Paris le 21 Novembre 2013

Détection de défauts statoriques naissants dans les moteurs à courant alternatif

Gérard Champenois & **Monia Bouzid**

L.I.A.S Poitiers
France

L.S.E Tunis
Tunisie

Plan

- Introduction
- Expressions analytiques des composantes symétriques en fonction du défaut statorique
- Compensation du courant inverse pour une meilleur précision de détection du défaut
- Conclusions et perspectives

Introduction

Diagnostic des défauts statoriques type court-circuit :

- **entre spires d'une même phase (défaut simple),**
- **entre phases (défaut interphase),**
- **entre phase - terre (phase-carcasse) (régime TT ou TN)**

⇨ **par les composantes symétriques du courant (CS)**

Introduction

Partie I

Présentation d□expressions analytiques des CS en fonction du défaut

Etude de leurs comportements en fonction du défaut

Extraction d□indicateurs fiables de défauts

Partie II

Amélioration de la précision de détection par la compensation du courant inverse en éliminant:

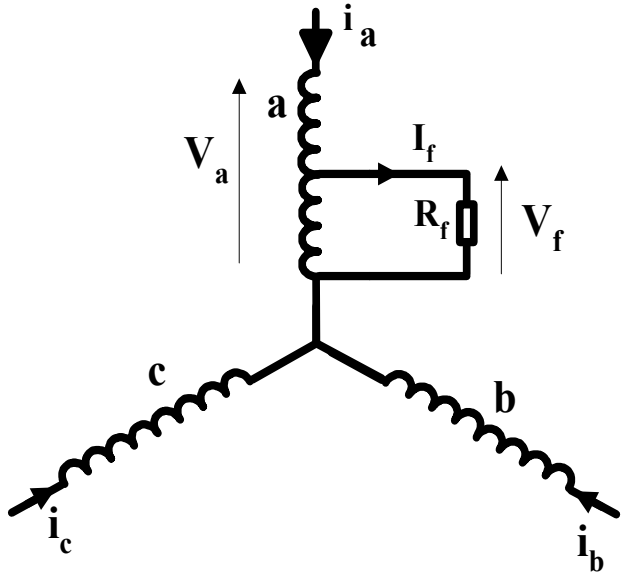
- **Le déséquilibre de tension**
- **La dissymétrie de la machine**
- **Le mauvais calibrage des capteurs**

Partie I

Expressions analytiques des composantes symétriques du courant

Expressions analytiques des CS du courant

Défaut simple



$$\bar{I}_f = \bar{V}_f / R_f$$

Hypothèses :

- Pas de déséquilibre de tension
- Chaque bobine se comporte comme un auto transformateur

$$\bar{V}_f / \bar{V}_a = N_a / N = x_a$$

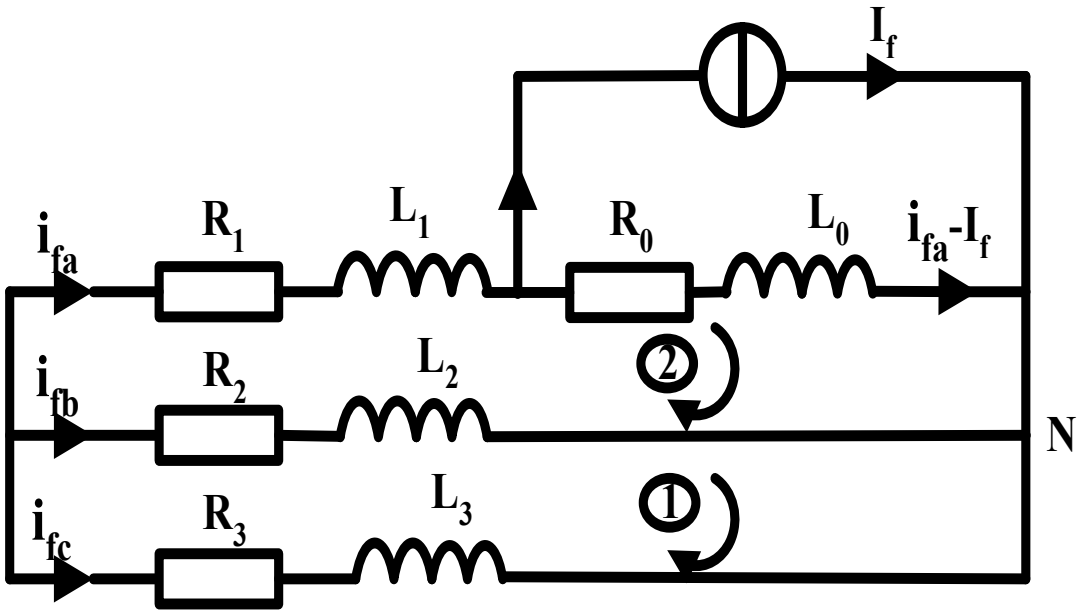
$$\bar{I}_f = \frac{x_a}{R_f} \cdot \bar{V}_a$$

Par superposition

$$\bar{i}_a = \bar{i}_{ha} + \bar{i}_{fa}$$
$$\bar{i}_b = \bar{i}_{hb} + \bar{i}_{fb}$$
$$\bar{i}_c = \bar{i}_{hc} + \bar{i}_{fc}$$

Expressions analytiques des CS du courant

Défaut simple



$$\bar{i}_{fa} = \frac{2}{3}.x_a.\bar{I}_f$$

$$\bar{i}_{fb} = \bar{i}_{fc} = -\frac{1}{3}.x_a.\bar{I}_f$$

$$\bar{i}_{fa} = \frac{2}{3}.\frac{x_a^{\,2}}{R_f}.\overline{V}a$$

$$\bar{i}_{fb} = \bar{i}_{fc} = -\frac{1}{3}.\frac{x_a^{\,2}}{R_f}.\overline{V}_a$$

Expressions analytiques des CS du courant

Défaut simple

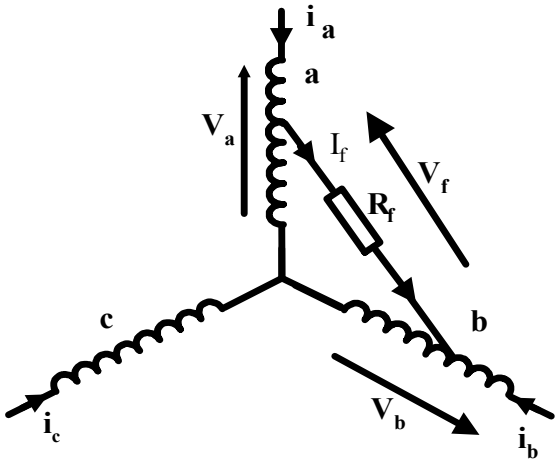
$$\bar{I}_2 = \frac{1}{3}(\bar{i}_a + a^2.\bar{i}_b + a.\bar{i}_c) \qquad \bar{I}_0 = \frac{1}{3}(\bar{i}_a + \bar{i}_b + \bar{i}_c)$$

	Défault sur "a "	Défaut sur " b "	Défaut sur “c"
I_2	$I_2 = \frac{1}{3}\frac{x_a^{\,2}}{R_f}V = \frac{1}{3}x_a I_f$	$I_2 = \frac{1}{3}\frac{x_b^{\,2}}{R_f}V = \frac{1}{3}x_b I_f$	$I_2 = \frac{1}{3}\frac{x_c^{\,2}}{R_f}V = \frac{1}{3}x_c I_f$
Φ_2	$\Phi_2 = 0°$	$\Phi_2 = 120°$	$\Phi_2 = -120°$
I_o	o	o	o
Φ_o	o	o	o

- Φ_2 localise, en sens inverse, la phase en défaut
- I_2 indique la sévérité du défaut pour un R_f ou I_f bien déterminé

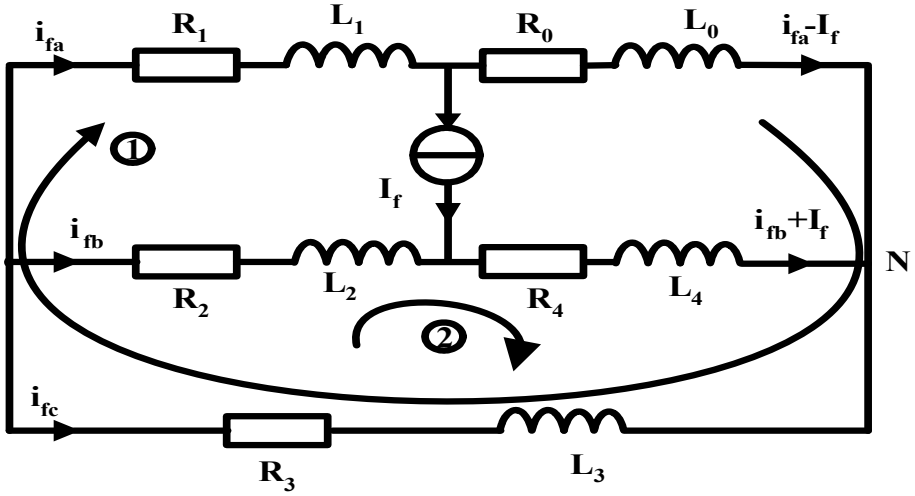
Expressions analytiques des CS du courant

Défaut interphase



$$\bar{I}_f = \frac{\bar{V}_f}{R_f}$$

$$\bar{V}_f = x_a.\bar{V}_a - x_b.\bar{V}_b$$



$$\begin{cases} \bar{i}_{fa} = \dfrac{2x_a + x_b}{3}.\bar{I}_f \\ \bar{i}_{fb} = -\dfrac{(2x_b + x_a)}{3}.\bar{I}_f \\ \bar{i}_{fc} = \dfrac{-x_a + x_b}{3}.\bar{I}_f \end{cases}$$

Expressions analytiques des CS du courant

Défaut interphase

Court-circuit entre la phase "a" et la phase "b"

I_2

$$\frac{V}{3.R_f}\sqrt{\left(x_a^2 - 0.5.x_b^2 + x_a.x_b\right)^2 + \left(0.866.\left(x_b^2 + 2.x_a.x_b\right)\right)^2}$$

$x_a = x_b = x$

$$I_2 = V.x^2/R_f$$

Φ_2

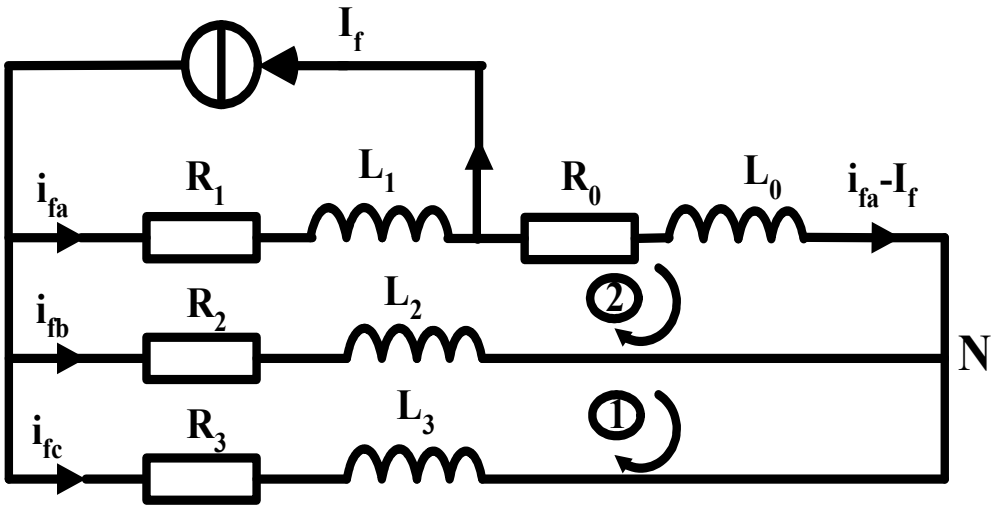
Argument de $\left(x_a^2 - 0.5.x_b^2 + x_a.x_b\right) + j.\left(0.866.\left(x_b^2 + 2.x_a.x_b\right)\right)$

$x_a > x_b$	$x_a = x_b$	$x_a < x_b$
$0° < \Phi_2 < 60°$	$\Phi_2 = 60°$	$60° < \Phi_2 < 120°$

- Φ_2 localise les deux phases en défauts
- I2 indique la sévérité du défaut pour une résistance de défaut R_f bien déterminée

Expressions analytiques des CS du courant

Défaut phase-terre



$$\bar{i}_{f_a} = \left(\frac{2.x_a + 1}{3}\right).\bar{I}_f$$

$$\bar{i}_{fb} = \bar{i}_{fc} = \left(\frac{-x_a + 1}{3}\right).\bar{I}_f$$

Avec

$$\bar{I}_f = \frac{x_a . \bar{V}_a}{R_f}$$

Expressions analytiques des CS du courant

Défaut phase terre

	Phase "a " à la terre	Phase " b " à la terre	Phase “c" à la terre
I_2	$I_2 = \frac{1}{3}\frac{x_a^{\,2}}{R_f}V = \frac{1}{3}x_a I_f$	$I_2 = \frac{1}{3}\frac{x_b^{\,2}}{R_f}V = \frac{1}{3}x_b I_f$	$I_2 = \frac{1}{3}\frac{x_c^{\,2}}{R_f}V = \frac{1}{3}x_c I_f$
Φ_2	$\Phi_2 = 0°$	$\Phi_2 = 120°$	$\Phi_2 = -120°$
I_o	$I_0 = \frac{1}{3}\cdot\frac{x_a}{R_f}V$	$I_0 = \frac{1}{3}\cdot\frac{x_b}{R_f}V$	$I_0 = \frac{1}{3}\cdot\frac{x_c}{R_f}V$
Φ_o	$\Phi_2 = 0°$	$\Phi_2 = 120°$	$\Phi_2 = -120°$

$\bar{I}_0 = \frac{1}{3}.\bar{I}_f$

$I_2/I_o = x_a$: indique le % de spires en défaut

Effet de la fréquence sur les CS du courant

Résultats expérimentaux I_f=0.12A (phase-terre)		N_a=116 x_a= 25%	N_b =116 x_b= 25%
I_2 (A)	cal	0.01	0.01
50Hz	No load	0.018	0.017
30Hz	No load	0.019	0.014
	½ Load	0.012	0.017
ϕ_2 (°)	cal	0	120
50Hz	No load	17	148
30Hz	No load	-18	152
	½ Load	23	156
I_o (A)	cal	0.04	0.04
50Hz	No load	0.041	0.043
30Hz	No load	0.030	0.034
	½ Load	0.031	0.033
ϕ_o (°)	cal	0	-120
50Hz	No load	-1.8	-122
30Hz	No load	-5.5	-122
	½ Load	-2.4	-115

Expressions analytiques des CS du courant

L'étude des expressions des composantes symétriques montre que :

Pour un I_f ou R_f donné, l'amplitude de I2 indique la sévérité du défaut

&

La valeur de la phase φ_2 de la composante inverse et l'amplitude de Io, permettent d'identifier et de localiser la ou les phases en défaut

Expressions analytiques des CS du courant

Ce travail a été concrétisé par :

- **Une communication présentée à la conférence ISIE 2011**

&

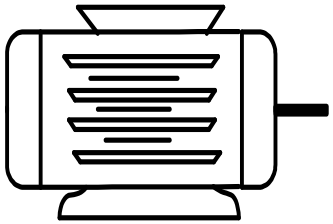
- **Une publication dans la revue IEEE Transaction on Industrial Electronics (TIE 2013)**

Partie II

Compensation du courant inverse

Compensation du courant inverse

Introduction



Machine déséquilibrée

Courant inverse I_2

Superposition du

1/ Défaut statorique I2f

2/ Déséquilibre de la tension d□alimentation I2uv

3/ Dissymétrie de la machine I2asy

4/ Mauvais calibrage des capteurs I2s

Compensation du courant inverse

Introduction

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{2f} + \bar{I}_{2uv} + \bar{I}_{2s} + \bar{I}_{2asy}$$

$$\bar{I}_{2f} = \bar{I}_2 - \underbrace{\bar{I}_{2uv}\bar{I}_{2s}\bar{I}_{2asy}}_{I_{2comp}}$$

$$\bar{I}_{2f} = \bar{I}_2 - \bar{I}_{2comp}$$

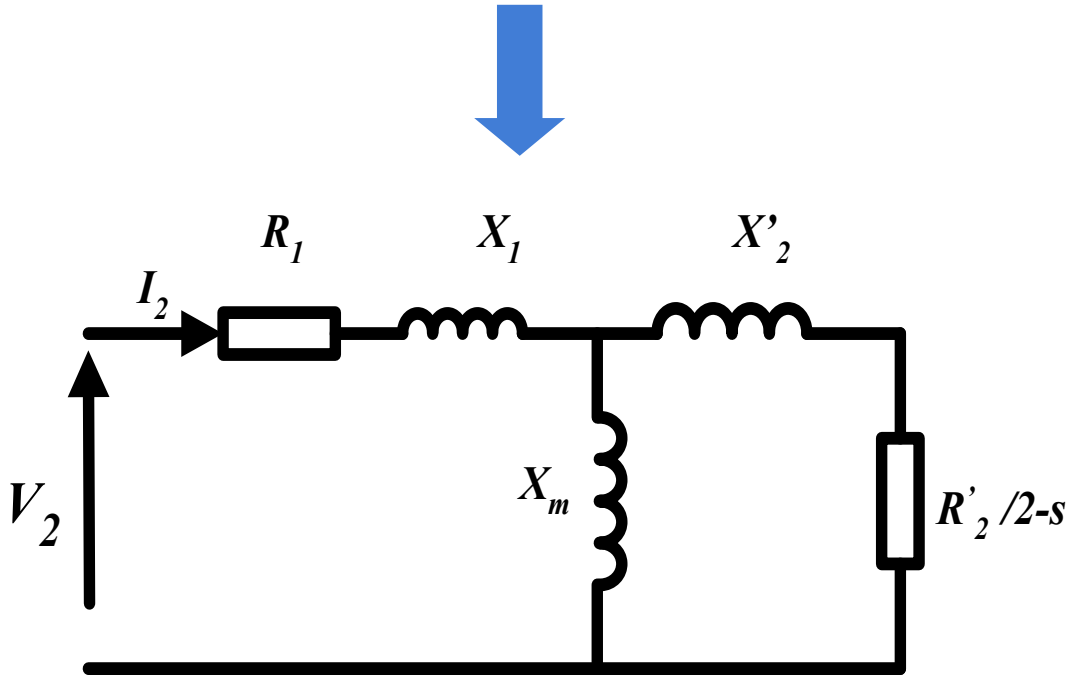
?

Comment identifier et isoler les différentes composantes I_{2asy}, I_{2uv} et I_{2asy}

Compensation du courant inverse

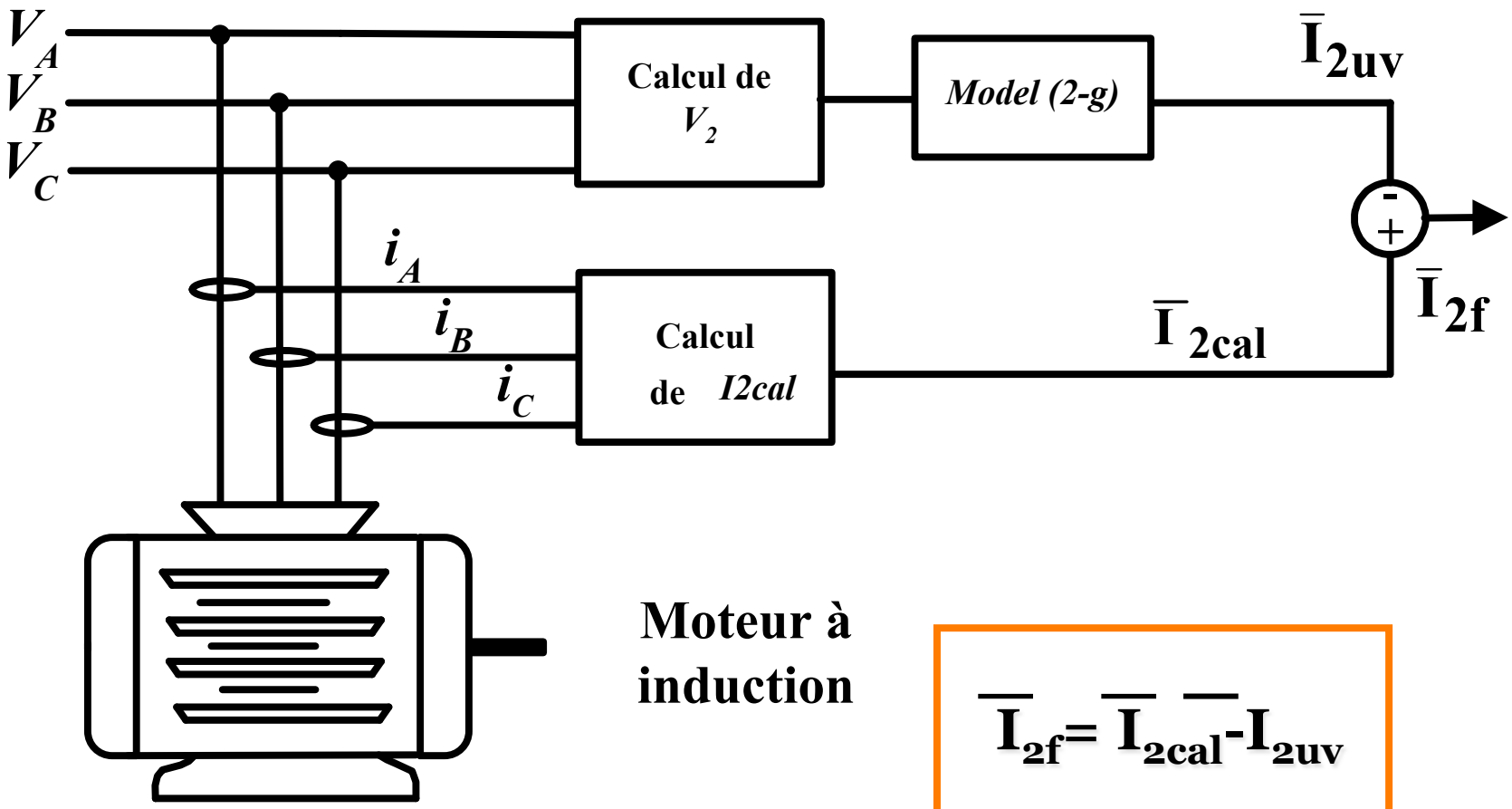
Identification de I_{2uv}

La CS inverse I_{2uv} dû au déséquilibre de tension est obtenu à partir du modèle avec un glissement (2-s) et alimenté par la tension inverse de l'alimentation



Compensation du courant inverse

Compensation de I_{2uv}



$$\bar{I}_{2f} = \bar{I}_{2cal} - \bar{I}_{2uv}$$

Compensation du courant inverse

Résultats expérimentaux

		V_1 (V)	V_2 (V)	I_{2uv} (A)	I_{2cal}(A)	I_{2f} (A)
F_1 & *BV*	Mag.	228.6	0.094	0.0055	0.0714	0.071
	Angle	0.145	129.3	83.9	-1.64	-6.07
F1 (-4V)	Mag.	228.2	1.372	0.0809	0.0408	0.072
	Angle	0.135	178.2	132.7	69.86	-17.05
F1 (+4V)	Mag.	230.8	1.249	0.0737	0.136	0.0744
	Angle	0.164	2.518	-42.93	-19.48	3.72
F1 (- 1°)	Mag.	228.3	1.22	0.072	0.065	0.0826
	Angle	0.469	-91.2	-136.6	-62.75	-5.88
F1 (+1°)	Mag.	228.8	1.36	0.0802	0.122	0.0555
	Angle	-0.15	93.4	47.94	26.56	-5.23
F1 (-4V) & (-1°)	Mag.	227.2	1.835	0.1097	0.031	0.085
	Angle	0.4634	-134.7	179.7	-144.2	-12.12

Compensation du courant inverse

Identification de I_{2asy} et I_{2s}

On utilise que deux capteurs de courant pour la mesure des courants de ligne de la machine

$$\bar{I}_2 = 1/3\,(\bar{I}_a + \bar{a}^2.\bar{I}_b + \bar{a}.\bar{I}_c)$$

&

$$\bar{I}_c = -\bar{I}_a - \bar{I}_b$$

$$\bar{I}_2 = 1/3\,(1-\bar{a}).(\bar{I}_a - \bar{a}.\bar{I}_b)$$

Compensation du courant inverse

Identification de I_{2asy}

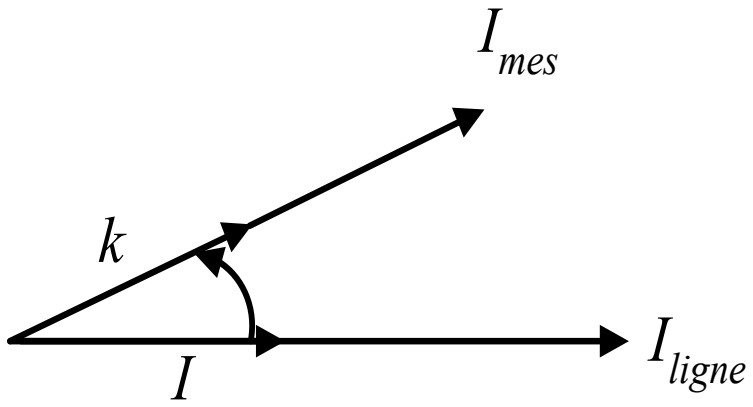
En supposant que la tension d'alimentation est équilibrée, que les capteurs de courant sont idéaux (bien calibrés) on a :

$$\bar{I}_{2asy} = 1/3\ (1-\bar{a}).(\bar{I}_a - \bar{a}.\bar{I}_b)$$

Compensation du courant inverse

Identification de I_{2s}

Les erreurs introduites par un mauvais calibrage des capteurs peuvent être modélisées en introduisant un gain k et un angle α



$$\bar{I}_{mes} = k.e^{j.\alpha}.\bar{I}_{ligne}$$

Compensation du courant inverse

Identification de I_{2s}

$$\bar{I}_{2s} = \frac{(1-\bar{a}).(k_a.e^{j\alpha_a}.\bar{I}_a - \bar{a}.k_b.e^{j\alpha_b}.\bar{I}_b)}{3}$$

Puisque $\bar{I}_b = \bar{a}^2\bar{I}_a$

$$\bar{I}_{2s} = \frac{(1-\bar{a}).\bar{I}_a(k_a.e^{j\alpha_a} - k_b.e^{j\alpha_b})}{3}$$

$$\bar{I}_1 = \frac{(1-\bar{a}).\bar{I}_a(-\bar{a}^2.k_a.e^{j\alpha_a} + k_b.e^{j\alpha_b})}{3}$$

Compensation du courant inverse

Identification de I_{2s}

$$\frac{\bar{I}_{2s}}{\bar{I}_1} = \frac{(k_a.e^{j\alpha_a} - k_b.e^{j\alpha_b})}{(-\bar{a}^2.k_a.e^{j\alpha_a} + k_b.e^{j\alpha_b})}$$

$$\frac{\bar{I}_{2s}}{\bar{I}_1} = K_{s-i}.\angle\theta_{s-i} \quad \begin{cases} K_{s-i} = I_{2s}/I_1 \\ \theta_{s-i} = \theta_{2s} - \theta_1 \end{cases}$$

$$\bar{I}_{2s} = I_1.K_{s-i}.\angle\theta_1 + \theta_{s-i}$$

Compensation du courant inverse

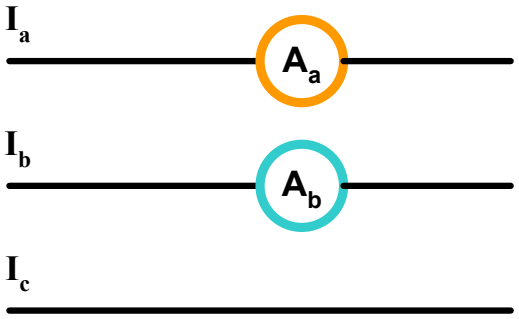
Dans une machine saine les deux effets se superposent

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{2asy} + \bar{I}_{2s}$$

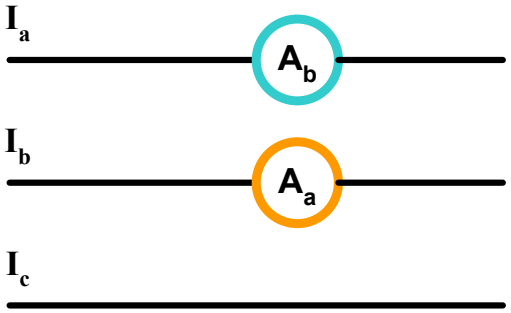
Séparation de I_{2s} et I_{2asy}

Pour les séparer la mesure des courants I_a et I_b se fait en mode direct et en mode inverse

Mode direct



Mode inverse



Compensation du courant inverse

Séparation de I_{2s} et I_{2asy}

En mode direct

$$\bar{I}_{2_d} = \frac{1}{3}(1-\bar{a}).(k_a.e^{j\alpha_a}.\bar{I}_a - \bar{a}.k_b.e^{j\alpha_b}.\bar{I}_b)$$

En mode inverse

$$\bar{I}_{2_rev} = \frac{1}{3}.(1-\bar{a}).(k_b.e^{j\alpha_b}.\bar{I}_a - \bar{a}.k_a.e^{j\alpha_a}.\bar{I}_b)$$

Compensation du courant inverse

Séparation de I_{2s} et I_{2asy}

$$\frac{\bar{I}_{2_d} + \bar{I}_{2_rev}}{2} = \underbrace{\frac{(k_a.e^{j\alpha_a} + k_b.e^{j\alpha_b})}{2}}.\bar{I}_{2asy}$$

Les erreurs de gain et de phase sont de quelques %

$$\frac{(k_a.e^{j\alpha_a} + k_b.e^{j\alpha_b})}{2} \approx 1$$

Compensation du courant inverse

Séparation de I_{2s} et I_{2asy}

$$\bar{I}_{2asy} \approx \frac{\bar{I}_{2_d} + \bar{I}_{2_rev}}{2}$$

Une fois I_{2asy} obtenu

→ **I_{2s} (capteurs) peut être déterminé**

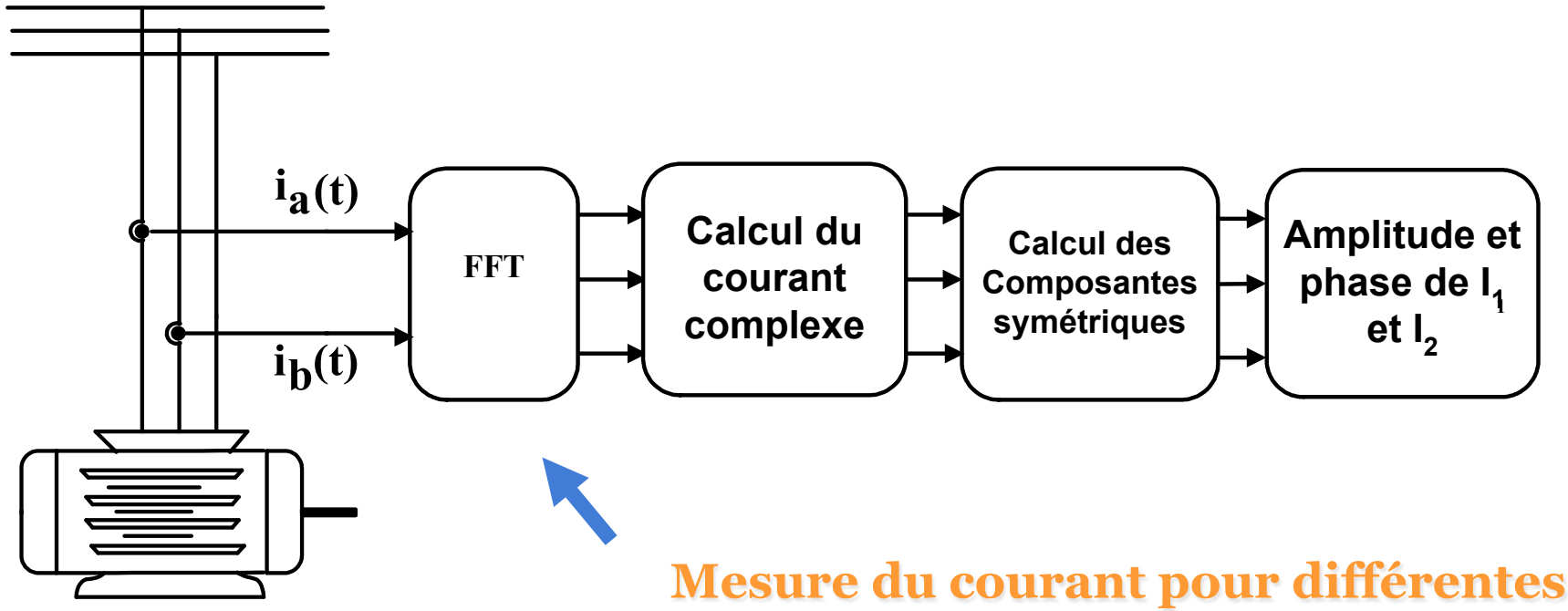
$$\bar{I}_{2s} = \bar{I}_2 - \bar{I}_{2asy}$$

Avec I_2 le CS inverse de la machine saine

Résultats expérimentaux

Moteur sain

Tension d'alimentation équilibrée



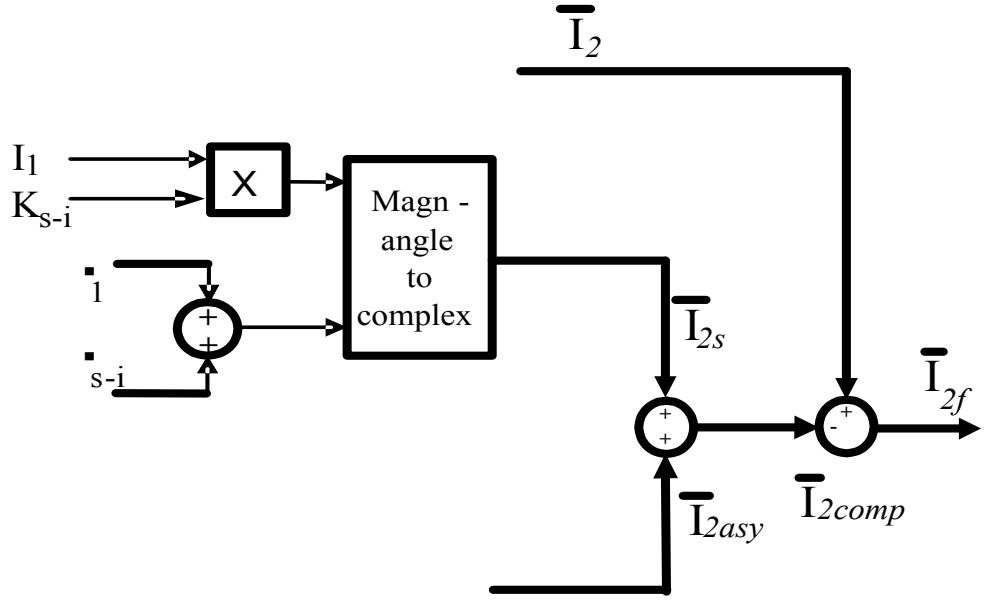
Mesure du courant pour différentes charges

Moteur asynchrone de 1.1 kW

Résultats expérimentaux

Moteur en défaut

Après la détermination de I_{2comp} la CS I_2 est compensée



$$\bar{I}_{2f} = \bar{I}_2 - \bar{I}_{2comp}$$

Résultats expérimentaux

Moteur sain

Moteur sain	ab_d	ab_{rev}	ab_d	ab_{rev}	ab_d	ab_{rev}
Torque (N.m)	7	7	3.5	3.5	no load	no load
I_1 (A)	3.585	3.55	2.725	2.71	2.52	2.51
θ_1(°)	-37	-37.7	-52.6	-53	-80.7	-81.2
I_{2_d} & I_{2_rev} (A)	0.0096	0.0334	0.006	0.0336	0.0286	0.0367
Θ (°)	103.9	-116.4	56.2	-113.5	-52	-101.3
I_{2asy} (A)	0.0134		0.0186		0.0297	
θ_{2asy}(°)	-129.8		-105.7		-79.9	
I_{2s} (A)	0.0206	0.0206	0.0154	0.0154	0.0141	0.0141
θ_{2s} (°)	72.3	-107.7	57	-123	28.5	-151.5
K_{s-i}	0.0057		0.0056		0.0056	
ϕ_{s-i}(°)	-109.3		-109.7		-109.2	

Résultats expérimentaux

Moteur sain

Moteur sain		I_1 (A)	I_2 mesuré (A)	I_{2_comp} (A)	$I_{2\text{-sain}}$ résiduel (A)
Charge nominale	Amplitude	3.58	0.0098	0.0094	0.0004
	Angle (°)	-37	105.7	104.5	133.9
Moitié charge	Amplitude	2.73	0.0055	0.0060	0.00056
	Angle (°)	-52.4	-60.2	-57.4	151.4
À Vide	Amplitude	2.52	0.0286	0.0286	0.00003
	Angle (°)	-80.7	-52	-51.7	-94.3

Amélioration notable de I2 du moteur sain (presque nul)

Résultats expérimentaux

Moteur en défaut

Nous présentons les résultats de deux types de défaut F1 et F2

Réaliser avec un I_f= 1A (Défaut naissant avec In=2.5A)

F_1 défaut de CC de 58 spires sur la phase C

F_2 CC entre les 58éme spires de la phase a et les 29éme spires de la phase c

Résultats expérimentaux

Moteur en défaut

Calcul analytique : F1 → $\Theta = -120°$ et $I_2 = 0.059$ A

I_f=1A		I_1 (A)	I_2 (A)	I_{2comp} (A)	I_{2f} (A)
A vide	Amplitude	2.52	0.072	0.028	0.056
	Angle (°)	-79.3	-97.8	-51.8	-119
Charge nominale	Amplitude	3.62	0.047	0.0096	0.053
	Angle (°)	-36.5	-130	104.3	-121.5

Résultats expérimentaux

Moteur en défaut

Calcul analytique : F_2

0.082A

φ =-38.2° rt I_2 =

I_f=1A		I_1 (A)	I_2 (A)	I_{2comp} (A)	I_{2f} (A)
A vide	Amplitude	2.52	0.101	0.028	0.074
	Angle (°)	-78.7	-39.8	-51.8	-35.3
Charge nominale	Amplitude	3.63	0.066	0.0097	0.073
	Angle (°)	-36.3	-31.3	104.5	-36.6

compensation notable de l'amplitude et de la phase de I2 ⟹ une détection plus précise

Compensation du courant inverse

Ce travail a été concrétisé par :

- **Une communication présentée à la conférence ICEM 2012**

- **Une communication présentée à la conférence IECON 2013**

Conclusions & perspectives

Pour le diagnostic de courts-circuits statoriques, les composantes symétriques offrent une bonne sensibilité pour la détection et la localisation des défauts.

Calcul analytique des amplitudes et phases (I2 et Io)

Avec l'hypothèse : pas de déséquilibre de tension

- **CC entre spires d'une même phase (défaut simple),**
- **CC entre phases (défaut interphase),**
- **CC entre phase - terre (phase-carcasse) (régime TT ou TN)**

➡ **Validations expérimentales**

Conclusions & perspectives

Mais cette méthode a aussi une grande sensibilité à d'autres défauts :

- **Déséquilibre de la tension d'alimentation**
  - ➡ **Compensable par l'impédance inverse de la MAS**
  - ➡ **Diagnostic sur la qualité de la source d'alimentation**
- **Mauvais calibrage des capteurs de courant**
  - ➡ **Mesurable par des essais spécifiques**
  - ➡ **Diagnostic sur la différence de calibrage des capteurs de courant**
- **Dissymétrie de construction de la machine**
  - ➡ **Déductible après la compensation des autres défauts**
  - ➡ **Diagnostic sur la qualité de fabrication de la machine**