

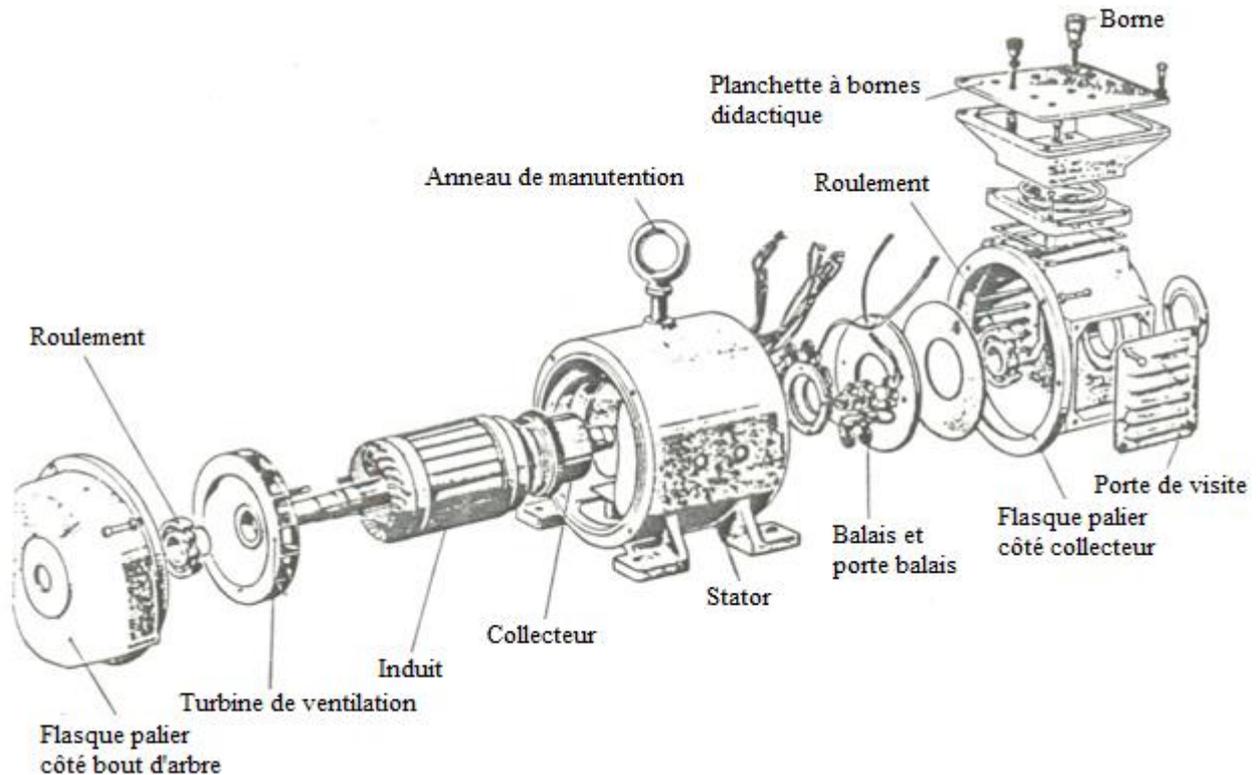
Université Internationale de Casablanca

Ecole d'Ingénierie

***COURS ET TRAVAUX DIRIGES DE
MACHINES ELECTRIQUES***

2^{ème} année GM/GInd

Ch I : **Machines à courant continu**



I- Introduction

Contrairement aux machines à courant alternatif qui sont des machines à champ tournant, les machines à courant continu sont des machines à champ fixe.

II- Description générale

Une machine à CC comprend deux armatures séparées par un entrefer :

- Une armature externe fixe appelée **stator**, formée d'un ensemble d'électroaimants alternativement N et S dont les bobines magnétisantes sont parcourues par un courant continu : c'est **l'inducteur** de la machine.
- Une armature interne mobile appelé **rotor**, à la périphérie de laquelle sont logés des conducteurs dans des encoches convenablement réparties : c'est **l'induit** de la machine.

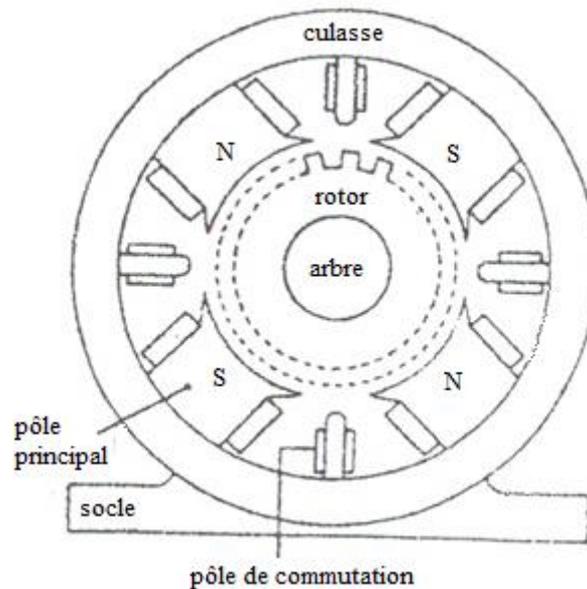
Le stator est constitué par la culasse et les pôles.

La culasse est un anneau en acier portant intérieurement les pôles et aux extrémités les flasques paliers aux centres desquels sont fixés les roulements qui supportent l'arbre de la machine.

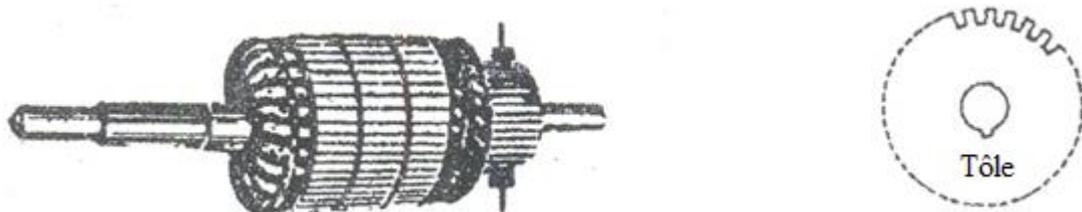
Sauf pour les machines de très faible puissance, le stator comporte en plus des pôles principaux des pôles auxiliaires ou de commutation.

Les bobines magnétisantes contiennent le même nombre de spires. Elles sont placées autour des pôles et sont parcourues par le même courant d'excitation avec un sens de parcours tel que l'on respecte la succession des pôles N et S.

Dans certaines applications les électroaimants sont remplacés par des aimants permanents (dynamos tachymétriques, petits moteurs à CC,...).



Le rotor est réalisé par empilement de tôles d'acier au silicium, isolées par un vernis. Devant l'une de ses faces est placé le collecteur. C'est un cylindre calé sur le même arbre et formé de lames en cuivre isolées. Sur la surface du collecteur frottent des balais en graphite dont la pression est réglée par des ressorts.



III- Principe de fonctionnement

On excite les bobines magnétisantes pour créer un champ d'induction magnétique fixe au stator. On entraîne l'enroulement induit se trouvant au rotor à une vitesse Ω . Il sera traversé par un flux variable et sera donc le siège de f.e.m continue grâce au collecteur (redresseur mécanique). Si on branche un récepteur, il sera traversé par un courant continu.

Donc à partir d'une énergie mécanique fournie à la machine, on obtient de l'énergie électrique en courant continu : C'est le fonctionnement en génératrice ou dynamo.

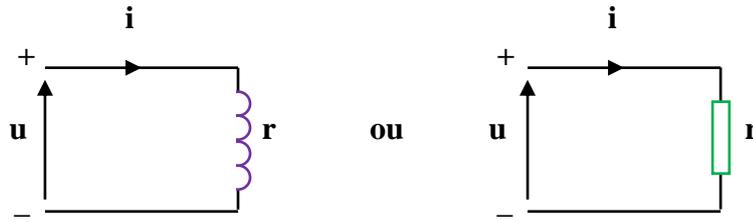
Réciproquement, on excite les bobines magnétisantes pour créer le champ d'induction magnétique et on alimente l'enroulement induit par une source de courant continu. La présence du champ et du courant donne naissance à des forces de la place dans l'induit, égales et opposées deux à deux grâce au collecteur, donc à un couple.

Donc à partir d'une énergie électrique en courant continu fournie à la machine, on obtient de l'énergie mécanique : C'est le fonctionnement en moteur.

Une machine à courant continu est réversible. Elle peut fonctionner en moteur ou en génératrice.

IV- Modélisation d'une machine à courant continu

1°) Inducteur

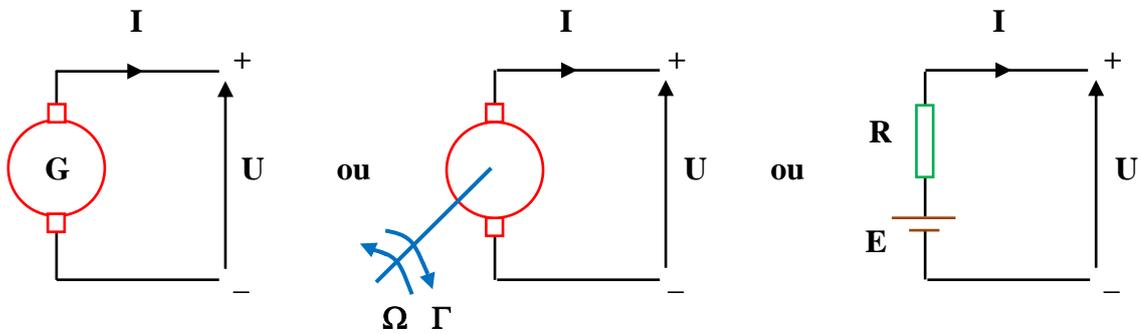


$$u = r i$$

r : résistance de l'inducteur.

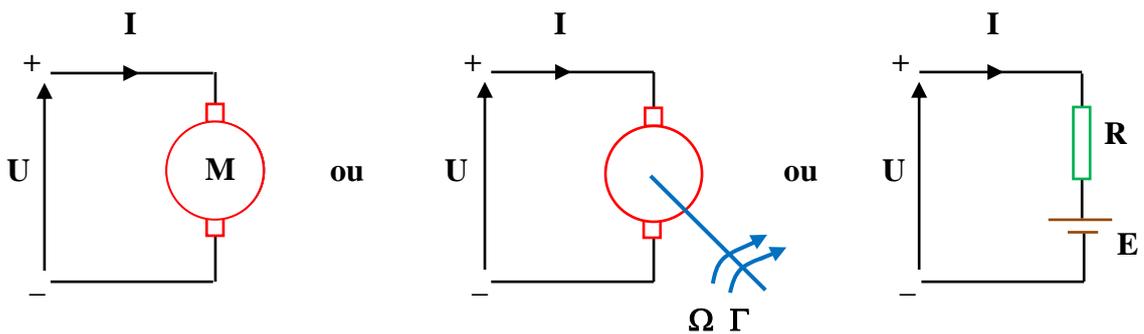
2°) Induit

- Génératrice :



$$U = E - RI$$

- Moteur :



$$U = E + RI$$

E : force électromotrice (f.e.m).

R : résistance de l'induit.

Γ : couple (résistant dans le cas d'une génératrice et moteur dans le cas d'un moteur).

V- Expressions de la f.e.m et du couple électromagnétique

$$\boxed{E = k \phi \Omega} \text{ et } \boxed{\Gamma_{em} = k \phi I}$$

k : constante.

ϕ : flux sous un pôle.

Ω : vitesse de rotation en rd/s ($\Omega = \frac{2\pi N}{60}$, N en tr/mn).

I : courant induit.

La f.e.m d'une machine à courant continu est proportionnelle au flux sortant d'un pôle et à la vitesse de rotation.

Le couple électromagnétique d'une machine à courant continu est proportionnel au flux sortant d'un pôle et au courant induit.

VI- Bilan de puissances - Couples - Rendement (fonctionnement en moteur)**1°) Diagramme de puissances**

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & P_{JS} = ri^2 & & & & P_{fer} \\
 & & & & & & \\
 P_a = UI + ui & \rightarrow & \updownarrow & \rightarrow & P_{em} = EI = \Gamma_{em}\Omega & \rightarrow & \updownarrow & \rightarrow & P_u = \Gamma_u\Omega \\
 & & P_{JR} = RI^2 & & & & P_{méc}
 \end{array}$$

P_a : Puissance absorbée

P_{em} : Puissance électromagnétique

P_u : Puissance utile

P_{JS} : Pertes Joule statoriques

P_{JR} : Pertes Joule rotoriques

P_{fer} : Pertes fer

$P_{méc}$: Pertes mécaniques

2°) Couples

Γ_{em} : Couple électromagnétique

Γ_u : Couple utile

Γ_p : Couple des pertes $\Gamma_p = \Gamma_{em} - \Gamma_u = \frac{P_{fer} + P_{méc}}{\Omega}$

3°) Rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - (P_{JS} + P_{JR} + P_{fer} + P_{méc})}{P_a}$$

VII- Caractéristiques des machines à courant continu

1°) Caractéristiques des génératrices

Actuellement les génératrices à courant continu sont de moins en moins utilisées (le plus souvent la marche en génératrice ne correspond qu'à des phases particulières de fonctionnement d'un moteur à courant continu, en particulier au freinage en récupération).

– Pour obtenir du continu à partir du réseau industriel, on utilise un pont redresseur à diodes ou thyristors.

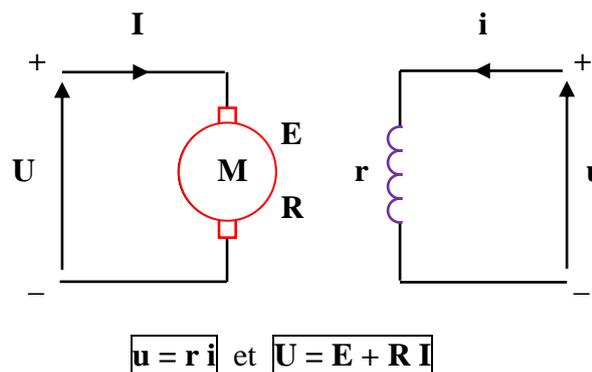
– Pour obtenir du continu en l'absence du réseau industriel, on utilise un groupe électrogène (moteur à explosion ou à combustion + alternateur) suivi d'un pont redresseur.

2°) Caractéristiques des moteurs

Les moteurs à courant continu sont plus coûteux que les moteurs à courant alternatif, leur entretien est plus exigeant, mais on peut facilement faire varier leur vitesse de rotation : c'est donc pour les entraînements à vitesse variable qu'on les utilise.

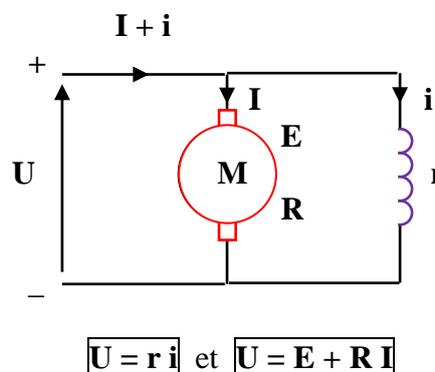
Les modes d'excitation les plus utilisés pour les moteurs à courant continu sont trois :

a- Excitation séparée ou indépendante

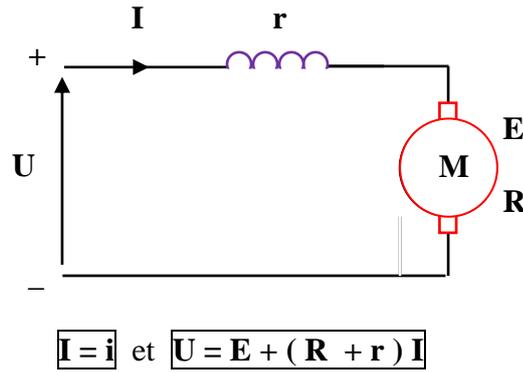


Ce type de moteurs est utilisé dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable.

b- Excitation shunt ou parallèle



Ce type de moteurs est utilisé également dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable.

c- Excitation série

Ce type de moteurs est utilisé en traction électrique et comme démarreur de véhicules.

Les moteurs à excitation séparée et les moteurs shunt s'emballent lorsqu'on coupe l'excitation. En effet :

$$U = E + RI \text{ et } E = k\phi(i)\Omega \Rightarrow \Omega = \frac{U - RI}{k\phi(i)}$$

$$i \rightarrow 0 \Rightarrow \phi(i) \rightarrow 0 \Rightarrow \Omega \rightarrow \infty$$

Les moteurs à excitation série s'emballent à vide. En effet :

$$U = E + (R + r)I \text{ et } E = k\phi(I)\Omega \Rightarrow \Omega = \frac{U - (R + r)I}{k\phi(I)}$$

$$I \rightarrow 0 \Rightarrow \phi(I) \rightarrow 0 \Rightarrow \Omega \rightarrow \infty$$

VIII- Démarrage des moteurs à courant continu

Au démarrage : $\Omega = 0 \Rightarrow k\phi\Omega = 0$

– Dans le cas d'un moteur à excitation séparée ou shunt :

$$U = E + RI \Rightarrow I_d = \frac{U}{R}$$

– Dans le cas d'un moteur à excitation série :

$$U = E + (R + r)I \Rightarrow I_d = \frac{U}{R + r}$$

Le courant n'est limité que par la résistance de l'induit (ou la somme des résistances de l'induit et l'inducteur) généralement faible. Il peut atteindre plusieurs fois le courant nominal. Donc :

- Si le moteur est alimenté par une source de tension réglable, on démarre avec une tension faible.
- Si le moteur est alimenté par une source de tension constante, on insère en série avec l'induit un rhéostat de démarrage de résistance R_d qu'on élimine progressivement au fur à mesure que la vitesse augmente.

IX- Variation de vitesse des moteurs à courant continu

– Dans le cas d'un moteur à excitation séparée ou shunt :

$$\Omega = \frac{U - RI}{k\phi}$$

– Dans le cas d'un moteur à excitation série :

$$\Omega = \frac{U - (R + r)I}{k\phi}$$

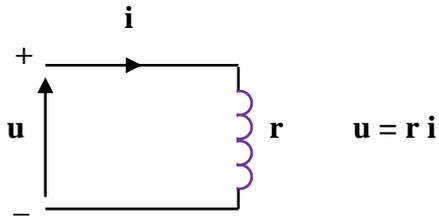
Pour faire varier la vitesse Ω :

→ On fait varier la tension U ;

→ On fait varier le flux ϕ en agissant sur le courant d'excitation i (on utilise un rhéostat en série avec l'inducteur dans le cas d'un moteur à excitation séparée ou shunt, et en parallèle dans le cas d'un moteur à excitation série).

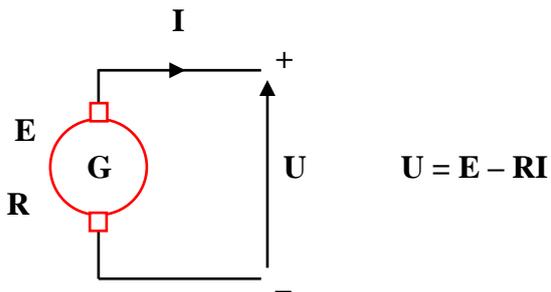
Résumé

Modélisation de l'inducteur



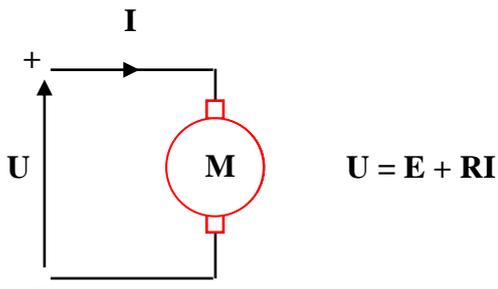
$$u = r i$$

Modélisation de l'induit d'une génératrice



$$U = E - RI$$

Modélisation de l'induit d'un moteur



$$U = E + RI$$

Expressions de la f.e.m et du couple électromagnétique

$$E = k \phi \Omega \quad \text{et} \quad \Gamma_{em} = k \phi I$$

k : constante.

ϕ : flux sous un pôle.

Ω : vitesse de rotation en rd/s ($\Omega = \frac{2\pi N}{60}$, N en tr/mn).

I : courant induit.

Diagramme de puissances (fonctionnement en moteur)

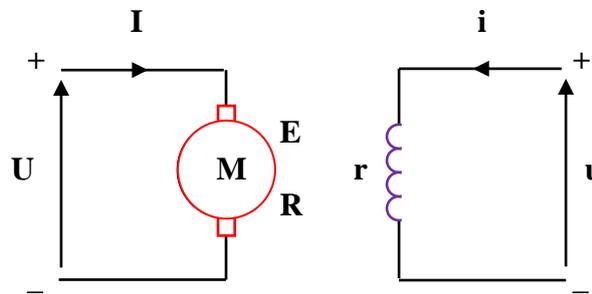
$$\begin{array}{ccccc}
 P_{JS} = ri^2 & & & & P_{fer} \\
 P_a = UI + ui \rightarrow \updownarrow \rightarrow P_{em} = EI = \Gamma_{em} \Omega \rightarrow \updownarrow \rightarrow P_u = \Gamma_u \Omega \\
 P_{JR} = RI^2 & & & & P_{méc}
 \end{array}$$

- P_a : puissance absorbée
- P_{em} : puissance électromagnétique
- P_u : puissance utile
- P_{JS} : pertes Joule statoriques
- P_{JR} : pertes Joule rotoriques
- P_{fer} : pertes fer.
- $P_{méc}$: pertes mécaniques
- Γ_{em} : couple électromagnétique
- Γ_u : couple utile

Γ_p : couple des pertes $\Gamma_p = \Gamma_{em} - \Gamma_u = \frac{P_{fer} + P_{méc}}{\Omega}$

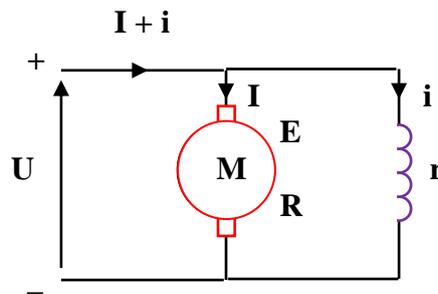
Le rendement du moteur est : $\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - (P_{JS} + P_{JR} + P_{fer} + P_{méc})}{P_a}$

Moteur à excitation séparée ou indépendante



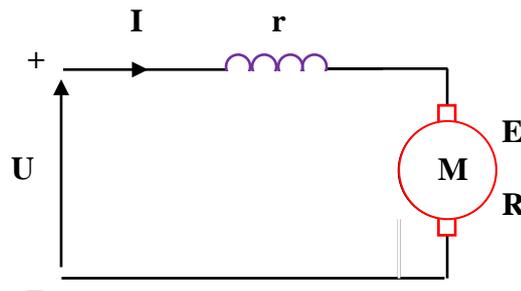
$u = r i$ et $U = E + R I$

Moteur à excitation shunt ou parallèle



$U = r i$ et $U = E + R I$

Moteur à excitation série



$I = i$ et $U = E + (R + r) I$

Procédés de démarrage des moteurs à CC

- Si le moteur est alimenté par une source de tension réglable, on démarre avec une tension faible.
- Si le moteur est alimenté par une source de tension constante, on insère en série avec l'induit un rhéostat de démarrage de résistance R_d qu'on élimine progressivement au fur à mesure que la vitesse augmente.

Procédés de variation de vitesse des moteurs à CC

On fait varier la tension U ou le flux ϕ en agissant sur le courant d'excitation i (on utilise un rhéostat en série avec l'inducteur dans le cas d'un moteur à excitation séparée ou shunt, et en parallèle dans le cas d'un moteur à excitation série).

Exercices d'applicationExercice I

Un moteur à courant continu à excitation indépendante possède les caractéristiques suivantes :

- Tension nominale d'induit $U_n = 220V$;
- Courant nominal d'induit $I_n = 30A$;
- Résistance d'induit $R = 0,2\Omega$;
- Vitesse nominale de rotation $N_n = 1500tr/mn$.

On étudie le fonctionnement de ce moteur à courant d'inducteur constant.

1°) Faire une figure.

2°) On effectue un démarrage direct du moteur. Quelle tension faut-il appliquer à l'induit pour que le courant absorbé soit $1,5 I_n$?

3°) Pour le fonctionnement nominal, calculer :

- a- la f.e.m. du moteur ;
- b- la puissance électromagnétique ;
- c- le couple électromagnétique.

4°) Pour un fonctionnement particulier, le courant absorbé par l'induit vaut $I_n/2$, alors que la tension d'alimentation est $U = 220V$. Calculer le nouveau couple électromagnétique Γ_{em}' et la nouvelle vitesse de rotation N' .

5°) Pour un deuxième fonctionnement particulier, le courant absorbé par l'induit vaut $5I_n/4$, alors que la tension d'alimentation est $U = 220V$. Calculer le nouveau couple électromagnétique Γ_{em}'' et la nouvelle vitesse de rotation N'' .

Exercice II

Une machine à courant continu est utilisée en moteur shunt.

Lors d'un essai à vide pour une vitesse de rotation de $1500tr/mn$, on a relevé les valeurs suivantes de du courant d'excitation et de la f.e.m :

i (A)	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25
E_0 (V)	5	95	142	180	204	224	240	251	260	265

La résistance de l'induit est $R = 0,4\Omega$, et celle de l'inducteur est $r = 160\Omega$. Pour la tension nominale d'alimentation $U = 240V$, l'intensité du courant absorbé par le moteur en charge nominale est de $21,5A$.

1°) Faire une figure.

2°) Calculer pour la charge nominale

a- la vitesse de rotation en tr/mn ;

b- la puissance utile et le rendement du moteur sachant que la somme des pertes fer et des pertes mécaniques sont égales à $200W$;

c- le couple disponible sur l'arbre.

3°) La tension d'alimentation restant égale à $240V$, on introduit dans le circuit inducteur un rhéostat d'excitation. L'intensité du courant d'excitation prend une nouvelle valeur i' . La vitesse de rotation à vide est alors de $2000tr/mn$. On suppose que le courant absorbé par l'induit du moteur tournant à vide est négligeable.

a- Quelle est la f.e.m. du moteur à $2000tr/mn$ pour ce nouveau courant i' , lors d'un fonctionnement à vide ?

b- Quelle serait la f.e.m. du moteur si, pour ce nouveau courant i' , sa vitesse de rotation à vide était de $1500tr/mn$?

c- Calculer la résistance du rhéostat d'excitation.

4°) Le rhéostat d'excitation étant supprimé, on adjoint au circuit de l'induit un rhéostat de démarrage. Calculer la résistance de ce rhéostat pour que l'intensité dans l'induit soit égale à 2 fois sa valeur nominale.

Exercice III

Les caractéristiques nominales d'un moteur à courant continu à excitation série sont :

$$U_n = 400V ; I_n = 27A ; N_n = 1000tr/mn$$

La résistance de l'inducteur est $r = 0,6\Omega$, et celle de l'induit $R = 1\Omega$.

On a relevé la caractéristique à vide à $1000tr/mn$:

i (A)	5,7	7,35	10,5	15,2	18	22,6	27	33,2	45
E₀ (V)	136	174	233	287	308	335	357	383	429

1°) Faire une figure.

2°) Le courant dans le moteur, alimenté sous $400V$, a pour intensité $I_1 = 22,6A$. Calculer la vitesse de rotation N_1 et le couple électromagnétique Γ_{em1} .

3°) Le moteur étant toujours alimenté sous $400V$, on l'équipe d'un rhéostat de démarrage qui limite le courant à $I_d = 45A$.

a- Calculer la résistance totale R_d de ce rhéostat.

b- Calculer la vitesse de rotation N_2 au moment où le courant I prend la valeur $27A$, la moitié du rhéostat de démarrage étant encore en service.

4°) Le courant dans le moteur est maintenant égale à $I_3 = 33,2A$ (le rhéostat de démarrage est court-circuité).

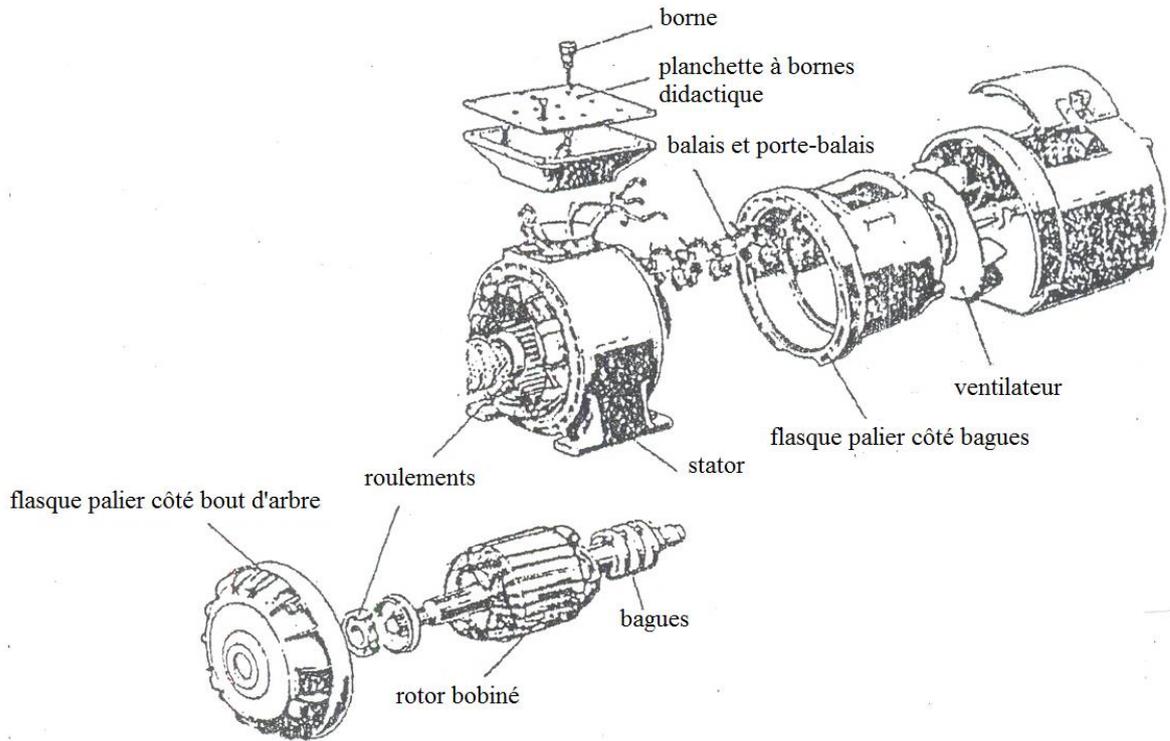
a- Calculer la vitesse de rotation N_3 du moteur alimenté sous $400V$.

b- Pour quelle tension le moteur devrait-il être alimenté pour tourner à $1000tr/mn$?

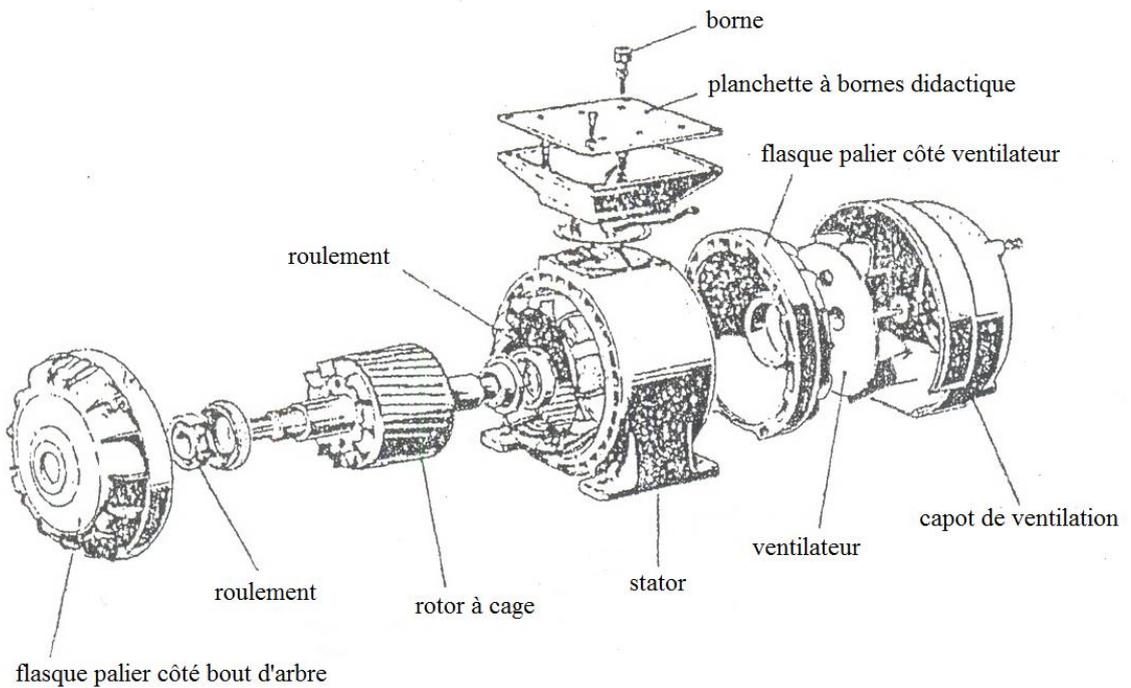
c- Sans calcul, comment peut-on obtenir cette vitesse si la tension d'alimentation ne peut pas dépasser $400V$?

5°) On place en parallèle avec l'inducteur une résistance $\rho = 2,61\Omega$. Quel doit être la vitesse de rotation N' du moteur alimenté sous $400V$, le courant dans l'induit étant égal à $33,2A$?

Ch II : Machines à courant alternatif asynchrones



Moteur asynchrone à rotor bobiné à bagues



Moteur asynchrone à cage

I- Introduction

Les machines à courant alternatif asynchrones sont des machines à champ magnétique tournant. Ce champ tournant peut être créé par des bobines fixes alimentées par un système de tensions triphasé équilibré, d'où le théorème de Ferraris : $3p$ bobines régulièrement réparties dans l'espace et parcourues par un système de courants triphasé équilibré de pulsation ω , créent p paires de pôles d'un champ

tournant à la vitesse angulaire $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$ (vitesse de synchronisme).

$$\Omega_s (\text{rd/s}) = \frac{\omega}{p} \Rightarrow N_s (\text{tr/mm}) = \frac{60\omega}{2\pi p} \Rightarrow \boxed{N_s (\text{tr/mm}) = \frac{60f}{p}}$$

Si $f = 50\text{Hz}$ alors $N_s (\text{tr/mm}) = \frac{3000}{p}$

p	1	2	3	4	5	6 ...
N_s	3000	1500	1000	750	600	500 ...

Une machine asynchrone est un convertisseur électromécanique qui, ayant $2p$ pôles et étant relié au réseau de fréquence f , ne tourne pas rigoureusement à la vitesse de synchronisme.

Remarque :
 $p=1$: machine bipolaire
 $p=2$: machine tétrapolaire
 $p=3$: machine hexapolaire

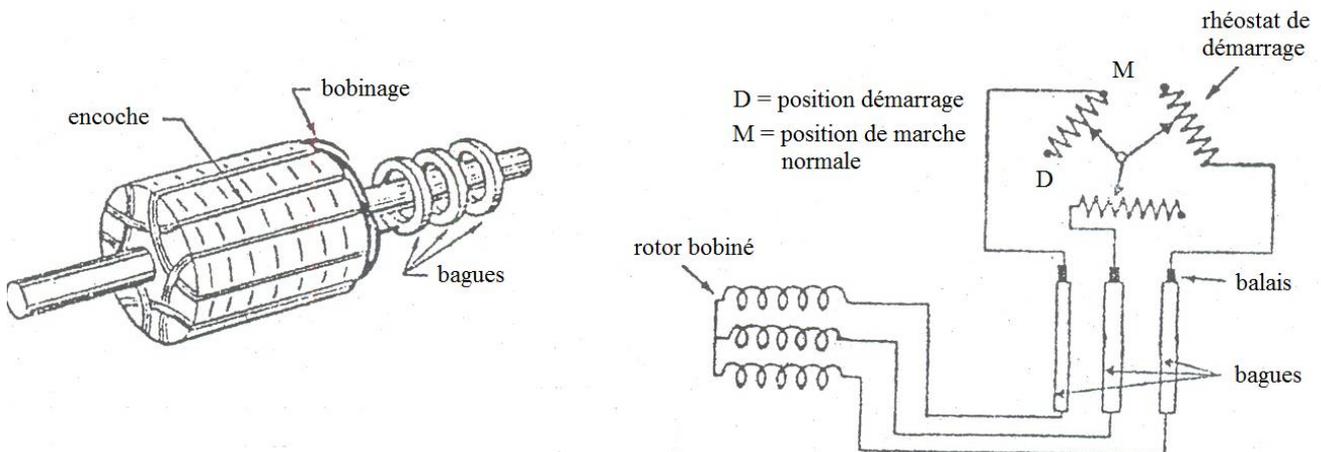
II- Description générale

Une machine asynchrone triphasée comporte 2 armatures séparées par un entrefer :

- Une armature fixe appelée **stator** : C'est un anneau de tôles encoché à l'intérieur et portant un enroulement triphasé. Il constitue l'**inducteur** de la machine.
- Une armature mobile appelée **rotor** : C'est un anneau de tôles encoché à l'extérieur et portant un enroulement polyphasé en court-circuit. Il constitue l'**induit** de la machine.

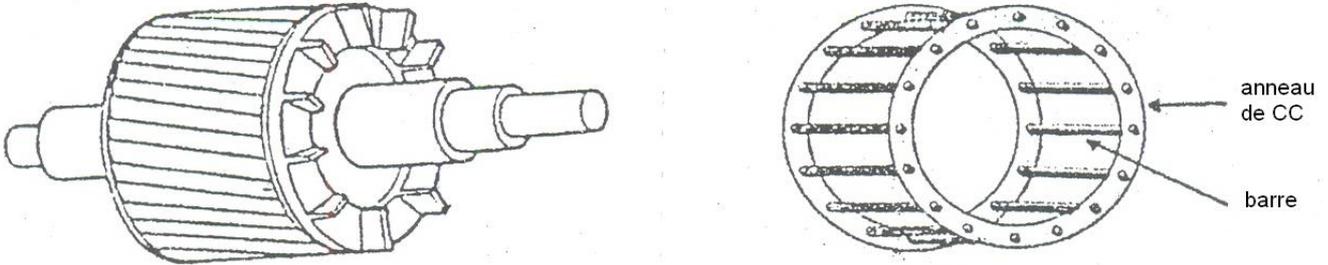
On distingue 2 types de rotors : le rotor bobiné à bagues et le rotor à cage.

1°) Rotor bobiné à bagues



Les extrémités des 3 bobinages sont reliées à 3 bagues sur lesquelles frottent 3 balais. Entre ces balais se trouve un rhéostat de démarrage qui limite le courant lors du démarrage du moteur. Sa résistance, au départ maximale, est annulée au fur et à mesure que la vitesse augmente. En marche normale les bobinages sont court-circuités.

2°) Rotor à cage



La cage est formée de barres métalliques en cuivre ou en aluminium logées dans les encoches du rotor et court-circuitées aux deux extrémités par des anneaux conducteurs.

III- Principe de fonctionnement

On alimente l'enroulement statorique par un système de tensions triphasé équilibré de pulsation ω , il se crée, d'après le théorème de Ferraris, un champ tournant à la vitesse angulaire $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$.

Supposons le rotor en train de tourner à la vitesse Ω . Ses enroulements voient défiler le champ tournant à la vitesse relative $\Omega_r = \Omega_s - \Omega$. Etant fermés sur des résistances ou court-circuités, ils seront parcourus par des courants induits. La présence du champ et des courants induits est à l'origine d'un couple électromagnétique qui tend, d'après la loi de Lenz, à s'opposer à la cause qui lui a donnée naissance c-à-d à la rotation relative du champ tournant par rapport au rotor. Ainsi, il doit :

- entraîner le rotor à la poursuite du champ tournant si $\Omega < \Omega_s$ et la machine fonctionne en **moteur** asynchrone ;
- freiner le rotor si $\Omega > \Omega_s$ et la machine fonctionne en **génératrice** asynchrone.

Remarque : le couple qui apparaît dans la machine asynchrone est nul lorsque le rotor tourne à la vitesse de synchronisme. Il n'y a donc de couple qu'en dehors du synchronisme, d'où le nom de machines asynchrones.

IV- Glissement

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{N_s - N}{N_s}$$

- $g < 0 \Leftrightarrow \Omega > \Omega_s$ correspond au fonctionnement en génératrice.
- $g = 0 \Leftrightarrow \Omega = \Omega_s$ correspond au fonctionnement à couple nul (fonctionnement à vide).
- $0 < g < 1 \Leftrightarrow \Omega < \Omega_s$ correspond au fonctionnement en moteur ($g \approx qqs \%$).
- $g = 1 \Leftrightarrow \Omega = 0$ correspond au fonctionnement à rotor bloqué (fonctionnement au démarrage).
- $g > 1 \Leftrightarrow \Omega < 0$ correspond au fonctionnement en freinage. (on l'obtient par inversion du sens de rotation du champ tournant en inversant 2 phases au stator).

VI- Démarrage des moteurs asynchrones triphasés

Les moteurs asynchrones triphasés et spécialement les moteurs à cage sont les moteurs les plus répandus dans l'industrie.

Au démarrage, le courant I_d absorbé par le moteur est souvent très supérieur au courant nominal I_n . La durée de démarrage étant très courte, même si le moteur est capable de supporter le courant de démarrage sans échauffement dangereux, il en résulte malheureusement dans la ligne alimentant le moteur une chute de tension inacceptable par les autres usagers branchés sur cette même ligne.

Aussi, on impose à la pointe de courant I_d/I_n au démarrage une limite à ne pas dépasser (de l'ordre de 2 à 3).

Les procédés de démarrage des moteurs asynchrones triphasés sont :

1°) Démarrage direct

Ce type de démarrage est réservé pour les moteurs à faible puissance (inférieure à 1,5KW).

2°) Démarrage étoile – triangle

Ce type de démarrage, facile à mettre en œuvre, est adopté surtout pour les moteurs à cage démarrant à vide ou à faible charge ($I_Y/I_\Delta=1/3$).

3°) Démarrage avec tension réduite

- à l'aide d'un autotransformateur ;
- à l'aide d'un gradateur ;
- par élimination de résistances insérées entre le réseau et les bornes statoriques.

4°) Démarrage à l'aide d'un rhéostat rotorique

- à plots dans les laboratoires ;
- à contacteurs dans l'industrie.

Ce type de démarrage est réservé uniquement pour les moteurs à rotor bobiné à bagues.

Résumé

Théorème de Ferraris

3p bobines régulièrement réparties au stator et alimentées par un système de tensions triphasé équilibré de pulsation ω , créent p paires de pôles d'un champ tournant à la vitesse angulaire $\Omega_s = \omega/p$ (vitesse de synchronisme en rad/s) ou $N_s = 60f/p$ (vitesse de synchronisme en tr/mn).

Si $f = 50\text{Hz}$ alors $N_s = 3000/p$

p	1	2	3	4	5 ...
N_s	3000	1500	1000	750	600 ...

Glissement

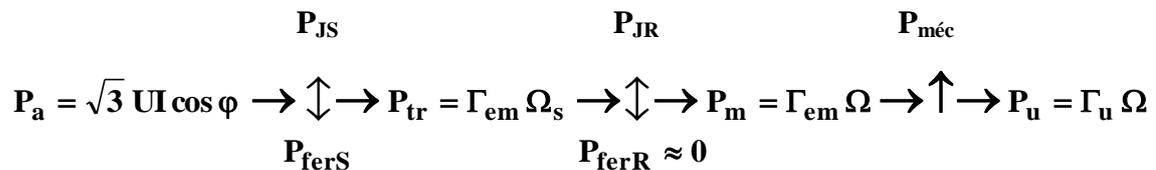
$g = \frac{N_s - N}{N_s}$ avec N_s la vitesse de synchronisme et N la vitesse du rotor.

$0 < g < 1 \Leftrightarrow N < N_s$ correspond au fonctionnement en moteur. (en pratique $g = \text{qq\%}$).

$g = 0 \Leftrightarrow N = N_s$ correspond au fonctionnement à couple nul (fonctionnement à vide).

$g = 1 \Leftrightarrow N = 0$ correspond au fonctionnement à rotor bloqué (fonctionnement au démarrage).

Diagramme de puissances



P_a : puissance absorbée par le stator.

P_{tr} : puissance transmise du stator au rotor.

P_m : puissance mécanique.

P_u : puissance utile.

P_{JS} : pertes Joule statoriques. $P_{JS} = 3 R_S I^2$ en Y ou $P_{JS} = 3 R_S J^2 = R_S I^2$ en Δ

P_{ferS} : pertes fer statoriques.

P_{JR} : pertes Joule rotoriques. $P_{JR} = g P_{tr}$

P_{ferR} : pertes fer rotoriques. $P_{ferR} = 0$

$P_{méc}$: pertes mécaniques.

Les pertes fer statoriques et les pertes mécaniques se déterminent à partir d'un essai à vide du moteur.

A vide : $\Omega_o \approx \Omega_s \Rightarrow g_o \approx 0 \Rightarrow P_{JR_o} \approx 0$.

$$P_{ao} = P_{JS_o} + P_{ferS} + P_{méc} \Rightarrow P_{ferS} + P_{méc} = P_{ao} - P_{JS_o}$$

$$\text{Si } P_{ferS} = P_{méc} \text{ alors } P_{ferS} = P_{méc} = \frac{P_{ao} - P_{JS_o}}{2}$$

Rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{\sqrt{3}UI \cos \varphi - (P_{JS} + P_{ferS} + P_{JR} + P_{méc})}{\sqrt{3}UI \cos \varphi}$$

Couples

$$\Gamma_{em} : \text{couple électromagnétique} \quad \Gamma_{em} = \frac{P_m}{\Omega}$$

$$\Gamma_u : \text{couple utile} \quad \Gamma_u = \frac{P_u}{\Omega}$$

$$\Gamma_p : \text{couple des pertes} \quad \Gamma_p = \Gamma_{em} - \Gamma_u = \frac{P_{méc}}{\Omega}$$

Exercices d'applicationExercice I

La plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé tétrapolaire porte les indications suivantes :

$$P_u = 40 \text{ kW} ; U = 380\text{V} ; f = 50\text{Hz} ; N = 1455\text{tr/mn} ; \eta = 80\% ; \cos \varphi = 0,76.$$

Les enroulements statoriques sont couplés en étoile.

La résistance de chaque phase statorique est $R_s = 0,15\Omega$.

On néglige les pertes mécaniques et les pertes fer au rotor.

- 1°) Quelle est la vitesse de synchronisme ?
- 2°) Calculer, pour le fonctionnement nominal :
 - a- le glissement g ;
 - b- le couple utile Γ_u ;
 - c- la puissance P_a consommée ;
 - d- le courant I absorbé par le moteur ;
 - e- la puissance P_{tr} transmise du stator au rotor ;
 - f- les pertes Joule rotoriques P_{JR} ;
 - g- les pertes Joule statoriques P_{JS} ;
 - h- les pertes fer statoriques P_{ferS} .

Exercice II

Un moteur asynchrone tétrapolaire dont le stator est couplé en triangle, est alimenté par un réseau triphasé 380V - 50Hz.

Ce moteur fonctionne avec un glissement $g = 5\%$. Le couple utile est alors $\Gamma_u = 250\text{Nm}$.

La puissance consommée est $P_a = 41\text{KW}$.

Les pertes fer statoriques sont évaluées à 800W.

Les pertes mécaniques et les pertes fer rotoriques sont négligeables.

La résistance de chaque phase statorique est $R_s = 0,2\Omega$.

- 1°) Quelle est la vitesse de rotation du moteur ?
- 2°) Quels sont :
 - a- la puissance P_u disponible sur l'arbre ?

- b-** la puissance transmise P_{tr} du stator au rotor ?
- c-** les pertes Joule rotor P_{JR} ?
- d-** les pertes Joule stator P_{JS} ?
- e-** le rendement η du moteur ?

3°) Déterminer le courant dans chaque enroulement du moteur et son $\cos \varphi$.

Exercice III

Un moteur asynchrone triphasé, tétrapolaire, couplé en étoile, est alimenté par un réseau triphasé 220/380V-50 Hz.

On a effectué les essais suivants :

- Essai à vide sous tension nominale : $I_0 = 5A$; $P_0 = 445W$; $N_0 \approx N_S$.
- Essai en charge : $I = 12A$; $P_a = 3750W$; $N = 1440tr/mn$.

On a mesuré la résistance d'une phase statorique et on a trouvé $R = 0,6\Omega$.

Les pertes fer au rotor sont négligeables.

- 1°) Calculer la résistance entre deux phases statoriques.
- 2°) Calculer les pertes mécaniques et les pertes fer au stator en les supposant égales.
- 3°) Pour le fonctionnement en charge, calculer :
 - a-** le glissement g ;
 - b-** les pertes Joule statoriques P_{JS} ;
 - c-** la puissance P_{tr} transmise du stator au rotor ;
 - d-** les pertes Joule rotoriques P_{JR} ;
 - e-** la puissance utile P_u ;
 - f-** le couple utile Γ_u .
- 4°) Le moteur entraîne maintenant un ventilateur qui exige un couple de 18Nm à 1500tr/mn. Ce couple est proportionnel au carré de la vitesse. On supposera que la caractéristique mécanique Γ_u (N) du moteur est rectiligne dans sa partie utile. Après avoir donné l'allure du couple utile Γ_u et du couple résistant Γ_r en fonction de N, déterminer la vitesse du groupe moteur-ventilateur.

Ch III : Machines à courant alternatif synchrones

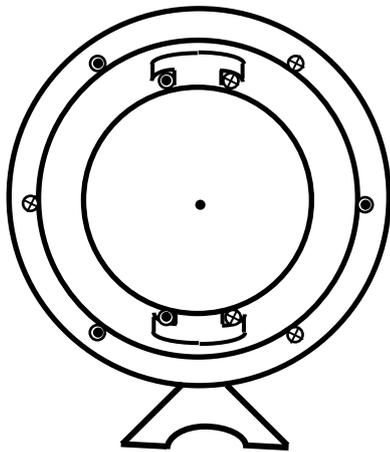
I- Description générale

Le stator porte extérieurement la culasse et intérieurement dans des encoches convenablement réparties un enroulement triphasé (3 p bobines régulièrement réparties dans l'espace) : C'est l'induit de la machine.

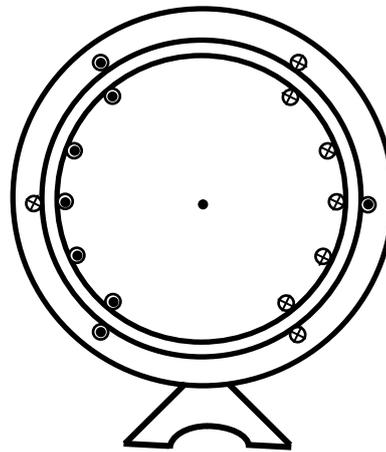
Le rotor porte un enroulement inducteur parcouru par un courant continu et ayant le même nombre de pôles que l'enroulement induit. Le courant continu est amené par l'intermédiaire de 2 balais fixes frottant sur 2 bagues isolées tournant avec le rotor.

Suivant la vitesse de rotation on distingue deux types de rotors :

- Les rotors à pôles lisses (turbo alternateurs ou alternateurs entraînés par des turbines à vapeur dans les centrales thermiques et nucléaires - moteurs synchrones à grande vitesse) ;
- Les rotors à pôles saillants (hydro alternateurs ou alternateurs entraînés par des turbines à chute d'eau dans les centrales hydrauliques - moteurs synchrones à faible vitesse).



Machine à pôles saillants (bipolaire)



Machine à pôles lisses (bipolaire)

En général les machines synchrones à pôles saillants sont des machines multipolaires ($p > 1$) et ce n'est que pour les très petites puissances qu'on remplace les électroaimants par des aimants permanents.

Rappel :

- $p=1$: machine bipolaire
- $p=2$: machine tétrapolaire
- $p=3$: machine hexapolaire

II- Principe de fonctionnement

On excite l'enroulement rotorique par un courant continu (inducteur) et on l'entraîne à une vitesse Ω . Il se crée alors un champ tournant.

L'enroulement triphasé statorique (induit) sera traversé par un flux variable et sera donc le siège, d'après la loi de Lenz-Faraday, d'un système de f.e.m triphasé équilibré. Si on branche un récepteur, il circulera un système de courants triphasé équilibré. Donc à partir d'une énergie mécanique fournie à la machine, on obtient de l'énergie électrique : C'est le fonctionnement en alternateur.

Réciproquement, on excite l'enroulement rotorique par un courant continu (inducteur). On alimente l'enroulement statorique par un système de tensions triphasé équilibré. Il se crée, d'après le théorème de Ferraris, un champ tournant qui va entraîner les pôles du rotor dans son sillage. Si une charge tend à freiner le rotor, elle recevra de l'énergie mécanique. Donc à partir d'une énergie électrique fournie à la machine, on obtient de l'énergie mécanique : C'est le fonctionnement en moteur synchrone.

Une machine synchrone est réversible. Elle peut fonctionner en alternateur ou en moteur.

III- Expression de la f.e.m

On démontre que la f.e.m par phase est $E_{ph} = k n f \phi$

k : coefficient de Kapp ($k \approx 2,22$)

n : nombre de conducteurs par phase

f : fréquence

ϕ : flux sous un pôle

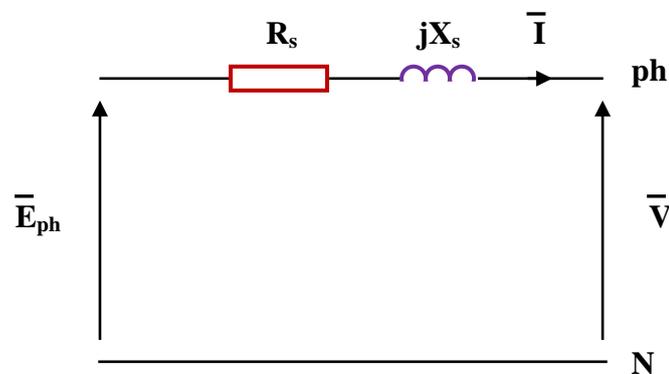
IV- Fonctionnement en charge – Modèle de Behn Eshenbarg

On suppose que la machine est à pôles lisses et non saturée.

1°) Cas d'un alternateur

a- Couplage étoile

► Schéma équivalent par phase :



$$\bar{V} = \bar{E}_{ph} - (R_s + jX_s) \bar{I}$$

R_s et X_s sont respectivement la résistance et la réactance synchrone d'une phase statorique.

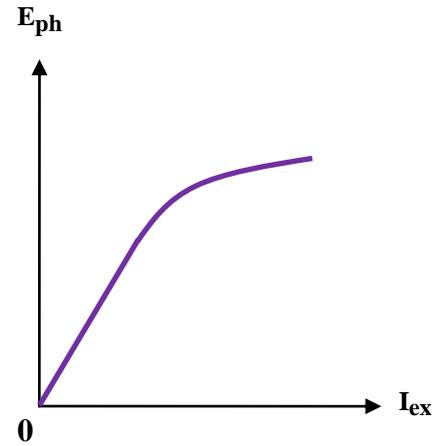
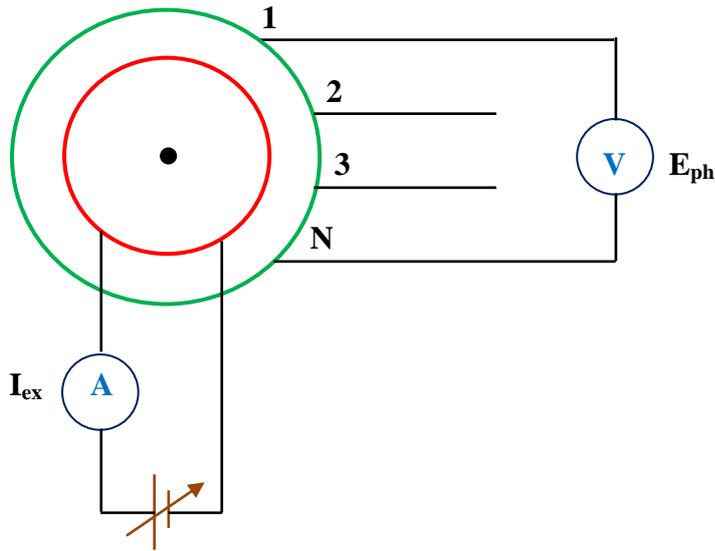
► Détermination de R_s et X_s :

- On mesure R_s avec un Ohmmètre ou avec la méthode volt-ampèremétrique sinon R_{AB} .

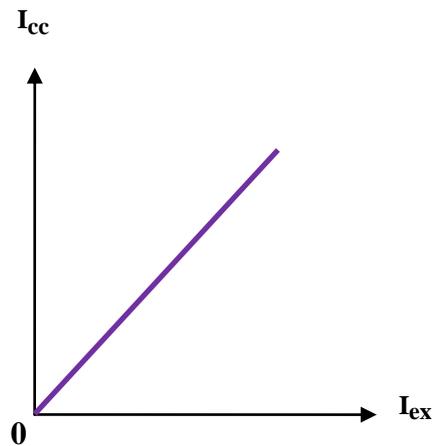
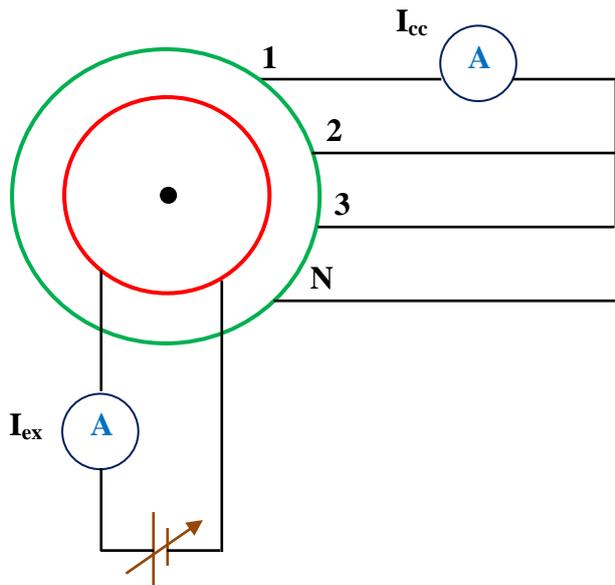
$$R_{AB} = 2R_s \text{ en Y et } R_{AB} = 2/3 R_s \text{ en } \Delta$$

- On déduit X_s à partir d'un essai à vide et d'un essai en court-circuit.

→ Essai à vide :



→ Essai en court-circuit :

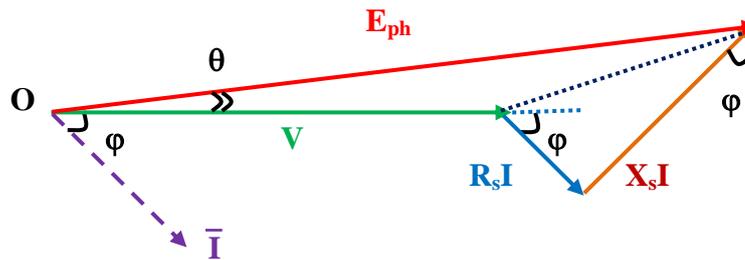


$$\bar{V} = \bar{E}_{ph} - (R_s + jX_s)\bar{I}$$

$$\text{En CC : } \bar{V} = 0 \text{ et } \bar{I} = \bar{I}_{cc} \Rightarrow \bar{E}_{ph} = (R_s + jX_s)\bar{I}_{cc} \Rightarrow X_s = \sqrt{\left(\frac{E_{ph}}{I_{cc}}\right)^2 - R_s^2}$$

$$\text{Pour les alternateurs puissants } R_s \ll X_s \text{ et } X_s \approx \frac{E_{ph}}{I_{cc}}$$

► Diagramme vectoriel :



$$\begin{cases} E_{ph} \cos \theta = V + R_s I \cos \phi + X_s I \sin \phi \\ E_{ph} \sin \theta = -R_s I \sin \phi + X_s I \cos \phi \end{cases}$$

$$\Rightarrow E_{ph} = \sqrt{(V + R_s I \cos \phi + X_s I \sin \phi)^2 + (-R_s I \sin \phi + X_s I \cos \phi)^2}$$

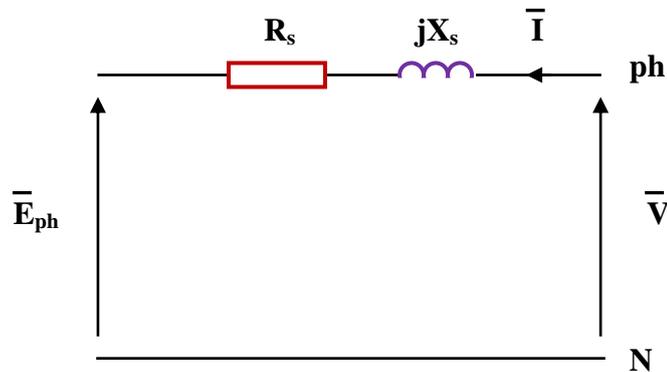
b- Couplage triangle

On aboutit aux mêmes résultats en remplaçant E_{ph} par E (entre phases), V par U et I par J .

2°) Cas d'un moteur

Dans le cas d'un moteur synchrone, le modèle de Behn Eshenbourg est le même en changeant le sens du courant (récepteur).

a- Couplage étoile



$$\bar{V} = \bar{E}_{ph} + (R_s + jX_s) \bar{I}$$

b- Couplage triangle

On aboutit aux mêmes résultats en remplaçant E_{ph} par E (entre phases), V par U et I par J .

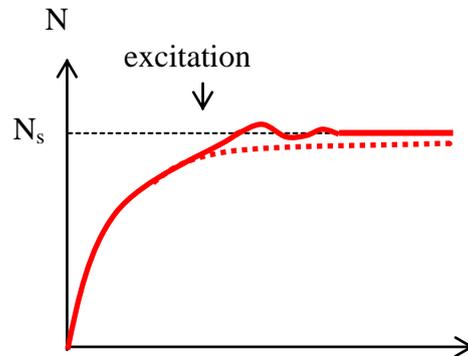
V- Pertes et rendement

Il existe 4 types de pertes :

VII - Démarrage des moteurs synchrones

1°) Démarrage en asynchrone

On court-circuite l'inducteur sur lui-même et on applique un système de tensions triphasées équilibrées réduites aux enroulements statoriques. Lorsque la vitesse N est voisine de la vitesse de synchronisme N_s , on fait passer le courant I_{ex} et le rotor s'accroche au champ tournant.



2°) Démarrage à l'aide d'un moteur auxiliaire

Avant de coupler le moteur synchrone au réseau, on le lance à l'aide d'un moteur auxiliaire (asynchrone de petite puissance). On excite ensuite l'inducteur et le rotor s'accroche au champ tournant.

VIII - Propriétés des moteurs synchrones

- Ils sont très puissants ;
- Ils ont un meilleur rendement ;
- Ils tournent rigoureusement à la vitesse de synchronisme ;
- On peut faire varier leur vitesse de rotation en agissant sur la fréquence ;
- On peut régler leur facteur de puissance en agissant sur le courant d'excitation ;
- Surexcités et tournant à vide (compensateurs synchrones), ils fournissent de la puissance réactive et permettent de régler le facteur de puissance d'une installation ;
- Sous-excités ou surchargés, ils décrochent du réseau.

Résumé

Expression de la f.e.m

$$E_{ph} = k n f \phi$$

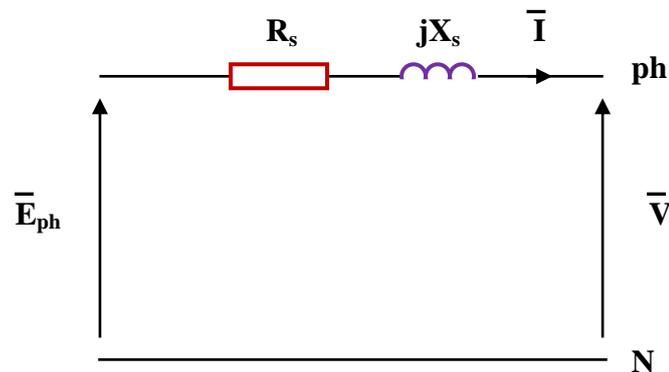
k : coefficient de Kapp ($k \approx 2,22$)

n : nombre de conducteurs par phase

f : fréquence

ϕ : flux sous un pôle

Modèle de Behn Eshenburg d'un alternateur (couplage étoile)

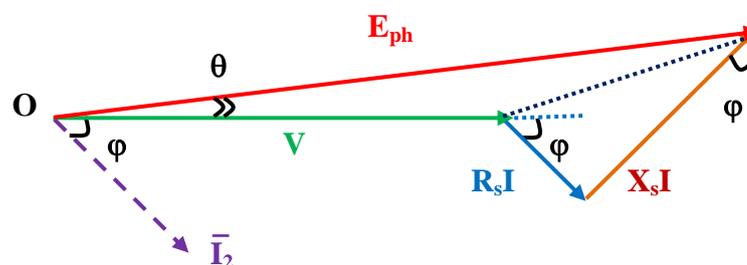


$$\bar{V} = \bar{E}_{ph} - (\mathbf{R}_s + j\mathbf{X}_s)\bar{I}$$

- On mesure la résistance \mathbf{R}_s avec un Ohmmètre ou avec la méthode volt-ampèremétrique.
- On déduit \mathbf{X}_s à partir d'un essai à vide et d'un essai en court-circuit.

$$\text{En CC : } \bar{V} = \mathbf{0} \text{ et } \bar{I} = \bar{I}_{cc} \Rightarrow \bar{E}_{ph} = (\mathbf{R}_s + j\mathbf{X}_s)\bar{I}_{cc} \Rightarrow \mathbf{X}_s = \sqrt{\left(\frac{E_{ph}}{I_{cc}}\right)^2 - \mathbf{R}_s^2}$$

Le diagramme vectoriel est :



$$\begin{cases} E_{ph} \cos \theta = V + R_s I \cos \phi + X_s I \sin \phi \\ E_{ph} \sin \theta = -R_s I \sin \phi + X_s I \cos \phi \end{cases}$$

$$\Rightarrow E_{ph} = \sqrt{(V + R_s I \cos \phi + X_s I \sin \phi)^2 + (-R_s I \sin \phi + X_s I \cos \phi)^2}$$

Modèle de Behn Eshenbourg d'un alternateur (couplage triangle)

On aboutit aux mêmes résultats en remplaçant E_{ph} par E (entre phases), V par U et I par J .

Modèle de Behn Eshenbourg d'un moteur

Le modèle est le même en changeant le sens du courant (récepteur).

Pertes et rendement

Il existe 4 types de pertes :

- Les pertes fer au stator ou pertes magnétiques P_{fer} .
- Les pertes mécaniques $P_{méc}$.
- Les pertes Joule statoriques P_{JS} ($P_{JS} = 3 R_S I_S^2$ en Y ou $P_{JS} = 3 R_S J_S^2 = R_S I_S^2$ en Δ).
- Les pertes Joule rotoriques P_{JR} ($P_{JR} = R_R I_{ex}^2$).

$$\eta_{\text{alternateur}} = \frac{P_u}{P_a} = \frac{\sqrt{3}UI \cos \varphi}{\sqrt{3}UI \cos \varphi + \text{pertes}}$$

$$\eta_{\text{moteur}} = \frac{P_u}{P_a} = \frac{\sqrt{3}UI \cos \varphi - \text{pertes}}{\sqrt{3}UI \cos \varphi}$$

Couplage au réseau

Les conditions de couplage sont donc les suivantes :

- Egalité des valeurs efficaces des tensions réalisée par action sur le courant d'excitation de l'alternateur.
- Egalité des fréquences réalisée par action sur la vitesse de rotation de l'alternateur.

Exercices d'applicationExercice I :

Un alternateur, couplé en étoile, possède les caractéristiques suivantes :

- Nombre de pôles : 28
- Flux utile sous un pôle : 23 mWb
- Fréquence : 50 Hz

Chaque phase, de résistance R_s négligeable et de réactance $X_s = 0,4 \Omega$, contient 2950 conducteurs.

En charge nominale, l'alternateur débite 5200 A sous 10500 V entre phases avec un $\cos \varphi = 0,8$ AR.

- 1°) Quelle est la vitesse de rotation N_s de l'alternateur ?
- 2°) Calculer directement la f.e.m. E_{ph} en prenant comme coefficient de Kapp $k \approx 2,22$.
- 3°) Donner le schéma équivalent de l'alternateur par phase.
- 4°) En déduire le diagramme de Behn-Eshenbourg.
- 5°) Calculer la f.e.m. E_{ph} . Retrouver le résultat de la question 2°.
- 6°) Calculer la puissance utile et le rendement de l'alternateur lorsque $P_{fer} + P_{méc} + P_{JR} = 1450$ KW.

Exercice II :

La plaque signalétique d'un alternateur triphasé, hexaphasé, couplé en étoile, porte les indications suivantes : 50KVA – 220/380V – 50Hz.

On a relevé, à la vitesse de synchronisme, la caractéristique à vide $E_{ph} = f(I_{ex})$.

I_{ex} (A)	10	17	25	37	48
E_{ph} (V)	81	139	200	260	310

1°) Déterminer la vitesse de synchronisme N_s en tr/mn.

2°) Calculer le courant nominal I_n .

3°) On obtient le courant nominal sous la tension nominale, dans une charge résistive, lorsque le courant d'excitation est $I_{ex} = 37A$. En utilisant le modèle de Behn-Eshenbourg et en négligeant la résistance R_s devant la réactance synchrone X_s :

a- calculer X_s (on conservera cette valeur dans la suite du problème) ;

b- calculer le courant d'excitation I_{ex} nécessaire pour obtenir, en court-circuit, $I_{cc} = I_n$.

4°) L'alternateur alimente maintenant :

– 5 moteurs triphasés, couplés en étoile, de facteur de puissance 0,8, absorbant chacun un courant de 11,17 A ;

– 180 lampes résistives 100W – 220V chacune, réparties régulièrement sur les 3 phases.

a- Faire une figure.

b- Calculer la puissance active P et la puissance réactive Q consommées par l'installation.

c- En déduire le courant de ligne I et le déphasage φ du courant sur la tension.

d- En utilisant le modèle de Behn-Eshenbourg, calculer la f.e.m E_{ph} . En déduire le courant I_{ex} correspondant.

e- Calculer le couple d'entraînement sachant que le rendement de l'alternateur seul est de 95 %.

Exercice III :

Un alternateur triphasé, couplé en triangle, ayant 16 pôles et entraîné à vitesse constante, débite dans un rhéostat triphasé équilibré, couplé en étoile.

Pour un courant d'excitation constant, on a relevé 3 points de la caractéristique en charge :

U (V)	400	385	0
I (A)	0	37,6	138

I : courant de ligne

U : tension aux bornes de l'alternateur de fréquence 50Hz.

On négligera la résistance R_s de chaque phase statorique devant la réactance synchrone X_s .

1°) Calculer la vitesse de rotation N_s de l'alternateur.

2°) Préciser le point de fonctionnement à vide. En déduire la f.e.m E entre phases.

3°) Préciser le point de fonctionnement en charge.

4°) Préciser le point de fonctionnement en court-circuit. En déduire le courant I_{cc} .

5°) En utilisant le modèle de Behn-Eshenbourg, calculer X_s de deux façons différentes.

6°) Quelle était la résistance d'une phase du rhéostat lorsqu'on a mesuré $I = 0$; $I = 37,6A$; $I = 138A$?

7°) L'alternateur débite un courant $I = 37,6A$ dans une charge triphasée purement inductive. Quelle est alors la nouvelle valeur de la tension U ?

8°) L'alternateur débite maintenant un courant $I = 37,6A$ dans une charge triphasée purement capacitive. Quelle est alors la nouvelle valeur de la tension U ?