

Etude de cas

Moteur Asynchrone:

- 1- Bobiné:
 - Cas seins
 - Cas avec défaut de court-circuit entre spires
- 2- A cage:
 - Cas seins
 - Cas avec défaut de cassure de barre
- 3- Défaut d'excentricité:
 - Analyse par courant statorique
 - Analyse par vibrations et bruits sonores

Onduleur de tension:

- 1- Fonction de commutation de l'onduleur sans défauts
- 2- Alimentation de la MAS par onduleur de tension
- 3- Détection de défauts par le principe de génération des résidus
- 4- Détection de défauts par l'analyse de la trajectoire du vecteur courant

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

Défaut d'un capteur:

- 1- Effet d'un défaut de capteur de vitesse/position sur la commande
- 2- Effet d'un défaut de capteur de courant sur la commande

Moteur Asynchrone

Mise en équation du modèle MAS à rotor bobiné :

1. Modèle de la machine asynchrone triphasée

Compte tenu que la répartition des enroulements statoriques et la géométrie propre de la machine sont très complexes, il est généralement nécessaire de considérer des hypothèses simplificatrices pour avoir un modèle simple de la machine.

Hypothèses simplificatrices

- la machine est de constitution symétrique,
- la saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés,
- les relations entre les flux et les courants sont linéaires,
- les résistances des enroulements ne changent pas avec la température,
- on considère que la densité du courant dans une section élémentaire des conducteurs est uniforme, l'effet de peau est négligé,
- on admet de plus que la force magnétomotrice créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale,
- l'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligé,
- les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales.

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

A. Equations électriques de la MAS

En tenant compte des hypothèses précédentes, les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine asynchrone bobinée s'écrivent comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} [V_s] = [R_s] [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \\ [0] = [R_r] [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \end{array} \right\}$$

$$\text{Avec, } [V_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}, [I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

B. Equations magnétiques de la MAS

Les équations magnétiques sont données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} [\Phi_s] = [L_{ss}] [I_s] + [M_{sr}] [I_r] \\ [\Phi_r] = [L_{rr}] [I_r] + [M_{rs}] [I_s] \end{array} \right\}$$

$$\text{Avec, } [L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}, [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}.$$

La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

$$[M_{sr}] = m_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix}; [M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

En remplaçant les équations magnétiques dans les équations électriques, on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] [I_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_{ss}] [I_s] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}] [I_r] \} \\ [V_r] = [R_r] [I_r] + \frac{d}{dt} \{ [L_{rr}] [I_r] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}] [I_s] \} \end{cases}$$

C. Equation mécanique de la MAS

Elle est définie par la relation suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - k_f \Omega$$

Où, le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante :

$$C_{em} = p [I_s]^T \frac{d}{d\theta} [M_{sr}] [I_r]$$

La résolution analytique dans le repère triphasé (a, b, c) est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de l'angle électrique de rotation de la machine θ . L'application de la transformation de Park facilite la résolution du système.

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

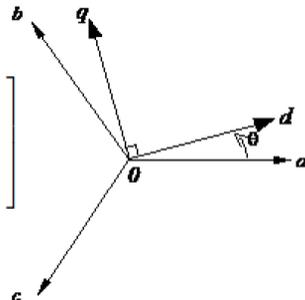
Transformation de Park

La transformation de Park dont le principe est montré par la figure suivante, consiste à transformer un système triphasé (a, b, c) en un système diphasé équivalent (d, q).

Les matrices de passage directe $[P(\vartheta)]$ et inverse $[P(\vartheta)]^{-1}$ sont définies comme suit :

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

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



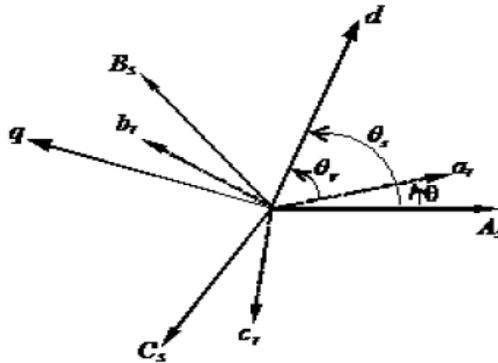
Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

La machine est schématisée par trois phases statoriques A_s, B_s et C_s et trois phases rotoriques a_r, b_r, c_r .

$$\text{On a : } \omega = p\Omega = \frac{d\theta}{dt}; \quad \theta_r = \theta_p - \theta$$

$$\omega_p = \frac{d\theta_p}{dt} : \text{Vitesse angulaire des axes } (d, q) \text{ par rapport au stator.}$$

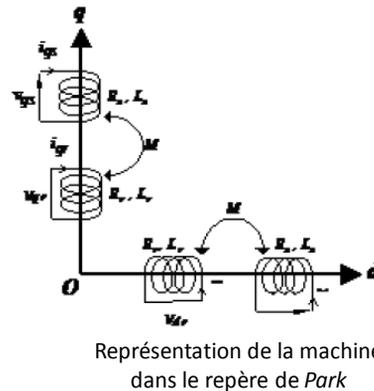
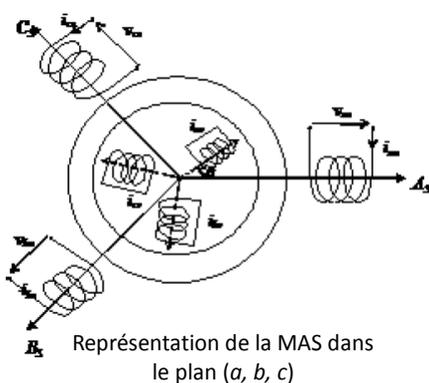
$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} : \text{Vitesse angulaire des axes } (d, q) \text{ par rapport au rotor.}$$



Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

Modélisation de la MAS dans le repère de Park

La transformation de *Park* consiste à appliquer aux courants, tensions et flux un changement de variables en faisant intervenir l'angle entre les axes des enroulements et les nouveaux axes d et q . Ceci peut être interprété comme la substitution, aux enroulements réels (a_s, b_s, c_s) et (a_r, b_r, c_r), des enroulements fictifs (d_s, q_s) et (d_r, q_r), dont les axes magnétiques sont liés aux axes d et q . Dans le repère de Park (d, q) tournant à la vitesse angulaire $\omega_p = d\theta_p/dt$, les équations des tensions au stator et au rotor sont :



Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_p \phi_{qr} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_p \phi_{dr} \\ 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_p - \omega) \phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_p - \omega) \phi_{dr} \end{cases}$$

Avec :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad \begin{cases} \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases}$$

Où $L_s = l_s - M_s$ est l'inductance cyclique statorique, $L_r = l_r - M_r$ est l'inductance cyclique rotorique et $M_{sr} = M_{rs} = M$ est l'inductance mutuelle cyclique entre rotor et stator.

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

2. Choix du référentiel

Le référentiel est le système d'axes (d, q) associé à la vitesse de rotation ω_p . On distingue trois types de référentiels qu'on choisit selon le cas étudié.

▪ Référentiel lié au stator

C'est le référentiel le mieux adopté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il se traduit par la condition :

$$\frac{d\theta_p}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega$$

▪ Référentiel lié au rotor

C'est le choix quand on a besoin d'étudier des grandeurs rotoriques. Il se traduit par la condition :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_p}{dt} = \omega$$

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

▪ Référentiel lié au champ tournant

C'est pour l'étude de la commande. Dans ce cas $\omega_p = \omega_s$ (ω_s : vitesse de synchronisme)

$$\frac{d\theta_p}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} \Rightarrow \omega_p = \omega_s$$

On considère le référentiel lié au stator. Le modèle de la machine asynchrone triphasée s'écrit alors dans le repère de *Park* comme suit :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} \end{cases}, \begin{cases} 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} + \omega \phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - \omega \phi_{dr} \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \\ J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \Omega \end{cases}$$

Avec

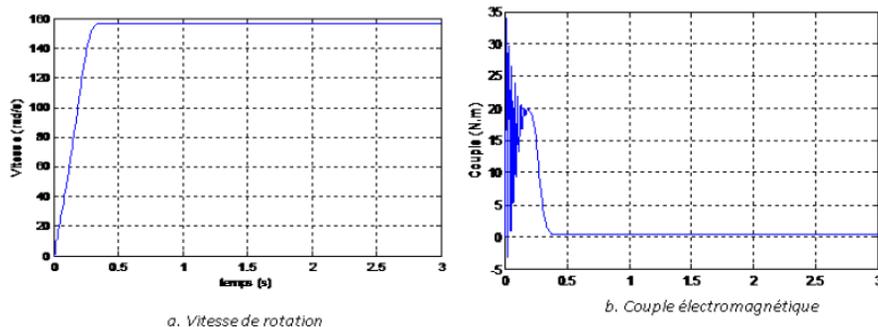
$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases}, \begin{cases} \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases}$$

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

Résultats de simulation

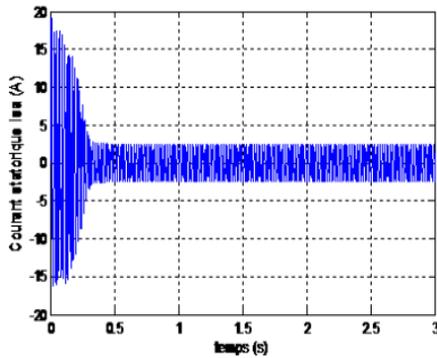
• Simulation de la machine asynchrone à vide

La figure suivante illustre les allures de la vitesse et du couple pour un **fonctionnement sain à vide**. On remarque que la vitesse atteint le **régime permanent** $\omega_r = 157 \text{ rad/s}$ et le couple tend vers le **couple à vide**. Au **démarrage (régime transitoire)** les courants statoriques sont importants et le couple est fortement pulsatoire, donc peuvent être, en cas de **répétitions excessives**, à l'origine d'un **sur-échauffement** de la machine et **d'un bruit** dans la partie mécanique.

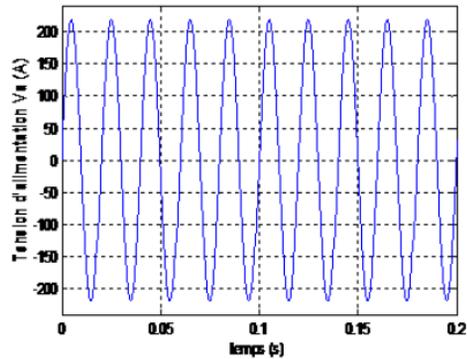


Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

Les deux figures du bas présentent les allures du courant dans la phase statorique a et la forme de la tension d'alimentation de la machine.



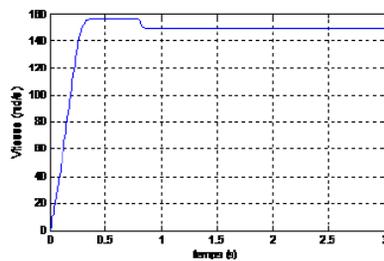
c. Courant de phase statorique "a"



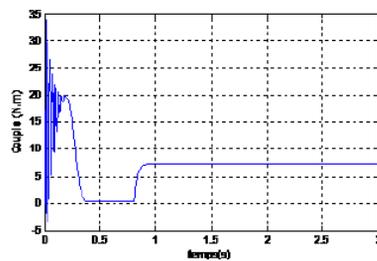
d. Tension d'alimentation

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

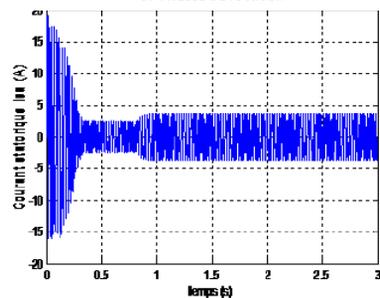
- Simulation de la machine asynchrone en charge



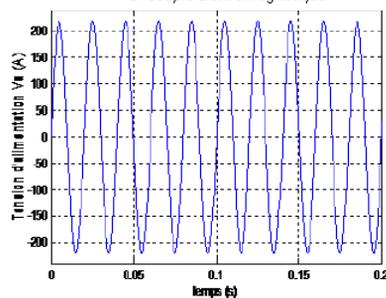
a. Vitesse de rotation



b. Couple électromagnétique



c. Courant de phase -a-

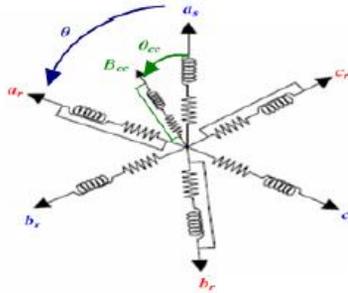


d. Tension d'alimentation

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

Modélisation de défaut de Court-circuit

Le diagnostic à base de modèles analytiques considéré pour la machine asynchrone doit décrire fidèlement le comportement de la machine. Ceci n'est faisable qu'en intégrant certains paramètres de la machine, ce qui présente donc un problème de précision lors de l'identification de ces paramètres et en conséquence, dans la précision de la méthode de diagnostic. Nous avons utilisé un modèle mathématique pour le défaut statorique. La figure suivante, présente le schéma des enroulements statoriques de la machine, ainsi que la partie présentant le court circuit. En considérant cette représentation, nous avons développé un modèle mathématique en vue du diagnostic.



Enroulements triphasés avec un court-circuit

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

Les équations des tensions et flux de la machine à induction en présence de défaut de court-circuit sont :

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

$$[0] = [R_r] [I_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r]$$

$$[0] = [R_{cc}] [I_{cc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{cc}]$$

Où, les matrices des résistances statoriques $[R_s]$ et rotoriques $[R_r]$ sont définies par :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_{sa} & 0 & 0 \\ 0 & r_{sb} & 0 \\ 0 & 0 & r_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} r_{ra} & 0 & 0 \\ 0 & r_{rb} & 0 \\ 0 & 0 & r_{rc} \end{bmatrix}$$

Les équations des flux sont :

$$\begin{cases} [\phi_s] = [L_s] [I_s] + [M_{sr}] [I_r] + [M_{scc}] [I_{cc}] \\ [\phi_r] = [M_{rs}] [I_s] + [L_r] [I_r] + [M_{rcc}] [I_{cc}] \\ [\phi_{cc}] = [M_{cs}] [I_s] + [M_{ccr}] [I_r] + [L_{cc}] [I_{cc}] \end{cases}$$

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

La matrice des inductances statoriques est :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{sa} & m_s & m_s \\ m_s & L_{sb} & m_s \\ m_s & m_s & L_{sc} \end{bmatrix}$$

Et celle des inductances rotoriques est :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{ra} & m_r & m_r \\ m_r & L_{rb} & m_r \\ m_r & m_r & L_{rc} \end{bmatrix}$$

La matrice des inductances mutuelles est exprimée selon l'expression suivante :

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{sara} \cos(\theta) & M_{sarb} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{sarc} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{sbrc} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{sbrb} \cos(\theta) & M_{sbrc} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ M_{sbra} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{sbrb} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{sbrc} \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

En supposant que : $r_{si} = R_s; r_{ri} = R_r; L_{fsi} = L_f; L_{fri} = 0$

$$L_{si} = L_{psi} + L_{fsi}; L_{ri} = L_{pri} + L_{fri}$$

$$m_s = \frac{-L_{sji}}{2}; m_r = \frac{-L_{rji}}{2}.$$

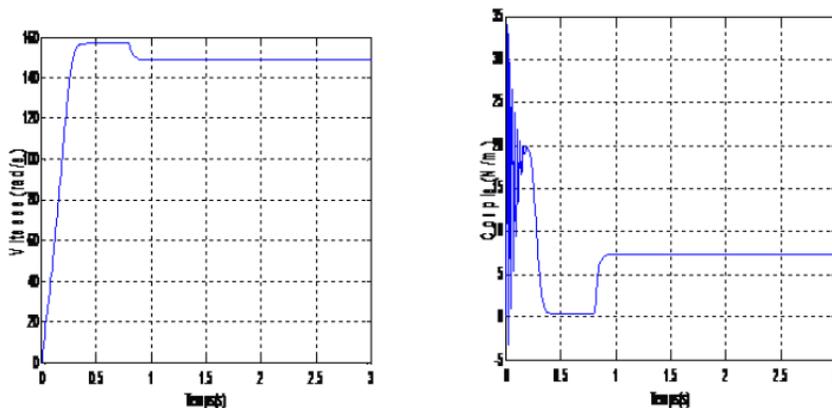
En cas de défaut, on peut écrire les différentes inductances et les mutuelles de la bobines ρ_{cc} par rapport aux phases statoriques et rotoriques de la machine à induction.

$$L_{cc} = \rho_{cc}^2 (L_p + L_f) \quad \rho_{cc} = \frac{n_{cc}}{n_s}$$

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

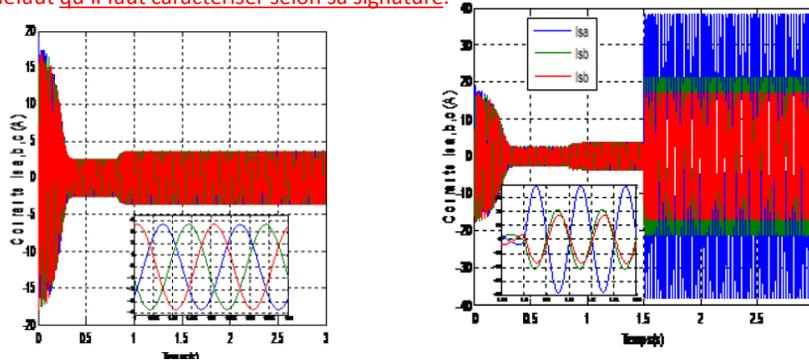
Simulations et Interprétations

Les figures au-dessous présentent les grandeurs de la machine lorsqu'elle est alimentée directement par une source purement sinusoïdale. Elle illustre, la vitesse de rotation, le couple électromagnétique et les courants statoriques ainsi qu'un zoom sur la partie où la charge est appliquée. Lors de cet essai, on note un démarrage à vide durant la première seconde, suivi de l'application d'une charge de 7 Nm à l'instant 0.8 seconde.



Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

La figure (b) montre les trois courants statoriques des phases de la machine lors d'un défaut de court circuit entre cinq (5) spires de la phase statorique a provoqué à l'instant $t = 1.5$ seconde. **L'augmentation des amplitudes des courants statoriques est un indice primaire de la présence de défaut qu'il faut caractériser selon sa signature.**



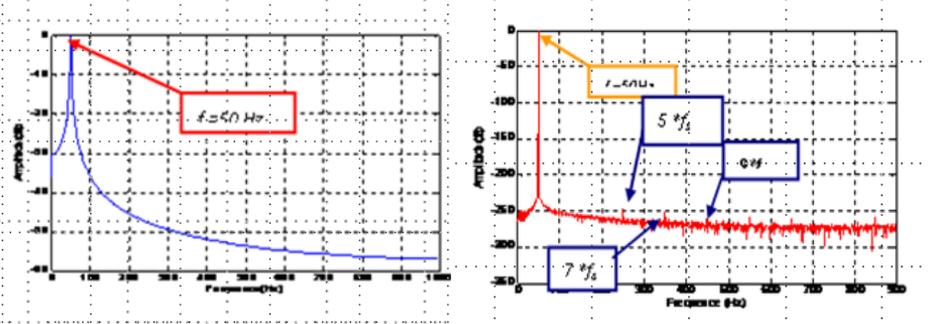
(a) Courant statorique sans défauts

(b) Courant statorique avec défaut de court circuit entre spires

- On remarque que les amplitudes des courants ne sont pas égales, donc on peut dire que les courts circuits entre spires d'une phase statorique affecte de nature différente les autres phases.
- Dans la phase défectueuse « a » le courant augmente jusqu'à la valeur de (38 A), (22 A) pour la phase « b » et finalement le courant dans la phase « c », prend la valeur de (18 A).

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

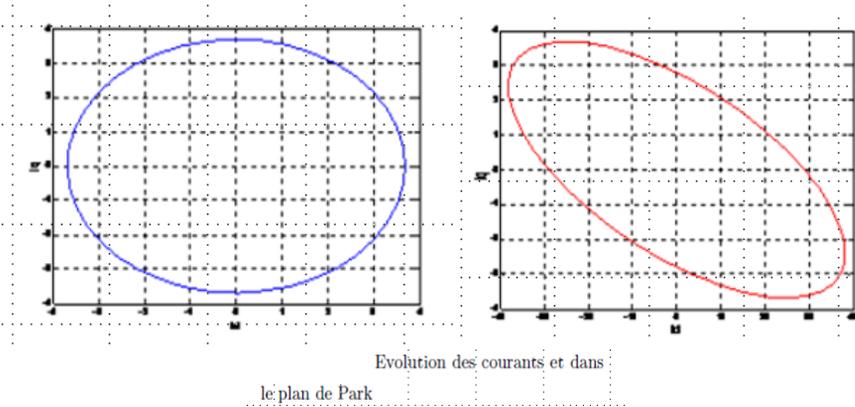
La figure présente **les analyses fréquentielles** des courants statoriques de la phase a pour un moteur sain et en présence de court-circuit, respectivement. On remarque que dans le **cas d'un fonctionnement sain seul la fondamentale apparaît**. Ce résultat sera considéré comme référence. Dans le cas de présence de court-circuit, on remarque l'apparition des fréquences caractéristiques des défauts d'ordre, $fc = nfs$ avec $n = 5, 7, 9, \dots$



Analyse fréquentielle du courant statorique

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

La deuxième méthode d'analyse des courants statoriques est basée sur l'évolution des courants i_d et i_q dans le plan de Park. Dans le cas du **moteur sans défaut**, la courbe de Lissajous $i_{sq} = f(i_{sd})$ prend une forme circulaire centrée à l'origine. Dans le cas du **moteur avec défaut** de court-circuit de la phase a la courbe de Lissajous change sa forme et devient ovale. Donc, en fonction de la forme et la position on peut diagnostiquer et évaluer la sévérité des défauts de court-circuit entre spires.



Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

deux équations sont données comme indicateur de présence de défaut de court-circuit entre spires

fréquences de court-circuit au stator

$$f_{st} = f_s * \left[k \pm n \frac{(1-s)}{P} \right]_{\substack{n=1,2,3 \\ k=1,3,5}} \quad (1)$$

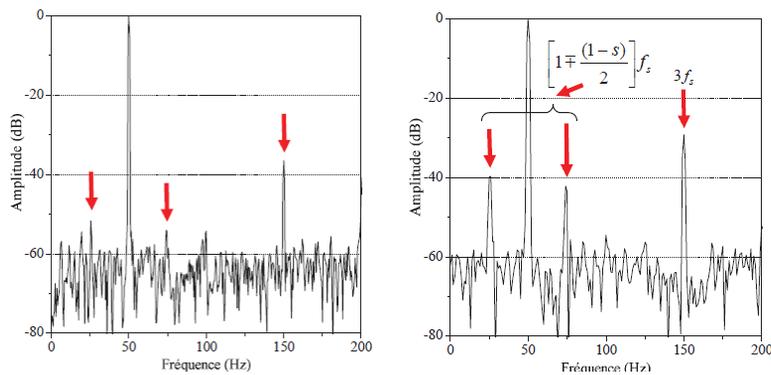
avec f_s une fréquence dépendant du nombre de spires court-circuitées au stator, $n=1,2,3..$, $k=1,3,5..$ entier, P est le nombre de paire de pôle, et s le glissement.

fréquences de court-circuit autour des harmoniques d'encoche rotoriques

$$f_{st} = f_s * \left[1 \pm \lambda n_b \frac{(1-s)}{P} \right]_{\lambda=1,2,3..} \quad (2)$$

avec λ un entier, et n_b nombre de barres rotoriques.

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid



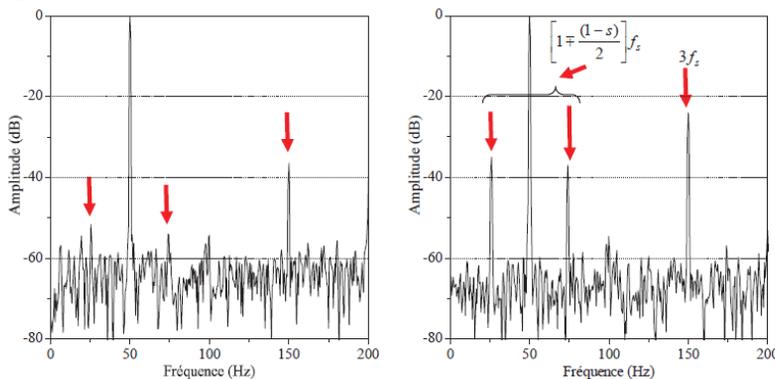
Spectre du courant statorique aux basses fréquences [0-200] Hz, machine saine (gauche), machine avec 10 % de spires d'une phase en court-circuit (droite)

La figure montre l'harmonique fondamental du spectre du courant statorique de la machine asynchrone fonctionnant à 25 % de charge.

D'une part on peut voir des composantes de fréquence à $f_s - f_r$ et $f_s + f_r$ qui sont déjà présentes mais de faibles amplitudes dans le spectre de la machine saine causées par l'excentricité naturelle. D'autre part, on observe l'augmentation de ces mêmes composantes données par l'équation 1 générées par 10% de spires court-circuitées de la machine asynchrone.

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

lors du court-circuit de 20% de spires, on remarque une augmentation substantielle des amplitudes des fréquences $f_s - f_r$ et $f_s + f_r$ données aussi par l'équation 1.

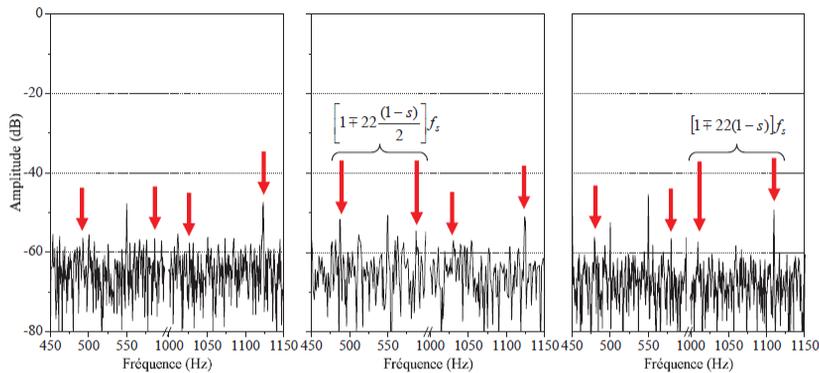


Spectre du courant statorique aux basses fréquences [0-200] Hz, machine saine (gauche), machine avec 20 % de spires d'une phase en court-circuit (droite)

Les deux figures précédentes, montre la variation significative de l'amplitude de la fréquence $3f_s$ qui est fonction du degré de court-circuit et de la présence naturelle du déséquilibre de l'alimentation.

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

Dans les trois figures suivantes, nous remarquons une atténuation de l'amplitude des harmoniques d'encoches rotoriques donnés par l'équation 2 respectivement à 10 et 20% de spires court-circuitées, d'où l'influence du court-circuit sur ces harmoniques est faible, d'où ces indicateurs restent difficilement exploitables.



Spectre du courant statorique autour du RSH, machine saine (gauche), machine avec 10% de spires en court-circuit (milieu) et machine avec 20% de spires en court-circuit (droite)

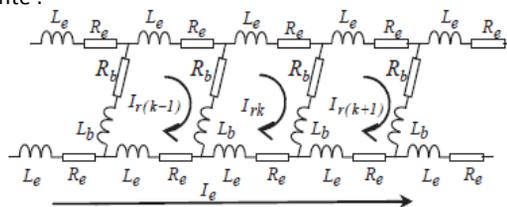
Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

Mise en équation du modèle MAS à cage :

Considérons une machine à induction à cage d'écureuil ayant au stator trois enroulements identiques et symétriques. Chacun de ces enroulements est traité en tant qu'enroulement séparé. Le rotor est considéré comme un circuit maillé, c'est-à-dire constitué d'un nombre (nb) de barres identiques et équidistantes court-circuitées aux deux extrémités par deux anneaux identiques. La machine est supposée en régime linéaire (non saturée), sans pertes fer, ni effet de peau avec un entrefer lisse.

Les équations électriques : les tensions statoriques et rotoriques

Les équations primaires de la machine à induction peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante :



Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

$$[V_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} [\psi_s]$$

Les tensions rotoriques sont données par :

$$\begin{bmatrix} [V_r] \\ [V_e] \end{bmatrix} = [0] = \begin{bmatrix} [R_r] & R_e \\ L' & n_b R_e \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [i_r] \\ [i_e] \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} [\psi_r]$$

Le flux statorique :

$$[\psi_s] = [L_s] \cdot [i_s] + [L_{sr}] \cdot [i_r]$$

Le flux rotorique :

$$[\psi_r] = \begin{bmatrix} [\psi_{rr}] \\ [\psi_{re}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{rr}] \cdot [i_r] \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_e & L_e \\ L_e L & n_b L_e \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [i_r] \\ [i_e] \end{bmatrix}$$

avec :

$$[V_s] = [V_{sa} \ V_{sb} \ V_{sc}]^t \text{ Vecteur des tensions statoriques}$$

$$\begin{bmatrix} [V_r] \\ [V_e] \end{bmatrix} = [V_{r1} \ V_{r2} \ \dots \ V_{rn_b} \ V_e]^t = [0] \text{ Vecteur des tensions rotoriques}$$

$$[i_s] = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^t \text{ et } [\psi_s] = [\psi_{sa} \ \psi_{sb} \ \psi_{sc}]^t \text{ Les courants et flux des différents enroulements statoriques.}$$

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

$$[i_r] = [i_{r1} \ \dots \ i_{rn_b}]^t, \quad [\psi_r] = [\psi_{r1} \ \dots \ \psi_{rn_b}]^t \text{ Les courants et flux des différentes mailles rotoriques.}$$

$[R_s]$ et $[R_r]$ représentent les matrices des résistances statoriques et rotoriques respectivement.

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

$[R_r]$ est une matrice symétrique de dimensions $(n_b \times n_b)$ représentant les différentes mailles rotoriques, où R_b est la résistance d'une barre et R_e d'une portion d'anneau de court-circuit

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & \dots & -R_b \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & \dots & 0 \\ 0 & -R_b & 2(R_b + R_e) & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ -R_b & 0 & 0 & \dots & 2(R_b + R_e) \end{bmatrix}$$

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

$[L_s]$ est la matrice des inductances propres statoriques de dimensions (3×3) dont les paramètres sont les inductances propres de chaque phase L_{si} et les mutuelles entre phases statoriques L_{sij}

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{sa} & L_{sa,b} & L_{sa,sc} \\ L_{sb,sa} & L_{sb} & L_{sb,sc} \\ L_{sc,sa} & L_{sc,b} & L_{sc} \end{bmatrix}$$

$[L_r]$ est la matrice des inductances rotoriques de dimensions $(n_b \times n_b)$ composées par l'inductance de fuite d'une barre L_b et l'inductance d'une portion de l'anneau de court-circuit L_e , en plus insérant les inductances propres aux mailles L_{mr} et les inductances mutuelles L_{rij} entre la maille i et la maille j .

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{mr} + 2(L_b + L_e) & L_{r1r2} - L_b & L_{r1r3} & \cdots & L_{r1rn_b} - L_b \\ L_{r2r1} - L_b & L_{mr} + 2(L_b + L_e) & L_{r2r3} - L_b & \cdots & L_{r2rn_b} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ L_{rn_b r1} - L_b & L_{rn_b r2} & L_{rn_b r3} & \cdots & L_{mr} + 2(L_b + L_e) \end{bmatrix}$$

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

Les matrices $[L_{sr}]$ et $[L_{rs}] = [L_{sr}]^t$ sont de dimensions $(3 \times n_b)$ et $(n_b \times 3)$ respectivement, comprenant les inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et les mailles rotoriques.

$$[L_{sr}] = \begin{bmatrix} [M_{sr}] & [0]_{3 \times 1} \end{bmatrix}$$

où

$[M_{sr}]$ est une matrice de dimensions $3 \times n_b$

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} L_{sar1} & L_{sar2} & \cdots & \cdots & L_{sar(n_b-1)} & L_{sar(n_b)} \\ L_{sbr1} & L_{sbr2} & \cdots & \cdots & L_{sbr(n_b-1)} & L_{sbr(n_b)} \\ L_{scr1} & L_{scr2} & \cdots & \cdots & L_{scr(n_b-1)} & L_{scr(n_b)} \end{bmatrix}$$

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

Équations mécaniques :

Le couple électromagnétique produit par la machine est Γ_e , Γ_r le couple de charge et ω est la vitesse électrique de rotor, p est le nombre de paire de pôles, et J est le moment d'inertie.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (\Gamma_e - \Gamma_r)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$

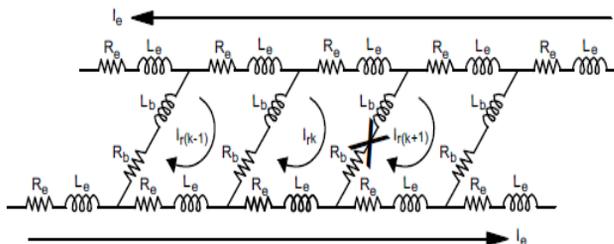
En utilisant le principe de base de la conversion d'énergie, le couple développé par la machine Γ_e peut être obtenu en considérant la variation de la co-énergie " \mathcal{W}_{co} ".

$$\Gamma_e = [i_s]^t \cdot \frac{\partial}{\partial \theta_r} [L_{sr}] \cdot [i_r]$$

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

Modélisation du défaut de Cassure de barre

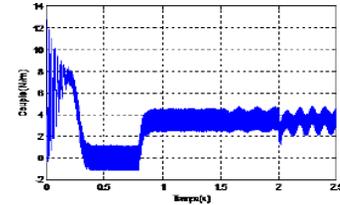
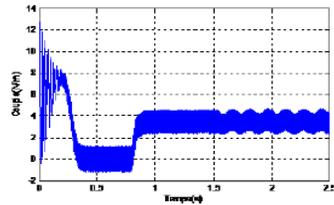
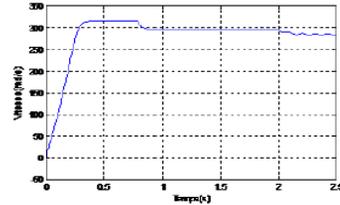
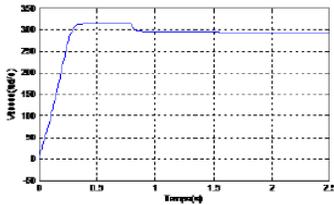
L'objectif est de développer un modèle de la machine asynchrone qui permet de mettre en évidence l'influence d'un défaut de cassure de barre. Les signatures qui présentent un tel défaut sont détectées en utilisant l'analyse spectrale. A cet effet, l'approche consiste à modéliser une cassure de barre en augmentant la valeur de sa résistance de telle sorte que le courant qui la traverse devienne plus proche possible de zéro.



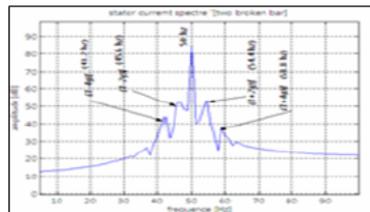
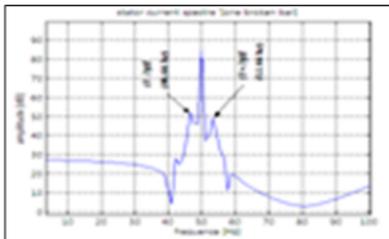
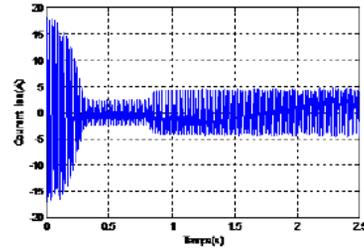
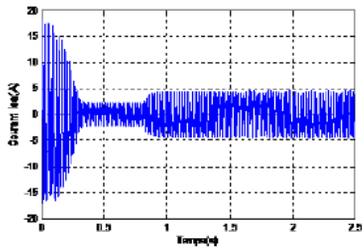
Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

Les résultats dans le cas de cassure d'une barre à l'instant 1.5 seconde suivi d'une deuxième cassure à l'instant 2 secondes. Dans les deux cas, les signatures de défauts sont caractérisées par les fréquences dont la position dépend du glissement et dont l'expression est légèrement différente par rapport au cas de la machine sans onduleur. En effet, il s'agit de tenir compte de cette expression :

$$g_{g,d} = (1 \pm 2gk) (2k - 1) f_s$$



Chargé de cours: Dr. Mohammadi Moufid



-d-

-d-

Cassure d'une barre

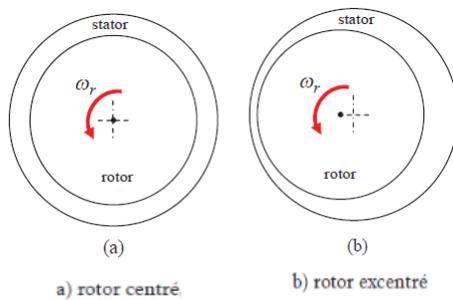
Cassure de deux barres

Chargé de cours: Dr. Mohammadi Moufid

Excentricité statique

Le rotor peut être le siège de défauts tels que l'excentricité statique, l'excentricité dynamique, ou mixte. Ces défauts sont détectables par la surveillance des vibrations ou par l'analyse des grandeurs électriques de la machine (courant, tension, flux)

L'excentricité statique a été provoquée intentionnellement par l'insertion, dans le logement du roulement, d'une bague avec une excentration de 15%



Schématisme d'une excentricité statique



Flasque de machine sans et avec bague additionnelle d'excentration

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

a) Analyse par courant statorique

Subhasis Nandi et Hamid Toliyat proposent de détecter l'excentricité du rotor par la surveillance de la variation spectrale des harmoniques du courant de ligne. Il peut être facilement vu que l'harmonique d'encoche rotorique augmente avec l'excentricité d'où le fait que les harmoniques dépendent principalement du nombre d'encoches rotoriques et du nombre de paires de pôles de la machine asynchrone.

$$f_{s, ecc} = \left[k n_b \left(\frac{1-s}{P} \right) \pm 1 \right] f_s$$

avec $k = 1, 2, 3 \dots$

En considérant l'influence des harmoniques de temps sur les tensions d'alimentation, la fréquence des courants induits dans le stator peut être exprimée comme suit :

$$f_{s, ecc} = \left[k n_b \left(\frac{1-s}{P} \right) \pm n \right] f_s$$

n : l'ordre des harmoniques de temps ($n = 1, 3, 5 \dots$)

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

En présence d'une excentricité mixte, les fréquences apparaissent également dans le spectre du courant statorique.

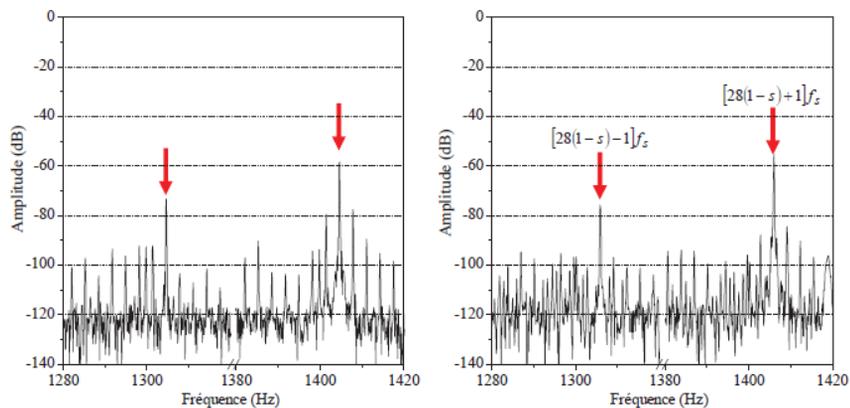
$$f_{mix} = \left(1 \pm k \frac{1-s}{p}\right) f_s$$

Évidemment, n'importe quelle **oscillation dans le couple de charge** à un multiple de la fréquence de rotation f_r , induira les fréquences correspondantes dans le spectre du courant statorique à :

$$f_{charge} = f_s \pm k f_r = \left(1 \pm k \frac{1-s}{p}\right) f_s$$

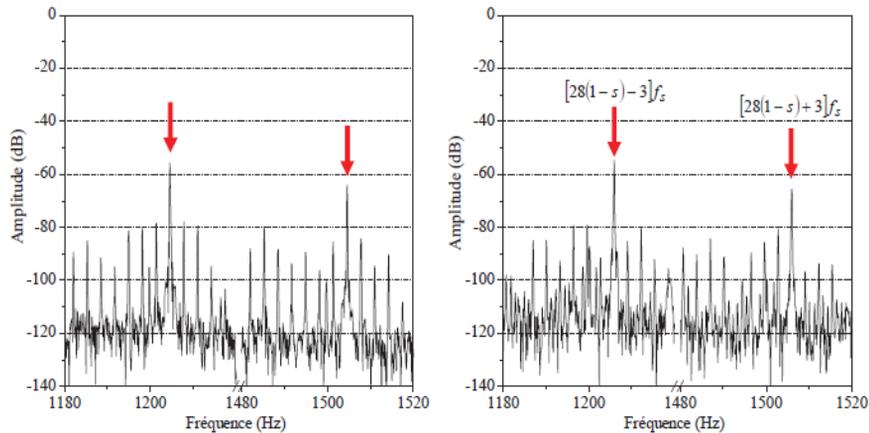
avec f_r fréquence de rotation, $k = 1, 2, 3, \dots$

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid



Spectre du courant statorique de l'excentricité statique avec $n = 1$, machine saine (gauche), machine excentrée (droite).

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid



Spectre du courant statorique de l'excentricité statique avec $n = 3$, machine saine (gauche), machine excentrée (droite)

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

b) Analyse par vibrations et bruits sonores

A. R. Crawford propose tout d'abord un glossaire des phénomènes vibratoires existant dans les machines électriques alimentées en alternatif. Puis, après avoir rappelé les équations fondamentales régissant les systèmes oscillants, il étudie la dynamique du rotor, en particulier sa déformation statique, son déséquilibre statique et dynamique et les vibrations dues à sa torsion. Il permet aussi au travers d'une étude simple de mieux appréhender certains phénomènes vibratoires.

L'excentricité du rotor génère des fréquences au double de la fréquence d'alimentation $2f_s$ à plus ou moins la fréquence de passage par pôle f_p .

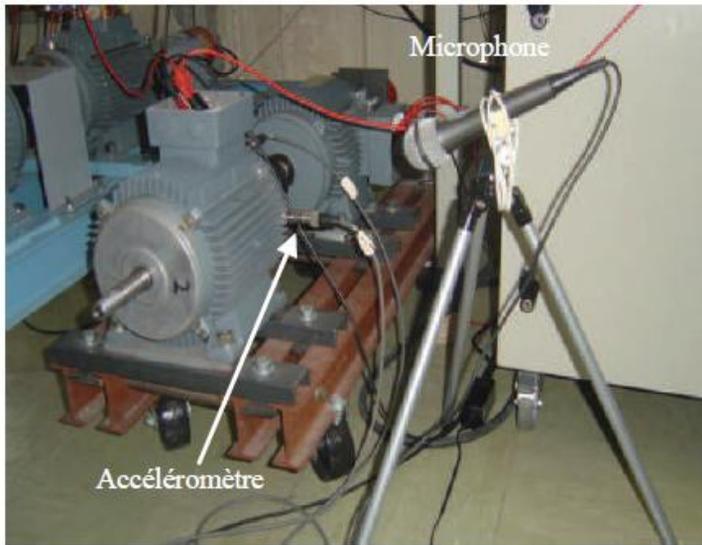
$$F_{ecc} = 2f_s \pm f_p$$

$$f_p = 2P \cdot f_s : \text{Fréquence de passage par pôle (Pole Pass Frequency)}$$

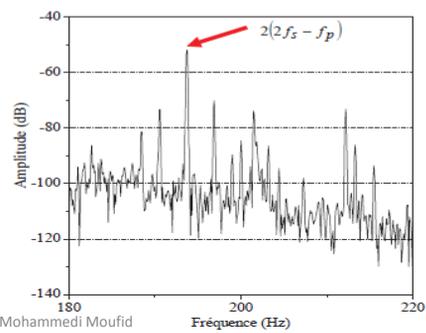
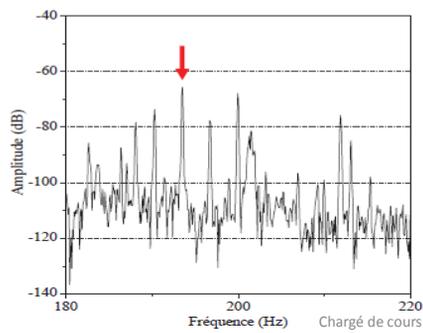
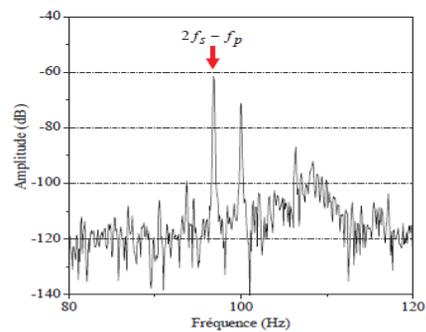
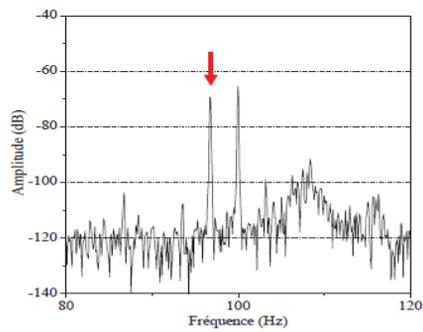
$$f_g = \frac{f_s}{P} - f_r : \text{Fréquence de glissement}$$

Pour toutes les expériences, une alimentation par le réseau était nécessaire afin d'éviter le bruit magnétique supplémentaire dû aux harmoniques d'alimentation induits par l'utilisation d'un onduleur de tension. Toutes les hélices de refroidissement ont été retirées des moteurs afin de réduire l'influence de tout bruit aérodynamique. Le microphone était déposé sur un trépied à une distance d'environ 30 cm de la machine. Les bruits sonores ont les mêmes fréquences que les vibrations |.

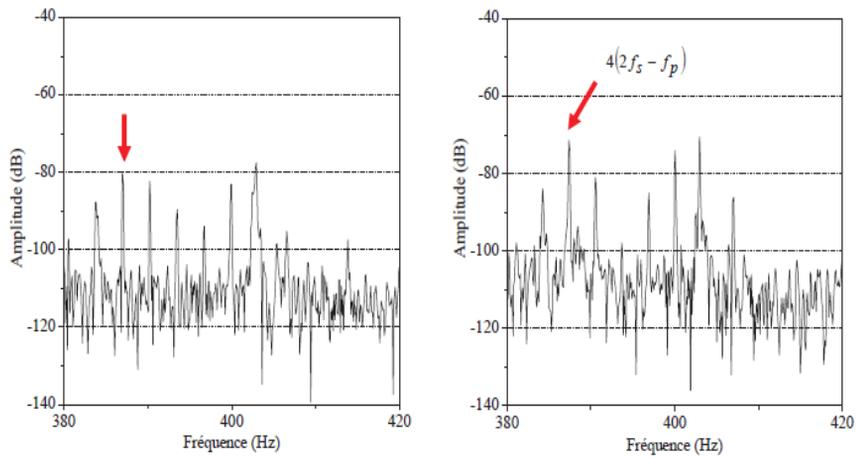
Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid



Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

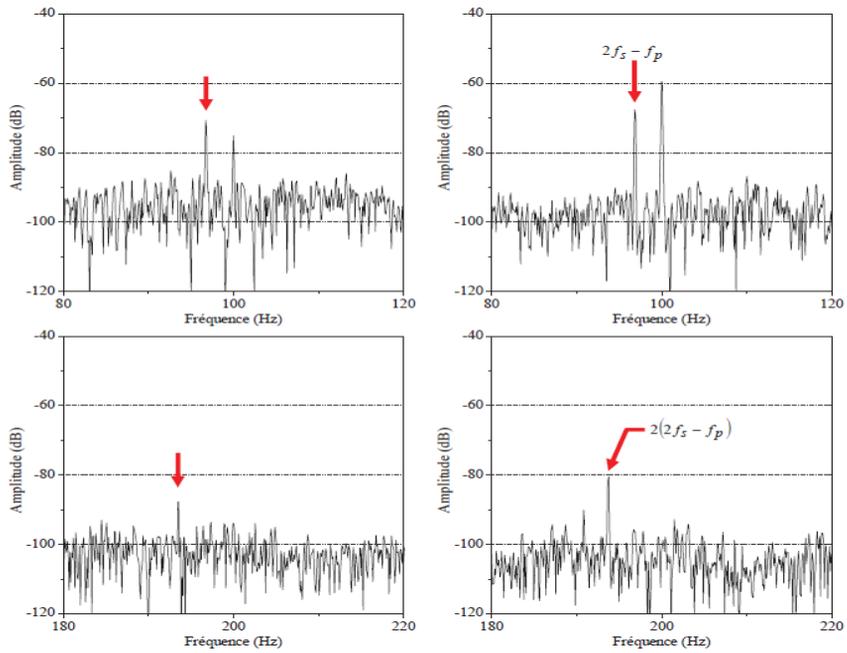


Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

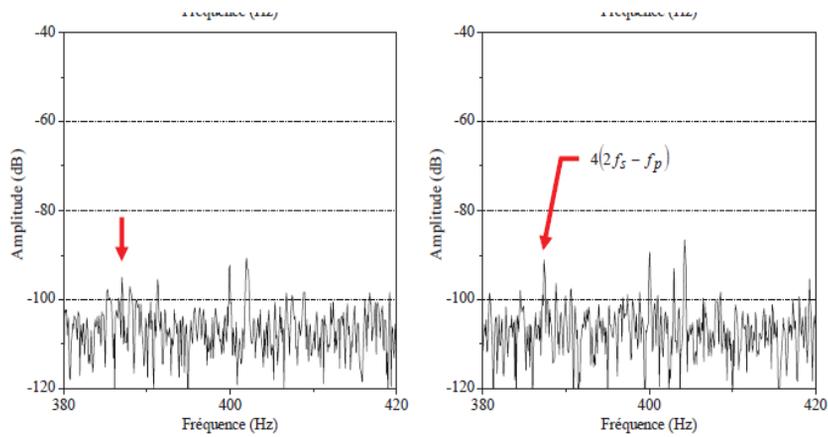


Spectre des vibrations radiales de l'excentricité statique, machine saine (gauche), machine excentrée (droite)

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid



Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid



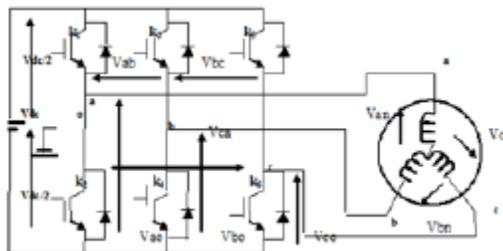
Spectre des bruits induits par une excentricité statique, machine saine (gauche), machine excentrée (droite)

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

Onduleur de tension

Fonction de commutation de l'onduleur sans défauts

On considère que l'onduleur est un convertisseur idéal. Chaque transistor T_i associé à une diode D_i montée en antiparallèle est modélisé par un interrupteur idéal K_i .



$$\text{l'état de l'interrupteur: } S = \begin{cases} 1 & \text{si } K_1 \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } K_1 \text{ est ouvert} \end{cases}$$

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

En utilisant la notion de fonction de commutation des interrupteurs, la relation entre l'entrée et la sortie de l'onduleur est exprimée par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} & V_{b0} & V_{c0} \end{bmatrix} = T_F V_d$$

Où T_F est la fonction de transfert, V_d est la tension d'entrée et les V_{i0} sont les tensions de sortie de l'onduleur.

$$T_F = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & S_3 \end{bmatrix}$$

Les relations entre les tensions V_{a0} , V_{b0} et V_{c0} et celle de l'entrée V_d seront données par :

$$V_{a0} = \frac{V_d}{2} S_1, \quad V_{b0} = \frac{V_d}{2} S_2, \quad V_{c0} = \frac{V_d}{2} S_3$$

Pour une connexion étoile du moteur la tension au point milieu des phases (V_{n0}) est calculée selon la relation :

$$V_{n0} = \frac{1}{3} (V_{a0} + V_{b0} + V_{c0})$$

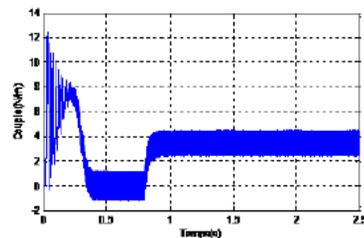
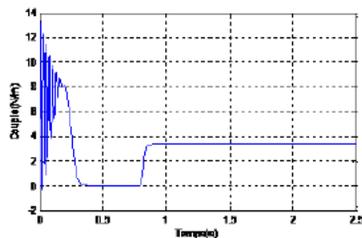
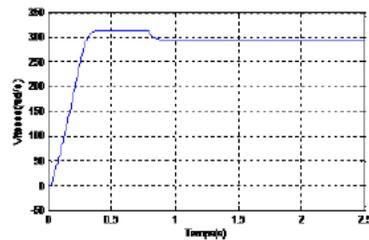
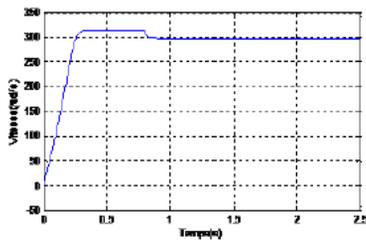
Par conséquent, les tensions des phases sont obtenues par la relation

$$V_{an} = V_{a0} - V_{n0}, \quad V_{bn} = V_{b0} - V_{n0} \text{ et } V_{cn} = V_{c0} - V_{n0}$$

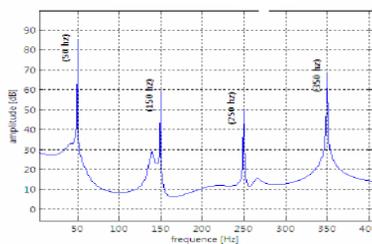
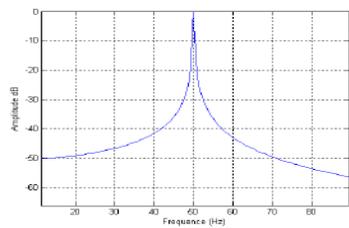
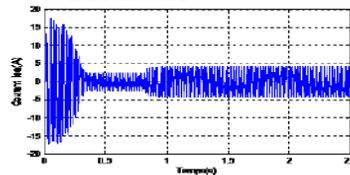
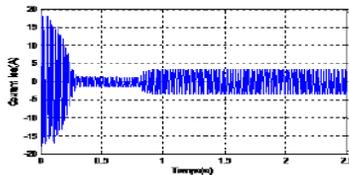
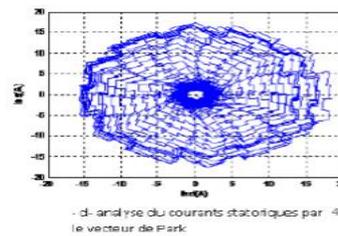
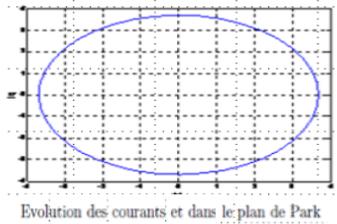
Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

Alimentation de la MAS par onduleur de tension

L'analyse fréquentielle, dans le cas la machine saine alimentée par un onduleur, révèle l'apparition de fréquences d'ordre multiple de celle de la fondamentale. Celles ci sont dûes à la présence de l'onduleur.



Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid



Alimentation sinusoïdale

Alimentation par onduleur

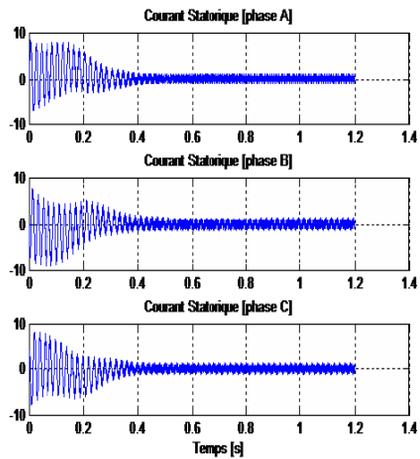
Détection de défauts par le principe de génération des résidus

Nous considérons un onduleur triphasé à IGBT commandé en modulation de largeur d'impulsion.

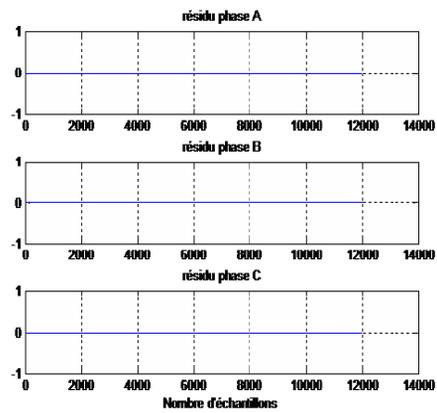
Il s'agit d'étudier le **défaut d'ouverture d'un des semi conducteurs de puissance** afin de proposer une analyse qui permet de détecter la présence d'un défaut et de localiser le semi conducteur en panne. A cet effet, le principe de détection consiste à comparer le comportement du système réel à surveiller et son modèle. Le vecteur résidu n'est autre que la différence entre les grandeurs correspondantes du système réel et de son modèle.

	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
r_1	-1	1	1	1	-1	-1
r_2	1	-1	1	-1	1	-1
r_3	1	1	-1	-1	-1	1

TABLE 3.3 – Table de signatures théoriques des défauts des interrupteurs

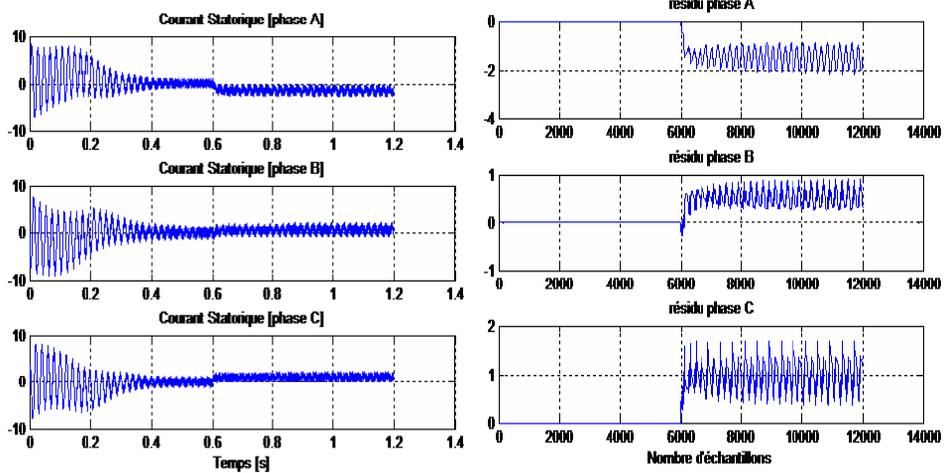


Courants statoriques, cas sain

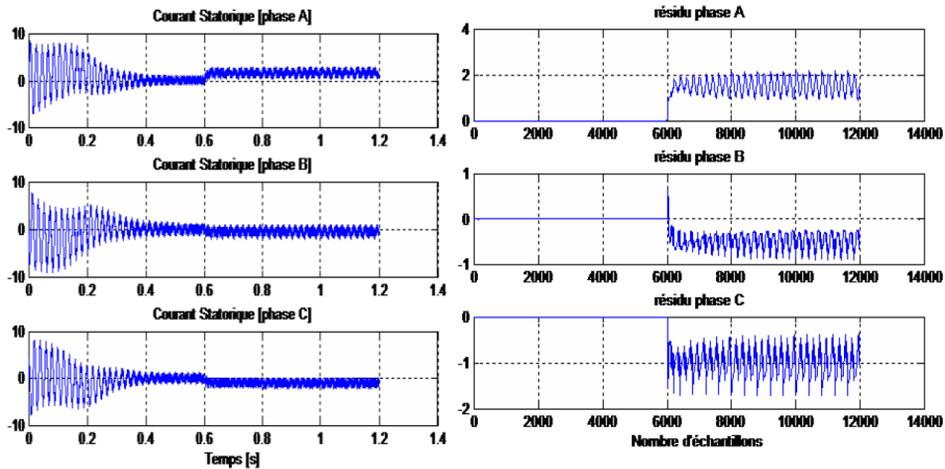


Résidus, cas sain

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

Courants statoriques, défaut sur K_1 Résidus, défaut sur K_1

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

Courants statoriques, défaut sur K_4 Résidus, défaut sur K_4

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

Détection de défauts par l'analyse de la trajectoire du vecteur courant

Les méthodes utilisées, dans cette étude pour la détection et la localisation de défauts dans les onduleurs à MLI (ouverture de l'interrupteur), sont basées sur l'analyse de la trajectoire du vecteur courant (Lissajous).

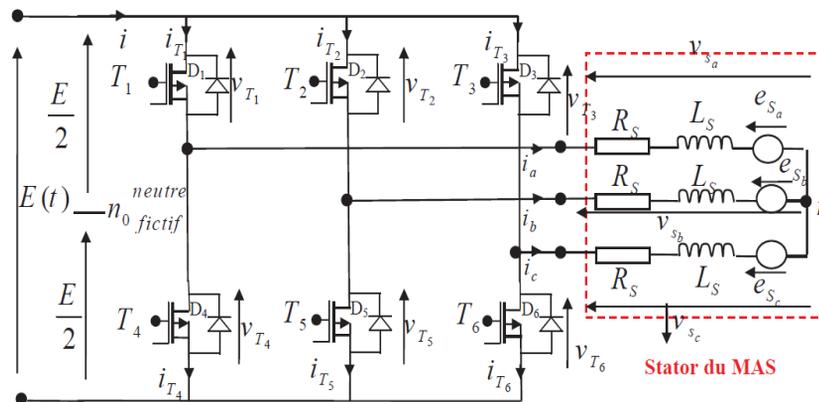


Schéma de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

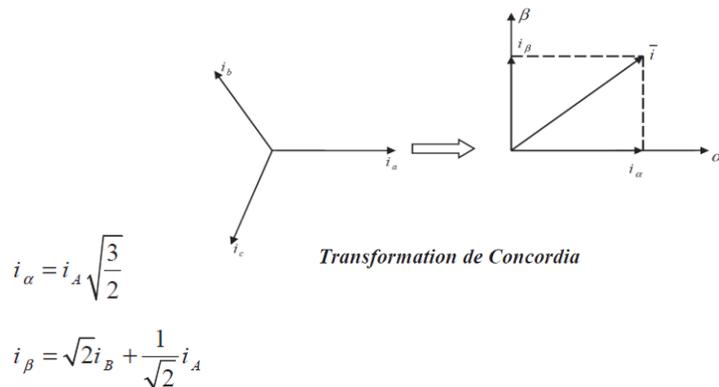
Dans les conditions idéales, on suppose que $i_A + i_B + i_C = 0$
 Les courants statoriques s'expriment sous la forme suivante:

$$\begin{cases} v_{Sa} = \frac{1}{3}(u_{Sab} - u_{Sca}) & i_A = \frac{1}{3}(i_a - i_b) \\ v_{Sb} = \frac{1}{3}(u_{Sbc} - u_{Sba}) & i_B = \frac{1}{3}(i_a + 2i_b) \\ v_{Sc} = \frac{1}{3}(u_{Sca} - u_{Sbc}) & i_C = \frac{1}{3}(-2i_a - i_b) \end{cases}$$

Avec i_A, i_B, i_C et i_a, i_b, i_c sont les courants de phase, sont les courants de ligne.

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

La transformation de Concordia permet de passer d'une représentation triphasée de la machine à une représentation biphasée équivalente figure suivante:



Dans ce cas, le contour de Park est un cercle centré à l'origine. Ce contour est considéré comme un indice de référence simple et intéressant dans la mesure où ces déviations indiquent les anomalies pouvant affecter la machine .

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

Dans ce cas, le contour de Park est un cercle centré à l'origine. Ce contour est considéré comme un indice de référence simple et intéressant dans la mesure où ces déviations indiquent les anomalies pouvant affecter la machine [15].

Le rapport ψ qui représente la pente de la trajectoire moyenne du courant sur un temps discret est défini par :

$$\psi = \frac{i_{\alpha k} - i_{\alpha k-1}}{i_{\beta k} - i_{\beta k-1}}$$

Où k et $k - 1$ sont l'instant actuel de calcul et l'instant d'avant.

Cas d'étude

1. Phase B en défaut : interrupteur ouvert :

- Si T_2 ou T_5 est ouvert : le courant de la phase B est nul pendant une demi période du courant. Les équations précédentes nous donnent $\psi = \sqrt{3}$ et :

$$i_{\alpha} = \sqrt{3}i_{\beta}$$

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

2. Phase A en défaut : interrupteur ouvert :

- Dans le cas de la phase A; avec le même raisonnement T_1 ou T_4 ouvert : les équations précédentes nous donnent $\psi = \infty$ et :

$$i_{\alpha} = 0 \text{ et } i_{\beta} = \sqrt{2}i_B$$

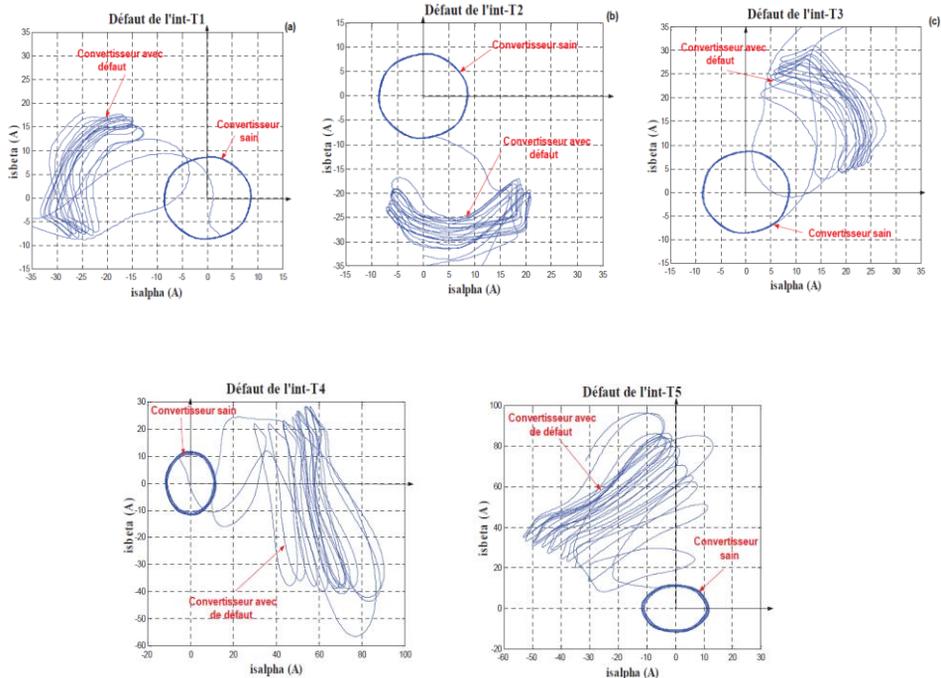
3. Phase C en défaut : interrupteur ouvert :

- Le défaut concerne la phase C, dans ce cas T_3 ou T_6 ouvert, il vient que

$$\psi = -\sqrt{3} \text{ et } i_{\beta} = \frac{\sqrt{2}}{2}i_A \text{ d'où:}$$

$$i_{\alpha} = -\sqrt{3}i_{\beta}$$

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid



Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

Défaut d'un capteur

Effet d'un défaut capteur de vitesse/position sur la commande

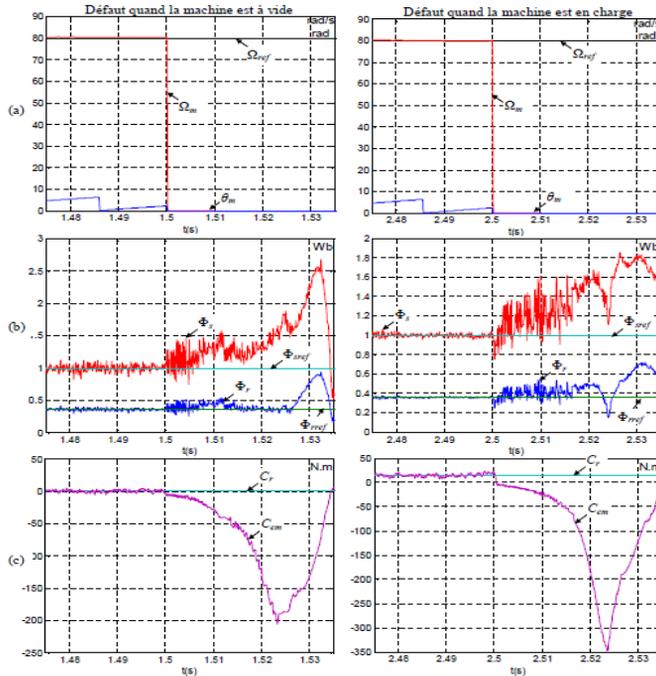
Dans ce qui suit, nous supposons la perte d'information à la sortie du capteur de position/vitesse, à un instant donné. Les effets de cette perte sur les performances de la commande est illustré dans la figure ci-dessous.

Afin de bien mettre en évidence l'effet d'un éventuel défaut capteur mécanique, nous l'appliquons pour différents points de fonctionnement de la machine, notamment quand la machine fonctionne à vide mais aussi quand la machine est en charge. L'application du défaut se fait en imposant une valeur nulle à la sortie du capteur de vitesse et de position à un instant donné : l'instant d'apparition du défaut et ceci quand le variateur est en régime permanent.

La figure suivante illustre les résultats ainsi obtenus. Dès l'application du défaut, le couple électromagnétique atteint des valeurs supérieures à deux fois la valeur maximale que la machine puisse supporter. Les modules des flux statoriques et rotoriques divergent et la vitesse de la machine est inconnue. Nous n'avons plus de rétroaction sur la vitesse, elle n'est donc plus contrôlée. Le système ne fonctionne plus correctement et tend à diverger. Une mise hors service est alors impérative afin de conserver l'état de notre système.

Chargé de cours: Dr. Mohammedi Moufid

Effet d'un défaut front du capteur de vitesse/position
(a): Allures de la vitesse et de la position avant et après défaut;
(b): Allures des modules des flux avant et après défaut ;
(c): Allure du couple électromagnétique avant et après défaut.

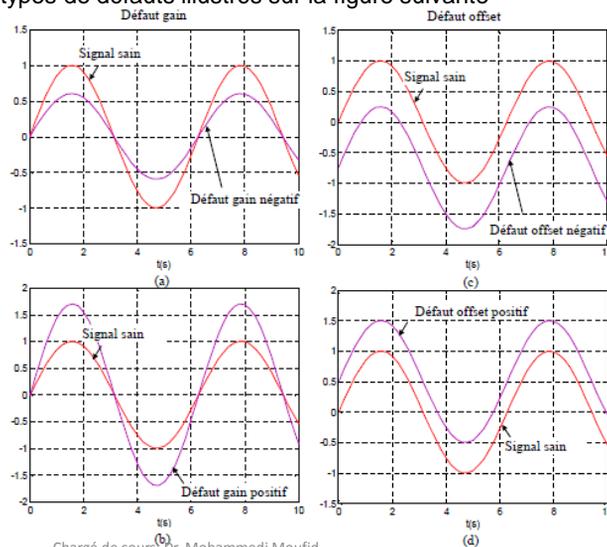


Chargé de cours: Dr. Mohammadi Moufid

Effet d'un défaut capteur de courant sur la commande

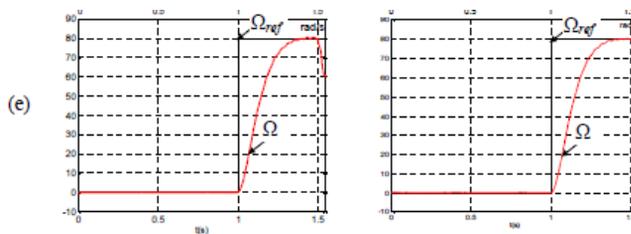
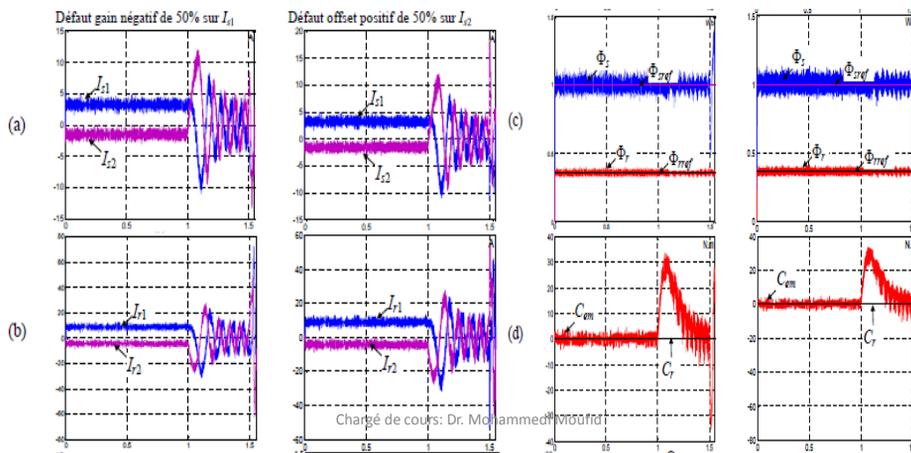
A part la perte totale de l'information à la sortie du capteur (défaut front), il existe deux autres types de défauts illustrés sur la figure suivante

Allures de la sortie d'un capteur de courant dans le cas
(a): d'un défaut de gain négatif;
(b): d'un défaut de gain positif;
(c): d'un défaut d'offset négatif ;
(d): d'un défaut d'offset positif.



Chargé de cours: Dr. Mohammadi Moufid

- défaut gain : c'est un défaut où le signal capté reste centré en zéro sauf que son amplitude est fautive. Cette amplitude peut être inférieure à la valeur saine (figure a) ou encore supérieure (figure b)
 - défaut offset : c'est un défaut où le signal capté n'est pas centré en zéro mais plutôt en une valeur quelconque. Cette valeur correspond à la valeur moyenne du signal. Selon le signe de l'offset, deux cas peuvent alors être envisagés. Le premier est quand cette valeur moyenne du signal à la sortie du capteur est négative (figure c). Le deuxième est quand la valeur moyenne est positive (figure d).
- Afin de bien illustrer l'effet d'un défaut capteur de courant sur le fonctionnement du système, nous simulons des défauts capteurs de courant du côté stator et du côté rotor.



Effets de défaut capteurs courants statoriques (phase 1 et phase2) gain et offset.

Il est à noter que les résultats trouvés indiquent que le système tend à diverger après application de n'importe quel de ces types de défauts. Le couple devient oscillant et atteint des valeurs importantes. Quant à la vitesse, elle se décroche de sa valeur de référence.

Nous sommes alors contraints d'arrêter le système afin de le préserver. Un défaut de capteur de courant est alors source de sa mise hors service.