

Défaut de court-circuit inter spires dans les machines synchrones à aimants permanents

T.BOILEAU (Green)
N.LEBOEUF (Green)
B.NAHID-MOBARAKEH (Green)
F.MEIBODY-TABAR (Green)
G. CLERC (Ampere)



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE

GREEN



Paris, le 21 Novembre 2013

Plan de l'exposé

- I. Introduction
- II. Modélisation
- III. Courant de défaut et tensions v_d , v_q
- IV. Méthodes de détection
- V. Conclusion

Introduction

I. Introduction

❖ Court-circuit inter-spire (d'une même phase)



- Modélisation du court-circuit inter-spices
- Les conséquences du court-circuit
- Détection de défaut

II. La modélisation

❖ Modélisation de la MSAP avec un court-circuit inter-spire

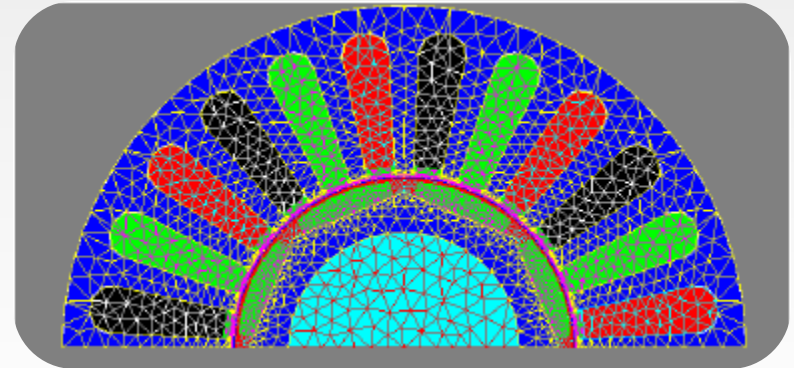
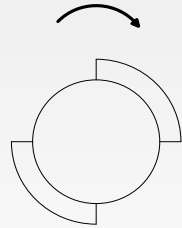
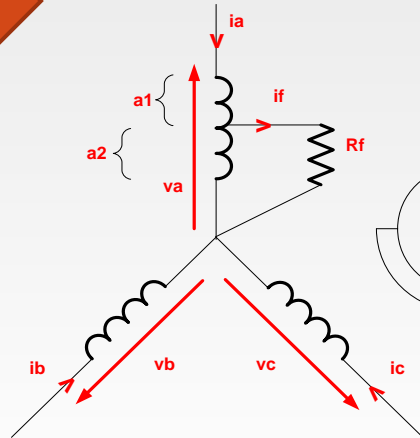
II. La modélisation

❖ MSAP en défauts électriques:

➤ Élaboration d'un modèle de défaut inter-spire sous hypothèses:

- ✓ Pôles lisses
- ✓ Court-circuit inter-spire dans une phase
- ✓ Effet de saturation négligé

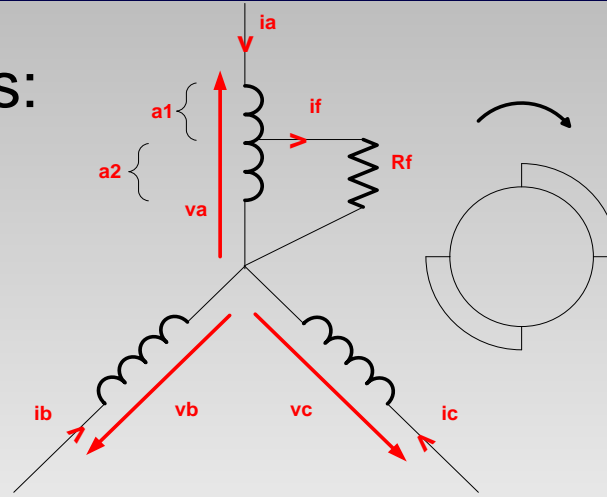
Modèle circuit validé par la méthode des éléments finis



II. La modélisation

❖ MSAP en défauts électriques:

➤ Relations:



$$v_{a1} = R_{a1} \cdot i_a + L_{a1} \cdot \frac{di_a}{dt} + M_{a1a2} \cdot \frac{d(i_a - i_f)}{dt} + M_{a1b} \cdot \frac{di_b}{dt} + M_{a1c} \cdot \frac{di_c}{dt} + e_{a1}$$

$$v_{a2} = R_{a2} \cdot (i_a - i_f) + L_{a2} \cdot \frac{d(i_a - i_f)}{dt} + M_{a1a2} \cdot \frac{di_a}{dt} + M_{a2b} \cdot \frac{di_b}{dt} + M_{a2c} \cdot \frac{di_c}{dt} + e_{a2} = R_f \cdot i_f$$

$$v_a = v_{a1} + v_{a2} = (R_{a1} + R_{a2}) \cdot i_a + (L_{a1} + L_{a2} + 2 \cdot M_{a1a2}) \cdot \frac{di_a}{dt} + (M_{a1b} + M_{a2b}) \cdot \frac{di_b}{dt} +$$

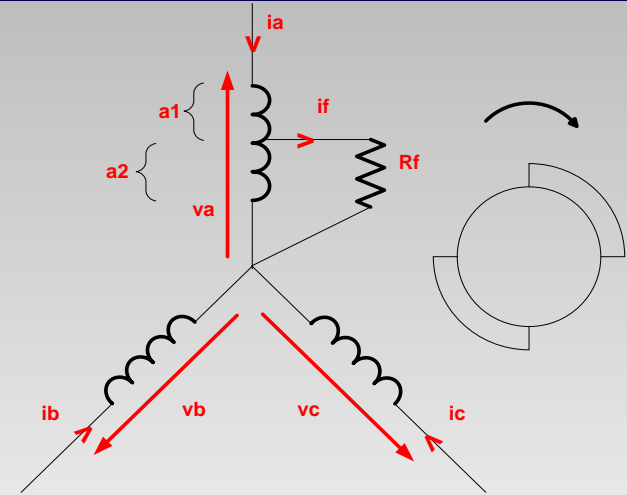
$$(M_{a1c} + M_{a2c}) \cdot \frac{di_c}{dt} - R_{a2} \cdot i_f - (L_{a2} + M_{a1a2}) \cdot \frac{di_f}{dt} + (e_{a1} + e_{a2})$$

II. La modélisation

❖ MSAP en défauts électriques:

➤ Relations:

Le court-circuit génère aussi une relation supplémentaire.



$$v_f = 0 = R_{a2} \cdot i_a + (L_{a2} + M_{a1a2}) \cdot \frac{di_a}{dt} + M_{a2b} \cdot \frac{di_b}{dt} + M_{a2c} \cdot \frac{di_c}{dt} + e_{a2} - (R_{a2} + R_f) \cdot i_f - L_{a2} \cdot \frac{di_f}{dt}$$

II. La modélisation

❖ MSAP en défauts électriques:

➤ Le tout mis en forme :

$$[v_{abcf}] = [R] \cdot [i_{abcf}] + [L] \cdot \frac{d}{dt} \cdot [i_{abcf}] + [e_{abcf}]$$

$$[v_{abcf}] = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ 0 \end{bmatrix} \quad [R] = \begin{bmatrix} R_{a1} + R_{a2} & 0 & 0 & -R_{a2} \\ 0 & R_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_c & 0 \\ -R_{a2} & 0 & 0 & (R_{a2} + R_f) \end{bmatrix} \quad [i_{abcf}] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \end{bmatrix} \quad [e_{abcf}] = \begin{bmatrix} e_{a1} + e_{a2} \\ e_b \\ e_c \\ -e_{a2} \end{bmatrix}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{a1} + L_{a2} + 2 \cdot M_{a1a2} & M_{a1b} + M_{a2b} & M_{a1c} + M_{a2c} & -(L_{a2} + M_{a1a2}) \\ M_{a1b} + M_{a2b} & L_b & M_{bc} & -M_{a2b} \\ M_{a1c} + M_{a2c} & M_{bc} & L_c & -M_{a2c} \\ -(L_{a2} + M_{a1a2}) & -M_{a2b} & -M_{a2c} & L_{a2} \end{bmatrix}$$

II. La modélisation

❖ Transformation (adaptation du modèle à la commande)

$$\begin{aligned}
 (\text{abcf} \rightarrow \alpha\beta f) \quad [T_{44}]^{-1} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} & [T_{44}] &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{2} & 0 & 0 \\ 1 & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & 0 \\ 1 & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{3} \end{bmatrix} \\
 [x_{0\alpha\beta f}] &= [T_{44}]^{-1} \cdot [x_{abcf}]
 \end{aligned}$$

$$[v_{0\alpha\beta f}] = [R_{0\alpha\beta f}] \cdot [i_{\alpha\beta f}] + [L_{0\alpha\beta f}] \cdot \frac{d}{dt} \cdot [i_{\alpha\beta f}] + [e_{0\alpha\beta f}] \quad [L_{0\alpha\beta f}] = [T_{44}]^{-1} \cdot [L] \cdot [T_{44}]$$

❖ Transformation

$$(\alpha\beta f \rightarrow \text{dqf}) \quad P_1(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad P_1(-\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

II. La modélisation

❖ Expression du modèle dans le repère tournant d,q

$$\begin{bmatrix} x_{dqf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1(-\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{\alpha\beta f} \end{bmatrix} \quad \text{avec } x = v, i, e$$

$$\begin{bmatrix} v_{dqf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{dqf} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{dqf} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{dqf} \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \left(\begin{bmatrix} P_1(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{dqf} \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} e_{dqf} \end{bmatrix}$$

Avec

$$\begin{bmatrix} R_{dqf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & -R'_{a2a} \cdot \cos \theta \\ 0 & R_s & R'_{a2a} \cdot \sin \theta \\ -R'_{a2a} \cdot \cos \theta & R'_{a2a} \cdot \sin \theta & R'_{fa} \end{bmatrix}$$

$$R'_{a2a} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot R_{a2}$$

$$R'_{fa} = R_{a2} + R_f$$

II. La modélisation

❖ Expression du modèle dans le repère tournant d,q

$$[L_{dqf}] = \begin{bmatrix} L & 0 & M_{f\alpha a} \cdot \cos \theta + M_{f\beta a} \cdot \sin \theta \\ 0 & L & -M_{f\alpha a} \cdot \sin \theta + M_{f\beta a} \cdot \cos \theta \\ M_{f\alpha a} \cdot \cos \theta - M_{f\beta a} \cdot \sin \theta & M_{f\alpha a} \cdot \sin \theta + M_{f\beta a} \cdot \cos \theta & L_{a2} \end{bmatrix}$$

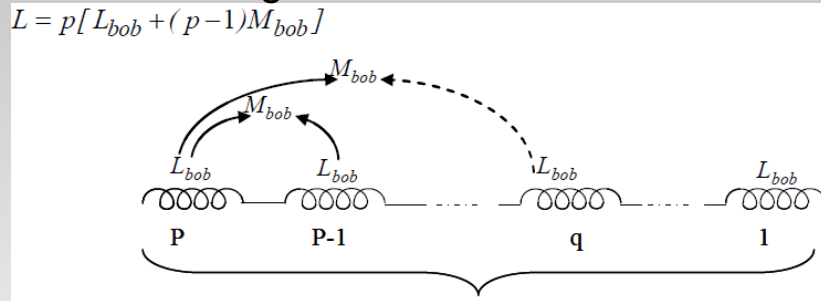
$$[P_1(-\theta)] \cdot [L_{\alpha\beta f}] \cdot \left(\frac{d}{dt} [P_1(-\theta)] \right) = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\theta} \cdot L & 0 \\ \dot{\theta} \cdot L & 0 & 0 \\ \dot{\theta} \cdot (-M_{f\alpha a} \cdot \sin \theta + M_{f\beta a} \cdot \cos \theta) & -\dot{\theta} \cdot (M_{f\alpha a} \cdot \cos \theta + M_{f\beta a} \cdot \sin \theta) & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_{f\alpha a} = \frac{-2 \cdot (L_{a2} + M_{a1a2}) + M_{a2b} + M_{a2c}}{\sqrt{6}} \quad M_{f\beta a} = \frac{-M_{a2b} + M_{a2c}}{\sqrt{2}}$$

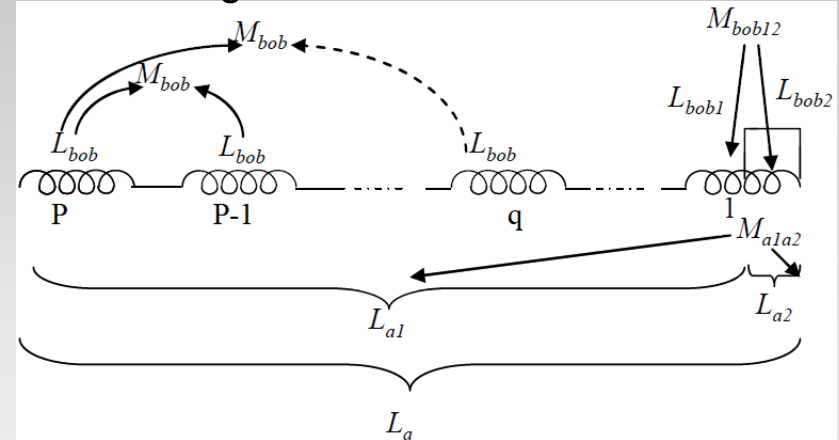
II. La modélisation

❖ Machine à une encoche par pôle et par phase

Bobinage sain



Bobinage en défaut



$$L_{bob1} = (1 - \mu_{bob})^2 \cdot L_{bob} \quad L_{bob2} = \mu_{bob}^2 \cdot L_{bob}$$

$$M_{bob12} = \mu_{bob} \cdot (1 - \mu_{bob}) \cdot L_{bob}$$

$$L_{a1} = (p-1) \cdot [L_{bob} + (p-2) \cdot M_{bob}] + (1 - \mu_{bob})^2 \cdot L_{bob} + 2 \cdot (1 - \mu_{bob}) \cdot (p-1) \cdot M_{bob}$$

$$L_{a2} = L_{bob2} = \mu_{bob}^2 \cdot L_{bob} \quad M_{a1a2} = \mu_{bob} \cdot (1 - \mu_{bob}) \cdot L_{bob} + \mu_{bob} \cdot (p-1) \cdot M_{bob}$$

Mutuelles avec les autres phases $M_{a2b} = M_{a2c}$ donc $M_{f\beta a} = \frac{-M_{a2b} + M_{a2c}}{\sqrt{2}} = 0$

Fem du défaut proportionnelle : $e_f = -\mu \cdot e_a$

III. Courant de défaut et tension v_d et v_q

- ❖ Etude du courant de défaut
- ❖ Etude de l'évolution des harmoniques de v_d et v_q

III. Courant de défaut et tension v_d et v_q

➤ Equation différentielle

$$\begin{aligned}
 -R'_{a2a} \cdot \cos \theta \cdot i_d + R'_{a2a} \cdot \sin \theta \cdot i_q + R'_{fa} \cdot i_f + \dot{\theta} \cdot (-M_{f\alpha a} \cdot \sin \theta) \cdot i_d - \dot{\theta} \cdot (M_{f\alpha a} \cdot \cos \theta) \cdot i_q \\
 + (M_{f\alpha a} \cdot \cos \theta) \cdot \frac{di_d}{dt} + (M_{f\alpha a} \cdot \sin \theta) \cdot \frac{di_q}{dt} + L_{a2} \cdot \frac{di_f}{dt} + e_f = 0
 \end{aligned}$$

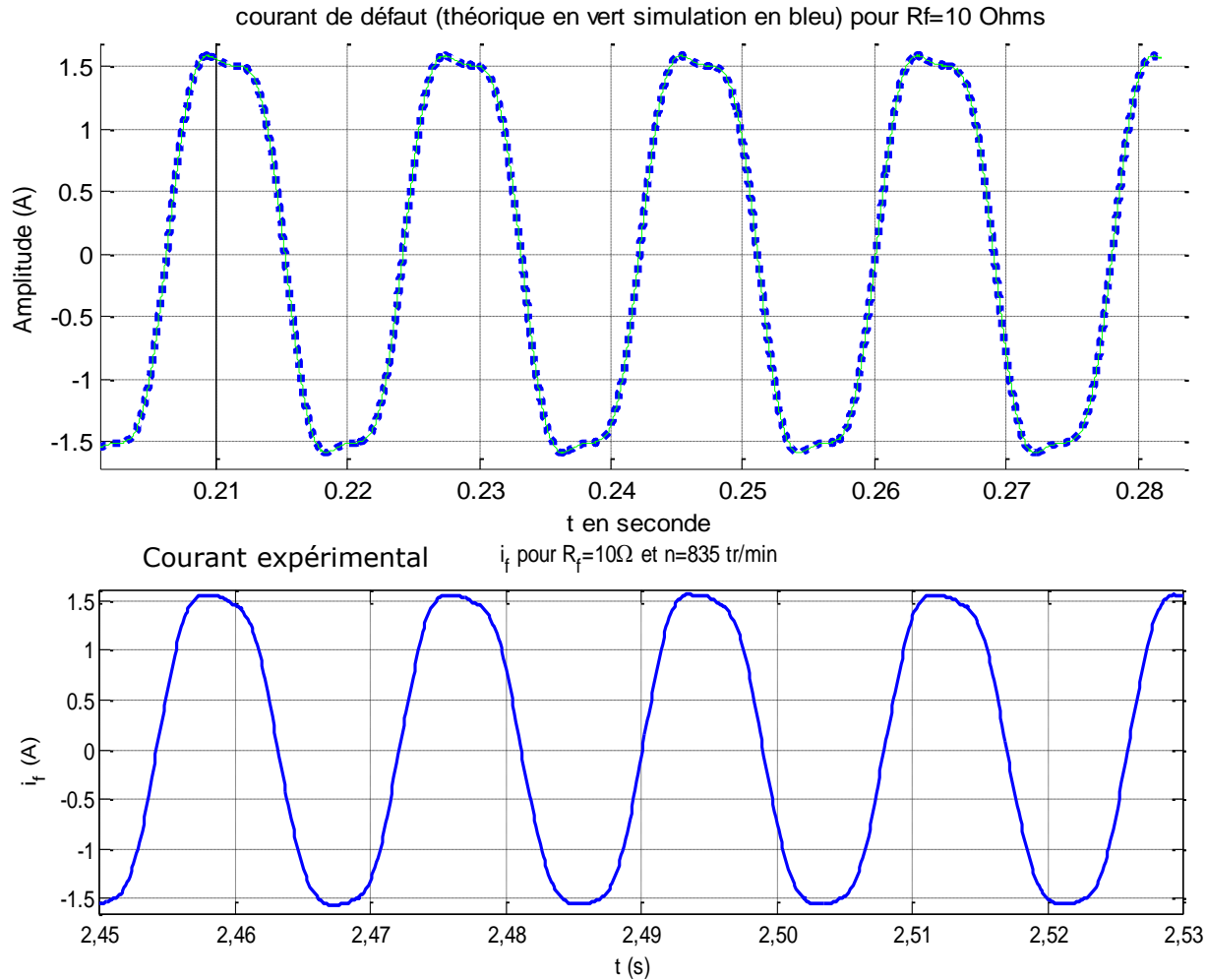
$$e_f = -e_{a2} = \mu \cdot \omega \cdot \psi_f \cdot [\sin(\theta) + 0,1477 \cdot \sin(3 \cdot \theta)]$$

➤ Solution avec $i_q = cste, i_d = 0, \dot{\theta} = cste$

$$\begin{aligned}
 i_f(t) = & \left(\frac{R'_{a2a} \cdot \omega \cdot I_q + M_{f\alpha a} \cdot I_q \cdot \omega_1 \cdot \omega + \mu \cdot \omega^2 \cdot \psi_f}{L_{a2} \cdot (\omega^2 + \omega_1^2)} \right) \cdot \cos(\theta) \\
 & + \left(\frac{-R'_{a2a} \cdot \omega_1 \cdot I_q + M_{f\alpha a} \cdot I_q \cdot \omega^2 - \mu \cdot \omega \cdot \omega_1 \cdot \psi_f}{L_{a2} \cdot (\omega^2 + \omega_1^2)} \right) \cdot \sin(\theta) \\
 & + \left(\frac{0,1477 \cdot \mu \cdot \psi_f \cdot 3 \cdot \omega^2}{L_{a2} \cdot (9 \cdot \omega^2 + \omega_1^2)} \right) \cdot \cos(3 \cdot \theta) + \left(\frac{-0,1477 \cdot \mu \cdot \psi_f \cdot \omega \cdot \omega_1}{L_{a2} \cdot (9 \cdot \omega^2 + \omega_1^2)} \right) \cdot \sin(3 \cdot \theta)
 \end{aligned}$$

$$\omega_1 = \frac{R'_f}{L_{a2}}$$

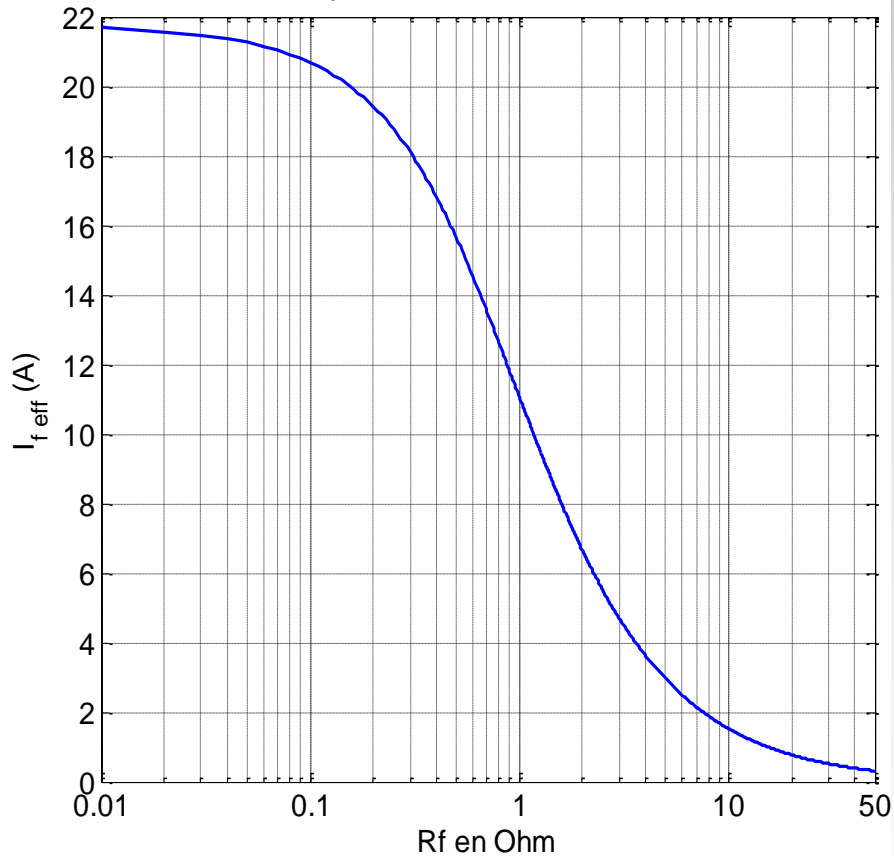
III. Courant de défaut et tension v_d et v_q



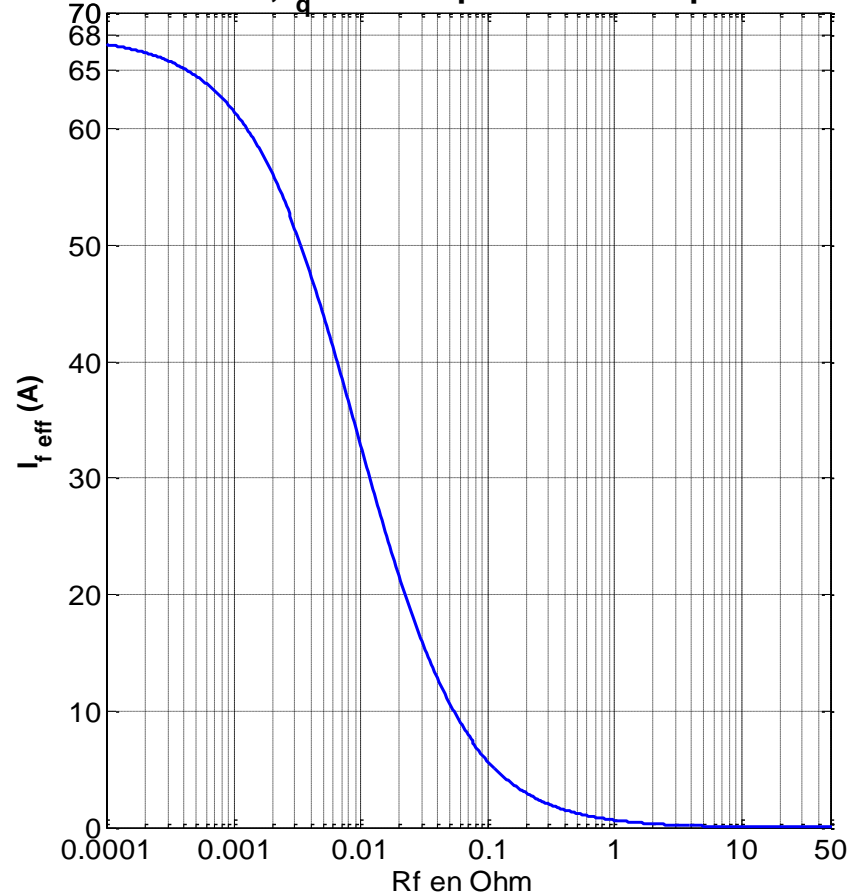
III. Courant de défaut et tension v_d et v_g

Evolution de la valeur efficace théorique du courant de défaut i_f en fonction de R_f

à 1000 tr/min , $i_q = 2.5A$ pour 50% d'une phase en cc



Evolution de la valeur efficace théorique du courant de défaut i_f en fonction de R_f à 1000 tr/min , $i_q = 2.5 A$ et pour 2% d'une phase en cc



➤ Nécessité de détecter le défaut en ligne

III. Courant de défaut et tension v_d et v_q

❖ Harmoniques des tensions v_d et v_q

- A l'aide du modèle de la machine en défaut
- Avec les hypothèses : $i_d=0$, $i_q=cste$, $\Omega=cste$.

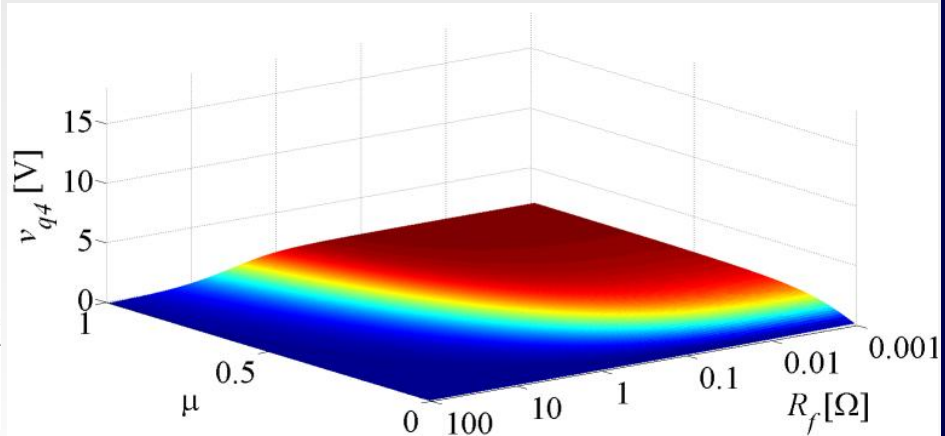
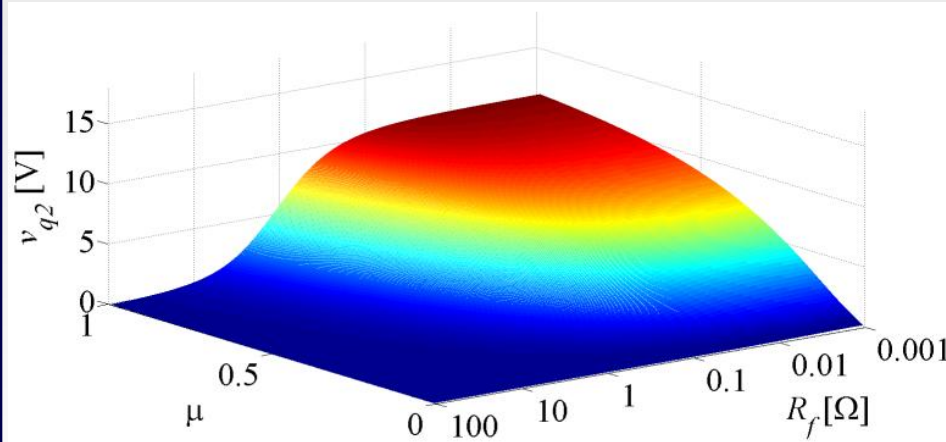
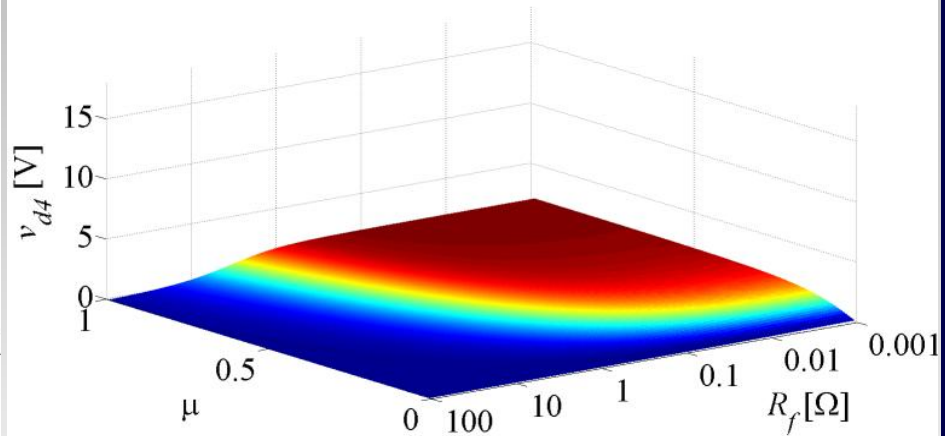
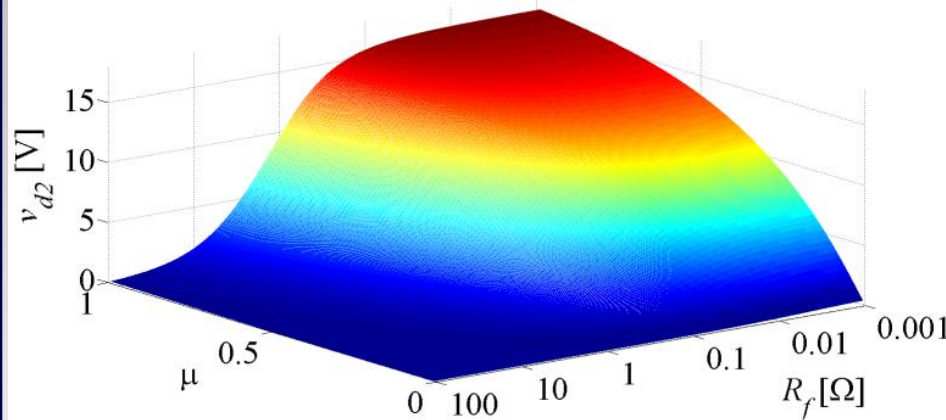
On montre que :

$$v_d = v_{d0}(R_f, \Omega, I_q) + v_{d2}(R_f, \Omega, I_q) \cdot \sin(2 \cdot \theta + \varphi_{d2}) + v_{d4}(R_f, \Omega, I_q) \cdot \sin(4 \cdot \theta + \varphi_{d4})$$
$$v_q = v_{q0}(R_f, \Omega, I_q) + v_{q2}(R_f, \Omega, I_q) \cdot \sin(2 \cdot \theta + \varphi_{q2}) + v_{q4}(R_f, \Omega, I_q) \cdot \sin(4 \cdot \theta + \varphi_{q4})$$

- Étude des expressions analytiques théoriques de v_{d0} , v_{d2} , v_{d4} , v_{q0} , v_{q2} , v_{q4}
- Évolution plus significative de v_{d2} et v_{q2} en fonction de la sévérité du défaut.

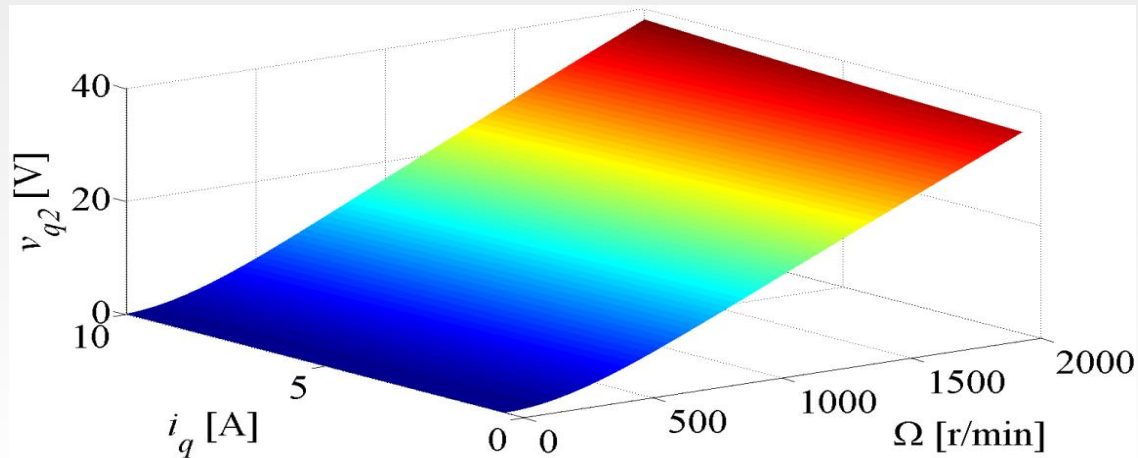
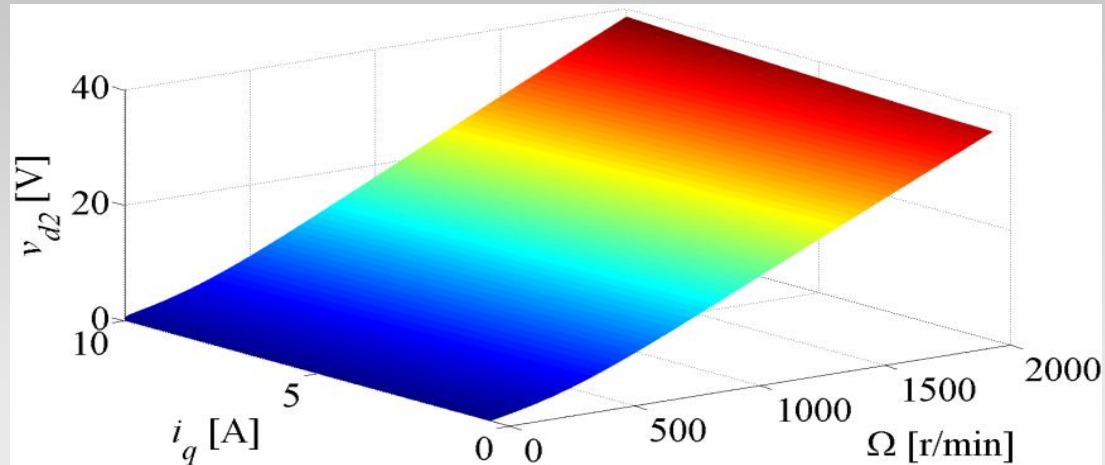
III. Courant de défaut et tension v_d et v_q

➤ Harmoniques des tensions v_d et v_q



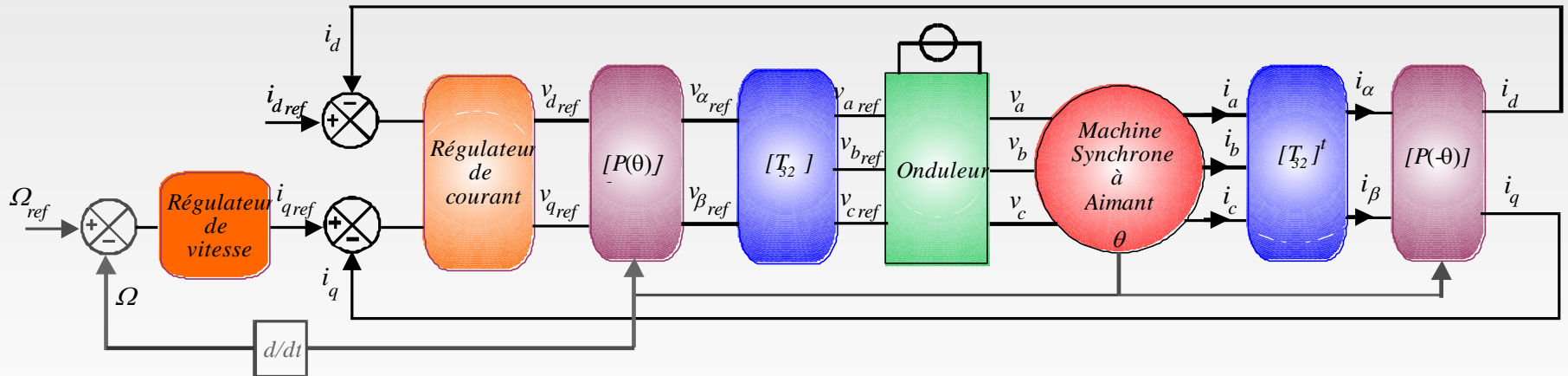
III. Courant de défaut et tension v_d et v_q

➤ Harmonique 2 des tensions v_d et v_q



IV. Détection du défaut

❖ Extraction de l'harmonique 2 de la tension de référence



IV. Détection de défaut

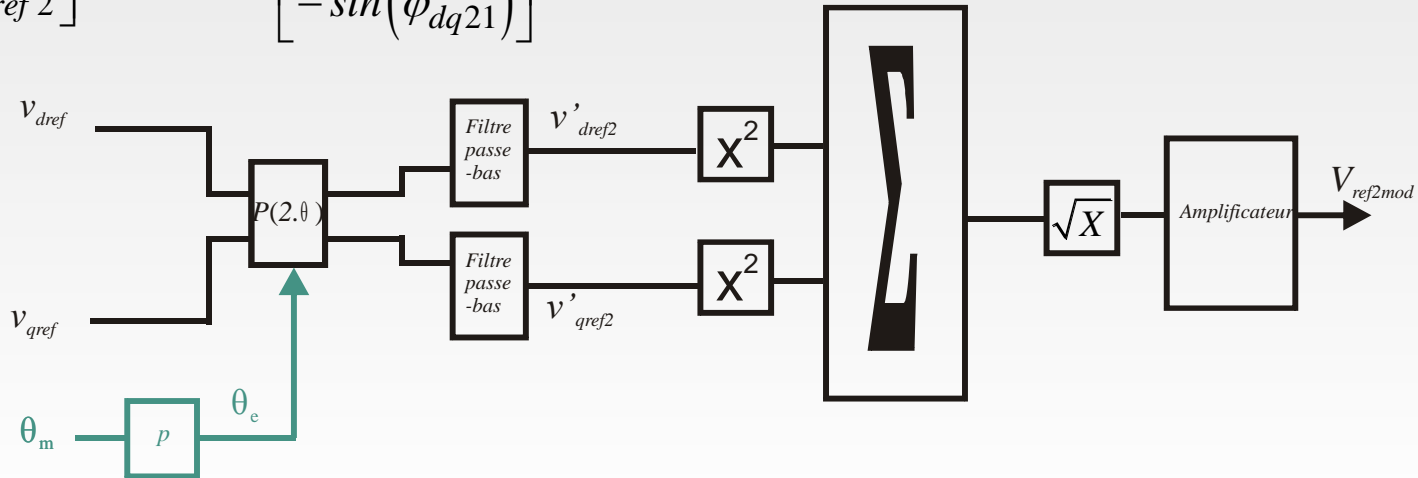
➤ D'après l'étude théorique

$$\begin{bmatrix} v_{dref} \\ v_{qref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{dref0} \\ v_{qref0} \end{bmatrix} + v_{dqref21} \cdot \begin{bmatrix} \cos(2 \cdot \theta(t) + \varphi_{dq21}) \\ -\sin(2 \cdot \theta(t) + \varphi_{dq21}) \end{bmatrix} + v_{dqref23} \cdot \begin{bmatrix} \cos(2 \cdot \theta(t) + \varphi_{dq23}) \\ \sin(2 \cdot \theta(t) + \varphi_{dq23}) \end{bmatrix} + v_{dqref4} \cdot \begin{bmatrix} \cos(4 \cdot \theta(t) + \varphi_{dq4}) \\ -\sin(4 \cdot \theta(t) + \varphi_{dq4}) \end{bmatrix}$$

➤ Application de P(2θ) suivi d'un filtrage passe-bas

$$\begin{bmatrix} v'_{dref2} \\ v'_{qref2} \end{bmatrix} = v_{dqref21} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{dq21}) \\ -\sin(\varphi_{dq21}) \end{bmatrix}$$

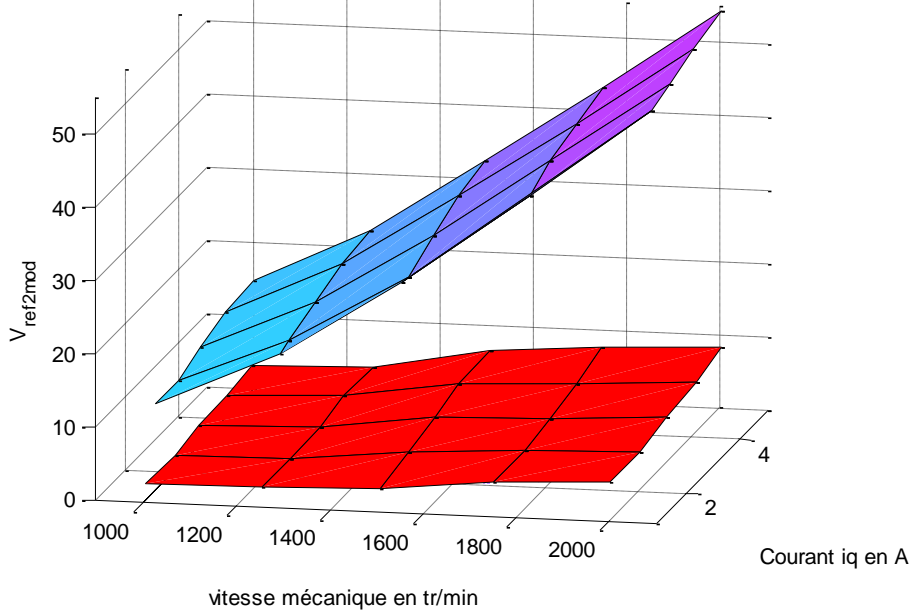
$$V_{ref2mod} = \sqrt{v'^2_{dref2} + v'^2_{qref2}} = v_{dqref21}$$



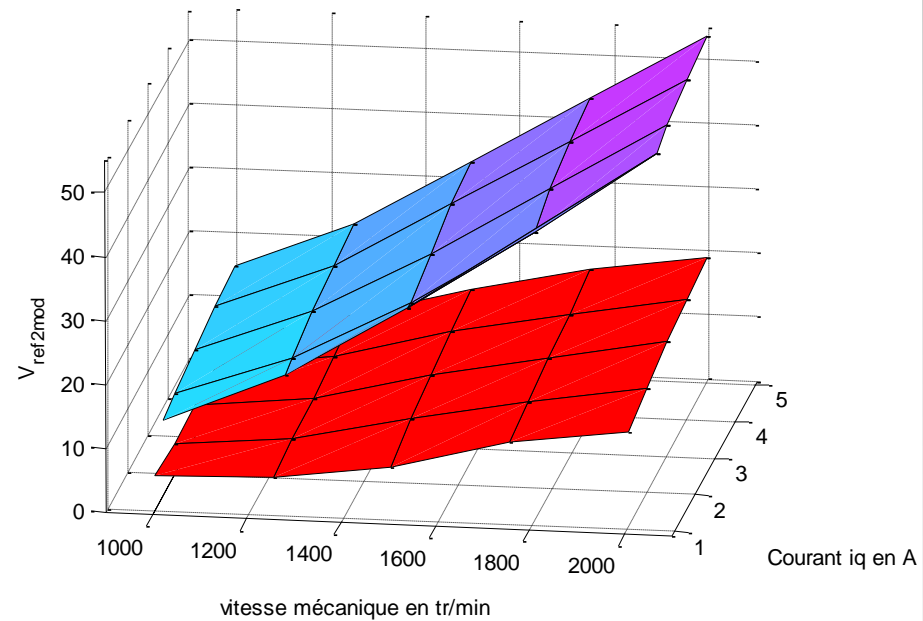
IV. Détection de défaut

➤ Résultats expérimentaux

Evolution de l'indicateur $V_{ref2mod}$ pour une régulation de courant.
Seuil de détection en rouge $+V_{ref2mod}$ pour $R_f=15\Omega$



Evolution de l'indicateur $V_{ref2mod}$ pour une régulation de vitesse.
Seuil de détection en rouge $+V_{ref2mod}$ pour $R_f=15\Omega$



IV. Détection de défaut

❖ Autres méthodes

$$Im_{p2} max = \langle |v_{dref0} \cdot i_{d2}(t)| + |v_{qref0} \cdot i_{q2}(t)| + |v_{qref2}(t) \cdot i_{q0}| \rangle$$

Méthode de détection basée sur les résidus des courants de phase

Méthode de détection basée sur l'estimation de paramètres

V. Conclusion

V. Conclusion

- ❖ Nécessité d'adapter le modèle au type de machine
- ❖ Nécessité d'utiliser une méthode de détection en ligne pour le défaut présenté
- ❖ Nécessité d'utiliser une autre méthode pour faire du pronostic

Bibliographie

Bibliographie

B. Vaseghi, B. Nahid-Mobarakeh, N. Takorabet, F. Meibody-Tabar « Modeling of Non-Salient PM Synchronous Machines under Stator Winding Inter-turn Fault Condition: Dynamic Model – FEM Model » in Proc Electrimacs 2008, 2008, pp. 141.

B. Vaseghi, B. Nahid-Mobarakeh, N. Takorabet, F. Meibody-Tabar " Experimentally Validated Dynamic Fault Model for PMSM with Stator Winding Inter-turn Fault " in IEEE Proc. IAS'08, 2008, Page(s): 1 - 5.

B. Vaseghi, Thèse " Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre spires" thèse de doctorat, Nancy Université, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, Décembre 2009.

T. Boileau, B. Nahid-Mobarakeh, F. Meibody-Tabar " Back-EMF Based Detection of Stator Winding Inter-turn Fault for PM Synchronous Motor Drives " in IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. Page(s): 95 - 100.

T. Boileau, N. Leboeuf, B. Nahid-Mobarakeh, and F. Meibody-Tabar, "Synchronous Demodulation of Control Voltages for Stator Interturn Fault Detection in PMSM ," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 12, pp. pp. 5647 - 5654, Dec 2013.

Bibliographie

T. Boileau, Thèse " Contribution à la continuité de service des actionneurs synchrones à aimants permanents. Tolérance au défaut de capteur mécanique. Détection de Défauts Electriques " thèse de doctorat, Nancy Université, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, Novembre 2010.

N. Leboeuf, T. Boileau, B. Nahid-Mobarakeh, F. Meibody-Tabar, and G. Clerc, "Real-Time Detection of Interturn Faults in PM Drives Using Back-EMF Estimation and Residual Analysis," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, no. 6, pp. 2402-2412, November 2011

N. Leboeuf, T. Boileau, B. Nahid-Mobarakeh, N. Takorabet, F. Meibody-Tabar, and G. Clerc, "Estimating Permanent-Magnet Motor Parameters Under Inter-Turn Fault Conditions," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 2, pp. 963-966, February 2011

N. Leboeuf, T. Boileau, B. Nahid-Mobarakeh, N. Takorabet, F. Meibody-Tabar, and G. Clerc, "Hybrid Data-based/Model-based Inter-turn Fault Detection Methods for PM Drives With Manufacturing Faults," in IEEE Transportation Electrification Conference and Exposition, Detroit, 2013

N. Leboeuf, Thèse " Contribution à l'étude des machines synchrones à aimants permanents en présence de défauts inter-spores : modélisation, détection de défauts inter-spores " thèse de doctorat, Université de Lorraine, Nancy, Décembre 2012.