

การปรับปรุงเสถียรภาพของการหยุด แบบยืดหยุ่นปลอดความผิดพลาดสำหรับ มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส

ทวีคุณ สวรรค์ตรานนท์

นักศึกษานิเทศศาสตร์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและระบบ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

วงศ์ศักดิ์ นริศชนาภรณ์

รองศาสตราจารย์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการเบรคมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยใช้คาปาซิเตอร์ ซึ่งเป็นการเบรคมอเตอร์ที่ไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก แต่อาศัยพลังงานไฟฟ้าที่เหลือค้างอยู่ในโรเตอร์เนื่องจากเวลาคงตัว (time constant) สัมพันธ์กับพลังงานจลน์ในโรเตอร์ขณะนั้น โดยมีคาปาซิเตอร์เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดพลังงานที่มากพอที่จะเบรคตัวมันเองได้ ในบทความได้แสดงการวิเคราะห์การเบรคมอเตอร์ด้วยวิธีการดังกล่าวทั้งทางด้านสถิติ คือ การวิเคราะห์เสถียรภาพของการเบรค รวมทั้งการปรับปรุงเสถียรภาพของการเบรคและการวิเคราะห์ทางด้านพลวัต โดยการจำลองการเบรคมอเตอร์ด้วยคอมพิวเตอร์ตามเงื่อนไขต่างๆ ที่แตกต่างกัน พร้อมทั้งนำเสนอผลการทดลองในทางปฏิบัติ เพื่อที่จะเป็นแนวทางในการปรับปรุงให้ใช้งานได้ดียิ่งขึ้น

Stability improvement of fail-safe dynamic brake for three phase induction motor

Taweekoon Sawantranon

Graduate Student in Electrical and System Engineering

Graduate School, Khon Khaen University

Vorasak Nirukkanaporn

Associate Professor

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering, Khon Khaen University

Abstract

This paper presents the method of how to brake the three-phase induction motor by using the capacitor without the required external energy. Instead, the temporary electrical energy left in the rotor due to the time constant which is related to the kinetic energy stored in the rotor at the moment is used with the capacitor to exite enough energy to stop itself. This paper shows the analysis of how to brake the motor as mentioned both statically in trems of the stability of braking including the improvement of the stability and dynamically by computer simulation in different conditions in addition to the experimental results for a better design and practical application of the three-phase induction motor braking.

บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสในขณะที่กำลังขับโหลดที่มีความเฉื่อยสูงๆ เมื่อเราต้องการที่จะเบรกมันในทันทีทันใดจะมีวิธีการที่นิยมใช้กันอยู่สองวิธีคือ วิธีที่หนึ่งใช้การป้อนไฟกระแสตรงเข้าไปในขดเสเตเตอร์ของมอเตอร์เมื่อปลดแหล่งจ่ายออกแล้วเรียกว่า ดี.ซี เบรก (D.C brake) อีกวิธีหนึ่งเป็นการเบรกแบบทางกล (mechanical brake) โดยการใช้ ดรัมเบรก (drum brake) หรือดิสก์เบรก

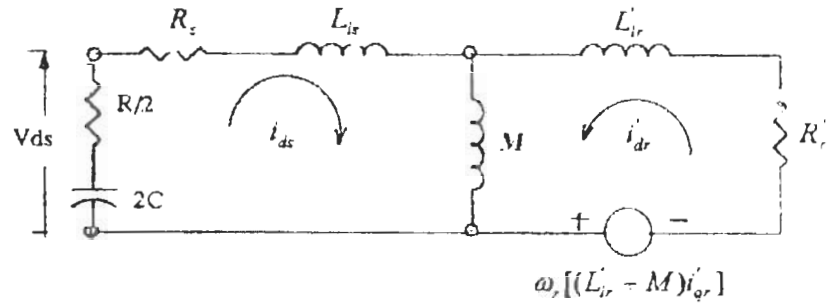
(disc brake) ซึ่งค่อนข้างจะเป็นวิธีที่เสียค่าใช้จ่ายสูงทั้งการออกแบบติดตั้ง การบำรุงรักษา และที่สำคัญทั้งสองวิธีจะต้องใช้พลังงานจากภายนอกมาทำให้มอเตอร์หยุดหมุน

การเบรคมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบยึดหยุดปลอดภัย (fail-safe dynamic brake) คือ การใช้คาปาซิเตอร์แบบไร้ขั้วต่อคร่อมสองเฟสของขดเสเตเตอร์ในทันทีที่ปลดแหล่งจ่ายกระแสสลับออกจากมอเตอร์ คาปาซิเตอร์จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสขึ้นในขดเสเตเตอร์ทั้งสองดังกล่าวอันเนื่องมาจากกระแสที่ยังตกค้างอยู่ในโรเตอร์เพราะโรเตอร์มีเวลาคงตัว โดยกระแสที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำจะปรากฏเฉพาะ i_{ds} , i'_{dr} และ i'_{qr} เมื่อพิจารณาในแกนเบรียบเทียบ d-q ส่วน i_{qs} จะเป็นศูนย์ ดังนั้น แรงบิดของมอเตอร์ [3] ในขณะนี้จะมียกทางเป็นลบต้านแรงบิดเนื่องจากโมเมนต์ของความเฉื่อยของโรเตอร์และโหลดทำให้ความเร็วของโรเตอร์ลดลงได้ระดับหนึ่งทราบเท่าที่ i_{ds} , i'_{dr} และ i'_{qr} ยังปรากฏอยู่ (ตามค่า time constant) เรียกช่วงนี้ว่า single-capacitor self-excitation และพร้อมกันนี้กระแส i_{ds} จะย้อนไปเหนี่ยวนำให้กระแส i'_{dr} และ i'_{qr} ให้มีขนาดสูงขึ้น

ต่อมาคาปาซิเตอร์จะถูกปลดออกพร้อมกับปลายทั้งสามของเสเตเตอร์จะถูกข้อตเข้าหากัน กระแส i'_{dr} และ i'_{qr} จะย้อนกลับมาเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสทางด้านเสเตเตอร์โดยกระแสทั้งทางโรเตอร์และเสเตเตอร์ขณะนี้จะทำให้เกิดแรงบิดสุทธิที่มีทิศทางการหมุนของโรเตอร์ทำให้โรเตอร์หยุดลงได้เกือบสมบูรณ์ซึ่งช่วงนี้เรียกว่าช่วงแมกเนติกส์เบรก (magnetic brake)

การวิเคราะห์ด้านสถิตย

ในการปรับปรุงเสถียรภาพของการเบรคมอเตอร์แบบยึดหยุดปลอดภัยนั้นจะใช้ความต้านทานขนาดตั้งแต่ 2 โอห์มขึ้นไปต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์เพื่อเพิ่มเวลาคงตัวให้กับคาปาซิเตอร์ โดยความต้านทานดังกล่าวจะถูกทรานสฟอร์ม (transform) ให้เป็น $R/2$ ในแกนเบรียบเทียบ d และจะได้สมการสเตตามสมการที่ (1) เมื่อนำสมการที่ได้ไปวิเคราะห์ค่า โอเกนเวลู (eigenvalues) และทางเดินของราก (root loci) โดยใช้พารามิเตอร์ (parameters) ของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้คือ ค่า $R_s = 1.2755\Omega$, $R'_r = 1.7049\Omega$, $L_{ls} = 0.0037H$, $L'_{lr} = 0.0091H$, $M = 0.1799H$ และใช้ $R = 3.5\Omega$ จะเห็นว่า ย่านเสถียรภาพของการเบรกจะถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยเฉพาะที่ความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง (1500 rpm) โดยรากจะไปปรากฏอยู่ในย่านที่เสถียรตามรูปที่ 1(ข)

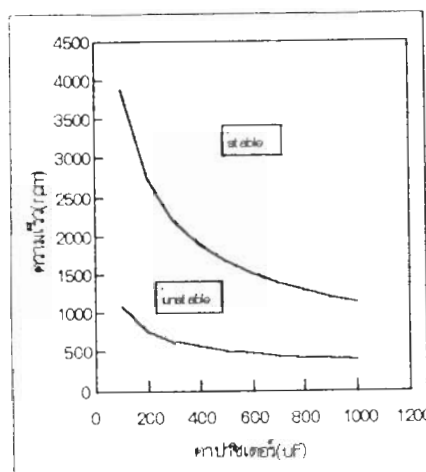


รูปที่ 1. วงจรเทียบเท่าในแกนแปรียบเทียบ d เมื่อต่อความต้านทานอนุกรมกับคาปาซิเตอร์

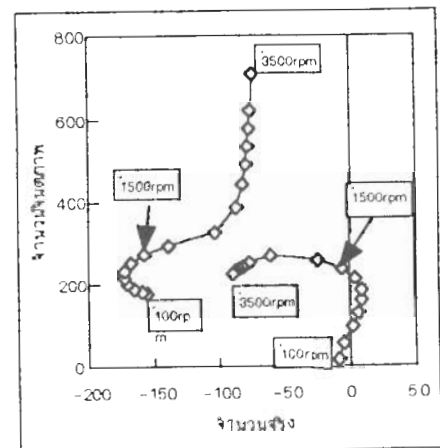
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & \frac{1}{2KCL_s} & 0 \\ \frac{R'_r M}{KL_s L_r} & \frac{-(R_s + R/2)}{KL_s} & \frac{0}{KL_s L_r} & \frac{0}{KL_s} \\ \frac{M}{2KCL_s L_r} & \frac{(R_s + R/2)M}{KL_s L_r} & \frac{-R'_r}{KL_r} & \frac{-\omega_r}{K} \\ 0 & \frac{M\omega_r}{L_r} & \omega_r & \frac{-R'_r}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

การวิเคราะห์ด้านพลวัต

เป็นการจำลองผลการเบรคมอเตอร์ด้วยคอมพิวเตอร์ (computer simulation) ตามสภาพเงื่อนไขต่างๆ โดยใช้สมการและลำดับขั้นตอนดังนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 ก. แสดงย่านเสถียรภาพถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น

ข. แสดงทางเดินของรากหลังการปรับปรุงเสถียรภาพ(C=700uF)

1. **เงื่อนไขเริ่มแรก** (initial condition) ก่อนการเปิดวงจรทางสแตเตอร์นั้น มอเตอร์ทำงานในสภาวะราบเรียบ (steady state) ดังนั้นทอมอนูพันธ์ (derivative) ทั้งหมดในสมการแรงดันในแกนแปริยบเทียบ d-q [3] จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$i'_{dr} = \frac{1}{\omega M} [(v_{qs} - R_s i_{qs} - \omega(L_{ls} + M)i_{ds}] \quad (2)$$

$$i'_{qr} = \frac{1}{\omega M} [(v_{ds} - R_s i_{ds} - \omega(L_{ls} + M)i_{qs}] \quad (3)$$

$$\text{โดย } v_{qs} = v_{as}, v_{ds} = -\frac{2}{\sqrt{3}}v_{bs} - \frac{1}{\sqrt{3}}v_{as}, i_{qs} = i_{as}, \text{ และ } i_{ds} = -\frac{2}{\sqrt{3}}i_{bs} - \frac{1}{\sqrt{3}}i_{as}$$

2. **เปิดวงจรไฟเข้ามอเตอร์ทั้งสามเฟส** (open circuit power supply) พิจารณาวงจรเทียบเท่าทางโรเตอร์ในแกนแปริยบเทียบ d-q ในทันทีที่ตัดไฟเลี้ยงมอเตอร์ทั้งสามเฟสเขียนสมการสแตตดังนี้

$$\begin{bmatrix} i'_{ds} \\ i'_{qs} \\ i'_{dr} \\ i'_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R'_r/L_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R'_r/L_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R'_r/L_r & -\omega_r \\ 0 & 0 & \omega_r & -R'_r/L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i'_{dr} \\ i'_{qr} \end{bmatrix} \quad (4)$$

นำสมการที่ (4) ไปจำลองหาค่า i'_{dr} , i'_{qr} โดย $i'_{dr} = i'_{dr} + i_{ds}$ และ $i'_{qr} = i'_{qr} + i_{qs}$ และให้ i_{ds} , i_{qs} , i'_{dr} และ i'_{qr} เริ่มแรกคือ ค่าที่ได้จากหัวข้อที่ 1

3. **เมื่อต่อคาปาซิเตอร์คร่อมสองเฟสของมอเตอร์** (single capacitor self-excitation) ในเวลาเกือบทันทีที่ปลดไฟออกจากมอเตอร์ทั้งสามเฟส คาปาซิเตอร์แบบไร้ขั้วจะถูกต่อคร่อมเข้าไปในระหว่างสองเฟสของมอเตอร์ กระแสที่ยังค้างอยู่ในโรเตอร์เนื่องจากเวลาคงตัวของโรเตอร์จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสในสแตเตอร์เฉพาะเฟสที่ต่อคร่อมด้วยคาปาซิเตอร์ ดังนั้น กระแสทางสแตเตอร์ขณะนี้จะปรากฏเฉพาะ i_{ds} ทำให้เกิดแรงบิดต้านการหมุนของโรเตอร์ตามสมการที่ (5) มีผลทำให้ความเร็วของโรเตอร์ลดลง การจำลองสภาพความเร็วของโรเตอร์ในตอนนี้จะใช้สมการที่ (6) และ (7) โดยมีเงื่อนไขเริ่มแรกดังนี้ ω_r คือ ความเร็วของโรเตอร์ก่อนการเบรค $i_{ds} = 0$, $i_{qs} = 0$, i'_{dr} และ i'_{qr} เท่ากับค่าสุดท้ายจากหัวข้อที่ 2 และประจุในคาปาซิเตอร์ก่อนหน้าให้เป็นศูนย์

$$T_e = -\frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) (M i_{ds} i'_{qr}) \quad (5)$$

$$\dot{\omega}_r = 0.375 \frac{P^2}{J} M(i_{qs}i'_{dr} - i_{ds}i'_{qr}) - \frac{T_L P}{2J} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -\frac{R_s}{2KCL_s} & \frac{R_r M}{KL_s L_r} & \frac{M\omega_r}{KL_s} \\ \frac{M}{2KCL_s L_r} & \frac{R_s M}{KL_s L_r} & -\frac{R_r}{KL_r} & -\omega_r \\ 0 & \frac{M\omega_r}{L_r} & \omega_r & -\frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

4. **เปิดวงจรของคาปาซิเตอร์** (open circuit capacitor) เมื่อคาปาซิเตอร์ถูกปลดออกก่อนที่จะช็อตปลายทั้งสามของสเตเตอร์เข้าหากันจะใช้สมการที่ (6) และ (8) จำลองค่า i'_{dr} , i'_{qr} และ ω_r ในขณะนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{ds} \\ \dot{i}'_{dr} \\ \dot{i}'_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R'_r/L_r & 0 & 0 \\ 0 & -R'_r/L_r & -\omega_r \\ 0 & \omega_r & -R'_r/L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i'_{dr} \\ i'_{qr} \end{bmatrix} \quad (8)$$

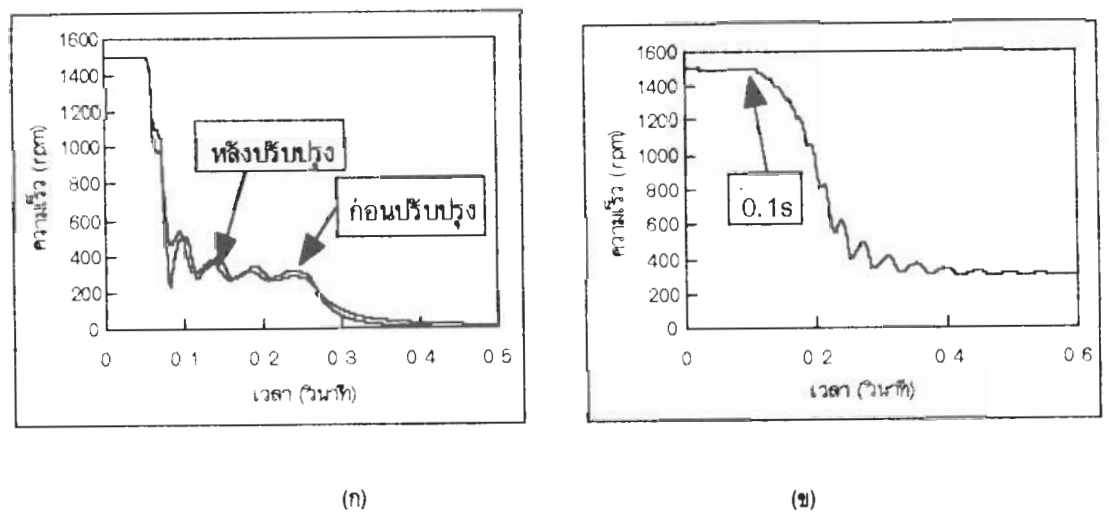
ซึ่ง $i'_{dr} = i'_{dr} + i_{ds}$, $i'_{qr} = i'_{qr}$ และเงื่อนไขเริ่มแรกคือ ค่าสุดท้ายของข้อที่ 3

5. **ช็อตปลายทั้งสามของสเตเตอร์เข้าหากัน** (magnetic brake) ในทันทีที่ปลดคาปาซิเตอร์ออกจากวงจรปลายทั้งสามของสเตเตอร์จะถูกช็อตเข้าหากันกระแสทางด้านโรเตอร์ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีค่าสูงขึ้นในขั้นตอนของการต่อคาปาซิเตอร์จะย้อนกลับมาเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสสูงขึ้นในสเตเตอร์ทำให้ความเร็วของโรเตอร์ลดลงเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสดังกล่าว เรียกช่วงนี้ว่า แมคเนติกเบรก การจำลองผลจะใช้สมการที่ (6) และ (9) โดยมีเงื่อนไขเริ่มแรกดังนี้คือ ω_r , i'_{dr} , i'_{qr} เท่ากับค่าสุดท้ายของหัวข้อที่ 4 และ i_{ds} , i_{qs} เท่ากับศูนย์

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{ds} \\ \dot{i}'_{dr} \\ \dot{i}_{qs} \\ \dot{i}'_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s/KL_s & MR'_r/KL_s L_r & 0 & \omega_r/KL_s \\ MR_s/KL_s L_r & -R'_r/KL_r & 0 & MR'_r/KL_s L_r \\ -M^2\omega_r/KL_s L_r & -\omega_r M/KL_s & -R_s/KL_s & MR_r/KL_s L_r \\ \omega_r M/KL_r & \omega_r/K & MR_s/KL_s L_r & -R'_r/KL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i'_{dr} \\ i_{qs} \\ i'_{qr} \end{bmatrix} \quad (9)$$

การจำลองผลหลังการปรับปรุงเสถียรภาพ

การจำลองผลจะใช้สมการและขั้นตอนคล้ายเดิมยกเว้นในขั้นตอนที่ 3 จะใช้สมการที่ (1) แทนสมการที่ (7) โดยใช้ค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์ขนาด 3.5Ω ผลที่ได้รับจะเห็นว่าแดมปีง (damping) มีขนาดลดลงรวมทั้งทรานเซียนท์ (transient) ของแรงดัน v_c และกระแส i_c ก็มีขนาดลดลงเช่นกันโดยที่ผลของการเบรคมอเตอร์แทบจะคงเดิม (ทั้งนี้ขนาดของความต้านทานจะต้องไม่มากจนเกินไปจนกลายเป็นตัวจำกัดกระแสในขั้นตอนการเหนี่ยวนำด้วยคาปาซิเตอร์) แต่ผลดังกล่าวจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อระยะเวลาก่อนต่อคาปาซิเตอร์ (t_s) ต้องสั้นมากๆ เท่านั้น (น้อยกว่า 0.05 วินาที) ถ้าเวลานานกว่านี้แดมปีงจะมีขนาดเล็กลงและมีผลต่อการเบรคมอเตอร์ด้วยดังรูปที่ 3(ข)

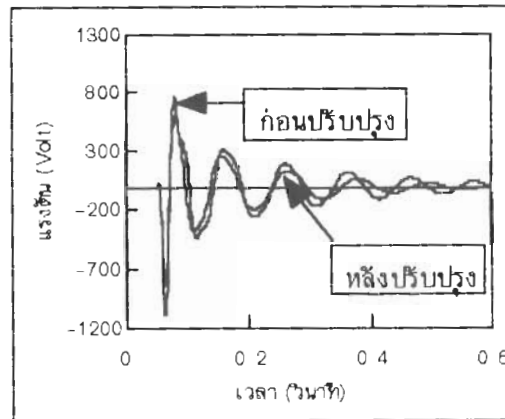


รูปที่ 3. (ก) แสดงแดมปีงของการเบรคลดลงหลังการปรับปรุงเสถียรภาพ
(ข) แดมปีงจะลดลงเมื่อเวลา t_s เท่ากับ 0.1 วินาที ($C=700 \mu F$)

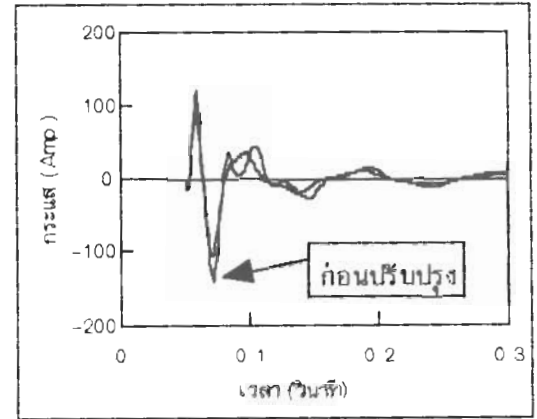
ผลการทดลอง

ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลครั้งนี้ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส 5 แรงม้า 220/380 โวลต์ 4 ขั้ว ต่อแบบ Y ติดตั้งด้วยแผ่นจานเหล็ก (flywheel) หนัก 8.5 กิโลกรัมเส้นผ่าศูนย์กลาง 30.5 เซนติเมตร ค่าโมเมนต์ของความเฉื่อยรวมเท่ากับ 0.113964 N-m-s^2 (ค่า T_L น้อยมาก) และใช้คาปาซิเตอร์ชนิดอิเล็กโทรไลต์ (electrolytic condenser) ขนาด $700\mu F/450V$ โดยมีวงจรการทดลองตามรูปที่ 6 การควบคุมรีเลย์ K1 จะควบคุมผ่านคีย์บอร์ดของเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านอินเตอร์เฟซการ์ด (interface card) ET-DIO ของ ETT โดยในทันทีที่สั่งให้รีเลย์ K1 หยุดทำงาน

เครื่องคอมพิวเตอร์จะเริ่มบันทึกสภาพความเร็วของมอเตอร์จากเครื่องวัดความเร็วรอบแบบใช้แสงที่เปลี่ยนความเร็วรอบเป็นแรงดันกระแสตรงในอัตรา 2V/20000 rpm ส่งผ่านอินเทอร์เฟซการ์ดดังกล่าวเก็บไว้เป็นแฟ้มข้อมูลในคอมพิวเตอร์และเมื่อนำไปพล็อตกราฟจะได้ผลการทดลองตามรูปที่ 7



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 (ก) แรงดัน และ

(ข) กระแส ของคาปาซิเตอร์ก่อนและหลังการปรับปรุงเสถียรภาพ

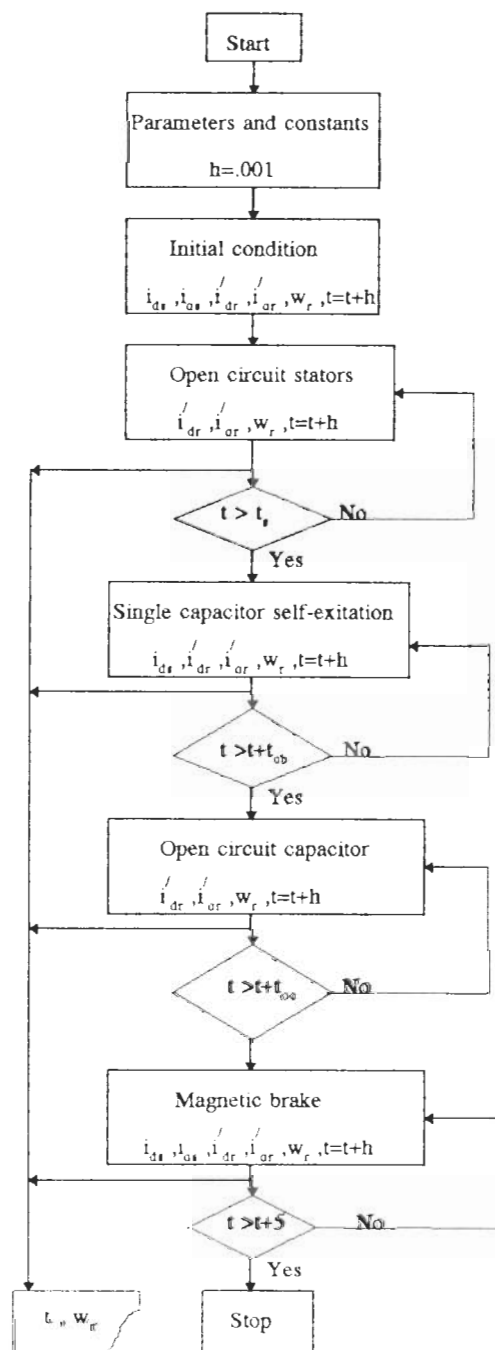
สรุป

จากการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์และการทดลองจะเห็นว่าการปรับปรุงเสถียรภาพของการเบรคมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสแบบยัดหย่นลดความผิดพลาด จะปรากฏผลชัดเจนเมื่อระยะเวลาการต่อคาปาซิเตอร์หลังจากตัดไฟที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีความเร็วมากพอซึ่งผลจากการจำลอง (ใช้เวลาช่วงนี้ 0.05 วินาที) จะพบว่าก่อนการปรับปรุงเสถียรภาพผลของการเบรคจะเกิดแฉกของความเร็วตลอดจนทรานเซียนของกระแสและแรงดันของคาปาซิเตอร์สูงและการต่อความต้านทานอนุกรมกับคาปาซิเตอร์สามารถลดแฉกของความเร็วและทรานเซียนของกระแสและแรงดันของคาปาซิเตอร์ลงได้

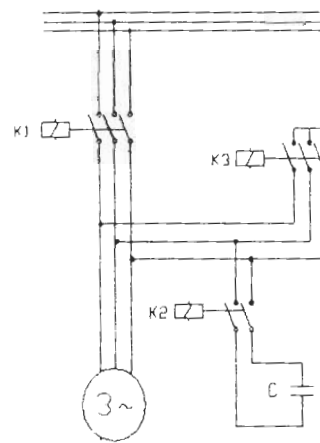
ในส่วนของการทดลองนั้นปรากฏว่าเวลาก่อนที่จะต่อคาปาซิเตอร์ทำได้เร็วที่สุดเพียง 0.1 วินาที (เนื่องจากแมคเนติกรีเลย์มี time delay) ดังนั้นผลของแฉกของความเร็วจึงปรากฏไม่ชัดเจนแต่การเบรคมอเตอร์ยังให้ผลที่ดี และจากการจำลองและการทดลองยังให้ผลสรุปได้อีกว่าขนาดของคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมคือ 600uF-800uF โดยที่ขนาดของกระแสและแรงดันของคาปาซิเตอร์ควรสูงกว่าค่าสูงสุด (rated) ของมอเตอร์ที่ต้องการจะเบรค

บรรณานุกรม

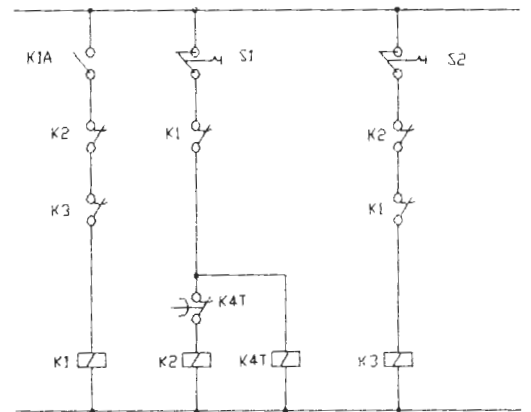
- [1] George A. Kaufman and Mark J. Kocher "Fail-Safe Dynamic Brake for Three-Phase Induction Machines", IEEE Tran. Ind. Appl., Vol. IA-20, No.5, pp.1229-1237, Sep./Oct. 1984
- [2] Ajay K. Tondon, S. Sreenivasa Murthy and B.P. Singh "**Experimental Studies on a Novel Braking System for Induction Motors**", IEEE Tran., Ind., Appl., Vol. IA-20, No.5, pp.1283-1243, Sep./Oct. 1984
- [3] Paul C. Krause, "**Analysis of Electrical Machinery**", McGraw-Hill Book Company, New York, 1986
- [4] M.G.Say, "**The Performance and Design of Alternating Current Machines**", Third edition, Sir Isaac Pitman & Sons, Ltd. ,London, 1962
- [5] P.C Sen, "**Principles of Electric Machines and Power Electronics**", John Wiley & Son, Inc. New York, 1989



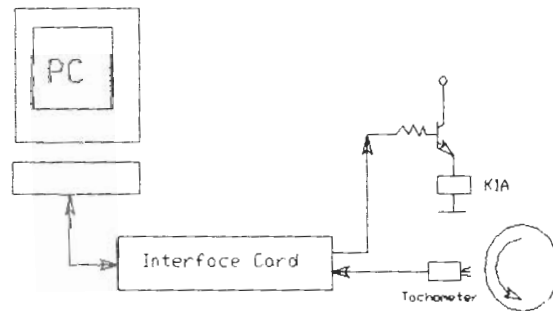
รูปที่ 5. แสดง flow chart ของการจำลองผลการเบรกด้วยคอมพิวเตอร์



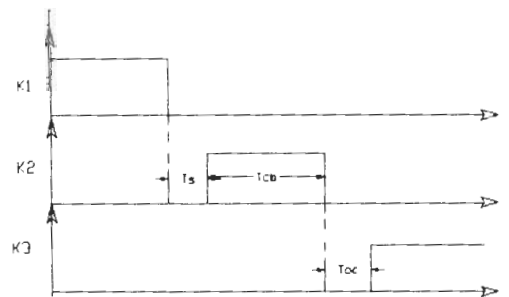
Power Circuit



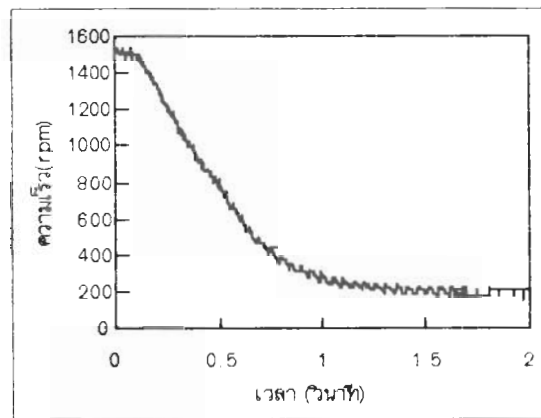
Control Circuit



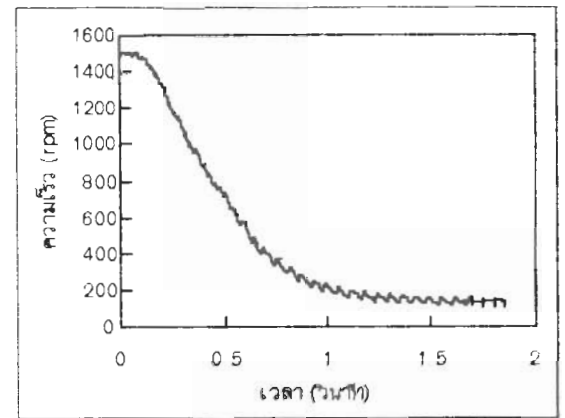
Control and Recording



รูปที่ 6. วงจรการทดลองเบรตมอเตอร์



(ก)



(ข)

รูปที่ 7. (ก) แสดงการเบรคก่อนการปรับปรุงเสถียรภาพ

(ข) แสดงการเบรคหลังการปรับปรุงเสถียรภาพ ($R = 3.5\Omega$, $C = 700\mu F$)