



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électrotechnique
Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Réf. :

Présenté et soutenu par :

NAIBA Saad

SBAI Mohamed Abdelmohaimene

Le :

Modélisation de la machine asynchrone monophasé en vue de sa commande

Jury :

Pr :	SRAIRI Kamel	Professeur	Université de Biskra	Président
Pr :	GHAMRI Ahmed	Professeur	Université de Biskra	Rapporteur
Pr :	BENCHOUIA Mohamed Toufik	Professeur	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2024/2025



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électrotechnique
Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Réf. :

Modélisation de la machine asynchrone monophasé en vue de sa commande

Le :

Présenté par :

NAIBA Saad

SBAI Mohamed Abdelmohaimene

Avis favorable de l'encadreur :

Pr. GHAMRI Ahmed

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signatu

إهداء:

إلى من سهر الليالي من أجلي..
إلى والديّ الحبيين، أساس نجاحي وعماد وجودي،
لكما كل الحب والعرفان، فأنتما سبب كل فرحة في حياتي.

إلى إخوتي وأصدقائي الذين كانوا عوناً وسنداً،
شاركوني لحظات الضعف وقسموا معي لحظات الفرح،
لكم مني كل التقدير والمحبة.

وخاصةً إلى إخوة الروح:

- حَيَّجُول صلاح الدين

- مَعَاش سعد الدين

- جُوبَر بلخير

رفاق العمر الذين جعلوا من التعب راحة،

ومن الصعوبات ذكريات لا تُنسى.

نائبه سعد

إهداء:

إلى من كانوا دائماً النور الذي أنار دربي، والسند الذي لا يميل...
إلى والديّ العزيزين، شكراً على دعائكما الصادق، ودعمكما الذي لم يتوقف يوماً، فبفضل الله ثم بفضل حبكما وتشجيعكما، مضيت قدماً رغم كل التحديات.
إلى أساتذتي الكرام، الذين لم يبخلوا بعلمهم وتوجيههم، وكانوا دوماً مثلاً في العطاء والقدوة.

إلى إخوتي وأصدقائي، الذين منحوني من وقتهم واهتمامهم ما خفف عني
عناء الطريق.

وإلى كل من كان له أثر ولو بسيط في رحلتي العلمية، أهدي ثمرة جهدي هذه
تعبيراً عن امتناني واعتزازي.

اسباعي محمد عبد المهيمن

Résumé :

Ce mémoire propose une étude approfondie de la modélisation et de la commande des moteurs asynchrones monophasés, largement utilisés dans les applications industrielles et domestiques. En développant un modèle mathématique précis et en validant les résultats via des simulations sous Matlab/Simulink, cette recherche met en évidence l'efficacité des configurations à condensateur permanent/démarrage, offrant un meilleur couple et une stabilité énergétique supérieure par rapport aux moteurs traditionnels. Les stratégies de commande en boucle ouverte et fermée ont démontré leur capacité à réguler efficacement la vitesse, ouvrant ainsi des perspectives d'optimisation pour des applications futures.

Mots-clés : Moteur asynchrone monophasé, modélisation mathématique, commande de vitesse, condensateur permanent, simulation Matlab /Simulink.

Abstract:

This thesis presents a comprehensive study on the modeling and control of single-phase induction motors, which are widely used in industrial and domestic applications. By developing an accurate mathematical model and validating the results through Matlab /Simulink simulations, the research highlights the effectiveness of permanent/start capacitor configurations, which provide better torque stability and higher energy efficiency compared to traditional motors. Open-loop and closed-loop control strategies proved effective in speed regulation, offering promising avenues for future performance optimization.

Keywords: Single-phase induction motor, mathematical modeling, speed control, permanent capacitor, Matlab /Simulink simulation.

ملخص:

تقدم هذه المذكرة دراسة متكاملة حول نمذجة وتحكم المحركات الحثية أحادية الطور، التي تُستخدم على نطاق واسع في التطبيقات الصناعية والمنزلية. من خلال تطوير نموذج رياضي دقيق والتحقق من النتائج عبر محاكاة Matlab /Simulink، أظهر البحث تفوق أنظمة المكثف الدائم/التشغيل في تحقيق عزم مستقر وكفاءة طاقة أعلى مقارنة بالمحركات التقليدية. كما أثبتت استراتيجيات التحكم في الحلقة المفتوحة والمغلقة فعاليتها في تنظيم السرعة، مما يفتح آفاقاً جديدة لتحسين الأداء في التطبيقات المستقبلية.

الكلمات المفتاحية: المحرك الحثي أحادي الطور، النمذجة الرياضية، تحكم السرعة، المكثف الدائم، محاكاة Matlab /Simulink.

Sommaire :

Introduction Générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre 1 : Étude du moteur asynchrone monophasé

1. Introduction.....	03
2. Historique	03
3. Constitution du moteur asynchrone monophasé	05
3.1. Le stator	05
3.2. Le rotor	07
4. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone monophasée	07
5. PRINCIPE DE DEMARRAGE	08
6. Classification des machines asynchrones monophasées	09
6.1. Machine asynchrone monophasée à enroulement auxiliaire résistif (MAMR).....	10
6.2. Machine asynchrone monophasée à enroulement auxiliaire avec condensateur de démarrage (MAMCD)	11
6.3. Machine asynchrone monophasée à enroulement auxiliaire avec condensateur permanent	11
6.4. Machine asynchrone monophasée à enroulement auxiliaire avec condensateur de démarrage et condensateur permanent (MAMCDP)	12
7. REMARQUE SUR LE DIMENSIONNEMENT DE C	13
8. Réglage de vitesse	14
9. Application du moteur asynchrone monophasé.....	14
10. Bilan des puissances.....	14
11. Avantages du moteur asynchrone monophasé.....	15
12. Inconvénients du moteur asynchrone monophasé	15
13. Conclusion	16

Chapitre 2 : Modélisation et simulation du moteur asynchrone monophasé

1. Introduction	18
2. Modélisation de la machine asynchrone à condensateur permanent dans un référentiel lié au stator	18
Equations électriques de la machine.....	19
Expression des grandeurs du rotor dans le référentiel lié du stator.....	21
Détermination du couple électromagnétique.....	22
Equation mécanique de la machine.....	22
3. Simulation de la machine	24
3.1. Comparaison entre un moteur à condensateur de démarrage et un moteur à condensateur permanent/démarrage	25
3.2. L'impact de la charge sur le moteur asynchrone monophasé avec condensateur de démarrage/permanent.....	28
3.3. Commande de le moteur monophasé à condensateur permanent/démarrage	30
3.3.1. L'onduleur.....	30
3.3.1.1. Onduleur de courant	30
3.3.1.2. Onduleur de tension	31
a. Onduleur non autonome	31
b. Onduleur autonome	31
3.3.2. Techniques de modulation	32
a. boucle ouverte	33
b. boucle fermée	35
4. Conclusion	38
Conclusion générale	40

Liste de figure :

Figure (1.1) : Portrait de Michael Faraday.....	03
Figure (1.2).: Constitution d'un moteur asynchrone monophasé.....	05
Figure (1.3) : couple résultant à un seul enroulement statorique	06
Figure (1.4) : Rotor à cage d'écureuil.....	07
Figure (1.5) : couple résultant à un seul enroulement statorique.....	08
Figure (1.6) : schéma électrique avec enroulement auxiliaire	09
Figure (1.7): Machine asynchrone monophasée à enroulement auxiliaire résistif.....	10
Figure (1.8): Machine asynchrone monophasée à enroulement auxiliaire avec condensateur de démarrage .	11
Figure (1.9) : Schéma d'un moteur asynchrone monophasé alimenté avec un condensateur permanent	12
Figure (1.10): Machine asynchrone monophasée à enroulement auxiliaire avec condensateur de démarrage et condensateur permanent	13
Figure (1.11): Bilan des puissances du moteur asynchrone monophasé.	14
Figure (2.1): Représentation schématique du moteur asynchrone monophasé à condensateur	19
Figure (2.2) : Schéma de simulation par Matlab/Simulink.....	25
Figure (2.3) : Courbe de courant d'enroulement principal.....	25
Figure (2.4) : Courbe de Tension de condensateur.....	26
Figure (2.5) : Courbe de couple électromagnétique	27
Figure (2.6) : Courbe de vitesse de rotation.....	27
Figure (2.7) : Schéma de simulation d'un moteur à condensateur de démarrage/permanent avec application d'une charge à l'instant $t=1s$	28
Figure (2.8) : Courbe de Tension de condensateur	29
Figure (2.9) : Courbe de couple électromagnétique.....	29
Figure (2.10) : Courbe de vitesse de rotation	30
Figure (2.11) : Schéma d'association convertisseur-machine.....	31
Figure (2.12) : Courbe de tension en sortie de l'onduleur.....	32

Figure (2.13) : Schéma de simulation en boucle ouverte.....	33
Figure (2.14) : Courbe de courant d'enroulement principal.....	33
Figure (2.15) : Courbe de couple électromagnétique	34
Figure (2.16) : Courbe de vitesse de rotation	34
Figure (2.17) : Schéma de simulation en boucle fermée.	35
Figure (2.18) : Courbe de courant d'enroulement principal	36
Figure (2.19) : Courbe de couple électromagnétique.....	36
Figure (2.20) : Courbe de vitesse de rotation.....	37

Introduction générale

Introduction Générale :

Dans le contexte des développements rapides dans le domaine du génie électrique et des systèmes de contrôle, le moteur asynchrone monophasé se distingue comme l'un des composants essentiels dans de nombreuses applications industrielles et domestiques. Ce type de moteur se caractérise par sa conception simple, ses faibles besoins en maintenance et son coût réduit, ce qui en fait un choix idéal pour les appareils électroménagers tels que les machines à laver et les réfrigérateurs, ainsi que pour les applications industrielles légères comme les pompes et les ventilateurs. Cependant, le contrôle efficace des performances de ces moteurs reste un défi majeur en raison de la complexité de leurs dynamiques et de l'influence de divers facteurs tels que les variations de charge et de fréquence.

Cette étude tire son importance du besoin urgent d'améliorer l'efficacité des moteurs asynchrones monophasés, notamment dans le contexte de la tendance mondiale vers l'optimisation énergétique et la réduction des émissions de carbone. De plus, les récents développements dans les technologies de contrôle et l'électronique de puissance ouvrent de nouvelles perspectives pour améliorer les performances de ces moteurs, ce qui rend la recherche dans ce domaine étroitement liée à la réalité pratique et aux applications.

Cette mémoire vise à présenter une étude complète de la modélisation et de l'analyse du moteur asynchrone monophasé, en mettant l'accent sur le développement d'un modèle mathématique précis permettant de simuler le comportement du moteur dans diverses conditions de fonctionnement. En outre, l'étude explore différentes stratégies de contrôle, en boucle ouverte et en boucle fermée, pour garantir des performances optimales et une adaptation aux exigences des applications pratiques.

Cette étude s'appuie sur une méthodologie analytique et appliquée, où le modèle mathématique a été développé à l'aide des équations de dynamique électromécanique du moteur, puis validé via la simulation du système de contrôle en utilisant le logiciel Matlab/Simulink. Les données ont également été collectées à travers une revue de la littérature scientifique et des études antérieures dans ce domaine.

En tant qu'étudiant en master spécialisé en énergies renouvelables en électrotechnique, j'ai préparé ce mémoire dans le cadre des exigences pour l'obtention du diplôme. Le choix de ce sujet découle de mon intérêt personnel pour le domaine des moteurs électriques et de mon désir de contribuer au développement de solutions pratiques pour améliorer leurs performances.

Cette mémoire est divisée en deux chapitres principaux : le premier chapitre traite de l'étude théorique du moteur asynchrone monophasé, y compris ses composants de base, son principe de fonctionnement et ses applications. Le deuxième chapitre se concentre sur la modélisation mathématique et la simulation, avec une analyse des résultats du système de contrôle de la vitesse du moteur. Cette structure a été choisie pour assurer une couverture complète du sujet, allant des fondements théoriques aux applications pratiques.

En combinant les aspects théoriques et appliqués, cette étude offre des perspectives précieuses aux ingénieurs et chercheurs dans le domaine des systèmes de contrôle et des machines électriques, tout en contribuant à l'enrichissement des connaissances scientifiques et en proposant des solutions innovantes aux défis de contrôle des moteurs asynchrones monophasés.

Chapitre 1 : Étude du moteur asynchrone monophasé

1. Introduction :

Le moteur asynchrone constitue de nos jours le type de moteur électrique le plus répandu tant dans le secteur industriel que domestique. L'un de ses atouts majeurs réside dans l'absence de contacts électriques mobiles, ce qui engendre une conception simplifiée, robuste et aisée à réaliser. La plage de puissance varie de quelques watts à plusieurs mégawatts.

Ce chapitre a pour objectif d'examiner les différentes composantes essentielles du moteur asynchrone monophasé ainsi que son mécanisme de fonctionnement.

2. Historique :

L'histoire de la machine asynchrone monophasée remonte au développement de la technologie électrique et des moteurs électriques en général. Voici un bref aperçu de l'histoire de la machine asynchrone monophasée :

- **Développement des moteurs électriques :**

Les premières formes de moteurs électriques ont été développées au 19^e siècle. Michael Faraday a découvert le principe de l'induction électromagnétique en 1831, jetant ainsi les bases des moteurs électriques.



Figure (1.1) : Portrait de Michael Faraday

- **Moteurs monophasés primitifs :**

Les premières versions de moteurs électriques étaient principalement des moteurs à courant continu. Cependant, il était difficile de les alimenter avec des systèmes électriques monophasés, ce qui limitait leur utilisation.

- **Émergence de la machine asynchrone :**

L'un des développements clés dans l'histoire des moteurs électriques a été la création de la machine asynchrone, également appelée moteur à induction. Les travaux de Nikola Tesla dans les années 1880 ont joué un rôle crucial dans cette avancée. Tesla a développé la théorie et les concepts fondamentaux des moteurs asynchrones, qui fonctionnent grâce à l'induction électromagnétique plutôt que par la commutation mécanique, comme c'était le cas pour les moteurs à courant continu.

- **Moteurs asynchrones triphasés :**

Les premiers moteurs asynchrones développés par Tesla étaient de type triphasé, nécessitant une alimentation à trois phases. Cependant, la distribution d'électricité monophasée était plus courante dans les foyers et les petites entreprises.

- **Transition vers le monophasé :**

Le défi majeur était de développer des moteurs asynchrones adaptés à l'alimentation monophasée qui était plus courante dans les ménages. Au fil du temps, des ingénieurs ont réussi à concevoir des moteurs asynchrones monophasés en utilisant des enroulements auxiliaires et des condensateurs pour créer un champ magnétique de démarrage.

- **Développement et améliorations :**

Au cours des 20e et 21e siècles, les moteurs asynchrones monophasés ont continué à être développés et améliorés pour une utilisation dans une grande variété d'applications domestiques et légères. Les avancées technologiques ont permis d'optimiser la performance, l'efficacité et la fiabilité de ces moteurs.

- **Applications modernes :**

Les moteurs asynchrones monophasés sont aujourd'hui couramment utilisés dans les appareils électroménagers, les machines-outils portatives, les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les petits systèmes de climatisation, et d'autres applications nécessitant une puissance relativement faible.

L'histoire de la machine asynchrone monophasée reflète l'évolution de la technologie électrique et des moteurs électriques au fil du temps, avec des développements et des adaptations spécifiques pour répondre aux besoins des utilisateurs dans le secteur domestique et léger. [5]

3. Constitution du moteur asynchrone monophasé :

Le moteur asynchrone monophasé est constitué de deux parties importantes comme la plupart des moteurs électrique, qui sont le rotor et le stator.

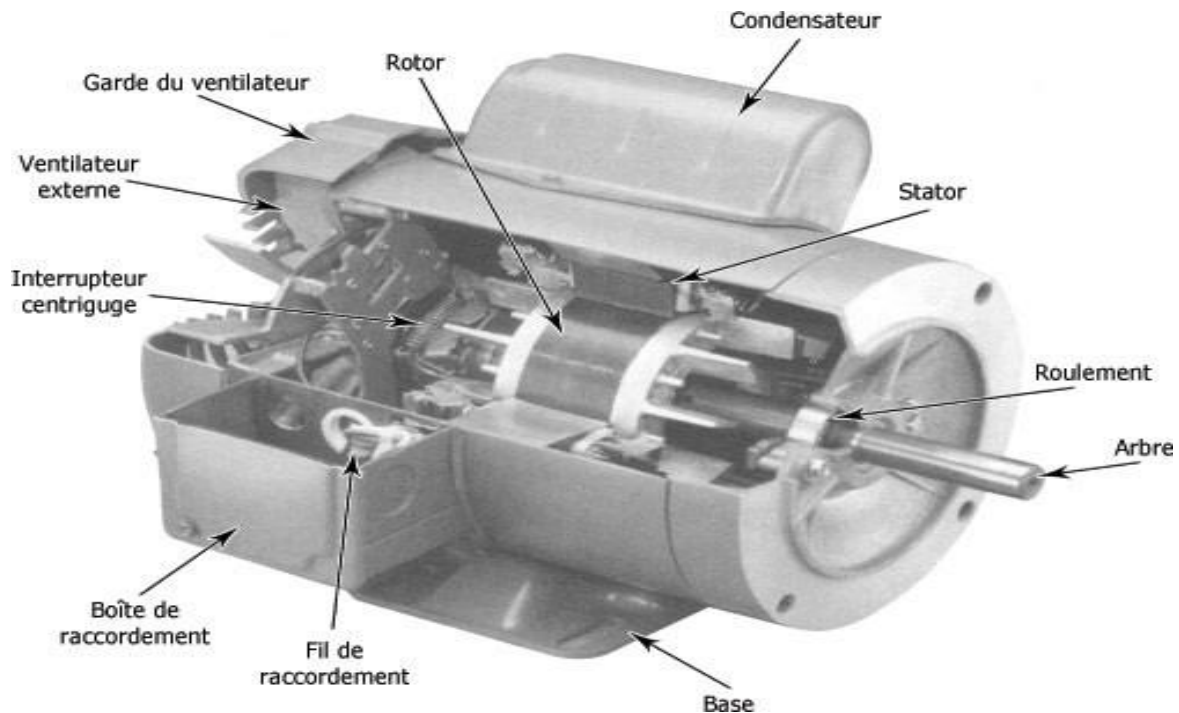


Figure (1.2): Constitution d'un moteur asynchrone monophasé

3.1. Le stator :

Le stator des moteurs asynchrones monophasés est constitué de :

- Un enroulement principal (enroulement de marche).
- Un enroulement de démarrage (enroulement auxiliaire).

Ces deux enroulements sont agencés dans les encoches du stator. L'enroulement de marche est ancré au fond des encoches, tandis que l'enroulement de démarrage est positionné sur l'enroulement de marche et décalé par rapport à celui-ci de 90° . Cette configuration est essentielle pour générer le champ magnétique tournant requis au démarrage du moteur. [5]



Figure (1.3) : couple résultant à un seul enroulement statorique

Le nombre d'enroulements de marche et de démarrage demeure toujours identique. Par conséquent, un moteur disposant de deux enroulements de marche et de deux enroulements de démarrage aura également deux pôles.

Le nombre d'enroulements principal est similaire à celui d'auxiliaire et le nombre de pôles définit la vitesse de champs tournant ; qui on appel aussi vitesse de synchronisme et qui se calcule avec la formule suivante :

$$N_s = 60 \cdot F_s / P \quad (1.1)$$

N_s : vitesse de rotation du champ tournant.

F_s : fréquence du courant d'alimentation (Hz).

P : nombre de paires de pôles du moteur.

3.2. Le rotor :

Le rotor se décompose aussi d'un circuit magnétique constitué de tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Le rotor de la machine asynchrone monophasé est de type : à cage d'écureuil. Le rotor à cage est constitué de barres d'aluminium, ces barres sont reliées entre elles à chacune des extrémités du rotor par un anneau de court-circuit. Très souvent les barres sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques et aussi diminuer fortement le bruit lors de l'accélération de la machine. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre. [9]

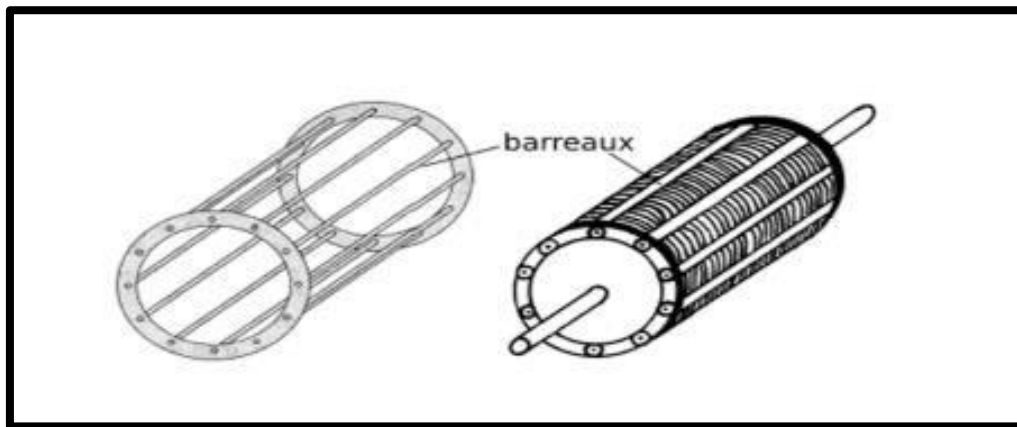


Figure (1.4) : Rotor à cage d'écureuil.

4. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone monophasée :

La f.m.m statorique crée un flux alternatif pulsant pouvant être décomposé en deux flux de même amplitude et tournant avec la même vitesse mais dans des sens différents. Ce qui développe sur le rotor deux couples de mêmes amplitudes agissant respectivement dans le sens direct et inverse.

Chaque flux induit dans le rotor des courants et tend à l'entraîner dans le même sens que lui, un moteur asynchrone est donc équivalent à deux moteurs triphasés identiques dont les rotors sont situés sur le même arbre, les enroulements statoriques sont connectés en série de façon à ce que les champs magnétiques engendrés tournent dans l'espace en sens inverse.

Le moment du couple électromagnétique du moteur monophasé est la somme algébrique des moments des couples des deux moteurs triphasés équivalents.

5. PRINCIPE DE DEMARRAGE :

Pour démarrer le moteur asynchrone monophasé dans un sens bien déterminé et pour avoir un meilleur fonctionnement en charge, on munit le stator d'un enroulement auxiliaire de façon que le champ alternatif qu'il produit soit perpendiculaire au champ produit par l'enroulement principal. Cet enroulement auxiliaire est alimenté à travers un condensateur qui déphase le courant dans les deux enroulements d'un angle environs de $\Pi/2$ mais suffisant pour créer un champ tournant.

Dans ce cas, le couple au démarrage est non nul et relativement important.

La figure (fig.1.6) présente le schéma électrique et le couple résultant avec enroulement auxiliaire.

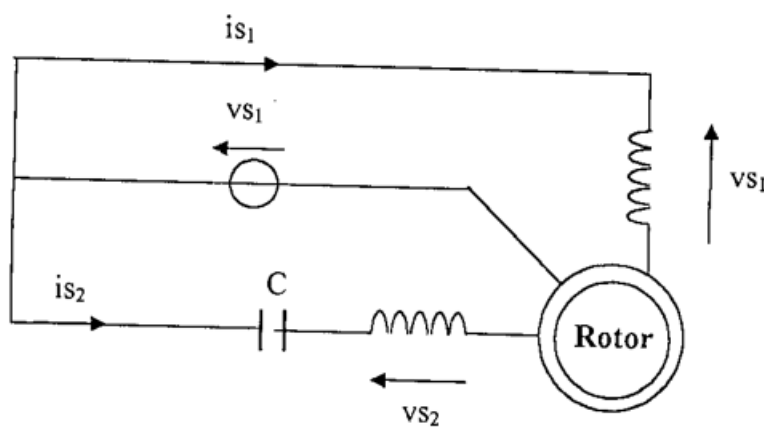


Figure (1.6) : schéma électrique avec enroulement auxiliaire.

Il est clair que pour chaque fréquence le couple résultant avec enroulement auxiliaire est plus important que celui à un seul enroulement statorique.

Le condensateur peut être branché au démarrage seulement puis déconnecté dès que la machine atteint 60% à 80% de la vitesse synchrone. Ou bien, il peut être branché en permanence et dans ce cas le moteur est à peu près équivalent à un moteur biphasé. [1]

6. Classification des machines asynchrones monophasées :

Les machines asynchrones monophasées se classifient en trois catégories selon le type de l'enroulement auxiliaire. Nous distinguons ainsi les machines à enroulement auxiliaire:

1. résistif;
2. avec condensateur de démarrage;
3. avec condensateur permanent.
4. avec condensateur de démarrage et condensateur permanent. [3]

6.1. Machine asynchrone monophasée à enroulement auxiliaire résistif (MAMR) :

L'enroulement auxiliaire est bobiné avec un fil de diamètre plus petit que celui utilisé pour l'enroulement principal. La résistance de l'enroulement auxiliaire est ainsi élevée et sa réactance est faible alors que l'enroulement principal possède une faible résistance et une réactance élevée. Le déphasage entre les courants est dû à la différence des impédances. Le champ tournant prend une forme elliptique et le couple de démarrage est relativement faible.

Étant donné que la résistance de l'enroulement auxiliaire est élevée, il ne peut pas rester en permanence en circuit sans surchauffer et se détruire. Cet enroulement est mis hors service au moyen d'un interrupteur centrifuge lorsque la vitesse de la machine atteint une valeur assez grande.

L'interrupteur centrifuge est la source de la majorité des pannes de la machine asynchrone monophasée. Si le moteur entraîne une charge lourde et l'interrupteur ne s'ouvre pas au moment opportun, l'enroulement auxiliaire finit par s'endommager.

La protection de la machine par un relais thermique s'avère nécessaire. [3]

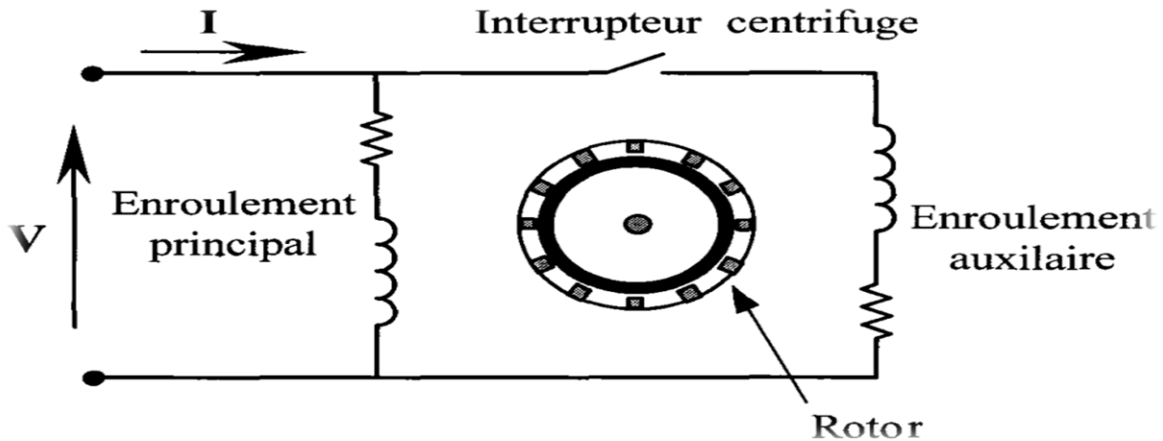


Figure (1.7): Machine asynchrone monophasée à enroulement auxiliaire résistif

6.2. Machine asynchrone monophasée à enroulement auxiliaire avec condensateur de démarrage (MAMCD) :

Un condensateur est placé en série avec l'enroulement auxiliaire comme illustré sur la Figure (1.8). C'est un condensateur électrolytique de forte capacité pour augmenter le couple de démarrage. Il est mis en service pendant le démarrage. Le condensateur et l'enroulement auxiliaire sont mis hors circuit lorsque la machine atteint une vitesse assez grande, souvent 75% de la vitesse synchrone. Cette configuration possède les mêmes performances en régime permanent que la MAMR. [3]

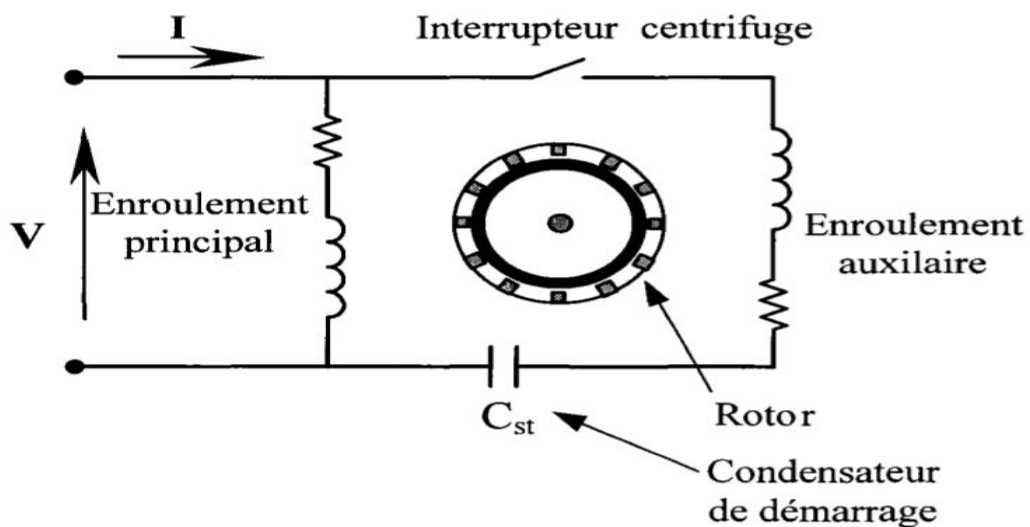


Figure (1.8): Machine asynchrone monophasée à enroulement auxiliaire avec

condensateur de démarrage

6.3. Machine asynchrone monophasée à enroulement auxiliaire avec condensateur permanent :

Le moteur à condensateur permanent est essentiellement un moteur diphasé ; il comporte un enroulement auxiliaire en série avec un condensateur à papier imprégné d'huile (Fig. 1.9). La phase auxiliaire, aussi bien que la phase principale, restent alimentée par la source tant que le moteur est en marche. On emploie ce moteur particulièrement silencieux dans les hôpitaux, les studios radiophoniques, etc., pour entraîner des charges constantes. Son facteur de puissance est très bon et sa construction mécanique est plus simple que celle des moteurs à phase auxiliaire et à démarrage par condensateur car il ne comporte pas d'interrupteur centrifuge. Son couple de démarrage est généralement faible. [4]

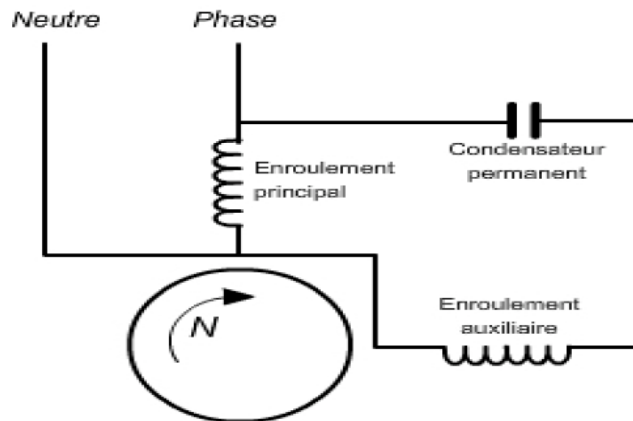


Figure (1.9) : Schéma d'un moteur asynchrone monophasé alimenté avec un condensateur permanent

Le moteur agit comme un véritable moteur diphasé seulement lorsqu'il fonctionne à pleine charge. Dans ces circonstances, les flux Φ_A et Φ_S créés par les deux enroulements sont égaux et déphasés de 90° . Par conséquent, pour ce type de moteur, la vibration qui caractérise les moteurs monophasés est éliminée lorsqu'il fonctionne à pleine charge. Cependant, la vibration réapparaît aux faibles charges. [4]

6.4. Machine asynchrone monophasée à enroulement auxiliaire avec condensateur de démarrage et condensateur permanent (MAMCDP) :

La machine asynchrone monophasée à enroulement auxiliaire avec condensateur de démarrage et

condensateur permanent (MAMCDP) comporte deux condensateurs comme le montre la figure 1.10. Le premier sert à assurer un meilleur couple de démarrage, il est identique à celui de la MAMCD. Le deuxième est un condensateur permanent qui demeure en permanence branché en série avec l'enroulement auxiliaire. Ce dernier est un condensateur à huile et de petite capacité. Il est dimensionné pour obtenir une distribution du champ magnétique dans l'entrefer de la machine de forme circulaire en régime nominal. Son rôle principal est d'atténuer les ondulations du couple électromagnétique et par la suite réduire les vibrations sur l'arbre du moteur. La MAMCDP possède un meilleur rendement et un meilleur facteur de puissance en comparaison avec la MAMCD et la MAMR [3]

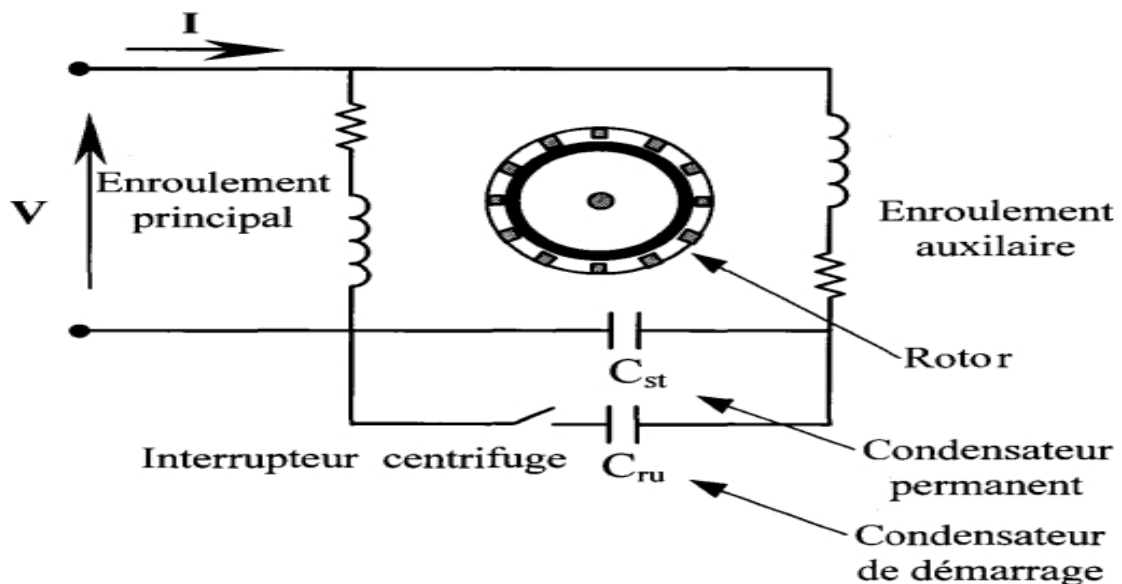


Figure (1.10): Machine asynchrone monophasée à enroulement auxiliaire avec condensateur de démarrage et condensateur permanent

7. REMARQUE SUR LE DIMENSIONNEMENT DE C :

La quadrature des courants i_{s1} , i_{s2} est recherché :

Posons :

$$V_{s1} = V_{\max} \cdot \cos(\omega t) \quad (1.2)$$

i_{s1} est en retard de phase par rapport à v_{s1} , le condensateur de capacité C doit rendre i_{s2} en quadrature avant sur i_{s1} , donc en avance de phase sur v_{s1} . on suppose que les deux phases présentent un modèle équivalent identique, constitué d'une inductance L en série avec une

résistance R. [2]

$$\left(\frac{IS_2}{IS_1} \right) = \left(\frac{R + jL\omega}{R + j(L\omega - \frac{1}{C\omega})} \right) \quad (1.3)$$

La condition : $\arg \left(\frac{IS_2}{IS_1} \right) = \frac{\pi}{2}$ (1.4)

est satisfaite pour la valeur de C calculée par la formule suivante :

$$C = \frac{L}{R^2 + j(L\omega)^2} \quad (1.5)$$

8. Réglage de vitesse :

Pour faire varier la vitesse nr du moteur asynchrone qui est égale à :

$$Nr = (60 * f / pm) (1-g) \quad (1.6)$$

il faut agir sur plusieurs paramètres :

- Par variation du glissement.
- Par variation de la fréquence f d'alimentation. [7]

9. Application du moteur asynchrone monophasé:

- L'électroménager (les machines à laver...)
- la production de froid (les condensateurs, les réfrigérateurs)
- le pompage (les pompes pour piscine, pompes de relevage...)
- la ventilation (VMC, convecteurs à ventilateur)
- l'air comprimé (compresseurs) [7]

10. Bilan des puissances :

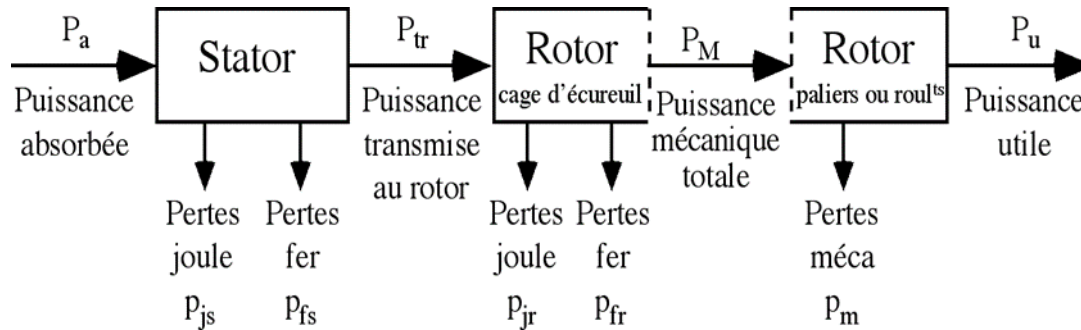


Figure (1.11): Bilan des puissances du moteur asynchrone monophasé .[7]

11. Avantages du moteur asynchrone monophasé:

- Il est facile à utiliser et à mettre en place.
- Il nécessite peu d'entretien.
- Il s'adapte à diverses applications.
- C'est un moteur économique.

12. Inconvénients du moteur asynchrone monophasé :

- La distribution d'énergie électrique en monophasé entraîne des pertes Joule plus élevées par rapport à celle en triphasé.
- Les machines monophasées génèrent plus de bruit et présentent des performances inférieures en comparaison avec des machines triphasées de puissance similaire.
- Le couple fluctuant à deux fois la fréquence d'alimentation occasionne des vibrations.

13. Conclusion :

En conclusion, ce chapitre propose une étude détaillée des moteurs asynchrones monophasés, largement utilisés dans les applications industrielles et domestiques. L'accent a été mis sur leurs composants de base, tels que le stator (comprenant les enroulements principaux et auxiliaires) et le rotor (cage d'écureuil ou bobiné). Le fonctionnement de ces moteurs repose sur l'interaction entre les champs magnétiques générés par le stator et le rotor, produisant un couple électromagnétique.

Les différents types de moteurs ont été discutés en fonction des caractéristiques des enroulements auxiliaires, tels que les moteurs à enroulement résistif, à condensateur permanent ou de démarrage. Les applications de ces moteurs dans des domaines tels que les appareils ménagers, le refroidissement et la ventilation ont également été mises en avant, tout en mentionnant certains défis comme les pertes d'énergie et le bruit.

Enfin, ces moteurs constituent un choix économique et efficace, et avec les avancées futures, leurs performances pourraient être améliorées et leurs inconvénients réduits, les rendant encore plus attractifs pour diverses utilisations.

Chapitre 2 : Modélisation et simulation du moteur asynchrone monophasé

1. Introduction :

Ce chapitre présente une analyse mathématique détaillée du moteur asynchrone monophasé, en mettant l'accent sur le développement d'un modèle mathématique précis permettant de simuler efficacement le comportement du moteur. Cette analyse revêt une importance particulière dans le domaine des systèmes de contrôle, car elle nous permet de:

- Développer un modèle mathématique complet reflétant les caractéristiques réelles du moteur
- Effectuer des simulations précises du comportement du système sous différentes conditions de fonctionnement
- Fournir la base théorique nécessaire à la conception des systèmes de contrôle

L'onduleur représente un élément vital dans le système de contrôle, car :

- Il permet le contrôle de la vitesse du moteur en modifiant la fréquence
- Il fournit le contrôle de la tension appliquée au moteur
- Il permet l'application de différentes stratégies de contrôle

2. Modélisation de la machine asynchrone à condensateur permanent dans un référentiel lié au stator :

L'étude de tout système et plus particulièrement d'une machine électrique s'appuie toujours sur un modèle de représentation.

Le moteur asynchrone monophasé étudié figure (2.1) est constitué d'un stator possédant deux enroulements en quadrature, le rotor est à cage d'écureuil que nous assimilons à deux enroulements court-circuités en quadrature.

Et pour entamer la modélisation de la machine asynchrone monophasée tel qu'il sera retenu par la suite dans notre étude, nous pouvons prendre en considération les hypothèses simplificatrices suivantes :

- On néglige l'effet de la saturation, ce qui permet de supposer que la machine est linéaire pour les flux (circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante), on considère une densité de courant uniforme des conducteurs élémentaires.
- Les phases principale et auxiliaire ont le même nombre de pôles, mais nombres de spire peuvent être différents.
- Les pertes fer, l'effet thermique, l'effet de peau sont aussi négligées.

Cependant nous allons non pas tenir compte de ces phénomènes car d'une part leur formulation mathématique est difficile, voir même impossible, d'autre part leur incidence sur le comportement de la machine est considérée comme négligeable, ou, du moins, dans certaines conditions ceci nous permet d'obtenir des équations simples, qui traduisent le fonctionnement de la machine. [6]

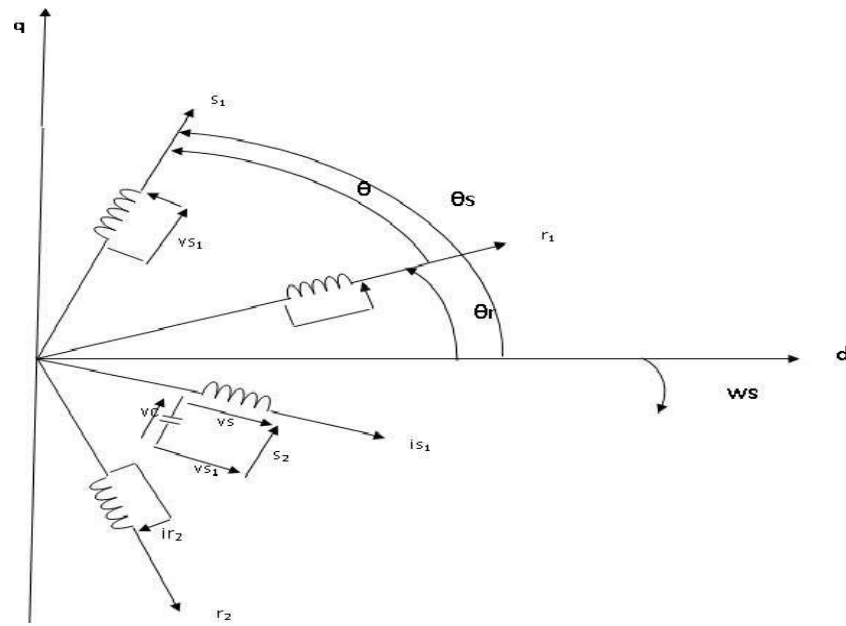


Figure (2.1): Représentation schématic du moteur asynchrone monophasé à condensateur. [2]

Equations électriques de la machine :

D'après la figure (2.1) et en se basant sur les hypothèses citées ci-dessus, les équations électriques de fonctionnement de la machine asynchrone monophasée à condensateur permanent peuvent s'écrire : (loi d'Ohm généralisée).

Notons que les grandeurs sont exprimés en valeurs réelles par :

$$\left[\begin{array}{ll} V_{s1} = R_{s1} i_{s1} + \frac{d\phi_{s1}}{dt} & \text{(enroulement principal)} \\ V_{s1} = R_{s2} i_{s2} + \frac{d\phi_{s2}}{dt} + V_c & \text{(enroulement auxiliaire)} \\ 0 = R_r i_{r1} + \frac{d\phi_{r1}}{dt} & \\ 0 = R_r i_{r2} + \frac{d\phi_{r2}}{dt} & \\ i_{s2} = i_c = C \frac{dV_c}{dt} = \frac{dq}{dt} & \text{(courant de la phase auxiliaire)} \end{array} \right. \quad (2.1)$$

q : quantité d'électricité

Les indices "s" et "r" indiquent les grandeurs du stator et du rotor respectivement.

Les équations (2.1) peuvent se mettre sous la forme matricielle :

$$V = R I + \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

Avec :

$$\mathbf{V} = [V_{s1} \ V_{s2} \ 0 \ 0]^t$$

$$\mathbf{I} = [i_{s1} \ i_{s2} \ i_{r1} \ i_{r2}]^t$$

$$\Phi = [\Phi_{s1} \ \Phi_{s2} \ \Phi_{r1} \ \Phi_{r2}]^t$$

$[\mathbf{R}]$: la matrice des résistance :

$$[\mathbf{R}] = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Avec :

$$[\Phi] = [\mathbf{L}] \cdot [\mathbf{I}] \quad (2.3)$$

$$[\mathbf{L}] = \begin{bmatrix} L_{s1} & 0 & M_{r1,s1} & M_{s1,r2} \\ 0 & L_{s2} & M_{s2,r1} & M_{s1,r2} \\ M_{r1,s1} & M_{r1,s2} & L_{r1} & 0 \\ M_{r2,s1} & M_{r1,s2} & 0 & L_{r2} \end{bmatrix}$$

La diagonale de $\mathbf{L}$ est constante car l'entrefer est constant.

Les mutuelles entre les enroulements dépendent des positions relatives de θ_s et θ_r .

$$M_{s1,r1} = M_d \cdot \cos(\theta_r - \theta_s)$$

$$M_{s1,r2} = M_d \cdot \sin(\theta_r - \theta_s)$$

$$M_{s2,r1} = M_q \cdot \sin(\theta_r - \theta_s) \quad (2.4)$$

$$M_{s1,r2} = M_q \cdot \cos(\theta_r - \theta_s)$$

avec :

$$\theta = \theta_s - \theta_r : \text{angle de glissement.}$$

M_d et M_q sont les mutuelles inductances maximales, donc les quatre composantes du vecteur

flux sont présentées par:

$$\begin{bmatrix} \phi_{s1} \\ \phi_{s2} \\ \phi_{r1} \\ \phi_{r2} \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{s1} & 0 & M_d \cos(\theta) & M_d \sin(\theta) & 0 \\ 0 & L_{s2} & -M_q \sin(\theta) & M_q \cos(\theta) & 0 \\ M_d \cos(\theta) & -M_q \sin(\theta) & L_{r1} & 0 & 0 \\ M_d \sin(\theta) & M_q \cos(\theta) & 0 & L_{r2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{r1} \\ i_{r2} \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Expression des grandeurs du rotor dans le référentiel lié du stator:

Nous allons exprimer les grandeurs réels du rotor (i_{r1} , i_{r2}), (Φ_{r1} , Φ_{r2}) dans le référentiel du stator (i_{rd} , i_{rq}), (Φ_{rd} , Φ_{rq}) par :

$$\begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = [A_s] \cdot \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = [A_s] \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{r1} \\ \Phi_{r2} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Avec :

$$[A_s] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$[A_s]$: Matrice de rotation des axes.

Donc l'équation (2.2) devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_{sd} i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = R_{sq} i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + V_c \\ 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{rq} \\ 0 = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \phi_{rd} \\ i_{sq} = i_c = c \frac{dV_c}{dt} = \frac{dq}{dt} \end{array} \right. \quad (2.7)$$

A partir des équations (2.5), les expressions des flux en fonctions des courants statoriques et rotoriques sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{sd} = L_{sd} \cdot i_{sd} + M_d \cdot i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_{sq} \cdot i_{sq} + M_q \cdot i_{rq} \end{array} \right. \quad (2.8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{rd} = L_{rd} \cdot i_{rd} + M_d \cdot i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_{rq} \cdot i_{rq} + M_q \cdot i_{sq} \end{array} \right. \quad (2.9)$$

En prenant $L_{rd}=L_{rq}=L_r$ (deux phases symétriques au rotor) ce qui est d'ailleurs toujours le cas dans un moteur à cage d'écureuil. Comme les courants rotoriques sont inaccessibles pour la mesure, il faut les exprimer en fonction des flux rotoriques et courants statoriques. [2]

Les équations (2.7) deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_{sd} \cdot i_{sd} + \frac{M_d}{L_r} \cdot \frac{d\phi_{rd}}{dt} + \left(L_{sd} - \frac{M_d^2}{L_r} \right) \cdot \frac{di_{sd}}{dt} \\ V_{sq} - V_c = R_{sq} \cdot i_{sq} + \frac{M_q}{L_r} \cdot \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \left(L_{sq} - \frac{M_q^2}{L_r} \right) \cdot \frac{di_{sq}}{dt} \\ 0 = \frac{R_r}{L_r} \cdot \phi_{rd} - \frac{R_r}{L_r} \cdot M_d \cdot i_{sd} + \frac{d\phi_d}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{rq} \\ 0 = \frac{R_r}{L_r} \cdot \phi_{rq} - \frac{R_r}{L_r} \cdot M_q \cdot i_{sq} + \frac{d\phi_q}{dt} + \omega_r \cdot \phi_{rd} \\ i_{sq} = i_c = c \frac{dV_c}{dt} = \frac{dq}{dt} \end{array} \right. \quad (2.10)$$

Détermination du couple électromagnétique:

Le couple électromagnétique développé par la machine est donné par l'expression suivante :

$$Te = pm \cdot \text{Im}(\overline{ir} \cdot \overline{\phi_r}) \quad (2.11)$$

pm : nombre de paire de pole.

$$\overline{ir} = id + iq \quad (2.12)$$

$$\overline{\phi_r} = \phi_d + j\phi_q \quad (2.13)$$

De l'expression (2.5), et avec l'utilisation des équations (2.8)-(2.13) on déduit l'expression finale du couple électromagnétique par :

$$Te = pm \cdot \left(\frac{Md}{L_r} \cdot \phi_q \cdot is_1 + \frac{Mq}{L_r} \cdot \phi_d \cdot is_2 \right) \quad (2.14)$$

Equation mécanique de la machine:

L'équation mécanique du moteur est donnée par :

$$J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} = T_e - T_r - f_v \cdot \Omega_r \quad (2.15)$$

J : est le moment d'inertie du rotor et de toute charge couplée avec lui.

T_r : est le couple de charge.

f_v : est coefficient de frottement.

En ajoutant les dynamiques du rotor (2.14) aux dynamiques électromagnétiques (2.10) et en arrangeant les équations dans la forme d'un espace d'état.

Le modèle du moteur asynchrone monophasé à condensateur permanent est donné par :

$$\left[\begin{array}{l} \frac{d\Phi_{rd}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \cdot \Phi_{rd} + pm \cdot \Omega_r \Phi_{rq} + \frac{R_r}{L_r} \cdot M_d \cdot i_{sd} \\ \frac{d\Phi_{rq}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \cdot \Phi_{rq} - pm \cdot \Omega_r \Phi_{rd} + \frac{R_r}{L_r} \cdot M_q \cdot i_{sq} \\ \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{M_d \cdot R_r}{\sigma_d \cdot L_{sd} \cdot L_r^2} \cdot \Phi_{rd} - \frac{pm M_d}{\sigma_d \cdot L_{sd} \cdot L_r} \Omega_r \cdot \Phi_{rq} - \frac{M_d^2 \cdot R_r + L_r^2 R_{sd}}{\sigma_d L_{sd} L_r^2} i_{sd} + \frac{V_{sd}}{\sigma_d \cdot L_{sd}} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{M_q \cdot R_r}{\sigma_q \cdot L_{sq} \cdot L_r^2} \cdot \Phi_{rq} - \frac{pm M_q}{\sigma_q \cdot L_{sq} \cdot L_r} \Omega_r \cdot \Phi_{rd} - \frac{M_q^2 \cdot R_r + L_r^2 R_{sq}}{\sigma_q L_{sq} L_r^2} i_{sq} + \frac{V_{sq} - V_c}{\sigma_q \cdot L_{sq}} \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{c} \cdot i_{sq} \end{array} \right. \quad (2.16)$$

Avec :

$$\sigma_d = \frac{L_{sd} \cdot L_r - M_d^2}{L_{sd} \cdot L_r} \quad \sigma_q = \frac{L_{sq} \cdot L_r - M_q^2}{L_{sq} \cdot L_r} \quad (2.17)$$

Si nous cherchons un modèle du moteur dont le vecteur d'état a pour composantes les courants du rotor et du stator, le modèle du moteur monophasé avec condensateur est donc donné par:

$$\left[\begin{array}{l} \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{pm}{J} \cdot (M_q \cdot i_{rd} \cdot i_{sq} - M_d \cdot i_{rq} \cdot i_{sd}) - \frac{f_v}{J} \cdot \Omega_r - \frac{T_r}{J} \\ \frac{di_{sd}}{dt} = -\frac{R_{sd}}{\sigma_d \cdot L_{sd}} \cdot i_{sd} + \frac{pm \cdot M_d \cdot M_q}{\sigma_d \cdot L_{sd} \cdot L_r} \cdot \Omega_r \cdot i_{sq} - \frac{M_d \cdot R_r}{\sigma_d \cdot L_{sd} \cdot L_r} \cdot i_{rq} + \frac{pm}{\sigma_d \cdot L_{sd} \cdot L_r} \cdot \Omega_r \cdot i_{rq} + \frac{V_{sd}}{\sigma_d \cdot L_{sd}} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{pm \cdot M_d \cdot M_q}{\sigma_q \cdot L_{sq} \cdot L_r} \cdot \Omega_r \cdot i_{sd} - \frac{R_{sq}}{\sigma_d \cdot L_{sq}} \cdot i_{sq} - \frac{M_q \cdot R_r}{\sigma_q \cdot L_{sq} \cdot L_r} \cdot i_{rd} + \frac{pm}{\sigma_q \cdot L_{sq} \cdot L_r} \cdot \Omega_r \cdot i_{rd} + \frac{V_{sd} - V_c}{\sigma_q \cdot L_{sq}} \\ \frac{di_{rd}}{dt} = \frac{M_d \cdot R_{sd}}{\sigma_d \cdot L_{sd} \cdot L_r} \cdot i_{sd} + \frac{pm \cdot M_q}{\sigma_d \cdot L_r} \cdot \Omega_r \cdot i_{sq} - \frac{pm}{\sigma_d} \cdot \Omega_r \cdot i_{rq} - \frac{R_r}{\sigma_d \cdot L_r} \cdot i_{rq} + \frac{M_d}{\sigma_d \cdot L_{sd} \cdot L_r} \cdot V_{sd} \\ \frac{di_{rq}}{dt} = \frac{M_q \cdot R_{sq}}{\sigma_q \cdot L_{sq} \cdot L_r} \cdot i_{sq} + \frac{pm \cdot M_d}{\sigma_q \cdot L_r} \cdot \Omega_r \cdot i_{sd} - \frac{pm}{\sigma_q} \cdot \Omega_r \cdot i_{rd} - \frac{R_r}{\sigma_q \cdot L_r} \cdot i_{rd} + \frac{M_d \cdot (V_{sd} - V_c)}{\sigma_q \cdot L_{sq} \cdot L_r} \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{c} \cdot i_{sq} \end{array} \right. \quad (2.18)$$

$$T_e = pm (M_q \cdot i_{rd} \cdot i_{sq} - M_d \cdot i_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (2.19)$$

3. Simulation de la machine :

Dans le cas où la MASM est alimentée par une tension alternative sinusoïdale :

$$V_s = V_{smax} \cdot \sin(\omega_s \cdot t)$$

Avec:

$$V_{smax} = 220 \cdot \sqrt{2}$$

Afin de valider le modèle mathématique donné par les relations (2.14),(2.15)et (2.16) pour le modèle d'alimentation en tension ayant comme variables d'état les flux rotoriques et les courants statoriques, une série de simulation dans l'environnement Matlab a été développé témoignant le fonctionnement de la machine. [6]

Dans un premier temps, nous allons voir une comparaison entre un moteur à condensateur démarrage /permanent et un moteur à condensateur de démarrage.

Nous analyserons ensuite les résultats à travers les courbes suivantes : courbe de vitesse, courbe de courant, courbe de couple électromagnétique et courbe de tension du condensateur.

Ensuite, nous poursuivrons notre travail sur le moteur le plus performant et le plus efficace, en étudiant l'effet de la charge sur celui-ci et en contrôlant sa vitesse de deux manières : en boucle ouverte et en boucle fermée.

3.1. Comparaison entre un moteur à condensateur de démarrage et un moteur à condensateur permanent/démarrage :

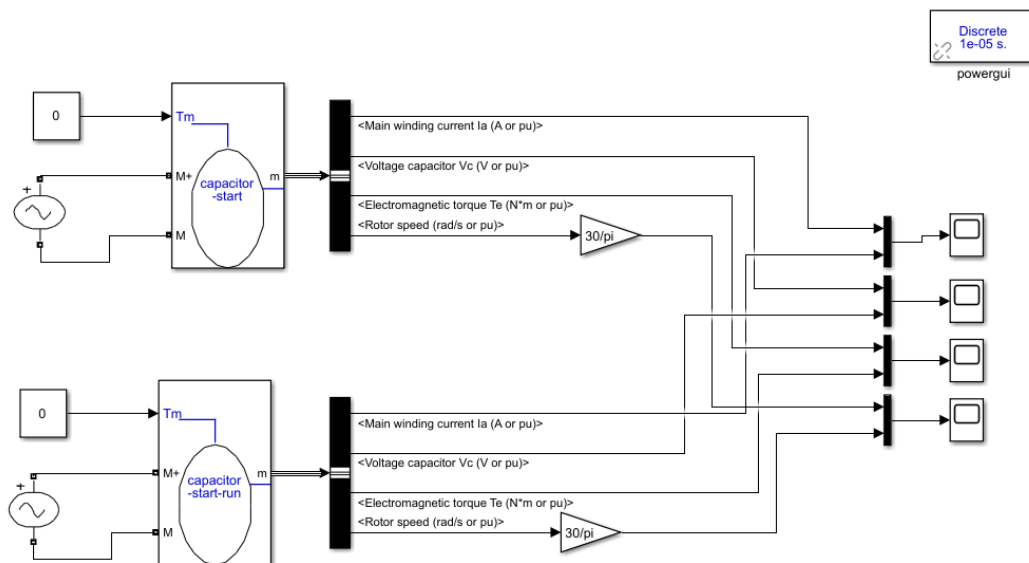


Figure (2.2) : Schéma de simulation par Matlab/Simulink. [8]

❖ Commentaire sur les résultats :

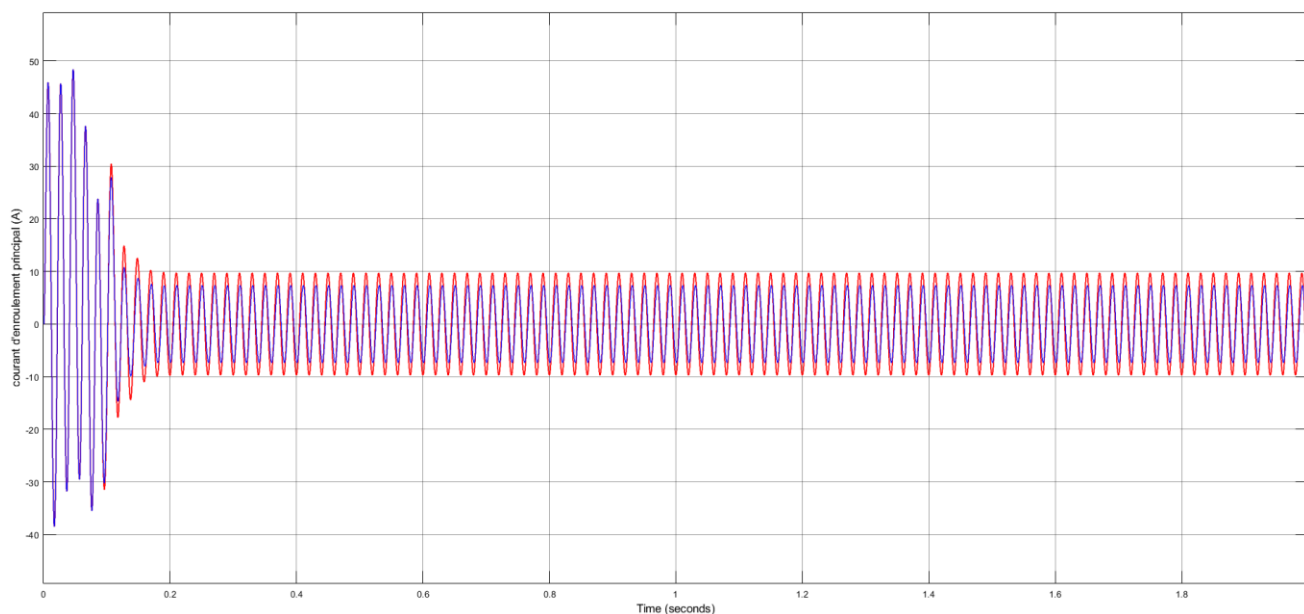


Figure (2.3) : Courbe de courant d'enroulement principal



Courbe du moteur à condensateur de démarrage



Courbe du moteur à condensateur permanent/démarrage

Phase initiale (démarrage) :

- Les deux moteurs consomment un courant élevé au démarrage .
- Le courant dans le moteur (condensateur de démarrage/ permanent) est légèrement plus élevé en raison de la présence du condensateur de permanent supplémentaire. Cependant, la différence est minime à ce stade.

Régime permanent :

- Dans le moteur (condensateur de démarrage), le courant diminue après la déconnexion du condensateur et devient inférieur à celui du moteur (condensateur de démarrage/ permanent).

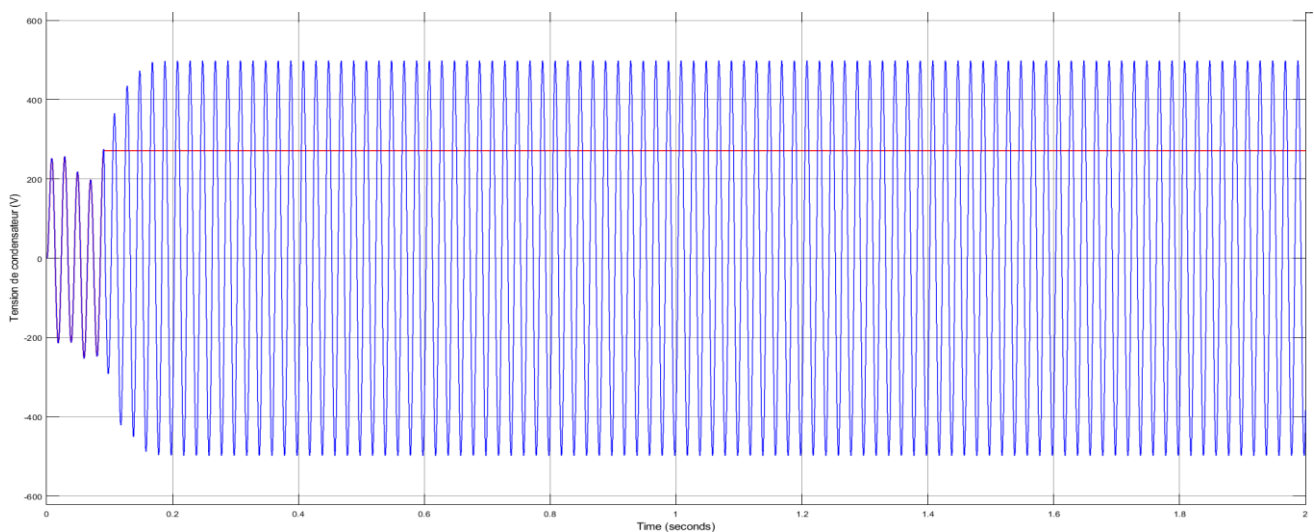


Figure (2.4) : Courbe de Tension de condensateur

-  Courbe du moteur à condensateur de démarrage
-  Courbe du moteur à condensateur permanent/démarrage

Après la déconnexion du condensateur de démarrage, il reste à sa valeur maximale (chargé), contrairement au condensateur permanent qui continue de fonctionner.

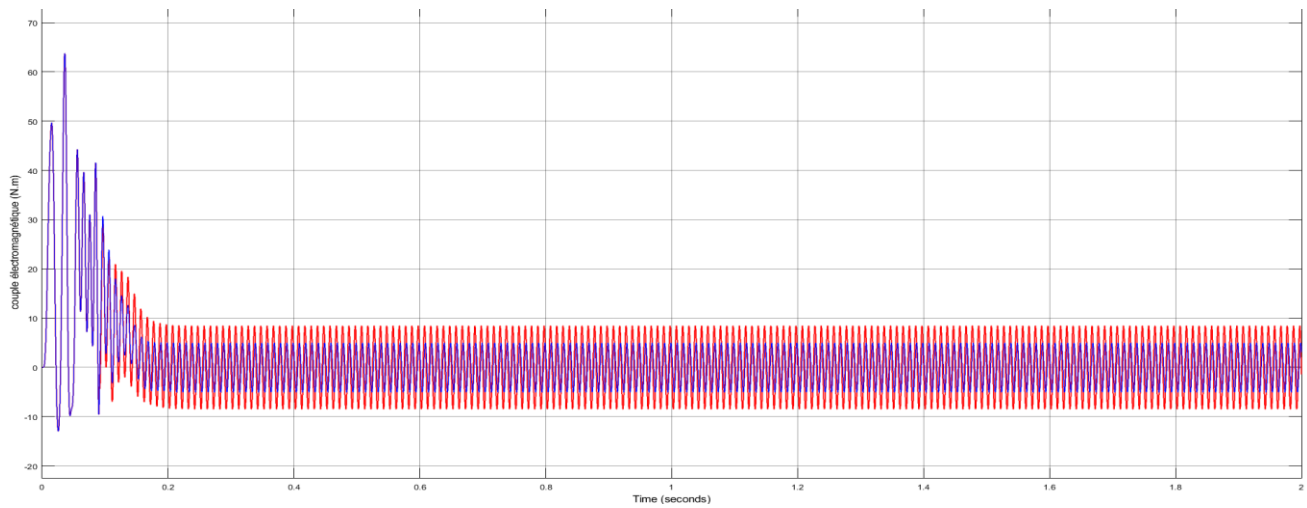


Figure (2.5) : Courbe de couple électromagnétique

- Courbe du moteur à condensateur de démarrage
- Courbe du moteur à condensateur permanent/démarrage

Le moteur (condensateur de démarrage/ permanent) fournit un couple plus élevé et plus stable en régime permanent grâce au condensateur permanent.

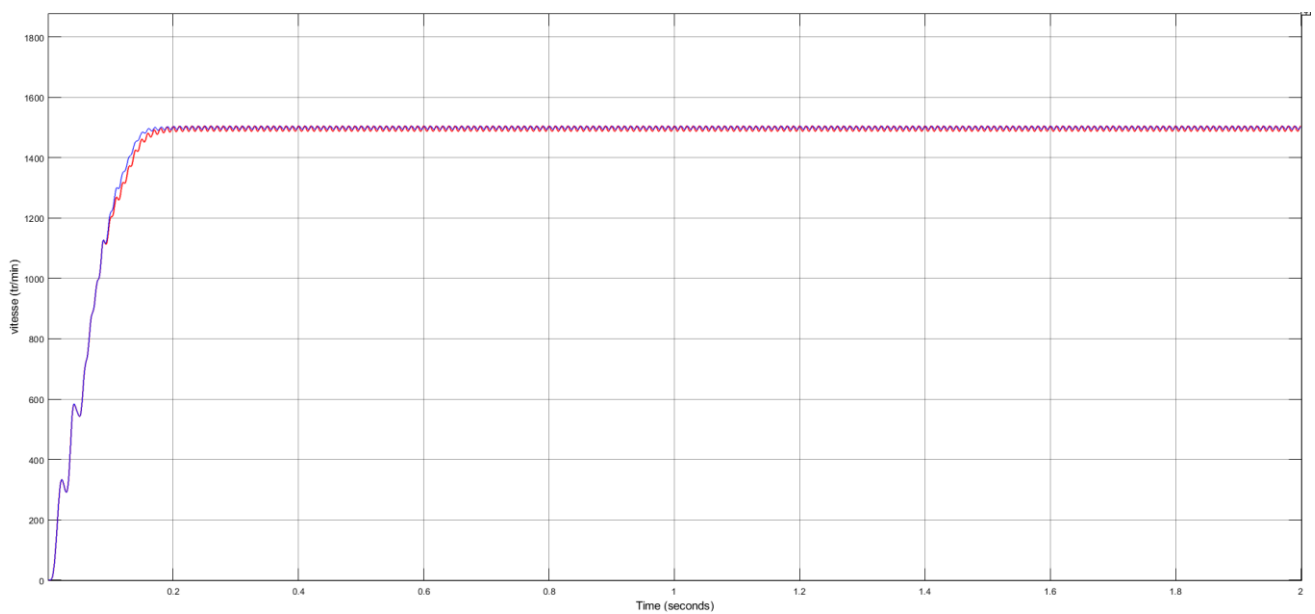


Figure (2.6) : Courbe de vitesse de rotation

- Courbe du moteur à condensateur de démarrage
- Courbe du moteur à condensateur permanent/démarrage

On observe que la vitesse du moteur (condensateur de démarrage) diminue légèrement après la déconnexion du condensateur, mais les deux moteurs atteignent la vitesse nominale.

❖ Conclusion :

Moteur (condensateur de démarrage) :

- Adapté aux applications avec charges temporaires.

Moteur (condensateur de démarrage/ permanent) :

- Adapté aux applications continues avec charges fixes ou variables.
- Offre des performances plus stables et une meilleure efficacité.

3.2. L'impact de la charge sur le moteur asynchrone monophasé avec condensateur de démarrage/permanent :

Le moteur fonctionnera à vide jusqu'à $t = 1\text{s}$, après quoi une charge de $T_m = 10\text{ N.m}$ lui sera appliquée.

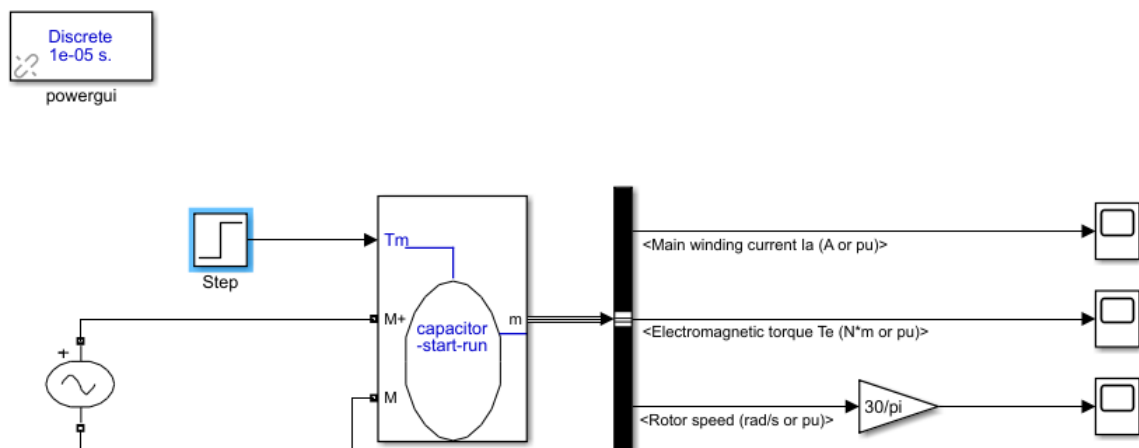
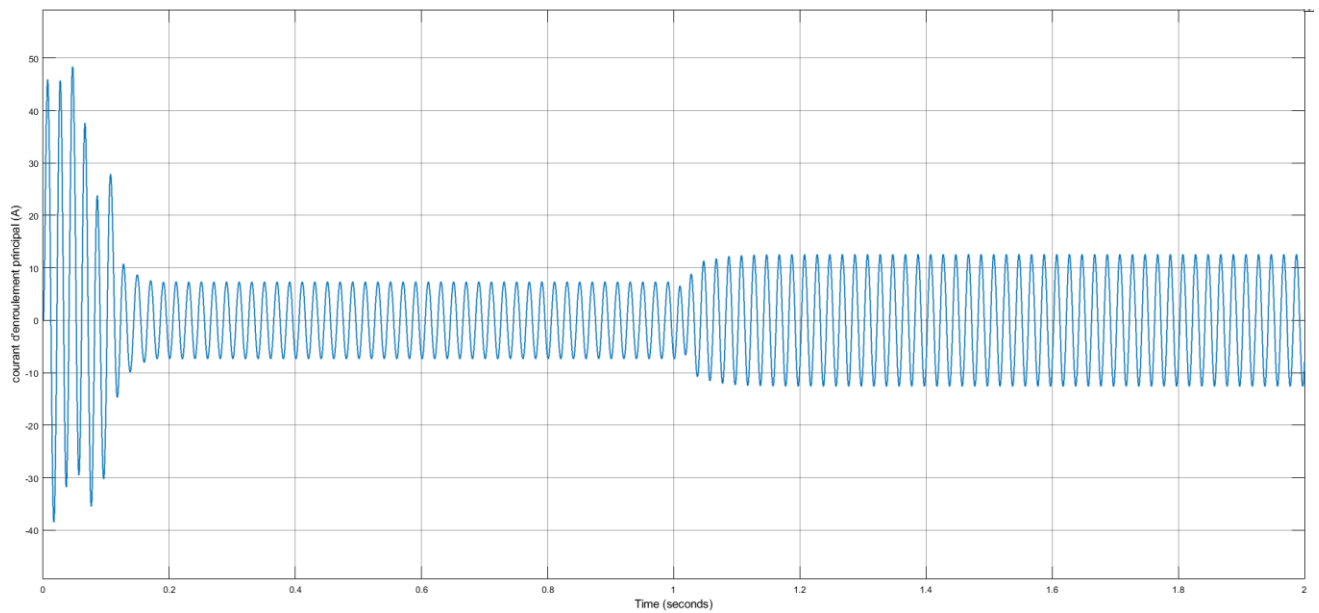
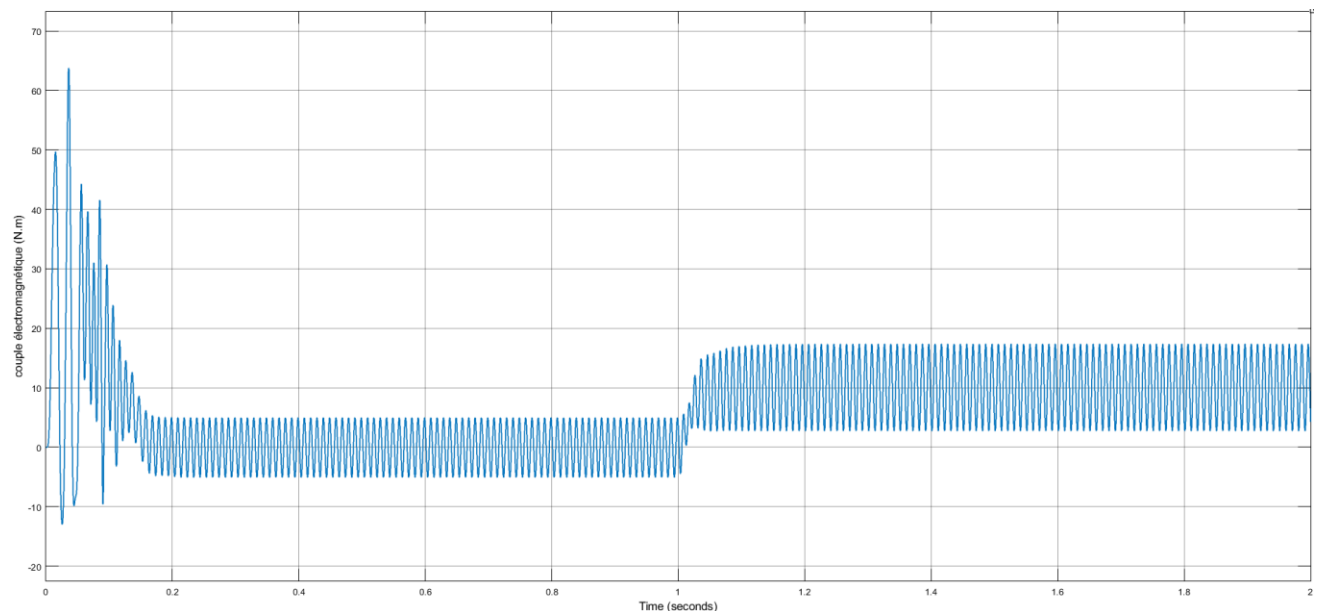


Figure (2.7) : Schéma de simulation d'un moteur à condensateur de démarrage/permanent avec application d'une charge à l'instant $t=1\text{s}$

❖ **Commentaire sur les résultats :****Figure (2.8) : Courbe de Tension de condensateur**

On observe une augmentation du courant au démarrage pendant un court instant, puis il chute jusqu'à zéro jusqu'au temps $T=1s$ où sa valeur augmente en raison de la charge appliquée.

**Figure (2.9) : Courbe de couple électromagnétique**

Initialement, le couple est nul puis après application de la charge.

sa valeur s'élève à $T_e=10 \text{ N.m}$

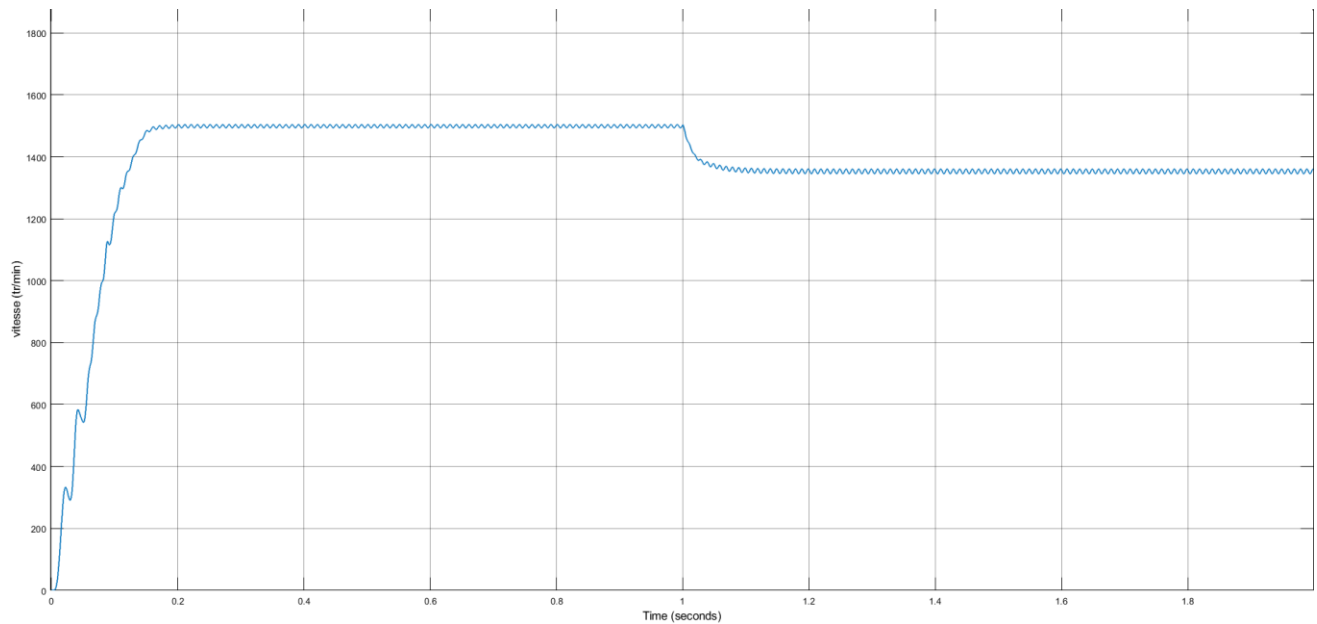


Figure (2.10) : Courbe de vitesse de rotation

On observe une élévation rapide de la courbe de vitesse jusqu'à **1480 tr/min**, puis à **t=1s**, la vitesse chute à **1380 tr/min** en raison de la charge appliquée.

3.3. Commande de le moteur monophasé à condensateur permanent/démarrage :

Pour commander un moteur asynchrone monophasé à condensateur permanent/démarrage l'utilisation d'un onduleur est essentielle pour fournir une tension et une fréquence adaptées au fonctionnement efficace du moteur.

3.3.1. L'onduleur :

L'onduleur est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie d'une source de tension (courant) continue en énergie à tension (courant) alternative. On distingue deux types de convertisseurs selon la source utilisée :

3.3.1.1. Onduleur de courant :

L'onduleur de courant transforme un courant continu en courant alternatif. Ce type d'onduleur ne permet que le réglage de la fréquence des grandeurs de sortie, tandis que l'amplitude de la sortie doit être réalisée par ajustement de la grandeur d'entrée. [2]

3.3.1.2. Onduleur de tension :

L'onduleur de tension transforme une tension continue en une autre alternative. Une commande adéquate permet le réglage de la fréquence et de l'amplitude des grandeurs de sortie.

Les différentes structures des convertisseurs de base peuvent être classées à deux familles selon l'utilisation :

a. Onduleur non autonome :

Les onduleurs non autonomes (redresseurs), sont les onduleurs dont la fréquence et la tension alternative sont imposées par le réseau qui l'alimente. Dans ces onduleurs, la commutation est naturelle.

b. Onduleur autonome :

L'onduleur autonome ne demande aucun réseau alternatif pour fonctionner, il transforme la puissance fournie par un générateur continu en une puissance alternative de fréquence f et de tension efficace V donnée par le générateur continu et le type de commande de l'onduleur. Dans ce type d'onduleur la commutation est forcé.

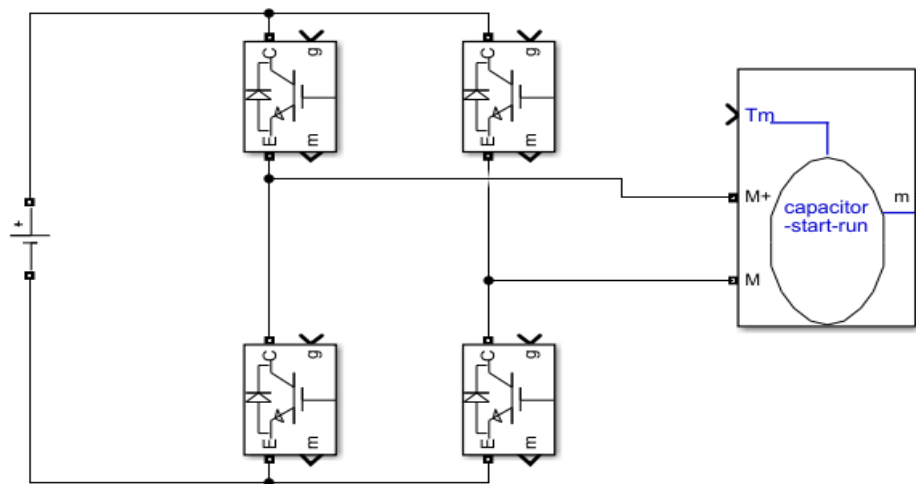


Figure (2.11) : Schéma d'association convertisseur-machine

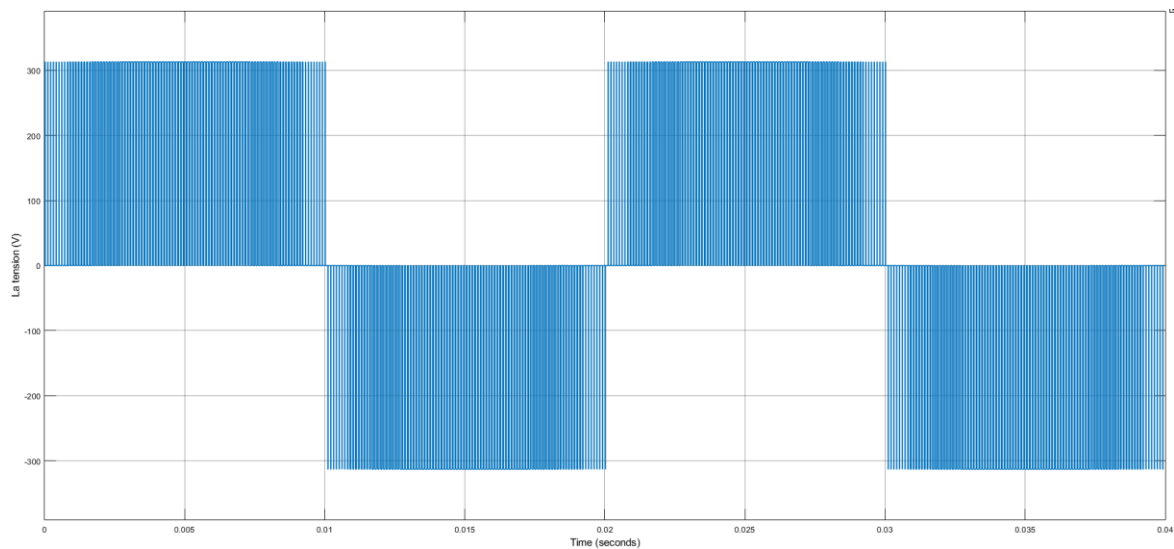


Figure (2.12) : Courbe de tension en sortie de l'onduleur

3.3.2. Techniques de modulation :

- Les techniques en boucle fermée (commande à hystérésis)
- Les techniques en boucle ouverte (PWM ou MLI)

Les techniques en boucle fermée dite à hystérésis utilisent un comparateur dit à hystérésis pour faire situer le signal mesuré par rapport à sa référence d'où l'appellation en boucle fermée. L'inconvénient de ces méthodes est la fréquence de commutation variable.

Les techniques en boucle ouverte ne nécessitent pas de retour d'information sur la grandeur mesurée du moment que les signaux de commande sont générés par comparaison de signaux en provenance du circuit de commande, l'un dit porteuse fixant la fréquence de commutation des interrupteurs, l'autre dit la modulante fixant la fréquence du signal de sortie. Dans ces techniques la fréquence de commutation est constante. [6]

a. boucle ouverte :

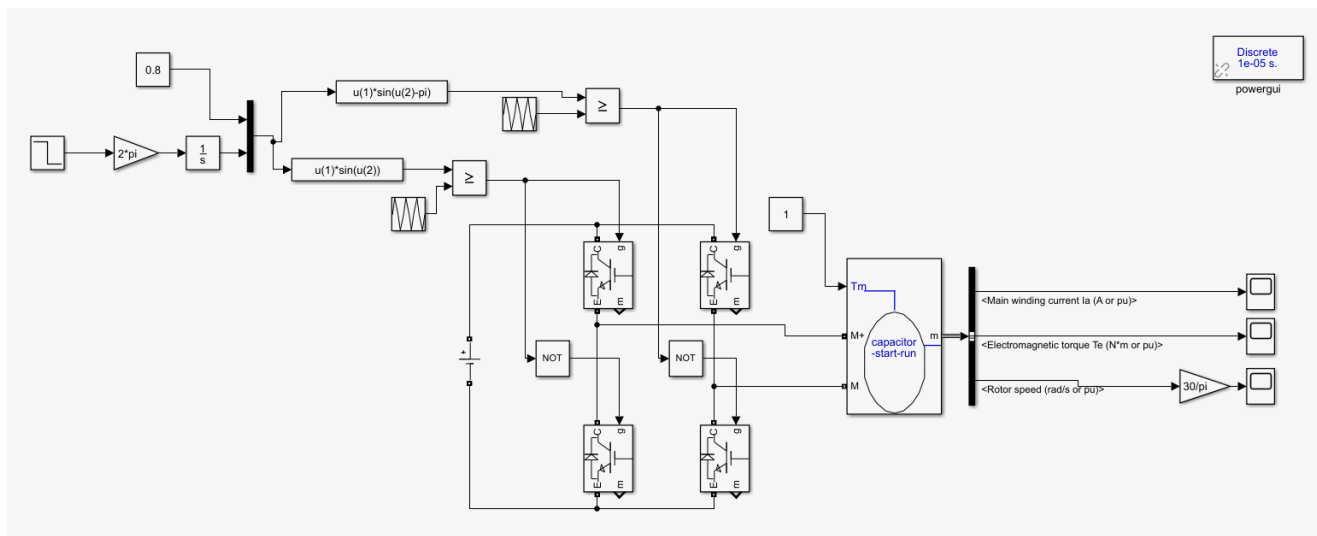


Figure (2.13) : Schéma de simulation en boucle ouverte. [8]

❖ Commentaire sur les résultats :

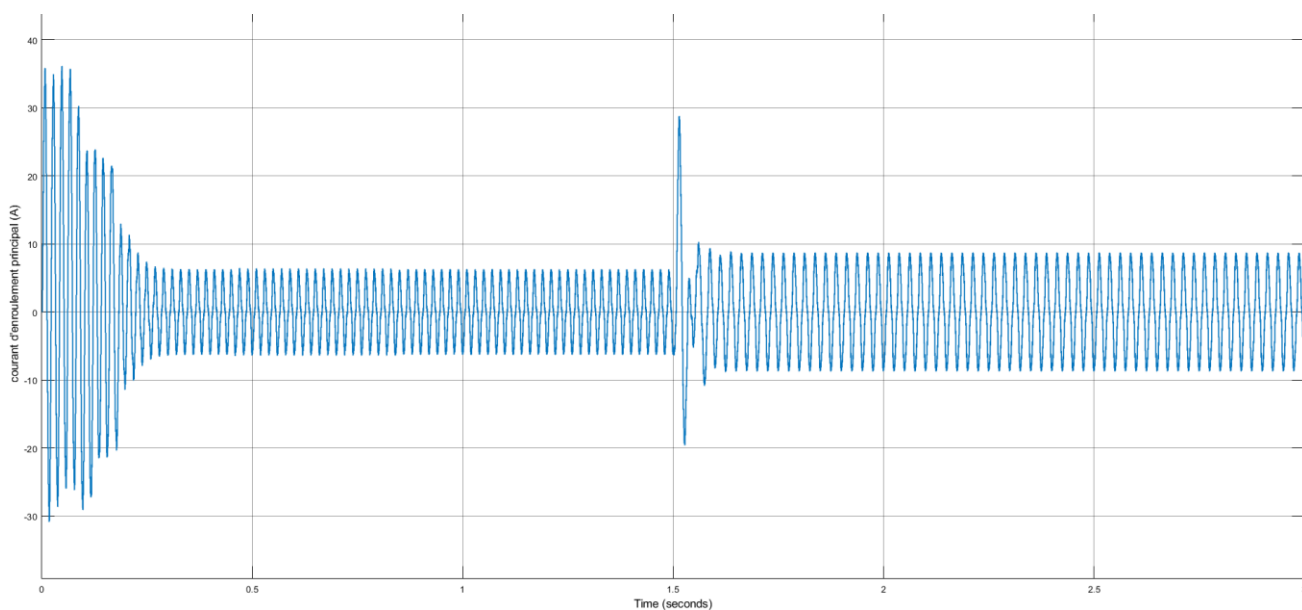


Figure (2.14) : Courbe de courant d'enroulement principal

- Démarrage (0 à 0,25 s) : Le courant augmente en raison du pic de démarrage nécessaire pour surmonter l'inertie.
- Régime stable (0,5 à 1,5 s) : Le courant se stabilise à une valeur constante.
- À 40 Hz (1,5 à 3s) : Le courant augmente légèrement en raison de la réduction de vitesse et de la charge relative accrue.

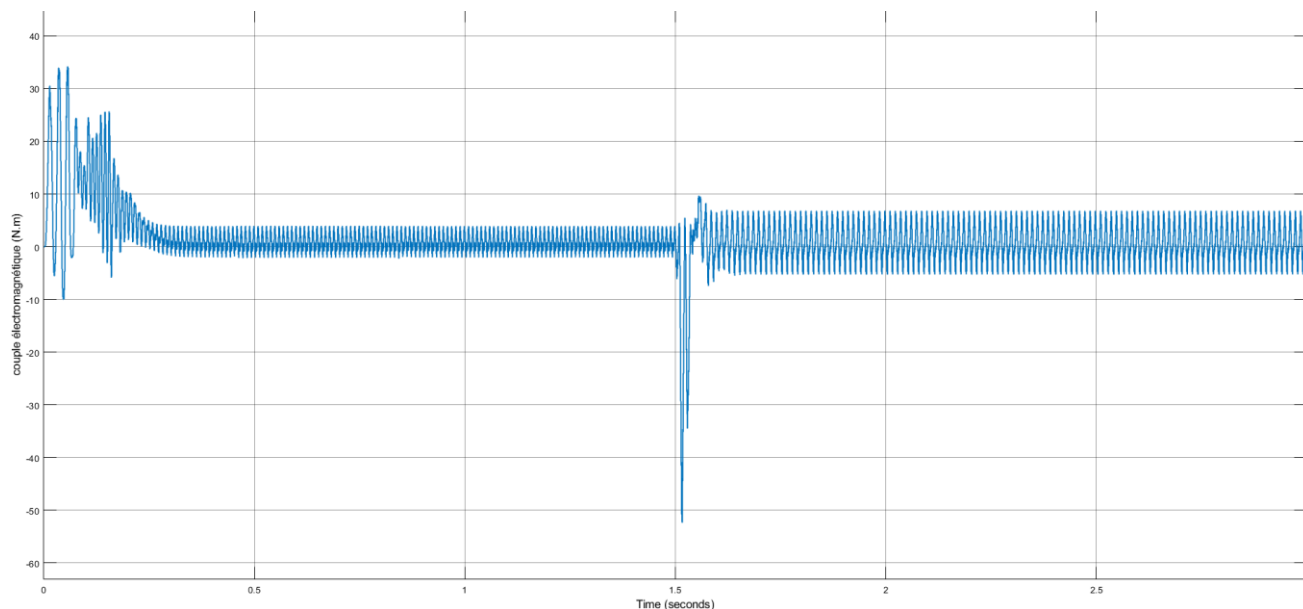


Figure (2.15) : Courbe de couple électromagnétique

- Démarrage : Pic de couple dû au couple de démarrage élevé des moteurs monophasés.
- Régime stable : Le couple se stabilise en fonction de la charge.
- Changement de fréquence : Variation légère du couple selon les conditions de charge et le point de fonctionnement.

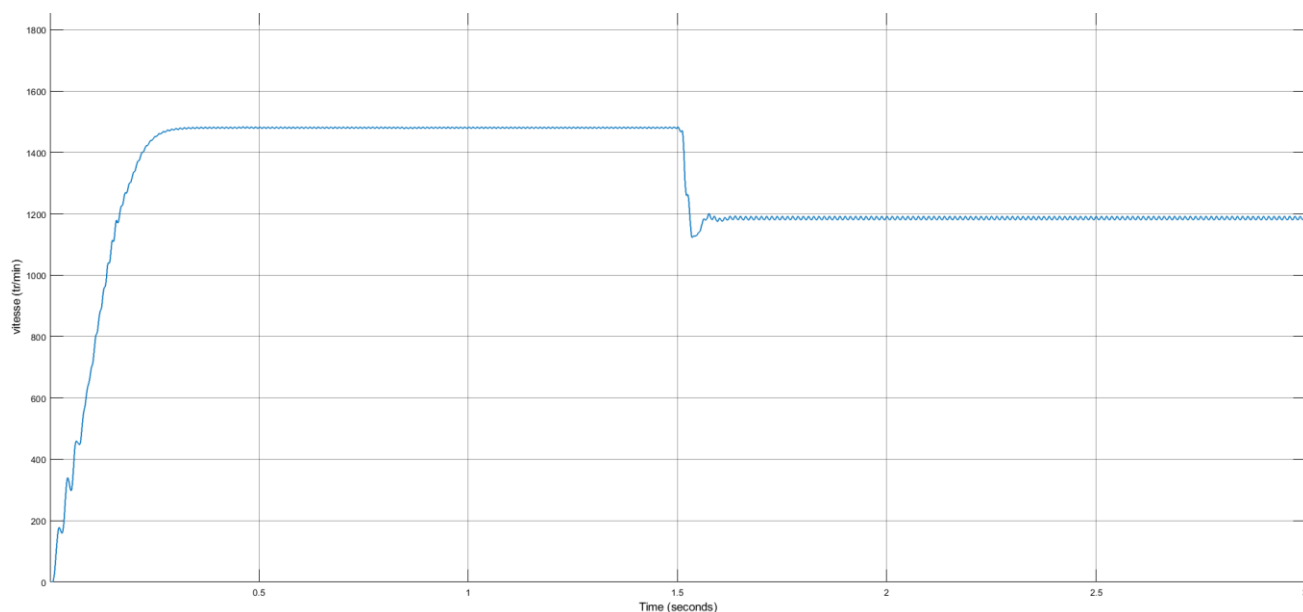


Figure (2.16) : Courbe de vitesse de rotation

- À 50 Hz (0 à 1.5 s) : La vitesse atteint une valeur synchrone d'environ 1480 tr/min (typique pour un moteur asynchrone).
- À 40 Hz (1.5 à 3 s) : La vitesse chute à environ 1200 tr/min, conformément à la relation linéaire entre fréquence et vitesse dans les moteurs asynchrones.

❖ Conclusion :

- Effet du changement de fréquence :
 - La réduction de fréquence (50 Hz $\rightarrow$ 40 Hz) entraîne une baisse de vitesse, conformément à la théorie des moteurs asynchrones .
 - Adaptation du courant et de la tension pour répondre aux exigences de charge.
- Performance du moteur :
 - Fonctionne efficacement aux deux fréquences, avec une légère augmentation du courant à 40 Hz due aux nouvelles conditions de charge.
 - Maintien d'un couple stable malgré les variations, démontrant une bonne robustesse.

b. boucle fermée :

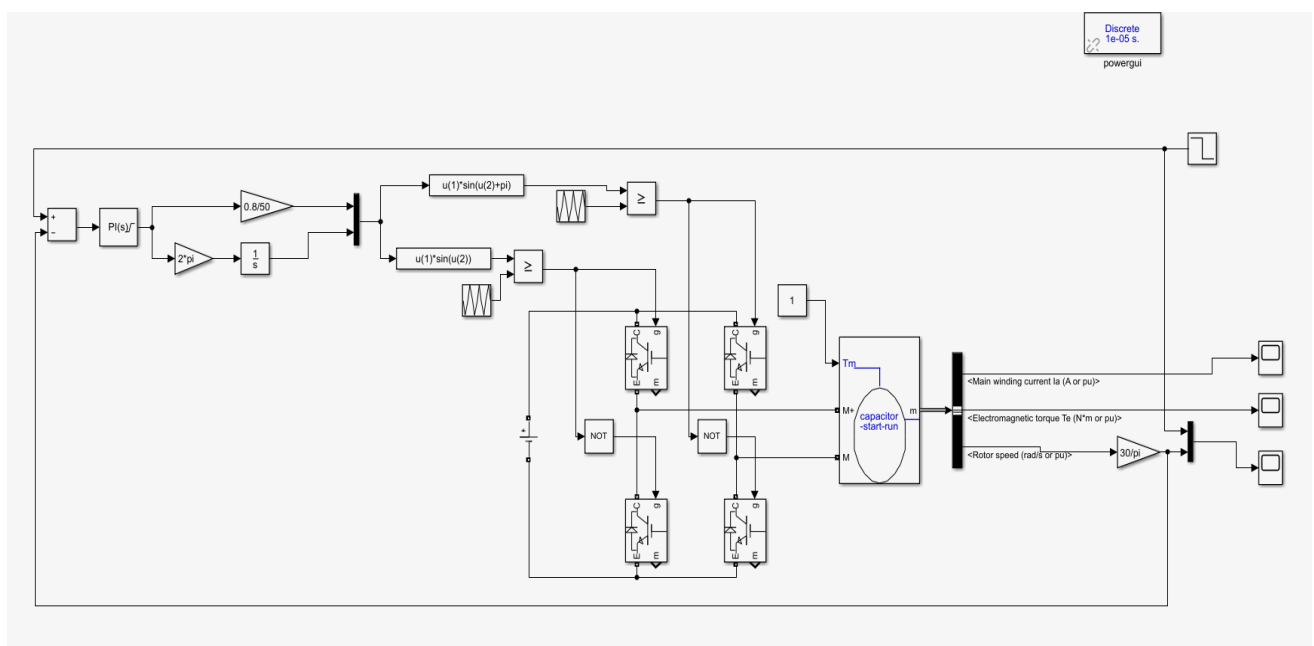
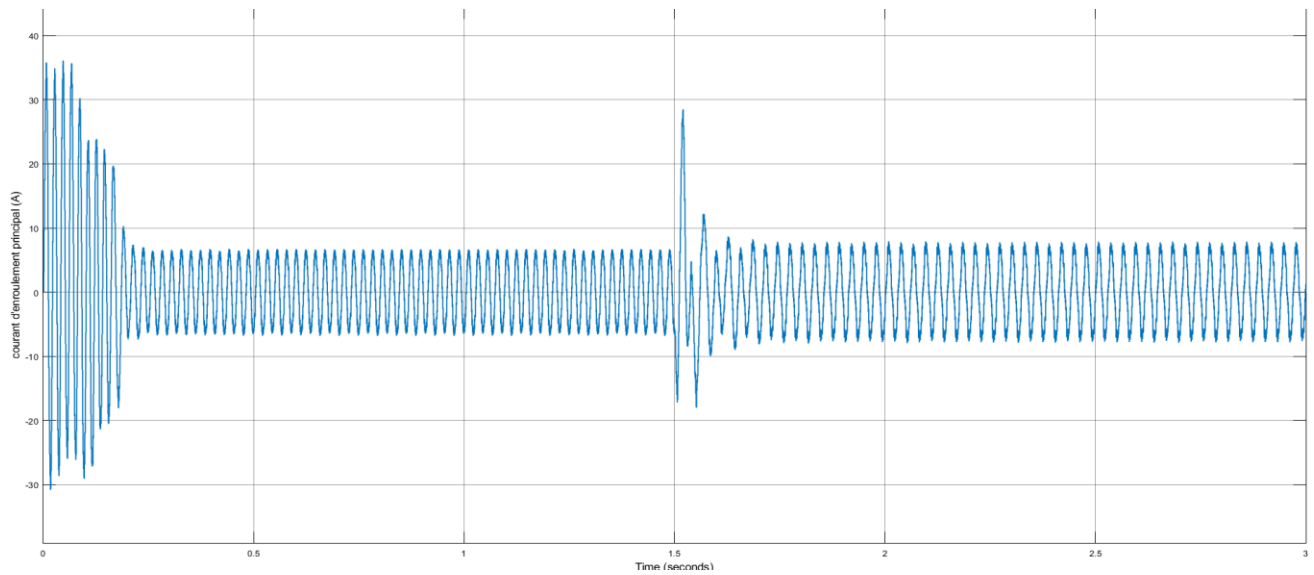
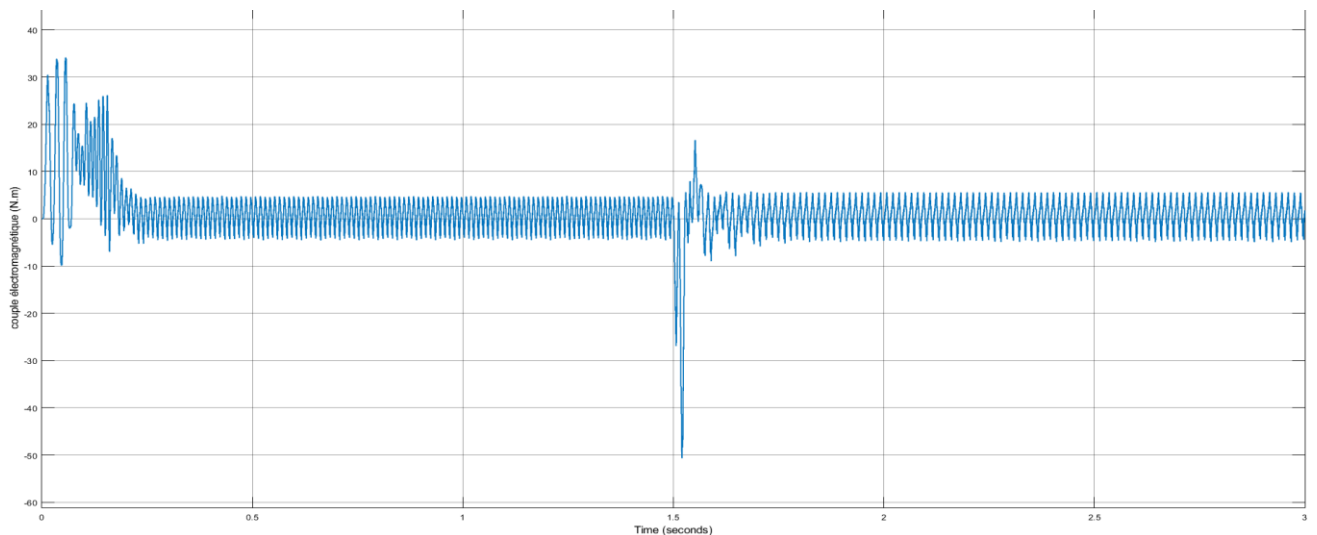


Figure (2.17) : Schéma de simulation en boucle fermée. [8]

❖ Commentaire sur les résultats :**Figure (2.18) : Courbe de courant d'enroulement principal**

- Pic important au démarrage dû au courant d'appel élevé
- Stabilisation du courant une fois la vitesse cible atteinte
- Augmentation temporaire du courant lors du changement de vitesse

**Figure (2.19) : Courbe de couple électromagnétique**

- Couple de démarrage élevé grâce au mécanisme du condensateur de démarrage
- Stabilisation du couple à la valeur requise pour la charge

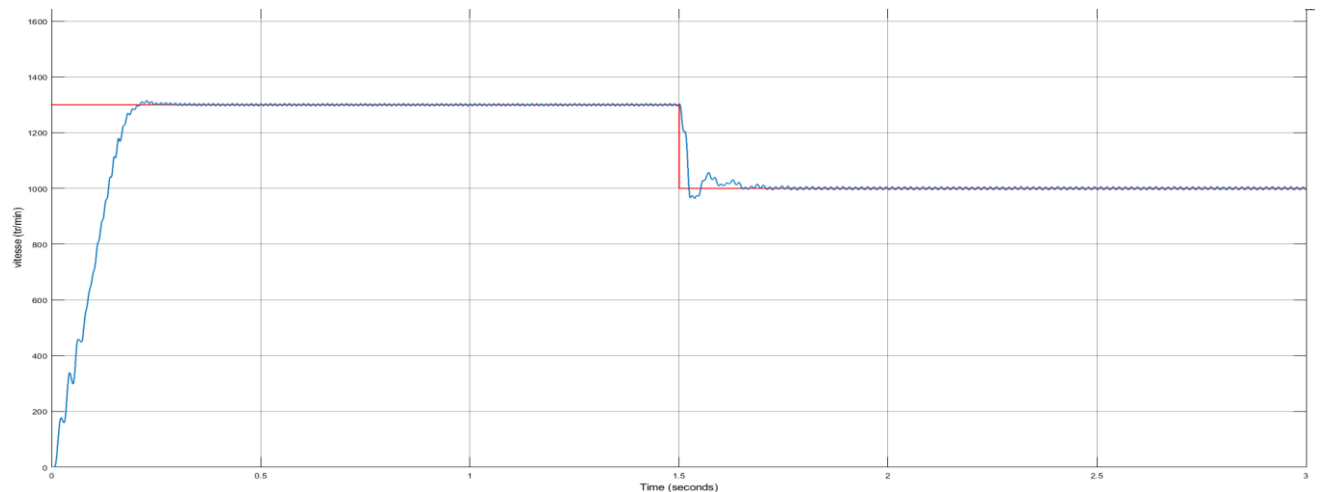


Figure (2.20) : Courbe de vitesse de rotation

On observe une baisse de la tension du condensateur lors du changement de vitesse à 1000 tours/minute.

❖ Conclusions et performance du système :

- La modification de vitesse par ajustement conjoint de la fréquence et de la tension est une méthode efficace pour les moteurs monophasés
- Le moteur atteint des vitesses proches des valeurs cibles (1300 et 1000 tr/min)
- La variation simultanée de la tension et de la fréquence permet de maintenir le flux constant, évitant ainsi la saturation magnétique, l'échauffement excessif ou l'affaiblissement du moteur.

4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons développé une modélisation complète du moteur asynchrone monophasé et analysé les performances des deux configurations moteur à condensateur de démarrage comparé au moteur à condensateur permanent/démarrage. Les résultats démontrent que le moteur équipé d'un condensateur permanent/démarrage présente des avantages significatifs en termes de stabilité du couple et d'efficacité énergétique en régime permanent, tandis que le moteur à condensateur de démarrage seul s'avère plus adapté aux applications à charges intermittentes. Les simulations en boucle ouverte et fermée ont validé la robustesse du système et l'efficacité des stratégies de commande pour la régulation de vitesse.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Cette étude a permis d'aboutir à plusieurs constats majeurs concernant le contrôle des moteurs asynchrones monophasés. Le développement d'un modèle mathématique précis a constitué une avancée significative, permettant de simuler avec fiabilité le comportement dynamique de ces moteurs dans différentes conditions de fonctionnement. Les simulations ont particulièrement mis en évidence l'efficacité des systèmes utilisant un condensateur permanent/démarrage, qui offrent des performances supérieures en termes de stabilité du couple et d'efficacité énergétique par rapport aux configurations traditionnelles.

L'approche adoptée dans cette recherche, combinant modélisation théorique rigoureuse et validation par simulation, a démontré son utilité pour l'analyse et l'optimisation des systèmes de contrôle. Cependant, certaines limites méritent d'être soulignées, notamment les simplifications inhérentes aux modèles mathématiques et l'absence de validation expérimentale sur des prototypes physiques. Ces contraintes ouvrent naturellement la voie à des investigations complémentaires pour consolider les résultats obtenus.

Les perspectives de recherche qui se dessinent sont nombreuses et prometteuses. L'intégration des techniques d'intelligence artificielle, le développement de nouveaux matériaux magnétiques, ainsi que l'extension des travaux aux systèmes multi-moteurs et aux applications dans le domaine des énergies renouvelables représentent autant de pistes fécondes pour approfondir cette thématique. Ces développements pourraient conduire à des solutions encore plus performantes et adaptées aux défis énergétiques actuels.

Au-delà des résultats techniques, ce travail contribue à une meilleure compréhension des mécanismes fondamentaux régissant le fonctionnement des moteurs asynchrones monophasés. Il fournit également des outils méthodologiques qui pourront être réutilisés et adaptés pour traiter des problématiques similaires dans le domaine de la commande des machines électriques. La complémentarité entre approche théorique et validation par simulation s'est avérée particulièrement pertinente pour ce type d'étude.

En définitive, les avancées réalisées dans cette recherche, bien que modestes à l'échelle du vaste champ des machines électriques, représentent une contribution utile à l'optimisation des systèmes existants. Elles posent également les bases pour des travaux ultérieurs plus ambitieux, visant à concilier performance énergétique, fiabilité et coût dans la conception des actionneurs électriques de demain. Le caractère polyvalent des méthodes développées laisse entrevoir des applications potentielles dans divers secteurs industriels où les moteurs monophasés jouent un rôle clé.

Bibliographie :

- [1] **BOUBEKKI** : "Commande d'une machine asynchrone monophasée par réseaux de neurones" (PPE) , E.N.P , génie électrique 2002.
- [2] **M. LOUDAHI Mehena** : "Commande d'une Machine Asynchrone Monophasée par Logique Floue" (PPE) , E.N.P , génie électrique 2004.
- [3] **HASSAN OUQUELLE** : "CONCEPTION ET VALIDATION D'UN MODÈLE DE SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE MONOPHASÉE" MÉMOIRE , ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC , 2005.
- [4] **BOUZARIA Samy , OUIKENE Arezki** : " Conception d'un moteur asynchrone monophasé" Mémoire de Fin d'Etude , UNIVERSITE MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU , 2022.
- [5] **ACHEMOUN Hakim , MESSAOUDI Ali** : " Etude et conception d'un moteur asynchrone monophasé à condensateur permanent", Mémoire de Fin d'Etude , UNIVERSITE MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU , 2023.
- [6] **Boubaker kerchou , Bouskaya ahmed** : " Commande vectorielle du moteur asynchrone monophasé", Mémoire de Fin d'Etude , UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI 2011.
- [7] **Taous sami, Kadi moussa** : " Conception et simulation d'un moteur asynchrone monophasé à cage d'écureuil", Mémoire de Fin d'Etude , UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA , 2021.
- [8] <https://youtube.com/playlist?list=PLUSE6w0Kh7fK5On6rnDRHvsB0jDSNR93H&si=2b47PTvNuWCU12XU>
- [9] **LAIHI Hanane** : " ETUDE ET FONCTIONNEMENT D'UN MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE" MÉMOIRE DE MASTER , Université Mohamed Khider de Biskra , 2024