



Université Abderrahmane-Mira de Bejaia

Faculté de Technologie

Département Génie Electrique

Mémoire de Fin d'études

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique industrielle

Thème :

Etude par simulation des différents modes de démarrage des moteurs monophasés à induction

Présenté par :

BOUDAOUD Massinissa

MEZZAI Yanis

Encadré par :

M. D. AOUZELLAG

M. F. HASSAINI

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

Tout d'abord, je rends grâce à Allah le tout puissant, qui m'a accordé toute la patience, volonté et sacrifices durant ce travail car de tout ça n'aurait été possible.

En second lieu, je tiens à remercier chaleureusement nos deux encadrant monsieur DJAMELAOUZELLAG pour la richesse de son savoir et la clarté de ses explications, ainsi monsieur FAYCAL.HASSAINI pour son accompagnement bienveillant et constant tout au long de ce projet, car il a su faire preuve engagement exceptionnel, n'hésitant pas à veiller tard la nuit pour que ce projet soit réalisé.

Je remercie aussi mon ami JUBA.HAMMICHE pour le partage de son savoir, sa contribution ainsi que son aide durant toute cette période.

Enfin, je salue toute ma famille, parents et frères pour leurs soutient, pour leur amour inconditionnel et leurs présences essentielle tout au long de mon parcours.

Dédicace

Ce mémoire est dédié

*A mes chers parents, à ma mère pour sa prière et son amour à
mon père pour ses encouragements.*

A mes frères : Salah , Brahim et Doudine.

A tous mes amis : Yanis , Youba , Bizek , Khelifa ,

Lhiya , Wassim , Fawzi , Sofiane , Manel .

A tous les camarades connus durant ce cursus universitaire

Promotion juin 2025

Massi

Dédicace

Ce mémoire est dédié

*À mes chers parents, à ma mère pour sa prière et son amour à
mon père pour ses encouragements.*

À mon frère : Mehdi

À ma sœur : Houda

À mon cousin : Samir

À tous mes amis : Massi , Youba , Lhiya , Rédha ,

Sifou , Wassim , Babi , Lotfi , Rayan, Feriel

À tous les camarades connus durant ce cursus universitaire

Promotion juin 2025

Yanis

LISTE DES SYMBOLES ET DES GRANDEURS

PHYSIQUES

1. Grandeurs électriques

Symbol	Signification	Unité
V	Tension (valeur efficace)	Volt (V)
v(t)	Tension instantanée	Volt (V)
I	Courant (valeur efficace)	Ampère (A)
i(t)	Courant instantané	Ampère (A)
R	Résistance	Ohm (Ω)
L	Inductance	Henry (H)
C	Capacité (condensateur)	Farad (F)
Z	Impédance	Ohm (Ω)
α	Angle de déclenchement (thyristor)	Radian ou degré
φ	Angle de phase électrique	Radian

2. Grandeurs mécaniques

Symbol	Signification	Unité
T_e	Couple électromagnétique	N·m
T_r	Couple résistant	N·m
J	Moment d'inertie	kg·m ²
Ω_r ou ω_r	Vitesse angulaire du rotor	rad/s
ω	Pulsation (fréquence angulaire)	rad/s
t	Temps	seconde (s)

3. Grandeurs magnétiques

Symbol	Signification	Unité
Φ	Flux magnétique	Weber (Wb)

Φ_d, Φ_q	Composantes du flux dans le repère dq	Weber (Wb)
M	Inductance mutuelle	Henry (H)
$\phi(t)$	Flux variable	Weber (Wb)

4. Rotation de Park

Symbol	Signification	Unité
v_d, v_q	Tensions dans le repère dq	Volt
i_d, i_q	Courants dans le repère dq	Ampère
ϕ_d, ϕ_q	Flux dans les axes direct et quadrature	Weber
g	Glissement	-

5. Constantes mathématiques

Symbol	Signification	Valeur/Unité
π	Constante de cercle	$\approx 3,1416$
ω	Pulsation : $\omega = 2\pi f$	rad/s

6. Symboles complémentaires issus des équations avancées

Symbol	Signification	Unité / Remarques
p	Nombre de paires de pôles	Sans unité
V_c	Tension du condensateur permanent	Volt
f	Fréquence de l'alimentation	Hertz (Hz)
τ_p	Périmètre polaire	m (mètre)
x	Position spatiale	m (mètre)
F_δ	Force magnétomotrice (f.m.m)	(Ampère-tour)
V	Vitesse d'onde magnétique mobile	m/s

sign()	Fonction signe utilisée dans la décomposition de la f.m.m.	Fonction mathématique
--------	--	-----------------------

7. Composants et dispositifs techniques

Terme	Signification	Unité / Detail
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion	Technique de variation d'impulsions
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (équivalent anglais de MLI)	—
Thyristor (T_1, T_2)	Composant semi-conducteur à commutation contrôlée	—
Rhéostat	Résistance variable utilisée pour le démarrage ou la régulation de vitesse	Ohm (Ω)
A_r, A_p	Amplitudes de la porteuse et de la référence en MLI	Volt (V)
f_p, f_r	Fréquence de la porteuse / fréquence de référence (MLI)	Hertz (Hz)
m	Indice de modulation ($m = f_p / f_r$)	—
$r = A_r / A_p$	Coefficient de réglage en tension	—
Ramp function	Bloc Simulink pour simuler un démarrage progressif	—
Repeating sequence	Bloc Simulink générant un motif périodique dans une commande MLI	—

LISTE DES FIGURES

FIGURE I.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN MOTEUR MONOPHASE A CAGE D'ECUREUIL AVEC UN SEUL ENROULEMENT.....	4
FIGURE I.2 DIFFERENTS SENS DES F.M.M.....	6
FIGURE I.3 SCHEMA EQUIVALENT D'UNE MACHINE ASYNCHRONE MONOPHASEEE.....	6
FIGURE I.4 DIFFERENTS COUPLES DANS UNE MACHINE MONOPHASEEE A CAGE D'ECUREUIL.....	7
FIGURE I.5 CLASSIFICATION DES MOTEURS MONOPHASES	8
FIGURE I.6 MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE A CAGE D'ECUREUIL AVEC DEUX ENROULEMENTS	8
FIGURE I.7 MOTEUR A PHASE AUXILIAIRE RESISTIVE.....	9
FIGURE I.8 MOTEUR A PHASE AUXILIAIRE A EFFET INDUCTIF	10
FIGURE I.9 MOTEUR A CONDENSATEUR DE DEMARRAGE	11
FIGURE I.10 MOTEUR A CONDENSATEUR PERMANENT	11
FIGURE I.11 MOTEUR A DOUBLE CONDENSATEUR.....	12
FIGURE I.12 MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE A SPIRE DE FRAGER ET SON ALLURE DE DE COUPLE ELECTROMAGNETIQUE EN FONCTION DE LA VITESSE DE ROTATION	13
FIGURE I.13 DISPOSITIF (A) ET DIAGRAMME VECTORIEL DES DIFFERENTS FLUX STATORIQUES (B) D'UN MOTEUR MONOPHASE A SPIRE FRAGER	13
FIGURE I.14 MOTEUR UNIVERSEL	14
FIGURE I.15 ALLURES DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE, DU COURANT D'INDUIT ET DU FLUX D'EXCITATION EN FONCTION DE L'ANGLE (ΩT) : A) EXCITATION SERIE, B) EXCITATION SHUNT OU SEPAREE	15
FIGURE I.16 DIFFERENTS SCHEMAS D'ALIMENTATION MONOPHASEEE DES BOBINES TRIPHASEES	17
FIGURE I.17 PRINCIPE DE DEMARRAGE DE VITESSE D'UN MOTEUR PAR POTENTIOMETRE	19
FIGURE I.18 PRINCIPE DE DEMARRAGE DE VITESSE D'UN MOTEUR PAR UN RHEOSTAT.....	20
FIGURE I.19 REPRESENTATION SCHEMATIQUE ET PHYSIQUE D'UN GRADATEUR MONOPHASE....	22
FIGURE II.1 REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA MAS MONOPHASEEE A CONDENSATEUR PERMANENT	29
FIGURE II.2 SCHEMA BLOC POUR EFFECTUER UN DEMARRAGE DIRECT DU MOTEUR ETUDIE.....	29
FIGURE II.3 ALLURES DU COURANT (A), COUPLE ELECTROMAGNETIQUE (B) ET VITESSE DE ROTATION (C) DU MOTEUR A CONDENSATEUR PERMANENT MODELISE	30
FIGURE II.4 MODELE EQUIVALENT A BASE DU SIMPOWERSYSTEMS /SIMULINK / MATLAB/ DU MOTEUR ETUDIE ET SES PARAMETRES	31

FIGURE II.5 SCHEMAS BLOC DU MOTEUR A CONDENSATEUR DE DEMARRAGE ET SES PARAMETRES	32
FIGURE II.6 ALLURE DES COURANTS DANS UN MOTEUR A CONDENSATEUR DE DEMARRAGE	33
FIGURE II.7 ALLURE DES COURANTS DANS UN MOTEUR A DEUX CONDENSATEURS.....	33
FIGURE II.8 ALLURE DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE DANS UN MOTEUR A CONDENSATEUR DE DEMARRAGE	33
FIGURE II.9 ALLURE DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE DU MOTEUR A DOUBLE CONDENSATEUR	33
FIGURE II.10 VITESSE DE ROTATION DU MOTEUR A CONDENSATEUR DE DEMARRAGE EN FONCTION DU TEMPS.....	34
FIGURE II.11 VITESSE DE ROTATION DU MOTEUR A DOUBLE CONDENSATEUR	34
FIGURE III.1 SCHEMA BLOC DE DEMARRAGE RHEOSTATIQUE D'UN MOTEUR A CONDENSATEUR PERMANENT	38
FIGURE III.2 COURANTS DANS LES ENROULEMENTS PRINCIPAUX (ROUGE) ET AUXILIAIRE (BLEU) D'UN MOTEUR A CONDENSATEUR PERMANENT EN FONCTION DU TEMPS	38
FIGURE III.3 ALLURE DU COUPLE DU MOTEUR A CONDENSATEUR PERMANENT	39
FIGURE III.4 ALLURE DE LA VITESSE DU MOTEUR A CONDENSATEUR PERMANENT	40
FIGURE III.5 SCHEMA BLOC DU DEMARRAGE DU MOTEUR ETUDIE ALIMENTE PAR UN GRADATEUR A THYRISTOR MONOPHASE	42
FIGURE III.6 VARIATIONS DE L'ANGLE ALPHA EN FONCTION DE TEMPS.....	43
FIGURE III.7 ALLURE DE LA TENSION D'ALIMENTATION PENDANT LE DEMARRAGE PROGRESSIF	44
FIGURE III.8 ALLURES DES DIFFERENTS COURANTS DU MOTEUR AU COURS DU DEMARRAGE PROGRESSIF	45
FIGURE III.9 ALLURES DES COUPLES RESISTANT, ELECTROMAGNETIQUE EN FONCTIONNE DE TEMPS	45
FIGURE III.10 ALLURE DE VITESSE DU MOTEUR EN DEMARRAGE PROGRESSIF	46
FIGURE III.11 PRINCIPES DE LA MODULATION	47
FIGURE III.12 SCHEMA BLOC DU MATEUR LIE A UN GRADATEUR MLI	48
FIGURE III.13 ALLURE DU COURANT DU MOTEUR A GRADATEUR COMMANDE EN MLI	49
FIGURE III.14 ALLURES DES COUPLES ELECTROMAGNETIQUE ET RESISTANT DU MOTEUR A GRADATEUR COMMANDE EN MLI	49
FIGURE III.15 ALLURE DE LA VITESSE DU MOTEUR A GRADATEUR COMMANDE EN MLI	50

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements

Dédicace

Liste des symboles et des grandeurs physiques

Liste des figures

Table des matières

Introduction générale _____ **I**

Chapitre I Généralités sur les moteurs asynchrones monophasés et leurs différents modes de démarrage

I.1	Introduction	3
I.2	Moteur asynchrone monophasé à cage d'écureuil avec un seul enroulement	3
I.3	Champ magnétique d'une seule bobine	5
I.4	Schéma électrique équivalent d'une machine monophasée	6
I.5	Caractéristiques du couple électromagnétique d'un MAS monophasé à cage d'écureuil	6
I.6	Classification des machines asynchrones monophasées	7
I.6.1	Moteurs à cage d'écureuil à induction à deux enroulements	8
I.6.1.1	Moteur à dispositif de déphasage	9
I.6.1.2	Moteurs asynchrones monophasés à cage d'écureuil avec spire Frager	12
I.6.2	Moteur monophasée à collecteur (universel)	14
I.7	Moteur triphasé adapté au monophasé (avec condensateur)	17
I.8	Types de contacteur de démarrage	17
I.9	Méthodes de démarrage des MAS monophasés	18
I.10	Conclusion	22

Chapitre II Modélisation et simulation d'un moteur monophasé à condensateur permanent

II.1	Introduction	25
------	--------------	----

II.2	Modélisation du moteur asynchrone monophasé à induction dans le repère dq relie au stator	25
II.2.1	Hypothèses simplificatrices	25
II.2.2	Transformation de Park	25
II.2.3	Equations électriques du moteur étudié dans le repère de Park relié au stator	26
II.2.4	Equations du couple électromagnétique	27
II.2.5	Equations mécanique	27
II.3	Etude comparative par simulation du moteur étudié	28
II.4	Étude comparative du démarrage direct d'un moteur à induction à condensateur de démarrage et à double condensateur	33
II.5	Conclusion	35
Chapitre III Modélisation, simulation et analyse du moteur étudié alimenté par différents modes de démarrage		
III.1	Introduction	37
III.2	Etude par simulation du moteur étudié alimenté par différent mode de démarrage	37
III.2.1	Par rhéostat	37
III.2.2	Commande par gradateur monophasé d'un moteur à condensateur permanent	40
III.2.2.1	Modélisation d'un gradateur monophasé à thyristor	40
III.2.2.2	Démarrage progressive du moteur étudié connecté à un gradateur	42
III.2.3	Commande par gradateur monophasé MLI d'un moteur à condensateur permanent	46
III.2.3.1	Modélisation de la commande MLI	47
III.2.3.2	Caractéristique de la modulation de largeur d'impulsion	47
III.2.3.3	Schéma bloc d'un gradateur MLI relié au moteur	47
III.3	CONCLUSION	50
Conclusion générale		53
Références Bibliographiques		55

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Les moteurs asynchrones monophasés occupent une place centrale dans de nombreuses applications domestiques, agricoles et industrielles légères, en raison de leur simplicité de conception, de leurs faibles coûts et de leur capacité à fonctionner directement sur une alimentation monophasée standard. Ce travail intègre également l'étude du moteur universel, souvent utilisé dans les applications nécessitant une vitesse variable et un couple élevé. Cependant, leur fonctionnement présente certaines limitations, notamment en termes de rendement, de couple de démarrage et de régulation de vitesse. Ces aspects techniques soulèvent un besoin croissant d'optimisation, notamment à travers une meilleure modélisation, une commande plus précise et une adaptation à différents modes de démarrage.

Ce travail s'inscrit dans cette problématique en proposant une étude progressive et comparative des moteurs asynchrones monophasés. On commencera par présenter un rappel sur les principes de fonctionnement des machines tournantes, ainsi qu'une présentation des différents types de moteurs monophasés et les méthodes classiques de variation de vitesse. Par la suite, nous nous consacrerons à la modélisation du moteur asynchrone monophasé à condensateur permanent.

Deux approches sont développées : une première fondée sur la transformation de Park permettant d'obtenir les équations dynamiques dans le repère dq, et une seconde basée sur l'utilisation des différents éléments de la bibliothèque PowerSys/Simulink /MATLAB. La validité des modèles est ensuite vérifiée par simulation. Après cette comparaison, nous avons poursuivi la simulation uniquement avec le moteur à condensateur permanent. Enfin, d'autres configurations telles que la machine à double condensateur sont également simulées pour évaluer leurs performances.

Par ailleurs, on s'intéressera à l'étude du comportement dynamique de la machine lorsqu'elle est associée à différents modes de démarrage. Trois dispositifs sont analysés : un rhéostat, un gradateur à angle de phase, et un gradateur commandé en Modulation de Largeur d'Impulsion. Les simulations permettent de comparer l'influence de chaque méthode sur la stabilité, le rendement énergétique et la réponse dynamique du moteur, en condition réelle de charge de type ventilateur.

Enfin, à travers une approche progressive mêlant modélisation, simulation et analyse comparative, ce travail vise à mieux comprendre le comportement des moteurs asynchrones monophasés et à identifier lequel de ces modes de démarrage est le plus adapté pour améliorer les performances de notre moteur.

CHAPITRE I

*Généralités sur les moteurs
asynchrones monophasés
et leurs différents modes de
démarrage*

I.1 Introduction

Les moteurs asynchrones monophasés (MAS monophasés) jouent un rôle essentiel dans de nombreux équipements et sont couramment utilisés dans les situations où l'alimentation triphasée est non disponible. Bien qu'ils constituent une solution viable pour le fonctionnement de certains systèmes, leurs rendements demeurent relativement faibles [1].

Les moteurs à induction monophasés restent largement employés, notamment dans les secteurs domestique et agricole, en raison de leur conception simple, de leur coût réduit, et de leur capacité à fonctionner directement sur le réseau monophasé domestique, sans nécessiter de dispositifs de conversion.

On distingue principalement deux types de moteurs : – les moteurs à cage d'écureuil à induction à deux enroulements, – et les moteurs à collecteur à excitation série (moteurs universels), chacun ayant ses propres modes d'utilisation, avantages et inconvénients.

Les moteurs universels se distinguent par leur aptitude à fonctionner aussi bien en courant alternatif qu'en courant continu, grâce à une conception spécifique. Compacts, légers, capables de fournir un couple élevé ainsi qu'une vitesse de rotation importante, ils sont particulièrement adaptés aux appareils électroportatifs, aux équipements ménagers et aux outils portatifs. Leur puissance varie généralement de quelques dizaines de Watt à environ 2 kW, selon les exigences de l'application [2].

Le présent chapitre est structuré en trois parties. La première propose un rappel général sur les machines tournantes. La deuxième décrit le principe de fonctionnement des machines à induction monophasées et des machines à collecteur, ainsi que la constitution de la machine asynchrone monophasée. Enfin, la troisième partie est consacrée à la présentation des types de différents modes de démarrage adaptés à ce type de motorisation.

I.2 Moteur asynchrone monophasé à cage d'écureuil avec un seul enroulement

Un moteur monophasé avec un seul enroulement statorique ne génère pas un champ tournant, mais un champ magnétique pulsant. Ce champ est fixe par rapport à l'enroulement statorique qui le crée, et son amplitude varie de manière sinusoïdale au cours du temps. Ce champ pulsant est mathématiquement décomposable en deux champs tournants de même amplitude, tournant en sens opposés.

Ces deux champs créent chacun un couple moteur sur le rotor, mais de sens opposés. À l'arrêt, les deux couples étant égaux et contraires, leur résultante est nulle, ce qui explique pourquoi le couple de démarrage est nul pour un moteur monophasé sans dispositif auxiliaire.

D'un point de vue électrique, on assimile le moteur asynchrone monophasé à deux moteurs asynchrones triphasés symétriques, dont les enroulements statoriques sont montés en série, avec deux phases croisées, comme illustré sur la Figure (I.1). Les deux rotors, solidaires d'un même arbre, tournent dans le même sens, sous l'effet de ces deux champs tournants opposés [3].

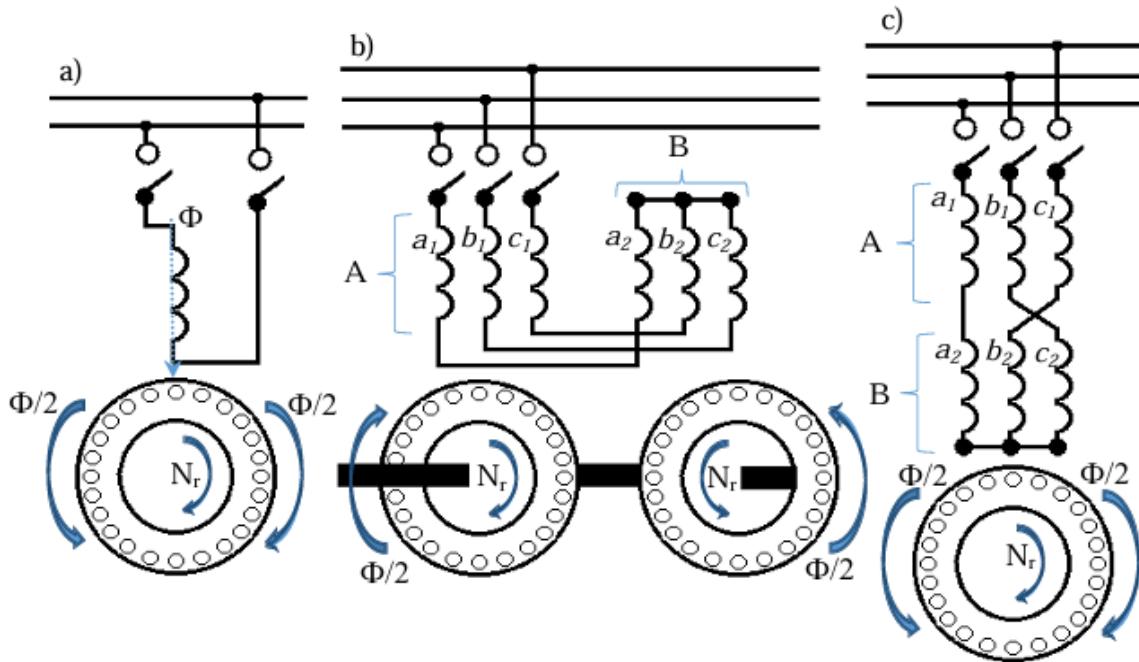


Figure I.1 Principe de fonctionnement d'un moteur monophasé à cage d'écureuil avec un seul enroulement

Le rotor est également soumis à l'action des deux champs tournants opposés issus de la décomposition du champ pulsant. En raison de la symétrie du moteur, ces deux champs produisent des couples électromagnétiques de sens contraires, mais de même amplitude lorsque le rotor est à l'arrêt. Par conséquent, le couple résultant au démarrage est nul, ce qui empêche toute mise en rotation spontanée.

Cependant, si le rotor commence à tourner à une vitesse de rotation Ω_r , cette symétrie est rompue. Il existe alors deux glissements distincts vis-à-vis des deux champs tournants

- Pour le champ tournant dans le même sens que le rotor, le glissement est :

$$g_1 = \frac{\Omega_1 - \Omega_r}{\Omega_1} \quad (\text{I.1})$$

- Pour le champ tournant dans le même sens que le rotor, le glissement est :

$$g_2 = \frac{\Omega_2 - \Omega_r}{\Omega_2} = 2 - g_1 \quad (\text{I.2})$$

Où : $\Omega_1 = \frac{\omega_s}{p}$; $\Omega_2 = -\frac{\omega_s}{p} = -\Omega_1$: Différentes vitesses du champ ; g_1 et g_2 : Glissements ; p : Nombre de pairs de pôles.

Dans ce cas, les deux champs n'ont plus le même effet sur le rotor : le champ tournant dans le même sens que le rotor voit son glissement (et donc son couple induit) réduit, tandis que le champ opposé voit son glissement augmenter. Cela permet au moteur de développer un

couple net, et donc de continuer à accélérer si un mouvement initial (par exemple, par un enroulement auxiliaire ou un condensateur de démarrage) a été fourni. Il nécessite aussi un dispositif extérieur (lancement manuel ou mécanique). Une fois lancé, il fonctionne de manière fiable et économique. On le retrouve principalement dans des équipements tels que les ventilateurs, les petits compresseurs ou les systèmes à faible inertie, où le couple de démarrage n'est pas déterminant.

I.3 Champ magnétique d'une seule bobine

$$F = H_\ell \cdot d\ell = n_1 \cdot I_m \cdot \sin(\omega t) = F_a + F_\delta \quad (\text{I.3})$$

Si on considère que f.m.m. dans l'acier (noyau, culasse et dents statoriques et rotoriques)

$F_a = 0$, puisque la perméabilité de l'acier $\mu \gg \mu_0$, c'est-à-dire presque toute la f.m.m. F dépense dans les deux entrefers :

$$F \approx F_\delta = \sqrt{2} \cdot n_1 \cdot I \cdot \sin(\omega t) \quad (\text{I.4})$$

Pour le fondamental (premier harmonique), on obtient la f.m.m. :

$$F_{\delta[t,x]} = F_{\delta m} \sin(\omega t) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) = F_{\delta[t,x]}' + F_{\delta[t,x]}'' \quad (\text{I.5})$$

Où : $F_{\delta[t,x]}' = 0.5 \cdot F_{\delta m} \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau_p} x)$ et

$$F_{\delta[t,x]}'' = 0.5 \cdot F_{\delta m} \cdot \sin(\omega t + \frac{\pi}{\tau_p} x) \quad (\text{I.6})$$

Des coordonnées du point x ($0 \leq x \leq 2\tau_p$), pour que la f.m.m. $F_{\delta[t,x]}'$ maximum est égale $0.5F_{\delta m}$, on peut obtenir : $\omega t - \frac{\pi}{\tau_p} x = \frac{\pi}{2}$.

Et la vitesse linéaire d'onde mobile $V = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega \tau_p}{\pi} = 2\tau_p f$.

La f.m.m $F_{\delta[t,x]}$ est décomposé en deux f.m.m. tournant dans les sens opposés ($F_{\delta[t,x]}'$ sens positif, et $F_{\delta[t,x]}''$ sens négatif) comme illustré sur la Figure (I.2) avec une vitesse linéaire $V = 2\tau_p f$ [3].

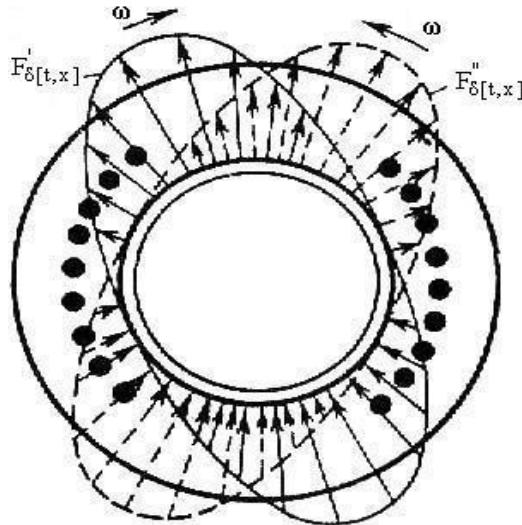


Figure I.2 Différents sens des f.m.m

I.4 Schéma électrique équivalent d'une machine monophasée

La présence des deux champs tournants (direct et inverse) conduit à la représentation d'un schéma électrique équivalent, tel qu'illustré dans la Figure (I.3). La force électromotrice (f.e.m.) induite dans l'enroulement statorique résulte alors de la superposition des composantes issues des deux séquences : directe et inverse [3], [4].

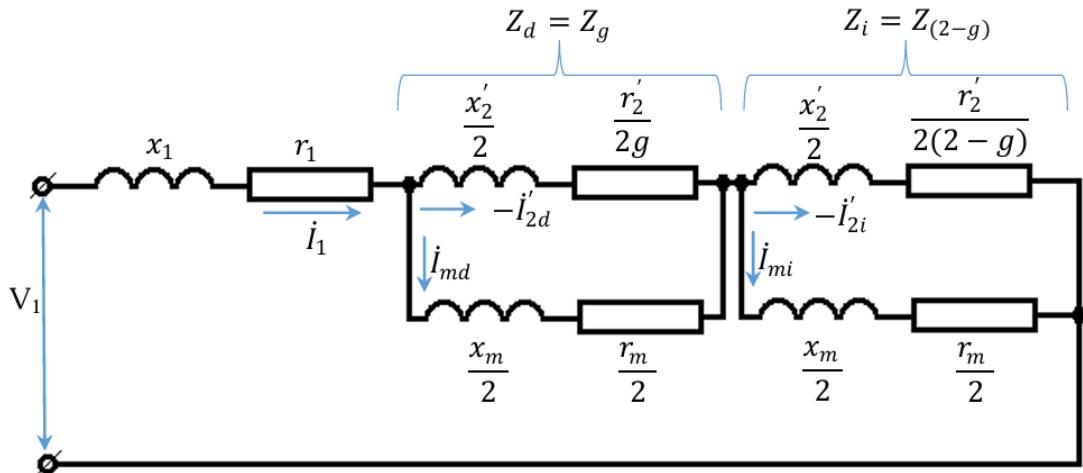


Figure I.3 Schéma équivalent d'une machine asynchrone monophasée

I.5 Caractéristiques du couple électromagnétique d'un MAS monophasé à cage d'écureuil

Lorsqu'un moteur asynchrone monophasé est alimenté uniquement via son enroulement principal, il génère deux composantes de couple électromagnétique : un couple direct (C_d) et un couple inverse (C_i), de même amplitude mais de sens opposés. Cette opposition rend la résultante nulle, empêchant ainsi le moteur de démarrer spontanément.

Pour remédier à cette limitation, un enroulement auxiliaire est ajouté. Ce dernier est connecté à un dispositif de déphasage, qui peut être inductif, résistif ou capacitif, ou encore mis en court-circuit dans le cas du moteur à spire de Frager. Ce dispositif crée un déséquilibre initial entre les composantes de champ, permettant au moteur d'amorcer sa rotation.

Une fois le moteur lancé, les glissements associés aux composantes directe et inverse deviennent différents :

- g pour la composante directe
- $2 - g$ pour la composante inverse

Ce déséquilibre produit un couple net non nul, suffisant pour maintenir la rotation [3].

La courbe du couple en fonction du glissement révèle un comportement asymétrique, caractéristique des moteurs monophasés à cage d'écureuil, comme illustré dans la Figure (I.4). Le couple est représenté par l'équation I.7 :

$$C = C_d + C_i = I'_{2d} \frac{r'_2}{2g} - I'_{2i} \frac{r'_2}{2(2-g)} \quad (I.7)$$

Où : I'_{2d} et I'_{2i} : Courants rotoriques ramenés au stator.

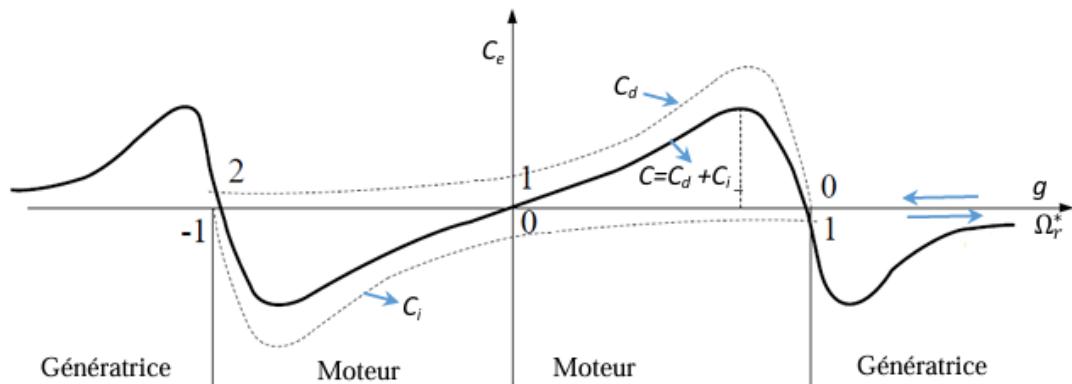
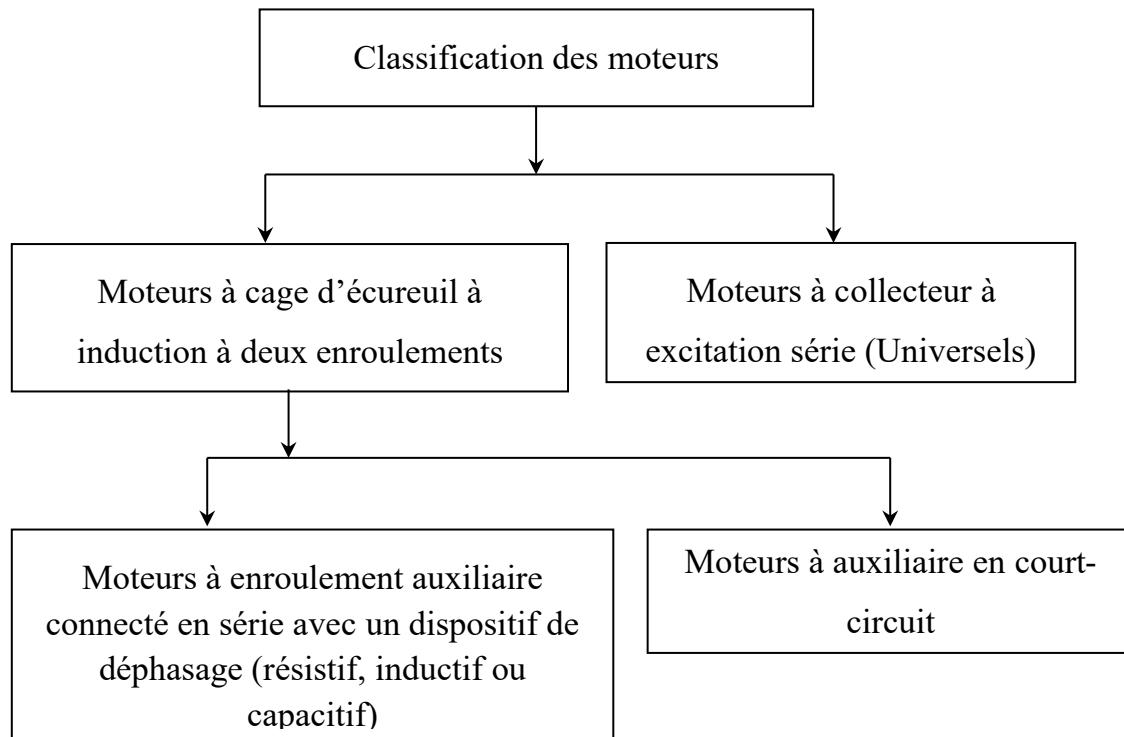


Figure I.4 Différents couples dans une machine monophasée à cage d'écureuil

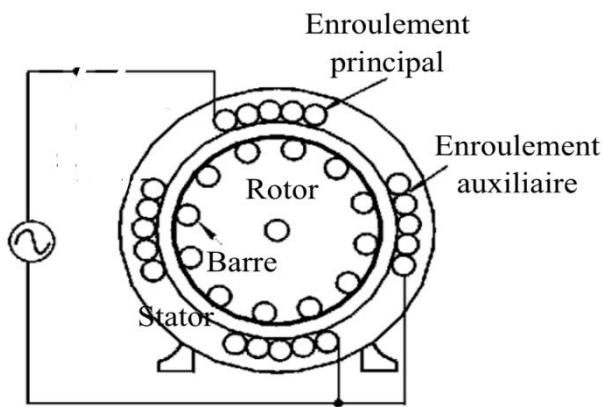
I.6 Classification des machines asynchrones monophasées

La Figure (I.5) illustre la classification des moteurs monophasés, qui se divisent en deux grandes catégories : d'une part, les moteurs avec contacts glissants, appelés moteurs universels, qui utilisent des balais et un collecteur ; d'autre part, les moteurs sans contacts glissants, dite moteurs à cage d'écureuil à induction, qui fonctionnent sans frottement électrique interne grâce à un principe de fonctionnement basé sur les courants induits rotoriques.

**Figure I.5** : Classification des moteurs monophasés

I.6.1 Moteurs à cage d'écureuil à induction à deux enroulements

Ce type de moteur est souvent comparé à un moteur biphasé, bien qu'il soit alimenté par une seule source monophasée. Le circuit électrique du stator comporte deux enroulements : un principal et un auxiliaire sont connectés en parallèle comme illustré dans la Figure I.6, ce dernier est connecté en série avec un dispositif de déphasage (tel qu'un condensateur, une résistance ou une inductance), ou est en court-circuit (spire de Frager) [3], [5].

**Figure I.6** Moteur asynchrone monophasé à cage d'écureuil avec deux enroulements

I.6.1.1 Moteur à dispositif de déphasage

Il s'agit d'un moteur asynchrone monophasé équipé d'un enroulement principal et d'un enroulement auxiliaire, entre lesquels un dispositif de déphasage a introduit généralement un condensateur. Ce dispositif permet de créer un décalage de phase entre les courants des deux enroulements, produisant ainsi un champ magnétique tournant nécessaire au démarrage du moteur. Selon le type de condensateur utilisé (de démarrage, de fonctionnement ou les deux), on distingue différentes variantes de ce moteur, adaptées à des exigences spécifiques en matière de couple de démarrage et de performance, on distingue trois types :

a) Moteur à phase auxiliaire résistive

Dans le moteur à phase auxiliaire résistive, illustré sur la Figure (I.7), l'enroulement principal, formé de nombreuses spires de gros fil, présente une forte réactance et une faible résistance, ce qui induit un courant fortement en retard sur la tension. En revanche, l'enroulement auxiliaire, constitué de fil plus fin et de moins de spires, possède une résistance élevée et une faible réactance, rendant son courant presque en phase avec la tension d'alimentation. En raison de sa forte résistance, cet enroulement ne peut rester connecté en permanence et est désactivé automatiquement par un interrupteur centrifuge lorsque la vitesse du moteur devient suffisante [6]. Ce type de moteur est couramment utilisé dans des applications domestiques et légères où un couple de démarrage modéré est suffisant. On le retrouve notamment dans les réfrigérateurs de nouvelle génération, les petites pompes à eau, les compresseurs d'air, les mixeurs de cuisine (anciens modèles), etc.

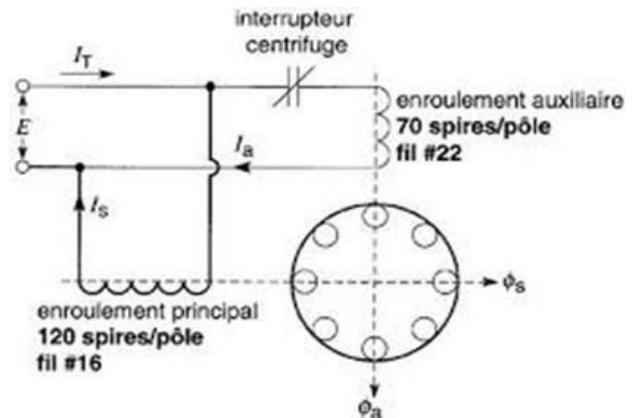


Figure I.7 Moteur à phase auxiliaire résistive

b) Moteur à phase auxiliaire à effet inductif

Le moteur asynchrone monophasé à phase auxiliaire inductive est un type de moteur électrique qui utilise une deuxième bobine, appelée bobine de phase auxiliaire, pour créer un champ magnétique qui permet le démarrage du moteur. Cette bobine est placée dans le stator et est connectée en série avec le bobinage principal, créant ainsi un champ magnétique tournant qui fournit un couple de démarrage au moteur [7]. Une fois que le moteur atteint sa vitesse nominale, la bobine auxiliaire est automatiquement déconnectée comme illustre sur la Figure (I.8). Ce type de moteur est souvent utilisé dans des applications telles que les ventilateurs de

radiateur dans les véhicules, la pompe à eau, et les machines à laver. Toutefois, il a une puissance limitée et est moins efficace.

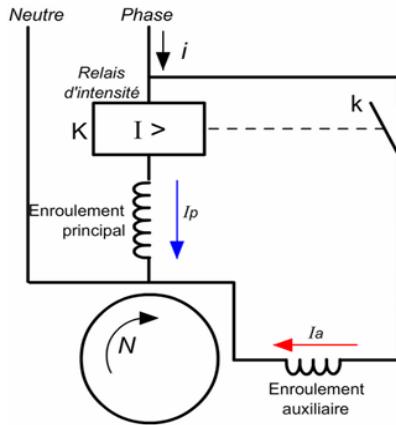


Figure I.8 Moteur à phase auxiliaire à effet inductif

c) Moteur à phase auxiliaire à effet capacitif

Le moteur asynchrone monophasé est constitué d'un enroulement principal et d'un enroulement auxiliaire associé à un condensateur. Ce dernier permet de créer un déphasage entre les courants circulant dans les deux enroulements, générant ainsi un champ magnétique tournant nécessaire au démarrage du moteur [7]. Ce type de moteur est apprécié pour sa simplicité de conception, sa fiabilité et son bon couple de démarrage. On distingue généralement trois configurations principales :

c.1) Moteur à condensateur de démarrage (condensateur temporaire)

Le moteur à condensateur de démarrage est un type de moteur monophasé asynchrone équipé d'un condensateur pour améliorer son couple de démarrage [3]. Ce condensateur connecté en série avec un enroulement auxiliaire, crée un déphasage du courant, générant un champ magnétique rotatif nécessaire au démarrage comme illustré dans la Figure (I.9). Une fois le moteur lancé, le condensateur est généralement désactivé par un interrupteur centrifuge ou un relais [7].

Ce type de moteur est adapté aux applications exigeant un démarrage sous charge. Il est couramment utilisé dans les compresseurs de réfrigérateur (domestique), scie circulaire de menuisier, ainsi que certains équipements agricoles ou industriels légers.

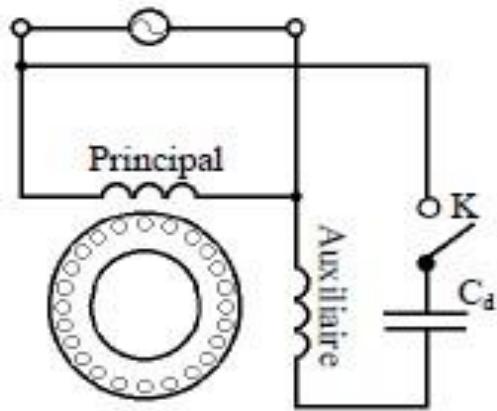


Figure I.9 Moteur à condensateur de démarrage

c.2) Moteur à condensateur permanent (condensateur en fonctionnement)

Le moteur à condensateur permanent, ou moteur à condensateur de fonctionnement comme illustré dans la Figure (I.10), est équipé d'un enroulement principal et d'un enroulement auxiliaire relié en permanence à un condensateur. Ce condensateur, généralement de type polypropylène auto-cicatrisant, permet de maintenir un déphasage constant entre les deux enroulements, ce qui génère un champ magnétique tournant stable pendant toute la durée de fonctionnement. Contrairement au moteur à condensateur de démarrage, il ne nécessite pas d'interrupteur centrifuge, ce qui simplifie sa construction et améliore sa fiabilité. Il offre un bon rendement et un facteur de puissance élevé (0,8 à 0,9), mais un couple de démarrage modeste (C_d/C_n) entre 0,3 et 0,8) [6].

Ce moteur offre un fonctionnement silencieux, un bon rendement et un facteur de puissance élevé (généralement entre 0,8 et 0,9). Il est donc particulièrement adapté aux applications à démarrage léger et fonctionnement continu, comme les ventilateurs, les climatiseurs, les pompes de circulation, les compresseurs à faible charge, la hotte de cuisine, et divers équipements de bureau ou de laboratoire.

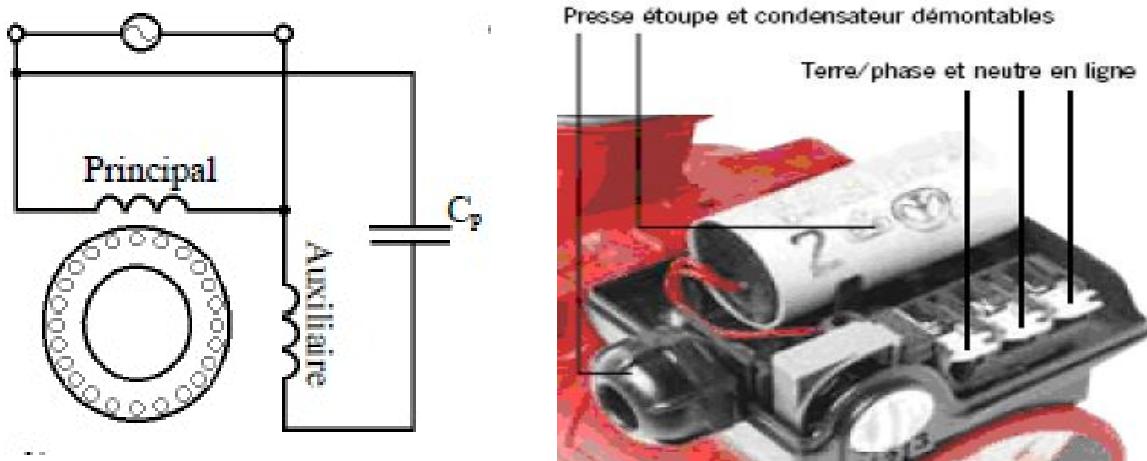


Figure I.10 Moteur à condensateur permanent

c.3) Moteur à double condensateur de démarrage et de fonctionnement

Le moteur à double condensateur représente une solution améliorée qui combine les avantages des moteurs à condensateur permanent et ceux des moteurs à condensateur de démarrage. Il comprend deux condensateurs : un condensateur permanent (C_p), dont la capacité varie entre 5 et 30 μF et qui est connecté en permanence pour maintenir un bon rendement en fonctionnement stable, et un condensateur de démarrage (C_d), dont la capacité est plus importante (100 à 400 μF) et qui est activé temporairement par un interrupteur (K) lors du démarrage. Cette configuration offre un excellent couple de démarrage tout en garantissant un rendement énergétique adéquat en utilisation normale [6]. Le principe de fonctionnement et la conception du moteur sont illustrés à la Figure (I.11).

Ce type de moteur présente à la fois un bon couple de démarrage et de bonnes performances en régime permanent, ce qui le rend idéal pour les applications exigeant à la fois un démarrage sous charge et une fiabilité en fonctionnement continu. On le retrouve notamment dans les compresseurs frigorifiques, la bétonnière électrique, scie circulaire fixe, les machines-outils légères, les équipements agricoles motorisés et certains appareils industriels nécessitant puissance et robustesse.

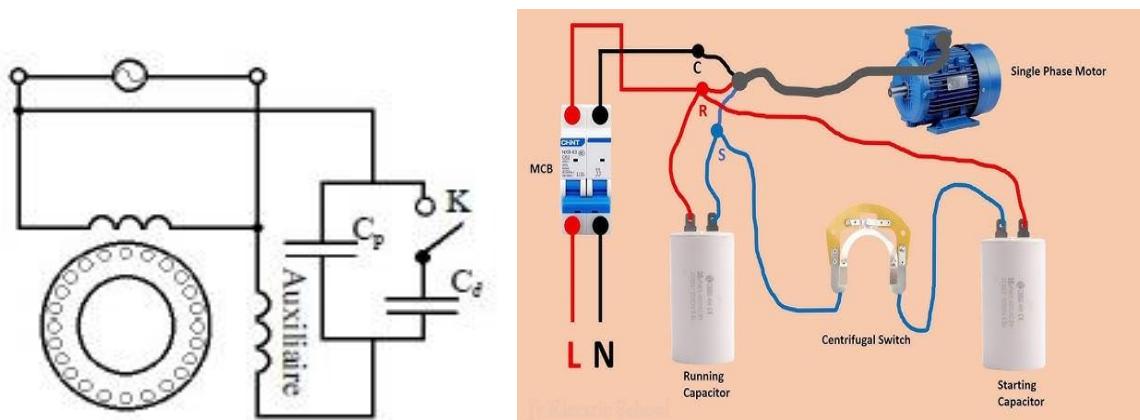


Figure I.11 Moteur à double condensateur

I.6.1.2 Moteurs asynchrones monophasés à cage d'écureuil avec spire Frager

Un moteur à spire Frager (ou moteur à bagues de court-circuit) est un type de moteur asynchrone à cage d'écureuil Figure (I.12). Ce moteur à bagues de court-circuit est très répandu pour des puissances inférieures à 300 W, notamment parce qu'il ne comporte pas de phase auxiliaire conventionnelle. Dans ce petit moteur monophasé à cage, l'enroulement auxiliaire est constitué d'une unique spire de cuivre en court-circuit, appelée spire de Frager [8], disposée en bague autour d'une portion de chaque pôle saillant.

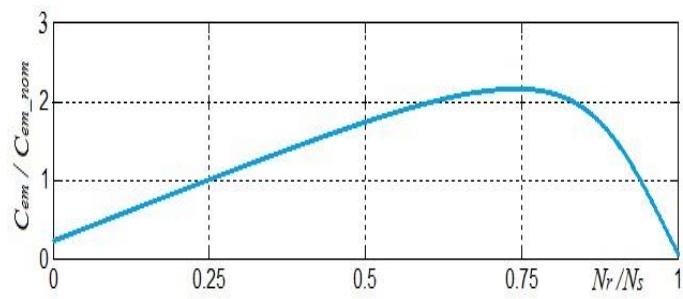


Figure I.12 Moteur asynchrone monophasé à spire de Frager et son allure de couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation

L'utilisation de ces moteurs reste très étroite, on les trouve dans les faibles puissances à savoir moteur de tourne-disques, de servomécanisme, petits ventilateurs, etc., comme illustré dans la Figure (I.13).

Avec : Φ_{ext} et Φ_{int} : Deux flux créent par le courant statorique I_1 à l'extérieur et à l'intérieur des anneaux respectivement ; Φ_{cc} : Flux créé par le courant induit I_{cc} dans l'anneau

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_{int} + \Phi_{cc} \quad (\text{I.4})$$

Φ_{Σ} : Flux résultant traversant des deux anneaux

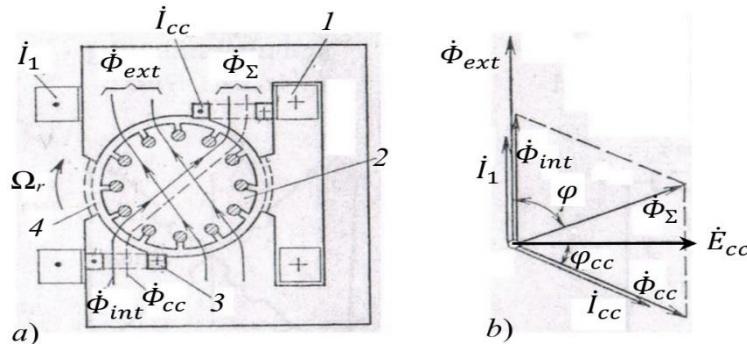


Figure I.13 Dispositif (a) et diagramme vectoriel des différents flux statoriques (b) d'un moteur monophasé à spire Frager

Le moteur monophasé à spire de Frager est fiable, simple et économique, ce qui le rend adapté aux petites charges domestiques comme les ventilateurs et petits électroménagers. Cependant, son faible couple de démarrage, son rendement souvent inférieur à 50 % et ses performances limitées restreignent son usage aux applications légères, excluant les environnements industriels ou exigeants [3].

Ce type de moteur est limité aux applications de très faible puissance. Il est néanmoins très répandu dans des équipements simples et peu coûteux tels que les petits ventilateurs, les minuteurs, les jouets motorisés, les sèche-cheveux, les moteurs de grille-pain ou les tournebroches, où la simplicité de conception et le faible coût sont des critères essentiels.

I.6.2 Moteur monophasée à collecteur (universel)

L'inducteur sert de composant fixe du moteur, avec sa structure enroulée, tandis que l'armature agit comme la partie dynamique, équipée d'un collecteur et de balais qui assurent la connectivité électrique. Le moteur est également doté d'un boîtier qui recouvre l'ensemble et d'un ventilateur fixé à l'arbre à des fins de refroidissement. Ce type de moteur, appelé moteur universel, peut fonctionner à la fois en courant continu et en courant alternatif, ce qui en fait un choix populaire pour les appareils électroménagers (aspirateurs, mixeurs, sèche-cheveux), compacts et les outils portatifs (perceuses, scies, ponceuses) en raison de sa conception simple, de sa petite taille et de son couple élevé à basse vitesse Figure (I.14). Le montage électrique est simple, ne nécessitant que deux fils connectés aux balais, et en théorie, l'inversion de ces fils modifierait le sens de rotation. Néanmoins, la plupart des moteurs universels ne sont pas conçus pour être réversibles sans modifications, car leur sens de rotation est déterminé par le pas de l'enroulement de l'armature [9], [10].

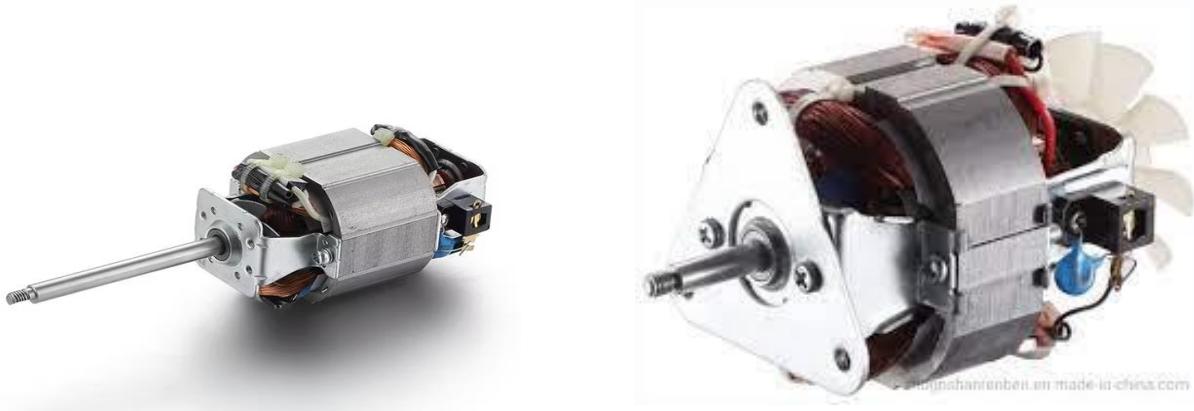


Figure I.14 Moteur universel

I.6.2.1 Principe de son fonctionnement

Le moteur monophasé en série avec commutateur fonctionne selon le même principe qu'un moteur à courant continu en série, mais il est spécialement conçu pour être utilisé avec une alimentation en courant alternatif. Dans cette configuration, l'inducteur au stator et l'induit au rotor sont connectés en série.

Lorsqu'une tension alternative est appliquée au moteur, le courant change de direction à chaque demi-cycle. Cependant, comme le même courant circule à la fois dans l'inducteur et dans l'induit, l'inversion simultanée du champ magnétique et du courant du rotor crée un couple électromagnétique qui maintient la même direction [10]. Cette synchronisation permet au rotor de tourner continuellement dans une seule direction, comme le montre la Figure (I.15).

De plus, le moteur est équipé d'un commutateur associé à des balais qui commutent le courant de l'induit pour faciliter le fonctionnement en courant alternatif. En revanche, dans un moteur à bobinage en dérivation ou à excitation séparée alimenté par une tension alternative sinusoïdale, le courant de l'induit et le flux magnétique ne sont pas alignés. Ce manque de

synchronisation empêche les inversions simultanées et entraîne un couple électromagnétique alternatif dont la valeur moyenne est nulle, rendant impossible une rotation stable [11].

Afin de minimiser les pertes par courants de Foucault, le circuit magnétique de l'inducteur est constitué de fines feuilles empilées, ce qui facilite l'inversion efficace du flux magnétique. Par conséquent, nous pouvons exprimer :

$$\phi = kI_{am}\cos(\omega t) \quad (I.5)$$

$$I_a = I_{am}\cos(\omega t) \quad (I.6)$$

D'où

$$C_e = \frac{p}{a} \frac{N}{2} I_{am}^2 (1 + \cos(2\omega t)) \quad (I.7)$$

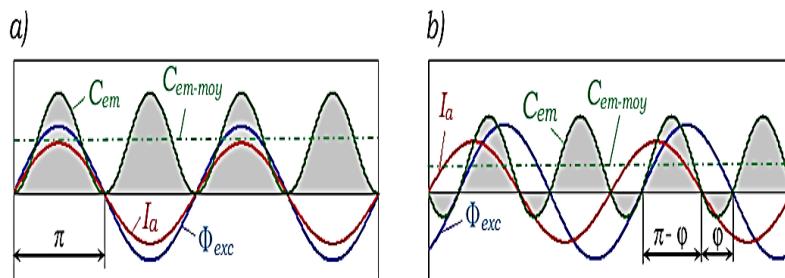


Figure I.15 Allures du couple électromagnétique, du courant d'induit et du flux d'excitation en fonction de l'angle (ωt) : a) excitation série, b) excitation shunt ou séparée

Dans un moteur série alimenté par une tension alternative, le couple électromagnétique comporte un terme constant ainsi qu'un terme oscillant à la fréquence double de la tension d'alimentation (2ω).

Par conséquent, le couple résultant ne change pas de signe, ce qui permet au rotor de maintenir une rotation continue dans un même sens [9], [10].

I.6.2.2 Amélioration du facteur de puissance d'un moteur universel

L'amélioration du facteur de puissance consiste à réduire le déphasage entre la tension et le courant dans un circuit. Cela permet de réduire la puissance réactive inutile et d'optimiser le rendement énergétique de l'installation.

➤ Utilisation de condensateurs (compensation capacitive)

Les moteurs universels fonctionnent généralement avec un certain déphasage entre la tension et le courant, principalement dû à l'inductance du moteur.

L'ajout d'un condensateur aide à compenser cette réactance inductive en fournissant de l'énergie réactive sous forme d'une charge capacitive.

Cela permet de réduire le déphasage et ainsi d'améliorer le facteur de puissance [9].

➤ Variateur de fréquence

Un VFD ajuste la fréquence du courant pour réguler la vitesse du moteur, mais il intègre également un circuit qui compense le facteur de puissance en ajustant la phase entre le courant et la tension [9].

➤ Utilisation de moteurs à faible impédance

En réduisant l'impédance totale (résistance et inductance), il y a moins de déphasage entre la tension et le courant, ce qui améliore le facteur de puissance [9].

➤ Moteur à faible consommation d'énergie

Un moteur conçu pour avoir un rendement élevé consomme moins d'énergie réactive pour produire la même puissance mécanique, ce qui améliore directement le facteur de puissance.

Ce type de moteur offre une grande flexibilité d'alimentation (AC/DC), un couple de démarrage élevé et un rendement satisfaisant à haute vitesse. En revanche, il nécessite un entretien régulier en raison de l'usure des balais, génère du bruit en fonctionnement et présente une durée de vie plus courte que les moteurs à induction [9].

I.6.2.3 Avantages et inconvénients des moteurs universels

Le moteur universel présente plusieurs avantages qui expliquent son utilisation dans de nombreux appareils électroménagers et outils portatifs. Il offre une grande vitesse de rotation, ce qui le rend particulièrement efficace pour les applications nécessitant de la puissance sur un court laps de temps, comme les perceuses ou les mixeurs. Il est également compact, léger et peu coûteux, ce qui facilite son intégration dans des appareils de petite taille. De plus, sa capacité à fonctionner indifféremment en courant alternatif ou continu le rend très polyvalent.

Cependant, le moteur universel présente aussi certains inconvénients. Il est généralement bruyant et s'use plus rapidement en raison de la présence de balais et de collecteurs, qui nécessitent un entretien régulier. Il a également un rendement énergétique plus faible que d'autres types de moteurs, notamment les moteurs à induction. Enfin, en raison des étincelles générées par les balais, il peut provoquer des interférences électromagnétiques et ne convient pas aux environnements où la sécurité ou le silence sont prioritaires.

I.6.2.4 Applications des moteurs universels

Le moteur universel est largement utilisé dans de nombreux appareils électroménagers et outils portatifs qui nécessite un fort couple de démarrage / ou une grande vitesse de rotation, en raison de sa capacité à fonctionner aussi bien en courant continu qu'en courant alternatif, de sa grande vitesse de rotation et de sa compacité. On le retrouve notamment dans les perceuses électriques, où il offre un couple élevé et une vitesse suffisante pour percer différents matériaux. Il équipe également les aspirateurs, auxquels il procure une aspiration puissante tout en restant léger et facile à intégrer dans des formats compacts. Dans le domaine de la couture, certaines machines à coudre utilisent ce type de moteur pour sa souplesse de fonctionnement et sa capacité à tourner lentement sans perte de couple, ce qui est essentiel pour les travaux de

précision. Enfin, dans les mixeurs, batteurs ou robots de cuisine, le moteur universel permet un fonctionnement rapide et efficace, avec la possibilité de varier la vitesse selon les besoins.

I.7 Moteur triphasé adapté au monophasé (avec condensateur)

L'adaptation d'un moteur asynchrone triphasé à une alimentation monophasée peut réaliser par l'ajout d'un condensateur, comme présenté sur la Figure (I.16). Ce dispositif permet de créer un déphasage entre les enroulements statoriques, générant ainsi un champ magnétique tournant comparable à celui obtenu en alimentation triphasée. Ce champ est indispensable au démarrage du moteur et à la stabilité de son fonctionnement. Bien que cette configuration présente des performances réduites en termes de couple et de rendement par rapport au fonctionnement triphasé, elle constitue une solution techniquement viable et économiquement avantageuse pour les applications domestiques et industrielles de faible puissance [3], [4].

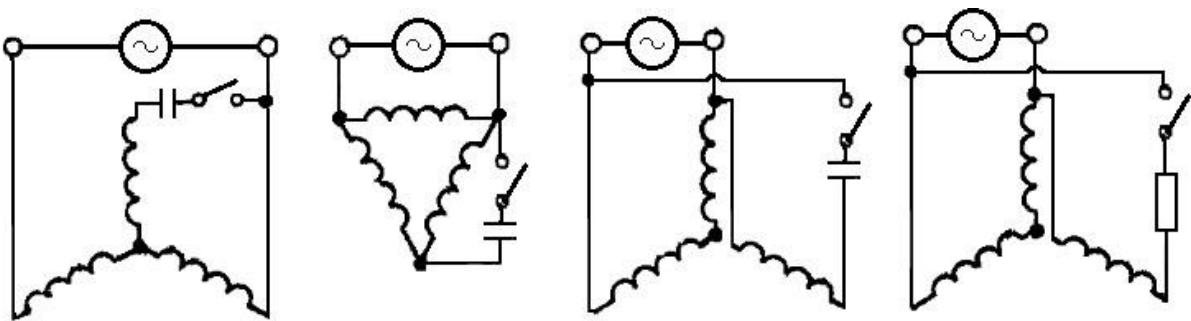


Figure I.16 Différents schémas d'alimentation monophasée des bobines triphasées

Ce type de moteur présente plusieurs avantages notables. Sa conception simplifiée, avec un nombre réduit de pièces mobiles, limite les risques d'usure mécanique et réduit les besoins en maintenance. L'intégration d'un condensateur permet d'améliorer le couple de démarrage, facilitant ainsi l'amorçage du moteur dans certaines conditions de charge.

Néanmoins, cette configuration présente également des limitations. Les performances globales demeurent inférieures à celles d'un moteur triphasé, en particulier en termes de rendement énergétique et de couple développé. Le couple de démarrage, bien qu'amélioré, reste relativement faible, ce qui peut limiter son usage dans des applications exigeant des efforts de démarrage importants. Par conséquent, ce type de moteur est principalement réservé à des usages spécifiques où les contraintes de puissance et de performance sont modérées.

I.8 Types de contacteur de démarrage

- **Contacteur centrifuge :** Le plus répandu, monté sur l'arbre côté opposé entraînement, derrière le ventilateur. A la mise sous tension, la phase auxiliaire en série avec le condensateur est alimentée. Lorsque le moteur atteint environ 70 % de sa vitesse nominale un contact centrifuge coupe le circuit de la phase auxiliaire [3].

- **Relais d'intensité** : Monté en série avec la phase de marche, opérant un contact rapide sur phase auxiliaire. Le relais colle avec l'appel de courant au démarrage, le contact se ferme et alimente la phase auxiliaire (en série avec le condensateur s'il y a), mais le courant décroît brusquement dans la phase principale quand le moteur approche de sa vitesse normale, ce qui a pour effet d'ouvrir le contact quand la valeur de seuil du relais est atteinte et de couper l'alimentation de la phase de démarrage [3].
- **Interrupteur (Spécial mono)** : Pour le démarrage manuel de certains tourets à meuler, on utilise parfois un interrupteur bipolaire comportant un contact de type "maintenu". Lors de la mise en marche, l'utilisateur appuie sur le levier et le maintien temporairement pour permettre le démarrage. Une fois relâché, le mécanisme interne composé de deux parties ramène automatiquement le contact maintenu en position ouverte. Ce contact temporaire sert à alimenter la phase de démarrage via le condensateur de démarrage. Le second contact, quant à lui, reste en position fermée pour assurer l'alimentation continue du bobinage de marche [3].
- **Relais de tension** : Monté en parallèle sur la phase auxiliaire (hors condensateur) : collé ou non suivant l'évolution de la tension aux bornes de la phase de démarrage [3].

I.9 Méthodes de démarrage des MAS monophasés

Un mode de démarrage est un dispositif ou une méthode permettant de contrôler les conditions initiales de mise en marche d'un moteur électrique, notamment en influençant la vitesse de rotation. Cette régulation s'effectue en agissant sur les paramètres d'alimentation, comme la tension, ou en adaptant les conditions de fonctionnement du circuit, en particulier pour les moteurs universels ou les moteurs asynchrones monophasés utilisant des condensateurs [12].

I.9.1 Types des démarrages

Dans le but de contrôler la vitesse d'un moteur asynchrone monophasé, plusieurs types de démarrage peuvent être mis en œuvre, ils agissent principalement sur la tension appliquée au moteur, ce qui permet de modifier la vitesse de rotation en fonction des besoins de l'application. On distingue plusieurs types dont :

I.9.1.1 Démarrage par un potentiomètre

Un potentiomètre est une résistance variable à trois bornes, largement utilisée pour contrôler des paramètres tels que la vitesse d'un moteur électrique. Il permet de modifier la tension de sortie en fonction de la position du curseur, offrant ainsi une tension de commande variable. Cette tension est ensuite transmise à un variateur de vitesse électronique ou à un contrôleur de moteur, qui l'utilise comme consigne de vitesse [14].

Le potentiomètre comporte trois bornes distinctes : Extrémité 1, souvent une borne extérieure, est connectée à la source d'alimentation électrique ; Extrémité 2, correspondant au curseur, est reliée à l'entrée de commande du variateur ou du contrôleur ; enfin, curseur,

également une borne extérieure, est connectée à la masse (terre) ou au pôle négatif de l'alimentation. Cette configuration permet de prélever une tension variable entre l'extrémité 1 et le curseur, contrôlé par la position du curseur sur l'extrémité 2 (voir Figure I.17).

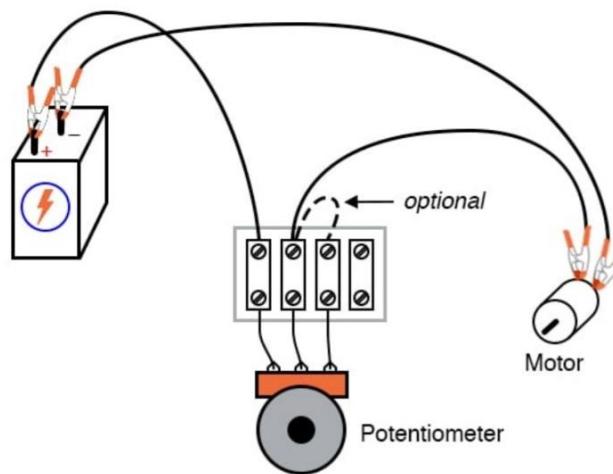


Figure I.17 Principe de démarrage de vitesse d'un moteur par potentiomètre

Étude des avantages et des inconvénients du système de démarrage moteur

Ce dispositif permet de contrôler de fortes puissances et reste simple à utiliser, ce qui le rend adapté au démarrage moteur, cependant il souffre d'une chauffe importante, d'une faible efficacité énergétique et d'une usure mécanique rapide.

Application des potentiomètres

Le potentiomètre est couramment utilisé dans les appareils où on souhaite faire varier la manuellement la vitesse d'un moteur comme le démarrage du moteur via variateur, contrôle du volume audio (radios, enceintes), commande manuelle dans un panneau de contrôle industriel.

I.9.1.2 Démarrage par un rhéostat

Le rhéostat est un dispositif constitué d'un enroulement de fil conducteur qui permet de modifier manuellement l'intensité du courant dans un circuit électrique. Il fonctionne de manière passive, sans nécessiter de commande électronique, et est couramment utilisé dans des montages simples pour le contrôle de lampes, de petits moteurs ou de systèmes de chauffage.

La Figure I.18 représente le principe de fonctionnement d'un rhéostat, montrant comment la variation de la résistance permet d'ajuster l'intensité du courant en agissant directement sur la longueur du fil traversé [14].

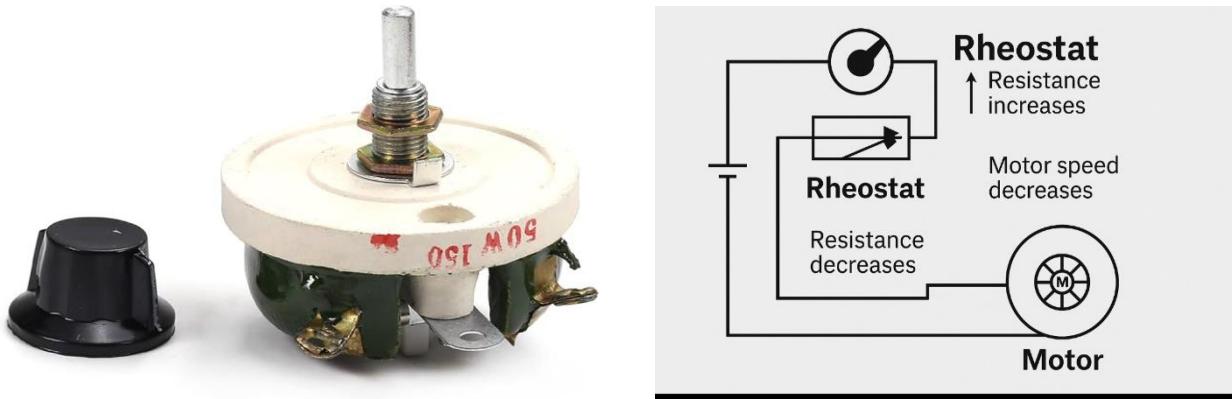


Figure I.18 Principe de démarrage d'un moteur par un rhéostat

Ce type de régulation présente plusieurs avantages : simplicité d'utilisation, coût réduit et adaptation à des circuits de faible ou moyenne puissance. Toutefois, il comporte aussi des inconvénients majeurs, tels que des pertes d'énergie par effet Joule, un faible rendement, une précision limitée du réglage et une inadaptation aux charges de forte puissance.

I.9.1.3 Démarrage par variation du nombre de spire

La variation du nombre de spires est une méthode de régulation utilisée pour ajuster la tension ou la résistance dans un enroulement, afin de contrôler le comportement d'un moteur électrique, notamment lors du démarrage ou pour la variation de vitesse. Elle repose sur le principe selon lequel la résistance et l'inductance sont proportionnelles au nombre de spires traversées par le courant. Cette méthode, simple à mettre en œuvre et peu coûteuse, est principalement employée dans les moteurs monophasés de faible puissance.

Parmi ses avantages, on note l'absence de composants électroniques et une grande simplicité de conception. En revanche, elle présente des limitations : manque de flexibilité, impossibilité d'ajustement dynamique, pertes d'énergie par effet Joule dues à l'augmentation de la résistance interne [7].

Cette technique est couramment utilisée dans les appareils de chauffage à résistances bobinées, les ventilateurs industriels et les compresseurs à MAS.

I.9.1.4 Démarrage par variation du nombre de paires de pôles

Variation du nombre de paires de pôles est une méthode couramment utilisée pour faire varier la vitesse de rotation d'un moteur asynchrone, tout en conservant une alimentation à fréquence constante. Ce procédé repose sur la relation fondamentale entre la vitesse de synchronisme et le nombre de paires de pôles, donnée par la formule suivante :

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (\text{I.7})$$

Avec : N_s : Vitesse du champ magnétique tournant; f : Fréquence du réseau ; p : nombre de paires de pôles

Cette méthode de régulation se distingue par sa simplicité de mise en œuvre, son faible coût d'entretien et sa robustesse, car elle ne nécessite aucun composant électronique. Elle offre

un bon rendement, en particulier à pleine vitesse, et convient aux applications nécessitant plusieurs vitesses fixes, comme les ventilateurs, pompes ou machines-outils [7].

En revanche, elle présente certaines limites : elle ne permet qu'un nombre restreint de vitesses prédéfinies, sans variation continue, ce qui peut provoquer des à-coups mécaniques. De plus, le couple moteur varie selon la configuration, et l'utilisation d'un bobinage spécifique augmente le coût initial du moteur.

Parmi les principales applications de la variation du nombre de spires, on peut citer les ascenseurs et monte-charges, les mélangeurs ou malaxeurs, ainsi que les machines à laver de l'ancienne génération, où des vitesses fixes suffisent pour assurer les différents cycles de fonctionnement.

I.9.1.5 Démarrage par l'autotransformateur

L'autotransformateur est un type particulier de transformateur dans lequel les enroulements primaire et secondaire partagent une portion commune de bobinage, en étant montés sur une même carcasse. Contrairement au transformateur classique où les enroulements sont entièrement séparés, l'autotransformateur présente une liaison électrique directe entre les deux enroulements, en plus du couplage magnétique.

Les enroulements sont connectés en série de manière à additionner les tensions. Cette configuration permet de prélever une tension variable à l'aide d'une prise mobile ou d'un curseur rotatif, permettant ainsi un réglage progressif de la tension d'alimentation du moteur.

Le couple développé par un moteur asynchrone étant proportionnel au carré de la tension d'alimentation, une diminution de la tension entraîne une diminution du courant et donc du couple, ce qui provoque une réduction de la vitesse, principalement lorsqu'il fonctionne à vide ou sous faible charge. À l'inverse, lorsque la tension augmente progressivement jusqu'à atteindre la valeur nominale, le moteur retrouve son couple et sa vitesse de fonctionnement normale. Il est important de noter que la réduction de tension à l'aide d'un autotransformateur n'affecte pas la fréquence de l'alimentation, contrairement à un variateur de fréquence [15].

La vitesse synchrone reste donc inchangée ; toutefois, la réduction de couple résultant de la baisse de tension affecte indirectement la vitesse de rotation du rotor, notamment en régime transitoire ou sous faible charge.

Étude des avantages et des limitations d'un réglage par l'autotransformateur

Le réglage par autotransformateur permet de modifier la tension d'alimentation d'un moteur de manière simple et efficace, notamment au démarrage. Il présente plusieurs avantages, tels qu'une réduction des courants d'appel, un bon rendement énergétique, une mise en œuvre économique et une diminution des contraintes mécaniques. Toutefois, cette méthode comporte aussi des limitations : absence d'isolation électrique entre l'entrée et la sortie, variation de vitesse limitée, encombrement et besoin de commutation mécanique. Parmi les domaines d'application les plus fréquents, on peut citer :

- Les systèmes de ventilation et de climatisation (HVAC),
- Les pompes centrifuges, Les convoyeurs mécaniques

I.9.1.6 Démarrage par un gradateur

Un gradateur est un convertisseur statique qui, alimenté sous une tension alternative sinusoïdale permet de faire varier la tension aux bornes de la charge alimentée [6].

Les tensions d'entrée et de sortie sont de fréquences égales, le gradateur permet le réglage continu du rapport des valeurs efficaces de la tension de sortie de ces deux tensions.

Les gradateurs fonctionnent en commutation naturelle, autrement dit on aura extinction du courant dans chaque semi-conducteur de lui-même à la fin de son intervalle normal de conduction [16], le schéma d'un gradateur est composé de deux interrupteurs montés en tête bêche comme illustre la Figure (I. 19).

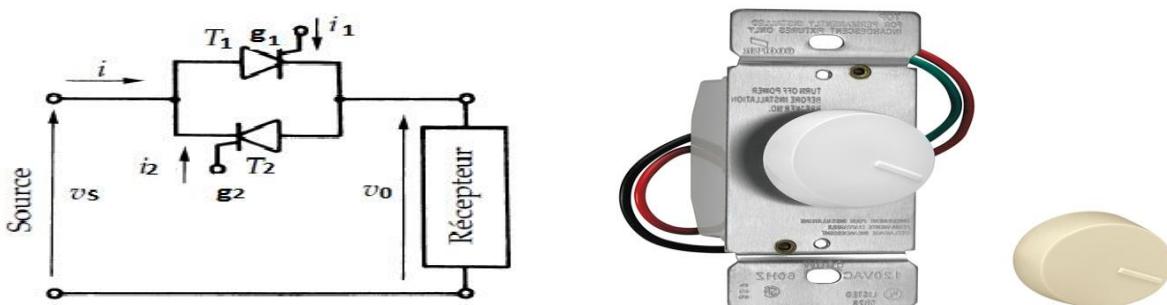


Figure I.19 Représentation schématique et physique d'un gradateur monophasé

Il existe deux principaux types de gradateurs : à angle de phase et à cycle de durée. Le gradateur à angle de phase, le plus utilisé pour la variation de vitesse des machines alternatives, ajuste la tension efficace sans changer la fréquence. Il est simple, peu coûteux et efficace, mais génère des harmoniques, peut perturber d'autres équipements et n'est pas adapté aux moteurs asynchrones, pouvant provoquer une perte de couple et un échauffement. Son contrôle est moins précis que celui des variateurs de fréquence modernes [19].

Applications spécifiques des gradateurs à angle de phase

Le gradateur à angle phase sont couramment utilisés dans des applications où on souhaite contrôler la puissance fournie à une charge monophasée ou les retrouve notamment dans les variateurs de vitesse pour ventilateurs régulation de lumière, chauffage électrique, commande de fours industriels.

I.10 Conclusion

Les moteurs asynchrones sont fréquemment associés à des démarreurs électriques qui assurent non seulement la régulation de la vitesse, mais également les fonctions de démarrage.

Bien que leurs performances soient inférieures à celles des machines triphasées, les moteurs asynchrones monophasés conservent une place prépondérante dans les applications domestiques et agricoles. Leur simplicité de conception, leur coût réduit et leur compatibilité avec les réseaux monophasés en font une solution pratique et largement utilisée.

Le chapitre suivant sera consacré, dans un premier temps, à la modélisation du moteur à condensateur permanent, puis à la simulation et à la comparaison sous Simulink-MATLAB [17] des différents modes de démarrage appliqués à deux types de moteurs : le moteur à condensateur de démarrage et le moteur à deux condensateurs.

CHAPITRE II

*Modélisation et simulation
d'un moteur monophasé à
condensateur permanent*

II.1 Introduction

Après avoir présenté dans le premier chapitre les différents types de moteurs monophasés utilisés dans les appareils domestiques, notamment les moteurs à induction et universels, en mettant en lumière leurs principes de fonctionnement, les méthodes de démarrage, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Ce deuxième chapitre se concentrera sur la modélisation et la simulation d'un ventilateur domestique équipé d'un moteur asynchrone monophasé à induction à deux enroulements (principal et auxiliaire). Dans cette configuration, l'enroulement principal est directement relié à une source monophasée, tandis que l'enroulement auxiliaire est connecté en série à un condensateur permanent, également alimenté par la même source. Pour cette modélisation, nous utiliserons la transformation de Park reliée au stator, ce qui facilitera l'analyse et la simulation du comportement du ventilateur étudié. Cette approche permettra d'obtenir des résultats précis et de mieux comprendre les performances du moteur dans différentes conditions de fonctionnement. En utilisant la Librairie PowerSys/Simulink/MATLAB, les résultats obtenus seront validés.

II.2 Modélisation du moteur asynchrone monophasé à induction dans le repère dq relié au stator

II.2.1 Hypothèses simplificatrices

Pour simplifier l'étude du moteur :

- On considère un circuit magnétique non saturé (comportement linéaire) ;
- Les pertes dans le fer (hystérésis et courants de Foucault) sont négligées ;
- L'entrefer est supposé uniforme ;
- Les effets de température sont ignorés ;
- La tension d'alimentation est sinusoïdale ;
- Les frottements mécaniques et perturbations parasites sont considérés comme négligeables ;

II.2.2 Transformation de Park

Dans l'analyse des machines électriques biphasées, la représentation des grandeurs électriques (comme les courants et les tensions) joue un rôle important pour comprendre le comportement de la machine. Ces grandeurs, lorsqu'elles sont exprimées dans le repère réel statorique ($a_s b_s$), conservent leur forme sinusoïdale. La figure II.1 illustre les différents enroulements de la machine asynchrone monophasée à condensateur permanent à deux enroulements statoriques, représentés sur les deux axes selon le repère virtuel dq , qui est fixe par rapport au stator.

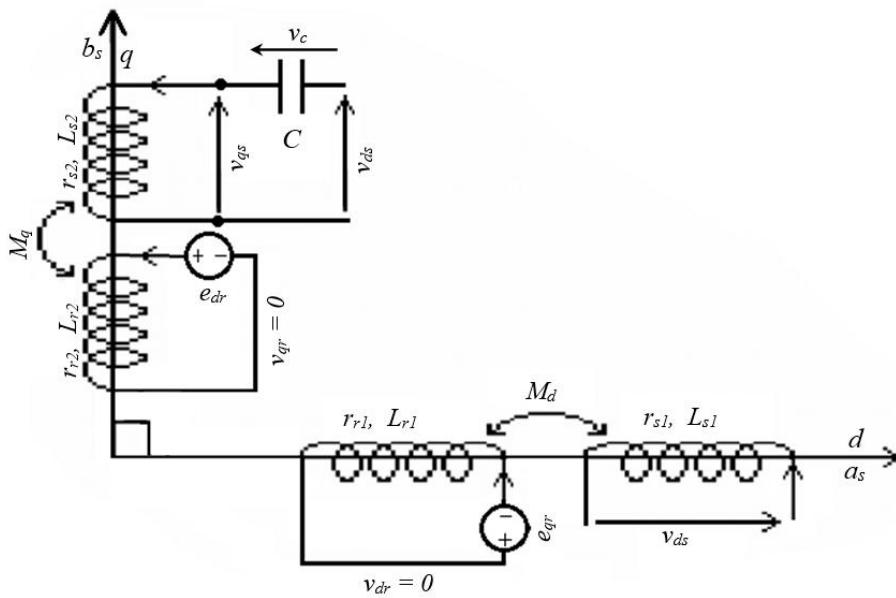


Figure II.1 Représentation schématique de la MAS monophasée à condensateur permanent

Où : r_{s1} ; r_{s2} ; r_{r1} ; r_{r2} : Résistances des enroulements statoriques et rotoriques, respectivement ; L_{s1} ; L_{s2} ; L_{r1} ; L_{r2} : Inductances propres cycliques des enroulements statoriques et rotoriques selon les deux axes d et q , respectivement ;

M_d ; M_q : Inductances mutuelles cycliques stator/rotor, selon les deux axes d et q , respectivement ; $e_{dr} = \omega_r \varphi_{dr}$; $e_{qr} = \omega_r \varphi_{qr}$: FEM de couplage ; v_c : Tension aux bornes du condensateur permanent (C), le rôle de ce dernier est de réaliser un retard de 90° .

II.2.3 Equations électriques du moteur étudié dans le repère de Park relié au stator

Les équations électriques du moteur monophasé à condensateur permanent dans le repère de Park relié au stator sont régies par le système d'équations présenté en (II.1) [18] :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds} = r_{s1} i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = v_{ds} - v_c = r_{s2} i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ v_{dr} = r_{r1} i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + \omega_r \varphi_{qr} \\ v_{qr} = r_{r2} i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \omega_r \varphi_{dr} \end{array} \right. \quad (\text{II.1})$$

Les expressions des flux statoriques et rotoriques sont définies comme indiqué dans l'équation (II.2).

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_{s1}i_{ds} + M_d i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_{s2}i_{qs} + M_q i_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_{r1}i_{dr} + M_d i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_{r2}i_{qr} + M_q i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

D'après les équations (II.1) et (II.2) et le rotor étant en court-circuit ($v_{dr} = v_{qr} = 0$), on obtient l'équation (II.3) en fonction des courants statoriques et les flux rotoriques :

$$\begin{cases} v_{ds} = r_{s1}i_{ds} + \frac{M_d}{L_{r1}} \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + (L_{s1} - \frac{M_d^2}{L_{r1}}) \frac{di_{ds}}{dt} \\ v_{ds} - v_c = r_{s2}i_{qs} + \frac{M_q}{L_{r2}} \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (L_{s2} - \frac{M_q^2}{L_{r2}}) \frac{di_{qs}}{dt} \\ 0 = \frac{r_{r1}}{L_{r1}} \varphi_{dr} - \frac{r_{r1}}{L_{r1}} M_d i_{ds} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + \omega_r \varphi_{qr} \\ 0 = \frac{r_{r2}}{L_{r2}} \varphi_{qr} - \frac{r_{r2}}{L_{r2}} M_q i_{qs} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \omega_r \varphi_{dr} \\ i_{qs} = i_c = C \frac{dv_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

On réécrit le système d'équations (II.3) sous la forme Cauchy :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{(L_{s1} - \frac{M_d^2}{L_{r1}})} (v_{ds} - r_{s1}i_{ds} - \frac{M_d}{L_{r1}} \frac{d\varphi_{dr}}{dt}) \\ \frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{(L_{s2} - \frac{M_q^2}{L_{r2}})} ((v_{ds} - v_c) - r_{s2}i_{qs} - \frac{M_q}{L_{r2}} \frac{d\varphi_{ds}}{dt}) \\ \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = -\frac{r_{r1}}{L_{r1}} \varphi_{dr} + \frac{r_{r1}}{L_{r1}} M_d i_{ds} - \omega_r \varphi_{qr} \\ \frac{d\varphi_{qr}}{dt} = -\frac{r_{r2}}{L_{r2}} \varphi_{qr} + \frac{r_{r2}}{L_{r2}} M_q i_{qs} + \omega_r \varphi_{dr} \\ \frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{C} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

II.2.4 Equations du couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique en fonction des courants statoriques et les flux rotoriques [18], s'écrit comme suit

$$C_{em} = p \left[\frac{M_d}{L_{r1}} \varphi_{qr} i_{ds} - \frac{M_q}{L_{r2}} \varphi_{dr} i_{qs} \right] \quad (\text{II.5})$$

II.2.5 Equations mécanique

L'équation mécanique du moteur s'écrit sous la forme suivante :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - T_r - K_f \Omega_r \quad (\text{II.6})$$

Avec : J : Coefficient du moment d'inertie des masses tournantes de la machine ; T_r : Couple résistant ; K_f : Coefficient de frottement visqueux.

II.3 Etude comparative par simulation du moteur étudié

La première partie de ce travail se concentre sur la simulation d'un démarrage direct d'un moteur asynchrone monophasé à condensateur permanent qui entraîne un ventilateur. À l'aide de Simulink/MATLAB, un schéma bloc a été élaboré, comme illustré dans la Figure II.2, en se basant sur les équations établies précédemment.

Dans la deuxième partie, un autre schéma bloc du moteur étudié a été réalisé en utilisant les différents éléments de la bibliothèque SimPowerSystems/Simulink, comme notre bibliothèque ne dispose pas du moteur à condensateur permanent, nous avons pris celui à double condensateur et nous avons annulé la capacité de démarrage en la mettant nul comme présenté dans la Figure II.4.

À partir de ces deux schémas, une comparaison a été effectuée entre les résultats obtenus. Cette analyse a porté sur les principales grandeurs caractéristiques de la machine, notamment les courants dans les enroulements principal et auxiliaire, le couple électromagnétique, ainsi que la vitesse de rotation.

Les résultats issus des deux modèles se sont révélés identiques (résultats de simulation insérés sur les figures II.3. En conséquence, et afin de simplifier la suite des simulations, il a été choisi de poursuivre l'ensemble des essais à l'aide du modèle fourni par la bibliothèque Simpower système, tout en conservant la validité du modèle théorique développé (voir la figure II.4).

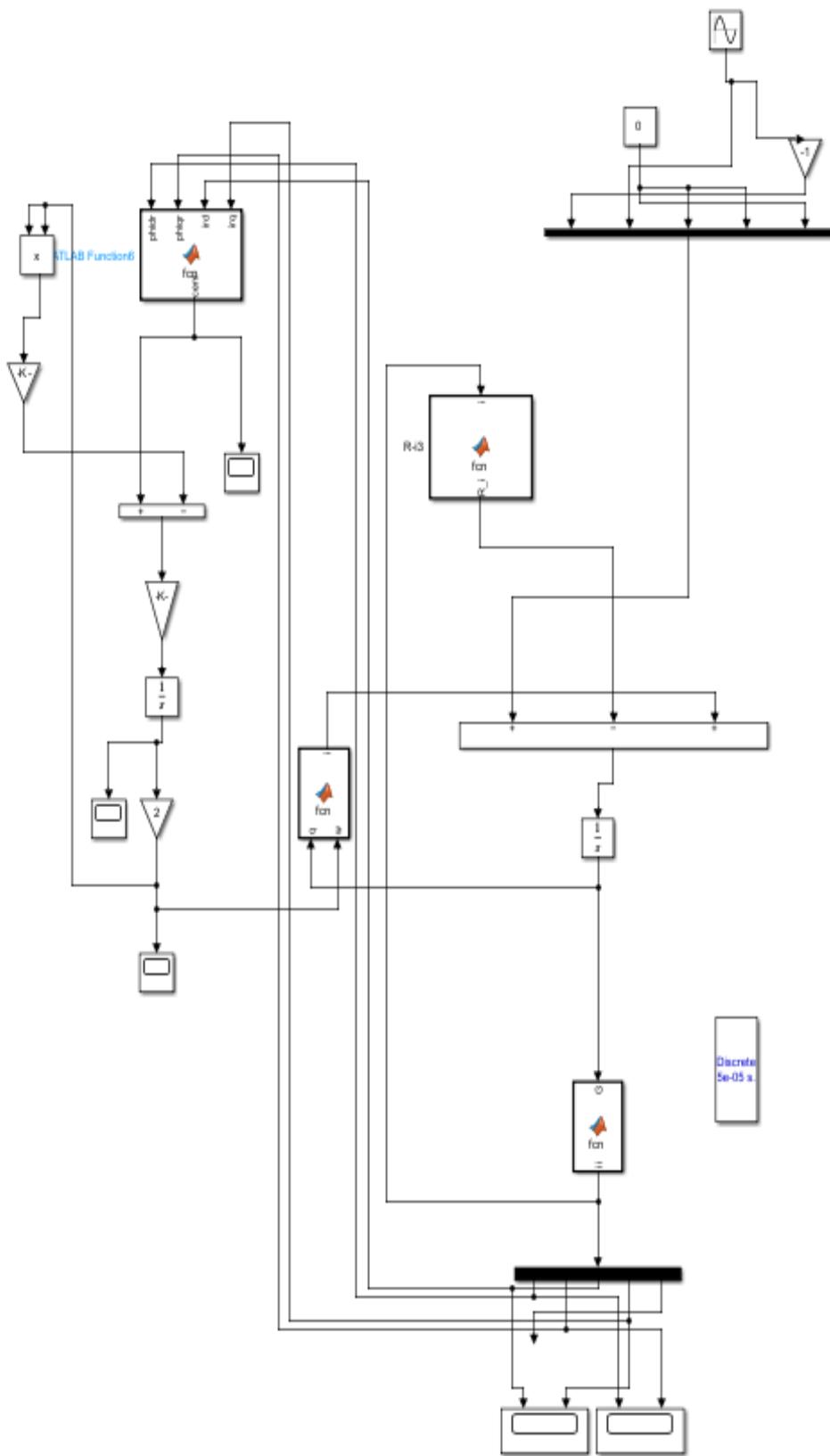
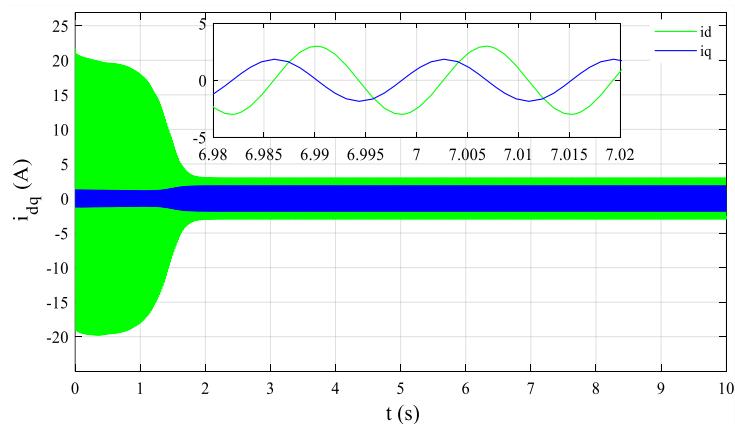


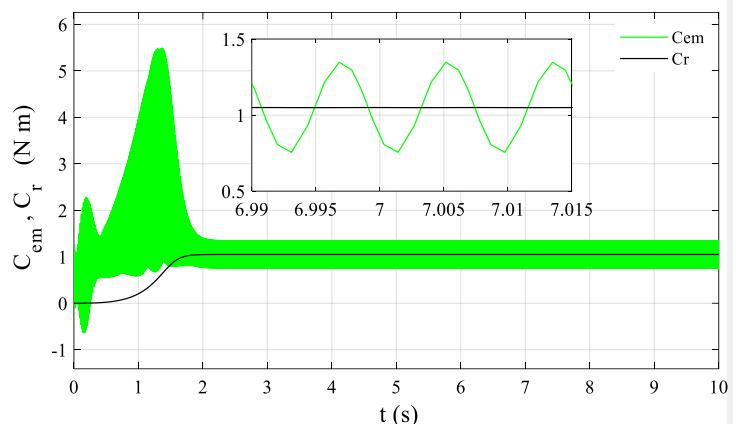
Figure II.2 Schéma bloc pour effectuer un démarrage direct du moteur

a) Résultats des simulations d'un démarrage direct du moteur étudié

(a)



(b)



(c)

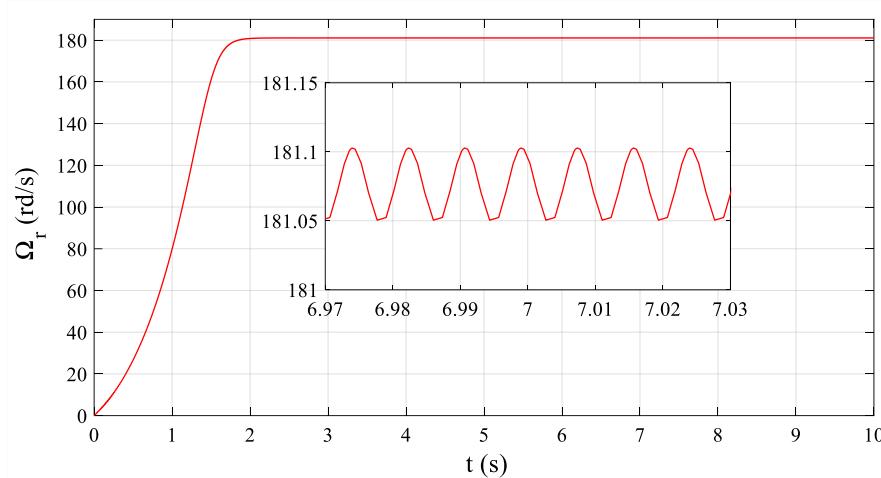


Figure II.3 Allures du courant (a), couple électromagnétique (b) et vitesse de rotation (c) du moteur à condensateur permanent modélisé

b) Explication de la simulation

Dans cette simulation, l'objectif principal était de valider la modélisation mathématique du moteur asynchrone monophasé à condensateur permanent en le comparant à celui disponible dans la bibliothèque Simulink/MATLAB, qui propose un modèle standardisé de ce type de moteur.

D'abord, le schéma bloc a été élaboré sous Simulink à partir des équations dynamiques du moteur à condensateur permanent, en tenant compte de plusieurs paramètres dans : les équations du circuit statorique (bobinage principal et auxiliaire), la rotation de Park et de l'alimentation en tension monophasée. Chaque composant de ces équations a été implémenté sous forme de blocs (gain, somme, intégrateur, etc.) pour reconstituer le comportement dynamique du moteur. En comparant les courbes obtenues pour chaque modèle, j'ai observé que :

- Les formes des courants sont quasiment les mêmes, aussi bien en transitoire qu'en régime permanent.
- Le couple électromagnétique évolue de la même manière dans les deux cas.
- La vitesse de rotation atteint la même valeur finale, avec un profil transitoire similaire.

Cela montre que la modélisation par équations du moteur est correcte et bien implémentée, et que nous pouvons continuer la suite de notre simulation avec celle de la bibliothèque de Simulink/MATLAB

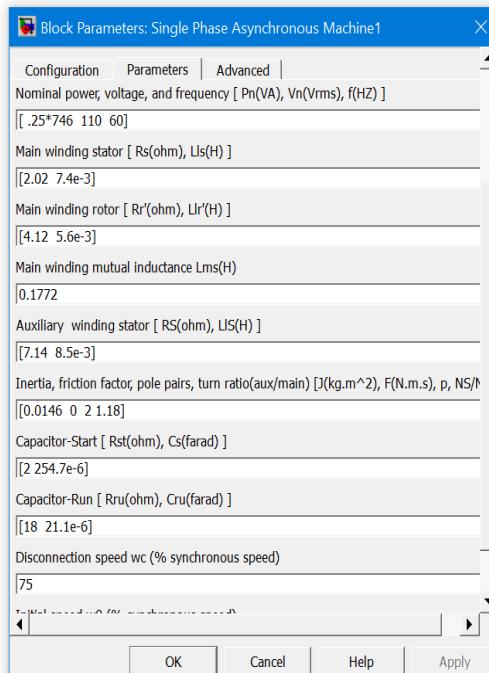
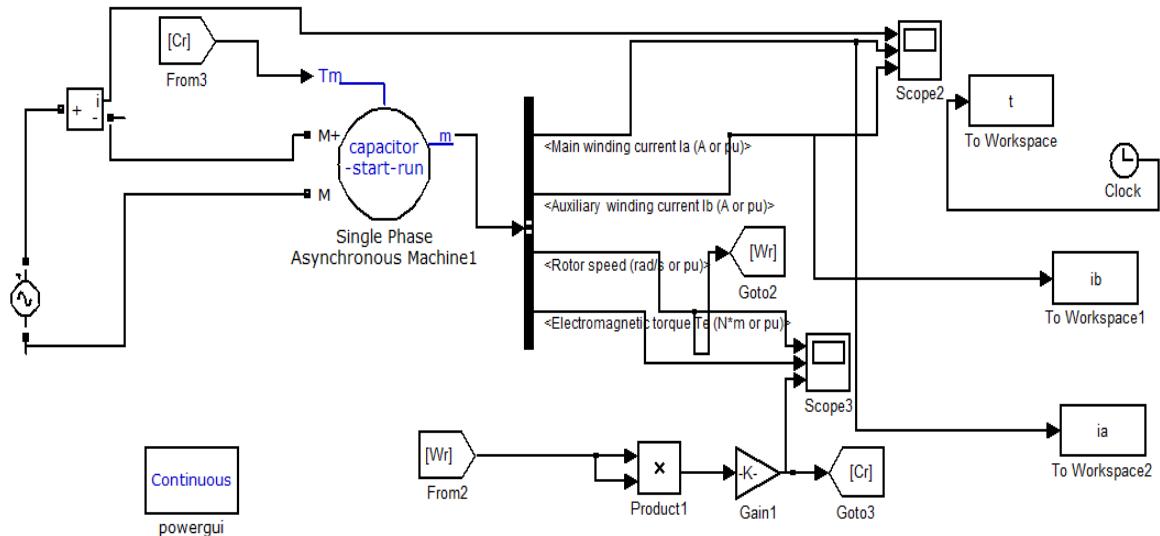


Figure II.4 Modèle équivalent à base du SimPowerSystems /Simulink / MATLAB/ du moteur étudié et ses paramètres

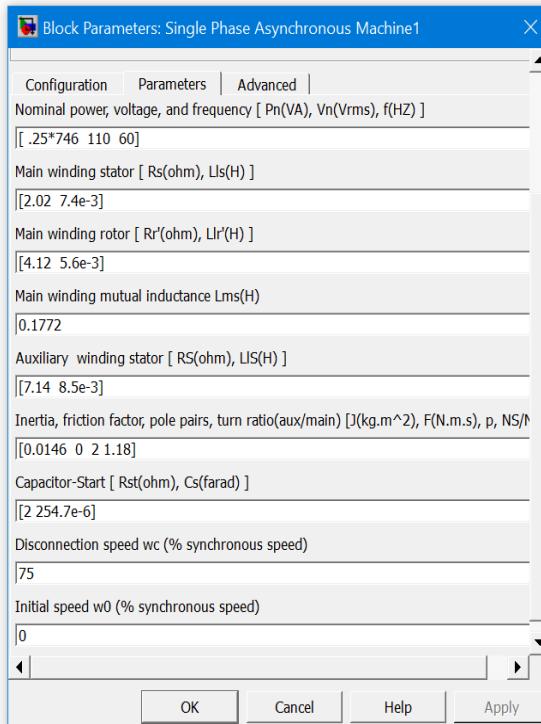
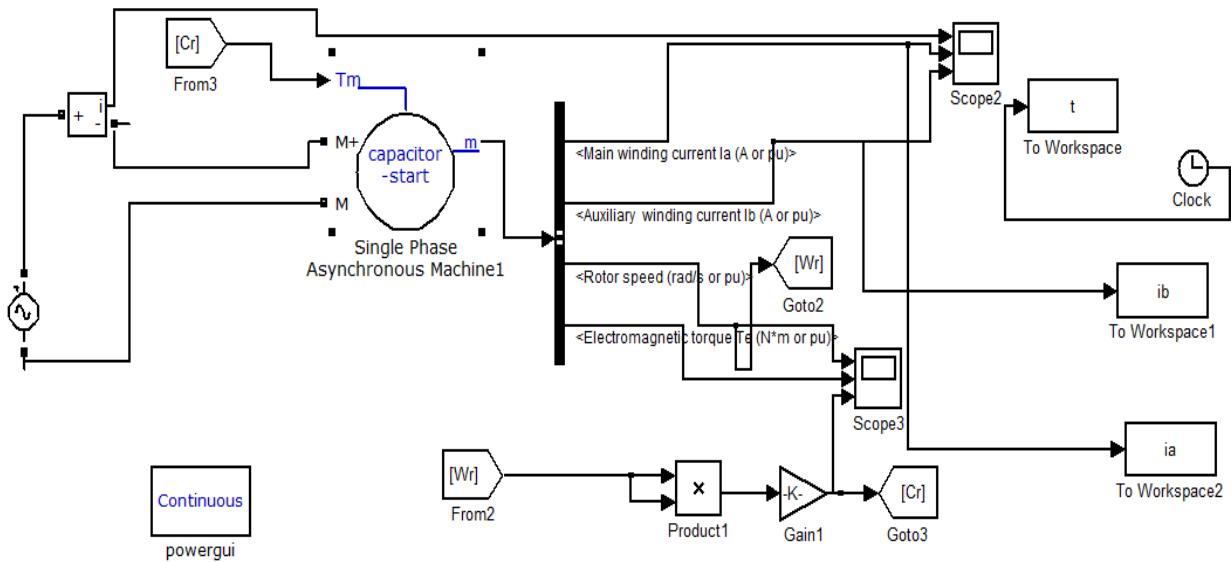


Figure II.5 schémas bloc du moteur à condensateur de démarrage et ses paramètres

II.4 Étude comparative du démarrage direct d'un moteur à induction à condensateur de démarrage et à double condensateur

L'objectif principal de cette simulation est d'analyser et de comparer en détail les performances dynamiques notamment le couple électromagnétique, la vitesse de rotation et les courants statoriques de deux types de moteurs asynchrones monophasés à induction : le moteur équipé d'un double condensateur (figure II.7), celui muni d'un condensateur de démarrage (figure II.6), et enfin, celui doté d'un double condensateur (démarrage et fonctionnement). Cette étude vise à mieux comprendre leur comportement.

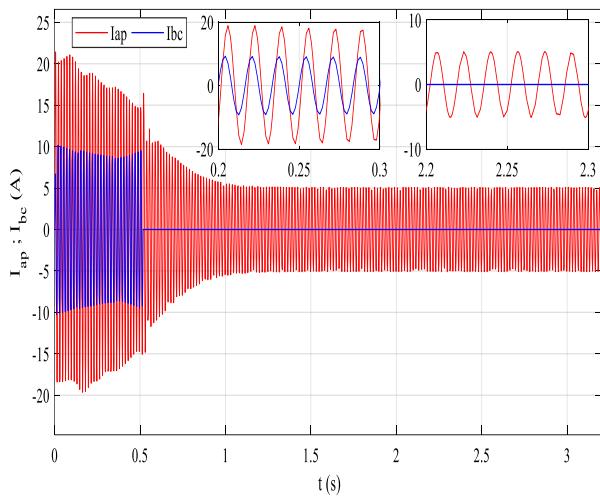


Figure II.6 Allure des courants dans un moteur à condensateur de démarrage

a) Interprétations des courants obtenus

Dans les Figures II.6 et II.7, on observe deux comportements distincts des courants dans un moteur à condensateur de démarrage. Dans le premier cas (Figure II.6), le courant auxiliaire disparaît après 75% de fonctionnement suite à la déconnexion automatique du condensateur de démarrage, ne laissant circuler que le courant principal. En revanche, dans le second cas (Figure II.7), les courants principal et auxiliaire subsistent même en régime établi, ce qui permet de maintenir un champ tournant plus symétrique.

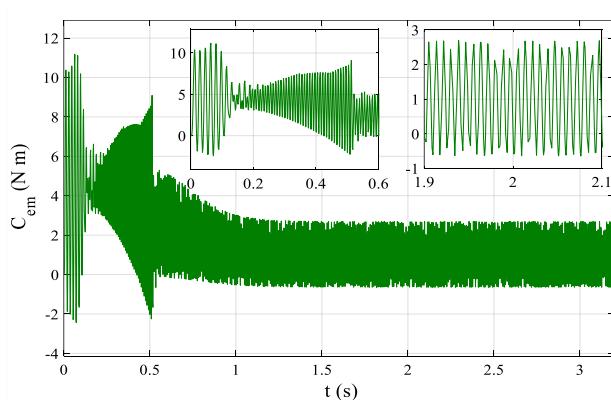


Figure II.8 Allure du couple électromagnétique dans un moteur à condensateur de démarrage

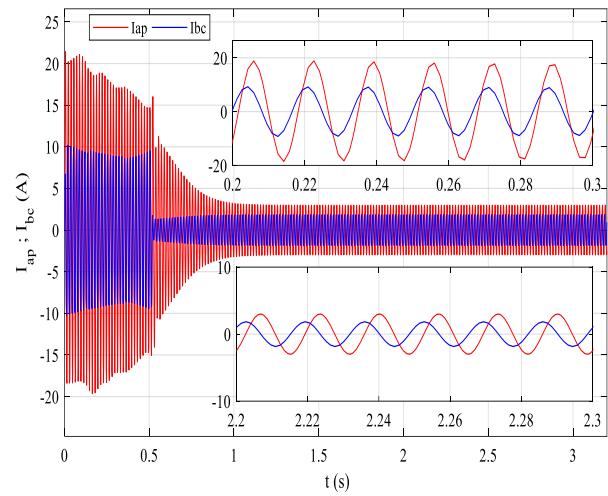


Figure II.7 Allure des courants dans un moteur à deux condensateurs

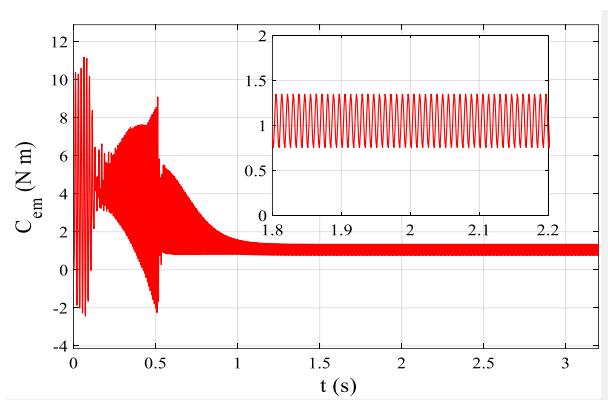


Figure II.9 Allure du couple électromagnétique du moteur à double condensateur

b) Interprétations des allures des couples électromagnétiques

D'après les Figures II.8 et II.9, le moteur à deux condensateurs développe le même couple de démarrage que celui du moteur à condensateur de démarrage, dans le premier cas, après 75% de fonctionnement suite à la déconnexion du condensateur de démarrage Au régime établi (après environ 1 seconde), le couple électromagnétique devient pratiquement constant, avec une valeur moyenne plus élevée que celle du moteur à double condensateur (Figure II.9). Cela signifie que le moteur à condensateur de démarrage fournit, dans ce cas précis, un couple soutenu et plus important une fois la phase transitoire terminée

Calculs des ondulations du couple électromagnétique en régime établie

$$\Delta C_{em} = \frac{C_{em_max} - C_{em_min}}{C_{em_moy}} \cdot 100\% = \frac{2.5 - (-0.5)}{1} \cdot 100\% = 300\% \text{ (Condensateur de démarrage)}$$

$$\Delta C_{em} = \frac{C_{em_max} - C_{em_min}}{C_{em_moy}} \cdot 100\% = \frac{1.38 - 0.7}{1.1} \cdot 100 = 61\% \text{ (Double condensateur)}$$

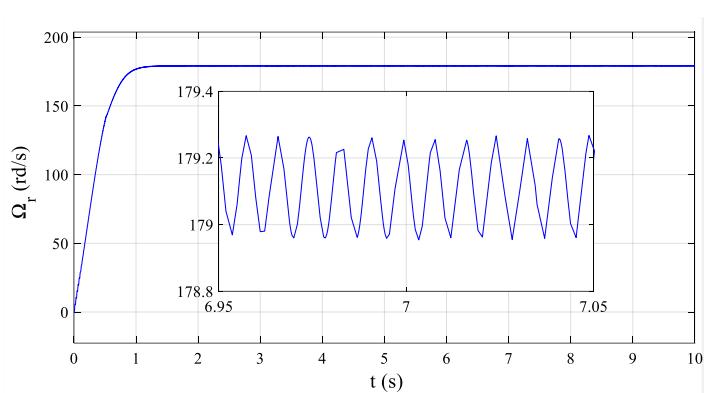


Figure II.10 Vitesse de rotation du moteur à condensateur de démarrage en fonction du temps

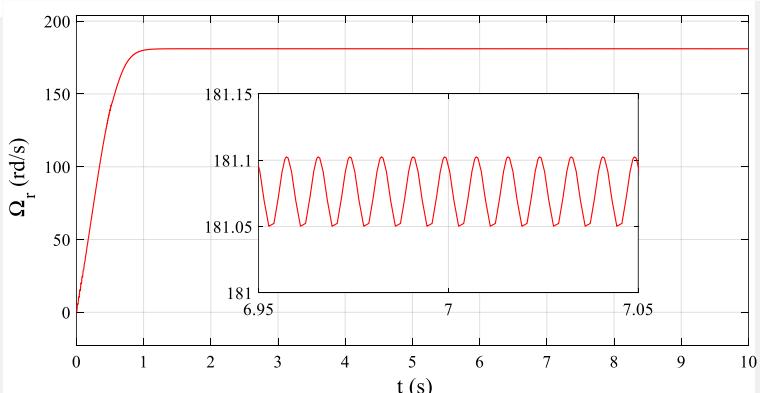


Figure II.11 Vitesse de rotation du moteur à double condensateur

c) Interprétations des allures des vitesses de rotation

Dans les Figures II.10 et II.11, on observe que la vitesse du moteur à double condensateur atteint en même temps sa valeur nominale avec celle du moteur à condensateur de démarrage. La différence se résulte dans le régime permanent, on voit que l'amplitude de la vitesse du moteur à double condensateur est légèrement supérieure à celle du moteur à condensateur de démarrage, on remarquera aussi la présence d'ondulations dans les deux moteurs et calculer sa valeur comme suit :

Calcule des ondulations de la vitesse de rotation

$$\Delta\Omega_r = \frac{\Omega_{r_max} - \Omega_{r_min}}{\Omega_{r_moy}} \cdot 100\% = \frac{179.25 - 178.9}{179.1} \cdot 100\% = 0.19\% \text{(Condensateur de démarrage)}$$

$$\Delta\Omega_r = \frac{\Omega_{r_max} - \Omega_{r_min}}{\Omega_{r_moy}} \cdot 100\% = \frac{181.14 - 181.09}{181.13} \cdot 100\% = 0.027\% \text{(Double condensateur)}$$

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé le moteur asynchrone monophasé à condensateur permanent en utilisant la transformation de Park dans un repère fixé au stator ($\theta = 0$), ce qui simplifie l'analyse dynamique de la machine. Cette approche a permis d'observer les allures des courants dans les enroulements principal et auxiliaire, ainsi que l'évolution de la vitesse de rotation et du couple électromagnétique. La validité du modèle a été confirmée en le comparant à une machine équivalente issue de la bibliothèque Power Sys de Simulink/Matlab. Ensuite, nous avons simulé le fonctionnement de différents types de moteurs asynchrones monophasés, notamment ceux à condensateur de démarrage et à deux condensateurs, en les connectant à une charge de type ventilateur. Les résultats obtenus ont été interprétés et comparés en termes de courants (principal et auxiliaire), de couple électromagnétique et de vitesse de rotation. Cette étude comparative a permis de mieux cerner le comportement dynamique de chaque structure, et de valider la pertinence du modèle utilisé. Le prochain chapitre portera sur la simulation des différents modes de démarrage ainsi que sur la régulation de la vitesse.

CHAPITRE III

*Modélisation, simulation et
analyse du moteur étudié
alimenté par différents
modes de démarrage*

III.1 Introduction

Le démarrage d'un moteur asynchrone monophasé sont des aspects essentiels à prendre en compte, notamment lorsqu'il est associé à une charge de type ventilateur. En effet, les méthodes de démarrage influencent directement le courant absorbé et le couple développé à l'instant initial, tandis que la régulation de vitesse permet d'adapter le fonctionnement du moteur aux besoins réels de la charge, tout en améliorant le rendement du système.

Ce chapitre est consacré à l'étude du comportement dynamique du moteur asynchrone monophasé à condensateur permanent lorsqu'il est associé à différents dispositifs des modes de démarrage. L'objectif est d'évaluer l'influence de ces dispositifs sur les performances globales du système, notamment au démarrage et au régime transitoire.

Pour cela, trois types de démarrage sont considérés : un rhéostat, un gradateur à angle de phase, et un gradateur commandé par modulation de largeur d'impulsion (MLI). Les simulations sont réalisées selon un ordre croissant de performance, allant de la solution la plus simple et la moins efficace (le rhéostat) à la plus avancée (le MLI). Cette approche comparative permet de mettre en évidence les avantages et les limites de chaque méthode, tant du point de vue énergétique que du comportement dynamique de la machine.

III.2 Etude par simulation du moteur étudié alimenté par différent mode de démarrage

III.2.1 Par rhéostat

L'une des méthodes les plus simples et les plus anciennes pour faire varier le courant de démarrage d'un moteur asynchrone monophasé consiste à introduire un rhéostat, en agissant comme une résistance variable, le rhéostat permet de réduire la tension appliquée au moteur, ce qui influence directement le couple développé et, par conséquent, courant de démarrage.

La figure III. 1 montre le schéma bloc du démarrage rhéostatique du moteur étudié connecté à une charge type ventilateur afin d'analyser l'influence de ce dispositif.

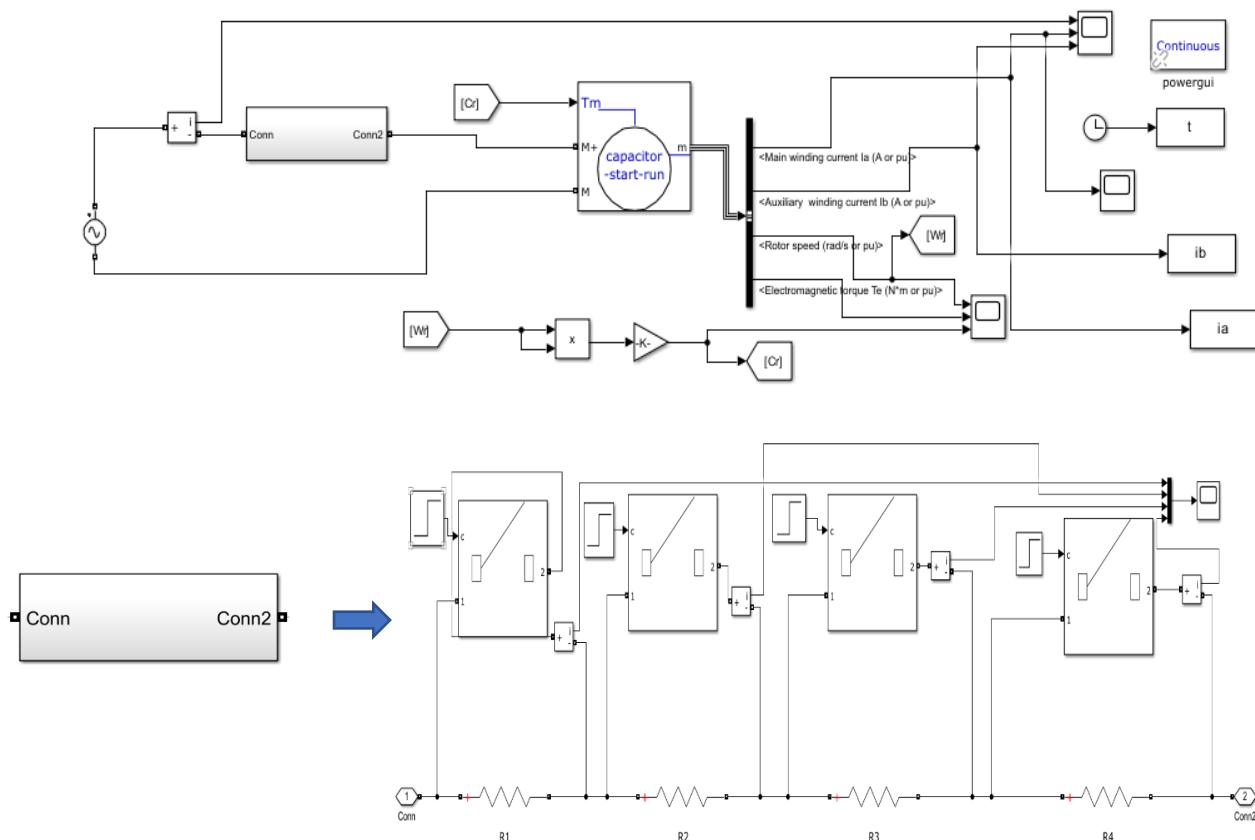


Figure III.1 Schéma bloc de démarrage rhéostatique d'un moteur à condensateur permanent

a) Résultats des simulations

Les résultats présentés ci-dessous illustrent l'ensemble du système de variation de vitesse lors du démarrage du moteur connecté au rhéostat.

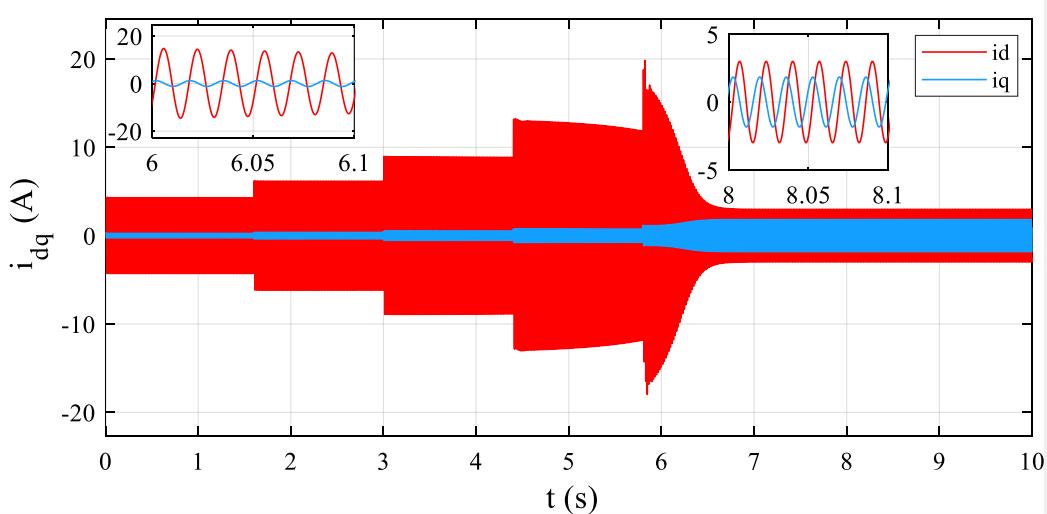


Figure III.2 Courants dans les enroulements principaux (rouge) et auxiliaire (bleu) d'un moteur à condensateur permanent en fonction du temps

b) Interprétations des résultats

Le moteur asynchrone monophasé à condensateur permanent étudié ici est alimenté à travers un rhéostat constitué de quatre résistances montées en série, de valeurs décroissantes $R_1=16.86\text{Ohm} > R_2=11.46\text{Ohm} > R_3=8.21\text{Ohm} > R_4=6.0532\text{Ohm}$, comme illustré dans la Figure III.1. L'évolution du courant présente un comportement caractéristique : au démarrage, la présence de la plus grande résistance limite fortement l'appel du courant (figure III.2), ce qui se traduit par une amplitude réduite.

Ensuite, à mesure que la résistance totale diminue (les résistances étant remplacées par des valeurs plus faibles), l'amplitude du courant augmente progressivement. Cette évolution est directement liée au temps de démarrage : dans les premières secondes, la limitation du courant permet un démarrage progressif. Puis, à mesure que le moteur accélère et que la charge est entraînée, la résistance diminue, ce qui augmente le courant jusqu'à atteindre une valeur quasi stable en régime permanent.

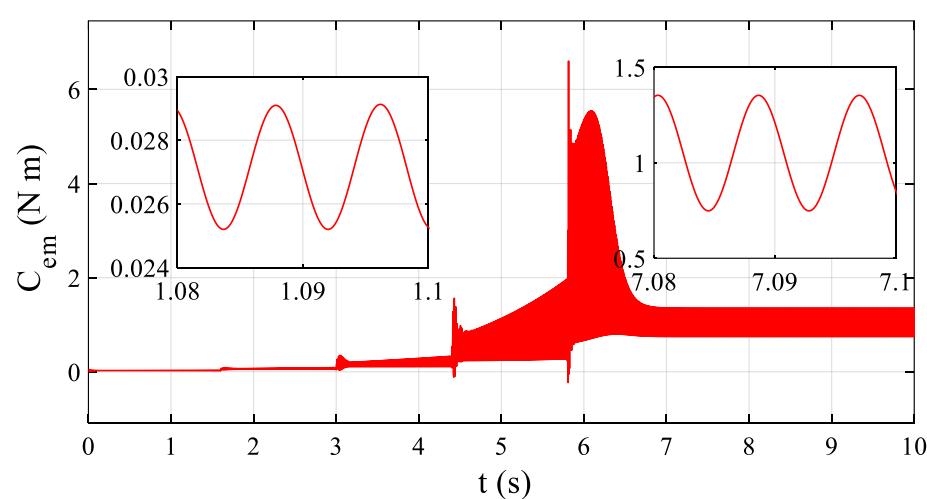


Figure III.3 Allure du couple du moteur à condensateur permanent

La figure III. 3 montre l'évolution du couple électromagnétique produit par le moteur au cours du démarrage. On remarque que le couple initial est relativement faible, ce qui est attendu suite à la chute de tension causer par le rhéostat.

À partir de $t \approx 3$ s, la réduction progressive des résistances en série (via le rhéostat) permet une augmentation de la tension appliquée au moteur, ce qui se traduit par une élévation brutale du couple. Cette phase est accompagnée de fortes ondulations estimées à 61%, ce qui est un déséquilibre électromagnétique transitoire.

à $t \approx 7$ s, le couple tend à se stabiliser, bien qu'il subsiste une ondulation de 69% .

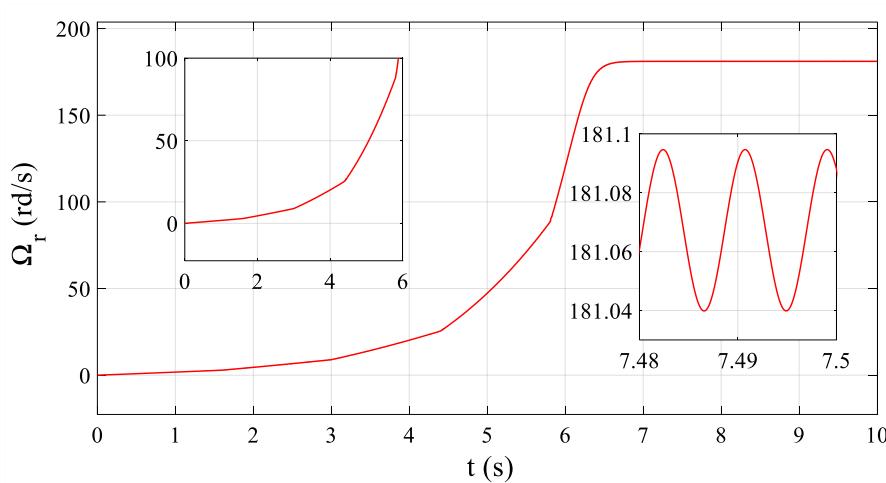


Figure III.4 Allure de la vitesse du moteur à condensateur permanent

La figure III. 4 illustre la variation de la vitesse de rotation du moteur en fonction du temps. On observe une montée progressive de la vitesse dès l'instant de mise sous tension, traduisant une accélération lente, cohérente avec un couple de démarrage réduit dû à l'absence de condensateur de démarrage.

Entre $t = 3$ s et $t = 6$ s, la courbe montre une accélération plus marquée, correspondant à la réduction progressive des résistances séries introduites par le rhéostat. Cette diminution de la résistance améliore le niveau de tension aux bornes du moteur, ce qui permet un apport énergétique plus important, augmentant ainsi la vitesse de manière significative.

Au-delà de $t \approx 7$ s, la vitesse atteint une valeur quasi constante, signe que le moteur entre en régime permanent avec des ondulations estimées à 0.033%.

L'utilisation d'un rhéostat en série avec un moteur à condensateur permanent permet ainsi de faire varier la vitesse par réduction de la tension aux bornes de la machine. Toutefois, cette méthode présente plusieurs inconvénients majeurs. D'une part, elle engendre des pertes importantes sous forme de chaleur dissipée dans les résistances, ce qui dégrade significativement le rendement du système. D'autre part, le contrôle de la vitesse reste peu précis et très sensible aux variations de charge, ce qui peut entraîner des instabilités en régime transitoire, ces limitations justifient le recours à des solutions plus performantes, telles que l'utilisation d'un gradateur, dont l'étude est présentée dans la section suivante.

III.2.2 Commande par gradateur monophasé d'un moteur à condensateur permanent

III.2.2.1 Modélisation d'un gradateur monophasé à thyristor

Le gradateur est un dispositif d'électronique de puissance largement utilisé pour la régulation de puissance dans les systèmes monophasés. Il fonctionne en contrôlant l'angle de conduction des composants semi-conducteurs, généralement des thyristors ou des triacs, afin de moduler la tension efficace appliquée à la charge. Dans le cas où la charge présente une

composante inductive (type RL), le comportement du système devient plus complexe. L'inductance provoque un déphasage entre la tension et le courant, ce qui modifie la forme d'onde du courant et influence directement les conditions d'amorçage et d'extinction des interrupteurs.

Avant de présenter la modélisation détaillée, il convient donc de rappeler ces aspects fondamentaux, car ils ont un impact significatif sur le comportement dynamique du système. La modélisation proposée ci-après permet d'intégrer ces effets et d'analyser précisément le fonctionnement du gradateur dans ce contexte. Sa modélisation se donne comme suite :

Le thyristor T_1 est amorcé à $\omega t = \alpha$ (retard α par rapport à l'instant de sa mise en direct). Lorsque T_1 est passant, le courant et la tension sont reliées par [19] :

$$U = V\sqrt{2}\sin\omega t = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (\text{III.1})$$

Avec $\omega t = \alpha$, $i = 0$

$$i(t) = \frac{V\sqrt{2}}{Z} [-\sin(\alpha - \varphi)e^{-\frac{R}{L}(t-\frac{\alpha}{\omega})} + \sin(\omega t - \varphi)] \quad (\text{III.2})$$

Avec $Z = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$, et $\varphi = \tan^{-1}\frac{L\omega}{R}$

T_1 se bloque lorsque i s'annule : si on note l'instant de blocage t_1 on peut écrire :

$$\sin(\omega t_1 - \varphi) = \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L}(t_1-\frac{\alpha}{\omega})} \quad (\text{III.3})$$

➤ Si $\varphi < \alpha < \pi$:

$\sin(\alpha - \varphi)$ Est positif $\rightarrow \sin(\omega t_1 - \varphi) > 0 \rightarrow \omega t_1 < \pi + \varphi \rightarrow \omega t_1 < \pi + \alpha$

L'intensité dans la charge s'annule qu'une impulsion arrive sur la gâchette du thyristor T_2

à $\omega t = \pi + \alpha$

➤ Si $\alpha < \varphi$:

$\sin(\alpha - \varphi)$ Est négatif $\rightarrow \sin(\omega t_1 - \varphi) < 0 \rightarrow \omega t_1 > \pi + \varphi \rightarrow \omega t_1 > \pi + \alpha$

L'intensité de la charge n'a pas changé de signe lorsqu'une impulsion arrive sur la gâchette de T_2 : le fonctionnement dépend du type d'impulsions délivrées par le déclencheur. Deux cas sont à distinguer :

- Le déclencheur délivre des impulsions de courte durée, le montage fonctionne en redresseur mono-alternance
- Le déclencheur délivre des impulsions de longue durée, le montage se comporte comme un interrupteur fermé.

III.2.2.2 Démarrage progressive du moteur étudié connecté à un gradateur

Dans le but de limiter le courant d'appel et de permettre une montée en vitesse progressive du moteur asynchrone monophasé, une méthode de démarrage progressif a été implémentée à l'aide d'un gradateur de tension figure III.5. Ce dispositif agit sur l'angle de déclenchement des composants semi-conducteurs, permettant une régulation continue de la tension efficace appliquée au stator. Cette variation progressive de la tension constitue une solution simple pour la variation de vitesse dans les applications de faible puissance.

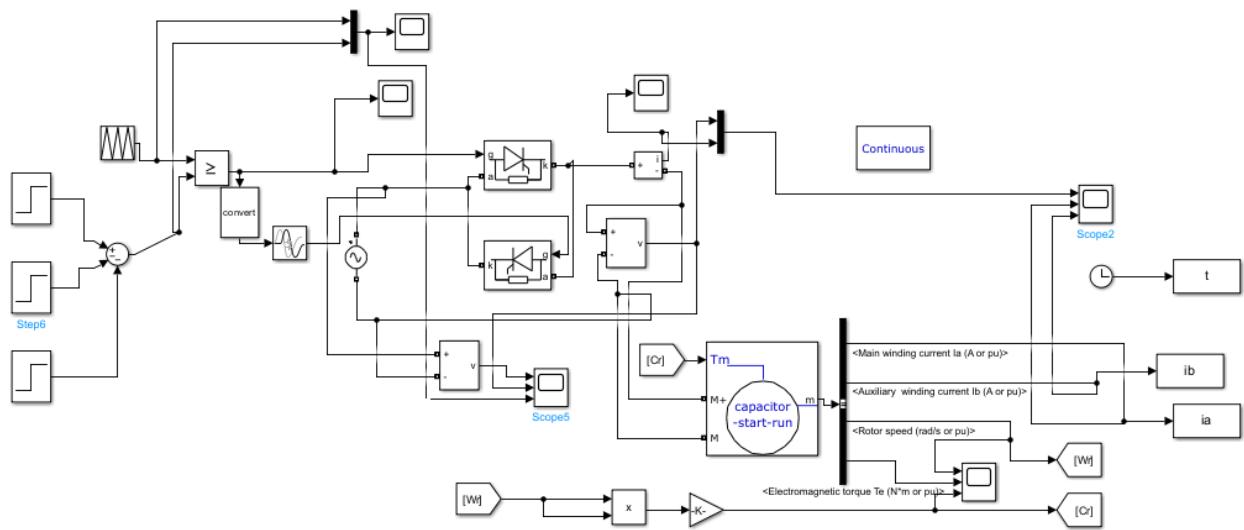


Figure III.5 Schéma bloc du démarrage du moteur étudié alimenté par un gradateur à thyristor monophasé

Dans le schéma de la Figure III.5, le démarrage progressif du moteur est réalisé à l'aide d'un gradateur de tension commandé par des thyristors. La variation de l'angle de déclenchement de ces thyristors est pilotée par un signal issu d'une combinaison de blocs step et d'une séquence périodique (Repeating Sequence).

Les trois blocs step situés à gauche du montage permettent de modifier l'angle de déclenchement à différents instants, afin de reproduire une montée progressive de la tension statorique. Voici leur rôle probable :

- **Step 1** : Applique un premier angle de déclenchement élevé (exemple 135° dans notre cas) au démarrage, ce qui limite fortement la tension efficace appliquée au moteur. Cela permet de réduire l'appel de courant et de démarrer le moteur en douceur.
- **Step 2** : l'angle de déclenchement est diminué (exemple à 90°), ce qui augmente la tension appliquée au moteur. Le couple commence à croître, entraînant une accélération du moteur.
- **Step 3** : l'angle de déclenchement est encore diminué (par exemple vers 90° ou moins), ce qui permet d'atteindre une tension proche de la pleine valeur. Le moteur atteint alors son régime permanent, avec une vitesse de rotation stabilisée.

a) Résultats des simulations

Les résultats présentés sur la figure III.6 illustrent l'ensemble du système de variation de vitesse lors du démarrage progressif du moteur connecté à un gradateur.

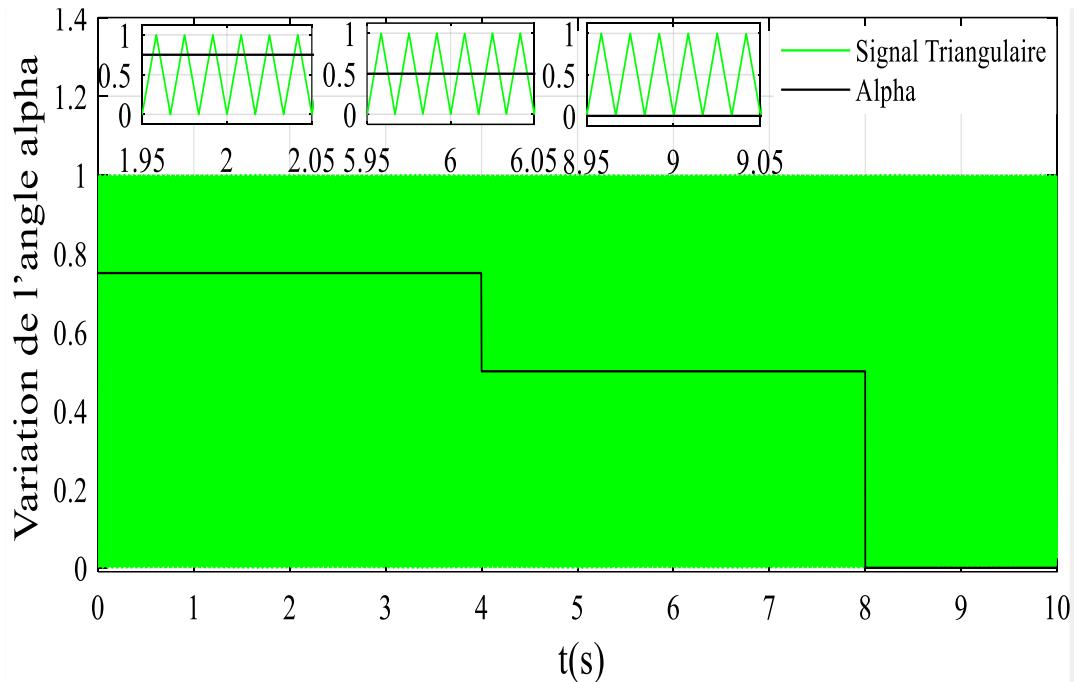


Figure III. 6 Variations de l'angle alpha en fonction de temps

b) Interprétations des résultats

La figure III.6 illustre la variation de l'angle de déclenchement α (alpha) dans le cadre de la commande d'un gradateur de tension utilisé pour contrôler un moteur à variation de vitesse.

Deux types de signaux y sont représentés : Le signal vert correspond à une porteuse triangulaire, utilisée dans la génération des impulsions de commande, le signal noir indique la valeur de l'angle alpha, c'est-à-dire l'instant de déclenchement de la conduction dans chaque période du signal sinusoïdal. Cet angle détermine la durée de conduction des thyristors de puissance.

L'évolution de l'angle alpha se fait en trois étapes : De 0 à 4 secondes, alpha est égal à 1, ce qui correspond à une conduction très tardive. Entre 4 et 8 secondes, alpha diminue à environ 0,6, ce qui allonge la durée de conduction. Cela se traduit par une augmentation de la tension moyenne et une hausse de la vitesse. À partir de 8 secondes, alpha atteint 0,3, ce qui déclenche la conduction encore plus tôt. La tension moyenne devient plus élevée, permettant au moteur de tourner à une vitesse plus importante.

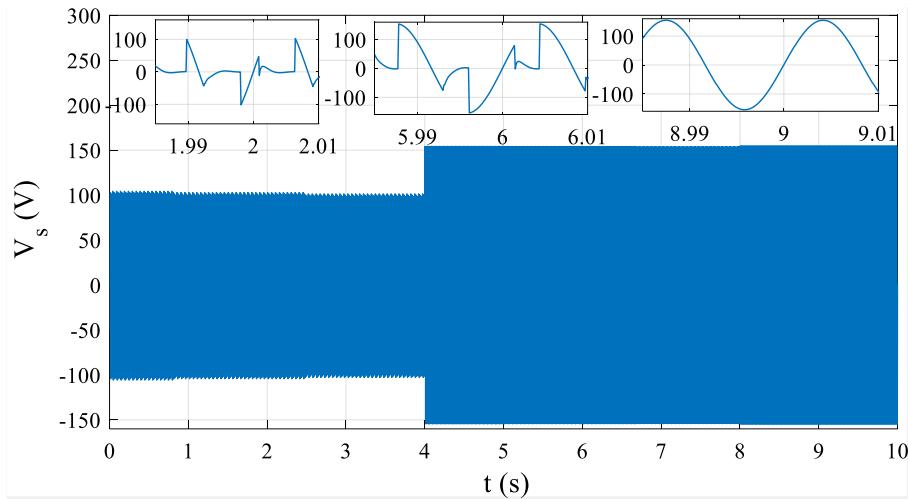


Figure III.7 Allure de la tension d'alimentation pendant le démarrage progressif

La figure III.7 illustre l'évolution de la tension V_s appliquée au moteur à condensateur permanent à l'aide d'un gradateur monophasé piloté par modulation d'angle de déclenchement. La tension varie selon les différentes valeurs de l'angle des thyristors, imposées par les blocs step du schéma de la Figure III.5.

Dans la première phase de 0 à 4s : La tension présente une forme très hachée et fortement réduite, ce qui reflète un angle de déclenchement élevé. La tension efficace appliquée au moteur est donc faible, ce qui permet de limiter l'appel de courant et d'assurer un démarrage en douceur.

Ensuite dans la seconde phase de 4 à 8s : On observe une augmentation de la largeur des alternances de la tension. Cela correspond à une réduction de l'angle de déclenchement, ce qui augmente la tension efficace fournie au moteur. Le couple électromagnétique disponible devient plus important, ce qui permet l'accélération du moteur.

Dans la dernière phase de ($t \geq 8$ s) : La tension devient quasi sinusoïdale, ce qui indique que les thyristors sont déclenchés très tôt dans chaque demi-alternance. Le moteur reçoit alors la tension secteur, et atteint son régime permanent.

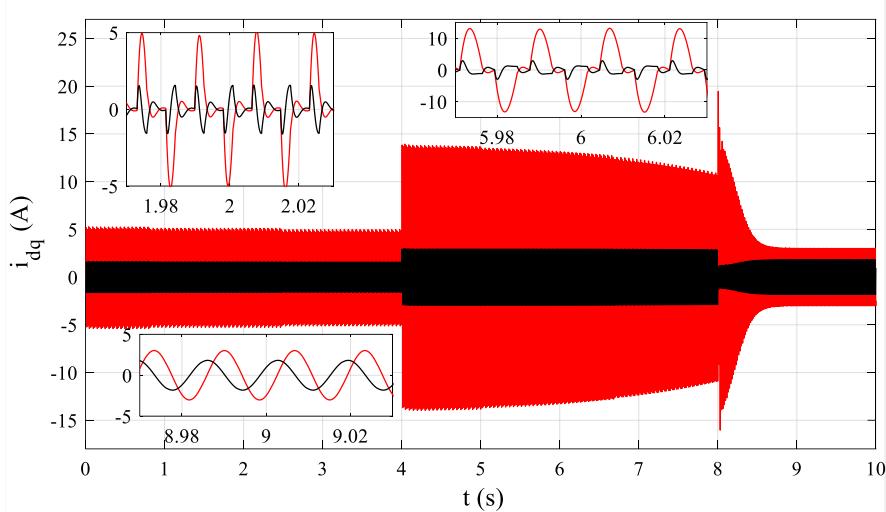


Figure III.8 Allures des différents courants du moteur au cours du démarrage progressif

La figure III.8 montre l'évolution des courants absorbés par les enroulements principal et auxiliaire du moteur, en lien direct avec la variation de la tension appliquée (Figure III.7). Les courants augmentent progressivement en amplitude selon les trois paliers de tension, traduisant un démarrage en douceur. En régime permanent ($t \geq 6$ s), ils tendent vers une forme quasi sinusoïdale, avec une stabilisation des valeurs. Le courant auxiliaire reste présent, conformément au fonctionnement d'un moteur à condensateur permanent.

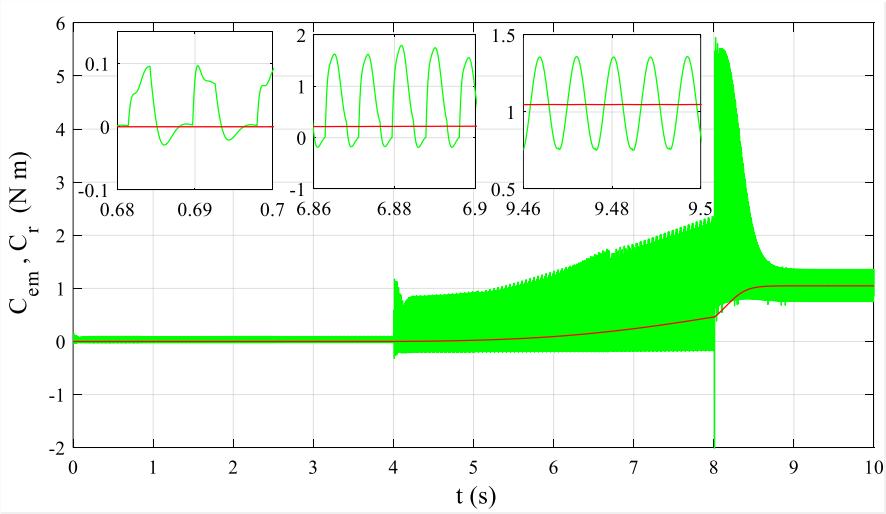


Figure III.9 Allures des couples résistant, électromagnétique en fonction de temps

La figure III.9 montre au démarrage que le couple électromagnétique est légèrement supérieur au couple résistant, ce qui explique la faible accélération initiale. À partir de $t \approx 3$ s, la tension augmente, permettant au couple électromagnétique de croître progressivement. Lorsque ce dernier est fortement supérieur au couple résistant, le moteur accélère plus rapidement, mais avec des ondulations estimées à 172 %.

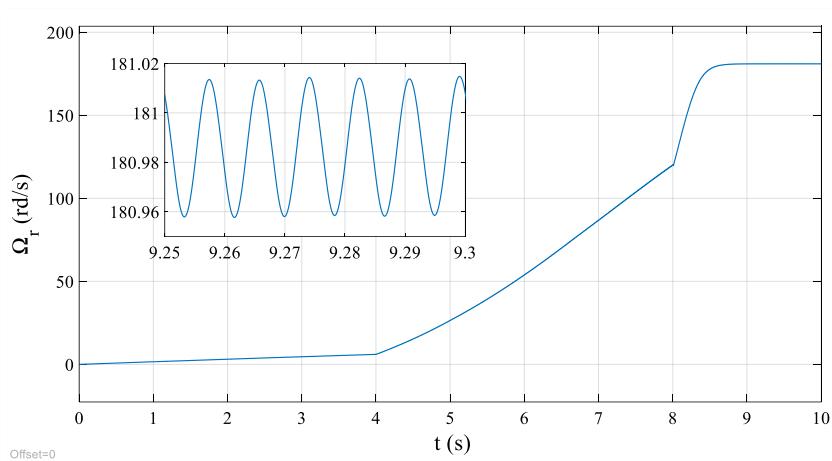


Figure III.10 Allure de vitesse du moteur en démarrage progressif

La figure III.10 illustre la variation de la vitesse de rotation du moteur au cours du démarrage, lié à la tension progressivement appliquée par le gradateur de tension.

Durant les premières secondes ($0 \text{ s} \leq t < 3 \text{ s}$), la vitesse augmente très lentement. Cela s'explique par la faible tension efficace appliquée, due à un angle de déclenchement élevé, ce qui limite le couple électromagnétique développé, insuffisant pour provoquer une accélération rapide.

À partir de $t \approx 3 \text{ s}$, la réduction de l'angle de tir du gradateur augmente la tension statorique. Le couple moteur devient alors supérieur au couple résistant de la charge (ventilateur), ce qui déclenche une phase d'accélération plus marquée de la vitesse.

À $t \approx 6 \text{ s}$, la tension appliquée devient pratiquement sinusoïdale, et le moteur atteint son régime permanent. La vitesse de rotation se stabilise autour d'une valeur constante avec les ondulations estimées à 0.03%, indiquant que l'équilibre dynamique est atteint entre le couple électromagnétique produit et le couple résistant de la charge. Cette stabilisation confirme le bon fonctionnement du démarrage progressif, sans surtension ni à-coup mécanique. Ses ondulations sont estimées à 0.033 %.

III.2.3 Commande par gradateur monophasé MLI d'un moteur à condensateur permanent

Le gradateur monophasé commandé par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) est un convertisseur statique permettant de contrôler la tension moyenne appliquée à une charge, en modulant la durée des impulsions. Il offre un meilleur rendement, un contrôle plus précis de la puissance et une réduction des pertes par rapport aux gradateurs classiques à angle de phase.

III.2.3.1 Modélisation de la commande MLI

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) est une technique de commande qui consiste à faire varier la durée des impulsions d'un signal pour contrôler la puissance fournie à une charge.

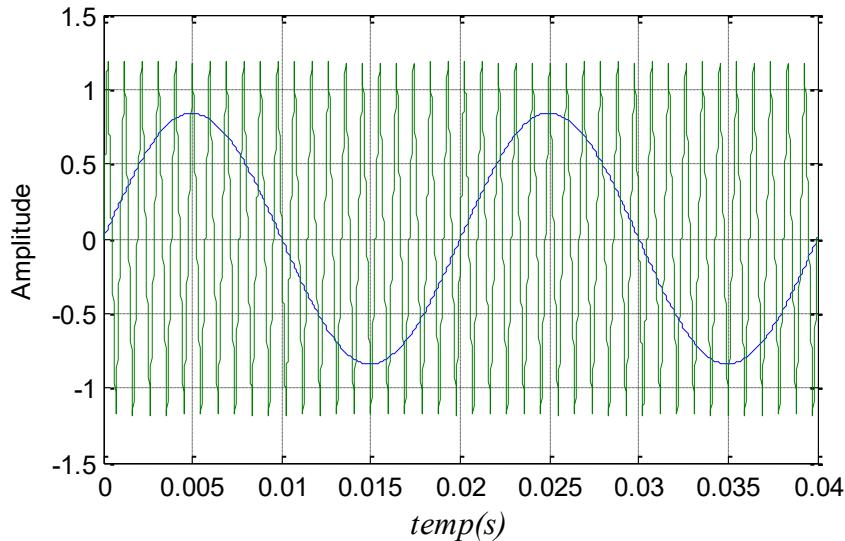


Figure III. 11 Principes de la modulation

III.2.3.2 Caractéristique de la modulation de largeur d'impulsion

Les paramètres essentiels de la MLI sont :

- La fréquence de modulation : f_p
- L'indice de modulation : $m = \frac{f_p}{f_r}$ où f_r est la fréquence de la référence
- Le coefficient de réglage en tension : $r = \frac{A_r}{A_p}$

Avec : A_r et A_p : Amplitudes de la référence et de la porteuse, respectivement.

III.2.3.3 Schéma bloc d'un gradateur MLI relié au moteur

Le schéma bloc schématisé sur la figure III.12 représente le démarrage du moteur étudié alimenté par un gradateur à MLI dans l'environnement PowerSys/Simulink /MATLAB.

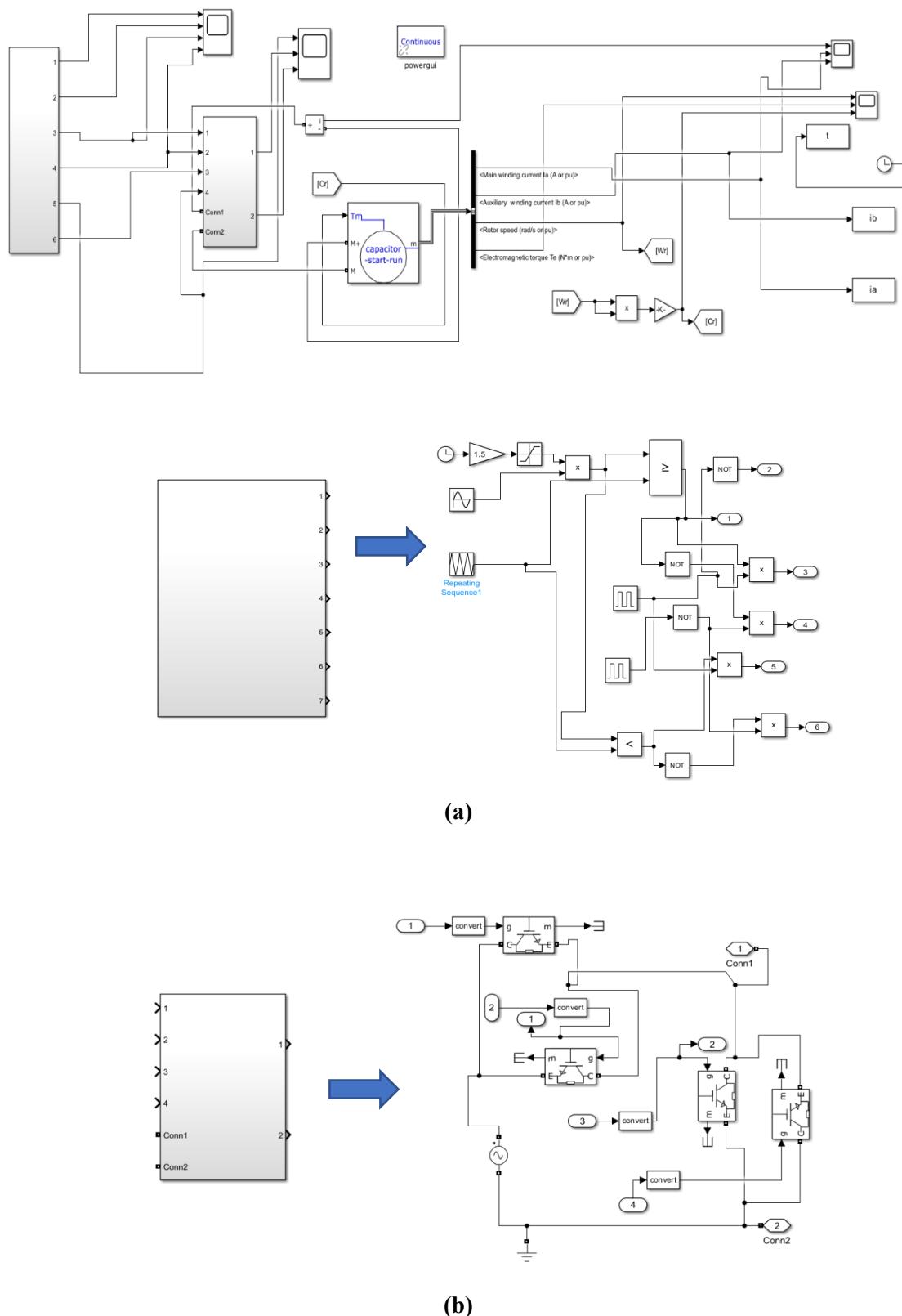


Figure III.12 Schéma bloc du moteur alimenté par un gradateur MLI

a) *Résultats des simulations*

Cela implique l'étude du comportement de la machine asynchrone monophasée lorsqu'elle est alimentée par un gradateur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) dans l'environnement Simulink.

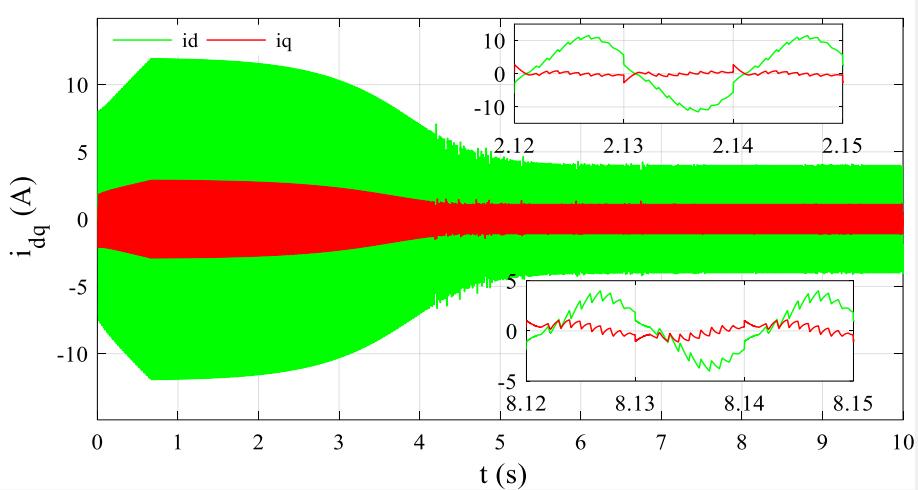


Figure III.13 Allure du courant du moteur à gradateur commandé en MLI

b) *Interprétations des résultats*

On remarque au démarrage la présence des courants principal et auxiliaire comme illustré dans la Figure III.13. Comparé au démarrage direct, le courant de démarrage est nettement réduit grâce au gradateur commandé en MLI, passe de 20A à 12A. Les signaux pulsés de la MLI provoquent des oscillations au début, puis les courants se stabilisent en amplitude après environ quatre secondes, indiquant l'entrée en régime établi.

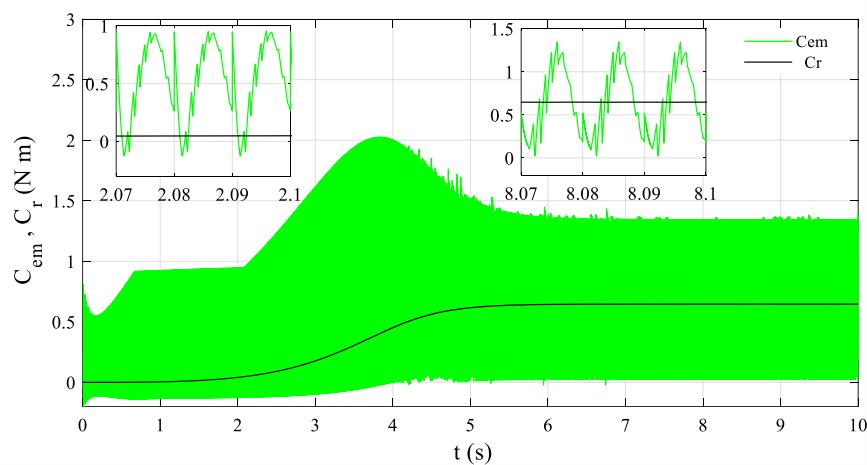


Figure III.14 Allures des couples électromagnétique et résistant du moteur à gradateur commandé en MLI

Le couple augmente progressivement comme illustré dans la Figure III.14, car notre gradateur applique une tension croissante, ce qui permet un démarrage progressif du moteur jusqu'à se stabiliser aux alentours des cinq seconde avec les ondulations estimées à 172 %.

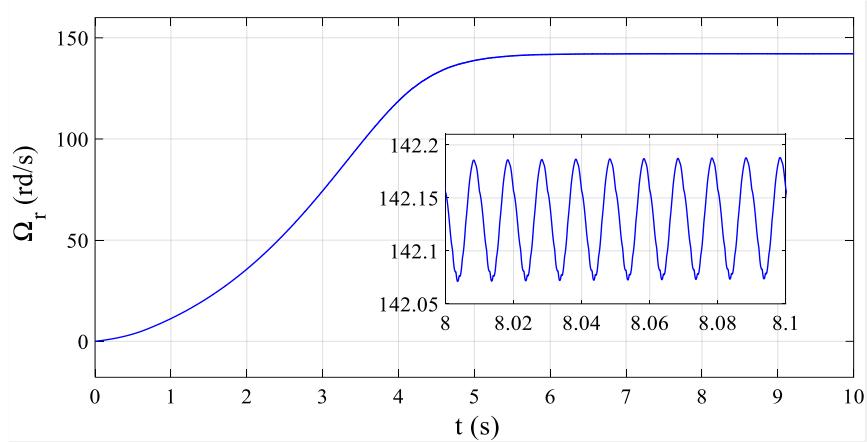


Figure III.15 Allure de la vitesse du moteur à gradateur commandé en MLI

Dans un autre coté on a une vitesse au démarrage qui monte progressivement comme illustré dans la Figure III.15, qui à un profil typique d'un régime d'accélération avec une commande de type rampe, La vitesse suit l'évolution du couple et se stabilise dès la cinquième seconde de fonctionnement, avec des ondulations estimées à 0.07 %.

La commande MLI représente une solution nettement plus performante pour la variation de vitesse du moteur asynchrone à condensateur permanent. En générant une tension moyenne équivalente à l'aide d'une série d'impulsions à haute fréquence, cette méthode permet de reconstituer une forme de tension plus proche d'une sinusoïde, réduisant ainsi la distorsion harmonique

Par rapport à un gradateur classique. Grâce à cette qualité de commande, le moteur bénéficie d'un meilleur maintien du couple, même à basse vitesse, et la régulation de la vitesse devient plus précise, plus stable et plus dynamique, quel que soit le régime de fonctionnement.

III.3 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié et comparé plusieurs méthodes de démarrage d'une machine asynchrone à condensateur permanent, en nous appuyant sur des simulations précises et des analyses techniques rigoureuses.

Dans un premier temps, la machine a été connectée à un rhéostat de démarrage. Cette méthode agit en insérant des résistances en série avec le moteur, ce qui provoque une chute de tension aux bornes du rhéostat. Par conséquent, la tension réellement appliquée au moteur est réduite, avec un temps de démarrage allongé mais une limitation du courant d'appel au démarrage. Toutefois, cette technique engendre des pertes d'énergie importantes sous forme de chaleur, et la gestion de la vitesse reste peu efficace, notamment en régime permanent.

Ensuite, un gradateur a été mis en œuvre pour assurer un démarrage progressif. Son principe repose sur la variation de l'angle d'amorçage, permettant de moduler la tension appliquée au moteur. Cette approche améliore la gestion de l'énergie au démarrage et offre une accélération plus progressive que celle obtenue avec le rhéostat.

Nous avons également analysé un gradateur commandé en modulation de largeur d'impulsion (MLI). Cette technique permet une meilleure qualité de la tension appliquée, avec des formes d'onde plus proches d'un signal sinusoïdal. Les résultats de simulation ont mis en évidence une nette amélioration du comportement dynamique du moteur, avec une meilleure maîtrise de la mise en régime et une réduction significative des perturbations électriques.

Enfin, nous avons étudié un démarrage progressif basé sur la variation de l'angle α , appliqué directement au moteur. Cette solution assure une montée en régime lente, régulière et sans à-coups, contribuant à préserver à la fois le moteur et la charge entraînée. La commande par angle α offre une souplesse appréciable, avec une réponse fluide, comme en témoignent les courbes de vitesse et de tension.

Au terme de cette étude comparative, il apparaît clairement que les méthodes fondées sur l'électronique de puissance, telles que le gradateur et la commande MLI, sont nettement plus performantes que l'utilisation d'un rhéostat classique. Elles permettent une meilleure gestion de la tension appliquée au moteur, tout en réduisant considérablement les pertes énergétiques. Parmi ces techniques, la commande MLI et le démarrage progressif par variation de l'angle α se distinguent par leurs performances, leur stabilité et leur capacité à protéger efficacement le moteur.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

À l'issue de ce travail, plusieurs points importants ont pu être mis en évidence concernant le comportement des moteurs asynchrones monophasés. Tout d'abord, la modélisation du moteur à condensateur permanent a démontré sa capacité à représenter fidèlement le fonctionnement réel de la machine, notamment grâce à l'utilisation de la transformation de Park et à sa validation par simulation sur PowerSys/Simulink/MATLAB. Cette modélisation s'est révélée fiable, tant sur les plans électrique que mécanique, ce qui en fait un outil pertinent pour l'analyse dynamique.

L'analyse des différents modes de démarrage a permis de classer ces dispositifs selon leurs performances lorsqu'ils sont associés au moteur étudié. Le rhéostat et le gradateur à angle de phase, bien que simples à mettre en œuvre, présentent des limites en termes de rendement énergétique et de génération d'harmoniques. À l'inverse, la commande par MLI offre une réponse dynamique plus précise.

De plus, l'utilisation de ces modes de démarrage a permis de limiter efficacement le courant d'appel au démarrage, mais cela s'accompagne d'une augmentation du temps nécessaire pour atteindre le régime permanent.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. Dumas, « Théorie des machines électriques – Tome 1 : Généralités et machines à courant alternatif », Dunod, 1983.
- [2] R. Abdessemed « modélisation et simulation des machine électriques » Ellipses edition markenting S. A 2011.
- [3] Aouzellag.D. Cours Moteur monophasé à Cage d'Ecureuil, Université de Bejaïa,
- [4] LIVRE M. KOSTENKO ET L. PIOTROVSKI « MACHINES ELECTRIQUES (Tome II) » Traduit Mir moscou, 1979.
- [5] A. Glavieux, « Machines électriques – Fondements et modélisation » Éditions Technip, 2001.
- [6] B. Multon « Machines électriques » Hermès Science, 2003.
- [7] SAOULI YOUSSEF « ETUDE ET SIMULATION D'UN MOTEUR ASYNCHRONE » Université BADJI MOKHTAR Annaba 1.
- [8] A. Bendaoud « Machines électriques pour débutants » Cépaduès, 2013.
- [9] H. Buret « Machines électriques tournantes – Cours et problèmes » Dunod, 2011.
- [10] D. Aouzellag « Cours Moteur monophasé » universel, Université de Bejaïa
- [11] H. Razik et M. Kourti « Machines électriques – Transformateurs, Machines à courant continu et à courant alternatif » Ellipses, 2015.
- [12] Cahier Technique Schneider Electric n° 208 Daniel CLENET
- [13] METATIDJ Mohamed « Etude et réalisation d'un variateur de vitesse d'un Moteur Asynchrone Monophasé » Université Djilali Bounaama KHEMIS MILIANA
- [14] H. Razik « Commande des machines électriques » Dunod, 2017.
- [15] J.-P. Hautier « Machines électriques et électronique de puissance » Lavoisier, 2010.
- [16] G. Séguier, « Électronique de puissance – Convertisseurs statiques », Dunod, 2005.
- [17] MathWorks, Inc. "MATLAB and SIMULINK, (R2015b)", [computer program]
Available at: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> [Accessed: 30 June 2024]
- [18] AMAMRA.Sid-ali_ZAATRI.Karim « commande d'une machine asynchrone par retour d'état et par réseaux de neurones »
- [19] Z. Boudries « cours d'électronique de puissance » Université de Bejaïa

(Résumé en Français)

Ce mémoire porte sur l'étude par modélisation et simulation des différents modes de démarrage d'un moteur asynchrone monophasé à condensateur permanent. Il présente une comparaison entre plusieurs méthodes de démarrage, notamment l'utilisation d'un rhéostat, d'un gradateur à angle de phase et d'un gradateur commandé en modulation de largeur d'impulsion (MLI). L'approche adoptée combine la modélisation mathématique basée sur la transformation de Park et des simulations sous Simulink/MATLAB. Les résultats obtenus permettent de comparer les performances dynamiques (couple, vitesse, courant) et d'identifier la solution la plus efficace selon les contraintes d'application.

(Abstract in English)

This thesis focuses on the modeling and simulation of various starting methods for a single-phase induction motor with a permanent capacitor. It provides a comparative analysis of several starting techniques, including the use of a rheostat, a phase-angle dimmer, and a PWM-controlled dimmer. The adopted approach combines mathematical modeling based on Park transformation and simulations using Simulink/MATLAB. The results allow for the comparison of dynamic performance (torque, speed, current) and help identify the most suitable solution depending on application constraints.

(الملخص بالعربية)

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة طرق تشغيل محرك حتى أحادي الطور مزود بمكثف دائم عن طريق النمذجة والمحاكاة. تتضمن الدراسة مقارنة بين عدة طرق تشغيل مثل استخدام الريوستات، والمخفض الزاوي، والمخفض الذي يعمل وفق تقنية تعديل عرض النبضة

(MLI).

تم اعتماد نمذجة رياضية تعتمد على تحويل بارك بالإضافة إلى المحاكاة باستخدام برنامج Simulink/MATLAB.

تسمح النتائج المستخلصة بمقارنة الأداء الديناميكي (العزم، السرعة، التيار) وتحديد الطريقة الأنسب حسب متطلبات التطبيق