



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบคงทน

A Study of Robust Brushless DC Motor Control

นามผู้วิจัย นายปริญญา ศรีธานี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์พีระยศ แสนโกชณ์, D.Sc.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์มิตี รุจามุรักษ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์วิชัย สุระพัฒน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบคงทน

A Study of Robust Brushless DC Motor Control

โดย

นายปริญญา ศรีธานี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปริญญา ศรีธานี 2555: การศึกษาการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบคงทน
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์
พีระยศ แสนโกชณ์, D.Sc. 85 หน้า

ในการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ให้สามารถตอบสนองสัญญาณอ้างอิงที่
เป็น ความเร็ว ตำแหน่ง และแรงบิดได้ดีนั้น ล้วนมีผลมาจากการมีตัวควบคุมที่ดี มีการวัดสัญญาณ
และประมวลผลสัญญาณที่ดี มีการชดเชยค่าความไม่แน่นอนต่างๆ เช่น ค่าพารามิเตอร์ของ
มอเตอร์ที่ไม่แม่นยำ สัญญาณรบกวนที่มาจากกริด และผลกระทบจากโหลด

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้นำวิธีการระบุค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
มาใช้ด้วยกัน 2 วิธี คือวิธีพีชคณิต และวิธีวัดผลตอบสนองกระแส ในการจำลองการทำงานได้ใช้
การหาค่าพารามิเตอร์วิธีพีชคณิต จากนั้นนำไปออกแบบตัวควบคุมแบบคงทน แล้วจึงนำตัว
ควบคุมแบบคงทนที่ได้เปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอโดยการจำลองการทำงาน
ผลตอบสนองกระแส ผลตอบสนองความเร็ว และผลตอบสนองต่อโหลด จากผลการจำลองสรุป
ได้ว่าตัวควบคุมแบบคงทนมีประสิทธิภาพมากกว่าตัวควบคุมแบบพีไอ

ส่วนในการทดลอง งานวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบวงจรขับมอเตอร์พร้อมทั้งหา
พารามิเตอร์ของมอเตอร์ด้วยวิธีการวัดผลตอบสนองกระแส และการทดลองตัวควบคุมความเร็ว
และตัวควบคุมกระแสแบบพีไอ ซึ่งจากการทดลองแบบไร้โหลดจะเห็นว่ามอเตอร์สามารถติดตาม
สัญญาณอ้างอิงได้ดี

ลายมือชื่อนิติสด

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Parinya Sritanee 2012: A Study of Robust Brushless DC Motor Control. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Peerayot Sanposh, D.Sc. 85 pages.

In the motor control, the main requirement of BLDC motor controller is to perform good tracking response on the reference signal such as speed, position and torque. The good performance form good measurement signal with good signal processing, and compensation for uncertainties such as measurement noise and loading effects.

This thesis use 2 methods for parameter identification of BLDC motor: algebraic method and current measurement response method. In the simulation algebraic method is used for parameter identification. Then, it is used to designed a robust controller. After that the robust controller is compared with a PI controller by simulate current response, speed response and load effects. As a conclusion, the robust controller is more efficient than PI controller.

In the experiment the motor drive circuit is designed, and the current measurement current response method is used for motor parameter system identification. Furthermore, PI current and speed controllers are used. From the no-load experimental results, motor can track reference signal.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระยศ แสนโกชณ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยและนำไปแก้ปัญหาที่ประสบขณะทำการวิจัย พร้อมทั้งให้ความสนับสนุนช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.มิตี รุจานุรักษ์ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยเพื่อให้งานวิจัยสามารถดำเนินการไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนวิจัยเลขที่ IUG5280005 และสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนวิจัยเลขที่ ว-ท(ค) 61.54

ขอกราบขอบพระคุณ ครูอาจารย์ทุกท่านที่ให้การอบรมสั่งสอนและถ่ายทอดวิชาความรู้ตลอดมา จนประสบความสำเร็จในชีวิตและการเรียนในวันนี้

ขอขอบคุณพี่ๆที่บริษัท ไพรมัส จำกัด และเพื่อนๆพี่ๆในห้องปฏิบัติการควบคุมทุกคนที่ช่วยในการแก้ปัญหาในระหว่างการทำวิจัยหลายครั้ง

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา อย่างสูง ที่คอยให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจขณะที่กำลังศึกษาในระดับปริญญาโทจนประสบผลสำเร็จในการเล่าเรียน

ปริญญา ศรีธานี

เมษายน 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	29
อุปกรณ์	29
วิธีการ	29
ผลและวิจารณ์	43
ผล	43
วิจารณ์	58
สรุปและข้อเสนอแนะ	60
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	61
ภาคผนวก	63
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	85

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	วิธีขั้มอเตอร์แบบตามเข็มนาฬิกา	11
2	วิธีขั้มอเตอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา	11
3	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน	43
4	ผลการระบุค่าพารามิเตอร์	45
5	ผลการควบคุมกระแสแบบพีไอและแบบคงทน	50
6	พารามิเตอร์ตัวควบคุมความเร็วและกระแสแบบพีไอดี	54
ตารางผนวกที่		
1	ตารางคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์	65

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก	4
2	ชั่วแรงแดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	4
3	กระแสไหลผ่านตัวนำ	5
4	ทิศทางของแรง	5
5	ภาพตัดขวางมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 2 โพล	6
6	วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	7
7	การต่ออุปกรณ์ Switching ทั้ง 6 ตัว	10
8	สัญญาณของ Hall Effect	12
9	สัญญาณ PWM ที่ใช้ควบคุมสวิตช์	13
10	วงจรสมมูลมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน	14
11	ลักษณะการต่อวงจรเพื่อหาค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำ	21
12	ผลตอบสนองกระแสชั่วครู่ที่ใช้หาค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำ	22
13	แผนภาพการควบคุมโดยรวม	24
14	แผนภาพบล็อกของการควบคุมกระแสอย่างง่าย	25
15	แผนภาพบล็อกตัวควบคุมกระแสแบบทันทานอย่างง่าย	25
16	แผนภาพบล็อกตัวควบคุมกระแสแบบทันทาน	26
17	แผนภาพการจำลองหาค่าพารามิเตอร์	31
18	แผนภาพ BLDC	32
19	แผนภาพ Sector selection	32
20	แผนภาพ Parameter Estimator	33
21	แผนภาพ Parameter Estimator1	33
22	แผนภาพการควบคุมกระแสแบบคงทน	34

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	แผนภาพ Speed controller	34
24	แผนภาพ BLDC	35
25	แผนภาพ Robust current control	35
26	แผนภาพ Current control i_a	36
27	แผนภาพ Unit vector generator	36
28	แผนภาพ Sector selection	37
29	การต่อวงจรโดยรวมการควบคุมแบบลูปเปิด	38
30	แผนผังการทำงานการควบคุมแบบลูปเปิด	39
31	แผนผังการทำงานการควบคุมแบบลูปปิดความเร็ว	40
32	การต่อวงจรโดยรวมการควบคุมแบบลูปปิดความเร็วและกระแส	41
33	แผนผังการทำงานการควบคุมแบบลูปปิดความเร็วและกระแส	42
34	ผลการจำลองหาค่าพารามิเตอร์มอเตอร์	44
36	ผลการจำลองตัวควบคุมกระแสแบบพีไอดี	46
37	ค่าความผิดพลาดของกระแส	47
38	ผลตอบสนองชั่วขณะของกระแส	47
40	ผลการจำลองผลตอบสนองกระแสตัวควบคุมแบบคงทน	48
41	ค่าความผิดพลาดกระแส	49
42	ผลตอบสนองกระแสชั่วขณะ	49
44	ผลการจำลองผลตอบสนองความเร็ว	51
45	ผลตอบสนองความเร็วขณะใส่โหลด	52
46	ผลตอบสนองกระแสเพื่อหาค่าพารามิเตอร์มอเตอร์	53
47	ผลตอบสนองสัญญาณสี่เหลี่ยมคางหมู	54

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
48	ผลตอบสนองสัญญาณขึ้นบันได	55
49	ผลตอบสนองสัญญาณรูปสามเหลี่ยม	55
50	ผลตอบสนองสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมคางหมู	56
51	ผลตอบสนองสัญญาณขึ้นบันได	57
52	ผลตอบสนองสัญญาณสามเหลี่ยม	57
ภาพผนวกที่		
1	ภาพของไมโครคอนโทรลเลอร์	65
2	ภาพวงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง	70
3	ภาพวงจร IPM วงจรวัดแรงดันและกระแส	71
4	ภาพลายวงจร PCB	72
5	ภาพบอร์ดทดลอง บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และมอเตอร์	73

การศึกษาการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบคงทน

A Study of Robust Brushless DC Motor Control

คำนำ

มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายรูปแบบ ส่วนมากจะถูกใช้อยู่ในเครื่องจักรที่มีขนาดใหญ่ และมีความสำคัญต่อโรงงานอุตสาหกรรม เช่น อยู่ในเครื่องซีเอ็นซี แขนหุ่นยนต์ ในรถยนต์ ในฮาร์ดดิสก์ และในอุตสาหกรรมอื่นๆอีก การที่จะควบคุมมอเตอร์นั้นให้มีความแม่นยำทั้งแรงบิด ความเร็ว และตำแหน่งของโรเตอร์นั้น จะต้องอาศัยค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่มีความถูกต้อง ซึ่งมอเตอร์ที่มีค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องนั้นมักจะมีราคาที่สูง ดังนั้นถ้าจะควบคุมมอเตอร์สักตัวที่ไม่รู้ค่าพารามิเตอร์อะไรเลย จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์เพื่อจะทำการควบคุมแรงบิด ความเร็ว และตำแหน่งให้ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุด วิธีการหาค่าพารามิเตอร์นั้นมีการหาทำได้หลายวิธี เช่น การหาโดยใช้ช่างงานประสาธ การหาค่าแบบออฟไลน์ใช้วิธีกำลังสองน้อยสุด การหาแบบออนไลน์โดยวิธีการปรับตัวได้ และวิธีอื่นๆอีก ซึ่งวิธีที่กล่าวมาก็มีข้อดีข้อเสียที่ต่างกัน ซึ่งวิธีที่จะกล่าวถึงนี้เป็นวิธีที่เรียกว่า วิธีการทางพีชคณิต ที่สามารถหาค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ของมอเตอร์ได้อย่างรวดเร็ว และมีค่าความถูกต้อง โดยที่มอเตอร์นั้นไม่ต้องทำงานแบบลูปปิด จากนั้นก็จะนำค่าพารามิเตอร์ที่หาได้นั้นมาออกแบบตัวควบคุม การออกแบบตัวควบคุมนั้นถ้าออกแบบโดยที่ไม่มีลูปปิดของกระแสจะทำให้แรงบิดที่ได้ออกมาไม่เรียบ ดังนั้นวิธีที่จะออกแบบก็คือ จะมีลูปปิดของกระแสและความเร็ว โดยการออกแบบตัวควบคุมกระแสนั้นมีหลายวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้น เช่น วิธีการควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส วิธีการควบคุมแบบปริภูมิเวกเตอร์ วิธีการควบคุมแบบทำนาย วิธีการควบคุมแบบเดคบิท และวิธีการอื่นๆอีก วิธีการควบคุมแบบต่างๆนั้นก็จะมีข้อดีข้อเสีย และข้อจำกัดในตัวมันเอง วิธีที่จะใช้ออกแบบตัวควบคุมกระแสนั้นจะใช้วิธีทันทาน ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพ ช่วยให้แรงบิดมีความเรียบขึ้น ตัวควบคุมความเร็วนั้นจะใช้วิธีควบคุมแบบ พี ไอ เนื่องจากแค่ตัวควบคุมชนิดนี้ก็เพียงพอแล้วที่จะทำให้ผลตอบสนองของความเร็วนั้นเป็นไปตามที่ต้องการ

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาวิธีการขับและควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
2. ศึกษาวิธีการระบุค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์
3. ศึกษาวิธีการควบคุมแบบคงทน
4. วิจัยและพัฒนาชุดขับและชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

การตรวจเอกสาร

ทฤษฎีเบื้องต้นของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

1. เครื่องจักรกลไฟฟ้า

เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่นิยมใช้กันก็จะมี 3 ชนิด ได้แก่ เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบอินดักชันและเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัส โดยเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหล่านี้จะทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานทางกล หรือในทางกลับกันสามารถแปลงจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้เช่นเดียวกัน โดยปรากฏที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. เมื่อตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำนั้น
2. เมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำที่วางในสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดแรงทางกลที่ตัวนำนั้น

เมื่อไรก็ตามที่สองปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นพร้อมกันจะทำให้เกิดการแปลงพลังงาน จากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล หรือแปลงจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ในมอเตอร์นั้นจะมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าและทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็ก ซึ่ง จะเกิดแรงขึ้นบนตัวนำ ถ้าตัวนำนั้นวางอยู่บนโครงสร้างที่เป็นอิสระก็จะเกิดการหมุนได้ แรงบิดนั้น จะเกิดขึ้นและทำให้โครงสร้างนั้นหมุนที่ความเร็วคงที่ ถ้าตัวนำที่หมุนตัดผ่านสนามแม่เหล็ก ก็จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นบนตัวนำนั้น

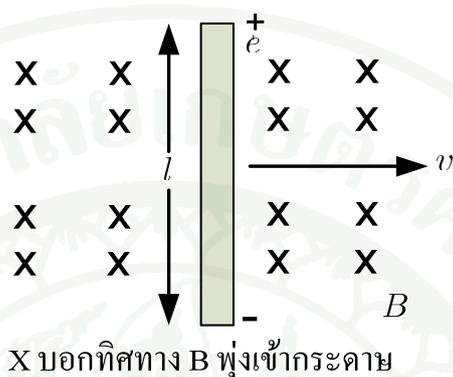
2. แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของตัวนำ

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในตัวนำที่เคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็ก แสดงดังภาพที่ 1 ถ้าตัวนำ ยาว l เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ในสนามแม่เหล็ก B แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำคือ

$$e = Blv \quad (1)$$

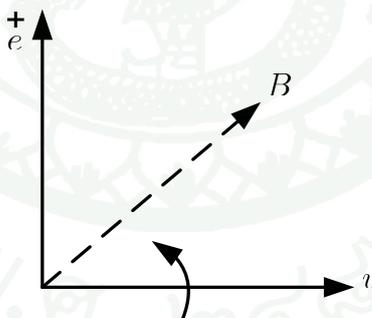
โดยที่ B , l และ v ต้องตั้งฉากซึ่งกันและกัน ขั้วของตัวนำสามารถหาได้จากกฎสกรู

แกนของ B, l และ v ตั้งฉากกันดังแสดงในภาพที่ 2 การหาชั่วของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำได้โดย หมุนเวกเตอร์ v ไปหาเวกเตอร์ B ถ้ามีขวานั้นหมุนไปทิศทางเดียวกันกับการหมุนสกรูแสดงว่า ทิศทางของการหมุนนั้นชี้ไปยังขั้วบวกของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 1 ตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก

ที่มา: Sen, (1996)



ภาพที่ 2 ชั่วแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

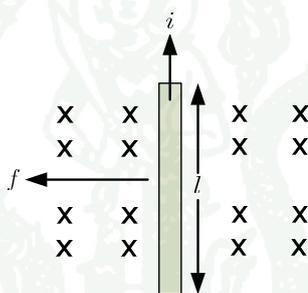
ที่มา: Sen, (1996)

3. แรงแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำดังภาพที่ 3 โดยแรงที่เกิดขึ้นบนตัวนำคือ

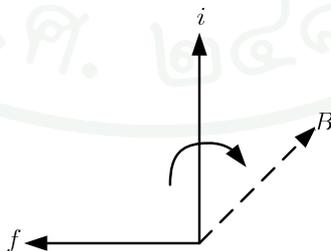
$$f = Bli \quad (2)$$

โดยที่ B, l และ i ต้องตั้งฉากซึ่งกันและกัน ทิศทางของแรงสามารถหาได้จากกฎสกรู ที่แสดงในภาพที่ 4 การหาทิศทางของแรงสามารถหาได้โดย หมุนเวกเตอร์ i ไปในทิศทางเวกเตอร์ B ถ้ามีมือขวานั้นหมุนไปทิศทางเดียวกันกับการหมุนสกรูแสดงว่าทิศทางของการหมุนนั้นชี้ไปยังทิศทางของแรงที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 3 กระแสไหลผ่านตัวนำ

ที่มา: Sen, (1996)



ภาพที่ 4 ทิศทางของแรง

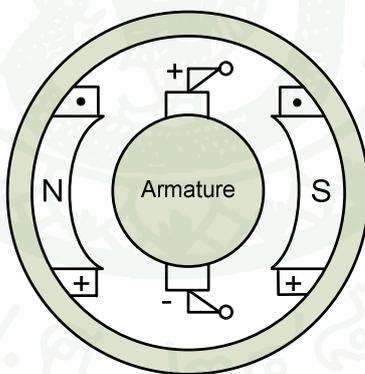
ที่มา: Sen, (1996)

แบบจำลองมอเตอร์

1. แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นมอเตอร์ที่สามารถใช้งานง่าย ควบคุมความเร็วและตำแหน่งได้ง่าย และมีอัลกอริทึมที่ใช้การควบคุมที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน แต่มีข้อเสียคือ ต้องมีการบำรุงรักษา มากกว่ามอเตอร์ประเภทอื่น เนื่องจากตัวมอเตอร์เองมีแปรงถ่านซึ่งต้องทำการเปลี่ยนแปลงถ่านอยู่ประจำ โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีส่วนประกอบหลักดังนี้

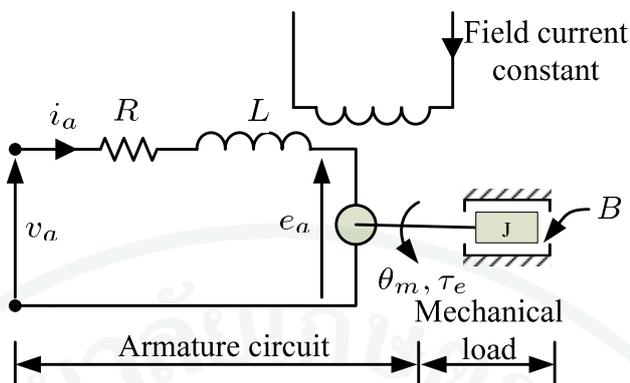
1. ส่วนสเตเตอร์ เป็นส่วนที่ใหญ่หนึ่ง ซึ่งประกอบไปด้วยแม่เหล็กถาวรที่ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก หรือเป็นแกนเหล็กที่พันด้วยขดลวดเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปก็จะทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กเช่นเดียวกัน
2. ส่วนโรเตอร์ เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ได้ (หมุน) ซึ่งประกอบไปด้วยขดลวดที่พันอยู่บนแกนโรเตอร์และต่อกับที่คอมมิวเตเตอร์ โดยบนที่คอมมิวเตเตอร์จะมีแปรงถ่านต่ออยู่เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขดอาร์เมเจอร์



ภาพที่ 5 ภาพตัดขวางมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 2 โพล

ที่มา: Sen, (1996)

สมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ทางไฟฟ้า และทางกลที่แสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ที่มา: Phillips and Harbor (2000)

จากภาพที่ 6 $v_a(t)$ คือ แรงดันอาร์เมเจอร์ที่เป็นอินพุตของระบบ R คือ ค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์ $e_a(t)$ คือ แรงดันที่ถูกสร้างในขดอาร์เมเจอร์เนื่องมาจากขดลวดเคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็กที่เรียกว่า แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Back-EMF) สามารถเขียนเป็นสมการจะได้

$$e_a(t) = k\Phi \frac{d\theta_m}{dt} \quad (3)$$

โดยที่ k คือค่าพารามิเตอร์มอเตอร์ Φ คือ ค่าฟลักซ์สนาม และ θ_m คือตำแหน่งของโรเตอร์ ซึ่ง $\frac{d\theta_m}{dt}$ คือความเร็วของโรเตอร์ เมื่อ Φ มีค่าประมาณเป็นค่าคงที่ ดังนั้นจะได้

$$e_a(t) = k_e \frac{d\theta_m}{dt} \quad (4)$$

จากวงจรอาร์เมเจอร์สามารถเขียนเป็นสมการได้

$$v_a(t) = Ri_a(t) + L \frac{di_a}{dt} + e_a(t) \quad (5)$$

ส่วนสมการแรงบิดของมอเตอร์คือ

$$\tau_e(t) = k\Phi i_a(t) = k_\tau i_a(t) \quad (6)$$

สมการผลรวมแรงบิดของมอเตอร์ ซึ่งรวมเอาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์เอง และรวมเอาค่าแรงเสียดทานต่างๆที่เกิดขึ้น (แรงเสียดทานที่เกิดจากอากาศและลูกปืน) ดังนั้นสมการผลรวมแรงบิดสามารถเขียนได้ดังนี้

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = \tau_e(t) - \tau_L(t) - B\omega_m \quad (7)$$

ดังนั้นเมื่อต้องการเขียนสมการให้อยู่ในรูปปริภูมิสถานะนำสมการที่ (5) และสมการที่ (7) มาจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{R}{L} i_a - \frac{k_e}{L} \omega_m + \frac{v_a}{L} \quad (8)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{k_\tau}{J} i_a - \frac{B}{J} \omega_m - \frac{\tau_L}{J} \quad (9)$$

สามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปปริภูมิสถานะได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{\omega}_m \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{k_e}{L} & 0 \\ \frac{k_\tau}{J} & \frac{B}{J} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ \tau_L \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \\ \theta_m \\ \tau_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ k_\tau & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} \quad (11)$$

2. การขับมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

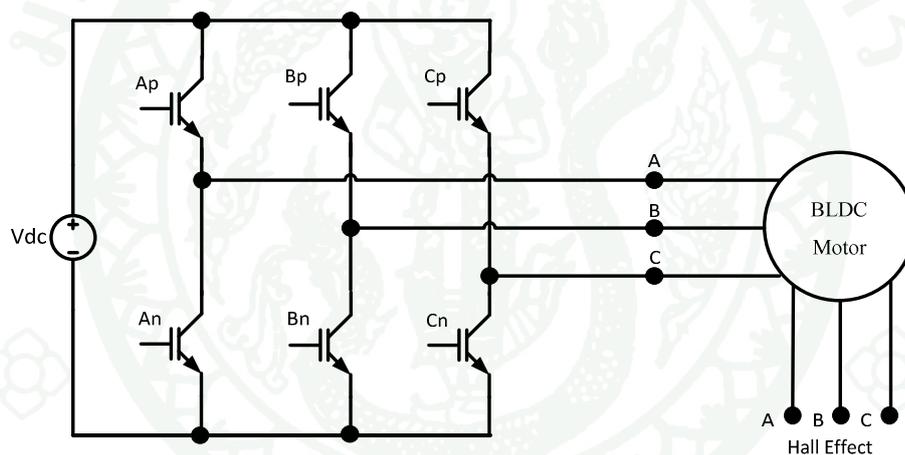
การวิจัยและพัฒนาชุดขับและชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านจะต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจของโครงสร้างของมอเตอร์ (Brown, 2002) ลักษณะการวางตำแหน่งของสโตน์เฟลด์ (Jani, 2007) วิธีการทำงานของมอเตอร์ (Jani, 2006) วิธีการควบคุมกระแสของมอเตอร์ (Chen *et al.*, 2000) วิธีการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ วิธีการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ และการสวิตช์สัญญาณ PWM แบบต่าง (Jani, 2007) ชุดขับของมอเตอร์ที่จะต้องประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ 6 ตัว (Brown, 2002) เมื่อเข้าใจคุณสมบัติต่างๆของมอเตอร์และชุดขับ แล้วก็จะมาศึกษาสมการคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ (Baldrusson, 2005) เพื่อให้สามารถเข้าใจถึงการทำงานของมอเตอร์มากยิ่งขึ้น และสามารถนำมาซึ่งการแก้สมการคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ค่าพารามิเตอร์ทางกลของมอเตอร์ และนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปออกแบบตัวควบคุมของมอเตอร์ต่อไป การแก้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ได้ถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของระบบเชิงเส้น (Fließ and Sira-Ramírez, 2003) ต่อมาได้มีการนำแนวคิดเดิมมาประยุกต์ใช้กับมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (Cortés-Romero *et al.*, 2010)

เนื่องจากมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม จึงมีการพัฒนาตัวควบคุมกระแสแบบต่างๆ (Kazmierowski and Malesani, 1998) เพื่อที่จะรองรับงานที่หลากหลายในอุตสาหกรรม โดยปกติการทำงานของมอเตอร์นั้นจะส่งผลกระทบต่อต่างๆ ทั้งกับตัวมอเตอร์เอง ชุดขับ และชุดควบคุม ดังนั้น ผลของพารามิเตอร์ทั้งทางกลและทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ค่าโหลดที่เปลี่ยนแปลงตลอดการทำงาน ทั้งสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในจากชุดขับเอง สัญญาณรบกวนที่เกิดการวัดสัญญาณเพื่อป้อนกลับให้ตัวควบคุม และผลของความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัด ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ตัวควบคุมแบบคงทน (Chen *et al.*, 2000) เนื่องจากสามารถลดผลกระทบดังที่กล่าวมาข้างต้นได้ และนำไปทำให้เกิดผลง่าย ตัวควบคุมแบบคงทนนั้นได้ถูกพัฒนามาใช้นำมาใช้กับตัวคอนเวอร์เตอร์ (Liaw and Chiang, 1993) จากนั้นได้นำหลักการเดียวกันมาประยุกต์ใช้กับมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (Chen *et al.*, 2000)

มอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านนั้นประกอบด้วย โรเตอร์ซึ่งมีแม่เหล็กถาวรเป็นส่วนประกอบ และสเตเตอร์ซึ่งมีขดลวดที่พันอยู่ ส่วนมากแล้วมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านนั้นจะมีวิธีวางขดลวดเป็นแบบสามเฟสต่อกันแบบสตาร์

วิธีการขับมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านนั้นจะต้องขับทีละสองเฟส (Jani, 2006) โดยวิธีการขับในแต่ละเฟสนั้นจะต้องสอดคล้องกับค่าของฮอลล์เอฟเฟกต์ที่ได้มาจากมอเตอร์ดังกล่าวให้เห็นในตารางที่ 1 เป็นวิธีการขับมอเตอร์แบบตามเข็มนาฬิกา และตารางที่ 2 เป็นการขับมอเตอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งวิธีการขับก็ขับในทิศทางตรงข้ามกันกับแบบตามเข็มนาฬิกา และในภาพที่ 7 แสดงถึงการต่ออุปกรณ์ switching ทั้ง 6 ตัวที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์และสัญญาณฮอลล์เอฟเฟกต์

ความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์นั้นสามารถควบคุมได้จาก encoder ที่จะติดตั้งเพิ่มเข้าไปให้กับมอเตอร์ โดยที่ความเร็วนั้นสามารถคำนวณได้จากฮอลล์เอฟเฟกต์เพียงอย่างเดียวก็ได้ แต่สำหรับตำแหน่งของมอเตอร์นั้นต้องคำนวณจาก encoder ได้เพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 7 การต่ออุปกรณ์ Switching ทั้ง 6 ตัว

ตารางที่ 1 วิธีขั้มอเตอร์แบบตามเข็มนาฬิกา

Phase	Sensor C	Sensor B	Sensor A	Cp Logic	Cn Logic	Bp Logic	Bn Logic	Ap Logic	An Logic
1	1	0	1	0	0	0	1	1	0
2	1	0	0	1	0	0	1	0	0
3	1	1	0	1	0	0	0	0	1
4	0	1	0	0	0	1	0	0	1
5	0	1	1	0	1	1	0	0	0
6	0	0	1	0	1	0	0	1	0

ที่มา: Brown (2002)

ตารางที่ 2 วิธีขั้มอเตอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา

Phase	Sensor C	Sensor B	Sensor A	Cp Logic	Cn Logic	Bp Logic	Bn Logic	Ap Logic	An Logic
1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
2	1	0	0	0	1	1	0	0	0
3	1	1	0	0	1	0	0	1	0
4	0	1	0	0	0	0	1	1	0
5	0	1	1	1	0	0	1	0	0
6	0	0	1	1	0	0	0	0	1

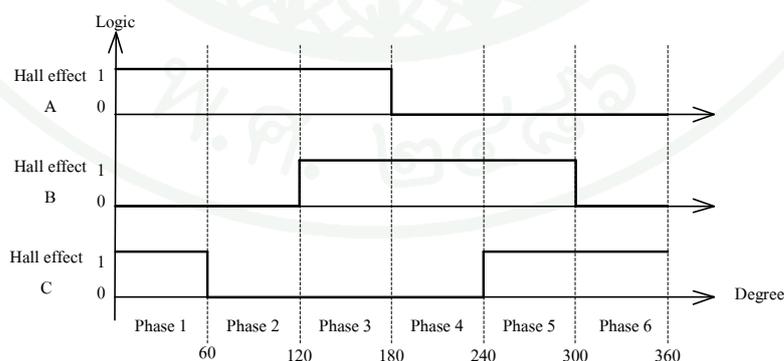
ที่มา: Brown (2002)

สัญญาณที่ใช้ในการในการควบคุมอุปกรณ์สวิทซ์ทั้งหมดตัวนั้นจะสลับกันทำงานไปตามค่าที่อ่านได้จากฮอลล์เอฟเฟกต์ โดยค่าที่อ่านได้นั้นจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโรเตอร์ โดยที่สัญญาณที่มาจากฮอลล์เอฟเฟกต์นั้นเป็นสัญญาณที่เปลี่ยนไปเป็นจำนวนหกครั้งในหนึ่งรอบทางไฟฟ้า และแต่ละเฟสของฮอลล์เอฟเฟกต์นั้นจะเปลี่ยนแปลงทุกๆ 120 องศา ที่เป็นไปตามภาพที่ 8 เพราะว่า

ตัวสอลล์เอฟเฟกต์ที่ติดไว้กับมอเตอร์นั้นถูกวางไว้ที่ตำแหน่งต่างกัน 120 องศา โดยปกติทั่วไปแล้ว การวางตัวของสอลล์เอฟเฟกต์นั้นจะมีอยู่ 2 แบบ (Jani, 2007) คือวางห่างกันที่ 120 องศา และวางห่างกันที่ 60 องศา

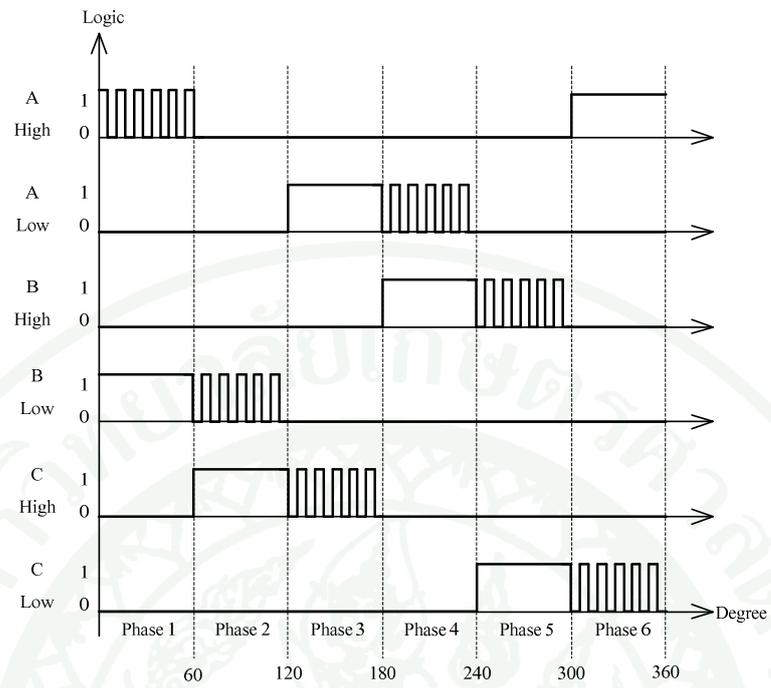
ทิศทางการหมุนของมอเตอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับการทำงานอุปกรณ์สวิตช์ตามตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2 โดยที่ความเร็วของมอเตอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับค่า duty cycle ของ สัญญาณ PWM ให้มีค่ามากขึ้น หรือน้อยลงตามความเร็วที่ต้องการ ซึ่งการเลือกใช้สัญญาณ PWM ที่จะขับมอเตอร์ นั้นมีหลายแบบและแต่ละแบบที่มิตนั้นก็มีข้อดีข้อเสียต่างกัน แต่ในภาพที่ 9 จะแสดงถึงสัญญาณ PWM ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เนื่องจากต้องการลดการสะสมของพลังงานที่ตัวสวิตช์ที่ได้รับพลังงาน มาจากตัวมอเตอร์ในขณะที่สวิตช์นั้นไม่ได้ทำงาน และความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะการเปลี่ยน สถานะของสวิตช์ ดังนั้นจึงต้องมีการเปลี่ยนสถานะจากที่อ่อนค้าง เปลี่ยนเป็นสัญญาณ PWM เพื่อ ลดความร้อนที่ตัวสวิตช์และกระจายความร้อนให้ความร้อนให้ทุกตัวเท่าๆกัน (Jani, 2007)

ข้อควรระวังในการทำชุดขับและชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านนั้นก็คือ ต้องระวังไม่ให้สวิตช์ตัวบน และตัวล่างในเฟสเดียวกันทำงานพร้อมกัน เนื่องจากจะทำให้เกิดการ ลัดวงจรในเฟสนั้นแล้วยังทำให้เกิดความเสียหายที่อุปกรณ์สวิตช์ด้วย การป้องกันเหตุการณ์นี้ สามารถทำได้โดยการเขียน โปรแกรมเพิ่มส่วนที่เรียกว่า dead time เข้าไป เพื่อป้องกันไม่ให้ สัญญาณ PWM ทำงานพร้อมกันในเฟสเดียวกัน และเพื่อป้องกันการพังของอุปกรณ์สวิตช์นั้นก็ควร มีวงจรป้องกันกระแสเกินด้วย



ภาพที่ 8 สัญญาณของ Hall Effect

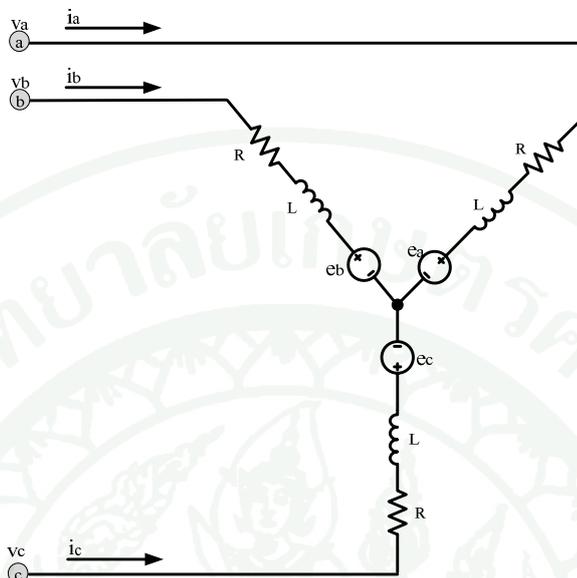
ที่มา: Jani (2006)



ภาพที่ 9 สัญญาณ PWM ที่ใช้ควบคุมสวิทช์

ที่มา: Jani (2007)

3. แบบจำลองมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (Baldursson, 2005)



ภาพที่ 10 วงจรสมมูลมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

ที่มา: Brown (2002)

มอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านมีวงจรสมมูลดังภาพที่ 10 ต่อแบบวาย เมื่อพิจารณาทางคณิตศาสตร์สามารถเขียนเป็นสมการทางไฟฟ้า สมการทางกล ที่เขียนอยู่ในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียล และฟังก์ชันค่าคงที่ต่างๆ สามารถเขียนได้ดังนี้

เมื่อ $i_c = 0$ จะได้

$$v_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b \quad (12)$$

เมื่อ $i_a = 0$ จะได้

$$v_{bc} = R(i_b - i_c) + L \frac{d}{dt}(i_b - i_c) + e_b - e_c \quad (13)$$

เมื่อ $i_b = 0$ จะได้

$$v_{ca} = R(i_c - i_a) + L \frac{d}{dt}(i_c - i_a) + e_c - e_a \quad (14)$$

$$\tau_e = B\omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} + \tau_L \quad (15)$$

โดยที่ v, i และ e หมายความว่าแรงดันเฟส, กระแสเฟส และแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเฟส a, b และ c ตามลำดับ, R คือค่าความต้านทานต่อเฟส, L คือค่าตัวเหนี่ยวนำต่อเฟส, τ_e คือค่าแรงบิดทางไฟฟ้า, τ_L คือแรงบิดภาระ, J คือค่าความเฉื่อยของโรเตอร์, B คือค่าคงที่ของแรงเสียดทาน และ ω_m คือความเร็วของโรเตอร์ จากความสัมพันธ์ของแบคอีเอ็มเอฟ และแรงบิดทางไฟฟ้า เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$e_a = \frac{k_e}{2} \omega_m F(\theta_e) \quad (16)$$

$$e_b = \frac{k_e}{2} \omega_m F(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \quad (17)$$

$$e_c = \frac{k_e}{2} \omega_m F(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \quad (18)$$

$$\tau_e = \frac{k_\tau}{2} \left[F(\theta_e) i_a + F(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) i_b + F(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) i_c \right] \quad (19)$$

โดยที่ k_e คือค่าคงที่แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, k_τ คือค่าคงที่แรงบิด, θ_e คือองศาทางไฟฟ้า, θ_m คือองศาทางกล θ_e และ θ_m มีความสัมพันธ์กันโดย $\theta_e = \frac{p}{2} \theta_m$ ฟังก์ชัน $F(\cdot)$ คือฟังก์ชันของรูปสี่เหลี่ยมคางหมูของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งคาบหนึ่งของฟังก์ชันนี้สามารถเขียนได้เป็นสมการดังนี้

$$F(\theta_e) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \theta_e < \frac{2\pi}{3} \\ \frac{-6(\theta_e - \frac{5\pi}{6})}{\pi}, & \frac{2\pi}{3} \leq \theta_e < \pi \\ -1, & \pi \leq \theta_e < \frac{5\pi}{3} \\ \frac{6(\theta_e - \frac{11\pi}{6})}{\pi}, & \frac{5\pi}{3} \leq \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad (20)$$

จากสมการที่ (12) ถึง (15) นั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปปริภูมิสถานะได้ ก่อนจะเขียนสมการปริภูมิสถานะนั้นต้องทำการจัดรูปสมการก่อน จากความสัมพันธ์ของสมการกระแส

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

ดังนั้นสมการที่ (13) สามารถเขียนได้เป็น

$$v_{bc} = R(i_a - 2i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - 2i_b) + e_{bc} \quad (21)$$

นำสมการที่ (12) คูณ 2 ทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$2v_{ab} = 2R(i_a - i_b) + 2L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + 2e_{ab} \quad (22)$$

นำสมการที่ (21) บวกกับสมการที่ (22) จะได้

$$2v_{ab} + v_{bc} = 3R(i_a) + 3L \frac{di_a}{dt} + 2e_{ab} + e_{bc}$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R}{L}(i_a) + \frac{2}{3L}(v_{ab} - e_{ab}) + \frac{1}{3L}(v_{bc} - e_{bc}) \quad (23)$$

นำสมการที่ (22) ลบกับสมการที่ (21) จะได้

$$v_{bc} - v_{ab} = 3R(i_b) + 3L \frac{di_b}{dt} + 2e_{bc} + e_{ab}$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\frac{di_b}{dt} = -\frac{R}{L}(i_b) - \frac{1}{3L}(v_{ab} - e_{ab}) + \frac{1}{3L}(v_{bc} - e_{bc}) \quad (24)$$

จากสมการที่ (15) นำมาจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{B}{J}\omega_m + \frac{1}{J}(\tau_e - \tau_L) \quad (25)$$

จากความสัมพันธ์ $\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}$ ถ้านำสมการที่ (23) สมการที่ (24) และสมการที่ (25) มาเขียนเป็นสมการปริภูมิสถานะที่สมบูรณ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{\omega}_m \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{B}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2}{3L} & \frac{1}{3L} & 0 \\ -\frac{1}{3L} & \frac{1}{3L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ab} - e_{ab} \\ v_{bc} - e_{bc} \\ \tau_e - \tau_L \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} \quad (27)$$

การระบุเอกลักษณ์

1. การระบุค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์โดยวิธีทางพีชคณิต

การหาค่าพารามิเตอร์แบบใช้วิธีทางพีชคณิต (Cortés-Romero *et al.*, 2010) แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งจะนำสมการที่ (23) มาจัดรูปและกำหนดตัวแปรขึ้นมาใหม่ เพื่อให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น และสามารถนำไปแก้สมการหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ไม่ทราบค่าได้ ส่วนที่สองนำสมการที่ (25) มาจัดรูปและกำหนดตัวแปรขึ้นมาใหม่ เพื่อให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น และสามารถนำไปแก้สมการหาค่าพารามิเตอร์ทางกลที่ไม่ทราบค่าได้ และส่วนสุดท้ายคือ ส่วนที่สามารถนำสมการที่ได้ผ่านการจัดรูปจากส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สองเพื่อมาหาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบค่าได้ โดยวิธีการทางคณิตศาสตร์

ส่วนที่หนึ่งหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าทางไฟฟ้า โดยนำค่า Lt มาคูณทั้ง 2 ข้างของสมการที่ (23) แล้วทำการหาปริพันธ์ทั้งสองข้างบนช่วง $[0, t]$ จะได้

$$Lt \frac{di_a}{dt} = -Rt(i_a) + \frac{2}{3}t(v_{ab} - e_{ab}) + \frac{1}{3}t(v_{bc} - e_{bc})$$

$$L \int t di_a = -R \int t dt + \frac{2}{3} \int t(v_{ab} - e_{ab}) dt + \frac{1}{3} \int t(v_{bc} - e_{bc}) dt$$

$$\frac{2}{3} \int t v_{ab} dt + \frac{1}{3} \int t v_{bc} dt = L(t i_a - \int i_a dt) + R \int t i_a dt + k_e \left(\frac{2}{3} \int t E_{ab} dt + \frac{1}{3} \int t E_{bc} dt \right)$$
(28)

โดยที่ $E_a = \frac{1}{2}F(\theta_e)\omega_m$, $E_b = \frac{1}{2}F(\theta_e - (\frac{2\pi}{3}))\omega_m$, $E_{ab} = E_a - E_b$ และฟังก์ชัน $F(\cdot)$ เป็นฟังก์ชันของรูปสี่เหลี่ยมคางหมูของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

สมการที่ (28) สามารถเขียนเป็นสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$LA_{e1}(t) + RA_{e2}(t) + k_e A_{e3}(t) = B_e(t)$$
(29)

$$\text{โดยที่ } A_{e1}(t) = (ti_a - \int i_a dt), A_{e2}(t) = \int ti_a dt, A_{e3}(t) = (\frac{2}{3} \int tE_{ab} dt + \frac{1}{3} \int tE_{bc} dt), \\ B_e(t) = \frac{2}{3} \int tv_{ab} dt + \frac{1}{3} \int tv_{bc} dt$$

กำหนดให้ $x_e = [L \ R \ k_e]^T$ และ $A_e = [A_{e1}(t) \ A_{e2}(t) \ A_{e3}(t)]$ ดังนั้นจะได้สมการเชิงเส้นที่มีลักษณะดังนี้

$$A_e(t)x_e = B_e(t) \quad (30)$$

เมื่อกำหนดให้ $\tau_L = 0$ และ $k_\tau = k_e$ นำ Jt มาคูณทั้งสองข้างของสมการที่ (25) แล้วทำการหาปริพันธ์ในช่วง $[0, t]$ แล้วได้

$$Jt \frac{d\omega}{dt} = -Bt\omega_m + t\tau_e$$

$$J \int t d\omega_m = -B \int t\omega_m dt + k_\tau \int t\tau_{ee} dt \quad (31)$$

ต่อมาจัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{J}{k_\tau} (t\omega_m - \int \omega_m dt) + \frac{B}{k_\tau} \int t\omega_m dt = \int t\tau_{ee} dt \quad (32)$$

โดยที่ $\tau_{ee} = \frac{1}{2} [F(\theta_e)i_a + F(\theta_e - \frac{2\pi}{3})i_b + F(\theta_e - \frac{4\pi}{3})i_c]$ และผลที่ได้ในสมการที่ (31) เขียนเป็นสมการเชิงเส้นจะได้

$$\frac{J}{k_\tau} A_{m1}(t) + \frac{B}{k_t} A_{m2}(t) = B_m(t) \quad (33)$$

โดยที่ $A_{m1}(t) = (t\omega_m - \int \omega_m dt), A_{m2}(t) = \int t\omega_m dt,$ และ $B_m(t) = \int t\tau_{ee} dt$

กำหนดให้ $x_m = [\frac{J}{k_\tau} \ \frac{B}{k_t}]^T$ และ $A_m = [A_{m1}(t) \ A_{m2}(t)]$ ดังนั้นจะได้สมการเชิงเส้นที่มีลักษณะดังนี้

$$A_m(t)x_m = B_m(t) \quad (34)$$

การหาค่าที่ทำให้สมการที่ (30) และ (34) มีค่าที่ทำให้เหมาะสมที่สุดนั้นเสนอให้อยู่ในรูปฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$J(x, t) = \frac{1}{2} \int_0^t \epsilon^2(x, \sigma) d\sigma \quad (35)$$

โดยที่

$$\epsilon(x, t) = A(t)x - B(t) \quad (36)$$

ซึ่งค่าที่เหมาะสมที่สุดนั้นจะอยู่ในรูปของ x ที่เป็นค่าที่ประมาณค่าเวกเตอร์ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเพื่อที่จะหาค่าที่ทำให้เหมาะสมที่สุดของสมการที่ (35) วิธีเกรเดียนต์จึงถูกนำมาใช้เพื่อหาอนุพันธ์ของ $J(x, t)$ เทียบกับเวกเตอร์ที่ต้องการประมาณค่าพารามิเตอร์ x จะได้

$$\begin{aligned} \nabla_x J(x, t) &= \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{2} \int_0^t \epsilon^2(x, \sigma) d\sigma \\ &= \frac{1}{2} \int_0^t \frac{\partial \epsilon^2}{\partial x} d\sigma \\ &= \int_0^t \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \epsilon(x, \sigma) d\sigma \end{aligned}$$

โดยที่ $\frac{\partial}{\partial x} (A(t)x - B(t)) = A^T(t)$ ดังนั้น

$$\nabla_x J(x, t) = \int_0^t A^T(\sigma) [A(\sigma)x - B(\sigma)] d(\sigma)$$

ให้ $\nabla_x J(x, t)$ เป็นฟังก์ชันคอนเวกซ์แล้วจะได้ว่ามีค่าต่ำสุดครอบคลุมทุกที่ ดังนั้น $\nabla_x J(x, t) = 0$ ที่ทุกเวลาแล้วจะได้

$$\left[\int_0^t A^T(\sigma)A(\sigma) d\sigma \right] x = \int_0^t A^T(\sigma)B(\sigma)d(\sigma) \quad (37)$$

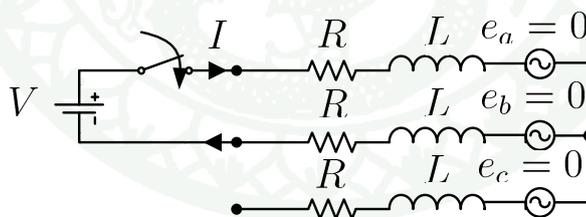
จะได้ว่า $A_e^T(t)A_e(t) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, $A_m^T(t)A_m(t) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$, $A_e^T(t)B_e(t) \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ และ $A_m^T(t)B_m(t) \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ จากสมการที่ (37) จะได้สมการที่อิสระจากกันที่หมดสมการสำหรับ $t > 0$ เพราะฉะนั้นเวกเตอร์ของตัวแปรที่เราต้องการทราบค่า \hat{x} สามารถหาได้จากสมการ

$$\hat{x} = \left[\int_0^t A^T(\sigma)A(\sigma) d\sigma \right]^{-1} \int_0^t A^T(\sigma)B(\sigma) d\sigma \quad (38)$$

เนื่องจาก \hat{x} ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาทำให้สมการด้านบนใช้ได้สำหรับช่วงเวลาเล็กๆ ที่นำมาหาปริพันธ์ $[0, \epsilon]$ ที่ $\epsilon > 0$ ดังนั้นจึงทำให้ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าสามารถหาค่าได้ค่อนข้างรวดเร็ว

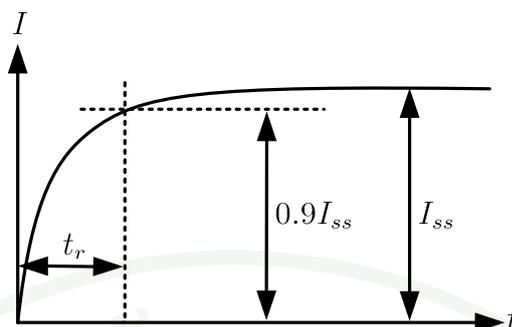
2. การระบุค่าพารามิเตอร์มอเตอร์โดยวิธีการวัดผลตอบสนององกระแส

การระบุค่าพารามิเตอร์มอเตอร์โดยวิธีการวัดผลตอบสนององกระแส (Chen *et al.*, 2000) เป็นการระบุค่าพารามิเตอร์แบบวิธีที่ไม่ซับซ้อนมากนัก



ภาพที่ 11 ลักษณะการต่อวงจรเพื่อหาค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำ

ที่มา: Chen *et al.* (2000)



ภาพที่ 12 ผลตอบสนองกระแสชั่วคราวที่ใช้หาค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำ

ที่มา: Chen *et al.* (2000)

จากภาพที่ 11 เป็นการต่อวงจรเพื่อหาค่าต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำโดยวิเคราะห์ผลตอบสนองกระแสชั่วคราวและผลตอบสนองของสภาวะคงตัวเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$i(t) = \frac{V}{2R}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = i_{ss}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (39)$$

โดยที่ $i_{ss} \triangleq \frac{V}{2R}$ = ค่ากระแสที่สภาวะคงตัว และ $\tau \triangleq \frac{L}{R}$ = ค่าคงที่ทางเวลา
ที่ $t \rightarrow \infty$ ค่าความต้านทานสามารถหาได้จากสมการ

$$\bar{R} = \frac{V}{2i_{ss}} \quad (40)$$

เมื่อ $t = t_r$ จะได้ $i(t_r) = 0.9i_{ss}$ ค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการ

$$\bar{L} = \bar{R} \left(-\frac{t_r}{\ln(0.1)} \right) \quad (41)$$

การหาค่าคงที่แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (k_e) ทำได้โดยทำการขับมอเตอร์ให้หมุนด้วยความเร็วคงที่ และอยู่ในสภาวะที่ไม่มีโหลด แล้ววัดแรงดันที่ขั้วมอเตอร์และวัดความเร็วรอบ แล้วจะสามารถคำนวณค่าคงที่แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ตามสมการ

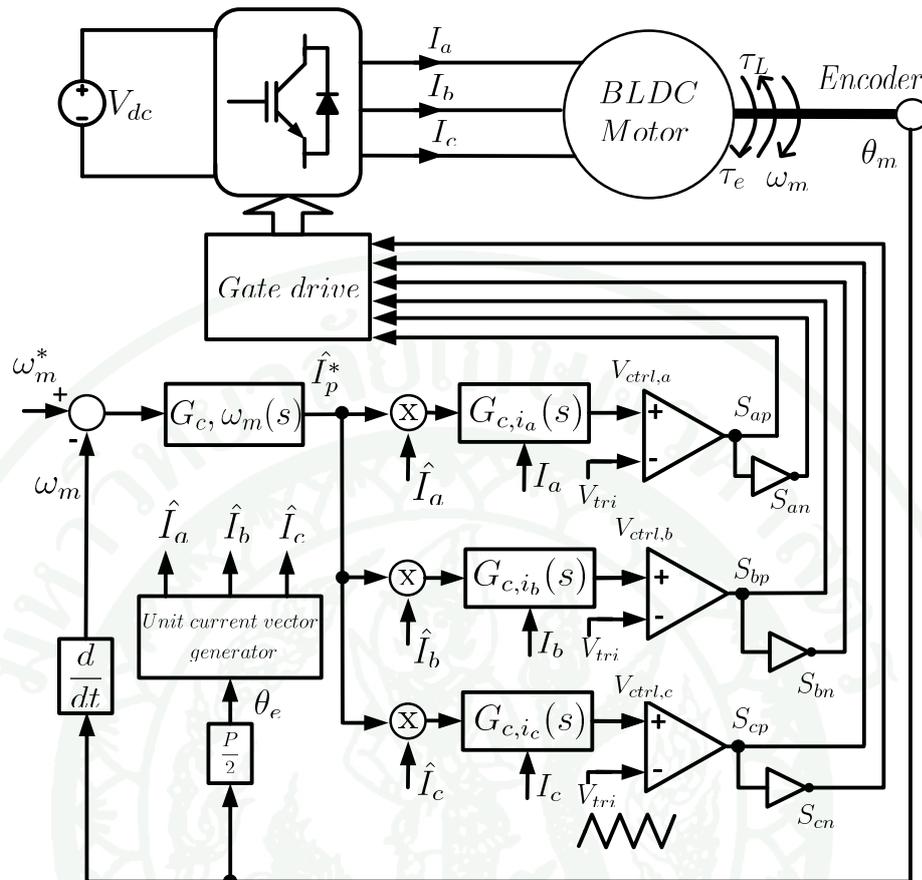
$$\bar{k}_e = \frac{e_{peak}}{\omega_m} \quad (42)$$

จากสมการที่ (40) สมการที่ (41) และสมการที่ (42) ก็จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ได้ ซึ่งวิธีที่ใช้นี้ไม่สามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้แม่นยำนัก เนื่องจากอุณหภูมิเอง หรือ ความแม่นยำของเครื่องมือวัดเองด้วย ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่หามาได้นี้จึงเหมาะสำหรับการควบคุมแบบคงทน

การควบคุมกระแสแบบคงทน

การควบคุมกระแสแบบคงทน (Chen *et al.*, 2000) พัฒนามาจากตัวควบคุมป้อนกลับ เพื่อต้องการให้มีผลตอบสนองของระบบดีกว่าเดิม โดยการเพิ่มตัวควบคุมป้อนไปหน้า จากนั้นผลตอบสนองก็ยังถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนที่มาจากการวัดสัญญาณป้อนกลับและผลของความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ และเพื่อต้องการลดผลกระทบดังกล่าวจึงเพิ่มตัวควบคุมป้อนไปหน้าแบบตัดสัญญาณรบกวนจากภาพที่ 13 เป็นแผนภาพโดยรวมของระบบที่ใช้ในการควบคุมความเร็ว ประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

1. ภาคเพาเวอร์ ประกอบด้วยแหล่งจ่ายสำหรับมอเตอร์ IGBT และมอเตอร์
2. ภาคควบคุม ประกอบด้วย $G_c, \omega_m(s), G_c, i_a(s), G_c, i_b(s), G_c, i_c(s)$, Unit vector current generator, V_{tri} และ Gate drive
 - 2.1 Gate drive คือ ส่วนที่แปลงจากสัญญาณควบคุมให้ IGBT สามารถทำงานได้
 - 2.2 Unit vector current generator ($F_i(\theta_e)$) คือ สัญญาณกระแสอ้างอิงของ $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$
 - 2.3 $G_c, \omega_m(s)$ คือ Speed controller เป็น PI-Controller จะไม่พูดถึงในงานวิจัยนี้
 - 2.4 $G_c, i_a(s), G_c, i_b(s), G_c, i_c(s)$ คือ Robust current controller ที่จะกล่าวต่อไป

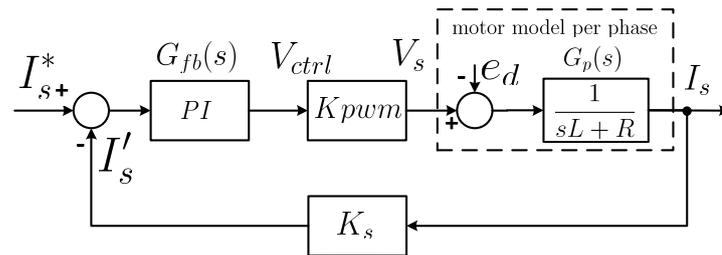


ภาพที่ 13 แผนภาพการควบคุมโดยรวม

ที่มา: Chen *et al.* (2000)

การออกแบบตัวควบคุมกระแสโดยวิธีทันทันนั้นถูกพัฒนาขึ้นโดย C.M. Liaw และ S.J. Chiang ตัวควบคุมกระแสแบบต่างๆ ก่อนที่จะเป็นตัวควบคุมกระแสแบบคงทงมี 3 ชนิด ดังนี้

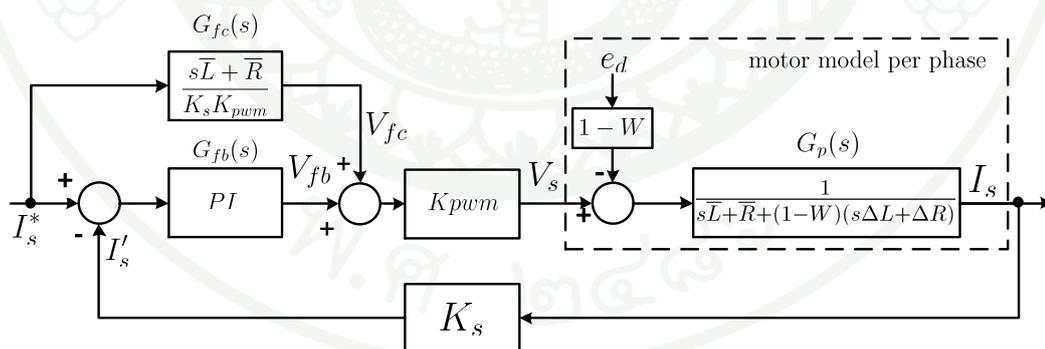
1. ตัวควบคุมกระแสอย่างง่าย ตัวควบคุมชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้กันเนื่องจากสามารถทำการปรับจูนตัวควบคุมได้ง่าย ประกอบด้วยตัวควบคุมป้อนกลับเพียงอย่างเดียว ทำหน้าที่รักษาเสถียรภาพของระบบ



ภาพที่ 14 แผนภาพบล็อกของการควบคุมกระแสอย่างง่าย

ที่มา: Chen *et al.* (2000)

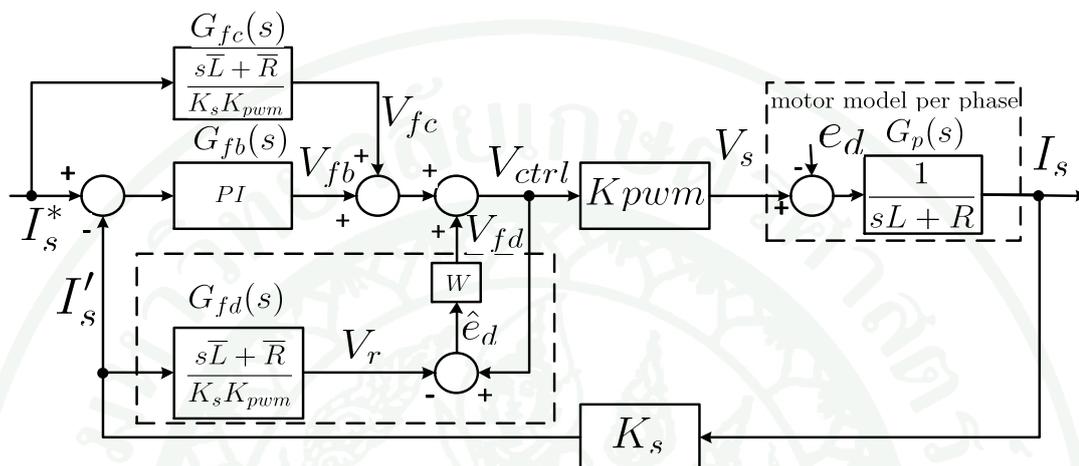
2. ตัวควบคุมกระแสแบบหนานอย่างง่าย ตัวควบคุมชนิดนี้จะมีผลตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุมกระแสอย่างง่าย เนื่องจากตัวควบคุม $G_{fc}(s)$ คอยทำหน้าที่ให้ $I'_s/I_s^* = 1$ โดยที่ตัวควบคุม $G_{fc}(s)$ จะทำหน้าที่ได้ดีก็ต่อเมื่อค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์หาค่าได้ถูกต้อง แต่ในทางปฏิบัติค่าพารามิเตอร์สามารถหาได้จากค่าประมาณขึ้นมาเท่านั้น จึงทำให้ผลตอบสนองที่ได้นั้นยังมีความผิดพลาดจากพารามิเตอร์ของมอเตอร์ และสัญญาณรบกวนของระบบ ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาตัวควบคุมไปหน้าแบบตัดสัญญาณรบกวน เพื่อลดผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์และสัญญาณรบกวนจากการวัด



ภาพที่ 15 แผนภาพบล็อกตัวควบคุมกระแสแบบหนานอย่างง่าย

ที่มา: Chen *et al.* (2000)

3. ตัวควบคุมกระแสแบบทันทาน ตัวควบคุมชนิดนี้จะเพิ่มตัวควบคุมป้อนไปหน้าแบบตัดสัญญาณรบกวน เพื่อลดผลกระทบความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์มอเตอร์ ซึ่งตัวควบคุมชนิดนี้สามารถปรับความต้องการติดตามสัญญาณหรือการลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนได้



ภาพที่ 16 แผนภาพบล็อกตัวควบคุมกระแสแบบทันทาน

ที่มา: Chen *et al.* (2000)

ส่วนประกอบในการควบคุมข้างต้นของตัวควบคุมประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1. ตัวควบคุมป้อนกลับ ($G_{fb}(s)$) เป็นตัวควบคุมป้อนกลับนั้นใช้เป็นแบบพีไอ มีหน้าที่รักษาเสถียรภาพของระบบมีสมการดังนี้

$$G_{fb}(s) = \frac{sK_p + K_i}{s} \tag{43}$$

หาฟังก์ชันถ่ายโอนของ I'_s/I_s^* จากภาพที่ 16 โดยไม่นำตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้าทั้งสองตัวมาคิดจะได้

$$\frac{I'_s}{I_s^*} = \frac{\bar{K}_{pwm} \bar{K}_s \left(\frac{sK_p + K_i}{sL + R_s} \right)}{s + \bar{K}_{pwm} \bar{K}_s \left(\frac{sK_p + K_i}{sL + R_s} \right)} \tag{44}$$

โดยที่ตัวแปรที่มีขีดอยู่บนตัวอักษรหมายถึงค่าพารามิเตอร์ที่เป็นค่าอนินต์ หลังจากที่ได้เลือก $K_i = K_p \bar{R}_s / L$ สมการที่ (44) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{I'_s}{I_s^*} = \frac{\bar{K}_{pwm} \bar{K}_s K_p / \bar{L}}{s + \bar{K}_{pwm} \bar{K}_s K_p / \bar{L}} \quad (45)$$

สมการที่ (45) มีลักษณะคล้ายฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่มีความถี่ขอบเขตเท่ากับ $f_c = K_p \bar{K}_{pwm} \bar{K}_s / (2\pi \bar{L})$ โดยปกติการเปลี่ยนแปลงของ V_{ctrl} ต้องไม่เร็วกว่าความชันของสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่ไปเปรียบเทียบเพื่อหาสัญญาณฐานสวิทซ์ซึ่ง ดังนั้น $f_c = 0.25 f_{tri}$ และจะได้

$$K_p = \frac{\pi f_{tri} \bar{L}}{2 \bar{K}_s \bar{K}_{pwm}}, \quad K_i = \frac{\pi f_{tri} \bar{R}}{2 \bar{K}_s \bar{K}_{pwm}} \quad (46)$$

2. ตัวควบคุมป้อนไปหน้า ($G_{fc}(s)$) มีหน้าที่ทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของ I'_s / I_s^* มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นตัวควบคุมป้อนไปหน้ามีสมการดังนี้

$$G_{fc}(s) = \frac{s\bar{L} + \bar{R}}{\bar{K}_s \bar{K}_{pwm}} \quad (47)$$

เพื่อให้ผลตอบสนองของสัญญาณกระแสติดค่าแบบตัวควบคุมป้อนไปหน้าอย่างเดียว จึงเสนอให้ใช้ตัวควบคุมป้อนไปหน้าตัดสัญญาณรบกวนแบบทันทาน ที่จะกล่าวต่อไป

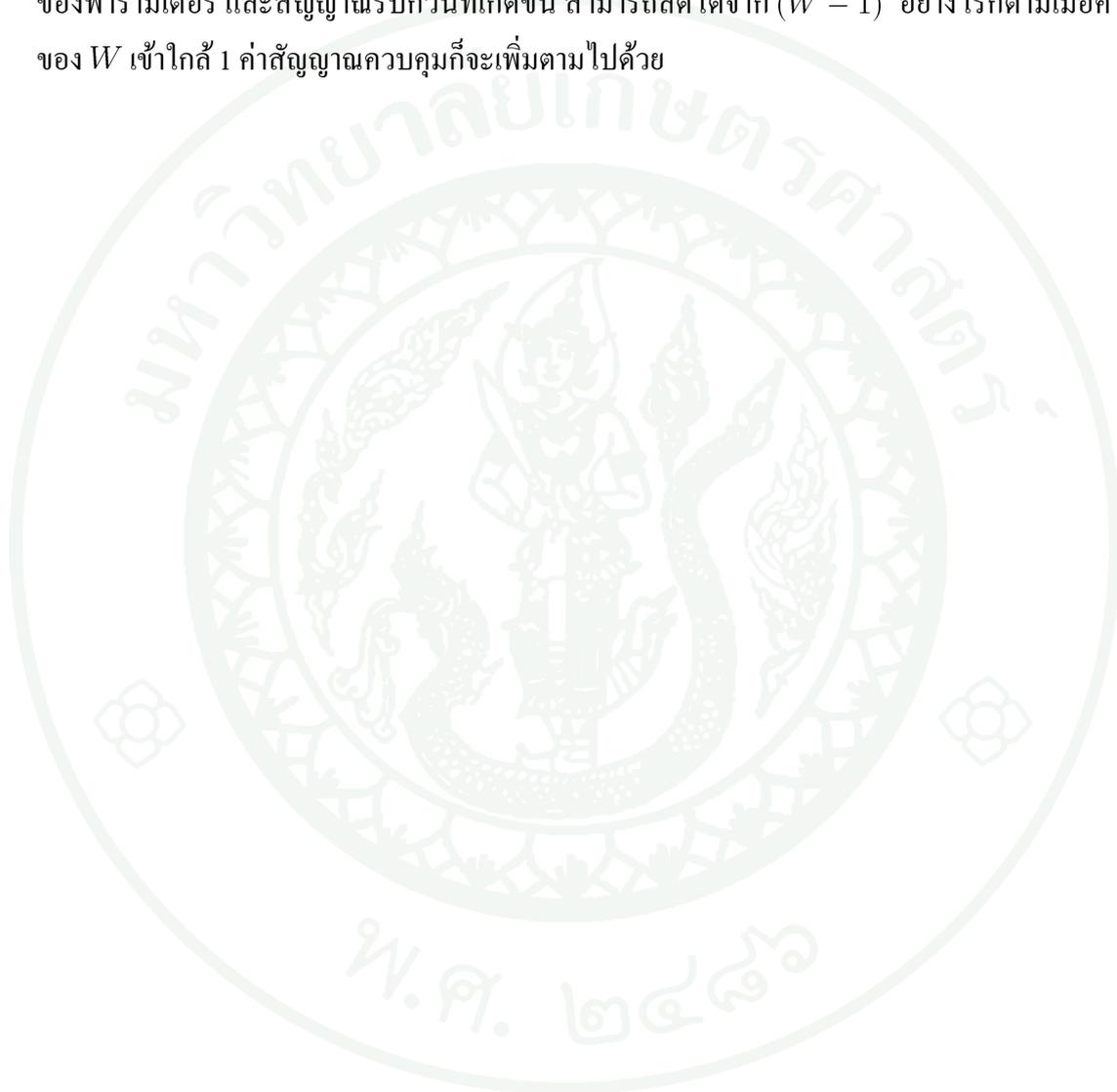
3. ตัวควบคุมป้อนไปหน้าตัดสัญญาณรบกวนแบบทันทาน ($G_{fd}(s)$) มีหน้าที่ประมาณค่าสัญญาณรบกวนเพื่อไปหักล้างกับสัญญาณรบกวนที่เข้ามาในระบบ และลดผลกระทบของความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับตัวพารามิเตอร์ของมอเตอร์ด้วย สมการดังนี้

$$G_{fd}(s) = \frac{s\bar{L} + \bar{R}}{\bar{K}_s \bar{K}_{pwm}} \quad (48)$$

ในส่วน of ตัวควบคุมสัญญาณ $V_{fd} = W \hat{e}_d$ สัญญาณควบคุมที่ถูกสร้างขึ้นจะเป็นไปตามสมการนี้

$$V_{ctrl} = V_{fb} + V_{fc} + V_{fd} = V_{fb} + V_{fc} + W\hat{e}_d \quad (49)$$

โดยที่ W , $0 \leq W \leq 1$ เป็นค่าน้ำหนักที่ปรับเพื่อให้ความสำคัญในการทำงานของตัวควบคุมระหว่างสิ่งที่ต้องการควบคุม และประสิทธิภาพของการควบคุมในภาพที่ 16 นั้นการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ และสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น สามารถลดได้จาก $(W - 1)$ อย่างไรก็ตามเมื่อค่าของ W เข้าใกล้ 1 ค่าสัญญาณควบคุมก็จะเพิ่มตามไปด้วย



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์มีดังนี้

1. คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง
2. โปรแกรม Matlab ใช้ในการจำลองการทำงาน
3. ออสซิลโลสโคป 1 ตัว
4. สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย Cosel 48 Volts 6.5 Amp
5. บอร์ดเพาเวอร์และบอร์ดควบคุม
 - 5.1 บอร์ดเพาเวอร์จะมี IPM สำหรับขับมอเตอร์
 - 5.2 บอร์ดควบคุมจะมีอุปกรณ์สำหรับวัดกระแส และแรงดันไฟฟ้า
 - 5.3 บอร์ดควบคุมจะมีส่วนติดต่อกับสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ และระหว่างบอร์ดควบคุม
 - 5.4 บอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (TI TMS320F2808) สำหรับประมวลผลสัญญาณดิจิทัล
 - 5.5 บอร์ดควบคุมมีหน้าจอ 7-Segment สำหรับแสดงผล
6. มัลติมิเตอร์ 1 ตัว
7. มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน 1 ตัว

วิธีการ

วิธีการทำงานวิจัยนี้จะเริ่มจากสร้างสมมุติฐานที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้ ให้มอเตอร์ต่อกันแบบวงและผลรวมของกระแสสามเฟสมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยจะมีการจำลองการทำงานและการทดลองโดยการเขียนโปรแกรมลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์

1. การจำลองการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
 - 1.1 จำลองการระบุค่าพารามิเตอร์วิธีพีชคณิต
 - 1.2 จำลองการทำงานตัวควบคุมกระแสแบบพีไอ
 - 1.3 จำลองการทำงานตัวควบคุมกระแสแบบคงทน

1.4 จำลองการทำงานการควบคุมความเร็ว

2. การทดลองควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยการเขียนโปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์แบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

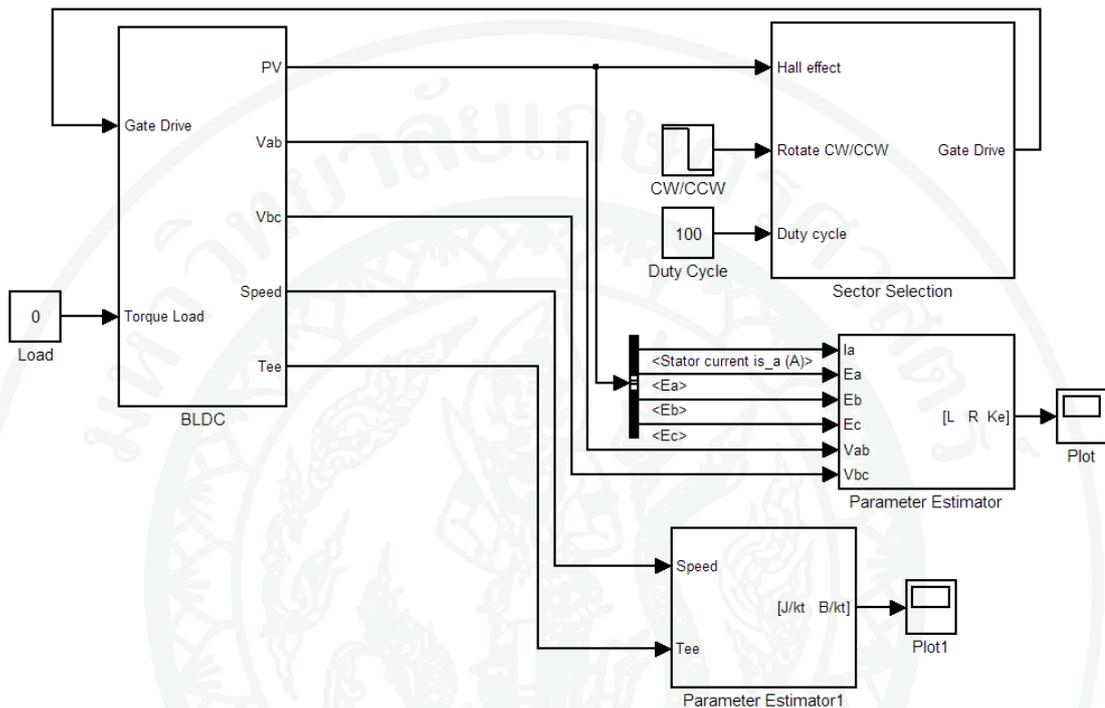
2.1. เขียนโปรแกรมแบบลูปเปิด คือ ปรับ duty cycle เพื่อให้มอเตอร์สามารถทำงานได้ตามปกติ

2.2. เขียนโปรแกรมแบบลูปปิดความเร็ว คือ จะควบคุมความเร็ว โดยใช้ความเร็วเป็นตัวป้อนกลับ และใช้ตัวควบคุมเป็นแบบพีไอดี

2.3. เขียนโปรแกรมแบบลูปปิดกระแสและความเร็ว คือ จะควบคุมความเร็ว โดยใช้ความเร็วเป็นตัวป้อนกลับลูปนอก ใช้กระแสเป็นตัวป้อนกลับลูปใน และใช้ตัวควบคุมเป็นแบบพีไอดีทั้งสองลูป

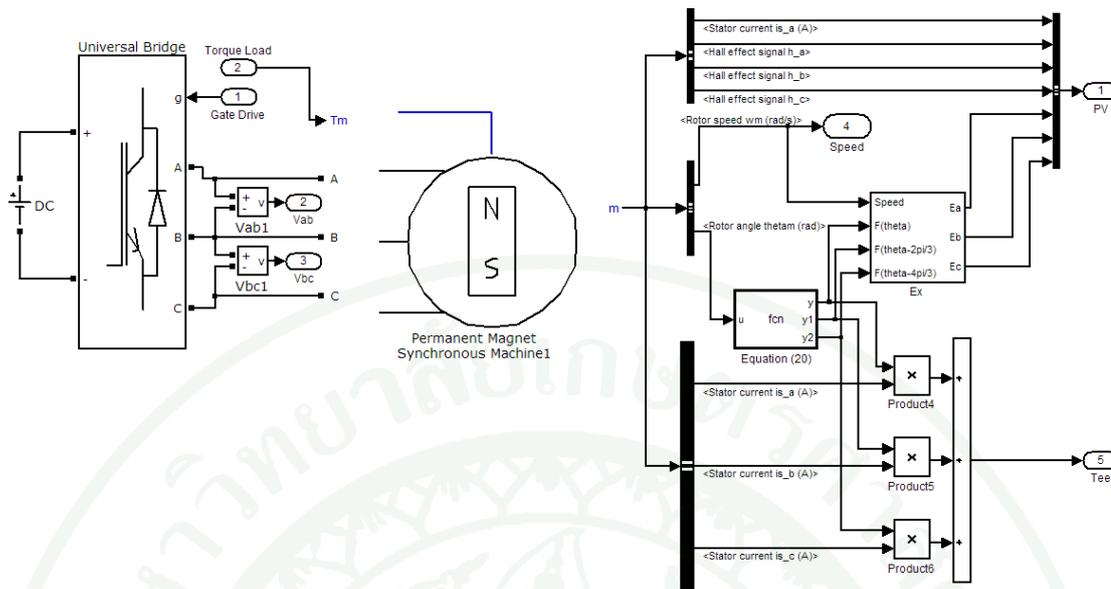
การจำลองการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

1. การระบุค่าพารามิเตอร์มอเตอร์



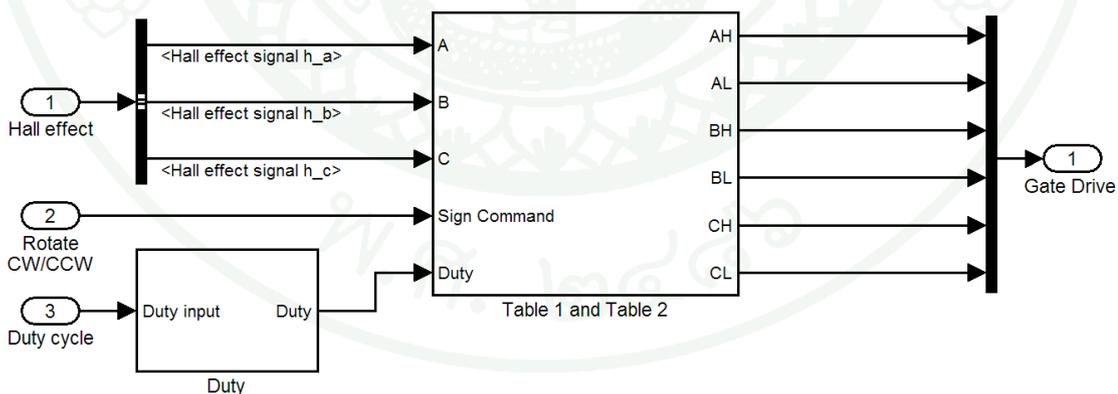
ภาพที่ 17 แผนภาพการจำลองหาค่าพารามิเตอร์

การหาค่าพารามิเตอร์นั้นทำได้โดยทำการขับมอเตอร์ให้หมุนแบบลูปเปิด แล้ววัดสัญญาณต่างๆดังนี้ $i_a, i_b, i_c, E_a, E_b, E_c, v_{ab}, v_{bc}, Speed$ และ T_{ee} ในภาพที่ 17 ประกอบด้วยบล็อกต่างๆ ดังนี้ บล็อก BLDC บล็อก Sector Selection บล็อก Parameter Estimator และบล็อก Parameter Estimator1



ภาพที่ 18 แผนภาพ BLDC

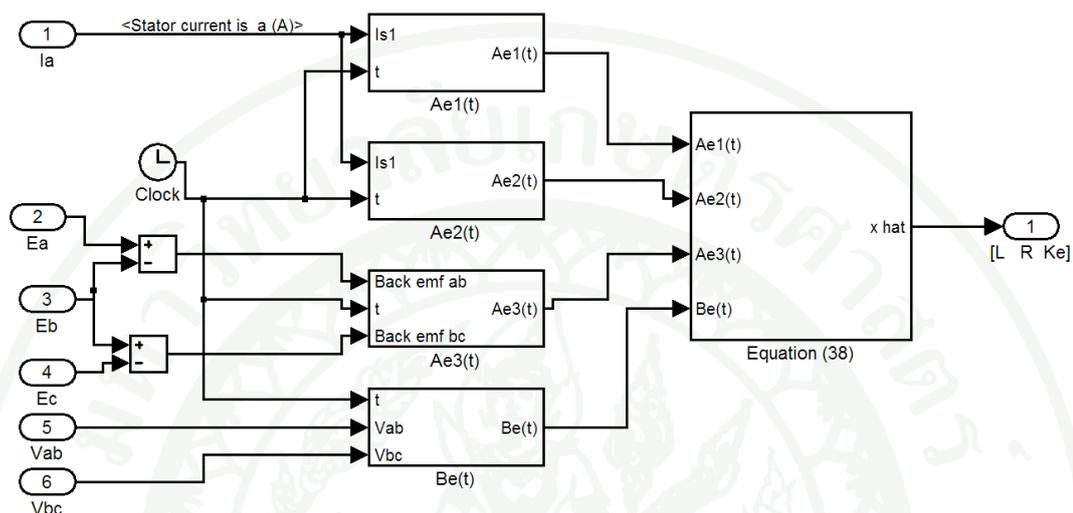
ภายในภาพที่ 18 ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง IPM ที่มีสัญญาณ Gate drive เป็นสัญญาณอินพุตและสัญญาณที่ออกจาก IPM จะต่อกับ BLDC เพื่อขับ BLDC และประกอบไปด้วยส่วนวัดสัญญาณ $i_a, i_b, i_c, E_a, E_b, E_c, v_{ab}, v_{bc}, Speed$ และ T_{ee}



ภาพที่ 19 แผนภาพ Sector selection

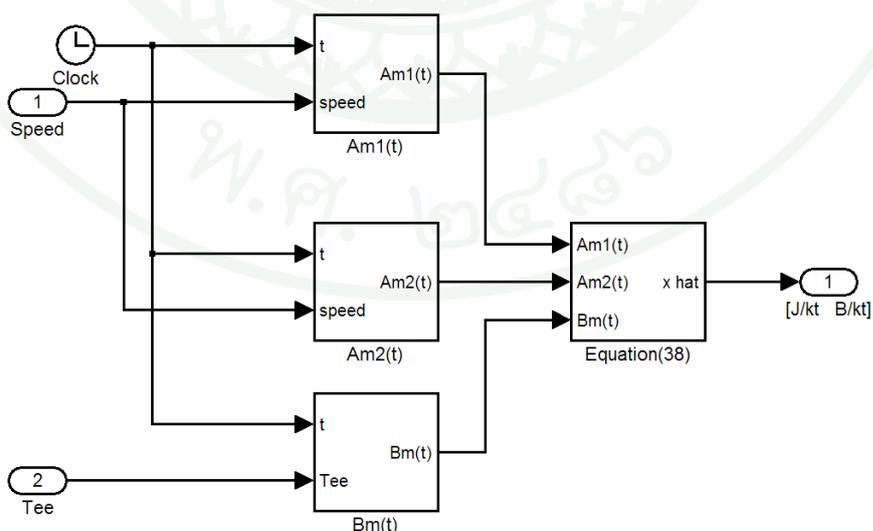
จากภาพที่ 19 แผนภาพ Sector selection ทำหน้าที่รับสัญญาณ hall effect มาแล้วดูตำแหน่งว่าอยู่ที่ตำแหน่งไหนแล้วจะทำการสร้างสัญญาณ gate drive ตามตารางที่ 1 หรือตารางที่ 2 นั้นขึ้นอยู่กับ

กับคำสั่งที่ให้หมุนทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกา ส่วนสัญญาณ duty cycle นั้นจะสั่งเป็น 0 – 100 ส่วนบล็อก duty นั้นจะแปลงสัญญาณจากคำสั่ง duty input ให้ออกมาอยู่ในรูปสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 20 kHz และ duty cycle ตามคำสั่ง input



ภาพที่ 20 แผนภาพ Parameter Estimator

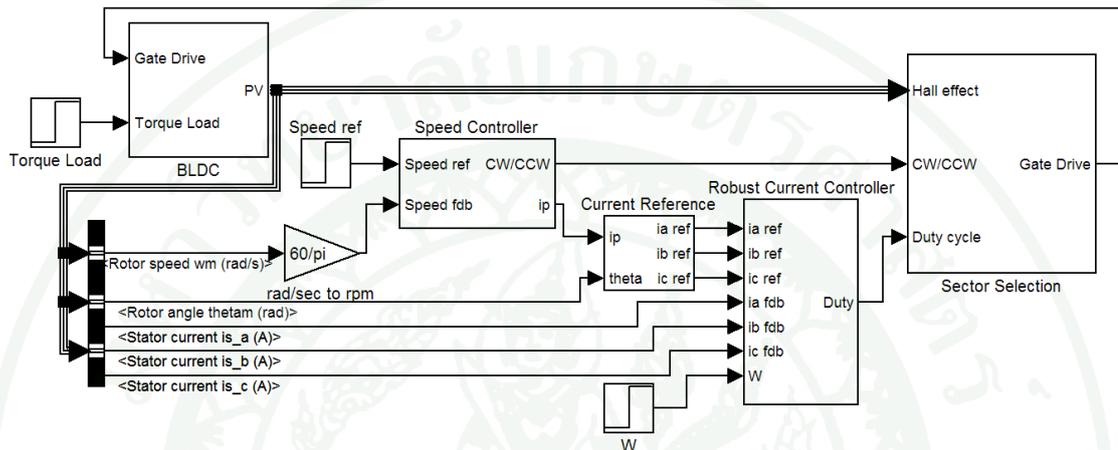
จากภาพที่ 20 จะนำค่าที่วัดได้จากมอเตอร์มาคำนวณหาค่า $A_{e1}(t)$, $A_{e2}(t)$, $A_{e3}(t)$ และ $B_e(t)$ จากนั้นก็จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าได้โดยใช้สมการที่ (38)



ภาพที่ 21 แผนภาพ Parameter Estimator1

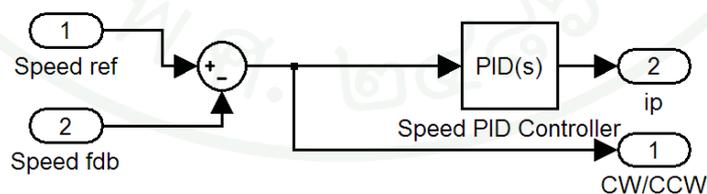
จากภาพที่ 21 จะนำค่าที่วัดได้จากมอเตอร์มาคำนวณหาค่า $A_{m1}(t)$, $A_{m2}(t)$ และ $B_m(t)$ จากนั้นก็จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าได้โดยใช้สมการที่ (38)

2. การควบคุมกระแสแบบคงทน



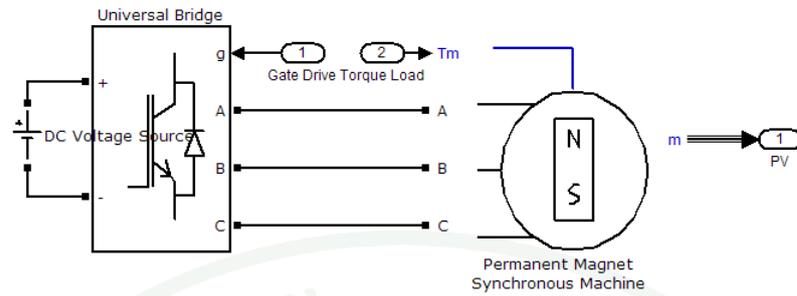
ภาพที่ 22 แผนภาพการควบคุมกระแสแบบคงทน

จากภาพที่ 22 เป็นแผนภาพที่ใช้ในการจำลองการทำงานของตัวควบคุมกระแสแบบคงทน หลังจากที่ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์แล้ว ในแผนภาพประกอบไปด้วย บล็อก BLDC บล็อก Speed Controller บล็อก Current Reference บล็อก Robust Current Controller และบล็อก Sector Selection ในแต่ละบล็อกอธิบายได้ดังนี้



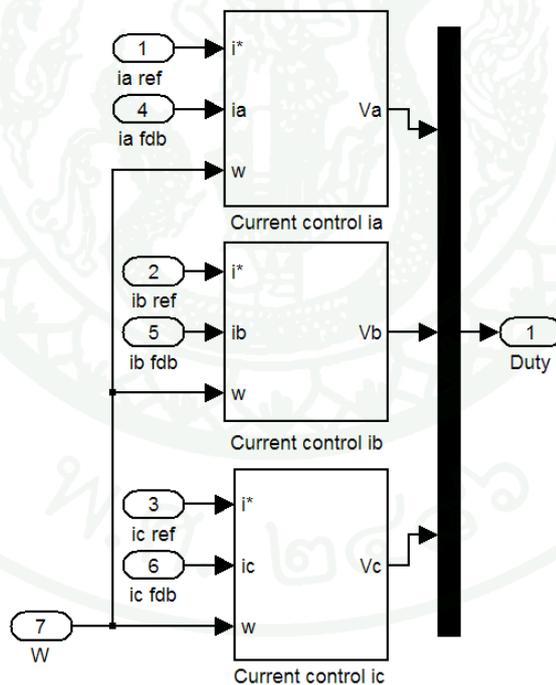
ภาพที่ 23 แผนภาพ Speed controller

ภายในภาพที่ 23 ประกอบไปด้วยสัญญาณ Speed reference เป็นสัญญาณอ้างอิงที่ป้อนให้ระบบ สัญญาณ Speed feedback เป็นสัญญาณที่วัดได้จากระบบ



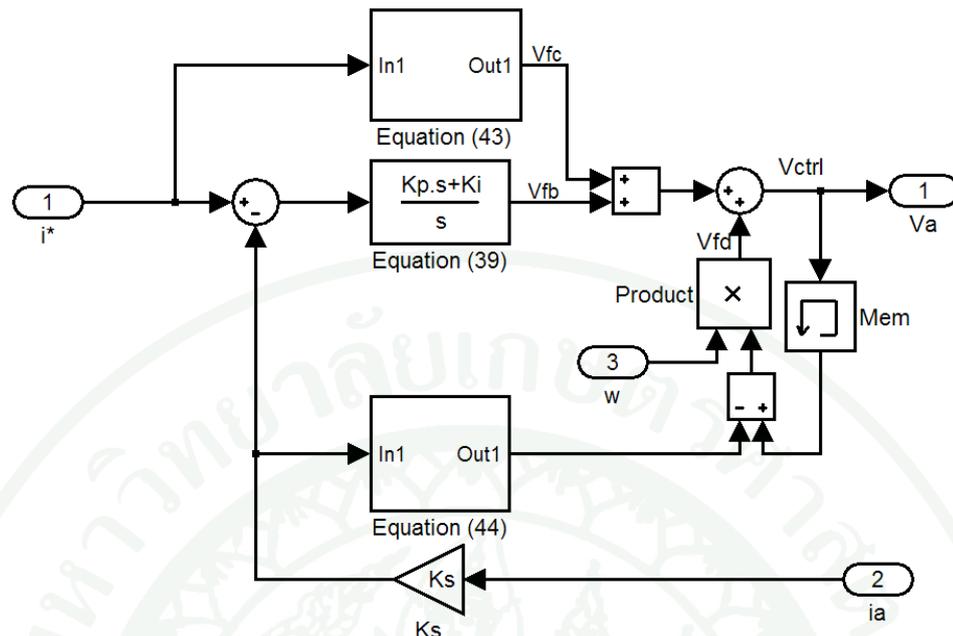
ภาพที่ 24 แผนภาพ BLDC

จากภาพที่ 24 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง IPM ที่มีสัญญาณ Gate drive เป็นสัญญาณอินพุตและสัญญาณที่ออกจาก IPM จะต่อกับ BLDC เพื่อขับ BLDC และสัญญาณ torque load



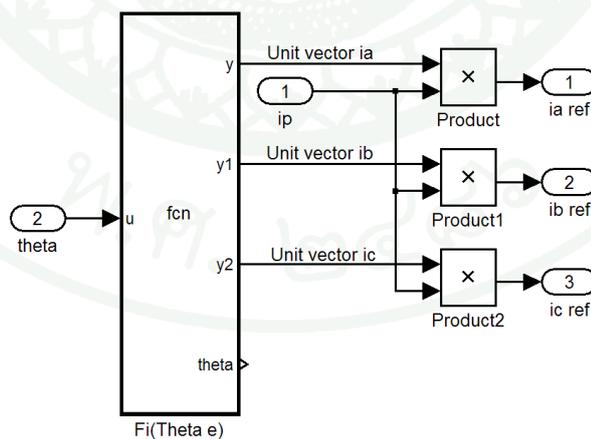
ภาพที่ 25 แผนภาพ Robust current control

จากภาพที่ 25 ประกอบไปด้วย Robust current controller ทั้งหมด 3 ตัว เพื่อควบคุม ia, ib, และ ic และค่า W เอาไว้รับเพื่อลดสัญญาณรบกวน



ภาพที่ 26 แผนภาพ Current control ia

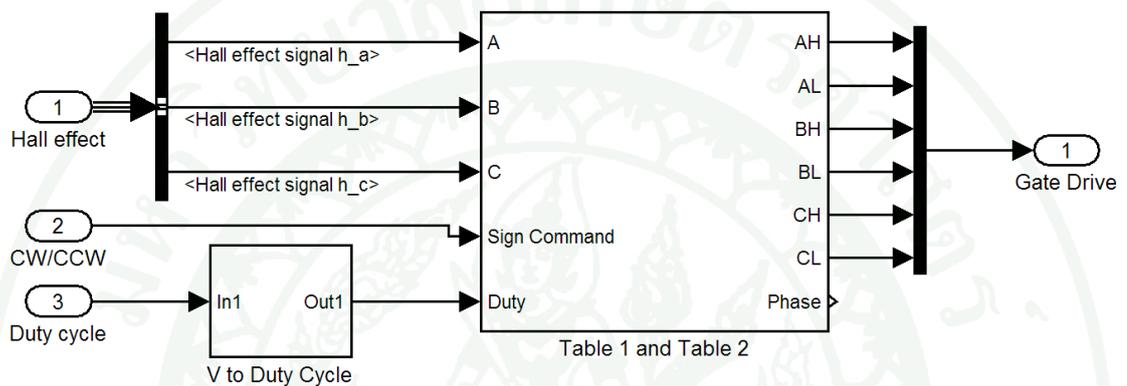
จากภาพที่ 26 จะเป็นส่วนประกอบของตัวควบคุม Robust current controller ที่ประกอบไปด้วย controller 3 ตัว ประกอบด้วย ตัวควบคุมป้อนไปหน้าสมการที่ (47) ตัวควบคุมป้อนกลับสมการที่ (43) และตัวควบคุมป้อนไปหน้าแบบตัดสัญญาณรบกวนแบบทันทานสมการที่ (48)



ภาพที่ 27 แผนภาพ Unit vector generator

จากภาพที่ 27 ประกอบด้วย I_p และฟังก์ชัน $F_i(\theta_e)$ มีค่าดังสมการที่ (50)

$$F_i(\theta_e) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \theta_e < \frac{2\pi}{3} \\ 0, & \frac{2\pi}{3} \leq \theta_e < \pi \\ -1, & \pi \leq \theta_e < \frac{5\pi}{3} \\ 0, & \frac{5\pi}{3} \leq \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad (50)$$

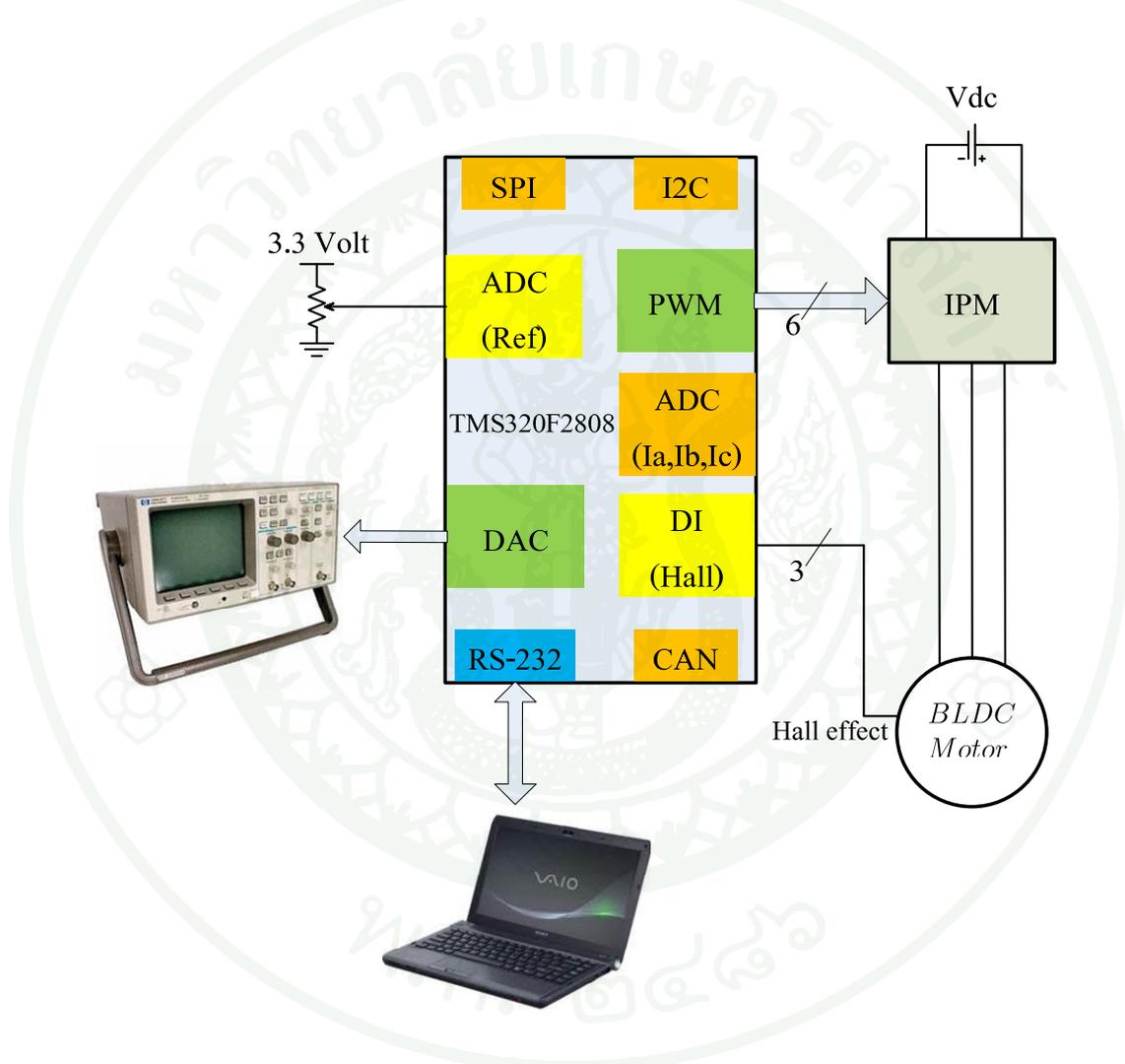


ภาพที่ 28 แผนภาพ Sector selection

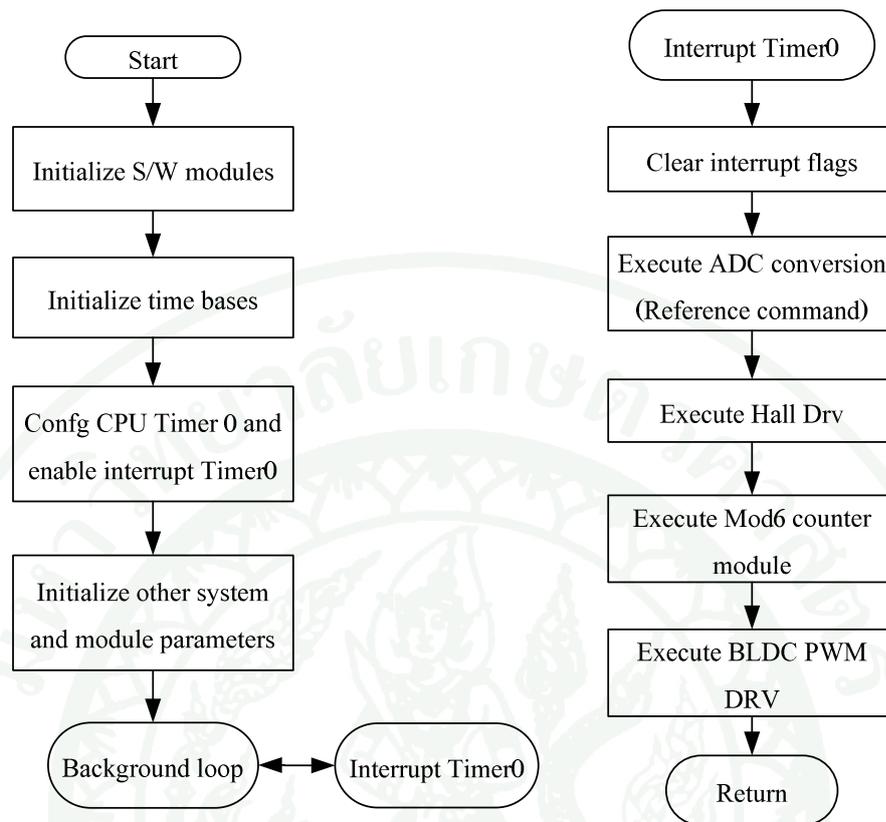
จากภาพที่ 28 ประกอบไปด้วยบล็อก V to Duty cycle เอาไว้สำหรับแปลงจาก volt ที่คำนวณได้จาก robust current controller ไปเป็น duty cycle และอ่านค่า hall effect เพื่อเปิด ตารางที่ 1 หรือตารางที่ 2 นั้นจะขึ้นอยู่กับสัญญาณ CW/CCW และรับสัญญาณเป็น duty cycle ออกไปทางสัญญาณ gate drive

การเขียนโปรแกรมลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS32F2808

1. การเขียนโปรแกรมควบคุมแบบลูปเปิด จากภาพที่ 29 บนตัว TMS320F2808 นั้น สีเขียว หมายถึงเอาต์พุต สีเหลืองหมายถึงอินพุต และสีขาหมายถึงส่วนที่ยังไม่เปิดใช้งาน ส่วนรายละเอียดของโปรแกรมและวงจรจะอยู่ในภาคผนวก โปรแกรมทำงานตามแผนผังดังนี้



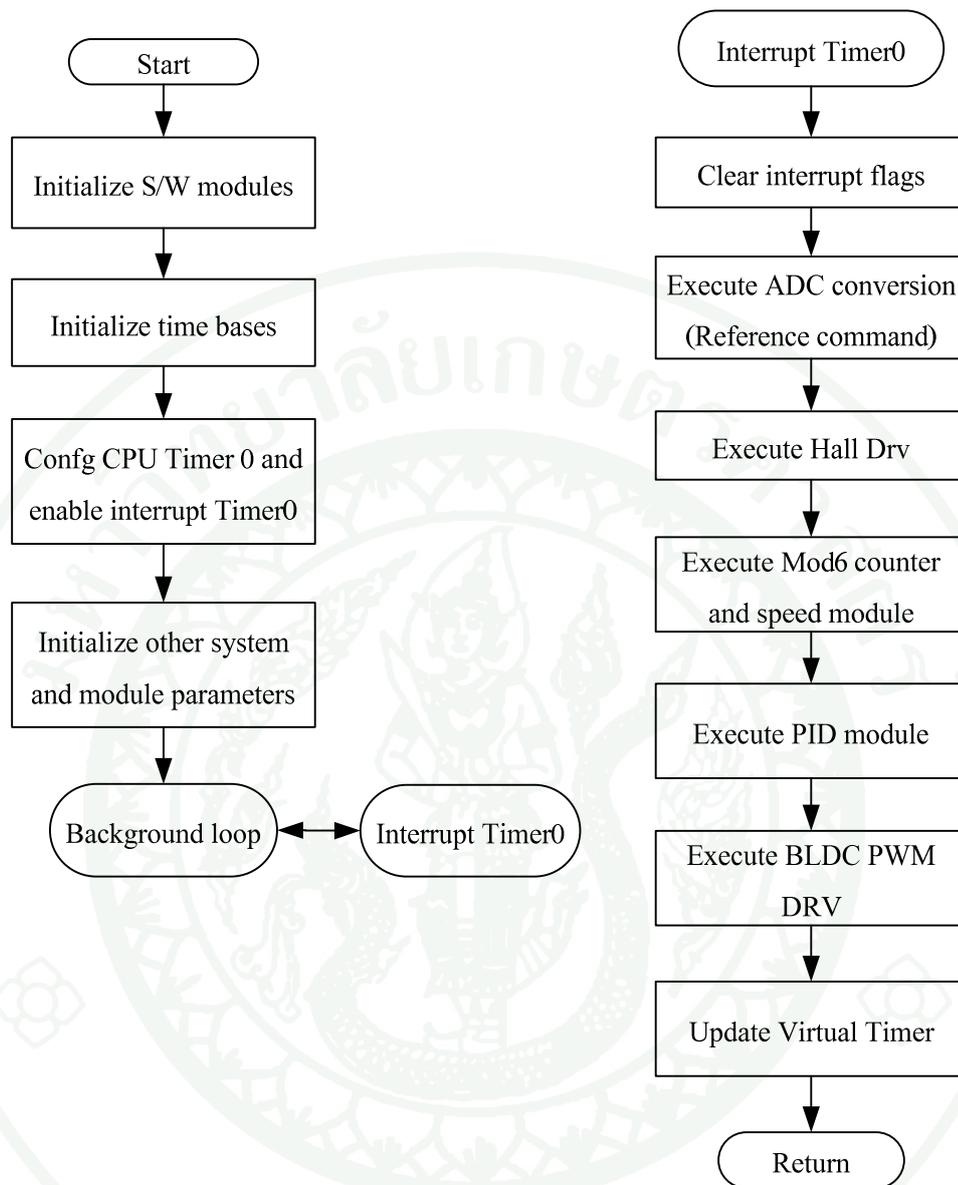
ภาพที่ 29 การต่อวงจรโดยรวมการควบคุมแบบลูปเปิด



ภาพที่ 30 แผนผังการทำงานการควบคุมแบบลูเปิด

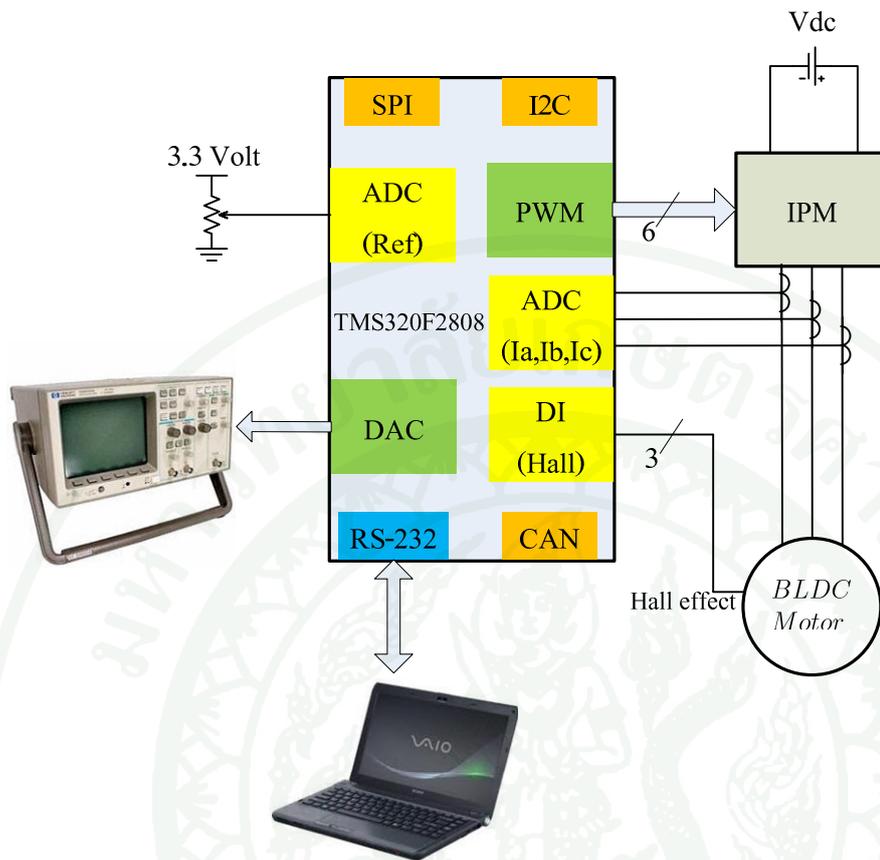
จากภาพที่ 30 การทำงานควบคุมแบบลูเปิดนั้นมีการทำงานที่ไม่ซับซ้อน เมื่อ โปรแกรมเริ่มทำงาน ก็จะกำหนดการใช้งานโมดูล เช่น โมดูลการเรียกใช้งาน ADC โมดูลการสื่อสารผ่าน RS-232 โมดูลการอ่านตำแหน่งของ hall effect โมดูลการใช้งาน Timer และโมดูลการใช้งาน PWM จากนั้นก็จะกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับแต่ละโมดูล จากนั้นโปรแกรมจะทำงานตาม interrupt timer0

2. การเขียนโปรแกรมควบคุมแบบลูปิดความเร็ว การต่อวงจรเหมือนกับภาพที่ 29 การเขียนแบบลูปิดความเร็ว นั้นแตกต่างจากลูเปิดเล็กน้อยคือ จะเขียนโปรแกรมเพิ่มส่วนการคำนวณความเร็วจาก hall effect เข้ามาเป็นตัวป้อนกลับแล้วลบกับค่า ADC ที่อ่านเข้ามาได้เพื่อหาค่า error แล้วป้อนเข้าตัวควบคุมแบบพีไอดี เพื่อทำการหาค่า duty cycle ที่จะขับมอเตอร์ต่อไป



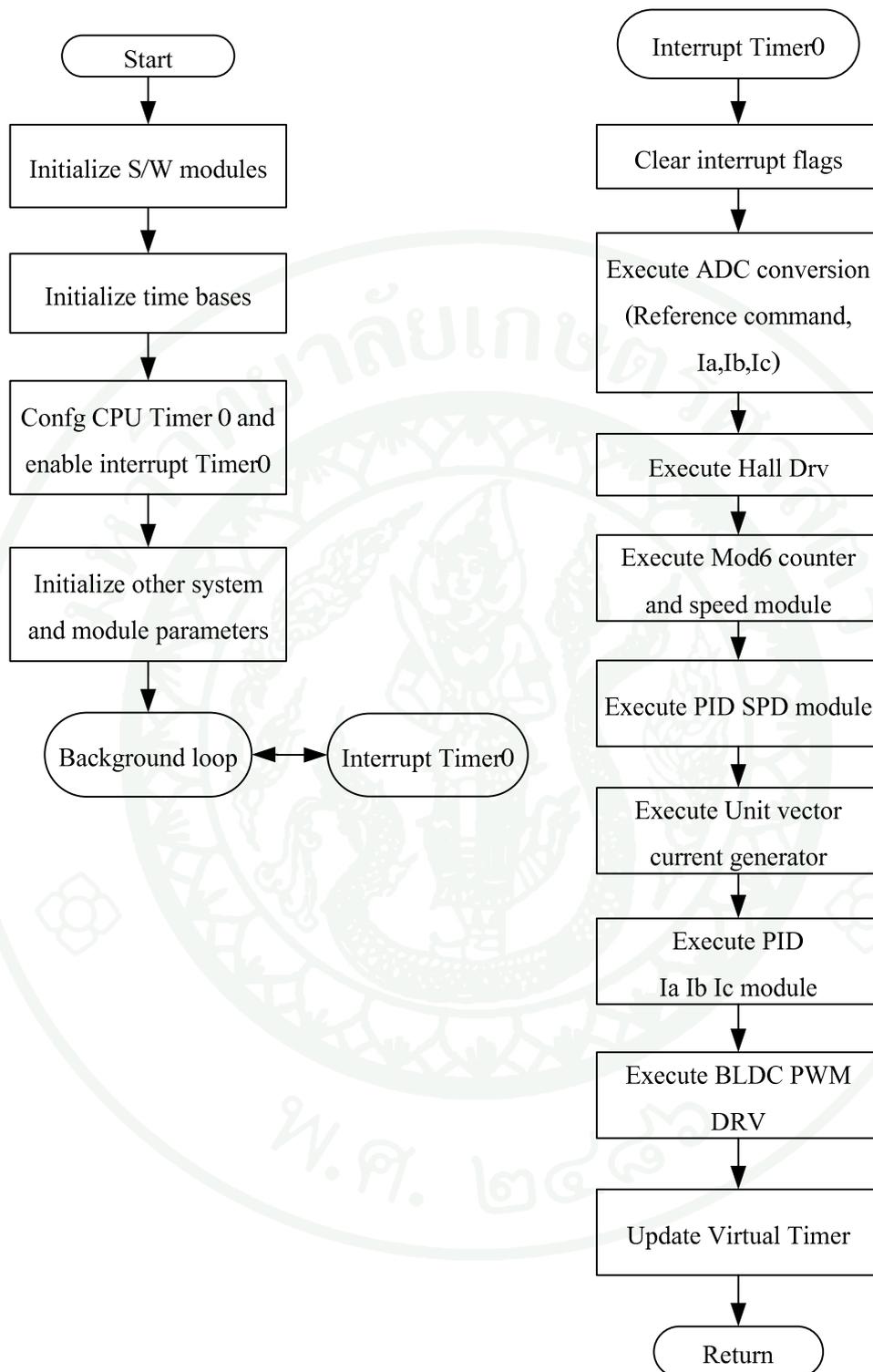
ภาพที่ 31 แผนผังการทำงานการควบคุมแบบลูปปิดความเร็ว

3. การเขียนโปรแกรมควบคุมแบบลูปปิดความเร็วและกระแส การเขียนโปรแกรมควบคุมลูปปิดความเร็วและการเสถียรความยุ่งยากซับซ้อนมากกว่าเดิม เนื่องจากต้องสร้างสัญญาณกระแสอ้างอิงที่มีลักษณะสามเฟสตามสมการที่ (50) และการทำงานของโปรแกรมนั้นจะให้ตัวควบคุมกระแสนั้นทำงานเร็วกว่าตัวควบคุมความเร็ว 10 เท่า



ภาพที่ 32 การต่อวงจรโดยรวมการควบคุมแบบลูปปิดความเร็วและกระแส

จากภาพที่ 32 การต่อวงจรจะแตกต่างจากแบบควบคุมความเร็วคือ ต้องต่อวงจรเพื่อวัดกระแส Ia, Ib และ Ic เพื่อให้สามารถควบคุมกระแสได้ ส่วน CAN bus จะเปิดใช้งานก็ต่อเมื่อต้องการควบคุมการทำงานของมอเตอร์แบบหลายตัว SPI จะเปิดใช้งานก็ต่อเมื่อต้องการแสดงผลบน 7 – Segment ส่วน I2C จะใช้โปรแกรมค่าพารามิเตอร์ที่เราต้องการเก็บค่าลงไป ใน EEPROM และ RS-232 ใช้ติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์สำหรับรับคำสั่งเพื่อเปิดการใช้งาน modules ต่างๆบนตัวไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 33 แผนผังการทำงานการควบคุมแบบลูปปิดความเร็วและกระแส

ผลและวิจารณ์

ผล

ผลจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

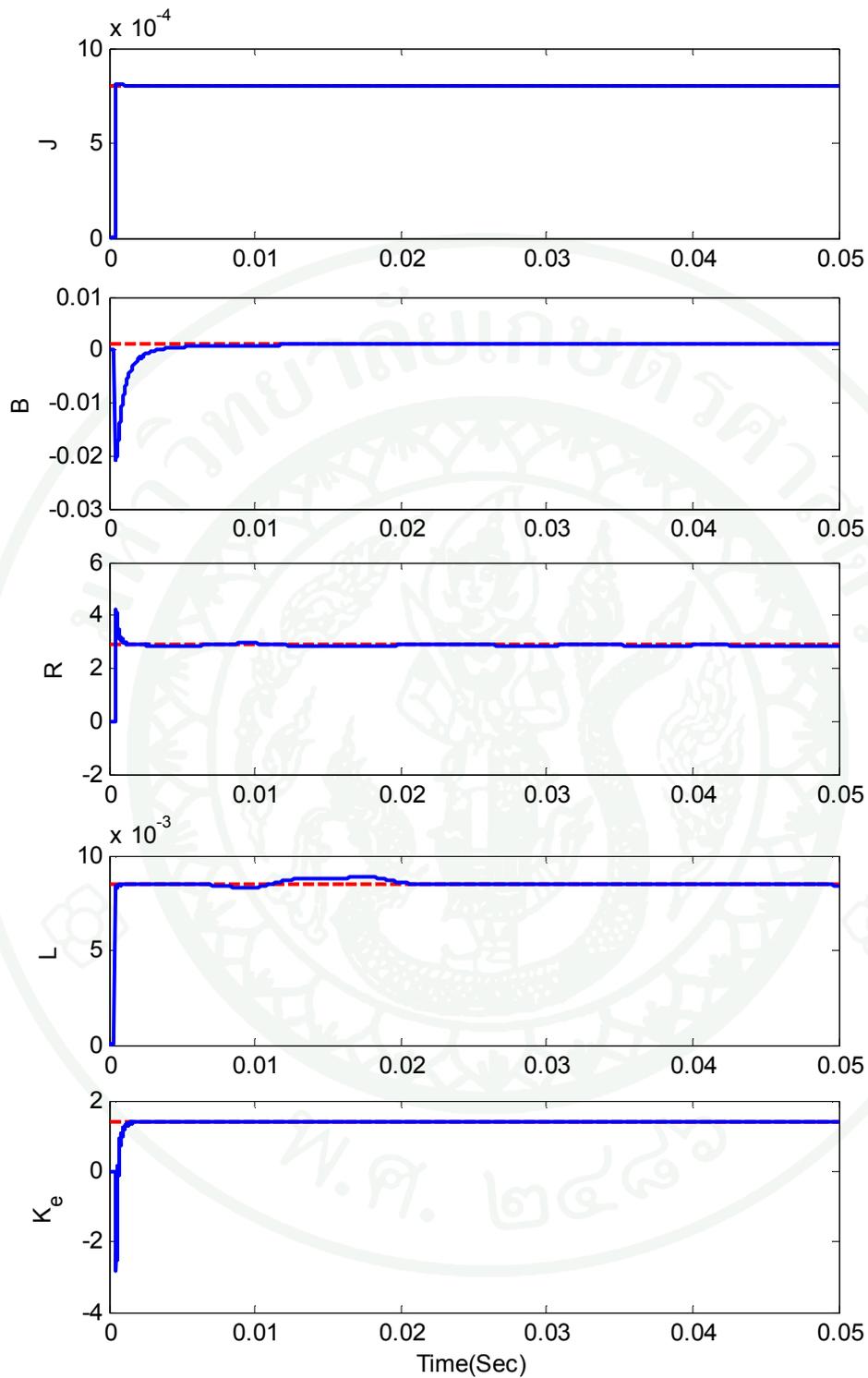
1. ผลการจำลองการทำงาน
 - 1.1 ผลการจำลองการหาค่าพารามิเตอร์วิธีพีชคณิต
 - 1.2 ผลการจำลองการควบคุมกระแสแบบพีไอดี
 - 1.3 ผลการจำลองการควบคุมกระแสแบบคงทน
 - 1.4 ผลการจำลองการควบคุมความเร็ว
2. ผลการทดลอง
 - 2.1 ผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์วิธีวัดผลตอบสนองกระแส
 - 2.2 ผลการทดลองควบคุมแบบลูปิดความเร็ว
 - 2.3 ผลการทดลองควบคุมแบบลูปิดความเร็วและกระแส

1. การจำลองการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

1.1 ผลการจำลองการหาค่าพารามิเตอร์วิธีพีชคณิต การจำลองหาค่าพารามิเตอร์สามารถต่อวงจรดังภาพที่ 17 และจำลองการทำงานตั้งแต่เวลา 0 ถึง 50 มิลลิวินาที ผลที่ได้จากการจำลองแสดงในภาพที่ 34 โดยสีแดงคือ ค่าจริง และสีน้ำเงินคือ ค่าผลที่ได้จากการจำลอง

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

<i>Parameter</i>	<i>Value</i>	<i>Parameter</i>	<i>Value</i>
V_{dc}	500V	\bar{R}	2.875 Ω
\bar{L}	8.5mH	k_τ	1.4
J	0.0008kgm ² /s ²	B	0.001Nm.s
P	8poles	f_{tri}	20kHz
K_p	0.5341	K_i	180.6416
K_s	1	K_{pwm}	500



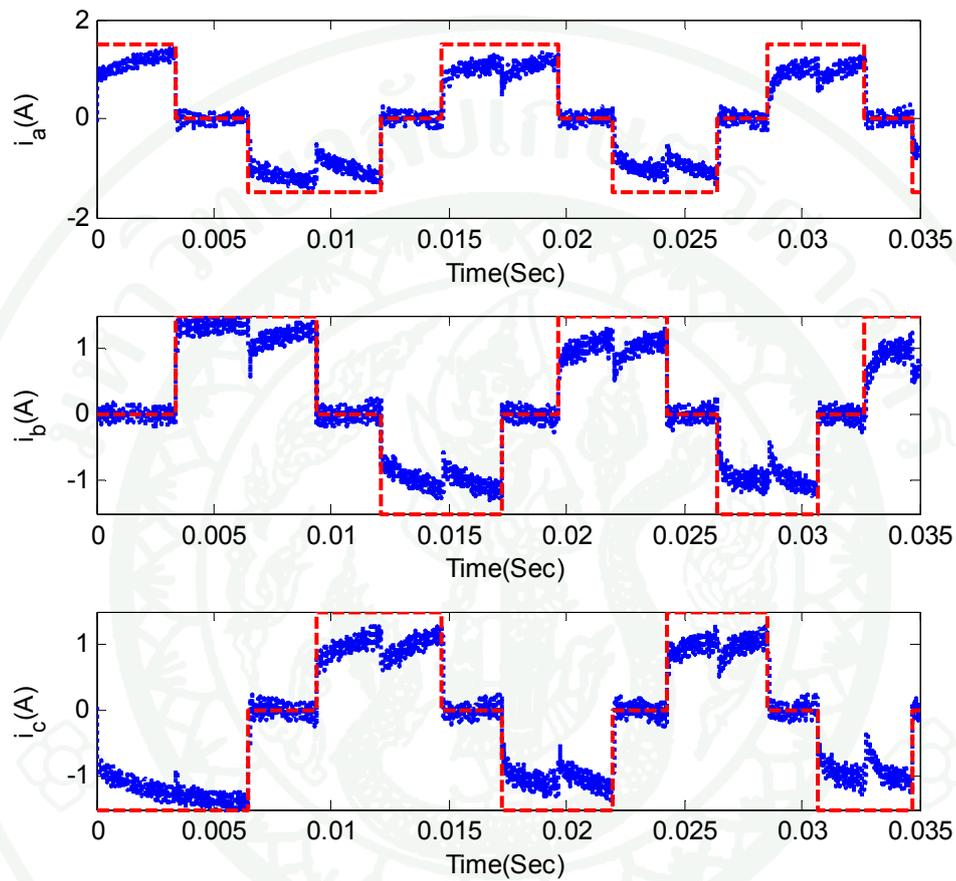
ภาพที่ 34 ผลการจำลองหาค่าพารามิเตอร์มอเตอร์

ตารางที่ 4 ผลการระบุค่าพารามิเตอร์

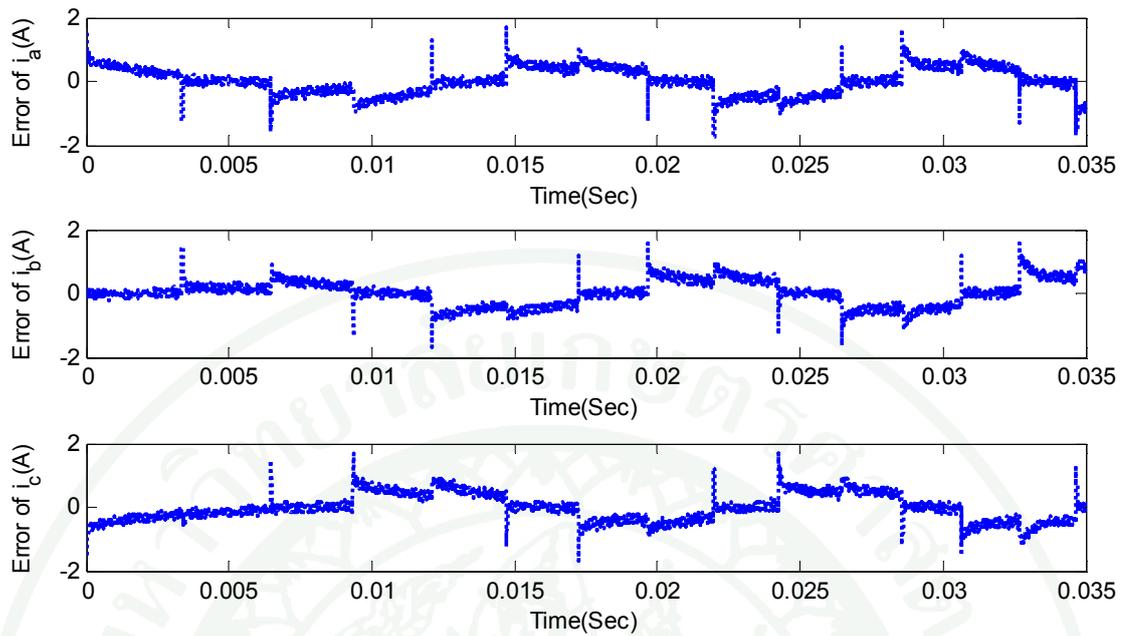
Parameter	Converge time (Sec)	Estimate value	Real value
J	7.75×10^{-4}	7.9955×10^{-4}	8×10^{-4}
B	0.0173	0.001	0.001
R	0.0111	2.8598	2.875
L	0.0201	0.0084355	0.0085
Ke	0.0184	1.40266	1.4

โดยที่ convergence time หมายถึง ค่าเวลาที่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่าน้อยกว่า 1% ซึ่งหาค่าได้จาก ตารางที่ 1 $1 - \frac{|\text{Estimate value} - \text{Real value}|}{\text{Real value}} \times 100$ จากการระบุค่าพารามิเตอร์มีการลู่เข้าอย่างรวดเร็ว โดยพิจารณาจากค่า convergence time ที่ช้าที่สุด คือ 0.0201 วินาที ซึ่งถือว่าเร็วเนื่องจากทำการจำลองการทำงาน 0.05 วินาที เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหาเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาเพราะว่าค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหานั้นขึ้นอยู่กับสัญญาณที่วัดได้ทางไฟฟ้าและทางกลเท่านั้น

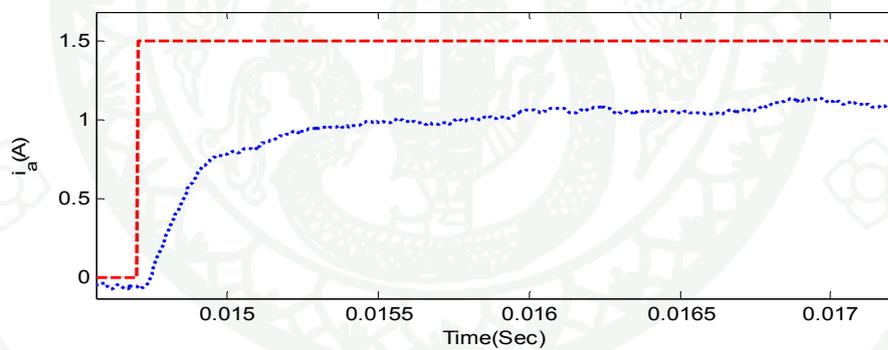
1.2 ผลการจำลองการควบคุมกระแสแบบพีไอดี การจำลองการทำงานของตัวควบคุมกระแสแบบพีไอดีนั้น สามารถทำได้โดยต้องจรรยาตามแบบภาพที่ 22 โดยค่าตัวควบคุมพีไอดีนั้นใช้ค่าตามตารางที่ 3 และใส่โหลด 1.5 mm ได้ผลการทดลองดังนี้



ภาพที่ 35 ผลการจำลองตัวควบคุมกระแสแบบพีไอดี



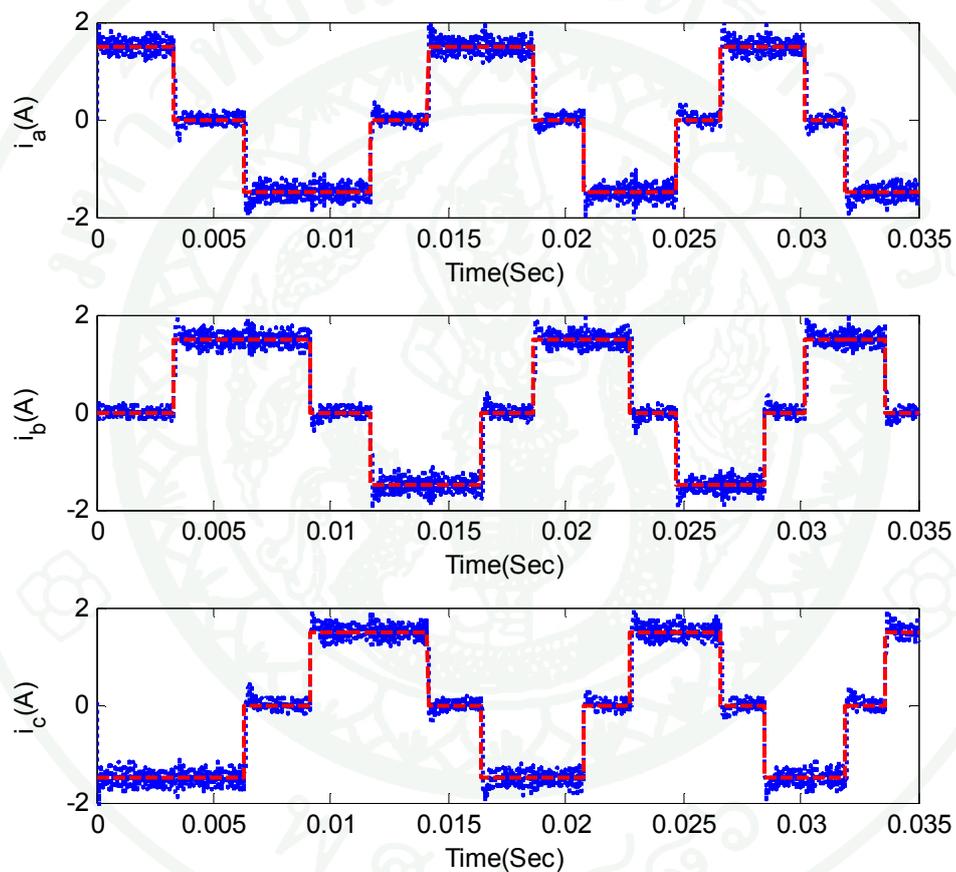
ภาพที่ 36 ค่าความผิดพลาดของกระแส



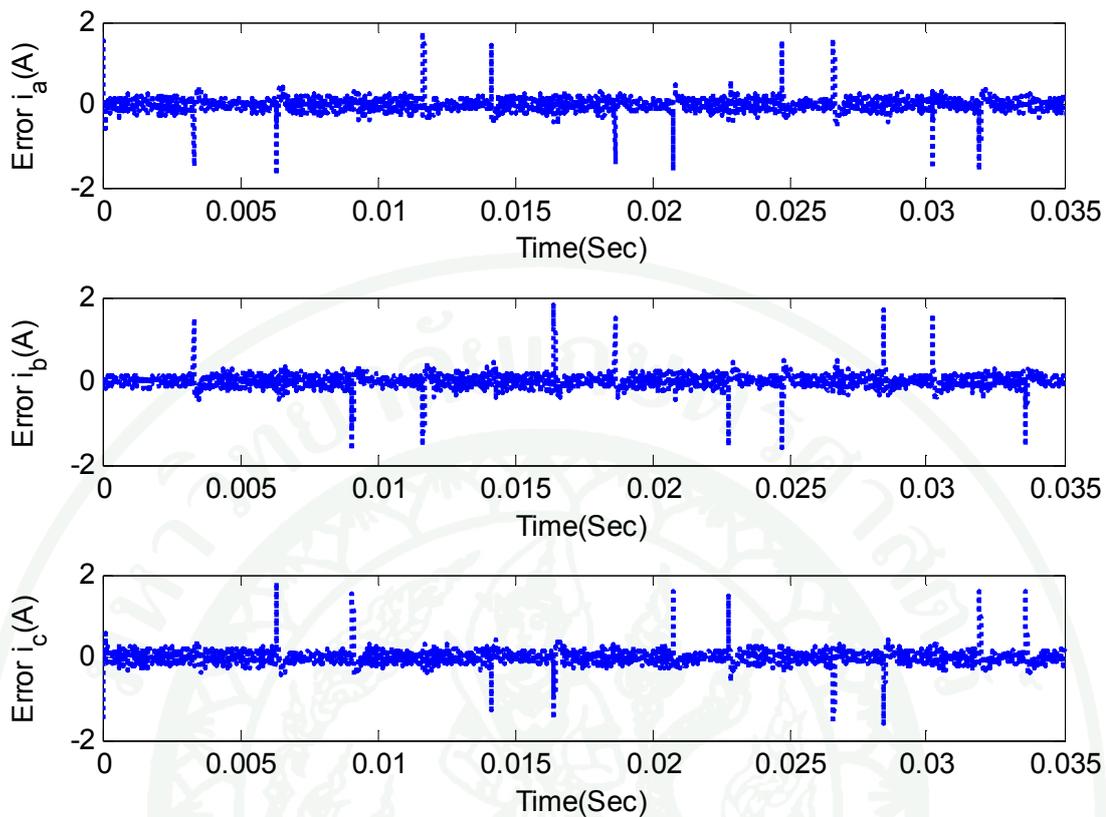
ภาพที่ 37 ผลตอบสนองชั่วขณะของกระแส

จากภาพที่ 35 เป็นผลการจำลองกระแสแบบใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีเพียงอย่างเดียว ซึ่งผลตอบสนองที่ได้นั้นไม่สามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้เลย

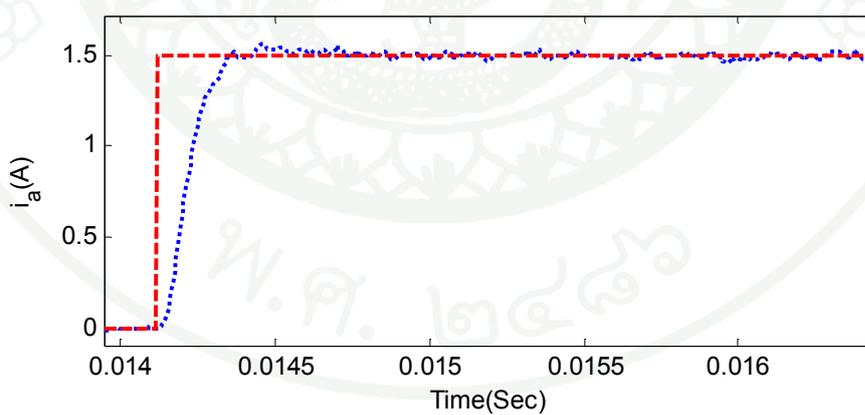
1.3 การจำลองการควบคุมกระแสแบบคงทน การจำลองการทำงานของตัวควบคุมกระแสแบบคงทนนั้น สามารถทำได้โดยต่อวงจรตามแบบภาพที่ 22 โดยค่าตัวควบคุมแบบคงทนนั้นใช้ค่าตามตารางที่ 3 ได้ผลการทดลองดังนี้



ภาพที่ 38 ผลการจำลองผลตอบสนองกระแสตัวควบคุมแบบคงทน



ภาพที่ 39 ค่าความผิดพลาดกระแส



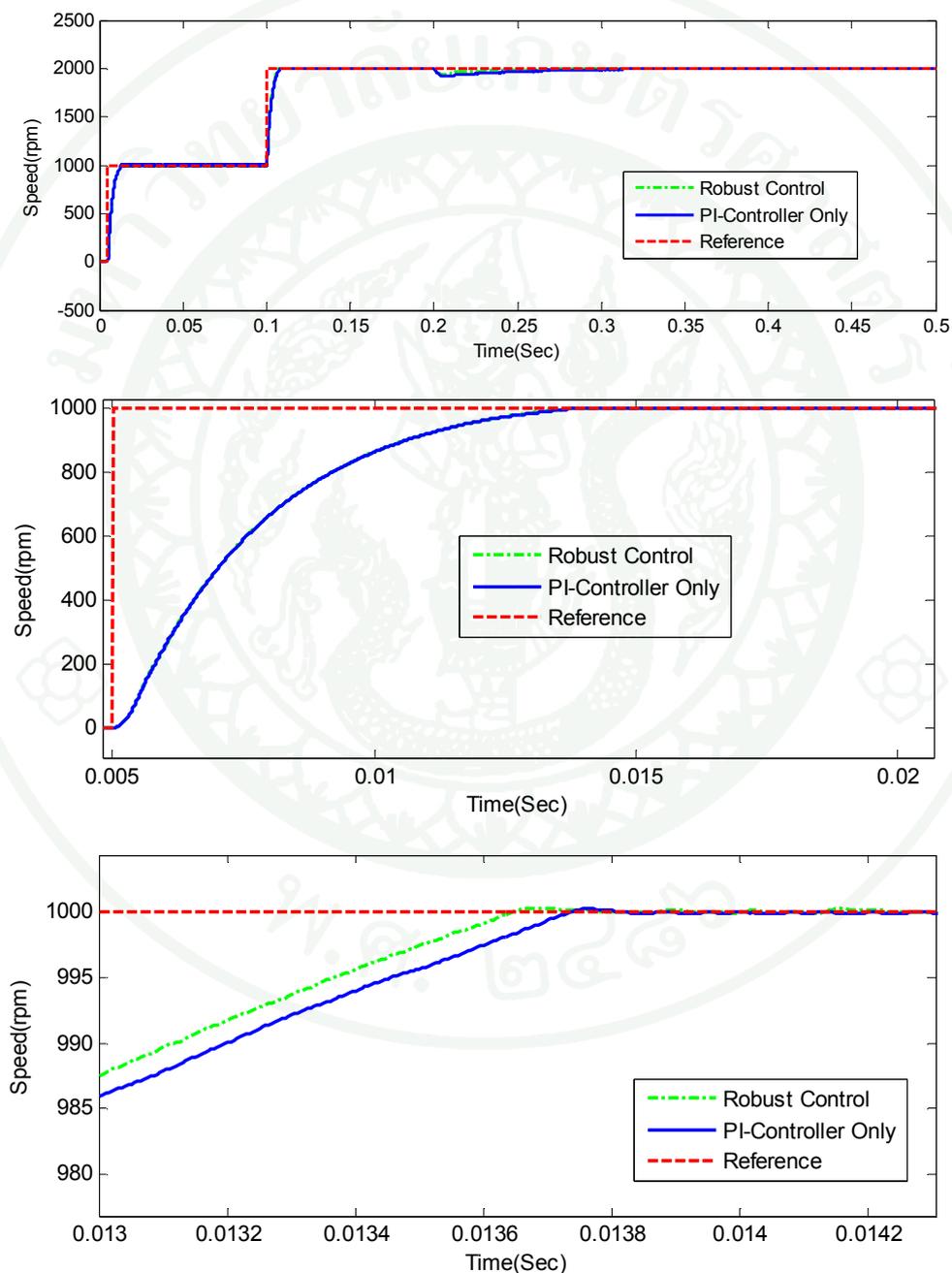
ภาพที่ 40 ผลตอบสนองกระแสช่วงขณะ

ตารางที่ 5 ผลการควบคุมกระแสแบบพีไอและแบบคงทน

Current phase	Max absolute error	
	PI – Controller	Robust Controller
Ia	1.6939	1.7279
Ib	1.6984	1.7342
Ic	1.6075	1.6657

จากภาพที่ 38 จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของกระแสที่ตัวควบคุมแบบคงทนนั้นสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้ดีเนื่องจากตัวผลของตัวควบคุมป้อนไปหน้าสองตัวที่เพิ่มเข้ามา ซึ่งมีผลทำให้ผลตอบสนองติดตามสัญญาณอ้างอิงได้ดี จากตารางที่ 5 ค่า maximum absolute error ของ robust control ที่มีค่ามากกว่า PI control เนื่องจากมีค่าพุ่งเกินเกิดขึ้นในช่วงชั่วขณะของการตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิง

1.4 ผลการจำลองการควบคุมความเร็ว การจำลองการทำงานควบคุมความเร็วนี้จะทดลองทั้งตัวควบคุมแบบพีไอดี และตัวควบคุมแบบคงทน โดยการทดลองนี้จะทดลองโดยเปลี่ยนความเร็วจาก 0 ถึง 1000 รอบ ที่เวลา 0.005 วินาที และทดลองใส่โหลดขนาด 2 Nm ที่เวลา 0.2 วินาที ได้ผลการจำลองดังนี้



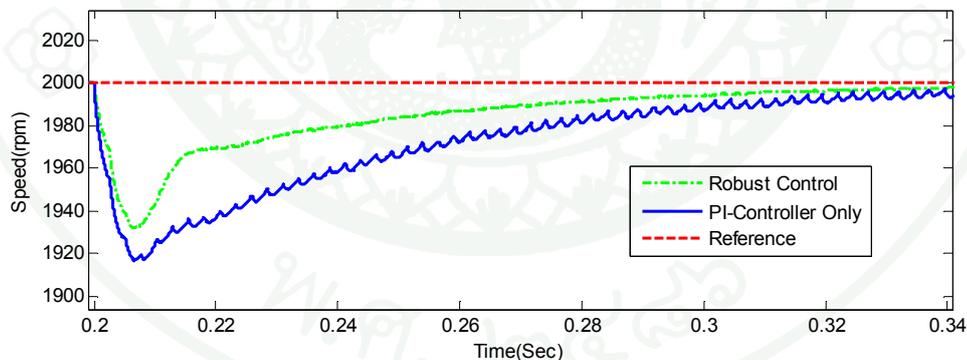
ภาพที่ 41 ผลการจำลองผลตอบสนองของความเร็ว

ตารางที่ 6 ผลตอบสนองความเร็วแบบพีไอและแบบคงทนที่ความเร็ว 0 rpm ถึง 1000 rpm

	Rise time	Settling time
PI	0.0051	0.0132
Robust Control	0.0051	0.0131

โดยที่ rise time หมายถึง ช่วงค่าเวลาของสัญญาณผลตอบสนองที่พุ่งจาก 10% ถึง 90% ของสัญญาณอ้างอิง และค่า settling time หมายถึง ค่าเวลาของสัญญาณผลตอบสนองที่มีค่า $\pm 1\%$ ของสัญญาณอ้างอิง

จากภาพที่ 41 จะเห็นว่าตัวควบคุมแบบพีไอตอบสนองได้ช้า และตัวควบคุมแบบคงทนนั้นจะสามารถตอบสนองได้เร็วหรือไม่ขึ้นอยู่กับ ค่า W หมายถึงเมื่อค่า W มีค่ามากสามารถทำให้ระบบตอบสนองได้เร็ว และเมื่อค่า W มีค่าน้อยลงก็จะทำให้ระบบตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงได้ช้าลง เนื่องจากตัวควบคุมแบบคงทนนั้นสามารถตัดสัญญาณรบกวนที่มากวนระบบได้และสามารถปรับค่าได้จากค่า W และอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ตัวควบคุมแบบคงทนตอบสนองได้ดีก็คือตัวควบคุมป้อนไปหน้าทั้งสองตัว



ภาพที่ 42 ผลตอบสนองความเร็วขณะใส่โหลด

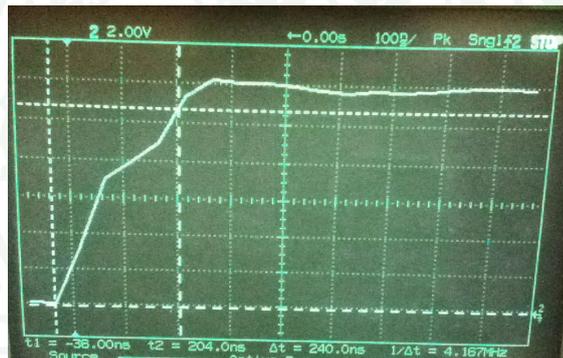
จากภาพที่ 42 ผลตอบสนองก็จะมีลักษณะคล้ายกับผลตอบสนองความเร็วคือ ตัวควบคุมแบบคงทนสามารถตอบสนองต่อ โหลดได้ดีกว่า ตัวควบคุมแบบพีไอดีเพียงอย่างเดียว และที่ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอนั้นมีลักษณะเป็นลูกคลื่นนั้นเนื่องมาจาก ผลตอบสนอง

กระแสของตัวควบคุมแบบพีไอดีเอง ที่ไม่สามารถตอบสนองต่อสัญญาณกระแสอ้างอิงได้ เลขทำให้แรงบิดที่ได้นั้น ไม่เรียบ จึงส่งผลให้ผลตอบสนองต่อโหลดไม่เรียบตามไปด้วย

2. การทดลองควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ผลการทดลองจะแบ่งได้ดังนี้ การระบุค่าพารามอเตอร์วิธีการวัดผลตอบสนองกระแส การควบคุมแบบลูปปิดความเร็วและการควบคุมลูปปิดความเร็วและกระแส การหาค่าพารามอเตอร์พีไอดีนั้นหามาจากการทดลองและปรับค่าเองจนได้ผลตอบสนองเป็นที่พอใจ ค่าพารามอเตอร์ตัวควบคุมที่ใช้ในการทดลองมีค่าตามตารางที่ 7

2.1 การระบุค่าพารามอเตอร์วิธีวัดผลตอบสนองกระแส การระบุค่าพารามอเตอร์ด้วยวิธีนี้นั้นเป็นวิธีที่สามารถหาค่าพารามอเตอร์แบบหยาบๆ เพื่อนำไปออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนที่สามารถลดผลกระทบของค่าความไม่แน่นอนของพารามอเตอร์



ภาพที่ 43 ผลตอบสนองกระแสเพื่อหาค่าพารามอเตอร์มอเตอร์

จากสมการที่ (40) สมการที่ (41) และสมการที่ (42) สามารถนำมาคำนวณหาค่าพารามอเตอร์ได้ดังนี้

$$t_r = 240nSec,$$

$$I_{ss} = \frac{V_{Rex}}{R_{ex}} = \frac{12.34}{493} = 25.03mA,$$

$$\bar{R} = \frac{V}{2i_{ss}} = \frac{2.245mV}{25.03mA} = 0.08969\Omega,$$

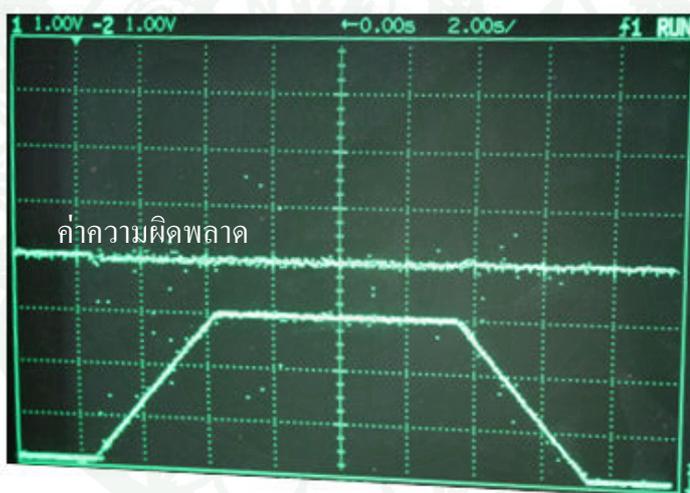
$$\bar{L} = 0.08969 \left(-\frac{240 \times 10^{-9}}{\ln(0.1)} \right) = 9.3488nH,$$

$$\bar{k}_e = \frac{e_{peak}}{\omega_m} = \frac{33}{3266} = 14.2893 \frac{V}{Krpm}$$

ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ตัวควบคุมความเร็วและกระแสแบบพีไอดี

	ตัวควบคุมความเร็ว	ตัวควบคุมกระแส
Kp	0.8	8
Ki	0.0025	2.5

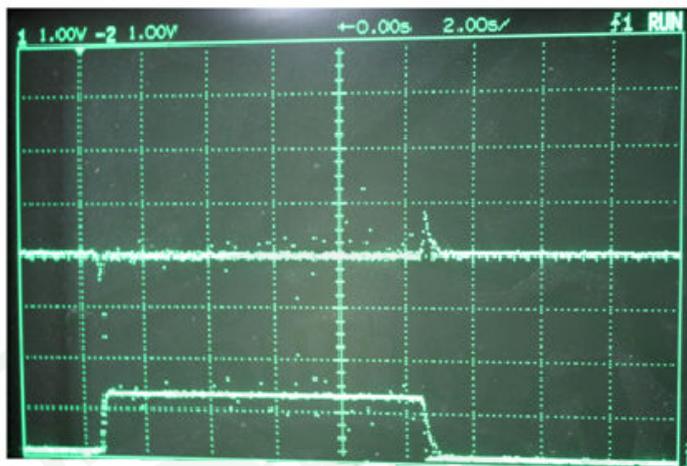
2.2 ผลการทดลองควบคุมแบบลูปิดความเร็ว ผลการทดลองลูปิดความเร็วโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมความเร็วมีค่าตามตารางที่ 7 การทดลองจะทดลองผลตอบสนองของสัญญาณที่เป็นสี่เหลี่ยมคางหมู สัญญาณขั้นบันได และสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม



ภาพที่ 44 ผลตอบสนองสัญญาณสี่เหลี่ยมคางหมู

จากภาพที่ 44 สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมคางหมูของสัญญาณอ้างอิง และผลตอบสนองนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากจึงไม่สามารถชี้ให้เห็นได้ ส่วนสัญญาณค่าความผิดพลาดนั้นมีลักษณะคล้ายเส้นตรงเนื่องจากระบบนั้นสามารถตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงได้ทัน สัญญาณอ้างอิงรูปสี่เหลี่ยมคางหมุนั้นเปลี่ยนแปลงจากความเร็ว 0 PU จนถึง 1 PU ในเวลา 4 วินาที

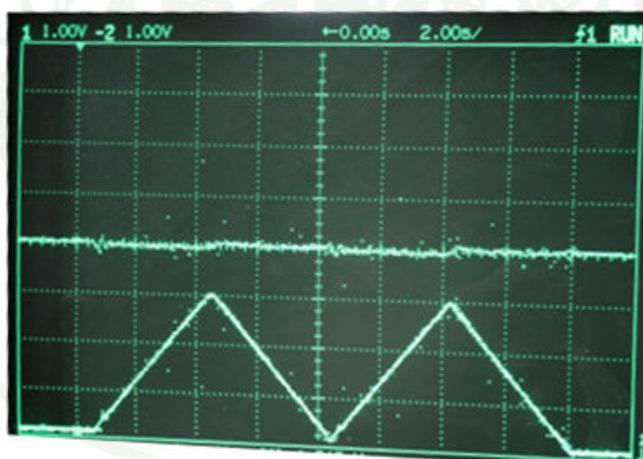
ผลตอบสนองของสัญญาณขั้นบันได ที่เปลี่ยนแปลงจาก 0 PU ไปที่ 0.42 PU ตามภาพที่ 45



ภาพที่ 45 ผลตอบสนองสัญญาณขั้นบันได

จากภาพที่ 45 ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะเกิดบนช่วงชั่วขณะของสัญญาณอ้างอิง

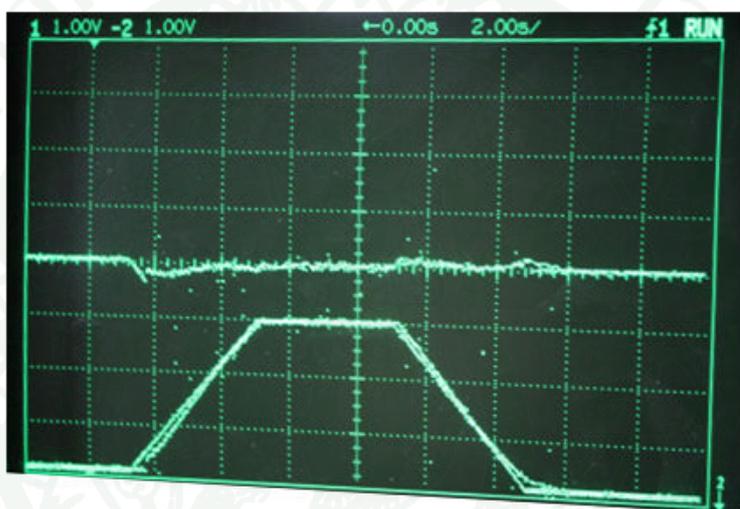
ผลตอบสนองของสัญญาณรูปสามเหลี่ยมตามภาพที่ 46 ที่เปลี่ยนแปลงจาก 0 PU ถึง 1 PU ใน 4 วินาที และเปลี่ยนแปลงจาก 1 PU ถึง 0 PU ใน 4 วินาที



ภาพที่ 46 ผลตอบสนองสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นตลอดการติดตามสัญญาณอ้างอิงที่เป็นรูปสามเหลี่ยม และค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นเป็นค่าคงที่ซึ่งสามารถสังเกตได้จากภาพที่ 46

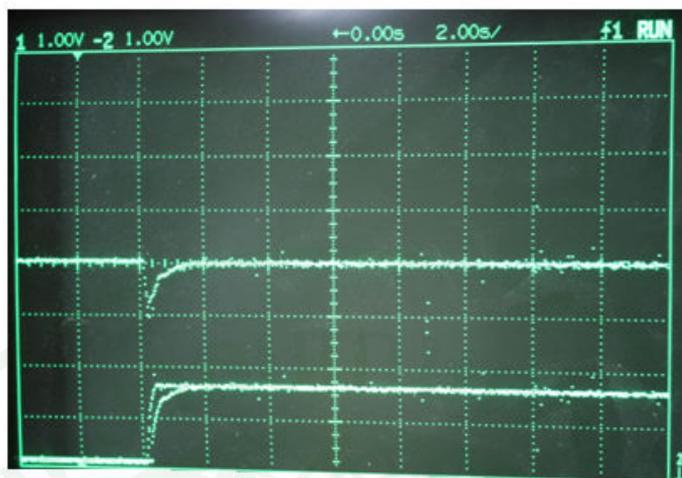
2.3 ผลการทดลองควบคุมแบบลูปปิดความเร็วและกระแส ผลการทดลองลูปปิดความเร็วและกระแสโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมความเร็วและ ตัวควบคุมกระแสมีค่าตามตารางที่ 7 การทดลองจะทดลองผลตอบสนองของสัญญาณที่เป็นสี่เหลี่ยมคางหมู สัญญาณขั้นบันได และสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม



ภาพที่ 47 ผลตอบสนองสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

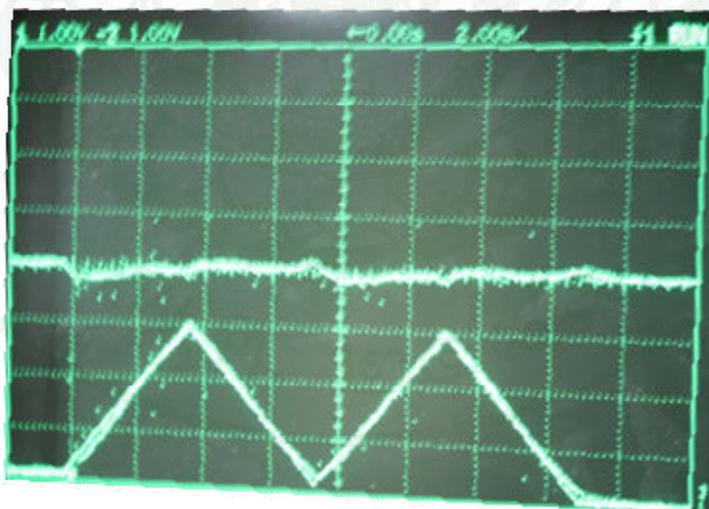
จากภาพที่ 47 ค่าความผิดพลาดนั้นจะเกิดขึ้นในช่วงที่สัญญาณอ้างอิงเปลี่ยนจาก 0 PU ถึง 1 PU และจาก 1 PU ถึง 0 PU

จากภาพที่ 48 เป็นผลตอบสนองที่เป็นสัญญาณขั้นบันไดที่เปลี่ยนจาก 0 PU ถึง 0.54 PU ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะเกิดบนช่วงช่วงช่วงของสัญญาณอ้างอิง



ภาพที่ 48 ผลตอบสนองสัญญาณขั้นบันได

จากภาพที่ 49 เป็นผลตอบสนองสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่เปลี่ยนแปลงจาก 0 PU ถึง 1 PU ใน 4 วินาที และเปลี่ยนแปลงจาก 1 PU ถึง 0 PU ใน 4 วินาที ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นตลอดการติดตามสัญญาณอ้างอิงที่เป็นรูปสามเหลี่ยม และค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นเป็นค่าคงที่ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากภาพที่ 49



ภาพที่ 49 ผลตอบสนองสัญญาณสามเหลี่ยม

วิจารณ์

วิจารณ์ผลการจำลองการทำงาน

ผลการจำลองการหาค่าพารามิเตอร์แสดงให้เห็นว่า การหาค่าพารามิเตอร์แบบวิธีพีชคณิตสามารถหาค่าจริงของพารามิเตอร์ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณค่าได้และค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นในตารางที่ 4 การหาค่าพารามิเตอร์นั้นสามารถหาค่าได้อย่างรวดเร็วนั้นเกิดจากค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหาค่านั้นไม่ขึ้นอยู่กับเวลา หมายถึง ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหานั้นขึ้นอยู่กับสัญญาณทางไฟฟ้าและสัญญาณทางกลที่วัดเข้ามาได้

ผลการจำลองการทำงานของตัวควบคุมกระแสแบบพีไอ และแบบคงทนนั้น แสดงผลให้เห็นถึงประสิทธิภาพของตัวควบคุมกระแสแบบพีไอ ว่าไม่เพียงพอที่จะควบคุมกระแสของมอเตอร์ให้เป็นไปตามสัญญาณอ้างอิง เนื่องจากค่า integral absolute error ของตัวควบคุมแบบพีไอ มีค่ามากกว่าตัวควบคุมแบบคงทนที่เวลาเดียวกัน และค่า integral absolute error มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องมาจากสัญญาณกระแสอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงค่าตลอดเวลา จึงทำให้เกิดค่าความผิดพลาดในช่วงช่วงขณะของการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอ้างอิง

ผลการจำลองการทำงานของตัวควบคุมความเร็วแบบพีไอ และตัวควบคุมกระแสเป็นแบบพีไอและ ตัวควบคุมกระแสแบบคงทน จากผลการทดลองของตัวควบคุมความเร็วและตัวควบคุมกระแสเป็นแบบพีไอ นั้นให้ผลที่ได้คือ มีค่า rise time, settling time และผลตอบสนองต่อโหลด ที่ช้ากว่าตัวควบคุมกระแสที่เป็นแบบคงทน เนื่องจากตัวควบคุมกระแสแบบพีไอนั้น ไม่มีตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า และตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้าแบบตัดสัญญาณรบกวน จึงทำให้ตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงได้ช้ากว่าตัวควบคุมกระแสแบบคงทน

วิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองการระบุค่าพารามิเตอร์นั้นใช้วิธีวัดผลตอบสนองกระแสเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่หาได้ในวิธีนี้เพียงพอที่จะนำไปออกแบบตัวควบคุมกระแสแบบคงทน

ผลการทดลองตัวควบคุมความเร็วแบบพีไอ สามารถตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงได้แต่จะมีค่าความผิดพลาดที่เป็นค่าคงที่ตอนสัญญาณอ้างอิงมีค่าความชันคงที่ และเมื่อทำการใส่โหลดโดยการใช่มือจับที่โรเตอร์เพื่อให้ความเร็วลดลงตัวควบคุมความเร็วเพียงอย่างเดียวนั้นไม่สามารถตอบสนองต่อโหลดได้เนื่องจากความเร็วมีค่าความผิดพลาดคงที่

ผลการทดลองตัวควบคุมความเร็วและกระแสแบบพีไอ สามารถตอบสนองสัญญาณอ้างอิงได้แต่จะมีค่าความผิดพลาดที่เป็นค่าคงที่ตอนสัญญาณอ้างอิงมีค่าความชันคงที่ และเมื่อทำการใส่โหลดโดยการใช่มือจับที่โรเตอร์เพื่อให้ความเร็วลดลงและสามารถตอบสนองต่อโหลดได้



สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยและพัฒนาตัวควบคุมมอเตอร์ ที่ต้องอาศัยการเขียนโปรแกรมเพื่อให้สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ ซึ่งการที่จะให้โปรแกรมนั้นทำงานได้ตามที่ต้องการนั้นต้องอาศัยปัจจัยหลายๆอย่าง เช่น การจัดการงานของการเขียนโปรแกรม ความเร็วของไมโครคอนโทรลเลอร์ ความซับซ้อนอัลกอริทึมที่ใช้ใน โปรแกรม ในงานวิจัยนี้ ปัญหาที่พบก็จะเป็นปัญหาที่ต้องคำนวณกระแสสามเฟสในเวลาเดียวกัน โดยที่ตัวควบคุมกระแสในแต่ละเฟสนั้น ก็จะมีตัวควบคุมสามตัว ดังนั้น เมื่อต้องการควบคุมกระแสทั้งสามเฟสก็จะประกอบไปด้วยตัวควบคุมทั้งหมด 9 ตัว ซึ่งยากต่อการจัดการที่จะทำให้เสร็จภายในเวลาที่กำหนด และเนื่องมาจากการทำงานวิจัยต้องมีการแสดงผล การรับค่าจากอินพุตภายนอก จึงทำให้ไมโครในงานวิจัยนี้มี GPIO ไม่เพียงพอ

เพื่อพัฒนาให้งานวิจัยให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น สมควรเพิ่มขนาดของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อให้สามารถจัดการกับงานที่ต้องทำให้ได้ในเวลาที่ต้องการ และให้มี GPIO ให้เพียงพอต่อการใช้งานที่หลากหลาย ส่วนที่สำคัญอีกอย่างในงานวิจัยคือแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้สำหรับมอเตอร์ เนื่องจากเมื่อป้อนสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณขั้นบันได เพื่อให้มอเตอร์นั้นตอบสนองได้ทันจึงต้องการกระแสสูงในช่วงเริ่มต้นการทำงานของมอเตอร์ ส่วนสัญญาณอ้างอิงที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูและรูปสามเหลี่ยมนั้น มอเตอร์ไม่ต้องการกระแสที่สูงก็สามารถตอบสนองได้ทัน

สำหรับตัวควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนั้นจะเห็นความแตกต่างในการทำงานช่วงเวลาชั่วขณะ เนื่องจากการควบคุมความเร็วเพียงอย่างเดียวนั้น จะมีปัญหาการเริ่มเดินมอเตอร์เนื่องจากต้องการกระแสสูงกว่าตัวควบคุม ที่ทำการควบคุมความเร็วและกระแส

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Chen, H.C., M.S. Huang, C.M. Liaw, Y.C. Chang, P.Y. Yu and J.M. Huang. 2000. Robust Current Control for Brushless Dc Motors. **IEE Proc.-Electro. Power Appl** (147): 503-512.
- Liaw, C.M. and S.J. Chiang. 1993. Robust Control of Current-Mode Controlled Converters. **Appl. Power Electron Conf and Expo** : 45-751.
- Cortés-Romero, J.A., A. Luviano-Juárez, R. Álvarez-Salas and H. Sira-Ramírez. 2010. Fast Identification and Control of an Uncertain Brushless DC Motor Using Algebraic Methods. **IEEE Conf. Power Electron Congr** : 9-14.
- Kazmierowski, M.P. and L. Malesani. 1998. Current Control techniques for three phase voltage-source PWM converter : a survey. **IEEE Trans. Ind. Electron** : 691-703.
- Fliess, M. and H. Sira-Ramírez. 2003. An algebraic framework for linear identification, **ESAIM, Control, Optimization and Calculus of Variations** (9): 151-168.
- Baldursson, S. 2005. **BLDC Motor Modelling and Control – A Matlab®/Simulink® Implementation**. M.S. Thesis, Institutionen för Energi och Miljö., Sverige.
- Brown, W. 2002. **Brushless DC Motor Control Made Easy**. Microchip Technology Inc.
- Jani, Y. 2006. **Implementing Embedded Speed Control for Brushless DC Motors: Part 1**. Available Source: <http://www.eetimes.com/design/embedded/4006773/Implementing-Embedded-Speed-Control-for-Brushless-DC-Motors-Part-1>, April 18, 2011.

Jani, Y. 2007. **Implementing Embedded Speed Control for Brushless DC Motors: Part 2.**

Available Source: <http://www.eetimes.com/design/embedded/4006777/Implementing-Embedded-Speed-Control-for-Brushless-DC-Motors-Part-2>, April 18, 2011.

Jani, Y. 2007. **Implementing Embedded Speed Control for Brushless DC Motors: Part 3.**

Available Source: <http://www.eetimes.com/design/embedded/4006779/Implementing-Embedded-Speed-Control-for-Brushless-DC-Motors-Part-3>, April 18, 2011.

Sen, P.C. 1996. **Principles of Electric Machines AND Power Electronics.** 2nd ed. John Wiley and Sons, Inc., Canada.

Phillips, C. L. and R. D. Harbor. 2000. **Feedback Control Systems.** 4th ed. Prentice Hall., Upper Saddle River, New Jersey.



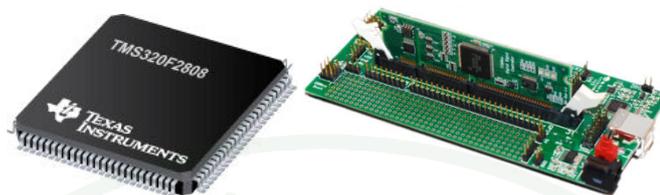
ภาคผนวก

เนื้อหาในภาคผนวกจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆดังนี้

1. Data sheet ของ microcontroller
2. ลายวงจรที่ใช้ในงานวิจัย
3. การเขียนโปรแกรมในงานวิจัย



Data sheet ของไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพผนวกที่ 1 ภาพของไมโครคอนโทรลเลอร์

ตารางผนวกที่ 1 ตารางคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์

FEATURE	F2808
Instruction Cycle (at 100 MHz)	10ns
Single-access RAM (SARAM) (16-bit word)	18K (L0, L1, M0, M1, H0)
3.3V on-chip flash (16-bit word)	64K
On-chip ROM (16-bit word)	-
Code security for on chip flash/SARAM/OTP blocks	Yes
Boot ROM (4K x 16)	Yes
One-time programmable (OTP) ROM (16-bit word)	1K
PWM outputs	ePWM1/2/3/4/5/6
HRPWM channels	ePWM1A/2A/3A/4A
32-bit CAPTURE inputs or auxiliary PWM outputs	eCAP1/2/3/4
32-bit QEP channels (four inputs/channels)	eQEP1/2
Watchdog timer	Yes
12-Bit, 16-channel ADC conversion time	160 ns
32-bit cpu timers	3
Serial Peripheral Interface (SPI)	SPI-A/B/C/D
Serial Communications Interface (SCI)	SCI-A/B
Enhanced Controller Area Network (eCAN)	eCAN-A/B
Inter Integrated Circuit (I2C)	I2C-A
Digital I/O pins (shared)	35
External interrupts	3

Datasheet แผ่นแรกของไอซีเบอร์ 24LC16B



24LC16B

16K I²C™ Serial EEPROM Extended (M) Operating Temperatures

Device Selection Table

Part Number	Vcc Range	Max. Clock Frequency	Temp. Ranges
24LC16B	2.5-5.5	400 kHz	M

Note 1: 100 kHz for Vcc < 2.5V.

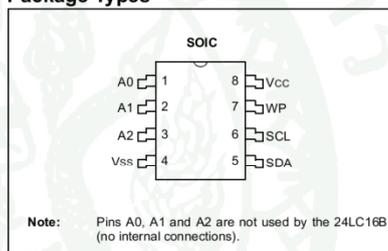
Features:

- Single Supply with Operation down to 2.5V
- Low-Power CMOS Technology:
 - Active current 1 mA, typical
 - Standby current, 1 μ A, typical
- 2-Wire Serial Interface, I²C™ Compatible
- Schmitt Trigger inputs for Noise Suppression
- Output Slope Control to eliminate Ground Bounce
- 100 kHz and 400 kHz Clock Compatibility
- Page Write Time 5 ms Max.
- Self-Timed Erase/Write Cycle
- 16-Byte Page Write Buffer
- Hardware Write-Protect
- ESD Protection > 4,000V
- More than 1 Million Erase/Write Cycles
- Data Retention > 200 Years
- Factory Programming Available
- Pb-Free and RoHS Compliant
- Temperature Ranges:
 - Extended (M): -55°C to +125°C

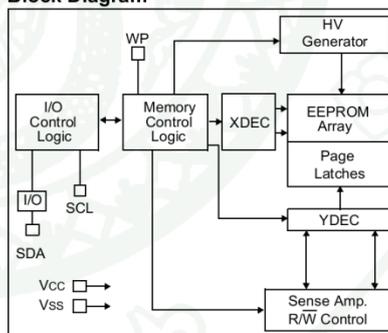
Description:

The Microchip Technology Inc. 24LC16B is a 16 Kbit Electrically Erasable PROM. The device is organized as eight blocks of 256 x 8-bit memory with a 2-wire serial interface. Low-voltage design permits operation down to 2.5V with standby and active currents of only 1 μ A and 1 mA, respectively. The 24LC16B also has a page write capability for up to 16 bytes of data. The 24LC16B is available in the standard 8-pin SOIC package.

Package Types



Block Diagram



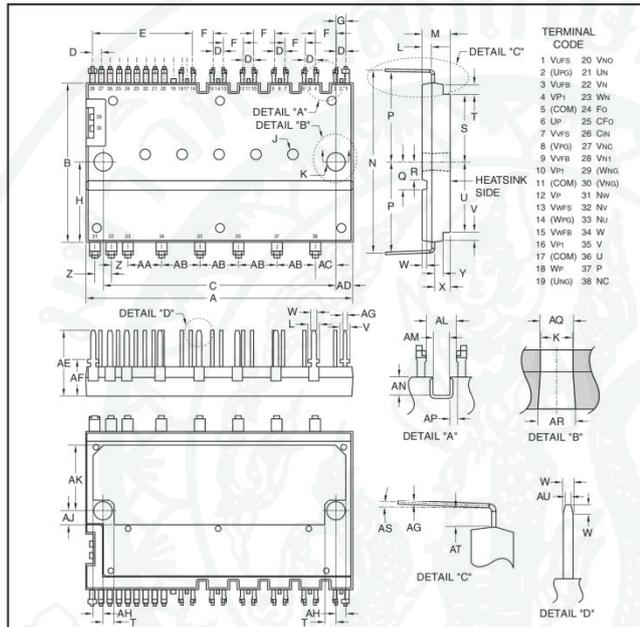
Datasheet แผ่นแรกของ IPM PS21765



Powerex, Inc., 173 Pavilion Lane, Youngwood, Pennsylvania 15697 (724) 925-7272

PS21765

Intellimod™ Module
Dual-In-Line Intelligent
Power Module
20 Amperes/600 Volts



Description:
DIP-IPMs are intelligent power modules that integrate power devices, drivers, and protection circuitry in an ultra compact dual-in-line transfer-mold package for use in driving small three phase motors. Use of 5th generation IGBTs, DIP packaging, and application specific HVICs allow the designer to reduce inverter size and overall design time.

- Features:**
- Compact Packages
 - Single Power Supply
 - Integrated HVICs
 - Direct Connection to CPU
 - Reduced R_{th}

- Applications:**
- Refrigerators
 - Air Conditioners
 - Small Servo Motors
 - Small Motor Control

Ordering Information:
PS21765 is a 600V, 20 Ampere short pin DIP Intelligent Power Module.

Outline Drawing and Circuit Diagram

Dimensions	Inches	Millimeters
A	2.07	52.5
B	1.22	31.0
C	1.81±0.008	46.0±0.2
D	0.07±0.008	1.78±0.2
E	0.77	19.58
F	0.17±0.008	4.32±0.2
G	0.08±0.019	2.04±0.3
H	0.61	15.5
J	0.09 Dia. x 0.1 Depth	2.2 Dia. x 2.6 Depth
K	0.13 Dia.	3.3 Dia.
L	0.08	2.0
M	0.22	5.6
N	1.41±0.02	35.9±0.5
P	0.69	17.7
Q	0.216	5.5
R	0.14	3.5
S	0.503	12.78
T	0.09	2.2
U	0.53	13.5
V	0.06	1.5
W	0.04	1.0

Dimensions	Inches	Millimeters
X	0.06	1.55
Y	0.12	3.1±0.1
Z	0.13±0.019	3.3±0.3
AA	0.26±0.019	6.6±0.3
AB	0.3±0.019	7.62±0.3
AC	0.15±0.019	3.95±0.3
AD	0.13	3.25
AE	0.5	12.7
AF	0.28	7.1
AG	0.02	0.5
AH	0.067	1.7
AJ	0.11	2.8
AK	0.51	13.0
AL	0.114	2.9
AM	0.063	1.6
AN	0.068	1.75
AP	0.03	0.75
AQ	0.14 Dia.	3.5 Dia.
AR	0.145 Dia.	3.7 Dia.
AS	0° ~ 5°	
AT	0.078	1.96
AU	0.023	0.6

Rev. 07/07

1

Datasheet แผ่นแรกของไอซีเบอร์ SN54HC595



SN54HC595
SN74HC595

www.ti.com

SCLS041H – DECEMBER 1982 – REVISED NOVEMBER 2009

8-BIT SHIFT REGISTERS WITH 3-STATE OUTPUT REGISTERS

Check for Samples: [SN54HC595](#) [SN74HC595](#)

FEATURES

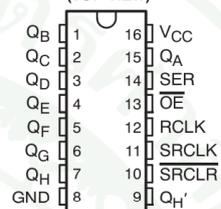
- 8-Bit Serial-In, Parallel-Out Shift
- Wide Operating Voltage Range of 2 V to 6 V
- High-Current 3-State Outputs Can Drive Up To 15 LSTTL Loads
- Low Power Consumption: 80- μ A (Max) I_{CC}
- $t_{pd} = 13$ ns (Typ)
- ± 6 -mA Output Drive at 5 V
- Low Input Current: 1 μ A (Max)
- Shift Register Has Direct Clear

DESCRIPTION

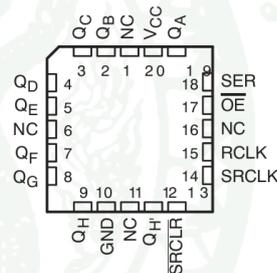
The 'HC595 devices contain an 8-bit serial-in, parallel-out shift register that feeds an 8-bit D-type storage register. The storage register has parallel 3-state outputs. Separate clocks are provided for both the shift and storage register. The shift register has a direct overriding clear (SRCLR) input, serial (SER) input, and serial outputs for cascading. When the output-enable (OE) input is high, the outputs are in the high-impedance state.

Both the shift register clock (SRCLK) and storage register clock (RCLK) are positive-edge triggered. If both clocks are connected together, the shift register always is one clock pulse ahead of the storage register.

SN54HC595...J OR W PACKAGE
SN74HC595...D, DB, DW, N, NS, OR PW PACKAGE
(TOP VIEW)



SN54HC595...FK PACKAGE
(TOP VIEW)



NC – No internal connection



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 1982–2009, Texas Instruments Incorporated

Datasheet แผ่นแรกของไอซีเบอร์ SN65HVD232



SN65HVD230
SN65HVD231
SN65HVD232

www.ti.com

SLOS346K – MARCH 2001 – REVISED FEBRUARY 2011

3.3-V CAN TRANSCEIVERS

Check for Samples: [SN65HVD230](#), [SN65HVD231](#), [SN65HVD232](#)

FEATURES

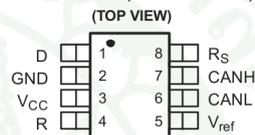
- Operates With a 3.3-V Supply
- Low Power Replacement for the PCA82C250 Footprint
- Bus/Pin ESD Protection Exceeds 16 kV HBM
- High Input Impedance Allows for 120 Nodes on a Bus
- Controlled Driver Output Transition Times for Improved Signal Quality on the SN65HVD230 and SN65HVD231
- Unpowered Node Does Not Disturb the Bus
- Compatible With the Requirements of the ISO 11898 Standard
- Low-Current SN65HVD230 Standby Mode 370 μ A Typical
- Low-Current SN65HVD231 Sleep Mode 40 nA Typical
- Designed for Signaling Rates⁽¹⁾ up to 1 Megabit/Second (Mbps)
- Thermal Shutdown Protection
- Open-Circuit Fail-Safe Design
- Glitch-Free Power-Up and Power-Down Protection for Hot-Plugging Applications

⁽¹⁾ The signaling rate of a line is the number of voltage transitions that are made per second expressed in the units bps (bits per second).

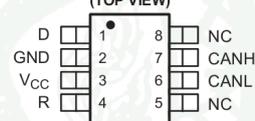
APPLICATIONS

- Motor Control
- Industrial Automation
- Basestation Control and Status
- Robotics
- Automotive
- UPS Control

SN65HVD230D (Marked as VP230)
 SN65HVD231D (Marked as VP231)



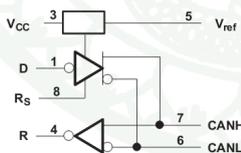
SN65HVD232D (Marked as VP232)



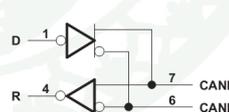
NC – No internal connection

LOGIC DIAGRAM (POSITIVE LOGIC)

SN65HVD230, SN65HVD231
 Logic Diagram (Positive Logic)



SN65HVD232
 Logic Diagram (Positive Logic)

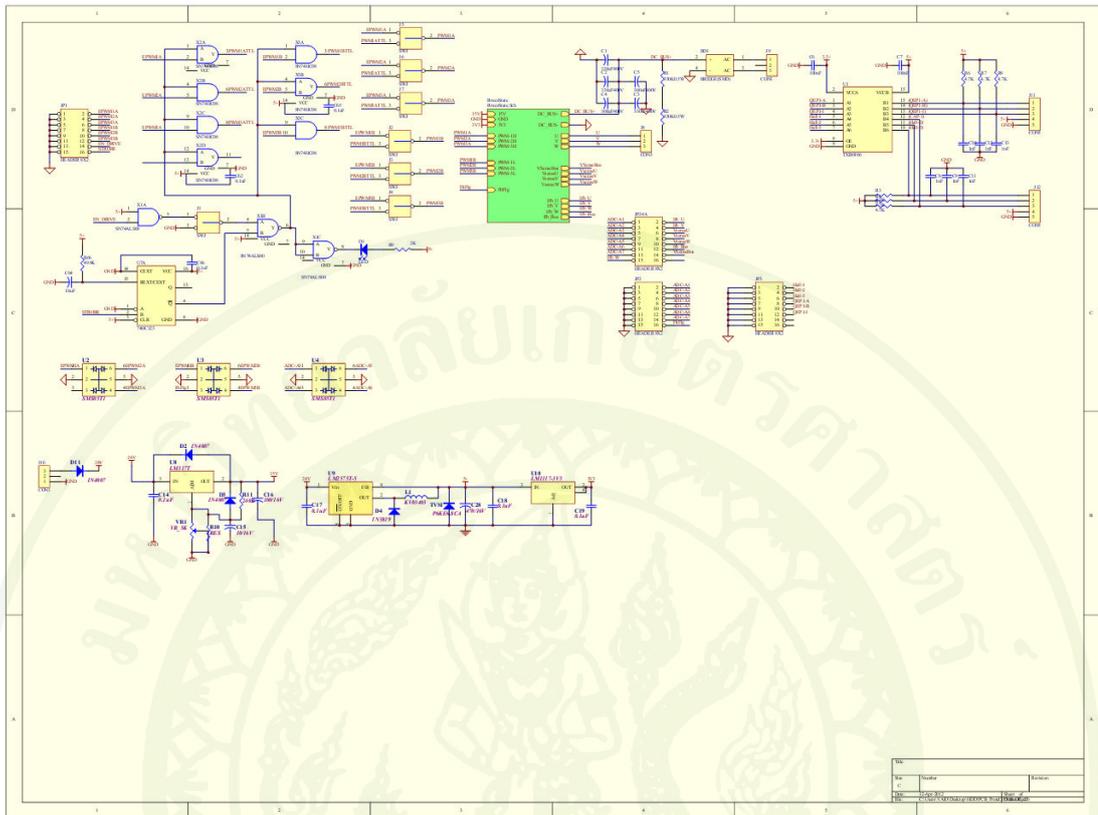


Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

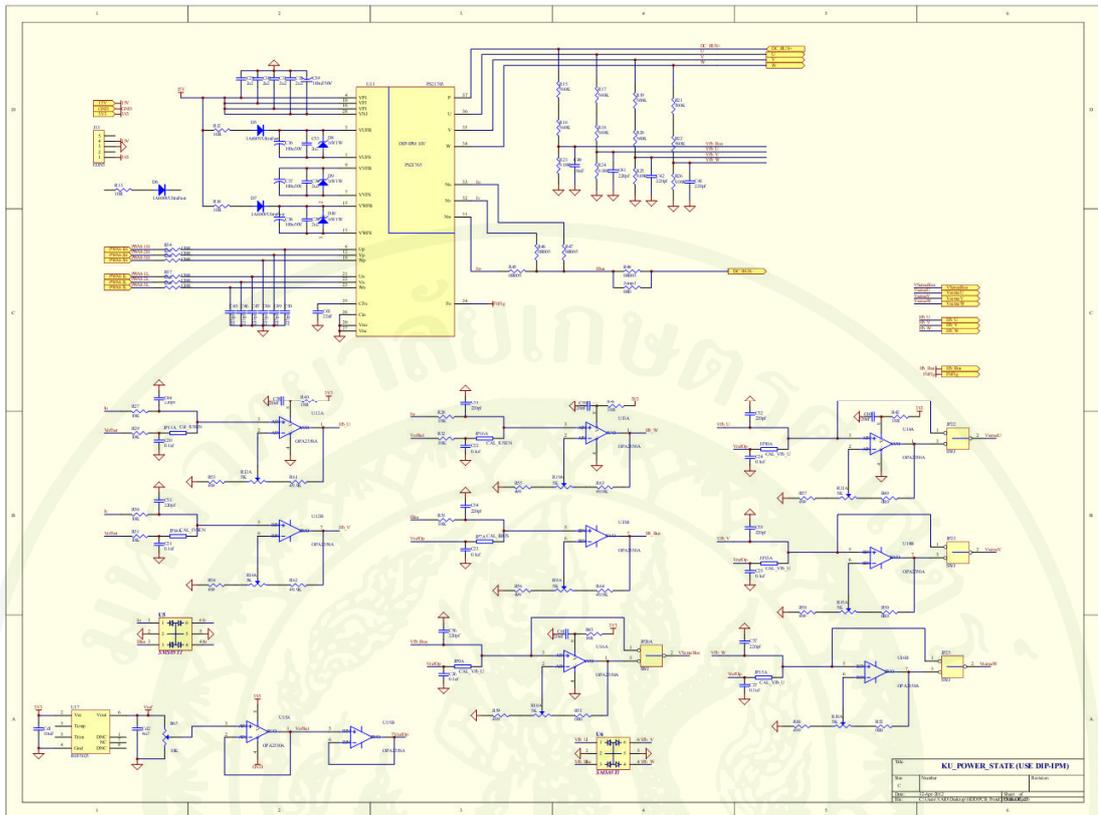
TMS320Lx240x is a trademark of Texas Instruments.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

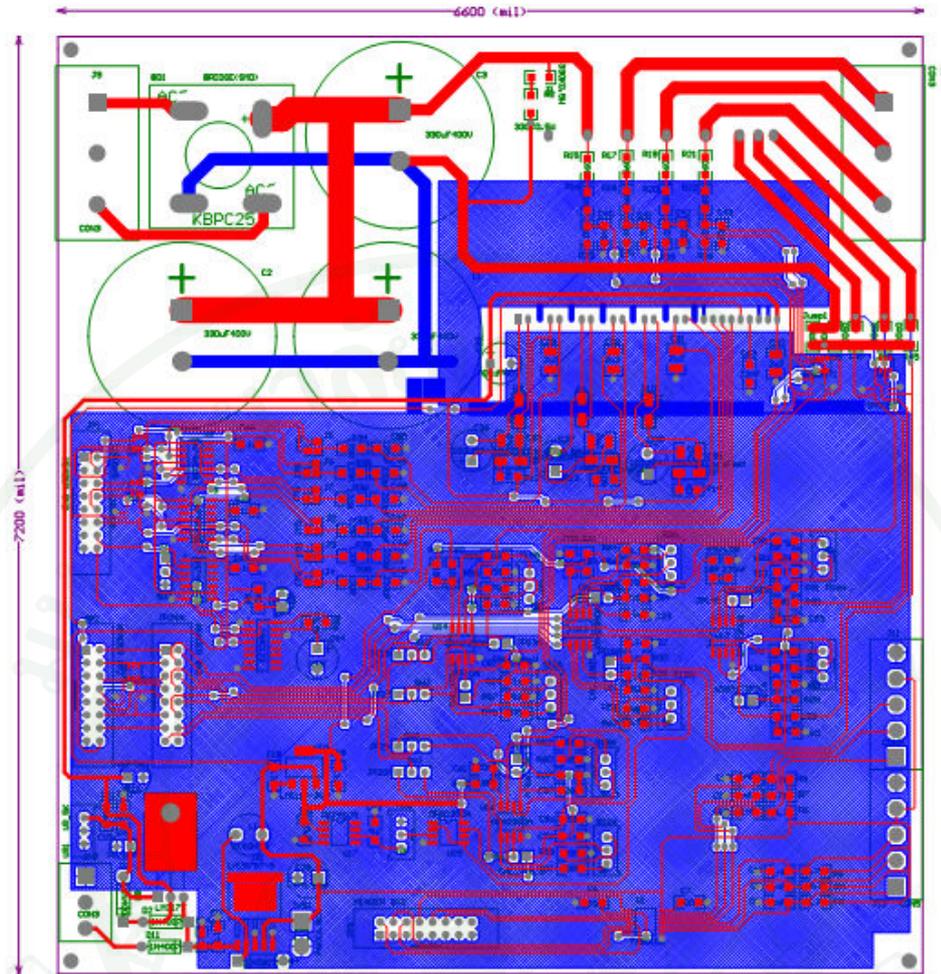
© 2001–2011, Texas Instruments Incorporated



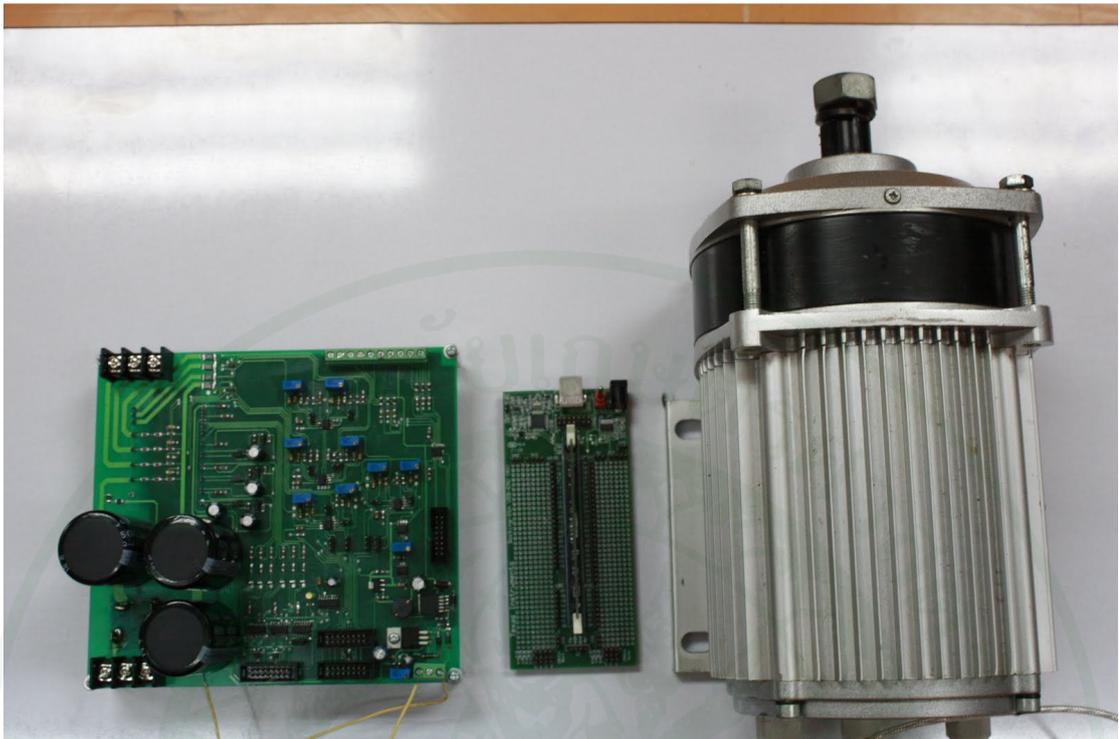
ภาพผนวกที่ 2 ภาพวงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง



ภาพผนวกที่ 3 ภาพวงจร IPM วงจรวัดแรงดันและกระแส



ภาพผนวกที่ 4 ภาพลายวงจร PCB



ภาพผนวกที่ 5 ภาพบอร์ดทดลอง บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และมอเตอร์

ตัวอย่างโปรแกรมที่เขียนในงานวิจัย

```

#define BLDCPWM_INIT_MACRO(v)
    /* Setup Sync*/
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = 0;
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = 0;
    EPwm3Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = 0;
    EPwm4Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = 0;
    EPwm5Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = 0;
    EPwm6Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = 0;

    /* Allow each timer to be sync'ed*/
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.PHSEN = 1;
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.PHSEN = 1;
    EPwm3Regs.TBCTL.bit.PHSEN = 1;
    EPwm4Regs.TBCTL.bit.PHSEN = 1;
    EPwm5Regs.TBCTL.bit.PHSEN = 1;
    EPwm6Regs.TBCTL.bit.PHSEN = 1;

    /* Init Timer-Base Period Register for EPWM1-EPWM3*/
    EPwm1Regs.TBPRD = v.PeriodMax;
    EPwm2Regs.TBPRD = v.PeriodMax;
    EPwm3Regs.TBPRD = v.PeriodMax;

    /* Init Timer-Base Phase Register for EPWM1-EPWM3*/
    EPwm1Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0;
    EPwm2Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0;
    EPwm3Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0;

    /* Init Timer-Base Control Register for EPWM1-EPWM3*/
    EPwm1Regs.TBCTL.all = BLDCPWM_INIT_STATE;
    EPwm2Regs.TBCTL.all = BLDCPWM_INIT_STATE;
    EPwm3Regs.TBCTL.all = BLDCPWM_INIT_STATE;

    /* Init Compare Control Register for EPWM1-EPWM3 */
    EPwm1Regs.CMPCTL.all = BLDCPWM_CMPCTL_INIT_STATE;
    EPwm2Regs.CMPCTL.all = BLDCPWM_CMPCTL_INIT_STATE;
    EPwm3Regs.CMPCTL.all = BLDCPWM_CMPCTL_INIT_STATE;

    /* Init Action Qualifier Output A Register for EPWM1-EPWM3*/
    EPwm1Regs.AQCTLA.all = BLDCPWM_AQCTLA_INIT_STATE;
    EPwm2Regs.AQCTLA.all = BLDCPWM_AQCTLA_INIT_STATE;
    EPwm3Regs.AQCTLA.all = BLDCPWM_AQCTLA_INIT_STATE;

    /* Init Dead-Band Generator Control Register for EPWM1-EPWM3*/
    EPwm1Regs.DBCTL.all = BLDCPWM_DBCTL_INIT_STATE;
    EPwm2Regs.DBCTL.all = BLDCPWM_DBCTL_INIT_STATE;
    EPwm3Regs.DBCTL.all = BLDCPWM_DBCTL_INIT_STATE;

    /* Init PWM Chopper Control Register for EPWM1-EPWM3*/
    EPwm1Regs.PCCTL.all = BLDCPWM_PCCTL_INIT_STATE;
    EPwm2Regs.PCCTL.all = BLDCPWM_PCCTL_INIT_STATE;
    EPwm3Regs.PCCTL.all = BLDCPWM_PCCTL_INIT_STATE;

EALLOW;          /* Enable EALLOW */
/* Setting six EPWM as primary output pins*/
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO0 = 1;          /* EPWM1A pin*/
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO1 = 1;          /* EPWM1B pin*/
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO2 = 1;          /* EPWM2A pin*/
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO3 = 1;          /* EPWM2B pin*/
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO4 = 1;          /* EPWM3A pin*/
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO5 = 1;          /* EPWM3B pin*/

EDIS;          /* Disable EALLOW*/

```

```

#define BLDCPWM_MACRO(v) /* */
/* Convert "Period" (Q15) modulation function to Q0 */
Tmp = (int32)v.PeriodMax*(int32)v.MfuncPeriod; /* Q15 = Q0xQ15 */
Period = (int16)(Tmp>>15); /* Q15 -> Q0 (Period) */

/* Check PwmActive setting */
if (v.PwmActive==1) /* PWM active high */
    GPRO_BLDC_PWM = 0x7FFF - v.DutyFunc; /* */
else if (v.PwmActive==0) /* PWM active low */
    GPRO_BLDC_PWM = v.DutyFunc; /* */

/* Convert "DutyFunc" or "GPRO_BLDC_PWM" (Q15) duty modulation function to Q0 */
Tmp = (int32)Period*(int32)GPRO_BLDC_PWM; /* Q15 = Q0xQ15 */

/* State s1: current flows to motor windings from phase A->B, de-energized phase = C */
if (v.CmntnPointer==0)
{
    EPwm1Regs.AQCSFRC.bit.CSFA = 0; /* Forcing disabledd on output A of EPWM1 */
    EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAU = 2; /* Set high when CTR = CMPA on UP-count */
    EPwm1Regs.AQCTLA.bit.ZRO = 1; /* Set low when CTR = Zero */
    EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = (int16)(Tmp>>15); /* PWM signal on output A of EPWM1 (Q15 -> Q0) */
    EPwm1Regs.AQCSFRC.bit.CSFB = 1; /* Forcing a continuous Low on output B of EPWM1 */
    EPwm2Regs.AQCSFRC.bit.CSFA = 1; /* Forcing a continuous Low on output A of EPWM2 */
    EPwm2Regs.AQCSFRC.bit.CSFB = 2; /* Forcing a continuous High on output B of EPWM2 */
    EPwm3Regs.AQCSFRC.bit.CSFA = 1; /* Forcing a continuous Low on output A of EPWM3 */
    EPwm3Regs.AQCSFRC.bit.CSFB = 1; /* Forcing a continuous Low on output B of EPWM3 */
}

/* State s2: current flows to motor windings from phase A->C, de-energized phase = B */
else if (v.CmntnPointer==1)
{
    EPwm1Regs.AQCSFRC.bit.CSFA = 0; /* Forcing disabledd on output A of EPWM1 */
    EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAU = 2; /* Set high when CTR = CMPA on UP-count */
    EPwm1Regs.AQCTLA.bit.ZRO = 1; /* Set low when CTR = Zero */
    EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = (int16)(Tmp>>15); /* PWM signal on output A of EPWM1 (Q15 -> Q0) */
    EPwm1Regs.AQCSFRC.bit.CSFB = 1; /* Forcing a continuous Low on output B of EPWM1 */
    EPwm2Regs.AQCSFRC.bit.CSFA = 1; /* Forcing a continuous Low on output A of EPWM2 */
    EPwm2Regs.AQCSFRC.bit.CSFB = 1; /* Forcing a continuous Low on output B of EPWM2 */
    EPwm3Regs.AQCSFRC.bit.CSFA = 1; /* Forcing a continuous Low on output A of EPWM3 */
    EPwm3Regs.AQCSFRC.bit.CSFB = 2; /* Forcing a continuous High on output B of EPWM3 */
}

/* State s3: current flows to motor windings from phase B->C, de-energized phase = A */
else if (v.CmntnPointer==2)
{
    EPwm1Regs.AQCSFRC.bit.CSFA = 1; /* Forcing a continuous Low on output A of EPWM1 */
    EPwm1Regs.AQCSFRC.bit.CSFB = 1; /* Forcing a continuous Low on output B of EPWM1 */
    EPwm2Regs.AQCSFRC.bit.CSFA = 0; /* Forcing disabledd on output A of EPWM2 */
    EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAU = 2; /* Set high when CTR = CMPA on UP-count */
    EPwm2Regs.AQCTLA.bit.ZRO = 1; /* Set low when CTR = Zero */
    EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = (int16)(Tmp>>15); /* PWM signal on output A of EPWM2 (Q15 -> Q0) */
    EPwm2Regs.AQCSFRC.bit.CSFB = 1; /* Forcing a continuous Low on output B of EPWM2 */
    EPwm3Regs.AQCSFRC.bit.CSFA = 1; /* Forcing a continuous Low on output A of EPWM3 */
    EPwm3Regs.AQCSFRC.bit.CSFB = 2; /* Forcing a continuous High on output B of EPWM3 */
}

```

```

/* State s4: current flows to motor windings from phase B->A, de-energized phase = C */
else if (v.CmntnPointer==3)
{
    EPwm1Regs.AQCSFRC.bit.CSFA = 1; /* Forcing a continuous Low on output A of EPWM1 */
    EPwm1Regs.AQCSFRC.bit.CSFB = 2; /* Forcing a continuous High on output B of EPWM1 */

    EPwm2Regs.AQCSFRC.bit.CSFA = 0; /* Forcing disabled on output A of EPWM2 */
    EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAU = 2; /* Set high when CTR = CMPA on UP-count */
    EPwm2Regs.AQCTLA.bit.ZRO = 1; /* Set low when CTR = Zero */
    EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = (int16)(Tmp>>15); /* PWM signal on output A of EPWM2 (Q15 -> Q0) */
    EPwm2Regs.AQCSFRC.bit.CSFB = 1; /* Forcing a continuous Low on output B of EPWM2 */

    EPwm3Regs.AQCSFRC.bit.CSFA = 1; /* Forcing a continuous Low on output A of EPWM3 */
    EPwm3Regs.AQCSFRC.bit.CSFB = 1; /* Forcing a continuous Low on output B of EPWM3 */
}

/* State s5: current flows to motor windings from phase C->A, de-energized phase = B */
else if (v.CmntnPointer==4)
{
    EPwm1Regs.AQCSFRC.bit.CSFA = 1; /* Forcing a continuous Low on output A of EPWM1 */
    EPwm1Regs.AQCSFRC.bit.CSFB = 2; /* Forcing a continuous High on output B of EPWM1 */

    EPwm2Regs.AQCSFRC.bit.CSFA = 1; /* Forcing a continuous Low on output A of EPWM2 */
    EPwm2Regs.AQCSFRC.bit.CSFB = 1; /* Forcing a continuous Low on output B of EPWM2 */

    EPwm3Regs.AQCSFRC.bit.CSFA = 0; /* Forcing disabled on output A of EPWM3 */
    EPwm3Regs.AQCTLA.bit.CAU = 2; /* Set high when CTR = CMPA on UP-count */
    EPwm3Regs.AQCTLA.bit.ZRO = 1; /* Set low when CTR = Zero */
    EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = (int16)(Tmp>>15); /* PWM signal on output A of EPWM3 (Q15 -> Q0) */
    EPwm3Regs.AQCSFRC.bit.CSFB = 1; /* Forcing a continuous Low on output B of EPWM3 */
}

/* State s6: current flows to motor windings from phase C->B, de-energized phase = A */
else if (v.CmntnPointer==5)
{
    EPwm1Regs.AQCSFRC.bit.CSFA = 1; /* Forcing a continuous Low on output A of EPWM1 */
    EPwm1Regs.AQCSFRC.bit.CSFB = 1; /* Forcing a continuous Low on output B of EPWM1 */

    EPwm2Regs.AQCSFRC.bit.CSFA = 1; /* Forcing a continuous Low on output A of EPWM2 */
    EPwm2Regs.AQCSFRC.bit.CSFB = 2; /* Forcing a continuous High on output B of EPWM2 */

    EPwm3Regs.AQCSFRC.bit.CSFA = 0; /* Forcing disabled on output A of EPWM3 */
    EPwm3Regs.AQCTLA.bit.CAU = 2; /* Set high when CTR = CMPA on UP-count */
    EPwm3Regs.AQCTLA.bit.ZRO = 1; /* Set low when CTR = Zero */
    EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = (int16)(Tmp>>15); /* PWM signal on output A of EPWM3 (Q15 -> Q0) */
    EPwm3Regs.AQCSFRC.bit.CSFB = 1; /* Forcing a continuous Low on output B of EPWM3 */
}

/*-----
PID Macro Definition
-----*/

#define PID_MACRO(v)
v.Err = v.Ref - v.Fdb; /* Compute the error */
v.Up = _IQmpy(v.Kp,v.Err); /* Compute the proportional output */
v.Ui = v.Ui + _IQmpy(v.Ki,v.Up) + _IQmpy(v.Kc,v.SatErr); /* Compute the integral output */
v.OutPreSat = v.Up + v.Ui; /* Compute the pre-saturated output */
v.Out = _IQsat(v.OutPreSat, v.OutMax, v.OutMin); /* Saturate the output */
v.SatErr = v.Out - v.OutPreSat; /* Compute the saturate difference */
v.Up1 = v.Up; /* Update the previous proportional output */
#endif // __PIDREG3_H

```

```

// Initialize the PID_REG3 module for speed
pid1_spd.Kp = _IQ(0.5);
pid1_spd.Ki = _IQ(T/0.05);
pid1_spd.Kd = _IQ(0/T);
pid1_spd.Kc = _IQ(0.1);
pid1_spd.OutMax = _IQ(1);
pid1_spd.OutMin = _IQ(0);

// Initialize the PID_REG3 module for Ia
pid1_HysIa.Kp = _IQ(1.5);
pid1_HysIa.Ki = _IQ(T/0.0055);
pid1_HysIa.Kd = _IQ(0/T);
pid1_HysIa.Kc = _IQ(0.05);
pid1_HysIa.OutMax = _IQ(1);
pid1_HysIa.OutMin = _IQ(0);

// Initialize the PID_REG3 module for Ib
pid1_HysIb.Kp = _IQ(1.5);
pid1_HysIb.Ki = _IQ(T/0.0055);
pid1_HysIb.Kd = _IQ(0/T);
pid1_HysIb.Kc = _IQ(0.05);
pid1_HysIb.OutMax = _IQ(1);
pid1_HysIb.OutMin = _IQ(0);

// Initialize the PID_REG3 module for Ic
pid1_HysIc.Kp = _IQ(1.5);
pid1_HysIc.Ki = _IQ(T/0.0055);
pid1_HysIc.Kd = _IQ(0/T);
pid1_HysIc.Kc = _IQ(0.05);
pid1_HysIc.OutMax = _IQ(1);
pid1_HysIc.OutMin = _IQ(0);

/*-----*/
HALL3_INIT Macro Definition
/*-----*/
#define HALL3_INIT_MACRO(v)
    EALLOW; /* Enable EALLOW*/
    /* Configure ECAP1/2/3 as GPIO-inputs (GPIO24/25/26 or GPIO24/13/14) for Piccolo B & A*/
    GpioCtrlRegs.GPAMUX2.bit.GPIO27 = 0; /* GPIO24 is ECAP4 - A */
    GpioCtrlRegs.GPAMUX2.bit.GPIO25 = 1; /* GPIO25 is ECAP2 - B */
    GpioCtrlRegs.GPAMUX2.bit.GPIO26 = 0; /* GPIO26 is ECAP3 - C */
    /* GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO13 = 0; /* GPIO14 is ECAP2 - B */
    /* GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO14 = 0; /* GPIO15 is ECAP3 - C */

    /* Config GPIO24/25/26/13/14 as inputs*/
    GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO27 = 0; /* GPIO24 is ECAP4 - A */
    GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO25 = 0; /* GPIO25 is ECAP2 - B */
    GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO26 = 0; /* GPIO26 is ECAP3 - C */
    /* GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO13 = 0; /* GPIO13 is ECAP2 - B */
    /* GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO14 = 0; /* GPIO14 is ECAP3 - C */
    EDIS; /* Disable EALLOW*/

HALL3_DETERMINE_STATE_MACRO(v)
v.HallGpioBuffer = v.HallGpio; /* Init with current ECAP/GPIO logic levels*/
v.HallGpioAccepted = v.HallGpio; /* Init with current ECAP/GPIO logic levels*/

```



```

void InitAdcx(void)//A0
{
    //uint8 i=0;

    AdcRegs.ADCTRL1.all = ADC_RESET_FLAG; // Reset the ADC Module
    Delay5ms();
    AdcRegs.ADCTRL3.bit.ADCBGRFDN = 0x3; // Power up bandgap/reference circuitry
    Delay5ms(); // Delay before powering up rest of ADC
    AdcRegs.ADCTRL3.bit.ADCPWDN = 1; // Power up rest of ADC
    Delay5ms();

    AdcRegs.ADCTRL3.bit.ADCCLKPS = 16; // Set up ADCTRL3 register
    AdcRegs.ADCTRL1.all = ADCTRL1_INIT_STATE_BIPOLAR; // Set up ADCTRL1 register
    AdcRegs.ADCTRL2.all = ADCTRL2_INIT_STATE_BIPOLAR; // Set up ADCTRL2 register
    AdcRegs.ADCMAXCONV.bit.MAX_CONV1 = 3; // Specify four conversions
    AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0; // REF
    AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV01 = 1; // Ia
    AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV02 = 2; // Ib
    AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV03 = 3; // Ic
    //AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1 = 1;
    //AdcRegs.ADCTRL2.bit.INT_ENA_SEQ1 = 1;
    AdcRegs.ADCREFSEL.bit.REF_SEL = 0; // Set up the ADC reference select register
    AdcRegs.ADCOFFTRIM.all = 0x0000; // Set up the ADC offset trim register

    // Set up Event Trigger with CNT_zero enable for Time-base of EPWM1
    EPwm1Regs.ETSEL.bit.SOCAEN = 1; // Enable SOCA
    EPwm1Regs.ETSEL.bit.SOCASEL = 1; // Enable CNT_zero event for SOCA
    EPwm1Regs.ETPS.bit.SOCAPRD = 1; // Generate SOCA on the 1st event
    EPwm1Regs.ETCLR.bit.SOCA = 1; // Clear SOCA flag
}

```

การระบุพารามิเตอร์อย่างรวดเร็วและการควบคุมกระแสแบบทนทานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

Fast Parameter Identification and Robust Current Control of Brushless DC Motor

ปริญญา ศรีธานี¹ และพีระยศ แสนโกชวี²

^{1,2}ห้องปฏิบัติการวิจัยทางด้านแมคคาทรอนิกส์ หุ่นยนต์และการควบคุมขนาดเล็ก

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถ.งามวงศ์วาน ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพฯ 10903

โทร 0-2942-8555 ต่อ 1502-4 โทรสาร 0-2942-8555 ต่อ 1550² E-mail : g5214502893@ku.ac.th¹, peerayots@ku.ac.th²

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการระบุพารามิเตอร์อย่างรวดเร็วโดยใช้วิธีการทางพีชคณิต และวิธีควบคุมกระแสแบบทนทานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ซึ่งวิธีที่ใช้หาพารามิเตอร์ของมอเตอร์สามารถหาค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ที่หาค่าได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว วิธีการควบคุมกระแสที่ใช้เป็นวิธีที่ออกแบบง่าย มีประสิทธิภาพสูง ช่วยลดผลกระทบของความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นจากตัวมอเตอร์ต่อผลสนองของมอเตอร์

คำสำคัญ: การระบุพารามิเตอร์, การควบคุมกระแสแบบทนทาน

Abstract

This article describes the fast parameter identification by using algebraic method and the robust current control of Brushless DC motor (BLDC). This identification method is capable of determine fast, and accurate on-line parameter identification. The robust current control method is of easily design with high efficiency. This method reduces the effect from uncertainties of motor parameters to motor response.

Keywords: Identification Parameters, Robust Current Control

1. บทนำ

วิธีการหาค่าพารามิเตอร์หาค่าได้หลายวิธี วิธีที่จะกล่าวถึงนั้นเป็นวิธีที่เรียกว่า วิธีการทางพีชคณิต [1] ที่สามารถหาค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ของมอเตอร์ได้อย่างรวดเร็ว และถูกต้องที่ได้พัฒนาต่อ โดยให้สามารถหาค่าแรงเสียดทานของมอเตอร์ได้ จากนั้นก็มาออกแบบตัวควบคุมกระแส วิธีที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมกระแสนั้นจะใช้วิธีการ

ควบคุมแบบทนทาน [2] ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย มีประสิทธิภาพ ช่วยให้แรงบิดมีความเรียบขึ้น และช่วยลดผลของความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นจากตัวมอเตอร์เอง

ในส่วนตัวต่อไป เป็นการกล่าวถึงสมการมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ส่วนที่ 3 เป็นการระบุค่าพารามิเตอร์โดยวิธีการทางพีชคณิต ส่วนที่ 4 เป็นการออกแบบตัวควบคุมกระแสโดยวิธีทนทาน ส่วนต่อไปเป็นผลการจำลองการทำงานของมอเตอร์ ในส่วนสุดท้ายจะเป็นการสรุปและกิตติกรรมประกาศ

2. สมการมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

สมการทางคณิตศาสตร์มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านสามเฟสที่ต่อกันแบบวาย [3] จะพิจารณาได้ ดังนี้

$$v_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b \quad (1)$$

$$v_{bc} = R(i_b - i_c) + L \frac{d}{dt}(i_b - i_c) + e_b - e_c \quad (2)$$

$$v_{ca} = R(i_c - i_a) + L \frac{d}{dt}(i_c - i_a) + e_c - e_a \quad (3)$$

$$T_e = B\omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L \quad (4)$$

โดยที่ v , i และ e หมายถึงแรงดันเฟสถึงเฟส, กระแสเฟส และแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสตามลำดับในเฟส a , b และ c , ส่วน R คือค่าความต้านทานต่อเฟส, L คือค่าตัวเหนี่ยวนำต่อเฟส, T_e คือแรงบิดทางไฟฟ้า, T_L คือค่าแรงบิดโหลด, J คือค่าความเฉื่อยของโรเตอร์, B คือค่าคงที่ของแรงเสียดทาน และ ω_m เป็นความเร็วของโรเตอร์

จากความสัมพันธ์ของสมการกระแส

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (5)$$

สามารถเขียนเป็นสมการ (1) - (4) ที่จะนำไปหาพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{-R}{L}i_a + \frac{2}{3L}v_{ab} - \frac{1}{3L}e_{ab} \quad (6)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{-B}{J}\omega_m + \frac{1}{J}(T_e - T_L) \quad (7)$$

ในส่วนต่อไปเป็นการนำสมการที่ (6) และสมการที่ (7) มาหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์

3. การระบุพารามิเตอร์แบบออนไลน์

การหาค่าพารามิเตอร์แบบใช้วิธีทางพีชคณิตนั้นได้ถูกนำเสนอโดย Fliess และ Sira-Ramírez [4] ซึ่งมีวิธีการดังนี้

จากสมการที่ (6) นำค่า L, t มาคูณทั้ง 2 ข้างแล้วทำการหาปริพันธ์ทั้งสองข้างของสมการ ผลที่ได้ทั้งหมดจะอยู่บนช่วง $[0, t]$ จะได้

$$\frac{2}{3} \int tv_{ab}dt + \frac{1}{3} \int tv_{bc}dt = L \left(\int t \frac{di_a}{dt} \right) - R \int ti_a dt + k_e \left(\frac{2}{3} \int tE_{ab}dt + \frac{1}{3} \int tE_{bc}dt \right) \quad (8)$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{2}{3} \int tv_{ab}dt + \frac{1}{3} \int tv_{bc}dt = L(ti_a - \int i_a dt) - R \int ti_a dt + k_e \left(\frac{2}{3} \int tE_{ab}dt + \frac{1}{3} \int tE_{bc}dt \right) \quad (9)$$

โดยที่ $E_a = \frac{1}{2}F(\theta_e)\omega_m$, $E_b = \frac{1}{2}F(\theta_e - \frac{2\pi}{3})\omega_m$, $E_{ab} = E_a - E_b$, และฟังก์ชัน $F(\cdot)$ เป็นฟังก์ชันของรูปสามเหลี่ยมคางหมูของแรงดันไฟฟ้าหนึ่งยูนิต มีสมการดังนี้

$$F(\theta_e) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \theta_e < \frac{\pi}{3} \\ \frac{-6(\theta_e - \frac{\pi}{2})}{\pi}, & \frac{\pi}{3} \leq \theta_e < \frac{2\pi}{3} \\ -1, & \frac{2\pi}{3} \leq \theta_e < \frac{4\pi}{3} \\ \frac{6(\theta_e - \frac{3\pi}{2})}{\pi}, & \frac{4\pi}{3} \leq \theta_e < \frac{5\pi}{3} \\ 1, & \frac{5\pi}{3} \leq \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad (10)$$

สมการที่ (9) สามารถเขียนเป็นสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$LA_{e1}(t) - RA_{e2}(t) + k_e A_{e3}(t) = B_e(t) \quad (11)$$

โดยที่ $A_{e1}(t) = (ti_a - \int i_a dt)$, $A_{e2}(t) = \int ti_a dt$,

$$A_{e3}(t) = \left(\frac{2}{3} \int tE_{ab}dt + \frac{1}{3} \int tE_{bc}dt \right)$$

$$B_e(t) = \frac{2}{3} \int tv_{ab}dt + \frac{1}{3} \int tv_{bc}dt$$

กำหนดให้ $x_e = [L \ R \ k_e]^T$ และ $A_e = [A_{e1}(t) \ A_{e2}(t) \ A_{e3}(t)]$ ดังนั้นจะได้สมการเชิงเส้นที่มีลักษณะดังนี้

$$A_e(t)x_e = B_e(t) \quad (12)$$

จากสมการที่ (7) คูณค่า Jt แล้วทำการหาปริพันธ์ทั้งสองข้างของสมการ เมื่อ $T_L = 0$ และ $k_t = k_e$ ผลที่ได้อยู่บนช่วง $[0, t]$ แล้วได้

$$J \int t d\omega_m = -B \int t\omega_m dt + k_t \int tT_{eed} dt \quad (13)$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{J}{k_t}(t\omega_m - \int \omega_m dt) + \frac{B}{k_t} \int t\omega_m dt = \int tT_{eed} dt \quad (14)$$

โดยที่

$$T_{ee} = \frac{1}{2} \left[F(\theta_e)i_a + F(\theta_e - \frac{2\pi}{3})i_b + F(\theta_e - \frac{4\pi}{3})i_c \right]$$

และผลที่ได้ในสมการที่ (14) เขียนเป็นสมการเชิงเส้นจะได้

$$\frac{J}{k_t}A_{m1}(t) + \frac{B}{k_t}A_{m2}(t) = B_m(t) \quad (15)$$

โดยที่ $A_{m1}(t) = (t\omega_m - \int \omega_m dt)$,

$A_{m2}(t) = \int t\omega_m dt$, และ

$B_m(t) = \int tT_{eed} dt$ ต่อมกำหนดให้ $x_m = [\frac{J}{k_t} \ \frac{B}{k_t}]^T$

และ $A_m = [A_{m1}(t) \ A_{m2}(t) \ A_{m3}(t)]$ ดังนั้นจะได้สมการเชิงเส้นที่มีลักษณะดังนี้

$$A_m(t)x_m = B_m(t) \quad (16)$$

การหาค่าที่ทำให้สมการที่ (12) และ (16) มีค่าที่ทำให้เหมาะที่สุดนั้นเสนอให้อยู่ในรูปฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$J(x, t) = \frac{1}{2} \int_0^t \epsilon^2(x, \sigma) d\sigma \quad (17)$$

เมื่อหาค่าน้อยที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้วค่าของ \hat{x} สามารถหาได้จากสมการ

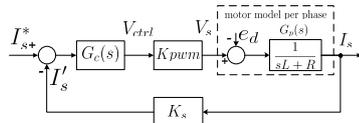
$$\epsilon(x, t) = A(t)x - B(t) \quad (18)$$

$$\hat{x} = \left[\int_0^t A^T(\sigma)A(\sigma) d\sigma \right]^{-1} \int_0^t A^T(\sigma)B(\sigma) d\sigma \quad (19)$$

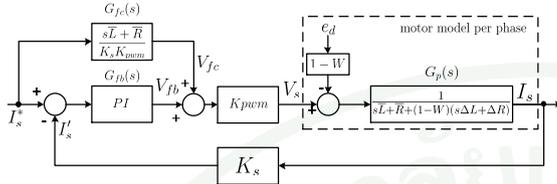
เนื่องจาก \hat{x} ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาทำให้สมการด้านบนใช้ได้สำหรับช่วงเวลาเล็กๆที่นำมาหาปริพันธ์ $[0, \epsilon]$ ที่ $\epsilon > 0$ ดังนั้นจึงทำให้ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าสามารถหาค่าได้ค่อนข้างรวดเร็ว

4. การควบคุมกระแสแบบทันทวน [2]

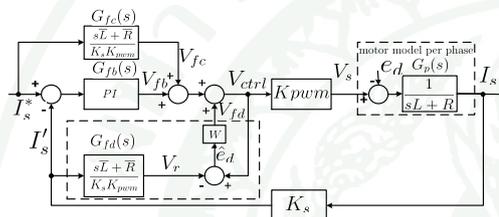
การออกแบบตัวควบคุมกระแสโดยวิธีทันทวนนั้นถูกพัฒนาขึ้นโดย C.M. Liaw และ S.J. Chiang การออกแบบตัวควบคุมกระแสแบบทันทวนจะประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้



รูปที่ 1 แผนภาพบล็อกของการควบคุมกระแสอย่างง่าย



รูปที่ 2 แผนภาพบล็อกตัวควบคุมกระแสแบบทันทันทายง่าย



รูปที่ 3 แผนภาพบล็อกตัวควบคุมกระแสแบบทันทันทาย

4.1 ตัวควบคุมป้อนกลับ

ตัวควบคุมป้อนกลับนั้นใช้เป็นแบบพีไอ มีหน้าที่รักษาเสถียรภาพของระบบมีสมการดังนี้

$$G_{fb}(s) = \frac{sK_p + K_i}{s} \tag{20}$$

หาฟังก์ชันถ่ายโอนของ I'_s/I_s^* จากรูปที่ 2 โดยไม่นำตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้าทั้งสองตัวมาคิดจะได้

$$\frac{I'_s}{I_s^*} = \frac{\bar{K}_{pwm} \bar{K}_s \left(\frac{sK_p + K_i}{sL + R_s} \right)}{s + \bar{K}_{pwm} \bar{K}_s \left(\frac{sK_p + K_i}{sL + R_s} \right)} \tag{21}$$

โดยที่ตัวแปรที่มีขีดอยู่บนตัวอักษรหมายถึงค่าพารามิเตอร์ที่เป็นค่าอนินต์ หลังจากที่ได้เลือก $K_i = K_p \bar{R}_s / L$ สมการที่ (21) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{I'_s}{I_s^*} = \frac{\bar{K}_{pwm} \bar{K}_s K_p \bar{L}}{s + \bar{K}_{pwm} \bar{K}_s K_p \bar{L}} \tag{22}$$

สมการที่ (22) คล้ายฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่มีความถี่ขอบเขตเท่ากับ $f_c = K_p \bar{K}_{pwm} \bar{K}_s / (2\pi \bar{L})$ โดยปกติการเปลี่ยนแปลงของ V_{ctrl} ต้องไม่เร็วกว่าความชันของสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่ไปเปรียบเทียบกับหาสัญญาณแอสวิทซ์ซึ่ง ดังนั้น $f_c = 0.25 f_{tri}$ และจะได้

$$K_p = \frac{\pi f_{tri} \bar{L}}{2 \bar{K}_s \bar{K}_{pwm}}, K_i = \frac{\pi f_{tri} \bar{R}}{2 \bar{K}_s \bar{K}_{pwm}} \tag{23}$$

4.2 ตัวควบคุมป้อนไปหน้า

ตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า มีหน้าที่ทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของ I'_s/I_s^* มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นตัวควบคุมป้อนไปหน้ามีสมการดังนี้

$$G_{fc}(s) = \frac{s\bar{L} + \bar{R}}{K_s \bar{K}_{pwm}} \tag{24}$$

เพื่อให้ผลตอบสนองของสัญญาณกระแสดีกว่าแบบตัวควบคุมป้อนไปหน้าอย่างเดียว จึงเสนอให้ใช้ตัวควบคุมป้อนไปหน้าตัดสัญญาณรบกวนแบบทันทันทาย ซึ่งจะกล่าวต่อไป

4.3 ตัวควบคุมป้อนไปหน้าตัดสัญญาณรบกวนแบบทันทันทาย

ตัวควบคุมป้อนไปหน้าตัดสัญญาณรบกวนแบบทันทันทาย มีหน้าที่ประมาณค่าสัญญาณรบกวนเพื่อไปหักล้างกับสัญญาณรบกวนที่เข้ามาในระบบ และลดผลกระทบของความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับตัวพารามิเตอร์ของมอเตอร์ด้วย สมการดังนี้

$$G_{fd}(s) = \frac{s\bar{L} + \bar{R}}{K_s \bar{K}_{pwm}} \tag{25}$$

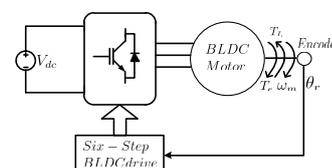
ในส่วนของตัวควบคุมสัญญาณ $V_{fd} = W \hat{e}_d$ สัญญาณควบคุมที่ถูกสร้างขึ้นจะเป็นไปตามสมการนี้

$$V_{ctrl} = V_{fb} + V_{fc} + V_{fd} = V_{fb} + V_{fc} + W \hat{e}_d \tag{26}$$

โดยที่ $W, 0 \leq W \leq 1$ เป็นค่าน้ำหนักที่ปรับเพื่อให้ความสำคัญในการทำงานของตัวควบคุมระหว่างสิ่งที่ต้องการควบคุม และประสิทธิภาพของการควบคุมในรูปที่ 3 นั้นการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ และสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น สามารถลดได้จาก $(W - 1)$ อย่างไรก็ตามเมื่อค่าของ W เข้าใกล้ 1 ค่าสัญญาณควบคุมก็จะเพิ่มตามไปด้วย [5]

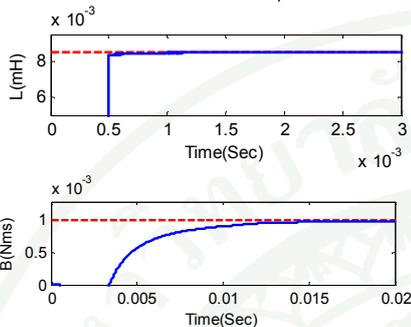
5. ผลจำลองการทำงาน

การจำลองหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ใช้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์และตัวควบคุมดังนี้



รูปที่ 4 แผนภาพบล็อกการระบุค่าพารามิเตอร์

- $V_{dc} = 500 V$
- $\bar{R} = 2.875 \Omega$
- $\bar{L} = 8.5 mH$
- $k_t = 1.4 Nm/A_{peak}$
- $J = 0.0008 kgm^2/s^2$
- $B = 0.001 Nms$
- $P = 8 poles$
- $f_{tri} = 20kHz$
- $K_p = 0.5341$
- $K_i = 180.6416$
- $K_s = 1$
- $K_{pwm} = 500$

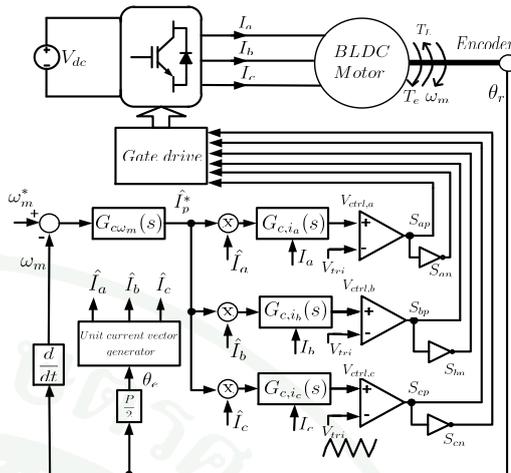


รูปที่ 5 ผลการระบุค่าพารามิเตอร์

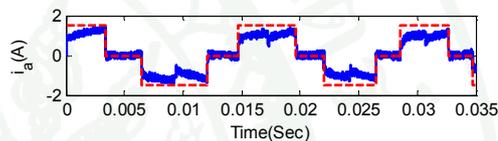
รูปที่ 5 เป็นการจำลองหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ตามรูปที่ 4 ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.02 วินาที ก็ได้ค่าพารามิเตอร์ทุกตัวของมอเตอร์ เส้นประแสดงถึงค่าจริง และเส้นทึบแสดงถึงค่าที่ได้จากการหาโดยวิธีการทางพีชคณิต ซึ่งมีการลู่เข้าค่าจริงได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากพื้นที่ที่มีจำกัดจึงขอแสดงเพียงบางพารามิเตอร์

การควบคุมกระแสใช้แผนภาพบล็อกในรูปที่ 6 ค่าในการจำลอง $R = 0.8\bar{R}$ และ $L = 1.2\bar{L}$ โดยที่ $\hat{i}_p = 1.5$ และ

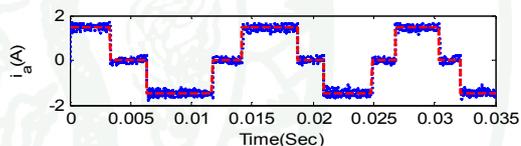
$$\hat{I}_a(\theta_e) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \theta_e < \frac{\pi}{3} \\ 0, & \frac{\pi}{3} \leq \theta_e < \frac{2\pi}{3} \\ -1, & \frac{2\pi}{3} \leq \theta_e < \frac{4\pi}{3} \\ 0, & \frac{4\pi}{3} \leq \theta_e < \frac{5\pi}{3} \\ 1, & \frac{5\pi}{3} \leq \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad (27)$$



รูปที่ 6 แผนภาพบล็อกการควบคุมทั้งหมด

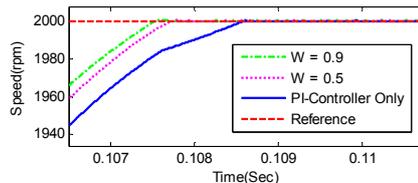
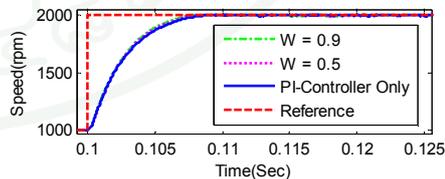


รูปที่ 7 ผลตอบสนองกระแสแบบไฟโอ



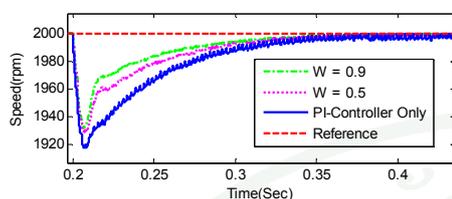
รูปที่ 8 ผลตอบสนองกระแสแบบทันทาน

รูปที่ 7 และ 8 เป็นผลตอบสนองของกระแส เห็นได้ว่าการควบคุมแบบทันทานตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงได้ดี และกระแสมีความเรียบ เนื่องจากผลของการควบคุมแบบป้อนไปหน้าและการควบคุมแบบป้อนไปหน้าตัดสัญญาณรบกวนแบบทันทาน จึงทำให้ค่าความผิดพลาดผลตอบสนองของสัญญาณลดลง



รูปที่ 9 ผลตอบสนองความเร็ว

รูปที่ 9 เป็นรูปผลตอบสนองของความเร็วโดยที่มีการเปรียบเทียบค่า W ค่าต่าง ๆ กัน ซึ่งค่า W ที่มากทำให้ผลตอบสนองที่เร็วกว่าแบบพีไอ



รูปที่ 10 ผลตอบสนองความเร็วที่เพิ่มโหลด

รูปที่ 10 เป็นผลตอบสนองในช่วงที่เพิ่มโหลดเข้าไปในระบบที่เวลา 0.2 วินาที โหลดที่เพิ่มเข้าไปมีค่าเท่ากับ 2 Nm ผลที่ได้ก็คือค่า W ที่มากนั้นตอบสนองต่อโหลดได้ดีกว่าแบบพีไอ เนื่องจากการควบคุมแบบพีไอนั้นไม่สามารถลดผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวนได้

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการระบุพารามิเตอร์อย่างรวดเร็วและการควบคุมกระแสแบบทันทัน การหาพารามิเตอร์อย่างรวดเร็วสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดเนื่องจากการวัดสัญญาณเพื่อนำไประบุค่าพารามิเตอร์ได้ จึงทำให้หาค่าพารามิเตอร์ที่ใกล้เคียงกับค่าจริง หาค่าได้อย่างรวดเร็ว และนำไปใช้จริงได้ง่าย เนื่องจากสมการและวิธีที่ใช้เป็นการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ และพิสูจน์ว่าสมการสามารถหาค่าตอบได้และมีคำตอบเดียว ส่วนการควบคุมกระแสแบบทันทันที่ออกแบบด้วยค่านอมนัลของพารามิเตอร์ สามารถลดผลจากสัญญาณรบกวนของพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า และสัญญาณรบกวนที่เข้ามาในระบบ นอกจากนี้ยังมีส่วนป้องกันไปหน้า และป้องกันกลับที่ทำให้ช่วยตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงได้ดี ดังที่เห็นได้จากผลการจำลองการทำงาน

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนวิจัยเลขที่ IUG5280005 และสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนวิจัยเลขที่ ว-ท(ด)61.54

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.A. Cortés-Romero, A. Luviano-Juárez, R. Álvarez-Salas and H. Sira-Ramírez, "Fast Identification and

Control of an Uncertain Brushless DC Motor Using Algebraic Methods," *IEEE Conf. Power Electron Congr.*, San Luis Potosi, S.L.P. México. 2010, pp. 9-14.

- [2] C.M. Liaw and S.J. Chiang, "Robust Control of Current-Mode Controlled Converters." *Appl. Power Electron Conf and Expo.*, San Diego, CA, USA. 1993, pp. 745-751.
- [3] Stefán Baldursson, "BLDC Motor Modelling and Control - A Matlab® /Simulink® Implementation." *M.S. thesis, Dept. Elect Power. Eng., Chalmers Univ of Technol.*, Gothenburg, Sweden, 2005.
- [4] Michel Filiess and Hebertt Sira-Ramírez, "An Algebraic Framework for Linear Identification," *Esaim Contr. Opt. Calc. Variat.*, Vol. 9, 2003.
- [5] C.M. Liaw and S.J. Chiang, "Robust control of multi-module current-mode controlled converters." *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 8, 1993, pp. 455-465.



ปริญญา ศรีธานี จบการศึกษาระดับปริญญาตรี จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปี พ.ศ. 2552 ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ม.เกษตรศาสตร์ งานวิจัยที่สนใจ คือ ระบบฝังตัว



พีระยศ แสนโกชน์ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ม.เกษตรศาสตร์ ในปี พ.ศ. 2538 ระดับปริญญาโท ทางด้าน

Electrical Engineering จาก University of Michigan ในปี พ.ศ. 2540 ระดับปริญญาโทและเอก ทางด้าน System Science and Mathematics จาก Washington University ในปี พ.ศ. 2542 และ พ.ศ. 2544 ตามลำดับ ปัจจุบันรับราชการที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ม.เกษตรศาสตร์ สาขาที่เชี่ยวชาญ คือ สาขา Optimal Control และ Process Control

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายปริญญา ศรีธานี
เกิดวันที่	2 ธันวาคม 2529
สถานที่เกิด	อำเภอเมืองของแก่น จังหวัดขอนแก่น
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (ไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ (พ.ศ.2551)
ตำแหน่งปัจจุบัน	พนักงานออกแบบ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท ไพรมัส จำกัด
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักกองทุน สนับสนุนการวิจัย ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนวิจัยเลขที่ IUG5280005 และสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่ง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนอุดหนุน วิจัยเลขที่ ว-ท(ด) 61.54