

# การตรวจสอบแรงบิดช่องอากาศของมอเตอร์ เหนี่ยวนำ 3 เฟส ภายใต้เงื่อนไขการทำงานของ การลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์\*

พูนศรี วรรณการ<sup>1)</sup> และ วิจิตร กิณเรศ<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> อาจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร วิทยาเขตพระนครเหนือ 10800

<sup>2)</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520

Email : v\_poonsri555@yahoo.com

## บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอถึงการตรวจสอบแรงบิดช่องอากาศของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 3 hp ภายใต้เงื่อนไขการทำงานของ การลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ โดยการวิเคราะห์จากแรงบิดช่องอากาศที่สภาวะคงตัว ภายใต้แหล่งจ่ายที่เป็นคลื่นไซน์ความถี่ 50 Hz ข้อมูลแรงดัน และกระแสสเตเตอร์ถูกตรวจจับ และประมวลผลด้วยเทคนิคออฟไลน์(Off-line) โดยใช้โปรแกรม Matlab ผลที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ทั้งโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ การแปลงให้อยู่ในโดเมนความถี่จะใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว เพื่อวิเคราะห์บ่งชี้ความผิดปกติของมอเตอร์ จากผลการทดสอบสามารถตรวจสอบหาความผิดปกติของมอเตอร์ในสภาวะลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ โดยใช้วิธีที่เสนอได้เป็นที่น่าพอใจ

**คำสำคัญ :** มอเตอร์เหนี่ยวนำ, แรงบิดช่องอากาศ, การลัดรอบ

---

\* รั้งต้นฉบับเมื่อวันที่ 22 กันยายน 2549 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 8 มกราคม 2550

# Investigation on Air-Gap Torque of Three-phase Induction Motors under Stator Winding Shorted-turn\*

Poonsri Wannakran<sup>1)</sup> and Vijit Kinnaree<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Lecturer, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamagala University of Technology Phra Nakhon North Bangkok Campus Bangkok Thailand 10800

<sup>2)</sup> Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok Thailand 10520

E-mail: v\_poonsri555@yahoo.com

## ABSTRACT

This paper presents an investigation on air-gap torque of three-phase 3 hp induction motor beneath operating condition of shorted-turn stator winding through air-gap torque at steady state conditions and 50 Hz sinusoidal mains supply. Voltage and currents data are detected and processed with an off-line technique using Matlab. The analysis is performed both in time domain and frequency domain. The frequency domain analysis is based on FFT technique in order to identify motor faults. The results show that the proposed technique is capable of detecting shorted-turn stator fault at satisfied level.

**Keywords :** Induction motor, Air-gap torque, Shorted-turn

---

\* Original manuscript submitted: September 22, 2006 and Final manuscript received: January 8, 2006

## บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนียวนำ 3 เฟส ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากการบำรุงรักษาน้อยกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าดีซี และการควบคุมการทำงานได้มีการพัฒนาเทียบได้กับมอเตอร์ไฟฟ้าดีซี รวมถึงราคาไม่แพง ดังนั้นการตรวจสอบเพื่อวิเคราะห์ความผิดปกติต่างๆ ที่เริ่มเกิดขึ้นภายในมอเตอร์จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการช่วยลดการเกิดความผิดปกติที่รุนแรง และเป็นการยืดอายุการใช้งานของมอเตอร์ ทำให้มอเตอร์สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และมีประสิทธิภาพ ซึ่งความผิดปกติที่มีสาเหตุมาจากตัวนำสเตเตอร์นับเป็นปัญหาที่สำคัญรองจากแบร์ริง (Bearing) (Benbouzid *et al.*, 2003) โดยมีสาเหตุมาจากปัจจัยที่สำคัญ คือ ความเค้น (Stress) ใต้แก๊ท ทางกล ทางไฟฟ้า ความร้อน และสภาพแวดล้อม ซึ่งนำไปสู่การลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์และอาจลุกลามขยายความรุนแรงต่อไป การวินิจฉัยความผิดปกติที่เกิดจากจนวนขดลวดเสื่อมสภาพของมอเตอร์แบบไม่ต้องรื้อโครงมอเตอร์ออก ทำได้โดยการวิเคราะห์จากสัญญาณกระแสสเตเตอร์ (Thomson *et al.*, 2001) กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ (Legowski *et al.*, 1996) หรืออิมพีแดนซ์ลำดับลบ (Melero *et al.*, 2003) ในบทความการศึกษาหาความผิดปกติของมอเตอร์เหนียวนำ 3 เฟสโดยใช้แรงบิดแอร์แก๊ป (อัมพร รัชญูเจริญ และคณะ, 2547) นั้นไม่มีผลการจำลองเทียบกับผลการทดลอง และการเปลี่ยนภาระโหลดที่สูงขึ้น ดังนั้นในบทความนี้จึงได้ศึกษาแบบจำลองในการตรวจสอบแรงบิดช่องอากาศของมอเตอร์เหนียวนำ 3 เฟส ภายใต้เงื่อนไขการทำงานของกลัตรอบของขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งเกิดจากผลของฟลักซ์และกระแสทั้งในสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งสามารถตรวจสอบการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ได้

## สมการแรงบิดช่องอากาศ

ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟส หาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\psi_a &= \int (v_a - R i_a) dt \\ \psi_b &= \int (v_b - R i_b) dt \\ \psi_c &= \int (v_c - R i_c) dt\end{aligned}\tag{1}$$

แรงบิดช่องอากาศเกิดจากฟลักซ์แม่เหล็ก และกระแส (Hsu, 1995) หาได้จากสมการ

$$Torque[Nm] = \frac{P\sqrt{3}}{6} \begin{bmatrix} i_a (\psi_c - \psi_b) + i_b (\psi_a - \psi_c) \\ + i_c (\psi_b - \psi_a) \end{bmatrix}\tag{2}$$

เมื่อ  $P$  คือจำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole) นำสมการที่ (1) แทนลงในสมการที่ (2) และจัดรูปใหม่จะได้

$$Torque[Nm] = \frac{P}{2\sqrt{3}} \left\{ \begin{array}{l} (i_A - i_B) \int [v_{CA} - R(i_C - i_A)] dt \\ -(i_C - i_A) \int [v_{AB} - R(i_A - i_B)] dt \end{array} \right\} \quad (3)$$

ซึ่ง  $P$  คือจำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole) ,  $i_A, i_B, i_C$  คือกระแสไลน์ ,  $R$  คือความต้านทานสเตเตอร์ เมื่อมอเตอร์ต่อแบบสตาร์ไม่มีนิวทรอล หรือต่อแบบเดลต้า จากสมการที่ (3) สามารถทำให้ง่ายขึ้นโดยแทน  $i_B = -(i_A + i_C)$  จะได้

$$Torque[Nm] = \frac{P\sqrt{3}}{6} \left\{ \begin{array}{l} (2i_A - i_C) \int [v_{CA} - R(i_C - i_A)] dt \\ -(i_C - i_A) \int [-v_{BA} - R(2i_A + i_C)] dt \end{array} \right\} \quad (4)$$

โดยที่ฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวคล้อง CA ( $\psi_{CA}$ ) และ AB ( $\psi_{AB}$ ) แสดงได้โดย

$$\begin{aligned} \psi_{CA} &= \int [v_{CA} - R(i_C - i_A)] dt \\ \psi_{AB} &= \int [-v_{BA} - R(2i_A + i_C)] dt \end{aligned} \quad (5)$$

### องค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ของแรงบิดช่องอากาศ

สมการที่ (6) เป็นสมการแรงบิดที่อธิบายในรูปขององค์ประกอบความถี่ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ที่สภาวะปกติ (Melero *et al.*, 1999)

$$\begin{aligned} T = -lR_r \cdot \frac{\delta}{\mu_o} \left\{ \frac{\mu_o}{\delta} \int_0^{2\pi} \left\{ \sum_{v=1}^{\infty} F \max_v \cdot \sin(v\alpha \mp \omega t) \cdot \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} B_{\mu v} \cdot \cos[\mu(\alpha - \omega_r t) \mp (\pm \omega - v\omega_r)t - \varphi_{\mu v}] \cdot d\alpha \right\} + \int_0^{\pi} \left\{ \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} B_{\mu v} \cdot \sin[\mu(\alpha - \omega_r t) \mp (\pm \omega - \omega_r)t - \varphi_{\mu v}] \cdot \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} \cos[\mu(\alpha - \omega_r t) \mp (\pm \omega - v\omega_r)t - \varphi_{\mu v}] \cdot d\alpha \right\} \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

โดยที่  $l$  คือ ความยาวของมอเตอร์ ,  $R_r$  คือ รัศมีของโรเตอร์ ,  $\delta$  คือ ความยาวของช่องอากาศ ,  $\omega_r$  คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ และ  $\alpha$  คือ ตำแหน่งเชิงมุมรอบช่องอากาศ

เมื่อวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์ (6) มอเตอร์ในสภาวะปกติพบว่าสเปกตรัมแรงบิดช่องอากาศมีคุณลักษณะดังนี้คือ (Melero *et al.*, 1999)

เหนี่ยวนำ 3 เฟส ภายใต้เงื่อนไขการทำงานของกลัฏรอบของขดลวดสเตเตอร์

- เกิดที่ความถี่เป็นสองเท่าของความถี่มูลฐาน ( $2f_1$ ): 100 Hz
- เกิดที่ความถี่เป็นตัวคูณของความเร็วโรเตอร์ตั้งสมการ

$$f_{ag1} = k.f_r \quad (7)$$

ซึ่ง

$$f_r = \left( \frac{1-s}{P} \right) . f_1 \quad (8)$$

เมื่อ  $f_1$  คือ ความถี่มูลฐาน,  $f_r$  คือ ความถี่ที่ความเร็วโรเตอร์,  $P$  คือ จำนวนคู่ขั้วแม่เหล็ก (Pole pair),

$s$  คือ สลิปของมอเตอร์,  $k$  คือ 1,2,3... เมื่อเกิดการลัดวงจรที่ขดลวดนอกจากจะพิจารณาสเปกตรัมที่ความถี่ที่กล่าวมาข้างต้นแล้วจะเกิดองค์ประกอบความถี่ไซด์แบนด์ของความถี่เป็นตัวคูณของความเร็วโรเตอร์ (Melero *et al.*, 1999) ตั้งสมการ

$$f_{ag2} = k.f_r + 2sf_1 \quad (9)$$

แต่เนื่องจากองค์ประกอบของขดลวดอาจมีผลไปลดหรือกำจัดองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์บางตัวของสนามแม่เหล็กซึ่งจะส่งผลให้แอมพลิจูดของสเปกตรัมของแรงบิดของอากาศบางองค์ประกอบจะมีค่าน้อยลง หรือไม่แสดงให้เห็น

## การจำลอง

ในการจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ(Chang *et al.*, 2003) จะใช้โปรแกรม Matlab/Simulink โดยจำลองมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า 50 Hz 4 ขั้ว 380 V โดยจะพิจารณาการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ต่อเป็นแบบวาย(Y) โดยมีการลัดรอบ 3% ของจำนวนรอบ 270 รอบต่อเฟส ซึ่งลัดรอบขดลวดทั้ง 3 เฟส

### แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ abc

สมการแรงดันที่สเตเตอร์และโรเตอร์แสดงตั้งสมการ

$$\begin{aligned} [U_s] &= [R_s][I_s] + [p\psi_s] \\ [0] &= [R_r][I_r] + [p\psi_r] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} [\psi_s] &= [L_{s\sigma} + M_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\psi_r] &= [M_{rs}][I_s] + [L_{r\sigma} + M_{rr}][I_r] \end{aligned} \quad (11)$$

โดย  $p$  คือ การจัดการอนุพันธ์ (d/dt) และ

$$[U_S] = \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} \quad [I_S] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad [I_R] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (12)$$

และเมตริกซ์ค่าความเหนี่ยวนำรวมสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$[M_{SR}] = [M_{RS}]^T \quad (13)$$

### สัมประสิทธิ์ของความผิดปกติ

กำหนดให้  $f_{sa}, f_{sb}, f_{sc}$  คือ เปอร์เซนต์ของการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ในเฟส a, b และ c ตามลำดับ สัมประสิทธิ์ของความผิดปกติแสดงได้โดย

$$f_{sa}^* = 1 - f_{sa} \quad ; \quad f_{sb}^* = 1 - f_{sb} \quad ; \quad f_{sc}^* = 1 - f_{sc} \quad (14)$$

ในกรณีที่ไมเกิดความผิดปกติขึ้นสัมประสิทธิ์ทั้งสาม  $f_{sa}^*, f_{sb}^*, f_{sc}^*$  จะมีค่าเท่ากับ 1

### การแสดงค่าพารามิเตอร์เมื่อเกิดความผิดปกติ

เมื่อเกิดการลัดรอบที่ขดลวดสเตเตอร์เมตริกซ์ทางด้านโรเตอร์ได้แก่  $[M_{RR}], [R_R], [L_{R\sigma}]$  จะไม่มีผลกระทบซึ่งแสดงได้โดย

$$[M_{RR}] = \begin{bmatrix} M & -\frac{M}{2} & -\frac{M}{2} \\ -\frac{M}{2} & M & -\frac{M}{2} \\ -\frac{M}{2} & -\frac{M}{2} & M \end{bmatrix}; [R_R] = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}; [L_{R\sigma}] = \begin{bmatrix} L_{r\sigma} & 0 & 0 \\ 0 & L_{r\sigma} & 0 \\ 0 & 0 & L_{r\sigma} \end{bmatrix} \quad (15)$$

แต่เมตริกซ์ทางด้านสเตเตอร์นั้นจะได้รับผลกระทบสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} [R_S] &= \begin{bmatrix} f_{sa}^* r_s & 0 & 0 \\ 0 & f_{sb}^* r_s & 0 \\ 0 & 0 & f_{sc}^* r_s \end{bmatrix} \\ [L_{S\sigma}] &= \begin{bmatrix} f_{sa}^{*2} & 0 & 0 \\ 0 & f_{sb}^{*2} & 0 \\ 0 & 0 & f_{sc}^{*2} \end{bmatrix} \\ [M_{SS}] &= \begin{bmatrix} M f_{sa}^{*2} & -f_{sa}^* f_{sb}^* \frac{M}{2} & -f_{sa}^* f_{sc}^* \frac{M}{2} \\ -f_{sa}^* f_{sb}^* \frac{M}{2} & f_{sb}^{*2} M & -f_{sb}^* f_{sc}^* \frac{M}{2} \\ -f_{sa}^* f_{sc}^* \frac{M}{2} & -f_{sb}^* f_{sc}^* \frac{M}{2} & f_{sc}^{*2} M \end{bmatrix} \\ [M_{SR}] &= \begin{bmatrix} f_{sa}^* M c_1 & f_{sa}^* M c_3 & f_{sa}^* M c_2 \\ f_{sb}^* M c_2 & f_{sb}^* M c_1 & f_{sb}^* M c_3 \\ f_{sc}^* M c_3 & f_{sc}^* M c_2 & f_{sc}^* M c_1 \end{bmatrix} = [M_{RS}]^T \end{aligned} \quad (16)$$

เมื่อ

$$f_{sa}^* f_{sb}^* f_{sc}^* = 0.97 ; r_r = 3.77 \Omega ; L_M = 0.249 H$$
$$M = \frac{2}{3} L_M ; c_1 = \cos \theta ; c_2 = \cos \left( \theta - \frac{2}{3} \pi \right) ; c_3 = \cos \left( \theta + \frac{2}{3} \pi \right) \quad (17)$$

มุม  $\theta$  คือมุมระหว่างสเตเตอร์เฟส a และโรเตอร์เฟส b แสดงได้โดย

$$\theta = \int \omega_r dt, \quad \omega_r = (1-s)\omega_s \quad (18)$$

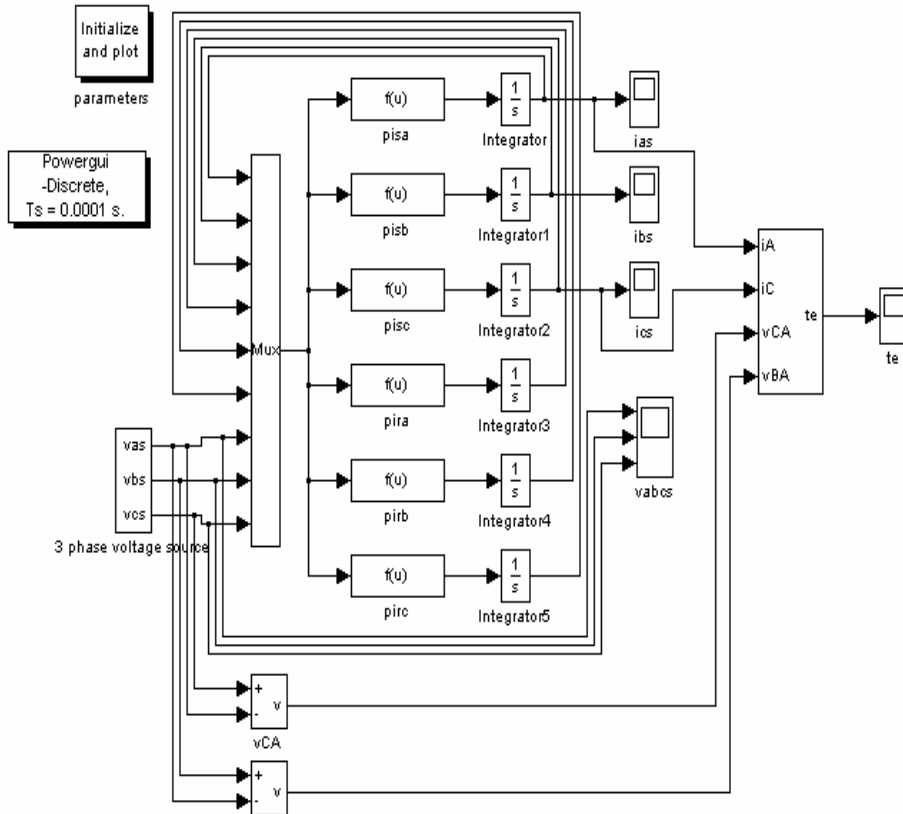
โดยที่  $s = (\omega_s - \omega_r) / \omega_s$  คือ ค่าสลิปของมอเตอร์

$\omega_s$  คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าที่สเตเตอร์

$\omega_r$  คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์

## แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้โปรแกรม Matlab

การเขียนแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส , กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์และโรเตอร์ และแบบจำลองแรงบิดช่องอากาศ โดยแบบจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 1



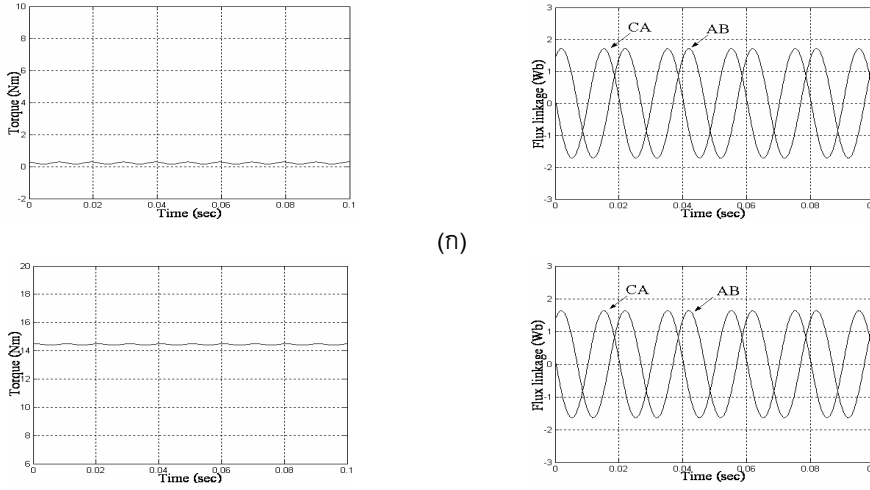
รูปที่ 1 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

### ผลการจำลอง

รูปที่ 2 แสดงแรงบิดช่องอากาศและฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวกับคอลลิ่งของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ในขณะที่ทำงานปกติ จะเห็นได้ว่าแรงบิดช่องอากาศจะค่อนข้างเรียบ ฟลักซ์ CA ( $\psi_{CA}$ ) , ฟลักซ์ AB ( $\psi_{AB}$ ) จะมีขนาดเท่ากัน



เห็นยวน่า 3 เฟส ภายใต้เงื่อนไขการทำงานของกลัทรอบของขดลวดสเตเตอร์

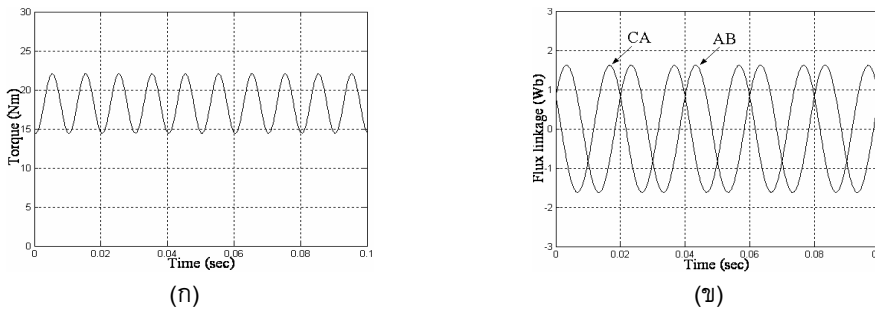


(ก)

(ข)

รูปที่ 2 ซ้ายคือแรงบิดช่องอากาศ และขวาคือฟลักซ์ CA ( $\psi_{CA}$ ), ฟลักซ์ AB ( $\psi_{AB}$ ) ของมอเตอร์ปกติ ขนาด 3 แรงม้าที่ได้จากการจำลอง (ก) ขณะไร้ภาระ (ข) ขณะภาระเต็มพิกัด

ในขณะที่มอเตอร์เกิดการลัทรอบของขดลวดสเตเตอร์แรงบิดช่องอากาศและฟลักซ์ CA ( $\psi_{CA}$ ), ฟลักซ์ AB ( $\psi_{AB}$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 3 ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า โดยจะเห็นได้ว่าแรงบิดช่องอากาศที่ได้นั้นจะมีการกระเพื่อมมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ปกติ และฟลักซ์แม่เหล็กก็มีขนาดที่ต่างกันเล็กน้อย

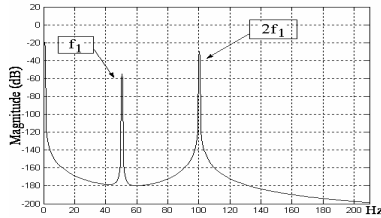


(ก)

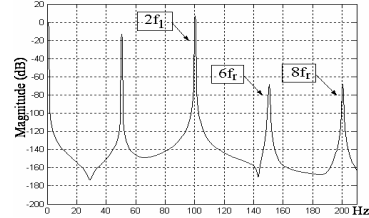
(ข)

รูปที่ 3 (ก) แรงบิดแอร์แกป (ข) ฟลักซ์ CA ( $\psi_{CA}$ ), ฟลักซ์ AB ( $\psi_{AB}$ ) ของมอเตอร์ 3 แรงม้าเมื่อ ขดลวดลัทรอบ 3% ขณะมีภาระเต็มพิกัด

รูปที่ 4 และรูปที่ 5 แสดงสเปคตรัมแรงบิดช่องอากาศเมื่อขดลวดเกิดการลัทรอบของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าขณะไร้ภาระและมีภาระตามลำดับ ซึ่งในขณะที่มอเตอร์ไร้ภาระนั้นสเปคตรัมแรงบิดช่องอากาศเมื่อขดลวดลัทรอบองค์ประกอบความถี่ที่  $2f_1$  จะมีแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นนอกจากนี้ก็มีองค์ประกอบความถี่ที่  $6f_1$  และ  $8f_1$  เกิดขึ้นและมีขนาดเพิ่มขึ้นตามจำนวนการลัทรอบเช่นเดียวกัน และขณะที่มอเตอร์มีภาระเต็มพิกัดนอกจากที่  $2f_1$  ก็เกิดองค์ประกอบความถี่ที่  $6f_1+2sf_1$  และ  $8f_1+2sf_1$  ซึ่งจะมีแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของการลัทรอบ

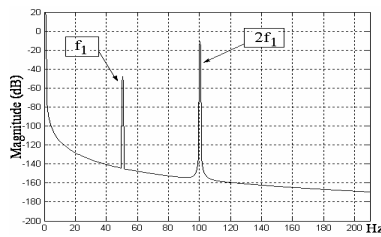


(ก)

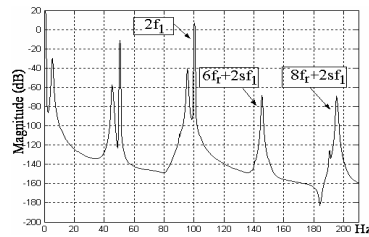


(ข)

รูปที่ 4 สเปกตรัมแรงบิดช่องอากาศเมื่อขดลวดลัดรอบของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าที่ได้จากการจำลอง  
ขณะไร้ภาระ (ก) มอเตอร์ปกติ (ข) ขดลวดลัดรอบที่ 3%



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 สเปกตรัมแรงบิดช่องอากาศเมื่อขดลวดลัดรอบของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าที่ได้จากการจำลองขณะ  
ภาระเต็มพิกัด (ก) มอเตอร์ปกติ (ข) ขดลวดลัดรอบที่ 3%

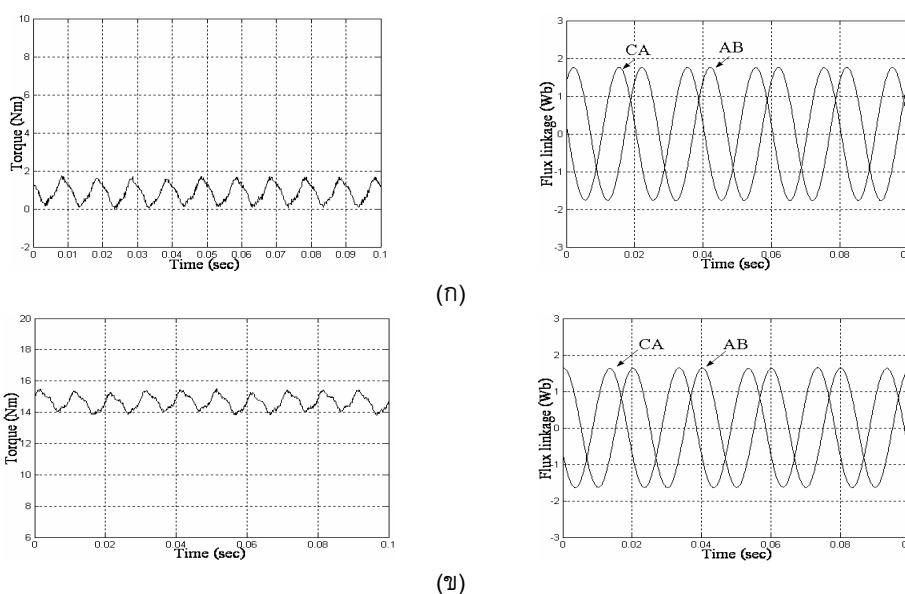
### การทดลอง

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด 3 แรงม้า 50 Hz 4 ขั้ว 380 V ทดสอบมอเตอร์ภายใต้สภาวะไร้ภาระ และมีภาระเต็มพิกัด ขดลวดต่อแบบสตาร์ โดยมีลักษณะของการลัดรอบของขดลวดต่อเฟสคือ 3% ของจำนวนรอบทั้งหมด วิเคราะห์สเปกตรัมในหน่วย dB โดยมีขั้นตอนในการทดลองและวิเคราะห์ดังนี้ เริ่มจากข้อมูลสัญญาณแรงดัน และกระแสเตเตอร์จะถูกตรวจจับโดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับแรงดัน และกระแสไฟฟ้า ซึ่งสัญญาณกระแสจะใช้ Hall effect ยี่ห้อ LEM เป็นอุปกรณ์ช่วยแยกโดดและลดทอน จากนั้นใช้สโคปแบบดิจิทัลอล 4 channel เก็บข้อมูล โดยข้อมูลที่เก็บมีอัตราการสุ่ม 10 kHz ความละเอียดความถี่เท่ากับ 0.5 Hz (ความละเอียดความถี่ =  $f_s / N$ ;  $f_s$  คืออัตราการสุ่ม,  $N$  คือจำนวนข้อมูล) ซึ่งเพียงพอที่จะค้นพบฮาร์มอนิกส์ที่แสดงให้เห็นถึงความผิดปกติ จากนั้นทำการประมวลผลหาแรงบิดช่องอากาศ ด้วยโปรแกรม Matlab และแปลงให้อยู่ในโดเมนความถี่โดยใช้ FFT เพื่อวิเคราะห์สเปกตรัมหาความผิดปกติของมอเตอร์

### ผลการทดลอง

#### มอเตอร์ปกติ

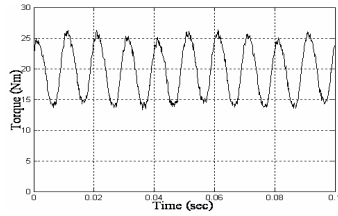
ผลการทดลองรูปที่ 6 แสดงรูปคลื่นของแรงบิดช่องอากาศ และฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวกับคลั่งของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า จะเห็นได้ว่าแรงบิดช่องอากาศที่ได้มีการกระเพื่อมเล็กน้อยและมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อภาระมากขึ้น โดยขณะมอเตอร์มีภาระเต็มพิกัดแรงบิดช่องอากาศมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้ามีขนาดประมาณ 15 Nm ส่วนฟลักซ์แม่เหล็กมีขนาดเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามการกระเพื่อมของแรงบิดเมื่อเทียบกับการจำลองจะมีค่ามากกว่า ส่วนค่าแรงบิดเฉลี่ยจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากร่องสลิต การลาดเอียงของแท่งตัวนำในโรเตอร์(skewing rotor bar) ส่งผลให้เกิด space harmonic ตามมา



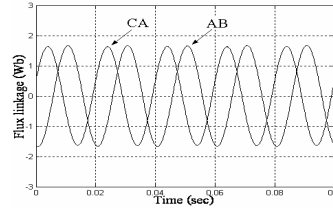
รูปที่ 6 ซ้ายคือแรงบิดช่องอากาศ และขวาคือฟลักซ์ CA ( $\psi_{CA}$ ), ฟลักซ์ AB ( $\psi_{AB}$ ) ของมอเตอร์ปกติ ขนาด 3 แรงม้า (ก) ขณะไร้ภาระ (ข) ขณะมีภาระเต็มพิกัด

#### การลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์

จากรูปที่ 7 แสดงแรงบิดช่องอากาศ และฟลักซ์แม่เหล็กขณะมอเตอร์มีภาระเต็มพิกัดของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า จะเห็นได้ว่าแรงบิดช่องอากาศของมอเตอร์จะมีการกระเพื่อมที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ปกติ ส่วนฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้ขณะขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ลัดรอบ 3% จะมีขนาดมากกว่ามอเตอร์ปกติเล็กน้อย ซึ่งจะให้ผลใกล้เคียงกับรูปที่ 3 ที่ได้จากการจำลอง เมื่อพิจารณาสเปคตรัมขณะมอเตอร์ไร้ภาระ พบว่าสเปคตรัมที่ความถี่ ( $3f_r$ ,  $2f_r$ ,  $5f_r$ ) จะปรากฏเห็นชัดมากขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 8



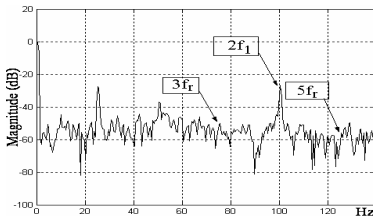
(ก)



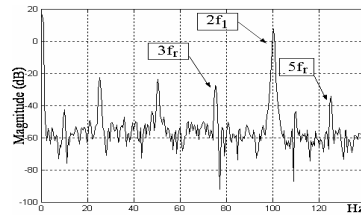
(ข)

รูปที่ 7 (ก) แรงบิดของอากาศ (ข) ฟลักซ์ CA ( $\Psi_{CA}$ ), ฟลักซ์ AB ( $\Psi_{AB}$ ) ของมอเตอร์ 3 แรงม้า เมื่อขดลวดลัดรอบ 3% ขณะมีภาระเต็มพิกัด

ขณะมอเตอร์มีภาระเต็มพิกัด (มอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า  $f_r = 23.75$  Hz ) พบว่าเมื่อเกิดการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์นอกจากจะพิจารณาความถี่ขณะมอเตอร์ปกติแล้ว ในขณะมอเตอร์มีภาระจะเกิดไซด์แบนด์คือ  $\pm 2sf_1$  เห็นเด่นชัดขึ้นที่ความถี่ที่เป็นตัวคูณของความเร็วโรเตอร์ ( $f_r+2sf_1, 3f_r+2sf_1, 5f_r+2sf_1$ ) โดยความถี่ดังกล่าวนี้จะเห็นเด่นชัดเมื่อเกิดการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ยกเว้นที่ความถี่  $5f_r+2sf_1$  นั้นจะเกิดขึ้นในขณะมอเตอร์ปกติด้วย แต่บางความถี่จะมีแอมพลิจูดที่เห็นไม่เด่นชัดได้แก่  $3f_r-2sf_1, 5f_r-2sf_1$  และที่ความถี่  $3f_r$  นั้นในขณะมอเตอร์มีภาระจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่มากนักเมื่อเกิดการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 9 โดยเหตุผลที่สเปคตรัมที่ได้จากผลการจำลองนั้นมีองค์ประกอบที่ไม่เหมือนกับผลจากการทดลอง เนื่องจากในการจำลองนั้นเป็นการจำลองมอเตอร์ในอุดมคติและไม่มีผลของฮาร์โมนิกอื่นเหมือนเช่นในการทดลอง แต่ในองค์ประกอบความถี่หลักคือที่  $2f_1$  นั้นก็มีขนาดที่ใกล้เคียงและมีแนวโน้มที่เหมือนกัน

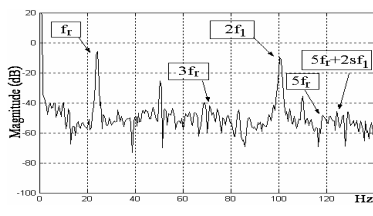


(ก)

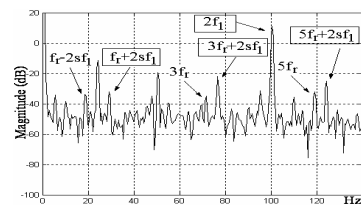


(ข)

รูปที่ 8 สเปคตรัมแรงบิดของอากาศเมื่อขดลวดลัดรอบของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าขณะไร้ภาระ (ก) มอเตอร์ปกติ (ข) ขดลวดลัดรอบที่ 3%



(ก)



(ข)

รูปที่ 9 สเปคตรัมแรงบิดของอากาศเมื่อขดลวดลัดรอบของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าขณะมีภาระเต็มพิกัด (ก) มอเตอร์ปกติ (ข) ขดลวดลัดรอบที่ 3%

## สรุปผลการทดลอง

การตรวจสอบความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์เกิดการลัดรอบ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมจากแรงบิดช่องอากาศ จะพบว่ากรณีขดลวดสเตเตอร์เกิดการลัดรอบจะมีขนาดแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นกว่าเมื่อขดลวดสเตเตอร์ยังไม่เกิดการลัดรอบ และผลที่ได้จากการจำลองนั้นก็มีลักษณะที่สอดคล้องกับผลการทดลอง ซึ่งเราสามารถใช่แรงบิดช่องอากาศเป็นดัชนีการวัด เพื่อหาความผิดปกติของมอเตอร์ที่เกิดจากสาเหตุต่างๆ เช่น การลัดรอบเนื่องจากการเสื่อมของฉนวน แท่งโรเตอร์แตกกร้าว แหล่งจ่ายไฟเข้ามอเตอร์ไม่สมดุล ซึ่งในการทดสอบครั้งต่อไปจะทำการทดสอบลัดรอบมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้เห็นผลที่ชัดเจนมากขึ้น และทำการทดสอบกับแหล่งจ่ายที่ไม่สมดุลและทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ตัวโรเตอร์มีความผิดปกติ

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นางสาวอัมพร รัชญูเจริญ ที่ช่วยให้คำแนะนำและให้ข้อมูลในการวิเคราะห์ ซึ่งทำให้งานวิจัยในบทความนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

- อัมพร รัชญูเจริญ, ชัยชัต มณีอินทร์ และ วิจิตร กิณเรศ. 2547. การศึกษาหาความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยใช้แรงบิดแอร์แกป. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 27; 11-12 พฤศจิกายน; มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น.
- Benbouzid M.E.H., Kliman G.B. 2003. What Stator Current Processing-Based Technique to Use for Induction Motor Faults Diagnosis. **IEEE. Trans. On Energy Conversion.** Vol.18, pp. 238-244.
- Thomson W.T., M. Fenger. 2001. Current signature analysis to detect induction motor faults. **IEEE IND. Applicat. Mag.** vol. 7, pp. 26-34.
- Legowski S.F., Sadrul Ula A.H.M., and Trzynadlowski A.M. 1996. Instantaneous power as a medium for the signature analysis of induction motors. **IEEE Trans. Ind. Applicat.** vol. 32, pp. 904-908.
- Melero M.G., Cabanas M.F., Rojas C.H., Orcajo G.A. and Solares J. 2003. Study of an Induction Motor Working Under Stator Winding Inter-Turn Short Circuit Condition. **IEEE SDEMPED.** pp.52-57.
- Hsu J.S. 1995. Monitoring of defects in induction motors through air-gap torque observations. **IEEE Trans. Ind. Applicat.** vol. 31, pp. 1016-1021.
- Melero M.G., Cabanas M.F., Faya F.R., Rojas CH and Solares J. 1999. **Electromagnetic torque harmonics for on-line inter - turn short circuits detection in squirrel cage induction motors.** In Proc. 8<sup>th</sup> European Conf. on Power Electronics and Appl. EPE'99.Lausanne, Switzerland.
- Xianrong Chang, Cocquempot V.,and Christophe C. 2003. A Model of Asynchronous Machines for Stator Fault Detection and Isolation. **IEEE Trans.Indus Electronics.** Vol. 50, pp. 578-584.