

République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de  
l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université BADJI

Mokhtar Faculté

de Technologie Département d'É

lectrotechnique

## **Mémoire de fin d'études**

**Envue de l'obtention du diplôme de licence**

Sujet

**MOTEUR A COURANT CONTINU  
AVEC CONVERTISSEUR BIDIRECTIONNEL**

Spécialité Electrotechnique

Présenté par:

*-BADIS SEIF EDDINE*

*-AYACHI MED FATHI*

Encadré par

*Mme. SOLTANI*

*EXAMINATEUR .*

*Dr Ourici*

*Année Universitaire 2020/ 2021*

# Sommaire

---

## CHAPITRE1:MOTEURACOURANTCONTINU

1.Introduction	01
2. Constitutiondumoteur	01
2.1. Le principephysique fondamental	02
2.2 Statordumoteur à courant continu	02
2.3Vued'ensemble (d'après LEROY SOMMER )	03
3. EtudequantitativedumoteuràC.C	04
3.1Expression delaforceélectromotriceinduite	04
3.2 Expression du coupleutile CU	05
3.3Expression du coupleélectromagnétiqueC <sub>em</sub>	05
3.4Propriétés	05
3.5Bilandela puissanceet lerendement du moteur	06
4. Démarrage d'unmoteur	06
4.1Démarragerapide	06
5. Lescaractéristiques	08
5.1Caractéristiques électromécaniques	08
5.2Caractéristique mécanique C=f(w)	09
5.3Caractéristique enchargeU=f(I)	09
6. Procédésdesréglagesdelavitesse	10
7.Réglage rhéostatiquedelatensiond'induitactionsurR	10
7.1Réglageparvariation detension del'induit	12
7.2 Réglageparle flux	13
8.Zonederéglage	14

---

## CHAPITRE 2: LES CONVERTISSEURS STATIQUES

1. Généralités	16
2. Les convertisseurs statiques	16
2.1 Les variateurs réversibles	16
2.2 Montage réversible tête-bêche	17
3. Principe de fonctionnement du convertisseur bidirectionnel	18
4. Les avantages et les inconvénients du système statique	21
4.1 Les avantages	21
4.2 Les inconvénients	21
5. Etude de fonctionnement du pont complètement commandé	22
5.1 Montage en pont triphasé commandé	22
5.2 Séquence de fonctionnement :	23

## CHAPITRE 3: CALCUL STATIQUE

1. Schéma général de l'installation	25
2. Calcul des paramètres du transformateur	26
2.1. Calcul de tension secondaire	26
2.2. L'essai de marche à vide	26
2.3. L'essai en circuit-court	27
3. Choix et calcul de la self de lissage	28
3.1. Calcul de l'inductance de lissage	29
3.2. Calcul de l'inductance d'induit du moteur	29
3.3. Calcul de l'inductance du transformateur du réseau d'alimentation	29
3.4. Calcul de l'inductance de lissage	29
4. Calcul des paramètres du moteur:	30

4.1. Calcul des constantes de temps du moteur	30
<b>5. Calcul statique du redresseur</b>	<b>31</b>
5.1. Calcul de la constante d'amplification du convertisseur	31
5.2. Calcul du coefficient du convertisseur statique du thyristor	31
5.3. Calcul et choix des convertisseurs	32
5.4. Choix des thyristors	33
<b>6. Circuit RC</b>	<b>34</b>
<b>7. Protection PL Moteur</b>	<b>35</b>
7.1. Protection contre le manque de courant d'excitation du Moteur	35
7.2. Protection contre la mise à la terre de circuit d'induit	36
7.3. Protection du circuit d'excitation	36

---

## **CHAPITRE 4: CALCUL DYNAMIQUE**

---

<b>1. Généralités</b>	<b>37</b>
<b>2. Les capteurs</b>	<b>37</b>
2.1 Capteur de vitesse	37
2.2 Fonction de transfert de capteur de vitesse	38
<b>3. Etude du système en boucle ouverte</b>	<b>39</b>
3.1 Fonction de transfert du moteur	39
3.2 Fonction de transfert du convertisseur	40
<b>4. Etude de la boucle fermée de la vitesse</b>	<b>41</b>
4.1. Synthèse de la boucle de vitesse	42
<b>5. Détermination du type de régulateur</b>	<b>42</b>
5.1 Paramètre de la chaîne de contre réaction	43
5.2 Paramètre d'entrée	44
<b>6. Fonction de transfert de la boucle fermée de vitesse</b>	<b>44</b>
6.1 Réponse industrielle	45

---

6.2 Le dépassement:D	45
6.3Le tempsde stabilisation (temps demontée)	45
	47
7. Vérificationdelastabilité	
7.1 Définition etconditiondelastabilitéd'un système	47
7.1.1 Critère Algébrique	47
7.1.2 Critère deHurwitz	47

---

## **Remerciements**

*Nous adressons nos remerciements à tous nos professeurs qui nous ont fait aimer cette branche et perfectionner nos connaissances servant pour nos études à venir plus approfondies.*

*A notre professeur et encadrante, Madame SOLTANI, nous exprimons reconnaissance pour l'enseignement particulièrement pédagogique et pour les conseils et recommandations prodigués pour la tenue de ce mémoire.*

*Enfin à nos parents nous pensons avoir tenu promesse en récompense de leur confiance et leur soutien inestimable. Une réussite de fin d'étude bien méritée.*

## **1. Introduction**

Le présent document s'inscrit dans le cadre de l'enseignement de la motorisation en BTS Conception de Produits Industriels (C.P.I.). Le référentiel de formation stipule de traiter du choix des motorisations à un niveau d'expression pour les connaissances et à un niveau de maîtrise d'outil pour le choix proprement dit. Le niveau d'expression est relatif à l'acquisition de moyens d'expression et de communication, c'est à dire la capacité à utiliser les termes composants la discipline, dans ce cas: le moteur courant continu. Cette indication justifie en partie la présentation à partir de la constitution technologique, le but étant d'acquérir le vocabulaire spécifique.

Le niveau de maîtrise d'outil est relatif à la maîtrise de procédés et d'outils d'étude, c'est à dire la capacité à utiliser, à manipuler des règles, des principes, en vue d'un résultat à atteindre. Cette indication justifie l'apport succinct des relations et des lois qui régissent le moteur pour entrer dans la compréhension des spécifications techniques fournies par les constructeurs. Le but de cette partie du cours est d'élaborer une représentation mentale aussi claire et fidèle que possible du moteur à courant continu.

## **2. Constitution du moteur:**

### **2.1. Le principe physique fondamental**

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 le stator, aussi appelé inducteur, crée un champ magnétique  $B_s$ . Le rotor, aussi appelé induit, est alimenté par un courant continu. Les conducteurs du rotor traversés par le courant sont immergés dans le champ  $B_s$ , or le physicien Laplace découvrit que le conducteur est soumis à une force  $F = B_s \wedge I$  ( $\wedge$  = produit vectoriel entre les deux vecteurs). C'est cette force qui va faire tourner le rotor et créer le couple moteur.

La constitution technologique du moteur matérialise ce principe de fonctionnement.

## 2.2. Stator du moteur courant continu

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.

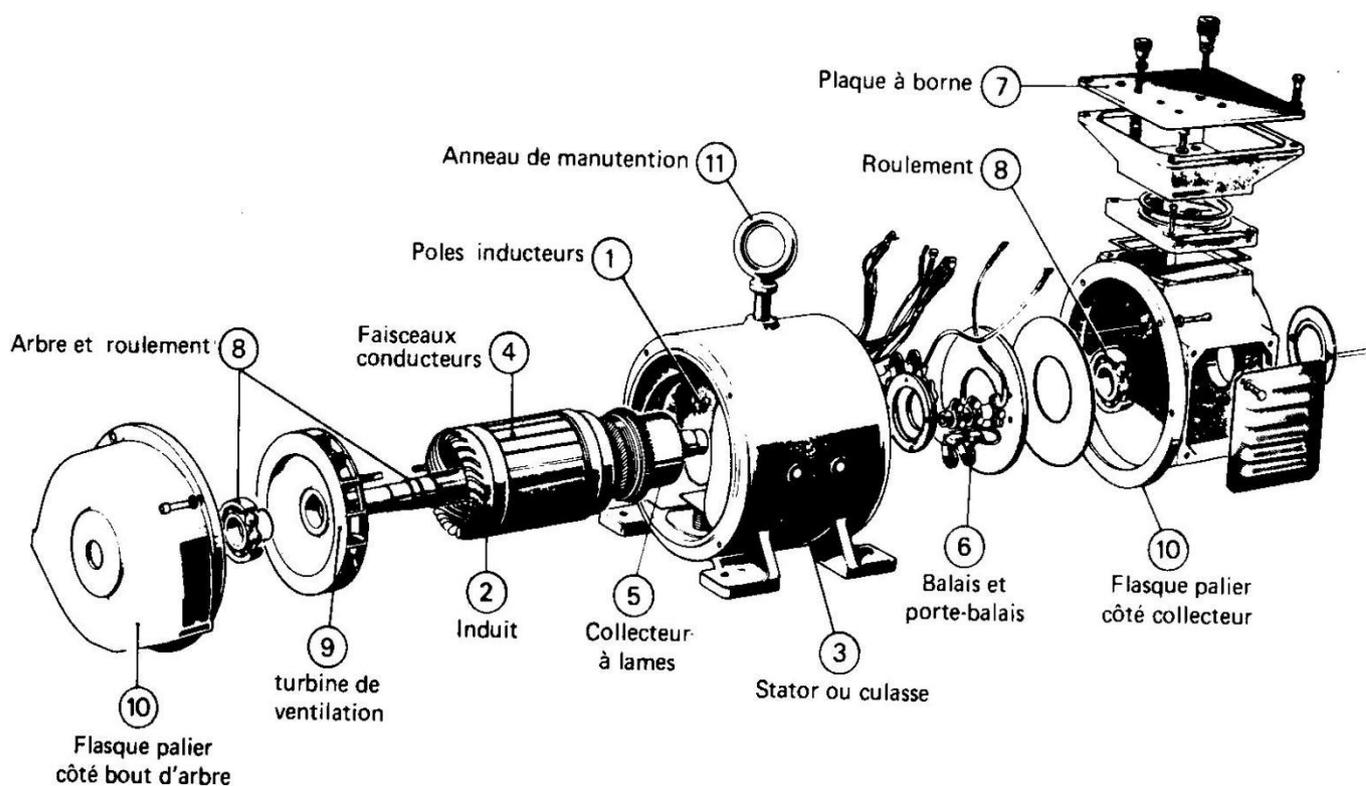
Le circuit magnétique du stator crée le champ magnétique appelé «champ inducteur» ( $B_s$ ).

L'inducteur magnétique du moteur en créant un flux magnétique ( $\Phi$ ) 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.

## 2.3 Vue d'ensemble (d'après LEROY-SOMMER):



**Figure1**

### 3. Etude quantitative du moteur à C.C.:

#### 3.1. Expression de la force électromotrice induite:

Au cours d'un tour de durée  $\Delta t = 1/n$ , un conducteur actif couple  $P$  fois le flux  $+\Phi$  et  $P$  fois le flux  $-\Phi$ .

La variation totale du flux vue par un conducteur est :

$$\Delta\varphi = +P\Phi - (-P\Phi) = 2P\Phi$$

Ainsi, chaque conducteur est le siège d'un f.ém.

$$e = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = 2P \cdot n \cdot \Phi$$

Les conducteurs sont organisés 2 fois en parallèle de  $N/2$  conducteurs en série, déduit l'expression de la f.ém à vide  $E$  totale recueillie:

$$E = N/2 \cdot a \cdot e$$

Soit :

$$E = \frac{P}{a} \cdot N \cdot n \cdot \Phi$$

$$E = \frac{1}{2P} \cdot \frac{P}{a} \cdot N \cdot \Phi \cdot \Omega$$

Avec :  $\Omega = \omega$

On désigne par:

**2P**: le nombre de pôles.

**2a**: le nombre de voix d'enroulement.

**$\Phi$**  : le flux moyen sous un pôle.

**N** : le nombre de conducteurs de l'induit.

**N** : la fréquence de rotation de l'induit (tours/s).

**$\Omega$** : la vitesse angulaire de l'induit (rad/s).

### 3.2. Expression du couple utile $C_U$ :

En réalité, le couple utile  $C_U$  (couple moteur ;  $C_m$ ) dont on dispose sur l'arbre du moteur est légèrement inférieur au couple électromagnétique  $C_{em}$ .

$$C_{em} : C_U = C_{em} - C_p$$

Le couple de perte  $C_p$  est dû :

- Aux pertes ferromagnétiques dans le rotor « hystérésis et courant de Foucault »
- Aux pertes mécaniques frottements aux paliers et aux contacts bâlois-collecteur ventilation.

Il se déduit d'un essai à vide.

$$C_p = K \cdot \Phi \cdot I_0 \quad \ll C_p = C_r = 0 \Rightarrow C_p = C_{em} \gg$$

Comme sa valeur est très faible devant  $C_{em}$  on peut le négliger, ce qui conduit à :

$$C_U = K \cdot \Phi \cdot (I - I_0) = K \cdot \Phi \cdot I$$

### 3.3. Expression du couple électromagnétique $C_{em}$ :

La puissance électromagnétique  $P_{em}$  donne naissance au couple électromagnétique  $C_{em}$  soit :

$$P_{em} = E \cdot I = C_{em} \cdot \Omega$$

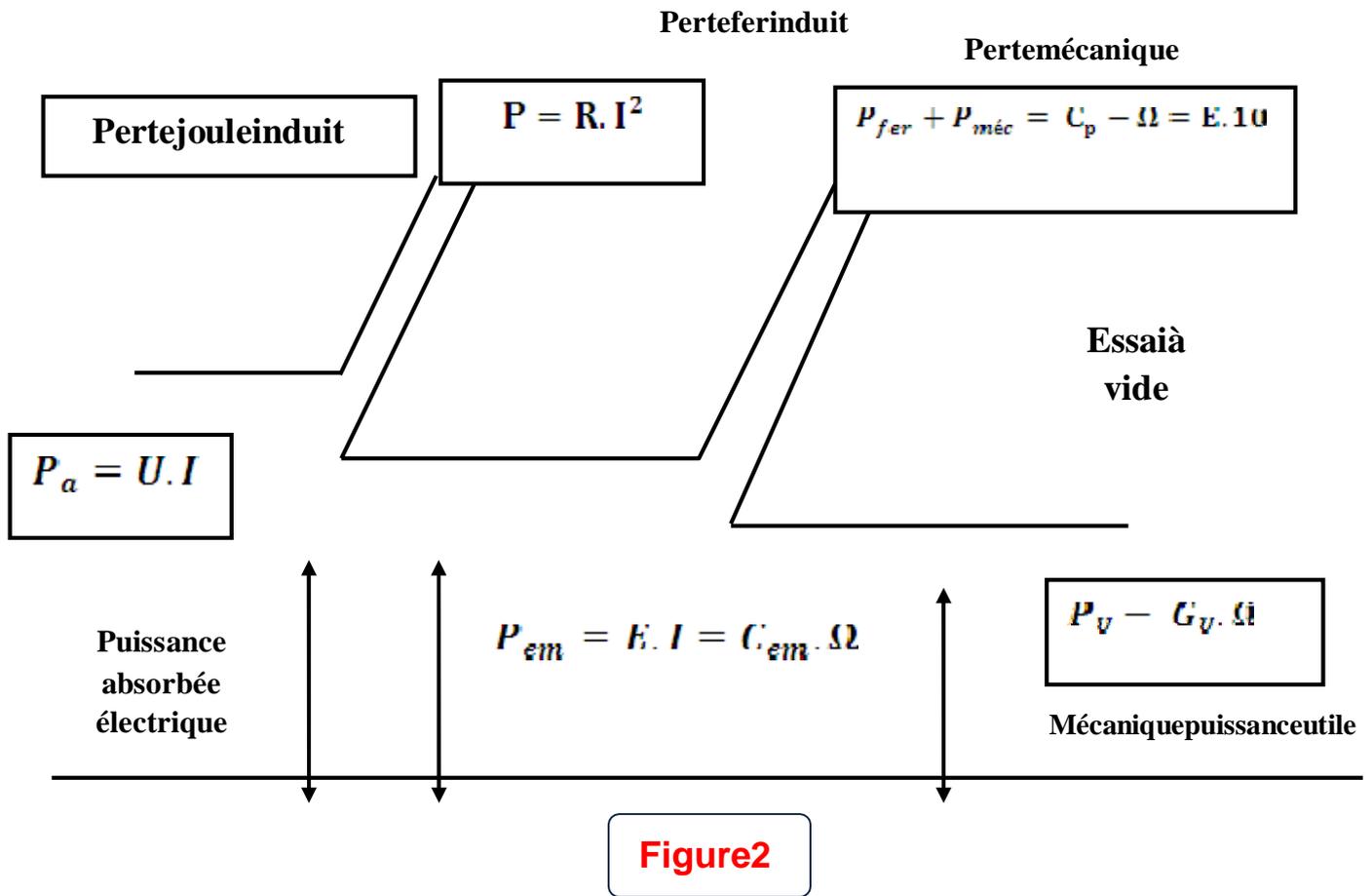
$$C_{em} = \left( \frac{1}{2P} \cdot \frac{P}{a} \cdot N \right) \cdot \Phi \cdot I = K \cdot \Phi \cdot I$$

### 3.4. Propriétés :

Pour un flux  $\Phi$

constant, le courant appelé par le moteur est proportionnel au couple mécanique demandé par la charge.

**3.5. Bilan de la puissance et le rendement du moteur :**



Le rendement est défini par:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a + (P_{ex})}$$

$P_{ex}$ : puissance absorbée par l'inducteur « sauf aimant permanent  $P_{ex} = U_e I_e$  »

**4. Démarrage d'un moteur:**

**4.1. Démarrer rapide :**

Pour démarrer rapidement le groupe moteur entraîné et l'amener à la vitesse  $\Omega_1$ :

1. Il faut en permanence que  $I = I_{max}$

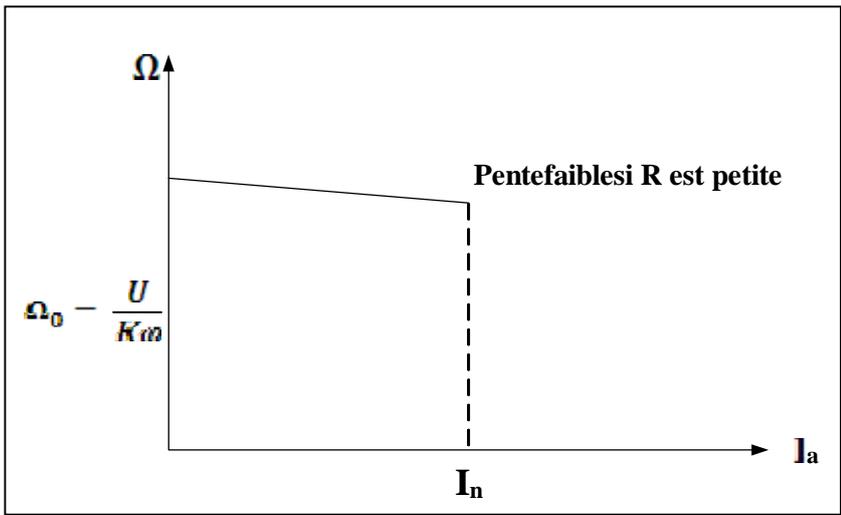


**5. Les caractéristiques:**

**5.1. Caractéristiques électromécaniques:**

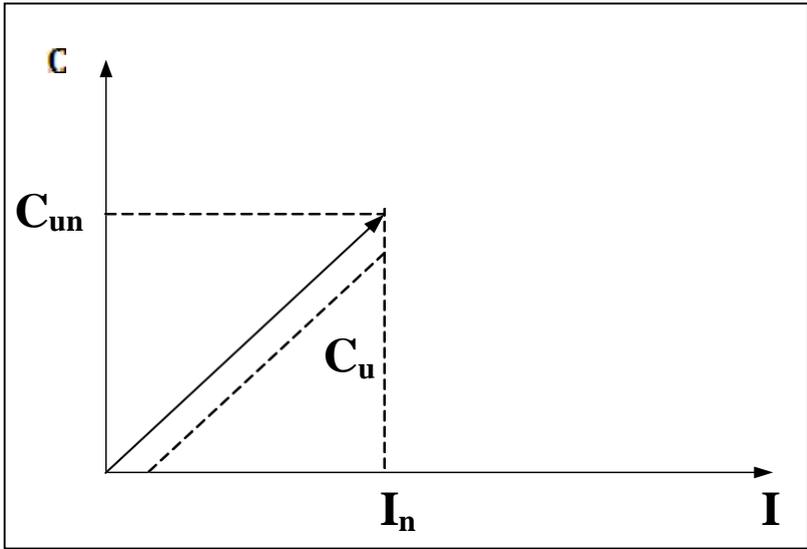
$$\Omega = f(I_a) \quad \text{Et} \quad C = f(I_a)$$

$$E = U - R_a \cdot I_a = K \cdot \Phi \cdot \omega = \frac{U - R_a I_a}{K \Phi}$$



$U = C^{ste}$   
 $I_n$ : Courant nominale

**Figure4**



$C = C_{em}$   
 $I_n$ : courant minimal.

$$C = K \Phi I_a$$

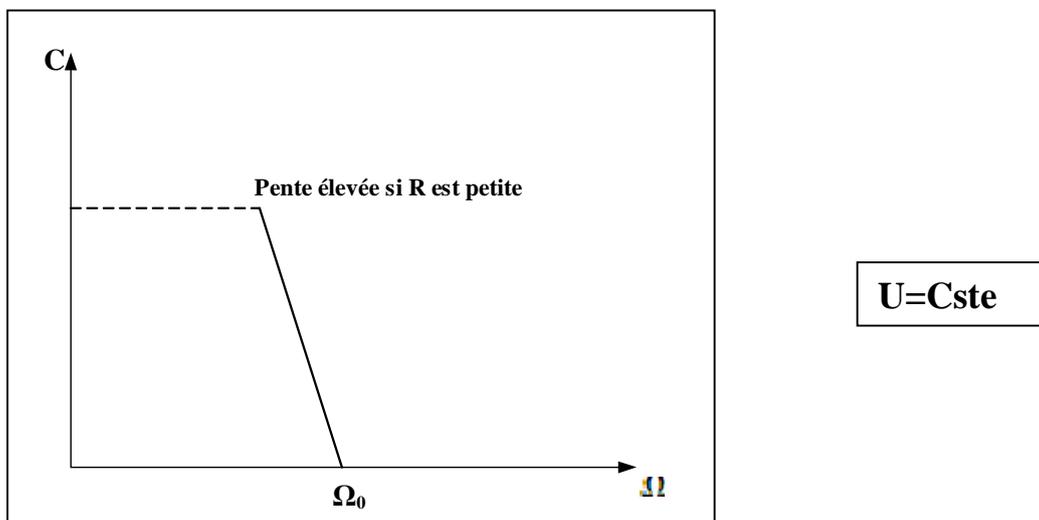
$$C_u = K \Phi - (I - I_0) I$$

**Figure5**

$C_{UM}$ : couple utilenominale

**5.2. Caractéristiques mécaniques  $C=f(\omega)$ :**

C'est la principale caractéristique de fonctionnement d'un moteur à courant continu.

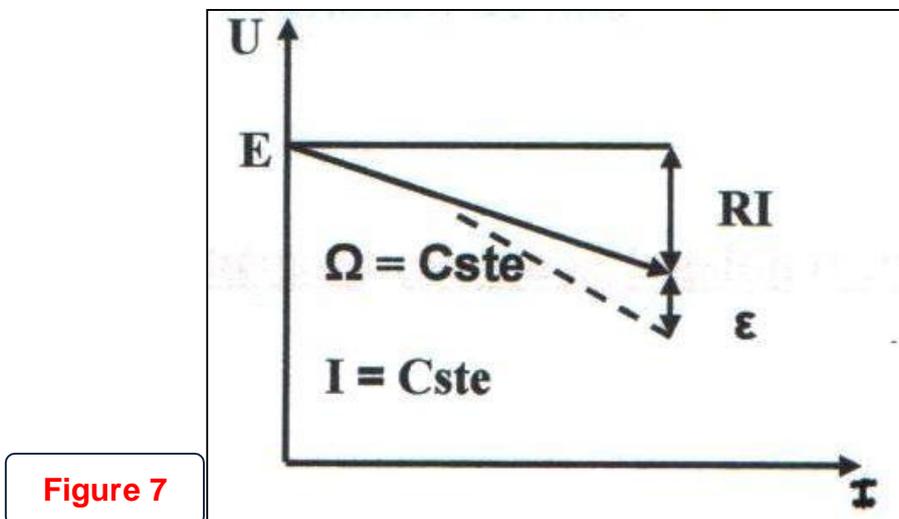


**Figure 6**

$$\Omega = \frac{U - RI}{K\Phi} = U - \frac{R_c}{K\Phi} = \frac{U}{K\Phi} - \frac{R C}{K\Phi^2}$$

à  $c=0$   $C_{em}$  à  $\Omega = \frac{U}{K\Phi}$

**5.3. Caractéristique en charge  $U=f(I)$  :**



- La résistance du bobinage provoque une légère chute de tension  $U = E - RI$ .
- Si on tenait compte de la réaction de l'induit on aurait une chute de tension supplémentaire  $\varepsilon$ .

### 6. Procédés des réglages de la vitesse:

En posant  $E = K \cdot \varphi \cdot \Omega$  et  $C_m = K \cdot \varphi \cdot I$  on démontre que:

$$C_m = \frac{K\varphi}{R} - \frac{(K\varphi)^2 \cdot \Omega}{R} \qquad \omega = \frac{U}{K\Phi} - \frac{R_a - I_a}{K\varphi}$$

- $\omega$ : Vitesse héostatique.
- $U$ : tension d'induit.
- $K\varphi$ : le flux magnétique.
- $R_a$ : résistance d'induit.

Pour une machine à courant continu à excitation indépendante, dans ces conditions, on constate qu'il y a 03 paramètres sur lesquels on peut agir:

1. Réglage héostatique.
2. Réglage par variation de tension d'induit.
3. Réglage par variation de flux.

### 7. Réglage héostatique de la tension d'induction sur $R$ :

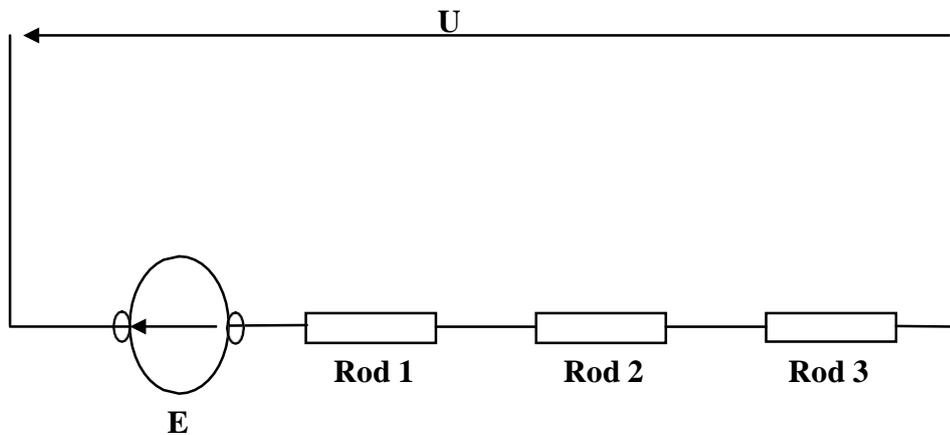
Comme le flux ( $\Phi$ ) est constant car on a toujours intérêt à faire fonctionner le moteur avec le flux maximal qu'il peut délivrer, on a:

$$\omega = (U_a - R_a I_a) / (K$$

$$\Phi) C_n \omega = K \Phi I$$

Ce type de réglage a l'avantage d'être simple à réaliser mais, il présente de graves inconvénients aussi bien sur le plan technique qu'économique ; il faut noter que pour un bon réglage de vitesse on doit provoquer le déplacement des caractéristiques parallèlement à la caractéristique d'origine.

En conséquence ce réglage n'est utilisé que dans la pratique pour que le fonctionnemenen régime permanent, toute fois, il demeure intéressant pour les régimes transitoires comme le démarrage et le freinage.



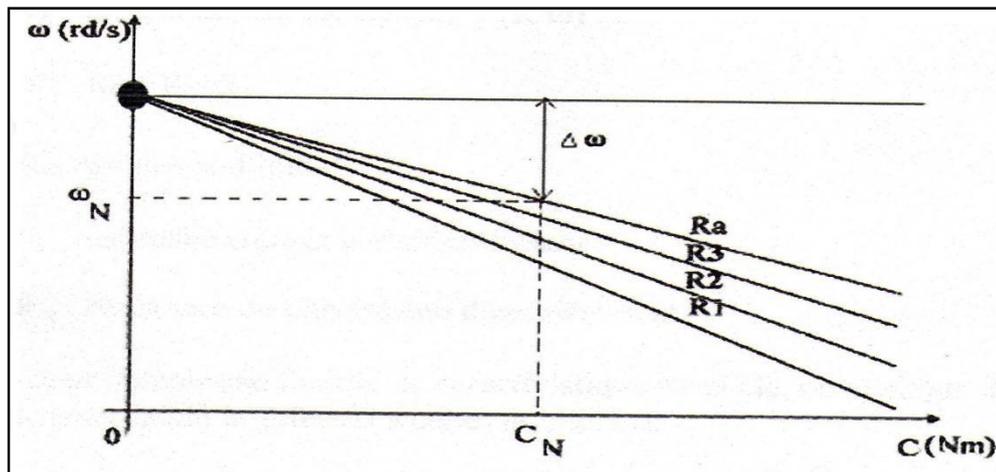
**Figure 8**

$$W = \left( \frac{U_a}{K\Phi} \right) - I_a \frac{R_a + R_r}{K\Phi} \quad \text{Pour } I=0, C=0$$

$$\Delta W = U_a / K\Phi = 0.$$

Pour  $W=0$

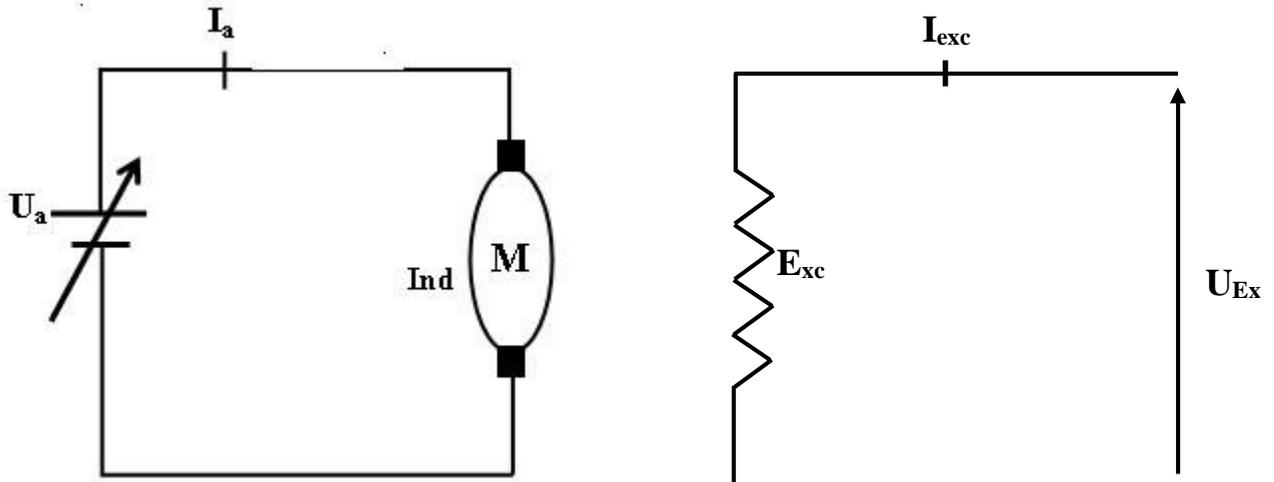
$$C = (U_a K\Phi) / (R_a + R_r) \quad R_{ad3} > R_{ad2} > R$$



**Figure 9: Caractéristique de réglage par résistance**

### 7.1. Réglage par variation de tension de l'induit:

Ce mode de réglage est excellent du point de vue technique et de point de vue économique. Car aucune énergie n'est gaspillée et on a la même rigidité comme il est désigné sur la figure suivante:



**Figure 10**

$$W = (U_d 0 K \cos \alpha) / (K \Phi) - (R_{\Sigma}) / (K \Phi)$$

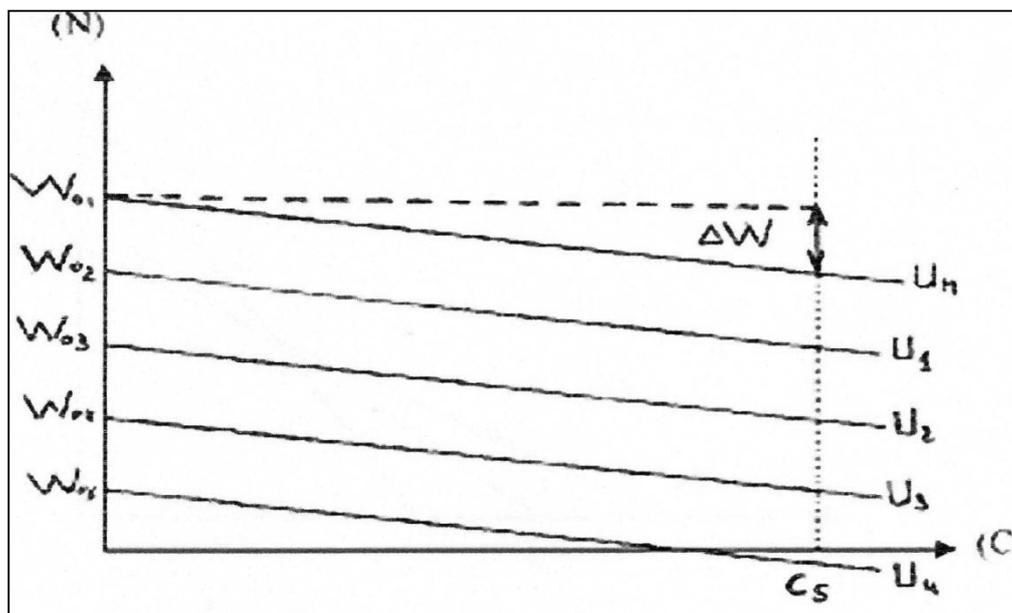
$$R_{\Sigma} = R_a + R_b + R_{\pi}$$

$R_a$ : Résistance de l'induit.

$R_b$ : résistance de contact des balais collecteurs.

$R_{\pi}$ : résistance du phénomène d'empatement.

Pour obtenir une famille de caractéristique parallèle, on applique de tension faible inférieure à celle nominales.



**Figure 11**

La caractéristique mécanique est parallèle par rapport à la Caractéristique naturelle et possédant la même rigidité

- L'écart de vitesse  $\Delta w$  est même pour toutes les tensions d'alimentation.
- Ce réglage permet une souplesse dans la variation de la vitesse, ce mode de réglage est utilisé pour faire varier la vitesse de  $w=0$  à  $w_n$ .

### 7.2. Réglage par le flux:

Il est important que le moteur doit absorber au démarrage un courant important pour lui permettre de porter à la vitesse nominale, toutes les masses qui sont initialement au repos, dans ces conditions en vertu de la relation  $C = K\Phi I$ .

En suite dès que la vitesse nominale est atteinte, il sera possible de réduire le flux toutefois il y a lieu de faire les remarques suivantes :

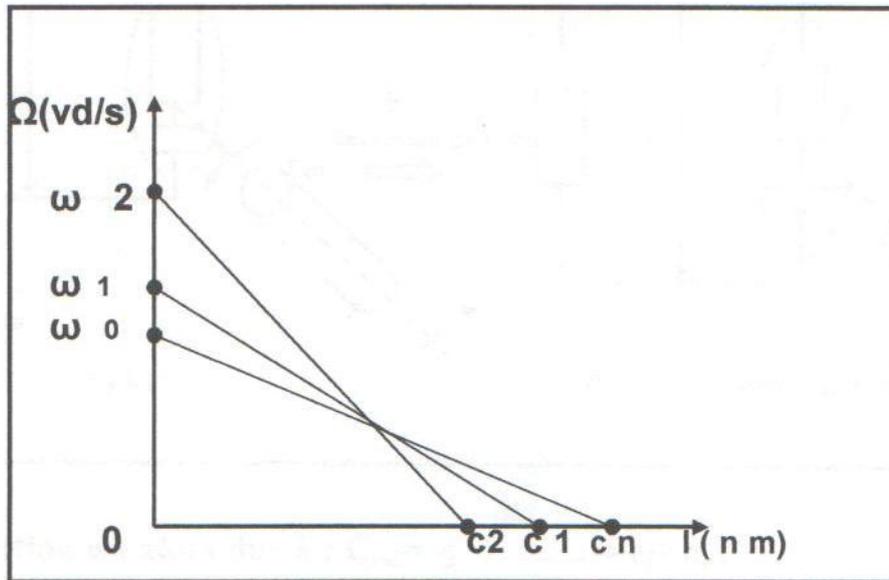
1. Avec ce procédé, on ne peut qu'augmenter la vitesse du moteur par rapport à sa vitesse nominale.

2. Si le couple résistant est constant, l'intensité augmentera quand on diminuera le flux et le moteur risque de chauffer, comme la tension est constante, l'intensité  $I$  demeure constante.

Et ce réglage donne l'expression suivante:

$$\Omega = \frac{U}{K\phi}$$

$$\Omega = \omega$$



**Figure 12: Caractéristique de réglage par flux.**

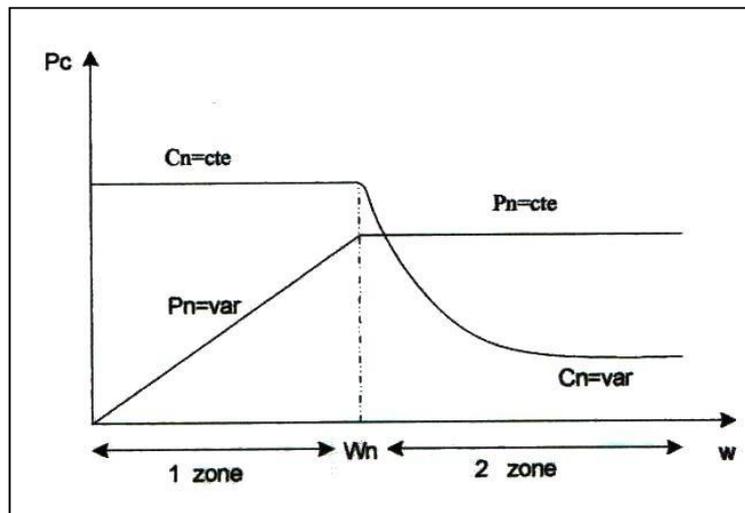
### 8. Zone de réglage:

Comme on a déjà indiqué que le réglage est effectué soit par variation de la tension aux bornes de l'induit, soit par affaiblissement du flux.

Le premier peut être obtenu lorsque le couple développé sur l'arbre du moteur est constant et la puissance variable. La variation de la tension aux bornes de l'induit, assurée par le convertisseur statique (valeur moyenne) permet la variation de la vitesse  $\omega$  de zéro à  $\omega_n$ , dans ces conditions on dit qu'on travaille dans la première zone de réglage.

La variation de la vitesse  $\omega_n$  à  $\omega_{max}$  par affaiblissement du flux où nous avons  $U = \text{constant}$  ce qui implique que  $P = \text{constante}$  et le couple variable d'où la vitesse inversement proportionnelle au couple. C'est la deuxième zone de réglage.

La figure montre les caractéristiques des deux zones de réglage d'un moteur à courant continu à excitation indépendante (séparée).



**Figure 13:** Zone de réglage d'un moteur à courant continu

**9. Les deux zones de réglage:**

1 zone	-Réglage rhéostatique - Réglage par tension d'induit	Variation $W < W_n$	$C = k \cdot \phi \cdot I = cte$ $P = C \cdot W = Var$
2 zone	-Réglage par flux	$W > W_n$	$C = K \cdot \Phi \cdot I = \left( \frac{U - R_{ind} I}{W} \right) - I_n$
			$C = (U \cdot I_n - R_{in}^2 / W) = A / W$
			$P = C \cdot W = A = cte$

## **1. Généralités:**

Le réglage de la vitesse des moteurs à courant continu par la variation de la tension d'induit a été réalisé pendant plusieurs années à l'aide des groupes tournants G-m (Groupe Léonard), mais avec l'évolution des semi-conducteurs, l'électronique de puissance met à la disposition de l'industrie des convertisseurs statiques qui ont des sources de tension continue variable.

## **2. Les convertisseurs statiques:**

Les différents types de convertisseurs statiques sont les suivants :

- Convertisseur alternatif-alternatif, exemple (Les gradateurs)
- Convertisseur alternatif-continu, exemple (Les redresseurs)
- Convertisseur Continu-continu, exemple (Les hacheurs)
- Convertisseur Continu-alternatif, exemple (Les onduleurs)

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs à composante électronique qui sont capables de faire varier la tension soit par les variateurs non réversibles ou par les variateurs réversibles.

### **2.1. Les variateurs réversibles:**

Par variateur de vitesse réversible on entend un entraînement permettant une inversion rapide du couple développée par la machine, autrement dit un passage rapide du quadrant 1 au quadrant 2 ou du quadrant 3 au quadrant 4.

La qualité d'un variateur réversible s'évalue par la rapidité du passage du plein couple moteur au plein couple de freinage.

Si la machine doit tourner dans les deux sens mais si l'inversion rapide du couple n'est pas nécessaire, un simple variateur non réversible suffit.

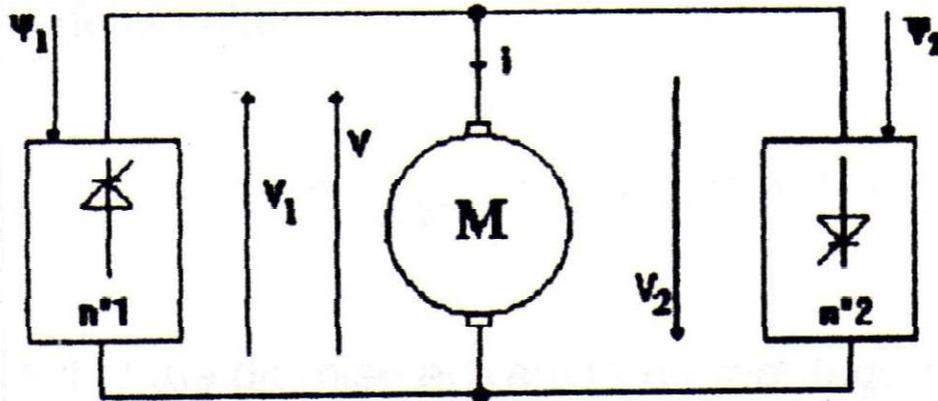
Un montage est possible pour les variateurs, à l'exemple du montage réversible tête-bêche.

**2.2. Montageréversible tête-bêche:**

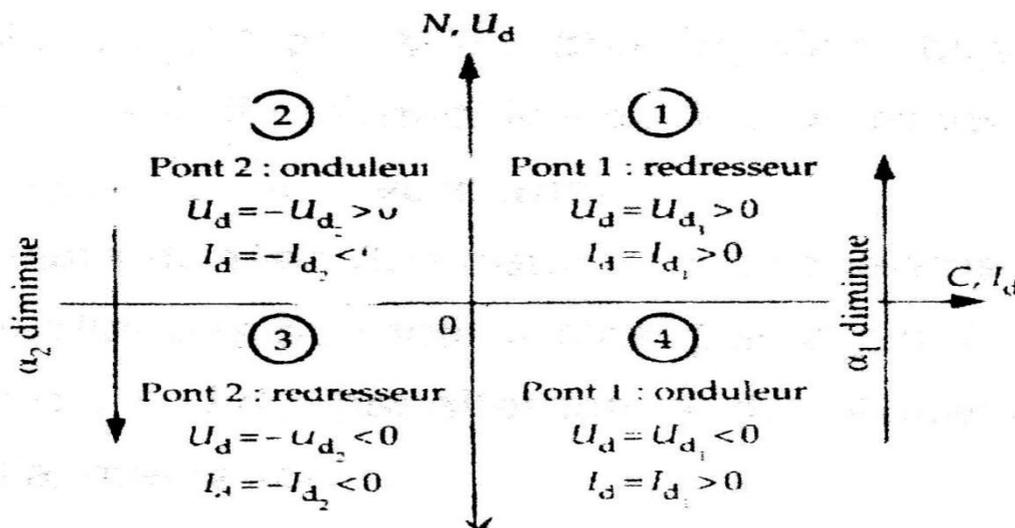
Pour assurer des inversion très rapides (5 à 20ms) avec un équipement totalement statique, on doit utiliser deux redresseurs principaux thyristors.

Il monté tête-bêche aux bornes de l'induit.

Le pont 1 assure le fonctionnement dans les quadrants 1 et 4, le pont 2 dans les quadrants 2 et 3.



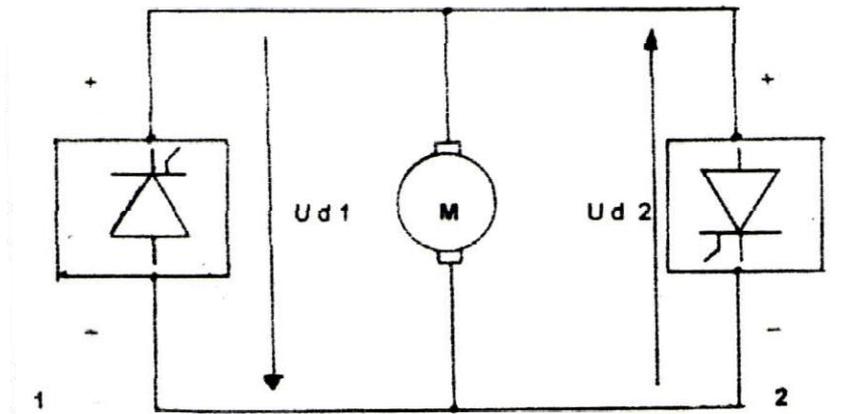
**Figure 2: Montagetête-bêchededeux redresseurs**



**Figure3**



### 3. Principe de fonctionnement du convertisseur bidirectionnel:



On admet arbitrairement comme sens positif de courant et de tension, le courant débité par le convertisseur (1) et la tension qu'il donne dans son fonctionnement en redresseur.

- Le convertisseur (1) fournit les courants positifs.
- Le convertisseur (2) fournit les courants négatifs.

Dans le premier quadrant le convertisseur (1) prend la charge avec un fonctionnement en redresseur, donc on a un régime moteur.

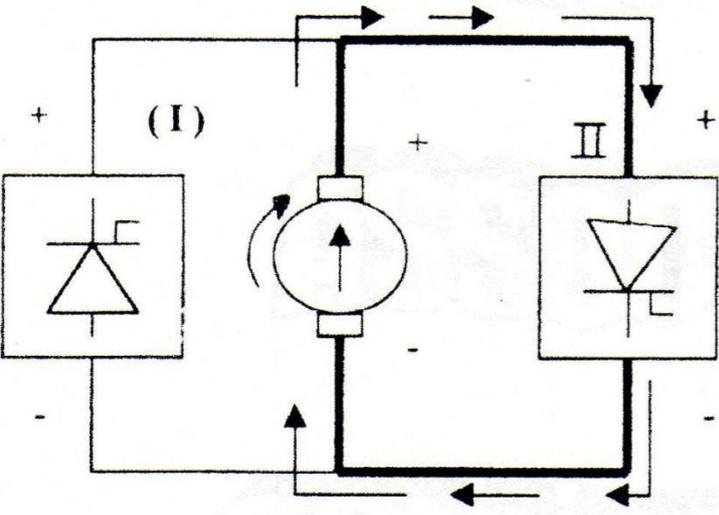
Dans le deuxième quadrant le convertisseur (2) fonctionne en onduleur qui nous permet un freinage avec récupération.

Dans le troisième quadrant, le convertisseur (2) prend la charge avec le fonctionnement en redresseur on a donc un régime moteur mais dans le sens inverse par rapport au premier quadrant.

Dans le quatrième quadrant, le convertisseur (1) fonctionne en onduleur qui provoque un régime de freinage à contre-courant.

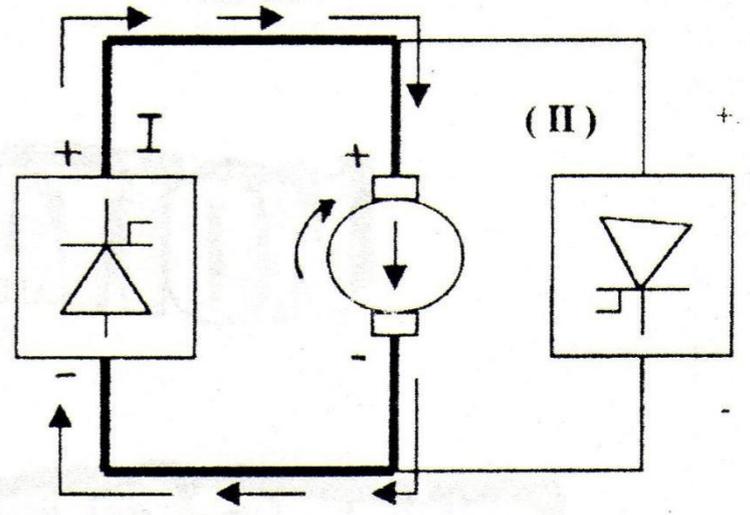
Rf(2)

- (A) : Redresseur à vide
- (B) : Onduleur en charge



RM(1)

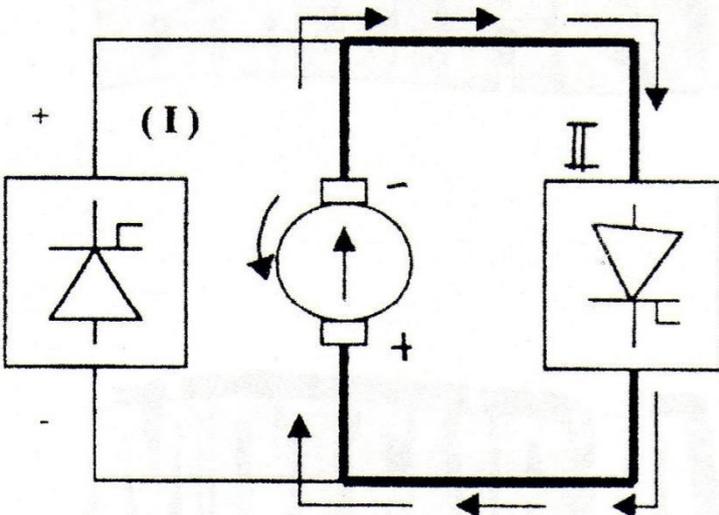
- (A) : Redresseur en charge
- (B) : Onduleur à vide



0

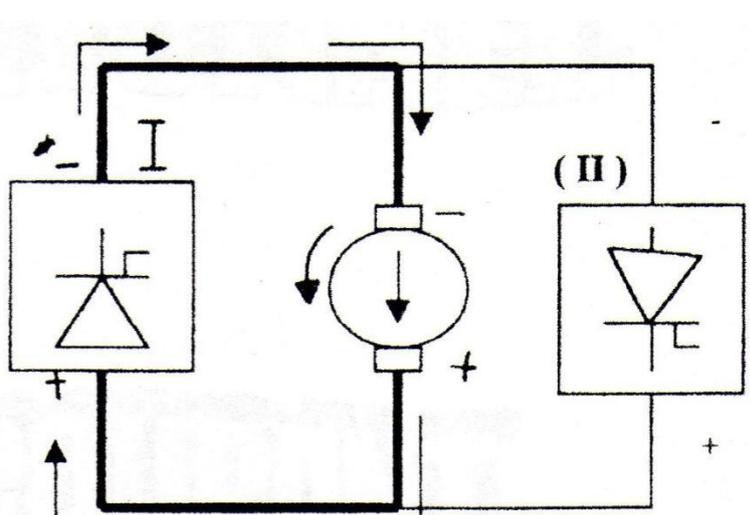
RM(1)

- (A) : Onduleur à vide
- (B) : Redresseur en charge



Rf(4)

- (A) : Onduleur en charge
- (B) : Onduleur à vide



Figure(5-8)

## **4. Les avantages et les inconvénients du système statique :**

### **4.1. Les avantages:**

- Le rendement est plus élevé  $\eta = 0,92 - 0,95$  grâce à la très faible chute de tension directe du thyristor.
- Une haute fiabilité, une fine sensibilité et un service simple.
- La rapidité de conversion est très élevée.
- Un prix d'achat est bas.
- Le bruit est plus bas, ce qui améliore les conditions de travail.
- Simplification des circuits de refroidissement.
- Contrôle simple des gâchettes des thyristors.

### **4.2. Les inconvénients:**

- Un échauffement des thyristors alors il faut ajouter un ventilateur.
- Une consommation de l'énergie réactive.
- Ils produisent des harmoniques et l'ondulation correspondante peut produire des perturbations dans le circuit de réglage.
- Sensibilité de température et aux poussières.

## 5. Etude de fonctionnement du pont complètement commandé :

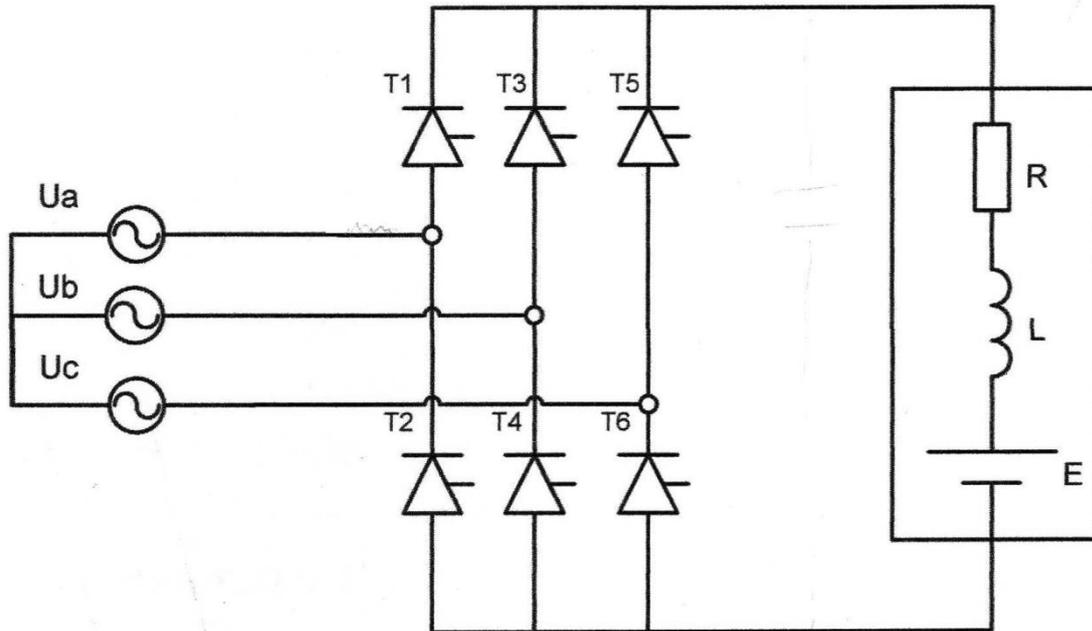


Figure 6: Pont de GREATZ

### 5.1. Montage en pont triphasé commandé:

Dans ce montage on a deux groupes de thyristors:

G1 : groupe cathodique (T1, T3, T5) correspondant à la borne positive de la tension. G2: groupe anodique (T2, T4, T6) correspond à la borne négative de la tension.

La tension ( $U_a, U_b, U_c$ ) sont des tensions simples.

La tension  $U_d$  est une tension composée de deux tensions  $U_{d1}$  redressée par le groupe (1), et  $U_{d2}$  redressée par le groupe (2), nous avons donc :

$$U_d = U_{d1} - U_{d2}$$

Le thyristor conducteur est toujours connecté à la tension d'alimentation positive à condition qu'il reçoit une impulsion d'allumage qui est fixé par l'angle de retard qui est de nouveau mesuré à partir de l'intersection de deux tensions simples pour  $U_{d1}$  et de deux tensions simples négatives pour  $U_{d2}$ .

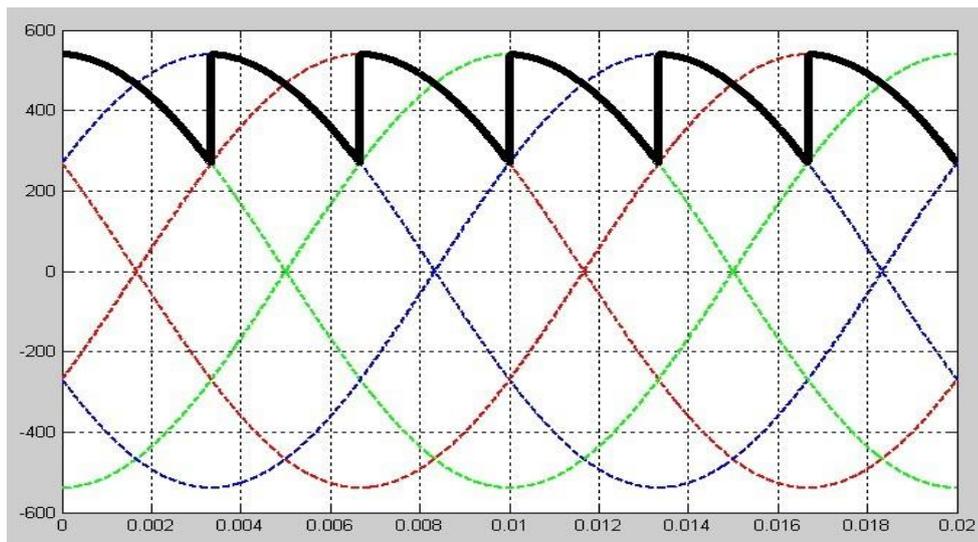
**5.2. Séquencede fonctionnement:**

Intervalles $\theta = \omega t$	Thyristorde conduction	Tensionredressée $U_d$
$0 < \theta < (\pi/6) + \alpha$	T5, T4	U cb
$(\pi/6) + \alpha < \theta < (\pi/2) + \alpha$	T1, T4	Ua b
$(\pi/2) + \alpha < \theta < (5\pi/6) + \alpha$	T1, T6	U a c
$(5\pi/6) + \alpha < \theta < (7\pi/6) + \alpha$	T3, T6	Ubc
$(7\pi/6) + \alpha < \theta < (3\pi/2) + \alpha$	T3, T2	U b a
$(3\pi/2) + \alpha < \theta < (11\pi/6) + \alpha$	T5, T2	Uc a
$(11\pi/6) + \alpha < \theta < (13\pi/2) + \alpha$	T5, T4	U cb

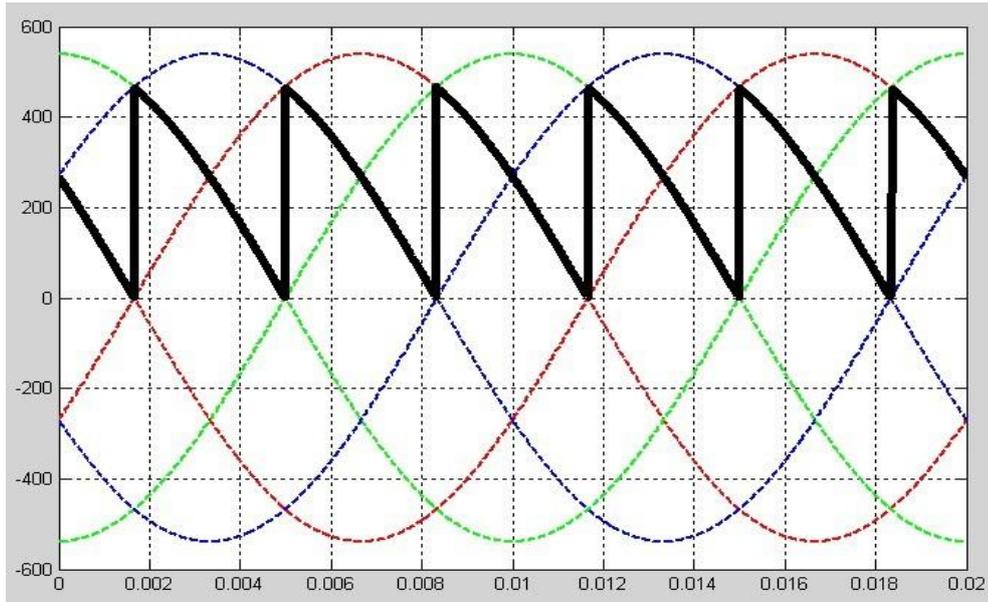
Lesformesdela tensionredresséepour différentsanglesd’amorçages:

- $\alpha=30^\circ$
- $\alpha=60^\circ$
- $\alpha=120^\circ$

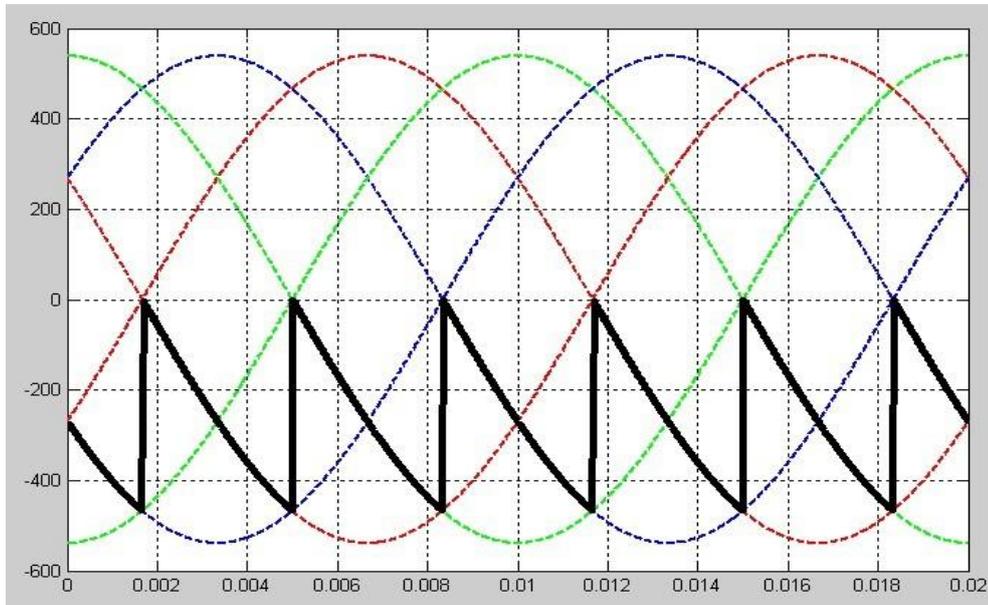
Sont représentésurlesfiguressuivantes:



**Figure7**  
**Tension redressée $\alpha=30^\circ$**



**Figure8**  
**Tension redressée  $\alpha=60^\circ$**



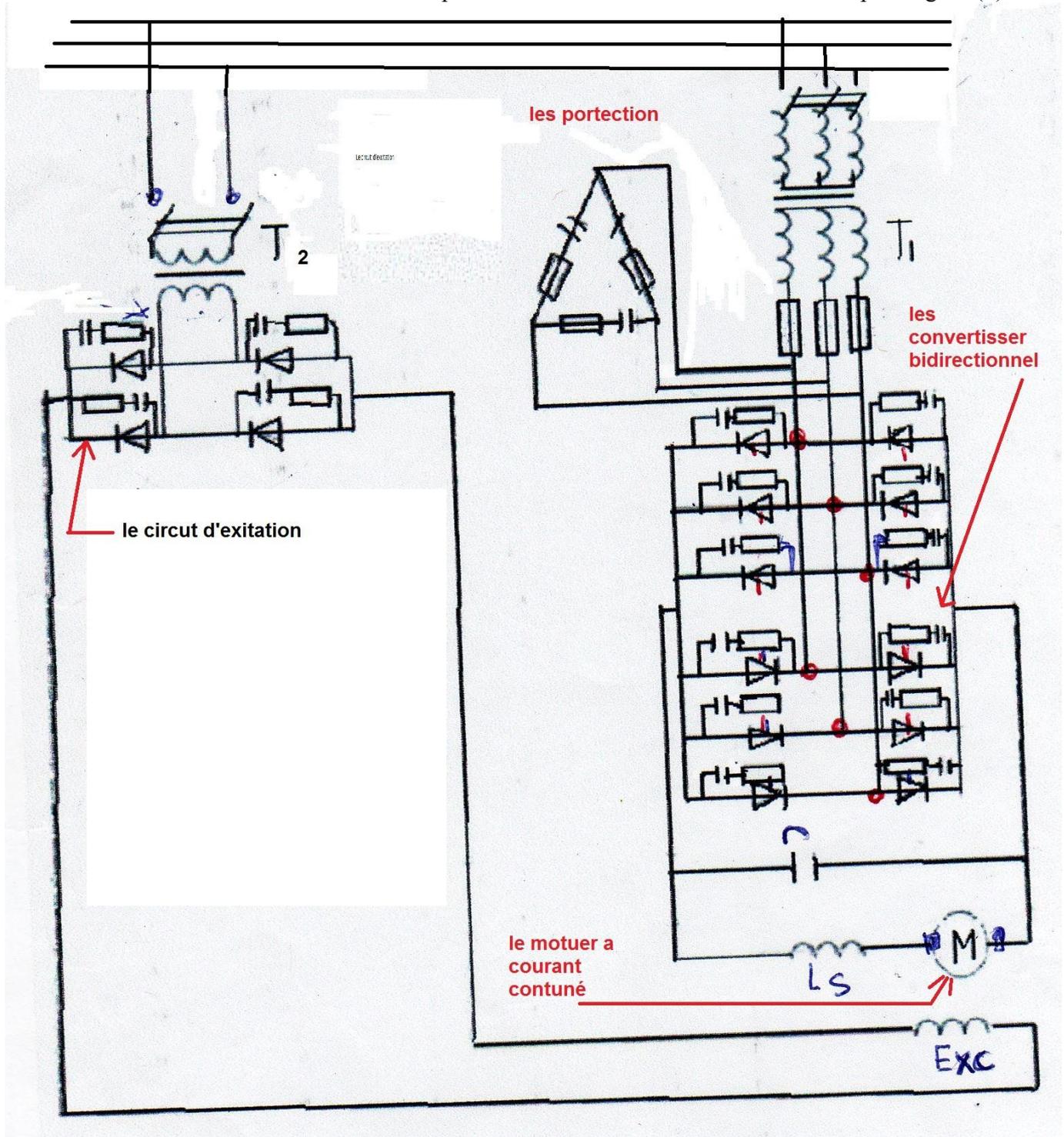
**Figure9**  
**Tension redressée  $\alpha=120^\circ$**

a) Pour  $\alpha=30^\circ$  et  $\alpha=60^\circ$  la tension redressée est positive, le convertisseur fonctionne en redresseur : La puissance passe du réseau alternatif au récepteur.

Pour  $\alpha=120^\circ$  la tension redressée est négative, le convertisseur fonctionne en onduleur assisté (non autonome)

**1. Schémagénéraldel’installation:**

Leschémad’unmoteur à C.Calimentéparunconvertisseurbidirectionnellestdonné parlafigure (1)



**Figure1**

Schémagénérale d’un moteur à C.C à excitation indépendante, alimenté par un convertisseur bidirectionnel

Le moteur qu'on va utiliser est un moteur à courant continu existant dans le laboratoire et qui a les données suivantes:

- l'induit:  $u_n = 220 \text{ V}$ ,  $I_n = 5,75 \text{ A}$ ,  $P_n = 1 \text{ KW}$ ,  $N_n = 2000 \text{ tr/mn}$ .

## 2. Calcul des paramètres du transformateur :

D'après le schéma de redressement utilisé pour l'alimentation de notre moteur nous pouvons calculer la tension secondaire simple du transformateur  $U_{2s}$ , qui nous permettra par la suite d'adapter le pont avec le réseau triphasé.

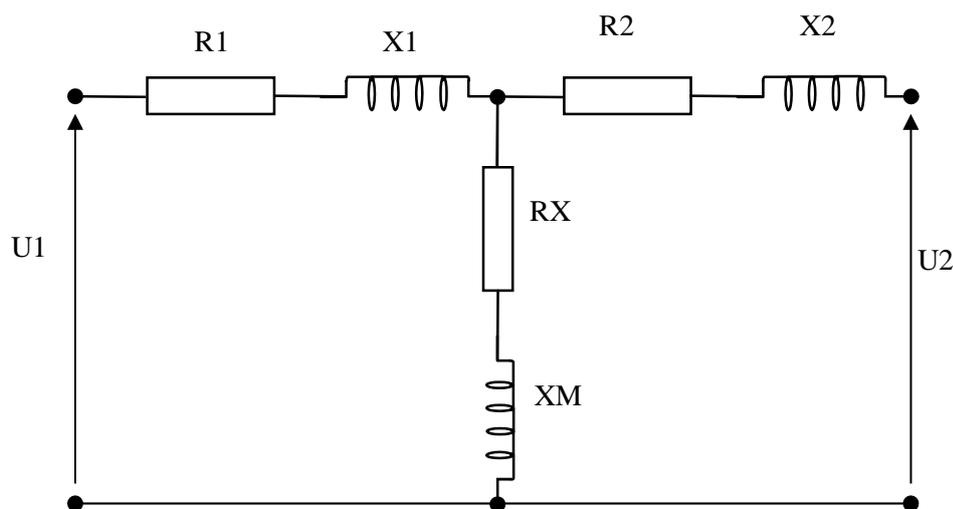
Ensuite, on peut déterminer ces paramètres en deux régimes à vide et en court-circuit.

### 2.1. Calcul de tension secondaire:

$$U_{eff} = \frac{E}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}} = \frac{E}{\sqrt{6}} = \frac{220}{\sqrt{6}} = 90v.$$

### 2.2. L'essai marche à vide:

On dit qu'un transformateur est en régime de marche à vide, lorsque l'enroulement primaire est connecté au réseau à courant alternatif tandis que son secondaire est ouvert (sans charge) ce régime nous permet de calculer certaines grandeurs:



**Figure2**

Après avoir effectué cet essai, on obtient les résultats suivants

$$:P_0 = 12,6W, U_{20} = 230 V, I_0 = 0,19A$$

D'où on peut calculer les paramètres suivants :

-le rapport du transformateur:

$$m = \frac{U_{20}}{U_1} = \frac{230}{220} = 1.04$$

$$P_{10} = P_{fer} + R \cdot I_0$$

Ici On néglige  $R \cdot I_0 =$

$$0P_{10} = P_{\text{fer}}$$

### 2.3. L'essai circuit-court:

Lecourt-

circuit d'un transformateur est un régime de fonctionnement limité où l'enroulement secondaire est fermé sur lui-même **fig.2** et par conséquent la tension secondaire  $U_2$  est nulle, et on applique aux bornes de son enroulement primaire la tension nominale  $U_{1n}$ .

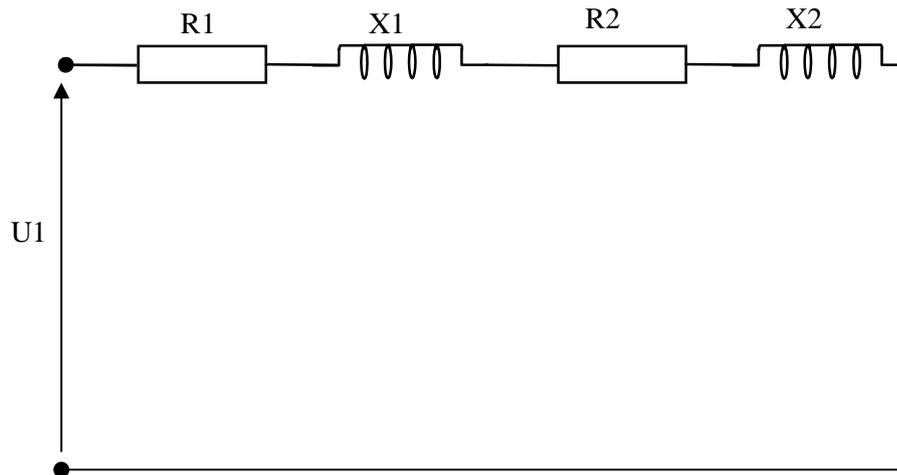


Figure3

Les données :

$$P_{cc} = 16\text{w}, \quad U_{cc} = 12\text{v}, \quad I_{cc} = 1.5\text{A} = I_{2n} \quad R_{Tr} = 2,66\Omega$$

La résistance:

$$P_{cc} = R_{Tr} I_{cc}^2 \rightarrow R_{Tr} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} = \frac{16}{(1,5)^2} = 7,11 \Omega$$

L'impédance:

$$U_{cc} = Z_{Tr} I_{cc} \rightarrow Z_{Tr} = \frac{U_{cc}}{I_{cc}} = \frac{12}{1,5} = 8 \Omega$$

La réactance:

$$Z_{cc}^2 = R_{Tr}^2 + X_{Tr}^2 \Rightarrow X_{Tr} = \sqrt{Z_{Tr}^2 - R_{Tr}^2} = \sqrt{8^2 - (2,66)^2}$$

$$X_{Tr} = 7,54 \Omega.$$

Latension du court-circuit en pourcent:

$$U_{cc} = \frac{U_{cc} \cdot 100}{U_{in}} = \frac{12 \cdot 100}{220} = 5,45\%$$

La puissance apparente du transformateur:

$$S_{Tr} = U_2 \cdot I_2 = 90 \cdot 1,5 = 135 \text{ VA}$$

### **3. Choix et calcul de la self de lissage:**

La self de lissage est connectée en série avec l'induit des moteurs afin d'assurer le filtrage des ondulations des intensités et tensions dans le système convertisseur moteur.

Cette self de lissage est choisie afin que:

D'une part réduire les ondulations du courant redressé jusqu'à la valeur désirée assurant la commutation suffisante sur le collecteur du moteur.

#### **3.1. Calcul de l'inductance de lissage :**

L'inductance de lissage est donnée par la formule approximative

$$L_s = (3 \div 5) L_{ind}$$

#### **3.2. Calcul de l'inductance d'induit du moteur**

• Dans notre cas on prend :  $L_s = 3 L_{ind} = 3 \cdot 0,0228 = 0,0684$

$$L_s = 0,0684 \text{ H}$$

$$L_{ind} = \frac{B \cdot U_n}{P \cdot W_n \cdot I_n}$$

P : nombre de paires de pôles qui est égal à 2.

B : coefficient empirique.

Avec :

$$W_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot N_n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2000}{60} = 209,33 \text{ rad/s} \quad L_{ind} = \frac{2,25 \cdot 220}{2 \cdot 5,75 \cdot 209,33} = 0,0228 \text{ H}$$

### 3.3. Calcul de l'inductance du transformateur du réseau d'alimentation:

$$X_{tr} = L_{tr} \cdot \omega_n$$

$$L_{tr} = \frac{X_{tr}}{\omega_{tr}} = \frac{X_{tr}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{7,45}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,024 \text{ H}$$

### 3.4. Calcul de l'inductance de lissage:

L'inductance de lissage est donnée par la formule approximative

$$L_s = (3 \div 5) L_{ind}$$

Dans notre cas on prend :  $L_s = 3 L_{ind} = 3 \cdot 0,0228 = 0,0684$

$$L_s = 0,0684 \text{ H}$$

## 4. Calcul des paramètres du moteur:

Le coefficient de transfert du moteur:

$$K_M = 1/K \cdot \Phi = 1/0,94 = 1,063 \text{ rd/s} = 1,063 \text{ rd/s}$$

### 4.1. Calcul des constantes de temps du moteur:

Calcul de la constante électromagnétique:

$$T_e = \frac{L_{ind}}{R_{ind}}$$

$$L_{ind} = L_{ind} + 2L_{TR} = 2 \cdot 0,024 + 0,00228 = 0,04828$$

$$R_{ind} = R_{ind} + 2R_{TR}$$

$$R_{ind} = 0,5 (1 - n) U_n / I_n$$

$$n = P_n / U_n \cdot I_n \Leftrightarrow n = 1000 / 220 \cdot 5,75 = 79\%$$

$$R_{ind} = 0,5 (1 - 0,79) \cdot 220 / 5,75 =$$

$$4 \Omega R_{ind} \cdot \varepsilon = 4 + 2 \cdot 2,66 = 9,33 \Omega$$

$$T_e = L_{ind} \cdot \varepsilon / R_{ind} \cdot \varepsilon = 0,04828 / 9,33 = 0,00517$$

Calcul de la constante électromécanique:

$$T_m = j \cdot R_{ind} \cdot \varepsilon / (K \Phi)^2, \quad T_m = 0,0092 \cdot 9,33 / (0,94)^2, \quad T_m = 0,097 \text{ s}$$

## 5. Calcul statique du redresseur :

### 5.1. Calcul de la constante d'amplification du convertisseur :

$$T_{\text{con}} = 1 / 2mf = 1 / 2 \cdot 3$$

$$.50T_{\text{con}} = 0,0033\text{s}$$

Où

**m**: nombre de phases du convertisseur

**f**: fréquence du réseau.

### 5.2. Calcul du coefficient du convertisseur statique du thyristor :

On détermine d'après la caractéristique de réglage par le rapport  $\Delta U / \Delta U_p$

$$U_d = 2,34 \times 90 \cos \alpha =$$

$$\Delta U_p = 8.75 - 7.5 = 1.25$$

$$\Delta U_d = 203 - 155.5 = 47.5$$

$$K_c = \frac{\Delta U_d}{\Delta U_p} = \frac{47.5}{1.25} = 38$$

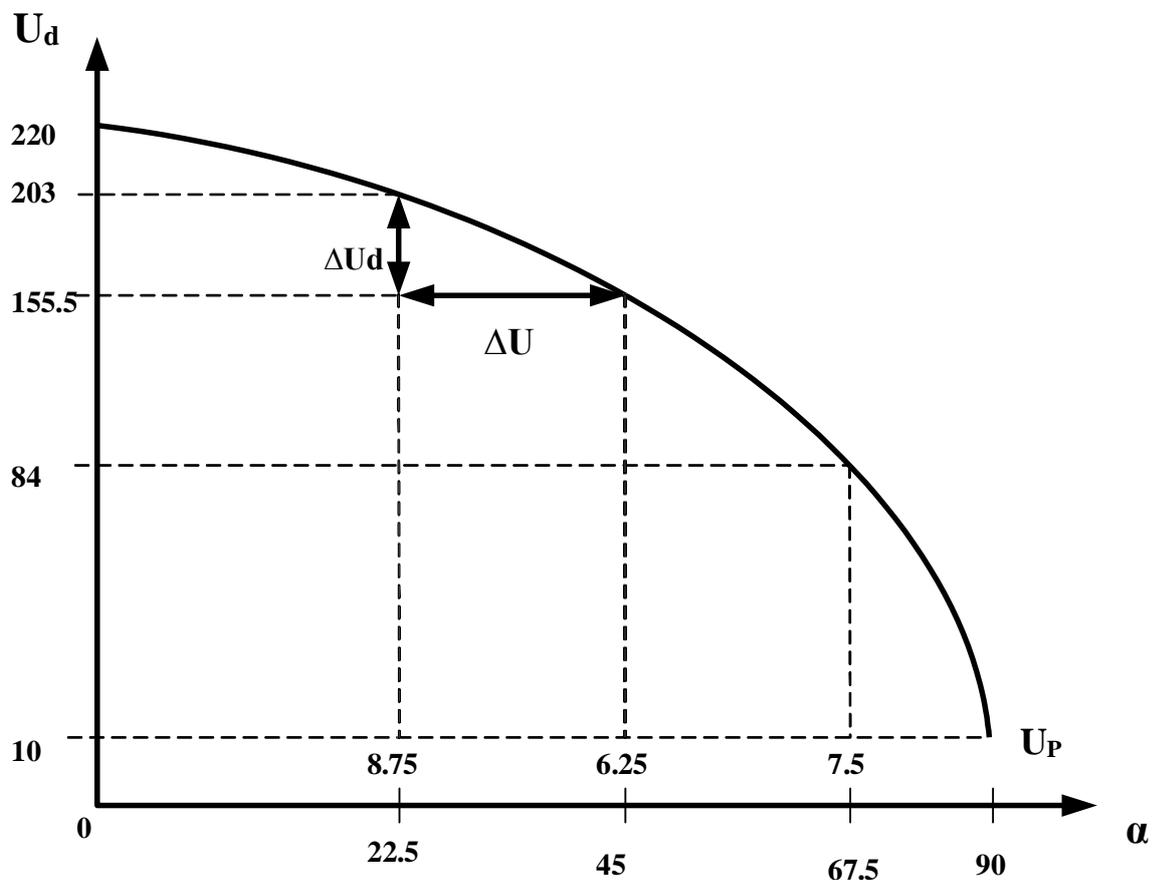


Figure3

$K_{conv}$ : est déterminé d'après la caractéristique de réglage par rapport  $U_d/U_c$

$U_d$ : la différence entre deux valeurs voisines de la tension redressée (d'après la caractéristique)

$U_c$ : La différence entre deux valeurs voisines de la tension de commande correspondante à celle de la tension redressée.

### 5.3. Calcul et choix des convertisseurs :

Le choix des convertisseurs à une grande importance, du fait qu'il se base sur les exigences technologiques de la commande électrique et d'autre part sur les paramètres techniques tels que la puissance, la tension, le courant redressé et les indices technico-économiques pour les moteurs à moyenne et grande puissance.

### 5.4. Choix des thyristors :

Le choix des thyristors s'effectue suivant deux grandeurs:

- Le courant maximal du thyristor.
- La tension inverse maximale aux bornes des thyristors.

$$I_{Tmax} = I_{Dmax} = I_n = 5,75$$

$$U_{invmax} = E = 200 \text{ v.}$$

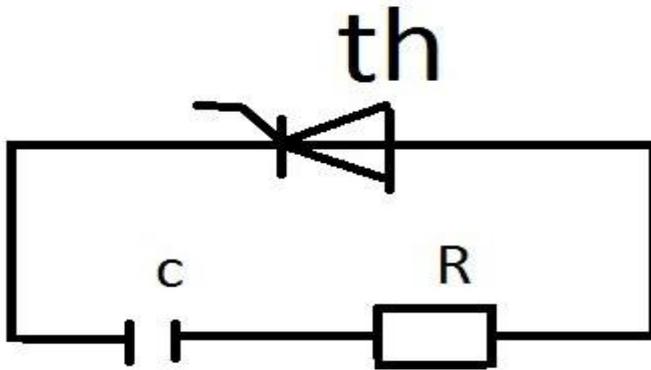
$$U_{Dmax} = \sqrt{6} U_T = \sqrt{6} \cdot 90 = 220 \text{ v}$$

Les thyristors choisis doivent avoir:

$$U_{inv} > U_{invmax} \text{ Calculé}$$

$$I_T > I_{Tmax} \text{ Calculé}$$

	$I_n(A)$	$U_{invmax}$
Thyristors	12	1000

**6. Circuit RC:****SCHEMA DE LA PROTECTION INDIVIDUELLE D'UN THYRISTOR**

Pour protéger l'élément redresseur (thyristor) contre les surtensions dues aux processus d'empyém enton branche un circuit RC parallèlement à celui-ci

Le calcul des paramètres de ce circuit est le suivant

$$C = 10 \cdot I_{th} / U_{inv \max}$$

$$C = 10 \cdot 4.312 / 238.48$$

$$C = (10 \text{ à } 30)$$

**7. Protection PL moteur:**

Les moteurs qui entraînent les mécanismes principaux fonctionnent généralement dans les conditions très dures ou il est nécessaire d'assurer les processus transitoires désirés de courtes dures, une grande gamme de réglage de vitesse et une grande capacité de surcharge.

Quelques conditions de travail des moteurs exigent l'observation de tous les paramètres de ces dernières doivent être protégés contre :

### **7.1. Protection contre Le Manque Du Courant D'excitation Du Moteur :**

Se fait à l'aide du relais de l'absence du courant RAC connecter en série avec l'enroulement d'excitation du moteur, ce qui permet d'éviter les dures conséquences du manque de flux magnétique du moteur qui provoque :

- ◆ Soit l'arrêt complet du moteur lors du fonctionnement à pleine vitesse et si le couple résistant existe

- ◆ Soit l'accroissement inadmissible de la vitesse du moteur si le couple résistant est absent (emballement)

La considération de ces conséquences prouve que dans tous les deux cas, il est nécessaire de déconnecter le moteur du convertisseur, cela se fait par le contact auxiliaire à ouverture du relais RAC qui coupe le circuit d'alimentation de l'enroulement du déclencheur du disjoncteur D

Le seuil de déclenchement du relais est :

$$I_{\text{exe dec}} = 0,9 I_{\text{ex min}}$$

$I_{\text{exe min}}$  : valeur minimal du courant d'excitation qui peut avoir normalement en tenant compte de l'affaiblissement du flux magnétique du moteur s'il y en a

### **7.2. Protection contre la mise à la terre:**

Elle est réalisée à l'aide de deux relais de contrôle de l'isolation (1RCI, 2RCI)

Certains moteurs doivent être protégés contre la détérioration due aux forces centrifuges lors des grandes vitesses.

Cette protection est assurée par un relais spécial centrifuge RC qui est monté directement sur l'arbre du moteur

### 7.3. ProtectionDuCircuitD'excitation :

Vue que la présence d'un courant continu traversant le circuit d'excitation Est très important pour le fonctionnement du moteur, la protection du

Convertisseur assurant une tension constante au circuit président devient

Obligatoire et essentielle

La protection du convertisseur contre les sur tensions et les sur intensités Se fait de la même manière que pour le convertisseur à thyristor, en Utilisant les fusibles, les disjoncteurs et les circuits RC

## **1. Généralités:**

Tous les systèmes, soit moteur ou générateur peuvent effectuer un travail avec des performances, le système doit être asservi et contrôlé à chaque instant, le but de la régulation est d'obliger les grandeurs de sorties à rester aussi proches que possible de la valeur d'entrée ou de commande. La méthode la plus efficace pour qu'on puisse asservir les grandeurs d'entrée (références) avec les grandeurs réelles de sortie avec précision, c'est de réaliser le système à boucle fermée, qui a des performances statiques et dynamiques beaucoup supérieures à celles du système à boucle ouverte, ce système est utilisé:

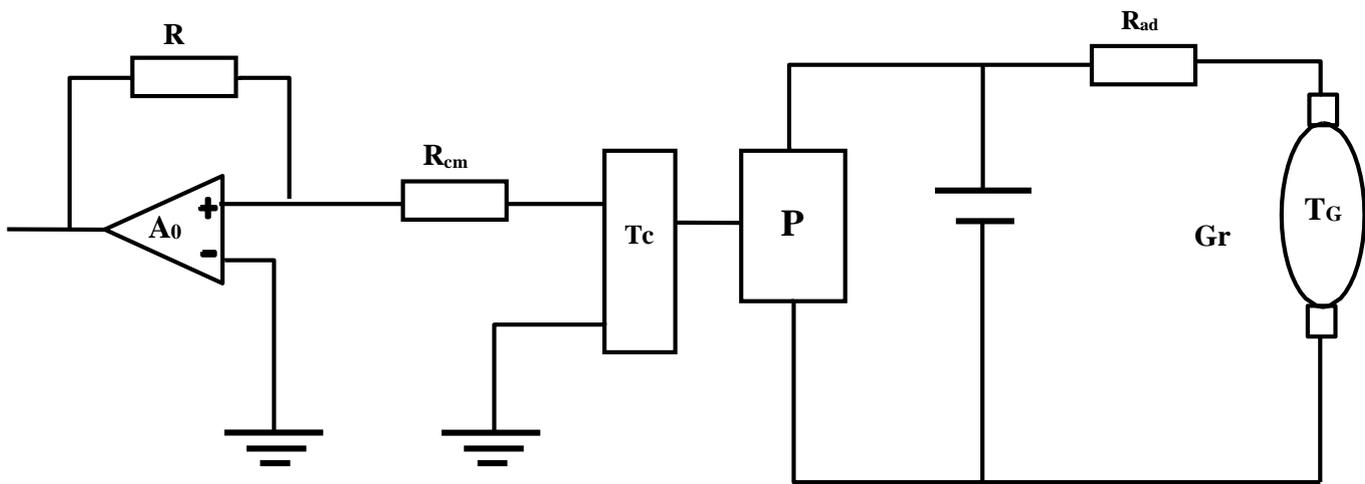
- Pour le réglage de la vitesse de rotation dans de larges gammes.
- Pour obtenir une précision statique et dynamique meilleure.
- Pour réaliser le processus de commande de démarrage, de freinage, et de renversement des moteurs électriques de manière optimale.

## 2. Les capteurs:

Le capteur est un dispositif qui produit à partir d'une mesure électrique appliquée à son entrée une grandeur exacte que possible sous forme de tension.

### 2.1. Capteur de vitesse:

Pour mesurer la vitesse de rotation du moteur, on utilise une dynamo Tachymétrique qui représente une petite génératrice à aimant permanent, entre les deux balais du rotor on obtient une tension proportionnelle à la vitesse dont la polarité est une indication pour la sens de rotation, ce capteur est composé de quatre éléments.



**Figure 1**

- Le Tachygénérateur (TG): capte la variation de la vitesse sur l'arbre du moteur.
- Le potentiomètre intermédiaire (P): réduit la tension de la TG jusqu'à 10V

Le transducteur (Tc) sert à séparer potentiellement le circuit de réglage de celui du (TG).

L'amplificateur opérationnel ( $A_0$ ): augmente la tension de sortie du TG jusqu'à la valeur nécessaire pour le régulateur de vitesse.

- Le facteur de transfert du capteur de vitesse.

Ce facteur est obtenu d'après ce qui suit :

La tension de sortie du capteur de vitesse doit être égale à 10V.

Quand la vitesse est maximale et on aura:  $K_{CV} =$

$$U_{pmax} / W_{max} = 10 / 209.33 = 0.047$$

rd/s Constante de temps  $T_{cv}$ :

$$T_{cv} = T_{fv1} + T_{fv2}$$

$T_{fv1}$ : la constante de temps conditionnée par la présence d'un filtre à la sortie de

$$TG(T_{fv1} = 0.01 \text{ s})$$

$T_{fv2}$ : la constante du filtre à la sortie du transducteur ( $T_{fv2} = 0.005$

s). Donc:  $T_{cv} = 0.01 + 0.005 = 0.015 \text{ s}$ .

**2.2. Fonction du transfert de capteur de vitesse:**

$$W = K_{cv} / (1 + T_{cv} P)$$

$$W = \frac{0.047}{0.015 P + 1}$$

**3. Etude du système en boucle ouverte:**

**3.1. Fonction du transfert du moteur:**

$$U = R_a I_a + L (di/dt) + E \dots \dots \dots$$

$$\dots \dots \dots (1)$$

$$E = K \Phi \omega \dots \dots \dots (2)$$

$$C_m - C_r = j \frac{d\omega}{dt} \dots \dots \dots (3)$$

$$C_m = K \Phi I_a \dots \dots \dots (4)$$

En utilisant la transformation de Laplace on aura :

$$U(P) = R_a I_a(P) + LP I_a(P) + E(P) \dots \dots \dots (1')$$

$$E(P) = K \omega(P) \text{ avec } K \Phi \dots \dots \dots (2')$$

$$C_m(P) - C_r(P) = jP \omega(P) \dots \dots \dots (3')$$

$$C_m(P) - K I_a(P) \dots \dots \dots (4')$$

Puisque le moteur n'entraîne aucune charge couple résistant égal à zéro ( $C_r=0$ )

$$\Rightarrow C_m = j P \omega(P) = K I(P) \dots\dots\dots (5)$$

D'après l'équation (1) on tire le courant:

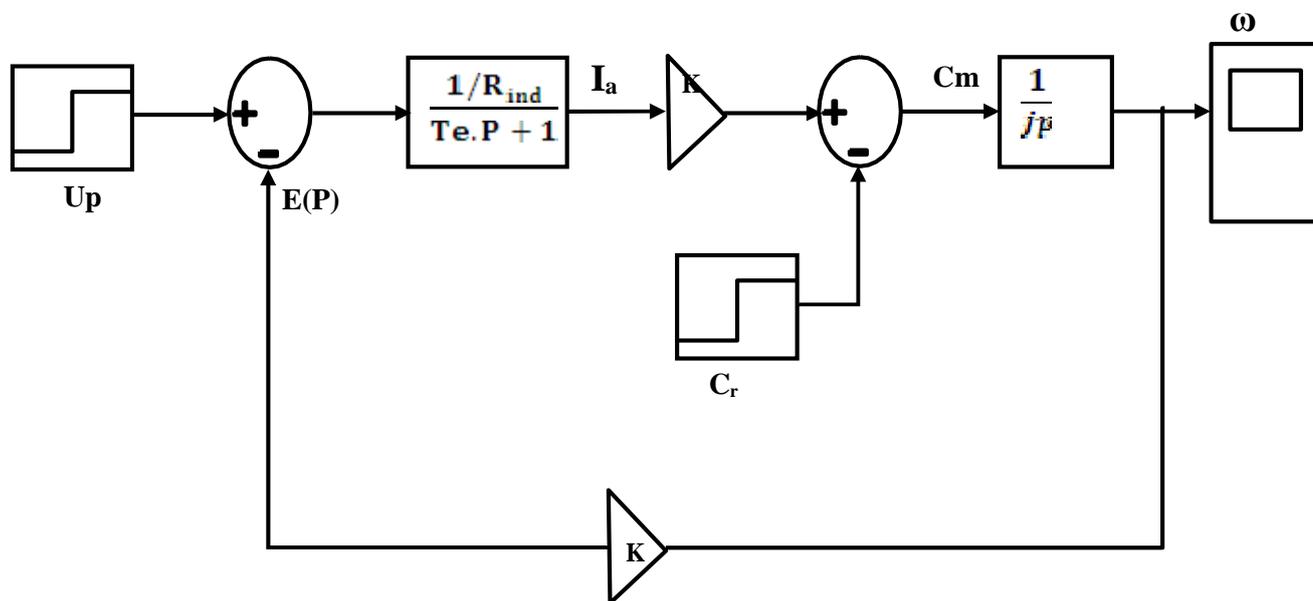
$$I_a(P) = \frac{U(P) - E(p)}{R_{ind} + LP_{ind}}$$

$$I_a(A) = [U(P) + E(P)] \frac{1}{R_{ind} + LP_{ind}} = [U(P) + E(P)] \frac{\frac{1}{R_{ind}}}{R + \frac{L}{R_{ind}} P}$$

$$I_a(P) = [U(P) + E(P)] \frac{1}{R + TeP}$$

Avec  $Te = L/R$ , la constante de temps électromagnétique du moteur.

A partir de ces équations on représente le schéma fonctionnel du moteur à courant continu par la figure ci-dessus avant l'association du convertisseur.



**Figure 2**

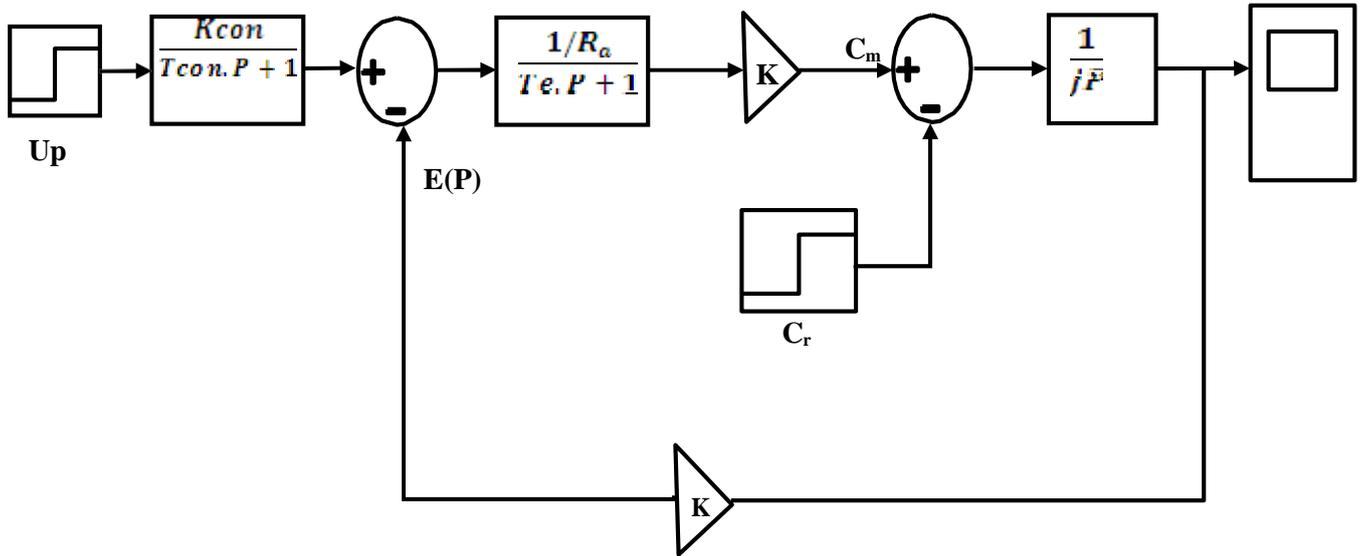
Pour un moteur commandé par l'induit on propose de déterminer les fonctions suivantes:

**3.2. Fonction de transfert du convertisseur:**

$$W_{conv}(P) = \frac{K_{conv}}{1 + T_{conv} P}$$

$K_{conv}$  : Le rapport du convertisseur est égal à =

$38T_{conv}$  : constant du temps du convertisseur.



**Figure3**

Nous représentons ci-dessus le schéma fonctionnel de l'association convertisseur statique-moteur à courant continu en boucle ouverte d'après le schéma fonctionnel.

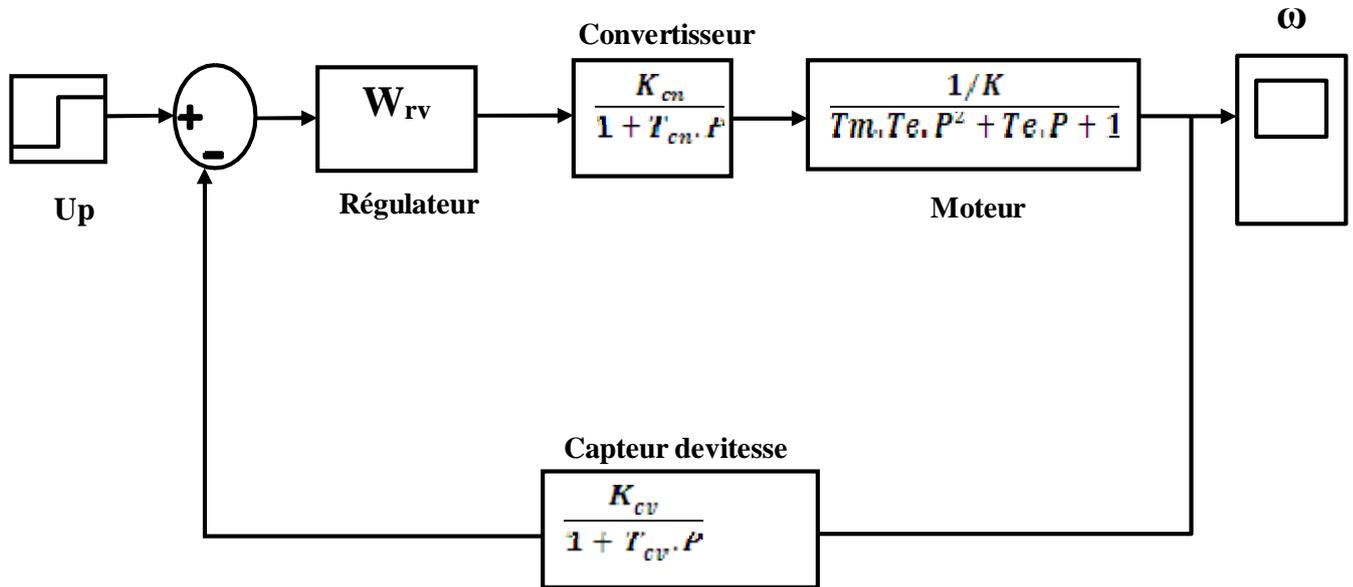
La fonction de transfert de l'ensemble (hacheur-moteur) sera comme suit :

$$W_1(P) = \frac{K_{conv}}{T_{conv} \times P + 1} \times \frac{1/K}{T_m P (1 + T_e P) + 1}$$

$$W_1(P) = \frac{38}{1 + 0.0033P} \times \frac{1.063}{0.00064P^3 + 0.097P + 1}$$

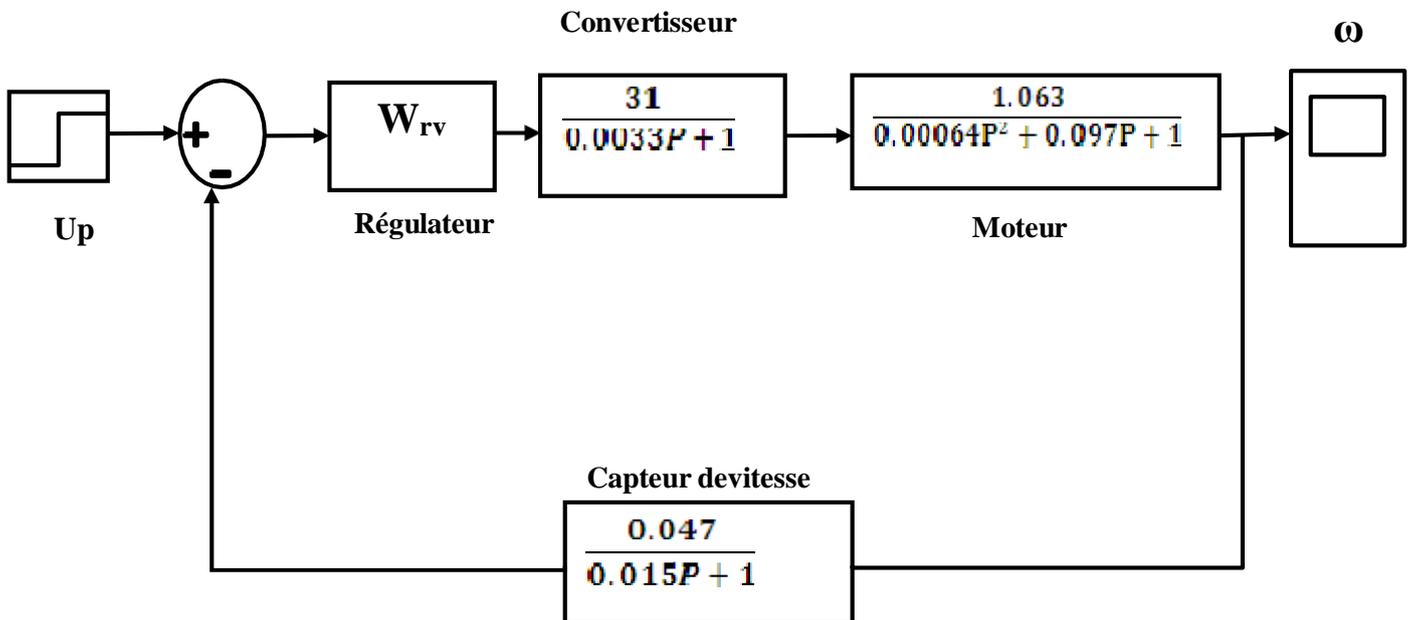
**4. Etudedelaboucle ferméedelavitesse**

Maintenantonintroduitlesfonctionsdetransfertdesdifférentséléments.OnObtientleschémastruct uralglobalsuivant:



**Figure4**

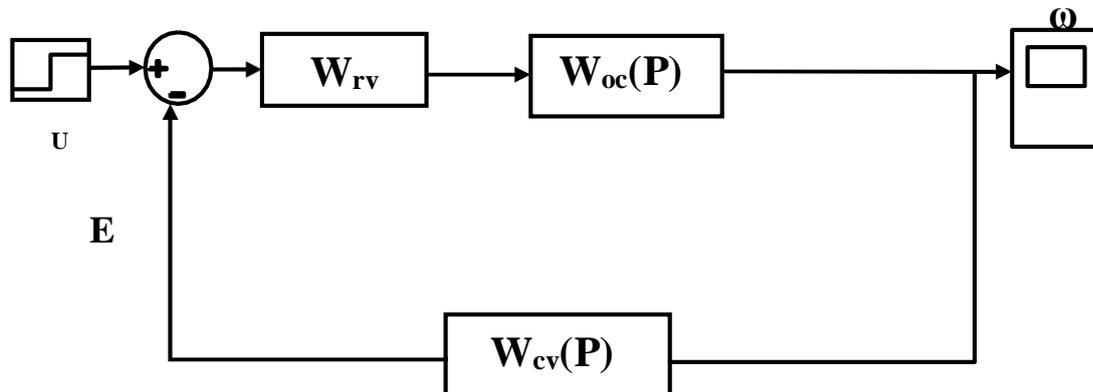
On remplace lesdifférentes constantesparleursvaleurs:



**Figure5**

#### 4.1.Synthèse de la boucle de vitesse:

Le schéma structural de la boucle de vitesse est représenté par la figure suivante:



**Figure 6**

Où:

$W_{rv}(P)$  : la fonction de transfert de régulateur de vitesse.  
 $W_{cv}(P)$ : la fonction de transfert du capteur de vitesse.

$W_{oc}(P)$ : la fonction de transfert de l'objet de commande.

#### 5. Détermination du type de régulateur:

Pour la détermination du type de régulateur de vitesse, on va suivre la méthode de l'optimum symétrique.

La fonction de transfert de l'installation à régler est sous la forme générale suivante:

$$G_s(P) = \frac{K_s}{PT_s(1 + PT_\Sigma)}$$

D'après l'optimum symétrique on a :

$$T_1 = 4 T_\Sigma$$

$$T_0 = K_s \cdot 2T_\Sigma \cdot \frac{T_1}{T_s}$$

$$G(s) = \frac{K_{conv}}{1 + PT_{conv}} \cdot \frac{1}{R_a} \cdot \frac{K\phi}{jP} \cdot \frac{K_{cv}}{1 + PT_{cv}}$$

$$T_m = \frac{K\phi}{R_a \cdot J}$$

$$G(s) = \frac{K_{conv} \cdot K_{cv}}{PT_m (1 + PT_e) \cdot (1 + PT_{cv}) \cdot (1 + T_{conv} \cdot P)}$$

$$G(s) = \frac{38 \times 0.047}{P(0.097)[(1 + P0.0016) \cdot (1 + P0.015)]}$$

$$G(s) = \frac{1.78}{0.097P[0.0000018P^3 + 0.00025P^2 + 0.0091P + 1]}$$

$$G(s) = \frac{1.457}{P0.097(0.0091P + 1)}$$

$$T1 = 4 \times 0.0091 = 0.036$$

$$T_0 = 1.78 \times 2 \times 0.0091 \times \frac{0.036}{0.097} = 0.012$$

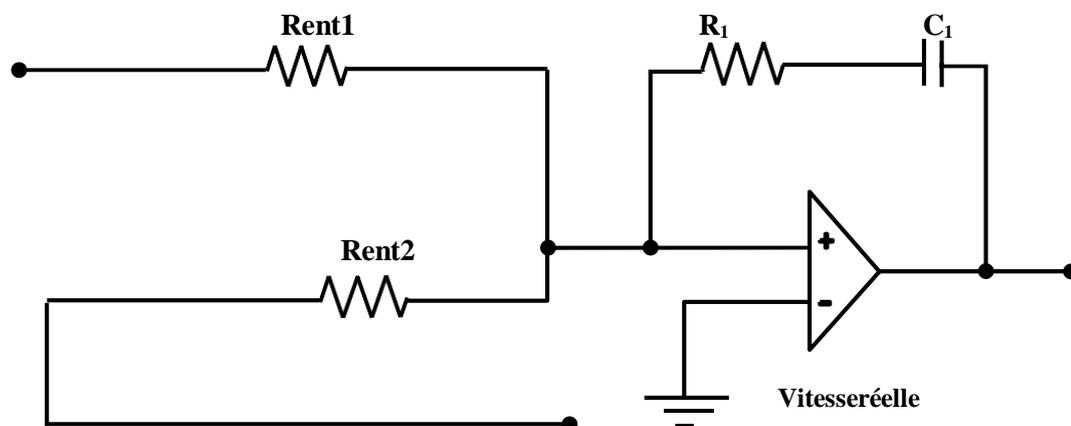
$$W_{rv}(P) = \frac{1 + PT_1}{T_0 P} = \frac{1 + P \times 0.036}{0.012 P}$$

On remarque que cette fonction de transfert représente celle d'un régulateur du type proportionnel intégré "PI".

5.1.

### Paramètre de la chaîne de contre réaction:

Le régulateur de vitesse est représenté par cette figure:



**Figure 7**

La capacité de la contre réaction est toujours standardisée à  $(1 \div 10) \mu F$ , Uf, on prend

$$C_1 = 1 \mu F : \text{Doncsarésistanceest} : R_1 = \frac{T_{RV}}{C_1} = \frac{0.036}{1 \times 10^{-6}} = 36 K\Omega$$

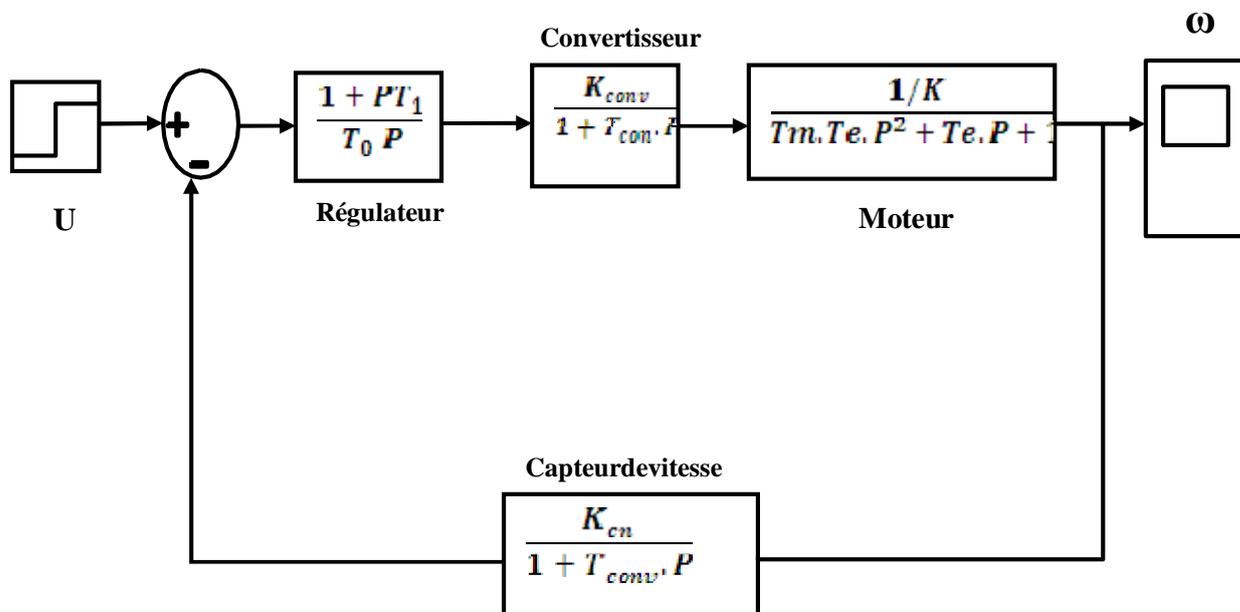
**5.2. Paramètred'entrée:**

$$R_{rent 2} = \frac{R_1}{K_{rv}} = \frac{36}{1.034} = 34 K\Omega$$

$$R_{rent 1} = \frac{R_{rent 2} \times U_{smax}}{K_{RV} \times \omega_n} = \frac{34 \times 10}{0.070 \times 209.33} = 23 K\Omega$$

**6. Fonctionde transfertdelabouclefermée vitesse :**

Finalemt,leschémastructural relatifà la bouclefermée de la vitesse sera:



**Figure8**

$$W(P) = \frac{\frac{1 + PT_1}{T_0 P} \times \frac{K_{conv} 1/K}{(1 + K_{conv}) \cdot (T_m T_e P^2 + T_m P + 1)}}{1 + \frac{K_{cv} P}{1 + T_{cv} P} \times \frac{K_{rv} K_{conv} (1 + T_{conv}) / K}{(1 + T_{conv}) (T_m T_e P^2 + T_m P + 1)}}$$

Après certaines transformations on remplace chaque inconnue par sa valeur, on obtient:

$$W(P) = \frac{0.086P^2 + 6.62P + 59.24}{0.13P^3 + 0.36P + 2.95}$$

**6.1. Réponse industrielle:**

La réponse indicielle d'un circuit de réglage est donnée par la réaction de signal de sortie d'un saut unitaire de la valeur de consigne, elle est basée sur la transformée inversée de la place des fonctions de transfert des différents paramètres à régler.

Cette réponse consiste à étudier le comportement des machines électriques pendant le régime transitoire, et ceci permet de diminuer l'influence des valeurs des points dangereux sur le processus technologique, et d'obtenir un régime transitoire bien amorti et assez rapide. D'après le schéma structural de la boucle ouverte et de la boucle fermée de vitesse on va tracer à l'aide du logiciel *Matlab* les réponses indicielles à vide et en charge.

**6.2. Le dépassement: D**

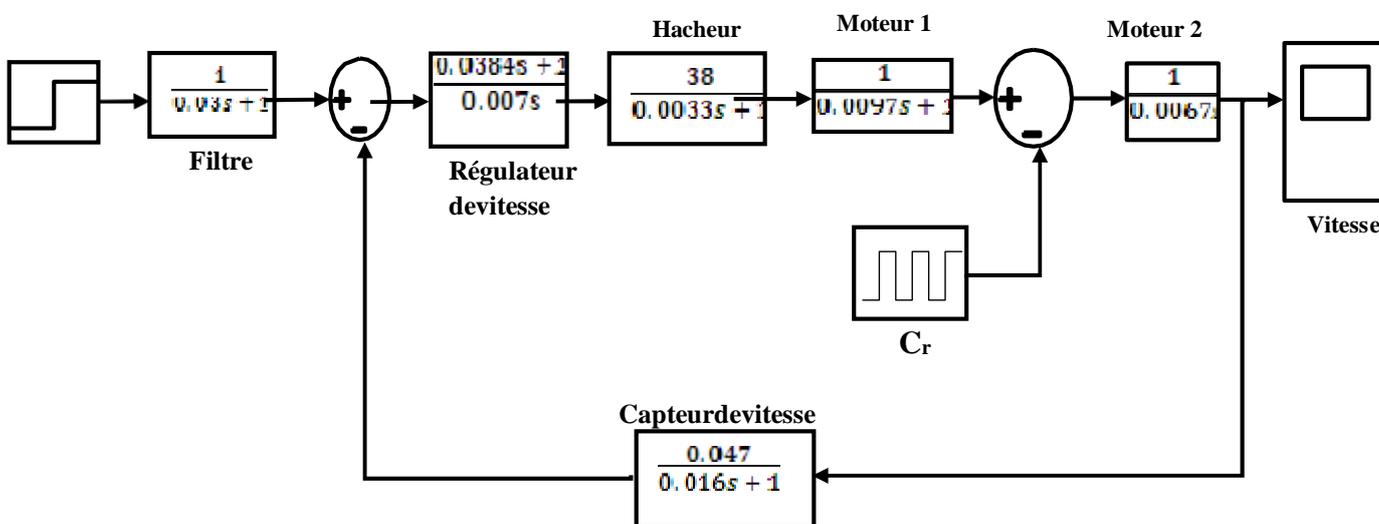
C'est la différence maximum entre les solutions transitoires et les solutions de régime permanent, c'est une mesure de stabilité on l'exprime en pourcentage de la valeur finale de la grandeur de sortie, c'est-à-dire vitesse

**D=13%**

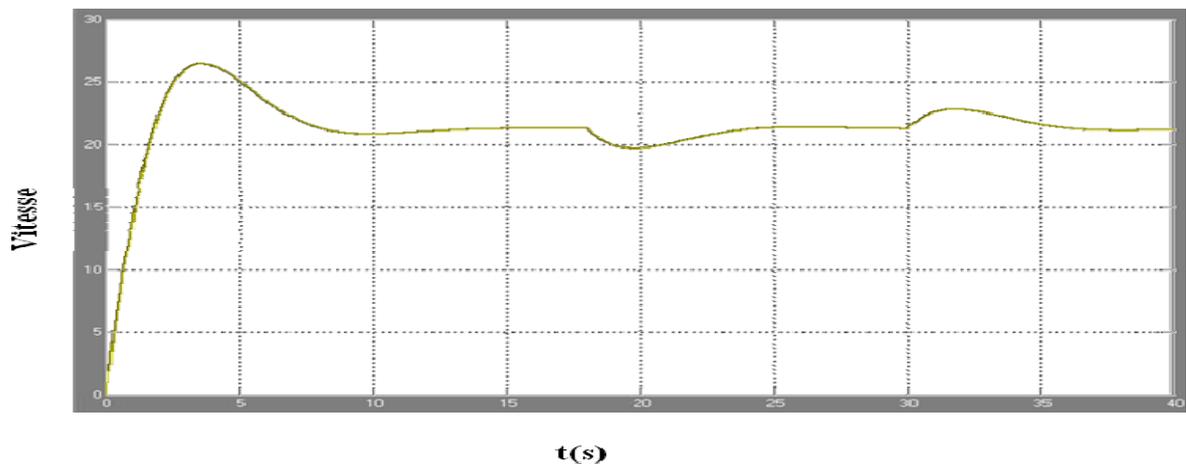
**6.3. Le temps de stabilisation (temps demontée) :**

C'est le temps que met la réponse indicielle pour atteindre la valeur finale de stabilité

**Ts = 1,2s**



**Figure 9**



**Figure10**

**7. Vérification de la stabilité :**

**7.1. Définition et condition de la stabilité d'un système :**

La stabilité est une caractéristique très importante pour les systèmes de régulation. D'une manière générale, un système est stable si à un signal limité sa réponse est aussi limitée.

**2.1.1. Critère Algébrique :**

**2.1.2. Critère de HURWITZ :**

Un polynôme  $P(P) = a_0 + a_1P + a_2P^2 + \dots + a_nP^n$ , avec  $a_0 > 0$  s'appelle polynôme de **HURWITZ**. Si toutes les racines  $P_i$  ( $i=1, i=n$ ) ont la partie réelle négative.

Un système est stable si sa caractéristique est un polynôme de **HURWITZ**, on doit vérifier les conditions suivantes :

- Tous les coefficients ( $a_i = 1, i=1, 2, \dots, n$ )  $\neq 0$
- Tous les coefficients  $a_i > 0$
- Tous les déterminants suivants sont positifs :  $D_i = a_{n-1} > 0$

$$D_2 = \begin{pmatrix} a_{n-1} & a_n \\ a_{n-3} & a_{n-2} \end{pmatrix} > 0$$

$$D_3 = \begin{pmatrix} a_{n-1} & a_n & 0 \\ a_{n-3} & a_{n-2} & a_{n-1} \\ a_{n-5} & a_{n-4} & a_{n-3} \end{pmatrix} > 0$$

Jusqu'à :

$$D_{n-1} = \begin{pmatrix} a_{n-1} & a_n & 0 \\ a_{n-3} & a_{n-2} & a_{n-1} \\ 0 & 0 & a_1 \end{pmatrix} > 0 \quad D_n = a_0 \quad D_{n-1} > 0$$

Jusqu'à:

$$H = \begin{pmatrix} a_{n-1} & a_n & 0 & 0 & 0 \\ a_{n-3} & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n & 0 \\ a_{n-5} & a_{n-4} & a_{n-3} & a_{n-2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

On a:

$$G(P) = \frac{N(P)}{D(P)} = \frac{0.086P^2 + 6.6P + 59.24}{0.13P^2 + 0.36P + 2.95}$$

$$D(P) = 0 \Leftrightarrow 0.013P^2 + 0.36P + 2.95 = 0$$

$D(P)$  est de la forme  $a_1 P^2 + a_2 P + a_0 = 0$

On a donc:  $a_1 = 0.013 > 0$ ;  $a_2 = 0.36 > 0$ ;  $a_0 > 0$ .

$$D' \text{ où: } H = \begin{pmatrix} u_1 & u_2 \\ 0 & a_0 \end{pmatrix}$$

$$H = \begin{pmatrix} 0.36 & 0.013 \\ 0 & 2.95 \end{pmatrix}$$

$$D_1 = a_{n-1} = a_1 = 0.36 > 0.$$

$$D_2 = H = \begin{pmatrix} 0.36 & 0.013 \\ 0 & 2.95 \end{pmatrix} = (0.36 \times 2.95) - 0 = 1.062 \Rightarrow D_2 = 1.062 > 0.$$

Donc en conclusion le système est stable.

## **Conclusion**

L'étude que nous venons de présenter nous a permis de mieux connaître l'association convertisseur statique moteur à courant continu du point de vue de la conception et de la commande.

La machine est alimentée par un redresseur triphasé bidirectionnel complètement commandé qui permet de fonctionner dans les quatre quadrants avec un bon rendement et une simplicité dans la commande et la régulation.

Ainsi ce travail nous a été très bénéfique, car il nous a permis une initiation à l'utilisation de l'outil informatique et la programmation des systèmes de commande, et aussi d'approfondir nos connaissances dans le domaine de l'électronique de puissance, machine à courant continu, les régulateurs, l'asservissement et le réglage de vitesse par variateur de vitesse à courant continu.

## **Bibliographie**

- « *Commande d'un moteur à courant continu à l'aide d'un convertisseur bidirectionnel* »  
Mémoire de fin d'étude préparé par le binôme *Khadr El-Wardi* et *Ziani Ramdan* Promotion 2009 Université BADJIMOKHTAR ; Annaba.
- « *Commande d'un moteur à courant continu par un hacheur à thyristor* »  
Mémoire de fin d'étude préparé par le binôme *Bourefis Fayçal* et *Hammani Mounia* promotion 2007/2008 Université badji mokhtar Annaba.
- « *Réglage de la vitesse d'un moteur à courant continu à l'aide d'un pont mixte* »  
Mémoire de fin d'étude préparé par le binôme *Djeddi Khaled* et *Bousbaâ Abdelhamid* Promotion 2007.
- Electronique de puissance Guy Séguier.
- Electronique de puissance Biihler