

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf -Mila
Institut des Sciences et de Technologie
Département de Sciences et Techniques



N°Ref :.....

Projet de Fin d'Etude préparé vue de l'obtention du diplôme de
MASTER
Spécialité : Electromécanique

**Etude de l'impact de démarrage des moteurs
électriques sur la qualité du réseau électrique**

Réalisé par :

- BOUTALEB BOUCHRA
- BENAZZEDINE BOCHRA

Soutenu devant le jury :

Mme YESSAD DALILA

M. BAZI SMAÏL

M. GUENTRI HOCINE

Président

Examineur

Promoteur

Année universitaire : 2019/2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace



... Je tiens à dédier ce modeste travail

À ma très chère Mère

À mon cher Père, en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leurs soutiens permanents durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'efforts pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but.

À ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance

À mes frères : Mohamed, Islam, Youssef,

Haroun, Abed-Rahman

À toute ma famille : Ben Azzedine, Hezoual

À tous les amis (es) d'études surtout ceux

D'électromécanique promotion 2020.

BOUTRAT

Dédicace



... À la plus belle créature que Dieu a créé sur terre

À cette source de tendresse, de patience et de générosité

À la mémoire de ma mère et mon grand père

À mon père

À ma grande mère

À tous mes frères : Louai, Younes

À Mes sœurs : Ibtissam, Zoubeyda, Saida, Mannar

À tous mes amis et collègues

À tous ceux qui me sont chers en témoignage de ma

profonde affection.

BOUCHRA BOUJLEB

Remerciements

En tout premier lieu, nous remercions Allah tout puissant de nous avoir donné la force et la volonté pour pouvoir finir ce mémoire de Master.

Nous tenons à remercier en outre :

*Notre encadreur Dr : **Guentri Hocine** enseignant au centre universitaire Abdelhafid Boussouf de Mila, de nous avoir fait bénéficier de ses connaissances qui nous ont permis de mener ce projet à sa fin, et surtout pour sa disponibilité et son amabilité et pour son suivi, sa patience, ces conseils, et son aide tout au long de la réalisation de ce travail.*

*Je remercie vivement Dr : **Yessad Dalila** enseignante au centre universitaire Abdelhafid Boussouf de Mila, pour l'intérêt qu'elle a portée à mon travail en acceptant de l'examiner.*

*Je tiens à témoigner ici ma respectueuse reconnaissance au Dr : **Bazi Smail** enseignant au centre universitaire Abdelhafid Boussouf de Mila, d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

Nos remerciements les plus profonds vont à mes familles, pour leur soutien et leur amour indéfectibles.

Nos plus vifs remerciements vont également aux enseignants de la spécialité d'Electromécanique.

Nous tenons remercier aussi tous nos amis qui nous ont aidé de loin ou de près dans la réalisation de ce travail.

Liste des symboles

F	Force en Newton
f.e.m	Force électromotrice
f.c.é.m	Force contre- électromotrice
B	Induction magnétique en Tesla
I	Intensité dans le conducteur en Ampère
L	Longueur de conducteur en metre
2p	Le nombre de pôles inducteurs
2a	Le nombre de voies d'enroulement
ϕ	Le flux moyen sous un pôle(en Weber)
n	Le nombre de conducteurs de l'induit
N	La fréquence de rotation de l'induit en tr/s
Ω	Vitesse angulaire de l'induit en rad/s
P_{em}	Puissance électromécanique
C_{em}	Couple électromécanique
U	Tension d'alimentation
R	Résistance d'enroulement d'induit
I	Courant d'induit
I_e	Courant d'excitation
Cr	Le moment du couple résistant
N_s	Vitesse de rotation du champ en tr/s
N_r	Vitesse de rotation du rotor
G	Glissement
Δ	L'angle interne
I_d	Courant de démarrage [A]
C_d	Couple de démarrage [Nm]
R_d	Résistances de démarrage
p	Le nombre de paires de pôles
F	La fréquence de l'alimentation
W	La vitesse angulaire de rotation
w_s	La vitesse angulaire de synchronisme du champ statorique
R_{eq}	La résistance équivalente
Φ_s	La phase à statorique
Φ_r	La phase à rotorique
L_s	L'inductance propre d'une phase statorique

Lr	L'inductance propre d'une phase rotorique
Ce	Couple électromagnétique
Cn	Couple nominal [Nm]
L1, L2, L3	Alimentation triphasée
Q1	Sectionneur fusible
KM1	Contacteur principal 1
F1	Relais thermique
M1	Moteur triphasé
KM1	Contacteur « ligne »
KM2	Contacteur « 2ème temps»
KM3	Contacteur « 3ème temps »
R1 et R2	Deux groupes de résistances
M	Moteur à rotor bobiné
Ur	La tension de réseau [V]
Ured	La tension réduite [V]
T	Transformateur
AC	Le moteur à courant alternatif
B1. B2	Balais fixes
STATCOM static	Synchronous compensator
SVC	Static var compensator
VDF	Variable Frequency Driver
Mcc	Moteur à courant continu

Sommaire

Sommaire

Dédicace	i
Dédicace	ii
Remerciements	iii
Liste des symboles	iv
Sommaire	vi
Liste des Tableaux	x
Liste des figures.....	xi
Abstract.....	xiv
Introduction générale	1
Chapitre I: Présentation des différents moteurs électriques	
I.1. Introduction	3
I.2. Historique des machines électriques.....	3
I.3 Définition des moteurs électriques.....	4
I.3.1. Principe de fonctionnement	4
I.4. Moteurs à courant continu	5
I.4.1. Pourquoi et comment ?	5
I.4.2. Avantages et inconvénients d'un moteur à courant continu.....	6
I.4.3.Principe de fonctionnement du moteur à courant continu	6
I.4.3.1. La force électromotrice (f,e,m)	7
I.4.3.2. La puissance électromagnétique et le couple électromagnétique	8
I.4.4.L'intérêt du moteur à courant continue.....	8
I.4.5. Moteur à excitation indépendante.....	8
I. 4.5.1. Modèle équivalent.....	8
I.4.5.2.Vitesse de rotation	9
I.4.6 Moteur à excitation série.....	10
I.4.6.1. Principe	10
I.4.6.2. Modèle équivalent et caractéristiques.....	11
I.4.6.3. Sens de rotation.....	11
I.4.7. Moteur à excitation parallèle (ou shunt)	12
I.4.7.1. Principe	12
I.4.8.Moteur a aimant permanent	13

I.5. Moteur sans balais.....	13
I.6. Moteur synchrone	14
I.6.1. Généralités	14
I.6.2. Constitution.....	15
I.6.2.1. Le stator	15
I.6.2.2. Le rotor	16
I. 6.3.Principe de fonctionnement	16
I. 6.4.La variation de la vitesse de moteur synchrone	17
I.7. Machine asynchrone	18
I.7.1. Les caractéristiques du moteur asynchrone	19
I.7.2. Principe fonctionnement du moteur asynchrone	22
I.7.2.a. Le moteur monophasé à induction	23
I.7.2.b. Le moteur triphasé à induction	24
I.8. Les moteurs universels.....	25
I.9. Les moteurs pas à pas	26
I.9.1. Fonctionnement d'un moteur pas à pas	27
I.10. Comparaison entre les différents types de moteurs	29
I.11. Conclusion.....	29

Chapitre II : Critères de choix des moteurs électriques

II.1.Introduction.....	30
II.2.Intérêt des moteurs électriques.....	30
II.3.Les avantages et les inconvénients des moteurs électriques.....	31
II.4.L'installation type moteur-application	31
II.5.Comment faire son choix ?.....	32
II.6.Les critères de choix pour un moteur électrique	33
II.6.1.Choix de la famille du moteur	33
II.6.2.Choix du type de l'alimentation électrique	33
II.6.3.Choix du type d'application	34
II.6.4.Choix du mouvement voulu	35
II.6.5.Choix des caractéristiques d'encombrement.....	35
II.6.6.Choix du rendement du moteur	35
II.6.6.1.Un moteur d'une puissance trop faible pour l'application	35
II.6.6.2.Un moteur trop puissant pour l'application.....	36
II.6.7. Choix de l'efficacité énergétique	37
II.6.8.Choix d'un moteur à induction	37
II.6.9.Choix d'un moteur synchrone	40

II.6.10.Choix d'un moteur à courant continu.....	40
II.7.Étude comparative entre un moteur DC et moteur AC	41
II.7.1.Étude de moteur DC	41
II.7.1.1.Définition et structure.....	41
II.7.1.2. Avantages	42
II.7.1.3.Inconvénients.....	42
II.7.1.4. Domaine d'utilisation	42
II.7.2.Étude de moteur AC	42
II.7.2.1. Définition et structure.....	42
II.7.2.2. Domaine d'utilisation	43
II.8.Les conséquences d'un choix du moteur	44
II.9.Conclusion	44
Chapitre III : Les différents modes de démarrage de moteur	
III.1.Introduction	45
III.2.Les problèmes de démarrage des moteurs asynchrone triphasé	45
III.3.Le choix de démarrage.....	46
III.4.Les principaux modes de démarrage.....	46
III.4.1.Démarrage classique	46
III .4.1.1.Démarrage direct	46
III.4.1.2.Démarrage étoile triangle	48
III.4.1.3.Démarrage par résistances statoriques	50
III.4.1.4.Démarrage par résistances rotoriques	51
III .4.1.5.Démarrage par autotransformateur	52
III.4.2. Démarrage progressif (électronique).....	53
III .4.2.1.Démarrage par un convertisseur électronique.....	53
III .4.2.2.Démarrage par convertisseur de fréquence	55
III.5. Les principaux modes de démarrage de moteur à courants continu	56
III.5.1.Démarrage direct des moteurs à courant continu	56
a. Démarrage manuel	56
b. Le démarrage à contacteur	57
III.5.2.Démarrage par élimination de résistances.....	60
a. Démarrage manuel	61
b. Démarrage automatique	63
III.6.Conclusion.....	64
Chapitre IV : Simulation et résultats en utilisant le logiciel ETAP12.6	
IV.1. Introduction	65
IV.2.Présentation du système.....	65

IV.3. L'écoulement de puissance	67
IV.4.Simulation de démarrage des moteurs	67
IV.5.Les problèmes de démarrage des moteurs	71
IV.6. Les solutions proposées	71
IV.6.1. Insertion des batteries de condensateur de compensation.....	72
IV .6.2. Insertion variateurs de fréquence VDF	75
IV.6.3. Décalage du temps de démarrage des moteurs	79
IV.7.interprétation de résultat	81
IV.8.conclusion	82
Conclusion générale	82
Références bibliographiques	
Résumé	

Liste des Tableaux

Tableau I. 1 : les nombres de paires de pôles	16
Tableau I. 2 : Caractéristiques du moteur asynchrone	21
Tableau I. 3 : les types de moteurs monophasés à induction.....	24
Tableau I. 4 : Comparaison entre les différents types des moteurs	28
Tableau II.1 : Tension nominale du réseau par rapport à la tension de la plaque signalétique du moteur.....	34
Tableau II. 2 : Les types d'enveloppes des moteurs électriques	36
Tableau II. 3 : Température maximale des enroulements d'un moteur d'une durée de vie de 20 000 heures à une température ambiante maximale de 40°C	37
Tableau II. 4 : Population de moteurs électriques et consommation d'énergie, 1977	38
Tableau II. 5 : Peut servir à déterminer quel type de moteur choisir.	39
Tableau II. 6 : Choix d'un moteur monophasé	41
Tableau III. 1 : Principe du démarrage par élimination de résistance.....	61
TableauIV.1 :Tableau de comparaison des résultats.....	80

Liste des figures

Figure I. 1: Transfère énergétique d'un moteur électrique	4
Figure I. 2 : Fonctionnements de moteur électrique	4
Figure I. 3 : Moteur à courants continu	5
Figure I. 4 : Fonctionnement moteur à courant continu	7
Figure I. 5 : Modèle d'un M.C.C à excitation indépendante.....	9
Figure I. 6: Moteur c.c. à excitation série	10
Figure I. 7: Modèle du M.C.C à excitation série	11
Figure I. 8 : Sens de rotation du M.C.C à excitation série.....	11
Figure I. 9: Modèle du M.C.C à excitation parallèle	12
Figure I. 10 : Moteur a aimant permanent	13
Figure I. 11: Moteur synchrone	15
Figure I. 12 : Schéma présente l'enroulement du stator	15
Figure I. 13 : Vue d'un rotor à cage	16
Figure I. 14 : Principe de fonctionnements de moteur synchrone	18
Figure I. 15: Modèle d'une phase d'un moteur synchrone	20
Figure I. 16: Vue extérieur de moteur asynchrone	21
Figure I. 17 : Point d'intersection du couple utile du moteur et le couple résistant de la charge en fonction de la vitesse	22
Figure I. 18 : Rendement du moteur asynchrone en fonction de la puissance utile	22
Figure I. 19 : Principe de fonctionnement du moteur asynchrone.....	23
Figure I. 20 moteur monophasé	24
Figure I. 21: Moteur triphasé	25
Figure I. 22: Moteur universels	26
Figure I. 23 : moteur pas à pas.....	26
Figure I. 24 : Position de moteur pas à pas.....	28
Figure II. 1 : le cycle normal de fonctionnement d'une installation type moteur-application	32
Figure III. 1 : Schéma fonctionnel de démarrage direct d'un moteur asynchrone triphasé	47
Figure III. 2 : schémas de puissance	47
Figure III. 3: Schéma d'un 1er temps couplage Y, et 2ème temps couplage.....	49

Figure III. 4 : Schéma fonctionnel de démarrage étoile-triangle d'un moteur asynchrone triphasé.....	49
Figure III. 5: Schéma fonctionnel de démarrage par résistances statoriques d'un moteur asynchrone triphasé.....	50
Figure III. 6: Schéma fonctionnel de démarrage par résistances rotoriques d'un moteur asynchrone triphasé.....	51
Figure III. 7 : Schéma fonctionnel de démarrage par autotransformateur d'un moteur asynchrone triphasé.....	53
Figure III. 8: Schéma de démarrage par un convertisseur électronique (Gradateur) moteur asynchrone triphasé.....	54
Figure III. 9: Schéma fonctionnel d'un Démarreur progressif d'un moteur asynchrone triphasé.....	54
Figure III. 10 : démarrage par convertisseur de fréquence	56
Figure III. 11: Interrupteur pour démarrage manuel	56
Figure III. 12 : fonctionnement de démarrage manuel.....	57
Figure III. 13: Schéma d'un démarreur à contacteur non inverseur	58
Figure III. 14: Schéma d'un démarreur à contacteur inverseur	59
Figure III. 15 : Schéma de branchement d'un rhéostat de démarrage	62
Figure III. 16 : Schéma développé d'un démarreur par élimination de résistances.....	63
Figure IV. 1: Structure du réseau électrique industriel proposé	66
Figure IV. 2: le réseau électrique industriel inséré dans le logiciel ETAP.....	67
Figure IV. 3 : programmation du temps de démarrage des moteurs	68
Figure IV. 4 : programmation du temps de démarrage des moteurs	68
Figure IV. 5 : résultat de simulation de démarrage	68
Figure IV. 6 : Programmation des résultats graphiques	69
Figure IV.7 : la tension des moteurs durant le démarrage des moteurs en fonction de temps.....	70
Figure IV. 8 : le courant de démarrage des moteurs en fonction de temps	70
Figure IV. 9: Insertion des batteries de condensateurs dans les ateliers	72
Figure IV. 10 : Le réglage des batteries condensateurs	72
Figure IV. 11 : Le résultat de l'écoulement de puissance après l'insertion des batteries...	73
Figure IV. 12: la tension de démarrage des moteurs en fonction de temps.....	73
Figure IV. 13 : le courant de démarrage des moteurs en fonction de temps après l'insertion des batteries de condensateurs.....	74

Figure IV. 14 : L’insertion des VFD dans le réseau électrique industriel	75
Figure IV. 15 : Le réglage de l’alimentation des VFD	75
Figure IV. 16 : Le réglage des fréquences de démarrage des VFD	76
Figure IV. 17 : l’écoulement de puissance après l’insertion des VFD	76
Figure IV. 18 : le niveau de tension après l’insertion des VFD	77
Figure IV. 19 : le courant de démarrage après l’insertion des VFD	77
Figure IV. 20 : La vitesse de démarrage après l’insertion des VFD.....	78
Figure IV. 21 : Le réglage du temps de démarrage des moteurs	79
Figure IV. 22 : Niveau des tensions après le décalage du temps de démarrage	79
Figure IV. 23 : Le courant de démarrage après le décalage du temps de démarrage	80

Abstract

The use of electric motors in the industrial sector has become increasingly important, especially with the development of power electronics. However, the use of these engines poses many problems, including start-up problems .

Our work focuses on the study of the impact of the start-up of electric motors on the quality of the industrial electricity grid, such as voltage drops during and after start-up, increasing the start-up current to exorbitant values, the start-up time becoming too long. In addition, propose and solutions for these problems, such as offsetting reactive power, insertion of VFD and lag in start-up time. In the end, do a comparative study between these different solutions, in order to justify the choice that is the insertion of VFD .

Keywords: electric motors start-up, network quality, compensation, VFD, start-up time lag.

ملخص

أصبح استخدام المحركات الكهربائية في القطاع الصناعي متزايد الأهمية، خاصة مع تطوير إلكترونيات الطاقة. ومع ذلك، فإن استخدام هذه المحركات يطرح العديد من المشاكل، بما في ذلك مشاكل بدء التشغيل . يركز عملنا على دراسة تأثير بدء تشغيل المحركات الكهربائية على جودة شبكة الكهرباء الصناعية، مثل انخفاض الجهد أثناء وبعد بدء التشغيل، وزيادة تيار البدء إلى القيم الباهظة، حيث أن وقت البدء أصبح طويلاً جداً. وبالإضافة إلى ذلك، اقترح حلول لهذه المشاكل، مثل تعويض القدرة التفاعلية، وإدخال VFD وتأخر في وقت بدء التشغيل. في النهاية، قمنا بدراسة مقارنة بين هذه الحلول المختلفة، من أجل تبرير الخيار الذي هو إدراج VFD.

الكلمات المفتاحية : بدء تشغيل المحركات الكهربائية , جودة الشبكة , التعويض , VFD , فارق بدء الفترة الزمنية.

Introduction générale

Introduction générale

Les moteurs électriques, de par leur robustesse et leur rapport poids/puissance, sont largement utilisés dans l'industrie. Assurer leur continuité de fonctionnement nécessite la mise en place des systèmes de démarrage.

Le processus de démarrage des moteurs électriques est le phénomène le plus important dans tout le fonctionnement de ces moteurs. Généralement, un moteur électrique est démarré par la mise sous tension. Cependant, trois possibilités doivent être envisagées:

1. Interférence avec l'alimentation sous la forme d'une chute de tension excessive qui est supérieure à celle qui peut être tolérée par d'autres équipements ou d'autres consommateurs connectés au même circuit d'alimentation.
2. Les courants de démarrage s'ajouteront au chauffage du moteur d'une quantité qui dépend de leurs valeurs efficaces et de la fréquence de démarrage. Les courants excessifs peuvent endommager le moteur lui-même, ainsi que les câbles de raccordement.
3. La durée de démarrage, qui peut influe sur la stabilité non seulement du moteur électrique mais tout le système d'alimentation.

Notre travail se focalise sur l'analyse de l'impact du démarrage des moteurs électriques sur le réseau électrique industriel. Montrer les différents problèmes provoqués par le démarrage des moteurs électriques et de trouver des solutions à ces problèmes. Dans ce travail, nous avons proposés trois solutions, la première solution consiste à insérer batteries de condensateurs pour compenser la puissance réactive et par la suite améliorer la tension pendant le démarrage. La deuxième solution, est l'insertion des variateurs de fréquences (VFDs) pour démarrer le moteur progressivement. La troisième solution consiste à décaler le temps de démarrage des moteurs électriques dans les différents ateliers de production. Pour faire nous avons un outil utilisé un outil de simulation pratique et très performant qui est ETAP 12.6.

Le présent mémoire est rédigé en quatre chapitres

Le premier chapitre est consacré à la présentation des différents types des moteurs électriques utilisés dans le domaine industriel. Nous présentons dans cette première partie, le principe de fonctionnement et différents moteurs électrique, ainsi que les types des moteurs électriques et leurs avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre est consacré aux critères de choix des moteurs électriques, sur quelle base on utilise un tel moteur et pas un autre, une étude comparative entre l'utilisation des

différents types de moteurs AC et DC, et les conséquences de choix d'un moteur électrique.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les différents modes de démarrage des moteurs électriques les plus utilisés dans l'industrie. Les différents problèmes liés au démarrage des moteurs électriques, le principe de chaque mode de démarrage.

Dans le quatrième chapitre, pour donner une contribution à notre travail, nous avons concrétisé par des simulations sur l'impact de démarrage des moteurs électriques, montré les différents problèmes de démarrage, proposé des solutions pour diminuer cet impact sur le réseau électrique industriel. Enfin, faire une étude comparative entre les solutions proposées pour adopter la solution adéquate qui élimine le maximum des problèmes de démarrage.

Finalement, on clôture ce mémoire par une conclusion générale faisant ressortir l'intérêt de ce travail ainsi que les perspectives et les recommandations relatives au développement futur du travail effectué [3].

Chapitre I

Présentation des différents moteurs électriques

I.1. Introduction

Les machines électriques sont des machines de la conversion de l' énergie électrique à partir d'une énergie mécanique sont appelées dynamos, alternateurs ou générateurs suivant la technologie utilisée, et produisant l'énergie mécanique à partir de l'énergie électrique comme les moteurs[1].

I.2. Historique des machines électriques

En 1821, après la découverte du phénomène de l'électromagnétisme par le chimiste danois Oersted, le physicien anglais Michael Faraday construit deux appareils pour produire ce qu'il appela une rotation électromagnétique : le mouvement circulaire continu d'une force magnétique autour d'un fil, en fait la démonstration du premier moteur électrique.

En 1822, Peter Barlow construit ce qui peut être considéré comme le premier moteur électrique de l'histoire : la « roue de Barlow » qui est un simple disque métallique découpé en étoile et dont les extrémités plongent dans un godet contenant du mercure qui assure l'arrivée du courant.

Le premier commutateur utilisable expérimentalement a été inventé en 1832 par William Sturgeon. Le premier moteur à courant continu fabriqué avec l'intention d'être commercialisé a été inventé par Thomas Davenport en 1834 puis breveté en 1837. Ces moteurs n'ont pas connu de développement industriel à cause du coût des batteries à l'époque.

En 1869 L'inventeur belge Zénobie Gramme, rend possible la réalisation des génératrices à courant continu en imaginant le collecteur. Il améliore les premières versions archaïques d'alternateurs (1867) et devient célèbre en retrouvant le principe de l'induit en anneau de Pacinotti. En 1871, il présentera à l'Académie des sciences de Paris la première génératrice industrielle de courant continu, que l'on appela machine de Gramme et qui était en fait une magnéto.

La paternité de la machine asynchrone est controversée entre trois inventeurs : en 1887, Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone, puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets. Pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1888. En 1889, Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski, électricien allemand d'origine russe, invente le

premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de 1891 [3].

I.3 Définition des moteurs électriques

D'une manière générale, on définit un moteur électrique comme étant un dispositif de conversion entre deux types d'énergies, l'une d'entre elle est électrique [2].

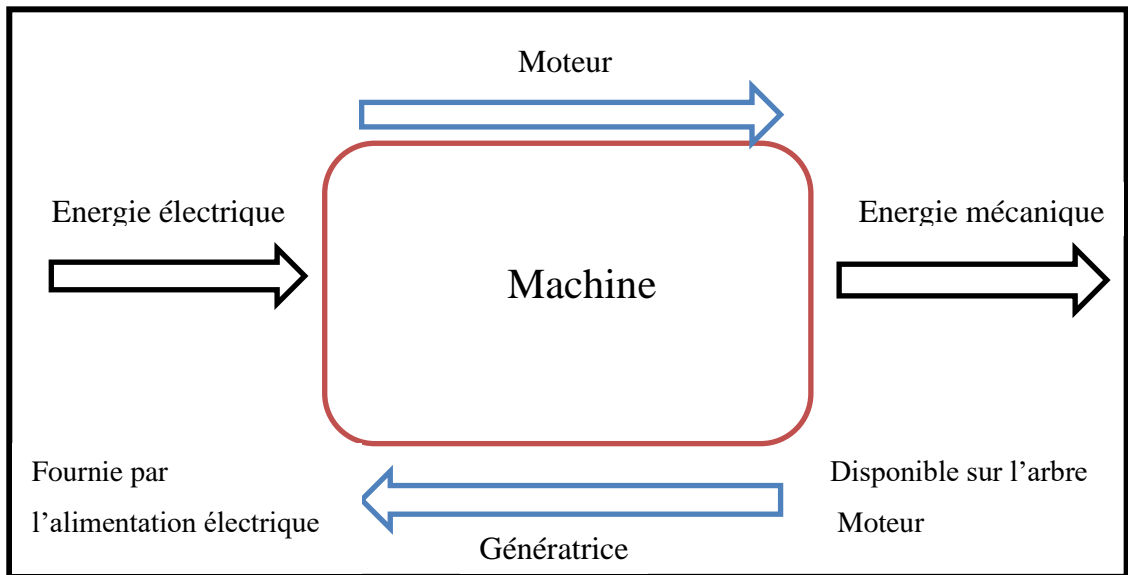


Figure I. 1: Transfère énergétique d'un moteur électrique

I.3.1. Principe de fonctionnement

Leur fonctionnement est basé sur l'obtention d'un effort mécanique par action d'un champ magnétique sur un circuit électrique traversé par un courant fourni par une source extérieure, et produire aussi éventuellement le champ magnétique. Selon que le courant électrique fourni par la source extérieure est continu ou alternatif, la machine sera appelée moteur à courant continu ou moteur à courant alternatif (synchrone ou asynchrone).

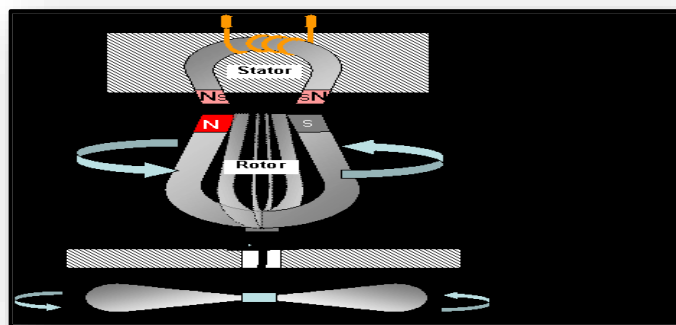


Figure I. 2 : Fonctionnements de moteur électrique

I.4. Moteurs à courant continu

Les machines à courant continu sont des membres de la famille des actionneurs. Les actionneurs sont des éléments qui produisent une action. Il existe ainsi deux types d'actionneurs, d'un cote nous trouvons les génératrices qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique créant un courant continu. Mais les machines continues sont également réversibles, on obtient alors notre second type de machine continue, les moteurs. Les moteurs à courant continu sont ainsi des machines à courant continu transformant des lors l'énergie électrique en énergie mécanique créant une rotation [1].

Les moteurs à courant continu sont généralement employés dans des domaines spécifiques. Par exemple, nous les retrouvons dans les domaines de la traction, du levage et du positionnement pour les fortes puissances. Mais il est également envisageable d'employer ce dernier lorsqu'un système utilise une source d'énergie autonome (pile ou batterie) [5].

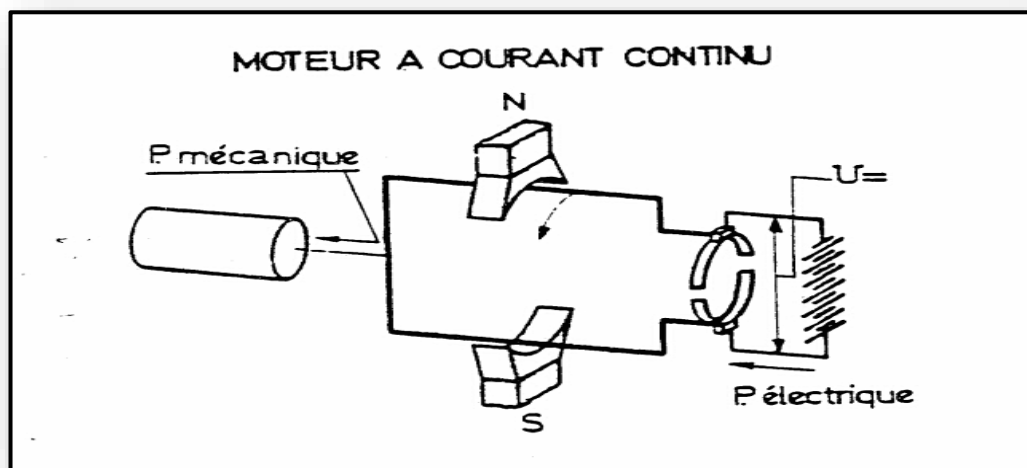


Figure I. 3: Moteur à courants continu

I.4.1. Pourquoi et comment ?

Le moteur à courant continu est un "**convertisseur électromécanique**" encore très utilisé.

Malgré le développement spectaculaire des machines à courant alternatif, lié aux progrès de l'électronique de puissance, le moteur à courant continu garde des domaines d'application où elle demeure la solution la plus économique :

On la rencontre dans des applications très diverses, par exemple:

- moteur de jouet (très faible puissance, alimentation par pile),

- moteurs d'équipement automobile (démarreur, essuie-glace, ventilateur...),
- moteur d'entraînement à vitesse variable.

Le « moteur universel », favori des équipements électroménagers et du petit outillage est également dérivé d'une machine à courant continu [9].

I.4.2. Avantages et inconvénients d'un moteur à courant continu

L'avantage principal des machines à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation : les variateurs de vitesse. Voir leur raccordement direct à la source d'énergie : batteries d'accumulateur, piles, etc.

Le principal problème de ces machines vient de la liaison entre les balais, ou « charbons » et le collecteur rotatif. Ainsi que le collecteur lui-même comme indiqué plus haut et la complexité de sa réalisation. De plus il faut signaler que :

Plus la vitesse de rotation est élevée, plus la pression des balais doit augmenter pour rester en contact avec le collecteur donc plus le frottement est important.

Aux vitesses élevées les balais doivent donc être remplacés très régulièrement.

Le collecteur imposant des ruptures de contact provoque des arcs, qui usent rapidement le commutateur et génèrent des parasites dans le circuit d'alimentation, ainsi que par rayonnement électromagnétique.

Un autre problème limite les vitesses d'utilisation élevées de ces moteurs lorsque le rotor est bobiné, c'est le phénomène de « dé frettage », la force centrifuge finissant par casser les liens assurant la tenue de l'ensemble de spires (le frettage).

Un certain nombre de ces inconvénients ont partiellement été résolus par des réalisations de moteurs sans fer au rotor, comme les moteurs « disques » ou les moteurs « cloches », qui néanmoins possèdent toujours des balais.

Les inconvénients ci-dessus ont été radicalement éliminés grâce à la technologie du moteur brushless, aussi dénommé « moteur à courant continu sans balais », ou moteur sans balais [5].

I.4.3.Principe de fonctionnement du moteur à courant continu

Le fonctionnement moteur à courant continu est basé sur le principe des forces de Laplace. Le champ magnétique est produit par l'inducteur, les conducteurs sont les spires placés dans l'induit. Lorsqu'on alimente les spires embrassées par le flux magnétique de l'inducteur, il se crée par celle-ci les forces électromagnétiques qui entraînent un déplacement angulaire de l'induit. Le collecteur alimente ensuite

une autre spire et ce phénomène se reproduit tant que le moteur est alimenté. L'induit entraîne alors le rotor en mouvement en lui transmettant un couple. Pour inverser le sens de rotation d'un M.C.C, il suffit d'inverser le sens du courant dans l'induit ou dans l'inducteur[3].

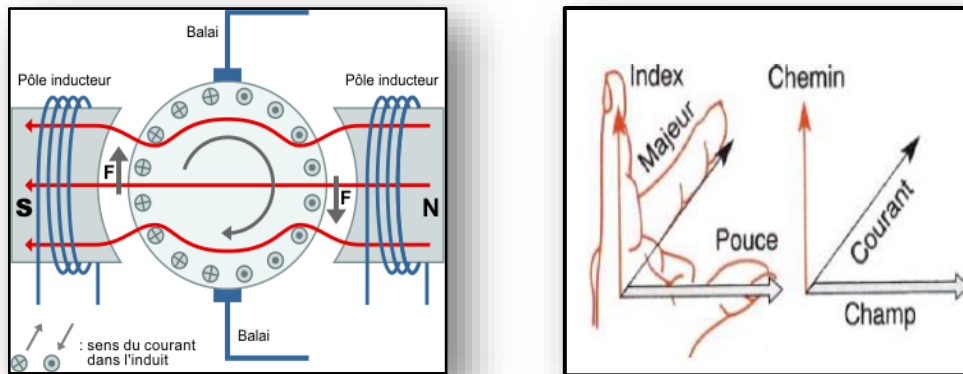


Figure I. 4 : Fonctionnement moteur à courant continu

I.4.3.1. La force électromotrice (f,e,m)

La valeur de la f.é.m. induite est donnée par la relation d'électrotechnique. La force électromotrice E est la tension produite par notre rotor lors de sa rotation dans le flux magnétique produit par la partie fixe de la machine, c'est à dire le stator. Elle dépend entre autre des éléments de constitution de la machine.

La relation est :

$$E = \frac{n.p}{2.\pi.a} . \phi . \Omega \tag{I.1}$$

Avec :

2p: le nombre de pôles inducteurs

2a: le nombre de voies d'enroulement

φ: Le flux moyen sous un pôle(en Weber)

n: le nombre de conducteurs de l'induit

N: la fréquence de rotation de l'induit en tr/s

Ω: La vitesse angulaire de l'induit en rad/s

Nous avons donc en définitive:

$$E = k . \phi . \Omega \tag{I.2}$$

La f,e,m est proportionnelle aux flux constant et la fréquence de rotation de la machine.

I.4.3.2. La puissance électromagnétique et le couple électromagnétique

La puissance électrique échangée dans l'induit est $E \cdot I_a$ (en Watt).

La puissance mécanique échangée dans l'induit lorsqu'il est en rotation s'exprime par le produit du moment d'un couple par la vitesse angulaire Ω .

Le moment de ce couple est appelé "couple électromagnétique". On le notera C_{em} .

D'après la loi de conservation de l'énergie, ces deux puissances sont égales. On les nomme "puissance électromagnétique" (ou puissance électromécanique (P_{em})).

La relation est :

$$P_{em} = E \cdot I_a = C_{em} \cdot \Omega \quad (I.3)$$

Il en résulte que le couple électromagnétique s'exprime par:

$$C_{em} = \frac{E \cdot I_a}{\Omega} = \frac{k \cdot \phi \cdot \Omega \cdot I_a}{\Omega} = k \cdot \phi \cdot I_a \quad (I.4)$$

Avec :

E en Volt ;

I_a en Ampères ;

C_{em} en (N.m) ;

Ω en rad/s ;

I.4.4.L'intérêt du moteur à courant continue

Le moteur à courant continue a été la machine à vitesse variable. Par excellence, de plus en plus remplacé dans ce rôle par des moteurs à courant alternatif, dans les applications industrielles, il est bien présent dans la réalisation existante et il le sera d'ailleurs pendant un certain nombre d'années, compte tenu de la durée de vie parfois assez longue des installations [1].

Dans l'application industrielle, c'est le moteur à excitation séparé qui de loin le plus courant.

Utiliser dans le domaine de robotique, les actionneurs à courant continu en à aimant permanente sont encore présents malgré la compétition des moteurs à courant continu sans Blais, et utiliser aussi dans le domaine de démarreur automobile, le moteur à courant continu est la solution traditionnelle, mais là aussi d'autres solutions sont de plus en plus utiliser [3].

I.4.5. Moteur à excitation indépendante

I. 4.5.1. Modèle équivalent

Le modèle du moteur à courant continu a excitation indépendante, ou l'induit et l'inducteur sont alimentés séparément.

Caractéristiques:

La force électromotrice:

$$E = K. \phi. \Omega \tag{I.5}$$

Le flux électromagnétique:

$$C_{em} = K. \phi. I \tag{I.6}$$

Comme nous avons la tension d'alimentation U:

$$U = E + R. I \tag{I.7}$$

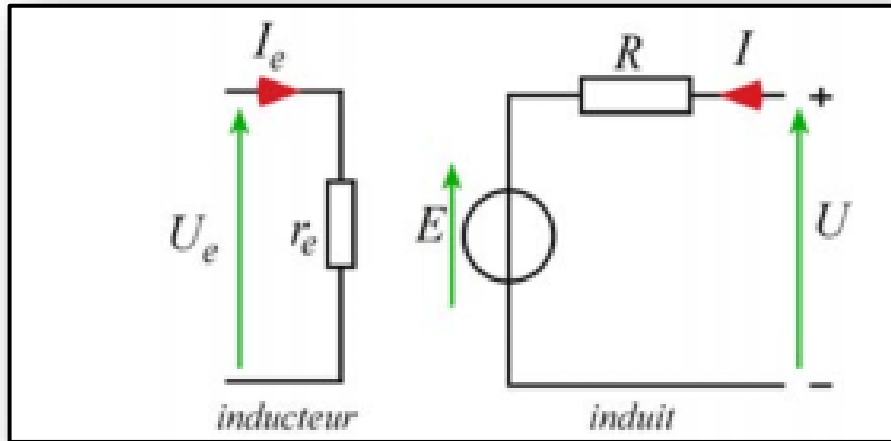


Figure I.5 : Modèle d'un M.C.C à excitation indépendante

L'induit est en convention récepteur, Il faut deux alimentations : une pour l'inducteur et l'autre pour l'induit. Les quatre grandeurs qui déterminent le fonctionnement du moteur sont : U, I et I_e.

I.4.5.2. Vitesse de rotation

Le sens de rotation dépend:

- du sens du flux, donc du sens du courant d'excitation I_e;
- du sens du courant d'induit I.

Expression de la vitesse:

Puisque:

$$E = k. \phi. \Omega = U - R. I \tag{I.8}$$

Nous avons donc:

$$\Omega = \frac{U - R.I}{k. \phi} \tag{I.9}$$

La vitesse de rotation dépend de:

- La tension d'alimentation U;

- L'intensité du courant I imposé par le moment du couple résistant.

U : reste tout de même grand devant $R.I$. En conséquence la vitesse est essentiellement fixée par la tension d'alimentation U et varié très peu en fonction du courant, c'est-à-dire de la charge.

On peut dire que:

- La tension d'alimentation impose la vitesse de rotation $\Omega \approx \frac{U}{k.\phi}$
- La charge impose la valeur du courant $I = \frac{C_r}{k.\phi}$

Où C_r est le moment du couple résistant.

I.4.6 Moteur à excitation série

L'enroulement inducteur comporte un nombre de spires relativement peu élevé et il est raccordé en série avec l'induit. Du fait qu'il est traversé par le plein courant de l'induit, l'intensité du champ magnétique augmente avec la charge et le courant d'induit [4].

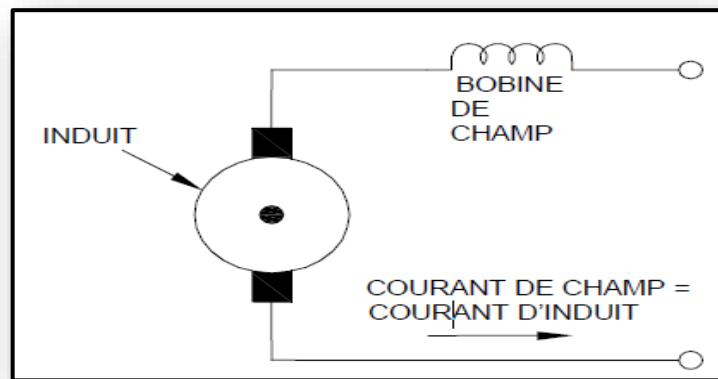


Figure I. 6: Moteur c.c. à excitation série

Ces moteurs se caractérisent par un couple de démarrage très élevé. La régulation de vitesse est difficile à assurer et ils ont une vitesse à vide très élevée.

I.4.6.1. Principe

L'induit et l'inducteur sont reliés en série comme indiqué dans la figure (I.7)

Conséquence: $I = I_e$

Et comme le flux ϕ est constant (hors saturation), qui est proportionnel au courant d'excitation, nous avons donc:

$$E = k.\phi.\Omega = K.\Omega.I \tag{I.10}$$

Et par la suite le moment du couple électromagnétique:

$$C_{em} = k \cdot \phi \cdot I = K \cdot I^2 \tag{I.11}$$

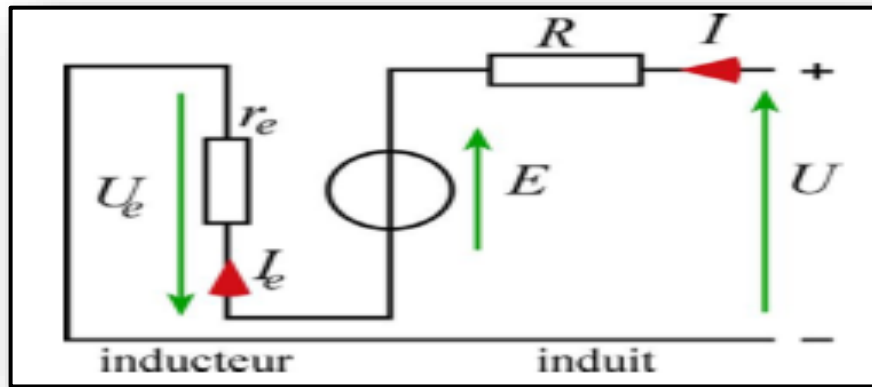


Figure I. 7: Modèle du M.C.C à excitation série

I.4.6.2. Modèle équivalent et caractéristiques

Le modèle équivalent comme indiqué dans la figure (I.8) l'induit et en série avec l'inducteur alimentés d'une seule source d'alimentation, à l'aide d'une seule tension U et le même courant I . La résistance totale $R_t = R + r_e$.

Caractéristiques:

$$U = E + R_t \cdot I \tag{I.12}$$

$$C_{em} = K \cdot I^2 \tag{I.13}$$

$$\Omega = \frac{U - R_t \cdot I}{K \cdot I} \tag{I.14}$$

I.4.6.3. Sens de rotation

Pour changer le sens de rotation d'un moteur à courant continu, il faut inverser soit le courant de l'induit I , soit le courant de l'inducteur I_e . Comme pour le moteur à excitation série $I = I_e$, pour changer son sens de rotation il faut inverser la connexion entre l'inducteur et l'induit.

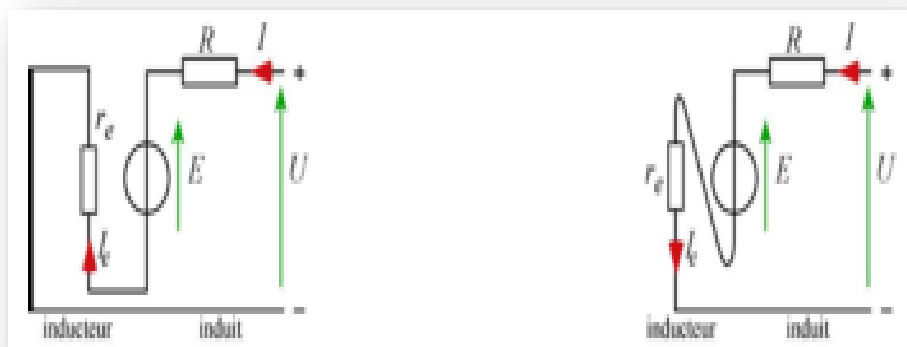


Figure I. 8 : Sens de rotation du M.C.C à excitation série

I.4.7. Moteur à excitation parallèle (ou shunt)

Le moteur à excitation dérivée ou shunt possède les mêmes propriétés que le moteur à excitations séparée du fait que dans les deux cas l'inducteur constitué un circuit extérieur à celui de l'induit.

Ce moteur a les même caractéristique que le moteur à excitation indépendante, il est utilisée sur des machines –outils démarrant à vide et sur des pompes de circulation. Ce type de moteur convient aux applications avec des vitesses constantes type aspirateurs ou convoyeurs. La figure suivante vous montre le schéma d'un moteur excitation shunt

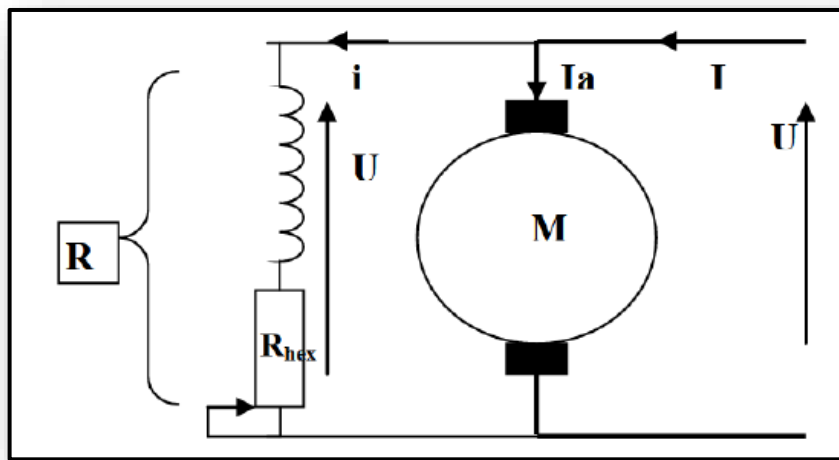


Figure I.9: Modèle du M.C.C à excitation parallèle

I.4.7.1. Principe

L'induit et l'inducteur sont connectés en parallèle comme indiqué dans la figure (I.9).

- **Caractéristiques**

La force électromotrice:

$$E = K \cdot \phi \cdot \Omega \tag{I.15}$$

Le flux électromagnétique:

$$C_{em} = K \cdot \phi \cdot I_a \tag{I.16}$$

Comme nous avons la tension d'alimentation de l'induit:

$$U = E + R \cdot I_a \tag{I.17}$$

Et nous avons aussi la tension d'alimentation de l'inducteur:

$$U = r \cdot i \tag{I.18}$$

Le courant total d'alimentation du moteur:

$$I = I_A + i \quad (I.19)$$

I.4.8. Moteur a aimant permanent

Dans le moteur a aimants permanents, le rotor et le stator sont constitués d'aimants dont les pôles identiques sont mis face à face afin de permettre le mouvement du moteur grâce au champ magnétique créé. Les pôles identiques se repoussent ce qui met le moteur en mouvement.

Le principal avantage de ce type de moteur réside dans sa dure de vie élevée qui correspond à celle des aimants (environ 400 ans). En revanche, les moteurs aimants permanents peuvent être encombrants lorsque l'on veut obtenir des moteurs puissants car il faut des aimants plus puissants [4].

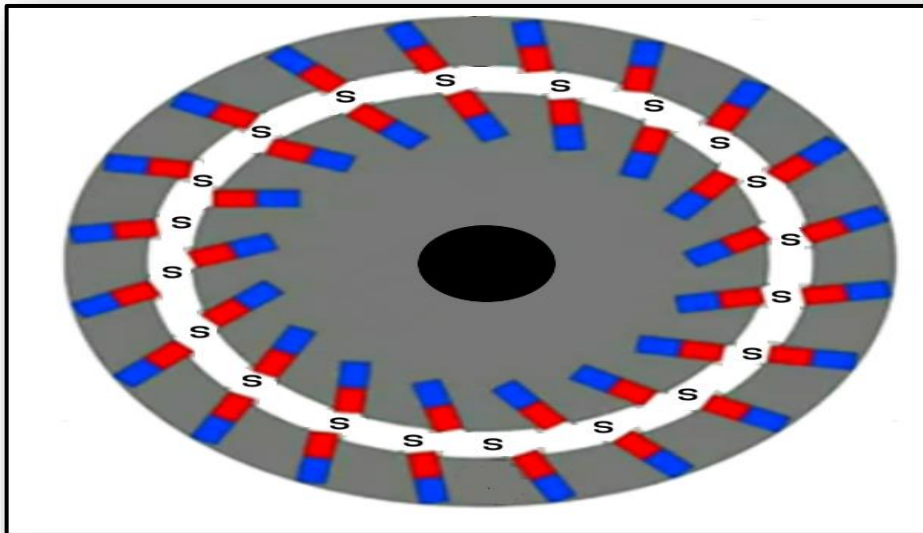


Figure I.10 : Moteur a aimant permanent

I.5. Moteur sans balais

Un moteur sans balais, ou moteur « brushless », est un moteur synchrone, dont le rotor est constitué d'un ou de plusieurs aimants permanents et pourvu d'origine d'un capteur de position rotorique (capteur à effet Hall, synchro-résolver, codeur incrémental par exemple). Vu de l'extérieur, il fonctionne courant continu. Son appellation Brushless vient du fait que ce type de moteur ne contient aucun balai. Par contre un système électronique de commande doit assurer la commutation du courant dans les enroulements statoriques. Ce dispositif peut être soit intégré au moteur, pour les petites puissances, soit extérieur. Le rôle de l'ensemble capteur-électronique de commande est d'assurer l'autopilote du moteur c'est-à-dire le maintien de

l'orthogonalité du flux magnétique rotorique par rapport au flux statorique, rôle autrefois dévolu à l'ensemble balais-collecteur sur une machine à courant continu.

Les moteurs brushless équipent en particulier les disques durs et les graveurs de DVD de nos ordinateurs. Ils sont également très utilisés en modélisme pour faire se mouvoir des modèles réduits d'avions, d'hélicoptères et de voitures ainsi que dans l'industrie, en particulier dans les servomécanismes des machines-outils et en robotique.

Les moteurs brushless comblent certains points faibles des moteurs à balais, notamment la présence de balais. Mais ces moteurs présentent également d'autres avantages [1] :

Ils peuvent opérer à des vitesses plus importantes (jusqu'à 100 000 tours par minute contre 20 000 pour les moteurs à balais).

Leur durée de vie est plus longue (au-delà de 10 000 heures de service)

Ils sont plus fiables et plus efficaces.

Il n'y a pas de pièce d'usure à part les roulements, ce qui réduit les opérations de maintenance [5].

I.6. Moteur synchrone

I.6.1. Généralités

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique. Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts. Le moteur synchrone est aussi un moteur utilisé pour la motorisation des ascenseurs. Ces dernières années ont vu ce type de moteur revenir en force parallèlement au développement des variateurs de vitesse.

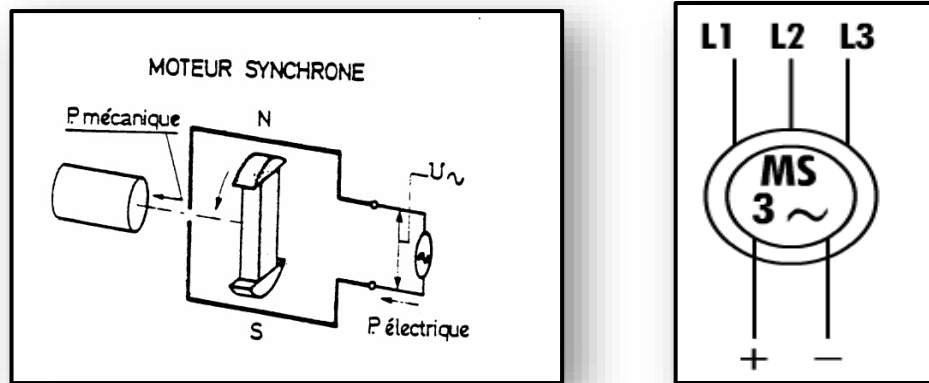


Figure I. 11: Moteur synchrone

I.6.2. Constitution

Le moteur synchrone est constituée par deux parties essentielles le stator et le rotor.

I.6.2.1. Le stator

Le stator d'un moteur triphasé (le plus courant en moyenne et grosse puissance), comme son nom l'indique, est la partie statique du moteur synchrone. Il s'apparente fort au stator des moteurs asynchrone. Il se compose principalement :

- de la carcasse,
- des paliers,
- des flasques de palier,
- du ventilateur refroidissant le moteur,
- le capot protégeant le ventilateur [5],

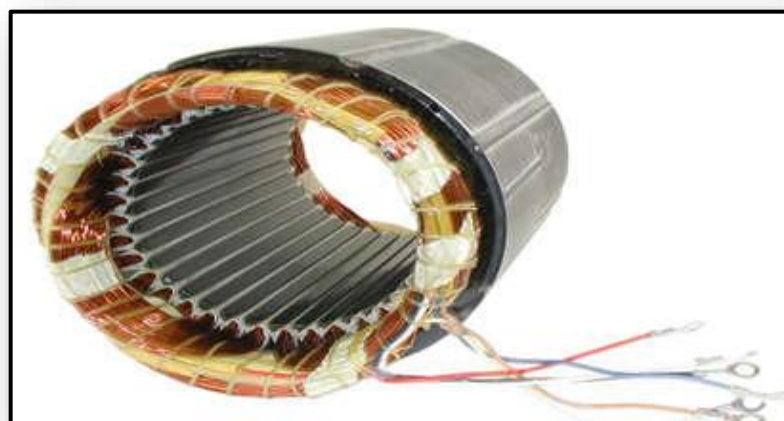


Figure I. 12: Schéma présente l'enroulement du stator

Lorsque les enroulements du stator sont parcourus par un courant triphasé, ceux-ci produisent un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme. La vitesse de synchronisme est fonction de la fréquence du réseau d'alimentation (50 Hz) et du nombre de paire de pôles. Vu que la fréquence est fixe, la vitesse du moteur peut varier en fonction du nombre de paires de pôles.

Tableau I. 1 : les nombres de paires de pôles

Paires de pôles	1	2	3	4	6
Nombre de pôles	2	4	6	8	12
n_0 [tr/min]	3000	1500	1000	750	500

I.6.2.2. Le rotor

Le rotor est la partie mobile du moteur synchrone. Couplé mécaniquement à un treuil d'ascenseur par exemple, il va créer un couple moteur capable de fournir un travail de montée et de descente de la cabine d'ascenseur. Il se compose essentiellement d'une succession de pôles Nord et Sud intercalés sous forme d'aimants permanents ou de bobines d'excitation parcourues par un courant continu. On distingue donc deux types de moteurs :

- à aimants permanents,
- à rotor bobinés [10].



Figure I. 13: Vue d'un rotor à cage

I. 6.3.Principe de fonctionnement

Le moteur synchrone converti la puissance électrique en puissance mécanique. Pendant longtemps, ce moteur fût relativement peu utilisé en raison de sa

difficulté à réguler sa vitesse. Ce problème est maintenant résolu grâce au progrès de l'électronique de puissance et des onduleurs qui lui sont associés.

Le moteur synchrone est alimenté par deux sources, la première à courant continue fournit de l'excitation, la deuxième polyphasée alimente l'induit, fournit la puissance à la machine. Le rotor crée un champ magnétique rotorique qui suit les champs tournant statorique, ce qui est entraîné la rotation du rotor à la vitesse de synchronisme, le couple fournit sur l'arbre est constant si les tensions polyphasés sont purement sinusoïdales et équilibrées.

Le stator de la machine est alimenté en triphasé; il se crée alors un champ magnétique tournant à la fréquence de rotation $n = \frac{f}{p}$ ce qui fait que le rotor de la machine tourne lui-aussi à la fréquence de rotation n .

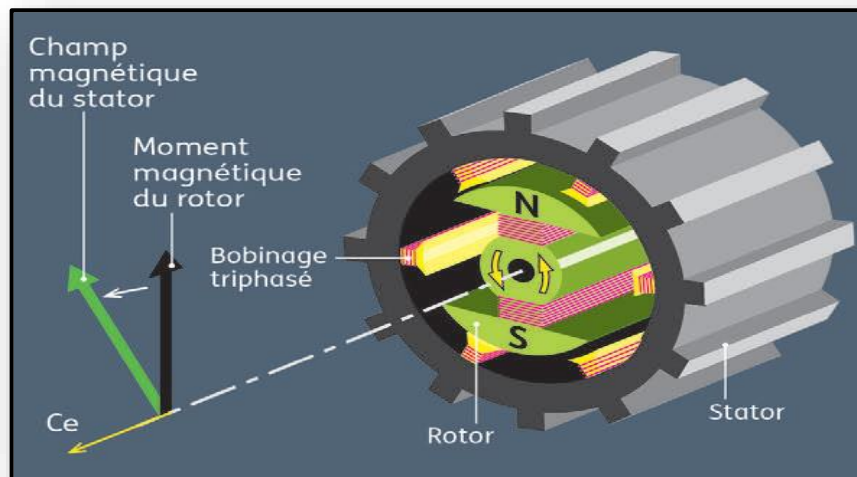


Figure I.14: Principe de fonctionnements de moteur synchrone

I. 6.4. La variation de la vitesse de moteur synchrone

Les machines synchrone utilisées en vitesse variable fonctionne en mode autopiloté pour prévenir tous les risque de décrochage, pour assurer un fonctionnement à vitesse variable de la machine synchrone, il est nécessaire s'alimenter la machine à fréquence variable qui se fait à l'aide d'un convertisseur statique généralement continue – alternatif. La source d'entrée peut être du type de source de courant ou de type source de tension, en sortie du convertisseur, on contrôle l'amplitude des tensions statorique ou l'amplitude des courants statorique et la fréquence f_s est proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine.

Pour une machine synchrone à pôles lisses, l'expression de couple électromagnétique déduite du modèle simplifié de la machine est :

$$C_{em} = 3p (\Phi_r/L) (V_s/\omega_s) \sin\delta \quad (I.20)$$

L : est inductance synchrone.

V_s : est la valeur efficace de la tension de phase, fournit par la source d'alimentation.

Φ_r : est le flux rotorique.

δ : est l'angle interne entre la f.e.m, et la tension statorique.

Pour la machine alimentée en tension, les variables de contrôle de couple sont alors :

- L'angle de décalage interne δ .
- La tension d'alimentation V_s .
- La pulsation statorique ω_s .

I.7. Machine asynchrone

La machines asynchrone est une machine à courant alternatif pour laquelle la vitesse de rotation de l'arbre est déférente de la vitesse de rotation de champs tournante. Elle est très utilisées (on estime que 80% des moteurs de la planète sont des moteurs asynchrones) car leur coût est inférieur à celui des autres machines, de plus ces machines sont robustes. Comme les autres machines, la machine asynchrone est réversible et de très nombreuses génératrices asynchrones de puissance inférieure à quelques 5 MW fournissent un surplus d'énergie active aussi bien sur des réseaux terrestres qu'à bord des navires.

Le démarrage d'un moteur asynchrone ne peut avoir lieu que si le couple moteur est à chaque instant supérieur au couple résistant de la machine à entraîner. Le couple résistant d'une machine définit l'effort que la charge mécanique oppose au maintien de sa mise en mouvement. Il s'exprime en Newton mètre (Nm).

Le moteur asynchrone, appelée aussi à moteur à induction, ils sont basés sur l'entraînement d'une masse métallique par l'action d'un champ tournant, ils comportent deux armateurs à champ tournant coaxiales ; l'une est fixe, l'autre est mobile .le stator comporte une carcasse en Fonte ou on tôle d'acier dans laquelle est inséré un circuit magnétique formé d'un empilage de tôles .il porte un enroulement triphasé réparti dans des encoches du circuit magnétique .Rotor (mobile) se divise en deux catégories suivants la structure de leur rotor qui peut être bobiné ou à cage d'écureuil.

Moteur asynchrone à cage d'écureuil, dans ce cas les encoches contiennent des barres reliées aux deux extrémités par des anneaux de court-circuit. L'ensemble forme une cage d'écureuil.

Ce moteur est le plus connu. Il impose grâce à sa robustesse, sa simplicité de construction et sa facilité d'entretien. Il est destiné en première lieu à l'entraînement de vitesse unique.

Moteur asynchrone à rotor bobiné, les encoches présentes à la périphérie du moteur contiennent un enroulement similaire à celui du stator. Le bobinage rotorique est toujours couplé en étoile et il est accessible de l'extérieur grâce à système de bagues et balais, ce qui permet soit de le court-circuiter, soit de le relier à un circuit permettant d'agir sur les caractéristiques de la machine dans certains fonctionnements.

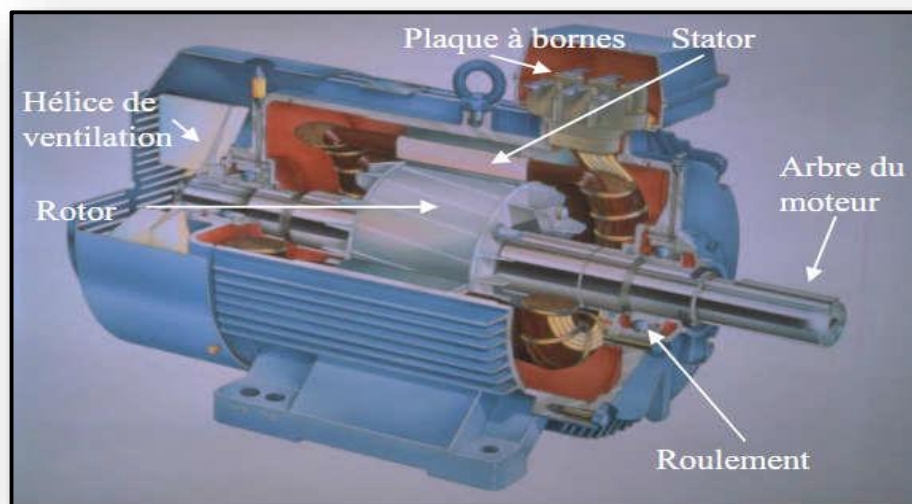


Figure I.15: Vue extérieure de moteur asynchrone

I.7.1. Les caractéristiques du moteur asynchrone

- Fonctionnement à vide :

A vide, le moteur n'entraîne pas de charge par conséquent le glissement est nul et le moteur tourne à la vitesse de synchronisme.

Notons que le glissement : $g = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$

Au fonctionnement à vide ; le facteur de puissance à vide est très faible ($< 0,2$) et le courant absorbé reste important (P est petit et Q est grand). On parle alors de courant réactif ou magnétisant (ils servent à créer le champ magnétique).

Avec :

n_s : Vitesse de rotation du champ en tr/s.

n_r : Vitesse de rotation du rotor.

g : glissement.

$g = 0$ donc $n_s = n_r$

- **Fonctionnement en charge :**

Le moteur consomme maintenant de la puissance active, le stator appelle un courant actif, parce qu'on lui applique un couple résistant, et lorsque ce couple résistant augmente

- La puissance mécanique à fournir par le moteur augmente.
- Le courant appelé augmente.
- La facture de puissance augmente.
- La fréquence de rotation baisse un peu.

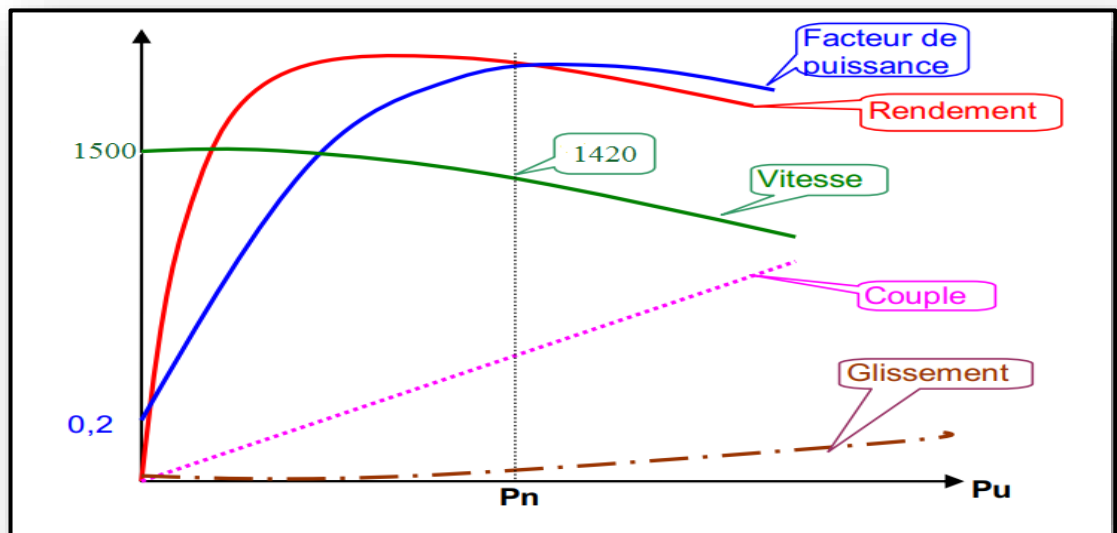


Figure I.16: Caractéristiques du moteur asynchrone en fonction de la puissance utile

On remarque que le facteur de puissance sa valeur baisse beaucoup quand la charge diminue. A vide il est d'environ 0,2. Il faut donc éviter d'installer des moteurs plus puissants qu'il n'est nécessaire. Le rendement est bon à partir de la demi-charge. Il est maximal au voisinage de la puissance nominale. La vitesse décroît quand la charge augmente. Toutefois la variation est faible puisqu'elle est seulement de 5 % entre la marche à vide et la marche à pleine charge. Le glissement des gros moteurs est plus faible encore. C'est parce que les moteurs d'induction n'ont pas une vitesse rigoureusement constante et surtout parce que cette vitesse ne résulte pas seulement de la fréquence du courant d'alimentation qu'on les nomme **moteurs asynchrones**. Mais une variation de la vitesse de 2 à 5 % entre la marche à vide et la marche à

pleine charge est négligeable dans la plupart des cas d'emplois industriels de moteurs.

Tableau I. 2 : Caractéristiques du moteur asynchrone

La vitesse de du moteur	Le glissement	Fonctionnement de la machine
$n = 0$	$g = 1$	Démarrage
$n = n_s$	$g = 0$	Synchronisme
$0 < n < n_s$	$0 < g < 1$	Moteur
$n > n_s$	$g < 0$	Génératrices

Le point de fonctionnement :

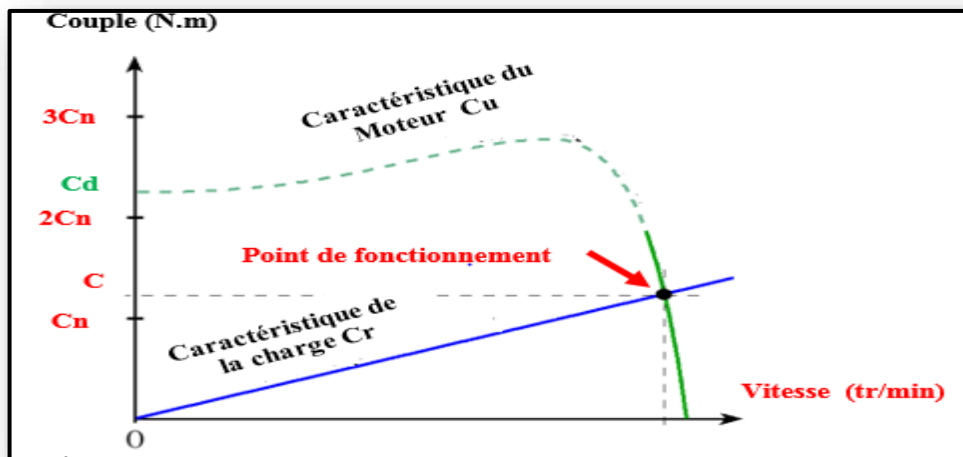


Figure I. 17: Point d'intersection du couple utile du moteur et le couple résistant de la charge en fonction de la vitesse

On observe que le couple (C) varie avec vitesse de rotation du moteur accouplé à la charge entraînée (supposée fixe). Les caractéristiques du moteur et de la charge se croisent au point de fonctionnement pour lequel les couples moteur et résistant sont identiques.

- Le rendement du moteur asynchrone
- Le rendement est égal au rapport de la puissance utile sur la puissance absorbée. Il est toujours inférieur à 1.

$$\eta = P_u / P_a < 1$$

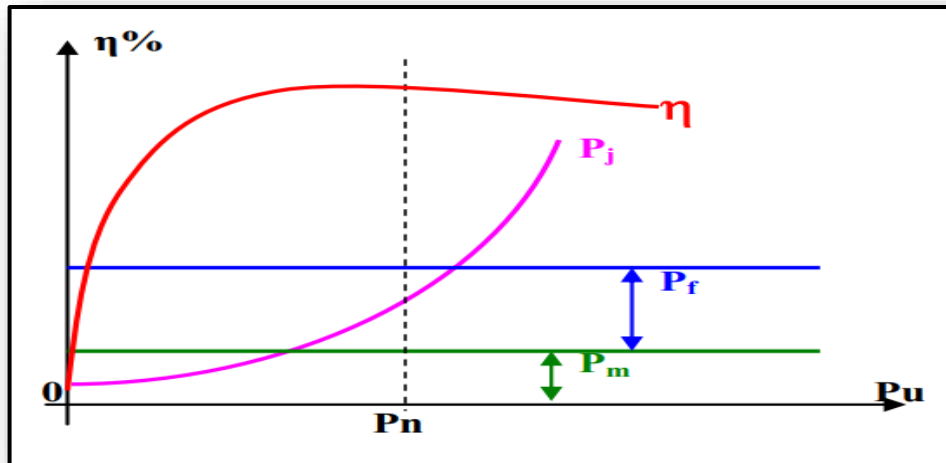


Figure I. 18 : Rendement du moteur asynchrone en fonction de la puissance utile

I.7.2. Principe fonctionnement du moteur asynchrone

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé entièrement sur la loi de l'induction ; la machine asynchrone est considérée comme un transformateur à champ magnétique tournant dont le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court-circuit. Ce fonctionnement repose sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par les courants triphasés fournis à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant.

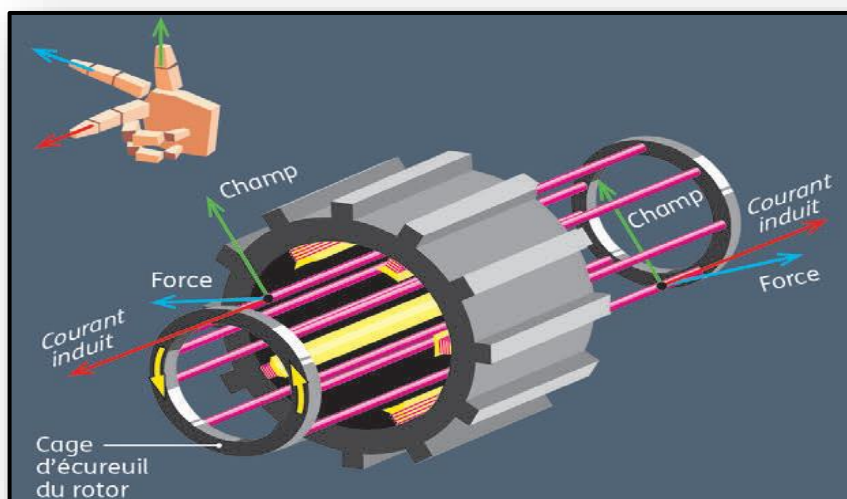


Figure I. 19: Principe de fonctionnement du moteur asynchrone

Le rotor a un moment magnétique représenté en noir, le stator porte des bobinages triphasés qui créent un champ tournant représenté en vert dans l'entrefer de la machine. La vitesse de rotation dépend de la fréquence des courants statoriques et du nombre de paires de pôles magnétiques de la machine. Il existe deux types de moteurs asynchrones :

I.7.2.a. Le moteur monophasé à induction

Le moteur monophasé à induction possède une partie interne fixe, le stator, dans laquelle on a inséré une partie mobile, le rotor. Le champ magnétique développé par ces deux parties produit un mouvement de rotation du rotor et un couple. Pour démarrer, ce type de moteur requiert l'aide d'un condensateur, habituellement placé dans un petit boîtier sur l'enveloppe du moteur. Les vitesses synchrones types vont de 1800 à 3600 tr/min. On peut utiliser ce type de moteur pour les charges constantes, comme les convoyeurs, et les charges variables, comme les ventilateurs.

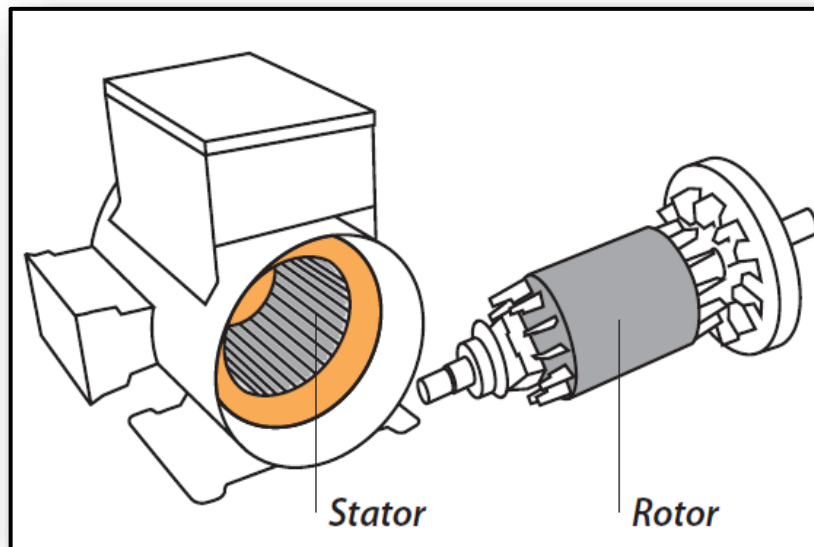


Figure I.20 : moteur monophasé

Les principaux types de moteurs monophasés à induction

Tableau I. 3 : les types de moteurs monophasés à induction

Type de moteurs	Puissance (HP)	Rendement(%)	Application
À induction à résistance de démarrage	Entre 1/20 ET 1/3	Inférieur à 60	-Ventilateur -Pompe centrifuge
À déphasage permanent condensateur	Entre 1/8 ET 10	Entre 50 et 85	-Ventilateur -Pompe centrifuge (vitesse variable)
À induction à condensateur de démarrage	Entre 1/8 ET 10	Entre 50 ET 80	-Compresseur -Convoyeur
À induction à condensateur permanent	Entre 1/2 ET 10	Entre 50 et 85	-Convoyeur -Pompe à vacuum

I.7.2.b. Le moteur triphasé à induction

Dans les exploitations agricoles desservies par un réseau de distribution triphasée, on pourra utiliser ce type de moteur dans des gammes de puissances plus importantes : entre 1 et 100 HP. C'est pourquoi, on remarquera que les centres de grains et les meuneries sont toujours desservies par un réseau triphasé, car on y utilise des moteurs de grande puissance. Le moteur triphasé à induction se caractérise par une grande robustesse, une fiabilité éprouvée et un entretien minimal. Sa vitesse de rotation synchrone se situe habituellement entre 1800 et 3600 tr/min. Les moteurs universels sont les moteurs les plus utilisés dans la vie domestique. Ils équipent les moulins à café, les mélangeurs, mixeurs et robots ménagers, les foreuses, ponceuses et autres scies sauteuses des bricoleurs, les petits ventilateurs, les sèche-cheveux, aspirateurs... Il s'agit de moteurs à collecteur, qui sont prévus pour fonctionner en courant alternatif monophasé (mais qui fonctionneraient mieux encore en courant continu : faites l'essai avec une foreuse en lui appliquant une tension continue d'une cinquantaine de volts). La vitesse de ces moteurs chute très vite lorsqu'un couple important leur est demandé comme nous le verra. On reconnaît, au bruit, que l'on a affaire à un moteur universel à l'extrême variation de sa vitesse avec la charge. L'usage des moteurs universels est limité aux puissances inférieures au kW. En effet, le fonctionnement du collecteur en courant sinusoïdal est encore plus délicat qu'en

courant continu, et l'ensemble balais-collecteur constitue la partie fragile de ces machines.

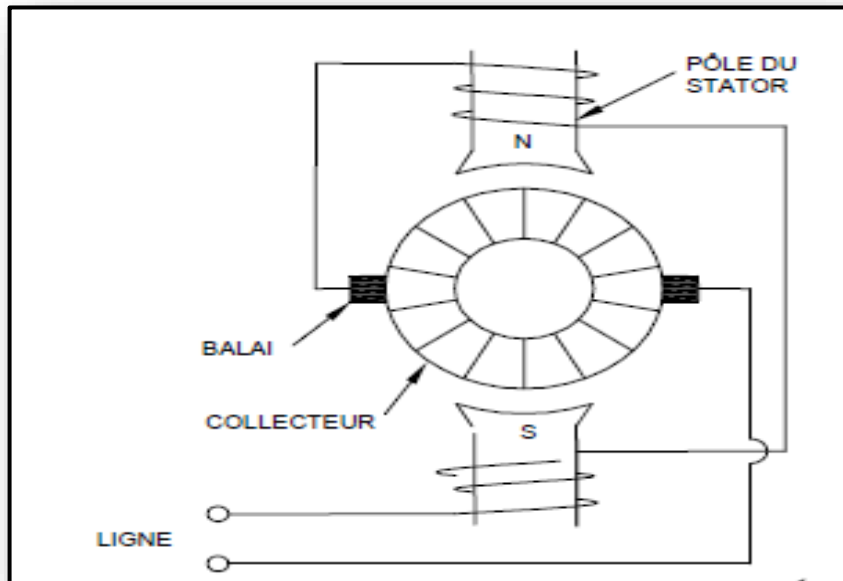


Figure I. 21: Moteur triphasé

I.8. Les moteurs universels

Un moteur universel est un moteur électrique fonctionnant sur le même principe qu'une machine à courant continu à excitation série : le rotor est connecté en série avec l'enroulement inducteur. Le couple de cette machine indépendant du sens de circulation du courant est proportionnel au carré de son intensité. Il peut donc être alimenté indifféremment en courant continu ou en courant alternatif, d'où son nom. Pour limiter les courants de Foucault qui apparaissent systématiquement dans toutes les zones métalliques massives soumises à des champs magnétiques alternatifs, son stator et son rotor sont feuilletés. Dans la pratique, ces moteurs ont un mauvais rendement, mais un coût de fabrication très réduit. Leur couple est faible, mais leur vitesse de rotation est importante. Quand ils sont utilisés dans des dispositifs exigeant un couple important, ils sont associés à un réducteur mécanique. Ils sont principalement utilisés dans l'électroménager, par exemple les aspirateurs, l'outillage électroportatif de faible puissance (jusqu'à environ 1 200 W) et de nombreuses applications domestiques. On règle facilement leur vitesse de rotation avec des dispositifs électroniques peu coûteux tels que les gradateurs [2].

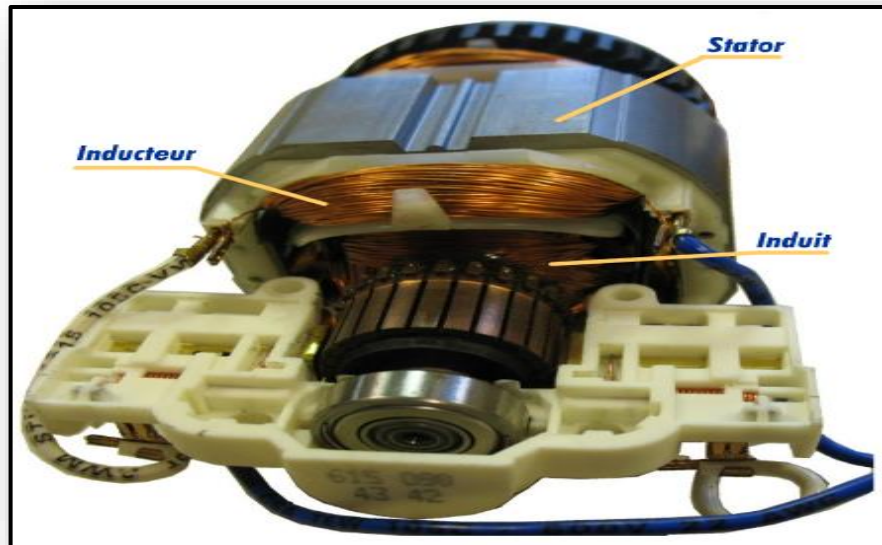


Figure I. 22: Moteur universels

I.9. Les moteurs pas à pas

Le moteur pas à pas est un moteur qui tourne en fonction des impulsions électriques reçues dans ses bobinages. L'angle de rotation minimal entre deux modifications des impulsions électriques s'appelle un pas.

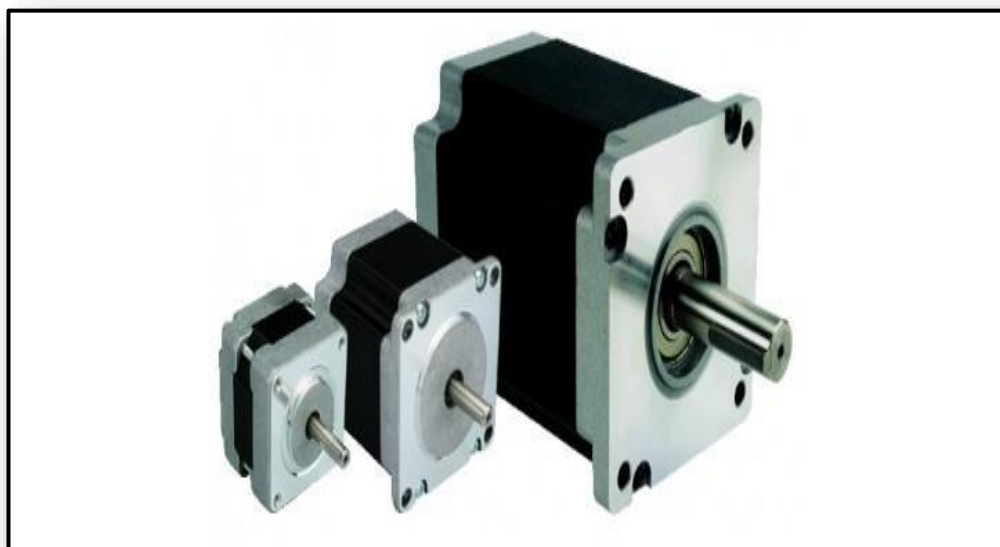


Figure I. 23 : moteur pas à pas

Le succès de ce moteur est en partie dû à sa constitution qui l'adapte parfaitement à une commande de type binaire, un coup d'horloge provoquant une rotation d'un pas. Pour l'électronicien, ce moteur est surtout utilisé dans le sens d'une

"conversion d'information", plutôt que dans le sens d'une "transformation d'énergie". On parle parfois de "moteur numérique". Les applications vont du périphérique d'ordinateur (imprimante, lecteur de disquette etc...) à la machine outils. Son utilisation reste cependant aujourd'hui limitée à des puissances de quelques dizaines de watts.

Ils offrent des caractéristiques qui simplifient considérablement la conception des équipements de position : ils permettent en effet, un blocage à l'arrêt en une position spécifiée, alors que les autres moteurs électriques doivent être bloqués, de l'extérieur, par un frein, dans la position qu'ils ont atteinte lorsqu'ils étaient alimentés. Cela est dû au fait que l'on peut les considérer comme composé d'un aimant (le rotor), venant se placer successivement devant les bobines qui sont alimentées à tour de rôle en courant continu. Il suffit de maintenir l'alimentation de la bobine en vis-à-vis du rotor arrêté, pour que celui-ci soit bloqué dans cette position. On rencontre ces moteurs en horlogerie, dans les machines à découper, dans les ensembles qui leur associent processeurs de contrôle et de calcul d'une part, laser d'usinage d'autre part, dans les automates ...La variation de vitesse de ces moteurs est obtenue par action sur le rythme de succession des bobines alimentées : c'est lorsqu'on les commande par microprocesseur, que ces moteurs atteignent leurs performances optimales (rapidité, précision) [16].

I.9.1. Fonctionnement d'un moteur pas à pas

La circulation d'un courant électrique dans un bobinage entraîne l'apparition d'un champ magnétique, comme le détaille la figure de gauche dans le cas du solénoïde, et donc la présence de pôles Nord et Sud (deux pôles de même nature se repoussent, deux pôles Nord et Sud s'attirent) ; c'est sur ce principe de base que repose le fonctionnement de tout moteur électrique, et, de manière plus générale, de bon nombre de dispositifs électro-mécaniques : relais, compteurs, galvanomètres, certains hautparleurs ou microphones, gâches électriques de porte, etc.

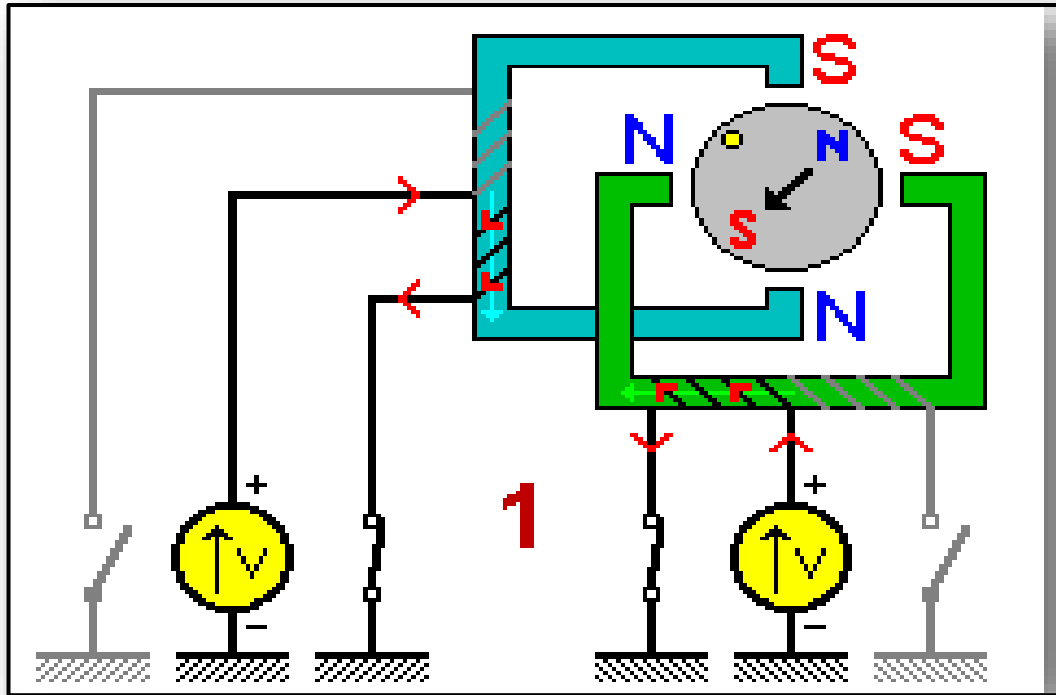


Figure I. 24: Position de moteur pas à pas

Le moteur pas à pas, représenté à droite, est constitué d'un rotor aimanté (en gris) avec deux pôles, Nord et Sud, ainsi que d'un double-stator (une partie en bleu, l'autre en vert) : à chacune de ces deux parties, est associé un bobinage avec un point milieu et deux phases ; en alimentant l'une ou l'autre des phases, on peut ainsi inverser l'aimantation au niveau du stator correspondant [10].

- **Constitution :**

IL existe trois types de moteur pas à pas :

- Moteur pas à pas à aimant permanent
- Moteur pas à pas à réluctance variable
- Moteurs pas à pas hybrides

I.10. Comparaison entre les différents types de moteurs

Tableau I. 4 : Comparaison entre les différents types des moteurs [6].

Les types du moteur	Avantages	Inconvénients
Moteur à courant continue	-couple élève au démarrage. -contrôle du couple et de la vitesse indépendants. -vitesse de rotation stable et précise.	-dissipation d'énergie (rotor) difficile à évacuer. -collecteur : -Cout élevé. -Complexité de fabrication. -Durée de vie limitée.
Moteur synchrone	-Pas de collecteur. -Rendement très élevé. -Faible inertie. -Durée de vie élevée.	-fonctionnement en boucle fermée. -commande électronique complexe et couteuse -cout élevé.
Moteur asynchrone	-Robustesse,Fiabilité -Durée de vie élevée -Cout faible 6Couple non nul au démarrage -Son rendement est proche de 99%	-Inertie élevée -Commande électronique complexe en variation de vitesse -Demande un fort couple lors du démarrage Difficulté de fonctionnement à faible vitesse

I.11. Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons exhibé un aperçu général sur les machines électriques et spécialement les moteurs électrique, en suite nous avons donnés une image globale sur les moteurs en courant continue, son principe de fonctionnement et ses propriétés de base des différents types. Nous avons vu que le moteur comprend essentiellement un stator fixe et un rotor tournant, Portant tous les trois bornes sont accessibles à travers un ensemble de bagues et de balais. Apres une brève étude sur le moteur sans balais, asynchrone et synchrone, universels, pas à pas, ces caractéristiques, sa construction son principe de fonctionnement, ainsi que ces différents modes d'utilisation. Nous avons terminé ce chapitre par une petite comparaison entre les différents types de moteur.

Chapitre II

Critères de choix des moteurs électriques

II.1.Introduction

Dans le domaine industriel, il existe des milliers des moteurs électriques des différentes tailles comme le moteur à courant continu, synchrone, asynchrone et pas à pas. Malheureusement, le choix du moteur convenable à l'application souhaité pose un grand problème pour les industriels. Dans ce chapitre on va voir quelles sont les critères de choix des moteurs électriques [13].

II.2.Intérêt des moteurs électriques

Les moteurs électriques ont sur les moteurs thermiques (à essence, gasoil ou gaz) de nombreux avantages :

- ils sont moins polluants et moins bruyants ;
- ils démarrent seuls et facilement ;
- ils ont souvent un fort couple moteur à faible vitesse et même à l'arrêt.

Cette dernière propriété est très importante. Parce que leur couple est faible à vitesse réduite et nul au démarrage, les moteurs thermiques (à explosion ou diesels) nécessitent un embrayage et un dispositif mécanique à engrenages. Le moteur tournant déjà, c'est en produisant patiner l'embrayage que l'on peut communiquer le mouvement à la charge : cela entraîne une dissipation d'énergie thermique par frottements. C'est aussi l'embrayage qui permet de découpler le moteur de la charge pour changer le rapport de la boîte de vitesses. L'embrayage n'est pas un dispositif transposable dans le domaine des hautes puissances. C'est pour cela que sur les locomotives diesel électrique, le moteur diesel n'entraîne pas la locomotive : il fait tourner un générateur qui alimente un moteur électrique et c'est ce dernier qui assure l'effort de traction. Les qualités qui font la supériorité du moteur électrique sur le moteur thermique sont [16] :

- la facilité d'emploi dans le cas de démarrages fréquents ;
- la régularité du couple utile ;
- la possibilité d'inversion du sens de rotation sans intervention de dispositifs mécaniques.

Ces qualités sont encore accentuées aujourd'hui, grâce à l'utilisation de l'électronique de puissance.

II.3. Les avantages et les inconvénients des moteurs électriques

Contrairement à un moteur thermique, un moteur électrique :

- peut fournir tout son couple même à vitesse nulle : il n'a donc **pas besoin d'un embrayage**, et permet des démarrages vifs.
- **est réversible** : si on l'entraîne, par exemple en descendant une pente ou en freinant, il transforme l'énergie mécanique en énergie électrique qui va recharger la batterie.
- Grâce à cela, on limite l'usure et l'échauffement des freins tout en économisant de l'énergie. à un **excellent rendement** : le rendement peut dépasser 90%, voire 95%, alors qu'un moteur thermique dissipe sous forme de chaleur quasiment les deux tiers de la puissance qu'il consomme. Il n'a donc pas besoin d'un dispositif de refroidissement aussi puissant qu'un moteur thermique, et sa température de fonctionnement étant plus basse, il vieillit aussi moins vite.
- peut fonctionner sur une large plage de couples et de vitesses : il n'a donc **pas besoin d'une boîte de vitesses**.
- **n'émet pas de gaz** de combustion, ni de particules
- **ne perd pas de puissance** ni de rendement avec l'altitude.
- **à très peu de pièces d'usure**, mis à part les roulements et les balais sur certains moteurs
- est beaucoup plus **silencieux** et ne vibre pas...

Le principal inconvénient du moteur électrique est la batterie qui l'alimente. En effet, la quantité d'énergie contenue dans une batterie est bien moindre que celle contenue dans un réservoir de carburant, et elle ne peut être rechargée aussi rapidement que l'on fait un plein. De plus la batterie reste un élément lourd et couteux.

C'est à cause des faibles performances des batteries que la voiture électrique est restée pendant longtemps un serpent de mer dans l'automobile, mais l'apparition des batteries au lithium, performantes et légères, a permis à la voiture électrique d'émerger enfin...

II.4. L'installation type moteur-application

Pour être en mesure de choisir le moteur approprié à la tâche et d'effectuer son entretien correctement, il est important de connaître le cycle normal de fonctionnement d'une installation type moteur-application comme indiqué dans la figure (II.1). Plusieurs éléments entrent en jeu dans une telle installation : l'alimentation électrique, le moteur, le mode d'entraînement, l'application et l'objectif visé [20].

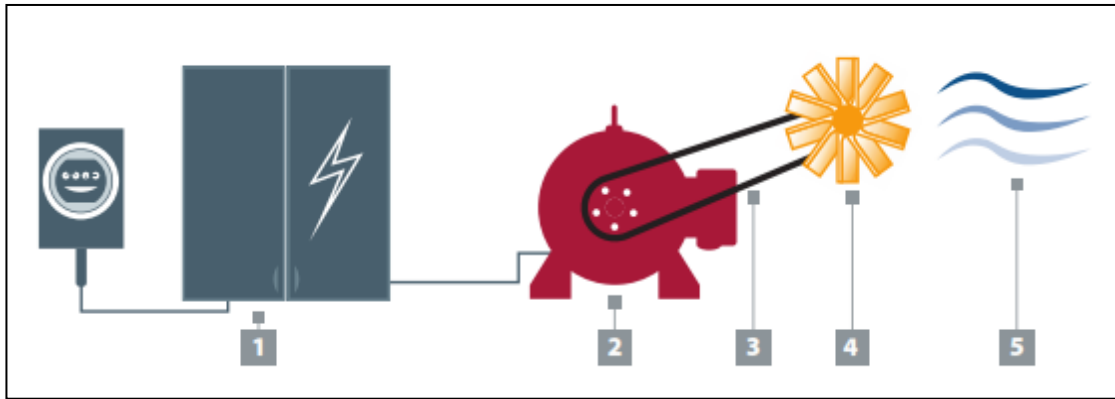


Figure II. 1 : le cycle normal de fonctionnement d'une installation type moteur-application

- ❖ **(1)L'alimentation électrique:** Habituellement, Sonelgaz fournit l'électricité aux industriels en alimentation triphasée à des tensions de 30kV/380 volts. La fréquence du réseau est de 50 hertz.
- ❖ **(2)Le moteur électrique:** Le moteur électrique transforme cette électricité en énergie mécanique. La tension indiquée sur la plaque signalétique des moteurs est légèrement inférieure aux tensions d'alimentation afin de tenir compte de la chute de tension inhérente aux câbles d'alimentation.
- ❖ **(3)L'entraînement:** L'entraînement (arbre, courroie, chaîne de transmission, boîtier de transfert) transmet l'énergie mécanique du moteur à l'application visée (ventilateur, pompe, etc.). On augmente le rendement du système si l'on maintient en bon état tous les composants qui se situent entre l'arbre du moteur et la charge à entraîner.
- ❖ **(4)L'application:** L'application est le dispositif qui effectue le travail. Il peut s'agir, entre autres, d'un convoyeur, d'un ventilateur ou d'une pompe à eau. C'est là qu'on peut réaliser les économies les plus substantielles. Plus l'application est efficace, plus l'ensemble moteur application aura un rendement élevé.
- ❖ **(5)L'objectif visé:** L'objectif visé, c'est le résultat que vous cherchez : le transport du fourrage, l'évacuation de l'air vicié d'un bâtiment, l'approvisionnement en eau, etc.

II.5.Comment faire son choix ?

Le type d'application oriente le choix de la technologie. Si le moteur doit fonctionner en continu, avec peu de changements de vitesse, un moteur asynchrone est suffisant. Pour des applications dynamiques, un moteur synchrone est plus indiqué. Dans

certains cas, les deux technologies peuvent convenir : le choix se fait alors selon un compromis entre coût et précision.

Le mouvement voulu détermine la puissance et le couple à déployer. Quelles doivent être la force et la vitesse en sortie du moteur ? Le mouvement doit-il être linéaire ou rotatif ? Cela s'ajuste à l'aide d'un réducteur, qui transforme le mouvement.

L'environnement définit les caractéristiques d'encombrement et de solidité. À puissance égale, la taille des moteurs est variable. Pour les environnements difficiles, il existe des carcasses renforcées, étanches, faciles à nettoyer, adaptées aux risques de chocs, de projections ou d'encrassement.

II.6. Les critères de choix pour un moteur électrique

Les moteurs électriques triphasés ou moteurs monophasés sont très utilisés sur des machines industrielles ou des équipements particuliers tels que des pompes, ventilateurs, broyeurs, convoyeurs, ponts élévateurs, compresseurs d'air, bétonnières, scie circulaire, combi pour le bois. Ils peuvent tourner à 750tr/min, 1000tr/min, 1500tr/min ou 3000tr/min en fonction de l'application.

Au moment d'acheter ou de remplacer un moteur électrique, vous devez vérifier est ce que le type de moteur conviendra à l'application visée, est ce qu'il pourra fonctionner dans l'environnement auquel vous le destinez, et est-ce que l'installation électrique est en mesure de supporter la nouvelle charge. Ce sont les critères de choix d'un moteur électriques et sont classés comme suit:

II.6.1. Choix de la famille du moteur

Il faut d'abord choisir entre trois grandes familles de moteurs électriques :

- Le moteur alternatif, soit un moteur asynchrone (monophasé ou triphasé), un moteur synchrone ou bien un moteur universel.
- Le moteur à courant continu ou brushles.
- Le moteur pas à pas.

II.6.2. Choix du type de l'alimentation électrique

Le réseau de distribution électrique alimentant le moteur doit fournir la tension appropriée et avoir une puissance suffisante pour démarrer et faire fonctionner la charge du moteur. Le Tableau (II-1) présente une comparaison des tensions nominales de réseau que l'on pourra retrouver sur une plaque signalétique classique de moteur.

La limite de la tension d'alimentation du réseau électrique est fonction du courant exigé par le moteur pour fonctionner. Par exemple, un moteur de 50 HP va absorber 150 ampères pour tourner sous 208/120 volts, mais seulement 50 ampères sous 600/347 volts. Par

conséquent, il ne serait ni économique ni pratique d'utiliser, pour une tension donnée, des moteurs dépassant une certaine puissance nominale si le diamètre des conducteurs devient trop gros, tant pour l'alimentation qu'à l'intérieur du moteur [18].

Tableau II. 1 : Tension nominale du réseau par rapport à la tension de la plaque signalétique du moteur

Tension nominale du réseau	Tension de la plaque signalétique du moteur
120 – 1 phase	115
208/120 – 3 phases	200
240 – 1 phase or 3 phases	230
480/277 – 3 phases	460
600/347 – 3 phases	575
2400 – 3 phases	2300
4160/2400 – 3 phases	4000

On doit éviter d'utiliser un moteur dont la tension d'alimentation n'est pas normalisée ou n'est pas appropriée à celle du réseau. Par exemple, un moteur indiquant une tension de 440 V sur sa plaque signalétique est parfois raccordé à un réseau 480 V. Même si la tension maximale permise pour ce moteur est de 484 V (110 % x 440), il n'existe aucune marge pour une hausse éventuelle de la tension d'alimentation (par exemple, l'entreprise de distribution d'électricité peut très bien fournir une tension de 500 volts et rester dans les tolérances acceptables) étant donné que le moteur fonctionne déjà à sa limite de tension maximale admissible. On devra utiliser un moteur de tension appropriée ou bien installer un transformateur délivrant la tension voulue.

II.6.3.Choix du type d'application

L'application est un élément déterminant dans le choix d'un moteur électrique efficace. C'est elle qui définira précisément les caractéristiques techniques du moteur et qui vous permettra d'obtenir un rendement élevé. L'application impose au moteur une charge caractérisée par un couple, une vitesse et un profil. Le profil de charge renseigne sur le niveau de couple au démarrage et à plein régime que requiert l'application. En effet, certaines applications demandent un couple important au démarrage. Il est donc important de choisir le moteur en fonction de ces critères.

II.6.4.Choix du mouvement voulu

En fonction du mouvement voulu, il vous faudra également déterminer les spécifications techniques et le dimensionnement du moteur :

- Concernant les spécifications techniques, il faudra déterminer la puissance, le couple et la vitesse du moteur.
- Concernant le dimensionnement, il faudra veiller à l'encombrement (la taille du moteur) et au type de montage (comment le moteur sera fixé dans le système).

II.6.5.Choix des caractéristiques d'encombrement

Le choix des caractéristiques d'encombrement et de solidité du moteur dépend aussi de l'environnement industriel dans lequel le moteur est appelé à opérer :

- Il existe une construction adaptée à tout type d'environnement particulier (atmosphère explosive corrosive, humide, températures élevées...)
- Pour les environnements difficiles, il existe des moteurs avec des carcasses renforcées, étanches résistantes aux chocs ou à l'encrassement [15].

II.6.6.Choix du rendement du moteur

Votre fournisseur d'équipement ou le marchand spécialisé qui vend des moteurs sont en mesure d'évaluer le profil de charge en fonction de l'application visée et d'y faire correspondre le type de moteur approprié. Il est important que le moteur soit assez puissant pour l'application, mais pas trop puissant afin de minimiser les pertes. Pour obtenir un rendement optimal, le niveau de charge idéal doit correspondre à environ 75 % de la puissance nominale du moteur. Il est donc important de choisir le moteur approprié au travail à effectuer. Un moteur mal dimensionné affichera un rendement moindre.

II.6.6.1.Un moteur d'une puissance trop faible pour l'application

Si la puissance du moteur est trop faible pour la charge à entraîner, le moteur fonctionnera en surcharge. Voilà pourquoi il faut éviter de choisir un moteur en fonction de ses limites de charge. Si la charge imposée au moteur correspond à 100 % de sa puissance, la marge permettant de répondre à une surcharge est très faible. Par conséquent, la protection thermique du moteur entrera souvent en action pour l'arrêter. Un facteur de service de 1.15, par exemple, signifie que le moteur peut répondre à une surcharge de 15 %, mais cela ne veut pas dire qu'il peut fonctionner de façon continue à 115 % de sa puissance. Pour ce qui est des moteurs existants, consultez un maître électricien ; il mesurera la puissance utilisée pour connaître le niveau de charge des moteurs. Cette mesure, effectuée quand le moteur est en charge, permet d'évaluer le pourcentage de la

puissance maximale que le moteur développe et vous indiquera s'il est en surcharge ou non.

II.6.6.2. Un moteur trop puissant pour l'application

Le rendement d'un moteur trop puissant pour l'application à entraîner diminuera car le moteur ne travaillera pas dans sa plage de rendement optimale. Dans le cas d'un moteur électrique, le rendement diminue rapidement quand la charge est inférieure à 50 % de sa puissance nominale. Les frais de fonctionnement d'un moteur qui roule à faible charge seront plus élevés parce qu'il subira des pertes plus importantes. La puissance utilisée sera donc plus grande que dans le cas d'un moteur roulant à charge optimale et effectuant le même travail. Par exemple, un moteur de 1 HP monté sur un ventilateur subissant une charge de 1/4 HP (25 % de charge) aura un rendement inférieur à un moteur de 1/4 HP à pleine charge pour la même application.

Choix par rapport à l'environnement (la poussière, l'humidité et l'air vicié)

À l'usine, on utilise souvent les moteurs électriques dans des conditions très difficiles. La poussière, l'humidité et l'air vicié influent sur le fonctionnement du moteur. Les fabricants ont mis au point certains types d'enveloppes qui résistent à ces diverses conditions.

Le tableau qui suit présente les moteurs en fonction de leur type d'enveloppes, de l'environnement dans lequel ils peuvent fonctionner et du type d'applications qu'ils entraînent [12].

Tableau II. 2 : Les types d'enveloppes des moteurs électriques

Type de moteur	Environnement
<p>Moteurabrité (Open Drip Proof):Moteur électrique ouvert construit de façon telle que les gouttes de liquide ou les particules solides qui l'atteignent verticalement ou à un angle avec la verticale pouvant aller jusqu'à 15° ne puissent nuire à son fonctionnement.</p> <p>Un ventilateur fait passer l'air à travers les parties internes du moteur.</p>	<p>Sec et propre, sans poussière</p>
<p>Moteur fermé autoventilé (TotallyEnclosed Fan Cooled)</p> <p>Moteur électrique fermé refroidi au moyen d'un ventilateur monté sur son arbre de transmission et soufflant l'air extérieur sur l'enveloppe extérieure du moteur.</p>	<p>Poussière, humidité et air vicié</p>
<p>Moteur fermé à circulation d'air (TotallyEnclosed Air Over)</p> <p>Moteur muni d'une enveloppe complète, sans orifices de ventilation, empêchant tout échange entre atmosphères intérieure et extérieure.</p> <p>Le refroidissement du moteur est assuré par l'air forcé qui circule autour de l'enveloppe.</p>	<p>Poussière, air vicié Note : Éviter les milieux clos</p>

Choix par rapport à la température ambiante

Voici un autre paramètre dont il faut tenir compte au moment de choisir un moteur électrique. Comme vous pouvez le constater dans le tableau qui suit, la température ambiante influe sur le choix de la classe d'isolation des enroulements d'un moteur.

Tableau II. 3 : Température maximale des enroulements d'un moteur d'une durée de vie de 20 000 heures à une température ambiante maximale de 40°C

Classe d'isolation	Température maximale
A	105°C
B	130°C
F	155°C
H	180°C

Même si les classes B et F sont d'un usage courant, l'utilisation d'un moteur de classe d'isolation supérieure permet d'obtenir une marge de sécurité pour les cas où le moteur travaille en surcharge, à une température constante avoisinant les 40 °C et subit des démarrages et des arrêts fréquents.

II.6.7. Choix de l'efficacité énergétique

Enfin, l'efficacité énergétique est devenue ces dernières années un critère important à prendre en considération dans le choix de son moteur :

- Un moteur électrique moins gourmand en énergie aura un faible impact énergétique ce qui permettra de réduire sa facture énergétique.

II.6.8. Choix d'un moteur à induction

Les moteurs à induction à rotor bobiné sont souvent nommés moteurs à cage d'écureuil. On les considère comme le cheval de bataille de l'industrie en raison de leur coût relativement peu élevé, leur haute fiabilité, et leur entretien minimal.

Le moteur à induction AC est utilisé plus que tout autre moyen pour alimenter un équipement industriel. Cela est confirmé par le rapport du Département américain de l'énergie sur les moteurs électriques, qui indique que 53 à 58% de l'énergie électrique générée est consommée par les moteurs électriques (voir le tableau II.4) [11].

Tableau II. 4 : Population de moteurs électriques et consommation d'énergie, 1977

Puissance	Nombre de Moteurs (000s)	Nouvelles ventes, moyenne pour 1973-1977(000s)	Consommation annuelle d'énergie électrique en milliards de kWh
1-5	54.583	3567	34
5.1-20	10.421	573	103
21-50	3.313	151	155
51-125	1.703	59	338
126 and over	1.004	35	573
Total	71.024	4385	1203

Les moteurs à induction triphasés à cage d'écureuil d'une puissance de 1 à 200 HP sont identifiés selon leur type de construction : A, B, C ou D.

Ces conceptions normalisées conviennent à des catégories particulières d'applications en fonction des charges types de chacune des catégories.

Les moteurs à induction à rotor bobiné sont très pratiques dans certaines applications du fait que l'on peut modifier les circuits de leur rotor de façon à obtenir les caractéristiques de démarrage et de fonctionnement voulues. Leurs balais nécessitent toutefois un entretien de service.

Les moteurs du type B sont de loin les plus courants et ils conviennent à presque toutes les applications, sauf celles où peuvent intervenir un couple de démarrage ou des charges de pointe élevés.

Les moteurs du type A servent rarement dans des applications nouvelles car leur courant de démarrage est plus élevé que celui des moteurs du type B pour un couple de démarrage quasiment identique. Le type A ne figure dans ce guide qu'à titre exhaustif seulement.

Tableau II. 5: Peut servir à déterminer quel type de moteur choisir.

Type	Couple de démarrage (en pour cent du couple de charge assigné)	Couple de décrochage (en pour cent du couple de charge assigné)	Courant de démarrage	Glissement	Applications types
Types A et B : Courant de démarrage normal.	100-200 %	200-250 %	Normal	< 5 %	Ventilateurs, pompes et compresseurs etc., pour lesquels le couple de démarrage est relativement peu élevé.
Type C : Couple de démarrage élevé et courant de démarrage normal.	200 - 250 %	200-250 %	Normal	< 5 %	Convoyeurs, machines à corder, agitateurs, pompes, compresseurs à pistons, etc., pour lesquels le démarrage en charge est requis.
Type D : Couple de démarrage et glissement élevés.	275 %	275 %	Peu élevé	> 5 %	Charges de pointe élevées avec volants d'inertie comme cisailles, monte-charge, extracteurs, pompes de puits de pétrole et étireuses.
Rotor bobiné	Tout couple inférieur ou égal au couple de décrochage	225-275 %	Selon le couple de démarrage.	Selon la résistance du rotor	Pour lesquelles un couple de démarrage élevé ou une régulation de vitesse limitée (2:1) sont nécessaires et dans lesquelles une charge à inertie élevée doit être accélérée.

II.6.9.Choix d'un moteur synchrone

C'est en raison de ses caractéristiques de fonctionnement qu'un moteur synchrone est parfois choisi au lieu d'un moteur à induction. Les moteurs synchrones sont d'un coût nettement plus élevé et ne sont donc utilisés que si leur choix se justifie sur la base des facteurs ci-après :

❖ **Vitesse :**

Les moteurs synchrones fonctionnent à la vitesse synchrone sans baisse de vitesse sur toute leur gamme de charges. On devra opter pour ces moteurs lorsqu'une vitesse précise et constante est nécessaire.

❖ **Correction du facteur de puissance :**

Les moteurs synchrones peuvent produire de la puissance réactive pour corriger le faible facteur de puissance du réseau d'alimentation, tout en produisant une puissance mécanique. Lorsqu'ils fournissent de la puissance réactive, on dit que les moteurs synchrones fonctionnent avec un facteur de puissance capacitif. Si l'inverse ils consomment de la puissance réactive, on dit que les moteurs synchrones fonctionnent avec un facteur de puissance inductif.

❖ **Coûts d'exploitation moins élevés :**

Les moteurs synchrones ont souvent un rendement énergétique supérieur à celui des moteurs à induction, et plus particulièrement dans les gammes de puissances élevées.

II.6.10.Choix d'un moteur à courant continu

On choisit souvent un moteur à courant continu. Lorsque qu'une régulation précise de la vitesse est nécessaire, car le contrôle de la vitesse d'un moteur c.c. est plus simple, moins coûteux et couvre une gamme de vitesses plus étendue que les systèmes de commande de vitesse des moteurs à courant alternatif.

❖ **Moteur monophasé**

Les moteurs monophasés sont choisis en fonction du type de charge ou des applications auxquelles ils sont destinés. Le Tableau II-6 donne les types, caractéristiques et utilisations types des moteurs monophasés.

Tableau II. 6 : Choix d'un moteur monophasé

Type	Vitesse type en tr/min	Couple de démarrage en pour cent du couple à pleine charge	Rendement comparé	Applications types
À bague de déphasage	1050, 1550, 3000	Très faible 50-100 %	Faible	Petits ventilateurs et soufflantes à entraînement direct.
À condensateur permanent (PSC)	825, 1075, 1625	Faible 75-150 %	Modéré	Ventilateurs et soufflantes à entraînement direct
À enroulement auxiliaire de démarrage	1140, 1725, 3450	Faible à modéré 130-170 %	Modéré	Ventilateurs et soufflantes à courroie et à entraînement direct, petits outils, pompes centrifuges et appareils électroménagers
À démarrage par condensateur	1140, 1725, 3450	Modéré à élevé 200-400 %	Modéré à élevé	Pompes, compresseurs, outils, convoyeurs, machines agricoles et ventilateurs industriels

II.7.Étude comparative entre un moteur DC et moteur AC

II.7.1.Étude de moteur DC

II.7.1.1.Définition et structure

Un moteur à collecteur à courant continu est une machine destinée à transformer de l'énergie électrique disponible sous forme de tension et du courant continu, on énergie mécanique. Il comporte un induit, un collecteur et des pôles magnétiques excités par une source de courant continu ou constitué d'aimant permanent.

II.7.1.2. Avantages

Le moteur à courant continu a l'avantage d'être facile à appréhender, car les deux bobines qui le composent sont non seulement fixes dans l'espace grâce à l'action du collecteur, mais aussi faiblement couplée [18].

II.7.1.3. Inconvénients

Ce moteur présente intrinsèquement une faiblesse liée à son collecteur mécanique. En effet, ce collecteur augmente l'encombrement du moteur, ainsi que son coût de fabrication et d'entretien. Ce système d'entraînement présente d'autres inconvénients de différentes origines parmi lesquelles :

- Le problème de la poussière causé par le vieillissement des filtres d'air, ce qui diminue la fiabilité du système de refroidissement donc augmente les pannes.
- La forte demande d'une vérification périodique des balais.
- Le problème de commutation caractérisé par des étincelles au niveau du collecteur.

II.7.1.4. Domaine d'utilisation

- Ascenseurs.
- Robotique.
- Les joues.

II.7.2. Étude de moteur AC**II.7.2.1. Définition et structure**

Le moteur à courant alternatif est un moteur qui sert à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique. Ils sont subdivisés en deux catégories : moteur asynchrone et moteur synchrone.

- **Moteur synchrone**

Le moteur synchrone est une machine à courant alternatif pour laquelle la vitesse de rotation de l'arbre est égale à la vitesse de rotation du champ tournant, on trouve deux types de moteur : moteur synchrone à rotor bobiné et à aimants permanents.

- ✓ **Moteur synchrone à rotor bobiné**

Le moteur synchrone à rotor bobiné a l'avantage d'avoir un facteur de puissance réglable par le courant d'excitation. Quand ils sont directement branchés à un réseau, leurs principaux inconvénients sont l'impossibilité de démarre sans artifice et le risque de décrochage lorsque le couple résistant est trop important. Il leur faut par ailleurs une deuxième source d'énergie pour alimenter l'inducteur en continu.

✓ Moteur synchrone à aimants permanent

Le moteur synchrone à aimants présente les avantages suivants :

- Fort couple massique.
- Bon rendement (absence des pertes joule au niveau du rotor).
- Champ magnétique important dans l'entrefer.
- Pas de source de tension continue pour l'excitation.

Le principal inconvénient, en dehors du coût assez élevé, est l'ondulation du couple, qui peut être néfaste dans certains domaines [19].

• Moteur asynchrone

Le moteur asynchrone est une machine à courant alternatif pour laquelle la vitesse de rotation de l'arbre est différente de la vitesse de rotation du champ tournant, on trouve deux types de moteur : moteur asynchrone à rotor bobiné et à cage d'écureuil.

✓ Moteur asynchrone à rotor bobiné

Le moteur asynchrone à rotor bobiné a son intérêt par exemple quand les conditions de démarrage sont particulièrement difficiles. L'action sur les grandeurs rotoriques permet d'améliorer un certain nombre de performances. Néanmoins, le coût plus élevé de la machine et la présence de contact entre balais et bague, qui entraînent une fiabilité moindre et un entretien plus contraignant, font que la solution du rotor bobiné n'est retenue que dans quelques cas particuliers.

✓ Moteur asynchrone à cage d'écureuil

Le moteur asynchrone à cage d'écureuil présente de nombreux avantages :

- Fiable coût de construction.
- Robustesse.
- Absence de système balais-collecteur (entretien réduit).
- Large gamme de variation de vitesse.

II.7.2.2. Domaine d'utilisation

Les moteurs à courant alternatif sont les plus utilisés dans plusieurs domaines :

- Les pompes.
- Les ventilateurs.
- Les grands portails mobiles.
- Le moteur du train électrifié (TGV).
- Parfois utilisée comme génératrice dans les éoliennes [17].

II.8. Les conséquences d'un choix du moteur

Le choix d'un moteur asynchrone seul doit permettre l'entraînement de la machine accouplée avec les performances imposées par le cahier des charges à savoir : Le nombre des quadrants de fonctionnement caractéristique mécanique de la charge (couple résistant de la charge, la puissance exigée et la vitesse désirée). Donc il faut suivre les normes imposées par CEI pour éviter les conséquences d'un mauvais choix [19]:

- **Moteur à puissance insuffisante**

- Perturbation du régime nominal du travail.
- La diminution de la productivité des machines entraînées.
- La réduction de la durée de vie du moteur.
- Des pannes peuvent être provoquées souvent.

- **Moteur à puissance plus grande**

- L'augmentation injustifiée de l'investissement du capital.
- La diminution des indices énergétiques de la commande (rendement et \cos) [15].

II.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué, quelles sont les critères de choix d'un moteur électrique, pour les moteurs à courant continu et à courant alternatif. Nous avons terminé ce chapitre par une étude comparative entre les deux moteurs DC et AC. Dans le chapitre suivant on va voir les différents modes de démarrage des moteurs électriques.

Chapitre III

Les différents modes de démarrage de moteur

III.1.Introduction

Lors de la mise sous tension d'un moteur électrique, l'appel de courant sur le réseau est devenu important et la section de la ligne d'alimentation est devenue insuffisante, provoquer une chute de tension susceptible d'affecter le fonctionnement des récepteurs. Parfois, cette chute de tension est perceptible sur les appareils d'éclairage. Pour remédier à ces inconvénients on fait recours à différents modes de démarrage pour réduire le courant électrique [26]. Ce chapitre est consacré à l'explication de ces modes de démarrage.

III.2.Les problèmes de démarrage des moteurs asynchrone triphasé

Au moment du démarrage, le moteur asynchrone triphasé fonctionne comme un transformateur, dans lequel le primaire (stator) est sous une tension et le secondaire (rotor) est en court-circuit, l'intensité appelée est alors très grande. Suivant le type et la puissance du moteur, le courant de démarrage peut atteindre 4 à 10 fois le courant nominale de pleine charge[8]. Cet appel de courant très important de court durée que le moteur pourrait le supporter sans risque d'échauffement dangereux, par ailleurs il est un gêne pour le distribution d'énergie électrique et pour les utilisateurs en voisinage sur la même ligne, en provoquant des chutes de tension excessive, il est alors nécessaire de réduire ce courant de démarrage [21].

- **Moteur à cage d'écureuil**

Pour ce type de moteur, le seul moyen pour réduire le courant de démarrage est de réduire la tension aux bornes du stator en utilisant plusieurs moyens par exemple le démarrage étoile-triangle.

- **Moteur à rotor bobiné**

Il est possible de réduire le courant de démarrage, en insérant un rhéostat dans les enroulements rotoriques. Le courant rotoriques est sensiblement proportionnel au couple fournie dans l'équation suivante:

$$C_d = 2C_n \text{ et } I_d = 2 I_n \quad (\text{III.1})$$

Avec:

I_d : courant de démarrage [A].

C_d : couple de démarrage [Nm].

C_n : couple nominal [Nm].

Le moteur a rotor bobiné ne peut pas démarre en un seul temps (courant et couple inadmissible). Il est recommandé d'employer les moteurs à rotor bobiné pour l'entraînement des machines de grande puissance et ceux exigent un grand couple de

démarrage et les moteurs à cage sont plus économiques, plus robustes ; que les moteurs à rotor bobiné. La puissance est : Inférieure à 30 kW sous 4 pôles ; Supérieure à 30 kW, on utilise des moteurs à rotor bobiné [26].

III.3.Le choix de démarrage

Le choix de démarrage est conditionné par des critères économiques et techniques qui sont :

- Les caractéristiques mécaniques.
- Les performances recherchées.
- La nature du réseau d'alimentation électrique.
- L'utilisation du moteur existant dans le cas d'un rééquipement.
- La politique de maintenance de l'entreprise.
- Le coût de l'équipement.

Le choix d'un démarreur est lié :

- au type d'utilisation : souple au démarrage.
- à la nature de la charge à entraîner.
- au type de moteur asynchrone et à courants continus.
- à la puissance de la machine.
- à la puissance de la ligne électrique.
- à la gamme de vitesse requise pour l'application [28].

III.4.Les principaux modes de démarrage

Il existe différentes commutations et méthodes de démarrage les plus importantes utilisées dans l'industrie sont présentées ci-dessous:

III.4.1.Démarrage classique

III .4.1.1.Démarrage direct

C'est le mode de démarrage le plus simple dans lequel le stator est directement couplé sur le réseau. Le moteur démarre sur ses caractéristiques naturelles. Au moment de la mise sous tension, le moteur se comporte comme un transformateur dont le secondaire, constitué par la cage du rotor très peu résistante, est en court-circuit. Le courant induit dans le rotor est important. Il en résulte une pointe de courant sur le redémarrage = 0.5 à 1.5 C nominal.

❖ Schéma fonctionnel

Le schéma ci-dessous représente le schéma fonctionnel du mode de démarrage direct d'un moteur asynchrone triphasé.

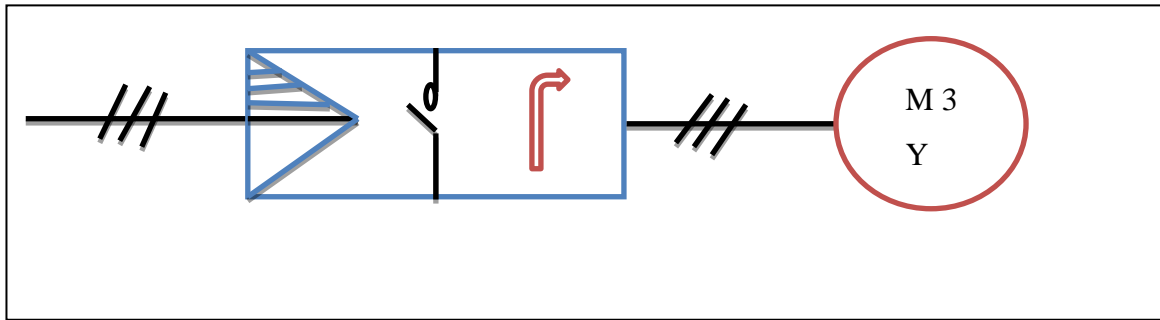


Figure III. 1 : Schéma fonctionnel de démarrage direct d'un moteur asynchrone triphasé

On veut démarrer un moteur asynchrone triphasé dans un sens de marche avec un bouton poussoir S2 et l'arrêt par un bouton poussoir S1.

- la machine entraînée ne nécessite pas une mise en vitesse progressive où comporte un dispositif amortisseur qui réduit le choc du démarrage,
- le couple de démarrage peut être élevé sans incidence sur le fonctionnement de la machine ou de la charge entraînée. la figure (III.2) présente schémas de puissance d'un démarrage direct et leur caractéristique :

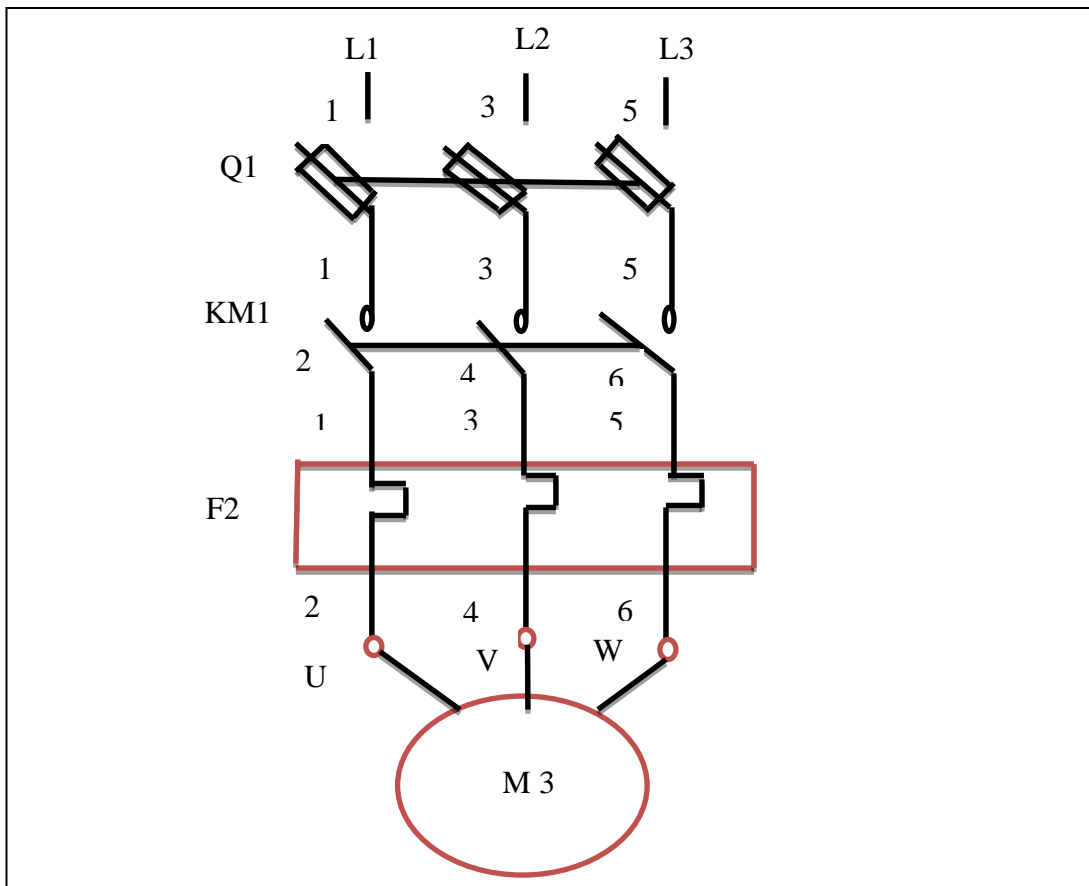


Figure III. 2 : schémas de puissance

Avec:

L1, L2, L3 : alimentation triphasée.

Q1 : sectionneur fusible.

KM1 : contacteur principal 1.

F1 : relais thermique.

M1 : moteur triphasé.

❖ **Avantages et inconvénients**

Les avantages et les inconvénients d'utilisation du mode de démarrage direct d'un moteur asynchrone triphasé sont comme suit:

a. Avantages

- Installation très simple.
- Démarrage simple.
- Couple de démarrage important.
- Prix faible.
- Temps de démarrage court.

b. Inconvénient

- Pointe de courant très important.
- S'assurer que le réseau admet cette pointe.
- Démarrage brutal.
- Ne permet pas un démarrage doux et progressif.
- Dans le démarrage direct d'un moteur asynchrone triphasé, le couplage des enroulements doit être en étoile ou en triangle selon les caractéristiques du moteur et le réseau d'alimentation.

III.4.1.2. Démarrage étoile triangle

Ce procédé n'est possible que pour les moteurs asynchrones triphasés destinés à fournir leur puissance nominale sous la tension du réseau, lorsque ses enroulements sont couplés en triangle. Il consiste à démarrer le moteur dans le 1er temps en couplant ses enroulements en étoile pendant le démarrage, puis à rétablir dans 2eme temps le couplage en triangle, ce qui revient à diviser la tension nominale du moteur en étoile par $\sqrt{3}$. La pointe de courant de démarrage est réduite de 3fois, $I_d = (1.5 \text{ à } 2.6) I_n$, ainsi que le couple $C_d = (0.2 \text{ à } 0.5) C_n$ [25].

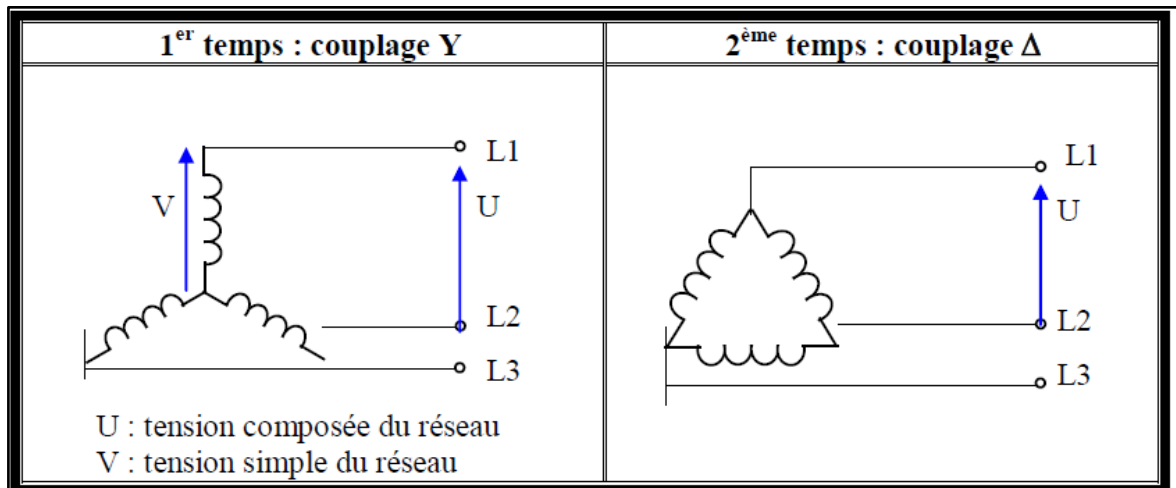


Figure III. 3 : Schéma d'un 1er temps couplage Y, et 2ème temps couplage

❖ Schéma fonctionnel

Le schéma ci-dessous représente le schéma fonctionnel du mode de démarrage étoile-triangle d'un moteur asynchrone triphasé.

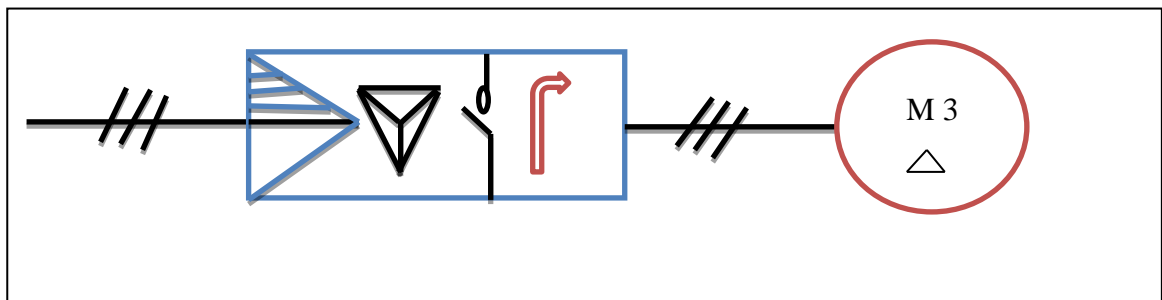


Figure III. 4: Schéma fonctionnel de démarrage étoile-triangle d'un moteur asynchrone triphasé

❖ Avantages et inconvénients

Les avantages et les inconvénients d'utilisation le mode de démarrage étoile-triangle d'un moteur asynchrone triphasé.

a. Avantages

- Réduction du courant de démarrage.
- Faible complication d'appareillage.
- Bon rapport couple/courant.

b. Inconvénients

- Couple très réduit.
- Coupure d'alimentation lors du passage étoile-triangle.
- Temps de démarrage plus élevé.
- Phénomènes transitoires.

- Condamnation électrique entre KM1 et KM3. Le temporisateur est muni d'un contact décalé d'environ 3 (s) ; ceci évitera un court-circuit éventuel lors de communication étoile-triangle.

III.4.1.3. Démarrage par résistances statoriques

Dans ce cas, l'alimentation du moteur se fait sous tension réduite en insérant des résistances en série avec les enroulements statoriques, qui sont éliminées à la fin de démarrage, puis le moteur est couplé directement au réseau ; cette opération est assurée par une temporisation. Pendant le démarrage la tension aux bornes du moteur est réduite par rapport à la tension du réseau, cette tension augmente au fur et mesure que la chute de tension aux bornes de la résistance insérée diminue (cette dernière est proportionnelle au courant de démarrage) cette résistance est calculée en fonction de la pointe de courant à ne pas dépasser ou la valeur minimale du couple de démarrage nécessaire (en tenant compte du couple résistant de la machine à entrainer. En générale, les valeurs du courant et du couple de démarrage donne dans l'équation suivant :

$$I_d = 4.5I_n \text{ et } C_d = 0.75C_n \tag{III.2}$$

Schéma fonctionnel

Le schéma ci-dessous montre le schéma fonctionnel du mode de démarrage par résistances statoriques d'un moteur asynchrone triphasé [24].

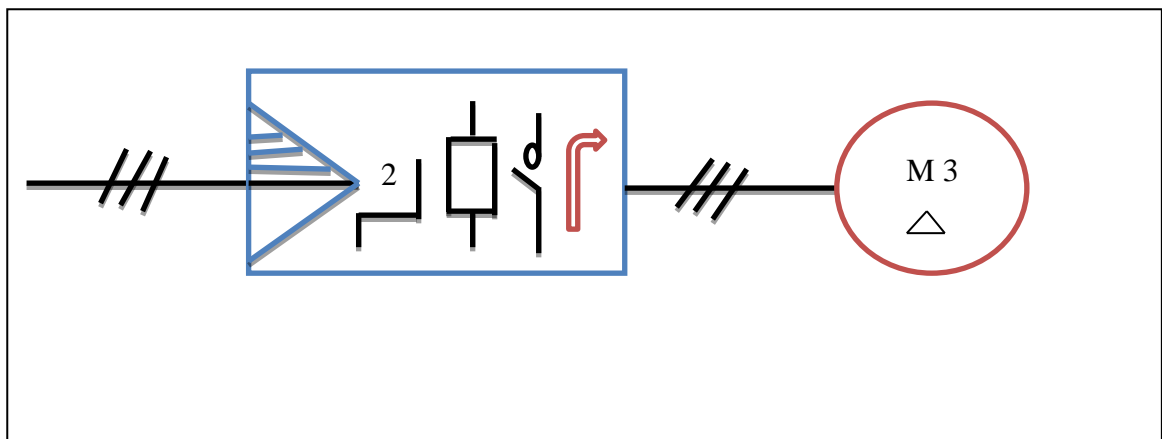


Figure III. 5 : Schéma fonctionnel de démarrage par résistances statoriques d'un moteur asynchrone triphasé

❖ **Avantages et inconvénients**

Les avantages et les inconvénients d'utilisation le mode de démarrage par résistances statoriques d'un moteur asynchrone triphasé sont données comme suit:

a. Avantages

- Pas de coupure d'alimentation pendant le démarrage.
- Forte réduction des pointes de courant transitoires (à ne pas confondre avec courant de démarrage).
- Possibilité de réglage des valeurs au démarrage.

b. Inconvénients

- Faible réduction de la pointe au démarrage.
- Nécessite des résistances.
- Une chute de tension importante aux bornes du moteur et par conséquent diminution du couple de démarrage.
- Perte de puissance dans les résistances [26].

III.4.1.4. Démarrage par résistances rotoriques

Dans le cas des moteurs asynchrones à rotor bobiné, le démarrage peut s'effectuer en insérant des résistances en série avec le bobinage rotorique, tout en alimentant le stator sous la pleine tension de réseau. Le courant absorbé est sensiblement proportionnel au couple fourni ou très peu supérieur. On obtient fréquemment des couples de démarrage égaux à 2.5fois le (C_n) sans surintensité excessive. On peut encore réduire la surintensité en augmentant le nombre de démarrage : $C_d < 2.5C_n$.

- Schéma fonctionnel

Le schéma ci-dessous représente le schéma fonctionnel modes de démarrage par résistances rotoriques d'un moteur asynchrone triphasé.

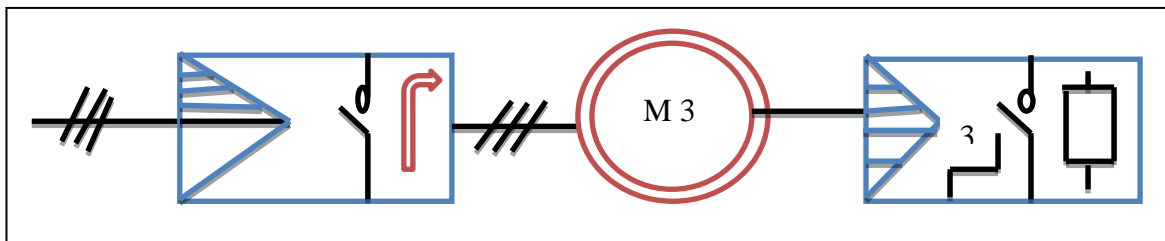


Figure III.6: Schéma fonctionnel de démarrage par résistances rotoriques d'un moteur asynchrone triphasé

- Avantages et inconvénients

Nous citons quelques avantage et inconvénients d'utilisation du mode de démarrage par résistances rotoriques d'un moteur asynchrone triphasé.

a. Avantages

- L'appel de courant est pour un couple de démarrage donné le plus faible par rapport tous les autres modes de démarrage.

- Possibilité de choisir par construction, couple et le nombre de temps de démarrage.
- Pas de coupure d'alimentation pendant le démarrage.

b. Inconvénients

- Moteur onéreux et moins robuste.
- Nécessite des résistances et des moteurs à rotor bobiné.

III .4.1.5.Démarrage par autotransformateur

Le moteur est alimenté sous tension réduite par l'intermédiaire d'un autotransformateur. Ce dernier est alimenté par la tension du réseau au primaire, l'autotransformateur est mis hors tension à la fin du démarrage. Cette opération s'effectue en trois temps :

-Le premier temps: L'autotransformateur est d'abord couplé en étoile, puis le moteur est couplé au réseau à travers ses enroulements. Le démarrage est réalisé sous une tension réduite qui est fonction du rapport de transformation. L'autotransformateur est choisi de façon à ce que la tension réduite soit la mieux adaptée (suffisante pour démarrer le moteur).

-Le deuxième temps: Avant de passer au couplage plein charge, le couplage en étoile est ouvert. La fraction de bobinage constitue une inductance en série avec le moteur.

-Le troisième temps: Le couplage plein tension intervient après le deuxième temps, généralement très court (fraction de seconde). Les inductances en série avec le moteur sont court-circuitées ; puis l'autotransformateur est mis hors circuit [22].

Le courant et le couple de démarrage varient dans la même proportion, ces derniers sont divisés par : $(U_r/U_{red})^2$.

U_r : la tension de réseau [V].

U_{red} : la tension réduite [V].

Les valeurs obtenues sont les suivantes : $I_d = (1,7 \text{ à } 4) I_n$ et $C_d = (0,5 \text{ à } 0,85) C_n$.

Ce mode de démarrage est généralement utilisé pour les moteurs asynchrones triphasés de puissance supérieur à 100 kW; $P \geq 100 \text{ Kw}$.

❖ Schéma fonctionnel

Le schéma ci-dessous représente le schéma fonctionnel de démarrage par autotransformateur d'un moteur asynchrone triphasé.

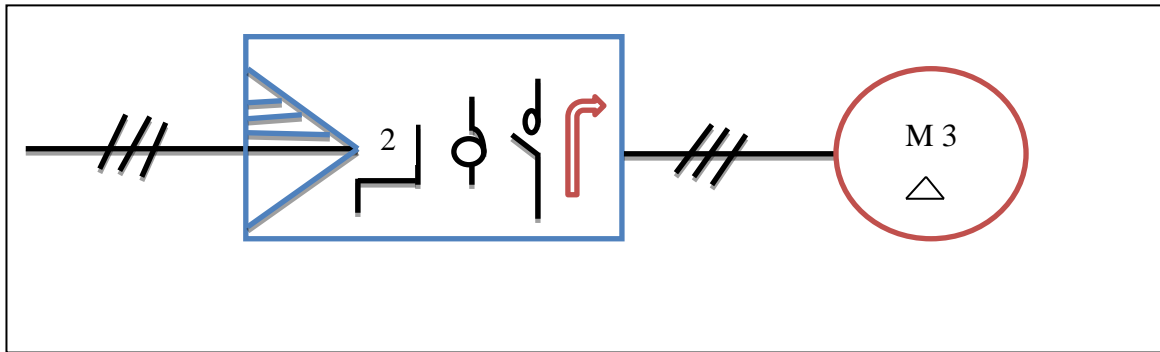


Figure III. 7: Schéma fonctionnel de démarrage par autotransformateur d'un moteur asynchrone triphasé

➤ Avantages et inconvénients

Nous citons les avantages et les inconvénients d'utilisation du mode de démarrage par autotransformateur d'un moteur asynchrone triphasé.

a. Avantages

- Possibilité de choisir le couple de
- Réduction de l'appel du courant.
- Démarrage en 3 temps sans coupure.

b. Inconvénients

- Prix d'achat élevé de l'équipement.
- Présente des risques sur le réseau perturbés [21].

III.4.2. Démarrage progressif (électronique)

III .4.2.1. Démarrage par un convertisseur électronique

Les démarreurs progressifs sont des appareils de commande électronique conçus pour le démarrage progressif des moteurs asynchrones triphasés. Par le biais d'une commande en angle de phase, les trois phases du moteur sont influencées par des thyristors (Gradateur) de telle sorte que les intensités puissent augmenter constamment. Le gradateur est un dispositif qui permet à partir d'une source alternative de convertir une tension sinusoïdale de valeur efficace constante à une tension alternative de même fréquence mais de valeur efficace variable, c'est un interrupteur statique constitué de deux thyristors « tête-bêche »

Pour la commande des puissances élevées ou un « triac » pour commande de faible puissances. Le couple du moteur se comporte de même manière au cours de l'accélération, ceci permet au moteur de démarrer sans secousse. On évite aussi la détérioration d'élément de commande en supprimant le couple au démarrage qui se manifeste brutalement dans le cas d'un enclenchement direct. Cette propriété permet de réduire les coûts de fabrication

des éléments du moteur. Quand le démarrage a réussi, les éléments de l'électronique de puissance sont shuntés aux éléments du moteur. La fonction d'arrêt progressif a pour le but de prolonger la durée naturelle de décélération des moteurs et éviter ainsi leur arrêt brutal. Le schéma ci-dessous représente démarrage par un convertisseur électronique (Gradateur) moteur asynchrone triphasé.

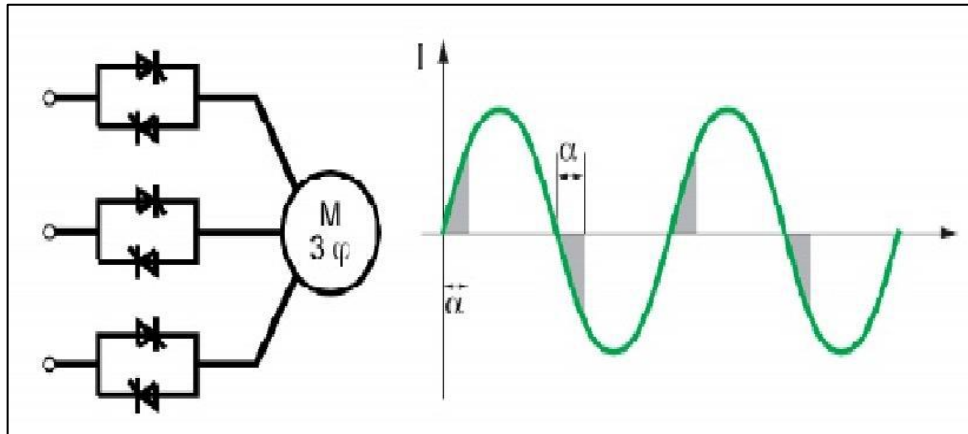


Figure III. 8: Schéma de démarrage par un convertisseur électronique (Gradateur) moteur asynchrone triphasé

❖ Schéma fonctionnel

Le schéma ci-dessous montre le schéma fonctionnel du mode de démarrage par un convertisseur électronique d'un moteur asynchrone.

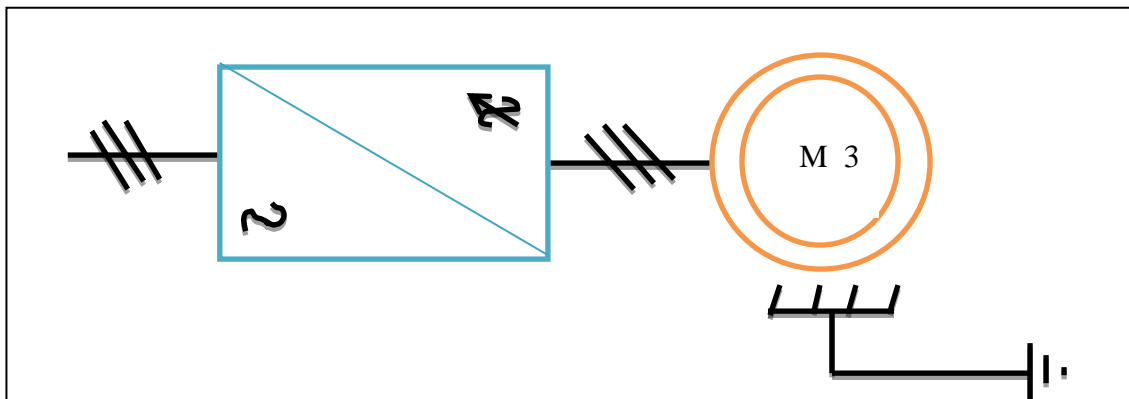


Figure III. 9: Schéma fonctionnel d'un Démarreur progressif d'un moteur asynchrone triphasé

❖ Principe de fonctionnement

La tension du réseau d'alimentation est appliquée progressivement au stator du moteur. La variation de la tension statoriques est obtenue par la variation continue de l'angle α de retard à l'amorçage des thyristors du gradateur. La consigne de démarrage permet de régler la pente d'un signal en forme de « rampe » cette consigne est étalonnée en

secondes. A la fin du démarrage, le stator du moteur est sous tension nominale, les thyristors sont alors en plein conduction. Pour une charge donnée, le réglage de la pente permet de faire varier la durée de démarrage, donc le temps de mise en vitesse progressive de l'association moteur charge.

Le phénomène inverse se produit lors d'un arrêt progressif contrôlé. La consigne de décélération permet de faire évoluer l'angle α des thyristors de 0° à 180° donc U moteur de U_n à 0.

❖ **Avantages et inconvénients**

Les avantages et les inconvénients d'utilisation le mode de démarrage électronique d'un moteur asynchrone triphasé est donne comme suit:

• **Avantages**

- La maîtrise des caractéristiques de fonctionnement.
- La protection thermique du moteur et du démarreur.
- Réduction des pointes de courant et diminution des chutes de tension en ligne.
- Démarrer progressivement les machines.
- Il permet décélération progressive.
- Réduction des couples au démarrage pour protéger la mécanique

Peu encombrant.

- Du point de vue économique, ce mode de démarrage satisfaisant car son rendement est excellent.

• **Inconvénients**

- Génère les perturbations.
- Ce procédé est utilisé que pour l'entraînement de machines démarrant à vide.
- Utiliser des capteurs [24].

III .4.2.2.Démarrage par convertisseur de fréquence

C'est un mode de démarrage performant utilisé dès qu'il est nécessaire de contrôler et de faire varier la vitesse figure (III.10) Il permet entre autre :

- de démarrer des charges de forte inertie,
- de démarrer des charges importantes sur un réseau de faible pouvoir de court-circuit,
- d'optimiser la consommation d'énergie électrique en fonction de la vitesse sur les turbos machines.

Ce type de démarrage s'applique sur tous types de machines. Cette solution est utilisée pour le réglage de la vitesse du moteur et accessoirement pour le démarrage [23].

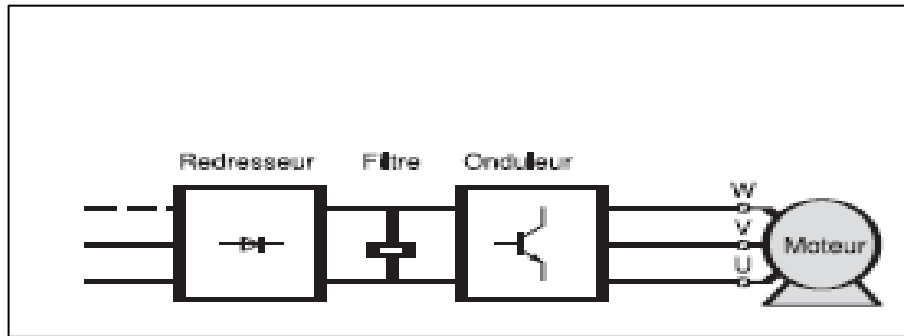


Figure III.10 : démarrage par convertisseur de fréquence

III.5. Les principaux modes de démarrage de moteur à courants continu

Les différents types de démarrage présentés dans ce cours sont [26] :

III.5.1. Démarrage direct des moteurs à courant continu

Les moteurs à courant continu de faible puissance peuvent être connectés directement à la source d'alimentation, donc à pleine tension, du fait que le courant et le couple du démarrage sont faibles.

Il existe deux types de démarrage :

- a. le démarrage manuel
- b. le démarrage à contacteur.

a. Démarrage manuel

Le démarrage manuel convient aux moteurs de puissance allant jusqu'à une dizaine de kW.

❖ Construction :

Les démarreurs manuels sont généralement constitués d'un interrupteur sectionneur. Ces démarreurs sont contenus dans un boîtier. La figure suivante vous montre un démarreur manuel.



Figure III.11 : Interrupteur pour démarrage manuel

❖ **Fonctionnement :**

Un démarreur manuel se branche dans le circuit de puissance du moteur. La figure suivante représente le schéma de branchement d'un démarreur manuel pour un moteur à courant continu. Les points identifiés par la lettre "L" du démarreur sont connectés à la source, tandis que ceux marqués par la lettre "T" sont connectés au moteur.

Schéma de branchement d'un interrupteur sectionneur pour démarrage manuel :

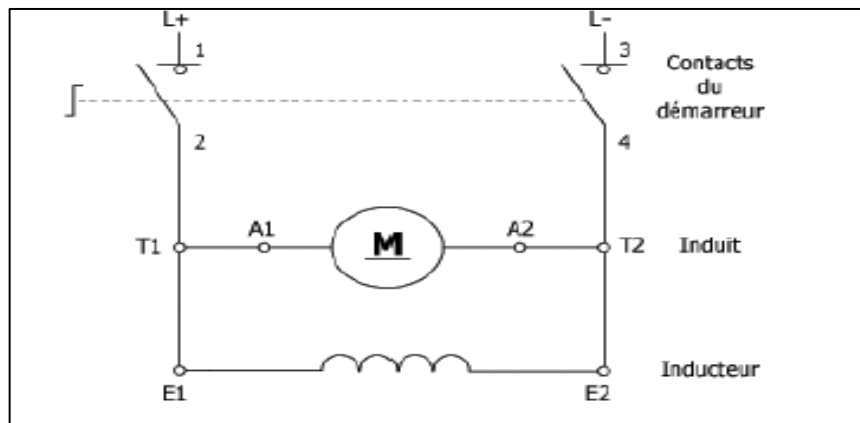


Figure III.12: fonctionnement de démarrage manuel

En tournant la poignée du démarreur manuel de la position O à la position I, on ferme les contacts placés dans le circuit de puissance. Le moteur démarre. L'arrêt du moteur se fera également de façon manuelle en plaçant la poignée de commande sur O. L'inconvénient de ce montage réside dans le fait que le moteur n'est pas protégé contre les surcharges. Pour assurer une bonne protection, il faut adjoindre au démarreur un disjoncteur magnétothermique adapté qui coupera l'alimentation en cas de surcharge ou de court-circuit ou utiliser un démarreur à contacteur.

b. Le démarrage à contacteur

➤ **Démarrage à contacteur non inverseur :**

Les démarreurs à contacteur sont les démarreurs de moteurs à pleine tension les plus fréquemment employés en industrie. On les utilise lorsqu'on désire commander un moteur à distance à l'aide d'un poste de commande à bouton-poussoir ou lorsque la puissance du moteur excède la capacité maximale des démarreurs manuels.

➤ **Démarreur non inverseur :**

Rappelez-vous qu'un démarreur non inverseur est constitué d'un contacteur et d'un relais thermique et parfois d'un poste de commande de marche-arrêt. La figure 3.13 vous montre les circuits de commande et de puissance d'un moteur commandé par un démarreur à contacteur non inverseur. Le moteur ne tournera donc que dans un sens de rotation. Tout

en vous reportant à la figure suivante, voici en quoi consiste le démarrage d'un moteur à courant continu à pleine tension dans un seul sens de rotation.

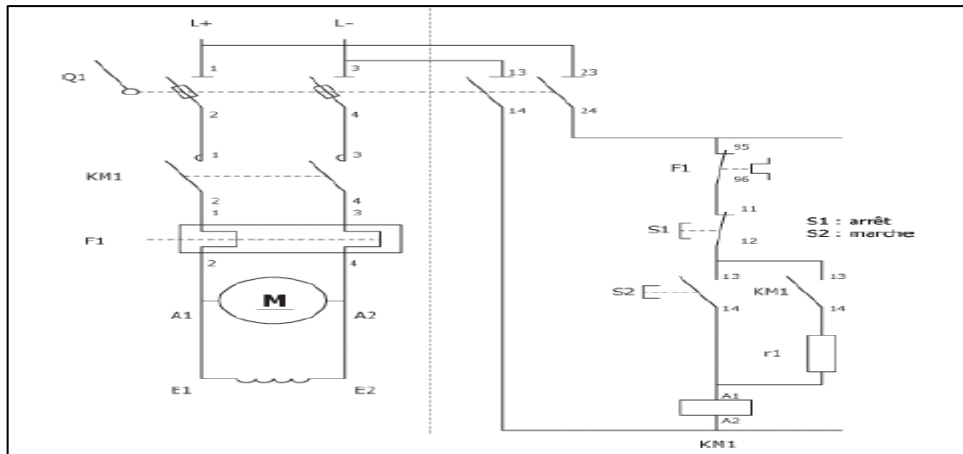


Figure III.13 : Schéma d'un démarreur à contacteur non inverseur

Lorsqu'on appuie sur le bouton-poussoir S2 de marche, on alimente la bobine KM1 du contacteur, ce qui ferme les contacts KM1 de puissance et le contact auxiliaire KM1. Ainsi, le moteur démarre.

En relâchant le bouton-poussoir, le moteur continue à tourner du fait que la bobine KM1, commandant la fermeture des contacts principaux, demeure excitée par l'intermédiaire du contact auxiliaire KM1 (13-14), appelé aussi contact de maintien ou d'auto-alimentation.

Pour arrêter le moteur, on appuie sur le bouton-poussoir S1 d'arrêt, ce qui coupe l'alimentation de la bobine KM1 qui, à son tour, relâche les contacts principaux, coupant l'alimentation du moteur. Si une baisse de tension apparaît ou une coupure de l'alimentation se produit, un moteur commandé par un démarreur à contacteur s'arrête puisque la bobine n'est plus alimentée et ses contacts principaux et auxiliaires sont ouverts.

De plus, contrairement au démarreur manuel, lorsque l'alimentation est rétablie, le démarreur à contacteur ne permet pas au moteur de redémarrer tout seul. Pour mettre le moteur en marche, il faut donc appuyer de nouveau sur le bouton-poussoir S2 de marche.

Une surcharge peut également provoquer l'arrêt du moteur. Les éléments chauffants du relais thermique F1 provoquent en cas de surcharge l'ouverture du contact F1 (95-96) du circuit de commande. Ce contact agit comme le bouton poussoir d'arrêt et stoppe le moteur.

❖ **Démarrage à contacteur inverseur**

Rappelez-vous qu'un démarreur inverseur est constitué :

- d'un contacteur commandant la marche avant KM1 ;
- d'un contacteur commandant la marche arrière KM2 ;

- d'un relais thermique F1.

La figure suivante vous montre les circuits de commande et de puissance d'un moteur commandé par un démarreur inverseur. Le moteur tournera donc dans les deux sens de rotation.

❖ Schéma d'un démarreur à contacteur inverseur :

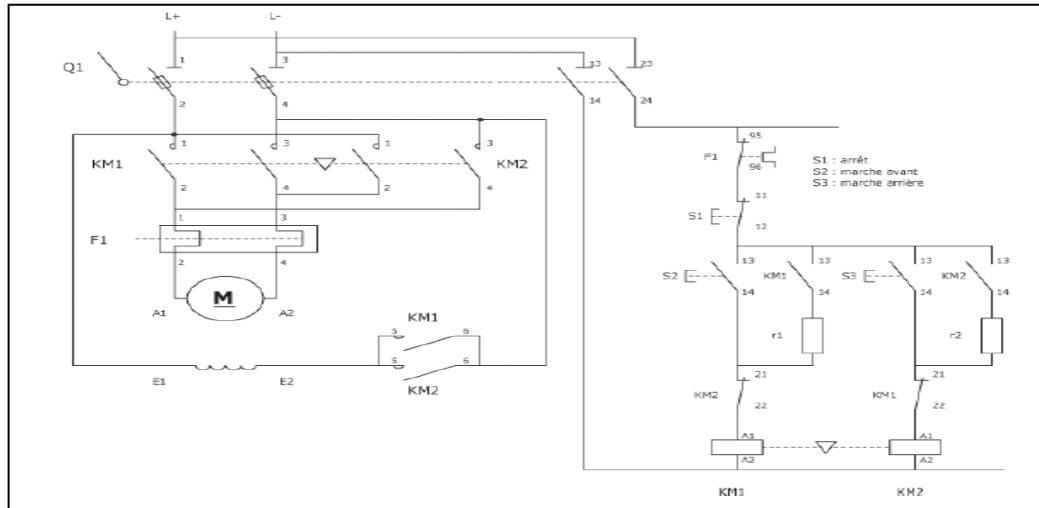


Figure III.14 : Schéma d'un démarreur à contacteur inverseur

Si l'on appuie sur le bouton-poussoir S2 "avant", on alimente la bobine KM1, ce qui provoque :

- la fermeture des deux contacts de puissance KM1 ;
- la fermeture du contact auxiliaire KM1 (13-14) ;
- l'ouverture du contact auxiliaire KM1 (21-22).

Le moteur démarre. Le courant suit le circuit L+, Q1 (1-2), KM1 (1-2), F1 (1-2), A1, A2, F1 (4-3), KM1 (4-3), Q1 (4-3), L-.

Si l'on relâche le bouton-poussoir "avant", le moteur continue à tourner puisque la bobine demeure excitée, par le biais de son auxiliaire KM1 (13-14) placé en parallèle avec le bouton-poussoir "avant", gardant ses contacts de puissance fermés.

Si l'on appuie sur le bouton-poussoir S1 "arrêt", on coupe l'alimentation de la bobine KM1 qui relâche ses contacts de puissance et auxiliaire, ce qui entraîne l'arrêt du moteur.

Si l'on appuie sur le bouton-poussoir S3 "arrière", on alimente la bobine KM2, ce qui provoque :

- la fermeture des deux contacts de puissance KM2 ;
- la fermeture du contact auxiliaire KM2 (13-14) ;
- l'ouverture du contact auxiliaire KM2 (21-22).

Le courant dans le moteur suit le circuit:

L+, Q1 (1-2), KM2 (1-2), F1 (3-4), A2, A1, F1 (2-1), KM2 (4-3), Q1 (4-3), L-,

Au lieu de celui de la marche avant. Le sens du courant d'induit étant inversé, le moteur change de sens de rotation.

En appuyant sur le bouton-poussoir "arrêt", on coupe l'alimentation de toutes les bobines et le moteur s'arrête.

III.5.2. Démarrage par élimination de résistances

On ne peut brancher directement à la source d'alimentation que des moteurs de faible puissance.

Pour les moteurs puissants, le courant au démarrage peut atteindre des valeurs très élevées de l'ordre de 20 à 30 fois le courant nominal du moteur, surintensité inacceptable pour le réseau d'alimentation. Il existe différentes solutions pour réduire cette intensité de démarrage.

❖ Principe

Le courant absorbé par un moteur à courant continu est donné par la loi d'ohm et comme nous l'avons rappelé dans la partie a de la figure 3.15. A l'instant précis du démarrage du moteur sa vitesse est encore nulle et on vient de lui appliquer la tension U. Puisque la f.c.é.m. E' est proportionnelle à la vitesse, elle est également nulle. L'expression du courant devient alors :

$$I = U/R \text{ (partie b de la figure suivante).}$$

La résistance de l'induit étant très faible, le courant est donc très important. Pour limiter ce courant à une valeur raisonnable (1, 2 à deux fois le courant nominal), on va brancher en série avec l'induit une résistance additionnelle comme cela est montré sur la partie c de la figure 3.15. Cette résistance est appelée résistance de démarrage R. Après un certain temps de démarrage, le moteur a atteint une vitesse suffisante et donc une f.c.é.m. E' suffisante pour nous retrouver dans le cas d de la figure suivante 5. Le courant a considérablement diminué puisque E' n'est plus nulle, on peut donc éliminer R pour terminer le démarrage et nous retrouver dans le cas a.

- Principe du démarrage par élimination de résistance :

Tableau III. 1 : Principe du démarrage par élimination de résistance

		Expression du courant	Schéma équivalent
a)	Fonctionnement normal	$I = \frac{U - E'}{R}$	
b)	Début du démarrage direct	$I_D = \frac{U}{R}$	
c)	Début du démarrage direct avec résistance	$I_D = \frac{U}{R + R_D}$	
d)	Fin du démarrage avec résistance	$I = \frac{U - E'}{R + R_D}$	

Dans la pratique, R sera constituée de plusieurs résistances en série que nous éliminerons progressivement les unes après les autres au fur et à mesure que le courant diminue. C'est cette élimination qui peut se faire manuellement ou de façon automatique et qui constitue "le démarrage par élimination de résistance".

Mais attention ! Il ne faut en aucun cas que cette résistance n'affecte le courant inducteur, car une diminution de ce courant conduirait à un emballement du moteur.

a. Démarrage manuel

Le principe du démarreur manuel est simple. Il permet d'insérer la série de résistances dans le circuit de l'induit au démarrage. Le courant induit est donc diminué. Progressivement, on met manuellement hors-circuit ces résistances. Ainsi, le courant augmente et la vitesse du moteur atteint sa valeur nominale.

- Construction :

Le démarreur manuel est composé des éléments suivants :

- une série de résistances raccordées sur des plots en cuivre ;
- une manette avec contact électrique se déplaçant sur les plots ;
- une bobine de maintien de la manette.

La figure suivante vous montre le schéma d'un démarreur raccordé à un moteur à courant continu à excitation shunt.

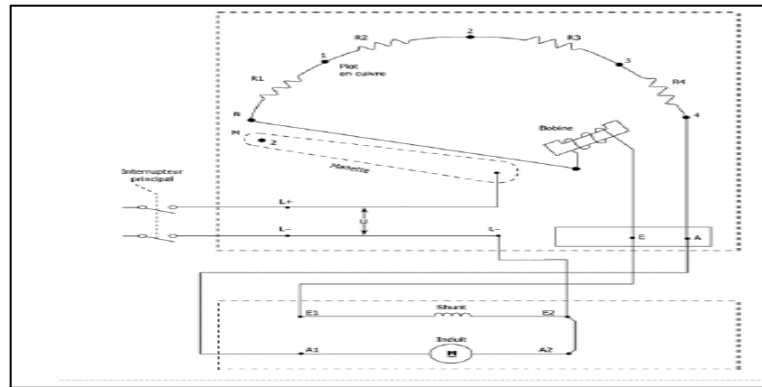


Figure III.15 : Schéma de branchement d'un rhéostat de démarrage

✓ **Fonctionnement**

Lorsque la manette de contact 1 est sur le plot mort M, le circuit du moteur est ouvert. Le moteur est à l'arrêt. Lorsqu'on déplace la manette du plot M au plot N à l'aide de la poignée 2, la tension du réseau est alors appliquée aux bornes du champ shunt et de la bobine de maintien branchée en série. Un courant circule dans le circuit de l'induit en passant par toutes les résistances du démarreur R1, R2, R3 et R4. Il est donc diminué ou limité par la somme des quatre résistances et la résistance de l'induit.

On déplace ensuite la manette du plot N au plot 1. Remarquez que le courant n'est plus limité que par les trois résistances R2, R3 et R4 et la résistance de l'induit. Ce courant a donc augmenté, ce qui provoque l'augmentation de la vitesse. Lorsque la manette est sur le plot 2, le courant est limité par les résistances R3, R4 et celle de l'induit. Puis, quand la manette se trouve sur le plot 3, le courant augmente puisqu'il n'est limité que par la résistance R4 et celle de l'induit. Lorsqu'on passe sur le plot 4, le courant d'induit n'est plus limité que par sa propre résistance. Ainsi, le démarrage est terminé et toute la tension d'alimentation est appliquée aux bornes du moteur. Il est fortement déconseillé de laisser la manette trop longtemps sur le même plot. Les résistances employées pour le démarrage ne sont pas faites pour endurer les courants de démarrage. La bobine de maintien, étant excitée, retient la manette sur le dernier plot. Ainsi, toute la tension du réseau est appliquée au moteur. Cette bobine joue un autre rôle important, celui de protéger le champ shunt. Étant en série avec le champ shunt, lorsque celui-ci s'ouvre (accidentellement), la bobine n'est plus alimentée. Par conséquent, elle perd son aimantation et relâche la manette qui revient à sa position initiale sur le plot M. Ainsi, l'alimentation du moteur est coupée. Rappelez-vous que pour le démarrage du moteur, on déplace la manette sur les résistances de démarrage pour limiter le courant d'induit (courant d'armature). Pour contrôler la vitesse du moteur, on utilise plutôt un rhéostat de champ.

b. Démarrage automatique

La technique de démarrage par résistance consiste à installer une résistance en série avec l'induit durant la période de démarrage et à la court-circuiter à la fin du démarrage. La figure suivante vous montre le schéma développé d'un démarreur automatique par élimination de résistances [7].

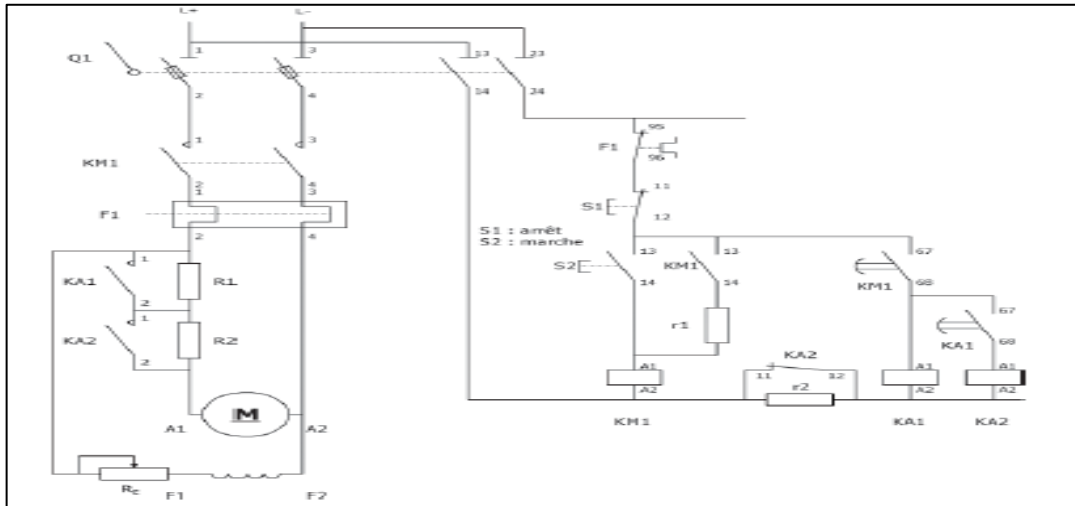


Figure III. 16 : Schéma développé d'un démarreur par élimination de résistances

Le démarreur par élimination de résistances se compose des éléments suivants :

- un contacteur KM1 avec un contact auxiliaire F instantané et un contact F Temporisé au travail ;
- un relais KA1 avec un contact F instantané et un contact F temporisé au travail ;
- un relais KA2 avec un contact O et un contact F ;
- deux résistances de démarrage R1 et R2 ;
- un relais thermique.

En actionnant le bouton-poussoir S2 "marche", on alimente la bobine du contacteur KM1. Cela provoque la fermeture de ses contacts de puissance.

Le contact auxiliaire KM1 (13-14) maintient l'alimentation de la bobine KM1 lorsque le bouton-poussoir de marche est relâché et met en service la résistance d'économie r1 qui diminue le courant dans la bobine KM1.

La période de temporisation correspondant au premier temps de démarrage commence à cet instant :

- le courant, dans le circuit de puissance, est limité par les résistances de démarrage R1 et R2 en série avec l'induit ;
- la tension appliquée au moteur est faible mais suffisante pour que le moteur commence à tourner. Au fur et à mesure que le moteur accélère, le courant dans le moteur diminue. Ce

la entraîne une chute de tension moins importante dans la résistance de démarrage, donc une tension plus grande au moteur. Lorsque la première période de temporisation est terminée, le contact KM1 (67-68) se ferme, ce qui permet d'alimenter la bobine du relais KA1. La fermeture du contact de puissance KA1 (1-2) court-circuite la première résistance de démarrage R1, permettant ainsi l'application d'une tension, plus grande au moteur.

Le deuxième temps du démarrage commence à cet instant [24] :

- Le courant dans le moteur n'est plus limité que par la résistance de démarrage R2 ;
- Le moteur reçoit donc une tension plus importante continuant ainsi son accélération.

Lorsque la deuxième période de temporisation est terminée, le contact KA1 (67- 68) se ferme, ce qui permet d'alimenter la bobine du relais KA2. La fermeture du contact de puissance KA2 (1-2) court-circuite la deuxième résistance de démarrage R2 permettant ainsi l'application de la pleine tension au moteur et terminant ainsi la phase de démarrage. Le contact KA2 (11-12), en s'ouvrant met en service la résistance d'économie r2 des bobines KA1 et KA2.

La commande du bouton-poussoir S1 "arrêt" coupe l'alimentation des bobines KM1, KA1, KA2, entraînant le retour des contacts à leur position de repos, ce qui provoque l'arrêt du moteur. Cette méthode donne un démarrage très doux, car la chute de tension dans les résistances, élevée au début, diminue à mesure que la vitesse augmente. L'inconvénient de cette méthode réside dans le couple moteur qui est faible au démarrage puisqu'il est proportionnel au courant d'induit, réduit au démarrage.

La norme NF C 15-100 définit la section utile des câbles d'alimentation en fonction de leur longueur et de l'intensité. Habituellement, le courant de démarrage des moteurs à courant continu est limité à 1.5 fois le courant nominal. Ceci pour éviter un surchauffement excessif dans les enroulements du moteur dû à un courant très élevé. Au démarrage, la force contre- électromotrice (f.c.é.m.) est nulle, tandis que le courant est limité par la résistance de l'induit et les résistances de démarrage de sorte qu'on peut établir l'équation suivante :

$$R_d = (U/105 \cdot I_n) - R_a \quad \text{(III.3)}$$

III.6.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé une étude sur les différents types de démarrages des moteurs électrique .Nous avons également cité les avantages et les inconvénients de chaque procédé et leur différente application et nous avons présenté chaque type de démarrage par une figure illustrée.

Chapitre IV

**Simulation et résultats en utilisant le
logiciel ETAP12.6**

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, des études de simulations effectuées, à l'effet de vérifier et analyser l'impact de démarrage des moteurs électriques sur le réseau électrique industriel, nous avons utilisé un logiciel pratique et performant " ETAP 12.6", par lequel, nous avons effectué plusieurs simulations pour voir les problèmes causés par le démarrage des moteurs électriques et leurs solutions.

Le logiciel " ETAP 12.6 " est un outil performant pour la conception des réseaux étant donné qu'à travers ça on peut savoir les éventuels menaces qui se trouvent dans les réseaux et dont nous pouvons simuler une solution et également prévenir contre d'autres défauts qui peuvent surgir aux cours du fonctionnement normal du réseau [27].

IV.2.Présentation du système

Le système proposé pour cette étude est présenté dans la figure (IV.1). Qui est une petite unité de production industrielle, se compose de ce qui suit:

- Une source d'alimentation du réseau de distribution moyenne haute tension B en 30 kV.
- Deux transformateurs (T1, T2) 30 kV débitant sur le jeu de barres (Bus12, Bus14) 0,38 kV de l'usine, d'une puissance de 800KVA chacune, connectés au jeu de barre 0.38Kv par deux câbles (cable11, cable12) d'une longueur de 60 et 90m respectivement.
- Quatre ateliers de production :
 - Atelier1 : Cet atelier est alimenté par le tableau principal par le câble 12. Se compose de trois machines de productions alimentés en 0,38 KV (Mtr1, Mtr2, Mtr3) de puissance 60KW chacune, connectés sur le jeu de barres 0,38 KV, chaque moteur est raccordé au jeu de barre par l'intermédiaire d'un câble d'une longueur spécifiée. Plus, une charge qui représente l'éclairage, et des prises de courant d'une puissance de 30KVA.
 - Atelier2: Cet atelier identique à l'atelier 1, il est alimenté par le tableau principal par le câble 11. Se compose de trois machines de productions alimentés en 0,38 KV (Mtr4, Mtr5, Mtr6) de puissance 70KW chacune, connectés sur le jeu de barres 0,38 KV, chaque moteur est raccordé au jeu de barre par l'intermédiaire d'un câble d'une longueur spécifiée. Plus, une charge qui représente l'éclairage, et des prises de courant d'une puissance de 30KVA.

- Atelier3 : Cet atelier est alimenté à partir de l'atelier 1 0.38KV par le câble 9. Il est composé de trois machines de productions de 50KW et une charge d'éclairage de 25KVA.
- Atelier4 : Cet atelier est identique à l'atelier 1 sauf qu'il est alimenté à partir de l'atelier 2 par le câble 13.

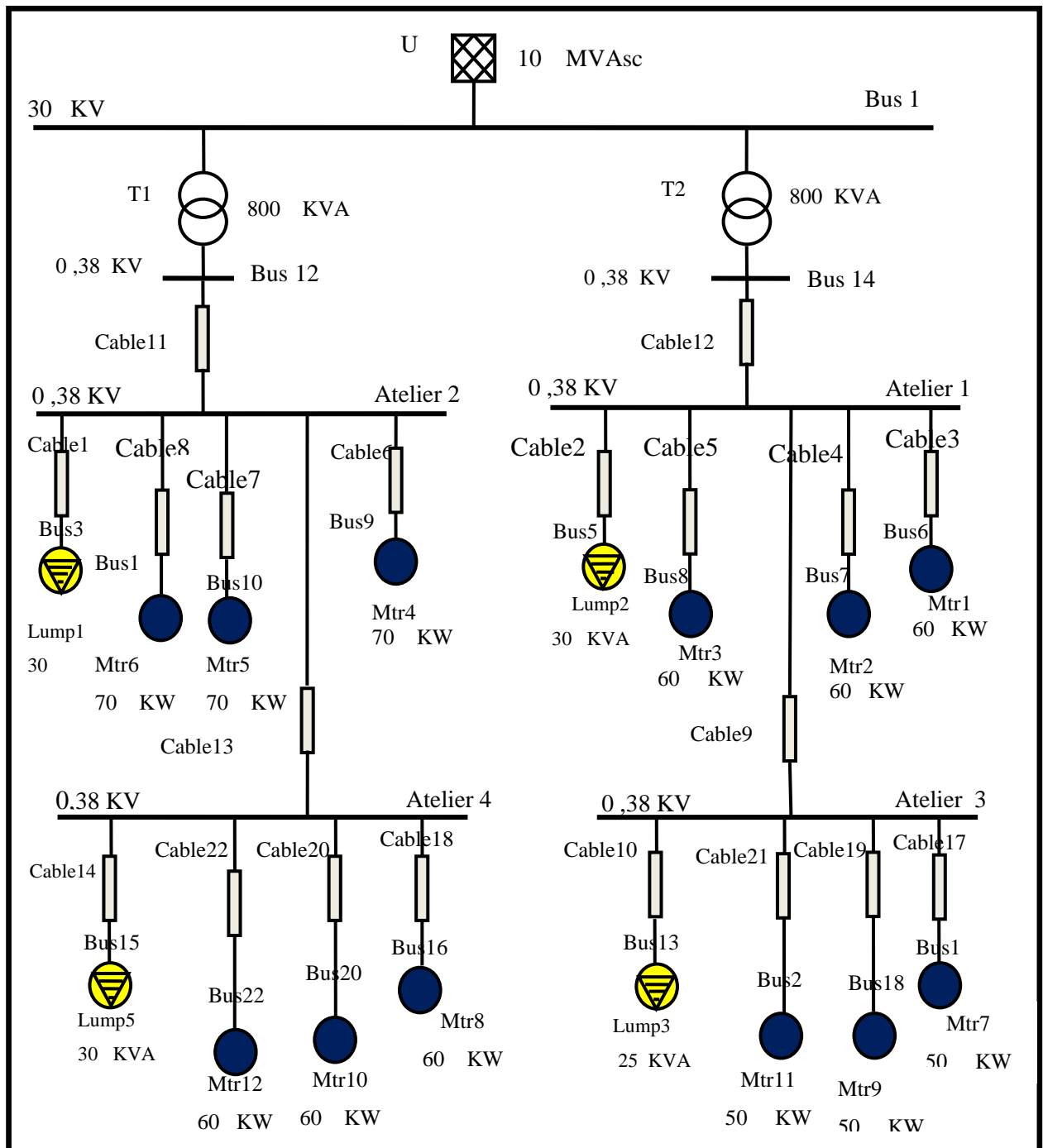


Figure IV. 1 : Structure du réseau électrique industriel proposé

IV.3. L'écoulement de puissance

Avant d'entamer les simulations dynamiques de démarrage des moteurs électriques, nous avons jugé nécessaire de réaliser la simulation de l'écoulement de puissance pour vérifier les niveaux des tensions et voir l'état de ce réseau. A cet effet nous avons inséré le système représenté précédemment dans le logiciel ETAP comme indiqué dans la figure IV.2. Après le lancement de simulation de l'écoulement de puissance nous avons obtenu les résultats tels que présenté dans la même figure.

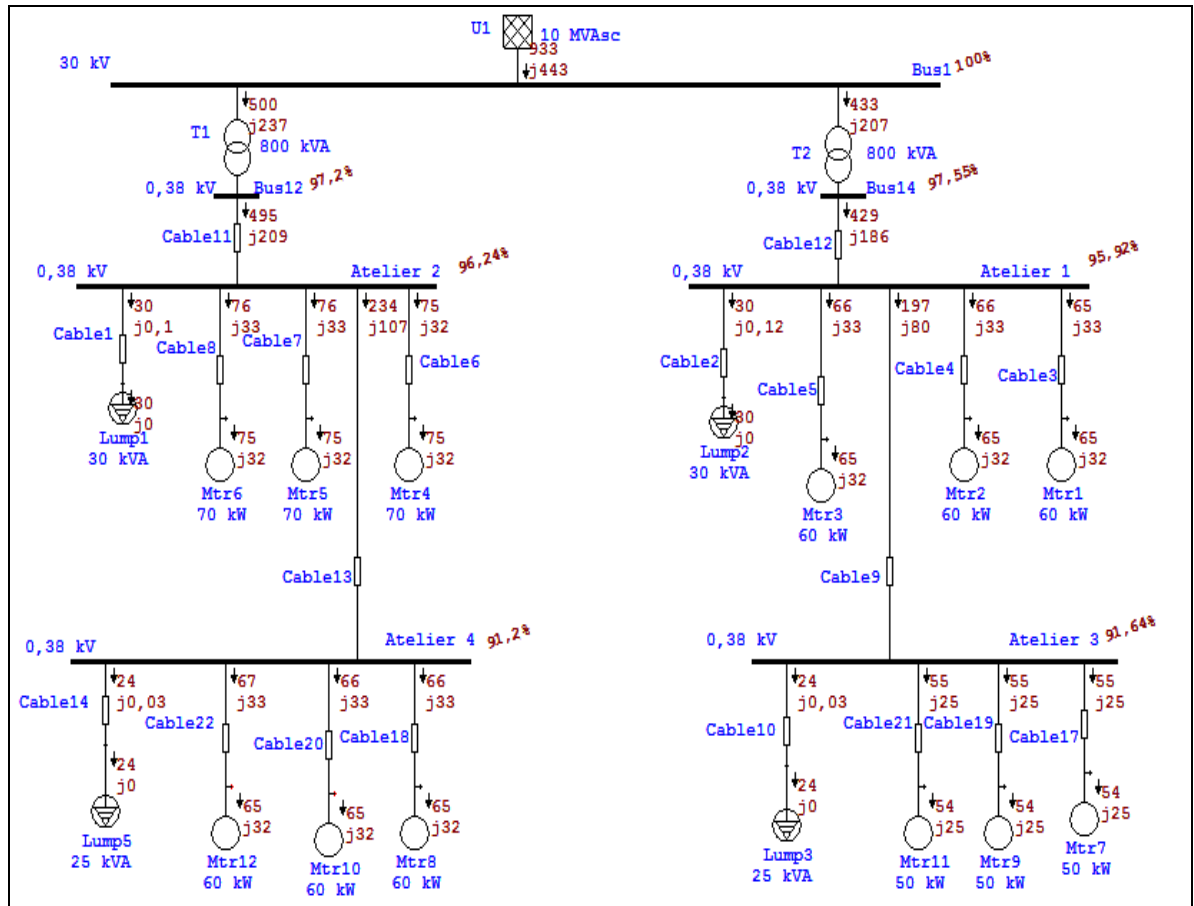


Figure IV. 2: le réseau électrique industriel inséré dans le logiciel ETAP

D'après les résultats de simulation de l'écoulement de puissance, on remarque que les tensions se trouvent dans une plage acceptable suivant les normes internationales, car toutes les tensions des différents ateliers sont supérieures à 90% et inférieure à 110%.

IV.4. Simulation de démarrage des moteurs

Après vérification d'état de notre réseau, nous allons lancer la simulation dynamique de démarrage des moteurs électriques, pour voir l'impact de démarrage de ces derniers sur le réseau électrique industriel.

Dans cette phase, nous avons procédé au réglage de notre système, déjà intégré dans le logiciel ETAP, agissant sur les paramètres; la durée totale de la simulation, le temps de démarrage de chaque moteur. En suivant les étapes suivantes :

- Nous avons commencé par la programmation le démarrage dynamique de chaque moteur à la première seconde, tel que dans la figure IV.3.

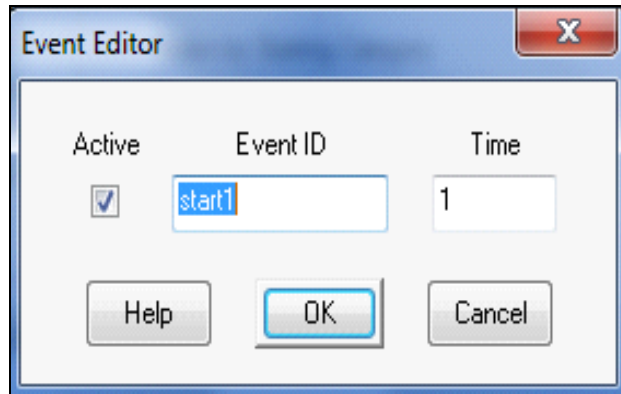


Figure IV. 3 : programmation du temps de démarrage des moteurs

- La deuxième étape consiste à programmer le type d'action (démarrage, arrêt) de chaque moteur comme indiqué dans la figure IV.4.

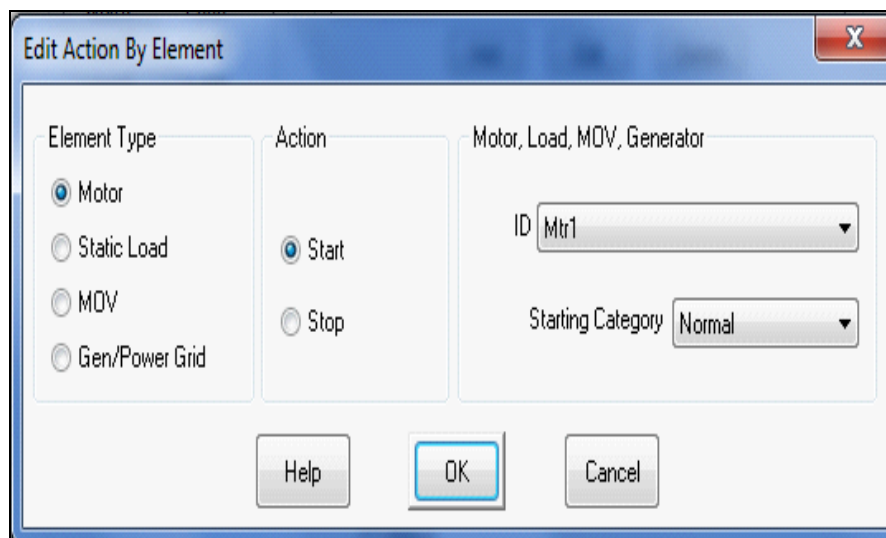


Figure IV. 4 : programmation du temps de démarrage des moteurs

Après que nous avons effectué la programmation de démarrage, nous avons lancé la simulation, nous avons obtenu les résultats présentés dans la figure suivante

Motor Starting Analysis Alert View - Output Report: Untitled

Study Case: MS Data Revision: Base
 Configuration: Normal Date: 07-15-2020

Zone Filter: 1 Area Filter: 1 Region Filter: 1

Critical									
Device ID	Type	Alert	Condition	Rating/Limit	Unit	Operating	% Operating	TBegin	Duration
Atelier 1	LV Bus	Bus Voltage	Under Voltage	0,38	kV	0,222	58,5	1	58,98
Atelier 2	LV Bus	Bus Voltage	Under Voltage	0,38	kV	0,225	59,2	1	58,98
Atelier 3	LV Bus	Bus Voltage	Under Voltage	0,38	kV	0,187	49,2	1	58,98

Marginal									
Device ID	Type	Alert	Condition	Rating/Limit	Unit	Operating	% Operating	TBegin	Duration
Atelier 1	LV Bus	Bus Voltage	Under Voltage	0,38	kV	0,34	89,5	59,98	0
Atelier 2	LV Bus	Bus Voltage	Under Voltage	0,38	kV	0,341	89,7	59,98	0
Atelier 3	LV Bus	Bus Voltage	Under Voltage	0,38	kV	0,323	85	59,98	0
Atelier 4	LV Bus	Bus Voltage	Under Voltage	0,38	kV	0,321	84,5	59,98	0
Bus1	Generator Bus	Bus Voltage	Under Voltage	30	kV	27,607	92	38,8	21,18
Bus1	HV Bus	Bus Voltage	Under Voltage	30	kV	27,003	90	37,76	22,22
Bus10	Motor Bus	Bus Voltage	Under Voltage	0,38	kV	0,304	80	36,78	23,2
Bus10	LV Bus	Bus Voltage	Under Voltage	0,38	kV	0,336	88,5	59,98	0
Bus11	Motor Bus	Bus Voltage	Under Voltage	0,38	kV	0,304	80	37,16	22,82

Figure IV. 5 : résultat de simulation de démarrage

Le logiciel ETAP présente aussi une autre alternative de présentation des résultats de simulation qui est la présentation graphique tels que indiqué dans la figure IV.6.

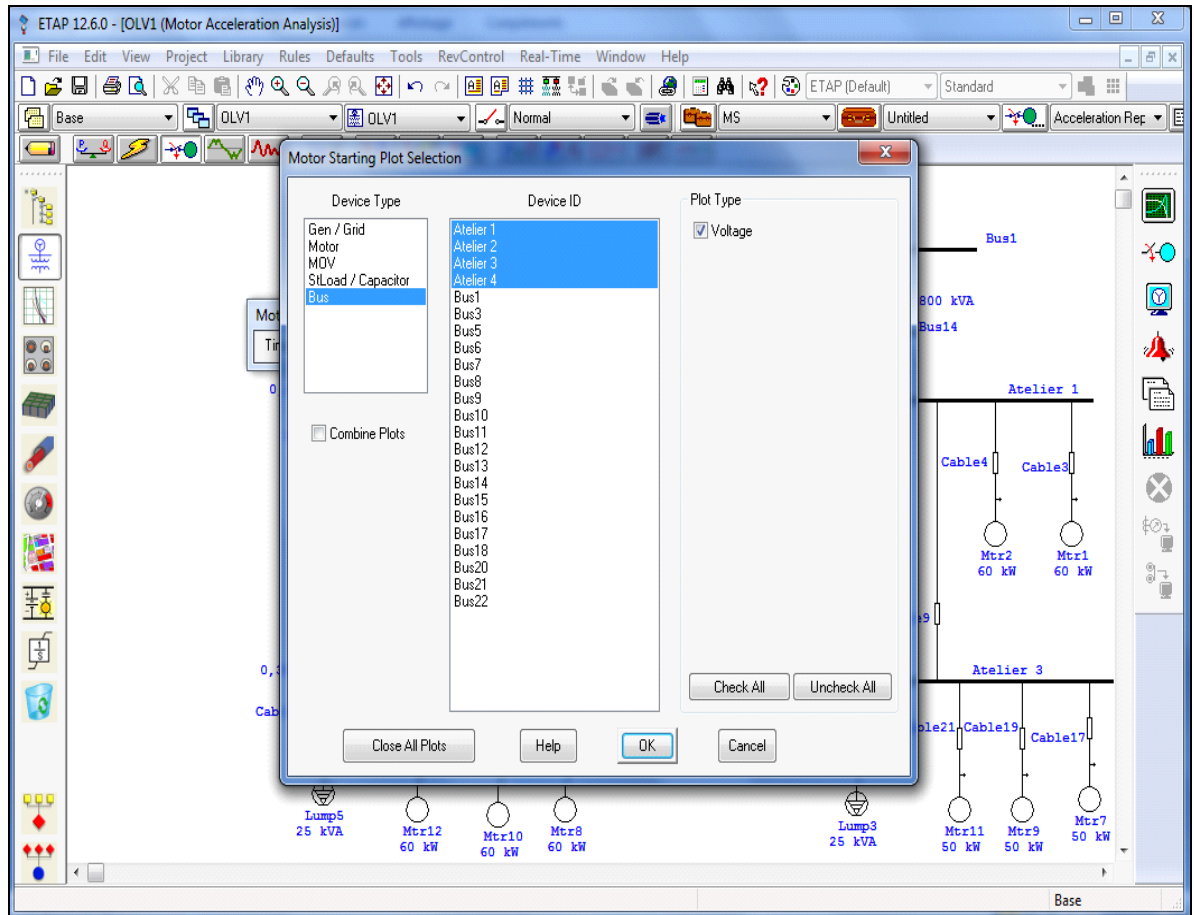


Figure IV. 6 : Programmation des résultats graphiques

Après cette étape nous avons obtenu les différents résultats de simulation sous forme graphiques. Nous avons commencé par la présentation des niveaux de tensions des différents ateliers durant et après la période de démarrage des moteurs électriques comme indiqué dans la figure IV.7.

D'après ces résultats, on remarque que le niveau des tensions pendant le démarrage est inférieur à 60% pour les deux ateliers 1 et 2, et inférieure 50% pour les deux ateliers 3 et 4. Suivi par l'augmentation progressive de tension jusqu'à la fin de la période de démarrage, la tension atteint un niveau inférieure à 90% après un temps de 40s à partir du temps de démarrage des moteurs électriques.

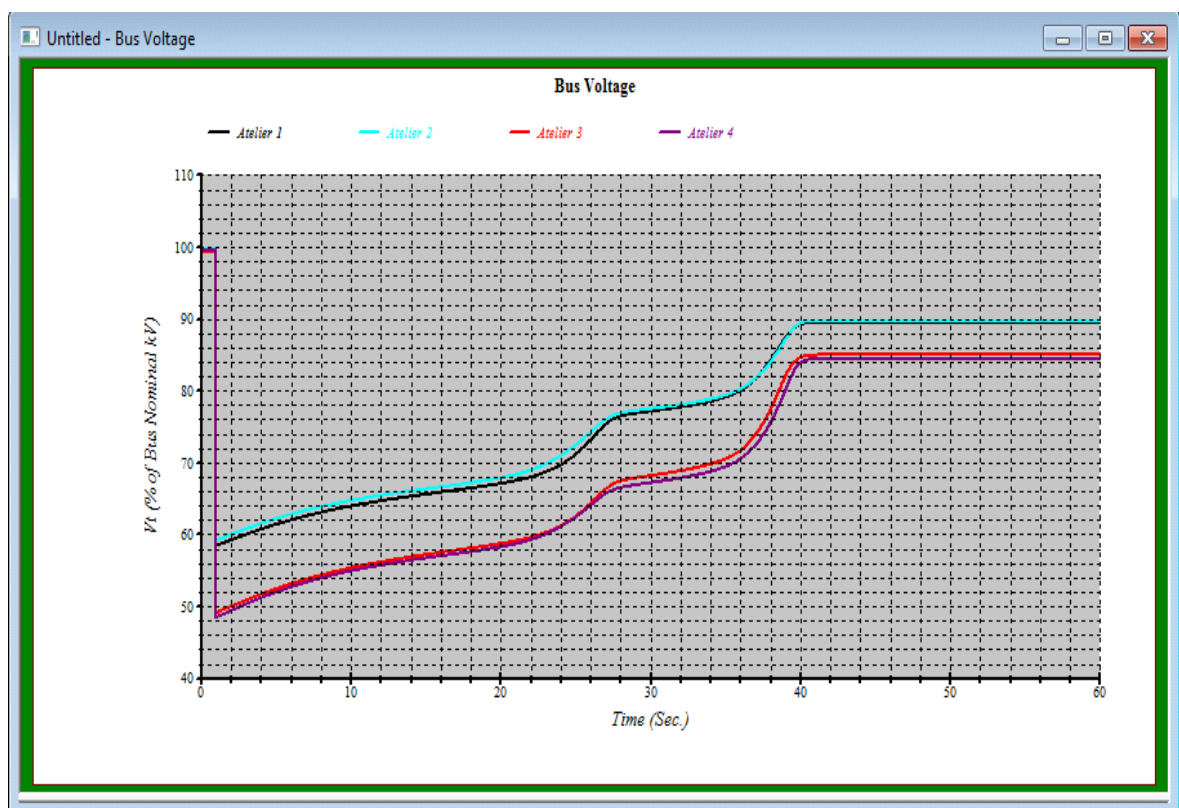


Figure IV. 7 : la tension des moteurs durant le démarrage des moteurs en fonction de temps

Ce logiciel nous permet aussi, de présenter le courant de démarrage de chaque moteur comme indiqué dans la figure IV.8.

D'après ce résultat de simulation, on remarque que le courant de démarrage est environ 300%, c.-à-d. le courant de démarrage $I_d = 3.I_n$, et diminue jusqu'au courant nominal après 40 secondes.

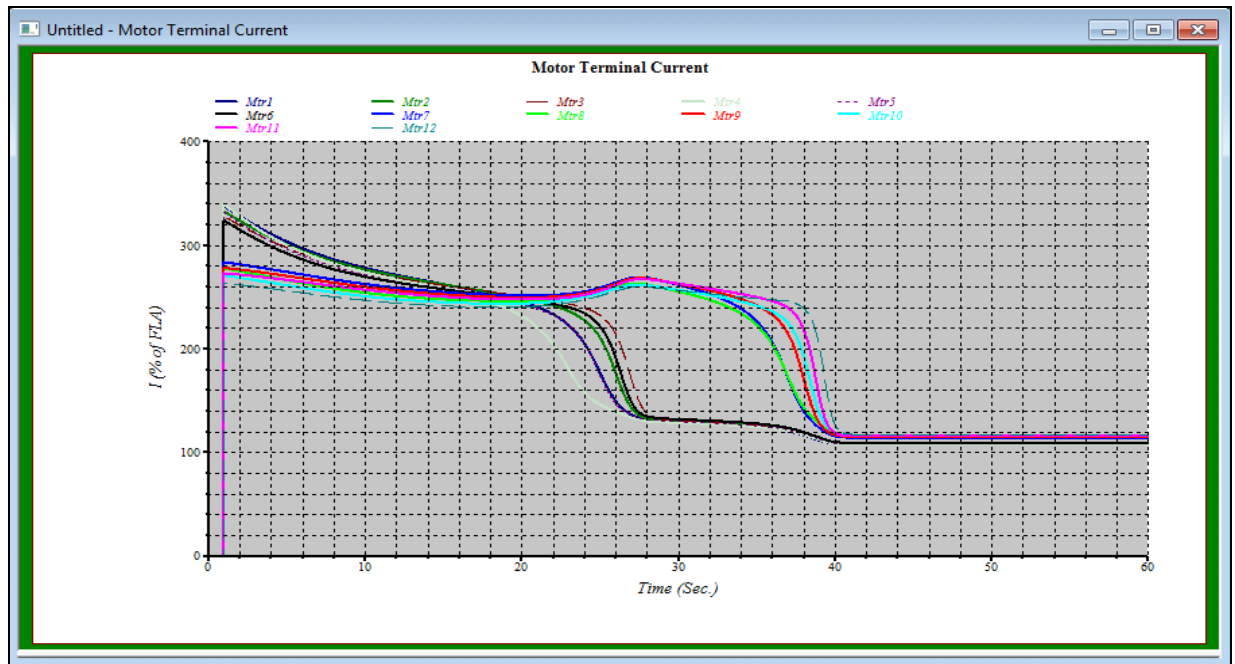


Figure IV. 8 : le courant de démarrage des moteurs en fonction de temps

IV.5. Les problèmes de démarrage des moteurs

D'après ces résultats de simulation on remarque que le démarrage des moteurs électriques provoque les problèmes suivants :

- Le courant au démarrage des moteurs I_d atteint ($I_d=3I_n$) pendant une période de 40 secondes, cette augmentation peut provoquer l'échauffement des moteurs et les câbles d'alimentation qui conduit à la détérioration de ces derniers.
- la tension au démarrage est diminuée au-dessous de 90% (inférieur 90%) : en provoquant des chutes de tension excessive qui influe sur le réseau électrique industriel, cette chute de tension peut conduire au blackout.
- La période transitoire est trop longue, durant cette période le système d'alimentation est instable, qui peut provoquer l'instabilité de tout le système.

IV.6. Les solutions proposées

Afin de régler les problèmes cités dans la section précédente, liés au démarrage des moteurs électriques, on propose les solutions suivantes :

- Insertion des batteries de condensateurs pour la compensation de la puissance réactive puisque ça concerne un problème de chute de tension.
- Insertion des variateurs de fréquence pour démarrer les machines progressivement, VFD (Variable Frequency Driver).
- Décalage du temps de démarrage des moteurs.

IV.6.1. Insertion des batteries de condensateur de compensation

A l'effet de régler le problème de la chute de tension, nous avons jugé utile d'utiliser la compensation de la puissance réactive en insérant des batteries de condensateurs. Nous avons inséré ces batteries au niveau des quatre ateliers de production tels que indiqué dans la figure IV.9.

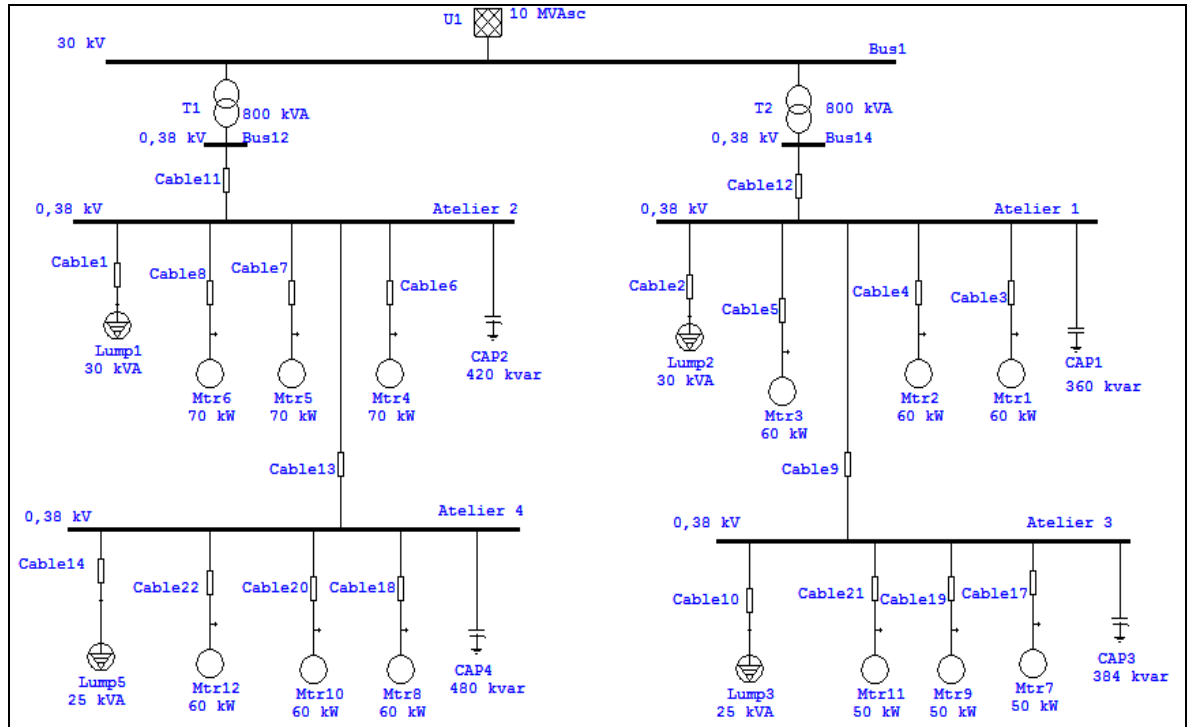


Figure IV. 9: Insertion des batteries de condensateurs dans les ateliers

Avant d’entamer la simulation de cette partie nous avons réglé le nombre des batteries de condensateurs pour trouver des bons résultats et améliorer le niveau de tension durant la période de démarrage, comme indiqué dans la figure IV.10.

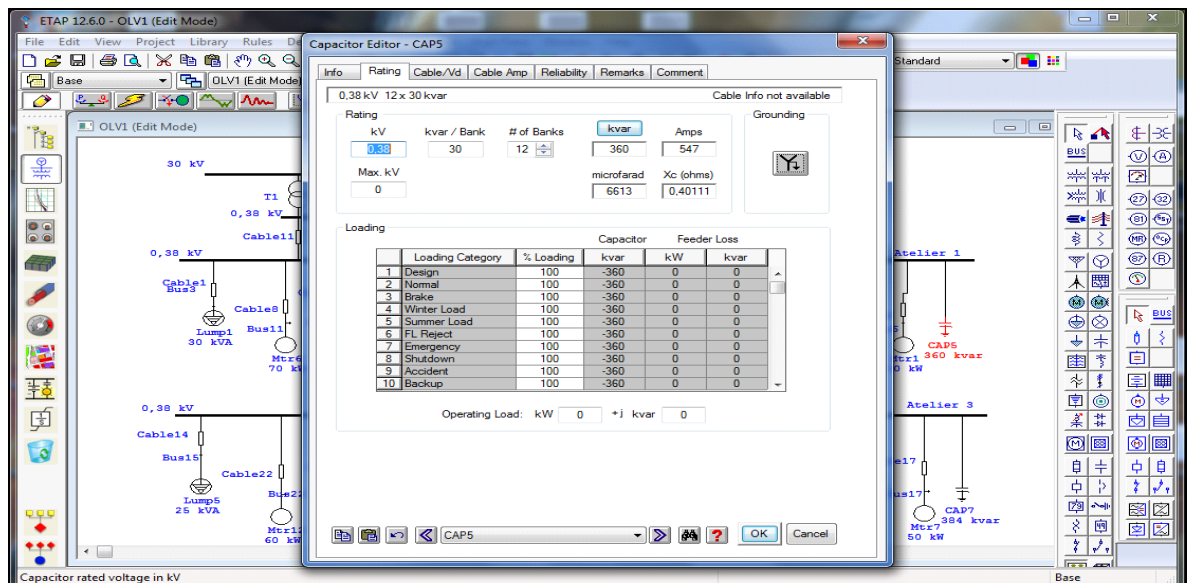


Figure IV. 10 : Le réglage des batteries condensateurs

Après l'étape de réglage nous avons lancé la simulation de l'écoulement de puissance au premier lieu, les résultats sont présentés dans la figure IV.11.

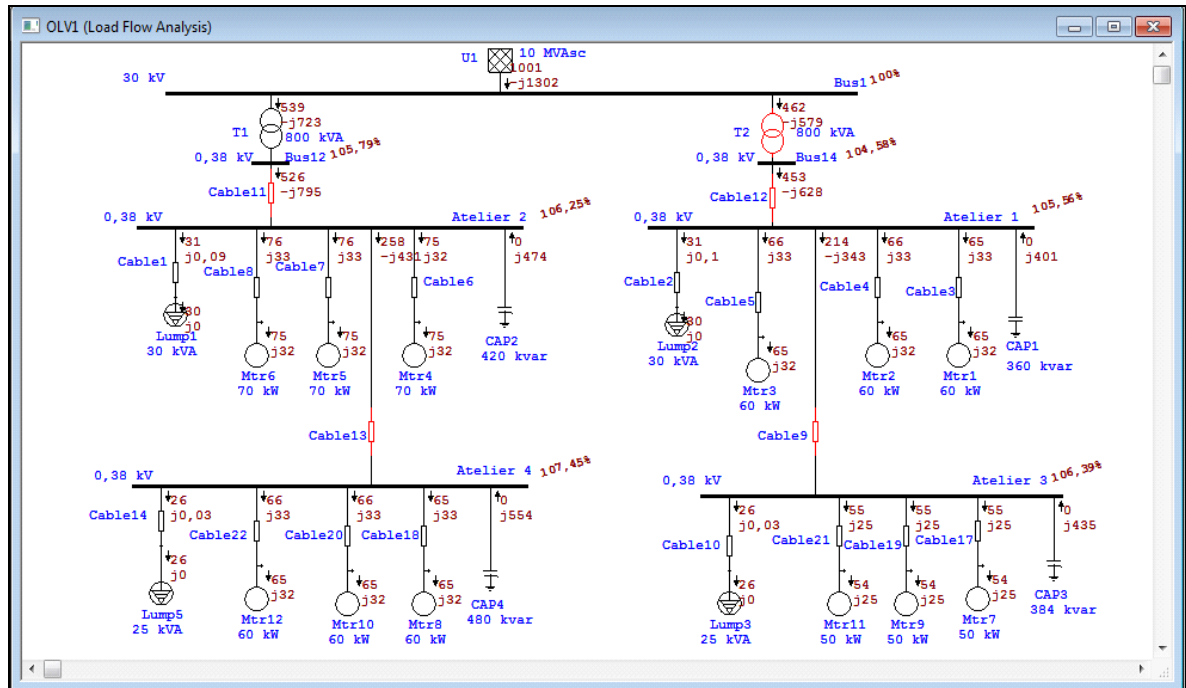


Figure IV. 11: Le résultat de l'écoulement de puissance après l'insertion des batteries D'après ces résultats, on remarque que les niveaux de tensions sont acceptables, car les niveaux des tensions sont $>90\%$ et $<110\%$.

Après la vérification des niveaux de tension des différents ateliers, nous avons lancé la simulation dynamique de démarrage des moteurs électriques des différentes machines dans les différents ateliers, nous avons obtenu les résultats présentés dans la figure IV.12.

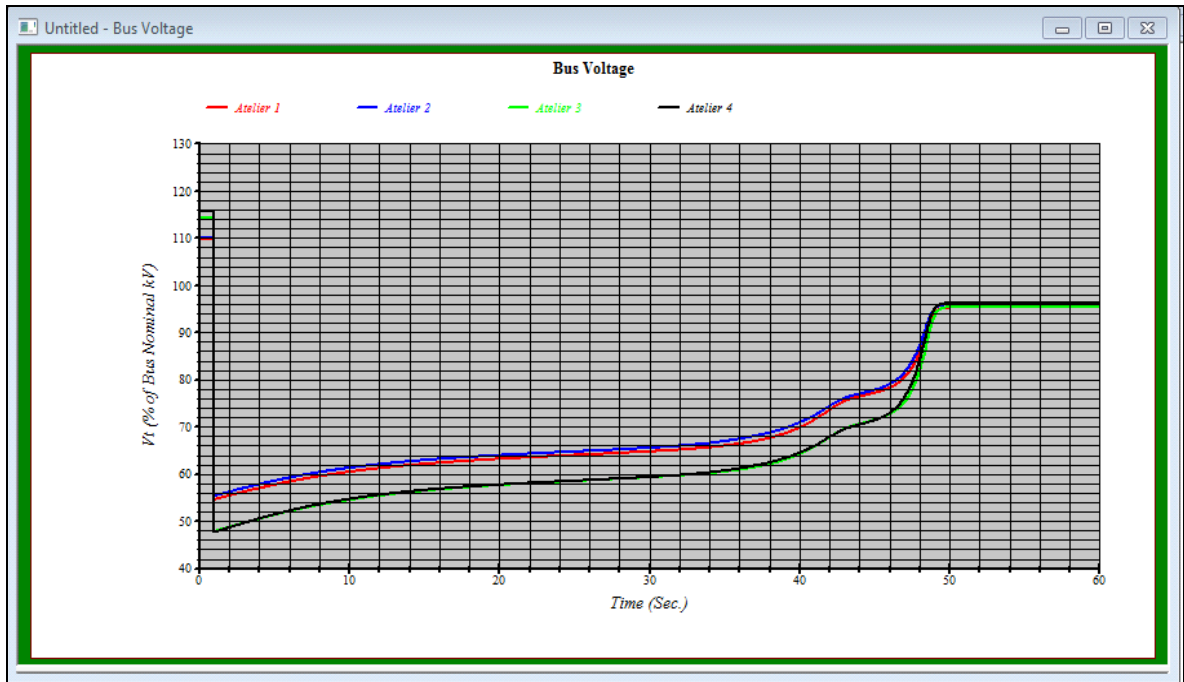


Figure IV. 12: la tension de démarrage des moteurs en fonction de temps

Le schéma illustre clairement que l'utilisation de la compensation par des batteries de condensateurs améliore la tension durant la période dynamique c.-à-d. après la période de démarrage. Néanmoins, durant le démarrage, le niveau de tension reste au-dessous de 90%. Comme voit aussi sur la figure IV.13 que le courant de démarrage durant le démarrage des machines égale trois fois le courant nominale, c.-à-d. pas d'amélioration

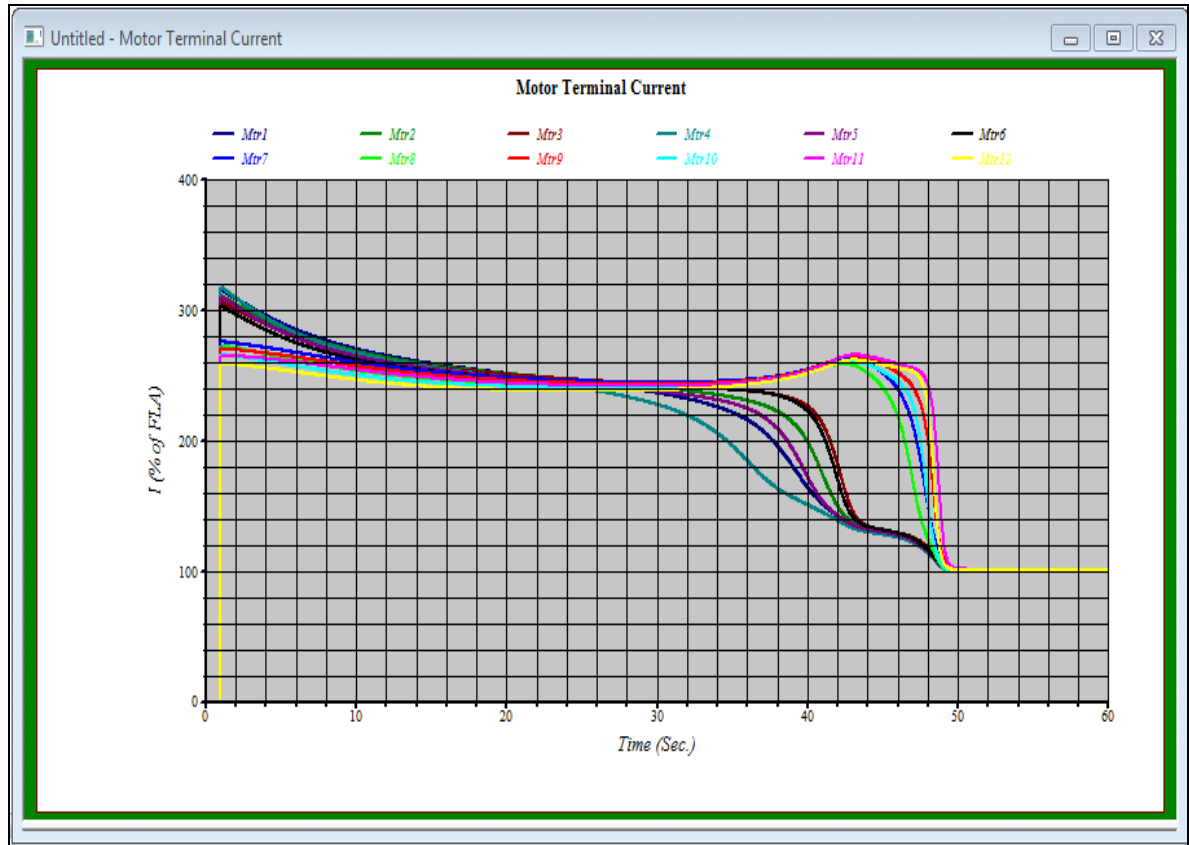


Figure IV. 13 : le courant de démarrage des moteurs en fonction de temps après l'insertion des batteries de condensateurs

IV .6.2. Insertion variateurs de fréquence VDF

Un variateur de fréquence est un appareillage électrique permet de régler la vitesse d'un moteur électrique, utilisé en électricité industrielle, L'utilisation des VFD va permettre de contrôler l'accélération d'un moteur asynchrone pendant la période de démarrage, en contrôlant la fréquence.

A cet effet, nous avons inséré ces VFD en série avec l'alimentation des moteurs incorporés dans les machines de production des différents ateliers, tels que montré dans la figure IV.13.

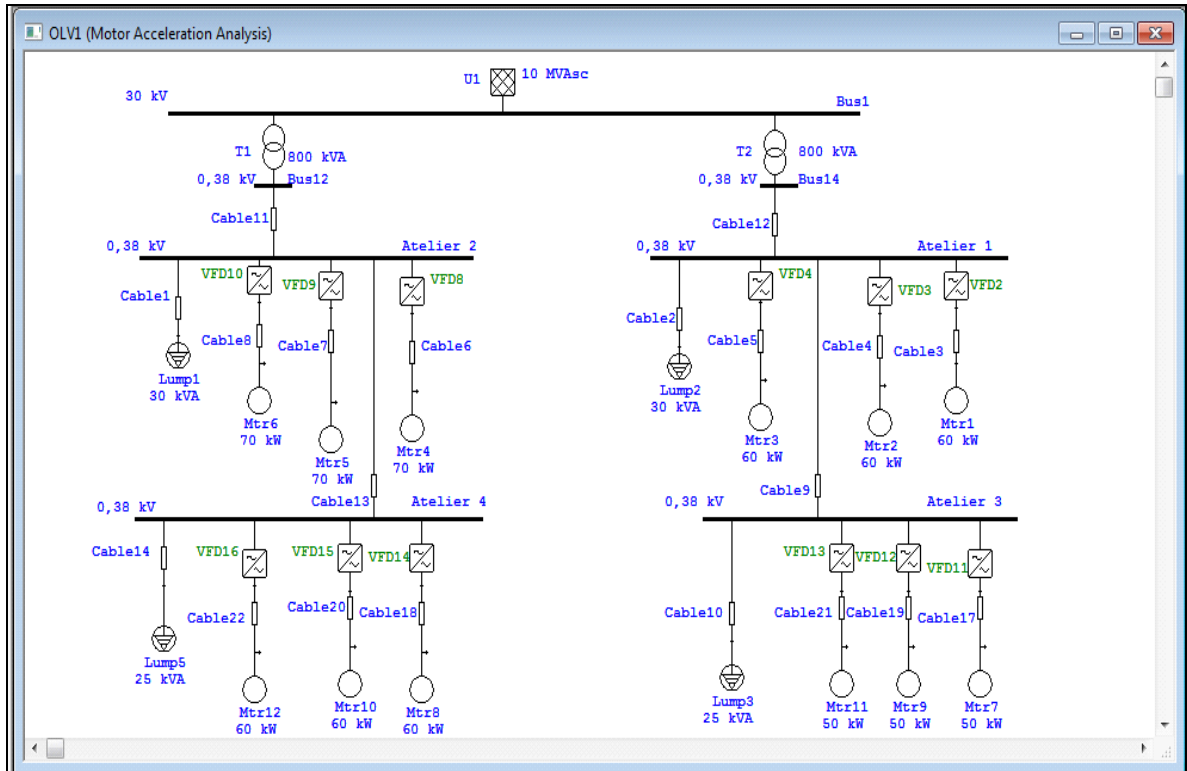


Figure IV. 14 : L'insertion des VFD dans le réseau électrique industriel

Nous avons procédé au réglage de ces VFD, en commençant par le réglage la puissance et la tension d'alimentation indiqué dans la figure IV.15, suivi par le réglage des fréquences de démarrage comme indique dans la figure IV.16.

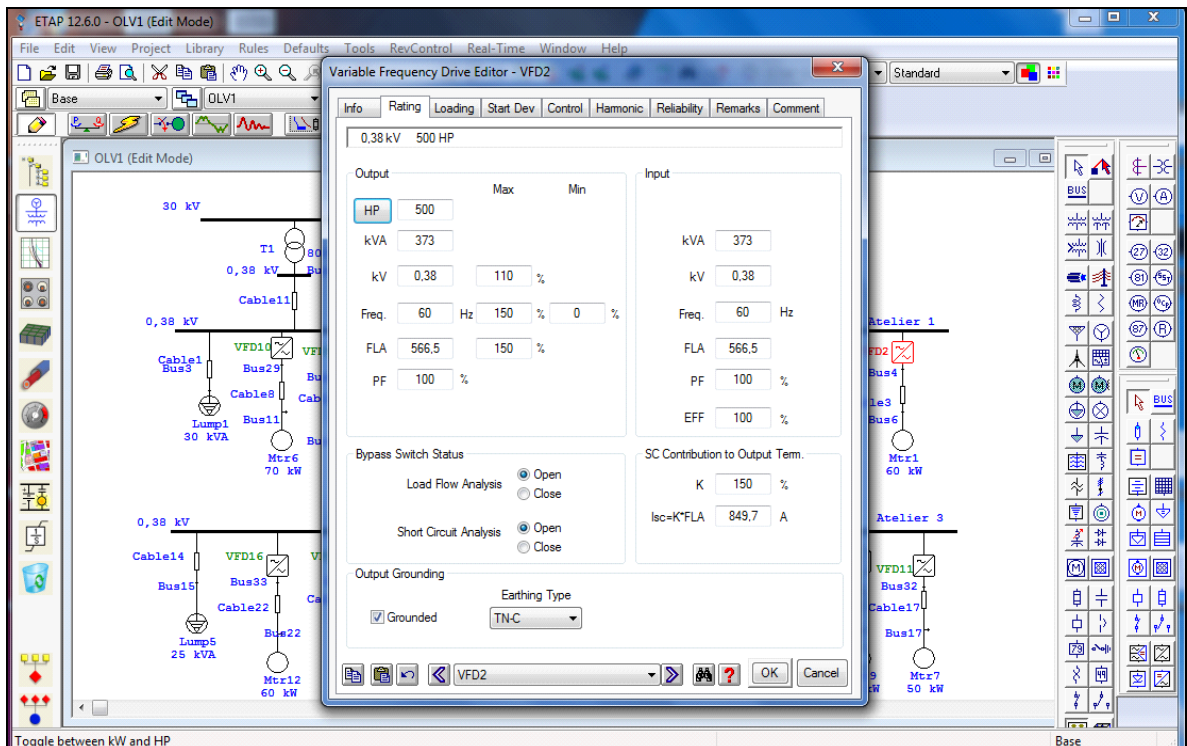


Figure IV. 15 : Le réglage de l'alimentation des VFD

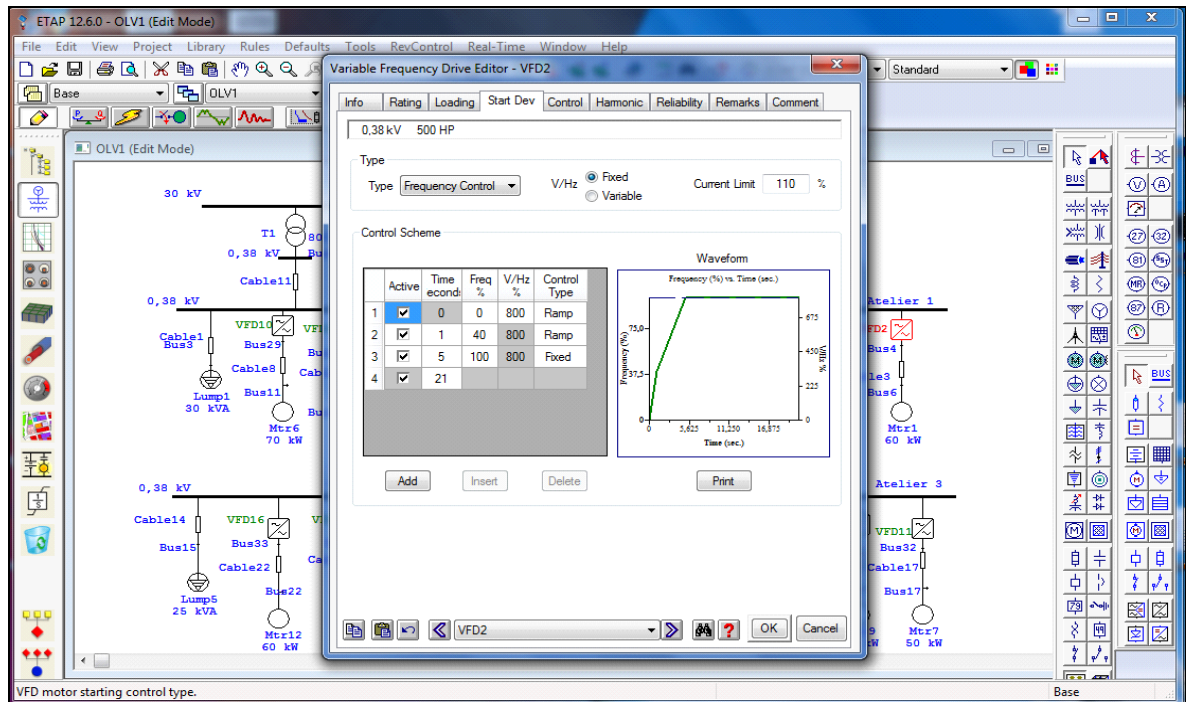


Figure IV. 16 : Le réglage des fréquences de démarrage des VFD

Après ce réglage, nous avons vérifié les niveaux de tension par la simulation de l'écoulement de puissance, on peut voir sur la figure IV.17 que le niveau des tensions est <100% et > 90%, c.-à-d. que le niveau des tensions est acceptable.

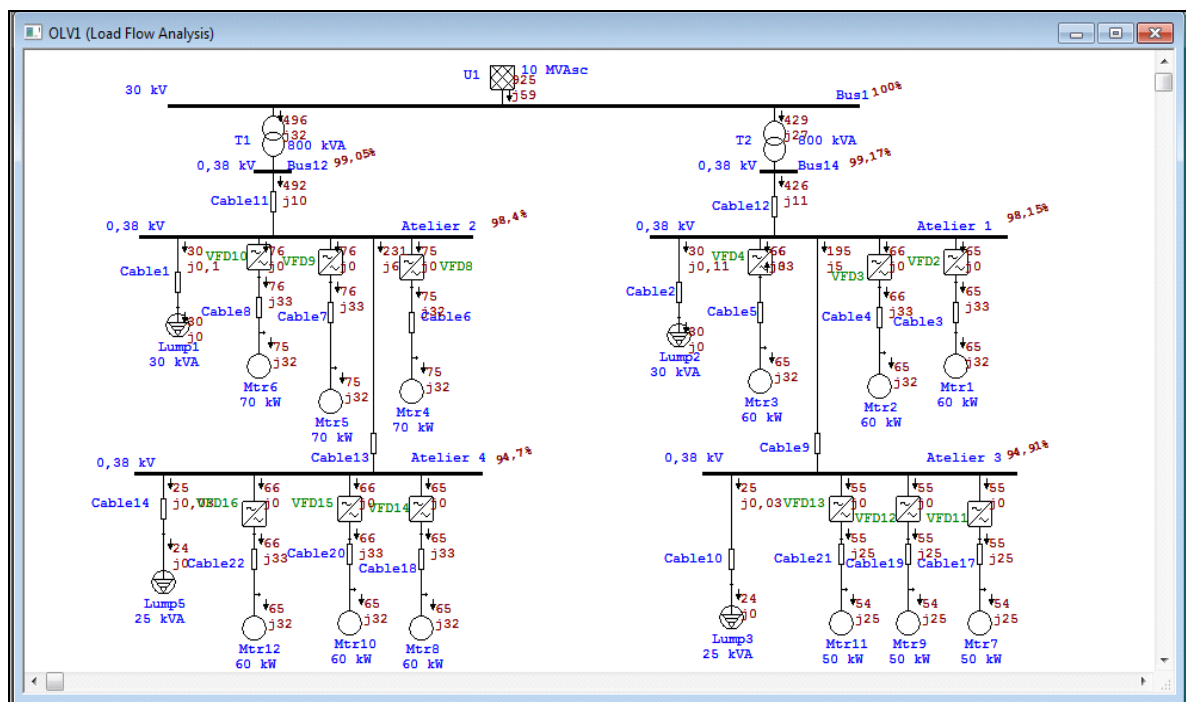


Figure IV. 17 : l'écoulement de puissance après l'insertion des VFD

Après la vérification des niveaux de tension, nous avons lancé la simulation dynamique du démarrage des moteurs avec l'insertion des VFD, les résultats sont mentionnés dans la figure suivante.

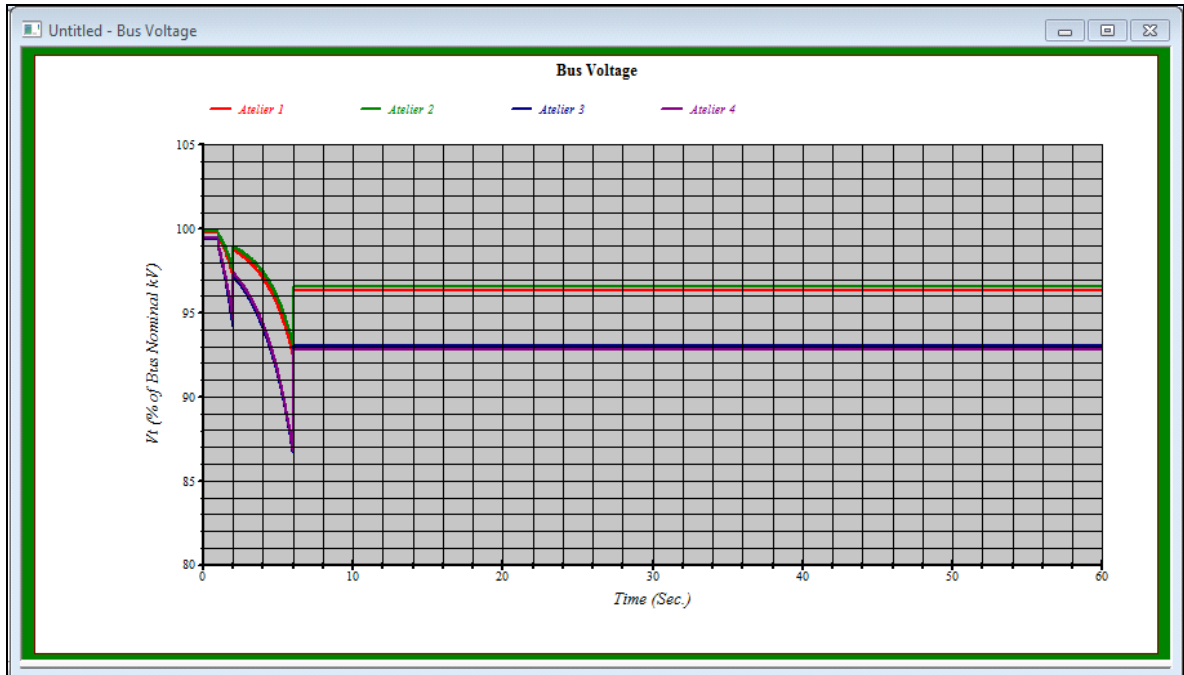


Figure IV. 18 : le niveau de tension après l’insertion des VFD

D’après les résultats de la figure IV.18, on remarque que la tension pendant le démarrage est augmentée à 87%, et après le démarrage c.-à-d. pendant le régime dynamique la tension à une valeur fixe qui est 93%. On remarque aussi que le temps de démarrage est diminué jusqu’à 8 secondes.

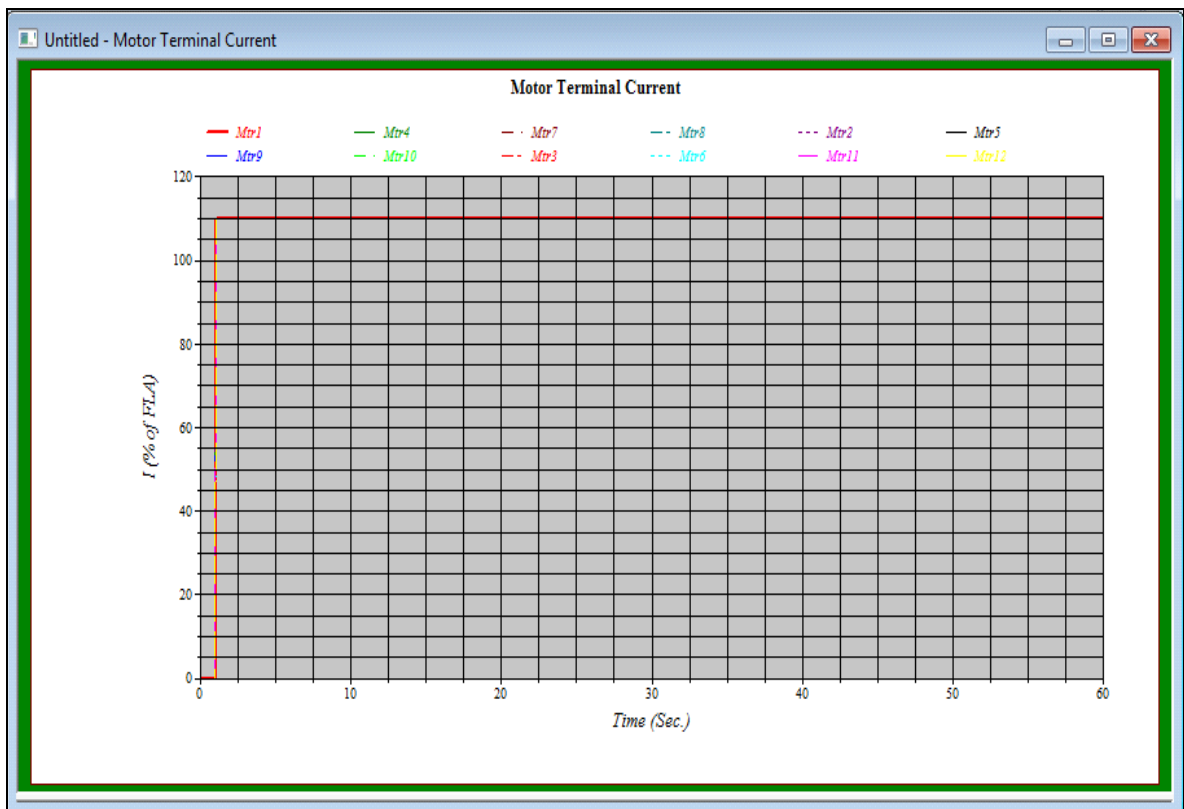


Figure IV. 19 : le courant de démarrage après l’insertion des VFD

Comme on remarque aussi sur la figure IV.19 que le courant de démarrage est diminué jusqu'à 120%, c.-à-d. 1.2 du courant nominal.

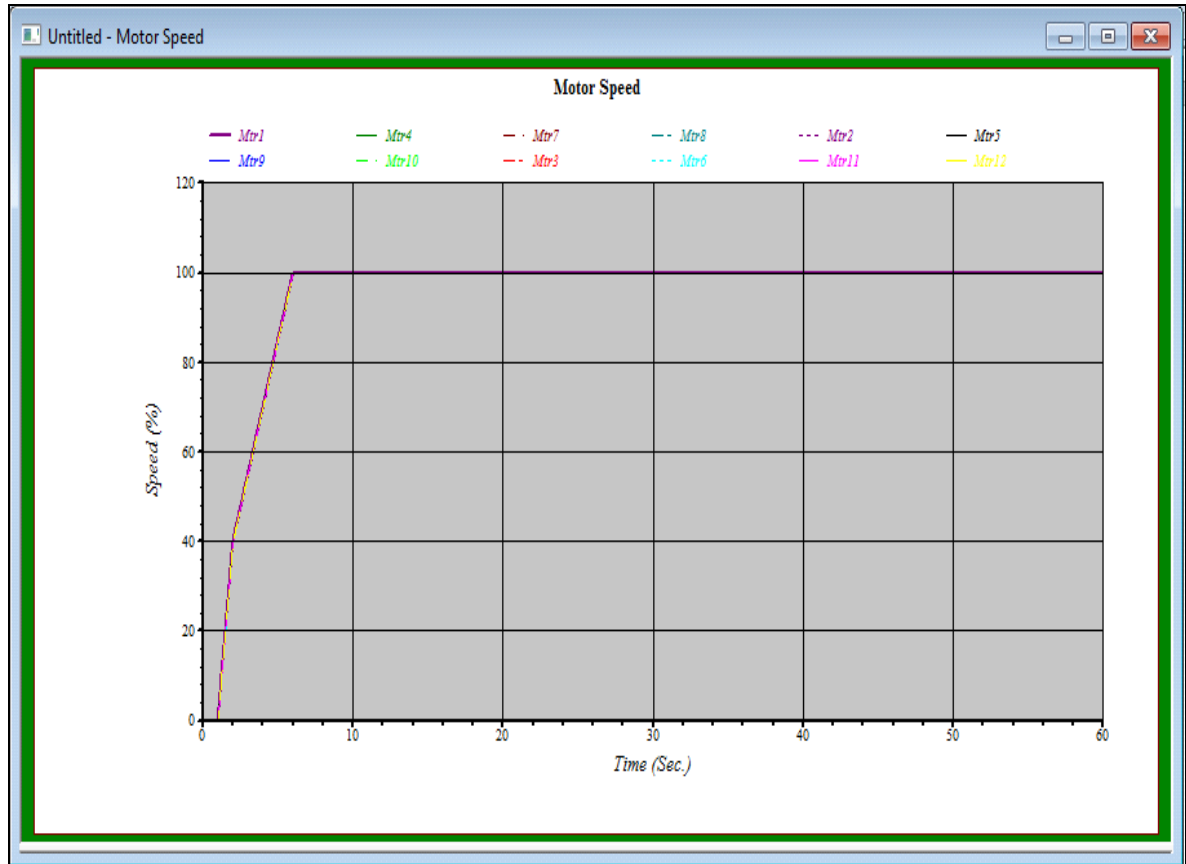


Figure IV. 20 : La vitesse de démarrage après l'insertion des VFD

Le schéma illustre clairement que la vitesse de démarrage a suivi le réglage de la fréquence effectué dans la boîte de réglage des VFD, aussi les moteurs ont pris 8 secondes pour démarrer est atteindre le régime dynamique.

IV.6.3. Décalage du temps de démarrage des moteurs

Dans cette phase, on a essayé de réaliser la simulation de la troisième partie qui est le décalage du temps de démarrage des moteurs dans les différents ateliers. À cet effet, nous avons adopté le réglage suivant, comme indiqué dans la figure IV.21.

On a programmé le démarrage des premiers moteurs de chaque atelier [Mtr1(atelier1),Mtr4(atelier2) ,Mtr7(atelier3) ,Mtr8(atelier4)] à la première seconde, ensuite, on a programmé le démarrage des deuxièmes moteurs de chaque atelier [Mtr2(atelier1),Mtr5(atelier2) ,Mtr9(atelier3) ,Mtr10(atelier4)] à la 10^{ème} seconde, enfin, on a programmé le démarrage les troisièmes moteurs de chaque atelier [Mtr3(atelier1),Mtr6(atelier2) ,Mtr11(atelier3) ,Mtr12(atelier4)] à la 20^{ème} seconde.

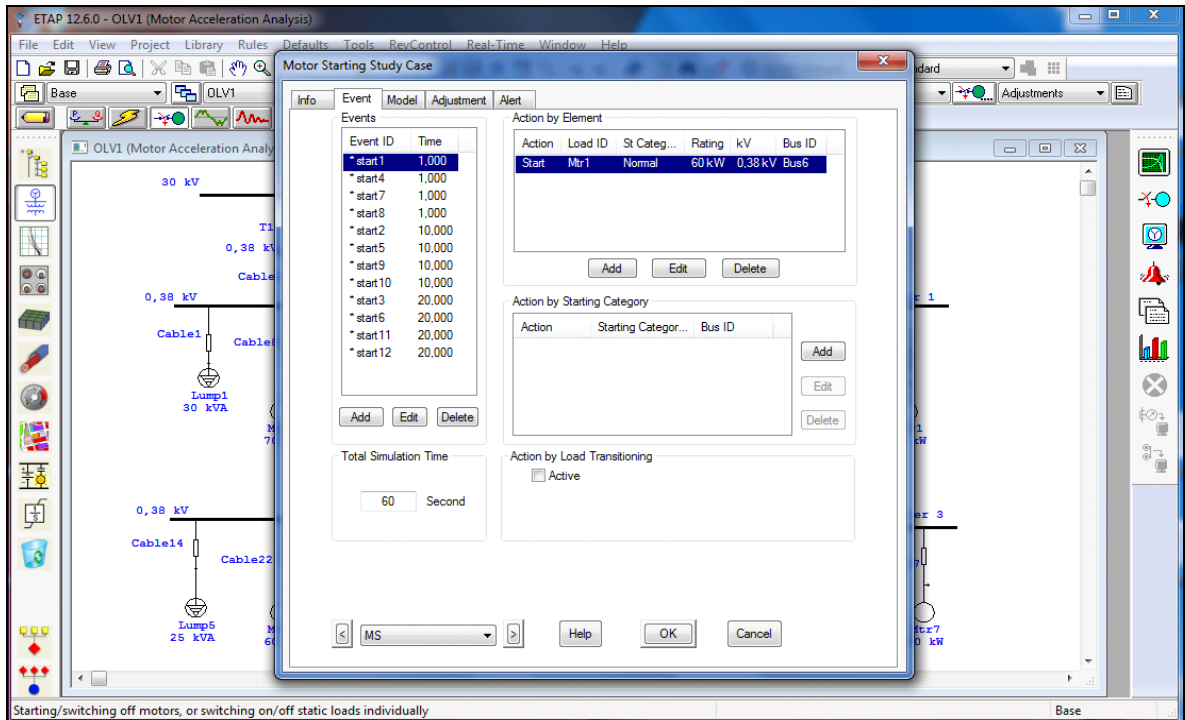


Figure IV. 21: Le réglage du temps de démarrage des moteurs

Après établissement de réglage du temps de démarrage, on a lancé la simulation dynamique de démarrage des moteurs, les résultats obtenus sont présentés dans la figure suivante.

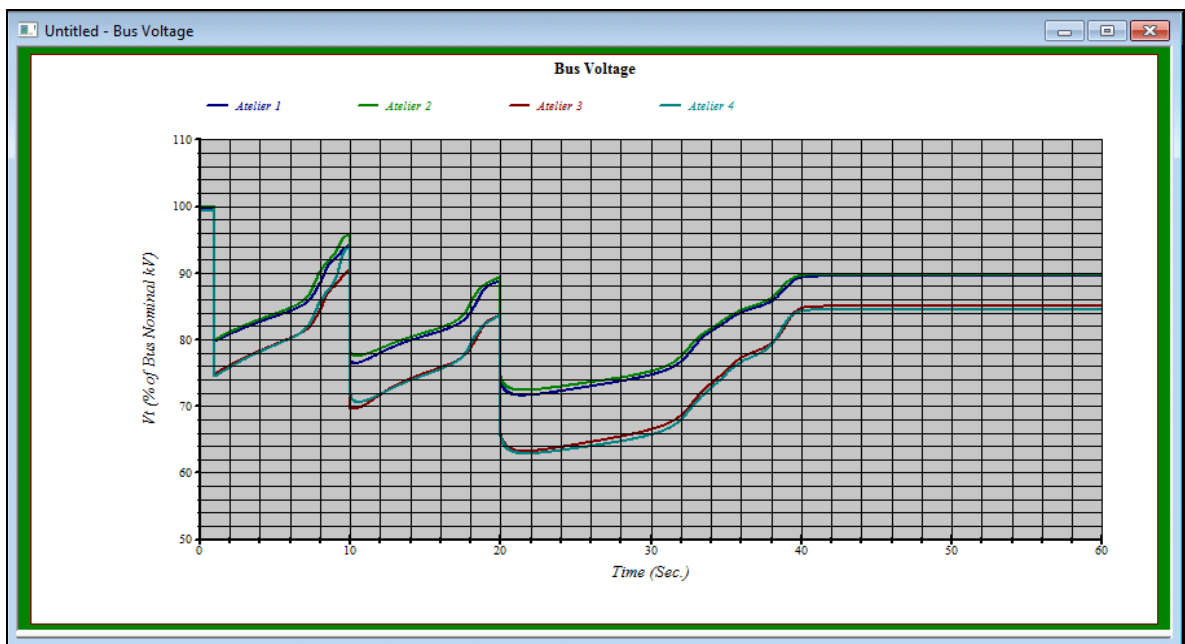


Figure IV. 22: Niveau des tensions après le décalage du temps de démarrage

La figure IV.22 présente le niveau des tensions des différents ateliers, on remarque que la tension est augmenté à 61%, la période du démarrage est diminué à entre 10 et 20 secondes.

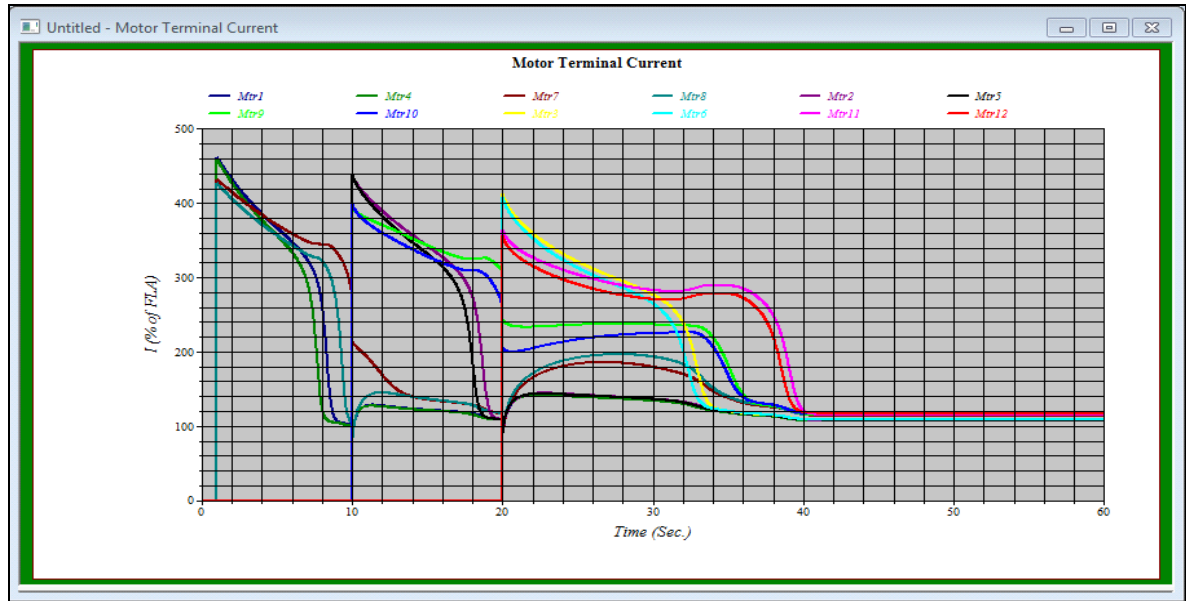


Figure IV. 23: Le courant de démarrage après le décalage du temps de démarrage

Aussi, sur la figure IV.23, on constate que le courant de démarrage est augmenté jusqu'à quatre fois le courant nominal.

IV.7.interprétation de résultat

Tableau IV. 1 : Tableau de comparaison des résultats

	Niveau de la tension pendant le démarrage	Niveau de la tension après le démarrage	Courant de démarrage	Durée de démarrage
Au démarrage normal	Entre 50 et 90%	< 90%	2 à 3.4 In	40 secondes
Avec insertion des batteries de condensateurs	Entre 50 %et 90%	95%	2 à 6,4 In	50secondes
Avec insertion des VFD	>85%	93%>V>97%	1.05 In	6 secondes
Avec le décalage de démarrage des moteurs	>60%	88%>V>93%	2 à 4.5 In	Entre 10 et 20 secondes

Le tableau IV.1 présente la comparaison entre le cas normal sans insertion et les autres cas : avec insertion des batteries condensateurs, insertion des VFD et décalage du temps de démarrage.

D'après les résultats obtenus présentés dans ce tableau, on peut remarquer clairement que l'insertion des VFD donne des bons résultats. Le niveau des tensions pendant le

démarrage est acceptable car il est supérieur à 85%, après le démarrage c.-à-d. pendant le régime permanent le niveau de tension atteint une valeur 97%, c'est une valeur très satisfaisante. Le courant de démarrage arrive jusqu'à une valeur de 1.05 du courant nominal, c'est une valeur très acceptable. On remarque aussi que l'insertion des VFD réduit la durée du démarrage (période transitoire) jusqu'à 6 secondes.

Pour sélectionner et adopter une solution parmi les solutions proposées, deux critères doivent être vérifiés, un critère technique et un critère économique. Techniquement, l'insertion des VFD beaucoup plus meilleurs par rapport aux autres solutions, Tandis que, économiquement, le choix de décalage du temps de démarrage est très convenable.

IV.8.conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par la présentation de notre système qui est composé d'une source d'alimentation 30kV, deux transformateurs abaisseurs 30kV/380V, quatre ateliers de production avec leurs connexion au tableau principal et les différents charges (machines, éclairage ...etc.) constituant chaque atelier.

Nous avons réalisé ce système global dans le logiciel ETAP, avec fixation des paramètres de chaque composant. Nous avons commencé par une première simulation de vérification de l'écoulement de puissance. En plus, la simulation dynamique du démarrage des moteurs est lancée dans une durée de 60 secondes les résultats obtenus montrent que le système pendant le démarrage souffre des problèmes suivants:

- Chute de tension pendant la période du démarrage, et aussi pendant la période dynamique.
- Augmentation du courant de démarrage jusqu'à 3 à 4 fois le courant nominal.
- Durée du démarrage est trop longue.

Pour résoudre ces problèmes nous avons proposé trois solutions, la première consiste à l'insertion des batteries de condensateurs pour la compensation de la puissance réactive et par la suite l'amélioration de la tension, la deuxième solution, l'insertion des variateurs de fréquence pour démarrer les moteurs progressivement. Enfin, la troisième solution, le décalage du temps de démarrage des moteurs électriques.

Les résultats obtenus montrent que la deuxième solution qui est l'insertion des VFDs est performante, car cette solution n'a pas amélioré seulement la tension et diminué le courant de démarrage, mais elle a aussi diminué la période de démarrage.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude était axée et accentuée sur l'étude de l'impact du démarrage des moteurs électriques sur le réseau électrique industriel.

L'objectif de ce travail est la contribution au démarrage des moteurs électriques utilisés dans le domaine industriel.

La croissance de la demande à l'utilisation des moteurs électriques, a été toujours en évolution et une nécessité permanente des industriels, qui rencontre souvent en face des problèmes liés à l'exploitation et l'utilisation de ces moteurs, d'une part.

D'autre part l'impact de démarrage de ces moteurs sur la qualité du réseau électrique industriel, tels que la qualité de la tension, l'augmentation du courant de démarrage et la durée de la période de démarrage.

Ces raisons ont incité les industriels à trouver une autre solution à ces problèmes de démarrage qui est l'utilisation des variateurs de vitesses.

Dans ce sens, dans notre travail, nous avons pu montrer ces différents problèmes en utilisant un outil de simulation performant qui est ETAP 12.6.

Une autre simulation a été réalisée pour faire une étude comparative entre les trois solutions proposées pour la résolution des problèmes de démarrage. Qui sont, l'utilisation des batteries de condensateurs pour la compensation de la puissance réactive, et par la suite l'amélioration de la tension, l'insertion des VFD pour assurer un démarrage progressive des moteurs électriques. Enfin, la troisième solution proposée qui est le décalage du temps de démarrage des moteurs électrique.

Ce travail, nous a permet de justifier le choix d'une solution qui est l'insertion des VFD, car cette solution donne des bonnes résultats, l'amélioration de la qualité de la tension pendant et après la période de démarrage. La diminution du courant de démarrage jusqu'à des valeurs admissibles pour ne pas chauffer le moteur. Enfin, réduire le temps démarrage pour ne pas perturber la stabilité du réseau électrique industriel.

En perspective, nous proposons de compléter et d'approfondir cette recherche par l'intégration des dispositifs dynamiques de compensation de la puissance réactive tels que les FACTS (STATCOM ou SVC). Faire une étude détaillée sur le décalage du tems de démarrage de chaque moteur des différents ateliers.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] <http://eskimon.fr/285-arduino-601-le-moteur-courant-continu.consulter>
le:**25/05/2020**.
- [2] Hammachi Oualid, Chaabana Salah, « Etude expérimental de quelques variateur de vitesse d'un moteur asynchrone » Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa ,**2018**.
- [3] <http://elec-ing.blogspot.fr/2015/08/machine-courant-continu.html.consulter>
le:**26/05/2020**.
- [4] [http://energiein.e-monsite.com/pages/55-moteur-a-aimant-permanent.html](http://energiein.e-monsite.com/pages/55-moteur-a-aimant-permanent.html.consulter)
.consulter le:**25/05/2020**.
- [5] Mikhail Kostenko, Ludvik Piotrovski, Machines électriques, Tome I, « Machines à courant continu, transformateurs », Éditions de Moscou (MIR), **1979**.
- [6] Laamayad Tahar, « Commande Optimale d'une Machine asynchrone Apport de La Logique Floue » mémoire Magister, Université EL- Hadj Lakhdar de Batna ,**2008**.
- [7] Adel Merabet, « Commande non linéaire à modèle prédictif pour une machine asynchrone » These du doctoat, Université de Québec,**2007**.
- [8] K. Sabour, S. Elazazi, « Commande vectorielle da la machine asynchrone à double alimentation » mémoire master, université Akli Mohaned Oulhadj de Bouira, **2015**.
- [9] E. Gaucheron, «Les moteurs électriques... pour mieux les piloter et les protéger», <http://www.schneider-electric.com>,**04/2020**.
- [10] Djedouani. Belal, Ouldamed. haiba, mohamed.lemine, «Développement d'un Banc d'essai pour l'étude est le diagnostic des moteurs à pas Hybrides»mémoire master, université Larbi Tébessi de Tébessa ,**2016**.
- [11] Marlin O. Thurston,' energy-efficient electric motors', electrical and computer engineering A Series of Reference Books and Textbooks, The Ohio State University Columbus, Ohio, USA, **2005**.
- [12] Austin Hughes, Bill Drury,' Electric motors and drives', Published by Elsevier Ltd, **2013**.
- [13] Antoincappelleredaction@industrie-technologies.com, 'Choisir un moteur électrique', consulter le: **01/05/2020**.
- [14] Bien choisir un moteur électrique disponible en ligne:

<http://guide.directindustry.com/fr/bien-choisir-un-moteur-electrique/>,
consulter le: **25/04/2020**.

- [15] 'Sélection et utilisation des moteurs électriques efficaces à la ferme', Guide pratique, l'Institut de technologie agroalimentaire de La Pocatière., Hydro-Québec, Canada, **2004**.
- [16] <https://www.cours-gratuit.com/cours-electricite/les-machines-electriques-cours-complet>, consulter le: **7/2020**.
- [17] Leroy Somer, Brochure technique « Moteurs asynchrones triphasés fermés, extraction du fumé ». **2001**.
- [18] Tabta Jugurta, Mansouri Azze-ddine « Substitution d'une variation de vitesse mécanique par une variation de vitesse électrique », mémoire de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, **2013**.
- [19] <http://guide.directindustry.com/fr/bien-choisir-un-moteur-electrique/> consulter le: **25/05/2020**.
- [20] Adel Said, Yassine Jemai (Installations Industrielles) Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Nabeul, **2014**.
- [21] <https://fr.scribd.com/doc/260415307/Differents-Modes-de-Demarrage-Des-Moteurs-Asynchrones-Triphase>. consulter le: **25/06/2020**.
- [22] Mutrel, Luc, le moteur asynchrone régimes statique et dynamique. 32, rue bargue 75740 paris cedex 15 : Ellipses Edition Marketing S.A, **1999**.
- [23] Physique appliquée, terminale génie électrotechnique - Delva, Leclercq, Trannoy – édition Hachette éducation **1994**.
- [24] www.e-catalogue.schneider-electric.fr. consulter le: **26/06/2020**.
- [25] Le démarrage direct (<https://www.technic-achat.com/boitier-de-demarrage-moteur,fr,3,84.c>). consulter le: **26/06/2020**.
- [26] Boudjlat Walid, Himoura Abedelkader, étude et simulation d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension à commande MLI, mémoire de master, Université Badji Mokhtar-Annaba, **2017**.
- [27] Dienta Oumou Koultoum et Traore Aboubacar, Etude et simulation d'un poste HT/MT par le logiciel ETAP, mémoire de master en génie électrique, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, **2019**
- [28] J. P. Caron et J.P. Hautier, "Modélisation et commande de la machine asynchrone". Editions Technip, Paris, **1995**.

Résumé

L'utilisation des moteurs électriques dans le domaine industriel est devenue de plus en plus importante, notamment avec le développement de l'électronique de puissance. Cependant, l'utilisation de ces moteurs pose de nombreux problèmes, parmi lesquels des problèmes de démarrage.

Notre travail se focalise sur l'étude de l'impact du démarrage des moteurs électriques sur la qualité du réseau électrique industriel, tels que les chutes de tension pendant et après le démarrage, l'augmentation du courant de démarrage jusqu'à des valeurs exorbitantes, la durée du démarrage qui devient trop longue. En outre, proposer et des solutions pour ces problèmes, comme la compensation de la puissance réactive, l'insertion des VFD et le décalage du temps de démarrage. En fin, faire une étude comparative entre ces différentes solutions, afin de justifier le choix qui est l'insertion des VFD.

Mots clés : démarrage des moteurs électriques, qualité du réseau, compensation, VFD, décalage du temps de démarrage;

Abstract

The use of electric motors in the industrial sector has become increasingly important, especially with the development of power electronics. However, the use of these engines poses many problems, including start-up problems .

Our work focuses on the study of the impact of the start-up of electric motors on the quality of the industrial electricity grid, such as voltage drops during and after start-up, increasing the start-up current to exorbitant values, the start-up time becoming too long. In addition, propose and solutions for these problems, such as offsetting reactive power, insertion of VFD and lag in start-up time. In the end, do a comparative study between these different solutions, in order to justify the choice that is the insertion of VFD .

Keywords: electric motors start-up, network quality, compensation, VFD, start-up time lag.

ملخص

أصبح استخدام المحركات الكهربائية في القطاع الصناعي متزايد الأهمية، خاصة مع تطوير إلكترونيات الطاقة. ومع ذلك، فإن استخدام هذه المحركات يطرح العديد من المشاكل، بما في ذلك مشاكل بدء التشغيل .

يركز عملنا على دراسة تأثير بدء تشغيل المحركات الكهربائية على جودة شبكة الكهرباء الصناعية، مثل انخفاض الجهد أثناء وبعد بدء التشغيل، وزيادة تيار البدء إلى القيم الباهظة، حيث أن وقت البدء أصبح طويلًا جدًا. وبالإضافة إلى ذلك، إقتراح حلول لهذه المشاكل، مثل تعويض القدرة التفاعلية، وإدخال VFD وتأخر في وقت بدء التشغيل. في النهاية، قمنا بدراسة مقارنة بين هذه

الحلول المختلفة، من أجل تبرير الخيار الذي هو إدراج VFD.

الكلمات المفتاحية : بدء تشغيل المحركات الكهربائية , جودة الشبكة, التعويض, VFD , فارق بدء الفترة الزمنية.