

**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE**



**FILIERE GENIE INDUSTRIEL  
DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE  
DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE ET PRODUCTIQUE**

*MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU  
DIPLOME D'INGENIEUR EN GENIE INDUSTRIEL  
N°38/2004*

**ETUDE DES DISPOSITIFS DE LIMITATION DU COURANT  
DE DEMARRAGE  
DES MOTEURS ASYNCHRONES A CAGE**



Présenté par :

**ANDRIAMPARAMANIRAKA Manampisoa Nirina**

Directeur de mémoire :  
**Monsieur RABENARIVO Michel**  
Enseignant à l' E.S.P.A

**Date de soutenance : 30 Avril 2005**

*PROMOTION 2004*



## REMERCIEMENTS

Ce mémoire a été préparé au sein du département Génie électrique, Filière Génie Industriel à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo. De ce fait, j'aimerais adresser mes sincères remerciements à :

- M. Benjamin RANDRIANOELINA, directeur de l'école supérieure polytechnique d'Antananarivo
- M. Yvon ANDRIANAHARISON, chef de département Génie électrique à l'E.S.P.A
- M. Rabenatoandro JOELIARITAHAKA, chef de département Génie mécanique et productique à l'E.S.P.A
- L'ensemble des enseignants à l'E.S.P.A

Je remercie également

- M. RATOVOHARISOA qui me fait l'honneur de présider ce jury, ainsi que
  - M. RAKOTONIAINA Solofo Hery, enseignant à l'ESPA , membre de jury,
  - M. RAJAONARIVELO Jean André, enseignant à l'ESPA , membre de jury,
  - M. RAVALOMANANA Olivier, enseignant à l'ESPA , membre de jury ;
- qui ont voulu consacrer leurs temps pour juger notre travail avec leurs questions et leurs remarques constructives

Je tiens à témoigner aussi ma reconnaissance à M. RABENARIVO Michel, enseignant à l'E.S.P.A pour son encadrement, ses conseils, ses encouragements et sa disponibilité sans faille

Je ne peux oublier toute ma famille, mes amis qui m'ont soutenu moralement, matériellement et financièrement

# RESUME

Le moteur asynchrone est le moteur de base de l'industrie actuelle. Le choix de ce moteur sur une application industrielle nécessite la maîtrise de son démarrage. Pour comprendre le comportement du moteur pendant la phase de démarrage, nous avons conçu un outil de calcul qui exécute les simulations de fonctionnement du moteur au démarrage. Nous avons étudié aussi quelques procédés de démarrage des moteurs asynchrones à cage d'écureuil.

Les théories, les méthodes utilisées, les schémas de circuit de puissance et circuit de commande des démarreurs, les informations sur le logiciel de simulation sont élaborés dans cet ouvrage

# ABSTRACT

The asynchronous motor is the motor of basis of the present industry. The choice of this motor on an industrial application requires the mastery of his starting. To understand the behavior of the motor during the phase of starting, we conceived a tool of calculation that executes the simulations of working of the motor to the starting. We studied as some processes of starting of the asynchronous motors in cage of squirrel.

The theories, the used methods, the diagrams of power circuit and circuit of order of the starters, the information on the software of simulation are elaborated in this work

## LISTE DES FIGURES

N°Figure	Titre	page
Fig1-1	Schéma simplifié d'un moteur asynchrone.....	15
Fig1-2	Moteur asynchrone.....	17
Fig1-3	Schéma équivalent d'un moteur asynchrone.....	20
Fig1-4	Schéma équivalent transformé.....	21
Fig1-5	Courbes du couple électromagnétique et du couple résistant.....	22
Fig1-6	Courbes des couples résistants.....	23
Fig2-1	Représentation schématique d'un moteur asynchrone triphasé....	25
Fig2-2	Représentation des différents systèmes d'axes.....	28
Fig2-3	Organigramme de calcul pour le régime transitoire.....	35
Fig2-4	Courbe du courant statorique en fonction du temps.....	36
Fig2-5	Courbe du couple électromagnétique en fonction du temps.....	36
Fig2-6	Schéma fonctionnel d'un entraînement électromagnétique.....	37
Fig3-1	Couplage étoile triangle.....	40
Fig3-2	Courbes des intensités du courant en couplage étoile triangle.....	42
Fig3-3	Courbes des couples moteurs en couplage étoile triangle.....	42
Fig3-4	Circuit de puissance d'un démarrage étoile triangle.....	44
Fig3-5	Circuit de commande d'un démarrage étoile triangle.....	45
Fig3-6	Chronogramme du circuit de commande .....	46
Fig4-1	Schéma de principe de fonctionnement d' un démarrage statorique à résistances.....	48
Fig4-2	Courbes des courants pour un démarrage statorique à résistances.....	49
Fig4-3	Courbes des couples pour un démarrage statorique à résistances	49
Fig4-4	Circuit de puissance d'un démarrage statorique à résistances....	51
Fig4-5	Circuit de commande d'un démarrage statorique à résistances....	52
Fig5-1	Montage anti-parallèle de deux thyristors.....	54
Fig5-2	Schéma de montage d'un gradateur triphasé.....	55
Fig5-3	Schéma fonctionnel d'un gradateur triphasé à charge résistive et inductive.....	57

Fig5-4	Allure des tensions d'alimentation.....	57
Fig5-5	Allure du courant à travers la charge RL.....	58
Fig5-6	Allure de la tension $V_{ch1}$ aux bornes de la charge RL.....	58
Fig5-7	Dispositif de démarrage par gradateur de tension d'un moteur asynchrone à deux sens de rotation.....	59
Fig5-8	Représentation schématique d'un dispositif de commande de gâchettes.....	60
Fig5-9	Fonctionnement d'un dispositif de commande de gâchettes.....	61
Fig5-10	Schéma bloc du circuit de commande d'un gradateur monophasé	61
Fig5-11	Schéma bloc du circuit de commande d'un gradateur triphasé.....	62
Fig5-12	Schéma d'un suiveur et d'un intégrateur.....	63
Fig5-13	Schéma de montage pour avoir la tension de commande $U_{cm}$ .....	63
Fig5-14	Schéma de montage d'un comparateur avec élimination de la composante négative de son signal de sortie.....	63
Fig5-15	Schéma d'un bascule monostable.....	64
Fig5-16	Schéma d'un amplificateur avec un transformateur d'impulsion....	64
Fig6-1	Fenêtre d'accueil de DEMAS.....	67
Fig6-2	Fenêtre d'accueil de DEMAS1.....	67
Fig6-3	Fenêtre d'accueil de DEMAS2.....	68
Fig6-4	Schéma de simulation d'un démarrage direct sous DEMAS2.....	69
Fig6-5	Allure des courants dans les enroulements statoriques en fonction du temps.....	69
Fig6-7	Courbe du couple électromagnétique en fonction du temps.....	70
Fig6-8	Courbe de la vitesse du moteur en fonction du temps.....	70
Fig6-9	Courbes du courant statorique, du couple électromagnétique, et de la vitesse du moteur en fonction du temps (sous DEMAS1).....	71
Fig6-10	Schéma des contacts d'un contacteur tripolaire.....	72
Fig6-11	Schéma de simulation d'un démarrage étoile triangle.....	73
Fig6-12	Courbes des courants statoriques en fonction du temps pendant le démarrage étoile triangle.....	73
Fig6-13	Courbe du couple électromagnétique en fonction du temps pendant le démarrage étoile triangle.....	74
Fig6-14	Courbe de la vitesse en fonction du temps pendant le démarrage	

	étoile triangle.....	74
Fig6-15	Schéma du démarreur statorique à résistances.....	75
Fig6-16	Schéma de simulation d'un démarrage statorique à résistances...	76
Fig6-17	Courbes des courants statoriques en fonction du temps au démarrage statorique à résistances.....	76
Fig6-18	Courbe du couple électromagnétique en fonction du temps au démarrage statorique à résistances.....	77
Fig6-19	Courbe de la vitesse en fonction du temps au démarrage statorique à résistances.....	77
Fig6-20	Schéma de simulation d'un démarrage par gradateur de tension..	78
Fig6-21	Schéma d'un gradateur triphasé.....	79
Fig6-22	Allure des impulsions introduites dans les gâchettes des thyristors.....	80
Fig6-23	Courbes des courants statoriques pour $\alpha=75^\circ$ .....	81
Fig6-24	Courbe du couple électromagnétique pour $\alpha=75^\circ$ .....	81
Fig6-25	Courbe de la vitesse de rotation pour $\alpha=75^\circ$ .....	81



## NOMENCLATURES

$g$  : glissement

$\Omega_r$  : Vitesse de rotation du rotor en [rad/s]

$n_r$  : Vitesse de rotation du rotor en [tr/min]

$\Omega_s$  : Vitesse du synchronisme en [rad/s]

$n_s$  : Vitesse du synchronisme en [tr/min]

$f$  : fréquence du réseau en [Hz]

$p$  : nombre de paire de pôles

$V_s$  : Tension statorique en [V]

$R_s$  : Résistance statorique en [ $\Omega$ ]

$X_{\sigma s}$  : Réactance de fuite du stator en [ $\Omega$ ]

$R_r$  : Résistance rotorique en [ $\Omega$ ]

$R_r'$  : Résistance rotorique ramenée au stator en [ $\Omega$ ]

$X_{\sigma r}'$  : Réactance de fuite du rotor ramenée au stator en [ $\Omega$ ]

$X_h$  : Réactance mutuelle apportée au stator en [ $\Omega$ ]

$k$  : rapport de transformation

$C_{em}$  : Couple électromagnétique en [N.m]

$C_r$  : Couple résistant en [N.m]

$l_s$  : Inductance propre d'une phase statorique en [H]

$l_r$  : Inductance propre d'une phase rotorique en [H]

$l_{ss}$  : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques en [H]

$l_{rr}$  : Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques en [H]

$l_{sr}$  : Inductance mutuelle entre phases statorique et rotorique en [H]

$\alpha$  : Angle électrique en [rad]

$L_s$  : Inductance cyclique statorique en [H]

$L_r$  : Inductance cyclique rotorique en [H]

$L_{sr}$  : Inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor en [H]

$J$  : moment d'inertie des parties tournantes en [kg/m<sup>2</sup>]

$\sigma$  : Coefficient de dispersion de Blondel

$T_e$  : période d'échantillonnage en [s]

$C_a$  : couple accélérateur en [N.m]

$K$  : gain

## TABLE DES MATIERES

<b>Remerciements</b> .....	3
<b>Résumé</b> .....	4
<b>Abstract</b> .....	5
<b>Liste des figures</b> .....	6
<b>Nomenclatures</b> .....	9
<b>Table des matières</b> .....	10
<b>Introduction</b> .....	13
<b>Première partie : LES PHENOMENES TRANSITOIRES AU DEMARRAGE DES MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASES A CAGE D'ECUREUIL</b> .....	14
<b>Chapitre 1 : GENERALITES SUR LES MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASES</b> .....	15
1.1. Constitution d'un moteur asynchrone.....	15
1.1.1.le stator.....	15
1.1.2. le rotor.....	15
1.1.2.1.le rotor à cage d'écureuil.....	16
1.1.2.2.le rotor bobiné.....	16
1.2. Description du moteur.....	17
1.3. Principe de fonctionnement.....	18
1.4. Glissement.....	19
1.5.Equations principales.....	20
1.6. stabilité du moteur.....	22
1.6.1. cas général.....	22
1.6.2. point de fonctionnement.....	22
1.7. Couple résistant.....	22
1.8. remarque.....	23
<b>chapitre 2 : LE REGIME TRANSITOIRE AU DEMARRAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE</b> .....	24
2.1. Modélisation du moteur asynchrone.....	24
2.1.1. Equations électriques en grandeur de phases.....	24
2.1.2.Changement de base de PARK.....	27
2.1.3. Couple électromagnétique .....	29
2.1.4. Equation mécanique du moteur.....	29

2.2. Résolution numérique.....	30
2.2.1. Résolution numérique des équations électriques.....	30
a) Equation d'état.....	30
b) transformation d'écriture des équation électriques.....	31
c) Résolution de l'équation d'état.....	32
2.2.2.Résolution numérique de l'équation dynamique du rotor.....	33
2.3. Courbes caractéristiques du moteur.....	35
2.4. Problèmes rencontrés au démarrage.....	36
2.5. Solutions au problèmes de démarrage.....	38
<b>Deuxième partie :LES PROCÉDES DE DEMARRAGE DES MOTEURS</b>	
<b>ASYNCHRONES TRIPHASES A CAGE D'ECUREUIL.....</b>	<b>39</b>
<b>Chapitre 3 :DEMARRAGE ETOILE TRIANGLE.....</b>	<b>40</b>
3.1. Principe.....	40
3.2. Courbes caractéristiques.....	41
3.3. Schéma de circuit de puissance.....	43
3.4. Schéma de circuit de commande.....	44
<b>Chapitre 4 : DEMARRAGE STATORIQUE A RESISTANCES.....</b>	<b>48</b>
4.1. Principe.....	48
4.2. Courbes caractéristiques.....	48
4.3. Schéma de circuit de puissance.....	50
4.4. Schéma de circuit de commande.....	51
<b>Chapitre 5 : DEMARRAGE PAR GRADATEUR DE TENSION.....</b>	<b>54</b>
5.1. Gradateur à charge résistive et inductive.....	54
5.1.1. Définition.....	54
5.1.2. Gradateur triphasé.....	55
5.1.3. Caractéristiques relatives à la charge résistive et inductive.....	56
5.2. Moteur asynchrone triphasé alimenté par un gradateur.....	59
5.3. Dispositifs de commande de gâchettes des thyristors.....	59
5.3.1. Principe de fonctionnement.....	60
5.3.2. Circuit de commande d'un gradateur monophasé.....	61
5.3.3. Circuit de commande d'un gradateur triphasé.....	62
<b>troisième partie : SIMULATION NUMERIQUE.....</b>	<b>65</b>
<b>Chapitre 6 : PRESENTATION ET EXPLOITATION DU LOGICIEL DE SIMULATION....</b>	<b>66</b>

6.1. Le logiciel DEMAS.....	66
6.2. guide d'utilisation.....	66
6.3. résultats et interprétation.....	68
6.3.1. régime transitoire au démarrage direct.....	68
6.3.2. démarrage étoile triangle.....	72
6.3.3. démarrage statorique à résistances.....	75
6.3.4. démarrage par gradateur de tension.....	78
<b>Conclusion</b> .....	83
<b>Bibliographie</b> .....	84
<b>ANNEXES</b> .....	85
Annexe A : Résultats numériques des simulations.....	86
Annexe B : Choix d'un démarreur.....	89
Annexe C : Impacts environnementaux.....	91

# INTRODUCTION

Le moteur asynchrone, avec sa simplicité de conception et d'entretien, avait la faveur des industriels depuis son invention par Nicola Tesla quand il découvrit des champs magnétiques tournants engendrés par un système de courants polyphasés. Cette simplicité s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique, liée aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor. Lors de sa mise en vitesse, la pointe d'intensité du courant est nuisible pour le réseau d'alimentation et l'à-coup du couple est gênant pour la mécanique entraînée. Il peut même avoir des conséquences destructives. D'où l'objectif principal de ce travail : « étude des dispositifs de limitation du courant de démarrage des moteurs asynchrones à cage ». Afin de procéder à l'analyse de cette étude, nous allons adopter un plan ternaire, dont la première partie sera consacrée à l'étude des phénomènes transitoires au démarrage comportant les deux chapitres suivants :

Le premier chapitre consiste à donner les généralités sur les moteurs asynchrones. Le deuxième chapitre approfondira le régime transitoire au démarrage direct d'un moteur asynchrone.

Dans la deuxième partie, nous allons présenter quelques procédés de démarrage ayant trois chapitres consécutifs ; d'abord, le démarrage étoile triangle dans le chapitre premier, ensuite, le démarrage statorique à résistance du chapitre second et enfin le troisième chapitre approfondira le démarrage par gradateur de tension.

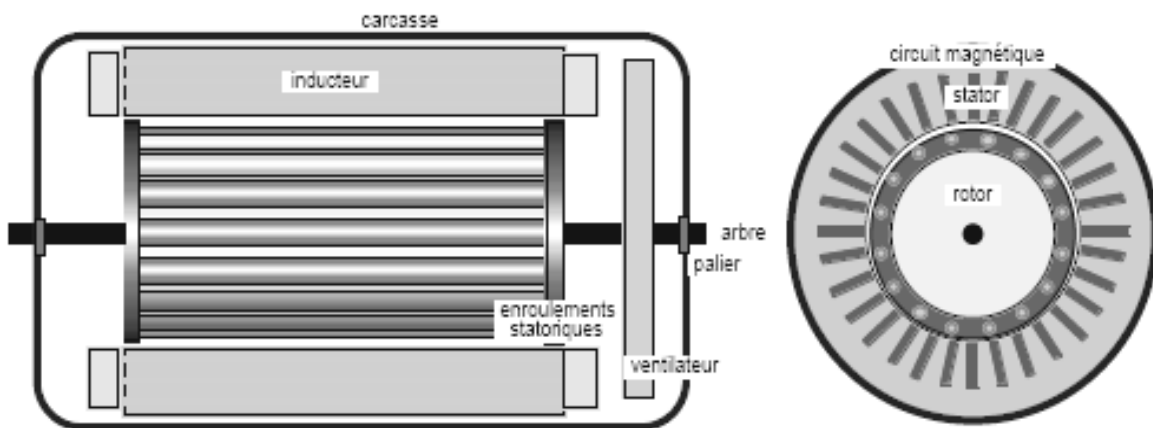
Finalement dans la troisième partie, nous passerons, en premier lieu à la simulation numérique du fonctionnement du moteur au démarrage direct et en deuxième lieu la simulation numérique du moteur avec les procédés de démarrages proposés.

# PARTIE 1

## LES PHENOMENES TRANSITOIRES AU DEMARRAGE DES MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASES A CAGE D'ECUREUIL

# GENERALITES SUR LES MOTEURS ASYNCHRONES

## 1.1. CONSTITUTION D'UN MOTEUR ASYNCHRONE :



**Fig 1-1 :** Schéma simplifié d'un moteur asynchrone

Selon le vocabulaire électrotechnique international, un « moteur asynchrone » est un moteur à courant alternatif dont la vitesse en charge et la fréquence du réseau auquel il est relié ne sont pas dans un rapport constant.

Il comprend 2 parties distinctes :

### 1.1.1. LE STATOR :

Les **différents types de moteurs asynchrones** ne se distinguent que par le rotor ; dans tous les cas le stator reste, au moins dans son principe, le même. Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine.

### 1.1.2. LE ROTOR :

C'est la partie mobile du moteur. Il est placé à l'intérieur du stator et est constitué d'un empilage de tôles d'aciers formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Parmi les types les plus utilisés, on distingue :

### **1.1.2.1. LE ROTOR A CAGE D'ECUREUIL :**

#### **a) le rotor à simple cage :**

Dans des trous ou dans des encoches disposés vers l'extérieur du cylindre et parallèlement à son axe sont placés des conducteurs en cuivre ou en Aluminium. A chaque extrémité, ceux-ci sont raccordés sur une couronne de même nature. L'ensemble a l'aspect d'une cage d'écureuil, d'où le nom de ce type de rotor.

Sur certains moteurs, la cage d'écureuil est entièrement moulée. L'aluminium injecté sous pression est fréquemment utilisé, les ailettes de refroidissement, coulées lors de la même opération font masse avec le rotor. Ces moteurs ont un couple de démarrage relativement faible et l'intensité absorbée lors de la mise sous tension est très supérieure à l'intensité nominale.

#### **b) le rotor à double cage :**

Ce rotor comporte deux cages concentriques ; l'une extérieure assez résistante, l'autre intérieure à résistance plus faible. Au début du démarrage, le flux étant à fréquence élevée, les courants induits s'opposent à sa pénétration dans la cage intérieure.

Le couple produit par la cage extérieure résistante est important et l'appel de courant est réduit.

En fin de démarrage, la fréquence diminue dans le rotor, le passage du flux à travers la cage intérieure est plus facile, le moteur se comporte alors sensiblement comme s'il était construit avec une seule cage peu résistante.

En régime établi, la vitesse correspondant au couple nominal n'est que très légèrement inférieure à celle du moteur à simple cage.

### **1.1.2.2. LE ROTOR BOBINE :**

Le rotor comporte un enroulement bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilées sur l'arbre de la machine. Cet enroulement est obligatoirement polyphasé, même si le moteur est monophasé, et, en pratique, toujours triphasé à couplage en étoile.

Les extrémités des enroulements rotoriques sont sorties et reliées à des bagues montées sur l'arbre, sur lesquelles frottent des balais en carbone. On peut ainsi mettre en série avec le circuit rotorique des éléments de circuit complémentaires (résistances, électronique de puissance...) qui permettent des réglages de la caractéristique couple/vitesse. Ce type de moteur est utilisé



essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles et/ou nombreux.

## I.2. DESCRIPTION DU MOTEUR :

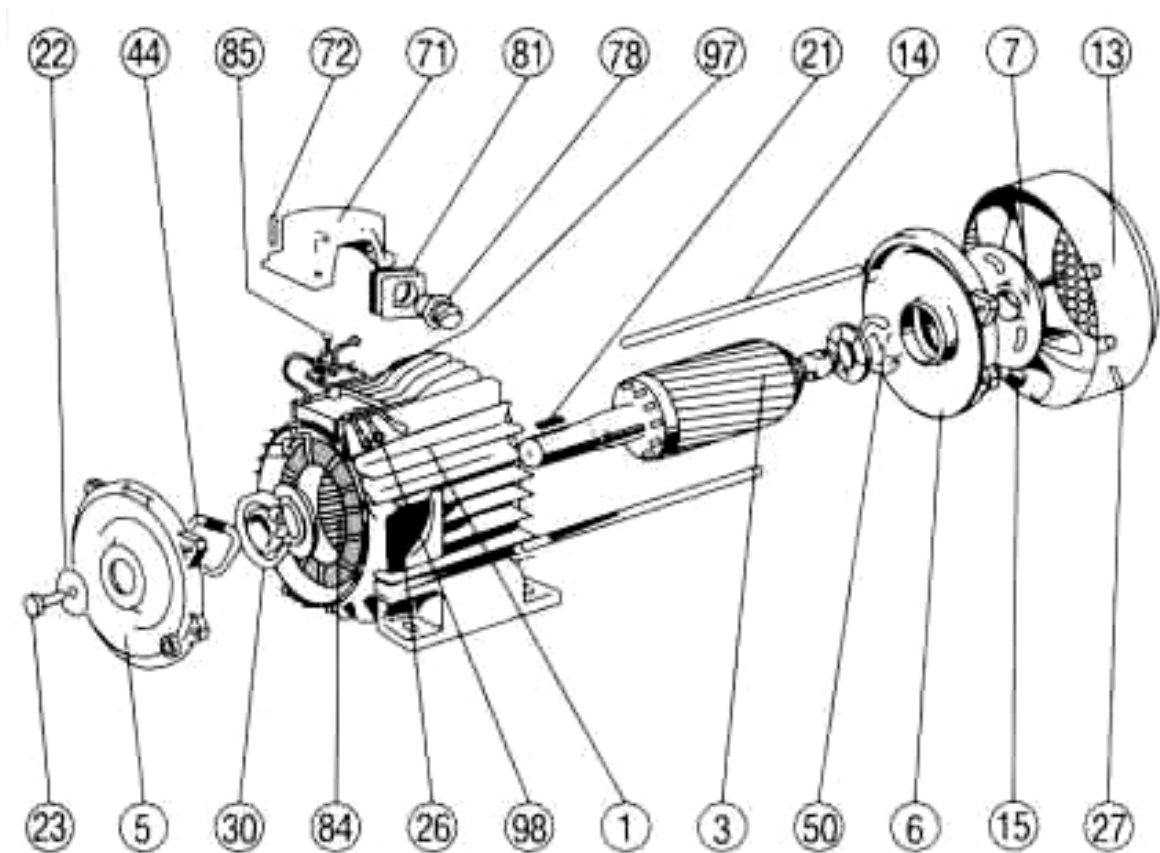


Fig 1-2 : Moteur asynchrone

<b>n°</b>	<b>Désignation</b>
1	Carter et stator bobiné
3	Rotor
5	Flasque côté accouplement
6	Flasque côté ventilation
7	Ventilateur
13	Capot de ventilateur
14	Tige d'assemblage
15	Ecrou de tige d'assemblage
21	Clavette de bout d'arbre
22	Rondelle de bout d'arbre
23	Vis de serrage rondelle
26	Plaque signalétique
27	Vis fixation capot
30	Roulement côté accouplement
44	Rondelle élastique
50	Roulement côté ventilateur
71	Boîte à bornes
72	Vis fixation boîte à bornes
78	Presse-étoupe
81	Plaque support presse-étoupe
84	Planchette à bornes
85	Vis de fixation planchette à bornes
97	Vis bornes de masse
98	Barrettes de connexion

### **I.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :**

Le moteur asynchrone ou moteur à induction est un transformateur à champ tournant : les courants triphasés alimentant le stator donnent naissance à un champ tournant qui induit des courants dans les conducteurs du rotor. L'action du champ sur les courants rotoriques génère des forces électromagnétiques qui font tourner le rotor.

### **I.3.1. CAS DU MOTEUR A CAGE :**

Les barres métalliques constituant la cage d'écureuil sont coupées par le champ tournant produit par le stator, ce qui donne naissance à des courants induits intenses.

Ceux-ci réagissent sur le champ tournant en donnant un couple moteur qui provoque la rotation de la cage.

### **I.3.2. CAS DU MOTEUR A BAGUE :**

Les enroulements du rotor sont couplés par l'intermédiaire des bagues et des balais sur une batterie à 3 résistances réglables et montées en étoile.

Coupés par le champ tournant, les conducteurs formant les enroulements rotoriques produisent des courants induits qui parcourent la batterie à résistance. Ces courants étant presque en phase avec les forces électromotrices qui les produisent, le couple de démarrage est très énergique et le rotor est entraîné dans le sens du champ tournant.

### **I.4. GLISSEMENT :**

Par définition, le glissement est l'écart relatif de la vitesse de rotation  $\Omega_r$  par rapport à la vitesse dite de synchronisation du champ tournant  $\Omega_s$ .

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (1-1)$$

$$\text{Avec } n_r = \frac{60 \cdot \Omega_r}{2 \cdot \pi} \quad \text{et} \quad n_s = \frac{60 \cdot \Omega_s}{2 \cdot \pi} \quad (1-2)$$

$$\Omega_s = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f}{p} \quad (1-3)$$

f : fréquence du réseau

p : nombre de paires de pôles

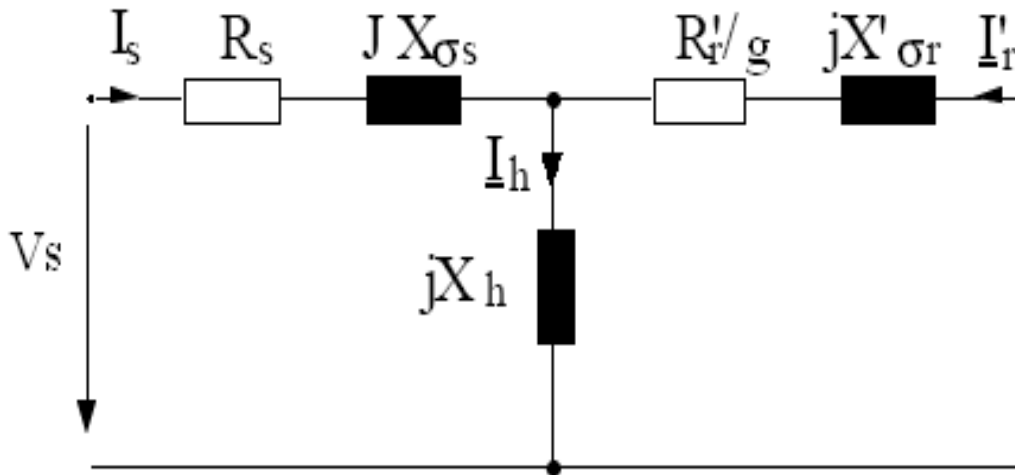
Il peut être dit qu'un moteur a un glissement nominal de 3% par exemple, s'il s'agit d'un moteur à 4 pôles (vitesse du champ tournant = 1500 tr/mn) dont le rotor tourne à 1455 tr/m, quand il fournit le couple minimal.

**Remarques :**

- $g = 0$  pour  $n = n_s$ , il n'y a pas de couple ;
- $g < 0$  pour  $n > n_s$ , la machine fonctionne en génératrice asynchrone ;
- $g > 0$  pour  $n < n_s$ , la machine fonctionne en moteur ;
- $g = 1$  pour  $n = 0$ , le moteur est à l'arrêt, ou à l'instant du début du démarrage ;
- $g > 1$  pour  $n < 0$ , la vitesse de rotation est inverse de celle du champ tournant ; le moteur fonctionne en freinage.

**I.5. EQUATIONS PRINCIPALES :**

Le comportement du moteur en régime quasi-statique (ou permanent) est entièrement défini par le schéma ci-dessous avec les équations correspondantes aux complexes.



**Fig1-3 :** Schéma équivalent d'un moteur asynchrone

$$V_s = R_s \underline{I_s} + jX_{\sigma s} \underline{I_s} + jX_h (\underline{I_h} + \underline{I_r}') \quad (1-4)$$

$$0 = \frac{R_r'}{g} \underline{I_r}' + jX_{\sigma r} \underline{I_r}' + jX_h (\underline{I_s} + \underline{I_r}') \quad (1-5)$$

$$C_{em} = \frac{3 R_r' I_r'^2}{g \Omega_s} \quad (1-6) \quad [11]$$

Avec  $R_s, X_{\sigma s}$  : résistance et réactance de fuite du stator

$R'_r, X'_{\sigma r}$  : Résistance et réactance de fuite du rotor apportées au stator

$$\text{avec } R'_r = X_r k^2, X'_{\sigma r} = X_{\sigma r} k^2 \quad (1-7)$$

$X_h$  : Réactance mutuelle (de champ principal) apportée au stator

$$X_h = X_{sr} \cdot k \quad (1-8)$$

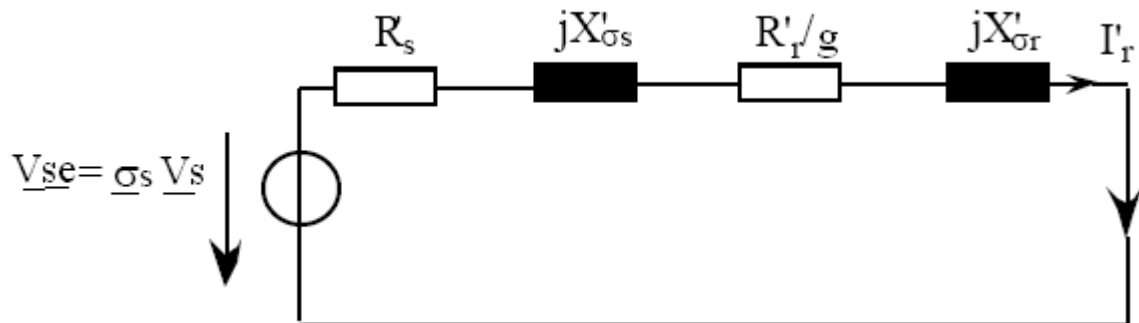
$g$  : glissement

$\Omega_s$  : Vitesse du champ tournant

$k$  : Rapport de transformation

$C_{em}$  : Couple électromagnétique

Le schéma équivalent peut être transformé en appliquant le principe de Thevenin au stator et à la branche magnétisante



**Fig1-4** : Schéma équivalent transformé

Avec :

$$V_{se} = \sigma_s V_s \quad (1-10)$$

$$R'_s = \sigma_s R_s \quad (1-11)$$

$$X'_{\sigma s} = \sigma_s X_{\sigma s} \quad (1-12)$$

$$\sigma_s = \frac{jX_h}{R_s + jX_{\sigma s} + jX_h} \quad (1-13)$$

On en déduit les expressions du courant et du couple

$$I'_r = \frac{\sigma_s V_s}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R'_r}{g}\right)^2 + X'^2_{CC}}} \quad (1-14)$$

$$C_{em} = \frac{3R'_r \sigma_s^2 V_s^2}{\left[\left(R'_s + \frac{R'_r}{g}\right)^2 + X'^2_{CC}\right]} \times \frac{1}{g\Omega_s} \quad (1-15)$$

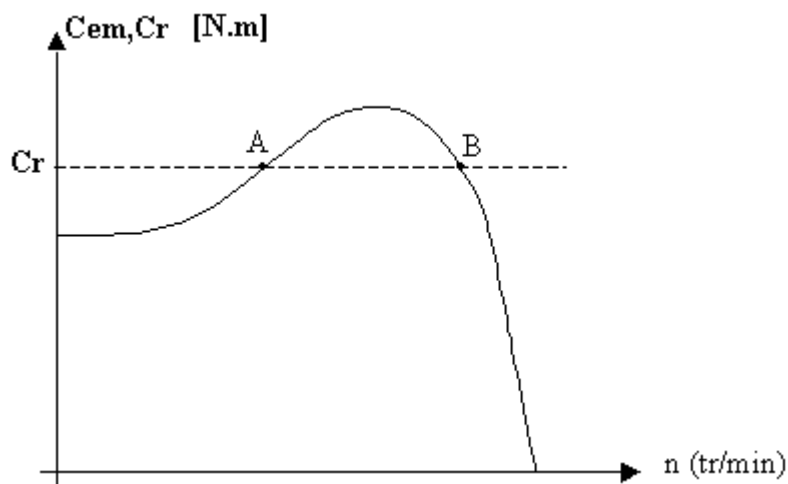
Avec  $X'_{CC} = X'_{\sigma s} + X'_{\sigma r}$  (1-16)

$$\underline{I}_S = \underline{I}_h + \underline{I}'_r \quad (1-17)$$

## **I.6. STABILITE DU MOTEUR :**

### **I.6.1. CAS GENERAL :**

Un système est stable s'il revient dans sa position d'origine après une perturbation.



**Fig 1-5 :** Courbes du couple électromagnétique et du couple résistant

D'après cette figure, il y a deux points de fonctionnement. Le point A est instable, le point B est stable

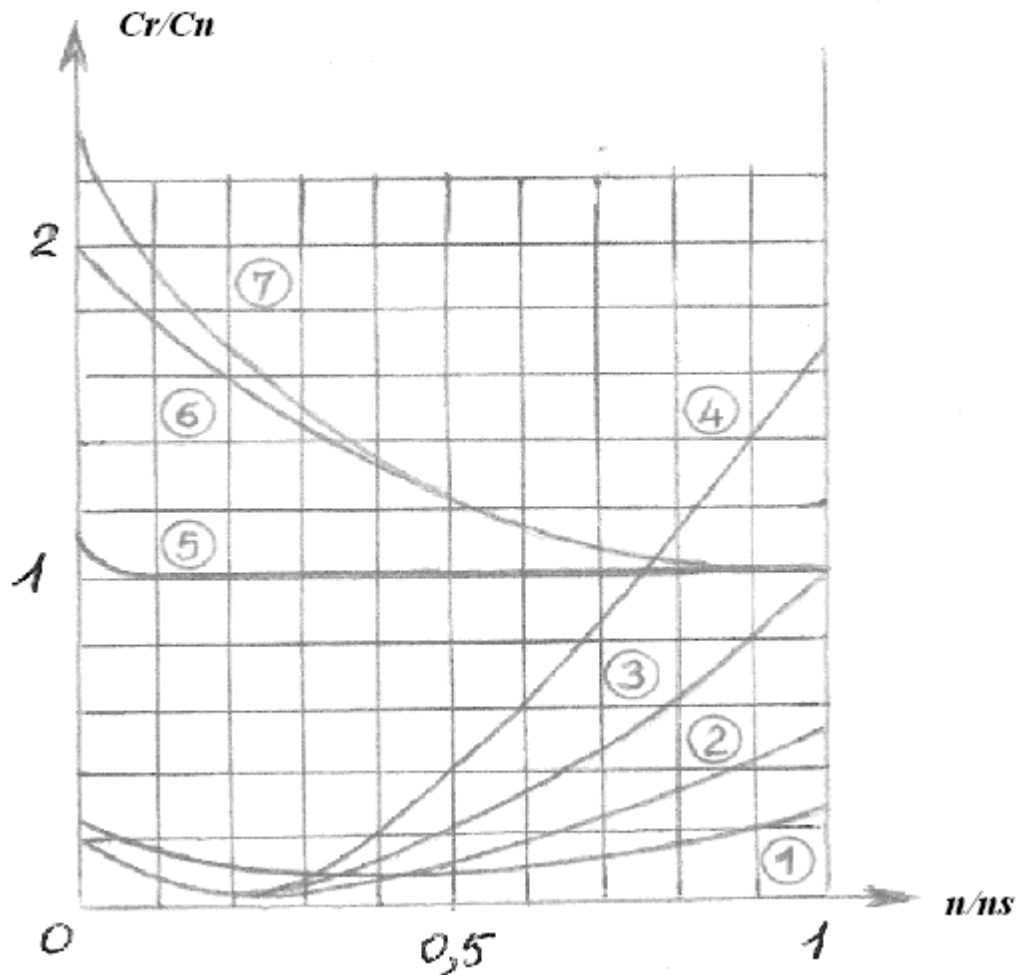
### **I.6.2. POINT DE FONCTIONNEMENT :**

Le point B est le point de fonctionnement (ou le point d'équilibre) du groupe moteur charge qui se situe à l'intersection des caractéristiques  $C_{em}=f(n)$  et  $Cr = f(n)$ .

$Cr$  : Couple résistant imposé par la charge

## **I.7. COUPLE RESISTANT :**

Le couple résistant dépend de la machine entraînée. Voici quelques types de machines d'entraînement avec ses courbes caractéristiques mécaniques en fonction de la vitesse de rotation.



**Fig1-6** : courbes des couples résistants

- 1-Transmissions démarrant entièrement à vide
- 2-Machines centrifuges démarrant à vide
- 3-Machines électriques démarrant en charge
- 4-Pompes hélicocentrifuges. Pompes à hélices
- 5-Machines à couple constant
- 6-Compresseurs à piston démarrant sans décompression
- 7-Petits compresseurs monocylindriques. Mouvements horizontaux des charges suspendues.

**I.8. REMARQUE :** La caractéristique couple/vitesse en régime établi ne permet pas de voir l'évolution des grandeurs pendant la phase de démarrage. Cette phase transitoire fait apparaître une caractéristique couple/vitesse quelque peu différente.

CHAPITRE

2

## REGIME TRANSITOIRE AU DEMARRAGE DIRECT D'UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE

Nous allons étudier dans ce chapitre le moteur en régime transitoire pendant le démarrage. Le but c'est d'analyser le comportement du moteur en déterminant les grandeurs électriques, électromagnétiques, et mécanique en fonction du temps par simulation numérique.

### **2.1. MODELISATION DU MOTEUR ASYNCHRONE**

Supposons que : - le moteur est directement alimenté par un réseau de distribution d'énergie

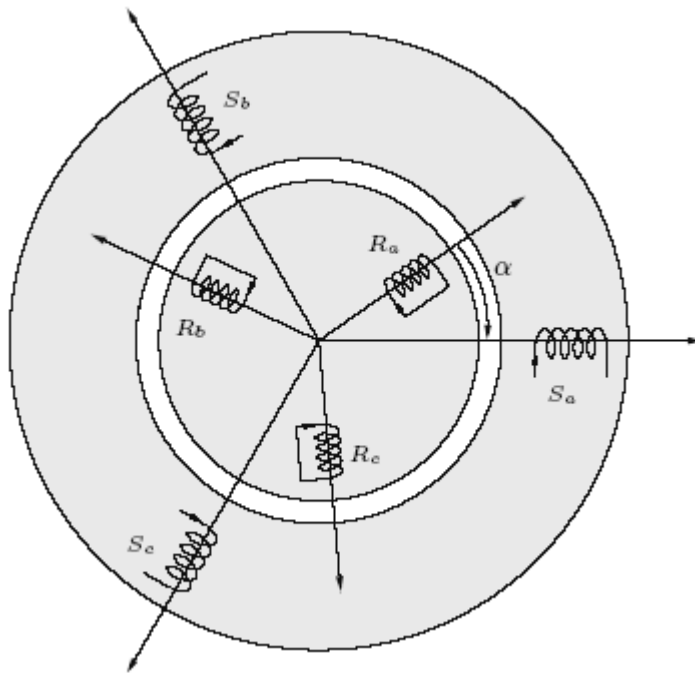
-le couple résistant est constant quelque soit la vitesse de rotation du moteur, ou dépendant de la vitesse mais suivant une loi connue.

#### **2.1.1. EQUATIONS ELECTRIQUES EN GRANDEURS DE PHASES :**

Il est habituel de représenter les machines électriques ; en particulier les machines asynchrones dans un repère de Fresnel triphasé et équilibré.

Considérons donc une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor représentée schématiquement sur la figure (**Fig2-1**) et dont les phases sont repérées respectivement par  $(S_a, S_b, S_c)$  et  $(R_a, R_b, R_c)$ . La position relative instantanée entre les deux axes  $S_a$  et  $R_a$  est définie par l'angle électrique  $\alpha$  variable en fonction du temps.





**Fig 2-1 :** Représentation schématique d'un moteur asynchrone triphasé

Nous pouvons alors écrire les équations des tensions statoriques et rotoriques sous forme matricielle :

$$\begin{cases} [V_S]_{abc} = R_S [I_S]_{abc} + \frac{d}{dt} [\phi_S]_{abc} & (2-1) \quad [5] \\ [V_r]_{abc} = R_r [I_r]_{abc} + \frac{d}{dt} [\phi_r]_{abc} = 0 & (2-2) \end{cases}$$

Les paramètres  $R_S$  et  $R_r$  représentent respectivement les résistances statoriques et rotoriques par phase. Les vecteurs  $[V_S]_{abc}$ ,  $[I_S]_{abc}$  et  $[\phi_S]_{abc}$  sont les vecteurs tensions, courant et flux statoriques.

On différencie les vecteurs rotoriques par l'indice  $r$ . Tous les vecteurs sont ainsi définis sous forme de :

$$[X_Y]_{abc} = \begin{bmatrix} X_y(a) \\ X_y(b) \\ X_y(c) \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

Les vecteurs  $[V]$  et  $[I]$  représentent les tensions simples et les courants de lignes. Le couplage entre le rotor et le stator intervient dans les équations des flux  $\phi$  qui s'écrivent sous la forme suivante :

$$[\phi_S]_{abc} = [L_S] \times [I_S]_{abc} + [L_{Sr}] \times [I_r]_{abc} \quad (2-4) \quad [5]$$

$$[\phi_r]_{abc} = [L_r] \times [I_r]_{abc} + [L_{rS}] \times [I_s]_{abc} \quad (2-5)$$

Dans les équations des flux, les matrices  $[L_S]$  et  $[L_r]$  sont les matrices inductances statoriques et rotoriques et dépendent de :

- l'inductance propre d'une phase statorique  $l_S$  ,
- l'inductance propre d'une phase rotorique  $l_r$  ,
- l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques  $l_{SS}$  ,
- l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques  $l_{rr}$

Elles s'expriment sous la forme suivante :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & l_{rr} & l_{rr} \\ l_{rr} & l_r & l_{rr} \\ l_{rr} & l_{rr} & l_r \end{bmatrix} \quad (2-5) \quad [L_S] = \begin{bmatrix} l_S & l_{SS} & l_{SS} \\ l_{SS} & l_S & l_{SS} \\ l_{SS} & l_{SS} & l_S \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

Quant à  $L_{Sr}$  , elle représente la matrice inductance mutuelle stator-rotor . Elle dépend de deux paramètres qui sont :

- l'inductance mutuelle maximum entre phases statorique et rotorique :  $l_{Sr}$
- l'angle électrique  $\alpha$  variable en fonction du temps.

$L_{Sr}$  s'exprime sous la forme suivante :

$$[L_{Sr}] = l_{Sr} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \alpha & \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (2-7) \quad [5]$$

De la même manière, on pourrait écrire la matrice inductance mutuelle rotor-stator  $[L_{rs}]$ . On s'aperçoit alors qu'elle n'est autre que la transposée de la matrice inductance mutuelle stator- rotor  $[L_{sr}]$ . Soit,  $[L_{rs}] = [L_{sr}]^t$

### 2.1.2. CHANGEMENT DE BASE DE PARK :

Au lieu de considérer les trois phases a, b, c d'axes fixes du stator, on considère l'enroulement équivalent formé de 2 bobinages d'axe perpendiculaire d et q.

La transformation de Park d'angle  $\theta$  est :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2-8) \quad [4]$$

L'angle  $\theta$  est au choix de l'utilisateur et peut dépendre du temps. Le fait que  $[P(\theta)]$  soit orthonormée implique que son inverse soit égal à sa transposée. Les vecteurs tensions dans la nouvelle base s'expriment sous la forme suivante :

$$[V_s]_{dq} = [P(\theta_s)]^t [V_s]_{abc} \quad (2-9) \quad [4]$$

$$[V_r]_{dq} = [P(\theta_r)]^t [V_r]_{abc} \quad (2-10) \quad [4]$$

On peut écrire les tensions dans le repère (d-q) :

$$[V_s]_{dq} = R_s [I_s]_{dq} + \frac{d}{dt} [\phi_s]_{dq} + \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} [\phi_s]_{dq} \quad (2-11)$$

$$[V_r]_{dq} = R_r [I_r]_{dq} + \frac{d}{dt} [\phi_r]_{dq} + \frac{d\theta_r}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} [\phi_r]_{dq} \quad (2-12)$$

Ainsi que le flux :

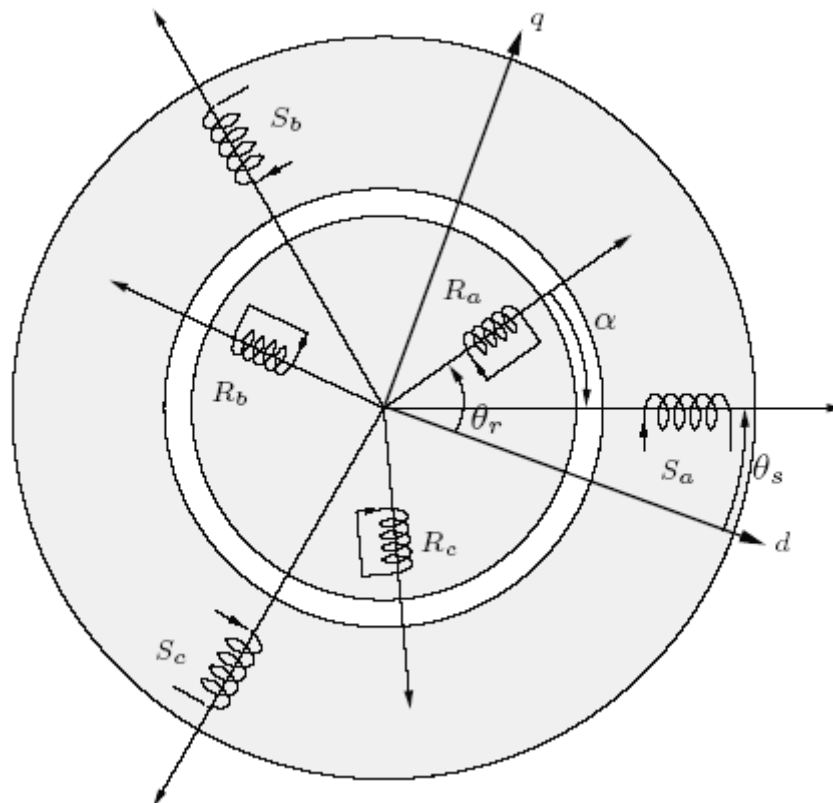
$$[\phi_s]_{dq} = L_s [I_s]_{dq} + L_{sr} [I_r]_{dq} \quad (2-13)$$

$$[\phi_r]_{dq} = L_r [I_r]_{dq} + L_{sr} [I_s]_{dq} \quad (2-14)$$

Dans les équations (2-13) et (2-14),  $L_s$  et  $L_r$  sont respectivement les inductances cycliques statoriques et rotoriques. Alors que  $L_{sr}$  est directement proportionnelle à la mutuelle stator-rotor.

- $L_s = l_s - l_{ss}$  : inductance cyclique statorique
- $L_r = l_r - l_{rr}$  : inductance cyclique rotorique
- $L_{sr} = \frac{3}{2} \times l_{sr}$  : inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor

Les angles  $\theta_s$  et  $\theta_r$  dans (2-11) et (2-12) représentent respectivement les angles entre l'axe a du stator ou du rotor et la référence d de la base (d, q). La figure suivante permet de visualiser les trois systèmes d'axes qui peuvent tourner à des vitesses différentes



**Fig 2-2 : Représentation des différents systèmes d'axes**

A partir de cette figure, nous pouvons exprimer la relation liant les angles entre eux, valable à tout instant :

$$\alpha = \theta_s - \theta_r \quad (2.15)$$

Soit un repère fixe et dont l'axe est confondu à l'axe  $Sa$  du stator (c'est-à-dire

$$\theta_s = 0 \text{ et } \frac{d\theta_s}{dt} = 0),$$

Les équations (2-11), (2-12) avec (2-13) et (2-14) donnent le système d'équations différentielles suivant :

$$\begin{cases} V_{Sd} = R_s I_{Sd} + L_s \frac{d}{dt} I_{Sd} + L_{Sr} \frac{d}{dt} I_{rd} \\ V_{Sq} = R_s I_{Sq} + L_s \frac{d}{dt} I_{Sq} + L_{Sr} \frac{d}{dt} I_{rq} \\ 0 = R_r I_{rd} + L_r \frac{d}{dt} I_{rd} + L_{Sr} \frac{d}{dt} I_{Sd} + \omega_r L_r I_{rq} + \omega_r L_{Sr} I_{Sq} \\ 0 = R_r I_{rq} + L_r \frac{d}{dt} I_{rq} + L_{Sr} \frac{d}{dt} I_{Sq} - \omega_r L_r I_{rd} - \omega_r L_{Sr} I_{Sd} \end{cases} \quad (2-16)$$

$$\text{Avec } \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (2-17)$$

### **2.1.3. COUPLE ELECTROMAGNETIQUE :**

Dans un repère fixe au stator, l'expression du couple est

$$C_{em} = \frac{3}{2} p (\Phi_{rq} I_{rd} - \Phi_{rd} I_{rq}) = \frac{3}{2} p (\Phi_{Sd} I_{Sq} - \Phi_{Sq} I_{Sd}) \quad (2-18) \quad [14]$$

$$\text{D'où : } C_{em} = \frac{3}{2} (I_{rd} I_{Sq} - I_{rq} I_{Sd}) \quad (2-19)$$

### **2.1.4. EQUATION MECANIQUE DU MOTEUR**

La vitesse angulaire de l'arbre moteur est régie par l'équation fondamentale de la dynamique :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r \quad (2-20)$$

Où  $C_{em}$  : Couple électromagnétique

$C_r$  : Couple résistant dû à la charge

$J$  : Moment d'inertie des parties tournantes

Le terme  $\frac{d\Omega_r}{dt}$  représente la variation de la vitesse

$\frac{d\Omega_r}{dt} > 0$  : accélération ;  $\frac{d\Omega_r}{dt} < 0$  : décélération

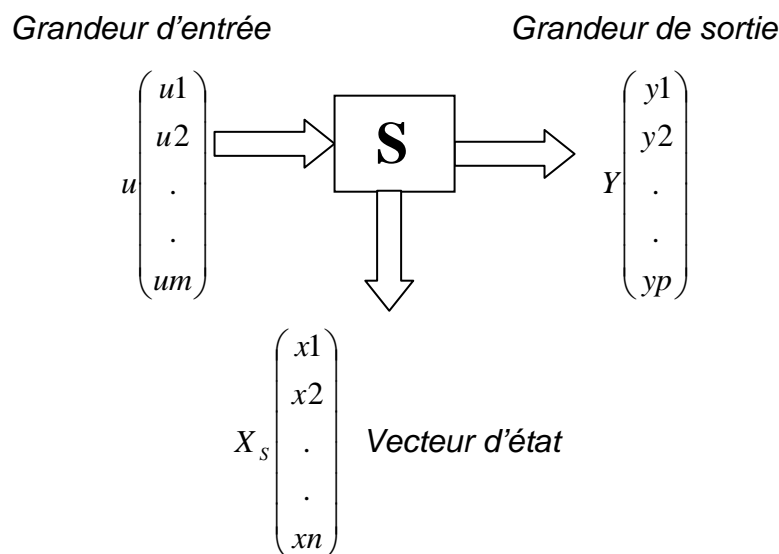
En régime permanent, le moteur doit entraîner en rotation la machine à son point de fonctionnement nominal  $C_{em} = C_r$ , il n'y a pas d'accélération  $\frac{d\Omega_r}{dt} = 0$ . Mais au démarrage, il faut accélérer ( $\frac{d\Omega_r}{dt} > 0$ ). Donc le couple électromagnétique au démarrage doit être supérieur au couple résistant ( $C_{em} > C_r$ ).

## **2.2. RESOLUTION NUMERIQUE:**

### **2.2.1. RESOLUTION NUMERIQUE DES EQUATIONS ELECTRIQUES :**

#### **a) équation d'état :**

La théorie moderne fait appel à la notion des variables d'état. Tout système peut être décrit à l'aide des variables d'état.



S : système multivariable qui possède plusieurs grandeurs d'entrée et plusieurs grandeurs de sortie.

$$\text{D'où l'équation d'état} \quad \begin{cases} \dot{X}_s = AX_s + Bu \\ Y = CX_s + Du \end{cases} \quad (2-21)$$

Où  $X_s$  est le vecteur d'état du système et  $\dot{X}_s$  sa dérivée en fonction du temps.

Y : Sa sortie

A : La matrice d'état décrivant le système

$B$  : Le vecteur de commande

$u$  : Le signal de commande

$C$  et  $D$  les matrices décrivant la sortie  $Y$

### **b) transformation d'écriture des équations électriques**

Le but est de transformer les équations électriques sous forme  $\begin{cases} \dot{X}_S = Ax_S + Bu \\ Y = Cx_S + Du \end{cases}$

On a vu que :

$$\begin{cases} V_{Sd} = R_{Sd}I_{Sd} + L_S \frac{d}{dt}I_{Sd} + L_{Sr} \frac{d}{dt}I_{rd} \\ V_{Sq} = R_S I_{Sq} + L_S \frac{d}{dt}I_{Sq} + L_{Sr} \frac{d}{dt}I_{rq} \\ 0 = R_r I_{rd} + L_r \frac{d}{dt}I_{rd} + L_{Sr} \frac{d}{dt}I_{Sd} + \omega_r L_r I_{rq} + \omega_r L_{Sr} I_{Sq} \\ 0 = R_r I_{rq} + L_r \frac{d}{dt}I_{rq} + L_{Sr} \frac{d}{dt}I_{Sq} - \omega_r L_r I_{rd} - \omega_r L_{Sr} I_{Sd} \end{cases} \quad (2-22)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{Sd} - R_{Sd}I_{Sd} = L_S \frac{d}{dt}I_{Sd} + L_{Sr} \frac{d}{dt}I_{rd} \\ V_{Sq} - R_S I_{Sq} = L_S \frac{d}{dt}I_{Sq} + L_{Sr} \frac{d}{dt}I_{rq} \\ L_r \frac{d}{dt}I_{rd} + L_{Sr} \frac{d}{dt}I_{Sd} = -R_r I_{rd} - \omega_r L_r I_{rq} - \omega_r L_{Sr} I_{Sq} \\ L_r \frac{d}{dt}I_{rq} + L_{Sr} \frac{d}{dt}I_{Sq} = -R_r I_{rq} + \omega_r L_r I_{rd} + \omega_r L_{Sr} I_{Sd} \end{cases} \quad (2-23)$$

Soit sous forme matricielle **(2-24)**

$$\begin{bmatrix} L_S & 0 & L_{Sr} & 0 \\ 0 & L_S & 0 & L_{Sr} \\ L_{Sr} & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_{Sr} & 0 & L_r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{d}{dt}I_{Sd} \\ \frac{d}{dt}I_{Sq} \\ \frac{d}{dt}I_{rq} \\ \frac{d}{dt}I_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_S & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_r L_r & -R_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_{Sr} & 0 & \omega_r L_r & -R_r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{Sd} \\ I_{Sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{Sd} \\ V_{Sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

En multipliant membre à membre l'équation (2-24) par  $\begin{bmatrix} L_S & 0 & L_{Sr} & 0 \\ 0 & L_S & 0 & L_{Sr} \\ L_{Sr} & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_{Sr} & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1}$  (matrice

inverse)

On obtient une équation d'état de la forme  $\dot{[I]}_{dq} = [A][I]_{dq} + [B][V]_{dq}$ , **(2-25)**

$$\text{Avec } \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{I} \end{bmatrix}_{dq} = \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} I_{Sd} \\ \frac{d}{dt} I_{Sq} \\ \frac{d}{dt} I_{rd} \\ \frac{d}{dt} I_{rq} \end{bmatrix} \quad \text{(2-26)} \quad [I]_{dq} = \begin{bmatrix} I_{Sd} \\ I_{Sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad \text{(2-27)} \quad [V]_{dq} = \begin{bmatrix} V_{Sd} \\ V_{Sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{(2-28)}$$

$$[A] = \frac{1}{\sigma} \times \begin{bmatrix} \frac{-R_S}{L_S} & \frac{\omega_r L_{Sr}^2}{L_S L_r} & \frac{L_{Sr} R_r}{L_S L_r} & \frac{\omega_r L_{Sr}}{L_S} \\ -\omega_r L_{Sr}^2 & -R_S & \omega_r L_{Sr} & \frac{L_{Sr} R_r}{L_S} \\ \frac{L_S L_r}{L_{Sr} R_S} & \frac{L_S}{-\omega_r L_{Sr}} & \frac{L_S}{-R_r} & \frac{L_S L_r}{L_S L_r} \\ \frac{L_S L_r}{\omega_r L_{Sr}} & \frac{L_r}{L_{Sr} R_S} & \omega_r & -R_r \\ L_r & L_S L_r & L_r & L_r \end{bmatrix} \quad \text{(2-29)}$$

$$[B] = \frac{1}{\sigma} \times \begin{bmatrix} \frac{1}{L_S} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_S} & 0 & 0 \\ -\frac{L_{Sr}}{L_S L_r} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-L_{Sr}}{L_{Sr} L_r} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{(2-30)}$$

$$\text{Avec } \sigma = 1 - \frac{L_{Sr}^2}{L_S L_r} \quad \text{et} \quad V_{Sd} = \sqrt{2} \times V_S \times \cos \omega_s t \quad ; \quad V_{Sq} = \sqrt{2} \times V_S \times \sin \omega_s t \quad \text{(2-31)}$$

### c) résolution de l'équation d'état

Pour résoudre numériquement l'équation d'état  $\dot{[I]}_{dq} = [A][I]_{dq} + [B][V]_{dq}$ , nous allons échantillonner les grandeurs qui dépendent du temps et les maintenir constantes durant la période dite « période d'échantillonnage ».



L'équation devient alors une équation d'état échantillonné ou discrétisé aux instants  $kT_e$  avec élément de maintien, du type

$$[I(k+1)] = [\Phi(T_e)][I(k)] + [\Psi(T_e)][B][V(k)] \quad (2-32) \quad [10]$$

Où  $[\Phi(T_e)]$  est la matrice de transition d'état

$$[\Phi(T_e)] = e^{AT_e} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i!} [[A]T_e]^i \quad (2-33)$$

$[\Psi(T_e)]$  est l'intégration de la matrice de transition d'état.

$$[\Psi(T_e)] = T_e \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(i+1)!} [[A]T_e]^i \quad (2-34)$$

$$\text{Et } [\Phi(T_e)] = [D] + [A][\Psi(T_e)] \text{ avec } [D] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

Lors du calcul numérique, on fait la somme des termes jusqu'à ce que la contribution du terme suivant devienne négligeable. En pratique, prenons  $i=5$

Les coefficients des matrices  $[\Phi(T_e)]$  et  $[\Psi(T_e)]$  seront recalculés à chaque pas de calcul. C'est-à-dire à chaque valeur trouvée pour la vitesse de rotation  $\Omega_r$

### **2.2.2. RESOLUTION NUMERIQUE DE L'EQUATION DYNAMIQUE DU ROTOR**

$$\text{On a } \frac{Jd\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r \quad (2-36)$$

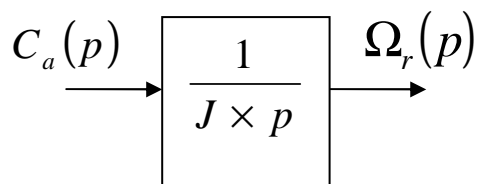
Posons  $C_a = C_{em} - C_r$ : le couple accélérateur. (2-37)

Passons maintenant à la transformation de Laplace avec conditions initiales nulles.

$$\text{L'équation (2-36) devient alors } J \times p \times \Omega_r(p) = C_a(p) \quad (2-38)$$

Où  $p$  opérateur de Laplace

$$\text{Soit } H(p) = \frac{\Omega_r(p)}{C_a(p)} = \frac{1}{J \times p} \quad (2-39)$$



Pour avoir une fonction de transfert échantillonnée, il faut transformer  $H(p)$  en  $H(z)$  (transformation en Z)

Par définition, la transformée en Z de  $H(p)$  est de la forme

$$H(z) = Z[B_0(p)G_a(p)] \quad (2-40) \quad [9]$$

$$\text{Avec } [B_0(p)] = \frac{1 - e^{-T_e \times p}}{p} \text{ bloqueur d'ordre zéro} \quad (2-41)$$

$G_a(p)$  : Le processus

$T_e$  : Période d'échantillonnage

$$\text{Dans notre cas } G_a(p) = \frac{1}{J \times p} \quad (2-42)$$

$$\text{Donc } H(z) = Z\left[\frac{1 - e^{-T_e \times p}}{p} \times \frac{1}{J \times p}\right] \quad (2-43)$$

$$H(z) = (1 - z^{-1})Z\left[\frac{1}{J \times p^2}\right] \quad (2-44)$$

Après la transformation, on aura

$$H(z) = K \times \frac{1}{z-1} \quad \text{Avec } K = \frac{T_e}{J} \quad (2-45) \quad [9]$$

$$\text{Or } H(z) = \frac{\Omega_r(z)}{C_a(z)} \quad (2-46)$$

$$\text{D'où } \Omega_r(z) = \frac{K \times C_a(z)}{z-1} \quad (2-47)$$

$$\Rightarrow \Omega_r(z) \times z - \Omega_r(z) = K \times C_a(z) \quad (2-48)$$

Soit sous forme d'une équation récurrente, l'équation (2-48) devient

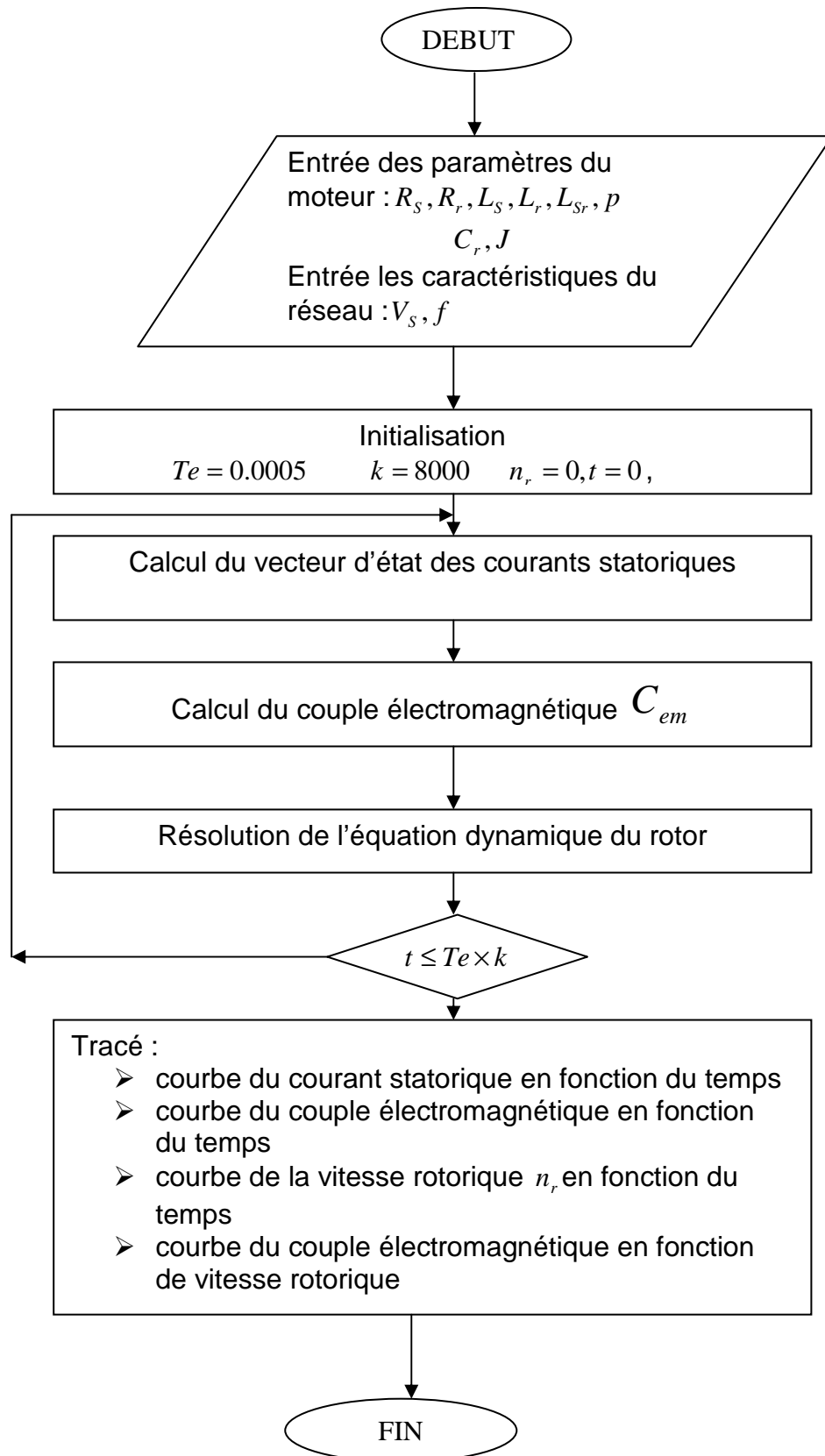
$$\Omega_{r_{k+1}} - \Omega_{r_k} = K \times C_{a_k} \quad (2-49)$$

Et pour la simulation de la vitesse de rotation du rotor, transformons (2-49) sous la forme d'une équation d'états discrets :

$$\Omega_r(k+1) = [1] \times \Omega_r(k) + K \times C_a(k) \quad (2-50)$$

Voici l'organigramme de calcul pour le régime transitoire au démarrage direct :

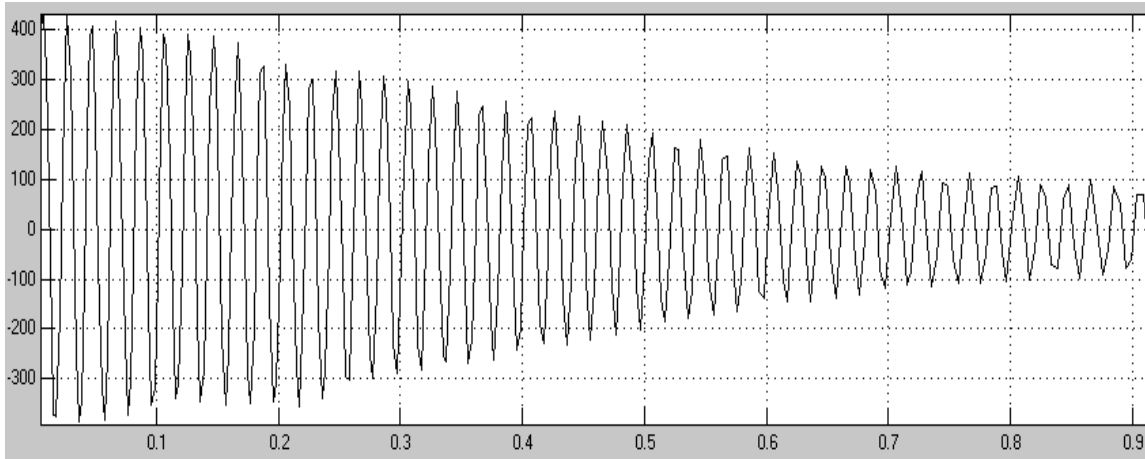




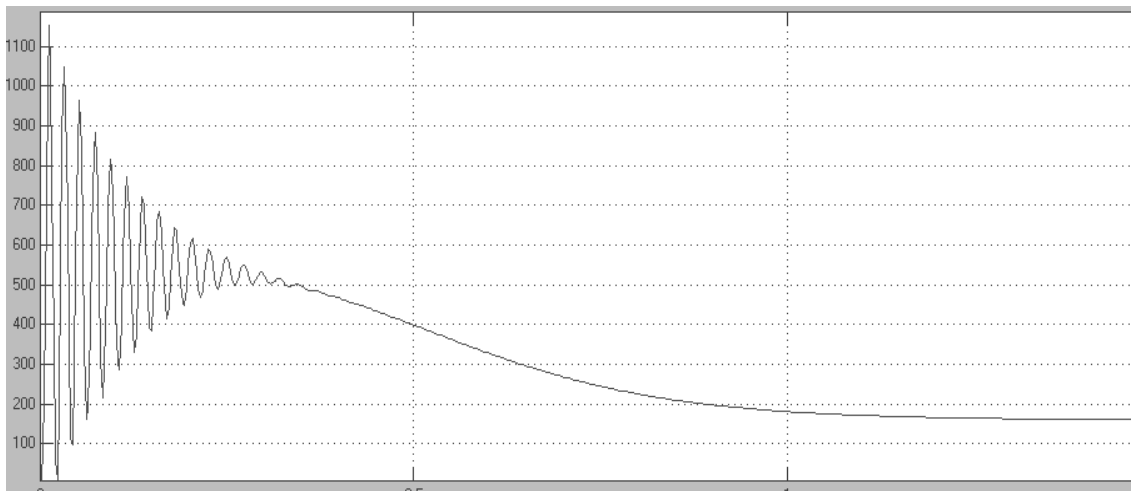
**Fig2-3:** organigramme de calcul pour le régime transitoire

### **2.3. COURBES CARACTERISTIQUES DU MOTEUR**

En simulant les équations (2-32), (2-19), on obtient les résultats suivants :



**Fig2-4** Courbe du courant statorique en fonction du temps



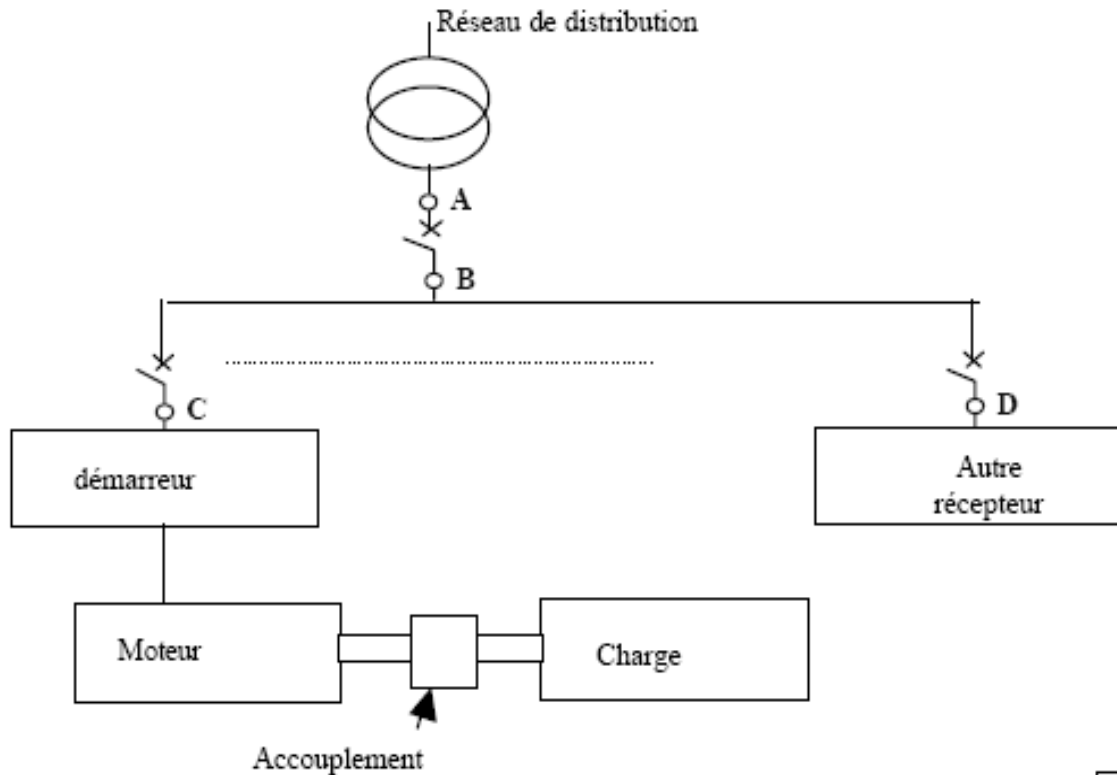
**Fig2-5** courbe du couple électromagnétique en fonction du temps

D'après ces deux figures, le courant de démarrage est très important et le couple de démarrage est énergique

### **2.4. PROBLEMES RENCONTRES AU DEMARRAGE :**

Tout d'abord, un entraînement électromécanique est constitué :

- d'un moteur électrique alimenté par un démarreur ou un réseau de distribution
- d'un accouplement,
- d'une machine,



**Fig2-6** Schéma fonctionnel d'un entraînement électromécanique

On a vu dans le paragraphe précédent que, lors de la mise en tension d'un moteur, l'appel de courant sur le réseau est important. Cet appel de courant entraîne :

- **des chutes de tensions supplémentaires** par rapport au régime permanent en deux points (Fig2-6) :
  - En amont du départ moteur (tronçon AB), celle-ci est perçue par le moteur mais aussi par les récepteurs voisins. Par exemple, si un circuit d'éclairage est connecté au point D, le démarrage d'un moteur au point C peut entraîner une baisse de l'intensité lumineuse sur ce circuit d'éclairage.
  - Dans la ligne du moteur (tronçon BC), celle-ci est perçue uniquement par le moteur. Par exemple, une chute de tension de 10% aux bornes du moteur entraîne une perte de couple de 19% (le couple moteur est proportionnel au carré de la tension d'alimentation), ce qui peut entraîner un blocage du rotor ( $C_{em} < C_r$ ) ou un temps de démarrage trop long ( $C_{em} < C_r$  mais  $C_a$  trop faible).

- **Des contraintes thermiques supplémentaires** pour le moteur .Les machines sont dimensionnées pour un point de fonctionnement nominal ; lors du démarrage, il convient de s'assurer que l'échauffement imposé au moteur ne risque pas de le détériorer .C'est à dire, qu'il faut s'assurer que le temps de démarrage ne soit pas trop long, compte tenue de la valeur du courant de démarrage.

## **2.5. SOLUTIONS AU PROBLEME DE DEMARRAGE :**

Si l'installation peut supporter l'appel de courant à la mise sous tension du moteur, celui-ci peut être directement couplé sur le réseau ; il démarre sur ses caractéristiques naturelles. Dans le cas contraire, le courant de démarrage doit être limité tout en maintenant les performances mécaniques de l'ensemble moteur et machine entraînée, conforme aux besoins de l'utilisateur.

Dans ce cas, cette limitation de courant est obtenue par :

- une réduction de la tension d'alimentation pour le moteur à cage. On agit sur le circuit primaire ou stator.
- Une augmentation de la résistance rotorique pour le moteur à bague. On agit sur le circuit secondaire ou le rotor.

Pour les solutions techniques, nous avons étudié quelques procédés de démarrage les plus utilisés dans la deuxième partie

# PARTIE 2

## LES PROCÉDES DE DEMARRAGE DES MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASES A CAGE D'ECUREUIL

# DEMARRAGE

## ETOILE TRIANGLE

### 3.1. PRINCIPE :

Ce démarrage ne peut s'appliquer qu'aux moteurs dont les deux extrémités des trois enroulements du stator sont sorties sur la plaque à bornes et dont le couplage triangle correspond à la tension du réseau. (Exemple : pour réseau 380 V, il faut un moteur 220V\380V)

Ce procédé est basé sur le rapport des grandeurs entre la tension simple et la tension composée d'un réseau triphasé de distribution

Dans un 1<sup>er</sup> temps, la tension appliquée à chacun des enroulements du moteur couplé en ETOILE est TENSION SIMPLE.

A l'issue de ce 1<sup>er</sup> temps, au couplage étoile est substitué le couplage TRIANGLE dans lequel est appliqué à chacun des enroulements la TENSION COMPOSEE.

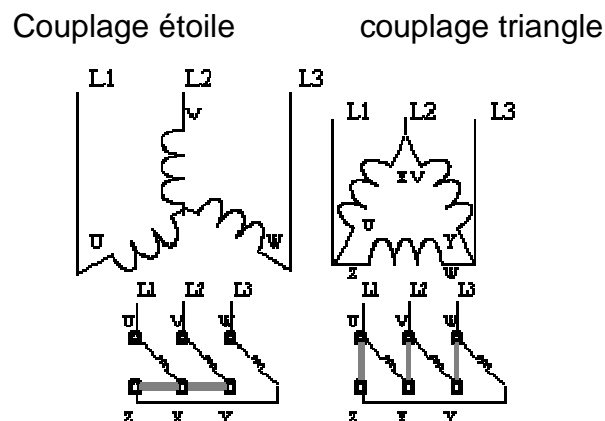


Fig 3-1 Couplage étoile-triangle

Soient  $V$  : la tension du réseau, qui est aussi la tension par phase lors de la connexion de l'enroulement statorique en triangle  $V_{\Delta} = V$

$V_Y$  La tension par phase lors de la connexion de l'enroulement statorique en étoile.



$$V_{\Delta} = V_Y \sqrt{3}$$

Soient  $I_{d_Y}, I_{d_{\Delta}}, I_{d_{phY}}, I_{d_{ph\Delta}}$  les courants de démarrage dans le réseau et dans les phases de l'enroulement statorique en étoile et en triangle

$Z_{CC}$  L'impédance de court-circuit d'une phase.

$$\text{On a alors : } I_{d_{phY}} = I_{d_Y} = \frac{V_Y}{Z_{CC}} = \frac{V_{\Delta}}{\sqrt{3} \cdot Z_{CC}}$$

Si nous avons branché le moteur sur le réseau, les enroulements étant connectés

en triangle, nous aurions obtenu :  $I_{d_{ph\Delta}} = \frac{V_{\Delta}}{Z_{CC}}$

$$\text{Or } I_{d_{\Delta}} = \sqrt{3} \cdot I_{d_{ph\Delta}} = \frac{\sqrt{3} \times V_{\Delta}}{Z_{CC}} \Rightarrow I_{d_Y} = \frac{I_{d_{\Delta}}}{3}$$

Ainsi le courant de démarrage pris au réseau lors de la connexion de l'enroulement statorique en étoile est 3 fois plus petit que lors de sa connexion en triangle. Mais le couple de démarrage  $C_d$  diminue également de 3 fois.

$$\text{En effet, } Cd_Y \equiv V_Y^2 \equiv \left( \frac{V_{\Delta}}{\sqrt{3}} \right)^2 \equiv \frac{V_{\Delta}^2}{3} \text{ tandis que } Cd_{\Delta} \equiv V_{\Delta}^2 \equiv V^2$$

### **3.2.COURBES CARACTERISTIQUES :**

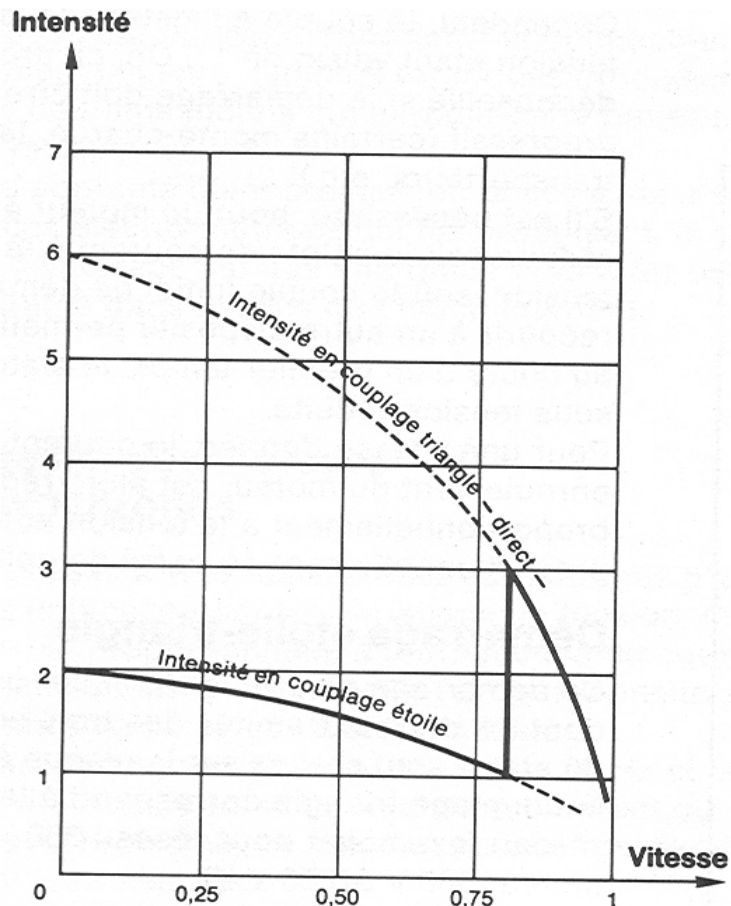


Fig3-2 Courbes des intensités du courant en couplage étoile triangle

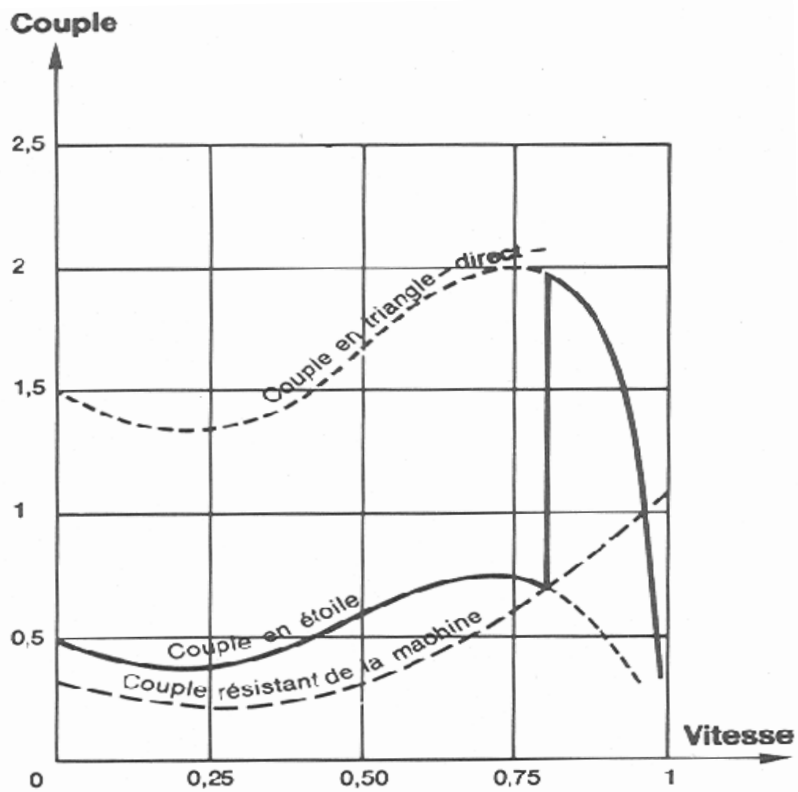


Fig3-3 Courbes des couples moteurs en couplage étoile triangle

Le couple moteur reste faible pendant tout le couplage « étoile » et la vitesse, stabilisée à la fin de ce temps, peut être assez basse si le couple résistant de la machine à entraîner est relativement élevé (par exemple dans le cas d'une machine centrifuge).

Il en résulte alors des pointes importantes de courant et de couple au passage « étoile-triangle ». Ces considérations peuvent conduire à renoncer au démarreur « étoile-triangle » pour les machines à caractéristiques centrifuges, surtout au-delà d'une certaine puissance (par exemple 30kW).

Par ailleurs, il faut remarquer que le courant qui traverse les enroulements du moteur est discontinu. En effet, il est interrompu au moment de l'ouverture du contacteur « étoile » pour se rétablir brutalement (sous la pleine tension du réseau) lors de la fermeture du contacteur « triangle ». (Cf schéma de puissance).

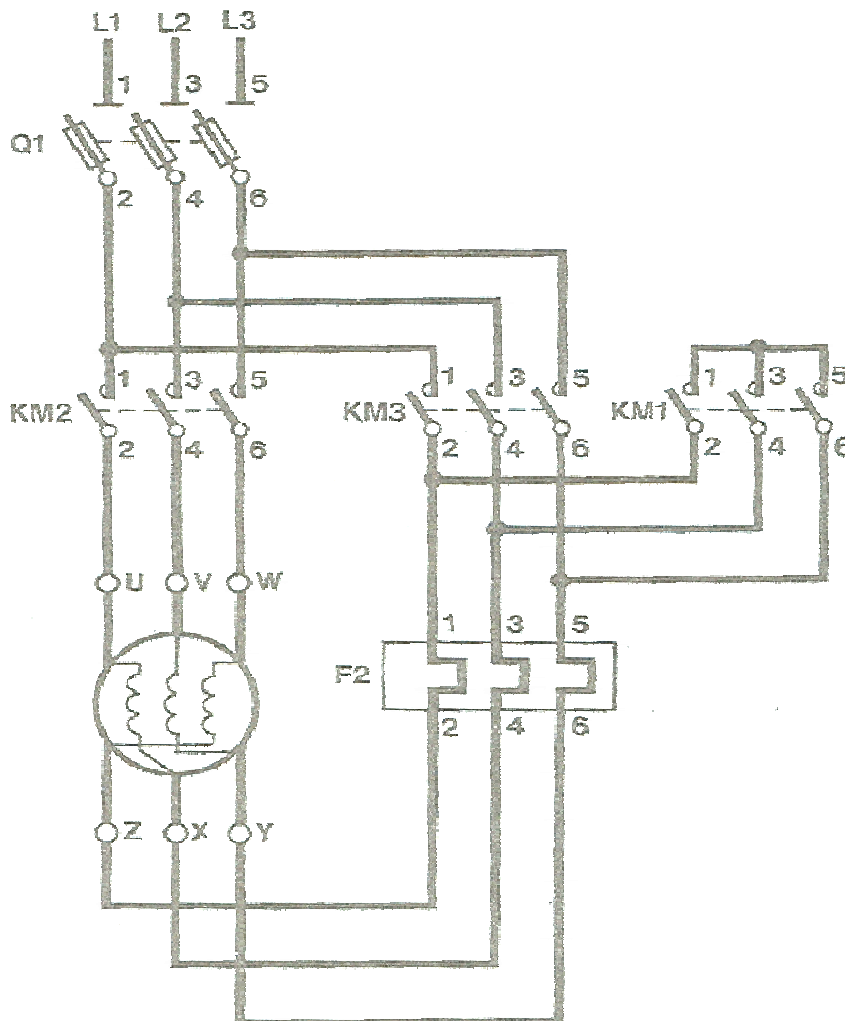
Au-delà d'une certaine puissance, il est donc conseillé soit de renoncer au démarrage étoile-triangle, soit d'utiliser une variante permettant de limiter les phénomènes transitoires.

Parmi ces variantes :

- « Etoile-triangle avec temporisation au passage étoile-triangle » : nécessite une machine à couple résistant très faible et d'inertie suffisante pour éviter une baisse de vitesse notable pendant la temporisation (en général 1 à 2s).
- Démarrage en 3 temps : étoile-triangle + résistance triangle : la coupure subsiste, mais une résistance est mise en série avec les enroulements couplés en triangle, pendant environ 3 secondes.
- Démarrage « étoile-triangle sans coupure » : la résistance destinée à se trouver temporairement en série avec le couplage triangle est branchée immédiatement avant l'ouverture du contacteur étoile afin d'éviter toute interruption du circuit.

**Remarque :** L'étude détaillée de ces variantes sortirait du cadre de cette présentation. Le démarrage étoile-triangle convient donc bien aux machines démarrant à vide ou à couple résistant faible.

### 3.3. SCHEMA DE CIRCUIT DE PUISSANCE :

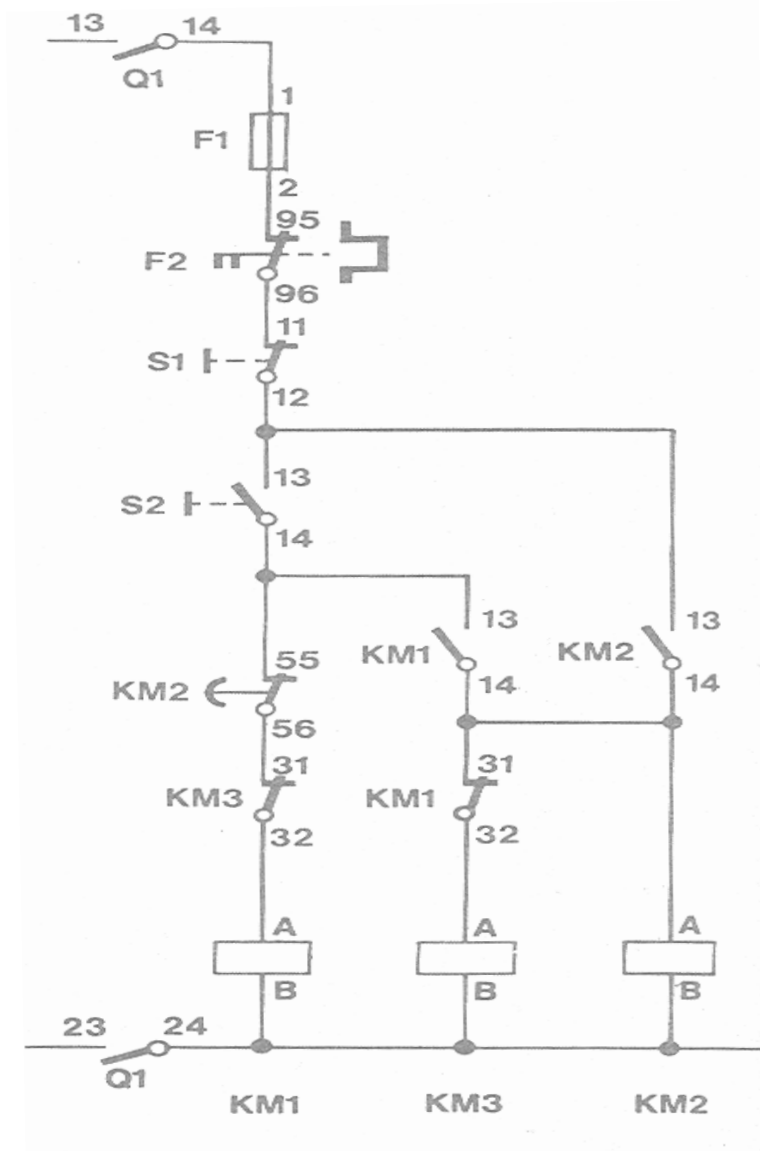


**Fig3-4** Circuit de puissance d'un démarrage étoile triangle

#### **Fonctionnement de circuit de puissance :**

- Fermeture manuelle de Q<sub>1</sub> ;
- Fermeture de KM1 – couplage étoile ;
- Fermeture de KM2 – alimentation du moteur ;
- Ouverture de KM1 – élimination du couplage étoile ;
- Fermeture de KM3 – couplage triangle.

### 3.4.CIRCUIT DE COMMANDE :



**Fig3-5** circuit de commande d'un démarreur « étoile triangle »

➤ **Fonctionnement :**

Impulsion sur S2 ;

Fermeture de KM1 ;

Fermeture de KM2 par KM1 (13-14) ;

Auto alimentation de KM1-KM2 par KM2 (13-14) ;

Ouverture de KM1 par KM2 (55-56) ;

Fermeture de KM3 par KM1 (31-32) ;

Arrêt : impulsion sur S1.

➤ **Particularité :**

Condamnation électrique entre KM1 et KM3 ;

➤ **Equations logiques :**

$$KM1 = Q1 \cdot \bar{F}2 \cdot \bar{S}1 \cdot (S2 + KM1_{(13-14)} + KM2_{(13-14)}) \cdot \overline{KM2_1}_{(55-56)} \cdot \overline{KM3_2}_{(31-32)}$$

$$KM2 = Q1 \cdot \bar{F}2 \cdot \bar{S}1 \cdot (S2 + KM1_{(13-14)} + KM2_{(13-14)})$$

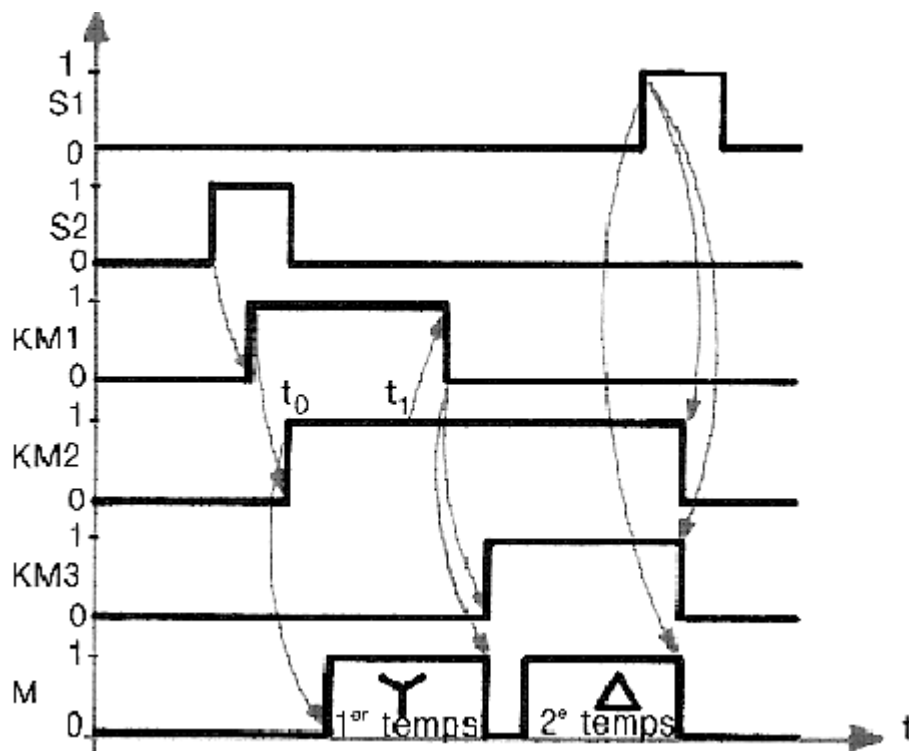
$$KM3 = Q1 \cdot \bar{F}2 \cdot \bar{S}1 \cdot KM2_{(13-14)} \cdot \overline{KM1_2}_{(31-32)}$$

$$M = KM2 \cdot (KM1 + KM3)$$

M= moteur

L'indice 1 signifie contact temporisé et l'indice 2 signifie contact de verrouillage électrique

➤ **Chronogramme**



**Fig3-6** Chronogramme du circuit de puissance d'un démarreur étoile triangle

Deux points importants sont à souligner :

- le contacteur KM1 est mis hors tension après un temps  $t = t_1 - t_0$  correspondant à la temporisation du contact KM2.
- l'alimentation du moteur est interrompue au changement du couplage afin d'éviter le court-circuit entre phases.

## Nomenclature

**L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub>** : Arrivée du réseau triphasé ;

**Q<sub>1</sub>** : Sectionneur tripolaire porte- fusible à 2 contacts à fermeture (F)

Calibre  $I_n$  moteur en  $\Delta$ ;

**F<sub>1</sub>** : Fusible de protection du circuit de puissance ;

**F<sub>2</sub>** : Relais d'intensité à effet thermique (relais thermique) à un contact à ouverture (O). Calibre  $I_n$  moteur en  $\Delta$ ;

Si : auxiliaires de commandes

**S1** : bouton poussoir d' « arrêt » (AT) à un contact O ;

**S2** : bouton poussoir de « marche » (MA) à un contact F ;

KMi : contacteurs tripolaires

**KM1** : contacteur couplage étoile à un contact O+un contact F calibre

$$\frac{I_n \text{ moteur en } \Delta}{\sqrt{3}}$$

**KM2** : contacteur de ligne à :

- un contact F + un contact O temporisé à l'action (Temporisation habituelle 7 à 15s.)

- calibre  $\frac{I_n \text{ moteur en } \Delta}{\sqrt{3}}$

**KM3** : contacteur couplage triangle à u contact O

$$\text{Calibre } \frac{I_n \text{ moteur en } \Delta}{\sqrt{3}}$$

➤ **Remarque** : L'inversion du sens de marche est obtenue par croisement de deux fils de phase (L1 et L2 sont inversés) aux bornes du stator.

O signifie ouverture et F fermeture

# DEMARRAGE STATORIQUE

## A RESISTANCES

### 4.1. PRINCIPE :

La tension réduite d'alimentation, nécessaire pour limiter l'intensité de décollage, est obtenue par insertion dans chacune des phases du stator d'une ou plusieurs résistances qui sont court-circuitées dès que le moteur a pris suffisamment de vitesse (soit 80% de sa vitesse nominale).

Il n'y a pas de coupure de l'alimentation du moteur entre les deux temps de démarrage.

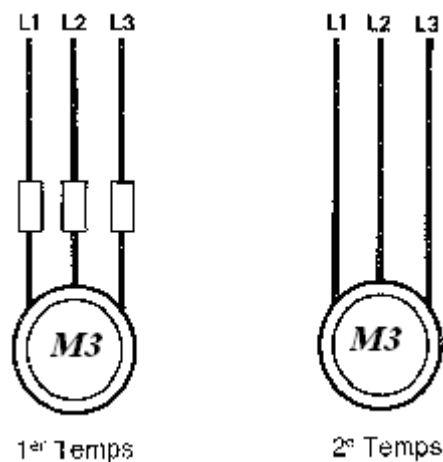
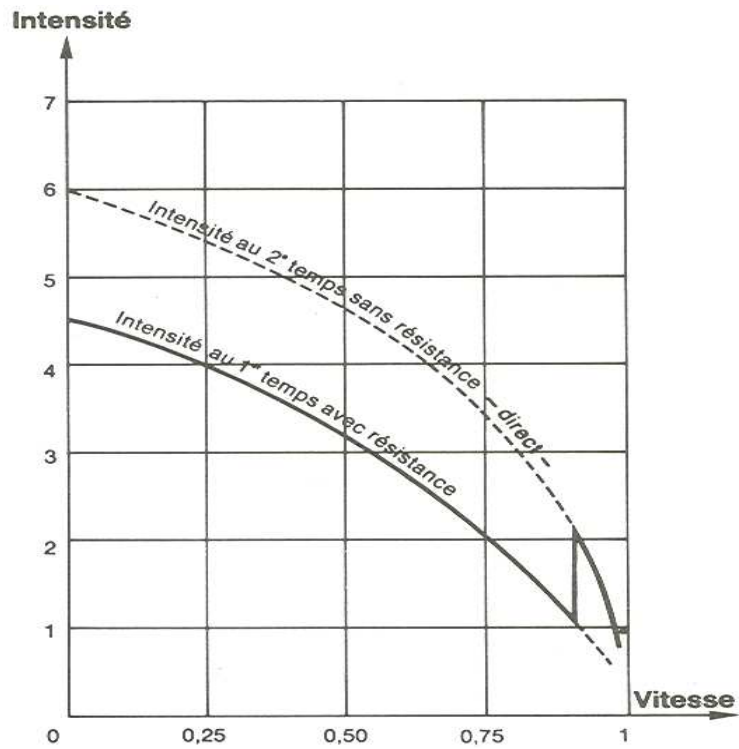


Fig4-1 schéma du principe de fonctionnement

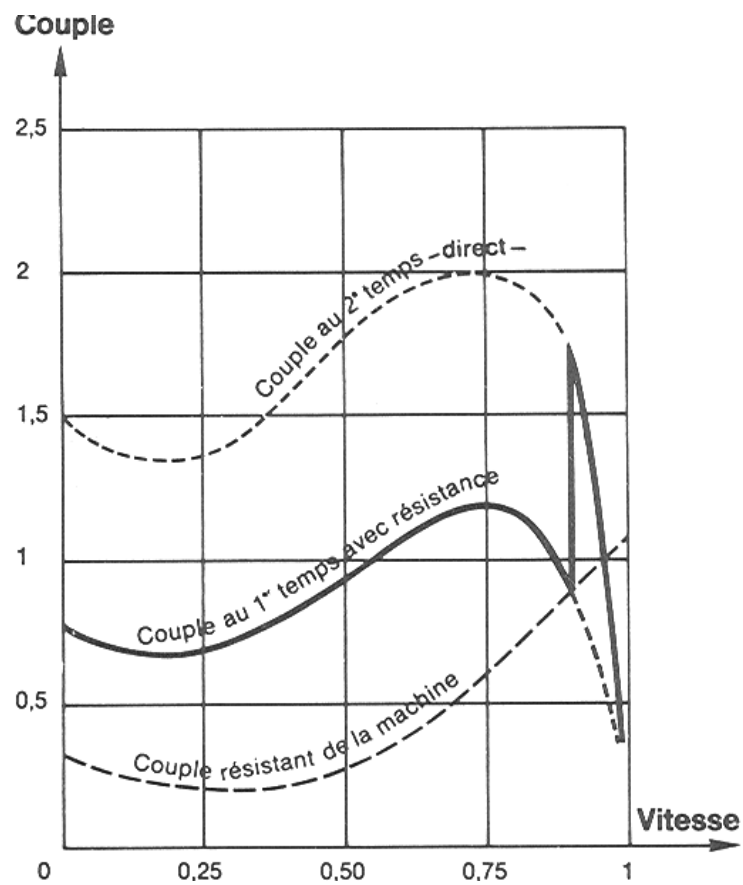
### 4.2. COURBES CARACTERISTIQUES :

Le couple initial de démarrage est relativement faible (valeur typique : 0,75 Cn) pour une pointe de courant encore importante (valeur typique 4,5 In) de l'ordre de 4 à 5





**Fig4-2** courbes des courants pour un démarrage statorique à résistance



**Fig4-3** courbes des couples pour un démarrage statorique à résistance

Ce procédé de démarrage est souple :

La tension d'alimentation réduite par les résistances ne reste pas constante, mais croît au fur et à mesure que le moteur s'accélère.

De ce qui précède, il faut retenir que ce procédé de démarrage :

- Permet une mise en vitesse plus rapide et sans à-coup. Il est d'ailleurs possible de modifier les valeurs d'intensité et de couple de démarrage en adaptant la résistance.
- Atténue les phénomènes transitoires (les enroulements moteurs ne sont jamais déconnectés du réseau d'alimentation) ;
- Convient pour les machines à couple résistant croissant au voisin de la moitié du couple nominal, y compris les machines puissantes et de forte inertie.

#### **4.3.SCHEMA DE CIRCUIT DE PUISSANCE :**

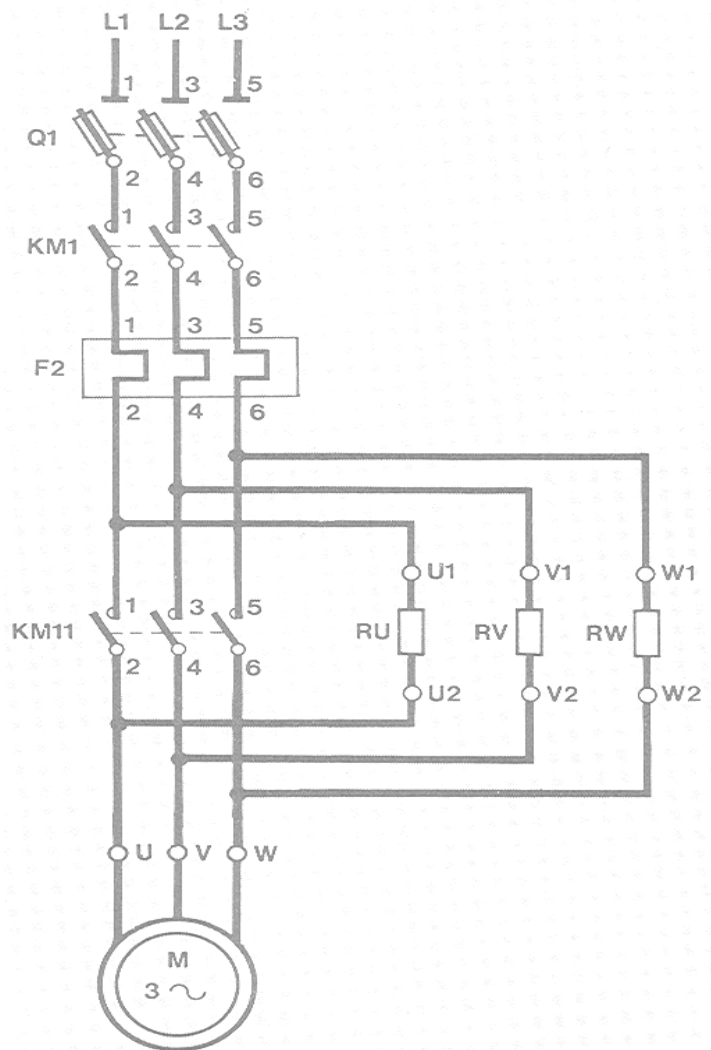
##### **Fonctionnement :**

Fermeture manuelle de  $Q_1$  ;

Fermeture de KM1 – Mise sous tension du moteur à résistances insérées ;

Fermeture de KM11 – Court-circuitage des résistances ;

Couplage direct du moteur sur le réseau d'alimentation.



**Fig 4-4** circuit de puissance d'un démarrage à résistance statorique

#### 4.4. SCHEMA DE CIRCUIT DE COMMANDE :

##### **Fonctionnement circuit de commande :**

Impulsion sur S2 ;

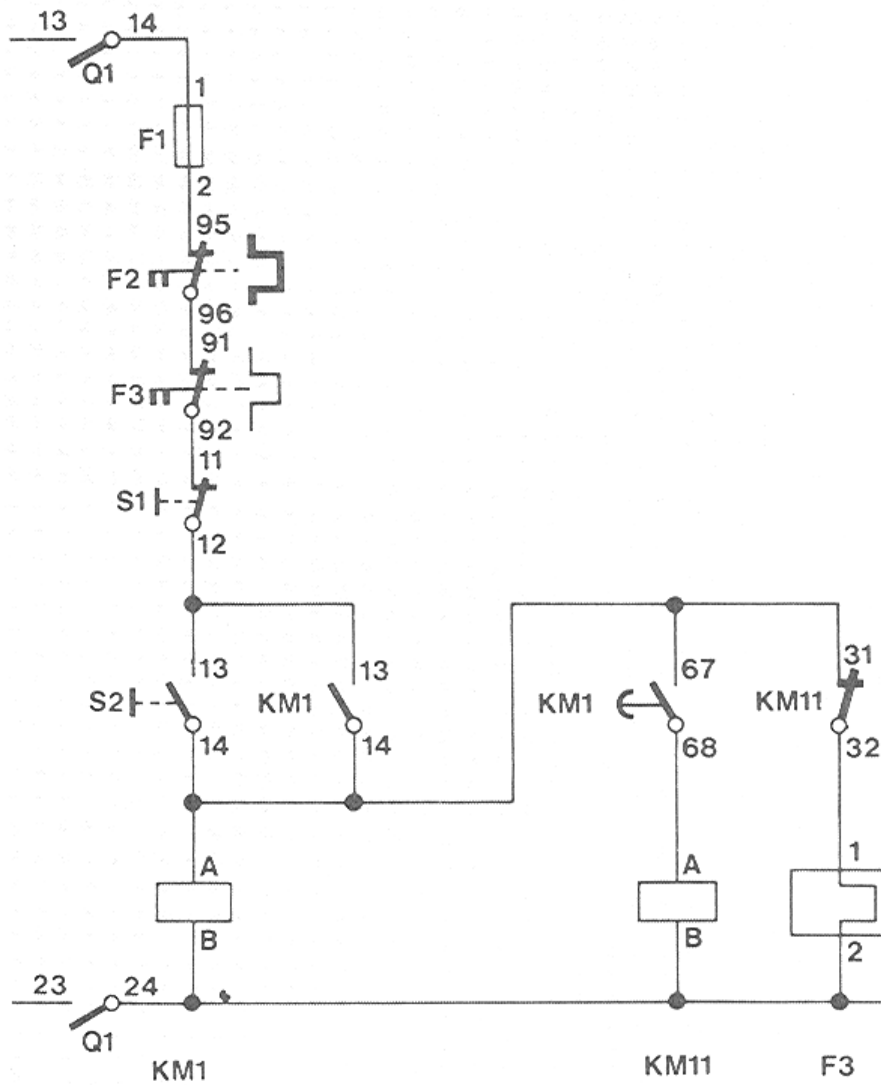
Fermeture de KM11 ;

Auto alimentation de KM11 (13-14) et alimentation du relais thermique F3 ;

Fermeture de KM1 par KM11 (67-68)

Elimination de F3 par KM1 (31-32)

Arrêt : impulsion sur S1



**Fig 4-5** circuit de commande d'un démarrage à résistance statorique

**Equations logiques :**

$$KM1 = Q1 \cdot \bar{F}2 \cdot \bar{F}3 \cdot \bar{S}1 \cdot (S2 + KM1_{(13-14)})$$

$$KM11 = Q1 \cdot \bar{F}2 \cdot \bar{F}3 \cdot \bar{S}1 \cdot KM1_{(67-68)}$$

$$F3 = Q1 \cdot \bar{F}2 \cdot \bar{F}3 \cdot \overline{KM11}_{(31-32)}$$

$$M = KM1 \cdot KM11$$

## Nomenclature

**L1, L2, L3** : Arrivée du réseau triphasé ;

**Q1** : Sectionneur porte fusibles tripolaires à 2 contacts à fermeture (F)  
**Calibre** In moteur ;

**F1** : Fusible de protection du circuit de commande ;

**F2** : Relais d'intensité à effet thermique à un contact à ouverture (O)  
**Calibre** In moteur ;

**F3** : Relais thermique assurant la protection des résistances contre les démarrages trop fréquents ou incomplets ;

**KM1** : Contacteur tripolaire de ligne à un contact F + bloc additif temporisé à l'action.

**Calibre** In moteur ;

**KM11** : Contacteur tripolaire de court-circuitage des résistances à un contact O.  
**Calibre** In moteur ;

**S1** : bouton poussoir d'arrêt (AT) à un contact O ;

**S2** : bouton poussoir de marche (MA) à un contact F ;

# DEMARRAGE PAR GRADATEUR DE TENSION

Le démarreur « étoile triangle » et le démarreur « statorique à résistance » sont les démarreurs classiques. Mais grâce à l'évolution de l'électronique de puissance, un gradateur triphasé peut jouer aussi le rôle d'un démarreur des moteurs asynchrones triphasés à cage. Dans ce chapitre, nous allons étudier un gradateur triphasé et son circuit de commande pour démarrer un moteur asynchrone à cage.

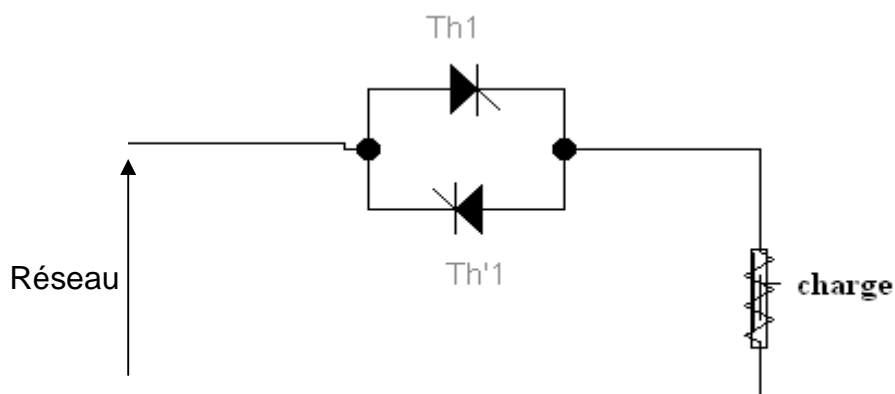
## 5.1. GRADATEUR TRIPHASE A CHARGE RESISTIVE ET INDUCTIVE

### 5.1.1. DEFINITION :

On appelle gradateur un dispositif technologique qui permet de commander et de régler le courant débité par une source de tension alternative sinusoïdale dans un récepteur.

On obtient à la sortie du gradateur une tension alternative de même fréquence que la source d'alimentation, mais de valeur efficace réglable.

L'élément fondamental d'un système gradateur est le montage anti-parallèle de 2 thyristors qui fonctionnent en commutation naturelle (i.e. que le courant dans chaque semi-conducteur s'annule de lui-même à la fin de l'intervalle normale de conduction de ce semi-conducteur)

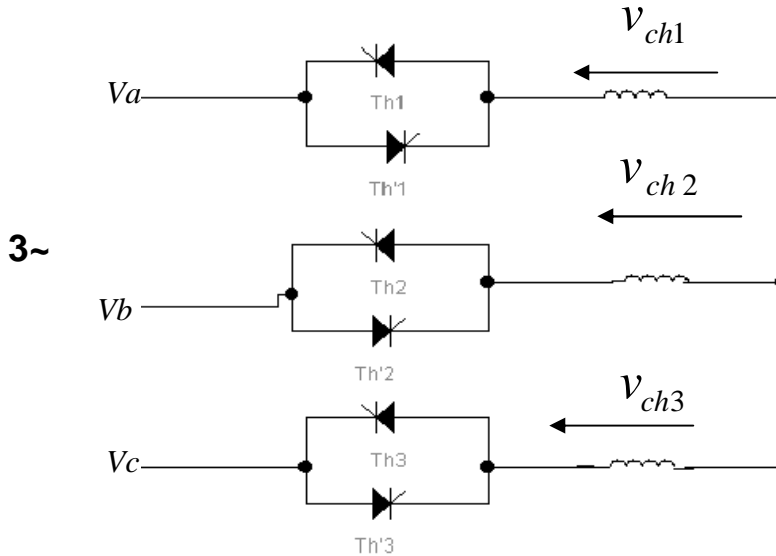


**Fig5-1** montage antiparallèle de deux thyristors

Par action sur l'instant d'amorçage des thyristors, on peut varier de façon continue l'énergie transmise à la charge.

### 5.1.2. GRADATEUR TRIPHASE :

Pour réaliser un gradateur triphasé, on dispose d'un gradateur monophasé en série sur chaque phase.



**Fig 5-2** Schéma de montage d'un gradateur triphasé

$V_a, V_b, V_c$  : tensions simples sinusoïdales de pulsation  $\omega$  du réseau

$$\text{Avec } V_a = V \times \sqrt{2} \times \sin(\omega t) \quad (5-1)$$

$$V_b = V \times \sqrt{2} \times \sin\left(\omega t + \frac{2\Pi}{3}\right) \quad (5-2)$$

$$V_c = V \times \sqrt{2} \times \sin\left(\omega t - \frac{2\Pi}{3}\right) \quad (5-3)$$

Les 6 thyristors sont débloqués (passants) tous les 6èmes d'une période dans l'ordre suivant :  $Th_1, Th'_3, Th_2, Th'_1, Th_3, Th'_2$ .

En effet, le thyristor est un composant unidirectionnel qui présente :



- un état bloqué lorsque la tension  $V_{AK}$  est négative (polarisation inverse)

lorsque la tension  $V_{AK}$  est positive (polarisation directe) et qu'il est amorcé.  
Cet amorçage peut se réaliser :

- soit par accroissement de la tension  $V_{AK}$ .
- Soit par injection d'une impulsion positive sur la gâchette.
- Soit par variation positive très rapide de la tension  $V_{AK}$ .
- Le retour à l'état bloqué se fait par EXTINCTION du thyristor en annulant ou en inversant la tension  $V_{AK}$ .

### **5.1.3. CARACTERISTIQUES RELATIVES A LA CHARGE RESISTIVE ET INDUCTIVE**

La tension  $V_{ch1}$ ,  $V_{ch2}$ ,  $V_{ch3}$  sont des tensions périodiques et symétriques. D'où la valeur efficace est :

$$V_{ch}^2 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\frac{\pi}{3}} (v_{ch1}^2 + v_{ch2}^2 + v_{ch3}^2) \cdot d\theta \quad (5-4) \quad [8]$$

Où  $\theta = \omega \cdot t$

$\alpha$  : Angle d'allumage des thyristors

$$\varphi = \text{Arctg} \frac{L\omega}{R}$$

$$- \text{ si } \varphi \leq \alpha \leq \frac{2 \cdot \pi}{3}$$

$$V_{ch}^2 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} (v_{ch1}^2 + v_{ch2}^2 + v_{ch3}^2) d\theta \quad (5-5) \quad [8]$$

Après le calcul, on trouve :

$$\frac{V_{ch}}{V} = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{3}{2 \cdot \pi} \cdot (\beta - \alpha) + \frac{3}{4 \cdot \pi} \left[ \sin 2\alpha + \sin \left( 2\beta + \frac{\pi}{3} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5-6) \quad [8]$$

$$- \text{ si } \frac{2 \cdot \pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{5 \cdot \pi}{3}$$



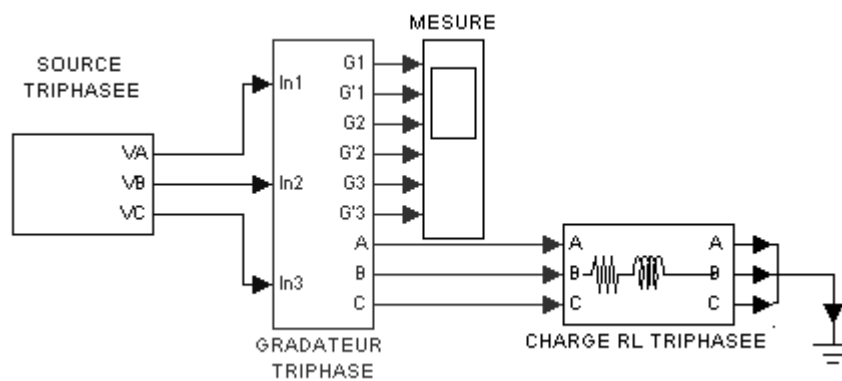
$$V_{ch}^2 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta_2} (v_{ch1}^2 + v_{ch2}^2 + v_{ch3}^2) \cdot d\theta \quad (5-7)$$

Après calcul, on trouve :

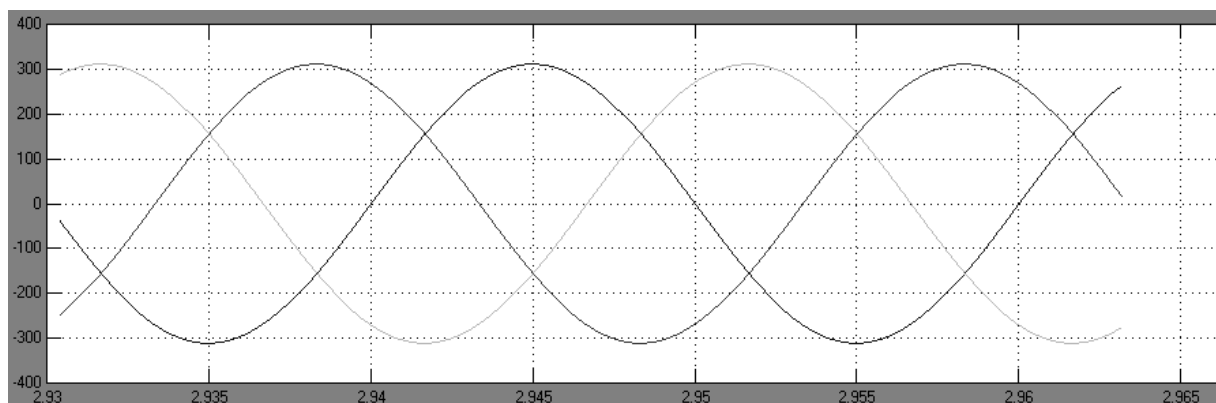
$$\frac{V_{ch}}{V} = \left\{ \frac{3}{2\pi} (\beta_2 - \alpha) + \frac{3}{4\pi} \left[ \sin\left(2\alpha + \frac{\pi}{3}\right) + \sin\left(2\beta_2 + \frac{\pi}{3}\right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5-8)$$

Où  $\beta$  et  $\beta_2$  sont les instants où les courants  $i$  sont nuls,  $i_A = i_B = 0$

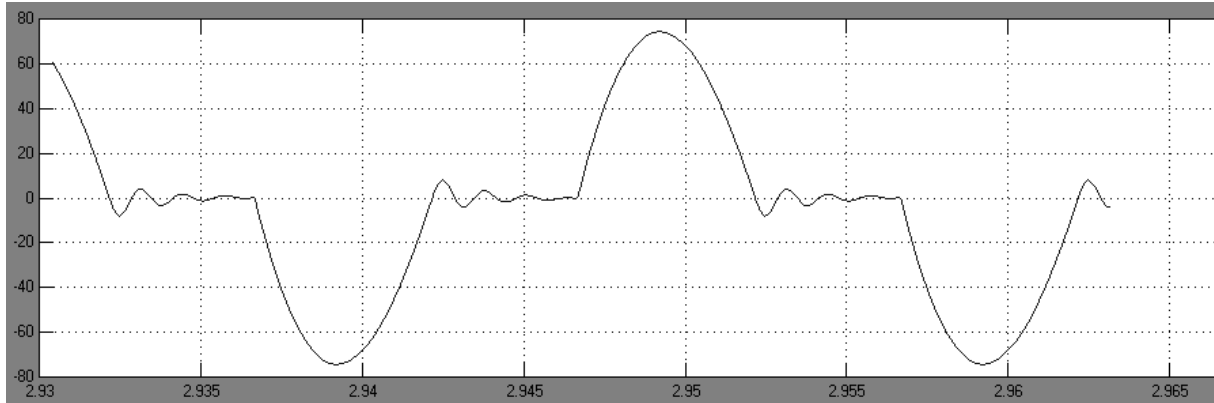
Par simulation numérique, on obtient les courbes caractéristiques suivantes :



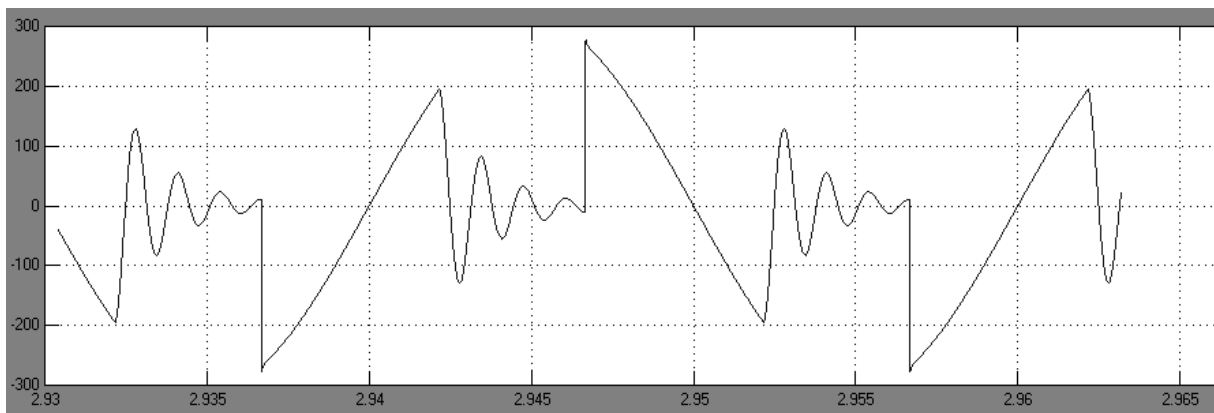
**Fig5-3** : schéma fonctionnel d'un gradateur triphasé à charge résistive et inductive



**Fig5-4** : Allure des tensions d'alimentation



**Fig5-5 :** Allure du courant à travers la charge RL



**Fig5-6 :** Allure de la tension  $V_{ch1}$  aux bornes de la charge RL

Pour un récepteur de nature inductive, on a  $\varphi = \frac{\pi}{2}$

$$- \text{ si } \frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{2\pi}{3}, \beta = \frac{4\pi}{3} - \alpha$$

$$\frac{V_{ch}}{V} = \sqrt{\frac{5}{2} - \frac{3\alpha}{\pi} + \frac{3\pi}{2} \sin 2\alpha} \quad (5-9)$$

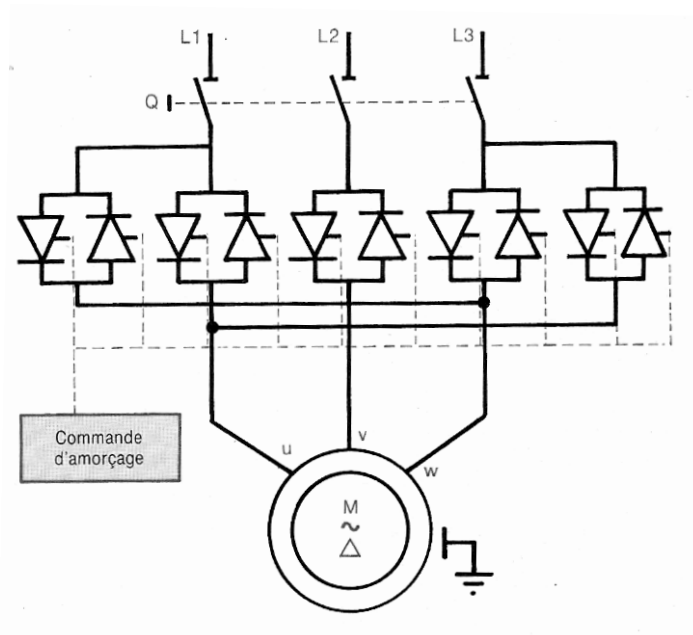
$$- \text{ si } \frac{2\pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{5\pi}{6}, \beta_2 = \frac{5\pi}{3} - \alpha$$

$$\frac{V_{ch}}{V} = \sqrt{\frac{5}{2} - \frac{3\alpha}{\pi} + \frac{3\pi}{2} \sin\left(2\alpha + \frac{\pi}{3}\right)} \quad (5-10)$$

→ En faisant varier  $\alpha$  de  $\frac{\pi}{2}$  à  $\frac{5\pi}{6}$ ,  $V_{ch}$  passe de  $V$  à  $0$ .

## **5.2. MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE ALIMENTÉ PAR UN GRADATEUR :**

On augmente progressivement la tension efficace aux bornes du moteur, ce qui évite les à-coups tout en réduisant la pointe du courant d'appel.



**Fig5-7 :** Dispositif de démarrage par gradateur de tension d'un moteur asynchrone à deux sens de rotation.

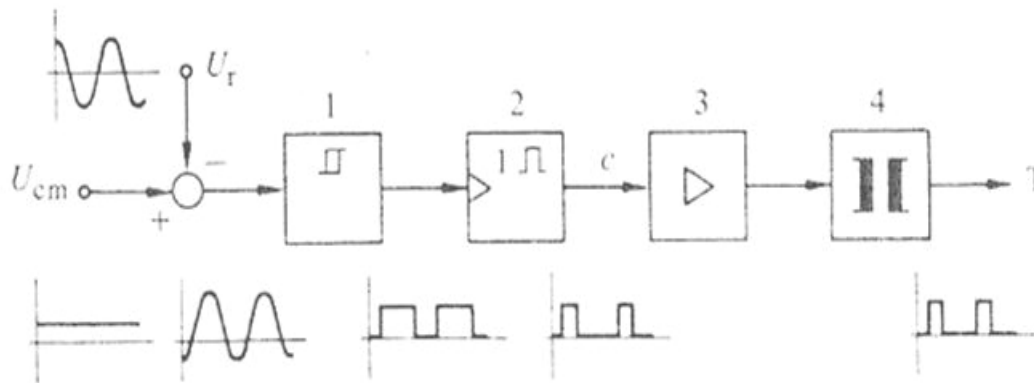
- L'angle d'amorçage du gradateur permet de régler la valeur efficace de la tension d'alimentation, c'est-à-dire, le gradateur ajuste l'intensité absorbée en fonction du couple demandé.
- En marche normale, les thyristors se comportent comme un contacteur statique (le retard à l'amorçage est alors nul et les thyristors se limitent à assurer ou à interrompre la liaison réseau charge.)
- L'inversion du sens de rotation se fait toujours par la modification de l'ordre de succession des phases.

## **5.3. DISPOSITIFS DE COMMANDE DE GACHETTES DES THYRISTORS**

Pour que les thyristors soient à l'état passant, il est nécessaire d'appliquer des impulsions positives à leurs gâchettes. Ces impulsions doivent avoir un certain angle d'allumage  $\alpha$  par rapport au point d'intersection des tensions alternatives alimentant le gradateur. On peut varier  $\alpha$  à l'aide d'une tension de commande  $U_{cm}$  continue.

### 5.3.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La figure ci-dessous montre schématiquement les parties essentielles d'un dispositif de commande de gâchettes.



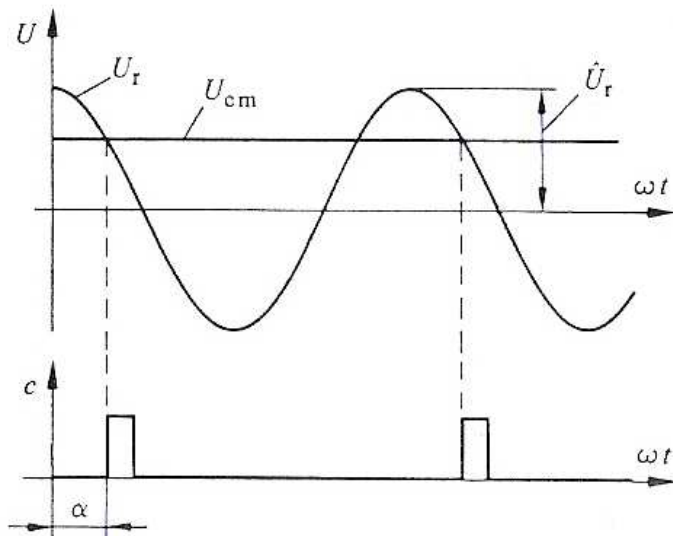
**Fig5-8** : Représentation schématique d'un dispositif de commande de gâchettes

La tension de référence sinusoïdale  $U_r$  est obtenue en intégrant la tension sinusoïdale de la tension d'alimentation.

Après, on compare cette tension  $U_r$  avec une tension de commande  $U_{cm}$  continue. La différence  $U_{cm}-U_r$  est appliquée à l'entrée d'une bascule de Schmitt 1, après avoir éliminé sa composante négative. Cette bascule de Schmitt convertit la tension sinusoïdale verticalement en une tension rectangulaire. Le flanc montant de cette tension est déphasé par rapport au passage par la valeur de crête de la tension  $U_r$ . Une bascule monostable 2, agissant sur le flanc montant fournit des impulsions sous forme d'un signal logique C. La durée de basculement de la bascule monostable détermine la durée des impulsions d'allumage.

Enfin, par l'intermédiaire d'un amplificateur 3 qui amplifie ce signal logique C, et d'un transformateur d'impulsion 4. On obtient des impulsions aptes à allumer le thyristor Th. Ce transformateur d'impulsion est utilisé pour garantir une séparation galvanique entre le circuit de commande et le circuit de puissance.

Les impulsions d'allumage ont la même fréquence que la tension de référence  $U_r$  et sont décalées de l'angle  $\alpha$  par rapport au passage par la valeur de crête  $U_r$ .



**Fig5-9** : Fonctionnement d'un dispositif de commande de gâchettes

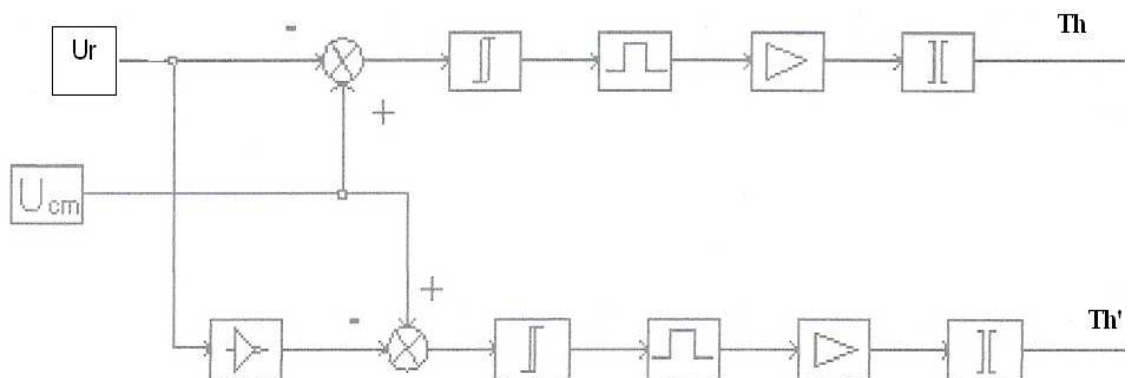
D'après cette figure, on déduit :

$$\hat{U}_r \times \cos \alpha = U_{cm} \quad (5-11)$$

$$\text{D'où } \alpha = \arccos \frac{U_{cm}}{\hat{U}_r} \quad (5-12)$$

### 5.3.2. CIRCUIT DE COMMANDE D'UN GRADATEUR MONOPHASE :

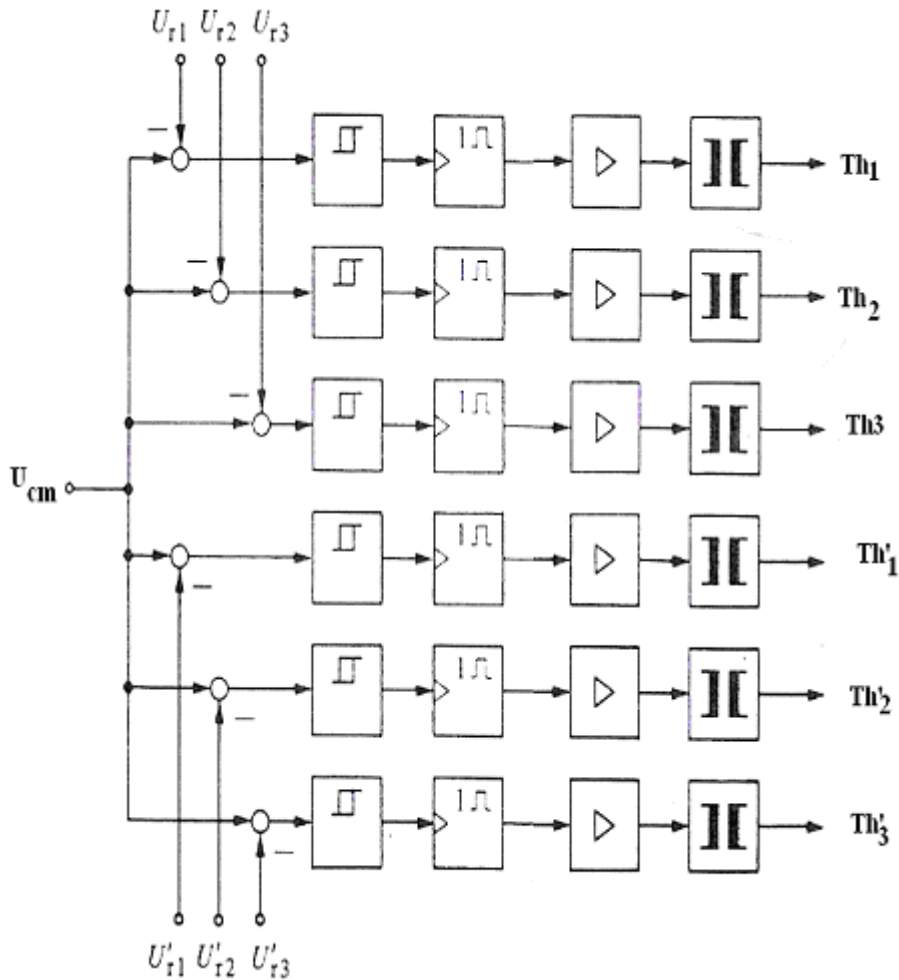
Nous avons vu dans le paragraphe précédent que les impulsions se sont produites à chaque alternance positive du réseau d'alimentation et qui ne débloquent que le Thyristor Th. Pour l'allumage de Th' qui doit être déphasé de  $\pi$  par rapport à Th, il suffit d'inverser la tension de référence  $U_r$  avant de la comparer avec la tension de commande  $U_{cm}$  continue.



**Fig5-10** : Schéma bloc du circuit de commande d'un gradateur monophasé

### 5.3.3. CIRCUIT DE COMMANDE D'UN GRADATEUR TRIPHASE :

La figure ci-dessous présente le schéma de principe complet.

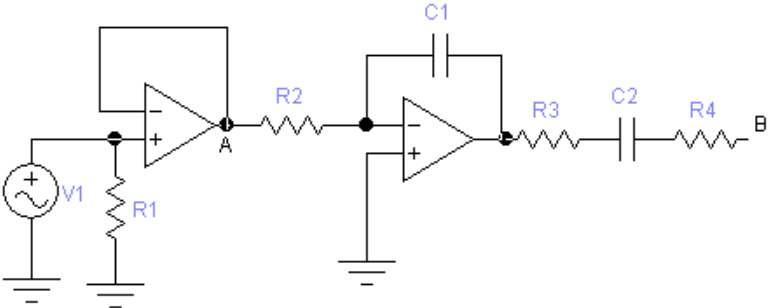


**Fig5-11** : Schéma bloc du circuit de commande d'un gradateur triphasé

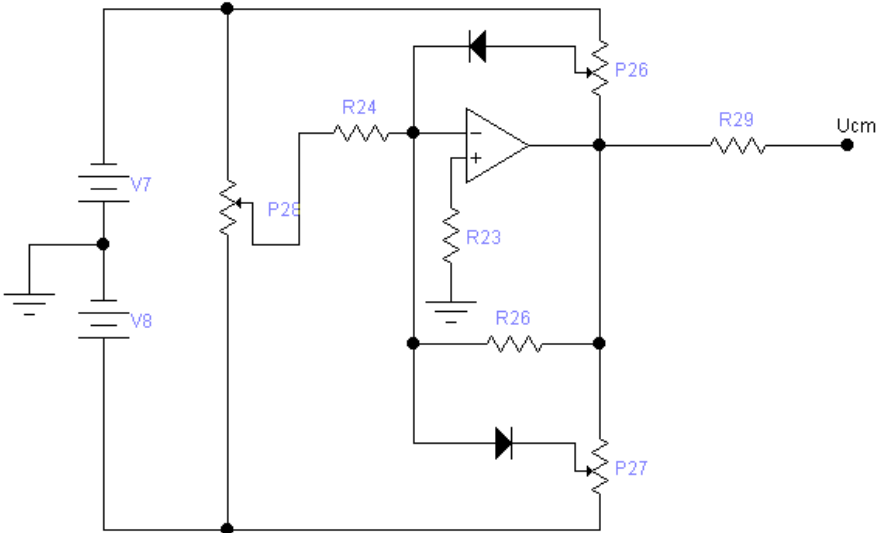
Les tensions de référence  $U_{r1}$ ,  $U_{r2}$ ,  $U_{r3}$  sont obtenues en intégrant les tensions d'alimentation

Les tensions de référence  $U'_{r1}$ ,  $U'_{r2}$ ,  $U'_{r3}$  sont obtenues en inversant les tensions  $U_{r1}$ ,  $U_{r2}$ ,  $U_{r3}$

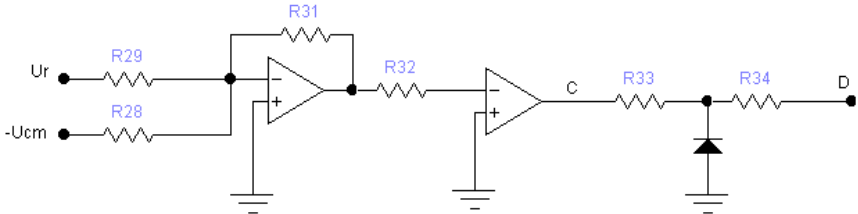
Les schémas de montage de chaque bloc sont représentés comme suit :



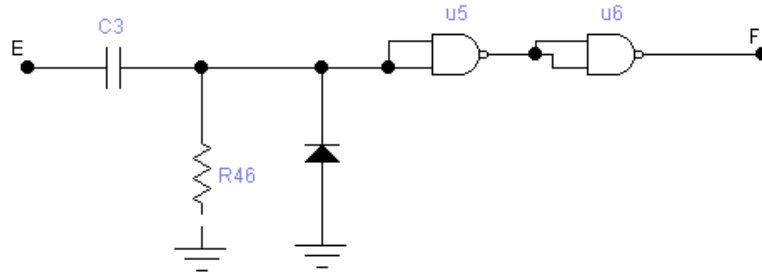
**Fig5-12** schéma d'un suiveur et d'un intégrateur



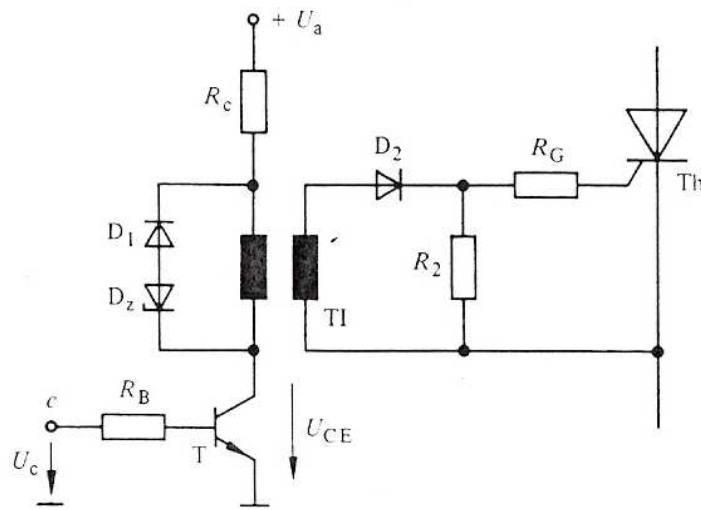
**Fig5-13** schéma de montage pour avoir la tension de commande  $U_{cm}$



**Fig5-14** schéma de montage d'un comparateur avec élimination de la composante négative de son signal de sortie



**Fig5-15** schéma d'un bascule monostable



**Fig5-16** schéma d'un amplificateur avec un transformateur d'impulsion



# PARTIE 3

## SIMULATION NUMERIQUE

CHAPITRE

6

# PRESENTATION ET EXPLOITATION DU LOGICIEL DE SIMULATION

## **6.1. LE LOGICIEL DEMAS :**

Le logiciel DEMAS est réalisé à partir du MATLAB (Matrix Laboratory) qui est un produit développé par la société MathWorks.

La raison pour laquelle nous avons utilisé MATLAB, c'est parce qu'il est conçu à la base pour être un environnement de calcul scientifique et de visualisation de données. MATLAB est aussi un langage de programmation complet dans un environnement de développement simple et pratique.

Le logiciel DEMAS nous permet d'étudier le comportement dynamique d'un moteur asynchrone à cage au démarrage et son fonctionnement avec les procédés de démarrages (démarrage étoile triangle, démarrage statorique à résistances et démarrage par gradateur de tension)

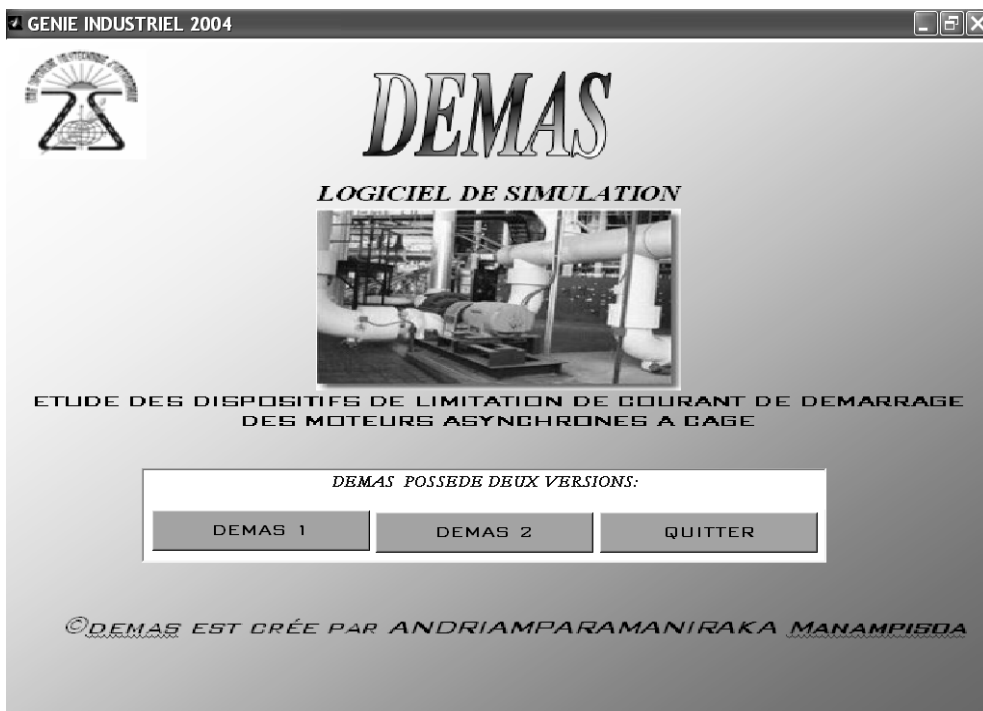
Il présente deux versions : DEMAS1 et DEMAS2

DEMAS1 est réalisé par une programmation événementielle (interface graphique) tandis que DEMAS2 est fait sous Simulink-Power System Blockset

L'un des deux DEMAS est considéré comme un outil de vérification

## **6.2. GUIDE D'UTILISATION :**

Tout d'abord, il faut ouvrir matlab. La fenêtre de commande MATLAB apparaît. Ensuite tapez à l'invite le mot DEMAS suivi de la touche d'entrée (l'invite est toujours donnée par un double chevron qui ne doit pas être tapé) et une fenêtre d'accueil apparaît



**fig6-1** : fenêtre d'accueil de DEMAS

Si vous voulez ouvrir DEMAS1 (respectivement DEMAS2) ; cliquez sur le bouton DEMAS1 (respectivement DEMAS2). Par contre si vous voulez quitter DEMAS, cliquez sur le bouton « QUITTER »



**fig6- 2:** fenêtre d'accueil de DEMAS 1



**Fig6-3** : fenêtre d'accueil de DEMAS 2

Pour entrer dans le corps du logiciel, cliquez sur le bouton « SUIVANT » pour DEMAS 1 et utilisez le menu déroulant pour DEMAS2.

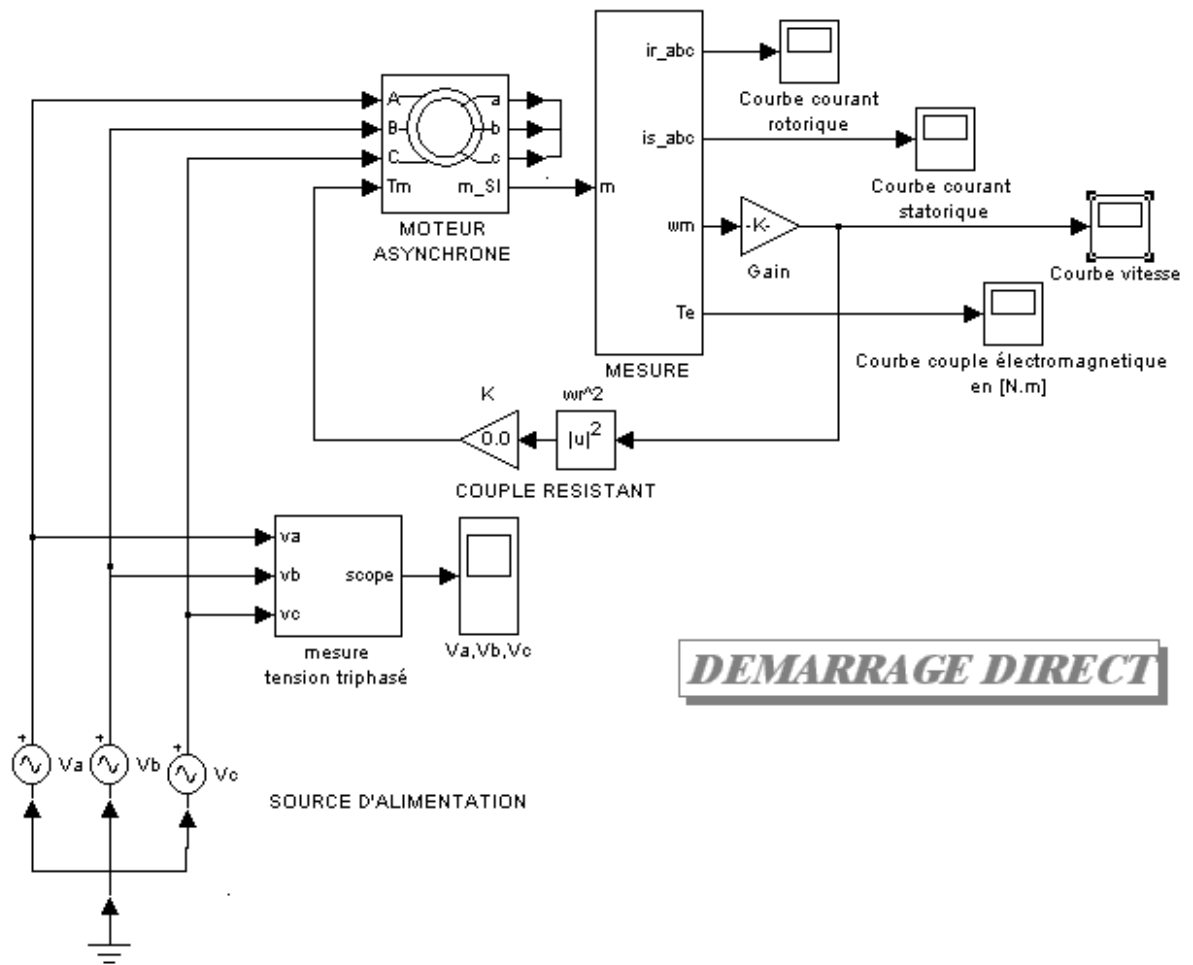
### **6.3. RESULTATS ET INTERPRETATION :**

#### **6.3.1. REGIME TRANSITOIRE AU DEMARRAGE DIRECT :**

Le moteur asynchrone est directement alimenté sur le réseau triphasé .le couple résistant est de la forme parabolique  $Cr = k \times n^2$  (cas des machines centrifuges, machines démarrants à vide comme pompes, ventilateurs....)

Si on voudrait changer les paramètres caractéristiques d'un bloc ; on fait une double clique sur ce et une fenêtre de dialogue apparaît. Par exemple, les paramètres du moteur utilisés sont :

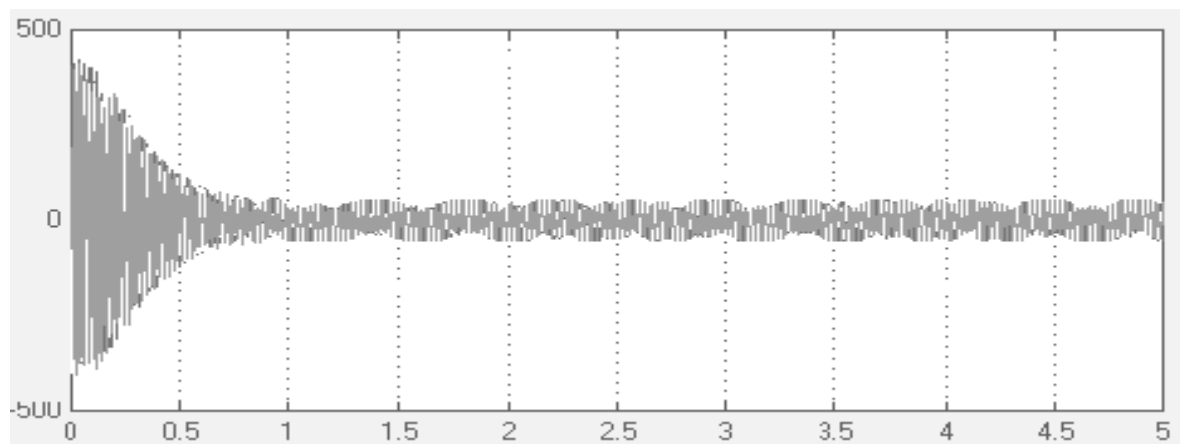
- $R_s$  : résistance statorique ;  $R'_r$  : résistance rotorique ramenée au stator
- $L_{ls}$  : inductance de fuite statorique ;  $L'_{lr}$  : inductance de fuite rotorique ramenée au stator ;  $L_{sr}$  : inductance mutuelle
- $J$  : moment d'inertie ;  $p$  : nombre de paire de pole
- Les conditions initiales.....



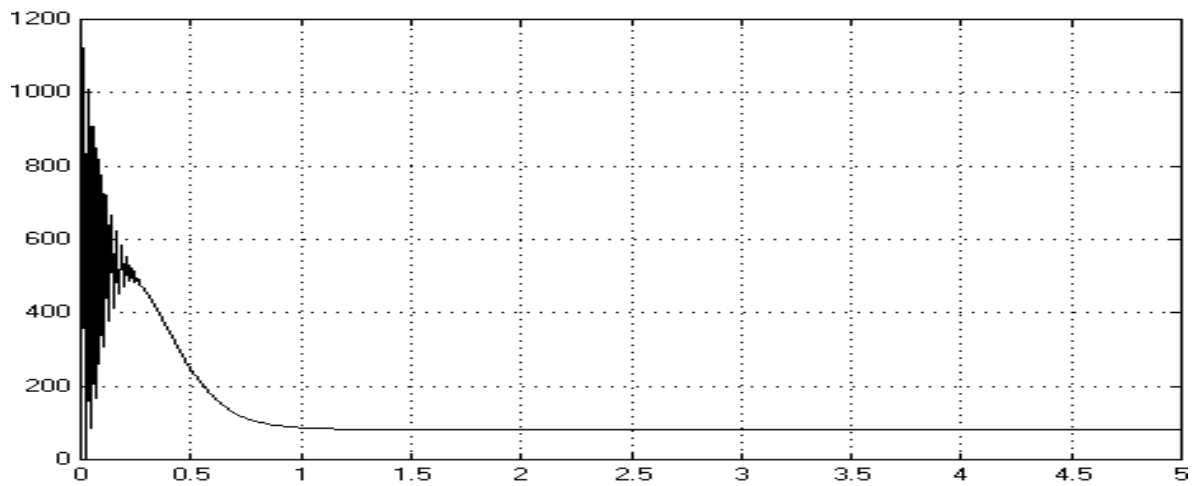
**Fig6-4** : schéma de simulation d'un démarrage direct sous DEMAS2 (simulink)

**Résultats :**

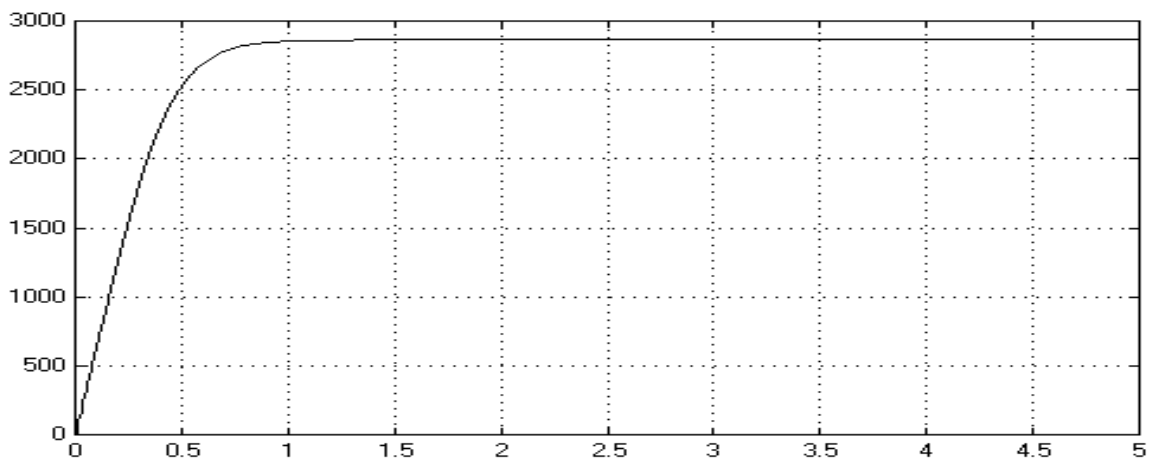
On lance la simulation et on trouve :



**Fig6-5** : allure des courants dans les enroulements statoriques en fonction du temps

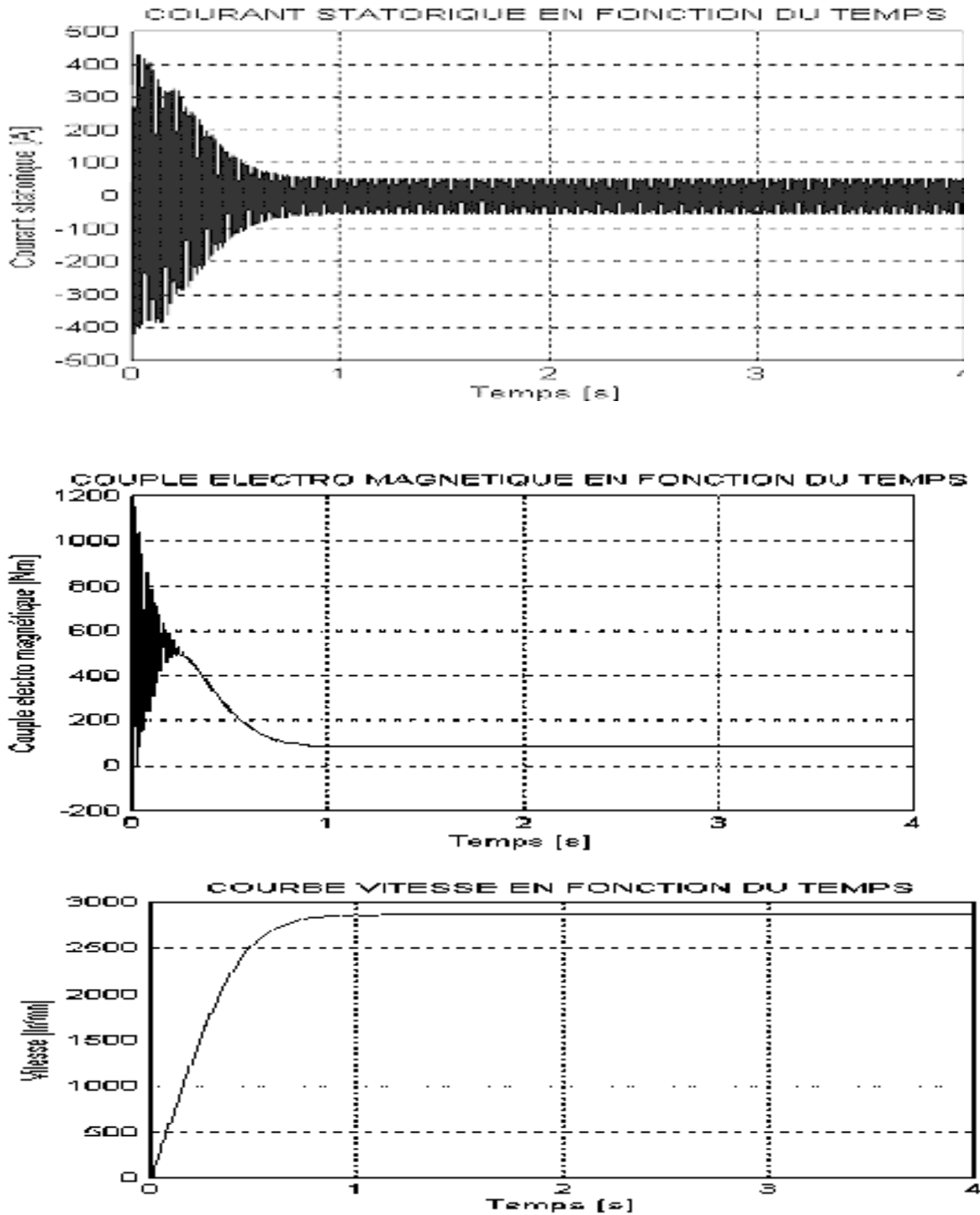


**Fig6-7** : courbe du couple électromagnétique en fonction du temps



**Fig6-8** : courbe de la vitesse du moteur en fonction du temps

Ces résultats sont acceptables parce qu'en vérifiant avec DEMAS1 ; on obtient les résultats suivants :



**Fig6-9** : courbes du courant statorique , du couple électromagnétique et de la vitesse du moteur en fonction du temps (sous DEMAS1)

Au démarrage, le courant statorique est très important (5 à 6 fois le courant normal).il diminue en fonction du temps et devient stable lorsque le régime permanent est atteint. Le couple électromagnétique est aussi énergique au démarrage et il diminue aussi en fonction du temps. Par contre, la vitesse augmente

à pente positive et au bout d'un certain temps, elle devient constante. Le régime permanent est alors atteint

Le temps de démarrage dépend des paramètres mécaniques appliqués au moteur. Plus la charge est très grande, plus le temps de démarrage est trop long et le temps de démarrage court nécessite un couple électromagnétique très grand

**Conclusion :**

a) Avantages du démarrage direct :

- Simplicité de l'appareillage.
- Couple important.
- Temps de démarrage court.

b) Inconvénients du démarrage direct :

- Appel du courant important
- Démarrage brutal

6.3.2. DEMARRAGE ETOILE TRIANGLE :

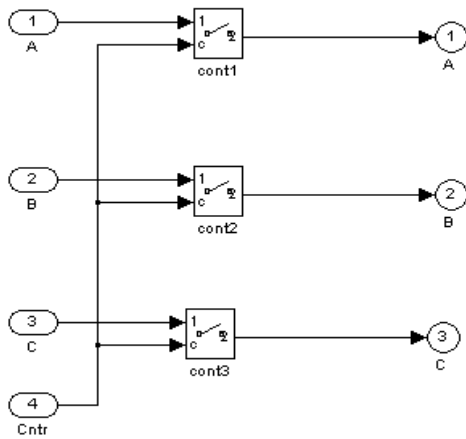
La figure (6-11) représente le schéma de simulation d'un démarrage étoile triangle. La « source triphasée étoile » (respectivement la « source triphasée triangle ») signifie la tension appliquée aux bornes du moteur en couplage étoile (respectivement la triangle). Par exemple 220V/380V

On utilise deux contacteurs tripolaires temporisés : contacteur étoile et contacteur triangle

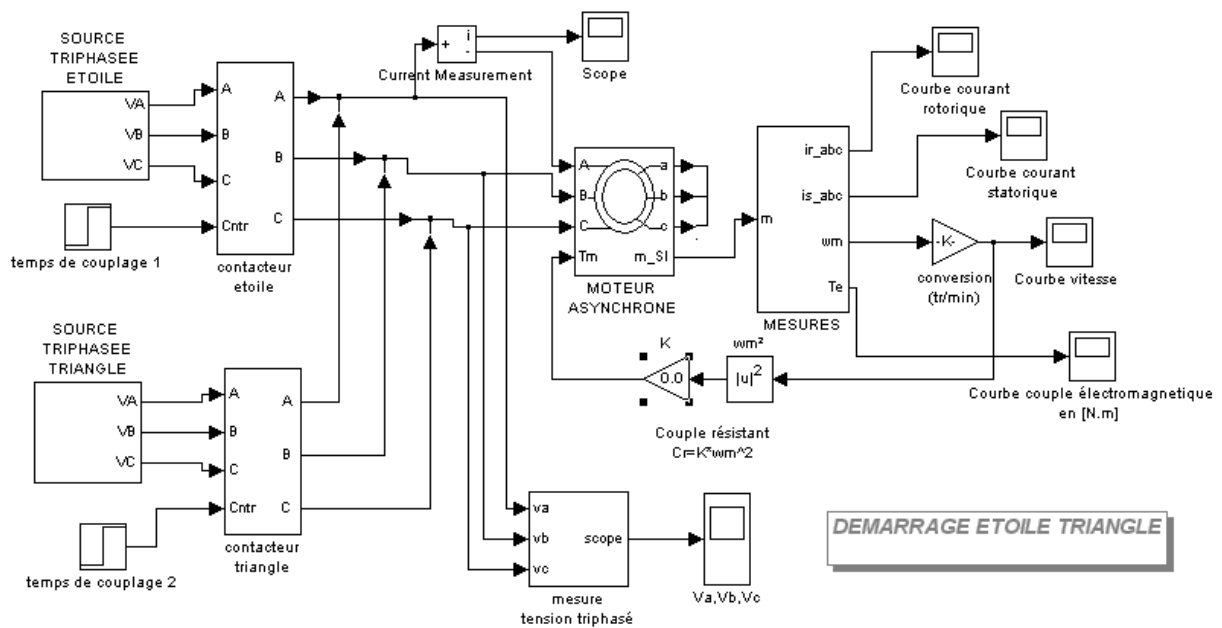
Pendant le couplage en étoile, on a : fermeture du contacteur étoile et ouverture du contacteur triangle

Par contre, au cours du couplage en étoile, on a : fermeture du contacteur triangle et ouverture du contacteur étoile





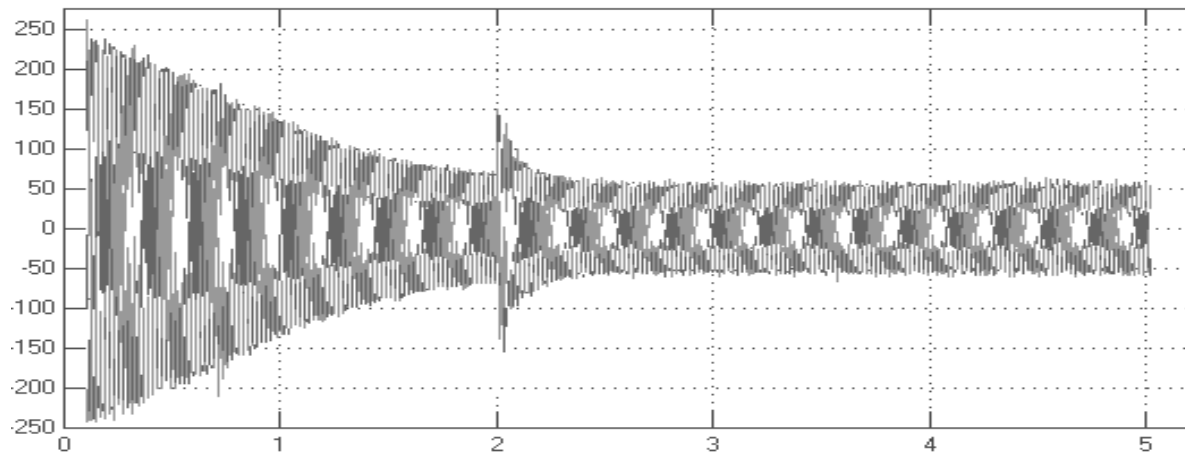
**Fig6-10 : schéma des contacts d'un contacteur tripolaire**



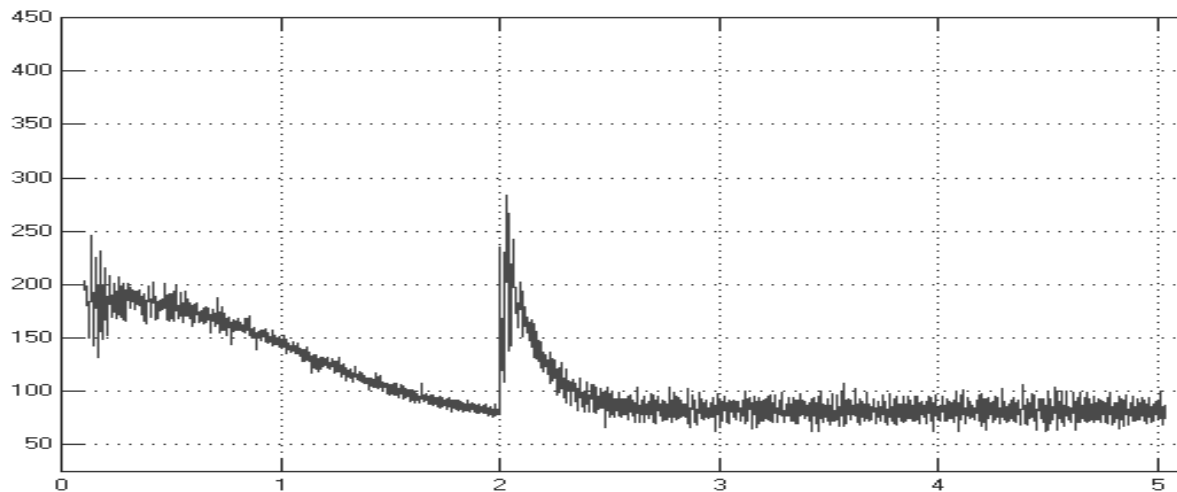
**Fig6-11 : schéma de simulation d'un démarrage étoile triangle**

## Résultats :

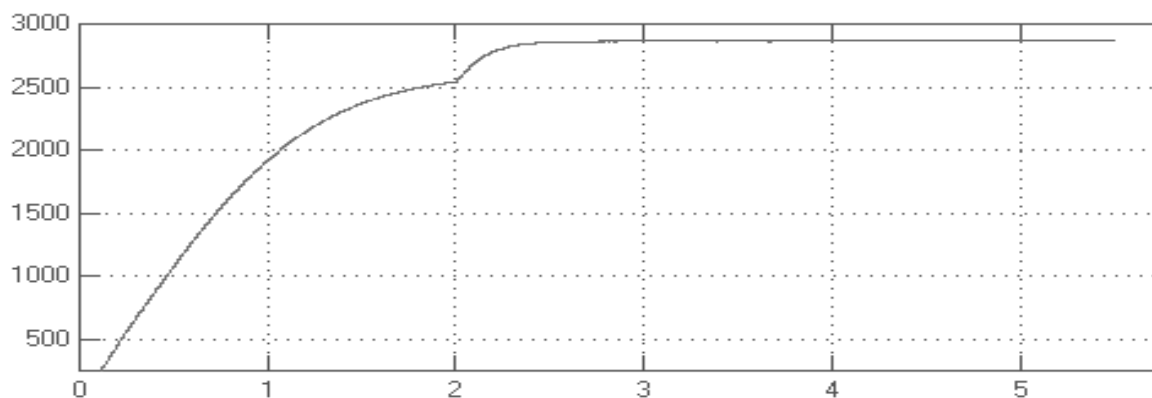
On lance la simulation et on trouve sur les oscilloscopes :



**Fig6-12 :** courbes des courants statoriques en fonction du temps pendant le démarrage étoile triangle



**Fig6-13 :** courbe du couple électromagnétique en fonction du temps pendant le démarrage étoile triangle



**Fig6-14 :** courbe de la vitesse en fonction du temps pendant le démarrage étoile triangle

L'appel du courant au démarrage est le 1/3 de l'appel de courant au démarrage direct et le couple est sensiblement 3 fois plus faible qu'en démarrage direct.

Lors du changement de couplage étoile en triangle, il y a une brutalité des régimes transitoires à cause de la coupure du courant. D'ou, le démarrage étoile triangle n'est envisageable que pour les moteurs de petites puissances

La valeur de la vitesse de rotation, à l'instant où le basculement du couplage étoile vers le couplage triangle a lieu, a d'une grande importance :

- si cette vitesse est trop faible, l'appel de courant est très important,
- si cette vitesse est trop proche de la vitesse de synchronisme le moteur risque de caler (si  $C_{moteur} < C_{résistant}$ ).

### **Conclusion :**

#### a) avantages du démarrage étoile triangle :

- Appel de courant en étoile réduit au tiers de sa valeur en direct
- .c'est un procédé extrêmement simple et peu coûteux (faible complication d'appareillage)

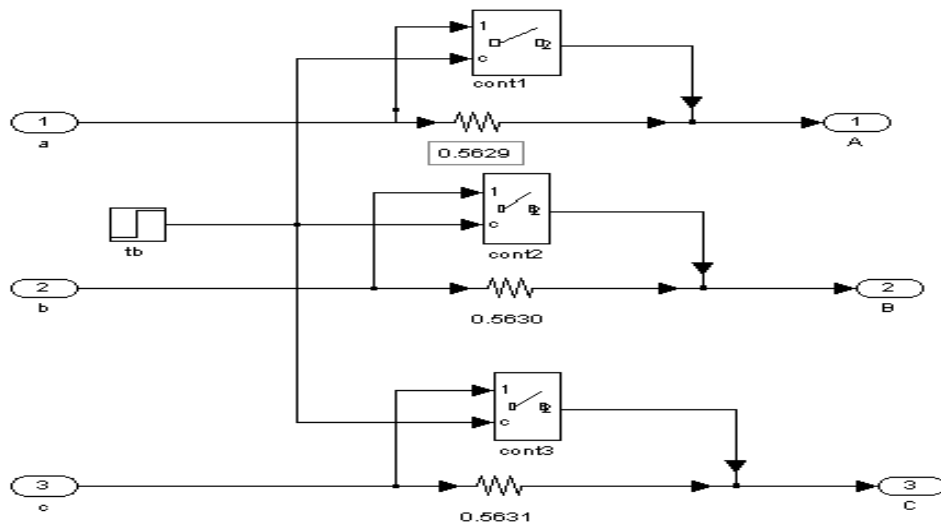
#### b) Inconvénients du démarrage étoile triangle :

- Couple réduit au tiers de sa valeur en direct
- Coupure entre les positions étoile et triangle d'ou apparition de phénomènes transitoires

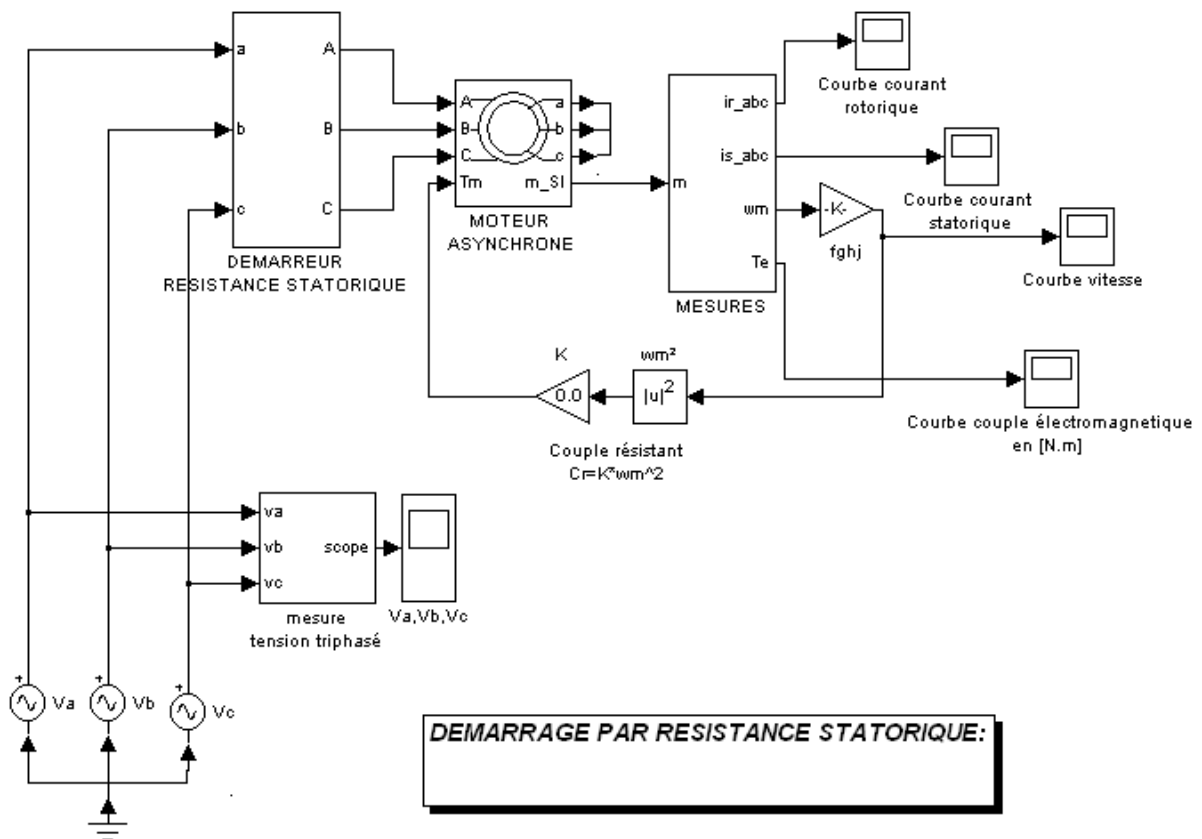
### **6.3.3. DEMARRAGE STATORIQUE A RESISTANCES :**

La figure (6-16) représente le schéma de simulation du démarrage à résistance statorique. Le court-circuitage des résistances en série avec le moteur est commandé par un contacteur temporisé. Dans cet ouvrage, on utilise qu'une seule résistance mais on peut utiliser plusieurs résistances et on obtiendra plusieurs crans de démarrage

A,B,C,a,b,c sont les bornes de sortie et bornes d'entrée du démarreur (cf.fig(6-15)) et tb commande l'ouverture et la fermeture des contacts

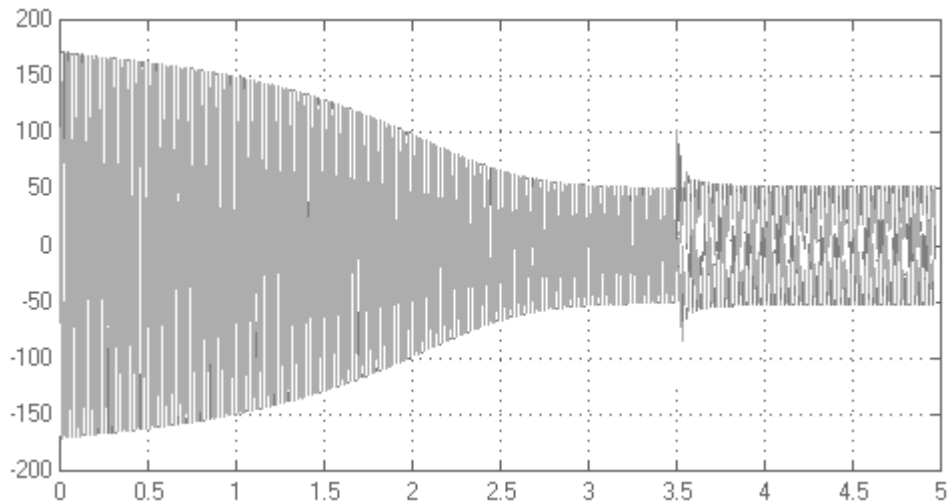


**Fig6-15 : schéma du démarreur statorique à résistances**

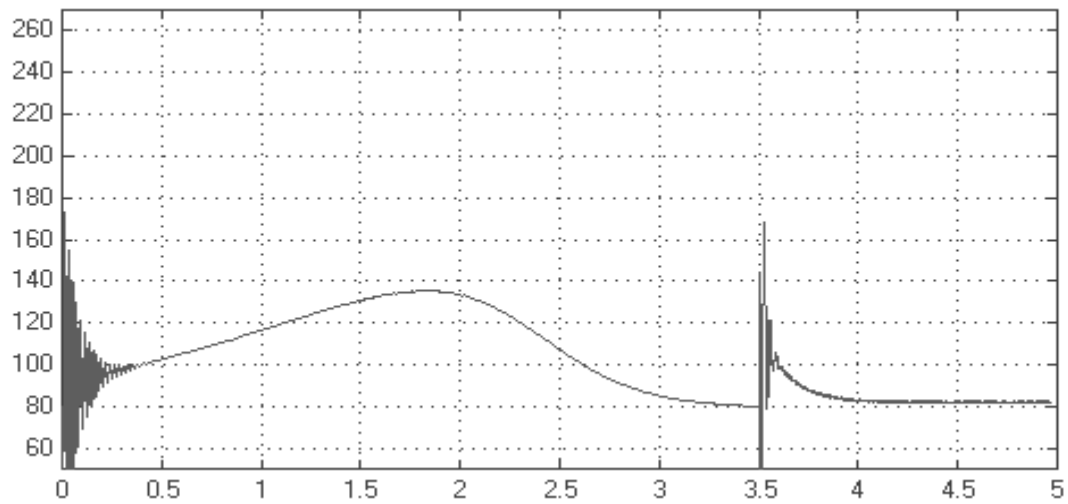


**Fig6-16 : schéma de simulation d'un démarrage statorique à résistances**

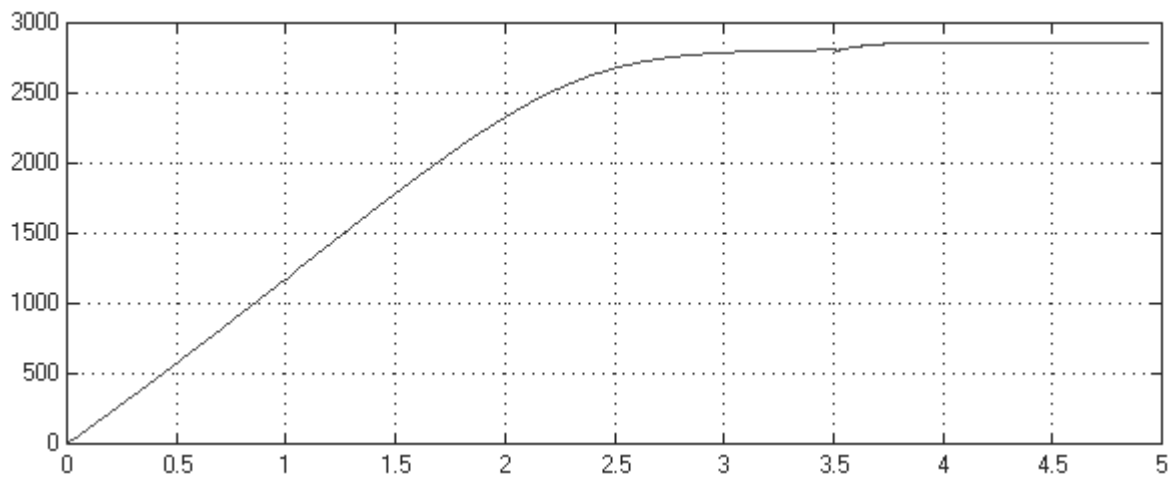
**Résultats :**



**Fig6-17** : courbes des courants statoriques au démarrage statorique a résistance



**Fig6-18** : courbes du couple électromagnétique en fonction du temps au démarrage statorique à résistances



**Fig6-19** : courbe de la vitesse de rotation en fonction du temps au démarrage statorique à résistances

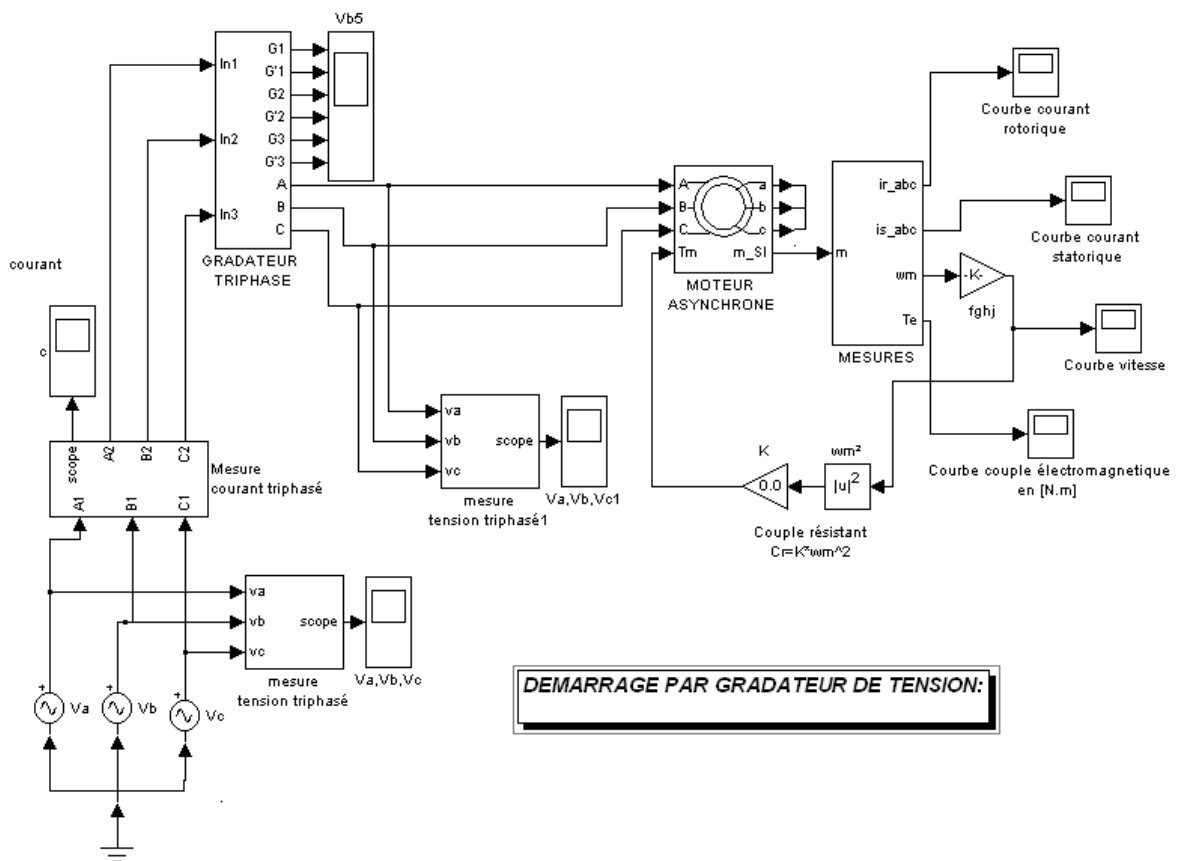
La tension appliquée aux bornes du moteur ne reste pas constante pendant le temps d'accélération et Le couple initial est relativement faible pour une pointe de courant assez importante, une petite perturbation a lieu lors du court-circuitage des résistances.

**Conclusion :**

C'est un démarrage progressif mais il y a toujours un appel du courant très important.

Il convient aux machines dont le couple de démarrage est plus faible que le couple nominale

**6.3.4. DEMARRAGE PAR GRADATEUR DE TENSION :**

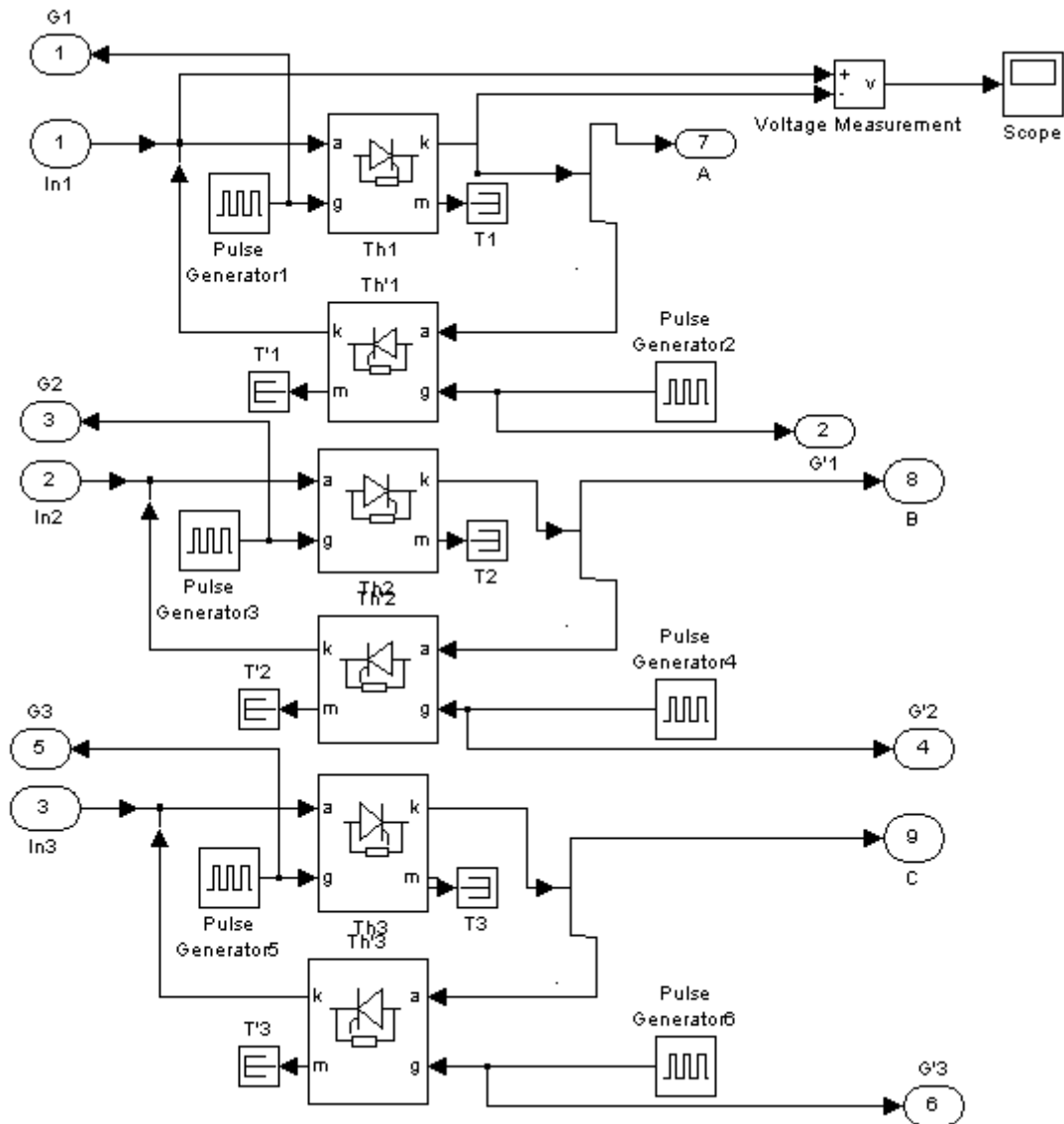


**Fig 6-20 :** schéma de simulation d'un démarrage par gradateur de tension

Va, Vb, Vc sont les tensions d'alimentation.

Le gradateur triphasé est représenté par la figure 6-21.

Les générateurs d'impulsion (pulse generator) délivrent des impulsions aptes à allumer les thyristors th1, th'1, th2, th'2, th3, th'3.



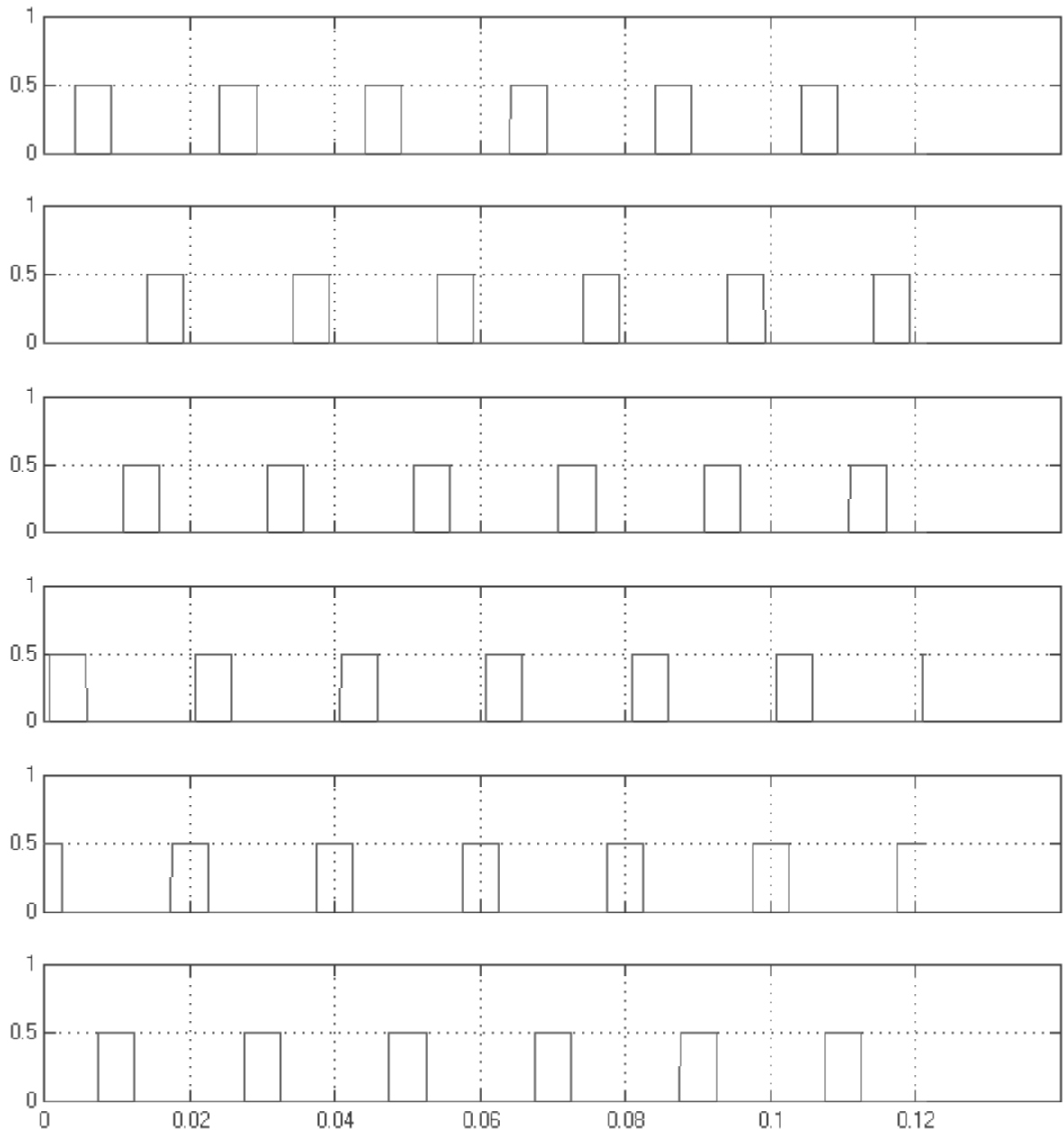
**Fig 6-21** : schéma d'un gradateur triphasé

**Résultats :**

Rappelons que l'ordre de l'amorçage des thyristors pour un angle  $\alpha$  est de : Th1, Th'3, Th2, Th'1, Th3, Th'2.

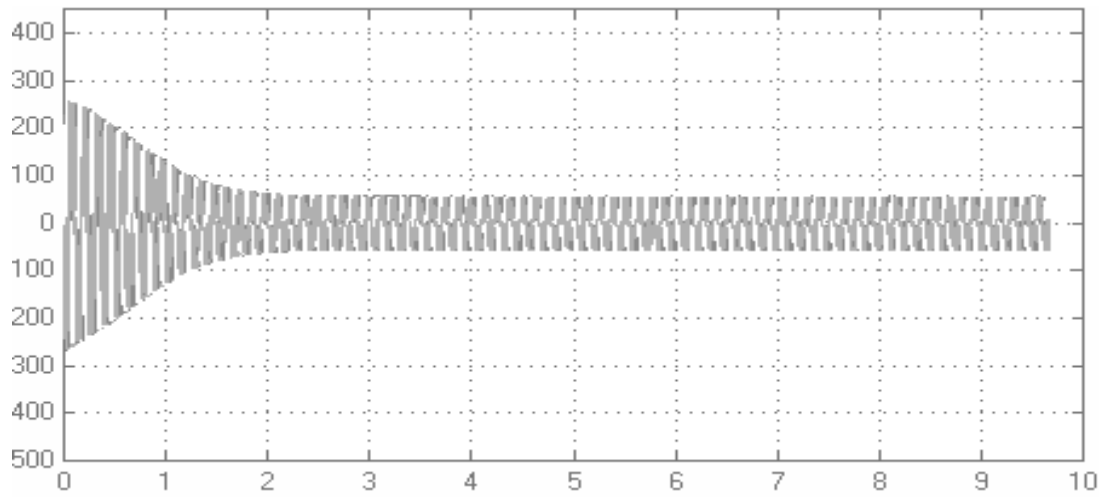
La figure (6-22) montre les allures des impulsions entrées dans les gâchettes des thyristors (on double clique le bloc vb5)

Grâce à cet angle d'amorçage, on peut modifier les caractéristiques du moteur

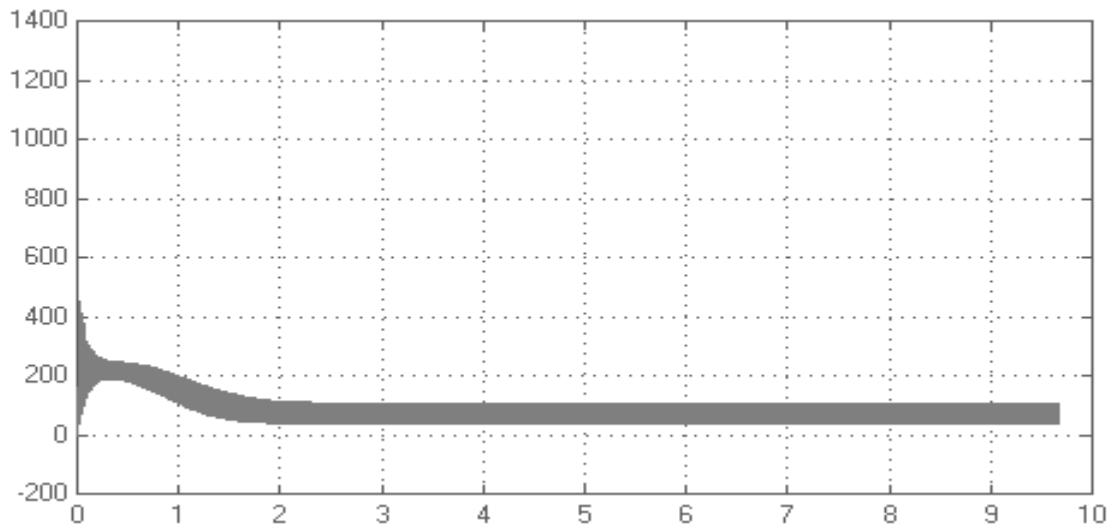


**Fig6-22** : allures des impulsions introduites dans les gâchettes des thyristors ( $\alpha=75^\circ$ )

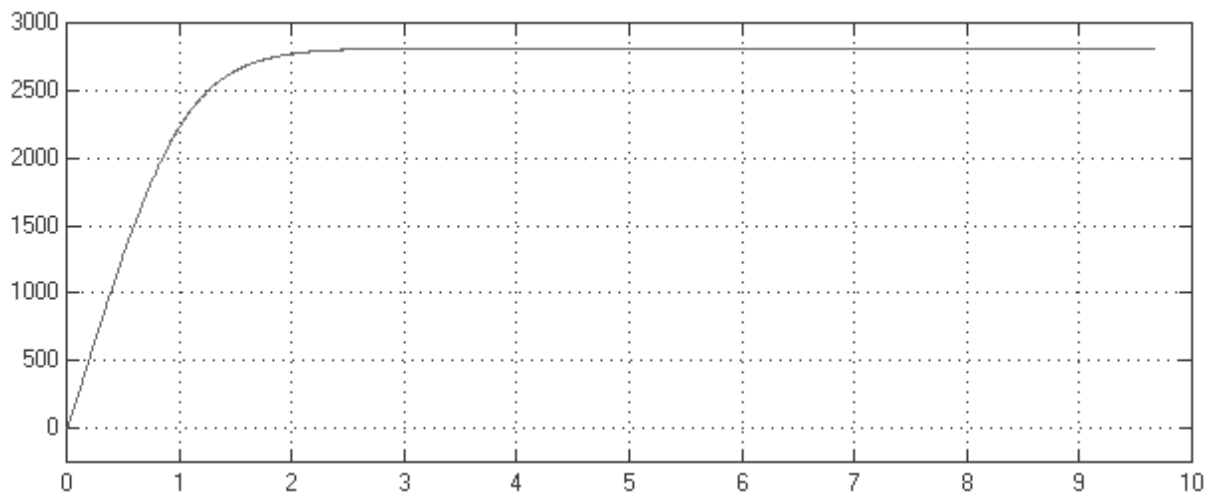




**Fig6-23** : courbes des courants statoriques pour  $\alpha=75^\circ$



**Fig6-24** : courbe du couple électromagnétique pour  $\alpha=75^\circ$



**Fig6-25** : courbe de la vitesse de rotation pour  $\alpha=75^\circ$

La forme de la tension appliquée au moteur est très riche en harmoniques et génère des échauffements supplémentaires dans celui-ci. Ces harmoniques entraînent aussi des perturbations au réseau. D'où il faut utiliser un filtre pour éviter le retour des harmoniques vers le réseau. On conclura en disant que ce type de démarrage ne convient que pour les machines présentant un *faible couple résistant à basse vitesse (ventilateur, pompes)*. Et la commande s'effectue par l'action sur un potentiomètre. (cf. chapitre4) .Dans ce cas Ce démarreur tend à remplacer avantageusement tous les démarreurs à contacteurs classiques tels les « étoile-triangle » et « statorique à résistances»,

## CONCLUSION

En conclusion, pendant la mise sous tension d'un moteur asynchrone ; un appel de courant aura lieu. On doit s'assurer que le rapport entre le courant de démarrage et le courant nominal (l'installation est prévue pour fonctionner sous ce courant) n'est pas préjudiciable à l'installation. De plus, le moteur doit délivrer un couple supérieur à celui opposé par la machine entraînée. D'une part, le couple délivré par le moteur doit être suffisamment grand pour que le temps de démarrage ne soit pas trop long ; d'autre part, le couple délivré par le moteur ne doit pas être trop grand pour que l'à-coup de couple n'endommage pas l'ensemble mécanique entraîné.

Pour la limitation du courant de démarrage des moteurs à cage, la solution employée consiste à sous alimenter la machine pendant la phase de démarrage. Il faut, cependant, que la charge mécanique permette cette sous alimentation car

diminuer la tension dans un rapport  $\frac{1}{n}$  entraîne une diminution du couple dans un

rapport  $\frac{1}{n^2}$

Grâce à cette étude, notre objectif est atteint puisque nous arrivons, d'un côté, à l'étude des modes de démarrage prêt à réaliser et de l'autre côté à concevoir un logiciel de simulation pour savoir le comportement du moteur pendant la phase de démarrage.

## BIBLIGRAPHIE

[1]	<b>Alain Hebert</b>	Machines électriques-électronique de puissance Collection Hebert-édition DUNOD 1985
[2]	<b>A.Ivanov Smolenski</b>	Machines électriques Edition MIR MOSCOU Volume1
[3]	<b>Andriantsihoarana Harlin</b>	Cours électronique de puissance2 5 <sup>ième</sup> année GI ESPA 2004
[4]	<b>G.Chagnon</b>	Cours de génie électrique Université PARIS VI-Jussieu 2003-2004
[5]	<b>GuySeguier/F.Notelet</b>	Electrotechnique industrielle 2 <sup>ième</sup> édition 1996
[6]	<b>Heiny -Capliez</b>	Technologie d'électricité Tome2 Edition FOUCHER
[7]	<b>H-Bühler</b>	Electronique de réglage et de commande Traité d'électricité volumeXVI
[8]	<b>H-Bühler</b>	Convertisseurs statiques Presses polytechniques romandes, Lausanne1991
[9]	<b>H-Bühler</b>	Conception des systèmes automatiques, volume1 et 2 Presses polytechniques romandes, 1988
[10]	<b>H-Bühler</b>	Réglages échantillonnés volume 1 et 2 Presses polytechniques romandes, 1982-1983
[11]	<b>LAI</b>	Moteur asynchrone Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 1997
[12]	<b>L.Lagron</b>	Les moteurs à courant alternatif
[13]	<b>Pierre Boye</b>	Le schéma en électrotechnique Delagrave 1981
[14]	<b>Phillipe Barret</b>	Régime transitoire des machines électriques tournantes Edition EYROLLES1987
[15]	<b>Rabenarivo Michel</b>	Cours appareillages électriques 5 <sup>ième</sup> année GI, ESPA ,2004
[16]	<b>Rakotoniaina Solofo Hery</b>	Cours Machines asynchrones 4 <sup>ième</sup> année GI, ESPA, 2003
[17]	<b>R.Bourgeois</b>	Mémotech électrotechnique édition CASTEILLA
[18]	<b>Télémechanique</b>	Conception d'un automatisme Schéma thèque

# ANNEXE

## ANNEXE A : RESULTATS NUMERIQUES DES SIMULATIONS :

### PARAMETRES DU MOTEUR UTILISE :

$P=45[\text{kW}]$     $U_n=220\text{v}/380\text{v}$     $I_n=81\text{A}$     $f=50\text{Hz}$     $\cos\varphi=0.92$     $n_r=2948 \text{ tr/min}$     $p=1$

$R_s=0.40947\Omega$

$R_r=0.66268\Omega$

$L_s=0.04239 \text{ H}$  (inductance cyclique statorique)

$L_r=0.04174 \text{ H}$  (inductance cyclique rotorique)

$L_{sr}=0.041 \text{ H}$  (inductance cyclique mutuelle)

$L_{ls}=L_s-L_{sr}=0.0014\text{H}$  (inductance de fuite statorique)

$L_{lr}=L_r-L_{sr}=0.00074\text{H}$  (inductance de fuite rotorique)

### Valeurs ramenées au stator :

$R'_r=k^2R_r$  avec  $k=L_s/L_{sr}=1.0156$

$L'_{lr}=k^2L_{lr} =0.00076327$

$R'_r=0.6835\Omega$

$J=0.8\text{kg.m}^2$

$C_r=0.000010 \text{ nr}^2$

$I_d$ =valeur maximale du courant de démarrage

$I_n$ =valeur maximale du courant au régime permanent

$t_d$ =temps de démarrage

$C_d$ =valeur maximale du couple au démarrage

$C_n$ =valeur maximale du couple au régime permanent

$N_r$ =vitesse de rotation en régime permanent

$I_{dn}$ =valeur maximale du courant lorsqu'on change du régime

$C_{dn}$ =valeur maximale du couple lorsqu'on change du régime

$N_{rd}$ =vitesse de rotation où on change de régime

### 1) DEMARRAGE DIRECT :

#### Résultats selon demas1 :

$I_d=430.465 \text{ A}$                        $I_n=53.6\text{A}$

$C_d=1155.0266\text{m.N}$                  $C_n=82.2 \text{ m.N}$

$T_d=1\text{s}$                                  $N_r=2866.2037 \text{ tr/min}$

resultats selon demas2 :

Id=433.6 A                      In=52.8A  
Cd=1155.0266m.N      Cn=82.5 m.N  
Td=1s                              Nr=2862 tr/min

2)DEMARRAGE ETOILE TRIANGLE:

Id=234.3 A                      Idr=149.6A                      In=82.4A  
Cd=389.4m.N                      Cdr=235 m.N                      Cn=85 m N  
Td total=4s                              nrd=2542 tr/min      nr=2863tr/min

3)DEMARRAGE A RESISTANCE STATORIQUE: R=2Ω

Id=172.5 A                      Idr=149.6A                      In=52.45A  
Cd=173m.N                      Cdr=168 m.N                      Cn=88.5 m N  
Td total=4s                              nrd=2810 tr/min      nr=2863tr/min

4) DEMARRAGE PAR GRADATEUR DE TENSION

Pour α=0°

Id=437.4 A                      In=52.6A  
Cd=1255.0266m.N      Cn=82.2 m.N  
Td=2s                              Nr=2866.2037 tr/min

Pour α=75°

Id=360 A                              In=68A  
Cd=841.N                              Cn=82.2 m.N  
Td=2s                                      Nr=2842 tr/min

Le dimensionnement des composants électroniques du circuit de puissance se fait par simulation sous PSPACE et il faut toujours tenir compte de la

$$\text{relation } \alpha = \arccos \frac{U_{cm}}{\hat{U}_r}$$

Par exemple, on veut avoir α=75°

La crête de la tension Ur est  $12 \times \sqrt{2}$  V

Donc Ucm doit être égale à 4.38 V

Montage pour avoir la tension de commande :

Résistances : 1K $\Omega$

Diodes : 1N4004

Potentiomètres : pour  $\alpha=75^\circ$  P26=15K ; P27=10K. P28=10K

Montage d'un comparateur et élimination des composantes négatives :

Résistances : 12K $\Omega$

Diodes : 1N4148

Montage d'un suiveur et d'un intégrateur :

Résistances : 12K $\Omega$

Condensateurs : C1=0.2 $\mu$ F ; C1=0.3 $\mu$ F

Montage d'une bascule monostable :

C3=680nF ; u5 et u6 : modèle 7403

R46=10K

Bascule de Schmitt : modèle 74132

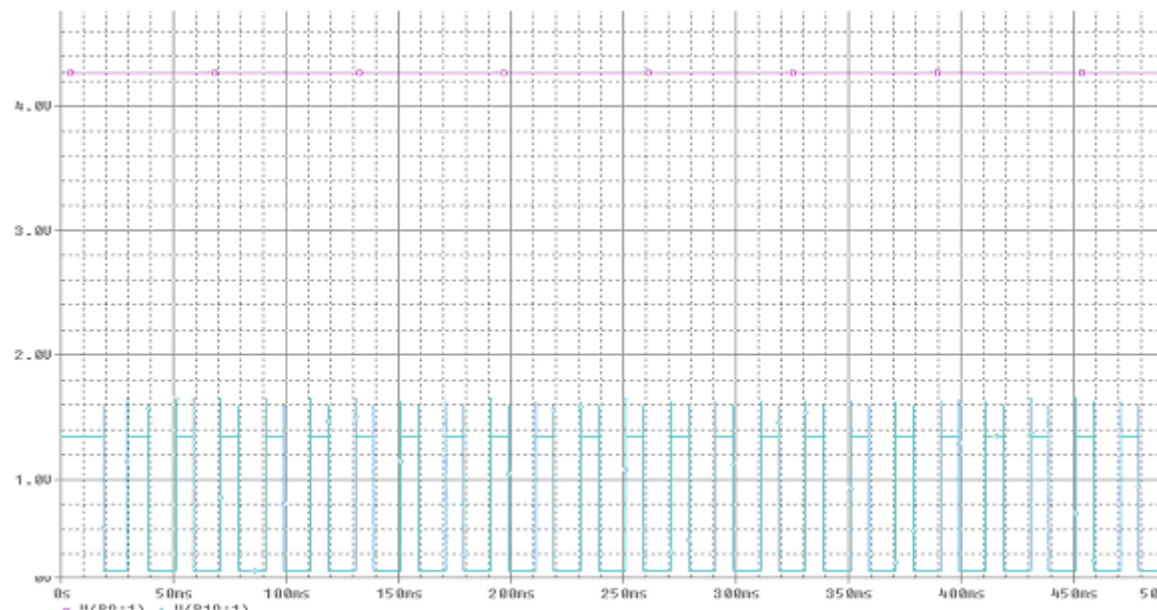


Figure : signal à la sortie de la bascule monostable



## ANNEXE B : CHOIX D'UN DEMARREUR

### CAS GENERAL :

- Si la source d'alimentation admet une forte pointe. c'est-à-dire la pointe de courant admissible en ligne  $I_p$  est supérieure à la pointe de courant de démarrage  $I_d$  :

Le démarreur direct (moteur à cage) permet de démarrer toutes les machines, même à pleine charge. Cependant, si la machine exige un démarrage doux et progressif (problème de tension de câble, crainte de patinage des transmissions de balancement de la charge pour engins de manutention- de fragilité de la machine, etc....), il convient de réduire le couple, ce qui conduit à réduire la pointe. Dans ce cas, choisir un type de démarrage permettant de réduire la pointe

- Si la source n'admet pas une forte pointe, c'est à dire  $I_p < I_d$  :

Choisir alors un mode de démarrage permettant de réduire la pointe en fonction des caractéristiques mécaniques de la machine, de sorte que le couple moteur disponible à la mise sous tension ne soit pas inférieur au couple résistant.

DETERMINER LE MODE DE DEMARRAGE EN FONCTION DE LA MACHINE (si le démarrage direct est impossible) :

- *Machines à couple résistant faible et pratiquement constant pendant le démarrage :*

C'est le cas des machines lancées à vide :

- Les groupes convertisseurs, machines à couple résistant très faible à vide et très faciles à démarrer ;
- Les machines outils classiques : tours, fraiseuses, perceuses à réglage de vitesse mécanique, presses à volant etc.....
- Les machines à bois : scies circulaires, toupies, dégauchisseuses, scies à rubans etc.....
- Les machines agricoles, telles que barattes, écrémeuses etc.....
- Les machines diverses comme les tronçonneuses à disque, les meules, les épurateurs centrifuges, etc.....

⇒ PROPOSITION : démarreur « étoile triangle » ; démarrage par de gradateur de tension

A partir de quelques centaines de kW, ou lorsque la tension est élevée (500 V), le risque de régimes transitoires importants, conduit normalement à adopter une

variante appropriée au démarrage étoile triangle ou bien un autre mode de démarrage.

- *Machines présentant pendant le démarrage un couple résistant voisin de la moitié du couple résistant en marche normale :*

Ce sont des machines où les frottements au démarrage sont importants.

Ex : Turbine, tonneau de tannerie, tonneau centrifugeur.

⇒ PROPOSITION : démarreur « statorique » ou démarreur par « autotransformateurs ». Démarrage par gradateur de tension

Si la pointe de courant de démarrage doit être encore plus réduite, principalement pour les machines de forte puissance.

⇒ PROPOSITION: démarreur « rotorique » (pour les moteurs à bague)

- *Machines à caractéristiques centrifuges :*

Ex. : Pompes et ventilateurs.

- Machines de petite et moyenne puissance (→ 55 kW)

⇒ MOTEUR A CAGE : démarreur « étoile triangle »

- Machines de forte puissance (> 55 kW)

⇒ MOTEUR A CAGE : démarreur « statorique » ou démarreur par « autotransformateur » ; démarrage par gradateur de tension

- *Machines démarrant à pleine charge :*

Ce sont des machines qui démarrent dans leurs conditions de travail normal, comme par exemple :

- Les élévateurs ou engins de levage ;
- Les tapis et transporteurs divers ;
- Les machines à imprimer, les cisailles ;
- Les pompes volumétriques ou à pistons ;
- Les compresseurs à pistons etc.....

⇒ MOTEUR À BAGUES : démarreur « rotorique »

## **ANNEXE C : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX :**

Tout système a des impacts environnementaux que ceux soient positifs ou négatifs. Les influences exercées par le moteur électrique sur l'environnement correspondent, en général, à des nuisances comme :

### **BRUIT :**

Le moteur électrique provoque des bruits d'origine mécanique ou magnétique, dus à la rotation des parties tournantes et des bruits d'origine aérodynamique dus à la ventilation et à la turbulence de l'air autour des parties tournantes.

Les bruits d'origine magnétique ont plusieurs causes qui résultent soit des forces radiales d'attraction entre le rotor et le stator ; soit des forces tangentielles qui s'exercent sur les conducteurs ; soit des forces longitudinales liées à certaines dissymétries. Par exemple : un mauvais choix du rapport entre les nombres d'encoches au stator et au rotor dans le moteur asynchrone à cage, est souvent générateur de bruits magnétiques ; les forces radiales créées, dans ce cas , étant prépondérante dans la génération de bruit

Parmi les bruits d'origine mécanique, non spécifiques aux machines électriques, nous citerons les bruits de roulement. Les pistes de roulement et les corps roulants ne sont jamais parfaitement ronds, et l'on comprend que les ondulations affectant la piste des bagues ou les éléments roulants soient génératrices de vibrations et de bruits.

L'excitation mécanique de la carcasse d'un moteur asynchrone par la machine qu'il entraîne peut faire croire, parfois, à un rayonnement acoustique dû au moteur lui-même, alors que celui-ci n'est en cause. Généralement, pour les grosses machines, le bruit mécanique d'un moteur asynchrone en bon état de fonctionnement est tout à fait négligeable par rapport aux autres types de bruits.

Les bruits d'origines aérodynamiques sont beaucoup plus fréquents. On distingue des bruits dus aux ventilateurs, qu'il s'agisse de ventilation externe ou interne, aux événements de ventilation et les bruits dus au rotor en mouvement, notamment de ses extérieurs (têtes de bobines ou cercles de court circuit ). Ces bruits peuvent être considérablement diminués par adjonction de pro secondaires (isolation de la carcasse, silencieux à l'aspiration et au refoulement ) par exemple.

## VIBRATION MECANIQUE :

Un autre phénomène vibratoire influe sur l'environnement : ces sont les vibrations mécaniques de la machine tournante. Ces derniers sont souvent très inférieurs à celles de l'organe accouplé comme pompes, ventilateurs, compresseurs,...Des amplitudes de vibrations de 16 à 40  $\mu\text{m}$  à 1500tr/min sont des valeurs raisonnables

Alors, notre travail joue un grand rôle sur les impacts environnementaux puisque nous arrivons, tout d'abord, à prédéterminer le comportement dynamique du moteur asynchrone avec des dispositifs de démarrage grâce à un logiciel de simulation que nous avons conçu. En plus, c'est une simulation numérique qui présente beaucoup d'avantages par rapport à une simulation analogique comme la précision, le gain du temps,....

La simulation analogique utilise des appareils de réglages, des appareils de mesure qui sont onéreux (exemple : un générateur de signaux d'entrée, un oscilloscope, ...) avec des câblages souvent compliqués. Par contre, en simulation numérique, les matériels sont remplacés par le logiciel DEMAS exécuté par un ordinateur. Le réglage des paramètres effectué à l'aide du clavier est beaucoup plus aisé que sur les simulateurs analogiques.

Ensuite, le moteur asynchrone triphasé à cage est le moteur le plus répandu dans l'industrie : il est robuste, fiable, économique. Il est également apprécié pour sa très bonne standardisation. Vu les résultats apportés par DEMAS, nous arrivons à prendre des précautions sur la protection du moteur et d'autre récepteur contre les chutes de tensions,les régimes transitoires au démarrage... Donc DEMAS est aussi utilisé pour choisir un démarreur compatible à un moteur sur une application industrielle donné. Par conséquent, la durée de vie du moteur devient de plus en plus longue.

Pourtant, un moteur asynchrone ne peut pas être opérationnel dans la région où il n'y a pas d'électricité. Donc il faut lancer et appuyer un programme de l'électrification rurale car la prospérité d'un pays (comme MADAGASCAR) réside surtout dans le développement de l'industrialisation.

**Nom :** ANDRIAMPARAMANIRAKA

**Prénom :** Manampisoa Nirina

**Tel :** 0330505785

**Adresse :** Lot B 109 Mahitsy Ambohidratrimo  
ANTANANARIVO

**TITRE :** ETUDE DES DISPOSITIFS DE LIMITATION DE COURANT DE  
DEMARRAGE DES MOTEURS ASYNCHRONES

**RESUME :**

Le moteur asynchrone est le moteur de base de l'industrie actuelle. Le choix de ce moteur sur une application industrielle nécessite la maîtrise de son démarrage. Pour comprendre le comportement du moteur pendant la phase de démarrage, nous avons conçu un outil de calcul qui exécute les simulations de fonctionnement du moteur au démarrage. Nous avons étudié aussi quelques procédés de démarrage des moteurs asynchrones à cage d'écureuil.

Les théories, les méthodes utilisées, les schémas de circuit de puissance et circuit de commande des démarreurs, les informations sur le logiciel de simulation sont élaborés dans cet ouvrage

**Nombre de pages :** 92

**Nombre de figure :** 65

**Mots clés :** moteur asynchrone ; démarrage ; matlab ; gradateur

**Encadreur :** M.Michel RABENARIVO

Enseignant à l'E.S.P.A