

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสี่ตัวสำหรับการควบคุมความเร็ว
แบบเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2563

**DESIGN OF FOUR PI CONTROLLERS FOR VECTOR
CONTROL OF INDUCTION MOTOR SPEED**



Kunlapong Boonmawong

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

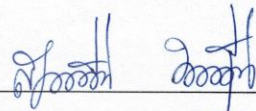
Suranaree University of Technology

Academic Year 2020

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสี่ตัวสำหรับการควบคุมความเร็ว
แบบเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

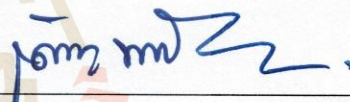


(ผศ. ดร.สุคาร์ตันน์ ขวัญอิน)

ประธานกรรมการ

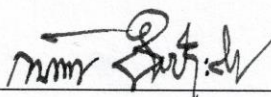


(อ. ดร.วิโรจน์ แสงสงทอง)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและ
พัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กุลพงษ์ บุญมาวงศ์ : การออกแบบตัวควบคุมพีไอสี่ตัวสำหรับการควบคุมความเร็วแบบเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (DESIGN OF FOUR PI CONTROLLERS FOR VECTOR CONTROL OF INDUCTION MOTOR SPEED) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.วิโรจน์ แสงธงทอง, 182 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวพร้อมกัน เพราะระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบเวกเตอร์โดยตรงมีตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวที่ทำหน้าที่ชดเชยพลวัตของตัวแปรสถานะ การออกแบบตัวควบคุมพีไอดังกล่าวคือการคำนวณค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวพร้อมกันโดยตรง ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีสมการปริภูมิสถานะที่มีตัวแปรสถานะ 8 ตัวและมีเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ที่มีค่าไอเกน 8 ค่า เมื่อตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวมีค่าเกนที่ไม่ทราบค่า เมตริกซ์สัมประสิทธิ์จะให้พหุนามคุณลักษณะที่มีสัมประสิทธิ์ที่สัมพันธ์กับค่าเกนที่ไม่ทราบค่า การกำหนดค่าไอเกนลบ 8 ค่าที่ต้องการจะให้พหุนามคุณลักษณะที่ต้องการที่มีสัมประสิทธิ์เป็นตัวเลข การเท่ากันของสัมประสิทธิ์ที่ตรงกันของพหุนามคุณลักษณะทั้งสองจะสร้างระบบสมการไม่เชิงเส้นที่มี 8 สมการและ 8 ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า การหาคำตอบเชิงเลขของระบบสมการไม่เชิงเส้นจะคำนวณค่าเกนโดยตรงและได้รับค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวพร้อมกัน การเขียนโปรแกรมเชิงสัญลักษณ์จะสร้างและจัดแจงพหุนามคุณลักษณะและระบบสมการไม่เชิงเส้น ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกับสมรรถนะของผลตอบสนองความเร็วเพลตาในกรณีที่มีมอเตอร์และโหลดเชิงกลมีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าที่ระบุและแตกต่างจากค่าที่ระบุ เมื่อตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวมีค่าเกนที่ได้รับจากการคำนวณโดยตรง ระบบควบคุมความเร็ววงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพลตาที่มีสมรรถนะดีกว่าสมรรถนะของผลตอบสนองความเร็วเพลตาที่เกิดจากการสุ่มเลือกค่าเกนของตัวควบคุม และเมื่อตัวควบคุมมีค่าเกนที่ได้รับจากการคำนวณโดยตรง ผลการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในลูบจะแสดงถึงความเป็นไปได้ในการเกิดผลตอบสนองความเร็วเพลตาที่มีสมรรถนะสูงในทางปฏิบัติ ถ้าเมตริกซ์สัมประสิทธิ์คือเมตริกซ์เฮอรัวิตซ์ ระบบควบคุมความเร็ววงปิดจะมีแนววิถีสถานะที่มีขอบเขตที่สม่ำเสมอ ถ้าค่าไอเกนลบที่มีขนาดน้อยที่สุดมีขนาดเพิ่ม แนววิถีสถานะจะมีขอบเขตที่แคบลงในสถานะอยู่ตัว

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2563

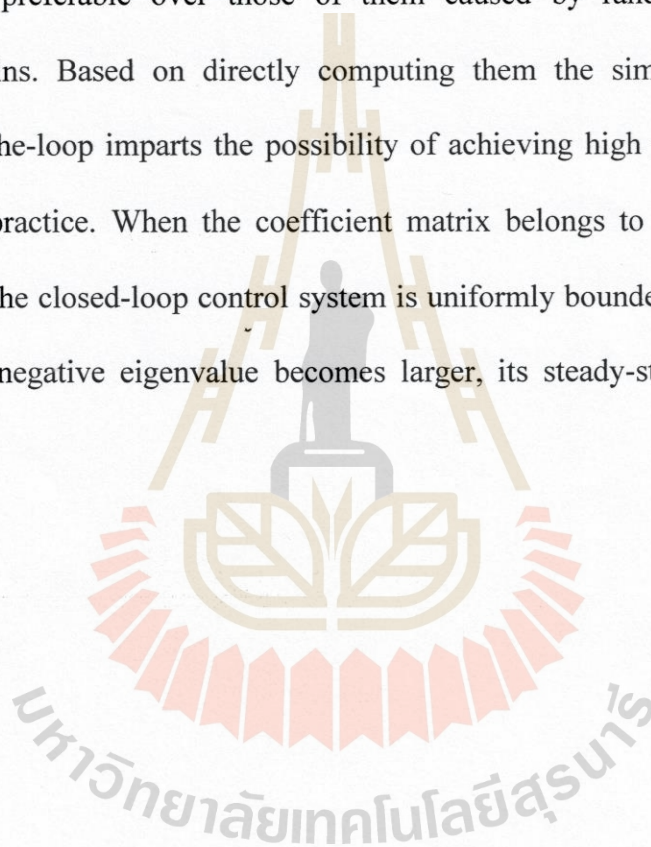
ลายมือชื่อนักศึกษา กุลพงษ์ บุญมาวงศ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา วิโรจน์ แสงธงทอง

KUNLAPONG BOONMAWONG : DESIGN OF FOUR PI CONTROLLERS
FOR VECTOR CONTROL OF INDUCTION MOTOR SPEED. THESIS
ADVISOR : WIROTE SANGTUNGTONG, Ph.D., 182 PP.

VECTOR CONTROL / INDUCTION MOTOR / STATE SPACE EQUATION /
SYMBOLIC PROGRAM / PARAMETER OF INDUCTION MOTOR

This thesis presents and provides a methodology toward designing concurrently four PI controllers. They all compensate dynamics of state variables occurring in the speed control system of a three-phase induction motor under direct vector control. Such a design of the four PI controllers accounts for directly numerical computation that simultaneously solves the eight gains of the four ones. The above closed-loop control system is conducted by the state-space equation with eight state-variables as well as its coefficient matrix pertaining to eight eigenvalues. When the whole gains of the four PI ones get unknown, the characteristic polynomial which involves the implicit coefficients containing the unknown gains will originate from the coefficient matrix. Assignment that places the eight eigenvalues into desirable negative values evaluates the characteristic polynomial which associates with all the explicit numerical coefficients. The method of equating the corresponding coefficients between the two mentioned characteristic polynomials will establish a system of the eight nonlinear equations accompanied by the eight unknowns. Numerical root-finding algorithm determines directly and yields simultaneously every proper gain of the four PI controllers. Symbolic programming realizes and then manipulates the two characteristic polynomials and the system of nonlinear equations. The simulation

results allow the performance of the shaft-speed responses to be compared together when the parameters of the induction motor and its mechanical load match with their corresponding nominal values and when they deviate from their corresponding ones. After all the gains of the four PI controllers are acquired through the direct computation, the closed-loop control system affords the speed responses with their performance preferable over those of them caused by random selection in the controller gains. Based on directly computing them the simulation incorporating hardware-in-the-loop imparts the possibility of achieving high performance of speed response in practice. When the coefficient matrix belongs to the Hurwitz one, the trajectory of the closed-loop control system is uniformly bounded. Furthermore, when the smallest negative eigenvalue becomes larger, its steady-state boundedness will contract.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2020

Student's Signature กฤษณะ วัฒนวิทย์

Advisor's Signature วิไลลักษณ์ อภัยวงศ์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดี ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

อาจารย์ ดร.วิโรจน์ แสงธทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำตักเตือนและแนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงช่วยแก้ไขปัญหา การตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนการค้นหาบทความ ทางวิชาการหรือข้อมูลที่มีความสำคัญยิ่งต่องานวิจัยรวมทั้งการจัดส่งบทความไปยังงาน ประชุมทางวิชาการและวารสารทางวิชาการระดับชาติ

ขอขอบคุณบัณฑิตทุกท่านในกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการ ควบคุม (PEMC) ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา แลกเปลี่ยนความรู้ทางด้านวิชาการตลอดมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ครู อาจารย์ ผู้สอน ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาท วิชาความรู้ทางด้านต่าง ๆ ที่ผ่านมามีในอดีตจนถึงปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้การสนับสนุนการศึกษาและคอยให้กำลังใจกับผู้วิจัยเสมอมา

กุลพงษ์ บุญมาวงศ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น	4
1.4 สมมติฐานการวิจัย	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	5
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 บทนำ	7
2.2 งานวิจัยที่มีเนื้อหาสัมพันธ์กับการปรับคุณค่าแกนของตัวควบคุมพีไอ ในแผนการควบคุมเวกเตอร์	7
2.3 สรุป	17
3 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำและแผนการควบคุมแบบเวกเตอร์โดยตรง	19
3.1 บทนำ	19
3.2 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	การแปลงพิกัด	21
3.3.1	การแปลงแบบคาร์ก (Clarke Transformation)	21
3.3.2	การแปลงแบบปาร์ก (Park's Transformation)	22
3.4	การจำลองสถานการณ์แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	23
3.5	การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรง	30
3.6	สรุป	35
4	สมการปริภูมิสถานะวงปิดและการคำนวณค่าแกนของตัวควบคุมพีไอ	36
4.1	บทนำ	36
4.2	สมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิด	36
4.3	การตรวจสอบความถูกต้องของสมการปริภูมิสถานะวงปิด	41
4.4	การหาพหุนามคุณลักษณะของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์	45
4.5	การระบุค่าไอเกนและการคำนวณค่าแกนของตัวควบคุมพีไอ	52
4.6	สรุป	57
5	ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	
	แบบเวกเตอร์โดยตรง	58
5.1	บทนำ	58
5.2	ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็ววงปิด	59
5.2.1	กรณีที่ความเร็วเพลอาอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงและโหลดทอร์คคงที่	60
5.2.2	กรณีที่ความเร็วเพลอาอ้างอิงคงที่และโหลดทอร์คมีการเปลี่ยนแปลง	66
5.3	ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็ววงปิดแบบฮาร์ดแวร์ในรูป	71
5.4	สรุป	76
6	การมีขอบเขตที่สม่ำเสมอของแนววิถีสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิด	78
6.1	บทนำ	78
6.2	การวิเคราะห์แนววิถีสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิด	78

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.3	การมีขอบเขตที่สม่ำเสมอของแนววิถีสถานะของระบบควบคุม ความเร็ววงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกนชุดที่ 1	85
6.4	การมีขอบเขตที่สม่ำเสมอของแนววิถีสถานะของระบบควบคุม ความเร็ววงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกนชุดที่ 2	87
6.5	สรุป	90
7	สมรรถนะของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มี ค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าที่ระบุ	91
7.1	บทนำ	91
7.2	ค่าไอเกนของระบบควบคุมความเร็ววงปิดและการเปลี่ยนแปลงของ ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์และโหลด	91
7.3	ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่มีมอเตอร์และโหลดมีค่าพารามิเตอร์ เท่ากับค่าที่ระบุ	96
7.4	ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าที่ระบุ	97
7.4.1	ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ R_r มีค่าเท่ากับ 10 เท่า ของค่าที่ระบุ	97
7.4.2	ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ R_s มีค่าเท่ากับ 10 เท่า ของค่าที่ระบุ	99
7.4.3	ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ J มีค่าเท่ากับ 10 เท่า ของค่าที่ระบุ	102
7.4.4	ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ R_r , R_s และ J มีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกัน	103
7.4.5	ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ R_r , R_s และ J มีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกันและมอเตอร์หมุนในสภาวะ ไร้โหลด	105
7.5	สมรรถนะของผลตอบสนองที่เกิดจากการคำนวณค่าเกนโดยตรง และการสุ่มเลือกค่าเกน	107

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.6 สรุป	108
8 สรุปและข้อเสนอแนะ	109
8.1 สรุป	109
8.2 ข้อเสนอแนะ	111
รายการอ้างอิง	112
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. รายละเอียดของสมการที่ใช้ในการแปลงพิกัด	114
ภาคผนวก ข. รายละเอียดในการแปลงพิกัดแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามเฟสแบบกรงกระรอก	121
ภาคผนวก ค. รายละเอียดของสมการปริภูมิสถานะระบบควบคุมความเร็ววงปิด ของการควบคุมแบบเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	134
ภาคผนวก ง. ชุดบล็อกที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ในโปรแกรม MATLAB/Simulink	143
ภาคผนวก จ. ชุดคำสั่งเชิงสัญลักษณ์ที่ใช้ในการหาค่าเกินของตัวควบคุมพีไอ โดยใช้โปรแกรม MATLAB Symbolic	150
ภาคผนวก ฉ. เทคนิคการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป	156
ภาคผนวก ช. ระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีพจน์ของการรั้งความและไม่มี พจน์ของการรั้งความ ผลของซีโรต่อผลตอบสนองความเร็วเพลา ผลของค่าไอเกินต่อค่าคงตัวทางเวลา และค่าโพลของตัวควบคุม พีไอแต่ละรูป	166
ภาคผนวก ซ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา	180
ประวัติผู้เขียน	182

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	งานวิจัยที่มีเนื้อหาสัมพันธ์กับการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ ในแผนการควบคุมเวกเตอร์ 8
3.1	ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 27
4.1	ค่าเกนชุดที่ 1 ของตัวควบคุมพีไอสี่ตัว 40
4.2	ค่าไอเกนของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ที่เกิดจากตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนชุดที่ 1 40
4.3	ค่าไอเกนที่ต้องการที่ใช้คำนวณหาค่าเกนชุดที่ 2 ของตัวควบคุมพีไอ 55
4.4	ค่าเกนชุดที่ 2 ของตัวควบคุมพีไอที่ได้รับจากการระบุค่าไอเกน 56
4.5	รากของสมการคุณลักษณะที่เปรียบเทียบกับค่าไอเกนที่ต้องการ 56
6.1	ค่าไอเกนของเมตริกซ์ P ที่เกิดจากตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2 81
7.1	ค่าเกนของของตัวควบคุมพีไอในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าที่ระบุ 93
7.2	ค่าไอเกนของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าที่ระบุ 93
7.3	ค่าไอเกนในกรณีที่ค่าความต้านทานโรเตอร์มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ 94
7.4	ค่าไอเกนในกรณีที่ค่าความต้านทานสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ 94
7.5	ค่าไอเกนในกรณีที่โมเมนต์ความเฉื่อยมีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ 95
7.6	ค่าไอเกนในกรณีที่ R_r , R_s และ J มีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกัน 95
ช.1	ค่าโพลของตัวควบคุมพีไอ 179

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	แกนอ้างอิงสามเฟส ABC และแกนอ้างอิงสองเฟส $\alpha\beta$ 21
3.2	แกนอ้างอิง $\alpha\beta$ และแกนอ้างอิง dq 22
3.3	ชุดบล็อกของแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก 25
3.4	ชุดบล็อกที่ใช้ในการแปลงแบบคาร์ก 26
3.5	ชุดบล็อกที่ใช้ในการแปลงย้อนกลับแบบคาร์ก 26
3.6	บล็อกของแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 26
3.7	การจำลองสถานการณ์แบบจำลองมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 27
3.8	กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์เฟส a ที่ได้รับจากแบบจำลองมาตรฐาน และแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 28
3.9	กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์เฟส b ที่ได้รับจากแบบจำลองมาตรฐาน และแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 28
3.10	กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์เฟส c ที่ได้รับจากแบบจำลองมาตรฐาน และแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 29
3.11	ความเร็วเพลลาที่ได้รับจากแบบจำลองมาตรฐานและแบบจำลองพลวัต ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 29
3.12	ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้รับจากแบบจำลองมาตรฐาน และแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 30
3.13	แผนการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรง 30
4.1	ความเร็วเพลลาอ้างอิงและผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่ได้รับจากแผนการ ควบคุมเวกเตอร์ 42
4.2	ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรง 42
4.3	ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวาง 43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ความผิดพลาดของฟลักซ์แม่เหล็ก โรเตอร์	43
4.5 ความผิดพลาดของความเร็วเพลลา	43
4.6 อินทิเกรตความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรง	44
4.7 อินทิเกรตความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวาง	44
4.8 อินทิเกรตความผิดพลาดของฟลักซ์แม่เหล็ก โรเตอร์	45
4.9 อินทิเกรตความผิดพลาดของความเร็วเพลลา	45
4.10 ฟังก์ชันการหาค่าไอเกนของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์	51
4.11 ฟังก์ชันการคำนวณหาค่าไอเกนของตัวควบคุมพีไอที่เกิดจากการระบุค่าไอเกน	54
5.1 ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรงที่มี อินเวอร์เตอร์	60
5.2 ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และความเร็วเพลลาอ้างอิง	62
5.3 ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 2 และความเร็วเพลลาอ้างอิง	62
5.4 ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2	63
5.5 ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และ โหลดทอร์ก	63
5.6 ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 2 และ โหลดทอร์ก	63
5.7 กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2	64
5.8 ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2	64
5.9 กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2	64
5.10 ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2	65
5.11 ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็ก โรเตอร์ที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2	65
5.12 ความผิดพลาดของขนาดของฟลักซ์แม่เหล็ก โรเตอร์ที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2	66
5.13 ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และความเร็วเพลลาอ้างอิง	67
5.14 ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 2 และความเร็วเพลลาอ้างอิง	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.15 ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 1 และค่าเกณฑ์ที่ 2	68
5.16 ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 1 และ โหลดทอร์ก	68
5.17 ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 2 และ โหลดทอร์ก	69
5.18 กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนตรงที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 1 และค่าเกณฑ์ที่ 2	69
5.19 ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนตรงที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 1 และค่าเกณฑ์ที่ 2	69
5.20 กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนขวางที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 1 และค่าเกณฑ์ที่ 2	70
5.21 ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนขวางที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 1 และค่าเกณฑ์ที่ 2	70
5.22 ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็ก โรเตอร์ที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 1 และค่าเกณฑ์ที่ 2	70
5.23 ความผิดพลาดของขนาดของฟลักซ์แม่เหล็ก โรเตอร์ที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 1 และค่าเกณฑ์ที่ 2	71
5.24 แนวคิดของการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป	73
5.25 ผลตอบสนองของความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 2 และความเร็วเพลลาอ้างอิง ที่ได้รับจากการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป	74
5.26 ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 2 และ โหลดทอร์กที่ได้รับ จากการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป	74
5.27 ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็ก โรเตอร์ที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 2 ที่ได้รับ จากการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป	75
5.28 กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์สามเฟสที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 2 ที่ได้รับ จากการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป	75
5.29 กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์สามเฟสที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 2 ในสถานะอยู่ตัวที่ได้รับ จากการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป	76
5.30 การกลับลำดับเฟสของกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์สามเฟสที่ได้รับ จากการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป	76
6.1 ขนาดของเวกเตอร์การรั้งความที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 1	82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.2	ขนาดของเวกเตอร์การรั้งความที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 2 82
6.3	ขนาดของ \mathbf{D}^T ที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 1 84
6.4	ขนาดของ \mathbf{D}^T ที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 2 84
6.5	ความเร็วเพลลาอ้างอิงและผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 1 86
6.6	อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียฟูโนฟที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 1 86
6.7	ฟังก์ชันเลียฟูโนฟที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 1 87
6.8	ขนาดของเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะและขอบเขต η ที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 1 87
6.9	ความเร็วเพลลาอ้างอิงและผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 2 88
6.10	อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียฟูโนฟที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 2 89
6.11	ฟังก์ชันเลียฟูโนฟที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 2 89
6.12	ขนาดของเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะและขอบเขต η ที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 2 89
7.1	ผลตอบสนองความเร็วเพลลาและความผิดพลาดของความเร็วเพลลา ที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 1 และค่าเกินชุดที่ 2 97
7.2	ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 1 และความเร็วเพลลาอ้างอิง ในกรณีที่ R_r มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ 98
7.3	ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 2 และความเร็วเพลลาอ้างอิง ในกรณีที่ R_r มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ 99
7.4	ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ในกรณีที่ R_r มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ 99
7.5	ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 1 และความเร็วเพลลาอ้างอิง ในกรณีที่ R_s มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ 100
7.6	ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 2 และความเร็วเพลลาอ้างอิง ในกรณีที่ R_s มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ 101
7.7	ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ในกรณีที่ R_s มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ 101

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.8	ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 1 และความเร็วเพลลาอ้างอิง ในกรณีที่มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ 102
7.9	ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 2 และความเร็วเพลลาอ้างอิง ในกรณีที่มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ 103
7.10	ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 1 และชุดที่ 2 ในกรณีที่มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ 103
7.11	ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 1 และความเร็วเพลลาอ้างอิง ในกรณีที่มีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกัน 104
7.12	ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 2 และความเร็วเพลลาอ้างอิง ในกรณีที่มีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกัน 105
7.13	ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 1 และชุดที่ 2 ในกรณีที่มีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกัน 105
7.14	ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 1 และความเร็วเพลลาอ้างอิง ในกรณีที่มีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกันและมอเตอร์ ไม่มีโหลดทอร์ก 106
7.15	ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 2 และความเร็วเพลลาอ้างอิง ในกรณีที่มีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกันและมอเตอร์ ไม่มีโหลดทอร์ก 107
7.16	ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 1 และชุดที่ 2 ในกรณีที่มี ค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกันและมอเตอร์ ไม่มีโหลดทอร์ก 107
ก.1	การแยกส่วนประกอบของเวกเตอร์ที่อยู่บนแกน α ลงในแกน d และแกน q 119
ก.2	การแยกส่วนประกอบของเวกเตอร์ที่อยู่บนแกน β ลงในแกน d และแกน q 119
ข.1	วงจรมุมของมอเตอร์เหนี่ยวนำในพิกัดที่ไม่ระบุ 122
ง.1	แผนการควบคุมแบบเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก 144

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.2	
ชุดบล็อกที่อยู่ภายในบล็อก “controller in dq-axis” ของแผนการควบคุม	
แบบเวกเตอร์จากรูปที่ ง.1	144
ง.3	
ชุดบล็อกที่อยู่ภายในบล็อก “computation block” ของแผนการควบคุม	
แบบเวกเตอร์จากรูปที่ ง.1	145
ง.4	
ชุดบล็อกที่อยู่ภายในบล็อก “Computation Psir_alpha,beta” จากบล็อก	
ในรูปที่ ง.3	146
ง.5	
ชุดบล็อกที่อยู่ภายในบล็อก “ab-axis to dq-axis transformation” จากบล็อก	
ในรูปที่ ง.3	146
ง.6	
ชุดบล็อกที่อยู่ภายในบล็อก “dq-axis to ab-axis transformation”	
ของแผนการควบคุมแบบเวกเตอร์จากรูปที่ ง.1	147
ง.7	
บล็อกสมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมวงปิด “State space eq.”	147
ง.8	
ชุดบล็อกที่อยู่ภายในบล็อก “State space eq.” จากบล็อกในรูปที่ ง.7	148
ง.9	
แผนการควบคุมแบบเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้อินเวอร์เตอร์	
ในการจ่ายแรงดันสามเฟส	149
ง.10	
ชุดบล็อกที่อยู่ภายในบล็อก “Control system” จากแผนการควบคุม	
แบบเวกเตอร์ในรูปที่ ง.9	149
ฉ.1	
เมนู Add – Ons ที่ใช้เข้าถึงซอฟต์แวร์ส่วนเสริม และซอฟต์แวร์ส่วนเสริม	
ที่ใช้งาน	157
ฉ.2	
ไดรเวอร์ของบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit และชุดบล็อกตัวอย่าง	
c2000_pil_block	158
ฉ.3	
โครงสร้างการเชื่อมต่อโดยวิธีการสื่อสารแบบอนุกรมผ่านทางพอร์ต USB	159
ฉ.4	
เมนูที่ใช้เลือกบอร์ดที่เชื่อมต่อและค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง	
ในการจำลองสถานการณ์	159
ฉ.5	
เมนูที่ใช้กำหนดคอมไพเลอร์และเมนูที่ใช้กำหนดประเภท	
ในการสร้างบล็อกใหม่	160

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ณ.6	เมนูที่ใช้สร้างบล็อกใหม่ที่คำนวณและประมวลผลโดยบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit 161
ณ.7	สถานะการสร้างโปรแกรมไปยังบอร์ดและบล็อกที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ในการทำงาน หรือประมวลผลภายในบอร์ด 162
ณ.8	ชุดบล็อก c2000_pil_block ที่ใช้การจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป 162
ณ.9	ผลการจำลองสถานการณ์แบบโปรเซสเซอร์ในรูป จากชุดบล็อก c2000_pil_block 163
ณ.10	ชุดบล็อกที่ใช้ทดสอบเบื้องต้นในการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป 164
ณ.11	ผลการจำลองสถานการณ์สัญญาณรูปคลื่นไซน์และสัญญาณรูปสามเหลี่ยม 164
ช.1	ความเร็วเพลอาอังกอิงและผลตอบสนองความเร็วเพลอาที่ได้จากระบบควบคุม ความเร็ววงปิดที่มีพจน์ของการรั้งควานและไม่มีพจน์ของการรั้งควาน 169
ช.2	ความผิดพลาดของความเร็วเพลอาที่ได้จากระบบควบคุมความเร็ววงปิด ที่มีพจน์ของการรั้งควานและไม่มีพจน์ของการรั้งควาน 169
ช.3	กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงที่ได้จากระบบควบคุมความเร็ววงปิด ที่มีพจน์ของการรั้งควานและไม่มีพจน์ของการรั้งควาน 170
ช.4	ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงที่ได้จากระบบควบคุม ความเร็ววงปิดที่มีพจน์ของการรั้งควานและไม่มีพจน์ของการรั้งควาน 170
ช.5	ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่ได้จากระบบควบคุมความเร็ววงปิด ที่มีพจน์ของการรั้งควานและไม่มีพจน์ของการรั้งควานที่ 171
ช.6	ความผิดพลาดของขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่ได้จากระบบควบคุม ความเร็ววงปิดที่มีพจน์ของการรั้งควานและไม่มีพจน์ของการรั้งควาน 171
ช.7	กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางที่ได้จากระบบควบคุมความเร็ววงปิด ที่มีพจน์ของการรั้งควานและไม่มีพจน์ของการรั้งควาน 172
ช.8	ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางที่ได้จากระบบควบคุม ความเร็ววงปิดที่มีพจน์ของการรั้งควานและไม่มีพจน์ของการรั้งควาน 172

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ช.9 ผลตอบสนองความเร็วเพลลาเมื่อความเร็วเพลลาอ้างอิงคืออินพุต ที่เป็นฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย	174
ช.10 ผลตอบสนองความเร็วเพลลาเมื่อความเร็วเพลลาอ้างอิงคืออินพุตที่เป็น ฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วยและฟังก์ชันถ่ายโอนไม่มีซีโร	174



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ภาคอุตสาหกรรมได้ใช้ประโยชน์มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอกตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เพราะมอเตอร์เอซิดังกล่าวมีความทนทาน มีความน่าเชื่อถือ ราคาถูก มีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูง และต้องการการบำรุงรักษาน้อยกว่า แต่การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นงานที่ซับซ้อนกว่าการควบคุมมอเตอร์ดีซีแบบแยกกระตุ่นที่มีแปรปรวน เมื่อพิจารณาการสร้างสนามแม่เหล็กและทอร์คภายในมอเตอร์ดีซีที่สามารถดำเนินการแยกออกจากกันได้อย่างอิสระ ความเร็วเพลจะมีคุณสมบัติเชิงเส้นกับแรงดันอาร์เมเจอร์ ทำให้มอเตอร์ดีซีมีสมรรถนะสูงในการขับเคลื่อนโหลดเชิงกล (H. Abu Rub, A. Iqbal, J. Guzinski, 2012) แต่การสร้างฟลักซ์แม่เหล็กและทอร์คภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำไม่สามารถดำเนินการแยกออกจากกันได้ และความเร็วเพลจะมีคุณสมบัติไม่เชิงเส้นที่มีอันดับสูงกว่า แนวคิดของการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำที่คล้ายกับการควบคุมมอเตอร์ดีซีเริ่มต้นเกิดขึ้นในปี ค.ศ.1970 โดยประมาณ แนวคิดนี้คือการควบคุมเวกเตอร์ (vector control หรือ field-oriented control) ที่สามารถควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กและทอร์คภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำให้แยกออกจากกันได้อย่างอิสระในกรอบอ้างอิงเวกเตอร์ปริภูมิฟลักซ์แม่เหล็กหรือในพิกัดสนามแม่เหล็ก

การควบคุมเวกเตอร์จะใช้การแปลงสามเฟสไปเป็นสองเฟสและการแปลงย้อนกลับ และใช้การแปลงพิกัดหรือการแปลงกรอบอ้างอิงจากพิกัดหยุดนิ่ง (stationary coordinate) ไปเป็นพิกัดสนามแม่เหล็กหรือพิกัดซิงโครนัส (synchronous coordinate) และการแปลงพิกัดย้อนกลับกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่อยู่ในพิกัดสนามแม่เหล็กจะประกอบด้วยกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรง (direct axis) ที่สมมูลกับ ฟลักซ์แม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวาง (quadrature axis) ที่สมมูลกับทอร์ค เนื่องจากการควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ทั้งสองสามารถดำเนินการแยกออกจากกันได้อย่างอิสระ การควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กและทอร์คภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำจะดำเนินการแยกออกจากกันได้เช่นเดียวกัน (H. Abu Rub, A. Iqbal, J. Guzinski, 2012) ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีสมรรถนะสูงในการขับเคลื่อนโหลดเชิงกล การควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงจะเทียบเท่ากับการควบคุมกระแสไฟฟ้าสนามที่ไหลผ่านขดลวดสนามในมอเตอร์ดีซี และการควบคุม

กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนขวางจะเทียบเท่ากับการควบคุมกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ในมอเตอร์ดีซี

ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำมาตรฐานคือปริมาณทางไฟฟ้าที่ไม่สามารถเข้าถึงได้และไม่สามารถวัดได้ แต่แรงดันสแตเตอร์และกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์สามเฟสคือปริมาณที่สามารถวัดได้ที่ขั้วต่อไฟฟ้าภายนอก การใช้แบบจำลองของมอเตอร์ประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กจะแทนที่การวัดฟลักซ์แม่เหล็กได้ แบบจำลองจะได้รับแรงดันสแตเตอร์และกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์และประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กแบบออนไลน์ เนื่องจากการควบคุมเวกเตอร์โดยตรง (direct vector control) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำต้องการการแปลงพิกัด ต้องการการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กในแกนแอลฟา (α) และในแกนบีตา (β) ในพิกัดหุคหนึ่ง และต้องการการคำนวณตำแหน่งเชิงมุมของเวกเตอร์ปริภูมิฟลักซ์แม่เหล็กที่ใช้ในการแปลงพิกัด แต่การควบคุมมอเตอร์ดีซีแบบแยกกระตุ้นไม่ต้องการการแปลงพิกัดและการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็ก การควบคุมเวกเตอร์จึงมีการคำนวณมากกว่าและซับซ้อนกว่า นั่นคือไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ต้องมีสถาปัตยกรรมและมีทรัพยากรมากกว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ควบคุมมอเตอร์ดีซี การควบคุมเวกเตอร์โดยอ้อม (indirect vector control) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำต้องการความเร็วสลลิป (slip speed) และความเร็วโรเตอร์ (rotor speed) ที่ได้จากการวัด ความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) คือผลลบระหว่างความเร็วสลลิปและความเร็วโรเตอร์ และตำแหน่งเชิงมุมของเวกเตอร์ปริภูมิฟลักซ์แม่เหล็กที่ใช้ในการแปลงพิกัด คือผลการอินทิเกรตของความเร็วซิงโครนัสที่เทียบกับเวลา ความเร็วสลลิปจะคำนวณได้จากกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์อ้างอิงในพิกัดซิงโครนัส แผนการควบคุมเวกเตอร์โดยอ้อมจึงมีความซับซ้อนน้อยกว่าและใช้ทรัพยากรในการประมวลผลที่น้อยกว่า แต่การควบคุมเวกเตอร์โดยอ้อมมีการแปลงแกนพิกัดที่ถูกต้องน้อยกว่า และการควบคุมเวกเตอร์โดยตรงมีการแปลงแกนพิกัดที่ถูกต้องมากกว่า นั่นคือการควบคุมเวกเตอร์โดยตรงมีสมรรถนะที่สูงกว่าการควบคุมเวกเตอร์โดยอ้อม

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้งานในปัจจุบันมีทรัพยากรเพิ่มขึ้นและใช้ช่วงระยะเวลาสั้นลงในการประมวลผลชุดคำสั่ง แต่มีราคาถูกลง นอกจากนี้การควบคุมความเร็วที่เปลี่ยนแปลงได้ของมอเตอร์เหนี่ยวนำต้องการอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีสวิทช์สารกึ่งตัวนำกำลังที่เปิดและปิดในความถี่สูง ทำให้ผู้ผลิตได้พัฒนาไอจีบีทีโมดูล (IGBT module) ที่มีวงจรถับเกตและหน่วยป้องกันรวมอยู่ในโมดูล การนำไอจีบีทีโมดูลมาสร้างอินเวอร์เตอร์จึงมีความสะดวกและประหยัดเวลามากขึ้น และอินเวอร์เตอร์พีดับเบิลยูเอ็มมีขนาดเล็กกลง รวมถึงผู้ผลิตได้พัฒนาเทคโนโลยีของเซนเซอร์วัดแรงดัน เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า และตัวแปลงความเร็วไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่มีความน่าเชื่อถือสูง และมีราคาไม่แพง ปัจจัยเหล่านี้จะทำให้การสร้างระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์มีความสะดวกและประหยัดเวลามากขึ้น และผู้ปฏิบัติงานสามารถนำระบบควบคุมนี้มาใช้งานได้ ทำ

ให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอกได้รับความนิยมนำใช้งานขับเคลื่อนโหลดเชิงกลเพิ่มขึ้น และแทนที่การใช้งานมอเตอร์ดีซีโดยส่วนใหญ่ได้

ระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรงอาจจะมีตัวควบคุมความเร็ว ตัวควบคุมฟลักซ์แม่เหล็ก ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรง และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวาง ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ทั้งสองจะอยู่ในลูบควบคุมชั้นใน ตัวควบคุมความเร็วและตัวควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กจะอยู่ในลูบควบคุมชั้นนอก ตัวควบคุมทั้ง 4 ตัวนี้อาจจะเป็นตัวควบคุมพีไอ ทำให้ผู้ใช้งานต้องมีภาระในการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ ทั้งหมด 8 ค่า แนวทางทั่วไปที่ใช้ในการปรับจูนค่าเกนดังกล่าวคือตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าทั้งสองมีค่าเกนพีเท่ากัน มีค่าเกนไอเท่ากัน และต้องมีค่าเกนสูงเพียงพอที่ทำให้ลูบควบคุมชั้นในมีพลวัตเร็วกว่าพลวัตของลูบควบคุมชั้นนอก ลูบควบคุมชั้นในจึงมีพลวัตที่เร็วมากและมีพฤติกรรมคล้ายกับอัตราขยายหนึ่ง ต่อมาผู้ใช้งานจะปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมความเร็วจนกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนโหลดเชิงกลจะหมุนด้วยความเร็วที่มีสมรรถนะตามความต้องการ (M. O. Ajangnay, 2010)

ตัวควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กหรือตัวควบคุมฟลักซ์จะมีค่าเกนที่ค่อนข้างสูง เพราะฟลักซ์แม่เหล็กภายในมอเตอร์จะต้องมีพลวัตของการเปลี่ยนแปลงที่เร็วกว่าการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองความเร็ว นั่นคือการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวพร้อมกันเป็นงานที่ไม่สามารถดำเนินการได้ เพราะผู้ใช้งานจะต้องเริ่มต้นปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า ต่อมาปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมฟลักซ์ และจากนั้นปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมความเร็ว เรียงตามลำดับ (Fayez F. M. El-Sousy, Faeka M.H. Khater and Farouk I. Ahmed, 1999) การปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุม 4 ตัวนี้จึงเป็นงานที่ใช้เวลานาน ดังนั้นการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวนี้ได้พร้อมกันจึงเป็นงานที่น่าสนใจในการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ และการพิจารณาสมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์อาจจะเป็นแนวทางหนึ่งที่ใช้ปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวนี้ได้พร้อมกัน เพราะค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวจะกำหนดค่าเจาะจงหรือค่าไอเกน (eigenvalues) ของระบบควบคุมวงปิดในระนาบเชิงซ้อน และในทางกลับกัน ค่าไอเกนของระบบควบคุมวงปิดจะกำหนดค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอกในพิกัดหุคหนึ่งและในพิกัดซิงโครนัสหรือพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ และศึกษาการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรงที่มีตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว

1.2.2 ศึกษาการสร้างสมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมวงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรง ประยุกต์ใช้สมการปริภูมิสถานะและค่าไอเกนของระบบควบคุมวงปิดเพื่อออกแบบหรือปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวพร้อมกัน

1.2.3 ศึกษาค่าไอเกนของระบบควบคุมวงปิดที่เปลี่ยนแปลงและได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1.2.4 เขียนโปรแกรมเชิงสัญลักษณ์หรือเชิงเลขที่คำนวณหาค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวพร้อมกัน สร้างการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรง และใช้ฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware-In-The-Loop) หรือ โปรเซสเซอร์ในลูป (Processor-In-The-Loop) เพื่อทดสอบระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสมมูลแบบกรงกระรอกที่พิจารณามีวงจรมแม่เหล็กเชิงเส้น

1.3.2 โหลดทอร์คที่เกิดขึ้นมีทิศตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของเพลามอเตอร์

1.3.3 ไอจีบีที 6 ตัวที่อยู่ในอินเวอร์เตอร์ที่ดับเบิลยูเอ็มสามเฟสมีคุณลักษณะที่ใกล้เคียงกับสวิตช์อุดมคติ

1.3.4 ฟลักซ์แม่เหล็กอ้างอิงมีค่าคงที่และเป็นค่าพารามิเตอร์

1.3.5 พิจารณาค่าเกนของตัวควบคุมพีไอทุกค่าที่เป็นค่าบวกเท่านั้น

1.4 สมมติฐานการวิจัย

1.4.1 ระบบควบคุมวงปิดของแผนการควบคุมแบบเวกเตอร์โดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีตัวควบคุมพีไอสี่ตัวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการปริภูมิสถานะได้

1.4.2 มีค่าไอเกนของระบบควบคุมวงปิด 8 ค่าที่สามารถนำไปคำนวณหาค่าเกนของตัวควบคุมพีไอสี่ตัวที่เป็นค่าบวกได้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 พิจารณาระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรงที่มีตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว

1.5.2 ใช้ค่าไอเกนของระบบควบคุมวงปิดออกแบบหรือคำนวณหาค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวพร้อมกัน

1.5.3 พิจารณาค่าไอเกินของระบบควบคุมวงปิดที่เปลี่ยนแปลงและได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์เชิงกลและค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1.5.4 วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมวงปิด

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 การออกแบบและคำนวณหาค่าเกินของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวพร้อมกันในระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรง

1.6.2 สมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์

1.6.3 โปรแกรมเชิงสัญลักษณ์หรือเชิงเลขที่คำนวณหาค่าเกินของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวพร้อมกัน

1.6.4 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมวงปิด

1.6.5 การจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ ผลการจำลองสถานการณ์ และผลการทดสอบที่ได้จากฮาร์ดแวร์ในรูปหรือโปรเซสเซอร์ในรูป

1.6.6 บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการหรือในวารสารวิชาการ

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์มีเนื้อหาทั้งหมด 8 บท และแต่ละบทมีเนื้อหาที่นำเสนอ ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยก่อนหน้านี้ สรุปบทความที่มีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ และมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการปรับจูนค่าเกินของตัวควบคุมพีไอที่เป็นส่วนหนึ่งในระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์และที่ใช้สร้างระบบควบคุมความเร็ววงปิดแบบเวกเตอร์ และแผนการควบคุมแบบเวกเตอร์โดยตรงที่มีตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว

บทที่ 4 กล่าวถึงสมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบเวกเตอร์ การตรวจสอบความถูกต้องของสมการปริภูมิสถานะวงปิด และการ

ปรับจูนค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวพร้อมกันหรือการคำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวโดยตรง

บทที่ 5 กล่าวถึงการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรงที่มีตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว การเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการสุ่มเลือกค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว และผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการคำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวโดยตรง และการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware-In-The-Loop) หรือ โพรเซสเซอร์ในลูป (Processor-In-The-Loop)

บทที่ 6 กล่าวถึงสมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีพจน์ของการรั้งความที่ไม่หาย การวิเคราะห์แนววิถีสถานะที่มีขอบเขตที่สม่ำเสมอของระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว และการเปรียบเทียบระหว่างแนววิถีสถานะที่เกิดจากการสุ่มเลือกค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว และแนววิถีสถานะที่เกิดจากการคำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวโดยตรง

บทที่ 7 กล่าวถึงการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็ววงปิดแบบเวกเตอร์โดยตรงที่มีตัวควบคุมพีไอสี่ตัวในกรณีที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลมีค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าที่ระบุ และการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการสุ่มเลือกค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว และผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากการคำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวโดยตรงในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าที่ระบุ

บทที่ 8 กล่าวถึงสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีทั้งหมด 6 ภาค และแต่ละภาคผนวกมีเนื้อหาที่น่าสนใจดังนี้

ภาคผนวก ก กล่าวถึงสมการที่ใช้ในการแปลงพิกัด

ภาคผนวก ข กล่าวถึงการแปลงพิกัดแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก

ภาคผนวก ค กล่าวถึงการได้รับสมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรง

ภาคผนวก ง กล่าวถึงชุดบล็อกที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

ภาคผนวก จ กล่าวถึงชุดคำสั่งเชิงสัญลักษณ์ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวโดยตรง

และภาคผนวก ฉ กล่าวถึงการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในลูปหรือโพรเซสเซอร์ในลูป

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้แผนการควบคุมเวกเตอร์ จะให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีและรวดเร็วในสถานะชั่วคราว และมีความผิดพลาดน้อยในสถานะอยู่ตัว เมื่อแผนการควบคุมดังกล่าวใช้ตัวควบคุมพีไอที่ทำหน้าที่คุมค่าตัวแปรสถานะ ตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกินถูกต้องและเหมาะสมจะชดเชยพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ค่อนข้างสมบูรณ์ ระบบควบคุมวงปิดจึงให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะสูงในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว แต่ถ้าตัวควบคุมพีไอมีค่าเกินที่ไม่ถูกต้องหรือไม่เหมาะสม ระบบควบคุมวงปิดจะให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะช้าหรือกวัดแกว่ง งานวิทยานิพนธ์ได้สรุปสาระสำคัญของงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีเนื้อหาสัมพันธ์กับการปรับจูนค่าเกินของตัวควบคุมพีไอที่อยู่ในแผนการควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีเนื้อหาสัมพันธ์กับตัวควบคุมพีไอในรูปแบบอื่นที่มีโครงสร้างเพิ่มเติมหรือแตกต่างจากตัวควบคุมพีไอมาตรฐาน

2.2 งานวิจัยที่มีเนื้อหาสัมพันธ์กับการปรับจูนค่าเกินของตัวควบคุมพีไอในแผนการควบคุมเวกเตอร์

งานวิจัยที่มีเนื้อหาสัมพันธ์กับการปรับจูนค่าเกินของตัวควบคุมพีไอที่อยู่ในแผนการควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่มีเนื้อหาสัมพันธ์กับการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอในแผนการควบคุม
 เวกเตอร์

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1999	Fayez F. M. El Sousy Faeka M. H. Khater and Farouk I. Ahmed	<p>ได้นำเสนอระบบควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอ้อม ตัวควบคุมความเร็วและตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงและในแกนขวางคือตัวควบคุมพีไอ ความอิสระหนึ่งระดับ และสองระดับ (one, two degree-of-freedom controller: 1, 2-DOFC) จะนำมาใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอในกรณีที่ใช้งานความอิสระหนึ่งระดับ ควบคุมกระแสไฟฟ้าในแกนขวางคือระบบอันดับสองที่มีซีโรหนึ่งตัว ควบคุมกระแสไฟฟ้าในแกนตรงคือระบบอันดับสามที่มีซีโรสองตัว และควบคุมความเร็วคือระบบอันดับสี่ที่มีซีโรสองตัว การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพหุนามคุณลักษณะของระบบและพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการหรือพหุนามคุณลักษณะที่เหมาะสมที่สุด จะได้รับสมการที่ใช้คำนวณค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ ในกรณีที่ใช้งานความอิสระสองระดับ ควบคุมกระแสไฟฟ้าในแกนตรงและในแกนขวางคือระบบอันดับสองที่มีซีโรหนึ่งตัว ตัวชดเชยจะได้รับกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์อ้างอิงและจ่ายสัญญาณถึงควบคุมกระแสไฟฟ้า ตัวชดเชยดังกล่าวมีฟังก์ชันถ่ายโอนที่เป็นส่วนกลับของพหุนามที่มีซีโรของควบคุมกระแสไฟฟ้า ระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าจึงไม่มีซีโร ควบคุมความเร็วคือระบบอันดับสองที่มีซีโรหนึ่งตัวเช่นเดียวกัน ตัวชดเชยจะได้รับความเร็วอ้างอิงและจ่ายสัญญาณถึงควบคุมความเร็ว ตัวชดเชยนี้มีฟังก์ชันถ่ายโอนที่เป็นส่วนกลับของพหุนามที่มีซีโรของควบคุมความเร็ว ระบบควบคุมความเร็วจึงไม่มีซีโร</p>

		<p>การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพหุนามคุณลักษณะอันดับสองและพหุนามคุณลักษณะที่เหมาะสมที่สุด จะได้รับสมการที่ใช้คำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอ เมื่อมอเตอร์ขับเคลื่อนโหลดที่เปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดและความเร็วอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดที่ทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทาง ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ใช้งานความอิสระหนึ่งระดับจะแสดงถึงผลตอบสนองความเร็วที่มีการพุ่งเกิน แต่ในกรณีที่ใช้งานความอิสระสองระดับ ระบบควบคุมวงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็วที่มีการพุ่งเกินน้อยกว่า และมีเวลาเข้าที่สั้นกว่า</p> <p>บทความมีจุดเด่นดังนี้ ระบบควบคุมที่มีตัวชดเชยจะไม่มีซีโร ผลตอบสนองความเร็วติดตามความเร็วอ้างอิงได้ดี และมีการพุ่งเกินเล็กน้อย</p> <p>แต่การออกแบบตัวควบคุมความเร็วมีขั้นตอนที่เพิ่มขึ้น การคำนวณค่าเกณฑ์จึงมีความซับซ้อน และบทความไม่แสดงค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์</p>
2009	<p>Khalaf Salloum G. Hew Wooi Ping H. A.F.Mohamed</p>	<p>ได้นำเสนอระบบควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอ้อม ตัวควบคุมความเร็วคือตัวควบคุมพีไอ การออกแบบตัวควบคุมพีไอจะเริ่มต้นจากการพิจารณาระบบควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้เป็นระบบควบคุมป้อนกลับความเร็วอันดับสองที่มีซีโรหนึ่งตัว ระบบควบคุมวงปิดนี้มีเสถียรภาพและประกอบด้วยตัวควบคุมความเร็วและพลาเน็ตเชิงกล การกำหนดค่าให้ระบบวงปิดมีคู่โพลตั้งยุคเชิงซ้อนที่มีอัตราส่วนการหน่วงที่ดีที่สุด ($\zeta \approx 0.707$) จะได้รับพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการ สมการที่ใช้คำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอจะเกิดจากการเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะวงปิดและพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการ เมื่อมอเตอร์อยู่ในสภาวะไร้โหลด ความเร็วอ้างอิงมีค่าคงที่และมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได (step) ผลการจำลองสถานการณ์จะแสดงถึงผลตอบสนองความเร็วที่ไม่มีการพุ่ง</p>

		<p>เกินและไม่มีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว</p> <p>บทความมีจุดเด่น ดังนี้ แผนการควบคุมแบบเวกเตอร์ที่นำเสนอใช้ตัวควบคุมความเร็วที่เป็นตัวควบคุมพีไอฟังก์ชันถ่ายโอนและสมการที่ใช้คำนวณหาค่าเกนของตัวควบคุมความเร็วไม่มีความซับซ้อน และผลตอบสนองความเร็วติดตามความเร็วอ้างอิงได้ดี</p> <p>แต่เมื่อผลตอบสนองความเร็ว ผลตอบสนองกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ ใน แกนตรงและใน แกนขวางมี สถานะ อยู่ตัว ผลตอบสนองฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์จะยังคงมีสถานะชั่วคราว และมีสถานะชั่วคราวที่ยาวนาน</p>
2010	Martino O Ajangnay	<p>ได้นำเสนอระบบควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอ้อม ตัวควบคุมความเร็วคือตัวควบคุมพีไอ การออกแบบตัวควบคุมพีไอจะเริ่มต้นจากการพิจารณาระบบควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้เป็นระบบควบคุมป้อนกลับความเร็วอันดับสองที่มีซีโรหนึ่งตัว ระบบควบคุมวงปิดนี้มีตัวควบคุมความเร็วและพลาเน็ตเชิงกล ตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนที่ทำให้ระบบวงปิดมีโพลและซีโรเท่ากัน การหักล้างของโพลและซีโรดังกล่าวจะทำให้เกิดระบบควบคุมความเร็วอันดับหนึ่ง สมการที่ใช้คำนวณค่าเกนของตัวควบคุมพีไอจะเกิดจากการเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะวงปิดและพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการ งานวิจัยนี้กำหนดให้ผลตอบสนองวงปิดมีเวลาเข้าที่ (settling time) ที่มีค่าเป็นห้าเท่าของค่าคงตัวเวลาของระบบวงปิด เมื่อมอเตอร์อยู่ในสภาวะไร้โหลด (no load) และความเร็วอ้างอิงมีค่าคงที่ ผลการจำลองสถานการณ์จะแสดงถึงผลตอบสนองความเร็วที่ไม่มีการพุ่งเกิน (overshoot) และไม่มีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว</p> <p>บทความมีจุดเด่น ดังนี้ สมการที่ใช้คำนวณค่าเกนของตัวควบคุมความเร็วไม่มีความซับซ้อน และผลตอบสนองความเร็วติดตามความเร็วอ้างอิงได้ดี</p>

		แต่บทความนี้ไม่กล่าวถึงวิธีการ คำนวณหาค่าเกินของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนตรงและในแกนขวาง และไม่ได้แสดงค่าเกินของตัวควบคุมพีไอ และค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์
2011	M. Chebre A. Meroufel Y. Bendaha	ได้นำเสนอระบบควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอ้อม ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนตรงและในแกนขวางและตัวควบคุมความเร็วคือตัวควบคุมพีไอ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm : GA) จะนำความคิดพลาดระหว่างความเร็วอ้างอิงและผลตอบสนอง มาหาค่าเกินที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมความเร็ว อัลกอริทึมนี้มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คืออินทิเกรตกำลังสองของความผิดพลาดเทียบกับเวลา (ISE) ที่น้อยที่สุดภายในเวลาเริ่มต้นศูนย์จนถึงเวลาที่ผ่านไปนานมาก เมื่อมอเตอร์อยู่ในสภาวะไร้โหลด และความเร็วอ้างอิงมีค่าคงที่ ผลการจำลองสถานการณ์จะแสดงถึงผลตอบสนองความเร็วที่มีการพุ่งเกินเล็กน้อยในสถานะชั่วคราวและไม่มีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว และเมื่อมอเตอร์จับเคลื่อนโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได ผลการจำลองสถานการณ์จะแสดงถึงระบบควบคุมวงปิดให้ผลตอบสนองความเร็วที่ฟื้นคืนสภาพเดิมภายในช่วงระยะเวลาสั้น บทความนี้มีจุดเด่นดังนี้ เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกินที่เหมาะสม ความผิดพลาดของผลตอบสนองจะน้อยที่สุด ผลตอบสนองจึงติดตามความเร็วอ้างอิงได้อย่างรวดเร็ว แต่วิธีเชิงพันธุกรรมมีความซับซ้อน และบทความนี้ไม่กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนตรงและในแกนขวาง
2011	Khalghani, M.R. Shamsi-Nejad M.A. Beyki, K.	ได้นำเสนอระบบควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอ้อม ตัวควบคุมความเร็วคือตัวควบคุมพีไอ อัลกอริทึมอนุภาคฝูงที่ดีที่สุด หรือ พีเอสโอ (particles swarm

		<p>optimization : PSO) จะใช้ความผิดพลาดระหว่างความเร็วอ้างอิงและผลตอบสนองความเร็ว นำมาปรับจูนค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอ อัลกอริทึมพีเอสโอมิฟังก์ชันวัตถุประสงค์คืออินทิเกรตผลคูณระหว่างเวลาและค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (ITAE) ที่น้อยที่สุด อินทิเกรตผลคูณดังกล่าวเริ่มต้นที่เวลาศูนย์จนถึงเวลาที่ผ่านไปนานมาก เมื่อมอเตอร์อยู่ในสภาวะไร้โหลด มอเตอร์ขับเคลื่อนโหลดเชิงกลความเร็วอ้างอิงมีค่าคงที่และมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได ผลการจำลองสถานการณ์ จะแสดงถึงผลตอบสนองความเร็วที่ไม่มีการพุ่งเกินและไม่มีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว</p> <p>บทความมีจุดเด่นดังนี้ ผลตอบสนองความเร็ว ติดตามความเร็วอ้างอิงที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดได้อย่างรวดเร็ว และผลตอบสนองมีเวลาเข้าที่สั้น</p> <p>แต่บทความไม่แสดงสมการและฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมความเร็ว อัลกอริทึมพีเอสโอที่ใช้งานมีความซับซ้อน และบทความไม่กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่เป็นตัวควบคุมพีไอและอยู่ในแผนการควบคุมแบบเวกเตอร์</p>
2012	Sreekumar T Jiji K S	<p>ได้นำเสนอระบบควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอ้อม ตัวควบคุมความเร็วคือตัวควบคุมพีไอหรือตัวควบคุมไอพีทีที่เกิดจากการปรับปรุงโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอ ระบบควบคุมวงปิดที่พิจารณาประกอบด้วยตัวควบคุมความเร็วและฟลันด์เชิงกล ระบบวงปิดมีจุดปรับตั้งคือความเร็วอ้างอิงและมีผลตอบสนองคือความเร็วที่ได้จากการวัด ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอคือระบบอันดับสองที่มีซีโรหนึ่งตัว ตัวควบคุมไอพีทีมีตัวควบคุมไอและตัวควบคุมพี ตัวควบคุมไอได้รับความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณป้อนกลับ และสร้างสัญญาณอ้างอิงเสมือน ตัวควบคุมพีได้รับความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงเสมือน</p>

		<p>และสัญญาณป้อนกลับ และสร้างทอร์กอ้างอิง ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมไอพีคือระบบอันดับสองที่ไม่มีซีโร สมการที่ใช้คำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมไอพีเกิดจากการเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะของระบบวงปิดและพหุนามคุณลักษณะของระบบอันดับสอง เมื่อมอเตอร์อยู่ในสภาวะไร้โหลด ความเร็วอ้างอิงมีค่าคงที่ และตัวควบคุมความเร็วคือตัวควบคุมพีไอ ผลการจำลองสถานการณ์จะแสดงถึงผลตอบสนองความเร็วที่มีการพุ่งเกินเล็กน้อย ถ้าตัวควบคุมความเร็วคือตัวควบคุมไอพี ผลการจำลองสถานการณ์จะแสดงถึงผลตอบสนองความเร็วที่ไม่มีการพุ่งเกิน และมีเวลาเข้าที่สั้นกว่า เมื่อมอเตอร์ขับเคลื่อนโหลดที่เปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได ตัวควบคุมความเร็วคือตัวควบคุมพีไอหรือตัวควบคุมไอพี ผลการจำลองสถานการณ์จะแสดงถึงผลตอบสนองความเร็วที่ฟื้นคืนสภาพเดิมภายในช่วงระยะเวลาสั้นมาก</p> <p>บทความมีจุดเด่นดังนี้ การออกแบบตัวควบคุม ไอพีไม่มีความซับซ้อนและมีวิธีการที่คล้ายกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ผลตอบสนอง ติดตามความเร็วอ้างอิงได้อย่างรวดเร็ว แต่บทความไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีผลกระทบถึงสมรรถนะของผลตอบสนองความเร็ว และไม่กล่าวถึงการออกแบบ ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงและในแกนขวางที่เป็นตัวควบคุมพีไอ และไม่แสดงค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม</p>
2013	Kassem A.M.	<p>ได้นำเสนอระบบควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยตรง ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงและในแกนขวางคือตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมความเร็วคือตัวควบคุมพีไอพีซีแบบปรับตัวที่มีค่าเกณฑ์และค่าเกณฑ์เปลี่ยนแปลงได้ ความผิดพลาดคือผลต่างระหว่างความเร็วอ้างอิงและผลตอบสนอง ค่าเกณฑ์คือผลคูณระหว่างค่าเกณฑ์</p>

		<p>คงที่และเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี และค่าเกนไอคือผลคูณระหว่างค่าเกน ไอคงที่และเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี ตัวควบคุมความเร็วสร้างกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์อ้างอิงในแกนขวาง ตัวควบคุมฟัซซีมีอินพุตคือความผิดพลาดและอัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด การแปลงอินพุตทั้งสองจะให้ค่าระดับการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต 7 เซตในจำนวน 2 ค่า ฐานกฎฟัซซีจะใช้ค่าระดับการเป็นสมาชิก 2 ค่า นำมาประมวลผลตัวคูณค่าเกนพีคงที่และตัวคูณค่าเกนไอคงที่ เมื่อมอเตอร์ขับเคลื่อน โหลดคงที่ และความเร็วอ้างอิงมีค่าคงที่ภายในช่วงระยะเวลาหนึ่งและมีค่าลดลงแบบขั้นบันได ผลการจำลองสถานการณ์จะแสดงถึงผลตอบสนองความเร็วที่มีการพุ่งเกินเล็กน้อย เวลาเข้าที่สั้น และไม่มี ความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว เมื่อมอเตอร์ขับเคลื่อน โหลดที่เพิ่มขึ้นแบบขั้นบันไดในสถานะอยู่ตัว และความเร็วอ้างอิงมีค่าคงที่ ผลการจำลองสถานการณ์จะแสดงถึงผลตอบสนองความเร็วเกือบคงที่</p> <p>บทความมีจุดเด่นดังนี้ ผลตอบสนองติดตามความเร็วอ้างอิงที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดได้อย่างรวดเร็ว แต่การออกแบบตัวควบคุมมีความซับซ้อนและต้องให้ความสนใจในวิธีการควบคุมแบบฟัซซี นอกจากนี้บทความไม่กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงและในแกนขวาง</p>
2013	<p>Q. Wei-min X. Jie, H.Wen-jian C. Chang-mao</p>	<p>ได้นำเสนอระบบควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอ้อม ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงและในแกนขวางคือตัวควบคุมพีไอที่อยู่ในรูปชั้นใน และตัวควบคุมตำแหน่งเชิงกลของโรเตอร์คือตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีพีไอ (fuzzy-neural network PI: FNN-PI) ที่อยู่ในรูปชั้นนอก ตัวควบคุมตำแหน่งดังกล่าวได้รับตำแหน่งเชิงกลที่ได้จากการวัด ความเร็วที่ได้จากการวัด และอินทิเกรตของความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งเชิงกลอ้างอิง</p>

		<p>และตำแหน่งที่ได้จากการวัด และสร้างกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ อังอิงในแกนขวาง ตัวควบคุมตำแหน่งที่ใช้งานมีโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีซีโนอันดับหนึ่งหกชั้น เมื่อมอเตอร์ขับเคลื่อน โหลดและตำแหน่งอังอิงมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดที่ทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทาง ผลการจำลองสถานการณ์จะแสดงถึงผลตอบสนองตำแหน่งเชิงกลที่ติดตามการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งอังอิง เมื่อตำแหน่งอังอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ผลตอบสนองจะมีเวลาเข้าที่ยาวนานขึ้นและมีการพุ่งเกินลดลง เมื่อโมเมนต์ความเฉื่อยมีค่าเพิ่มขึ้น ผลตอบสนองจะไม่แตกต่างจากผลตอบสนองในกรณีที่โมเมนต์ความเฉื่อยมีค่าปกติ</p> <p>บทความมีจุดเด่นดังนี้ ผลตอบสนองติดตามตำแหน่งอังอิง และผลตอบสนองมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ความเฉื่อย</p> <p>แต่การออกแบบตัวควบคุมมีความซับซ้อนมาก และต้องใช้ความเข้าใจในวิธีการควบคุมแบบพีซีซีและโครงข่ายประสาทเทียม และบทความไม่กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนตรงและในแกนขวาง</p>
2013	<p>A. Mechemene L.C. Alaoui M. Zerikat N. Benharir H. Benderradji</p>	<p>ได้นำเสนอระบบควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอ้อม ตัวควบคุมความเร็วและตัวควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กได้รับความผิดพลาดระหว่างค่าอังอิงและผลตอบสนอง และนำมาประมวลผลกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์อังอิงที่จ่ายถึงตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนขวางและในแกนตรงตามลำดับ ตัวควบคุมสี่ตัวนี้คือตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมฟลักซ์และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ามีค่าเกณฑ์ แต่ตัวควบคุมความเร็วมีค่าเกณฑ์เปลี่ยนแปลงไปตามเส้นโค้งพหุนามที่มีค่าเริ่มต้นและค่าสุดท้ายภายในช่วงระยะเวลาที่น้อยกว่าเวลาที่ที่กำหนดไว้ ค่าเกณฑ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้นจนถึงค่าสุดท้ายและมีค่าเกณฑ์ ค่าเกณฑ์ไอจะมีค่าเริ่มต้นเท่ากับศูนย์และ</p>

	<p>เปลี่ยนแปลงเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงของค่าแกนพี เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าแกนที่เปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นจนถึงค่าสุดท้ายที่เหมาะสม มอเตอร์อยู่ในสภาวะไร้โหลด และความเร็วอ้างอิงมีค่าคงที่หรือเปลี่ยนแปลงแบบลาดเอียง ผลการทดลองจะแสดงถึงผลตอบสนองความเร็วที่มีการพุ่งเกินน้อยมากในสถานะชั่วคราว ติดตามความเร็วอ้างอิง และไม่มี ความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว และเมื่อมอเตอร์ขับเคลื่อน โหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได ผลตอบสนองจะ พื้นถิ่นสภาพเดิมภายในช่วงระยะเวลาสั้น ผู้ใช้งานนำวิธีการทดลองผิดพลาดถูก มาเลือกค่าเริ่มต้นและค่าสุดท้ายที่เหมาะสมของค่าแกน</p> <p>บทความมีจุดเด่นดังนี้ ขั้นตอนการออกแบบ ตัวควบคุมความเร็วไม่ซับซ้อน เพราะการออกแบบเริ่มต้นจากการหาค่าพารามิเตอร์แบบลองผิดลองถูก ต่อมาหาค่าพารามิเตอร์ แทนค่าลงในสมการ และคำนวณหาค่าแกนของตัวควบคุมพีไอ ผลตอบสนองความเร็วติดตามความเร็วอ้างอิงได้ดี</p> <p>แต่บทความไม่พิจารณา ความเร็วอ้างอิงที่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงระยะเวลาที่อยู่นอกขอบเขตเส้นโค้งพหุนาม และไม่กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมฟลักซ์แม่เหล็ก โรเตอร์ และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงและในแกนขวาง</p>
--	---

แผนการควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่พิจารณาโดยส่วนใหญ่คือระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ วิธีการต่างๆที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอหรือปรับจูนค่าแกนของตัวควบคุมพีไอมีหลักการคล้ายกัน ระบบควบคุมความเร็ววงปิดมีฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้รับจากพลาเน็ตเชิงกลหรือระบบเชิงกลและตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมพีไอมีค่าแกนที่ทำให้ระบบควบคุมวงปิดไม่มีซีโรหรือมีจำนวนของซีโรลดลง ผลตอบสนองความเร็วจึงมีการพุ่งเกินลดลง การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการและพหุนามคุณลักษณะของระบบวงปิด จะนำมาใช้คำนวณค่าแกนของตัวควบคุมพีไอ ระบบควบคุมวงปิดจึงมีโพลที่ต้องการ

และให้ผลตอบแทนที่มีสมรรถนะอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม การปรับปรุงโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอ การเพิ่มเติมตัวชดเชยที่หักล้างซีโรในระบบควบคุมวงปิด และการใช้อัลกอริทึมคำนวณค่าเกนที่เหมาะสมของตัวควบคุมพีไอ มีจุดประสงค์ในการลดความผิดพลาดระหว่างความเร็วอ้างอิงและผลตอบแทน ระบบควบคุมวงปิดจะให้ผลตอบแทนที่ดี มีการพุ่งเกินต่ำและมีเวลาเข้าที่สั้น งานวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาระบบควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยตรงที่เป็นระบบควบคุมความเร็วและมีตัวควบคุมความเร็ว ตัวควบคุมฟลักซ์แม่เหล็ก ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวาง และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงตัวควบคุม 4 ตัวดังกล่าวคือตัวควบคุมพีไอ การใช้งานตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวพร้อมกันที่มีความสะดวก คือการปรับจูนหรือการคำนวณค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวพร้อมกัน (simultaneous tuning or evaluation over the eight gains of the four PI controllers) แนวทางหรือวิธีการคำนวณค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 8 ค่า จะเริ่มต้นจากการนำแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำในพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์และสมการของตัวควบคุมพีไอ มาเขียนสมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมวงปิดดังกล่าวที่มีตัวแปรสถานะ 8 ตัว สมการปริภูมิสถานะนี้จะให้พหุนามคุณลักษณะของระบบควบคุมวงปิดที่มีค่าเกนของตัวควบคุม 8 ค่าเป็นส่วนหนึ่งของสัมประสิทธิ์ การกำหนดค่าเจาะจงหรือค่าไอเกน (eigenvalues) 8 ค่าของระบบควบคุมวงปิดในระนาบเชิงซ้อน จะได้รับพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการ การกำหนดให้พหุนามคุณลักษณะของระบบควบคุมวงปิด เท่ากับพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการ จะได้รับสมการของพหุนามดีกรี 8 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ที่ตรงกันระหว่างพหุนามคุณลักษณะของระบบควบคุมวงปิดและพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการ จะให้ระบบสมการไม่เชิงเส้นที่มี 8 สมการและ 8 ตัวแปรที่เป็นค่าเกนของตัวควบคุม 8 ค่า และการเขียนโปรแกรมหาคำตอบของระบบสมการไม่เชิงเส้นนี้และการดำเนินการหาคำตอบเชิงเลข จะได้รับคำตอบที่เป็นตัวเลขของค่าเกน 8 ค่า

2.3 สรุป

งานวิจัยก่อนหน้านี้นี้โดยส่วนใหญ่ได้ออกแบบตัวควบคุมความเร็วที่เป็นตัวควบคุมพีไอในระบบควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ การออกแบบตัวควบคุมความเร็วมีหลายวิธีและวิธีการออกแบบบางวิธีมีความซับซ้อน ผลตอบแทนความเร็วจึงมีสมรรถนะที่ขึ้นอยู่กับค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ การพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมวงปิดจะนำมาใช้คำนวณค่าเกนที่เหมาะสมของตัวควบคุมพีไอ การปรับปรุงโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอคือวิธีการหนึ่งที่ใช้ปรับปรุงสมรรถนะของผลตอบแทน การใช้งานตัวควบคุมพีไอและตัวชดเชยจะหักล้างซีโรของลูปควบคุมและลดการพุ่งเกินของผลตอบแทน และการใช้อัลกอริทึมหาค่าเกนที่เหมาะสมของตัวควบคุมพีไอ ดังนั้นการปรับจูนหรือการคำนวณค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวพร้อมกันที่ทำหน้าที่

เป็นตัวควบคุมความเร็ว ตัวควบคุมฟลักซ์แม่เหล็ก และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ จึงไม่
เข้าชื้อนกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ เพราะผลตอบสนองความเร็วมีสมรรถนะที่ขึ้นอยู่กับค่าเกณฑ์ของตัว
ควบคุมพีไอ 4 ตัวนี้



บทที่ 3

แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำและแผนการควบคุมแบบเวกเตอร์โดยตรง

3.1 บทนำ

เมื่อพิจารณาแผนการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ การศึกษาแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีความสำคัญ เพราะแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูกต้องจะแสดงพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้งาน ในทางปฏิบัติ บทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์และใช้สร้างระบบควบคุมความเร็ววงปิดแบบเวกเตอร์ และแผนการควบคุมแบบเวกเตอร์โดยตรงที่มีตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว การเปรียบเทียบระหว่างพฤติกรรมของแบบจำลองพลวัตดังกล่าวและพฤติกรรมของแบบจำลองมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีอยู่ในโปรแกรม Matlab/Simulink จะนำมาใช้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และการแปลงพิกัดอ้างอิงจะนำมาประยุกต์ใช้งานในระบบควบคุม แบบเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.2 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก

วงจรมอเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือด้านสเตเตอร์ (ส่วนอยู่กับที่) และด้านขดลวดโรเตอร์ (ส่วนหมุน) หลักการทำงานพื้นฐานจะคล้ายกับการทำงานของหม้อแปลง มอเตอร์เหนี่ยวนำมีส่วนประกอบสองส่วนนี้เหมือนกับขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิในหม้อแปลงตามลำดับ กระแสไฟฟ้าโรเตอร์จะเกิดจากการเหนี่ยวนำของฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์ ขดลวดสเตเตอร์สามเฟสเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันเอชไอสามเฟสสมดุล และมีกระแสไฟฟ้าเอชไอสเตเตอร์สามเฟสสมดุลไหลผ่าน แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกที่พิจารณามีขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์สมมาตรกัน และมีวงจรแม่เหล็กเชิงเส้น

แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่อยู่ในพิกัดหุคหนึ่ง (กรอบอ้างอิงหุคหนึ่ง) หรือพิกัดสเตเตอร์ (กรอบอ้างอิงสเตเตอร์) มีสมการเชิงอนุพันธ์ในสมการที่ (3-1) ถึง (3-5) มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกไม่มีแรงดันโรเตอร์ ($u_r = 0$) (H. Abu Rub, A. Iqbal, J. Guzinski, 2012) (รายละเอียดของสมการที่ (3-1) ถึง (3-5) แสดงในภาคผนวก ข)

$$\frac{di_{s\alpha}}{dt} = a_1 i_{s\alpha} + a_2 \psi_{r\alpha} + a_3 \omega_r \psi_{r\beta} + a_4 u_{s\alpha} \quad (3-1)$$

$$\frac{di_{s\beta}}{dt} = a_1 i_{s\beta} + a_2 \psi_{r\beta} - a_3 \omega_r \psi_{r\alpha} + a_4 u_{s\beta} \quad (3-2)$$

$$\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = a_5 \psi_{r\alpha} - \omega_r \psi_{r\beta} + a_6 i_{s\alpha} \quad (3-3)$$

$$\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = a_5 \psi_{r\beta} + \omega_r \psi_{r\alpha} + a_6 i_{s\beta} \quad (3-4)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{L_m}{JL_r} \frac{3}{2} \frac{p}{2} (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}) - \frac{1}{J} T_L \quad (3-5)$$

โดยที่ $a_1 = -\frac{L_r^2 R_s + L_m^2 R_r}{\sigma L_s L_r^2}$, $a_2 = \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r^2}$, $a_3 = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}$, $a_4 = \frac{1}{\sigma L_s}$,

$$a_5 = -\frac{R_r}{L_r}, \quad a_6 = \frac{L_m}{L_r} R_r, \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \text{ และ } J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L$$

$u_{s\alpha}$, $u_{s\beta}$ คือแรงดันสเตเตอร์ในแกน α และในแกน β ตามลำดับ

$i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ คือกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกน α และในแกน β ตามลำดับ

$\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$ คือฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ในแกน α และในแกน β ตามลำดับ

ω_r คืออัตราเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ไฟฟ้า

ω_m คืออัตราเร็วเชิงมุมของโรเตอร์เชิงกลหรือความเร็วเพลลา

J คือโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์และโหลดเชิงกลสุทธิ

T_L , T_{Lm} คือโหลดทอร์กและขนาดของโหลดทอร์กตามลำดับ

T_e คือทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า

p คือจำนวนโพลของมอเตอร์

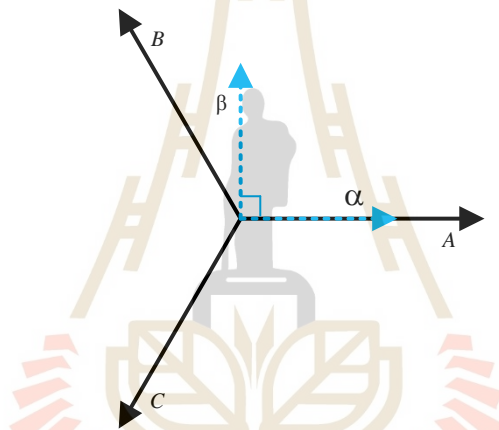
R_s , R_r คือค่าความต้านทานสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ

L_s, L_r คือค่าความเหนี่ยวนำสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ
และ L_m คือค่าความเหนี่ยวนำร่วม

3.3 การแปลงพิกัด

3.3.1 การแปลงแบบคาร์ก (Clarke Transformation ; $ABC - \alpha\beta$)

สัญญาณไฟฟ้าสามเฟสรูปคลื่นไซน์สามารถแสดงให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ปริภูมิที่มีแกนอ้างอิงสามแกนหรือแกนอ้างอิง ABC แกนแต่ละแกนทำมุมต่อกัน 120 องศา แกนอ้างอิง ABC จะแปลงให้อยู่ในรูปปริมาณสองเฟส (ปริมาณเอชซี) บนแกนอ้างอิง $\alpha\beta$ ที่เป็นแกนตั้งฉากกันในพิกัดหยุดนิ่ง (stationary coordinate) (H. Abu Rub, A. Iqbal, J. Guzinski, 2012) ที่แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แกนอ้างอิงสามเฟส ABC และแกนอ้างอิงสองเฟส $\alpha\beta$

การแปลงแบบคาร์กจะแปลงแกน ABC ไปเป็นแกน $\alpha\beta$ และมีความสัมพันธ์ในสมการที่ (3-6)

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{3}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

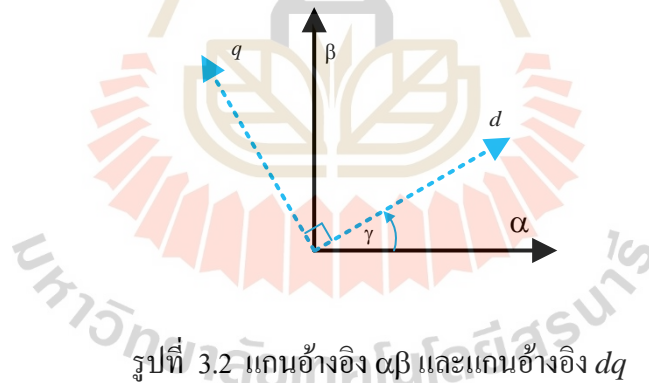
และการแปลงย้อนกลับจากแกน $\alpha\beta$ ไปเป็นแกน ABC จะใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (3-7)

$$\begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

โดยที่ f ใช้แทน u_s, i_s, i_r, ψ_s และ ψ_r

3.3.2 การแปลงแบบพาร์ก (Park's Transformation ; $\alpha\beta-dq$)

การแปลงแบบพาร์กคือการแปลงพิกัดหนึ่งที่เป็นปริมาณสองเฟสให้อยู่ในพิกัดหมุนหรือพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ (rotating coordinate) ที่มีแกนอ้างอิงคือแกนตรง (direct axis ; d) และแกนขวาง (quadrature axis ; q) ที่ตั้งฉากกัน แกนอ้างอิง dq นี้จะมีการเปลี่ยนตำแหน่งเชิงมุมไปตามมุม γ ที่เป็นมุมระหว่างแกนตรงกับแกน α ที่แสดงในรูปที่ 3.2 การแปลงแบบพาร์กมีประโยชน์ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์



รูปที่ 3.2 แกนอ้างอิง $\alpha\beta$ และแกนอ้างอิง dq

การแปลงแบบพาร์กจะแปลงพิกัดจากแกน $\alpha\beta$ ไปเป็นแกน dq และมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$f_{dq} = (f_\alpha \cos(\gamma) + f_\beta \sin(\gamma)) + j(f_\beta \cos(\gamma) - f_\alpha \sin(\gamma)) \quad \text{หรือ} \quad f_{dq} = (f_\alpha + jf_\beta)e^{-j\gamma}$$

โดยที่ $f_{dq} = f_d + jf_q$ และ $j = \sqrt{-1}$

การจัดรูปใหม่จะได้สมการที่ใช้ในการแปลงแบบพาร์กดังนี้

การแปลงพิกัดจากแกน $\alpha\beta$ ไปเป็นแกน dq จะใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (3-8)

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

และการแปลงย้อนกลับจากแกน dq ไปเป็นแกน $\alpha\beta$ จะใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (3-9)

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

(ที่มาของสมการที่ใช้ในการแปลงพิกัดจากสมการที่ (3-6) ถึงสมการที่ (3-9) ได้แสดงในภาคผนวก ก)

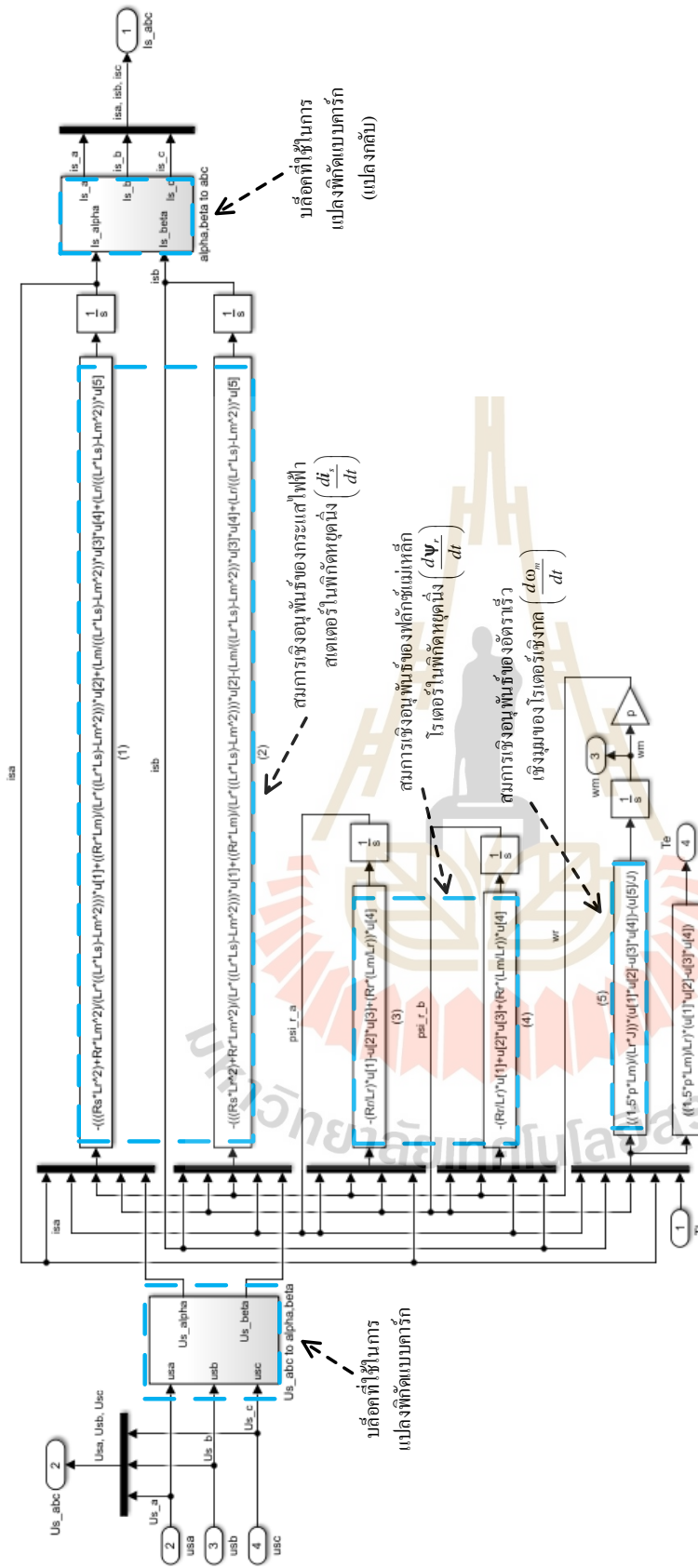
3.4 การจำลองสถานการณ์แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

เมื่อพิจารณาแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ การนำสมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำในพิกัดหุคหนึ่งในสมการที่ (3-1) ถึงสมการที่ (3-5) มาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนโปรแกรม Matlab/simulink จะได้ชุดบล็อกของแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่แสดงในรูปที่ 3.3 ถึงรูปที่ 3.6 การแปลงแบบคาร์กในสมการที่ (3-6) จะแปลงแรงดันเอซีสเตเตอร์สามเฟสไปเป็นแรงดันสเตเตอร์สองเฟส ชุดบล็อกที่ใช้ในการแปลงแบบคาร์กที่แสดงในรูปที่ 3.4 การแปลงย้อนกลับแบบคาร์กในสมการที่ (3-7) จะแปลงกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์สองเฟสที่ได้จากระบบสมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ ไปเป็นกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์สามเฟส ชุดบล็อกที่ใช้ในการแปลงย้อนกลับที่แสดงในรูปที่ 3.5 กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์สามเฟสที่ได้จะนำมาป้อนกลับในแผนการควบคุมแบบเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ บล็อกของแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะแสดงในรูปที่ 3.6

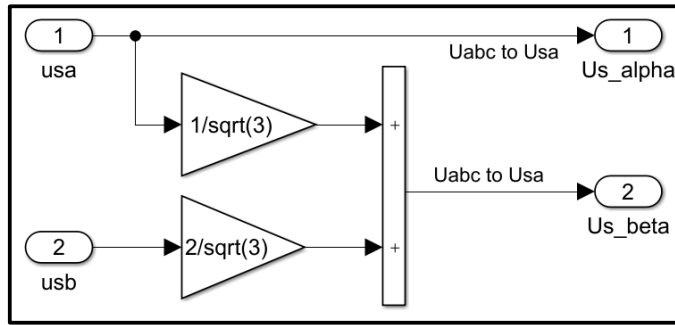
พฤติกรรมของแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะนำมาเปรียบเทียบกับพฤติกรรมของแบบจำลองมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Three-Phase Asynchronous Machine) ใน SimPowerSystem ของโปรแกรม Matlab/simulink แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำและแบบจำลองมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันเอซีสเตเตอร์สามเฟสตัวเดียวกัน และมีค่าพารามิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 3.1 เหมือนกัน ชุดบล็อกที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์จะแสดงในรูปที่ 3.7 แบบจำลองมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำคือบล็อกในสี่เหลี่ยมเส้นประสีน้ำเงิน

และบล็อกของแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำคือบล็อก IM model ในสี่เหลี่ยมเส้นประสีแดง การวัดสัญญาณของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์เฟส a กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์เฟส b กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์เฟส c ความเร็วเพลา และทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้รับจาก แบบจำลองทั้งคู่ และการนำสัญญาณที่วัดได้มาเปรียบเทียบกัน จะใช้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

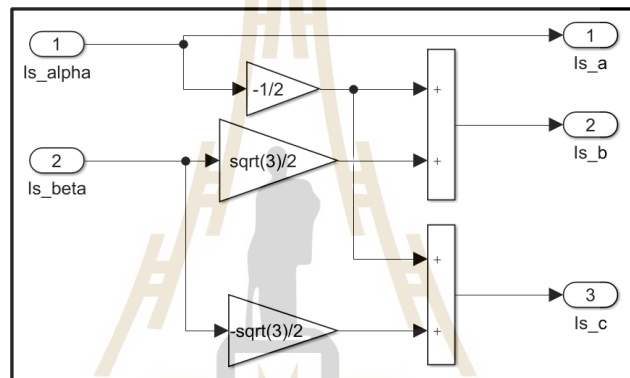




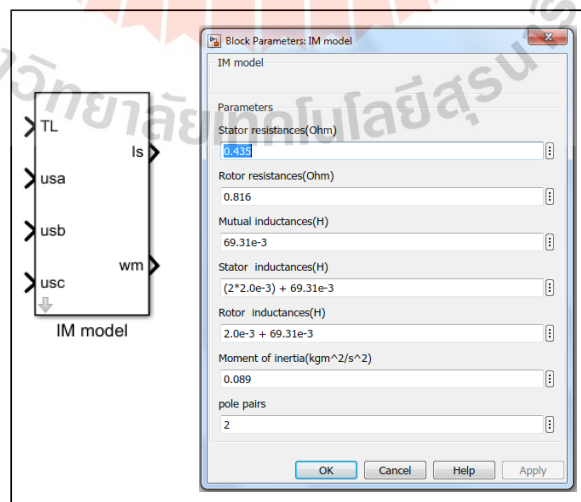
รูปที่ 3.3 ชุดบล็อกของแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก



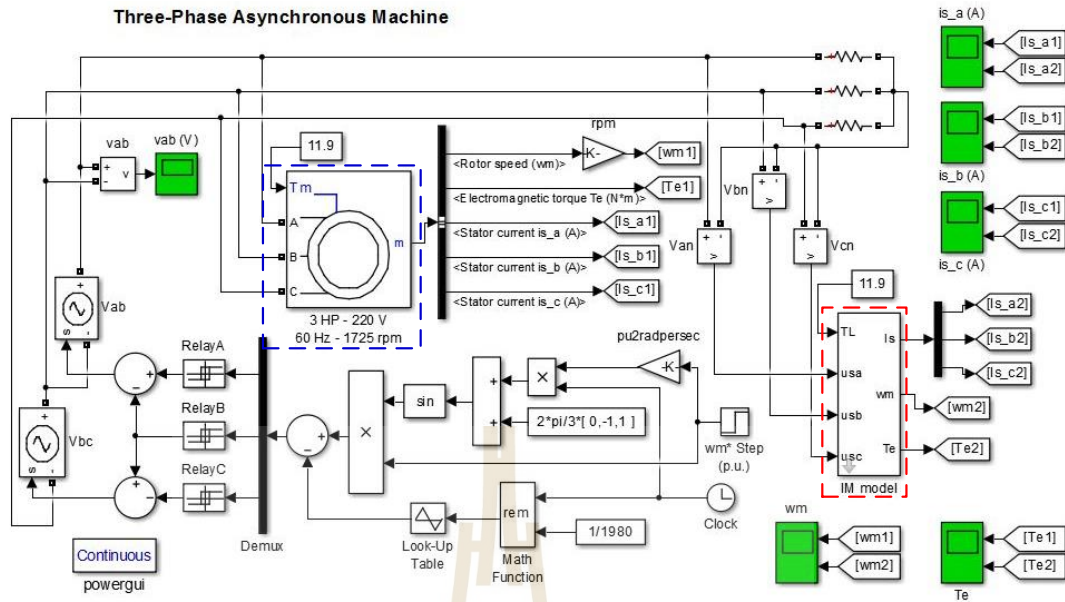
รูปที่ 3.4 ชุดบล็อกที่ใช้ในการแปลงแบบคาร์ก



รูปที่ 3.5 ชุดบล็อกที่ใช้ในการแปลงย้อนกลับแบบคาร์ก



รูปที่ 3.6 บล็อกของแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



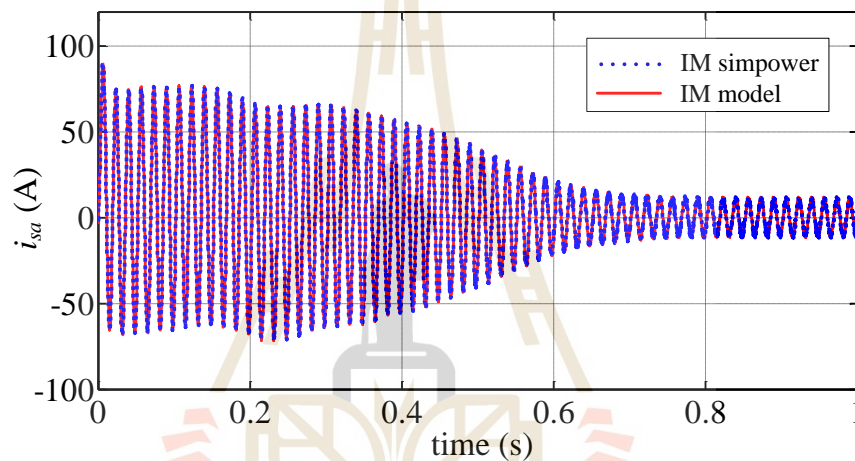
รูปที่ 3.7 การจำลองสถานการณ์แบบจำลองมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (เส้นประสีน้ำเงิน) และแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (เส้นประสีแดง)

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

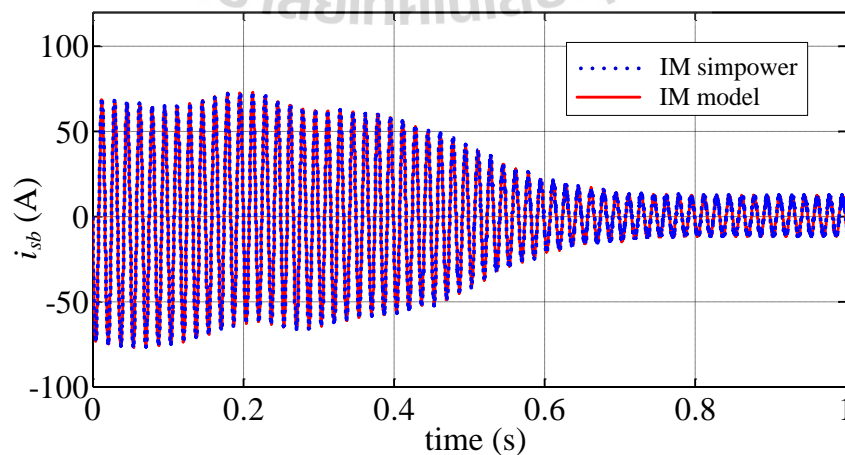
พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	ค่าพารามิเตอร์
ค่าความต้านทานสเตเตอร์ (R_s)	0.435 Ω
ค่าความต้านทานโรเตอร์ (R_r)	0.816 Ω
ค่าความเหนี่ยวนำรวม (L_m)	69.31 mH
ค่าความเหนี่ยวนำสเตเตอร์ (L_s)	73.3 mH
ค่าความเหนี่ยวนำโรเตอร์ (L_r)	71.3 mH
โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์และโหลดเชิงกล (J)	0.089 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
ขนาดของโหลดทอร์ก (T_{Lm})	11.9 N·m
จำนวนโพลของมอเตอร์ (p)	4

การจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 3.7 ใช้เวลา 1 วินาที และให้กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์สามเฟส ความเร็วเพลา และทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า ที่แสดงในรูปที่ 3.8 ถึงรูปที่ 3.12 ตามลำดับ ในช่วงระยะเวลาที่มอเตอร์เริ่มเดินเครื่องหรือเริ่มต้นการหมุน กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์สามเฟสมีค่ายอดหรือ

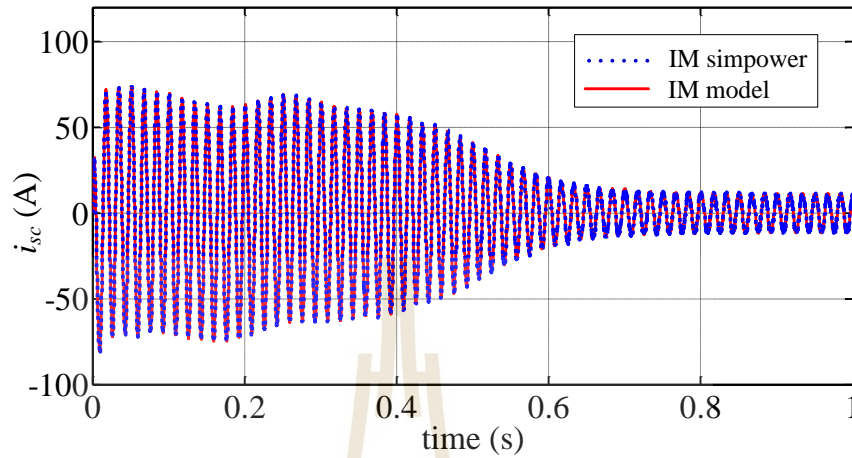
ขนาดค่อนข้างสูงและทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้ามีการแกว่งมาก จากนั้นมอเตอร์และโหลดเชิงกลหมุนด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์มีขนาดลดลง และทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้ามีการแกว่งน้อยลงและมีขนาดลดลง ต่อมามอเตอร์และโหลดเชิงกลหมุนด้วยความเร็วคงที่ กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์มีขนาดคงที่ และทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้ามีขนาดคงที่และเท่ากับโหลดทอร์ก ในสถานะอยู่ตัว แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (IM model) และแบบจำลองมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (IM simpower) จะให้กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ ความเร็วเพลา และทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมือนกันและไม่มีความแตกต่าง ดังนั้นแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงมีความถูกต้อง และจะนำมาใช้งานต่อไป



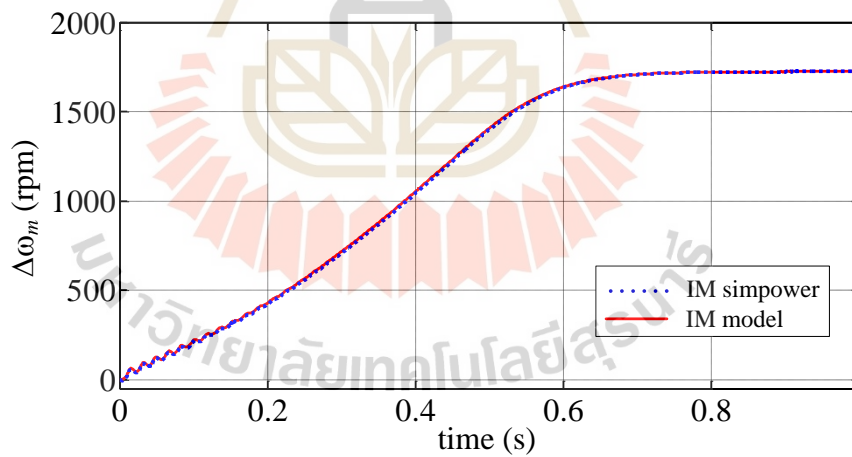
รูปที่ 3.8 กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์เฟส a ที่ได้รับจากแบบจำลองมาตรฐาน (เส้นประสีน้ำเงิน) และแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (เส้นสีแดง)



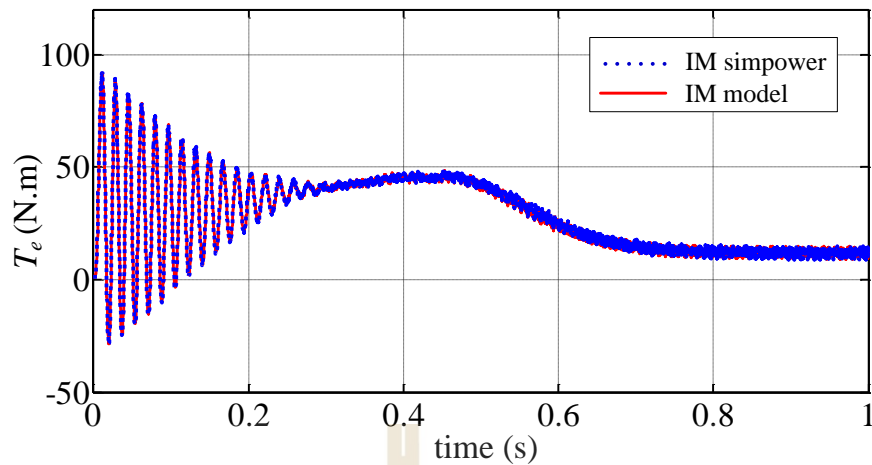
รูปที่ 3.9 กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์เฟส b ที่ได้รับจากแบบจำลองมาตรฐาน (เส้นประสีน้ำเงิน) และแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (เส้นสีแดง)



รูปที่ 3.10 กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์เฟส c ที่ได้รับจากแบบจำลองมาตรฐาน (เส้นประสีน้ำเงิน) และแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (เส้นสีแดง)

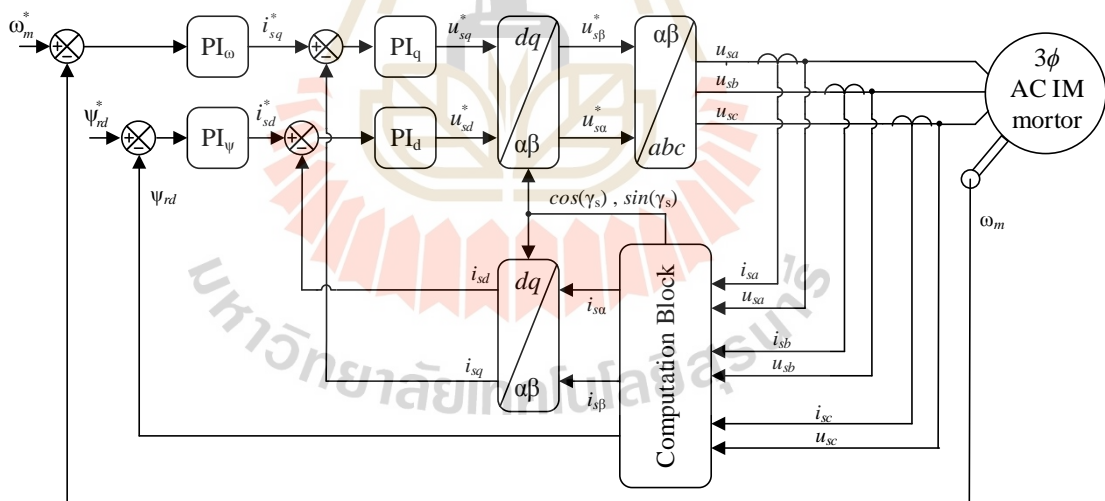


รูปที่ 3.11 ความเร็วเพลลาที่ได้รับจากแบบจำลองมาตรฐาน (เส้นประสีน้ำเงิน) และแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (เส้นสีแดง)



รูปที่ 3.12 ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้รับจากแบบจำลองมาตรฐาน (เส้นประสีน้ำเงิน) และแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (เส้นสีแดง)

3.5 การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรง



รูปที่ 3.13 แผนการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรง

เมื่อพิจารณาระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรงที่แสดงในรูปที่ 3.13 พลานต์คือแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่อยู่ในพิกัดหุคหนึ่งหรือพิกัดสเตเตอร์ ตัวควบคุมความเร็ว (PI_{ω}) ตัวควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ (PI_{ψ})

ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรง (แกน d) และในแกนขวาง (แกน q) (PI_d และ PI_q) คือตัวควบคุมพีไอที่อยู่ในพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์หรือพิกัดซิงโครนัส แผนการควบคุมแบบเวกเตอร์จะแยกการควบคุมความเร็วและสนามแม่เหล็กออกจากกันอย่างอิสระ เพราะการแปลงพิกัดจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปเป็นกรอบอ้างอิงซิงโครนัส จะเปลี่ยนกรอบอ้างอิงของแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสมการที่ (3-1) ถึงสมการที่ (3-5) ให้อยู่ในพิกัดซิงโครนัส กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางจะสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงจะสร้างฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ ในทางปฏิบัติอินเวอร์เตอร์สามเฟสจะสร้างและจ่ายแรงดันสเตเตอร์ถึงมอเตอร์เหนี่ยวนำ แรงดันเอชีสเตเตอร์จะมีค่าอาร์เอ็มเอสและความถี่เปลี่ยนแปลงได้

มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกสามเฟสมีแบบจำลองพลวัตที่อยู่ในพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ ($\psi_{rq} = 0$) และมีสมการเชิงอนุพันธ์ (รายละเอียดที่มาของสมการ (3-10) ถึง (3-14) แสดงในภาคผนวก ข)

$$\frac{di_{sd}}{dt} = a_1 i_{sd} + a_2 \psi_{rd} + \omega_{\psi r} i_{sq} + a_4 u_{sd} \quad (3-10)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = a_1 i_{sq} - \omega_{\psi r} i_{sd} - a_3 \omega_r \psi_{rd} + a_4 u_{sq} \quad (3-11)$$

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = a_5 \psi_{rd} + a_6 i_{sd} \quad (3-12)$$

$$\omega_{\psi r} = \omega_r + \frac{a_6 i_{sq}}{\psi_{rd}} \quad (3-13)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{K_T}{J} \psi_{rd} i_{sq} - \frac{1}{J} T_L \quad (3-14)$$

โดยที่ $\omega_r = \frac{p}{2} \omega_m$, $K_T = 0.75p \frac{L_m}{L_r}$, $T_L = T_{Lm} \frac{\omega_m}{|\omega_m| + \epsilon}$

u_{sd} , u_{sq} คือแรงดันสเตเตอร์ในแกนตรงและในแกนขวางตามลำดับ

i_{sd}, i_{sq}	คือกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงและในแกนขวางตามลำดับ
Ψ_{rd}, Ψ_{rq}	คือฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ในแกนตรงและในแกนขวางตามลำดับ
$\varepsilon = 0.001$	คือค่าคงที่บวกน้อยมาก
และ ω_{pr}	คืออัตราเร็วเชิงมุมของพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์

ตัวควบคุมความเร็วและตัวควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กจะอยู่ในรูปควบคุมชั้นนอก และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงและในแกนขวางจะอยู่ในรูปควบคุมชั้นใน รูปควบคุมชั้นนอกจะมีการป้อนกลับของความเร็วเพลลาและขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ (Ψ_{rd}) และรูปควบคุมชั้นในจะมีการป้อนกลับของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงและในแกนขวางที่เป็นกระแสไฟฟ้าดีซี การแปลงพิกัดของกระแสไฟฟ้าเอชีสเตเตอร์ ($i_{s\alpha}, i_{s\beta}$) จากพิกัดหุคหนึ่งไปเป็นพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ จะได้รับกระแสไฟฟ้าดีซีสเตเตอร์ (i_{sd}, i_{sq}) การวัดกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์สามเฟส (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) และการแปลงจากสามเฟสไปเป็นสองเฟสจะให้กระแสไฟฟ้าเอชีสเตเตอร์ ตัวควบคุมความเร็วจะนำความผิดพลาดของความเร็ว ($\Delta\omega_m$) มาคำนวณหากระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางอ้างอิง (i_{sq}^*) ที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าอ้างอิง ($T_e^* = K_T \Psi_{rd}^* i_{sq}^*$) ตัวควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กจะนำความผิดพลาดของฟลักซ์แม่เหล็ก ($\Delta\Psi_{rd}$) มาคำนวณหากระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงอ้างอิง (i_{sd}^*) ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางจะนำความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าในแกนขวาง (Δi_{sq}) มาคำนวณหาแรงดันสเตเตอร์ในแกนขวางอ้างอิง (u_{sq}^*) และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงจะนำความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าในแกนตรง (Δi_{sd}) มาคำนวณหาแรงดันสเตเตอร์ในแกนตรงอ้างอิง (u_{sd}^*) แรงดันสเตเตอร์อ้างอิงจะอยู่ในพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์และเป็นแรงดันดีซี การแปลงพิกัดย้อนกลับของแรงดันดีซี สเตเตอร์อ้างอิงจากพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ไปเป็นพิกัดหุคหนึ่งจะได้รับแรงดันเอชีสเตเตอร์อ้างอิง ($u_{s\alpha}^*, u_{s\beta}^*$) การแปลงแรงดันเอชีสเตเตอร์อ้างอิงจากสองเฟสไปเป็นสามเฟสจะให้แรงดัน สเตเตอร์สามเฟส (u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}) เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำได้รับแรงดันสเตเตอร์สามเฟส มอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์สามเฟส (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) ไหลผ่านและสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า ($T_e = K_T \Psi_{rd} i_{sq}$) ที่ขับเคลื่อนโหลดเชิงกลให้เกิดการหมุน กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์สามเฟสที่ได้จากการวัดจะแปลงไปเป็นกระแสไฟฟ้าเอชีสเตเตอร์สองเฟส ($i_{s\alpha}, i_{s\beta}$) และแรงดัน สเตเตอร์สามเฟส (u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}) ที่ได้จากการวัดจะแปลงไปเป็นแรงดันเอชีสเตเตอร์สองเฟส ($u_{s\alpha}, u_{s\beta}$) กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์สองเฟสและแรงดันสเตเตอร์สองเฟสจะนำมาใช้คำนวณหาฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์ ($\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}$) และฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ ($\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$) ที่อยู่ในพิกัดหุคหนึ่งตามลำดับ และค่าโคไซน์และค่าไซน์ของตำแหน่งเชิงมุมของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่ใช้ในการแปลงพิกัด (γ_s) จะคำนวณได้จาก

$$\cos(\gamma_s) = \frac{\Psi_{r\alpha}}{\Psi_{rd}} \quad \text{และ} \quad \sin(\gamma_s) = \frac{\Psi_{r\beta}}{\Psi_{rd}} \quad \text{โดยที่} \quad \Psi_{rd} = \sqrt{\Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2}$$

ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำคือปริมาณที่ไม่สามารถวัดได้ แต่แรงดันเอชีสเตเตอร์และกระแสไฟฟ้าเอชีสเตเตอร์คือปริมาณที่สามารถวัดได้จากขั้วต่อของมอเตอร์ แรงดันเอชีสเตเตอร์และกระแสไฟฟ้าเอชีสเตเตอร์จะนำมาใช้คำนวณหาฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่อยู่ในพิกัดหุคหนึ่ง ฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์ (Ψ_s) ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ (Ψ_r) แรงดันสเตเตอร์ (u_s) กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ (i_s) และกระแสไฟฟ้าโรเตอร์ (i_r) จะมีความสัมพันธ์ระหว่างกันดังนี้

$$\Psi_s = \int_0^t (u_s - R_s i_s) d\tau \quad (3-15)$$

$$\Psi_s = L_s i_s + L_m i_r \quad (3-16)$$

$$\Psi_r = L_r i_r + L_m i_s \quad (3-17)$$

โดยที่ $u_s = u_{s\alpha} + j u_{s\beta}$, $i_s = i_{s\alpha} + j i_{s\beta}$, $i_r = i_{r\alpha} + j i_{r\beta}$, $\Psi_s = \Psi_{s\alpha} + j \Psi_{s\beta}$
และ $\Psi_r = \Psi_{r\alpha} + j \Psi_{r\beta}$

ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ในสมการที่ (3-17) มีพจน์ของกระแสไฟฟ้าโรเตอร์ที่ไม่สามารถวัดได้ในทางปฏิบัติ การจัดรูปสมการที่ (3-16) ใหม่และการแทนค่ากระแสไฟฟ้าโรเตอร์ลงในสมการที่ (3-17) จะได้รับสมการที่คำนวณหาฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ได้ดังนี้

$$\Psi_r = \frac{L_r}{L_m} (\Psi_s - i_s L_s \delta) \quad (3-18)$$

โดยที่ $\delta = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s L_r}$

ฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์และฟลักซ์แม่เหล็ก โรเตอร์จะคำนวณได้จากสมการที่ (3-15) และ (3-18) ตามลำดับ

ระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์มีตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวดังนี้

ตัวควบคุมความเร็ว

$$i_{sq}^* = K_{P\omega}\Delta\omega_m + K_{I\omega}\int_0^t \Delta\omega_m d\tau \quad (3-19)$$

ตัวควบคุมฟลักซ์แม่เหล็ก

$$i_{sd}^* = K_{P\psi}\Delta\psi_{rd} + K_{I\psi}\int_0^t \Delta\psi_{rd} d\tau \quad (3-20)$$

ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวาง

$$u_{sq} = u_{sq}^* = K_{Pq}\Delta i_{sq} + K_{Iq}\int_0^t \Delta i_{sq} d\tau \quad (3-21)$$

และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรง

$$u_{sd} = u_{sd}^* = K_{Pd}\Delta i_{sd} + K_{Id}\int_0^t \Delta i_{sd} d\tau \quad (3-22)$$

โดยที่ $\Delta\omega_m = \omega_m^* - \omega_m$, $\Delta\psi_{rd} = \psi_{rd}^* - \psi_{rd}$, $\Delta i_{sq} = i_{sq}^* - i_{sq}$,
 $\Delta i_{sd} = i_{sd}^* - i_{sd}$

ω_m^* คืออัตราเร็วเชิงมุมอ้างอิงของโรเตอร์เชิงกลหรือความเร็วเพลลาอ้างอิง

ψ_{rd}^* คือขนาดอ้างอิงของฟลักซ์แม่เหล็ก โรเตอร์

$K_{P\omega}$, $K_{I\omega}$ คือค่าเกนพีและค่าเกนไอของตัวควบคุมความเร็ว

$K_{P\psi}$, $K_{I\psi}$ คือค่าเกนพีและค่าเกนไอของตัวควบคุมฟลักซ์แม่เหล็ก

K_{Pq}, K_{Iq} คือค่าเกนพีและค่าเกนไอของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนขวาง
และ K_{Pd}, K_{Id} คือค่าเกนพีและค่าเกนไอของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนตรง

3.6 สรุป

แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกที่สร้างจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่อยู่ในพิกัดหุคหนึ่ง มีพฤติกรรมที่เหมือนกับพฤติกรรมของแบบจำลองมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำใน Simpowersystem ของโปรแกรม Matlab/simulink แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ดังกล่าวคือพลาตันต์ในระบบควบคุมเวกเตอร์โดยตรง ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์มีตัวควบคุมพีไอสี่ตัว การปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอสี่ตัวคืองานที่ต้องดำเนินการต่อไป ผลการจำลองสถานการณ์ของแผนการควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่แสดงในรูปที่ 3.13 จะแสดงในบทที่ 4 และจะนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้รับจากสมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมวงปิด การเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์จะใช้ตรวจสอบความถูกต้องของสมการปริภูมิสถานะที่นำมาคำนวณค่าเกนของตัวควบคุมพีไอสี่ตัว

บทที่ 4

สมการปริภูมิสถานะวงปิดและการคำนวณค่าเกินของตัวควบคุมพีไอ

4.1 บทนำ

ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรงหรือแผนการควบคุมเวกเตอร์ที่พิจารณา มีตัวควบคุมพีไอสี่ตัว ค่าเกินพีและค่าเกินไอของตัวควบคุมแต่ละตัวมีผลกระทบถึงผลตอบสนองความเร็วเพลลา ระบบควบคุมวงปิดดังกล่าวมีสมการปริภูมิสถานะที่มีตัวแปรสถานะ 8 ตัวแปร เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของสมการปริภูมิสถานะมีค่าไอเกิน 8 ค่าที่ใช้คำนวณหาหรือปรับจูนค่าเกินของตัวควบคุมพีไอสี่ตัวพร้อมกัน สมการปริภูมิสถานะที่มีความถูกต้องจะให้ผลเฉลยหรือคำตอบของตัวแปรสถานะที่เหมือนกับตัวแปรสถานะที่ได้รับจากแผนการควบคุมเวกเตอร์โดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ บทนี้จะกล่าวถึงสมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบเวกเตอร์หรือสมการปริภูมิสถานะวงปิด การตรวจสอบความถูกต้องของสมการปริภูมิสถานะวงปิด และการปรับจูนค่าเกินของตัวควบคุมพีไอสี่ตัวพร้อมกัน

4.2 สมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิด

กำหนดให้ขนาดอ้างอิงของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ (ψ_{rd}^*) เป็นค่าพารามิเตอร์คงที่ และกำหนดให้ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์มีตัวแปรสถานะ Δi_{sd} , Δi_{sq} , $\Delta \psi_{rd}$, $\Delta \omega_m$, $\int_0^t \Delta i_{sd} d\tau$, $\int_0^t \Delta i_{sq} d\tau$, $\int_0^t \Delta \psi_{rd} d\tau$ และ $\int_0^t \Delta \omega_m d\tau$

การเขียนสมการปริภูมิสถานะวงปิดจะเริ่มต้นจากการหาอนุพันธ์ของตัวแปรสถานะ Δi_{sd} , Δi_{sq} , $\Delta \psi_{rd}$ และ $\Delta \omega_m$ เทียบกับเวลา ต่อมาพิจารณาและแทนค่าจากสมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่อยู่ในพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ในสมการที่ (3-10) ถึง (3-14) และสมการของตัวควบคุมพีไอสี่ตัวในสมการที่ (3-19) ถึง (3-22) ลงในพจน์ที่เกิดจากการหาอนุพันธ์ หลังจากการจัดรูปสมการครั้งที่หนึ่งและแทนค่าจากสมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสมการที่ (3-12) และ (3-14) และสมการของตัวควบคุมพีไอสองตัวในสมการที่ (3-19) และ (3-20) ลงในพจน์ที่เกิดจากการจัดรูปสมการครั้งที่หนึ่ง

การจัดรูปสมการครั้งที่สองจะให้สมการเชิงอนุพันธ์ที่มีสัมประสิทธิ์สัมพัทธ์กับค่าเกินของตัวควบคุมพีไอดังนี้ (การได้รับสมการที่ (4-1) ถึง (4-4) มีรายละเอียดที่แสดงในภาคผนวก ค)

$$\begin{aligned} \frac{d(\Delta i_{sd})}{dt} = & (a_1 - a_4 K_{Pd} + a_6 K_{P\psi}) \Delta i_{sd} + (a_2 + K_{I\psi} + a_5 K_{P\psi} - K_{P\psi} (a_1 + \\ & a_6 K_{P\psi})) \Delta \psi_{rd} - a_4 K_{Id} \int_0^t \Delta i_{sd} d\tau - K_{I\psi} (a_1 + a_6 K_{P\psi}) \int_0^t \Delta \psi_{rd} d\tau \\ & - \omega_{\psi} i_{sq} - (a_2 + a_5 K_{P\psi}) \psi_{rd}^* \end{aligned} \quad (4-1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d(\Delta i_{sq})}{dt} = & (a_1 - a_4 K_{Pq} + \frac{K_T}{J} K_{P\omega} \psi_{rd}^*) \Delta i_{sq} + K_{P\omega} \dot{\omega}_m^* + \frac{K_{P\omega}}{J} T_L - \\ & a_4 K_{Iq} \int_0^t \Delta i_{sq} d\tau - (a_1 K_{I\omega} + \frac{K_T}{J} K_{P\omega} K_{I\omega} \psi_{rd}^*) \int_0^t \Delta \omega_m d\tau + \omega_{\psi} i_{sd} \\ & + \left(\frac{K_T}{J} K_{P\omega} i_{sq} - a_3 \omega_r \right) \Delta \psi_{rd} + \frac{a_3 P}{2} \psi_{rd}^* \omega_m^* + (K_{I\omega} - a_1 K_{P\omega} - \\ & \left(\frac{a_3 P}{2} + \frac{K_T}{J} K_{P\omega}^2 \right) \psi_{rd}^*) \Delta \omega_m \end{aligned} \quad (4-2)$$

$$\frac{d(\Delta \psi_{rd})}{dt} = a_6 \Delta i_{sd} + (a_5 - a_6 K_{P\psi}) \Delta \psi_{rd} - a_6 K_{I\psi} \int_0^t \Delta \psi_{rd} d\tau - a_5 \psi_{rd}^* \quad (4-3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d(\Delta \omega_m)}{dt} = & \frac{K_T}{J} \psi_{rd}^* \Delta i_{sq} - \frac{K_T}{J} K_{P\omega} \psi_{rd}^* \Delta \omega_m - \frac{K_T}{J} K_{I\omega} \psi_{rd}^* \int_0^t \Delta \omega_m d\tau + \frac{1}{J} T_L \\ & + \dot{\omega}_m^* + \frac{K_T}{J} i_{sq} \Delta \psi_{rd} \end{aligned} \quad (4-4)$$

การจัดรูปสมการที่ (4-1) ถึง (4-4) จะสร้างสมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิด

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{\Phi} + \mathbf{Bu} \quad (4-5)$$

โดยที่ $\mathbf{x} = [\Delta i_{sd} \quad \Delta i_{sq} \quad \Delta \psi_{rd} \quad \Delta \omega_m \quad \int_0^t \Delta i_{sd} d\tau \quad \int_0^t \Delta i_{sq} d\tau \quad \int_0^t \Delta \psi_{rd} d\tau \quad \int_0^t \Delta \omega_m d\tau]^T$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} & 0 & a_{15} & 0 & a_{17} & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & a_{24} & 0 & a_{26} & 0 & a_{28} \\ a_{31} & 0 & a_{33} & 0 & 0 & 0 & a_{37} & 0 \\ 0 & a_{42} & 0 & a_{44} & 0 & 0 & 0 & a_{48} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & b_{43} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = [\omega_m^* \quad \dot{\omega}_m^* \quad T_L]^T$$

\mathbf{x} คือเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะ

$\dot{\mathbf{x}}$ คือเวกเตอร์ของอนุพันธ์ตัวแปรสถานะเทียบกับเวลา

\mathbf{A} คือเมทริกซ์สัมประสิทธิ์

Φ คือเวกเตอร์การรบกวน

\mathbf{B} คือเมทริกซ์อินพุต

และ \mathbf{u} คือเวกเตอร์อินพุต

เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ \mathbf{A} เมทริกซ์อินพุต \mathbf{B} และเวกเตอร์การรบกวน Φ มีสมาชิกแต่ละตัวที่มีรายละเอียดดังนี้

$$a_{11} = a_1 - a_4 K_{Pd} + a_6 K_{P\psi}, \quad a_{13} = a_2 + K_{I\psi} + a_5 K_{P\psi} - K_{P\psi}(a_1 + a_6 K_{P\psi})$$

$$a_{15} = -a_4 K_{Id}, \quad a_{17} = -K_{I\psi}(a_1 + a_6 K_{P\psi}), \quad a_{22} = a_1 - a_4 K_{Pq} + \frac{K_T}{J} K_{P\omega} \psi_{rd}^*$$

$$\begin{aligned}
a_{24} &= K_{I\omega} - a_1 K_{P\omega} - \left(\frac{a_3 p}{2} + \frac{K_T}{J} K_{P\omega}^2 \right) \psi_{rd}^* , \quad a_{26} = -a_4 K_{Iq} , \\
a_{28} &= -a_1 K_{I\omega} - \frac{K_T}{J} K_{P\omega} K_{I\omega} \psi_{rd}^* , \quad a_{31} = a_6 , \quad a_{33} = a_5 - a_6 K_{P\psi} , \\
a_{37} &= -a_6 K_{I\psi} , \quad a_{42} = \frac{K_T}{J} \psi_{rd}^* , \quad a_{44} = -\frac{K_T}{J} K_{P\omega} \psi_{rd}^* , \\
a_{48} &= -\frac{K_T}{J} K_{I\omega} \psi_{rd}^* , \quad \varphi_1 = -\omega_{\psi} i_{sq} - (a_2 + a_5 K_{P\psi}) \psi_{rd}^* \\
\varphi_2 &= \omega_{\psi} i_{sd} + \left(\frac{K_T}{J} K_{P\omega} i_{sq} - a_3 \omega_r \right) \Delta \psi_{rd} , \quad \varphi_3 = -a_5 \psi_{rd}^* , \\
\varphi_4 &= \frac{K_T}{J} i_{sq} \Delta \psi_{rd} , \quad b_{21} = \frac{a_3 p}{2} \psi_{rd}^* , \quad b_{22} = K_{P\omega} , \quad b_{23} = \frac{K_{P\omega}}{J} \\
\text{และ } b_{43} &= \frac{1}{J}
\end{aligned}$$

ระบบควบคุมความเร็ววงปิดดังกล่าวคือตัวอย่างหนึ่งของระบบไม่เชิงเส้น ถ้าความเร็วเพลลาอ้างอิงมีค่าคงที่ ($\dot{\omega}_m^* = 0$) โหลดทอร์คที่ด้านทานการหมุนไม่มีการเปลี่ยนแปลง ($\dot{T}_L = 0$) และตัวแปรสถานะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ($\dot{\mathbf{x}} = 0$) ระบบควบคุมความเร็ววงปิดในสมการที่ (4-5) จะมีจุดสมดุลหรือจุดการทำงานในสถานะอยู่ตัวที่คำนวณได้จาก

$$\mathbf{x}_e = -\mathbf{A}^{-1}(\Phi + \mathbf{B}\mathbf{u}) \quad (4-6)$$

ระบบควบคุมความเร็ววงปิดมีจุดการทำงาน (\mathbf{x}_e) ที่ขึ้นอยู่กับเวกเตอร์การรั้งความ Φ , ความเร็วเพลลาอ้างอิง ω_m^* และโหลดทอร์ค T_L นั่นคือ $\mathbf{x}_e \neq \mathbf{0}$

เมื่อสมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิดหรือสมการปริภูมิสถานะวงปิดมีค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่แสดงในตารางที่ 3.1 และกำหนดให้ขนาดอ้างอิงของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ $\psi_{rd}^* = 0.7 \text{ Wb}$ และโหลดทอร์ค $T_L = T_{Lm} = 12 \text{ N}\cdot\text{m}$ และตัวควบคุมพีไอสี่ตัวมีค่าเกนชุดที่ 1 ที่ได้จากการการสุ่มเลือกแบบลองผิดลองถูกและแสดงในตารางที่ 4.1 เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ \mathbf{A} จะมีค่าไอเกน 8 ค่าที่เป็นจำนวนเต็มบวกและแสดงในตารางที่ 4.2 เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ \mathbf{A} จะมีอินเวอร์สของการคูณ \mathbf{A}^{-1} ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าเกนชุดที่ 1 ของตัวควบคุมพีไอสี่ตัว

สัญลักษณ์ของค่าเกนพี	ค่าเกนพี	สัญลักษณ์ของค่าเกนไอ	ค่าเกนไอ
K_{Pd}	8	K_{Id}	2
K_{Pq}	8	K_{Iq}	2
$K_{P\psi}$	8	$K_{I\psi}$	2
$K_{P\omega}$	8	$K_{I\omega}$	2

ตารางที่ 4.2 ค่าไอเกนของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ที่เกิดจากตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนชุดที่ 1

สัญลักษณ์ของค่าไอเกน	ค่าไอเกนจากค่าเกนชุดที่ 1
λ_1	-0.0914
λ_2	-0.2372
λ_3	-0.245 - j0.0356
λ_4	-0.245 + j0.0356
λ_5	-15.9343
λ_6	-184.6201
λ_7	-1363.6809
λ_8	-1543.971

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0.003 & 0 & -0.7364 & 0 & -4 & 0 & -3.1321 & 0 \\ 0 & -0.003 & 0 & -0.0025 & 0 & -4 & 0 & -0.6744 \\ 0 & 0 & -0.6304 & 0 & 0.5 & 0 & -11.214 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0218 & 0 & 0.5 & 0 & -4 \end{bmatrix}$$

เมตริกซ์ \mathbf{A}^{-1} มีเมตริกซ์ย่อยที่มีมิติ 4×4 ที่อยู่ทางด้านซ้ายบน เป็นเมตริกซ์ศูนย์ เมื่อพิจารณาสมการที่ (4-6) จะได้ว่าหลังจากเวลาผ่านไปนานมากเพียงพอ ($t \rightarrow \infty$) เวกเตอร์ตัวแปร

สถานะ x_e มีตัวแปรสถานะสี่ตัวแรก $\Delta\omega_m(\infty) \rightarrow 0$, $\Delta\psi_{rd}(\infty) \rightarrow 0$, $\Delta i_{sq}(\infty) \rightarrow 0$ และ $\Delta i_{sd}(\infty) \rightarrow 0$ และมีตัวแปรสถานะที่เหลืออยู่เข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่งในสถานะอยู่ตัว

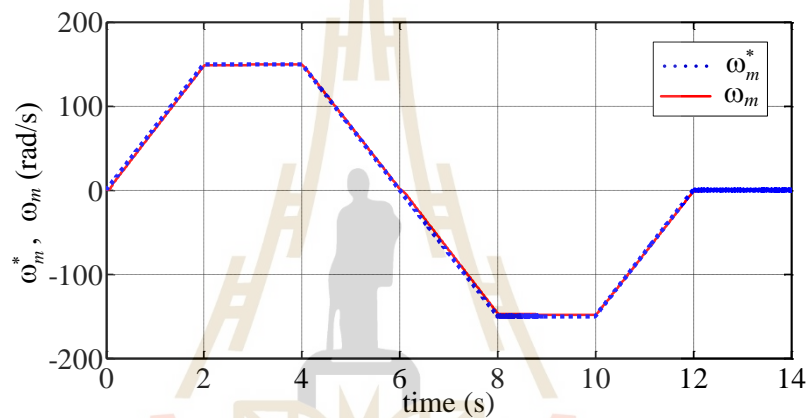
4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของสมการปริภูมิสถานะวงปิด

การตรวจสอบความถูกต้องของสมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิด คือ การเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ระหว่างตัวแปรสถานะ Δi_{sd} , Δi_{sq} , $\Delta\psi_{rd}$, $\Delta\omega_m$, $\int_0^t \Delta i_{sd} d\tau$, $\int_0^t \Delta i_{sq} d\tau$, $\int_0^t \Delta\psi_{rd} d\tau$ และ $\int_0^t \Delta\omega_m d\tau$ ที่ได้รับจากแผนการควบคุมเวกเตอร์ โดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่แสดงในรูปที่ 3.13 และตัวแปรสถานะที่เป็นผลเฉลยของสมการปริภูมิสถานะวงปิดในสมการที่ (4-5) ถ้าตัวแปรสถานะที่ตรงกันมีพลวัตและการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกันในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว สมการปริภูมิสถานะวงปิดจะมีความถูกต้อง แผนการควบคุมเวกเตอร์ให้กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรง กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวาง ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ และอัตราเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ไฟฟ้า ถึงสมการปริภูมิสถานะวงปิด กำหนดให้ $\psi_{rd}^* = 0.7$ Wb และ $T_{Lm} = 12$ N·m การจำลองสถานการณ์มีขั้นตอนเวลาที่ (fixed stepsize) เท่ากับ $10 \mu s$ และแผนการควบคุมเวกเตอร์และสมการปริภูมิสถานะวงปิดได้รับความเร็วเพลอาอิงเดียวกัน มอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่าพารามิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 3.1 และตัวควบคุมพีไอสี่ตัวมีค่าเกนชุดที่ 1 ที่แสดงในตารางที่ 4.1 (ชุดบล็อกที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แสดงในภาคผนวก)

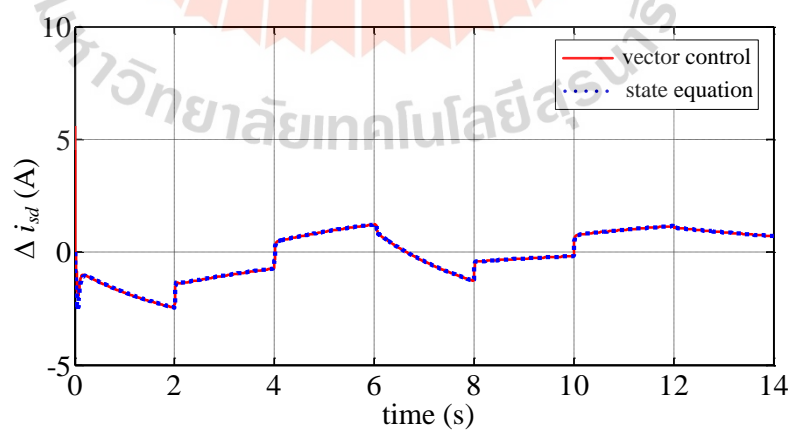
ความเร็วเพลอาอิงที่แสดงในรูปที่ 4.1 (เส้นประสีน้ำเงิน) จะบังคับให้มอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนจากสภาพหยุดนิ่งด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นจนถึง 150 rad/s และหมุนด้วยอัตราเร็วคงที่ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ต่อมามอเตอร์หมุนช้าลงและหมุนกลับทิศทางด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นจนถึง 150 rad/s และหมุนด้วยอัตราเร็วคงที่ จากนั้นมอเตอร์หมุนช้าลงและหยุดหมุน แผนการควบคุมเวกเตอร์ให้ผลตอบสนองความเร็วเพลอา (เส้นทึบสีแดง) ที่ติดตามความเร็วเพลอาอิง

รูปที่ 4.2 ถึง 4.5 แสดงตัวแปรสถานะที่เป็นความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรง ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวาง ความผิดพลาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ และความผิดพลาดของความเร็วเพลอาตามลำดับ รูปที่ 4.6 ถึง 4.9 แสดงตัวแปรสถานะที่เป็นอินทิเกรตของความผิดพลาด แผนการควบคุมเวกเตอร์ให้ความผิดพลาดและอินทิเกรตของความผิดพลาดที่เป็นเส้นทึบสีแดง สมการปริภูมิสถานะวงปิดให้ความผิดพลาดและอินทิเกรตของความผิดพลาดที่เป็นเส้นประสีน้ำเงิน แผนการควบคุมเวกเตอร์และสมการปริภูมิสถานะวงปิด จะให้ความผิดพลาดและอินทิเกรตของความผิดพลาดที่ตรงกันที่มีพลวัตแบบเดียวกันในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัวหรือมีความแตกต่างกันน้อยมาก

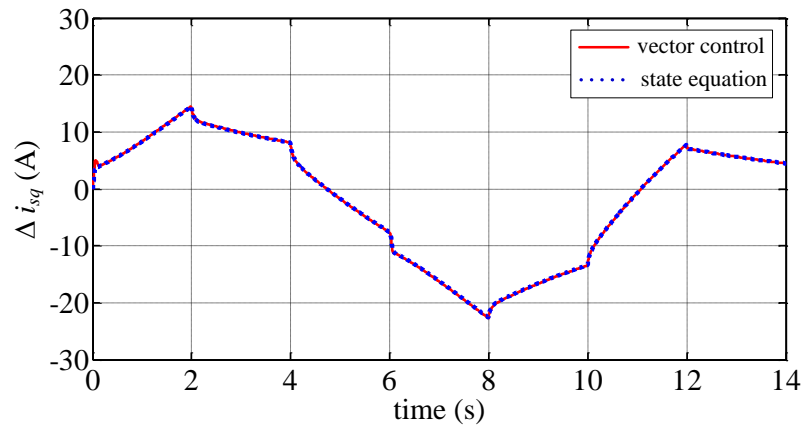
พลวัตที่แตกต่างกันที่แสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.4 จะเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นเท่านั้น เพราะแผนการควบคุมเวกเตอร์มีความผิดพลาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์เริ่มต้น $\Delta\psi_{rd}(0) = 0.7$ Wb ทำให้ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงเริ่มต้น $\Delta i_{sd}(0) = K_{P\psi}\Delta\psi_{rd}(0) = (8)(0.7) = 5.6$ A แต่สมการปริภูมิสถานะวงปิดมีความผิดพลาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์เริ่มต้น $\Delta\psi_{rd}(0) = 0$ และความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงเริ่มต้น $\Delta i_{sd}(0) = 0$ แผนการควบคุมเวกเตอร์และสมการปริภูมิสถานะวงปิดจึงมีตัวแปรสถานะ Δi_{sd} และ $\Delta\psi_{rd}$ ที่แตกต่างกันในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นเท่านั้น ดังนั้นผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงในรูปที่ 4.2 ถึง 4.9 จะยืนยันถึงความถูกต้องของสมการปริภูมิสถานะวงปิด



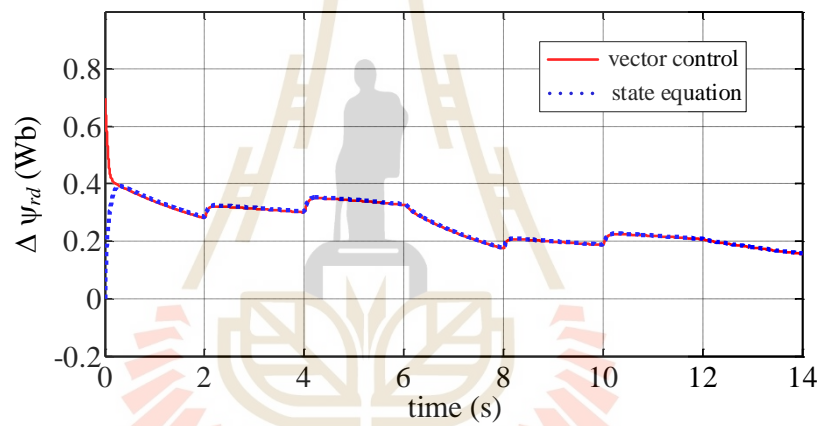
รูปที่ 4.1 ความเร็วเพล่าอ้างอิงและผลตอบสนองความเร็วเพล่าที่ได้รับจากแผนการควบคุมเวกเตอร์



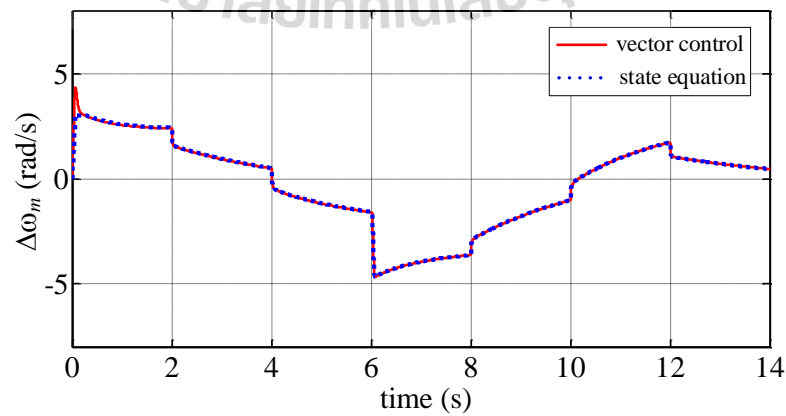
รูปที่ 4.2 ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรง



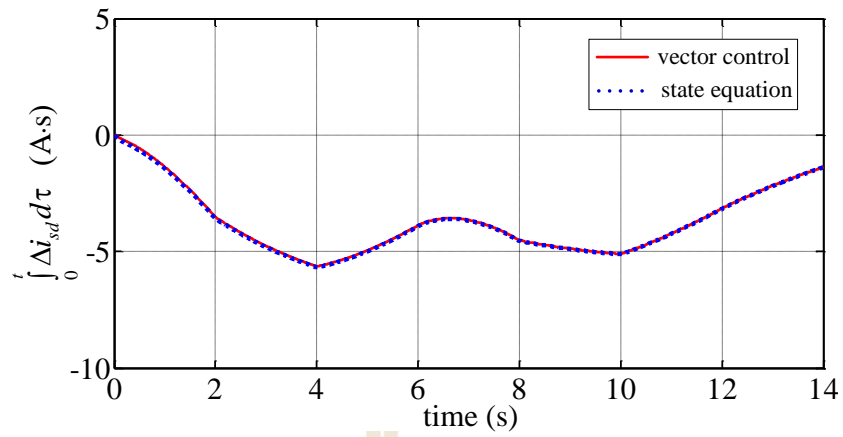
รูปที่ 4.3 ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวาง



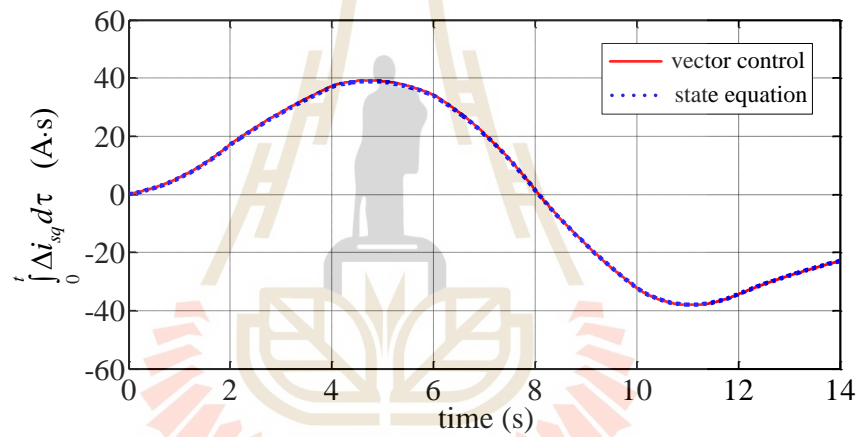
รูปที่ 4.4 ความผิดพลาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์



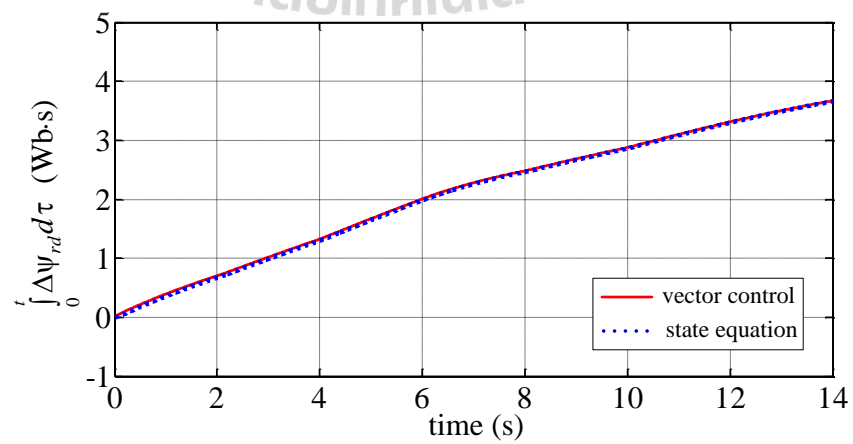
รูปที่ 4.5 ความผิดพลาดของความเร็วเพลา



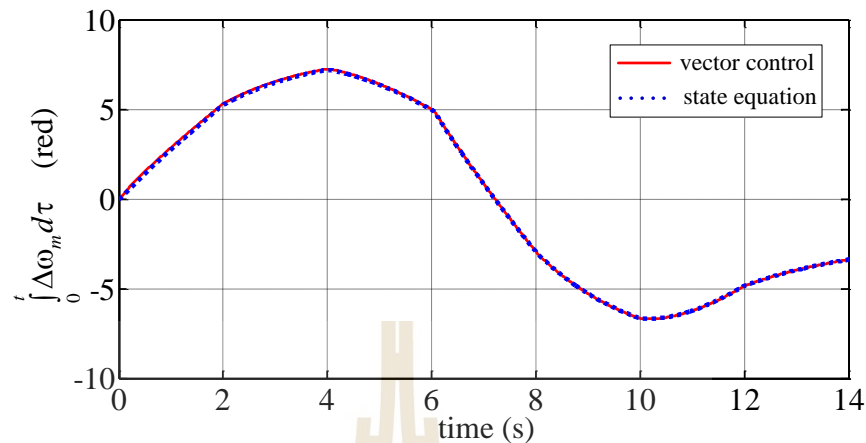
รูปที่ 4.6 อินทิเกรตความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรง



รูปที่ 4.7 อินทิเกรตความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวาง



รูปที่ 4.8 อินทิเกรตความผิดพลาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์



รูปที่ 4.9 อินทิเกรตความผิดพลาดของความเร็วเพลา

4.4 การหาพหุนามคุณลักษณะของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์

ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรงที่มีตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว จะมีสมการปริภูมิสถานะที่มีตัวแปรสถานะ 8 ตัวแปร ถ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลมีค่าพารามิเตอร์ทุกค่าที่ทราบตัวเลขที่แสดงในตารางที่ 3.1 แต่ตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวมีค่าเกนพีและค่าเกนไอที่เป็นตัวแปรและไม่ทราบตัวเลข สมการปริภูมิสถานะจะมีเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ \mathbf{A} ที่มีสมาชิกบางตัวคือตัวเลขศูนย์ สมาชิกบางตัวคือตัวเลขหนึ่ง สมาชิกบางตัวคือตัวเลขอื่นที่ไม่มีตัวแปร และสมาชิกบางตัวคือนิพจน์ของพหุนามที่มีตัวแปร เมตริกซ์สัมประสิทธิ์จึงมีค่าเจาะจงหรือค่าไอเกน 8 ค่าที่ขึ้นอยู่กับค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว และในทางกลับกัน ค่าไอเกน 8 ค่าจะกำหนดค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว ระบบควบคุมความเร็ววงปิดต้องการเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ที่มีค่าไอเกนทุกค่าที่เป็นจำนวนจริงลบหรือคู่สังยุคเชิงซ้อนที่มีส่วนจริงลบ เมตริกซ์ \mathbf{A} มีสมการคุณลักษณะ $\det(\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}) = 0$ ที่เป็นสมการพหุนามดังนี้

$$\begin{aligned} & \lambda^8 + g_7 \lambda^7 + g_6 \lambda^6 + g_5 \lambda^5 + g_4 \lambda^4 + g_3 \lambda^3 + g_2 \lambda^2 + g_1 \lambda + g_0 \\ & = (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2)(\lambda - \lambda_3)(\lambda - \lambda_4)(\lambda - \lambda_5)(\lambda - \lambda_6)(\lambda - \lambda_7)(\lambda - \lambda_8) = 0 \end{aligned} \quad (4-7)$$

โดยที่ g_i คือสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะ

$$g_i = g_i(K_{P\omega}, K_{P\psi}, K_{Pd}, K_{Pq}, K_{I\omega}, K_{I\psi}, K_{Id}, K_{Iq})$$

I คีอเมตริกซ์เอกลักษณะ

และ λ_i คีอค่าไอเกนหรือรากของสมการคุณลักษณะ

พหุนามคุณลักษณะของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ในสมการที่ (4-7) มีสัมประสิทธิ์ที่เป็นนิพจน์ของพหุนามที่มีตัวแปรไม่ทราบค่า ค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวคือตัวแปรที่ไม่ทราบค่าดังกล่าว การแยกตัวประกอบของพหุนามคุณลักษณะจะให้รากหรือค่าไอเกนของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ ค่าเกนพี 4 ค่าและค่าเกนไอ 4 ค่าจะกำหนดค่าไอเกน 8 ค่า และในทางกลับกัน ค่าไอเกน 8 ค่าจะกำหนดค่าเกนพี 4 ค่าและค่าเกนไอ 4 ค่า ค่าไอเกนทุกค่าอาจจะเป็นจำนวนจริงลบที่มีค่าแตกต่างกันทุกค่า หรือค่าไอเกนบางค่าอาจจะเป็นจำนวนจริงลบที่มีค่าซ้ำกัน หรือค่าไอเกนบางค่าอาจจะเป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนที่มีส่วนจริงลบ

โปรแกรม Matlab Symbolic จะนำมาใช้คำนวณหาสัมประสิทธิ์แต่ละตัวของพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ (4-7) ได้ดังนี้

$$g_7 = 168.2395K_{Pd} + 168.2395K_{Pq} + 417.1929$$

$$g_6 = \left(\frac{K_{I\psi}}{81673098100736000} - \frac{3K_{I\omega}}{3634452865482752} + 9.0756K_{P\psi} - 4.6527 \times 10^3 K_{P\omega} \right) + (168.2395K_{Pd} - 0.7931K_{P\psi}) + 202.8750(168.2395K_{Pq} - 22.9337K_P + 202.8750) + (0.7931K_{P\psi} + 11.4430)(168.2395K_{Pd} - 0.7931K_{P\psi} + 202.8750) + (0.7931K_{P\psi} + 11.4430)(168.2395K_{Pq} - 22.9337K_{P\omega} + 202.8750) + 0.7931K_{P\psi}(0.7931K_{P\psi} - 202.8750) + 22.9337K_{P\omega}(168.2395K_{Pd} - 0.7931K_{P\psi} + 202.8750) + 22.9337K_{P\omega}(168.2395K_{Pq} - 22.9337K_{P\omega} + 202.8750) + 525.956K_{P\omega}^2 + 22.9337K_{P\omega}(0.7931K_{P\psi} + 11.4430) + 3.7662 \times 10^3$$

$$g_5 = (0.7931K_{I\psi}(0.7931K_{P\psi} - 202.8750) - 18.1891K_{P\omega}(K_{I\psi} - 11.4430K_{P\psi} - K_{P\psi}(0.7931K_{P\psi} - 202.8750) + 1.8712 \times 10^3) - ((8.7183 \times 10^{16}K_{Pq} -$$

$$\begin{aligned}
& 1.1884 \times 10^{16} K_{P\omega} + 105131556080443120)(K_{I\psi} - 11.4430 K_{P\psi} - \\
& K_{P\psi}(0.7931 K_{P\psi} - 202.8750) + 1.8712 \times 10^3)) \left(\frac{1}{653384784805888} \right) - \\
& ((7.4278 \times 10^{14} K_{P\psi} + 10716760054947688)(K_{I\omega} + 202.8750 K_{P\omega} - \\
& 22.9337 K_{P\omega}^2 - 228.9294)) \left(\frac{1}{40836549050368} \right) - 4.6527 \times 10^3 K_{I\omega} + \\
& 168.2395 K_{Iq} (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + 202.8750) + \\
& 0.7931 K_{I\psi} (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + 202.8750) + 22.9337 \\
& K_{I\omega} (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + 202.8750) + 168.2395 K_{Id} \\
& (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) + 0.7931 K_{I\psi} (168.2395 K_{Pq} \\
& - 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) + 22.9337 K_{I\omega} (168.2395 K_{Pq} - \\
& 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) + 168.2395 K_{Id} (0.7931 K_{P\psi} + 11.4430) + \\
& 168.2395 K_{Iq} (0.7931 K_{P\psi} + 11.4430) + 22.9337 K_{I\omega} ((0.7931 K_{P\psi} + \\
& 11.4430) - ((1.575610^{17} K_{Pd} - 7.4278 \times 10^{14} K_{P\psi} + \\
& 189999404267985248)(K_{I\omega} + 202.8750 K_{P\omega} - 22.9337 K_{P\omega}^2 - \\
& 228.9294)) \left(\frac{1}{40836549050368} \right) + 3.8584 \times 10^3 K_{Id} K_{P\omega} + \\
& 3.8584 \times 10^3 K_{Iq} K_{P\omega} + 18.1891 K_{I\psi} K_{P\omega} + 525.9561 K_{I\omega} K_{P\omega} + \\
& (0.7931 K_{P\psi} + 11.4430)(168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + \\
& 202.8750)(168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) + \\
& 22.9337 K_{P\omega} (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + 202.8750)(168.2395 K_{Pq} - \\
& 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) + 22.9337 K_{P\omega} (0.7931 K_{P\psi} + \\
& 11.4430)(168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + 202.8750) + 22.9337 \\
& K_{P\omega} (0.7931 K_{P\psi} + 11.4430)(168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + \\
& 202.8750)))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
g_4 = & (((((2971114557633697 K_{I\psi} - 3.3998 \times 10^{16} K_{P\psi} - \\
& 2971114557633697 K_{P\psi} (0.7931 K_{P\psi} - 202.8750) + \\
& 5559459677161890816) K_{I\omega} + 202.8750 K_{P\omega} - 22.9337 K_{P\omega}^2 - \\
& 228.9294)) \left(\frac{1}{163346196201472} \right) - 133.4331 K_{Iq} (K_{I\psi} - 11.4430 K_{P\psi} - \\
& K_{P\psi} (0.7931 K_{P\psi} - 202.8750) + 1.8712 \times 10^3) - 18.1891 K_{I\omega} (K_{I\psi} - \\
& 11.4430 K_{P\psi} - K_{P\psi} (0.7931 K_{P\psi} - 202.8750) + 1.8712 \times 10^3) - \\
& ((1.9 \times 10^{17} K_{I\omega} - 2.147810^{16} K_{I\omega} K_{P\omega})(168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 202.8750) \left(\frac{1}{40836549050368} \right) - 3.8584 \times 10^3 K_{Id} (K_{I\omega} + 202.8750 K_{P\omega}) \\
& - 22.9337 K_{P\omega}^2 - 228.9294) - 18.1891 K_{I\psi} (K_{I\omega} + 202.8750 K_{P\omega} - \\
& 22.9337 K_{P\omega}^2 - 228.9294) - ((7.4278 \times 10^{14} K_{P\psi} + \\
& 10716760054947688)(202.8750 K_{I\omega} - \\
& 22.9337 K_{I\omega} K_{P\omega}) \left(\frac{1}{40836549050368} \right) + 2.8305 \times 10^4 K_{Id} K_{Iq} + \\
& 133.4331 K_{Id} K_{I\psi} + 3.8584 \times 10^3 K_{Id} K_{I\omega} + 133.4331 K_{Iq} K_{I\psi} + \\
& 3.8584 \times 10^3 K_{Iq} K_{I\omega} + 18.1891 K_{I\psi} K_{I\omega} + 3.8584 \times 10^3 K_{Id} K_{P\omega} (0.7931 K_{P\psi} \\
& + 11.4430) + 3.8584 \times 10^3 K_{Iq} K_{P\omega} (0.7931 K_{P\psi} + 11.4430) - \\
& 18.1891 K_{P\omega} (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) (K_{I\psi} - \\
& 11.4430 K_{P\psi} - K_{P\psi} (0.7931 K_{P\psi} - 202.8750) + 1.8712 \times 10^3) - \\
& ((7.4278 \times 10^{14} K_{P\psi} + 10716760054947688)(168.2395 K_{Pd} - \\
& 0.7931 K_{P\psi} + 202.8750) (K_{I\omega} + 202.8750 K_{P\omega} - 22.9337 K_{P\omega}^2 - \\
& 228.9294)) \left(\frac{1}{40836549050368} \right) + 0.7931 K_{I\psi} (0.7931 K_{P\psi} - \\
& 202.8750) (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) + \\
& 0.7931 K_{I\psi} (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + 202.8750) (168.2395 K_{Pq} - \\
& 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) + 22.9337 K_{I\omega} 168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + \\
& 202.8750) (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) + 168.2395 K_{Iq} \\
& (0.7931 K_{P\psi} + 11.4430) (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + 202.8750) + \\
& 22.9337 K_{I\omega} (0.7931 K_{P\psi} + 11.4430) (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + \\
& 202.8750) + 168.2395 K_{Id} (0.7931 K_{P\psi} + 11.4430) (168.2395 K_{Pq} - \\
& 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) + 22.9337 K_{I\omega} K_{I\omega} (0.7931 K_{P\psi} + \\
& 11.4430) (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) + \\
& 18.1891 K_{I\psi} K_{P\omega} (0.7931 K_{P\psi} - 202.8750) + 3.8584 \times 10^3 K_I \\
& K_{P\omega} (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + 202.8750) + 18.1891 K_{I\psi} \\
& K_{P\omega} (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + 202.8750) + \\
& 3.8584 \times 10^3 K_{Id} K_{P\omega} (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + \\
& 202.8750) 3.8584 \times 10^3 + 18.1891 K_{I\psi} K_{P\omega} (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + \\
& 202.8750) + 22.9337 K_{P\omega} (0.7931 K_{P\psi} + 11.4430) (168.2395 K_{Pd} - \\
& 0.7931 K_{P\psi} + 202.8750) (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750))
\end{aligned}$$

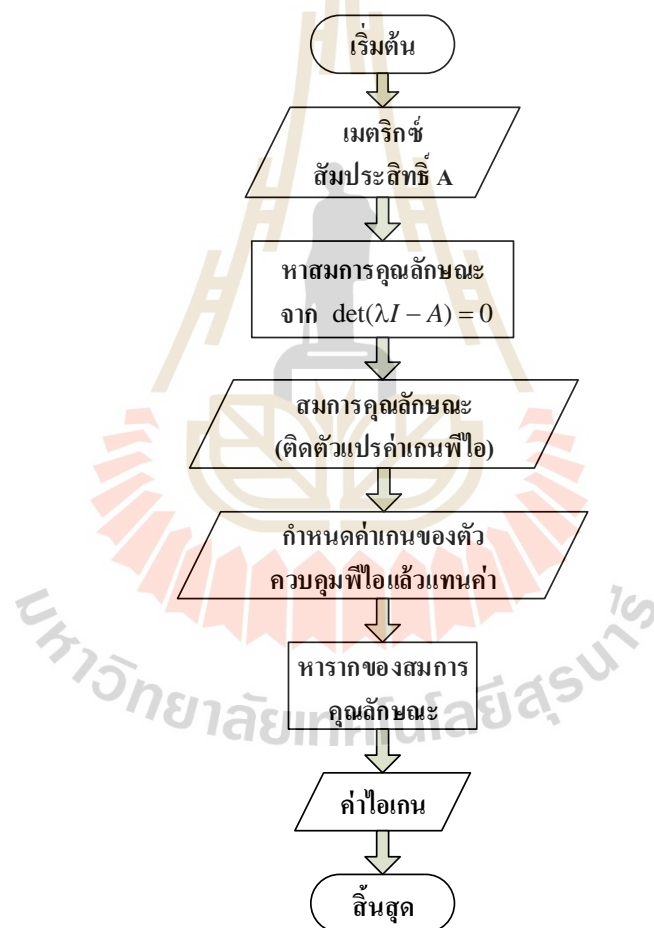
$$\begin{aligned}
g_3 = & \left((6.0276 \times 10^{17} K_{I\omega} - 6.813910^{16} K_{I\omega} K_{P\omega}) (K_{I\psi} - 11.4430 K_{P\psi} - \right. \\
& \left. K_{P\psi} (0.7931 K_{P\psi} - 202.8750) + 1.87 \times 10^3) \right) \left(\frac{1}{163346196201472} \right) - \\
& 3.8584 \times 10^3 K_{Id} (202.8750 K_{I\omega} - 22.9337 K_{I\omega} K_{P\omega}) - \\
& 18.1891 K_{I\psi} (202.8750 K_{I\omega} - 22.9337 K_{I\omega} K_{P\omega}) + \\
& 2.8305 \times 10^4 K_{Id} K_{Iq} (0.7931 K_{P\psi} + 11.4430) + \\
& 3.8584 \times 10^3 K_{Id} K_{Id} K_{I\omega} (0.7931 K_{P\psi} + 11.4430) + \\
& 3.8584 \times 10^3 K_{Iq} K_{I\omega} (0.7931 K_{P\psi} + 11.4430) - ((7.4278 \times 10^{14} K_{P\psi} + \\
& 10716760054947688) (202.8750 K_{I\omega} - 22.9337 K_{I\omega} K_{P\omega}) (168.2395 K_{Pd} - \\
& 0.7931 K_{P\psi} + 202.8750) \left(\frac{1}{40836549050368} \right) - \\
& 18.1891 K_{I\omega} (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) (K_{I\psi} - \\
& 11.4430 K_{P\psi} - K_{P\psi} (0.7931 K_{P\psi} - 202.8750) + 1.8712 \times 10^3) + \\
& 6.4913 \times 10^5 K_{Id} K_{Iq} K_{P\omega} + 3.0601 \times 10^{14} K_{Id} K_{I\psi} K_{P\omega} + \\
& 3.0601 \times 10^{14} K_{Iq} K_{I\psi} K_{P\omega} - 18.1891 K_{I\psi} (0.7931 K_{P\psi} - 202.8750) (K_{I\omega} + \\
& 202.8750 K_{P\omega} - 22.9337 K_{P\omega}^2 - 228.9294) - \\
& 18.1891 K_{I\psi} (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + 202.8750) (K_{I\omega} + \\
& 202.8750 K_{P\omega} - 22.9337 K_{P\omega}^2 - 228.9294) - 3.0601 \times 10^{14} K_{Iq} K_{P\omega} (K_{I\psi} \\
& - 11.4430 K_{P\psi} - K_{P\psi} (0.7931 K_{P\psi} - 202.8750) + 1.8712 \times 10^3) - \\
& 3.8584 \times 10^3 K_{Id} (0.7931 K_{P\psi} + 11.4430) (K_{I\omega} + 202.8750 K_{P\omega} - \\
& 22.9337 K_{P\omega}^2 - 228.9294) + 133.4331 K_{Iq} K_{I\psi} (0.7931 K_{P\psi} - 202.8750) + \\
& 18.1891 K_{I\psi} K_{I\omega} (0.7931 K_{P\psi} - 202.8750) + \\
& 133.4331 K_{Iq} K_{I\psi} (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + 202.8750) + \\
& 3.8584 \times 10^3 K_{Iq} K_{I\omega} (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + 202.8750) + \\
& 18.1891 K_{I\psi} K_{I\omega} (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + 202.8750) + \\
& 133.4331 K_{Id} K_{I\psi} (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) + \\
& 3.8584 \times 10^3 K_{Id} K_{I\omega} (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) + \\
& 18.1891 K_{I\psi} K_{I\omega} (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) + \\
& 22.9337 K_{I\omega} (0.7931 K_{P\psi} + 11.4430) (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + \\
& 202.8750) (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) + \\
& 18.1891 K_{I\psi} K_{P\omega} (0.7931 K_{P\psi} - 202.8750) (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + \\
& 202.8750) + 18.1891 K_{I\psi} K_{P\omega} (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + \\
& 202.8750) (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) + \\
& 3.8584 \times 10^3 K_{Iq} K_{P\omega} (0.7931 K_{P\psi} + 11.4430) (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} \\
& + 202.8750) + 3.8584 \times 10^3 K_{Id} K_{P\omega} (0.7931 K_{P\psi} + \\
& 11.4430) (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
g_2 = & (2.2449 \times 10^4 K_{Id} K_{Iq} K_{I\psi} - 18.1891 K_{I\psi} (0.7931 K_{P\psi} - \\
& 202.8750) (202.8750 K_{I\omega} - 22.9337 K_{I\omega} K_{P\omega})) + 6.4913 \times 10^5 K_{Id} K_{Iq} K_{I\omega} + \\
& 3.0601 \times 10^3 K_{Id} K_{I\psi} K_{I\omega} + 3.0601 \times 10^3 K_{Iq} K_{I\psi} K_{I\omega} - \\
& 18.1891 K_{I\psi} (202.8750 K_{I\omega} - 22.9337 K_{I\omega} K_{P\omega}) (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} \\
& + 202.8750) - 3.8584 \times 10^3 K_{Id} (0.7931 K_{P\psi} + 11.4430) (202.8750 K_{I\omega} - \\
& 22.9337 K_{I\omega} K_{P\omega}) - 3.0601 \times 10^3 K_{Iq} K_{I\omega} (K_{I\psi} - 11.4430 K_{P\psi} - \\
& K_{P\psi} (0.7931 K_{P\psi} - 202.8750) + 1.8712 \times 10^3) - 3.0601 \times 10^3 K_{Id} K_{I\psi} (K_{I\omega} \\
& + 202.8750 K_{P\omega} - 22.9337 K_{P\omega}^2 - 228.9294) + \\
& 3.0601 \times 10^3 K_{Iq} K_{I\psi} K_{P\omega} (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + 202.8750) + \\
& 3.0601 \times 10^3 K_{Id} K_{I\psi} K_{P\omega} (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) + \\
& 6.4913 \times 10^5 K_{Id} K_{Iq} K_{P\omega} (22.9337 K_{P\omega} + 11.4430) + \\
& 18.1891 K_{I\psi} K_{I\omega} (0.7931 K_{P\psi} - 202.8750) (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + \\
& 202.8750) + 18.1891 K_{I\psi} K_{I\omega} (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + \\
& 202.8750) (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) + \\
& 3.8584 \times 10^3 K_{Iq} K_{I\omega} (0.7931 K_{P\psi} + 11.4430) (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} \\
& + 202.8750) + 3.8584 \times 10^3 K_{Id} K_{I\omega} (0.7931 K_{P\psi} + \\
& 11.4430) (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) + \\
& 3.0601 \times 10^3 K_{Iq} K_{I\psi} K_{P\omega} (0.7931 K_{P\psi} - 202.8750))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
g_1 = & (3.0601 \times 10^{14} K_{Iq} K_{I\psi} K_{I\omega} (168.2395 K_{Pd} - 0.7931 K_{P\psi} + 202.8750) - \\
& 3.0601 \times 10^{14} K_{Id} K_{I\psi} (202.8750 K_{I\omega} - 22.9337 K_{I\omega} K_{P\omega})) + \\
& 3.0601 \times 10^{14} K_{Id} K_{I\psi} K_{I\omega} (168.2395 K_{Pq} - 22.9337 K_{P\omega} + 202.8750) + \\
& 6.4913 \times 10^5 K_{Id} K_{Iq} K_{I\omega} (0.7931 K_{P\psi} + 11.4430) + \\
& 5.1483 \times 10^5 K_{Id} K_{Iq} K_{I\psi} K_{P\omega} + 3.0601 \times 10^{14} K_{Iq} K_{I\psi} K_{I\omega} (0.7931 K_{P\psi} - \\
& 202.8750)
\end{aligned}$$

$$\text{ແລະ } g_0 = 5.1483 \times 10^5 K_{Id} K_{Iq} K_{I\psi} K_{I\omega}$$

พหุนามคุณลักษณะของเมตริกซ์ A มีสัมประสิทธิ์แต่ละตัวที่สัมพันธ์กับค่าเกินของตัวควบคุมพีไอ นั่นคือค่าเกินพีและค่าเกินไอจะกำหนดค่าไอเกินหรือรากของสมการคุณลักษณะ ถ้าตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวมีค่าเกินทุกค่าที่ทราบตัวเลข การแยกตัวประกอบพหุนามจะคำนวณหาค่าไอเกิน 8 ค่าของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ A ได้ ค่าไอเกิน 8 ค่านี้จะมีผลกระทบถึงสมรรถนะของผลตอบสนองความเร็วเพลลา เมื่อตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวมีค่าเกินชุดที่ 1 ที่แสดงในตารางที่ 4.1 พหุนามคุณลักษณะของเมตริกซ์ A จะมีสัมประสิทธิ์ที่เป็นตัวเลข โปรแกรม Matlab จะใช้อัลกอริทึมเชิงเลขหารากของสมการคุณลักษณะหรือค่าไอเกินของเมตริกซ์ A ขั้นตอนการหารากจะแสดงในรูปที่ 4.10 และเมตริกซ์ A มีค่าไอเกิน 8 ค่าที่แสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.10 ฟังงานการหาค่าไอเกินของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์

ในตารางที่ 4.2 เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ A มีค่าไอเกิน 6 ค่าที่เป็นจำนวนจริงลบและมีค่าไอเกิน 2 ค่าที่เป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนที่มีส่วนจริงลบ นั่นคือเมตริกซ์ A มีค่าไอเกินทุกค่าอยู่ในตำแหน่งด้าน

ซ้ายมือของระนาบเชิงซ้อน และมีค่าไอเกน 4 ค่าแรก ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ และ λ_4) ที่อยู่ใกล้แกนจินตภาพของระนาบเชิงซ้อนมาก เมื่อความเร็วเพลต้าอั้งอิงและโพลทอรัคกที่ ระบบควบคุมความเร็ววงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพลตา (ω_m) และขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ (ψ_{rd}) ในสถานะชั่วคราวที่มีช่วงระยะเวลายาวนาน หรือผลตอบสนองมีสมรรถนะที่ช้ามาก ถ้าเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ A มีค่าไอเกนทุกค่าอยู่ห่างจากแกนจินตภาพในตำแหน่งด้านซ้ายมือของระนาบเชิงซ้อน ผลตอบสนองจะมีสมรรถนะที่เร็วขึ้น

4.5 การระบุค่าไอเกนและการคำนวณค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ

เมื่อพิจารณาระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรงที่มีตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ A จะต้องมีค่าไอเกนทุกค่าอยู่ในตำแหน่งด้านซ้ายมือของระนาบเชิงซ้อน การปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวดังกล่าวที่ทำให้ค่าไอเกนทุกค่าอยู่ในตำแหน่งด้านซ้ายมือของระนาบเชิงซ้อน และค่าไอเกนทุกค่าอยู่ห่างจากแกนจินตภาพ คืองานที่ต้องใช้เวลายาวนานมากและไม่แน่นอน แต่การระบุค่าไอเกน 8 ค่าที่เป็นค่าลบที่ต้องการและการคำนวณหาค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวพร้อมกัน คืองานที่มีความเป็นไปได้มากกว่าและมีแนวโน้มของการใช้เวลาน้อยกว่า การระบุค่าลบที่ชัดเจนของค่าไอเกน 8 ค่าจะได้รับพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ เมื่อกำหนดให้พหุนามคุณลักษณะที่ต้องการเท่ากับพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ (4-7) ที่มีสัมประสิทธิ์เป็นนิพจน์ของพหุนามที่มีตัวแปรไม่ทราบค่า การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ที่ตรงกันจะสร้างระบบสมการไม่เชิงเส้นที่มี 8 สมการและ 8 ตัวแปรคำตอบหรือผลเฉลยของระบบสมการคือตัวเลขของค่าเกนพีและค่าเกนไอของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว เนื่องจากระบบสมการไม่เชิงเส้นนี้คือระบบสมการพหุนามที่มีนิพจน์ที่มีความซับซ้อนมาก การหาคำตอบจึงต้องใช้วิธีการเชิงเลขแบบวนซ้ำและการเขียน โปรแกรมและชุดคำสั่งเชิงสัญลักษณ์ที่ดำเนินการทางพีชคณิตที่มีการบวก การลบ และการคูณของพหุนาม

ตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวจะต้องมีค่าเกนทุกค่าที่เป็นจำนวนจริงบวกเท่านั้น ถ้าระบบสมการพหุนามที่เกิดจากการเลือกค่าไอเกนทุกค่าที่เป็นจำนวนจริงลบ ให้คำตอบที่เป็นจำนวนจริงลบหรือจำนวนเชิงซ้อน การเลือกค่าไอเกนที่แตกต่างจากค่าเดิม การประมวลผลทางพีชคณิต และการหาคำตอบเชิงเลข จะต้องดำเนินการซ้ำจนกว่าคำตอบที่ได้รับเป็นจำนวนจริงบวกทุกค่า การระบุค่าไอเกน 8 ค่าที่เป็นค่าลบที่ต้องการ จะให้พหุนามคุณลักษณะที่ต้องการที่มีสัมประสิทธิ์ทุกตัวเป็นตัวเลขดังนี้

$$\begin{aligned}
& (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2)(\lambda - \lambda_3)(\lambda - \lambda_4)(\lambda - \lambda_5)(\lambda - \lambda_6)(\lambda - \lambda_7)(\lambda - \lambda_8) \\
& = \lambda^8 + h_7\lambda^7 + h_6\lambda^6 + h_5\lambda^5 + h_4\lambda^4 + h_3\lambda^3 + h_2\lambda^2 + h_1\lambda + h_0
\end{aligned}
\tag{4-8}$$

โดยที่ h_i คือสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการ
 $h_i = h_i(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8)$
และ λ_i คือค่าไอเกนที่ต้องการของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ **A**

พหุนามคุณลักษณะที่ต้องการในสมการที่ (4-8) มีสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับค่าไอเกนที่ต้องการ 8 ค่า นั่นคือค่าไอเกนทุกค่าจะกำหนดสัมประสิทธิ์ของพหุนาม ถ้าต้องการให้เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ **A** มีค่าไอเกน 8 ค่าที่ต้องการ เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะต้องมีพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ (4-7) ที่เท่ากับพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการดังนี้

$$\begin{aligned}
& \lambda^8 + g_7\lambda^7 + g_6\lambda^6 + g_5\lambda^5 + g_4\lambda^4 + g_3\lambda^3 + g_2\lambda^2 + g_1\lambda + g_0 \\
& = \lambda^8 + h_7\lambda^7 + h_6\lambda^6 + h_5\lambda^5 + h_4\lambda^4 + h_3\lambda^3 + h_2\lambda^2 + h_1\lambda + h_0
\end{aligned}
\tag{4-9}$$

พหุนามคุณลักษณะของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์มีสัมประสิทธิ์ที่เท่ากับสัมประสิทธิ์ที่ตรงกันของพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการ และการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ที่ตรงกันในสมการที่ (4-9) จะสร้างระบบสมการไม่เชิงเส้นหรือระบบสมการพหุนาม 8 สมการและ 8 ตัวแปรดังนี้

$$g_i(K_{P\omega}, K_{Pv}, K_{Pd}, K_{Pq}, K_{I\omega}, K_{Iv}, K_{Id}, K_{Iq}) = h_i(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8)
\tag{4-10}$$

โดยที่ $i = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$

ระบบสมการพหุนามดังกล่าวมีนิพจน์ที่มีความซับซ้อนมากและมีคำตอบคือค่าเกนที่ 4 ค่าและค่าเกนไอล 4 ค่าของตัวควบคุมที่ไอล 4 ตัว การใช้งานโปรแกรม Matlab symbolic ที่มีคำสั่งหาคำตอบเชิงเลขแบบวนซ้ำ จะให้คำตอบของตัวแปรที่ไม่ทราบค่า 8 ค่าพร้อมกันได้ (Lopez CP, 2014) ขั้นตอนการหาคำตอบจะแสดงในรูปแบบที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผังงานการคำนวณหาค่าเกนของตัวควบคุมพีไอที่เกิดจากการระบุค่าไอเกน

ค่าไอเกน 8 ค่าที่ต้องการและเป็นจำนวนเต็มลบจะแสดงในตารางที่ 4.3 ค่าไอเกนชุดนี้เกิดจากการการเปลี่ยนแปลงค่าไอเกนของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ที่แสดงในตารางที่ 4.2 ค่าไอเกน 4 ค่าแรกที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพ จะอยู่ห่างจากแกนจินตภาพมากขึ้นเรียงตามลำดับในตำแหน่งด้านซ้ายมือของระนาบเชิงซ้อน

การระบุค่าไอเกน 8 ค่าที่เป็นค่าลบที่ต้องการจะให้สมการคุณลักษณะที่ต้องการที่มีพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการที่มีสัมประสิทธิ์ทุกตัวเป็นตัวเลขดังนี้

$$\lambda^8 + 2370\lambda^7 + 1582140\lambda^6 + 222029400\lambda^5 + 1.0036 \times 10^{10}\lambda^4 + 1.4735 \times 10^{11}\lambda^3 + 9.1699 \times 10^{11}\lambda^2 + 2.473310^{12}\lambda + 2.3040 \times 10^{12} = 0 \quad (4-11)$$

ตารางที่ 4.3 ค่าไอเกนที่ต้องการที่ใช้คำนวณหาค่าเกนชุดที่ 2 ของตัวควบคุมพีไอ

สัญลักษณ์ของค่าไอเกน	ค่าไอเกนที่ต้องการ
λ_1	-2
λ_2	-4
λ_3	-6
λ_4	-8
λ_5	-50
λ_6	-100
λ_7	-1000
λ_8	-1200

โปรแกรม Matlab ที่มีชุดคำสั่งประมวลผลทางคณิตศาสตร์เชิงสัญลักษณ์ (Symbolic toolbox) จะสร้างระบบสมการพหุนามที่มี 8 สมการและ 8 ตัวแปร และหาคำตอบเชิงเลขของระบบสมการ ตัวแปร 8 ตัวของค่าเกนพีและค่าเกนไอ $K_{P\omega}$, $K_{P\psi}$, K_{Pd} , K_{Pq} , $K_{I\omega}$, $K_{I\psi}$, K_{Id} และ K_{Iq} จะมีคำตอบที่แสดงในตารางที่ 4.4 ค่าเกนดังกล่าวคือค่าเกนที่ได้จากการคำนวณโดยตรงหรือค่าเกนชุดที่ 2 (โปรแกรมเชิงสัญลักษณ์ที่คำนวณหาค่าเกนมีรายละเอียดที่แสดงในภาคผนวก จ)

ตารางที่ 4.4 ค่าเกณฑ์อันดับ 2 ของตัวควบคุมพีไอที่ได้รับจากการระบุค่าไอเกน

สัญลักษณ์ของค่าเกณฑ์	ค่าเกณฑ์	สัญลักษณ์ของค่าไอเกน	ค่าไอเกน
K_{Pd}	5.002880	K_{Id}	9.921008
K_{Pq}	6.604424	K_{Iq}	36.590161
K_{Pv}	66.167473	K_{Iv}	302.162517
$K_{P\omega}$	4.977657	$K_{I\omega}$	40.799553

การตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบจะเริ่มต้นจากการพิจารณาเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ ต่อมานำคำตอบที่แสดงในตารางที่ 4.4 แทนค่าลงในตัวแปรค่าเกณฑ์และค่าไอเกน และจากนั้นหาค่าไอเกนของเมตริกซ์ดังกล่าวและนำมาเปรียบเทียบกับค่าไอเกนที่ต้องการ ถ้าการเปรียบเทียบระหว่างค่าไอเกนของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์และค่าไอเกนที่ต้องการ ให้ความใกล้เคียงกันมาก ค่าเกณฑ์และค่าไอเกนที่เป็นคำตอบจะมีความถูกต้อง

วิธีการอื่นที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบจะเริ่มต้นจากการพิจารณาสมการคุณลักษณะของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ ต่อมานำคำตอบที่แสดงในตารางที่ 4.4 แทนค่าลงในตัวแปรค่าเกณฑ์และค่าไอเกนที่ปรากฏในสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะ และจากนั้นหารากของสมการคุณลักษณะและนำมาเปรียบเทียบกับค่าไอเกนที่ต้องการ ถ้าการเปรียบเทียบระหว่างรากของสมการคุณลักษณะและค่าไอเกนที่ต้องการ ให้ความใกล้เคียงกันมาก ค่าเกณฑ์และค่าไอเกนที่เป็นคำตอบจะมีความถูกต้องเช่นเดียวกัน เมื่อพหุนามคุณลักษณะมีสัมประสิทธิ์ทุกตัวเป็นตัวเลขที่ไม่มีตัวแปร สมการคุณลักษณะมีรากที่แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 รากของสมการคุณลักษณะที่เปรียบเทียบกับค่าไอเกนที่ต้องการ

สัญลักษณ์ของค่าไอเกน	รากของสมการคุณลักษณะ
λ_1	-1.9999999694538876509363132026026
λ_2	-3.9999999971191770586642081264095
λ_3	-5.9999995004300285405343437810516
λ_4	-8.000001006027292864623351560273
λ_5	-50.000000651318313851724208187451
λ_6	-99.999990451060904570547639268095

λ_7	-1000.0000531734572336039142919339
λ_8	-1200.0000501444693160594251361134

สมการคุณลักษณะของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์มีรากเกือบเท่ากับค่าไอเกนที่ต้องการที่แสดงในตารางที่ 4.3 นั่นคือเมตริกซ์สัมประสิทธิ์มีค่าไอเกนเกือบเท่ากับค่าไอเกนที่ต้องการ เนื่องจากการคำนวณเชิงเลขมีความผิดพลาดที่เกิดจากการตัดและการปัดเศษ รากของสมการคุณลักษณะและค่าไอเกนที่ต้องการจะมีความแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้นคำตอบของระบบสมการไม่เชิงเส้นที่แสดงในตารางที่ 4.4 จึงมีความถูกต้อง และตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวมีค่าเกนที่ทำให้ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์มีเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ที่มีค่าไอเกนที่ต้องการ ตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวมีค่าเกนทุกตัวเป็นค่าบวก

4.6 สรุป

ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรงที่มีตัวควบคุมพีไอสี่ตัว จะให้สมการปริภูมิสถานะวงปิดที่มีตัวแปรสถานะ 8 ตัวและมีเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ที่มีมิติ 8×8 และให้ค่าไอเกนที่มีผลกระทบต่อถึงสมรรถนะของผลตอบสนอง การจำลองสถานการณ์แสดงถึงความถูกต้องของสมการปริภูมิสถานะวงปิด ระบบควบคุมความเร็ววงปิดมีจุดสมดุลหรือจุดการทำงานที่ขึ้นอยู่กับเวกเตอร์การรั้งความ ความเร็วเพล่าอ้างอิง และ โหลดทอร์ค ถ้าเมตริกซ์สัมประสิทธิ์มีค่าไอเกนทุกค่าอยู่ในตำแหน่งด้านซ้ายมือของระนาบเชิงซ้อน และความเร็วเพล่าอ้างอิงและโหลดทอร์คมีค่าคงที่ ผลตอบสนองความเร็วเพล่าจะไม่มี ความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว การระบุค่าไอเกน 8 ค่าที่เป็นค่าลบของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์จะกำหนดค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว เมื่อตัวควบคุมพีไอทุกตัวมีค่าเกนพีและค่าเกนไอที่ไม่ทราบค่าหรือเป็นตัวแปร เมตริกซ์สัมประสิทธิ์จะมีสมาชิกบางตัวที่เป็นนิพจน์ของพหุนามที่มีตัวแปร การเขียนโปรแกรมเชิงสัญลักษณ์จะสร้างพหุนามคุณลักษณะของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์และพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการ การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ที่ตรงกันของพหุนามคุณลักษณะทั้งสองจะสร้างระบบสมการไม่เชิงเส้นที่มี 8 สมการและ 8 ตัวแปร การหาคำตอบเชิงเลขแบบวนซ้ำของระบบสมการไม่เชิงเส้นนี้จะให้ค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวพร้อมกัน เมื่อคำตอบมีความถูกต้องและตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวมีค่าเกนทุกค่าที่เป็นค่าบวก ตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวจะมีค่าเกนที่ทำให้ระบบควบคุมความเร็ววงปิดมีค่าไอเกนทุกตัวที่เป็นค่าลบที่ต้องการ

บทที่ 5

ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ แบบเวกเตอร์โดยตรง

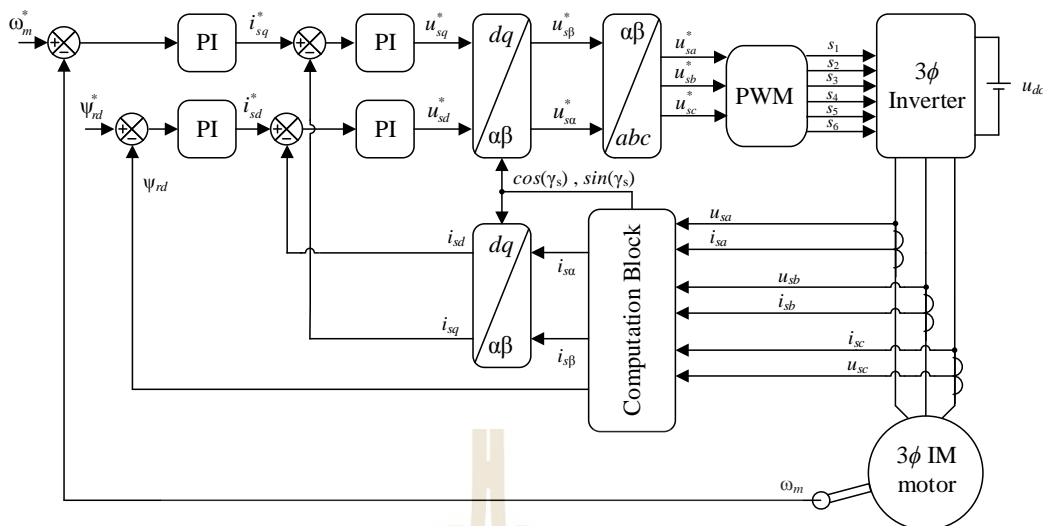
5.1 บทนำ

เมื่อพิจารณาระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบเวกเตอร์โดยตรงที่มีตัวควบคุมพีไอสี่ตัว การสุ่มเลือกค่าแกนของตัวควบคุมพีไอจะได้รับค่าแกนชุดที่ 1 ที่เป็นจำนวนเต็มบวก และการคำนวณค่าแกนโดยตรงจะให้ค่าแกนชุดที่ 2 ที่เป็นจำนวนจริงบวก เนื่องจากค่าแกนของตัวควบคุมทั้งสองชุดนี้มีค่าที่แตกต่างกัน เมตริกซ์สัมประสิทธิ์จะมีค่าไอเกนสองชุดที่แตกต่างกัน และค่าไอเกนทุกค่ามีตำแหน่งอยู่ทางด้านซ้ายมือของแกนจินตภาพในระนาบเชิงซ้อน ระบบควบคุมวงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่มีสมรรถนะแตกต่างกัน ผลตอบสนองจึงมีสมรรถนะที่ขึ้นอยู่กับค่าแกนของตัวควบคุม ถ้าตัวควบคุมพีไอสี่ตัวมีค่าแกนชุดที่ 1 เมตริกซ์สัมประสิทธิ์จะมีค่าไอเกนบางค่าที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพมาก ระบบควบคุมความเร็วมีแนวโน้มให้ผลตอบสนองในสถานะชั่วครู่ที่มีช่วงระยะเวลานาน แต่ถ้าตัวควบคุมพีไอสี่ตัวมีค่าแกนชุดที่ 2 เมตริกซ์สัมประสิทธิ์จะมีค่าไอเกนทุกค่าที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ ระบบควบคุมมีแนวโน้มให้ผลตอบสนองในสถานะชั่วครู่ที่มีช่วงระยะเวลาน้อยกว่า เพราะก่อนการคำนวณค่าแกนของตัวควบคุมพีไอโดยตรง ค่าไอเกนทุกค่าจะได้รับการกำหนดให้มีตำแหน่งที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ และค่าไอเกนทุกค่าต้องเป็นจำนวนเต็มลบ บทนี้จะกล่าวถึงการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมวงปิดที่นำมาใช้ตรวจสอบแนวโน้มของผลตอบสนองความเร็วเพลลา แผนการควบคุมเวกเตอร์โดยตรงจ่ายสัญญาณขั้วเกต 6 สัญญาณถึงอินเวอร์เตอร์พีดับเบิลยูเอ็มสามเฟสที่เชื่อมต่อกับขั้วต่อไฟฟ้าสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพราะในทางปฏิบัติ อินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงค่าอาร์เอ็มเอสและความถี่ของแรงดันเอชีสเตเตอร์สามเฟส จะขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำให้หมุนด้วยความเร็วเพลลาที่เปลี่ยนแปลงได้ การจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอสี่ตัวที่มีค่าแกนชุดที่ 1 และตัวควบคุมพีไอสี่ตัวที่มีค่าแกนชุดที่ 2 จะให้ผลการจำลองสถานการณ์ที่เปรียบเทียบสมรรถนะของผลตอบสนองความเร็วเพลลาได้

การจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware-In-The-Loop) หรือ โพรเซสเซอร์ในลูป (Processor-In-The-Loop) จะนำมาใช้ตรวจสอบสมรรถนะของผลตอบสนองความเร็วพลตาที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ในทางปฏิบัติ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เป็นฮาร์ดแวร์ภายนอกจะเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้จำลองสถานการณ์ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่เป็นแผนการควบคุมเวกเตอร์โดยตรงที่มีการแปลงพิกัดหรือการแปลงกรอบอ้างอิง ตัวควบคุมพีไอสี่ตัว หน่วยคำนวณพลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ และหน่วยมอดูเลตความกว้างพัลส์หรือพีดับเบิลยูเอ็ม และโปรแกรม MATLAB/Simulink ที่เป็นซอฟต์แวร์ภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ จะทำหน้าที่เป็นแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โหลดเชิงกล อินเวอร์เตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม วงจรเรียงกระแส และแหล่งจ่ายแรงดันเอซีสามเฟส

5.2 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็ววงปิด

ระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่แสดงในรูปที่ 5.1 ประกอบด้วยแผนการควบคุมเวกเตอร์โดยตรง มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ขับเคลื่อน โหลดเชิงกล อินเวอร์เตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม และแหล่งจ่ายแรงดันดีซี วงจรเรียงกระแสที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันเอซีสามเฟสจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันดีซี อินเวอร์เตอร์สามเฟสประกอบด้วยไอจีบีที 6 ตัว แผนการควบคุมเวกเตอร์โดยตรงประกอบด้วยหน่วยแปลงพิกัดหรือกรอบอ้างอิง ตัวควบคุมพีไอสี่ตัว หน่วยคำนวณพลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ (computational block) และหน่วยพีดับเบิลยูเอ็ม แรงดันเอซีสเตเตอร์อ้างอิงที่อยู่ในพิกัดหุคหนึ่ง (u_{sa}^* , u_{sb}^*) จะแปลงไปเป็นแรงดันสเตเตอร์สามเฟสอ้างอิง (u_{sa}^* , u_{sb}^* , u_{sc}^*) ที่อยู่ในพิกัดหุคหนึ่ง การเปรียบเทียบระหว่างแรงดันสเตเตอร์สามเฟสอ้างอิงและสัญญาณพาหะสามเหลี่ยมที่มีความถี่สูง จะสร้างขบวนสัญญาณพัลส์ 6 สัญญาณที่มีความกว้างเปลี่ยนแปลงได้ (s_1 , s_2 , s_3 , s_4 , s_5 และ s_6) ขบวนสัญญาณพัลส์ที่ได้นี้คือสัญญาณขับเคลื่อน และความกว้างที่เปลี่ยนแปลงได้ของสัญญาณพัลส์คือการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (pulse-width modulation) หรือพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) ขบวนสัญญาณพัลส์ 6 สัญญาณจะบังคับลำดับการสวิตช์ของไอจีบีที 6 ตัว อินเวอร์เตอร์จึงแปลงแรงดันดีซีไปเป็นแรงดันเอซีสเตเตอร์สามเฟสที่มีค่าอาร์เอ็มเอสและความถี่ที่เปลี่ยนแปลงได้ และอินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันเอซีสเตเตอร์สามเฟสถึงมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 5.1 ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรงที่มีอินเวอร์เตอร์

การจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรงที่มีอินเวอร์เตอร์ที่แสดงในรูปที่ 5.1 จะแบ่งออกเป็น การจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ความเร็วเพลอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงและโหลดทอร์กคงที่ และการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ความเร็วเพลอ้างอิงคงที่และโหลดทอร์กมีการเปลี่ยนแปลง ในแต่ละกรณี ตัวควบคุมพีไอสี่ตัวมีค่าเกนชุดที่ 1 ที่แสดงในตารางที่ 4.1 และมีค่าเกนชุดที่ 2 ที่แสดงในตารางที่ 4.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลมีค่าพารามิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 3.1 การจำลองสถานการณ์มีขนาดอ้างอิงของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ $\psi_{rd}^* = 0.7 \text{ Wb}$ และมีขั้นเวลา (stepsize) เท่ากับ $10 \mu\text{s}$ แหล่งจ่ายแรงดันอินเวอร์เตอร์สามเฟสมีแรงดันระหว่างสาย (line-to-line voltage) $380 \text{ V}_{\text{rms}}$ ที่มีความถี่ 50 Hz และตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่ออยู่ระหว่างวงจรเรียงกระแสและอินเวอร์เตอร์ มีค่าความจุ 5 mF

5.2.1 กรณีที่ความเร็วเพลอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงและโหลดทอร์กคงที่

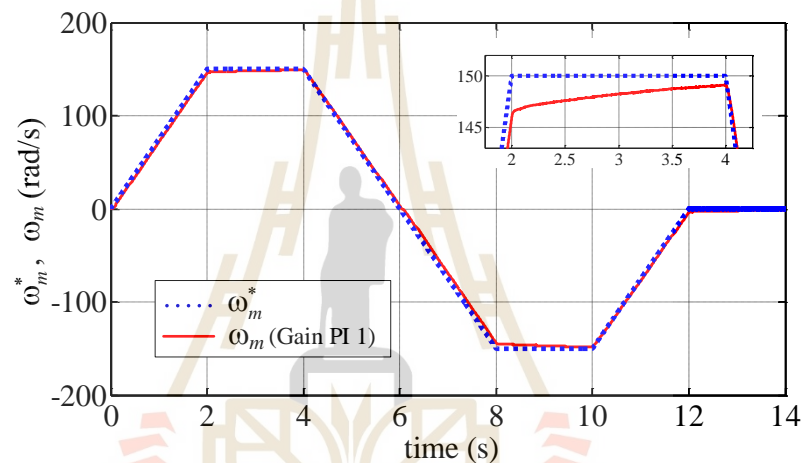
ความเร็วเพลอ้างอิง (ω_m^*) ที่มีการเปลี่ยนแปลง (กราฟเส้นประสีน้ำเงิน) จะแสดงในรูปที่ 5.2 และ 5.3 ความเร็วเพลอ้างอิงนี้คือความเร็วเพลอ้างอิงในหัวข้อที่ 4.3 โหลดทอร์กมีขนาด $T_{Lm} = 12 \text{ N}\cdot\text{m}$ และการจำลองสถานการณ์ใช้เวลา 14 วินาที

เมื่อตัวควบคุมพีไอสี่ตัวมีค่าเกนชุดที่ 1 (Gain PI 1) ระบบควบคุมความเร็ววงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพลที่แสดงในรูปที่ 5.2 (ω_m : กราฟเส้นทึบสีแดง) ในช่วงระยะเวลาที่ความเร็วเพลอ้างอิงคงที่ ผลตอบสนองจะใช้ระยะเวลานานในการลู่เข้าหาความเร็วเพลอ้างอิง

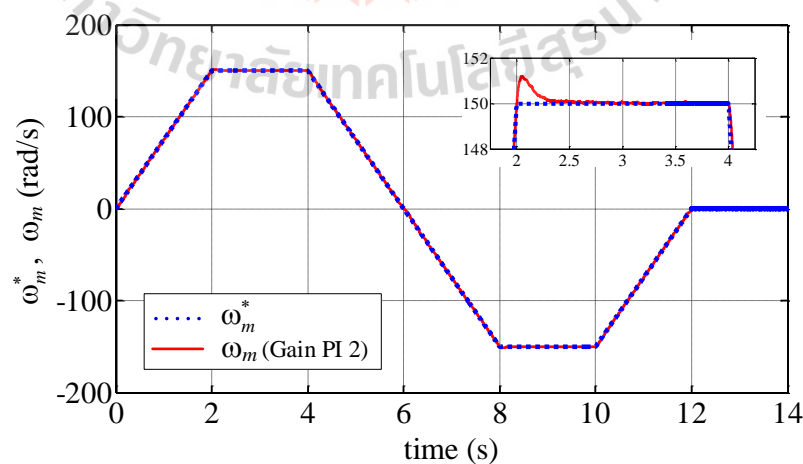
มอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลจึงหมุนด้วยความเร็วเพล่าที่มีความผิดพลาดที่แสดงในรูปที่ 5.4 ($\Delta\omega_m$: กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) แต่ความผิดพลาดของความเร็วเพล่ามีแนวโน้มลดลง ในช่วงระยะเวลาที่ความเร็วเพล่าอ้างอิงเพิ่มขึ้น มอเตอร์จะสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 5.5 (T_e : กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) ที่มีขนาดมากกว่าโหลดทอร์ก (T_L : กราฟเส้นประสีดำ) มอเตอร์จึงขับเคลื่อนโหลดให้หมุนด้วยความเร็วเพล่าที่เพิ่มขึ้น ในช่วงระยะเวลาที่ความเร็วเพล่าอ้างอิงลดลง มอเตอร์จะสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขนาดน้อยกว่าโหลดทอร์ก มอเตอร์และโหลดจึงหมุนด้วยความเร็วเพล่าที่ลดลง ในช่วงระยะเวลาที่ความเร็วเพล่าอ้างอิงคงที่ มอเตอร์จะสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขนาดเท่ากับหรือใกล้เคียงกับโหลดทอร์กโดยประมาณ กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนตรงที่แสดงในรูปที่ 5.7 (i_{sd} : กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) คือกระแสไฟฟ้าดีซีและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนตรงมีความผิดพลาดที่แสดงในรูปที่ 5.8 (Δi_{sd} : กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) ความผิดพลาดมีแนวโน้มลดลง กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนขวางที่แสดงในรูปที่ 5.9 (i_{sq} : กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) จะเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงของทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า เพราะกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนขวางคือปริมาณที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนขวางมีความผิดพลาดที่แสดงในรูปที่ 5.10 (Δi_{sq} : กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) และขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่แสดงในรูปที่ 5.11 (ψ_{rd} : กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) มีขนาดที่น้อยกว่าขนาดอ้างอิงของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ (ψ_{rd}^* : กราฟเส้นประสีดำ) ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์จึงมีความผิดพลาดที่แสดงในรูปที่ 5.12 ($\Delta\psi_{rd}$: กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) แต่มีแนวโน้มลดลง

เมื่อตัวควบคุมพีไอสี่ตัวมีค่าเกนชุดที่ 2 (Gain PI 2) ระบบควบคุมความเร็ววงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพล่าที่แสดงในรูปที่ 5.3 (ω_m : กราฟเส้นทึบสีแดง) ในช่วงระยะเวลาที่ความเร็วเพล่าอ้างอิงคงที่ ผลตอบสนองจะลู่เข้าหาความเร็วเพล่าอ้างอิง (ω_m^* : กราฟเส้นประสีน้ำเงิน) ภายในช่วงระยะเวลาดังนั้น ผลตอบสนองจึงมีสถานะชั่วคราวในช่วงระยะเวลาที่สั้นมากแต่เกิดการพุ่งเกิน (overshoot) เล็กน้อยในสถานะชั่วคราว มอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลจะหมุนด้วยความเร็วเพล่าที่มีความผิดพลาดน้อยมากที่แสดงในรูปที่ 5.4 ($\Delta\omega_m$: กราฟเส้นทึบสีแดง) และผลตอบสนองความเร็วเพล่าไม่มีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 5.6 (T_e : กราฟเส้นทึบสีแดง) จะเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงของทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 แต่มีการสั่นมากกว่า กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนตรงที่แสดงในรูปที่ 5.7 (i_{sd} : กราฟเส้นทึบสีแดง) คือกระแสไฟฟ้าดีซีที่มีแนวโน้มคงที่และมีค่ามากกว่ากระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนตรงที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 (กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนตรงมีความผิดพลาดที่แสดงในรูปที่ 5.8 (Δi_{sd} : กราฟเส้นทึบสีแดง) ความผิดพลาดมีค่าศูนย์โดยประมาณ ในช่วงระยะเวลาที่ความเร็วเพล่าอ้างอิงคงที่

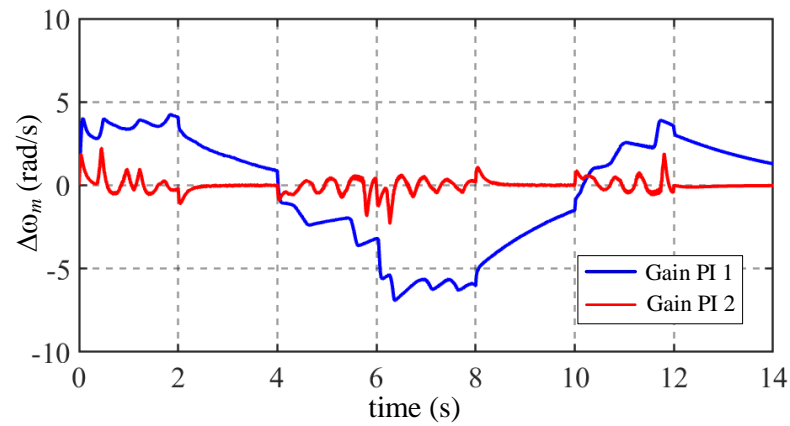
กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนขวางที่แสดงในรูปที่ 5.9 (i_{sq} : กราฟเส้นทึบสีแดง) มีขนาดน้อยกว่า และเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงของทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 5.6 กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนขวางมีความผิดพลาดที่แสดงในรูปที่ 5.10 (Δi_{sq} : กราฟเส้นทึบสีแดง) และไม่มีความผิดพลาดในช่วงระยะเวลาที่ความเร็วเพลลาอ้างอิงคงที่ และขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่แสดงในรูปที่ 5.11 (ψ_{rd} : กราฟเส้นทึบสีแดง) มีขนาดเท่ากับหรือใกล้เคียงกับขนาดอ้างอิงของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ (ψ_{rd}^* : กราฟเส้นประสีดำ) ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์จึงมีความผิดพลาดน้อยมากที่แสดงในรูปที่ 5.12 ($\Delta \psi_{rd}$: กราฟเส้นทึบสีแดง) และไม่มีความผิดพลาดในช่วงระยะเวลาที่ความเร็วเพลลาอ้างอิงคงที่



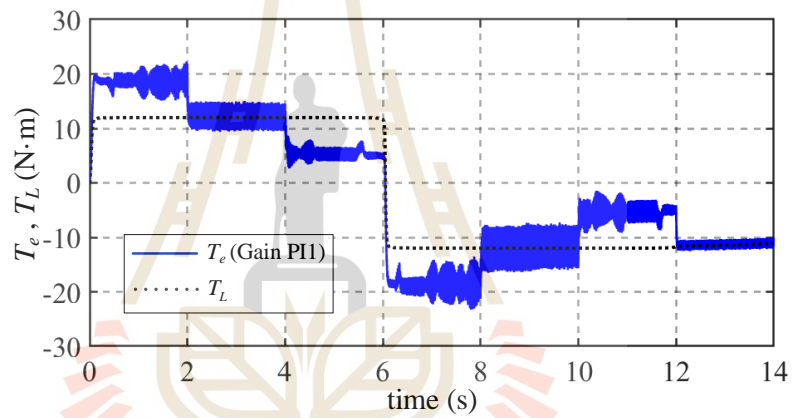
รูปที่ 5.2 ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และความเร็วเพลลาอ้างอิง



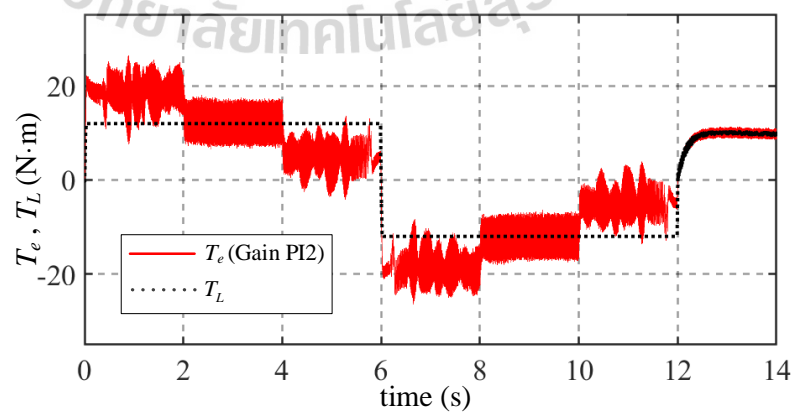
รูปที่ 5.3 ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 2 และความเร็วเพลลาอ้างอิง



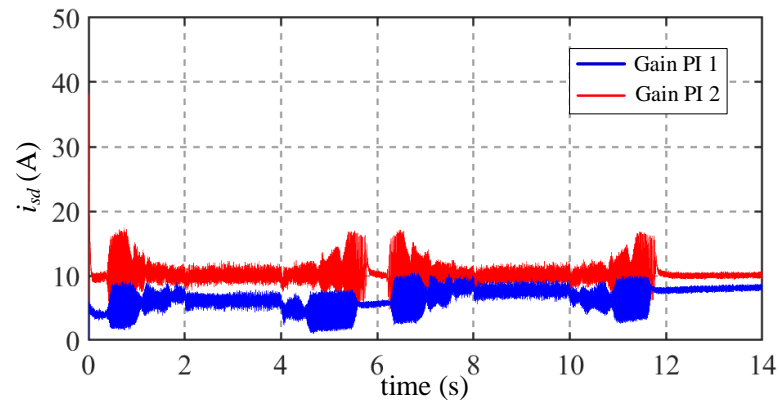
รูปที่ 5.4 ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2



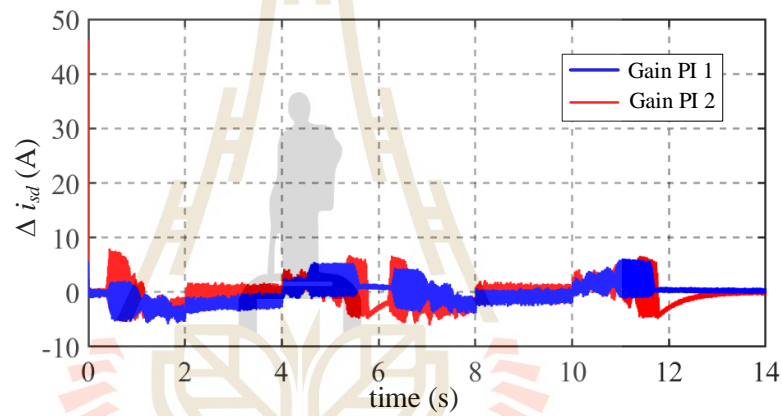
รูปที่ 5.5 ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และโหลดทอร์ก



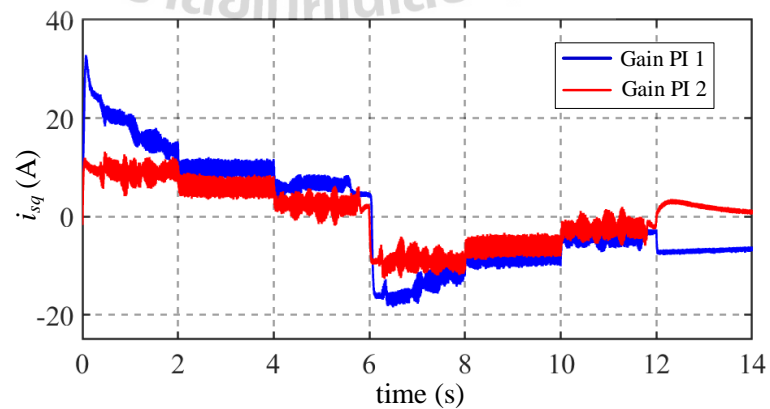
รูปที่ 5.6 ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 2 และโหลดทอร์ก



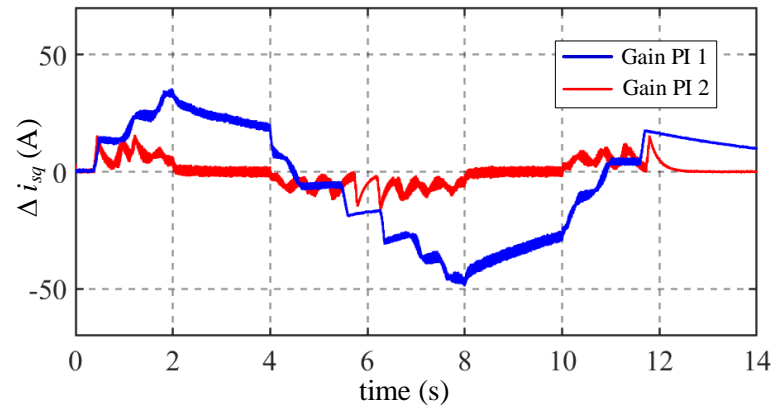
รูปที่ 5.7 กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2



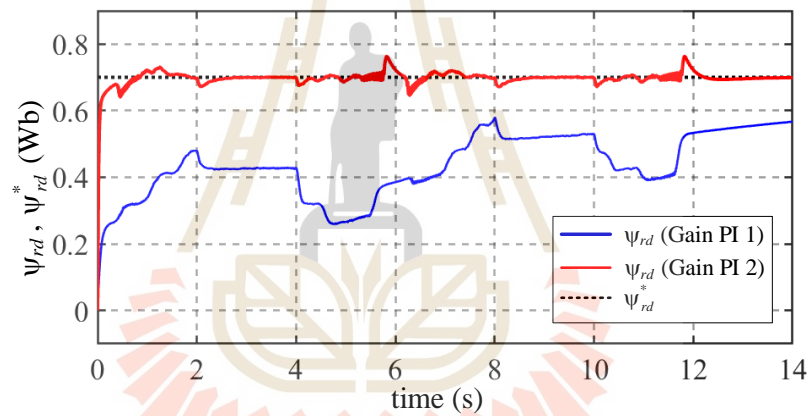
รูปที่ 5.8 ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2



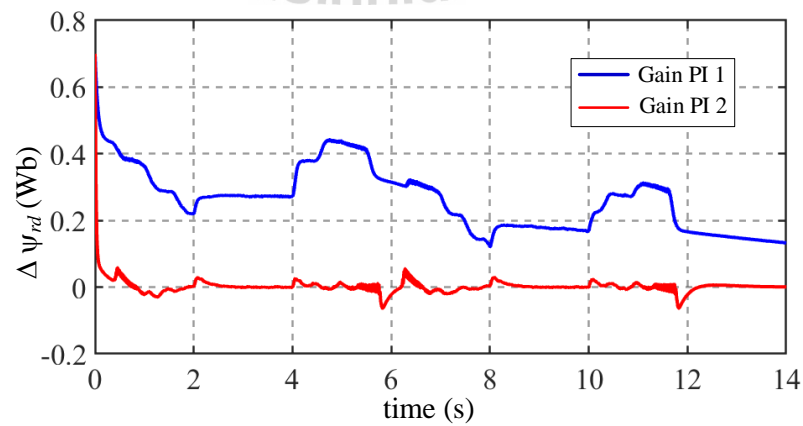
รูปที่ 5.9 กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2



รูปที่ 5.10 ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนขวางที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2



รูปที่ 5.11 ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2



รูปที่ 5.12 ความผิดพลาดของขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2

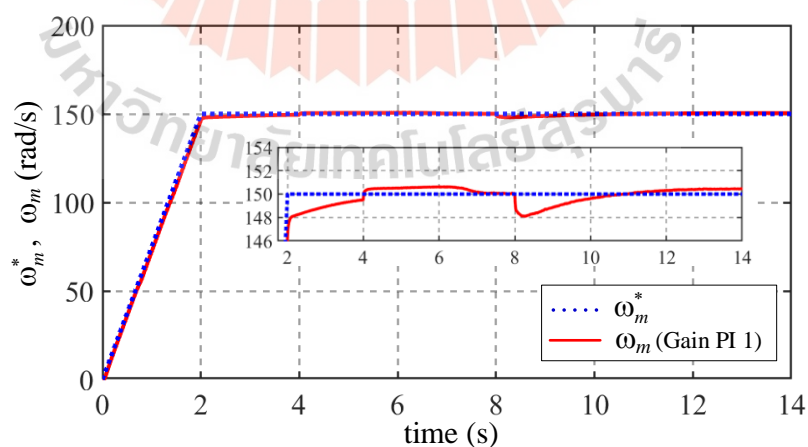
5.2.2 กรณีที่ความเร็วเพลลาอ้างอิงคงที่และโหลดทอร์กมีการเปลี่ยนแปลง

กำหนดให้โหลดทอร์กมีขนาดที่เปลี่ยนแปลงดังนี้ ที่เวลาเริ่มต้น (0 วินาที) $T_{Lm} = 5$ N·m , ที่เวลา 4 วินาที $T_{Lm} = 0$ (no load) และที่เวลา 8 วินาที $T_{Lm} = 10$ N·m การจำลองสถานการณ์ใช้เวลา 14 วินาที ความเร็วเพลลาอ้างอิงที่แสดงในรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 (ω_m^* : กราฟเส้นประสีน้ำเงิน) จะบังคับให้มอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนจากสภาพหยุดนิ่งและหมุนด้วยความเร็วเพลลาที่เพิ่มขึ้นจนถึง 150 rad/s และหมุนด้วยความเร็วเพลลาคงที่

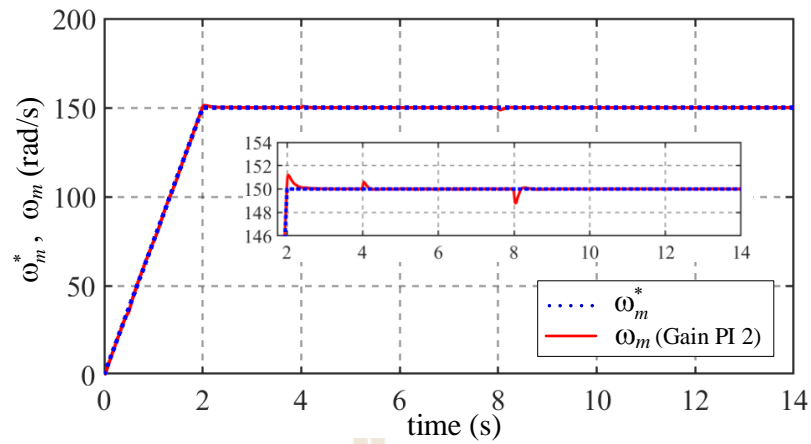
เมื่อตัวควบคุมพีไอสี่ตัวมีค่าเกนชุดที่ 1 (Gain PI 1) ระบบควบคุมความเร็ววงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 5.13 (ω_m : กราฟเส้นทึบสีแดง) ผลตอบสนองมีความผิดพลาดในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.15 ($\Delta\omega_m$: กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) ในช่วงระยะเวลาที่ความเร็วเพลลาอ้างอิงเพิ่มขึ้น มอเตอร์จะสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 5.16 (T_e : กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) ที่มีขนาดมากกว่า โหลดทอร์ก (T_L : กราฟเส้นประสีดำ) ในช่วงระยะเวลาที่ความเร็วเพลลาอ้างอิงคงที่ มอเตอร์จะสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขนาดเท่ากับหรือใกล้เคียงกับโหลดทอร์กโดยประมาณ กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงที่แสดงในรูปที่ 5.18 (i_{sd} : กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) คือกระแสไฟฟ้าดีซีที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่หลังจากโหลดทอร์กมีขนาดที่เพิ่มขึ้นจาก $T_{Lm} = 0$ ถึง $T_{Lm} = 10$ N·m กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงเริ่มมีแนวโน้มคงที่ กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงมีความผิดพลาดที่แสดงในรูปที่ 5.19 (Δi_{sd} : กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางที่แสดงในรูปที่ 5.20 (i_{sq} : กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) จะเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงของทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางมีความผิดพลาดที่แสดงในรูปที่ 5.21 (Δi_{sq} : กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) แต่ความผิดพลาดมีแนวโน้มลดลง และขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่แสดงในรูปที่ 5.22 (ψ_{rd} : กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) มีขนาดที่น้อยกว่าขนาดอ้างอิงของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ (ψ_{rd}^* : กราฟเส้นประสีดำ) ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์มีขนาดที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่หลังจากโหลดทอร์กมีขนาดที่เพิ่มขึ้นจาก $T_{Lm} = 0$ ถึง $T_{Lm} = 10$ N·m ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์เริ่มมีแนวโน้มคงที่ ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์จึงมีความผิดพลาดในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.23 ($\Delta\psi_{rd}$: กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน)

เมื่อตัวควบคุมพีไอสี่ตัวมีค่าเกนชุดที่ 2 (Gain PI 2) ระบบควบคุมความเร็ววงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 5.14 (ω_m : กราฟเส้นทึบสีแดง) ในช่วงระยะเวลาที่ความเร็วเพลลาอ้างอิงคงที่และหลังจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดทอร์ก ผลตอบสนองจะลู่เข้าหา

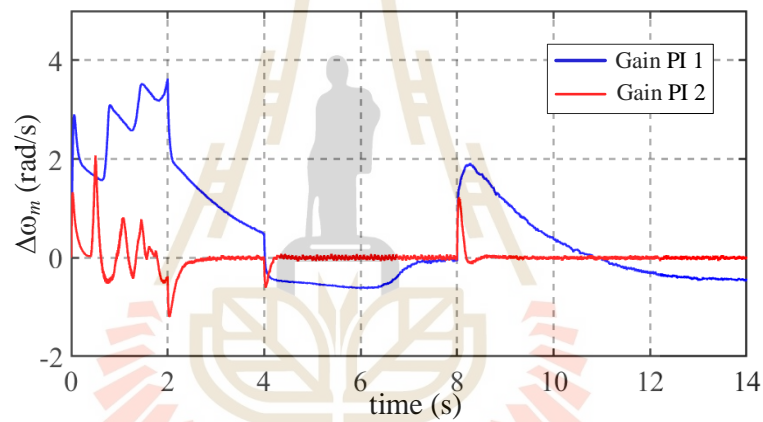
ความเร็วเพลาอ้างอิง (ω_m^* : กราฟเส้นประสีน้ำเงิน) ภายในช่วงระยะเวลาสั้น ผลตอบสนองจึงมีสถานะชั่วคราวในช่วงระยะเวลาที่สั้นมากแต่เกิดการพุ่งเกินเล็กน้อยหรือการพุ่งต่ำ (undershoot) เล็กน้อยในสถานะชั่วคราว มอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลจะหมุนด้วยความเร็วเพลาที่มีความผิดพลาดน้อยมากและไม่มี ความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.15 ($\Delta\omega_m$: กราฟเส้นทึบสีแดง) ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 5.17 (T_e : กราฟเส้นทึบ สีแดง) มีการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงของทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจาก ค่าแกนชุดที่ 1 แต่มีการสั้นมากกว่า กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงที่แสดงในรูปที่ 5.18 (i_{sd} : กราฟเส้นทึบสีแดง) คือ กระแสไฟฟ้าดีซีและมีแนวโน้มคงที่มากกว่ากระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงที่เกิดจากค่าแกนชุดที่ 1 (กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงมีความผิดพลาดที่แสดงในรูปที่ 5.19 น้อยกว่า (Δi_{sd} : กราฟเส้นทึบสีแดง) กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางที่แสดงในรูปที่ 5.20 (i_{sq} : กราฟเส้นทึบสีแดง) มีการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางที่เกิดจากค่าแกนชุดที่ 1 (กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) แต่มีการสั้นมากกว่า และในช่วงระยะเวลาที่ความเร็วเพลาอ้างอิงเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางมีขนาดน้อยกว่า กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางไม่มีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.21 (Δi_{sq} : กราฟเส้นทึบสีแดง) และขนาดของฟลักซ์แม่เหล็ก โรเตอร์ที่แสดงในรูปที่ 5.22 (ψ_{rd} : กราฟเส้นทึบสีแดง) มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับขนาดอ้างอิงของฟลักซ์แม่เหล็ก โรเตอร์ (ψ_{rd}^* : กราฟเส้นประสีน้ำเงิน) ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็ก โรเตอร์จึงมีความผิดพลาดน้อยมากและไม่มี ความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.23 ($\Delta\psi_{rd}$: กราฟเส้นทึบสีแดง)



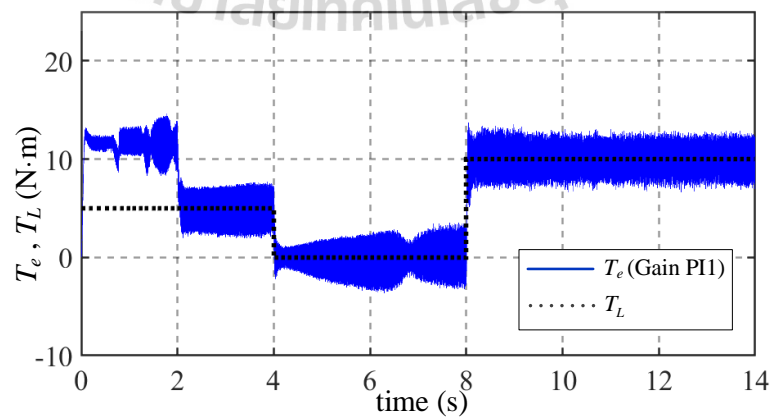
รูปที่ 5.13 ผลตอบสนองความเร็วเพลาที่เกิดจากค่าแกนชุดที่ 1 และความเร็วเพลาอ้างอิง



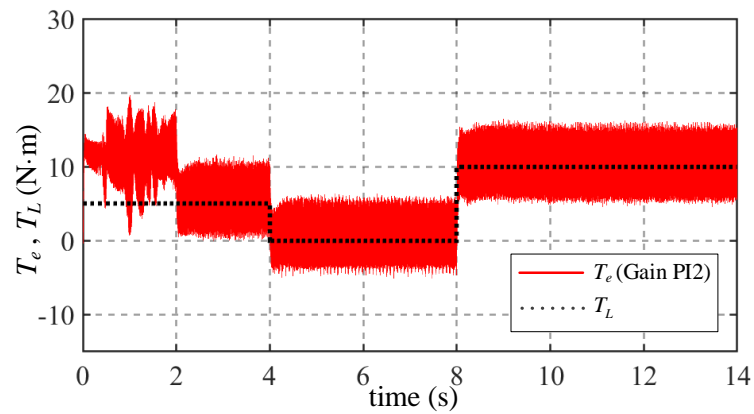
รูปที่ 5.14 ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 2 และความเร็วเพลลาอ้างอิง



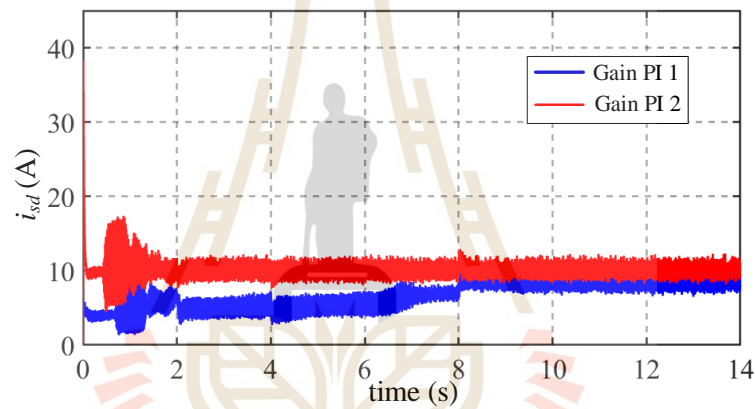
รูปที่ 5.15 ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2



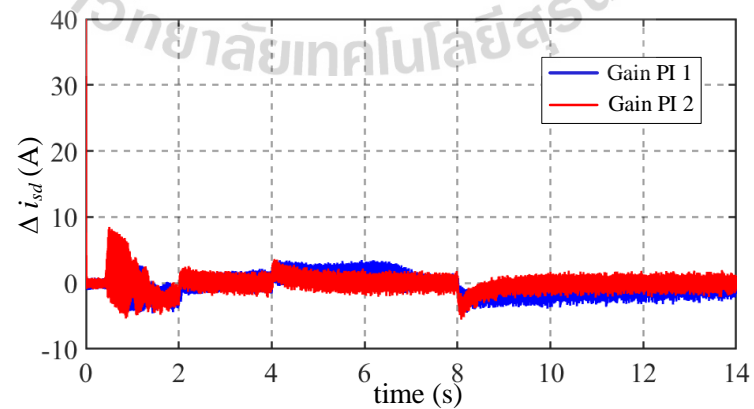
รูปที่ 5.16 ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และโหลดทอร์ก



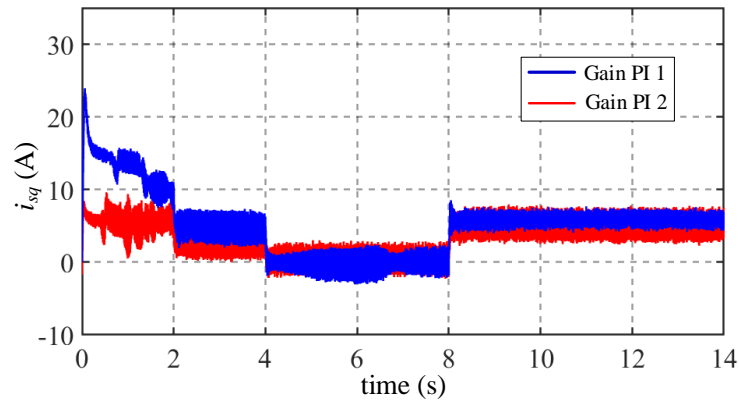
รูปที่ 5.17 ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 2 และ โหลดทอร์ก



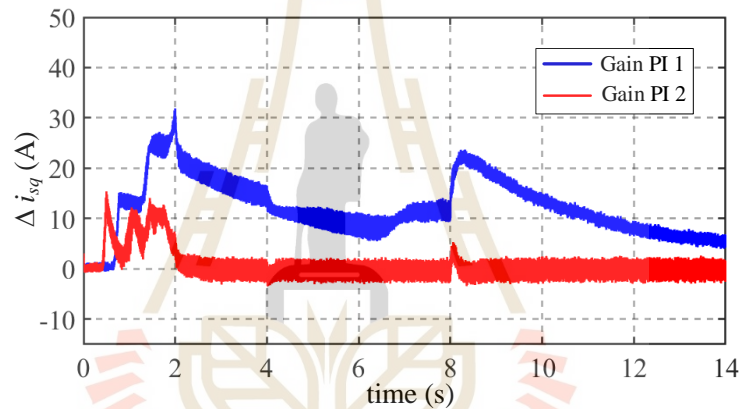
รูปที่ 5.18 กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 1 และค่าเกณฑ์ที่ 2



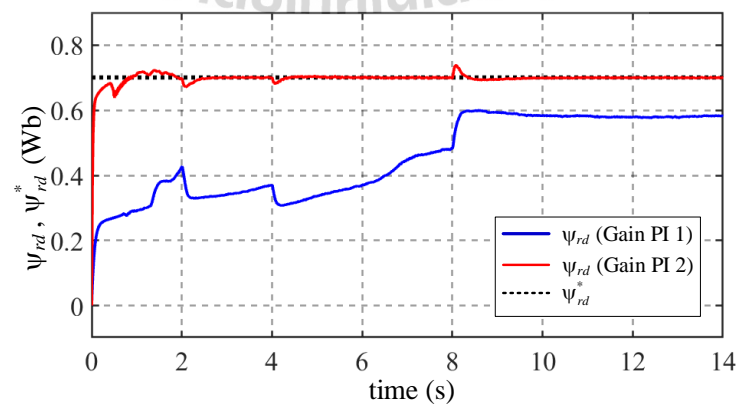
รูปที่ 5.19 ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 1 และค่าเกณฑ์ที่ 2



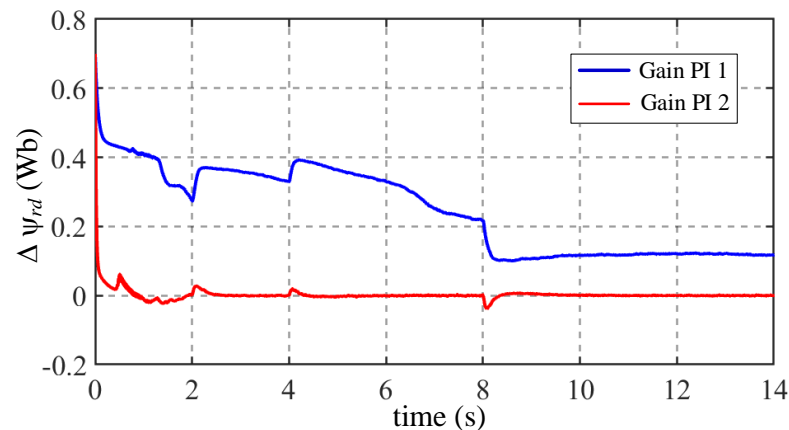
รูปที่ 5.20 กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2



รูปที่ 5.21 ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2



รูปที่ 5.22 ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2



รูปที่ 5.23 ความผิดพลาดของขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2

5.3 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็ววงปิดแบบฮาร์ดแวร์ในรูป

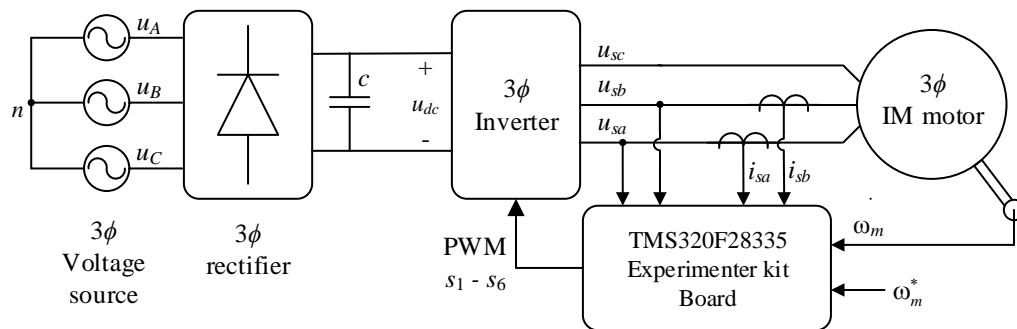
ในหัวข้อที่ 5.2 โปรแกรม MATLAB/Simulink คือซอฟต์แวร์ที่ใช้จำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็ววงปิดทั้งหมด การจำลองสถานการณ์จึงเกิดขึ้นภายในเครื่องคอมพิวเตอร์เท่านั้น (computer simulation) ระบบควบคุมความเร็ววงปิดในทางปฏิบัติคือระบบควบคุมแบบดิจิทัลที่มีเครื่องคอมพิวเตอร์หรือไม่โครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่เป็นแผนการควบคุมเวกเตอร์โดยตรง และมีพลาเน็ตทางกายภาพที่ประกอบด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โหลดเชิงกล และอินเวอร์เตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม ไมโครคอนโทรลเลอร์จ่ายสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม 6 สัญญาณที่เป็นสัญญาณขับเคลื่อนถึงพลาเน็ต และได้รับสัญญาณป้อนกลับความเร็วเพลอาและกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ และสัญญาณวัดแรงดันสเตเตอร์จากพลาเน็ต แนวคิดหนึ่งของการจำลองสถานการณ์ที่เลียนแบบระบบควบคุมวงปิดในทางปฏิบัติ คือการใช้แบบจำลองพลวัตของพลาเน็ตแทนที่พลาเน็ตทางกายภาพและซอฟต์แวร์ที่ใช้จำลองสถานการณ์ทำหน้าที่เป็นแบบจำลองพลวัตของพลาเน็ตเท่านั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็นแผนการควบคุม แนวคิดนี้คือการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป (HIL) หรือโปรเซสเซอร์ในรูป (PIL) แนวคิดดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายที่แพงน้อยกว่าการทดลองระบบควบคุมวงปิดทางกายภาพ และใช้ตรวจสอบสมรรถนะของผลตอบสนองที่มีโอกาสเกิดขึ้นในทางปฏิบัติ

การเพิ่มเติมการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็ววงปิดจะใช้การจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป โปรแกรม MATLAB/Simulink ที่เป็นซอฟต์แวร์จำลองสถานการณ์ จะทำหน้าที่เป็นแบบจำลองพลวัตของพลาเน็ต เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ประมวลผลการจำลองสถานการณ์และชุดคำสั่งของโปรแกรม MATLAB/Simulink จะเชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

TMS320F28335 ที่อยู่ภายนอก พอร์ตยูเอสบี (USB port) จะเชื่อมต่อสัญญาณดิจิทัลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เข้าด้วยกัน เครื่องคอมพิวเตอร์จึงติดต่อสื่อสาร รับและส่งข้อมูลถึงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โปรแกรม MATLAB ที่ใช้งานคือ MATLAB R2018a ที่ประมวลผลในระบบปฏิบัติการ Windows 7 คอมไพเลอร์หรือตัวแปลโปรแกรม (compiler) ภาษาซีที่ใช้งานร่วมกับหรือพร้อมกับโปรแกรม MATLAB/Simulink คือ Code Composer Studio (CCS) เวอร์ชัน 8.2.0 เพราะแผนการควบคุมเวกเตอร์โดยตรงจะอยู่ในรูปของโปรแกรมภาษาซี

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์คือส่วนรับข้อมูลที่ส่งจากแบบจำลองพลวัตของพลาตันที่อยู่ในโปรแกรม MATLAB/Simulink ข้อมูลที่ได้รับคือสัญญาณป้อนกลับและสัญญาณวัด บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะประมวลผลแผนการควบคุมเวกเตอร์โดยตรงและส่งสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มถึงแบบจำลองพลวัตของพลาตัน การรับและส่งข้อมูลจะเกิดขึ้นตลอดระยะเวลาของการจำลองสถานการณ์ (รายละเอียดของการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในลูบจะอธิบายในภาคผนวก จ)

การจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีฮาร์ดแวร์ในลูบมีแนวคิดที่แสดงในรูปที่ 5.24 ระบบควบคุมความเร็วดังกล่าวคือระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรงที่มีอินเวอร์เตอร์สามเฟสในหัวข้อที่ 5.2 แบบจำลองพลวัตของพลาตันที่อยู่ในโปรแกรม MATLAB/Simulink ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันเอชีสสามเฟส วงจรเรียงกระแส อินเวอร์เตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม และแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและโหลดเชิงกล บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่เป็นแผนการควบคุมเวกเตอร์โดยตรงที่มีการแปลงพิกัด ตัวควบคุมพีไอสี่ตัว หน่วยคำนวณฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ และหน่วยพีดับเบิลยูเอ็มแบบจำลองพลวัตของพลาตันให้ผลตอบสนองความเร็วเพลลา กระแสไฟฟ้าสเตรเตอร์ และแรงดันสเตรเตอร์ ถึงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ หลังจากการได้รับสัญญาณป้อนกลับความเร็วเพลลาและกระแสไฟฟ้าสเตรเตอร์ และสัญญาณวัดแรงดันสเตรเตอร์จากแบบจำลองพลวัตของพลาตัน บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะคำนวณและประมวลผล สร้างและจ่ายสัญญาณพัลส์ 6 สัญญาณ (s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 และ s_6) ถึงแบบจำลองพลวัตของพลาตัน วงจรเรียงกระแสจ่ายแรงดันดีซีถึงอินเวอร์เตอร์ สัญญาณพัลส์ 6 สัญญาณจะบังคับลำดับการสวิตช์ของไอจีบีที 6 ตัวที่เชื่อมต่อเป็นอินเวอร์เตอร์สามเฟส แรงดันดีซีจะเปลี่ยนรูปไปเป็นแรงดันเอชีสเตรเตอร์สามเฟสแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้รับแรงดันเอชีสเตรเตอร์สามเฟส

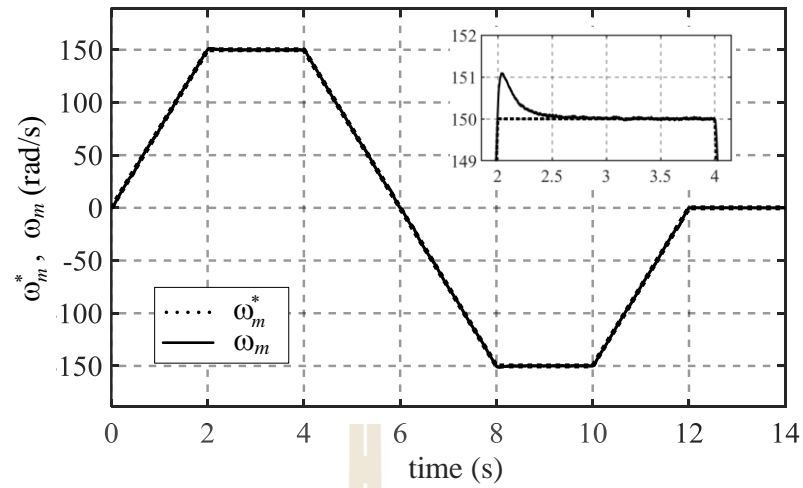


รูปที่ 5.24 แนวคิดของการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป

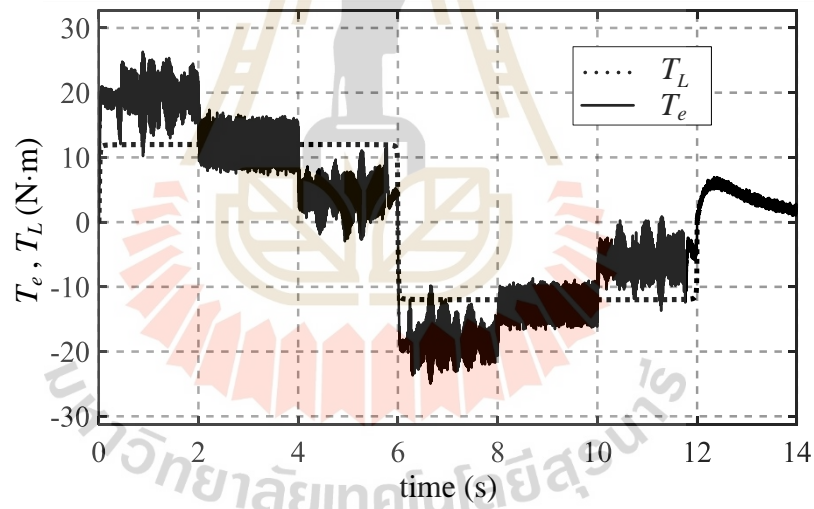
การจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีฮาร์ดแวร์ในรูปมีเงื่อนไขและค่าพารามิเตอร์ที่เหมือนกับการจำลองสถานการณ์ในหัวข้อที่ 5.2.1 ตัวควบคุมพีไอส์ตัวมีค่าแกนชุดที่ 2 (ค่าแกนที่ได้จากการคำนวณ โดยตรง) ที่แสดงในตารางที่ 4.4

ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีฮาร์ดแวร์ในรูปจะแสดงในรูปที่ 5.25 ถึงรูปที่ 5.29 การเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูปและผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องคอมพิวเตอร์เท่านั้นในหัวข้อที่ 5.2.1 จะให้ความแตกต่างกันน้อยมาก ในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 5.25 (กราฟเส้นทึบ) ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 5.26 (กราฟเส้นทึบ) และขนาดของฟลักซ์แม่เหล็ก โรเตอร์ที่แสดงในรูปที่ 5.27 จะมีลักษณะที่เหมือนกับผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 5.3 (กราฟเส้นทึบสีแดง) ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 5.6 (กราฟเส้นทึบสีแดง) และขนาดของฟลักซ์แม่เหล็ก โรเตอร์ที่เกิดจากค่าแกนชุดที่ 2 ที่แสดงในรูปที่ 5.11 (กราฟเส้นทึบสีแดง) ตามลำดับ สมรรถนะของผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 5.25 จึงมีโอกาสเกิดขึ้นได้ในทางปฏิบัติ กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์สามเฟสที่แสดงในรูปที่ 5.28 ถึงรูปที่ 5.30 มีรูปคลื่นไซน์ที่มีความเพี้ยนในสถานะอยู่ตัว เพราะแรงดันสแตเตอร์สามเฟสคือแรงดันเอซีพีดับเบิลยูเอ็ม ในช่วงระยะเวลา 5.7 วินาที ถึง 6.3 วินาที โดยประมาณ กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์สามเฟสที่แสดงในรูปที่ 5.30 จะเปลี่ยนแปลงจากลำดับเฟสบวก (ลำดับเฟส abc) ไปเป็นลำดับเฟสลบ (ลำดับเฟส acb) การกลับลำดับเฟสของกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์จะบังคับให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทาง

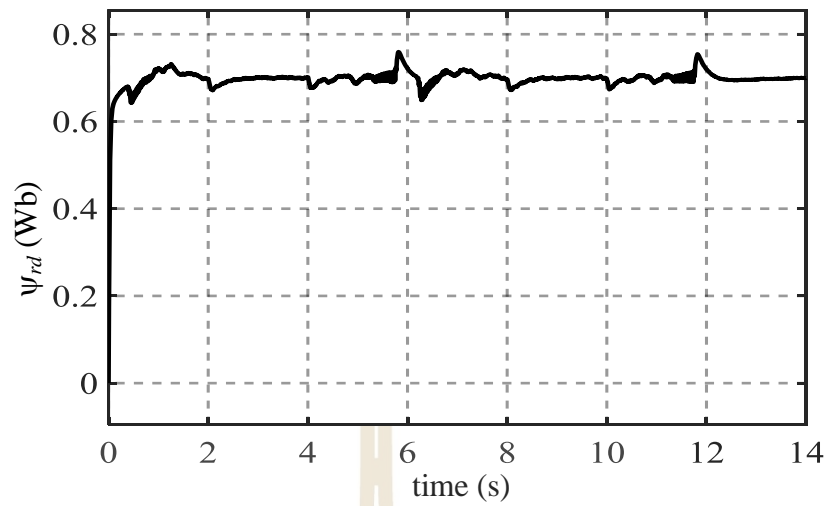
ในช่วงระยะเวลาที่มอเตอร์หยุดหมุน กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์มีความถี่น้อย และการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูปจะให้ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าและโหลดทอร์กที่แตกต่างจากการจำลองสถานการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องคอมพิวเตอร์เท่านั้น



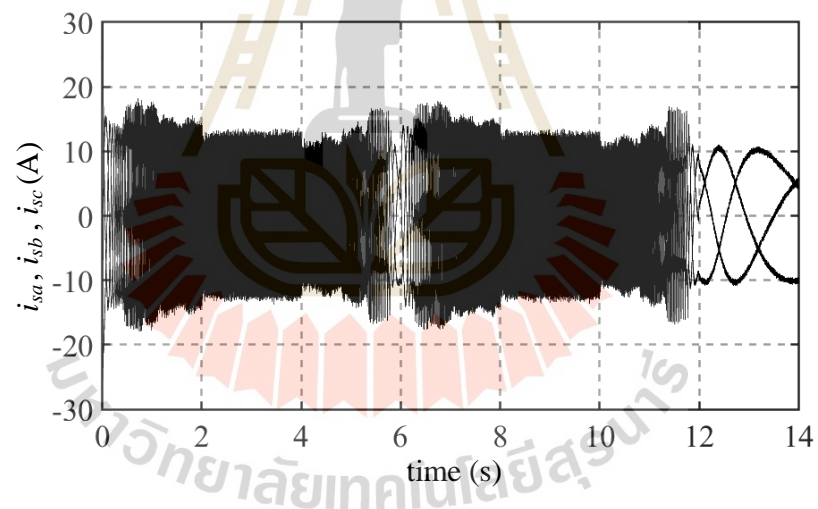
รูปที่ 5.25 ผลตอบสนองของความเร็วเพลาที่เกิดจากค่าแกนชุดที่ 2 และความเร็วเพลาอ้างอิงที่ได้รับจากการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป



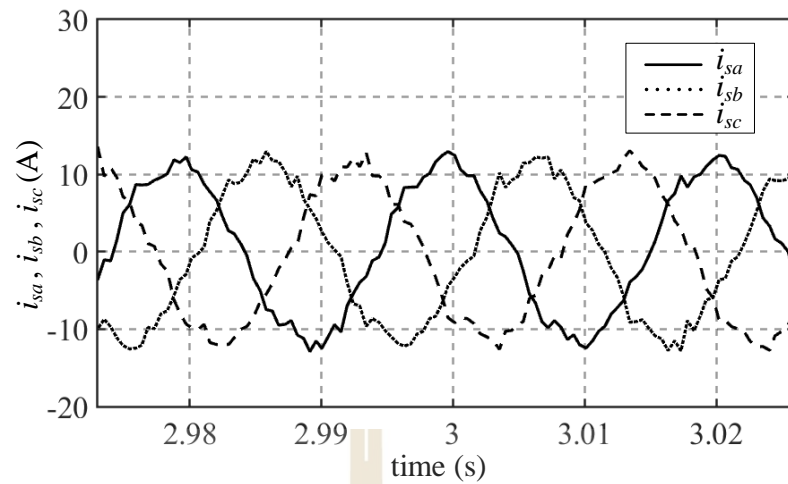
รูปที่ 5.26 ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากค่าแกนชุดที่ 2 และโหลดทอร์กที่ได้รับจากการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป



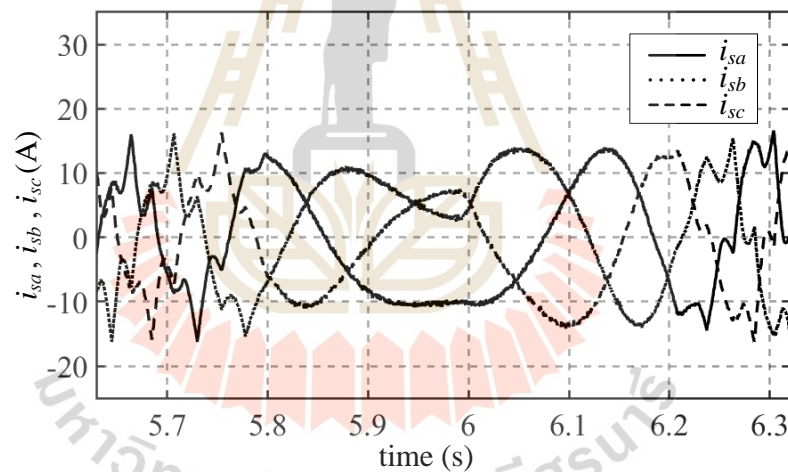
รูปที่ 5.27 ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่เกิดจากค่าแกนชุดที่ 2 ที่ได้รับจากการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป



รูปที่ 5.28 กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์สามเฟสที่เกิดจากค่าแกนชุดที่ 2 ที่ได้รับจากการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป



รูปที่ 5.29 กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์สามเฟสที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 2 ในสถานะอยู่ตัวที่ได้รับจากการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป



รูปที่ 5.30 การกลับลำดับเฟสของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์สามเฟสที่ได้รับจากการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป

5.4 สรุป

การจำลองสถานการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องคอมพิวเตอร์เท่านั้นแบ่งออกเป็นการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่มีความเร็วเพลลาอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงและโหลดทอร์กคงที่ และการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่มีความเร็วเพลลาอ้างอิงคงที่และโหลดทอร์กมีการเปลี่ยนแปลง ในแต่ละกรณีระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบเวกเตอร์โดยตรงมีตัวควบคุมพีไอ

สี่ตัวที่มีค่าเกณฑ์ที่ 1 (ค่าเกณฑ์ที่รับจากการสุ่มเลือก) และมีค่าเกณฑ์ที่ 2 (ค่าเกณฑ์ที่รับจากการคำนวณโดยตรง) เมื่อตัวควบคุมพีไอสี่ตัวที่มีค่าเกณฑ์ที่ 2 ระบบควบคุมความเร็ววงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพล่าที่มีสมรรถนะดีกว่าการใช้งานค่าเกณฑ์ที่ 1 ผลตอบสนองความเร็วเพล่าจะถูเข้าหาความเร็วเพล่าอ้างอิงภายในช่วงระยะเวลาสั้นแต่เกิดการพุ่งเกินเล็กน้อยในสถานะชั่วคราว และไม่มีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว และขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์มีสถานะชั่วคราวในช่วงระยะเวลาสั้นและแทบไม่มีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว แต่เมื่อตัวควบคุมพีไอสี่ตัวที่มีค่าเกณฑ์ที่ 1 ระบบควบคุมวงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพล่าที่มีสถานะชั่วคราวยาวนานกว่า มีความผิดพลาดมากกว่า และมีแนวโน้มของการเกิดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว และขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์มีความผิดพลาดและมีแนวโน้มของการเกิดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเช่นเดียวกัน การจำลองสถานการณ์ ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูปได้นำมาใช้จำลองสถานการณ์ในกรณี que ความเร็วเพล่าอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลง และโหลดทอร์กคงที่ และให้ผลการจำลองสถานการณ์ที่มีความเหมือนและใกล้เคียงกับผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องคอมพิวเตอร์เท่านั้น ดังนั้นเมื่อตัวควบคุมพีไอสี่ตัวที่มีค่าเกณฑ์ที่ 2 สมรรถนะดีกว่าและรวดเร็วกว่าของผลตอบสนองความเร็วเพล่าจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้ในทางปฏิบัติ



บทที่ 6

การมีขอบเขตที่สม่ำเสมอของแนววิถีสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิด

6.1 บทนำ

ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรงมีสมการปริภูมิสถานะที่มีพจน์ (เทอม) ของการรบกวน (perturbation) หรือเวกเตอร์การรบกวน ผลตอบสนองความเร็วเพลาจึงมีสมรรถนะที่ได้รับผลกระทบจากพจน์ (เทอม) ของการรบกวน และระบบควบคุมความเร็ววงปิดดังกล่าวคือระบบไม่เชิงเส้น เมื่อระบบควบคุมความเร็ววงปิดมีเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ที่มีค่าไอเกนทุกค่าที่เป็นจำนวนจริงลบหรือมีตำแหน่งที่อยู่ทางด้านซ้ายมือของแกนจินตภาพในระนาบเชิงซ้อน ค่าไอเกนทุกค่าจะไม่ยืนยันเสถียรภาพของระบบควบคุมความเร็ววงปิด ถ้าระบบควบคุมความเร็ววงปิดมีตัวแปรสถานะทุกตัวเข้าใกล้ศูนย์ ($\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{0}$) เวกเตอร์การรบกวนจะไม่เข้าใกล้ศูนย์หรือไม่หาย ($\Phi \neq \mathbf{0}$) (nonvanishing perturbation) เพราะเวกเตอร์การรบกวนมีสมาชิกบางตัวที่เป็นอิสระจากตัวแปรสถานะ และระบบควบคุมวงปิดมีจุดการทำงานที่ขึ้นอยู่กับเวกเตอร์การรบกวน ความเร็วเพลาอ้างอิง และโหลดทอร์ค ระบบควบคุมวงปิดจึงไม่มีจุดสมดุลและมีจุดการทำงานที่ไม่เป็นจุดศูนย์ ($\mathbf{x}_e \neq \mathbf{0}$) ในสถานะอยู่ตัว เนื่องจากระบบควบคุมวงปิดไม่มีจุดสมดุลและมีจุดการทำงานที่เปลี่ยนแปลงได้ การตรวจสอบเสถียรภาพของจุดสมดุลจึงไม่สามารถดำเนินการได้ แต่การพิจารณาการมีหรือไม่มีขอบเขตที่สม่ำเสมอ (uniform boundedness) ของเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะ (\mathbf{x}) ในสถานะอยู่ตัว คืองานที่สามารถดำเนินการต่อไปได้ (Khalil, 2000) การเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว จะสร้างแนววิถีสถานะ (state trajectory) หรือผลเฉลย (solution) (\mathbf{x}) ของระบบควบคุมความเร็ววงปิด และขนาดของเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะ ($\|\mathbf{x}\|$) คือระยะห่างระหว่างแนววิถีสถานะและจุดศูนย์

6.2 การวิเคราะห์แนววิถีสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิด

ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรง คือตัวอย่างหนึ่งของระบบที่มีการรบกวน (perturbed system) ที่มีพจน์ของการรบกวนที่ไม่หาย ถ้าระบบควบคุมความเร็ววงปิดดังกล่าวไม่มีพจน์ของการรบกวน และความเร็วเพลาอ้างอิงและโหลดทอร์คเท่ากับศูนย์ ระบบควบคุมวงปิดที่พิจารณาจะเป็นระบบเชิงเส้น ($\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x}$)

เมื่อเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ \mathbf{A} มีค่าไอเกนทุกค่าเป็นจำนวนจริงลบหรือเป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนที่มีส่วนจริงลบ หรือมีค่าไอเกนบางค่าเป็นจำนวนจริงลบและค่าไอเกนที่เหลือเป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนที่มีส่วนจริงลบ (เมตริกซ์ \mathbf{A} มีค่าไอเกนทุกค่าที่มีตำแหน่งอยู่ทางด้านซ้ายมือของแกนจินตภาพในระนาบเชิงซ้อน) เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ \mathbf{A} คือเมตริกซ์เสถียรภาพ (stability matrix) หรือเมตริกซ์เฮอว์วิตซ์ (Hurwitz matrix) และระบบเชิงเส้นจะมีจุดสมดุลที่เป็นจุดศูนย์ที่มีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับแบบวงกว้าง (globally asymptotically stable) และมีฟังก์ชันเลียปูนอฟ (Lyapunov function) ในรูปกำลังสอง (quadratic form) ดังนี้

$$V = V(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x} \quad (6-1)$$

โดยที่ \mathbf{P} คือเมตริกซ์สมมาตรจำกัดบวก (positive-definite symmetric matrix) ($\mathbf{P} = \mathbf{P}^T > \mathbf{0}$) ฟังก์ชันเลียปูนอฟจะสอดคล้องกับสมการ $\lambda_{\min}(\mathbf{P})\|\mathbf{x}\|^2 \leq V(\mathbf{x}) \leq \lambda_{\max}(\mathbf{P})\|\mathbf{x}\|^2$ โดยที่ $\lambda_{\min}(\mathbf{P})$ คือค่าไอเกนน้อยที่สุดของเมตริกซ์ \mathbf{P} และ $\lambda_{\max}(\mathbf{P})$ คือค่าไอเกนมากที่สุดของเมตริกซ์ \mathbf{P} ฟังก์ชันเลียปูนอฟมีอนุพันธ์ไปตามแนววิถีสถานะดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{dV(\mathbf{x})}{dt} = \frac{\partial V(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{P} \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{P} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{x}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}) \mathbf{x} \\ \dot{V} &= \mathbf{x}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}) \mathbf{x} = -\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} \leq -\lambda_{\min}(\mathbf{Q})\|\mathbf{x}\|^2 \end{aligned} \quad (6-2)$$

โดยที่ \mathbf{Q} คือเมตริกซ์สมมาตรจำกัดบวก ($\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T > \mathbf{0}$) และ $\lambda_{\min}(\mathbf{Q})$ คือค่าไอเกนน้อยที่สุดของเมตริกซ์ \mathbf{Q} สมการที่ (6-2) ให้สมการเลียปูนอฟ (Lyapunov equation) ดังนี้

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{Q} \quad (6-3)$$

เมตริกซ์ \mathbf{A} คือเมตริกซ์เฮอว์วิตซ์ สมการเลียปูนอฟจะให้คำตอบเดียว (unique solution) นั่นคือการเลือกเมตริกซ์ \mathbf{Q} หนึ่งเมตริกซ์และการแทนค่าเมตริกซ์ \mathbf{Q} ลงในสมการเลียปูนอฟ จะให้เมตริกซ์ \mathbf{P} หนึ่งเมตริกซ์เท่านั้น ระบบเชิงเส้น $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x}$ จึงมีจุดสมดุลที่เป็นจุดศูนย์ที่มีเสถียรภาพเอกซ์โพเนนเชียลแบบวงกว้าง (globally exponentially stable)

เมื่อตัวควบคุมพีไอสี่ตัวมีค่าเกนชุดที่ 1 (ค่าเกนที่ได้จากการสุ่มเลือก) ที่แสดงในตารางที่ 4.1 และตัวควบคุมพีไอสี่ตัวมีค่าเกนชุดที่ 2 (ค่าเกนที่ได้จากการคำนวณโดยตรง) ที่แสดงในตารางที่ 4.4 เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ **A** จะมีค่าไอเกนชุดที่ 1 ที่แสดงในตารางที่ 4.2 และเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ **A** จะมีค่าไอเกนชุดที่ 2 ที่แสดงในตารางที่ 4.3 ตามลำดับ ค่าไอเกนทุกค่าในตารางที่ 4.2 และในตารางที่ 4.3 มีตำแหน่งที่อยู่ทางด้านซ้ายมือของแกนจินตภาพในระนาบเชิงซ้อน การเลือก $\mathbf{Q} = \mathbf{I}$ โดยที่ **I** คือเอกลักษณ์การคูณของเมตริกซ์ และการแทนค่าเมตริกซ์ **Q** ลงในสมการเลียปูนอฟ จะให้เมตริกซ์ **P** ที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0.0003 & 0 & 0.0010 & 0 & 0.0015 & 0 & 0.0004 & 0 \\ 0 & 0.0004 & 0 & 0 & 0 & 0.0015 & 0 & 0.0002 \\ 0.0010 & 0 & 0.2402 & 0 & 0.2738 & 0 & 0.4255 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0028 & 0 & -0.0004 & 0 & 0.0111 \\ 0.0015 & 0 & 0.2738 & 0 & 2.1844 & 0 & 0.2226 & 0 \\ 0 & 0.0015 & 0 & -0.0004 & 0 & 2.1618 & 0 & 0.0411 \\ 0.0004 & 0 & 0.4255 & 0 & 0.2226 & 0 & 6.0648 & 0 \\ 0 & 0.0002 & 0 & 0.0111 & 0 & 0.0411 & 0 & 2.1777 \end{bmatrix}$$

และให้เมตริกซ์ **P** ที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 2

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0.0005 & 0 & 0.0063 & 0 & 0.0003 & 0 & 0.0252 & 0 \\ 0 & 0.0004 & 0 & 0.0002 & 0 & 0.0001 & 0 & 0.0013 \\ 0.0063 & 0 & 1.2024 & 0 & -0.1184 & 0 & 4.7728 & 0 \\ 0 & 0.0002 & 0 & 0.0048 & 0 & -0.0081 & 0 & 0.0055 \\ 0.0003 & 0 & -0.1184 & 0 & 1.2412 & 0 & -0.4633 & 0 \\ 0 & 0.0001 & 0 & -0.0081 & 0 & 2.8674 & 0 & 0.0364 \\ 0.0252 & 0 & 4.7728 & 0 & -0.4633 & 0 & 21.0684 & 0 \\ 0 & 0.0013 & 0 & 0.0055 & 0 & 0.0364 & 0 & 4.1989 \end{bmatrix}$$

เมตริกซ์ **P** ที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และเมตริกซ์ **P** ที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 2 มีค่าไอเกนที่เป็นค่าบวกทุกค่าที่แสดงในตารางที่ 6.1

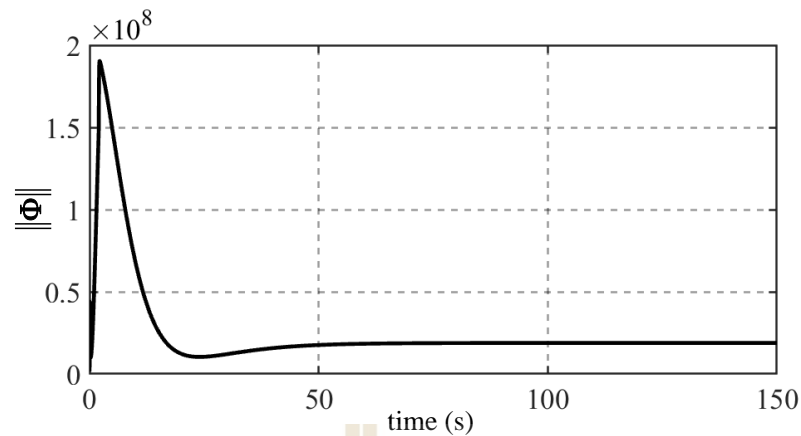
ตารางที่ 6.1 ค่าไอเกนของเมตริกซ์ \mathbf{P} ที่เกิดจากตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2

ค่าไอเกนของเมตริกซ์ \mathbf{P} ที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1	ค่าไอเกนของเมตริกซ์ \mathbf{P} ที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 2
0.0003	0.0004
0.0004	0.0005
0.0027	0.0048
0.1762	0.1151
2.1279	1.2305
2.2025	2.8665
2.2116	4.1999
6.1106	22.1665

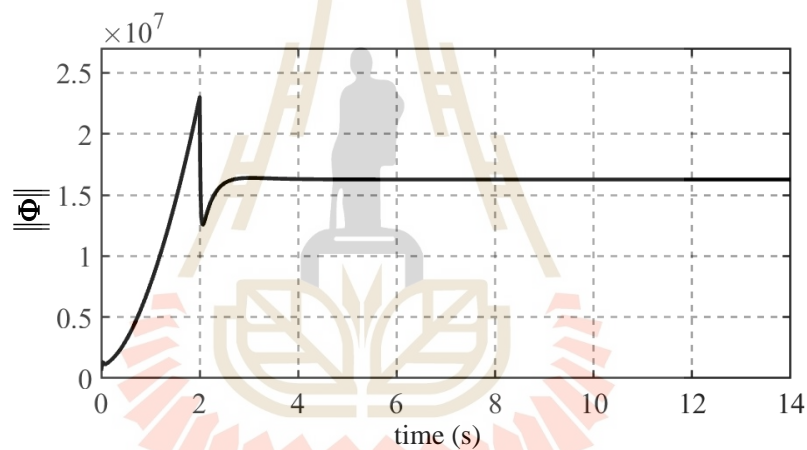
ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรงที่มีพจน์ของการรั้งความถี่ไม่หาย จะมีสมการปริภูมิสถานะดังนี้ (สมการที่ (4-5) บทที่ 4)

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \Phi + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (6-4)$$

เมื่อความเร็วเพลอา้างอิง (ω_m^*) มีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะลาดเอียง (ramp) จากศูนย์ถึง 150 rad/s ภายในช่วงระยะเวลา 2 s และต่อมาความเร็วเพลอา้างอิงมีค่า 150 rad/s คงที่ และตัวควบคุมพีไอสี่ตัวมีค่าเกนชุดที่ 1 (ค่าเกนที่ได้จากการสุ่มเลือก) และมีค่าเกนชุดที่ 2 (ค่าเกนที่ได้จากการคำนวณโดยตรง) ระบบควบคุมความเร็ววงปิดมีเวกเตอร์การรั้งความถี่ที่มีขนาด ($\|\Phi\|$) ที่แสดงในรูปที่ 6.1 และรูปที่ 6.2 เมื่อความเร็วเพลอา้างอิงและโหลดทอร์กมีค่าคงที่ เวกเตอร์การรั้งความถี่จะมีขนาดลู่เข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่งในสถานะอยู่ตัว นั่นคือเวกเตอร์การรั้งความถี่ไม่เป็นศูนย์ ($\Phi \neq \mathbf{0}$) ในสถานะอยู่ตัว ถ้าระบบควบคุมวงปิดมีตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกนชุดที่ 2 การลู่เข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่งของขนาดของเวกเตอร์การรั้งความถี่ จะใช้ช่วงระยะเวลาสั้นลง (4 s โดยประมาณ) ในการจำลองสถานการณ์สมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิดมอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลมีค่าพารามิเตอร์ที่เหมือนกับค่าพารามิเตอร์ในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.3 $\psi_{rd}^* = 0.7 \text{ Wb}$ และ $T_L = 12 \text{ N}\cdot\text{m}$ ตัวควบคุมพีไอสี่ตัวมีค่าเกนชุดที่ 1 ที่แสดงในตารางที่ 4.1 และตัวควบคุมพีไอสี่ตัวมีค่าเกนชุดที่ 2 ที่แสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 6.1 ขนาดของเวกเตอร์การรั้งความที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1



รูปที่ 6.2 ขนาดของเวกเตอร์การรั้งความที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 2

เมื่อพิจารณาสมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิด และกำหนดให้พจน์ $\mathbf{D} = \Phi + \mathbf{B}\mathbf{u}$ โดยที่ $\mathbf{D} \in \mathbf{R}^8$ จะได้รับสมการปริภูมิสถานะในสมการที่ (6-5)

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{D} \quad (6-5)$$

โดยที่ $\mathbf{A}\mathbf{x}$ คือพจน์เชิงเส้นของสมการปริภูมิสถานะ ระบบควบคุมความเร็ววงปิดในสมการที่ (6-5) มีฟังก์ชันเลียปูนอฟในรูปกำลังสองในสมการที่ (6-1) และฟังก์ชันเลียปูนอฟมีอนุพันธ์ไปตามแนววิถีสถานะดังนี้

$$\dot{V} = \frac{dV(\mathbf{x})}{dt} = \frac{\partial V(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{P} \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{P} \dot{\mathbf{x}}$$

$$\dot{V} = (\mathbf{x}^T \mathbf{A}^T + \mathbf{D}^T) \mathbf{P} \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{P} (\mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{D})$$

$$\dot{V} = \mathbf{x}^T \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{D}^T \mathbf{P} \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{D}$$

$$\dot{V} = \mathbf{x}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}) \mathbf{x} + 2 \mathbf{D}^T \mathbf{P} \mathbf{x} \quad (6-6)$$

โดยที่ $\mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{D} = (\mathbf{P} \mathbf{x})^T \mathbf{D} = \mathbf{D}^T \mathbf{P} \mathbf{x}$ กำหนดให้ $\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{I}$ และ $\mathbf{x}^T \mathbf{x} = \|\mathbf{x}\|^2$ จะได้รับสมการที่ (6-7) ดังนี้

$$\dot{V} = -\|\mathbf{x}\|^2 + 2 \mathbf{D}^T \mathbf{P} \mathbf{x} \quad (6-7)$$

พจน์ $-\|\mathbf{x}\|^2$ มีค่าลบ แต่พจน์ $2 \mathbf{D}^T \mathbf{P} \mathbf{x}$ อาจจะมีค่าบวกหรือค่าลบ ในการจำลองสถานการณ์ เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนชุดที่ 1 และมีค่าเกนชุดที่ 2 \mathbf{D}^T จะมีขนาด ($\|\mathbf{D}^T\|$) ที่เปลี่ยนแปลงในสถานะชั่วคราวและมีขนาดลู่อเข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่งในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 6.3 และรูปที่ 6.4 \mathbf{D}^T จะมีขนาดเท่ากัน ในสถานะอยู่ตัว ถ้าตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนชุดที่ 2 การลู่อเข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่งของ $\|\mathbf{D}^T\|$ จะใช้ช่วงระยะเวลาสั้นลง (4 s โดยประมาณ) การพิจารณาพจน์ $2 \mathbf{D}^T \mathbf{P} \mathbf{x}$ ที่มีค่าบวกจะได้รับสมการดังนี้

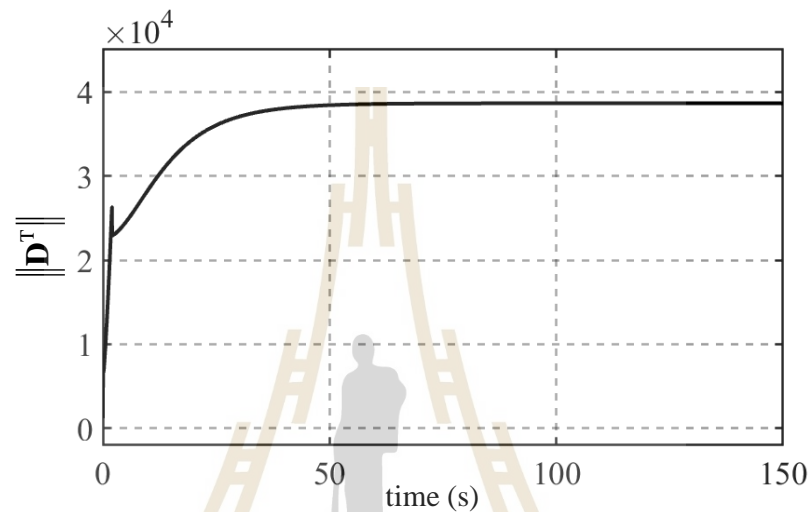
$$2 \mathbf{D}^T \mathbf{P} \mathbf{x} = \eta \|\mathbf{x}\| \quad (6-8)$$

โดยที่ $\eta = \frac{2 \mathbf{D}^T \mathbf{P} \mathbf{x}}{\|\mathbf{x}\|}$ และฟังก์ชันเลียปูโนฟมีอนุพันธ์ไปตามแนววิถีสถานะดังนี้

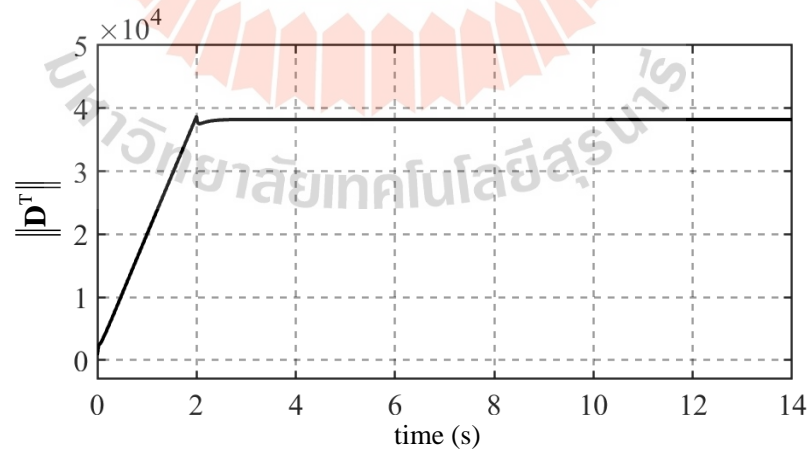
$$\dot{V} = -\|\mathbf{x}\|^2 + \eta \|\mathbf{x}\| = -\|\mathbf{x}\| (\|\mathbf{x}\| - \eta) \quad (6-9)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (6-1) และ (6-9) และสมมุติว่า η มีค่าลดลงหรือมีค่าคงที่หรือมีค่าเกือบคงที่ในสถานะชั่วคราว ถ้า $\|\mathbf{x}\| < \eta$ จะได้ว่า $\dot{V} > 0$ V มีค่าเพิ่มขึ้น และ $\|\mathbf{x}\|$ มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้า

$\|\mathbf{x}\| > \eta$ จะได้ว่า $\dot{V} < 0$ V มีค่าลดลง และ $\|\mathbf{x}\|$ มีค่าลดลง และถ้า $\|\mathbf{x}\| = \eta$ จะได้ว่า $\dot{V} = 0$ V มีค่าคงที่ และ $\|\mathbf{x}\|$ มีค่าคงที่ ถ้า η มีค่าคงที่ในสถานะอยู่ตัว จะได้ว่า $\|\mathbf{x}\| \leq \eta$ และ η ก็คือขอบเขต (boundedness) ของ $\|\mathbf{x}\|$ หรือแนววิถีสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิดในสมการที่ (6-4) นั่นคือเมื่อเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ \mathbf{A} คือเมตริกซ์เฮอริวิตซ์ ระบบควบคุมวงปิดจะมีแนววิถีสถานะที่มีขอบเขตที่สม่ำเสมอ แต่ไม่มีจุดสมดุล การจำลองสถานการณ์จะให้ค่า η



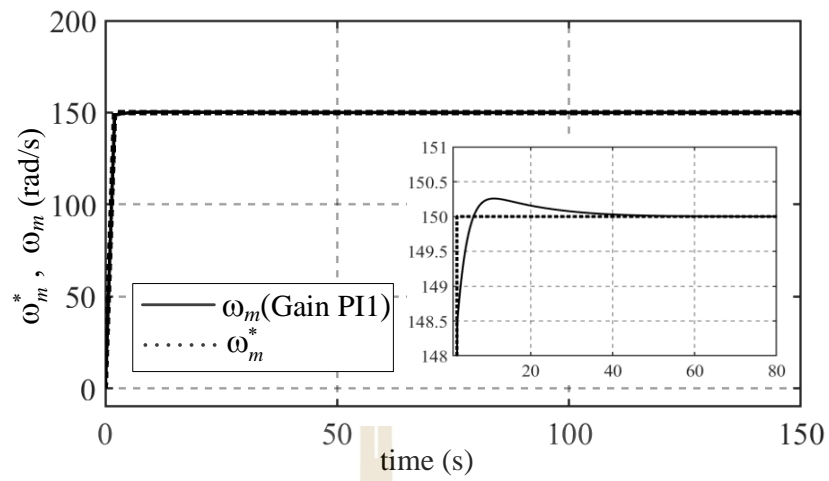
รูปที่ 6.3 ขนาดของ D^T ที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 1



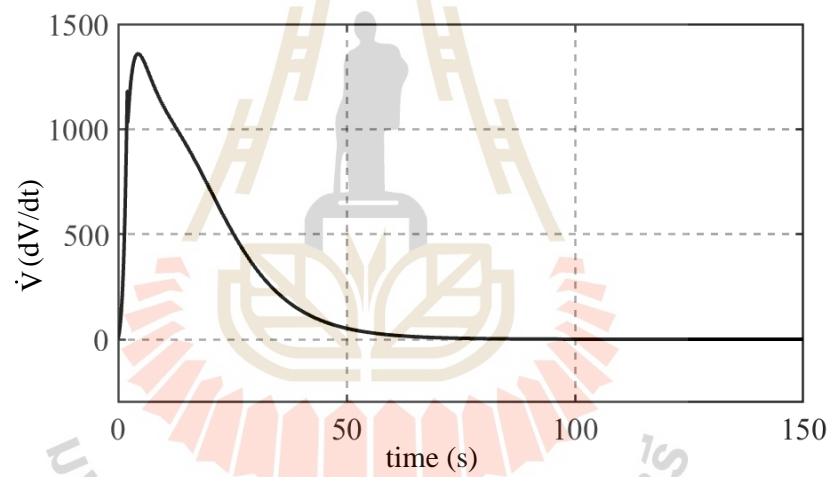
รูปที่ 6.4 ขนาดของ D^T ที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 2

6.3 การมีขอบเขตที่สม่ำเสมอของแนววิถีสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกนชุดที่ 1

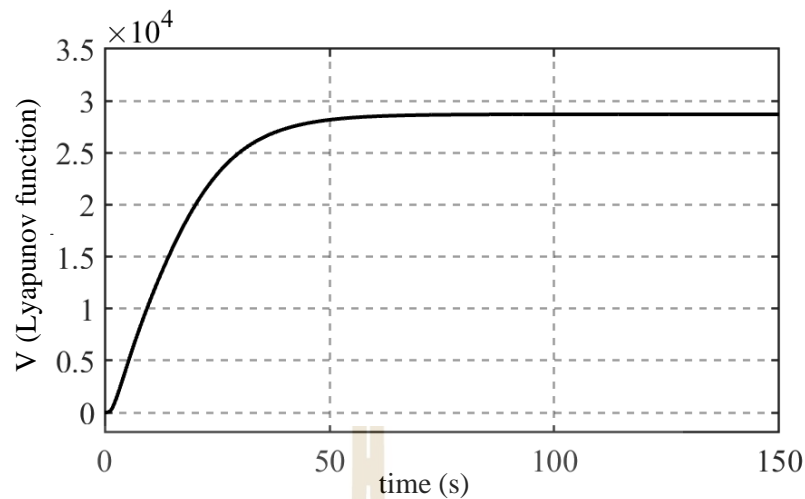
เมื่อระบบควบคุมความเร็ววงปิดมีตัวควบคุมพีไอสี่ตัวที่มีค่าเกนชุดที่ 1 (Gain PI 1) เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ A คือเมตริกซ์เซอร์วิคซ์ ความเร็วเพลลาอ้างอิงที่แสดงในรูปที่ 6.5 (เส้นประสีดำ) จะบังคับให้มอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลหมุนจากสภาพหยุดนิ่งด้วยความเร็วเพลลาที่เพิ่มขึ้นจนถึง 150 rad/s ภายในช่วงระยะเวลา 2 วินาที และหมุนด้วยความเร็วเพลลา 150 rad/s คงที่ ระบบควบคุมวงปิดให้ผลตอบสนองความเร็วเพลลา (เส้นทึบสีดำ) ที่มีสถานะชั่วคราวในช่วงระยะเวลายาวนาน และผลตอบสนองความเร็วเพลลาเท่ากับความเร็วเพลลาอ้างอิง (เส้นประสีดำ) ในสถานะอยู่ตัว เมื่อมอเตอร์และโหลดเริ่มหมุนจากสภาพหยุดนิ่งและหมุนด้วยความเร็วเพลลาที่เพิ่มขึ้นในสถานะชั่วคราว อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟ (\dot{V}) ที่แสดงในรูปที่ 6.6 มีค่าบวกที่เพิ่มขึ้นจากศูนย์อย่างรวดเร็วถึงค่าหนึ่ง และฟังก์ชันเลียปูนอฟ (V) ที่แสดงในรูปที่ 6.7 มีค่าที่เพิ่มขึ้นจากศูนย์เช่นเดียวกัน เพราะขอบเขต η (เส้นประสีดำ) และเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะมีขนาด ($\|x\|$) (เส้นทึบสีดำ) ที่เพิ่มขึ้นที่แสดงในรูปที่ 6.8 แต่ขอบเขต η มีค่าที่เพิ่มขึ้นที่รวดเร็วกว่าและมีค่ามากกว่าขนาดของเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะ ($\|x\| < \eta$) เมื่อมอเตอร์และโหลดหมุนด้วยความเร็วเพลลาที่เริ่มคงที่ อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟมีค่าลดลงถึงศูนย์อย่างต่อเนื่อง ฟังก์ชันเลียปูนอฟจึงมีค่าเพิ่มขึ้นช้าลง และลู่อู่เข้าหาค่าคงที่บวกค่าหนึ่ง เพราะขอบเขต η มีค่าที่เพิ่มขึ้นช้าลง และเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะมีขนาดลู่อู่เข้าหาขอบเขต η ($\|x\| = \eta$) เมื่อมอเตอร์และโหลดหมุนด้วยความเร็วเพลลาคงที่แน่นอนค่าหนึ่งในสถานะอยู่ตัว อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟมีค่าศูนย์ ($\dot{V} = 0$) และฟังก์ชันเลียปูนอฟมีค่าคงที่ เพราะขอบเขต η มีค่าคงที่และเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะมีขนาดไม่มากกว่าขอบเขต η ($\|x\| \leq \eta$) นั่นคือระบบควบคุมความเร็ววงปิดมีแนววิถีสถานะที่มีขอบเขตที่สม่ำเสมอ และ $\eta = 115$ คือขอบเขตในสถานะอยู่ตัว ดังนั้นระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกนชุดที่ 1 มีขอบเขตที่สม่ำเสมอ



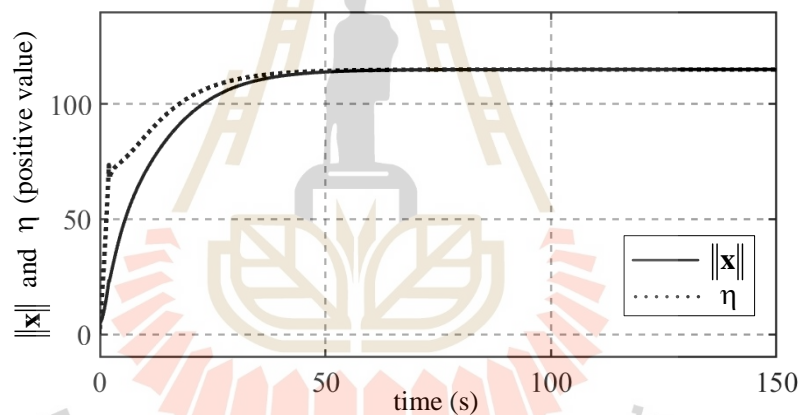
รูปที่ 6.5 ความเร็วเพลาอ้างอิงและผลตอบสนองความเร็วเพลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1



รูปที่ 6.6 อนุพันธ์ของฟังก์ชันเคปโนฟที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1



รูปที่ 6.7 ฟังก์ชันเลียปูนอฟที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1

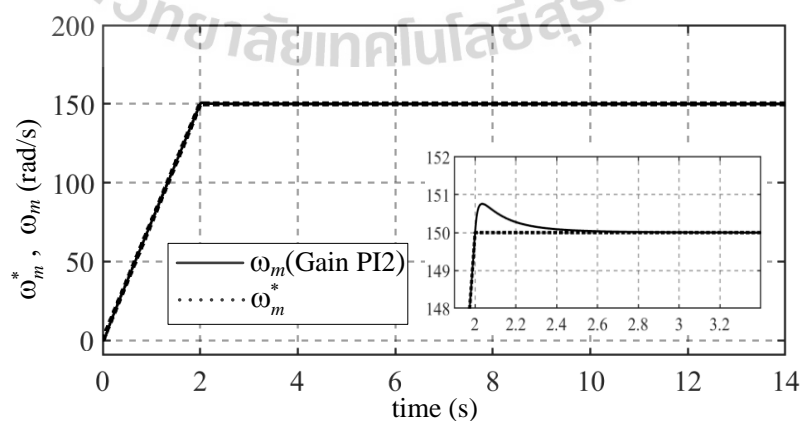


รูปที่ 6.8 ขนาดของเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะและขอบเขต η ที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1

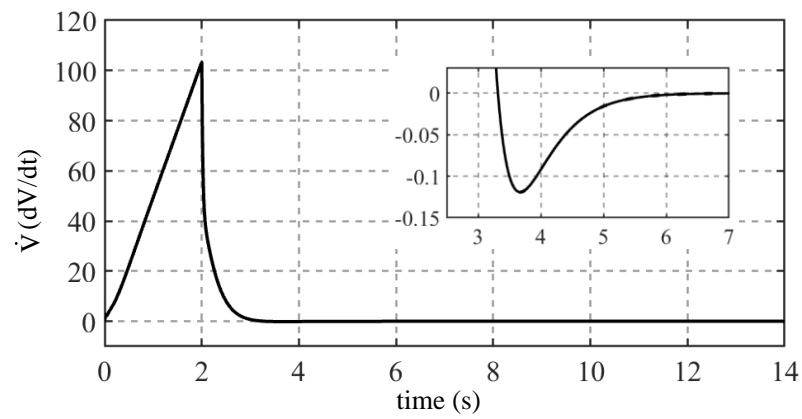
6.4 การมีขอบเขตที่สม่ำเสมอของแนววิถีสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกนชุดที่ 2

เมื่อระบบควบคุมความเร็ววงปิดมีตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกนชุดที่ 2 (Gain PI 2) เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ \mathbf{A} คือเมตริกซ์เฮอริวิตซ์ ความเร็วเพลลาอ้างอิงที่แสดงในรูปที่ 6.9 (เส้นประสีดำ) จะบังคับให้มอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลหมุนจากสภาพหยุดนิ่งด้วยความเร็วเพลลาที่เพิ่มขึ้นจนถึง 150 rad/s ภายในช่วงระยะเวลา 2 วินาที และหมุนด้วยความเร็วเพลลา 150 rad/s คงที่ ระบบควบคุมวงปิดให้ผลตอบสนองความเร็วเพลลา (เส้นทึบสีดำ) ที่ติดตามความเร็วเพลลาอ้างอิง (เส้นประสีดำ) ได้อย่างรวดเร็ว มีสถานะชั่วคราวในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก และไม่มีภาวะผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว เมื่อ

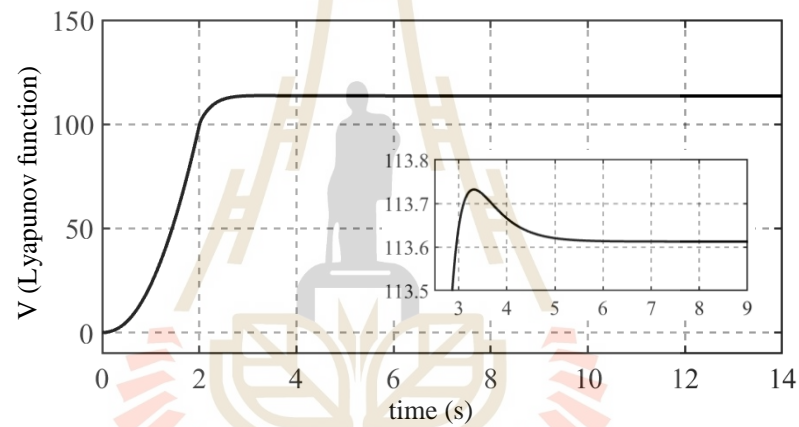
มอเตอร์และโหลดเริ่มหมุนจากสภาพหยุดนิ่งและหมุนด้วยความเร็วเพลาทีเพิ่มขึ้นในสถานะชั่วคราว อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟ (\dot{V}) ที่แสดงในรูปที่ 6.10 มีค่าบวกที่เพิ่มขึ้นจากศูนย์ถึงค่าหนึ่ง ในช่วงระยะเวลา 2 วินาที และฟังก์ชันเลียปูนอฟ (V) ที่แสดงในรูปที่ 6.11 มีค่าที่เพิ่มขึ้นจากศูนย์อย่างรวดเร็ว เพราะขอบเขต η (เส้นประสีดำ) และเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะมีขนาด ($\|x\|$) (เส้นทึบสีดำ) ที่เพิ่มขึ้นที่แสดงในรูปที่ 6.12 แต่ขอบเขต η มีค่าที่เพิ่มขึ้นที่รวดเร็วกว่าและมีค่ามากกว่าขนาดของเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะ ($\|x\| < \eta$) เมื่อมอเตอร์และโหลดหมุนด้วยความเร็วเพลาทีเริ่มคงที่ อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟมีค่าลดลงถึงศูนย์อย่างรวดเร็ว ฟังก์ชันเลียปูนอฟจึงมีค่าเพิ่มขึ้นช้าลงและลู่เข้าหาค่าคงที่บวกค่าหนึ่งภายในช่วงระยะเวลาสั้น เพราะเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะเริ่มมีขนาดคงที่ แต่ขอบเขต η มีค่าที่ลดลงอย่างรวดเร็ว ขอบเขต η จะมีค่าที่ลดลงต่ำกว่าขนาดของเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะเพียงเล็กน้อย ($\|x\| > \eta$) ภายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟจึงมีค่าลบ ($\dot{V} < 0$) ฟังก์ชันเลียปูนอฟมีค่าลดลงเล็กน้อยภายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง และเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะมีขนาดลดลงเล็กน้อยเช่นเดียวกัน และมีขนาดลู่เข้าหาขอบเขต η ($\|x\| = \eta$) เมื่อมอเตอร์และโหลดหมุนด้วยความเร็วเพลาคงที่แน่นอนค่าหนึ่ง สถานะอยู่ตัว อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟมีค่าที่ลู่เข้าหาศูนย์ ($\dot{V} = 0$) และฟังก์ชันเลียปูนอฟมีค่าที่ลู่เข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่ง เพราะขอบเขต η มีค่าคงที่และเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะมีขนาดไม่มากกว่าขอบเขต η ($\|x\| \leq \eta$) นั่นคือระบบควบคุมความเร็ววงปิดมีแนววิถีสถานะที่มีขอบเขตที่สม่ำเสมอ และ $\eta = 6.309$ คือขอบเขตในสถานะอยู่ตัว ดังนั้นระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอที่มีค่าแกนชุดที่ 2 มีขอบเขตที่สม่ำเสมอ เมื่อสมการปริภูมิสถานะมีพจน์เชิงเส้น Ax ที่ชดเชยพจน์ D ได้น้อย ขอบเขต η จะมีค่ามากในสถานะอยู่ตัว แต่เมื่อสมการปริภูมิสถานะมีพจน์เชิงเส้น Ax ที่ชดเชยพจน์ D ได้มากขึ้น ขอบเขต η จะมีค่าน้อยลงในสถานะอยู่ตัว



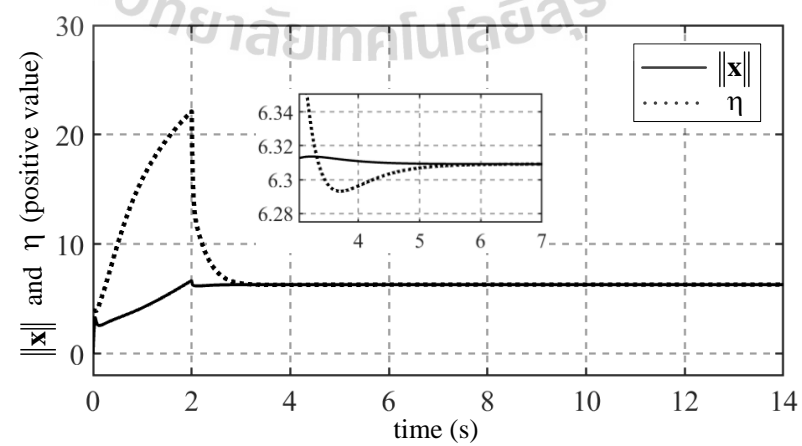
รูปที่ 6.9 ความเร็วเพลอ้างอิงและผลตอบสนองความเร็วเพลาทีเกิดจากค่าแกนชุดที่ 2



รูปที่ 6.10 อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 2



รูปที่ 6.11 ฟังก์ชันเลียปูนอฟที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 2



รูปที่ 6.12 ขนาดของเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะและขอบเขต η ที่เกิดจากค่าเกณฑ์ที่ 2

6.5 สรุป

ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรงที่มีตัวควบคุมพีไอไอสี่ตัว จะไม่มีจุดสมดุลและมีจุดการทำงานที่ไม่เป็นจุดศูนย์กลางในสถานะอยู่ตัว การวิเคราะห์เสถียรภาพของจุดสมดุลจึงไม่สามารถดำเนินการได้ แต่ถ้าเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ A คือเมตริกซ์เฮอร์วิตซ์ ระบบควบคุมความเร็ววงปิดจะมีแนววิถีสถานะที่มีขอบเขตที่สม่ำเสมอ เพราะขอบเขต η มีค่าคงที่ในสถานะอยู่ตัว และแนววิถีสถานะมีขนาดที่ไม่เกินขอบเขต η ค่าเกินของตัวควบคุมพีไอสี่ตัวมีผลกระทบถึงขอบเขต η ในสถานะอยู่ตัว เมื่อตัวควบคุมพีไอสี่ตัวมีค่าเกินชุดที่ 1 เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ A จะมีค่าไอเกินบางค่าที่มีตำแหน่งอยู่ใกล้กับแกนจินตภาพในระนาบเชิงซ้อน ขอบเขต η จะมีค่ามากในสถานะอยู่ตัว และแนววิถีสถานะมีค่าที่อยู่ห่างไกลจากจุดศูนย์กลางในสถานะอยู่ตัวเช่นเดียวกัน แนววิถีสถานะจึงมีขอบเขตที่กว้าง และระบบควบคุมวงปิดให้ผลตอบแทนความเร็วเพลทที่มีสถานะชั่วครู่ในช่วงระยะเวลาที่ยาวนาน แต่เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกินชุดที่ 2 ค่าไอเกินของเมตริกซ์ A ที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพมากที่สุด จะมีตำแหน่งที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพมากขึ้น ขอบเขต η จะมีค่าลดลงในสถานะอยู่ตัว และแนววิถีสถานะมีค่าที่อยู่ใกล้กับจุดศูนย์กลางในสถานะอยู่ตัว แนววิถีสถานะจึงมีขอบเขตที่แคบลง และระบบควบคุมวงปิดให้ผลตอบแทนความเร็วเพลทที่มีสถานะชั่วครู่ในช่วงระยะเวลาที่สั้นลง หรือมีสมรรถนะที่ดีกว่า

บทที่ 7

สมรรถนะของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าที่ระบุ

7.1 บทนำ

ในทางปฏิบัติ เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำขับเคลื่อนโหลดเชิงกล ความร้อนจะเกิดขึ้นภายในมอเตอร์ และแท่งตัวนำโรเตอร์และชุดขดลวดสเตเตอร์จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นจากค่าปกติหรือค่าที่ระบุ หรือในบางกรณี มอเตอร์เหนี่ยวนำอาจจะต้องขับเคลื่อนโหลดเชิงกลที่มีโมเมนต์ความเฉื่อยเปลี่ยนแปลงจากค่าที่ระบุ (Sul SK, 2011) การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานและโมเมนต์ความเฉื่อยจะมีผลกระทบต่อสมรรถนะของผลตอบสนองความเร็วเพลลา เพราะระบบควบคุมความเร็ววงปิดแบบเวกเตอร์มีค่าไอเกนที่เปลี่ยนแปลงจากค่าที่ระบุหรือค่าที่ได้เลือกในขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุม ค่าความต้านทานและโมเมนต์ความเฉื่อย (J) อาจเปลี่ยนแปลงจากค่าที่ระบุได้ถึง 2 เท่าหรือมากกว่า นั่นคือผลตอบสนองความเร็วเพลลา (ω_m) ที่ติดตามความเร็วเพลลาอ้างอิง (ω_m^*) อาจจะมีการผิดพลาด ($\Delta\omega_m$) เพิ่มขึ้น และถ้าค่าความต้านทานและโมเมนต์ความเฉื่อยมีการเปลี่ยนแปลงมากเกินไปหรือผิดพลาด ระบบควบคุมความเร็ววงปิดจะไม่สามารถควบคุมการหมุนของมอเตอร์ได้

7.2 ค่าไอเกนของระบบควบคุมความเร็ววงปิดและการเปลี่ยนแปลงของค่า

พารามิเตอร์ของมอเตอร์และโหลด

การลองผิดลองถูกหรือการสุ่มเลือกจะกำหนดให้ตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวมีค่าเกนพีเท่ากันและมีค่าเกนไอเท่ากัน ค่าเกนพีมีค่าเท่ากับ 8 และค่าเกนไอมีค่าเท่ากับ 2 ค่าเกนพีและค่าเกนไอดังกล่าวคือค่าเกนชุดที่ 1 ที่แสดงในตารางที่ 7.1 และเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลมีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าที่ระบุที่แสดงในตารางที่ 3.1 เมตริกซ์สัมประสิทธิ์จะมีค่าไอเกนชุดที่ 1 ที่แสดงในตารางที่ 7.2 ค่าไอเกนทุกค่าคือจำนวนจริงลบและจำนวนเชิงซ้อนที่มีส่วนจริงลบ หรือค่าไอเกนทุกค่ามีตำแหน่งอยู่ทางด้านซ้ายมือของแกนจินตภาพในระนาบเชิงซ้อน ค่าไอเกน 4 ค่าแรกมีตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพ ค่าไอเกน 4 ค่านี้จึงเป็นค่าที่ไม่ต้องการ แต่ค่าไอเกนที่เหลืออีก 4 ค่ามีตำแหน่งที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ

การคำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมโดยตรงจะเกิดจากการกำหนดให้ค่าไอเกณฑ์ทุกค่าเป็นจำนวนจริงลบที่แตกต่างกันหรือมีตำแหน่งที่อยู่ทางด้านซ้ายมือของแกนจินตภาพ และอยู่ห่างจากแกนจินตภาพเรียงตามลำดับที่แสดงในตารางที่ 7.2 ค่าไอเกณฑ์ทุกค่านี้คือค่าไอเกณฑ์ที่ต้องการและเป็นค่าไอเกณฑ์ที่ 2 เมื่อมอเตอร์และโหลดมีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าที่ระบุ การหาค่าตอบเชิงเลขของระบบสมการพหุนาม 8 สมการและ 8 ตัวแปรจะให้ค่าเกณฑ์และค่าเกณฑ์ไอของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวคำตอบที่ได้รับคือค่าเกณฑ์ที่ 2 ที่แสดงในตารางที่ 7.1 ค่าเกณฑ์ทุกค่ามีค่าบวก

เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำขับเคลื่อนโหลดเชิงกล มอเตอร์และโหลดจะมีค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงจากค่าที่ระบุภายในขอบเขตหนึ่ง และผู้ใช้งานจะไม่ทราบขอบเขตดังกล่าวได้อย่างชัดเจน (Tang J, Yang Y, Diao L, Chen J, Chang Y, Liu Z, 2018) มอเตอร์เหนี่ยวนำที่พิจารณา มีค่าพารามิเตอร์บางค่าที่แตกต่างจากค่าที่ระบุที่แสดงในตารางที่ 3.1 ค่าความต้านทานสเตเตอร์ (R_s) มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ หรือค่าความต้านทานโรเตอร์ (R_r) มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ หรือมอเตอร์และโหลดเชิงกลมีโมเมนต์ความเฉื่อย (J) ที่มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ และค่าความต้านทานโรเตอร์ ค่าความต้านทานสเตเตอร์ และโมเมนต์ความเฉื่อยมีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกัน การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างจากค่าที่ระบุจึงมี 4 กรณี ในแต่ละกรณี เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกณฑ์ที่ 1 และค่าเกณฑ์ที่ 2 เมตริกซ์สัมประสิทธิ์จะมีค่าไอเกณฑ์ที่แตกต่างกัน และระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรงจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพล่าที่มีสมรรถนะแตกต่างกัน ดังนั้นในแต่ละกรณี การเปรียบเทียบสมรรถนะของผลตอบสนองความเร็วเพล่าจะแสดงถึงค่าเกณฑ์ที่ 1 หรือค่าเกณฑ์ที่ 2 ของตัวควบคุมที่ให้ผลตอบสนองความเร็วเพล่าที่มีสมรรถนะดีกว่า แผนการควบคุมแบบเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ ได้ใช้งานแผนการควบคุมเวกเตอร์โดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีอินเวอร์เตอร์ที่แสดงในรูปที่ 5.1 ในบทที่ 5

ตารางที่ 7.1 ค่าเกณฑ์ของของตัวควบคุมพีไอในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าที่ระบุ

สัญลักษณ์ของค่าเกณฑ์	ค่าเกณฑ์ที่ 1	ค่าเกณฑ์ที่ 2
K_{Pd}	8	5.0029
K_{Pq}	8	6.6044
$K_{P\psi}$	8	66.1675
$K_{P\omega}$	8	4.9777
K_{Id}	2	9.921
K_{Iq}	2	36.5902
$K_{I\psi}$	2	302.1625
$K_{I\omega}$	2	40.7996

ค่าเกณฑ์ที่ 1 และค่าเกณฑ์ที่ 2 ที่แสดงในตารางที่ 7.1 คือค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอที่แสดงในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 7.2 ค่าไอเกณฑ์ของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าที่ระบุ

สัญลักษณ์ของค่าไอเกณฑ์	ค่าไอเกณฑ์ที่ 1	ค่าไอเกณฑ์ที่ 2
λ_1	-0.0914	-2
λ_2	-0.2372	-4
λ_3	$-0.245 + j0.0356$	-6
λ_4	$-0.245 - j0.0356$	-8
λ_5	-15.9344	-50
λ_6	-184.6201	-100
λ_7	-1363.6809	-1000
λ_8	-1543.971	-1200

ค่าไอเกณฑ์ที่ 1 และค่าไอเกณฑ์ที่ 2 ที่แสดงในตารางที่ 7.2 คือค่าไอเกณฑ์ที่แสดงในตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 ตามลำดับ

เมื่อค่าความต้านทานโรเตอร์มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ และตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวมีค่าเกณฑ์ที่รับจากการสุ่มเลือกและการคำนวณโดยตรง (ค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2) เมตริกซ์สัมประสิทธิ์จะมีค่าไอเกนชุดที่ 3 และชุดที่ 4 ที่แสดงในตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 ค่าไอเกนในกรณีที่ค่าความต้านทานโรเตอร์มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ

สัญลักษณ์ของค่าไอเกน	ค่าไอเกนชุดที่ 3	ค่าไอเกนชุดที่ 4
λ_1	-0.091	-2.0062
λ_2	-0.2372	-3.7286
λ_3	$-0.2454 + j0.0347$	-5.384
λ_4	$-0.2454 - j0.0347$	-10.9154
λ_5	-90.2198	-40.4261
λ_6	-95.8871	-259.4565
λ_7	-2619.6301	-2061.0127
λ_8	-2739.89	-2424.4916

เมื่อค่าความต้านทานสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ และตัวควบคุมพีไอไม่มีค่าเกณฑ์ที่รับจากการสุ่มเลือกและการคำนวณโดยตรง เมตริกซ์สัมประสิทธิ์จะมีค่าไอเกนชุดที่ 5 และชุดที่ 6 ที่แสดงในตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.4 ค่าไอเกนในกรณีที่ค่าความต้านทานสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ

สัญลักษณ์ของค่าไอเกน	ค่าไอเกนชุดที่ 5	ค่าไอเกนชุดที่ 6
λ_1	$-0.1259 + j0.0278$	-2.5729
λ_2	$-0.1259 - j0.0278$	-2.849
λ_3	$-0.2452 + j0.0351$	-5.5805
λ_4	$-0.2452 - j0.0351$	-9.4974
λ_5	-14.5608	-32.5466
λ_6	-120.5106	-57.1876
λ_7	-2086.4476	-1676.6893
λ_8	-2204.0791	-1900.3923

เมื่อโมเมนต์ความเฉื่อยมีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ และตัวควบคุมมีค่าเกณฑ์ที่เกิดจากการสุ่มเลือกและการคำนวณโดยตรง เมทริกซ์สัมประสิทธิ์จะมีค่าไอเกนชุดที่ 7 และชุดที่ 8 ที่แสดงในตารางที่ 7.5

ตารางที่ 7.5 ค่าไอเกนในกรณีที่โมเมนต์ความเฉื่อยมีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ

สัญลักษณ์ของค่าไอเกน	ค่าไอเกนชุดที่ 7	ค่าไอเกนชุดที่ 8
λ_1	-0.0914	-2
λ_2	-0.2372	-4
λ_3	$-0.2471 + j0.0347$	$-4.7408 + j7.8004$
λ_4	$-0.2471 - j0.0347$	$-4.7408 - j7.8004$
λ_5	-15.9344	-5.321
λ_6	-16.1801	-50
λ_7	-1532.1168	-1000
λ_8	-1543.971	-1299.1976

เมื่อค่าความต้านทานโรเตอร์ (R_r) ค่าความต้านทานสเตเตอร์ (R_s) และโมเมนต์ความเฉื่อย (J) มีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกัน และตัวควบคุมมีค่าเกณฑ์ที่เกิดจากการสุ่มเลือกและการคำนวณโดยตรง เมทริกซ์สัมประสิทธิ์จะมีค่าไอเกนชุดที่ 9 และชุดที่ 10 ที่แสดงในตารางที่ 7.6

ตารางที่ 7.6 ค่าไอเกนในกรณีที่ R_r , R_s และ J มีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกัน

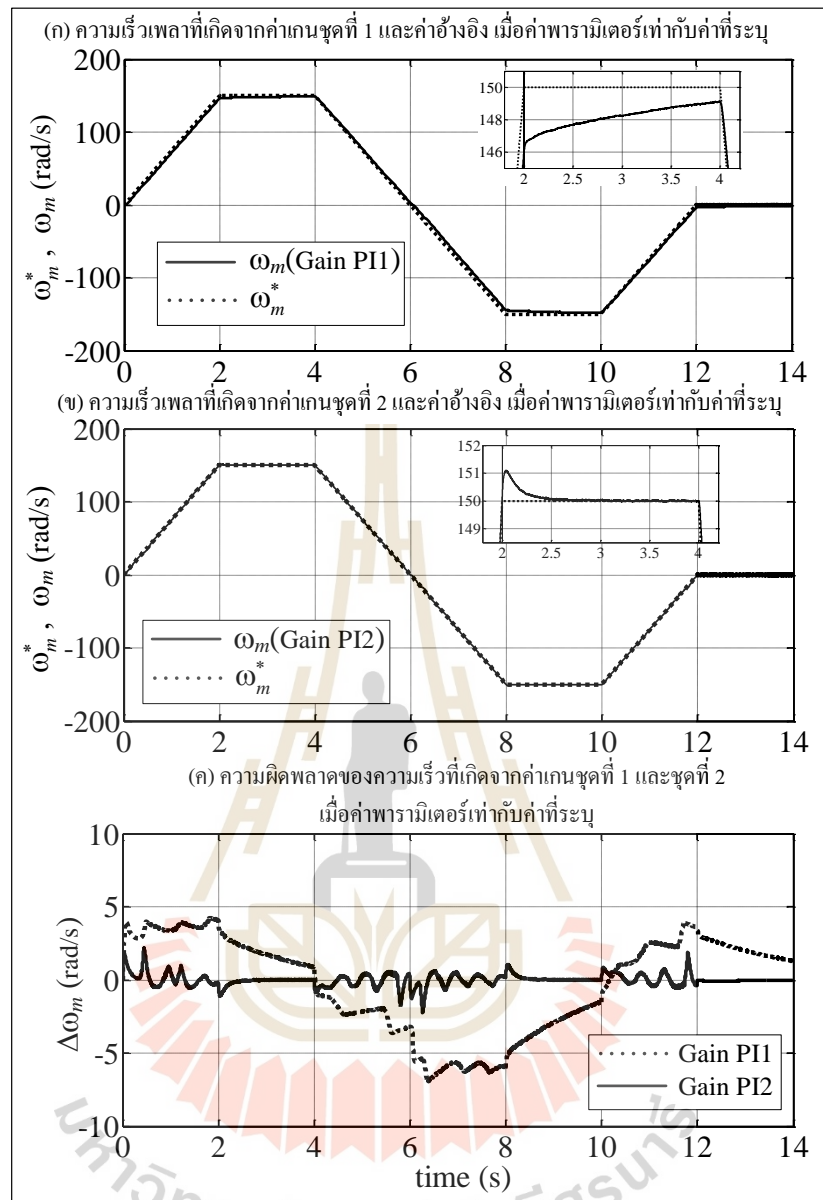
สัญลักษณ์ของค่าไอเกน	ค่าไอเกนชุดที่ 9	ค่าไอเกนชุดที่ 10
λ_1	-0.0981	-2.1328
λ_2	-0.1999	-3.396
λ_3	$-0.2466 - j0.0333$	-5.0094
λ_4	$-0.2466 + j0.0333$	$-7.7338 + j9.5557$
λ_5	-29.2903	$-7.7338 - j9.5557$
λ_6	-50.5702	-142.4271
λ_7	-2127.6325	-1550.998
λ_8	-2152.3197	-1902.1479

7.3 ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่มอเตอร์และโหลดมีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าที่ระบุ

เมื่อตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวมีค่าเกนชุดที่ 1 (Gain PI1) ค่าไอเกนชุดที่ 1 ที่แสดงในตารางที่ 7.2 จะมีค่าไอเกน 4 ค่าแรกที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพ ระบบควบคุมความเร็ววงปิดจึงให้ผลตอบสนองความเร็วเพลลา (ω_m : กราฟเส้นทึบ) ที่ใช้เวลานานในการลู่เข้าหาความเร็วเพลลาอ้างอิงหรือค่าอ้างอิง (ω_m^* : กราฟเส้นประ) ที่แสดงในรูปที่ 7.1(ก) เมื่อตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวมีค่าเกนชุดที่ 2 (Gain PI2) ค่าไอเกนชุดที่ 2 ที่แสดงในตารางที่ 7.2 จะมีค่าไอเกนที่ใกล้กับแกนจินตภาพอยู่ห่างจากแกนจินตภาพมากขึ้น ผลตอบสนองความเร็วเพลลาจึงมีสถานะชั่วคราวในช่วงระยะเวลาที่สั้นมากที่แสดงในรูปที่ 7.1(ข) และติดตามความเร็วเพลลาอ้างอิงได้อย่างรวดเร็ว แต่เกิดการพุ่งเกินเล็กน้อยในสถานะชั่วคราว เพราะผลตอบสนองที่มีความรวดเร็วจะกระตุ้นพลวัตไม่เชิงเส้นของการรั้งควาน ตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกนชุดที่ 1 ให้ความผิดพลาดของความเร็วเพลลา ($\Delta\omega_m$: กราฟเส้นประ) มากกว่าความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่ได้รับจากตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกนชุดที่ 2 (กราฟเส้นทึบ) ที่แสดงในรูปที่ 7.1(ค)

ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2 และ ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ที่แสดงในรูปที่ 7.1 คือ ผลตอบสนองความเร็วเพลลาและความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 5.2, 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ





รูปที่ 7.1 ผลตอบสนองความเร็วเพล่าและความผิดพลาดของความเร็วเพล่าที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และค่าเกนชุดที่ 2

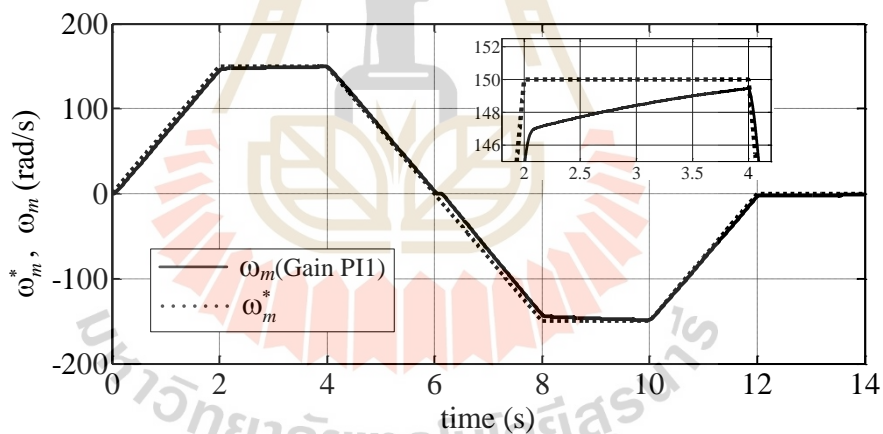
7.4 ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าที่ระบุ

7.4.1 ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ R , มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ

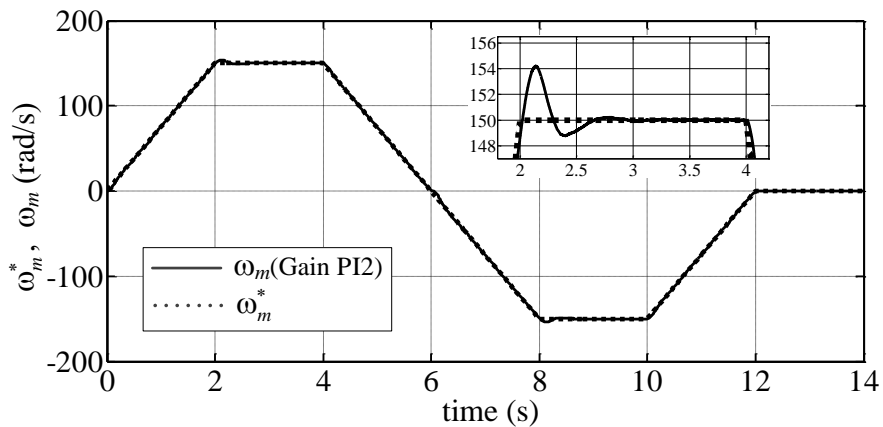
ในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความต้านทานโรเตอร์เท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ เมื่อตัวควบคุมพีไอไม่มีค่าเกนชุดที่ 1 ค่าไอเกนชุดที่ 3 ที่แสดงในตารางที่ 7.3 จะมีค่าไอเกน 4 ค่าแรกที่ใกล้เคียงกับค่าไอเกน 4 ค่าแรกของค่าไอเกนชุดที่ 1 ที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพที่แสดงใน

ตารางที่ 7.2 และค่าไอเกนชุดที่ 3 มีค่าไอเกนที่เหลืออีก 4 ค่าที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.2 จึงเหมือนกับผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.1(ก) เมื่อมอเตอร์และโหลดหมุนกลับทิศทาง ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.4 (กราฟเส้นประ) จะเพิ่มขึ้น

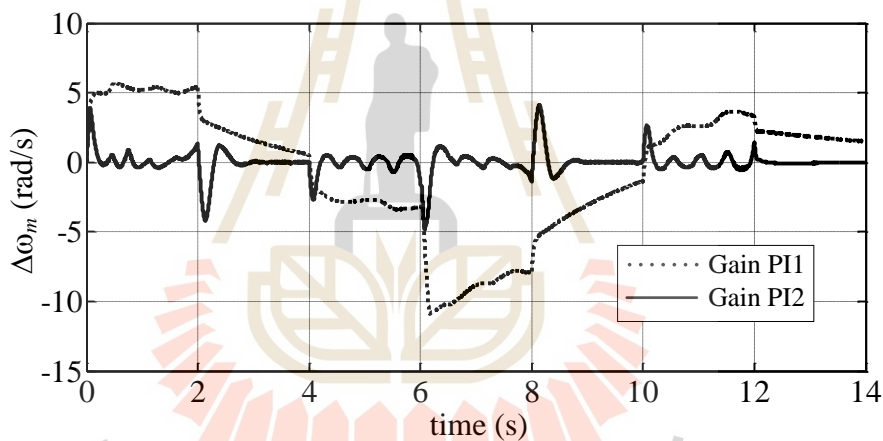
เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนชุดที่ 2 ค่าไอเกนชุดที่ 4 ที่แสดงในตารางที่ 7.3 จะมีค่าไอเกน 4 ค่าแรกที่ใหญ่ใกล้เคียงกับค่าไอเกน 4 ค่าแรกของค่าไอเกนชุดที่ 2 ที่แสดงในตารางที่ 7.2 และค่าไอเกนชุดที่ 4 มีค่าไอเกนที่เหลืออีก 4 ค่าที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.1(ข) ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.3 มีการพุ่งเกินเพิ่มขึ้นและมีการพุ่งต่ำในสถานะชั่วคราว เพราะพลวัตไม่เชิงเส้นของการรั้งความเร็วที่ได้รับภาระกระตุ้นเพิ่มขึ้น ผลตอบสนองจะใช้ช่วงระยะเวลาในการลู่เข้าหาความเร็วเพลลาอ้างอิง ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.4 (กราฟเส้นทึบ) จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ค่าเกนชุดที่ 1 ให้ความผิดพลาดของความเร็วเพลลามากกว่าความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่ได้รับจากค่าเกนชุดที่ 2



รูปที่ 7.2 ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และความเร็วเพลลาอ้างอิง ในกรณีที่ R_s มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ



รูปที่ 7.3 ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 2 และความเร็วเพลลาอ้างอิง ในกรณีที่มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ



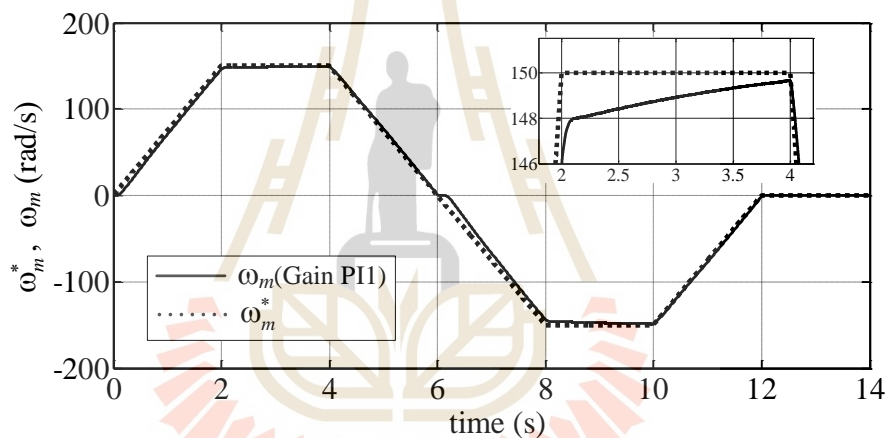
รูปที่ 7.4 ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ในกรณีที่มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ

7.4.2 ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ

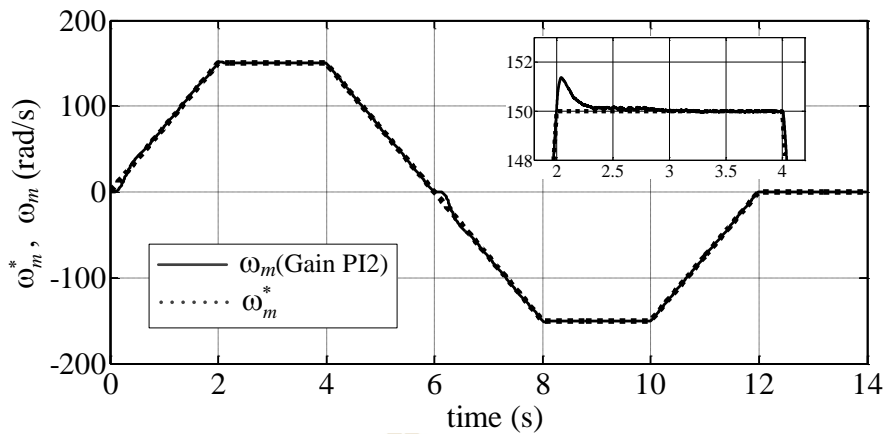
ในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความต้านทานสเตเตอร์เท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนชุดที่ 1 ค่าไอเกนชุดที่ 5 ที่แสดงในตารางที่ 7.4 จะมีค่าไอเกน 4 ค่าแรกที่เป็นคู่สังยุคของจำนวนเชิงซ้อน 2 คู่ที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพของระนาบเชิงซ้อน และค่าไอเกนชุดที่ 5 มีค่าไอเกนที่เหลืออีก 4 ค่าที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.5 จึงเหมือนกับผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.1(ก) เมื่อมอเตอร์และโหลดเริ่ม

เดินเครื่องและหมุนกลับทิศทาง ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.7 (กราฟเส้นประ) จะเพิ่มขึ้น

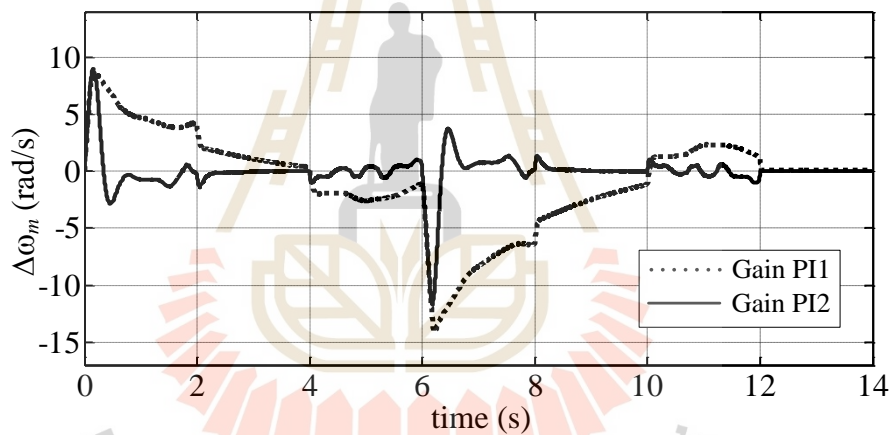
เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนชุดที่ 2 ค่าไอเกนชุดที่ 6 ที่แสดงในตารางที่ 7.4 จะมีค่าไอเกน 4 ค่าแรกที่ไม่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพ และมีค่าไอเกนที่เหลืออีก 4 ค่าที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.6 มีการพุ่งเกินที่ใกล้เคียงกับการพุ่งเกินของผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.1(ข) และมีสถานะชั่วครู่ในช่วงระยะเวลาที่นานกว่าเล็กน้อย แต่เมื่อมอเตอร์และโหลดเริ่มเดินเครื่องและหมุนกลับทิศทาง ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.7 (กราฟเส้นทึบ) จะมากกว่าความผิดพลาดที่แสดงในรูปที่ 7.1(ค) (กราฟเส้นทึบ) ค่าเกนชุดที่ 1 ให้ความผิดพลาดของความเร็วเพลลามากกว่าความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่ได้รับจากค่าเกนชุดที่ 2



รูปที่ 7.5 ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และความเร็วเพลลาอ้างอิง ในกรณีที่ R_s มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ



รูปที่ 7.6 ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 2 และความเร็วเพลลาอ้างอิง ในกรณีที่ R_s มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ



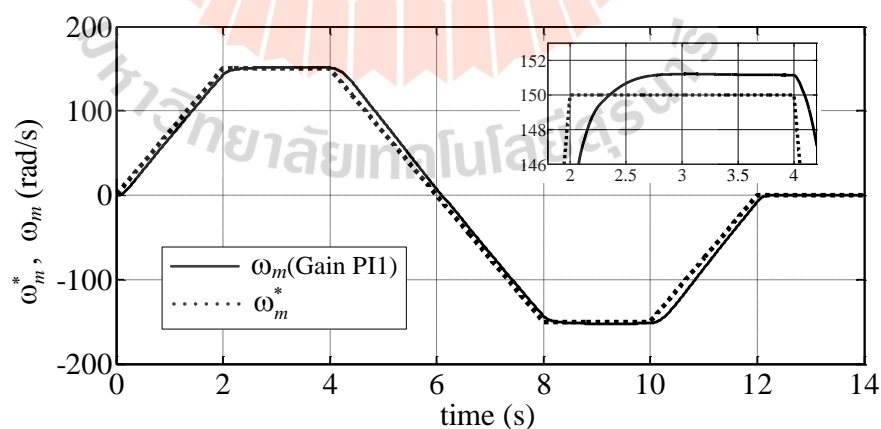
รูปที่ 7.7 ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกินชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ในกรณีที่ R_s มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ

ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรงที่ใช้งาน มีแผนการคำนวณฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่ใช้ค่าความต้านทานสเตเตอร์ และฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่ได้จากการคำนวณจะนำมาใช้ในการแปลงพิกัด การเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานสเตเตอร์จะมีผลกระทบถึงความถูกต้องของการคำนวณฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ ผลตอบสนองจึงมีความผิดพลาดที่เพิ่มขึ้น

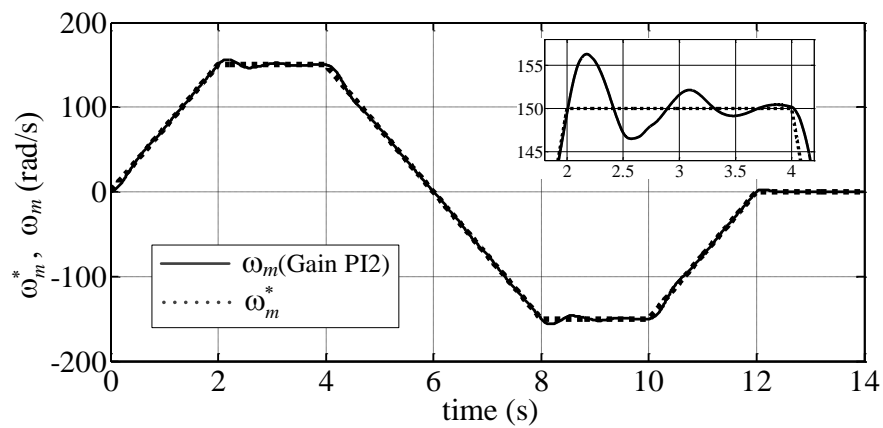
7.4.3 ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณี J มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ

ในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลมีโมเมนต์ความเฉื่อยเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนชุดที่ 1 ค่าไอเกนชุดที่ 7 ที่แสดงในตารางที่ 7.5 จะมีค่าไอเกน 4 ค่าแรกที่อยู่ใกล้เคียงกับค่าไอเกน 4 ค่าแรกของค่าไอเกนชุดที่ 1 ที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพที่แสดงในตารางที่ 7.2 และค่าไอเกนชุดที่ 7 มีค่าไอเกนที่เหลืออีก 4 ค่าที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ แต่ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.8 มีความแตกต่างจากผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.1(ก) เมื่อมอเตอร์และโหลดเริ่มเดินเครื่องและหมุนกลับทิศทาง ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาแสดงในรูปที่ 10 (กราฟเส้นประ) จะเพิ่มขึ้น

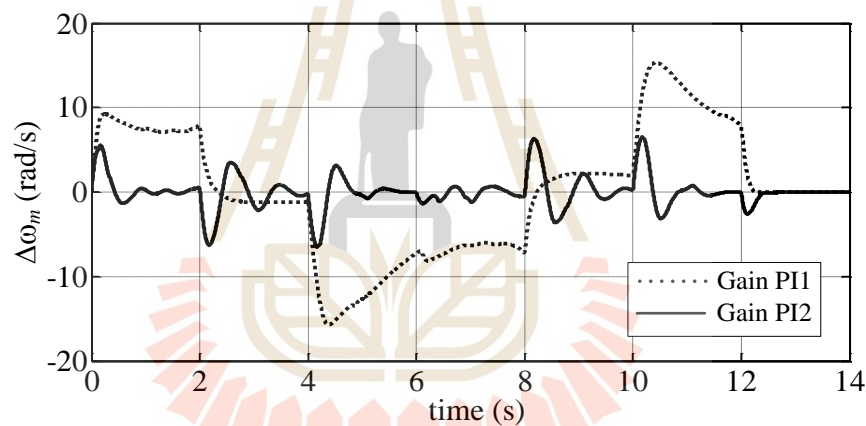
เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนชุดที่ 2 ค่าไอเกนชุดที่ 8 ที่แสดงในตารางที่ 7.5 จะมีค่าไอเกน 5 ค่าแรกที่ไม่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพ แต่ค่าไอเกน 2 ค่าที่เป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนมีขนาดของส่วนจินตภาพมากกว่าขนาดของส่วนจริง และค่าไอเกนชุดที่ 8 มีค่าไอเกนที่เหลืออีก 3 ค่าที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.1(ข) ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.9 มีการพุ่งเกินมากกว่า มีการพุ่งต่ำ มีการแกว่ง และมีสถานะชั่วคราวในช่วงระยะเวลาที่ยาวนาน เพราะค่าไอเกนชุดที่ 8 มีค่าไอเกน 2 ค่าที่เป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนเด่น ผลตอบสนองมีแนวโน้มเข้าสู่หาความเร็วเพลลาอ้างอิง ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.10 (กราฟเส้นทึบ) จะมากกว่าความผิดพลาดที่แสดงในรูปที่ 7.1(ค) (กราฟเส้นทึบ) ค่าเกนชุดที่ 1 ให้ความผิดพลาดของความเร็วเพลลามากกว่าความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่ได้รับจากค่าเกนชุดที่ 2



รูปที่ 7.8 ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และความเร็วเพลลาอ้างอิง ในกรณีที่ J มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ



รูปที่ 7.9 ผลตอบสนองความเร็วเพล่าที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 2 และความเร็วเพล่าอ้างอิง ในกรณีที่มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ



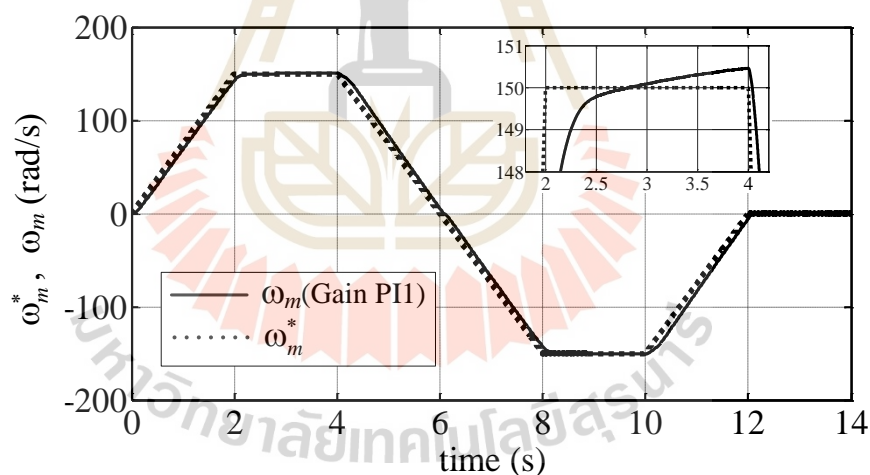
รูปที่ 7.10 ความผิดพลาดของความเร็วเพล่าที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ในกรณีที่มีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าที่ระบุ

7.4.4 ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่มีค่า R_r , R_s และ J มีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุ พร้อมกัน

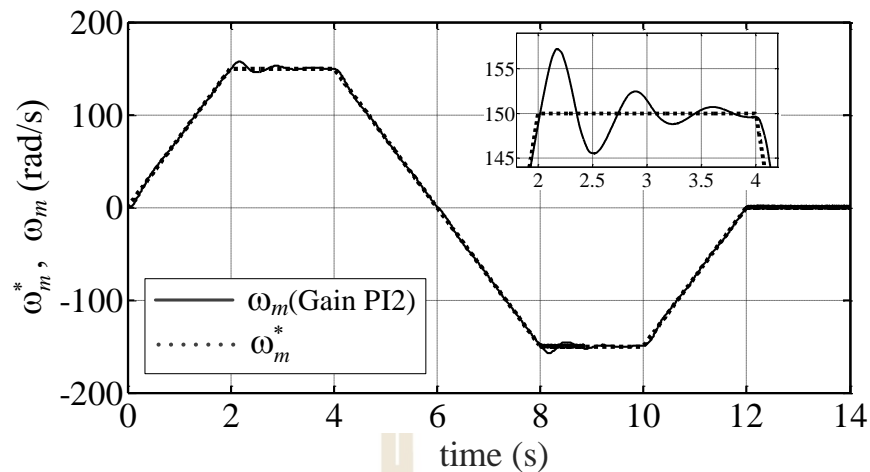
ในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่าความต้านทานโรเตอร์และค่าความต้านทานสเตเตอร์ เท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกัน และมอเตอร์และโหลดเชิงกลมีโมเมนต์ความเฉื่อยเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุ เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนชุดที่ 1 ค่าไอเกนชุดที่ 9 ที่แสดงในตารางที่ 7.6 จะมีค่าไอเกน 4 ค่าแรกที่ใกล้เคียงกับค่าไอเกน 4 ค่าแรกของค่าไอเกนชุดที่ 1 ที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพที่แสดงในตารางที่ 7.2 และค่าไอเกนชุดที่ 9 มีค่าไอเกนที่เหลืออีก 4 ค่าที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ แต่

ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.11 มีความแตกต่างจากผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.1(ก) เมื่อมอเตอร์และโหลดเริ่มเดินเครื่องและหมุนกลับทิศทาง ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.13 (กราฟเส้นประ) จะเพิ่มขึ้น

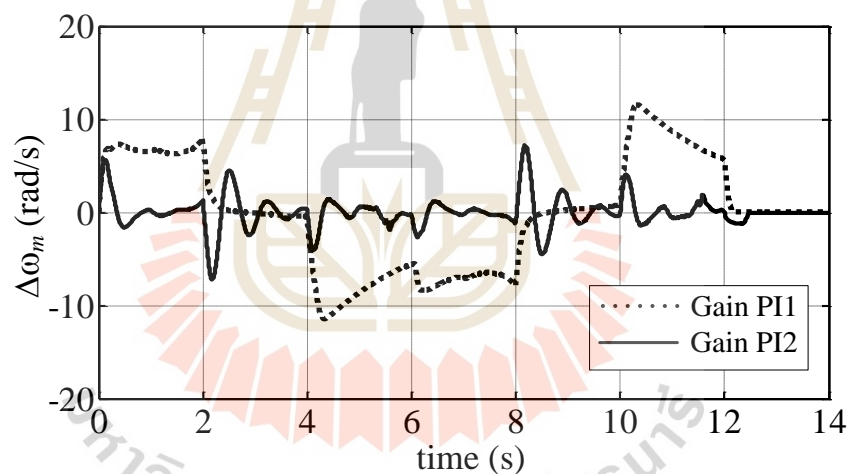
เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนชุดที่ 2 ค่าไอเกนชุดที่ 10 ที่แสดงในตารางที่ 7.6 จะมีค่าไอเกน 5 ค่าแรกที่ไม่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพ แต่ค่าไอเกน 2 ค่าที่เป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนมีขนาดของส่วนจินตภาพมากกว่าขนาดของส่วนจริง และค่าไอเกนชุดที่ 10 มีค่าไอเกนที่เหลืออีก 3 ค่าที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.1(ข) ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.12 มีการพุ่งเกินมากกว่า มีการพุ่งต่ำ มีการแกว่ง และมีสถานะชั่วคราวในช่วงระยะเวลาที่ยาวนาน เพราะค่าไอเกนชุดที่ 10 มีค่าไอเกน 2 ค่าที่เป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนเด่น ผลตอบสนองมีแนวโน้มลู่เข้าหาความเร็วเพลลาอ้างอิง ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่แสดงในรูปที่ 7.13 (กราฟเส้นทึบ) จะมากกว่าความผิดพลาดที่แสดงในรูปที่ 7.1(ค) (กราฟเส้นทึบ) ค่าเกนชุดที่ 1 ให้ความผิดพลาดของความเร็วเพลลามากกว่าความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่ได้รับจากค่าเกนชุดที่ 2



รูปที่ 7.11 ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และความเร็วเพลลาอ้างอิง ในกรณีที่ R_r , R_s และ J มีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกัน



รูปที่ 7.12 ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 2 และความเร็วเพลลาอ้างอิง ในกรณีที่ R_r , R_s และ J มีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกัน

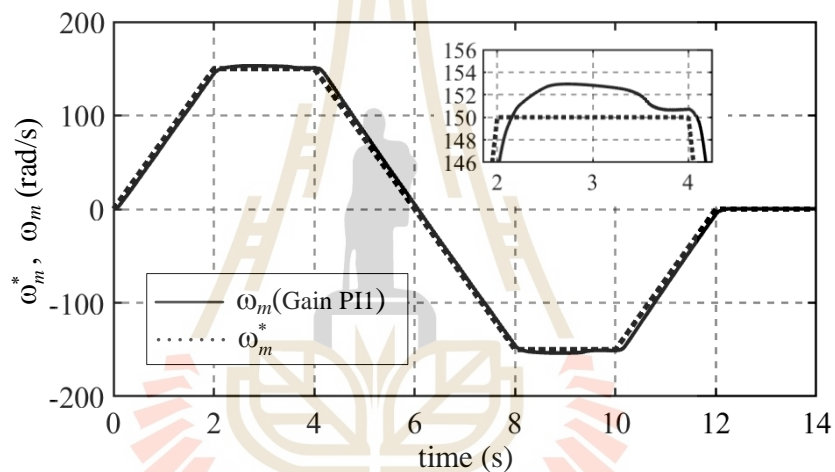


รูปที่ 7.13 ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ในกรณีที่ R_r , R_s และ J มีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกัน

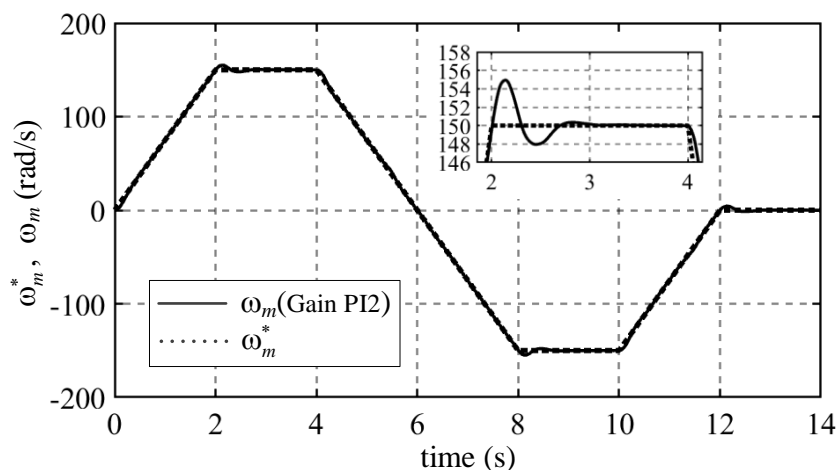
7.4.5 ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ R_r , R_s และ J มีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุ พร้อมกันและมอเตอร์หมุนในสถานะไร้โหลด

เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนชุดที่ 1 (Gain PI1) และมอเตอร์เหนี่ยวนำไม่มีโหลดทอร์ค ($T_L = 0$) ดำเนินการหมุนหรือมอเตอร์หมุนในสถานะไร้โหลด (no-load condition) หลังจากความเร็วเพลลาอ้างอิง (กราฟเส้นประ) ที่แสดงในรูปที่ 7.14 มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงและมีค่าคงที่ที่ไม่

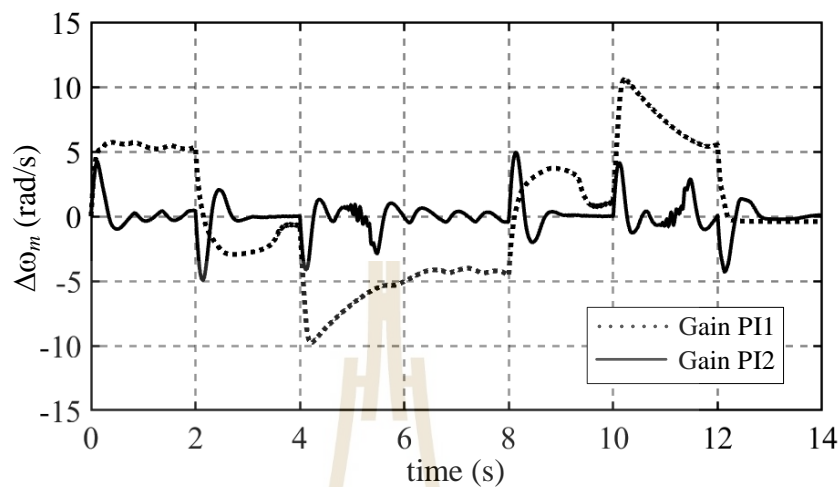
เป็นศูนย์ ระบบควบคุมความเร็ววงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพลา (กราฟเส้นทึบ) ที่มีการพุ่งเกินในช่วงระยะเวลายาวนาน และมีแนวโน้มของการเกิดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนชุดที่ 2 (Gain PI2) ระบบควบคุมความเร็ววงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพลา (กราฟเส้นทึบ) ที่แสดงในรูปที่ 7.15 ที่มีการพุ่งเกินสูงกว่าเล็กน้อย แต่การพุ่งเกินเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้น และสถานะชั่วคราวมีช่วงระยะเวลาสั้นกว่า ผลตอบสนองจะลู่เข้าหาความเร็วเพลาอ้างอิง (กราฟเส้นประ) ในสถานะอยู่ตัว และผลตอบสนองจะติดตามการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเพลาอ้างอิงได้ดีกว่า เพราะตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกนชุดที่ 2 ให้ความผิดพลาดของความเร็วเพลา (กราฟเส้นทึบ) ที่แสดงในรูปที่ 7.16 น้อยกว่าความผิดพลาดของความเร็วเพลา (กราฟเส้นประ) ที่ได้รับจากค่าเกนชุดที่ 1



รูปที่ 7.14 ผลตอบสนองความเร็วเพลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และความเร็วเพลาอ้างอิง ในกรณีที่ R_r , R_s และ J มีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกันและมอเตอร์ไม่มีโหลดทอร์ค



รูปที่ 7.15 ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 2 และความเร็วเพลลาอ้างอิง ในกรณีที่ R_r , R_s และ J มีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกันและมอเตอร์ไม่มีโหลดทอร์ค



รูปที่ 7.16 ความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่เกิดจากค่าเกนชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ในกรณีที่ R_r , R_s และ J มีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าที่ระบุพร้อมกันและมอเตอร์ไม่มีโหลดทอร์ค

เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำขับเคลื่อน โหลดเชิงกลและมอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนในสภาวะไร้โหลด ตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกนที่ได้รับจากการคำนวณโดยตรง จะให้ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่มีความผิดพลาดน้อยกว่าความผิดพลาดของความเร็วเพลลาที่เกิดจากตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกนที่ได้รับจากการสุ่มเลือก

7.5 สมรรถนะของผลตอบสนองที่เกิดจากการคำนวณค่าเกนโดยตรงและการสุ่มเลือกค่าเกน

ในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลมีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าที่ระบุและแตกต่างกันจากค่าที่ระบุ เมื่อความเร็วเพลลาอ้างอิงต้องการให้มอเตอร์และโหลดหมุนด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น หมุนด้วยความเร็วที่ลดลง และหมุนกลับทิศทาง ตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวที่มีค่าเกนที่ได้รับจากการคำนวณโดยตรงจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่มีความผิดพลาดน้อยกว่า และถ้าความเร็วเพลลาอ้างอิงมีช่วงระยะเวลาที่ต้องการให้มอเตอร์และโหลดหมุนด้วยความเร็วคงที่ที่ยาวนานมากขึ้น ผลตอบสนองความเร็วเพลลาจะมีแนวโน้มกลุ่มเข้าหาความเร็วเพลลาอ้างอิง และความผิดพลาดของความเร็วเพลลาในสถานะอยู่ตัวมีแนวโน้มลดลงเป็นศูนย์ หรือผลตอบสนองความเร็วเพลลาไม่มีความ

ผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว เพราะเมตริกซ์สัมประสิทธิ์มีค่าไอเกนที่มีตำแหน่งใกล้เคียงกับแกนจินตภาพมากที่สุดอยู่ห่างจากแกนจินตภาพ และถ้าเมตริกซ์สัมประสิทธิ์มีค่าไอเกนบางค่าที่เป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนเด่น ค่าไอเกนจะมีขนาดของส่วนจินตภาพที่มากกว่าขนาดของส่วนจริงน้อยกว่า 2 เท่า และผลตอบสนองความเร็วเพลลาจะมีการพุ่งเกินที่ไม่สูงมากในสถานะชั่วคราว

เมื่อตัวควบคุมพีไอมีค่าเกนที่ได้จากการสุ่มเลือก ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่มีความผิดพลาดมากกว่าจะมีโอกาสเกิดขึ้นสูงกว่า เพราะเมตริกซ์สัมประสิทธิ์อาจจะมีค่าไอเกนบางค่าที่อยู่ใกล้เคียงกับแกนจินตภาพมาก ดังนั้นการสุ่มเลือกค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวที่ทำให้ค่าไอเกนทุกค่าอยู่ห่างจากแกนจินตภาพ คืองานที่ใช้ระยะเวลายาวนานและไม่มีความแน่นอน

7.6 สรุป

ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยตรงที่มีตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว จะมีเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ที่มีค่าไอเกน 8 ค่า เมื่อมอเตอร์และโหลดเชิงกลมีค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงและแตกต่างจากค่าที่ระบุ ค่าไอเกนบางค่าหรือทุกค่าจะเปลี่ยนแปลงจากค่าเดิมหรือจากค่าที่ได้เลือกในขั้นตอนการคำนวณโดยตรง การเปลี่ยนแปลงของค่าไอเกนจะมีผลกระทบถึงผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่มีแนวโน้มของความผิดพลาดมากขึ้น เมื่อพิจารณาการนำค่าไอเกนลบ 8 ค่ามาคำนวณหาค่าเกนของตัวควบคุมโดยตรงและการกำหนดให้ค่าไอเกนที่ใกล้เคียงกับแกนจินตภาพมากที่สุดมีตำแหน่งอยู่ห่างจากแกนจินตภาพ ถ้ามอเตอร์และโหลดเชิงกลมีค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงจากค่าที่ระบุ และค่าไอเกนที่ใกล้เคียงกับแกนจินตภาพที่สุดยังคงมีตำแหน่งอยู่ห่างจากแกนจินตภาพ ระบบควบคุมความเร็ววงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่มีความผิดพลาดน้อยกว่า การสุ่มเลือกค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวอาจจะได้รับค่าไอเกนบางค่าที่มีตำแหน่งอยู่ใกล้เคียงกับแกนจินตภาพมาก ถ้ามอเตอร์และโหลดเชิงกลมีค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงจากค่าที่ระบุ และค่าไอเกนบางค่ายังคงมีตำแหน่งอยู่ใกล้เคียงกับแกนจินตภาพมาก ระบบควบคุมความเร็ววงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่มีความผิดพลาดมากกว่า

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

งานวิทยานิพนธ์ได้พิจารณาระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบเวกเตอร์โดยตรงที่มีตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว และนำเสนอการคำนวณค่าแกนของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวพร้อมกันโดยตรง ระบบควบคุมความเร็ววงปิดดังกล่าวมีเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ที่มีค่าไอเกน 8 ค่า การกำหนดค่าไอเกน 8 ค่าคือขั้นตอนที่สำคัญที่ทำให้ระบบสมการไม่เชิงเส้น 8 สมการ 8 ตัวแปรมีคำตอบที่เป็นค่าบวกทุกคำตอบ นั่นคือตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวมีค่าแกนบวกทุกค่าและระบบควบคุมความเร็ววงปิดมีค่าไอเกนตามที่ต้องการและแน่นอน ถ้าค่าไอเกนทุกค่าเป็นจำนวนจริงลบและมีตำแหน่งอยู่ห่างจากแกนจินตภาพในระนาบเชิงซ้อน ระบบควบคุมวงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพลทที่มีสมรรถนะสูงในสถานะชั่วครู่และไม่มีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ผลการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในลูบจะยืนยันการเกิดผลตอบสนองความเร็วเพลทที่มีสมรรถนะสูงในทางปฏิบัติ ถ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลมีค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าที่ระบุ ระบบควบคุมวงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพลทที่มีสมรรถนะเปลี่ยนแปลง แต่มีความเป็นไปได้ในการรักษาสมรรถนะที่ดีของผลตอบสนองความเร็วเพลท

การกำหนดค่าไอเกน 8 ค่าที่เป็นจำนวนจริงลบที่มีค่าแตกต่างกันคือวิธีการหนึ่งในการวางตำแหน่งของค่าไอเกนบนแกนจริงของระนาบเชิงซ้อน ค่าไอเกนที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพมากที่สุดจะมีตำแหน่งที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ และค่าไอเกนที่อยู่ห่างไกลจากแกนจินตภาพมากที่สุดจะมีขนาดไม่มากเกินไป เพราะถ้าระบบควบคุมความเร็ววงปิดมีค่าไอเกนลบที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพมากเกินไป สมการปริภูมิสถานะวงปิดจะให้ตัวแปรสถานะที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมากในสถานะชั่วครู่ ระบบควบคุมวงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพลทที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมากเช่นเดียวกัน การจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมวงปิดจะขาดเสถียรภาพเชิงเลข และการจำลองสถานการณ์จะต้องใช้ขั้นเวลา (stepsize) ที่มีขนาดสั้นมากในการรักษาเสถียรภาพเชิงเลขของตัวแปรสถานะหรือแนววิถีสถานะ หรือการจำลองสถานการณ์อาจจะไม่สามารถดำเนินการต่อไปได้

ถ้าตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวมีค่าเกณฑ์ที่ได้รับจากการสุ่มเลือก ค่าไอเกณฑ์บางค่าอาจจะมีตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพหรืออาจจะเป็นจำนวนจริงบวก การสุ่มเลือกค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวจึงไม่สามารถกำหนดค่าไอเกณฑ์ 8 ค่าของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ได้ และระบบควบคุมวงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่มีสมรรถนะที่ไม่สามารถทำนายได้ การสุ่มเลือกค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมมีความเป็นไปได้และโอกาสน้อยมากในการเกิดผลตอบสนองที่มีสมรรถนะที่ต้องการ แต่การคำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมโดยตรงมีความเป็นไปได้และโอกาสมากกว่าในการเกิดผลตอบสนองที่มีสมรรถนะสูง การสุ่มเลือกและการคำนวณโดยตรงคืองานวนซ้ำ เพราะการสุ่มเลือกจะกำหนดค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมจนกว่าระบบควบคุมวงปิดให้ผลตอบสนองความเร็วเพลลาที่มีสมรรถนะที่ต้องการ และการคำนวณโดยตรงจะกำหนดค่าไอเกณฑ์ 8 ค่าจนกว่าระบบสมการไม่เชิงเส้นมีคำตอบที่เป็นค่าบวกทุกคำตอบ แต่การสุ่มเลือกมีแนวโน้มในการใช้เวลานานกว่า

การสุ่มเลือกค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมไม่ต้องการค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและโหลดเชิงกล แต่การคำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมโดยตรงต้องการค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์และโหลด ผู้ผลิตที่ออกแบบและสร้างมอเตอร์จะทราบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และในปัจจุบัน ผู้ผลิตได้สร้างระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ในเชิงพาณิชย์ที่มีลักษณะในโมดูลเดียวที่ประกอบด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส อินเวอร์เตอร์ วงจรเรียงกระแส ไมโครคอนโทรลเลอร์ เซนเซอร์วัดแรงดัน เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า และเซนเซอร์วัดความเร็ว โมดูลเดี่ยวนี้มีการทดสอบก่อนการใช้งานในตัว (self-commissioning) หรืออัลกอริทึมของการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ (parameter identification) ที่ประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์และโหลดเชิงกล ไมโครคอนโทรลเลอร์จะได้รับและบันทึกตัวเลขของค่าพารามิเตอร์ลงในหน่วยความจำ ในอนาคต การพัฒนาสถาปัตยกรรมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์จะสร้างไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ประมวลผลได้รวดเร็วกว่า มีหน่วยประมวลผลอิสระมากกว่าหนึ่งหน่วย และมีความจุของหน่วยความจำเพิ่มขึ้น และการพัฒนาตัวแปลภาษาหรือคอมไพเลอร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์จะสร้างการแปลงชุดคำสั่งคำนวณเชิงสัญลักษณ์ไปเป็นชุดคำสั่งคำนวณเชิงเลข การเขียนโปรแกรมเชิงสัญลักษณ์จะกำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัวพร้อมกันโดยตรงได้

เมื่อระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบเวกเตอร์โดยตรงที่มีตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว มีเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ที่มีค่าไอเกณฑ์ทุกค่าอยู่ในตำแหน่งด้านซ้ายมือของแกนจินตภาพ (ค่าไอเกณฑ์มีค่าที่เป็นจำนวนจริงลบหรือคู่สังยุคเชิงซ้อนที่มีส่วนจริงลบ) ระบบควบคุมความเร็ววงปิดมีแนววิถีสถานะที่มีขอบเขตที่สม่ำเสมอ และถ้าค่าไอเกณฑ์ที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพมากที่สุดมีตำแหน่งที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ ระบบควบคุมวงปิดจะให้แนววิถีสถานะที่มีขนาดที่ใกล้กับจุดศูนย์และมีขอบเขตที่แคบลงในสถานะอยู่ตัว

8.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในทางปฏิบัติ ตัวสังเกตฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์หรือระบบปรับตัวที่อ้างอิงแบบจำลอง (MRAS) จะนำมาใช้งานแทนที่หน่วยคำนวณฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ เพราะตัวสังเกตฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์หรือระบบปรับตัวที่อ้างอิงแบบจำลอง คำนวณหรือประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่มีความถูกต้องมากกว่า เนื่องจากระบบควบคุมความเร็วแบบเวกเตอร์โดยตรงใช้ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ในการแปลงพิกัดหรือในการแปลงกรอบอ้างอิง ระบบควบคุมดังกล่าวจึงต้องการฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่มีความถูกต้องสูง

2. การหาคำตอบของระบบสมการไม่เชิงเส้นที่มี 8 สมการ 8 ตัวแปร ต้องการวิธีการเชิงเลขมาตรฐาน อัลกอริทึมอื่นของการค้นหาคำตอบที่ใช้เวลาน้อยกว่า อาจนำมาใช้งานแทนที่วิธีการเชิงเลขมาตรฐานได้

3. การกำหนดค่าไอเกน 8 ค่าที่ทำให้ระบบสมการไม่เชิงเส้น 8 สมการ 8 ตัวแปรมีคำตอบที่เป็นค่าบวกทุกคำตอบ อาจเป็นงานวนซ้ำ การหาหรือการพัฒนาหลักเกณฑ์ที่ใช้กำหนดค่าไอเกนดังกล่าวแทนที่งานวนซ้ำที่อาจจะเกิดขึ้น จึงมีประโยชน์ แต่มีความยุ่งยากและซับซ้อนมากในการดำเนินงาน

รายการอ้างอิง

- A. Mechemene, L.C. Alaoui, M. Zerikat, N. Benharir, H. Benderradji. (2013). VGPI controller for high performance speed tracking of induction motor drive. **Systems and Control (ICSC) 2013 3rd International Conference**. (pp. 472-477): October.
- Abu Rub H, Iqbal A, Guzinski J. (2012). **High performance control of AC drives with MATLAB/SIMULINK models**. West Sussex United Kingdom: John Wiley & Sons.
- Fayez F. M. El-Sousy, Faeka M.H. Khater and Farouk I. Ahmed. (1999). Analysis and Design of Indirect Field Orientation Control for Induction Machine Drive System. In **Proceeding of the 38th SICE annual conference**. (pp. 901-908): 28-30 July.
- Kassem A.M. (2013). Fuzzy-logic based self-tuning PI controller for high-performance vector controlled induction motor fed by PV-generator. **WSEAS Transactions on Systems**. 12 (1): January, 22-31.
- Khalaf Salloum Gaeid, Hew Wooi Ping, Haider A. F. Mohamed. (2009). Indirect Vector Control of a Variable Frequency Induction Motor Drive (VCIMD) . **International Conference on Instrumentation, Communication, Information Technology, and Biomedical Engineering**. (pp. 36-41): 23-25 Nov.
- Khalghani, M.R., Shamsi-Nejad, M.A., Beyki, K. (2011). An intelligent controller for optimal vector control of induction motor. **IEEE International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE)**. (pp. 78-81): 4-7 Dec.
- Khalil H.K. (2000). **Nonlinear systems**. Third Edition. Singapore: Prentice-Hall (Pearson International Edition).
- Lopez CP. (2014). **MATLAB symbolic algebra and calculus tools: hands-on MATLAB training and exercises**. New York USA: Springer.
- M. Chebre, A. Meroufel, Y. Bendaha. (2011). Speed Control of Induction Motor Using Genetic Algorithm-based PI Controller. **Acta Polytechnica Hungarica**. 8 (6): November, 141-153.

- M. O. Ajangnay. (2010). Optimal PID controller parameters for vector control of induction motors. **SPEEDAM, Pisa.** (pp. 959-965): 14-16 June.
- Q. Wei-min, X. Jie, H. Wen-jian and C. Chang-mao. (2013). Research on fuzzy neural network PI controller for position control of motor drive. In **Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference.** (pp. 3459-3463): 26-28 July.
- Sreekumar T, and Jiji K S. (2012). Comparison of Proportional-Integral (P-I) and Integral-Proportional (I-P) controllers for speed control in Vector controlled Induction Motor Drive. **International Conference on Power, Control and Embedded Systems.** 17-19 Dec.
- Sul SK. (2011). **Control of electric machine drive systems.** New Jersey USA: John Wiley & Sons.
- Tang J, Yang Y, Diao L, Chen J, Chang Y, Liu Z. (2018). Parameter identification of induction motors for railway traction applications. In **Proceedings of the 10th Annual 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)** (pp. 284-8): 23-27 Sep.





ภาคผนวก ก

รายละเอียดของสมการที่ใช้ในการแปลงพิกัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การแปลงแบบคาร์ก

เวกเตอร์ปริภูมิที่มีแกนอ้างอิงสามแกน (สามเฟส) หรือแกนอ้างอิง A - B - C ที่แต่ละแกนทำมุม 120 องศาซึ่งกันและกัน สามารถแสดงอยู่ในรูปของสมการดังนี้ (H. Abu Rub, A. Iqbal, J. Guzinski, 2012)

$$f_{ABC} = \frac{2}{3}(f_A + af_B + a^2f_C) \quad (\text{ก-1})$$

โดยที่ $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$, $a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$, $e^{j\gamma} = \cos(\gamma) + j\sin(\gamma)$, f_A คือปริมาณไฟฟ้าเฟส A, f_B คือปริมาณไฟฟ้าเฟส B และ f_C คือปริมาณไฟฟ้าเฟส C

f_A , f_B และ f_C ใช้แทนแรงดันสแตเตอร์เฟส A, B และ C ตามลำดับ กระไฟฟ้าสแตเตอร์เฟส A, B และ C ตามลำดับ กระไฟฟ้าโรเตอร์เฟส A, B และ C ตามลำดับ ฟลักซ์แม่เหล็กสแตเตอร์เฟส A, B และ C ตามลำดับ และฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์เฟส A, B และ C ตามลำดับ

พิจารณาสมการที่ (ก-1) และแทนค่าตัวแปร a จะได้ว่า

$$af_B = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)f_B \quad (\text{ก-2})$$

$$a^2f_C = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)f_C \quad (\text{ก-3})$$

กำหนดให้ระบบสามเฟสที่พิจารณาเป็นระบบสามเฟสสมดุล จะได้ว่า $f_A + f_B + f_C = 0$ หรือ $f_C = -f_A - f_B$ และแทนค่าตัวแปร f_C ลงในสมการที่ (ก-3) จะได้ว่า

$$a^2f_C = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)(-f_A - f_B) \text{ ต่อมาจัดรูปสมการใหม่ จะได้ว่า}$$

$$a^2 f_C = \left(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)f_A + \left(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)f_B \quad (\text{ก-4})$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรที่จากสมการที่ (ก-2) และ (ก-4) ลงในสมการที่ (ก-1) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} f_A + af_B + a^2 f_C &= f_A + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)f_B + \left(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)f_A \\ &\quad + \left(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)f_B \end{aligned}$$

$$f_A + af_B + a^2 f_C = \left(\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)f_A + j\sqrt{3}f_B$$

ดังนั้น $f_{ABC} = \frac{2}{3}\left(\left(\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)f_A + j\sqrt{3}f_B\right)$ และต่อมาจัดรูปสมการใหม่ จะได้

เวกเตอร์ปริภูมิสามเฟส f_{ABC} ดังนี้

$$f_{ABC} = \left(1 + \frac{j}{\sqrt{3}}\right)f_A + j\frac{2}{\sqrt{3}}f_B \quad (\text{ก-5})$$

เวกเตอร์ปริภูมิสามเฟส f_{ABC} คือจำนวนเชิงซ้อน ส่วนจริงของ f_{ABC} และส่วนจินตภาพของ f_{ABC} คือปริมาณเอซีสองเฟสที่มีแกนอ้างอิงสองแกนตั้งฉากกันในพิกัดหุคหนึ่ง เมื่อกำหนดให้แกน α คือส่วนจริงของเวกเตอร์ปริภูมิสามเฟส และแกน β คือส่วนจินตภาพของเวกเตอร์ปริภูมิสามเฟส จะได้ว่า

$$f_{ABC} = f_{\alpha\beta} = f_\alpha + jf_\beta \quad (\text{ก-6})$$

โดยที่ $f_\alpha = \text{Re}(f_{ABC})$ และ $f_\beta = \text{Im}(f_{ABC})$ ต่อมาจัดรูปสมการที่ (ก-5) ใหม่ และเปรียบเทียบกับสมการที่ (ก-6) จะได้ว่า

$$f_\alpha = f_A \quad (\text{ก-7})$$

$$f_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} f_A + \frac{2}{\sqrt{3}} f_B \quad (\text{ก-8})$$

สมการที่ (ก-7) และ (ก-8) ให้สมการเมตริกซ์

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{3}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} \quad (\text{ก-9})$$

สมการที่ (ก-9) คือสมการที่ใช้ในการแปลงแบบคาร์กที่เปลี่ยนปริมาณเอชีสามเฟสในแกน $A-B-C$ ไปเป็นปริมาณเอชีสองเฟสในแกน $\alpha-\beta$ สมการที่ (ก-9) คือสมการที่ (3-6) ในบทที่ 3 ต่อมาพิจารณาสมการที่ (ก-7) และ(ก-8) และหาสมการที่ใช้ในการแปลงย้อนกลับแบบคาร์กที่เปลี่ยนปริมาณเอชีสองเฟสในแกน $\alpha-\beta$ ไปเป็นปริมาณเอชีสามเฟสในแกน $A-B-C$

$$f_A = (1)f_\alpha + (0)f_\beta \quad (\text{ก-10})$$

จัดรูปสมการที่ (ก-8) ใหม่ จะได้ว่า $\sqrt{3}f_\beta = f_\alpha + 2f_B$

$$f_B = -\frac{1}{2}f_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}f_\beta \quad (\text{ก-11})$$

ต่อมาแทนค่า f_A และ f_B จากสมการที่ (ก-10) และ (ก-11) ลงในสมการ $f_C = -f_A - f_B$

$$\text{จะได้ว่า } f_C = -f_\alpha + \frac{1}{2}f_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}f_\beta$$

$$f_C = -\frac{1}{2}f_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}f_\beta \quad (\text{ก-12})$$

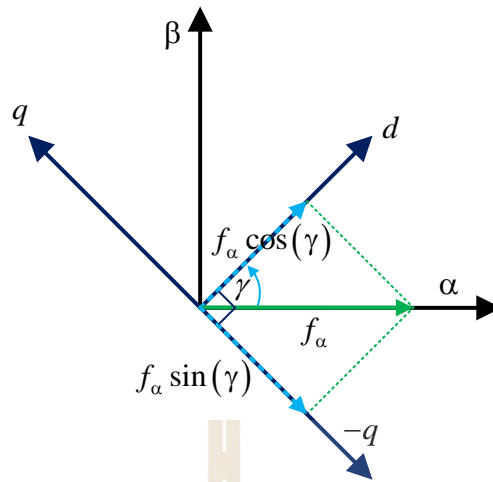
สมการที่ (ก-10), (ก-11) และ (ก-12) ให้การแปลงย้อนกลับแบบคาร์ก

$$\begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{ก-13})$$

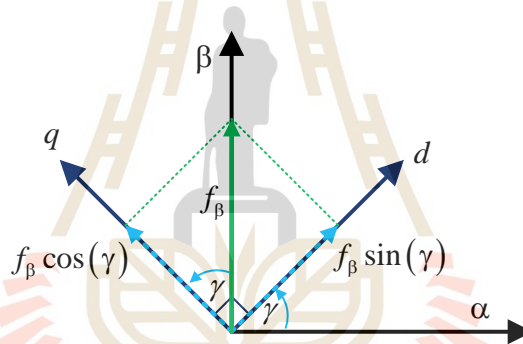
สมการที่ (ก-13) คือสมการที่ (3-7) ในบทที่ 3

การแปลงแบบปาร์ค

การแปลงแบบปาร์คคือการเปลี่ยนปริมาณเอชีสองเฟสในแกน α - β (พิกัดหยุดนิ่งหรือพิกัดสเตเตอร์) ไปเป็นปริมาณดีซีในแกน d - q (พิกัดซิงโครนัสหรือพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์) เมื่อแกน d - q หมุนด้วยตำแหน่งเชิงมุม γ ที่เทียบกับแกน α - β ที่อยู่นิ่ง แกน d (แกนตรง) และแกน q (แกนนอน) จะมีมุมระหว่างกัน γ และแกน q (แกนขวาง) และแกน β (แกนตั้ง) จะมีมุมระหว่างกัน γ เช่นเดียวกัน การแยกส่วนประกอบของเวกเตอร์ที่อยู่นบนแกน α ลงในแกน d และแกน q จะแสดงในรูปที่ ก.1 และการแยกส่วนประกอบของเวกเตอร์ที่อยู่นบนแกน β ลงในแกน d และแกน q จะแสดงในรูปที่ ก.2 พิกัดหยุดนิ่งและพิกัดซิงโครนัสมีความสัมพันธ์ระหว่างกันดังนี้



รูปที่ ก.1 การแยกส่วนประกอบของเวกเตอร์ที่อยู่บนแกน α ลงในแกน d และแกน q



รูปที่ ก.2 การแยกส่วนประกอบของเวกเตอร์ที่อยู่บนแกน β ลงในแกน d และแกน q

$$f_d = f_\alpha \cos(\gamma) + f_\beta \sin(\gamma) \quad (\text{ก-14})$$

$$f_q = -f_\alpha \sin(\gamma) + f_\beta \cos(\gamma) \quad (\text{ก-15})$$

สมการที่ (ก-14) และ (ก-15) ให้สมการเมตริกซ์

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{ก-16})$$

สมการที่ (ก-16) คือสมการที่ (3-8) ที่ใช้ในการแปลงแบบปาร์ค และสมการที่ (ก-16) จะให้การแปลงย้อนกลับแบบปาร์ค กล่าวคือ $\begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix}$ จะได้

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (\text{ก-17})$$

สมการที่ (ก-17) คือสมการที่ (3-9) ที่ใช้เปลี่ยนปริมาณดีซีในแกน $d-q$ ไปเป็นปริมาณเอชีสองเฟสในแกน $\alpha-\beta$

การนำ $e^{-j\gamma}$ มาคูณกับ f_{dq} ในสมการที่ (ก-6) จะเปลี่ยนปริมาณเอชีสองเฟสในแกน $\alpha-\beta$ ไปเป็นปริมาณดีซีในแกน $d-q$ ดังนี้

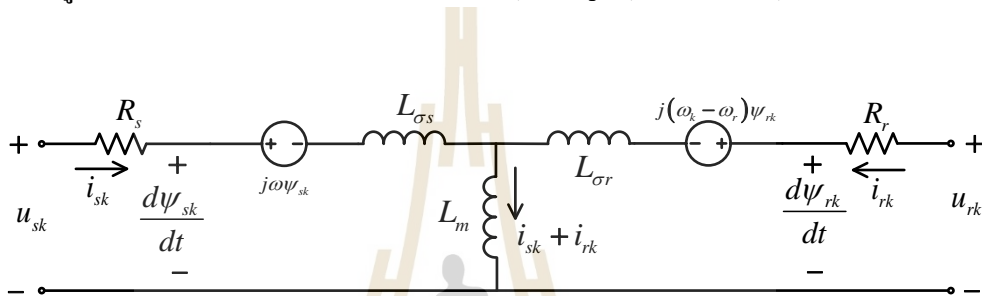
$$f_{dq} = (f_\alpha + jf_\beta)e^{-j\gamma} \quad (\text{ก-18})$$

โดยที่ $f_{dq} = f_d + jf_q$ และการนำ $e^{j\gamma}$ มาคูณกับ f_{dq} จะเปลี่ยนปริมาณดีซีในแกน $d-q$ ไปเป็นปริมาณเอชีสองเฟสในแกน $\alpha-\beta$



แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำในพิกัดที่ไม่ระบุและในพิกัดสเตเตอร์

แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอกในพิกัดสเตเตอร์และในพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ ที่แสดงในบทที่ 3 จะได้รับจากแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิง (พิกัด) ที่ไม่ระบุ (arbitrary reference frame ; k) และพิกัดที่ไม่ระบุมีแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ω_k แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำในพิกัดที่ไม่ระบุมีวงจรมูลที่แสดงในรูปที่ ข.1 และมีสมการดังนี้ (H. Abu Rub, A. Iqbal, J. Guzinski, 2012)



รูปที่ ข.1 วงจรมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำในพิกัดที่ไม่ระบุ

$$u_{sk} = R_s i_{sk} + \frac{d\psi_{sk}}{dt} + j\omega_k \psi_{sk} \quad (\text{ข-1})$$

$$u_{rk} = R_r i_{rk} + \frac{d\psi_{rk}}{dt} + j(\omega_k - \omega_r) \psi_{rk} \quad (\text{ข-2})$$

$$\psi_{sk} = L_s i_{sk} + L_m i_{rk} \quad (\text{ข-3})$$

$$\psi_{rk} = L_r i_{rk} + L_m i_{sk} \quad (\text{ข-4})$$

โดยที่ $L_s = L_{\sigma s} + L_m$, $L_r = L_{\sigma r} + L_m$, $L_{\sigma s}$ คือ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลที่สเตเตอร์ และ $L_{\sigma r}$ คือ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลที่โรเตอร์ ต่อมาจัดรูปสมการที่ (ข-4) ใหม่

จะได้ว่า $i_{rk} = \frac{1}{L_r} (\psi_{rk} - L_m i_{sk})$ และแทนค่า i_{rk} จากสมการที่ (ข-3) จะได้รับ

$$\psi_{sk} = L_s i_{sk} + \frac{L_m}{L_r} (\psi_{rk} - L_m i_{sk}) \quad (\text{ข-5})$$

การหาอนุพันธ์ของ ψ_{sk} ในสมการที่ (ข-5) จะได้ว่า

$$\frac{d\psi_{sk}}{dt} = L_s \frac{di_{sk}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_{rk}}{dt} - \frac{L_m^2}{L_r} \frac{di_{sk}}{dt} \quad (\text{ข-6})$$

การแทนค่า ψ_{sk} และ $\frac{d\psi_{sk}}{dt}$ จากสมการที่ (ข-5) และ (ข-6) ลงในสมการที่ (ข-1) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} u_{sk} &= R_s i_{sk} + L_s \frac{di_{sk}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_{rk}}{dt} - \frac{L_m^2}{L_r} \frac{di_{sk}}{dt} + j\omega_k \frac{L_m}{L_r} (\psi_{rk} - L_m i_{sk}) \\ &\quad + j\omega_k L_s i_{sk} \\ u_{sk} &= \left(R_s + j\omega_k \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \right) i_{sk} + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{di_{sk}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_{rk}}{dt} \\ &\quad + j \frac{L_m}{L_r} \omega_k \psi_{rk} \end{aligned} \quad (\text{ข-7})$$

การแทนค่า i_{rk} ลงในสมการที่ (ข-2) จะได้ว่า

$$u_{rk} = R_r \left(\frac{1}{L_r} (\psi_{rk} - L_m i_{sk}) \right) + \frac{d\psi_{rk}}{dt} + j(\omega_k - \omega_r) \psi_{rk}$$

และการจัดรูปสมการใหม่จะได้อัน

$$\frac{d\psi_{rk}}{dt} = \frac{L_m}{L_r} R_r i_{sk} - \left(\frac{R_r}{L_r} + j(\omega_k - \omega_r) \right) \psi_{rk} + u_{rk} \quad (\text{ข-8})$$

การแทนค่า $\frac{d\psi_{rk}}{dt}$ จากสมการที่ (ข-8) ลงในสมการที่ (ข-7) จะได้ว่า

$$u_{sk} = \left(R_s + j\omega_k \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \right) i_{sk} + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{di_{sk}}{dt} + \frac{L_m^2}{L_r^2} R_r i_{sk} \\ + j \frac{L_m}{L_r} \omega_k \psi_{rk} - \frac{L_m}{L_r} \left(\frac{R_r}{L_r} + j(\omega_k - \omega_r) \right) \psi_{rk} + \frac{L_m}{L_r} u_{rk} \quad (\text{ข-9})$$

การจัดรูปสมการที่ (ข-9) ใหม่จะได้ว่า

$$\left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{di_{sk}}{dt} = - \left(R_s + \frac{L_m^2}{L_r^2} R_r + j\omega_k \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \right) i_{sk} \\ + \frac{L_m}{L_r} \left(\frac{R_r}{L_r} - j\omega_r \right) \psi_{rk} + u_{sk} - \frac{L_m}{L_r} u_{rk}$$

การนำ L_r คูณเข้าทั้งสองข้างของสมการ จะได้ว่า

$$\left(L_s L_r - L_m^2 \right) \frac{di_{sk}}{dt} = - \left(L_r R_s + \frac{L_m^2}{L_r} R_r + j\omega_k \left(L_r L_s - L_m^2 \right) \right) i_{sk} \\ + L_r u_{sk} - L_m u_{rk} + L_m \left(\frac{R_r}{L_r} - j\omega_r \right) \psi_{rk}$$

การนำ $\frac{1}{(L_s L_r - L_m^2)}$ คูณทั้งสองข้างของสมการและจัดรูปสมการใหม่ จะได้รับ

$$\frac{di_{sk}}{dt} = - \left(\frac{L_r R_s + L_m^2 R_r}{L_r (L_s L_r - L_m^2)} + j\omega_k \right) i_{sk} + \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \left(\frac{R_r}{L_r} - j\omega_r \right) \psi_{rk} \\ + \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} u_{sk} - \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} u_{rk}$$

(ข-10)

แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในพิกัดหุคหนึ่ง (ในแกน α - β) มีแกนอ้างอิง (แกน α และแกน β) ที่หมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุม $\omega_k = 0$ และมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกมีแรงดันโรเตอร์เท่ากับศูนย์ ($u_r = 0$) (H. Abu Rub, A. Iqbal, J. Guzinski, 2012) และกำหนดให้

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad \text{หรือ} \quad \sigma L_s L_r = L_s L_r - L_m^2 \quad \text{นั่นคือ}$$

$$\frac{di_{sk}}{dt} = -\left(\frac{L_r^2 R_s + L_m^2 R_r}{\sigma L_s L_r^2}\right) i_{sk} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \left(\frac{R_r}{L_r} - j\omega_r\right) \psi_{rk} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{sk} \quad (\text{ข-11})$$

และสมการที่ (ข-8) ให้

$$\frac{d\psi_{rk}}{dt} = \frac{L_m}{L_r} R_r i_{sk} - \left(\frac{R_r}{L_r} - j\omega_r\right) \psi_{rk} \quad (\text{ข-12})$$

กำหนดให้ $a_1 = -\frac{L_r^2 R_s + L_m^2 R_r}{\sigma L_s L_r^2}$, $a_2 = \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r^2}$, $a_3 = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}$,

$a_4 = \frac{1}{\sigma L_s}$, $a_5 = -\frac{R_r}{L_r}$, $a_6 = \frac{L_m R_r}{L_r}$ จะได้ว่า

$$\frac{di_{sk}}{dt} = a_1 i_{sk} + a_2 \psi_{rk} - j\omega_r a_3 \psi_{rk} + a_4 u_{sk} \quad (\text{ข-13})$$

$$\frac{d\psi_{rk}}{dt} = a_6 i_{sk} + a_5 \psi_{rk} + j\omega_r \psi_{rk} \quad (\text{ข-14})$$

กำหนดให้ $i_{sk} = i_{s\alpha} + ji_{s\beta}$, $\psi_{rk} = \psi_{r\alpha} + j\psi_{r\beta}$ และ $u_{sk} = u_{s\alpha} + ju_{s\beta}$ การแทนค่า i_{sk} , ψ_{rk} และ u_{sk} ลงในสมการที่ (ข-13) และ (ข-14) และการจัดรูปสมการใหม่ จะได้รับแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำในพิกัดสเตเตอร์ดังนี้

$$\frac{di_{s\alpha}}{dt} = a_1 i_{s\alpha} + a_2 \psi_{r\alpha} + a_3 \omega_r \psi_{r\beta} + a_4 u_{s\alpha} \quad (\text{ข-15})$$

$$\frac{di_{s\beta}}{dt} = a_1 i_{s\beta} + a_2 \psi_{r\beta} - a_3 \omega_r \psi_{r\alpha} + a_4 u_{s\beta} \quad (\text{ข-16})$$

$$\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = a_5 \psi_{r\alpha} - \omega_r \psi_{r\beta} + a_6 i_{s\alpha} \quad (\text{ข-17})$$

$$\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = a_5 \psi_{r\beta} + \omega_r \psi_{r\alpha} + a_6 i_{s\beta} \quad (\text{ข-18})$$

สมการที่ (ข-15) , (ข-16) , (ข-17) และ (ข-18) คือสมการที่ (3-1) , (3-2) , (3-3) และ (3-4) ตามลำดับ

ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีกำลังงานจริงที่เกิดขึ้น มอเตอร์เหนี่ยวนำจะสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนโหลดเชิงกลให้เกิดการหมุน มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีแรงดันสเตเตอร์ตกคร่อมและมีกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ไหลผ่าน จะมีกำลังงานเชิงซ้อนเกิดขึ้นดังนี้ (S.-K. Sul , 2011)

$$S = VI^* \quad \text{หรือ} \quad S = P + jQ$$

โดยที่ S คือกำลังงานเชิงซ้อน (complex power) , P คือกำลังงานจริง (real power) , Q คือกำลังงานรีแอกทีฟ (reactive power) , V คือเวกเตอร์แรงดันสามเฟส , I คือเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสามเฟส , $P = \text{Re}(S)$ และ $Q = \text{Im}(S)$ นั่นคือ $P = \text{Re}(VI^*)$

เมื่อ u_{ABC} คือ เวกเตอร์แรงดันสามเฟสและ i_{ABC} คือ เวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสามเฟสที่มีรูปแบบในสมการที่ (ก-1) เวกเตอร์แรงดันสามเฟสมีแรงดันเฟส A , B และ C และเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสามเฟสมีกระแสไฟฟ้าเฟส A , B และ C ระบบสามเฟสสมดุลมี $i_A + i_B + i_C = 0$ มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีกำลังงานจริงที่เกิดขึ้น (S.-K. Sul , 2011) คือ

$$P = \text{Re}\left(\frac{3}{2}(u_{ABC}i_{ABC}^*)\right) \quad \text{และ}$$

$$\operatorname{Re}(\mathbf{u}_{ABC} \mathbf{i}_{ABC}^*) = \frac{2}{3}(u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C) \quad (\text{ข-19})$$

เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยทั่วไปมีกำลังงานอินพุตที่เกิดขึ้นดังนี้

$$P_{in} = u_{sA} i_{sA} + u_{sB} i_{sB} + u_{sC} i_{sC} + u_{rA} i_{rA} + u_{rB} i_{rB} + u_{rC} i_{rC}$$

โดยที่ u_{sA} , u_{sB} , u_{sC} คือแรงดันสเตเตอร์เฟส A, B และ C ตามลำดับ u_{rA} , u_{rB} , u_{rC} คือแรงดันโรเตอร์เฟส A, B และ C ตามลำดับ i_{sA} , i_{sB} , i_{sC} คือกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์เฟส A, B และ C ตามลำดับ และ i_{rA} , i_{rB} , i_{rC} คือกระแสไฟฟ้าโรเตอร์เฟส A, B และ C ตามลำดับ

การพิจารณาสมการที่ (ข-19) จะได้ว่า

$$P_{in} = \frac{3}{2} \operatorname{Re}(\mathbf{u}_{sABC} \mathbf{i}_{sABC}^*) + \frac{3}{2} \operatorname{Re}(\mathbf{u}_{rABC} \mathbf{i}_{rABC}^*) \quad (\text{ข-20})$$

การพิจารณาสมการที่ (ข-20) ที่อยู่ในกรอบอ้างอิง (พิกัด) ที่ไม่ระบุ (arbitrary reference frame ; k) ที่หมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ω_k จะได้ว่า

$$P_{in} = \frac{3}{2} \operatorname{Re}(u_{sk} i_{sk}^*) + \frac{3}{2} \operatorname{Re}(u_{rk} i_{rk}^*) \quad (\text{ข-21})$$

การแทนค่า u_{sk} , u_{rk} , ψ_{sk} และ ψ_{rk} จากสมการที่ (ข-1), (ข-2), (ข-3) และ (ข-4) ลงในสมการที่ (ข-21) จะได้ว่า

$$P_{in} = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left(\left(R_s i_{sk} + L_s \frac{di_{sk}}{dt} + L_m \frac{di_{rk}}{dt} + j\omega_k (L_s i_{sk} + L_m i_{rk}) \right) i_{sk}^* \right) + \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left(\left(R_r i_{rk} + \left(L_r \frac{di_{rk}}{dt} + L_m \frac{di_{sk}}{dt} \right) + j(\omega_k - \omega_r)(L_r i_{rk} + L_m i_{sk}) \right) i_{rk}^* \right)$$

$$P_{in} = \frac{3}{2}R_s|i_{sk}|^2 + \frac{3}{2}R_r|i_{rk}|^2 + \frac{3}{2}\text{Re}\left[\frac{d}{dt}(L_s i_{sk} + L_m i_{rk})i_{sk}^* + \frac{d}{dt}(L_r i_{rk} + L_m i_{sk})i_{rk}^*\right] \\ + \frac{3}{2}\text{Re}\left[j\omega_k(L_s|i_{sk}|^2 + L_m i_{rk}i_{sk}^*) + j(\omega_k - \omega_r)(L_r|i_{rk}|^2 + L_m i_{sk}i_{rk}^*)\right] \quad (\text{ข-22})$$

ต่อมาพิจารณาด้านขวามือของสมการที่ (ข-22) พจน์แรกและพจน์ที่สองคือกำลังงานสูญเสียในชุดขดลวดสเตเตอร์และในชุดขดลวดโรเตอร์ (stator/rotor copper losses) ตามลำดับ พจน์ที่สามคือการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่เก็บสะสมในชุดขดลวด พจน์ที่สามจึงไม่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล ดังนั้นพจน์ที่สี่คือกำลังงานเชิงกล (P_m) ที่ขับเคลื่อนโหลดเชิงกลให้เกิดการหมุน (S.-K. Sul, 2011)

$$P_m = \frac{3}{2}\text{Re}\left[j\omega_k(L_s|i_{sk}|^2 + L_m i_{rk}i_{sk}^*) + j(\omega_k - \omega_r)(L_r|i_{rk}|^2 + L_m i_{sk}i_{rk}^*)\right] \quad (\text{ข-23})$$

ด้านขวามือของสมการที่ (ข-23) มีพจน์ที่เป็นจำนวนจริงเท่านั้น พจน์ $j\omega_k L_s|i_{sk}|^2$ และพจน์ $j(\omega_k - \omega_r)L_r|i_{rk}|^2$ คือจำนวนจินตภาพ นั่นคือ

$$P_m = \frac{3}{2}\text{Re}\left[j\omega_k L_m(i_{rk}i_{sk}^* + i_{sk}^*i_{rk}) - j\omega_r L_m i_{sk}i_{rk}^*\right] \quad (\text{ข-24})$$

เมื่อพิจารณาคูสมบัติของจำนวนเชิงซ้อน ถ้า $A = a_r + ja_i$ และ $B = b_r + jb_i$ จะได้ว่า $A \cdot B^* + A^* \cdot B = 2(a_r b_r + a_i b_i)$ เป็นจำนวนจริง ด้านขวามือของสมการที่ (ข-24) จึงมีพจน์แรกที่เป็นจำนวนจินตภาพ นั่นคือ

$$P_m = -\frac{3}{2}\text{Re}\left[j\omega_r L_m i_{sk}i_{rk}^*\right] \quad (\text{ข-25})$$

เนื่องจาก $i_{sk}i_{rk}^* = \text{Re}(i_{sk}i_{rk}^*) + j\text{Im}(i_{sk}i_{rk}^*)$ จะได้ว่า $j i_{sk}i_{rk}^* = j\text{Re}(i_{sk}i_{rk}^*) - \text{Im}(i_{sk}i_{rk}^*)$

$$j\omega_r L_m i_{sk} i_{rk}^* = j\omega_r L_m \operatorname{Re}(i_{sk} i_{rk}^*) - \omega_r L_m \operatorname{Im}(i_{sk} i_{rk}^*)$$

กล่าวคือ $\operatorname{Re}[j\omega_r L_m i_{sk} i_{rk}^*] = -\omega_r L_m \operatorname{Im}(i_{sk} i_{rk}^*)$ และ

$$P_m = \frac{3}{2} \omega_r L_m \operatorname{Im}(i_{sk} i_{rk}^*) \quad (\text{ข-26})$$

กำลังงานเชิงกลเท่ากับผลคูณระหว่างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า (T_e) และอัตราเร็วเชิงมุมเชิงกลของเพลา (ω_m) กล่าวคือ $P_m = \frac{\omega_r}{(p/2)} T_e$ และ $\omega_r = \frac{p}{2} \omega_m$ คืออัตราเร็วเชิงมุมโรเตอร์ไฟฟ้า ดังนั้นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า

$$T_e = \frac{3p}{2} L_m \operatorname{Im}(i_{sk} i_{rk}^*) \quad (\text{ข-27})$$

พจน์ $\operatorname{Im}(i_{sk} i_{rk}^*)$ มีรูปแบบหลายรูปแบบ สมการของทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าจึงมีหลายรูปแบบ เช่นเดียวกัน การพิจารณาสมการที่ (ข-4) จะได้ว่า $i_{rk} = \frac{1}{L_r} (\psi_{rk} - L_m i_{sk})$ ต่อมาแทนค่า

ลงในพจน์ $\operatorname{Im}(i_{sk} i_{rk}^*)$ จะได้ว่า $i_{sk} i_{rk}^* = i_{sk} \left(\frac{1}{L_r} (\psi_{rk}^* - L_m i_{sk}^*) \right)$ และการจัดรูปใหม่ จะได้รับ

$$i_{sk} i_{rk}^* = \frac{1}{L_r} \psi_{rk}^* i_{sk} - \frac{L_m}{L_r} |i_{sk}|^2 \quad \text{แต่พจน์ } \frac{L_m}{L_r} |i_{sk}|^2 \text{ เป็นจำนวนจริง นั่นคือ}$$

$$T_e = \frac{3p}{2} L_m \operatorname{Im} \left(\frac{1}{L_r} \psi_{rk}^* i_{sk} \right) \quad \text{การพิจารณาทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในพิกัดหุคนี้}$$

จะได้ว่า

$$T_e = \frac{3p}{2} L_m \operatorname{Im} \left(\frac{1}{L_r} (\psi_{r\alpha} - j\psi_{r\beta})(i_{s\alpha} + ji_{s\beta}) \right)$$

$$T_e = \frac{3p}{2} \frac{L_m}{L_r} \operatorname{Im}(\psi_{r\alpha} i_{s\alpha} + \psi_{r\beta} i_{s\beta} + j(\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}))$$

พจน์ $\psi_{r\alpha}i_{s\alpha} + \psi_{r\beta}i_{s\beta}$ เป็นจำนวนจริง นั่นคือ

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \frac{L_m}{L_r} (\psi_{r\alpha}i_{s\beta} - \psi_{r\beta}i_{s\alpha}) \quad (\text{ข-28})$$

และการหมุนของมอเตอร์และ โทลด์เชิงกลมีพลวัต

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{L_m}{JL_r} \frac{3}{2} \frac{p}{2} (\psi_{r\alpha}i_{s\beta} - \psi_{r\beta}i_{s\alpha}) - \frac{1}{J} T_L \quad (\text{ข-29})$$

สมการที่ (ข-29) คือสมการที่ (3-5) ในบทที่ 3

การแปลงพิกัดแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

สมการที่ (ก-18) ใช้ในการแปลงพิกัดหุคหนึ่งไปเป็นพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ดังนี้

$$\mathbf{f}_{dq} = (f_\alpha + jf_\beta)e^{-j\gamma} \quad \text{และ} \quad \mathbf{f}_{dq} = f_d + jf_q \quad \text{กำหนดให้} \quad \mathbf{u}_s = u_{s\alpha} + ju_{s\beta},$$

$$\mathbf{i}_s = i_{s\alpha} + ji_{s\beta}, \quad \mathbf{i}_r = i_{r\alpha} + ji_{r\beta}, \quad \boldsymbol{\psi}_s = \psi_{s\alpha} + j\psi_{s\beta} \quad \text{และ} \quad \boldsymbol{\psi}_r = \psi_{r\alpha} + j\psi_{r\beta}$$

การจัดรูปใหม่ของสมการที่ (ข-13) และ (ข-14) ที่อยู่ในพิกัดหุคหนึ่งหรือพิกัดสเตเตอร์ จะได้ว่า

$$\frac{d\mathbf{i}_s}{dt} = a_1\mathbf{i}_s + a_2\boldsymbol{\psi}_r - j\omega_r a_3\boldsymbol{\psi}_r + a_4\mathbf{u}_s \quad (\text{ข-30})$$

$$\frac{d\boldsymbol{\psi}_r}{dt} = a_6\mathbf{i}_s + a_5\boldsymbol{\psi}_r + j\omega_r\boldsymbol{\psi}_r \quad (\text{ข-31})$$

การแปลงพิกัดหุคหนึ่งไปเป็นพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ จะได้รับ

$$\frac{d(i_s e^{-j\gamma})}{dt} = i_s \frac{de^{-j\gamma}}{dt} + e^{-j\gamma} \frac{di_s}{dt} \quad \text{และ} \quad \frac{d(i_s e^{-j\gamma})}{dt} = i_s e^{-j\gamma} \frac{d(-j\gamma)}{dt} + e^{-j\gamma} \frac{di_s}{dt}$$

กล่าวคือ

$$\frac{d(i_s e^{-j\gamma})}{dt} = -j i_s e^{-j\gamma} \omega_{\psi r} + e^{-j\gamma} \frac{di_s}{dt} \quad (9-32)$$

โดยที่ γ คือตำแหน่งเชิงมุมของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ และ $\omega_{\psi r}$ คืออัตราเร็วเชิงมุมของสนามแม่เหล็กโรเตอร์ ต่อมานำ $e^{-j\gamma}$ คูณทั้งสองข้างของสมการที่ (9-30) จะได้ว่า

$$e^{-j\gamma} \frac{di_s}{dt} = e^{-j\gamma} (a_1 i_s + a_2 \psi_r - j\omega_r a_3 \psi_r + a_4 u_s)$$

การแทนค่า $e^{-j\gamma} \frac{di_s}{dt}$ จะได้ว่า

$$\frac{d(i_s e^{-j\gamma})}{dt} + j i_s e^{-j\gamma} \omega_{\psi r} = a_1 i_s e^{-j\gamma} + a_2 \psi_r e^{-j\gamma} - j\omega_r a_3 \psi_r e^{-j\gamma} + a_4 u_s e^{-j\gamma}$$

การแทนค่า u_s , i_s , i_r , ψ_s และ ψ_r ลงในสมการ จะได้ว่า

$$\frac{d(i_{sd} + j i_{sq})}{dt} + j(i_{sd} + j i_{sq}) \omega_{\psi r} = a_1 (i_{sd} + j i_{sq}) + a_2 (\psi_{rd} + j \psi_{rq}) - j\omega_r a_3 (\psi_{rd} + j \psi_{rq}) + a_4 (u_{sd} + j u_{sq})$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{sd}}{dt} + j \frac{di_{sq}}{dt} &= a_1 i_{sd} + j a_1 i_{sq} + a_2 \psi_{rd} + j a_2 \psi_{rq} - j \omega_r a_3 \psi_{rd} \\ &\quad + \omega_r a_3 \psi_{rq} + a_4 u_{sd} + j a_4 u_{sq} - j \omega_{\psi r} i_{sd} + i_{sq} \omega_{\psi r} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\frac{di_{sd}}{dt} = a_1 i_{sd} + a_2 \psi_{rd} + \omega_r a_3 \psi_{rq} + a_4 u_{sd} + i_{sq} \omega_{\psi r} \quad (\text{ข-33})$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = a_1 i_{sq} + a_2 \psi_{rq} - \omega_r a_3 \psi_{rd} + a_4 u_{sq} - \omega_{\psi r} i_{sd} \quad (\text{ข-34})$$

และการนำ $e^{-j\gamma}$ คูณทั้งสองข้างของสมการที่ (ข-31) และการจัดรูปสมการใหม่ จะได้ว่า

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = a_6 i_{sd} + a_5 \psi_{rd} - \omega_r \psi_{rq} + \psi_{rq} \omega_{\psi r} \quad (\text{ข-35})$$

$$\frac{d\psi_{rq}}{dt} = a_6 i_{sq} + a_5 \psi_{rq} + \omega_r \psi_{rd} - \psi_{rd} \omega_{\psi r} \quad (\text{ข-36})$$

การพิจารณาทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า $T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \frac{L_m}{L_r} \text{Im}(\psi_r^* i_s)$ และพจน์ $\psi_r^* i_s$ จะได้ว่า

$$e^{-j\gamma} (\psi_r^* i_s) = (\psi_{rd} - j\psi_{rq})(i_{sd} + j i_{sq})$$

$$\text{Im}(\psi_r^* i_s) = \psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd}$$

นั่นคือ $T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \frac{L_m}{L_r} \text{Im}(\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd})$ และการแทนค่า T_e ลงในสมการที่ (ข-29) จะได้

ว่า

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \frac{L_m}{JL_r} (\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd}) - \frac{1}{J} T_L \quad (\text{ข-37})$$

การพิจารณาพิกัดเชิงโคโรนาที่มีมุมด้วยอัตราเร็วเชิงมุม $\omega_{\psi r}$ และมีแกน d ที่อยู่บนเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ จะได้ว่า $\psi_{rq} = 0$ และ ψ_{rd} คือขนาดของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ การจัดรูปสมการที่ (ข-33), (ข-34), (ข-35), (ข-36) และ (ข-37) จะได้รับแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่อยู่ในพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ดังนี้

$$\frac{di_{sd}}{dt} = a_1 i_{sd} + a_2 \psi_{rd} + i_{sq} \omega_{\psi r} + a_4 u_{sd} \quad (\text{ข-38})$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = a_1 i_{sq} - \omega_{\psi r} i_{sd} - \omega_r a_3 \psi_{rd} + a_4 u_{sq} \quad (\text{ข-39})$$

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = a_6 i_{sd} + a_5 \psi_{rd} \quad (\text{ข-40})$$

$$\omega_{\psi r} = \omega_r + \frac{a_6 i_{sq}}{\psi_{rd}} \quad (\text{ข-41})$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \frac{L_m}{JL_r} (\psi_{rd} i_{sq}) - \frac{1}{J} T_L \quad (\text{ข-42})$$

สมการที่ (ข-38), (ข-39), (ข-40), (ข-41) และ (ข-42) คือสมการที่ (3-10), (3-11), (3-12), (3-13) และ (3-14) ในบทที่ 3 ตามลำดับ



ภาคผนวก ก

รายละเอียดของสมการปริภูมิสถานะระบบควบคุมความเร็ววงปิด
ของการควบคุมแบบเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ระบบควบคุมความเร็ววงปิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบเวกเตอร์มีตัวแปรสถานะ Δi_{sd} , Δi_{sq} , $\Delta \psi_{rd}$, $\Delta \omega_m$, $\int_0^t \Delta i_{sd} d\tau$, $\int_0^t \Delta i_{sq} d\tau$, $\int_0^t \Delta \psi_{rd} d\tau$ และ $\int_0^t \Delta \omega_m d\tau$ แผนการควบคุมความเร็วและฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์จะพิจารณาแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่อยู่ในพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ที่แสดงในสมการที่ (3-10) ถึง (3-14) และพิจารณาตัวควบคุมฟีดแบ็กที่แสดงในสมการที่ (3-19) ถึง (3-22) ดังนี้

$$\frac{di_{sd}}{dt} = a_1 i_{sd} + a_2 \psi_{rd} + \omega_{\psi r} i_{sq} + a_4 u_{sd} \quad (3-10)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = a_1 i_{sq} - \omega_{\psi r} i_{sd} - a_3 \omega_r \psi_{rd} + a_4 u_{sq} \quad (3-11)$$

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = a_5 \psi_{rd} + a_6 i_{sd} \quad (3-12)$$

$$\omega_{\psi r} = \omega_r + \frac{a_6 i_{sq}}{\psi_{rd}} \quad (3-13)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{K_T}{J} \psi_{rd} i_{sq} - \frac{1}{J} T_L \quad (3-14)$$

$$i_{sq}^* = K_{P\omega} \Delta \omega_m + K_{I\omega} \int_0^t \Delta \omega_m d\tau \quad (3-19)$$

$$i_{sd}^* = K_{P\psi} \Delta \psi_{rd} + K_{I\psi} \int_0^t \Delta \psi_{rd} d\tau \quad (3-20)$$

$$u_{sq} = u_{sq}^* = K_{Pq} \Delta i_{sq} + K_{Iq} \int_0^t \Delta i_{sq} d\tau \quad (3-21)$$

$$u_{sd} = u_{sd}^* = K_{Pd}\Delta i_{sd} + K_{Id}\int_0^t \Delta i_{sd} d\tau \quad (3-22)$$

โดยที่ $\Delta i_{sd} = i_{sd}^* - i_{sd}$, $\Delta i_{sq} = i_{sq}^* - i_{sq}$, $\Delta \psi_{rd} = \psi_{rd}^* - \psi_{rd}$ และ $\Delta \omega_m = \omega_m^* - \omega_m$ ระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสแบบเวกเตอร์มีสมการปริภูมิสถานะที่ได้รับจากการหาอนุพันธ์ $\Delta \psi_{rd}$

$$\frac{d(\Delta \psi_{rd})}{dt} = \frac{d(\psi_{rd}^* - \psi_{rd})}{dt} = \frac{d\psi_{rd}^*}{dt} - \frac{d\psi_{rd}}{dt} \quad (ก-1)$$

โดยที่ ψ_{rd}^* คือขนาดอ้างอิงของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่เป็นค่าคงที่ และ $\frac{d\psi_{rd}^*}{dt} = 0$

ต่อมาแทนค่า $\frac{d\psi_{rd}}{dt}$ จากสมการที่ (3-12) ลงในสมการที่ (ก-1)

$$\frac{d(\psi_{rd}^* - \psi_{rd})}{dt} = \frac{d\psi_{rd}}{dt} = -a_5\psi_{rd} - a_6i_{sd} \quad (ก-2)$$

การนำพจน์ $a_6i_{sd}^*$ และ $a_5\psi_{rd}^*$ บวกและลบด้านขวามือของสมการที่ (ก-2) จะได้ว่า

$$\frac{d(\psi_{rd}^* - \psi_{rd})}{dt} = a_5(\psi_{rd}^* - \psi_{rd}) + a_6(i_{sd}^* - i_{sd}) - a_5\psi_{rd}^* - a_6i_{sd}^* \quad (ก-3)$$

การแทนค่า i_{sd}^* จากสมการที่ (3-20) ลงในสมการที่ (ก-3) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{d(\psi_{rd}^* - \psi_{rd})}{dt} &= a_5(\psi_{rd}^* - \psi_{rd}) + a_6(i_{sd}^* - i_{sd}) - a_5\psi_{rd}^* - a_6K_{P\psi}(\psi_{rd}^* - \psi_{rd}) \\ &\quad - a_6K_{I\psi}\int_0^t (\psi_{rd}^* - \psi_{rd}) dt \end{aligned}$$

ต่อมาจัดรูปสมการใหม่

$$\begin{aligned} \frac{d(\psi_{rd}^* - \psi_{rd})}{dt} = & a_6(i_{sd}^* - i_{sd}) + (a_5 - a_6 K_{P\psi})(\psi_{rd}^* - \psi_{rd}) - a_5 \psi_{rd}^* \\ & - a_6 K_{I\psi} \int_0^t (\psi_{rd}^* - \psi_{rd}) dt \end{aligned} \quad (ค-4)$$

สมการที่ (ค-4) คือสมการที่ (4-3) ในบทที่ 4 ต่อมาหาอนุพันธ์ของ Δi_{sd}

$$\frac{d(\Delta i_{sd})}{dt} = \frac{d(i_{sd}^* - i_{sd})}{dt} = \frac{di_{sd}^*}{dt} - \frac{di_{sd}}{dt} \quad (ค-5)$$

การหาอนุพันธ์ $\frac{di_{sd}^*}{dt}$ จากสมการที่ (3-20) จะได้ว่า

$$\frac{di_{sd}^*}{dt} = K_{P\psi} \frac{d(\psi_{rd}^* - \psi_{rd})}{dt} + K_{I\psi} (\psi_{rd}^* - \psi_{rd})$$

การแทนค่า $\frac{di_{sd}}{dt}$ จากสมการที่ (3-10) และการแทนค่า $\frac{di_{sd}^*}{dt}$ ลงในสมการที่ (ค-5) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{d(i_{sd}^* - i_{sd})}{dt} = & K_{P\psi} \frac{d(\psi_{rd}^* - \psi_{rd})}{dt} + K_{I\psi} (\psi_{rd}^* - \psi_{rd}) - a_1 i_{sd} - a_2 \psi_{rd} \\ & - i_{sq} \omega_{pr} - a_4 u_{sd} \end{aligned} \quad (ค-6)$$

การนำพจน์ $a_1 i_{sd}^*$ และ $a_2 \psi_{rd}^*$ บวกและลบด้านขวามือของสมการที่ (ค-6) และการแทนค่า u_{sd} จากสมการที่ (3-22) ลงในสมการที่ (ค-6) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{d(i_{sd}^* - i_{sd})}{dt} &= K_{P\psi} \frac{d(\psi_{rd}^* - \psi_{rd})}{dt} + K_{I\psi} (\psi_{rd}^* - \psi_{rd}) + a_1 (i_{sd}^* - i_{sd}) \\ &+ a_2 (\psi_{rd}^* - \psi_{rd}) - a_1 i_{sd}^* - a_2 \psi_{rd}^* - i_{sq} \omega_{\psi r} \\ &- a_4 K_{Pd} (i_{sd}^* - i_{sd}) - a_4 K_{Id} \int_0^t (i_{sd}^* - i_{sd}) dt \end{aligned}$$

(ก-7)

การแทนค่า $\frac{d(\psi_{rd}^* - \psi_{rd})}{dt}$ จากสมการที่ (ก-4) และการแทนค่า i_{sd}^* จากสมการที่ (3-20) ลงในสมการที่ (ก-7) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{d(i_{sd}^* - i_{sd})}{dt} &= K_{P\psi} a_6 (i_{sd}^* - i_{sd}) + (K_{P\psi} a_5 - K_{P\psi} a_6 K_{P\psi}) (\psi_{rd}^* - \psi_{rd}) \\ &- K_{P\psi} a_5 \psi_{rd}^* - K_{P\psi} a_6 K_{I\psi} \int_0^t (\psi_{rd}^* - \psi_{rd}) dt + a_1 (i_{sd}^* - i_{sd}) \\ &+ K_{I\psi} (\psi_{rd}^* - \psi_{rd}) + a_2 (\psi_{rd}^* - \psi_{rd}) - K_{P\psi} a_1 (\psi_{rd}^* - \psi_{rd}) \\ &- K_{I\psi} a_1 \int_0^t (\psi_{rd}^* - \psi_{rd}) dt - a_2 \psi_{rd}^* - a_4 K_{Pd} (i_{sd}^* - i_{sd}) \\ &- i_{sq} \omega_{\psi r} - a_4 K_{Id} \int_0^t (i_{sd}^* - i_{sd}) dt \end{aligned}$$

ต่อมาจัดรูปสมการใหม่

$$\begin{aligned} \frac{d(i_{sd}^* - i_{sd})}{dt} &= (K_{P\psi} a_6 + a_1 - a_4 K_{Pd}) (i_{sd}^* - i_{sd}) - (K_{P\psi} a_5 + a_2) \psi_{rd}^* \\ &+ (K_{P\psi} a_5 + K_{I\psi} + a_2 - K_{P\psi} (K_{P\psi} a_6 + a_1)) (\psi_{rd}^* - \psi_{rd}) \\ &- a_4 K_{Id} \int_0^t (i_{sd}^* - i_{sd}) dt - K_{I\psi} (K_{P\psi} a_6 + a_1) \int_0^t (\psi_{rd}^* - \psi_{rd}) dt \\ &- i_{sq} \omega_{\psi r} \end{aligned}$$

(ก-8)

สมการที่ (ก-8) คือสมการที่ (4-1) ในบทที่ 4 ต่อมาหาอนุพันธ์ของ $\Delta \omega_m$

$$\frac{d(\Delta\omega_m)}{dt} = \frac{d(\omega_m^* - \omega_m)}{dt} = \frac{d\omega_m^*}{dt} - \frac{d\omega_m}{dt} \quad (\text{ก-9})$$

การแทนค่า $\frac{d\omega_m}{dt}$ จากสมการที่ (3-14) ลงในสมการที่ (ก-9) จะได้ว่า

$$\frac{d(\omega_m^* - \omega_m)}{dt} = \dot{\omega}_m^* - \frac{K_T}{J} \psi_{rd} i_{sq} + \frac{T_L}{J} \quad (\text{ก-10})$$

การพิจารณา $\Delta\psi_{rd} = \psi_{rd}^* - \psi_{rd}$ จะได้ว่า $\psi_{rd} = \psi_{rd}^* - \Delta\psi_{rd}$ การพิจารณา $\Delta i_{sq} = i_{sq}^* - i_{sq}$ จะได้ว่า $i_{sq} = i_{sq}^* - \Delta i_{sq}$ และการพิจารณาพจน์ $\psi_{rd} i_{sq}$ จะได้ว่า

$$\psi_{rd} i_{sq} = (\psi_{rd}^* - \Delta\psi_{rd})(i_{sq}^* - \Delta i_{sq}) = \psi_{rd}^* i_{sq}^* - \Delta i_{sq} \psi_{rd}^* - \Delta\psi_{rd} i_{sq}$$

การแทนค่า i_{sq}^* จากสมการที่ (3-19) จะได้ว่า

$$\psi_{rd} i_{sq} = K_{P\omega} \psi_{rd}^* (\omega_m^* - \omega_m) + K_{I\omega} \psi_{rd}^* \int_0^t (\omega_m^* - \omega_m) dt - \Delta i_{sq} \psi_{rd}^* - \Delta\psi_{rd} i_{sq}$$

การแทนค่าพจน์ $\psi_{rd} i_{sq}$ ลงในสมการที่ (ก-10) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{d(\omega_m^* - \omega_m)}{dt} &= \frac{K_T}{J} \psi_{rd}^* (i_{sq}^* - i_{sq}) - \frac{K_T}{J} K_{P\omega} \psi_{rd}^* (\omega_m^* - \omega_m) \\ &\quad - \frac{K_T}{J} K_{I\omega} \psi_{rd}^* \int_0^t (\omega_m^* - \omega_m) dt + \frac{K_T}{J} \Delta\psi_{rd} i_{sq} + \dot{\omega}_m^* + \frac{T_L}{J} \end{aligned} \quad (\text{ก-11})$$

สมการที่ (ก-11) คือสมการที่ (4-4) ในบทที่ 4 ต่อมาหาอนุพันธ์ของ Δi_{sq}

$$\frac{d(\Delta i_{sq})}{dt} = \frac{d(i_{sq}^* - i_{sq})}{dt} = \frac{di_{sq}^*}{dt} - \frac{di_{sq}}{dt} \quad (\text{ค-12})$$

การหาอนุพันธ์ $\frac{di_{sq}^*}{dt}$ จากสมการที่ (3-19) จะได้ว่า

$$\frac{di_{sq}^*}{dt} = K_{P\omega} \frac{d(\omega_m^* - \omega_m)}{dt} + K_{I\omega} (\omega_m^* - \omega_m)$$

การแทนค่า $\frac{di_{sq}}{dt}$ จากสมการที่ (3-11) และการแทนค่า $\frac{di_{sq}^*}{dt}$ ลงในสมการที่ (ค-12) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{d(i_{sq}^* - i_{sq})}{dt} &= K_{P\omega} \frac{d(\omega_m^* - \omega_m)}{dt} + K_{I\omega} (\omega_m^* - \omega_m) - a_1 i_{sq} + i_{sd} \omega_{\psi r} \\ &\quad + a_3 \omega_r \psi_{rd} - a_4 u_{sq} \end{aligned} \quad (\text{ค-13})$$

การนำพจน์ $a_1 i_{sq}^*$ บวกและลบด้านขวามือของสมการที่ (ค-13) การแทนค่า u_{sq} จากสมการที่ (3-21) และการแทนค่า $\frac{d(\omega_m^* - \omega_m)}{dt}$ จากสมการที่ (ค-11) ลงในสมการที่ (ค-13) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{d(i_{sq}^* - i_{sq})}{dt} &= K_{P\omega} \frac{K_T}{J} \psi_{rd}^* (i_{sq}^* - i_{sq}) - K_{P\omega} \frac{K_T}{J} K_{P\omega} \psi_{rd}^* (\omega_m^* - \omega_m) \\ &\quad - K_{P\omega} \frac{K_T}{J} K_{I\omega} \psi_{rd}^* \int_0^t (\omega_m^* - \omega_m) dt + K_{P\omega} \frac{K_T}{J} \Delta \psi_{rd} i_{sq} + K_{P\omega} \dot{\omega}_m^* \\ &\quad + K_{P\omega} \frac{T_L}{J} + K_{I\omega} (\omega_m^* - \omega_m) + a_1 (i_{sq}^* - i_{sq}) + i_{sd} \omega_{\psi r} + a_3 \omega_r \psi_{rd} \\ &\quad - a_4 K_{Pq} (i_{sq}^* - i_{sq}) - a_4 K_{Iq} \int_0^t (i_{sq}^* - i_{sq}) dt - a_1 i_{sq}^* \end{aligned} \quad (\text{ค-14})$$

การพิจารณาพจน์ $\omega_r \psi_{rd}$ จะได้ว่า $\omega_r \psi_{rd} = \frac{p}{2} \omega_m \psi_{rd}$ และการพิจารณา

$\Delta \psi_{rd} = \psi_{rd}^* - \psi_{rd}$ จะได้ว่า $\psi_{rd} = \psi_{rd}^* - \Delta \psi_{rd}$ นั่นคือ

$$\omega_r \psi_{rd} = \frac{p}{2} \omega_m \psi_{rd}^* - \frac{p}{2} \omega_m \Delta \psi_{rd}$$

การนำพจน์ $\frac{p}{2} \omega_m \psi_{rd}^*$ บวกและลบด้านขวามือของสมการและการจัดรูปสมการใหม่ จะได้ว่า

$$\omega_r \psi_{rd} = -\frac{p}{2} \psi_{rd}^* (\omega_m^* - \omega_m) - \omega_r \Delta \psi_{rd} + \frac{p}{2} \omega_m \psi_{rd}^*$$

การแทนค่า $\omega_r \psi_{rd}$ ที่ได้รับและการแทนค่า i_{sq}^* จากสมการที่ (3-19) ลงในสมการที่ (ค-14) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{d(i_{sq}^* - i_{sq})}{dt} = & K_{P\omega} \frac{K_T}{J} \psi_{rd}^* (i_{sq}^* - i_{sq}) - K_{P\omega} \frac{K_T}{J} K_{P\omega} \psi_{rd}^* (\omega_m^* - \omega_m) \\ & - K_{P\omega} \frac{K_T}{J} K_{I\omega} \psi_{rd}^* \int_0^t (\omega_m^* - \omega_m) dt + K_{P\omega} \frac{K_T}{J} \Delta \psi_{rd} i_{sq} \\ & + K_{P\omega} \dot{\omega}_m^* + K_{P\omega} \frac{T_L}{J} + K_{I\omega} (\omega_m^* - \omega_m) + a_1 (i_{sq}^* - i_{sq}) \\ & + i_{sd} \omega_{\psi r} - a_3 \frac{p}{2} \psi_{rd}^* (\omega_m^* - \omega_m) - a_3 \omega_r \Delta \psi_{rd} + a_3 \frac{p}{2} \omega_m \psi_{rd}^* \\ & - a_4 K_{Pq} (i_{sq}^* - i_{sq}) - a_4 K_{Iq} \int_0^t (i_{sq}^* - i_{sq}) dt \\ & - a_1 K_{P\omega} (\omega_m^* - \omega_m) - a_1 K_{I\omega} \int_0^t (\omega_m^* - \omega_m) dt \end{aligned}$$

การจัดรูปสมการใหม่ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
\frac{d(i_{sq}^* - i_{sq})}{dt} = & \left(a_1 - a_4 K_{Pq} + \frac{K_T}{J} K_{P\omega} \Psi_{rd}^* \right) (i_{sq}^* - i_{sq}) \\
& + \left(K_{I\omega} - a_1 K_{P\omega} - a_3 \frac{p}{2} \Psi_{rd}^* - \frac{K_T}{J} K_{P\omega}^2 \Psi_{rd}^* \right) (\omega_m^* - \omega_m) \\
& - a_4 K_{Iq} \int_0^t (i_{sq}^* - i_{sq}) dt + K_{P\omega} \dot{\omega}_m^* + \frac{T_L}{J} K_{P\omega} \\
& - \left(a_1 K_{I\omega} + \frac{K_T}{J} K_{P\omega} K_{I\omega} \Psi_{rd}^* \right) \int_0^t (\omega_m^* - \omega_m) dt \\
& + \left(\frac{K_T}{J} K_{P\omega} i_{sq} - a_3 \omega_r \right) (\Psi_{rd}^* - \Psi_{rd}) + \omega_{\Psi r} i_{sd} + a_3 \frac{p}{2} \Psi_{rd}^* \omega_m^*
\end{aligned}$$

(ค-15)

สมการที่ (ค-15) คือสมการที่ (4-2) ในบทที่ 4



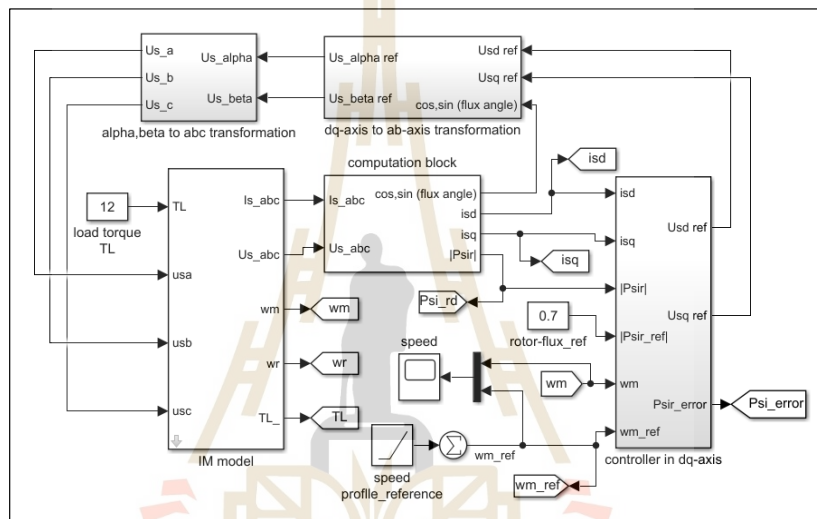


ภาคผนวก ง

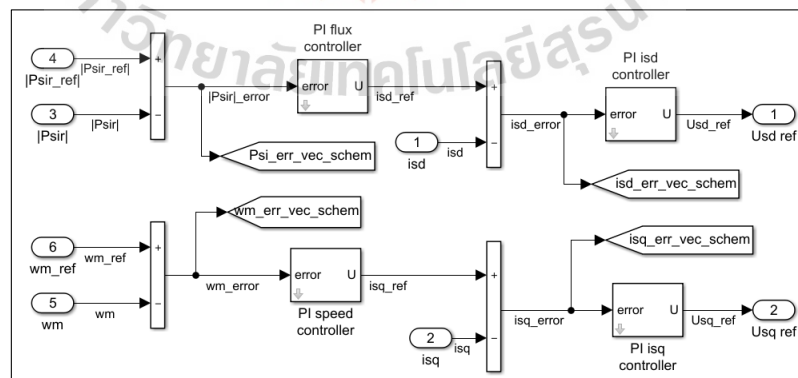
ชุดบล็อกที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์โปรแกรม MATLAB/Simulink

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในการจำลองสถานการณ์ในหัวข้อที่ 4.3 “การจำลองสถานการณ์และการตรวจสอบสมการปฏิภูมิสถานะของระบบควบคุม” ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์แผนการควบคุมเวกเตอร์โดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำและผลการจำลองสถานการณ์สมการปฏิภูมิสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิด จะมีชุดบล็อกที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/ Simulink ดังต่อไปนี้

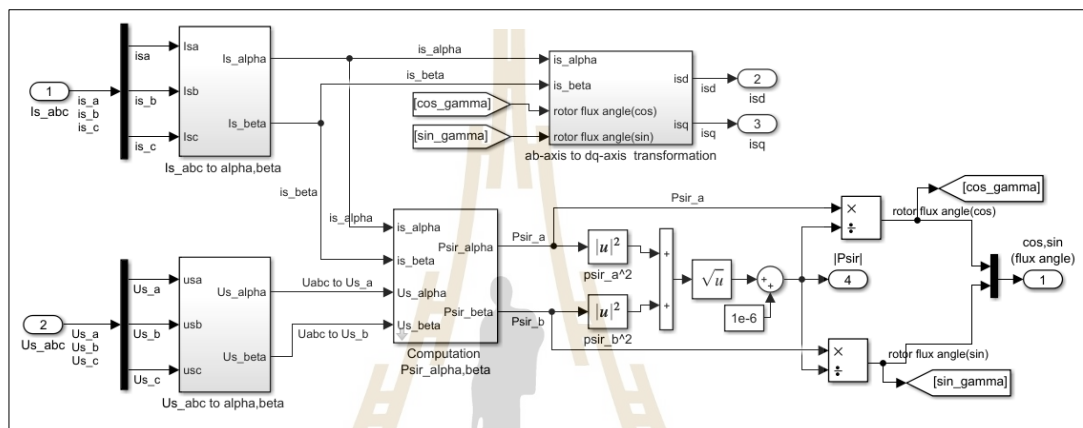


รูปที่ ๓.1 แผนการควบคุมแบบเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก



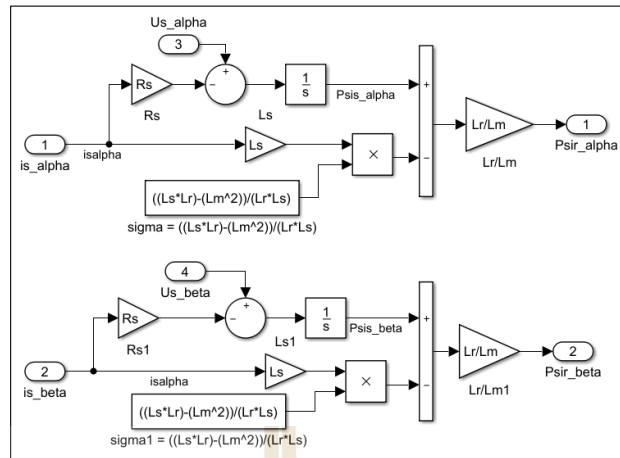
รูปที่ ๓.2 ชุดบล็อกที่อยู่ภายในบล็อก “controller in dq-axis” ของแผนการควบคุมแบบเวกเตอร์จากรูปที่ ๓.1

โดยที่ รูปที่ ง.2 คือชุดบล็อกของตัวควบคุมพีไอสี่ตัวของระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ ค่าความผิดพลาด ที่ได้จากแผนการควบคุมแบบเวกเตอร์ทั้งสี่ค่าจะนำไปเปรียบเทียบกับ ค่าความผิดพลาดที่เป็นตัวแปรสถานะของสมการปริภูมิสถานะ นั่นคือ ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์แกนตรง (“isd_err_vec_schem”) ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์แกนขวาง (“isq_err_vec_schem”) ความผิดพลาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ (“Psi_err_vec_schem”) และความผิดพลาดของอัตราเร็วเชิงมุมของโรเตอร์เชิงกล (“wm_err_vec_schem”)



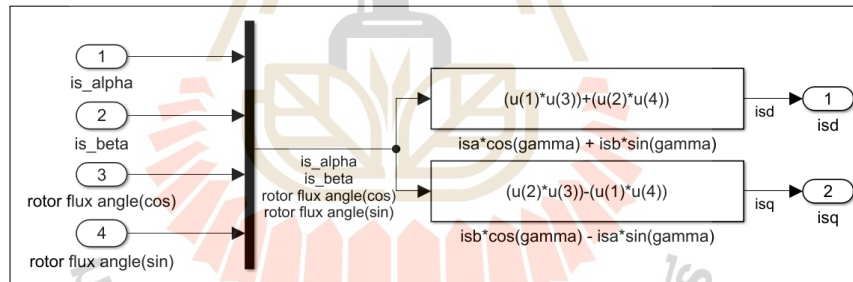
รูปที่ ง.3 ชุดบล็อกที่อยู่ภายในบล็อก “computation block” ของแผนการควบคุมแบบเวกเตอร์จากรูปที่ ง.1

โดยที่ รูปที่ ง.3 คือ ชุดบล็อกที่ใช้ในการคำนวณค่าโคไซน์และค่าไซน์ของตำแหน่งเชิงมุมของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่ใช้ในการแปลงพิกัด (“cos_gamma” และ “sin_gamma”) กำหนดขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ Ψ_{rd} (“|Psiir|”) และกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์แกนตรง i_{sd} และแกนขวาง i_{sq} (“isd” และ “isq”)



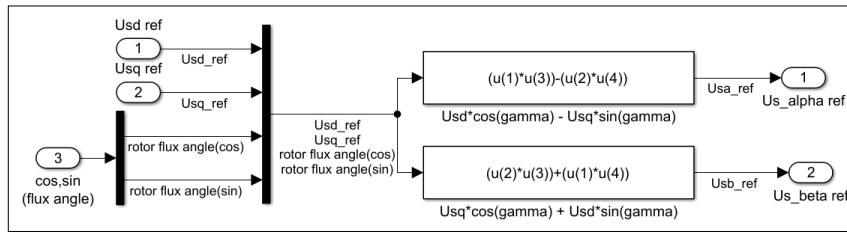
รูปที่ ๓.๔ ชุดบล็อกที่อยู่ภายในบล็อก “Computation Psir_alpha,beta” จากบล็อกในรูปที่ ๓.๓

โดยที่ รูปที่ ๓.๔ คือ ชุดบล็อกที่ใช้ในการคำนวณหาฟลักแม่เหล็กโรเตอร์ในแกน $\alpha\beta$ (“Psir_alpha” และ “Psir_beta”) จากกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์พิกัดหยุดนิ่ง $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ (“is_alpha” และ “is_beta”)



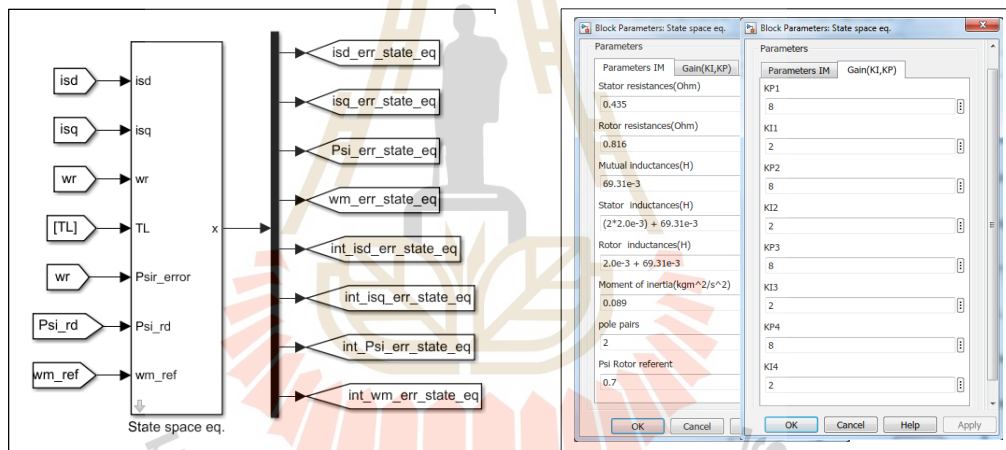
รูปที่ ๓.๕ ชุดบล็อกที่อยู่ภายในบล็อก “ab-axis to dq-axis transformation” จากบล็อกในรูปที่ ๓.๓

โดยที่ รูปที่ ๓.๕ คือ ชุดบล็อกที่ใช้ในการแปลงพิกัดกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์จากพิกัดหยุดนิ่ง $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ ให้อยู่ในพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ i_{sd}, i_{sq} (“isd” และ “isq”)



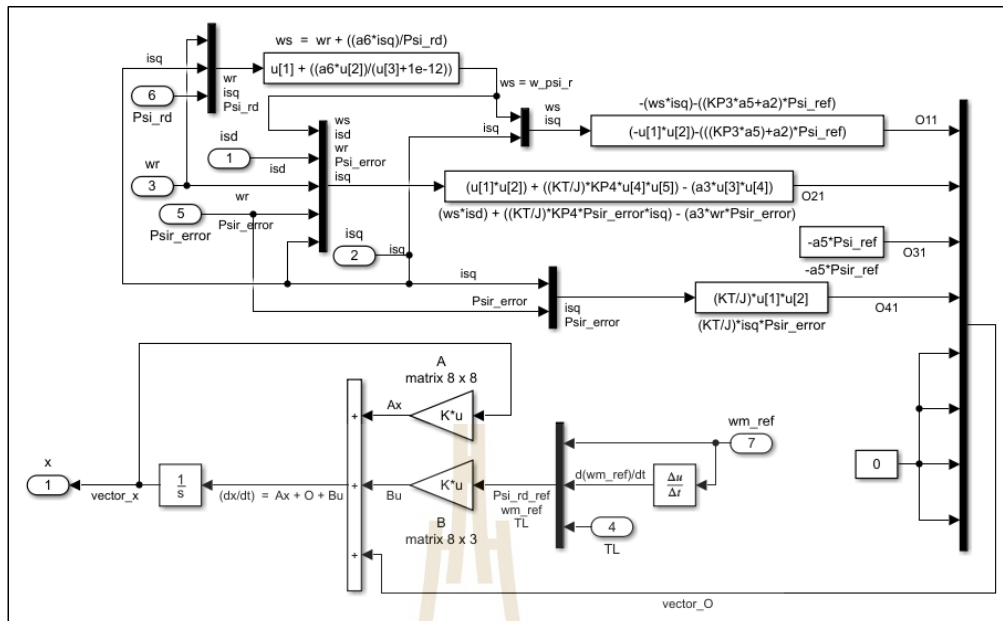
รูปที่ ๓.6 ชุดบล็อกที่อยู่ภายในบล็อก “dq-axis to ab-axis transformation” ของแผนการควบคุมแบบเวกเตอร์จากรูปที่ ๓.1

โดยที่ รูปที่ ๓.6 คือ ชุดบล็อกที่ใช้ในการแปลงพิกัดแรงดันสเตเตอร์อ้างอิง u_{sd}^* , u_{sq}^* (“Usd_ref” และ “Usq_ref”) ให้เป็นแรงดันเฟสสเตเตอร์อ้างอิง $u_{s\alpha}^*$, $u_{s\beta}^*$ (“Us_alpha_ref” และ “Us_beta_ref”)



รูปที่ ๓.7 บล็อกสมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมวงปิด “State space eq.”

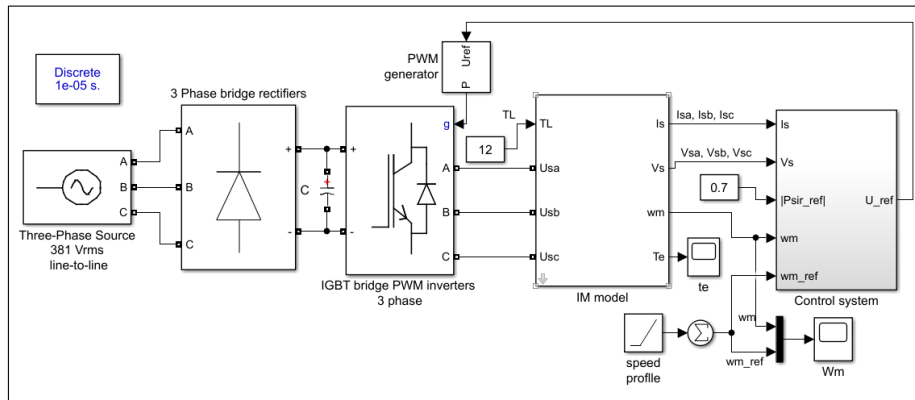
รูปที่ ๓.7 แสดง บล็อก “State space eq.” เป็นบล็อกที่ใช้คำนวณตัวแปรสถานะทั้งแปดตัว นั่นคือ ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์แกนตรง (“isd_err_state_eq”) ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์แกน ขวาง (“isq_err_state_eq”) ความผิดพลาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ (“Psi_err_state_eq”) และ ความผิดพลาดของอัตราเร็วเชิงมุมของโรเตอร์เชิงกล (“wm_err_state_eq”) ซึ่งค่าความผิดพลาดเหล่านี้ คือ ตัวแปรสถานะสี่ตัวแรกของสมการปริภูมิสถานะ ตัวแปรสถานะ อีกสี่ตัวคืออินทิเกรตความผิดพลาดอีกสี่ตัว (“int_isd_err_state_eq”, “int_isq_err_state_eq”, “int_Psi_err_state_eq”, “int_wm_err_state_eq”) โดยบล็อกดังกล่าวนี้ ต้องมีการป้อนค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำและค่าเกนของตัวควบคุมพีไอลงไปด้วย



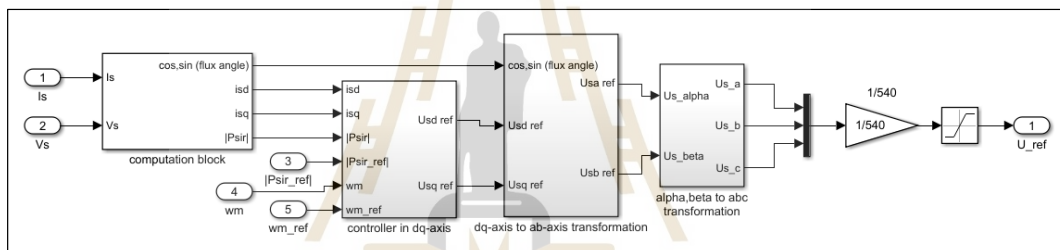
รูปที่ ๓.๘ ชุดบล็อกที่อยู่ภายในบล็อก “State space eq.” จากบล็อกในรูปที่ ๓.๗

โดย ชุดบล็อกในรูปที่ ๓.๘ ได้สร้างมาจากสมการปริภูมิสถานะ $\dot{x} = Ax + \Phi + Bu$ ที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ (4-5) ในบทที่ 4

ในการจำลองสถานการณ์ในหัวข้อที่ 5.1 “ผลการจำลองสถานการณ์แผนการควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ค่าแกนของตัวควบคุมพีไอจากการคำนวณ” ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์แผนการควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ค่าแกนของตัวควบคุมพีไอจากการคำนวณหรือ ค่าแกนชุดที่ 2 โดยชุดบล็อกที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์โดยส่วนใหญ่จะใช้ชุดบล็อกเหมือนกันกับชุดบล็อกที่ใช้ในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งชุดบล็อกที่เพิ่มเติม คือ บล็อก “Threere-Phase Source” ที่เป็นบล็อกแหล่งจ่ายแรงดันเอชีสามเฟส บล็อก “3 Phase bridge rectifiers” ที่เป็นบล็อกที่ใช้ในการแปลงแรงดันเอชีสามเฟสเป็นแรงดันดีซี และบล็อก “IGBT bridge PWM inverters 3 phase” ที่เป็นบล็อกที่ใช้แปลงแรงดันดีซีไปเป็นแรงดันเอชีสามเฟสซึ่งเป็นอินเวอร์เตอร์แบบ 6 step inverter ที่ใช้สัญญาณ PWM ในการควบคุมการสวิตช์ IGBT 6 ตัว โดยบล็อกทั้งสามบล็อกจะเป็นบล็อกที่อยู่ใน เมนู Library Browser ของโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งชุดบล็อกของแผนการควบคุมที่ใช้งาน มีดังต่อไปนี้



รูปที่ ๓.๙ แผนการควบคุมแบบเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้อินเวอร์เตอร์ในการจ่ายแรงดันสามเฟส



รูปที่ ๓.๑๐ ชุดบล็อกที่อยู่ภายในบล็อก “Control system” จากแผนการควบคุมแบบเวกเตอร์รูปที่ ๓.๙





ภาคผนวก จ

ชุดคำสั่งเชิงสัญลักษณ์ที่ใช้ในการหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอ
โดยใช้โปรแกรม MATLAB Symbolic

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

% กำหนดค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$R_s = 0.435;$ % stator resistance

$L_s = (2 \cdot 2.0e-3) + 69.31e-3;$ % stator inductance

$R_r = 0.816;$ % rotor resistance

$L_r = 2.0e-3 + 69.31e-3;$ % rotor inductance

$L_m = 69.31e-3;$ % mutual inductance

$p = 2;$ % pole pair

$J = 0.089;$ % moment of inertia

$\Phi_r = 0.7;$ % rotor flux

% กำหนดตัวแปรภายในเมตริกซ์ A

$A = \text{sym}([a_{11} \ 0 \ a_{13} \ 0 \ a_{15} \ 0 \ a_{17} \ 0; \ 0 \ a_{22} \ 0 \ a_{24} \ 0 \ a_{26} \ 0 \ a_{28}; \ a_{31} \ 0 \ a_{33} \ 0 \ 0 \ 0 \ a_{37} \ 0; \ 0 \ a_{42} \ 0 \ a_{44} \ 0 \ 0 \ 0 \ a_{48}; \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]);$

$x = \text{sym}('x');$ % กำหนดตัวแปร x

% กำหนดตัวแปรที่อยู่ภายในสมการแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$a_1 = \text{sym}('-(R_s \cdot L_r^2 + R_r \cdot L_m^2) / (L_r \cdot ((L_r \cdot L_s) - L_m^2))');$

$a_2 = \text{sym}('((R_r \cdot L_m) / (L_r \cdot ((L_r \cdot L_s) - L_m^2)))');$

$a_3 = \text{sym}('(L_m / ((L_r \cdot L_s) - L_m^2))');$

$a_4 = \text{sym}('(L_r / ((L_r \cdot L_s) - L_m^2))');$

$a_5 = \text{sym}('-(R_r / L_r)');$

$a_6 = \text{sym}('(R_r \cdot (L_m / L_r))');$

$KT = \text{sym}('(1.5 \cdot p) \cdot (L_m / L_r)');$

$a_7 = \text{sym}('(KT \cdot \Phi_r) / J');$

$a_8 = \text{sym}('a_3 \cdot p \cdot \Phi_r');$

```

% กำหนดตัวแปรที่ใช้แทนค่าแกนพีและค่าแกนไอของตัวควบคุม  $i_{sd}$ 
KP1 = sym('KP1');
KI1 = sym('KI1');
% กำหนดตัวแปรที่ใช้แทนค่าแกนพีและค่าแกนไอของตัวควบคุม  $i_{sq}$ 
KP2 = sym('KP2');
KI2 = sym('KI2');
% กำหนดตัวแปรที่ใช้แทนค่าแกนพีและค่าแกนไอของตัวควบคุม  $\psi_{rd}$ 
KP3 = sym('KP3');
KI3 = sym('KI3');
% กำหนดตัวแปรที่ใช้แทนค่าแกนพีและค่าแกนไอของตัวควบคุม  $\omega_m$ 
KP4 = sym('KP4');
KI4 = sym('KI4');

% กำหนดตัวแปรที่อยู่ภายในสมาชิกแต่ละตัวของเมทริกซ์ A
a11 = sym('((KP3*a6)+a1-(a4*KP1)');
a13 = sym('((KP3*a5)+KI3+a2-(((KP3*a6)+a1)*KP3)');
a15 = sym('-(a4*KI1)');
a17 = sym('-(KI3*((KP3*a6)+a1)')');
a22 = sym('a1-(a4*KP2)+(a7*KP4)');
a24 = sym('KI4-(a1*KP4)-a8-(a7*(KP4^2))');
a26 = sym('a4*KI2');
a28 = sym('-(a1*KI4)+(a7*KP4*KI4)');
a31 = sym('a6');
a33 = sym('a5-(a6*KP3)');
a37 = sym('a6*KI3');
a42 = sym('a7');
a44 = sym('a7*KP4');
a48 = sym('a7*KI4');

```

```

% หาสมการคุณลักษณะแล้วเก็บไว้ในตัวแปร poly_x
poly_x = det(x*eye(size(A)) - A);

% แยกสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะแล้วเก็บไว้ในตัวแปร coef
[coef, x_var] = coeffs(collect(eval(poly_x)), x);

% สร้างสมการคุณลักษณะโดยใช้ค่าไอเกนที่ต้องการที่ได้กำหนดไว้แล้ว
char_poly = poly([-2 -4 -6 -8 -50 -100 -1000 -1200]);

% กำหนดให้พหุนามคุณลักษณะทั้งสองมีสัมประสิทธิ์เท่ากันเพื่อจะใช้ในการเทียบสัมประสิทธิ์
eq1 = vpa(collect(expand(vpa(coef(2), 8))), 8) == char_poly(2);
eq2 = vpa(collect(expand(vpa(coef(3), 8))), 8) == char_poly(3);
eq3 = vpa(collect(expand(vpa(coef(4), 8))), 8) == char_poly(4);
eq4 = vpa(collect(expand(vpa(coef(5), 8))), 8) == char_poly(5);
eq5 = vpa(collect(expand(vpa(coef(6), 8))), 8) == char_poly(6);
eq6 = vpa(collect(expand(vpa(coef(7), 8))), 8) == char_poly(7);
eq7 = vpa(collect(expand(vpa(coef(8), 8))), 8) == char_poly(8);
eq8 = vpa(collect(expand(vpa(coef(9), 8))), 8) == char_poly(9);

% หาคำตอบของสมการไม่เชิงเส้นทั้ง 8 สมการ
S = vpasolve(eq1, eq2, eq3, eq4, eq5, eq6, eq7, eq8);

% แสดงค่าเกนของตัวควบคุมพีไอที่คำนวณได้ทั้ง 8 ค่า
KI1 = S.KI1;
KI2 = S.KI2;
KI3 = S.KI3;
KI4 = S.KI4;
KP1 = S.KP1;
KP2 = S.KP2;
KP3 = S.KP3;

```

KP4 = S.KP4;

```
fprintf('KP1 = %f\n', double(KP1))
fprintf('KI1 = %f\n', double(KI1))
fprintf('KP2 = %f\n', double(KP2))
fprintf('KI2 = %f\n', double(KI2))
fprintf('KP3 = %f\n', double(KP3))
fprintf('KI3 = %f\n', double(KI3))
fprintf('KP4 = %f\n', double(KP4))
fprintf('KI4 = %f\n', double(KI4))
```

การสร้างระบบสมการเชิงสัญลักษณ์จะเริ่มต้นจากการกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลเป็นตัวเลข จากนั้นคำสั่ง `sym` จะสร้างตัวแปร `x` (ใช้แทน λ ในบทที่ 4) ของค่าไอเกน และสร้างเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ **A** ที่มีมิติ 8×8 และมีสมาชิก 14 ตัวที่เป็นตัวแปร a_{11} , a_{13} , a_{15} , a_{17} , a_{22} , a_{24} , a_{26} , a_{28} , a_{31} , a_{33} , a_{37} , a_{42} , a_{44} และ a_{48} ต่อมาคำสั่ง `sym` จะสร้างพจน์ 9 พจน์ที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์และโหลด และสร้างตัวแปร 8 ตัวของค่าเกนพี 4 ค่า และค่าเกนไอ 4 ค่าที่ไม่ทราบค่า KP1 ถึง KP4 และ KI1 ถึง KI4 (หรือ K_{Pd} , K_{Pq} , $K_{P\psi}$, $K_{P\omega}$, K_{Id} , K_{Iq} , $K_{I\psi}$ และ $K_{I\omega}$ ตามลำดับ)

จากนั้นคำสั่ง `sym` จะกำหนดพจน์ของตัวแปร a_{11} , a_{13} , a_{15} , a_{17} , a_{22} , a_{24} , a_{26} , a_{28} , a_{31} , a_{33} , a_{37} , a_{42} , a_{44} และ a_{48} ให้เป็นพหุนาม โดยที่ภายในพหุนามจะมีตัวแปรบางตัวคือพจน์ของค่าพารามิเตอร์เท่านั้น และตัวแปรบางตัวคือพจน์ที่มีค่าพารามิเตอร์และค่าเกนของตัวควบคุมที่ไม่ทราบค่า ต่อมาคำสั่ง `det(λ *I - A)` (หรือ `det(x*eye(size(A)) - A)`;) จะสร้างพหุนามคุณลักษณะของเมตริกซ์ **A** แต่พหุนามคุณลักษณะที่ได้รับมีพจน์ (term) ของตัวแปร `x` ที่มีเลขชี้กำลังหรือดีกรีเท่ากันหลายพจน์ในลักษณะกระจายที่แยกออกจากกัน และไม่รวมเป็นพจน์เดียว จากนั้นคำสั่ง `eval` จะแทนค่าตัวเลขลงในค่าพารามิเตอร์ คำนวณพจน์ของค่าพารามิเตอร์ให้เป็นตัวเลขเดียว และคำนวณพจน์ที่มีค่าพารามิเตอร์และค่าเกนที่ไม่ทราบค่าให้เป็นรูปแบบที่สั้นที่สุด ต่อมาคำสั่ง `collect` จะนำพจน์ของตัวแปร `x` ที่มีเลขชี้กำลังเท่ากันหลายพจน์ มารวมเข้าด้วยกันให้เป็นพจน์เดียว

จากนั้นคำสั่ง `coeffs` จะแยกสัมประสิทธิ์ซึ่งจะเก็บไว้ในตัวแปร `coef` ออกจากพหุนามคุณลักษณะของเมตริกซ์ **A** ($g_7, g_6, g_5, g_4, g_3, g_2, g_1$ และ g_0 ในสมการที่ (4-7)) ต่อมาคำสั่ง

poly จะใช้ค่าไอเกนที่ต้องการ ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7$ และ λ_8 ในสมการที่ (4-8)) สร้างสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการ ($h_7, h_6, h_5, h_4, h_3, h_2, h_1$ และ h_0 ในสมการที่ (4-8)) จากนั้นคำสั่ง vpa, expand และ collect จะคำนวณสัมประสิทธิ์ให้เป็นรูปแบบที่สั้นที่สุดและจำกัดจำนวนตัวเลขโดดที่อยู่หลังจุดทศนิยม ต่อมำหนดให้พหุนามคุณลักษณะทั้งสองมีสัมประสิทธิ์เท่ากัน นั่นคือ $eq_1: g_7 = h_7$, $eq_2: g_6 = h_6$, $eq_3: g_5 = h_5$, $eq_4: g_4 = h_4$, $eq_5: g_3 = h_3$, $eq_6: g_2 = h_2$, $eq_7: g_1 = h_1$ และ $eq_8: g_0 = h_0$ สมการพหุนาม 8 สมการที่เกิดขึ้นพร้อมกันนี้คือระบบสมการพหุนามที่มี 8 สมการและ 8 ตัวแปร จากนั้นคำสั่ง vpsolve(eq₁, eq₂, eq₃, eq₄, eq₅, eq₆, eq₇, eq₈) จะใช้วิธีการเชิงเลขแบบวนซ้ำคำนวณหาคำตอบของระบบสมการ





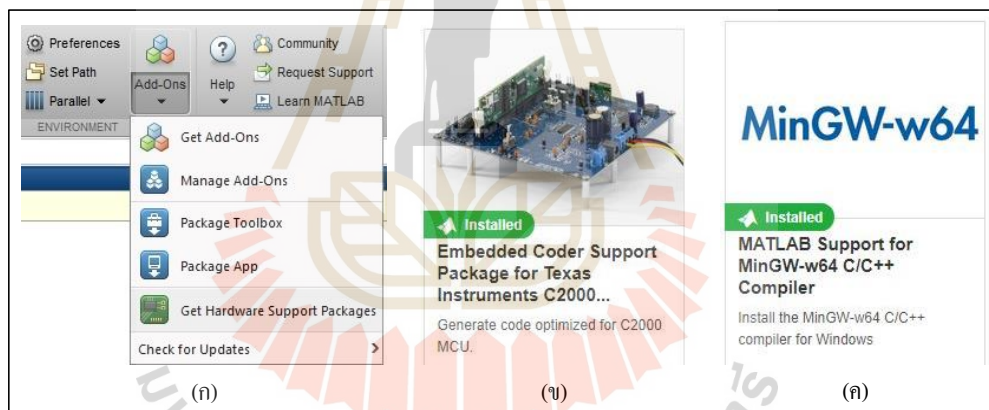
ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

เทคนิคการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขั้นตอนการตั้งค่าโปรแกรม

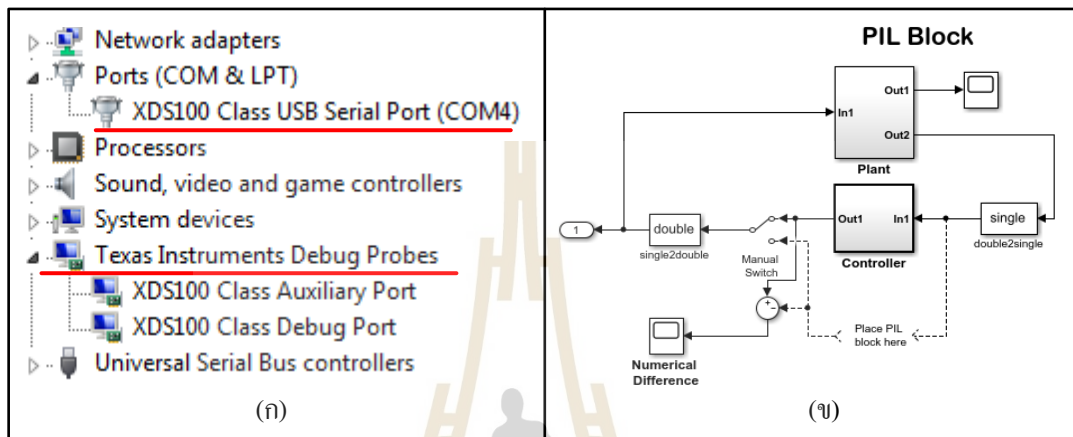
เริ่มต้นให้ทำการลงชื่อเข้าใช้งาน (Sign in) โปรแกรม MATLAB R2018a เพื่อติดตั้งซอร์ฟแวร์ส่วนเสริมที่เกี่ยวข้องซึ่งมี 2 ส่วนนั่นคือ ส่วนแรกเป็นซอร์ฟแวร์สนับสนุนการสร้างโปรแกรมภาษา C เพื่อใช้กับบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit และสนับสนุนการทำงานร่วมกันระหว่างบอร์ด TMS320F28335 กับโปรแกรม MATLAB/Simulink และส่วนที่สองเป็นซอร์ฟแวร์สนับสนุนการสร้างโปรแกรมภาษา C/C++ จากชุดบล็อกหรือแบบจำลองภายในโปรแกรม MATLAB/Simulink ในการติดตั้งซอร์ฟแวร์ส่วนเสริมส่วนแรกสามารถเข้าถึงได้จากเมนู Add – Ons --> Get Hardware Support Packages ที่แสดงในรูปที่ ฅ1(ก) แล้วเลือกซอร์ฟแวร์ส่วนเสริม Embedded Coder Support Package for Texas Instruments C2000 Processors ที่แสดงในรูปที่ ฅ.1(ข)



รูปที่ ฅ.1 เมนู Add – Ons ที่ใช้เข้าถึงซอร์ฟแวร์ส่วนเสริม และซอร์ฟแวร์ส่วนเสริมที่ใช้งาน

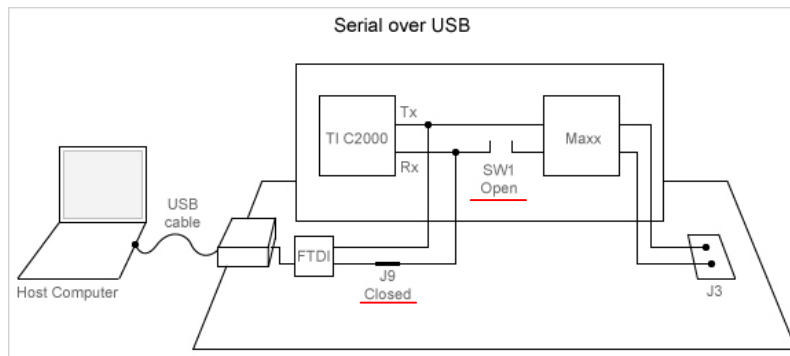
ซอร์ฟแวร์ส่วนเสริม Embedded Coder Support Package for Texas Instruments C2000 Processors จะมีการแนะนำให้ทำการติดตั้งโปรแกรมภายนอกซึ่งเป็น โปรแกรมที่ต้องใช้งานร่วมกันกับโปรแกรม MATLAB โดยโปรแกรมภายนอกเหล่านี้คือ โปรแกรม TI controlSUITE , TI Code Composer Studio และ TI C2000Ware โดยที่ ภายในเมนูติดตั้งได้แนะนำรุ่นของโปรแกรมและมีการเชื่อมโยงไปยังหน้าเว็บดาวน์โหลดของโปรแกรมดังกล่าวไว้แล้ว การติดตั้งซอร์ฟแวร์ส่วนเสริมส่วนที่สองสามารถเข้าถึงได้จากเมนู Add – Ons --> Get Add – Ons แล้วเลือกซอร์ฟแวร์ส่วนเสริม MATLAB Support for MinGW-w64 C/C++ Compiler ที่แสดงในรูปที่ ฅ.1 (ค)

หลังจากที่ติดตั้งซอฟต์แวร์ส่วนเสริมให้ทำการตรวจสอบการติดตั้งไดรเวอร์ของอุปกรณ์ โดยทำการเชื่อมต่อบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit กับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต USB แล้วทำการตรวจสอบ Ports (COM & LPT) และ TexasInstruments Debug Probes ที่แสดงในรูปแบบที่ ฅ.2(ก) โดยเข้าถึงได้จาก Computer --> Control Panel --> Device Manager



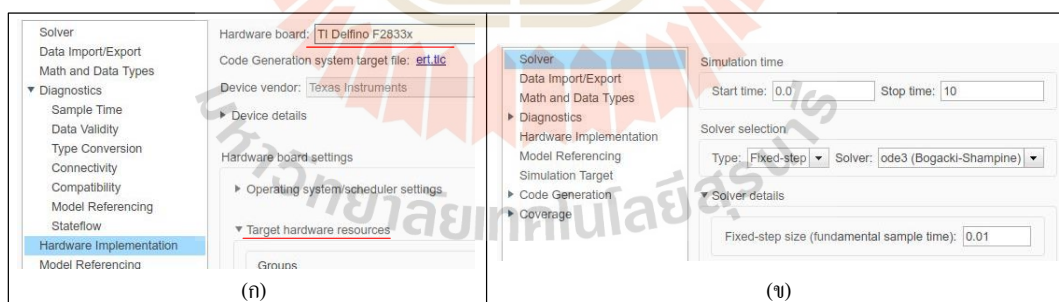
รูปที่ ฅ.2 ไดรเวอร์ของบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit และชุดบล็อก ตัวอย่าง c2000_pil_block

ซอฟต์แวร์ส่วนเสริม Embedded Coder Support Package for Texas Instruments C2000 Processors จะให้ตัวอย่าง (Demo) ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานร่วมกันระหว่างบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit และโปรแกรม MATLAB/Simulink ที่หลากหลาย ซึ่งตัวอย่างที่มีความเกี่ยวข้องกับส่วนของการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ คือ ตัวอย่าง Code Verification and Validation with PIL ที่มีชุดบล็อกที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ คือ ชุดบล็อก c2000_pil_block ที่แสดงในรูปแบบที่ ฅ.2(ข) ภายในตัวอย่าง Code Verification and Validation with PIL ได้แสดงรายละเอียดและคำแนะนำในการจำลองสถานการณ์ รวมถึงวิธีการเชื่อมต่อบอร์ดเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต USB โดยวิธีการสื่อสารแบบอนุกรม (serial communication) ที่จะนำมาใช้งาน สามารถดูรายละเอียดได้ที่เมนู Set Up Serial Communication with Target Hardware โดยคำแนะนำในส่วนของบอร์ด DSP รุ่น TMS320F28335 Experimenter Kit จะต้องทำการ OFF สวิตช์ 1 (SW1) ที่อยู่บนการ์ดควบคุม และทำการเชื่อมต่อขา J9 (Closed) เข้าไว้ด้วยกัน โดยมีโครงสร้างการเชื่อมต่อที่แสดงในรูปแบบที่ ฅ.3



รูปที่ ๓.3 โครงสร้างการเชื่อมต่อโดยวิธีการสื่อสารแบบอนุกรมผ่านทางพอร์ต USB

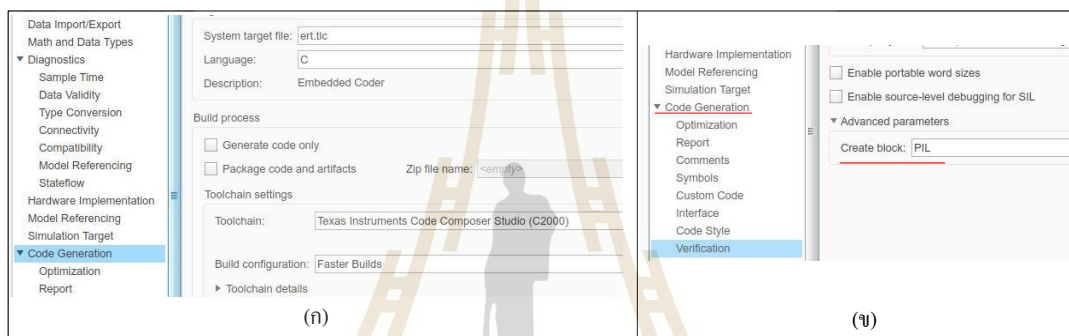
การเตรียมการตั้งค่าที่เกี่ยวข้องในการจำลองสถานการณ์จากบล็อกตัวอย่าง c2000_pil_block มีการตั้งค่าที่เกี่ยวข้อง ดังนี้ เริ่มต้นให้เข้าไปที่เมนู Simulation --> Model Configuration Parameters เลือกเมนู Diagnostics ที่เป็นเมนูหลักจากนั้นเลือกเมนู Hardware Implementation ที่เป็นเมนูย่อย ให้ทำการเลือกบอร์ดที่ต้องการเชื่อมต่อ จากเมนู Hardware board โดยเลือก TI Delfino F2833x ที่แสดงในรูปที่ ๓.4(ก) และเลือก Target hardware resources --> External mode จากนั้นทำการกำหนด Serial port โดยสามารถตรวจสอบ Serial port ได้ที่ Device manager ที่แสดงในรูปที่ ๓.2(ก) ซึ่งในที่นี้คือ COM4



รูปที่ ๓.4 เมนูที่ใช้เลือกบอร์ดที่เชื่อมต่อและค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการจำลองสถานการณ์

ในการจำลองสถานการณ์จะกำหนดให้เวลาที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์เท่ากับ 10 วินาที ใช้การหาค่าตอบประเภท Fixed - Step และมี Step Size เท่ากับ 0.01 s ที่แสดงในรูปที่ ๓.4(ข) การเลือกคอมไพเลอร์ (compiler) ที่ใช้ทำงานร่วมกับบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit สามารถ

เข้าถึงได้จาก Code Generation ที่เป็นเมนูหลัก แล้วทำการกำหนด Toolchain ให้ใช้งานโปรแกรม Texas Instruments Code Composer Studio (C2000) โดยได้แสดงการตั้งค่าไว้ในรูปที่ ๓.5(ก) จากนั้นเลือกเมนู Verification ซึ่งเป็นเมนูย่อยของเมนู Code Generation ที่แสดงในรูปที่ ๓.5(ข) ทำการเลือกเมนู Advanced Parameters --> Create block แล้วให้ทำการเลือกแบบ PIL เพื่อกำหนดประเภทของบล็อกใหม่ที่จะถูกสร้าง ซึ่งเทคนิคแบบโปรเซสเซอร์ในรูปที่ใช้งานจะมีการสร้าง บล็อกขึ้นมาใหม่ โดยบล็อกใหม่นี้มีการทำงานหรือประมวลผลภายในบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit การสร้างบล็อกใหม่จะใช้บล็อกที่อยู่ภายในโปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นต้นแบบ ในการสร้างโปรแกรมลงไปในบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit ที่จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ ๓.5 เมนูที่ใช้กำหนดคอมพิวเตอร์และเมนูที่ใช้กำหนดประเภทในการสร้างบล็อกใหม่

จากนั้น พิมพ์คำสั่งดังต่อไปนี้ที่ Command Window

```
setpref('MathWorks_Embedded_IDE_Link_PIL_Preferences','COMPort','COM4');
```

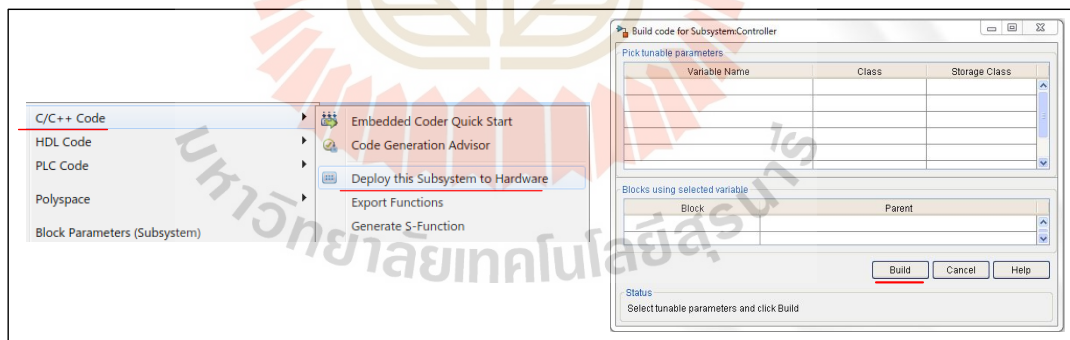
```
setpref('MathWorks_Embedded_IDE_Link_PIL_Preferences','BaudRate',115200);
```

```
setpref('MathWorks_Embedded_IDE_Link_PIL_Preferences','enableserial',true);
```

คำสั่งเหล่านี้จะใช้เพื่อกำหนด COM Port (ในที่นี้คือ COM4) , กำหนดอัตราบอด (Baud rate) และเปิดการใช้งานการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูปผ่านทาง USB Port

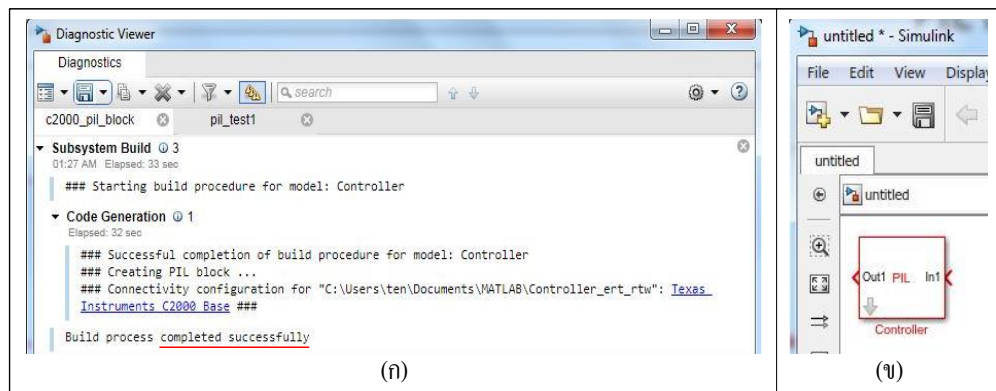
ชุดบล็อกตัวอย่าง c2000_pil_block ที่แสดงในรูปที่ รูปที่ ๓.2(ข) ประกอบไปด้วยบล็อกที่เป็นพลานต์ของระบบ (บล็อก Plant) และบล็อกที่ทำหน้าที่คำนวณหรือประมวลผลข้อมูล (บล็อก Controller) โดยในตอนนี้บล็อก Controller จะมีการคำนวณหรือประมวลผลข้อมูลภายในโปรแกรม MATLAB/Simulink การสร้างบล็อกที่มีคุณสมบัติเหมือนบล็อก Controller แต่มีการคำนวณและประมวลผลโดยบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit คือ การนำบล็อก Controller ไปเป็นต้นแบบในการสร้างโปรแกรมให้กับบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit ที่เกิดขึ้นได้จาก

การทำงานร่วมกันของซอฟต์แวร์ส่วนเสริมที่สามารถสร้างโปรแกรมภาษา C/C++ จาก ชุดบล็อกที่เป็นชุดบล็อกต้นแบบที่สร้างขึ้นจากชุดเครื่องมือภายใน Libraly Browser ของ Simulink แล้วทำการอัปโหลดโค้ด (code) ไปยังบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit ซึ่งจะได้บล็อกใหม่ที่มีการทำงานภายในบอร์ดและมีการทำงานที่เหมือนหรือใกล้เคียงชุดบล็อกที่ได้นำมาเป็นต้นแบบ จากชุดบล็อกตัวอย่าง c2000_pil_block จะมีขั้นตอนในการสร้างบล็อกใหม่ที่ประมวลผลโดยบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit ดังต่อไปนี้ ให้ทำการคลิกเมาส์ขวาที่ บล็อก Controller (บล็อกต้นแบบ) เลือกเมนู C/C++ Code --> Deploy this Subsystem to Hardware ที่แสดงในรูปที่ ๖.6 ซึ่งจะปรากฏกล่องเมนู Build code for subsystem ขึ้นมา ให้ทำการเลือก Build จากนั้นจะเกิดขึ้นตอนการสร้างโปรแกรมจากบล็อก Controller ไปยังบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit โดยมีการทำงานร่วมกันกับโปรแกรม TexasInstruments Code Composer Studio ซึ่งสามารถตรวจสอบสถานะการสร้างโปรแกรมได้ที่ Diagnostic Viewer ที่แสดงในรูปที่ ๖.7(ก) หากไม่มีข้อผิดพลาดใดๆ กระบวนการนี้จะเสร็จสมบูรณ์และมีการสร้างบล็อกขึ้นมาใหม่ที่แสดงในรูปที่ ๖.7(ข) บล็อกที่ถูกสร้างขึ้นใหม่นี้จะสามารถทำหน้าที่คำนวณหรือประมวลผลข้อมูลได้เช่นเดียวกับบล็อก Controller แต่มีการทำงานหรือประมวลผล โดยบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit โดยบล็อกที่ถูกสร้างขึ้นใหม่นี้จะถูกนำไปใช้งานร่วมกับชุดบล็อกตัวอย่าง c2000_pil_block นั่นคือบล็อก Controller1 ที่อยู่ภายในสี่เหลี่ยมเส้นประสีแดง ที่แสดงในรูปที่ ๖.8

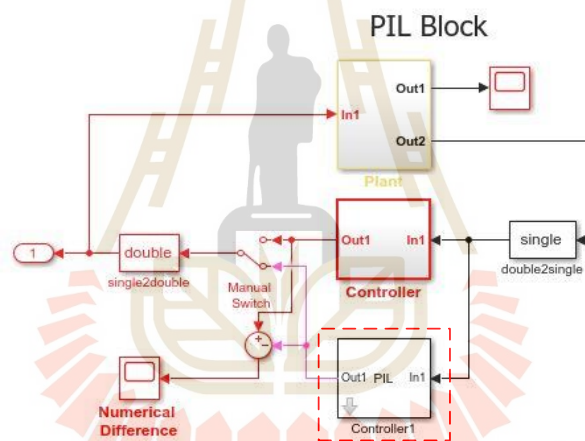


รูปที่ ๖.6 เมนูที่ใช้สร้างบล็อกใหม่ที่คำนวณและประมวลผลโดยบอร์ด

TMS320F28335 Experimenter Kit



รูปที่ ๗.๗ สถานะการสร้างโปรแกรมไปยังบอร์ด และบล็อกที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ที่ทำงานหรือประมวลผลภายในบอร์ด

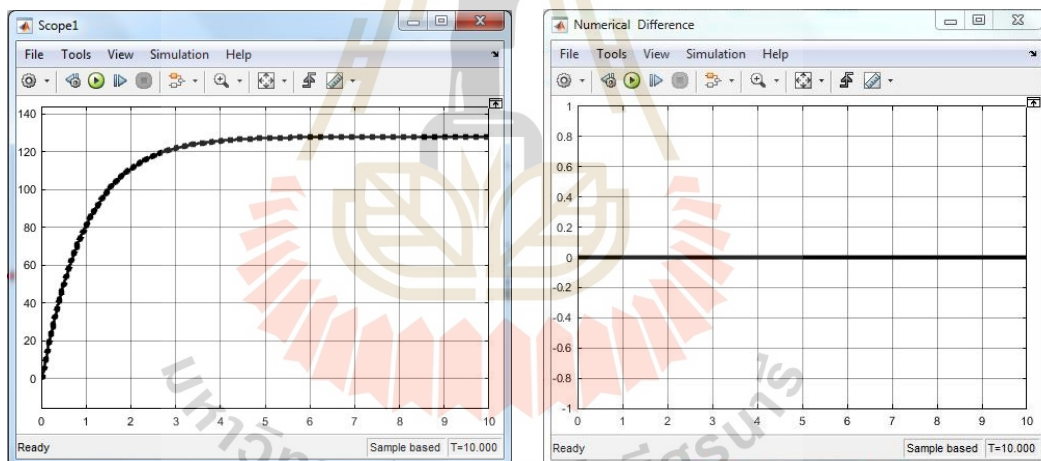


รูปที่ ๗.๘ ชุดบล็อก c2000_pil_block ที่ใช้การจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป

การจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูปของตัวอย่าง c2000_pil_block ที่แสดงในรูปที่ ๗.๘ จะทำการเปรียบเทียบการทำงานระหว่างบล็อก Controller ที่เป็นบล็อกที่ทำงานภายในโปรแกรม MATLAB/Simulink หรือเป็นบล็อกต้นแบบ และบล็อก Controller1 ที่เป็นบล็อกที่ถูกสร้างขึ้นที่มีการทำงานหรือประมวลผลภายในบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit เมื่อทำการ Run โปรแกรม โปรแกรม MATLAB/Simulink จะมีการเชื่อมต่อไปยังบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit โดยทำงานร่วมกับโปรแกรม TexasInstruments Code Composer Studio จากนั้นบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit จะมีการทำงานตามโปรแกรมคำสั่งที่ถูกสร้างไว้ โดยบอร์ดจะทำการรับ - ส่งข้อมูลรวมถึงมีการการคำนวณหรือประมวลผลภายในบอร์ด ซึ่งการจำลอง

สถานการณ์ดังกล่าวจะไม่ใช้เวลาจริง (Real time) สามารถตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อหรือการแจ้งเตือนข้อผิดพลาดได้ที่ Diagnostic Viewer และหากบอร์ดมีการทำงานร่วมกับโปรแกรมจะสามารถสังเกตเห็นได้จากไฟแสดงสถานะที่อยู่บนการ์ดควบคุมของบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit ที่มีการเปลี่ยนแปลง

ผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงในรูปที่ ๑.๑ แสดงผลตอบสนองที่ได้จากบล็อกที่ทำหน้าที่คำนวณหรือประมวลผลข้อมูลภายในโปรแกรม MATLAB/Simulink (บล็อก Controller) ที่แสดงเป็นเส้นทึบสีดำและผลตอบสนองที่ได้จากบล็อกที่ทำหน้าที่คำนวณหรือประมวลผลข้อมูลโดยบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit (บล็อก Controller1) ที่แสดงเป็นเส้นประสีดำ ผลตอบสนองที่ได้จากบล็อกทั้งสองจะไม่มี ความแตกต่างกัน หรือมีค่าความแตกต่างกันที่เป็นศูนย์ นั่นคือ บล็อกสร้างขึ้นใหม่ (บล็อก Controller1) ที่คำนวณหรือประมวลผลข้อมูลภายในบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit จะให้ข้อมูลที่เป็นผลลัพธ์เหมือนกับบล็อกที่เป็นต้นแบบ (บล็อก Controller) ที่ทำงานหรือคำนวณภายในโปรแกรม MATLAB/Simulink

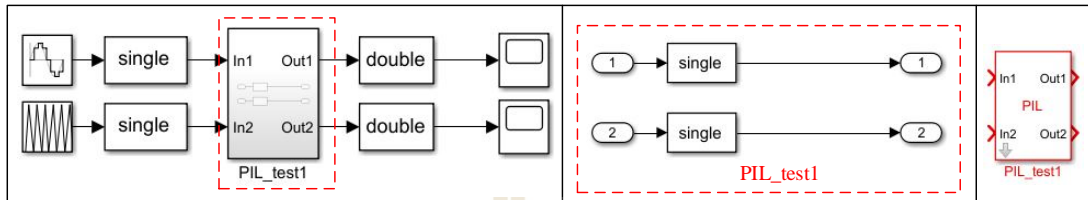


รูปที่ ๑.๑ ผลการจำลองสถานการณ์แบบโปรเซสเซอร์ในรูปจากชุดบล็อก c2000_pil_block

การทดสอบเบื้องต้นในการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป

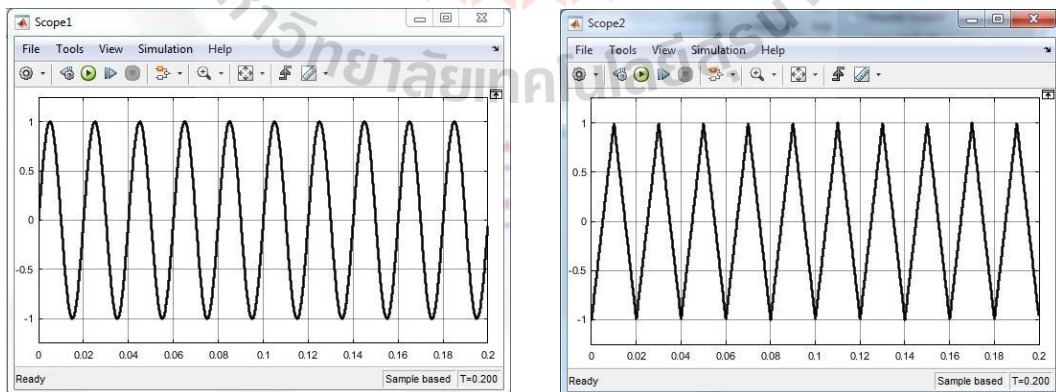
ในการทดสอบเบื้องต้นในการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป จะทำการส่งข้อมูลสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sin Wave) ที่มีความถี่ 50 Hz และมีขนาดเท่ากับ 1 และส่งข้อมูลสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (Triangular) ที่มีความถี่ 50 Hz และมีขนาดระหว่าง -1 ถึง 1 โดยกำหนดการซัดตัวอย่างข้อมูลเท่ากับ 100 μ s (sample time: 1e-4) ข้อมูลสัญญาณทั้งสองจะถูกส่งจากชุดบล็อกภายในโปรแกรม MATLAB/Simulink ไปยังบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit จากนั้นบอร์ดจะทำ

การส่งข้อมูลกลับมายังชุดบล็อกภายใน โปรแกรม MATLAB/Simulink และให้โปรแกรมทำการแสดงผลข้อมูลที่ได้รับมาจากบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit โดยมีชุดบล็อกที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ ที่แสดงในรูปที่ น.10



รูปที่ น.10 ชุดบล็อกที่ใช้ทดสอบเบื้องต้นในการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูป

ในการส่งข้อมูลจาก โปรแกรม MATLAB/Simulink ไปยังบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit จำเป็นที่จะต้องทำการแปลงชนิดของข้อมูลจากข้อมูลชนิด double ไปเป็นข้อมูลชนิด single โดยใช้บล็อก Data Type Conversion ในการแปลงชนิดของข้อมูล และต้องแปลงชนิดของข้อมูลที่ได้รับจากบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit จากข้อมูลชนิด single ไปเป็นข้อมูลชนิด double โดยใช้บล็อกเช่นเดียวกัน ในการจำลองสถานการณ์จะกำหนดให้เวลาที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์เท่ากับ 0.2 วินาที ใช้การหาค่าตอบประเภท Variable - Step และมี Step Size เท่ากับ $10\mu\text{s}$ ($1\text{e-}5$) โดยผลการจำลองสถานการณ์ในการทดสอบเบื้องต้นของการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูปได้แสดงในรูปที่ น.11



รูปที่ น.11 ผลการจำลองสถานการณ์สัญญาณรูปคลื่นไซน์และสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

โปรแกรม MATLAB/Simulink ได้แสดงผลการจำลองสถานการณ์ คือ สัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sin Wave) และสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (Triangular) ที่มีความถี่และขนาดเป็นไปตามที่ได้กำหนดไว้ แสดงให้เห็นถึงความถูกต้องในการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม MATLAB/Simulink และบอร์ด TMS320F28335 Experimenter Kit เทคนิคการจำลองสถานการณ์ที่มีฮาร์ดแวร์ในรูปที่ได้นำเสนอนี้จึงถือเป็นพื้นฐานสำคัญที่สามารถนำไปปรับปรุงใช้ในงานที่มีความซับซ้อนมากกว่าการทดสอบเบื้องต้นดังที่ได้แสดงไว้ข้างต้น





ภาคผนวก ช

ระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีพจน์ของการรั้งความและไม่มีพจน์ของการ
รั้งความ ผลของซีโร่ต่อผลตอบสนองความเร็วเพลา ผลของค่าไถเกน
ต่อค่าคงตัวทางเวลา และค่าโพลของตัวควบคุมพีไอแต่ละดูป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

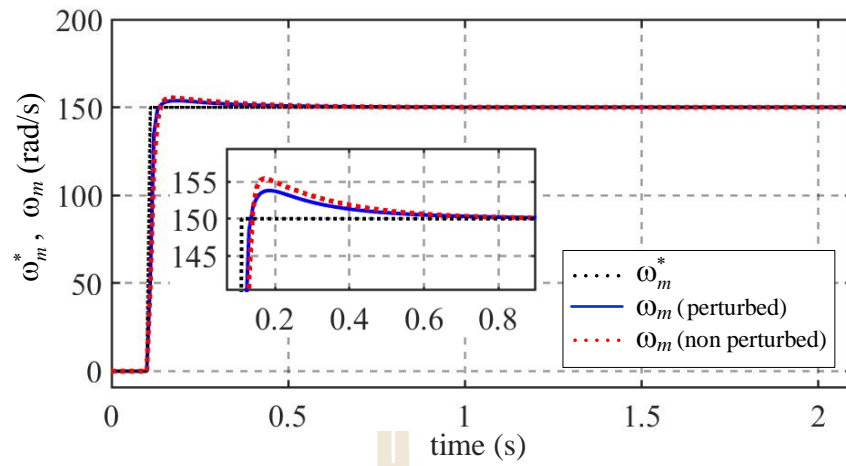
การจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีพจน์ของการรั้งความและไม่มีพจน์ของการรั้งความ

กำหนดให้การจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมวงปิดมีแผนการควบคุมและค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เหมือนกับการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมวงปิดที่ปรากฏในบทที่ 4 และตัวควบคุมพีไอสี่ตัวมีค่าแกนชุดที่ 2 ที่แสดงในตารางที่ 4.6 โดยที่ ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่แสดงในรูปที่ ข.12 ถึงรูปที่ ข.8 ได้รับมาจากสมการปริภูมิสถานะวงปิดในสมการที่ (4-5) ที่มีพจน์ของการรั้งความ $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \Phi + \mathbf{Bu}$ และได้รับมาจากสมการปริภูมิสถานะวงปิดที่ไม่มีพจน์ของการรั้งความ $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}$

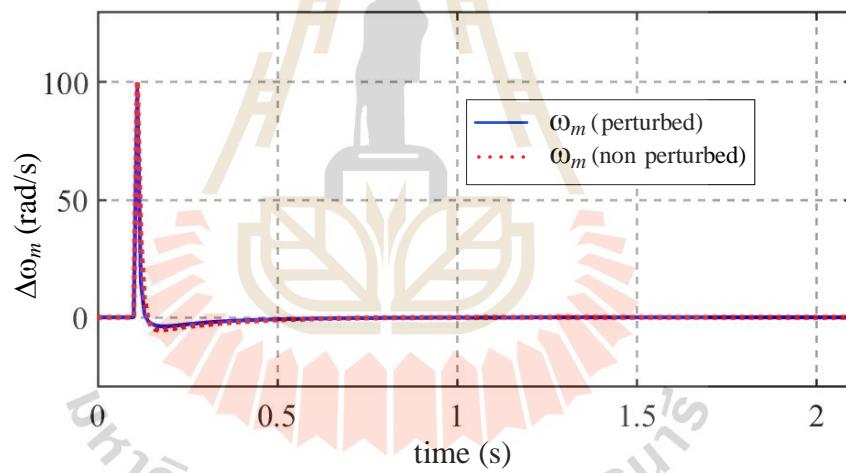
ความเร็วเพลาอ้างอิงที่แสดงในรูปที่ ข.13 (ω_m^* เส้นประสีดำ) คือสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันไดที่จะกำหนดให้มอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนด้วยความเร็ว 150 rad/s ระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีพจน์ของการรั้งความจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพลา (ω_m : กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) มอเตอร์เหนี่ยวนำจะหมุนจากสภาพหยุดนิ่ง (เริ่มที่เวลา 0.1s) ด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นจนถึง 150 rad/s ภายในช่วงระยะเวลาสั้น ผลตอบสนองจึงมีสถานะชั่วคราวในช่วงระยะเวลาที่สั้นมากแต่เกิดการพุ่งเกิน (overshoot) เล็กน้อยในสถานะชั่วคราว ซึ่งระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่ไม่มีพจน์ของการรั้งความ จะให้ผลตอบสนองความเร็วเพลา (ω_m : กราฟเส้นประสีแดง) ที่คล้ายกันแต่มีการพุ่งเกินที่มากกว่าเล็กน้อย เมื่อระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีพจน์ของการรั้งความ ($\Delta\omega_m$: กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) และระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่ไม่มีพจน์ของการรั้งความ ($\Delta\omega_m$: กราฟเส้นประสีแดง) มอเตอร์เหนี่ยวนำและโหลดเชิงกลจะหมุนด้วยความเร็วเพลาที่มีความผิดพลาดมากในช่วงที่มอเตอร์มีการเพิ่มความเร็วที่แสดงในรูปที่ ข.2 และจะเห็นว่าผลตอบสนองความเร็วเพลาไม่มีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว

กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงที่ได้จากระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีพจน์ของการรั้งความ (i_{sd} : กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) ที่แสดงในรูปที่ ข.3 คือกระแสไฟฟ้าดีซีที่มีแนวโน้มคงที่แต่จะมีค่ามากในช่วงสถานะชั่วคราว ขณะที่กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงที่ได้จากระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่ไม่มีพจน์ของการรั้งความ (i_{sd} : กราฟเส้นประสีแดง) จะมีค่าน้อยกว่าในช่วงสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัวจะมีแนวโน้มของผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกัน กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงมีความผิดพลาดที่แสดงในรูปที่ ข.4 ระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีพจน์ของการรั้งความ (Δi_{sd} : กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) จะให้ความผิดพลาดที่มีค่ามากในช่วงสถานะชั่วคราว

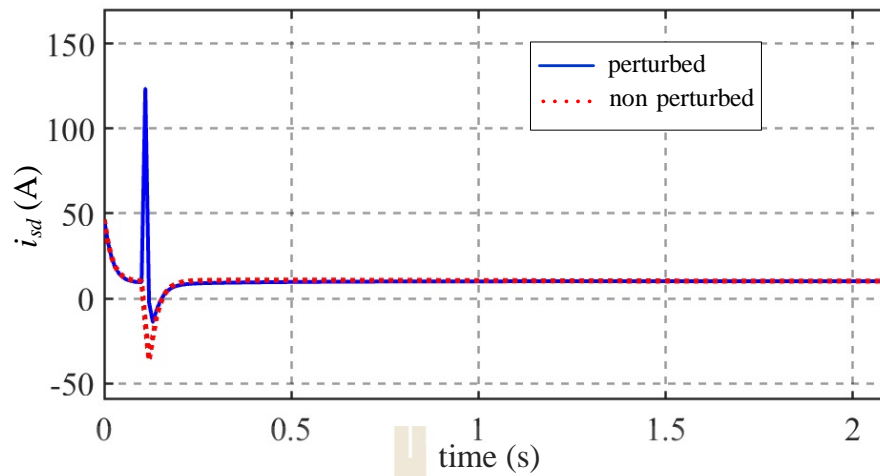
แต่จะเป็นศูนย์ในช่วงระยะเวลาที่ความเร็วเพลอาอิงกงที่ในสถานะอยู่ตัว ขณะที่ระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่ไม่มีพจน์ของการรั้งควาน (i_{sd} : กราฟเส้นประสีแดง) จะให้ความผิดพลาดที่เป็นศูนย์ตลอดเวลา ($\Delta i_{sd} = 0$) หรือระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่ไม่มีพจน์ของการรั้งควาน จะให้ผลเฉลยของตัวแปรสถานะ Δi_{sd} ที่เป็นศูนย์ โดยที่ กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงสามารถหาได้จาก $i_{sd} = i_{sd}^* - \Delta i_{sd}$ จึงทำให้ $i_{sd} = i_{sd}^*$ ซึ่งสอดคล้องกับความผิดพลาดของฟลักซ์แม่เหล็ก โรเตอร์ที่เกิดจากระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่ไม่มีพจน์ของการรั้งควานที่แสดงในรูปที่ ๕.6 ($\Delta \psi_{rd}$: กราฟเส้นประสีแดง) ที่มีความผิดพลาดเป็นศูนย์ตลอดเวลา ($\Delta \psi_{rd} = 0$) นั่นคือผลเฉลยของ ตัวแปรสถานะ $\Delta \psi_{rd}$ จะเป็นศูนย์ตลอดเวลา และ $\psi_{rd} = \psi_{rd}^*$ เสมอ ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่แสดงในรูปที่ ๕.5 (ψ_{rd} : กราฟเส้นประสีแดง) จึงมีขนาดเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์อ้างอิง ($\psi_{rd}^* = 0.7$) ตลอดเวลา ขณะที่ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ (ψ_{rd} : กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) ที่ได้จากระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีพจน์ของการรั้งควาน จะมีค่ามากในสถานะชั่วคราวและมีค่าเท่ากับค่าอ้างอิง ในสถานะอยู่ตัวทำให้ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์จึงมีความผิดพลาด ($\Delta \psi_{rd}$: กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) ที่แสดงในรูปที่ ๕.6 ในสถานะชั่วคราวและจะเป็นศูนย์เมื่อเข้าสู่สถานะอยู่ตัว กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางที่แสดงในรูปที่ ๕.7 ที่ได้จากระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีพจน์ของการรั้งควาน (i_{sq} : กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) และ ระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่ไม่มีพจน์ของการรั้งควาน (i_{sq} : กราฟเส้นประสีแดง) จะให้ผลตอบสนองที่คล้ายกัน ซึ่งจะมีค่ามากในช่วงสถานะชั่วคราวที่มอเตอร์เหนี่ยวนำเริ่มหมุนและเพิ่มความเร็ว แต่จะมีค่าลดลงแล้วคงที่เมื่อเข้าสู่สถานะอยู่ตัว กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางมีความผิดพลาดที่ได้จากระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีพจน์ของการรั้งควาน (Δi_{sq} : กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) และระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่ไม่มีพจน์ของการรั้งควาน (Δi_{sq} : กราฟเส้นประสีแดง) ที่แสดงในรูปที่ ๕.8 และไม่มีความผิดพลาดในช่วงระยะเวลาที่ความเร็วเพลอาอิงกงที่



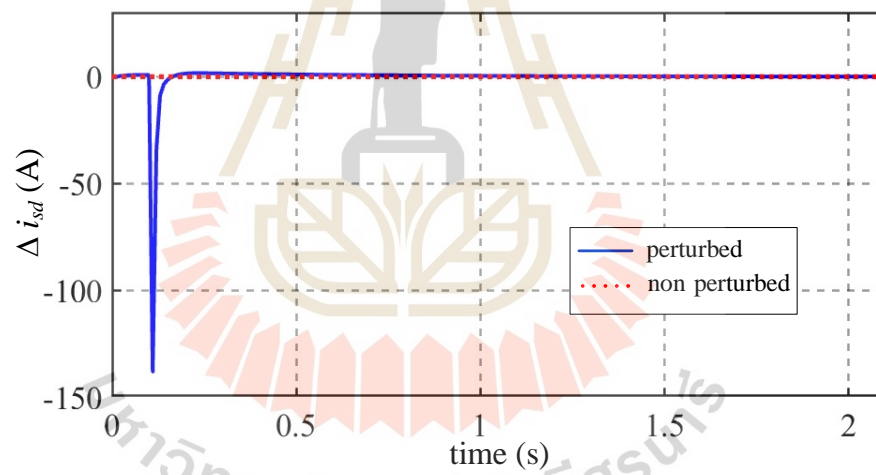
รูปที่ ๑.1 ความเร็วเพลาอ้างอิงและผลตอบสนองความเร็วเพลาที่ได้จากระบบควบคุม
ความเร็ววงปิดที่มีพจน์ของการรบกวนและไม่มีพจน์ของการรบกวน



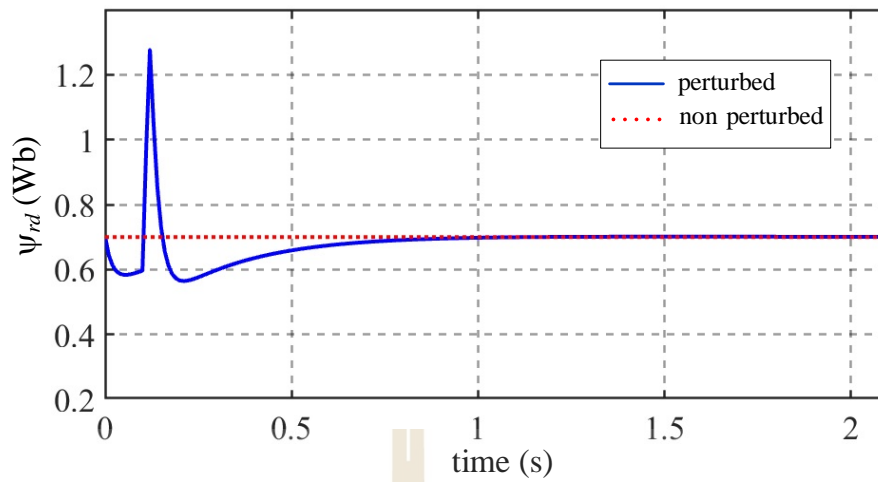
รูปที่ ๑.2 ความผิดพลาดของความเร็วเพลาที่ได้จากระบบควบคุมความเร็ววงปิด
ที่มีพจน์ของการรบกวนและไม่มีพจน์ของการรบกวน



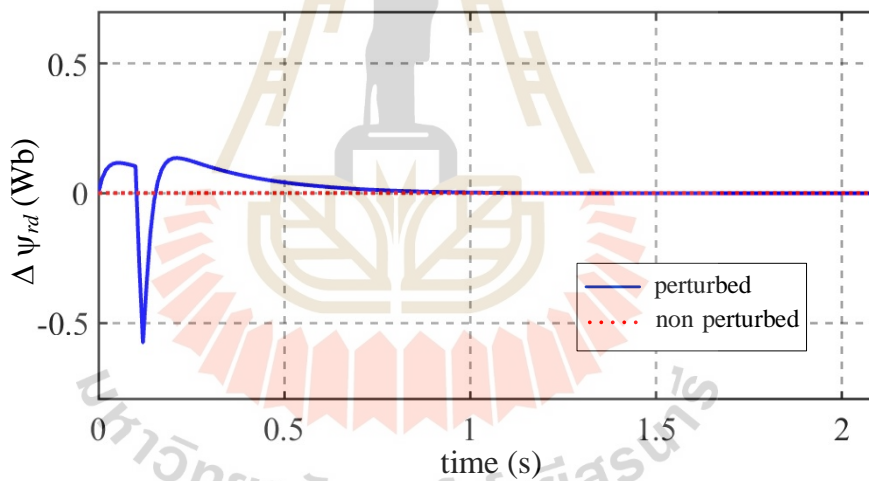
รูปที่ ๓.3 กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงที่ได้จากระบบควบคุมความเร็ววงปิด
ที่มีพจน์ของการรั้งควานและไม่มีพจน์ของการรั้งควาน



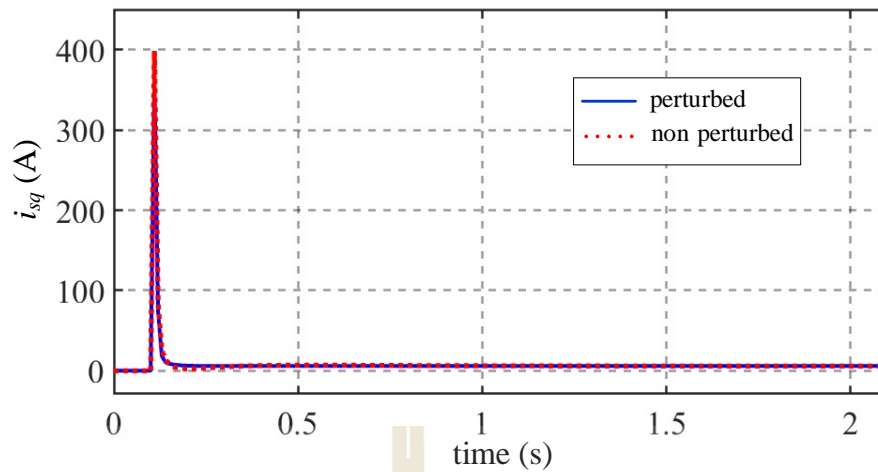
รูปที่ ๓.4 ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงที่ได้จากระบบควบคุม
ความเร็ววงปิดที่มีพจน์ของการรั้งควานและไม่มีพจน์ของการรั้งควาน



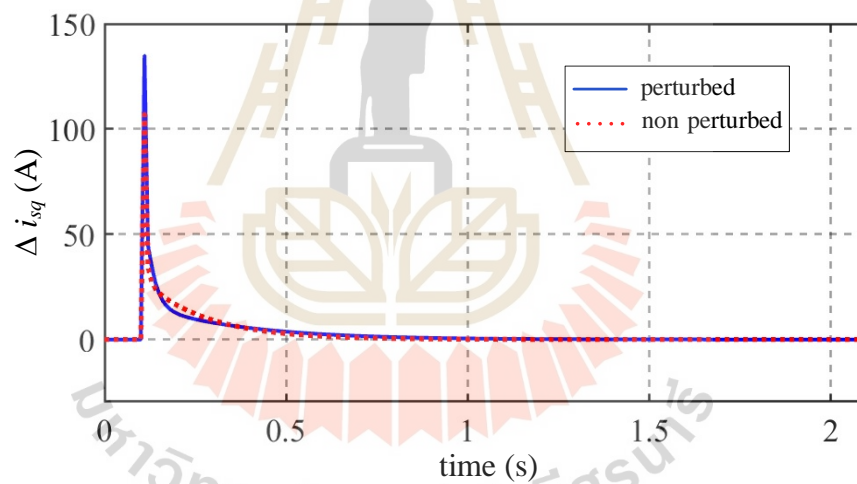
รูปที่ 3.5 ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่ได้จากระบบควบคุมความเร็ววงปิด
ที่มีพจน์ของการรบกวนและไม่มีพจน์ของการรบกวน



รูปที่ 3.6 ความผิดพลาดของขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่ได้จากระบบควบคุม
ความเร็ววงปิดที่มีพจน์ของการรบกวนและไม่มีพจน์ของการรบกวน



รูปที่ ๗.7 กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางที่ได้จากระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีพจน์ของการรั้งความและไม่มีพจน์ของการรั้งความ



รูปที่ ๗.๘ ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางที่ได้จากระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่มีพจน์ของการรั้งความและไม่มีพจน์ของการรั้งความ

ผลของซีโรต่อผลตอบสนองความเร็วเพลา

พิจารณาสมการปริภูมิสถานะของระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่แสดงในสมการที่ (4-5) เมื่อทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนโดยกำหนดให้ความเร็วเพลาอ้างอิง (ω_m^*) คืออินพุตของฟังก์ชัน

ถ่ายโอน ความเร็วเพลา (ω_m) คือเอาต์พุตของฟังก์ชันถ่ายโอน และระบบควบคุมความเร็ววงปิดมีค่าเกินขีดที่ 2 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมความเร็ววงปิด คือ $\frac{\omega_m}{\omega_m^*} = \frac{N}{D}$

การนำเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ **A** เมตริกซ์อินพุต **B** การใช้งานชุดคำสั่ง Control System Toolbox ภายในโปรแกรม Matlab และการคำนวณเชิงเลขที่มีความผิดพลาดจากการปัดเศษ (Round-off error) ที่เกิดจากการตัดทอนตัวเลขหรือความผิดพลาดจากการตัดปลาย (Truncation error) ที่เกิดจากการตัดทอนจำนวนพจน์ของการคำนวณจะทำให้ได้รับฟังก์ชันถ่ายโอนข้างต้นที่มีสมการคุณลักษณะอันดับ 16 โดยที่

$$N = 1.11 \times 10^{-16} s^{16} + 1.819 \times 10^{-12} s^{15} + 1.268 \times 10^5 s^{14} + 4.363 \times 10^8 s^{13} + 5.312 \times 10^{11} s^{12} + 2.643 \times 10^{14} s^{11} + 4.596 \times 10^{16} s^{10} + 3.605 \times 10^{18} s^9 + 1.436 \times 10^{20} s^8 + 3.094 \times 10^{21} s^7 + 3.941 \times 10^{22} s^6 + 3.137 \times 10^{23} s^5 + 1.599 \times 10^{24} s^4 + 5.194 \times 10^{24} s^3 + 1.033 \times 10^{25} s^2 + 1.14 \times 10^{25} s + 5.308 \times 10^{24}$$

และ

$$D = s^{16} + 4740 s^{15} + 8.781 \times 10^6 s^{14} + 7.943 \times 10^9 s^{13} + 3.576 \times 10^{12} s^{12} + 7.504 \times 10^{14} s^{11} + 8.175 \times 10^{16} s^{10} + 4.927 \times 10^{18} s^9 + 1.691 \times 10^{20} s^8 + 3.373 \times 10^{21} s^7 + 4.122 \times 10^{22} s^6 + 3.209 \times 10^{23} s^5 + 1.616 \times 10^{24} s^4 + 5.215 \times 10^{24} s^3 + 1.034 \times 10^{25} s^2 + 1.14 \times 10^{25} s + 5.308 \times 10^{24}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนข้างต้นมีโพลของระบบ ดังนี้

$$-1200, -1200, -1000, -1000, -99.9999, -99.9999, -50, -49.9999, -8, -7.9999, -5.9999, -5.9999, -3.9999, -3.9999, -1.9999, -1.9999$$

และมีซีโร ดังนี้

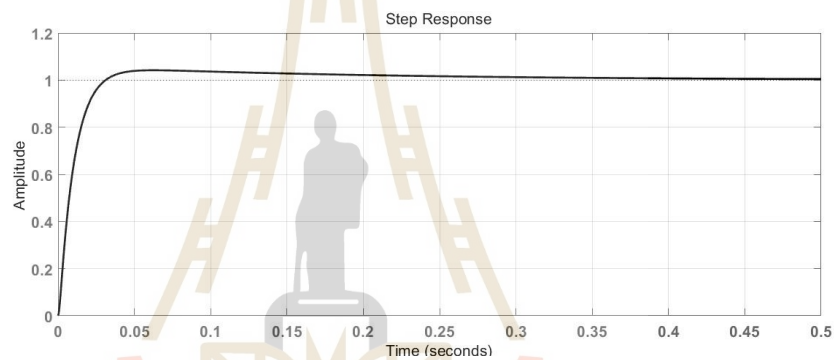
$$-6.4721 \times 10^3 \pm j3.3801 \times 10^{10}, -1200, -1000 \pm j3.9100 \times 10^{-3}, -100, -50.0018, -49.9982, -8.1970, -7.9994, -6.0006, -5.5397, -4.0071, -3.9930, -2.0003, -1.9997$$

จะเห็นว่าโพลของระบบมีค่าที่ซ้ำกันและโพลบางค่าจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับซีโรมากหรือมีตำแหน่งเดียวกันกับซีโร ทำให้สามารถหักล้างซีโรบางค่าได้และซีโรที่มีตำแหน่งที่ห่างจากแกนจินตภาพของระนาบเชิงซ้อนมากจะไม่นำมาพิจารณา จะได้ว่าซีโรและโพลของระบบที่ไม่มีการหักล้างกัน มีซีโรคือ -8.2 และ -5.54 และมีโพลคือ $-6, -8, -100$ และ -1200

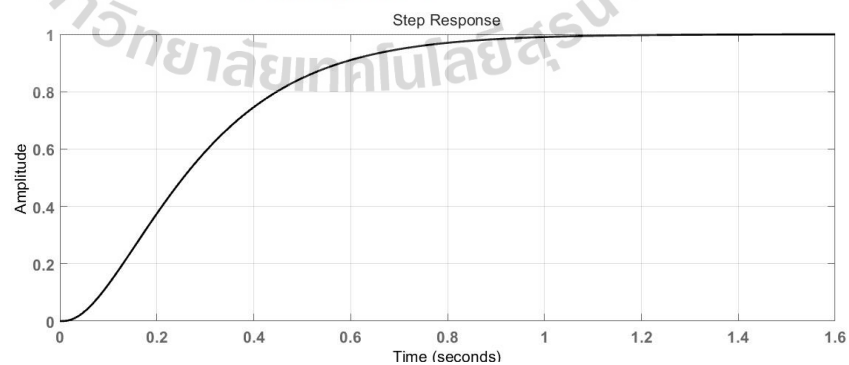
ดังนั้นจึงสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมความเร็ววงปิดในรูปแบบใหม่ที่มีอันดับที่ลดลงได้ดังนี้

$$\frac{\omega_m}{\omega_m^*} = \frac{(s+8.2)(s+5.54)}{(s+6)(s+8)(s+100)(s+1200)}$$

เมื่อกำหนดให้ฟังก์ชันถ่ายโอนข้างต้นมีความเร็วเพลาอ้างอิง (ω_m^*) ที่เป็นอินพุต คือ ฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย จะได้ผลตอบสนองความเร็วเพลาที่แสดงในรูปที่ ข.9 และผลตอบสนองความเร็วเพลาที่ไม่มีผลของซีโรที่แสดงในรูปที่ ข.10 ดังนี้



รูปที่ ข.9 ผลตอบสนองความเร็วเพลาเมื่อความเร็วเพลาอ้างอิงคืออินพุตที่เป็นฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย



รูปที่ ข.10 ผลตอบสนองความเร็วเพลาเมื่อความเร็วเพลาอ้างอิงคืออินพุตที่เป็นฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วยและฟังก์ชันถ่ายโอนไม่มีซีโร

เมื่อพิจารณาค่าไอเกนที่ต้องการที่ใช้คำนวณหาค่าเกณฑ์ 2 ของตัวควบคุมพีไอที่แสดงในตารางที่ 4.3 แม้ว่าในการระบุค่าเกณฑ์ที่ต้องการได้มีการกำหนดให้ค่าไอเกน (ค่าโพล) เป็นจำนวนจริงลบทุกค่าแต่เนื่องจากมีชิโรบางค่าที่ไม่ถูกค่าโพลของระบบหักล้างไปและชิโรทุกค่าเป็นจำนวนจริงลบจึงส่งผลให้ผลตอบสนองความเร็วเพลาเกิดการพุ่งเกินเกิดขึ้นแต่มีการลู่เข้าหาความเร็วเพลาอ้างอิงที่รวดเร็วมากกว่าหรือใช้ระยะเวลาในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่สั้นกว่าเมื่อเทียบกับฟังก์ชันถ่ายโอนที่ไม่มีชิโรที่ให้ผลตอบสนองความเร็วเพลาที่ไม่มีการพุ่งเกินแต่ใช้ระยะเวลาในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ยาวนานมากกว่า

ผลของค่าไอเกนต่อค่าคงที่ทางเวลาของระบบ

การกำหนดให้ค่าไอเกนที่ใกล้กับแกนจินตภาพมากที่สุด (โพลเด่น) มีตำแหน่งอยู่ห่างจากแกนจินตภาพและกำหนดให้ค่าไอเกนที่เหลืออยู่ห่างจากค่าไอเกนดังกล่าวออกไปจะทำให้สามารถประมาณให้ระบบควบคุมความเร็ววงปิดที่พิจารณาเป็นระบบอันดับหนึ่งได้ ระบบอันดับหนึ่งมีค่าคงที่ทางเวลาของระบบ (τ) ที่สามารถใช้ประมาณระยะเวลาในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวของผลตอบสนองได้ โดยสามารถหาได้จาก $\tau \approx -\frac{1}{P}$ โดยที่ P คือค่าโพลของระบบ จากการกำหนดค่าไอเกนที่ต้องการที่แสดงในตารางที่ 4.3 ค่าไอเกนที่ใกล้กับแกนจินตภาพมากที่สุดเท่ากับ -2 จะได้ว่า ค่าคงที่ทางเวลาของระบบของระบบควบคุมความเร็ววงปิดมีค่าประมาณ 0.5 ($\tau \approx 0.5$) หรือผลตอบสนองความเร็วเพลาจะใช้ระยะเวลาประมาณ 0.5 วินาทีในการลู่เข้าสู่สถานะอยู่ตัว พิจารณาผลตอบสนองความเร็วเพลาที่ได้จากสมการปริภูมิสถานะวงปิดที่มีพจน์ของการรบกวน (ω_m : กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) ซึ่งเป็นระบบควบคุมความเร็ววงปิด แบบปกติ จะเห็นว่าระบบควบคุมความเร็ววงปิดจะให้ผลตอบสนองความเร็วเพลาเริ่มต้นที่เวลาเท่ากับ 0.1 วินาทีตามความเร็วเพลาอ้างอิงและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่เวลาประมาณ 0.7 วินาที ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมพีไอโดยการคำนวณหาค่าเกณฑ์ที่ต้องการที่ได้จากการกำหนดค่าไอเกนที่ต้องการจึงสามารถทำให้ผลตอบสนองความเร็วเพลาที่มีค่าคงที่ทางเวลาที่ใกล้เคียงกับค่าคงที่ทางเวลาที่ได้ออกแบบไว้ได้

โพลของลูปควบคุมย่อย

การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนตรง

พิจารณา สมการที่ (3-10) และกำหนดให้ $u_{sd} = u_{sd}^*$ ทำการแทนค่า u_{sd}^* จากสมการที่ (3-22)

ลงในสมการที่ (3-10) จะได้

$$\frac{di_{sd}}{dt} = a_1 i_{sd} + a_2 \psi_{rd} + \omega_{\psi r} i_{sq} + a_4 (K_{Pd} \Delta i_{sd} + K_{Id} \int_0^t \Delta i_{sd} d\tau) \quad (ข-1)$$

จากสมการ (ข-1) ทำการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาทั้งสองข้างของสมการ โดยที่ การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรงจะพิจารณาพจน์ที่มีการคูณของ i_{sd} เท่านั้น จะได้ว่า

$$\frac{d^2 i_{sd}}{dt^2} = a_1 \frac{di_{sd}}{dt} + a_4 K_{Pd} \frac{di_{sd}^*}{dt} - a_4 K_{Pd} \frac{di_{sd}}{dt} + K_{Id} i_{sd}^* - K_{Id} i_{sd} \quad (ข-2)$$

จากสมการ (ข-2) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ โดเมนเอส ได้ดังนี้

$$s^2 I_{sd}(s) = sa_1 I_{sd}(s) + sa_4 K_{Pd} I_{sd}^*(s) - sa_4 K_{Pd} I_{sd}(s) + K_{Id} I_{sd}^*(s) - K_{Id} I_{sd}(s) \quad (ข-3)$$

จากสมการ (ข-3) ทำการจัดรูปใหม่จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรง ดังนี้

$$\frac{I_{sd}(s)}{I_{sd}^*(s)} = \frac{sa_4 K_{Pd} + K_{Id}}{s^2 - s(a_1 - a_4 K_{Pd}) + K_{Id}} \quad (ข-4)$$

การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวาง

พิจารณา สมการที่ (3-11) และกำหนดให้ $u_{sq} = u_{sq}^*$ ทำการแทนค่า u_{sq}^* จากสมการที่ (3-21) ลงในสมการที่ (3-11) จะได้ว่า

$$\frac{di_{sq}}{dt} = a_1 i_{sq} - \omega_{\psi r} i_{sd} - a_3 \omega_r \psi_{rd} + a_4 (K_{Pd} \Delta i_{sd} + K_{Id} \int_0^t \Delta i_{sd} d\tau) \quad (ข-5)$$

จากสมการ (ข-5) ทำการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาทั้งสองข้างของสมการ โดยที่ การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวางจะพิจารณาพจน์ที่มีการคูณของ i_{sq} เท่านั้น จะได้ว่า

$$\frac{d^2 i_{sq}}{dt^2} = a_1 \frac{di_{sq}}{dt} + a_4 K_{Pq} \frac{di_{sq}^*}{dt} - a_4 K_{Pq} \frac{di_{sq}}{dt} + K_{Iq} i_{sq}^* - K_{Iq} i_{sq} \quad (\text{ข-6})$$

จากสมการ (ข-6) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ โดเมนเอส ได้ดังนี้

$$s^2 I_{sq}(s) = sa_1 I_{sq}(s) + sa_4 K_{Pq} I_{sq}^*(s) - sa_4 K_{Pq} I_{sq}(s) + K_{Iq} I_{sq}^*(s) - K_{Iq} I_{sq}(s) \quad (\text{ข-7})$$

จากสมการ (ข-7) ทำการจัดรูปใหม่จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ในแกนขวาง ดังนี้

$$\frac{I_{sq}(s)}{I_{sq}^*(s)} = \frac{sa_4 K_{Pq} + K_{Iq}}{s^2 - s(a_1 - a_4 K_{Pq}) + K_{Iq}} \quad (\text{ข-8})$$

การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปควบคุมฟลักซ์แม่เหล็ก

พิจารณา สมการที่ (3-12) และกำหนดให้ $i_{sd}^* = i_{sd}$ ทำการแทนค่า i_{sd}^* จากสมการที่ (3-20) ลงในสมการที่ (3-12) จะได้

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = a_5 \psi_{rd} + a_6 (K_{P\psi} \Delta\psi_{rd} + K_{I\psi} \int_0^t \Delta\psi_{rd} d\tau) \quad (\text{ข-9})$$

จากสมการ (ข-9) ทำการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาทั้งสองข้างของสมการ โดยที่ การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กจะพิจารณาพจน์ที่มีการคูณของ ψ_{rd} เท่านั้น จะได้ว่า

$$\frac{d^2 \psi_{rd}}{dt^2} = a_5 \frac{d\psi_{rd}}{dt} + a_6 K_{P\psi} \frac{d\psi_{rd}^*}{dt} - a_6 K_{P\psi} \frac{d\psi_{rd}}{dt} + K_{I\psi} \psi_{rd}^* - K_{I\psi} \psi_{rd} \quad (\text{ข-10})$$

จากสมการ (ข-10) จะได้ว่า $\frac{d\psi_{rd}^*}{dt} = 0$ และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ โดเมนเอส ได้ดังนี้

$$s^2 \psi_{rd}(s) = sa_5 \psi_{rd}(s) - sa_6 K_{P\psi} \psi_{rd}(s) + K_{I\psi} \psi_{rd}^*(s) - K_{I\psi} \psi_{rd}(s) \quad (\text{ข-11})$$

จากสมการ (ข-11) ทำการจัดรูปใหม่จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของรูปควบคุมฟลักซ์แม่เหล็ก ดังนี้

$$\frac{\psi_{rd}(s)}{\psi_{rd}^*(s)} = \frac{K_{I\psi}}{s^2 - s(a_5 - a_6 K_{P\psi}) + K_{I\psi}} \quad (\text{ข-12})$$

การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของรูปควบคุมความเร็ว

พิจารณา สมการที่ (3-14) และกำหนดค่าให้ $i_{sq}^* = i_{sq}$ และ $\psi_{rd}^* = \psi_{rd}$ ทำการแทนค่า i_{sq}^* จากสมการที่ (3-19) ลงในสมการที่ (3-14) จะได้

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{K_T}{J} \psi_{rd}^* (K_{P\omega} \Delta\omega_m + K_{I\omega} \int_0^t \Delta\omega_m d\tau) - \frac{1}{J} T_L \quad (\text{ข-13})$$

จากสมการ (ข-13) ทำการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาทั้งสองข้างของสมการ จะได้ว่า

$$\frac{d^2\omega_m}{dt^2} = \left(\frac{K_T}{J} \psi_{rd}^*\right) (K_{P\omega} \frac{d\omega_m^*}{dt} - K_{P\omega} \frac{d\omega_m}{dt} + K_{I\omega} \omega_m^* - K_{I\omega} \omega_m) \quad (\text{ข-14})$$

จากสมการ (ข-14) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ โดเมนเอส ได้ดังนี้

$$s^2 \omega_m(s) = \left(\frac{K_T}{J} \psi_{rd}^*(s)\right) (sK_{P\omega} \omega_m^*(s) - sK_{P\omega} \omega_m(s) + K_{I\omega} \omega_m^*(s) - K_{I\omega} \omega_m(s)) \quad (\text{ข-15})$$

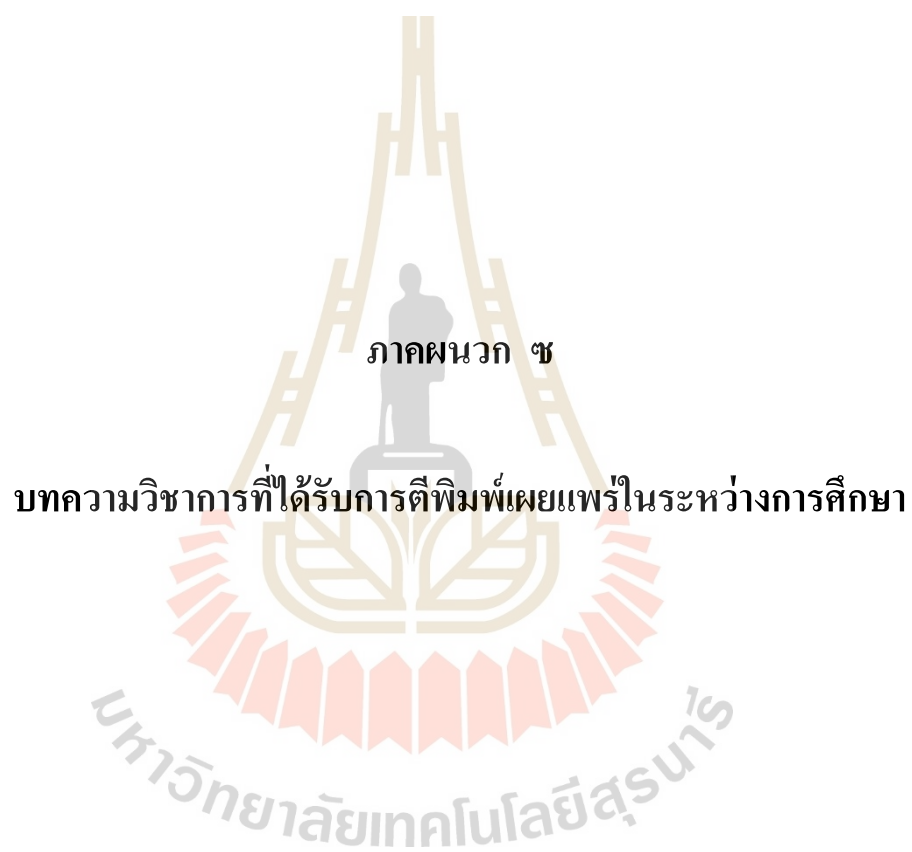
จากสมการ (ข-15) ทำการจัดรูปใหม่จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของรูปควบคุมความเร็ว ดังนี้

$$\frac{\omega_m(s)}{\omega_m^*(s)} = \frac{\frac{K_T}{J} \psi_{rd}^*(s) (sK_{P\omega} + K_{I\omega})}{s^2 + \frac{K_T}{J} \psi_{rd}^*(s) (sK_{P\omega} + K_{I\omega})} \quad (\text{ข-16})$$

เมื่อทำการหาค่าโพลตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรง ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวาง ตัวควบคุมฟลักซ์แม่เหล็ก และตัวควบคุมความเร็ว โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนจากสมการที่ (ซ-4) สมการที่ (ซ-8) สมการที่ (ซ-12) และสมการที่ (ซ-16) ตามลำดับ กำหนดให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่าพารามิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 3.1 ตัวควบคุมพีไอสี่ตัวมีค่าเกนชุดที่ 2 $\psi_{rd}^* = 0.7 \text{ Wb}$ และ $T_{Lm} = 12 \text{ N}\cdot\text{m}$ จะได้ค่าโพลที่แสดงในตารางที่ ซ.1 จะเห็นว่าเมื่อตัวควบคุมพีไอทั้งสี่ตัว มีค่าเกนชุดที่ 2 จะทำให้ค่าโพลของตัวควบคุมพีไอแต่ละตัวมีค่าโพลที่เป็นจำนวนจริงลบทุกค่า นั่นคือผลตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมพีไอแต่ละตัวจะมีแนวโน้มที่ลู่เข้าหาค่าอ้างอิงและความผิดพลาดของผลตอบสนองจะลู่เข้าหาศูนย์ในสถานะอยู่ตัว

ตารางที่ ซ.1 ค่าโพลของตัวควบคุมพีไอ

ตัวควบคุมพีไอ	ค่าโพล (s_1, s_2)
ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนตรง	-1044.59052 , -0.00949
ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแกนขวาง	-1313.97219 , -0.02784
ตัวควบคุมฟลักซ์แม่เหล็ก	-58.78085 , -5.14049
ตัวควบคุมความเร็ว	-105.26761 , -8.88864



ภาคผนวก ซ

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

กุลพงษ์ บุญมาวงศ์, วิโรจน์ แสงธงทอง. (2562). การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากค่าที่ระบุ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 38 (6): 655-665.



ประวัติผู้เขียน

นายกุลพงษ์ บุญมาวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน 2535 ที่อำเภอเชียงของ จังหวัดเชียงราย สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเชียงของวิทยาคม ในปี พ.ศ. 2550 และปี พ.ศ. 2553 ตามลำดับ ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรีที่ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำเร็จ การศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) ในปี พ.ศ. 2558 และได้เข้า ศึกษาต่อในระดับปริญญาโทที่สถาบันเดียวกัน

ระหว่างการศึกษาปริญญาโทได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในวิชาปฏิบัติการวงจรและอุปกรณ์ และมีผลงานตีพิมพ์ปรากฏดั่งภาคผนวก ข จำนวน 1 ฉบับ

