

## การศึกษาพฤติกรรมของฮาร์มอนิกที่เกิดจากความเป็นสล็อต สำหรับประยุกต์ใช้ในการคำนวณความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ชาญวิทย์ ตั้งสิริวรกุล<sup>1</sup>

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

เฉลิมชาติ มานพ<sup>2</sup>

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

รับเมื่อ 25 กุมภาพันธ์ 2546 ตอรับเมื่อ 16 ตุลาคม 2546

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาพฤติกรรมของฮาร์มอนิกที่เกิดจากความเป็นสล็อตของมอเตอร์ หรือ เรียกว่า สล็อตฮาร์มอนิก (Slot harmonics) หรือโรเตอร์สล็อตฮาร์มอนิก (Rotor slot harmonics, RSH) สำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โรเตอร์สล็อตฮาร์มอนิกจะมีคุณสมบัติขึ้นอยู่กับความเร็วของมอเตอร์และเกิดขึ้นในกระแสสเตเตอร์ ข้อมูลของกระแสสเตเตอร์จะถูกประมวลผลแบบดิจิทัล สำหรับการวิเคราะห์และศึกษาอย่างละเอียดของพฤติกรรมในด้านต่างๆ ก่อนการนำไปประยุกต์ใช้ พฤติกรรมของ RSH จะถูกทดสอบภายใต้สภาวะการทำงานของมอเตอร์ได้แก่ โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้า แหล่งจ่ายที่เป็นคลื่นไซน์และอินเวอร์เตอร์แบบ PWM สภาวะแรงดันไม่สมดุล อุณหภูมิ เป็นต้น จากผลการศึกษาพบว่าในสภาวะดังกล่าวจะทำให้เกิดสัญญาณฮาร์มอนิกรวมอยู่ในช่วงความถี่ของ RSH แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับกรณีของ RSH ที่เกิดขึ้นเป็นคู่ ค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณความเร็วยังคงมีความแม่นยำสูง โดยมีค่าไม่เกิน 0.1%

<sup>1</sup> อาจารย์ ภาควิชาไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

<sup>2</sup> อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

## The Study of Harmonic Behavior Caused by Slotting for Speed Calculating Application in Induction Motors

Chanwit Tangsiriworakul<sup>1</sup>

King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok, 10800

Chalermchat Manop<sup>2</sup>

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10520

*Received 25 February 2003 ; accepted 16 October 2003*

### Abstract

In this paper, the study of harmonic behavior caused by slotting (slot harmonics or rotor slot harmonic, RSH) for speed calculating application in induction motor is proposed. These RSH's are dependent from motor speed and inherent in stator currents. The stator current data are processed digitally for fully analysis and study before implementation. The RSH behavior is tested under steady state conditions with the specific condition such as: sinusoidal and PWM inverter supplies, unbalance voltage condition, temperature etc. The results under such conditions show that harmonic signals are within the RSH range. From the experimental results, the error for speed calculation is under 0.1% if RSH's exist in pairs.

---

<sup>1</sup> Lecturer, Department of Electrical, College of Industrial Technology.

<sup>2</sup> Lecturer, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering.

### 1. บทนำ

อุปกรณ์วัดความเร็วจะมีความสำคัญต่อระบบการขับเคลื่อนที่ต้องการสมรรถนะสูง การคิดค้นวิธีการใหม่ๆ และดัดแปลงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวิธีการที่มีอยู่เดิมเป็นสิ่งที่ต้องการมาก แต่ผลที่ตามมาก็คือจะทำให้วงจรมีความยุ่งยากและซับซ้อนมากยิ่งขึ้นถ้าประมวลผลด้วยวงจรทางอนาล็อก และถ้าเป็นเทคนิคการประมวลผลทางดิจิทัลโดยวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกจำเป็นจะต้องใช้อัลกอริทึมในการแปลง (transform) ไปยังโดเมนความถี่ซึ่งจะมีผลทำให้เสีย เวลาสำหรับการประมวลผลในส่วนนี้ แต่ด้วยอัลกอริทึมของการแปลงไปยังโดเมนความถี่ที่รวดเร็วของ FFT รวมถึงความก้าวหน้าของตัวประมวลผล อย่างเช่น DSP ทำให้ใช้เวลาในส่วนนี้ไม่มากนัก

ในงานวิจัย [1]-[3] ได้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับการคำนวณหาความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ฮาร์มอนิกที่เกิดจากความเป็นสล็อตของมอเตอร์หรือ RSH ที่เกิดขึ้นรวมอยู่ในกระแสสเตเตอร์ซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่งานวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้ครอบคลุมถึงกรณีที่จะเกิดขึ้นกับมอเตอร์ในหลายๆ กรณี เช่น เมื่ออุณหภูมิของมอเตอร์สูงขึ้น ผลของฮาร์มอนิกอื่น พารามิเตอร์ของเครื่องจักรกล ฯลฯ ทั้งนี้สาเหตุดังกล่าวอาจจะมีผลทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกขึ้นรวมอยู่ในกระแสสเตเตอร์แล้วไปรบกวนฮาร์มอนิกที่เกิดจากความเป็นสล็อตทำให้การคำนวณหาความเร็วผิดพลาดไป ในบทความนี้จึงได้ทดลองในประเด็นดังกล่าวเพื่อเป็นข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับการนำฮาร์มอนิกที่เกิดจากความเป็นสล็อต ไปประยุกต์ใช้สำหรับคำนวณหาความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำและการประยุกต์ใช้อื่นๆ ต่อไป

### 2. แฟคเตอร์ที่มีผลต่อขนาดและความถี่ของโรเตอร์สล็อตฮาร์มอนิก

สัญญาณกระแสโรเตอร์สล็อตฮาร์มอนิก ( $i_{sh}$ ) เกิดมาจากสัญญาณแรงดันโรเตอร์สล็อตฮาร์มอนิก ( $v_{sh}$ ) ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดสเตเตอร์ซึ่งมีสมการเป็น [4]

$$i_{sh} = \frac{v_{sh}}{R_s + 2 \cdot \pi \cdot f_{sh} \cdot L_s} \tag{1}$$

โดยที่  $f_{sh}$  คือความถี่ของ RSH,  $L_s$  คือค่าอินดักติฟของขดลวดสเตเตอร์ และ  $v_{sh}$  จะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส ( $N_p$ ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $D$ ) และความยาวของโรเตอร์ ( $l$ ) ความหนาแน่นของฟลักซ์สล็อตฮาร์มอนิก ( $B_{sh}$ ) รวมทั้งแฟคเตอร์การกระจายของขดลวด ( $k_{dsh}$ ) แฟคเตอร์พิทช์ ( $k_{csh}$ ) และแฟคเตอร์เนื่องจากการเฉียงของสล็อต ( $k_{skewsh}$ ) ซึ่งจะสามารถคำนวณหาแรงดันสล็อตฮาร์มอนิกได้จากสมการ

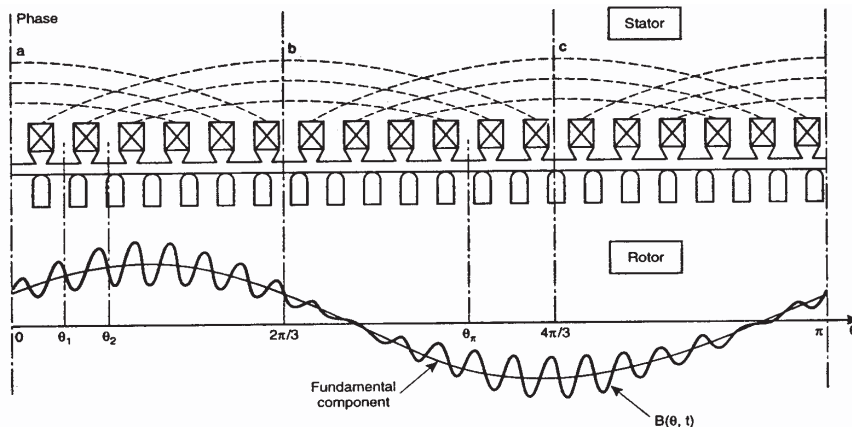
$$v_{sh} = N_p \cdot \frac{D \cdot l}{P_{sh}} \cdot B_{sh} \cdot k_{dsh} \cdot k_{csh} \cdot k_{skewsh} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot f_{sh} \tag{2}$$

เมื่อ  $P_{sh}$  คือขั้วแม่เหล็กสล็อตฮาร์โมนิกมีค่าเท่ากับ  $N_r \pm nP$  เมื่อ  $N_r$  คือจำนวนแท่งตัวนำโรเตอร์ และ  $n$  คืออันดับของสเปซฮาร์โมนิก  $P$  คือจำนวนขั้วแม่เหล็ก ซึ่งถ้าไม่คิดอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย ขนาดของกระแสสล็อตฮาร์โมนิกจะหาได้จากแรงดันสล็อตฮาร์โมนิกหารด้วยค่าการรั่วไหลของอิมพีแดนซ์สเตเตอร์ และส่วนใหญ่อิมพีแดนซ์สเตเตอร์จะเป็นอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ ( $2\pi f_{sh} l_s$ ) เนื่องจากสล็อตฮาร์โมนิกจะเป็นฮาร์โมนิกที่มีความถี่สูง ถ้าไม่คิดในกรณีที่มีความถี่ต่ำขนาดของกระแสสล็อตฮาร์โมนิกจะสามารถหาได้จาก

$$i_{sh} \approx \frac{N_p \cdot D \cdot l \cdot B_{sh} \cdot k_{dsh} \cdot k_{csh} \cdot k_{skewsh}}{l_s \cdot \sqrt{2} \cdot P_{sh}} \quad (3)$$

จากสมการทำให้ทราบถึงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแอมพลิจูดของ RSH ซึ่งนอกจากนี้แล้วยังมีอีกหลายสาเหตุที่มีผลกระทบต่อ RSH ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

## 2.1 องค์ประกอบการกระจายของกระแสโรเตอร์สล็อตฮาร์โมนิก



รูปที่ 1 โครงสร้างของความหนาแน่นฟลักซ์ในช่องอากาศ

สนามแม่เหล็กในช่องอากาศของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อจ่ายแรงดันที่เป็นคลื่นไซน์ การวิเคราะห์ทั่วไปจะสมมุติให้ฟลักซ์ฮาร์โมนิกในช่องอากาศมีสาเหตุมาจากฮาร์โมนิกของรูปคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ( $MMF_{ag}$ ) และผลของค่าความนำแม่เหล็กในช่องอากาศ ( $P_{ag}$ ) จะมีสาเหตุมาจากความเป็นสล็อตของโรเตอร์และสเตเตอร์ ความนำแม่เหล็กภายในช่องอากาศนี้จะกระจายอย่างสม่ำเสมอเป็นระยะๆ ตามระยะห่างของสล็อต และจำนวนสล็อตของโรเตอร์ ซึ่งเมื่อรวมกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศ จะส่งผลทำให้เกิดความหนาแน่นของฟลักซ์ในช่องอากาศ ( $B_{ag}$ ) ซึ่งจะถูกมอดูเลต (modulated) โดยผ่านสล็อตของโรเตอร์ ทำให้เกิดองค์ประกอบของ 2 ฮาร์โมนิกที่มีความถี่ดังสมการที่ (6) เรียกฮาร์โมนิกนี้ว่า โรเตอร์สล็อตฮาร์โมนิก โดยที่การกระจายของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กภายในช่องอากาศจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 1 และมีสมการเป็น [3]

$$B_{ag}(\theta, t) = B_1 \cos(\omega_1 t - P\theta) + B_{r1} \cos \left[ \left( \frac{N_r}{P} \omega_{ro} + \omega_1 \right) t - (P + N_r)\theta + \psi_{r1} \right] + B_{r2} \cos \left[ \left( \frac{N_r}{P} \omega_{ro} - \omega_1 \right) t - (P - N_r)\theta + \psi_{r2} \right] \quad (4)$$

รูปแบบของกระแสฮาร์มอนิกที่ถูกเหนี่ยวนำในเฟส  $a$  รวมทั้ง RSH จะมีสมการเป็น

$$i_a(t) = \sum_{v=1}^H A_v \cos(2\pi v f_1 t - \psi_v) \quad (5)$$

สมการความสัมพันธ์พื้นฐานของความถี่ RSH ที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้า (positive signal) และถอยหลัง (negative signal) แสดงด้วยเครื่องหมายบวกและลบคือ

$$\omega_{sh} = \frac{N_r}{P} \omega_{ro} \pm \omega_1 \quad (6)$$

เมื่อ  $N_r$  คือจำนวนสล็อตของโรเตอร์,  $\omega_{ro}$  คือความถี่เชิงมุมของโรเตอร์สล็อตฮาร์มอนิก และสำหรับในกรณีที่แหล่งจ่ายของมอเตอร์ไม่ใช่คลื่นไซน์ ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะมีผลกระทบต่อการกระจายความหนาแน่นของฟลักซ์ในช่องอากาศ ซึ่งจะทำความถี่ของ RSH หาได้จากสมการ

$$\omega_{sh} = \frac{N_r}{P} \omega_{ro} \pm k\omega_1 \quad (7)$$

และจะสามารถคำนวณหาความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้จากสมการ

$$n_r = \frac{60}{N_r} (f_{sh} \pm kf_1) \quad (8)$$

## 2.2 ผลการเฉียงของแท่งตัวนำโรเตอร์

การเฉียง (skew) คือการบิดเป็นมุม ( $\alpha$ ) ของสล็อตที่ออกจากทิศทางตามแนวแกน จุดประสงค์ก็เพื่อป้องกันการดูดกันระหว่างซี่ฟันของโรเตอร์กับสเตเตอร์ รวมถึงปัญหาของเสียงรบกวนทางไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง และด้วยเหตุนี้ก็เป็นผลให้แรงดันเหนี่ยวนำ EMF ที่เกิดขึ้นในแท่งตัวนำโรเตอร์ลดลง รวมถึงแรงดันฮาร์มอนิกที่มีสาเหตุมาจากความเป็นสล็อตด้วย ค่าแฟคเตอร์การเฉียงของสล็อตที่มุมต่างๆ หาได้จากสมการที่ (9) ซึ่งการเฉียงของแท่งตัวนำโรเตอร์จะลดขนาดของสล็อตฮาร์มอนิก แต่มีผลน้อยมาก [4]

$$k_{skewsh} = \frac{\sin(\alpha/2)}{\alpha/2} \quad (9)$$

### 2.3 ผลของความเป็นสล็อต

ความเป็นสล็อตของมอเตอร์คือ ปรากฏการณ์ที่ฟลักซ์จากสเตเตอร์จะต้องไหลผ่านซี่ฟัน ผ่านช่องอากาศ และผ่านซี่ฟันของโรเตอร์ ผลของความเป็นสล็อตนี้จะขึ้นอยู่กับความยาวของฟัน ซึ่งในโครงสร้างของเครื่องจักรกลที่มีซี่ฟันที่ยาว จะมีความเป็นสล็อตสูงกว่าที่มีซี่ฟันสั้น ดังเช่นในงานวิจัย [1] พบว่า RSH ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดลวดพันจะมีแอมพลิจูดโดดเด่นอย่างชัดเจนได้มากกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกที่พิกัดกำลังเดียวกัน

สำหรับการวิเคราะห์ที่สูงขึ้นในการพิจารณาความเป็นสล็อต จะพิจารณาความเป็นสล็อตของทั้ง 2 ด้านของเครื่องจักรกล คือความเป็นสล็อตของโรเตอร์และความเป็นสล็อตของสเตเตอร์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำแม่เหล็ก จะเป็นผลรวมของค่าความนำที่เกิดจากสเตเตอร์และค่าความนำที่เกิดจากโรเตอร์ แต่ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กในช่อง อากาศพบว่าสล็อตของสเตเตอร์จะไม่ทำให้เกิดความถี่ใหม่ยกเว้นในกรณีที่มีจำนวนของคู่ขั้วแม่เหล็กมาก [3]

### 2.4 ผลของจำนวนแท่งตัวนำโรเตอร์

จากสมการที่ (6) ทำให้ทราบว่าถ้าจำนวนของแท่งตัวนำโรเตอร์มีจำนวนมากจะทำให้ RSH มีความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่งในกรณีที่แหล่งจ่ายเป็นคลื่นไซน์ก็จะมีผลต่อการตรวจจับ แต่ถ้าแหล่งจ่ายเป็นอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ซึ่งจะมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกที่เกิดจากการสวิต ( $f_{sw}$ ) ดังนั้นถ้าจำนวนของแท่งตัวนำโรเตอร์มีจำนวนมากก็จะทำให้ความถี่ของ RSH เข้าใกล้ฮาร์มอนิกดังกล่าวทำให้ไม่สามารถตรวจจับ RSH ได้ ในงานวิจัย [1] พบว่าจำนวนของ แท่งตัวนำโรเตอร์ควรจะมีจำนวนซึ่งทำให้ RSH เกิดขึ้นอยู่ในช่วง  $f_{sw}/2$  Hz แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ถ้าไม่สามารถหลีกเลี่ยงในเรื่องของจำนวนแท่งตัวนำได้ ก็สามารถแก้ไขได้โดยเลือกความถี่ในการสวิตที่ค่าสูงๆ ก็จะทำให้ปัญหาดังกล่าวหมดไป

### 2.5 ผลของฮาร์มอนิกอื่นๆ

โดยปกติแล้วในเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะมีฮาร์มอนิก หรือสัญญาณรบกวน (noise) เกิดขึ้นรวมอยู่ในกระแสสเตเตอร์มากมาย เช่น ฮาร์มอนิกที่เกิดจากใบพัด ความเยื้องศูนย์กลางของโรเตอร์ (eccentricity) รวมถึงในกรณีเครื่องจักรกลที่ไม่มีความสมบูรณ์ ก็จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกเพิ่มมากขึ้นไปอีก ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเหล่านี้อาจจะไปรบกวนโดยมีความถี่อยู่ในช่วงความถี่ของ RSH ทำให้การตรวจจับมีปัญหาได้ นอกจากนี้ฮาร์มอนิกในบางความถี่ยังมีผลโดยตรงต่อ RSH อีกด้วยได้แก่ ฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 และอันดับที่ 3 รวมถึงฮาร์มอนิกที่เป็นจำนวนเท่าของ 3 โดยจะทำให้สัญญาณของ RSH ถูกรบกวนจากสัญญาณขนาดเล็ก

### 2.6 ผลของจำนวนขั้วแม่เหล็ก

จากสมการที่ (6) ถ้าจำนวนของแท่งตัวนำโรเตอร์คงที่ และเพิ่มจำนวนขั้วแม่เหล็กจะทำให้ RSH มีความถี่ เข้าใกล้ความถี่มูลฐานซึ่งอาจจะทำให้ RSH ถูกปิดบังได้เนื่องจากผลการรั่วไหลของสเปคตรา นอกจากนี้จำนวนของขั้วแม่เหล็กที่มีผลโดยตรงต่อสัญญาณ RSH คือ สัญญาณจะมีความแน่นอนถ้าจำนวนขั้วแม่เหล็กไม่เป็นจำนวนเท่าของ 3 และในเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 ขั้วแม่เหล็กที่มีแท่งตัวนำโรเตอร์เป็นจำนวนคู่ ในสภาวะการ

เยื้องศูนย์กลางสถิต (static) จะทำให้เกิดสัญญาณขนาดเล็ก และการเยื้องศูนย์กลางไดนามิก (dynamic) จะทำให้ความถี่ของสล็อตฮาร์โมนิกมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มี 2 ขั้วแม่เหล็กจะทำให้เกิดอย่างน้อย 1 สล็อตฮาร์โมนิก [4], [5]

## 2.7 พิกัดของเครื่องจักรกล

สิ่งหนึ่งที่งานวิจัยนี้ได้นำเสนอคือการตรวจจับ RSH ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กซึ่งจะมีความยากกว่าเครื่องจักรกลขนาดใหญ่ ทั้งนี้จากสมการที่ (3) พบว่าขนาดของกระแสโรเตอร์สล็อตฮาร์โมนิก นอกจากจะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังที่ได้กล่าวมาแล้วยังขึ้นอยู่กับขนาดของโรเตอร์ด้วย

## 3. เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

### 3.1 สัญญาณที่ได้จากการสุ่ม

ในการเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อทำการประมวลผลจะทำได้โดยการสุ่มสัญญาณ (sampling) หรือตัดสัญญาณอนาล็อกออกเป็นส่วนๆ ซึ่งจากทฤษฎีของ Shannon's famous ได้ข้อสรุปออกมาว่าสัญญาณควรจะถูกสุ่ม ( $f_s$ ) อย่างน้อยด้วยความถี่ประมาณ 2 เท่าของความถี่สูงสุด ( $f_{max}$ ) เขียนเป็นสมการได้  $f_s \geq 2 f_{max}$  ทั้งนี้จะต้องขึ้นอยู่กับฮาร์โมนิกที่ต้องการตรวจจับด้วย เพราะบางฮาร์โมนิกจะมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะขนาดหรือในบางสาเหตุจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและความถี่ เช่น RSH ในงานวิจัย [1] พบว่าที่อัตราการสุ่ม  $f_s = 2.5 f_{sh} (+k)$  จะมีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับการตรวจจับ RSH ที่จะไม่ทำให้แอมพลิจูดของ RSH ถูกลดทอนลงไปมากนัก

### 3.2 ตัวกรองดิจิทัลด้วยฟังก์ชันวินโดว์

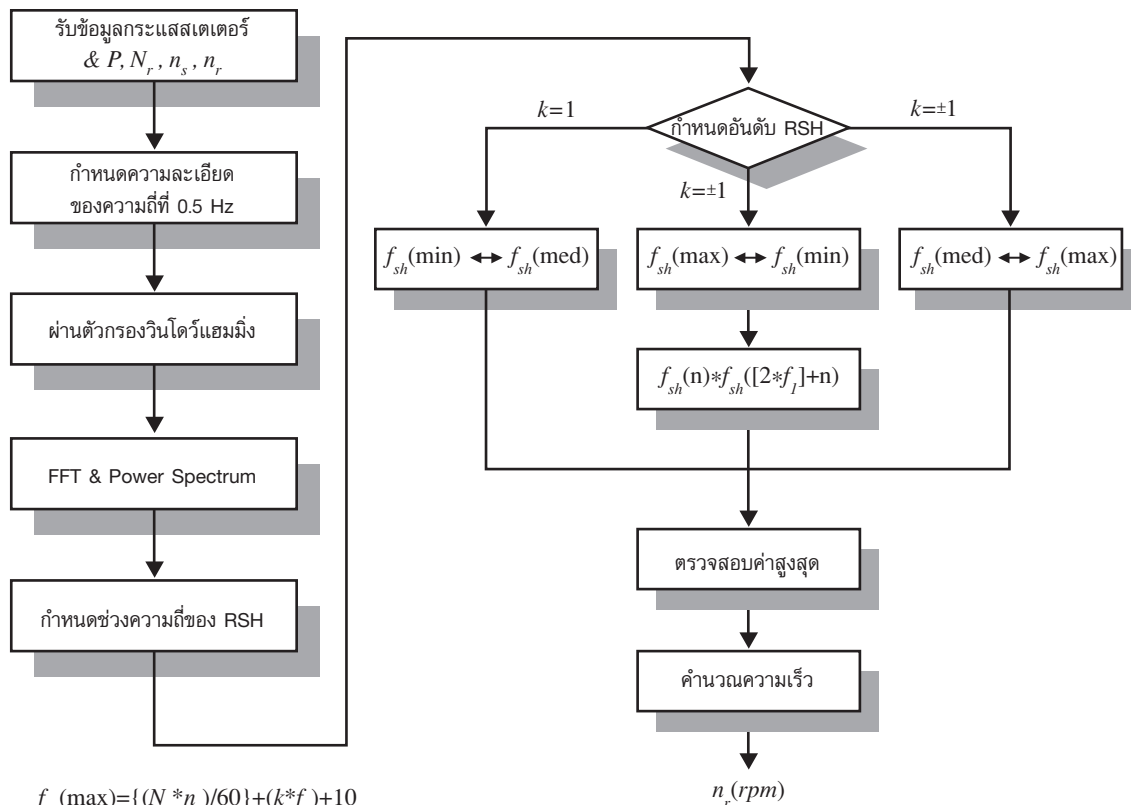
ตัวกรองดิจิทัลด้วยฟังก์ชันวินโดว์หรือตัวกรองวินโดว์เป็นเทคนิควงจรกรองดิจิทัลประเภท FIR มีข้อดีคือสามารถลดการรั่วไหลของสเปกตรานเนื่องจากการแปลงไปยังโดเมนความถี่ และผลของฮาร์โมนิกย่อยเนื่องมาจากสัญญาณที่ไม่ครบคาบ ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการจัดรูปแบบของข้อมูลใหม่โดยอาศัยฟังก์ชันวินโดว์ ด้วยการคูณกันทางโดเมนเวลาระหว่างข้อมูลที่ต้องการกับสมการฟังก์ชันวินโดว์ การคูณกันทางโดเมนเวลาดังกล่าวก็คือการคอนโวลูชัน (convolution) กันทางโดเมนความถี่ การทำเช่นนี้จะทำให้ข้อมูลของสัญญาณกระแสอินพุตมีผลการตอบสนองทางความถี่ (เฟส) ที่ดีขึ้น โดยอาศัยการตัดปลายหรือถ่วงน้ำหนักเพื่อลดโหลบข้าง (side-lobes) ตลอดสัญญาณซึ่งในอัลกอริทึมสำหรับการตรวจจับ RSH ได้เลือกใช้การคูณกันทางโดเมนเวลาด้วยวินโดว์ชนิดแฮมมิง (Hamming)

### 3.3 การประมาณค่าสเปกตราดด้วย FFT

ข้อสำคัญสำหรับการแปลงไปยังโดเมนความถี่ด้วย Fast Fourier Transform, FFT ต่อความแม่นยำของการค้นหา RSH คือความถี่ของ RSH ที่มีความถี่เป็นและไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน จะทำให้เกิดผลที่สำคัญๆ ตามมา 2 ประการ ประการแรกคือฮาร์โมนิกย่อยที่ได้จากการคำนวณจะมีผลทำให้เกิดข้อผิดพลาดมาก

เมื่อเทียบกับโทรมฮาร์โมนิก ข้อผิดพลาดนี้จะมีผลกระทบต่อความแม่นยำเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของความถี่ ผลที่ตามมาประการที่ 2 คือการรั่วไหลของสเปกตรัม (spectral leakage หรือ peak spreading) ซึ่งผลดังกล่าวนี้จะมีผลสำคัญมาก กล่าวคือเมื่อฮาร์โมนิกที่มีแอมพลิจูดต่ำที่อยู่ใกล้กับฮาร์โมนิกที่มีแอมพลิจูดมากค่าหนึ่ง จะถูกปิดบังจากการกระจายของพลังงานฮาร์โมนิกที่มีแอมพลิจูดสูงกว่า วิธีที่สามารถจะลดผลที่เกิดขึ้นนี้ได้วิธีหนึ่งที่น่านำมาใช้คือ ตัวกรองดิจิทัลด้วยฟังก์ชันวินโดว์

#### 4. การคำนวณความเร็วโดยอาศัย RSH



$$f_{sh}(\max) = \{(N_r * n_s) / 60\} + (k * f_l) + 10$$

$$f_{sh}(\min) = \{(N_r * n_s) / 60\} - (k * f_l) - 10$$

$$f_{sh}(\text{med}) = \{f_{sh}(\max) - f_{sh}(\min)\} / 2$$

รูปที่ 2 แผนภูมิลำดับขั้นตอนการคำนวณความเร็วโดยอาศัย RSH

ชุดข้อมูลที่จะนำไปประมวลผลจะได้จากข้อมูลของกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยที่สัญญาณกระแสดังกล่าวจะถูกลดทอนขนาดลงด้วยตัวตรวจจับกระแส LEM ซึ่งใช้หลักการของ Hall-effect sensor แล้วจึงนำไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter, LPF) ซึ่งจะสามารถช่วยลดการเกิดการโอเวอร์ในกระบวนการทางดิจิทัลได้ ต่อจากนั้นได้กรองความถี่มูลฐาน โดยใช้วงจรกรองนอตช์ (notch) และได้ขยายสัญญาณ (gain) ก่อนเก็บข้อมูลโดยใช้ดิจิทัลออสซิลอสโคปพร้อมทั้งปรับอัตราการสุ่มและจำนวนของรูปคลื่นตามที่ต้องการ

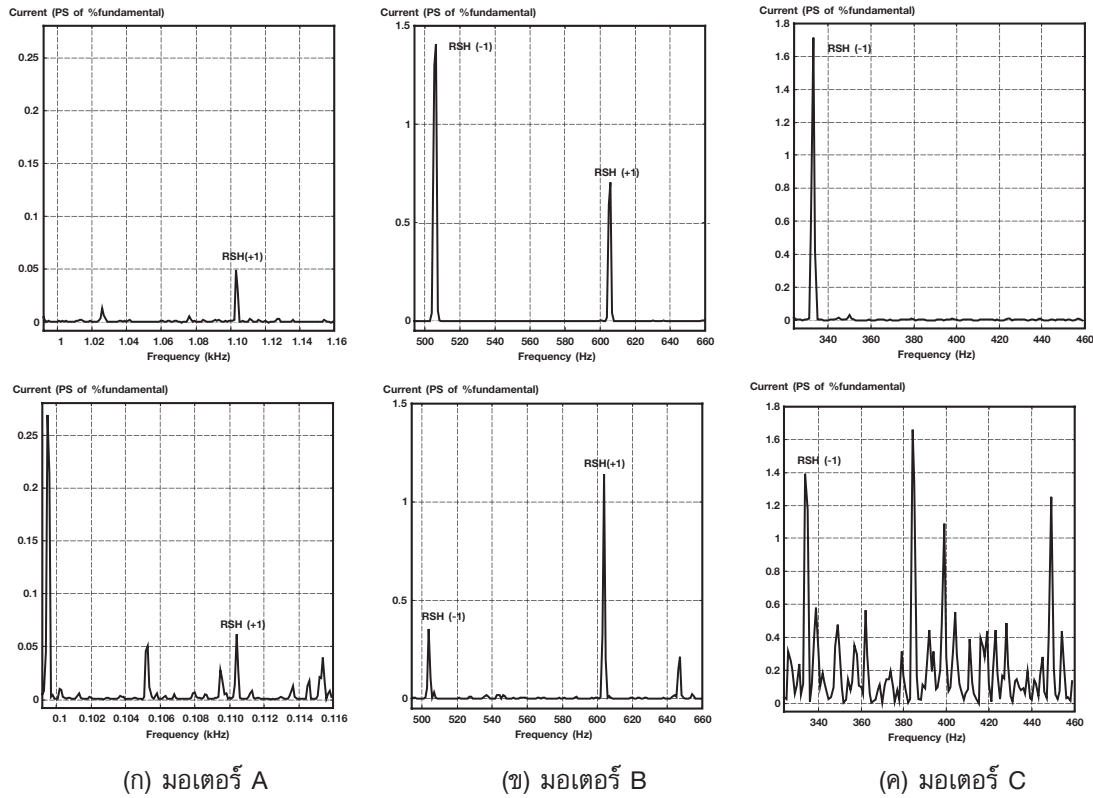


ลำดับของการประมวลผลต่อไปจะได้นำชุดของข้อมูลดังกล่าวไปประมวลผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งมีขั้นตอนของการประมวลผลดังรูปที่ 2 ซึ่งมีส่วนสำคัญคือการพิจารณาช่วงความถี่ของ RSH จะกำหนดจากอันดับค่า  $k = \pm 1$  ที่ RSH เกิดขึ้นได้ 3 กรณีคือ เมื่อ RSH มีอันดับ  $k = -1$  และ  $k = +1$  เพียงอย่างเดียวหรือมีทั้ง 2 อันดับ ทั้งนี้จะมีการแยกคำนวณดังแผนภูมิ ซึ่งในส่วนของ RSH ที่  $k = \pm 1$  นี้ จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด กล่าวคือสามารถใช้ความเป็นคู่ช่วยในการเพิ่มขนาดของ RSH ให้มีความโดดเด่นมากยิ่งขึ้นนั่นเองดังสมการ  $f_{sh}(n) \cdot f_{sh}([2 \cdot f_1] + n)$  ทั้งนี้ช่วงความถี่ของ RSH จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (10) ซึ่งเป็นการพิจารณาจากสมการที่ (8) และได้เพิ่มช่วงความถี่เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของความถี่ RSH เท่ากับ  $f_1 / 5$  Hz อีกด้วย

$$\frac{(N_r \times n_r)}{60} - (-k \times f_1) - \frac{f_1}{5} < f_{sh} < \frac{(N_r \times n_s)}{60} + (+k \times f_1) + \frac{f_1}{5} \tag{10}$$

อัลกอริทึมที่ถูกสร้างขึ้นนี้จะนำไปทดลองกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสซึ่งมีรายละเอียดดังภาคผนวก ความเร็วที่คำนวณได้จะนำไปเปรียบเทียบกับ photo tachometer แบบทั่วไปที่มีความคลาดเคลื่อนประมาณ  $\pm 1$  rpm โหลดของมอเตอร์เป็นทั้งโหลดทางกลโดยใช้เหล็กถ่วงน้ำหนักและโหลดทางไฟฟ้าโดยใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าดีซีทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายให้กับโหลดไฟ

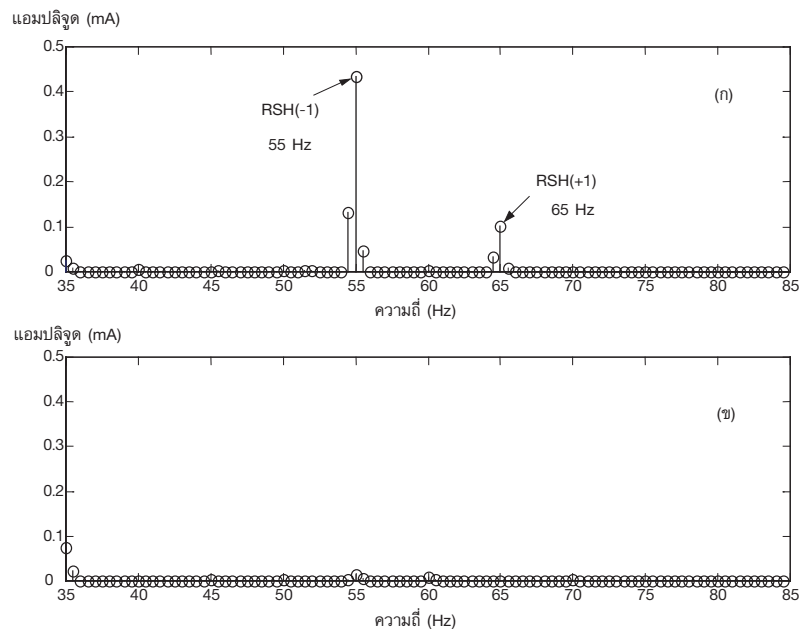
**5. ผลการทดลอง**



**รูปที่ 3** ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ของ RSH เมื่อมอเตอร์ทำงานที่พิกัด,  $k = \pm 1$ , FFT โดยใช้ 50 รุปคลื่น.

แหล่งจ่ายเป็นคลื่นไซน์ (บน) และอินเวอร์เตอร์แบบ PWM (ล่าง)

แหล่งจ่ายที่นำมาทดสอบได้แก่แหล่งจ่ายที่เป็นคลื่นไซน์ และอินเวอร์เตอร์แบบ PWM โดยขั้นแรกได้พิจารณาอันดับของ RSH ที่  $k=\pm 1$  ของมอเตอร์ทั้ง 3 พิกัด ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแหล่งจ่ายที่เป็นอินเวอร์เตอร์แบบ PWM จะมีฮาร์โมนิกเกิดขึ้นรวมอยู่ในกระแสเดเตอร์และรวมอยู่ในช่วงของ RSH มากกว่าแหล่งจ่ายที่เป็นคลื่นไซน์ นอกจากนี้พบว่าในมอเตอร์ A RSH จะเกิดขึ้นเฉพาะที่อันดับ  $k=+1$  มอเตอร์ C เกิดขึ้นที่  $k=-1$  ดังนั้นในการทดลองใช้กับอัลกอริทึมจึงเกิดความคลาดเคลื่อนของความเร็วเนื่องมาจากสาเหตุนี้ แต่สามารถดัดแปลงอัลกอริทึมเพื่อทำการทดลองโดยการคิดเฉพาะครึ่งช่วงของความถี่ RSH โดยแทนในอันดับที่ไม่ปรากฏด้วยศูนย์ เช่นในมอเตอร์ A ที่ RSH เกิดขึ้นเฉพาะที่  $k=+1$  ดังนั้นที่  $-k$  แทนด้วยศูนย์จะได้ความถี่ที่จะพิจารณาเป็น 1,042-1,160 Hz และในมอเตอร์ C แทนอันดับ  $+k$  ด้วยศูนย์ จะได้ช่วงความถี่ของ RSH ที่จะพิจารณาเป็น 324-410 Hz แต่ในมอเตอร์ B RSH เกิดขึ้นตรงตามที่ได้ออกแบบอัลกอริทึมไว้คือที่  $k=-1$  และ  $k=+1$  ซึ่งในการทดลองจึงได้ใช้มอเตอร์ B เป็นหลักเพื่อศึกษาพฤติกรรมของ RSH ในด้านต่างๆ



รูปที่ 4 ช่วงความถี่ของ RSH (ก) มอเตอร์หมุน (ข) มอเตอร์หยุดนิ่ง

ในการทดลองถึงการเกิดขึ้นของ RSH ได้ตั้งสมมุติฐานไว้ว่า จากทฤษฎีของ RSH ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำในช่องอากาศเนื่องมาจากความเป็นสล็อตนั้นก็คือมอเตอร์จะต้องหมุนจึงจะเกิดปรากฏการณ์นี้ ในการทดลองถึงสมมุติฐานดังกล่าวจึงได้ใช้แหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ทดลองที่ความถี่ 5 Hz เนื่องจากสามารถใส่โหลดให้กับมอเตอร์จนกระทั่งมอเตอร์หยุดหมุนได้โดยมอเตอร์ไม่เป็นอันตรายเนื่องจากไม่ได้มีการชดเชยแรงดันที่ความถี่ดังกล่าว ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4 สรุปได้ว่าข้อสมมุติฐานเป็นจริง นั่นคือ RSH จะไม่ปรากฏขึ้นเมื่อมอเตอร์หยุดนิ่ง

ผลการทดลองดังตารางที่ 1 ได้แสดงช่วงความถี่ของ RSH เมื่อ  $k=\pm 7$  ในตารางดังกล่าวได้แสดงแอมป์ลิจูดของ RSH ที่ถูกต้องโดยไม่ผ่านตัวกรองวินโดว์ จากการทดลองจะสังเกตเห็นได้ว่า RSH ไม่ได้เกิดขึ้นในทุกอันดับ

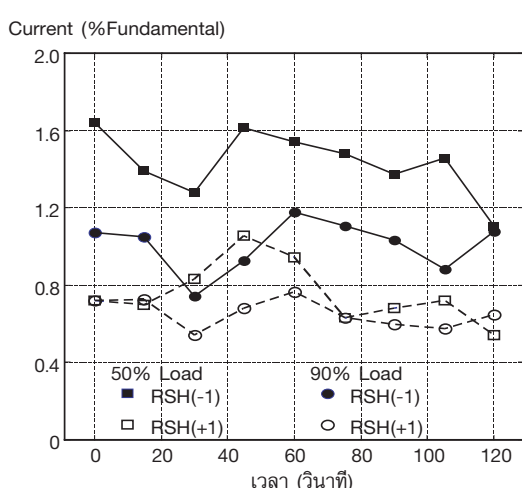
โดยเฉพาะอันดับที่เป็นเลขคู่ ในส่วนของเรื่องแอมพลิจูดจะเห็นได้ว่าที่อันดับ  $k=\pm 1$  จะมีค่ามากกว่าอันดับที่สูงขึ้นไป แต่ทั้งนี้ในการทดลองกับมอเตอร์ A ในอันดับที่  $k=-3$  จะมีแอมพลิจูดสูงกว่าที่  $k=+1$  ทั้งนี้่าจะมีสาเหตุมาจากการเสริมกันของฮาร์มอนิกอื่นที่มีความถี่เท่ากับกับความถี่ของ RSH

จากผลการทดลองตารางที่ 1 แอมพลิจูดของ RSH ที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากผลการทดลอง 3 ครั้งในเวลาต่างกัน เนื่องจาก RSH เป็นเพียงริบเบิลที่เกิดขึ้นในช่องอากาศตามการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำที่เป็นผลมาจากการหมุนของมอเตอร์ ทำให้แอมพลิจูดของ RSH มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังผลการทดลองรูปที่ 5 อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของ RSH เนื่องจากการหมุนของมอเตอร์ยังมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสภาวะโหลด

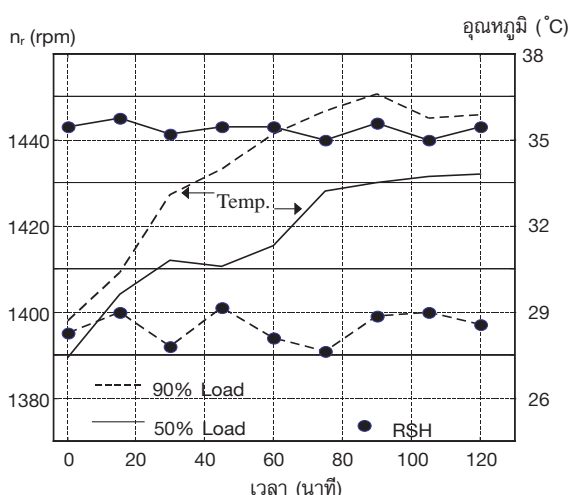
ตารางที่ 1 เปอร์เซนต์แอมพลิจูดของ RSH เมื่อแหล่งจ่ายเป็นคลื่นไซน์ที่อันดับ  $k$  ต่างๆเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ที่กัก

Motor	k=1		k=2		k=3		k=4		k=5		k=6		k=7	
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
A	.175	-	-	-	.068	.235	-	-	-	-	-	-	.050	-
B	.712	1.06	-	-	-	-	-	-	.128	.113	-	-	-	-
C	-	1.20	-	-	.857	.394	-	-	.197	.112	-	-	-	-

หมายเหตุ แอมพลิจูดของฮาร์มอนิกโดยเฉลี่ยในช่วงความถี่ของ RSH ตั้งแต่อันดับที่  $\pm 1$  ถึงอันดับที่  $\pm 7$  ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ A, B และ C มีค่าเท่ากับ 0.05%, 0.04% และ 0.08% ตามลำดับ



รูปที่ 5 แอมพลิจูดของ RSH ที่เกิดขึ้นขึ้นใน Motor B เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

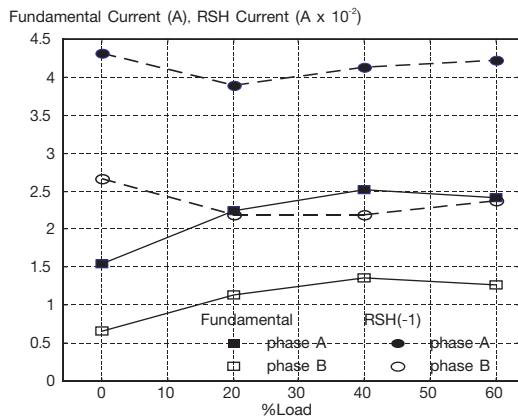


รูปที่ 6 ค่าของความเร็วที่ได้จากการคำนวณกับที่ได้จากการวัดมีค่าใกล้เคียงกันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

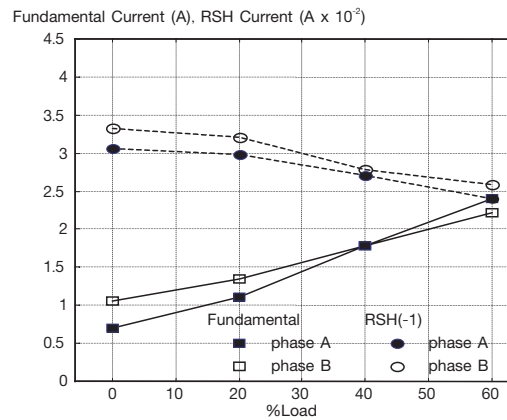
พฤติกรรมอีกด้านหนึ่งที่ต้องได้รับการพิจารณาเพื่อให้ RSH เป็นที่น่าเชื่อถือในการนำไปประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ ผลของอุณหภูมิและผลของฮาร์มอนิกอื่น ในการทดลองผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของ RSH ได้ทดลองกับมอเตอร์ B เมื่อแหล่งจ่ายเป็นคลื่นไซน์ที่พิกัด 50% โหลด และ 90% โหลด จากผลการทดลองรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น การคำนวณความเร็วยังคงมีความถูกต้องแม่นยำโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.1% ของความเร็วที่วัดได้จากเทคโนโลยีเตอร์ ในส่วนของการทดลองผลของฮาร์มอนิกอื่น ได้ทดลองที่สภาวะแรงดันไม่สมดุลระดับต่างๆ ในการทดลองได้ใช้หม้อแปลง 1 เฟส 3 ตัว และมอเตอร์ต่อแบบวายพร้อมสายนิวตรอลเมื่อกำหนดให้สภาวะแรงดันเป็นดังตารางที่ 2 จากสภาวะดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 มีค่าสูงถึง 3% ของมูลฐาน

ตารางที่ 2 สภาวะแรงดันไม่สมดุลระดับต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ

Motor	สูงกว่าปกติ		ต่ำกว่าปกติ	
	220	230	220	220
$V_{an}$ (volts)	220	230	220	220
$V_{bn}$ (volts)	238	230	210	204
$V_{cn}$ (volts)	238	220	210	204



(ก) ต่ำกว่าปกติ (220 204 204)

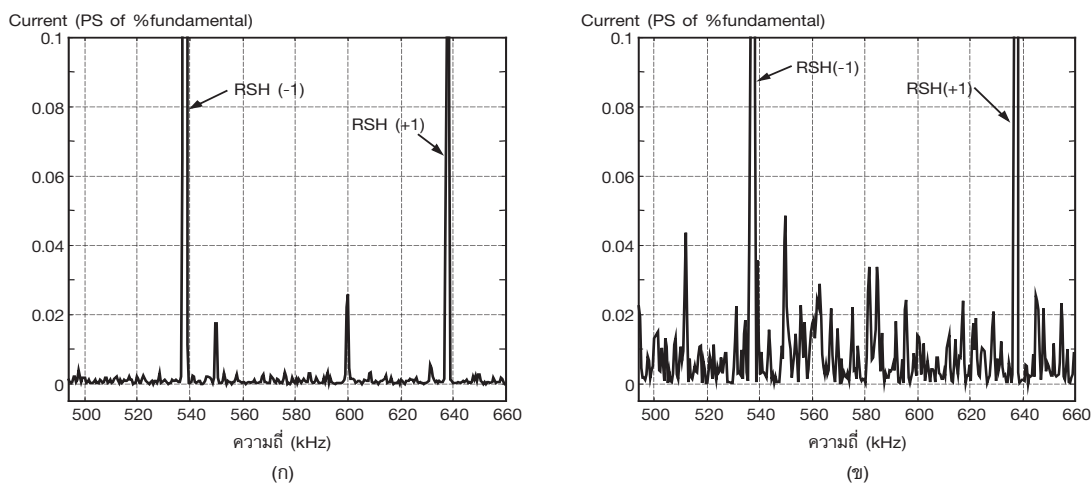


(ข) สูงกว่าปกติ (220 238 238)

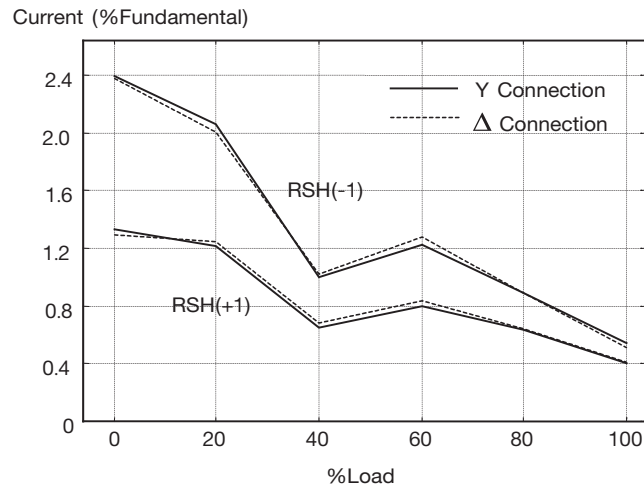
รูปที่ 7 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของ RSH เมื่อสภาวะแรงดันไม่สมดุลระดับต่างๆ ( $V_{an}$   $V_{bn}$   $V_{cn}$ )

ในสภาวะแรงดันไม่สมดุลจะทำให้กระแสที่ไหลในแต่ละเฟสมีค่าแตกต่างกันไป ซึ่งจะทำให้แอมพลิจูดของ RSH มีค่าต่างกันไปด้วย ผลการทดลองยังได้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของ RSH พร้อมกับกระแสมูลฐานที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะของแรงดันเช่นผลการทดลองรูปที่ 7(ก) กระแสที่ไหลในไลน์ A จะมากกว่ากระแสที่ไหลในไลน์ B ซึ่ง RSH ที่เกิดขึ้นในไลน์ A ก็จะมีแอมพลิจูดมากกว่าในไลน์ B ด้วยเช่นกัน และถึงแม้ว่าการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูด RSH ที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสจะแตกต่างกันไปแต่ในช่วงความถี่ของ RSH ก็ยังคงมีแต่ RSH เท่านั้นที่โดดเด่นอย่างชัดเจน ถึงแม้ว่าช่วงความถี่ของ RSH จะถูกรบกวนไปด้วยฮาร์มอนิกจากสาเหตุดังกล่าวแสดง ดังรูปที่ 8 ทั้งนี้เนื่องจากฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะไม่มีความเป็นคู่เหมือน RSH ทำให้การคำนวณหาความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวยังคงมีความแม่นยำสูง

สำหรับการดำเนินการต่อมอเตอร์แบบสตาร์และเดลต้าของมอเตอร์ทั้ง 3 พิกัด ซึ่งผลที่ได้คือ แอมพลิจูดของ RSH ในการต่อแบบวายและเดลต้าจะไม่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 9 ทั้งนี้กระแสที่ไหลในขดลวดแต่ละเฟส ( $I_p$ ) ยังคงมีค่าเท่ากัน ในส่วนของสัญญาณฮาร์มอนิกในช่วงความถี่ของ RSH เมื่อโหลดของมอเตอร์เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าดีซี และเหล็กถ่วงน้ำหนัก สรุปได้ว่าในช่วงความถี่ของ RSH จะมีสัญญาณฮาร์มอนิกเกิดขึ้นแตกต่างกันรวมถึงแอมพลิจูดของ RSH ด้วย แต่ทั้งนี้สัญญาณฮาร์มอนิกดังกล่าวจะมีแอมพลิจูดที่ลดลงไปหลังจากผ่านขั้นตอนของความเป็นคู่ฮาร์มอนิก ซึ่งจะมีเพียงแต่ RSH เท่านั้นที่โดดเด่นอย่างชัดเจน ผลการทดลองการเกิดขึ้นของสัญญาณฮาร์มอนิกในช่วงความถี่ของ RSH แสดงดังรูปที่ 10

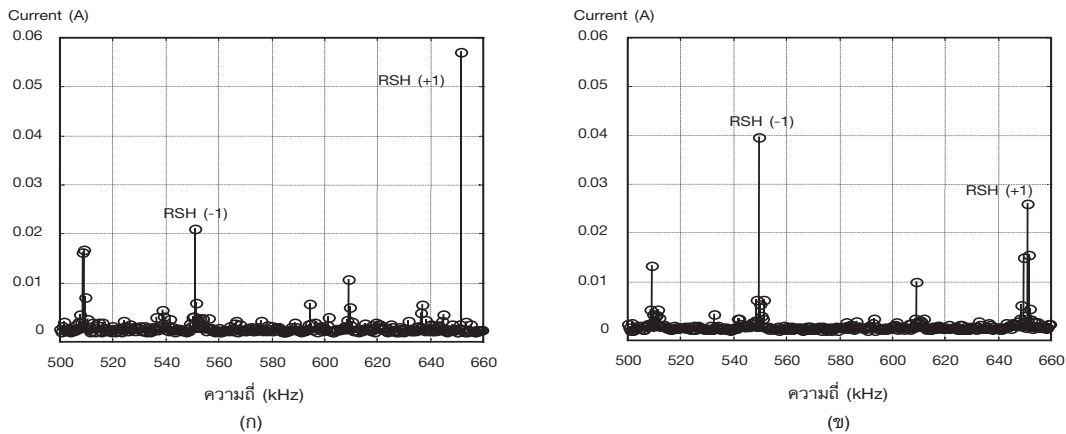


รูปที่ 8 ช่วงความถี่ RSH (ก) ที่สภาวะแรงดันปกติ (ข) ที่สภาวะแรงดันไม่สมดุล



รูปที่ 9 แอมพลิจูดของ RSH เมื่อมอเตอร์ต่อแบบ Y และแบบ Δ

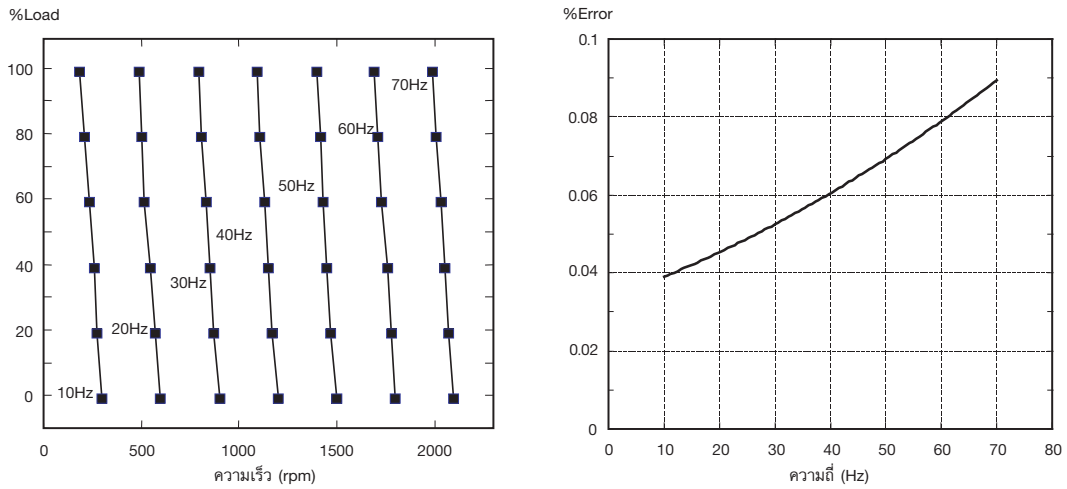
รูปที่ 11(ก) แสดงผลการทดลองการคำนวณความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่มูลฐาน จากที่ 10Hz - 70Hz และสภาวะโหลดที่ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% เครื่องหมาย ■ แทนการคำนวณความเร็วโดยอาศัย RSH และในรูปที่ 11(ข) แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่คำนวณได้ตลอดย่านความถี่มูลฐานของการทดลองรูปที่ 11(ก) ซึ่งได้คำนวณโดยใช้ค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นที่ความถี่เดียวกันในแต่ละพิกัดโหลด จากรูปสามารถสรุปได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าสูงขึ้นตามความถี่มูลฐาน



รูปที่ 10 ฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ของ RSH เมื่อโหลดเป็น

(ก) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

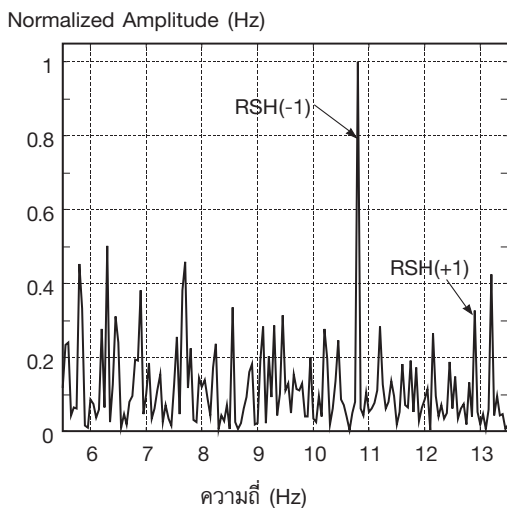
(ข) โดยใช้เหล็กถ่วงน้ำหนัก



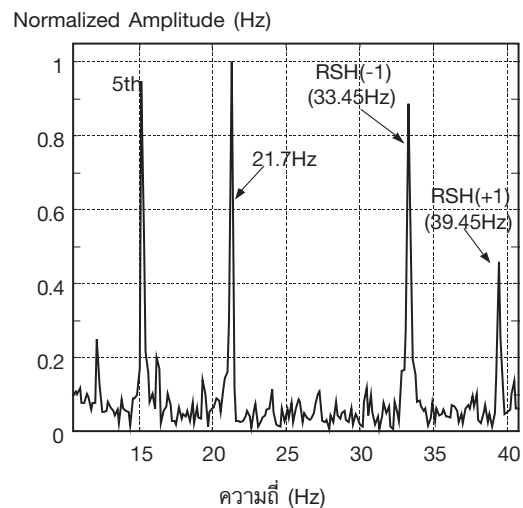
**รูปที่ 11** ความเร็วที่คำนวณได้โดยอาศัย RSH (■) จะใกล้เคียงกับที่วัดได้จาก photo tachometer (—) (รูปซ้าย) โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสูงขึ้นตามความถี่มูลฐาน (รูปขวา)

ในส่วนของการทดลองที่ความถี่มูลฐานต่ำกว่า 10 Hz ได้แสดงดังรูปที่ 12 และ 13 ซึ่งเป็นการทดลองที่ความถี่ 1 Hz และ 3 Hz ที่สภาวะการทำงานไร้โหลดของมอเตอร์จากรูปแสดงให้เห็นว่า RSH ยังคงเกิดขึ้นเป็นคู่อันดับกันอยู่ ทำให้สามารถคำนวณหาความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้อย่างแม่นยำ

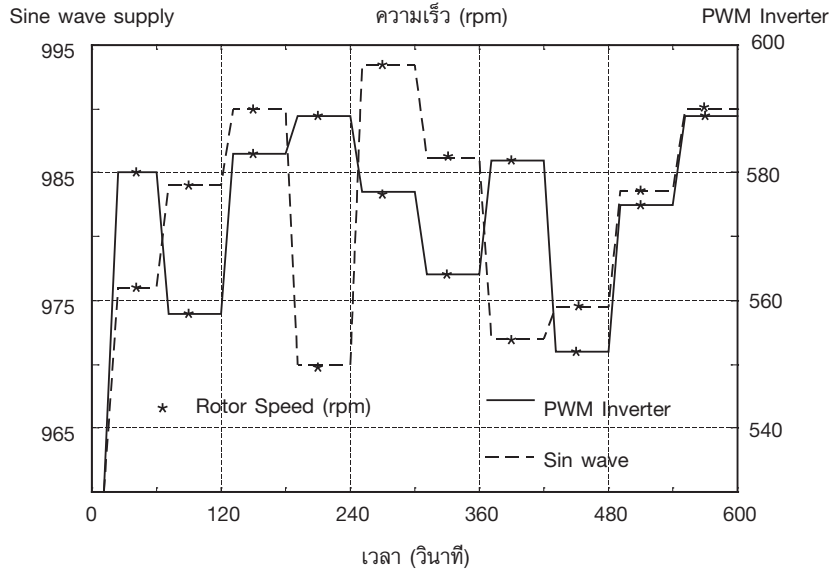
รูปที่ 14 เป็นการเปรียบเทียบการวัดความเร็วด้วย photo tachometer กับการคำนวณโดยอาศัย RSH เมื่อเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ที่เวลาต่างๆ จากรูปการทดลองกับแหล่งจ่ายที่เป็นคลื่นไซน์ ได้ทดลองกับมอเตอร์ C และมอเตอร์ B กับแหล่งจ่าย PWM อินเวอร์เตอร์ (ที่ความถี่มูลฐานเท่ากับ 20 Hz) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า RSH สามารถใช้คำนวณหาความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ทั้งแหล่งจ่ายที่เป็นคลื่นไซน์และ PWM อินเวอร์เตอร์ได้อย่างแม่นยำ



**รูปที่ 12** RSH ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ B โดยมีความถี่มูลฐานเท่ากับ 1 Hz ที่สภาวะไร้โหลด



**รูปที่ 13** RSH ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ B โดยมีความถี่มูลฐานเท่ากับ 3 Hz ที่สภาวะไร้โหลด



รูปที่ 14 เปรียบเทียบการคำนวณหาความเร็วภายใต้การเพิ่มและลดภาระของมอเตอร์เมื่อแหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นไซน์ และ PWM อินเวอร์เตอร์ (ที่ความถี่มูลฐานเท่ากับ 20 Hz)

## 6. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพฤติกรรมของฮาร์มอนิกที่เกิดจากความเป็นสล็อตในด้านต่างๆ พบว่าในขณะที่มอเตอร์หยุดนิ่ง โรเตอร์สล็อตฮาร์มอนิกจะไม่เกิดขึ้นทำให้ไม่สามารถคำนวณหาความเร็วที่สภาวะดังกล่าวได้ นอกจากนี้ยังพบว่า โรเตอร์สล็อตฮาร์มอนิกไม่ได้เกิดขึ้นในทุกอันดับ จากการทดลองกับมอเตอร์ 3 พิกัด ไม่พบในอันดับที่เป็นเลขคู่ และ แอมพลิจูดของโรเตอร์สล็อตฮาร์มอนิกในอันดับที่สูงกว่าอาจจะมีขนาดที่มากกว่าในอันดับที่ 1 ได้ จากการทดลอง ยังพบอีกว่าถึงแม้ว่าที่สภาวะโหลดเดียวกันก็ตามขนาดของโรเตอร์สล็อตฮาร์มอนิกที่เวลาต่างๆ กันยังมีขนาดที่ต่างกันไป แต่จะไม่มีผลต่อการคำนวณหาความเร็วเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และที่การทำงานของมอเตอร์เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ก็ยังสามารถคำนวณหาความเร็วของมอเตอร์ได้อย่างแม่นยำ รวมถึงที่สภาวะแรงดันไม่สมดุลในระดับต่างๆ ด้วย ถึงแม้ว่าในสภาวะที่แรงดันไม่สมดุลจะทำให้เกิดฮาร์มอนิกที่ 3 ขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดสัญญาณรบกวนในช่วงความถี่ของโรเตอร์สล็อตฮาร์มอนิก จากการทดลองดังกล่าวยังสามารถคำนวณหาความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้อย่างถูกต้องแม่นยำ โดยจะมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.1% เมื่อ RSH เกิดขึ้นเป็นคู่อันดับกัน

## 7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในโครงการ ทุนสนับสนุนนักวิจัยรุ่นใหม่ ประจำปี พ.ศ. 2546



## 8. ภาคผนวก

3-Phase IM	Motor A	Motor B	Motor C
With Rotor	Cage	Wound	Cage
Power rating, Hp	3	1.34	1
Rated current, A( $\Delta/Y$ )	8.0/4.6	4.32/2.5	3.12/1.8
Rated voltage, V( $\Delta/Y$ )	220/380	220/380	220/380
Rated speed, rpm	1435	1385	962
No. of poles	4	4	6
Rotor slot	44	24	24
<b>PWM Inverter</b>	SPWM Switching frequency at 2.9 kHz		

## 9. เอกสารอ้างอิง

1. เฉลิมชาติ มานพ, สกล กลิ่นหรั่ง และ วิจิตร กิณเรศ, 2544, “การออกแบบอัลกอริทึมสำหรับระบบโรเตอร์สล็อตฮาร์โมนิกเพื่อวัดความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบไร้ตัวตรวจจับความเร็ว,” รายงานการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24, พฤศจิกายน, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง, หน้า 311-316.

2. Hurst, K.D. and Habetler, T.G., 1996, “Sensorless Speed Measurement using Current Harmonic Spectral Estimation in Induction Machine Drives,” *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 11, No. 1, January, pp. 66-73.

3. Ferrah, A., Bradley, K.J., and Asher, G.M., 1992, “An FFT-based Novel Approach to Noninvasive Speed Measurement in Induction Motor Drives,” *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, Vol. 41, No. 6, December, pp. 797-802.

4. Ferrah, A., Hogben-Laing, P.J., Bradley, K.J., Asher, G.M., and Woolfson, M.S., 1997, “The Effect of Rotor Design on Sensorless Speed Estimation using Rotor Slot Harmonics Identified by Adaptive Digital Filtering using the Maximum Likelihood Approach,” *IEEE IAS Annual Meeting*, New Orleans, pp. 128-135.

5. Guldemir, H. and Bradley, K.J., “The Effect of Rotor Design on Rotor Slot Harmonics in Induction Machines,” *Electric Power Components and Systems*, pp. 771-788.