

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE UNIVERSITE DE BOUIRA FACULTE DES SCIENCES ET DES
SCIENCES APPLIQUEES



L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

COURS
Identification et diagnostic des machines électriques
Pour 2^{ème} master : machine électrique

Préparé par : Mr. SERHOUD Hicham
Maître de Conférences ‘’A’’

Contenu de la matière :

L'identification paramétrique de la machine asynchrone est l'un des objectifs les plus importants en vue de sa simulation, sa commande et son diagnostic .

Cette brochure de travaux est destinée aux étudiants de deuxième année master machines électriques, il est constitué des parties suivant :

Partie 1

Identification de la machine asynchrone à cage

Identification de la machine asynchrone à rotor bobiné

Identification paramétrique de la machine synchrone

Identification paramétrique de la machine à courant continu

Partie 2

Les défauts des machines électriques et leur diagnostic. Constitution des machines. Stator. Rotor. Les paliers.

1. Les défaillances des machines électriques. Défaillances mécaniques. Défaillances électriques.
2. Techniques de diagnostic avec modèle analytique. Identification. Observation d'état.
3. Modélisation des défauts de bobinage.
4. Techniques de diagnostic sans modèle analytique. Approche par traitement de signal. Méthodes d'intelligence artificielles (réseaux de neurones, logique floue,...).

I- Identification paramétrique du moteur asynchrone

Les paramètres électrique de la machine sont identifiés on utilisation la circuit équivalent a une machine asynchrone par phase ramené au stator .

I.1 circuit équivalent ramène au stator :

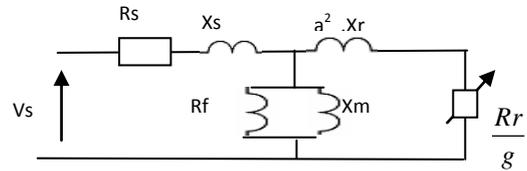


Fig1- Circuit équivalent a une machine asynchrone par phase ramené au stator

Le rapport d'équivalence $a = \frac{ns}{nr}$

$Xs = \omega_s l_s = \omega_s [Ls_a Mo]$: Réactance de fuit statorique par phase

$Xr = \omega_s l_r = \omega_s [Lr_a Mo]$: Réactance de fuit rotorique par phase

$Xm = \omega_s M$ Réactance de magnétisation par phase

2-Détermination des paramètres du moteur par des essais :

Pour détermination les paramètres du circuit équivalent ramené au stator en réalisant trois essais :

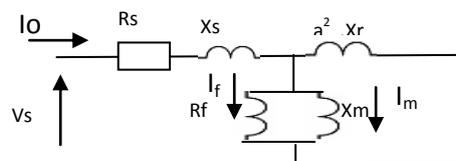
A-Essai en continu

La résistance d'une phase de la machine (R_s) est mesurée directement par multimetre ou par la methode de volt-ampèremétrie

B-Essai a charge nulle $g=0$

On applique la tension nominal au moteur, et on laisse tourne à vide, la puissance consommée est alors faible (elle correspond seulement aux pertes fer dans la carcasse et aux pertes rotationnelles a glissement nul.

sur le circuit de la figure 1 ceci signifie que la parte située a droite de la branche shunt peut être considérée comme un circuit ouvert (I_1 très faible $I_s=I_o$)



on mesure la puissance active absorbé le courant et la tension par phase : P_o, I_o, V_o

On en déduit le facteur de puissance correspondant a ces conditions :

$$\cos \vartheta_o = \frac{P_o}{V_o I_o}, \text{ d'ou les valeurs de } R_f \text{ et } X_m :$$

$$I_m = I_o \sin(\vartheta_o)$$

$$I_f = I_o \cos(\vartheta_o)$$

$$R_f = \frac{V_o}{I_f} =$$

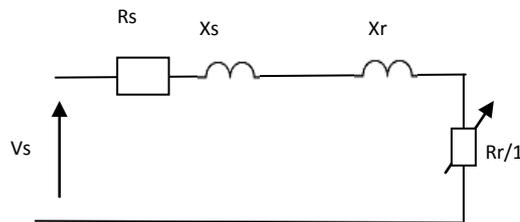
$$X_m = \frac{V_o}{I_m}$$

.....(1)

C-Essai a rotor Bloqué (g=1)

on bloque le rotor et on alimenté le moteur sous tension réduit (15 a 20%) de la tension nominale la machine fonction alors comme un transformateur qui aurait beaucoup de fuites et dont le secondaire (rotor) serait en court –circuit.

on peut supposer que c'est maintenant la branche shunt du circuit de la fig1 qui est négligeable puis que le courant de magnétisation et les pertes fer sont très réduits (Io faible Is=I1) par ailleurs la rotor étant bloqué (g=1) . ($R_m // X_m \gg R_r, X_r$)



On mesure la puissance active absorbé la courant et la tension par phase : P1, I1, V1

On en déduit le facteur de puissance correspondant a ces conditions : $\cos \vartheta_1 = \frac{P_1}{V_1 I_1}$

$$Z = \frac{V_1}{I_1}$$

$$Z \cos(\vartheta_1) = R_s + a^2 . R_r = \frac{P_1}{I_1^2} \dots\dots\dots(2)$$

$$Z \sin(\vartheta_1) = X_s + a^2 . X_r = \frac{V_1 \sin \vartheta_1}{I_1}$$

On peut ensuite calculer les valeurs individuelles de **Rr ,Rs, Xr,Xs** si on connaît la rapport d'équivalence 'a' de la machine en mesurant directement Rs et Xs qui accessibles.

II-identification des paramètres mécaniques(moment d'inertie J, frottements f)

Les paramètres mécaniques de la machine sont identifiés par la méthode de l'essai de ralentissement et par la méthode de séparation des pertes.

II .1-l'essai de ralentissement

La machine est alimentée sous sa tension nominale on la laisse tourner à vide($C_r=0$). L'alimentation est ensuite coupée avec l'évolution de la vitesse en fonction du temps.

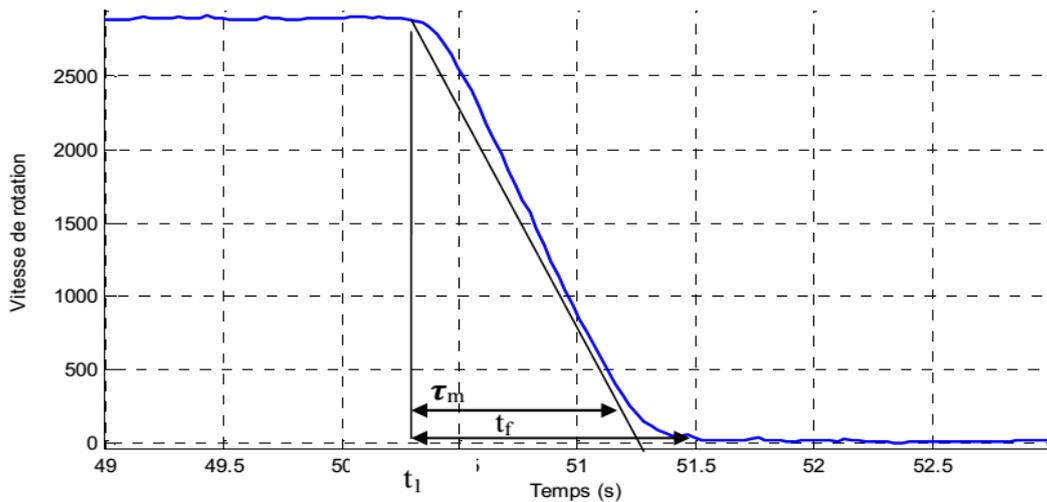


Fig.II-1 : Essai de ralentissement effectué sur un moteur asynchrone à cage

Le couple électromagnétique du moteur est donné par l'équation : $C_e - C_r = J \frac{d\omega}{dt} + f\omega$

- C_e : Couple électromagnétique
- C_r = Couple de charge
- J = Inertie $kg \cdot m^2$
- f = Frottement visqueux

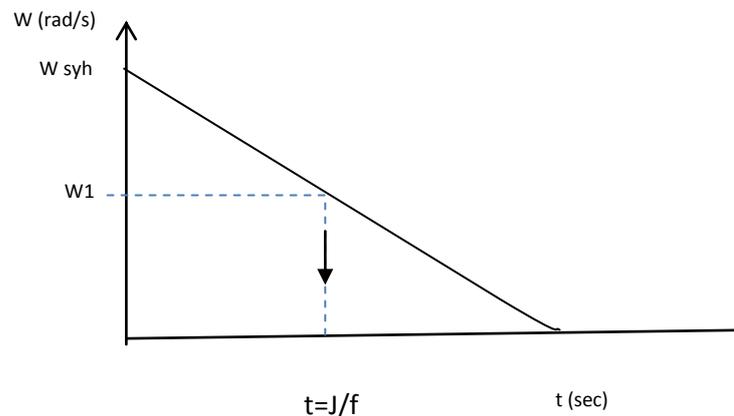
a vide $C_r=0$ donc $J \frac{d\omega}{dt} = -f\omega + C_e$ (Équation différentielle du premier ordre la résolution de

cette équation donne par $\omega(t) = \frac{C_e}{f} (1 - e^{-\frac{f}{J}t})$)

En régime permanent a vide ($C_r=0$, $w = w_{syh}$), donc

$$C_e = f \cdot \omega_{syh} \quad f = \frac{C_e}{\omega_{syh}}, \quad C_e = P_{mec} / \omega_{syh} \quad \text{donc}$$

$$f = \frac{P}{\omega_{syh}^2}$$



Essai de ralentissement (t=0 - w = w_{syh} A vide)

$$\omega(t) = w_{syh} e^{-\frac{f}{J}t}$$

on prendre $t=J/f$

$$\omega(t) = w_{syh} e^{-1} = 0.3679 w_{syh} = w_1$$

$$W1 = 0.3679 w_{syh}$$

Utilisation le courbe de ralentissement pour trouve la valeur de t.

Le temps correspondant à cette vitesse est $t=J/f$ donc $J= f*t$

II.2 Méthode de séparation des pertes

Lors de fonctionnement du MAS en moteur à vide, la puissance active absorbée représente la somme des pertes suivantes :

-Les pertes ohmiques statoriques: (par effet joule dues au courant statorique) : $P_{Js} = 3 R_s I_{s0}^2$

-Les pertes ferromagnétiques (dites pertes dans le fer) dues à la variation du flux: P_{Fe}

-Les pertes mécaniques dues aux frottements et à la ventilation : P_{mec}

En effet la puissance active à vide est donnée par: $P_{s0} = P_{js0} + P_{fe} + P_{mec}$

Donc :

$$P_{s0} - P_{js0} = P_{fe} + P_{mec}$$

Cette méthode consiste à alimenter le moteur à **vide** sous **tension variable** et mesurer le courant statorique et la puissance active.

la vitesse doit demeurer **constante** afin de conserver la constance des pertes mécaniques constante .

les pertes fer varient proportionnellement au carré de la tension d'alimentation;

D'après la courbe on trouve : P_{mec} , P_{fer}

$$P_{s0} - P_{js0}$$

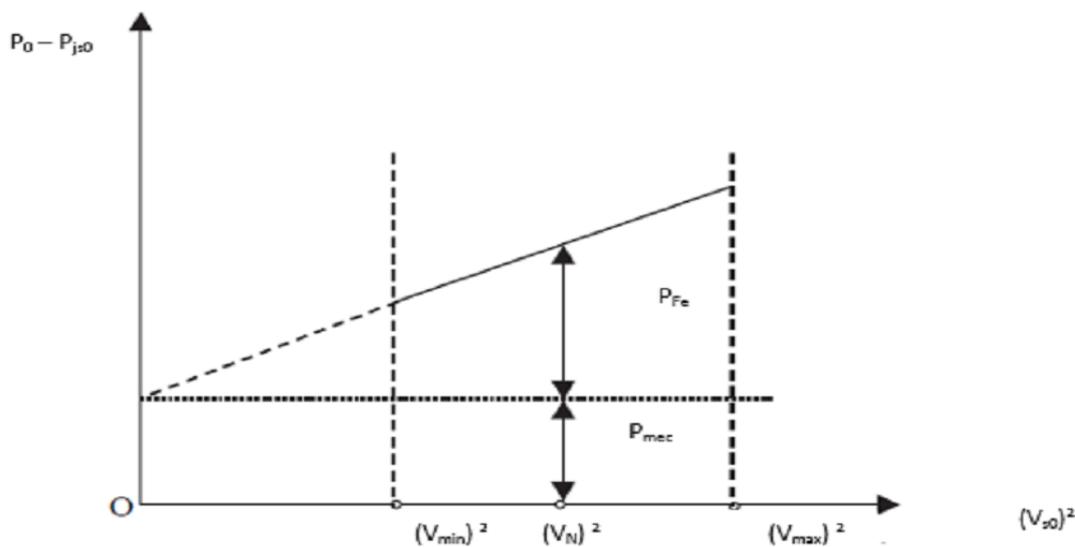


Figure II-2: Méthode de séparation des pertes

$$f = \frac{P_m}{\omega^2}$$

2- Identification paramétrique du machine asynchrone a rotor bobiné (RS,Rr,Ls,Lr,M) :

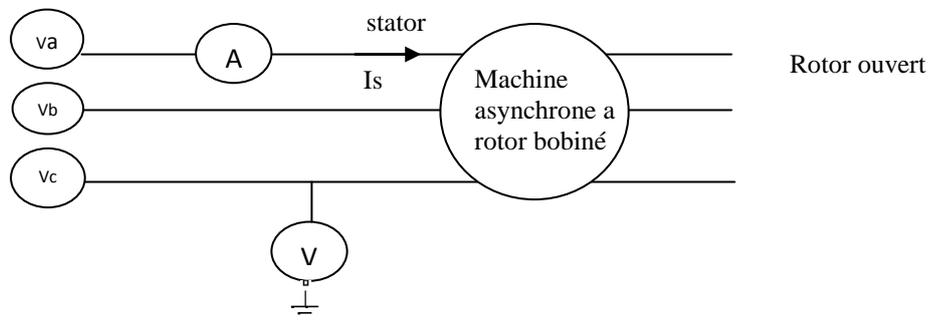
Les paramètres électrique de la machine asynchrone a rotor bobiné sont identifiés par les test suivant :

A-Essai en continu(Rs ,Rr)

La résistance d'une phase de la machine (Rs ,Rr) est mesurée directement par multimetre ou par la methode de volt-ampèremétrie

b- Essai en trnsformatour a rotor ouvert (Ls)

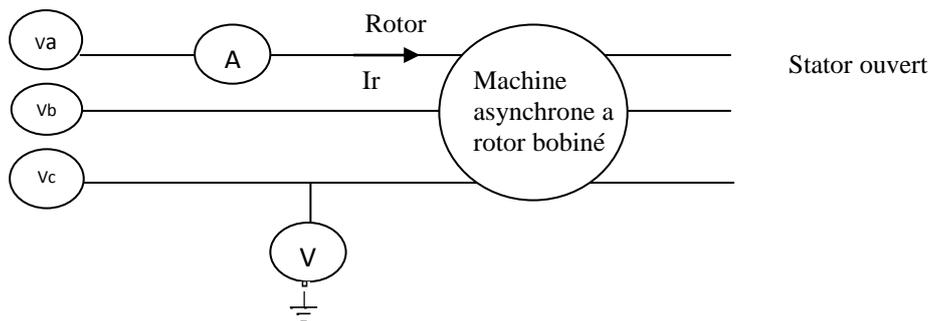
Le rotor est ouvert, le stator est relié à une source triphasée équilibré



$$V_s = R_s I_s + jL_s \omega I_s \Rightarrow L_s = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{V_s}{I_s}\right)^2 - R_s^2}$$

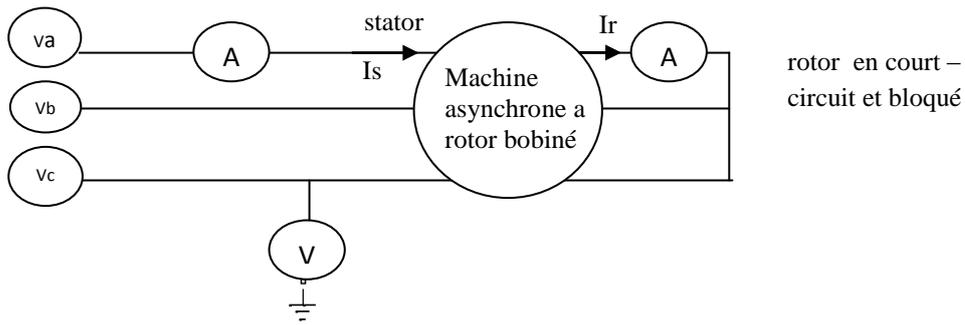
c- Essai en trnsformatour a stator ouvert (Lr)

Le stator est ouvert, le rotor est relié à une source triphasée équilibré



$$V_r = R_r I_r + jL_r \omega I_r \Rightarrow L_r = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{V_r}{I_r}\right)^2 - R_r^2}$$

d- Essai a rotor en coutrt –circuit et bloqué (Vr=0 ,g=1,wr=0)



L'équation complexe de la machine a rotor bobine dans le système X-Y

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d}{dt} \bar{\Phi}_s + j\omega_s \bar{\Phi}_s$$

$$\bar{V}_r = R_r \bar{I}_r + \frac{d}{dt} \bar{\Phi}_r + jg(\omega_s - \omega_r) \bar{\Phi}_r$$

$\omega_r = 0$, En régime permanent ($\frac{d}{dt} = 0$)

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + j\omega_s \bar{\Phi}_s$$

$$\bar{V}_r = R_r \bar{I}_r + jg(\omega_s) \bar{\Phi}_r$$

Et

$$\bar{\phi}_r = L_r \bar{I}_r + M \bar{I}_s$$

Avec $\mathbf{Vr=0}$

$$0 = R_r \bar{I}_r + jg(\omega_s)(L_r \bar{I}_r + M \bar{I}_s)$$

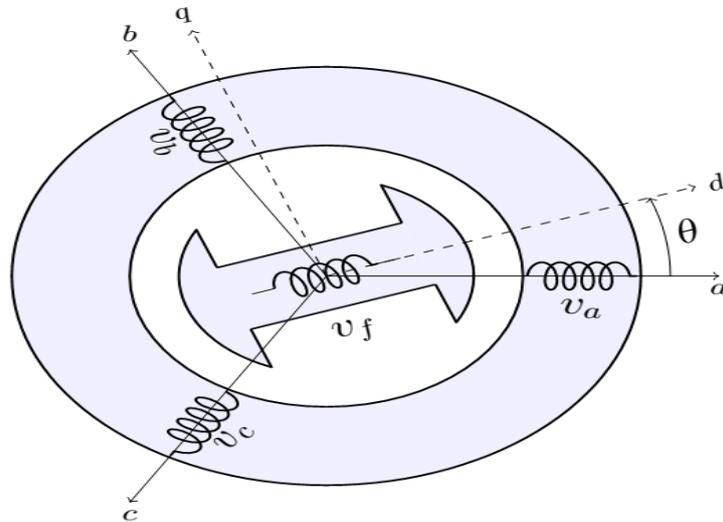
$$0 = (R_r + jg\omega_s L_r) \bar{I}_r + jg\omega_s M \bar{I}_s$$

Donc :

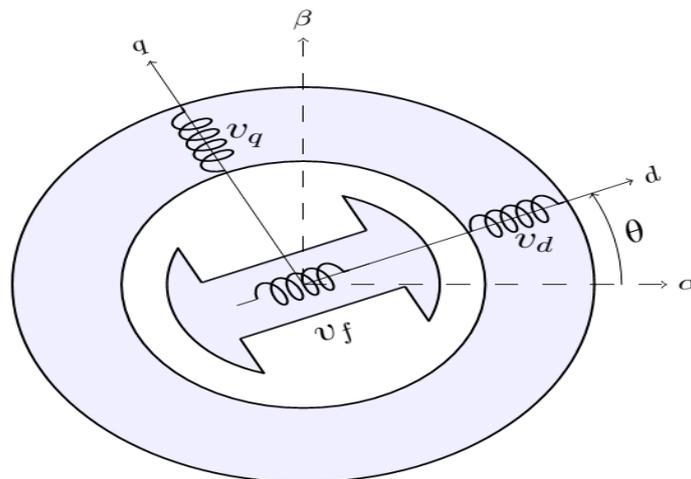
$$M = \frac{1}{\omega_s} \frac{I_r}{I_s} \sqrt{(R_r)^2 - (\omega_s L_r)^2} ,$$

3-Identification paramétriques de la machine synchrone à pôles saillants sans amortisseurs

Model mathématique de la machine :



Représentation symbolique de la machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants



Représentation symbolique de la machine synchrone équivalente au sens de Park

Le système d'équation de Park simplifié de la machine synchrone à pôles saillants donne par

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega \varphi_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega \varphi_d \end{cases}$$

et les flux étant donnés par :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + M_f i_f \\ \varphi_q = L_q i_q \\ \varphi_f = L_f i_f + M_f i_q \end{cases}$$

Avec

L_q : Inductance d'axe en quadrature

L_d : Inductance d'axe direct

R_s : Résistance statorique

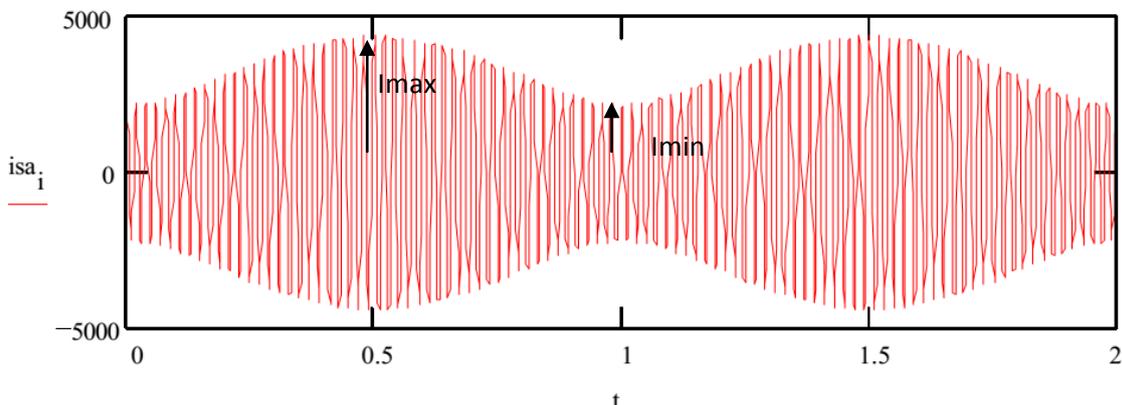
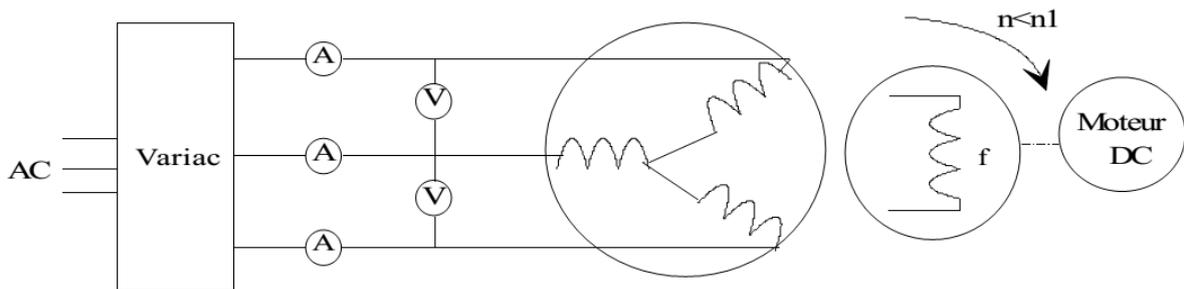
R_f : Résistance du circuit inducteur

M_f : Inductance mutuelle maximale entre un circuit statorique et un circuit rotorique

Détermination les paramètres de la machine synchrones à pôles saillants par des tests

3-1 Essai de glissement ($g < 0.01$, $i_f = 0$)

- Les enroulements statoriques sont alimentés par des tensions réduites triphasées équilibrées
- L'enroulement inducteur ouvert, n'est pas excité. ($i_f = 0$)
- Le rotor est entraîné par une machine à courant continu à une vitesse très petit différant a la vitesse de synchronisme ($g < 0.01$)

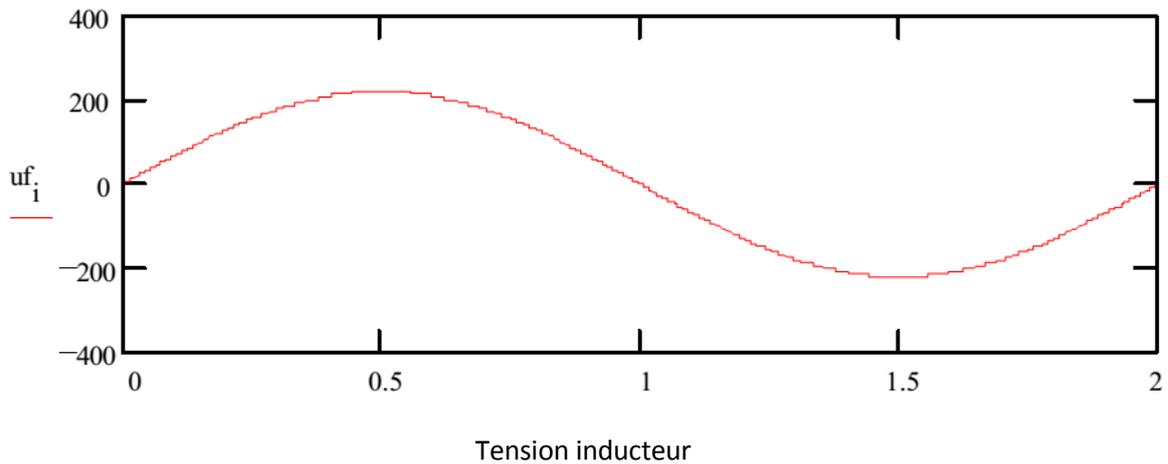


Courant induit

Lorsque l'axe de la Fmm « coïncide » avec la position longitudinale de l'inducteur $I = I_{min}$

$$(Ld = \frac{V}{\omega I_{min}})$$

Lorsque l'axe de la Fmm sont en quadrature $I=I_{max}$ ($Lq = \frac{V}{\omega I_{max}}$)



3-2- Essai en alternateur à vide

Cet essai permet de déterminer la mutuelle M_f entre le stator et l'inducteur

La machine est entraînée à la vitesse de synchronisme on relève la caractéristique $E=f(I_f)$

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d}{dt} \bar{\Phi}_s + j\omega_s \bar{\Phi}_s$$

À vide ($i_{sd}, i_{sq} = 0$) et en régime permanent ($\frac{d}{dt} = 0$)

Donc

$$\varphi_d \cong M_f i_f$$

$$\varphi_q \cong 0$$

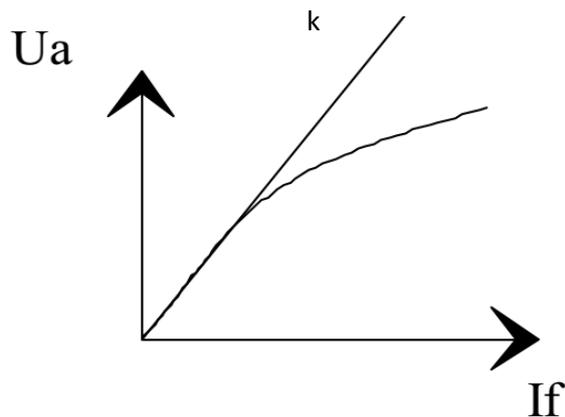
$$\varphi_f \cong L_f i_f$$

$$\bar{V}_s \approx j\omega_s \bar{\Phi}_s \Rightarrow V_s \approx \omega_s M_f i_f$$

$$M_f \approx \frac{E}{\omega_s i_f} \text{ avec } k = E/i_f$$

Donc :

$$M_f = K/\omega$$



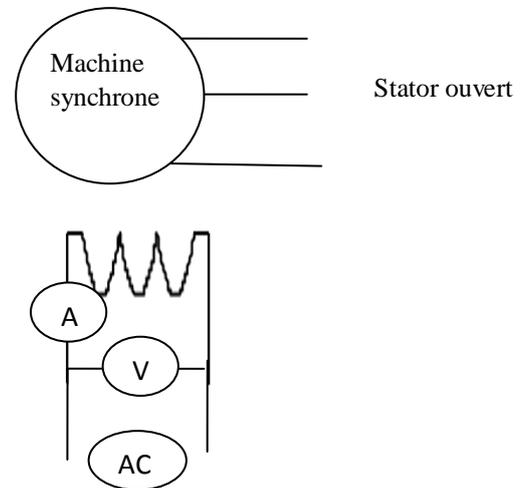
3-3-mesure en courant continu(R_s, R_f)

Les résistances d'une phase de la machine (R_s, R_f) est mesurée directement

3-4-mesure en courant alternatif

L'alimentation en courant alternatif de inducteur à stator ouvert donne directement l'inductance

d'enroulement ;
$$L_f = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{V_f}{I_f}\right)^2 - R_f^2}$$



4- identification paramétrique de la machine à courant continu

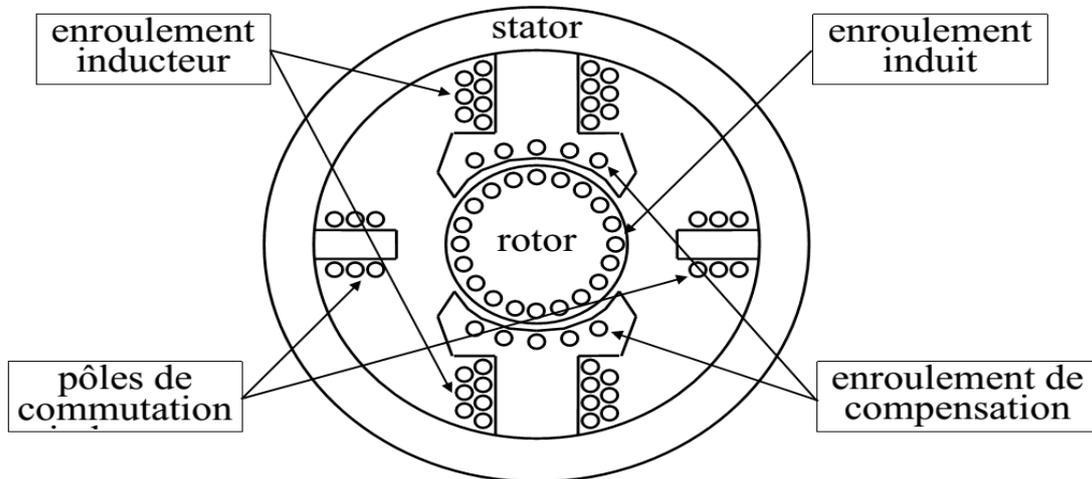
Généralités sur la machine courant continu

son fonctionnement repose sur l'interaction entre deux champs magnétiques:

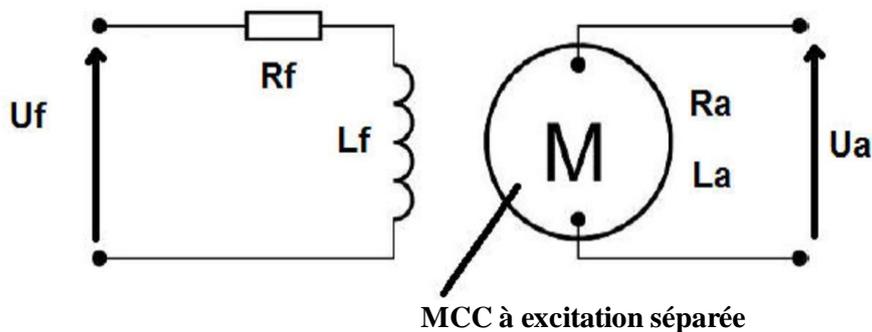
Le champ inducteur, Le champ induit

Le champ inducteur, créé, soit par un bobinage alimenté en courant continu, soit par un système d'aimants permanents, l'un comme l'autre étant placé au stator de la machine.

Le champ induit, toujours créé par un bobinage placé au rotor



4-1. Modélisation d'une machine à courant continu à excitation séparée :



MCC à excitation séparée

Equation électrique :

Équation de l'inducteur :

$$U_f = R_f I_f + L_f \frac{dI_f}{dt}$$

Équation de l'induit :

$$U_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + \Omega \phi_f$$

Équation du flux :

$$\phi_f = M I_f$$

Équation du couple :

$$C_e = M I_f I_a$$

Equation mécanique :

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

C_e : Couple électromagnétique

C_r : Couple de charge

J=Inertie kg.m²
F=Frottement visqueux

4-2. Détermination les paramètres électrique du moteur par des essais :

a-Mesure de résistance (la résistance d'induit et inducteur Rs ,Rf)

Les résistance d'induit et inducteur sont mesurées a chaud par la méthode de volt-ampèremétrique , la mesure s'effectuent a différent valeur de courant (jusque a 30% de la courant nominal) pour ne pas échauffement de da machine)

La résistance mesurée est alors le rapport de la tension mesurée par l'intensité mesurée du courant

b-Détermination les l'inductances (induit et l'inducteur) La ,Lf

L'alimentation en courant alternatif de l'induit a inducteur ouvert et inversement donne directement les inductances de chaque enroulement

$$L_a = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{V_a}{I_a}\right)^2 - R_a^2}, \quad L_f = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{V_f}{I_f}\right)^2 - R_f^2}$$

c-Détermination de la mutuelle l'inductance M (La machine en mode séparé (indépendant))

-Essai en génératrice a vide

On mesure la mutuelle l'inductance M par un essai en génératrice, On effectue la moyenne des mesures

$$E = \Omega \phi_f \quad \text{et} \quad \phi_f = M I_f$$

Donc $M = E/(\Omega I_f)$

1-Le Diagnostic

Le diagnostic consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance.

Un **diagnostic fiable**, nécessite une bonne connaissance des mécanismes des défauts à surveiller, ainsi que leurs conséquences sur les grandeurs électromagnétiques de la machine

La procédure de diagnostic s'articule autour des étapes suivantes :

- Localisation** : détermine-le sous-système fonctionnel à l'origine de l'anomalie et progressivement affine cette détermination pour désigner l'organe ou le dispositif élémentaire défectueux.
- Identification** : détermine les causes qui ont engendré la défaillance constatée.
- Explication** : justifie les conclusions du diagnostic.

D'après la littérature, les principaux signaux de la machine utilisés pour obtenir des informations sur l'état de santé de la machine sont les suivants :

- ⊕ Courant statorique
- ⊕ Couple électromagnétique
- ⊕ Vibration mécanique
- ⊕ La tension de neutre
- ⊕ La puissance instantanée
- ⊕ Flux magnétique axial

2-Conséquences des défauts

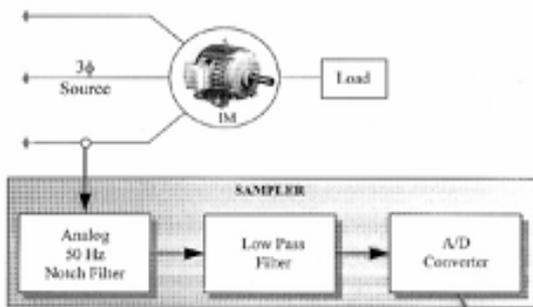
Les défauts qui surviennent sur les machines asynchrones conduisent à de multiples problèmes qui affectent la rentabilité de l'installation globale, et qui peuvent aller jusqu'à l'arrêt total. On cite parmi les conséquences des défauts :

- Effectuassions au niveau du couple et de la vitesse
- Appel supplémentaire de courant
- Déséquilibre au niveau de la tension et de courant de ligne
- Augmentation des arrêts non programmés, des pertes de production et par conséquent le rendement global.

3-les méthodes internes et externes de diagnostic

3-1 Méthodes externes

Les méthodes externes de diagnostic supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine acquise par apprentissage, ces méthodes se basent sur l'analyse des signaux que fournit la machine lors de son fonctionnement,



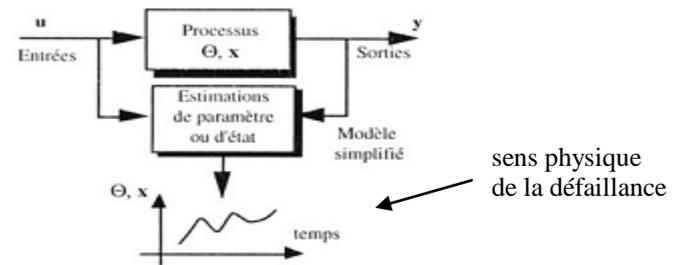
Système de surveillance du courant statorique

Dans cette catégorie, on retrouve toutes les méthodes basées sur l'intelligence artificielle :

- les systèmes experts
- les réseaux de neurones artificiels
- l'analyse spectrale des signaux

3-2 Méthodes internes :

Elles impliquent une connaissance approfondie du fonctionnement sous la forme de modèles mathématiques, Cette technique est basée sur l'identification paramétrique ou estimation de variables d'état du modèle électrique de la machine.



sens physique de la défaillance

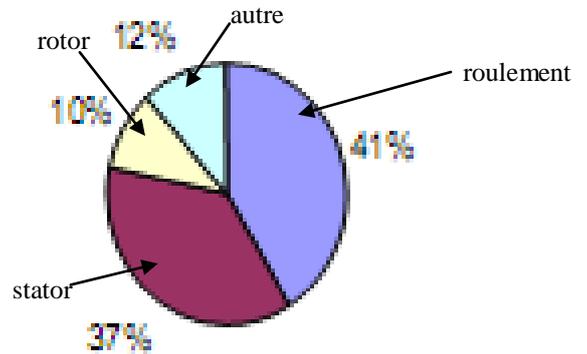
4-Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone

Ces dégâts peuvent avoir pour origines des problèmes de nature très différentes, souvent reliés les uns aux autres.

- Causes thermiques : température ambiantes élevée, ...
- Causes électriques : transitoire d'alimentation, déséquilibres, ...
- Causes mécaniques : chocs en service, vibrations, jeux, ...
- Causes chimiques : corrosion, humidité, ...

5- les principaux défauts dans la machine asynchrone

Une étude statistique révèle que certaines pannes sont plus fréquentes que d'autres; à savoir : défauts de roulement, stator, rotor..



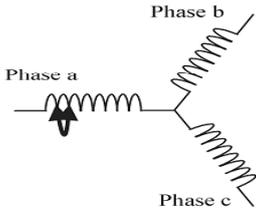
5-1 Défaillances au stator

- Court-circuit entre spires
- Court-circuit entre phases
- Court-circuit entre phase et le neutre, (phase et la carcasse métallique)
- Ouverture d'une phase

Les courts-circuits entre spires est donc le défaut le plus fréquemment rencontré au stator, la fréquence caractéristique de ce défaut est :

$$f_{cs} = f_s \left[\frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right]$$

Avec $n=1,2,3,\dots$ et $k=1,3,5$.



5-2 Les défauts rotoriques

- Cassure de Barre
- Ruptures d'anneaux
- Les défauts d'excentricités :

Cassure de Barre

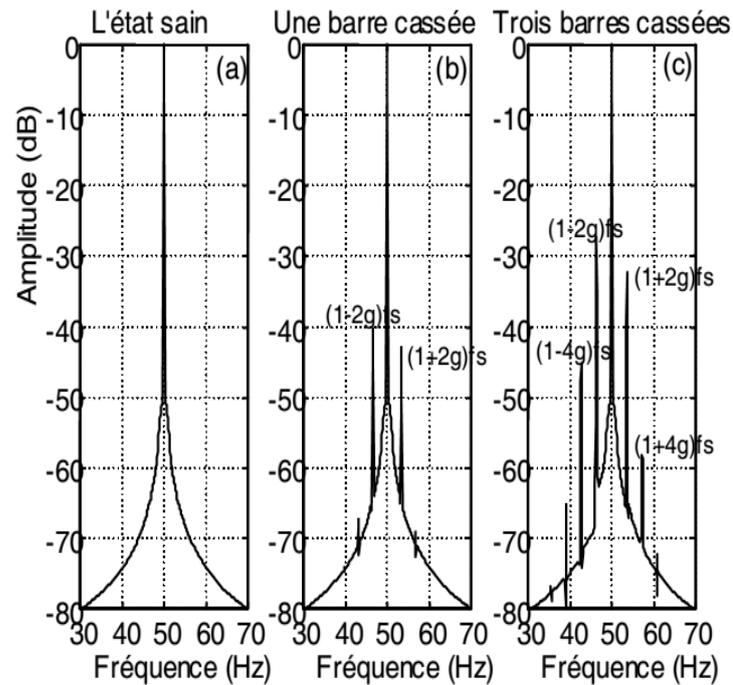
Le rotor avec ce défaut de structure crée en plus du champ rotorique direct qui tourne à $g\omega_s$ par rapport au rotor, un champ inverse qui lui tourne à $-g\omega_s$ dans le repère rotorique.

L'interaction de ces champs avec celui issu du bobinage statorique donne naissance à un couple électromagnétique somme d'une composante directe constante et d'une composante inverse sinusoïdale de pulsation $2g\omega_s$

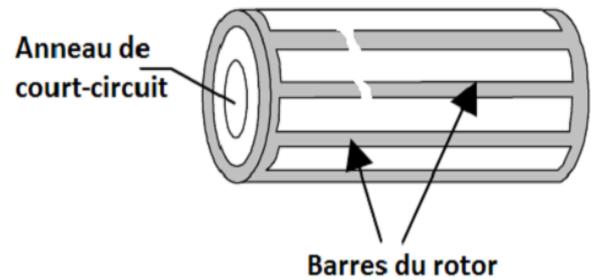
Les f.e.m. induites au stator comportent, à cause de cette oscillation de la vitesse, des composantes en ω_s , $(1-2g)\omega_s$, $(1+2g)\omega_s$ et $(1-4g)\omega_s$

Donc : $F_{\text{defaut}} = (1 \pm 2kg) f_s$

K=le nombre de barres cassées

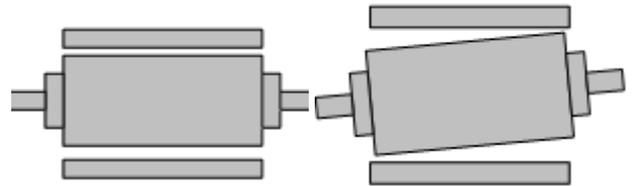


analyse spectrale par la transformée de Fourier rapide du courant statorique

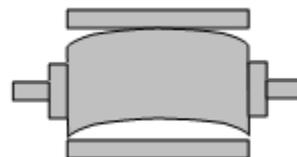


5-3 Excentricité statique et dynamique

Excentricité statique: le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.



Excentricité dynamiques : le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.



diagnostic de la machine asynchrone

L'excentricité mixte est la somme des deux cas présentés ci-avant

L'excentricité dans les machines à induction augmente l'apparition des composantes additionnelles dans le spectre du courant, leurs fréquences sont données par.

$$f_{excen} = f_s (kn \pm n_e) \frac{(1-g)}{p} \pm n_w$$

n: le nombre d'encoches rotoriques

$n_e=0$ dans le cas d'une excentricité statique et $n_e=1$, dans le cas d'une excentricité dynamique

$k=1,2,3,\dots$ et $n_w=1,3,5,7,\dots$

5-4 Défaillances mécaniques

DÉFAUTS AU NIVEAU DES ROULEMENTS :

- Défaits au niveau d'une bille
- Défaits sur la bague intérieure
- Défaits sur la bague extérieure

Défauts au niveau des roulements

$$f_{roul} = |f_s - kf_v|$$

d'où: $k=1,2,3,\dots$, et f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations

Défauts au niveau d'une bille

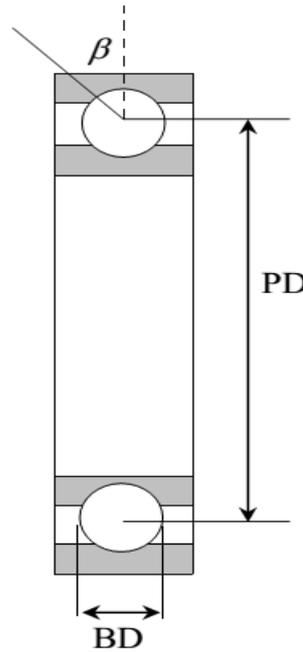
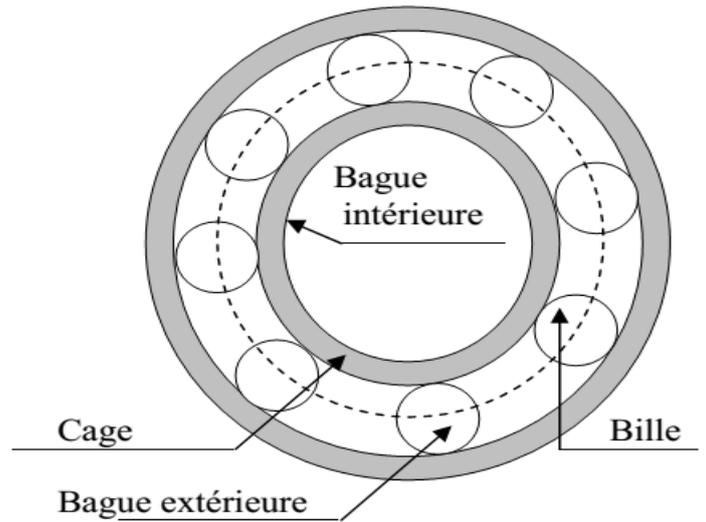
$$f_b = \frac{PD}{BD} f_{rot} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right)^2 \right]$$

Défauts sur la bague intérieure

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 + \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right]$$

Défauts sur la bague extérieure

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right]$$



BD :le diamètre d'un élément roulant

PD: la distance entre les centres des billes diamétralement opposées

n_b : le nombre d'éléments roulants

β angle de contact des billes avec les bagues du roulement

f_{rot} :la fréquence de rotation du rotor

6- Modèles de la machine asynchrone dédiés à la simulation du défaut rotorique

6-1 modele multi-enroulements de la machine asynchrone

les equation de tension statorique dans la réper d-q donne par

$$V_{dqs} = R_s i_{dqs} + \omega_r P \left(\frac{\pi}{2} \right) \Phi_{dqs} + \frac{d}{dt} \Phi_{dqs}$$

P(pi/2)=

Le equation de flux statorique donne par

$$\Phi_{dqs} = \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 \\ 0 & L_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dqs} \\ i_{dqs} \end{bmatrix} - M_{sr} \begin{bmatrix} \dots & \cos ka & \dots \\ \dots & \sin ka & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rk} \\ i_{rk} \end{bmatrix}$$

$a = p \frac{2\pi}{N_r}$ est l'angle électrique entre deux mailles rotoriques

la mutuelle stator-rotor entre la phase statorique met la maille rotorique k

$$M_{sr} = \frac{4}{\pi} \frac{\mu_0}{ep^2} N_s LR \sin\left(\frac{a}{2}\right)$$

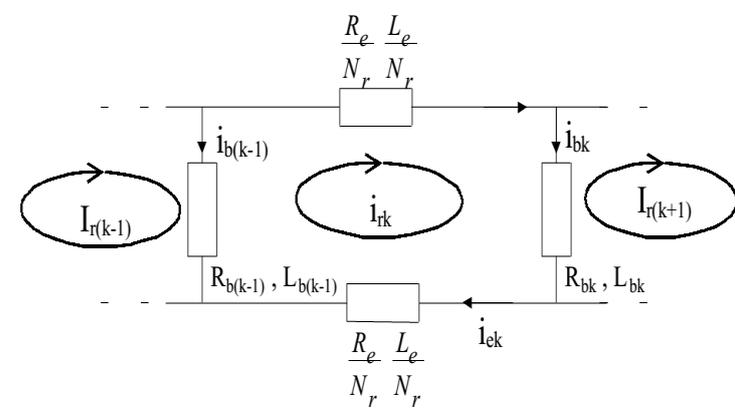
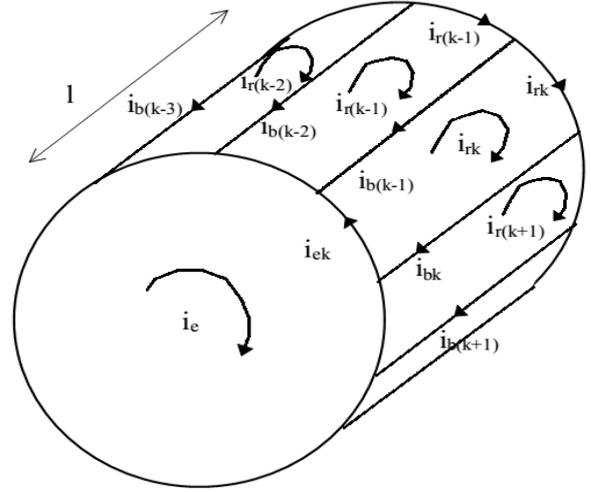
I_{rk} : court de une maille rotorique

Donc :

$$\begin{bmatrix} V_{dqs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_r L_{sc} & \dots & \omega_r M_{sr} \sin ka & \dots \\ \omega_r L_{sc} & R_s & \dots & -\omega_r M_{sr} \cos ka & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dqs} \\ i_{dqs} \\ \dots \\ i_{rk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & \dots & -M_{sr} \cos ka & \dots \\ 0 & L_{sc} & \dots & -M_{sr} \sin ka & \dots \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{dqs} \\ i_{rk} \end{bmatrix}$$

Equations au rotor

La figure suivant présente une boucle k du rotor et montre les conventions choisies pour les courants



L'équation de cette boucle est :

$$\frac{R_e}{N_r} i_{rk} - R_{b(k-1)} i_{b(k-1)} + \frac{R_e}{N_r} i_{ek} + R_{bk} i_{bk} + \frac{d}{dt} \Phi_{rk} = 0$$

Avec

$$i_{ek} = i_{rk} - i_e$$

$$i_{bk} = i_{rk} - i_{r(k+1)}$$

$$0 = \frac{R_e}{N_r} I_{rk} - R_{b(k-1)} [I_{r(k-1)} - I_{rk}] + \frac{R_e}{N_r} [I_{rk} - I_e] + R_{bk} [I_{rk} - I_{r(k+1)}] + \frac{d\Phi_{rk}}{dt}$$

Le flux totalisé Φ_{rk} pour un circuit élémentaire d'indice k est composé de la somme des termes suivants :

1-Le flux principal $L_{rp} \cdot i_{rk}$

2-Le flux mutuel avec les autres circuits du rotor

$$M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} i_{rj}$$

3-Le flux mutuel avec le stator après la transformation choisie, en négligeant la composante homopolaire

$$-\frac{3}{2} M_{sr} \begin{bmatrix} \vdots & \vdots \\ \cos ka & \sin ka \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} [i_{dqs}]$$

4-Les flux de fuites rotoriques (barres et anneaux) :

$$L_b (i_{rk} - i_{r(k-1)}) + \frac{L_e}{N_r} i_{rk} + L_b (i_{rk} - i_{r(k+1)}) + \frac{L_e}{N_r} (i_{rk} - i_e)$$

l'équation devient donc :

$$R_{bk} i_{r(k-1)} + \left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b(k-1)} + R_{bk} \right) i_{rk} - R_{bk} i_{r(k+1)} - \frac{R_e}{N_r} i_e + \frac{d}{dt} \Phi_{rk} = 0$$

d'où :

$$\Phi_{rk} = \left(L_{rp} + 2L_b + 2 \frac{L_e}{N_r} \right) i_{rk} + M_{sr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} i_{rj} - \frac{3}{2} M_{sr} [\cos ka \quad \sin ka] [i_{dqs}] - L_b (i_{r(k-1)} + i_{r(k+1)}) - \frac{L_e}{N_r} i_e$$

Il faut enfin compléter le système d'équations des circuits du rotor par celle de l'anneau de court circuit.

On a alors

$$\frac{R_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{ek} + \frac{L_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \frac{d}{dt} i_{ek} = 0$$

soit

$$\frac{R_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} + \frac{L_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \frac{d}{dt} i_{rk} - R_e i_e - L_e \frac{d}{dt} i_e = 0$$

La mise en équation du modèle de la machine conduit à un système complet (I) avec $(N_r + 3)$ équations électriques

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = [L] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \end{bmatrix} + [R] \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

Le couple électromagnétique donné par :

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot M_{sr} \left(i_{ds} \sum_{k=0}^{N_r-1} \sin ka \cdot i_{rk} - i_{qs} \sum_{k=0}^{N_r-1} \cos ka \cdot i_{rk} \right)$$

SIMULATION DE RUPTURE DE BARRES AU ROTOR

Pour simuler la rupture de barre, il faut forcer à **zéro** ou **diminuer fortement le courant** parcourant la barre k. Pour ce faire, il suffit d'en **augmenter suffisamment la résistance**.

Calcul des inductances

l'inductance cyclique du Stator

$$L_{sc} = \frac{3}{2} L_{sp} + l_{sl} = \frac{6}{\pi} \mu_0 \frac{N_s^2}{ep^2} RL + L_{sl}$$

Rotor

l'inductance principale d'une maille rotorique

$$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} 2\pi LR$$

l'inductance mutuelle entre deux maille rotorique

$$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} 2\pi LR$$

Stator-Rotor

la mutuelle stator-rotor entre la phase statorique met la maille rotorique k

$$M_{sr} = \frac{4}{\pi} \frac{\mu_0}{ep^2} N_s LR \sin\left(\frac{a}{2}\right)$$

$a = p \frac{2\pi}{N_r}$ est l'angle électrique entre deux mailles rotoriques

$$[L] = \left[\begin{array}{cc|cccccc|c}
 L_{sc} & 0 & \dots & \dots & -M_{sr} \cos ka & \dots & \dots & 0 \\
 0 & L_{sc} & \dots & \dots & -M_{sr} \sin ka & \dots & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & -\frac{L_e}{N_r} \\
 \vdots & \vdots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & \vdots \\
 -\frac{3}{2}M_{sr} \cos ka & -\frac{3}{2}M_{sr} \sin ka & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & -\frac{L_e}{N_r} \\
 0 & 0 & -\frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{N_r} & L_e
 \end{array} \right]$$

} $[L_r]$

$$[R] = \left[\begin{array}{cc|cccccc|c}
 R_s & -\omega_r L_{sc} & \dots & \dots & M_{sr} \omega_r \sin ka & \dots & \dots & 0 \\
 \omega_r L_{sc} & R_s & \dots & \dots & -M_{sr} \omega_r \cos ka & \dots & \dots & 0 \\
 0 & 0 & R_{b0} + R_{b(N_r-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{b0} & 0 & \dots & -R_{b(N_r-1)} & -\frac{R_e}{N_r} \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & 0 & -R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{bk} & 0 & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\
 0 & 0 & -R_{b(N_r-1)} & 0 & \dots & -R_{b(N_r-2)} & R_{b(N_r-1)} + R_{b(N_r-2)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -\frac{R_e}{N_r} \\
 0 & 0 & -\frac{R_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & -\frac{R_e}{N_r} & R_e
 \end{array} \right]$$

} $[R_r]$

exemple :

Les paramètres de la machine utilisés pour la simulation du modèle multienroulements.

- R=0.0516 m** Rayon moyen à l'entrefer
- L=0.125 m** Longueur active du circuit magnétique
- e=0.000172 m** Entrefer
- Ns=80** Nombre de spires statoriques par phase
- Nr=28** Nombre de barres rotoriques
- p=1** Nombre de paires de pôles
- Rs=2.86** Résistance statorique
- Lsf =0.009594 H** Inductance de fuites statorique
- Lb=1.27*10⁻⁶ H** Inductance d'une barre rotorique
- Le=1.27*10⁻⁶ H** Inductance totale de l'anneau de court-circuit
- Rb=2.856*10⁻⁵** Résistance d'une barre rotorique
- Re=1.574*10⁻⁵** Résistance totale de l'anneau de court-circuit
- u0=4*pi*10⁻⁷ H m⁻¹**

6-2 Modèle de taille réduite

Transformation de Clarke généralisée

nous avons appliqué une transformation de Clarke généralisée (Nr) qui permet de passer des Nr grandeurs équilibrées vers deux grandeurs dq

$$\begin{bmatrix} I_{r0} \\ \vdots \\ I_{rk} \\ \vdots \\ I_{r(N_r-1)} \end{bmatrix} \xrightarrow{T_r^{-1}} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix}$$

Avec

$$T_r^{-1} = \frac{2}{N_r} \begin{bmatrix} \dots & \cos ja & \dots \\ \dots & -\sin ja & \dots \end{bmatrix}$$

la transformation directe

$$T_r = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots \\ \cos ka & -\sin ka \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ \vdots \\ I_{rk} \\ \vdots \\ I_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cos ka & -\sin ka & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_e \end{bmatrix}$$

La nouvelle matrice d'inductance du modèle dq équivalent

$$[L_{eq}] = {}^a T_r^{-1} [L]^a T_r =$$

$$= \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & \frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 \\ -\frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{bmatrix}$$

avec

$$L_{rc} = L_{rp} - M_{rr} + 2 \frac{L_e}{N_r} + 2L_b(1 - \cos a)$$

la résistance :

$$[R_{eq}] = {}^a T_r^{-1} [R]^a T_r =$$

diagnostic de la machine asynchrone

$$\begin{bmatrix} R_s & -\omega L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2} \omega M_{sr} & 0 \\ \omega L_{sc} & R_s & -\frac{N_r}{2} \omega M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e \end{bmatrix}$$

Avec

$$R_r = 2 \frac{R_e}{N_r} + 2R_b(1 - \cos a)$$

Le modèle complet de la machine est maintenant réduit, nous avons donc un système d'équations d'ordre 5

$$\begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & \frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 \\ -\frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \\ V_e \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & \frac{N_r}{2} \omega_r M_{sr} & 0 \\ 0 & R_s & \frac{N_r}{2} \omega_r M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_e \end{bmatrix}$$

Dans le cas où le défaut concernerait la barre k, la nouvelle matrice de résistances rotoriques s'écrit:

$$[R_{rf}] = [R_r] + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots \\ 0 & \dots 0 & 0 & 0 & 0 \dots \\ 0 & \dots 0 & R'_{bk} & -R'_{bk} & 0 \dots \\ 0 & \dots 0 & -R'_{bk} & R'_{bk} & 0 \dots \\ 0 & \dots 0 & 0 & 0 & 0 \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_{[R_r']}$$

la matrice résistances finale

$$[R_{rfdq}] = \begin{bmatrix} R_{rdd} & R_{rdq} \\ R_{rqd} & R_{rqq} \end{bmatrix}$$

où les quatre termes de cette matrice sont :

$$R_{rdd} = 2R_b(1 - \cos a) + 2 \frac{R_e}{N_r} + \frac{2}{N_r} (1 - \cos a) \sum_k R_{bfk} (1 - \cos(2k-1)a)$$

$$R_{rqq} = R_{rdd}$$

$$R_{rdq} = -\frac{2}{N_r} (1 - \cos a) \sum_k R_{bfk} \sin(2k-1)a$$

$$R_{rqd} = R_{rdq}$$

l'indice k caractérise une barre cassée

R_{bfk} : résistance d'une barre rotorique cassée.

l'expression du couple donne par

$$C_e = \frac{3}{2} p \frac{N_r}{2} M_{sr} (i_{ds} \cdot i_{qr} - i_{qs} \cdot i_{dr})$$

la simulations la rupture de la première barre (k=0) par une augmentation de 11 fois de sa résistance