

การออกแบบและสร้างระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบด้านเดียวใน รถไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการควบคุมค่าสลลิป

Design and Build of a Slip Power Control for a Single Side Linear Induction Motor in a Miniature EV Train

ทรงกลด ศรีปรังค์¹ วันชัย ทรัพย์สิงห์²

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ถนนเพชรเกษม ตำบลหนองแก อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110 โทร 0-3261-8500 โทรสาร 0-3261-8570 E-mail:

songklod.sriprang@gmail.com

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทร 0-2549-3497 โทรสาร 0-2549-3432 E-mail: w.subsinghaa@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบด้านเดียว (Single-side Linear Induction Motor: SLIM) โดยใช้วิธีการควบคุมแบบ Volts/Hz ด้วยการควบคุมค่าสลลิป (Slip Regulation) ซึ่งระบบโดยรวมนั้นประกอบด้วย ชุดแปลงผันพลังงานไฟฟ้า ระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) และมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบด้านเดียวแบบ Short primary การทำงานนั้นจะเป็นแบบวิ่งบนรางที่ความเร็วต่ำ สำหรับการวิเคราะห์นั้นใช้หลักการเดียวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก และไม่คำนึงถึงผลกระทบที่เกี่ยวข้อง และวิธีการควบคุมนั้นเป็นแบบวงปิด (Close loop control) โดยทำการบ่อนกลับความเร็ว มาเปรียบเทียบกับความเร็วที่ต้องการ (Speed command) ค่าผิดพลาด (Error) ที่ได้คือความเร็วสลลิป (Slip speed) เข้าสู่ตัวควบคุมเพื่อปรับผลตอบสนองของระบบ ตัวควบคุมที่ใช้เป็นแบบพีไอ (PI Controller) ผลการทดลอง ระบบที่สร้างขึ้นสามารถควบคุมความเร็วของ SLIM แบบ Volts/Hz ได้ และระบบควบคุมแบบพีไอที่ออกแบบนั้นทำให้ระบบมีค่าฟุงเกินน้อย 0.12 % ระบบมีดัชนีสมรรถนะที่ดี และสามารถตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดทันทีทันใดได้ภายในเวลา 0.05 วินาที

คำสำคัญ: ระบบควบคุมแบบ Volts/Hz, วิธีการควบคุมค่าสลลิป, มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบด้านเดียว

Abstract

This paper presents the implementation of a single-sided linear induction motor speed control by using Volt/Hz controlled with slip regulation approach, the overall system is composed of power module, Digital Signal Processing system (DSP) and Single-side linear induction motor in form of a short primary type, which will run on the rail at low speed. The SLIM is analyzed as the same method as an Induction motor, by regardless of some effects. Close loop feedback system is take place by comparing an actual

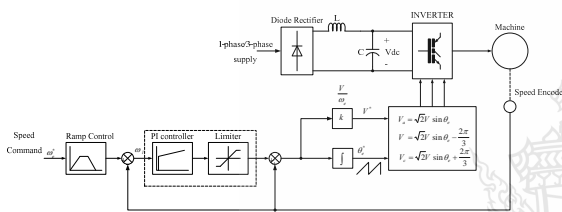
speed, demand speed into a slip power regulator in order to optimize an output speed and torque response using PI controller. The experimental results in the effective of the system's control speed of single-side linear induction motor, which an overshoot is about less than 0.12 %, and the time response of output speed response is within 0.05 second.

Keywords: Volt/Hz control, Slip regulation, Single-side linear induction motor

1. บทนำ

ปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นนั้นมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เช่น ระบบการลำเลียงวัสดุ ระบบการขนส่ง เป็นต้น เนื่องจากเป็นระบบที่ก่อให้เกิดมลภาวะในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับการใช้เครื่องจักรในการขนส่ง ลดการซ่อมบำรุงเนื่องไม่มีระบบเกียร์ ในปัจจุบันการใช้งานนั้นมุ่งเน้นในการใช้งานกับระบบการขนส่งเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งระบบการขนส่งที่ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นนั้นถือได้ว่าเป็นระบบการขนส่งแห่งอนาคต ในปัจจุบันมีงานวิจัยหลายเรื่องที่น่าสนใจเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น ส่วนใหญ่จะเป็นการวิจัยเพื่อการใช้งานในระบบการขนส่งแบบความเร็วสูง หรือ MAGLEV ประกอบด้วยการทำทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ ระบบการควบคุม และศึกษาถึงผลกระทบต่างๆที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น อันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เปลี่ยนไป มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นนั้นพัฒนาจากมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหมุน (Rotary Induction Motor: RIM) โดยการนำมาทำการผ่าและคลี่ออก แต่ยังคงมีโครงสร้างหลัก 2 ส่วน คือ สเตเตอร์และโรเตอร์ ในสเตเตอร์นั้นจะมีขดลวดพันอยู่ในร่องสลิต แต่ด้านโรเตอร์นั้นจะเปลี่ยนไปคือ กลายเป็นแผ่นที่เรียกว่า Reaction plate ทำจากอะลูมิเนียม และมีแผ่นเหล็กประกบด้านหลังเรียกว่า Back iron ในการใช้งานนั้นมี 2 ลักษณะ คือ ส่วนที่เคลื่อนที่เป็นด้านสเตเตอร์ เรียกว่า Short primary และในลักษณะที่ส่วนโรเตอร์เป็นส่วนที่เคลื่อนที่เรียกว่า Short secondary ผลกระทบที่กล่าวถึงในตอนต้นนั้นประกอบด้วย ผลกระทบส่วนปลายสุด (End effect)

ผลกระทบส่วนขอบด้านข้าง (Edge effect) แต่ในการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นที่ความถี่ต่ำนั้น ผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้นจะมีผลต่อพลวัตของระบบน้อยมากจึงไม่คำนึงถึง ระบบควบคุมของ SLIM นั้นใช้หลักการเดียวกับ RIM ซึ่งประกอบด้วย 2 รูปแบบ คือ การควบคุมแบบสเกลาร์ เช่นการควบคุมแบบ Volt/Hz และการควบคุมแบบเวกเตอร์ เช่น Vector control หรือ Field oriented control [1-5] โดยในงานวิจัยนี้นำเสนอระบบควบคุมแบบสเกลาร์ เนื่องจากระบบมีขนาดเล็กไม่ต้องการการตอบสนองของระบบพลวัต เพื่อทดลองการควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น เป็นการศึกษาเบื้องต้น ระบบควบคุมที่นำเสนอเป็นนั้น เป็นระบบควบคุมความเร็วของ SLIM ด้วยวิธีการแบบ Volt/Hz ด้วยการควบคุมค่าสลิป เป็นการควบคุมแบบวงปิด โดยทำการป้อนกลับความเร็วของ SLIM เพื่อเปรียบเทียบกับความเร็วที่ต้องการ ค่าผิดพลาดที่ได้คือค่าความถี่สลิป นำเข้าตัวควบคุมเพื่อปรับผลตอบสนองของระบบ โดยตัวควบคุมที่ใช้เป็นแบบพีไอ (PI Controller) จากนั้นนำค่าความถี่สลิปที่ได้บวกกับความถี่ที่วัดได้กลายเป็นความถี่ที่จะเข้าสู่กระบวนการควบคุมแบบ Volt/Hz โดยกระบวนการทั้งหมดแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 1



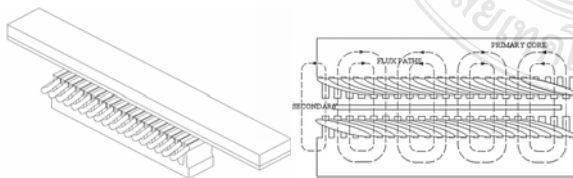
รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบการควบคุมค่าสลิป

ในส่วนกระบวนการคำนวณการสร้างสัญญาณนั้นจะกระทำโดยระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) โดยจะใช้ dsPIC30F2010 ของบริษัท Microchip Inc [6]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และส่วนประกอบของระบบ

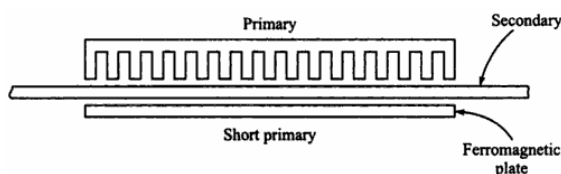
2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นที่เป็นแบบสเตเตอร์เคลื่อนที่นั้นแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ แบบด้านเดียว (Single-side) และแบบสองด้าน (Double-side) ซึ่งในการสร้างนั้นแบบที่สองจะมีความยุ่งยากกว่าโครงสร้างของทั้งสองแบบแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างแบบด้านเดียวและแบบสองด้าน

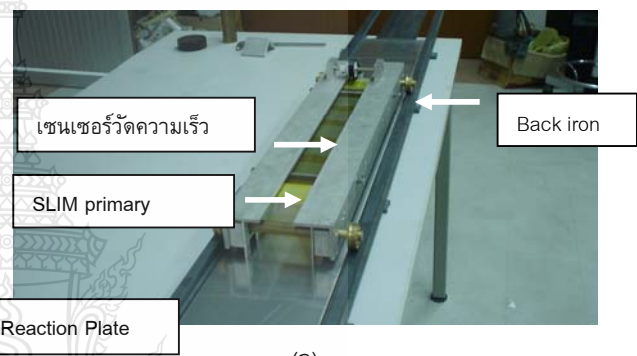
ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษารูปแบบที่เป็นแบบด้าน ซึ่งการใช้งานนั้นเป็นดังรูปที่ 3



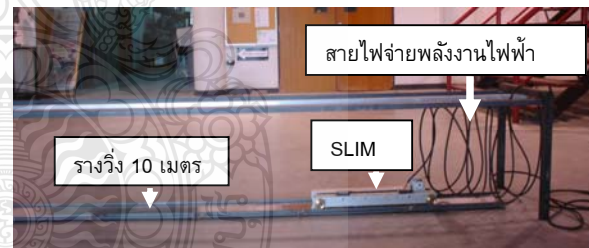
รูปที่ 3 รูปแบบของ SLIM ที่ใช้ในการศึกษา

การหาค่าพารามิเตอร์ของ SLIM นั้นจะใช้วิธีการเดียวกับการหาค่าพารามิเตอร์ของ RIM ซึ่งจะประกอบด้วย การทดสอบด้วย DC test การทดสอบด้วยการ Block stator test และการทดสอบในขณะที่ไม่มีโหลด No load test ค่าพารามิเตอร์ของ SLIM ที่ใช้ในการศึกษานั้นมีค่าตามตารางที่ 1 และรูปของ SLIM แสดงดังรูปที่ 4

| ค่าพารามิเตอร์ | ค่าที่ใช้ |
|-----------------------------------|-----------|
| ความต้านทาน Rs | 8.4 |
| ความต้านทาน Rr | 3.82 |
| ลี้คเกจรีแอคแตนซ์ด้านสเตเตอร์ Lis | 0.029874 |
| ลี้คเกจรีแอคแตนซ์ด้านโรเตอร์ Llr | 0.029874 |
| ความเหนี่ยวนำร่วมน Lm | 0.268079 |
| จำนวนขั้วแม่เหล็ก P | 2 |
| โมเมนต์ความเฉื่อย J | 0.00055 |



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 ต้นแบบของ SLIM ที่ใช้ในการศึกษา

2.2 การควบคุมแบบ Volt/Hz ด้วยการควบคุมค่าสลิป

ก่อนที่จะกล่าวถึงวิธีการควบคุมแรงดันแปรตามความถี่ด้วยการควบคุมค่าสลิป หรือที่รู้จักกันในชื่อ "Volt/Hz Control with Slip Regulation" ในเบื้องต้นนั้นต้องเข้าใจหลักการของการควบคุมแบบ Volt/Hz ซึ่งอาศัยหลักการที่ว่าแรงบิด (Torque) และขนาดของเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux) แปรผันตามอัตราส่วนของขนาดของแรงดัน และความถี่ โดยพิจารณาจากสมการที่ 2.62, 2.63 และ 2.64 ดังนี้

$$m = \frac{3(1-\sigma)}{2} \frac{V^2}{\sigma \omega^2} \frac{2}{\frac{1}{p} + \frac{1}{p}} = \frac{2}{p} \frac{2}{\frac{1}{p} + \frac{1}{p}} \quad (1)$$

เมื่อ

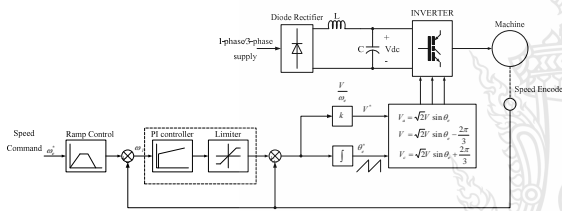
$$p = \frac{3(1-\sigma)}{2} \frac{V^2}{\sigma \omega^2}; \text{ Pull-out Torque} \quad (2)$$

$$|\vec{v}| \approx \frac{|\vec{V}|}{2\pi} \quad (3)$$

สมการที่ 1 นั้นเป็นสมการแรงบิดของเครื่องกลโดยทั่วไป และจากสมการที่ 2 จะเห็นว่าแรงบิดสูงสุดนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงระหว่าง แรงดัน V และความถี่ ω ดังนั้นการที่จะทำให้แรงบิดมีค่าคงที่นั้นจะต้องมีการควบคุมค่าของแรงดันและความถี่ และจากสมการที่ 3 นั้น แสดงถึงเส้นแรงแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตาม อัตราส่วนของแรงดันและความถี่เช่นเดียวกัน ดังนั้นสรุปได้ว่าการที่จะควบคุมให้แรงบิดและเส้นแรงแม่เหล็กคงที่นั้น จะต้องควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและความถี่ให้เป็นสัดส่วนกัน เมื่อทราบหลักการของการควบคุมแบบ V/F ขั้นตอนต่อไปคือการดำเนินการในการควบคุม

2.3 การควบคุมความเร็วด้วยการควบคุมค่าสลิป (Speed Control with Slip Regulation)

เป็นอีกวิธีการหนึ่งในหลักการควบคุมด้วยวิธีแรงดันแปรตามความถี่ โดยการนำค่าสัญญาณความเร็วเอาต์พุตมาเป็นสัญญาณป้อนกลับให้ระบบควบคุม บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมความเร็วด้วยการควบคุมค่าสลิป แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็วด้วยการควบคุมค่าสลิป

หากพิจารณาสมการที่ 1 การดำเนินการควบคุมแบบ Volt/Hz วงปิดนั้น ทำได้โดยการควบคุมค่าสลิป ให้อยู่ในช่วงที่น้อยกว่า Pull out slip p เนื่องจากเมื่อ $\omega = p$ แรงบิดของมอเตอร์จะมีค่าสูงสุด หลักการของการควบคุมแบบ Volt/Hz ด้วยการควบคุมค่าสลิป หากพิจารณาจากรูปที่ 5 มีหลักการดังนี้ เริ่มจากการปรับค่าความเร็วที่ต้องการ (Speed Command) เข้าสู่บล็อกของ Ramp Control เพื่อเป็นการค่อยเพิ่มความเร็วจนตามจำนวนรอบการทำงานของโปรแกรม ข้อดีของ Ramp control คือช่วยลดการกระชากในขณะเริ่มเดินของมอเตอร์ จากนั้นทำการเปรียบเทียบระหว่างความเร็วที่ต้องการกับความเร็วที่วัดได้ (Speed measurement) ค่าผิดพลาด (Error) ที่ได้คือค่าความเร็วสลิป (ω_s) ได้จากสมการที่ 4

$$\omega_s = \omega_e - \omega_r \quad (4)$$

จากนั้นเข้าสู่บล็อกตัวควบคุมแบบพีโอเพื่อเป็นตัวควบคุมผลตอบสนองของระบบ จากนั้นนำค่าความเร็วสลิปที่ได้บวกกับค่าความเร็วที่วัดได้ จะได้ความเร็วอ้างอิงหรือความเร็วของมอเตอร์ที่ต้องการ ตามสมการที่ 5

$$\omega_e = \omega_r + \omega_s \quad (5)$$

จากนั้นเข้าสู่กระบวนการของการควบคุมแบบ Volt/Hz ข้อดีของการควบคุมแบบ Volt/Hz ด้วยการควบคุมค่าสลิปคือ มีการ

ป้อนกลับสัญญาณเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต ทำให้สามารถคงที่สัญญาณเอาต์พุตได้ สำหรับการตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตจะถูกจัดการโดยตัวควบคุม ทั้งหมดที่กล่าวมาคือหลักการในการควบคุมแบบ Volt/Hz ด้วยการควบคุมค่าสลิป

3 การออกแบบระบบควบคุมความเร็วของ SLIM [7]

ระบบควบคุมความเร็วที่ทำการออกแบบนั้นมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้ คือ

1. ชุดแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier)
2. ชุดแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter)
3. ชุดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP)

ซึ่งส่วนประกอบทั้งหมดนั้นแสดงดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7 โดยการออกแบบนั้นใช้ข้อมูลจากพิกัดของ SLIM และข้อมูลจาก Datasheet ของอุปกรณ์แต่ละตัว

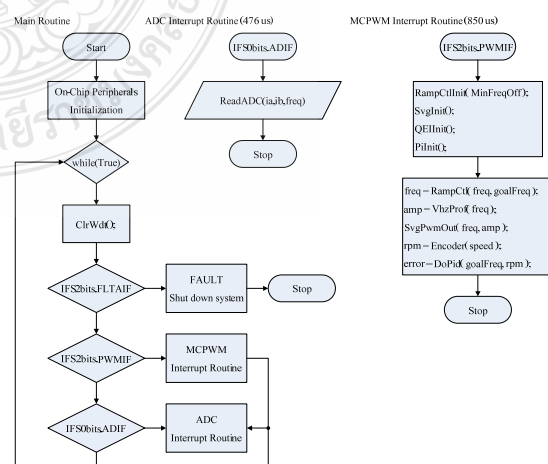
จากรูปที่ 6 (ค) วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ใช้โมดูล IGBT แบบ DIPIPM เบอร์ PS21A7 ซึ่งสะดวกต่อการใช้งาน และรูปที่ 7 วงจรของระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัลนั้นทำการออกแบบโดยคำนึงถึงสัญญาณรบกวนที่จะก่อให้เกิดการทำงานผิดพลาดของระบบด้วย

4 โปรแกรมสำหรับระบบควบคุม

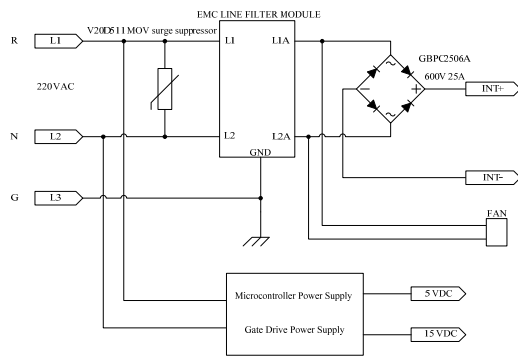
โปรแกรมควบคุมการทำงานที่ทำการเขียนขึ้นนั้น เขียนโดยโปรแกรมภาษาซี โดยใช้โปรแกรม MPLAB IDE เป็นตัว Editor และ MPLAB C30 เป็นตัว Compiler โดยทำการแบ่งไฟล์โปรแกรมออกดังนี้

- ไฟล์โปรแกรมหลัก (Main.c)
- ไฟล์โปรแกรมอ่านค่าจากโมดูลแปลงสัญญาณ ADC (read_adc.s)
- ไฟล์โปรแกรม Ramp Control (ramp_ctl.s)
- ไฟล์โปรแกรมกำเนิดสัญญาณ SVPWM (svg_pwm.s)
- ไฟล์โปรแกรม V/F Control (vhz_prof.s)
- ไฟล์โปรแกรมระบบควบคุมแบบพีโอ (pi.s)

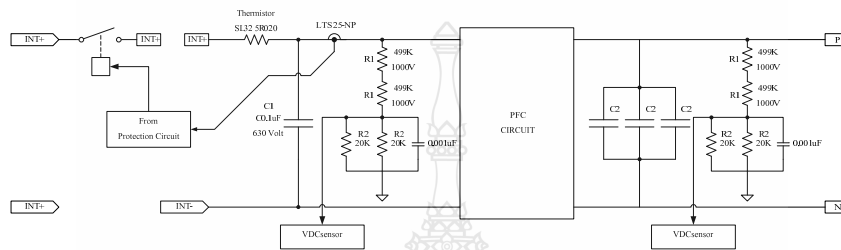
ซึ่งการทำงานของโปรแกรมแสดงเป็นโฟลว์ชาร์ตได้ดังรูปที่ 8



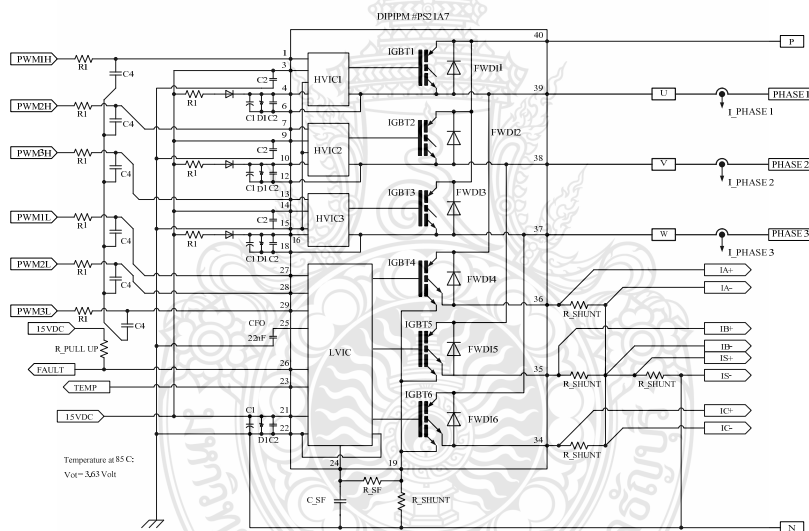
รูปที่ 8 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรม



(ก)

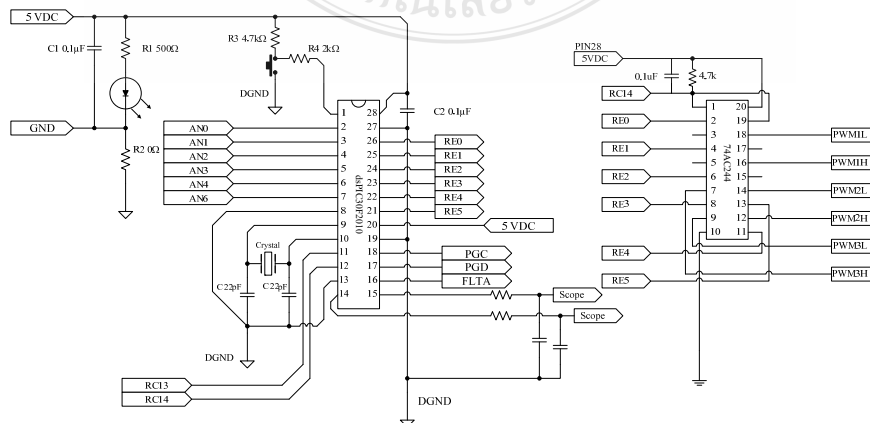


(ข)



(ค)

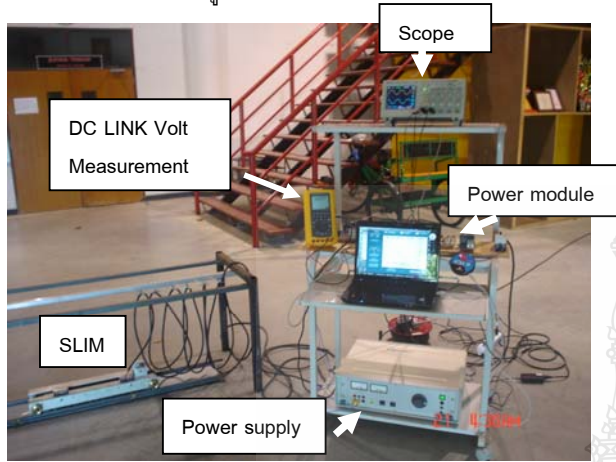
รูปที่ 6 (ก) วงจร Rectifier (ข) วงจร Inrush Current วงจรกรองแรงดัน (Filter) (ค) วงจร 3-phase Inverter



รูปที่ 7 วงจรการทำงานของระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

5. ผลการทดลอง

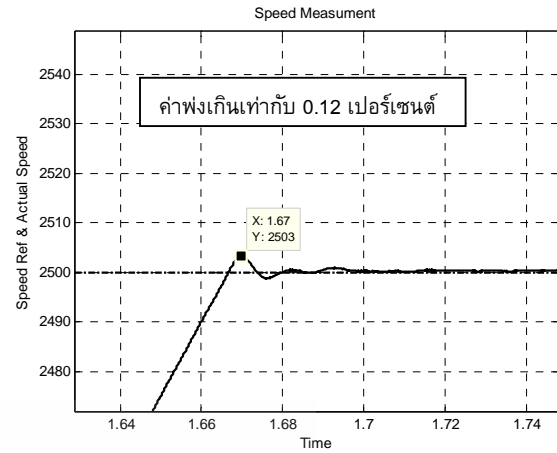
ในการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมนั้นเริ่มจาก การสร้างแบบจำลองโดยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อวิเคราะห์ผลการทำงานของระบบควบคุม และผลตอบสนองของระบบจากค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้ จากนั้นก็ทำการทดสอบกับระบบจริง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ต้นแบบระบบควบคุมที่ใช้ในการทดลอง

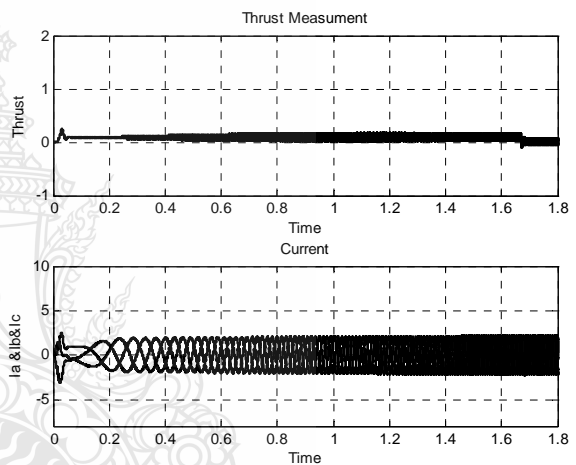
ผลการทดลองที่ได้เป็นดังนี้

เริ่มจากการทดลองเพื่อดูผลตอบสนองความเร็วโดยการตั้งความเร็วที่ต้องการไว้ที่ 2500 รอบต่อวินาที ระบบควบคุมสามารถตอบสนองต่อความเร็วได้เป็นอย่างดี โดยระบบมีค่าฟุ้งเกินของความเร็วอยู่ที่ 0.12 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 10 (ก) และ (ข) และผลตอบสนองของแรงบิด และกระแสเฟสนั้นแสดงดังรูปที่ 11 ถัดมาทำการทดสอบโดยการปรับค่าความเร็วที่ต้องการอยู่ที่ 1500 รอบต่อวินาที ในขณะที่บรรทุกโหลดขนาด 0.5 นิวตันเมตร และทำการปลดโหลดออก ณ เวลา 1 วินาทีเพื่อดูผลตอบสนองความเร็วขณะที่บรรทุกโหลด ผลการทดลองระบบสามารถตอบสนองความเร็วได้เป็นอย่างดี โดยระบบมีการตอบสนองต่อความเร็วภายในเวลา 0.05 วินาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 12

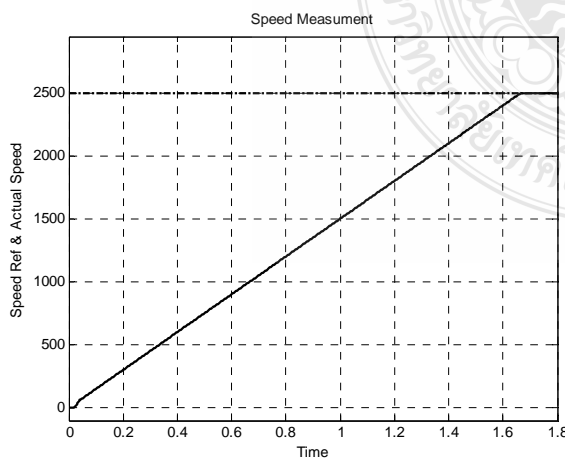


(ข) ค่าฟุ้งเกินที่เกิดขึ้น

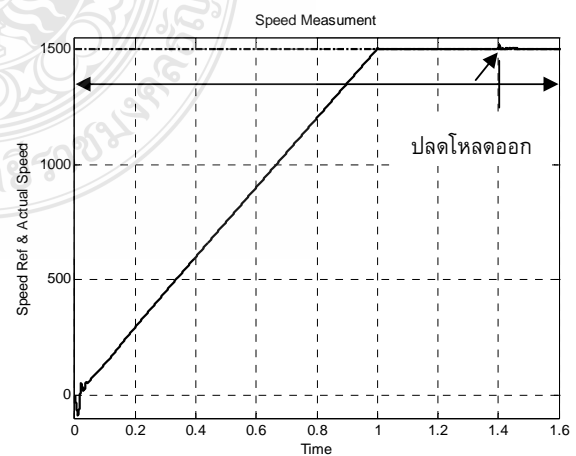
รูปที่ 10 ผลตอบสนองความเร็วในขณะที่ไม่มีการโหลด



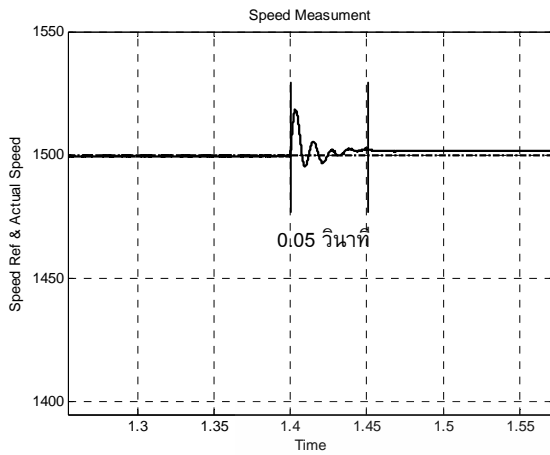
รูปที่ 11 แรงบิดและกระแสเฟส



(ก) ผลตอบสนองความเร็วที่ 2500 รอบต่อวินาที



(ก) ผลตอบสนองความเร็ว

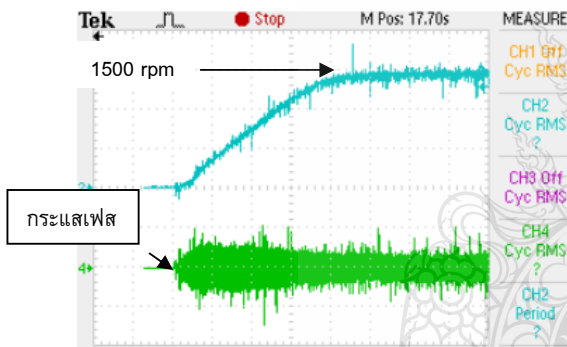


(ข)

รูปที่ 12 (ก) ผลตอบสนองความเร็ว (ข) 0.05 วินาที

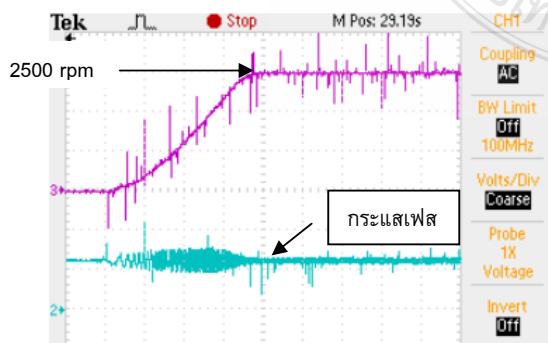
ทำการทดสอบระบบควบคุมต้นแบบที่สร้างขึ้น

ทำการตั้งค่าความเร็วที่ต้องการไว้ที่ 1500 รอบต่อวินาที และบรรทุกโหลดขนาด 0.5 นิวตันเมตร ผลตอบสนองความเร็ว และกระแสเฟส ที่ได้แสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ผลตอบสนองความเร็วที่ 1500 rpm โหลด 0.5 Nm

การทดสอบที่ความเร็วอ้างอิงที่ 2500 รอบต่อวินาที ขณะไม่มีโหลด ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ผลตอบสนองความเร็ว 2500 rpm ไม่มีโหลด

6. สรุป และวิจารณ์

ในงานวิจัยนี้นำเสนอการสร้างต้นแบบระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบด้านเดียว โดยใช้วิธีการควบคุมแบบ Vol/Hz ด้วยการควบคุมคาสลิป ผลการที่ได้คือ ระบบควบคุมที่สร้างขึ้นนั้นสามารถควบคุมความเร็วของ SLIM ได้ตามที่ต้องการ สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วได้ และเนื่องจากโครงสร้างการจ่ายพลังงานและการวัดความเร็วของมอเตอร์นั้นตัวเซนเซอร์จะต้องติดตั้งบนตัวมอเตอร์ การวัดความเร็วเพื่อป้องกันนั้นจะเกิดผิดพลาดเนื่องจากขนาดสายที่ยาวขึ้น ในขณะที่แรงดันเท่า 5 โวลต์ ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK นั้น ระบบสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วได้อย่างดี มีค่าฟุงเกิน 0.12 % และการตอบสนองความเร็วภายในเวลา 0.05 วินาที สรุปในส่วนของระบบควบคุมนั้นสามารถทำงานได้เป็นอย่างดี แต่ในส่วนของโครงสร้าง ระบบการเคลื่อนที่ของมอเตอร์นั้นยังถือว่าจะต้องมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบ เช่น ในระบบการจ่ายพลังงาน การวัดแบบไม่มี Sensor ระบบบางที่ไม่สามารถทำงานเป็นลูบได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Laithwaite, E. R. & Nasar, S. A. (1970) Linear-motion electrical machines. Proceedings of the IEEE, 58(4), 531-542.
- [2] McLean, G. W. (1988). "Review of recent progress in linear motors." Electric Power Applications, IEE Proceedings B 135(6): 380-416.
- [3] Mi Ching, T. and C. Jeng Hu (1999). A practical implementation of a linear induction motor drive using new generation DSP controller. Control Applications, 1999. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on.
- [4] Boldea, I. and Nasar, S.A., Linear Motion Electromagnetic Devices, Taylor & Francis, United States of America, 2001.
- [5] Sarveswara Prasad Bhamid, " Design of a Single Sided Linear Induction Motor (SLIM) Using a User Interactive Computer Program" In partial fulfillment of the requirement for the degree master of science, A Thesis presented to the faculty of the Graduate School University of Missouri-Columbia, May 2005.
- [6] Microchip Technology Inc. "dsPIC30F2010 Data Sheet" (DS70118H), 2008
- [7] ทรงกลด ศรีปรางค์, วันชัย ททรัพย์สิงห์, "การดำเนินการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นโดยใช้ dsPIC30F2010" การประชุมวิชาการ "แม่ฟ้าหลวงวิชาการ" ประจำปี พ.ศ. 2553 : 12 ปี ตามรอยสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว 19-20 พฤศจิกายน 2553