

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAND AKLI OULHADJ DE BOUIRA  
FACULTE DE SCIENCES DE TECHNOLOGIES



# MEMOIRE

**Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master**

**Réalisé par :**

- **FERGANI Okba**
- **MEZIANE Abdallah**

**Thème**

**Démarrage étoile-triangle d'un moteur asynchrone triphasé à deux sens de rotation avec un système de freinage par injection de courant continu**

Le : 27/12/2020

**Devant le jury composé de :**

**Président : Pr. BENSAID Samir**

**Examineur : Dr. AMEZIANE Sadek**

**Encadreur : Dr. AIT ABBAS Hamou**

Année Universitaire : 2019/2020

## Remerciements

Nous tenons à exprimer, en premier lieu, nos plus vifs remerciements et gratitude à notre encadreur Dr.AIT ABBAS Hamou de nous avoir proposé le sujet, pour son attention, son implication et son entière disponibilité, ainsi que ses précieux conseils.

Nous remercions également nos familles pour leurs conseils et encouragements.

Nous saisissons cette occasion pour remercier les enseignants de la faculté des sciences et de technologies de l'université Mohand AkliOulhadj de Bouira

Et enfin, nous remercions tous nos amis sans les nommer car ils se reconnaîtront eux-mêmes.

# SOMMAIRE

<b>Introduction Générale</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITER (I) : Etat de l'art sur le démarrage et de freinage du MAS</b>	
<b>Introduction</b> .....	<b>3</b>
1) Moteur asynchrone .....	3
1.1) Principe .....	3
1.2) Composition.....	3
1.3) Principe de fonctionnement.....	4
1.4) Caractéristiques mécanique.....	5
1.5) Schéma équivalent monophasé.....	5
1.6) Bilan de puissance.....	8
2) Démarrage de moteur asynchrone.....	8
2.1) Phénomène de démarrage.....	8
2.2) Procédure de démarrage .....	8
2.2.a) Démarrage direct.....	8
2.2.b) Technique de démarrage avec limitation de courant .....	9
1) Démarrage étoile triangle .....	10
2) Démarrage par élimination de résistance statorique .....	11
3) Démarrage par élimination de résistance rotorique .....	11
4) Démarrage électronique .....	12
4.1) Variateur de vitesse .....	12
4.2) Les avantages et les inconvénients .....	14
4.2.1) Avantages .....	14
4.2.2) Inconvénients .....	14
4.2.3) Principe de fonctionnement.....	15
3) Freinage de moteur .....	17
3.1) Freinage par contre courant.....	17
3.2) Freinage par injection de courant continue .....	17
<b>Conclusion</b> .....	<b>18</b>
<b>CHAPITER (II) : Démarrage étoile-triangle et freinage par injection de courant continue</b>	
<b>Introduction</b> .....	<b>19</b>
1) Démarrage étoile triangle.....	19
1.1) Principe .....	19
1.2) Caractéristiques.....	19
1.3) Schéma de fonctionnement par logiciel CADe-SIMU .....	20
1.4) Appareillages utilisé.....	21
a) Appareillages de sécurité .....	21
a.1) Disjoncteur .....	21
a.2) Relais thermique .....	27
b) Appareillages de commande .....	28
b.1) Contacteur.....	28
2) Freinage par injection de courant continue .....	29
2.1) Principe.....	29
2.2) Caractéristiques .....	29
2.3) Schéma de fonctionnement par logicielCADe-SIMU.....	29
2.4) Redresseur triphasé .....	30
2.4.a) Circuit et fonctionnement.....	30
2.4.b) Prospérité de tension de redresseur triphasé.....	31
<b>Conclusion</b> .....	<b>32</b>
<b>CHAPITER (III) : Etude, Simulation et réalisation</b>	
<b>Introduction</b> .....	<b>33</b>
1) Simulation via logiciel Schémaplic .....	33

1.1) Démarrage étoile sens 1.....	33
1.1.a) Circuit de puissance.....	33
1.1.b) Circuit de commande.....	34
1.2) Démarrage triangle sens 1.....	34
1.2.a) Circuit de puissance.....	34
1.2.b) Circuit de commande.....	35
1.3) Démarrage étoile sens 2.....	35
1.3.a) Circuit de puissance .....	35
1.3.b) Circuit de commande.....	36
1.4) Démarrage triangle sens 2.....	36
1.4.a) Circuit de puissance.....	36
1.4.b) Circuit de commande.....	37
1.5) Démarrage direct avec injection de CC.....	37
1.5.a) Démarrage direct circuit de puissance.....	37
1.5.b) Démarrage direct circuit de commande.....	38
1.5.c) Circuit de puissance mode freinage.....	38
1.5.d) Circuit de commande mode freinage .....	39
2) Simulation de circuit par MATLAB.....	39
2.1) Simulation des éléments du système.....	39
2.2) Modèle de disjoncteur.....	39
2.3) Modèle du contacteur.....	40
2.4) Modèle de relais thermique.....	41
2.5) Modèle de circuit de démarrage étoile triangle .....	42
2.6) Les résultats de simulation.....	42
2.6.a) Le courant appliqué.....	42
2.6.b) la puissance.....	43
2.7) Simulation de circuit de freinage par injection de courant continue.....	43
2.8) Les résultats.....	44
2.8.a) Le courant.....	44
2.8.b) Le couple .....	44
3) Etude pratique et Choix des matériaux.....	45
3.1) Caractéristiques des récepteurs .....	45
3.1.a) Moteur de démarrage direct avec freinage .....	45
3.1.b) Moteur de démarrage étoile triangle.....	45
3.2) Choix des appareillages.....	46
3.2.1) Choix des appareillages de protection.....	46
3.2.1.a) Caractéristiques de choix de disjoncteur. ....	46
3.2.1.b) Caractéristiques de choix d'un relais thermique.....	46
3.2.2) Choix d'appareillages de commande.....	47
3.2.2.a) Choix de contacteur .....	47
3.3) Choix des files .....	47
3.4) Caractéristiques des appareillages utilisé.....	48
3.4.1) Contacteur .....	48
3.4.2) Temporisateur.....	49
<b>Conclusion</b> .....	49
<b>Conclusion Général</b> .....	50

# Liste d'abréviation

**C<sub>em</sub>**: couple électromagnétique  
**C<sub>n</sub>**: couple direct  
**Cos( $\alpha$ )**: facteur de puissance  
**C<sub>u</sub>**: couple utile  
**C<sub>y</sub>**: couple en étoile  
**C <sub>$\Delta$</sub>** : couple triangle  
**f**: fréquence  
**F**: relais thermique  
**f**: coefficient de frottement  
**g**: glissement  
**I<sub>n</sub>**: courant direct  
**I<sub>y</sub>**: courant en étoile  
**I <sub>$\Delta$</sub>** : courant triangle  
**J1**: courant statorique  
**J2**: courant rotorique  
**KM**: contacteur  
**l1**: inductance d'un enroulement statorique  
**l2**: inductance d'un enroulement rotorique  
**m**: rapport de transformation  
**M**: moteur triphasé  
**n**: la vitesse de rotation en (tr/min)  
**ns**: la vitesse de rotation synchronise en (tr/min)  
**p**: nombre de paire de pole  
**P<sub>fr</sub>**: perte fer rotorique  
**P<sub>fs</sub>**: perte fer statorique  
**P<sub>mec</sub>**: perte mécanique  
**P<sub>jr</sub>**: perte joule rotorique  
**P<sub>js</sub>**: perte joule statorique  
**Q**: sectionneur fusible  
**R<sub>m</sub>**: résistance de perte fer de circuit magnétique  
**R1**: résistance d'un enroulement statorique  
**R2**: résistance d'un enroulement rotorique  
**U**: tension composé de réseau  
**V**: tension simple de réseau  
**X<sub>m</sub>**: réactance du circuit magnétique  
 **$\Omega_s$** : la vitesse de rotation synchronise en (rad/s)  
 **$\Omega$** : la vitesse de rotation en (rad/s)

# Liste des Figures

- Figure (1)** : stator de moteur asynchrone
- Figure (2)** : rotor à cage
- Figure (3)** : rotor bobiné
- Figure (4)** : graphe de couple en fonction de la vitesse
- Figure (5)** : alimentation de MAS
- Figure (6)** : schéma équivalent monophasé d'un MAS
- Figure (7)** : schéma équivalent ramené au stator
- Figure (8)** : bilan de puissance
- Figure (9)** : démarrage direct d'un moteur électrique
- Figure (10)** : couplage étoile triangle
- Figure (11)** : schéma d'un démarrage étoile triangle
- Figure (12)** : démarrage par élimination d'une résistance rotorique
- Figure (13)** : variateur de vitesse type ATS
- Figure (14)** : variateur de vitesse d'un moteur asynchrone
- Figure (15)** : schéma explicatif de fonctionnement d'un variateur
- Figure (16)** : schéma d'un variateur de vitesse triphasé
- Figure (17)** : schéma de construction d'un variateur de vitesse
- Figure (18)** : freinage par contre-courant
- Figure (19)** : schéma de freinage par injection de courant continue
- Figure (20)** : caractéristique de démarrage étoile triangle
- Figure (21)** : circuit d'un démarrage étoile triangle
- Figure (22)** : disjoncteur magnétothermique
- Figure (23)** : fonctionnement magnétique de disjoncteur
- Figure (24)** : fonctionnement thermique de disjoncteur
- Figure (25)** : chambre d'extension d'arc électrique
- Figure (26)** : disjoncteur divisionnaire
- Figure (27)** : disjoncteur magnétothermique
- Figure (28)** : disjoncteur chassies métallique
- Figure (29)** : disjoncteur MT
- Figure (30)** : disjoncteur HT
- Figure (31)** : courbe de déclenchement de disjoncteur
- Figure (32)** : relais thermique
- Figure (33)** : symbole d'un relais thermique
- Figure (34)** : schéma explicatif d'un relais thermique
- Figure (35)** : contacteur de puissance
- Figure (36)** : symbole d'un contacteur
- Figure (37)** : schéma de freinage par injection d'un courant continue
- Figure (38)** : redresseur triphasé

**Figure (39)** : schéma d'un redresseur triphasé

**Figure (40)** : graphe des commandes et des tensions de redresseur

**Figure (41)** : graphe explicatif de tension de redresseur

**Figure (42)** : simulation de circuit de puissance de démarrage étoile 1<sup>er</sup> sens

**Figure (43)** : simulation de circuit de commande de démarrage étoile 1<sup>er</sup> sens

**Figure (44)** : simulation de circuit puissance fonctionnement en triangle 1<sup>er</sup> sens

**Figure (45)** : simulation de circuit commande fonctionnement en triangle 1<sup>er</sup> sens

**Figure (46)** : simulation de circuit puissance de démarrage étoile 2<sup>eme</sup> sens

**Figure (47)** : simulation de circuit de commande démarrage étoile 2<sup>eme</sup> sens

**Figure (48)** : simulation de circuit de puissance fonctionnement triangle 2<sup>eme</sup> sens

**Figure (49)** : simulation de circuit de commande fonctionnement triangle 2<sup>eme</sup> sens

**Figure (50)** : simulation de circuit de puissance sans freinage

**Figure (51)** : simulation de circuit de commande sans freinage

**Figure (52)** : simulation circuit puissance avec freinage de moteur

**Figure (53)** : simulation circuit de commande avec freinage de moteur

**Figure (54)** : simulation d'un disjoncteur par matlab

**Figure (55)** : simulation d'un contacteur par matlab

**Figure (56)** : simulation d'un relais thermique par matlab

**Figure (57)** : simulation d'un démarrage étoile triangle par matlab

**Figure (58)** : résultats de courant de démarrage étoile triangle

**Figure (59)** : puissance active dans démarrage étoile triangle

**Figure (60)** : simulation de freinage par injection de courant continue par matlab

**Figure (61)** : résultats de courant

**Figure (62)** : résultats de couple

**Figure (63)** : plaque signalétique d'un moteur asynchrone

**Figure (64)** : plaque signalétique d'un moteur à 6 bornes

**Figure (65)** : relais thermique des classe 20 A et 10A

**Figure (66)** : contacteur de puissance





**Résumé :**

Les moteurs asynchrones (MAS) triphasé représentent les moteurs plus utilisés dans le domaine industriel pour leur robustesse et leur facilité de conception. Ils sont composés de deux parties importantes, une partie fixe qui est le stator et une partie mobile qui est le rotor. Plusieurs types de démarrage ont été développés dans le but de protéger le moteur et limiter les appels de courant pour éviter les chutes de tension. Nous trouvons le démarrage direct, le démarrage par élimination de résistance, le démarrage étoile- triangle ...etc.

Dans la plupart des cas, nous trouvons ce dernier qui est le couplage étoile-triangle pour les moteurs asynchrones à six bornes. Le moteur démarre dans le sens inverse si deux phases sont inversés. Pour le freinage il existe aussi différents types comme le freinage par injection du courant continue. Dans ce rapport, nous avons détaillé la composition et le fonctionnement du moteur asynchrone (MAS) triphasé, le démarrage étoile-triangle à deux sens et le freinage par injection du courant continue.

**Mots clés :** Moteurs asynchrones, Stator, Rotor, Démarrage étoile-triangle, MAS à six bornes.

**Abstract :**

Three-phases asynchronous motors (MAS) represent most of the motors used in the industry because of their robustness and design. They are composed by two important parts, a fixed part which is the stator and a rotating part which is the rotor. To protect the motor and limit current in rushes to avoid voltage drops, several types of motor starting have been developed like the direct starting, the starting by resistance elimination and the star-delta starting... etc. In most cases, the star-delta coupling is used in six terminal asynchronous motors. The motor starts in the opposite direction if two phases are reversed. There are also different types of braking, such as direct current power injection braking. In this report, we have detailed the composition and the principle of functioning of three-phase asynchronous motors (MAS), two- ways star-delta starting and direct current power injection braking.

**Key words :** asynchronous motor, Stator, Rotor, star-delta starting

## Introduction générale :

Dans le domaine industriel les moteurs représentent le noyau de chaque installation industrielle. Dans ce domaine, les moteurs asynchrones représentent les moteurs le plus utilisés dans l'industrie vu leurs caractéristiques, néanmoins, l'inconvénient de mode de démarrage dont le courant est dix fois plus le courant nominal peut causer des problèmes dangereux comme les court-circuit, l'échauffement ..etc., et par conséquent le moteur peut être endommagé.

Dans ce contexte, l'auteur de travail [1] clarifie les risques de moteur lors de démarrage.

Ainsi, une étude bien détaillée a été fournie par [4] dont il explique clairement que ce démarrage de moteur a été associé avec des influences négatives sur toute l'installation

Pour cela, des techniques de démarrage étaient associées pour assurer un bon démarrage sans augmentation brusque de courant ; parmi ces techniques y a le démarrage étoile triangle qu'est un type de démarrage fréquemment utiliser à cause de son efficacité et sa simple installation.

Ainsi, le freinage des moteurs asynchrones est aussi un phénomène qui demande des techniques et des installations pour assurer un freinage souple et sans problème comme dans le cas de démarrage dans le sens inverse, échauffement...etc., ce point est très bien détaillé par l'auteur de travail [3] dont il explique la nécessité de procéder à l'utilisation de freinage.

## Objectif :

On se focalisera dans notre étude à détailler le démarrage étoile-triangle à deux sens de rotation d'une machine asynchrone avec un circuit de freinage par injection de courant continue, leurs caractéristiques, leurs avantages, leurs inconvénients, les machines qui utilisent ces techniques avec des solutions permettant d'améliorer ce circuit.

## Structure de mémoire :

Le reste du manuscrit est structuré comme suit :

- ✓ Dans le 1<sup>er</sup> chapitre on présentera en générale les caractéristiques des moteurs asynchrones, leur principe de fonctionnement, leurs caractéristiques eux-mêmes avec les techniques de démarrage utilisées, ainsi que les avantages et les inconvénients de chacune, et bien sûr avec les techniques de freinage.
- ✓ Dans le 2<sup>ème</sup> chapitre, on entamera en détail le démarrage étoile-triangle à deux sens avec un freinage par injection de courant continue, dont on exposera même la partie hard de notre réalisation.
- ✓ Dans le 3<sup>ème</sup> chapitre, on présentera les résultats de simulation de circuit par logiciel de Simulation Schemaplic, avec le choix des matériels utilisés pour la réalisation du circuit ainsi que leurs caractéristiques.
- ✓ L'étude sera clôturée par une conclusion générale dont on présentera un aperçu des taches réalisées ainsi que les perspectives.

# Chapitre (I) : Etat de l'art sur le démarrage et le freinage du MAS

## Introduction :

Le démarrage d'un moteur électrique est associé à une augmentation du courant et de couple énorme. Cela peut causer des problèmes et dans certain cas des défauts comme le court-circuit et les surcharges peuvent apparaître.

Afin d'éviter ces problèmes, plusieurs techniques sont étudiées pour assurer un démarrage sécurisé des moteurs et équipements. Le fonctionnement sain du freinage d'un moteur électrique est bien défini et très important pour de nombreuses activités industrielles pour garantir plus de sécurité et de fiabilité.

Dans ce chapitre, on détaillera les techniques de démarrage et de freinage utilisés dans le domaine industriel pour un moteur asynchrone.

## 1) Moteur asynchrone :

### 1.1) **Principe :**

Le moteur asynchrone triphasé est un convertisseur électromécanique qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique de rotation. Il est très souvent utilisé dans le domaine industriel. Il représente plus des moteurs utilisés et il est connu par sa robustesse et sa facilité de conception.

### 1.2) **Composition :**

Le moteur asynchrone triphasé est constitué en générale de deux parties principales :

#### a) **Stator :**

C'est la partie fixe du moteur. Elle est composée par un ensemble de bobinage enrôlé sur un circuit magnétique feuilleté, l'ensemble est constitué de trois bobinages décalés spatialement par 120 degrés. Ces derniers génèrent un champ magnétique tournant à base du théorème de Ferrare en présence d'un courant électrique[1]



Figure (1) : stator de moteur asynchrone [1]

#### b) **Rotor :**

C'est la partie mobile ou bien la partie tournante. On distingue deux types de rotors [1]:

## Chapitre (I) : Etat de l'art sur le démarrage et le freinage du MAS

### b-1) Rotor à cage d'écureuil :

Il est constitué des bars en aluminium renforcés sur une cage en métal noyés dans un circuit magnétique. Ces barres sont reliées à leur extrémité par deux anneaux conducteurs et constituent une cage d'écureuil. Le rotor à cage d'écureuil est le type de rotor le plus utilisé grâce à sa robustesse



Figure (2) : Rotor à cage[1].

### b-2) Rotor bobiné:

Il est muni d'un enroulement triphasé composé des bobines, l'enroulement est généralement couplé en étoile et connecté à trois bagues conductrices isolées une par rapport aux autres.



Figure (3) : Rotor bobiné [1].

### 1.3) Principe de fonctionnement :

L'alimentation des trois enroulements statoriques par un système triphasé des tensions donne un champ magnétique tournant à une vitesse angulaire  $\Omega_s = \omega_s / P$  avec P est le nombre de paires de pole.

# Chapitre (I) : Etat de l'art sur le démarrage et le freinage du MAS

Le champ tourne engendrer le rotor à une vitesse angulaire  $\Omega$ (rad/s). Dans ce cas, on dit que le rotor glisse par rapport au champ tournant et on définit le glissement comme suite :

$$g=(ns-n)/ns =(\Omega s-\Omega)/\Omega s.....(1)$$

Le glissement représente le retard de création de courant dans le rotor

## 1.4) **Caractéristiques mécaniques :**

Pour analyser les différentes expressions des couples, on exprime la conversion de la puissance électrique en puissance mécanique tel que :

### Couple électromécanique :

$$C_{em}=P_{em}/\Omega.....(2)$$

### Couple utilisé :

$$C_u=P_u/\Omega.....(3)$$

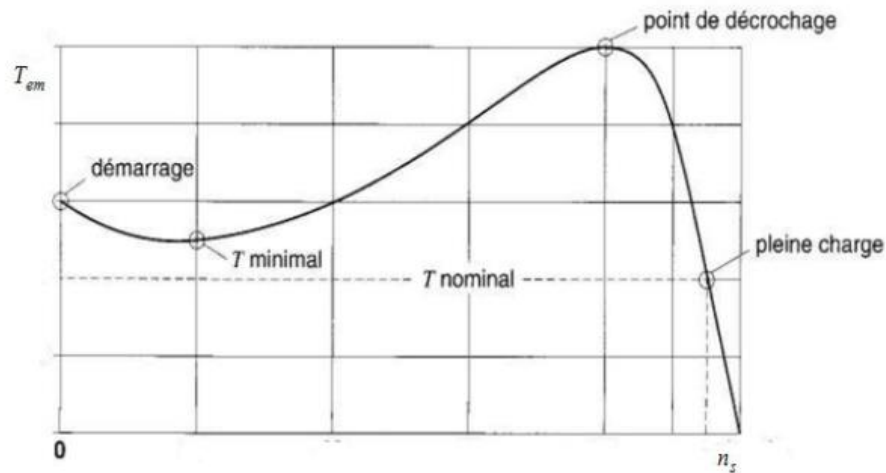


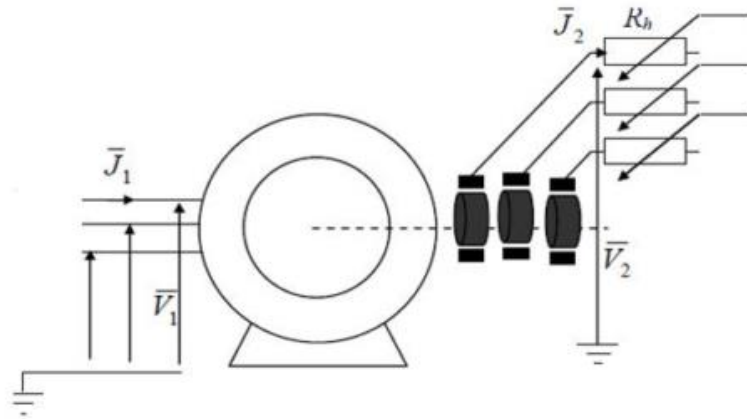
Figure (4) : Graphe de couple en fonction de la vitesse [5].

## 1.5) **Schéma équivalent monophasé :**

### **Principe :**

On dispose d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné dont ces enroulements sont connectés à un rhéostat

# Chapitre (I) : Etat de l'art sur le démarrage et le freinage du MAS



Figure(5) : alimentation de MAS[5].

Le schéma équivalent monophasé est le suivant :

La fréquence des courants rotoriques est  $\mathbf{fr=g.fs}$ , pour cela la force électromotrice generée au rotor est  $\mathbf{E2=m.E1}$ , elle est comme l'amplitude  $\mathbf{g.E2}$  et la fréquence  $\mathbf{g.fs}$ . Le courant ramené au stator est :  $\mathbf{J1=m.J2}$

A partir de ce schéma monophasé, on destingue le schéma ramené au stator :

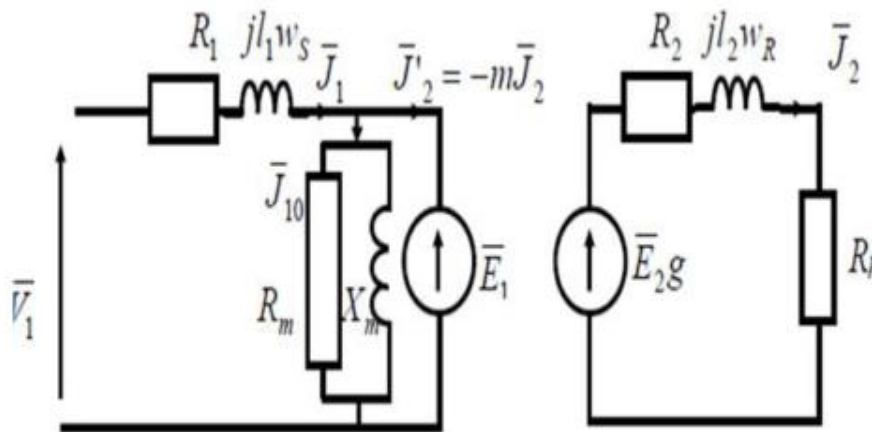


Fig (6) : schéma équivalent monophasé d'un MAS [1]

$$g * E2 = J2 * (Rh + R2 + J12 * wr) = m * g * E1 \rightarrow$$

$$E1 = J2 * \frac{Rh+R2+J12*wr}{m*g} \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{Ou : } J2 = \frac{J1}{m} \rightarrow E1 = J2 * \frac{Rh+R2+J12*wr}{g*m^2} \dots\dots\dots(5)$$

Si on remplace wr par g.ws , l'expression de E1 devient la suivante :

## Chapitre (I) : Etat de l'art sur le démarrage et le freinage du MAS

$$E1 = J1 * \left( \frac{Rh+R2}{g*m^2} + \frac{l2*ws}{m^2} \right) \dots \dots \dots (6)$$

Si on suppose :

$$Rr = Rh + R2 \dots \dots \dots (7)$$

Donc, le terme  $\frac{Rr}{g*m^2}$  est égale à  $\left( \frac{Rr}{m^2} \right) * \left( 1 + \frac{(1-g)}{g} \right)$

Le schéma équivalent ramené au stator est défini comme suit :

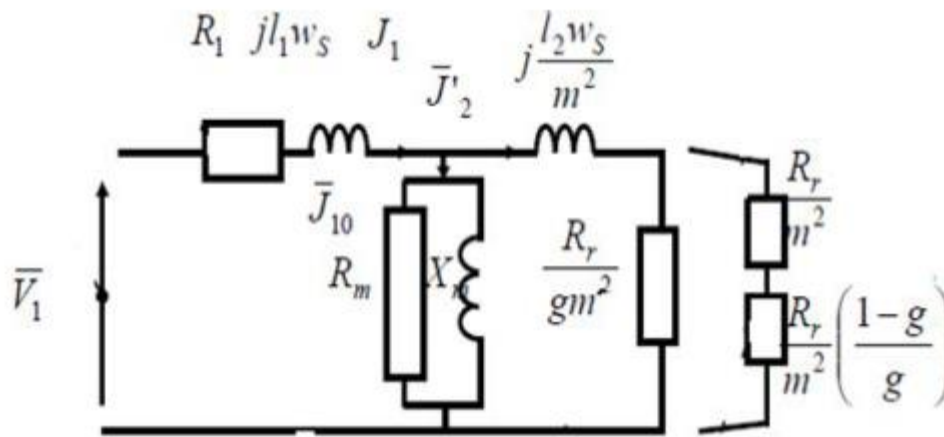


Fig (7) : le schéma équivalent ramené au stator [1]

Avec :

- R1 : Résistance d'un enroulement statorique
- l1 : Inductance d'un enroulement statorique
- R2 : Résistance d'un enroulement rotorique
- l2 : Inductance d'un enroulement rotorique
- Rm : Résistance de perte fer de circuit magnétique
- Xm : Réactance du circuit magnétique



# Chapitre (I) : Etat de l'art sur le démarrage et le freinage du MAS

## 1.6) Bilan de puissance :

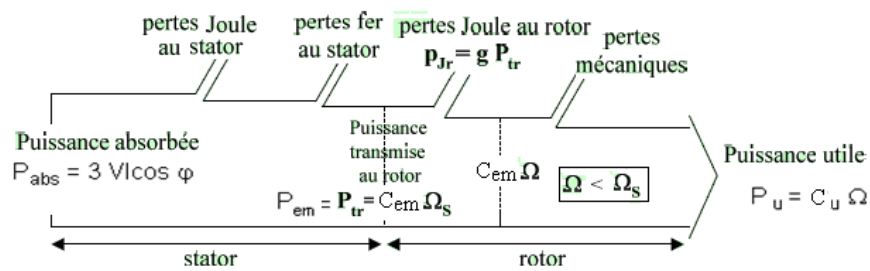


Fig (8) : Bilan de puissance [1]

Avec :

- $P_a$  : puissance active absorbée par le stator,
- $P_{js}$  : Perte joule au stator,
- $P_{fs}$  : Perte fer au stator,
- $P_{tr}$  : puissance transmise de stator au rotor,
- $P_{jr}$  : Perte joule au rotor,
- $P_{fr}$  : Perte fer au rotor,
- $P_{em}$  : puissance électromagnétique,
- $P_{mec}$  : Pertes mécaniques,
- $P_u$  : Puissance utile,
- $C_{em}$  : Couple électromagnétique,
- $C_u$  : Couple utile,
- $\Omega_s$  : Vitesse de rotation synchronisme,
- $\Omega$  : Vitesse de rotation du rotor.

## 2) Démarrage de moteur asynchrone :

### 2-1) phénomène de démarrage :

Lors de la mise sous tension, l'appelle de courant sur le réseau est important, surtout si la section de la ligne d'alimentation est insuffisante. Il peut provoquer une chute de tension susceptible d'affecter le fonctionnement des récepteurs. Pour cela, plusieurs techniques de démarrage sont implémentées pour limiter ce courant de démarrage.

### 2-2) procédure de démarrage :

#### 2-2-a) démarrage direct :

Dans cette procédure de démarrage, le moteur asynchrone est branché directement au réseau d'alimentation et le démarrage est effectué à un seul temps. Dans ce cas, le courant de

# Chapitre (I) : Etat de l'art sur le démarrage et le freinage du MAS

démarrage peut atteindre 4 à 8 fois le courant nominal du rotor et le couple de décollage est important et peut atteindre 1.5 fois le couple nominal.

Ce type de démarrage est utilisé pour les moteurs de faible puissance ou le risque d'augmentation de courant est faible.

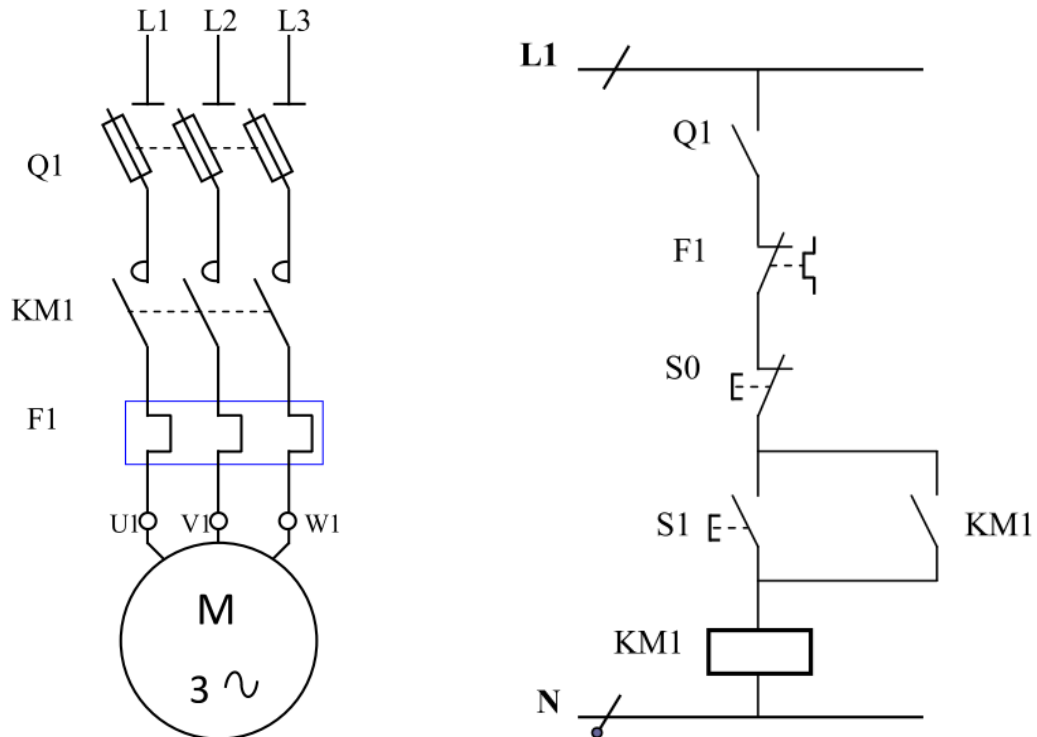


Fig (9) : Démarrage direct d'un moteur électrique [2]

L1, L2 ,L3 : alimentation triphasé

Q1 : sectionneur fusible

KM1 : contacteur principale 1

F1 : relais thermique

M : moteur triphasé

## 2-2-b) Techniques de démarrage avec limitation de courant de démarrage :

Contrairement au démarrage direct, le démarrage des moteurs de moyenne et forte puissance nécessite l'utilisation de procédures de limitation de courant de démarrage. Il existe deux actions :

### 1)action sur le stator :

Elle consiste à réduire la tension aux bornes des enroulements statoriques comme :

- Démarrage étoile triangle

## Chapitre (I) : Etat de l'art sur le démarrage et le freinage du MAS

- Démarrage par élimination de résistance statorique
- Démarrage par autotransformateur

### 2) action sur le Rotor :

- Démarrage par élimination des résistances rotoriques

#### 1) Démarrage étoile triangle :

Le démarrage étoile triangle est utilisé pour les moteurs à six bornes. Ce type de démarrage est effectué en deux temps :

- **1<sup>er</sup> temps** : chaque enroulement de stator est alimenté sous une tension réduite en utilisant le couplage étoile Y, c'est le temps nécessaire pour que la vitesse de rotation atteigne environ 80% de sa vitesse nominale dans un temps de 3s en générale
- **2<sup>ème</sup> temps** : chaque enroulement de stator est alimenté par sa tension nominale à partir du changement de couplage vers le couplage triangle.

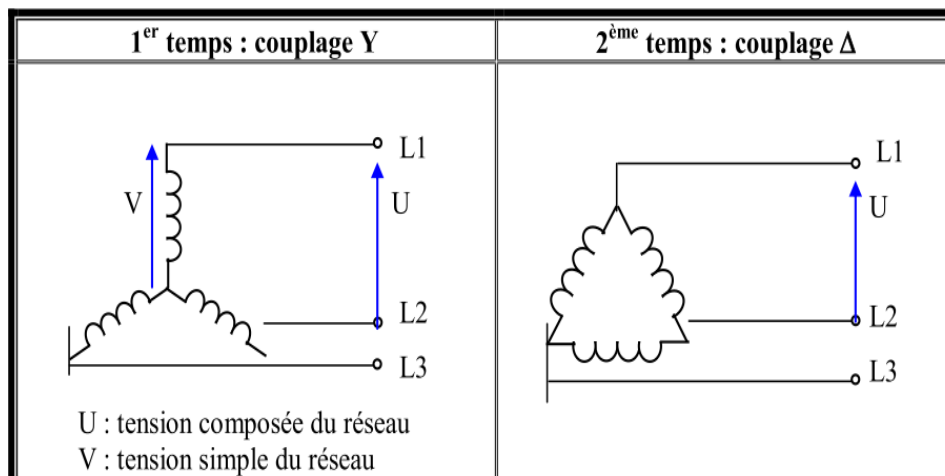


Fig (10) :couplage étoile/triangle [3]

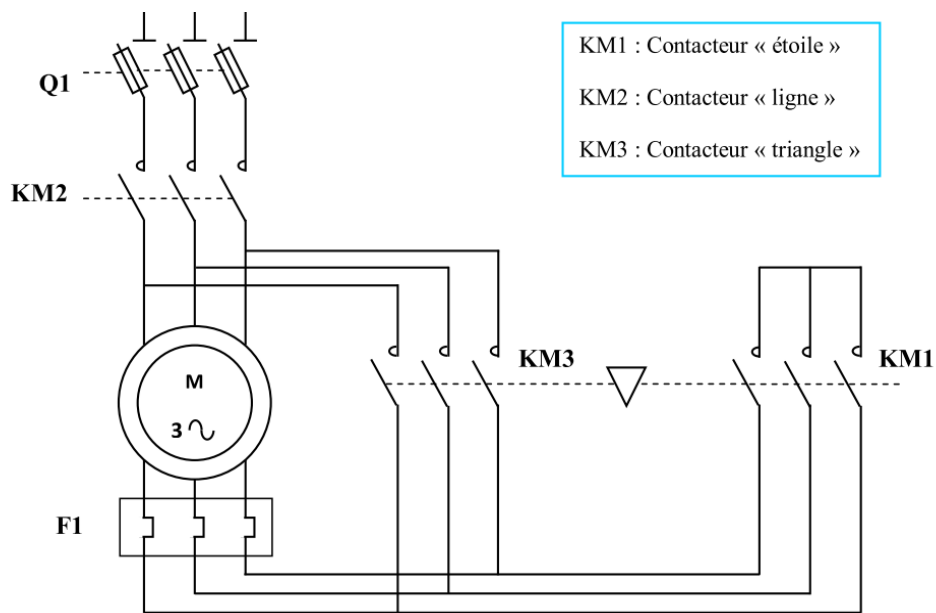


Fig (11) : schéma d'un démarrage étoile/triangle [2]

### 2) Démarrage par élimination de résistance statorique :

Ce type de démarrage est effectué en deux temps :

- **1<sup>er</sup> temps** : les enroulements de stator sont alimentés avec la présence de 3 résistances placées chacune sur un réseau pour minimiser le courant pendant un temps de 3s
- **2<sup>ème</sup> temps** : les enroulements sont alimentés par le réseau sans la présence des résistances statoriques.

### 3) Démarrage par élimination des résistances rotoriques :

Ce type de démarrage est utilisé pour les moteurs à rotor bobiné dont les enroulements sont couplés en étoile et les bornes de sorties sont soudés à bagues fixés sur l'arbre de moteur aux quelle on peut insérer des résistances à l'arbre de balais frottant. Ce type de démarrage est effectué en 3 temps :

- **1<sup>er</sup> temps** : On insère la totalité des résistances dans les enroulements du rotor
- **2<sup>ème</sup> temps** : on élimine une partie des résistances insérées
- **3<sup>émé</sup> temps** : on élimine toutes les résistances rotoriques et on court-circuitant les enroulements du rotor

## Chapitre (I) : Etat de l'art sur le démarrage et le freinage du MAS

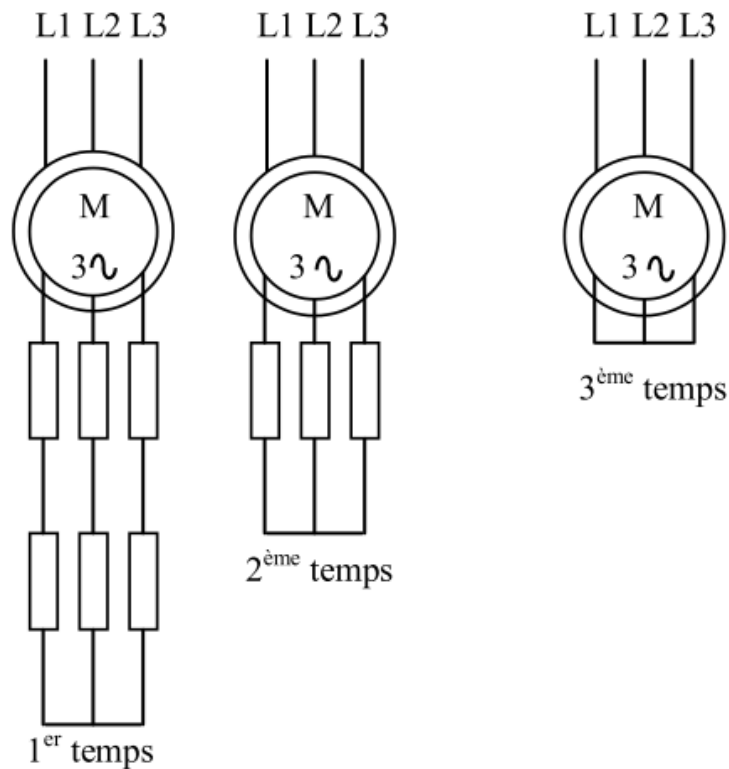


Fig (12) : Démarrage par élimination par résistance rotorique [2]

### 4) Démarrage électronique :

Le démarrage électronique est effectué à l'aide d'un variateur de vitesse du moteur tout en protégeant contre tous les surintensités

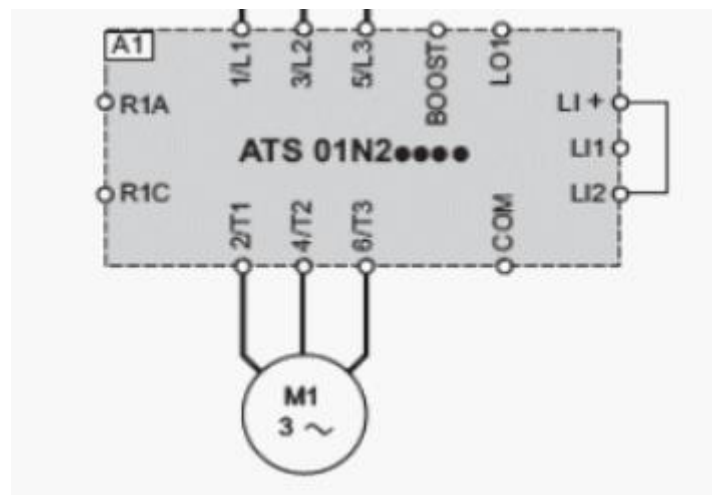


Figure (13) : variateur de vitesse type ATS [3]

### 4-1) variateurs de vitesse :

# Chapitre (I) : Etat de l'art sur le démarrage et le freinage du MAS

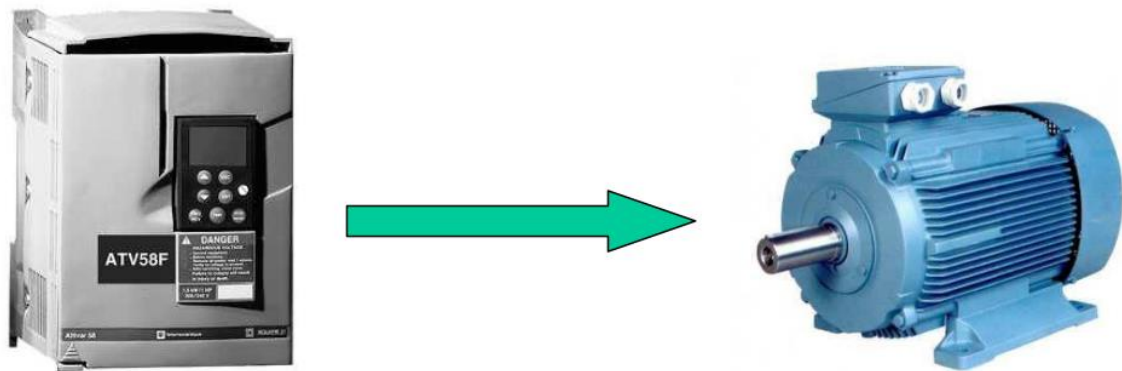


Figure (14) : variateur de vitesse d'un moteur asynchrone [2].

$$N_s = (60 \cdot f) / p \dots \dots \dots (8)$$

Un variateur de vitesse est un équipement qui permet à faire varier la vitesse de moteur, une nécessité pour de nombreux procédés industriels.

En effet, la plupart des moteurs tournent à vitesse constante pour moduler la vitesse des équipements de procédé, on a longtemps eu recours à divers dispositifs mécaniques mais aujourd'hui, on fait surtout appel à des variateurs de vitesse électroniques.

Pour les procédés industriels exigeant une régulation précise de la vitesse, on a d'abord utilisé des moteurs à courant continu (CC) commandés par des variateurs électroniques à semi-conducteurs. Cette technique consiste à faire varier la vitesse proportionnellement à la tension. Etant donné la complexité de l'entretien des moteurs CC, les applications récentes n'utilisent que rarement ce système à cause des problèmes représentés par les moteurs à courant continu.

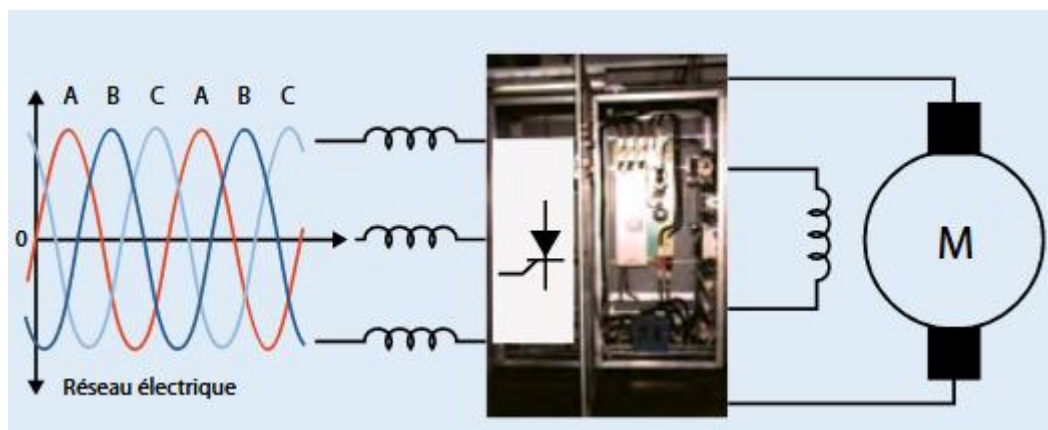


Figure (15) : Schémas explicatif de fonctionnement d'un variateur [6]

Dans les premiers variateurs de vitesse électroniques à courant continu, le dispositif de commande utilisé était le thyristor, un dispositif vulnérable aux perturbations de réseaux.

## Chapitre (I) : Etat de l'art sur le démarrage et le freinage du MAS

Depuis, l'électronique de puissance a fait des progrès considérables et on installe de plus en plus des variateurs de vitesse à fréquence variable avec des moteurs à courant alternatif. Ces variateurs de vitesse exploitent le plus souvent la modulation de largeur d'impulsion (MLI) et les transistors bipolaires à grille isolés (IGBT).

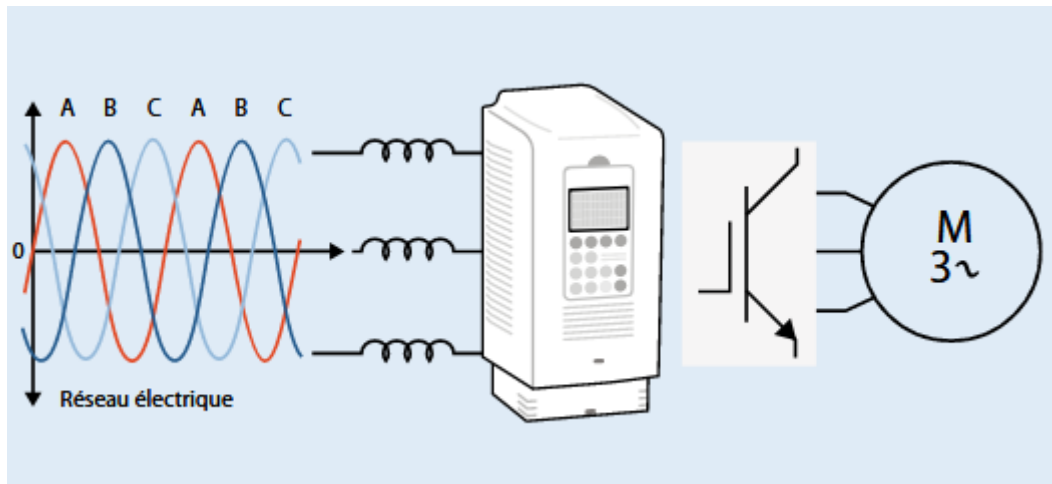


Fig (16) : schéma d'un variateur de vitesse triphasé [3]

### 4-2) Les avantages et les inconvénients :

#### 4-2-1) Les avantages

Le recours aux variateurs de vitesse offre plusieurs avantages :

- Démarrage progressif des moteurs réduisant les chutes de tension dans le réseau et limitant les courants de démarrage.
- Amélioration de facteur de puissance
- Précision accrue de la régulation de vitesse
- Prolongement de la durée de service du matériel entraîné
- Diminution de la consommation d'électricité

De nouveaux variateurs de vitesse plus performants peuvent éviter l'interruption des procédés en cas de perturbation du réseau de courte durée

#### 4-2-2) Les inconvénients :

Tous les variateurs de vitesse intègrent des dispositifs de commutation (diodes, thyristors, IGBT, etc) forment une charge non linéaire qui engendre des courants harmoniques, sources de distorsion de l'onde (chute ou perturbation de la tension) dans le réseau électrique. Cette dégradation de l'onde peut perturber tant les équipements électriques du client que ceux du réseau électrique si aucune mesure d'immunité n'est prise. Par ailleurs, des résonances harmoniques peuvent également apparaître entre les variateurs de vitesse et les batteries de condensateurs.

## **Chapitre (I) : Etat de l'art sur le démarrage et le freinage du MAS**

Le effets néfastes peuvent se manifester par la défaillance prématurée des équipements électriques (surchauffe des moteurs, des câbles et des transformateurs), par la dégradation de l'isolation des moteurs commandés ou par l'interruption des procédures (fusibles brulés )

Pour immuniser les variateurs de vitesse contre les creux de tension et les harmoniques, voici les actions à faire :

- Optimiser les protections (fusibles adéquats pour la protection de l'électronique de puissance).
- Choisir judicieusement les réglages (sous-tension, surtension, surintensité ,surcharge, redémarrage, automatique, temps d'accélération et de décélération, etc).
- Prévoir des mesures d'attention (transformateurs à tension constante, transformateurs d'isolement, réactance de 3%, alimentation sans coupure [UPS], conditionneurs et régulateurs de tension) et dans la mesure du possible réserver des artères distinctes aux variateurs de vitesse.
- Installer des filtres passifs ou actifs pour réduire l'impact des courants et des tensions harmoniques causées par les variateurs de vitesse et limiter leur propagation dans le reste du réseau électrique
- Consulter des spécialistes dans le cas de variateurs de vitesse de grande puissance ou de charges non linéaires dépassent 20% de la charge totale de l'usine

### **4-2-3) Principe de fonctionnement d'un variateur de fréquence :**

La vitesse du champ magnétique et donc la vitesse de rotation d'un moteur asynchrone dépend directement de la fréquence de la tension d'alimentation  $N_s = f/p$  c'est sur ce paramètre que le variateur va agir. Le principe général étant de fournir un courant à amplitude et à fréquence variable tout en maintenant une tension constante[3].

Un variateur de fréquence est constitué de quatre parties, le redresseur, le circuit intermédiaire ou filtre de lissage, l'onduleur et le circuit de commande



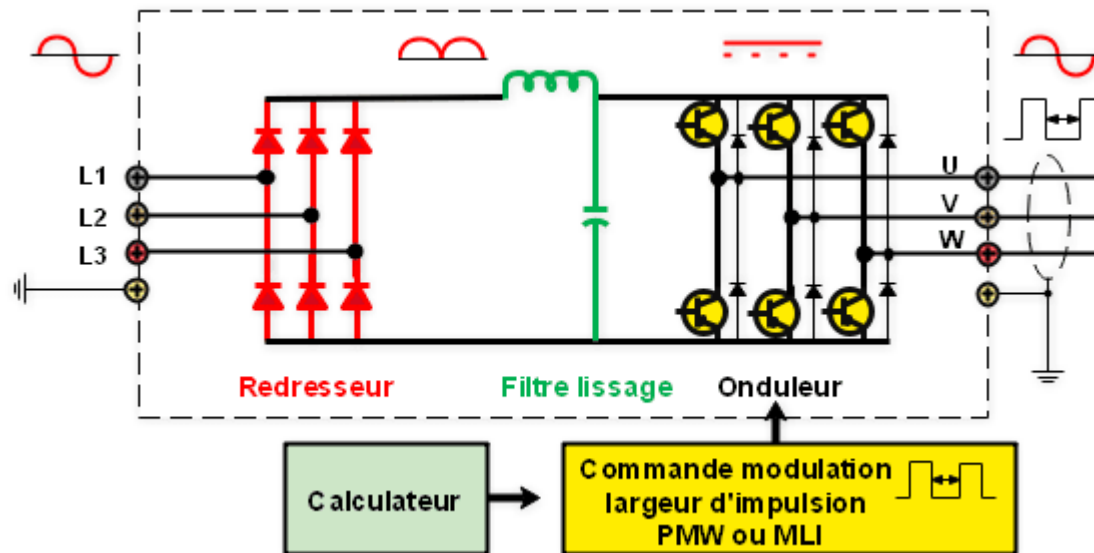


Fig (17) : schémas de construction d'un variateur de vitesse [6]

#### 4-2-4) Le redresseur :

Le rôle du redresseur est de transformer la tension alternative en tension continue ou plus exactement en tension pseudo continue. En effet la tension continue obtenue n'est pas parfaite car elle comporte des ondulations positives résiduelles. Le redresseur est formé de diodes semi-conductrices. Ce composant électronique fonctionne comme à un clapet anti-retour n'autorisant le passage du courant que dans un sens. C'est cette fonction qui permet la modification de la nature du courant[3].

#### 4-2-5) Circuit intermédiaire ou filtre de lissage :

Le circuit intermédiaire (formé de bobines et de condensateurs), remplit généralement plusieurs fonctions, il sert de stockage d'énergie (grâce à des condensateurs), et il réduit et filtre les parasites[3].

#### 4-2-6) L'Onduleur :

Les semi-conducteurs composant l'onduleur permettent de recréer un courant alternatif (triphase) à fréquence ou ondulation variable. C'est l'amplitude des variations des sinusoides qui détermine la fréquence du courant appliquée au moteur. Un calculateur commande la largeur des impulsions du courant en actionnant des transistors IGBT, qui se comportent comme des interrupteurs qui se commutent plus ou moins rapidement en fonction de la fréquence en Hertz donc de la vitesse demandée[3].

# Chapitre (I) : Etat de l'art sur le démarrage et le freinage du MAS

## 4-2-7) Circuit de Commande :

C'est le cerveau du variateur de fréquence, un calculateur récolte les données et délivre les messages d'erreurs, il pilote le redresseur et l'onduleur, il protège le moteur et l'ensemble du variateur. Suivant sa technologie le variateur dispose de multiples fonctions de commande et de surveillance.

### 3) Freinage de moteur

#### 3-1) procédure de freinage [2]:

Il existe plusieurs procédés de freinage pour les moteurs asynchrones tel que :

##### 1) Freinage par contre-courant : action sur le stator

###### Principe :

Le principe de ce freinage est basé sur l'inversement de deux phases pour inverser le champ tournant donc ralentissement du rotor

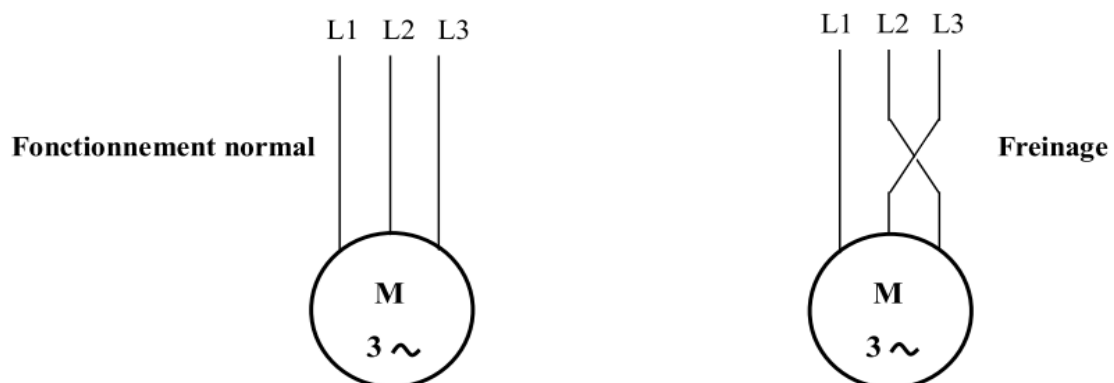


Fig (18) : freinage par contre courant [2]

###### Avantages :

- freinage plus efficace : le ralentissement est violent
- il n'y a pas de blocage

###### Inconvénient :

- il existe le risque de redémarrer le moteur dans le sens inverse

##### 2) Freinage par injection de courant continu

###### Principe :

Ce type de freinage se repose sur la déconnecte des enroulements du stator, puis on alimente le moteur par une source de tension redressé , le champ tournant est remplacé par un champ fixé qui provoque le ralentissement du rotor.

## Chapitre (I) : Etat de l'art sur le démarrage et le freinage du MAS

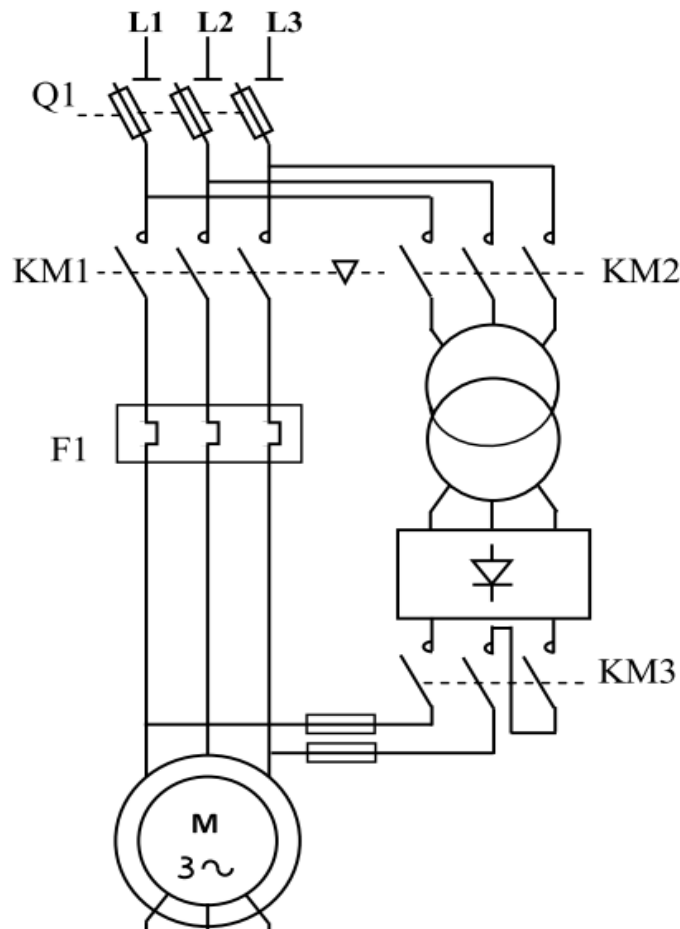


Fig (19) : schéma de freinage par injection de courant [2]

### Caractéristiques :

- Pas de blocage
- Le courant de freinage est de l'ordre de  $1.3 I_n$  [8] (le courant nominale)
- La valeur moyenne de la tension redressée ne dépasse pas 20V [8] pour éviter l'échauffement

### Conclusion :

On a entamé dans ce chapitre une généralité sur la machine asynchrone et leurs caractéristiques, leurs principes de fonctionnement et les techniques de démarrage et de freinage de ce dernier

### **Introduction :**

Parmi les techniques de démarrage et de freinage les plus utilisées, le démarrage étoile-triangle et le freinage par injection de courant continue à cause de leurs efficacités et leurs constitutions simples. Dans le chapitre en cours, on détaillera les deux techniques avec leurs circuits, leurs avantages et inconvénients.

#### 1) **Démarrage étoile triangle :**

##### 1.1) **Principe :**

Démarrage étoile triangle est un type de démarrage qui est réalisé à deux temps et ne peut être utilisé qu'avec un moteur sur lequel les deux extrémités de chacun des trois enroulements statoriques sont ramenées sur la plaque à bornes.

Son principe consiste à démarrer le moteur en couplant les enroulements en étoile (1<sup>er</sup> temps) sous la tension de réseau, ce qui permet de diviser la tension nominale de moteur par  $\sqrt{3}$  et le courant de démarrage de diviser par 3

- Id (le courant de démarrage) = 1.5 à 2.6 de In ( le courant nominale)
- Et le couple de démarrage étant proportionnel au carré de la tension d'alimentation, il est aussi divisé par 3
- Cd (couple de démarrage) = 0.2 à 0.5 de Cn (couple nominale)

La vitesse du moteur se stabilise quand les couples moteur et résistants 'équilibrent, généralement entre 75 à 85 % de la vitesse nominale, les enroulements alors sont couplés en triangle (2<sup>ème</sup> temps) et le moteur rejoint ses caractéristiques nominales

##### 1.2) **Caractéristiques :**

- Le passage de couplage étoile vers le couplage triangle est commandé par un temporisateur, la fermeture du contacteur triangle s'effectue avec un retard de 30 à 50 ms, après l'ouverture du contacteur étoile, ce qui permettra d'éviter un court-circuit entre phases, les deux contacteurs ne peuvent pas être fermés simultanément et assurer par un verrouillage mécanique et un technique de verrouillage électrique.
- Le courant qui traverse les enroulements est interrompu par l'ouverture du contacteur étoile, il se rétablit à la fermeture de contacteur triangle, ce passage s'accompagne d'une pointe de courant transitoire très brève mais très importante, elle est due à la force contre électromotrice du moteur.

Pour cela le démarrage étoile-triangle convient aux machines qui ont un faible couple résistant ou qui ceux qui démarrent à vide (Ex : machine à bois).

Et pour éviter le phénomène transitoire, on utilise deux temporisateurs de 1 à 2 secondes à passage étoile-triangle ; Ces temporisateurs permettent une diminution de la force contre électromotrice, donc de la pointe de courant transitoire mais la durée de temporisation est insuffisante pour éviter le ralentissement.

Pour cela il existe une autre technique qui est le démarrage en 3 temps :

Etoile-triangle+résistance -triangle

La résistance est mise en série avec les enroulements immédiatement avant l'ouverture du contacteur étoile, cela évitera toute interruption de courant donc l'apparition de phénomènes transitoires.

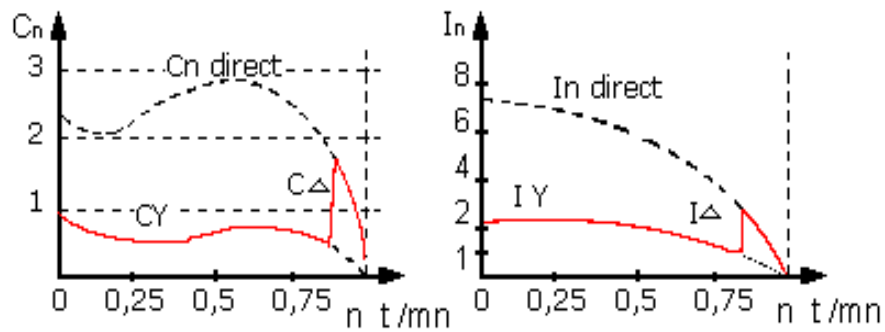


Figure (20) : caractéristique de démarrage étoile triangle.

### 1.3) Schéma de fonctionnement dessiné par logicielle CADe-SIMU

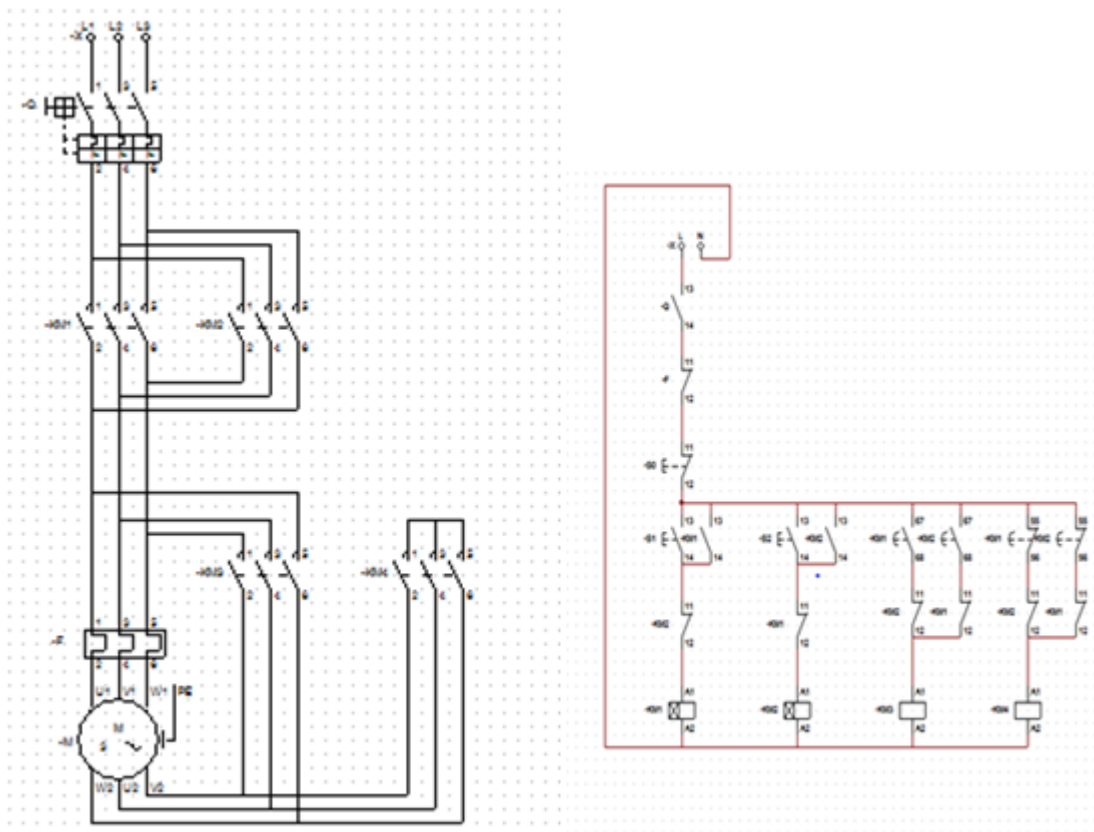


Figure (21) : circuit d'un démarrage étoile triangle

#### Analyse de circuit :

- La commande est effectuée par des boutons poussoirs (S0 pour l'arrêt, S1 pour démarrer dans le sens 1, S2 pour démarrer dans le sens 2). une impulsion sur le bouton marche S1 excite la bobine de contacteur KM1 de ligne à la fois avec la bobine de

contacteur KM4 pour le couplage étoile et le cycle de temporisation démarrer pour le moteur marche dans le sens 1 en étoile

- Le temps pré-réglé du dispositif de temporisation s'écoule et les contacts de la temporisation se déclenchent après 3 à 5s.

La bobine KM4 n'est pas alimentée à cause de l'ouverture du contact temporisé, normalement fermé NC, et le contact temporisé normalement ouvert NO doit être fermé et la bobine KM3 est alimentée, ce dernier qui s'éclanche et permet au couplage triangle d'être effectif.

Même procédure si on effectue une impulsion sur le Botton poussoir S2 pour le sens 2 sauf que pour aller du sens 1 au sens 2, il faut arrêter le système puis le redémarrer. Sinon on tomber dans le cas du freinage contre-courant.

### 1.4) Appareillage utilisé :

L'appareillage utilisé pour réaliser le démarrage étoile-triangle est divisé en deux types :

#### a) Appareillage de sécurité :

##### a-1) Disjoncteur :



Figure (22) : disjoncteur magnétothermique [2]

C'est un appareil qui permet de protéger les équipements contre les court-circuits et surcharges selon deux phénomènes physiques :

**Magnétiques** : avec un système d'électro-plongeur (électro-aimant) constitué d'une plongeur en métal, qui sera attiré par une bobine s'il est parcouru par un courant supérieur ou courant de déclenchement (pouvoir de coupure). Le phénomène magnétique est utilisé pour la protection contre les courts-circuits à cause de sa réponse rapide (ter).

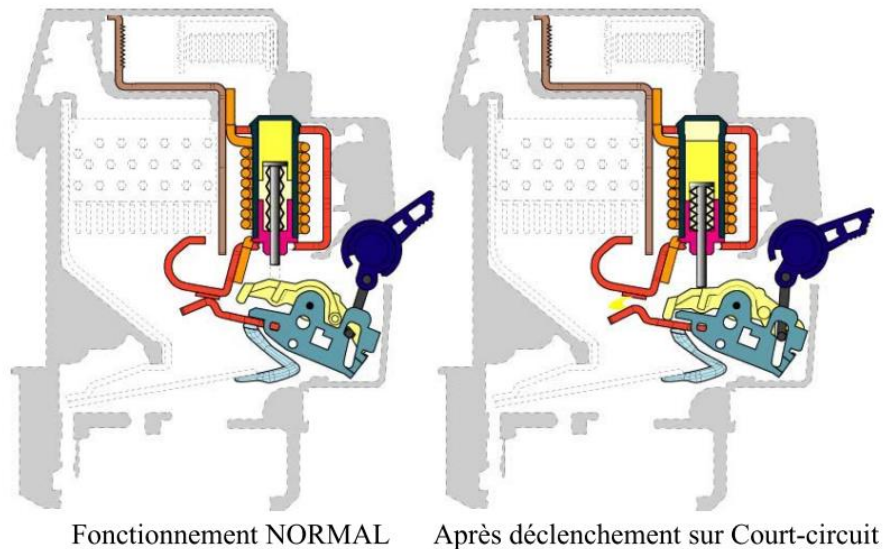


Figure (23) : fonctionnement magnétique de disjoncteur [2]

**Thermique** : si le courant qui parcourt sur les bilames a une grande valeur, ce dernier doit délayer et permet la coupure. Le phénomène thermique est utilisé pour la protection contre les surcharges.

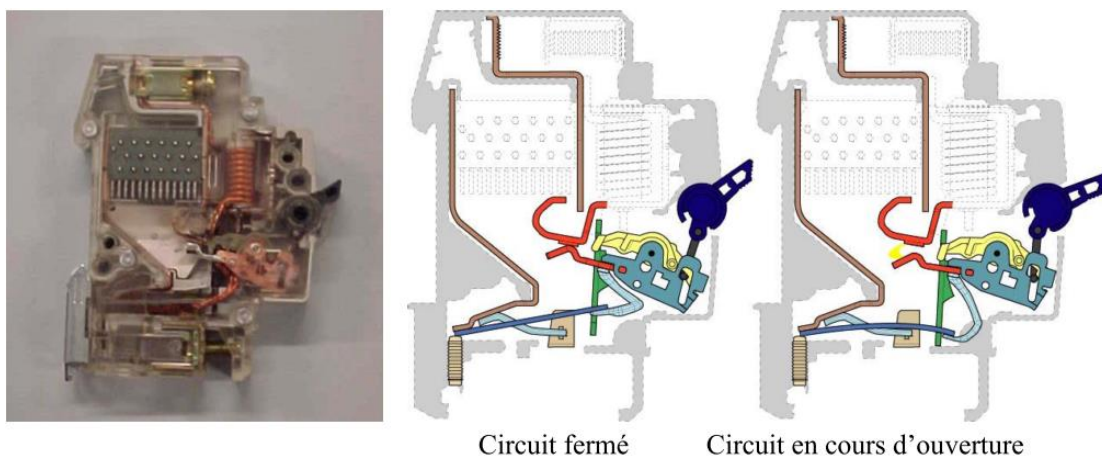


Figure (24) : fonctionnement thermique de disjoncteur [7]

### a-1-1) caractéristiques de disjoncteur :

Le disjoncteur est caractérisé par :

- Tension nominale : tension de fonctionnement de disjoncteur sans échauffement ou des ruptures,
- Courant nominale : courant de fonctionnement de disjoncteur sans échauffement ou des ruptures,
- Pouvoir de coupure : c'est la valeur de courant de défaut pour que le disjoncteur doit déclencher (couper),
- Chambre de distancerions d'arc électrique :

Le but de chambre de distancerons d'arc électriques est de consommé ce dernier par deviser lui

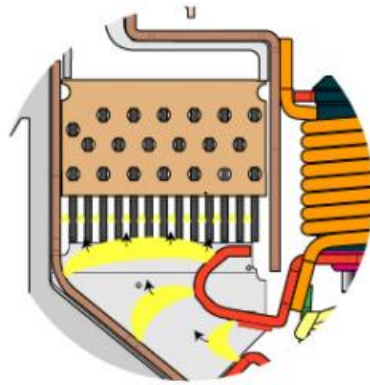


Figure (25) : chambre d'extinction d'arc électrique [2]

**Différent types de disjoncteurs :**

**1. Disjoncteur divisionnaire (domestique) :**



Figure (26) : disjoncteur divisionnaire [7]

La tendance est au remplacement des fusibles sur les tableaux de distribution d'abonnés par des disjoncteurs magnétothermiques qui assurent la protection des lignes et des appareils d'utilisation

**Caractéristiques :**

Réseau 220-380 V,

Pouvoir de coupure : 6000 A



Calibres : 10-15-20-25-32 A

### 2. Disjoncteur industriel base tension BT:



Figure (27) : disjoncteur magnétothermique [2]

Pour la commande de la protection des circuits de moteurs et de distribution, il existe deux types de construction de disjoncteurs

#### a. Les disjoncteurs sous boîtier moulé de 32 à 1250 A

La commande de ces disjoncteurs est en général manuelle, ils sont équipés de relais thermiques, magnétiques ou magnétothermiques.

#### b. Les disjoncteurs sur chassies métallique :



Figure (28) : disjoncteur chassies métallique [7]

La commande de ces disjoncteurs peut être manuelle ou électrique. Les déclencheurs peuvent être magnétique, thermique ou magnétothermiques.

### Caractéristiques :

Courant nominal thermique : 800 à 6300 A

Pouvoir de coupure sous : 500 V ; 70000 A

Pouvoir de fermeture : 175000 A

Déclencheurs magnétothermique réglés de 8 à 9 In

### 3. Disjoncteurs moyenne tension MT :



Figure (29) : disjoncteur MT

Ils sont destinés à la protection des réseaux de distribution, et des postes de transformation, ils vont de 3 à 36 kV, ils sont réalisés soit avec coupure dans l'air, soit ils utilisent le gaz hexafluorure de soufre (SF6) pour l'isolement et la coupure.

### 4. Disjoncteur haute tension HT :



Figure (30) : disjoncteur HT

Après la construction des disjoncteurs à gros puits à faible volume d'huile, et le disjoncteur à air comprimé, la nouvelle génération de disjoncteurs HT utilisent SF<sub>6</sub>. Selon la tension, un pôle de disjoncteur est constitué de plusieurs chambres de coupure.

### Technique de coupure dans le disjoncteur (absorption d'arc électrique) :

Il existe plusieurs techniques pour couper l'arc électrique à part de chambre d'absorption d'arc électriques comme :

- **Les disjoncteurs à l'huile** : ce technique repose à absorber l'arc électrique on utilise l'huile ce dernier saura ioniser et absorber l'arc, mais cette technique représente des inconvénients comme :
  - Il faut toujours remplacer l'huile après absorption,
  - Il existe les risques d'inflammation
- **Les disjoncteurs à l'air comprimé**
- **Les disjoncteurs à gaz SF<sub>6</sub>** : cette technique repose à l'utilisation de gaz hexafluorure de soufre ce dernier qui ionise et absorbe l'arc électrique, il représente les avantages suivantes par rapport à l'huile :
  - Le gaz est ionisé dans le moment d'arc et désionisé après,
  - N'existe pas de risques d'inflammation.

### Courbe de déclenchement :

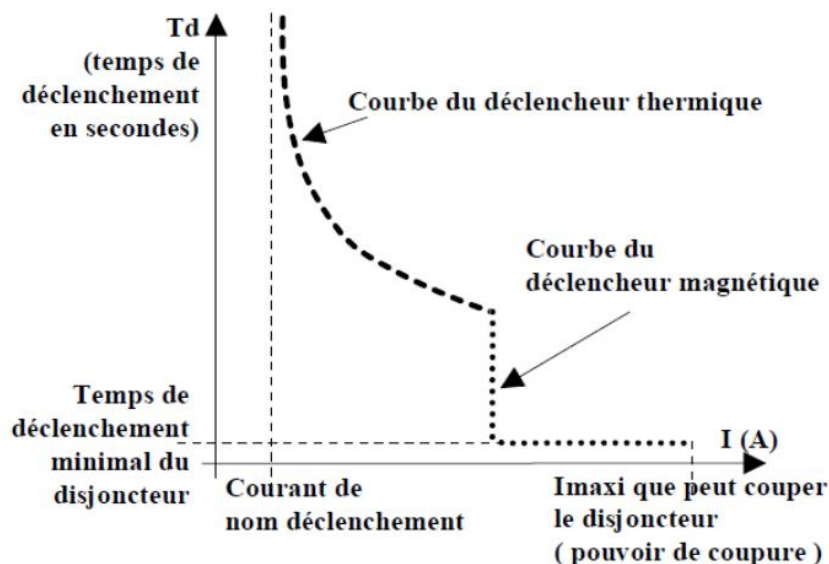


Figure (31) : courbe de déclenchement de disjoncteur [2]

Cette courbe regroupe les deux précédentes afin d'obtenir la courbe complète de déclenchement du disjoncteur. Elle indique que si on se trouve à droite et/ou au-dessus de la courbe, on aura un déclenchement.

## a-2) Relais thermique :



Figure (32) : Relais thermique [2]

Le relais thermique est un appareil qui protège le récepteur placé en aval contre la surcharge et les coupures de phase. Tel qu'en cas de surcharge, le relai thermique n'agit pas directement sur le circuit de puissance mais avec un contact ; le relai thermique ouvre le circuit de commande d'un contacteur et le contacteur coupe ensuite le circuit.

### a-2-1) symbole :

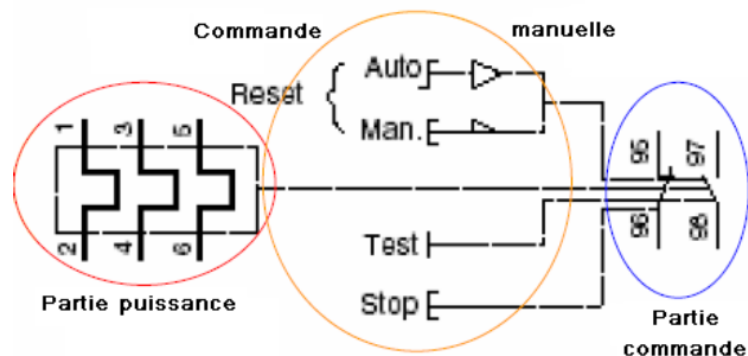


Figure (33) : symbole d'un relais thermique [2]

### a-2-2) constitution :

1	Arrivé du courant
2	Système de déclenchement
3	Réglage du calibre de déclenchement
4	Départ courant
5	Elément bimétallique
6	Contact auxiliaire
7	Bouton de réarmement

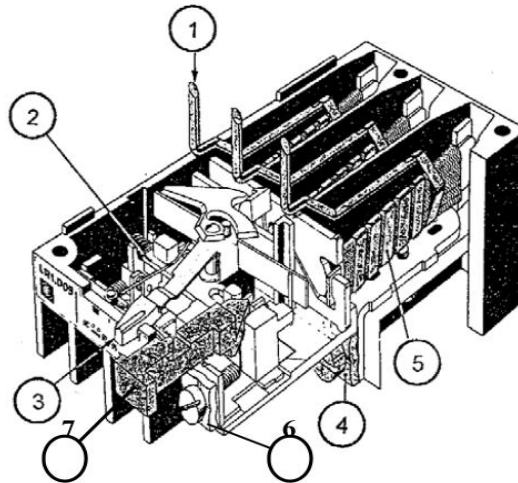


Figure (34) : schéma explicatif d'un relais thermique [3]

**b) Appareillage de commande**

**b-1) le contacteur :**

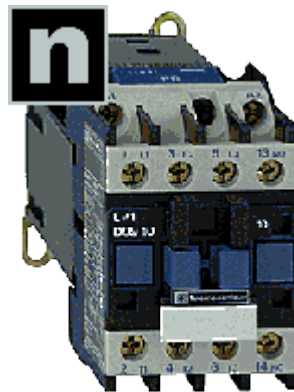


Figure (35) : Contacteur de puissance [2]

C'est appareil électromagnétique de connexion ayant une seule position de repos, commandé électriquement et capable d'établir, de support et interrompre les courants dans des conditions nominales de circuit. C'est essentiellement un appareil de commande et de contrôle capable d'effectuer un grand nombre de manœuvre sous des courants de charges normaux

**b-1-1) symbole :**

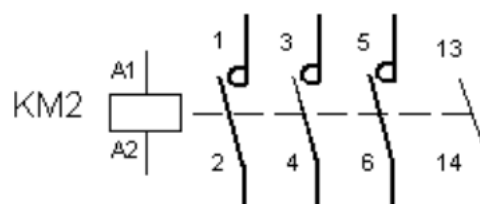


Figure (36) : symbole d'un contacteur [3]

### b-1-2) constitution :

- les contacts principaux, organes de manœuvre (électro-aimant)
- bobine de commande
- les auxiliaire comme :

Contact temporisé : C'est un contact qui permet d'établir ou d'ouvrir les contacts après un certain temps pré-réglé de façon à permettre à notre équipement de fonctionner convenablement.

### 2) Freinage par injection de courant redressé :

#### 2-1) Principe :

Ce mode de freinage est utilisé sur les moteurs à bagues et à cage tel que le procédé consiste à envoyer du courant redressé dans le stator préalablement séparé du réseau, ce courant redressé crée un flux fixe dans l'entrefer du moteur pour que la valeur de ce flux corresponde à un freinage convenable, le courant doit être envoyé est 1.3 fois de courant nominal.

#### 2-2) Caractéristiques :

- L'énergie dissipée dans les résistances rotoriques ou dans la cage est moins importante
- Si la charge n'est pas entraînée, le moteur ne redémarre pas en sens inverse contrairement au freinage par contre-courant.
- Si la charge est entraînée, le système fournit un freinage qui permet de retenir cette charge à faible vitesse, il s'agit donc d'un freinage de ralentissement et non pas un freinage d'arrêt, la caractéristique est beaucoup plus stable qu'en contre-courant.

#### 2-2) Schéma dessiné par le logiciel CADE-SIMU :

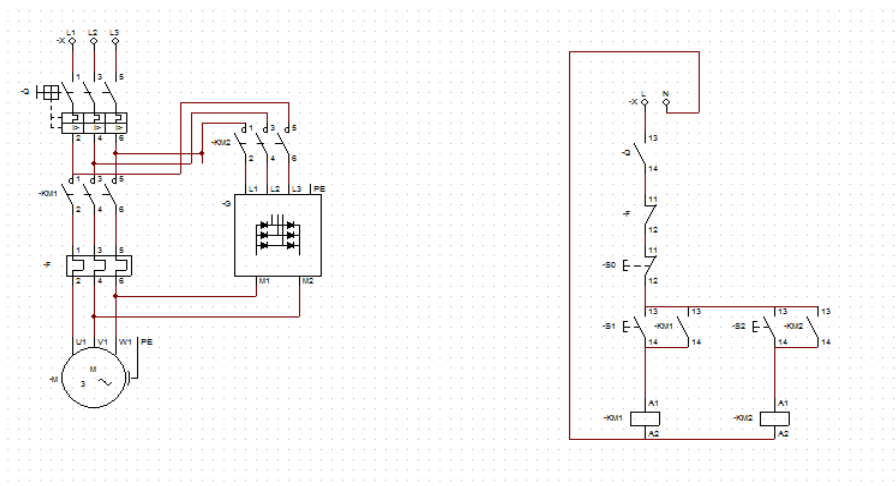


Figure (37) : schéma de freinage par injection d'un courant continu

### 2-3) redresseur triphasé :



Figure (38) : redresseur triphasé [7]

Le redresseur est un circuit d'électronique de puissance permettant de transformer une tension ou un courant alternatif en son équivalent de continu, il est utilisé dans de nombreuses applications telles que le freinage par injection de courant continu.

#### 2-3-a) Circuit et fonctionnement :

Le redresseur triphasé est constitué essentiellement par six diodes bien dimensionner (tension, courant nominale), ce dernier qui est commandé naturellement tel que ; si le courant est dans le sens positive la diode est fermé (permet le passage), sinon il est bloqué.

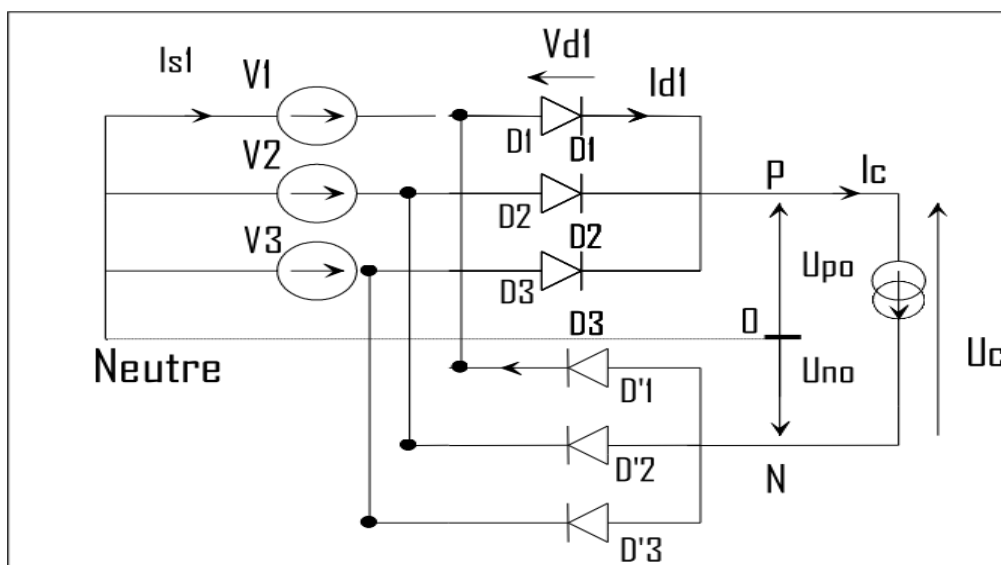


Figure (39) : schéma d'un redresseur triphasé [8]

Le redresseur triphasé classique n'utilise pas le neutre. Pour un réseau 230V/400V, il y a 400V entre 2 entrées du redresseur. En effet, entre 2 entrées, il y a toujours une tension composée  $U$  ( $=400V$ ).

Un redresseur non commandé, cela veut dire qu'on ne peut pas régler la tension de sortie moyenne pour une tension d'entrée donnée. Le redressement non commandé utilise des diodes.

## Chapitre (II) : Démarrage Etoile-Triangle et freinage par injection de CC

Un redresseur commandé permet l'ajustement de la tension de sortie moyenne en jouant sur les retards des amorçages des *thyristors* (utilisés à la place des diodes). Cette commande nécessite un circuit électronique complexe non étudié ici.

Une diode se comporte comme un thyristor amorcé sans retard, donc passant aussi souvent qu'il le peut.

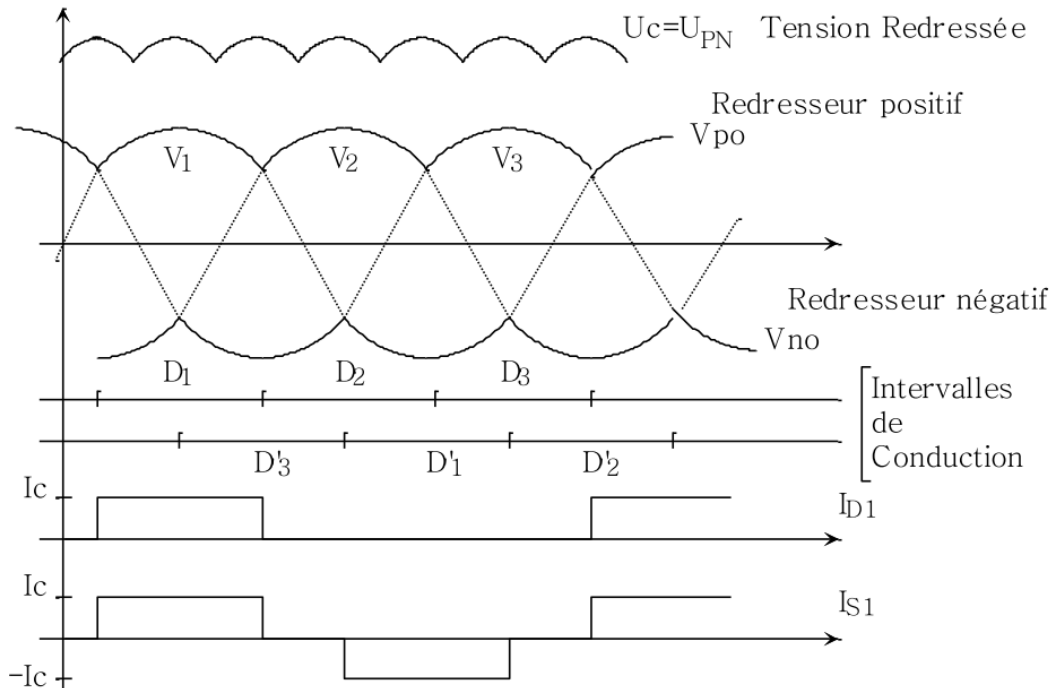


Figure (40) : Graphe des courants et des tensions de redresseur [8]

Il apparaît 7 courbes au total : 6 sinusoides et une courbe rouge qui joint le haut des sinusoides ("calottes de sinusoides").

Les 6 sinusoides représentent les 3 tensions composées  $U$  entre phases et les 3 mêmes tensions mais de signe opposé :

$$U_{31} = -U_{13} U_{23} = -U_{32} U_{21} = -U_{12}$$

La courbe rouge représente la tension en sortie du redresseur, c'est-à-dire aux bornes de la charge résistive. Cette tension n'est pas référencée par rapport au neutre. Elle est flottante. Cette tension fluctue entre  $1.5V_{\max}$  et  $1.732V_{\max}$  (racine de 3).

$V_{\max}$  est la valeur crête d'une tension simple et vaut  $230 \times 1.414 = 325V$

### Prospérité de la tension de redresseur triphasé :

Allure de courbe valable seulement sur charge résistive- redressement non commandé (à diodes)- ne repasse pas par zéro, contrairement au redresseur mono alternance (pont de



## Chapitre (II) : Démarrage Etoile-Triangle et freinage par injection de CC

Graetz). L'ondulation est ainsi beaucoup plus faible. Le dimensionnement d'une inductance et/ou d'un condensateur de lissage est ainsi moins contraignant que pour un pont de Graetz

Pour obtenir une tension de sortie non nulle, il faut au moins 2 phases présentes.

### Min, max et valeur moyenne de la tension redressée triphasée

Numériquement, pour un réseau 230V/400V, la tension redressée fluctue entre :

$$\begin{aligned} \text{tension min} &= 1.5V_{\text{max}} = 1.5 \times (1.414 \times 230) = 488\text{V} \\ \text{tension max} &= 1.732V_{\text{max}} = 1.732 \times (1.414 \times 230) = 563\text{V} \end{aligned}$$

La valeur moyenne de la tension redressée triphasée est égale à :

$$\text{tension moy} = 1.654V_{\text{max}} = 1.654 \times (1.414 \times 230) = 538\text{V}$$

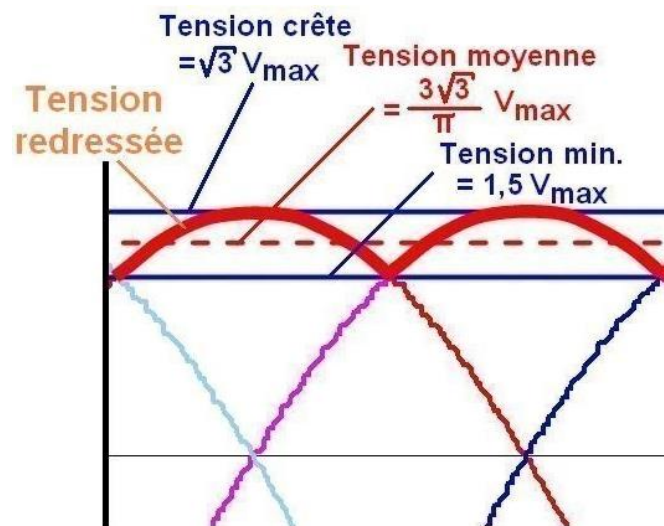


Figure (41) : graphe explicatif de tension de redresseur [7]

### Conclusion :

On a entamé dans ce chapitre les deux techniques, démarrage et freinage, d'un MAS qui sont : le démarrage étoile triangle à deux sens, et le freinage par injection de courant continue, avec une étude détaillée sur le principe de fonctionnement, les appareillages utilisés ainsi que les avantages et les inconvénients.

**Introduction :**

Dans ce chapitre on a vérifié le fonctionnement des circuits de démarrage étoile/triangle et un freinage par injection de CC par logiciels Schemaplic associé avec une simulation par MATLAB pour expliquer les variations des grandeurs et une étude sur les choix des appareillages et le fonctionnement de les deux circuits.

1) **Simulation via le logiciel Schemaplic****Introduction au logiciel Schemaplic**

Schemaplic est un logiciel de conception des schémas électriques, la simulation du fonctionnement et l'édition des schémas avant leur mise en œuvre, il est créé par la société française Fitec.

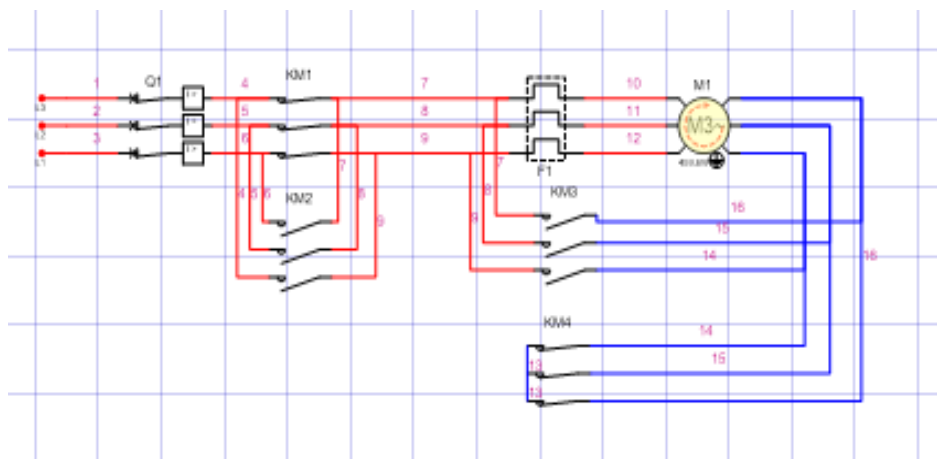
1.1) **Démarrage étoile sens (1) :****1-1-a) Circuit de puissance pour le mode (démarrage étoile dans le sens 1)**

Figure (42) : simulation de circuit puissance de démarrage étoile 1<sup>er</sup> sens

Dans la figure(42) , le moteur est démarré en 1<sup>er</sup> temps en étoile avec le sens 1, dont la vitesse du moteur et sa puissance sont faibles.

## 1-1-b) démarrage étoile dans le sens 1 circuit de commande

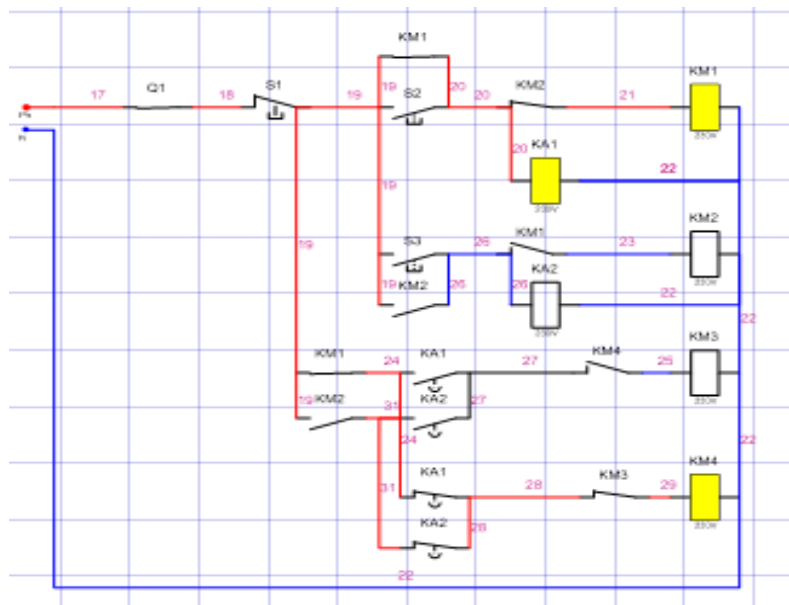


Figure (43) : simulation de circuit de commande de démarrage étoile sens 1

A partir de la figure (43) qui représente le circuit de commande (pour le mode démarrage étoile dans le sens 1), on constate que si on appuie sur la Bouton poussoir S1 en vue que la bobine d'alimentation dans sens 1 est excitée par un système auto-maintenance assuré par contact auxiliaire KM1 et la bobine de la temporisation dans la sens 1 KA1 est excitée avec aussi la bobine KM4 pour assurer le couplage en étoile

## 1.2) Démarrage triangle sens 1 :

## 1-2-a) démarrage triangle sens 1 circuit de puissance :

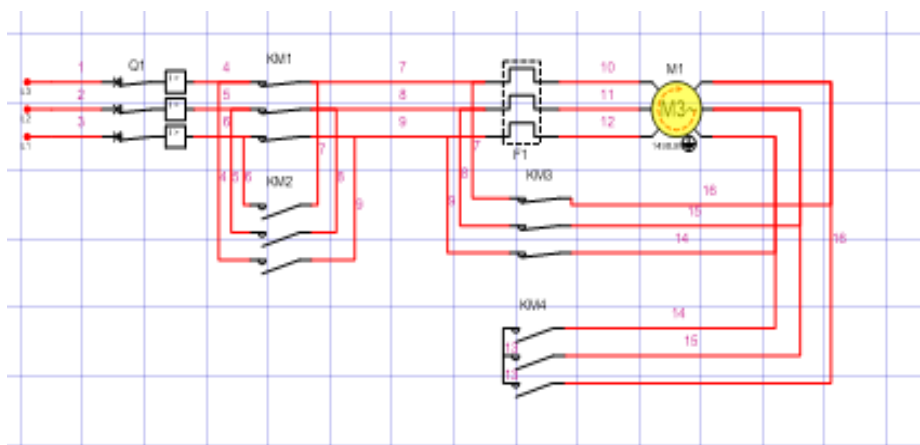


Figure (44) : simulation de circuit de puissance fonctionnement en triangle sens 1

A partir de la figure (44), on remarque que le moteur est alimenté en triangle (2ème temps) avec augmentation de la vitesse et du couple de moteur.

1-2-b) démarrage triangle sens 1 circuit de commande :

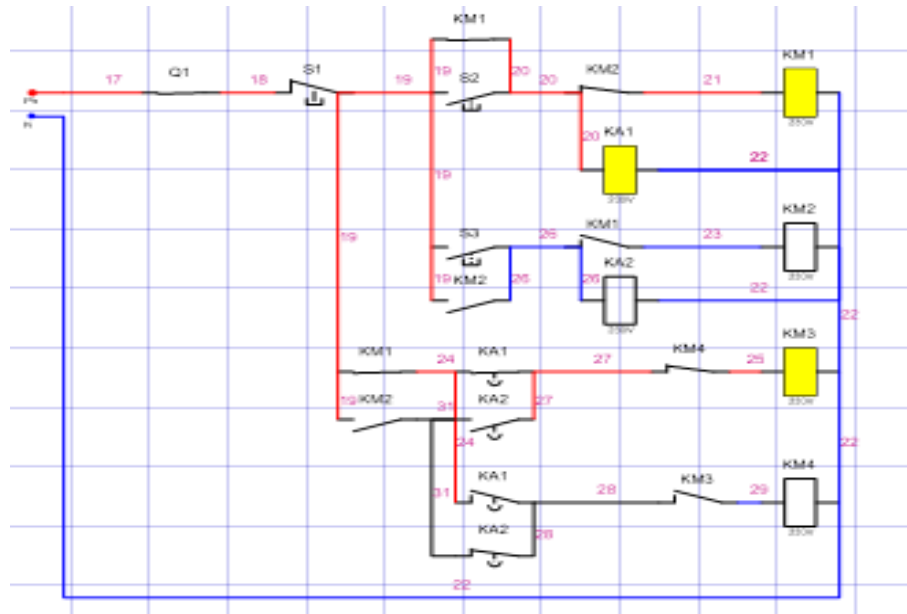


Figure (45) : simulation de circuit de commande fonctionnement en triangle sens 1

A partir de cette figure(45),on constate après le temps de temporisation que la bobine de **KM4** est non alimentée et la bobine **KM3**est alimentée pour assurer le couplage en triangle.

1.3) Démarrage étoile sens 2

1-3-a) Circuit de puissance du mode de démarrage étoile dans le sens 2

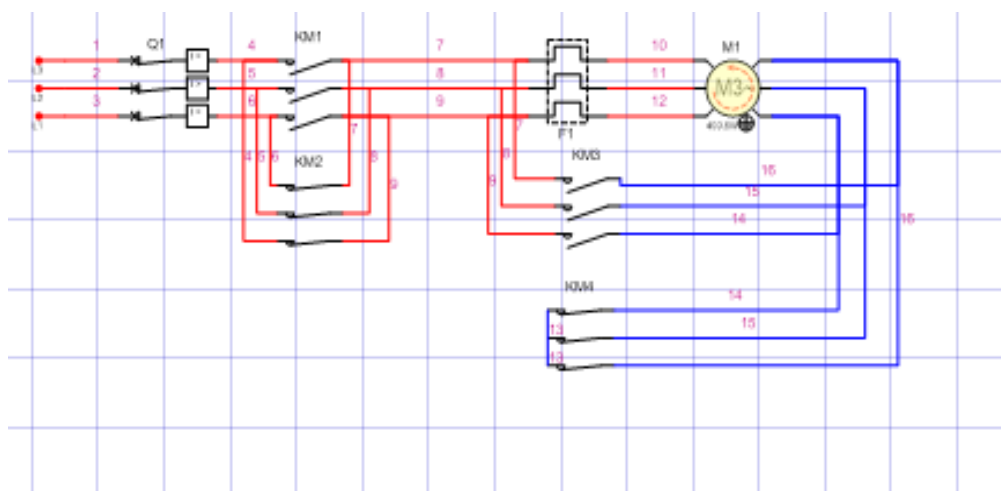


Figure (46) : simulation de circuit puissance de démarrage étoile 2eme sens

En remarque à partir de la figure(46)que le moteur est démarré en étoile dans le sens 2 avec un couple et une vitesse faibles.

## 1-3-b) Circuit de commande de mode de démarrage étoile dans le sens 2

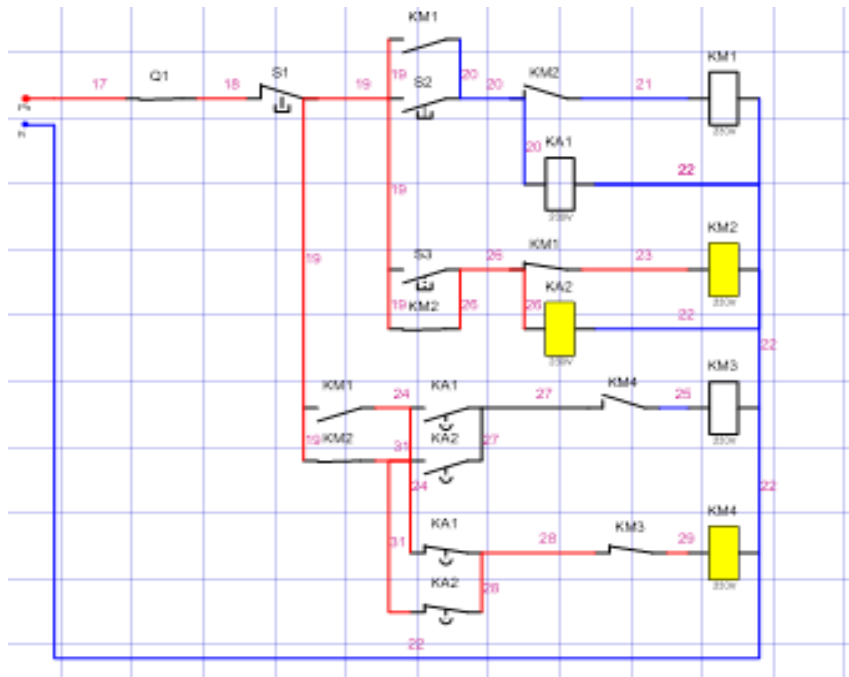


Figure (47) : simulation de circuit de commande de démarrage étoile sens 2

A partir de la figure (47), on remarque que si on appuie sur le Botton poussoir **S3** la bobine **KM2** du contacteur d'alimentation dans le sens 2 est alimenté au même temps avec la bobine **KA2** de temporisation dans le sens 2, ainsi la bobine **KM4** pour assurer le couplage étoile.

## 1.4) Démarrage triangle dans le sens 2 :

## 1-4-a) Circuit de puissance pour le mode de démarrage triangle dans le sens 2

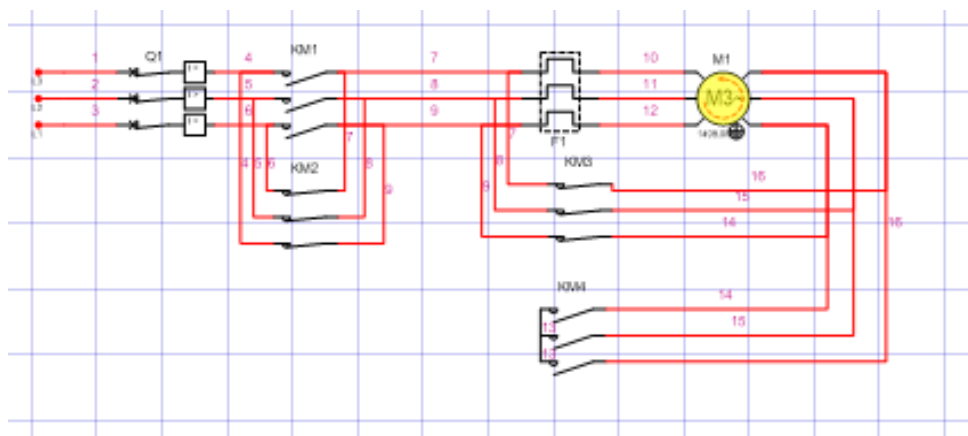


Figure (48) : simulation de circuit de puissance fonctionnement en triangle sens 2

A travers la figure (48), le moteur est démarré en triangle dans le sens 2 dont le couple et la vitesse augmentent.

1-4-b) **Circuit de commande pour le mode de démarrage triangle sens 2**

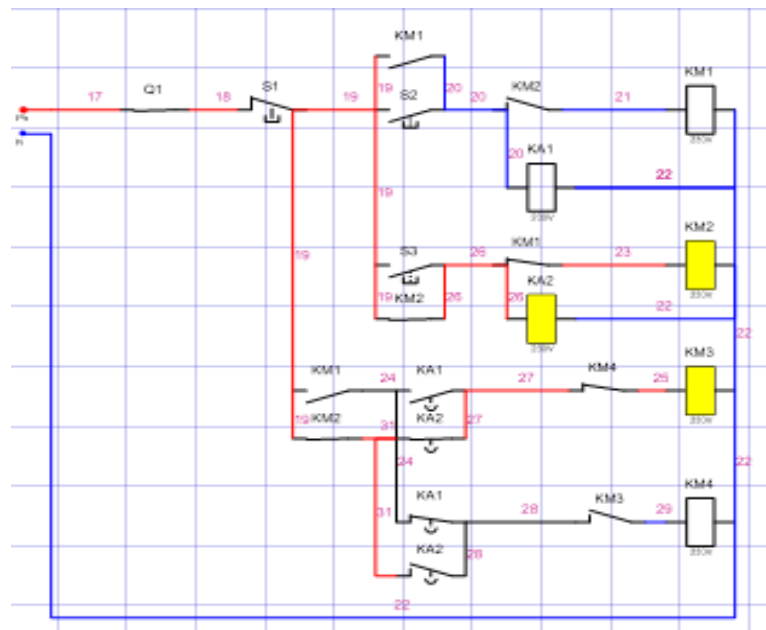


Figure (49) : simulation de circuit de commande de démarrage étoile sens 2

Pour le 2ème temps, on remarque qu'après 3 secondes la bobine **KM3** est alimentée à partir de la fermeture du contact temporisé **KA2** afin d'assurer le couplage en triangle (voir figure (49)).

1.5) **Démarrage direct avec freinage par injection de courant continu :**

1-5-a) **démarrage circuit de puissance :**

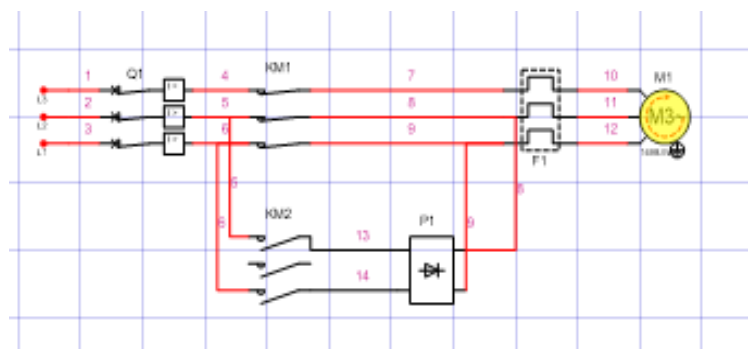


Figure (50) : simulation de circuit de puissance sans freinage

Ce circuit représenté en figure (50) schématise le mode de démarrage direct du moteur avec une protection magnétothermique.

#### 1-5-b) circuit de commande :

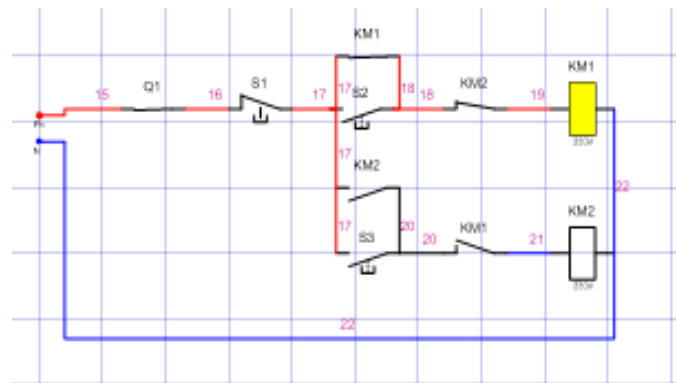


Figure (51) : simulation circuit de commande sans freinage

A partir de la figure (51), on constate que si on appuie sur le Bouton poussoir **S2** la bobine **KM1** du contacteur d'alimentation direct est alimentée.

#### 1-5-c) Circuit de puissance du mode de freinage

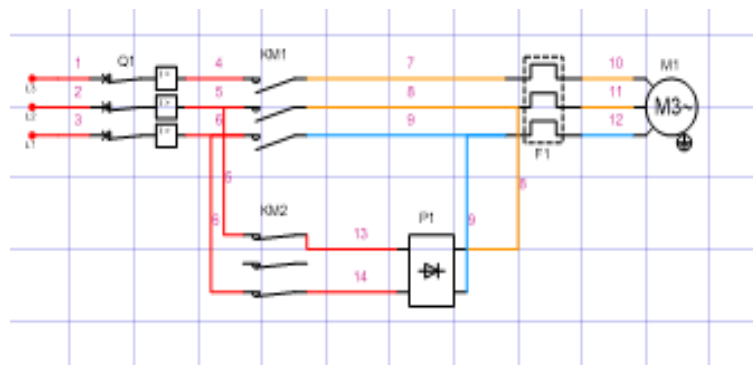


Figure (52) : simulation de circuit de puissance freinage de moteur

On voit à partir de la figure (52) que la contacteur **KM2** est fermé et alimente un redresseur, ce dernier qui délivre un courant continu pour assurer le freinage.

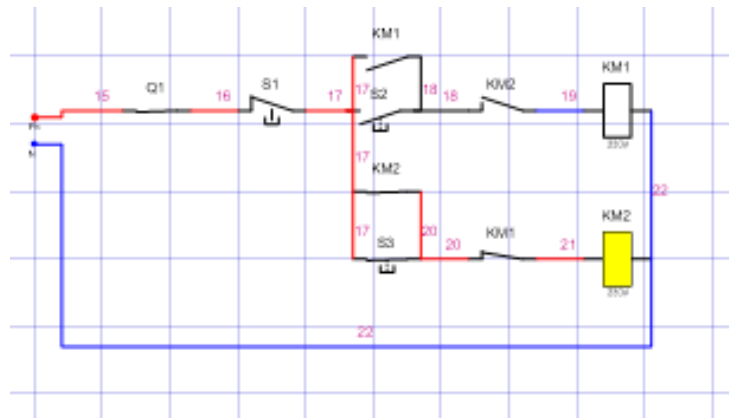
1-5-d) **Circuit de commande** du mode **freinage**

Figure (53) : simulation de circuit de commande avec freinage de moteur

On appuie sur le bouton poussoir normalement fermé **S1** afin de couper l'alimentation triphasé du moteur, puis on appuie sur le bouton poussoir **S3** afin d'assurer l'alimentation de la bobine **KM2** qui assure le freinage par injection de courant continu (voir la figure (53)).

2) **Simulation du circuit par MATLAB**

Le logiciel MATLAB joue plus que jamais un rôle respectable dans le monde des logiciels de simulation possédant une large base des données et incluant l'outil Simulink pour les simulations électrotechniques. De ce fait, on pourra l'utiliser pour reproduire le contacteur électrique, le disjoncteur, et le relais thermique.

2-1) **Simulation des éléments du système**

L'outil Simulink sera employé pour développer un modèle mathématique représentant chaque élément. Pour cela, on utilisera les bibliothèques de Simulink afin de reproduire fidèlement le comportement électromécanique et électrotechnique des relais thermiques et des contacteurs.

2-2) **Modèle de disjoncteur**

On simulera un disjoncteur magnétothermique, sachant que le système d'équation qui traduit le fonctionnement de ce dernier est :

Si :  $H_{ph} = H_n$ ,  $\implies$  alors disjoncteur fermé,

Si :  $H_{ph} \neq H_n$ ,  $\implies$  alors disjoncteur ouvert.



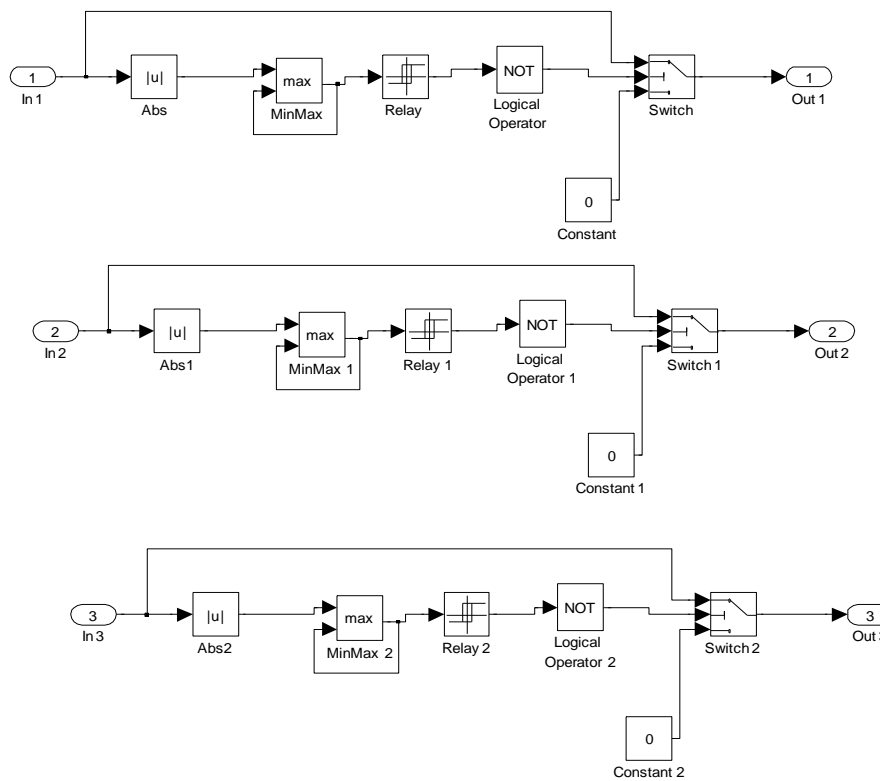


Figure (54) : simulation d'un disjoncteur par MATLAB

2-3) Modèle du contacteur

Lorsque sa bobine de commande est alimentée, elle crée un champ magnétique qui attire les contacts liés mécaniquement et ainsi fermé le circuit, tel que la bobine est branchée sur le circuit de commande. Le modèle sur le Simulink est le suivant:

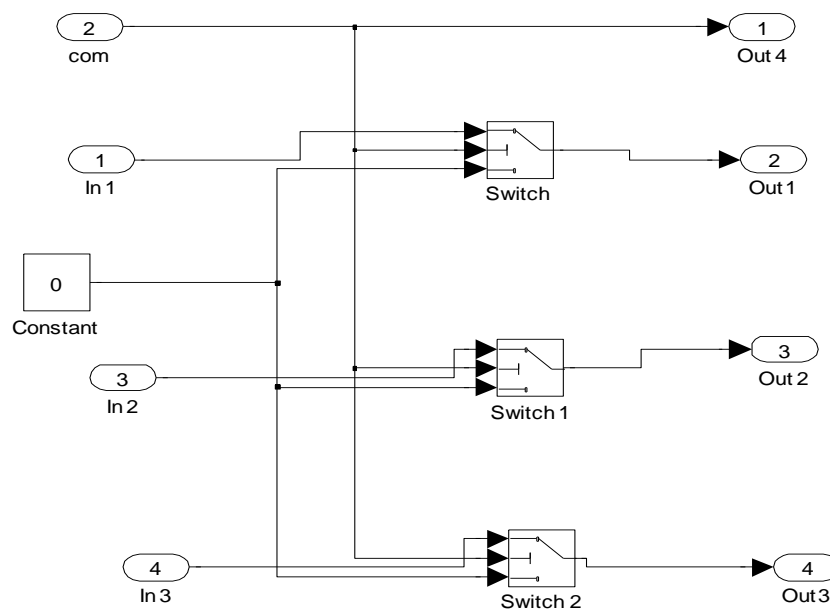


Figure (55) : simulation d'un contacteur par MATLAB

### 2-4) Modèle du relais thermique

En cas de surcharge, le relais thermique n'agit pas directement sur le circuit de puissance, un contact du relais thermique ouvre le circuit de commande de la bobine de maintien ainsi le contacteur coupe le courant dans le récepteur, ainsi il faut ajouter une temporisation comme pour relais de phase :

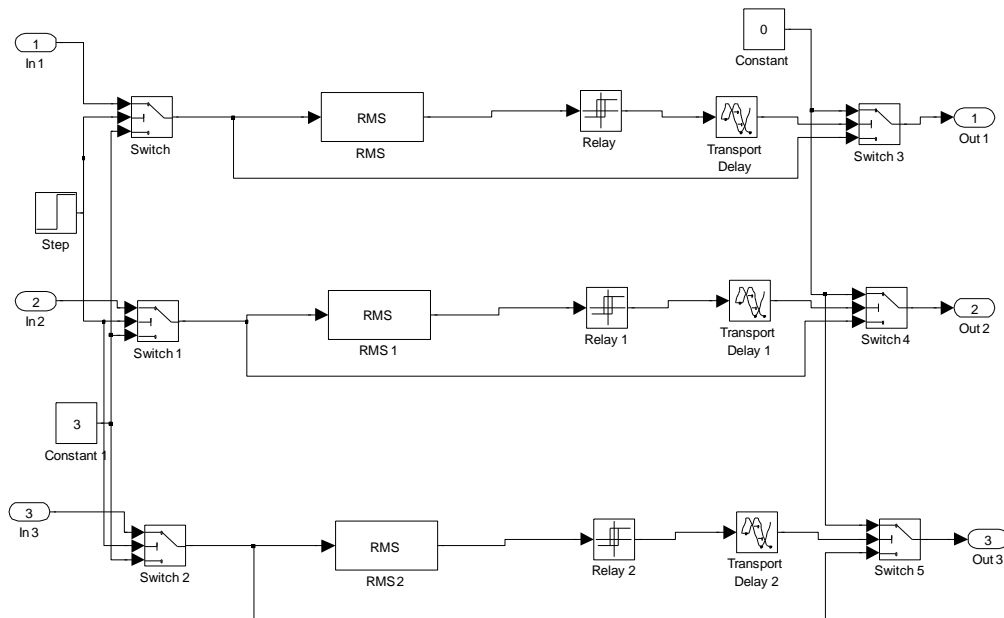


Figure (56) : simulation d'un relais thermique par MATLAB

### 2-5) Modèle du circuit de démarrage étoile triangle

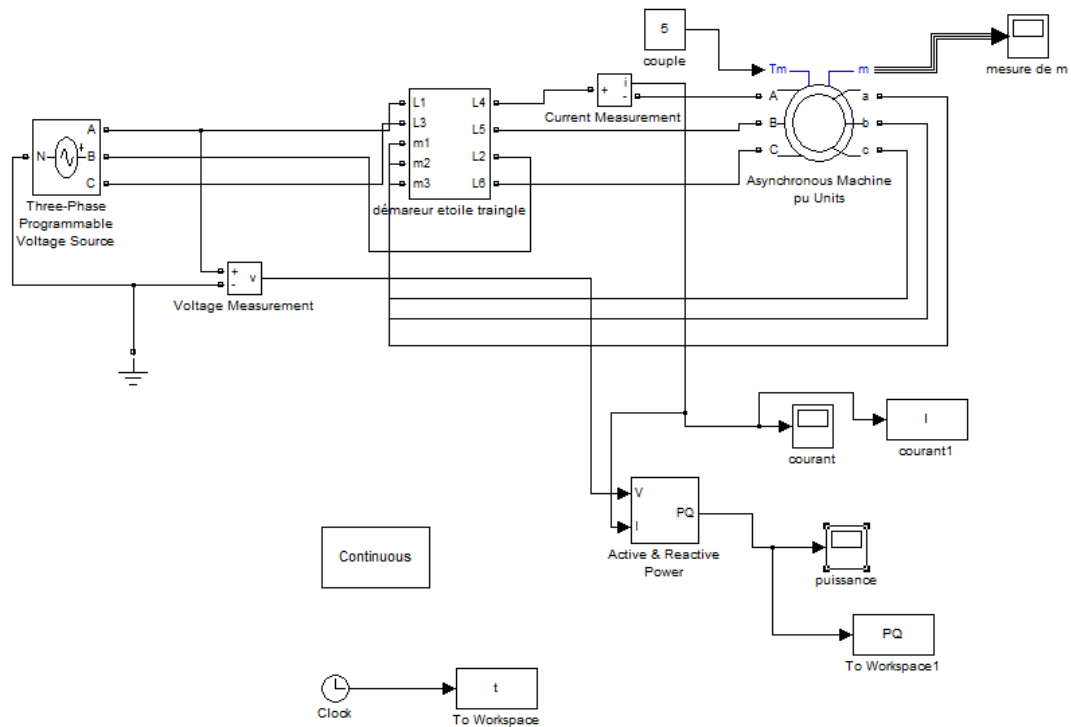


Figure (57) : simulation d'un démarrage étoile triangle par MATLAB

### 2-6) Les résultats de simulation

#### 2-6-a) Le courant appliqué

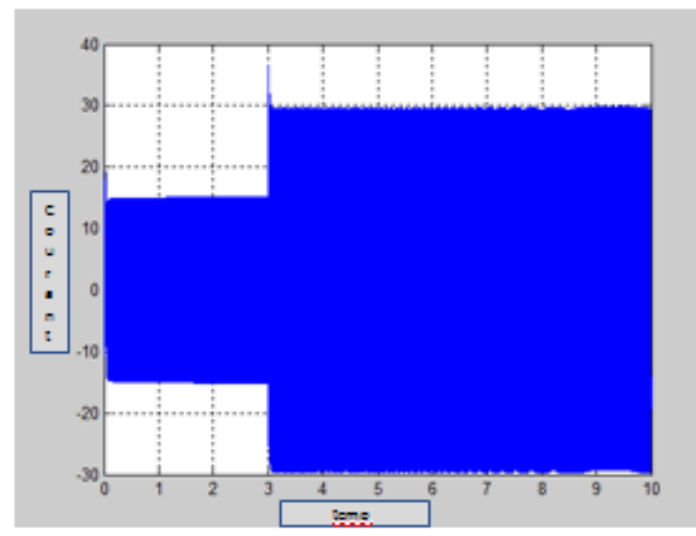


Figure (58) : résultat de courant dans le démarrage étoile triangle

On constate à travers la figure (58) que le courant de démarrage est peu faible dans le moment de démarrage de  $t=0s$  à  $t=3s$ , et à partir de  $t=3s$  il augmente pour atteindre 30 A

2-6-b) La puissance

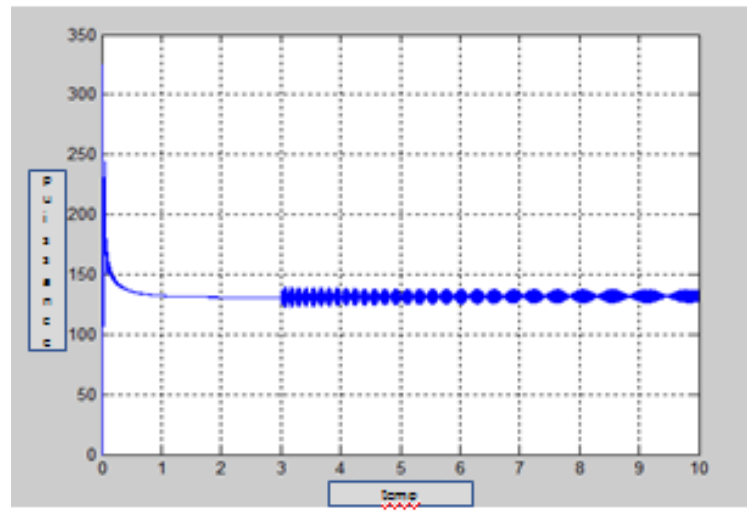


Figure (59) : figure de puissance active et réactive dans le démarrage étoile triangle

A partir de la figure (59), on remarque que la puissance active (ligne bleue) est faible dans le moment de démarrage (dans le couplage étoile), et après 3s on constate que ce dernier augmente.

2-7) Simulation du circuit de freinage par injection de courant continu

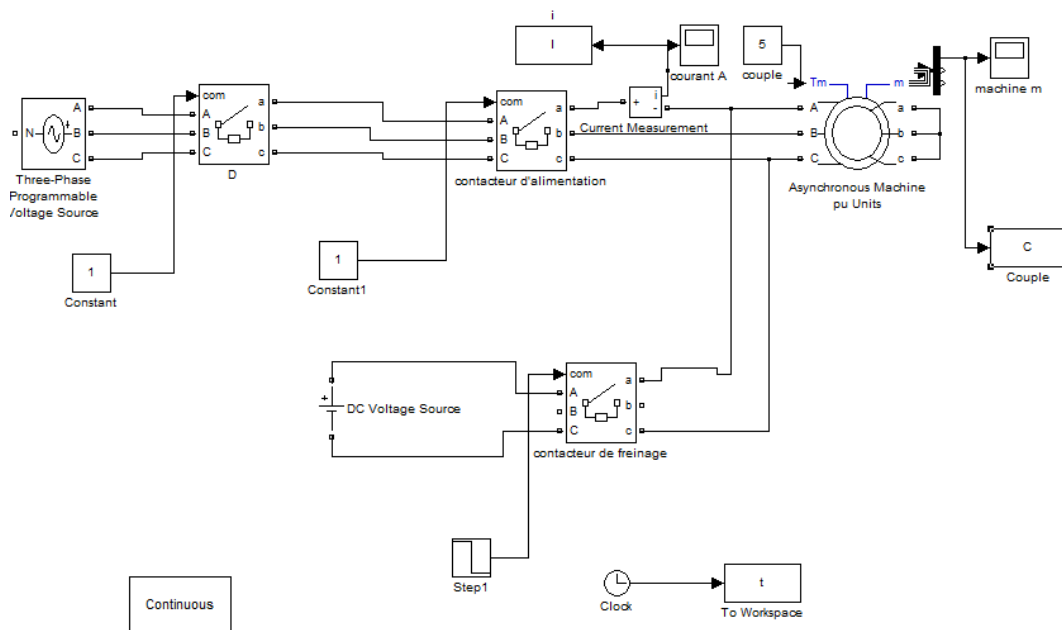


Figure (60) : simulation de freinage par injection de courant continu par MATLAB

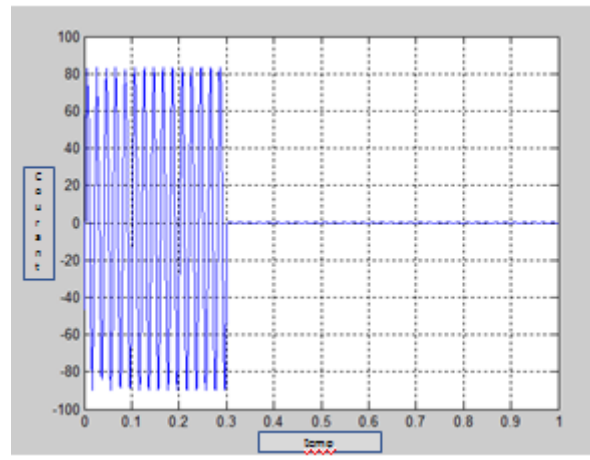
2-8) Les résultats2-8-a) Le courant

Figure (61) : résultat de courant

A travers la figure (61), on remarque que le courant après 0.3s est parfaitement sinusoïdale et égale à 80 A, mais si on injecte le courant continu (voir  $t=0.3s$ ) on constate que le courant devient nulle ce qui signifie que le moteur est freiné.

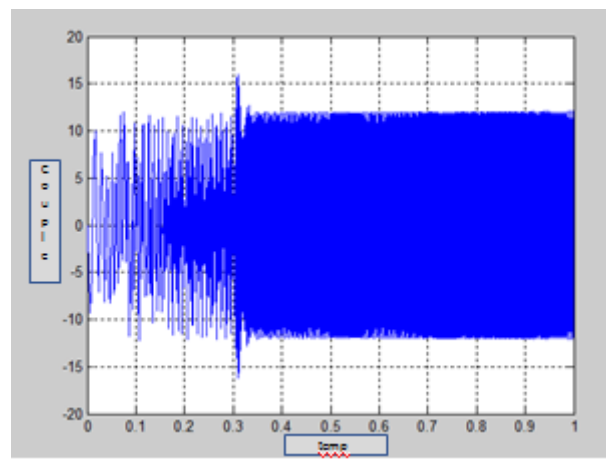
2-8-b) Le couple

Figure (62) : résultat de couple

On remarque à partir de la figure (62) que le couple oscille sur la valeur de 10 N.m mais après l'injection de courant continu (le freinage de moteur) le couple augmente jusqu'à 12 N.m (Voir  $t=0.3s$ ).

3) Etude pratique et choix des matériaux3-1) caractéristique des récepteurs (des moteurs)3-1-a) moteur de démarrage direct avec freinage par injection de courant continu

Figure (63) : plaque signalétique d'un moteur asynchrone

Cette plaque signalétique illustrée dans la figure (63) est pour un moteur de faible puissance 1.5 Kw avec une tension simple de 230V et composée de 400V, son facteur de puissance est de 0.78 et un courant max de 6.65A et min de 3.84 A, avec une vitesse de rotation de 1440 tr/min.

3-1-b) moteur pour le démarrage étoile triangle :

Figure (64) : plaque signalétique d'un moteur asynchrone à 6 bornes

A partir de la plaque signalétique de la figure (64), on constate que ce moteur-là est de moyenne puissance avec une puissance active de 5.5 KW et une vitesse de rotation de 1455 tr/min et de courant max de 11.3 A et min de 3.5 A avec un facteur de puissance de 0.85.

3-2) **choix des appareillages :**3-2-1) **Choix d'appareillages de protection :**3-2-1-a) **caractéristique de choix d'un disjoncteur :**

Le choix de disjoncteur est très important dans l'installation électrique industriel tel qu'il en fonction de :

- Des caractéristiques électriques de l'installation sur laquelle il est installé,
- De l'environnement dans lequel il se trouve, température ambiante, installation en armoire, conditions climatiques,
- Des caractéristiques de pouvoir de coupure et de pouvoir de fermeture,
- Des impératifs d'exploitation : sélectivité, nécessité ou non de fonctions auxiliaires telles que télécommande, commande rotative, contacts auxiliaires, bobines de déclenchement auxiliaire,
- Insertion dans un réseau de communication local ou de supervision, etc.,
- Des règles d'installation, en particulier pour la protection des personnes,
- Des caractéristiques des récepteurs, tels que moteurs, éclairage fluorescent, transformateurs BT / BT, etc. Les problèmes posés par ces récepteurs sont examinés en détail au chapitre M.

Donc pour les deux circuits, on choisi un disjoncteur de pouvoir de coupure supérieure à 11.5 A donc un disjoncteur de pouvoir de coupure de 16A, pour le circuit de démarrage étoile triangle et 6.65A pour le 2ème circuit donc un disjoncteur de pouvoir de coupure de 8A.

3-2-1-b) **caractéristique de choix d'un relais thermique :**

Le choix d'un relais thermique dépend de courant de surcharge pour la coupure LRD donc pour un moteur de 6.65A on choisi un relais thermique de LRD10 en classe de 20A, et pour un moteur de 11.5A on choisi un LRD1510 en classe de 20A.



Figure (65) : relais thermique des classes 20A et 10A [8]

### 3-2-2) choix d'appareillages de commande :

#### 3-2-2-a) choix de contacteur :

Le choix de contacteur dépend de :

-Courant d'emploi  $I_e$  : c'est le courant pour que le contacteur doit fonctionner sans échauffement,

-Tension d'emploi  $U_e$  : c'est la tension à laquelle le contacteur fonctionne de façon efficace,

-Pouvoir de coupure: c'est la valeur maximale de courant pour que le contacteur doit assurer le contact et le pouvoir de coupure dépend de la tension c'est la tension d'alimentation est faible plus le pouvoir de coupure est grande,

-Pouvoir de fermeture: c'est la valeur de courant maximale pour que le contacteur doit fonctionner sans souder de contact,

-Tension de bobine : c'est la tension de fonctionnement de la bobine de commande de contacteur,

Pour les deux circuits, on choisit un contacteur de tension de bobine de 230V et tension des contacts de 400V avec un courant de 16A.



Figure (66) : contacteur de puissance [2]

#### 4) Choix des files :

Le choix de file est très important dans l'installation industrielle à cause de leur résistance, noter bien que ce choix dépend de la tension d'alimentation, de la température et des conditions climatiques et environnementales.

Exemple, pour le circuit de puissance on a choisi des files qui supportent une tension de 400V et pour le circuit de commande des files qui supportent 230V.



Tel que pour calculer la section des files qu'on a utilisé dans l'armoire en utilise la loi suivante :

$$S=I/L \dots\dots\dots(9) [8]$$

Ou :

S : la section de file

I : le courant qui parcure

L : la longueur de file

A.N :

On la longueur des files est  $L=50 \text{ cm} = 0.5 \text{ m}$

Le courant qui parcure est  $I= P/(3*V*\cos(\alpha)) = 1500/(380*3*0.95) = 1.38 \text{ A}$

Ou : P : puissance active de moteur , V : tension simple ,  $\cos(\alpha)$  : facteur de puissance

Donc  $S= 1.38/0.5$

$S = 2.76 \text{ mm}^2$  donc on doit choisi une file de section  $S= 4 \text{ mm}^2$  pour assurer l'absence d'échauffement

## 5) Caractéristiques des appareils utilisées

### 5-1) contacteur

Le contacteur que nous avons choisi est caractérisé par :

- tension alternative de 380 V pour les contacte de puissance
- tension de la bobine est de 220 V avec fréquence de 50HZ
- puissance supporter est de 4 kW
- calibre de courant de 16 A
- courant thermique de 25 A
- tension de défaillance de 600 V

**5-2) temporisateur**

On a choisi un temporisateur On Delay (de travail) LA2-DT2 de :

- calibre de temps entre 0.1 à 30s
- courant nominale de fonctionnement 6 A
- courant maximale de 10 A
- tension de fonctionnement 380 V
- tension maximale 500 V

**Conclusion :**

Dans ce chapitre on a entamé la simulation de circuit utilisons deux logiciels MATLAB et shémaplic pour tester le bien fonctionnement de circuit avec leurs caractéristiques.

Le choix des appareillages est très important pour le bien fonctionnement de circuit talque chaque appareillage est repos sur des critères spécifiques.

## Conclusion générale

---

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif principale d'étudier et de réaliser le démarrage étoile triangle à deux sens de rotation avec un circuit de freinage par injection de courant continu.

Dans le 1<sup>er</sup> chapitre on a présenté brièvement les moteurs asynchrones, les techniques de démarrage avec leurs circuits et ainsi les circuits des freinages de moteur.

Dans le 2<sup>ème</sup> chapitre, on a entamé en détail la technique de démarrage étoile triangle à deux sens avec un freinage par injection de courant continu, dont on a étudié les appareils utilisés pour les deux circuits.

Dans le 3<sup>ème</sup> chapitre on c'est focalisé sur la simulation du circuit par le logiciel Schemaplic avec le choix du matériels utilisés pour la réalisation de circuit et ces caractéristiques.

Ce travail de fin d'étude en Master 2 en électromécanique représente une solution industrielle qui permettra de surmonter les problèmes fréquemment rencontrés dans les unités industrielles (démarrage et freinage).

Comme perspectives, on propose :

- L'utilisation de démarrage étoile triangle surtout pour une chaîne de production industrielle,
- Remplacer l'appareillage couteux par un circuit électronique des relais et de microcontrôleur qui permet le même fonctionnement de démarrage étoile triangle.

## Références

[1] **Amari M (2017)** Cours d'électrotechniques. Institut Supérieure des études Technologiques de Nabeul.

[2] **Said A, Jemal Y (2003,2004)** Cours Installation industrielle, Institut Supérieure des Etudes Technologiques de Nabeul.

[3] **Benaïed N (2014)** Cours Schémas et appareillages électriques, Centre Universitaire de Relizene, Institut des sciences et de technologie.

[4] **Schneider électrique (2007)** Cours Démarrage et protection de moteur, Chapitre 4 : Démarrage et freinage de moteur asynchrone.

[5] **Guezmil A (2016)** thèse de doctorat : Synthèse et Implémentation des observateurs d'Etat pour le diagnostic et la commande de la Machine Asynchrone. Ecole Nationale d'ingénieurs de Monastir.

[6] [fr.electrical-installation.org](http://fr.electrical-installation.org), consulté le 24/09/2020

[7] [www.schéma-électrique.net](http://www.schéma-électrique.net), consulté le 13/10/2020

[8] [www.cours-gratuit.com](http://www.cours-gratuit.com) , consulté le 02/08/2020

[9] **Benttia H (2017)** mémoire de master : Etude et dimensionnement électrique du nouveau site de la câblerie algérienne, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem.

