

---

## ملخص:

بدء تشغيل المحرك اللازامي يعتمد على تصميم الدوار (الدوار قفص السنجاب أو دوار اللفات). اختيار النظام بدءا يعتمد على المعطيات التالية: (قوة المحرك، الجمود، انخفاض التوتر الخ.).

لبداء تشغيل المحرك اللازامي، هناك عدة إقلاعات.

العمل المقدم في هذه المذكرة هو اختراع حبكة اعلامية تسهل استثمار مختلف إقلاعات المحرك اللازامي.

---

**Résumé :** Le démarrage d'un moteur asynchrone triphasé dépend de la conception du rotor (rotor à cage d'écureuil ou rotor bobiné). Le choix du système de démarrage dépend de paramètres, (puissance du moteur, inertie de la machine entraînée, puissance du réseau, chute de tension, etc.). Pour démarrer un moteur asynchrone, il existe plusieurs procédures de démarrages

Le travail présenté dans ce mémoire a pour but l'élaboration d'un simulateur de ses différentes procédures sous environnement MATLAB.

**Mots clés :** MAS, modélisation de la MAS, procédures de démarrage de la MAS, interfaces.

---

**Abstract :** The starting of a three-phase asynchronous motor depends first of all on the design of the rotor. The choice of the system of starting depends on many parameters. To start an asynchronous motor, there is several methods .

The purpose of the work presented in this memory is: the elaboration of differents methods of starring for the asynchronous machine

**Keywords :** MAS, Modelisation of the asynchronous machine, starring methods for asynchronous motor, Interfaces.

---

## Introduction générale

Le moteur asynchrone ou moteur d'induction est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple et robuste facile à construire, de son faible encombrement, de son bon rendement. Le domaine de puissance va de quelques watts à plusieurs mégawatts. Face à ses avantages on trouve comme même deux limitations principales qui sont, une vitesse pratiquement imposée, car elle est liée au synchronisme du réseau, et un courant très élevés lors du démarrage.

Une machine asynchrone qui démarre est équivalente à un transformateur dont le rotor est en court-circuit avec la pleine tension appliquée au primaire, la pulsation du rotor est alors la pulsation de synchronisme ( $\omega_s$ ), le courant appelé sur le réseau est alors très élevé (6 à 10 fois le courant nominal), la plupart des moteurs de petites puissance démarrent sans précaution particulière, par contre pour les moteurs de moyenne et grande puissance, plusieurs procédures dites procédures de démarrages sont mise en place. Le choix sera dicté par des impératifs électriques, mécaniques et économiques. La nature de la charge entraînée aura également une grande incidence sur le mode de démarrage à retenir.

Lors de la mise sous tension d'un moteur, l'appel de courant sur le réseau est important et peut, surtout si la section de la ligne d'alimentation est insuffisante, provoquer une chute de tension susceptible d'affecter le fonctionnement de tous les récepteurs. Si le réseau d'alimentation ne supporte pas le courant de démarrage, on doit donc le limiter, pour cela on peut agir sur deux grandeurs : La tension d'alimentation ou La résistances des enroulements rotoriques. On peut donc classer les procédés de démarrage de la MAS 3~ en deux catégories :

-Action sur la tension d'alimentation on trouve les démarrages (statorique, étoile triangle, autotransformateur Démarrage fréquentiel )

## INTRODUCTION GENERALE

---

-Action sur la résistance rotorique on trouve le démarrage rotorique utilisé seulement pour les machines asynchrone à rotor bobiné.

Dans le cas de notre projet, l'élaboration d'un logiciel simulateur de démarrage est très intéressant afin de prévoir le comportement du moteur asynchrone et quantifier les caractéristiques de chaque procédure ; sans pour autant procéder à des essais et testes très coûteux en laboratoire.

Le travail aura pour objectif la création d'interfaces qui consiste à :

- **Donner la main à l'utilisateur pour l'introduction des paramètres de sa machine.**
- choix de la procédure de démarrage parmi d'autre.
- Introduire la notion de convertisseur +machine.
- **Simuler le démarrage de la machine comme moteur ou comme actionneur.**

A ce titre le présent travail aura pour contenu quatre chapitres dont le contenu sera le suivant :

Le premier sera une introduction sur la machine asynchrone triphasée ainsi que les différents démarrages classiques.

Le deuxième se basera sur la modélisation de la machine asynchrone ou le but est d'élaborer un modèle qui puisse rendre compte de la réalité de la machine asynchrone.

Le troisième c'est la simulation et l'interprétation des résultats.

Le quatrième renferme le principe d'exploitation du produit (fenêtres graphiques, Accès aux menus,.....)

Pour conclure ce travail nous mettrons l'accent sur l'intérêt de l'élaboration d'un logiciel simulateur de démarrages .

## Principal Notation:

<b>Symboles</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
$Cem$	<i>couple électromagnétique</i>	(N.m)
$Ck$	<i>couple de décrochage</i>	(N.m)
$Cr$	<i>couple résistant</i>	(N.m)
$Cu$	<i>couple utile du moteur</i>	(N.m)
$d, q$	Axes correspondants au référentiel de PARK	
$g$	<i>Glissement</i>	
$I$	<i>Courant de phase</i>	(A)
$Ik_1, Ik_2, Ik_3$	<i>Les courants dans les intercepteurs</i>	(A)
$Is$	<i>Courant statorique</i>	(A)
$Is_d, Is_q$	<i>Courants statoriques dans un système d'axes (d, q)</i>	(A)
$J$	<i>moment d'inertie des parties tournantes</i>	Kg. m <sup>2</sup>
$L_f, L_r, L_s$	<i>L'inductance de: fuite; rotorique; statorique</i>	(H)
$M_{sr}$	<i>inductance mutuelle stator-rotor</i>	(H)
$m$	<i>Indice de modulation</i>	
$n$	<i>vitesse de rotation du rotor</i>	tr.s <sup>-1</sup>
$p$	<i>nombre de paires de pôles</i>	
$p_a$	<i>Puissance électrique absorbée</i>	(kw)
$p_c$	<i>pertes collectiv<u>u</u></i>	(J)
$P_{Jr}$	<i>Pertes par effet joule au stator</i>	(J)
$R_s, R_r$	<i>Résistances des enroulements statoriques et rotoriques par phase</i>	(Ω)
$R$	<i>résistance</i>	(Ω)
$r$	<i>Taux de modulation</i>	
$S$	<i>Section d'un conducteur</i>	(m <sup>2</sup> )
$s, r$	<i>Indices respectifs du stator et du rotor</i>	
$T$	<i>la chaleur spécifique du matériau constituant la cage</i>	j/Kg°C
$T_r$	<i>Constantes de temps rotorique</i>	(s)
$td$	<i>Le temps de démarrage</i>	(s).

$U$	Tensions composés	(V)
$V$	tension simple d'alimentation	(V)
$V_s$	vecteur constitué des trois tension stator	
$V_{sd}$	composant directe de park	
$V_{sq}$	composant en quadrature	
$W_{thr}$ ,	l'énergie dissipée sous forme de chaleur dans le	(J)
$W_{ths}$ .	rotor, et le stator	
$\phi_{sq}$ $\phi_{sd}$	Flux statoriques dans un système d'axes (d, q)	(Wb)
$\phi_{Rd}$ $\phi_{Rq}$	Flux rotoriques dans un système d'axes (d, q)	(Wb)
$\eta$	Rendement	
$\rho$	résistivité du matériau	
$\sigma$	Coefficient de fuite total	
$\tau_k$	constante d'accélération pour le couple maximal	(s)
$\tau_m$	la constante de temps mécanique	(s)
$\omega$	Pulsation des courants alternatifs	rad. s <sup>-1</sup>
$\Omega$	vitesse de rotation du rotor	rad. s <sup>-1</sup>
$\Omega_s$	Vitesse synchrone de rotation du champ tournant	rad. s <sup>-1</sup>

# Sommaire

	N°
	Page
<b>Introduction générale.....</b>	<b>01</b>
<b>Chapitre I : la machine asynchrone et les différents types de démarrage</b>	
I-1-Introduction .....	03
I-2- Constitution.....	03
I-3- Le principe de fonctionnement du machine asynchrone.....	05
I-4-les caractéristiques de la machine asynchrone.....	06
I-4-1- la vitesse de synchronisme .....	06
I-4-2- le glissement .....	06
I.4.3-Fréquence $f_R$ des courants rotoriques .....	06
I-5- Définitions des puissances (actives) :.....	07
I-6- Couple électromagnétique $C_{em}$ :.....	08
I-7-Energie mise en jeu pendant le démarrage .....	09
I.8 Echauffement rotorique au démarrage.....	11
I-9-Problème de démarrage d'une Machine Asynchrone .....	12
I.10.les procédés classiques de démarrage en HT .....	12
I.10.1 .Démarrage Direct .....	12
I.10.2. Démarrage Etoile -Triangle (Y- $\Delta$ ) .....	14
I.10.3. Démarrage par autotransformateur .....	17
I.10.4. Démarrage a résistances statoriques .....	19
I.10.5. Démarrage à résistance rotorique .....	21
I.10.6. Démarreur progressif .....	23
I.10.7. Démarrage fréquentiel .....	24
I.11. Conclusion .....	26
<b>Chapitre II: Modélisation de l'association convertisseur-machine</b>	

## **asynchrone**

II-1- Introduction.....	27
II-2- Mise en équation de la machine asynchrone.....	27
II-2-1- Description.....	27
II-2-2- Hypothèses simplificatrices.....	28
II-2-3- Equation aux tensions.....	28
II-3- Modèle de park de la machine asynchrone.....	29
II-3-1- Transformation de park.....	30
II-3-2-Application de la transformation de la park a la machine asynchrone.	31
II-3-2-1- Equation des tensions.....	31
II-3-2-2- Equation des flux.....	32
II-4- Choix du référentiel.....	32
II-4-1- Référentiel lié au champ tournant.....	32
II-5- Calcule du couple électromagnétique.....	33
II-5-1- Equation mécanique.....	33
II-6- Mise sous forme d'équation d'état.....	34
II-7- Modélisation de l'alimentation de la machine.....	35
II-7-1- Modélisation du l'onduleur de tension.....	36
II-8- Modélisation de largeur d'impulsion (MLI).....	37
II-10- conclusion.....	40

## **Chapitre III: Simulation numérique des différents démarrages**

III-1- Introduction.....	41
III-2-Présentation et interprétation des résultats .....	41
III-2-1-Démarrage direct.....	41
III-2-2-Démarrage étoile-triangle.....	45
III-2-3- Démarrage par autotransformateur.....	48
III-2-4- Démarrage progressif.....	51
III-2-5- Démarrage fréquentiel.....	54
III-2-6- Démarrage statorique.....	57
III-2-7- Démarrage rotorique .....	59
III-3- Simulation du démarrage direct d'une MAS avec un convertisseur.....	61
III-4-Conclusion.....	65

#### **Chapitre IV: Présentation du logiciel**

IV-1- Introduction .....	66
IV.2. Présentation du logiciel MATLAB .....	66
IV.3.Interface graphique.....	69
IV.3.1.Généralité .....	69
IV.3.2.les objets graphique et leurs fonctionnement .....	69
IV.4.Présentation de l'interface .....	72
IV.5.Présentation de l'interface après exécution.....	77
IV.6.Conclusion.....	78

#### **Conclusion générale**



## Conclusion générale

Le choix du démarrage de la machine asynchrone est guidé par des critères économiques et techniques tel que : la nature de la charge, la puissance de la MAS, souplesse au démarrage, type d'utilisation, la puissance de l'installation électrique.

A la mise sous tension de la machine asynchrone, un grand appel de courant a lieu. On doit s'assurer que le rapport entre le courant de démarrage et le courant nominal n'est pas préjudiciable à l'installation. Au démarrage la MAS doit délivrer un couple supérieur à celui opposé par la charge. D'une part, le couple délivré par la MAS doit être suffisamment grand pour que le temps de démarrage ne soit pas trop long, afin d'éviter des charges mécaniques et thermiques; d'autre part, le couple délivré ne doit pas être trop élevé pour que l'à-coup de couple n'endommage pas l'ensemble mécanique.

A fin de remédier à ces problèmes la création d'un logiciel simulateur qui permet d'appliquer à la machine asynchrone les six techniques de démarrages suivant :

- démarrage étoile triangle.
- démarrage par autotransformateur.
- démarrage progressif.
- Démarrage statorique
- Démarrage fréquentiel.
- Démarrage rotorique utilisé seulement pour les machines asynchrone à rotor bobiné.

-Les différentes simulations ont montré l'allure générale du comportement de la machine asynchrone lors du démarrage pour les différentes méthodes, ainsi que tous les phénomènes transitoires.

-Une interface graphique a été présentée a la fin de ce mémoire et qui a donner a l'utilisateur comme on la vue dans le (chapitre IV) une nouvelle manière d'exploiter des programmes informatiques déjà établit a travers des fenêtres graphiques, des menu ainsi que des options qui rappelons le ont été construit d'une manière très simple afin de rendre leurs utilisation accessible a n'importe quel utilisateur.

Ce logiciel reste ouvert a des critiques constructives ainsi qu'a d'autres améliorations tel que le temps d'exécution ,l'ajout de nouvelle options pour le rendre plus efficace.

## Liste des tableaux

<b>Tableau (III.1) : Paramètre du démarrage direct</b>	44
<b>Tableau (III.2) : Paramètre du démarrage étoile triangle</b>	47
<b>Tableau (III.3) : Paramètre du démarrage autotransformateur</b>	50
<b>Tableau (III.4) : Paramètre du démarrage progressif</b>	53
<b>Tableau (III.5) : Paramètre du démarrage fréquentiel</b>	56
<b>Tableau (III.6) : Paramètre du démarrage statorique</b>	59
<b>Tableau (III.7) : Paramètre du démarrage rotorique</b>	61

## **Listes des figures**

<b>Figure .(I-1)</b> : Stator d'une machine triphasée	3
<b>Figure.(I-2)</b> :Rotor a cage d'écureuil	4
<b>Figure.(I-3)</b> : Rotor bobiné	5
<b>Figure.(I-4)</b> :Variation de l'intensité I en fonction de la vitesse N (Démarrage directe)	13
<b>Figure.(I-5)</b> :Variation du couple C en fonction de vitesse $\Omega$ d'une MAS.	14
<b>Figure.(I-6)</b> :Variation de l'intensité I en fonction de la vitesse n(Démarrage étoile triangle)	15
<b>Figure.(I-7)</b> : Variation du couple C en fonction de la vitesse (Démarrage étoile triangle)	16
<b>Figure.(I-8)</b> : La variation de l'intensité I en fonction de la vitesse n (Démarrage auto- transformateur).	17
<b>Figure .(I-9)</b> : Variation du couple C en fonction de la vitesse (Démarrage autotransformateur)	18
<b>Figure.(I-10)</b> :Variation de l'intensité I en fonction de la vitesse n (Démarrage statorique).	19
<b>Figure .(I-11)</b> :Variation du couple C en fonction de la vitesse n(Démarrage statorique).	20
<b>Figure.(I-12)</b> :Variation du l'intensité I en fonction de la vitesse n (Démarrage rotorique)	21
<b>Figure.(I-13)</b> :Variation du couple C en fonction de la vitesse n (Démarrage rotorique)	22
<b>Figure.( I-14)</b> : Démarrage progressif par rampe de tension	23
<b>Figure.(I-15)</b> : Variation de la tension en fonction temps	24
<b>Figure.(II-1)</b> : Représentation de la machine asynchrone	27
<b>Figure. (II-2)</b> : Passage du triphasé au biphasé	30

<b>Figure.(II-3) :</b> Association onduleur de tension - MAS	35
<b>Figure.(II-4) :</b> Représentation des transistors par des interrupteurs	36
<b>Fig.(II-5) :</b> Principe de la technique triangulo –sinusoïdale( $m = 21, r = 0.8$ )	38
<b>Figure.(III-1) :</b> Variations de la vitesse angulaire $\omega$ en fonction du temps pour un démarrage direct d'une MAS.	42
<b>Figure.(III-2) :</b> Variations du vecteur général courant $i_s$ en fonction du temps pour un démarrage direct d'une MAS.	42
<b>Figure.(III-3) :</b> Variations du vecteur général courant $i_{as}$ en fonction du temps pour un démarrage direct d'une MAS .	43
<b>Figure.(III-4) :</b> Variations du couple électromagnétique $C_{em}$ en fonction du temps pour un démarrage direct d'une MAS.	43
<b>Figure.(III-5) :</b> Variations de la vitesse angulaire $\omega$ et de la tension $U$ en fonction du temps pour un démarrage étoile triangle d'une MAS.	45
<b>Figure.(III-6) :</b> Variations du vecteur général courant $i_s$ en fonction du temps pour un démarrage étoile -triangle d'une MAS	46
<b>Figure.(III-7) :</b> Variations du vecteur général courant $i_{as}$ en fonction du temps pour un démarrage étoile- triangle d'une MAS.	46
<b>Figure.(III-8) :</b> Variations du couple électromagnétique $C_{em}$ en fonction du temps pour un démarrage étoile- triangle d'une MAS.	47
<b>Figure.(III-9) :</b> Variations de la vitesse angulaire $\omega$ et de la tension $U$ en fonction du temps pour un démarrage par autotransformateur d'une MAS.	48
<b>Figure.(III-10) :</b> Variations du vecteur général courant $i_s$ en fonction du temps pour un démarrage par autotransformateur d'une MAS.	49
<b>Figure.(III-11) :</b> Variations du vecteur général courant $i_{as}$ en fonction du temps pour un démarrage par autotransformateur d'une MAS.	49
<b>Figure.(III-12) :</b> Variations du couple électromagnétique $C_{em}$ en fonction du temps pour un démarrage par autotransformateur d'une MAS.	50
<b>Figure .(III.13):</b> Variation de la vitesse angulaire $\omega$ et tension $U$ en fonction du temps pour un démarrage a tension progressive d'une MAS.	51

<b>Figure .(III.14):</b> Variation du vecteur générale courant $i_s$ en fonction du temps pour un démarrage a tension progressive d'une MAS .	52
<b>Figure.( III.15) :</b> Variation du vecteur générale courant $i_{as}$ en fonction du temps pour un démarrage a tension progressive d'une MAS.	52
<b>Figure.( III.16) :</b> Variation du couple électromagnétique $C_{em}$ en fonction du temps pour un démarrage a tension progressive.	53
<b>Figure.(III.17) :</b> Variations de la vitesse angulaire $W$ , la tension $V$ et la fréquence $f$ en fonction du temps pour un démarrage fréquentiel d'une MAS.	54
<b>Figure.(III.18) :</b> Variations du vecteur générale courant $i_s$ en fonction du temps pour un démarrage fréquentiel d'une MAS.	55
<b>Figure.(III.19) :</b> Variations du vecteur générale courant $i_{as}$ en fonction du temps pour un démarrage fréquentiel d'une MAS.	55
<b>Figure.(III.20) :</b> Variations du couple électromagnétique $C_{em}$ en fonction du temps pour un démarrage fréquentiel d'une MAS.	56
<b>Figure.(III.21) :</b> Variations de la vitesse angulaire $W$ , la tension $V$ et la fréquence $f$ en fonction du temps pour un démarrage statorique d'une MAS.	57
<b>Figure.(III.22) :</b> Variations du vecteur générale courant $i_s$ en fonction du temps pour un démarrage statorique d'une MAS.	57
<b>Figure.(III.23) :</b> Variations du vecteur générale courant $i_{as}$ en fonction du temps pour un démarrage fréquentiel d'une MAS.	58
<b>Figure.(III.24) :</b> Variations du couple électromagnétique $C_{em}$ en fonction du temps pour un démarrage statorique d'une MAS.	58
<b>Figure.(III.25) :</b> Variations de la vitesse angulaire $W$ , la tension $V$ et la fréquence $f$ en fonction du temps pour un démarrage rotorique d'une MAS.	59
<b>Figure.(III.26) :</b> Variations du vecteur générale courant $i_{as}$ en fonction du temps pour un démarrage rotorique d'une MAS.	60
<b>Figure.(III.27) :</b> Variations du vecteur générale courant $C_{em}$ en fonction du temps pour un démarrage rotorique d'une MAS.	60

<b>Figure.(III.28)</b> : Variations de la vitesse angulaire $W$ en fonction du temps pour un démarrage direct d'une MAS avec convertisseur.	61
<b>Figure.(III-29)</b> : Variations du vecteur générale courant $i_s$ en fonction du temps pour un démarrage direct d'une MAS avec convertisseur.	62
<b>Figure.(III-30)</b> : Variations du vecteur générale courant $i_{as}$ en fonction du temps pour un démarrage direct d'une MAS avec convertisseur.	62
<b>Figure.(III-31)</b> : Variations du vecteur générale courant $C_{em}$ en fonction du temps pour un démarrage direct d'une MAS avec convertisseur.	63
<b>Figure .(III.32)</b> : états des interrupteurs de l'onduleur	63
<b>Figure .(III.33)</b> :tensions de sortie de l'onduleur	64
<b>Figure .(III.34)</b> : états des interrupteurs de l'onduleur	64
<b>Figure.(IV- 1)</b> :logiciel MATLAB	67
<b>Figure.(IV- 2)</b> : Command Windows	67
<b>Fig.(IV-3)</b> : Figure Windows	68
<b>Figure.(IV-4)</b> : Edit Windows	68
<b>Figure.(IV-5)</b> : Guide du MATLAB	69
<b>fig.(IV-6)</b> : Hiérarchie des objets graphiques	70
<b>Figure.(VI-7)</b> : Exemple de figure	70
<b>Figure.(IV-8)</b> : Exemple de figure avec zone de traçage	71
<b>Figure.(IV-9)</b> : Exemple de figure avec bouton de commande	71
<b>Fig.(IV-10)</b> : Fenêtre principale du logiciel	73
<b>Figure.(IV-11)</b> : liste des démarrages	73
<b>Figure. (IV-12)</b> : Valeur des paramètres	74
<b>Figure.(IV-13)</b> : Titre du fenêtre	74
<b>Figure.(IV-14)</b> : Bouton démarrer	74
<b>Figure.(IV-15)</b> : bouton actualiser	74
<b>Figure.(IV-16)</b> : bouton agrandir	75
<b>Figure.(IV-17)</b> : association convertisseur	75

<b>Figure.(IV-18) : coulpe des charges</b>	75
<b>Figure.(IV-19) : coulpe des charges</b>	75
<b>Figure.(IV-20) : les axes</b>	76
<b>Figure.(IV-21) : menu option</b>	76
<b>Figure.(IV-22) : démarrage rotorique par interface</b>	77
<b>Figure.(IV-23) :fenêtre du graph de vitesse par appui sur le bouton agrandir</b>	



# REMERCIEMENTS

*Tout d'abord, nous remercions le Bon DIEU, de nous avoir donné la foi, la patience et le courage pour pouvoir réaliser ce modeste travail.*

*On voudrait en suite remercier ma directrice de thèse, Mme cheggaga pour son aide durant tout notre travail.*

*Que tous nos professeurs qui ont contribué à notre formation trouvent ici notre plus profonde gratitude.*

*Nous adressons nos plus sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.*

*Enfin, nous souhaitons dédier ce mémoire à nos parents. Rien n'aurait été possible sans leur soutien, leur confiance et leur générosité.*

## II.1.Introduction :

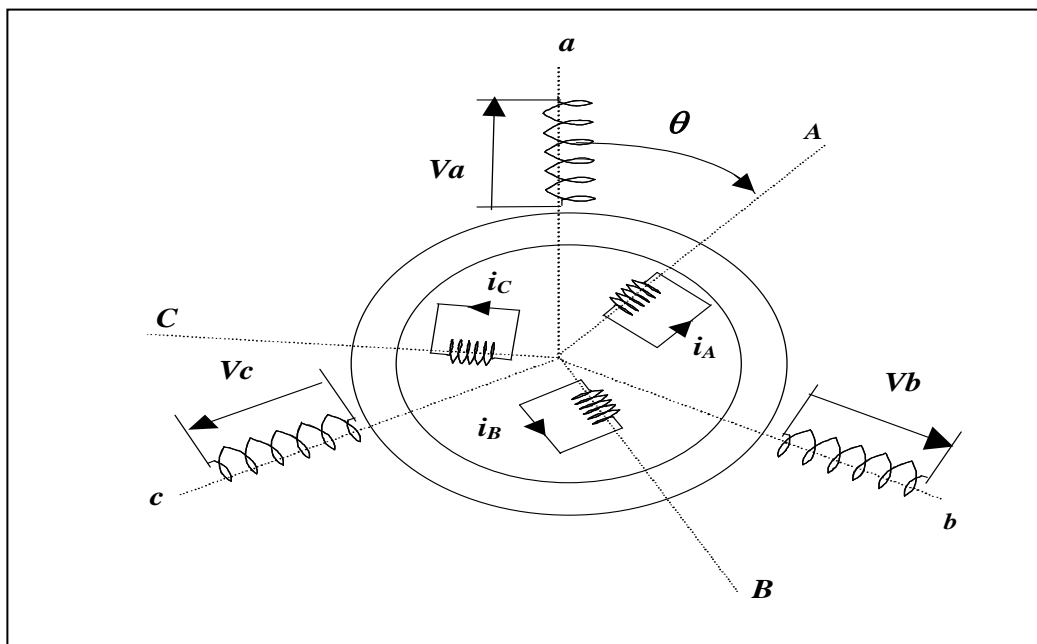
La machine asynchrone est caractérisée par sa robustesse et sa simplicité de construction, seulement elle présente un système d'équations très complexe à étudier, exigent un calcul matriciel. Il est donc nécessaire de développer un modèle plus simple. Le modèle mathématique de la machine asynchrone est un système à six équations différentielles. La résolution d'un tel système est difficile même avec l'utilisation de l'outil informatique. L'utilisation de la transformation de PARK permet de détourner cette difficulté.[27,28].

## II.2. Mise en équations de la machine asynchrone :

### II.2.1.Description :

La machine asynchrone représentée sur la (Fig-II-1-) est constituée :

- D'un stator, qui comporte trois phases identiques décalées dans l'espace d'un angle de  $2\pi/3$ . Ce bobinage est relié à une source de tensions alternatives d'alimentation triphasée.
- D'un rotor, (à bagues où à cage d'écurueil), comportant trois phases identiques qui sont également décalées dans l'espace d'un angle de  $2\pi/3$ , mais qui sont court-circuitées.



**Figure.(II-1):** Représentation de la machine asynchrone

### II.2.2. Hypothèses simplificatrices :

Afin de développer un modèle permettant une bonne description de la dynamique de la machine asynchrone qui est employée dans les étapes de conception et de la mise en œuvre des différentes stratégies de commande présentées dans cette étude, il faut admettre approximativement les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les circuits magnétiques ne sont pas saturés et sont parfaitement feuilletés ;
- Seuls les enroulements sont parcourus par des courants, dont la densité est supposée uniforme dans la section des conducteurs, (on néglige l'effet pelliculaire) ;
- La répartition des forces magnétomotrices dans l'espace est sinusoïdale (on ne tiendra compte que du fondamental). [22]

### II.2.3. Equations aux tensions :

Dans les conditions citées ci-dessus, les tensions statoriques et rotoriques, représentées sur la figure (Figure-II-2-) seront données comme suit :

**Au stator :**

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} \quad (II-1)$$

**Au rotor :**

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_A \\ \phi_B \\ \phi_C \end{bmatrix} \quad (II-2)$$

Les équations de fonctionnement de la machine seront données par les deux relations matricielles suivantes :

$$\begin{cases} [V_{abc}] = R_s [i_{abc}] + [L_s] \frac{d}{dt} [i_{abc}] + \frac{d}{dt} ( [L_{sr}] [i_{ABC}] ) \\ [0] = R_r [i_{ABC}] + [L_r] \frac{d}{dt} [i_{ABC}] + \frac{d}{dt} ( [L_{sr}]^T [i_{abc}] ) \end{cases} \quad (II-3)$$

$$\text{avec : } [L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{aa} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{ab} & L_{aa} \end{bmatrix} ; \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AA} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AB} & L_{AA} \end{bmatrix} \quad (II-4)$$

$$[L_{sr}] = L_{aA} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (II-5)$$

On constate bien que le système d'équations (II-3) est à coefficients variables de  $\theta$ . Sa résolution analytique dans ce repère reste très complexe. D'où la nécessité d'introduire la notion de transformation trigonométrique, ceci pour aboutir à un système à coefficients constants. [22.23]

### II.3. Modèle de park de la machine asynchrone :

Afin d'aboutir à un modèle mathématique plus simple que le modèle réel du système, nous utiliserons des transformations orthogonales. Nous obtenons donc, des équations plus simples par des changements de variables appropriés. Parmi ces transformations, nous utiliserons celle de *PARK*. La (Figure-I1-2-) représente clairement cette transformation des axes réels « *a, b, c* » aux axes « *d et q* ». [22.23]

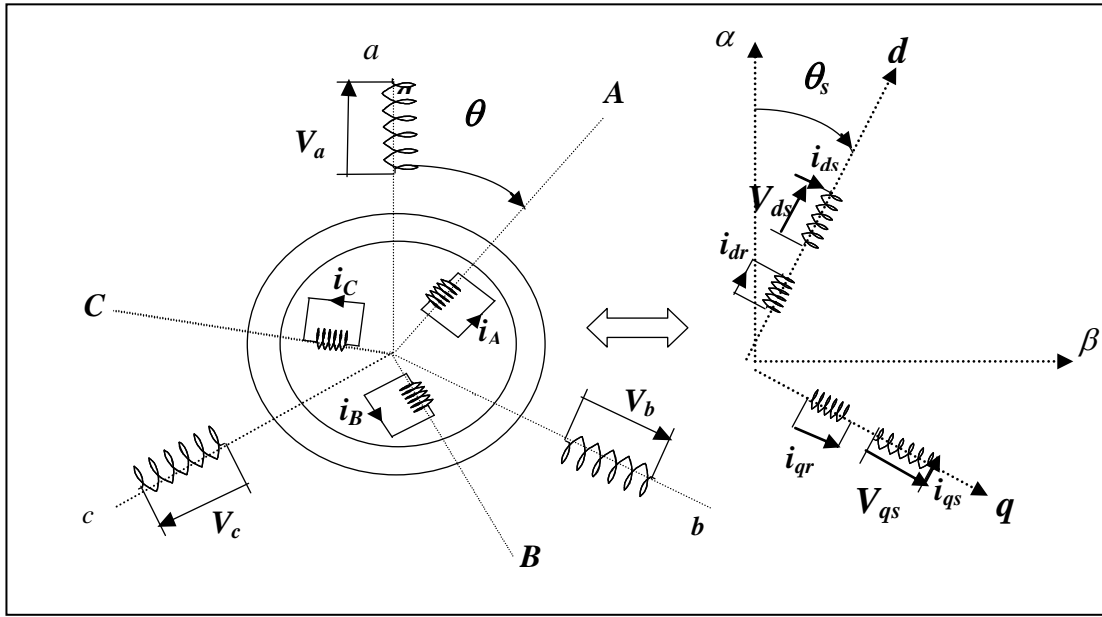


Figure. (II-2) : Passage du triphasé au biphasé

### II.3.1. Transformation de PARK :

Cette transformation est définie par sa matrice  $[A(\theta)]$  telle que :

$$[A(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II-6)$$

Les courants, les tensions et les flux se transforment de la manière suivante :

$$\begin{cases} [i_{dq}] = [A] [i_{abc}] \\ [V_{dq}] = [A] [V_{abc}] \\ [\phi_{dq}] = [A] [\phi_{abc}] \end{cases} \quad (II-7)$$

Les vecteurs  $[i_{dq}]$ ,  $[V_{dq}]$  et  $[\phi_{dq}]$  sont les vecteurs obtenus par la transformation de PARK de ceux des vecteurs réels  $[i_{abc}]$ ,  $[V_{abc}]$  et  $[\phi_{abc}]$ .

La matrice de PARK écrite sous cette forme est orthogonale, ce qui conduit à l'égalité des valeurs efficaces des grandeurs physiques dans les deux repères. De

ce fait, la conservation de la puissance pour ce changement de repère est vérifiée.

L'orthogonalité nous permet d'écrire : [24]

$$[A(\theta)]^{-1} = [A(\theta)]^T \quad (II-8)$$

Donc :

$$[A(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II-9)$$

### II.3.2. Application de la transformation de PARK à la machine asynchrone :

#### II.3.2.1. Equations des tensions :

En appliquant la transformation de *PARK* aux équations (II-1) à (II-7), nous obtenons le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_e \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_e \phi_{ds} \\ 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_e - \omega_m) \phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_e - \omega_m) \phi_{dr} \end{cases} \quad (II-10)$$

avec :  $\omega_e = \frac{d\theta_e}{dt}$  ;  $\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}$

Notons que, l'angle «  $\theta$  » prend la valeur «  $\theta_s$  » pour les grandeurs statoriques et la valeur «  $\theta_s - \theta$  » pour les grandeurs rotoriques.

### II.3.2.2. Equations des flux

Les relations entre les flux et les courants sont données par : [24.25]

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (II-11)$$

## II.4. choix du référentiel :

On distingue trois types de référentiels, à savoir :

- Référentiel lié au stator ;
- Référentiel lié au rotor ;
- Référentiel lié au champ tournant.

Dans notre étude, nous allons travailler avec le référentiel lié au champ tournant. [25]

### II.4.1. Référentiel lié au champ tournant :

Ce référentiel est caractérisé par «  $\omega_e = \omega_s$  », dans ce cas les grandeurs rotoriques et statoriques en régime permanent, sont continues. Il est donc préférable d'utiliser ce référentiel lors de l'étude de la commande de la machine asynchrone.

Les équations de la machine dans ce repère s'écrivent de la manière suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \phi_{dr} \end{cases} \quad (II-12)$$

avec :  $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$

## II.5. Calcul du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique est défini par la relation suivante :

$$C_{em} = p \left[ i_{abc} J^T \frac{dL_{sr}}{d\theta} [i_{ABC} J] \right] \quad (II-13)$$

D'où :

$$\begin{aligned} C_{em} &= p L_m (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \\ C_{em} &= p \frac{L_m}{L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \end{aligned} \quad (II-14)$$

### II.5.1. Equation mécanique :

En appliquant les lois fondamentales de la dynamique à la machine, l'équation mécanique sera donnée par la relation suivante :

$$\frac{J}{p} \frac{d\omega_m}{dt} = C_{em} - C_r - C_f \quad (II-15)$$

Ainsi l'équation mécanique peut être formulée de la façon suivante : [24]

$$\frac{J}{p} \frac{d\omega_m}{dt} = p \frac{L_m}{L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) - C_r - \frac{f_l}{p} \omega_m \quad (II-16)$$



## II.6. Mise sous forme d'équation d'état :

Nous choisissons dans tout ce qui suit, le vecteur  $[i_{ds}, i_{qs}, \phi_{dr}, \phi_{qr}, \omega_m]^T$  comme vecteur d'état et les grandeurs  $V_{ds}, V_{qs}$  comme variables de commande. Ainsi, nous exprimons  $\{i_{dr}, i_{qr}, \phi_{ds}, \phi_{qs}\}$  en fonction du vecteur choisi, d'où :

$$\begin{cases} i_{dr} = \frac{1}{L_r} \phi_{dr} - \frac{L_m}{L_r} i_{ds} \\ i_{qr} = \frac{1}{L_r} \phi_{qr} - \frac{L_m}{L_r} i_{qs} \\ \phi_{ds} = L_s \sigma i_{ds} - \frac{L_m}{L_r} \phi_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s \sigma i_{qs} - \frac{L_m}{L_r} \phi_{qr} \end{cases} \quad (II-17)$$

En remplaçant  $\phi_{qs}, \phi_{ds}$ , en fonction de  $\phi_{qr}, \phi_{dr}$ , dans le système (II-12), nous aboutissons aux équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + L_s \sigma \frac{di_{ds}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_s \left[ L_s \sigma i_{qs} + \frac{L_m}{L_r} \phi_{qr} \right] \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + L_s \sigma \frac{di_{qs}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\phi_{qr}}{dt} - \omega_s \left[ L_s \sigma i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} \phi_{dr} \right] \end{cases} \quad (II-18)$$

D'après (II-12) nous aurons :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \phi_{dr} = -R_r i_{dr} + (\omega_s - \omega_m) \phi_{qr} \\ \frac{d}{dt} \phi_{qr} = -R_r i_{qr} - (\omega_s - \omega_m) \phi_{dr} \end{cases} \quad (II-19)$$

Le modèle mathématique de la machine asynchrone sous les hypothèses citées et avec une alimentation en tension, en fonction des variables d'état est donné par le système suivant : [24.25]

$$\begin{cases}
 \frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[ -R_{sm} i_{ds} + \omega_s \sigma L_s i_{qs} + \frac{L_m}{L_r T_r} \phi_{dr} + \frac{L_m}{L_r} \omega_m \phi_{qr} + V_{ds} \right] \\
 \frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[ -\omega_s \sigma L_s i_{ds} - R_{sm} i_{qs} + \frac{L_m}{L_r} \omega_m \phi_{dr} + \frac{L_m}{L_r T_r} \phi_{qr} + V_{qs} \right] \\
 \frac{d\phi_{dr}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{ds} - \frac{1}{T_r} \phi_{dr} + (\omega_s - \omega_m) \phi_{qr} \\
 \frac{d\phi_{qr}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{qs} - (\omega_s - \omega_m) \phi_{dr} - \frac{1}{T_r} \phi_{qr} \\
 \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{p^2}{J} \frac{L_m}{L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) - \frac{p}{J} C_r - \frac{f_l}{J} \omega_m
 \end{cases} \tag{II-20}$$

avec 
$$R_{sm} = R_s + \frac{L_m^2}{L_r T_r} ; \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} ; \quad T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

### II.7. Modélisation de l'alimentation de la machine :

Nous présentons la modélisation de l'étage d'alimentation de la machine asynchrone qui est composée d'un onduleur de tension, contrôlé par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI), et d'un redresseur à diodes alimentant cet onduleur. Un filtre passe-bas a été introduit afin de filtrer la tension redressée et de réduire les ondulations du courant d'entrée (Figure-II-3).

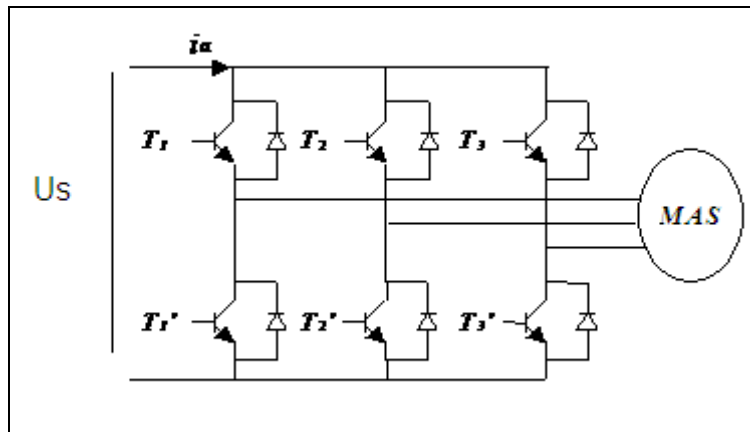
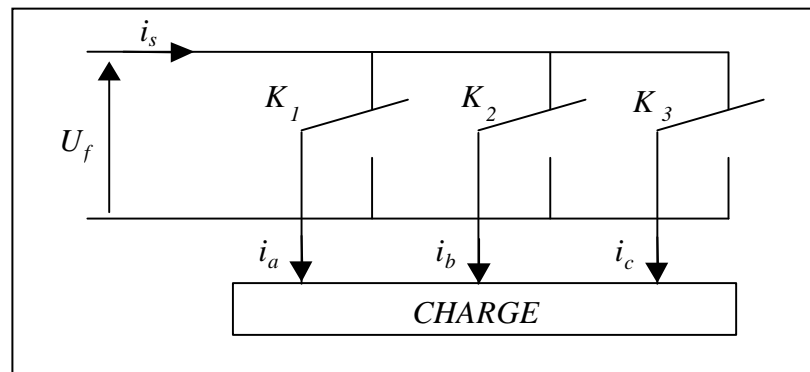


Figure.(II-3) :Association onduleur de tension - MAS

### II.7.1. Modélisation de l'onduleur de tension :

L'onduleur utilisé est un onduleur à trois bras, dont chaque bras est constitué par deux interrupteurs bidirectionnels. Un interrupteur est composé par un transistor  $T_i$  et d'une diode  $D_i$ . La commande des transistors est complémentaire, d'où nous pouvons remplacer chaque bras de l'onduleur par un interrupteur à deux positions ( $K_i$ ) comme indiqué sur la figure (Figure-II-6-).



**Figure.(II-4) :** Représentation des transistors par des interrupteurs

On définit les fonctions logiques de connexion par ( $i = 1, 2, 3$ ) :

$$F_i = \begin{cases} 0 & \text{si } T_i \text{ est fermé et } T_i' \text{ est ouvert} \\ 1 & \text{si } T_i \text{ est ouvert et } T_i' \text{ est fermé} \end{cases} \quad (II-29)$$

Les tensions de sortie de l'onduleur sont données par :

$$\begin{cases} V_{ab} = U_f (F_1 - F_2) \\ V_{bc} = U_f (F_2 - F_3) \\ V_{ca} = U_f (F_3 - F_1) \end{cases} \quad (II-30)$$

Par conséquent, les tensions simples sont exprimées de la manière suivante :

$$\begin{cases} V_a = \frac{U_f}{3}(2F_1 - F_2 - F_3) \\ V_b = \frac{U_f}{3}(-F_1 + 2F_2 - F_3) \\ V_c = \frac{U_f}{3}(-F_1 - F_2 + 2F_3) \end{cases} \quad (II-31)$$

Le courant  $i_s$  à l'entrée de l'onduleur sera donné par la relation suivante : [25]

$$i_s = F_1 i_a + F_2 i_b + F_3 i_c \quad (II-32)$$

## II.8. Modulation de largeur d'impulsions (M.L.I) :

- **La stratégie triangulo-sinusoïdale :**

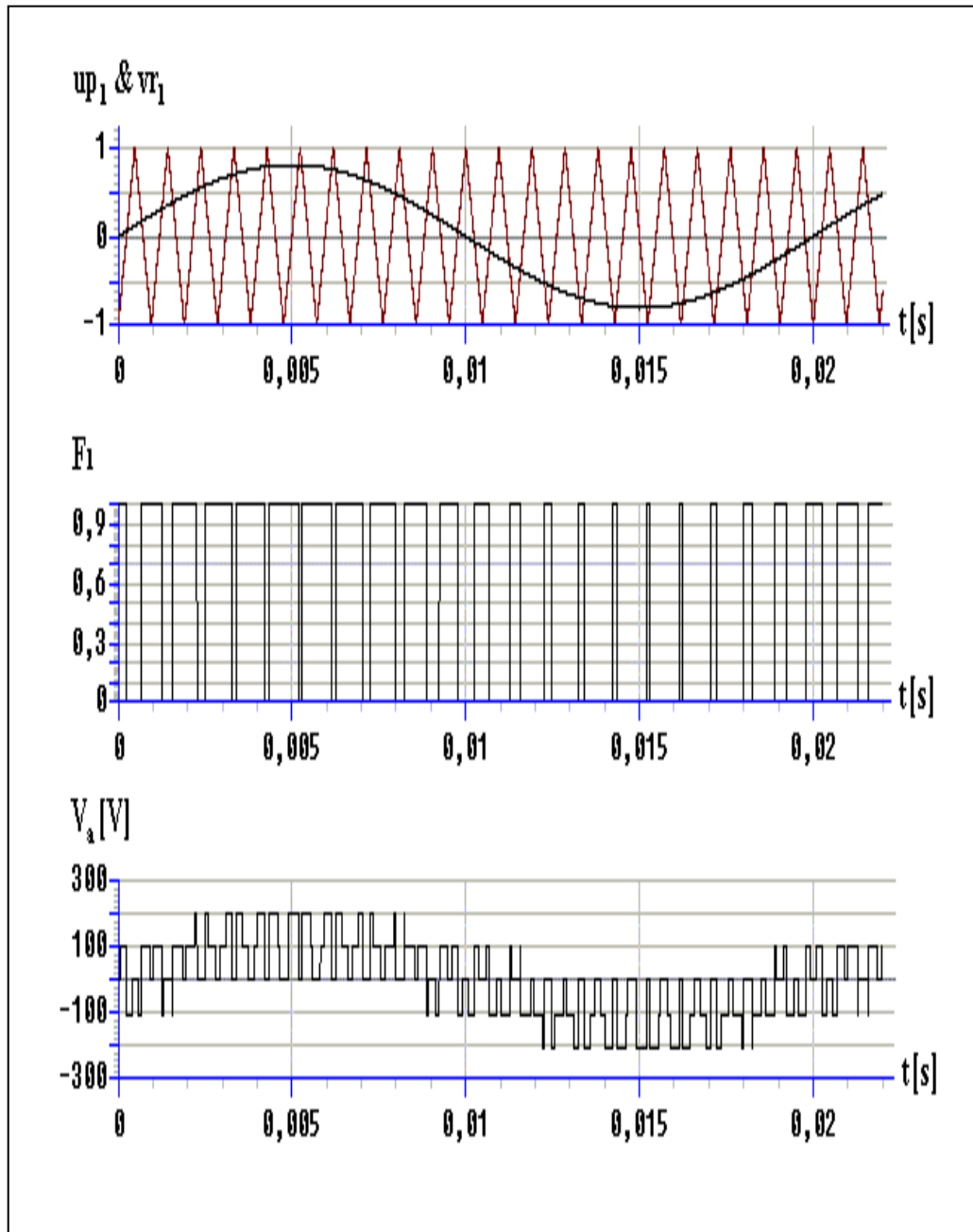
La (M.L.I), permet l'obtention des alternances de la tension de sortie qui est formée de plusieurs créneaux. Ceci peut être fait en adoptant des techniques de commande des interrupteurs, il existe plusieurs, à savoir la stratégie triangulo-sinusoïdale, la stratégie hystérésis. Dans cette étude, nous nous intéressons à la première technique.

Cette stratégie dont le principe est basé , sur la variation de l'amplitude de la référence «  $vr_1$  », et la fixation de celle de la porteuse «  $up_1$  », qui est représentée par un signal triangulaire.

L'onde de sortie, est alors obtenue par une simple comparaison des deux ondes, donnant ainsi l'ordre d'allumage où d'extinction aux composants constituant l'onduleur.

Dans cette technique (Fig.(II-7-)), il faut définir deux paramètres qui sont :

- L'indice de modulation «  $m$  » qui représente le rapport entre la fréquence de la porteuse «  $f_p$  » à la fréquence de la référence «  $f$  » désirée.
  - Le coefficient de réglage en tension «  $r$  » qui représente le rapport entre l'amplitude de l'onde de référence à la valeur de crête de l'onde porteuse.
- [22.26]



**Figure-II-7- :** Principe de la technique triangulo – sinusoidale  
( $m = 21, r = 0.8$ )

Ainsi, nous présentons le modèle de cette association sous forme d'équation d'état telle que : [24.26]

$$\dot{X} = AX + BU$$

$$\dot{X} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma L_s} R_{sm} & \omega_s & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r} & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_m \\ -\omega_s & -\frac{1}{\sigma L_s} R_{sm} & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_m & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r} \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & +(\omega_s - \omega_m) \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} & -(\omega_s - \omega_m) & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix}$$

### **II.9. Conclusion :**

Dans ce chapitre, La modélisation d'une machine asynchrone a pour rôle l'obtention d'un modèle mathématique très simple, qui a été réduit en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et la transformation de PARK.

Nous avons modélisé l'association convertisseur-moteur asynchrone en vue de l'étude du comportement de la machine asynchrone lors des différents démarrages, l'onduleur étant contrôlé par la stratégie triangulo- sinusoïdale.

### III.1-Introduction :

La simulation numérique est assez connue actuellement dans le domaine des machines électrique et des entraînements. Elle nous permet d'analyser et de simuler les systèmes avec une grande précision.

De nos jours, plusieurs logiciels sont utilisés pour simuler les machines électriques. Nous utilisons le logiciel MATLAB qui présente un système interactif de programmation, pour le calcul numérique et la visualisation graphique .c'est un logiciel qui nous permet de faire des calculs mathématiques et numériques, afin de réaliser la solution numérique du système d'équation (II.10) par la méthode d'Euler, pour la simulation de la machine asynchrone triphasée ainsi que les démarrages :statorique , rotorique, auto-transformateur, étoile-triangle ,progressif et fréquentiel .

### III.2 –Présentation et interprétation des résultats :

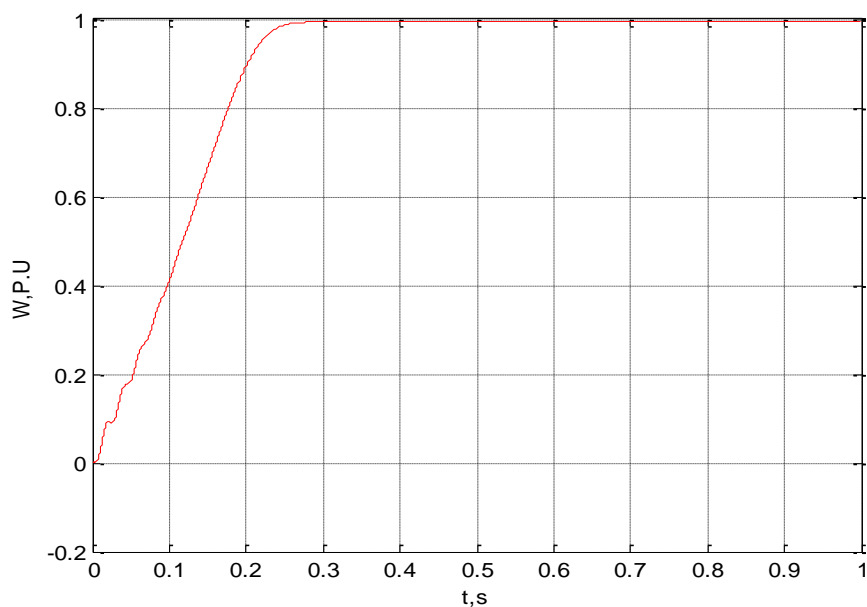
#### III.2 .1-Démarrage direct :

La première application, désormais classique, concerne un démarrage direct sur un réseau triphasé équilibré de tensions sinusoïdales de fréquence fixe; d'un moteur asynchrone. On a réalisé une évaluation grâce a une comparaison entre des résultats réels et ceux obtenus par le programme.

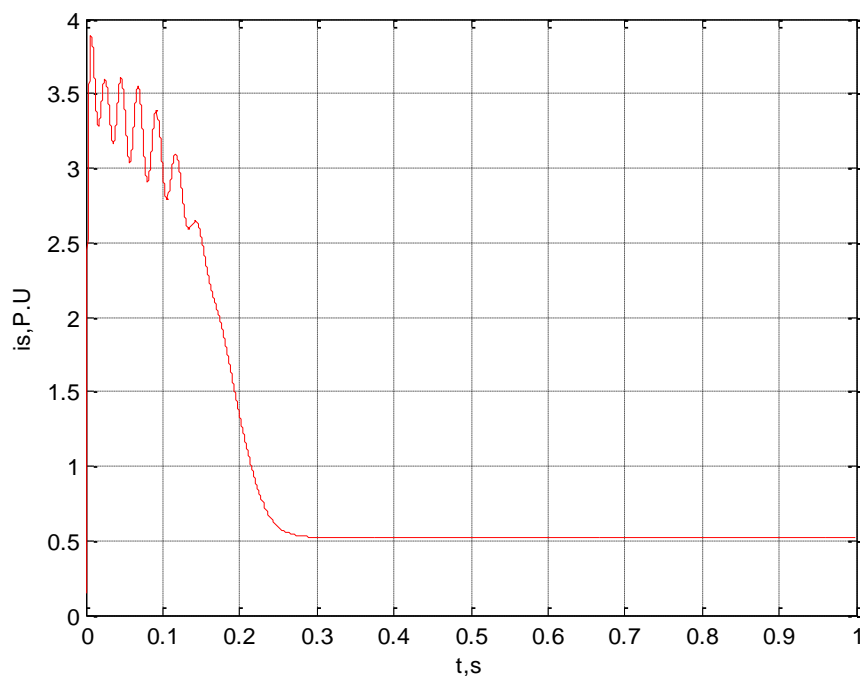
L'analyse des régimes donnés est effectuée pour les valeurs nominales de la fréquence et de la tension à l'aide du programme correspondant à l'organigramme de la simulation présentée en annexe 2.

Les résultats présentés aux figures III.1, III.2 et III.3 concernent les réponses instantanées transitoires de la vitesse angulaire  $W$ , du vecteur général courant statorique  $i_s$  et du couple électromagnétique, en fonction du temps « t », qui sont calculés pour le moteur asynchrone utilisé dans lors d'un démarrage direct.

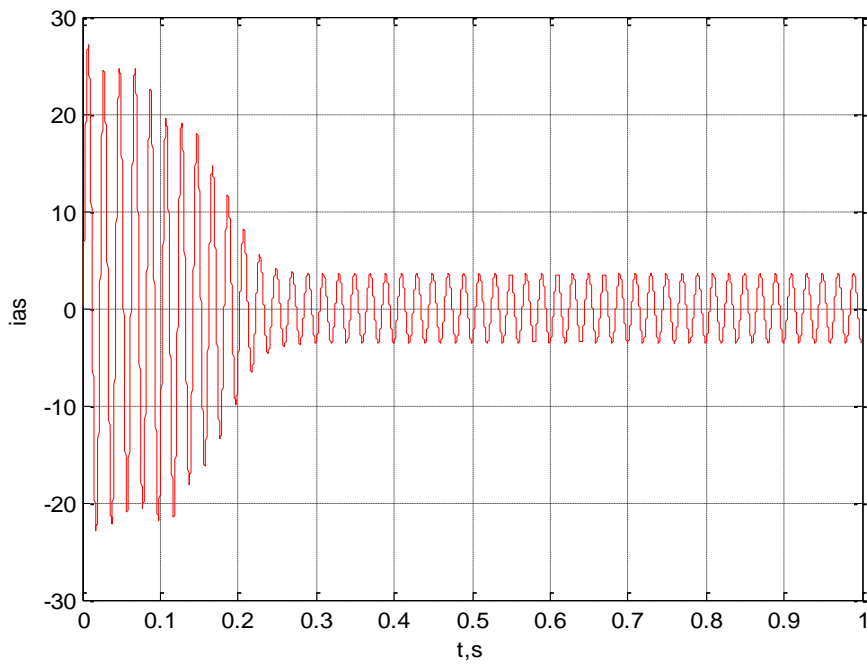




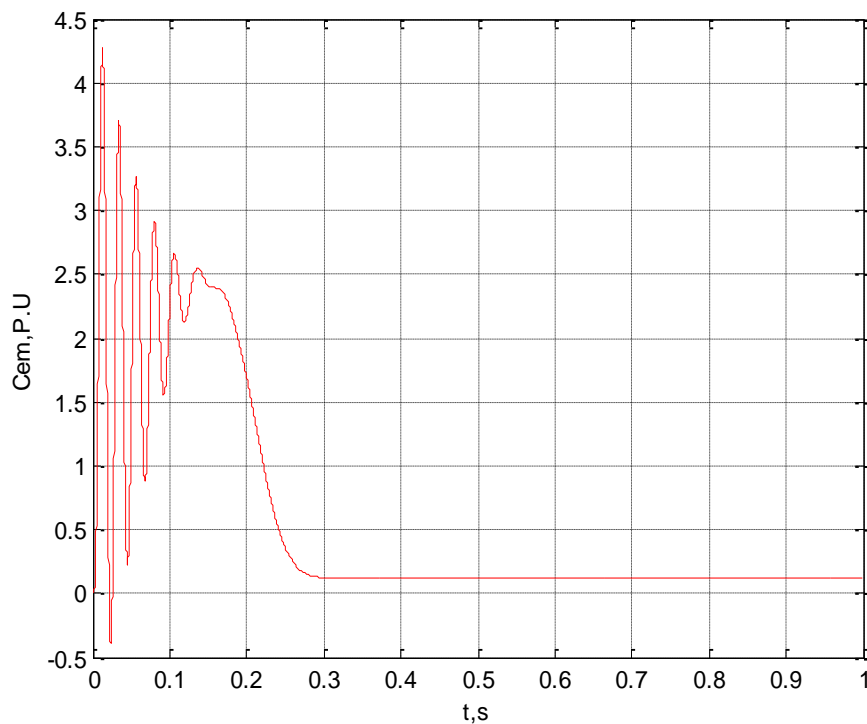
**Figure.(III.1)** :Variations de la vitesse angulaire  $W$  en fonction du temps  
pour un démarrage direct d'une MAS



**Figure.(III.2)** :Variations du vecteur général courant  $i_s$  en fonction  
du pour un démarrage direct d'une MAS



**Figure.(III.3) :** Variations du vecteur courant  $i_{as}$  en fonction du temps pour un démarrage direct d'une MAS



**Figure.(III.4) :** Variations du couple électromagnétique  $C_{em}$  en fonction du temps pour un démarrage direct d'une MAS.

Le tableau suivant présente des résultats numériques pour un démarrage direct.

	<b>TD (s)</b>	<b>ID</b>	<b>I<sub>max</sub></b>	<b>C<sub>m</sub> (pu)</b>	<b>C<sub>max</sub> (pu)</b>
<b>Démarrage direct</b>	0.29	27	27	3.65	4.26

**Tableau III.1** : Paramètre du démarrage direct

TD: représente le temps de démarrage en (s)

ID: représente la valeur moyenne du courant .

*I<sub>max</sub>*: représente le courant maximale (courant de pique) .

*C<sub>m</sub>* : représente le couple moyen en (Pu).

*C<sub>max</sub>* : représente le couple maximal (Pu).

Lors du démarrage direct de la MAS, on constate d'emblée l'importance des courants statoriques pouvant être à l'origine de la destruction de la machine par sur échauffement, surtout en cas de répétitions excessives.[2]

Dans le cas de démarrage d'un moteur non chargé  $M_c = 0$ , le temps de démarrage peut être calculé par la formule :

$$t_d = \Delta\omega J_s / M_{moy} \quad (III.1)$$

Avec  $\Delta\omega$ : changement de la vitesse angulaire lors du démarrage en rd/s.

$J_s$ : moment d'inertie sur l'axe du moteur  $\text{Kg.m}^2$

$M_{moy}$ : couple du démarrage N.m.

On considère  $\Delta\omega$  égale à la vitesse angulaire nominale rd/s.

$$\Delta\omega = \omega_n (1 - g) = 2\pi f / p (1 - g).$$

On détermine la valeur moyenne du couple du moteur au démarrage par la formule empirique :

$$M_{moy} = (2M_D + M_{max})/3,5$$

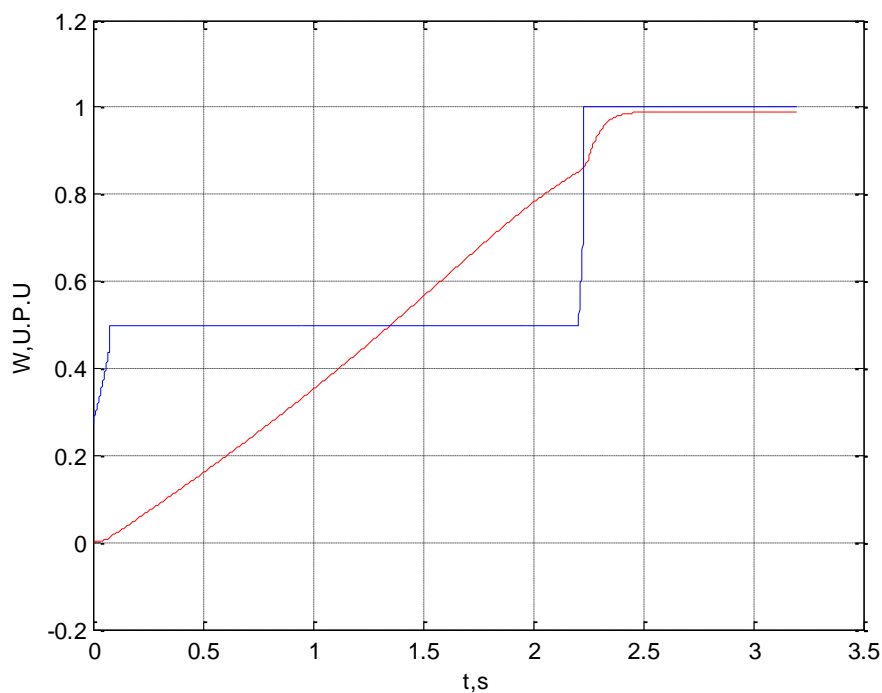
Par la formule 3-1 on calcul le temps de démarrage en S.

$$t_d = \Delta\omega J_s / M_{moy} = 0.688S.$$

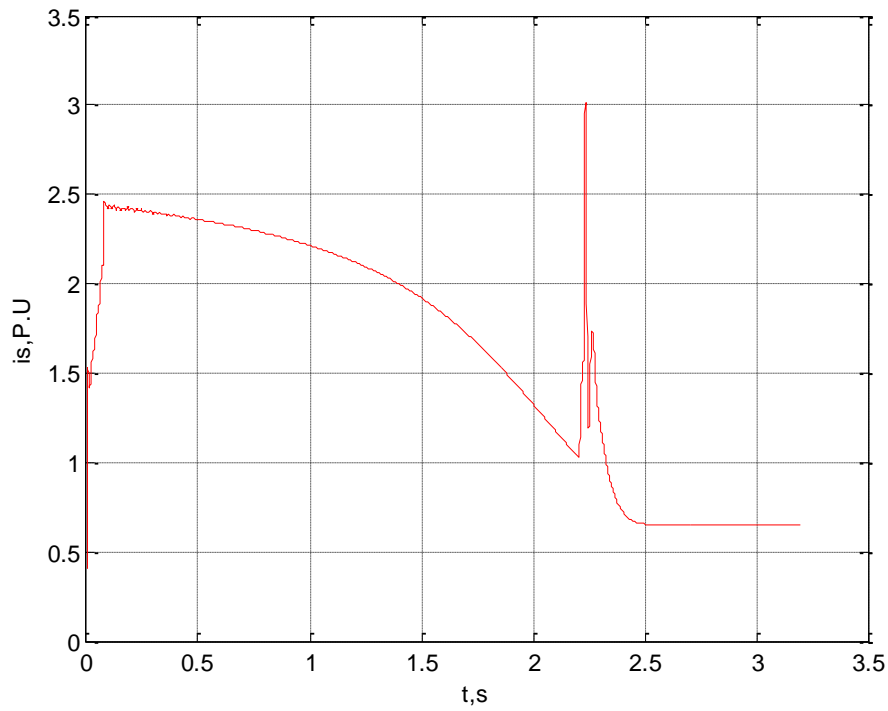
Le temps de démarrage trouvé pour les mêmes données initiales à l'aide du programme vaut 0.29 s,

### III.2 .2-démarrage étoile –triangle :

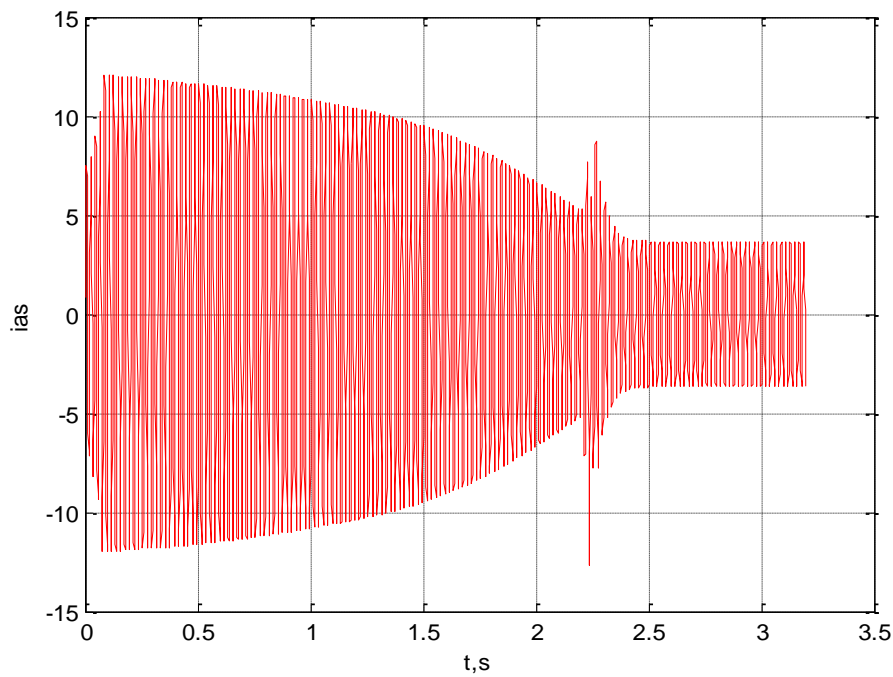
les graphes des réponses transitoires instantanées de la vitesse angulaire W et la tension U, du vecteur générale du courant statorique  $i_s$ , du couple électromagnétique en fonction du temps t, calculés pour le démarrage statorique, étoile triangle est représentée dans les figures III.4, III.5 et III.6.



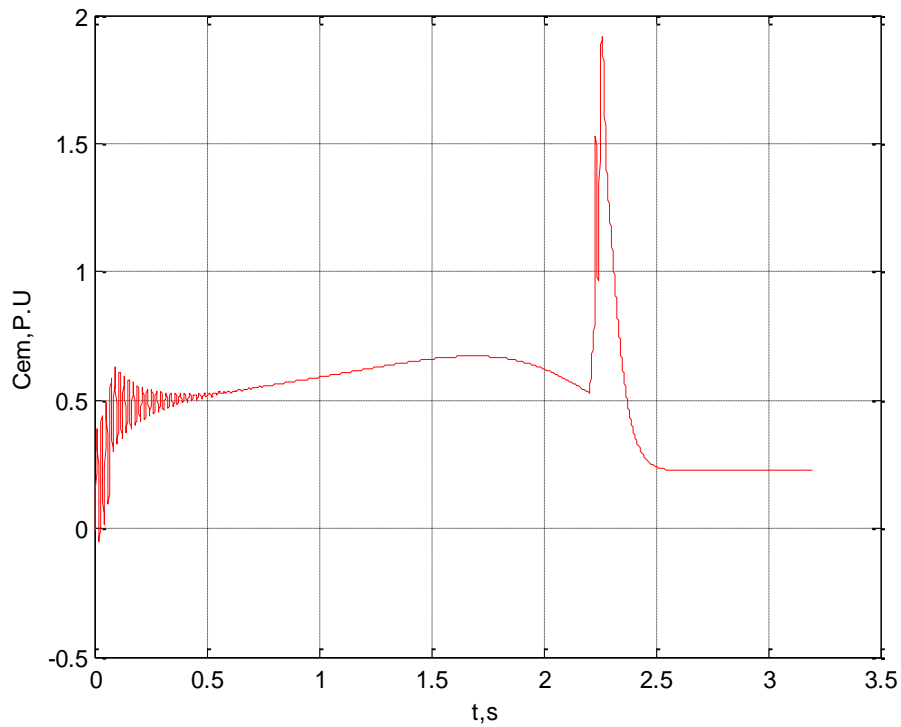
**Figure.(III.5) :** Variations de la vitesse angulaire W et de la tension U en fonction du temps pour un démarrage étoile triangle d'une MAS



**Figure.(III.6) :** Variations du vecteur général courant  $i_s$  en fonction du temps pour un démarrage étoile -triangle d'une MAS



**Figure.(III.7) :** Variations du vecteur général courant  $i_{as}$  en fonction du temps pour un démarrage étoile- triangle d'une MAS



**Figure.(III.8) :** Variations du couple électromagnétique  $C_{em}$  en fonction du temps pour un démarrage étoile- triangle d'une MAS

Le tableau suivant présente des résultats numériques pour un démarrage étoile-triangle.

	<b>TD (s)</b>	<b>ID</b>	<b>I<sub>max</sub></b>	<b>C<sub>m</sub> (pu)</b>	<b>C<sub>max</sub> (pu)</b>
<b>Démarrage étoile-triangle</b>	2.2	7.5	12	0.73	1.81

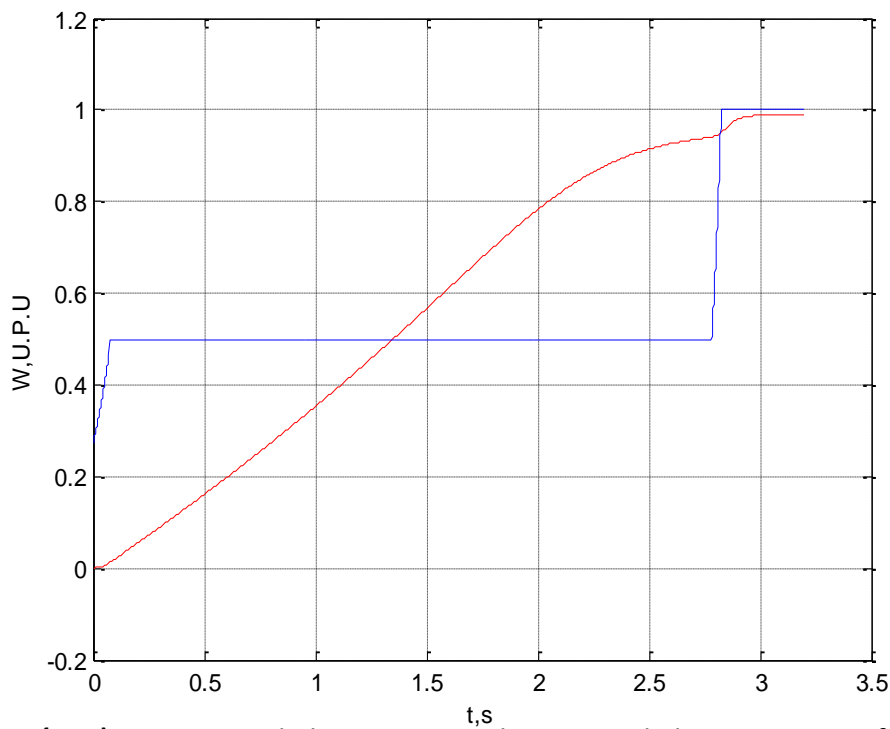
**Tableau (III.2) :** Paramètre du démarrage étoile-triangle

En étudiant ce démarrage on remarque des pics de courants et du couple qui apparaissent à l'instant du passage au couplage normal en triangle

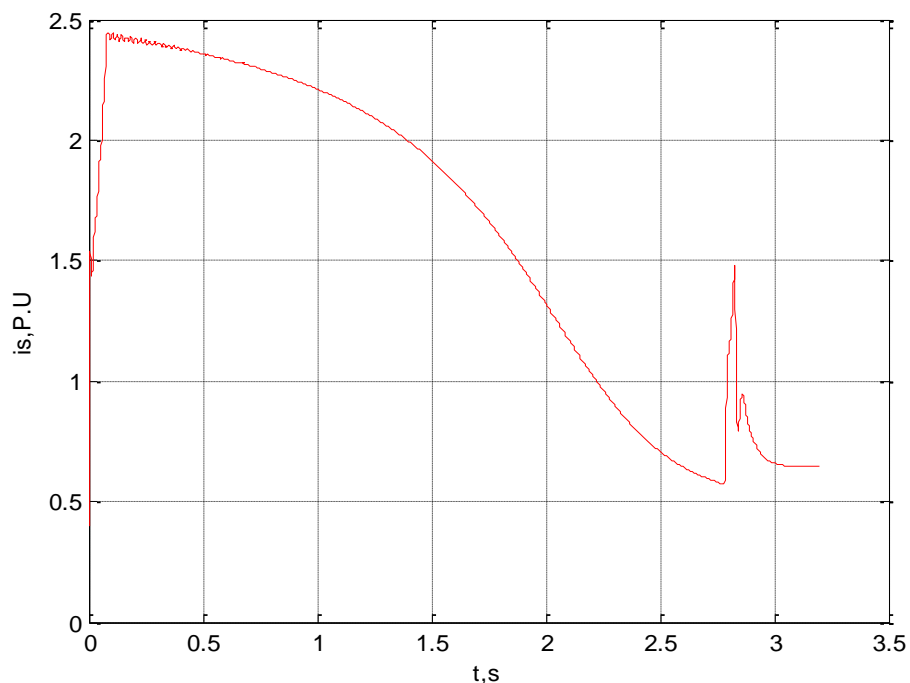
Les inconvénients de ce démarrage sont à l'origine de la longue durée de démarrage, de grandes pertes, ainsi que l'échauffement des enroulements du moteur. Son avantage c'est la limitation de la valeur du courant de démarrage.

### III.2 .3-Démarrage autotransformateur :

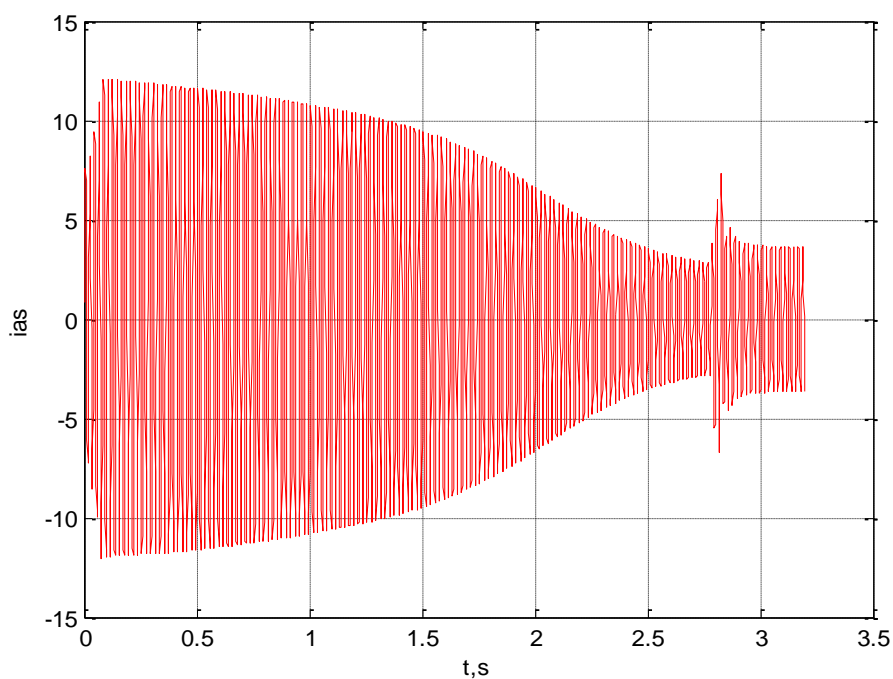
Les réponses transitoires instantanées de la vitesse  $W$ , de la tension  $U$ , du vecteur général du courant statorique  $i_s$  et du couple électromagnétique en fonction du temps ( $t$ ) sont calculées pour le démarrage par autotransformateur avec comme coefficient de transformation  $K_{tR} = 2$  sont présentées dans les figures III.7, III.8, et III.9.



**Figure.(III.9) :** Variations de la vitesse angulaire  $W$  et de la tension  $U$  en fonction du temps pour un démarrage par autotransformateur d'une MAS

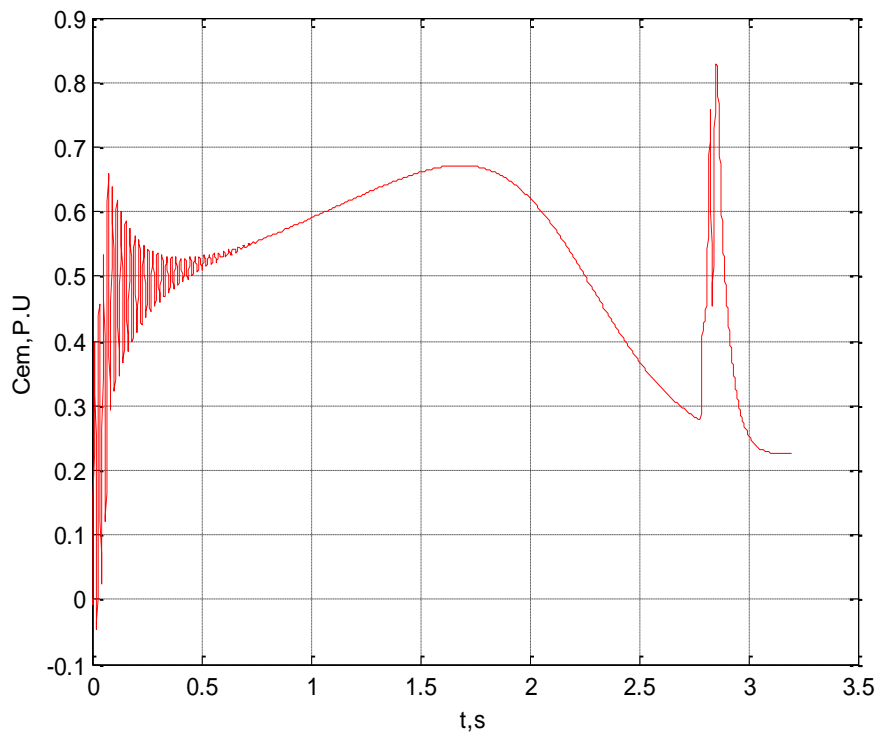


**Figure.(III.10)** : Variations du vecteur général courant  $i_s$  en fonction du temps pour un démarrage autotransformateur d'une MAS



**Figure.(III.11)** : Variations du vecteur général courant  $i_{as}$  en fonction du temps pour un démarrage par autotransformateur d'une MAS





**Figure.(III.12) :** Variations du couple électromagnétique  $C_{em}$  en fonction du temps pour un démarrage par autotransformateur d'une MAS.

Le tableau suivant présente des résultats numériques pour un démarrage autotransformateur.

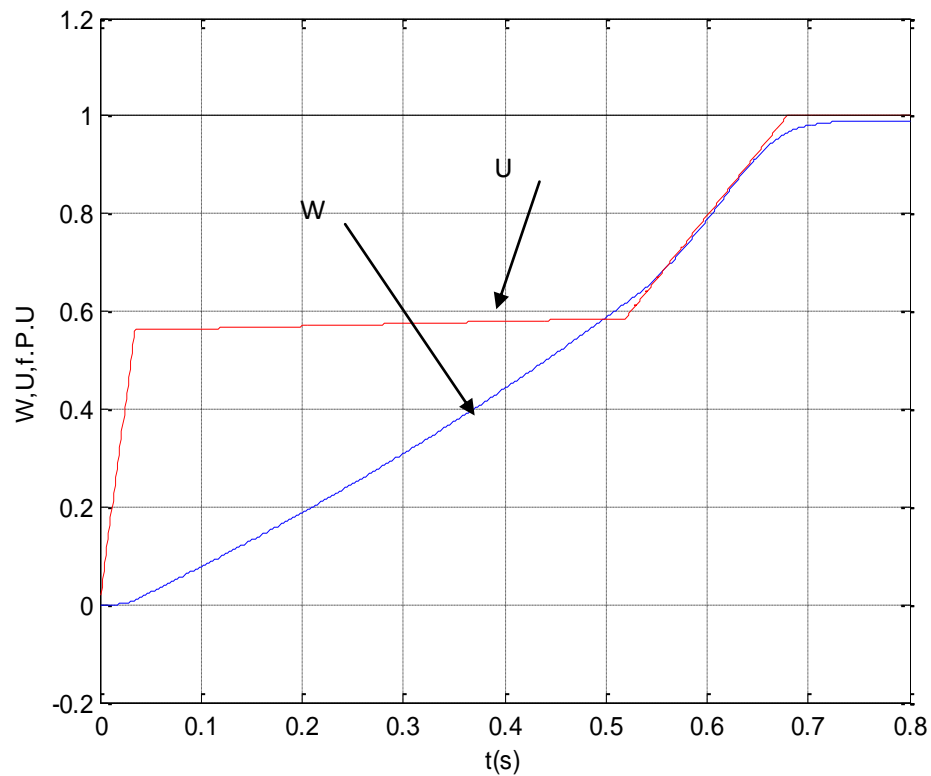
	<b>TD (s)</b>	<b>ID</b>	<b>I<sub>max</sub></b>	<b>C<sub>m</sub> (pu)</b>	<b>C<sub>max</sub> (pu)</b>
<b>Démarrage autotransformateur</b>	2.86	7.6	12	0.46	0.81

**Tableau (III.3) :** Paramètre du démarrage autotransformateur

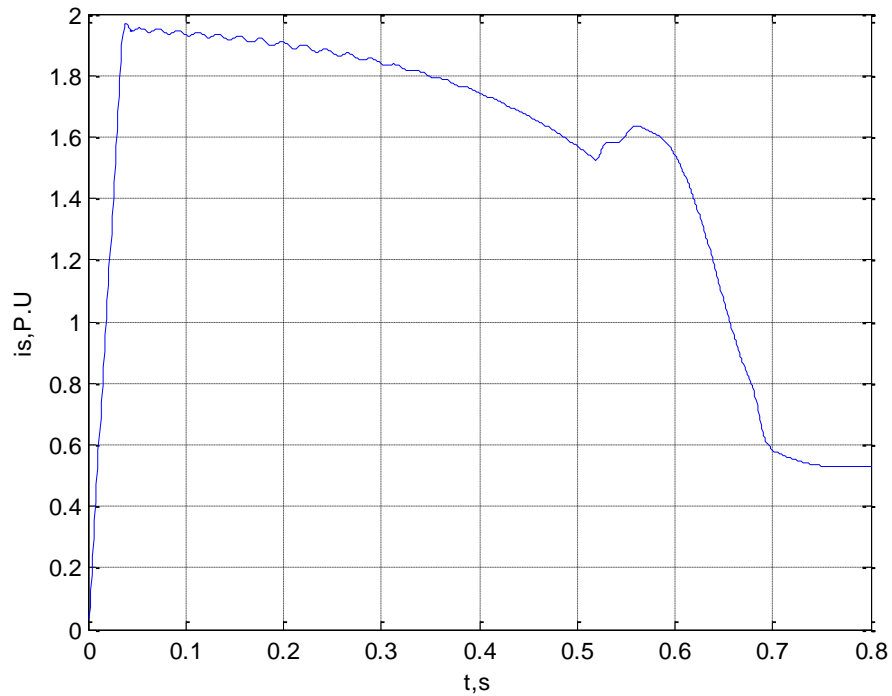
Le démarrage par autotransformateur ressemble beaucoup au démarrage étoile-triangle, il est caractérisé par les grands pics de courant au moment du passage des enroulements de la MAS d'une tension diminuée au nominal figure.III.8, et III.9, une grande durée de démarrage, de grandes pertes, ainsi qu'un échauffement des enroulements.

### III.2 .4-Démarrage progressif :

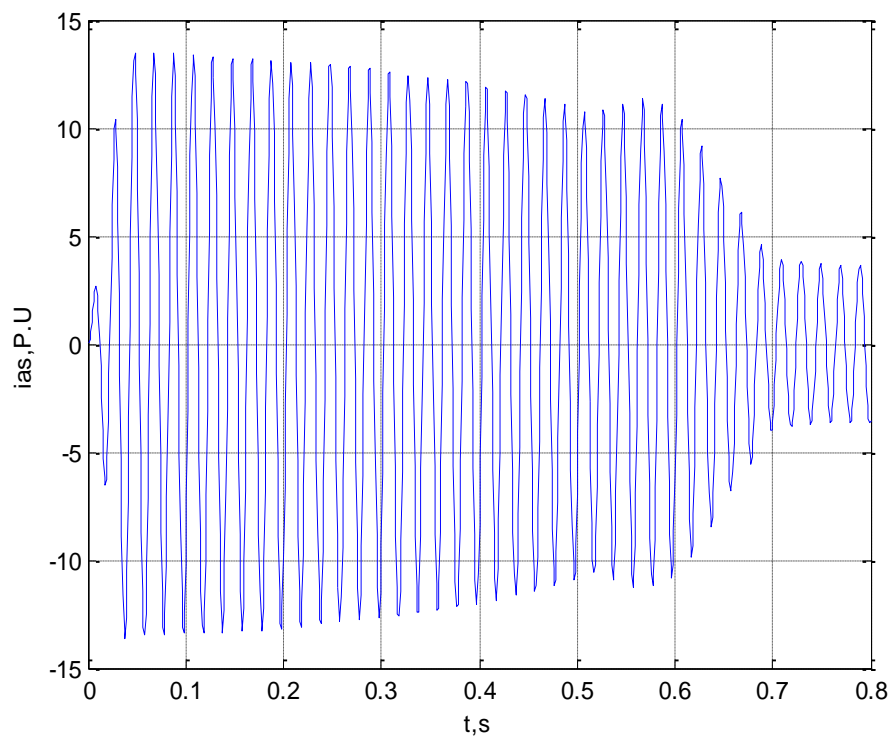
Les réponses des valeurs instantanées transitoires de la vitesse angulaire  $W$ , de la tension  $U$ , du vecteur général courant  $i_s$  et du couple électromagnétique  $C_{em}$  en fonction du temps sont calculées pour un démarrage à fréquence de rotation constante de la génératrice et sont présentées aux figures III.13, III.14 III.15 et III.16.



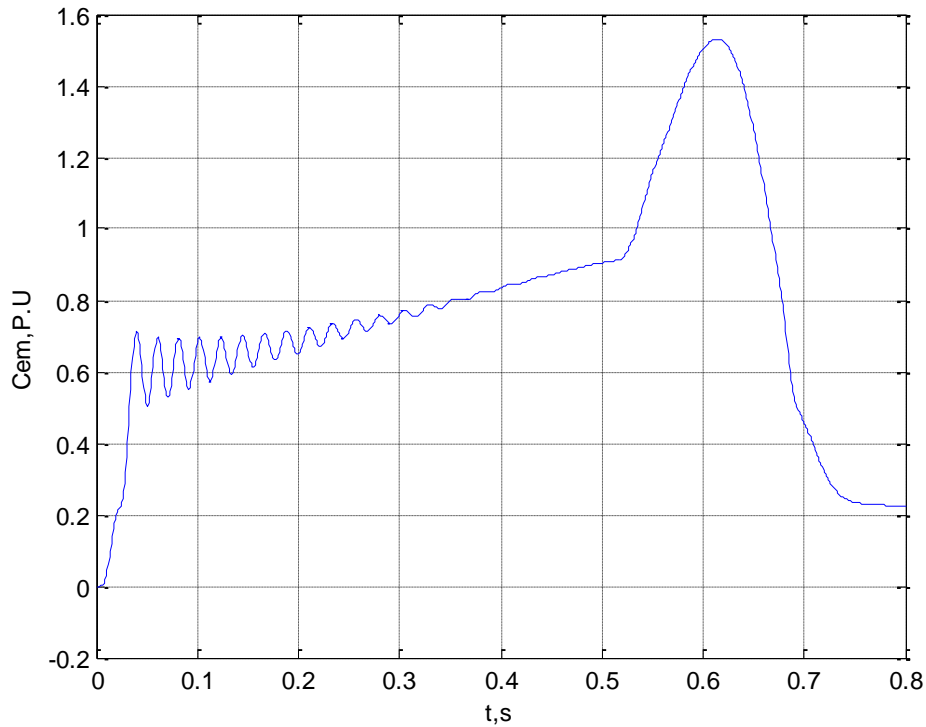
**Figure.(III.13):** Variation de la vitesse angulaire  $W$  et tension  $U$  en fonction du temps pour un démarrage à tension progressive d'une MAS .



**Figure .(III.14):** Variation du vecteur générale courant  $i_s$  en fonction du temps pour un démarrage a tension progressive d'une MAS.



**Figure .(III.15):** Variation du vecteur générale courant  $i_{as}$  en fonction du temps pour un démarrage a tension progressive d'une MAS



**Figure. ( III.16 ):** Variation du couple électromagnétique  $C_{em}$  en fonction du temps pour un démarrage à tension progressive

Le tableau suivant présente des résultats numériques pour un démarrage autotransformateur.

	<b>TD (s)</b>	<b>ID</b>	<b>I<sub>max</sub></b>	<b>C<sub>m</sub></b> <b>(pu)</b>	<b>C<sub>max</sub></b> <b>(pu)</b>
<b>Démarrage progressif</b>	0.72	2.7	13.5	0.49	1.54

**Tableau (III.4) :** Paramètre du démarrage progressif

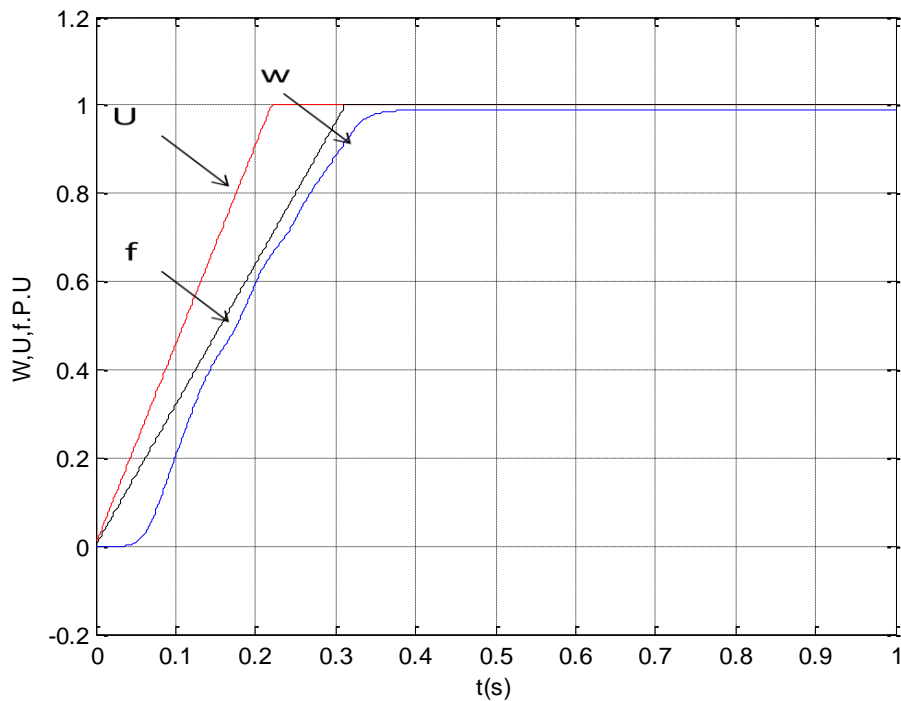
D'après les figures III-10 à III-12 on constate que cette méthode de démarrage est différente des méthodes de démarrage étoile-triangle et par autotransformateur. On constate surtout l'absence des pics de courant dans l'étape de finalisation du démarrage car le passage à la tension nominale dans ce procédé se réalise progressivement grâce à l'augmentation du courant de la génératrice. Outre cette méthode de démarrage typique en diminuant la tension

est caractérisée par l'augmentation du temps de démarrage, les pertes, ainsi que le sur échauffement des enroulements du moteur électrique .

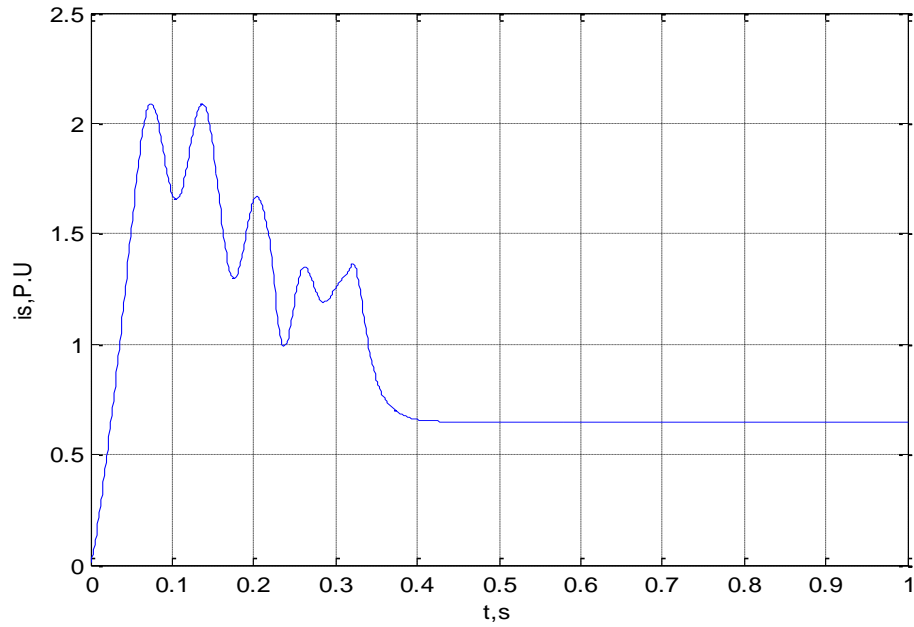
### III.2 .5-Démarrage fréquentiel :

Ce démarrage impose une lois linéaire de changement de la fréquence et de la tension ,en concéderons à l'état initial ( $t=0$ ),une fréquence et une tension nul

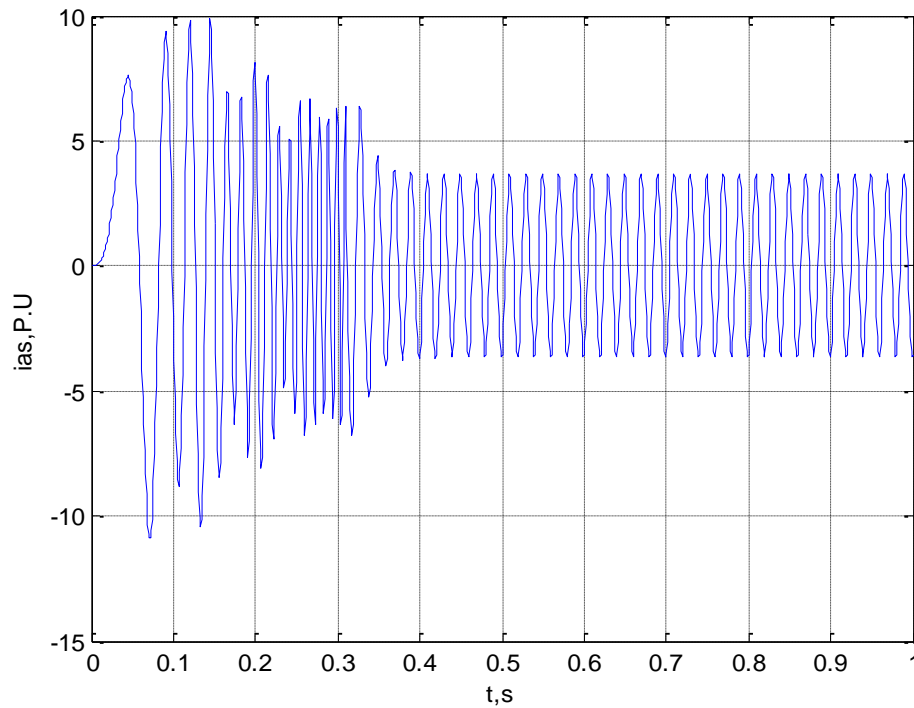
Les réponses des valeurs instantanées transitoires de la vitesse  $W$ , du courant  $i_s$ , et courant du phase  $i_{as}$  ,du couple électromagnétique en fonction du temps lors du démarrage fréquentiel sont représentées par les figures III.17, III.18, III.19 , III.20



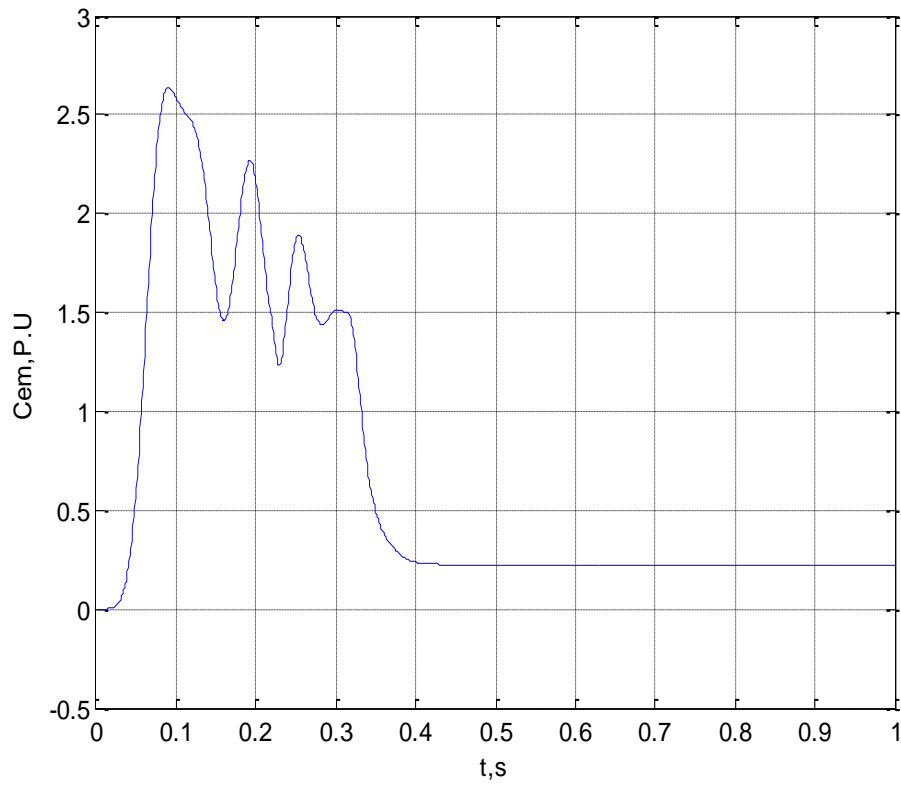
**Figure.(III.17) :** Variations de la vitesse angulaire  $W$ , la tension  $V$  et la fréquence  $f$  en fonction du temps pour un démarrage fréquentiel d'une MAS.



**Figure.(III.18)** : Variations du vecteur générale courant  $i_s$  en fonction du temps pour un démarrage fréquentiel d'une MAS.



**Figure.(III.19)** : Variations du vecteur générale courant  $i_{as}$  en fonction du temps pour un démarrage fréquentiel d'une MAS



**Figure.(III.20)** : Variations du couple électromagnétique  $C_{em}$  en fonction du temps pour un démarrage fréquentiel d'une MAS.

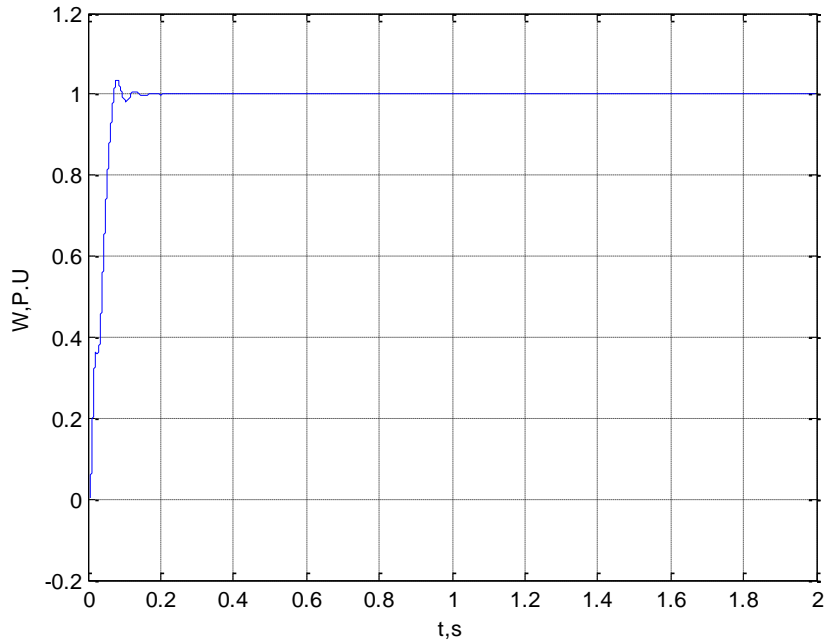
Le tableau suivant présente des résultats numériques pour un démarrage autotransformateur.

	TD (s)	ID	I <sub>max</sub>	C <sub>m</sub> (pu)	C <sub>max</sub> (pu)
<b>Démarrage autotransformateur</b>	0.38	9.8	7.6	2.31	2.7

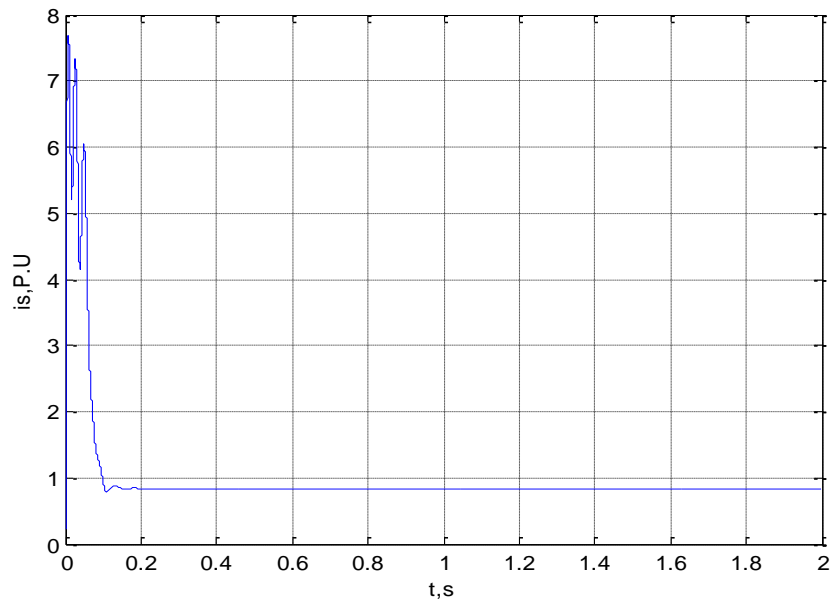
**Tableau (III.5)** : Paramètre du démarrage fréquentiel

### III.2 .6-Démarrage statorique :

Les réponses des valeurs instantanées transitoires de la vitesse  $W$ , du courant  $i_s$ , du couple électromagnétique en fonction du temps lors du démarrage fréquentiel sont représentées par les figures III.17, III.18, III.19 , III.20.

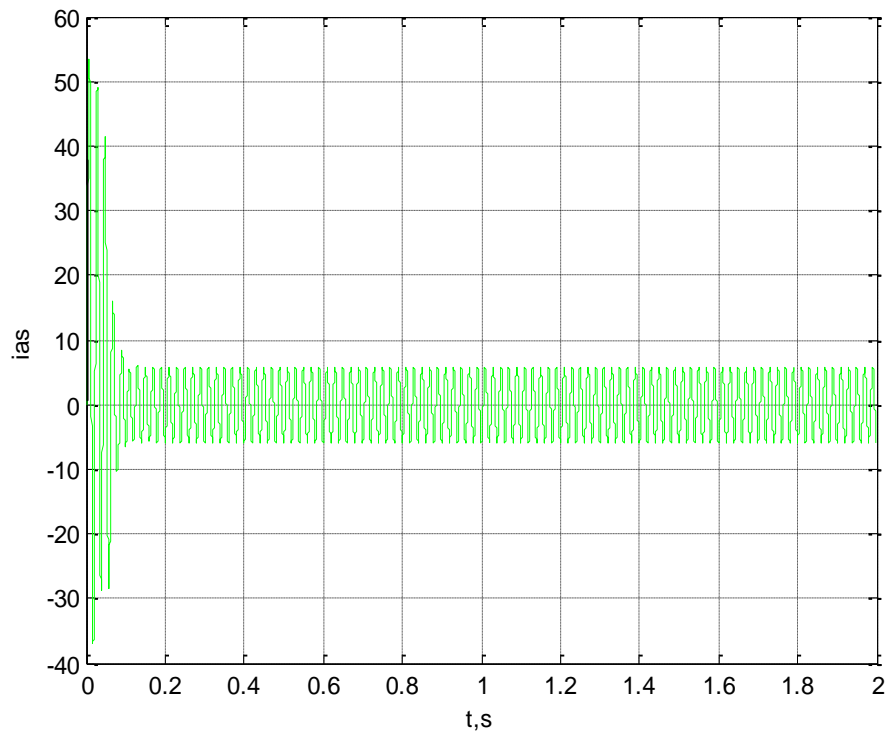


**Figure.(III.21):** Variations de la vitesse angulaire  $W$ , la tension  $V$  et la fréquence  $f$  en fonction du temps pour un démarrage statorique d'une MAS.

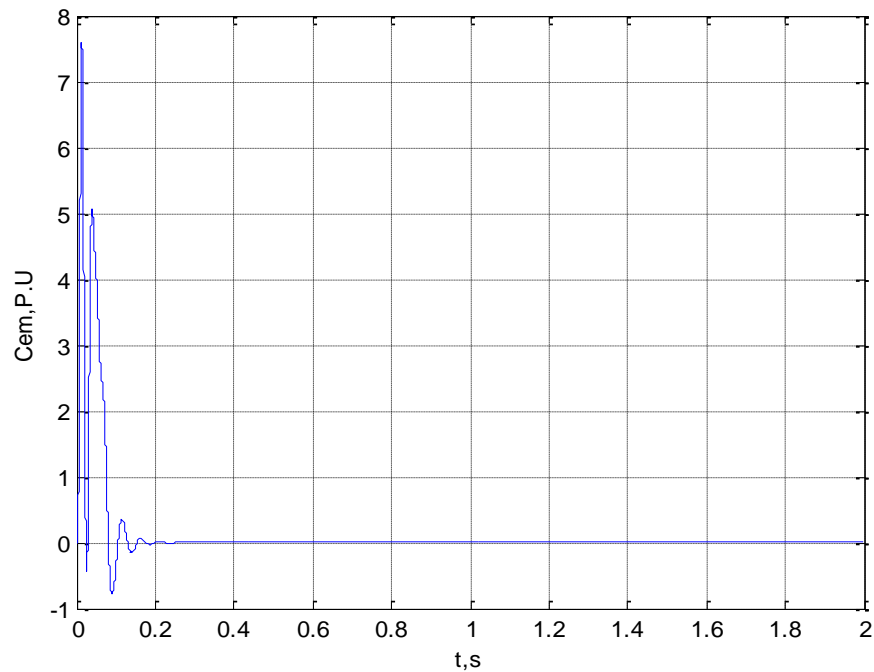


**Figure.(III.22) :** Variations du vecteur générale courant  $i_s$  en fonction du temps pour un démarrage statorique d'une MAS.





**Figure.(III.23)** : Variations du vecteur générale courant  $i_{as}$  en fonction du temps pour un démarrage statorique d'une MAS.



**Figure.(III.24)** : Variations du couple électromagnétique  $Cem$  en fonction du temps pour un démarrage statorique d'une MAS

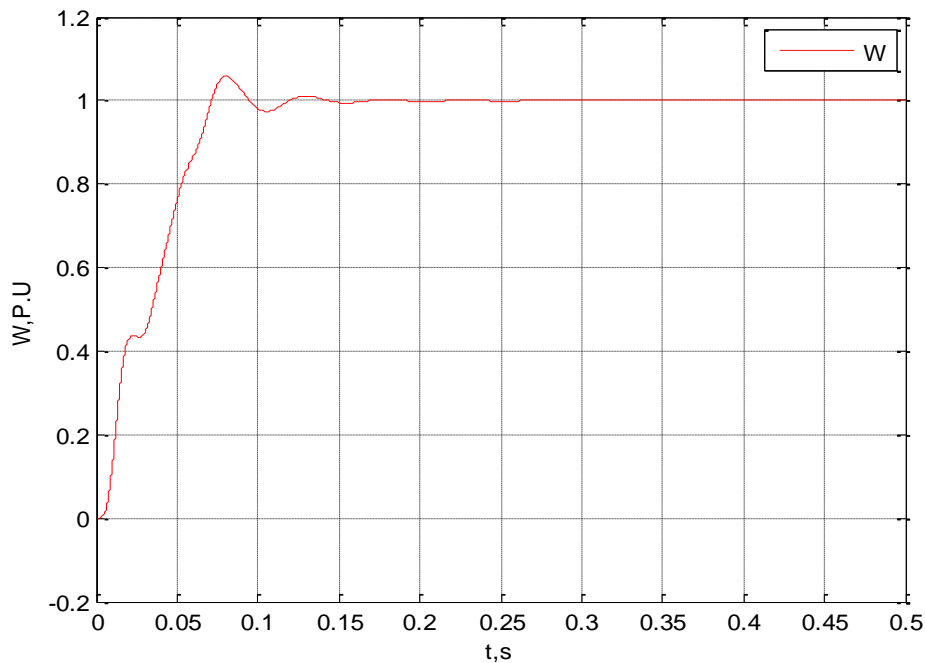
Le tableau suivant présente des résultats numériques pour un démarrage statorique.

	TD (s)	ID	I <sub>max</sub>	C <sub>m</sub> (pu)	C <sub>max</sub> (pu)
Démarrage statorique	0.2	53.4	53.4	6.51	7.6

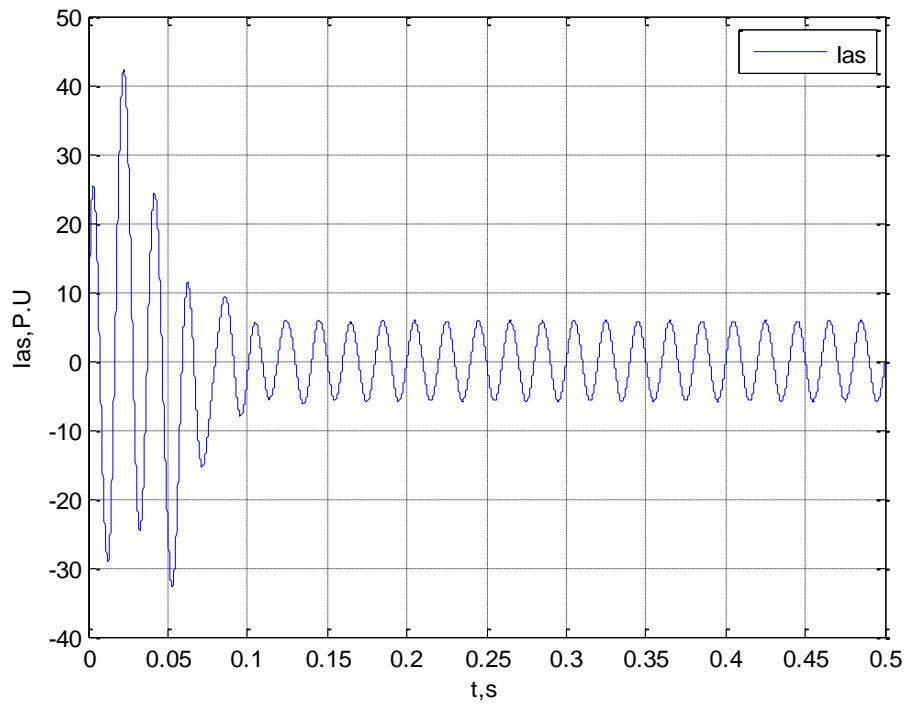
**Tableau (III.6) :** Paramètre du démarrage statorique

### III.2 .7-Démarrage rotorique :

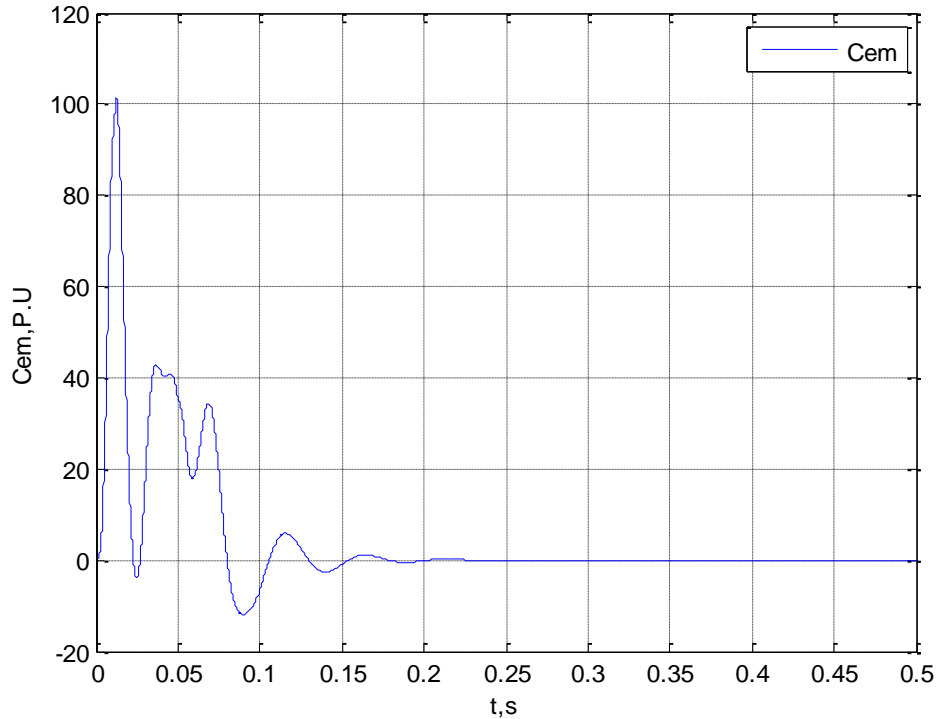
Les réponses des valeurs instantanées transitoires de la vitesse  $W$ , du courant  $i_s$ , du couple électromagnétique en fonction du temps lors du démarrage fréquentiel sont représentées par les figures III.25, III.26, III.27 .



**Figure.(III.25) :** Variations de la vitesse angulaire  $W$ , la tension  $V$  et la fréquence  $f$  en fonction du temps pour un démarrage rotorique d'une MAS.



**Figure.(III.26) :** Variations du vecteur générale courant  $i_{as}$  en fonction du temps pour un démarrage rotorique d'une MAS.



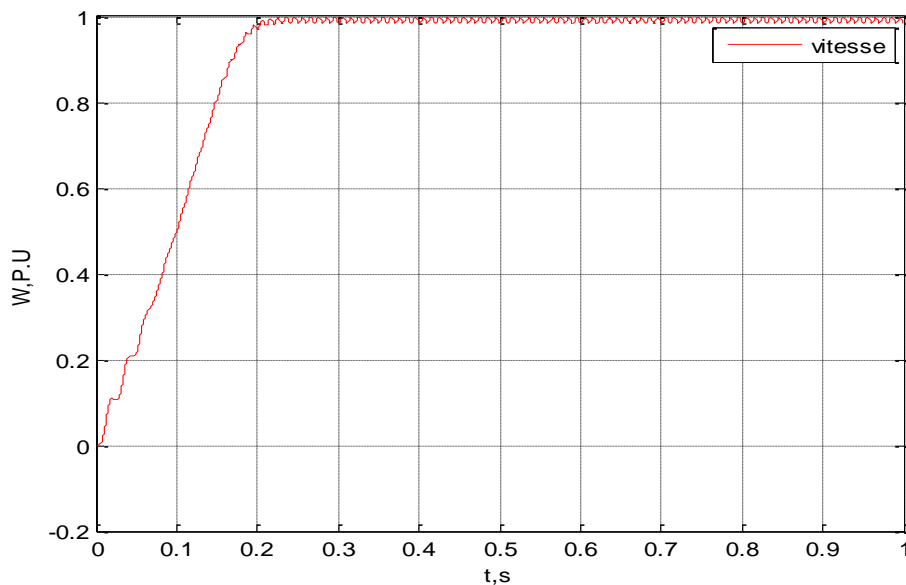
**Figure.(III.27) :** Variations du vecteur générale courant  $C_{em}$  en fonction du temps pour un démarrage rotorique d'une MAS.

Le tableau suivant présente des résultats numériques pour un démarrage rotorique.

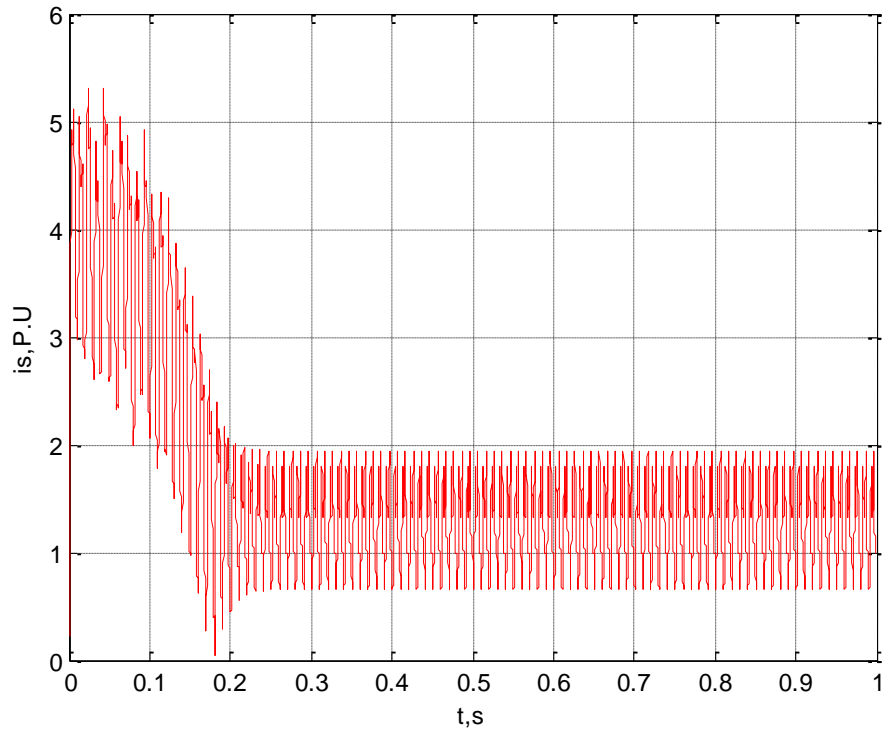
	<b>TD (s)</b>	<b>ID</b>	<b>I<sub>max</sub></b>	<b>C<sub>m</sub></b> <b>(pu)</b>	<b>C<sub>max</sub></b> <b>(pu)</b>
<b>Démarrage autotransformateur</b>	0.15	25	42	8.57	10

**Tableau (III.7) :** Paramètre du démarrage rotorique

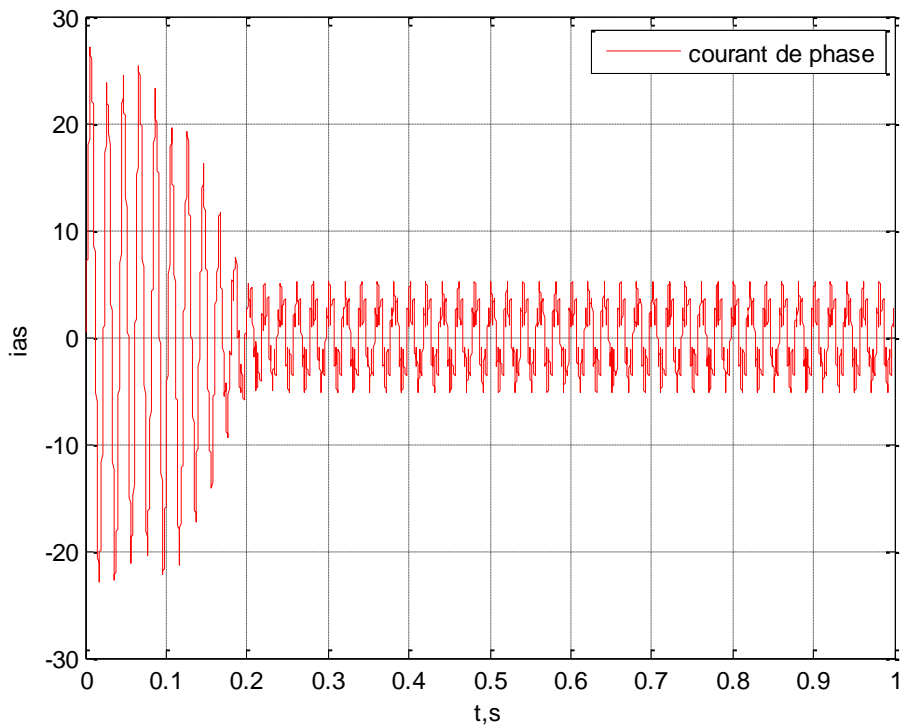
### III.3. Simulation du démarrage direct d'une machine avec convertisseur (Commande MLI) :



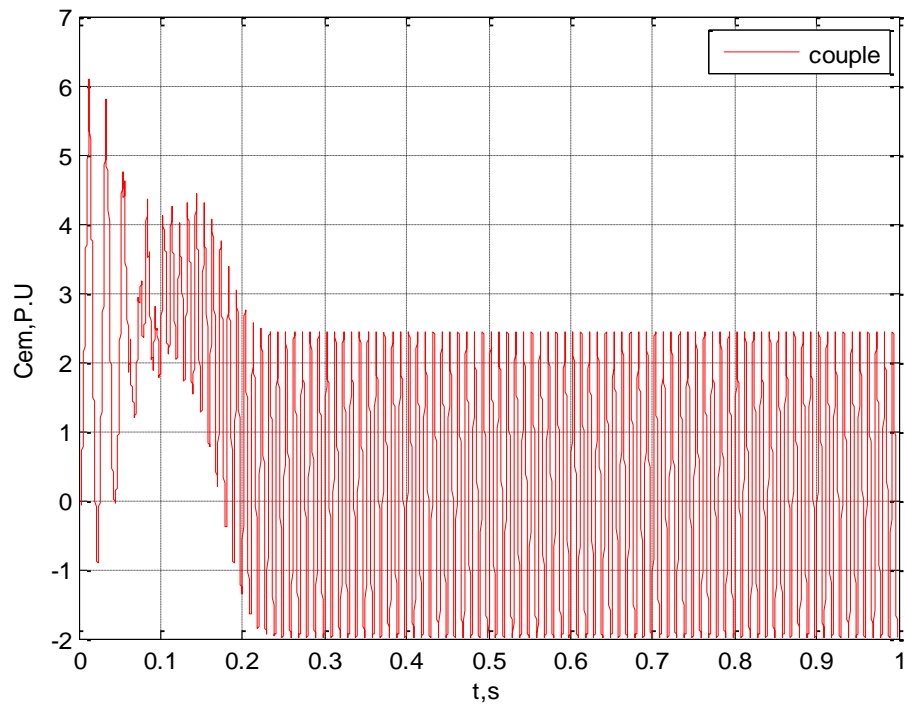
**Figure.(III.28) :** Variations de la vitesse angulaire  $W$  en fonction du temps pour un démarrage direct d'une MAS avec convertisseur.



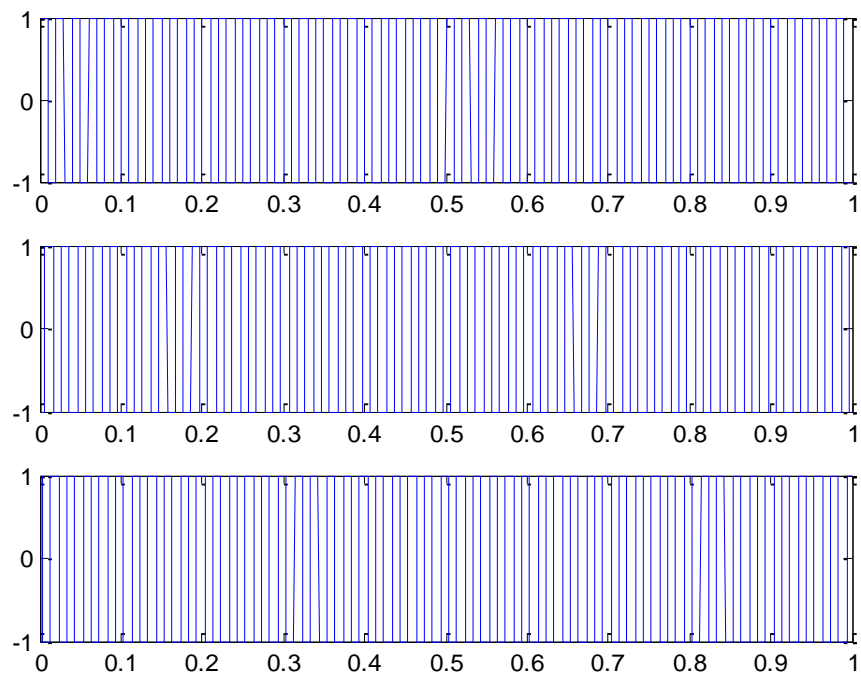
**Figure.(III-29)** : Variations du vecteur générale courant  $i_s$  en fonction du temps pour un démarrage direct d'une MAS avec convertisseur.



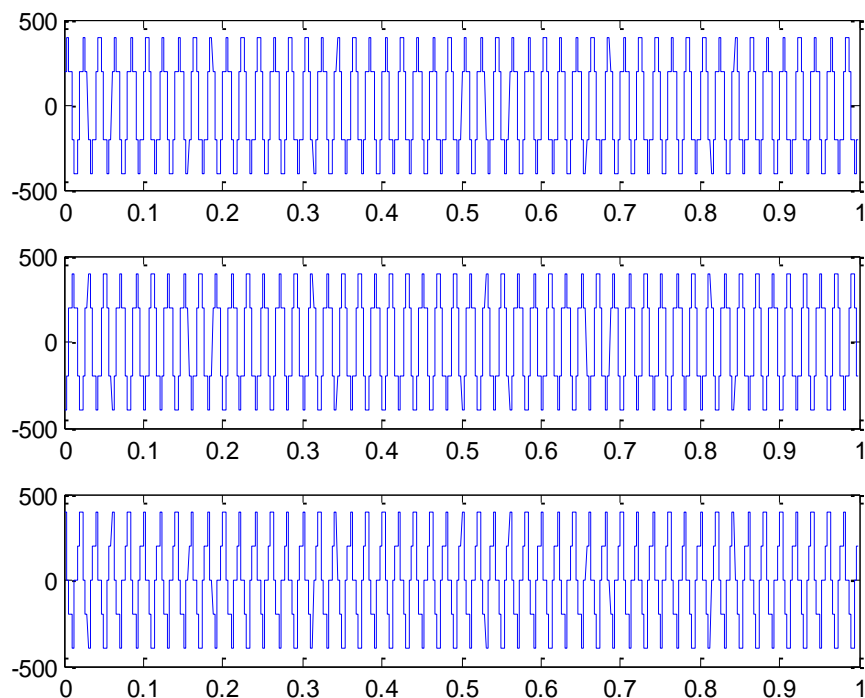
**Figure.(III-30)** : Variations du vecteur générale courant  $i_{as}$  en fonction du temps pour un démarrage direct d'une MAS avec convertisseur.



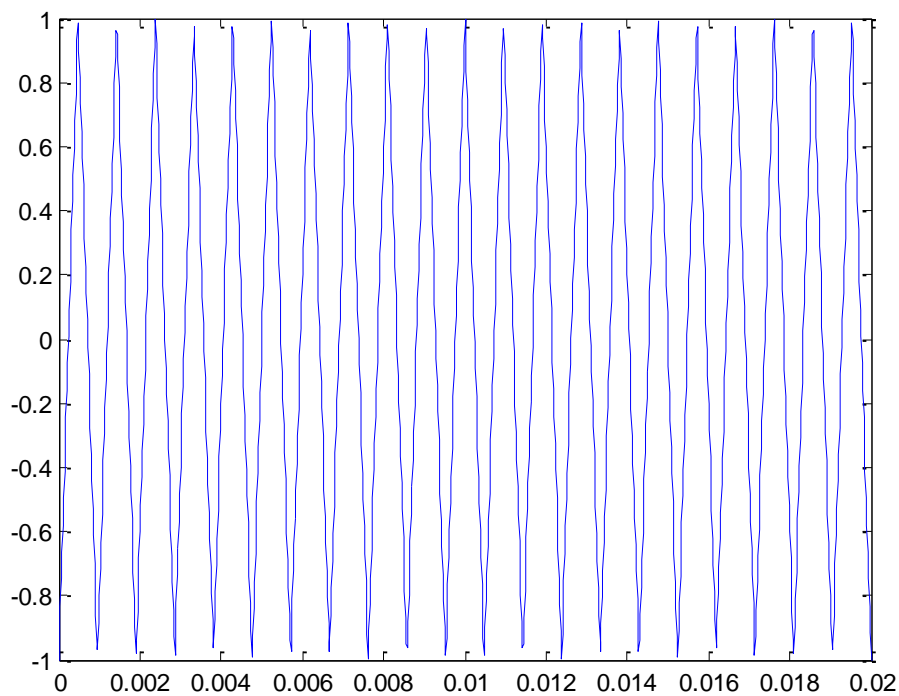
**Figure.(III-31) :** Variations du vecteur générale courant  $C_{em}$  en fonction du temps pour un démarrage direct d'une MAS avec convertisseur.



**Figure .(III.32) :** Etats des interrupteurs de l'onduleur



**Figure .(III.33) :**tensions de sortie de l'onduleur



**Figure .(III.34) :** forme d'onde de la porteuse généré par la technique MLI

### **III.4.Conclusion :**

1- A la mise sous tension d'un moteur asynchrone un appel de courant a lieu. On doit s'assurer que le rapport entre le courant de démarrage et celui du nominal (l'installation est prévue pour fonctionner sous ce courant) n'est point préjudiciable.

2- Il est impératif qu'à la mise sous tension 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 inférieur a fin que là-coup de couple n'endommage pas l'ensemble mécanique entraîné.

3- le choix d'une procédure parmi les démarrages cités dan ce chapitre est très dépendant des caractéristiques cités dans le paragraphe précédant, l'élaboration d'un logiciel simulateur permet un choix plus quantitative et réaliste.



## IV-1.Introduction :

Ce chapitre est dédié à la présentation de logiciel qui est la réalisation d'une interface qui a pour but de donner la main à l'utilisateur pour choisir le types de démarrage selon les caractéristiques de ça machine.

Ce logiciel a été réalisé sous environnement matlab, dans ce qui suit une petite présentation de ce logiciel.

## IV.2. Présentation du logiciel MATLAB :

Ce logiciel a été réalisé en utilisant MATLAB version 7.8 (R2009a), sous environnement Windows XP.

Le logiciel permet, de manière interactive :

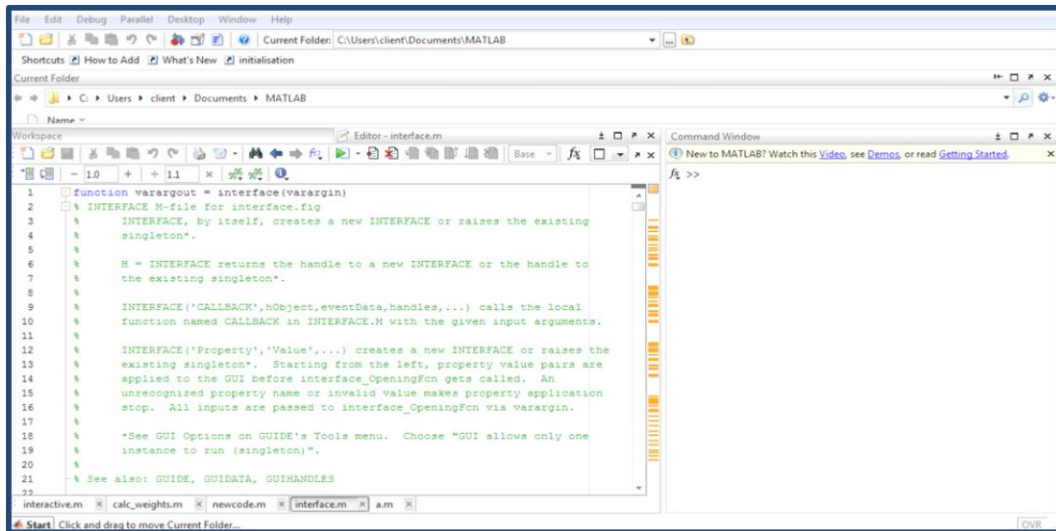
- de faire des calculs matriciels ;
- d'analyser les données ;
- de visualiser les résultats en 2D et 3D.

Langage de programmation :

- **Toolbox** : ensemble des fonctions (fichier .M) développées pour des domaines d'application spécifique.
- **Simulink** : extension graphique interactive de MATLAB.

Fonctionnement :

- **Mode interactif** : les instructions sont exécutées au fur et à mesure qu'elles sont entrées par l'utilisateur.
- **Mode de programmation** : MATLAB exécute, ligne par ligne, les instructions d'un fichier .M
- **Type des variables** : matrices.

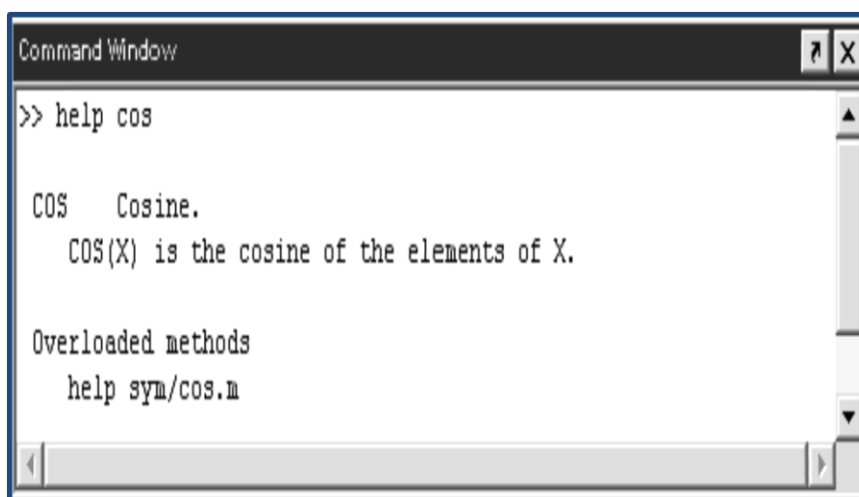


**Figure.(IV.1) :** Logiciel MATLAB

- **Espace de travail dans MATLAB**

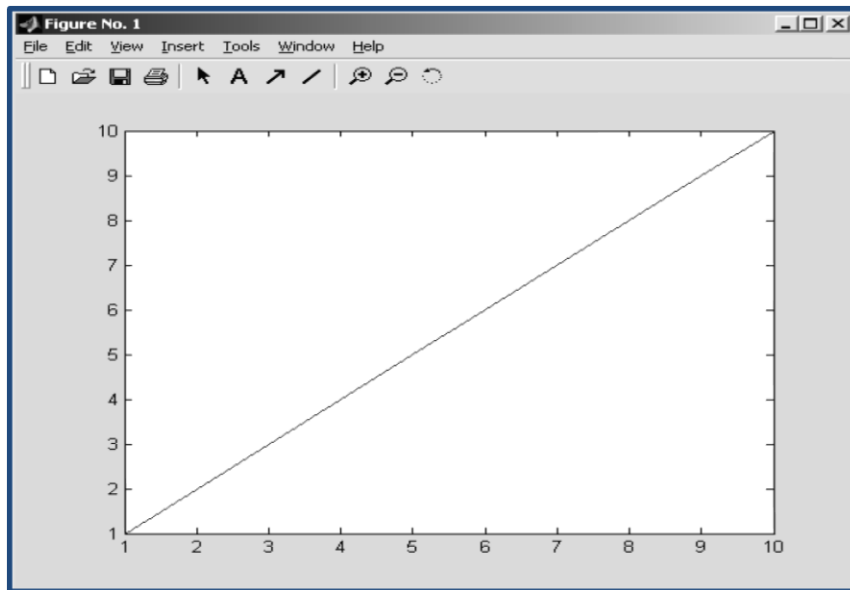
MATLAB affiche plusieurs fenêtres sur l'écran. Les trois types de fenêtres les plus importants sont:

- **Command Windows** : où toutes les commandes sont entrées.



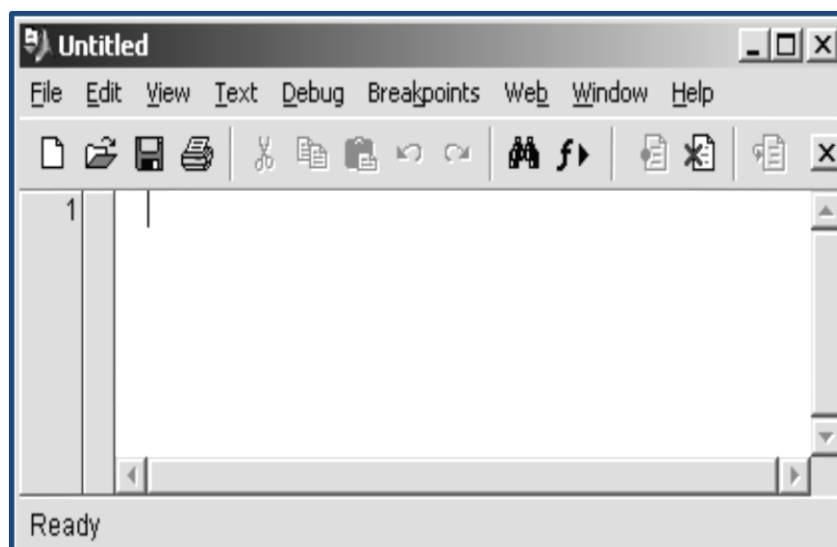
**Figure.(IV- 2):** Command Windows

- **Figure Windows** : dans lesquelles des figures et des graphiques sont dessinés.



**Figure.(IV-3)** : Figure Windows

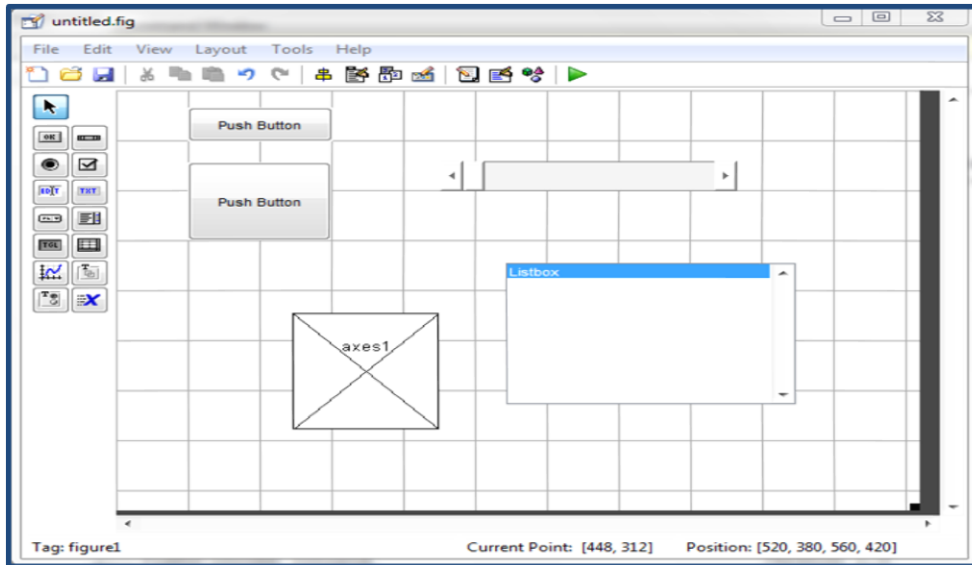
- **Edit Windows** : où l'utilisateur peut modifier ou créer des programmes MATLAB ("M-files").



**Figure.(IV-4)** : Edit Windows

- **Présentation du GUIDE**

Le GUIDE (Graphical User Interface Design Editor) est un outil graphique sous MATLAB qui regroupe tout ce dont le programmeur a besoin pour créer une interface graphique de façon intuitive.



**Figure.(IV-5) :** Guide du MATLAB

### IV.3.interface graphique :

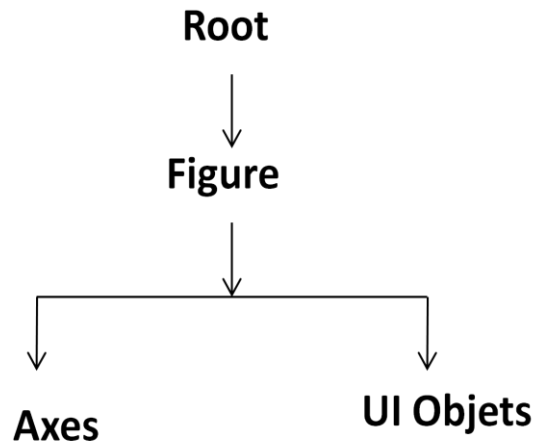
#### IV.3.1.généralité :

Les IHM (Interfaces Homme Machine), sont appelées GUI (Graphical User Interfaces) dans MATLAB. Elles permettent à l'utilisateur, grâce à des objets graphiques (boutons, menus, cases à cocher, ...) d'interagir avec un programme informatique.

#### IV.3.2.les objets graphiques et leurs fonctionnements :

##### -Les objets graphiques :

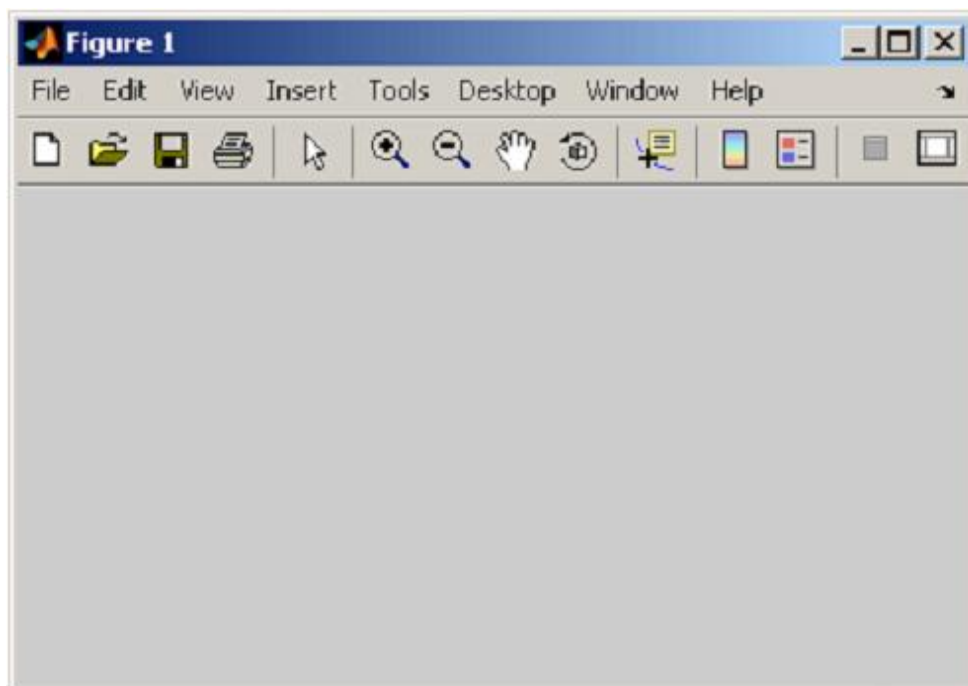
Sous Matlab, les objets graphiques sont disposés selon une hiérarchie pyramidale parent-enfant :



**Figure.(IV-6) :** Hiérarchie des objets graphiques

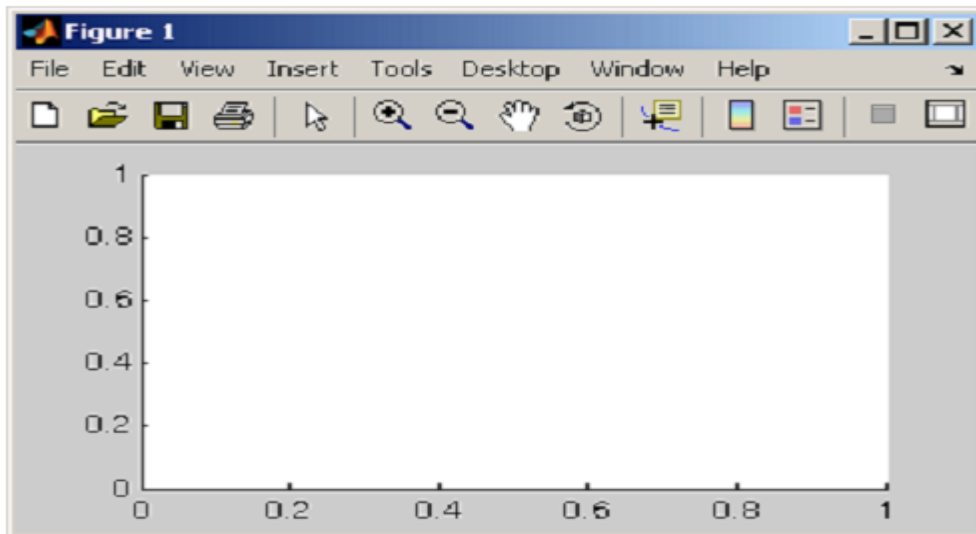
**Root :** c'est un objet invisible .L'utilisateur n'interagit que très rarement avec cet objet.

**Figure :** c'est le conteneur visible où sont disposés tous les autres objets. Plusieurs objets Figure peuvent être ouverts simultanément et peuvent éventuellement communiquer entre eux .



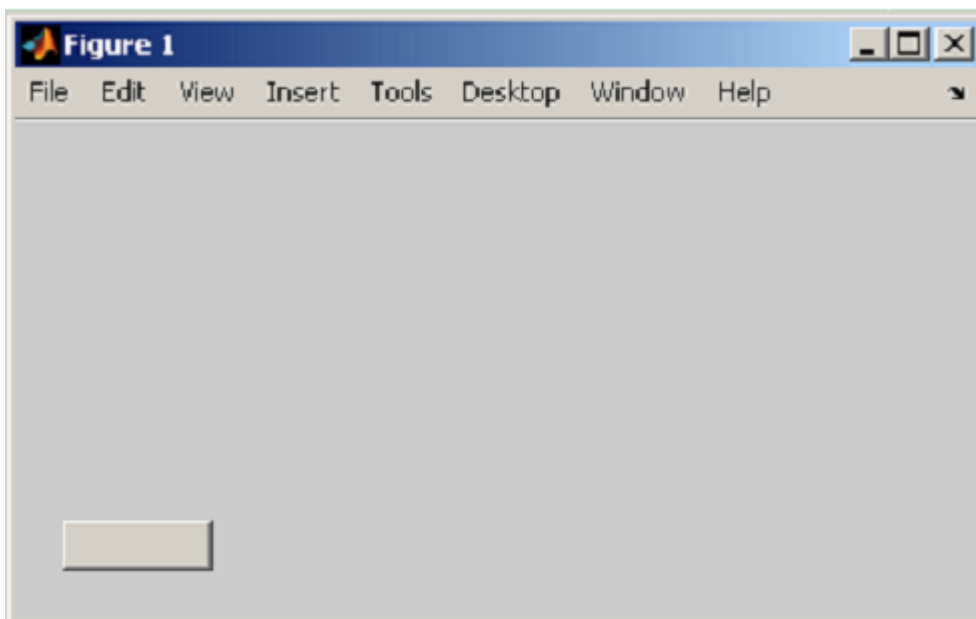
**Figure .(IV-7) :** Exemple de figure

**Axes** : ce sont les zones de traçage des graphiques (2D ou 3D), ils contiennent tous les objets représentant des résultats mathématiques (courbes, surfaces, images, maillages, etc.).



**Figure.(IV-8)** : Exemple de figure avec zone de traçage

**Uobject** :(User Interface object ) ce sont des boutons, des menus, des cases à cocher , Ces objets permettent à l'utilisateur d'interagir dynamiquement à la souris avec le GUI.



**Figure.(IV-9)** : Exemple de figure avec bouton de commande

**-Les propriétés des objets graphiques :**

Chaque objet graphique possède des propriétés (position, couleur, action, etc.) qui sont définies à sa création et qui peuvent être modifiées dynamiquement au cours du fonctionnement du GUI. Ces propriétés peuvent être récupérées et modifiées en utilisant l'identifiant de l'objet et les fonctions GET et SET.

**IV.4. Présentation de l'interface :**

Il est nécessaire de mettre à la disposition de l'utilisateur une interface pratique, permettant de choisir un démarrage parmi une liste de démarrages de la machine asynchrone, ainsi que ses caractéristiques décrite dans le chapitre précédent, simplifiant l'interaction entre l'utilisateur et le système.

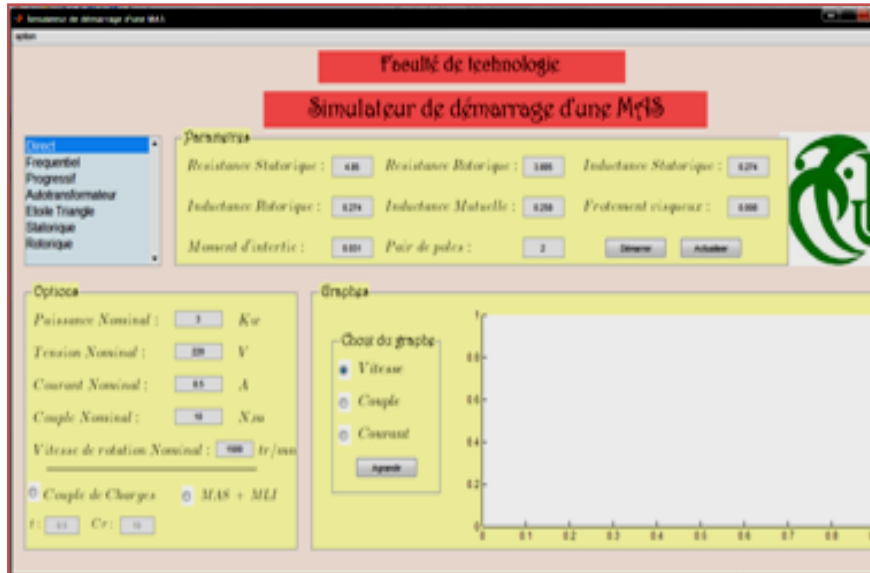
Nous portons à l'attention de l'utilisateur que l'interface peut être faite de deux manière soit par le guide dans la fenêtre command Window soit par programmation sur fichier ce qui est le cas dans cette étude, cette interface ne peut être exploité que si :

- La résolution d'écran recommandé est de 1366x768.
- La gamme de version MATLAB va de la version 2007 jusqu'à 2011.
- Toutes les fonctions figures et programmes sont disponible.

Nous allons donc présenter cette interface. Ensuite, nous présenterons la visualisation des graphs, pour donner un aperçu des résultats.

- **La fenêtre principale du logiciel**

La fenêtre de présentation de notre travail est donnée par la Fig.(IV-6) :



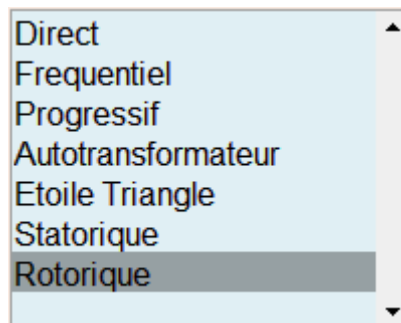
**Figure.(IV-10)** : Fenêtre principale du logiciel

L'interface graphique présentée ici est composée de :

- **Palette des paramètres :**

Cette palette contient essentiellement :

1. **the uicontrol** : qui sert à crée des objets graphiques qu'on peut contrôler en leur assignant :
  - des propriétés : dans le cas de notre interface c'est le choix d'un démarrage a partir d'une liste.



**Figure.(IV-11)** : liste des démarrages

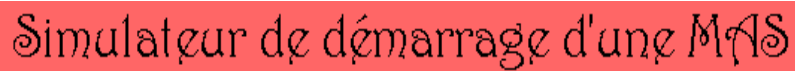


- des valeurs : ou l'utilisateur peut écrire les valeurs des paramètres de sa machine selon le domaine d'utilisation.



**Figure. (IV-12) :** Valeur des paramètres

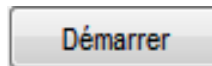
- des titres : ou on peut titrer chaque objet.



**Figure.(IV-13) :** Titre du fenêtre

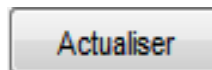
**2.The uipanel :** qui est une zone qui permet de regrouper l'ensemble de bouton , ,cases à coché , axes et menu .

- ❖ Dans cette interface on a utilisé trois boutons représenté dans les figures suivantes :



**Figure.(IV-14) :** Bouton démarrer

-A travers un clic de la souris sur ce bouton l'utilisateur peut démarrer l'exécution .



**Figure.(IV-15) :** bouton actualiser

-Ce bouton permet d'actualiser la fenêtre pour un nouveau choix ou un changement.

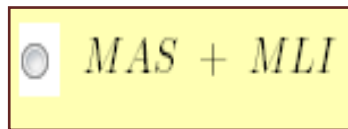


**Figure.(IV-16)** : bouton agrandir

-Une fois que la figure est affichée ce bouton permet à l'utilisateur d'agrandir sa figure .

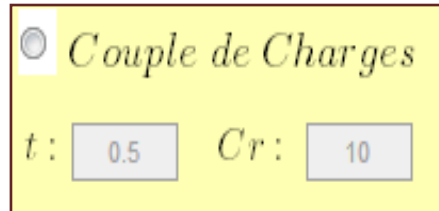
❖ On a utilisé des cases à coché pour donner à l'utilisateur la possibilité :

-D'associer la machine à un convertisseur :



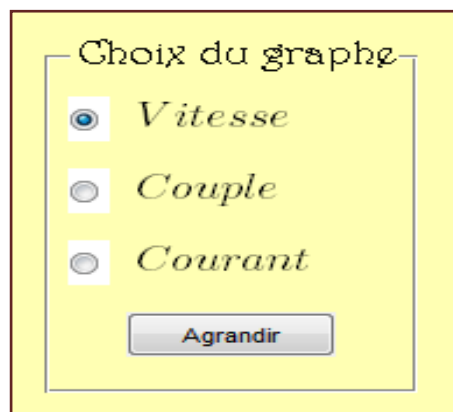
**Figure.(IV-17)** : association convertisseur

-L'application d'un couple de charge :



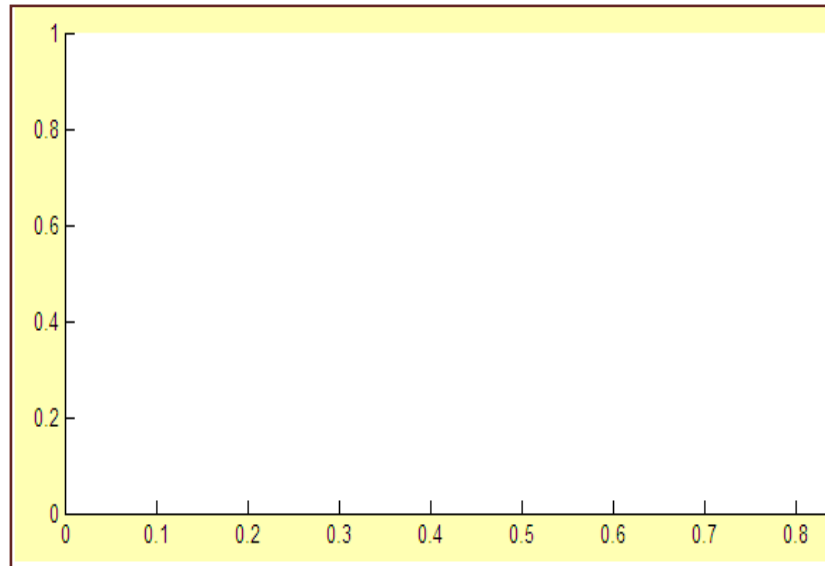
**Figure.(IV-18)** : couple des charges

-Choisir le graph à afficher :



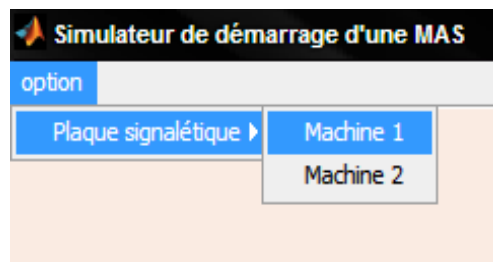
**Figure.(IV-19)** : choix du graph

- ❖ On a utilisé aussi des axes qui sont des zones de traçage des sorties de la machine asynchrone (Couple,vitesse et courant)ou l'utilisateur peut visualiser ses graphes .



**Figure.(IV-20) :** les axes

- ❖ On a utilisé menu :ce menu permet d'afficher les modèles de la machine à analyser.



**Figure.(IV-21) :** menu option

### IV.5-présentation des résultants après exécution:

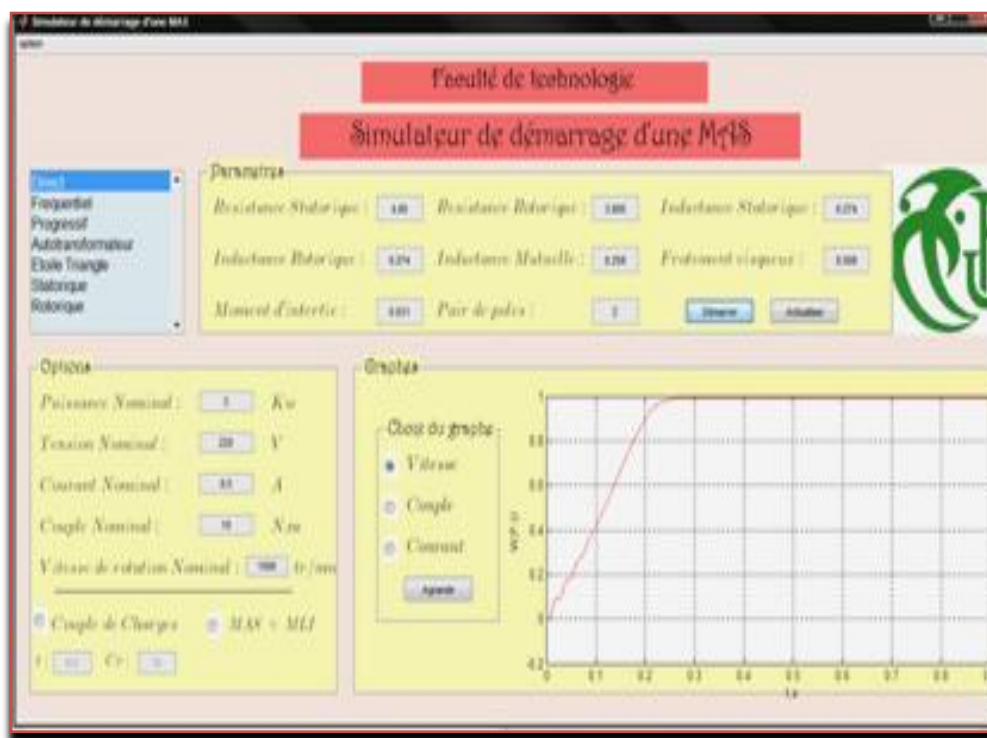


Figure.(IV-22) : démarrage rotorique par interface

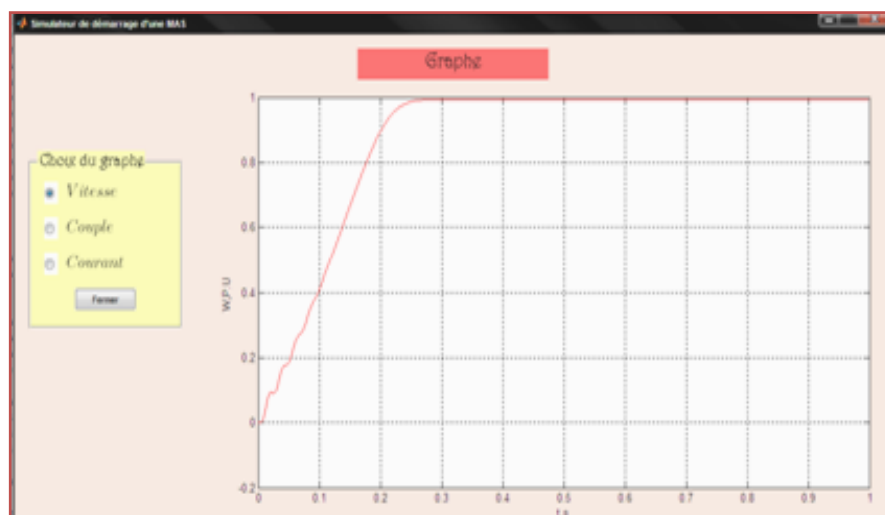


Figure .(IV-23) : fenêtre du graph de vitesse par appui sur le bouton agrandir

## **IV.6.Conclusion :**

Ce chapitre a été dédié à l'élaboration d'un logiciel simulateur de démarrage d'une machine asynchrone triphasée grâce aux interfaces graphiques de MATLAB par programmation qui ont permis une nouvelle manière d'exploitation des programmes informatiques .

Cette interface offre à l'utilisateur la possibilité d'introduire les paramètres de sa machine, de choisir la procédure de démarrage adéquate à son application, d'introduire un couple de charge à un instant quelconque, d'associer la machine à un convertisseur et de choisir les sorties à interpréter.

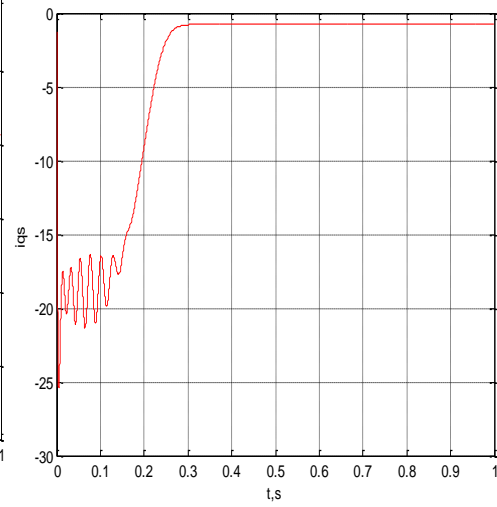
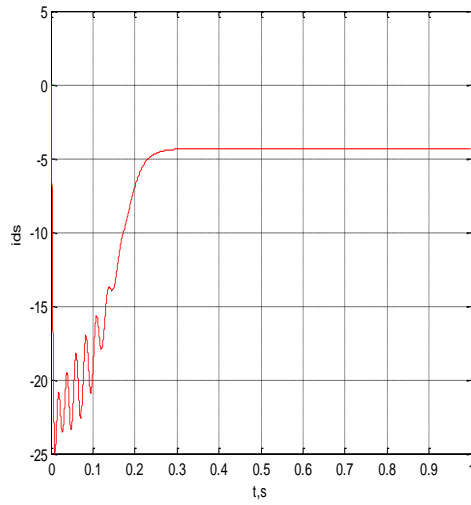
- [1] Francois C.  
« Génie électrique cours complet illustré » Paris : ellepses 2004-457p
- [2] Abudura S  
«l'équipement et la constriction électrique des machines»  
Edition techniques kiev. Journal n° 52.1999
- [3] Prétov G.N.  
« Les machines électriques », Moscou :Gel , 1963 , 416p
- [4] Sipalov. G.A.  
« les machines électriques navales d'automatisme » Moscou, école supérieur,  
1987,247p
- [5] Technique de l'ingénieur , traité génie électrique , dessonde-H.  
« moteurs asynchrone » , D 34906-1996.
- [6] GOLOUBEV V.K.  
« les systèmes de commandes modernes des complexes thermo  
énergétiques navals»Moscou , mortekhinformareclama , 1986 , 36P.
- [7] Vassiliev , V.N , Nikealove .S.A.  
« le démarrage d'un moteur asynchrone puissant » , transport maritime ,  
exploitation techniques de la flot N° 11 , 1981 ,Moscou
- [8] J.Y.Blanc  
« Contrôle, commande et protection des moteurs HT »  
CT 165 édition : Schneider électrique décembre 1992,28p
- [9] Jean Chatelain.  
« Machine électrique ».volume X, lausanne :presses polytechniques romandes  
1989. 626.P
- [10] guide technique  
« Démarrage des moteurs asynchrones »  
guide technique à l'usage des professeurs d'électrotechnique de l'académie de  
Poitiers

- [11] Sonieva.K.N.  
« Les méthodes de démarrages du moteurs asynchrones à rotor court-circuité »  
Moscou :vintixe N°10,24.
- [12] Boye .P Biancciotta .A  
« Le schéma en élechtrotéchnique »1990 ,159p
- [13] Sonieva.K.N  
« Les méthodes de démarrages du moteurs asynchrones à rotor court-circuité »  
Moscou :vintixe N°10,24.
- [14] Jean Chatelain  
« Machine électrique ».volume X -1989. 628.P
- [15] Bedahman.B  
« L'analyse des méthodes de démarrage du moteur asynchrone d'un système  
propulseur alimenté par une génératrice  
autonome », odessa : TEMA OGMY1999, N°2.
- [16] Sheniev R.T  
« La commande fréquentielle optimal des actionneurs électriques asynchrone»  
Leningrad : Soudastraina, 1982,220P
- [17] Prétov G.N.  
« Les machines électriques », Moscou :Gel , 1963 , 416p
- [18] Vassiliev V.N. Sheshenco A.V. Bendahman.B.  
« Le démarrage commander par thyristor de moteur asynchrone naval »  
Odessa : OGMA 1999
- [19] [http://www.google.fr/#hl=fr&output=search&sclient=psy-ab&q=asg\\_4\\_demarrage\\_protection\\_moteurs&oq=asg\\_4\\_demarrage\\_protection\\_moteurs&aq=f&aqi=g-s1&aql=&gs\\_](http://www.google.fr/#hl=fr&output=search&sclient=psy-ab&q=asg_4_demarrage_protection_moteurs&oq=asg_4_demarrage_protection_moteurs&aq=f&aqi=g-s1&aql=&gs_)
- [20] <http://ebookbrowse.com/icg-wp002-fr-p-pdf-d65126735>
- [21] [http://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=Cours\\_modele\\_cmde\\_MAS&source=web&cd=1&ved=0CFUQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.clubeea.org%2Fdocuments%2Fmediatheque%2FCours\\_modele\\_cmde\\_MAS.pdf&ei=ro3bT9mMItGi-gb8\\_fGzCg&usg=AFQjCNGdXRaoQOgPvSqcMipjKvqwX-3svg](http://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=Cours_modele_cmde_MAS&source=web&cd=1&ved=0CFUQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.clubeea.org%2Fdocuments%2Fmediatheque%2FCours_modele_cmde_MAS.pdf&ei=ro3bT9mMItGi-gb8_fGzCg&usg=AFQjCNGdXRaoQOgPvSqcMipjKvqwX-3svg)

- [22] Baret P.  
« régime transitoire des machines tournantes électriques »,  
Paris EYROLLES, 1982 . 207P
- [23] Caron. JP. Hautier.JP.  
« Modélisation et commande de la machine asynchrone » Paris :  
édition TECHNIP 1995 .324p
- [24] Vagenov.A.I.  
« Les régimes transitoires des machines à courants alternatif » 1  
engrad :GET, 1980, 463p.
- [25] CAPILOV.A.I.  
« Modélisation mathématique des machines électriques »Moscou : école  
Supérieure, 1987,248p.
- [26] Baranov L.A Malinine V.V, coline V,P.  
« les convertisseurs analogiques numériques » , Moscou : radio moderne , 1980, 280P.
- [27] Baghli .L  
« Modélisation et commande de la machine asynchrone »  
IUFM de loraine-2003-2004.
- [28] CAPILOV.A.I  
« Modélisation mathématique des machines électriques »Moscou :  
upérieure, 1987,248p.

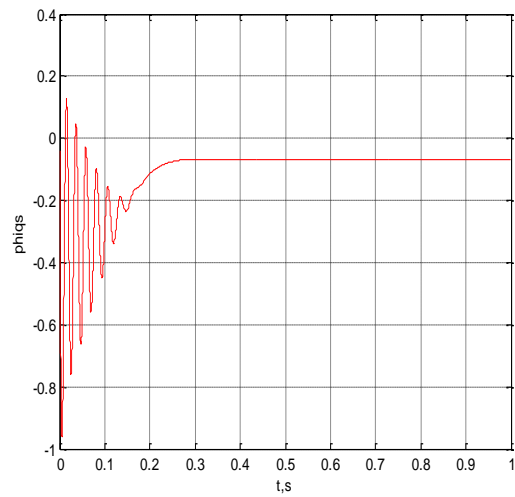
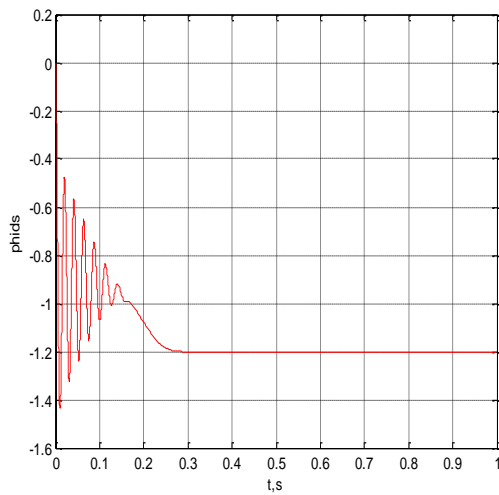


Simulation des autres paramètres de Démarrage directe :



Variation du courant du PARK de repère q

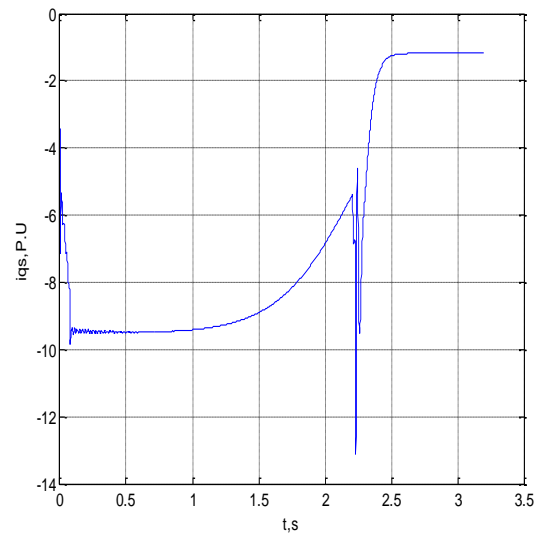
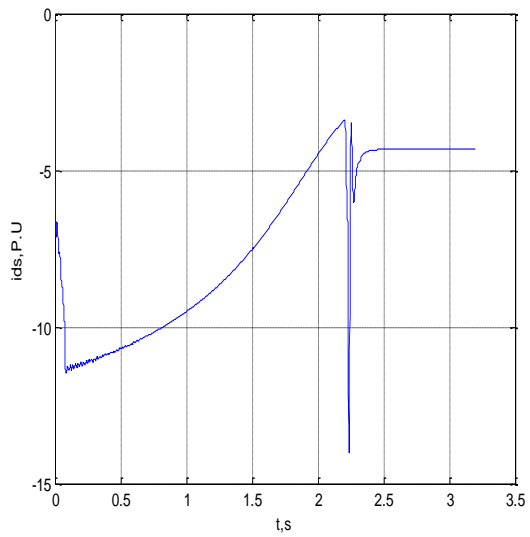
Variation du courant du PARK de repère q



Variation du flux du PARK de repère d

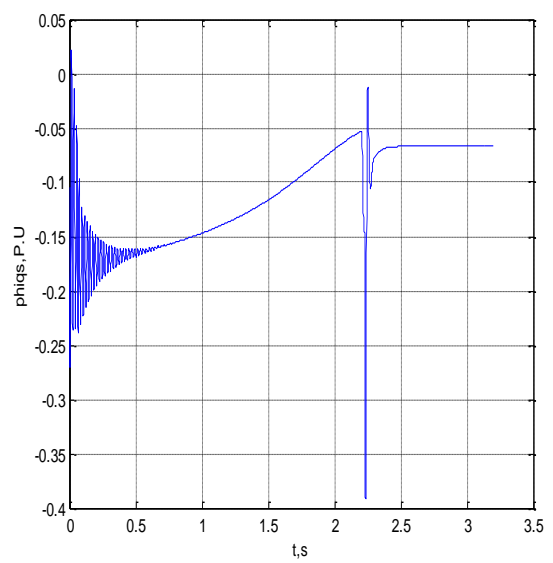
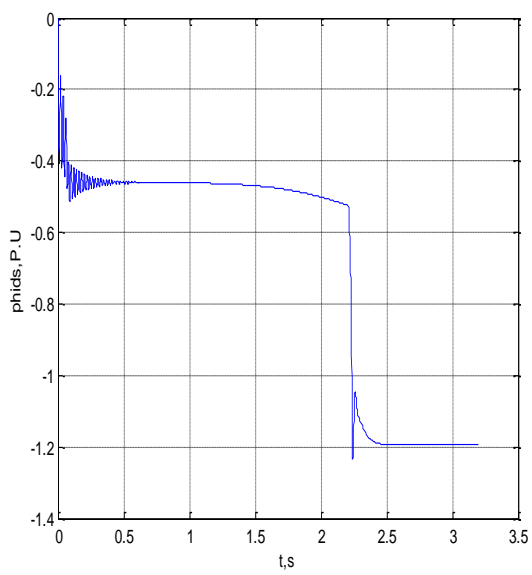
Variation du flux du PARK de repère q

Simulation des autres paramètres de Démarrage étoile triangle :



Variation du courant du PARK de repère d

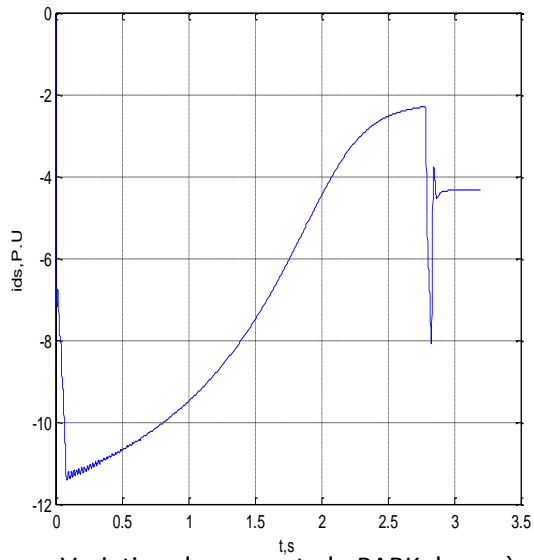
Variation du courant du PARK de repère q



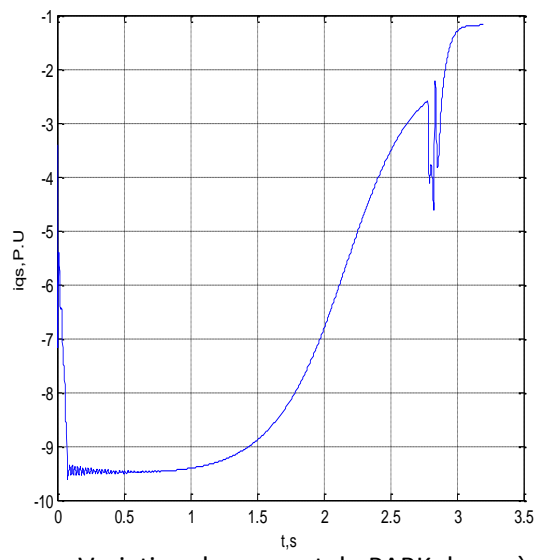
Variation du flux du PARK de repère d

Variation du flux du PARK de repère q

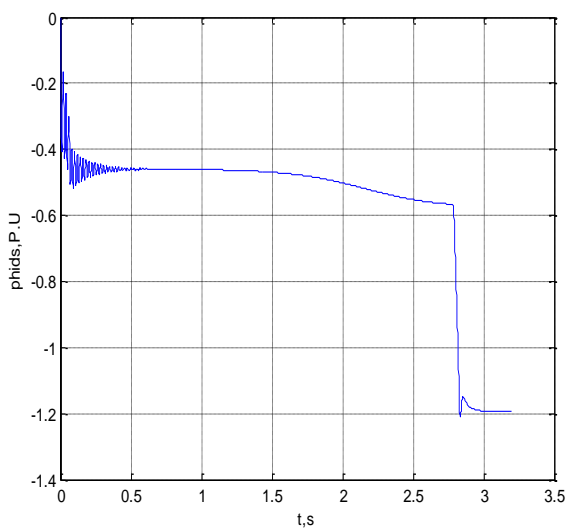
## Simulation des autres paramètres de Démarrage autotransformateur :.



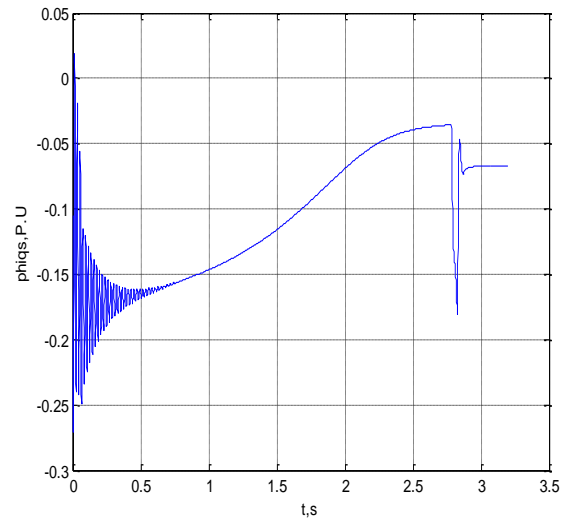
Variation du courant du PARK de repère d



Variation du courant du PARK de repère q

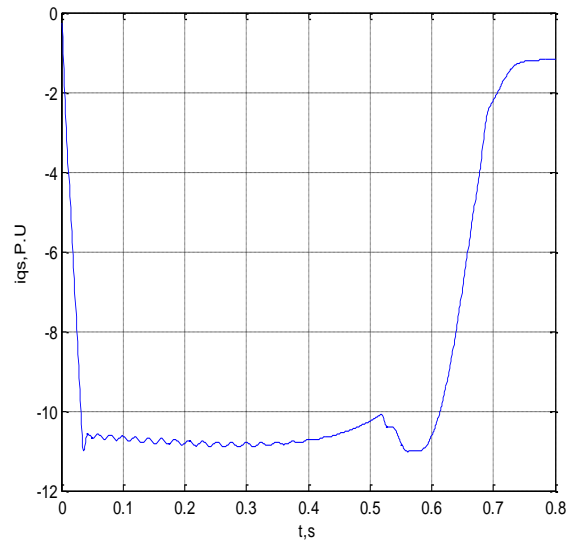
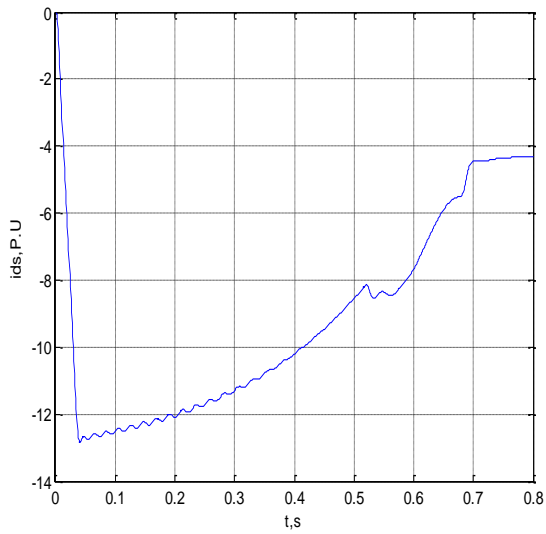


Variation du flux du PARK de repère d



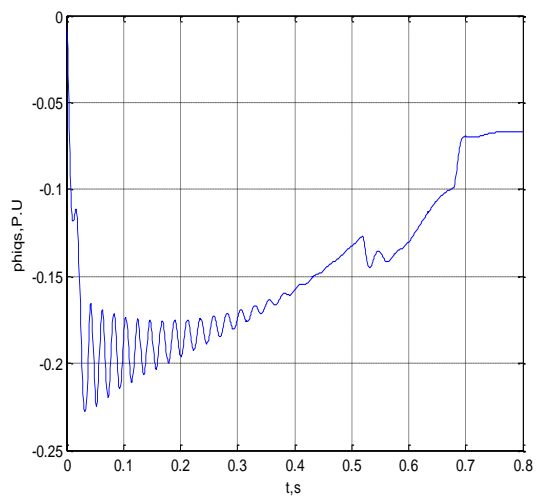
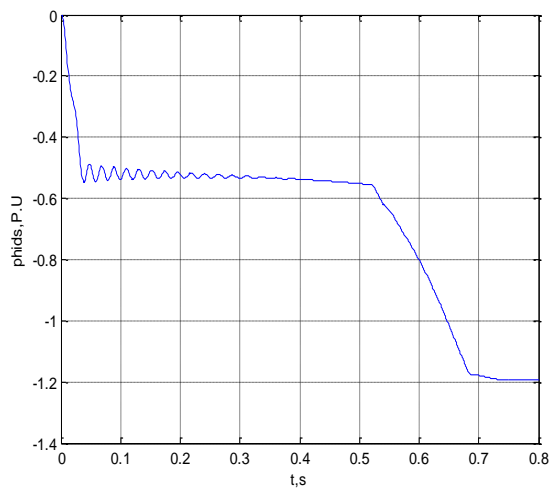
Variation du flux du PARK de repère q

Simulation des autres paramètres de Démarrage progressif :



Variation du courant du PARK de repère d

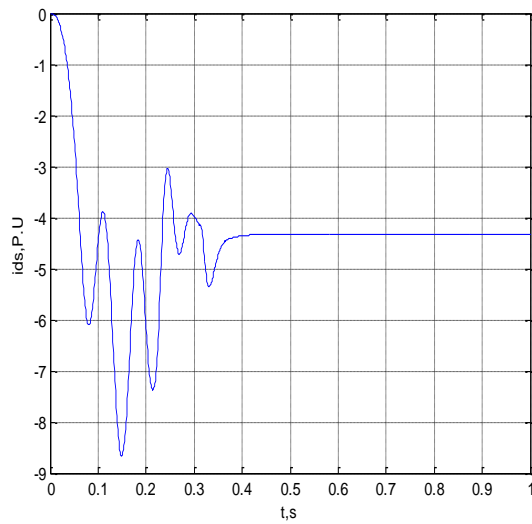
Variation du courant du PARK de repère q



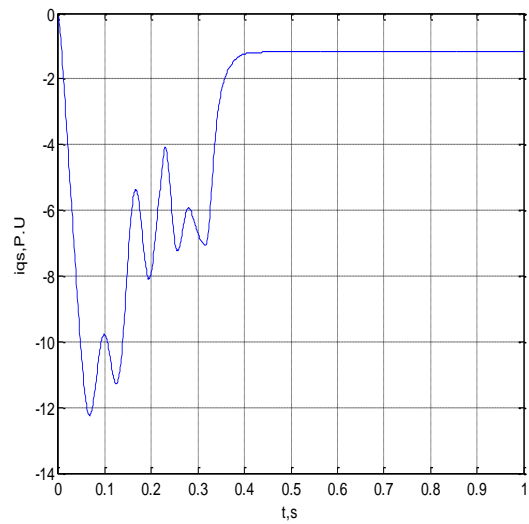
Variation du flux du PARK de repère d

Variation du flux du PARK de repère q

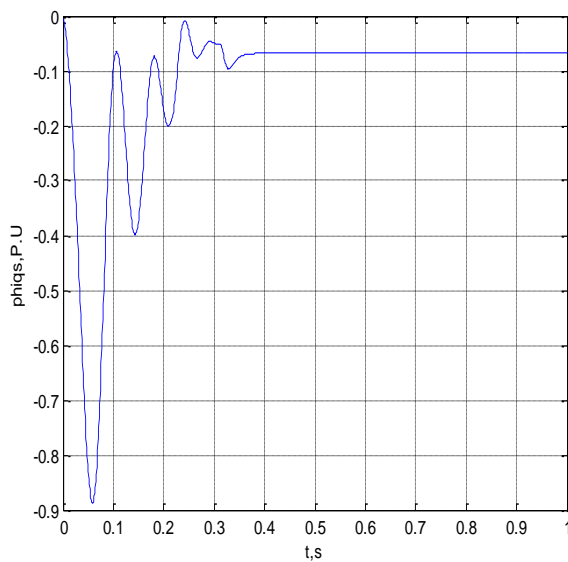
**Simulation des autres paramètres de Démarrage fréquentiel :**



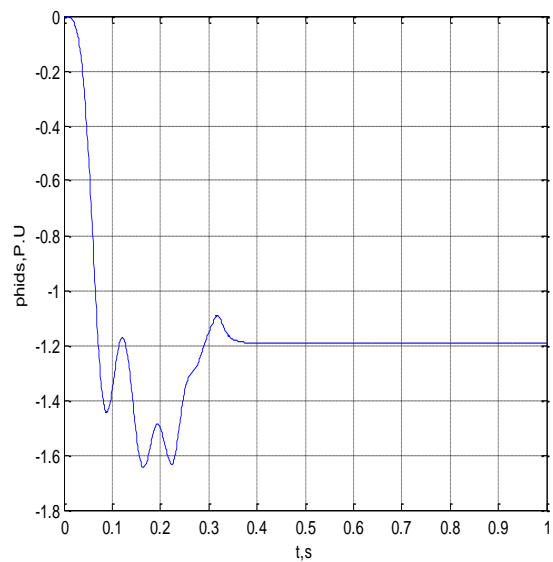
Variation du courant du PARK de repère d



Variation du courant du PARK de repère q

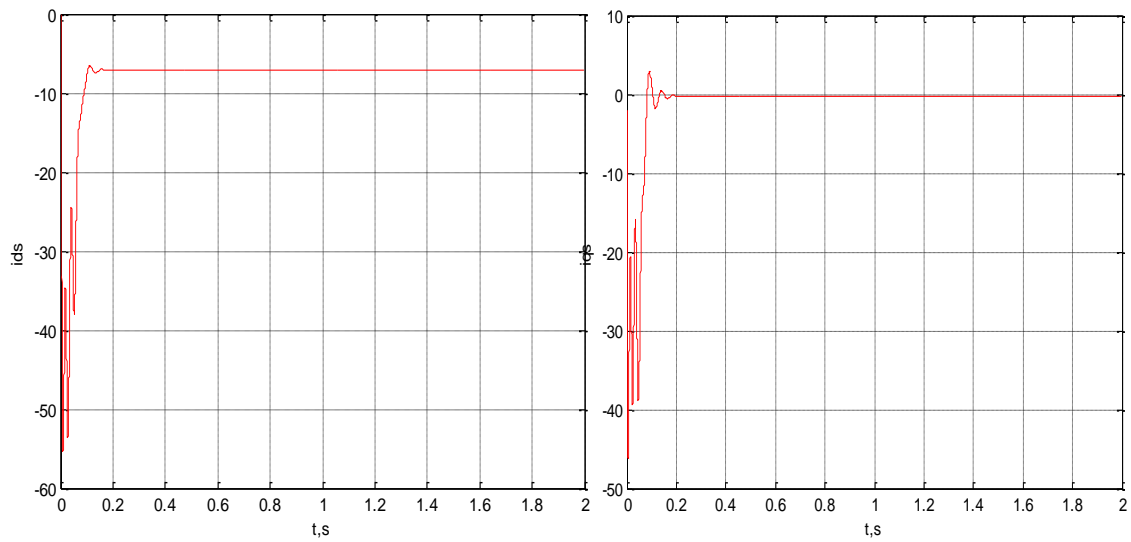


Variation du flux du PARK de repère q



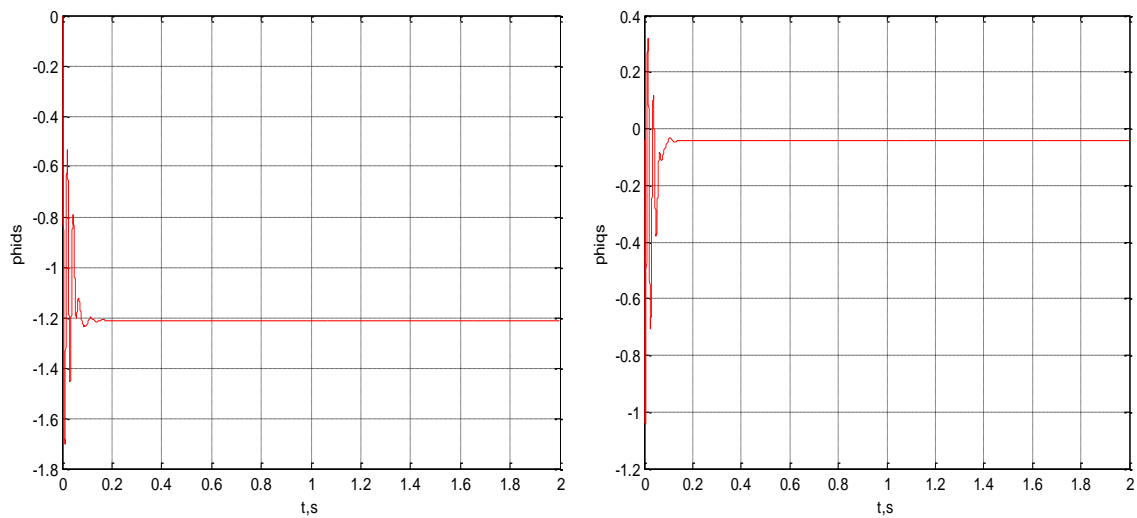
Variation du flux du PARK de repère d

## Simulation des autres paramètres de Démarrage statorique :



Variation du courant du PARK de repère d

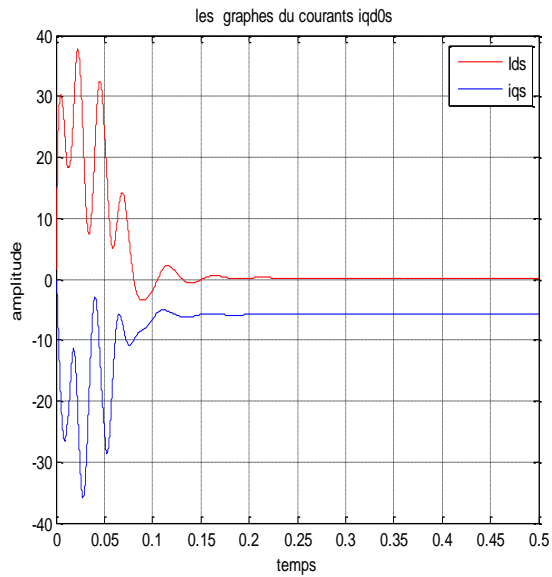
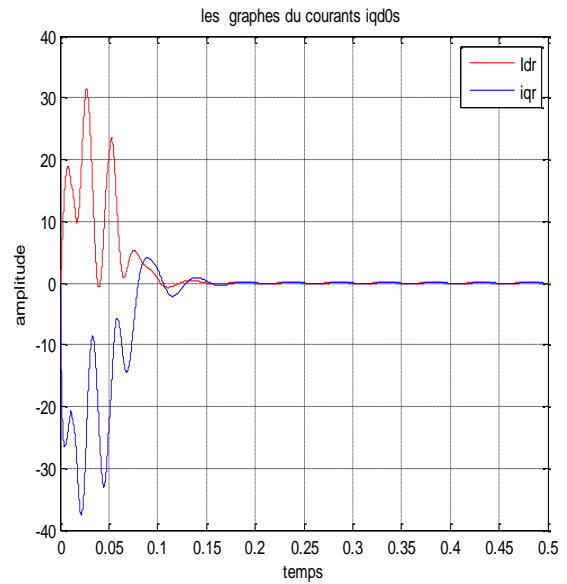
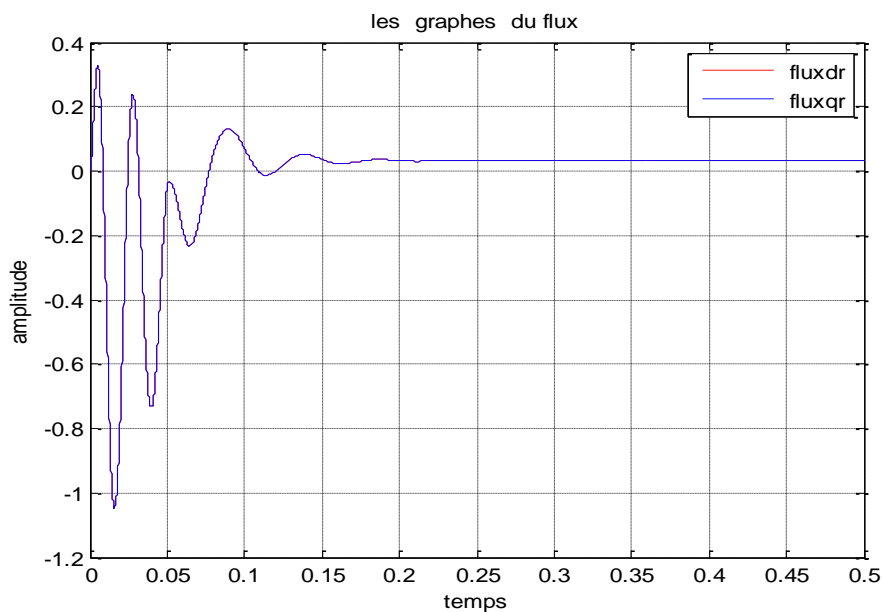
Variation du courant du PARK de repère q



Variation du flux du PARK de repère q

Variation du flux du PARK de repère d

## Simulation des autres paramètres de Démarrage rotorique :

Variation du courant statorique du PARK  
repère d-qVariation du courant rotorique du PARK de  
repère d-qVariation du flux rotorique du PARK  
repère d-q

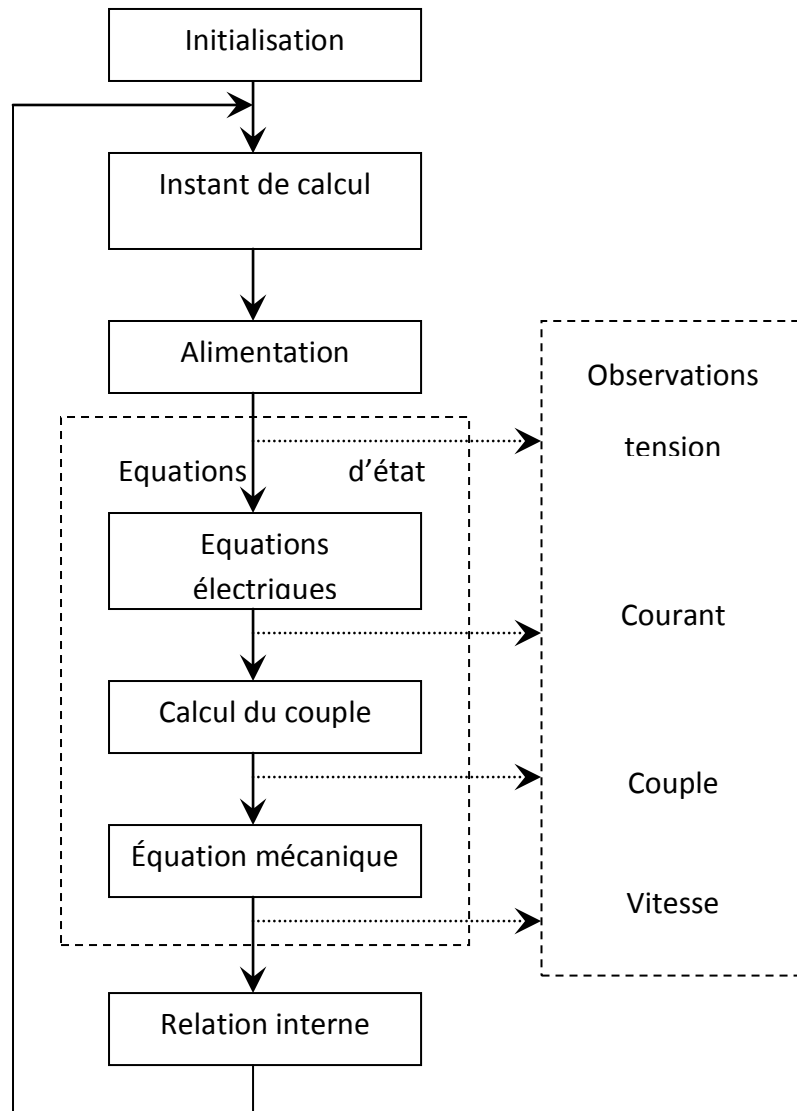


Fig.1. organigramme de la simulation du démarrage direct.



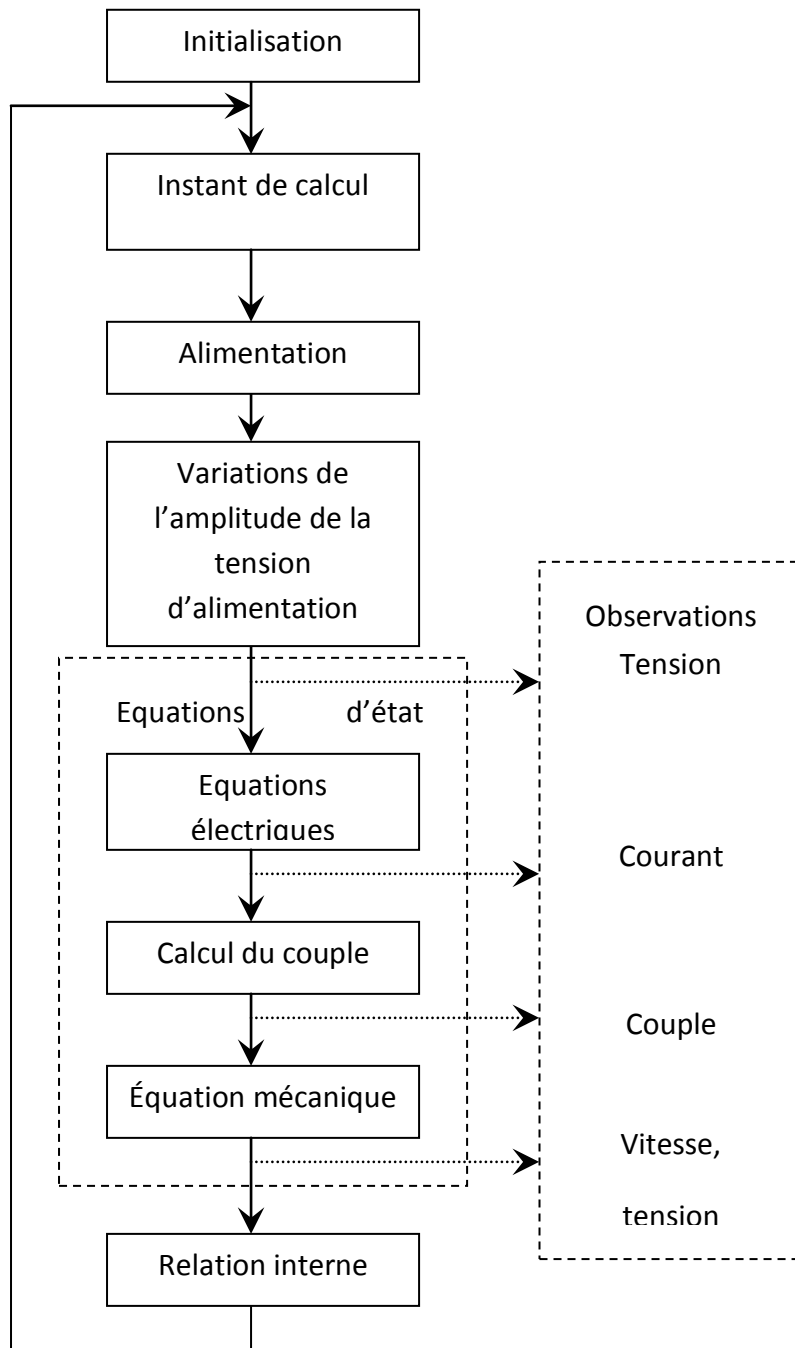


Fig. 2. Organigramme de la simulation des démarrages progressif

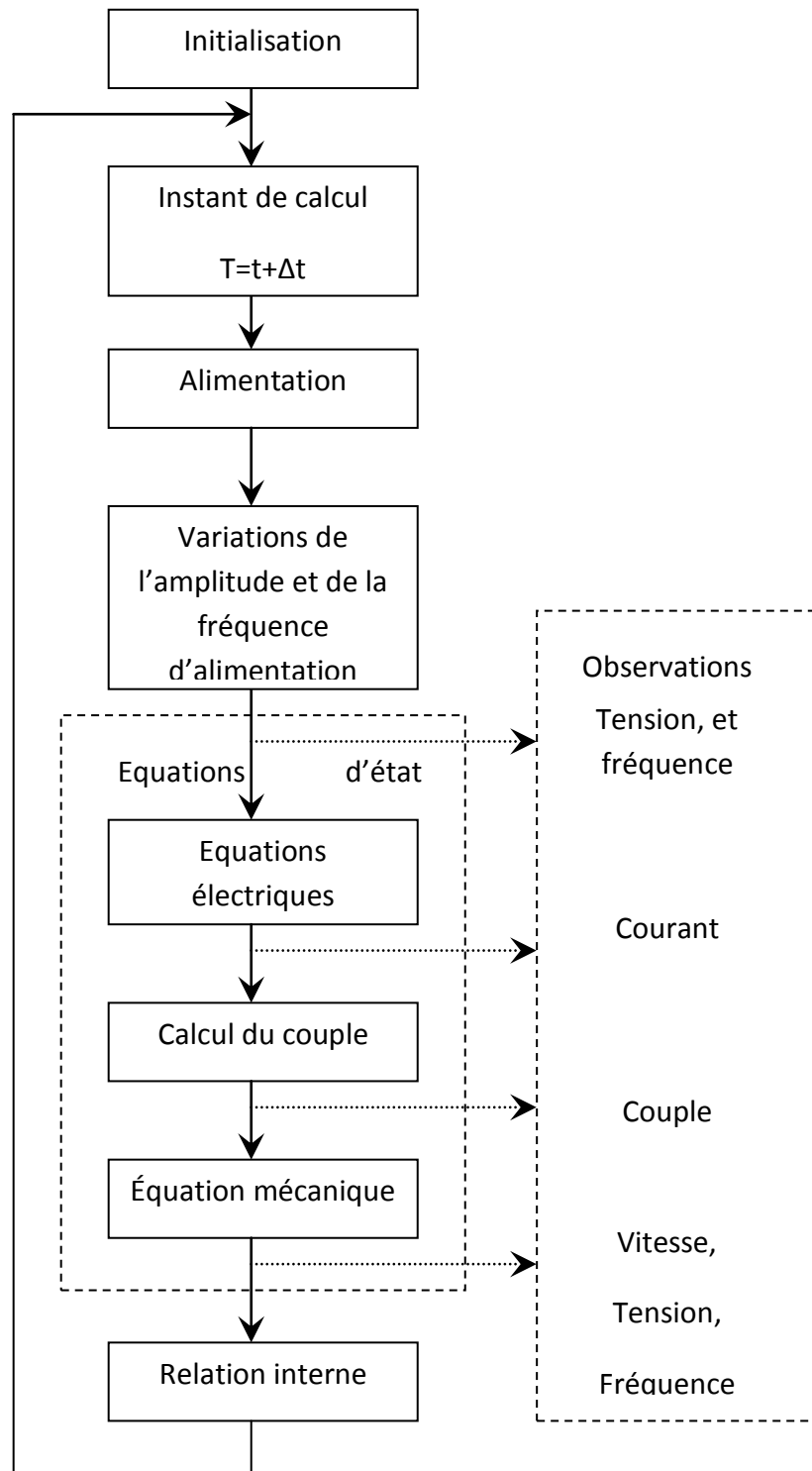


Fig. 3. Organigramme de la simulation des démarrages fréquentiel.

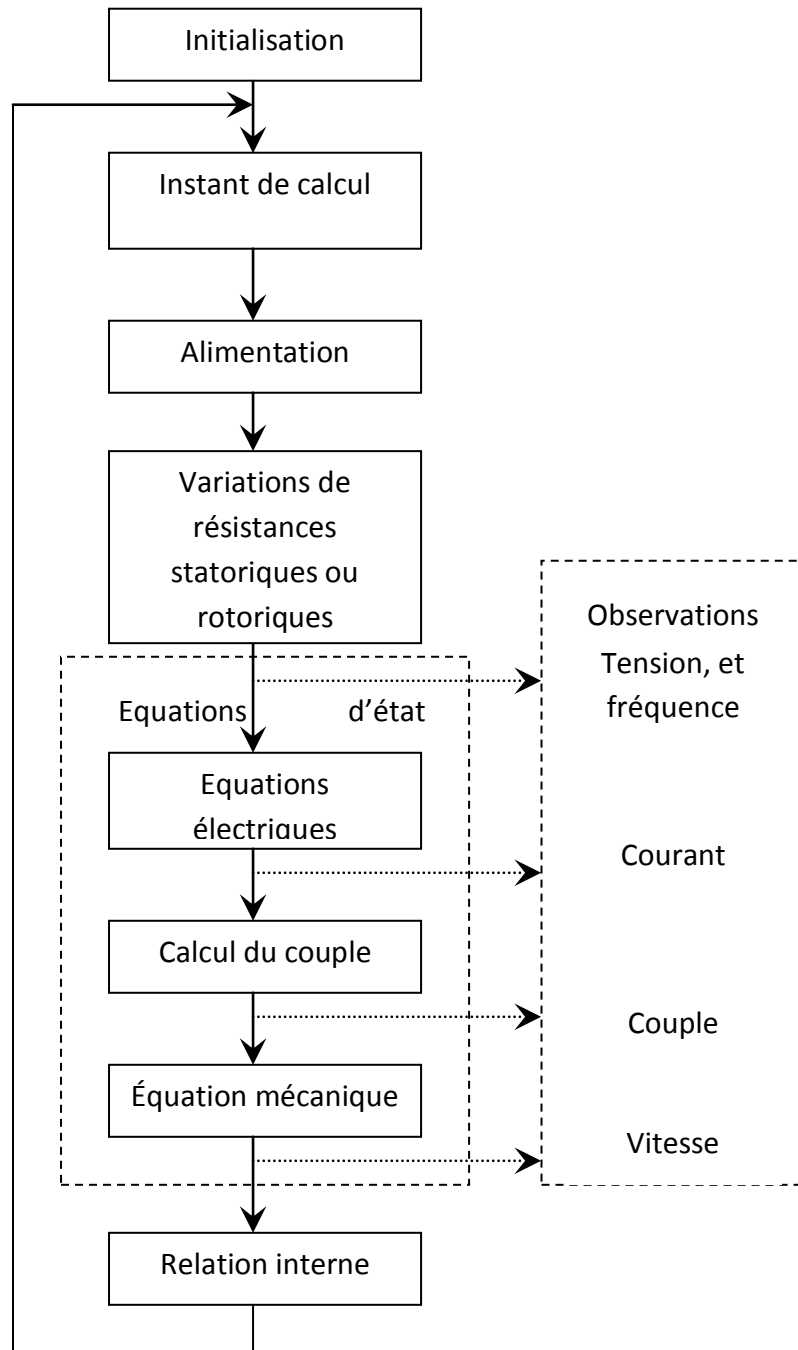


Fig. 4. Organigramme de la simulation des démarrages statorique et rotorique .

# Chapitre II:

## Modélisation de la machine asynchrone

chapitre I:  
la machine asynchrone  
et les différents types  
de démarrages

# Bibliographie

# Introduction Générale

# Chapitre II

## modulisation de la machine asynchrone



# Chapitre IV :

## Présentation de logiciel

# ANNEXES

# Conclusion Générale

### Les Paramètres Des Machines Asynchrones Triphasée Utilisées:

Les paramètre	Machine I	Machine II
La puissance nominale	$P_n = 3 \text{ kW}$	$P_n = 396 \text{ kW}$
La tension nominale	$U_n = 220 \text{ V}$	$U_n = 380 \text{ V}$
Le courant nominal	$I_n = 8.5 \text{ A}$	$I_n = 1441 \text{ A}$
Le couple nominal	$C_n = 10 \text{ N.m}$	$C_n = 3000 \text{ N.m}$
La vitesse de rotation nominale	$N_n = 1500 \text{ tr/mn}$	$N_n = 1520 \text{ tr/mn}$
La résistance statorique	$r_s = 4.850 \ \Omega$	$r_s = 0.01539 \ \Omega$
La résistance rotorique	$r_r = 3.805 \ \Omega$	$r_r = 0.01152 \ \Omega$
L'inductance statorique	$L_s = 0.274 \text{ H}$	$L_s = 0.008115 \text{ H}$
L'inductance rotorique	$L_r = 0.274 \text{ H}$	$L_r = 0.008085 \text{ H}$
L'inductance mutuelle	$M = 0.258 \text{ H}$	$M = 0.008 \text{ H}$
Moment d'inertie	$J = 0.031 \text{ kg m}^2$	$J = 35 \text{ kg m}^2$
Nombre de paires de pôles	$P = 2$	$P = 2$

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A ma source de bonheur et d'amour : « mes parents »*

*A ma sœur « Sarah » , mes frères « hichem » et « yazid »*

*A mohamed ;*

*A mon binôme Radhia qui a partagé avec moi les bons*

*Moments et à toute sa famille.*

*Sans oublier : ma tante louiza et rabiaa,*

*Mes cousine Mazola et Nesrine*

*A tout mes amies,*

*A toute la promotion -2012-Électrotechnique*

*A tous ceux qui me sont chers*

*Djamila.R*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A ma source de bonheur et d'amour : « douce maman et très cher papa »*

*A ma sœur « K̄halida » et son époux « Miloud », mon frère « Ayoub »*

*A mon binôme Djamila qui a partagé avec moi les bons*

*Moments et à toute sa famille.*

*Sans oublier : mes tantes mes oncles et tout mes cousins*

*A tout mes amis,*

*A toute la promotion -2012-Électrotechnique*

*A tous ceux qui me sont chers*

*Radhia.M*

## I.1. Introduction :

Ce chapitre permet d'étudier la constitution de la machine asynchrone, les différents types de moteurs asynchrone, les différents types de démarrage et leur choix.

Le moteur asynchrone triphasé est largement utilisé dans l'industrie, sa simplicité de construction en fait un matériel très fiable et qui demande peu d'entretien. Il est constitué d'une partie fixe et d'une partie rotative.

## I. 2. Constitution d'une Machine Asynchrone industrielle :

Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes :

-le stator : partie fixe.

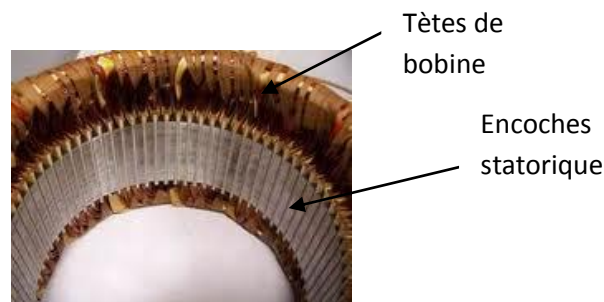
-l'entrefer : partie amagnétique.

-Le rotor : partie mobile.

- **Le stator :**

Cette partie fixe de la machine crée le champ tournant. Elle est organisée en un circuit magnétique circulaire et creux. Sur la périphérie intérieure des encoches sont aménagées pour recevoir les enroulements du bobinage.

C'est la partie reliée au réseau qui peuvent être couplés en étoile Y ou en triangle  $\Delta$  selon le réseau d'alimentation.



**Figure.(I-1) :** Stator d'une machine triphasée

- **L'entrefer :**

Cette la partie amagnétique entre le stator et le rotor qui doit être très étroit pour éviter les pertes de flux.

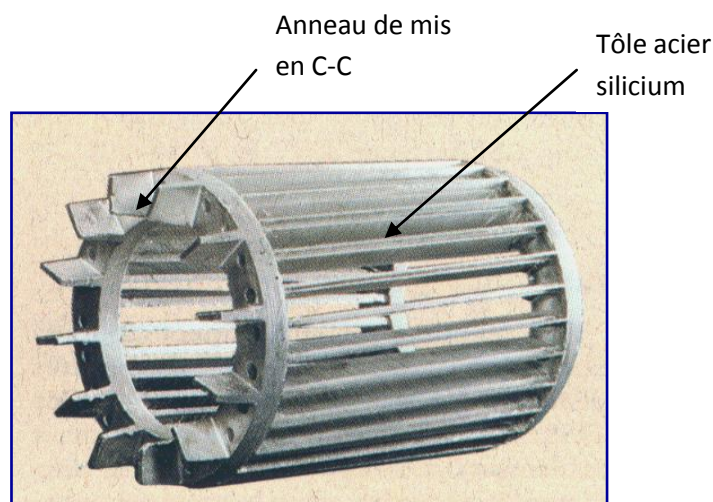
- **Le rotor :**

Il est constitué d'un cylindre fixé au stator par des paliers. Il comporte un enroulement constitué de conducteurs en court-circuit parcourus par des courants induits par le champ magnétique créé par les courants statoriques. Il existe deux types :

- ❖ **Rotor à Cage d'écureuil :**

Il est constitué de barres conductrices en aluminium. Les extrémités de ces barres sont réunies par deux couronnes également conductrices. On dit que **le rotor est en court-circuit**. Sa résistance électrique est très faible.

Ce type de moteur est utilisé pour les petites puissances ou pour des puissances élevées n'ayant pas besoin de démarrer à pleine charge.



**Figure.(I-2) :**Rotor a cage d'écureuil



### ❖ Rotor bobiné :

Les tôles de ce rotor sont munies d'encoches où sont placés des conducteurs formant des bobinages. On peut accéder à ces bobinages par l'intermédiaire de trois bagues et trois balais. Ce dispositif permet de modifier les propriétés électromécaniques du moteur.

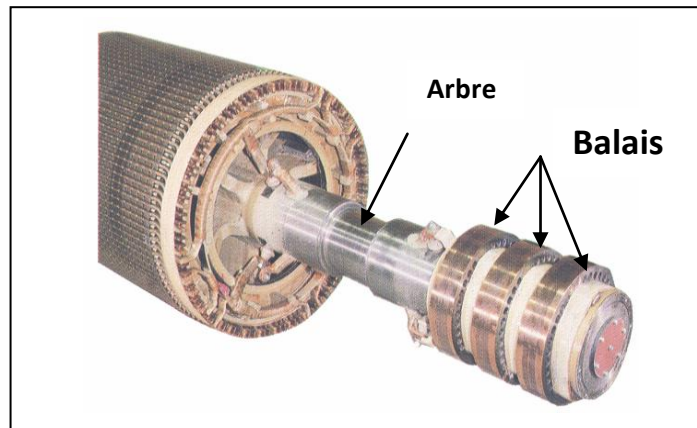


Figure.(I-3): Rotor bobiné

### I. 3. Principe de fonctionnement :

Les bobinages statoriques, alimentés par des courants triphasés de pulsation  $\omega$ , créent un champ magnétique  $\vec{B}$  tournant (théorème de Ferraris) à la vitesse  $\Omega_s = \omega / p$  ou  $p$  est le nombre de paires de pôles au stator.

Ce champ (donc ce flux) tournant balaie le bobinage rotorique et induit des forces électromotrices (fem) d'après la **loi de Lenz**. Le bobinage rotorique étant en court-circuit, ces fem produisent des courants induits.

- C'est l'action du champ tournant  $\vec{B}$  sur les courants induits qui crée le couple moteur. Ce dernier tend à réduire la cause qui a donné naissance aux courants, c'est à dire la rotation relative du champ tournant par rapport au rotor. Le rotor a tendance à suivre ce champ.

- Le rotor tourne forcément à une vitesse  $\Omega < \Omega_s$  (d'où le terme asynchrone). En effet, s'il tournait à la même vitesse  $\Omega_s$  que le champ tournant,

il n'y aurait plus, ni de f.e.m, ni de courants induits, donc plus de couple moteur.

- Pour changer le signe de  $\Omega_s$  (donc le sens de rotation), il suffit de permuter deux fils de phase.[1]

## I.4. Caractéristiques du moteur asynchrone :

### I.4.1-Vitesse de synchronisme :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \quad \text{ou} \quad n_s = \frac{f}{p} \quad [\text{en tr/s}] \quad (1.1)$$

### I.4.2-Glisement :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (1.2)$$

Ce paramètre caractérise la diminution relative de vitesse en fonctionnement.

On l'exprime très souvent en pourcentage.

### I.4.3-Fréquence f<sub>R</sub> des courants rotoriques :

La vitesse relative à laquelle le champ tournant balaie les conducteurs du rotor vaut

$(\Omega_s - \Omega)$  la pulsation  $\omega_R$  des courants induits est égale à :

$$\omega_R = p(\Omega_s - \Omega) = \omega \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (1.3)$$

$$\text{Soit : } \omega_R = p(\Omega_s - \Omega) = \omega \text{ ou } f_R = g \cdot f \quad (1.4)$$

Elle varie donc avec le glissement à l'arrêt ( $\Omega = 0$ )  $f_R = f(g = 1)$  [3.4]

### 1.5. Définitions des puissances (actives) :

- Puissance active absorbée par le moteur :  $P_a = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi$  (1.5)

Indépendant du couplage

- Pertes Joules au stator :  $P_{JS} = 3 R_1 I_1^2$  (1.6)

Au lieu de  $I_1$  si couplage  $\Delta$

- Pertes fer au stator :  $P_{fS} = 3 \frac{E_1^2}{R_1}$  (1.7)

- Puissance transmise du stator au rotor

Elle est aussi appelée puissance électromagnétique  $P_{em}$  ou puissance transmise à travers l'entrefer. On notera la différence entre  $P_m = C_{em} \Omega$  pour la MCC,  $P_{em} = P_{TR} = C_{em} \Omega_s$  (1.8)

pour la MAS car c'est le champ tournant  $\Omega_s$  qui est à l'origine de cette puissance.

- Pertes Joules au rotor :  $P_{JR} = 3 R_2 I_2^2 = 3 \frac{R_2}{m^2} I_1'^2$  car  $I' = m(-I_2)$  (1.9)

(Relation très utilisée)  $P_{JR} = g \cdot P_{TR}$  (1.10)

- Puissance mécanique sur le rotor :  $P_{méca} = P_{TR} - P_{JR} = (1 - g) \cdot P_{TR}$  (1.11)

La quantité  $(1 - g)$  est souvent appelée "rendement du rotor"

- Puissance mécanique utile :

$$P_u = P_{méca} - P_{pm} \Rightarrow C_u = C_{em} - C_p \quad (1.12)$$

En marche normale, on néglige les pertes dans le fer du rotor car elles sont proportionnelles à la fréquence  $f_R = g.f$  très faible des courants rotorique. [3.4.5]

### I.6.Couple électromagnétique $C_{em}$ :

La puissance électromagnétique utile transformée en énergie mécanique est définie :

$$P_{em} = C_{em} \cdot \Omega = 3 \cdot P_r^* \cdot \frac{1-g}{g} \cdot I_r^2 \quad (\text{I.13})$$

Si on néglige la résistance statorique on obtient :

$$I_r^2 = \frac{V_s^2}{(N_r w_s)^2 + \left(\frac{R_r^*}{g}\right)^2} \quad (\text{I.14})$$

Avec  $V_s$  : valeur efficace de la tension aux bornes d'une des phases du stator de la machine.

Pour une machine à  $p$  paires de pôles on a :

$$\Omega = (1 - g) \cdot \frac{w_s}{p} \quad (\text{I.15})$$

Cela conduit à :

$$\begin{aligned} C_{em} &= 3 \cdot p \frac{V_s^2}{w_s} \cdot \frac{\frac{R_r^*}{g}}{(N_r w_s)^2 + \left(\frac{R_r^*}{g}\right)^2} = 3 \cdot p \frac{V_s^2}{w_s} \cdot \frac{1}{\left(\frac{g(N_r w_s)^2}{R_r^*}\right) + \left(\frac{R_r^*}{g}\right)} \\ &= \frac{3p}{N_r} \cdot \frac{V_s^2}{w_s^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{g N_s w_s}{R_r^*}\right) + \left(\frac{R_r^*}{g N_s w_s}\right)} \end{aligned}$$

Le couple électromagnétique passe par un maximum :

$$C_{max} = \frac{3p}{2N_r} \cdot \frac{V_s^2}{w_s^2}$$

$$g = g_{max} = \frac{R_r^*}{N_r w_s}$$

En introduisant ce couple maximal et le glissement correspondant dans l'équation du couple électromagnétique on obtient la relation :[21]

$$C_{em} = 2C_{em} \cdot \frac{1}{\left(\frac{g_{max}}{g}\right) + \left(\frac{g_{max}}{g}\right)} \quad (I.16)$$

### I.7. Energies mises en Jeu pendant le démarrage :

Le démarrage d'un moteur asynchrone s'accompagne d'une dissipation d'énergie sous forme de chaleur dans les enroulements statorique et rotorique susceptible de provoquer des échauffements dangereux pour la bonne tenue du matériel.

On a :

$$P_{tr} = C_{em} \Omega_s \quad (I.17)$$

$$P_{jr} = g \cdot P_{tr} \quad (I.18)$$

Dans le cas d'un démarrage à vide ( $C_{ext} = 0$ ), le moteur, initialement à l'arrêt ( $g = 1$ ), atteint pratiquement sa vitesse synchrone à la fin du démarrage ( $g \cong 0$ ),

L'énergie dissipée dans l'enroulement rotorique se calcule à partir des relations précédentes :

$$C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} = -J\Omega_s \frac{dg}{dt} \quad (I.19)$$

$$w_{thr} = \int_0^t p_{jr} dt = \int_0^t g \cdot p_{tr} dt = j\Omega_s^2 \int_0^1 g dg = \frac{J\Omega_s^2}{2} \quad (I.20)$$

$w_{thr}$  : L'énergie dissipée sous forme de chaleur dans le rotor.

Le démarrage provoque ainsi dans l'enroulement rotorique une dissipation d'énergie thermique au moins égale à l'énergie cinétique du groupe.

En l'absence de pertes statoriques, le réseau fournirait une énergie correspondant à :

$$w = \int_0^t p_{tr} dt = J\Omega_s^2 \int_0^1 dg = J\Omega_s^2 \quad (I.21)$$

Soit une énergie correspondant à l'énergie dissipée sous forme de chaleur dans le rotor et à l'énergie cinétique communiquée aux masses tournantes.

La quantité de chaleur dissipée dans l'enroulement statorique vaut approximativement, en supposant  $l_s$  et  $l'_t$  du même ordre de grandeur :

$$w_{ths} \cong w_{thr} \frac{R_s}{R'_r} \quad (I.22)$$

$R'_r$  = résistance rotorique ramené au stator.

Ainsi l'énergie thermique dissipée dans les enroulements statorique et rotorique au cours d'un démarrage à vide vaut :

$$w_{ths+r} \cong \frac{J\Omega_s^2}{2} \left( 1 + \frac{R_s}{R'_r} \right) \quad (I.23)$$

Et l'énergie totale fournie par le réseau, en supposant les pertes fer négligeables. [9.10.11]

$$w_{réseau} \cong \frac{J\Omega_s^2}{2} \left( 2 + \frac{R_s}{R'_r} \right) \quad (I.24)$$

## I.8.Échauffement rotorique au démarrage :

Du fait des densités de courant choisies généralement plus élevées au rotor et à l'effet pelliculaire dont les conducteurs rotoriques sont affectés, l'échauffement critique est le souvent celui du rotor. Dans le cas du démarrage dit 'lourds' (couple résistante et inertie élevés), il convient de vérifier soigneusement la capacité thermique et les conditions de refroidissement du rotor, afin d'éviter des échauffements dangereux pour la tenue diélectrique ou mécanique de la machine.

Dans le cas d'un moteur à bagues à démarrage rhéostatique, la majeure partie de l'énergie thermique de démarrage est dissipée dans la résistance extérieure.

Dans le cas de moteur à cage, l'énergie de démarrage apparaît par contre dans l'enroulement du rotor. [2-12].

Pour des démarrages 'légers' (couple résistant et inertie réduits), le temps de démarrage est trop court (< 10s) pour qu'un échange thermique appréciable avec l'extérieur puisse se développer. Une bobine estimation de l'échauffement à la fin du démarrage set fournie par un calcul d'échauffement adiabatique :

$$\Delta\theta = \frac{w_{thr}}{mT} \cong \frac{J\Omega_s^2}{2mT} = \frac{(2\pi n_s)^2 J}{2mT} \quad (1.25)$$

$T$  : représente la chaleur spécifique du matériau constituant la cage en  $J/Kg^\circ C$

et  $m$  la masse de la cage en  $Kg$ .

Dans le cas de démarrage 'lourds' conduisant à des temps de démarrage de l'ordre de 60 à 100 s, il est nécessaire d'étudier le régime thermique transitoire complet, complet tenu de la conduction et de la convection. Dans ce cas, l'échauffement maximal atteint au cours du démarrage est de l'ordre de 50% de l'échauffement adiabatique.

## **I.9.Problème de démarrage d'une Machine Asynchrone :**

Dans la plus part des cas les problèmes des démarrage sont essentiellement lié à :

- L'intensité élevée : de l'ordre de 5 à 8 fois, l'intensité nominale en démarrage direct, qui peut provoquer des chutes qui perturbent les autres structures alimentés par le même réseau :
- Fluctuations de luminosité des éclairages
- Influence sur les installations informatiques
- Défaillances des contacteurs et des relais
- La qualité du couple de démarrage : qui doit être suffisamment élevée, à taux réduit d'oscillation et adaptée à la charge entraînée afin d'éviter l'à-coup mécanique à une durée trop longue.
- Le démarrage d'un moteur asynchrone s'accompagne d'une dissipation d'énergie sous forme de chaleur dans les enroulements statorique et rotorique susceptible de provoquer des échauffements dangereux pour la bonne tenue du matériel.

## **I.10.les procédés classiques de démarrage en HT :**

Les principaux procédés de démarrage des moteurs asynchrone sont les suivants :[8-13-14-15].

### **I.10.1 .Démarrage Direct :**

C'est le plus simple qui ne peut être exécuté qu'avec la machine asynchrone à rotor à cage (faible puissance). Les enroulements du stator sont couplés directement sur le réseau.



- **Intensité et couple :**

**Intensité :**

La surintensité au moment du démarrage peut être de 4 & 8 fois l'intensité nominale  $I_d = 4 \text{ à } 8 I_n$

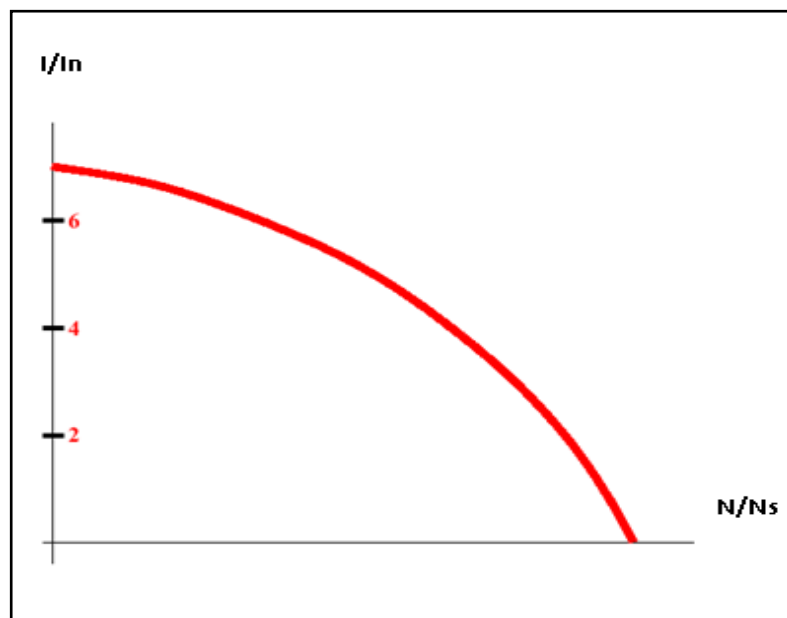


Fig.(I-4) :Variation de l'intensité I en fonction de la vitesse N

(Démarrage directe)

- **Couple moteur :**

Au moment du démarrage, le couple moteur est en moyenne de 1,5 à 2 fois le couple nominal.

La figure figure.(I.7) montre l'évolution de la courbe couple- vitesse pour deux valeurs différentes de la tension d'alimentation du moteur. Le couple maximum délivré par le moteur étant proportionnel au carré de la tension

d'alimentation toute diminution de celle-ci entraîne une diminution du couple moteur.

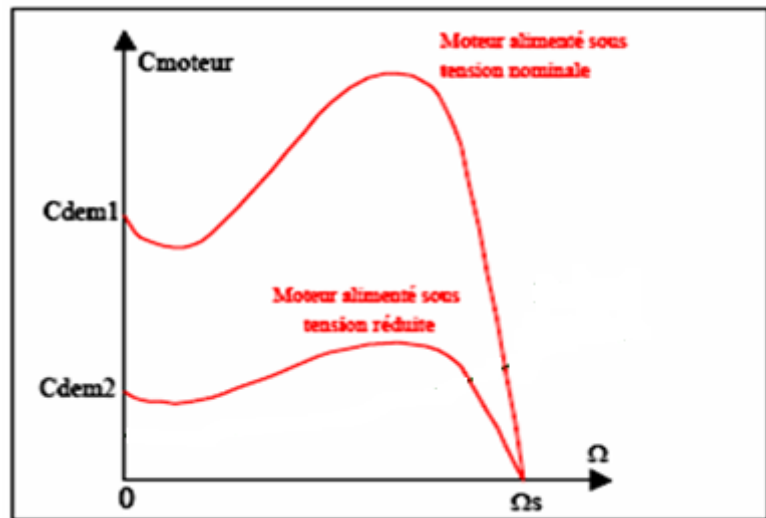


Fig.(I-5) :Variation du couple  $C$  en fonction de vitesse  $\Omega$  d'une MAS.

#### Avantage :

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

#### Inconvénients :

- Appel du courant important
- Démarrage brutal
- Procédé utilisé pour des moteurs à petite puissance.

### I.10.2. Démarrage Etoile -Triangle (Y- $\Delta$ ) :

Ce procédé ne peut s'appliquer qu'aux moteurs dont toutes les extrémités d'enroulement sont sorties sur la plaque à bornes, et dont le couplage triangle correspond à la tension du réseau. Le démarrage s'effectue en 2 temps.

#### Couplage étoile :

##### ❖ 1<sup>ere</sup> Temps :

Mise sous tension et couplage étoile des enroulements, Le moteur démarre à tension réduite  $n$ .

##### ❖ 2<sup>eme</sup> Temps :

Suppression du couplage étoile, et mise en couplage triangle Le moteur est alimenté sous pleine tension.

#### • Intensité et Couple :

**Intensité :** L'appel du courant au démarrage est le 1/3 de l'appel au démarrage direct en triangle  $I_d - 1,3$  à  $2,6 I_n$ .

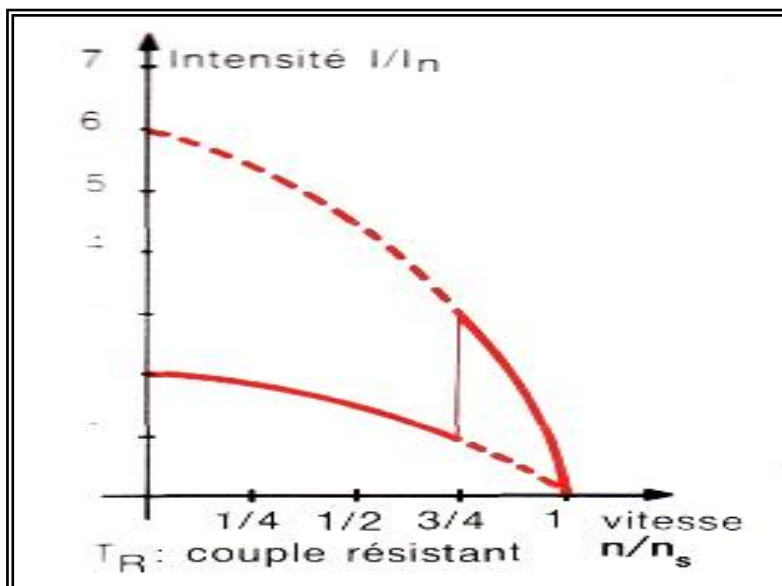


Fig.(I-6) :Variation de l'intensité  $I$  en fonction de la vitesse  $n$   
(Démarrage étoile triangle)

**Couple :**

Le couple est sensiblement 3 fois plus faible qu'en démarrage direct  $C_d = 0,2$  à  $0,5 C_n$ .

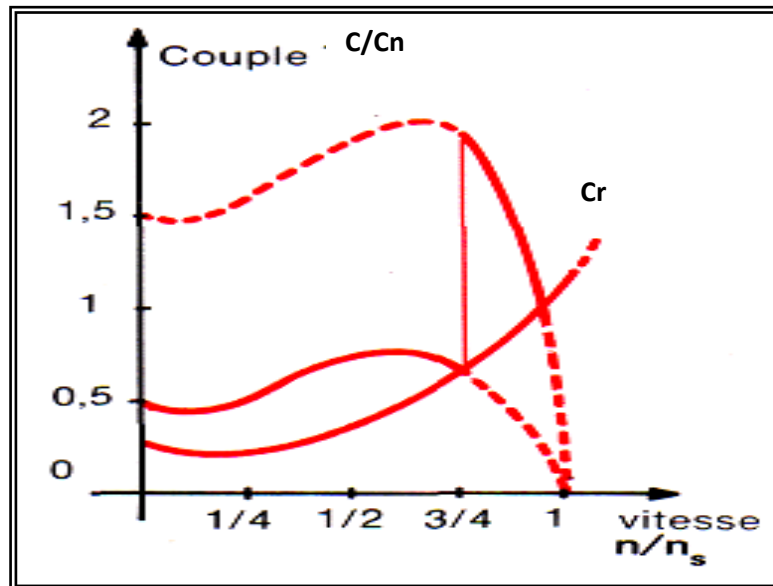


Fig.(I-7) : Variation du couple C en fonction de la vitesse  
(Démarrage étoile triangle).

**Avantage:**

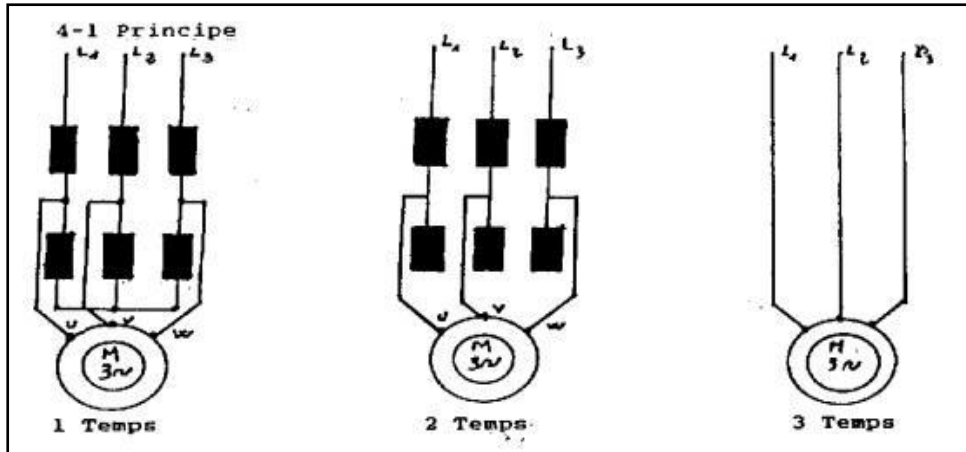
- Appel de courant en étoile réduit au tiers de sa valeur en direct.
- Relativement moins cher .

**Inconvénients :**

- Faible complication d'appareillage.
- Couple réduit au tiers de sa valeur en direct
- Coupure entre les positions étoile et triangle d'où apparition de phénomènes transitoires.

### I.10.3. Démarrage par autotransformateur :

Le moteur est alimenté sous tension réduite par l'intermédiaire d'un autotransformateur qui est mis hors circuit quand le démarrage est terminé .



- 1<sup>er</sup> Temps : Auto -transformateur en Y le moteur est alimenté à tension réduite.
- 2<sup>eme</sup> Temps : Ouverture du point Y, seul la self de la partie supérieure de l'enroulement limite le courant.
- 3<sup>eme</sup> Temps : Alimentation du moteur sous pleine tension.
- **Intensité et couple :**

#### Intensité :

Le courant à l'intérieur de chaque enroulement réduit dans le rapport de la tension :  $I_d = 1.7 \text{ à } 4 I_n$ .

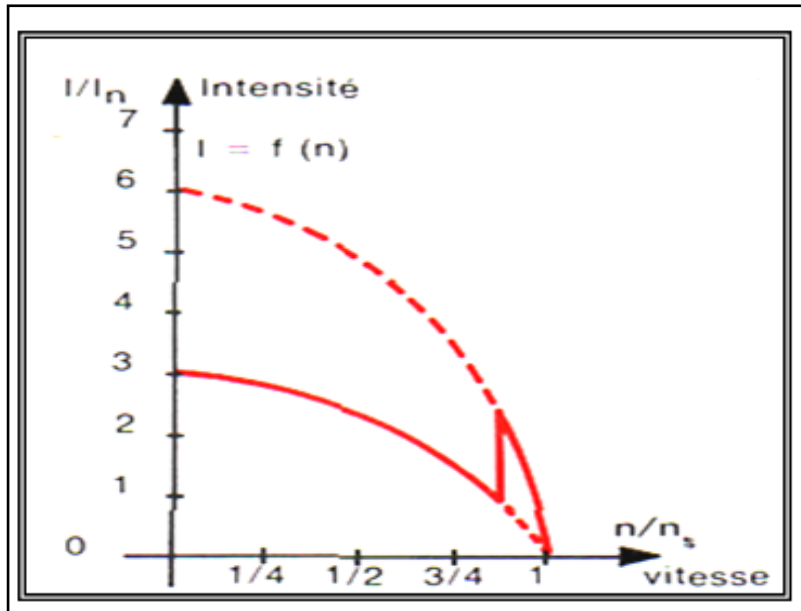


Fig.(I-8) : La variation de l'intensité I en fonction de la vitesse n  
(Démarrage auto- transformateur)

**Couple :**

On obtient un couple plus élevé avec une pointe d'intensité plus faible que pour les autres procédés de démarrage.

$$C_d = 0.4 \text{ à } 0.85 C_n$$

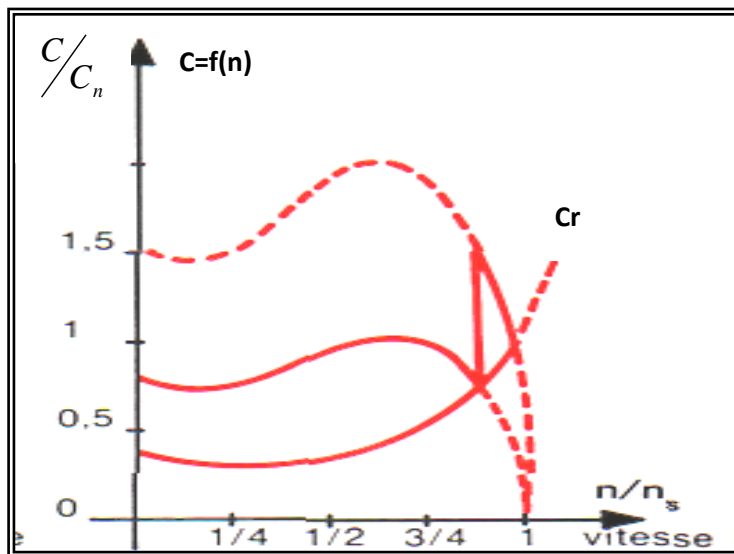


Fig.(I-9) : Variation du couple C en fonction de la vitesse  
(Démarrage autotransformateur)

**Avantage :**

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

**Inconvénients :**

- Onéreux.
- Réservé pour les puissances plus de 50kw approximativement

**I.10.4. Démarrage a résistances statoriques :**

Le principe consiste à démarrer le moteur sous tension réduite en insérant des résistances en série avec les enroulements. Lorsque la vitesse se stabilise, les résistances sont éliminées et le moteur est couplé directement sur le réseau.

- **Intensité et couple :**

**Intensité :** La tension appliquée aux bornes du moteur ne reste pas constante pendant le temps d'accélération,

L'intensité maximale se situe lors de la mise sous tension, puis elle diminue  $I_d = 4,5 I_n$ .

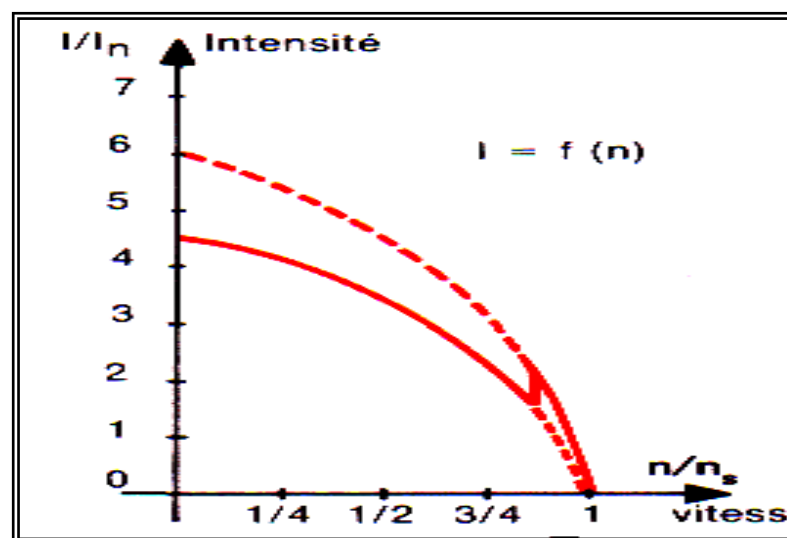


Fig.(I-10) :Variation de l'intensité I en fonction de la vitesse n

(Démarrage statorique).

**Couple :**

Le couple initial est relativement faible pour une pointe de courant assez importante.  $C_d = 0,75 C_n$

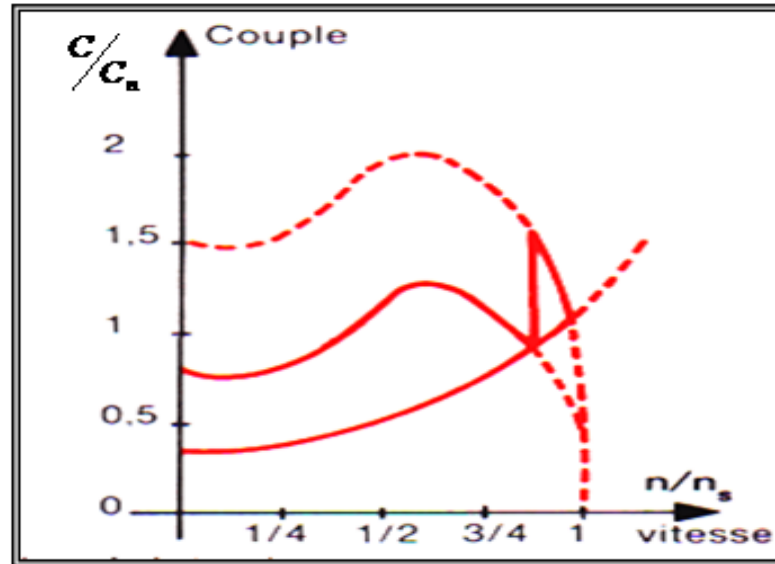


Fig .(I-11) :Variation du couple C en fonction de la vitesse n

(Démarrage statorique).

**Avantage :**

- Possibilité de choisir le couple de démarrage et le passage des différents temps de démarrage sans coupure du courant.

**Inconvénients :**

- La tension d'alimentation est très fortement réduite au moment de démarrage, car l'appel du courant reste important.
- Couple moteur croissant pendant le démarrage et démarrage plus progressif Appel du courant plus important qu'en étoile- triangle 4 à 5 fois  $I_n$ .
- Le couple de démarrage est diminué par rapport au démarrage direct  $0,75 C_n$ .



### I.10.5. Démarrage à résistance rotorique :

Ce procédé est utilisé pour les moteurs à rotor bobiné avec sortie de l'enroulement rotorique sur trois bagues.

On limite le courant au stator et on ajoute des groupes de résistances sont des bobinages rotoriques pendant le démarrage, puis sont court-circuités. Ce système permet certainement de diminuer pointe de courant au démarrage.

- **Intensité et Couple :**

**Intensité :**

Le courant absorbé est sensiblement proportionnel au couple fourni ou très peu supérieur.

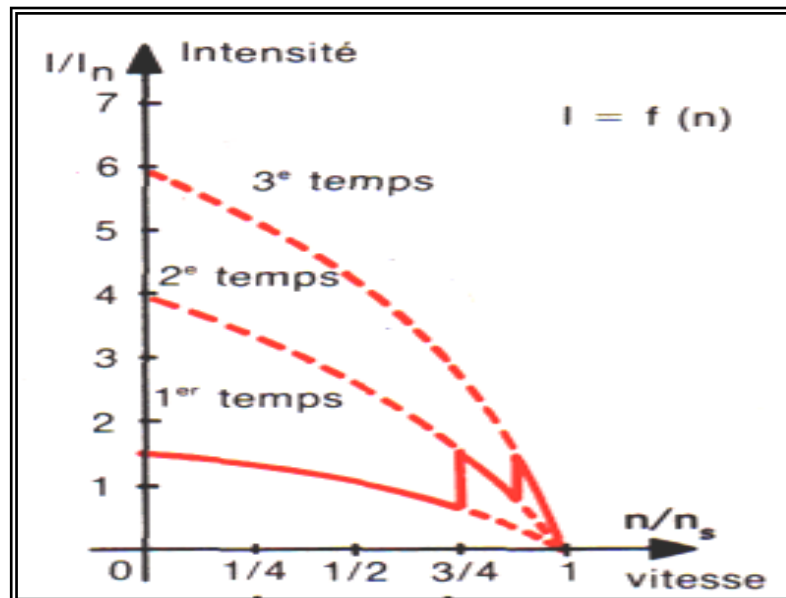


Fig .(I-12) : La Variation du l'intensité I en fonction de la vitesse n

(Démarrage rotorique)

**Couple :**

On obtient fréquemment des couples de démarrage égaux à 1,5 fois le  $C_n$  sans surintensité excessive.

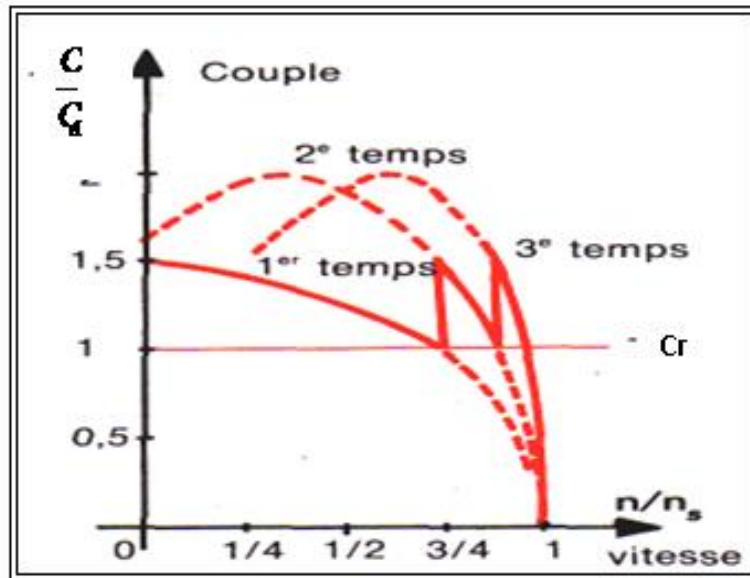


Fig.(I-13) :Variation du couple  $C$  en fonction de la vitesse  $n$

(Démarrage rotorique)

**Avantage :**

- L'appel de courant est pour un couple de démarrage donné le plus faible par rapport à tous les autres modes de démarrage.
- Possibilité de choisir par construction, couple et le nombre de temps de démarrage nécessité d'un moteur à rotor bobiné équipement plus cher.

**Inconvénients :**

- Cette procédure est réservée pour les démarrages difficiles :
- Si le couple de démarrage élevé est exigé.
- Pour les machines à grandes moment d'inertie.
- Si le démarrage progressif est nécessaire.

### I.10.6. Démarrage progressif :

Le démarrage progressif gère en continu la tension depuis une valeur de départ sélectionnable jusqu'à cent pour-cent de la tension nominal suivant une rampe de tension ou Le couple et le courant augmentent ainsi de manière continue.

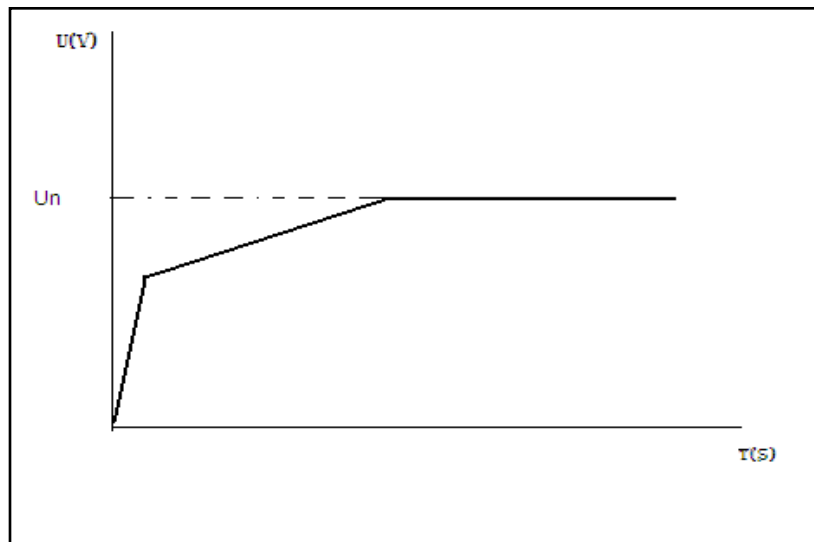


Figure (I.14) :démarrage progressif par rampe de tension

Lors du démarrage sur rampe de tension figure (I.16) le temps de démarrage ou temps d'accélération et le couple initial de décollement sont fixés. Le démarrage progressif augmente la tension aux bornes du moteur linéairement depuis une valeur prédéfinie (tension de départ) jusqu'à la tension entière du réseau. La faible tension moteur au départ du processus a pour conséquence un couple moteur plus faible et entraîne ainsi un cycle d'accélération progressif. La valeur de départ de la tension à appliquer est définie par le couple initial de décollement = couple de départ du moteur.

Lors d'un démarrage progressif sur rampe de tension, le courant augmente jusqu'à une valeur maximale et il redescend à la valeur  $I_N$  en atteignant la vitesse nominale du moteur. Le courant maximal ne peut pas être déterminé à l'avance; il dépend de chaque moteur

**Avantage :**

- Le courant de démarrage est réduit ou peut être limité.
- Le couple est adapté à la charge correspondante.

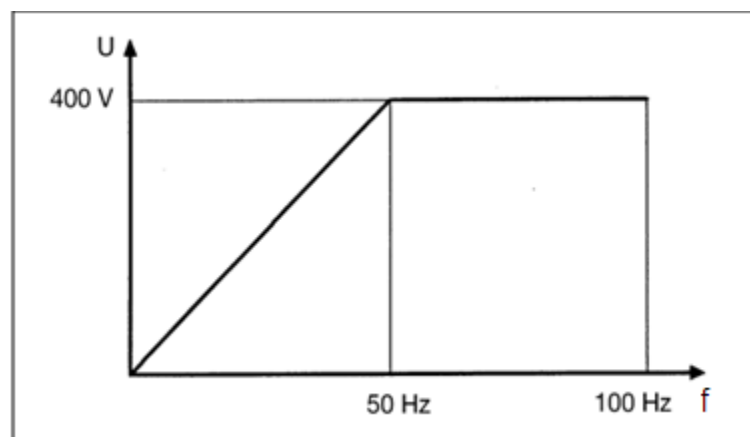
**Inconvénients :**

- Pour des temps de démarrage plus longs et pour des grandes puissances.
- Seul le démarreur progressif commandé par alternance complète est applicable.

**I.10.7. Démarrage fréquentiel :**

C'est un mode de démarrage performant utilisé dès qu'il est nécessaire de contrôler et de faire varier la fréquence et la tension, Le moteur peut fournir alors un couple élevé à toutes les vitesses. Ce type de démarrage s'applique sur tous types de machines.[19]

- **Relation fréquence – tension :**



**Fig.(I-15) : Variation de la tension en fonction temps**

En raccordant directement le moteur au réseau d'alimentation, on obtient les relations de fonctionnement idéales pour le moteur. En faisant varier la tension, le convertisseur de fréquence garantit une bonne approche de ces relations.

Lorsque la fréquence augmente à plus de 50 Hz la tension n'augmente plus. Le moteur ne peut pas développer la puissance nominale et il ne peut donc plus être sollicité à pleine charge.

Pour que la fréquence limite (normalement 50 Hz) soit plus élevée, le moteur doit être dimensionné autrement. 230V - 50 Hz et 380 V - 87 Hz sont des rapports tension – fréquence normalisés. Le moteur peut ainsi travailler avec la puissance nominale jusqu'à 87 Hz. [20]

**Avantages :**

- le moteur tourne avec une vitesse correspondant à son besoin momentané donc l'énergie est économisée.
- La consommation de courant est également moindre pour une vitesse plus faible et un couple plus élevé.
- La vitesse peut être adaptée de manière optimale à des conditions spéciales.
- Le convertisseur de fréquence ne nécessite aucun entretien
- Le moteur permet de démarrer des charges de forte inertie
- Fonctionnement souple du moteur.

**Inconvénients :**

- Principalement pour fonctionnement avec vitesse réglable.
- Remplace également démarrage progressif pour petites puissances.

### **I.11. Conclusion :**

Le choix du démarrage est guidé par les caractéristiques technico-économique, pour chaque application de la machine asynchrone, en tenant compte des avantages et des inconvénients de chaque mode de démarrage. Ces derniers sont étroitement liés au couple délivré, à l'appel de courant et surtout au câblage et à l'appareillage.