

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Présenté par

SALEM Nour Elislam

Et

BELGROUN Aimen

Filière : Hydrocarbure

Spécialité : Génie électrique - électricité Industrielle

Thème

**La protection d'un moteur asynchrone
triphase**

Devant le jury :

KIFOUCHE

Rezki

MCA

UMBB

Président

KHELIFI

Fateh

MAA

UMBB

Examineur

KESRAOUI

Mohamed

Pr

UMBB

Encadrant

Année Universitaire : 2024/2025

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie
Département : Automatisation des Procédés et Electrification
Filière : Hydrocarbure
Spécialité : Génie électrique - électricité Industrielle

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER
Thème

La protection d'un moteur asynchrone triphasé

Présenté par :
SALEM Nour Elislam
BELGROUN Aimem

Avis favorable de l'encadrant :
Nom et prénom : KESRAOUI Mohamed
signature :

Avis favorable du Président du jury
Nom et Prénom : KIFOUICHE Rezki
Signature :
Cachet et signature

REMERCIEMENTS

Louange à Allah, le Tout-Puissant,

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos parents,

Monsieur et Madame Nous, pour leur amour inconditionnel, leur soutien moral et financier, ainsi

que pour leur patience et leurs prières constantes, qui ont été une source précieuse de motivation et

de persévérance tout au long de notre parcours.

Nos remerciements les plus sincères vont également à Monsieur Mohamed Kesraoui,

Notre encadrant universitaire, pour son encadrement attentif, ses conseils éclairés, et sa

disponibilité permanente. Sa rigueur scientifique, sa pédagogie et son engagement ont largement

contribué à la qualité de ce mémoire.

Dédicaces

À nos chers parents,

Pour votre amour incommensurable, votre soutien inébranlable et vos encouragements constants. Vous êtes notre source d'inspiration et de force. Sans vous, rien de tout cela n'aurait été possible. Cette réussite est le reflet de tout ce que vous nous avez transmis.

À notre famille élargie,

Pour votre soutien moral et votre affection. Votre présence dans notre vie nous a donné la motivation nécessaire pour persévérer et aller de l'avant.

À nos amis,

Pour votre amitié sincère, votre compréhension et vos encouragements. Votre présence a rendu cette aventure académique bien plus agréable, enrichissante et inoubliable.

Enfin, à chacun d'entre vous,

Nous vous dédions ce travail avec toute notre gratitude et notre affection.

Sommaire

<

REMERCIEMENTS	3
Dédicaces	4
Résumé	7
Abstract	8
الملخص	9
Liste des tableaux.....	10
Liste des figures	11
Introduction Générale	1
Chapitre I Généralités sur les moteurs asynchrones	3
Chapitre II Défauts et dispositifs de protection	17
Principe:	26
Courbes de déclenchements	26
Leurs limites sont :	27
Les caractéristiques des disjoncteurs :	28
Choix des disjoncteurs :	30
Les relais thermiques tripolaires :	33
Les relais compensés :	33
Les relais sensible à une perte de phases :	33
Les relais à sonde à thermistances PTC :	34
Chapitre III Modèle Mathématique de MAS.....	38
Chapitre IV Simulation d'un moteur asynchrone dynamique	48
Chapitre V Dimensionnement Disjoncteur et Relais	56
Principe :	58
Formule utilisée :	58
Données spécifiques :	58
Principe :	58
Formules utilisées :	58
Données spécifiques :	58
Principe :	59

Recommandation :	59
Application :	59
Principe :	59
Recommandation :	60
Calcul indicatif :	60
Principe :	60
Note :	61
Principe :	61
Condition de vérification :	61
Données spécifiques :	62
Conclusion Générale	65

Résumé

Ce mémoire s'intéresse à la protection des moteurs asynchrones triphasés, largement utilisés dans l'industrie pour leur fiabilité, leur robustesse et leur simplicité de fonctionnement. Malgré leurs nombreux avantages, ces machines restent exposées à différents types de défauts, notamment les courts-circuits, les surcharges, l'échauffement excessif, les pertes de phases et les courants de démarrage élevés. Ces dysfonctionnements peuvent causer des dommages importants si une protection adéquate n'est pas mise en place.

Le travail commence par une étude générale du moteur asynchrone, en expliquant sa structure, son principe de fonctionnement, ainsi que les différents types de rotors. Ensuite, une analyse détaillée des défaillances possibles est présentée, suivie de l'étude des dispositifs de protection couramment utilisés, tels que les fusibles, les disjoncteurs magnétothermiques et les relais thermiques.

Une modélisation mathématique rigoureuse du moteur est ensuite développée à l'aide des transformations de Park et Concordia, permettant une analyse dynamique du comportement de la machine. Cette modélisation est exploitée dans une simulation numérique visant à observer l'évolution du couple, de la vitesse et des courants lors du démarrage et en régime permanent.

Enfin, un chapitre est consacré au dimensionnement des protections électriques, avec des calculs précis permettant de sélectionner les disjoncteurs et relais thermiques en fonction des caractéristiques réelles du moteur.

Ce mémoire apporte ainsi une approche complète mêlant théorie, modélisation, simulation avec MATLAB\SIMULINK et application pratique, en vue d'assurer une protection efficace des moteurs asynchrones dans les environnements industriels.

Abstract

This thesis focuses on the protection of three-phase asynchronous motors, widely used in industry due to their reliability, robustness, and simple operation. Despite these advantages, such machines are exposed to various faults like short circuits, overloads, overheating, phase loss, and high starting currents. The absence of proper protection can lead to severe damage.

The study begins with an overview of the asynchronous motor, covering its structure, operation principle, and rotor types. Then, it analyzes common faults and standard protection devices such as fuses, thermal-magnetic circuit breakers, and thermal relays. A mathematical model is developed using Park and Concordia transformations to analyze the dynamic behavior of the motor. This model is simulated using MATLAB/Simulink to observe torque, speed, and current evolution.

Finally, the work addresses the sizing of protection components based on the motor's actual characteristics. This thesis offers a complete approach combining theory, modeling, simulation, and practical application to ensure effective motor protection in industrial environments.

الملخص

تُستخدم المحركات غير المتزامنة ثلاثية الطور على نطاق واسع في المجال الصناعي بسبب بساطتها، متانتها، لكن رغم هذه المزايا، فهي معرضة لمشاكل مثل الدوائر القصيرة، الحمل الزائد، السخونة الزائدة، وقلة تكلفتها هذه الأعطال قد تسبب أضرارًا كبيرة إذا لم تتم حمايتها بشكل جيد. فقدان أحد الأطوار، والتيارات العالية عند الإقلاع جيد.

يهدف هذا البحث إلى دراسة كيفية حماية هذه المحركات من خلال تحليل مكوناتها، وطريقة عملها، وأنواع كما يتناول البحث أهم الأعطال التي قد تصيب المحرك، ويشرح مختلف وسائل الدوائر المستخدمة فيها الحماية المستعملة مثل المصهرات، القواطع الحرارية المغناطيسية، والمرحلات الحرارية.

تم أيضًا تطوير نموذج رياضي للمحرك باستخدام تحويلات بارك وكونكورديا، وتمت محاكاة هذا النموذج وفي الأخير، لدراسة سلوك المحرك في حالات التشغيل المختلفة MATLAB/Simulink باستخدام برنامج تم حساب واختيار الأجهزة المناسبة لحماية المحرك، مثل القواطع والمرحلات، حسب خصائصه الفعلية.

يمثل هذا العمل دراسة شاملة تجمع بين الجوانب النظرية والعملية، بهدف ضمان تشغيل آمن وفعال للمحركات غير المتزامنة داخل المنشآت الصناعية.

Liste des tableaux

Table 1 : Couplage triangle et Couplage étoile	20
Table 2 : Temps de fusion d'un fusible.....	23
Table 3 : Pouvoir de coupure et de fermeture.	29
Table 4 : Passage d'un système triphasé au système biphasé.	43

Liste des figures

Figure 1 : Coupe d'un moteur asynchrone triphase	4
Figure 2 : la constitution d'un moteur asynchrone triphase.....	5
Figure 3 : Schéma d'une cage d'écureuil	7
Figure 4 : Rotor à bagues	8
Figure 5 : Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone	8
Figure 6 : Schéma équivalent d'un moteur asynchrone	10
Figure 7 : Plaque signalétique d'un moteur asynchrone	11
Figure 8 : Couplage triangle et Couplage étoile	13
Figure 9 : symbole des fusibles	21
Figure 10 : La structure d'un fusible	21
Figure 11 : Courbe de déclenchement d'un fusible *8+	22
Figure 12 : Courbe du pouvoir de limitation	22
Figure 13 : Abaque de détermination de fusibles.....	23
Figure 14 : Disjoncteur magnétique et son symbole	25
Figure 15 : Coupe transversale d'un disjoncteur magnétothermique.....	26
Figure 16 : Symbole d'un disjoncteur magnétothermique :	26
Figure 17 : Courbes de déclenchements d'un disjoncteur.....	27
Figure 18 : Courbe de fonction d'un disjoncteur.	29
Figure 19 : Courbe des circuits	30
Figure 20 : Courbes de fonctionnement d'un disjoncteur	32
Figure 21 : Relais thermique de surcharge et son symbole.....	33
Figure 22 : Symbole contacteur	35
Figure 23 : les dispositifs de protection multiples.....	37
Figure 24 : Représentation schématique d'une machine asynchrone (MAS)	40
Figure 25 : Représentation de la machine asynchrone triphasée et sa machine biphasée.....	45
Figure 26 : Schéma synoptique de la machine asynchrone.....	46
Figure 27 : Schema de bloc du moteur a induction.....	49
Figure 28 : Source d'alimentation Triphasee	50
figure 29 : Schema bloc de la source.....	39
Figure 30 : Schema de bloc de Transformation	51
Figure 31 : les équations différentielles du modèle dq du moteur.	51
Figure 32 : Schema bloc de calcul du Couple.....	52
Figure 33 : Transformation dq \rightarrow abc	52
Figure 34 : figure des tension d'alimentation	53
Figure 35 : Le courant d'alimentation	53
Figure 36 : Le Couple électromagnétique	53
Figure 37 : Vitesse de rotation	54
Figure 38 : Alimentation du moteur.....	57

Introduction Générale

Introduction Générale

Les moteurs asynchrones triphasés représentent aujourd'hui l'un des éléments clés dans le fonctionnement des installations industrielles grâce à leur simplicité de conception, leur robustesse mécanique, leur faible coût de fabrication et leur bonne efficacité énergétique. Ces caractéristiques en font des machines particulièrement prisées dans les systèmes automatisés modernes, où la fiabilité et la durabilité sont des critères essentiels. Leur large utilisation dans divers secteurs industriels, tels que les systèmes de pompage, les convoyeurs, les ventilateurs, les compresseurs ou encore les machines-outils, témoigne de leur adaptabilité à un grand nombre d'applications, qu'elles soient légères ou à forte contrainte.

Cependant, malgré leurs nombreux avantages, ces machines électriques ne sont pas exemptes de défaillances. En effet, elles peuvent être exposées à divers types de défauts électriques et thermiques tels que les surcharges, les courts-circuits, les échauffements excessifs, les défauts d'isolement, ou encore les pertes de phases. Ces anomalies, si elles ne sont pas détectées ou traitées à temps, peuvent entraîner des pannes majeures, des arrêts de production coûteux, une détérioration accélérée des composants, voire des risques pour la sécurité du personnel et des équipements environnants. D'où l'importance cruciale de mettre en œuvre des dispositifs de protection efficaces et bien dimensionnés pour préserver l'intégrité des moteurs et assurer la continuité de service.

Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique industrielle en visant à analyser en profondeur le comportement et les besoins de protection des moteurs asynchrones triphasés. L'objectif principal est de fournir une étude complète, mêlant théorie, modélisation et pratique, pour identifier les types de défauts courants auxquels ces moteurs sont exposés, et proposer les solutions de protection les plus adaptées.

Dans un premier temps, le mémoire présente les bases théoriques en décrivant en détail la constitution du moteur, le fonctionnement du couple stator-rotor, ainsi que le principe d'induction électromagnétique qui en découle. Ensuite, une classification des défaillances les plus fréquentes est exposée, accompagnée d'une étude technique des dispositifs de protection tels que les fusibles, les disjoncteurs magnétothermiques, les relais thermiques et les contacteurs. Ces dispositifs sont analysés selon leurs principes de fonctionnement, leurs caractéristiques techniques et leur domaine d'application.

Par ailleurs, une modélisation mathématique de la machine est développée à l'aide des transformations de Park et de Concordia, permettant de mieux comprendre son comportement électromagnétique en régime dynamique. Cette modélisation est ensuite exploitée dans une simulation numérique, visant à observer les variations du couple, de la vitesse de rotation et des courants en régime transitoire et permanent, afin de mieux appréhender les phénomènes critiques liés au démarrage ou aux variations de charge.

Enfin, une partie est consacrée au dimensionnement des dispositifs de protection, avec des calculs précis permettant de sélectionner correctement les disjoncteurs et les relais thermiques en fonction des caractéristiques du moteur, des normes en vigueur et des conditions d'utilisation.

Chapitre I

Généralités sur les moteurs asynchrones

1.Introduction

Les moteurs asynchrones triphasés occupent une place prépondérante dans le domaine Industriel en raison de leurs nombreux avantages. Leur conception simple, leur robustesse, leur fiabilité et leur coût relativement faible en font des choix privilégiés pour une Grande variété d'applications, allant des systèmes de ventilation aux chaînes de production Automatisées.

Ces moteurs sont dits « asynchrones » car la vitesse de rotation de leur rotor est Toujours inférieure à la vitesse du champ magnétique tournant généré dans le stator. Cette Caractéristique est essentielle à leur fonctionnement, basé sur le principe de l'induction Électromagnétique. Leur alimentation se fait par un courant alternatif triphasé, ce qui permet la création d'un champ magnétique tournant dans le stator. Ce champ induit un courant dans le Rotor, générant à son tour un couple électromagnétique qui met le rotor en mouvement. Grâce à leur simplicité de mise en œuvre, leur efficacité énergétique et leur capacité à Fonctionner dans des conditions sévères, les moteurs asynchrones triphasés sont devenus Les moteurs les plus utilisés dans l'industrie moderne¹.

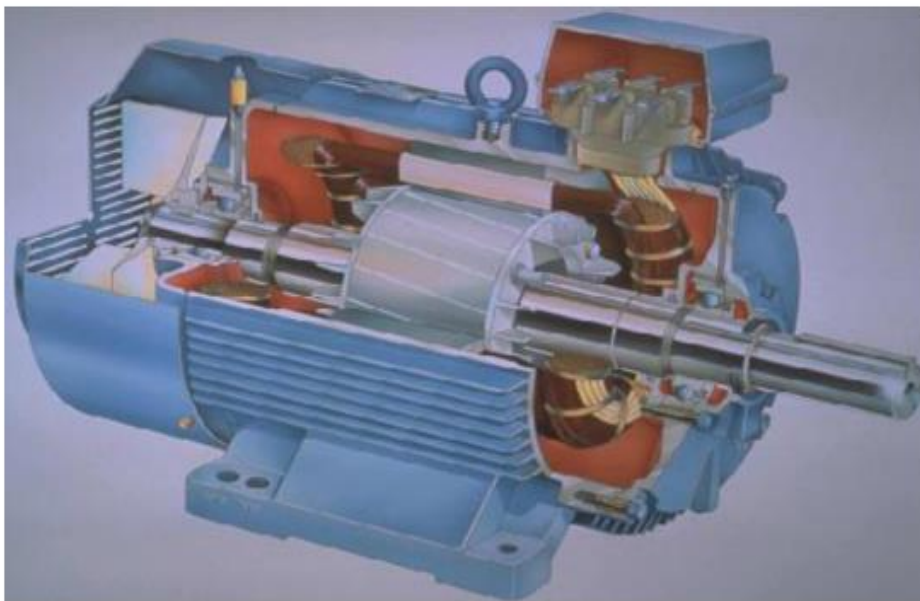


Figure 1.1 : Coupe d'un moteur asynchrone triphase

2.Constitution

Le moteur asynchrone triphasé est constitué principalement de deux parties Essentielles : le stator (partie fixe) et le rotor (partie mobile). Ces deux composants interagissent électromagnétiquement pour produire un mouvement de rotation.

Le stator est formé d'un empilement de tôles magnétiques sur lequel sont enroulés trois bobinages disposés à 120° les uns des autres, destinés à être alimentés par un réseau triphasé. Ces enroulements créent un champ magnétique tournant qui joue un rôle fondamental dans le principe de fonctionnement du moteur. Le rotor, quant à lui, est placé à l'intérieur du stator avec un entrefer très réduit afin de faciliter l'induction magnétique

Il existe principalement deux types de rotors :

- Le rotor en cage d'écureuil, largement utilisé pour sa simplicité et sa robustesse,

— Le rotor bobiné, qui permet un contrôle plus fin du démarrage grâce à l'utilisation de résistances externes connectées via des bagues collectrices. Cette structure permet au moteur asynchrone d'être adapté à de nombreuses applications industrielles, tout en offrant un bon rendement et une grande fiabilité².

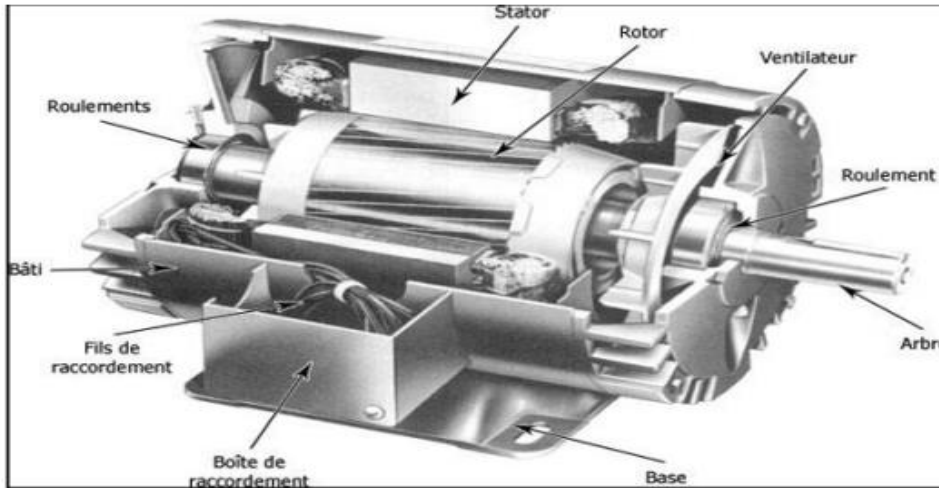


Figure 1.2. la constitution d'un moteur asynchrone triphase

2.1.Stator

Le stator constitue la partie fixe du moteur asynchrone triphasé. Il est composé d'un noyau en tôle ferromagnétique empilée afin de réduire les pertes par courants de Foucault, et est muni de rainures dans lesquelles sont logés les enroulements statoriques.

Ces enroulements sont constitués de fils de cuivre isolés, répartis en trois phases séparées de 120° électriques, et sont conçus pour être alimentés par un réseau triphasé. Selon les besoins d'alimentation, ils peuvent être couplés en étoile (Y) ou en triangle (Δ)³.

L'objectif principal du stator est de générer un champ magnétique tournant lorsqu'il est alimenté. Ce champ traverse l'entrefer et coupe les conducteurs du rotor, induisant ainsi des courants qui sont à l'origine du couple électromagnétique moteur. La qualité de construction du stator, notamment l'isolation des enroulements et la ventilation, est essentielle pour assurer un bon rendement et une longue durée de vie du moteur.

2.2. Rotor

Le rotor est la partie tournante du moteur asynchrone triphasé. Il est placé à l'intérieur du stator, séparé par un entrefer très faible, et a pour rôle de transformer l'énergie électromagnétique induite en énergie mécanique par la rotation de son axe.

On distingue deux grandes familles de rotors selon leur mode de construction :

— Le rotor en cage d'écureuil, le plus couramment utilisé dans les moteurs standards, se compose de barres conductrices (en aluminium ou en cuivre) insérées dans des encoches et reliées à leurs extrémités par deux couronnes conductrices. Ce type de rotor est robuste, simple et nécessite peu d'entretien.

— Le rotor bobiné, également appelé rotor à bagues, contient des enroulements triphasés similaires à ceux du stator, connectés à l'extérieur par l'intermédiaire de bagues collectrices et de balais. Ce système permet l'ajout de résistances externes pour améliorer le contrôle du démarrage et du couple.

La conception du rotor influence directement le comportement dynamique du moteur, notamment lors des phases de démarrage et en cas de variation de charge. Ainsi, le choix du type de rotor dépend des exigences de l'application industrielle visée⁴.

Rotor à cage

Le rotor à cage, également appelé « cage d'écureuil », est la forme la plus répandue de rotor dans les moteurs asynchrones triphasés standards, notamment pour les applications nécessitant un fonctionnement simple, fiable et peu coûteux.

Il est constitué de barres conductrices en aluminium ou en cuivre, disposées parallèlement à l'axe de rotation, et insérées dans les encoches du noyau magnétique. Ces barres sont reliées électriquement à leurs extrémités par deux anneaux conducteurs appelés couronnes. Cette configuration forme un circuit fermé dans lequel des courants induits

Apparaissent lors de l'interaction avec le champ magnétique tournant du stator.

Ce type de rotor présente plusieurs avantages :

- Grande robustesse mécanique,
- Faible coût de fabrication,
- Absence de composants de frottement comme les balais,
- Entretien minimal.

Il est largement utilisé dans les moteurs de faible et moyenne puissance, notamment dans les applications telles que les ventilateurs, les compresseurs, les convoyeurs et autres systèmes automatisés.



Figure 1.3 : Schéma d'une cage d'écureuil

Rotor à double cages

Le rotor à double cage est une variante améliorée du rotor à cage simple, conçue pour optimiser les performances du moteur, notamment au démarrage. Il est particulièrement adapté aux applications nécessitant un couple de démarrage élevé tout en limitant l'intensité du courant absorbé.

Ce type de rotor comporte deux circuits conducteurs superposés :

— La cage extérieure, généralement en bronze ou en aluminium, possède une résistance élevée et une inductance faible. Elle est située près de la surface du rotor, proche de l'entrefer. Son rôle est de fournir un fort couple au démarrage, car elle permet un courant important en réponse à l'induction initiale.

— La cage intérieure, réalisée en cuivre ou matériau équivalent, présente une résistance faible mais une inductance plus élevée, car elle est noyée plus profondément dans le noyau du rotor. Elle prend le relais lorsque la vitesse du moteur augmente, assurant ainsi un bon rendement en régime établi.

Ce montage double cage permet une répartition intelligente du courant en fonction de la vitesse :

- À faible vitesse : la cage extérieure est dominante,
- À haute vitesse : la cage intérieure devient prédominante.

Grâce à cette conception, le rotor à double cage combine les avantages d'un bon couple de démarrage et d'un fonctionnement efficace en régime nominal, ce qui le rend idéal pour les machines à forte inertie comme les compresseurs, les broyeurs ou certaines machines-outils.

Rotor bobiné (à bagues)

Le rotor bobiné à bagues est un type de rotor utilisé dans les moteurs asynchrones triphasés, qui se distingue par l'utilisation de bobines de cuivre ou d'aluminium sur son noyau, reliées à des bagues collectrices. Ces bagues permettent de connecter les enroulements du rotor à un circuit externe via des balais.

Ce type de rotor est souvent utilisé dans des applications où un contrôle du démarrage

est nécessaire, car il permet l'ajout de résistances pour réduire le courant au démarrage et augmenter le couple. Il est également utile dans les moteurs de grande puissance ou ceux nécessitant un démarrage sous charge.

En résumé, le rotor bobiné offre un meilleur contrôle du moteur, notamment lors du démarrage, mais il requiert un entretien plus régulier en raison de l'usure des balais et des bagues collectrices.



Figure 1.4 : Rotor à bagues

3.Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé repose sur l'induction électromagnétique. Lorsque le courant alternatif passe à travers les enroulements du stator, il crée un champ magnétique tournant. Ce champ magnétique induit un courant dans les enroulements du rotor, qui, en réponse, génère un couple permettant la rotation du rotor.

Cette interaction entre le champ magnétique du stator et le courant induit dans le rotor est la base du fonctionnement du moteur asynchrone⁵.

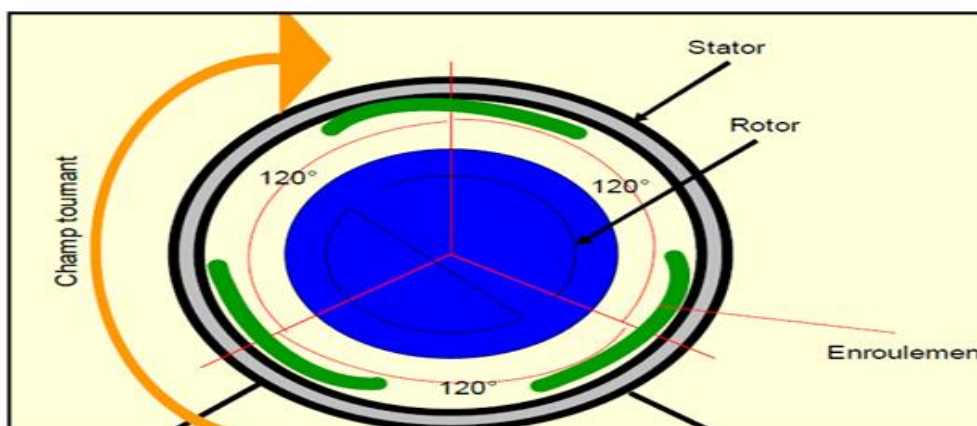


Figure 1.5 : Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone

3.1. Le glissement

Le glissement est une grandeur qui représente l'écart entre la vitesse de rotation du champ magnétique statorique (n_s) et celle du rotor (n_r) dans une machine asynchrone.

Pour que ce type de moteur fonctionne, il doit toujours exister une différence de vitesse entre le champ statorique et le rotor. Le rotor « suit » le champ, mais ne l'atteint jamais complètement, car c'est le champ statorique qui entraîne le rotor.

En général, le glissement est faible et exprimé en pourcentage :

- Environ 2 % pour les machines de forte puissance,
- De 6 à 7 % pour les machines triphasées de faible puissance,
- Jusqu'à 10 % pour les machines monophasées de faible puissance.

Les pertes par effet Joule dans le rotor étant proportionnelles au glissement, une bonne machine doit fonctionner avec un glissement réduit.

3.2. Vitesse de synchronisme (n_s)

La vitesse de rotation du champ magnétique statorique est notée n_s , tandis que la vitesse de rotation réelle du rotor est n_r .

La vitesse de synchronisme dépend de la fréquence de l'alimentation (f) et du nombre de paires de pôles (P) de la machine.

Formules générales : En tr/s (tours par seconde) :

$$n_s = \frac{f}{P}$$

En tr/min (tours par minute) :

$$n_s = \frac{60f}{P}$$

Avec:

- f : fréquence d'alimentation en Hz,
- P : nombre de paires de pôles.

Calcul du glissement Le glissement g est défini comme le rapport entre la différence de vitesse (synchronisme - rotor) et la vitesse de synchronisme :

$$g = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

Il peut également être exprimé à partir des vitesses angulaires :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

Où :

- ω_s : vitesse angulaire du champ statorique,
- ω_r : vitesse angulaire du rotor.

3.3. Les fréquences des courants rotoriques

Les courants induits dans le rotor d'un moteur asynchrone triphasé ont une fréquence qui dépend du glissement. La fréquence des courants rotoriques f_r est liée à la fréquence du courant statorique f_s et au glissement S par la relation suivante :

$$f_r = S \times f_s$$

Où :

- f_s est la fréquence du courant alternatif dans le stator,
- S est le glissement du moteur.

Cela signifie que la fréquence des courants rotoriques est proportionnelle au glissement, et donc, lorsque le glissement augmente (par exemple, au démarrage), la fréquence des courants induits dans le rotor augmente également. Cette relation est essentielle pour comprendre comment le moteur génère du couple en fonction du glissement⁵.

4 . Schéma équivalent d'un moteur asynchrone

Le schéma équivalent d'un moteur asynchrone permet de modéliser le moteur de manière simplifiée, en représentant les principaux éléments électriques qui interviennent dans son fonctionnement. Ce schéma comprend des résistances, des inductances et des sources de tension, permettant de décrire les pertes et le comportement du moteur.

En général, un schéma équivalent comprend :

- La résistance du stator R_s et l'inductance du stator L_s ,
- La résistance du rotor R_r et l'inductance du rotor L_r ,
- La résistance de l'induit du rotor, qui est modifiée par le glissement,
- Une source de tension représentant le champ magnétique tournant généré par le stator.

Ce modèle permet de mieux comprendre les pertes dans le moteur et d'analyser son comportement électrique sous différentes conditions de fonctionnement⁶.

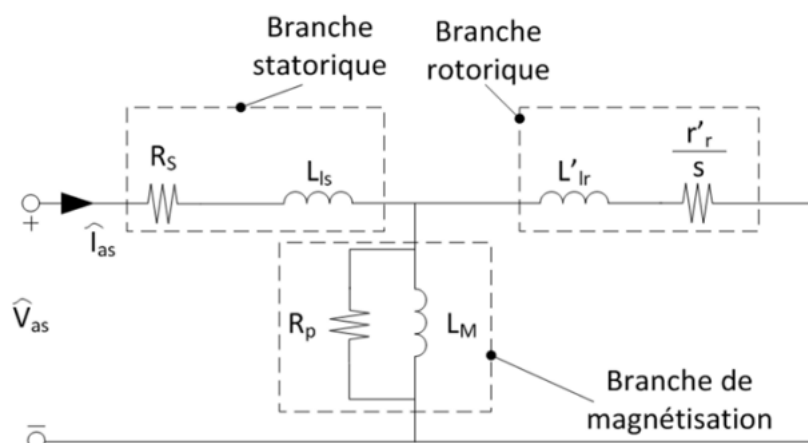


Figure 1.6 : Schéma équivalent d'un moteur asynchrone

4.1. Plaque signalétique

La plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé est une étiquette fixée sur le moteur, contenant des informations essentielles pour le bon fonctionnement et l'identification du moteur. Ces informations incluent généralement :

- La puissance nominale du moteur (en kW ou HP),
- La tension d'alimentation (en V),
- Le courant nominal (en A),
- La fréquence (en Hz),
- La vitesse synchrone et la vitesse du rotor (en tours par minute),
- Le rendement du moteur,
- Le facteur de puissance,

Le type de protection du moteur (par exemple, IP55 pour la protection contre la poussière et l'eau).

Ces données sont cruciales pour l'installation, le contrôle et la maintenance du moteur, et permettent également de vérifier que le moteur fonctionne dans des conditions optimales en fonction de ses spécifications techniques⁷.

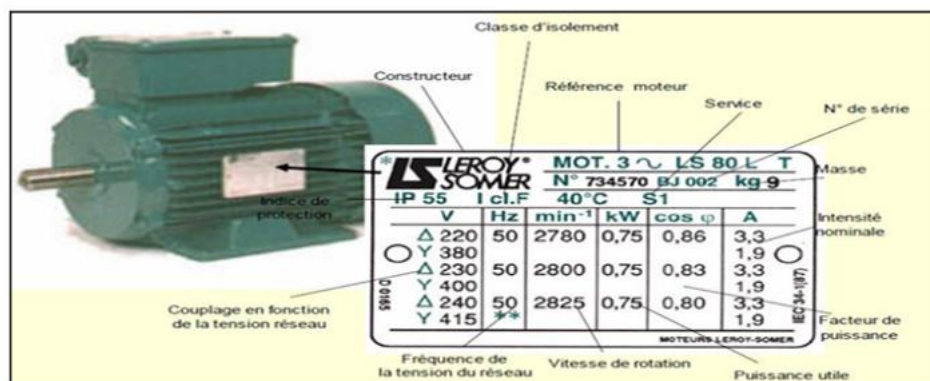


Figure 1.2 : Plaque signalétique d'un moteur asynchrone

5. Mode de couplage

Le mode de couplage des enroulements du stator dans un moteur asynchrone triphasé est essentiel pour déterminer la tension d'alimentation et les caractéristiques de fonctionnement du moteur. Les deux principaux types de couplage utilisés sont le couplage étoile et le couplage triangle. Ces configurations affectent la tension, le courant, et le couple généré par le moteur.

Le choix du mode de couplage dépend de la source de tension disponible et des exigences de l'application, comme le couple au démarrage ou l'efficacité énergétique du moteur⁸.

5.1. Couplage étoile

Le couplage étoile (ou "Y") est une méthode de connexion des enroulements du stator dans laquelle les trois enroulements sont connectés à un point commun, appelé le point neutre. Chaque enroulement du stator est relié à une phase de l'alimentation électrique, et les trois points de connexion sont reliés ensemble pour former un « Y »⁸.

Avantages du couplage étoile :

Réduction de la tension appliquée aux enroulements : Dans un couplage étoile, la tension appliquée à chaque enroulement est réduite par un facteur de $\sqrt{3}$ (environ 1,732), ce qui permet d'adapter la tension du moteur à celle de la source d'alimentation.
Démarrage plus doux : Le moteur démarre avec une tension plus faible, réduisant ainsi le courant de démarrage et minimisant les effets de démarrage sur le réseau électrique.

Utilisation :

Ce type de couplage est couramment utilisé dans les moteurs asynchrones alimentés par des sources de haute tension, afin de diminuer la tension appliquée aux enroulements du stator et d'optimiser les performances du moteur.

5.2. Couplage triangle

Le couplage triangle (ou " Δ ") est une configuration dans laquelle les trois enroulements du stator sont connectés en forme de triangle, chaque enroulement étant relié à deux autres enroulements par des points de connexion. Dans ce mode, chaque enroulement est alimenté par la pleine tension de la source.

$$P_a = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi$$

Avantages du couplage triangle :

Tension maximale sur les enroulements : Le couplage triangle permet d'appliquer la tension nominale complète à chaque enroulement, ce qui permet au moteur de délivrer un couple plus élevé à la même fréquence d'alimentation.

Meilleure performance en régime stable : Une fois démarré, le moteur fonctionne avec une plus grande efficacité, générant plus de puissance et de couple par rapport au couplage étoile.

Utilisation :

Le couplage triangle est souvent utilisé dans les moteurs qui sont alimentés par une tension basse, ou lorsque des performances élevées sont nécessaires, notamment dans des applications industrielles où le couple est crucial.

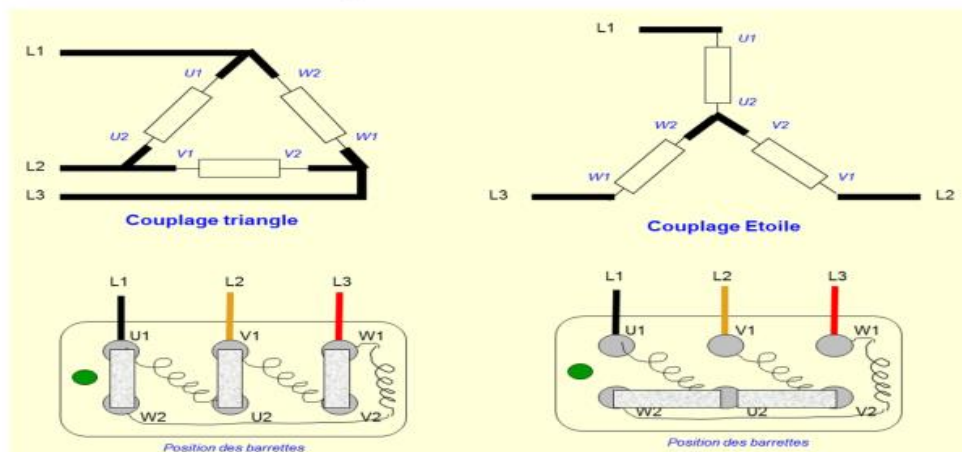


Figure 1.3 : Couplage triangle et Couplage étoile .

6. Le bilan de puissances

Le bilan de puissances dans un moteur asynchrone triphasé permet d'évaluer les différentes formes de puissance qui circulent à travers le moteur. Ces puissances incluent la puissance active, la puissance réactive et la puissance apparente, ainsi que les pertes dues à la résistance des enroulements, les frottements, et autres facteurs internes.⁹

Les principales puissances à considérer sont :

6.1. La puissance active (P) : C'est la puissance réelle qui est convertie en travail mécanique pour faire tourner le rotor. Elle est mesurée en watts (W) et est directement utilisée pour accomplir le travail utile.

6.2. La puissance réactive (Q) : C'est la puissance qui ne produit pas de travail utile mais qui est nécessaire pour maintenir les champs magnétiques dans le moteur. Elle est mesurée en volt-ampères réactifs (VAR).

6.3. La puissance apparente (S) : C'est la somme vectorielle de la puissance active et de la puissance réactive. Elle est mesurée en volt-ampères (VA).

Calcul du bilan de puissances :

Le bilan énergétique du moteur peut être exprimé comme suit :

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

où :

S est la puissance apparente,

P est la puissance active,

Q est la puissance réactive.

En outre, il faut tenir compte des pertes dans le moteur, qui incluent les pertes par effet Joule dans les enroulements, les pertes mécaniques dues aux frottements, et les pertes magnétiques. Ces pertes diminuent l'efficacité globale du moteur, d'où l'importance du rendement.

Ce bilan permet ainsi de comprendre l'efficacité du moteur et d'optimiser son fonctionnement en ajustant les paramètres de conception ou d'opération pour minimiser les pertes et maximiser la puissance utile⁹.

6.4. Le rendement d'un moteur asynchrone triphasé

Le rendement d'un moteur asynchrone triphasé est un indicateur clé de son efficacité énergétique. Il représente le rapport entre la puissance utile délivrée par le moteur (la puissance mécanique produite) et la puissance absorbée par le moteur (la puissance électrique consommée). Le rendement est exprimé en pourcentage et est calculé comme suit⁹ :

$$\text{Rendement}(\eta) = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{absorbée}}} \times 100$$

Où :

P utile est la puissance mécanique produite par le moteur, c'est-à-dire la puissance qui est réellement convertie en travail.

P absorbe est la puissance électrique consommée par le moteur depuis le réseau d'alimentation.

Facteurs influençant le rendement :

Pertes dans les enroulements : Les pertes ohmiques dues à la résistance des enroulements du stator et du rotor réduisent le rendement global.

Pertes magnétiques : Les pertes dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans le noyau magnétique du moteur contribuent également aux pertes énergétiques.

Pertes mécaniques : Les frottements dans les roulements et autres composants mobiles génèrent des pertes mécaniques qui affectent le rendement.

Qualité de la conception et des matériaux : Un moteur bien conçu avec des matériaux de haute qualité aura généralement un rendement plus élevé.

Importance du rendement :

Un rendement élevé est essentiel pour minimiser la consommation d'énergie et réduire les coûts d'exploitation. Un moteur avec un faible rendement peut entraîner des pertes d'énergie importantes, ce qui peut être coûteux, surtout dans les applications industrielles où le moteur fonctionne sur de longues périodes.

Ainsi, le rendement doit être optimisé lors de la conception du moteur et peut être amélioré par des pratiques de maintenance régulières, telles que la lubrification correcte des composants et le remplacement des pièces usées.

7. Couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est la force qui fait tourner le rotor d'un moteur asynchrone triphasé. Ce couple est généré par l'interaction entre le champ magnétique tournant du stator et le courant induit dans les enroulements du rotor. Cette interaction crée une force qui tend à faire tourner le rotor, ce qui entraîne le moteur¹⁰.

Le couple électromagnétique (TT) peut être exprimé mathématiquement par la formule suivante :

$$T = \frac{P_{\text{utile}}}{\omega}$$

Où :

T est le couple électromagnétique,

P utile est la puissance mécanique produite par le moteur,

ω est la vitesse angulaire du rotor.

7.1 Relation du couple avec le glissement :

Le couple généré dans un moteur asynchrone dépend du glissement SS . À l'instant du démarrage, le glissement est maximal, ce qui génère un couple élevé. À mesure que le moteur atteint sa vitesse synchrone, le glissement diminue et le couple devient plus faible. Le couple maximum est atteint lorsque le glissement est faible, mais non nul, ce qui est essentiel pour le fonctionnement du moteur.

7.2 Expression du couple en fonction du glissement :

Le couple électromagnétique peut également être exprimé en fonction du glissement (SS) et des paramètres du moteur :

$$T = k \cdot (1 - S)S$$

Où k est une constante qui dépend des caractéristiques du moteur.

7.3 Importance du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique est un paramètre crucial pour déterminer la capacité du moteur à accomplir des travaux mécaniques. Il joue un rôle clé dans les applications nécessitant des démarrages puissants ou des charges lourdes, comme dans les ascenseurs, les convoyeurs et les compresseurs. Un moteur avec un couple élevé est nécessaire dans des environnements industriels où des charges importantes doivent être déplacées à partir du démarrage.

8. Conclusion

Les moteurs asynchrones triphasés sont des éléments essentiels dans de nombreuses applications industrielles grâce à leur simplicité, leur robustesse et leur efficacité. À travers l'analyse de leur constitution, de leur fonctionnement et de leurs performances, nous avons pu mettre en évidence plusieurs aspects clés qui influencent leur efficacité et leur adaptabilité.

Chapitre II

Défauts et dispositifs de protection

1.Introduction

En fonctionnement normal les moteurs asynchrones triphasés sont soumis à plusieurs contraintes intrinsèques et extrinsèques dues aux durées de fonctionnement aux milieux d'utilisation, comme les courts-circuits, les manques de phases, les surcharges, l'échauffement, les défauts d'isolation et la tropicalisation.

On pourrait admettre que des entraînements correctement conçus, dimensionnés, montés, utilisés et entretenus ne soient pas défaillants. Dans la pratique, cette situation idéale n'existe pratiquement pas. La fréquence des différentes pannes des moteurs est différente selon les conditions spécifiques de fonctionnement.

Les statistiques montrent qu'il faut compter avec un taux de défaillance annuel de 0,5 à 4%. La plupart des défaillances trouvent leur origine dans les surcharges. Les défauts d'isolation, qui entraînent des défauts de terre ou des courts-circuits entre spires et enroulements, sont les conséquences de surtensions ou de contamination par l'humidité, l'huile, la graisse, la poussière ou d'autres produits chimiques¹¹.

La répartition approximative des dommages est la suivante :

- ✓ Surcharge : 30%
- ✓ Dommages à l'isolation : 20%
- ✓ Défaillance de phase : 14%
- ✓ Dommages aux paliers : 13%
- ✓ Vieillessement : 10%
- ✓ Dommages aux rotors : 5%
- ✓ Divers : 8%

2.Les défaillances

2.1. Les court- circuits:

Un court- circuit est une mise en relation directe entre deux points qui sont soumis à des potentiels électriques différents (liaison entre phases, entre phases et neutre ou entre phases et masse conductrice).

Il est traduit par une augmentation brutale du courant qui peut atteindre en quelques milli- secondes une valeur importante égale à plusieurs centaines de fois le courant d'emploi.

Le courant de court- circuit provoque des effets électrodynamiques et thermiques pouvant produire des destructions importantes sur le matériel, les câbles et les jeux de barres situés en amont du point de court- circuit.

Les effets électrodynamiques :

- Casse ou déformation des pièces et des jeux de barres ;
- Repulsion des contacts;
- Propagation des arcs électriques.

Les effets thermiques :

- Fusion des contacts, des enroulements, des bilames et des connexions¹².

2.2.L'échauffement :

C'est l'augmentation anormale de température à l'intérieur du moteur, cette augmentation est causée par différentes pertes (par effet Joule, courants de Foucault, pertes mécaniques) et les surcharges, Calcination des matériaux isolants.

Définition des différentes pertes :

Les pertes Joule : c'est la puissance perdue dans le moteur sous forme de chaleur sous l'effet des résistances que contient ce dernier et celle du matériel utilisé.

$$P_j = R * I^2(W)$$

Les pertes fer : comprennent les pertes par hystérésis et les pertes par courant de Foucault à cause du courant de fuite.

Les pertes mécaniques : sont les pertes due au frottement dans les paliers.

2.3.Les surcharges :

Les surcharges entraînent l'augmentation du courant absorbé par le moteur, ce qui produira des effets thermiques et c'est le défaut le plus fréquent dans les moteurs asynchrones.

Les effets de surcharge :

La surcharge conduit à la diminution de la durée de vie des moteurs par vieillissement des isolants sous l'action de la chaleur élevée.

Les courants de démarrage :

Le démarrage des moteurs asynchrones triphasés provoque des pics de courants qui atteint des valeurs de plusieurs fois le courant nominal.

La marche en manque de phase :

La marche en manque de phases est le déséquilibre ou l'absence de courant dans une des Phases d'alimentation du moteur.

On résumé le tableau suivant montre les causes de défaillances les plus fréquentes, leurs effets et les dommages que peuvent provoquer :

Cause	Effet	Domage possibles
Surcharges thermiques Condition de démarrage extrême Rotor bloqué Surcharge de longue durée Sous tension Fonctionnement intermittent inadmissible	Surintensité et donc échauffement inadmissible des enroulements	Cage de rotor dessoudée Enroulements stator brûlé
Problèmes de refroidissement Refroidissement perturbé Température ambiante trop élevée	Echauffement inadmissible	Enroulements stator brûlé
Causes électrique Fonctionnement sur une phase Asymétrie tension Défaut de terre Court-circuit entre spires Court-circuit entre enroulements	Surintensité asymétrique Echauffement inadmissible selon la dimension du moteur et de la charge	Enroulement ou partie d'enroulement brûlé Dommages aux paliers
Causes mécanique Mauvais équilibrage Mauvais alignement de l'entraînement Entraînement mal monté	Détérioration irrégulière des paliers	Dommage aux paliers

Table 1 : Couplage triangle et Couplage étoile .

3. Protection

3.1. Les dispositifs de protection contre le court-circuit

Pour obtenir un fonctionnement fiable d'un entraînement électrique, il faut observer les points suivants :

- Conception appropriée : le bon moteur adapté à l'application en question
- Exploitation professionnelle : une installation professionnelle et un entretien régulier sont les conditions indispensables d'un fonctionnement fiable
- Bonne protection du moteur : protection adaptée à l'ensemble des problèmes prévisibles

Aussi longtemps que le moteur n'est pas en danger, l'appareil de protection ne doit pas déclencher. Si le moteur est en danger, l'appareil de protection doit déclencher avant qu'un dommage se produise. Si un dommage ne peut pas être évité, l'appareil de protection doit déclencher aussi vite que possible pour limiter l'étendue des dégâts.

Ces dispositifs doivent donc détecter le défaut et couper le circuit très rapidement avant que le courant n'atteigne sa valeur maximale, ils sont des coupe-circuits fusibles et disjoncteurs¹³.

Les coupe-circuits fusibles

Définition : Un fusible est un appareil de connexion dont la fonction est d'ouvrir par fusion d'un ou de plusieurs de ses éléments conçus et calibrés à cet effet, et d'interrompre le courant lorsque celui-ci dépasse pendant un temps suffisant, une valeur précisée. Ils sont symbolisés de la façon suivante :

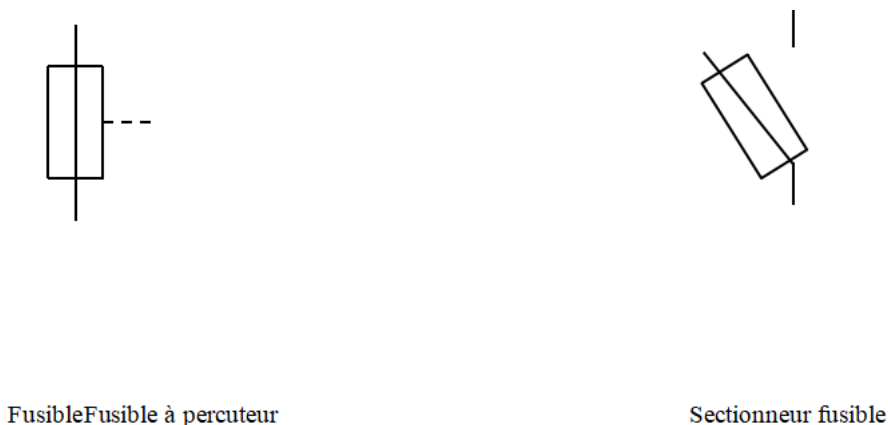


Figure 2.0 : symbole des fusibles

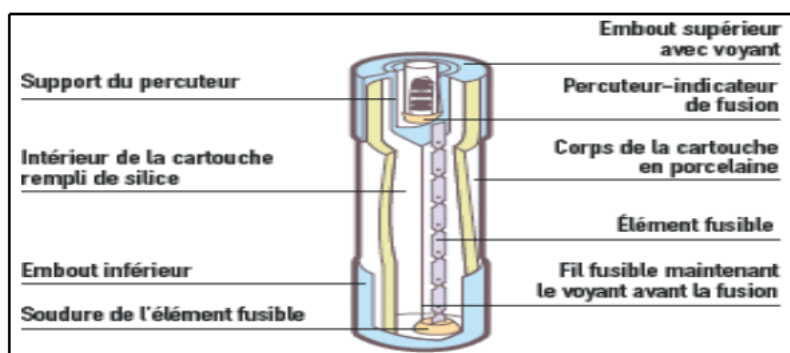


Figure 2.1: La structure d'un fusible

Les classes de fusibles : Selon l'utilisation, on choisira entre 3 classes d'éléments de fusibles :

- **Classe gI** : fusible d'usage général. Ils protègent contre les surcharges et les courts-circuits. Ce sont les fusibles d'usage général (g).
- **Classe gII** : fusible d'usage général temporisé dont le temps de fusion est retardé.
- **Classe aM** : Accompagnement moteur : ces fusibles sont prévus uniquement pour la protection contre les courts-circuits. Ils sont surtout prévus pour la protection des moteurs à courant alternatif. La protection contre les surcharges doit être assurée par un autre dispositif tel que relais thermique par exemple.

Caractéristiques d'un fusible :

- Tension nominale : 250, 400, 500, 660V
- Courant nominal (I_n) : c'est le calibre du fusible ou de la cartouche de remplacement
- Courant de non fusion (I_{nf}) : c'est la valeur du courant qui peut être supporté par l'élément fusible pendant un temps conventionnel sans fondre
- Courant de fusion (I_f) : c'est la valeur du courant qui provoque la fusion du fusible avant la fin du temps conventionnel
- Durée de coupure : c'est le temps qui s'écoule entre le moment où commence à circuler un courant suffisant pour provoquer la fusion et la fin de fusion
- Pouvoir de coupure : c'est la plus grande valeur du courant de court-circuit qu'un fusible peut interrompre sous sa tension nominale
- Zone de fonctionnement : C'est l'intervalle du temps entre le début et la fin de la Fusion

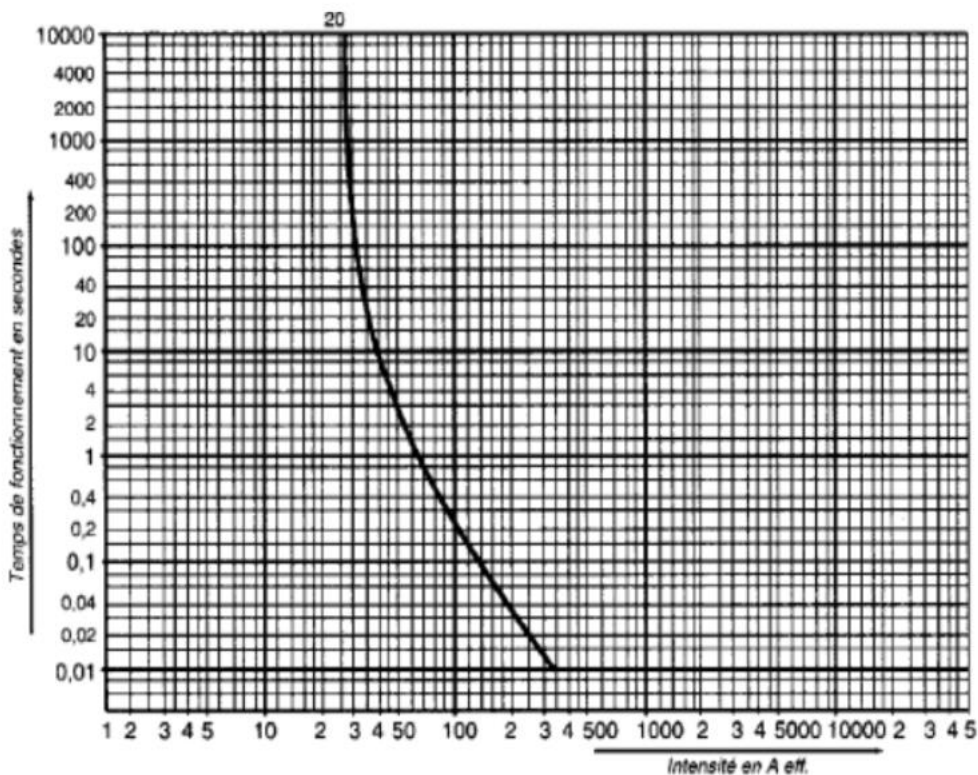


Figure 2.2: Courbe de déclenchement d'un fusible *8+

Le pouvoir de limitation : il est inférieur au courant de court-circuit présumé, ce qui permet au fusible de couper ce courant par sa fusion lorsque ce courant atteint cette limite donc avant d'atteindre sa valeur maximale,

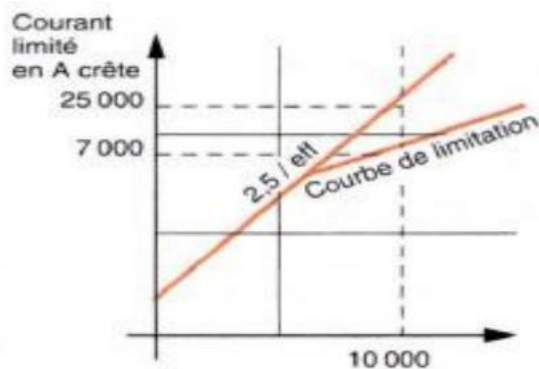


Figure 2.3 : Courbe du pouvoir de limitation

Choix des fusibles : Le calibre des fusibles est déterminé en fonction de :

L'intensité nominale I_n ;

le rapport I_d / I_n (I_d = courant de démarrage) ;

la durée de démarrage est déterminée à l'aide de l'abaque de la figure si dessous. Pour plus de précisions sur le choix du fusible, on peut se reporter au Cahier Technique n° 107. Il fait rappeler que les fusibles protègent le moteur contre les surintensités supérieures à environ cinq fois le courant nominal du moteur, et qu'ils doivent être associés à des protections complémentaires (relais thermiques...)

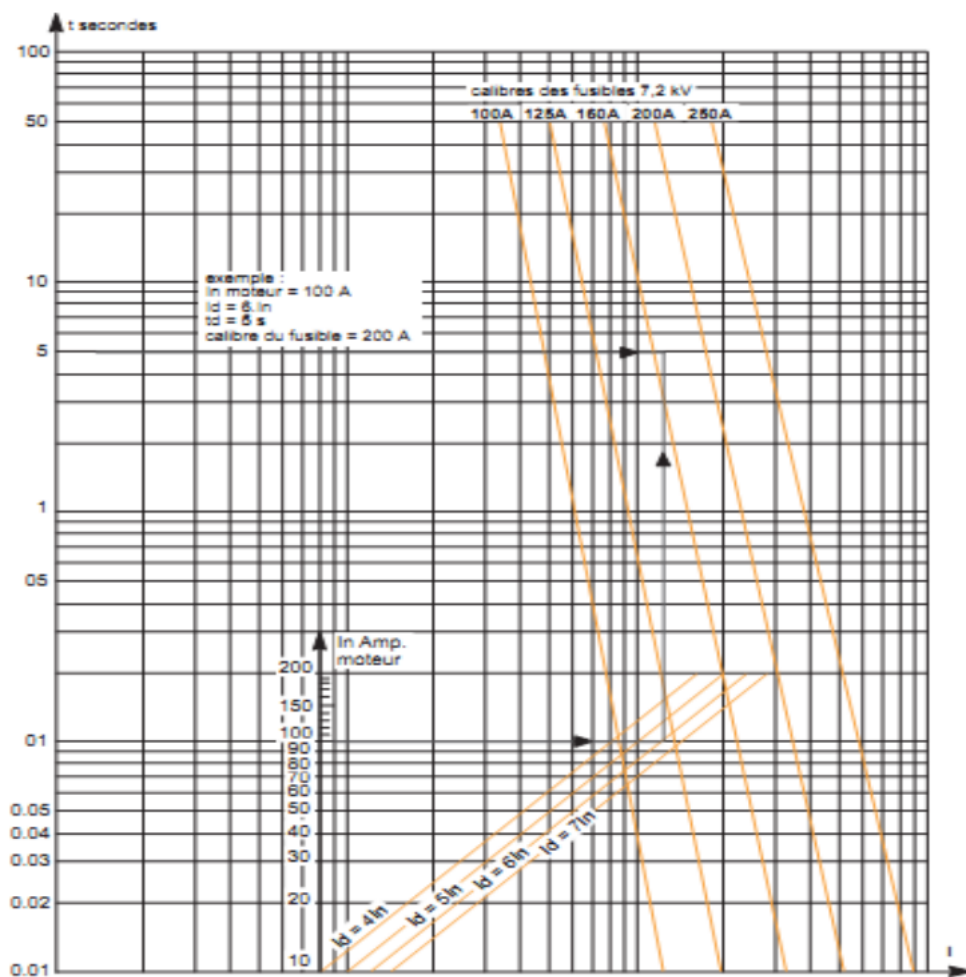


Figure 2.4: Abaque de détermination de fusibles

Le tableau ci-dessous présente le temps de fusion d'un fusible en fonction du courant de non-fusion, du courant de fusion et du calibre.

Table 2 : Temps de fusion d'un fusible

Calibre	Intensité de non-fusion (I_n)	Intensité de fusion (I_f)	Temps de fusion (t)
4 A	1.5 I_n	2.1 I_n	1 h
5 à 10 A	1.5 I_n	1.9 I_n	1 h
11 à 25 A	1.4 I_n	1.75 I_n	1 h
26 à 63 A	1.3 I_n	1.6 I_n	1 h
64 à 100 A	1.3 I_n	1.6 I_n	2 h
101 à 160 A	1.2 I_n	1.6 I_n	2 h
161 à 400 A	1.2 I_n	1.6 I_n	3 h

Le tableau qui présente le temps de fusion d'un fusible en fonction du courant de non-fusion, du courant de fusion et du calibre.

Les disjoncteurs :

Les disjoncteurs magnétiques :

Ces disjoncteurs assurent, dans la limite de leur pouvoir de coupure et par l'intermédiaire de leurs déclencheurs magnétiques (un par phase), la protection des installations contre les courts-circuits

Les disjoncteurs magnétiques réalisent d'origine une coupure omnipolaire : le fonctionnement d'un seul déclencheur magnétique suffit à commander l'ouverture simultanée de tous les pôles. Pour des courants de court-circuit peu élevés, le fonctionnement des disjoncteurs est plus rapide que celui des fusibles.

Pour interrompre efficacement un courant de court-circuit, trois impératifs doivent être respectés :

Détecter très tôt le courant de défaut, Séparer très vite les contacts, Interrompre le courant de court-circuit. La plupart des disjoncteurs magnétiques destinés à protéger les moteurs sont des limiteurs de courant et contribuent ainsi à la coordination. Leur durée de coupure particulièrement brève leur permet d'interrompre le courant de court-circuit avant qu'il n'atteigne son amplitude maximale. De fait, les effets thermiques et électrodynamiques sont aussi limités, d'où une meilleure protection des câbles et de l'appareillage¹⁴.

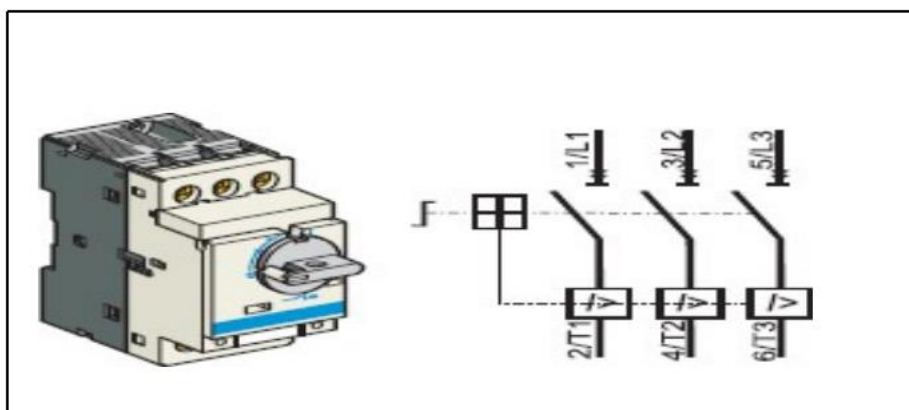


Figure 2.5: Disjoncteur magnétique et son symbole

Les “disjoncteurs moteurs” (disjoncteurs magnétothermiques) :

Le “disjoncteur moteur” est un disjoncteur magnétothermique qui réalise à la fois la protection contre les courts-circuits et contre les surcharges par ouverture rapide du circuit en défaut. Il est la combinaison du disjoncteur magnétique et du relais de surcharge.

Dans ces disjoncteurs, les dispositifs magnétiques (protection contre les courts-circuits) ont un seuil de déclenchement non réglable, en général d'environ 10 fois le courant de réglage maximal des déclencheurs thermiques. Leurs éléments thermiques (protection contre les surcharges) sont compensés contre les variations de la température ambiante. Le seuil de protection thermique est quant à lui réglable. Sa valeur doit correspondre au courant nominal du moteur à protéger. Dans tous ces disjoncteurs, la coordination (type II) entre les éléments thermiques et la protection court-circuit est assurée par construction

De plus, en position d'ouverture, la plupart de ces appareils ont une distance d'isolement suffisante (entre leurs contacts) pour réaliser la fonction de sectionnement.

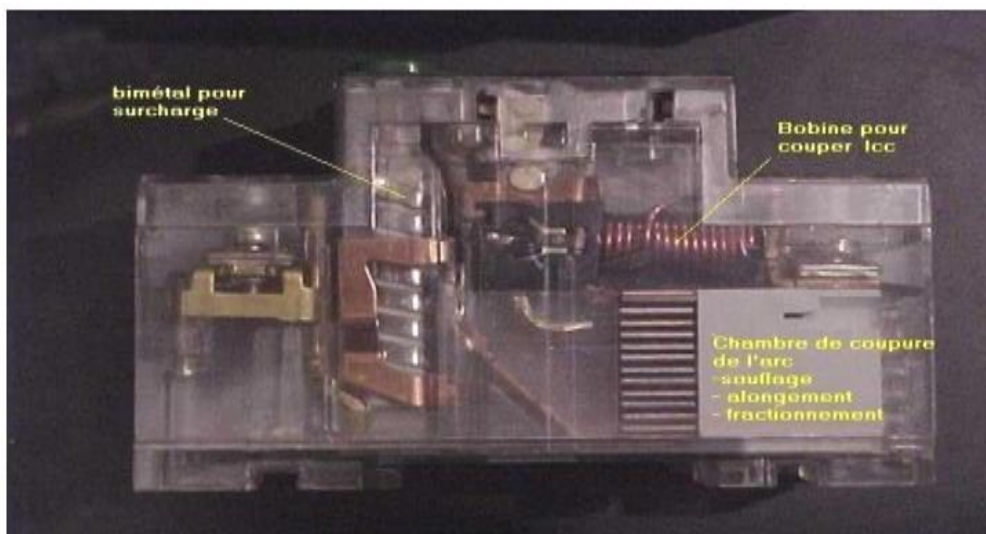


Figure 2.6 : Coupe transversale d'un disjoncteur magnétothermique

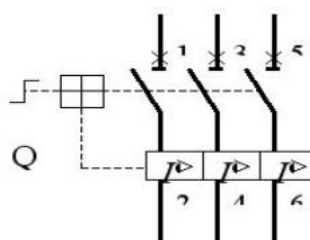


Figure 2.7 : Symbole d'un disjoncteur magnétothermique :

Principe:

Le disjoncteur de moteur fonctionne selon deux principes:

Thermique (avec limiteur) :

Ceci offre la possibilité de protéger les enroulements du moteur contre les surcharges imposées mécaniquement au moteur. Une augmentation de la charge sur l'arbre du moteur implique une augmentation du courant, donc une augmentation de la température sur la lame bimétallique.

Magnétique : offre la possibilité de fermer ou d'ouvrir le circuit au moyen d'une commande manuelle ou automatique autant de fois qu'on désire.

Courbes de déclenchements

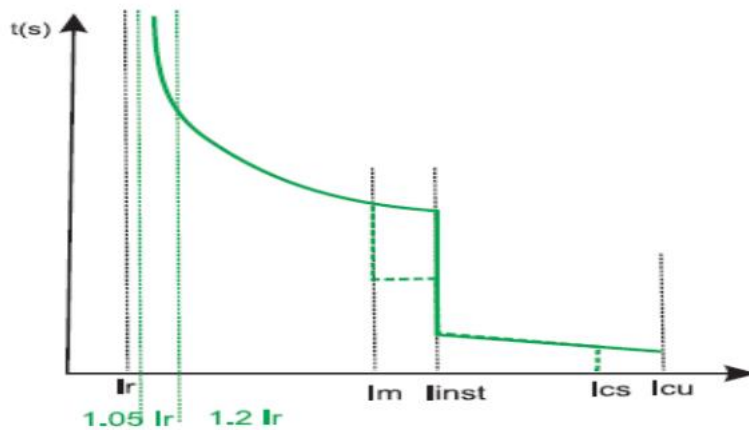


Figure 2.8 : Courbes de déclenchements d'un disjoncteur

Un disjoncteur moteur est caractérisé par sa courbe de déclenchement, qui représente les temps de déclenchement du disjoncteur en fonction du courant (multiple d' I_r).

Cette courbe comporte quatre zones:

- ✓ La zone de fonctionnement normal : tant que $I < I_r$, il n'y a pas de déclenchement,
- ✓ La zone des surcharges thermiques : le déclenchement est assuré par le "thermique"; plus la surcharge est importante, plus le temps de déclenchement est court. Ce mode de déclenchement est ainsi appelé "à temps inverse".
- ✓ La zone des courants forts : surveillée par le "magnétique instantané" ou "court-circuit" dont le fonctionnement est instantané (inférieur à 5 ms), et sur certains disjoncteurs (disjoncteurs électroniques), une zone intermédiaire surveillée par un "magnétique temporisé" dont le fonctionnement est retardé (de 0 à 300 ms). Ce mode de déclenchement est appelé "à retard indépendant". Il permet d'éviter des déclenchements intempestifs à l'enclenchement sur les pointes de courants magnétisants des moteurs.

Leurs limites sont :

I_r : courant de réglage de la protection contre les surcharges, il doit correspondre à la valeur du courant nominal (I_n) du moteur à protéger ;

I_m : courant de déclenchement de la protection magnétique temporisée ;

I_{inst} : courant de déclenchement de la protection magnétique instantanée. Il peut varier de 3 à 17 fois I_r mais est en général proche de $10 I_r$;

I_{cs} : pouvoir assigné de coupure de service en court-circuit ; I_{cu} : pouvoir de coupure ultime (maximum) en court-circuit.

Les caractéristiques des disjoncteurs :

Tension nominale : C'est la tension maximale d'utilisation en courant continu ou alternatif. C'est également la tension à laquelle se rapporte le pouvoir de coupure et de fermeture du disjoncteur.

Un disjoncteur peut avoir plusieurs tensions nominales, chacune d'elle correspondant à un pouvoir de coupure différent.

Courant nominal : C'est le courant que le disjoncteur est capable de supporter dans des conditions d'essais spécifiés en service ininterrompu tout en respectant les limites d'échauffement (température ambiante=30°)

Le courant nominal est déterminé en fonction de l'intensité du courant admissible passant dans la section du conducteur à protéger.

Pouvoir de coupure : c'est la plus grande valeur du courant présumé de court-circuit, qu'un disjoncteur peut interrompre sous une tension donnée et dans certaines conditions. Il s'exprime K_a .

Pouvoir de fermeture : C'est la plus grande valeur du courant, qu'un disjoncteur peut établir sous sa tension nominale dans des conditions spécifiées. En alternatif, il s'exprime par la valeur de crête du courant, elle est égale à k fois le pouvoir de coupure selon le tableau ci- dessous :

Table 3 : Pouvoir de coupure et de fermeture.

Pouvoir de coupure (PdC)	cos	Pouvoir de fermeture (PdF)
4,5kA < PdC 6 kA	0,7	1,5 PdC
6kA < PdC 10 kA	0,5	1,7 PdC
10kA < PdC 20kA	0,3	2 PdC
20kA < PdC 50kA	0,25	2,1 PdC
50kA < PdC	0,2	2,2 PdC

cos(α) :Le facteur de puissance

Auto-protection : C'est l'aptitude d'un appareil à limiter le courant de court-circuit à une valeur inférieure à son pouvoir de coupure grâce à son impédance interne

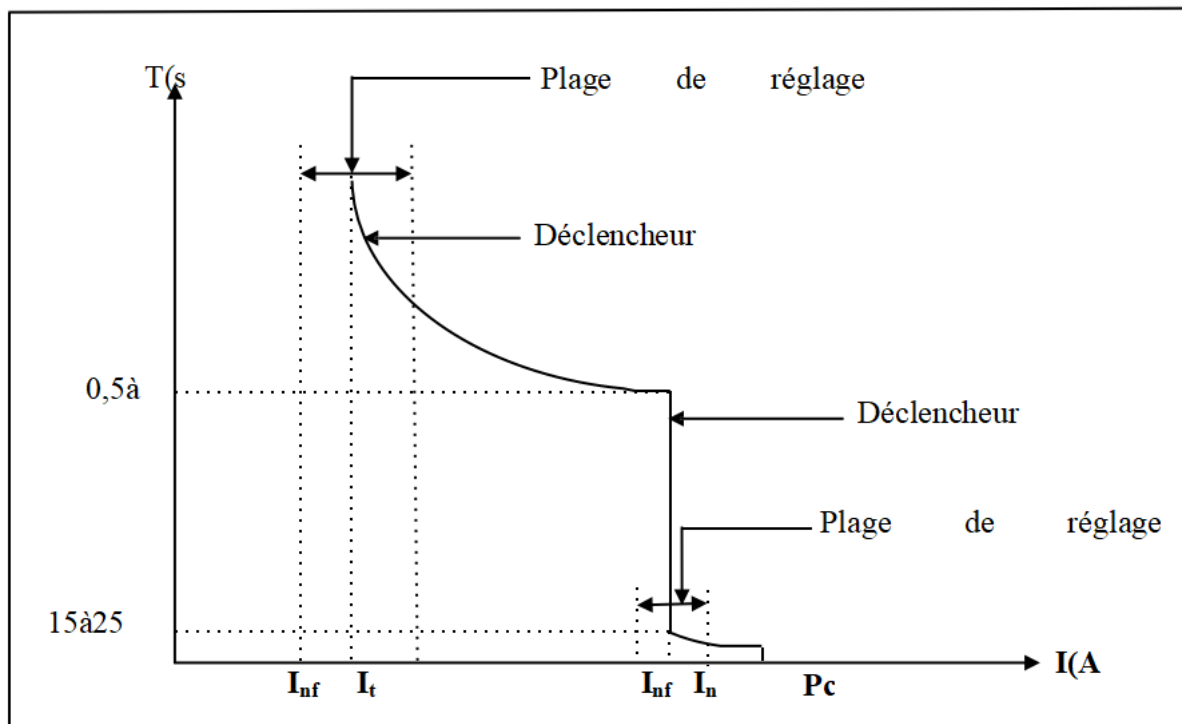


Figure 2.9: Courbe de fonction d'un disjoncteur.

I_n : Courant de fonctionnement ; **I_{nf}** : Courant de non-fusion ; **I_f** : Courant de fusion. **P_c** : Pouvoir de coupure ; **I_t** : Courant de réglage .

Pouvoir de limitation : Un disjoncteur est dit limiteur, lorsque le courant réellement interrompu ou coupé en cas de défaut est inférieur au courant présumé de court – circuit

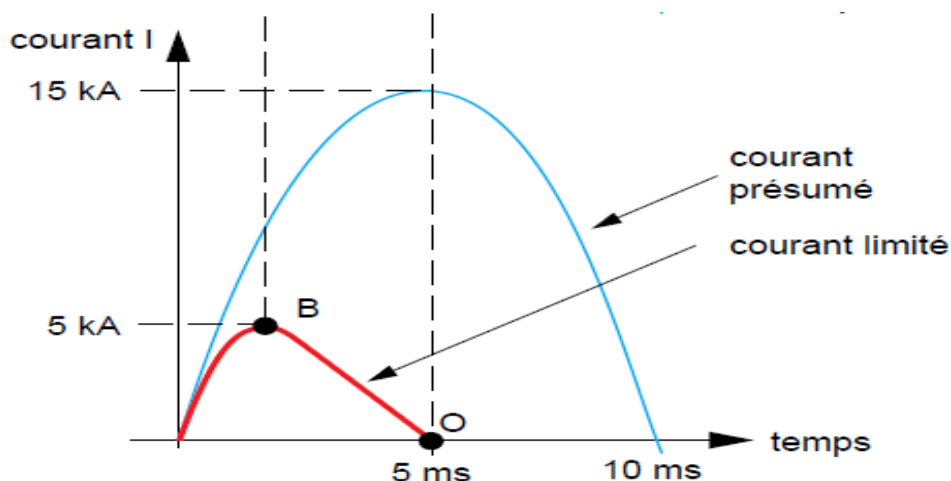


Figure 2.10: Courbe des circuits

Remarque :

Pour des courants de court-circuit élevés, le fonctionnement des disjoncteurs est plus rapide que celui des fusibles.

Choix des disjoncteurs :

Le choix d'un disjoncteur s'effectue en fonction :

De la norme d'installation : ex NF C 15-100,

(Installation domestique - type de récepteur - intensité d'emploi - courbes de fonctionnement)

des normes produites,

Des caractéristiques du réseau (tension, fréquence),

De l'environnement (type de local, température, section et nature des câbles en aval),

Des impératifs d'exploitation (sélectivité, auxiliaires de commande,...).

Pouvoir de coupure

C'est l'intensité maximale du courant de court-circuit que peut couper le dispositif de protection sans se détériorer et sans mettre en danger l'entourage, dans les conditions de tension, de $\cos \phi$ et de court-circuit déterminé par les normes.

Le pouvoir de coupure doit être au moins égal au courant de court-circuit présumé au point

D'installation du disjoncteur ($P_{dc} > I_{cc \text{ max}}$).

Courbes de fonctionnement

Les normes "produits" disjoncteur imposent au moins l'existence des courbes B, C et D

(Figure 2.9).

On choisira la courbe de fonctionnement du disjoncteur en fonction du type de récepteurs (résistifs, inductifs) et de la ligne à protéger :

- La courbe B : le disjoncteur a un déclenchement magnétique relativement bas (entre 3 et $5xI_n$) et permet d'éliminer les courts-circuits de très faible valeur. Cette courbe est également utilisée pour les circuits ayant des longueurs de câbles importantes.
- La courbe C : ce disjoncteur couvre une très grande majorité des besoins (récepteurs inductifs) et s'utilise notamment dans les installations domestiques. Son déclenchement magnétique se situe entre 5 et $10xI_n$.
- La courbe D : cette courbe est utilisée pour la protection des circuits où il existe de très fortes pointes de courant à la mise sous tension (ex: moteurs). Le déclenchement magnétique de ce disjoncteur se situe entre 10 et $20I_n$.

Ces trois courbes sont représentées sur la figure (II-10).

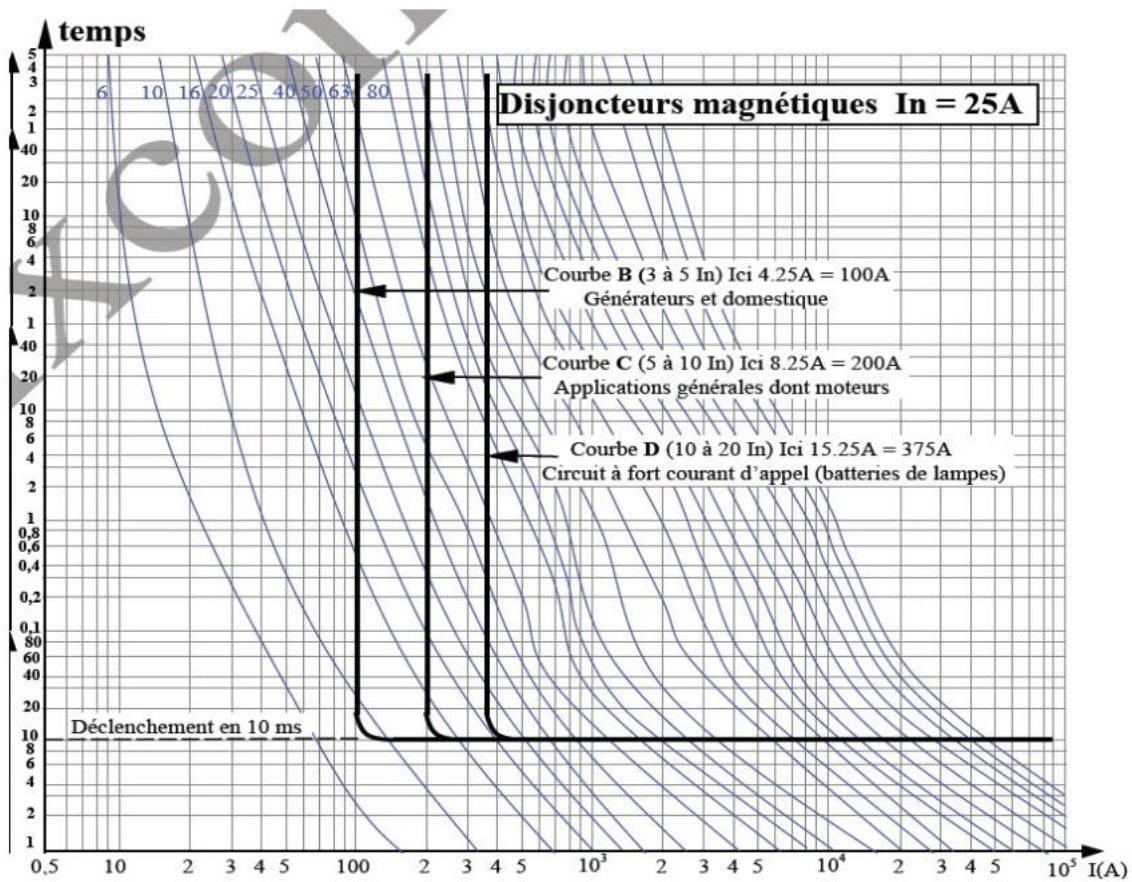


Figure 2.11 : Courbes de fonctionnement d'un disjoncteur

3.2. Les dispositifs de protection contre les surcharges :

Les surcharges n'impliquent pas nécessairement un arrêt du moteur mais il est important de revenir rapidement au fonctionnement normal. Il est donc important de protéger le moteur contre ce phénomène par des dispositifs spécial qu'on appelle relais.

Les relais thermiques de surcharge à bilames

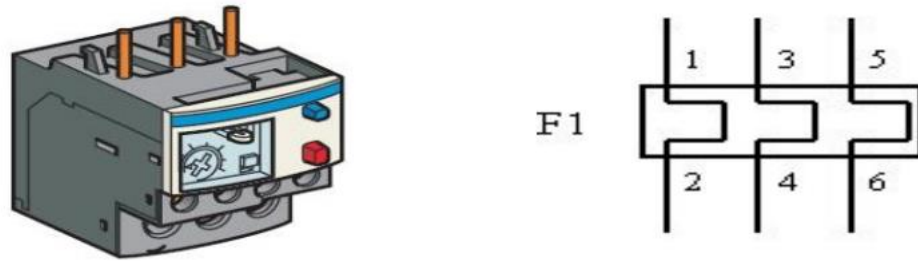


Figure 2.12 : Relais thermique de surcharge et son symbole

Ils assurent, par association avec un contacteur, la protection du moteur, de la ligne et de l'appareillage contre les surcharges faibles et prolongées.

Ils sont donc conçus pour autoriser le démarrage normal des moteurs sans déclenchement. Cependant, ils doivent être protégés contre les fortes surintensités par un disjoncteur, ou par des fusibles (voir protection contre les courts-circuits).

Les relais thermiques à bilames sont généralement :

- tripolaires
- Compensés
- sensibles à une perte de phases.

Les relais thermiques tripolaires :

Ils comportent trois bilames dont le coefficient de dilatation est très différent. Un enroulement échauffant est bobiné autour de chaque bilame, ces enroulements s'échauffent sous l'effet du courant absorbé par le moteur, ce qui provoque une déformation des bilames. En se déformant les bilames commandent le déclenchement du dispositif.

Les relais compensés :

Les effets thermiques du courant absorbé par le moteur provoquent la déformation des bilames, pour annuler l'influence de la température ambiante sur ces dernières, un relais de compensation est monté en opposition avec eux.

Ces bilames sont influencés uniquement par les variations de température de l'air ambiant.

La déformation des bilames principaux est compensée par celle des bilames de compensation.

Les relais sensible à une perte de phases :

Ils comportent deux réglottes dont le mouvement est solidaire à celui des bilames.

Le bilame correspondant à la phase non alimentée ne se déforme pas et bloque l'une des deux réglettes, ce qui provoque le déclenchement.

Les relais à sonde à thermistances PTC :

Ce système contrôle la température réelle de l'élément à protéger, il est constitué : D'une ou plusieurs sondes à thermistance à coefficient de température positif (PTC).

Ce sont des composants statiques dont la résistance augmente brutalement, quand la température atteint un seuil appelé température nominale de fonctionnement TNF.

D'un dispositif électronique qui mesure en permanence les résistances des sondes qui lui sont associées.

Des circuits à seuil qui commandent les changements d'état des contacts de sortie
Les relais à maximum de courant :

Ils sont destinés à la protection du moteur contre les surcharges importantes et ils comportent: Un circuit magnétique d'une partie fixe, d'une armature et d'une bobine.

Un mécanisme de déclenchement actionné par l'armature mobile qui est branché en série dans l'une des phases du récepteur.

Les relais temporisateurs thermiques :

Ils ont pour but de : -contrôler le courant qui passe par l'intermédiaire d'un contact auxiliaire

-temporiser l'action du relais¹⁵

4.La sélectivité :

4.1.Définition :

La sélectivité des dispositifs de protection est le choix du réglage de telle sorte à ce que

L'appareil dont se produit le défaut réagit seul, les autres appareils restent en fonction.

Il y a sélectivité des protections si un défaut, survenant en un point quelconque du réseau, est éliminé par l'appareil de protection placé immédiatement en amont du défaut et lui seul (sur la figure (II-10) c'est le disjoncteur B).

On peut réaliser la sélectivité en deux degrés :

La Sélectivité total : Si le dispositif placé en amont assure la coupure du courant de défaut sans l'intervention de celui en aval (la sélectivité est totale entre A et B si B fonctionne pour toute valeur de I_{cc} au point où il est placé)

La sélectivité partielle : on dit que la sélectivité est totale si la protection est assurée par un dispositif jusqu'à une certaine valeur du courant puis les dispositifs réagissent simultanément (la sélectivité est partielle entre A et B si B fonctionne seul jusqu'à une certaine valeur de I_{cc} , puis au delà de cette valeur, A et B fonctionnent tous les deux.)

les dispositifs de protection contre les phases en marche :

Les contacteurs

Définition des contacteurs :

C'est un appareil mécanique de connexion ayant une seul position (au repos), commandé autrement qu'à la main

De par sa conception assez complexe, il est conçu pour résister mieux que tout autre

composant à l'arc électrique à chaque ouverture et fermeture¹⁶.

Symbole d'un contacteur :

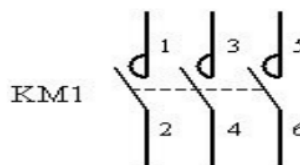


Figure 2.13 : Symbole contacteur

Choix d'un contacteur :

Pour choisir un contacteur, il faut définir les valeurs des éléments suivants :

-courant d'emploi

-tension d'emploi

-catégorie d'emploi : elle fixe la valeur du courant que le contacteur doit établir qui dépend de la nature du récepteur.

4.2. Les dispositifs de protection multiples :

Ils sont utilisés pour réaliser la protection contre les courts-circuits et les surcharges par l'association de différents dispositifs :

- fusible-contacteur
- fusible- relais thermique- contacteur
- Relais thermique- contacteur
- Disjoncteur - contacteur

Fusible -contacteur :

C'est une association de deux dispositifs :

- Un contacteur permettant une facilité de commande
- Un fusible situé en amont du contacteur, assurant la protection contre le court – circuit (c'est une association qui est très économique)

Fusible-relais thermique- contacteur :

C'est une association de trois dispositifs qui assurent la protection contre le court-circuit et

contre la surcharge (c'est plus facile de commander le moteur par le contacteur).

Relais thermique- contacteur :

C'est une association de deux dispositifs, ce qui permet de protéger le moteur contre les surcharges et facilite la commande du moteur

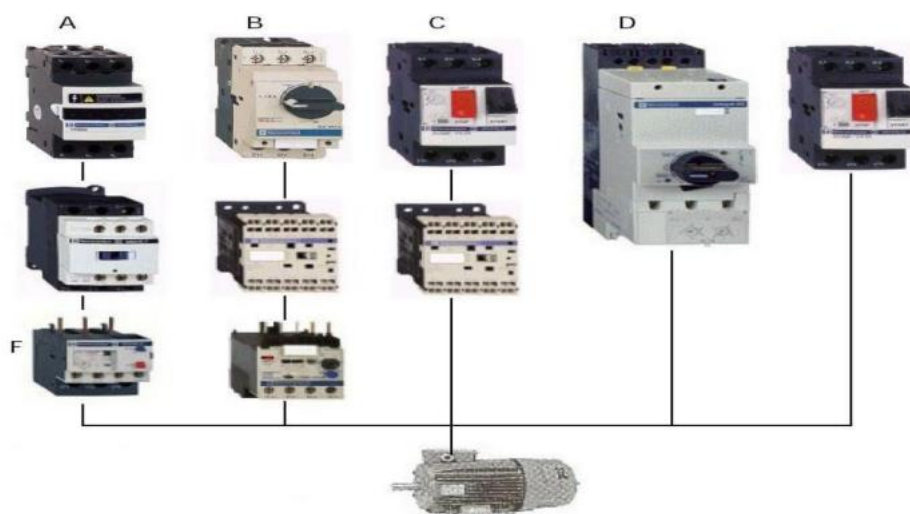


Figure 2.14 : les dispositifs de protection multiples.

Avec :

- A : un sectionneur porte fusible
- B : disjoncteur magnétique
- C : disjoncteur magnétothermique
- D : démarreur intégral
- E : contacteur tripolaire F : relais de protection thermique.

5. Conclusion

La protection des moteurs est une fonction essentielle pour la continuité du fonctionnement des machines. Le choix du dispositif de protection doit être fait avec rigueur. L'utilisateur aura tout intérêt à sélectionner les dispositifs intégrant une électronique de communication pour anticiper et prévenir les éventuels défauts.

Chapitre III

Modèle Mathématique de MAS.

1. Introduction

Compte tenu que la répartition des enroulements statoriques et la géométrie propre de la machine sont très complexes, il est généralement nécessaire de considérer des hypothèses simplificatrices pour avoir un modèle simple de la machine¹⁷.

2. Modélisation de la machine asynchrone (MAS):

L'étude de cette machine traduit les lois de l'électromagnétisme dans le contexte habituel des hypothèses simplificatrices :

- L'entrefer constant.
- L'effet d'encoche négligé.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Pertes ferromagnétiques négligeables.

L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer :

- L'association du flux.
- La constance des inductances propres.
- L'invariance des résistances statoriques et rotoriques.

La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

La représentation schématique de la MAS dans l'espace électrique est donnée sur la Fig. (II.14), elle est munie de six enroulements¹⁸.

Le stator de la machine est formé de trois enroulements fixes décalés de 120° dans l'espace et traversés par trois courants variables.

Le rotor peut être modélisé par trois enroulements identiques décalés dans l'espace de 120° , ces enroulements sont en court-circuit et la tension à leurs bornes est nulle.

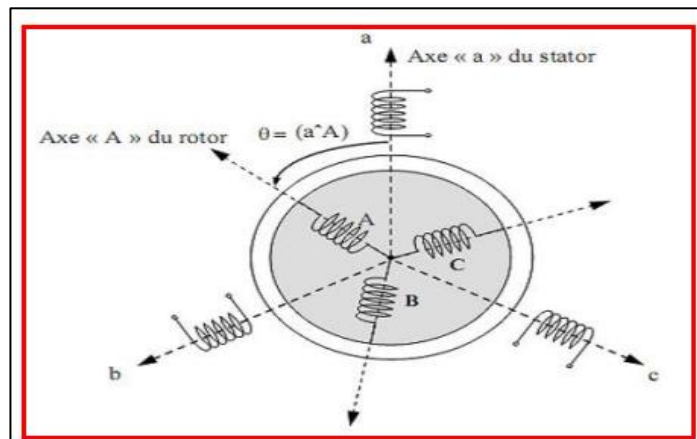


Figure 3.1 : Représentation schématique d'une machine asynchrone

(MAS)

2.1. Les Equations:

Equations électriques:

Les six enroulements (a, b, c, A, B, C) représentés sur la figure (3.2) obéissent aux équations matricielles suivantes

Pour le stator :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\psi_s] \quad (3.1)$$

Pour le rotor :

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\psi_r] = [0 \ 0 \ 0]^T \quad (3.2)$$

Equations magnétiques:

Les hypothèses simplificatrices citées antérieurement conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants de la machine asynchrone, ces relations s'écrivent matriciellement comme suit [17] :

Pour le stator :

$$[\psi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (3.3)$$

Pour le rotor :

$$[\psi_r] = [L_r][I_r] + [M_{sr}][I_s] \quad (3.4)$$

Avec les matrices d'inductances :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$[M_{sr}] = [M]^T = M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Équations mécaniques

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire la variation non seulement des paramètres électriques (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse).

Couple électromagnétique :

$$C_{em} = p [I_{s_{abc}}]^T \frac{d}{dt} [M_{sr}] [I_{r_{abc}}] \quad (3.8)$$

Équation du mouvement :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_{em} - C_r - f_r \Omega \quad (3.9)$$

2.2. Transformation du système triphasé en biphasé

La mise en équation des moteurs triphasés aboutit à des équations différentielles à coefficients variables. L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse, vu le grand nombre de variables.

On utilise alors des transformations qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. Les transformations utilisées doivent conserver la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles¹⁹.

2.3. Transformation Clarke/Concordia

Le but de l'utilisation de cette transformation c'est de passer d'un système triphasé Abc vers un système diphasé, Il existe principalement deux transformations : Clarke et Concordia¹⁹.

Table 4 : Passage d'un système triphasé au système biphasé.

Transformation de Concordia	Transformation de Clarke
Passer d'un système triphasé abc vers un système diphasé α β	
$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \xrightarrow{T_{23}} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \text{ c.-à-d. } [x_{\alpha\beta}] = T_{23}[x_{abc}]$ <p>Avec $T_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$</p>	$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \xrightarrow{C_{23}} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \text{ c.-à-d. } [x_{\alpha\beta}] = C_{23}[x_{abc}]$ <p>Avec $C_{23} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$</p>
Passer d'un système diphasé α β vers un système abc	
$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \xrightarrow{T_{32}} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \text{ c.-à-d. } [x_{abc}] = T_{32} [x_{\alpha\beta}]$ <p>Avec $T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$</p>	$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \xrightarrow{C_{32}} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \text{ c.-à-d. } [x_{abc}] = C_{32} [x_{\alpha\beta}]$ <p>Avec $C_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$</p>

Le choix de matrice de passage non norme (Clarke) est bien pratique en commande où l'on traite des grandeurs d q (I_{ds} , I_{qs} que l'on verra par la suite). En effet, cela permet, par exemple, d'apprécier directement le module du courant qui est absorbé par le moteur, sans avoir à passer par un coefficient multiplicateur.

Mathématiquement parlant, le choix d'une matrice normée (Concordia) est souvent utilisé pour des raisons de symétrie de transformation directe et inverse.

Nous allons utiliser la transformation de Concordia dans notre modélisation. Son application aux équations de la machine écrites ci-dessous¹⁹

$$[v_{\alpha\beta s}] = R_s [i_{\alpha\beta s}] + \frac{d}{dt} [\psi_{\alpha\beta s}] \tag{3.10}$$

$$[v_{\alpha\beta r}] = R_r [i_{\alpha\beta r}] + \frac{d}{dt} [\psi_{\alpha\beta r}] \tag{3.11}$$

Avec les inductances cycliques :

$$L_s = l_s - m_s \tag{3.12}$$

$$L_r = l_r - m_r \tag{3.13}$$

$$M = \frac{2}{3} m_{sr} \quad (3.14)$$

Alors

$$\begin{bmatrix} \psi_{\alpha\beta s} \\ \psi_{\alpha\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & MP(-\theta) \\ 0 & L_s & 0 \\ MP(-\theta) & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha\beta s} \\ i_{\alpha\beta r} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Où la matrice P (θ) est la matrice de rotation :

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

2.4. Transformation de Park :

La transformation de Park a pour but de traiter une large gamme de machines de façon unifiée en un modèle unique. Cette conversion est appelée souvent transformation des axes, fait correspondant aux deux enroulements de la machine originale suivie d'une rotation, les enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique

3.5.1 Différents repères

L'isotropie du moteur asynchrone permet une souplesse dans la composition des équations de la machine selon deux axes à l'aide des composantes de Park.

Il existe différents référentiels :

- Référentiel immobile par rapport au stator : ($\alpha - \beta$) $\rightarrow \omega = 0$
- Référentiel immobile par rapport au rotor : ($x - y$) $\rightarrow \omega = \omega_r$
- Référentiel immobile par rapport au champ tournant : ($d - q$) $\rightarrow \omega = \omega_s$

La transformation de Park est définie par la matrice normalisée [P]²⁰ :

$$[P] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Application de la transformation de Park au modèle de la MAS :

Équations électriques :

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \psi_{sd} - \omega_s \psi_{sq} \quad (3.18)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \psi_{sq} + \omega_s \psi_{sd} \quad (3.19)$$

$$0 = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \psi_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} \quad (3.20)$$

$$0 = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \psi_{rq} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rd} \tag{3.21}$$

Équations magnétiques :

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \tag{3.22}$$

$$\psi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \tag{3.23}$$

$$\psi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \tag{3.24}$$

$$\psi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \tag{3.25}$$

Avec : $L_s = l_s - M$, $L_r = l_r - M$, $M = \frac{3}{2} M_0$

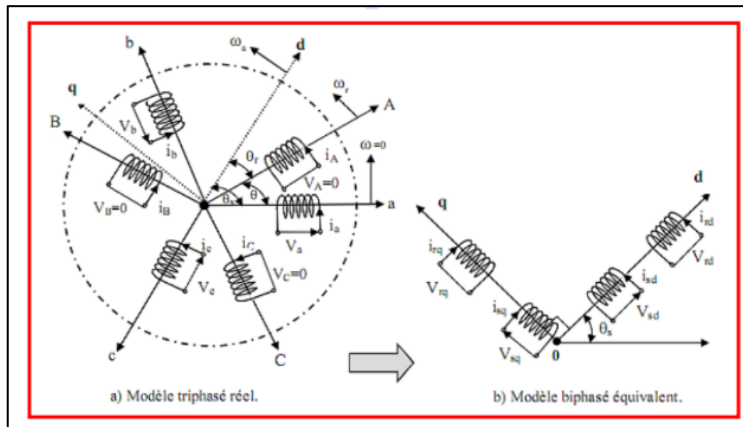


Figure 3.2 : Représentation de la machine asynchrone triphasée et sa machine biphasée.

Équation mécanique:

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd}) \tag{3.26}$$

3. Alimentation de la machine asynchrone:

Pour une machine asynchrone alimentée en tension, si on considère le courant statique i_s et i_r comme variables d'état, et la pulsation ω_s et les tensions V_{sd} , V_{sq} comme grandeurs de commande et le couple C_r comme une perturbation, on aura le schéma bloc suivant²¹ :

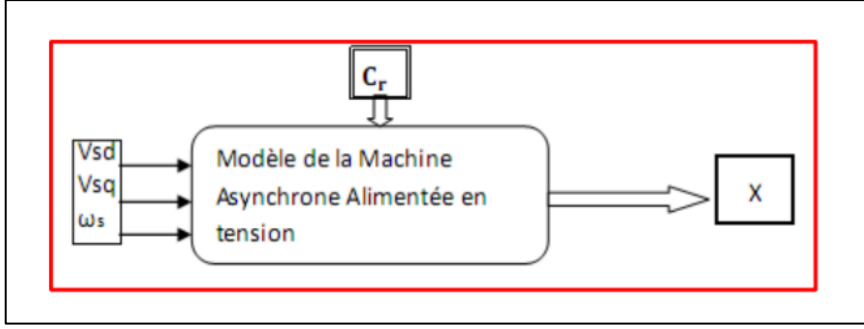


Figure 3.3 : Schéma synoptique de la machine asynchrone.

Le vecteur de sortie $[X]$ peut avoir différentes expressions :

$$[X] = [i_{sd} \ i_{sq} \ i_{rd} \ i_{rq}]^T \quad (3.27)$$

$$[X] = [\psi_{sd} \ \psi_{sq} \ \psi_{rd} \ \psi_{rq}]^T \quad (3.28)$$

$$[X] = [\psi_{sd} \ \psi_{sq} \ i_{rd} \ i_{rq}]^T \quad (3.29)$$

$$[X] = [i_{sd} \ i_{sq} \ \psi_{rd} \ \psi_{rq}]^T \quad (3.30)$$

Notre choix est porté sur le vecteur :

$$[X] = [i_{sd} \ i_{sq} \ \psi_{rd} \ \psi_{rq}]^T \quad (3.31)$$

4.Représentation d'état du modèle de la MAS

La forme générale de l'équation d'état s'écrit :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad (3.32)$$

Avec :

$$[X] = [i_{sd} \ i_{sq} \ \psi_{rd} \ \psi_{rq}]^T \quad (3.33)$$

$$[U] = [V_{sd} \ V_{sq}]^T \quad (3.34)$$

4.1.Mise en équation d'état :

Les phénomènes transitoires dans les machines asynchrones peuvent être étudiés à partir du modèle généralisé dans un référentiel lié au stator (α, β). Le système d'équations statoriques et rotoriques s'exprime comme suit :

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = r_s i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\alpha} \\ V_{s\beta} = r_s i_{s\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\beta} \\ V_{r\alpha} = 0 = r_r i_{r\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\alpha} + \omega_r \Phi_{r\beta} \\ V_{r\beta} = 0 = r_r i_{r\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\beta} - \omega_r \Phi_{r\alpha} \end{cases} \quad (3.35)$$

En substituant, on aboutit à la représentation matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r & 0 & 0 \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & -\omega_r \\ 0 & \frac{M}{T_r} & \omega_r & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \Phi_{r\alpha} \\ \Phi_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma L_s & 0 & \frac{M}{L_r} & 0 \\ 0 & \sigma L_s & 0 & \frac{M}{L_r} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_{s\alpha} \\ \frac{d}{dt} i_{s\beta} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{r\alpha} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Le modèle d'état s'écrit :

$$[X] = [A][X] + [B][U] \quad (3.37)$$

Avec :

$$[A] = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{M^2}{L_r T_r}\right) & 0 & \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} & \frac{M}{\sigma L_s L_r} \omega_r \\ 0 & -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{M^2}{L_r T_r}\right) & -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \omega_r & \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & -\omega_r \\ 0 & \frac{M}{T_r} & \omega_r & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Avec les constantes :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \quad (\text{Coefficient de la fuite totale}) \quad (3.39)$$

$$T_s = \frac{L_s}{R_s} \quad (\text{Constante de temps statorique}) \quad (3.40)$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (\text{Constante de temps rotorique}) \quad (3.41)$$

Équations mécaniques :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_r} (\Phi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Phi_{r\beta} i_{s\alpha}) \quad (3.42)$$

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f \Omega_r \quad (3.43)$$

Avec :

- J : Moment d'inertie des masses tournantes
- Cr : Couple résistant appliqué sur l'arbre de la machine
- Ω_r : Vitesse électrique rotorique
- f : Coefficient de frottement visqueux

5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons commencé par une description générale du moteur asynchrone et nous avons présenté les différentes parties de la machine asynchrone et leurs types selon une classification donnée. Nous avons aussi comparé la machine asynchrone avec d'autres machines en citant ses avantages et inconvénients.

L'utilisation de la transformation de Park nous a permis le passage d'un repère triphasé à un autre biphasé. L'objectif primordial de cette transformation est de rendre le système, modèle de la MAS, linéaire.

Chapitre IV

Simulation d'un moteur asynchrone dynamique

1.Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une simulation numérique d'un moteur asynchrone triphasé en régime dynamique. L'objectif est d'étudier son comportement électromagnétique et mécanique en fonction des tensions d'alimentation, à l'aide du modèle mathématique en coordonnées directes-quadrature (dq). Cette modélisation permet d'analyser les grandeurs physiques du moteur dans un référentiel tournant lié au stator²².

2. Objectif de la Simulation

2.Le but de cette simulation est de :

- Représenter le comportement réel du moteur asynchrone en régime transitoire.
- Étudier l'évolution du couple électromagnétique, des courants et de la vitesse.
- Mettre en œuvre les transformations de Park pour faciliter l'analyse.
- Permettre une interprétation visuelle à travers des courbes issues de la simulation²².

3.Schéma Fonctionnel

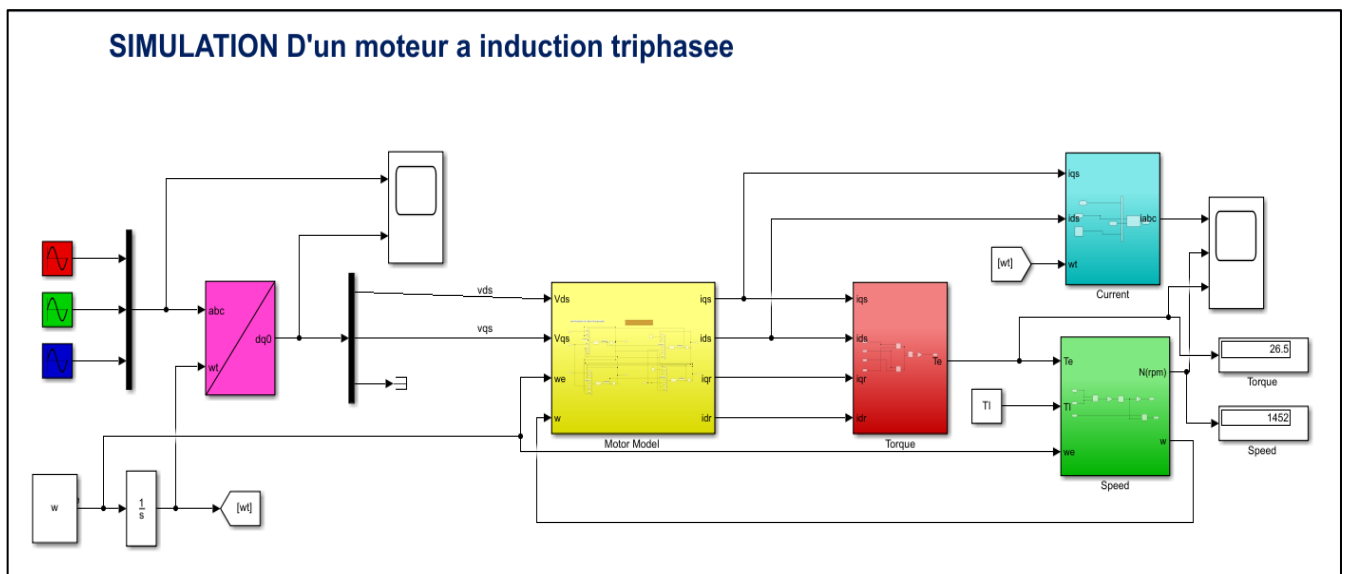


Figure 4.1 : Schéma de bloc du moteur a induction.

Description du Schéma Fonctionnel :

Le schéma de la simulation est basé sur une structure modulaire constituée de plusieurs blocs fonctionnels²³

3.1.Source d'Alimentation Triphasée :

Trois tensions sinusoïdales déphasées de 120° , qui représentent les phases A, B et C.

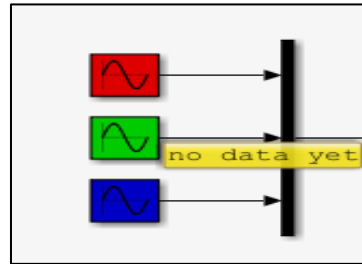


Figure 4.2: Schema de bloc de la source

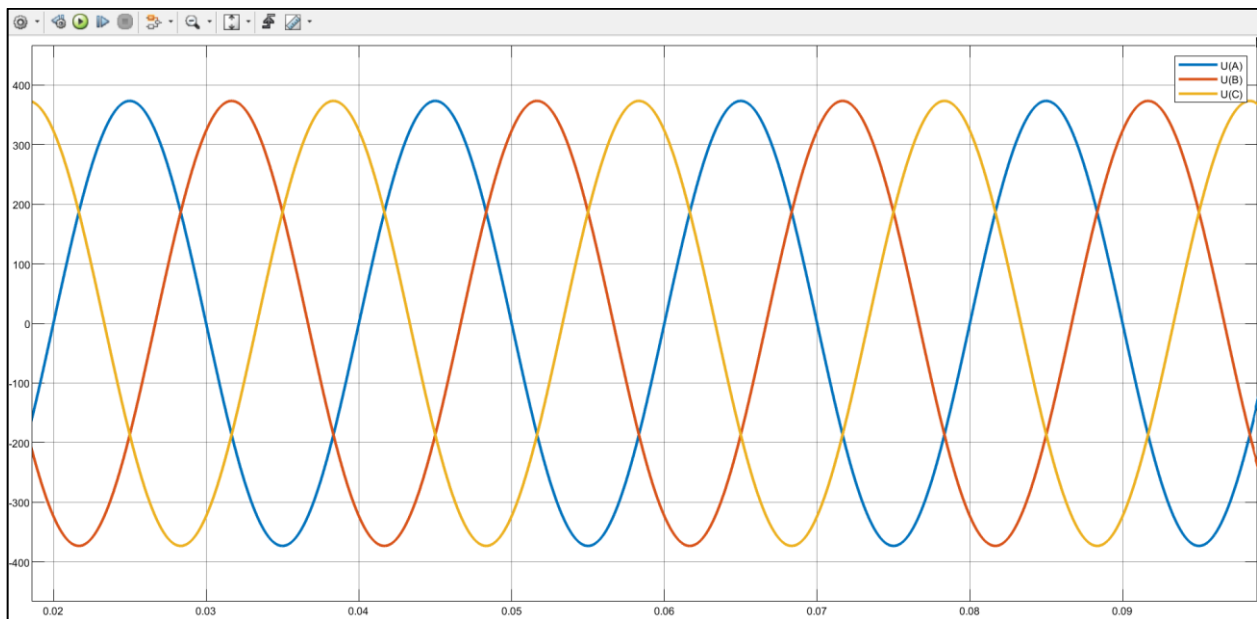


Figure 4.3: Source d'alimentation Triphasee

Description de la figure :

Analyse : La figure représente les tensions simples (tensions de phase) d'un système triphasé équilibré en régime sinusoïdal. On y observe les tensions suivantes :

- U(A) : tension entre la phase A et le neutre (courbe bleue),
- U(B) : tension entre la phase B et le neutre (courbe rouge),
- U(C) : tension entre la phase C et le neutre (courbe jaune).

Ces tensions sont parfaitement sinusoïdales, de même amplitude (environ =400 V crête), et présentent un déphasage de 120° électriques entre elles, ce qui est caractéristique d'un système triphasé équilibré.

Interprétation électrique : Ce type de tension est typique des réseaux de distribution triphasés utilisés pour alimenter des machines tournantes comme les moteurs asynchrones. La tension efficace par phase peut être estimée par :

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \approx \frac{400}{\sqrt{2}} \approx 283 \text{ V}$$

3.2. Transformation abc → dq0 (Transformation de Park) :

Ce bloc convertit les signaux triphasés (abc) en composantes dans le référentiel dq :

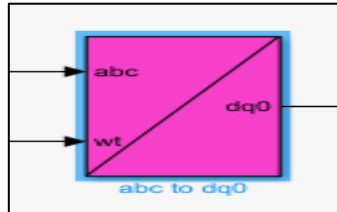


Figure 4.4 : Schema de bloc de Transformation

TROIS TENSION D'entrees (A et B et C) sont convertit en deux tension en V_{ds} : composante directe de la tension statorique.

V_{qs} : composante en quadrature.

Description :

Cette transformation simplifie l'étude en transformant les signaux variables dans le temps en signaux continus.

3.3. Modèle du Moteur Asynchrone

Schema bloc du moteur a induction :

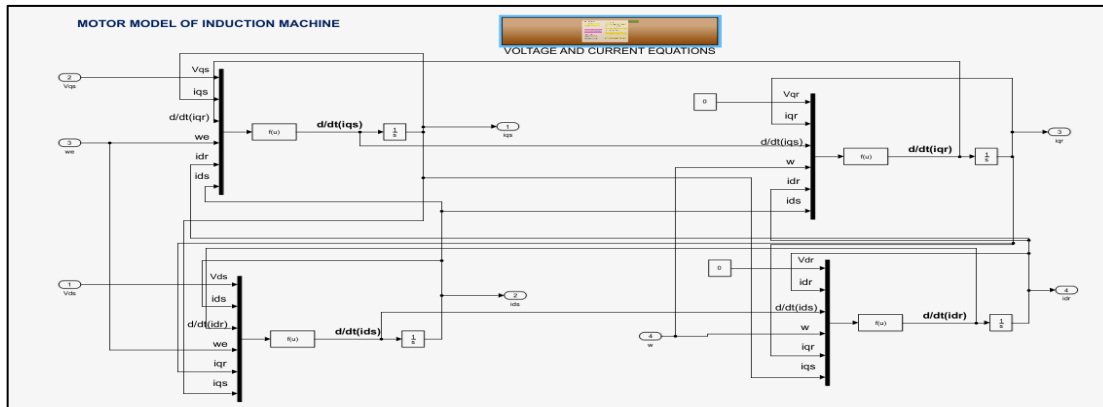


Figure 4.5 : les équations différentielles du modèle dq du moteur.

Description :

On a des Entrées : v_{ds} , v_{qs} , vitesse mécanique ce à quoi ils sont confrontés avec des sorties : courants statoriques (i_{ds} , i_{qs}) et rotoriques (i_{dr} , i_{qr}).

Ce modèle permet de simuler l'évolution du flux magnétique, du courant et de la vitesse.

3.4. Bloc de Calcul du Couple :

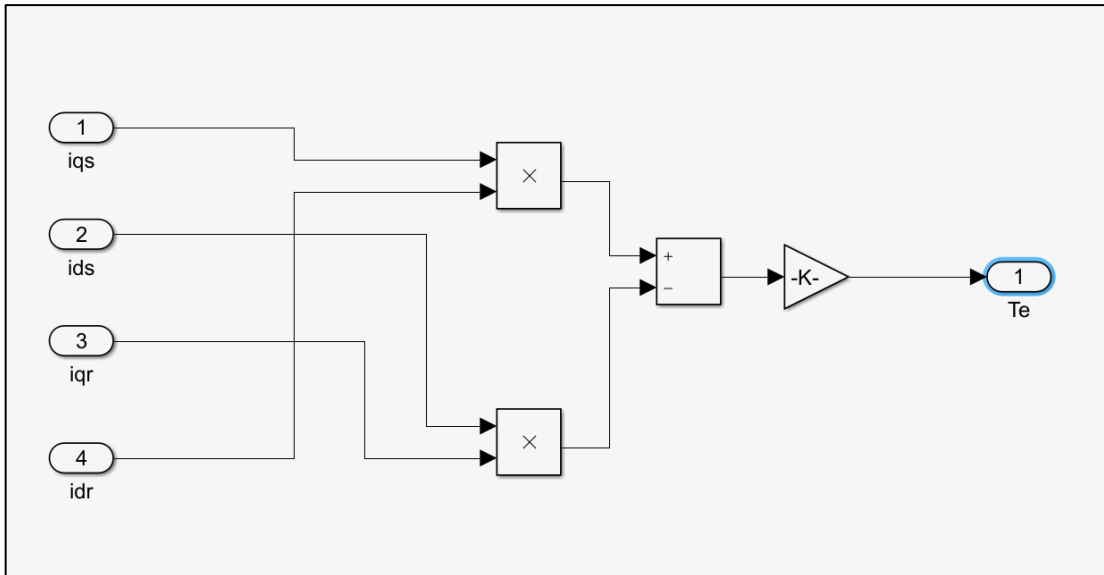


Figure 4.6: Schéma bloc de calcul du Couple

À partir des courants calculés, ce bloc détermine le couple électromagnétique (T) produit par le moteur :

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot L_m (i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr})$$

3.5. Transformation dq → abc :

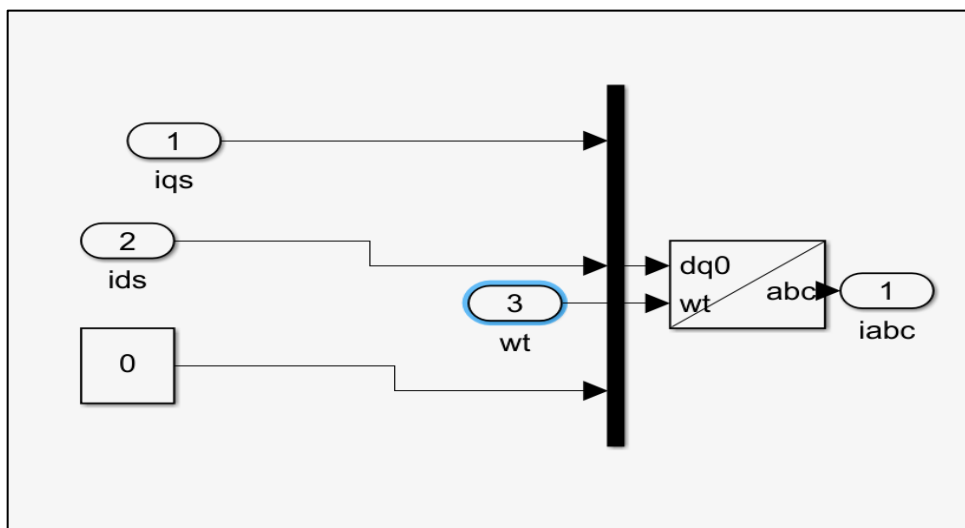


Figure 4.7: Transformation dq → abc

Description :

Elle permet de reconvertir les courants ids, iqs en courants triphasés ia, ib, ic pour une observation directe du comportement du moteur dans le domaine temporel.

4. Résultats de la Simulation²⁴

4.1. Tension d'alimentation

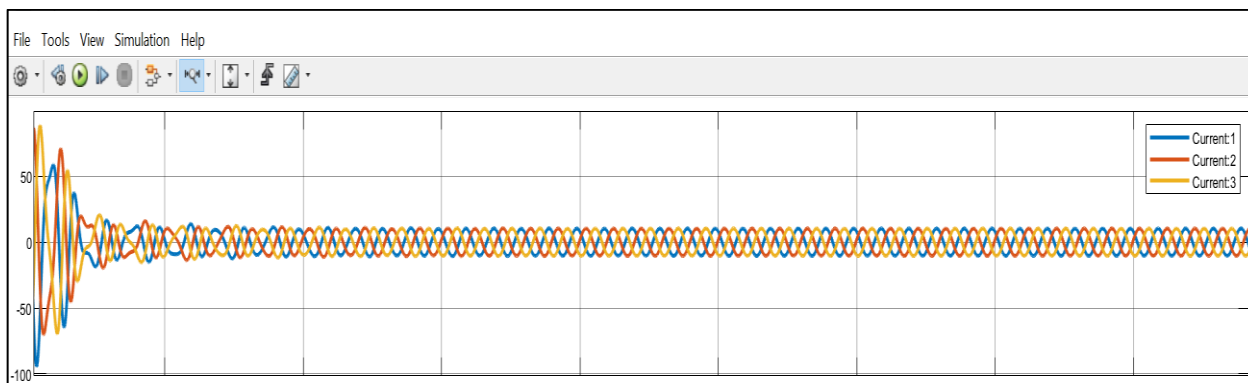


Figure 4.8: figure des tension d'alimentation

4.2. Courant Ia

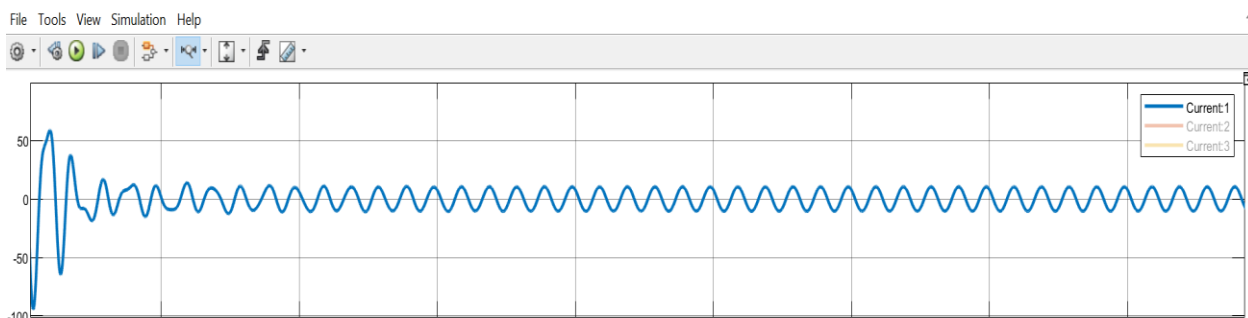


Figure 4.9 Le courant d'alimentation

4.3. Couple électromagnétique :

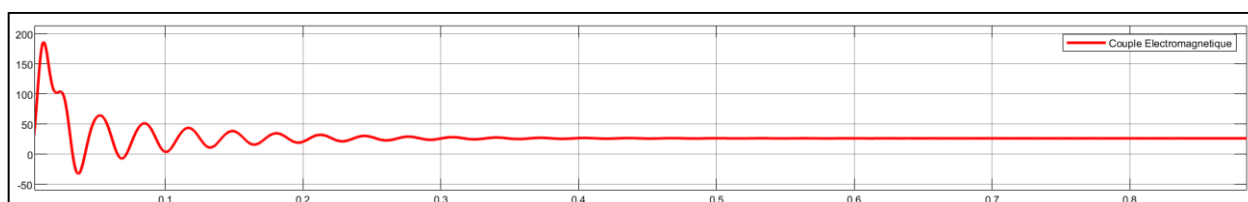


Figure 4.10: Le Couple électromagnétique

4.4. Vitesse de rotation :

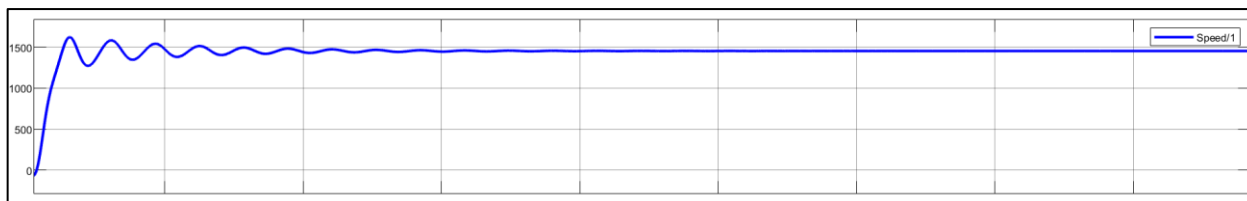


Figure 4.11 Vitesse de rotation

Description :

- Courbe du Couple électromagnétique (T_e) vs Temps :

Démarrage : On observe un pic de couple immédiat après la mise sous tension — le fameux couple de démarrage (ou “locked rotor torque”).

Ce pic peut atteindre environ $1,5 \times$ le couple nominal.

Phase transitoire : Ensuite, le couple diminue doucement et oscille avant de se stabiliser vers sa valeur nominale, typiquement une valeur basse (env. $26,5 \text{ N}\cdot\text{m}$ dans ta simulation). Ces oscillations proviennent des inrush currents et de la réponse dynamique du système.

Régime permanent : Après stabilisation, la courbe devient plate. Le couple électromagnétique s'équilibre avec le couple de charge, indiquant que le moteur tourne en régime permanent.

- Courbe de la vitesse de rotation (en tr/min) vs Temps :

Démarrage : La vitesse initiale est nulle, puis croît rapidement au début, car le couple élevé imprime une forte accélération.

Transition : La progression se ralentit à mesure que le couple diminue jusqu'à l'équilibre. Le régime transitoire peut durer quelques centaines de millisecondes ou plus, selon les paramètres d'inertie du rotor.

Régime permanent : Enfin, la courbe atteint une valeur quasi constante ($\approx 1452 \text{ tr}/\text{min}$, légèrement sous la vitesse synchrone). Le léger écart correspond au glissement du moteur.

5. Analyse et Interprétation :

Le couple démarre avec une valeur élevée, puis se stabilise une fois la vitesse nominale atteinte.

La vitesse reste légèrement inférieure à la vitesse synchrone, ce qui est typique pour les moteurs asynchrones.

La transformation dq permet de mieux suivre les grandeurs en supprimant les composantes alternatives²⁴.

6. Conclusion

La simulation réalisée permet de valider efficacement le modèle dynamique du moteur asynchrone triphasé, en reproduisant avec précision son comportement dans les domaines transitoire et permanent.

D'un point de vue électrique, elle révèle la nature des courants d'appel et transitoires statoriques/rotoriques, ainsi que les oscillations de tension associées, ce qui est crucial pour dimensionner les protections et les dispositifs de démarrage .

L'utilisation du référentiel dq permet une analyse raffinée des composantes continues (i_{ds} , i_{qs}), facilitant le contrôle et la commande vectorielle du moteur, avec une vision claire des interactions flux-courant-torque.

Au niveau électromagnétique, cette approche modélisation permet de disséquer les phénomènes d'induction, flux, réaction statorique, et leur conversion en couple électromagnétique, étape essentielle pour expliquer la relation couple-vitesse et le concept de glissement . La simulation rend visible le couple de démarrage élevé, suivi d'une décroissance progressive jusqu'à un régime stable, illustrant parfaitement la réponse dynamique d'un moteur asynchrone.

Sur le plan pédagogique, ce modèle constitue un véritable outil de formation supérieur : il permet aux étudiants et ingénieurs d'explorer visuellement les réponses du moteur sous différentes conditions (alimentation, charge, paramétrage), sans nécessiter d'expérimentation en laboratoire souvent coûteuse ou complexe²⁵.

Chapitre V

Dimensionnement des Protections Électriques des Moteurs

1.Introduction au Dimensionnement des Protections Électriques des moteurs

Le dimensionnement correct des dispositifs de protection, tels que les disjoncteurs et les relais thermiques, est crucial pour la sécurité des installations électriques et des équipements. Un disjoncteur protège contre les surintensités (surcharges et courts-circuits), tandis qu'un relais thermique protège spécifiquement les moteurs contre les surcharges prolongées. Un mauvais dimensionnement peut entraîner des déclenchements intempestifs, une usure prématurée des équipements, voire des risques d'incendie ou d'électrocution. Cet exercice vous guidera à travers les étapes clés du dimensionnement de ces protections pour un moteur asynchrone triphasé.

2.Données de l'étude

On souhaite dimensionner les protections pour un moteur asynchrone triphasé alimentant une pompe centrifuge.

2.1.Caractéristiques du moteur et de l'installation :

- * Puissance utile du moteur (P_u) : 15kW
- * Tension d'alimentation (entre phases) (U) : 400V
- * Fréquence : 50Hz
- * Facteur de puissance ($\cos\alpha$) : 0.85
- * Rendement (η) : 0.90
- * Rapport courant de démarrage / courant nominal (I_d/I_n) : $k=6$
- * Classe de déclenchement du relais thermique souhaitée : Classe 10
- * Type de disjoncteur à envisager pour la protection magnétique : Disjoncteur moteur (courbe D ou équivalent pour moteurs)

2.2.Schéma de principe de l'alimentation du moteur

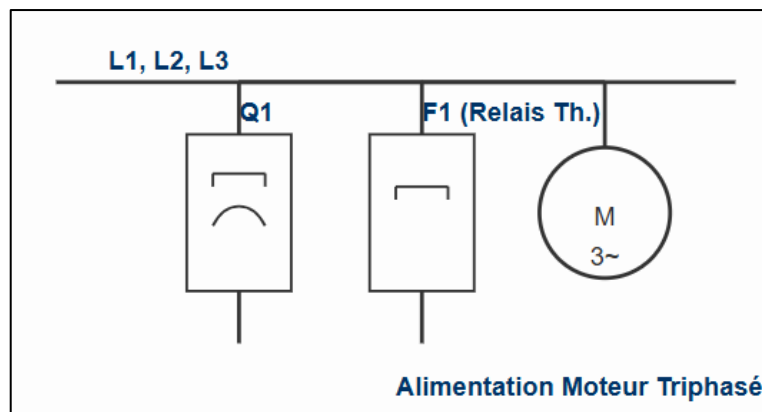


Figure 5 : Alimentation du moteur.

Schéma unifilaire simplifié : Alimentation, Disjoncteur (Q1), Relais Thermique (F1), Moteur (M).

3.Dimensionnement Disjoncteurs et Relais Thermiques

3.1.Courant Nominal (In)

Principe :

Le courant nominal (In) est le courant absorbé par le moteur en fonctionnement normal à sa puissance utile nominale. Pour un moteur triphasé, il se calcule à partir de la puissance utile (Pu), de la tension d'alimentation (U), du facteur de puissance (cos?) et du rendement (?).

Formule utilisée :

$$I_n = \frac{P_u}{\sqrt{3} \times U \times \cos \varphi \times \eta}$$

Données spécifiques :

- * Pu=15kW=15000W
- * U=400V
- * cos(α)=0.85
- * η =0.90
- * √3=1.732

$$\begin{aligned} I_n &= \frac{15000 \text{ W}}{1.732 \times 400 \text{ V} \times 0.85 \times 0.90} \\ &= \frac{15000}{692.8 \times 0.85 \times 0.90} \\ &= \frac{15000}{588.88 \times 0.90} \\ &= \frac{15000}{529.992} \\ &\approx 28.30 \text{ A} \end{aligned}$$

Le courant nominal du moteur est In?28.30A.

3.2.Courant de Démarrage (Id)

Principe :

Le courant de démarrage (Id) est le pic de courant transitoire absorbé par le moteur lors de sa mise sous tension. Il est généralement plusieurs fois supérieur au courant nominal. Il est calculé en multipliant le courant nominal (In) par le rapport Id/In (souvent noté k).

Formules utilisées :

$$I_d = k \cdot I_n$$

Données spécifiques :

- $I_n \approx 28.30 \text{ A}$
- $k = I_d / I_n = 6$

$$I_d = 6 \times 28.30 \text{ A} = 169.8 \text{ A}$$

Le courant de démarrage du moteur est $I_d = 169.8 \text{ A}$

3.3. Réglage du Relais Thermique (I_{rth}) Principe :

Principe :

Le relais thermique protège le moteur contre les surcharges. Son courant de réglage (I_{rth}) doit être choisi en fonction du courant nominal (I_n) du moteur. En général, on règle I_{rth} à la valeur du courant nominal I_n . Les relais thermiques possèdent une plage de réglage permettant un ajustement fin.

Recommandation :

Le courant de réglage du relais thermique I_{rth} est typiquement réglé à la valeur du courant nominal I_n .

$$I_{rth} \approx I_n$$

Application :

Avec $I_n = 28.30 \text{ A}$, on choisira un relais thermique dont la plage de réglage encadre cette valeur. Par exemple, un relais thermique avec une plage de réglage de 25-32A serait approprié. On réglerait alors le relais à $I_{rth} = 28.3 \text{ A}$ (ou la valeur la plus proche disponible sur le relais).

- Le relais thermique sera réglé à $I_{rth} = 28.3 \text{ A}$. Une plage de relais de 25-32A est adaptée.

- Un relais thermique protège principalement contre :
Les surcharges prolongées.

3.4. Réglage de la Protection Magnétique (I_m)

Principe :

La protection magnétique du disjoncteur (ou le déclencheur magnétique) protège contre les courts-circuits. Son seuil de déclenchement (I_m) doit être suffisamment élevé pour ne pas déclencher lors du démarrage du moteur (où I_d est élevé), mais assez bas pour réagir rapidement en cas de court-circuit.

Pour les disjoncteurs moteurs, la plage de réglage magnétique est souvent exprimée en multiples du courant nominal ou du calibre du disjoncteur.

Pour un disjoncteur moteur (type D ou équivalent), le déclencheur magnétique est typiquement réglé entre 10 et 14 fois le courant nominal maximal de la plage du disjoncteur, ou selon les spécifications du fabricant pour assurer le passage du courant de démarrage.

Recommandation :

Le seuil de déclenchement magnétique I_m doit être supérieur au courant de démarrage I_d .

$$I_m > I_d$$

Pour un disjoncteur moteur, on choisit un calibre qui permet le passage du courant de démarrage. Si l'on considère un réglage magnétique typique pour un départ moteur à $12 \times I_n$ (valeur indicative, à vérifier selon le matériel) :

Calcul indicatif :

$$\begin{aligned} I_m &\approx 12 \times I_n \\ &\approx 12 \times 28.30 \text{ A} \\ &\approx 339.6 \text{ A} \end{aligned}$$

Ce calcul donne un ordre de grandeur. Le choix final dépendra des calibres et des courbes de déclenchement des disjoncteurs disponibles. Il faut s'assurer que $I_m > I_d = 169.8 \text{ A}$. Le réglage magnétique doit donc être au minimum supérieur à 169.8 A .

Résultat Question 4 : Le seuil de déclenchement magnétique I_m devra être supérieur à 169.8 A . Un réglage typique pourrait être autour de 340 A , selon le disjoncteur choisi.

3.5.Choix du Disjoncteur Moteur Magnétothermique Principe :

Principe :

Le disjoncteur moteur magnétothermique combine la protection thermique (réglable, comme le relais thermique) et la protection magnétique (contre les courts-circuits). Son calibre doit être choisi pour correspondre au courant nominal du moteur et sa plage de réglage thermique doit permettre de fixer $I_{rth} \approx I_n$. Le déclencheur magnétique doit être adapté au courant de démarrage.

Nous avons $I_n \approx 28.30 \text{ A}$ et $I_d \approx 169.8 \text{ A}$.

- **Protection thermique** : Le disjoncteur doit avoir une plage de réglage thermique qui inclut 28.30 A . Par exemple, une plage de $25\text{-}32 \text{ A}$ ou $24\text{-}36 \text{ A}$ serait adéquate.
- **Protection magnétique** : Le déclencheur magnétique doit être supérieur à $I_d = 169.8 \text{ A}$.

On pourrait choisir un disjoncteur moteur magnétothermique.

- * Calibre nominal (ou plage de courant assigné d'emploi) : un disjoncteur de 32 A.
- * Plage de réglage thermique : 24A-32A. On le réglerait à 28.3A.
- * Déclencheur magnétique : Si ce disjoncteur a un déclencheur magnétique fixe à, par exemple, $12 \times 32A = 384A$. Ceci est supérieur à $I_d = 169.8A$, donc acceptable.

Note :

Le choix précis se fait toujours en consultant les catalogues des fabricants qui fournissent les courbes de déclenchement.

Un disjoncteur moteur magnétothermique de calibre 32 A avec une plage de réglage thermique de 24-32A (réglé à 28.3A) et un déclencheur magnétique fixe autour de 384A (ou une plage réglable adéquate) pourrait convenir.

- La principale différence entre un disjoncteur magnétothermique et un ensemble contacteur + relais thermique séparé est :

Le disjoncteur magnétothermique intègre les deux protections (surcharge et court-circuit) en un seul appareil.

3.6.Vérification du Déclenchement Magnétique pour I_{kmin}

Principe :

Il est essentiel de s'assurer que le courant de court-circuit minimal (I_{kmin}) en bout de ligne (point le plus éloigné de l'installation protégé par le disjoncteur) est suffisant pour actionner le déclencheur magnétique du disjoncteur. Si I_{kmin} est inférieur au seuil de déclenchement magnétique I_m , la protection contre les courts-circuits n'est pas garantie pour les défauts en bout de ligne.

Condition de vérification :

$$I_{kmin} > I_m \text{ (seuil de déclenchement magnétique)}$$

Ou, plus précisément, I_{kmin} doit être supérieur au seuil de déclenchement magnétique maximal toléré par la norme (par exemple, pour un disjoncteur courbe D, le déclenchement est attendu entre 10 et 20 I_n , donc I_m est dans cette plage. On vérifie que I_{kmin} est supérieur à la borne inférieure de cette plage pour garantir le déclenchement).

Pour notre disjoncteur choisi avec un déclencheur magnétique fixe à 384A (valeur indicative), nous devons vérifier si I_{kmin} est supérieur à cette valeur. Cependant, il est plus courant de vérifier que I_{kmin} est supérieur au seuil *minimal* de déclenchement magnétique pour garantir l'ouverture. Si le disjoncteur a une plage de déclenchement magnétique (par ex. 10-14 Icalibre), I_{kmin} doit être supérieur à la borne inférieure de cette plage.

Supposons que notre disjoncteur de 32A ait un déclencheur magnétique qui agit entre 10 et 14 fois son calibre (courbe typique pour moteur). Seuil minimal de déclenchement magnétique : $10 \times 32A = 320A$. Seuil maximal de déclenchement magnétique : $14 \times 32A = 448A$. Le réglage effectif du disjoncteur se situe dans cette plage (par exemple, notre 384A est bien dans cette plage). Pour garantir le déclenchement, I_{kmin} doit être supérieur au seuil maximal de la plage de non-déclenchement, qui est la borne inférieure de la plage de déclenchement magnétique (i.e., 320A).¹

Données spécifiques :

* $I_{kmin}=500A$

* Seuil de déclenchement magnétique du disjoncteur choisi (exemple) : $I_m = 384A$. Plus précisément, la plage de déclenchement est 320A-448A.

On a :

$$500 A > 384 A \quad (\text{Vrai})$$

Ou plus rigoureusement, on vérifie que I_{kmin} est supérieur à la valeur maximale de la plage de non-déclenchement instantané. Si le disjoncteur déclenche entre 10 et 14 fois son calibre (32A), il déclenchera assurément pour un courant supérieur à $10 \times 32A = 320A$. Comme $500A > 320A$, le déclenchement est assuré.

- Avec $I_{kmin}=500A$ et un seuil de déclenchement magnétique effectif du disjoncteur (par exemple, 384A ou une plage de 320-448A), la condition $I_{kmin} > I_m(\text{min_declenchement})$ est vérifiée. Le déclenchement magnétique est assuré pour un court-circuit en bout de ligne.

Note :

1- Le courant nominal d'un moteur triphasé dépend-il de son rendement ?

- Oui, un meilleur rendement implique un courant nominal plus faible pour une même puissance utile.

2- La protection magnétique d'un disjoncteur est principalement conçue pour :

- Détecter les courants de court-circuit.

3 - Comment règle-t-on typiquement un relais thermique pour un moteur ?

-Approximativement au courant nominal du moteur (I_n).

4.Glossaire

Disjoncteur

Appareil de protection capable d'interrompre un courant électrique en cas de surintensité (surcharge ou court-circuit).

Relais Thermique

Dispositif de protection qui détecte une surchauffe due à une surcharge prolongée, typiquement utilisé pour les moteurs. Il agit sur un circuit de commande pour couper l'alimentation (via un contacteur).

Courant Nominal (I_n)

Courant électrique pour lequel un appareil ou une installation est conçu pour fonctionner en conditions normales et continues.

Courant de Démarrage (I_d)

Pointe de courant transitoire, significativement plus élevée que le courant nominal, absorbée par un moteur lors de sa mise sous tension.

Surcharge

Condition où un circuit ou un équipement est traversé par un courant supérieur à son courant nominal, mais inférieur à un courant de court-circuit, pendant une durée anormale.

Court-Circuit

Connexion accidentelle de très faible impédance entre deux points d'un circuit électrique présentant une différence de potentiel, entraînant un courant très élevé.

Facteur de Puissance $\cos(\alpha)$

Rapport entre la puissance active (réellement consommée et transformée en travail) et la puissance apparente (produit de la tension et du courant) dans un circuit en courant alternatif.

Rendement (η)

Rapport entre la puissance utile (fournie par l'appareil) et la puissance absorbée (consommée par l'appareil).

Disjoncteur Magnétothermique

Type de disjoncteur qui combine une protection thermique (contre les surcharges) et une protection magnétique (contre les courts-circuits).

Classe de Déclenchement (Relais Thermique)

Indique le temps maximal de déclenchement d'un relais thermique pour un multiple donné de son courant de réglage (ex: Classe 10, Classe 20). Une Classe 10 déclenche plus rapidement qu'une Classe 20 pour une même surcharge.

5.Conclusion :

Le dimensionnement des protections électriques est bien plus qu'une simple formalité technique : c'est une démarche essentielle pour assurer la sécurité des personnes, la fiabilité des équipements et la pérennité des installations. À travers ce chapitre, nous avons exploré pas à pas les éléments clés pour protéger efficacement un moteur asynchrone triphasé, en veillant à ce que chaque choix soit justifié et adapté aux besoins réels.

Les calculs du courant nominal et du courant de démarrage, le réglage précis du relais thermique, et la sélection rigoureuse du disjoncteur ne sont pas de simples exercices théoriques. Ils traduisent une volonté de concilier performance et sécurité, en anticipant les risques liés aux surcharges, aux courts-

circuits ou aux démarrages répétés. Chaque paramètre ajusté, chaque protection choisie, contribue à éviter des pannes coûteuses, des interruptions intempestives, ou pire, des accidents graves.

Ce travail souligne également l'importance de ne pas se contenter des formules, mais de toujours contextualiser les solutions en s'appuyant sur les normes et les recommandations des fabricants. Une protection mal dimensionnée peut être aussi dangereuse qu'une absence de protection.

En conclusion, ce chapitre rappelle que derrière chaque disjoncteur, chaque relais, se cachent des enjeux humains et techniques majeurs. Une installation bien protégée, c'est une équipe en sécurité, un outil de travail fiable, et une exploitation sereine. C'est pourquoi ce dimensionnement doit être abordé avec rigueur, mais aussi avec la conscience de son impact concret sur le quotidien des utilisateurs et la durée de vie des équipements.

Parce qu'en électricité, la meilleure énergie reste celle qui est maîtrisée.

Conclusion Générale

Les moteurs asynchrones triphasés constituent aujourd'hui un pilier fondamental dans le secteur industriel, en raison de leur conception simple, leur faible coût, leur robustesse, et leur adaptabilité à un large éventail d'applications. Qu'il s'agisse de pompes, de compresseurs, de convoyeurs ou d'équipements de production automatisés, ces moteurs sont omniprésents dans les installations industrielles modernes. Toutefois, cette omniprésence ne doit pas occulter les risques auxquels ils sont exposés. Une défaillance, même ponctuelle, peut engendrer des arrêts de production, des pertes économiques considérables, ou encore des risques matériels et humains. C'est dans ce cadre que la problématique de la **protection des moteurs asynchrones** prend tout son sens.

Ce mémoire a été structuré de manière progressive afin d'offrir une vue globale, mais aussi technique, sur la question. Dans un premier temps, une étude détaillée du fonctionnement du moteur asynchrone a été menée, mettant en lumière le rôle du **stator**, du **rotor** (cage d'écureuil et bobiné), ainsi que les phénomènes électromagnétiques à l'origine de la production du couple moteur. Cette phase a permis de comprendre les principes de base nécessaires pour anticiper les comportements du moteur en situation normale ou perturbée.

La seconde partie du travail a porté sur les **défauts courants** rencontrés lors du fonctionnement des moteurs : surcharge, court-circuit, échauffement, déséquilibre ou perte de phase, courant d'appel excessif au démarrage, etc. Chacun de ces défauts a été analysé dans ses causes, ses effets, et surtout les risques qu'il représente pour l'intégrité de la machine et la sécurité de l'installation. Face à ces risques, une étude comparative des **dispositifs de protection** les plus utilisés a été réalisée : fusibles, disjoncteurs magnéto-thermiques, relais thermiques, contacteurs, etc., avec un accent particulier sur leurs principes de fonctionnement, leurs seuils d'intervention, et leur adéquation à différents contextes industriels.

Dans une troisième étape, le mémoire a abordé la **modélisation mathématique** du moteur, en utilisant les transformations de Park et de Concordia. Ces outils ont permis de traduire le fonctionnement dynamique de la machine dans un repère tournant simplifié, facilitant ainsi l'analyse et la simulation du comportement du moteur en régime transitoire et permanent.

La partie simulation, réalisée sous **MATLAB/Simulink**, a offert une visualisation claire des grandeurs électriques et mécaniques (courant, couple, vitesse) dans différentes conditions de fonctionnement. Cette simulation a permis de valider les modèles étudiés, d'observer les réponses du moteur à des perturbations, et d'illustrer l'impact de certaines protections sur le comportement de la machine.

Enfin, une attention particulière a été portée au **dimensionnement des dispositifs de protection**, étape indispensable pour garantir un fonctionnement sûr et fiable. À travers des calculs concrets, en lien avec les caractéristiques techniques réelles du moteur, les courbes de déclenchement et les normes en vigueur (comme la norme CEI 60947), des choix judicieux de disjoncteurs et relais ont été proposés.

L'ensemble de cette démarche permet de conclure que la protection efficace des moteurs asynchrones ne peut se résumer à l'installation d'un seul dispositif, mais nécessite une **approche globale** combinant

Références

1. Wildi, T. (2006). *Machines électriques, entraînements et systèmes de puissance* (6e éd.). Pearson.
2. Krause, P. C. (2013). *Analyse des machines électriques et des systèmes d'entraînement* (3e éd.). Wiley-IEEE Press.
3. Sen, P. C. (1996). *Principes des machines électriques et de l'électronique de puissance* (2e éd.). Zak Alger, P. L. (1970). *Machines asynchrones : leur comportement et leurs applications* (2e éd.). Gordon and Breach.
4. Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Umans, S. D. (2003). *Machines électriques* (6e éd.). McGraw-Hill.
5. Bose, B. K. (2006). *Électronique de puissance et entraînements électriques : avancées et tendances*. Academic Press. Leonhard, W. (2001). *Commande des entraînements électriques* (3e éd.). Springer.
6. Vas, P. (1992). *Machines et entraînements électriques : approche par la théorie des vecteurs d'espace*. Oxford University Press.
7. Novotny, D. W., & Lipo, T. A. (1996). *Commande vectorielle et dynamique des entraînements à courant alternatif*. Oxford Science Publications.
8. IEC 60034-1. *Machines électriques tournantes – Partie 1 : Caractéristiques nominales et performances*.
9. Guru, B. S., & Hiziroğlu, H. R. (2001). *Machines électriques et transformateurs* (3e éd.). Oxford University Press.
10. Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (1994). *Analyse des systèmes de puissance* (2e éd.). McGraw-Hill.
11. NEMA MG-1. *Moteurs et générateurs*. Association nationale des fabricants de matériel électrique (États-Unis).
12. Mohan, N. (2003). *Entraînements électriques : une approche intégrée*. MNPERE.
13. IEEE Std 1415-2006. *Guide IEEE pour la protection des moteurs asynchrones*.
14. NEMA MG-1. *Moteurs et générateurs*. Association nationale des fabricants de matériel électrique (États-Unis).
15. Thøgersen, P. (2004). *Détection de défauts et surveillance d'état des moteurs asynchrones*. Université technique du Danemark.
16. Sen, P. C. (1996). *Principes des machines électriques et de l'électronique de puissance* (2e éd.). Wiley.
17. Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Umans, S. D. (2003). *Machines électriques* (6e éd.). McGraw-Hill.
18. IEC 60269-1. *Fusibles à basse tension – Partie 1 : Exigences générales*. Schneider Electric. (2018). *Cahier Technique n°107 : Protection des moteurs asynchrones*.
19. IEC 60947-2. *Appareillage à basse tension – Partie 2 : Disjoncteurs*. Merlin Gerin. (2000). *Guide de protection des moteurs et des transformateurs*.
20. Alstom. (2010). *Protection des réseaux électriques industriels*. Wiley.
- IEC 60947-4-1. *Contacteurs et démarreurs pour moteurs*.
21. Siemens. (2015). *Catalogue SIRIUS – Commandes industrielles*.
22. Krause, P. C. (2013). *Analyse des machines électriques et des systèmes d'entraînement* (3e éd.). Wiley-IEEE Presse
23. Boldea, I., & Nasar, S. A. (2002). *Manuel de conception des machines asynchrones* (2e éd.). CRC Press.

24. Vas, P. (1992). *Machines et entraînements électriques : approche par la théorie des vecteurs d'espace*. Oxford University Press.
25. Novotny, D. W., & Lipo, T. A. (1996). *Commande vectorielle et dynamique des entraînements à courant alternatif*. Oxford Science Publications.
26. Mohan, N. (2003). *Entraînements électriques : une approche intégrée*. MNPERE.
- Leonhard, W. (2001). *Commande des entraînements électriques (3e éd.)*. Springer.
27. Park, R. H. (1929). *Théorie des deux réactions des machines synchrones*. Transactions de l'AIEE.
28. Bose, B. K. (2006). *Électronique de puissance et entraînements électriques : avancées et tendances*. Academic Press.
29. Franklin, G. F., et al. (2015). *Commande par retour d'état des systèmes dynamiques (8e éd.)*. Pearson.
30. Ogata, K. (2010). *Commande automatique moderne (5e éd.)*. Prentice Hall.
31. Belgroun Aimen et Salem Nour Elislam. (2025). *simulation et commande de machine asynchrone*.