

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER - BISKRA

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

FILIÈRE : ÉLECTROMÉCANIQUE

OPTION : ÉLECTROMÉCANIQUE



Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de master en génie électrique

LA VARIATION DE VITESSE D'UNE MCC EN UTILISANT UN PONT À THYRISTORS TRIPHASÉ

Réalisé par: **Yacine ABBOUNA**

Soutenue publiquement le : 11/07/2019

Devant le jury composé de:

Dr. BENCHOUIA Mohammed Toufik	Pr	Université de Biskra	Président
Dr. GHEMRI Ahmed	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Dr. GHOGGAL Adel	MCA	Université de Biskra	Examineur

Année Universitaire 2018/2019

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER - BISKRA

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

FILIÈRE : ÉLECTROMÉCANIQUE

OPTION : **électromécanique**



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme:

Master

en génie électrique

Thème

***LA VARIATION DE VITESSE D'UNE MCC
EN UTILISANT UN PONT À THYRISTORS
TRIPHASÉ***

Présenté par

Yacine ABBOUNA

Avis favorable de l'encadreur:

Dr. GHEMRI Ahmed

Cachet et signature

Je dédie ce modeste travail À:

mes très chers parents qui m'ont soutenu et encouragé jusqu'au bout et à qui je dois tout l'amour et le respect ,

À mes chères soeurs ,

À mes chères frères,

À mon cher oncle BEKKOUCH Mohammed (Que Dieu ait pitié de lui) et son fils Rafiq,

À mon cher ami CHIKHSALAH Mohammed .

À tous mes amis,

À toute la section ÉLECTROMÉCANIQUE,

À tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de mon travail .

REMERCIEMENTS

A vant tout :

Nous remercions ALLAH tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour terminer ce travail. J'adresse très sincèrement mes plus vifs remerciements à mon encadrant Dr. GHEMRI Ahmed , pour son soutien, ses encouragements tout au long de ce travail de recherche. Je tiens également à le remercier pour la confiance qu'il m'a accordée, pour sa patience et son calme.

Ce présent mémoire, n'aurait pu voir le jour sans la contribution de nombreuses personnes dont nous faisons aujourd'hui un plaisir et un devoir de les remercier, et de leur témoigner notre profonde gratitude. À tous les enseignants de la Dpartement de Génie électrique ,Surtout les enseignants de la filière: ÉLECTROMICANIQUE; qui n'ont pas cessé de nous porter aide et assistance.

Je remercie également, ma famille (à tout la famille de ABBOUNA) surtout à mon oncle BEKKOUCH Mohammed (Que Dieu ait pitié de lui) et mes amis, pour leur aide dans la réalisation de ce travail, leur immense soutien moral et affectif pendant toutes ces années.

Je n'oublie pas nos remerciements aux membres de jury qui daigneront, évaluer et juger notre travail. Enfin, nos remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidé, de près ou de loin durant notre formation.

L'usage des moteurs à courant continu est plutôt restreint, car la distribution se fait à courant alternatif. Cependant, pour certaines applications il est parfois avantageux d'utiliser des moteurs à courant continu alimentés par des convertisseurs qui transforment le courant alternatif en courant continu. La supériorité de ces moteurs réside dans le fait qu'ils se prêtent facilement à un contrôle souple, continu et presque instantané de leur vitesse.

Pour les applications industrielles exigeant une commande ou bien une régulation précise de la vitesse, on a d'abord utilisé des moteurs à courant continu (CC) commandés par des variateurs de vitesse électroniques, cette commande peut être réglée par un pont à six thyristor, mais le problème de cette commande est de générer six impulsions aux thyristors, plusieurs méthodes de génération de six impulsions peuvent être envisagées, dans notre projet on va citer les différents procédés de génération d'impulsion et utiliser l'une d'elle dans la simulation.

LA VARIATION DE VITESSE D'UNE MCC EN
UTILISANT UN PONT À THYRISTORS
TRIPHASÉ

Yacine ABBOUNA

July 13, 2019

TABLE DES MATIÈRES

1	LA MACHINE À COURANT CONTINU	3
1.1	Introduction	3
1.2	Symboles	4
1.3	Conversion d'énergie	4
1.4	Constitution d'une machine à courant continu	5
1.4.1	Stator du moteur courant continu (inducteur)	5
1.4.2	Rotor du moteur courant continu (induit)	6
1.4.3	Collecteur et balais	7
1.5	Principe de fonctionnement	8
1.6	Equations des grandeurs du moteur à courant continu	10
1.6.1	Modèle de l'induit	10
1.6.2	La force électromotrice (f.e.m.)	10
1.6.3	Moment du couple électromagnétique	10
1.6.4	Cas d'une machine multipolaire	11
1.6.5	Expression de la vitesse	11
1.7	Bilan de puissances en régime permanent	11
1.8	Le rendement	13
1.9	Les différents types de moteurs à courant continu	13
1.9.1	Les moteurs à inducteur à aimant permanent	13
1.9.2	Les moteurs à inducteur bobiné	13
1.10	Caractéristiques des moteurs	19
1.11	Conclusion	20

2	<i>VARIATION DE VITESSE DU MACHINÉ À COURANT CONTINU</i>	21
2.1	Introduction	21
2.2	Quadrants de fonctionnement	22
2.3	Variation de vitesse	23
2.4	Principe du variateur de vitesse pour un moteur à CC	24
2.5	Les dispositifs électroniques utilisés pour la variation de vitesse des moteurs à courant continu:	24
2.5.1	Structure des variateurs de vitesse	25
2.5.2	La conversion Alternatif - Continu (redresseur)	25
2.5.3	Alimentation d'un moteur à courant continu par un redresseur com- mandé	26
2.5.4	Alimentation d'un moteur à courant continu par un hacheur	28
2.6	Introduction	30
2.7	Le thyristor	31
2.8	Principe de fonctionnement	32
2.8.1	Conditions d'amorçage (d'allumage, de conduction) du thyristor	33
2.8.2	Caractéristique courant - tension $I_D = f(V_{AK})$	34
2.8.3	Influence du courant de gâchette i_G	35
2.8.4	Types d'amorçage par la gâchette	35
2.8.5	Angle de retard	37
2.9	Redressement commandé (tout thyristors)	38
2.10	Remarque au sujet de la commande des thyristors	39
2.10.1	Commande brève - Commande longue	39
2.10.2	Commande des montages triphasés tout thyristors	41
2.11	Etude du montage PD_3	42
2.11.1	Analyse du fonctionnement	43
2.11.2	Valeur moyenne de la tension de sortie U_C	44
2.12	Conclusion	46
3	<i>Simulation d'un variateur de vitesse</i>	47
3.1	Introduction	47
3.2	Partie de simulation	47
3.3	Modélisation de la MCC (machine à courant continu)	48

3.3.1	Equations de la MCC	48
3.4	Simulation d'un redresseur à 6 thyristor commande un moteur à courant continu	50
3.4.1	Schéma bloc de la simulation	50
3.5	Générateur d'impulsion pratiquement	50
3.6	Résultats de simulation	53
3.6.1	Moteur à vide avec une angle d'amorçage $\alpha=0^\circ$:	53
3.6.2	Essai en charge avec changement d'angle d'amorçage	60
3.7	Parti pratique	62
3.8	Conclusion	65

LISTE DES FIGURES

1.1	Symboles de la machine à courant continu.	4
1.2	Fonctionnement de machine à courant continu.	4
1.3	Constitution d'une machine à courant continu.	5
1.4	Inducteur de moteurs à courant continu.	6
1.5	Induit d'une machine à courant continu.	7
1.6	Collecteur et Balais d'une machine à courant continu.	8
1.7	Bilan de la puissance.	12
1.8	Moteur à aimant permanent.	13
1.9	Moteur à excitation séparé.	14
2.1	Quadrants de fonctionnement d'une machine à courant continu[2].	22
2.2	CONVERTISSEUR ALTERNATIF-CONTINU.	24
2.3	CONVERTISSEUR CONTINU-CONTINU.	24
2.4	Machine alimentée par un redresseur entièrement commandé.	27
2.5	Fonctionnement dans les quatre quadrants de la machine à courant continu.	28
2.6	Synoptique d'un moto variateur a hacheur.	29
2.7	schéma d'un hacheur.	29
2.8	structure et symbole du thyristor.	31
2.9	différents type de thyristor.	31
2.10	représentation des grandeurs électriques sur un thyristor.	34
2.11	caractéristique courant-tension d'un thyristor.	34
2.12	Amorçage par courant continu.	36
2.13	Amorçage par courant alternatif.	36

2.14	Principe de générateur de signaux analogique.	37
2.15	les signaux de générateur analogique.	37
2.16	Redresseurs triphasés: (a) P_3 . (b) PD_3 . (c) S_3	39
2.17	40
2.18	41
2.19	41
2.20	Redresseurs triphasés PD_3 tous thyristors.	43
3.1	schéma bloc d'une MCC.	49
3.2	Schéma bloc d'un redresseur alimenté en triphasé commande un moteur à courant continu.	50
3.3	Générateur d'impulsion.	50
3.4	signal sinusoïdale (le déphasage entre l'un et l'autre 120°).	51
3.5	Tension en dents de scie.	51
3.6	signal constante avec une dents de sci.	52
3.7	Les impulsion des gâchettes.	52
3.8	Opération de TCA785.	63
3.9	circuit schématique de TCA785.	64
3.10	circuit générale d'un TCA785 avec le redresseur.	65

LIST OF TABLES

*L*es moteurs à courant continu sont des appareils qui transforment l'énergie électrique qu'ils reçoivent en énergie mécanique, alors est une convertisseur d'énergie totalement réversible, elle peut fonctionner soit en moteur, convertissant de l'énergie électrique en énergie mécanique, soit en génératrice, convertissant de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Les machines à courant continu ont pendant longtemps été les seuls aptes à la vitesse variable à large bande passante (robotique). Ils ont l'objet de nombreuse amélioration, et beaucoup de produit commercialisés aujourd'hui n'ont rien à envier à leurs homologues sans balais.

En électromecanique, on s'intéresse toujours en premier lieu à la machine à courant continu, car il est possible d'obtenir de manière relativement simple sa modélisation surtout dans le cas où le flux agissant sur l'induit est constant (machine à flux constant). Il s'en suit que la machine à courant continu est une référence aussi bien en fonctionnement moteur qu'en génératrice.

Le présent travail fera l'objet d'une étude de la commande de vitesse de la machine à courant continu, il se présentera en trois chapitres, selon l'ordre suivant :

- Le premier chapitre consiste à faire une étude générale sur la machine à courant continu.

- Le deuxième chapitre repose sur l'étude du variateur de vitesse de la machine à courant continu, aussi une étude du thyristor et sa commande.
- Le troisième chapitre consiste la modélisation et simulation le pont à six thyristor pour la variateur de vitesse de la machine à courant continu.
- Enfin, nous tirons une conclusion générale qui résume l'ensemble de notre travail effectué.

CHAPITRE 1

LA MACHINE À COURANT CONTINU

1.1 Introduction

Les moteurs à courant continu restent très utilisés dans le domaine de l'automobile (ventilateurs, lève-vitre, etc.) ainsi qu'en tant que (moteur universel) dans l'électroménager et l'outillage. Dans le domaine des puissance supérieure au mégawatt, les sous-marins seront les seuls utilisateurs de machines à courant continu afin d'assurer leur propulsion. En effet, pour éviter de (rayonner) du 50 ou du 60 Hertz qui les rendrait facilement détectables, les sous-marins utilisent des circuits de distribution de l'énergie électrique à tensions continues.

Le moteur à courant continu a l'avantage d'être facile à appréhender, car les deux bobines qui le composent sont non seulement fixes dans l'espace grâce à l'action du collecteur, mais aussi faiblement couplées. Il offre donc une introduction facile au fonctionnement de ses homologues, en donnant des repères clairs, auxquels le néophyte pourra toujours se raccrocher.

Dans ce chapitre, nous allons faire une étude générale sur la machine à courant continu (construction; principe de fonctionnement; étude énergétique...)

1.2 Symboles

Voici les différents symboles employés pour représenter la machine à courant continu, selon qu'elle fonctionne en génératrice (dynamo) ou en moteur et selon le type d'excitation employée [506].

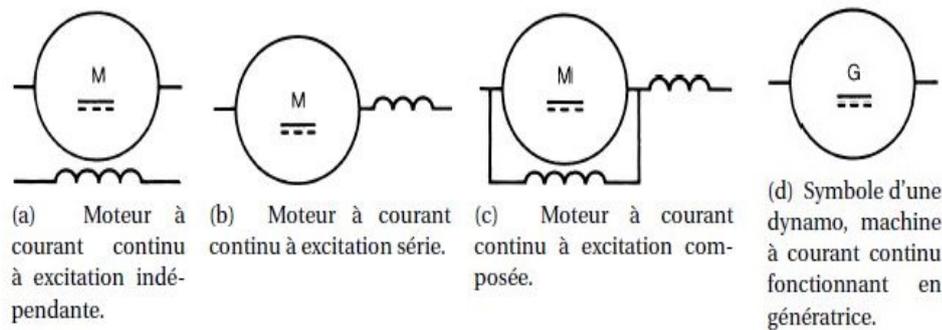


Fig 1.1: Symboles de la machine à courant continu.

1.3 Conversion d'énergie

La machine à courant continu (MCC) est faite pour être utilisée en :

- **Moteur** : pour entraîner un système en rotation (c'est à dire fournir de la puissance mécanique).
- **Génératrice** : pour transformer de l'énergie mécanique et alimenter en courant une installation électrique (c'est-à-dire fournir de la puissance électrique)[17].

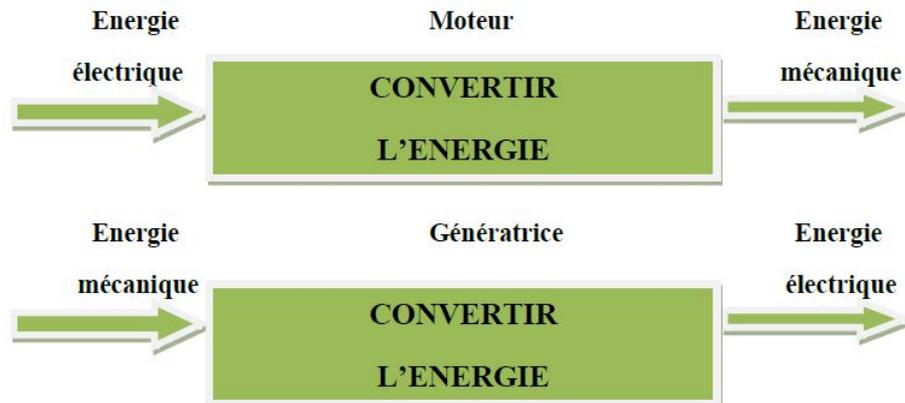


Fig 1.2: Fonctionnement de machine à courant continu.

1.4 Constitution d'une machine à courant continu

Comme toute les machine tournant, le moteur à courant continu comporte un stator et un rotor séparés par un entrefer, mais un dispositif particulier est nécessaire à son fonctionnement, le collecteur et les balais.

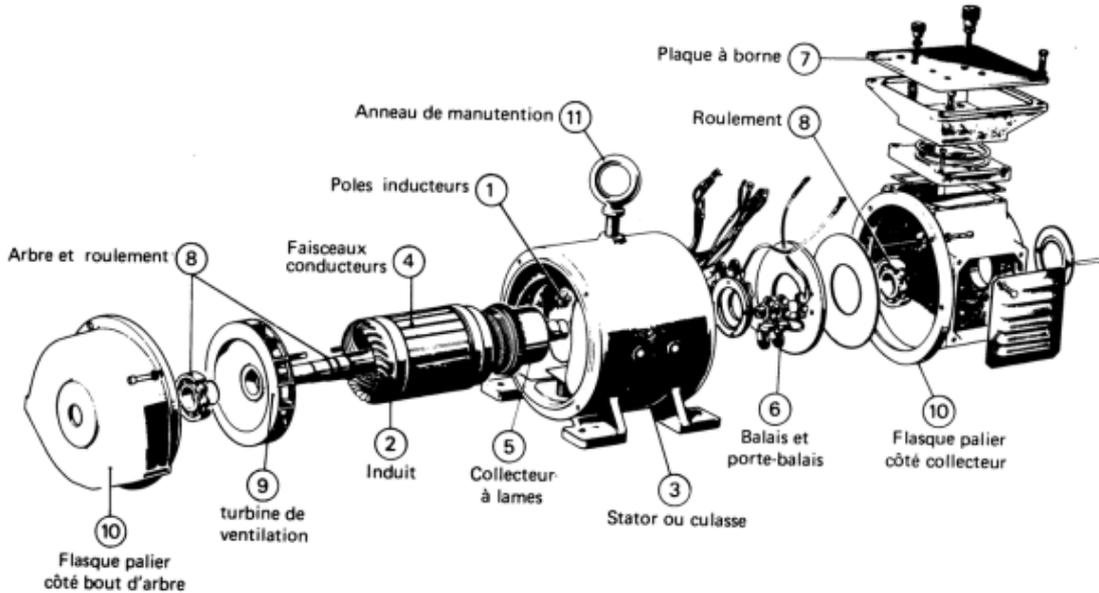


Fig 1.3: Constitution d'une machine à courant continu.

1.4.1 Stator du moteur courant continu (inducteur)

Le stator est constitué de la carcasse du moteur et du circuit magnétique proprement dit. Un circuit magnétique est constitué d'une structure ferromagnétique qui canalise le flux magnétique, créé par une source de champ magnétique: aimant permanent ou électroaimant. Le circuit magnétique du stator crée le champ magnétique appelé (champ inducteur) (B_s). L'inducteur magnétise le moteur en créant un flux magnétique (ϕ) dans l'entrefer. L'entrefer est l'espace entre les pôles du stator et le rotor. Le flux magnétique est maximal au niveau des pôles magnétiques[3].

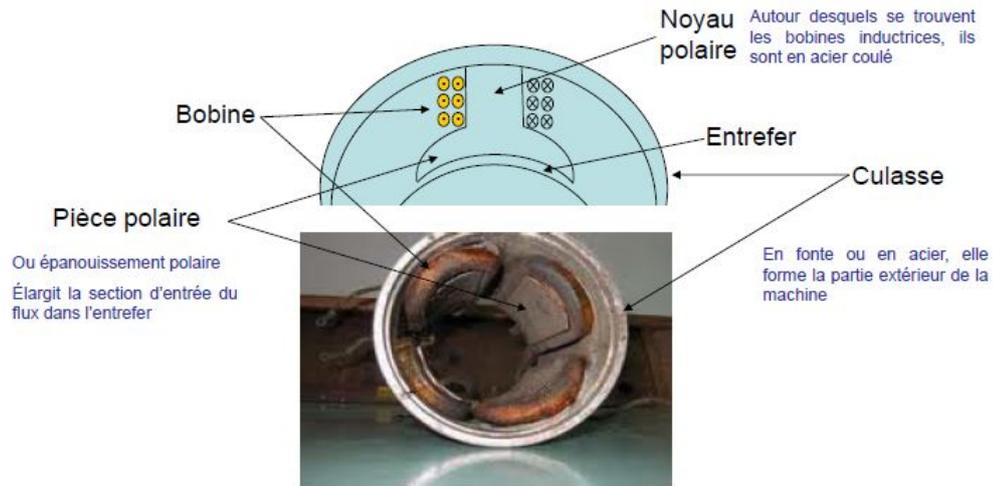


Fig 1.4: Inducteur de moteurs à courant continu.

Les bobines excitatrices sont alimentées en courant continu, et le courant qui les traverse porte le nom de courant d'excitation (I_e). Ces bobines sont composées de plusieurs centaines de spires et sont traversées par un courant relativement faible. Comme l'induit et l'inducteur sont construits avec des matériaux de faible réluctance, la majeure partie de la F.M.M. sert à (pousser) le flux à travers l'entrefer. Celui-ci doit donc être aussi peu long que possible.

Le nombre de pôles que porte l'inducteur d'une machine à courant continu dépend surtout de la grosseur de la machine. Plus une machine est puissante et plus sa vitesse est basse, plus grand sera le nombre de pôles.

1.4.2 Rotor du moteur courant continu (induit)

L'induit est composé d'un ensemble de bobines identiques réparties uniformément autour d'un noyau cylindrique. Il est monté sur un arbre et tourne entre les pôles de l'inducteur. L'induit constitue un ensemble de conducteurs qui coupent les lignes de champ magnétique. Les bobines sont disposées de telle façon que leurs deux côtés coupent respectivement le flux provenant d'un pôle nord et d'un pôle sud de l'inducteur.

Le noyau est formé d'un assemblage de tôles en fer doux. Ces tôles sont isolées électriquement les unes des autres et portent des encoches destinées à recevoir les bobines. Les

conducteurs de l'induit sont parcourus par le courant absorbé ou débité par la machine. Ils sont isolés du noyau par des couches de feuilles isolantes[2].

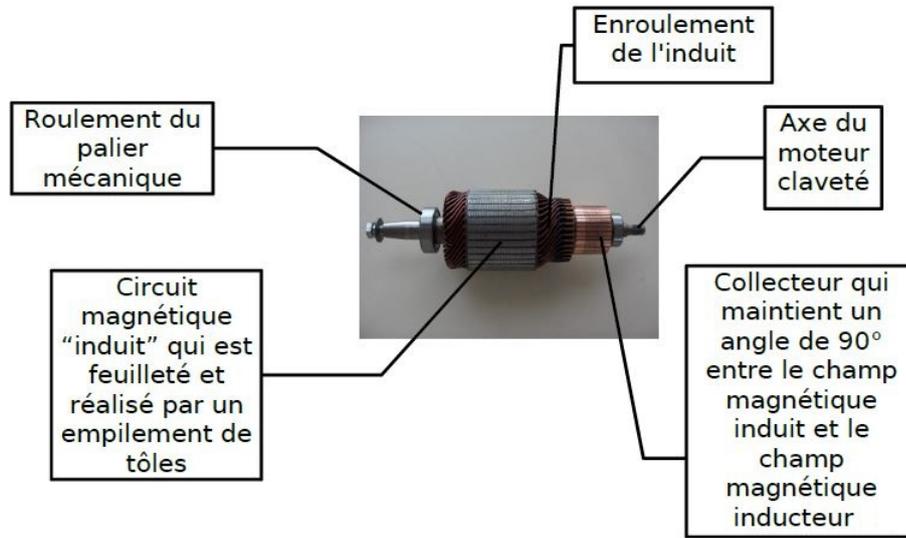


Fig 1.5: Induit d'une machine à courant continu.

1.4.3 Collecteur et balais

Le dispositif collecteur / balais permet de faire circuler un courant dans l'induit, le collecteur est un ensemble de lames de cuivre, isolées latéralement les unes des autres par des feuilles de mica, et disposées suivant un cylindre, en bout de rotor. Ces lames sont réunies aux conducteurs de l'induit et transforment le courant alternatif dans le bobinage en courant continu.

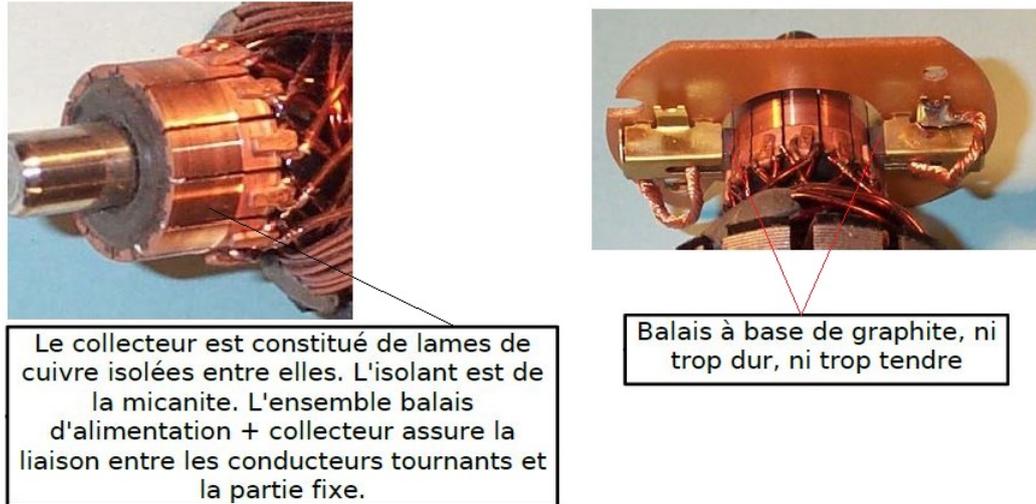


Fig 1.6: Collecteur et Balais d'une machine à courant continu.

Les balais, portés par le rotor, frottent sur les lames du collecteur, ces contacts glissants entre lames et balais permettent d'établir une liaison électrique entre l'induit, qui tourne et l'extérieur de la machine.

Le collecteur est un commutateur mécanique qui inverse le sens du courant dans les conducteurs qui franchissent la ligne neutre. Les balais solidaires de la carcasse qui frottent sur le collecteur, lorsque l'induit est soumis à une tension, appliquée entre balais, le système balais -collecteur répartit le courant dans les conducteurs comme indiqué sur le schéma de la figure 1.6 le sens conventionnel est le même dans tous les conducteur situés sous un pôle, et le sens contraire dans tous les situés sous l'autre pôle[1] .

1.5 Principe de fonctionnement

Tous les moteurs électriques sont basés sur le principe physique du couplage magnétique entre deux champs magnétiques. La transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique s'opère à travers ce couplage magnétique ou interaction magnétique. De ce principe il découle que tout moteur comporte deux circuits magnétiques, appelés stator (partie fixe) et rotor (partie mobile).

Dans le cas du moteur à courant continu un conducteur de longueur (L), placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant, est soumis à une force électromagné-

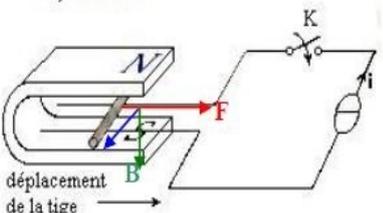
tique. Le champ créé par l'inducteur agit sur les conducteurs de l'induit: Chacun des (N) conducteurs de longueurs (L) placé dans le champ (B) et parcouru par un courant (I) est le siège d'une force électromagnétique perpendiculaire au conducteur [716]:

$$F = B.I.L \quad (1.1)$$

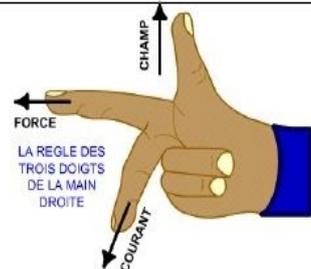
Ces forces de Laplace exercent un couple proportionnel à l'intensité (I) et au flux (ϕ) sur le rotor. Le moteur se met à tourner à une vitesse proportionnelle à la tension d'alimentation (V) et, inversement proportionnelle au flux (ϕ). Au passage de tout conducteur de l'induit sur la ligne neutre, le courant qui le traverse change de sens grâce au collecteur. Le moteur conserve le même sens de rotation. Pour inverser le sens de rotation du moteur, il convient d'inverser le sens du champ produit par l'inducteur par rapport au sens du courant circulant dans l'induit:

- Soit on inverse la polarité de la tension d'alimentation de l'induit.
- Soit on inverse la polarité d'alimentation du circuit d'excitation.

a) Moteur



Un conducteur parcouru par un courant I et placé dans une induction B reçoit sur chaque élément de longueur dl un effort $d\vec{F} = I d\vec{l} \wedge \vec{B}$ (effort de Laplace).



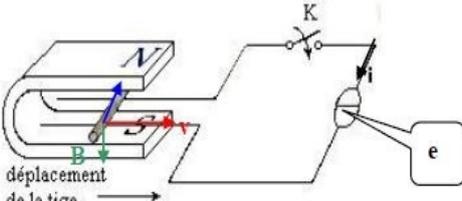
LA REGLE DES TROIS DOIGTS DE LA MAIN DROITE

Force électromagnétique : $\vec{F} = B I \vec{l}$

Le sens est donné par les trois doigts de la main droite :

Pouce	sens du champ magnétique B
Index	sens de la force électromagnétique F
Majeur	sens du courant I

b) Génératrice



Si le conducteur placé dans l'induction **B** se translate à une vitesse linéaire v il apparaît une force électromotrice e aux bornes de celui-ci : $e = B.l.v$

(loi de Faraday ou loi de l'induction électromagnétique)

1.6 Equations des grandeurs du moteur à courant continu

1.6.1 Modèle de l'induit

$$U = E + R.I \quad (1.2)$$

avec: E: fem(force électromotrice)(V), U: tension d'induit (V), I: courant d'induit (A), R: résistance d'induit (Ω) qui tient compte de l'enroulement, du collecteur et des balais.

1.6.2 La force électromotrice (f.e.m.)

L'induit étant en rotation, les conducteurs coupent le flux magnétique inducteur et sont le siège d'une tension induite alternative. Le collecteur redresse cette tension; le nombre d'encoches étant important, la fem E entre les balais est quasiment continue [1].

$$E = Nn\Phi \text{ ou } E = K\Phi\Omega \text{ avec } K = N/2\pi \quad (1.3)$$

E: fem en (V); N: nombre de conducteurs actifs de l'induit; ϕ : flux sous un pôle de l'inducteur en (Wb); n et ω : vitesse de rotation (n en tr/min, et ω en rad/s).

Remarques:

- Le collecteur est un redresseur de tension tournant.
- Si le flux est constant (cas fréquent), $E = k\Omega$ est directement proportionnelle à la vitesse.
- Le courant dans l'induit provoque un champ magnétique qui modifie la fem: c'est la réaction magnétique d'induit, qu'on atténue en disposant des enroulements supplémentaires au rotor. On négligera ce phénomène par la suite.

1.6.3 Moment du couple électromagnétique

La puissance électromagnétique est convertie en puissance mécanique[10 2].

$$C_{Em} = EI = C_{Em}\Omega \text{ avec } E = K\Phi\Omega \quad (1.4)$$

D'où:

$$C_{Em} = K\Phi I \quad (1.5)$$

C_{Em} : moment du couple électromagnétique en (Nm); ϕ : flux sous un pôle de l'inducteur en (Wb); I: courant dans l'induit en (A).

1.6.4 Cas d'une machine multipolaire

Une machine à p paires de pôles comporte p paires de balais. Selon la façon dont l'induit est bobiné, la machine peut comporter plus de deux voies d'enroulement. Dans ce cas, les expressions de la fem et du couple deviennent :

$$E = \frac{p}{a}K\Phi\Omega \text{ et } C_{Em} = \frac{p}{a}K\Phi I \text{ avec } 1 \leq 2a \leq 2p \quad (1.6)$$

2a: nombre paires de voies d'enroulements en parallèles (a: entier positif).

1.6.5 Expression de la vitesse

La loi d'Ohm et l'expression de la fem donnent :

$$\Omega = \frac{U - RI}{K} \quad (1.7)$$

Ω : vitesse de rotation de l'induit en (rad/s); U: tension d'induit en (V); I: courant d'induit en (A); R: résistance d'induit en (Ω); Φ : flux sous un pôle d'inducteur en (Wb).

1.7 Bilan de puissances en régime permanent

- La puissance appelée par l'induit du moteur est:

$$P_a = U_a i_a \quad (1.8)$$

- la puissance reçue par le circuit inducteur (puissance d'excitation) est:

$$P_e = U_f i_f \quad (1.9)$$

- L'induit est le siège de pertes par effet joule:

$$P_{ja} = R_a i_a^2 \quad (1.10)$$

- L'inducteur est le siège de pertes par effet joule:

$$P_{je} = R_f i_f^2 \quad (1.11)$$

Le rotor étant soumis à un flux variable à cause de son mouvement, il est le siège de pertes ferromagnétiques p_f . Les frottements sur les paliers, la ventilation et les frottements des balais sur le collecteur conduisent à des pertes mécaniques p_m . Le total des pertes est ainsi:

$$p = p_{ja} + p_{je} + p_f + p_m \quad (1.12)$$

La puissance disponible pour la charge est appelée puissance utile P_u . Elle représente la différence entre la puissance électrique appelée P_a et l'ensemble des pertes:

$$P_u = P_a - p \quad (1.13)$$

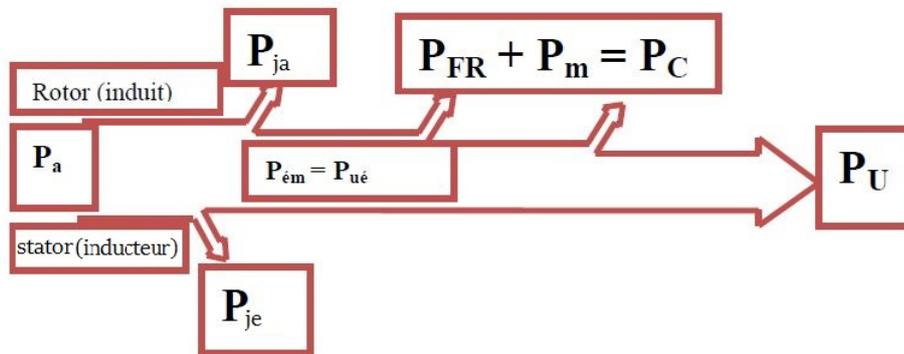


Fig 1.7: Bilan de la puissance.

P_a : Puissance absorbée

P_u : Puissance utile

$P_{ém}$: Puissance électromagnétique

P_{JS} : Pertes par effet joule dans l'inducteur

P_{JR} : Pertes par effet joule dans l'induit

P_C : Pertes fer + pertes mécaniques : dites pertes collectives = constant

1.8 Le rendement

Les moteurs à courant continu consomment une partie de l'énergie absorbée pour leur fonctionnement. L'énergie mécanique fournie sera toujours plus petite que l'énergie électrique absorbée. Le rapport entre l'énergie fournie et l'énergie absorbée est le rendement [506].

$$\eta = \frac{P_U}{P_A} = \frac{P_A - (p_{ja} + p_{je} + p_c)}{P_A} \quad (1.14)$$

1.9 Les différents types de moteurs à courant continu

On distingue deux types de moteurs à courant continu :

1.9.1 Les moteurs à inducteur à aimant permanent

Il n'y a pas de circuit inducteur, le flux inducteur est produit par un aimant permanent. Tous les moteurs à courant continu de faible puissance et les micromoteurs sont des moteurs à aimant permanent. Ils représentent maintenant la majorité des moteurs à courant continu. Ils sont très simples d'utilisation.

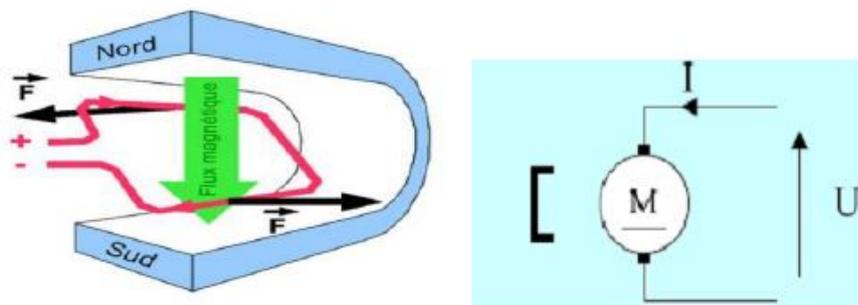


Fig 1.8: Moteur à aimant permanent.

1.9.2 Les moteurs à inducteur bobiné

Il existe 4 types différents de moteurs électriques qui sont classés en fonction du type d'excitation qui est employé, qui sont :

- le moteur à excitation séparée.
- le moteur à excitation shunt.

- le moteur à excitation série.
- le moteur à excitation composée.

Le moteur à excitation séparée:

Ce moteur n'est pas beaucoup utilisé parce qu'il nécessite deux sources d'alimentation ;on lui préfère le moteur shunt qui a des caractéristiques semblables.

Lorsque l'inducteur et l'induit sont reliés à des sources différentes. Ces moteurs ont l'avantage d'avoir une vitesse relativement stable et réglable par la tension d'induit, mais nécessitent une alimentation continue ou redressée indépendante pour l'inducteur[11].

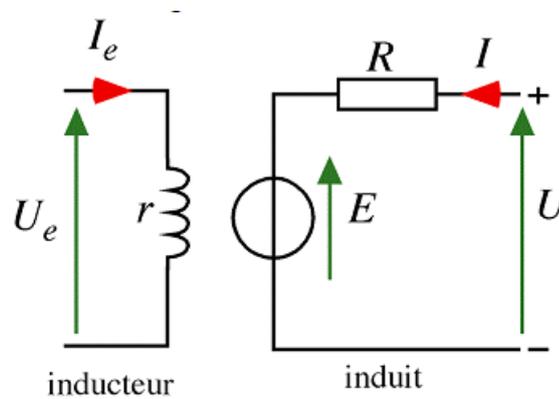


Fig 1.9: Moteur à excitation séparé.

En peut écrit :

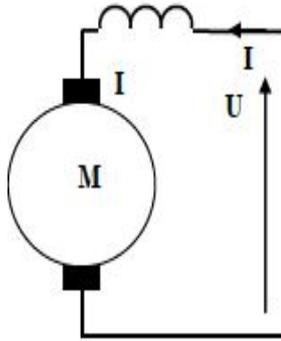
$$U = RI + L \frac{di}{dt} + E \quad (1.15)$$

avec:

$$U_e = I_e r \quad (1.16)$$

Le moteur à excitation série:

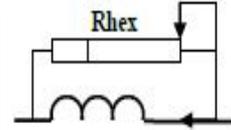
Dans un moteur à excitation série ou moteur série, le circuit d'excitation est en série avec le circuit d'induit, ainsi les deux bobinages sont alimentés par le même courant I. Ce moteur possède un fort couple de démarrage.



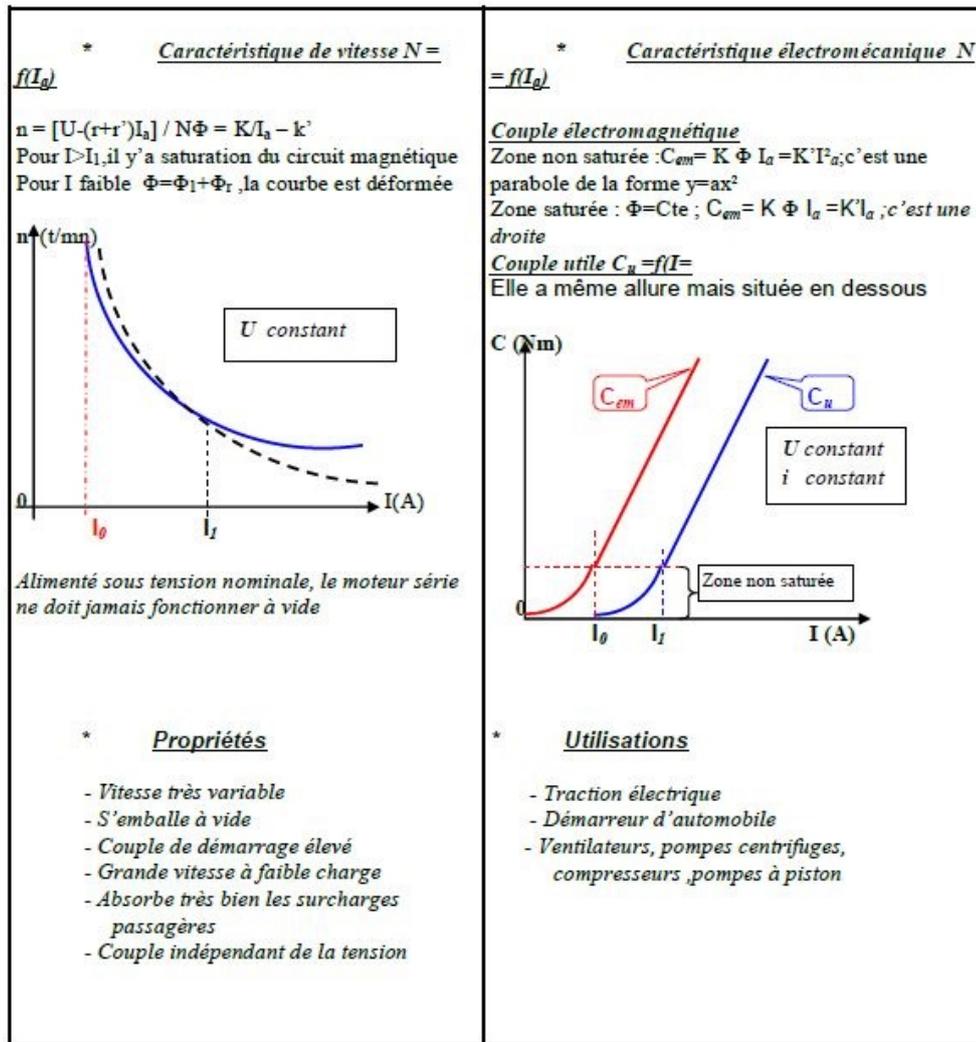
$$\eta = Pu/Pa = (Pa-p)/Pa = 1-p/Pa$$

$$Pa = UI$$

pertes joules inducteur = $r'I^2$
 pertes joules induit = rI^2
 pertes totales = $rI^2 + r'I^2 + Pc$
 Le couple $C = Pu/2\pi n$



NB : Le rhéostat d'excitation comporte une butée pour limiter le courant d'excitation à une valeur minimale et éviter l'emballement

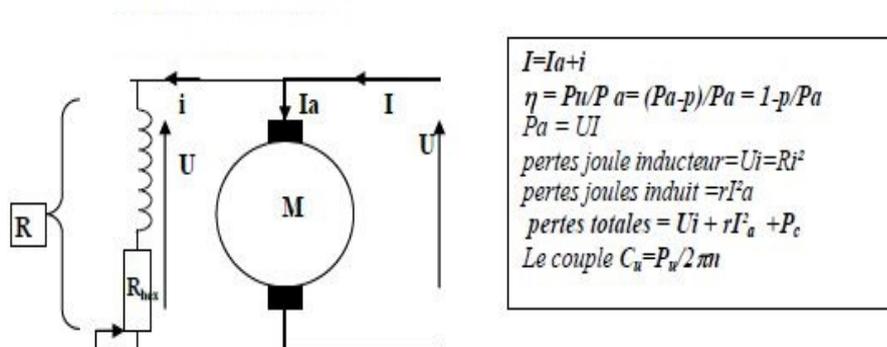


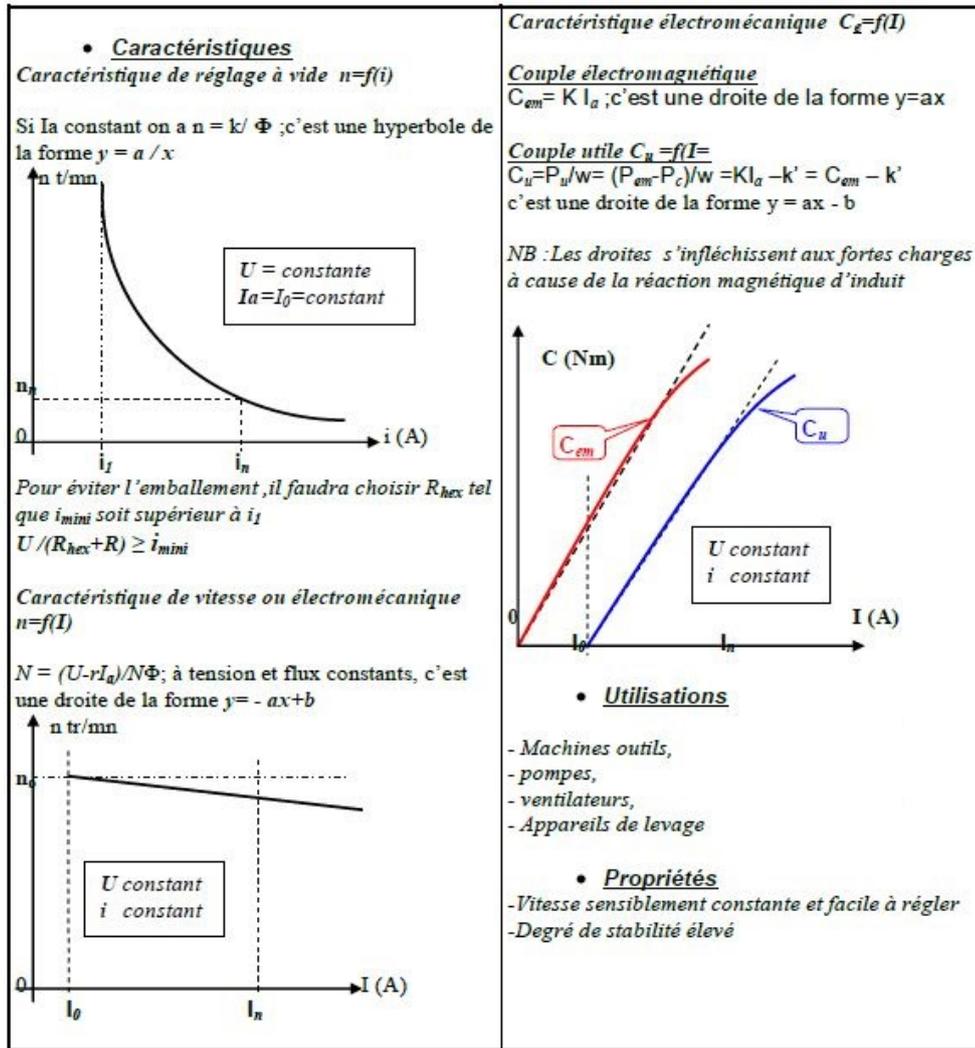
Le moteur à excitation shunt:

La même source d'alimentation alimente l'induit et l'inducteur. L'inducteur est mis en parallèle avec l'induit.

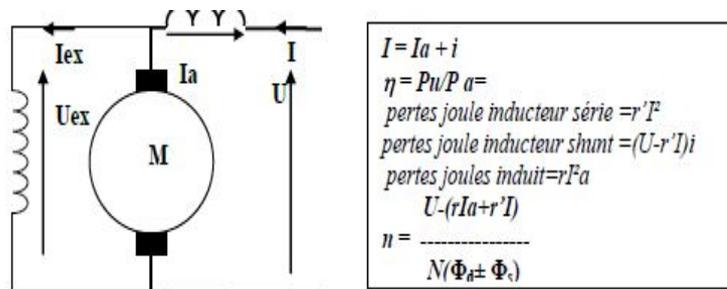
Les propriétés du moteur à excitation dérivation sont les mêmes que celle du moteur à excitation indépendante.

Pour varier la vitesse, il faut varier le courant d'excitation ainsi une variation du couple développé par le moteur suivra, ce qui rend le réglage de la vitesse problématique





Le moteur à excitation composée :



Tout comme la génératrice, le moteur compound peut être à flux additif ou à flux soustractif.

1. Flux additif

Les caractéristiques sont intermédiaires entre celles du Moteur série et celle du Moteur shunt. Suivant l'importance de la F.M.M. de l'enroulement série, ses caractéristiques se rapprocheront d'avantage de celles du moteur série (pour les fortes charges) ou de celles du moteur shunt (à vide et à faible charge).

Propriétés:

- Couple de démarrage élevé que celui du moteur shunt et croissant très rapidement avec la courant.
- Vitesse pratiquement constant aux charges normales et très rapidement décroissant lorsque le couple augmente.
- Ne s'emballe pas a vide ou aux faibles charges comme le moteur série.

Utilisations:

- Machines-outils à couple variable ou à mouvement alternatif (étaux-limeurs, raboteuses, ...).
- Machine démarrant en charge (treuils, pompes à piston, ...).
- Traction électrique.

2. Flux soustractif

Propriétés:

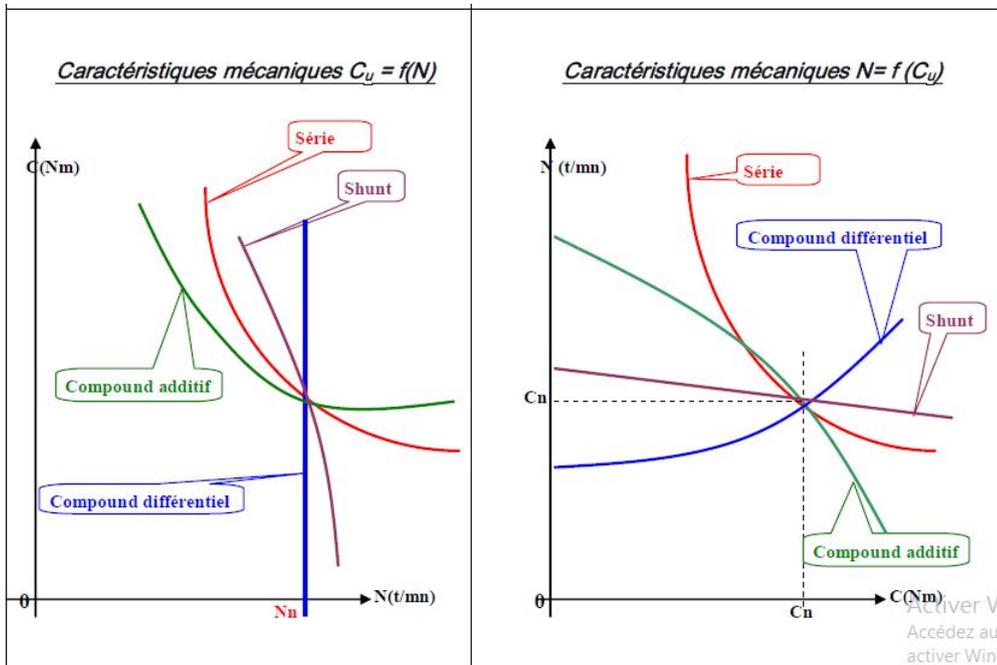
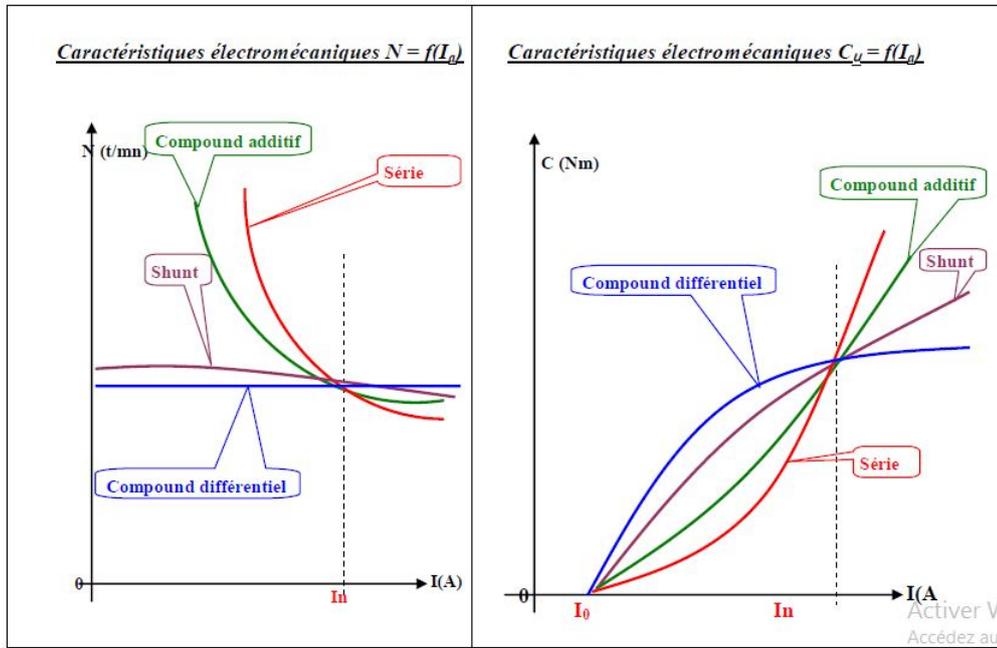
- Couple de démarrage croissant d'abord avec le courant pour les faibles charges, puis décroissant.
- Vitesse variant peu avec le courant et pouvant être maintenue ou croitre quand la charge croit.

Inconvénients:

- Instabilité et risque d'emballement si, par accroissement de vitesse, le couple moteur devient supérieur au couple résistant.
- inversion possible de sens de rotation en cas de surcharge, d'ou surintensité très dangereuse.

Remarque: Ce moteur n'est pas pratiquement utilisé[4].

1.10 Caractéristiques des moteurs



1.11 Conclusion

Les machines à courant continu ne sont plus guère utilisées à l'heure actuelle comme génératrices de puissance, leurs larges possibilités de réglage de vitesse ont favorisé leur utilisation en moteur (à excitation séparée) dans les applications où cette caractéristique est importante, surtout depuis le développement des semi-conducteurs de puissance (transistors et thyristors).

La supériorité de ces moteurs réside dans le fait qu'ils se prêtent facilement à un contrôle souple, continu et presque instantané de leur vitesse, Dans le chapitre suivant, nous allons étudier le variateur de vitesse du moteur à courant continu.

CHAPITRE 2

VARIATION DE VITESSE DU MACHINE À COURANT

CONTINU

2.1 Introduction

Le moteur à courant continu a longtemps été considéré comme le moteur le mieux adapté au fonctionnement à vitesse variable à condition de régler sa vitesse par la tension d'induit. A l'époque où les seuls semi-conducteurs de puissance disponibles étaient les diodes et les thyristors, l'association d'un montage redresseur commandé ou semi-commandé et d'une machine à courant continu constituait la solution type dans le domaine de la variation de vitesse.

Les moteurs à courant continu sont très utilisés dans les systèmes automatiques qui nécessitent une régulation précise de la vitesse de rotation. Le principe de la régulation de vitesse consiste à choisir le bon convertisseur.

Les moteurs à courant continu sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles, bien que leur construction soit plus complexe que celle des moteurs à courant alternatif, Les avantages de ces moteurs sont:

- une large gamme de variations de vitesse au-dessus et au-dessous de la vitesse de régime;
- un fonctionnement avec des couples constants ou variables ;

- une accélération, un freinage et une inversion du sens de rotation très rapide, ce qui est avantageux dans le cas des appareils de levage et des machines outils;
- une vitesse de rotation qui peut être réglée par l'intermédiaire d'un système de rétroaction;
- la possibilité de fonctionner comme générateur lors du freinage par récupération d'énergie;

Dans ce chapitre nous allons présenter les différents dispositifs qui sont utilisés dans les processus de régulation de vitesse du moteur à CC.

2.2 Quadrants de fonctionnement

Deux paramètres qui définissent le fonctionnement de système sont le couple et la vitesse. Le couple dépend de la charge qui peut être entraînée ou entraînée. Le signe de la vitesse dépend du sens de rotation du moteur. Quatre quadrants définissent les zones de fonctionnement[9].

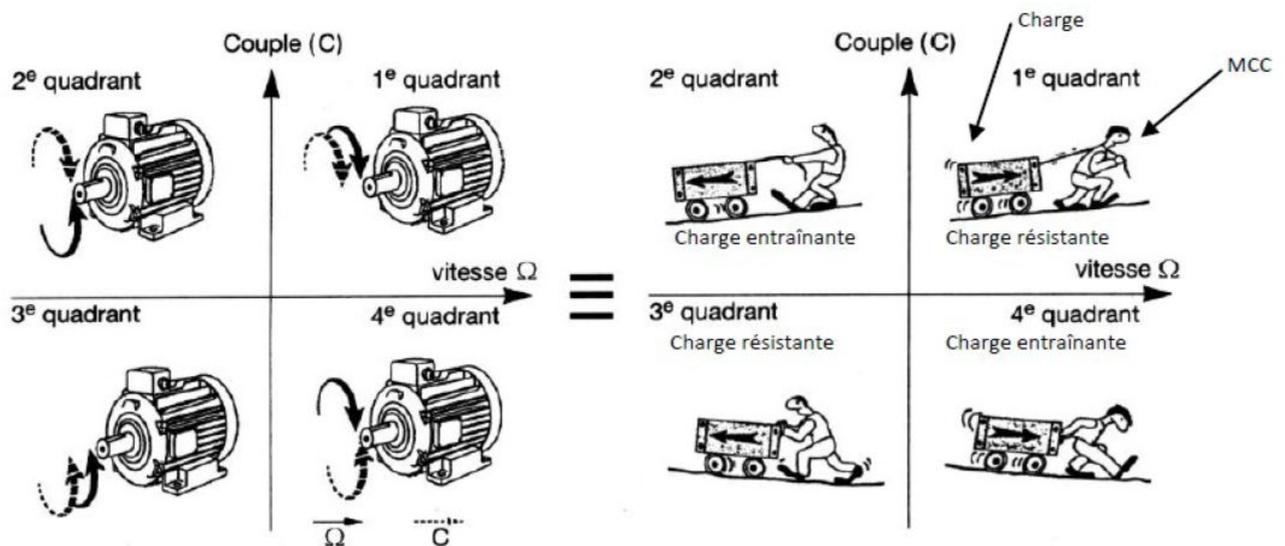


Fig 2.1: Quadrants de fonctionnement d'une machine à courant continu[2].

Premier quadrant:

Le moteur fonctionne dans le sens direct. Le couple et la vitesse sont positifs.

Deuxième quadrant:

Le moteur fonctionne en sens inverse (vitesse négative) et le couple est positif (période de freinage ou récupération).

Troisième quadrant:

Le moteur fonctionne en sens inverse et le couple est négatif.

Quatrième quadrant:

Le couple est négatif et la vitesse est positive (période de freinage ou récupération).

2.3 Variation de vitesse

1- Par action sur le courant d'excitation:

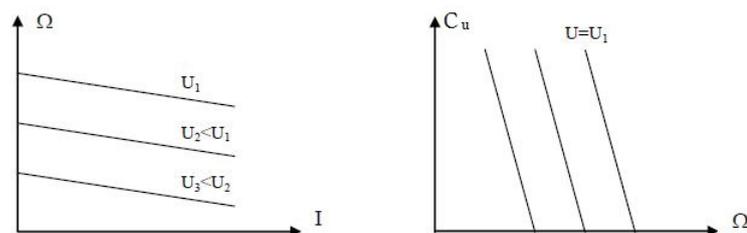
A tension U constante, la vitesse du moteur est inversement proportionnelle au flux et donc au courant d'excitation (i_e). L'action sur le courant d'excitation permet donc essentiellement d'accroître la vitesse à partir du point de fonctionnement nominal jusqu'à la vitesse maximale supportable par le moteur[814].

$$\Omega = \frac{U - RI}{K\Phi} \approx \frac{U}{K\Phi} \quad (2.1)$$

L'alimentation de l'induit par l'intermédiaire d'un pont redresseur commandé permet donc de faire varier continuellement la vitesse de 0 jusqu'à Ω_N .

2- Par action sur la tension d'alimentation:

A flux constant, la vitesse du moteur est quasiment proportionnelle à U :



2.4 Principe du variateur de vitesse pour un moteur à CC

Il y a plusieurs façons ou précédés pour varier la vitesse d'un moteur CC. On peut faire modifier la vitesse en variant la tension d'alimentation, mais dans ce cas une partie importante de l'énergie est consommée par le dispositif d'alimentation. Pour cette raison, on préfère l'alimenter de façon discontinue avec des variateurs électronique et faire ainsi varier la tension moyenne aux bornes de la machine. On parle alors sur les redresseurs commandés à thyristor et les hacheurs [506].

2.5 Les dispositifs électroniques utilisés pour la variation de vitesse des moteurs à courant continu:

Pour obtenir une tension continue variable, il existe 2 possibilités :

- Partir d'une tension continue fixe et utiliser un hacheur.
- Partir d'une tension alternative sinusoïdale et utiliser un redresseur.

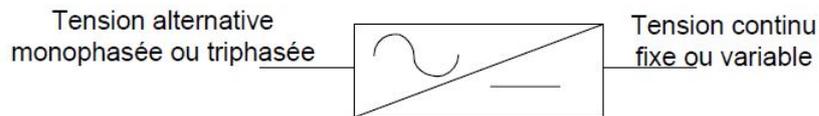


Fig 2.2: CONVERTISSEUR ALTERNATIF-CONTINU.

Dans ce type de convertisseur, on peut les classer en deux classes : les redresseurs non contrôlés et les redresseurs contrôlés.

Le hacheur est un commutateur statique constitué de thyristors ou de transistors qui permet de transformer une tension continue fixe en une autre tension continue variable.

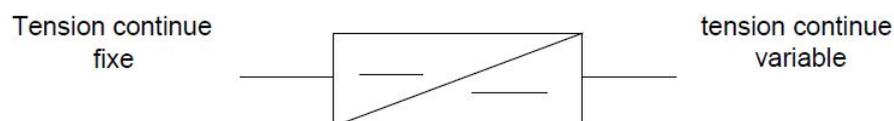


Fig 2.3: CONVERTISSEUR CONTINU-CONTINU.

Un hacheur peut être réalisé à l'aide des interrupteurs électroniques commandables à la fermeture et à l'ouverture telle que les transistors bipolaires ou IGBT ou les thyristors GTO.

2.5.1 Structure des variateurs de vitesse

Le choix de la structure d'un variateur de vitesse doit satisfaire les critères suivants :

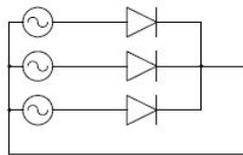
- Nature de la source d'énergie (continue ou alternative).
- 1 ou 2 sens de rotation.
- Charge entraînée ou non.
- Freinage naturel ou forcé.

2.5.2 La conversion Alternatif - Continu (redresseur)

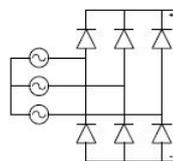
Ce sont les plus répandus dans les applications industrielles puisqu'ils partent directement de la tension du réseau (avec ou sans transformateur). Ils sont monophasés ou triphasés selon la puissance du moteur.

Les différents types des redresseurs

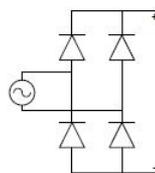
1. **Les redresseurs non commandés** : Ces ponts ne délivrent qu'une tension de sortie fixe, et ne seront donc pas utilisés pour faire la variation de vitesse pour les MCC. Ces redresseurs ne sont composés que de diodes.



Le pont simple triphasé PS3

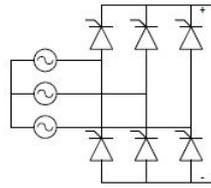


Le pont double triphasé PD3

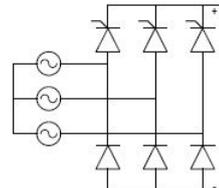


Le pont double monophasé PD2

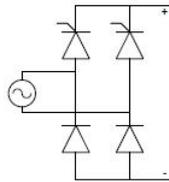
2. **Les redresseurs commandés** : Ces redresseurs permettent de faire varier la tension efficace avec, soit des diodes et des thyristors, soit seulement des thyristors.



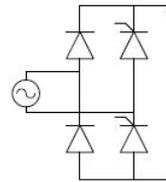
Le pont tout thyristor triphasé PT3



Le pont mixte triphasé PM3



Le pont mixte symétrique monophasé



Le pont mixte asymétrique monophasé

2.5.3 Alimentation d'un moteur à courant continu par un redresseur commandé

1- Montages non réversibles

Lorsque le moteur à courant continu ne doit tourner que dans un sens et que l'entraînement ne nécessite pas un freinage rapide, on utilise un variateur non réversible permettant la marche de la machine en moteur dans le quadrant 1.

Montages alimentés en triphasé: Le redresseur commandé (essentiellement à thyristors) assure directement la conversion de l'énergie alternative en continu. Il délivre une tension légèrement ondulée dont la valeur moyenne U est réglable, le redresseur est alimenté en triphasé [814]

On utilise les montages en pont pour éviter l'emploi d'un transformateur. Il y'a deux possibilités :

- Pont complet à six thyristors.
- Pont mixte (3 thyristors et 3 diodes.) Le montage mixte est le plus économique, mais ses performances sont si mauvaises qu'on utilise le plus souvent le pont tout thyristors.

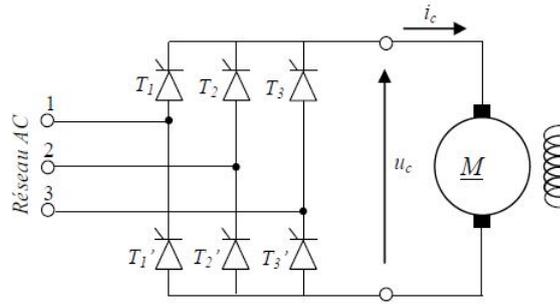


Fig 2.4: Machine alimentée par un redresseur entièrement commandé.

- Interrupteurs unidirectionnels en courant (machine non réversible en couple)
- Un seul sens de rotation
- Deux quadrants de fonctionnement ($n^{\circ}1$ et $n^{\circ}2$)
- Freinage statique (moteur sens direct = génératrice sens inverse).

2- Montages réversibles

L'induit de la machine est alimenté par un convertisseur partiellement ou totalement réversible, dont le type, comme pour les variateurs non réversibles, dépend essentiellement de la puissance mise en jeu et éventuellement des contraintes liées à la nature du réseau d'alimentation, les réalisations étant très diverses.

Par variateur réversible, on entend un entraînement permettant une inversion rapide du sens de rotation. Le variateur doit pouvoir assurer le fonctionnement dans les quatre quadrants.

- Quadrant 1 : marche en moteur dans le sens direct.

$$n > 0, U_c I_c > 0 \quad (2.2)$$

- Quadrant 2 : marche en générateur (récupération) dans le sens direct.

$$n > 0, U_c I_c < 0 \quad (2.3)$$

- Quadrant 3 : marche en moteur dans le sens inverse.

$$n < 0, U_c I_c > 0 \quad (2.4)$$

- Quadrant 4 : marche en récupération dans le sens inverse.

$$n < 0, U_c I_c < 0 \quad (2.5)$$

Le déroulement d'un cycle de travail conduit à passer d'un quadrant à l'autre dans le sens de leur numérotation

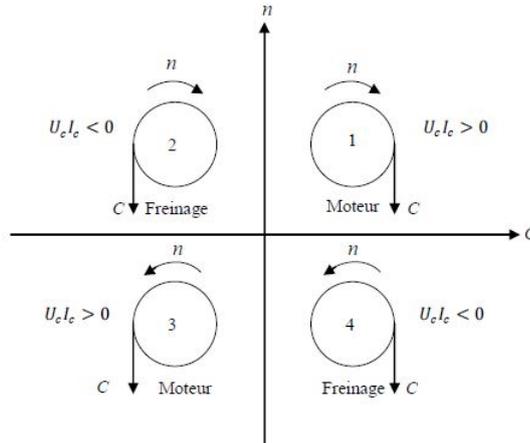


Fig 2.5: Fonctionnement dans les quatre quadrants de la machine à courant continu.

Trois montages sont possibles :

- Inversion du courant inducteur,
- Inversion du courant d'induit,
- Montage réversible tête-bêche.

Ils utilisent tous au moins un montage tout thyristors permettant l'inversion de la tension U_c ; c'est la réalisation des passages entre les quadrants 1 et 2 ou 3 et 4 qu'ils diffèrent. C'est la rapidité de ces passages qui permet de les classer.

2.5.4 Alimentation d'un moteur à courant continu par un hacheur

Si le réseau disponible est un réseau continu, alors le convertisseur statique qu'on associe à la machine à courant continu ne peut être qu'un hacheur. Cette commande est réalisable soit par action sur la tension d'induit soit par action sur le flux. Sachant que le réseau continu provient soit :

- Soit de batteries.
- Soit d'un redresseur à diode.

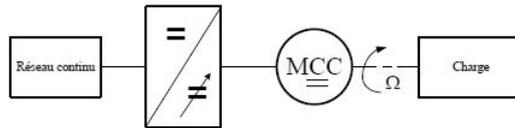


Fig 2.6: Synoptique d'un moto variateur a hacheur.

Principe du hacheur

La figure 2.7 présente le schéma de principe d'un hacheur. Il comporte un interrupteur commandé à l'amorçage et au blocage (transistor bipolaire, IGBT,...) et un interrupteur à amorçage naturel (diode).

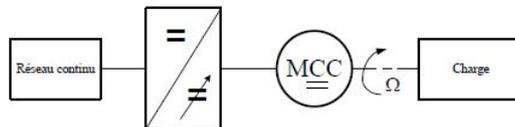


Fig 2.7: schéma d'un hacheur.

La tension moyenne de sortie est peut être inférieure ou supérieure à la tension d'entrée. Avec ce type de hacheur on peut travailler dans un quadrant (1 et 2) ou quadrants (1 et 4) suivant la réversibilité en courant de l'interrupteur statique et de la source [6].

ÉTUDE D'UN REDRESSEUR COMMANDÉ (À THYRISTOR)

2.6 Introduction

Les montages redresseurs, souvent appelés simplement redresseurs, sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent directement la conversion alternatif continu. Alimentés par une source de tension alternative monophasée ou polyphasée, ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie.

On utilise un redresseur chaque fois que l'on a besoin de continu alors que l'énergie électrique est disponible en alternatif. Comme c'est sous cette seconde forme que l'énergie électrique est presque toujours générée et distribuée, les redresseurs ont un très vaste domaine d'applications.

Les redresseurs à thyristors, ou redresseurs contrôlés, permettent, pour une tension alternative d'entrée fixée, de faire varier la tension continue de sortie. Ils sont de plus réversibles; lorsque'ils assurent le transfert de puissance du côté continu vers le côté alternatif.

Dans ce partie, nous étudierons les thyristors. Nous aborderons leur principe de fonctionnement, les conditions de leur conduction (amorçage) et blocage, leur caractéristique courant-tension.

2.7 Le thyristor

Le thyristor est un composant de l'électronique de puissance adapté pour la commande des convertisseurs statiques d'énergie tels que onduleurs, hacheurs et gradateurs.

Les thyristors tiennent donc une place importante dans les applications de puissance de l'avionique, du ferroviaire, de l'automobile, du réseau électrique, etc...

Le thyristor est un composant électronique semi-conducteur à trois bornes composé, de quatre couches de silicium dopées alternativement par des accepteurs (P) et des donneurs (N). La structure en couches P-N-P-N du thyristor peut être modélisée par deux transistors PNP et NPN connectés selon le schéma ci-dessous. Les deux bornes principales [13 4]:

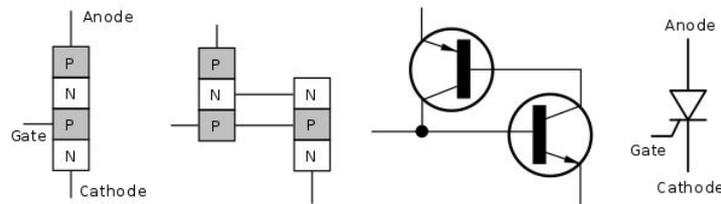


Fig 2.8: structure et symbole du thyristor.

l'anode (électrode positive) et la cathode (électrode négative), se situent de part et d'autre des quatre couches. La troisième borne, appelée gâchette, sert à commander le thyristor. Elle est reliée à la couche P près de la cathode. On peut modéliser le fonctionnement d'un thyristor par deux transistors bipolaires connectés de manière à former une bascule.

L'ensemble semi-conducteur est ensuite (en-capsulé) dans différents types de boîtiers selon qu'il s'agit de thyristor à faible, moyenne ou forte puissance



Fig 2.9: différents type de thyristor.

2.8 Principe de fonctionnement

Pour qu'un thyristor conduise (interrupteur fermé): il faut que la tension $U_{AK} \geq 0$; et envoyer un courant i_G dans la gâchette pour amorcer le thyristor. Dès que ces deux conditions sont remplies, le thyristor conduit tant que le courant i qui circule dans le thyristor de l'anode vers la cathode reste positif.

C'est donc une diode commandée et plus spécifiquement un redresseur commandé d'où son nom anglais (Silicon Controlled Rectifier) (SCR) ce qui signifie (Redresseur commandé au Silicium).

L'amorçage

C'est le passage de l'état bloqué à l'état passant lorsque le thyristor est alimenté sous tension directe. On emploie également l'expression: déclenchement du thyristor. L'amorçage est obtenu par application d'un courant de gâchette.

Tant que l'impulsion est insuffisante en intensité et en durée, la conduction du thyristor est rapide, précise et sûre. Noter que une impulsion de gâchette trop faible ou trop courte peut provoquer l'autodestruction du thyristor. Dans ce cas de figure, la portion de jonction qui s'ouvre sous l'influence du courant de gâchette est trop petite et le passage du courant de l'anode vers la cathode crée lors du passage un échauffement thermique entraînant la fusion du semi conducteur.

Si la puissance thermique dissipée par le thyristor est supérieure à celle que peut évacuer son système de refroidissement, la température des jonctions va augmenter. Or on sait que le courant inverse d'une jonction augmente avec la température. Dès lors, si pour une raison ou l'autre, la température des jonctions vient à monter, le courant de fuite de cette jonction augmente et peut être suffisant pour amorcer le thyristor. Noter que le seuil de tension de retournement diminue en fonction de l'élévation de température[16].

2.8.1 Conditions d'amorçage (d'allumage, de conduction) du thyristor

Conditions d'amorçage:

1. **En polarisation inverse:** ($V_{AK} \leq 0$):

- Le thyristor est alors bloqué et aucun courant I_a ne peut circuler.
- Lorsque la tension inverse devient trop forte, elle produit un claquage destructif du thyristor.

2. **En polarisation directe:** ($V_{AK} > 0$):

- **Sans commande de gâchette:** le thyristor reste bloqué jusqu'à une valeur limite de la tension directe et le courant I_a est négligeable.

- au delà de cette tension (atteinte de la tension de retournement V_{BO}), le thyristor devient passant, le courant circule de l'anode vers la cathode et la tension V_{ak} tombe à une valeur proche de 0 ($\approx 1V$).

- **Lorsqu'on applique une commande de gâchette:** le thyristor devient passant dès que la tension V_{ak} est positive et le courant circule de l'anode vers la cathode.

le thyristor reste passant tant qu'il circule un courant minimal (même si on débranche le circuit de gâchette)

Conditions de blocage:

Rendre $V_{AK} \leq 0$ ou diminuer le courant anode en dessous du courant de maintien I_H (H: Holding).

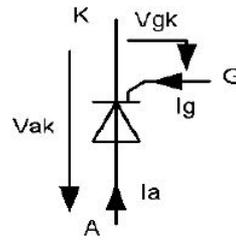


Fig 2.10: représentation des grandeurs électriques sur un thyristor.

2.8.2 Caractéristique courant - tension $I_D = f(V_{AK})$

1. **ZONE OA:** Le thyristor est sous tension directe et reste bloqué si $V_{AK} < V_{B00}$. Le courant I_A est très faible.
2. **ZONE AB:** C'est une zone transitoire où le thyristor est instable. Le fonctionnement normal ne se fait jamais dans cette zone.
3. **ZONE BC:** Le thyristor est conducteur et se comporte comme une diode passante. Le point de fonctionnement se trouve sur la droite BC[18]

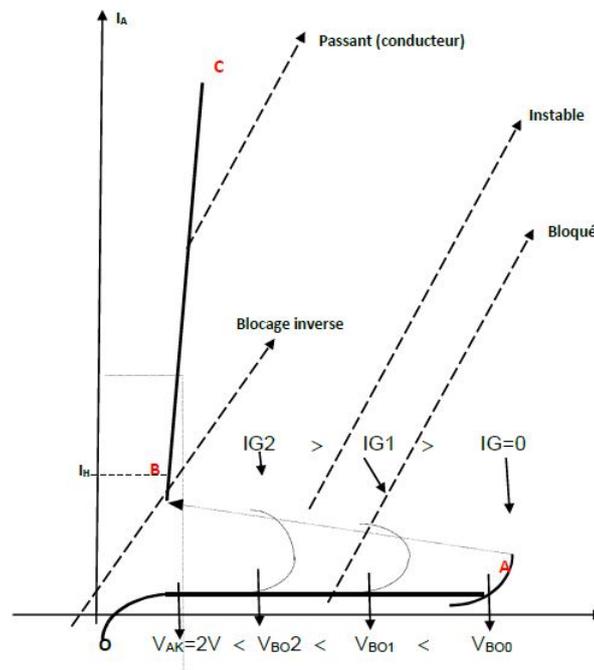
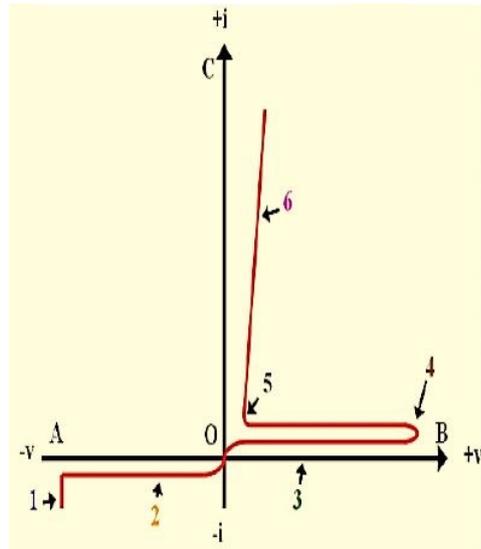


Fig 2.11: caractéristique courant-tension d'un thyristor.

Voici la description plus précise des différentes parties:



1. Avalanche, ou tension de claquage; 2. Courant inverse; 3. Courant de fuite direct;
4. Tension d'amorçage; 5. Courant de maintien; 6. Courant de conduction

2.8.3 Influence du courant de gâchette i_G

- Si $I_G = 0$, le thyristor s'amorcera lorsque $V_{AK} \geq V_{B00}$. (fonctionnement non désiré).
- Lorsque le courant de gâchette augmente ($I_{G2} > I_{G1}$) la tension V_{BO} sous laquelle il devient conducteur diminue ($V_{B02} < V_{B01}$) et le thyristor s'amorce.

Alors la tension d'amorçage est d'avantage plus faible que le courant de gâchette I_G est élevé.

2.8.4 Types d'amorçage par la gâchette

1. **Courant continu:** La tension de commande reste présente pendant tout le temps de conduction du thyristor. Dans ce cas, le circuit de commande peut être complété par un dispositif qui réduit ou supprime le courant de commande avant et après l'amorçage du thyristor, de façon à éviter les pertes au niveau du circuit de gâchette (Non précis; Pertes d'énergie)

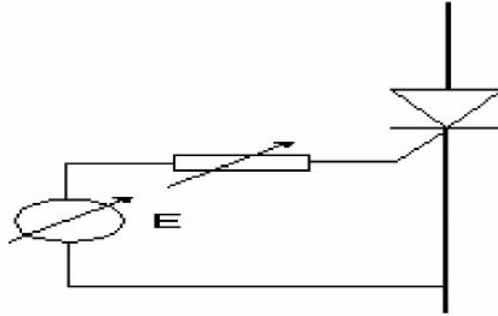


Fig 2.12: Amorçage par courant continu.

2. **Signal impulsionnel:** La tension de commande se présente sous forme d'impulsion de tension. C'est ce mode de commande qui est utilisée dans la plupart des cas. Les avantages sont les suivants:

- Faible puissance dissipée dans le circuit de gâchette, même avec des impulsions largement dimensionnées.
- Evite les amorçages intempestifs. La gâchette peut être maintenue au potentiel de la cathode entre deux impulsions de commande.
- Séparation électrique entre le circuit de commande et le circuit de puissance. Dans ce cas, les impulsions sont transmises à la gâchette par l'intermédiaire d'un condensateur ou d'un transformateur.
- Précis et pas de pertes d'énergie

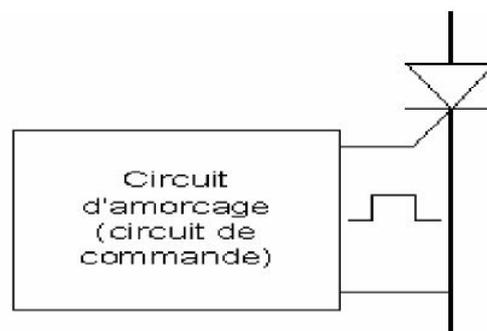


Fig 2.13: Amorçage par courant alternatif.

3. **Circuit analogique:** La commande électronique doit permettre la réalisation d'un signal de tension $V_{int}(t)$ dont la durée vérifie la relation linéaire: $t_1 = a y(t) + b$

, avec $a = T/2V$ et $b = T/2$, $y(t)$ est une tension continu variable ;Où t_1 est la durée de commande à la fermeture de l'interrupteur, la période T de la commande étant constante ($0 \leq t_1 \leq T$). Le principe de la commande utilisée est le suivant:

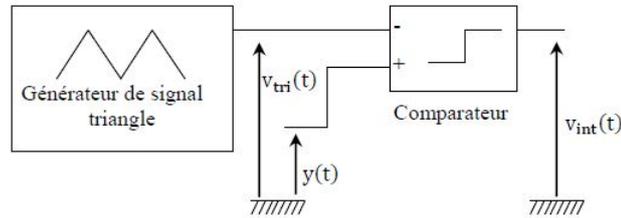


Fig 2.14: Principe de générateur de signaux analogique.

Le générateur de signal triangulaire fournit entre 0 et $+V$ un signal double rampe, à la pente en descente. La période T du signal est imposée constante. Le comparateur permet d'obtenir les signaux suivants[14]:

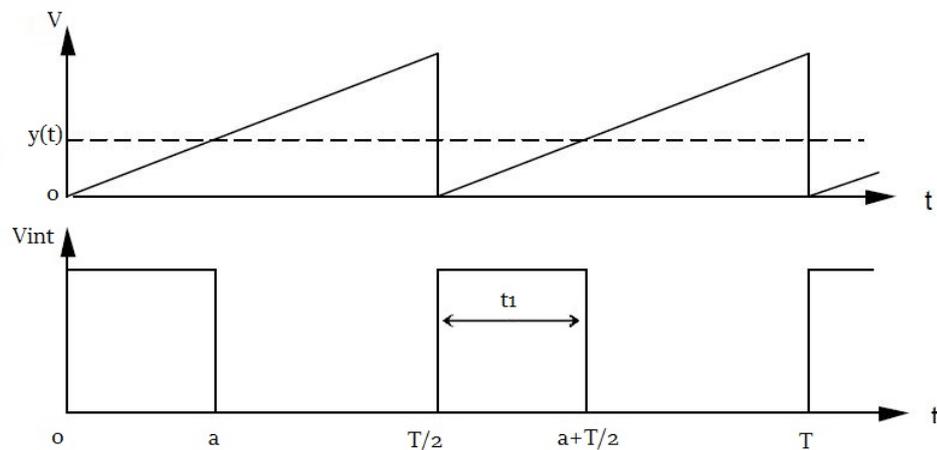


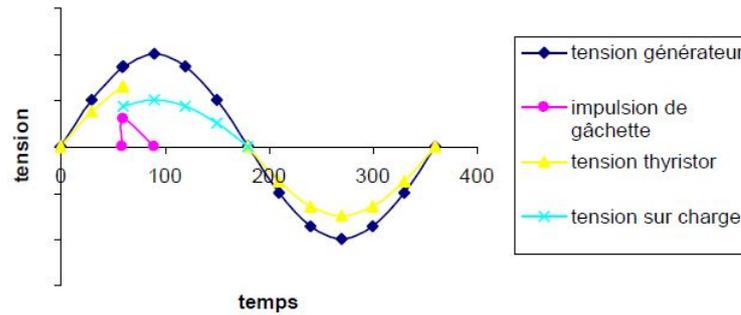
Fig 2.15: les signaux de générateur analogique.

2.8.5 Angle de retard

Nous savons à présent que le thyristor pour pouvoir se mettre en conduction doit vérifier deux points important, avoir une tension direct aux bornes du thyristor (anode et cathode) et recevoir une impulsion de gâchette.

En pratique, nous dois donc placer un générateur d'impulsion afin de commander cycliquement la gâchette du thyristor. Analysons pour le schéma ci-dessous l'allure des

tensions.



On remarque clairement que durant la conduction, la tension du thyristor est inexistante. Lors de cette même conduction, le tension apparaît aux bornes de la charge puisque nous avons circulation d'un courant. Le cas dessiné montre que L'impulsion de gâchette à été donnée 60° après le passage en positif de la tension générateur. On voit dès lors que le thyristor ne conduira que 120° . La tension aux bornes de la charge sera donc fonction de ce temps de conduction.

Le temps t_1 est donc le retard à l'allumage du thyristor par rapport au passage en positif de la tension générateur. L'angle correspondant à $\alpha = \omega t_1$ est l'angle de retard. Il peut être réglé (théoriquement) entre 0 et 180° .

2.9 Redressement commandé (tout thyristors)

Pour obtenir une tension continue, on redresse un ensemble de q tensions alternatives, d'ordinaire supposées sinusoïdales et formant un système polyphasé équilibré (nombre de phases q). Ces tensions peuvent être les tensions aux bornes d'un alternateur, généralement, elles sont fournies par le réseau monophasé ou plus souvent par le réseau triphasé, d'ordinaire par l'intermédiaire d'un transformateur. On distingue trois types de montages[12]:

- P_q : montages avec source en étoile et un seul commutateur ou redresseur "simple alternance".
- PD_q : montages avec source en étoile et deux commutateurs ou redresseurs "en pont" avec source étoilée.

- S_q : montages avec source en polygone et deux commutateurs ou redresseurs "en pont" avec source polygonale.

La figure ci-dessous donne le schéma électrique des montages P3, PD3 et S3. Ces trois montages sont le plus communément utilisés pour le redressement de tensions triphasées.

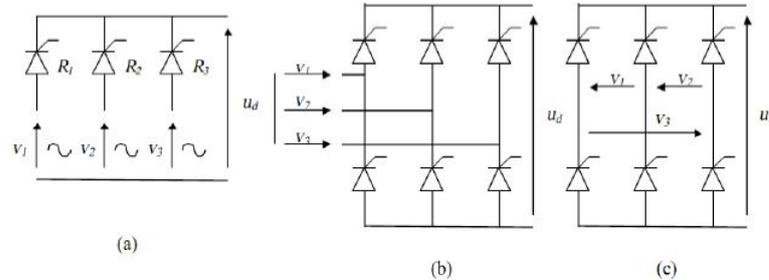


Fig 2.16: Redresseurs triphasés: (a) P_3 . (b) PD_3 . (c) S_3

2.10 Remarque au sujet de la commande des thyristors

2.10.1 Commande brève - Commande longue

Le fonctionnement interne du thyristor fait que celui-ci peut être amorcé par des signaux de gâchette de très courte durée. La commande d'un certain nombre de montages se fait donc par une impulsion unique, dont la durée ne dépasse habituellement pas une centaine de microsecondes.

L'inconvénient de ce mode de commande est que, si le thyristor n'est pas encore polarisé positivement au moment où arrive l'impulsion (ce qui peut se produire par exemple en régime transitoire dans un variateur de vitesse), l'amorçage ne peut pas se produire. Pendant une ou plusieurs alternances du réseau, le redresseur restera donc bloqué et on assistera à une anomalie de fonctionnement. Lorsque ce défaut est susceptible de se produire, on utilise, à la place de la commande brève, une commande longue qui consiste, soit à alimenter la gâchette jusqu'à la fin de la demi-alternance, soit à répéter les impulsions (figure 2.17)

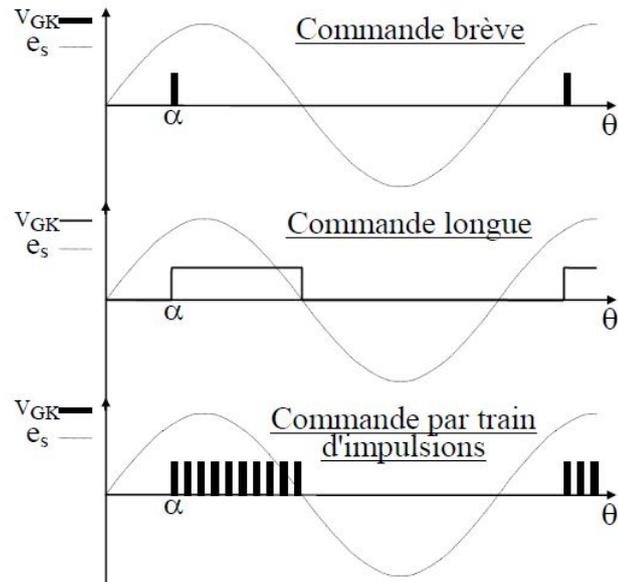


Fig 2.17

Dans ce cas, la commande sera encore présente au moment où le thyristor peut redevenir passant, ce qui élimine le problème signalé précédemment. Il faut cependant noter que, dans ce cas, l'amorçage est régi par des conditions internes de fonctionnement et ne dépend plus formellement de la commande.

Remarque:

Sur la figure 2.17, e_s désigne la tension de synchronisation du dispositif électronique fournissant les signaux de commande. Pour que α puisse être réglé entre 0° et 180° , il faut que le passage par zéro de e_s coïncide avec celui de la tension aux bornes du thyristor bloqué. Étant donné que les problèmes en courant interrompu peuvent être résolus comme indiqué ci-dessus, on se contente de réaliser cette condition en courant ininterrompu, en imposant que e_s soit l'image de la tension d'alimentation en monophasé, et celle de la tension composée adéquate en triphasé (ou de la tension simple, si on veut obtenir automatiquement une butée onduleur de 30° - mais, dans ce cas, le début de la caractéristique de réglage du dispositif de commande doit être neutralisé, pour éviter d'envoyer des impulsions sur un thyristor polarisé négativement).

2.10.2 Commande des montages triphasés tout thyristors

L'utilisation des circuits habituels de commande brève conduirait à une répartition temporelle des signaux de commande comme indiqué (figure 2.18).

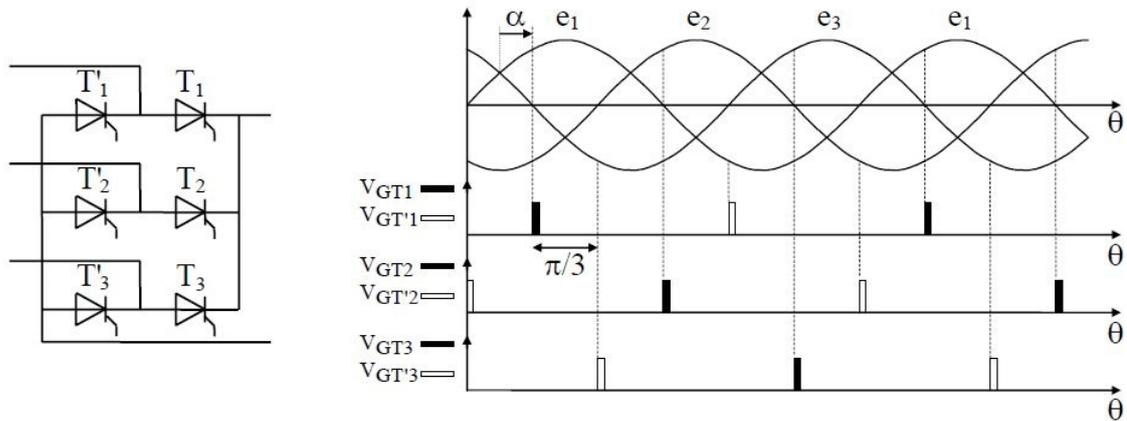


Fig 2.18

A cause de cette répartition, la mise en conduction du pont est impossible. En effet, celle-ci suppose que deux thyristors soient amorcés simultanément (par exemple T1 et T'3), donc qu'il y ait coïncidence d'arrivée des impulsions de commande, ce qui n'est pas le cas ici. Pour y remédier, deux solutions sont possibles:

1- Utilisation d'une impulsion de confirmation

Chaque thyristor reçoit une première impulsion, normalement retardée de α , suivie d'une deuxième, retardée de $\alpha + \pi/3$, qui coïncide donc avec la première impulsion de commande du thyristor de l'autre montage parallèle (schéma partiel figure 2.19).

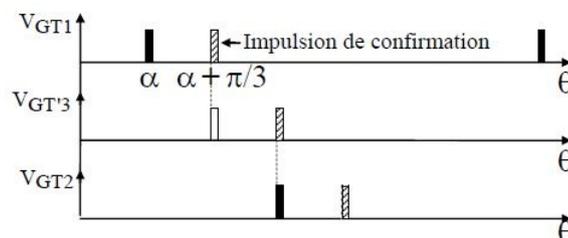


Fig 2.19

Ce procédé est répété pour tous les thyristors, car, lors d'un fonctionnement en courant

interrompu (cas qui est loin d'être exceptionnel), le problème se repose à chaque nouvel amorçage d'un thyristor.

2- Elargissement des signaux de commande

Leur largeur est rendue supérieure à $\pi/3$. Le circuit de gâchette du premier thyristor est donc encore alimenté quand on commande le thyristor de l'autre montage parallèle, ce qui rend effectivement possible la mise en conduction du pont.

2.11 Etude du montage PD_3

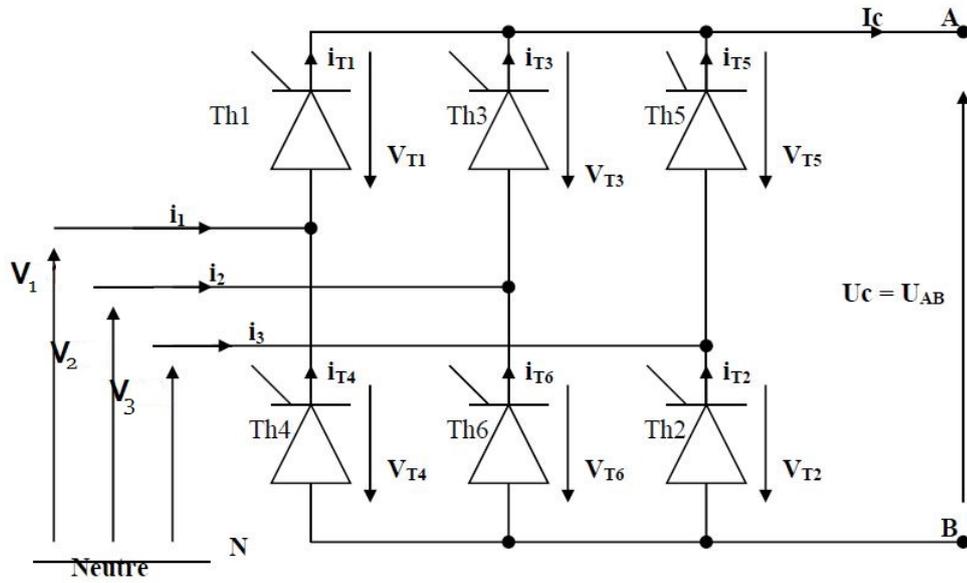
Ce pont est composé de 6 thyristors. Les thyristors T_1, T_3 et T_5 sont amorcés pendant l'alternance positive des tensions v_1, v_2 et v_3 . Les thyristors T_2, T_4 et T_6 sont amorcés pendant l'alternance négative.

La référence des angles d'amorçage est toujours l'angle d'amorçage naturel.

Le transformateur en couplage étoile- étoile sera considéré comme dépourvu de fuites magnétiques et de résistances. Le pont sera lui aussi considéré comme parfait et la charge est constituée d'un moteur à courant continu avec un courant continu absorbé constant I_C .

Le réseau de tensions secondaires du transformateur sera noté de la façon suivante:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_1 = V_m \sin(\theta) \\ v_2 = V_m \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ v_3 = V_m \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{array} \right\} \quad (2.6)$$


 Fig 2.20: Redresseurs triphasés PD_3 tous thyristors.

2.11.1 Analyse du fonctionnement

Le retard à l'amorçage est ψ ; on détermine la tension $V_+(\theta)$ ($U_A(\theta)$) pour cette valeur d'angle d'amorçage en suite, on détermine la tension $V_-(\theta)$ ($U_B(\theta)$) pour la même valeur de l'angle de commande. Il est alors possible de déterminer les grandeurs caractéristiques de ce pont. En opérant par intervalles successifs, il est alors possible d'établir le tableau suivant[14]:

Intervalle	Thyristors en conduction	Tension de sortie U_c	Tension aux bornes de T_1	Courant i_{T1}	Courant i_1
$[\psi + \frac{\pi}{6}; \psi + \frac{\pi}{2}]$	T_1 et T_6	$v_1 - v_2 = U_{12}$	0	I_c	I_c
$[\psi + \frac{\pi}{2}; \psi + \frac{5\pi}{6}]$	T_1 et T_2	$v_1 - v_3 = U_{13}$	0	I_c	I_c
$[\psi + \frac{5\pi}{6}; \psi + \frac{7\pi}{6}]$	T_3 et T_2	$v_2 - v_3 = U_{23}$	$v_1 - v_2$	0	0
$[\psi + \frac{7\pi}{6}; \psi + \frac{3\pi}{2}]$	T_3 et T_4	$v_2 - v_1 = U_{21}$	$v_1 - v_2$	0	$-I_c$
$[\psi + \frac{3\pi}{2}; \psi + \frac{11\pi}{6}]$	T_5 et T_4	$v_3 - v_1 = U_{31}$	$v_1 - v_3$	0	$-I_c$
$[\psi + \frac{11\pi}{6}; \psi + \frac{13\pi}{6}]$	T_5 et T_6	$v_3 - v_2 = U_{32}$	$v_1 - v_3$	0	0

2.11.2 Valeur moyenne de la tension de sortie U_C

La relation $U_C(\theta) = U_{AB}(\theta) = U_A(\theta) - U_B(\theta)$ permet aussi de calculer la valeur moyenne de la tension U_C : On à

$$U_{C \text{ moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U_C(\theta) d\theta = \frac{1}{T} \int_0^T U_{A \text{ moy}}(\theta) d\theta - \frac{1}{T} \int_0^T U_{B \text{ moy}}(\theta) d\theta \quad (2.7)$$

$$U_{A \text{ moy}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \Psi}^{\frac{5\pi}{6} + \Psi} U_{\max} \sin(\theta) d\theta = \frac{3U_{\max}}{2\pi} [-\cos(\theta)]_{\frac{\pi}{6} + \Psi}^{\frac{5\pi}{6} + \Psi} \quad (2.8)$$

$$U_{A \text{ moy}} = \frac{3U_{\max}}{2\pi} \left[-\cos\left(\frac{5\pi}{6} + \Psi\right) + \cos\left(\frac{\pi}{6} + \Psi\right) \right] \quad (2.9)$$

On à

$$\cos(a) - \cos(b) = -2 \sin\left(\frac{a+b}{2}\right) \sin\left(\frac{a-b}{2}\right) \quad (2.10)$$

alors:

$$U_{A \text{ moy}} = \frac{3U_{\max}}{2\pi} \left[-\cos(\Psi) \cos\left(\frac{5\pi}{6}\right) + \sin(\Psi) \sin\left(\frac{5\pi}{6}\right) + \cos(\Psi) \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) - \sin(\Psi) \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \right] \quad (2.11)$$

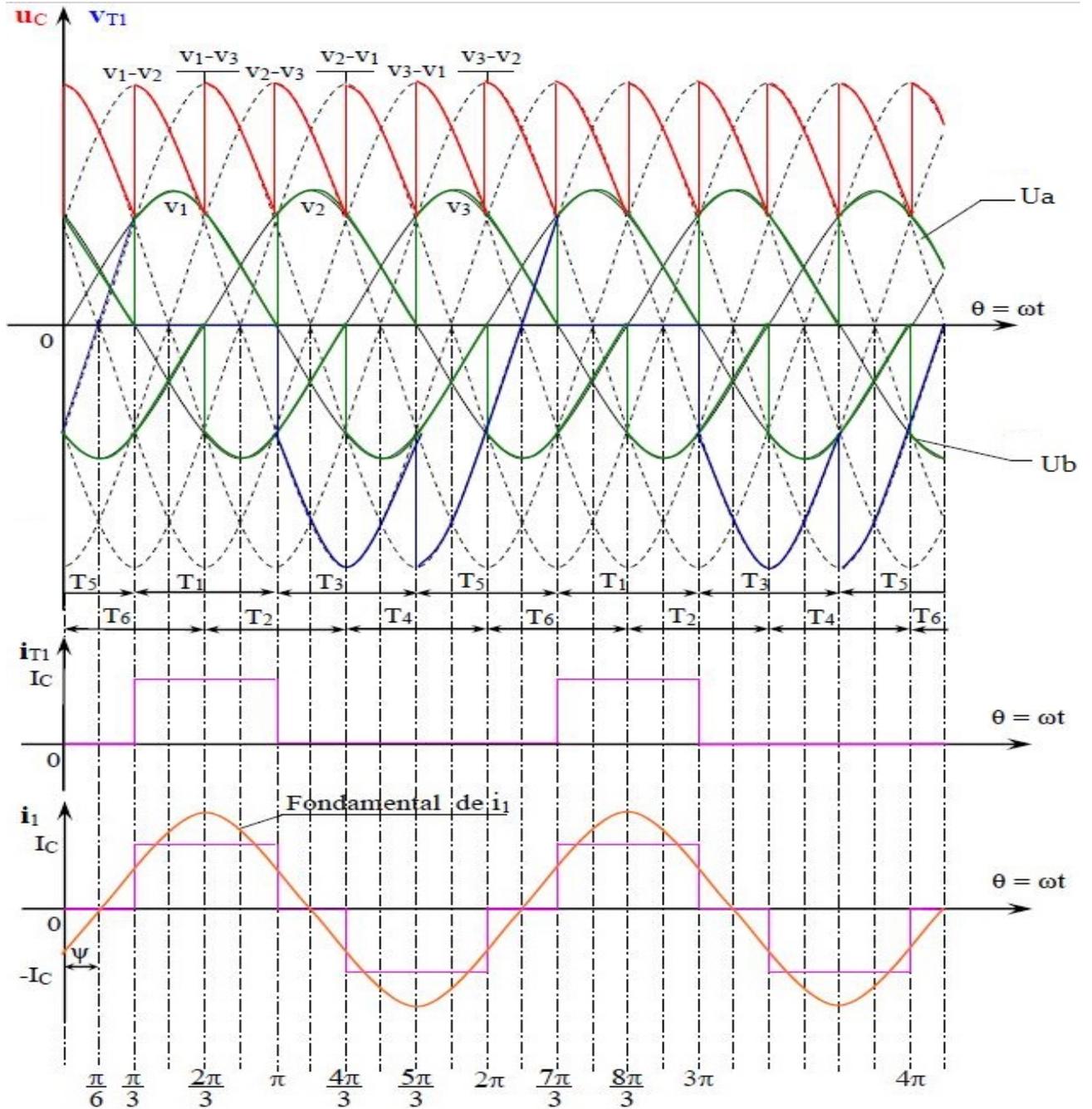
$$U_{A \text{ moy}} = \frac{3U_{\max}}{2\pi} \left[\cos(\Psi) \frac{\sqrt{3}}{2} + \cos(\Psi) \frac{\sqrt{3}}{2} \right] = \frac{3\sqrt{3}U_{\max}}{2\pi} \cos(\Psi) \quad (2.12)$$

D'après la courbe on constate que:

$$U_{B \text{ moy}} = -U_{A \text{ moy}} \Rightarrow U_{B \text{ moy}} = -\frac{3\sqrt{3}U_{\max}}{2\pi} \cos(\Psi) \quad (2.13)$$

$$U_{C \text{ moy}} = \frac{3\sqrt{3}U_{\max}}{\pi} \cos(\Psi) \quad (2.14)$$

Formes d'ondes des différentes grandeurs $\Psi = \frac{\pi}{6}$



On a

$$U_c(t) = Ri_c(t) + E \Rightarrow U_{C \text{ moy}} = Ri_{C \text{ moy}} + E \Leftrightarrow i_{C \text{ moy}} = \frac{U_{C \text{ moy}} - E}{R} \quad (2.15)$$

La puissance active reçue par la charge est:

$$P = U_{C \text{ moy}} I_C = \frac{3\sqrt{3}U_{\text{max}} \cdot I_C}{\pi} \cos(\Psi) \quad (2.16)$$

la puissance apparente au secondaire est:

$$S = 3U_{eff}I_{eff} = 3\frac{U_{max}}{\sqrt{2}}I_C\sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2.17)$$

Le facteur de puissance de la ligne a pour expression:

$$F = \frac{P}{S} = \frac{\frac{3\sqrt{3}U_{max}I_C}{\pi} \cos(\Psi)}{3\frac{U_{max}}{\sqrt{2}}I_C\sqrt{\frac{2}{3}}} = \frac{3}{\pi} \cos(\Psi) \quad (2.18)$$

2.12 Conclusion

Dans ce chapitre, on à vu la variation de la vitesse d'un moteur à courant continu, en à vue les différents méthode de la variation de vitesse ,Les conversions Alternatif - Continu (redresseur) commandée et non commandée ,le convertisseur CC/CC (Hacheur).

On à vu aussi les thyristor et sa Principe de fonctionnement avec ces différent type, et nous spécialisées notre étude sur Les redresseur commandée à six thyristor ,

Dans le chapitre suivant, nous allons entrer dans une vision de la simulation d'une redresseur commandée à six thyristor avec la machine à courant continu.

CHAPITRE 3

SIMULATION D'UN VARIATEUR DE VITESSE

3.1 Introduction

Pour faire varier la vitesse d'un moteur à courant continu on varie la tension d'alimentation à ses bornes. Pour atteindre cet objectif on utilise un redresseur, ce dernier commande la variation de la tension moyenne aux bornes de notre moteur est par la suite la variation de la vitesse de rotation.

Dans ce chapitre, nous allons simuler et réaliser le circuit de redresseur triphasé tout thyristors (PD_3) pour varier la vitesse d'un moteur à courant continu.

3.2 Partie de simulation

Nous utiliserons le logiciel MATLAB auquel est intégré l'outil SIMULINK qui est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation de systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal.

Logiciel MATLAB/SIMULINK, est un bon moyen d'étude du fonctionnement des machines à courant continu et d'autres types de machines également dans les conditions de fonctionnement voulues. Il nous permet d'observer de manière réaliste des phénomènes

électriques et physiques (couple, vitesse, courant)[15].

3.3 Modélisation de la MCC (machine à courant continu)

3.3.1 Equations de la MCC

- Equation électrique: $U = E + RI + L \frac{dI}{dt}$
- Equation mécanique: $J \frac{d^2\theta}{dt^2} + f \frac{d\theta}{dt} = C_e + C_r$
- Equations de couplage électromécanique: $C_e = KI$; $E = K \frac{d\theta}{dt}$

Le modèle de la MCC peut être implanté de plusieurs manières:

- forme développée: à l'aide d'opérateurs mathématiques de base (intégrateurs, sommateurs...).
- fonction de transfert: plus compacte.

Afin d'avoir accès à chacune des variables du modèle de la MCC, nous implantons le modèle sous forme développée.

Modèle électrique

$$U = E + RI + L \frac{dI}{dt} \Rightarrow \frac{dI}{dt} = \frac{1}{L} \left(-RI + U - K \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (3.1)$$

Modèle mécanique

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + f \frac{d\theta}{dt} = C_e + C_r \Rightarrow \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{J} (C_e + C_r) - f \frac{d\theta}{dt} \quad (3.2)$$

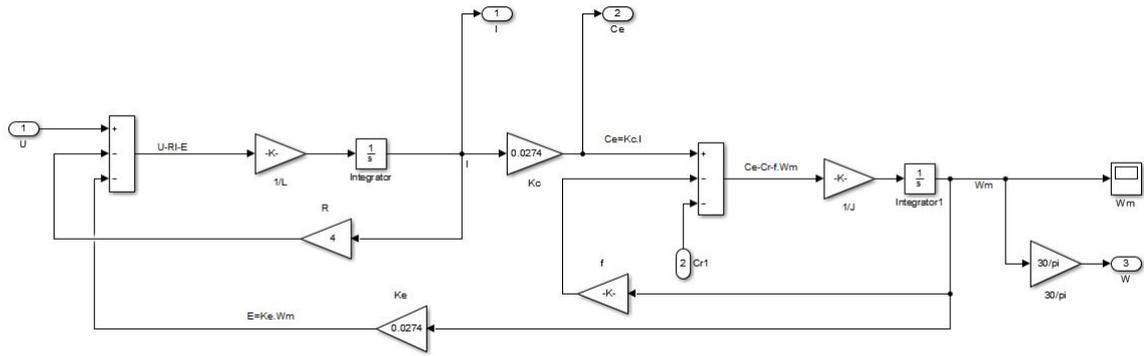


Fig 3.1: schéma bloc d'une MCC.

Réglage des paramètres de MCC

Pour une tension d'alimentation $U_{max} = 220V$ on obtient $U_{eff} = 220 * \sqrt{2} = 311.126V$, et la tension composée $U_{com} = 220 * \sqrt{3} = 381.05V$. D'après la relation:

$$U_{C \text{ moy}} = \frac{3\sqrt{3}U_{max}}{\pi} \cos(\Psi) \quad (3.3)$$

et pour $\Psi = 0^\circ$ on trouve: La tension ou borne de redresseur est $U_{C \text{ moy}} = 514.59V$ Les paramètres et conventions de notations de la machine à courant continu étudiée sont les suivants:

- Moment d'inertie du rotor: $J = 0.04251kg.m^2$
- Résistance induct $R = 4.712\Omega$
- Inductance induct $L = 0.05277H$
- l'excitation d'inducteur $U_f=240V$
- Facteur d'amortissement mécanique $f=0.003406 \text{ N.m.s}$
- Puissance nominale $p=3.5KW$
- courant nominale d'induct $I=16A$

3.4 Simulation d'un redresseur à 6 thyristor commande un moteur à courant continu

Un redresseur est un dispositif électrique permettant de faire varier la vitesse d'un moteur à courant continu en faisant varier la tension moyenne d'alimentation du moteur.

3.4.1 Schéma bloc de la simulation

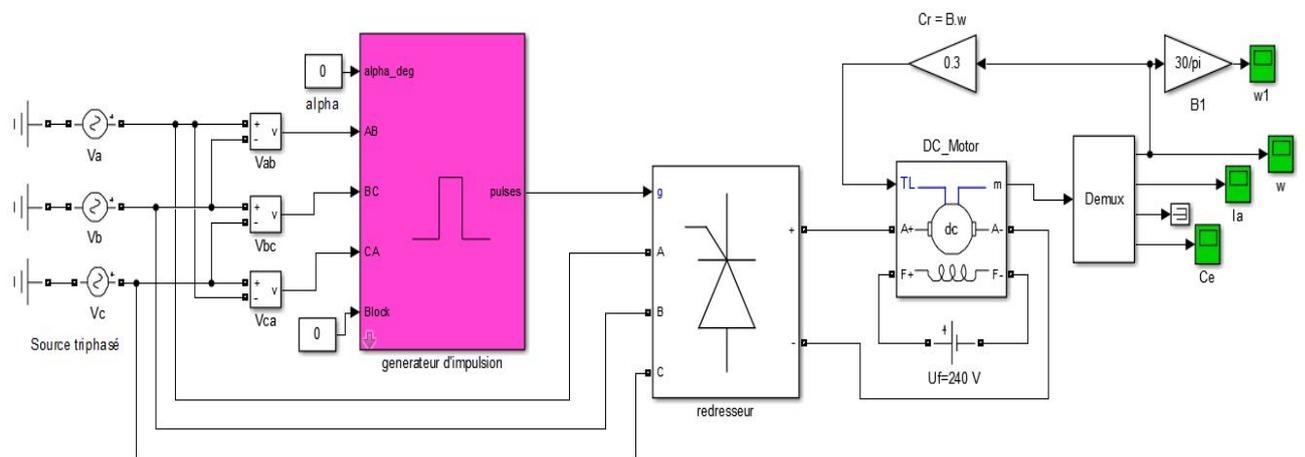


Fig 3.2: Schéma bloc d'un redresseur alimenté en triphasé commande un moteur à courant continu.

3.5 Générateur d'impulsion pratiquement

Le problème ne se pose pas dans la source ou le pont redresseur ou la charge mais le problème dépend de comment générer six impulsions aptitude pour les six thyristor?

Pour ce procédé nous allons opter pour la méthode suivant:

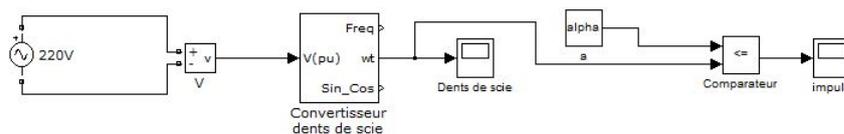


Fig 3.3: Générateur d'impulsion.

Le comportement serait le suivant:

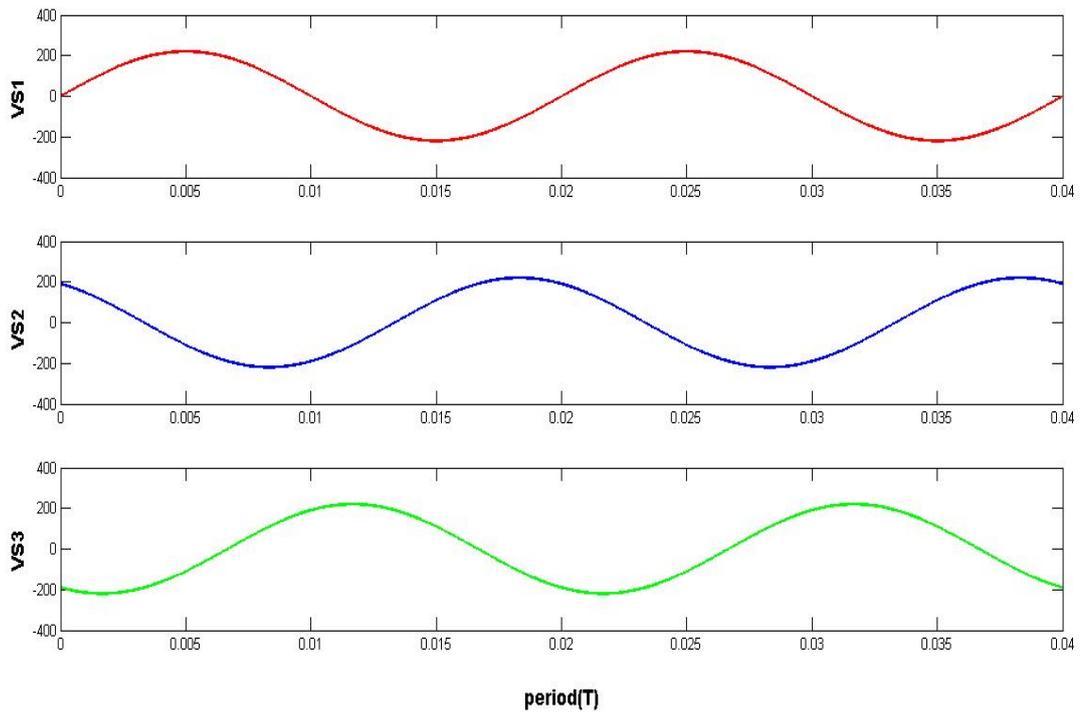


Fig 3.4: signal sinusoidale (le déphasage entre l'un et l'autre 120°).

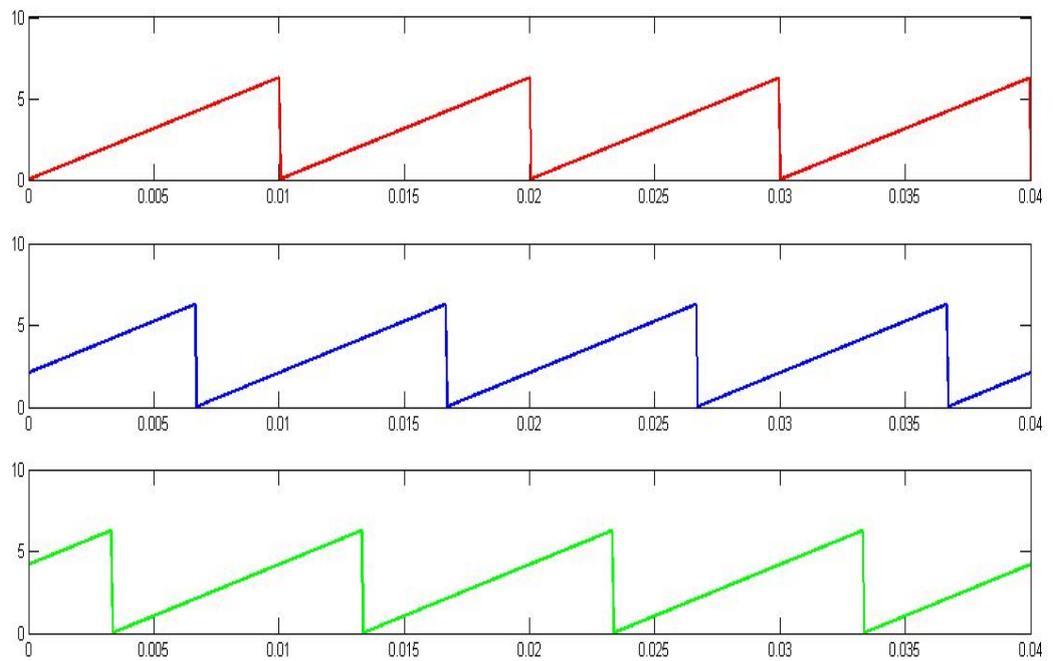


Fig 3.5: Tension en dents de scie.

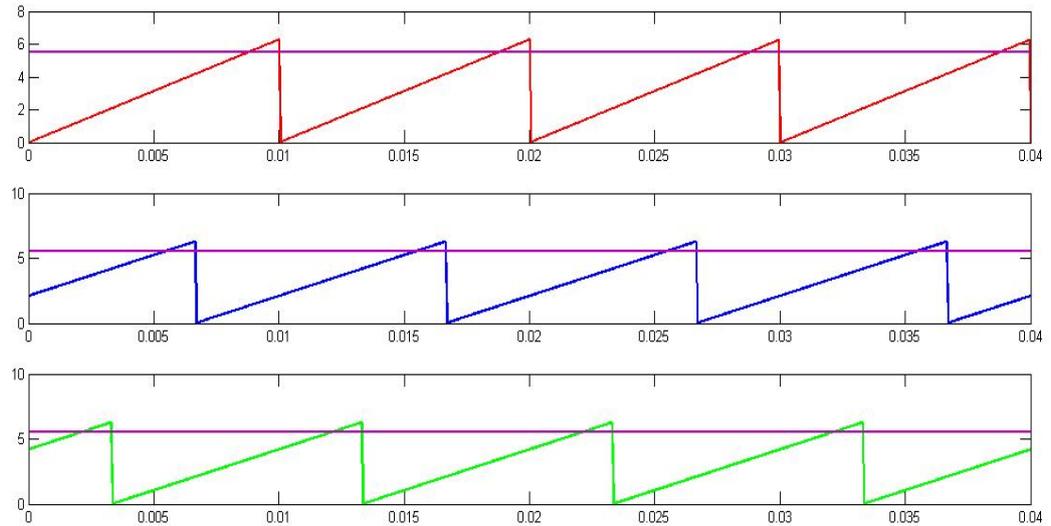


Fig 3.6: signal constante avec une dents de sci.

La technique j'ai utilisé pour la production d'un signal d'impulsion est comparer un signal constante à une dents de sci, et ce dernier est généré à partir d'une source sinusoïdale. Ainsi, la tension de sortie est formée par une succession de créneau d'amplitude égale à la tension sinusoïdale d'alimentation, je veux dire que le signale de dents de scie est synchronisé avec la source.

Si le signal dents de sci dépasse la constante, le signal de sortie (impulsion) passe à $+V_{cc}$ (ou 1 logique), sinon le signal passe à 0. Nous remarquons que si nous faisons varier la constante, les largeurs du signal de sortie grandissent (varie la constante de 1 jusqu'à 6; Pour que la valeur de 0 correspond angle 0° et la valeur 6 correspond angle 180°).

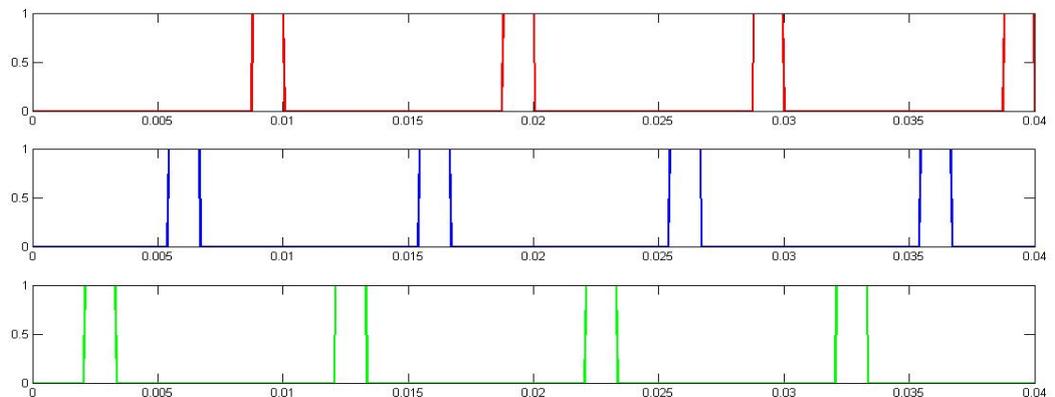


Fig 3.7: Les impulsion des gâchettes.

Ces impulsions représentées:

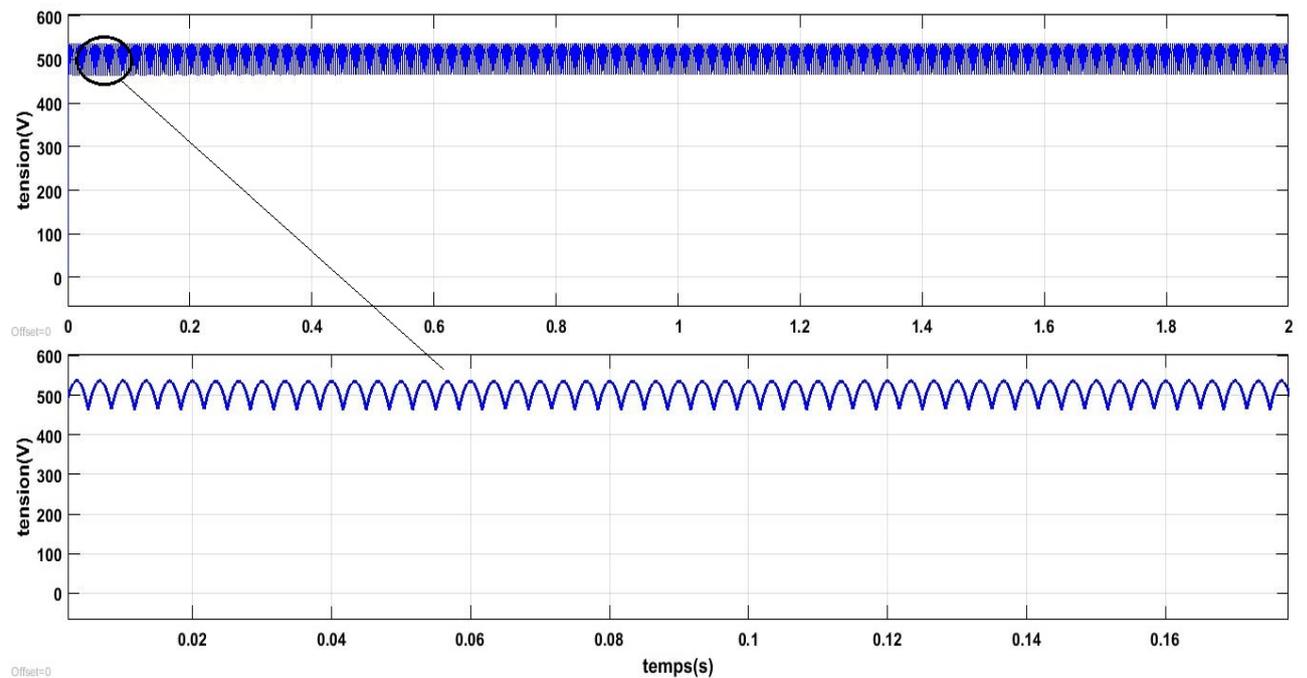
- Pour l'internonce positive les impulsions de thyristor 1 et 3 et 5.
- Pour l'internonce négatif les impulsions de thyristor 4 et 6 et 2.

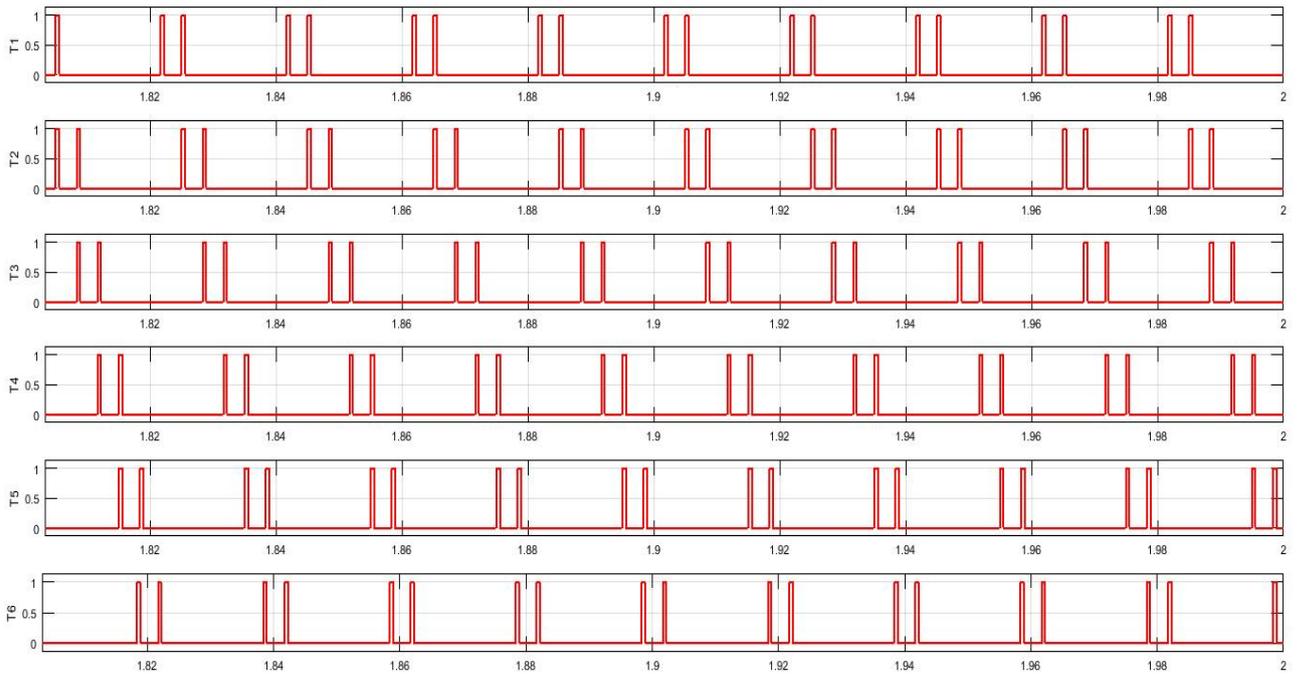
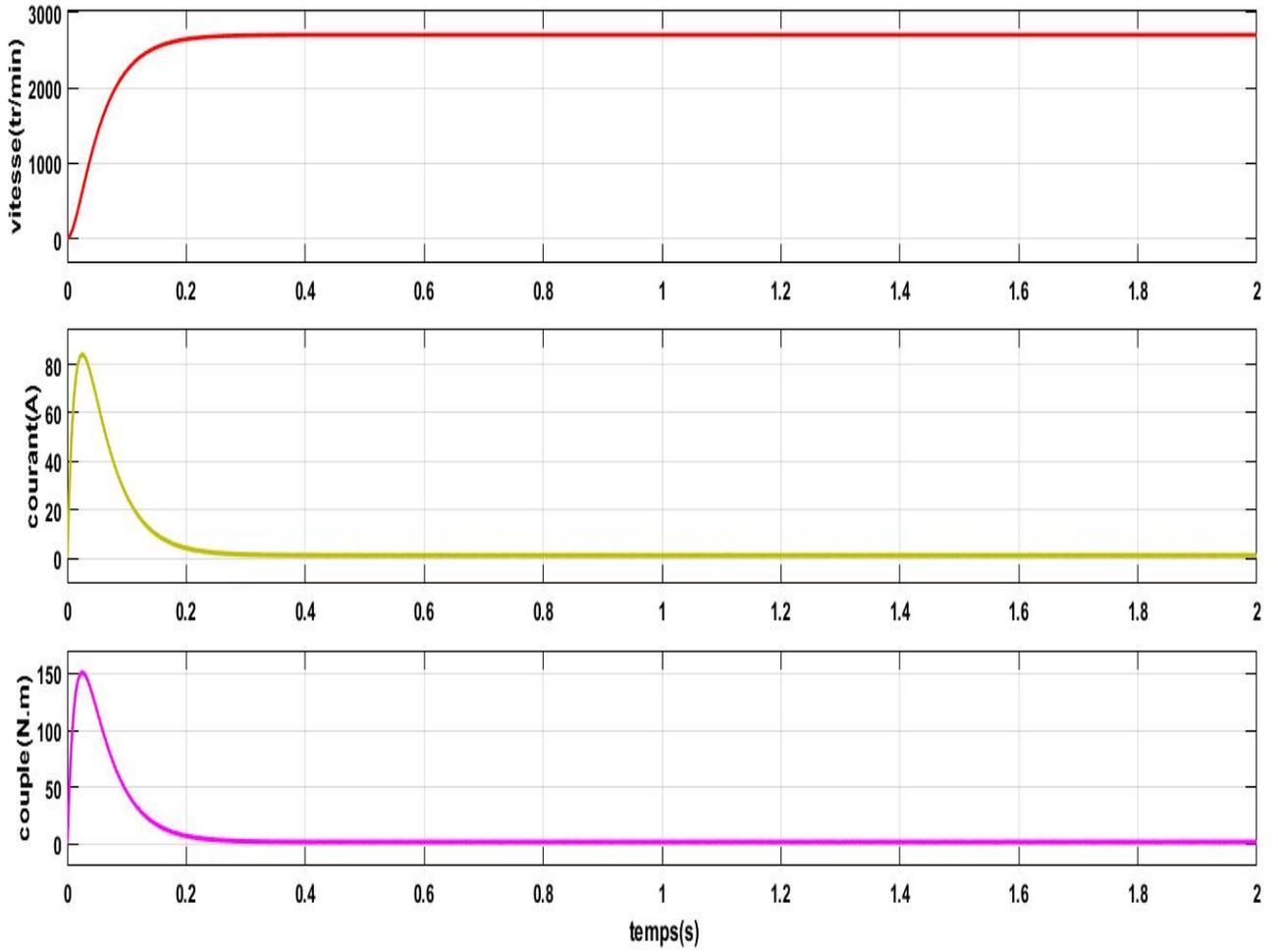
3.6 Résultats de simulation

Pour montre l'importance de la variation de l'angle d'amorçage sur la variation de la vitesse nous prenons des angles d'amorçage différents.

3.6.1 Moteur à vide avec une angle d'amorçage $\alpha=0^\circ$:

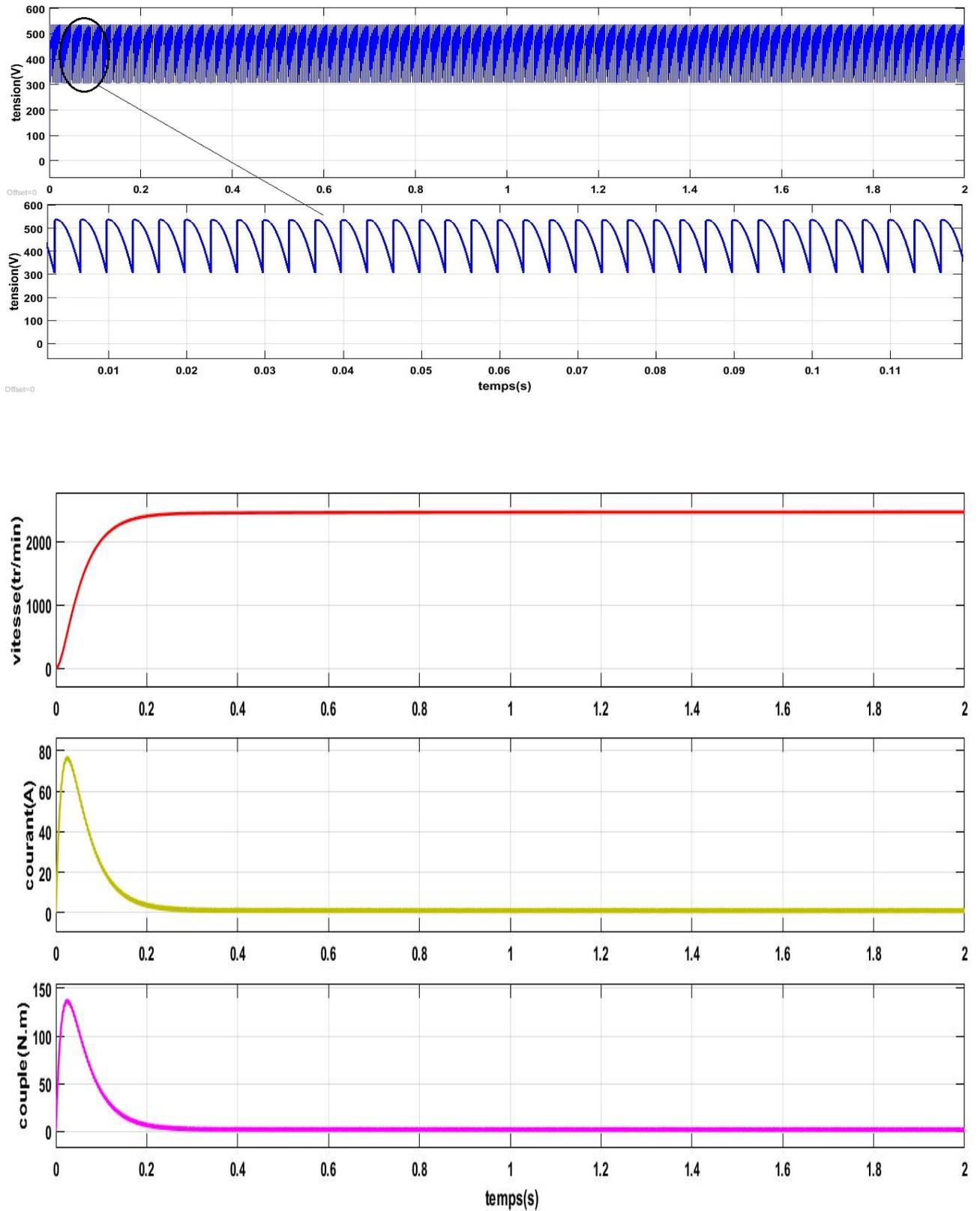
Nous obtenons une tension redresseur $U_{C_{moy}} = 514.59V$

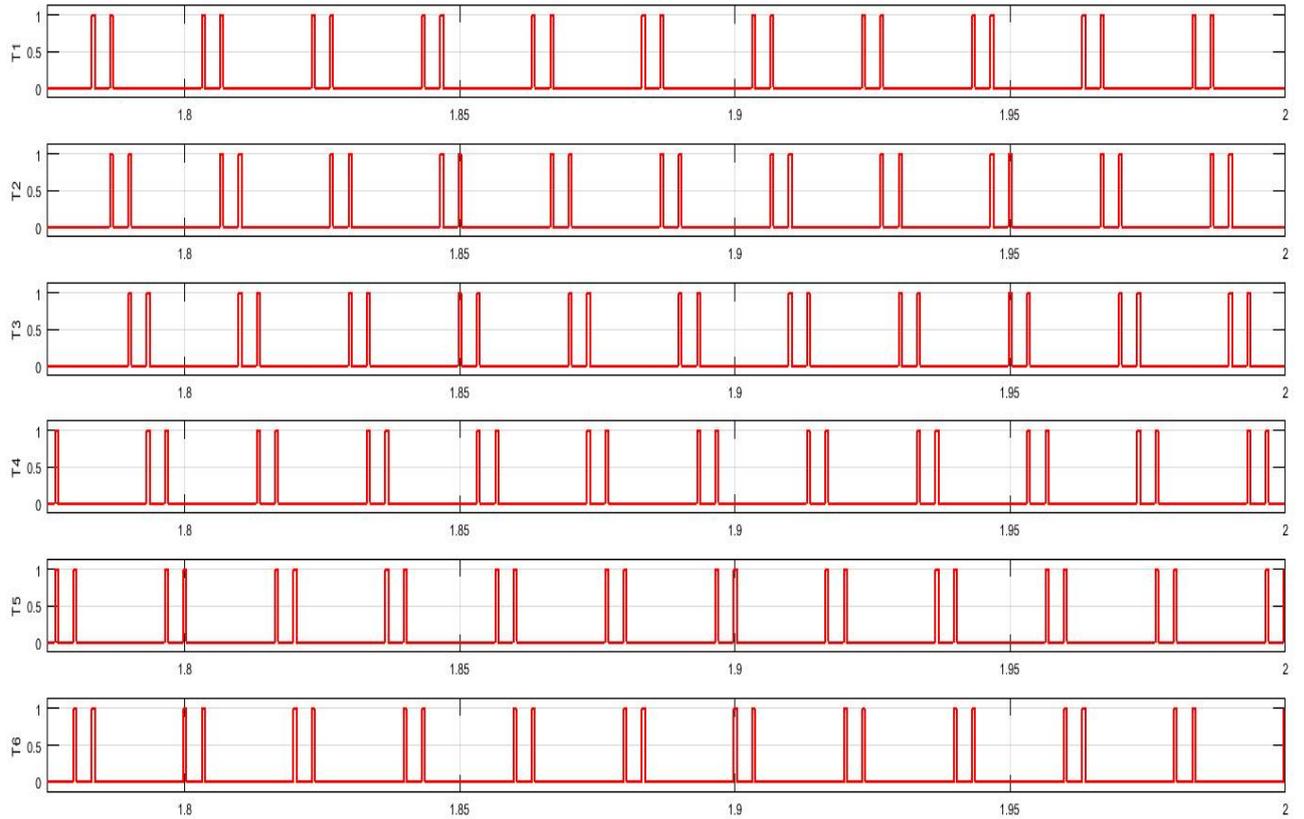




Pour angle d'amorçage $\alpha=25^\circ$:

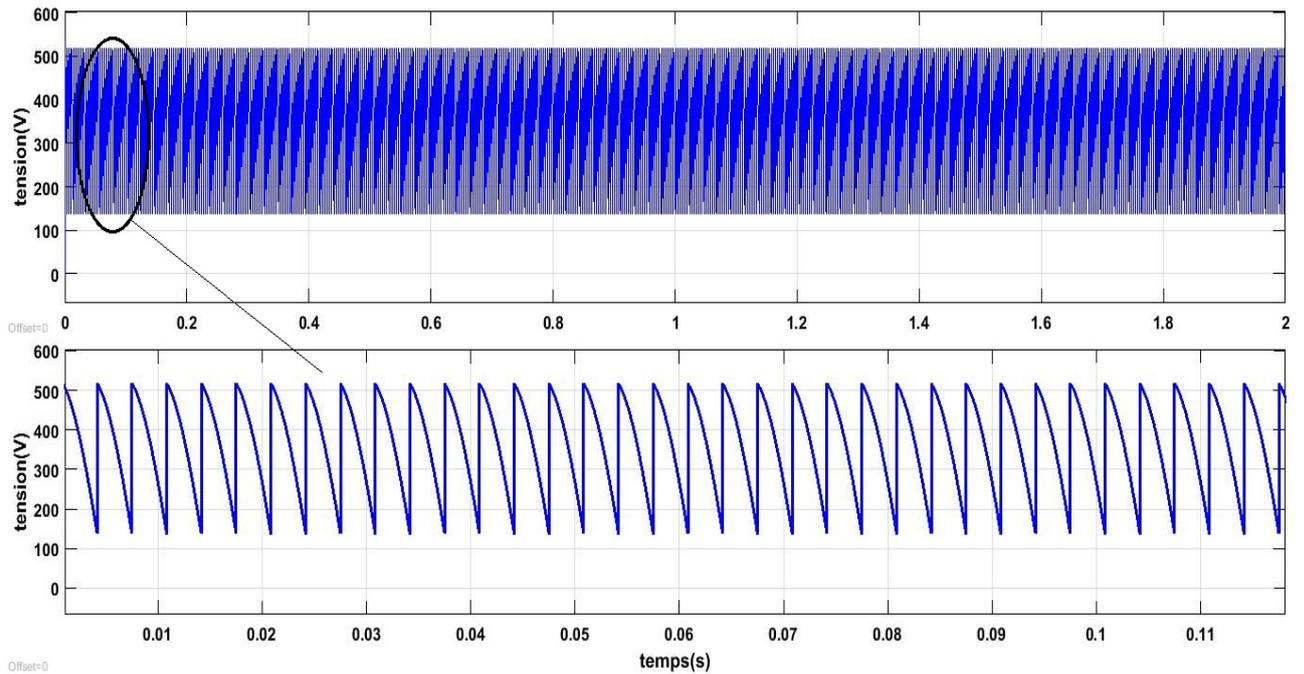
Nous obtenons une tension redresseur $U_{C_{moy}} = 466.38V$

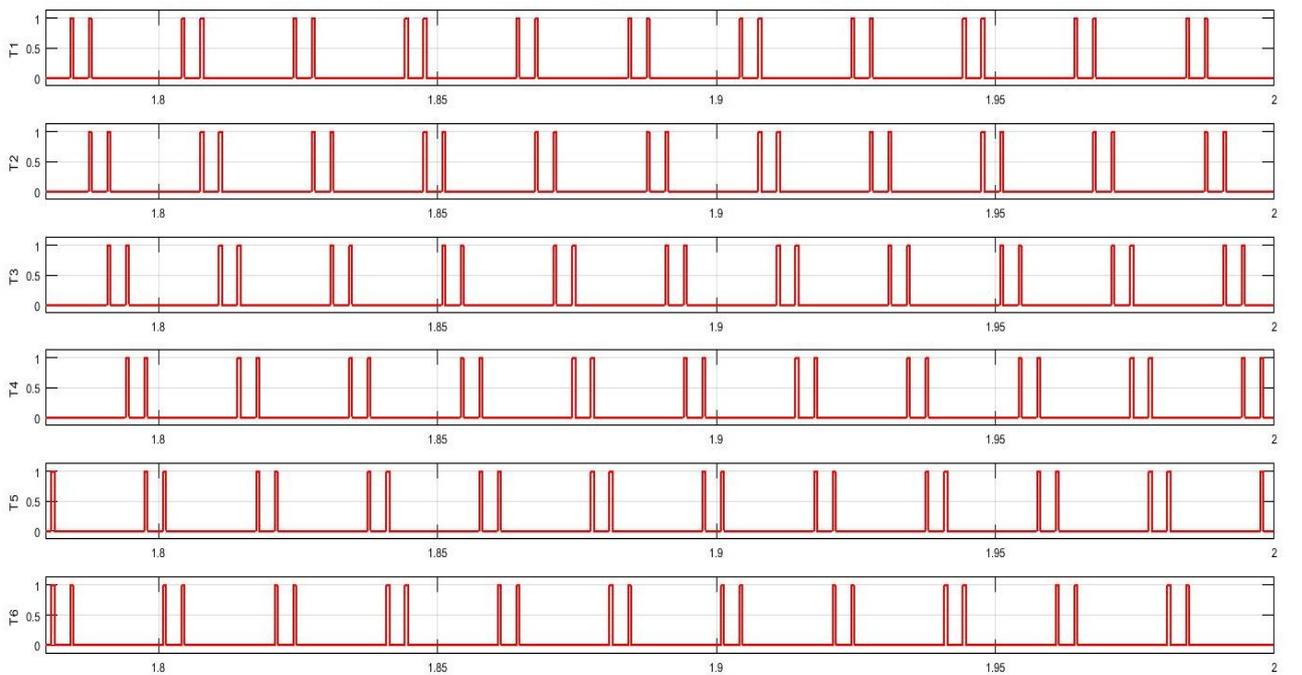
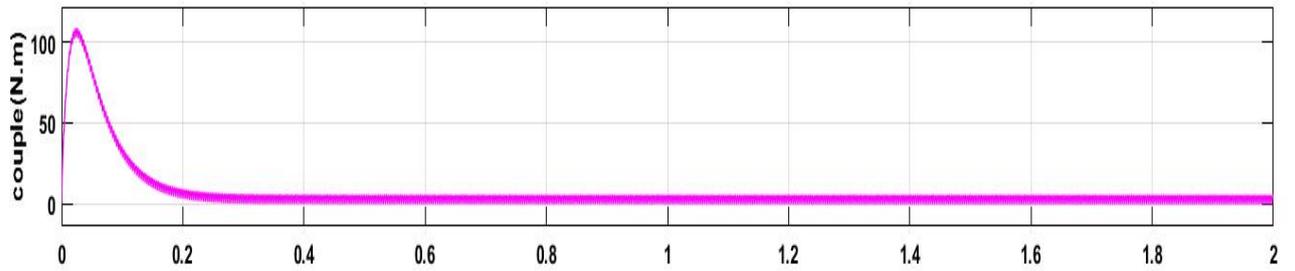
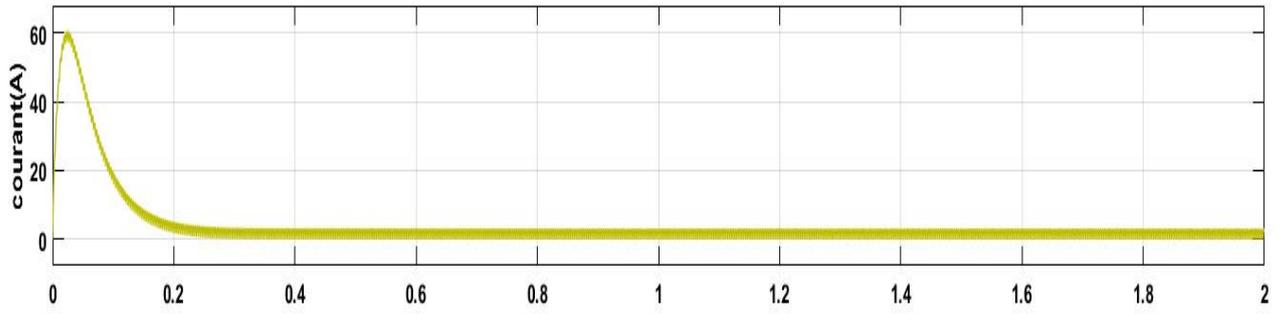
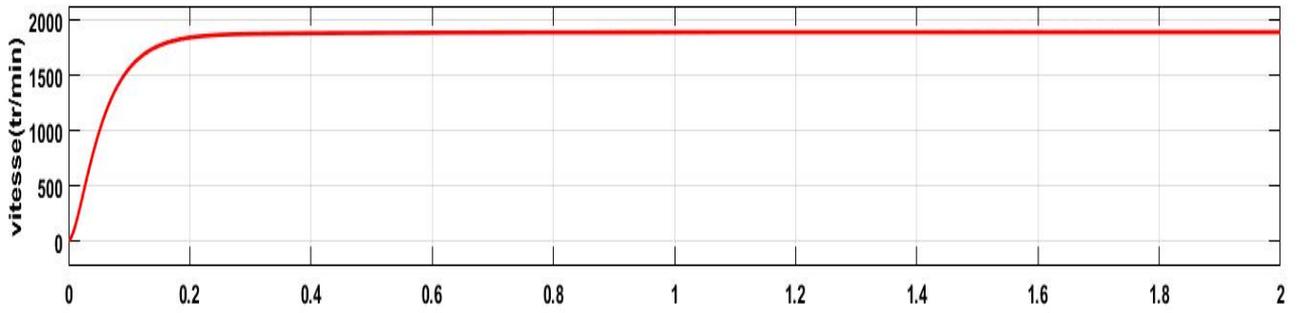




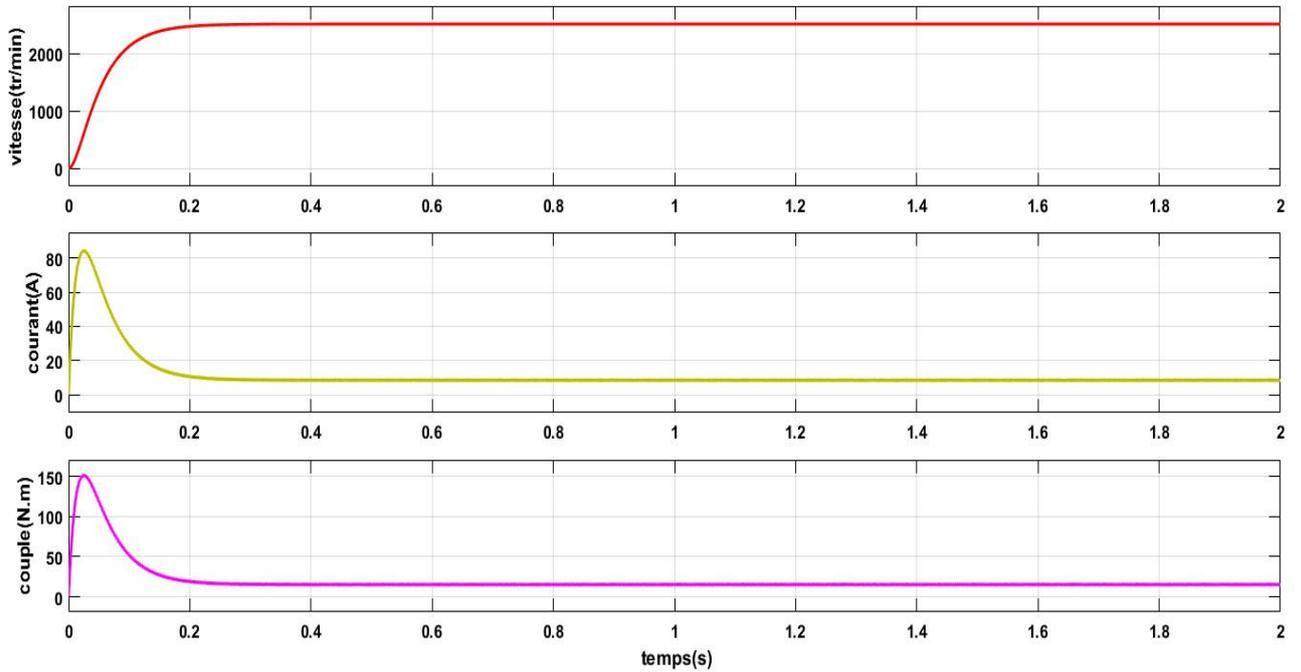
Pour angle d'amorçage $\alpha=45^\circ$:

Nous obtenons une tension redresseur $U_{C_{moy}} = 363.87V$

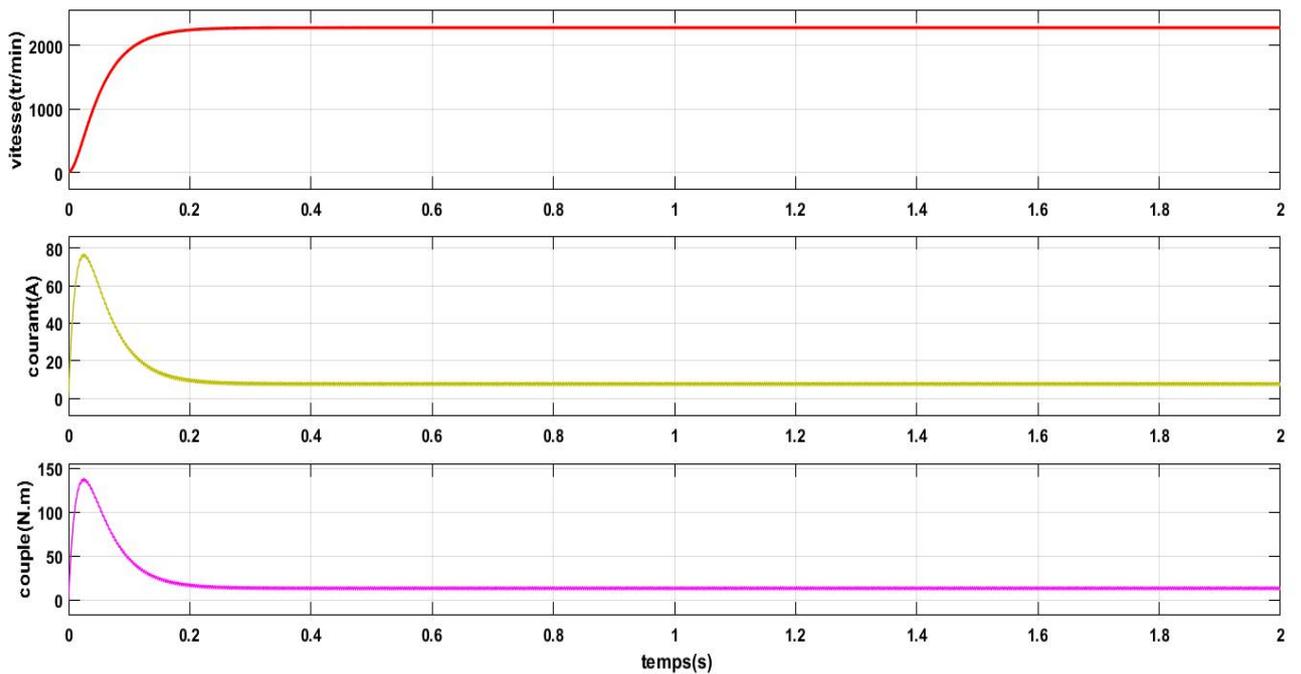




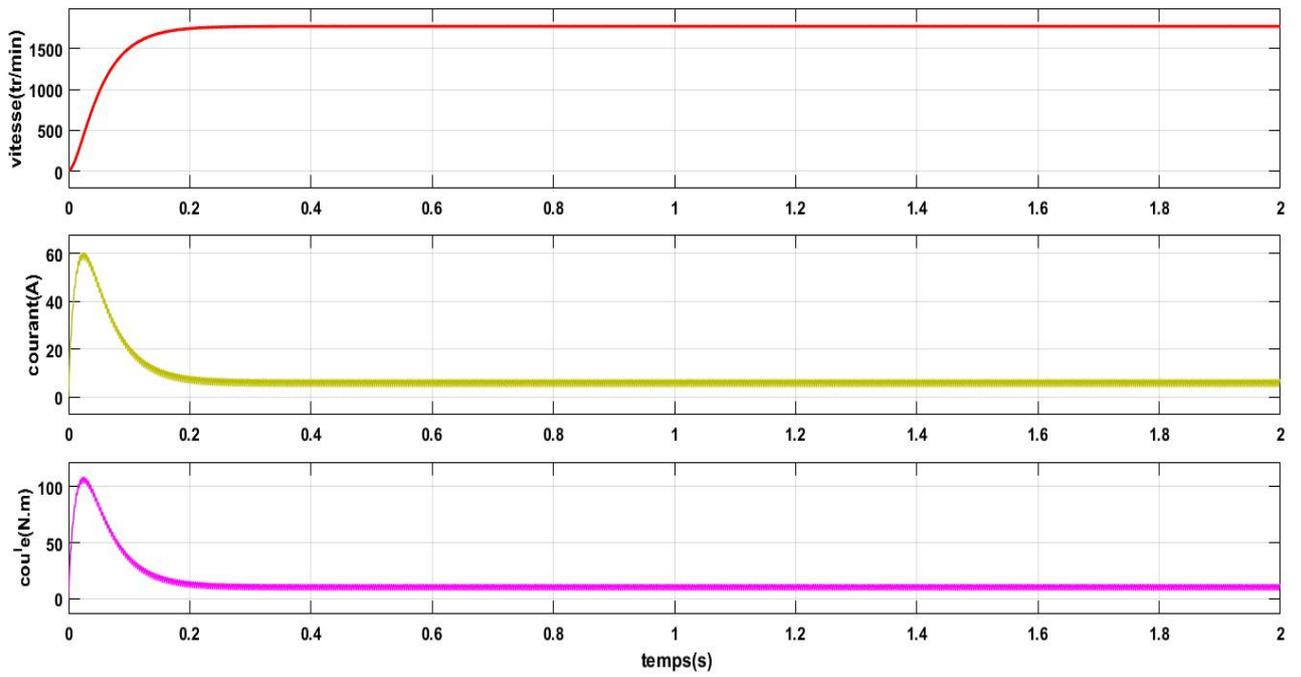
On applique une couple résistive $C_r=14\text{N.m}$ et pour angle d'amorçage $\alpha=0^\circ$:



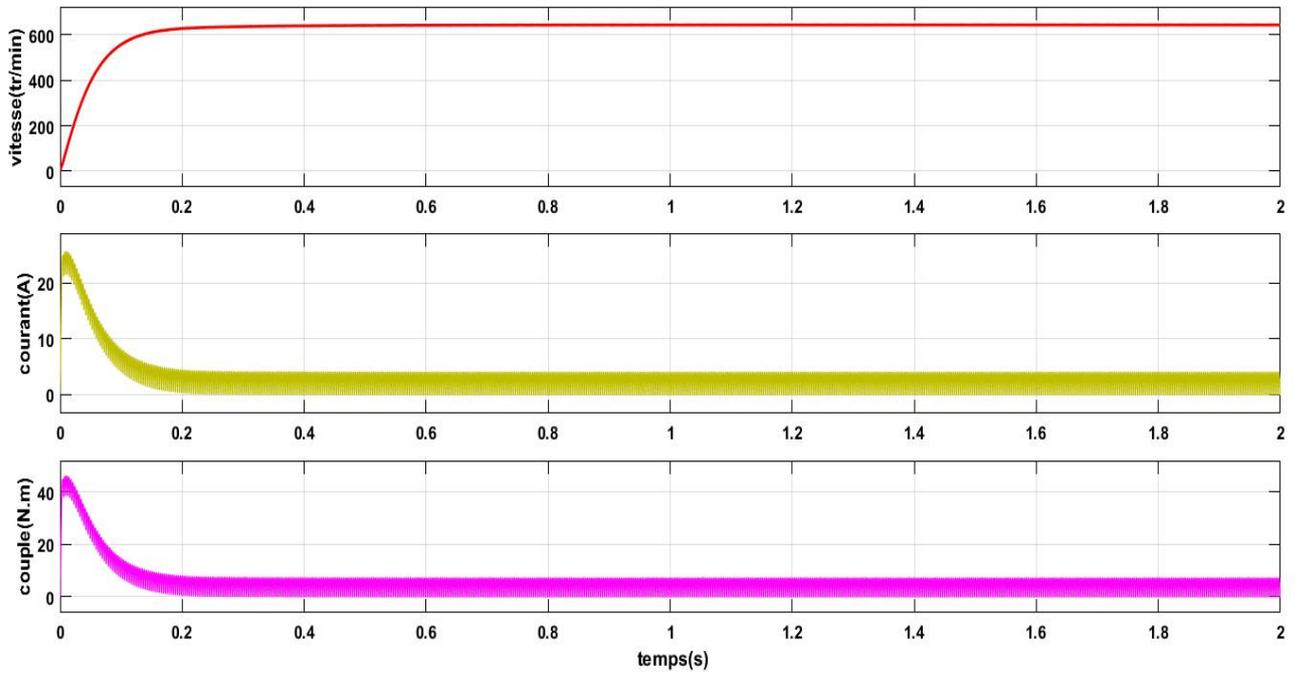
pour angle d'amorçage $\alpha=25^\circ$:



pour angle d'amorçage $\alpha=45^\circ$:

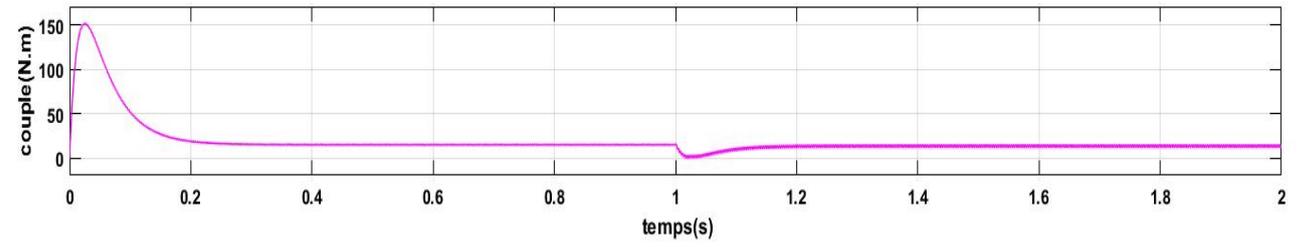
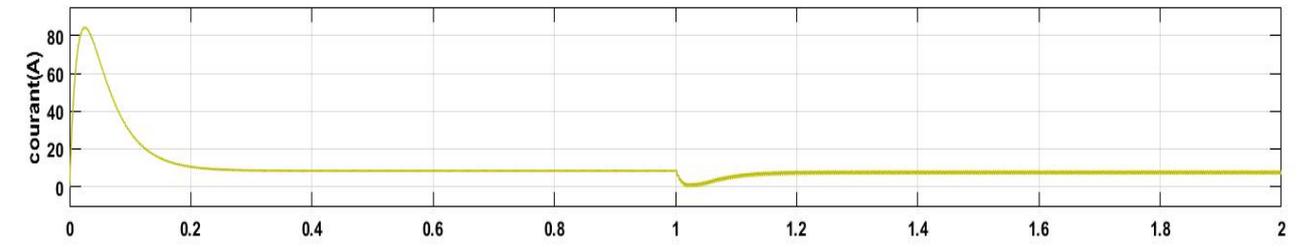
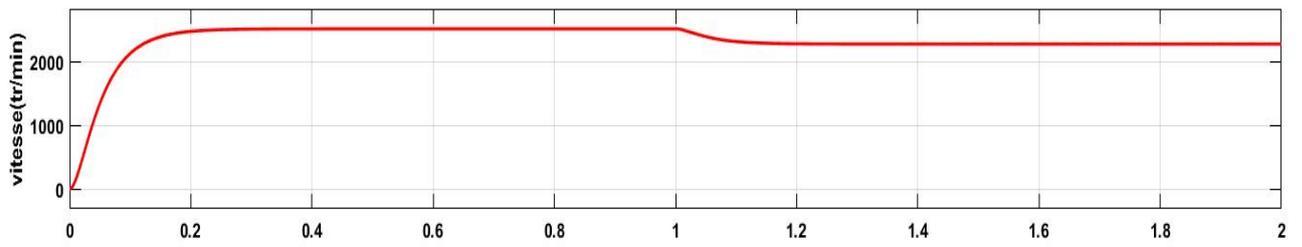
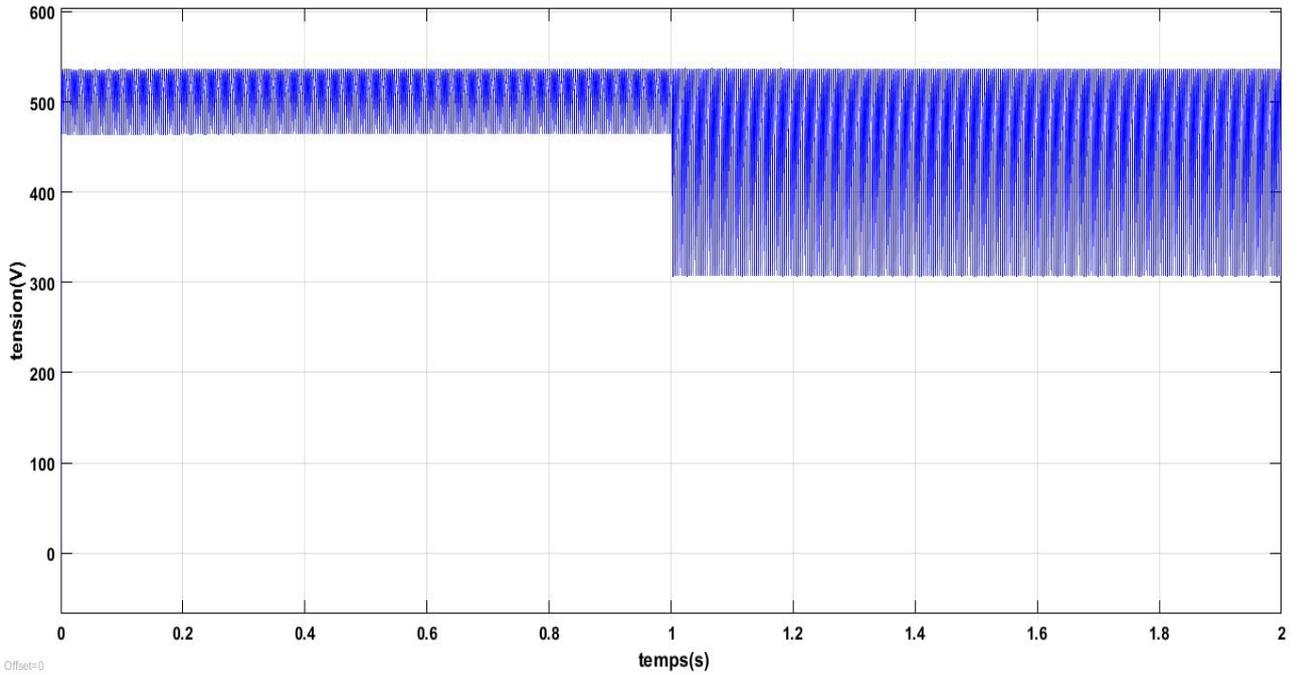


pour angle d'amorçage $\alpha=75^\circ$:

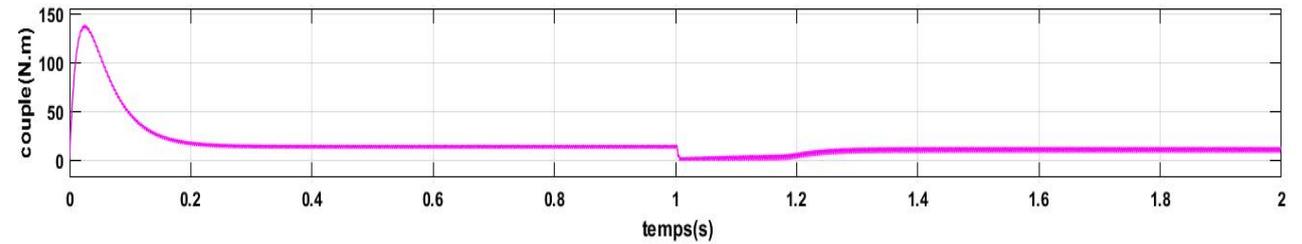
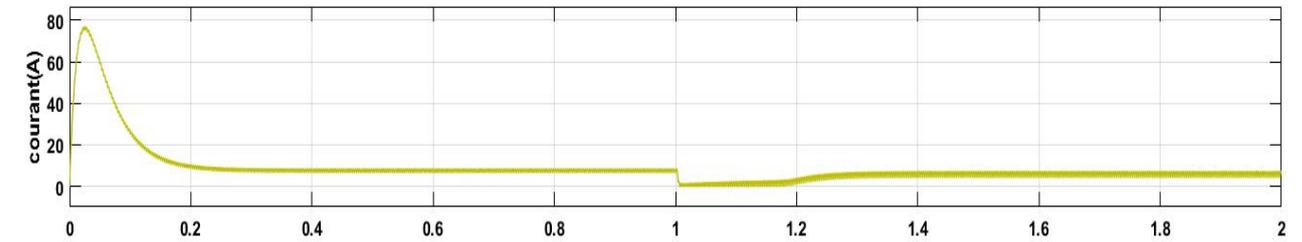
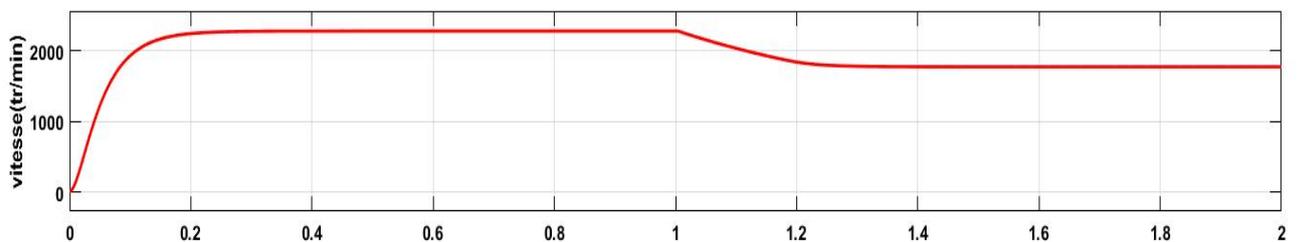
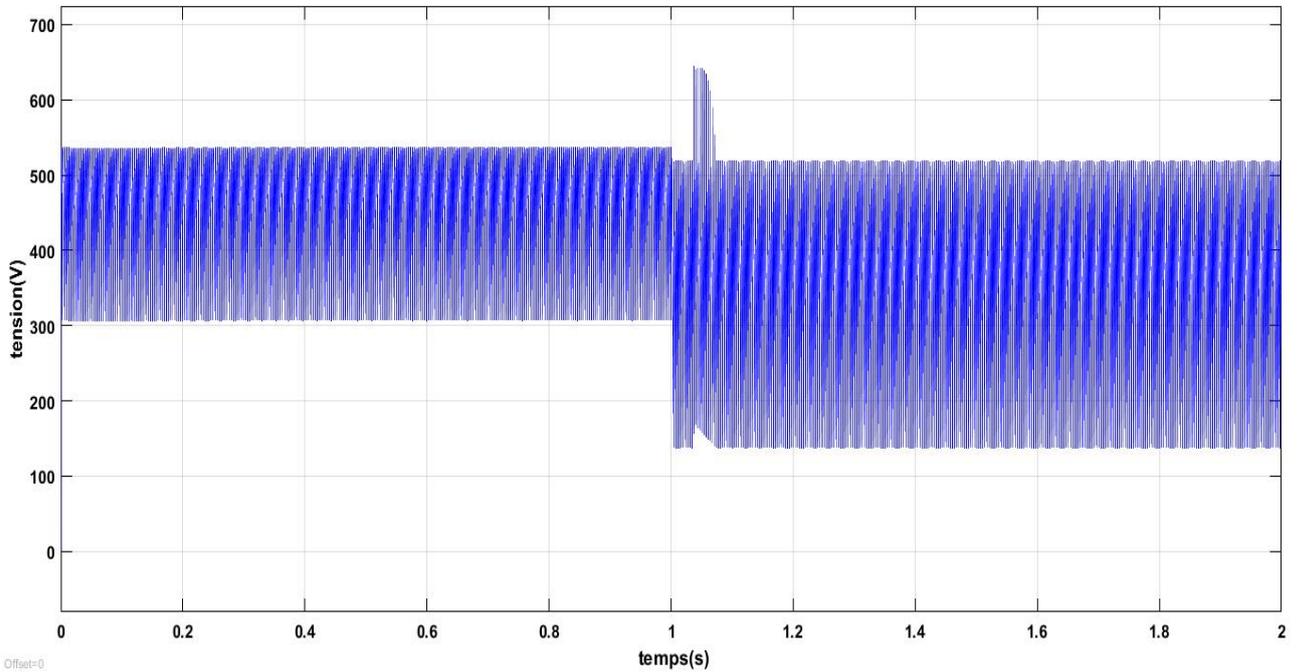


3.6.2 Essai en charge avec changement d'angle d'amorçage

à l'instant $t=0s$ nous prenons $\alpha=0^\circ$ et à l'instant $t=1s$ nous prenons $\alpha=25^\circ$:



à l'instant $t=0s$ nous prenons $\alpha=25^\circ$ et à l'instant $t=1s$ nous prenons $\alpha=45^\circ$:



Interprétation:

1. Essai à vide:

- La vitesse débute de zéro pour se stabiliser de 2700 tr/min, qui est la vitesse en régime établie. La courbe à une forme exponentielle, ce qui correspond à la présence de phénomènes transitoires dans les enroulements de la machine.
- Le moteur démarre avec un courant de démarrage très élevée de l'ordre 84A, puis le courant passe du régime transitoire au régime établi pour se stabiliser autour de 1.1A.
- Le couple de démarrage est très important de l'ordre 151N.m, puis le couple passe du régime transitoire au régime établi pour se stabiliser autour de 2N.m.
- Si on change l'angle d'amorçages alors la tension redressé est varier et à partir de là, tous les performances de la machine va changer, elle va diminuer (vitesse, couple, courant).

2. Essai en charge:

- si on applique une couple résistive nous remarquons une diminution de la vitesse, le courant et le couple à cause de cette couple résistive.

3.7 Parti pratique

Nous aimerions avoir une expérimental à propos de la génération d'impulsion dans le laboratoire utilisant un circuit intégré TCA785, tout le matérielle existe dans le laboratoire mais Malheureusement nous ne pouvons pas le faire. Ici, je vais expliquer brièvement comment ça fonctionner cette circuit.



Le TCA785 est un circuit intégré conçu spécifiquement pour contrôler la gâchette des thyristors. Ce circuit est capable de générer des signaux d'impulsion synchronisés avec le secteur alimentation, nécessitant seulement quelques composants externes tels que des résistances et des condensateurs pour le faire fonctionner correctement.

Ce circuit est répété trois fois dans chaque module triphasé et il y a un circuit de contrôle pour chaque bras de thyristors.

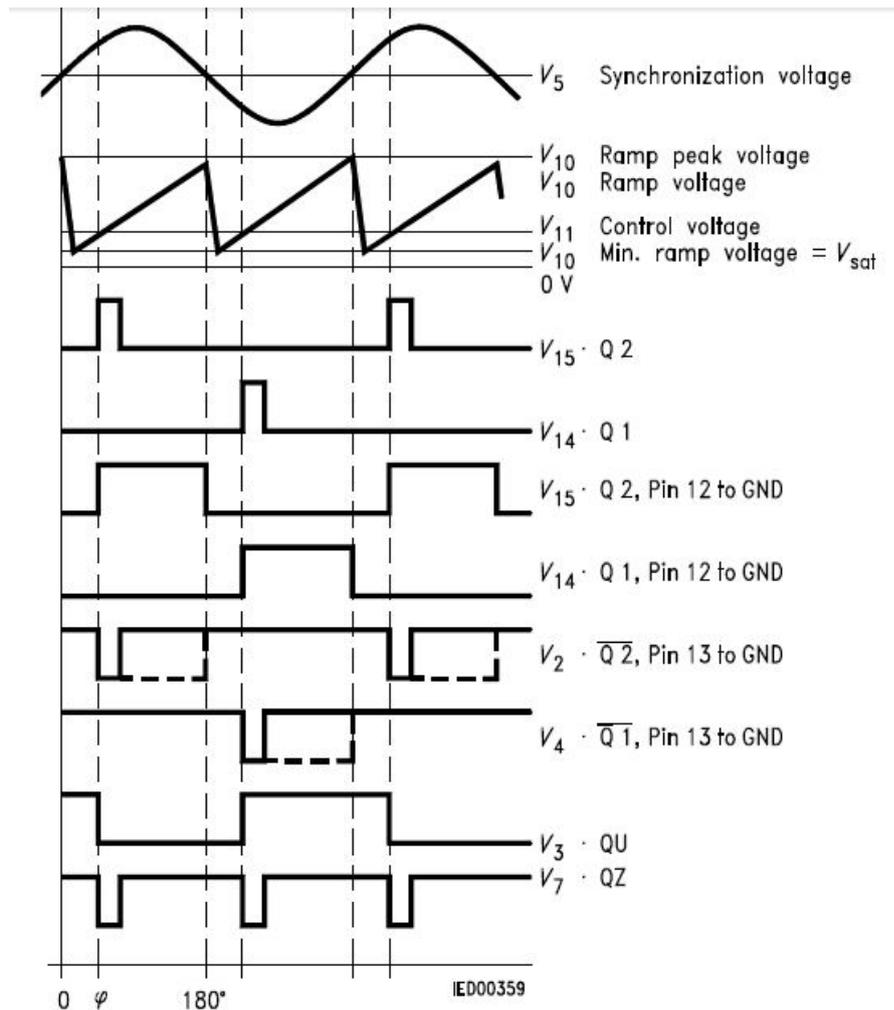


Fig 3.8: Opération de TCA785.

Les composants de ce circuit peuvent être décrits comme suit: la broche 1 est connectée au sol étant la référence au CI; la broche 5 à deux diodes 1N4148 en antiparallèle par rapport à la masse (pour limiter la tension à ce point à la tension goutte de conduction diode); la broche 6 active le circuit intégré et est connectée à l'alimentation tension par une résistance de 10 k Ω ; à la broche 9, il y a une résistance qui règle le courant de charge de la dent de scie; à la broche 10, un condensateur chargé et déchargé produisant un

signal en dents de scie; à la broche 11 entre la tension de comparaison; à la broche 12 il est un condensateur qui détermine la largeur d'impulsion; les impulsions de déclenchement quittent les broches 14 et 15 et seront traitées par le circuit de déclenchement; la broche 16 est connectée au stabilisé alimentation en tension de 12 V; les autres broches ne seront pas utilisées. Le schéma de cette le circuit est illustré à la fig. 3.9.

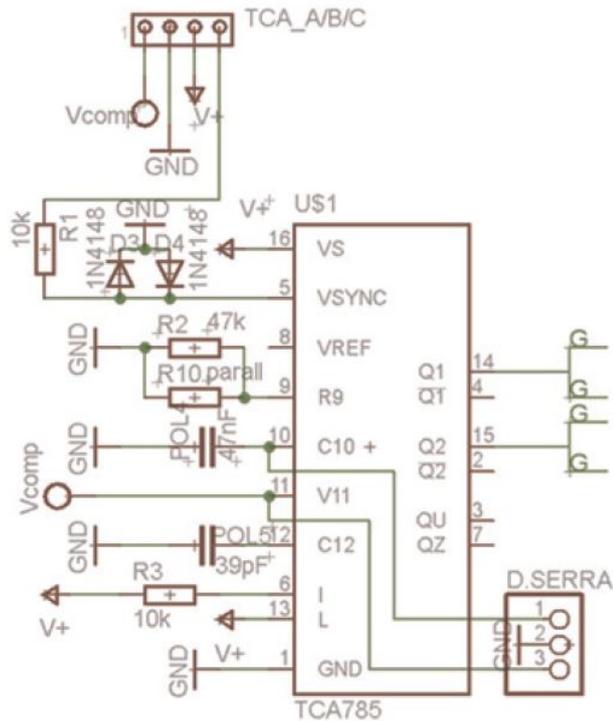


Fig 3.9: circuit schématique de TCA785.

Un fusible forme la protection de tout le circuit dans chaque transformateur de phase et d'impulsion isoler le circuit de contrôle, qui est la partie où l'étudiant aura plus de contact. Compte tenu des circuits d'alimentation et de synchronisation, un circuit 12 / + 12 V transformateur sera utilisé qui a une fonction d'isolation galvanique [19].

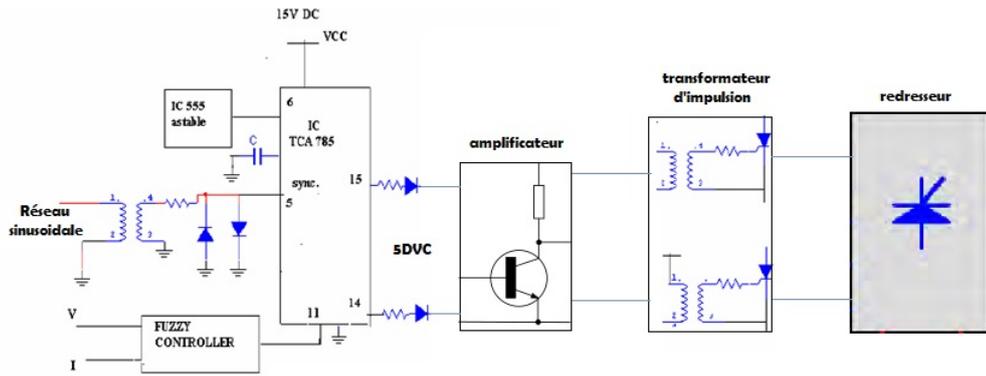


Fig 3.10: circuit générale d'un TCA785 avec le redresseur.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, on a vu la variation de la vitesse d'un moteur à courant continu en utilisant le convertisseur AC/DC (redresseur).

D'après les résultats obtenus par le logiciel MATLAB, on remarque que la vitesse du moteur à courant continu dépend sa tension d'alimentation, la variation de l'angle d'amorçage varie la tension ou borne de moteur à courant continu.

Pour ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$): le montage fonctionne en redresseur $P > 0$. Il reçoit l'énergie de la ligne triphasée.

Enfin, le résultat de cette étude est destiné particulièrement à la commande d'un redresseur triphasé en pont à thyristors en vue de varier la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu. Il peut encore servir dans plusieurs applications.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail a été consacré à une étude et simulation d'un variateur de vitesse commande un moteur à courant continu. Malgré le développement des moteurs à vitesse variable, les moteurs à courant continu sont très utilisés de nos jours, notamment dans les applications automobiles, dans des applications de faible puissance utilisant des batteries ou encore pour la traction électrique.

Les structures et les principes de fonctionnement des machines à courant continu sont relativement bien connus. Aussi, il y a peu de travaux de recherche qui sont développés sur ce type de machine depuis plusieurs années. En fait, l'essentiel de la recherche sur ces machines est mené par des industriels. Cette recherche porte plus particulièrement sur les matériaux qui sont utilisés pour réaliser les collecteurs et les balais.

Le moteur à courant continu est plus coûteux que le moteur à courant alternatif. Son entretien est plus délicat (collecteur et balais) mais par contre on peut faire varier sa vitesse de rotation d'une façon aisée (action sur la tension d'induit généralement).

Le choix de ce genre du moteur parmi les autres types est basé sur l'avantage de découplage naturel qui existe entre le couple et le flux qui est du à la séparation physique existe entre les deux circuits constituant ce moteur (l'inducteur et l'induit).

Dans ce travaille, nous avons présente l'étude du moteur à courant continu, puis la technique de la variation de vitesse, et enfin la simulation de notre model sur logiciel de

simulation MATLAB.

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé les principaux éléments de constitution de la machine à courant continu. Puis nous avons présenté les différents types du moteur à courant continu ainsi que les avantages et les inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, nous avons rappelé la variation de la vitesse d'un moteur à courant continu, en à vue les différents méthode de la variation de vitesse, Les conversions Alternatif - Continu (redresseur) commandée et non commandée, le convertisseur CC/CC (Hacheur). On à vu aussi les thyristor et sa Principe de fonctionnement avec ces différent type, et nous spécialisées notre étude sur Les redresseur commandée à six thyristor.

Dans le troisième chapitre, nous avons simulé et réalisé d'un variation de vitesse d'un moteur à courant continu en utilisant le convertisseur AC/DC (redresseur) à partir de logiciel MATLAB, Nous avons montre que La vitesse de rotation d'un moteur à courant continu dépend sa tension d'alimentation.

BIBLIOGRAPHY

- [1] 1. *MANUEL DE GÉNIE ÉLECTRIQUE*, Michel Boës; Jacques Vaillant; Daniel Verkindère, Professeurs de Physique Appliquée au lycée Jules Algoud (Valence). (pages 8, 10).
- [10 2] 10. *La commande électronique des machine*. MICHEL PINARD, EN65 fiches-outils; MICHEL Dunod paris 2013 (page 10).
- [11] 11. *COURS COMMANDE DES MACHINES ELECTRIQUES*, Préparé par: Mr. BOUDRIES Zoubir (MCB), UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA - BEJAA. (page 14).
- [12] 12. *Les Redresseurs commandés*, École National d'Ingénieurs de Sousse ENISO, *Électronique de puissance, Chapitre 3*. (page 38).
- [13 4] 13. *Conversion statique d'énergie*. Michel piou, GENIE ELECTRIQUE, Conversion AC-DC (redressement triphasé), Edition 24/11/2010 (page 31).
- [14] 14. *Support de cours D'électronique de puissance Les convertisseurs AC-DC et AC-AC*, Hidri Imed, Institut supérieur des études technologiques de Nabeul Département: Génie Electrique, Technologie À l'ISSET de Nabeul. (pages 37, 43).
- [15] 15. *Cours d'électronique de Puissance et Application avec SimPowerSystems (Matlab/Simulink)*, MAMMAR KHALED, Enseignant (Maitre de Conférence 'B') en Génie Électrique a l'Université de Bechar, 2008. (page 48).
- [16] 16. *Modélisation et Commande des Convertisseurs AC-DC*, Belambri Mohand Idir, *Mémoire de Master en Génie électrique, Promotion 2011/2012*. (page 32).

- [17] 17. *Structure et fonctionnement d'un moteur à courant continu à vitesse variable document de cour*, Académie de Nantes, Lycée Colbert De Torcy. (page 4).
- [18] 18. *MANUEL PROFESSIONNEL; ETUDE DES CIRCUITS DE L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE*, Noureddine BOUANANI, Professeur Spécialisé de la Formation et de l'Enseignement Professionnels grade 2 Chargé de l'ingénierie pédagogique; *INSTITUT DE FORMATION ET D'ENSEIGNEMENT PROFESSIONNELS SANHADRI ABDELHAFID - SIDI BEL-ABBES*. (page 34).
- [19] 19. *teaching of three-phase rectifier circuits in power electronics*, Marcelo R. S. Brito, *International Journal of Electrical Engineering Education* October 2014, Volume 51, Number 4. (page 64).
- [2] 2. *Etude et réalisation de la commande par retour d'état adaptative d'un moteur à courant continu*, Mr SADEG Mohammed Amine, *MEMOIRE DE FIN D'ETUDES MASTER*, Année Universitaire: 2015-2016. (pages iv, 7, 22).
- [3] 3. *Moteur courant continu*, C.P.I, Lycée Polyvalent Louis COUFFIGNAL, 11, route de la Fédération 67025 STRASBOURG, 2006. (page 5).
- [4] 4. *MACHINES A COURANT CONTINU*, Bapio BAYALA, *FORMATION CONTINUE - TECHNICIENS SUPERIEURS - INGENIEURS ELECTROTECHNICIENS*, Edition 2010. (page 19).
- [506] 5. *Aide-mémoire électrotechnique*. Pierre Mayé, Dunod, paris, 2006. (pages 4, 13, 24).
- [6] 6. *Rapport de projet de fin d'étude Master Génie Electrique Option: Automatique*, DAHDOUH Adel; BOUDIA Assam, *COMMANDE EN VITESSE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU PAR BACKSTEPPING*. (page 29).
- [716] 7. *Étude et simulation d'un variateur de vitesse commande un moteur à courant continu*. BEKKOUCHE Charaf Eddine; TOUGGOURTI Abdel Kader, *Mémoire MASTER ACADEMIQUE*, Année universitaire 2015/2016. (page 9).

- [814] 8. *Commande Electrique des Machines*. Youssef AGREBI ZORGANI; Hichem ZAYANI, Filière: Génie mécanique, Option: MI et CI, REPUBLIQUE TUNISIENNE, 2013/2014. (pages [23](#), [26](#)).
- [9] 9. *COMMANDE ELECTRONIQUE DES MOTEURS: INSTALLATION, REPARATION, SPECIALITE: ELECTROMECHANIQUE DE SYSTEMES AUTOMATISES, NIVEAU: TECHNICIEN SPECIALISE, élaboré par: FAURESCU FLORIN ISTA. TAZA. CN*. (page [22](#)).