^6)} = 97.94 \%$$

### Exercice 2

$$U = 5500V; S = 110KVA; n = 1000 \text{ tr/min}; 2p = 6; R_{pps} = 4 \Omega.$$

$$E_0 = 115 \times I_e; I_{cc} = 1.1 \times I_e.$$

1. Calculer :

a. La fréquence ( $f_s$ ).

$$N = N_s = \frac{60 \times f_s}{p} \Rightarrow f_s = \frac{p \cdot N}{60} = \frac{3 \times 1000}{60} = 50 \text{ Hz}$$

b. La résistance d'une phase du stator ( $R_s$ ).

$$R_{pps} = 4 \Omega \Rightarrow R_s = \frac{R_{pps}}{2} = \frac{4}{2} = 2 \Omega$$

c. L'intensité efficace de courant de ligne (I).

$$S = \sqrt{3} \times U \times I \Rightarrow I = \frac{S}{\sqrt{3} \times U} = \frac{110 \times (10^3)}{\sqrt{3} \times 5500} = 11.547 \text{ A}$$

d. La réactance synchrone ( $X_s$ ).

$$\text{En court-circuit : } V_{cc} = 0 \text{ V}$$

$$E_{cc} = R_s \times I_{cc} + j \times X_L \times I_{cc}$$

$$X_L = \frac{\sqrt{E_{cc}^2 - R \times I_{cc}^2}}{I_{cc}} = \frac{\sqrt{(115)^2 \times I_e^2 - (1.1 \times 2)^2 \times I_e^2}}{1.1 \times I_e}$$

$$X_L = \frac{\sqrt{(115)^2 - (1.1 \times 2)^2}}{1.1} = 104.52 \Omega$$

2.  $U = 5500V; \eta = 0.8$ .

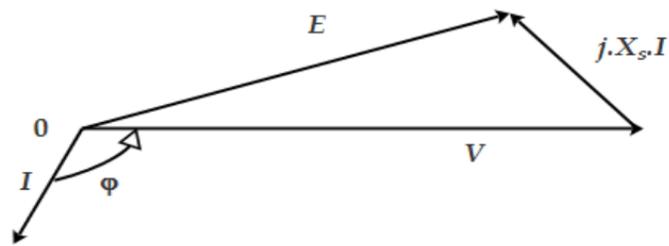
a. Calculer la puissance active (P).

$$P_u = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos(\varphi) = 3 \times (5500) \times (11.547) \times 0.8 = 88 \text{ kW}$$

b. Calculer la puissance réactive (Q).

$$Q = \sqrt{3} \times U \times I \times \sin(\varphi) = 3 \times (5500) \times (11.547) \times \sin(\arccos(\varphi)) = 66 \text{ kVar}$$

c. Tracer le diagramme de Fresnel ( on néglige R devant  $X_s$ ).



d. Donner la valeur de  $E_0$ , d'eduire le courant d'excitation ( $I_e$ ).

$$E_0 = V + j \times X_L \times I$$

$$E_0 = \sqrt{V^2 + X_L^2 \cdot I^2} = 3397 \text{ V}$$

$$E_0 = 115 \times I_e \Rightarrow I_e = \frac{E_0}{115} = \frac{3397}{115} = 29.53 \text{ A}$$

### V.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé le modèle d'une phase d'un Moteur Synchrone (MS) et déterminé les équations de bilan de puissance nécessaires. Nous avons également étudié le fonctionnement capacitif et inductif d'un MS, en analysant les caractéristiques liées à ces deux modes de fonctionnement.

Ensuite, nous nous sommes penchés sur la technique de variation de vitesse par autopilotage, en mettant l'accent sur l'action sur la fréquence. Cette approche permet de contrôler la vitesse du MS en ajustant la fréquence d'alimentation, ce qui offre un contrôle précis et réactif.

Nous avons également exploré la structure d'association d'un MS avec des convertisseurs statiques, ce qui permet de varier la vitesse du MS par autopilotage. Cette configuration facilite le contrôle de la vitesse en ajustant les paramètres des convertisseurs statiques.

Pour renforcer notre compréhension, nous avons inclus des exercices pratiques avec leurs corrections. Ces exercices ont été conçus pour nous aider à appliquer les concepts théoriques et à approfondir notre compréhension du fonctionnement et du contrôle du MS.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

La commande des machines électriques est un domaine important de l'électrotechnique qui permet de contrôler la vitesse, la puissance et la direction du mouvement des machines électriques.

Ce support de cours divisé en cinq chapitres a permis de couvrir les bases de la commande des machines électriques, en commençant par l'introduction des principes de fonctionnement des différentes machines électriques et les différents types de commandes utilisées pour les contrôler.

Les techniques de commande des convertisseurs statiques ont été abordées, notamment la modulation de largeur d'impulsion (MLI), qui permet de contrôler la tension et le courant fournis aux machines électriques.

Le support de cours a également couvert la commande des moteurs à courant continu, des moteurs asynchrones et des moteurs synchrones, en expliquant comment régler la vitesse de chaque type de moteur en utilisant des techniques de contrôle de la vitesse, de la fréquence et de la tension d'alimentation. Les exercices corrigés associés à chaque chapitre ont permis de consolider les connaissances acquises.

En conclusion, ce support de cours est un outil essentiel pour les étudiants de troisième année en électrotechnique, qui souhaitent comprendre les principes de base de la commande des machines électriques et développer leurs compétences en la matière. Nous espérons que ce support de cours vous a été utile et qu'il vous aidera à poursuivre votre apprentissage et votre exploration de la commande des machines électriques.

# Références bibliographiques

1. Guy, Chateigner. et al. (2007). MANUEL DE GÉNIE ÉLECTRIQUE. Paris : STEDI MEDIA, 626 p.
2. Luc, Lasne. (2007). EXERCICES ET PROBLÈMES D'ÉLECTROTECHNIQUE. Belgique : SNEL Grafics sa, 258 p.
3. Bapio, BAYALA. (2010). LA MACHINE ASYNCHRONE. 51 p.
4. Claude, CHEVASSU. (2014). MACHINES SYNCHRONES Cours et Problèmes. 100 p.
5. B. MULTON. (2004). LES MACHINES SYNCHRONES AUTOPILOTÉES. Bretagne : Cachan, 62 p.
6. Michel, PINARD. (2007). La commande électronique des machines. Paris, 445 p.
7. BENDAHMANE Boukhalfa, (2014). Polycopié de cours de Machines Electriques : Les Transformateurs et Les Machines à courant continu. Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 53 p.
8. BOUDRIES Zoubir. COURS COMMANDE DES MACHINES ELECTRIQUES. Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 92 p.
9. BELKACEM Sebti, (2020). Entraînements Electriques. Université de Batna 2, 43 p.
10. Abdelfettah KERBOUA, (2015). Polycopié de cours : MACHINES ELECTRIQUES A COURANT ALTERNATIF. Université de Mascara, 51 p.