

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

Université Abderrahmane Mira-Bejaïa

Faculté de Technologie

Département de Génie électrique



## *Mémoire de fin d'étude*

En vue de l'obtention du diplôme Master en électrotechnique

Option : Electromécanique

Thème

**Banc d'essai virtuel pour un moteur à courant continu**

Réaliser par :

M<sup>r</sup>. ILILTEN ATHMANE

Encadré par :

M<sup>r</sup>. R. SAOU

Promotion : 2012/2013

# *REMERCIEMENTS*

*Dieu merci de m' avoir permis d'atteindre ce stade de  
connaissance et de réussir dans les études*

*Je tiens à remercier ma famille d'abord pour leur soutenance  
durant tous mon cursus d'étude*

*Je remercie mon promoteur Mr SAOU pour ce mémoire et son  
aide et ça compréhension*

*Je remercie mes enseignants chacun dans ça spécialité pour le  
savoir précieux qui mon transmet*

*Je remercie mes amis intimes qui m' ont soutenus*

*Je remercie également mon promoteur et ainsi que toute la  
famille de l'électrotechnique de l'institut de l'université de  
Bejaia.*

*ILILTEN ATHMANE*

# *DÉDICACE*

*Je dédie ce modeste travail en guise d'amour, de respect et de reconnaissance :*

*Aux deux être les plus chers au monde, ma mère et mon père, pour leurs soutien, sacrifice, patience, ainsi pour leurs conseils dont ils ont fait preuves pour m'avoir a la première réussite dans ma vie, que dieu les protèges et les entoure de sa bénédiction.*

*A mes très chers frères et sœur  
votre soutien réserve et vos encouragements m'ont permis d'affronter  
beaucoup d'épreuves.*

*A tous mes proches et mes amis sans exception  
A ce que j'aime et qui m'aiment et qui me sont très chers.*

***ILILTEN ATHMANE.***

**Liste des figures**

Fig.I.1- coupe d'une machine à courant continu

Fig.I.2 - Recherche du sens du courant dans les conducteurs d'induit au moyen de règle des trois doigts de la main gauche pour la marche en génératrice

Fig.I.3-Barre en translation dans le champ B

Fig.I.4- Recherche du sens de la force appliquée aux conducteurs par la règle de la main droite

Fig.I. 5 - Vue éclatée d'une machine à courant continu

Fig.I.6 -Circuit magnétique d'une MCC

Fig.I.7 - Pôle inducteur

Fig.I.8 – Différents pôles et enroulements d'une MCC

Fig.I.9-le rôle des enroulements de compensation magnétique d'induit

Fig.I.10 - Représentation de 3 sections sur un induit de machine à 4 pôles

Fig.I.11 – Exemple : Induit comportant 24 faisceaux, 12 lames au collecteur, pas arrière 7, pas avant 5. Pas résultant :  $Y=Y_1 \pm Y_2 = 7 - 5 = 2$

Fig.I.12 - Exemple : Induit comportant 24 faisceaux, 12 lames au collecteur, pas arrière 7, pas avant 7. Pas résultant = 14

Fig.I.13- schéma de principe de fonctionnement du système balais collecteur

Fig.I.14 - Rotors et coupes longitudinale et transversale d'un collecteur

Fig. I.15 – Balais et porte balais

FigureI.16 - Différentes connexions du circuit d'excitation :a)- séparée ; b)- Shunt ; c)- Série ; d)- composée

Fig.I.17- la tension récoltée d'une seule spire.

Fig.1.18-Faisceaux et section

Fig-I.19.Répartition des voies d'enroulements entre deux balais

Fig.I.20-Répartition des voies d'enroulements entre deux balais pour  $2a=4$

Fig.I.21-schéma globale d'induit

Fig.II.1- Modèle électrique de la MCC à excitation indépendante

Fig.II.2- schéma bloc tension-vitesse de la machine à courant continu à excitation séparée.

Fig.II.3- Modèle électrique d'une MCC à excitation série

## LISTE DES FIGURES

---

Fig.II.4- schéma bloc tension-vitesse de la machine à courant continu à excitation série.

Fig.II.5- Modèle électrique d'une MCC à excitation shunt

Fig.II.6- schéma bloc tension-vitesse du moteur à courant continu à excitation shunt.

Fig.III.1-L'induit d'un moteur à courant continu

Fig.III.2-L'induit d'une génératrice à courant continu

Fig.III.3-schéma électrique de L'inducteur d'une machine à courant continu

Fig.III.4-Schéma électrique d'un moteur à courant continu à excitation séparée

Fig.III.5-La courbe  $\Omega=f(I_a)$  pour un moteur à excitation séparée

Fig.III.6-La courbe  $C_e=f(I_a)$  pour un moteur à excitation séparée

Fig.III.7-La courbe  $C_e=f(\Omega)$  pour un moteur à excitation séparée

Fig.III.8-Schéma électrique du moteur à excitation série

Fig.III.9-La courbe  $\Omega=f(I_a)$  pour un moteur à excitation série

Fig.III.10-La courbe  $C_e=f(I_a)$  pour un moteur à excitation série

Fig.III.11-La courbe  $C_u=f(\Omega)$  pour un moteur à excitation série

Fig.III.12-Schéma électrique du moteur à excitation shunt

Fig.III.13-La courbe  $\Omega=f(I_a)$  pour un moteur à excitation shunt

Fig.III.14-La courbe  $C_e=f(I_a)$  pour un moteur à excitation shunt

Fig.III.15-La courbe  $C_e=f(\Omega)$  pour un moteur à excitation shunt

Fig.III.16-Schéma électrique de la génératrice à excitation séparée

Fig.III.17-La courbe  $U_a=f(I_a)$  pour une génératrice à excitation séparée

Fig.III.18-Les courbes  $U_a=f(I_a)$  et  $E=f(I_e)$  pour une génératrice à excitation séparée

Fig.III.19-La courbe  $I_e=f(I_a)$  pour une génératrice à excitation séparée

Fig.III.21-La courbe  $U_a=f(I_a)$  pour une génératrice à excitation série

Fig.III.22-Schéma électrique de la génératrice à excitation série avec une résistance d'excitation variable

Fig.III.23-La courbe  $U_a=f(I_a)$  pour une génératrice à excitation série réglable

Fig.III.24-Schéma électrique de la génératrice à excitation shunt

## LISTE DES FIGURES

---

- Fig.III.24-La courbe  $U_a=f(I_a)$  pour une génératrice à excitation shunt
- Fig.III.25-Les courbes  $U_a=f(I_a)$  et  $E=f(I_e)$  pour une génératrice à excitation shunt
- Fig.III.26-La courbe  $I_e=f(I_a)$  pour une génératrice à excitation shunt
- Fig.IV.1-Schéma bloc d'un MCC à excitation séparée
- Fig.IV.2-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  pour un moteur à excitation séparée
- Fig.IV.3-Le couple  $C_e=f(t)$  pour un moteur à excitation séparée
- Fig.IV.4-Le courant  $I_a=f(t)$  pour un moteur à excitation séparée
- Fig.IV.5-Schéma bloc d'une MCC à excitation shunt
- Fig.IV.6-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  pour un moteur à excitation shunt
- Fig.IV.7-Le couple  $C_e=f(t)$  pour un moteur à excitation shunt
- Fig.IV.8-Le courant  $I_a=f(t)$  pour un moteur à excitation shunt
- Fig.IV.9-Schéma bloc d'une MCC à excitation série
- Fig.IV.10-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  pour un moteur à excitation série
- Fig.IV.11-Le couple  $C_e=f(t)$  pour un moteur à excitation série
- Fig.IV.12-Le courant d'induit  $I_a=f(t)$  pour un moteur à excitation série
- Fig.IV.13-Schéma bloc d'une MCC à excitation série alimenté avec une tension alternatif (220V-50Hz)
- Fig.IV.14-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  pour un moteur série alimenté en alternatif
- Fig.IV.15-Le couple  $C_e=f(t)$  pour un moteur série alimenté en alternatif
- Fig.IV.16-Le courant d'induit  $I_a=f(t)$  pour un moteur série alimenté en alternatif
- Fig.IV.17-Schéma bloc pour la simulation de démarrage rhéostatique d'une MCC à excitation séparée
- Fig.IV.18-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  pour un démarrage rhéostatique du moteur à excitation séparée
- Fig.IV.19-Le couple  $C_e=f(t)$  pour un démarrage rhéostatique du moteur à excitation séparée
- Fig.IV.20-Le courant d'induit  $I_a=f(t)$  pour un démarrage rhéostatique du moteur à excitation séparée

## LISTE DES FIGURES

---

Fig.IV.21-Schéma bloc d'une MCC à excitation shunt alimenté avec une tension alternatif redressée (220V-50Hz)

Fig.IV.22-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  d'un moteur shunt alimenté en tension alternatif redressée

Fig.IV.23-Le couple  $C_e=f(t)$  d'un moteur shunt alimenté en tension alternatif redressée

Fig.IV.24-Le courant d'induit  $I_a=f(t)$  d'un moteur shunt alimenté en tension alternatif redressée

Fig.IV.25-Schéma bloc d'une MCC à excitation séparée alimenté avec un hacheur série

Fig.IV.26-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  d'un moteur à excitation séparée alimenté par un hacheur série

Fig.IV.27-Le couple  $C_e=f(t)$  d'un moteur à excitation séparée alimenté par un hacheur série

Fig.IV.28-Le courant d'induit  $I_a=f(t)$  d'un moteur à excitation séparée alimenté par un hacheur série

Fig.IV.29-Schéma bloc pour la simulation de la coupure d'excitation à  $t=6s$  pour un moteur à excitation séparée

Fig.IV.30-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  après la coupure de l'excitation du moteur à excitation séparée

# NOMENCLATURE



## Nomenclature

- a : nombre des voies d'enrouements
- B : l'induction magnétique en (wb)
- Ce : couple électromagnétique en (N.m)
- Cp : couple de pertes en (N.m)
- Cr : couple imposé par la charge en (N.m)
- e(t) : la tension aux bornes de l'induit en (V)
- E : la force électromotrice de la machine à courant continu
- F : la force en (N)
- F' : la fréquence en (Hz)
- I : le courant en (A)
- Ia : le courant circulant dans l'induit en (A)
- Ie : le courant circulant dans l'inducteur en (A)
- J : l'inertie du moteur et la charge en (kg.m<sup>2</sup>)
- K : la constante mécanique de la machine à courant continu
- l : la longueur des conducteur de l'induit en (m)
- L : l'inductance électrique en (H)
- La : l'inductance des enroulements d'induit en (H)
- Le : l'inductance des enroulements de l'inducteur en (H)
- Lea : la mutuelle inductance entre l'induit et l'inducteur en (H)
- n : nombres des conducteurs actifs
- Nr : la vitesse de rotation de l'induit en (tr/mn)
- P : le nombre de paires de pôles
- Pa : la puissance absorbée par le moteur à courant continu en (kW)
- Pe : la puissance électromagnétique du moteur à cc en (kW)
- Pc : les pertes constantes
- Pfer : les pertes fer en (kW)

- $P_{méc}$  : les pertes mécaniques en (kW)
- $R$  : la résistance électrique en ( $\Omega$ )
- $R_a$  : la résistance électrique des enroulements d'induit en( $\Omega$ )
- $R_e$  : la résistance électrique des enroulements d'inducteur en ( $\Omega$ )
- $R'$  : le rayon de l'induit en ( $\Omega$ )
- $S$  : la surface embrassée par le champs magnétique en ( $m^2$ )
- $t$  : le temps en (s)
- $U$  : la tension électrique en (V)
- $U_a$  : la tension d'induit en (V)
- $U_e$  : la tension d'inducteur en (V)
- $V$  : la vitesse linéaire en (m/s)
- $\Omega$  : la vitesse de rotation de l'induit en (rd/s)
- $\Phi$  : le flux magnétique en (wb)

## **Introduction générale :**

Parmi les difficultés qu'on a rencontré durant nos études à l'université, c'est le manque en matériels et en équipements , du point de vue qualitatif et surtout quantitatif, pour réaliser nos travaux pratiques. Nombreux sont les laboratoires pédagogiques, qui après avoir servi à la formation de générations de diplômés sont devenus vétustes . Dans ces conditions, il est pratiquement impossible aux enseignants de mener à bien leur mission qui consiste avant tout à la mise en place d'un enseignement de qualité autant théorique que pratique.

L'une des solutions alternatives à ce problème peut être trouvée dans l'utilisation des logiciels informatique de calcul et de simulation . Parmi ces logiciels, on trouve Matlab simulink .

Simulink est un instrument interactif pour la modélisation, la simulation et l'analyse des systèmes dynamiques. Il donne la possibilité de construire des blocs diagrammes graphiques, d'imiter les systèmes dynamiques, d'étudier la capacité de fonctionnement des systèmes et d'améliorer les projets. Simulink est entièrement incorporé dans MATLAB, et permet un accès rapide à un large spectre d'instruments d'analyse et de conception.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre présent travail qui consiste en la réalisation d'un laboratoire virtuel pour moteur à courant continu.

Ce travail est constitué de quatre chapitres .

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les machines à courant continu. Seront décrit leurs constitution, leurs principes de fonctionnement (moteur, générateur) ainsi que leurs différents types d'excitation .

Le deuxième chapitre concerne, la modélisation des moteurs à courant continu à excitation séparée, shunt et série .

Le troisième chapitre est consacré à une étude théorique des caractéristiques de fonctionnement des machines à courant continu (moteur et générateur)

Le quatrième et dernier chapitre consiste à réaliser les schémas fonctionnels des moteurs à courant continu à excitation séparée, shunt et série dans l'environnement Simulink

de Matlab basés sur les modèles de ces derniers. La simulation du moteur en fonctionnement permet de visualiser l'évolution des différents paramètres ( vitesse, couple...etc.) de la machine en fonction du temps .

## I.1- Introduction :

Les machines électriques tournantes sont des convertisseurs d'énergie électromécanique. Leur importance économique est considérable, car elles assurent la production de la quasi-totalité de l'énergie électrique. Par ailleurs, les moteurs électriques, généralement associés aux convertisseurs statiques de l'électronique de puissance, assurent une part importante et croissante de l'actionnement dans tous les secteurs industriels, ainsi que dans la vie quotidienne. Parmi ces machines on trouve la machine à courant continu .

On appelle "machine à courant continu" des convertisseurs d'énergie électromécanique caractérisés par le fait que l'énergie électrique qu'ils échangent avec leur environnement (alimentation ou charge) se présente sous la forme de tension et de courant continus. Ceci est rendu possible par le système balais collecteur qui joue un rôle de "redresseur mécanique" et qui confie à ces machines l'appellation de "machine à collecteur". Comme toutes les machines tournantes, les machines à courant continu sont réversibles et peuvent fonctionner en moteur ou en génératrice (elles sont parfois appelées "dynamo" dans ce dernier cas ). On peut toutefois noter que le développement remarquable de l'électronique de puissance à partir des années 1960, a progressivement marginalisé l'utilisation des génératrices à courant continu. La fonction générateur de ces machines étant actuellement limitée à la récupération de l'énergie cinétique lors des freinages et ralentissements. Malgré cela, l'utilisation des machines à courant continu comme moteur reste préférée dans plusieurs applications nécessitant un entraînement électromécanique à vitesse variable en raison de la qualité d'entraînement qu'elles offrent. Leurs constructions sont parfaitement normalisées. La disposition et le dimensionnement de ces machines sont semblables d'un constructeur à l'autre.

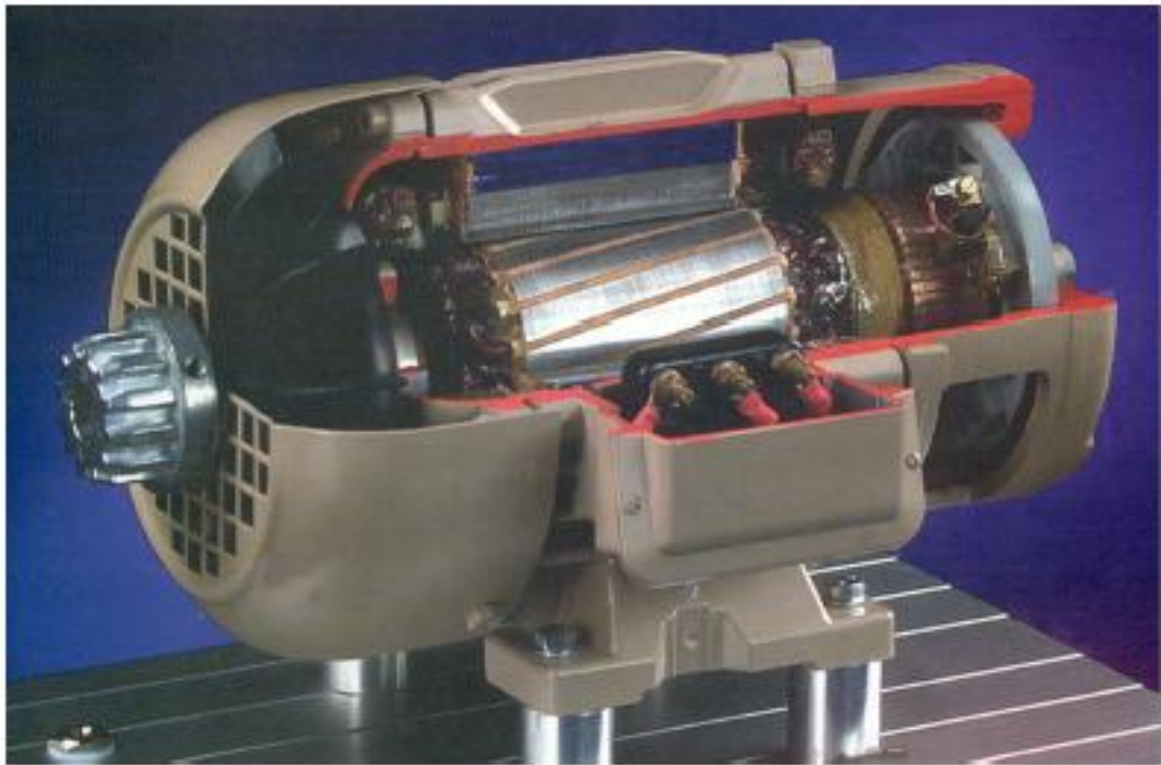


Fig.I.1- coupe d'une machine à courant continu

## **I.2- Principe de fonctionnement des machines à courant continu:**

### **I.2.1- principe de fonctionnement des générateurs à courant continu :**

lorsque un conducteur se déplace dans un champ magnétique, en coupant les lignes de ce champ, il devient le siège d'une force électromotrice induite.

C'est sur ce principe que l'on a construit les générateurs à courant continu, qui comprennent un système inducteur fixe et un induit mobile composé d'un cylindre de tôles assemblées rainées pour y loger des conducteurs [01]. Si l'on fait tourner le cylindre, les conducteurs qu'il supporte coupent les lignes du champ magnétique produit par les inducteurs. Ces conducteurs sont le siège d'une force électromotrice induite dirigée en sens inverse de part et d'autre de la ligne neutre, comme l'indique la Fig.2.

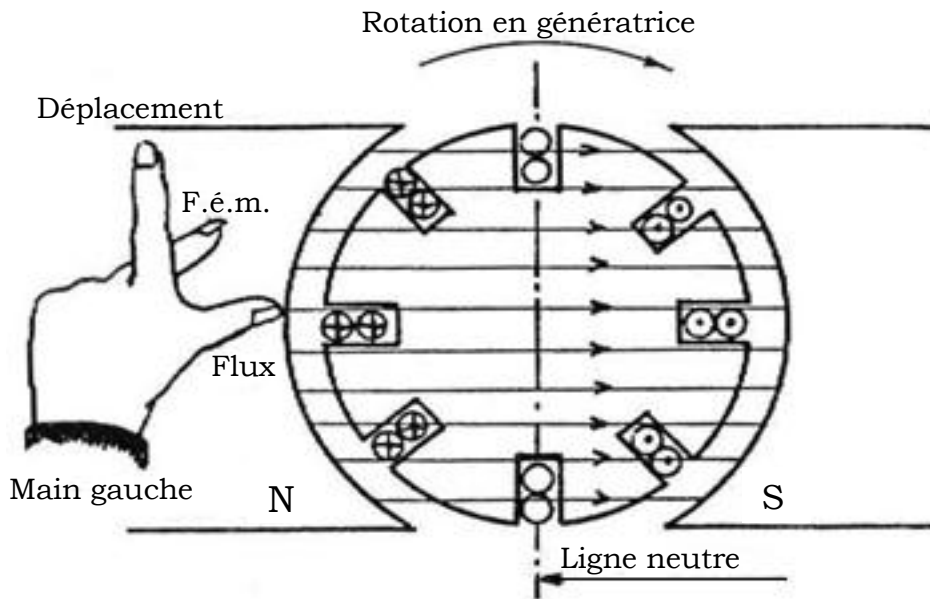


Fig.I.2 - Recherche du sens du courant dans les conducteurs d'induit au moyen de règle des trois doigts de la main gauche pour la marche en génératrice

Les forces électromotrices ainsi obtenues s'ajoutent dans les conducteurs judicieusement reliés entre eux.

Sur la ligne neutre, les conducteurs qui s'y trouvent momentanément ne coupent plus les lignes du champ. C'est à cet endroit que le courant change de sens dans le bobinage et qu'on le recueille par l'intermédiaire du collecteur et des balais.

Pour déterminer le sens du courant dans les conducteurs d'un induit en tambour, on applique la règle dite « des trois doigts de la main gauche ». Le pouce se place dans la direction du champ magnétique, l'index dans le sens de rotation de l'induit et le majeur donne le sens du courant qui circule dans les conducteurs

Voyons comment il est possible de produire de l'énergie électrique par déplacement de conducteur dans un champ magnétique :

considérons dans un repère  $(i,j,k)$  un conducteur de longueur  $l$ , est en mouvement à vitesse constante  $\vec{V}$  dans un champ magnétique uniforme et orthogonale au plan du mouvement du conducteur (voir Fig.3.)

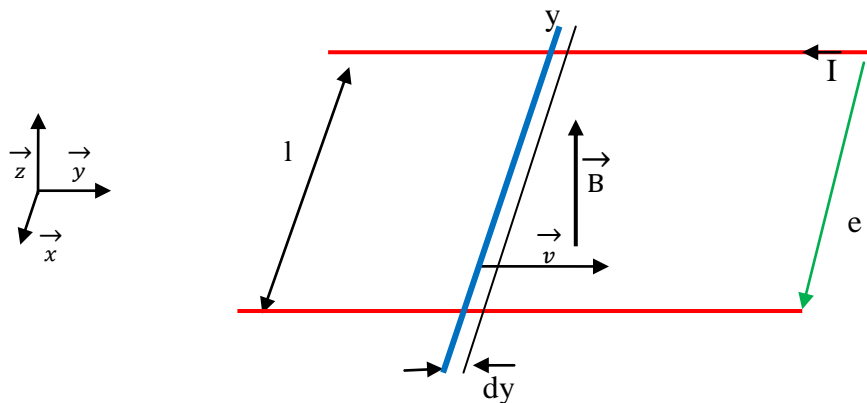


Fig.I.3-Barre en translation dans le champ B

entre  $t$  et  $t+dt$ , la barre parcourt la distance élémentaire  $dy = V \cdot dt$

le flux coupé par le conducteur est alors:

$$d\Phi = B \cdot dS = B \cdot L \cdot dy \quad (I.1)$$

en appliquant (en module) la loi de Faraday, on obtient l'expression de la f.e.m induite:

$$e = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{B \cdot l \cdot dy}{dt} = B \cdot l \cdot V \quad (I.2)$$

On remarque que la f.e.m est principalement en fonction de l'induction magnétique  $\vec{B}$  créé par l'excitatrice et de la vitesse du conducteur  $\vec{V}$

#### Remarque :

Si l'induction  $\vec{B}$  ou la vitesse  $\vec{V}$  changent de sens, le sens de flux change et la f.e.m change de sens.

### I.2.2- Principe de fonctionnement des moteurs à courant continu :

Un conducteur placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant est soumis à une force mécanique  $\vec{F}$  dite «force de Laplace» dont le sens est déterminé par la direction du champ et celle du courant. C'est sur ce principe que sont basés les moteurs électriques.

En tenant compte de ce qui est écrit au début et en se rapportant à la fig.3., il suffit d'appliquer la règle des trois doigts de la main droite pour trouver le sens de la force qui agit sur les conducteurs et donner de ce fait le sens de rotation du moteur.



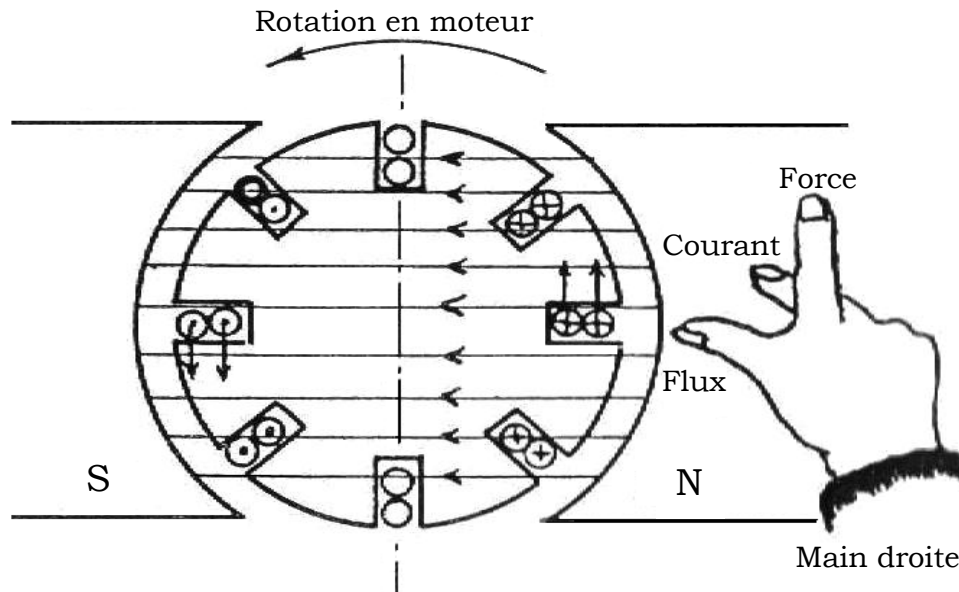


Fig.I.4- Recherche du sens de la force appliquée aux conducteurs par la règle de la main droite

voyons comment il est possible de créer une force mécanique sur un conducteur parcouru par un courant électrique et logé dans un champ magnétique :

Soit le même schéma de la figure.3.

Si le conducteur est maintenant parcouru par un courant  $I$ , la loi de Laplace nous donne:

$$d\vec{F} = I.d\vec{x} \wedge \vec{B} \quad (I.3)$$

$$d\vec{F} = B.I.dx.\vec{x} \wedge \vec{z} = B.I.dx(-\vec{y}) \quad (I.4)$$

$$d\vec{F} = -B.I.dx.\vec{y} \quad (I.5)$$

$d\vec{F}$  c'est l'effort élémentaire appliqué au conducteur

On remarque que le mouvement a lieu dans le sens contraire au précédent ( $-\vec{y}$ ). C'est ce que l'on traduit souvent par l'expression de f.e.m «s'opposant» au déplacement du conducteur.

### I.3- Morphologie:

La construction des machines à courant continu est parfaitement normalisée. Ainsi, la disposition et le dimensionnement sont semblables d'un constructeur à l'autre [01].

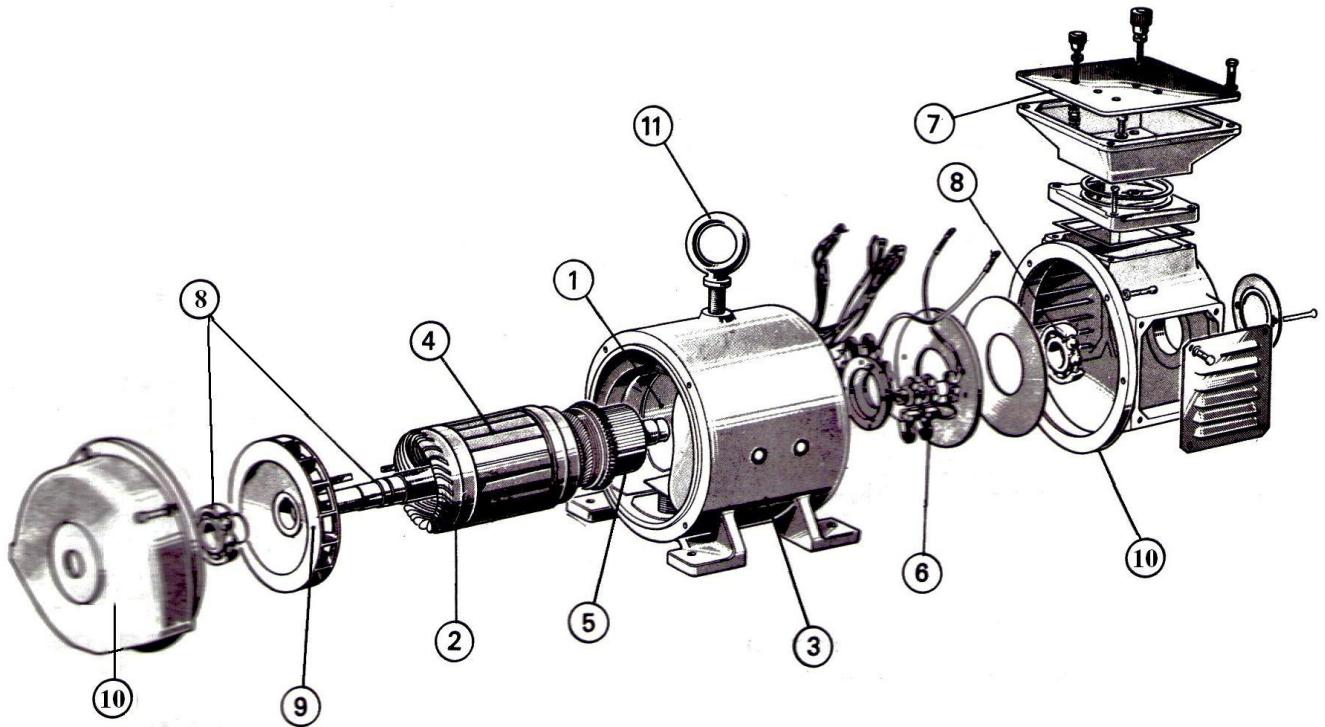


Fig.I. 5 - Vue éclatée d'une machine à courant continu : 1 – Pôles d'inducteur ; 2 – Induit; 3 – Stator ; 4 – Faisceaux conducteurs ; 5 – Collecteur ; 6 – Balais et porte-balais ; 7 – Plaque à bornes ; 8 – Roulement ; 9 – Turbine de ventilation ; 10 – Flasques paliers (côté bout d'arbre et côté collecteur) ; 11 – Anneau de manutention

#### I.3.1-Organes magnétique :

Ils produisent le flux et le canalisent; ce sont : les pôles inducteurs (1); l'induit (2); la culasse (3); les pôles auxiliaires (4).

#### I.3.2-Organes électriques :

Ils sont le siège de la f.é.m. et assurent la liaison avec le circuit extérieur ; ce sont : les faisceaux de conduction (4) ; le collecteur (5) ; les balais (6) ; la plaque à bornes (7) ; l'enroulement de compensation magnétique d'induit ; l'enroulement des pôles auxiliaire .

#### I.3.3-Organes mécaniques :

Ils servent à fixer les organes magnétiques et électriques les uns par rapport aux autres et à assurer le guidage en rotation ; ce sont : le stator ou la carcasse avec pattes de fixation (3) ; l'arbre et les roulements (8) ; la turbine de ventilation (9) ou ventilateur ; les flasques paliers côté arbre et côté collecteur (10) ; l'anneau de manutention (11).

## I.4- Les rôles des organes d'une machine à courant continu :

On distingue deux types de circuits dans une machine à courant continu :

### I.4.1- Circuit magnétique :

Le circuit magnétique d'une machine tournante est un producteur d'un flux fixe. Ce flux est canalisé par la culasse d'une part, et passe par l'entrefer et l'induit tournant d'une autre part. Parmi ces composants on trouve :

#### I.4.1.1- Pôles inducteurs

Les pôles inducteurs ont pour rôle de créer le flux inducteur dans la machine. Ce flux est généré soit par un ou plusieurs enroulements d'excitation alimentés en courant continu, soit par des aimants permanents. Ce flux est canalisé par des matériaux ferromagnétiques, il est constant dans la partie portant les pôles inducteurs et dans les pôles eux-mêmes (noyaux).

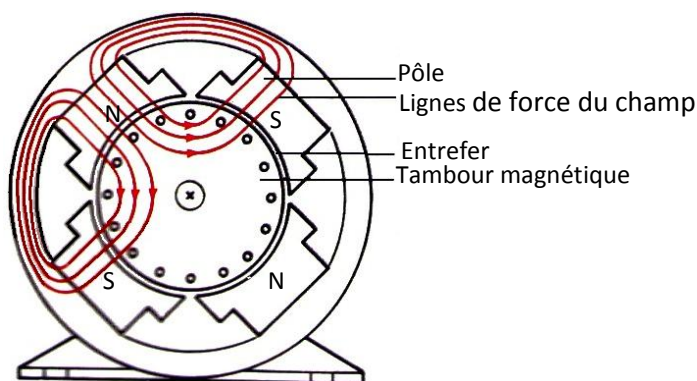


Fig.I.6 -Circuit magnétique d'une MCC

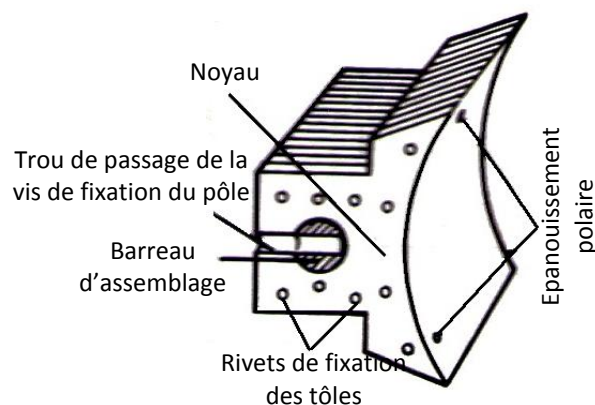


Fig.I.7 - Pôle inducteur

Le noyau du pôle peut être massif ou en assemblage de tôles magnétiques d'acier au silicium (1 ÷ 4% de silicium).

#### I.4.1.2- Pôles auxiliaire ou de commutation

Ils sont placés entre les pôles principaux selon les axes inter polaires dits axes neutres, le flux qu'ils produisent améliore la commutation. Ils réduisent les étincelles aux balais, ces étincelles étant produites par le renversement du sens de courant dans les sections court-circuitées par les balais. L'enroulement de ces pôles est en série avec l'enroulement d'induit.

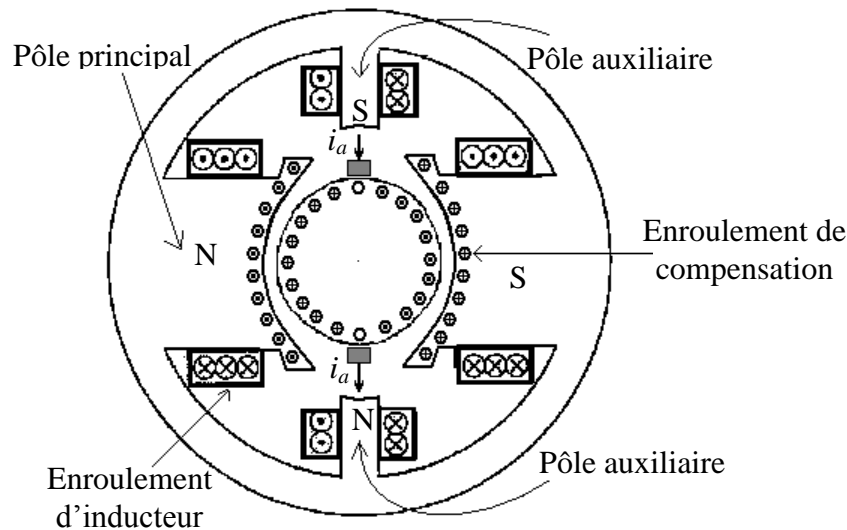


Fig.I.8 – Différents pôles et enroulements d'une MCC

#### I.4.1.3- Circuit magnétique tournant

Le flux est variable à chaque tour d'où la nécessité de feuilletter le circuit magnétique pour diminuer les pertes par des courants de Foucault (tôle d'épaisseur 0,35 à 0,5 mm d'acier au silicium (1 ÷ 4% de silicium)).

#### I.4.1.4- La Carcasse ou la culasse

Elle assure simultanément deux fonctions: Elle permet aux lignes du champ magnétique de se refermer, d'où une section minimale à respecter et l'emploi de matériaux tels que l'acier moulé ou l'acier forgé ; C'est le bâti de la machine sur lequel viennent se fixer les pôles, les flasques, la plaque à bornes.

### I.4.2- Circuit électrique :

parmi ses composants on trouve :

#### I.4.2.1- Les Bobines d'inducteur

Elles sont destinées à produire le flux inducteur. La puissance d'excitation est environ 1 à 3 % de la puissance totale ; elle peut aller jusqu'à 5 % pour les petites machines. On distingue l'enroulement d'excitation monté en dérivation sur l'induit (excitation shunt), grand nombre de spires de fil fin, l'enroulement d'excitation en série, petit nombre de spires, de gros fil, l'enroulement d'excitation séparée et l'enroulement d'excitation composée

### I.4.2.2- Les bobines des pôles auxiliaires (pôles de commutation) :

Elles sont toujours en série avec l'induit et comportent seulement quelques spires de fil de grosse section.

Lorsque qu'une section (ensemble de conducteurs logés dans des encoches distantes d'un pas polaire:  $N_e$  / nombre de pôles, ou  $N_e$  est le nombre d'encoches) passe dans le plan neutre (endroit où la polarité magnétique change de signe dans l'entrefer), le courant doit s'inverser. Idéalement, l'évolution du courant devrait être linéaire pour garder une densité de courant constante sous les balais. En pratique, il n'en est pas ainsi à cause de l'inductance des sections en commutation (qui occasionne un retard dans l'évolution du courant). Lorsque le balai court-circuite la section, on écrit :

$$R.I(t) + L \frac{dI(t)}{dt} = 0 \quad (I.5)$$

Donc, sans apport d'une f.e.m. extérieure, il est impossible que le courant s'inverse dans la section. Sur les machines de puissance supérieure à quelques kW, il est nécessaire de générer cette f.e.m. de commutation ( $e_c$ ) à l'aide d'un champ extérieur, créé à l'aide de pôles auxiliaires de commutation. Si  $T$  est le temps durant lequel la section est en court circuit et que l'on néglige  $R$ , on peut écrire :

$$e_c = L \cdot \frac{dI(t)}{dt} = L \cdot \frac{\Delta I}{T} = L \cdot \frac{I}{T} \quad (I.6)$$

On constate que cette f.e.m. est proportionnelle au courant et à la vitesse de rotation. La f.e.m induite par la présence des pôles auxiliaires étant, elle aussi, proportionnelle à la vitesse de rotation, il suffit pour assurer une bonne commutation que le nombre de spires des pôles auxiliaires soit bien calculé et que le courant qui les traverse soit proportionnel au courant d'induit.

### I.4.2.3- Enroulement de compensation magnétique d'induit :

Le passage du courant dans les enroulements d'induit provoque l'apparition d'un champ magnétique transversal ayant pour conséquence de déformer les lignes de champs principales dans la machine. Ceci entraîne généralement une diminution du flux total. Pour réduire ce phénomène, on place pour de très grosses machines, dans les pôles inducteurs, des enroulements parcourus par le courant d'induit, ayant pour rôle de créer un champ antagoniste

au champ transversal d'induit. Cet enroulement est disposé dans de petites encoches pratiquées à la surface des pôles principaux. On peut ainsi créer une f.m.m. exactement opposée à celle de l'induit. L'enroulement de compensation est mis en série avec l'induit. Sa résistance s'ajoute donc à la résistance d'induit.

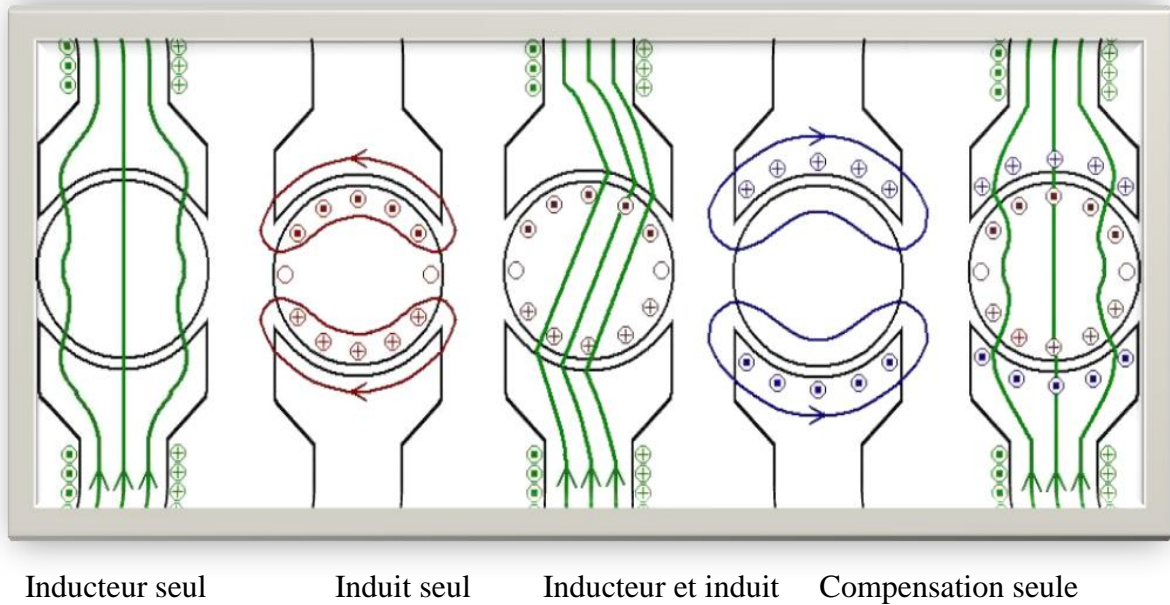


Fig.I.9-le rôle des enroulements de compensation magnétique d'induit .

**I.4.2.4- Enroulement d'induit :**

Il se compose d'un certain nombre de sections fermées de spires dont les extrémités sont reliées à deux lames consécutives du collecteur.

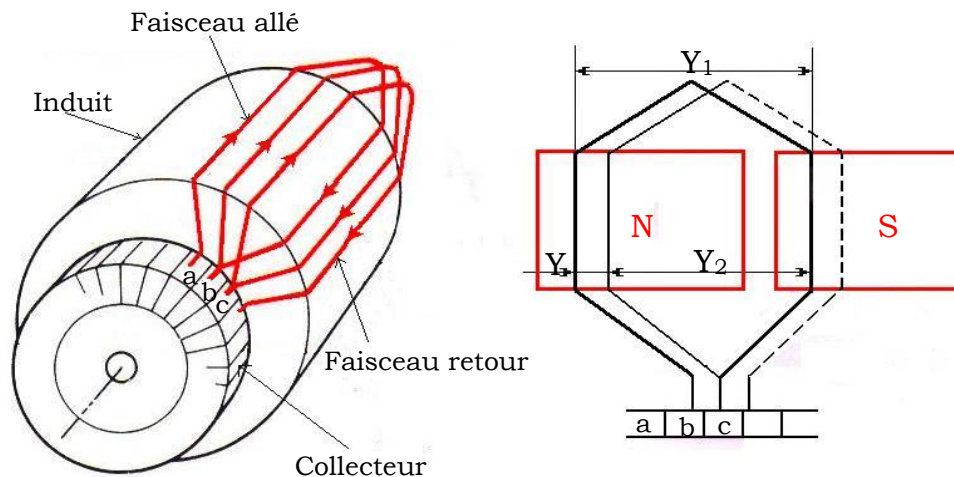


Fig.I.10 - Représentation de 3 sections sur un induit de machine à 4 pôles



Définitions :

- Section (trait fort) : c'est l'ensemble des spires que l'on parcourt pour aller d'une lame de collecteur à la lame suivante.
- Faisceau ou demi – section : c'est l'ensemble des conducteurs actifs d'une section.
- ( $Y_1$ ) Largeur de section ou pas arrière : nombre de faisceaux pour aller d'un faisceau à l'autre d'une même section.
- ( $Y_2$ ) Pas avant : nombre de faisceaux pour aller du faisceau de sortie d'une section au faisceau d'entrée de la section suivante.
- ( $Y$ ) Pas résultant : ces 3 pas sont reliés par la relation suivante :  $Y=Y_1 \pm Y_2$ . La condition essentielle que doit remplir un enroulement est que la largeur de la section  $Y_1$  soit aussi proche que possible du pas polaire. Enfin, un enroulement de machine à courant continu est fermé sur lui – même et symétrique par rapport aux balais.

On distingue deux types d'enroulements ou de bobinages :

#### I.4.2.4.1- Enroulement imbriqué :

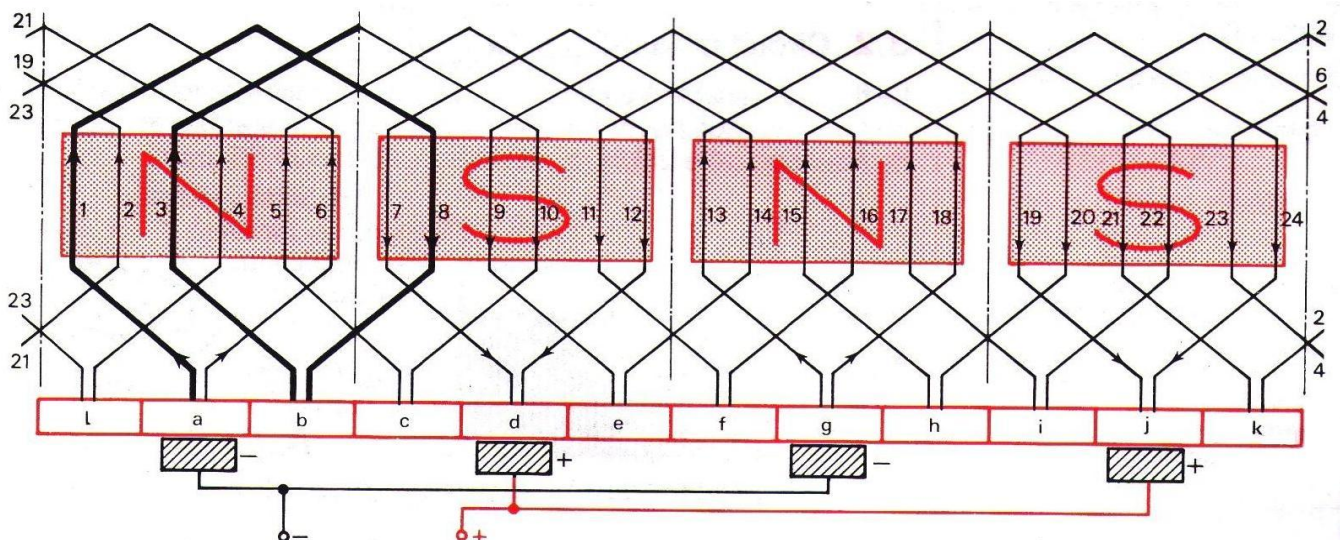


Fig.I.11 – Exemple : Induit comportant 24 faisceaux, 12 lames au collecteur, pas arrière 7, pas avant 5. Pas résultant :  $Y=Y_1 \pm Y_2 = 7 - 5 = 2$

#### I.4.2.4.2- Enroulement ondulé :

C'est un enroulement en série, les sections sont reliées à la suite les unes des autres

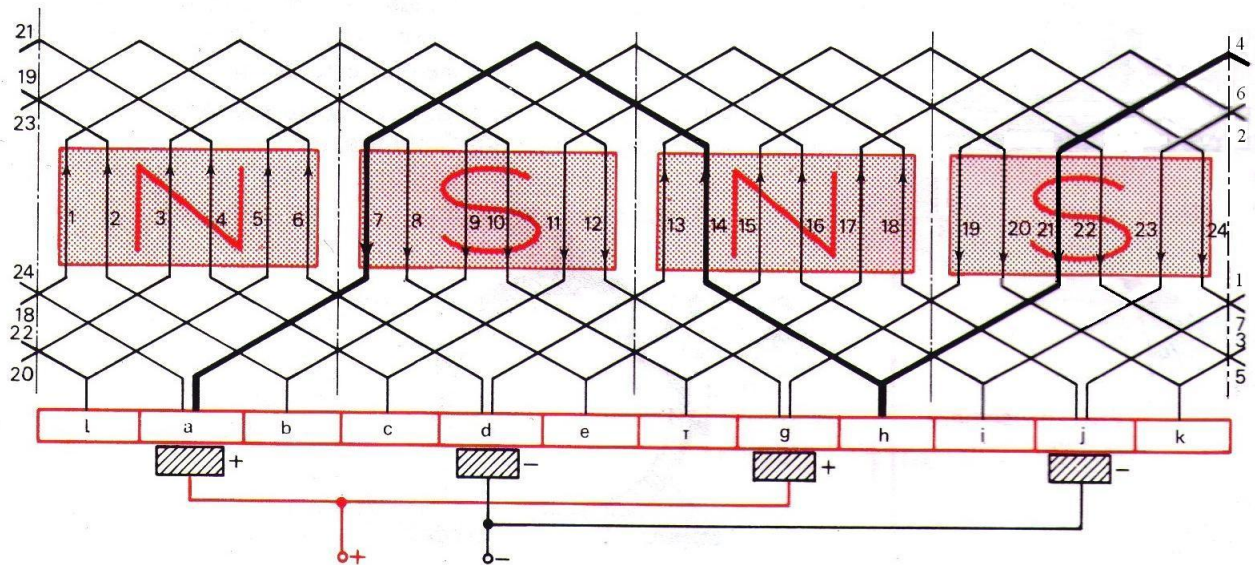


Fig.I.12 - Exemple : Induit comportant 24 faisceaux, 12 lames au collecteur, pas arrière 7, pas avant 7. Pas résultant = 14

#### I.4.2.5- Le collecteur :

Le collecteur assure la liaison entre les conducteurs tournants et le circuit extérieur fixe. Il transforme le courant alternatif induit dans les bobinages en courant continu (fonctionnement génératrice) et le courant continu d'alimentation en courant alternatif (fonctionnement moteur).

En traversant la ligne neutre, la polarité des conducteurs change ; mais, en même temps, les demi-bagues changent aussi de balais ; finalement, les balais conservent la même polarité. Lorsque la spire est sur la ligne neutre, les f.e.m. induites dans les conducteurs sont nulles et la spire est en court – circuit par les balais.



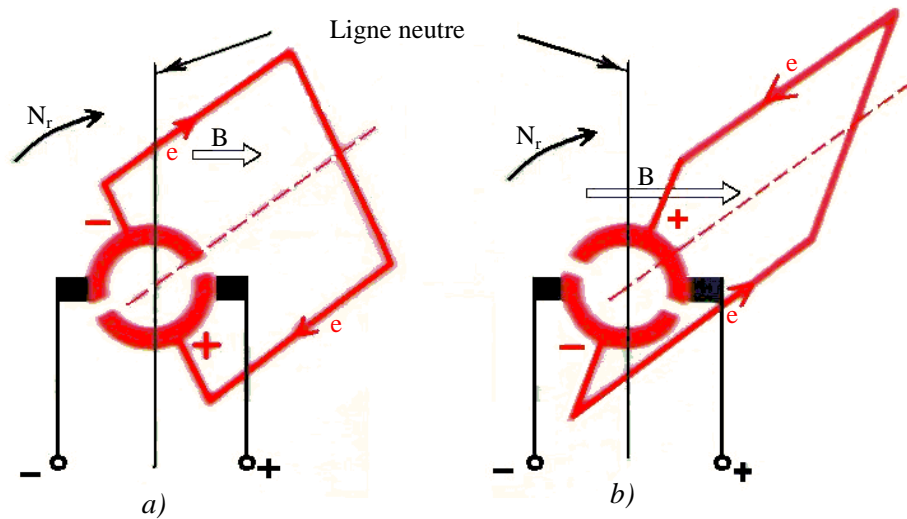


Fig.I.13- schéma de principe de fonctionnement du système balais collecteur.

Le collecteur est claveté sur l'arbre de l'induit. Il se compose de lame de cuivre, dont la section est un trapèze, portant chacune une ailette de connexion à l'enroulement de l'induit; ces lames sont isolées, par du mica, les unes des autres et assemblées de façon former une couche cylindrique sur laquelle frottent les balais.

Chaque lame est soudée au fil de sortie d'une section et à l'entrée de la section suivante, c'est-à-dire chaque lame est reliée électriquement au bobinage induit.

Le collecteur est le constituant critique des machines à courant continu car ses lames sont soumises aux efforts centrifuges et assemblées manuellement. Son usure due au frottement avec les balais nécessite un démontage et un ré-usinage périodiques. De plus, il accroît de 20 à 30% la longueur totale de la machine.

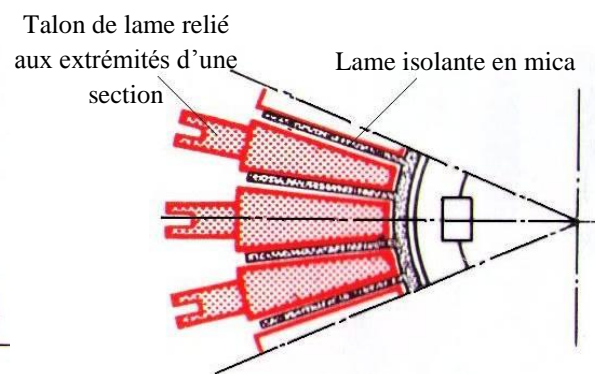
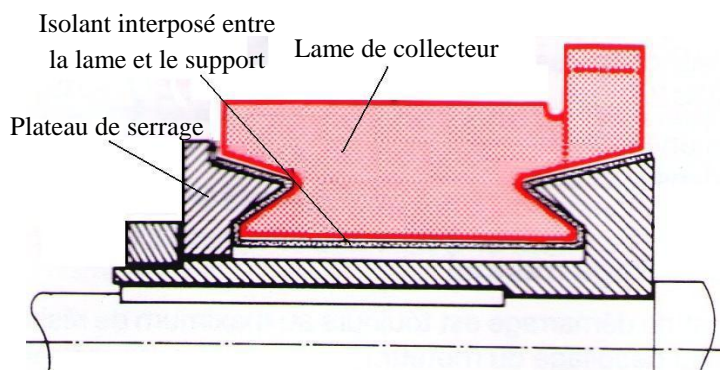
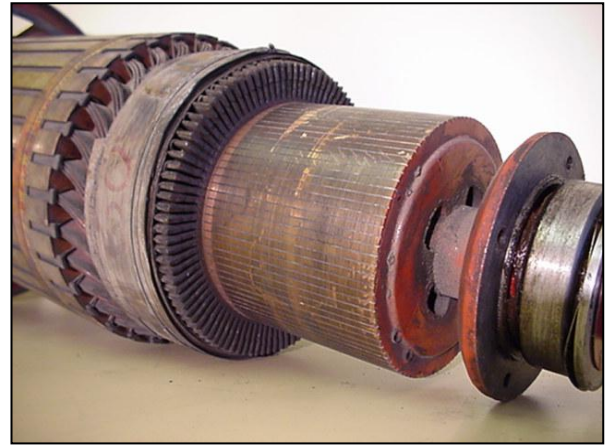
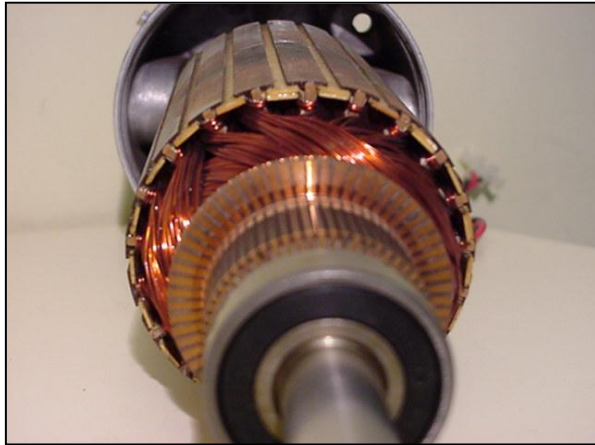


Fig.I.14 - Rotors et coupes longitudinale et transversale d'un collecteur

#### I.4.2.6- Les Balais :

Les balais sont fixes et isolés électriquement du bâti de la machine. Ils assurent la liaison électrique (contact glissant) entre la partie fixe et la partie tournante. Pour des machines de forte puissance, la mise en parallèle des balais est alors nécessaire.

Pour des raisons d'économie, ils doivent avoir une durée de vie aussi longue que possible et assurer un bon contact électrique. Différentes technologies existent : les balais au charbon dur, les graphitiques, les électro-graphitiques, et les métallo-graphitiques. On peut considérer que dans un contact glissant, les pertes sont de nature mécanique à 35% et de nature électrique à 65%. Pour améliorer la conductibilité des balais et assurer un meilleur contact avec les porte – balais, on leur applique un cuivrage par électrolyse. Que le charbon soit cuivré ou non, le contact entre balais et porte – balais est toujours shuntés par un petit câble souple en cuivre.

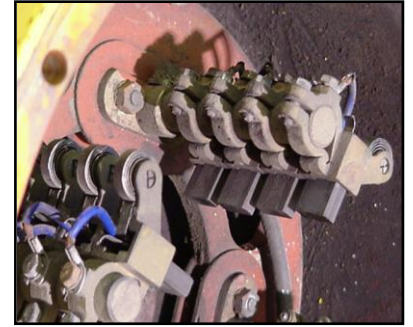
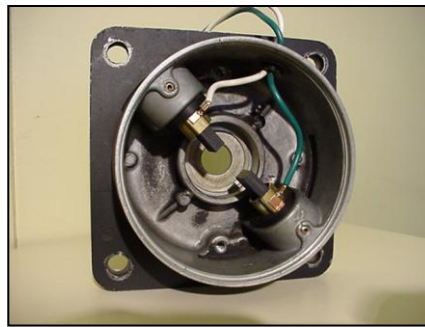


Fig. I.15 – Balais et porte balais

### I.5- Modes d'excitation

Les circuits de l'induit et de l'inducteur peuvent être connectés à la source électrique selon 4 modes différents [01]. Ce sont :

**I.5.1- L'excitation séparée:** est la solution qui donne la plus grande souplesse au niveau du réglage et ce mode permet en effet de contrôler de façon complètement séparée  $I$  et  $\Phi$ , mais elle suppose qu'on dispose de deux sources de tension réglables séparément pour les circuits induit et inducteur.

**I.5.2- L'excitation shunt (ou parallèle):** est utilisée précisément lorsque le réglage séparé des tensions induit et inducteur n'est pas possible.

**I.5.3- L'excitation série :** Les machines à excitation série sont équipées d'un enroulement à faible nombre de spires de forte section connecté en série avec l'induit et parcouru par un courant d'excitation égal au courant d'induit. Elle a deux intérêts :

- elle confère à la machine un comportement particulièrement bien adapté aux problèmes de la traction : lorsque la machine est à l'arrêt, la f.c.é.m. est nulle, le courant induit et le flux sont donc maximaux, d'où un démarrage facilité.

- son utilisation en courant alternatif est possible (moteur dit universel).

**I.5.4- L'excitation composée:** constitue une recherche de compromis entre les propriétés de l'excitation séparée et de l'excitation série. De plus, la composition peut être mise en œuvre soit de façon additive soit de façon soustractive, ce qui permet en particulier de corriger l'effet de la réaction d'induit. Cette machine est plus complexe, elle nécessite deux enroulements d'excitation.

Le comportement global de la machine, en particulier la caractéristique couple – vitesse, pour ne parler que du régime permanent, est fonction du mode d'excitation choisi.

Le mode (a) est aujourd'hui le plus important. Les possibilités de l'électronique actuelle, à la fois pour la commande et pour l'alimentation en puissance, permettent souvent d'éviter de recourir aux trois autres modes, où  $I$  et  $\Phi$  sont nécessairement liés. Ces modes constituaient des principes extrêmement sommaires de régulation. Or, la souplesse des régulateurs existants permet de définir à volonté les caractéristiques de la réponse, et fait perdre une grande partie de l'intérêt des systèmes d'excitation complexe.

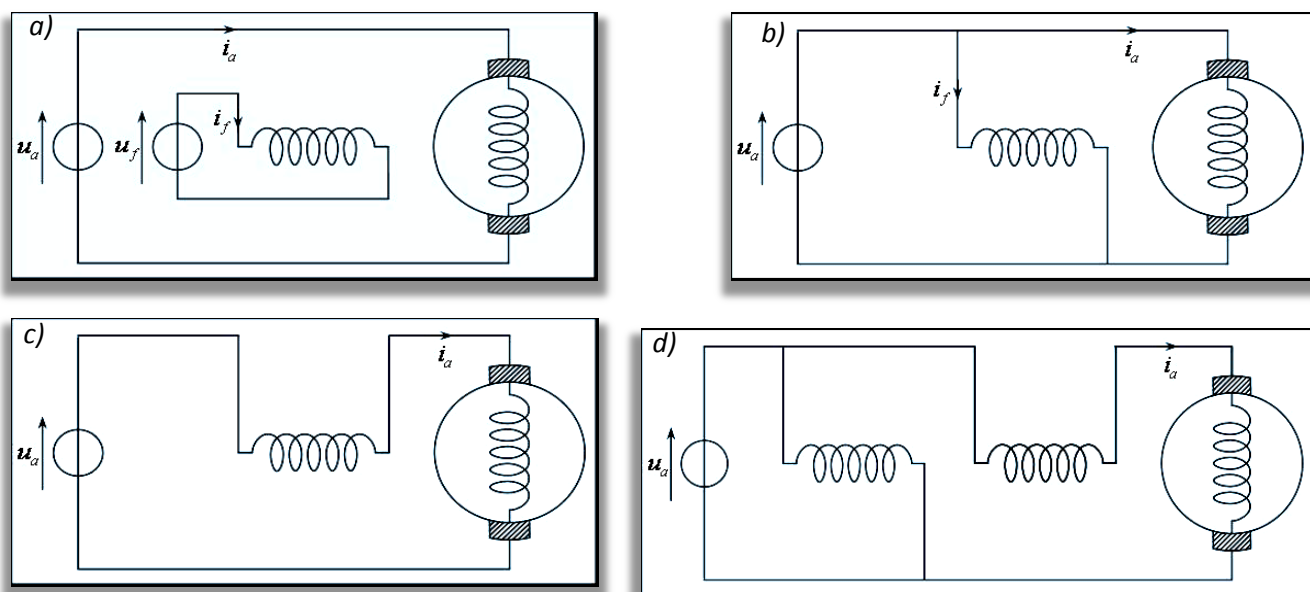


Figure I.16 - Différentes connexions du circuit d'excitation : a)- séparée ; b)- Shunt ; c)- Série ; d)- composée

## I.6- Choix d'un moteur à courant continu pour un service déterminé

Ce sont les caractéristiques de vitesse et de couple qui fixent le choix du type de moteur convenant à un emploi déterminé [01]:

**I.6.1-Moteurs à excitation indépendante** : La séparation complète des deux circuits d'inducteur et d'induit donne à ces moteurs une grande souplesse, mais complique leur installation. On ne les emploie que pour des puissances de plusieurs centaines de chevaux, par exemple pour la commande des laminoirs, la manœuvre des cages d'extraction dans les mines; Souvent leur excitation est constante. On applique aux bornes de l'induit une tension dont le sens peut changer, dont la valeur est réglable. On obtient ainsi une vitesse qui est réglable dans de très grandes limites, dans l'un ou l'autre sens de rotation.

**I.6.2- Moteurs shunt :**

Leur vitesse est pratiquement constante et réglable, leur couple est de valeur moyenne constante tant au démarrage qu'en marche normale. Ils servent pour la commande de machines – outils, de pompes centrifuges, de tous appareils dont le couple de démarrage est relativement faible. Certains ont une puissance de plusieurs milliers de chevaux.

**I.6.3- Moteurs compound :**

Leur vitesse diminue quand la charge augmente ; leur couple au démarrage est élevé. Ils conviennent pour entraîner des compresseurs, des pompes alternatives, des appareils démarrant en charge avec un couple important.

**I.6.4- Moteurs série :**

Leur vitesse est très variable, leur couple de démarrage est grand. Ce sont des moteurs de traction pour les tramways, les locomotives et les camions électriques, les tracteurs de bateaux, les appareils de levage . On ne les emploie pas quand ils risquent de fonctionner à vide ou à charge réduite. On en construit jusqu'à une puissance de quelques centaines de chevaux.

### I.7-f.e.m et couple de machines à courant continu

Avant d'entamer le chapitre suivant qui consiste à faire une modélisation de la machine à courant continu, il est nécessaire d'expliquer deux notions fondamentales sur les machines à courant continu [02] :

$$E = K.\Phi.\Omega \tag{I.7}$$

$$C_e = K.\Phi.I \tag{I.8}$$

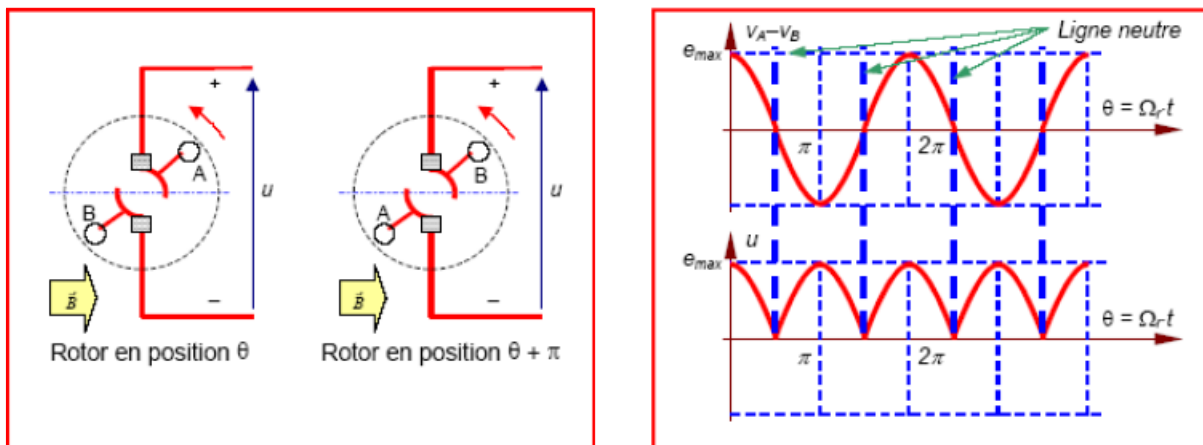


Fig.I.17- tension récoltée aux bornes d'une seule spire.

Le champ d'induction B est créé dans l'entrefer par les enroulements d'inducteur. Il est normale et de module constant en tout point de l'entrefer.

Sous l'effet de la rotation, la spire voit l'induction sous la surface :

$$S(t) = 2.R'.l.\sin\Omega r t. \tag{I.9}$$

Par sa variation, le flux qui en découle  $\Phi(t) = B.S(t)$  permet de créer la f.e.m  $e(t)$  par spire :

$$e(t) = \frac{d\Phi}{dt} = B.\frac{dS(t)}{dt} = 2.B.R'.l.\Omega r.\cos(\Omega r t) = \Phi.\Omega r.\cos(\Omega r t) \tag{I.10}$$

Ce résultat montre que la f.e.m induite est proportionnelle au flux  $\Phi$  sous un pôle et à la vitesse de rotation  $\Omega r$ .

### I.7.1-De la spire à l'enroulement :

Une spire a donc été soumise à une f.e.m induite lors de son déplacement dans le champ d'induction. Mais le niveau de la tension n'est pas suffisant pour un usage industriel : il est nécessaire de multiplier la tension récoltée entre les deux balais. Cela peut être obtenu au travers de trois moyens :

#### I.7.1.1-Création de faisceaux :

Pour élever la tension par spire, il faut augmenter la longueur des conducteurs  $l$  (dans l'expression  $B.l.V$  ). Mais c'est au détriment de l'encombrement de la machine (elle devient plus longue). Pour éviter cet inconvénient, le conducteur est bouclé plusieurs fois dans la même encoche pour augmenter la longueur équivalente. (voir Fig.19).

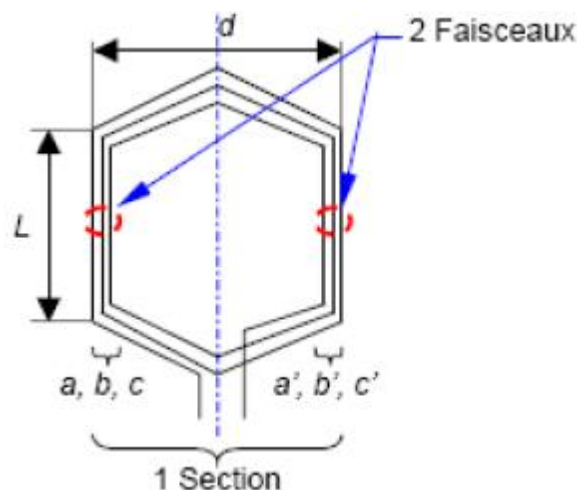


Fig.1.18-Faisceaux et section

#### I.7.1.2-Augmentation du nombre de voies d'enroulement :

Les groupes de conducteurs sous chaque pôle sont placés en parallèle pour former les voies d'enroulements. C'est la partie de bobinage comprise entre deux balais. Le nombre de voie d'enroulement est toujours paire, on le note par  $2a$  ( $a$  désigne le nombre de paire de voies d'enroulement. (voir Fig.21)



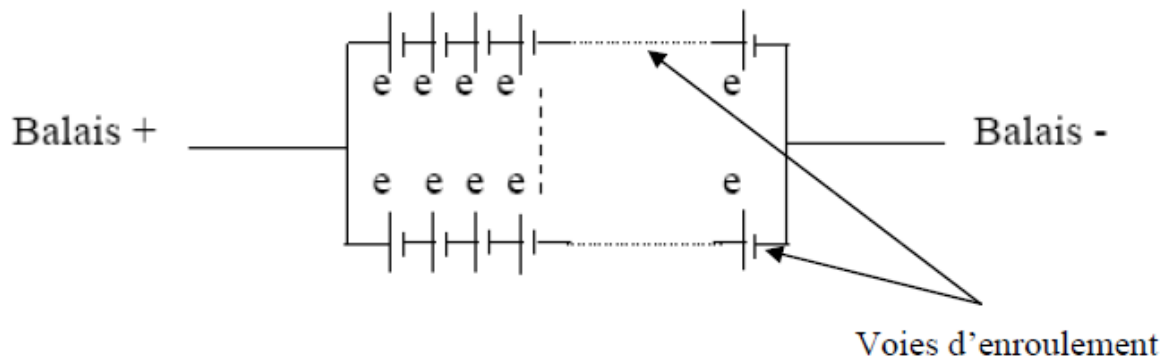
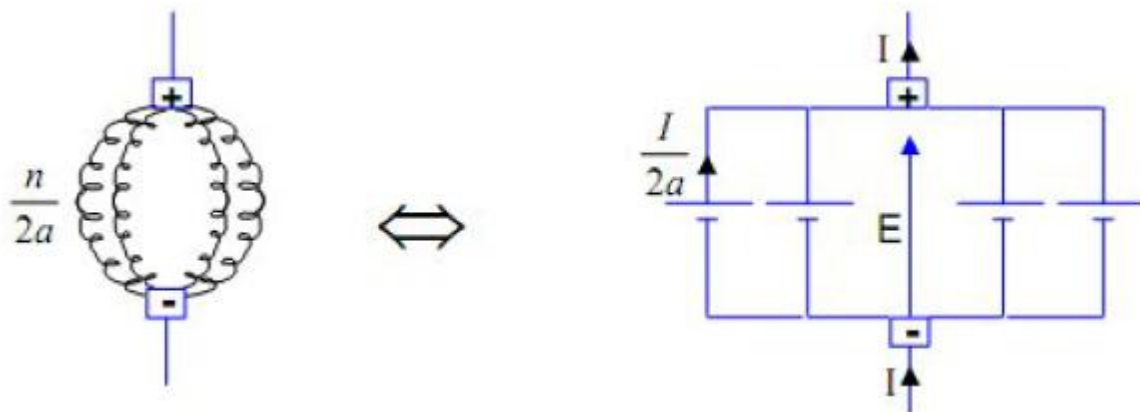


Fig-I.19.Répartition des voies d'enroulements entre deux balais

Exemple  $2a=4$ Fig.I.20-Répartition des voies d'enroulements entre deux balais pour  $2a=4$ 

La tension développée entre les deux balais est celle aux bornes d'une voie d'enroulement, par contre le courant traversant chaque voie est  $I/2a$ . C'est aussi le courant traversant chaque conducteur.

### I.7.1.3-création de pôles supplémentaires :

Ce moyen consiste à créer des f.e.m induites sous des pôles supplémentaires (qui vont par paires) puis à placer en série les f.e.m résultantes.

On appelle alors  $p$  le nombre de paires de pôles inducteurs de la machine.(voir Fig.22)



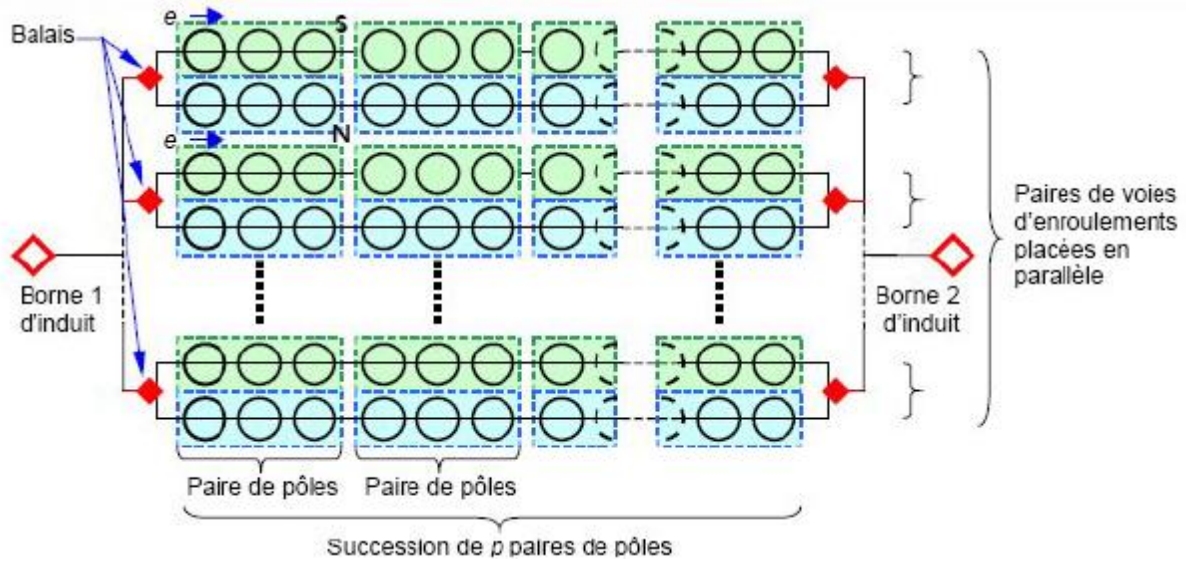


Fig.I.21-schéma globale d'induit

**I.7.2-Calcul de la f.e.m totale E :**

Pour exprimer la f.e.m totale délivrée par la MCC, on considère une machine bipolaire, à deux voies d'enroulement, pourvue de \$n\$ conducteurs ou brins actifs (\$n/2\$ spire).

$$E = \sum_{i=1}^{n/2} e_i = \frac{n}{2} e = \frac{n}{2} \frac{\Phi \cdot \Omega r}{\pi} \tag{I.11}$$

La f.e.m est proportionnelle au nombre de conducteur (\$n\$), au flux sous un pôle (\$\Phi\$ en Wb) et à la vitesse de rotation \$\Omega r\$ en rad/s

$$E = n \cdot \Phi \cdot \frac{\Omega r}{2\pi} \tag{I.12}$$

On pose \$Nr = \frac{\Omega r}{2\pi}\$ : vitesse de rotation en tr/s \$\Rightarrow E = n \cdot Nr \cdot \Phi\$ (I.13)

**I.7.3-Expression finale de la f.e.m :**

L'augmentation du nombre de paires de pôle diminue le pas polaire, ce qui permet de créer des f.e.m élémentaires sur une fraction de tour de la machine. en plaçant toutes ces f.e.m par pôle en série, on augmente la f.e.m totale d'un facteur \$2p\$ (le nombre de répétition des pôles). Mais les conducteurs organisés en voies d'enroulements sont mis en parallèle. Cela diminue la f.e.m d'un facteur égale au nombre de voies, soit \$2a\$. On obtient la nouvelle relation:

$$E = \frac{2p}{2a} \cdot n \cdot \Phi \cdot \frac{\Omega r}{2\pi} \quad (\text{I.14})$$

$$\text{En posant : } K = \frac{p}{2\pi a} n \Rightarrow E = K \cdot \Phi \cdot \Omega r \quad (\text{I.15})$$

La f.e.m totale de la MCC dépend :

- de paramètres de construction, purement technologiques(p, a et n) ;
- du paramètre de fonctionnement interne, le flux sous un pôle  $\Phi$  ;
- du paramètre de fonctionnement externe, la vitesse de rotation  $\Omega_r$ .

#### I.7.4-Le couple électromagnétique :

$$\text{On a la puissance électromagnétique } P_e = E \cdot I_a \quad (\text{I.16})$$

( $I_a$  le courant qui circule dans l'induit)

$$P_e = C_e \cdot \Omega r \quad (\text{I.17})$$

( $C_e$  Le couple électromagnétique)

$$C_e = \frac{P_e}{\Omega r} \quad (\text{I.18})$$

$$\text{D'après la formule (I.15) } \Omega r = \frac{E}{K \cdot \Phi} \quad (\text{I.19})$$

$$\text{Donc } C_e = \frac{P_e \cdot K \cdot \Phi}{E} \Rightarrow C_e = \frac{E \cdot I_a \cdot K \cdot \Phi}{E} \Rightarrow C_e = K \Phi I_a \quad (\text{I.20})$$

Le couple délivré par la machine dépend :

- de paramètres de construction, purement technologiques(p,a et n) ;
- du paramètre de fonctionnement interne, le flux sous un pôle  $\Phi$  ;
- du paramètre de fonctionnement externe, le courant d'induit  $I_a$ .

On remarque que la constante de la f.e.m  $K$  et celle du couple électromagnétique sont égales.

## 1.8- Conclusion :

### Pourquoi utilise – t – on encore des moteurs à CC ?

Les technologies alternatives de moteurs électriques (moteur synchrone, moteur asynchrone), permettent aujourd'hui en association à l'électronique de puissance de réaliser des équivalents fonctionnels de la machine à CC, avec des performances techniques ou économiques supérieures (compacité, durée de vie). Les machines à CC restent néanmoins utilisées, principalement dans les situations suivantes :

- Lorsque l'on ne dispose que d'une source d'énergie électrique en continu (véhicule,...) ;
- Lorsque l'on a besoin d'une précision élevée en vitesse, en positionnement, ou en accélération (asservissements, robotiques,...) ;
- Lorsque l'on veut réaliser simplement la commande de  $U$  et de  $\Phi$  (donc de  $\Omega$  et de  $C_e$ ) ;
- Lorsque l'on a besoin d'un couple élevé à l'arrêt ;

Il n'y a pas lieu d'envisager la disparition de ces machines, en dehors du domaine des fortes puissances et de la production d'énergie électrique. Le secteur de la construction automobile en particulier devrait rester pour un certain nombre d'années au moins, un grand consommateur de ce type de machines.

## II.1- Introduction :

La machine à courant continu peut être modélisée par un groupe d'équations électrique, électromécanique et mécanique. Ces trois groupes d'équations nous permettront de mieux comprendre le fonctionnement réel de la machine. En général ces équations sont complexes. En effet, la répartition du flux, des enroulements et la géométrie propre de la MCC rendent son modèle difficile à mettre en œuvre. Cependant, l'adoption de certaines hypothèses simplificatrices permet de contourner cette difficulté. Et pour cela le modèle que nous adopterons tient compte des hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable ;
- Machine d'une construction symétrique ;
- La saturation du circuit magnétique et les courants de Foucault sont négligeables
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau (effet pelliculaire);

## II.2- Modélisation d'une machine à courant continu à excitation indépendante :

Le schéma électrique d'une machine à excitation indépendante est le suivant :

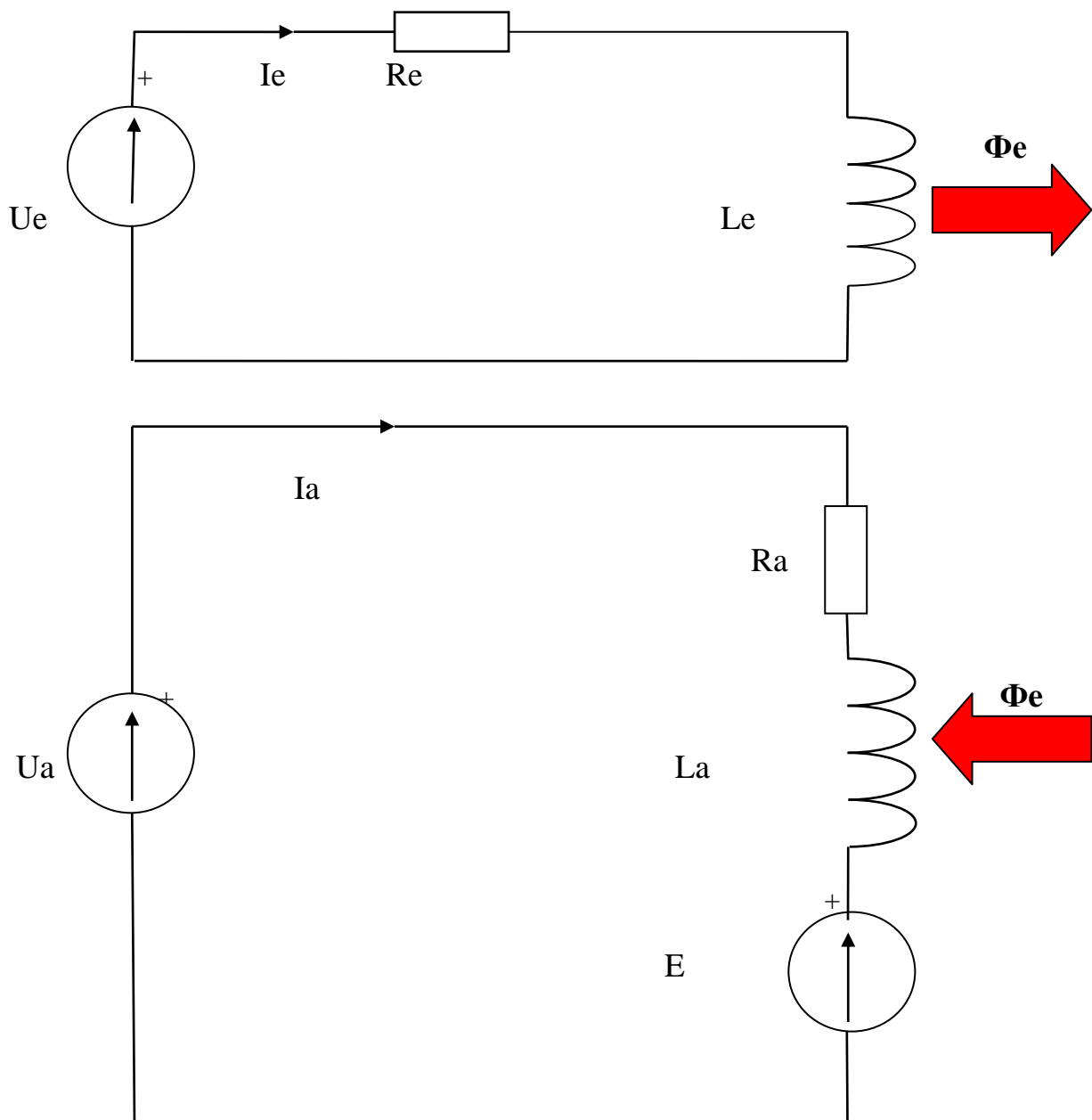


Fig.II.1- Modèle électrique de la MCC à excitation indépendante

**II.2.1- Les paramètres de la machine à CC à excitation séparée :**

- La tension aux bornes de l'induit  $U_a(t)$
- le circuit électrique de l'induit, faisant apparaître :
- La résistance de l'induit  $R_a$  ;
- L'inductance de l'induit  $L_a$  ;
- Une tension  $E(t)$  appelée f.e.m. (force électro-motrice), proportionnelle à la vitesse angulaire  $\Omega(t)$  ;
- Le courant traversant le circuit d'induit  $I_a(t)$  ;
- La tension qui alimente l'inducteur  $U_e(t)$  ;
- le courant qui circule dans l'inducteur  $I_e(t)$  ;
- Le circuit électrique de l'inducteur, fixé au stator, créant un flux magnétique d'excitation  $\Phi_e$ , il comporte :
- une résistance  $R_e$ , et une inductance  $L_e$  ;
- $L_{ea}$  : Mutuelle inductance entre l'inducteur et l'induit ;
- Le courant traversant le circuit d'inducteur  $I_e(t)$  ;
- La charge mécanique, dépendante de l'application (inertie  $J$ , frottement  $f$ ) ;
- La vitesse du rotor du moteur  $\Omega(t)$

**II.2.2- Equations électriques :**

-équation d'inducteur :

$$U_e(t) = R_e \cdot I_e(t) + L_e \cdot \frac{dI_e(t)}{dt} \quad (\text{II.1}) [2]$$

-équation d'induit :

$$U_a(t) = R_a \cdot I_a(t) + \frac{d\Psi}{dt} = R_a \cdot I_a(t) + L_a \cdot \frac{dI_a(t)}{dt} + e(t)$$

$$U_a(t) = R_a \cdot I_a(t) + L_a \cdot \frac{dI_a(t)}{dt} + e(t) \quad (\text{II.2}) [2]$$

équation du flux magnétique :

$$\Phi_e(t) = L_{ea} \cdot I_e \quad (\text{II.3}) [2]$$

**II.2.3- Equations électromécaniques :**

-La tension induite  $e(t)$ , appelée f.e.m ("force électromotrice") est proportionnelle à la vitesse angulaire  $\Omega(t)$  et au flux inducteur  $\Phi_e(t)$  :

$$e(t) = K \cdot \Phi_e(t) \cdot \Omega(t) \quad (\text{II.4}) [2]$$

$K$  est une constante dépendant de la construction de la machine. La première équation montre que  $e(t)$  s'oppose à  $U_a(t)$ , c'est à dire que le moteur réagit en créant une f.e.m  $e(t)$  tendant à s'opposer à  $U_a(t)$ . Cet effet est bien visible dans le schéma fonctionnel du moteur.

Le couple électromagnétique  $C_e$  développé a pour expression :

$$C_e = K \cdot \Phi_e(t) \cdot I_a(t) \quad (\text{II.5}) [2]$$

**II.2.4- équation mécanique :**

En assimilant le couple moteur au couple électromagnétique, il devient :

$$C_e - C_r = \Sigma J \cdot \frac{d\Omega(t)}{dt} + f \cdot \Omega(t) \quad (\text{II.6}) [2]$$

Où  $C_r$  est le couple résistant imposé par la charge,  $\Sigma J$  le moment d'inertie total (machine + charge entraînée) et  $f$  le coefficient de frottement proportionnel à la vitesse de rotation  $\Omega(t)$ .

**II.2.5- Transformées de Laplace**

Les transformées de Laplace des équations sont les suivantes :

$$U_e = R_e \cdot I_e + s \cdot L_e \cdot I_e$$

$$U_a = R_a \cdot I_a + s \cdot L_a \cdot I_a + E$$

$$\Phi_e = L_e \cdot I_e$$

$$E = K \cdot \Phi_e \cdot \Omega$$

$$C_e = K \cdot \Phi \cdot I_a$$

$$C_e - C_r = \Sigma J \cdot s \cdot \Omega + f \cdot \Omega$$





### II.3- Modélisation d'une machine à courant continu à excitation série :

Le schéma électrique d'une machine à excitation série est le suivant :

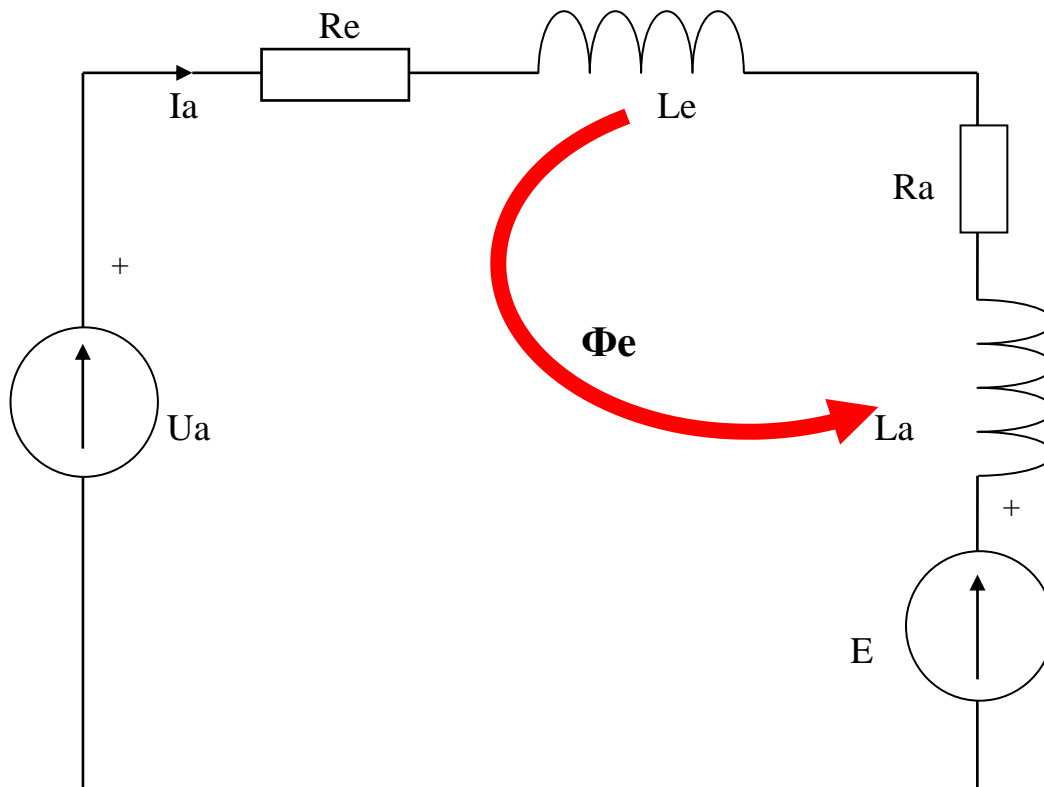


Fig.II.3- Modèle électrique d'une MCC à excitation série

#### II.3.1- Les paramètres de la machine à CC à excitation série :

- La tension aux bornes de l'induit  $U_a(t)$
- La résistance de l'induit  $R_a$  ;
- L'inductance de l'induit  $L_a$  ;
- Une tension  $e(t)$  appelée f.e.m. (force électromotrice), proportionnelle à la vitesse angulaire  $\Omega(t)$  ;
- Le courant traversant le circuit d'induit  $I_a(t)$  ;
- L'inducteur créant un flux magnétique d'excitation  $\Phi_e$ ; il comporte :
  - une résistance  $R_e$ , et une inductance  $L_e$  ;
  - $L_{ea}$  : Mutuelle inductance entre l'inducteur et l'induit ;

- La charge mécanique, dépendante de l'application (inertie  $J$ , frottement visqueux, élasticité de la transmission, etc.) ;
- La vitesse du rotor du moteur  $\Omega(t)$

### II.3.2- Equations électriques :

-Equation d'induit :

$$U_a(t) = (R_a + R_e).I_a(t) + (L_a + L_e) \cdot \frac{dI_a(t)}{dt} + e(t) \quad (\text{II.7}) [2]$$

-équation de flux :

$$\Phi_e(t) = L_{ea}.I_a \quad (\text{II.8}) [2]$$

### II.3.3- Equations électromécaniques :

La tension induite  $e(t)$ , appelée f.e.m ("force électromotrice") est proportionnelle à la vitesse angulaire  $\Omega(t)$  et au flux inducteur  $\Phi_e(t)$  :

$$e(t) = K \cdot \Phi_e(t) \cdot \Omega(t)$$

$$e(t) = K \cdot L_{ea} \cdot I_a \cdot \Omega(t) \Rightarrow e(t) = K' \cdot I_a \cdot \Omega(t) \quad (\text{II.9}) [2]$$

Le couple électromagnétique  $C_e$  développé a pour expression :

$$C_e = K \cdot \Phi_e(t) \cdot I_a(t) \quad (\text{II.10}) [2]$$

### II.3.4- équation mécanique :

En assimilant le couple moteur au couple électromagnétique, il devient :

$$C_e - C_r = \Sigma J \frac{d\Omega(t)}{dt} + f \cdot \Omega(t) \quad (\text{II.11}) [2]$$

Où  $C_r$  est le couple résistant imposé par la charge,  $\Sigma J$  le moment d'inertie total (machine + charge entraînée) et  $f$  le coefficient de frottement proportionnel à la vitesse de rotation  $\Omega(t)$ .

**II.3.5- Transformées de Laplace**

Les transformées de Laplace des équations sont les suivantes :

$$U_a = (R_a + R_e).I_a + s.(L_a + L_e).I_a + E$$

$$\Phi_e = L_e.I_a$$

$$E = K.\Phi_e.\Omega$$

$$C_e = K.\Phi.I_a$$

$$C_e - C_r = \Sigma J.s.\Omega + f.\Omega$$

**II.3.6- Schéma bloc :**

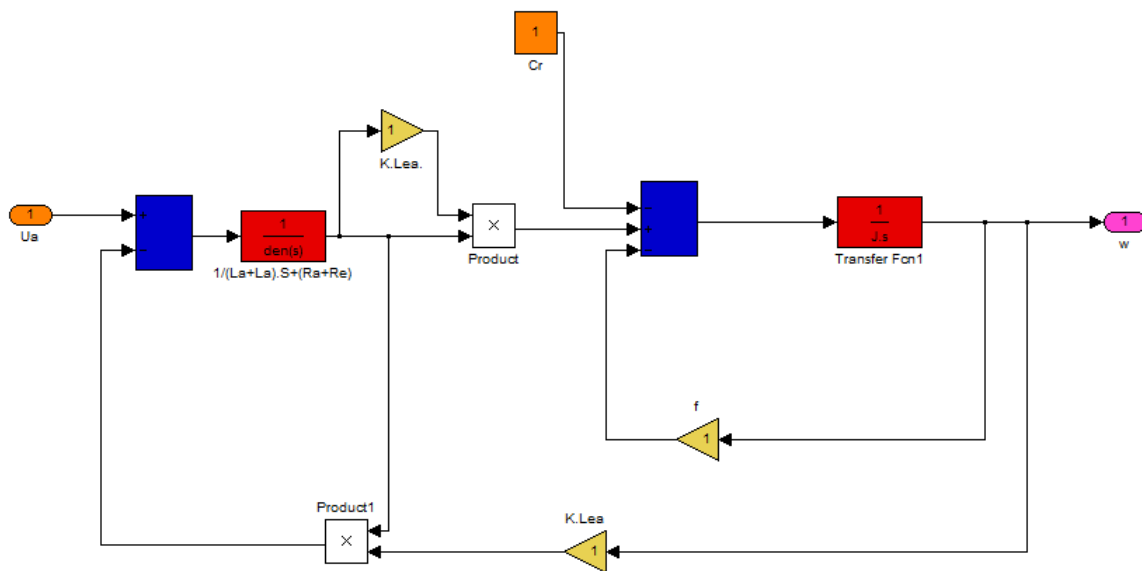


Fig.II.4- schéma bloc tension-vitesse de la machine à courant continu à excitation série.

## II.4- Modélisation d'une machine à courant continu à excitation shunt :

Le schéma électrique d'une machine à excitation shunt est le suivant :

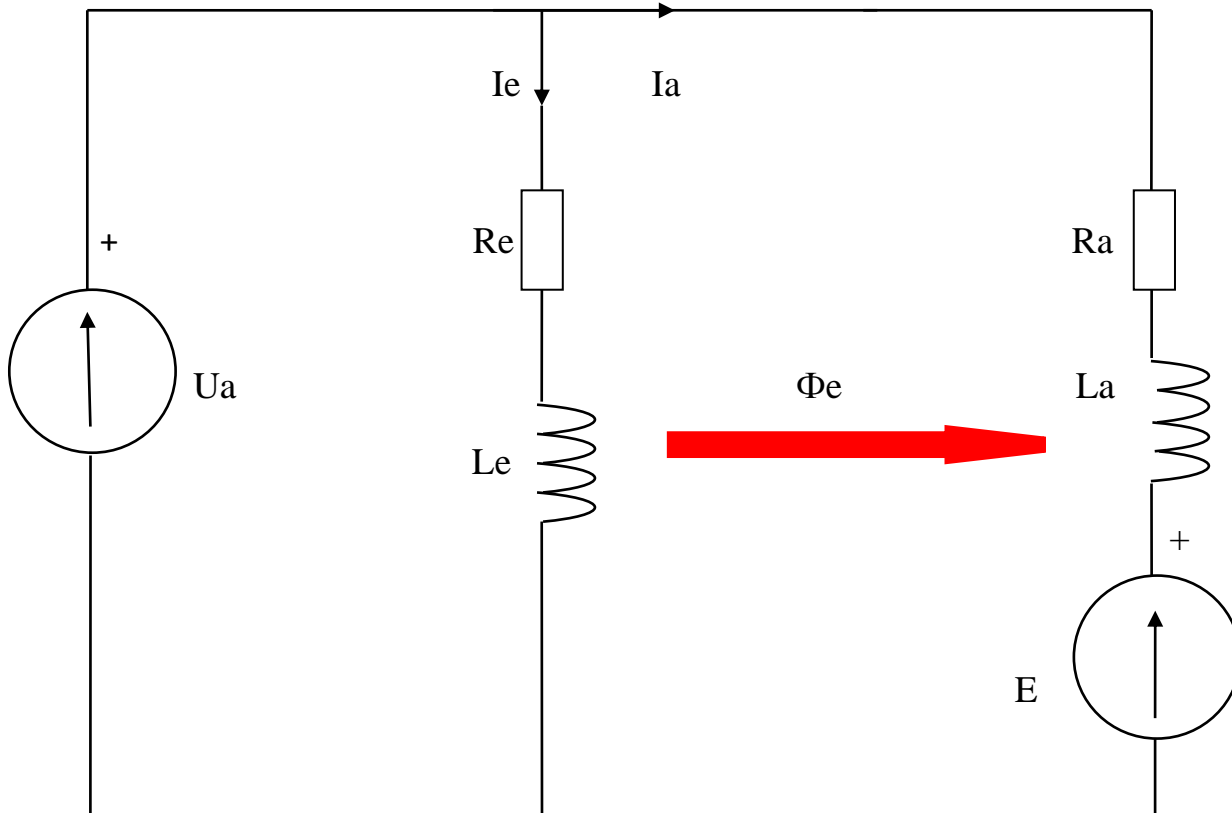


Fig.II.5- Modèle électrique d'une MCC à excitation shunt

### II.4.1- Les paramètres de la machine à CC à excitation shunt :

- La tension aux bornes de l'induit et de l'inducteur  $U_a(t)$
- La résistance de l'induit  $R_a$  ;
- L'inductance de l'induit  $L_a$  ;
- Une tension  $E(t)$  appelée f.e.m. (force électro-motrice), proportionnelle à la vitesse angulaire  $\Omega(t)$  ;
- Le courant traversant le circuit d'induit  $I_a(t)$  ;
- le courant qui circule dans l'inducteur  $I_e(t)$  ;
- L'inducteur, fixé au stator, créant un flux magnétique d'excitation  $\Phi_e$ ; il comporte une résistance  $R_e$ , et une inductance  $L_e$  ;
- $L_{ea}$  : Mutuelle inductance entre l'inducteur et l'induit ;

- La charge mécanique, dépendante de l'application (inertie  $J$ , frottement visqueux, élasticité de la transmission, etc.) ;

- La vitesse du rotor du moteur  $\Omega(t)$

#### II.4.2- Equations électriques :

-équation d'inducteur :

$$U_a(t) = R_e \cdot I_e(t) + L_e \cdot \frac{dI_e(t)}{dt} \quad (\text{II.12})$$

-équation d'induit :

$$U_a(t) = R_a \cdot I_a(t) + \frac{d\Psi}{dt} = R_a \cdot I_a(t) + L_a \cdot \frac{dN\Phi_e(t)}{dt}$$

$$U_a(t) = R_a \cdot I_a(t) + L_a \cdot \frac{dI_a(t)}{dt} + e(t) \quad (\text{II.13})$$

équation de flux :

$$\Phi_e(t) = L_e \cdot I_e \quad (\text{II.14})$$

#### II.4.3- Equations électromécaniques :

-La tension induite  $e(t)$ , appelée f.e.m ("force électromotrice") est proportionnelle à la vitesse angulaire  $\Omega(t)$  et au flux inducteur  $\Phi_e(t)$  :

$$e(t) = K \cdot \Phi_e(t) \cdot \Omega(t) \quad (\text{II.15})$$

-Le couple électromagnétique  $C_e$  développé a pour expression :

$$C_e = K \cdot \Phi_e(t) \cdot I_a(t) \quad (\text{II.16})$$

#### II.4.4- équation mécanique :

En assimilant le couple moteur au couple électromagnétique, il devient :

$$C_e - C_r = \Sigma J \cdot \frac{d\Omega(t)}{dt} + f \cdot \Omega(t) \quad (\text{II.17})$$

Où  $C_r$  est le couple résistant imposé par la charge,  $\Sigma J$  le moment d'inertie total (machine + charge entraînée) et  $f$  le coefficient de frottement proportionnel à la vitesse de rotation  $\Omega(t)$ .

**II.4.5- Transformées de Laplace**

Les transformées de Laplace des équations sont les suivantes :

$$U_a = R_e.I_e + s.L_e.I_e$$

$$U_a = R_a.I_a + s.L_a.I_a + E$$

$$\Phi_e = L_{ea}.I_e$$

$$E = K.\Phi_e.\Omega$$

$$C_e = K.\Phi_e.I_a$$

$$C_e - C_r = \Sigma J.s.\Omega + f.\Omega$$

**II.4.6- Schéma bloc**

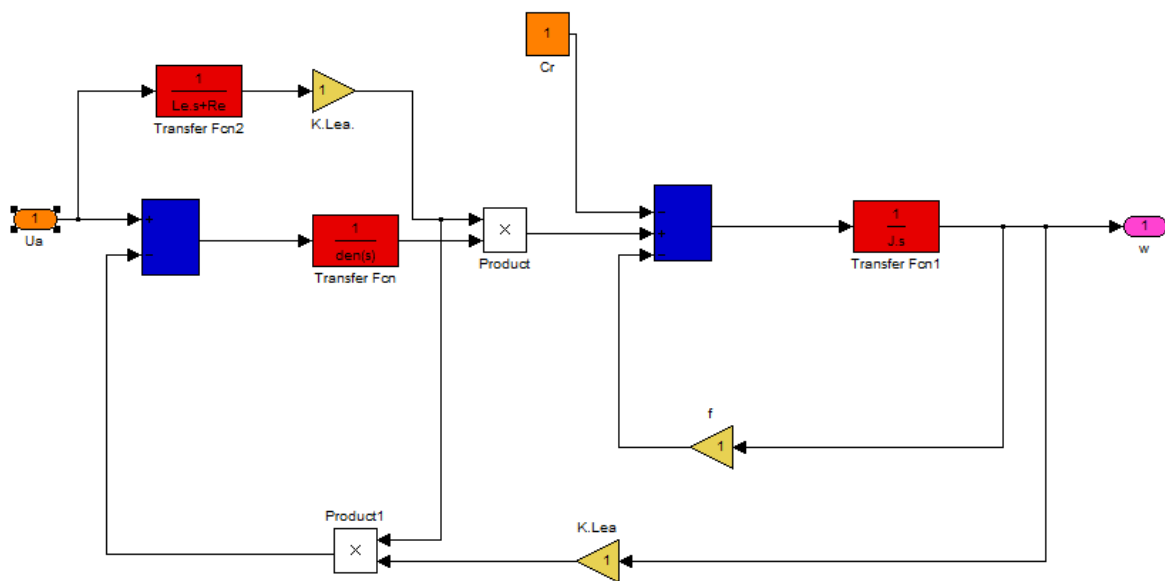


Fig.II.6- schéma bloc tension-vitesse du moteur à courant continu à excitation shunt.

**II.5-Conclusion :**

Les équations électriques, mécaniques et électromécanique des machines étudiées, nous a permis de modéliser les moteurs à courant continu à excitation séparée, shunt et série, et de réaliser les schémas blocs (tension-vitesse) d'après les transformés de Laplace .

### III.1- Introduction :

Dans ce chapitre nous allons désormais supposer que la tension et le courant dans les enroulements sont strictement continus et négliger l'effet des inductances propres des enroulements [02]. Nous allons par la suite nous intéresser aux différentes caractéristiques électriques et mécaniques des machine à courant continu à excitation séparée, série et shunt .

#### III.1.1- Modèle équivalent de l'induit

##### III.1.1.1- Fonctionnement en Moteur

Des caractéristiques précédentes on déduit un schéma équivalent de l'induit :

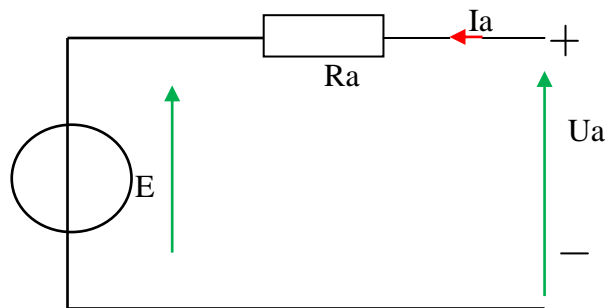


Fig.III.1-L'induit d'un moteur à courant continu

E : f.e.m.

Ra : résistance du bobinage

Ia : courant d'induit

Ua : tension aux bornes d'induit.

D'après le schéma on a :

$$U_a = E + R_a \cdot I_a \quad (III.1)$$

##### III.1.1.2- Fonctionnement en Génératrice

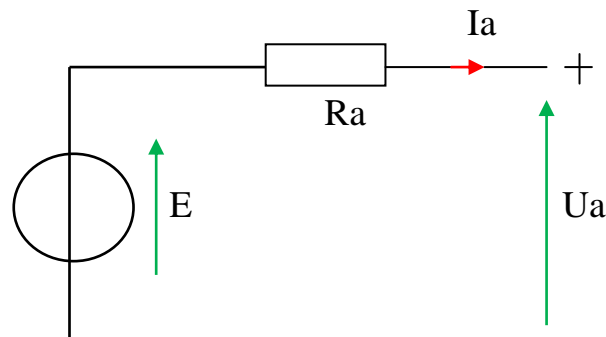


Fig.III.2-L'induit d'une génératrice à courant continu

$$U_a = E - R_a \cdot I_a \quad (III.2)$$



### III.1.2- Modèle équivalent de l'inducteur

Le bobinage inducteur alimenté sous tension continue ne présente que sa résistance de bobinage.

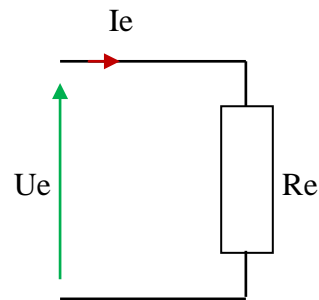


Fig.III.3-schéma électrique de  
L'inducteur d'une machine à courant  
continu

$$U_e = R_e \cdot I_e \quad (III.3)$$

$R_e$  : résistance de l'enroulement inducteur ( $\Omega$ ).

$U_e$  : Tension d'alimentation de l'inducteur (V).

$I_e$  : courant dans l'inducteur (A).

(Valable uniquement dans le cas où l'inducteur est bobiné)

### III.1.3- Les différentes pertes dans les machines à courant continu :

Pertes	Pertes fer ( $P_{fer}$ )	Pertes joules ( $P_J$ )	Pertes mécaniques ( $P_{méca}$ )
<b>Causes</b>	Elles sont dues à l'hystérésis (champ rémanent) et aux courants de Foucault (courant induit dans le fer) et dépendent de B et de $\Omega$ .	Pertes dans l'induit ( $R_a \cdot I_a^2$ ) Et l'inducteur ( $R_e \cdot I_e^2$ ) dues aux résistances des bobinages.	Elles sont dues aux frottements des diverses pièces en mouvement.
<b>Parades</b>	Utilisation de matériaux à cycles d'hystérésis étroits, comme le fer au silicium et le feuilletage de l'induit.	Il faut surtout éviter l'échauffement par l'insertion des systèmes de ventilation.	Utilisation de roulements et de lubrifiants.

On définit :

Pertes constantes ( $P_C$ ) :

$$P_C = P_{fer} + P_{méca} \quad (III.4)$$

les pertes dites « constantes » ou « collectives ». C'est à dire que si le moteur travaille à vitesse et flux constants, les pertes fer et mécaniques sont approximativement constantes.

**Remarque :**

Toute relation entre des puissances peut être ramenée à une relation entre des couples. Il suffit de diviser cette première par la vitesse de rotation  $\Omega$  (en rad/s)

Couple de pertes ( $C_p$ ) :

$$C_p = \frac{P_C}{\Omega} \quad (III.5)$$

$P_c$  est proportionnel à  $\Omega$ , donc :

$$P_c = k \cdot \Omega \quad (\text{III.6})$$

$$\text{Donc : } C_p = \frac{P_c}{\Omega} = \frac{k\Omega}{\Omega} = k \quad (\text{III.7})$$

le moment du couple de pertes est une caractéristique constante du moteur quelle que soit la vitesse

**Rendement :**

Du fait de ces différentes pertes, le rendement d'une machine à courant continu varie entre 80 et 95 %.

**III.2- Caractéristiques du fonctionnement du moteur a courant continu en régime permanent**

**III.2.1- Fonctionnement d'un moteur à excitation séparée :**

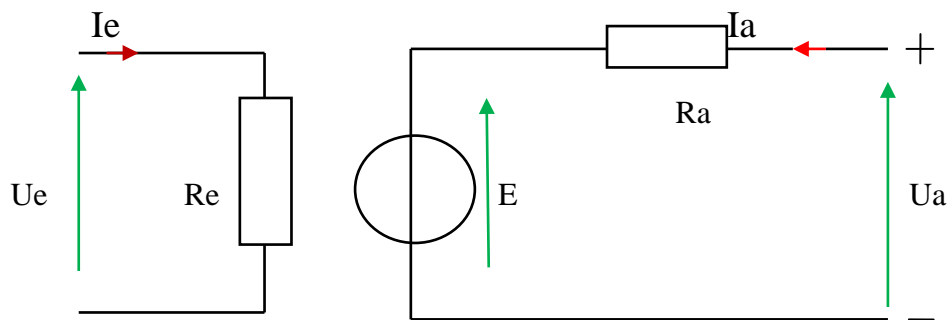


Fig.III.4-Schéma électrique d'un moteur à courant continu à excitation séparée

$$U_a = E + R_a \cdot I_a \text{ et } E = K\Phi\Omega \Rightarrow \Omega = \frac{U_a}{K\Phi} - \frac{R_a \cdot I_a}{K\Phi} \quad (\text{III.8})$$

$$\Omega = \Omega_0 - \Delta\Omega$$

**III.2.1.1- La caractéristique  $\Omega = f(I_a)$  à  $U_a$  et  $\Phi$  constants :**

D'après l'équation (III.8) on a :

$$\Omega = \frac{U_a}{K\Phi} - \frac{R_a \cdot I_a}{K\Phi} \text{ et comme } U_a \text{ et } \Phi \text{ sont constant on aura :}$$

$$\Omega = A - B \cdot I_a \tag{III.9}$$

ou  $A = \frac{U_a}{K\Phi}$  et  $B = \frac{R_a}{K\Phi}$  c'est une droite à pente négative très faible

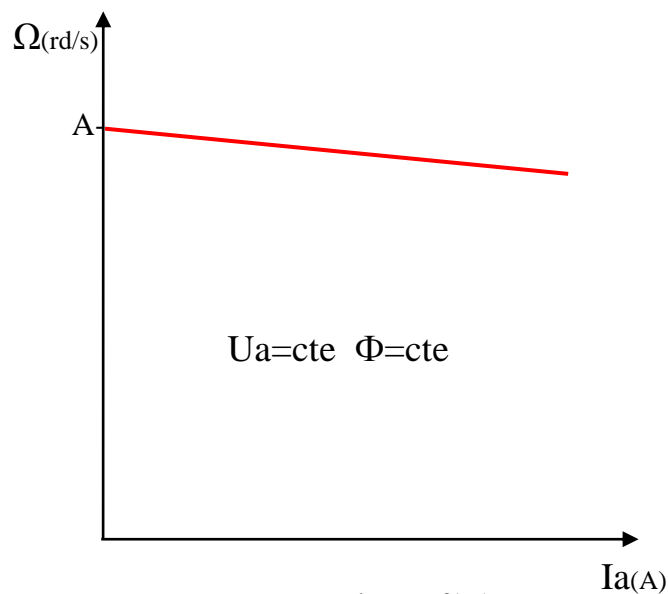


Fig.III.5-La courbe  $\Omega=f(I_a)$  pour un moteur à excitation séparée

En conclusion, à tension d'induit constante et excitation constante, la vitesse d'un moteur à excitation séparée reste presque constante

**III.2.1.2- La caractéristique  $C_e = f(I_a)$  à  $U_a$  et  $\Phi$  constants :**

$$C_e = K\Phi I_a$$

A vide  $I_a=I_{a0}$  très faible et  $C_e=C_p$  (couple de pertes constantes)

$$C_u = C_e - C_p \Rightarrow \text{à vide } C_u = 0$$

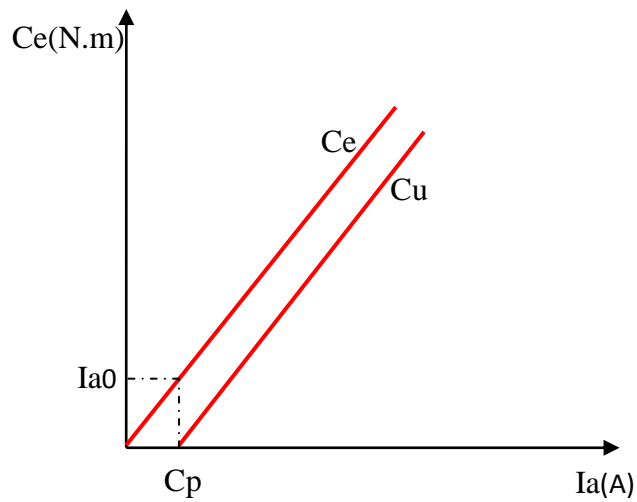


Fig.III.6-La courbe  $C_e=f(I_a)$  pour un moteur à excitation séparée

**III.2.1.3- La caractéristique  $C_e = f(\Omega)$  à  $U_a$  et  $\Phi$  constants :**

$$\text{On a : } \Omega = \frac{U_a}{K\Phi} - \frac{R_a \cdot C_e}{(K\Phi)^2} \Rightarrow C_e = \frac{U_a \cdot K \cdot \Phi}{R_a} - \frac{(K \cdot \Phi)^2}{R_a} \cdot \Omega \quad (\text{III.10})$$

(équation d'une droite très proche de la verticale). Et comme U et  $\Phi$  sont constants on aura :

$$C_e = A - B \cdot \Omega \quad (\text{III.11})$$

ou  $A = \frac{U_a \cdot K \cdot \Phi}{R_a}$  et  $B = \frac{(K \cdot \Phi)^2}{R_a}$

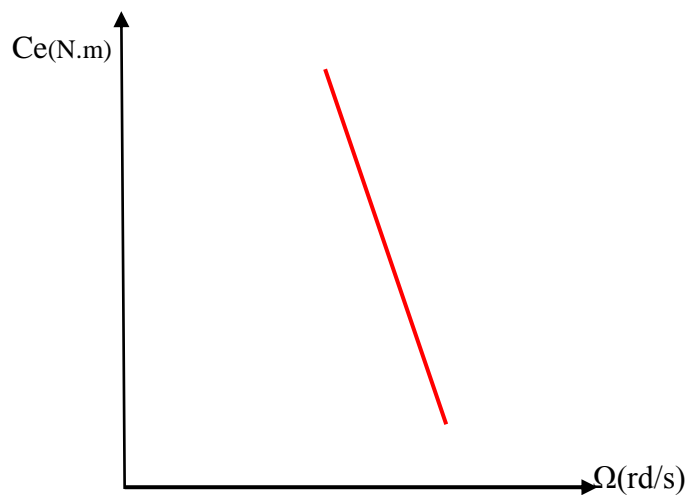


Fig.III.7-La courbe  $C_e=f(\Omega)$  pour un moteur à excitation séparée

III.2.2- Fonctionnement d'un moteur a excitation série :

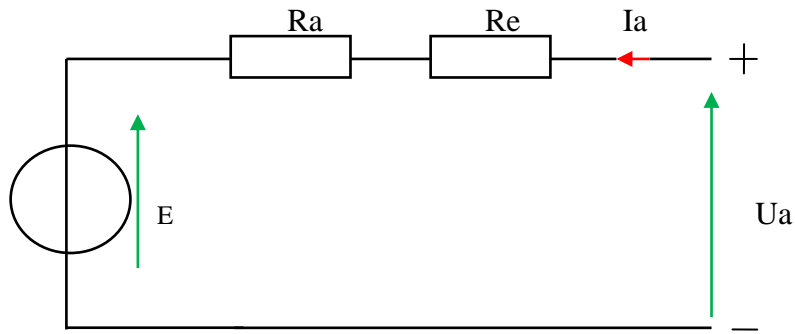


Fig.III.8-Schéma électrique du moteur à excitation série

$$U_a = E + (R_a + R_e) \cdot I_a \text{ et } E = K\Phi\Omega \Rightarrow \Omega = \frac{U_a}{K\Phi} - \frac{(R_a + R_e) \cdot I_a}{K\Phi} \quad (\text{III.12})$$

$$\text{Comme } \Phi = f(I_a) \Rightarrow \Phi = K' \cdot I_a \text{ et on aura : } \Omega = \frac{U_a}{K' \cdot I_a} - \frac{(R_a + R_e)}{K'} \quad (\text{III.13})$$

III.2.2.1- La caractéristique  $\Omega = f(I_a)$  à  $U_a$  et  $\Phi$  constants :

$$\Omega = \frac{U_a}{K' \cdot I_a} - \frac{(R_a + R_e)}{K'}$$

et comme  $U_a$  et  $\Phi$  sont constant on aura :

$$\Omega = \frac{A}{I_a} - B \text{ ou}$$

$$A = \frac{U_a}{K'} \text{ et } B = \frac{R_a + R_e}{K'}$$

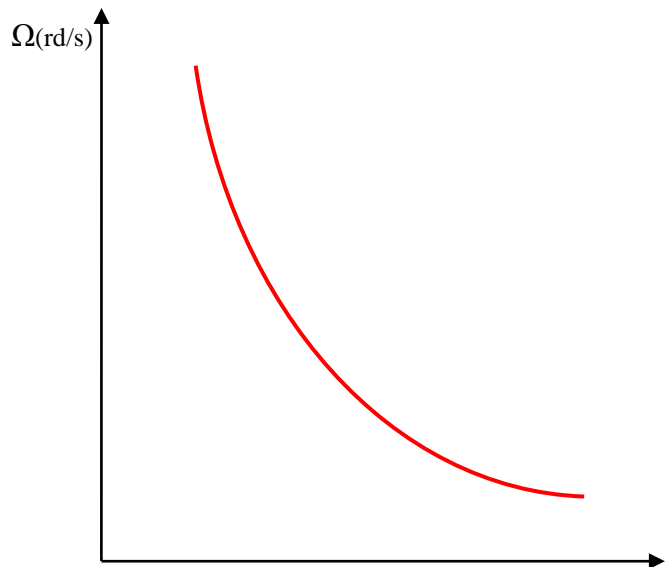


Fig.III.9-La courbe  $\Omega = f(I_a)$  pour  $I_a(A)$  un moteur à excitation série

III.2.2.2- La caractéristique  $C_e = f(I_a)$  à  $U_a$  constants :

On a :  $C_e = K\Phi I_a$

Comme  $\Phi = K' \cdot I_a$  , on aura :

$$C_e = K' \cdot I_a^2 \quad (III.14)$$

$$C_u = C_e - C_p$$

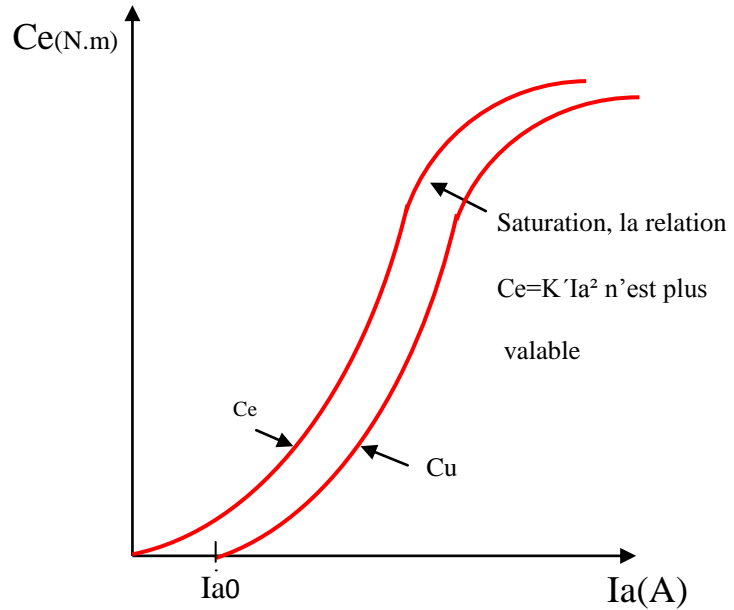


Fig.III.10-La courbe  $C_e=f(I_a)$  pour un moteur à excitation série

**III.2.2.3- La caractéristique  $C_e = f(\Omega)$  à  $U_a$  constants :**

Pour un fonctionnement sous une tension nominale, Si nous négligeons les différentes pertes :

$$U_a = E = K\Phi\Omega ; \quad \Phi = K' \cdot I_a ; \quad I_a = \frac{U_a}{K' \cdot \Omega} \quad \text{et} \quad C_u = K' \cdot I_a^2 \Rightarrow C_u = \frac{U_a^2}{K' \cdot \Omega^2} \quad (III.15)$$

$$C_u \cdot \Omega^2 = A \quad \text{ou} \quad A = \frac{U_a^2}{K'}$$



Fig.III.11-La courbe  $C_u=f(\Omega)$  pour un moteur à excitation série

**III.2.3- Fonctionnement d'un moteur a excitation shunt :**

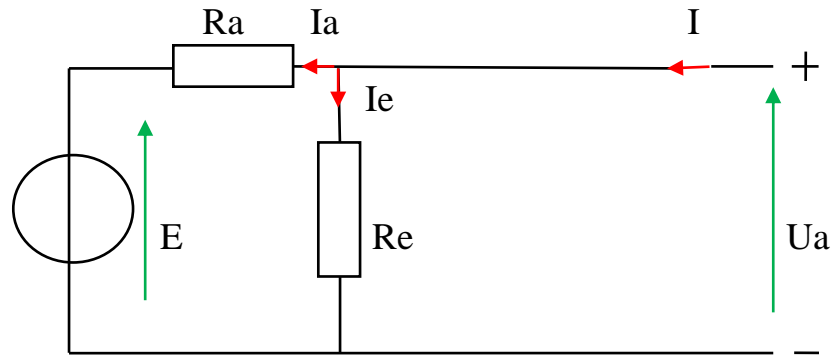


Fig.III.12-Schéma électrique du moteur à excitation shunt

$$U_a = E + R_a \cdot I_a \text{ et } E = K\Phi\Omega \Rightarrow \Omega = \frac{U_a}{K\Phi} - \frac{R_a \cdot I_a}{K\Phi} \quad (\text{III.16})$$

$$\Omega = \Omega_0 - \Delta\Omega$$

**III.2.3.1- La caractéristique  $\Omega = f(I_a)$  à  $U_a$  et  $\Phi$  constants :**

D'après l'équation (III.2) on a :

$$\Omega = \frac{U_a}{K\Phi} - \frac{R_a \cdot I_a}{K\Phi} \text{ et comme } U_a \text{ et } \Phi \text{ sont constant on aura :}$$

$$\Omega = A - B \cdot I_a \text{ ou } A = \frac{U_a}{K\Phi} \text{ et } B = \frac{R_a}{K\Phi} \text{ c'est une droite à pente négative très faible}$$

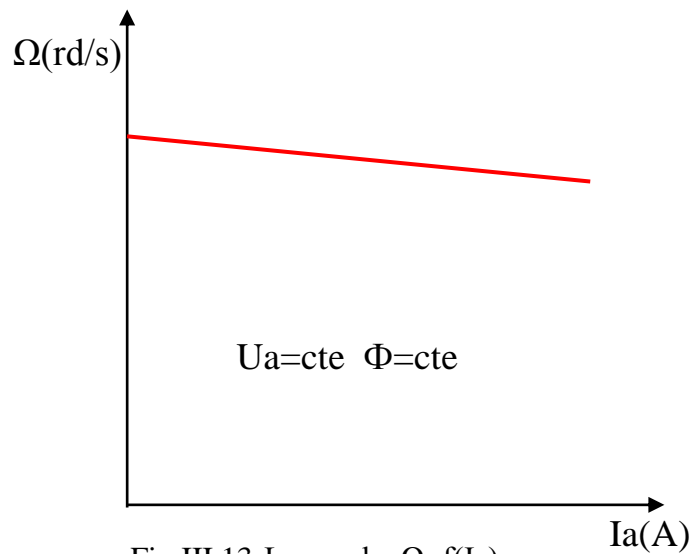


Fig.III.13-La courbe  $\Omega=f(I_a)$  pour un moteur à excitation shunt



En conclusion, à tension d'induit constante et excitation constante la vitesse d'un moteur à excitation séparée reste presque constante

**III.2.3.2- La caractéristique  $C_e = f(I_a)$  à  $U_a$  et  $\Phi$  constants :**

$$C_e = K\Phi I_a$$

A vide  $I_a = I_{a0}$  très faible et  $C_e = C_p$  (couple de pertes constantes)

$$C_u = C_e - C_p \Rightarrow \text{à vide } C_u = 0$$

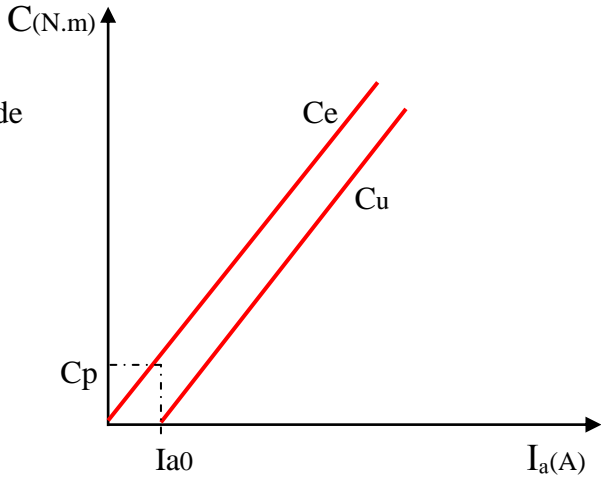


Fig.III.14-La courbe  $C_e=f(I_a)$  pour un moteur à excitation shunt

**III.2.3.3- La caractéristique  $C_e = f(\Omega)$  à  $U_a$  et  $\Phi$  constants :**

On a :  $\Omega = \frac{U_a}{K\Phi} - \frac{R_a \cdot C_e}{(K\Phi)^2} \Rightarrow C_e = \frac{U \cdot K \cdot \Phi}{R_a} - \frac{(K \cdot \Phi)^2}{R_a} \cdot \Omega$  (équation d'une droite très proche de la verticale). Et comme  $U$  et  $\Phi$  sont constants on aura :

$$C_e = A - B \cdot \Omega \text{ ou } A = \frac{U_a \cdot K \cdot \Phi}{R_a} \text{ et } B = \frac{(K \cdot \Phi)^2}{R_a}$$

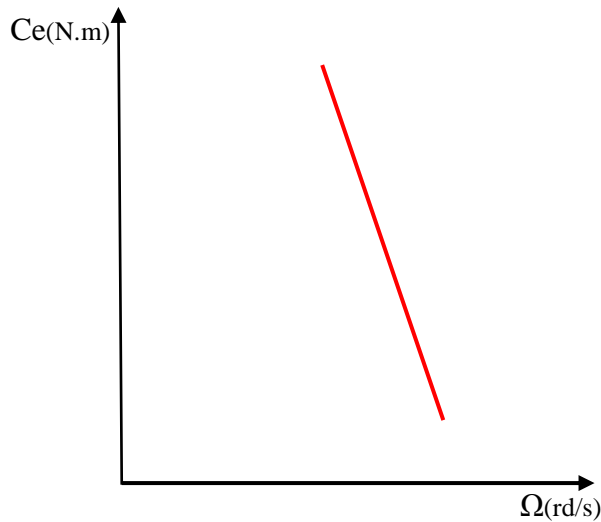


Fig.III.15-La courbe  $C_e=f(\Omega)$  pour un moteur à excitation shunt

### III.3- Caractéristiques du fonctionnement de la génératrice à courant continu en régime permanent : [02]

#### III.3.1- Génératrice à excitation indépendante :

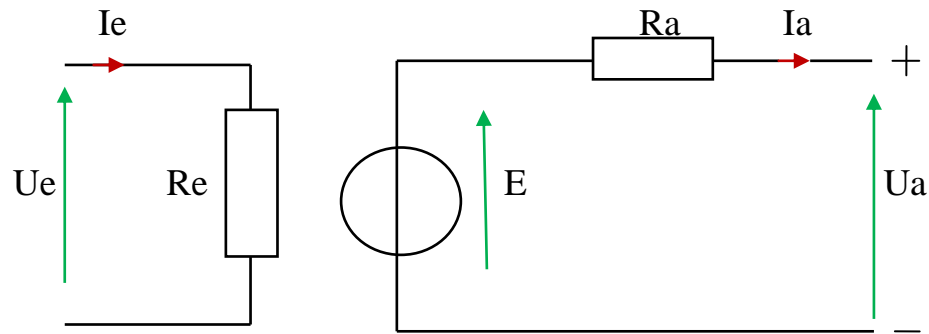


Fig.III.16-Schéma électrique de la génératrice à excitation séparée

$$U_a = E - R_a \cdot I_a - \varepsilon \quad (III.17)$$

ou  $\varepsilon$  est la réaction magnétique d'induit qui est en fonction de  $I_a$  et  $E = K\Phi\Omega$ .

#### III.3.1.1- La caractéristique $U_a = f(I_a)$ à $\Omega$ et $\Phi$ constants :

$$U_a = K\Phi\Omega - R_a \cdot I_a - \varepsilon(I_a) \quad (III.18)$$

et comme  $\Omega$  et  $\Phi$  sont constants on aura :

$$U_a = E - \Delta u$$

$$\text{ou } \Delta u = R_a \cdot I_a + \varepsilon(I_a)$$

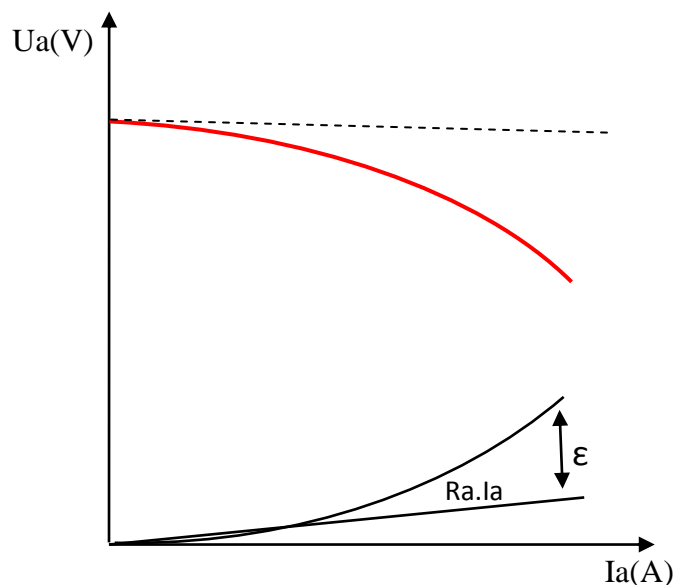


Fig.III.17-La courbe  $U_a = f(I_a)$  pour une génératrice à excitation séparée

III.3.1.2- La caractéristique  $I_e=f(I_a)$  à  $U$  et  $\Omega$  constants

$$U_a = E - \Delta u \text{ ou } \Delta u = R_a \cdot I_a + \epsilon(I_a)$$

On a  $\Delta u = f(I_a)$  et  $E = f(I_e)$

Pour maintenir  $U$  constante il faut augmenter  $E$  qui est égale à  $U + \Delta u$  (agir sur le courant d'excitation) au fur et à mesure que  $I_a$  croît

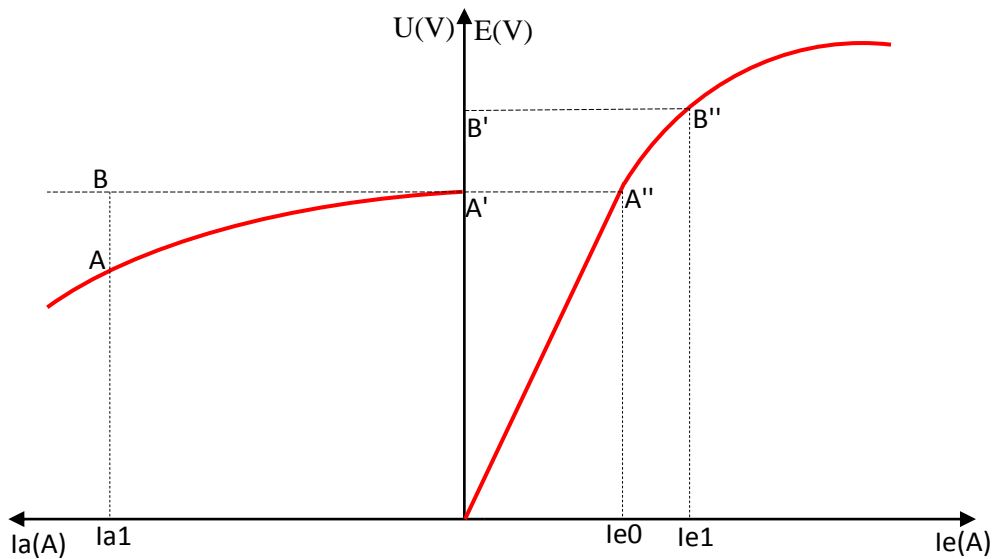


Fig.III.18-Les courbes  $U_a=f(I_a)$  et  $E=f(I_e)$  pour une génératrice à excitation séparée

Pour un courant  $I_{a1} \Rightarrow \Delta u = AB = A'B'$  cette chute de tension est compensée en augmentant l'excitation de  $I_{e0}$  à  $I_{e1}$ .

Ainsi pour tout courant d'induit  $I_{ai}$  on trouve  $I_{ei}$  correspondant et on trace la caractéristique  $I_e=f(I_a)$

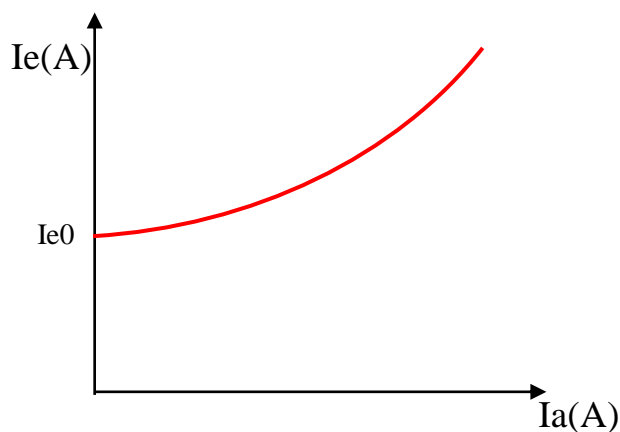


Fig.III.19-La courbe  $I_e=f(I_a)$  pour une génératrice à excitation séparée

III.3.2- Génératrice à excitation série :

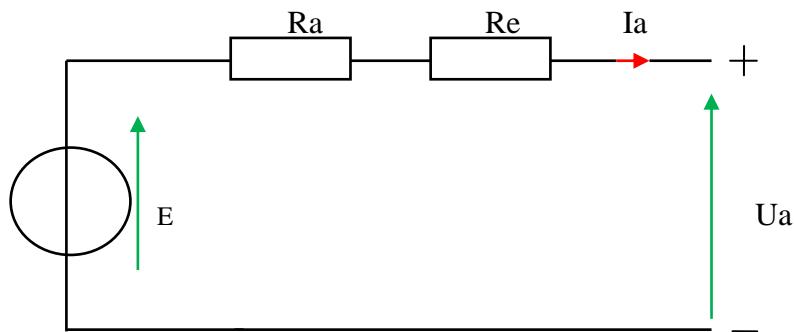


Fig.III.20-Schéma électrique de la génératrice à excitation série

$$U_a = E - (R_a + R_e) \cdot I_a - \epsilon(I_a) \quad (III.19)$$

$$E = K\Phi\Omega = K' \cdot I_a \cdot \Omega \text{ ou } K' = K \cdot L_e a$$

III.3.2.1- La caractéristique  $U_a = f(I_a)$  à  $\Omega$  :

$$U_a = E - (R_a + R_e) \cdot I_a - \epsilon(I_a)$$

$$U_a = K' \cdot I_a \cdot \Omega - (R_a + R_e) \cdot I_a - \epsilon(I_a)$$

comme  $\Omega = \text{cte}$  on a

$$U_a = K'' \cdot I_a - R_a \cdot I_a - \epsilon(I_a)$$

$$\text{donc : } U_a = K'' \cdot I_a - \Delta u \quad (III.20)$$

$$\Delta u = (R_a + R_e) \cdot I_a + \epsilon(I_a)$$

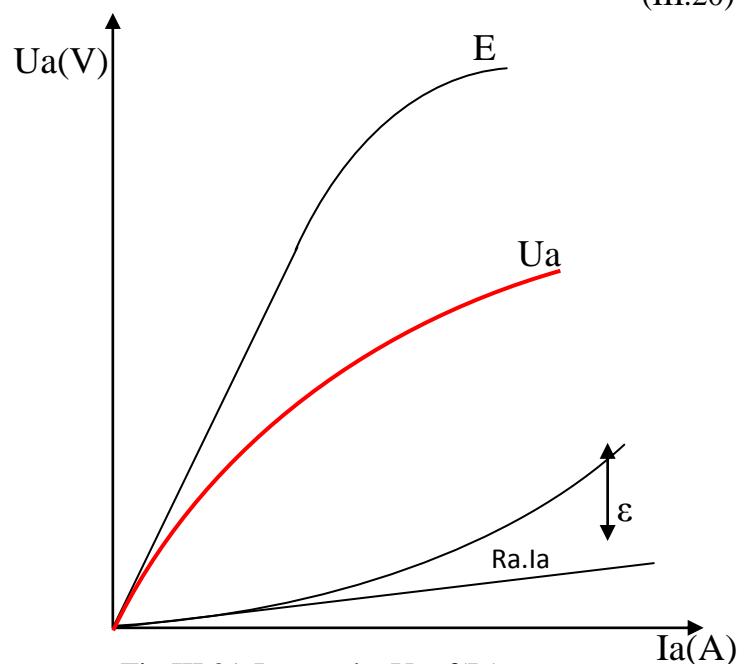


Fig.III.21-La courbe  $U_a = f(I_a)$  pour une génératrice à excitation série

III.3.2.2- La caractéristique  $U_a = f(I_a)$  à  $I_e$  réglable :

Pour commander le courant d'excitation  $I_e$  on place en parallèle de la résistance d'excitation  $R_e$  une autre résistance  $R_p$  réglable

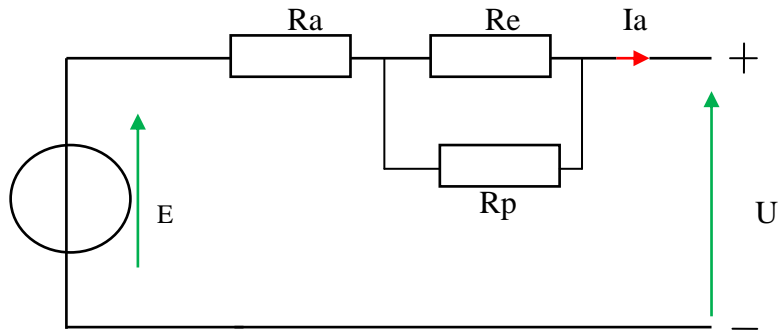


Fig.III.22-Schéma électrique de la génératrice à excitation série avec une résistance d'excitation variable

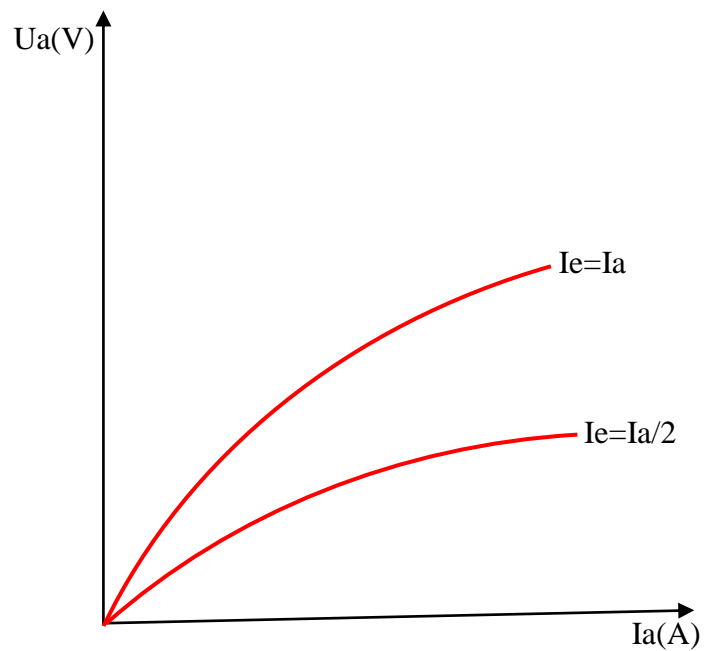


Fig.III.23-La courbe  $U_a=f(I_a)$  pour une génératrice à excitation série réglable

III.3.3- Génératrice à excitation shunt :

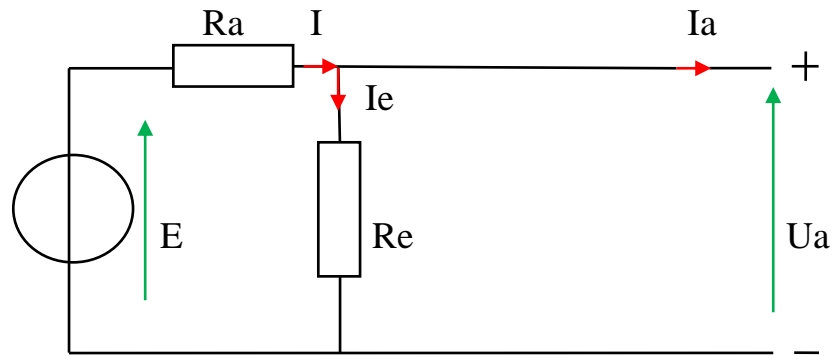


Fig.III.24-Schéma électrique de la génératrice à excitation shunt

$$U_a = E - R_a \cdot I - \varepsilon(I) = E - R \cdot (I_e + I_a) - \varepsilon(I) \quad (III.21)$$

Si  $I_a$  augmente  $\Rightarrow \Delta u = R_a \cdot (I_e + I_a) + \varepsilon(I)$  augmente, Alors  $U_a$  diminue  $\Rightarrow I_e$  diminue, donc  $E$  diminue

$\Rightarrow E_{shunt} < E_{séparée}$

III.3.3.1- La caractéristique  $U_a = f(I_a)$  à  $\Omega$  et  $\Phi$  constants :

$$U_a = E - R_a \cdot I - \varepsilon(I)$$

$$U_a = E - R_a \cdot (I_e + I_a) - \varepsilon(I)$$

$$U_a = E - \Delta u \text{ ou } \Delta u = R_a \cdot I + \varepsilon(I)$$

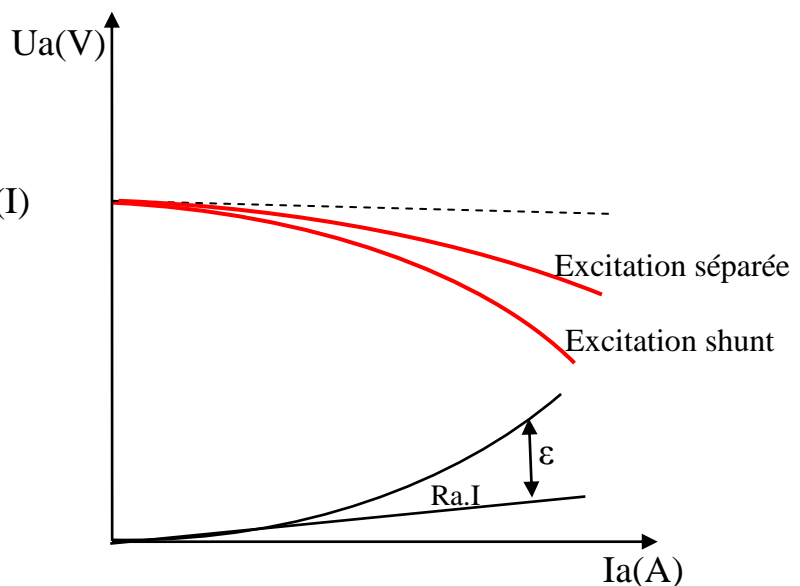


Fig.III.24-La courbe  $U_a=f(I_a)$  pour une génératrice à excitation shunt

III.3.3.2- La caractéristique  $I_e = f(I_a)$  à  $U$  et  $\Omega$  constants :

$$U_a = E - \Delta u \text{ ou } \Delta u = R_a \cdot I_a + \varepsilon(I_a)$$

On a  $\Delta u = f(I_a)$  et  $E = f(I_e)$

Pour maintenir  $U$  constante il faut augmenter  $E$  qui est égale à  $U + \Delta u$  (agir sur le courant d'excitation) au fur et à mesure que  $I_a$  croit

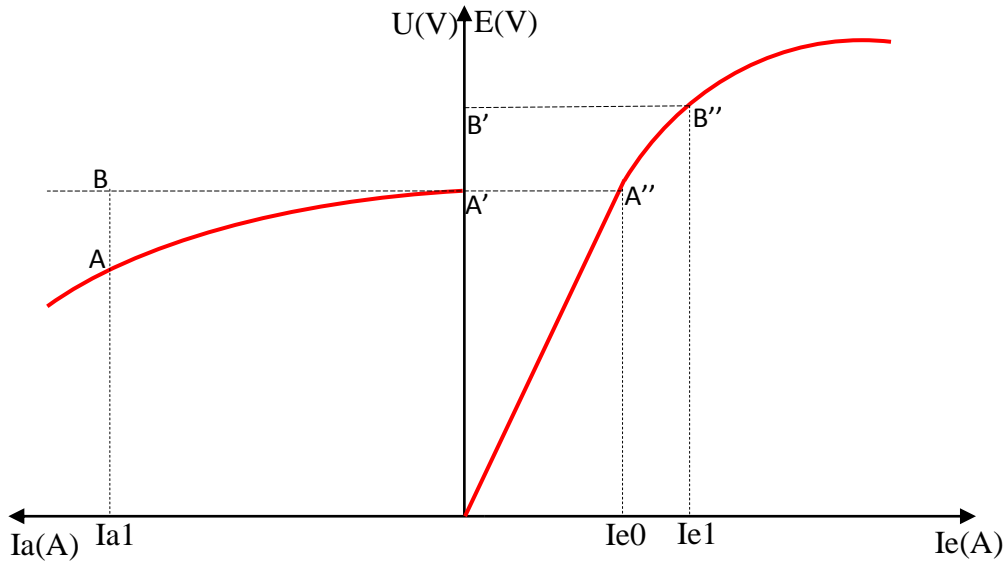


Fig.III.25-Les courbes  $U_a=f(I_a)$  et  $E=f(I_e)$  pour une génératrice à excitation shunt

Pour un courant  $I_{a1} \Rightarrow \Delta u = AB = A''B''$  cette chute de tension est compensée en augmentant l'excitation de  $I_{e0}$  à  $I_{e1}$ .

Ainsi pour tout courant d'induit  $I_{ai}$  on trouve  $I_{ei}$  correspondant et on trace la caractéristique  $I_e=f(I_a)$

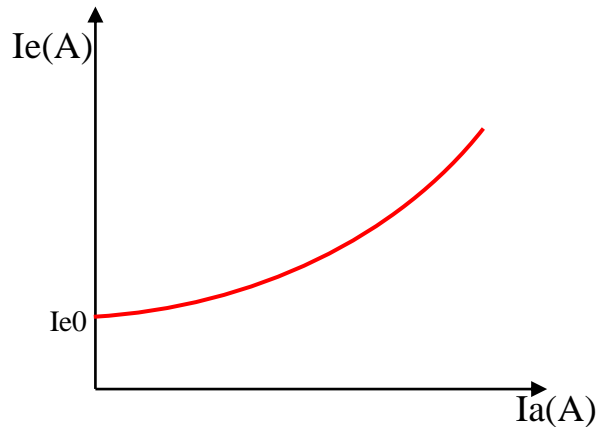


Fig.III.26-La courbe  $I_e=f(I_a)$  pour une génératrice à excitation shunt

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

Les caractéristiques de fonctionnement de la machine à courant continu des différents constructeurs avec différents paramètres sont les mêmes . Il suffit de connaître quelques paramètres pour prévoir l'évolution des autres .



**IV.1- Introduction**

Il s'agit, dans ce chapitre, de faire la simulation et de visualiser le fonctionnement des différents types de machines à courant continu (série, shunt, séparée) en simulant puis en interprétant leurs courbes de fonctionnement. Pour ce faire, nous utiliserons le logiciel MATLAB auquel est intégré l'outil SIMULINK .

Simulink est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes électromécaniques, de communications, de traitement du signal ....etc.

**IV.2-Simulation du moteur à courant continu à excitation séparée :**

**IV.2.1-Paramètres du moteur à courant continu à excitation séparée :**

$P = 3.5 \text{ kW}$  ;  $U_a = 220 \text{ V}$  ;  $U_e = 220 \text{ V}$  ;  $\Omega_n = 1900 \text{ tr/min}$  ;  $R_a = 0.25 \text{ } \Omega$  ;  $L_a = 0.02 \text{ H}$

$R_e = 240 \text{ } \Omega$  ;  $L_e = 10 \text{ H}$  ;  $f = 0.0521$  ;  $J = 3.19 \text{ kg.m}^2$  ;  $Cr = 10 \text{ N.m}$  ;  $L_{ea} = 0.7958 \text{ H}$

$K = 1.5$

**IV.2.2- Schéma bloc d'une MCC à excitation séparée :**

D'après les équation (II-1;II-2;II-3;II-4;II-5;II-6), le schéma de simulation du moteur à courant continu à excitation séparée est le suivant :

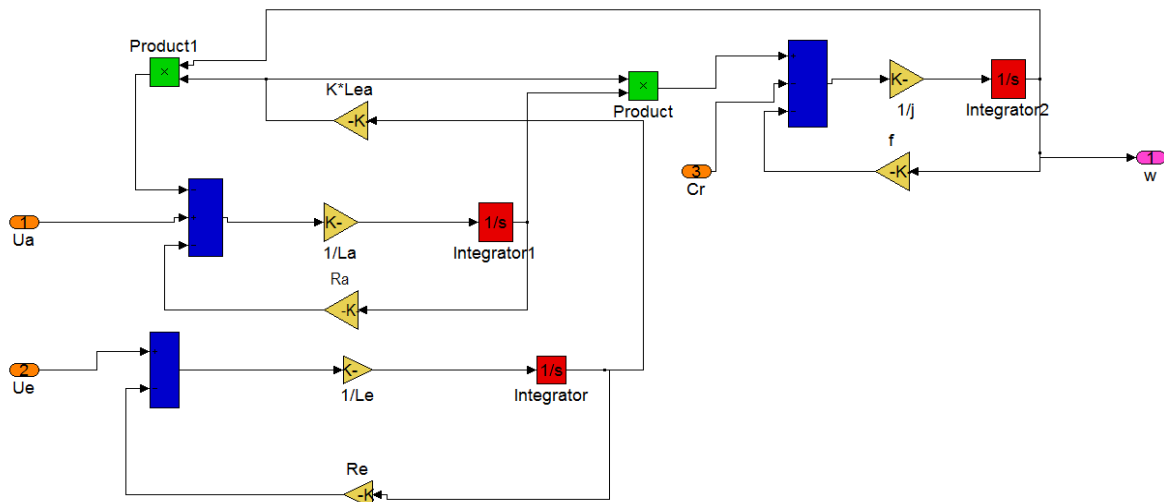


Fig.IV.1-Schéma bloc d'un MCC à excitation séparée

### IV.2.3- Les résultats de simulation :

#### IV.2.3.1-La vitesse de rotation $\Omega=f(t)$ :

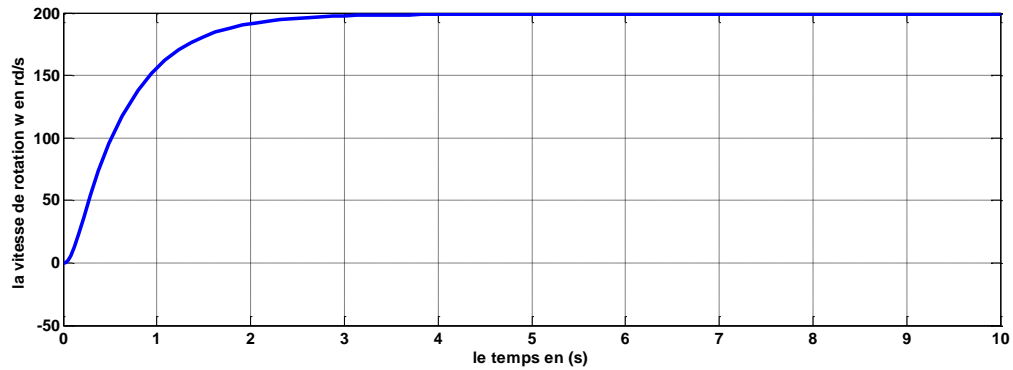


Fig.IV.2-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  pour un moteur à excitation séparée

La vitesse part de zéro pour se stabiliser autour de 200 rd/s, qui est la vitesse en régime établi. La courbe a une forme exponentielle, ce qui correspond à la présence de phénomènes transitoires dans les enroulements de la machine . Le moteur a mit 3s pour atteindre le régime permanent, cela est du à l'inertie de la machine et de la charge .

#### IV.2.3.2-Le couple $C_e=f(t)$ :

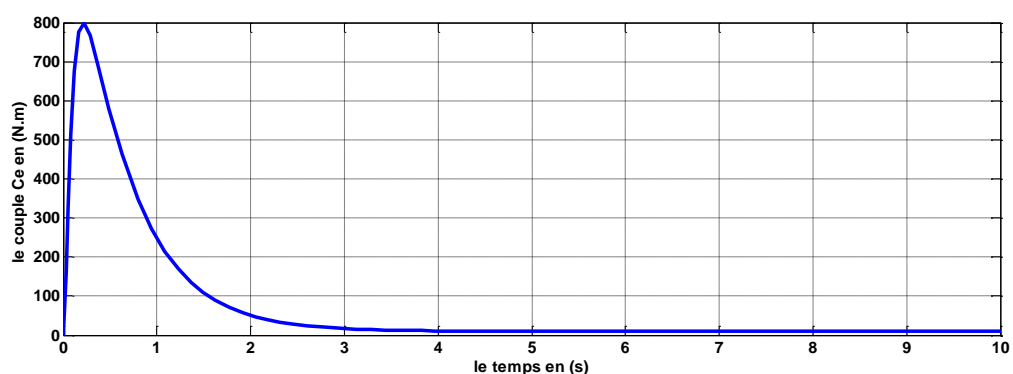


Fig.IV.3-Le couple  $C_e=f(t)$  pour un moteur à excitation séparée

Le moteur démarre avec un couple de démarrage important de l'ordre de 800 N.m, puis le couple passe du régime transitoire, et après avoir vaincu l'inertie de la machine, au

régime établi pour se stabiliser autour de 10 N.m, qui correspond au couple résistant imposé par la charge .

$$\text{On a } C_e = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + C_r .$$

entre 0s et 3s la vitesse est variable donc  $C_e = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + C_r$  qui correspond à la partie transitoire . Au-delà de 3s la vitesse est constante donc  $C_e = C_r$

#### IV.2.3.3-Le courant d'induit $I_a=f(t)$ :

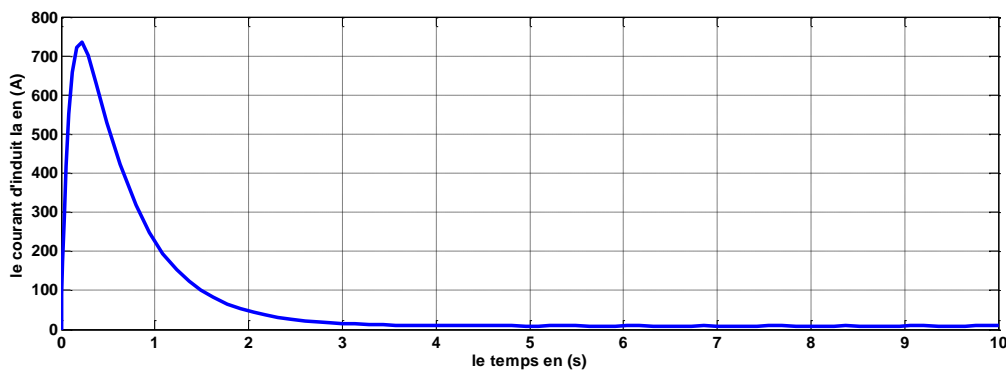


Fig.IV.4-Le courant  $I_a=f(t)$  pour un moteur à excitation séparée

Au démarrage le moteur subit, pendant le régime transitoire, un fort appel de courant d'induit qui atteint 740A puis le courant induit se stabilise autour de 8A .

$$\text{Au démarrage } E = 0 \Rightarrow U_a \approx R_a \cdot I_d \Rightarrow I_d \approx \frac{U_a}{R_a} \approx \frac{220}{0.25} \approx 880A$$

### IV.3-Simulation du moteur à courant continu à excitation shunt :

#### IV.3.1-Paramètres du moteur à courant continu à excitation shunt :

$$P = 5 \text{ kW} ; U_a = 220 \text{ V} ; \Omega_n = 4000 \text{ tr/min} ; R_a = 2.52 \text{ } \Omega ; L_a = 0.048 \text{ H} ; R_e = 92 \text{ } \Omega$$

$$L_e = 5.257 \text{ H} ; f = 0.0142 ; J = 0.1 \text{ kg.m}^2 ; C_r = 10 \text{ N.m} ; L_{ea} = 0.1724 \text{ H} ; K = 1.5$$

**IV.3.2- Schéma bloc d'une MCC à excitation shunt :**

D'après les équation (II-12;II-13;II-14;II-15;II-16;II-17), le schéma de simulation du moteur à courant continu à excitation shunt est le suivant :

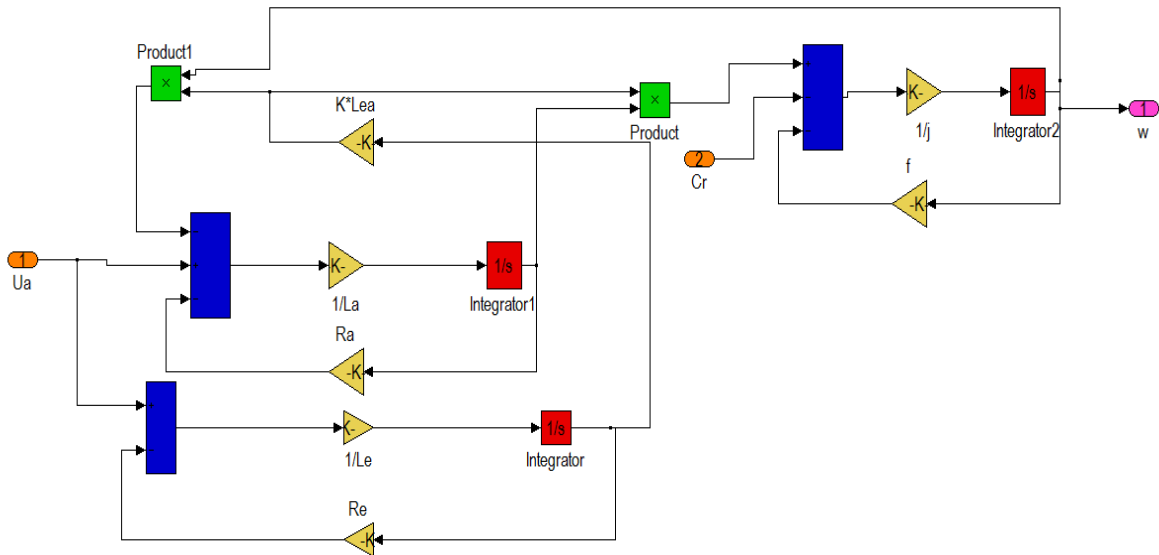


Fig.IV.5-Schéma bloc d'une MCC à excitation shunt

**IV.3.3- Les résultats de simulation :**

**IV.3.3.1-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  :**

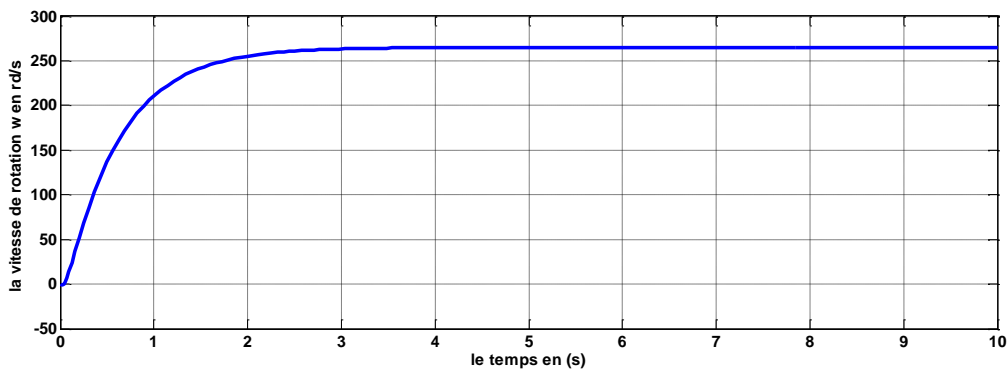


Fig.IV.6-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  pour un moteur à excitation shunt

**Interprétation**

La vitesse part de zéro pour se stabiliser autour de 270 rd/s, qui est la vitesse en régime établi. La courbe présente une forme exponentielle, qui correspond à la présence de phénomènes transitoires dans les enroulements de la machine.

### IV.3.3.2-Le couple $C_e=f(t)$ :

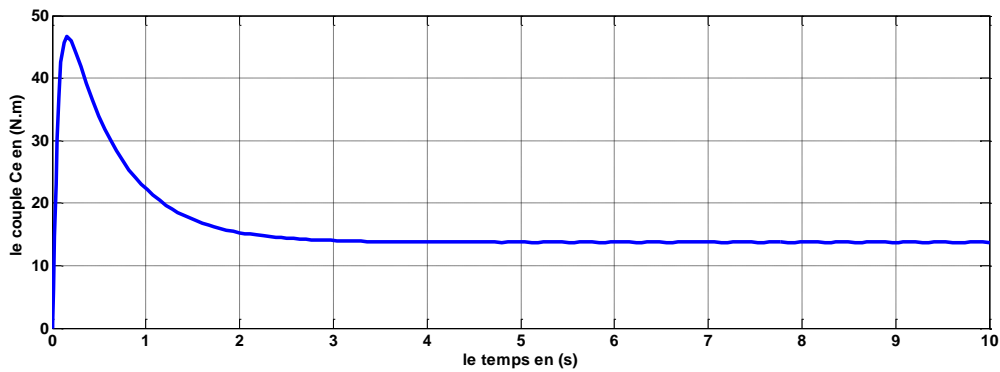


Fig.IV.7-Le couple  $C_e=f(t)$  pour un moteur à excitation shunt

Le moteur démarre avec un couple de démarrage important de l'ordre de 48 N.m, puis le couple passe du régime transitoire au régime établi pour se stabiliser autour de 12 N.m, qui correspond au couple résistant imposé par la charge

### IV.3.3.3-Le courant d'induit $I_a=f(t)$ :

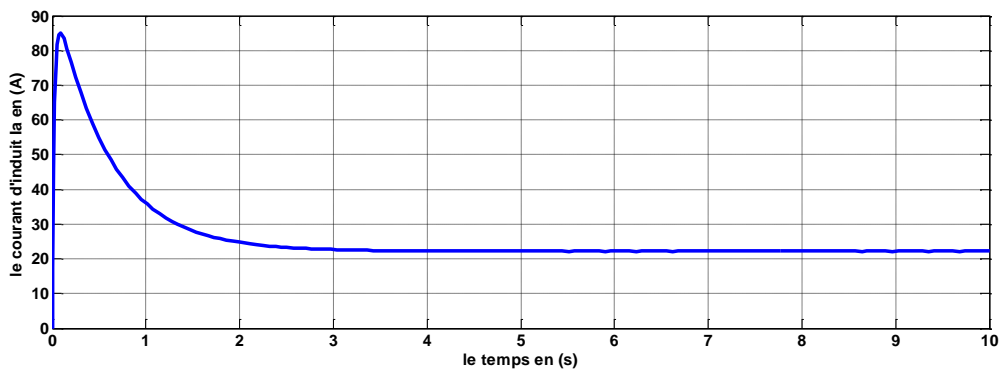


Fig.IV.8-Le courant  $I_a=f(t)$  pour un moteur à excitation shunt

Au démarrage le moteur appelle un fort courant d'induit qui atteint 88A puis il se stabilise autour de 22A .

$$\text{Au démarrage } E=0 \Rightarrow U_a \approx R_a \cdot I_d \Rightarrow I_d \approx \frac{U_a}{R_a} \approx \frac{220}{2.52} \approx 88\text{A}$$

**IV.4-Simulation du moteur à courant continu à excitation série :**

**IV.4.1- paramètres du moteur à courant continu à excitation série :**

$P = 750 \text{ W}$  ;  $U_a = 220 \text{ V}$  ;  $\Omega_n = 3000 \text{ tr/min}$  ;  $R_a = 0.5 \Omega$  ;  $L_a = 0.01 \text{ H}$  ;  $R_e = 0.1 \Omega$

$L_e = 0.025 \text{ H}$  ;  $f = 3.8.e-4$  ;  $J = 0.003 \text{ kg.m}^2$  ;  $Cr = 10 \text{ N.m}$  ;  $L_{ea} = 0.0995 \text{ H}$  ;  $K = 1.5$

$F' = 50 \text{ Hz}$

**IV.4.2- Schéma bloc d'une MCC à excitation série :**

D'après les équations (II-7;II-8;II-9;II-10;II-11), le schéma de simulation du moteur à courant continu à excitation série est le suivant :

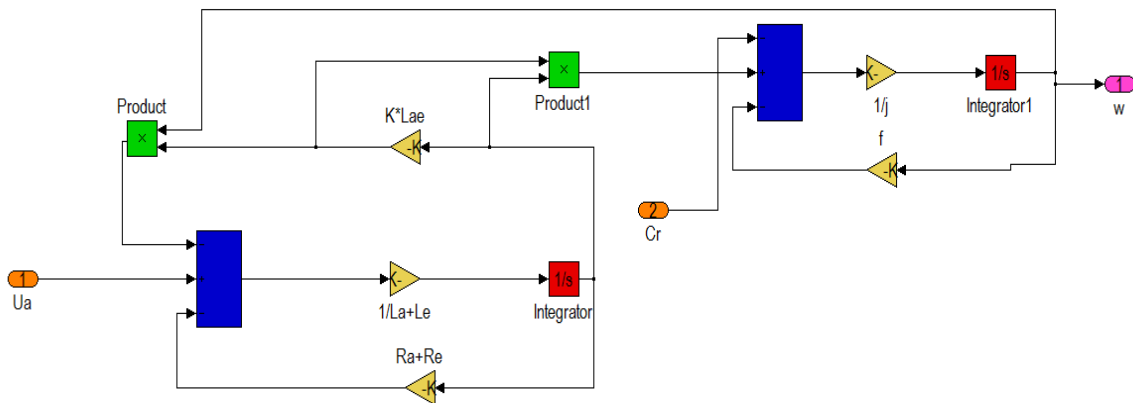


Fig.IV.9-Schéma bloc d'une MCC à excitation série

**IV.4.3- Les résultats de simulation :**

**IV.4.3.1-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  :**

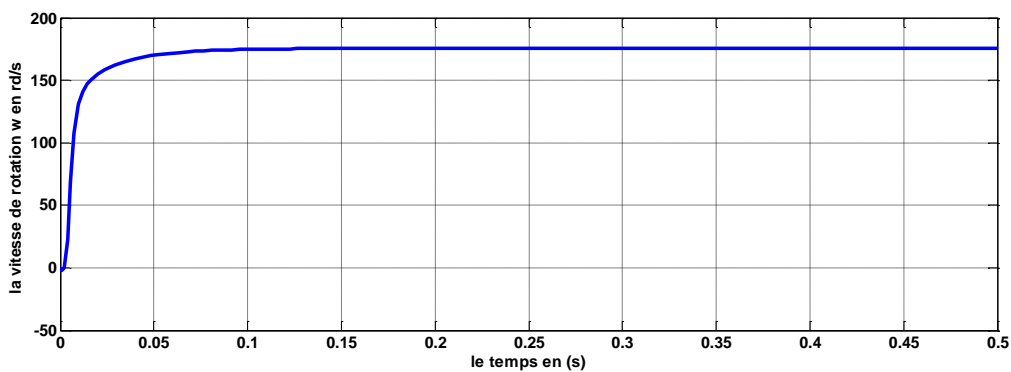


Fig.IV.10-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  pour un moteur à excitation série

La vitesse part de zéro pour se stabiliser autour de 170 rd/s, qui est la vitesse en régime établi. La courbe a une forme exponentielle, ce qui correspond à la présence de phénomènes transitoires dans les enroulements de la machine. Le temps que met le moteur pour atteindre son régime établi est 0.07s (plus petit que les autres types de moteurs déjà étudiés). Cela est dû au fait que le couple moteur est proportionnelle au carré du courant d'induit.

#### IV.4.3.2-Le couple $C_e=f(t)$ :

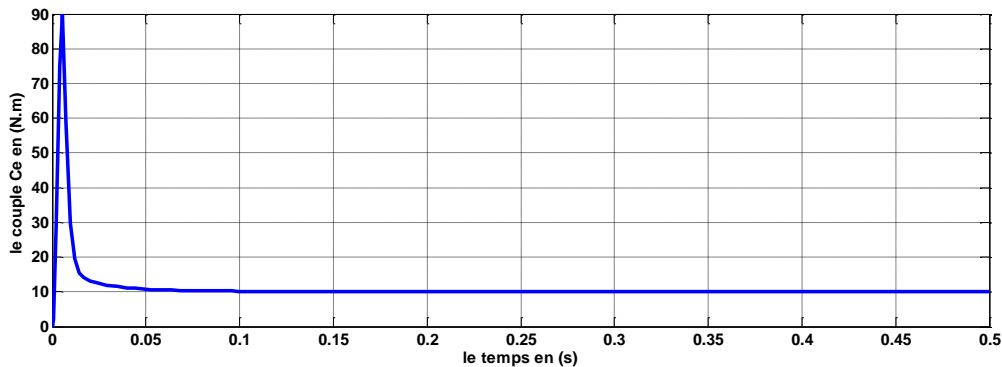


Fig.IV.11-Le couple  $C_e=f(t)$  pour un moteur à excitation série

Le moteur démarre avec un couple de démarrage important de l'ordre de 90 N.m, puis le couple passe du régime transitoire au régime établi pour se stabiliser autour de 10 N.m, qui correspond au couple résistant imposé par la charge.

#### IV.4.3.3-Le courant d'induit $I_a=f(t)$ :

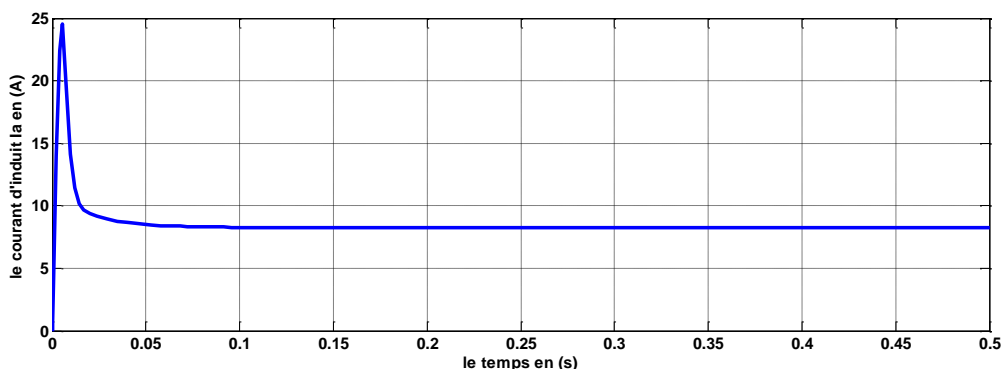


Fig.IV.12-Le courant d'induit  $I_a=f(t)$  pour un moteur à excitation série

Au démarrage le moteur appelle à un fort courant d'induit qui atteint 25A puis il se stabilise autour de 8A .

**IV.5-Simulation du moteur à courant continu à excitation série alimenté en alternatif :**

**IV.5.1- Schéma bloc :**

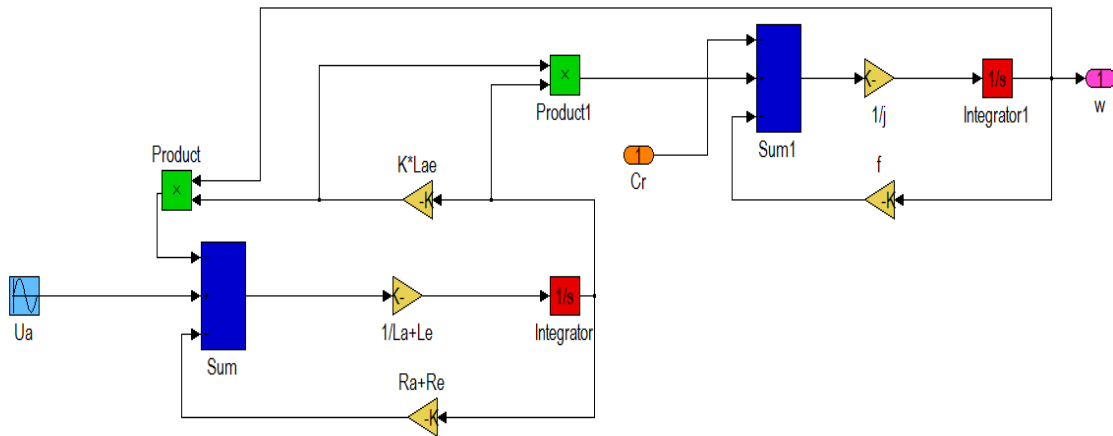


Fig.IV.13-Schéma bloc d'une MCC à excitation série alimenté avec une tension alternatif (220V-50Hz)

**IV.5.2- Les résultats de simulation :**

**IV.5.2.1-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  :**

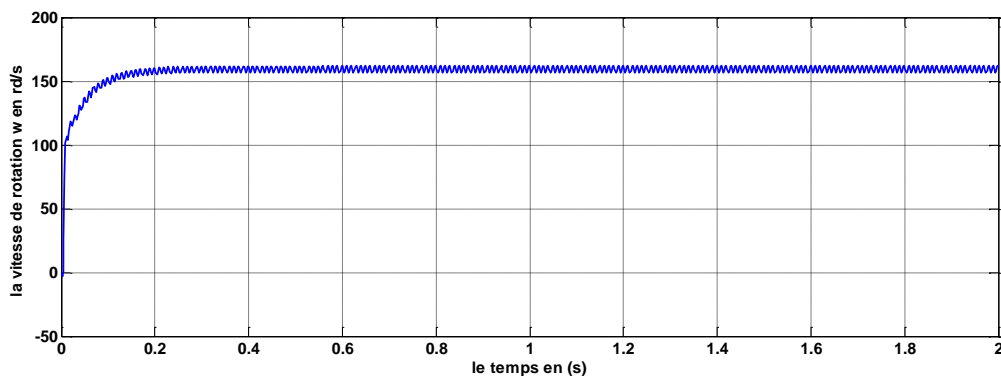


Fig.IV.14-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  pour un moteur série alimenté en alternatif

La vitesse part de zéro pour se stabiliser autour de 170 rd/s, qui est la vitesse en régime établi. La courbe a une forme exponentielle, ce qui correspond à la présence de phénomènes transitoires dans les enroulements de la machine. l'ondulation de la courbe est du à la tension d'alimentation alternative .



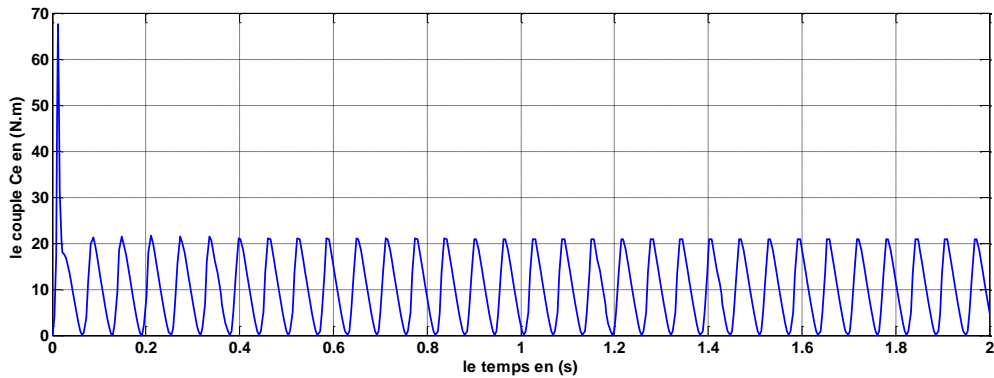
**IV.5.2.2-Le couple  $C_e=f(t)$  :**

Fig.IV.15-Le couple  $C_e=f(t)$  pour un moteur série alimenté en alternatif

Le moteur démarre avec un couple de démarrage important de l'ordre de 70 N.m, puis le couple passe du régime transitoire au régime établi pour se stabiliser autour de 10 N.m (valeur moyenne), qui correspond au couple résistant imposé par la charge. L'ondulation de la courbe est due à la tension d'alimentation alternative.

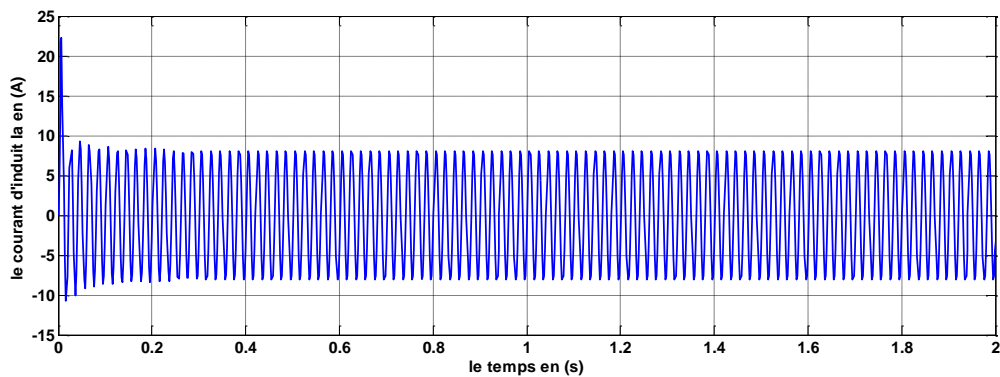
**IV.5.2.3-Le courant d'induit  $I_a=f(t)$  :**

Fig.IV.16-Le courant d'induit  $I_a=f(t)$  pour un moteur série alimenté en alternatif

Au démarrage le moteur appelle à un fort courant d'induit qui atteint 25A puis le courant induit alternatif se stabilise autour de 8A (valeur efficace).

**IV.6-Démarrage rhéostatique d'une MCC à excitation séparée :**

**IV.6.1- Schéma bloc :**

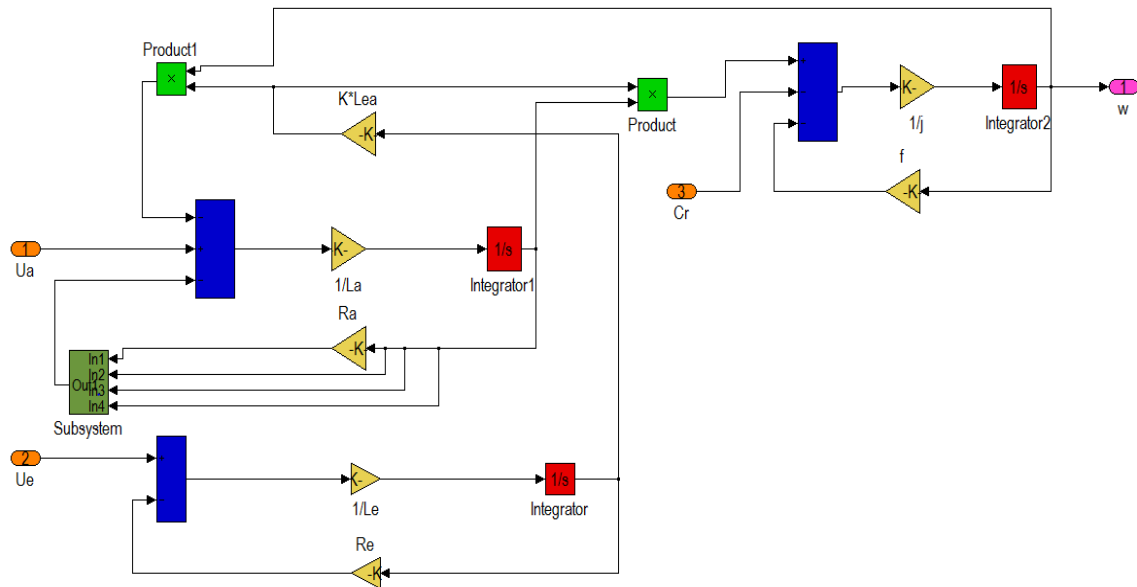
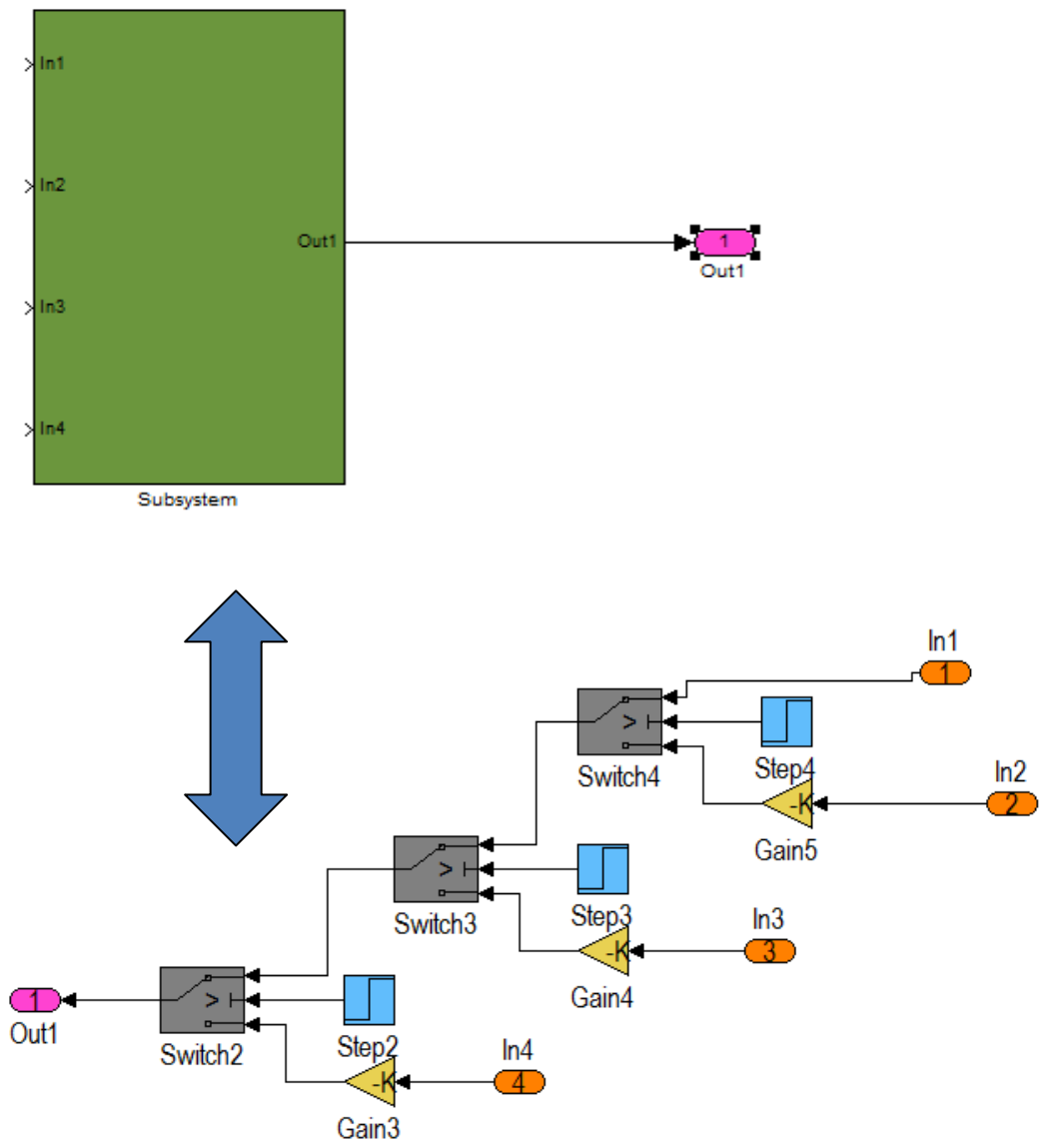


Fig.IV.17-Schéma bloc pour la simulation de démarrage rhéostatique d'une MCC à excitation séparée

IV.6.1.1- Schéma bloc du démarreur rhéostatique :



IV.6.2- Les résultats de simulation :

IV.6.2.1-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  :

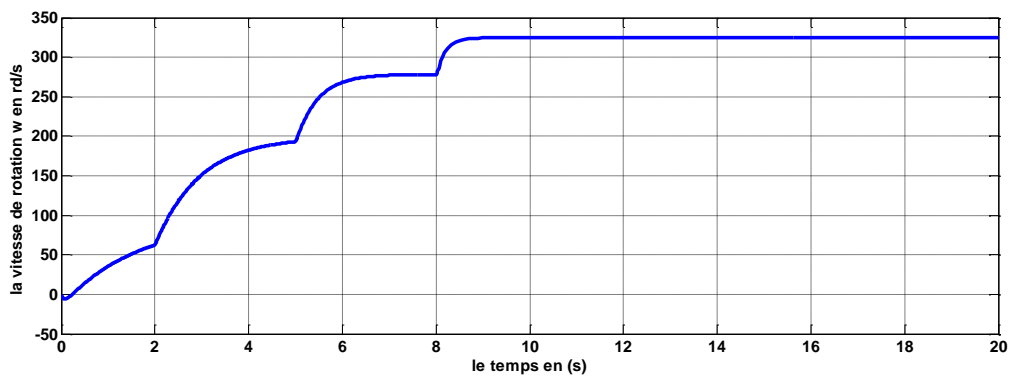


Fig.IV.18-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  pour un démarrage rhéostatique du moteur à excitation séparée

Au fur et à mesure que le moteur prend de la vitesse la résistance mise en série avec l'induit diminue.

A  $t=0$  elle vaut  $20 \Omega$ , puis  $20-8 \Omega$  à  $t=2s$  et  $20-8-6 \Omega$  à  $t=5s$  et enfin nulle à  $t=8s$

Comme la vitesse  $\Omega = \frac{U_a}{K\Phi} - \frac{(R_a+R_h).I_a}{K\Phi}$ . La diminution de  $R_h$  entraîne l'augmentation de  $\Omega$

#### IV.6.2.2-Le couple $C_e=f(t)$ :

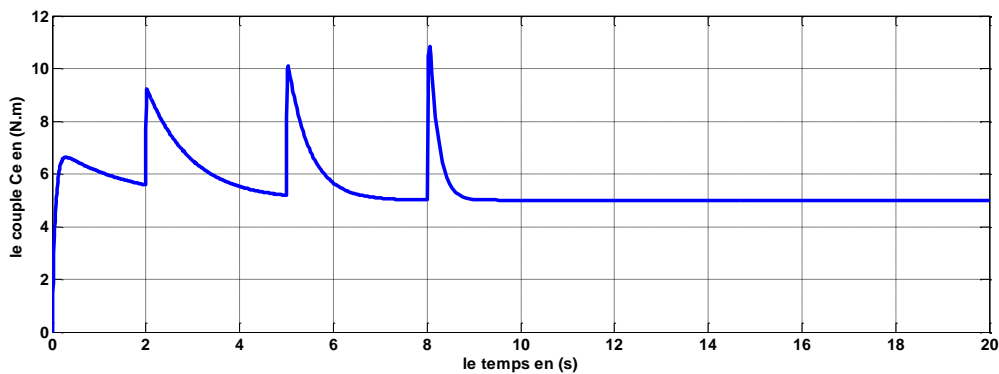


Fig.IV.19-Le couple  $C_e=f(t)$  pour un démarrage rhéostatique du moteur à excitation séparée

L'expression du couple en fonction de  $R_h$  est comme suit :  $C_e = \frac{U_a - (R_a + R_h).I_a}{\Omega}$

Le couple moteur démarre de zéro pour atteindre 6 N.m puis diminue car la vitesse a augmenté entre temps. Arrivé à deuxième seconde, on réduit  $R_h$  de  $5 \Omega$ , le couple fait un pic de 9.2 Nm puis diminue de nouveau avec l'augmentation de la vitesse. L'opération est renouvelée aux instants  $t = 5s$  puis  $8 s$ . Une fois le régime établi, et la résistance de démarrage éliminée, le couple prend une valeur constante correspondant à la charge entraînée.

**IV.6.2.3-Le courant d'induit Ia=f(t) :**

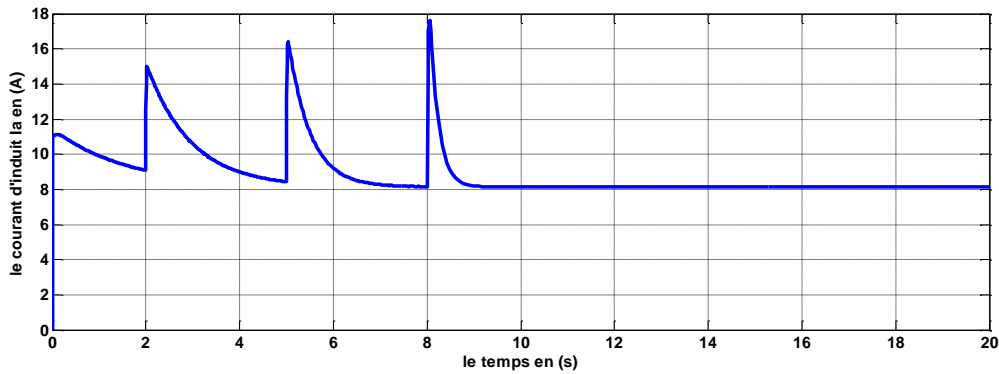


Fig.IV.20-Le courant d'induit Ia=f(t) pour un démarrage rhéostatique du moteur à excitation séparée

$$I_a = \frac{U_a - K\Phi\Omega}{R_a + R_h}$$

Comme le couple, vu que l'excitation est constante, lorsque Rh diminue brusquement le courant augmente brusquement, ensuite la vitesse augmente progressivement et le courant diminue progressivement. Et ça se répète à chaque fois que Rh diminue.

**IV.7-Simulation du moteur à courant continu à excitation shunt alimenté avec une tension alternatif redressée :**

**IV.7.1- Schéma bloc :**

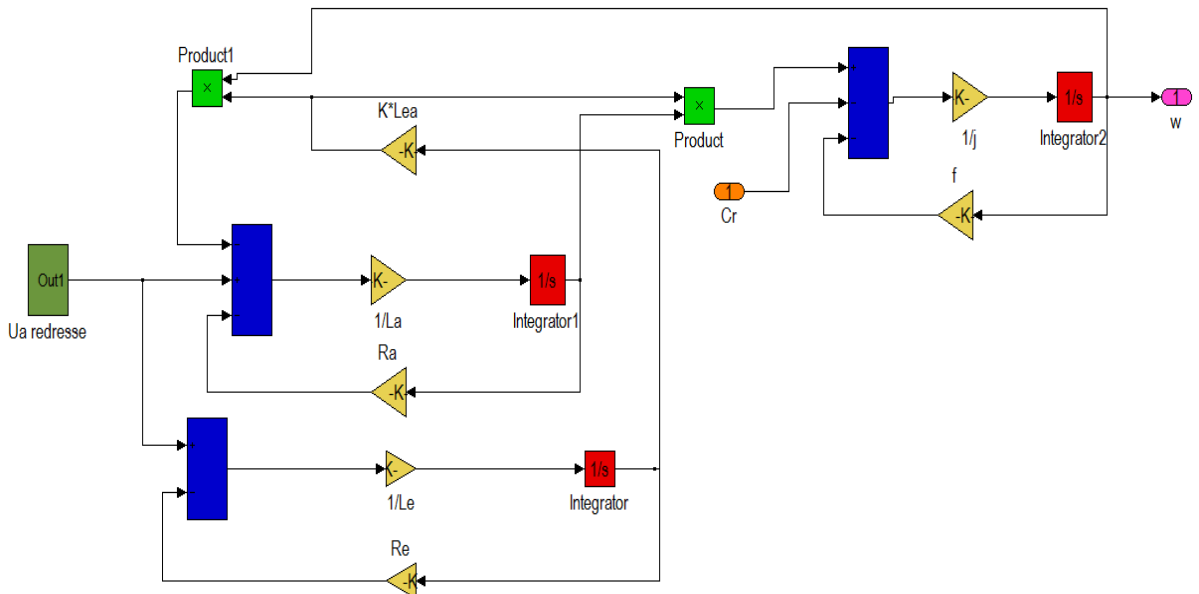
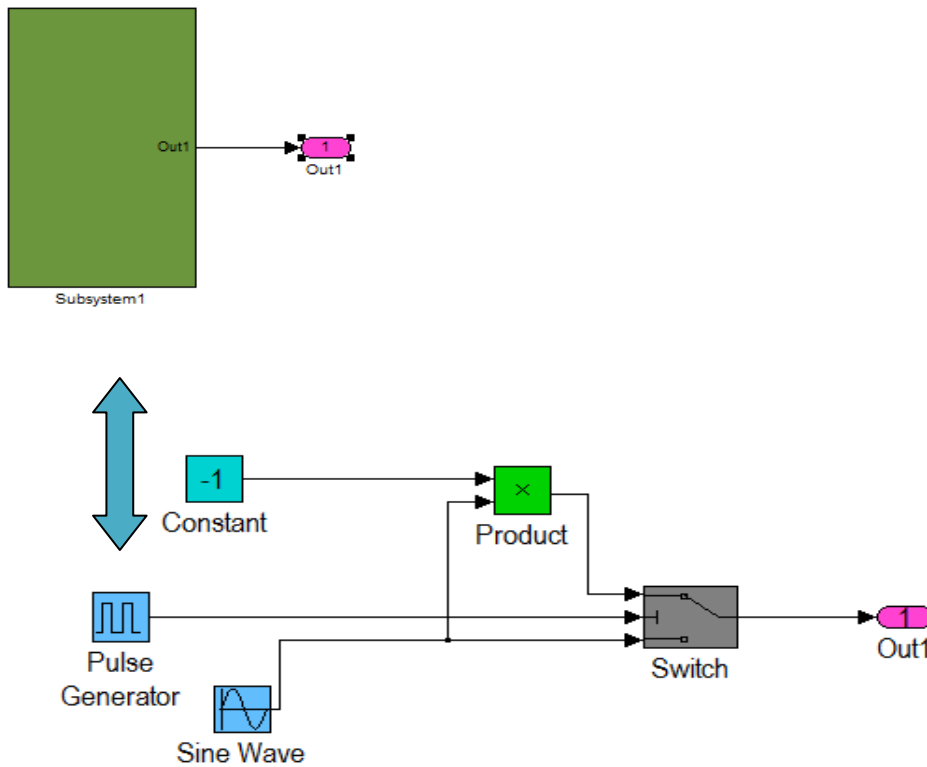


Fig.IV.21-Schéma bloc d'une MCC à excitation shunt alimenté avec une tension alternatif redressée (220V-50Hz)

IV.7.1.1- Schéma bloc du redresseur :



IV.7.2- Les résultats de simulation :

IV.7.2.1-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  :

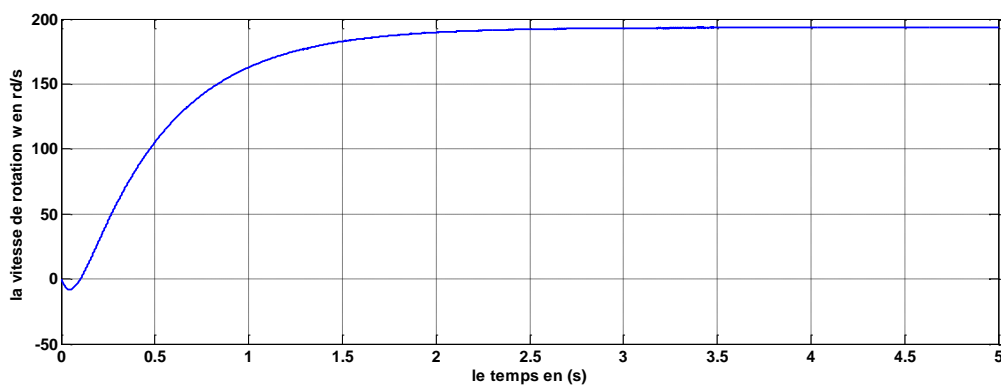


Fig.IV.22-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  d'un moteur shunt alimenté en tension alternatif redressée

La vitesse part de zéro pour se stabiliser autour de 200 rd/s, qui est la vitesse en régime établi. La courbe a une forme exponentielle, ce qui correspond à la présence de phénomènes

transitoires dans les enroulements de la machine . Le moteur a mit 3s pour atteindre le régime permanent, cela est du à l'inertie de la machine et de la charge

#### IV.7.2.2-Le couple $C_e=f(t)$ :

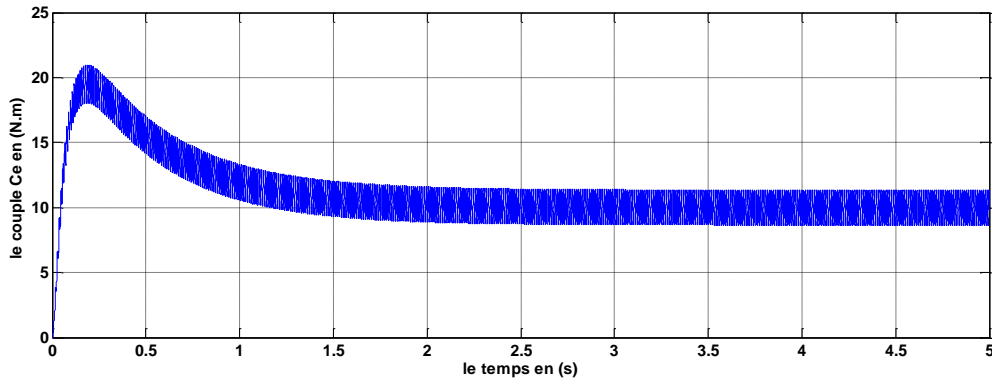


Fig.IV.23-Le couple  $C_e=f(t)$  d'un moteur shunt alimenté en tension alternatif redressée

Le moteur démarre avec un couple de démarrage important de l'ordre de 20 N.m, puis le couple passe du régime transitoire au régime établi pour se stabiliser autour de 10 N.m, qui correspond au couple résistant imposé par la charge. l'ondulation de la courbe est due à la tension alternative redressée

#### IV.7.2.3-Le courant d'induit $I_a=f(t)$ :

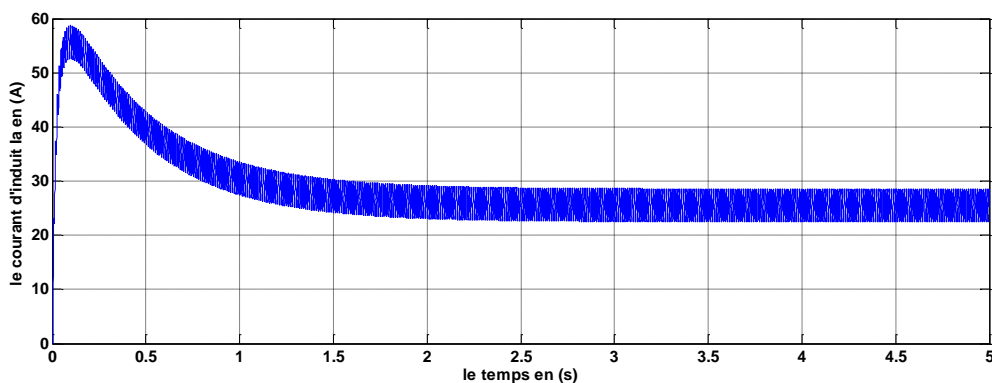


Fig.IV.24-Le courant d'induit  $I_a=f(t)$  d'un moteur shunt alimenté en tension alternatif redressée

Au démarrage le moteur appelle à un fort courant d'induit qui atteint 60A puis il se stabilise autour de 25A . l'ondulation de la courbe est due à la tension alternative redressée .

**IV.8-Simulation du moteur à courant continu à excitation séparée alimenté avec un hacheur série (dévolteur) :**

**IV.8.1- Schéma bloc :**

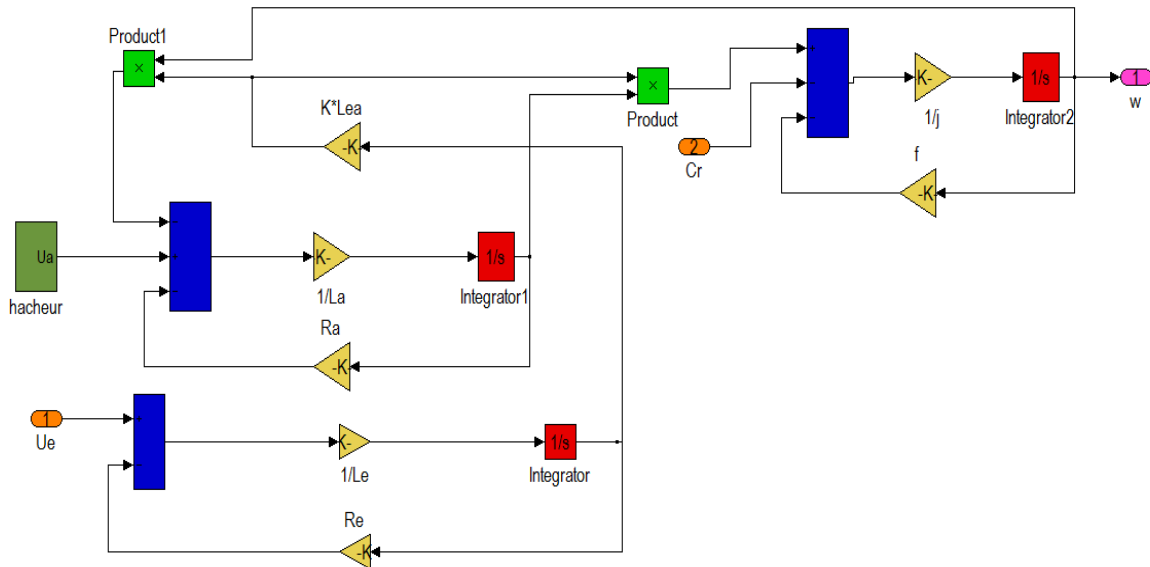
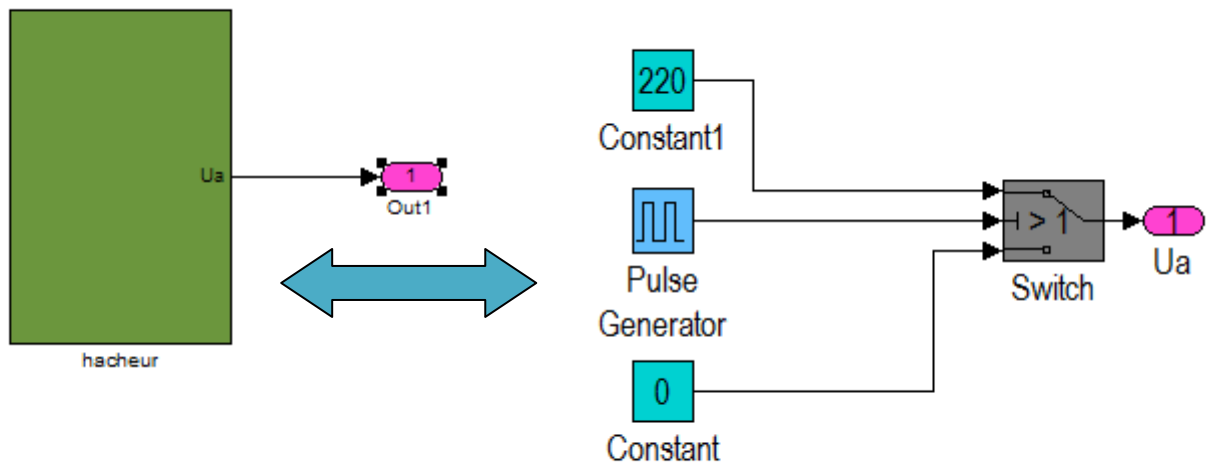


Fig.IV.25-Schéma bloc d'une MCC à excitation séparée alimenté avec un hacheur série

**IV.8.1.1- Schéma bloc du hacheur série :**





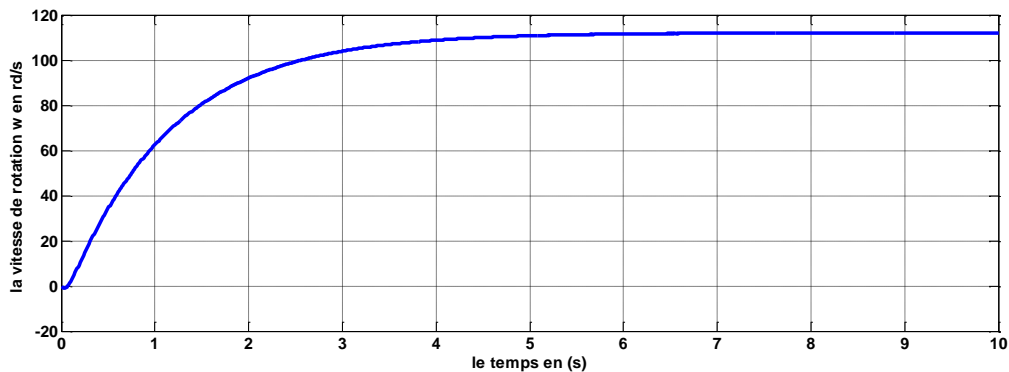
**IV.8.2- Les résultats de simulation :****IV.8.2.1-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  :**

Fig.IV.26-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  d'un moteur à excitation séparée alimenté par un hacheur série

Le rapport cyclique du hacheur est fixé à 0.5.

La vitesse du moteur alimenté par le hacheur dévolteur part de zéro pour se stabiliser autour de 110 rd/s, qui est la vitesse en régime établi. La courbe a une forme exponentielle, ce qui correspond à la présence de phénomènes transitoires dans les enroulements de la machine.

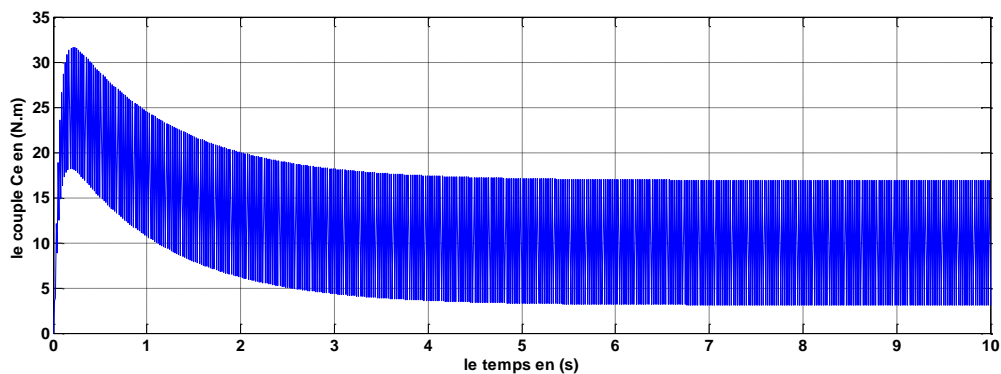
**IV.8.2.2-Le couple  $C_e=f(t)$  :**

Fig.IV.27-Le couple  $C_e=f(t)$  d'un moteur à excitation séparée alimenté par un hacheur série

Le moteur démarre avec un couple de démarrage important de l'ordre de 32 N.m, puis le couple passe du régime transitoire au régime établi pour se stabiliser autour de 10 N.m, qui correspond au couple résistant imposé par la charge. L'ondulation de la courbe est due à la tension alternative à la sortie du hacheur.

**IV.8.2.3-Le courant d'induit  $I_a=f(t)$  :**

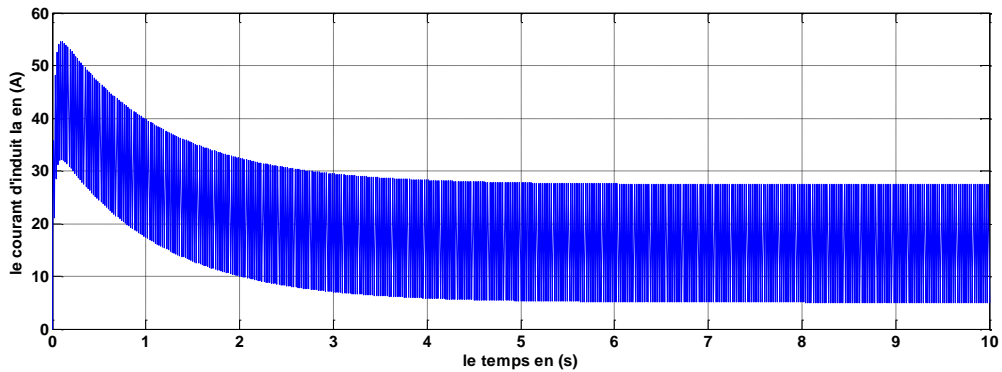


Fig.IV.28-Le courant d'induit  $I_a=f(t)$  d'un moteur à excitation séparée alimenté par un hacheur série

Au démarrage le moteur appelle à un fort courant d'induit qui atteint 54A puis il se stabilise autour de 16A . l'ondulation de la courbe est due à la tension alternative à la sortie du hacheur .

**IV.9-Simulation de la coupure d'excitation pour un moteur à excitation séparée :**

**IV.9.1- Schéma bloc :**

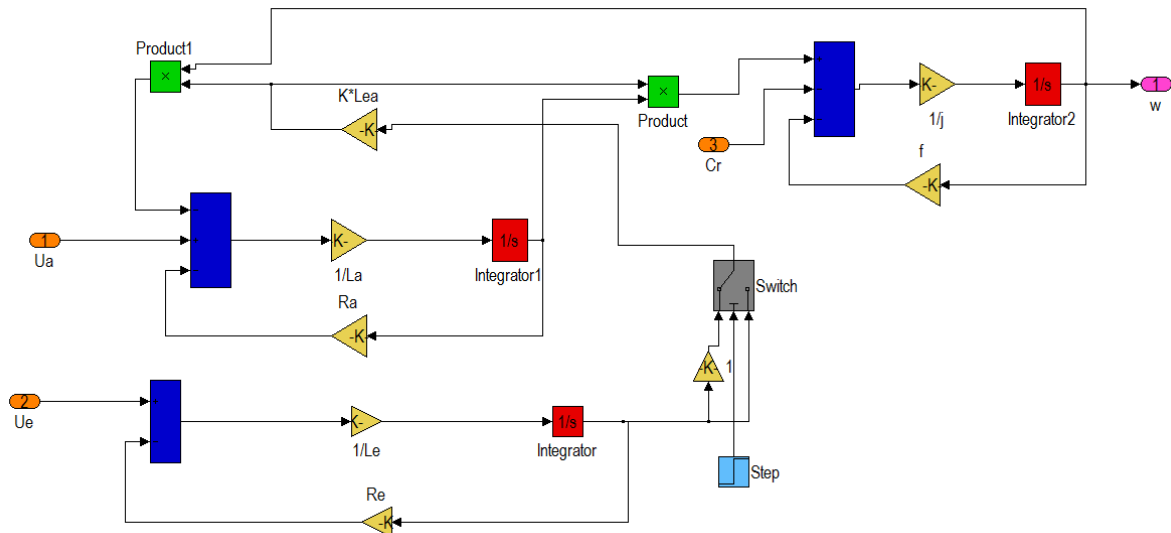


Fig.IV.29-Schéma bloc pour la simulation de la coupure d'excitation à  $t=6s$  pour un moteur à excitation séparée

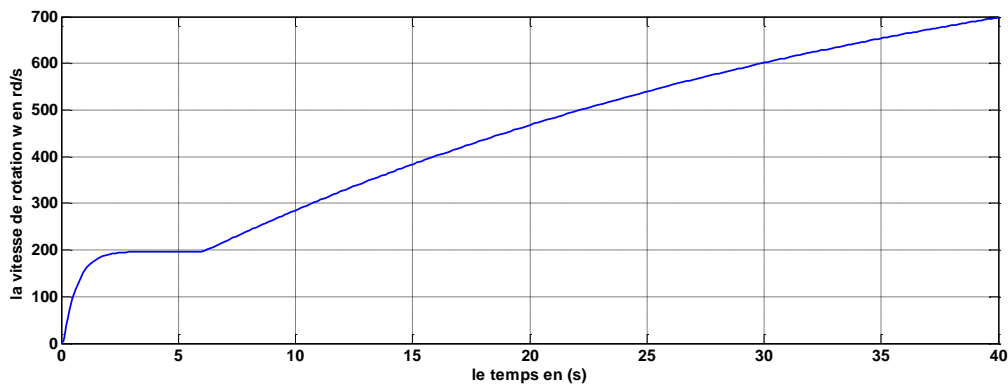
**IV.9.2- Les résultats de simulation :****IV.9.2.1-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  :**

Fig.IV.30-La vitesse de rotation  $\Omega=f(t)$  après la coupure de l'excitation du moteur à excitation séparée

La vitesse part de zéro pour se stabiliser autour de 200 rd/s, qui est la vitesse en régime établi. Après la sixième seconde l'excitation est coupée et la vitesse tend vers l'infini .

$$E = K\Phi\Omega \Rightarrow \Omega = \frac{E}{K\Phi}$$

$$I_e = 0 \Rightarrow \Phi = 0 \Rightarrow \Omega \rightarrow \infty$$

**IV.10-Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons réalisé des blocs de simulation des moteurs à courant continu à excitation séparée, shunt et série à l'aide du logiciel Matlab Simulink .

Les résultats obtenus dans notre laboratoire virtuel nous montrent des caractéristiques qui sont en concordance avec celles obtenues avec les modèles théoriques et vérifiées pratiquement. Nous en concluons que les modèles réalisés sont assez fiables et précis. Il va de soit que d'autres simulations peuvent être faites.

### **Conclusion générale :**

Les machines à courant continu sont peu à peu remplacées par les machines asynchrones et synchrone dans certains processus. Pourtant leur étude s'avère nécessaire car elles sont toujours utilisées dans plusieurs domaines où elles sont les mieux adaptées. Ce projet de fin d'étude nous a permis de mettre en place un laboratoire virtuel de simulation des machines à courant continu en vue de leur étude.

Les résultats obtenus dans nos laboratoires virtuels nous montrent des caractéristiques qui sont en concordance avec celles obtenues avec les modèles théoriques. Ce qui nous permet de dire que le modèle est assez fiable et suffisamment précis.

L'environnement virtuel qu'est MATLAB/SIMULINK, est un bon moyen d'étude du fonctionnement des MCC (et aussi d'autres systèmes) dans les conditions de fonctionnement voulues. En effet il nous permet de présenter une approche assez réaliste des phénomènes physiques et d'envisager plusieurs cas de fonctionnement du modèle élaboré.

Ce laboratoire, en association avec d'autres déjà mis en place, peut constituer une puissante source de connaissances au profit des étudiants qui seront acquises par ses utilisateurs, après un travail actif et individuel.

Au terme de cette étude, nous pouvons dire que nous avons atteint les objectifs fixés par le thème en procédant à la mise en place de cette plate forme simulation, malgré les difficultés rencontrées au cours de l'élaboration de ce projet.

Nous voudrions terminer en disant que ce projet de fin d'étude nous a permis d'approfondir nos connaissances dans les machines à courant continu et de nous familiariser avec l'outil qu'est MATLAB/SIMULINK. Sa puissance de programmation nous incite à exhorter les étudiants de le maîtriser..