N° Ordre ..... /Faculté/UMBB/2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES

FACULTE DES HYDROCARBURES ET DE LA CHIMIE

DEPARTEMENT D'AUTOMATISATION ET ELECTRIFICATION DES PROCEDES

Mémoire de fin d'études

MASTER

Présenté par :

En vue d'obtention du diplôme de :

KEBIR AYMEN

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Electricité industrielle.

Thème

Simulation du démarrage progressif du moteur principal de l'extrudeuse du complexe CP2/K

Devant le jury :

Mr.	Bendjeghaba O.	Dr. UMBM	Président
Mr.	Khelifi F.	MC(A) UMBB	Examinateur
Mr.	Kifouche Rezki	MC(A) UMBB	Encadreur

2021/2022

N° Ordre ..... /Faculté/UMBB/2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES

FACULTE DES HYDROCARBURES ET DE LA CHIMIE

DEPARTEMENT D'AUTOMATISATION ET ELECTRIFICATION DES PROCEDES

Mémoire de fin d'études

En vue d'obtention du diplôme de :

MASTER

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Electricité industrielle.

Thème

Simulation du démarrage progressif du moteur principal de l'extrudeuse du complexe CP2/K

Présenté par :

KEBIR AYMEN

Avis favorable de l'encadreur

Mr. Kifouche Rezki

Avis favorable du Président du jury

Nom Prénom **Signature**

Cachet et signature

2021/2022

Remerciements :

Je tiens à exprimer mes remerciements avec un grand plaisir et un grand respect à mon promoteur Monsieur Kifouche Rezki pour ses conseils, sa disponibilité et ses encouragements qui m'ont permis de réaliser ce travail dans les meilleures conditions.

J'exprime ma gratitude envers tous ceux qui m'ont accordé leur soutien, tant par leur gentillesse que par leur dévouement.

A tous les enseignants qui m'ont aidé pendant les cinq années passées à l'Université de Boumerdes.

A toute
Personne ayant contribué de près ou de loin à l'avancement de mon projet.

A ma chère mère quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit, ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon cher père, Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager.

Que ce modeste travail traduit ma gratitude et mon affection.

Je ne pourrai nommer ici toutes les personnes qui m'ont aidé et encouragés de près ou de loin et je les remercie vivement.

Puisse dieu vous donne sante, bonheur, courage et surtout réussite.

DEDICACES :

Je dédie ce mémoire de fin d'étude.
A mes chers parents pour leur soutien, leur patience, leur sacrifice et leur amour.
Vous méritez tout compliment.

Vous qui avez fait de moi ce que je suis maintenant.

J'espère être l'image que vous vous êtes fait de moi.
Que dieu vous garde et vous bénisse.
Je dédie ce travail à mon cher frère Ramy, cher père, chère mère et ma très chère tante Rachida pour leur affection, encouragement qui ont toujours été pour moi des plus précieux.

Que ce travail soit pour vous le gage de mon profond amour

A tous mes amis

A tous ceux qui m'ont aidé.
A tous ceux que j'aime, je dédie ce travail …

Résumé :

Actuellement, les moteurs à induction triphasés sont largement utilisés dans divers domaines industriels en raison de leurs faibles coûts de production et de maintenance et de leur grande fiabilité. Un moteur à induction triphasé consomme un courant plus que la capacité nominale pendant la phase de démarrage, ce qui pourrait endommager ses enroulements statoriques et provoquer des chutes de tension dans le réseau électrique. Pour éviter ces problèmes, plusieurs types de démarrage sont utilisés. Cependant, les démarrages conventionnels ne sont pas toujours la meilleure solution. Avec l'évolution de l'électronique de puissance, des démarreurs progressifs ont été développés pour offrir de meilleures performances de démarrage en termes de réduction du courant d'appel et des contraintes mécaniques en plus du faible coût en particulier pour les moteurs à induction triphasés fonctionnant à vitesse fixe. L'objectif de ce projet est de proposer l'installation d'un démarreur progressif pour le moteur principal de l'extrudeuse du complexe industriel CP2/K. Pour consolider notre proposition, une étude des caractéristiques des moteurs asynchrones triphasés pendant la phase de démarrage avec une comparaison entre leurs méthodes de démarrage ainsi qu'une simulation du démarrage direct et progressif du moteur concerné à l'aide du logiciel "MATLAB/Simulink" ont été réalisées. Les résultats de la simulation montrent l'avantage de connecter le moteur à un démarreur progressif plutôt que de le laisser démarrer directement.

ملخص:

حاليًا ، تُستخدم المحركات الحثية ثلاثية الطور على نطاق واسع في مختلف المجالات الصناعية نظرًا لانخفاض تكاليف إنتاجها وصيانتها و موثوقيتها العالية. يستهلك المحرك الحثي ثلاثي الطور تيارًا أكثر من السعة المقدرة خلال مرحلة الإقلاع ، مما قد يؤدي إلى إتلاف ملفات الجزء الثابت ويسبب انخفاض الجهد في الشبكة الكهربائية. لتجنب هذه المشاكل، يتم استخدام عدة طرق عند الإقلاع. ومع ذلك، فإن الطرق التقليدية ليست دائمًا الحل الأفضل. مع تطور إلكترونيات الإستطاعة ، تم تطوير المشغلات اللينة لتقديم أداء إقلاع أفضل من حيث تقليل تيار الاندفاع والضغوط الميكانيكية بالإضافة إلى التكلفة المنخفضة، خاصة بالنسبة للمحركات الحثية ثلاثية الطور التي تعمل بسرعة ثابتة. الهدف من هذا المشروع هو اقتراح تركيب مشغل لين للمحرك الرئيسي لجهاز *البثق* الخاص بالمجمع الصناعي CP2 / K. لتعزيز اقتراحنا، تم إجراء دراسة خصائص المحركات غير المتزامنة ثلاثية الأطوار أثناء مرحلة بدء التشغيل مع مقارنة بينط رق إقلاعها بالإضافة إلى محاكاة الإقلاع المباشر و الإقلاع الناعم للمحرك المعني باستخدام برنامج"MATLAB/Simulink". تظهر نتائج المحاكاة ميزة توصيل المحرك بالمشغل اللين بدلاً من تركه يقلع مباشرة.

Abstract:

Currently, the three phase induction motors are widely used in various industrial fields due to their low production and maintenance costs and high reliability. A three-phase induction motor draws current more than the rated capacity during the starting phase which might damage its stator windings and cause voltage drops in the electrical network. To avoid these problems, several types of starting are used. However, conventional starts are not always the best solution. With the evolution of power electronics, soft starters were developed to provide a better starting performance in terms of reduction of inrush current and mechanical stress in addition to the low cost especially for three phase induction motors running at fixed speed. The aim of this project is to propose the installation of soft starter for the extruder's main drive of CP2/K industrial

complex. To consolidate our proposition, a study of three phase induction motors characteristics during the starting phase with a comparison between their starting methods as well as a simulation of the concerned motor's direct and soft start using "MATLAB/Simulink" software were carried out. The simulation results show the advantage of connecting the motor to a soft starter rather than letting it starts directly.

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des annexes

Liste des abréviations

Notations

SOMMAIRE :

I) Introduction générale : 1

II) Chapitre I : Généralité sur l'extrudeuse : 3

II.1) Introduction : 3

II.2) Présentation de SONATRACH : 3

II.2.1) Activité Raffinage et Pétrochimie (RPC) : 3

II.2.2) Division Raffinage : 3

II.2.3) Division pétrochimie (PEC) 4

II.3) Présentation du lieu de stage : 4

II.3.1) Historique : 4

II.3.2) Implantation du CP2/K 4

II.3.3) Activité du CP2/K : 5

II.3.4) Installations principales du CP2/K 5

II.3.5) Installations auxiliaires du CP2/K : 6

II.4) Description du procédé général : 6

II.4.1) Les installations électriques : 7

II.5) L'extrudeuse : 9

II.5.1) Rôle : 9

II.5.2) Caractéristiques : 9

II.5.3) Fonctionnement : 11

II.6) Le moteur de l'extrudeuse : 12

II.6.1) Type : 12

II.6.2) Définition du moteur asynchrone triphasé : 12

II.6.3) Construction du moteur de l'extrudeuse : 13

II.6.4) Caractéristique Moteur de l'extrudeuse : 15

II.6.5) Fonctionnement : 15

II.7) Problématique 16

II.8) Solution proposée : 19
II.9) Conclusion : 19
III) Chapitre II : modélisation du moteur asynchrone 20
III.1) Introduction : 20
III.2) Définition de la machine asynchrone : 20
III.3) Description de la machine asynchrone triphasée :..... 21
III.4) Constitution de la machine asynchrone à cage :[1] 22
III.5) Avantages et inconvénients la machine asynchrone :..... 23
III.6) Modélisation de la machine asynchrone :..... 23
III.6.1) Hypothèse simplificatrice :..... 23
III.6.2) Modélisation de machine asynchrone dans le plan triphasé abc : 24
III.6.3) Équations générales de la machine asynchrone triphasé :..... 25
III.6.4) Transformation du système triphasé :..... 28
III.6.5) La transformation de Park : 28
III.6.6) Représentation sous forme d'état de la MAS 33
III.7) La machine asynchrone alimentée en tension : 36
III.8) Simulation de la machine asynchrone : 37
III.8.1) Procédure :..... 37
III.8.2) Paramètres du moteur 253-231 :..... 37
III.8.3) Simulation du démarrage direct du moteur 253-231 :..... 37
III.9) Résultats de simulation :..... 38
III.9.1) A vide : Cr=0 [N.m] : 38
III.9.2) En charge : Cr=50000 [N.m] à t=2s : 41
III.10) Interprétation des résultats de simulation : 45
III.11) Conclusion : 45
IV) Chapitre III : les démarreurs progressifs (gradateur triphasé) :..... 46
IV.1) Introduction : 46
IV.2) Rappel sur les démarreurs progressifs :..... 46
IV.3) Rappel sur les semi-conducteurs : 47
IV.3.1) 3.1 Diode : [2] 48
IV.3.2) Thyristors : [2]..... 50
3.2.1 Principe de fonctionnement : 50
IV.4) Gradateurs : [2]..... 52
IV.4.1) Définition : 52
IV.4.2) Gradateur monophasé :..... 53
IV.4.3) Gradateur triphasé : 53
IV.5) Description d'un démarreur électronique progressif : 54

IV.5.1) Principe de fonctionnement du gradateur du démarreur progressif :55
IV.6) Types de démarreurs progressifs : 55
IV.6.1) Nombre de phases commandées : 55
IV.6.2) Types du second semi-conducteur polarise inversement : 56
IV.7) Applications du démarreur progressif : 58
IV.8) Avantages du démarreur progressif : 59
IV.8.1) Avantages mécaniques : 59
IV.8.2) Avantages électriques : 60
IV.9) Option d'arrêt progressif : 60
IV.10) Hypothèse simplificatrice : 60
IV.11) Commande des gradateurs : 61
IV.11.1) Commande par angle de phase : 61
IV.11.2) 11.2 Commande par train d'onde : 63
IV.12) Simulation de la commande par angle de phase : 65
IV.13) Résultats de simulation du gradateur triphasé (Vs) : 67
IV.14) Interprétation des résultats de simulation : 70
IV.15) Conclusion : 70
V) Chapitre IV : Le démarrage progressif du moteur asynchrone 253-231 (simulation de l'ensemble gradateur-moteur) : 71
V.1) Introduction : 71
V.2) Le système complet simulé : 71
V.3) Les résultats de simulation : 72
V.3.1) La tension : 72
V.3.2) A vide : Cr=0 [N.m] : 75
V.4) Interprétation des résultats de simulation : 77
V.4.1) Simulation de l'ensemble gradateur-moteur 77
V.5) Etude comparative des résultats des deux simulations : 77
V.5.1) Les courants de démarrages : 77
V.5.2) Les vitesses et les couples : 77
V.6) Conclusion : 78
VI) Conclusion générale : 79
VII) Références Bibliographiques : 80
VIII) Annexes : 82

Liste des figures :

Chapitre I : GÉNÉRALITE SUR L'EXTRUDEUSE.

Figure I 1: Implantation du complexe CP2/K. 5
Figure I 2: Schéma du procédé du CP2/K. 6
Figure I 3: schéma électrique des deux sous-stations n°1 et n°2. 8
Figure I 4: schéma de l'extrudeuse 11
Figure I 5: Moteur principal de l'extrudeuse. 12
Figure I 6: Stator du moteur asynchrone triphasé. 13
Figure I 7: rotor a cage d'écureuil. 14
Figure I 8: couplage du moteur dans la boite à bornes. 14
Figure I 9: Schéma Bloc Extrudeuse pris de La S.NC.C. 16
Figure I.10 Figure I 10: Courbes des essais de démarrage du moteur 253.231. 16
Figure I 11: Courbes du déclenchement de la protection lors du dernier échec du démarrage du moteur 253.231 17
Figure I 12: Schéma Unifilaire initial du Moteur principal de l'extrudeuse. 17

Chapitre II : MODELISATION DU MOTEUR ASYNCHRONE.

Figure II 1: Constitution de la machine asynchrone. 21
Figure II 2: cage d'écureuil. Figure II 3: Le stator. 22
Figure II 4 : 24
Figure II 5: Transformation de Park et choix des angles de Park. 29
Figure II 6: Enroulements triphasés représentés dans le repère de Park. 30
Figure II 7: Schéma bloc de la machine asynchrone alimentée en tension. 36
Figure II 8 : Variation de la vitesse en fonction du temps avec couple résistant (Cr=0 [N.m]). 38
Figure II 9 : zoom sur la Variation de la vitesse en fonction du temps. 38
Figure II 10 : Variation du couple électromagnétique en fonction du temps avec couple résistant (Cr=0 [N.m]). 39
Figure II 11 : zoom sur la Variation du couple électromagnétique en fonction du temps. 39
Figure II 12 : Variation du courant statorique en fonction du temps avec couple résistant (Cr=0 [N.m]). 40
Figure II 13 : Zoom sur le courant statorique de démarrage (directe) en fonction du temps. . 40
Figure II 14 : Variation de la vitesse en fonction du temps avec couple résistant (Cr=50000 N.m à t= 2s). 41
Figure II 15 : Zoom sur la variation de la vitesse en fonction du temps avec couple résistant (Cr=50000 N.m à t= 2s). 41
Figure II 16 : Variation du couple électromagnétique en fonction du temps avec couple résistant (Cr=50000 N.m à t= 2s). 42
Figure II 17 : zoom sur la Variation du couple électromagnétique en fonction du temps avec couple résistant (Cr=50000 N.m à t= 2s). 42
Figure II 18 : Variation du courant statorique en fonction du temps avec couple résistant (Cr=50000 N.m à t= 2s). 43
Figure II 19 : Zoom sur le courant statorique de démarrage en fonction du temps. 43

Chapitre III : LES DÉMARREURS PROGRESSIFS (GRADATEUR TRIPHASÉ).

Figure III 1 : Démarreur progressif pour (a) moteurs à faible puissance et (b) moteur à haute puissance. 47
Figure III 2 : La présentation symbolique de la diode. 48
Figure III 3 : Caractéristique statique Id (Vd) de la diode. 49
Figure III 4 : Caractéristique statique d'une diode idéale. 49
Figure III 5 : La présentation symbolique thyristor. 50
Figure III 6 : Caractéristique de thyristor. 51
Figure III 7 : L'association tête-bêche de deux thyristors. 52
Figure III 8 : Gradateur monophasé. 53
Figure III 9 : Variation de la tension de sortie du gradateur monophasé en fonction du temps pour les valeurs de Vg. 53
Figure III 10 : Gradateur triphasé. 54
Figure III 11 : Commande sur une phase. 56
Figure III 12 : Commande par demi-alternance. 57
Figure III 13 : Commande par alternance complète. 58
Figure III 14 : Courbes de la variation de la tension par la commande d'angle de phase. (a) : pour une charge résistive pour différentes valeurs de α. 61
Figure III 15 : Schéma-bloc de l'algorithme de commande par angle de phase. 62
Figure III 16 : variation de la tension d'image en fonction du temps V_g. 63
Figure III 17 : Courbes de la variation de la tension par la commande d'angle de phase. 64
Figure III 18 : Schéma-bloc de l'algorithme de commande par train d'onde. 64
Figure III 19 : bloc Simulink du gradateur triphasé. 65
Figure III 20 : Variation de la tension d'image en fonction de temps. 65
Figure III 21 : Impulsions générées à partir de la commande angle de phase (Vc1+Vc2). 66
Figure III 22 : Formes de variation de la tension sortie du gradateur triphasé en fonction du temps. 69

Chapitre IV : LE DEMARRAGE PROGRESSIF DU MOTEUR ASYNCHRONE 253-231 (SIMULATION DE L'ENSEMBLE GRADATEUR-MOTEUR).

Figure IV 1 : La représentation du système complet à simuler, (Bloc Simulink de l'ensemble gradateur-moteur asynchrone). 71
Figure IV 2 : progression de la tension appliquée au démarrage du moteur en fonction du temps. 72
Figure IV 3 : Zoom sur la progression de la tension appliquée au démarrage du moteur en fonction du temps. 74
Figure IV 4 : Variation de la vitesse en fonction du temps avec couple résistant. 75
Figure IV 5 : Variation du couple électromagnétique en fonction du temps avec couple résistant. 75
Figure IV 6 : Variation du courant statorique en fonction du temps avec couple résistant. ... 76
Figure IV 7 : Zoom sur le courant statorique de démarrage (progressif) en fonction du temps. 76

Liste des tableaux :

Tableaux I 1 : Les caractéristiques de l'extrudeuse (promenade principales, partie traitement, décharge). 10

Liste des annexes :

Annexe 1 : Bloc Simulink d'un moteur asynchrone. 82
Annexe 2 : Bloc Simulink du gradateur. 83
Annexe 3 : Bloc Simulink d'un gradateur triphasé. 83

Liste des abréviations :

Abréviation	Dénomination
ADS	Aguas de Skikda
BAD	Banque Algérienne de Développement
Cacc	Couple d'accélération
Cd	Coule de démarrage
Cn	Couple nominal
Cr	Couple résistant de la machine entrainé
CP1/K	Complexe Pétrochimique n°1 de Skikda
CP2/K	Complexe Pétrochimique n°2 de Skikda
CP1/Z	Complexe Pétrochimique n°1 d'Arzew
DOS	Direction des Œuvres Sociales
DRIK	Direction Régional Industrielle de Skikda
ENCG	Entreprise Nationale des Corps Gras
ENIP	Entreprise Nationale des industries pétrochimiques
ENPC	Groupe Industriel des Plastiques et Caoutchoucs
F	Relai thermique/ fusible
FIR	Force d'Intervention et de Réserve
GL1/K	Complexe liquéfaction de gaz n°1 de Skikda
Id	Courant de démarrage
IM	Moteur à induction
In	Courant nominal
Lr	Inductance rotorique
Ls	Inductance Statorique
Lm	Inductance mutuelle
Km	Contacteur
M~3	Moteur triphasé
MTA	Millions de tonnes par an
P	Nombre de pôles
PEC	Division Pétrochimie
PEHD	Poly éthylène Haute Densité
POLYMED	La Méditerranéenne des Polymère
Q	Protection
RA1/D	Raffinerie n°1 d'Adrar
RA1/K	Raffinerie n°1 de Skikda
RA2/K	Raffinerie n°2 de Skikda
RA1/Z	Raffinerie n°1 d'Alger
RA1/Z	Raffinerie n°1 d'Arzew
REPSOL	Refinería Española de Petróleo, Sociedad Limitada (Raffinerie de pétrole d'Espagne)

RPC	Activité Raffinage et Pétrochimie
Rr	Résistance rotorique
Rs	Résistance statorique
RTE	Direction Régionale Est Transport par canalisation
SKS	Sharikat Kahraba Skikda
SPE	Société de production d'électricité Est
STH	La Société de Gestion et d'Exploitation des Terminaux Marins à Hydrocarbures
SONATRACH	Société nationale pour la recherche, la production, le transport, la transformation, et la commercialisation des hydrocarbures
SONELGAZ	Société Nationale de l'Electricité et du Gaz
VFD	*Variable Frequency Drive (Variateur de vitesse)*

Notations :

A,b,c : indices correspondant aux trois phases "a", "b","c".

s,r : indices correspondant au stator et au rotor.

d,q : axes correspondant au référentiel lie au champ tournant.

L_s, L_r : inductances cycliques statoriques et rotoriques par phase.

M : inductance mutuelle.

R_s, R_r : résistances respectives de l'enroulement statoriques et rotoriques par phase.

T_s, T_r : constantes de temps statorique et rotorique ($T_s = L_s/R_s$, $T_r = L_r/R_r$).

σ : coefficient de fuite total ($\sigma = 1-L_m^2/L_sL_r$).

P : nombre de pair de pôles.

C_e : couple électromagnétique.

C_r : couple résistant.

K_f : coefficient de frottement visqueux.

J : moment d'inertie de la partie tournante.

θ_s, θ_r : angles électriques statorique et rotorique.

θ_{sl} : angle électrique de glissement

ω_s, ω_r : vitesses angulaires électriques statorique et rotorique.

ω_{sl} : glissement de vitesse angulaire électrique

Ω_r : vitesse mécanique

φ_s, φ_r : flux statorique, rotorique

I : courant.

V : tension.

s,r : axes correspondants au stator (rotor).

G : Glissement.

i_s, i_r : Courant statorique. Courant rotorique.

(XY) : axes correspondants au référentiel lié au rotor.

[P(θ)] : matrice de transformation de Park.

MAS : Machine asynchrone.

Les autres symboles utilises sont définis dans le texte.

I) Introduction générale :

Les moteurs asynchrones triphasés sont de loin les machines les plus répandues dans l'industrie des hydrocarbures et de la pétrochimique à travers le monde entier. Cette croissance de ce type de machines électriques est essentiellement due à sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique et ça faible nécessité d'entretien.
Comme tous moteurs électriques, les moteurs asynchrones triphasés transforment l'énergie électrique en une énergie mécanique.
Ils sont constitués d'un stator et un rotor. Selon la conception du rotor, deux types des moteurs asynchrones triphasés sont distingués ; à rotor bobiné et à cage d'écureuil. Ces derniers sont les plus utilisés, ils sont caractérisés principalement par la vitesse de rotation, l'intensité de courant absorbée et enfin le couple nominal qui, pour un fonctionnement correct doit être égal au couple résistant de la charge entrainée.

Lors d'un démarrage d'une machine asynchrone triphasé, la vitesse est inférieure à la vitesse du synchronisme et le couple moteur doit être supérieur au le couple résistant. Quant à l'appel de courant, il peut atteindre plusieurs fois le courant nominal ce qui peux provoquer une chute de tension dans le réseau susceptible d'affecter le fonctionnement des récepteurs et endommager le moteur. Pour remédier à ces inconvénients, plusieurs méthodes permettant de limiter le courant de démarrages sont utilisées dont le choix est dicté par des impératifs électriques, mécaniques et économiques et aussi par la nature de la charge entraînée. Les démarrages conventionnels sont encore existants dans les installations anciennes ou par mesure d'économie surtout dans le cas de faibles puissances. Avec l'apparition de l'électronique de puissance, des démarrages plus performants ont vu le jour, que ce soit pour les applications nécessitant ou pas une variation de vitesse.

Les démarreurs progressifs sont une solution à la fois efficace et économique pour le démarrage des moteurs asynchrones triphasés quand la variation de vitesse n'est pas requise.

Ce sont des appareils connectés au moteurs par différentes manières et qui contrôlent généralement la tension d'alimentation du moteur mais dans certains cas d'autres paramètres comme le courant ou bien le couple. Le démarrage progressif par rampe de tension est basé sur un circuit gradateur comprenant, dans la plupart des cas, des thyristors. La commande de l'angle d'amorçage de ces semi-conducteurs prenant comme un exemple la commande par angle de phase, permet de déterminer la forme et la valeur de la tension fournie au moteur qui serait réduite au début du démarrage et augmentée peu à peu jusqu'à la tension nominale. Le courant étant proportionnel à cette tension, serait réduit et pareil pour le couple, la vitesse de rotation du moteur, par contre, serait lente ce qui donne un démarrage progressif et doux.

Dans le premier chapitre on a effectué une présentation de la structure d'accueil : le complexe pétrochimique CP2/K, où notre stage de mise en situation professionnelle s'est déroulé, puis on a effectué une description de l'extrudeuse, et de son moteur (MAS triphasés) et ses caractéristiques.

La modélisation du moteur asynchrone et simulation de démarrage direct du moteur à vide et en charge a été abordé au deuxième chapitre.

Le troisième chapitre est consacré au démarreur progressif (les gradateurs triphasés). Où est donner un aperçu sur leur principe de fonctionnement, leurs structures et leurs techniques de commandes. La simulation de démarreur progressif a été réalisée.

On termine le travail par le quatrième chapitre où l'association du moteur et des systèmes de démarrages (simulation de l'ensemble gradateur-moteur**)** a été accompli. Les résultats de la simulation sont illustrés par des courbes et ensuite discutés en comparant l'effet des deux démarrages sur la tension, le courant de démarrage, le couple et la vitesse du moteur étudié. Cela permettra de voir si la solution proposée dans ce mémoire est efficace ou non.

Nous terminons notre mémoire par une conclusion sur ce que ce travail nous a apporté et par une présentation des perspectives envisagées.

CHAPITRE I : GÉNÉRALITE SUR L'EXTRUDEUSE.

II) Chapitre I : Généralité sur l'extrudeuse :

II.1) Introduction :

Pour satisfaire le marché national, SONATRACH a acquis l'unité PEHD qui se trouve au niveau du CP2/K afin de réduire ses importations en polyéthylène et essayer d'aller vers son exportation.

Etant affecté à la division Pétrochimie, on a effectué notre stage de mise en situation professionnel au CP2/K dans le but de traiter la problématique choisie durant le stage.

II.2) Présentation de SONATRACH :

SONATRACH est un groupe pétrolier et gazier qui intervient dans l'exploration, la production, le transport par canalisation, la transformation et la commercialisation des hydrocarbures et de leurs dérivés. Il se développe également dans les activités de pétrochimie, de génération électrique, d'énergies nouvelles et renouvelables, de dessalement d'eau de mer et d'exploitation minière. Cette compagnie a été créée le 31 décembre 1963.

II.2.1) Activité Raffinage et Pétrochimie (RPC) :

SONATRACH s'est dotée de l'activité RPC dans le but de faire la transformation et la valorisation des hydrocarbures. Cette activité est constituée des maillons suivants :

II.2.2) Division Raffinage :

SONATRACH dispose de 5 raffineries nationales :

- La raffinerie de Skikda RA1/K : 16.5 MTA ;
- La raffinerie Topping Condensa de Skikda RA2/K : 5.5 MTA ;
- La raffinerie d'Arzew RA1/Z : 3.75 MTA ;
- La raffinerie d'Alger RA1/Z : 3.65 MTA ;
- La raffinerie d'Adrar RA1/D : 0.6 MTA.

Les bonnes performances de raffinage en 2015 ont permis une production supplémentaire de 500 mille tonnes de Gasoil, ayant pour conséquence la réduction les importations.

II.2.3) Division pétrochimie (PEC)

L'industrie pétrochimique exploite actuellement, deux complexes à savoir :

- Le complexe CP2/K (ex-POLYMED), situé à Skikda, produit uniquement du Polyéthylène à haute densité (PEHD) ;
- Le Complexe CP1/Z, situé à Arzew, produit du méthanol, du formaldéhyde, de la formuerai et des résines.

II.3) Présentation du lieu de stage :

II.3.1) Historique :

Le complexe CP2/K a vu le jour au niveau de la zone industrielle de SKIKDA en janvier 2004 après que le projet de réalisation d'une unité de polyéthylène haute densité soit signé en avril 1991 entre l'ENIP (Entreprise Nationale des Industries Pétrochimiques) et Repsol Quimica (filiale de Repsol) s'inscrivant dans le cadre de la coopération industrielle Algéro-Espagnole. L'unité mixte portait alors le nom de POLYMED (Méditerranéenne des Polymères).

Le capital de l'unité était détenu par l'ENIP à 64%, REPSOL à 23% et BAD (Banque Algérienne de Développement) à 13%. Par la suite, l'ENIP a décidé de racheter les parts de REPSOL et la BAD après que ces derniers aient décidé de se retirer. Aujourd'hui, SONATRACH a repris l'unité qui désormais porte le nom de CP2/K.

II.3.2) Implantation du CP2/K

Le complexe CP2/K qui comporte l'unité PEHD est implanté à l'intérieur de la zone industrielle de Skikda. D'une superficie d'environ 17 hectares (166800 m²), dont 10% sont bâtis, le complexe CP2/K se trouve sur la côte à 06 km à l'Est du chef-lieu de la wilaya de Skikda et à une hauteur moyenne d'environ 06 m au-dessus du niveau de la mer.

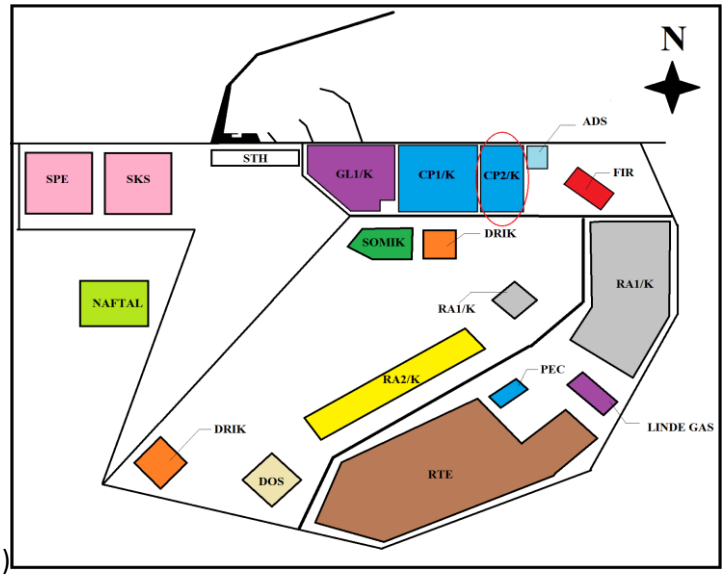
Sa position géographique est limitée comme suit :

- Au Nord : par la mer Méditerranée ;

- Au Sud : par la route principale de la zone industrielle ;

- A l'Est : par la FIR (Force d'Intervention et de Réserve) ;

- A l'Ouest : par CP1/K (Complexe Pétrochimique 1 de Skikda).



II)

Figure I 1: Implantation du complexe CP2/K.

II.3.3) Activité du CP2/K :

Le complexe CP2K a pour objectif de produire du polyéthylène à haute densité PEHD.

Il est d'une capacité de 130.000 t/an au niveau de la zone industrielle de Skikda et comporte une seule ligne de production.

Le complexe utilise comme matières premières principales :

- L'éthylène consommé est importé (Italie, Libye, Espagne, Arabie Saoudite) ;
- Isobutane venant du GL1K situé également à proximité consommé d'une moyenne de 2500 t/an ;
- L'Hexène-1 importé d'une moyenne de 1 430 t/an.

La production de l'unité PEHD est destinée à l'approvisionnement de l'industrie nationale de transformation plastique et éventuellement à l'exportation.

La clientèle nationale est constituée de diverses entreprises publiques telles que : ENPC, ENCG, et aussi des entreprises de transformation du secteur privé.

II.3.4) Installations principales du CP2/K

1) Unité de préparation et de traitement des matières premières
2) Réacteur où se déroulent la polymérisation et la récupération du PEHD en poudre.
3) Extrudeuse qui transforme la poudre en granulés.
4) Stockage intermédiaire (Capacité 3500 Tonnes).
5) Unité de conditionnement.

II.3.5) Installations auxiliaires du CP2/K :

6) Production de vapeur, électricité, air…etc. ;
7) Traitement des effluents ;
8) Stockage de matières premières, utilités et additifs (Eau, Hydrogène, Hexène, et de l'Isobutane) ;
9) Magasin de stockage de produit fini d'une superficie de 18 000 m2 soit une capacité de 12 000 tonnes.

II.4) Description du procédé général :

Le complexe utilise le procédé PHILLIPS, connu sous le nom "PF Process" ou "procédé de particules", qui a été conçu pour l'usine de POLYMED. Il exige de soumettre les matières premières à un processus de conditionnement et de purification, afin d'obtenir le degré de pureté demandé par la réaction de polymérisation qui consiste essentiellement à produire le polyéthylène.

Le procédé de particules est divisé en une série d'étapes ou systèmes : traitement de matières premières ; activation et addition du catalyseur ; polymérisation dans un réacteur sous forme de boucle ; système de flash et séchage du polymère ; purification et récupération du gaz de recyclage. Le procédé se termine par le système de finition du polymère : extrusion et séchage de celui-ci. Le résultat est un granulé d'une certaine taille et d'une qualité apte à une grande variété d'applications.

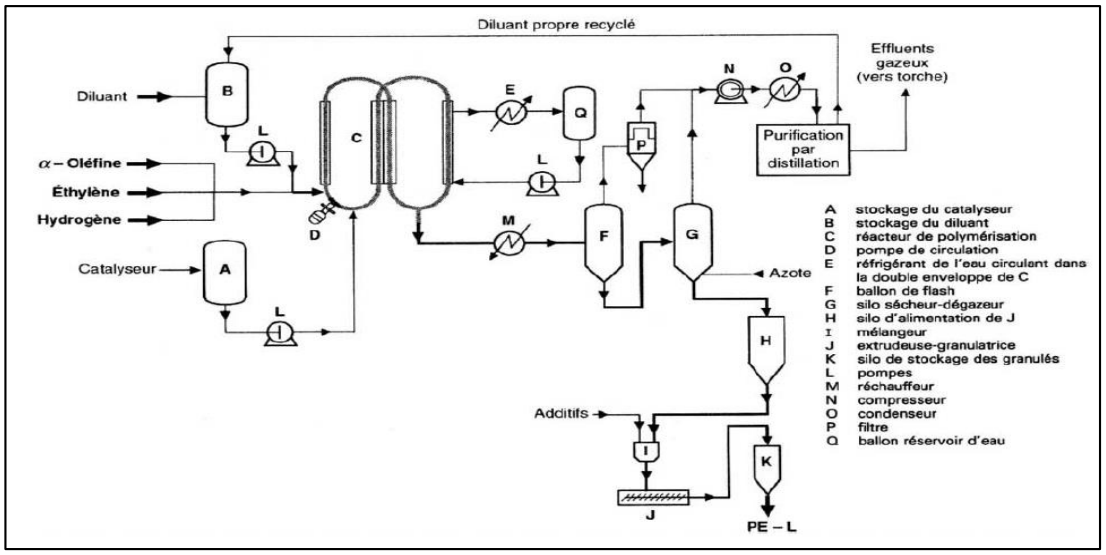


Figure I 2: Schéma du procédé du CP2/K.

II.4.1) Les installations électriques :

Le complexe est doté deux stations principales :

a. Sous-station n°1 :

Elle est connectée avec deux arrivées électriques venant de deux différents postes électriques Sonelgaz du réseau 63kV, elle est équipée des armoires de protection électrique et de deux transformateur abaisseur 63/5,5kV. Chaque transformateur assure l'alimentation d'un jeu de barre, avec l'existence d'un couplage entre les deux.

b. Sous-station n°2 :

Elle est alimentée par la sous-station n°1, elle assure la répartition des deux jeux de barres 5,5kV sur l'ensemble des équipements de Haute tension (HTA). Elle dispose aussi de deux transformateur abaisseur 5500/400V pour l'alimentation basse tension (BT) des équipements.

- Le complexe dispose d'un groupe électrogène diesel d'une capacité de 2,5MVA et d'un système d'alimentation sans interruption (UPS) afin de secourir les équipements stratégiques en cas de perte de l'alimentation principale.

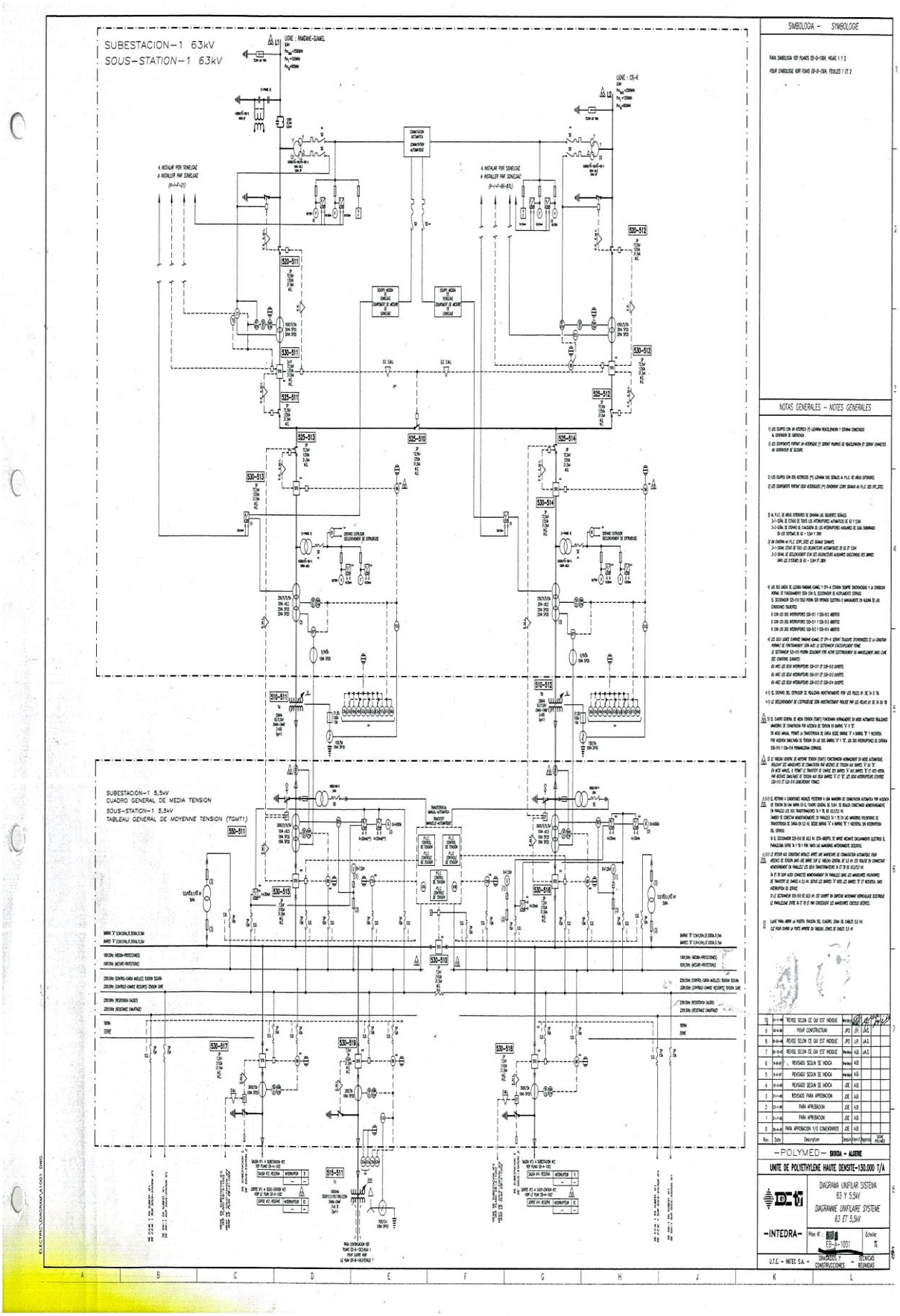


Figure I 3: schéma électrique des deux sous-stations n°1 et n°2.

c. Atelier de maintenance :

L'atelier dispose de quelques machines de fraisage et de coupure pour les interventions simple alors que les opérations complexes de maintenance sont assurées par la société Somik SPA, qui dispose de ces propres ateliers qui se situe dans la Plateforme de Skikda.

II.5) L'extrudeuse :

II.5.1) Rôle :

L'extrudeuse est la machine principale responsable de transformation de la poudre de polymère en granulés de polyéthylène haute densité, la poudre est mélangée avec des additifs et fondue puis coupée en pellets ou en granulés. Ces derniers sont envoyés vers des silos mélangeurs. Ces Silos déchargent les granulés en vrac dans des camions ou dans les silos d'alimentation des lignes d'ensachage. Si les granulés obtenus sont hors spécifications, ils sont envoyés vers des silos de stockage de granulés.

II.5.2) Caractéristiques :

a. Promenade principale :

NOMENCLATURE	Moteur d'entraînement principal	Auxiliaire démarrer le moteur	L'embrayage
Poids à vide			
Poids opérationnel	148 KN	4,25 KN	14 KN

NOMENCLATURE	Boîte de vitesses avec couvercle de boîte de vitesses	Couvercle de boîte de vitesses	Cabine insonorisée (Capot anti-bruit)
Poids à vide	465 KN		
Poids opérationnel	495 KN	70KN	32KN

b. Partie traitement :

NOMENCLATURE	Chaque baril (Huile à chauffage ou vapeur)	Chaque baril (chauffage électrique)	Chaque support
Poids à vide			
Poids opérationnel	18,5 KN	21,6 KN	14 KN

NOMENCLATURE	Arbres à vis incl. éléments à vis	Unité de refroidissement par eau en ZSK
Poids à vide		19 KN
Poids opérationnel	2 X 17 KN	24 KN

c. Décharge :

NOMENCLATURE	Vanne de dérivation DAV 300/200	Changeur de pack d'écran SWZ 4500	Pelle tiseur sous-marin ug500
Poids à vide			50 KN
Poids opérationnel	20 KN	36 KN	60 KN

NOMENCLATURE	Moteur de pelle tiseur	Unité hydraulique DAV/SWZ/UG	Décharge de l'unité chauffage au mazout
Poids à vide		10,2 KN	23KN
Poids opérationnel	15KN	12,4 KN	32KN

Tableaux I 1 : Les caractéristiques de l'extrudeuse (promenade principales, partie traitement, décharge).

d. Électrique :

- Partie du processus de chauffage de l'armoire électrique.
- Armoire électrique unité de chauffage à l'huile.
- Armoire de commande rhéomètre gottfert.
- Entraînement de granulateur d'armoire de convertisseur.
- Panneau de contrôle local.
- Armoire de commande moteur.
- Armoire de verrouillage.

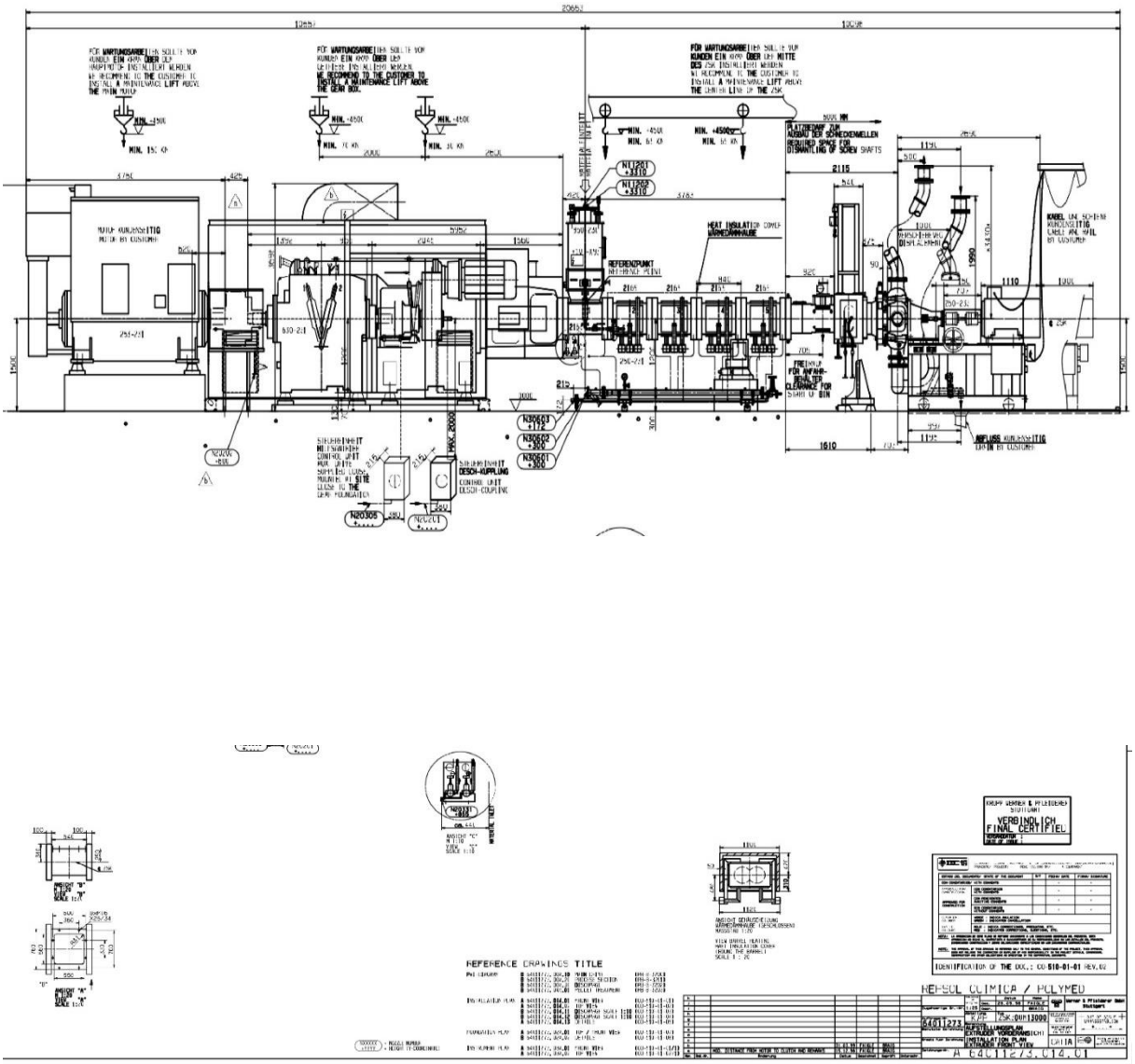


Figure I 4: schéma de l'extrudeuse.

II.5.3) Fonctionnement :

L'extrudeuse est composée d'une vis qui est constituée d'un ensemble d'éléments de vis assemblés sur un arbre cannelé. La vis malaxe, compresse, cisaille, échauffe et transporte en continu la matière fluidifiée et homogène vers la filière. Celle-ci conférera à la masse plastifiée la forme désirée.

II.6) Le moteur de l'extrudeuse :

II.6.1) Type :

Moteur asynchrone triphasé (cage d'écureuil) **:**

Figure I 5: Moteur principal de l'extrudeuse.

II.6.2) Définition du moteur asynchrone triphasé :

Les moteurs asynchrones triphasés appelés aussi moteurs triphasés à induction sont pratiquement les moteurs employés le plus fréquemment dans les raffineries et en usines pétrochimiques, ils constituent plus de 95% des moteurs utilisés. Ce choix est basé sur leur simplicité, robustesse, prix peu élevé et leur entretien facile, en plus, ils peuvent être construits avec des caractéristiques qui satisfont pratiquement n'importe quel besoin de l'industrie.

II.6.3) Construction du moteur de l'extrudeuse :

a. Stator :

Le stator est la partie fixe du moteur. Il comporte une carcasse, généralement en acier, renfermant un empilage de tôles minces identiques qui constituent un cylindre vide. Ces tôles servent à limiter les pertes par courants de Foucault et par hystérésis. Elles sont percées de trous à leur périphérie intérieure. L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquelles un bobinage triphasé est logé. [15]

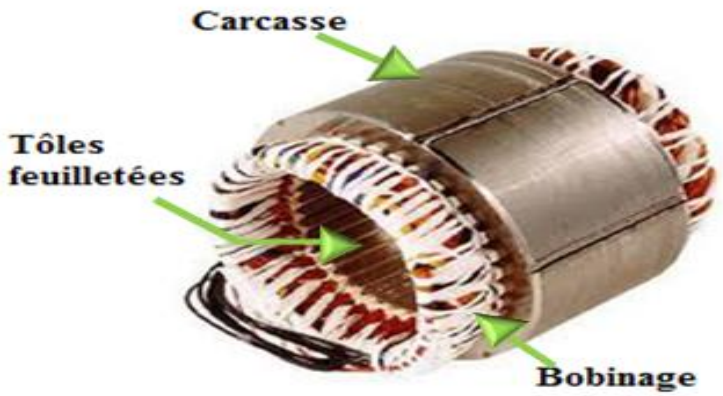


Figure I 6: Stator du moteur asynchrone triphasé.

b. Le rotor :

Le rotor est l'élément mobile du moteur. Il se compose d'un cylindre de tôles isolées entre elles et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Ces tôles sont poinçonnées à leur périphérie extérieure pour former les encoches destinées à recevoir des conducteurs. Il est séparé du stator par un entrefer très court - de l'ordre de 0,4 à 2 mm seulement. [15]

Rotor à cage d'écureuil :

L'enroulement du rotor à cage d'écureuil est constitué de barres de cuivre nues introduites dans les encoches ; ces barres sont soudées à chaque extrémité à deux anneaux qui les court-circuitent. L'ensemble ressemble à une cage d'écureuil d'où le nom de rotor à cage d'écureuil, ou simplement rotor à cage. Dans les moteurs de petite et moyenne puissance, les barres et les anneaux sont formés d'un seul bloc d'aluminium coulé. [15]

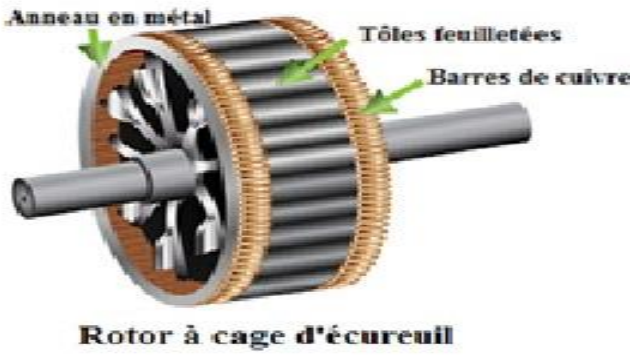


Figure I 7: rotor a cage d'écureuil.

c. Boite à bornes :

La boite à bornes est située au sommet du moteur ou sur le côté et elle est orientable dans les quatre directions. Pour les gros moteurs, la boîte est fixe. L'entrée dans cette boîte à se fait en général par un câble tripolaire à travers un presse-étoupe. Les extrémités du câble sont munies de cosses permettant le raccordement sur les bornes du moteur.

La boite à bornes contient une plaque qui comporte six bornes sur lesquelles les enroulements du stator sont connectés pour permettre un couplage en étoile ou en triangle.

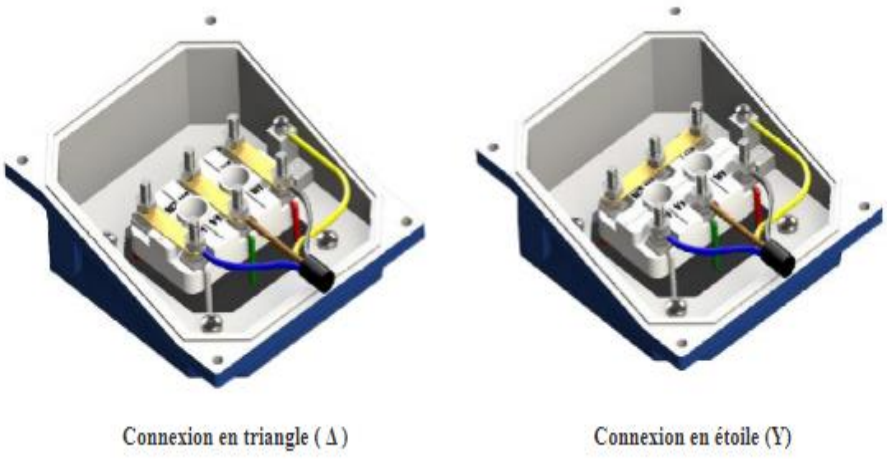


Figure I 8: couplage du moteur dans la boite à bornes.

II.6.4) Caractéristique Moteur de l'extrudeuse :

Opérations des données	**Point de repère**
Tension nominale	5.5 KV
Puissance active	5.3 MW
Facteur de puissance	0.90
Courant minimale	3500 A
Courant a vide	2800A
Courant de démarrage	7*In
Fréquence	50 Hz
Vitesse/vitesse Max	1493 /1800
Température de refroidissement	40/55 C
Rs	0.077771 Ω
Rr	0.073454 Ω
Ls	0.005629 H
Lr	0.005629 H
Lm	0.0052712 H
P	4
J	860kg*m²
K_f	0.02

II.6.5) Fonctionnement :

Durant la conception, le démarrage du moteur devait être assuré avec un autotransformateur qui n'était pas installé durant la mise en service. Actuellement, le moteur démarre en mode à vide, ce dernier est accouplé avec un moteur axillaire par un embrayage afin de le faire tourner avant le démarrage. Le moteur principal démarre après avoir atteint la vitesse de 1000 tr/mn à cause des contraintes mécaniques, l'auxiliaire est alors mis hors circuit par l'embrayage qui une fois le temps de démarrage achevé accouple le moteur en charge avec l'extrudeuse.

II.7) Problématique

Notre problématique concerne le moteur principal 253-231 (Figure I 5) qui fait tourner la vis de l'extrudeuse (Figure I 9) qui est la machine responsable de la fabrication des granulés du PEHD.

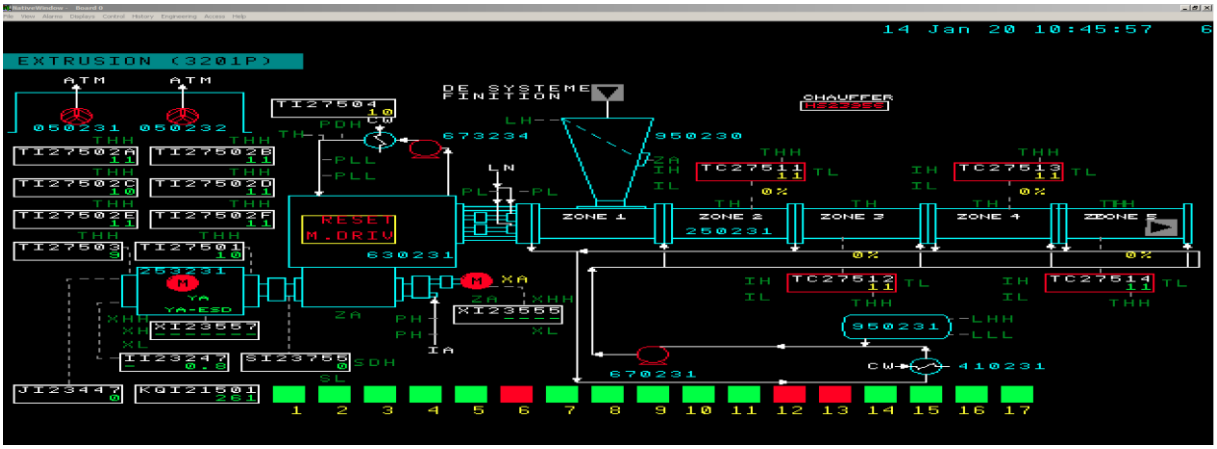
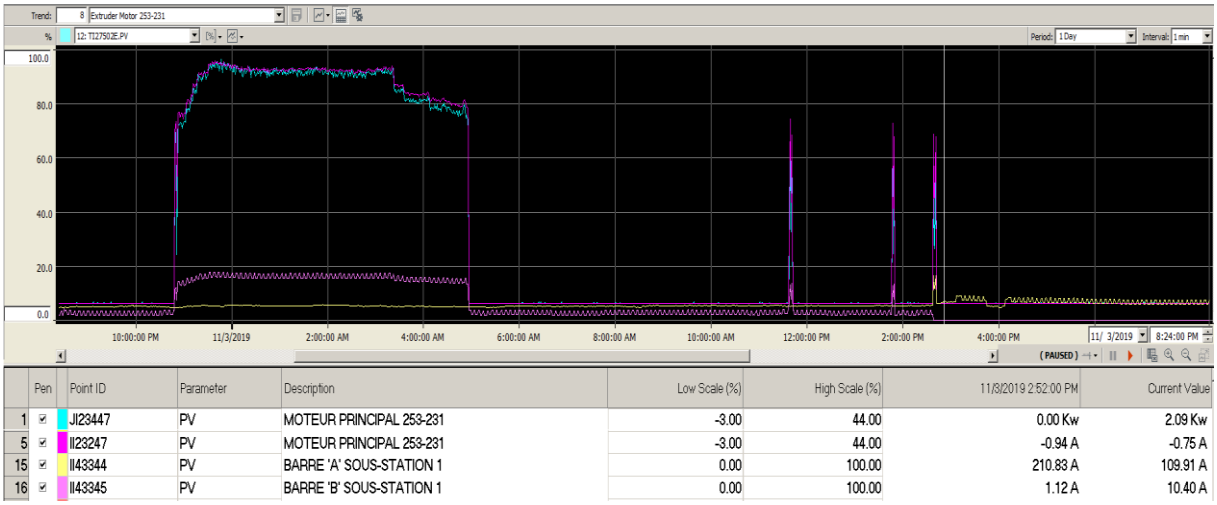


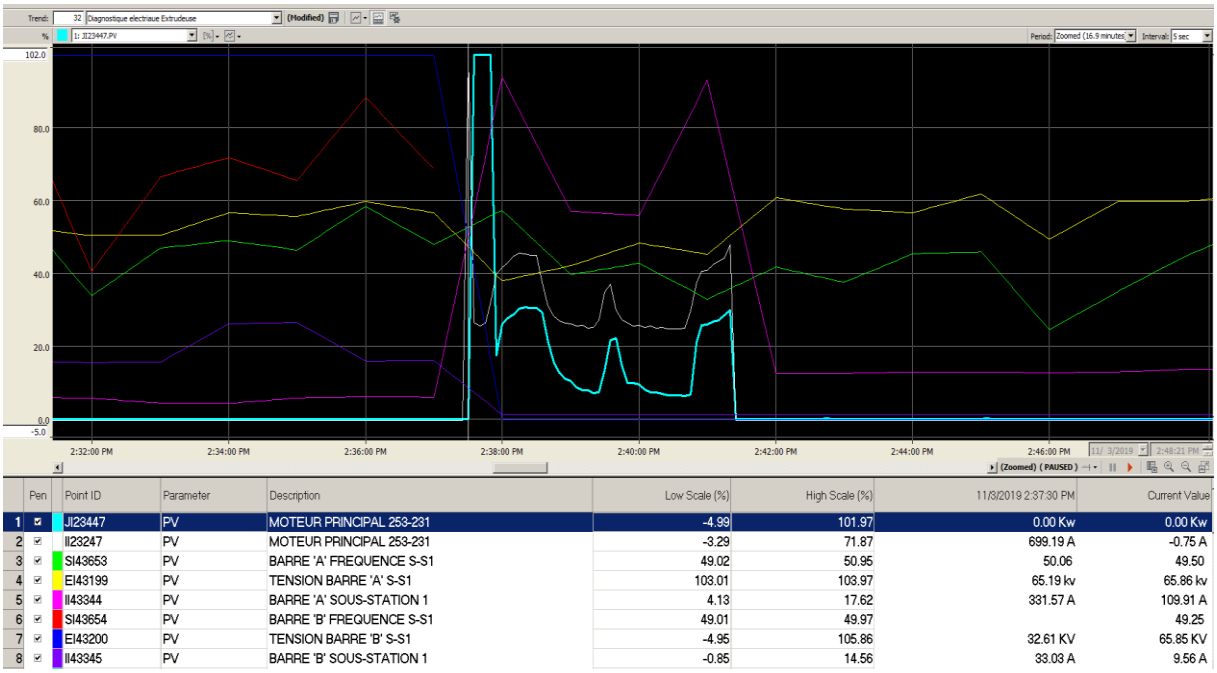
Figure I 9: Schéma Bloc Extrudeuse pris de La S.NC.C.

Pendant la journée du 03/11/2019, les répercussions du démarrage direct ont empêché le démarrage de l'extrudeuse à 11 :38 vu que la tension du réseau SONELGAZ était un peu faible (64.93 kV) en comparaison à celle du démarrage réussi vers 23 :00 de la nuit précédente avec une tension de réseau égale à 65.5 k. Un autre échec de démarrage est survenu à 13 :47 dans la même journée avec une tension de réseau de 65.02 kV. Enfin, un dernier essai à 14 :38 c'est soldé par un échec de démarrage et un déclanchement de la protection minimum de tension de la barre B qui a actionné le déclanchement du disjoncteur principal (Figure I 11).



Pen	Point ID	Parameter	Description	Low Scale (%)	High Scale (%)	11/3/2019 2:52:00 PM	Current Value
1	JI23447	PV	MOTEUR PRINCIPAL 253-231	-3.00	44.00	0.00 Kw	2.09 Kw
5	II23247	PV	MOTEUR PRINCIPAL 253-231	-3.00	44.00	-0.94 A	-0.75 A
15	II43344	PV	BARRE 'A' SOUS-STATION 1	0.00	100.00	210.83 A	109.91 A
16	II43345	PV	BARRE 'B' SOUS-STATION 1	0.00	100.00	1.12 A	10.40 A

Figure I.10 Figure I 10: Courbes des essais de démarrage du moteur 253.231.



	Pen	Point ID	Parameter	Description	Low Scale (%)	High Scale (%)	11/3/2019 2:37:30 PM	Current Value
1	☑	JI23447	PV	MOTEUR PRINCIPAL 253-231	-4.99	101.97	0.00 Kw	0.00 Kw
2	☑	II23247	PV	MOTEUR PRINCIPAL 253-231	-3.29	71.87	699.19 A	-0.75 A
3	☑	SI43653	PV	BARRE 'A' FREQUENCE S-S1	49.02	50.95	50.06	49.50
4	☑	EI43199	PV	TENSION BARRE 'A' S-S1	103.01	103.97	65.19 kv	65.86 kv
5	☑	II43344	PV	BARRE 'A' SOUS-STATION 1	4.13	17.62	331.57 A	109.91 A
6	☑	SI43654	PV	BARRE 'B' FREQUENCE S-S1	49.01	49.97		49.25
7	☑	EI43200	PV	TENSION BARRE 'B' S-S1	-4.95	105.86	32.61 KV	65.85 KV
8	☑	II43345	PV	BARRE 'B' SOUS-STATION 1	-0.85	14.56	33.03 A	9.56 A

Figure I 11: Courbes du déclenchement de la protection lors du dernier échec du démarrage du moteur 253.231.

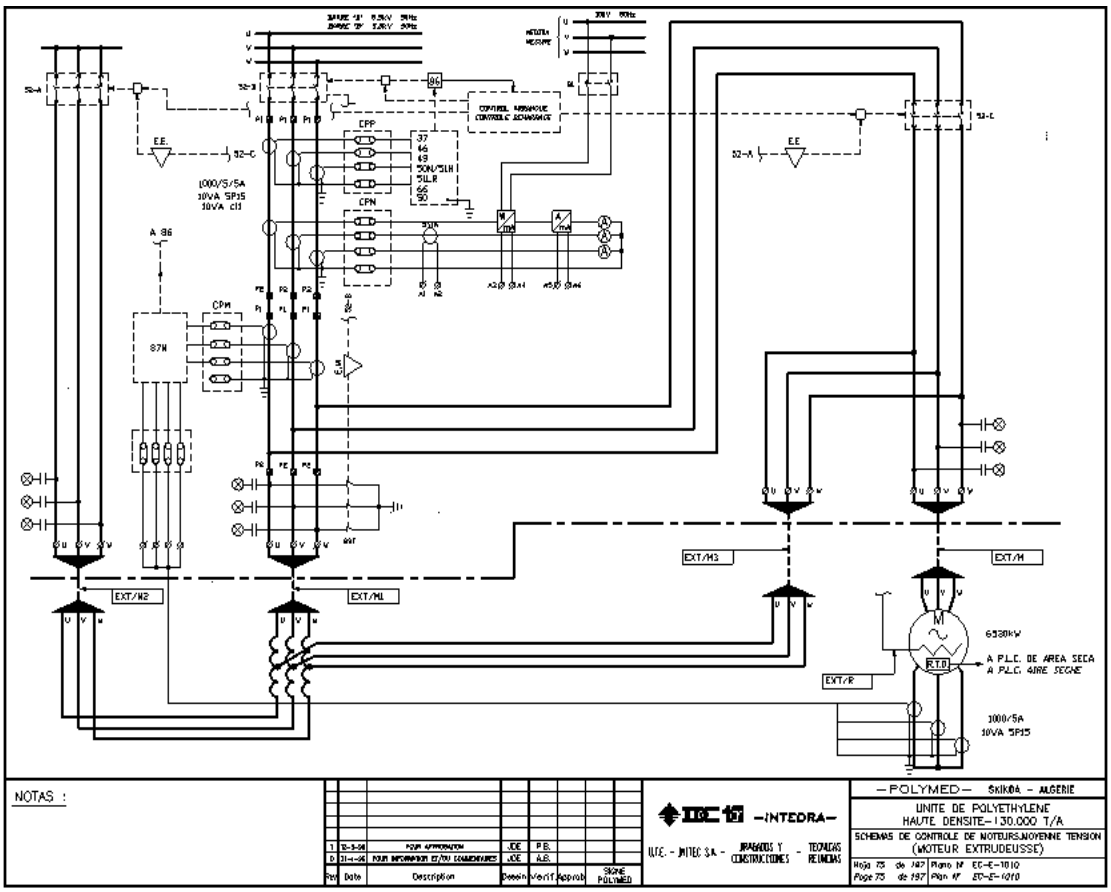
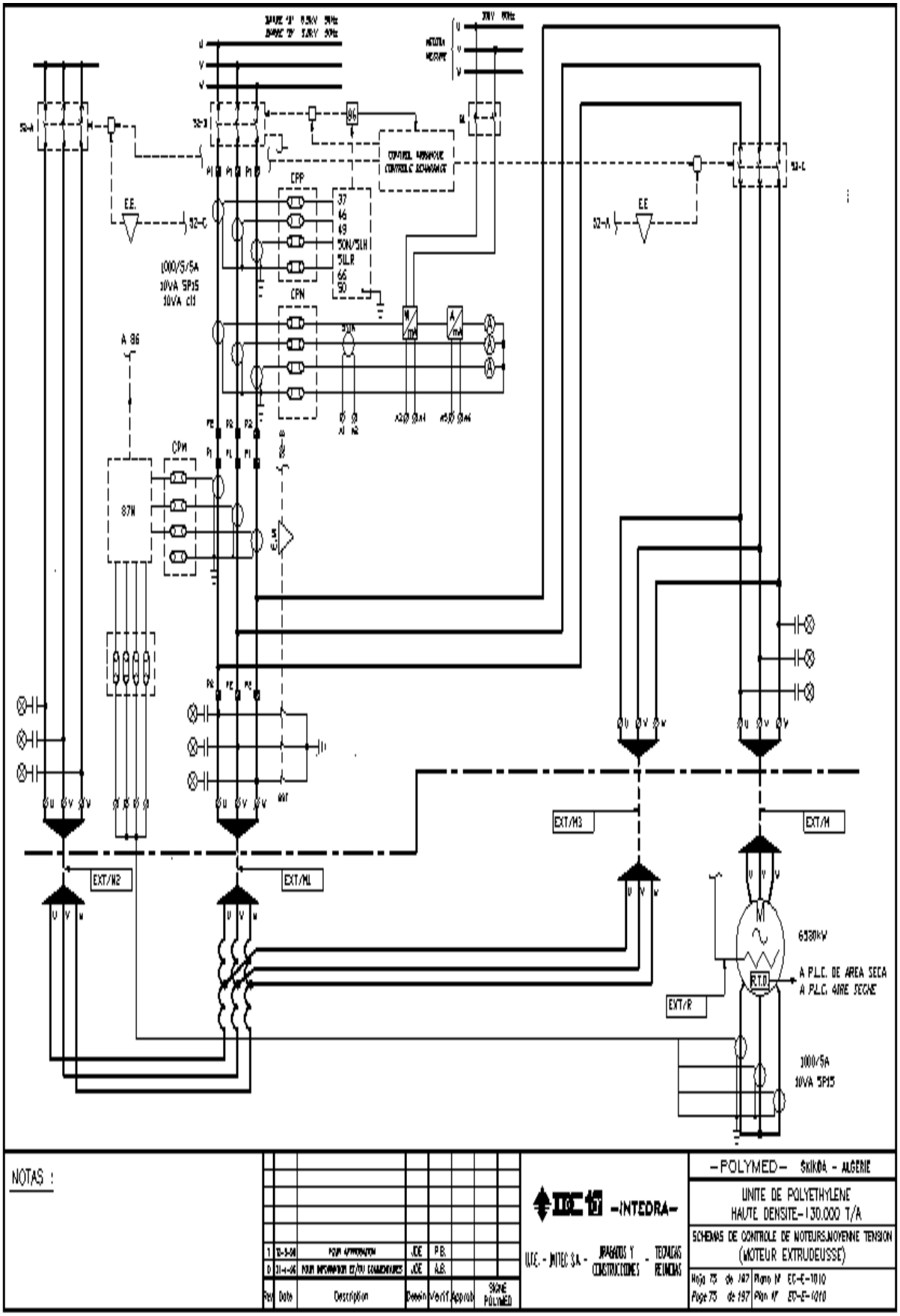


Figure I 12: Schéma Unifilaire initial du Moteur principal de l'extrudeuse.

Figue (I 12) agrandie :



Pendant la conception du complexe, le démarrage du moteur 253-231(5,3 MW et 5,5 kV) devait être assuré avec un autotransformateur or, durant la mise en service, ce dernier n'a pas été installé. Actuellement, le moteur démarre directement, et comme son courant nominal est de 3500 A, son appel de courant est considérablement élevé, voir la figure (I 12).
Dans le cas normal, cela provoque des chutes de tension dans le réseau ce qui engendre l'arrêt de plusieurs équipements du complexe.
Durant les périodes de forte consommation de l'électricité, les chutes de tension sont si importantes qu'elles causent l'activation de la protection de minimum de tension et donc le déclenchement du disjoncteur principal de La barre B.

Cette contrainte a plusieurs répercutions :

- L'échec de la mise en marche de l'extrudeuse.
- Le risque d'interrompre la réaction chimique du procédé principal.
- Blackout dans tout le complexe.

II.8) Solution proposée :

Notre choix c'est porté sur le démarrage électronique (gradateur triphasé) puisqu'il est la meilleure alternative à l'autotransformateur en termes de diminution de la tension appliquée au moteur et donc la limitation du courant de démarrage. En plus, il est moins couteux qu'un démarrage avec variateur de vitesse surtout que le procédé actuel de l'extrudeuse nécessite une vitesse fixe.

II.9) Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté la compagnie nationale SONATRACH et son activité raffinage et pétrochimie ainsi que le complexe CP2/K et passant en revue ces unités principales. Son procédé général et le procédé d'extrusion (l'extrudeuse, moteur d'extrudeuse) en particulier, la problématique et la solution proposée.

Chapitre II :
MODELISATION DU MOTEUR ASYNCHRONE.

III) Chapitre II : modélisation du moteur asynchrone

III.1) Introduction :

La Modélisation de la machine asynchrone triphasée (MAS). Dans un premier lieu, on donnera de manière explicite le modèle mathématique de la machine asynchrone (Equations électriques et mécaniques) dans son référentiel triphasé. Puis, on réduira l'ordre du système par une transformation dite de PARK. Cette transformation modélise la MAS dans un nouveau référentiel, biphasé cette fois. Dans un dernier lieu, on donnera la simulation numérique de différentes grandeurs de la MAS [11]. Dans les pays industrialisés, plus de 60% de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie mécanique par des entraînements utilisant les moteurs électriques. Le modèle mathématique d'une Machine Asynchrone (MAS) nous facilite largement son étude et permet sa commande dans les différents régimes de fonctionnement transitoire ou permanent [11]. La représentation de la machine asynchrone par des équations selon le système triphasé donne un modèle, dont les équations sont à coefficients variables en fonction du temps [3]. Dans le but de faciliter leur résolution, on a recours à une modélisation dite « transformation de Park », qui consiste à transformer le système triphasé en système à deux axes orthogonaux. L'élaboration d'une telle modélisation est indispensable pour l'étude du régime de contrôle du flux, de couple, de régulation de tension et de vitesse [4]. Dans ce chapitre nous nous intéresserons à la modélisation de la machine asynchrone par :

- La mise en équation de la machine asynchrone à partir d'hypothèses simplificatrices.
- La simplification de ces équations par l'introduction de la transformation de Park.
- La mise sous forme d'équation d'état.

III.2) Définition de la machine asynchrone :

On appelle machine asynchrone toute machine, qui, ayant ($2\ p$) pôles et étant reliée à un réseau de fréquence f, ne tourne pas exactement à la vitesse asynchrone ($60f_s\ /$). On parle généralement de moteurs asynchrones car ces machines sont destinées à fournir de la puissance mécanique à partir du réseau électrique.Parmi les machines asynchrones, on peut distinguer deux types [5] :

- Les machines d'induction.
- Les machines à collecteur.

Le moteur d'induction est tellement plus utilisé que les autres que lorsqu'on parle de moteur asynchrone on sous-entend d'induction. La machine d'induction est caractérisée par une armature non alimentée (rotor), parcourue par des courants induits par l'autre armature qui est alimentée à partir d'un réseau de fréquence (stator) f_s [6].

*Une machine asynchrone est une machine à courant alternatif dont la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales. Le rotor est toujours en retard par rapport à la vitesse du champ statorique.

La machine asynchrone est dite machine à induction car l'énergie transférée du stator au rotor ou inversement se fait par induction électromagnétique.

III.3) Description de la machine asynchrone triphasée :

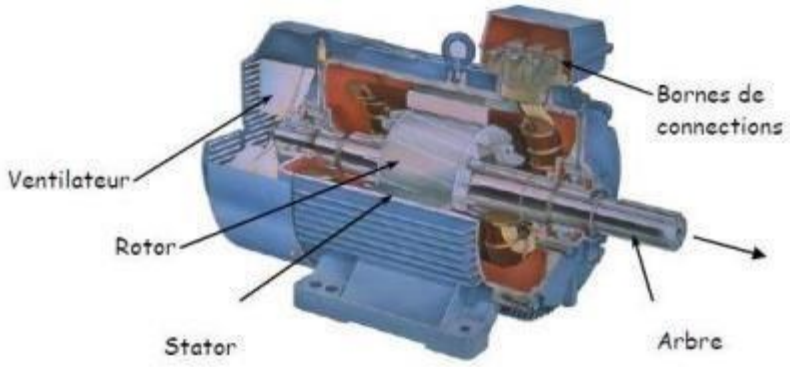


Figure II 1: Constitution de la machine asynchrone.

La machine asynchrone comporte une partie fixe constituée d'une carcasse à L'intérieure de Laquelle sont logés le circuit magnétique et le bobinage du stator d'une part, et une partie mobile appelée rotor qui peut être soit bobiné soit à cage d'écureuil d'autre part. La carcasse nervurée à ailettes longitudinales est un monobloc en fonte ou en acier [3]. Le principe de fonctionnement du moteur asynchrone est basé sur l'induction des courants dans le bobinage du rotor par un champ tournant dans l'entrefer dû à la circulation des courants polyphasés dans le stator. Ce champ tournant va créer un couple moteur qui s'exerce sur les conducteurs des courants induits, Il provoque ainsi le démarrage et la rotation du rotor dans le même sens que le champ tournant [5]. En fonctionnement normal, le rotor de la machine asynchrone tourne à la vitesse de fi$r$exprimée en radians par seconde, et la force magnétomotrice produite par les courants statoriques tourne à la vitesse de synchronisme à fi$s$ exprimée en radians par seconde, mais la vitesse fi$r$ est généralement inférieure à fi$s$ et on a :

$$\Omega = \frac{\omega s}{p} \qquad (2\text{-}1)$$

Avec :

ms : pulsation statorique, liée à la fréquence du stator.

P : nombre de pair de pole de la force magnétomotrice résultante. Le rotor est constitué de manière à obtenir trois enroulements ayant un nombre de pôles Identique à celui du stator. Les enroulements rotoriques sont en court-circuit, la vitesse de rotation du rotor est inférieure à fis, et on note : [7]

g : Glissement de la vitesse de rotation par apport à celle du champ tournant statorique[10].

$$g = \frac{\Omega s - \Omega}{\Omega s} \qquad (2\text{-}2)$$

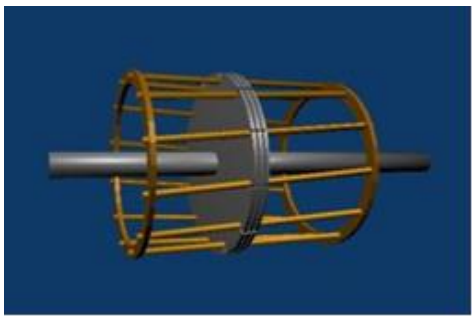


Figure II 2: cage d'écureuil.

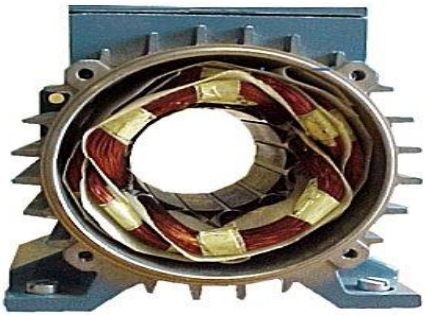


Figure II 3: Le stator.

III.4) Constitution de la machine asynchrone à cage :[1]

Le moteur asynchrone comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au Silicium et comportant des encoches dans lesquelles sont placés les enroulements. Le stator est fixe, on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné et à cage d'écureuil.

On se propose dans cette partie, de donner quelques informations sur les éléments constituant les machines asynchrones. Cette description va nous permettre de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement. Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes comme le montre la (Figure 2.1).

1. Le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique.
2. Le rotor, partie tournante permettant de mettre en rotation la charge mécanique.
3. Les paliers, parties mécaniques logeant les roulements et supportant le rotor via l'arbre.

III.5) Avantages et inconvénients la machine asynchrone :

Le moteur asynchrone est le moteur électrique le plus utilisé dans l'industrie ; il est peu coûteux, on le fabrique en grande sérier, il est robuste, fiable et économique. Il fonctionne directement sur le secteur alternatif, sans transformations préalables de l'énergie électrique qui l'alimente, c'est le moteur industriel par excellence qui ne possède pas d'organes délicats comme le collecteur du moteur à courant continu et qui n'utilise pas de contacts glissants comme le moteur synchrone (pour l'excitation du rotor). Les courants qui circulent dans le stator, constituent l'unique source externe du champ magnétique. Sa vitesse varie un peu quand on le charge, on dit qu'il glisse, mais ce glissement est en générale ne dépasse pas quelques centièmes de la vitesse à vide, il est négligeable le plus souvent.

Le démarrage des moteurs asynchrones ne pose pas de problèmes pour les unités de petite puissance. Par contre, pour les moteurs de forte puissance, il faut démarrer sous tension réduite pour éviter un appel de courant trop élevé. Par contre dans le moteur asynchrone les courants statoriques sont à la fois à générer le flux et le couple. Le découplage naturel de la machine à courant continu n'existe pas. D'autre part on ne peut connaître les variables internes du rotor à cage qu'à travers le stator. L'inaccessibilité du rotor nous amènera à modifier l'équation vectorielle rotorique pour exprimer les grandeurs rotoriques à travers leurs actions sur le stator. La simplicité structurelle cache donc une grande complexité fonctionnelle due aux caractéristiques qui viennent d'être évoquées mais également aux non linéarités, à la difficulté d'identification et aux variations des paramètres (Rr en particulier) [8].

III.6) Modélisation de la machine asynchrone :

III.6.1) Hypothèse simplificatrice :

En limitant aux étapes les plus importantes et aux résultats utiles pour la commande, nous examinons ici les trois principales hypothèses classiques pour la modélisation de la MAS triphasée :

1. Une symétrie parfaite de la machine.
2. Le bobinage statorique est reparti de manière à donner une f.m.m sinusoïdale et les barres du rotor sont assimilées à un bobinage triphasé en court-circuit.
3. Le niveau de la saturation est faible et on néglige l'hystérésis, le courant de Foucault et l'effet de peau.

Ces hypothèses impliquent que :

4. Les flux sont additifs.
5. Les inductances propres sont constantes.
6. La mutuelle inductance varie d'une façon sinusoïdale.

III.6.2) Modélisation de machine asynchrone dans le plan triphasé abc :

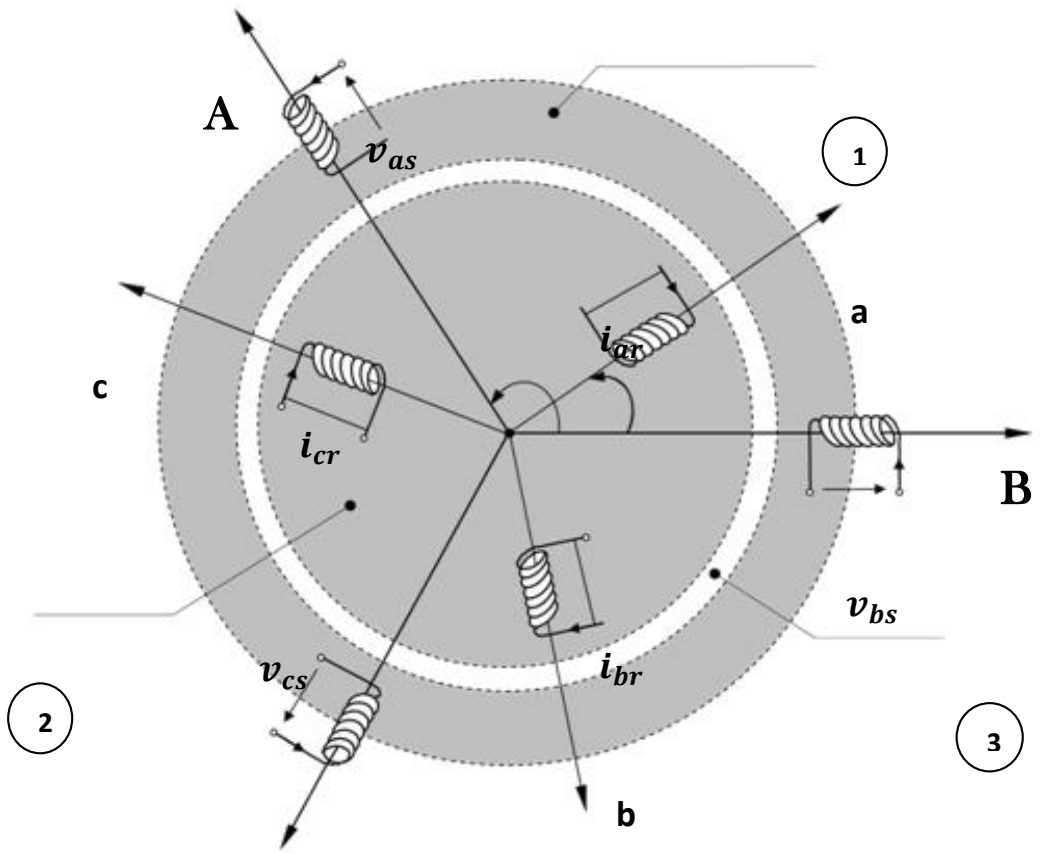
La machine asynchrone peut être représentée par la figure (**Figure II 4 :)**

Le stator est formé de trois enroulements décalés de 120° dans l'espace, traversés par trois courants variables formant un système triphasé équilibré [9].

Le rotor peut être modélisé, comme le stator, par trois enroulements décalés de 120° dans l'espace, mais, elles sont en court-circuit.

Les trois enroulements statoriques et les trois enroulements rotoriques sont notés,

Respectivement, (A , B ,C) et (a ,b , c). L'angle q est l'angle que fait le rotor en effectuant sa rotation par rapport au stator.



C **Figure II 4 :**

1 : Partie fixe : Stator.**2 : Partie mobile** : Rotor.**3** : Entrefer constant

III.6.3) Équations générales de la machine asynchrone triphasé :

Dans ces conditions, si on considère que le moteur à induction est triphasé au stator et aurotor. Les trois types d'équations traduisant le comportement du moteur sont [9] :

a. **Équations électriques** [9] [14] **:**

En appliquant la loi d'Ohm et la loi de Faraday aux enroulements du stator et du rotor, on trouve une écriture sous forme matricielle :

$$\begin{cases} (V_s) = (R_s)(I_s) + \dfrac{d}{dt}(\varphi_s) \\ (V_r) = (Rr)(I_r) + \dfrac{d}{dt}(\varphi_r) \end{cases} \quad (II.1)$$

Les matrices de tensions, de courants et du flux sont données :

$$V_s = \begin{pmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{pmatrix}, V_r = \begin{pmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{pmatrix}, \varphi_s = \begin{pmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{pmatrix}, \varphi_r = \begin{pmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{pmatrix}, \quad I_s = \begin{pmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{pmatrix}, I_r = \begin{pmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{pmatrix}$$

Les équations de tension des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques Sont :

$$\begin{cases} V_{sa} = RS\ i_{sa} + \frac{d}{dt}\Phi sa \\ V_{sb} = RS\ i_{sb} + \frac{d}{dt}\Phi sb \\ V_{sc} = RS\ i_{sc} + \frac{d}{dt}\Phi sc \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{ra} = Rr\ i_{ra} + \frac{d}{dt}\Phi ra \\ V_{rb} = Rr\ i_{rb} + \frac{d}{dt}\Phi rb \\ V_{rc} = Rr\ i_{rc} + \frac{d}{dt}\Phi rc \end{cases}$$

Les matrices de résistances statoriques et rotoriques sont :

$$(R_s) = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{pmatrix} (R_r) = \begin{pmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{pmatrix}$$

En désignant par :

V_{ar}, V_{bs}, V_{cr}: Les tenions appliquées aux trois phases statoriques.

I_{as}, I_{br}, I_{cr}: Les courants qui traversent les trois phases statoriques.

$\varphi_{ar}, \varphi_{bs}, \varphi_{cs}$: Les flux totaux à travers ces enroulements

R_s: Résistance d'une phase statorique

R_r: Résistance d'une phase rotorique

Les équations (III. 1)peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante :

Pour le stator :

$$\begin{pmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{pmatrix} \text{(II. 2)}$$

Pour le rotor :

$$\begin{pmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{pmatrix} \text{(II. 3)}$$

b. **Equations magnétiques** [9] **:**

Les relations entre les flux et les courants s'écrivent sous forme matricielle comme suit :

Pour le stator :

$$(\varphi_s) = (L_s)(I_s) + (M_{sr})(I_r) \text{(II. 4)}$$

Pour le rotor :

$$(\varphi_r) = (L_r)(I_r) + (M_{rs})(I_s) \text{(II. 5)}$$

Tel que :

$$[Ls] = \begin{bmatrix} Ls & Ms & Ms \\ Ms & Ls & Ms \\ Ms & Ms & Ls \end{bmatrix}$$

$$[Lr] = \begin{bmatrix} Lr & Mr & Mr \\ Mr & Lr & Mr \\ Mr & Mr & Lr \end{bmatrix}$$

$$(M_{sr}) = (M_{rs})^t = M\begin{pmatrix} cos\theta & co\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & cos\theta \\ cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & cos\theta & cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & cos\theta \end{pmatrix} \quad \text{(II. 6)}$$

θ : Angle qui définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases statoriques et rotoriques.

On aura finalement :

[**V**sabc]=[**R**s][**I**sabc]+ $\frac{d}{dt}$([**L**s][**I**sabc]+[**M**sr][**I**rabc]).

[**V**rabc]=[**R**r][**I**rabc]+ $\frac{d}{dt}$([**L**r][**I**rabc]+[**M**rs][**I**sabc]).

M : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique lorsque les deux axes se coïncident

On désigne par :

(L_s): Matrice des inductances statoriques

(L_r): Matrice des inductances rotoriques

(M_{sr}): Matrice des inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

(M_{rs}): Matrice des inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

c. Equation mécanique :

La loi de la mise en rotation du moteur est donnée par l'équation générale de la dynamique :

$$\sum C_{exe} = C_e - C_r - \Omega k_f = J_t \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{(II. 7)}$$

$J \frac{d}{dt} \boldsymbol{\Omega_r} = C_e - C_r - Kf\ \boldsymbol{\Omega r}$

Où $J_t$est le moment d'inertie totale ramené à l'arbre du moteur.

Avec :

***J* :** Moment d'inertie des masses tournantes.

Cr : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine.

$\boldsymbol{\Omega r}$ **:** Vitesse rotorique.

$\boldsymbol{Ce}$ **:** Couple électromagnétique.

$\boldsymbol{K_f}$ **:** Coefficient de frottement visqueux.

Les équations précédentes font apparaitre des difficultés pour la résolution analytique du fait que les termes trigonométriques de la matrice des inductances varient en fonction de la position. Cela conduite à l'usage de la transformation de Park, qui permettra de rendre ces termes indépendants de la position.

III.6.4) Transformation du système triphasé :

La mise en équations de la machine asynchrone aboutit à un système de six équations différentielles à coefficients variables, la résolution de ce système est très difficile, d'où la nécessité de faire une transformation du système triphasé vers un système biphasé équivalent. Cette transformation doit conserver la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles, ceci permet d'établir une expression du couple électromagnétique valable pour la machine réelle avec le développement de l'outil numérique, cette transformation peut se faire facilement.

III.6.5) La transformation de Park :

La transformation de Park est la plus utilisée dans la littérature, elle permet d'exprimer les grandeurs statoriques et rotoriques dans un repère biphasé tournant (d,q), ce repère forme avec le repère fixe (a,b) un angle θ appelé angle de Park.

Pour transformer un système triphasé (d, q) en un système biphasé (a, b) avec une composante homopolaire comme indique dans l'équation suivante :

$$\begin{pmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{pmatrix} = \big(P(\theta)\big) \begin{pmatrix} X_0 \\ X_d \\ X_q \end{pmatrix} \qquad (\text{II.}10)$$

Le passage inverse est donné par :

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ X_d \\ X_q \end{pmatrix} = \big(P(\theta)\big)^{-1} \begin{pmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{pmatrix} (\text{II.}11)$$

La matrice de transformation de Park est donnée par :

$$\left(P(\theta)\right) = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & cos\theta & -sin\theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{pmatrix}, \qquad (II.12)$$

Et sa matrice inverse est donnée par :

$$\left(P(\theta)\right)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ cos\theta & cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -sin\theta & -sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{pmatrix} \qquad (II.13)$$

On note par θ_s et $\theta_r$les angles de Park statorique et rotorique ; pour simplifier les équations de la machine, ces angles doivent être choisis de telle sorte que les repères de transformations de Park pour les grandeurs statoriques et rotoriques coïncident, ceci implique que$\theta_s = \theta + \theta_r$, le principe est donné en **(figure II 5 :)** où θ est l'angle électrique entre la phase

A statorique et la phase a rotorique [12].

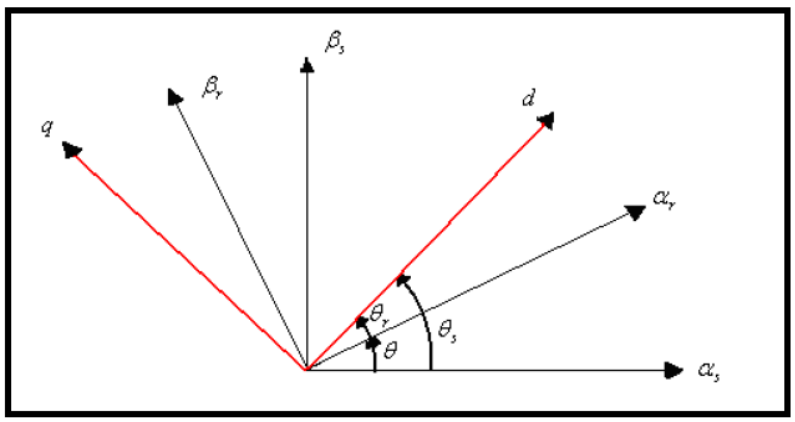


Figure II 5: Transformation de Park et choix des angles de Park.

Cette coïncidence ramène deux repères l'un statorique et l'autre rotorique vers le

Troisième repère commun qu'on note (d, q) **(Figure II 4 :)** au lieu de les ramener vers deux repères différents (d_s ,q_s) statorique et (d_r,q_r) rotorique.

a. Les équations électriques dans le repère de Park (d, q) :

En appliquant la transformation de Park aux équations du système (II.1). On obtient les équations électriques pour le stator et le rotor dans le repère (d, q), les composantes homopolaires sont toujours nulles car le système est équilibré.

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_S \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -\omega_c \\ \omega_c & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -\omega_g \\ \omega_g & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{pmatrix} \end{cases} \quad (\text{II. } 14)$$

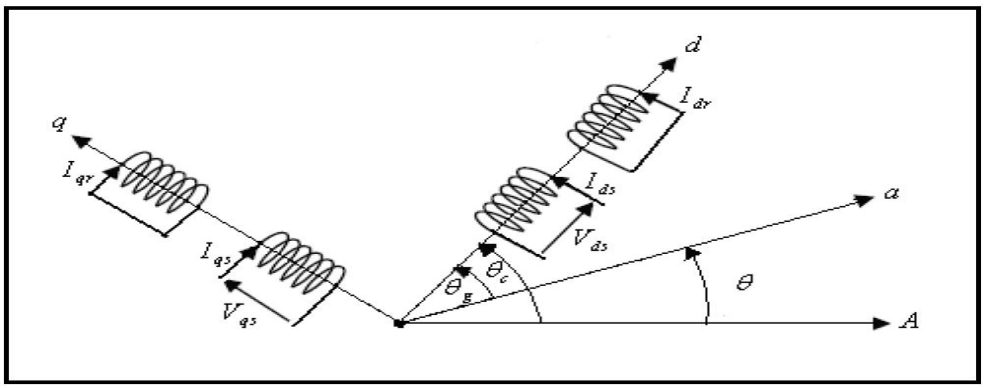


Figure II 6: Enroulements triphasés représentés dans le repère de Park.

En appliquant la transformation de Park au système d'équations(II. 4), (II. 5) on obtient les équations magnétiques pour le stator et le rotor dans le repère (d, q) :

$$\begin{pmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & O \\ 0 & M & 0 & L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{pmatrix} \quad (\text{II. } 15)$$

b. Equations des tensions :

En développant les flux en fonction des courants, on obtient les équations électriques de la machine :

$$\begin{pmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & -L_s\omega_c & 0 & -M\omega_c \\ L_s\omega_c & R_s & M\omega_c & 0 \\ 0 & -M\omega_g & R_r & -L_r\omega_g \\ M\omega_g & 0 & L_r\omega_g & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & O \\ 0 & M & 0 & L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_{ds} \\ \dot{I}_{qs} \\ \dot{I}_{dr} \\ \dot{I}_{qr} \end{pmatrix} \quad (II.16)$$

ou :

$$[V] = \begin{bmatrix} Vds \\ Vqs \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, [I] = \begin{bmatrix} Ids \\ Iqs \\ Idr \\ Iqr \end{bmatrix}, [R] = \begin{bmatrix} Rs & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Rs & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Rr & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Rr \end{bmatrix}, [L] = \begin{bmatrix} Ls & 0 & M & 0 \\ 0 & Ls & 0 & M \\ M & 0 & Lr & 0 \\ 0 & M & 0 & Lr \end{bmatrix}$$

$$[A1] = \begin{bmatrix} 0 & -Ls & 0 & -M \\ Ls & 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, [A2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Lr & 0 & -M \\ Lr & 0 & M & 0 \end{bmatrix}.$$

c. Expression du couple électromagnétique et de la puissance :

Le couple électromagnétique est obtenu à l'aide d'un bilan de puissance. La puissance électrique consommée par la machine est exprimée dans le repère (d, q) par :

$P_e = V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs}$ (II.17)

Cette dernière se décompose en trois termes :

10) Puissance dissipée par pertes Joule :

$$\Delta P_j = R_s\left(I^2_{ds} + I^2_{qs}\right) + R_r\left(I^2_{dr} + I^2_{qr}\right) (II.18)$$

11) Puissance représentant les échanges de l'énergie électromagnétique avec la source :

$$I_{ds}\left(\frac{d\varphi_{ds}}{dt}\right) + I_{qs}\left(\frac{d\varphi_{qs}}{dt}\right) + I_{dr}\left(\frac{d\varphi_{dr}}{dt}\right) + I_{qr}\left(\frac{d\varphi_{qr}}{dt}\right) \quad (II.19)$$

12) Puissance mécanique :

$$P_m = (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds})\omega_c + (\varphi_{dr} I_{qr} - \varphi_{qr} I_{dr})\omega_g \qquad (II.20)$$

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_e = P_m / \Omega = p\left(\frac{P_m}{\omega}\right) \qquad (II.21)$$

D'après le système d'équations (II.7) on peut avoir plusieurs expressions du couple :

$$\begin{cases} C_e = pM(I_{dr} I_{qs} - I_{qr} I_{ds}) \\ C_e = p(\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \\ C_e = p(\varphi_{qr} I_{ds} - \varphi_{dr} I_{qs}) \\ C_e = p\dfrac{M}{L_r}(\varphi_{dr} I_{qs} - \varphi_{qr} I_{ds}) \end{cases} \qquad (II.22)$$

Le choix de l'expression à utiliser dépend de vecteur d'état choisi (Paragraphe **II.6.6**). Dans notre travail on utilise la quatrième expression.

d. Choix du repère (d, q) :

Le choix de repère se fait selon l'objectif de l'application, on distingue trois choix plus importants :

- Repère (d, q) lié au stator : ce repère est fixe par rapport au stator, il est utilisé pour l'étude de démarrage et de freinage de la machine. Il est caractérisé par :$\omega_c = 0$ et $\omega_g = -\omega$,
- Repère (d, q) lié au rotor : ce repère est fixe par rapport au rotor, il est utilisé pour la simulation des régimes transitoires des machines. Il est caractérisé par : $\omega_c = \omega$et $\omega_g = 0$,
- Repère lié au synchronisme : ce repère est fixe par rapport au champ tournant, il est utilisé pour la commande vectorielle de la machine, il est caractérisé par :

$\omega_c = \omega_s$ Ce qui implique que les grandeurs de réglage sont continuées.

III.6.6) Représentation sous forme d'état de la MAS

a. **La représentation d'état** :

Nous représentons les équations de la machine asynchrone sous forme d'état, cette représentation à la forme suivante :

$$\begin{cases} (\dot{X}) = (A)(X) + (B)(U) \\ (Y) = (C)(X) \end{cases} \qquad (II.17)$$

Avec :

(X) : vecteur d'état qui représente l'ensemble des variables du système.

(U) : vecteur d'entrée ou de commande.

(Y) : vecteur de sortie.

(A) : matrice d'état dite également matrice d'évolution.

(B) : matrice d'entrée.

(C) : matrice de sortie.

b. Modèle d'état de la machine asynchrone :

Le choix du vecteur d'état dépend de l'objectif tracé [9], pour notre étude on choisit :

- Le vecteur de commande :$(U) = (V_{ds} V_{qs})^t$
- Le vecteur d'état :$(X) = (I_{ds} I_{qs} \varphi_{dr}\, \varphi_{qr,} \Omega)^t$
- Le vecteur de sortie :$(Y) = (I_{ds} I_{qs})^t$

En manipulant les systèmes d'équations (II.8) et (II.9), on obtient une représentation du modèle de la machine sous la forme suivante :

$$\begin{cases} (\dot{X}) = (A)(X) + (B)(U) \\ \dfrac{d\Omega}{dt} = \dfrac{1}{J_t}(C_e - C_r - k_t \Omega) \end{cases} \qquad (II.18)$$

Où les paramètres A, B et U sont donnés par :

$$(A) = \begin{pmatrix} -\left(\frac{1}{T_s\sigma} + \frac{(1-\sigma)}{T_r\sigma}\right) & \omega_c & \frac{(1-\sigma)}{T_r M\sigma} & \frac{(1-\sigma)}{M\sigma}\omega \\ -\omega_c & \left(\frac{1}{T_s\sigma} + \frac{(1-\sigma)}{T_r\sigma}\right) & -\frac{(1-\sigma)}{M\sigma}\omega & \frac{(1-\sigma)}{T_r M\sigma} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & \omega_g \\ 0 & \frac{M}{T_r} & -\omega_g & -\frac{1}{T_r} \end{pmatrix}$$

$$(B) = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_s\sigma} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s\sigma} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (U) = \begin{pmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{pmatrix}$$

Le vecteur X_1est donné par :

$$(X) = (I_{ds,} I_{qs,} \varphi_{dr,} \varphi_{qr})^t$$

En plus de l'équation mécanique (II.16) :

$$J_t \frac{d\Omega}{dt} = (C_e - C_r - k_t\Omega)$$

Le couple électromagnétique$C_e$est donné par (II.15).

$$C_e = p\frac{M}{L_r}\left(\varphi_{dr} I_{qs} - \varphi_{qr} I_{ds}\right)$$

Le vecteur qui donne le couple résistant C_r est considéré.

Donc, le système s'écrit :

$$\begin{cases} (\dot{X}) = (A)(X) + (B)(U) \\ (Y) = (C)(X) \end{cases} \quad (II.19)$$

c. Représentation d'état dans le repère lié au stator :

Dont le but de simuler le démarrage de la machine, on fait une représentation du modèle dans le repère lié au stator, c'est-à-dire le repère (a, b).

La représentation d'état dans ce repère est donnée par le système (II.20) suivant :

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_{ds} \\ \dot{I}_{qs} \\ \dot{\varphi}_{dr} \\ \dot{\varphi}_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\left(\frac{1}{T_s\sigma} + \frac{(1-\sigma)}{T_r\sigma}\right) & 0 & \frac{(1-\sigma)}{T_rM\sigma} & \frac{(1-\sigma)}{M\sigma}\omega \\ 0 & -\left(\frac{1}{T_s\sigma} + \frac{(1-\sigma)}{T_r\sigma}\right) & \frac{(1-\sigma)}{M\sigma}\omega & \frac{(1-\sigma)}{T_rM\sigma} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & \omega \\ 0 & \frac{M}{T_r} & \omega & -\frac{1}{T_r} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{pmatrix}$$

$$+ \begin{pmatrix} \frac{1}{L_s\sigma} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s\sigma} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{pmatrix} \quad (II.20)$$

La matrice de transmission est nulle et la matrice de sortie est donnée par :

$$(C) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (II.21)$$

Cette matrice donne le vecteur de sortie Y.

III.7) La machine asynchrone alimentée en tension :

Pour une machine asynchrone alimentée en tension, si on considère le courant statorique i_S et le flux rotorique Φr comme variables d'état, et la pulsation ω_S et les tensionsV_{sd}, V_{sq}, comme grandeur de commande et le couple Cr comme une perturbation, on aura le schéma bloc suivant, « **Figure II 7 :** ».

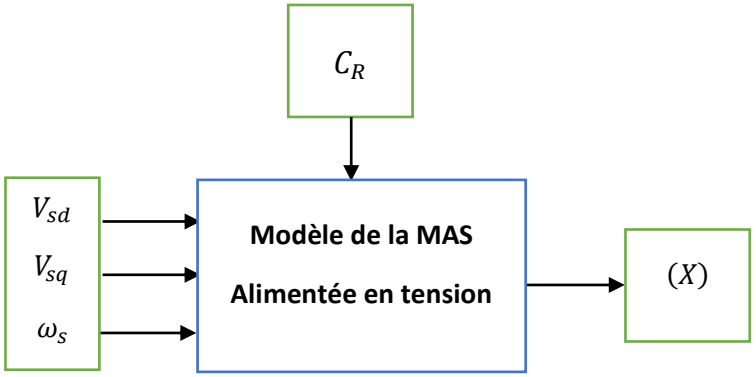


Figure II 7: Schéma bloc de la machine asynchrone alimentée en tension.

III.8) Simulation de la machine asynchrone :

Actuellement la simulation numérique est devenue un moyen inévitable qui permet d'analyser les plus compliquées et de prévoir leurs comportements. Parmi les méthodes numériques, nous avons opté pour l'utilisation du logiciel "MATLAB/Simulink".

III.8.1) Procédure :

Notre simulation est procédée de la manière suivante :

Nous avons réalisé le branchement direct du moteur au réseau et exécuter la simulation, afin de pouvoir visualiser l'évolution du courant de démarrage, du couple et de la vitesse en fonction du temps.

III.8.2) Paramètres du moteur 253-231 :

Avant d'effectuer la simulation, nous avons calculé les propriétés du moteur à l'aide du certificat d'essais réalisé par le constructeur Siemens.

Rs= 0.077771 Ω, Ls= 0.005629 H, Rr= 0.073454 Ω, Lr= 0.005629 H,

Lm= 0.0052712 H

Nous avons aussi utilisé les informations fournies dans la fiche technique du moteur.

$V_{réseau}$= 5.5 kV, f= 50 Hz, P= 4, Moment d'inertie= 860 kg*m², I_N= 3500 A

K_f =0.02.

III.8.3) Simulation du démarrage direct du moteur 253-231 :

On effectue la simulation en supposant que la machine est alimentée directement à la source de tension de 5.5kV et de fréquence 50HZ.

III.9) Résultats de simulation :

III.9.1) A vide : Cr=0 [N.m] :

- **La vitesse de rotation (w) :**

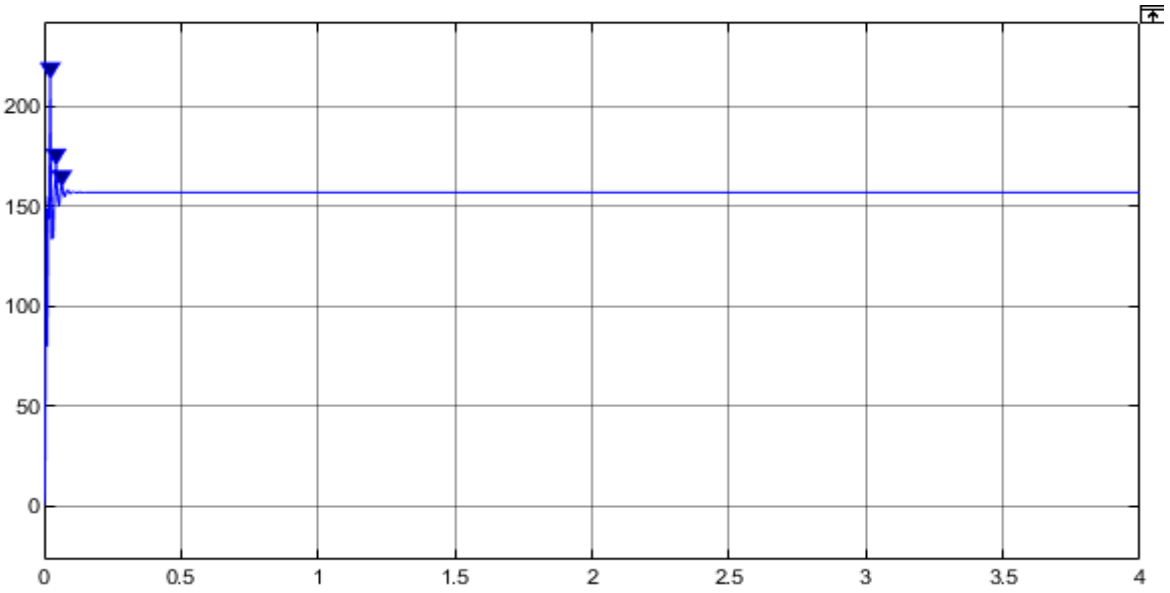


Figure II 8 : Variation de la vitesse en fonction du temps avec couple résistant (Cr=0 [N.m]).

Zoom :

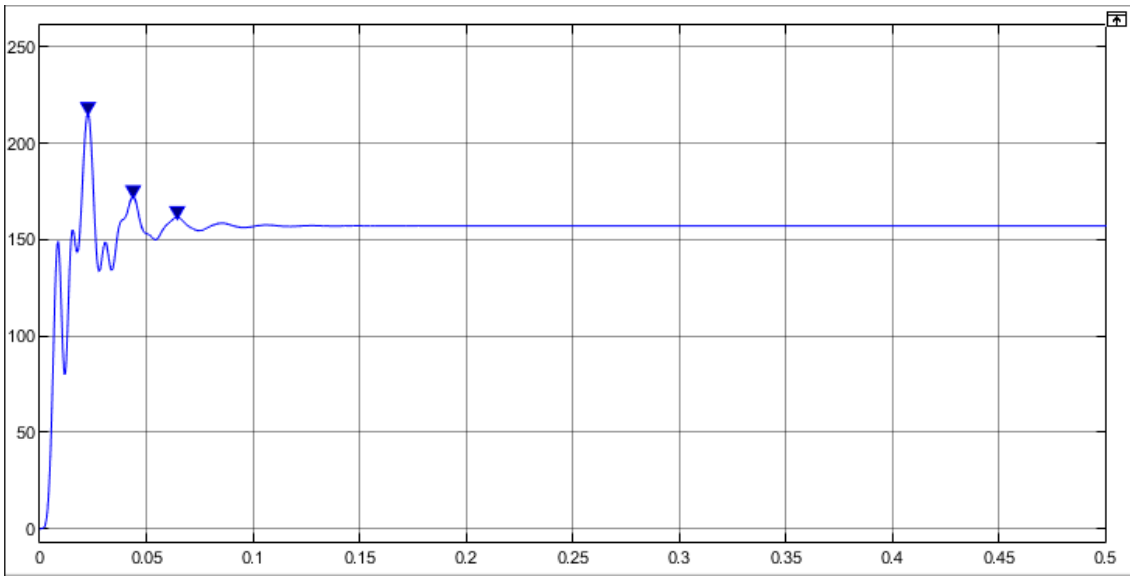


Figure II 9 : zoom sur la Variation de la vitesse en fonction du temps.

- **Le couple électromagnétique (Ce) :**

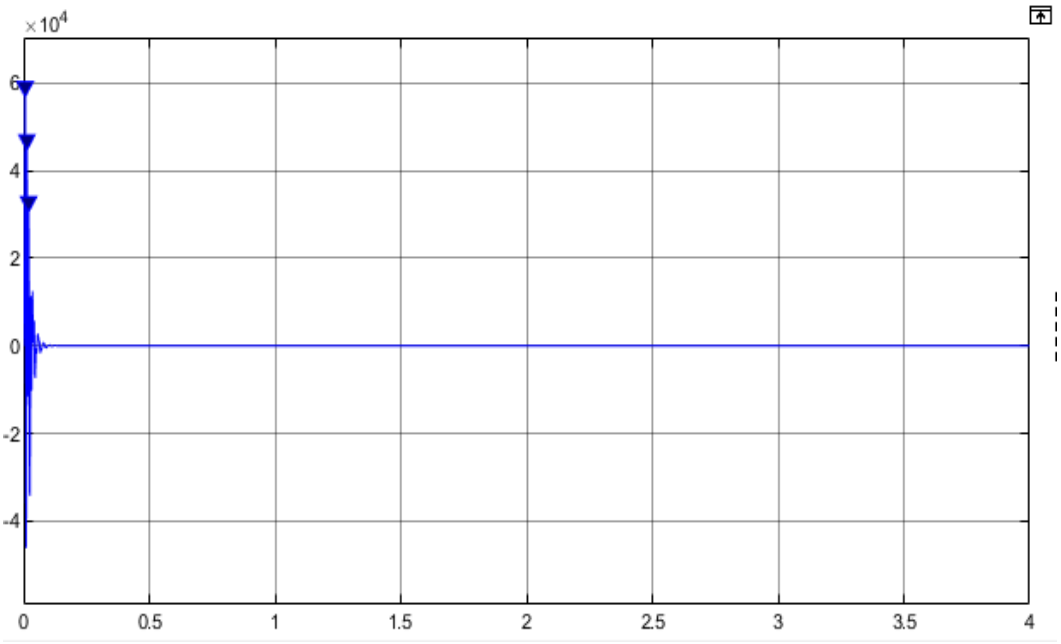


Figure II 10 : Variation du couple électromagnétique en fonction du temps avec couple résistant (Cr=0 [N.m]).

Zoom :

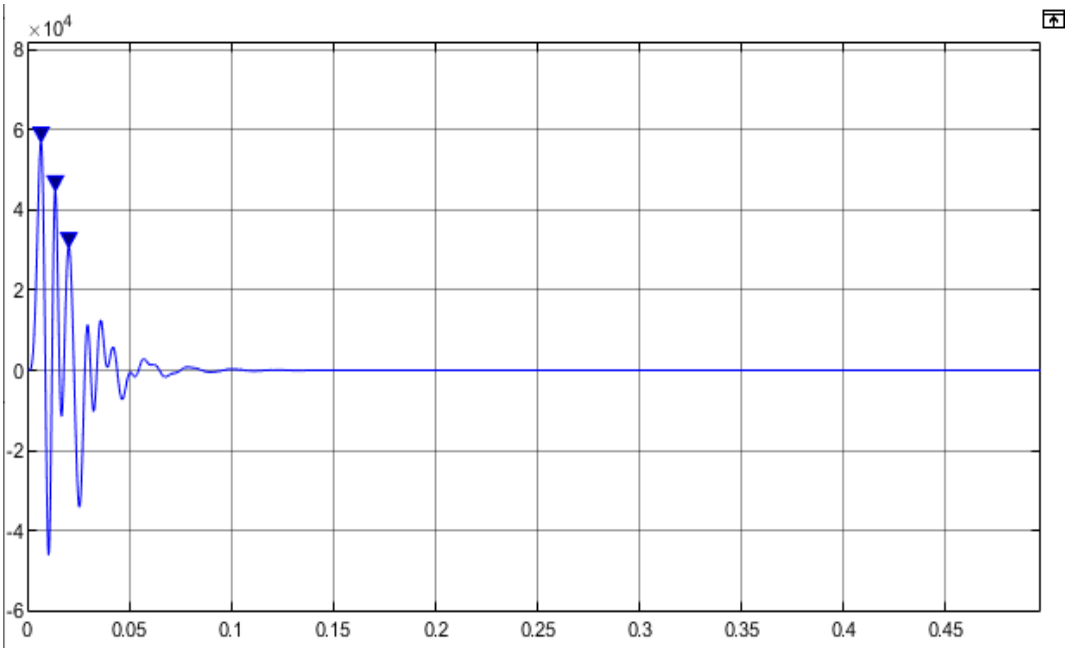


Figure II 11 : zoom sur la Variation du couple électromagnétique en fonction du temps.

- **Le courant statorique (is) :**

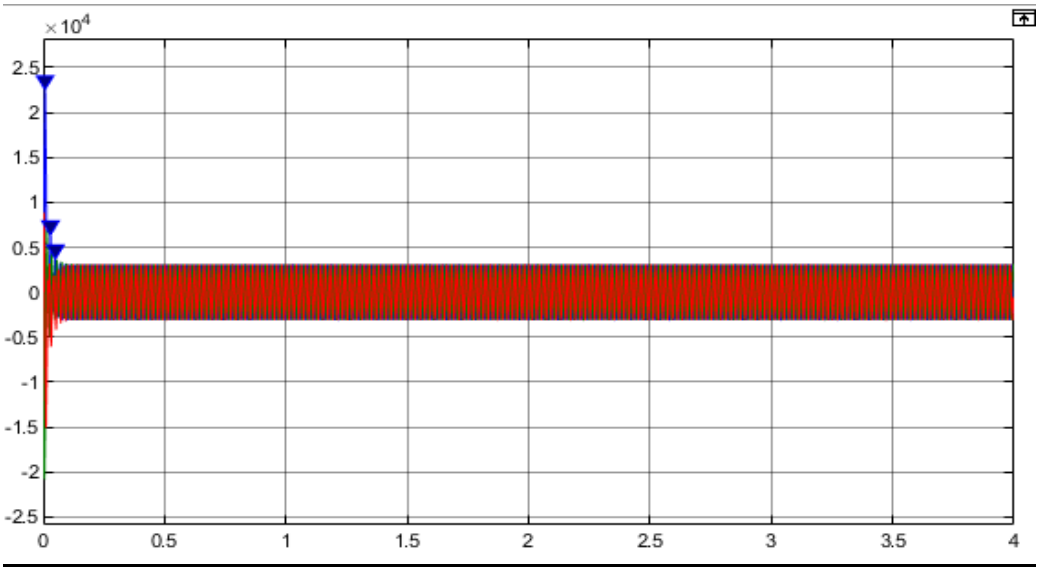


Figure II 12 : Variation du courant statorique en fonction du temps avec couple résistant (Cr=0 [N.m]).

Zoom :

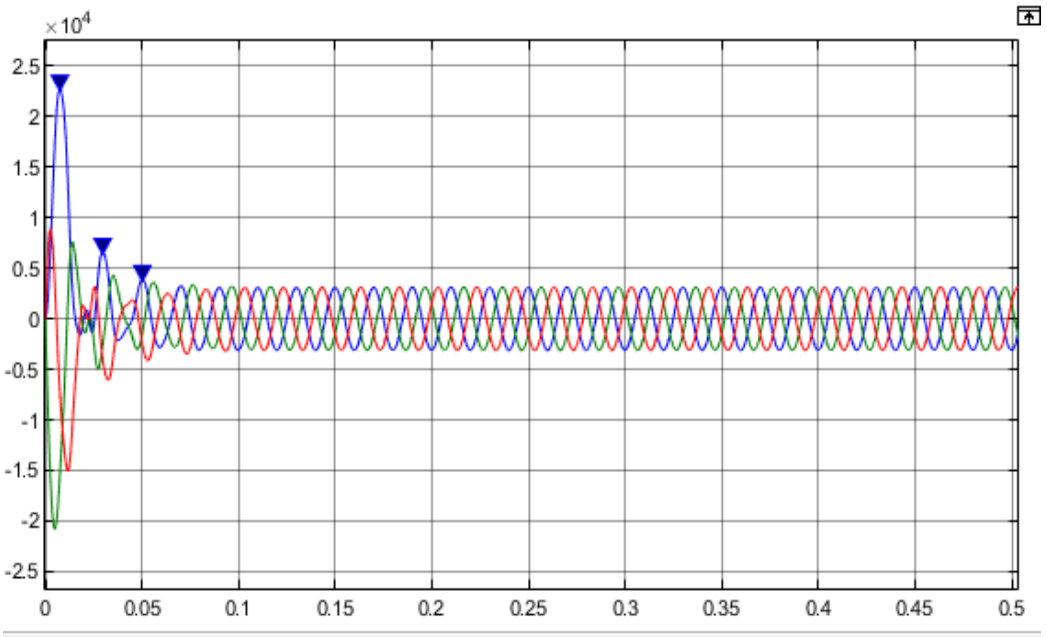


Figure II 13 : Zoom sur le courant statorique de démarrage (directe) en fonction du temps.

III.9.2) En charge : Cr=50000 [N.m] à t=2s :

- **La vitesse de rotation (w) :**

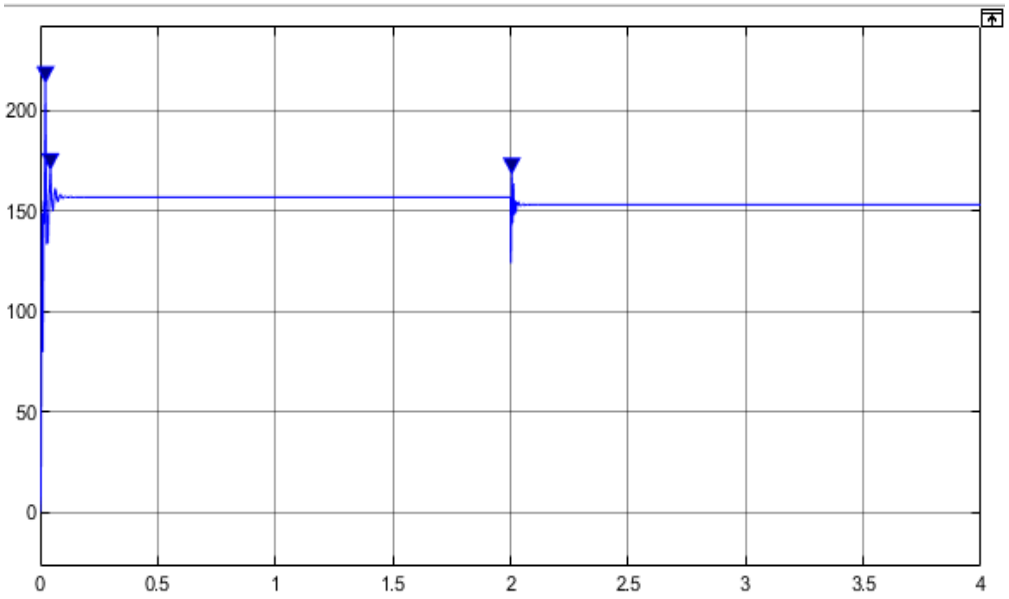


Figure II 14 : Variation de la vitesse en fonction du temps avec couple résistant (Cr=50000 N.m à t= 2s).

ZOOM :

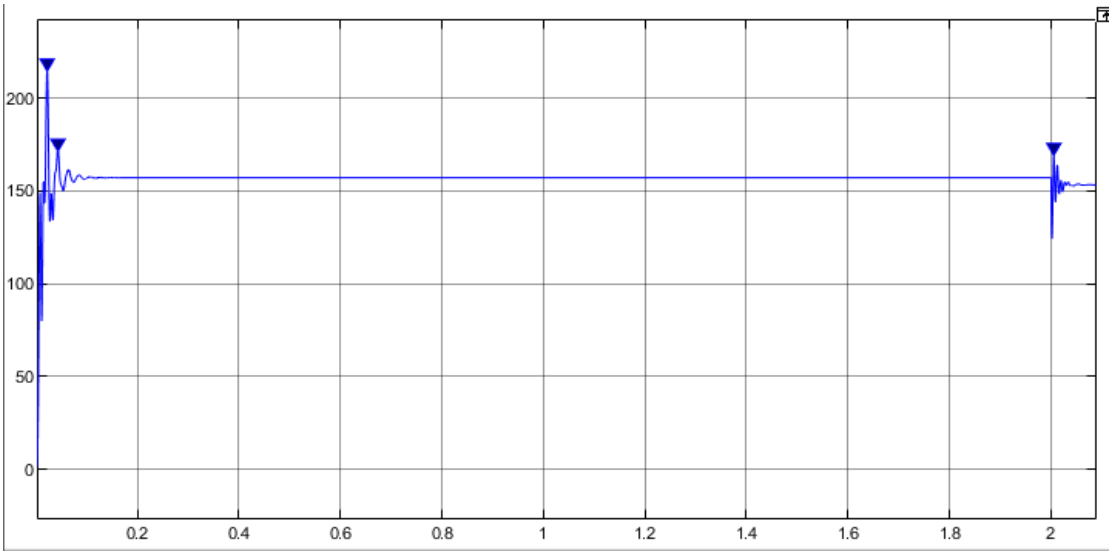


Figure II 15 : Zoom sur la variation de la vitesse en fonction du temps avec couple résistant (Cr=50000 N.m à t= 2s).

- **Le couple électromagnétique (Ce) :**

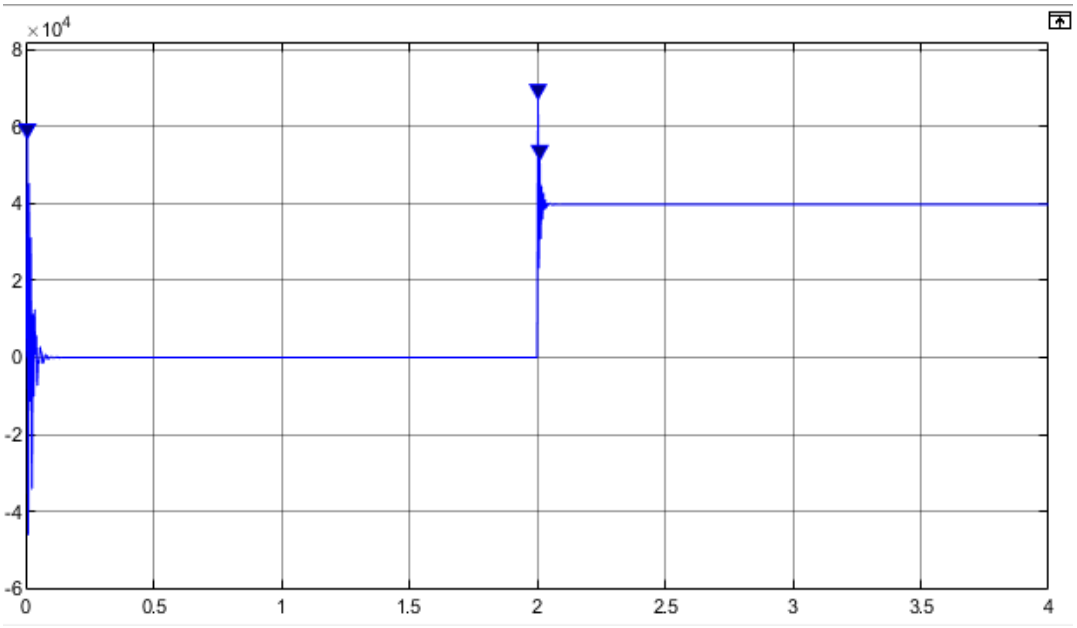


Figure II 16 : Variation du couple électromagnétique en fonction du temps avec couple résistant (Cr=50000 N.m à t= 2s).

ZOOM :

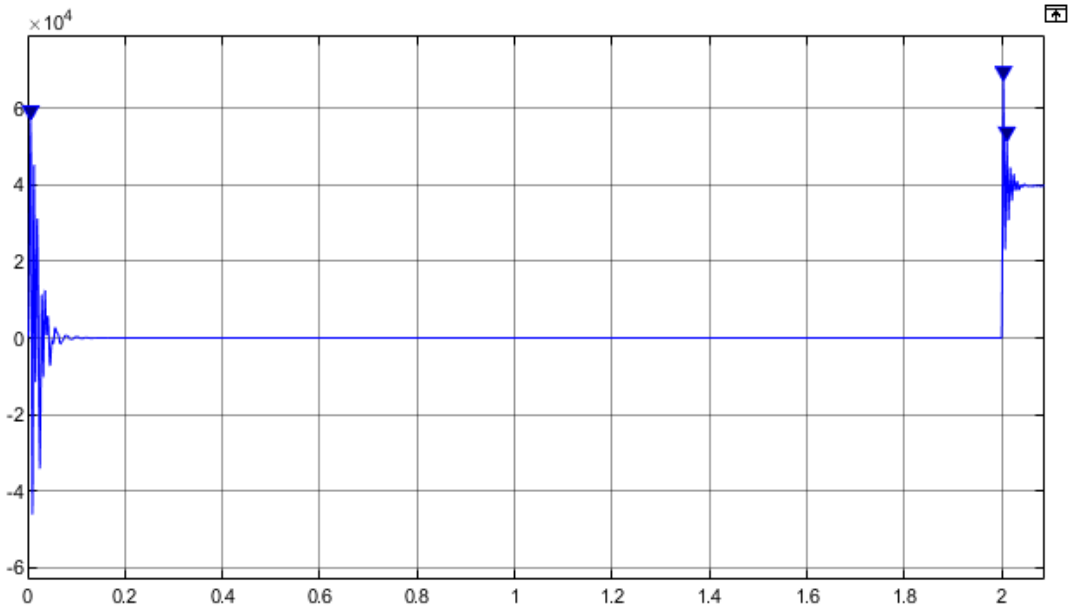


Figure II 17 : zoom sur la Variation du couple électromagnétique en fonction du temps avec couple résistant (Cr=50000 N.m à t= 2s).

- **Le courant statorique (is) :**

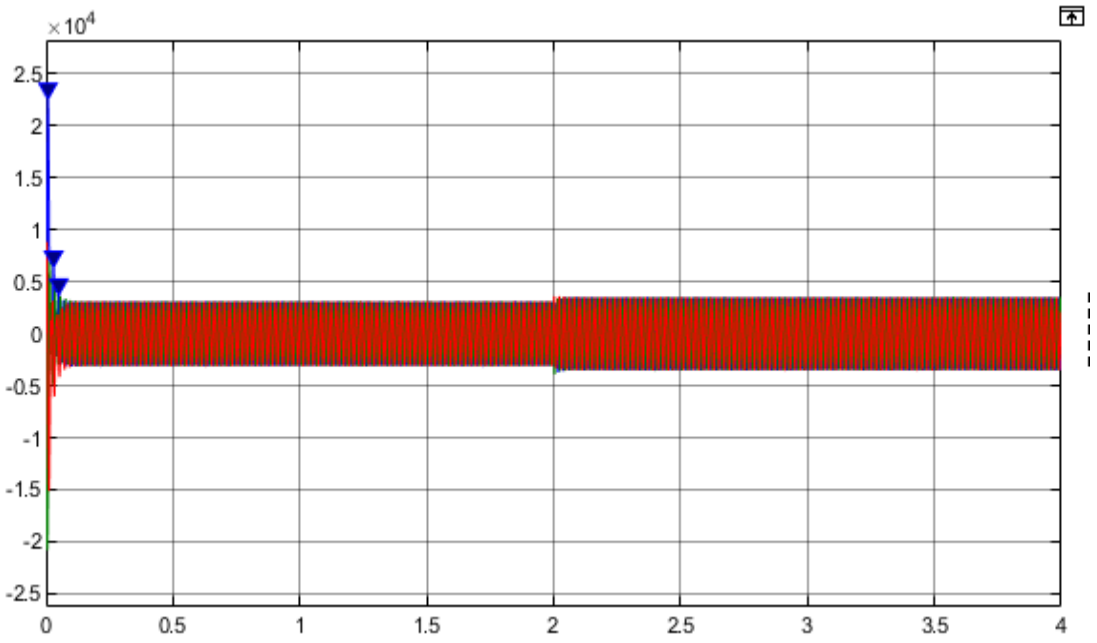


Figure II 18 : Variation du courant statorique en fonction du temps avec couple résistant (Cr=50000 N.m à t= 2s).

Zoom :

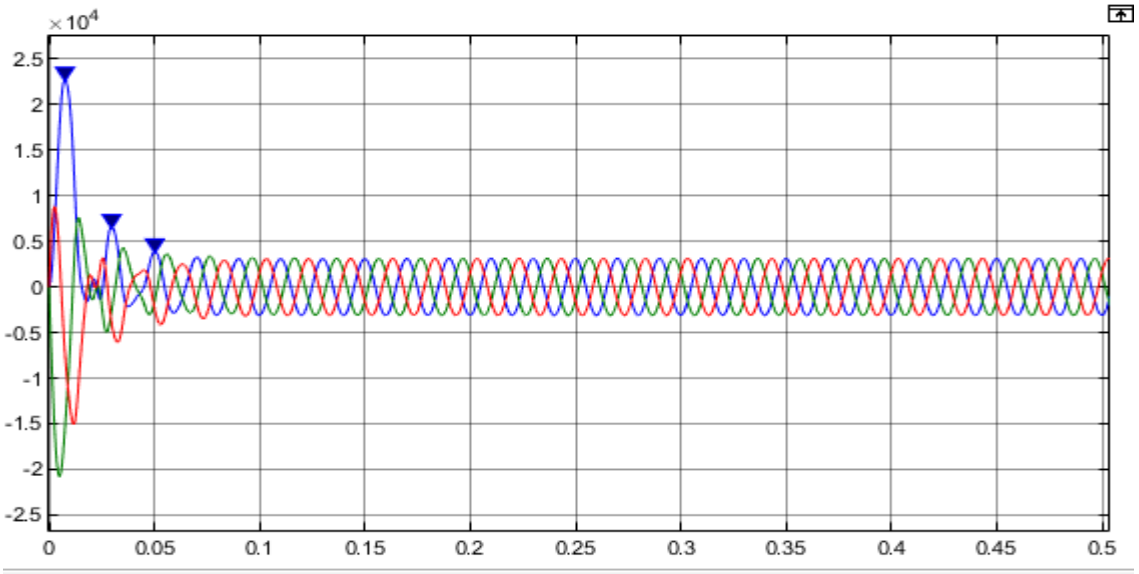


Figure II 19 : Zoom sur le courant statorique de démarrage en fonction du temps.

Zoom sur courant statorique en fonction du temps avec couple résistant (Cr=50000 N.m à t= 2s) :

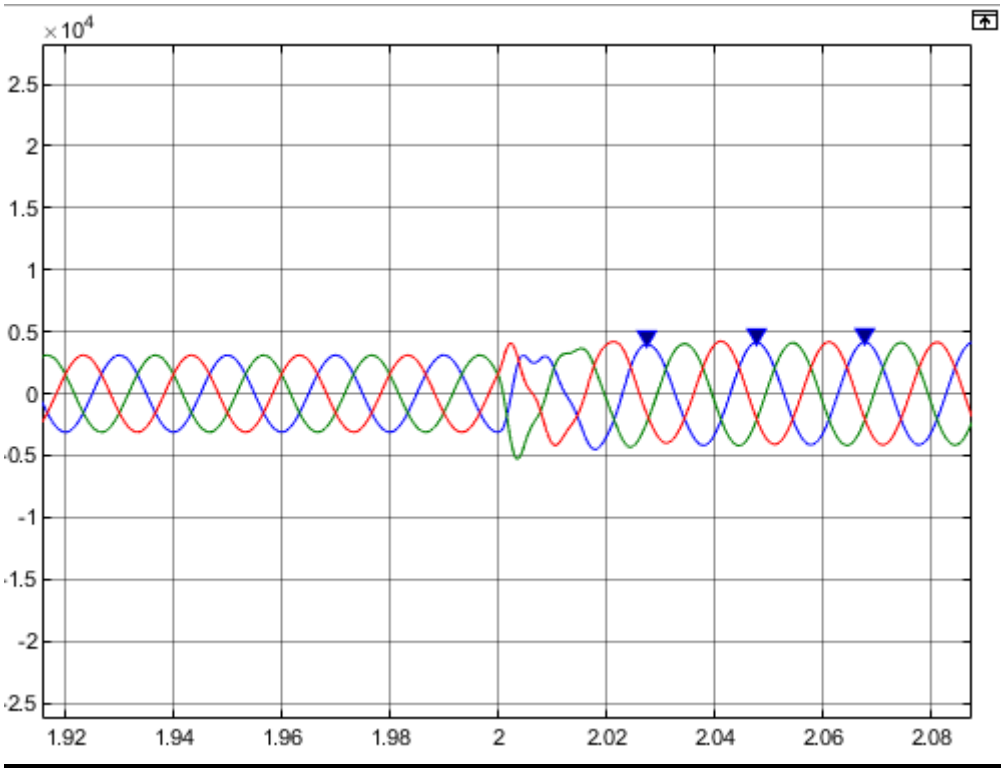


Figure II 20 : Zoom sur le courant statorique de démarrage en fonction du temps.

III.10) Interprétation des résultats de simulation :

En première temps on a simulé numériquement le fonctionnement de la machine asynchrone alimentée directement par le réseau 5.5kV, 50HZ et sans l'application de la charge (Cr nul).

L'examen des courbes permet de constater que le démarrage à vide avec une tension nominale

Permet d'avoir :
Aux premiers instants, les courants statoriques absorbés présentent des valeurs très importantes ou ils atteignent un pie de 23000A. ce sont des courants de démarrages qui sont aux alentours de 7 fois le courant nominale à vide selon les figures (II 8, II 10, II 12) on constate selon la même figure que ses courants baissent sensiblement par la suite, après que la vitesse du moteur, selon la même figure ait atteint la valeur nominale. Ces valeurs importantes de courants peuvent être à l'origine de destruction de la machine par l'échauffement en cas de répétitions excessives.

Le couple électromagnétique est fortement pulsatoire pendant le régime transitoire, il présente aux premiers instants de démarrage des battements importants suivi d'un nombre d'oscillations avant de se stabiliser à des valeurs très faibles.

Une fois la vitesse du moteur stabilisée au tour de la vitesse nominale à vide, comme deuxième étape, on applique un couple résistant (Cr=50000[Nm]), qui correspond à la charge appliquée à l'arbre du moteur à l'instant (t=2s) et les résultats de simulation sont regroupés dans la figure (II 14, II 16, II 18) :

Lors de l'application de la charge, nous constatons une décroissance progressive de la vitesse de rotation, un glissement qui augmente au même temps que la vitesse, ce qui permet au couple électromagnétique de rejoindre le couple résistant, avec une réponse dont le retard est identique à celui de la vitesse.

III.11) Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la modélisation et à la simulation de la machine asynchrone triphasée. Les résultats obtenus ont permis la validation du modèle choisi. Ce même modèle sera, donc, utilisé pour la suite du travail, où on aura à traiter des démarreurs progressifs qu'on testera avec ce même modèle.

Dans le chapitre qui suit on traitera des démarreurs progressifs et des gradateurs triphasés en particulier.

Chapitre 3 : LES DÉMARREURS PROGRESSIFS (GRADATEUR TRIPHASÉ).

IV) Chapitre III : les démarreurs progressifs (gradateur triphasé) :

IV.1) Introduction :

Selon la qualité du réseau, des variations rapides du courant consommé, comme c'est le cas lors du démarrage d'un moteur asynchrones, peuvent provoquer des chutes de tension qui perturbent les autres appareils alimentés par ce même réseau.

Lors de démarrage, les éléments mécaniques d'une machine ou installation sont fortement sollicités par l'impact du couple due au démarrage. Le démarreur électronique progressif gère en continu de varier la tension depuis une valeur de départ sélectionné jusqu'à cent pour cent, le couple et le courant augmentent ainsi de manière continuelle. Le démarreur progressif permet également un cycle d'arrêt continuel du moteur sous charge.

Dans ce chapitre, nous présenterons le principe du démarreur électronique progressif et sa constitution (gradateur triphasé), ainsi qu'une technique de commande de ce dernier. Cette méthode est dite angle de phase.

IV.2) Rappel sur les démarreurs progressifs :

Comme vu dans le chapitre précédent, les démarreurs progressifs ou « soft starter » en anglais, sont des appareils à base de semi-conducteurs qui sont montés en amont des moteurs et qui servent à démarrer différentes applications. En général, lors de l'utilisation de démarreurs progressifs, il est important qu'un entraînement électrique ne démarre pas immédiatement à pleine puissance lors de la mise en marche. Cela permet d'éviter :

- Que les composants mécaniques sont endommagés par un démarrage brusque.
- Que l'ensemble de l'appareil se déplace de manière incontrôlée en raison des forces élevées au démarrage.
- Que les disjoncteurs du réseau soient déclenchés par la consommation d'énergie en augmentation rapide.

(a) **(b)**

Figure III 1 : Démarreur progressif pour (a) moteurs à faible puissance et (b) moteur à haute puissance.

Généralement, les démarreurs progressifs électriques jouent sur la tension fournie au moteur ; la valeur efficace de la tension du moteur durant un temps de démarrage définissable sera augmentée d'une valeur réduite jusqu'à la tension assignée du moteur.

Le courant du moteur évolue proportionnellement à la tension appliquée au moteur. Le courant de démarrage sera donc réduit en fonction de la tension appliquée sur le moteur.

Le couple de rotation évolue au carré par rapport à la tension appliquée sur le moteur. Le couple de démarrage sera donc réduit proportionnellement au carré de la tension appliquée sur le moteur.

IV.3) Rappel sur les semi-conducteurs :

Les semi-conducteurs de puissance sont des interrupteurs électroniques qui s'amorcent et se bloquent soit par une commande électronique, soit spontanément en fonction des grandeurs électriques externes, Leur utilisation permet la réalisation des convertisseurs statiques qui assurent et contrôlent l'échange d'énergie entre deux sources. Le principal intérêt de ces systèmes est de pouvoir convertir l'énergie électrique avec des rendements très élevés (en forte puissance proche de 90%).

Un interrupteur idéal doit avoir les caractéristiques suivantes : impédance nulle à l'état fermé et infinie à l'état ouvert, puissance consommée et temps de commutation nuls. On peut donc avancer qu'un interrupteur idéal n'existe pas aujourd'hui et n'existera pas d'avantage demain.

IV.3.1) 3.1 Diode : [2]

La diode est le semi-conducteur élémentaire constituée par une seule jonction PN, aussi on la définit comme un interrupteur électronique non commandé réalisant les fonctions suivantes :

- Fermé dans un sens (direct),
- Ouvert dans l'autre (inverse).

La figure.III.1.1 donne sa représentation symbolique et indique les conventions de signes pour le courant et la tension :

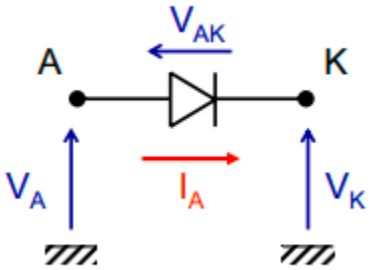


Figure III 2 : La présentation symbolique de la diode.

a) **Etat passant :**

Quand le circuit dans lequel la diode est placée tend à faire passer un courant dans le sens direct, c'est-à-dire de l'anode A vers la cathode K, la diode est conductrice ou passante.

Le courant i prend une valeur qui est imposée par la charge, et cette valeur ne doit pas dépasser le courant tolérable par la diode. La valeur de la tension VAK, est de l'ordre du volt.

b) Etat bloquée :

Quand une tension négative aux bornes de la diode tend à faire passer le courant dans le sens inverse, la diode est bloquée.

Il faut veiller à ce que la tension inverse reste inférieure à la tension inverse maximale que peut supporter la diode.

Le courant négatif, ou inverse, est très faible par rapport au courant direct durant la phase conductrice.

c) Caractéristique statique Id (Vd) :

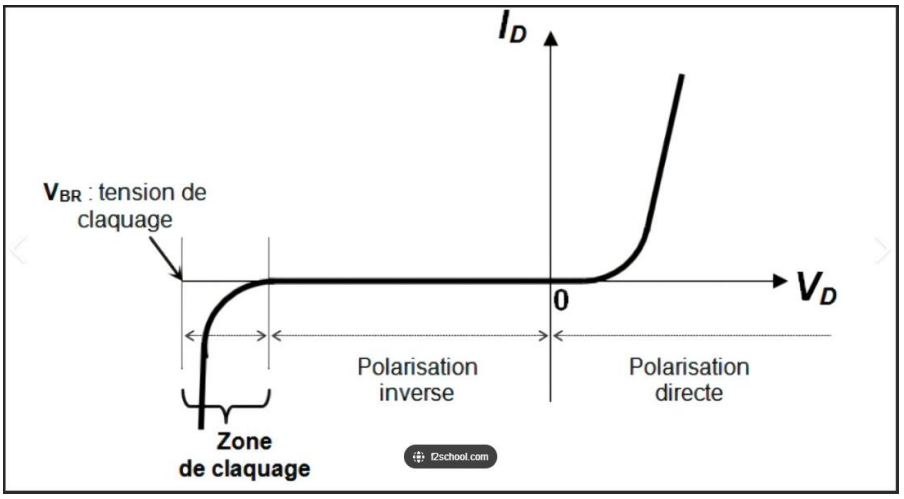


Figure III 3 : Caractéristique statique Id (Vd) de la diode.

Remarque :

Dans l'étude des circuits, on suppose la diode parfaite, c'est-à-dire :

- Chute de tension directe nulle.
- Courant inverse nul.

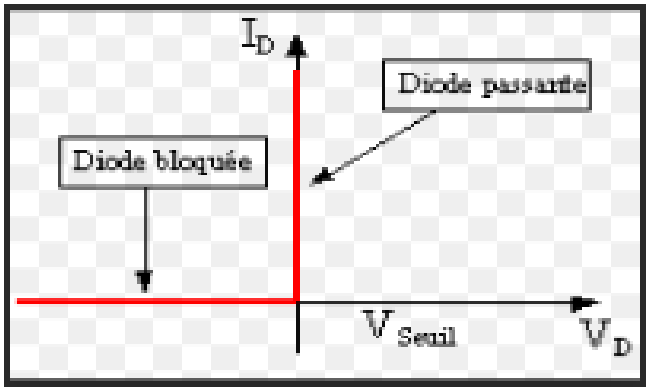


Figure III 4 : Caractéristique statique d'une diode idéale.

IV.3.2) Thyristors : [2]

Le thyristor est un semi-conducteur à 3 jonctions PN. Outre l'anode A et la cathode K. ce redresseur est muni d'une électrode de déblocage ou gâchette G.

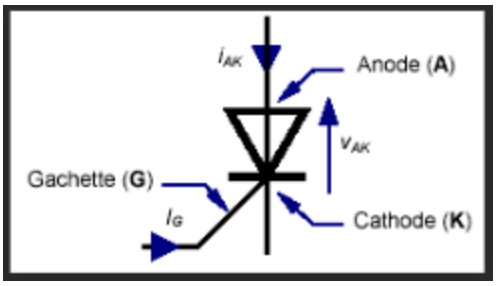


Figure III 5 : La présentation symbolique thyristor.

3.2.1 Principe de fonctionnement :

1) Etat du thyristor :

Le thyristor est tout d'abord une diode avec un sens passant et un sens bloqué.

Amorçage :

Pour que le thyristor s'amorce, il faut que la tension U_{AK} soit positive.

✓ Envoyer un courant de gâchette Ig.
Une fois le thyristor amorce on peut supprimer le courant Ig.

Etat passant :

Une fois amorcé, le thyristor se comporte comme une diode passante La tension à ses bornes est de l'ordre de 1V. Le courant I circule dans le sens anode-cathode.

Blocage :

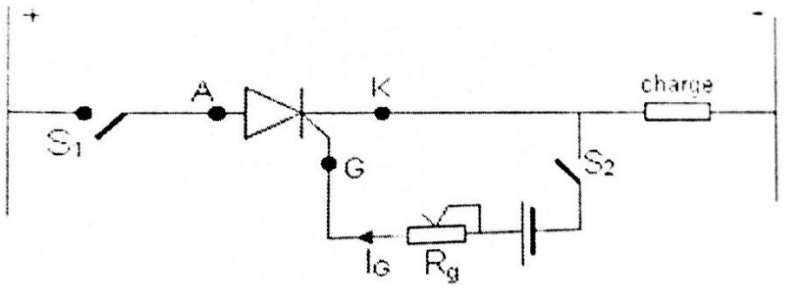
Pour bloquer le thyristor, il faut interrompre le courant 1 et lui appliquer une tension anode-cathode négative.

Etat bloqué :

Une fois bloqué, le courant I dans le thyristor est nul quel que soit le sens de la tension U_{AK}.

2) Analyse du fonctionnement :

Etant donné le montage ci-dessous, si on ferme l'interrupteur S_1, alors que S_2 est ouvert, le thyristor est alimenté sous une tension V_{AK} positive mais il ne conduit pas. A la fermeture de S2, on établit un courant de gâchette et on provoque alors l'amorçage du thyristor, qui devient conducteur.



Une fois le thyristor est amorcé, la gâchette n'a aucune influence sur le thyristor qui se comporte comme une diode.

3) Caractéristique :

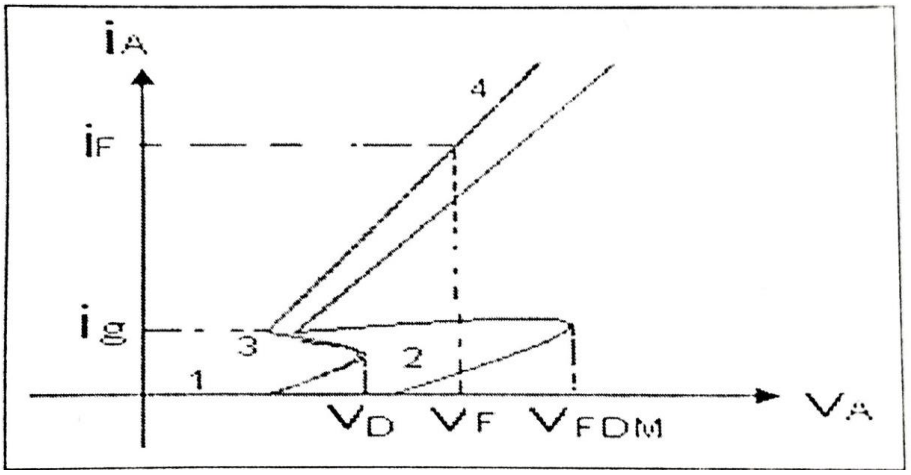


Figure III 6 : Caractéristique de thyristor.

Ig : courant de maintien (on ne peut le supprimer que lorsque le courant direct atteint une valeur suffisante pour maintenir la conduction).

IF : courant direct moyen (courant de fonctionnement).

VF : tension directe moyenne (tension de fonctionnement).

VFDM : tension de retournement (des centaines de volts) c'est la valeur maximale qui peut être appliquée en A et K sans risque de déclenchement lorsque la gâchette n'est pas alimentée.

Vd (VAK) : tension de retournement (quelque volts), tension maximale entre A et K lorsque la gâchette est alimentée positivement

IV.4) Gradateurs : [2]

IV.4.1) Définition :

On désigne sous le nom de gradateurs tous les convertisseurs statiques qui, alimentés par un réseau alternatif, fournissent une ou plusieurs tensions à valeur moyenne nulle, de même fréquence que celle du réseau d'alimentation, mais de valeur efficace différente, celle-ci étant habituellement réglable.

Bien que cela ne soit pas la seule technique possible, tous les gradateurs fonctionnent actuellement sur le principe de la commande de phase qui consiste à amorcer les thyristors avec un retard réglable, par exemple par rapport au passage par zéro d'une tension d'alimentation, et à laisser le blocage s'effectuer en commutation naturelle Ceci permet l'emploi de composants de type thyristors, le fonctionnement bidirectionnel étant obtenu grâce à l'association tête-bêche de deux éléments.

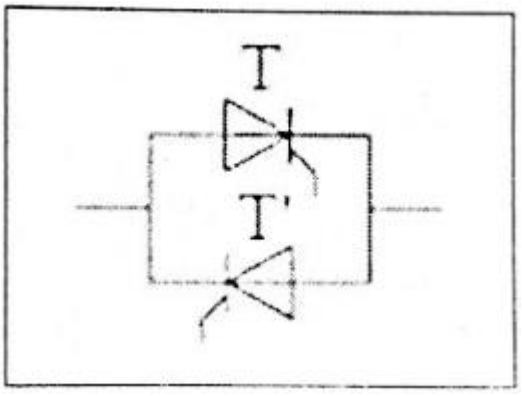


Figure III 7 : L'association tête-bêche de deux thyristors.

IV.4.2) Gradateur monophasé :

Le gradateur monophasé, comme représenté par la figure ci-dessous, est constitué de deux thyristors monté tête bêche sur une même phase. La tension appliquée e est une tension sinusoïdale. L'action sur l'angle de retard à l'amorçage de thyristor, compté à partir du passage par zéro de e, permet d'avoir une tension de sortie, aux bornes de la charge R, variable en valeur efficace mais de même fréquence que la tension V.

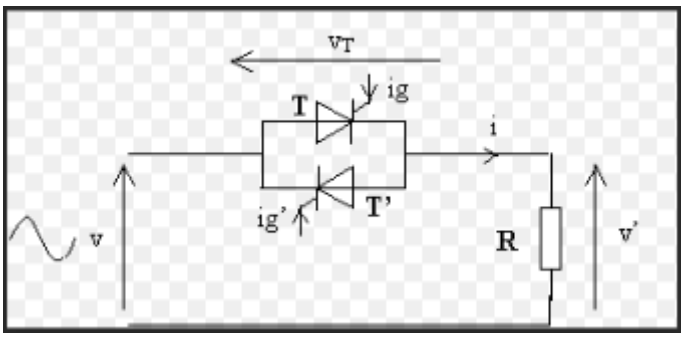


Figure III 8 : Gradateur monophasé.

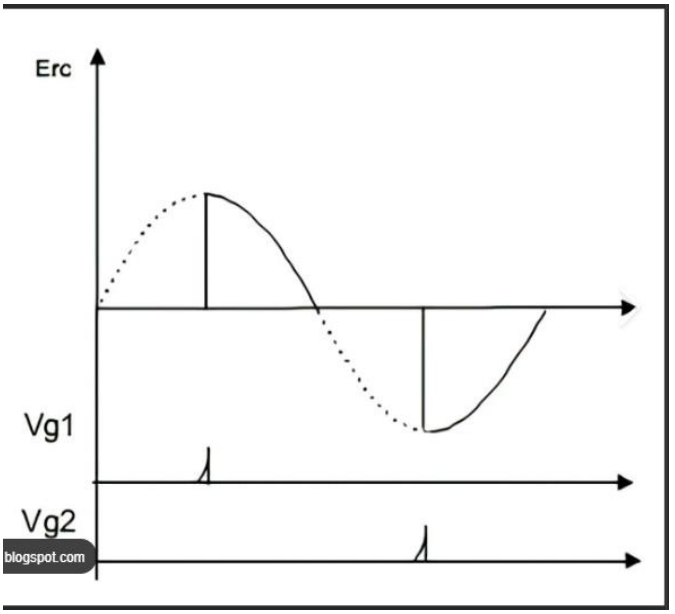


Figure III 9 : Variation de la tension de sortie du gradateur monophasé en fonction du temps pour les valeurs de Vg.

IV.4.3) Gradateur triphasé :

Contrairement au monophasé, où il n'y avait qu'une seule façon d'associer l'interrupteur avec la charge, il existe en triphasé diverses possibilités, surtout si la charge, que nous supposerons toujours équilibrée, est de type à six bornes accessibles. De plus, on peut dans certains cas

remplacer les interrupteurs à deux thyristors par des interrupteurs mixtes (un thyristor et une diode), ce qui augmente encore le nombre de structures possibles :

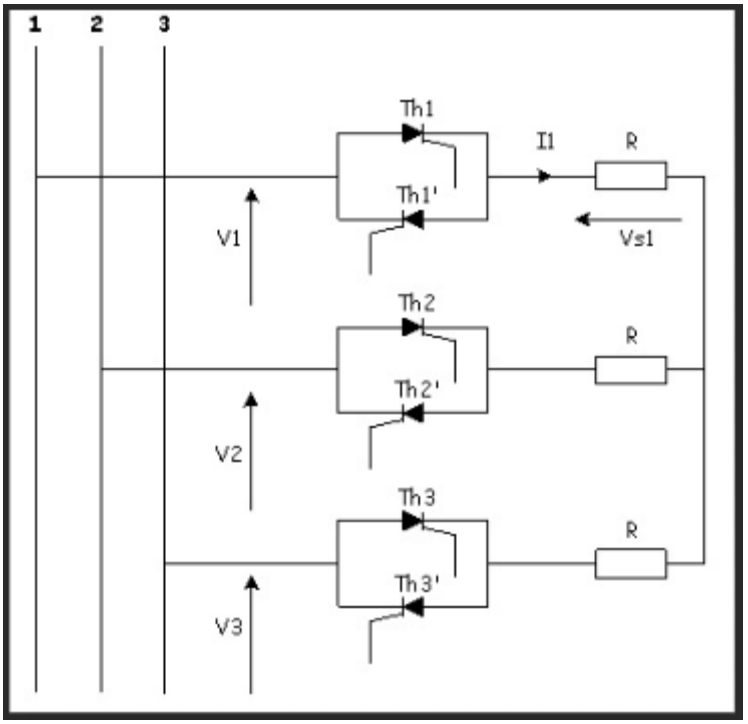


Figure III 10 : Gradateur triphasé.

C'est le mode le plus couramment utilisé Le couple initial du moteur est défini par l'utilisation dans une plage allant de 0 à 90% du couple rotor bloqué. A partir du niveau de couple initial, la tension de sortie appliquée au moteur est progressivement augmentée pendant le temps de la rampe d'accélération/

Le temps de la rampe d'accélération est réglable par l'utilisateur, dès que le démarreur détecte que le moteur est parvenu à la vitesse permanente, la tension de sortie est automatiquement commutée à la pleine tension et le contacteur de bay-passe est fermé.

IV.5) Description d'un démarreur électronique progressif :

Les démarreurs électroniques sont des gradateurs triphasés tout thyristors (montage étoile) constitués de 6 thyristors, monte tête-bêche par 2 dans chaque phase du réseau, lis permettant en fonction de l'angle d'amorçage des thyristors, de délivrer une tension découpée dont la valeur efficace varie (la fréquence reste fixe). [13]

IV.5.1) Principe de fonctionnement du gradateur du démarreur progressif :

Le démarreur progressif contrôle la tension transmise au moteur en utilisant un circuit gradateur.

Le gradateur est un appareil qui permet de convertir une tension alternative sinusoïdale à fréquence fixe et de valeur efficace constante en une tension alternative de valeur efficace réglable.

Les gradateurs peuvent assurer la commande et le réglage du courant débité par une source alternative dans une charge aussi alternative, avec valeur efficace contrôlée sans changement de fréquence. La variation de cette valeur efficace se fait par découpage de la tension à l'aide d'un interrupteur statique qui s'agit des thyristors pour les moyennes et hautes puissances ou bien simplement d'un triac pour les plus faibles puissances.

Le gradateur triphasé à base de thyristors possède dans chacune des phases deux thyristors commutés de manière antiparallèle. Il s'agit d'un thyristor pour l'alternance positive et d'un thyristor pour l'alternance négative.

Le thyristor est un composant à semi-conducteurs qui a deux états différents : bloquant ou conducteur. Dans son état de veille, il est en état de blocage, ce qui signifie qu'aucun courant ni aucune tension n'est transmise. Le thyristor est commandé via un signal de gâchette : lorsque le thyristor reçoit une impulsion vers sa gâchette, il commence à conduire, et il continue à le faire jusqu'à ce que la tension franchisse la ligne zéro (appelé passage à zéro). L'impulsion est contrôlée à partir d'un circuit de commande.

IV.6) Types de démarreurs progressifs :

La différence entre les différents types de démarreurs progressifs réside dans la construction de la partie puissance et la caractéristique de commande.

Comme déjà expliqué, le démarreur progressif est basé sur le principe du découpage de phase. Au moyen d'un thyristor, il est possible de n'appliquer qu'une partie de la tension au moteur, en coupant la demi-alternance sinusoïdale.
Le thyristor ne laisse passer le courant que dans une direction. Un second semi-conducteur polarisé en sens contraire conduisant le courant négatif (semi-conducteur monté tête-bêche) est donc nécessaire. [13]
On différencie les démarreurs progressifs selon les deux critères suivants :

IV.6.1) Nombre de phases commandées :

Une phase (démarreur progressif commandé sur une phase), deux phases (démarreur progressif commandé sur deux phases) ou trois phases (démarreur progressif commandé sur trois phases).

IV.6.2) Types du second semi-conducteur polarise inversement :

Si on choisit une diode, on parle alors d'un démarreur progressif commandé par demi - alternance.

Si on choisit un thyristor, on parle alors d'un démarreur progressif commandé par alternance complète.

Comme les différents types influencent différemment la tension et le courant, on peut expliquer au moyen des trois schémas de principe qui suivent :

a. Démarreur progressif commandé par alternance complète sur une phase :

Dans le démarreur commandé sur une phase, le découpage de phase est réalisé sur une phase au moyen de deux thyristors placés tête- bêche (phase L2). Les phases L1et L3 sont directement connectées au moteur.

Dans les phases L1 et L3, lors du démarrage, circule toujours un courant de 6 fois le courant nominal du moteur. Il est possible de diminuer le courant à 3fois le courant nominal, seulement dans la phase commandée.

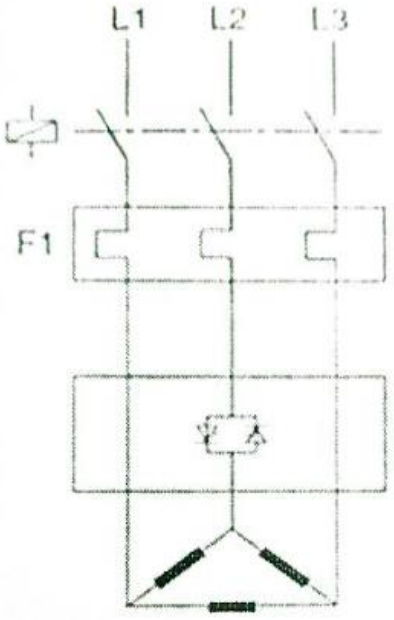


Figure III 11 : Commande sur une phase.

En comparant cette méthode avec le démarrage direct. On constate que le temps d'accélération est plus long mais que le courant moteur n'est pas considérablement réduit. La conséquence est que le même courant environ que pour le démarrage direct circule à travers le moteur. Ce qui fait que le moteur s'échauffe.

Comme une seule phase est découpée, le réseau est chargé asymétriquement pendant la phase de démarrage. Cette méthode correspond à la commutation classique.

Les démarreurs commandés sur une et deux phases sont principalement utilisés dans les domaines de puissances allant jusqu'à 5,5 kW maximum. Ils sont seulement appropriés pour éviter les chocs mécaniques dans le système. Le courant de démarrage du moteur à courant alternatif n'est pas diminué avec cette méthode. [11]

b. Démarreur progressif commandé par demi-alternance sur trois phases :

Dans le démarreur progressif commandé par demi-alternance sur trois phases, le découpage de phase est appliqué sur les trois phases. Comme semi-conducteur de puissance, un thyristor est monté tête- bêche avec une diode. Le découpage de phase se fait donc uniquement en demi alternance (commande par demi alternance). Ainsi, la tension n'est diminuée que lors de la demi-alternance, lorsque le thyristor est conducteur. Lors de la deuxième demi alternance, lorsque la diode est conductrice, la tension réseau entière est appliquée au moteur.

Dans la demi-alternance non commandée (diode) les pointes de courant sont plus grandes que dans la demi-alternance commandée. Les oscillations harmoniques ainsi générées entraînent un échauffement supplémentaire du moteur.

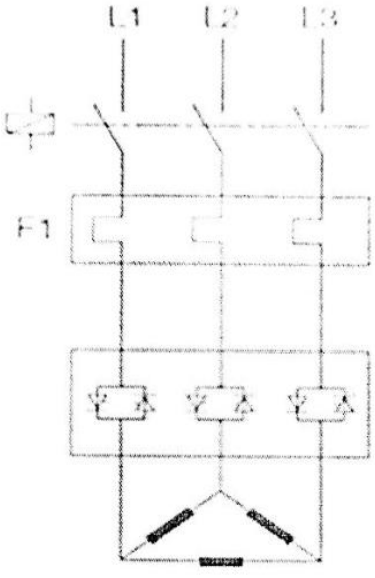


Figure III 12 : Commande par demi-alternance.

Comme les pointes de courant dans la demi alternance non commandée (diode) et les oscillations harmoniques conséquentes sont critiques pour des grandes puissances, les démarreurs progressifs commandés par demi-alternance ne sont utilisables efficacement que jusqu'à environ 45 kW. [9]

c. **Démarreur progressif commandé par alternance complète sur trois phases :**

Dans ce type de démarreur, le découpage de phase se fait sur les trois phases. Comme semi-conducteur de puissance on utilise deux thyristors montés tête-bêche. La tension de phase est ainsi découpée dans les deux demi-alternances (commande alternance complète). A cause des oscillations harmoniques créées lors du découpage de phases, le moteur, par contre, est thermiquement plus sollicité avec le démarrage progressif qu'avec le démarrage direct.

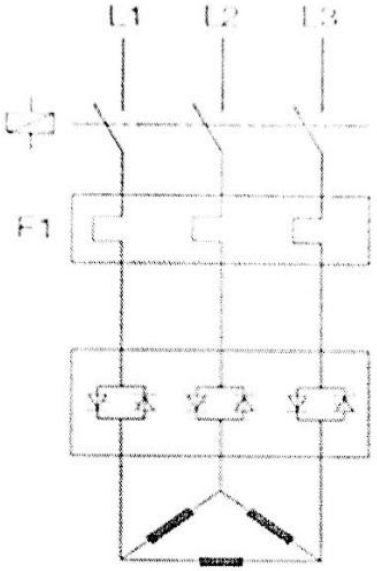


Figure III 13 : Commande par alternance complète.

Les démarreurs progressifs commandés par alternance complète sur trois phases sont utilisés pour des puissances allant jusqu'à environ 630 kW. [11]

IV.7) Applications du démarreur progressif :

Les démarreurs progressifs peuvent être adaptés pour servir une grande variété d'applications dans les commandes de moteurs. Les avantages de l'utilisation de démarreurs progressifs sont évidents : une durée de vie de l'équipement plus longue et un flux de production plus fluide, ce qui se traduit par des économies de temps et de coûts.

La majorité des démarreurs progressifs sont installés dans des applications de pompes et de ventilateurs, bien qu'ils puissent être intégrés dans de nombreuses autres applications de moteur qui ne nécessitent pas de contrôle de vitesse. On peut citer parmi ces applications :

- Convoyeurs, courroies, chaînes, vis, matériaux en vrac, et matériel emballé.
- Ventilateurs, soufflantes, compresseurs et pompes.
- Machines-outils, meuleuses, tours et presses à emboutir.

- Machines sur mesure, étiqueteuses, machines d'emballage, lave-bouteilles, tréfilage, textiles et similaires.
- Extrudeuses.
- Machines de traitement, fours, broyeurs, mélangeurs et agitateurs.

IV.8) Avantages du démarreur progressif :

Les caractéristiques d'un démarreur progressif, ont des avantages nous les allons citer :

- Grâce au démarrage lent, le démarreur progressif ménage le moteur et la machine.

- Le courant de démarrage est réduit ou peut être limité.

- Le couple est adapté à la charge correspondante.

- Pour les pompes, les ondes de pression au démarrage et à l'arrêt sont évitées.

- Les mouvements de retour et les chocs pouvant perturbés un processus sont évités.

- L'usure des courroies, chaînes, entraînements et paliers est diminuée.

- Grâce aux différentes possibilités de commande, l'automatisation est facilitée.

On distingue deux différents types d'avantages, avantages mécanique et électriques : [13]

IV.8.1) Avantages mécaniques :

Avec un démarrage direct, le moteur développe un couple de démarrage très important.
Normalement les valeurs des couples de démarrage sont de 150 à 300 % de celles du couple nominal.
Selon le type de démarrage et à cause du fort couple de démarrage, la mécanique de l'entraînement peut être sollicitée exagérément ("contrainte mécanique"), ou bien le processus de fabrication est perturbé par des chocs et des à-coups inutiles.

- Grâce à la mise en œuvre d'un démarreur progressif, on évite les chocs subis par les parties mécaniques de la machine.

- La caractéristique de démarrage peut être adaptée à l'utilisation (par exemple commande de pompe).

- Câblage moteur facilité (seulement 3 conducteurs). [13]

IV.8.2) Avantages électriques :

Le démarrage d'un moteur à courant alternatif entraîne dans le réseau des appels de courant importants (6 à 7 fois le courant nominal). Il peut en résulter d'importantes chutes de tension qui perturbent les autres utilisateurs connectés sur ce réseau. Les distributeurs d'électricité imposent donc des limites pour les courants de démarrage des moteurs.

- Avec un démarreur progressif, il est possible de limiter le courant de démarrage du moteur, pour autant qu'un couple de démarrage élevé ne soit pas nécessaire.

- Les charges sur le réseau sont alors diminuées.

- Diminution éventuelle des frais de connexion au réseau.

- Dans de nombreux cas, une limitation du courant de démarrage est imposée par le distributeur d'électricité : les prescriptions correspondantes sont ainsi respectées. [13]

IV.9) Option d'arrêt progressif :

Cette option est utilisable dans les applications nécessitant un temps d'arrêt étendu. Le temps de diminution progressive de la tension est réglable par l'utilisateur. Il est réglé indépendamment du temps de démarrage. La charge s'arrête quand la tension de sortie descend à un niveau tel que de la charge devient supérieure au couple développé par le moteur.

IV.10) Hypothèse simplificatrice :

On peut définir un convertisseur statique comme un bloc de transformation qui utilise des interrupteurs de puissance a semi- conducteur permettant un échange énergétique entre deux réseaux électriques, une source et une charge, de nature différente.

Nous considérons ces interrupteurs (thyristors) idéalisés :

- Réaction instantanée aux signaux de commande donc la puissance consommée et le temps de consommation.

- Résistance nulle à l'état fermé et infini a l'état ouvert.

IV.11) Commande des gradateurs :

Il existe plusieurs méthodes de commande des thyristors du circuit gradateur utilisé pour le démarrage progressif. Les deux méthodes les plus connues et les plus utilisées seront discutées cette section.

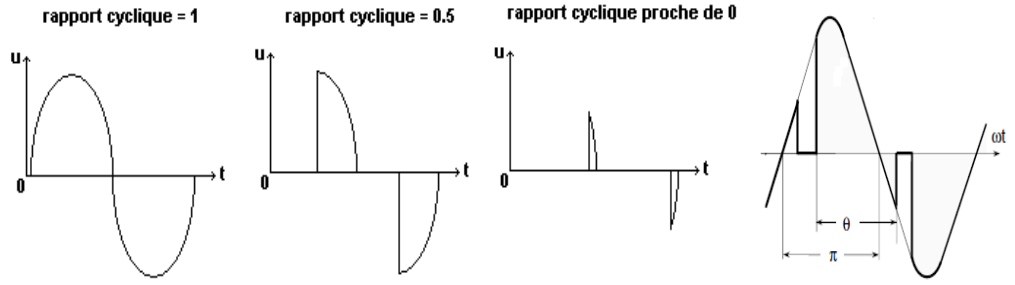
IV.11.1) Commande par angle de phase :

Elle fournit une tension alternative, de valeur efficace variable et de fréquence fixe (celle du réseau) par modulation de l'angle d'amorçage des thyristors.

a. Principe de la commande par angle de phase :

Le thyristor autorise le passage du courant durant un temps plus ou moins long de la demi-période. Ce temps est défini par le rapport cyclique qui est le rapport du temps de fermeture divisé par la demi-période, il est donc compris entre 0 et 1. Quand il est égal à 0 la tension de sortie est quasiment nulle et quand il est égal à 1 la tension de sortie est la même que celle de l'entrée (du réseau).

Le signal de commande, appelé angle de retard à l'ouverture, doit être synchrone avec la tension aux bornes de l'interrupteur.



(a) **(b)**

Figure III 14 : Courbes de la variation de la tension par la commande d'angle de phase.
(a) : pour une charge résistive pour différentes valeurs de α.

(b) : pour une charge inductive.

a. Algorithme de commande par angle de phase :

Le fonctionnement de la commande par angle de phase se base sur la génération d'un signal image de la tension du réseau V_r, et d'un autre signal V_g en décalage de l'angle (pi) avec le signal image de la tension du réseau V_r.

L'algorithme consiste à gérer, en fonction du temps, le décalage du signal V_g de telle sorte à ce qu'après le temps de démarrage souhaité, le signal V_g et V_r devient superposé, ce qui permettra de varier la tension de sortie efficace de zéro '0' à la valeur max.

$$\begin{cases} V_{C1} = (V_r \geq 0) \quad \& \quad (V_g \geq 0) \\ V_{C2} = (V_r < 0) \quad \& \quad (V_g < 0) \end{cases}$$

$$V_S = V_{réseau} * (V_{c1} + V_{c2}) = V_{réseau} * V_c$$

Tels que :

$V_r = V_{rm}$ .sin (ωt-φ) : tension de référence.

$V_g = V_{gm}$ .sin (ωt-φ-g) : tension image de l'angle g de retard d'amorçage.

V_c : tension de commande.

V_s : tension de sortie du gradateur.

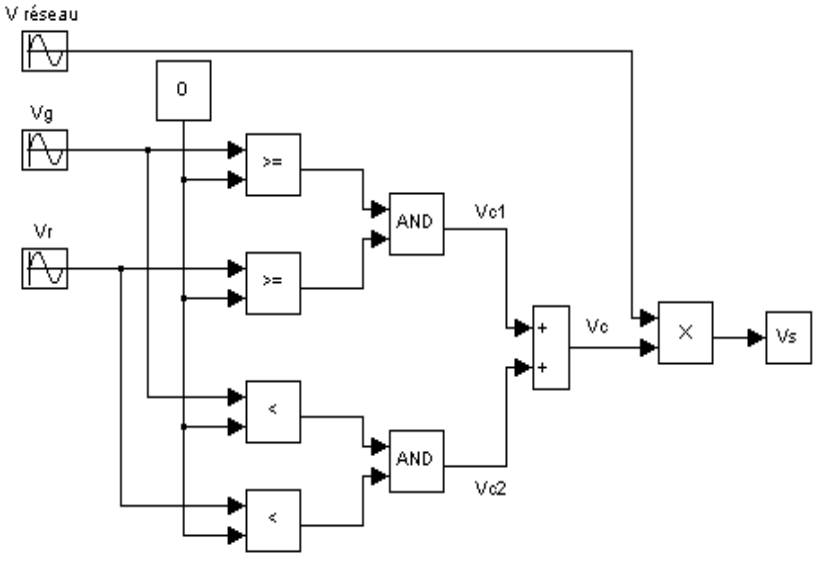
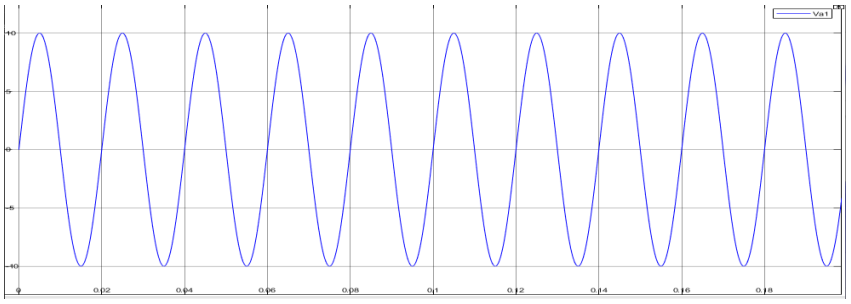


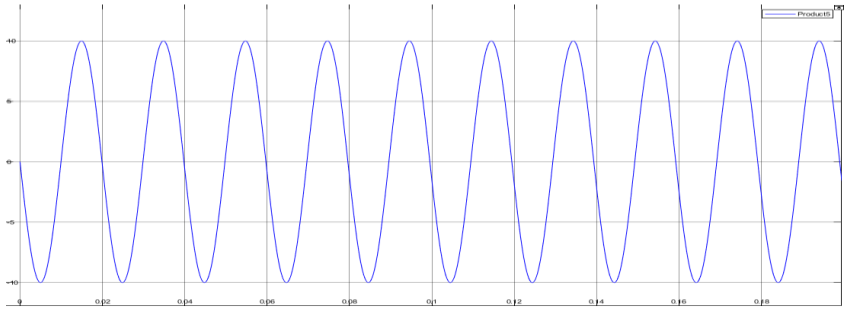
Figure III 15 : Schéma-bloc de l'algorithme de commande par angle de phase.

Les deux figures ci-dessous représentent l'évolution du signal V_g en fonction du temps.

Après le temps de démarrage 't_d' V_g sera décalé de l'angle (pi).



La tension d'image :



Décalage de (pi) :

Figure III 16 : variation de la tension d'image en fonction du temps V_g.

IV.11.2) 11.2 Commande par train d'onde :

Elle permet le réglage d'énergie, par envoi de trains d'ondes entières durant p périodes, d'amplitude et de fréquence égale à celles du réseau, séparés par des absences totales de tension pendant p' périodes, la période de la tension U est donc (p+p') /f.

p et p' étant des nombres entiers, la tension et la puissance varient de façon discontinue.

a. Principe de la commande par train d'ondes :

L'interrupteur autorise le passage du courant pendant une durée T_1 correspondant à un nombre entier de périodes du secteur. Puis il coupe pendant le reste de la période T_2 de fonctionnement.

Le transfert d'énergie est réglé en faisant varier le rapport T_1/T_2. Ce procédé est réservé aux machines à fortes inerties telles que les fours, le chauffage (dans ce cas inertie thermique).

Il permet de s'affranchir des problèmes de facteur de puissance et d'harmoniques hautes fréquences provoqués par la technologie « angle de phase » mais, en revanche, il introduit des perturbations de très basses fréquences provoquant sur le réseau des effets tel que le papillotement.

Le nombre entier de périodes est nécessaire pour que la tension délivrée soit alternative (la valeur moyenne est nulle). En revanche, il est possible que la durée T_2 correspondant à un nombre impair de demi-périodes.

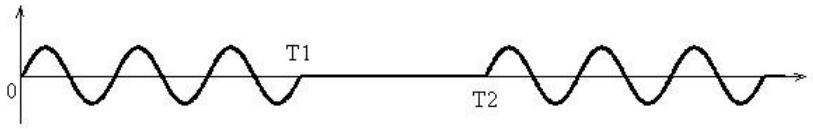


Figure III 17 : Courbes de la variation de la tension par la commande d'angle de phase.

b. Algorithme de commande par train d'onde :

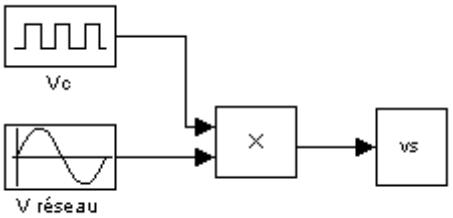


Figure III 18 : Schéma-bloc de l'algorithme de commande par train d'onde.

$$V_c = \begin{cases} 1, & \frac{t}{T_m} \leq a \\ 0, & a < \frac{t}{T_m} < 1 \end{cases}$$

$$V_S = V_{réseau} * V_c$$

Tels que :

V_c : tension de command.

V_s : tension a la sortie de gradateur.

T_m= m*T : période de modulation.

T_{on} : période de marche.

a = T_{on} / T_m : le rapport cyclique.

m : nombre entier (1.2.3…n).

t : temps.

Le modèle à simuler :

Pour notre travail, on a choisi d'utiliser la commande par angle de phase.

Pour les besoins de simplification on a considéré que les composants semi-conducteurs qui constituent le gradateur sont conduire à chaque fois que V_g et V_r sont de même signe.

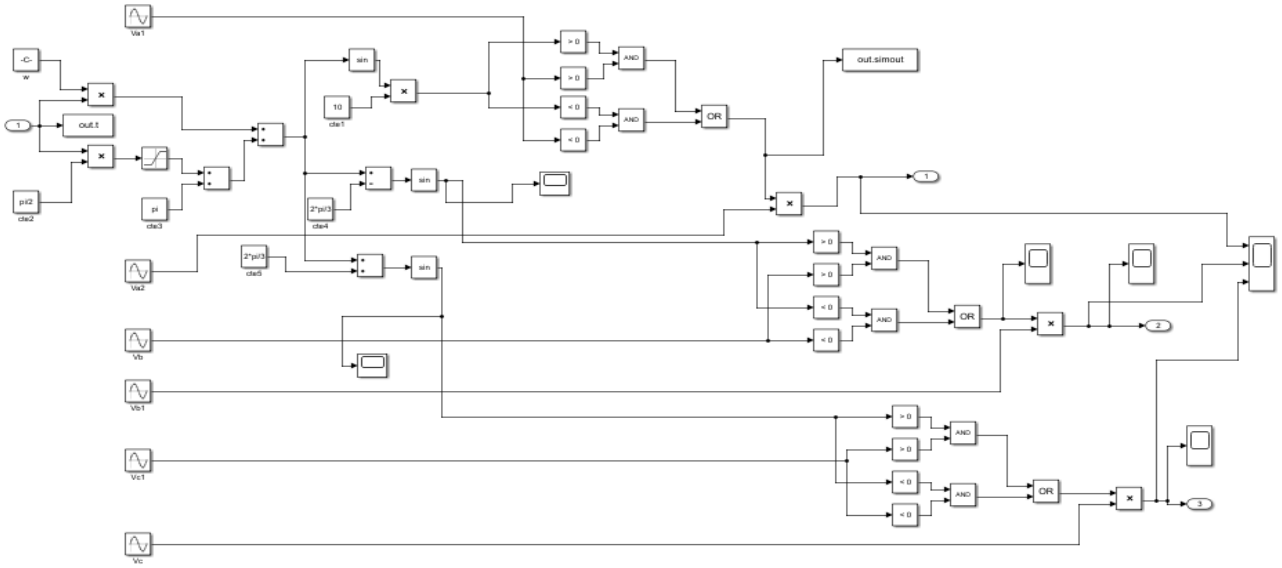


Figure III 19 : bloc Simulink du gradateur triphasé.

IV.12) Simulation de la commande par angle de phase :

La tension d'image (vr) :

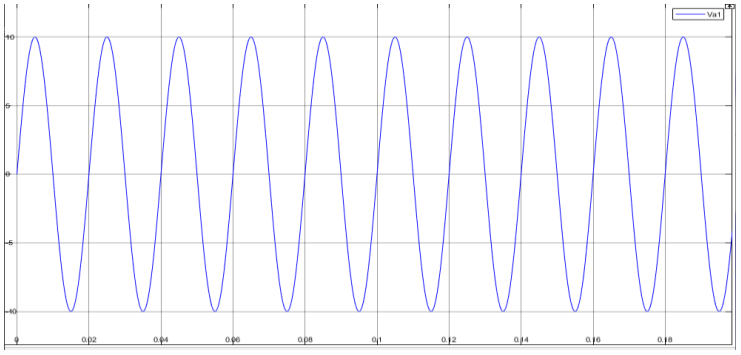
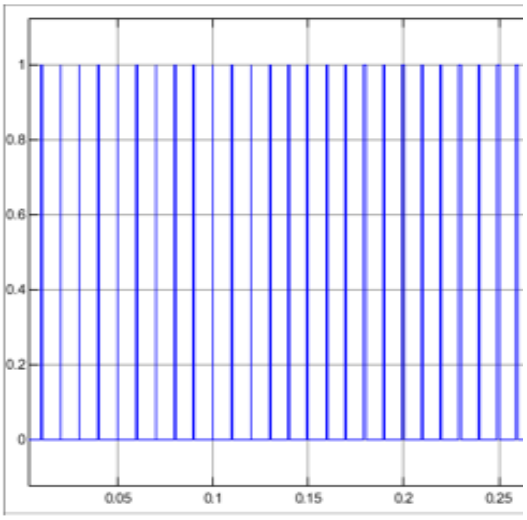


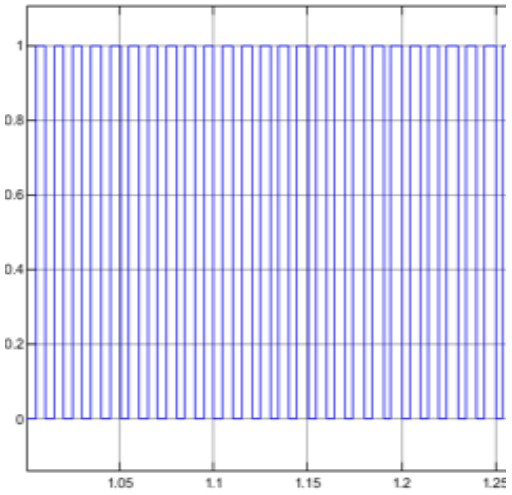
Figure III 20 : Variation de la tension d'image en fonction de temps.

Vc1+Vc2 :

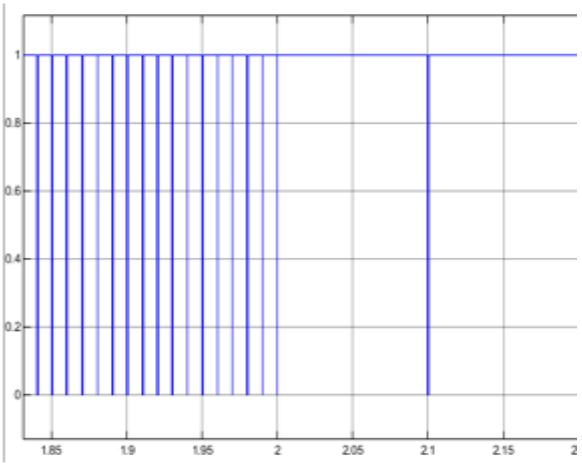
T=(0s,0.5s), les impulsions sont fines.



T=(1s,1.5s), les impulsions sont moyennes.



T=(1.7s,4s), les impulsions sont larges.



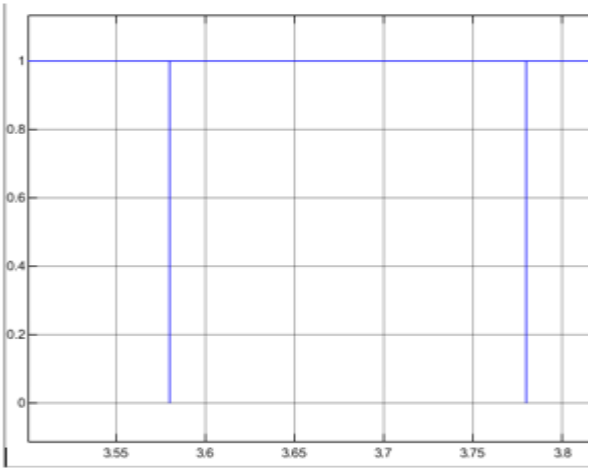
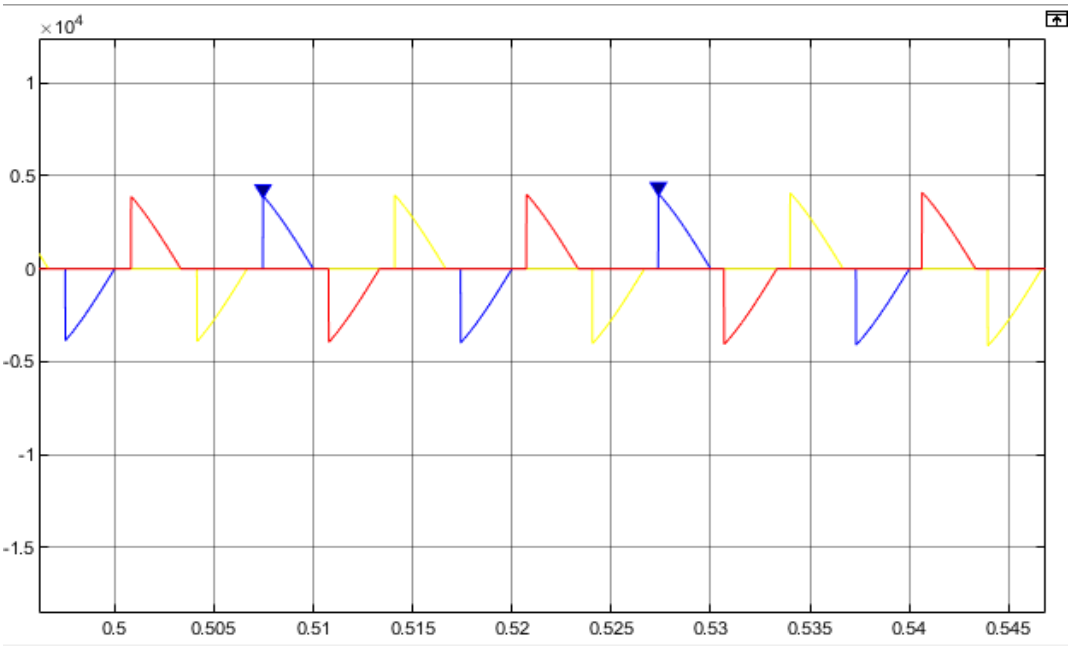


Figure III 21 : Impulsions générées à partir de la commande angle de phase (Vc1+Vc2).

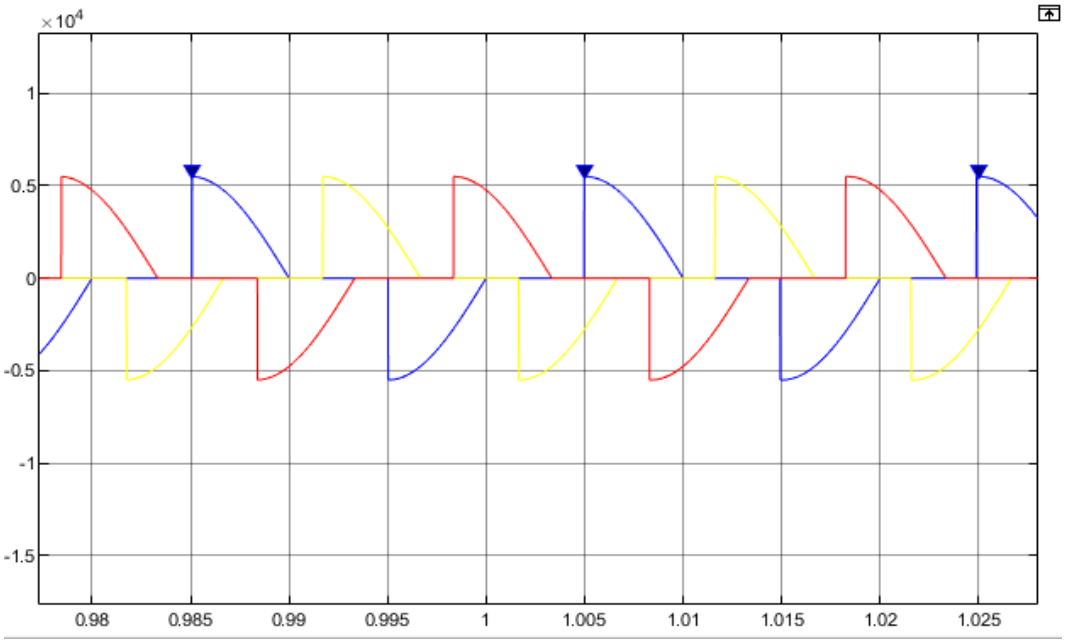
IV.13) Résultats de simulation du gradateur triphasé (Vs) :

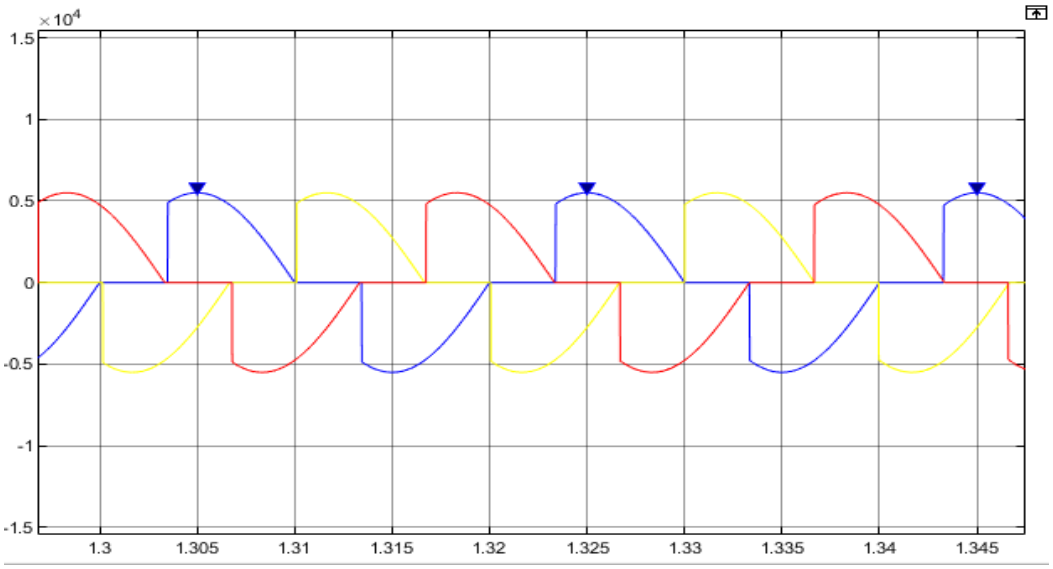
La tension :

T=(0s,0.7s).

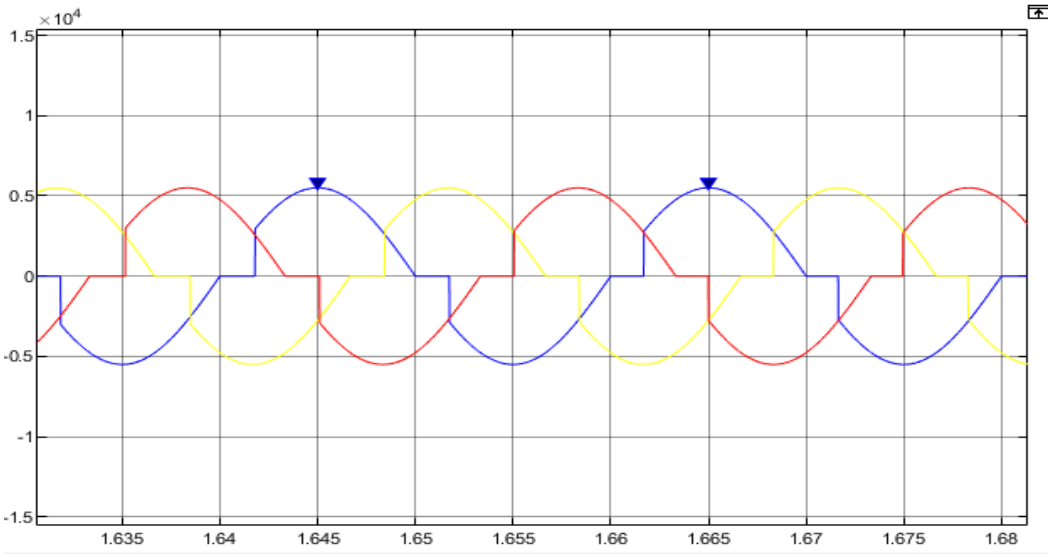


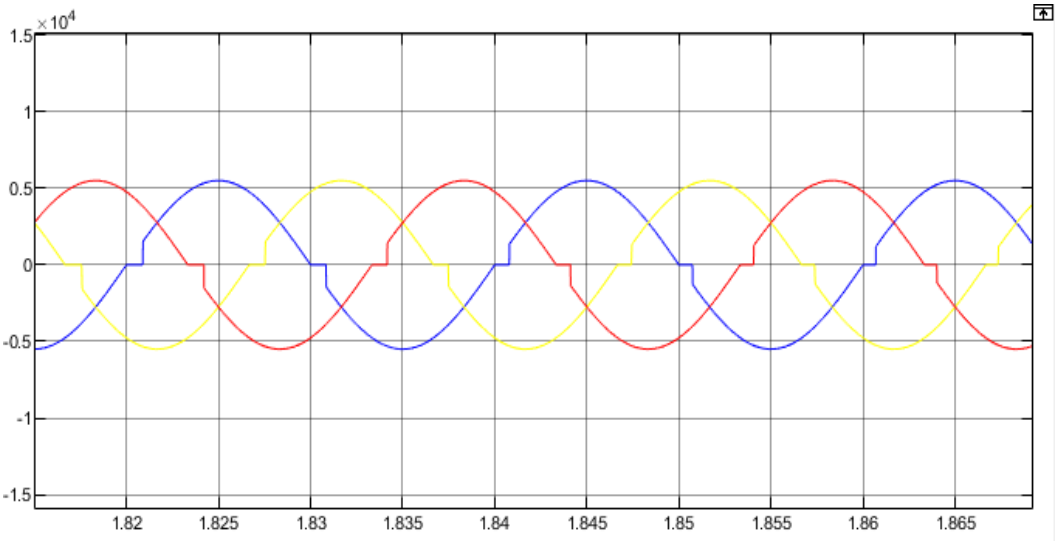
T=(0.9s,1.5s).




×10^4
1.5
1
0.5
0
-0.5
-1
-1.5
1.3
1.305
1.31
1.315
1.32
1.325
1.33
1.335
1.34
1.345

T=(1.6s,1.9s).


×10^4
1.5
1
0.5
0
-0.5
-1
-1.5
1.635
1.64
1.645
1.65
1.655
1.66
1.665
1.67
1.675
1.68


×10^4
1.5
1
0.5
0
-0.5
-1
-1.5
1.82
1.825
1.83
1.835
1.84
1.845
1.85
1.855
1.86
1.865

T=(1.9s,4s).

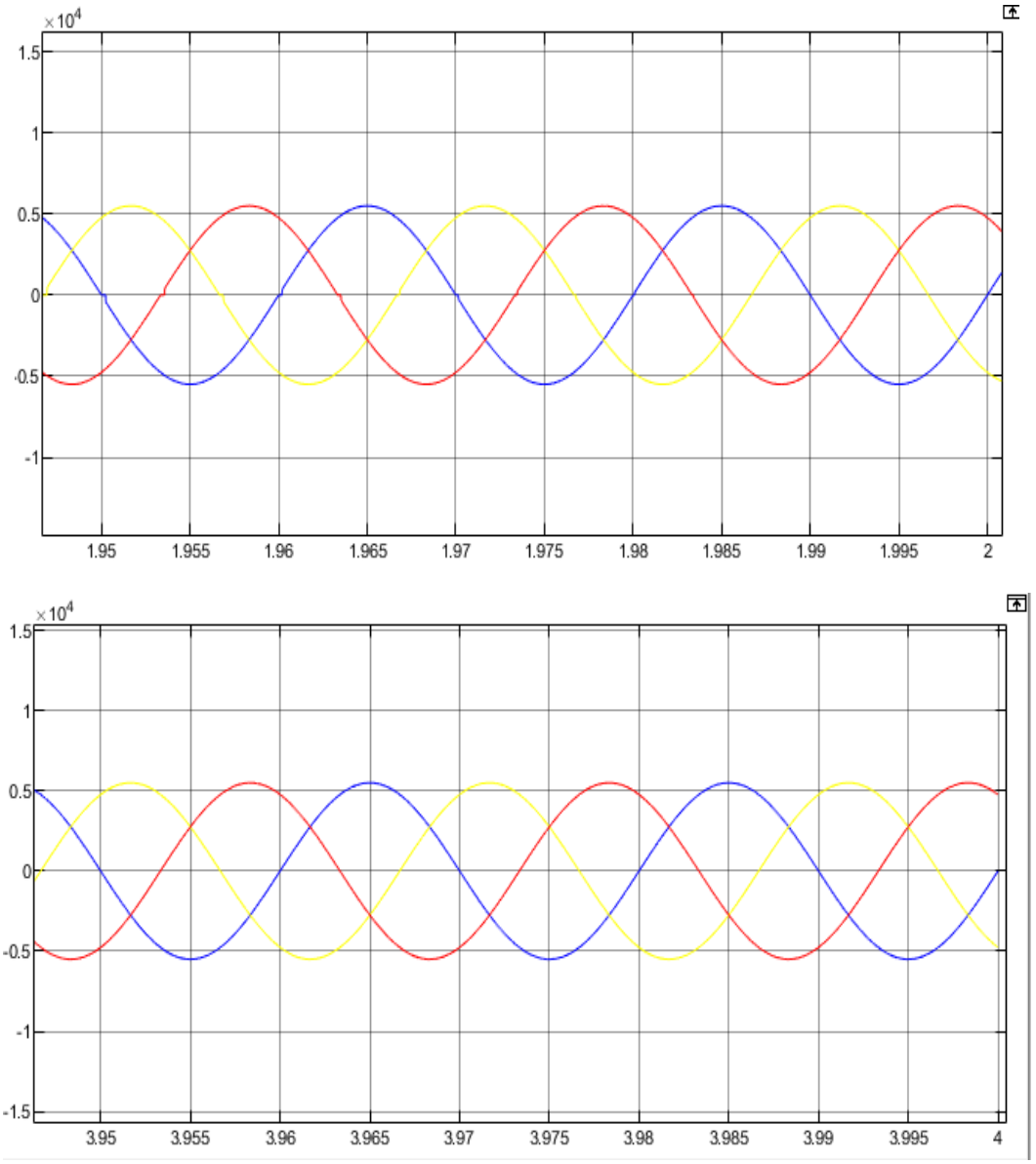


Figure III 22 : Formes de variation de la tension sortie du gradateur triphasé en fonction du temps.

IV.14) Interprétation des résultats de simulation :

Les résultats de simulation obtenue permettent d'expliciter encore plus le principe de fonctionnement du gradateur et de valider le fonctionnement de la méthode de commande utilisée qui est la commande par angle de phase.
On a, donc, défini un angle de phase g associer à une tension qu'on a comparé à une tension de référence Vr (tension d'image) qui elle-même est synchronisée avec la tension du réseau, à l'entrée du gradateur.

Pour les différentes valeurs de g, qui est l'angle de phase de la tension Vg, on a obtenu des retards a l'amorçage des thyristors différents et qui correspondent à l'angle g, ce qui a permis d'obtenir des tensions de sortie variable en valeur efficaces à la sortie du gradateur.

IV.15) Conclusion :

Les démarreurs progressifs ce sont des convertisseurs de puissance alternatifs/alternatifs. Dans ce chapitre, on a fait une description détaillée de ce dernier comme on a présenté la stratégie la plus répondue pour ça commande, qui est celle de l'angle de phase Ensuite on a procédé à la simulation de ce dernier.
Pour utiliser ce convertisseur comme démarreur progressif pour un moteur asynchrone, il faut prévoir une évolution de la tension en fonction du temps qui permettra d'obtenir un temps de démarrage du moteur variable en fonction de l'évolution de la tension de la valeur minimale à la valeur maximale qui est celle du réseau, et cela sera détaillé dans le chapitre suivant.

Chapitre IV : LE DEMARRAGE PROGRESSIF DU MOTEUR ASYNCHRONE 253-231 (SIMULATION DE L'ENSEMBLE GRADATEUR-MOTEUR).

V) Chapitre IV : Le démarrage progressif du moteur asynchrone 253-231 (simulation de l'ensemble gradateur-moteur) :

V.1) Introduction :

Dans ce chapitre on va procéder à la simulation de l'ensemble moteur gradateur. On a, déjà, procédé à la validation du modèle du moteur asynchrone dans le deuxième chapitre et du gradateur (la méthode de l'angle de phase) dans le troisième chapitre.

Pour réaliser le démarrage progressif, il faut pouvoir générer une tension qui augmente progressivement, à l'entrée du moteur, de la valeur minimale, qu'on peut définir d'avance, jusqu'à une tension maximale qui correspond celle nominale du réseau La progressivité de l'évolution de la tension et le facteur principal qui permet d'avoir une pente de lancement, ou un temps de démarrage réglable.

V.2) Le système complet simulé :

Le système à simuler est constitué du gradateur et sa commande et du moteur asynchrone.
On va donc simuler le démarrage du moteur, et on s'intéresser à la pente démarrage à l'évolution des courants de démarrage, les tensions d'alimentations ainsi qu'à Vg

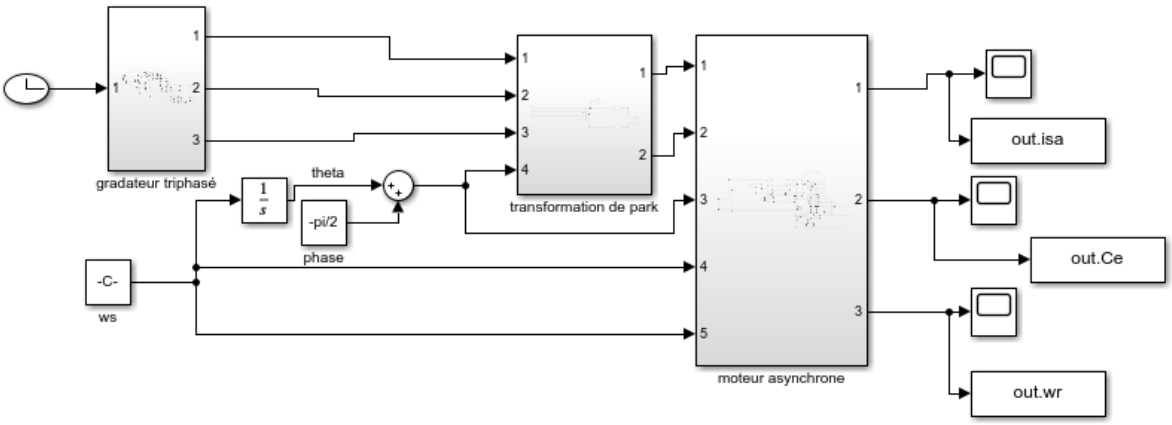


Figure IV 1 : La représentation du système complet à simuler, (Bloc Simulink de l'ensemble gradateur-moteur asynchrone).

V.3) Les résultats de simulation :

V.3.1) La tension :

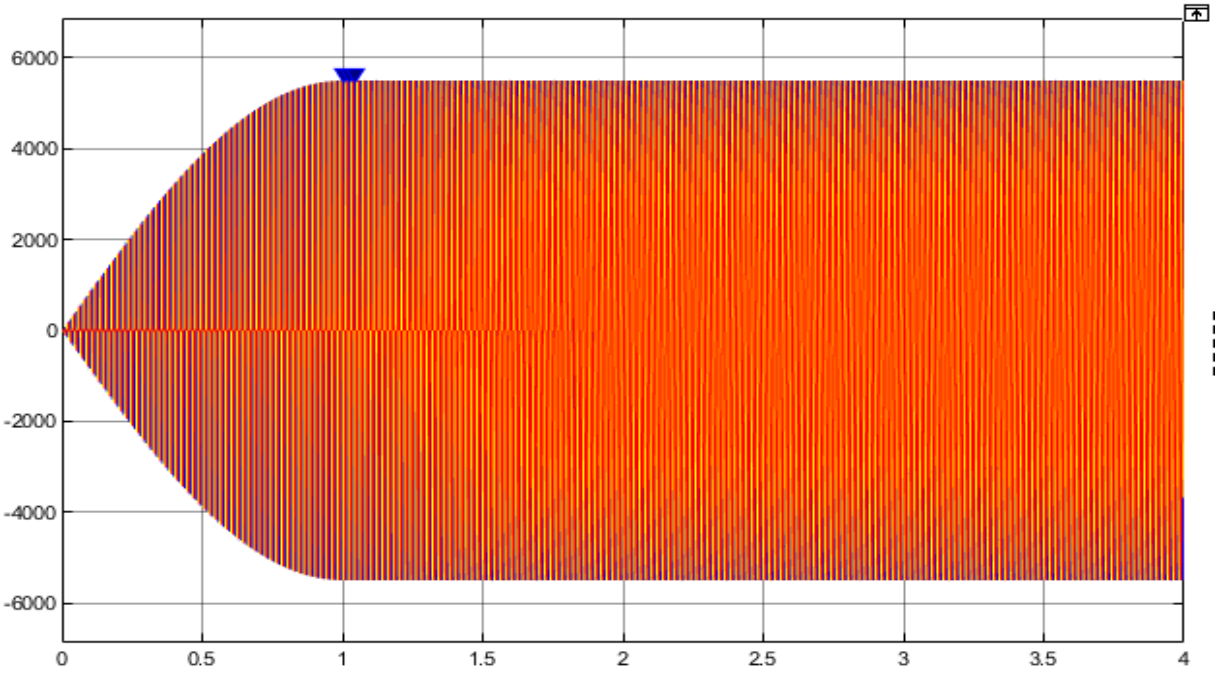
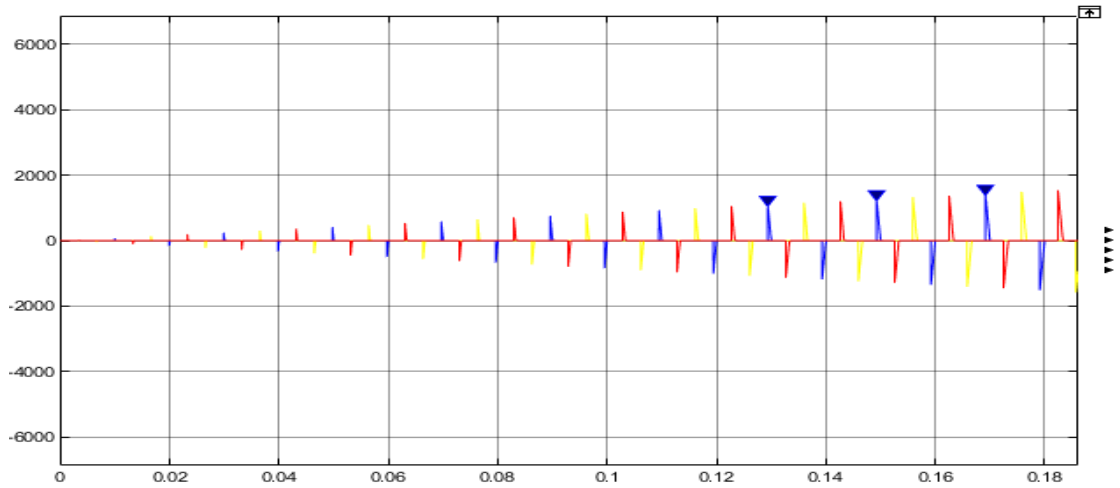
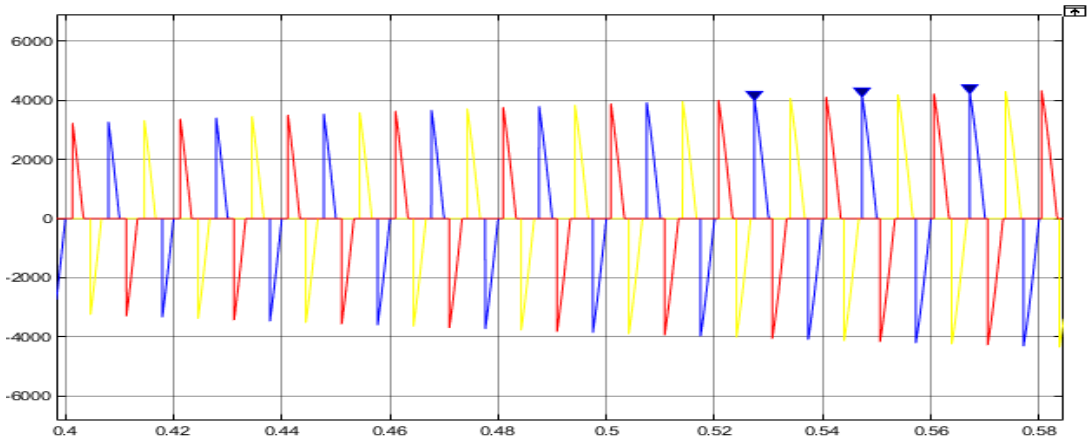


Figure IV 2 : progression de la tension appliquée au démarrage du moteur en fonction du temps.

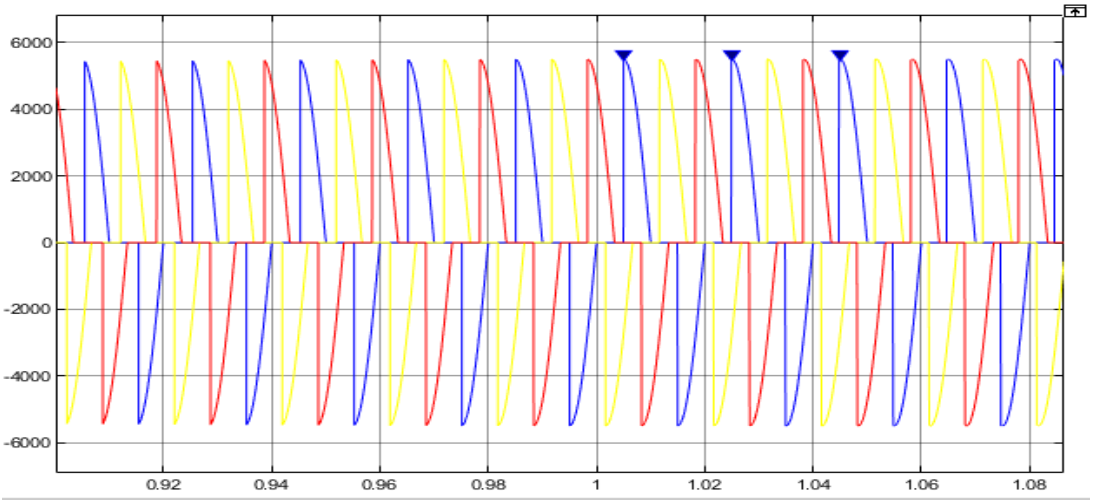
<u>Zoom sur la progression de la tension appliquée au démarrage du moteur en fonction du temps :</u>

<u>T=(0s,0.6s).</u>

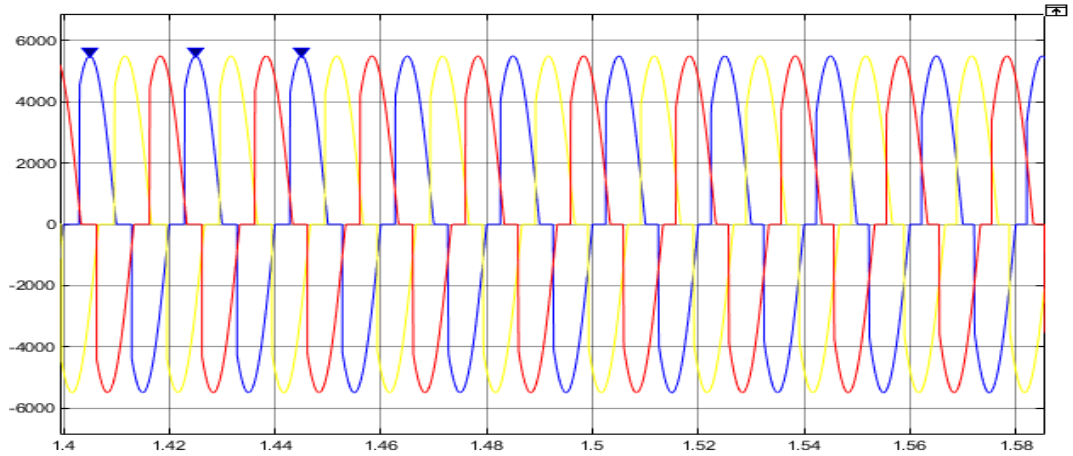




T=(0.9s,1.2s).



T=(1.2s,1.7s).



T=(1.7s,4s).

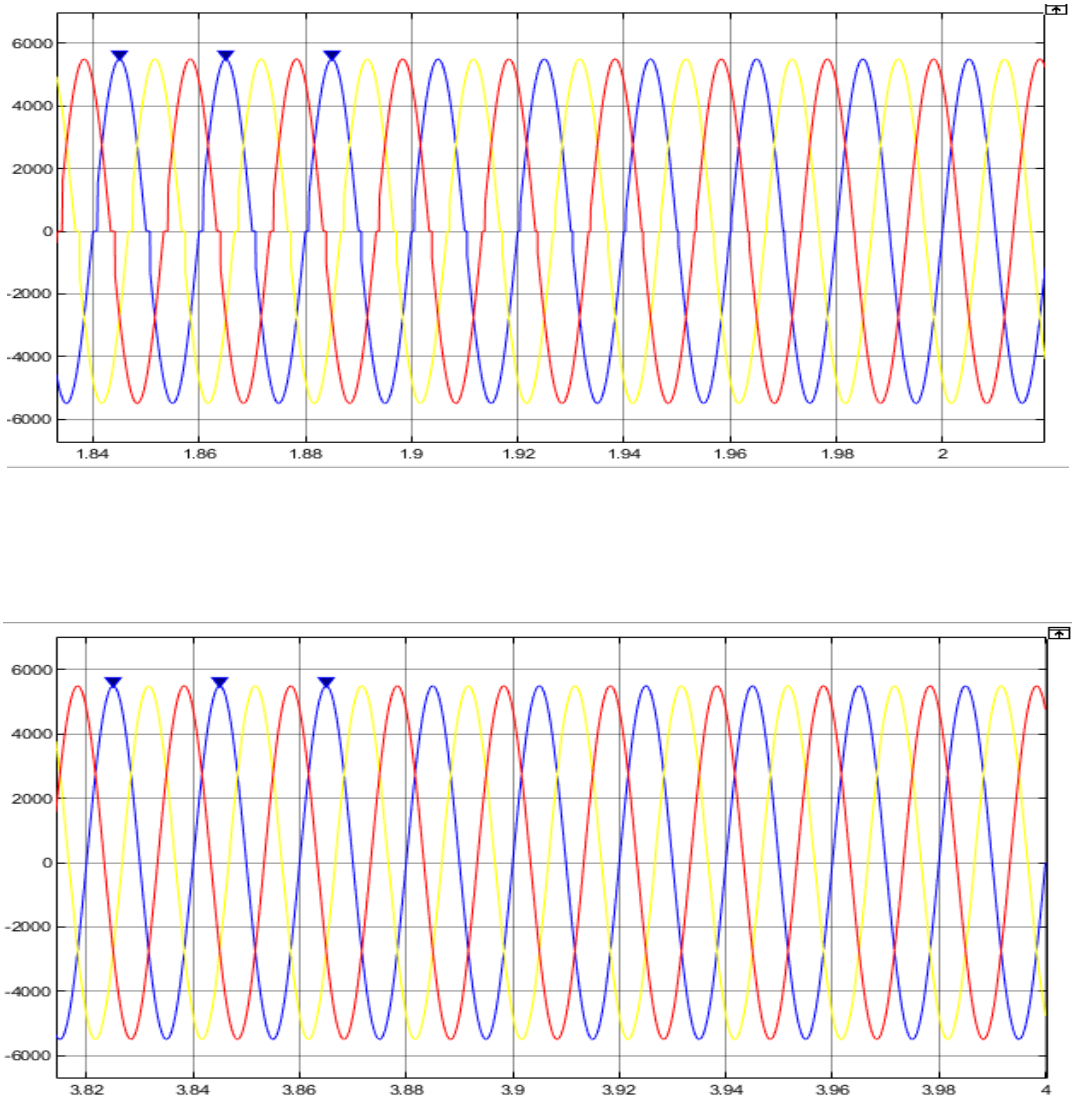


Figure IV 3 : Zoom sur la progression de la tension appliquée au démarrage du moteur en fonction du temps.

V.3.2) A vide : Cr=0 [N.m] :

- **La vitesse de rotation (w) :**

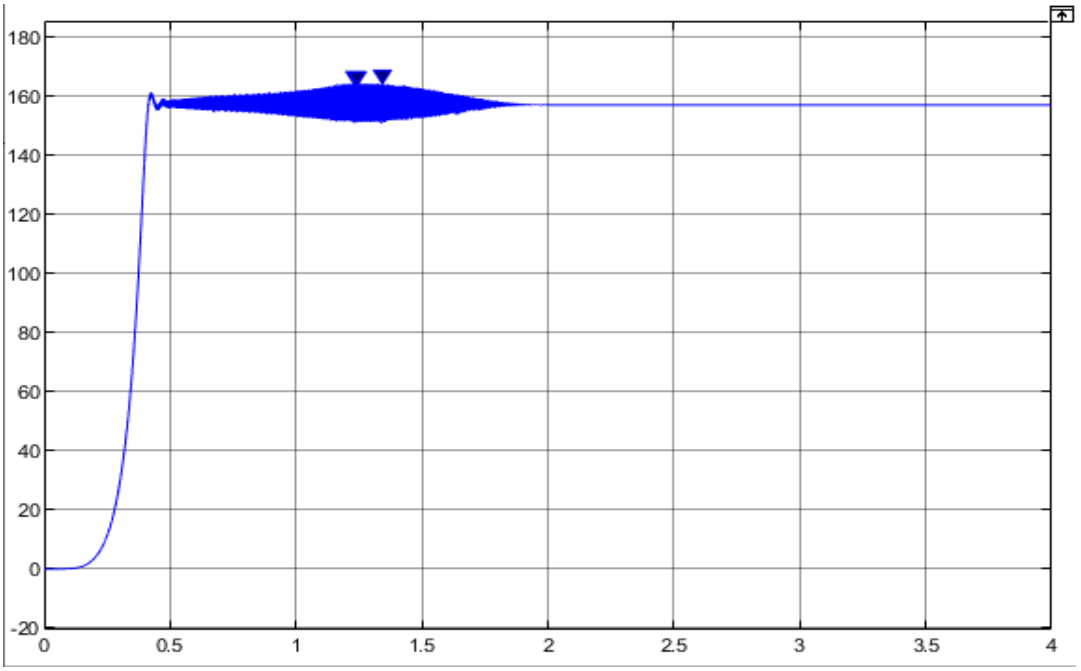


Figure IV 4 : Variation de la vitesse en fonction du temps avec couple résistant.

- **Le couple électromagnétique (Ce) :**

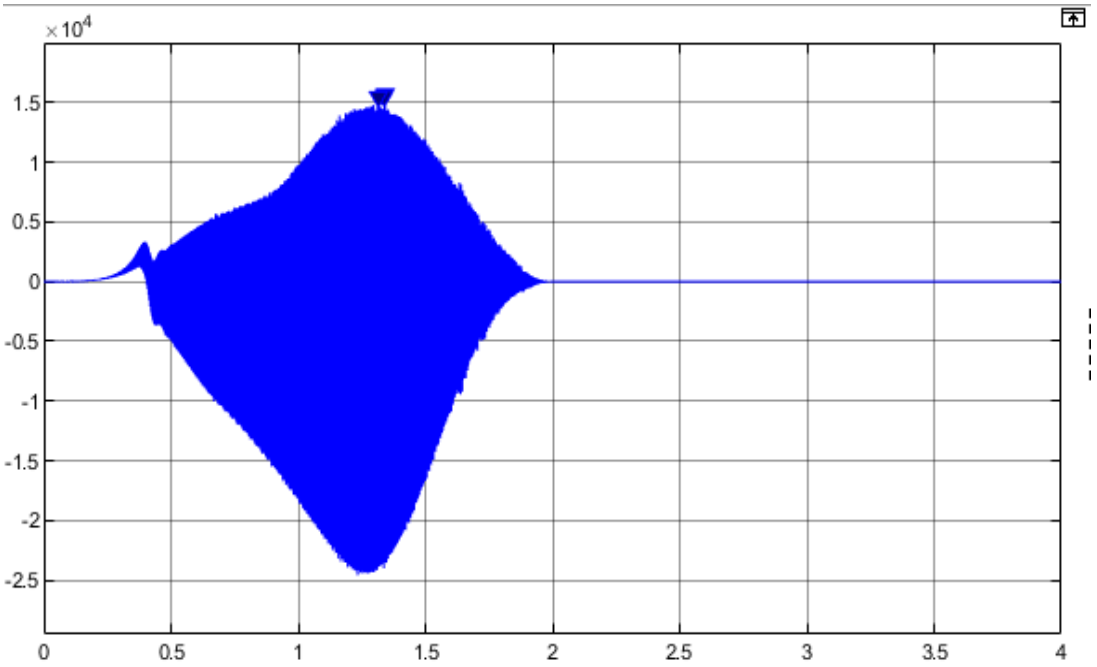


Figure IV 5 : Variation du couple électromagnétique en fonction du temps avec couple résistant.

- **Le courant statorique (is) :**

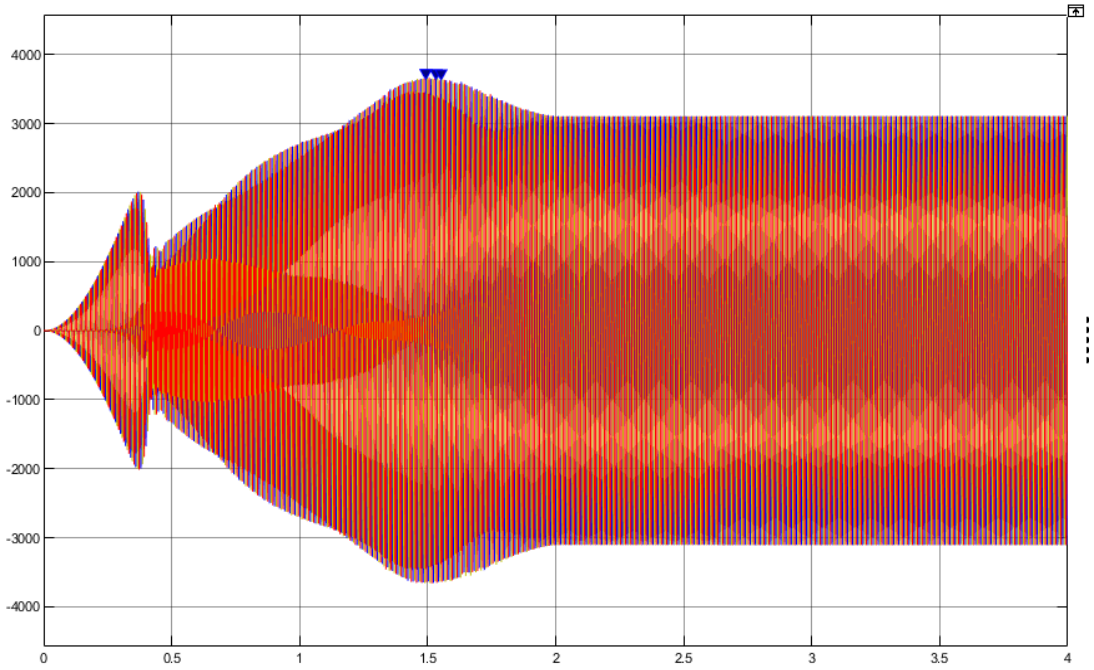


Figure IV 6 : Variation du courant statorique en fonction du temps avec couple résistant.

ZOOM :

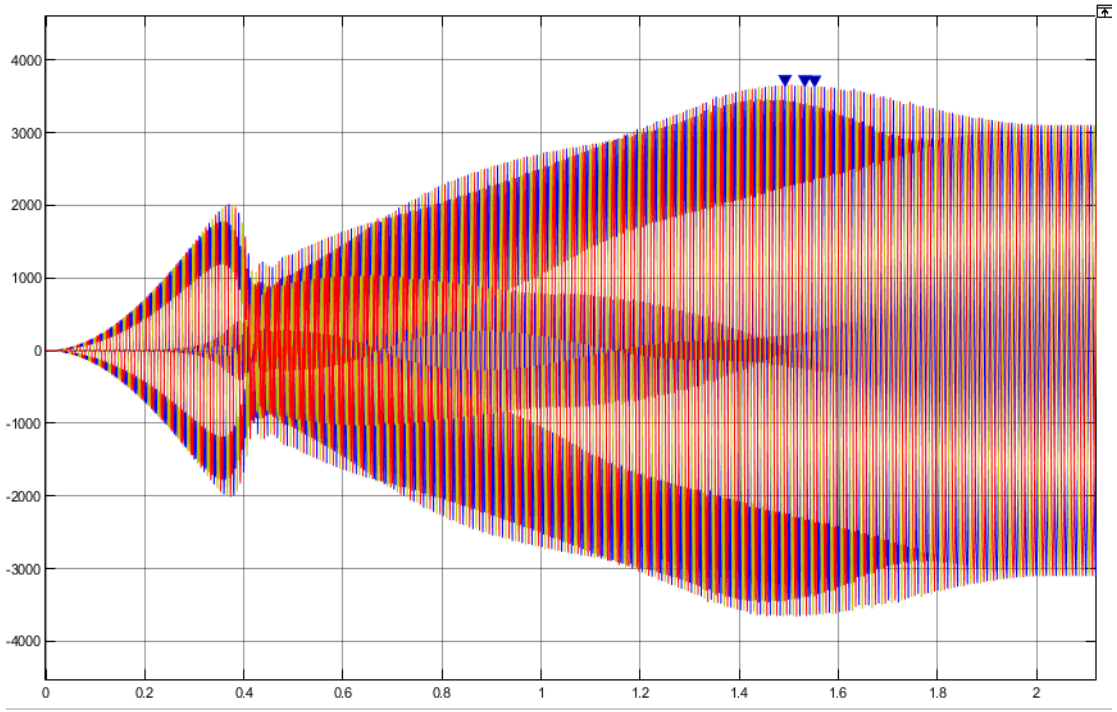


Figure IV 7 : Zoom sur le courant statorique de démarrage (progressif) en fonction du temps.

V.4) Interprétation des résultats de simulation :

V.4.1) Simulation de l'ensemble gradateur-moteur

Apres avoir simulé l'ensemble moteur-gradateur, on constate l'augmentation du temps de démarrage, les courants d'appel diminuent en amplitude et leur temps d'application augmente.

Il est intéressant d'obtenir une réduction des courants de démarrages, cela permet de réduire les perturbations que risque à chaque fois de provoquer ce dernier. Seulement il faut réajuster les réglages des protections pour éviter leurs réactions.
La diminution du courant d'appel est accompagnée par la diminution du couple moteur, dont tout de même, la durée du régime transitoire et la même avec celui du courant.

La réduction du couple est intéressante pour les grands moteurs.

De même pour les tensions minimales, surtout si le moteur démarre en charge, il faut connaitre la tension minimale à appliquer pour pouvoir, réellement. Lancer le moteur à l'instant voulu. Le temps que passe la tension à évoluer du zéro « < 0 » à la tension minimale et un temps perdu.

V.5) Etude comparative des résultats des deux simulations :

V.5.1) Les courants de démarrages :

- Les figures (II 13, IV 7) illustrent une comparaison des courants de démarrage direct et progressif du moteur. Il est clair que le démarrage progressif offre un démarrage plus doux (les courants de démarrage diminuent).
- La valeur efficace des courants de démarrage progressif dans les trois phases est nettement diminuée de 83.99 % par rapport à la valeur efficace des courants de démarrage direct.

V.5.2) Les vitesses et les couples :

- En examinant les figure (II 9, IV 4) le moteur prend plus de temps pour atteindre la vitesse nominale dans le démarrage progressif que démarrage direct.
- Après la comparaison des deux couples de démarrage comme les figures (II 11, IV 5) le montre, $C_{\text{démarrage progressif}} < C_{\text{démarrage direct}}$.
- Malgré la lenteur du démarrage progressif par rapport au démarrage direct, nous avons réduit les contraintes mécaniques occasionnées par le démarrage brusque.

V.6) Conclusion :

Le démarrage progressif du moteur asynchrone 253-231 est simulé à l'aide du logiciel "MATLAB/Simulink". Les résultats de la simulation montrent que l'utilisation du démarrage progressif pour le démarrage du moteur à induction réduit le courant et le couple de démarrage par rapport au démarrage direct. Il est aussi noté que la solution que nous avons proposée réduit également les contraintes mécaniques en offrant un démarrage souple contrairement au démarrage brusque du démarrage direct.

VI) Conclusion générale :

A travers ce mémoire, nous avons pu élargir nos connaissances sur des moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil et en se concentrant sur le démarrage progressif que nous avons choisi comme solution pour le problème de démarrage du moteur 253-231 installé au niveau du complexe CP2/K.

La réalisation de la simulation à l'aide du logiciel "MATLAB/Simulink", nous a aidé à analyser le comportement du moteur pendant la phase de démarrage avec et sans l'installation du démarreur progressif et à surligner les avantages de l'utilisation de ce dispositif.

Les résultats obtenus ont démontré la réduction du courant de démarrage qui est la cause principale des chutes de tension dans le réseau du complexe et des échecs de démarrage du moteur 253-231. En effet, le démarrage progressif nous a également offert une grande souplesse lors du lancement du moteur suite à la réduction du couple de démarrage. Cela fait du dispositif de démarrage suggéré un choix raisonnable et préféré.

La solution que nous avons proposée dans ce mémoire était d'opter pour un démarreur progressif pour assister le démarrage du moteur 253-231. En effet, au niveau du complexe CP2/K, ce moteur n'est pas le seul moteur à forte puissance qui démarre directement. Nous avons comme exemple le moteur qui entraine la pompe réacteur (673-151) qui est d'une puissance de 1,1 MW. Etant donné que le démarreur progressif peut assurer le démarrage de plusieurs moteurs en parallèle, nous pouvons suggérer comme suite à ce travail l'étude du démarrage des deux moteurs avec un seul et même démarreur progressif.

VII) Références Bibliographiques :

[1] COURS DES MACHINES ELECTRIAUES, EDITION **J.L.Dalmasso** 1987.

[2] Guy SÉGUIER. Electronique de puissance, 8ème édition, Dunod, 2004.

[3] TamrabetHanene" Robustesse d'un Control Vectoriel de Structure Minimal d'une Machine Asynchrone " Thèse de magistère, Batna, 20.05.2006.

[4] G. Brahim," Commande non linéaire de la machine à induction ", Thèse de master, Université de Batna, 2012.

[5] Dissa Abdennour,"Contrôle direct du couple du moteur à induction sans capteur de vitesse associée à un observateur non linéaire ", thèse de magister, Université de Batna.

[6] Abdelli, R " Perturbations singulières appliquées au modèle de machine asynchrone avec défauts au stator et au rotor ", mémoire de magister, école nationale polytechnique d'Alger, 2007.

[7] Guy Strutzer, Eddie Samigil, "Modélisation et Commande des Moteurs Triphasés. Commande vectorielle des moteurs synchrones, commande numérique par contrôleurs".

[8] Abed Khoudir, "Techniques de commande avancées appliquées aux machines de type asynchrone", Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 22/06/2010. DSP''. Ellipses, Mars 2000.

[9] Grellet G, clerc G, "actionneurs électriques, principes modèles commande "éditions eyrolles 1997.

[10] Frank Morand "technique d'observation sans capteur de vitesse en vue de la commande des machine asynchrones" thèse de doctorat, école doctorale : électronique, électrotechnique, automatique de Lyon 2005.

[11] Lamine M, Traoré.A, "Modélisation et simulation d'une machine asynchrone à cage à l'aide du logiciel Matlab/Simulink " Thèse de magistère, Batna année 2005.

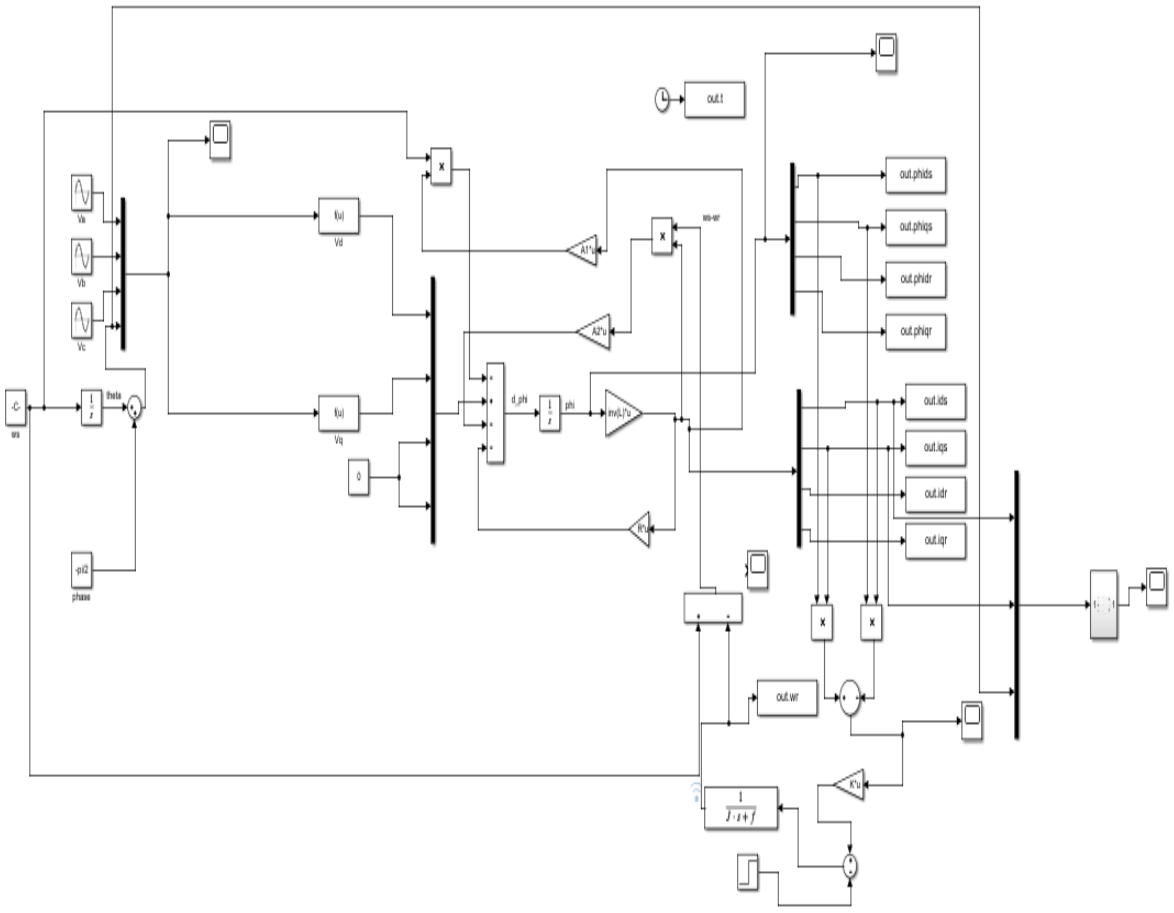
[12] Carlos Canudasde wit, "Commande des Moteur Asynchrones. Volume1, Modélisation Contrôle Vectoriel et DTC," Paris, Hermès Science publications, 2000.

[13] Guide de choix de démarrage progressif Scheiner.

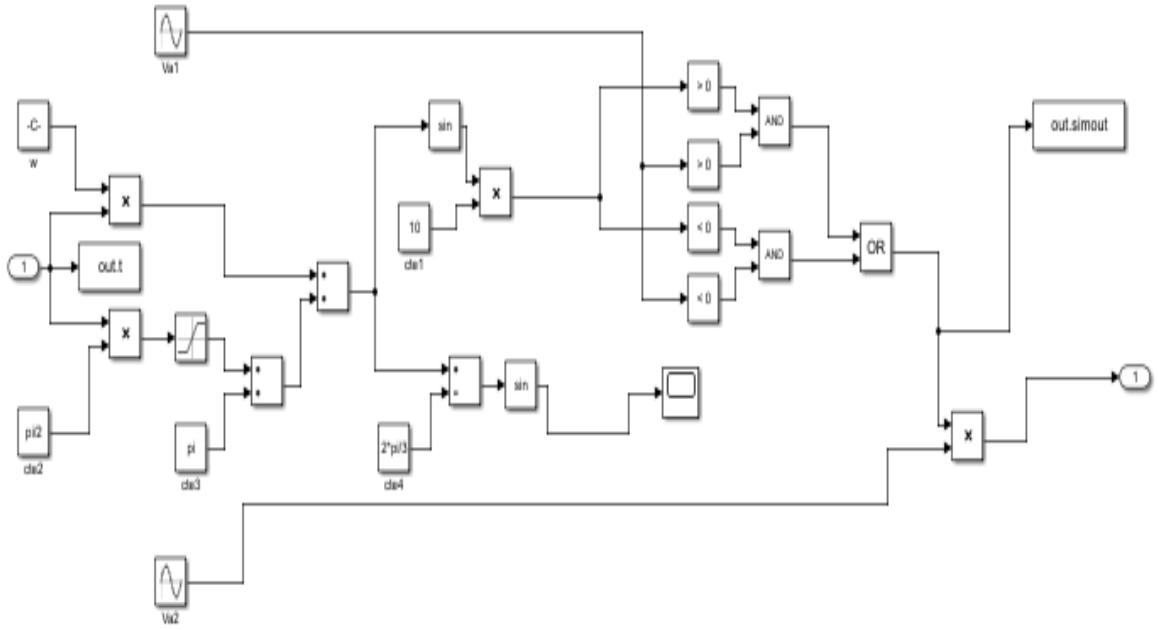
[14] C CANUDAS « SCHEMA ELECTRIQUE», 1994.

[15] Gilbert SYBILLE, Théodore WILDI, 4ème édition, chapitre 33: moteurs asynchrones triphasés.

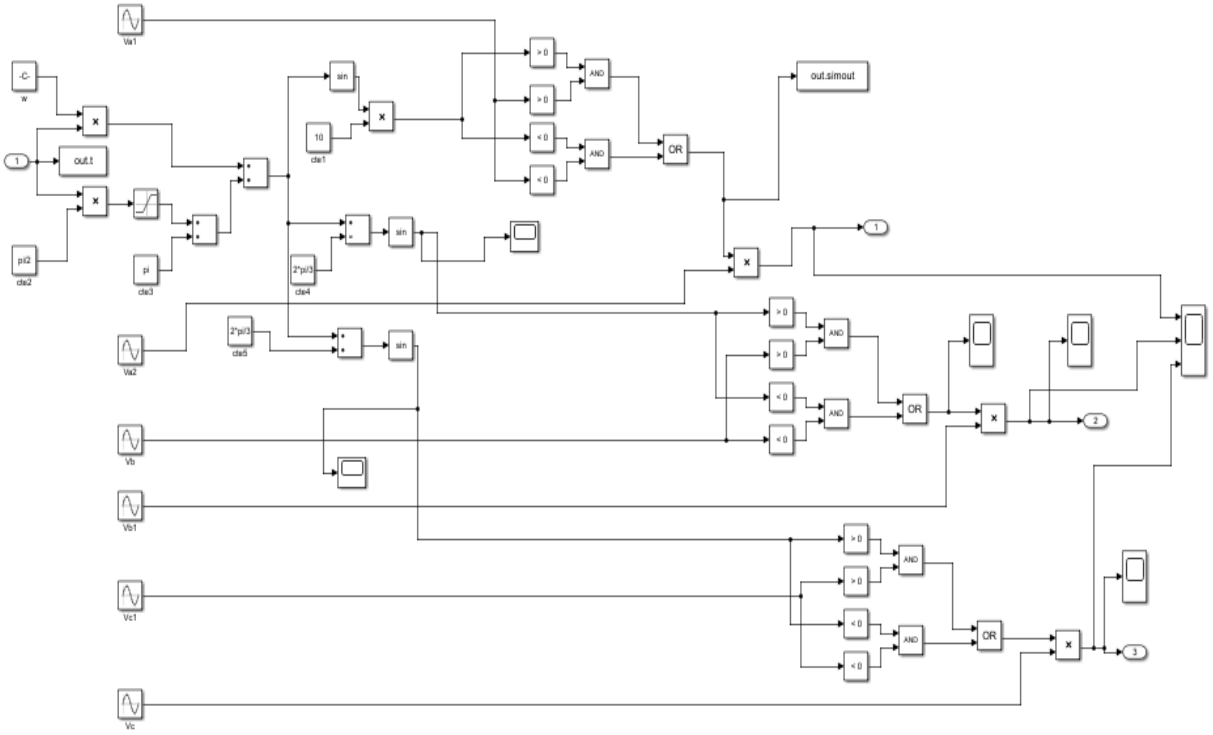
VIII) Annexe :



Annexe 1 : Bloc Simulink d'un moteur asynchrone.



Annexe 2 : Bloc Simulink du gradateur.



Annexe 3 : Bloc Simulink d'un gradateur triphasé.