

## การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์หาค่าสมรรถนะ ของมอเตอร์แบบบั้งข้าว

สัญญาชัยยะ ผสมกุลศิลป์<sup>1</sup> ประเมิน อู๋ปะจ๊ะ<sup>1</sup>  
มณฑล สีลาจินดาไกรฤกษ์<sup>2</sup> และ ศุภี บรรจงจิตร<sup>3</sup>  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

งานวิจัยที่นำเสนอนี้เป็นผลการวิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อช่วยวิเคราะห์หาค่าสมรรถนะของมอเตอร์แบบบั้งข้าว โดยซอฟต์แวร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้จะทำงานบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลภายใต้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ วิธีการคำนวณจะเริ่มต้นด้วย การคำนวณหาค่ากระแสในส่วนต่างๆ ของวงจรสมมุทธ์ด้วยการใช้กฎของคราเมอร์ หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าสมรรถนะของมอเตอร์ต่อไป ในตอนท้ายได้แสดงถึงตัวอย่างมอเตอร์ชนิดดังกล่าวที่นำมาทดสอบกับโปรแกรม นอกจากนี้ประโยชน์ของงานวิจัยชิ้นนี้ยังสามารถช่วยให้เป็นจุดตั้งต้นของการออกแบบมอเตอร์แบบบั้งข้าวได้ เพราะผลลัพธ์ของโปรแกรมจะช่วยวิเคราะห์ค่าสมรรถนะของมอเตอร์ที่ออกแบบ อันจะสามารถนำไปดำเนินงานในเรื่องของการพัฒนาการออกแบบต่อไปได้

<sup>1</sup> นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

<sup>3</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

## Computer Aided Performance Analysis of Shaded-Pole Motors

Sanchaiya Pasomkusolsil<sup>1</sup> Pramern Oupaja<sup>1</sup>

Monthon Leelajindakrairerk<sup>2</sup> and Sulee Banjongjit<sup>3</sup>

King Mongkut's Institute of Technology Lardkrabang

---

### Abstract

The development of a software package for performance analysis of single phase shaded-pole motor is presented in this article. This software is run on a personal computer along with Microsoft Windows operating system. The initial stage of this calculation method is to solve the currents in each circuit by Cramer's Rule. Later, the calculated currents are then used for performance calculation. An example of performance analysis of shaded pole motors is shown with Shaded Pole Motor Performance Analysis Program (SHPMPAP). This research can be applied to the design of a shaded-pole motor and to be used as a guide for further development.

---

<sup>1</sup> Graduate Student, Department of Electrical Engineering

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Electrical Engineering

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Electrical Engineering

## บทนำ

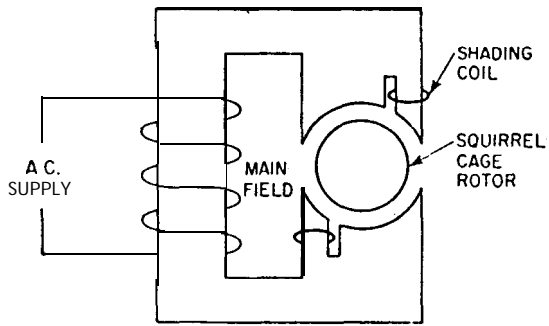
โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน อาทิเช่น พัดลมดูดอากาศ เครื่องปรับอากาศ ตู้เย็น ปีมขนาดเล็ก เป็นต้น จะใช้ มอเตอร์ เป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งสามารถแบ่งแยกออกเป็นอีกหลายชนิด ส่วนใหญ่นั้นก็ย้งต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศทั้งในรูปวัตถุดิบและสำเร็จรูป อันทำให้ประเทศไทยต้องสูญเสียเงินตราเป็นค่าลิขสิทธิ์และค่าวัตถุดิบจากต่างประเทศเป็นจำนวนมากมายต่อปี มอเตอร์แบบบังขั้วนี้ (Shaded pole single phase induction motor) ก็เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งผู้ผลิตมอเตอร์ภายในประเทศสามารถที่จะผลิตเองได้แล้ว แต่ผู้ผลิตส่วนใหญ่ยังไม่นิยมทำกันเพราะประสบปัญหาในเรื่องของ ค่าใช้จ่ายและเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่มาช่วยในการทำวิจัยและพัฒนาเช่น ซอฟต์แวร์ เป็นต้น

ดังนั้นจากปัญหาข้างต้น จึงขอนำเสนองานวิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อช่วยวิเคราะห์หาค่าสมรรถนะของมอเตอร์แบบบังขั้ว (Shaded Pole Motor Performance Analysis Program, SHPMPAP) ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาด้วย Microsoft Visual Basic ซึ่งจะทำงานบนระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows อนึ่งวัตถุประสงค์ของการนำเสนอานวิจัยนี้ ยังมีได้มุ่งประเด็นไปที่การนำเอา SHPMPAP มาใช้หามอเตอร์แบบบังขั้ว ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าในปัจจุบัน แต่จะเป็นการนำเสนอ SHPMPAP มาช่วยในการออกแบบเพื่อให้ผู้ออกแบบมอเตอร์ได้ทราบถึงค่าสมรรถนะต่างๆ ของมอเตอร์ที่ได้ออกแบบเอาไว้และเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาออกแบบมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนในสถาบันการศึกษา

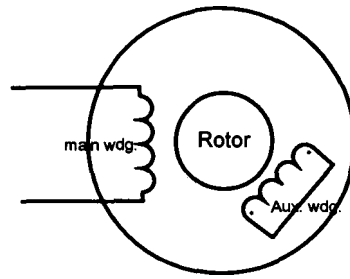
## โครงสร้างและหลักการของมอเตอร์แบบบังขั้ว

มอเตอร์แบบบังขั้ว จัดเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขนาดเล็กชนิดหนึ่งที่มีขนาดให้เลือกใช้งานตั้งแต่ 1/100, 1/20, 1/4 ไปจนถึง 1 แรงม้า ลักษณะของโครงสร้างและแผนภาพอย่างง่าย ดังแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ ตัวสเตเตอร์จะทำมาจากแผ่นลามิเนตบางๆ อัดแน่นติดกัน โรเตอร์ส่วนใหญ่เป็นแบบกรงกระรอก (squirrel cage) โดยในแต่ละขั้วจะมีขั้วส่วนหนึ่งที่ถูบบังไว้ ตัวที่ไปบังไว้คือขดลวดตัวนำหรือขดทองแดงที่ครบวงจรในตัวมันเองอยู่แล้ว ขดลวดทองแดง ลัดวงจร (short circuit) ที่ใส่ไปนี้จะเรียกว่า “ขดลวดบังขั้ว” (shading coil)

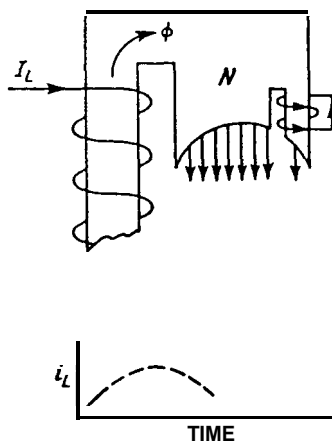
รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในมอเตอร์แบบบังขั้ว การเริ่มหมุนของมอเตอร์แบบบังขั้ว เริ่มจากการป้อนไฟ AC เข้าที่ขดลวดหลัก (Main winding) ที่พันอยู่รอบๆ ขั้วแม่เหล็ก ในช่วงไซเคิลบวก จะมีกระแสไหลผ่านขดลวดหลักทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น (หลักการนี้คล้ายๆ กับปฏิกิริยาของหม้อแปลงไฟฟ้า) ที่ขดลวดบังขั้ว อันมีผลทำให้เกิดกระแสจำนวนมากไหลในขดลวดบังขั้ว กระแส



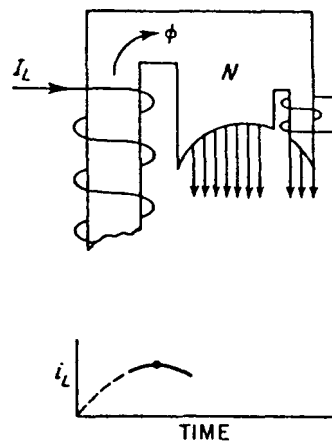
รูปที่ 1 โครงสร้างของมอเตอร์แบบบังขั้ว



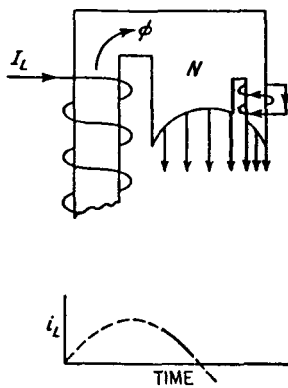
รูปที่ 2 แสดงแผนภาพอย่างง่าย [1]



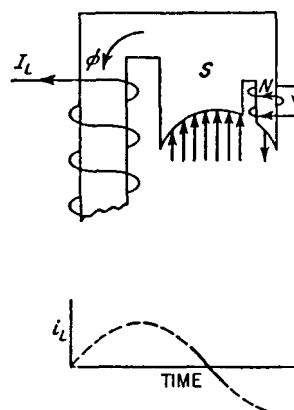
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กของมอเตอร์แบบบังขั้ว

ดังกล่าวนี้เป็นตัวทำให้เกิดสนามแม่เหล็กสวนทางกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดหลัก ในช่วงจุดสูงสุดของไซเคิลบวก กระแสในขดลวดหลักจะมีค่าสูงสุด การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กช้ามากหรือแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงเลย นั่นคือไม่มีการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ขดบังขั้ว ฉะนั้นจึงไม่มีกระแสไหลในขดบังขั้ว ย่อมทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีค่าสูงสุด (ไม่มีเส้นแรงสวนจากขดบังขั้ว) และกระจายไปทั้งขั้วแม่เหล็ก เมื่อเวลาผ่านไป กระแสในขดลวดหลักลดลงอย่างรวดเร็ว ฉะนั้นจึงทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำขึ้นในขดบังขั้ว ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับการลดของกระแสของขดลวดหลัก ทำให้มีเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นในส่วนที่ถูกพันด้วยขดบังขั้ว ซึ่งจะดูเหมือนว่าขั้วเหนือแม่เหล็กขั้วหนึ่งเลื่อนจากส่วนที่ไม่ได้ถูกพันด้วยขดลวดบังขั้วไปยังส่วนที่ถูกพันด้วยขดลวดบังขั้ว

ส่วนในช่วงไซเคิลลบ ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเหมือนกับที่กล่าวไว้ในตอนต้นแต่จะสลับทิศทางกันเท่านั้น กล่าวคือ ทำให้เกิดขั้วใต้ขึ้นไปในทิศทางที่ทำให้สนามแม่เหล็กวิ่งจากส่วนที่ไม่ได้ถูกพันด้วยขดลวดบังขั้วไปยังส่วนที่ถูกพันด้วยขดลวดบังขั้ว ฉะนั้นจึงทำให้มอเตอร์เริ่มหมุนได้

#### การวิเคราะห์วงจร

ในการพิจารณาเพื่อวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์แบบบังขั้วนี้ให้ง่ายขึ้น จะต้องเขียนแผนภาพในรูปที่ 2 ใหม่ โดยเขียนให้อยู่ในรูปของวงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าดังแสดงอยู่ในรูปที่ 4 ซึ่งได้มาจากทฤษฎี cross-field [2] ในมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

โดยที่  $E$  เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์

$I_L$  เป็นกระแสไลน์ของมอเตอร์

$I_1$  และ  $Z_1$  เป็นกระแสที่ไหลในขดลวดหลักและอิมพีแดนซ์ของขดลวดหลัก

$I_a$  และ  $Z_a$  เป็นกระแสที่ไหลในขดเซตตั้งและอิมพีแดนซ์ของขดเซตตั้ง

$I_{2m}$  เป็นกระแสทางด้านโรเตอร์ในแกน main-field

$Z_{2m}$  เป็นอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์เมื่ออ้างอิงถึงขดลวดหลัก

$I_{2a}$  เป็นกระแสทางด้านโรเตอร์ในแกน cross-field

$Z_{2a}$  เป็นอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์เมื่ออ้างอิงถึงขดเซตตั้ง

$X_{mm}$  เป็นรีแอกแตนซ์ที่เกิดจากฟลักซ์เหนี่ยวนำร่วมในช่องอากาศของขดลวดหลัก

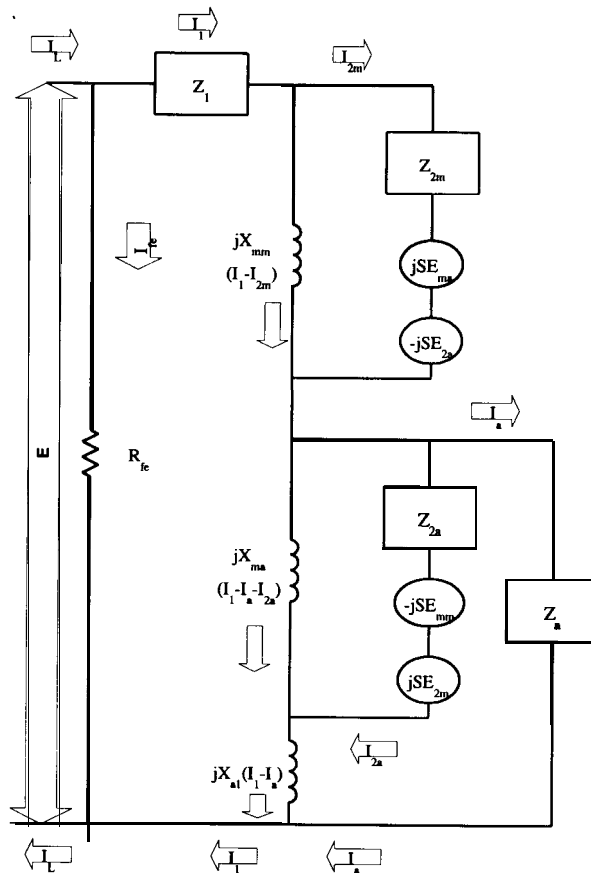
$X_{ma}$  เป็นรีแอกแตนซ์ที่เกิดจากฟลักซ์เหนี่ยวนำร่วมในช่องอากาศของขดเซตตั้ง

$X_{a1}$  เป็นรีแอกแตนซ์ที่เกิดจากการสกีวโรเตอร์, ฮาร์โมนิคต่าง ๆ ในช่องอากาศ

$X_{02}$  เป็นรีแอกแตนซ์ที่โรเตอร์ขณะเปิดวงจร

$R_{fe}$  เป็นความต้านทานที่สูญเสียในแกนเหล็ก

$S$  เป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วของตัวหมุนต่อความเร็วซิงโครนัส



รูปที่ 4 แสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์แบบบังขั้วเมื่อได้รับการจ่ายแรงดัน

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4 ค่าของ  $I_1$ ,  $I_a$ ,  $I_{2m}$ ,  $I_{2a}$  เป็นค่าที่ต้องถูกพิจารณาเป็นพิเศษ เนื่องจากค่าอื่นๆ ในวงจรสมมูลทราบค่ามาแล้วก่อนที่จะถูกวิเคราะห์และเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการหาคุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์ เช่น แรงบิด กำลังไฟฟ้า ค่าความสูญเสียต่างๆ ซึ่งในการวิเคราะห์หาค่ากระแสที่ค่าจะแสดงตามขั้นตอนต่อไปนี้ จากวงจรสมมูลสามารถเขียนเป็นสมการได้สี่สมการดังนี้

สมการของส่วนที่ผ่านขดลวดหลัก (primary)

$$(r_1 + jX_1)I_1 + jX_{mm}(I_1 - I_{2m}) + jX_{a1}(I_1 - I_a) + jX_{ma}(I_1 - I_a - I_{2a}) = E \quad \text{.....(1)}$$

สมการของส่วนที่ผ่านขดลวดบังขั้ว (shading coil)

$$(r_a + jX_a)I_a - jX_{a1}(I_1 - I_a) - jX_{ma}(I_1 - I_a - I_{2a}) = 0 \quad \text{.....(2)}$$

สมการแทนส่วน Rotor Main Phase

$$(r_{2m} + jX_{2m})I_{2m} - jX_{mm}(I_1 - I_{2m}) - SX_{ma}(I_1 - I_a - I_{2a}) + SX_{2a}I_{2a} = 0 \quad \text{.....(3)}$$

สมการแทนส่วน Rotor Shaded Pole Phase

$$(r_{2a} + jX_{2a})I_{2a} - jX_{ma}(I_1 - I_a - I_{2a}) + SX_{mm}(I_1 - I_{2m}) - SI_{2m}X_{2m} = 0 \quad \text{.....(4)}$$

นำสมการทั้งสี่สมการหารด้วย  $X_{02}$  และคูณสมการ (2), (3) และ (4) ด้วย  $j$

$$\left[ \frac{r_1}{X_{02}} + j \frac{X_1 + X_{mm} + X_{ma} + X_{a1}}{X_{02}} \right] I_1 + \left[ -j \frac{X_{a1} + X_{ma}}{X_{02}} \right] I_a + \left[ -j \frac{X_{mm}}{X_{02}} \right] I_{2m} + \left[ -j \frac{X_{ma}}{X_{02}} \right] I_{2a} = \frac{E}{X_{02}} = i_m \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\left[ \frac{X_{a1} + X_{ma}}{X_{02}} \right] I_1 + \left[ j \frac{r_a}{X_{02}} - \frac{x_a + X_{a1} + X_{ma}}{X_{02}} \right] I_a + [0] I_{2m} + \left[ -\frac{X_{ma}}{X_{02}} \right] I_{2a} = 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\left[ \frac{X_{mm}}{X_{02}} - jS \frac{X_{ma}}{X_{02}} \right] I_1 + \left[ jS \frac{X_{ma}}{X_{02}} \right] I_a + \left[ j \frac{r_2}{X_{02}} - 1 \right] I_{2m} + \left[ jS \frac{X_{03}}{X_{02}} \right] I_{2a} = 0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$\left[ \frac{X_{ma}}{X_{02}} + jS \frac{X_{mm}}{X_{02}} \right] I_1 + \left[ -\frac{X_{ma}}{X_{02}} \right] I_a + [-jS] I_{2m} + \left[ j \frac{r_2}{X_{02}} - \frac{X_{03}}{X_{002}} \right] I_{2a} = 0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

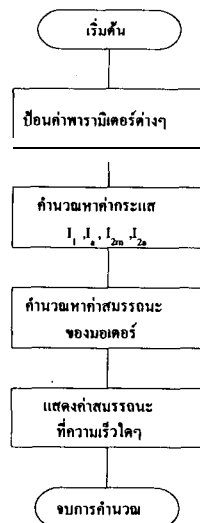
นำสมการที่ (5) ถึง (8) มาเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 & d_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_a \\ I_{2m} \\ I_{2a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E/X_{02} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

จากนั้นก็ใช้ Cramer's Rule ในการแก้ปัญหาหาค่าของ  $I_1$ ,  $I_a$ ,  $I_{2m}$  และ  $I_{2a}$  ตามลำดับและนำไปคำนวณหาค่าสมรรถนะต่อไป

**ผังงานของการคำนวณ**

ในรูปที่ 5 จะแสดงถึงขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของโปรแกรม

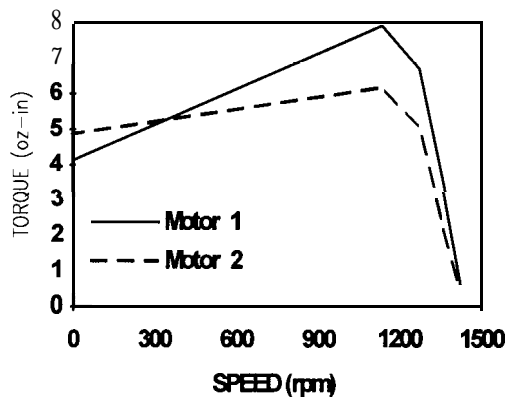
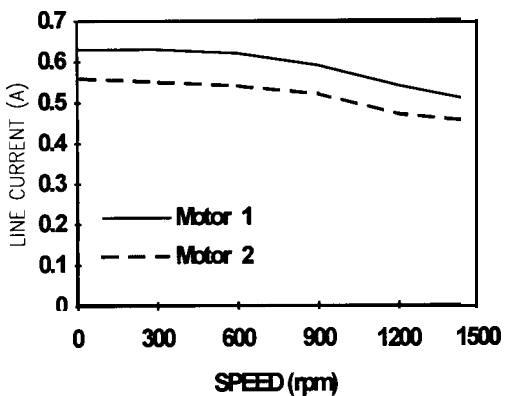
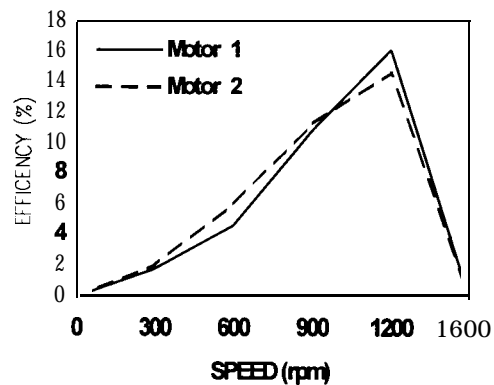
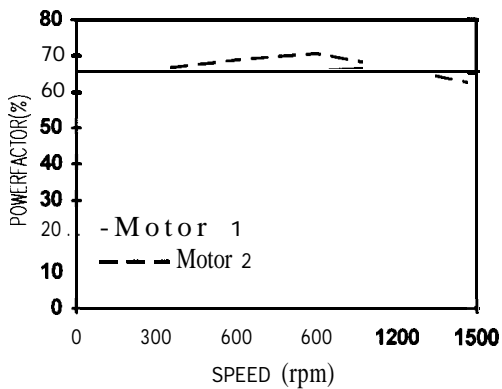
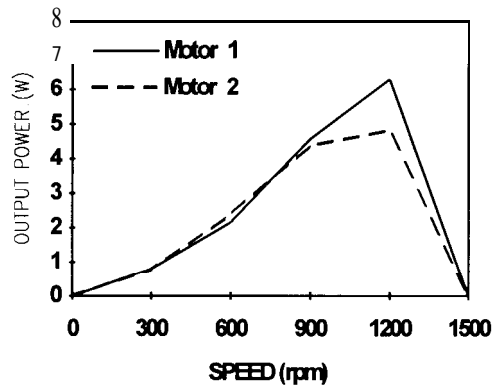
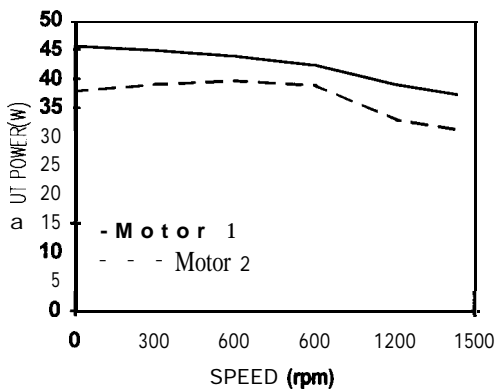


รูปที่ 5 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

### ตัวอย่างการวิเคราะห์หาค่าสมรรถนะ

ตัวอย่างของการคำนวณที่พิจารณาจากการวิเคราะห์ห้วงจรสมมูลยั้งข้างต้น โดยใช้มอเตอร์แบบบังขั้ว มีรายละเอียดดังนี้

มอเตอร์ตัวที่ 1 มีแรงดันพิกัด 110 v 8mhp 1425 rpm มีจำนวนขั้วแม่เหล็ก 4 ขั้วแม่เหล็ก ซึ่งแต่ละขั้วมี single shading coil มีค่าความต้านทานของขดลวดหลัก (main winding), ความต้านทานของขดลวดบังขั้วและความต้านทานแทนส่วนโรเตอร์เท่ากับ 47.4, 90.5 และ 39 โอห์ม ตามลำดับ



รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะต่างๆ ระหว่างมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว



มอเตอร์ตัวที่ 2 มีแรงดันพิกัด 110 v 8mhp 1495 rpm มีจำนวนขั้วแม่เหล็ก 4 ขั้วแม่เหล็ก ซึ่งแต่ละขั้วมี single shading coil มีค่าความต้านทานของขดลวดหลัก ความต้านทานของขดลวดบังขั้ว และความต้านทานแทนส่วนโรเตอร์เท่ากับ 58.1, 0.0018 และ 65 โอห์มตามลำดับ ตัวโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก ขดลวดบังขั้วเป็นทองแดง [3] โดยผลการวิเคราะห์หาค่าสมรรถนะต่าง ๆ ของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวจะนำมาเปรียบเทียบกันซึ่งแสดงในรูปที่ 6

### การวิจารณ์ผลของการใช้ SHPMAPP

งานวิจัยชิ้นนี้ นับได้ว่าเป็นเครื่องมือที่ช่วยวิเคราะห์และจำลองให้เห็นถึงค่าสมรรถนะต่าง ๆ ของมอเตอร์แบบบังขั้ว ซึ่งจากข้อมูลของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว ที่นำมาทดสอบจนได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 5 นั้นพบว่า มอเตอร์ตัวที่ 2 มีค่าอิมพีแดนซ์ที่แทนส่วนของขดลวดหลัก และค่าอิมพีแดนซ์ที่แทนส่วนโรเตอร์มีค่ามากกว่ามอเตอร์ตัวที่ 1 ทำให้กระแส  $I_1$  และ  $I_{2m}$  มีค่าน้อย ( $I = E/Z$ ) อันมีผลให้กระแสที่ไหลผ่านในส่วนต่างๆ มีค่าลดลงตามไปด้วย เมื่อนำไปคำนวณหาค่าสมรรถนะต่างๆ จึงทำให้มีค่าต่ำกว่า ดังนั้นถ้าหากทำการออกแบบหรือเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของขดลวดหลัก ขดลวดบังขั้วของมอเตอร์ตัวที่ 2 ใหม่ให้มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับมอเตอร์ตัวที่ 1 แล้วจะมีผลทำให้ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ตัวที่ 2 ดีขึ้นกว่าเดิม

แต่อย่างไรก็ตาม การออกแบบและวิจัยมอเตอร์ควรที่จะทำการศึกษาถึงผลของพารามิเตอร์อื่นๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพ การทำงานของมอเตอร์และเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมกับเครื่องทดสอบมอเตอร์ ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่จะนำไปใช้งาน รวมทั้งศึกษาทฤษฎีเพิ่มเติมเพื่อปรับปรุง SHPMAPP ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น อันเป็นวัตถุประสงค์ที่จะดำเนินต่อไปในงานวิจัย

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยชื่อ “หน่วยวิจัยและบริการเทคโนโลยีมอเตอร์ (Research and Service Unit on Motor Technology)” ของศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม และขอขอบคุณ คุณวัลลภ เรืองด้วยธรรม ผู้ช่วยนักวิจัยของโครงการที่กรุณาให้คำปรึกษา

## เอกสารอ้างอิง

1. Veinott, C.G., 1986, "Theory and Design of Small Induction Motor", Printed by the Author, Sarssota, Florida, USA.
2. Trickey, P.H., 1981, "Electric Motor and Generator Design Philosophy and **Procedures**", Printed by Duke University.
3. Guru, B.S., 1983, "**Revolving-Field Analysis a Shaded-Pole Motor**", IEEE Trans., Power Apparatus and Systems, Vol. 102, No.4, pp. 918-927.

## ภาคผนวก

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ นั้น สามารถหาได้จากข้อมูลทางกายภาพของตัวมอเตอร์รวมทั้งจากสูตรการคำนวณของ [2] ดังต่อไปนี้

1. ความต้านทานของขดลวดหลัก ( $r_1$ ) สามารถคำนวณหาได้จาก

$$r_1 = R_{wm} p N_m L_m$$

โดยที่  $R_{wm}$  = ความต้านทานประสิทธิผลของขนาดขดลวดหลัก

$p$  = จำนวนขั้วแม่เหล็ก

$N_m$  = จำนวนรอบของขดลวดหลักต่อขั้วแม่เหล็ก

$L_m$  = ความยาวโดยเฉลี่ยของขดลวดหลักหน่วยเป็นนิ้ว

2. ความต้านทานของขดลวดบังขั้ว ( $r_a$ ) สามารถคำนวณหาได้จาก

$$r_a = 1.385 \frac{lmc_a}{S_a} N_2 p \frac{C^2}{C_a} 10^{-8}$$

$lmc_a$  = ความยาวเฉลี่ยของตัวนำของขดลวดบังขั้ว

$S_s$  = พื้นที่หน้าตัดของขดลวดบังขั้ว

$N_2$  = จำนวนรอบของขดลวดบังขั้วต่อขั้วแม่เหล็ก

$C_a$  = จำนวนตัวนำทั้งหมดของขดลวดบังขั้ว

3. ความต้านทานโรเตอร์ ( $r_2$ ) สามารถคำนวณหาได้จาก

$$r_a = \left( \frac{\sqrt{W^2 + SK^2}}{S_c S_s} + \frac{0.637 D_r}{S_r p^2} \right) 1.3856 10^{-8}$$

$W$  = ความกว้างของตัวโรเตอร์

$SK$  = การสกิวโรเตอร์หน่วยเป็นนิ้ว

$S_c$  = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำบนโรเตอร์หน่วยเป็นตารางนิ้ว

$S_s$  = จำนวนตัวนำบนโรเตอร์

$S_r$  = พื้นที่หน้าตัดของวงแหวนหน่วยเป็นตารางนิ้ว

$D_r$  = เส้นผ่าศูนย์กลางที่ปลายของตัวนำบนโรเตอร์กับวงแหวน

4. อิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ ( $Z_2$ ) จะถูกอ้างอิงแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

4.1 อิมพีแดนซ์ของโรเตอร์เมื่ออ้างอิงถึงขดลวดหลัก ( $Z_{2m}$ ) สามารถหาได้จาก

$$Z_{2m} = r_{2m} + x_{2m}$$

4.2 อิมพีแดนซ์ของโรเตอร์เมื่ออ้างอิงถึงขดลวดบังซ์ ( $Z_{2a}$ )

$$Z_{2a} = r_{2a} + x_{2a}$$

โดยที่ค่า  $r_{2m} = r_{2a} = r_2$

$$x_{2a} = x_{2m} = x_2$$

4.2.1 รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์เมื่ออ้างอิงถึงขดลวดหลัก ( $x_{2m}$ ) จะมีอยู่ 3 ส่วนคือ

$$x_{2m} = x_{slot} + x_{sk} + x_{zz}$$

4.2.1a รีแอกแตนซ์รั้วซี่ของช่องสลีต ( $x_{slot}$ ) สามารถคำนวณได้จาก

$$x_{slot} = 2\pi f C^2 10^{-8} \left( \frac{0.637W}{S_s} K_s \right)$$

$f$  = ความถี่

$C$  = จำนวนขดลวดที่พันบนขดลวดหลัก

$K_s$  = ค่าคงที่ของช่องสลีต

4.2.1b รีแอกแตนซ์รั้วซี่ที่เกิดจากการทำสลีตเฉียง ( $x_{sk}$ ) สามารถคำนวณได้จาก

$$x_{sk} = X_m \left( \frac{1 - C_{sk}}{C_{sk}} \right)$$

โดยที่  $x_m = 2\pi f C^2 10^{-8} \left( \frac{0.647W\lambda_p}{l_g p} \sin^2 \beta / 2 \right) C_{sk}$

$l_g$  = ความยาวของช่องอากาศ

$\lambda_p$  = ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก

$\beta$  = มุมของพื้นผิวขั้วแม่เหล็ก

$$C_{sk} = \frac{\sin^2 \theta_{sk} / 2}{\theta_{sk} / 2}$$

$\theta_{sk}$  = มุมของการสกวินหน่วยเป็นองศาทางไฟฟ้า

4.2.1c รีแอกแตนซ์รั้วซิมซิกแซก ( $x_{zz}$ ) สามารถคำนวณหาได้จาก

$$x_{\text{zigzag}} = 2\pi f C^2 10^{-8} \left( \frac{6.38W}{S_s} * \frac{T_f / 2}{S\Delta} \right)$$

$T_f$  = ความกว้างของช่องอากาศที่พื้นผิวหน้าของโรเตอร์

$\Delta$  = ค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องอากาศ

5. รีแอกแตนซ์ที่เกิดจากฟลักเหนี่ยวนำร่วมมี 2 ส่วนด้วยกันคือ

5.1 รีแอกแตนซ์ที่เกิดจากฟลักเหนี่ยวนำร่วมในช่องอากาศของขดลวดหลัก

$$x_{\text{mm}} = (2\pi f C^2 10^{-8}) \frac{3.19W\lambda_p}{4l_s p} a$$

$\alpha$  = ค่าประสิทธิผลพื้นผิวขั้วแม่เหล็ก

5.2 รีแอกแตนซ์ที่เกิดจากฟลักเหนี่ยวนำร่วมในช่องอากาศของขดลวดบังขั้ว

$$x_{\text{ma}} = 2\pi f C^2 10^{-8} \frac{0.647W\lambda_p}{l_s p} \sin^2 \frac{\beta}{2}$$

6. รีแอกแตนซ์ที่เกิดจากการสกีวโรเตอร์และฮาร์โมนิค ( $x_{a1}$ )

$$x_{a1} = x_h + x_{sk}$$

โดยที่ 
$$x_h = 2\pi f C^2 10^{-8} \left( \frac{0.647W\lambda_p}{l_s p} \sin^2 \frac{\beta}{2} \right) C_s$$

$$C_h = \left( \frac{1.232\alpha - \sin^2 \beta / 2}{\sin^2 \beta / 2} \right) = \left( \frac{1.232\alpha}{\sin^2 \beta / 2} - 1 \right)$$

7. รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ขณะเปิดวงจร ( $x_{02}$ )

$$x_{02} = x_{\text{mm}} + x_{2m}$$