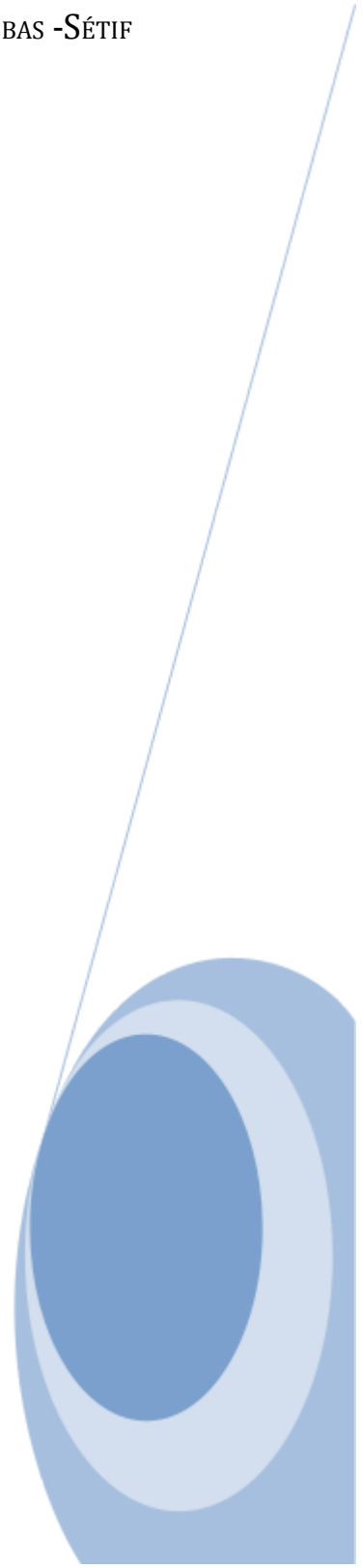
MINISTÈRE DE L'**E**NSEIGNEMENT **S**UPÉRIEUR ET DE LA **R**ECHERCHE **S**CIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS -SÉTIF



Faculté de Technologie
Département d'électrotechnique

MINER PROJET

MACHINE SYNCHRONE à AIMANT PERMANENT

Realisé par

Chettih sara

roposé & Dirigé par :

Prof. K:E: HEMSAS

2013/2014

01/GENERALITE SUR LES MACHINES A AIMANTS PERMANENTS

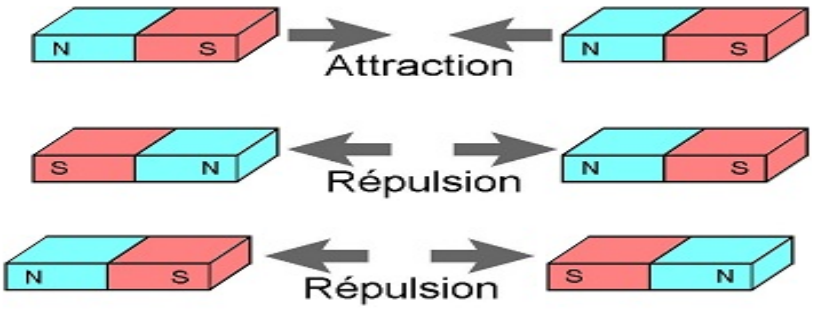
1-1/ MOTEUR A AIMANTS PERMANENTS

Le moteur électrique fonctionne sur le même principe que le moteur à aimants permanents au rotor et au stator. Cependant, ce dernier est limité par l'encombrement des aimants. Soit, pour les mêmes dimensions qu'un moteur électrique, il a une plus faible puissance et un plus petit couple. Mais cela n'empêche pas le moteur à aimants permanents au rotor et au stator de fonctionner et de pourvoir entraîner bien des systèmes en adaptant sa taille à l'utilisation souhaité. Toutefois, le moteur à aimants permanents n'est pas éternel. Un aimant en néodyme à une durée de vie de 400 ans.

L'utilisation d'un moteur à aimant permanent est en elle même non polluante. Mais les aimants ne sont pas à proprement parler une énergie renouvelable. La majorité des aimants que nous utilisons sont fabriqués par l'homme à partir d'alliage de Cobalt, Nickel, Fer, aluminium, Samarium et Néodyme. Pourtant, les aimants ne sont ils pas alors comparable à un moyen de stockage de l'énergie, malgré que cela ne soit jamais évoqué? Alors qu'il est toujours reproché aux énergies renouvelables de ne pas pouvoir être stockables, un jour, peut être y aura t'il des aimants produits à partir d'énergie renouvelable.

1-2/Principe de base de tous les moteurs utilisant le magnétisme (comme les moteurs électriques):

Le pôle nord d'un aimant et le pôle sud d'un autre aimant s'attirent.
Le pôle nord de deux aimants ou le pôle sud de deux aimants se repoussent.



Dans un moteur électrique les aimants sont tous ou en parti remplacés par des électroaimants et voir même au rotor de moteur asynchrone par une cage constitué d'aluminium rempli de fer blanc . Les électroaimants permettent aussi l'inversement des pôles magnétiques en jouant sur le sens du courant, ce qui à aussi un rôle dans le fonctionnement de différents moteurs électriques, comme inverser le sens de rotation du moteur

1-3/Moteur à aimant permanent au rotor et au stator:

Le principe du moteur à aimant permanent au rotor et au stator, est comparable à un moteur à courant continu (c.a.d la dynamo), appelé aussi moteur universel
Les pôles sud (dans cet exemple) des aimants du rotor et du stator s'opposent continuellement, obligeant le rotor à tourner.
Le moteur ne sera plus fonctionnel lorsque les aimants auront perdu leur magnétisme.

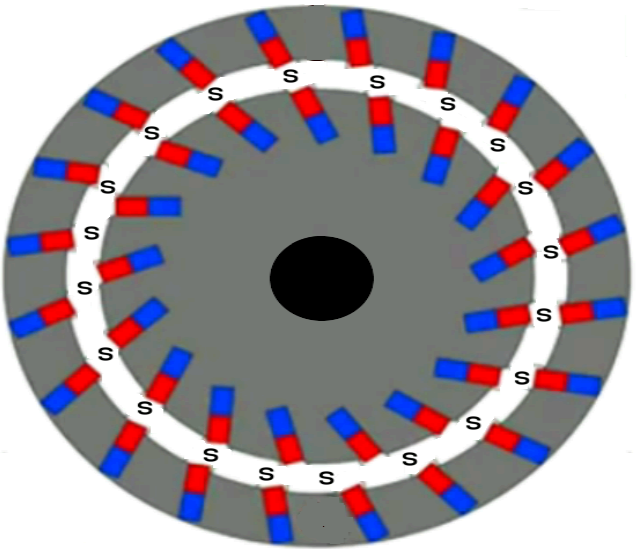
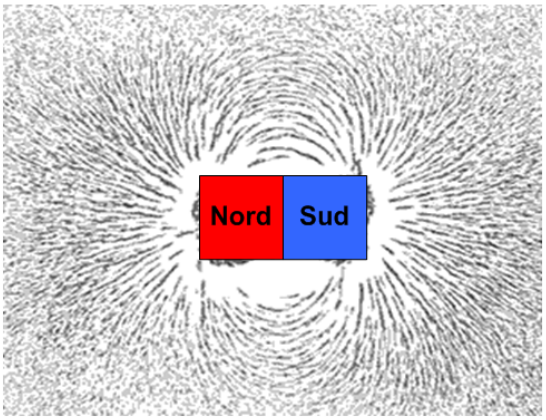


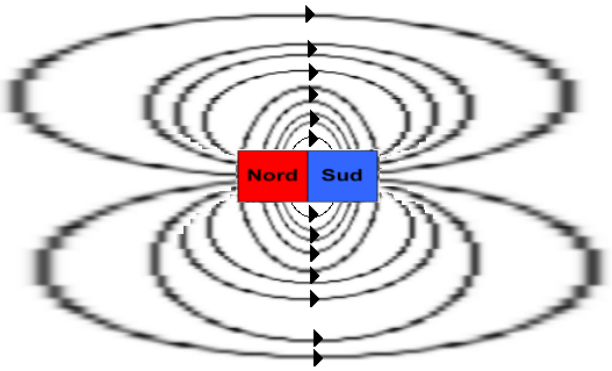
Figure 1-a

1-4/principe de fonctionnement des moteurs et génératrices électriques

a- LE CHAMP MAGNÉTIQUE

Les aimants ont un champ magnétique qui leur permet d'attirer les objets ferreux.le champ magnétique peut se matérialiser avec de la limaille de fer placée autour d'un aimant.





le champ magnétique se présentent sous forme de boucles.
Les lignes de force vont du pôle nord au pôle sud, à l'extérieur de l'aimant.
Du pôle sud au pôle Nord à l'intérieur.

Définition : Un champ magnétique est un champ de force résultant du déplacement des charges (courant électrique).
L'intensité d'un champ magnétique est mesurée en Gauss (G) ou Tesla (T).
L'intensité du champ diminue à mesure qu'augmente la distance à sa source.
Source : GreenFacts

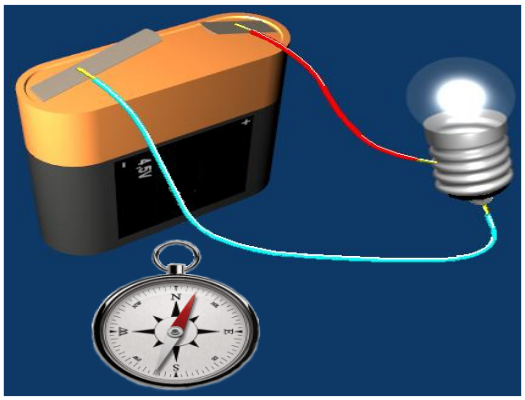
b- Les moteurs et les génératrices électriques fonctionnent sure le principe des aimants

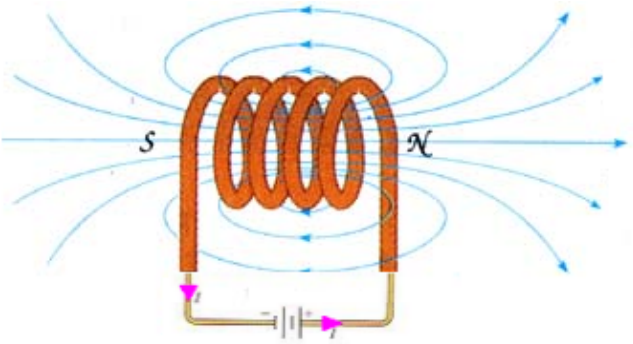
(Aimant naturel)

Le champ magnétique des aimants les fait aussi interagir entre eux, ils s'attirent ou se repoussent.
Les pôles magnétiques contraire s'attirent et Les même pôles magnétiques se repoussent
Le pôle nord d'un aimant et le pôle sud d'un autre aimant s'attirent.
Le pôle nord de deux aimants ou le pôle sud de deux aimant se repoussent.
(Les moteurs électriques utilisent surtout le principe de répulsion des aimants pour tourner)

C- électroaimant:

Tout déplacement de charge électrique, que ce soit dans le vide ou dans une matière conductrice crée un champ magnétique comme les aimants naturels





Expérience d'Œrsted, la circulation d'un courant électrique dans un fil conducteur fait dévier l'aiguille d'une boussole, mettant en évidence la création d'un champ magnétique.

Pour utiliser ce phénomène physique il est utilisé des enroulements de fil conducteur (appelé bobine, bobinage, solénoïde) qui soumis à un courant électrique réagissent comme des aimants en ayant un champ magnétique avec un pôle sud et un pôle nord, d'où le nom d'électroaimant.

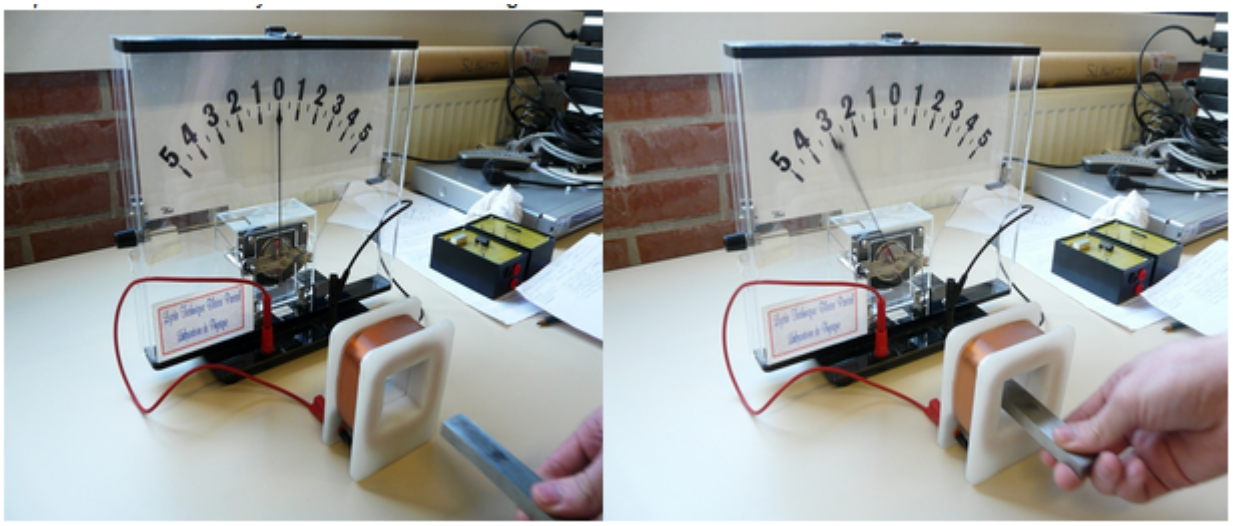
Les pôles de l'électroaimant sont définis par le sens du courant électrique et le sens d'enroulement du bobinage. Un courant électrique alternatif inversera alternativement les pôles de l'électroaimant. Le nombre d'enroulement, le diamètre du fil conducteur et la grandeur du courant électrique supporté définissent la puissance de l'électroaimant.



Un électroaimant avec une bobine artisanale attire des trombones métalliques comme un aimant naturel le ferait. Dans tous les moteurs électriques, que se soit en courant continu ou alternatif il y a des enroulements de fils électriques (des bobines) pour jouer le rôle d' aimants.

d- COURANT ÉLECTRIQUE INDUIT D'UNE BOBINE

(courants de Foucault)

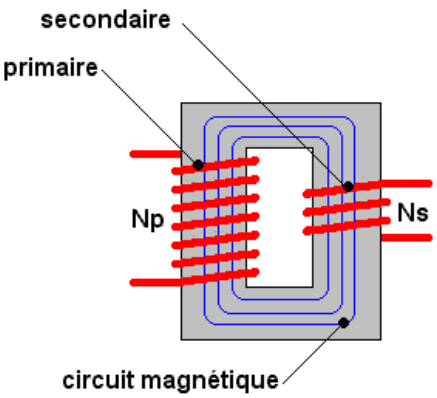


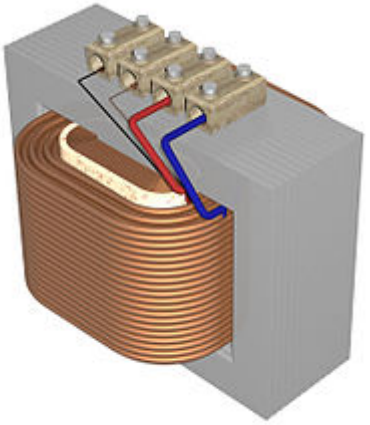
Expérience de Faraday sur électricité et magnétisme:
Une bobine est branchée sur un ampèremètre.
Un aimant est approché de la bobine. L'aiguille de l'ampèremètre bouge.
Le champ magnétique de l'aimant induit dans la bobine un courant électrique.
Une bobine soumise à un champ magnétique produit un courant électrique.

Les courants de Foucault, sont les courants électriques créés dans une masse conductrice, soit par la variation au cours du temps d'un champ magnétique extérieur traversant ce milieu (le flux du champ à travers le milieu), soit par un déplacement de cette masse dans un champ magnétique constant. Ils sont une conséquence de l'induction magnétique.
Ce phénomène a été découvert par le physicien français Léon Foucault en 1851.

e- TRANSFORMATEUR ÉLECTRIQUE

Le transformateur électrique fonctionne avec du courant alternatif. En utilisant un enroulement primaire et secondaire, Il applique la propriété d'induction de l'électroaimant dans un enroulement de fil conducteur





Transformateur 240/12V

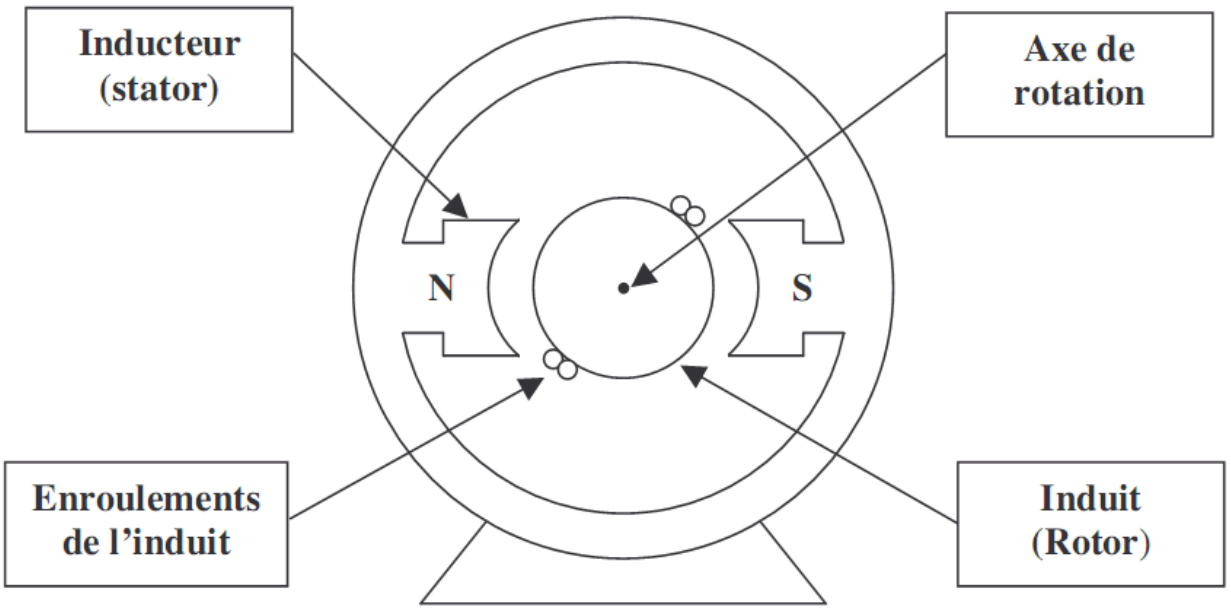
La bobine du primaire soumis à une charge électrique devient un électroaimant émettant un champ magnétique qui induit dans la bobine secondaire un courant électrique.
Le diamètre du fil et le nombre d'enroulement des bobines déterminent les capacités du transformateur.

02/ MACHINE A COURANT CONTINU A AIMANT PERMANENT

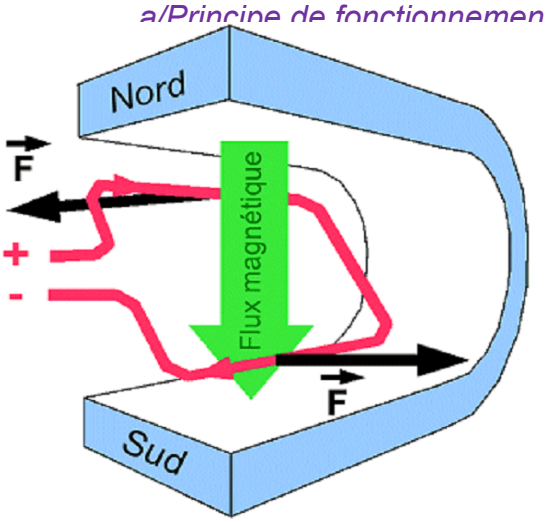
2-1/ Moteur à courant continu à aimant permanent :

. Un moteur à courant continu à aimant permanent se compose de trois éléments essentiels :
- Une partie fixe, l'inducteur (stator) constitué d'un aimant permanent. (Figure 1)
- Une partie mobile, l'induit (rotor) comportant une ou plusieurs bobines tournant dans le champ magnétique crée par l'inducteur. (Figure 1)
- Le collecteur qui associé aux balais, permet de relier les enroulements du rotor à l'extérieur du moteur. (Figure 2)

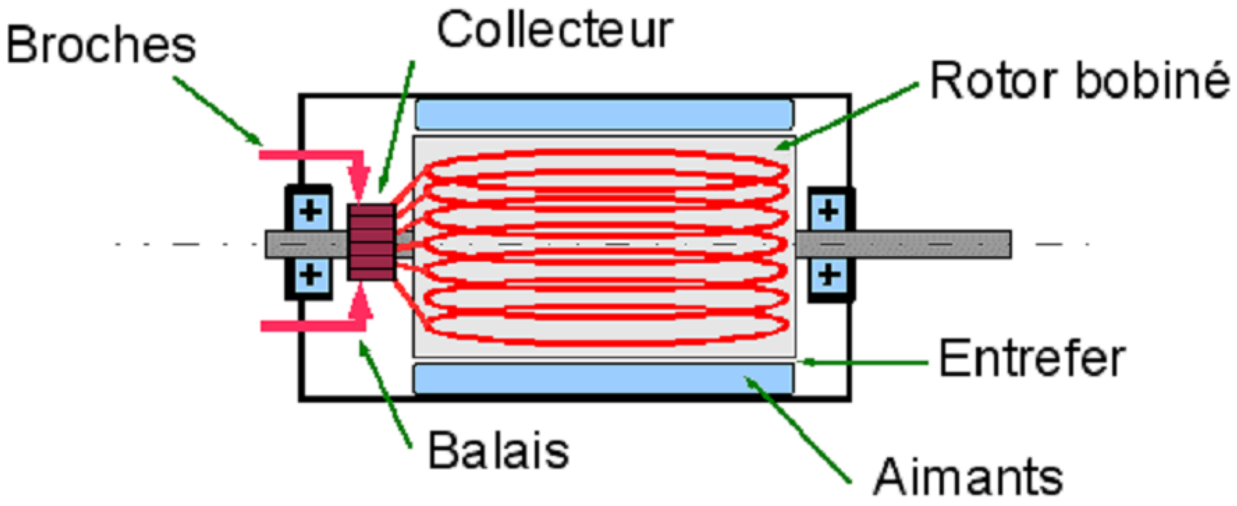
Figure 1 : vue en coupe simplifiée



a/Principe de fonctionnement



Le rotor, (partie tournante), est constitué d'un noyau métallique avec un bobinage de cuivre, le stator comporte des aimants permanents qui engendrent un champ magnétique dont le flux traverse le rotor. L'espace étroit entre le rotor et le stator est nommé entrefer.



Le rotor est l'induit et le stator l'inducteur, dans d'autre moteurs, l'inducteur peut également être bobiné. Un collecteur avec des balais (charbons) permet de transmettre l'énergie électrique au rotor.

Le rotor est donc constitués de fils électriques parcourus par un courant qui forment des spires, ces même fils sont dans le flux magnétique des aimants. Ces conducteurs sont donc soumis à des forces de Laplace, un couple moteur est donc créé. Pour entretenir la rotation du moteur, le collecteur inverse le sens du courant dans les spires à chaque demi tour.

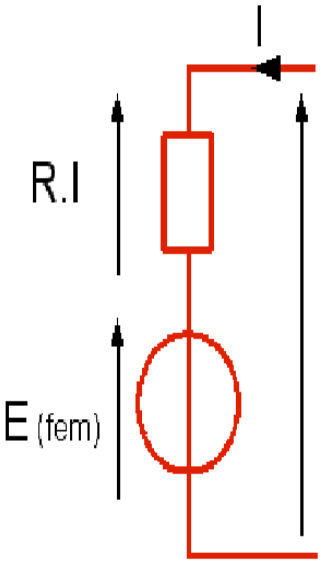
b/Schéma équivalent du moteur à courant continu.

Le moteur se comporte
avec un générateur de ten

I : c
U : T

R :

En réalité, il existe aussi
que l'



La force électromotrice E est proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur $\Omega(rad/\sec)$

$K_e . \Omega = E$ K_e : est une constante

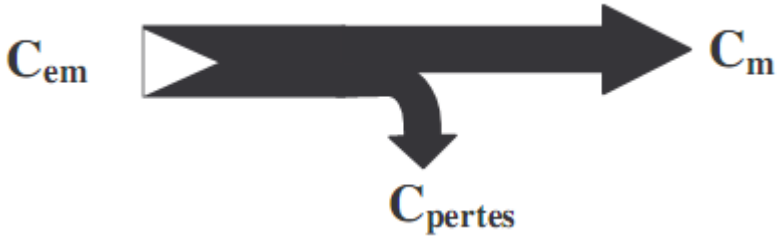
Le courant I est proportionnel au couple électromagnétique Cem(Nm)

Cem=Kc*I Kc est une constante

Remarque :Kc=Ke

Couple moteur (couple utile) et couple de pertes

Le couple électromagnétique **Cem** n'est pas égal au couple moteur **Cm** disponible sur l'arbre du moteur. Il y a une perte de couple **Cpertes** due aux frottements des diverses pièces en rotation et aux pertes fer (courants de Foucault…). Pour un moteur donné Cpertes est constant :



Le couple moteur Cm est aussi appelé couple utile Cu.

Cm = **C**em – **C**pertes

Couple résistant

Le couple résistant Cr est le couple qu'exerce sur l'arbre, la charge que le moteur doit entraîner en rotation. Plus la charge est importante plus Cr est important.

Equation mécanique du moteur

$$Cm - Cr = j\frac{d\Omega}{dt}$$

J : Moment d'inertie (g.m-2)

J est une constante propre à chaque moteur.

Interprétation de l'équation mécanique

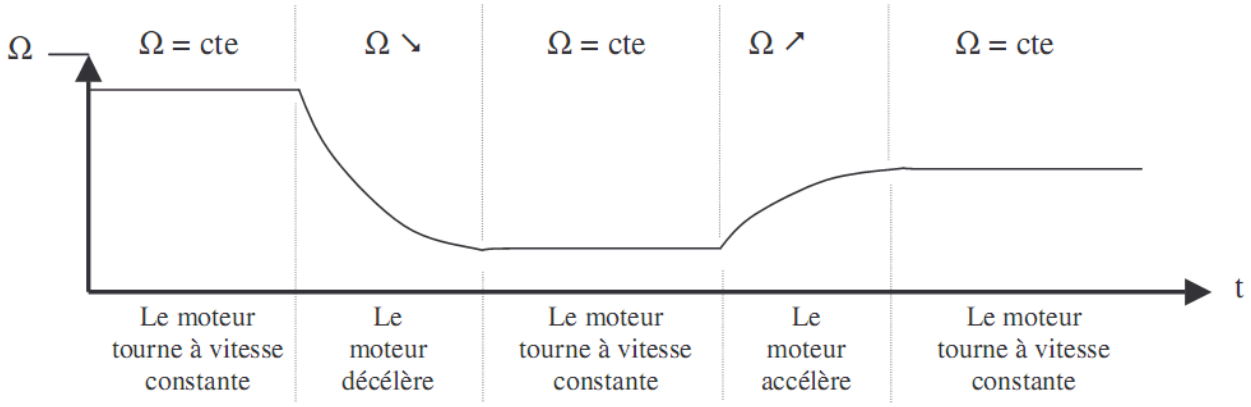
Quand Cm > Cr $\Rightarrow$ $j\frac{d\Omega}{dt}$ >0 $\Rightarrow$ Ω augmente $\Rightarrow$ le moteur accélère.

- Quand Cm = Cr $\Rightarrow$ $j\frac{d\Omega}{dt}$ =0 $\Rightarrow$ Ω =cte $\Rightarrow$ le moteur tourne à vitesse constante

- Quand Cm < Cr $\Rightarrow$ $j\frac{d\Omega}{dt}$ <0 $\Rightarrow$ Ω diminuer $\Rightarrow$ le moteur décélère.

Dans le cas, où le moteur est alimenté par une tension **U** constante, le couple moteur **Cm** cherche toujours à compenser le couple résistant **Cr** pour atteindre le point d'équilibre

Cm=Cr. Ceci est illustré par les chronogrammes ci-dessous :



- A la date t1, la charge à entraîner augmente (**Cr** augmente), **Cm** devient inférieur à **Cr** le moteur décélère(. Ω **diminuer**) **Cm** augmente pour essayer d'égaler **Cr**. Il y parvient à la date **t2.**
- Entre les dates **t2** et **t3** le moteur tourne à vitesse constante.
- A la date t3, la charge à entraîner diminue (**Cr diminuer**), **Cm** devient supérieur à **Cr** le moteur accélère (Ω augment). **Cm diminue** pour essayer d'égaler **Cr**. Il y parvient à la date **t4**.

Interprétation de l'équation électrique

On suppose que le moteur est alimenté par une tension U constante : U = RI + E = Cte.

- Quand **Cr** augmente ⇒ **Cm** augmente ⇒ **I** augment (RI + E = U = Cte) ⇒ **E** diminuer Ω diminuer .
- Quand **Cr** diminuer ⇒ **Cm** diminuer ⇒ **I** diminuer (RI + E = U = Cte) ⇒ **E** augmente Ω augmente

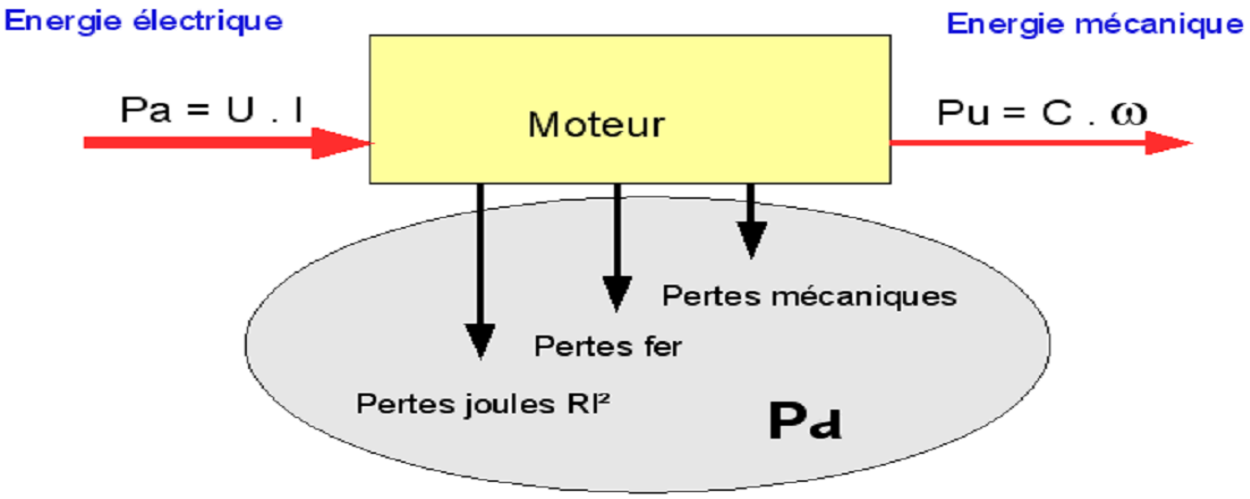
On suppose que la charge à entraîner est constante.

Dans ce cas ⇒ Cr = cte ⇒ Cm = cte ⇒ I = cte

- Si **U**augmente (U=RI+E) ⇒ **E** augmente ⇒ Ω augmente
- Si **U**diminuer(U=RI+E) ⇒ **E**diminuer ⇒ Ω diminuer

En conclusion pour faire varier la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu il suffit de faire varier la valeur de sa tension d'alimentation U.

d/Puissance et rendement



Puissance absorbée (Watt) : c'est la puissance électrique prélevée sur l'alimentation Pa = U.I

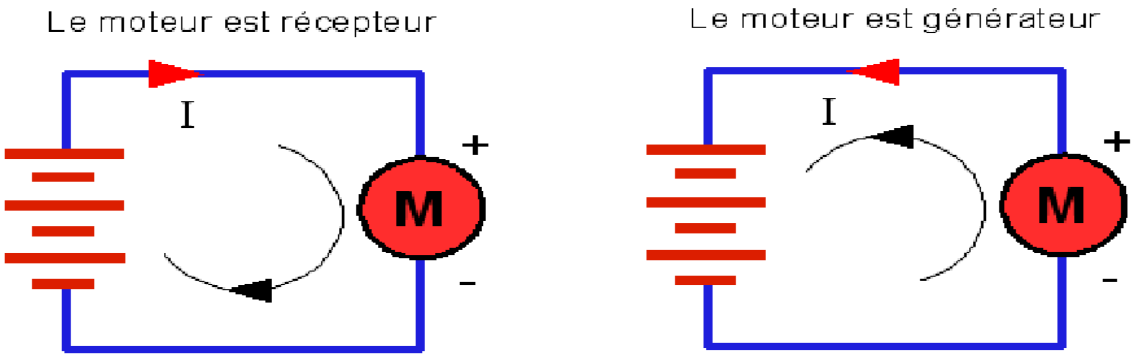
Puissance utile (Watt) : c'est la puissance mécanique disponible sur l'arbre en sortie Pu = C. W

Puissance dissipée (Watt) : cette puissance correspond aux pertes électriques par effet joules(R.I²), aux pertes mécaniques et aux pertes magnétiques, La puissance utile est donc toujours plus faible que la puissance absorbée Pd = Pa - Pu

Rendement (sans unité) : c'est le rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée, il est toujours inférieur à 1, μ = Pu / Pa

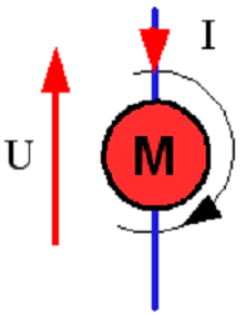
e/Réversibilité.

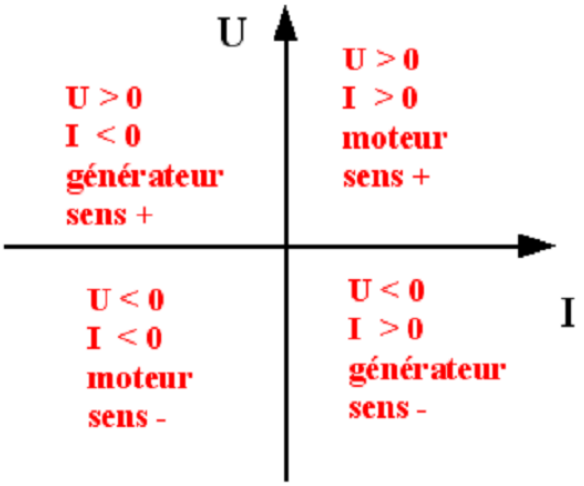
Ce type de moteur peut convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, comme tous les moteurs, mais il peut aussi faire le contraire, il se comporte alors en générateur.



Dans le premier cas, le moteur alimenté par la batterie entraîne la mécanique, dans le second cas, c'est la mécanique qui entraîne le moteur et il peut charger la batterie.

On dit que ce moteur est réversible et qu'il peut fonctionner dans quatre quadrants





2/GÉNÉRATRICE A COURANT CONTINU

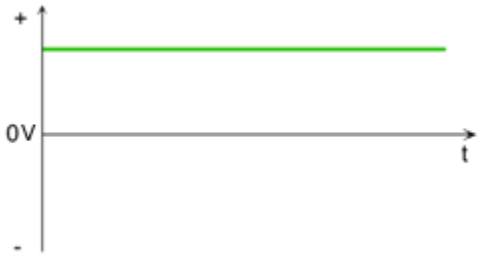
La dynamo est une génératrice de courant électrique continu et l'alternateur est une génératrice de courant électrique alternatif.

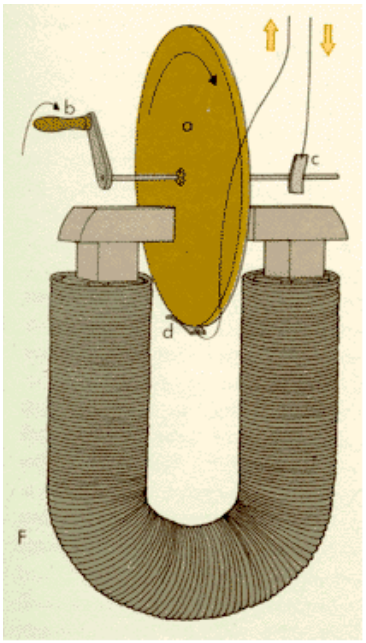
a) le disque dynamo

Un disque tourne entre le pôle nord et le pôle sud d'un aimant (ou électroaimant alimenté en courant continu) en U. Deux connexions par frottement de balais avec des fils conducteurs sont faites sur le disque. Une sur l'axe en matière conductrice du disque et une autre sur la périphérie du disque en métal conducteur.

Les appareils de mesure démontrent la production d'un courant électrique continu.

Les mêmes faces du disque en métal conducteur sont exposées toujours au même pôle de l'aimant. Il n'y a pas d'alternance de pôle, c'est pourquoi le courant électrique est continu





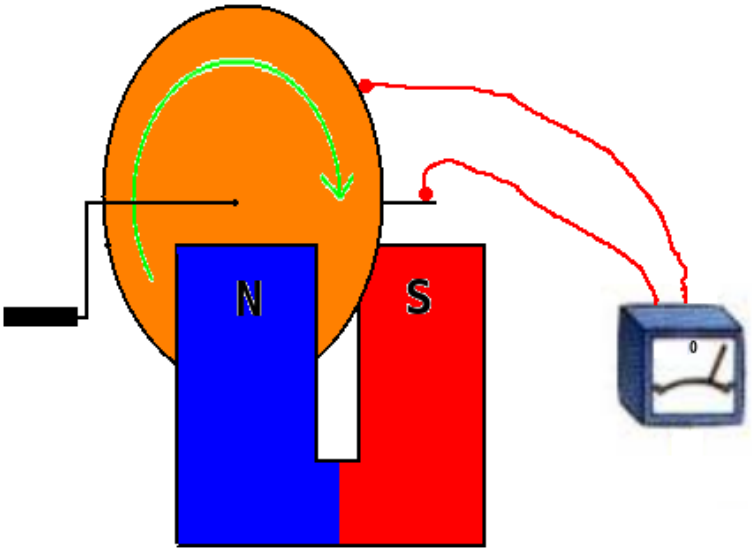
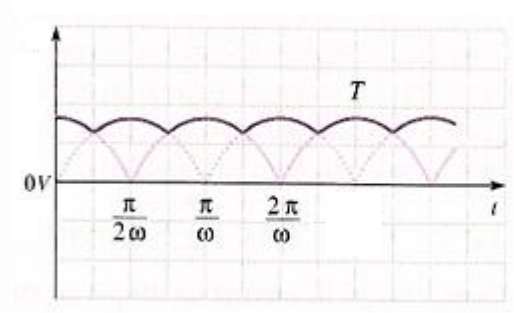
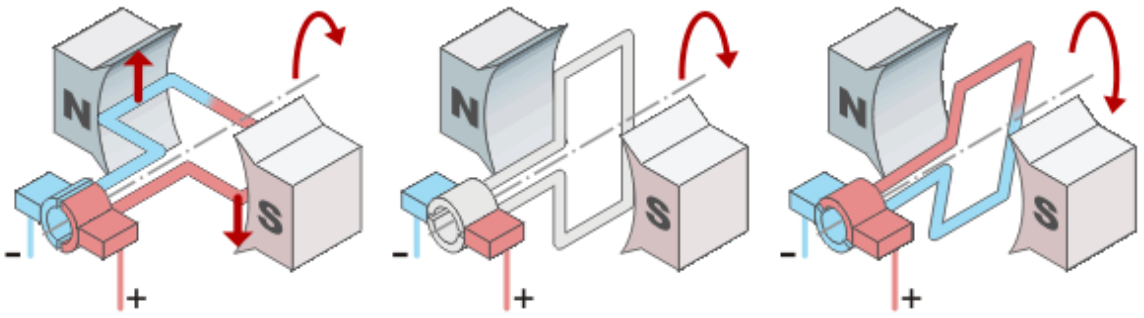


*Figure03 : Disque dynamo de FARADAY-**1831***

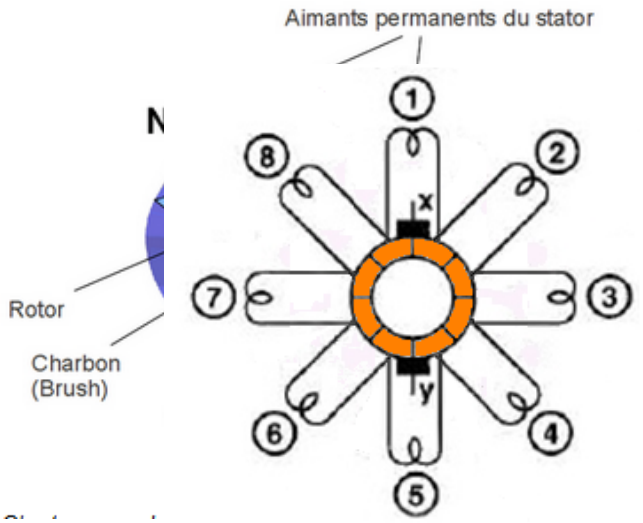
B)La dynamo à aimant permanent au stator

Dynamo à aimant permanent au stator à un seul enroulement au rotor, dont le rotor est entraîné en rotation par une force motrice extérieur.





Le courant continu d'une dynamo électrique à aimant permanent au stator est obtenu en maintenant face à face les mêmes pôles magnétiques du stator et du rotor. Il n'y a pas d'alternance de pôle magnétique, le pôle nord du stator doit toujours être en face du pôle nord du rotor et le pôle sud du stator doit toujours être en face du pôle sud du rotor.



Branchement en série des enroulement du rotor. *ment*

C'est pour cela qu'a été inventé les balais (charbons) et le collecteur à lamelles sur le rotor.
Les balais et le collecteur à lamettes inversent le sens de circulation du courant électrique de la bobine du rotor à chaque demie arc de cercle du rotor et cela dans le cas de cette dynamo n'ayant qu'un enroulement au rotor connecter par deux lamettes au collecteur.
Pour accroître la puissance d'une génératrice ou d'un moteur à courant continu, il est nécessaire d'ajouter des enroulements au rotor est au stator. Cela permet au rotor d'avoir toujours un enroulement en face des aimants (ou électroaimant alimenté en courant continu) du stator. Et Pour augmenter le nombre d'enroulement indépendant, il faut ajouter des lamelles sur le collecteur.

CHAPITRE 03 : MACHINE SYNCHRONE A AIMANT PERMANENT

1-INTRODUCTION

Dans l'industrie le moteur synchrone à aimants permanent essaye de plus de remplacer le moteur à courant continu dans les applications ou l'on cherche des performances dynamiques et statiques très élevées avec des puissances importantes.
Ce type de moteur s'impose sure le marché en raison de sa simplicité de commande et sa puissance massique élevée, vu que les aimants modernes ont la capacité de produire une forte induction dans l'entrefer sous un faible volume, ce qui est impossible avec un inducteur bobiné.

2-MACHINES SYNCHRONS A AIMANTS PERMANENTS(MSAP)

De nombreuses tentatives ont été faites par des chercheurs pour réaliser des moteurs synchrones à aimants, mais ce n'est qu'avec l'apparition des matériaux à fort champ coercitif et induction rémanente assez élevée qu'elles ont pu, réellement se concrétiser.

1-2/Structure

Le moteur synchrone est constitué de deux parties ; une partie mobile ou rotor constituant l'inducteur ; et une partie fixe ou stator portant des enroulements constituant l'induit .la mince zone localisée entre ces deux éléments est appelée entrefer.
Le stator d'une machine synchrone triphasée est constitué de trois enroulements identiques décalé de $(120°)$ dans l'espace, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe. Ce dernier est feuilleté afin de réduire les courants de Foucault et de limiter les pertes dans le fer.

Il est généralement construit en tôle à base d'alliage fer-silicium qui permet l'obtention d'une induction élevée.

Au rotor, les enroulements parcourus par un courant continu (dans le cas de la machine à rotor bobiné) sont remplacés par des aimants permanents alternant pôles nord et pôles sud. Le flux inducteur balaye les enroulements statoriques et y induit des forces électromotrices (f.é.m) alternatives. L'interaction des champ statorique donne naissance à un couple sur l'arbre du moteur et entraine le moteur à vitesse de rotation synchrone

La figure suivante, présente une machine synchrone à aimant en surface.

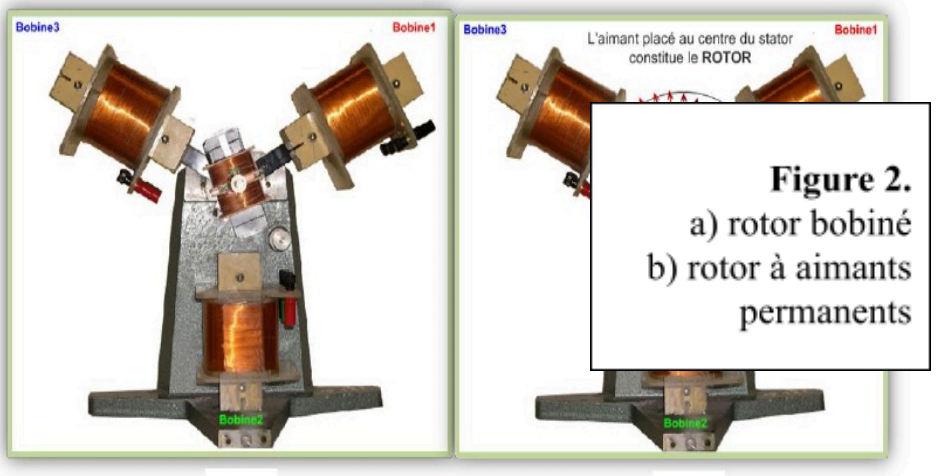


Figure 2.
a) rotor bobiné
b) rotor à aimants permanents



***Figure 1a** : moteur industriel à aimants permanents qq kW*
(doc. aimants Philips)

1.2.1. Structures avec pièces polaires (APP)

Les machines APP servent à la concentration du flux d'induction magnétique dans l'entrefer. Pour ce type de machine, il existe aussi plusieurs structures qui diffèrent suivant le sens des aimants et la disposition des pièces polaires au rotor. Les figures (1.3 a-b c)représentent des exemples de cette structure [1].

L'inductance de l'induit n'est plus constante en fonction de la position du rotor et l'on peut distinguer une inductance dans l'axe longitudinal notée L_d L_d, et une dans l'axe transversale notée L_q L_q.

Les structures avec pièces polaires entraînent l'existence d'un couple de réluctance qui se superpose au couple électromagnétique résultant du couplage rotor-stator, ceci affecte la qualité du couple dont les ondulations seront plus importantes.

1.2.2. Equations Structures sans pièces polaires (SPP)

Dans cette structure, les aimants sont directement placés dans l'entrefer à la surface du rotor constitué d'un noyau central magnétique et maintenu par une frette en fibre de verre ou de carbone.

La perméabilité des aimants étant voisine de μ_0 μ_0 le rotor vu de l'induit se comporte d'un point de vue magnétique comme un rotor lisse. L'inductance de l'induit est donc indépendante de position angulaire, figure (1.3 d) [2].

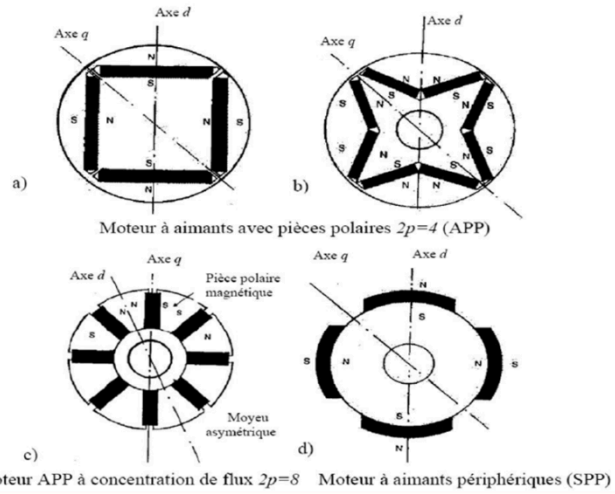


Figure 1.3. Différentes structures de la roue polaire d'un moteur synchrone à aimants permanents

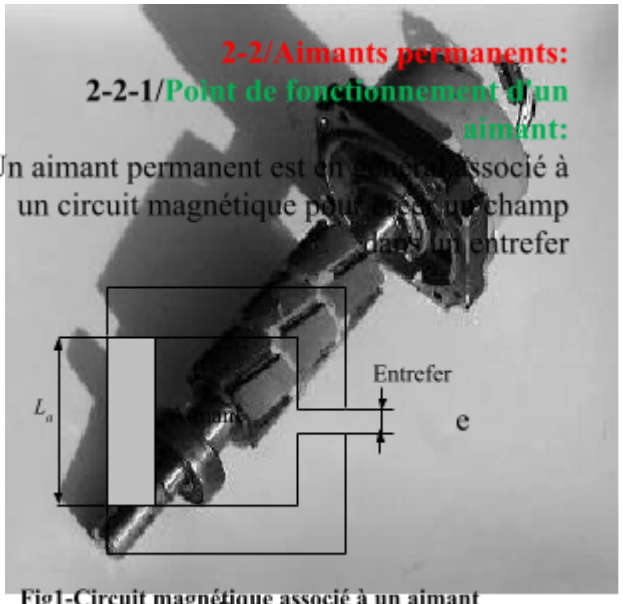


Fig1-Circuit magnétique associé à un aimant

La perméabilité des pièces de matériau ferromagnétique étant très élevée, la reluctance de ces tronçons de circuit magnétique est négligeable devant celle de l'entrefer.
Soient : la la longueur de l'aimant, e la largeur de l'entrefer, H l'excitation magnétique dans l'aimant et H_e l'excitation magnétique dans l'entrefer (mesures algébrique).
Le théorème d'Ampère donne :

$$Hla + H_e e = 0 .$$

Par ailleurs si S_a et S_e sont les sections de l'aimant et l'entrefer, la conservation du flux s'écrit :
$BS_a=B_eS_e$, B et B_e les champs magnétiques de l'aimant et l'entrefer.
En fin, le perméabilité de l'entrefer étant μ_0 , on a : $B_e = \mu_0 H_e$.
A partir des trois équations précédentes on peut déduire la relation : $B= - \mu_0 \frac{S_e}{S_a}\frac{l_a}{e} H$
C'est l'équation d'une droite dans le plant H,B, on la nomme droite d'entrefer.
Comme l'aimant impose une seconde relation entre B et H par sa caractéristique magnétique, on obtient le point de fonctionnement S par intersection de la droite et de la courbe.
On constate que l'excitation magnétique H est toujours négative, c'est-à-dire qu'à l'intérieur de l'aimant, les vecteurs B et H sont de sens opposés, par ailleurs, on voit que pour obtenir un champs magnétique important, il faut utiliser pour l'aimant des matériaux qui possède à la fois un champ rémanent important et une excitation coercitive élevée.

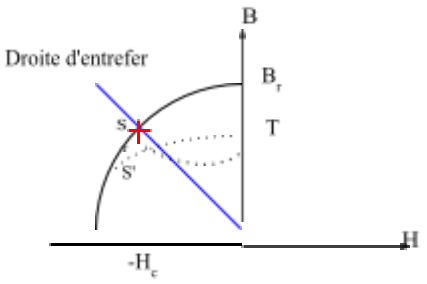


Fig2-Détermination du point de fonctionnement

I-1-2Droite de recul: En partant d'un point S du cycle, on réduit la largeur de l'entrefer. le point de fonctionnement se déplace sur un arc de courbe ST si on l'on va jusqu'au court-circuit magnétique (absence d'entrefer).On élargit ensuite l'entrefer jusqu'à ses dimensions de départ ; le point de fonctionnement décrit une nouvelle portion de courbe TS' .après quelques allers et retours, le point représentatif parcourt une courbe fermée de recul. En pratique, ce cycle est étroit de telle sorte qu'on peut l'assimiler à un segment de droite .Le support Δ de ce segment est appelé droite de recul. La pente μc de cette droite est nommée perméabilité de recul.

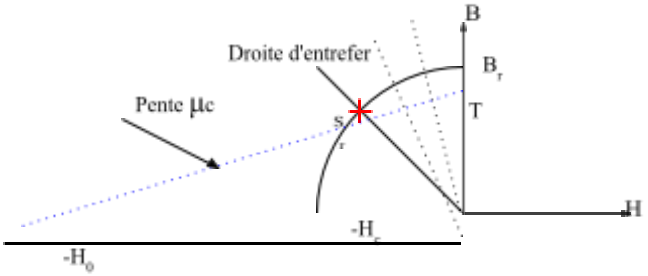


Fig3-Droite de recul

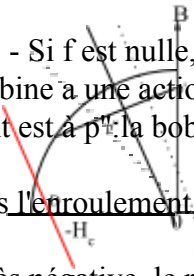
I-1-3 Fonctionnement avec une force magnétomotrice antagoniste:

Très souvent, l'aimant n'est pas la source de flux dans la machine car il existe des enroulements parcourus par des courants. Considérons par exemple le circuit magnétique élémentaire sur lequel on ajoute un bobinage de force magnétomotrice: $f=Ni$

Le théorème d'Ampère donne $Hl_a + H_e e = f$

Par ailleurs , on a toujours $BS_a=B_eS_e$ et $B_e=\mu_0 H_e$

On obtient à partir de ces trois relations : $H=\frac{f}{l_a}-\frac{S_a}{S_e}\frac{e}{l_a}\frac{B}{\mu_0}$



- Si f est nulle, le point st en p.
- Si f est positif, le point est en p':la bobine a une action magnétisante.
- si f est négative, le point est à p'':la bobine a une action Démagnétisante
- Quand on coupe le courant dans l'enroulement, le point revient En p
- Si la force magnétomotrice est très négative, le point peut passer en D sur le cycle , la droite de de recule est plus basse et l'aimant est partiellement démagnétisé.
- Ce phénomène peut se produire lors de l'apparition d'une surintensité importante dans le fonctionnement d'une machine

I-2 Matériaux pour aimants:

On peut distinguer trois grande catégories de matériaux utilisés pour la réalisation es aimants :

1-Les alnico:sont les alliages de fer, d'aluminium, de nickel et de cobalt. Leurs champ rémanent est élevé, mais leur excitation coercitive est faible. Sensibles aux champs antagonistes, leur part de marché est assez réduite et leur coût est moyen.

2-Les férrites : sont des composés d'oxyde de ferrique et d'oxyde de strontium ou de baryum. Leur champ rémanent n'est pas très élevé, mais leur excitation coercitive est importante. Leur faible coût fait Que les ferrites occupent aujourd'hui la majorité du marché des aimants.

3-Les composés de cobalt et de terres rares comme le samarium. Ces matériaux ont d'excellentes performances techniques. Leur champ rémanent et leur excitation Coercitive sont élevés, leur inconvénient reste le coût important.

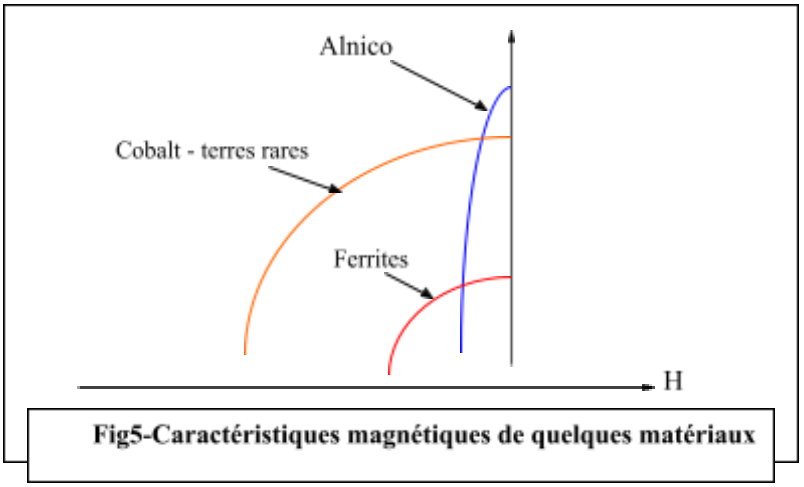


Fig5-Caractéristiques magnétiques de quelques matériaux

I-3 Comparaison entre la machine synchrone classique et la machine synchrone à aimant permanent

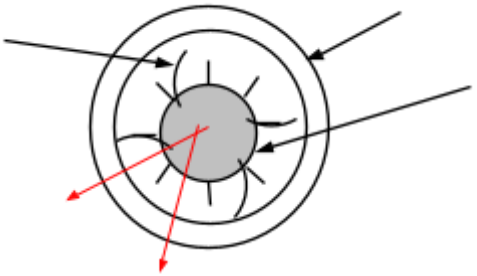
- Les MSAP n'exigent pas d'excitation , et grâce à l'absences des pertes par excitation et dans les contacts frottants , elles possèdent un rendement élevé , par contre dans les MS classiques l'excitation est nécessaire ,l'enroulement d'excitation tournant et les balais présentent assez fréquemment des défaillances de plus , d'où le rendement est relativement faible.
- La MSAP n'exige aucun entretien pendant toute la durée de vie, et se caractérise par une sécurité de fonctionnement plus élevée, mais dans le MS classique, l'entretien est exigé avec moins de sécurité.
- Les MSAP diffèrent de leurs analogues à excitation électromagnétique par la construction des systèmes inducteurs.
- La MS classique peut avoir trois modes de fonctionnement , à excitation optimale, sous excitée , et sur excitée .Ce qui la rend capable d'améliorer le facteur de puissance d'une installation comportant des appareils consommateurs de puissance réactive ,ces avantages ne peuvent être donnés par une MSAP.
- La présence de l'inducteur à CC dans la MS rend le moteur plus coûteux qu'un MSAP, et nécessite de plus une alimentation et un réglage de l'excitation.

I-4 Types des machines synchrones à aimant permanent :

Dans la MSAP, le champ du flux du rotor Ψ_f est considéré comme constant, l'effet de saturation est négligeable due aux propriétés physiques de l'aimant et suivant la position géométrique de l'aimant dans la machine, on distingue deux types :

1- MSAP où l'aimant est monté sur la surface du rotor, l'entrefer effectif large a pour conséquence :

- Pas d'effet de saillante signifiant
- L'effet de réaction d'armature est négligeable

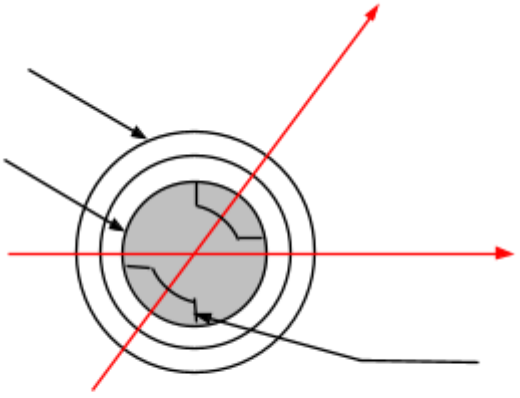


Stator
Rotor
Aimant

Fig6- MS à aimant monté sur la surface du rotor

Axe direct
Axe indirect

2-MSAP à aimant inséré dans la matière du rotor donnant ainsi une forme cylindrique au rotor.



Y

X
Stator

aimant

Fig7- MS à aimants insérés dans la matière du rotor

rotor

L'aimant apparaît comme un entrefer large d'axe directe (X) ou les épanouissements polaires présentent un petit entrefer dans l'axe (Y).

Domaine d'application

Le moteur synchrone à aimants permanents est utilisé dans une large gamme de puissance, allant de centaines de Watts (servomoteurs) à plusieurs méga Watts (systèmes de propulsion des navires), dans des applications aussi diverses que le positionnement, la synchronisation l'entraînement à vitesse variable, et la traction.

_ Il fonctionne comme compensateur synchrone.

_ Il est utilisé pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges.

2-2-3/Avantages du MSAP

Aujourd'hui, avec le progrès actuel des aimants permanents, le moteur synchrone est de plus en plus utilisé dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable à hautes performances.

Son choix dans ce domaine est devenu attractif et concurrent à celui des moteurs à courant continu et des moteurs asynchrones. Cela est dû principalement à ses avantages multiples, On cite principalement :

_ Facteur de puissance et rendement élevé par rapport à ceux des moteurs asynchrones.

_ Robustesse incontestée par rapport au moteur à courant continu.

_ Puissance massique élevée et précision de sa commande.

_ Développement de la technologie des composants de l'électronique de puissance, et l'apparition des processeurs numériques à fréquence élevée et à forte puissance de calcul, surmontant ainsi le problème de l'implantation d'algorithmes de commande de l'onduleur assurant l'autopilotage de la MASP .

_ Augmentation de la constante thermique et de la fiabilité, à cause de l'absence de contacts bague balais dans ces machines.

2-2-4/ Domaine d'application

Le moteur synchrone à aimants permanents est utilisé dans une large gamme de puissance, allant de centaines de Watts (servomoteurs) à plusieurs méga Watts (systèmes de propulsion des navires), dans des applications aussi diverses que le positionnement, la synchronisation l'entraînement à vitesse variable, et la traction.

_ Il fonctionne comme compensateur synchrone.

_ Il est utilisé pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges.

2-3/ MODEL DE LA MACHINE A AIMANT PERMANENT

2-3-1/ Modèle équivalent à un aimant:

On revient au cas de l'aimant seul qui crée un champ magnétique dans un entrefer.

$Hl_a + H_e e = 0$

Lorsque le point de fonctionnement est sur une droite de recul donnée, on a également :

$$H = \frac{B}{\mu_c} - H_0$$

Pour l'entrefer, on a $B_e = \mu_0 H_e$.

La relation peut donc s'exprimer sous la forme : $$\frac{B}{\mu_c} l_a + \frac{B_e}{\mu_0} e = H_0 l_a$$

Le flux à travers une section du circuit magnétique est : $\Phi = BS_a = B_e S_e$

On en déduit :

$$\frac{1}{\mu_c}\frac{l_a}{S_a}\Phi + \frac{1}{\mu_0}\frac{e}{S_e}\Phi = H_0 l_a$$

On reconnaît dans cette équation la reluctance de l'entrefer: $$R_e = \frac{1}{\mu_0}\frac{e}{S_a}$$

On définit la reluctance interne de l'aimant par : $$R_i = \frac{1}{\mu_0}\frac{l_a}{S_a}$$

O définit également la force magnétomotrice de l'aimant : $F_a = H_0 l_a$

Avec ces grandeurs, on arrive à :

$$(R_i + R_e)\Phi = F_a$$

On peut alors tracer des schémas électriques analogues :

R_i

Fig8-Avec source de tension

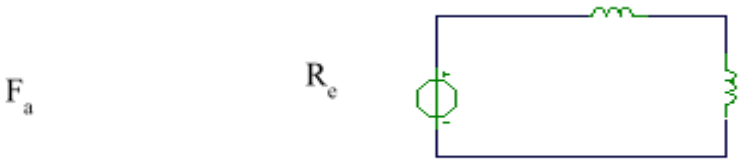
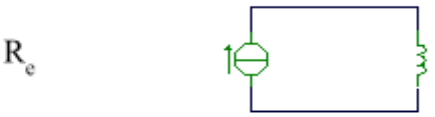


Fig9--Avec source de courant



2-2-4/ Modèle de la MSAP:

Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents obéit à certaines hypothèses essentielles simplificatrices :

. L'absence de saturation dans le circuit magnétique.

. La distribution sinusoïdale de le FMM crée par les enroulements du stator.

. L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.

. L'effet d'encochage est négligeable.

. La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé a,b,c au stator .Les aimants permanents sont représentés par un inducteur au rotor alimenté par une source de courant continu Fig9.

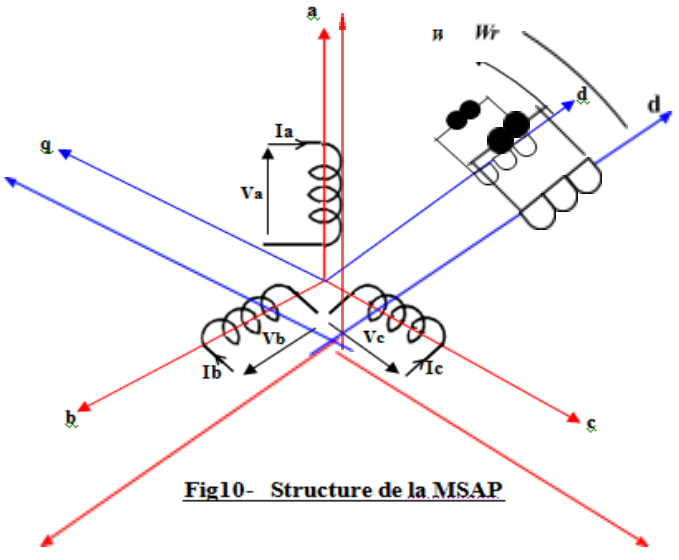


Fig10- Structure de la MSAP

1) Equations électriques :

A) au stator :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s]$$

: Tension, courant et flux au stator. $[\Phi_s]$, $[I_s]$, $[V_s]$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

B) au rotor :

$$[V_f] = [R_f][I_f] + \frac{d}{dt}[\Phi_f]$$

$$[I_f] = \begin{bmatrix} I_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad [R_f] = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad [V_f] = \begin{bmatrix} V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

2) Equations magnétiques:
a)flux statorique:

$$[\Phi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sf}][I_f]$$

b)flux rotorique :

$$[\Phi_f] = [L_f][I_f] + [M_{sf}][I_s]$$

$$= \begin{bmatrix} L_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [\mathrm{Lf}]$$

La matrice [Ls] est une matrice carrée et d'ordre 3, elle contient des termes constants que nous regroupons dans [Ls0] et les termes variables dépendent de θ , que nous regroupons dans [Ls2(θ)]
Posons :
[Ls]=[Ls0]+[Ls2]

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix}$$

Et :

$$[L_{s2}] = L_{s2}\begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos 2(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos 2(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\theta) \\ \cos 2(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\theta) & \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$[M_{sf}]$: est la matrice inductance qui correspond au couplage entre le rotor et le stator.

$$[M_{sf}] = M_f \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} et [M_{sf}] = [M_{fs}]^t$$

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}([L_s][I_s] + [M_{sf}][I_f])$$

$$[V_f] = [R_f][I_f] + \frac{d}{dt}([L_f][I_f] + [M_{sf}][I_s])$$

2-2-3/ Equations de la machine biphasée équivalente :

Pour simplifier le système d'équations à coefficients variables (5), (6), on introduit la transformée de PARK qui fait correspondre aux variables réelles leurs composantes :

$$V_d, V_q, V_h, et I_d, I_q, I_h$$

Sachant que la passage triphasé – biphasé est donné comme suit :

$[V_s]=[P(\theta)][V_{sdqh}]$, $[I_s]=[P(\theta)][I_{sdqh}]$, $[P(\theta)]$:matrice de PARK normalisée

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

Les équations deviennent :

Equations de tension:

$$[V_{s\,dqh}] = [R_s][I_{sdqh}] + [P(\theta)]^{-1}\frac{d}{dt}([L_s][P(\theta)][I_{sdqh}] + [M_{sf}][I_f])$$

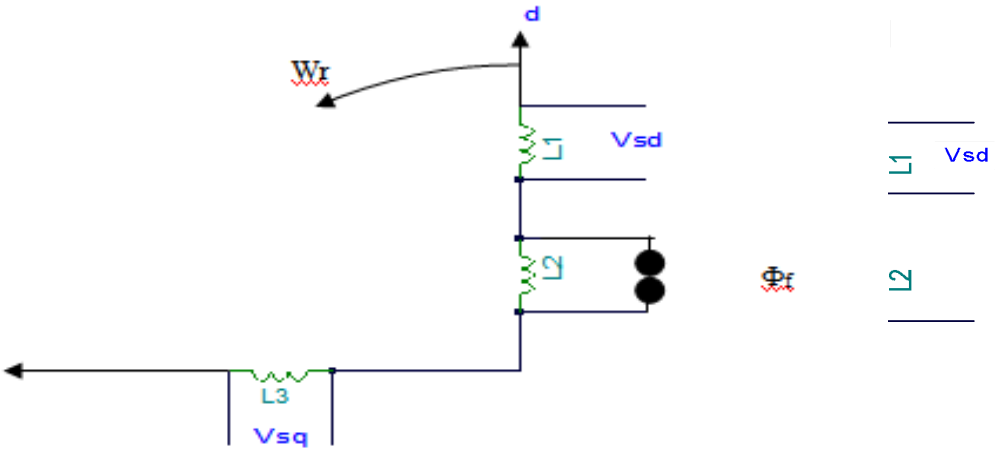
$$[V_f] = [R_f][I_f] + \frac{d}{dt}([M_{sf}][P(\theta)][I_{dqh}] + [L_f][I_f])$$

Après développement des équations ci-dessus, on obtient les équations suivantes :

1- Equations électriques:

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt}\Phi_{ds} - \omega_r \Phi_{qs}$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt}\Phi_{qs} + \omega_r \Phi_{ds}$$



FIG(11) Modèle de PARK pour MSAP

2- Equations magnétiques:

Les flux peuvent être formulés par les équations suivantes :

1-sur l'axe d :

$$\Phi_d = L_d I_d + \Phi_f$$

Φ_f : Constante indiquant le champs dû à l'aimantation permanente du rotor.

2-sur l'axe q :

$$\Phi_q = L_q I_q$$

Le modèle de la MSAP peut s'écrire sous la forme suivante:

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + L_{ds}\frac{d}{dt} I_{ds} - \omega_r L_{qs} I_{qs}$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + L_{qs}\frac{d}{dt} I_{qs} + \omega_r (L_{ds} I_{ds} + \Phi_f)$$

En introduisant la transformée de LAPLACE dans les équations ci-dessus elles deviennent :

$$SI_{ds} = \frac{1}{L_{ds}}[-R_s I_{ds} + \omega_r L_{qs} I_{qs} + V_{ds}]$$

$$SI_{qs} = \frac{1}{L_{qs}}[-R_s I_{qs} - \omega_r (L_{ds} I_{ds} + \Phi_f) + V_{qs}]$$

3) Expression du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique C_e est exprimé par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor :

$$C_e = \frac{dW_e}{d\theta_{geo}} = P\frac{dW_e}{d\theta_e}$$

W_e: Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

$\theta_{geo:}$Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator)

P : nombre de pair de pôle

Selon PARK, l'expression de la puissance transmise est la suivante :

$$P(t) = \frac{3}{2}(V_d I_d + V_q I_q)$$

En remplaçant V_d , V_q par leurs expressions on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2}[-R_s(I_d{}^2 - I_q{}^2) - (I_d \frac{d\Phi_{ds}}{dt} + I_q \frac{d\Phi_{qs}}{dt}) + \frac{d\theta}{dt}(\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds})]$$

$3/2\{-R_s(I_{ds}{}^2 - I_{qs}{}^2)\}$:représente la puissance dissipée en pertes Joules dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2}[I_{ds}\frac{d\Phi_{ds}}{dt} + I_{qs}\frac{d\Phi_{qs}}{dt}]$: représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2}[\frac{d\theta}{dt}(\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds})]$:

représente la puissance électromagnétique.

Sachant que :

$P\Omega=\omega$, et $P_e=C_e\Omega$

$$C_e = \frac{3}{2}P[\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}]$$

Après affectation des opérations nécessaires on peut écrire :

$$C_e = \frac{3}{2} P[(L_{ds} - L_{qs}]I_{ds} I_{qs} + I_{qs}\Phi_f)]$$

4- Equations mécaniques :

La dynamique de la machine est donnée par l'équation mécanique suivante :

$$C_e - C_r - f\Omega = J\frac{d\Omega}{dt}$$

C_r : Le couple résistant.

Ωf: Le couple de frottement.

3/-SIMULATION DE LA MSAP :

Considérons les tensions V_{ds} , V_{qs} et le flux d'excitation Φ_f comme grandeurs de commande , les courants I_{ds} , I_{qs} comme variables d'état .

Equations d'état :

On cherche à obtenir un système d'équations sous forme d'équations d'état :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][V]$$
$$[Y] = [C][X] + [D][V]$$

$[X]=[I_{ds} \quad I_{qs}]^t$, $[V]=[V_{ds} \quad V_{qs} \quad \Phi_f]^t$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{ds} \\ \dot{I}_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \omega\frac{L_q}{L_d} \\ -\omega\frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & -\frac{\omega}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \Phi_f \end{bmatrix}$$

On peut écrire les matrices [A] et [B] sous la forme :

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_d} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q}{L_d} \\ -\frac{L_d}{L_q} & 0 \end{bmatrix}$$

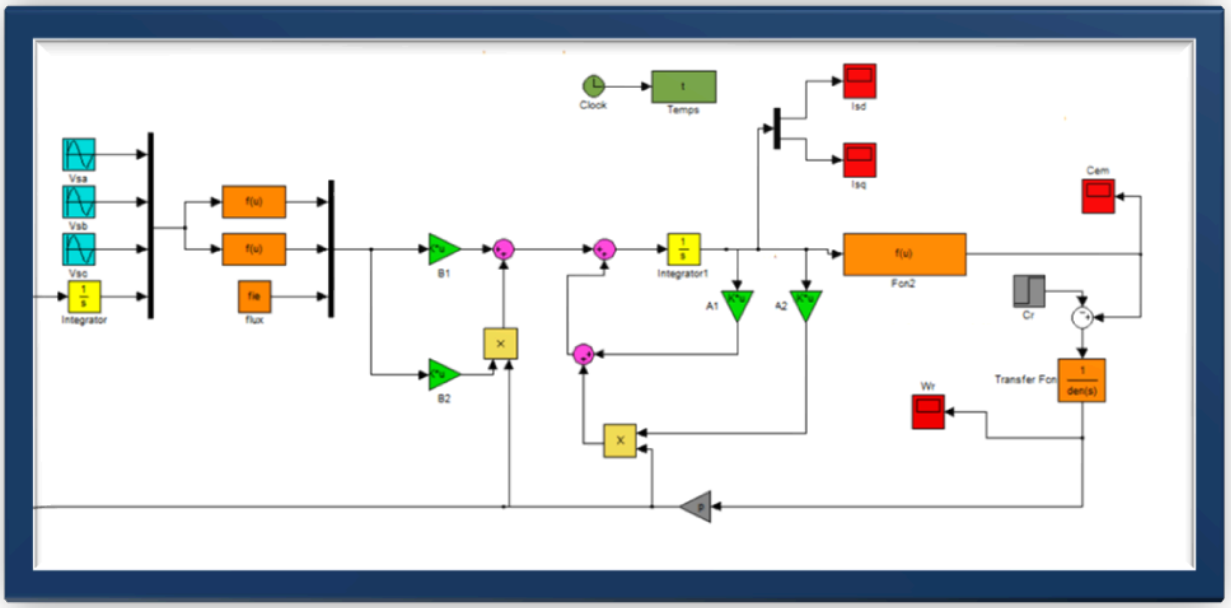
$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_q} \end{bmatrix}$$

Pour arriver au système défini par les équations précédentes, il faut ajouter [C], et [D]:

[C]=[1 1 1 1]

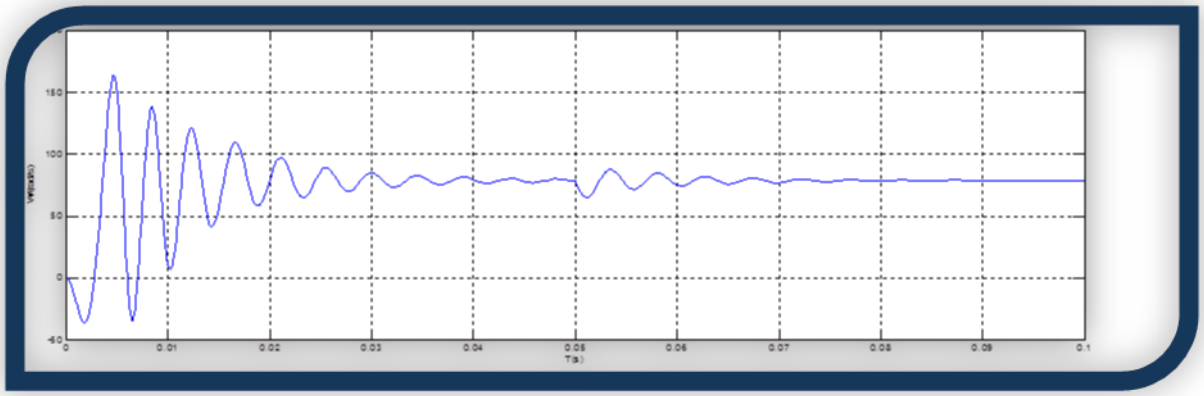
[D]=0

FIG12 Schéma bloc de la simulation-1-

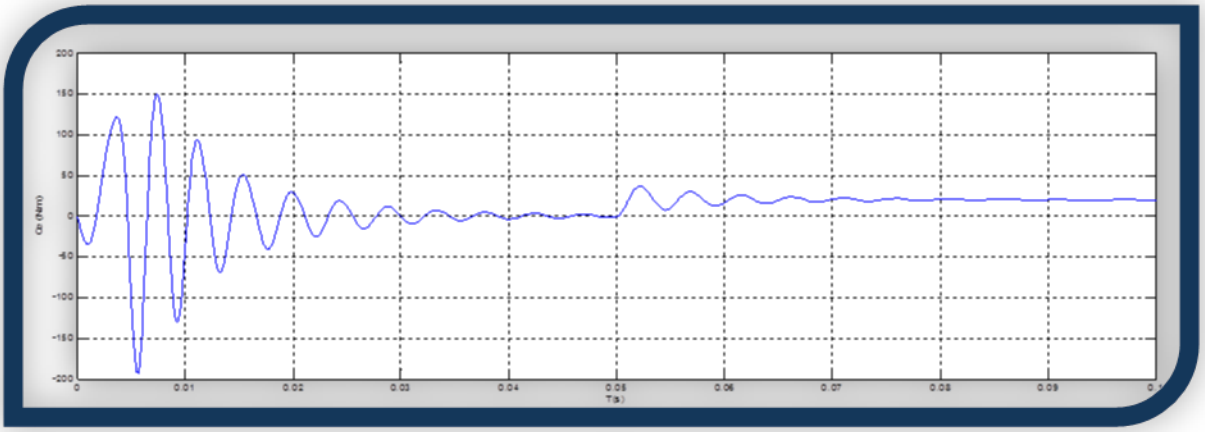


Parametre de la MSAP

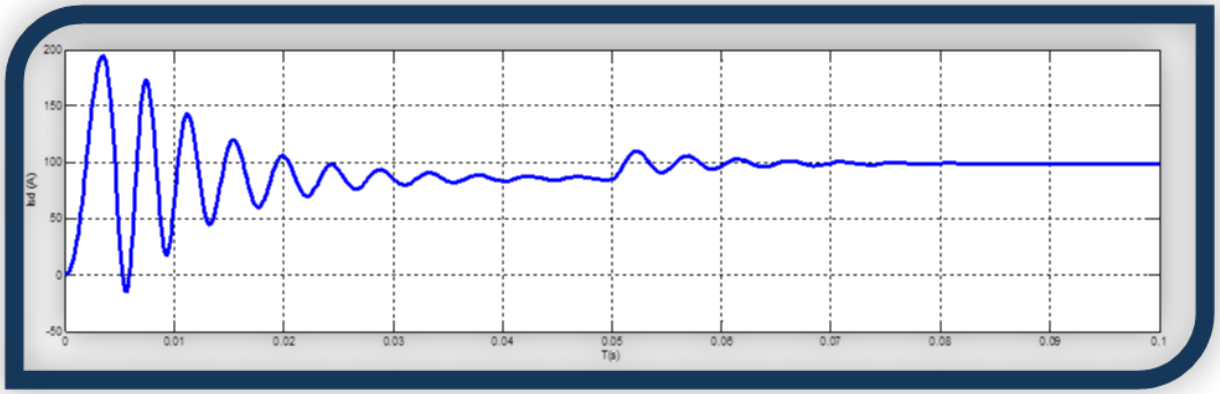
```
Rs=0.6;
Ld=1.4*10^(-3);
Lq=2.8*10^(-3);
j=0.0011;
f=0.0014;
fie =0.12;
p=4;
%.....................................%
A1=[-Rs/Ld 0;0 -Rs/Lq];
%.....................................%
A2=[0 Lq/Ld;-Ld/Lq 0];
%.....................................%
B1=[1/Ld 0 0 ; 0 1/Lq 0];
%.....................................%
B2=[0 0 0;0 0 -1/Lq];
```



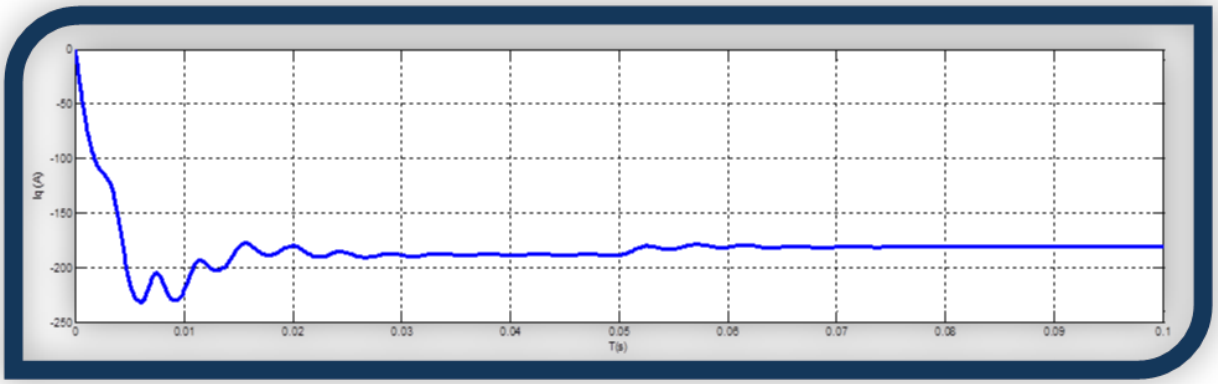
W (rad/s)=f(t)



Cem(N.m)=f(t)



Isd(A)=f(t)



Iq(A)=f(t)

Simulation d'un démarrage direct en charge (Cr=20 Nm)

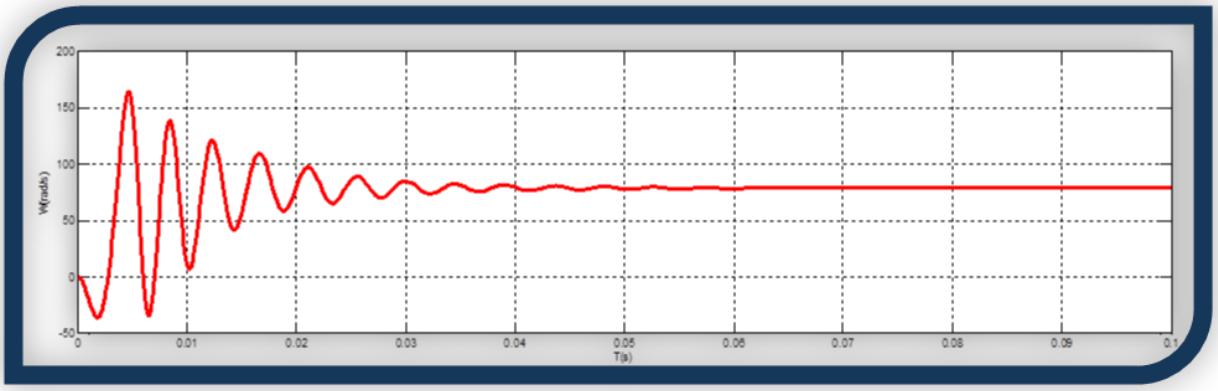
5/- Interprétation des résultats de simulation en charge

Pour la vitesse ω_m , l'inertie des masses tournantes tend à ramener le moteur au repos, ce qui traduit par des valeurs négatives très faible et de très courte durées.

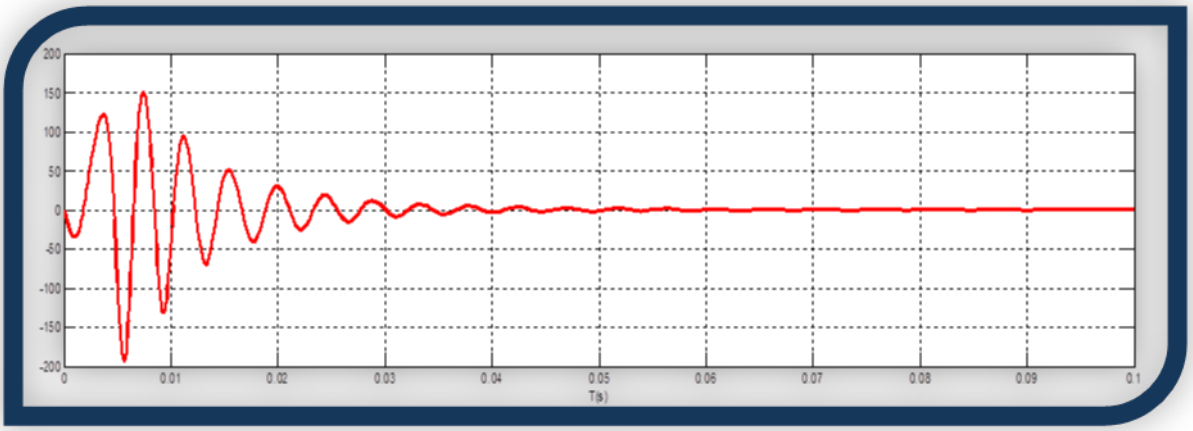
L'allure du couple présente aux premières instants de démarrage des battements importants, pendent un intervalle de temps très courts l'allure coïncide avec celle de la vitesse pour tendre finalement à une valeur qui annule le couple résistant.

Pour les courants $I_d = f(t)$ et $I_q = f(t)$, des pics dues à la FCEM sont constatés au démarrage, par suite ils se rétabliront a leurs valeurs correspondantes au régime de fonctionnement.

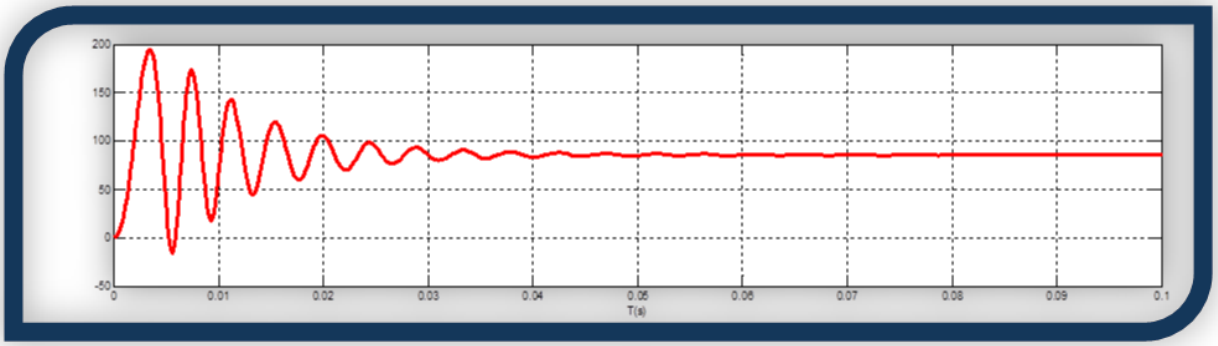
Avide



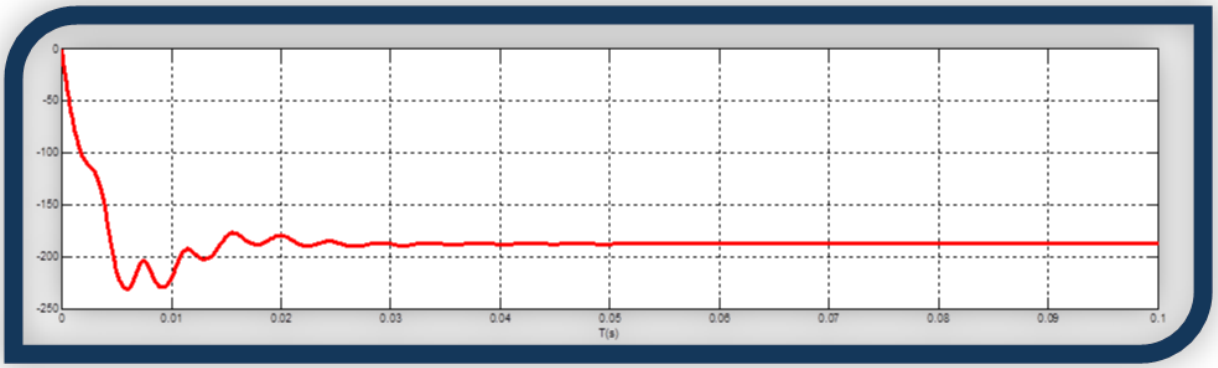
W=f(t)



Cem (N.m)=f(t)



Id(A)=f(t)



Id(A)=f(t)

2/Interprétation des résultats de simulation Avide

Les figure [w=f(t), Cem=f(t), Id=f(t), Iq=f(t)]montrent le comportement du MSAP lors d'un démarrage a vide.

On remarque que la vitesse prend des pics très important au début puis se stabilise à la vitesse de synchronisme. Ces pics sont dus à l'absence d'enroulement d'amortissements pour la stabilisation de la vitesse au point de synchronisme.

Après un régime transitoire de 0.04sec, le couple ramène le rotor à la vitesse de synchronisme ou il se stabilise au voisinage de zéro puisque il n'ya pas de charge est les frottements sont négligé.

Aux démarrages les courant direct et en quadrature id et iq sont caractérisés par des pics très important qui, apprêt le régime transitoire, tendent vers leur valeur nominale .Ces pics s'expliquent par une f.c.e .m liée à la valeur de vitesse au démarrage.

MODELISATION ET SIMULATION D'UNE GENERATRICE SYNCHRONE A AIMANT PERMANENT

La GSAP est caractérisé par un couple vomique élevé, une inertie très faible et de faible inductance.

Toutes ces caractéristiques offrent à la génératrice des performances élevée, un rendement important et une meilleure controlabilité.

Le modèle de park pour la GSAP est le même de MSAP.

En utilisant la convection génératrice ; on inverse le sens des courant id et iq dans le repérer de park et le modèle de la GSAP ainsi obtenu peut s'écrire sous la forme :

$$V_{ds} = -R_s I_{ds} - L_{ds}\frac{d}{dt}I_{ds} - \omega_r L_{qs} I_{qs}$$

$$V_{qs} = -R_s I_{qs} - L_{qs}\frac{d}{dt}I_{qs} - \omega_r (L_{ds} I_{ds} + \Phi_f)$$

$$C_e = \frac{3}{2}P[(L_{qs} - L_{ds}]I_{ds} I_{qs} + I_{qs}\Phi_f)]$$

$$C_m - C_e - f\Omega = J\frac{d\Omega}{dt}$$

Avec **Cm** : le couple moteur

Fonctionnement a vide

Le fonctionnement a vide est caractérisé par des courant nuls

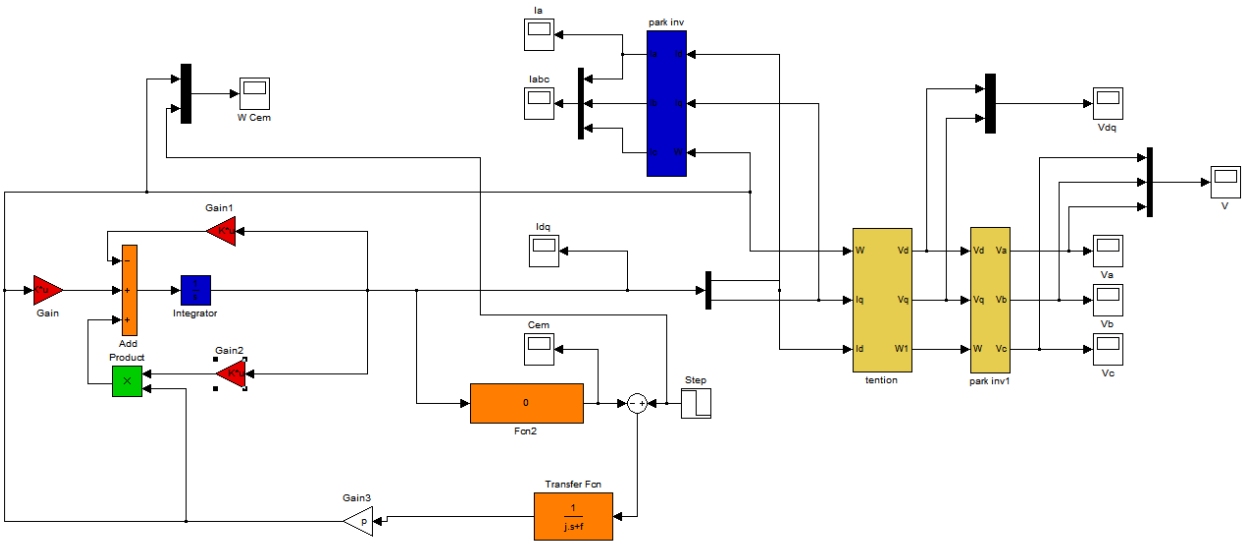
Isq=0

Isd=0

Les expression du tension et du couple devient

$$\begin{cases} U_{SD} = 0 \\ U_{sa} = \omega_r \cdot \Psi_f \\ C_e = 0 \end{cases}$$

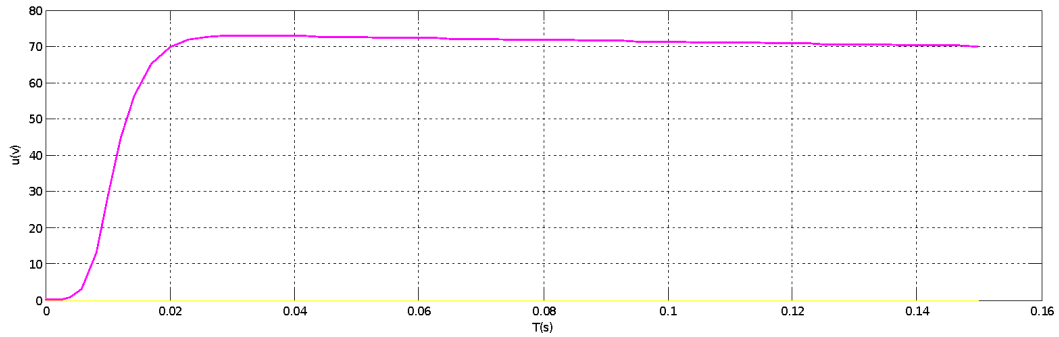
Schémas de simulation



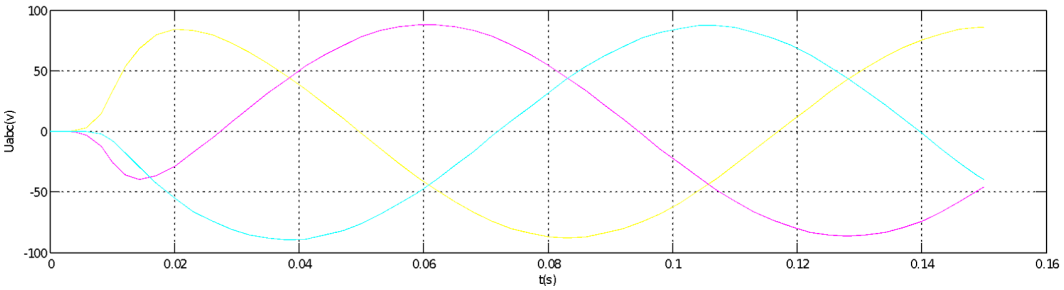
Paramétrer de simulation

```
Rs=2.875
Ld=0.0085
Lq=0.0085
j=0.0085
f=0.001
p=4
fif=0.175
Rch=0
Lch=0
%.....................%
A=[(Rs+Rch)/(Ld+Lch),0;0,(Rs+Rch)/(Lq+Lch)]
C=[0,(Lq+Lch)/(Ld+Lch);-(Ld+Lch)/(Lq+Lch),0]
%.....................................%
B=[0;fif/(Lq+Lch)];
```

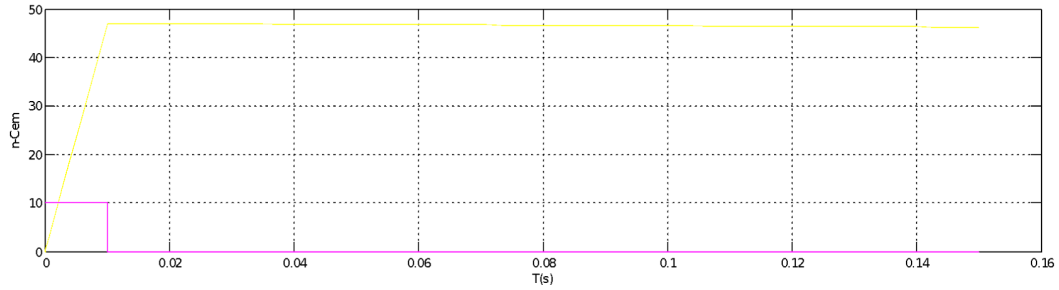
Résultat



Usd ,Usq =f(t)



Uabc=f(t)



N(rad/sec)-Cem(Nm)=f(t)

Fonctionnements en charge

Paramètres de la machine

```
Rs=0.895
Ld=0.012
Lq=0.0211
j=0.00141
f=0.001
p=3
fif=0.9
Rch=50
Lch=0.002
%.....................%
A=[(Rs+Rch)/(Ld+Lch),0;0,(Rs+Rch)/(Lq+Lch)]
C=[0,(Lq+Lch)/(Ld+Lch);-(Ld+Lch)/(Lq+Lch),0]
```

```
%.....................................%
B=[0;fif/(Lq+Lch)];
```

BIBLIOGRAPHIE

1-Modélisation des machines électriques.
R.Abdessemed et M.Kadjoudj
Presses de l'université de Batna.

2-Operating Limits of Inverter-Driven Permanent Magnet Motor Drives
TOMY SEBASTIAN , MEMBER,IEE, AND GORDON R.Slemon,FELLOW,IEE

3-Eletrotechnique et machines électriques.
B.Saint-Jean, ing c ode 1120

4-Moteurs électriques pour robotique
Pierre Mayé code 3946