



## รายงานการวิจัย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบรถไฟฟ้า

(Mathematical Models of Electric Vehicle Systems)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบรถไฟฟ้า

### (Mathematical Models of Electric Vehicle Systems)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ผศ.ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2555

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบรถไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย แบตเตอรี่ วงจรแปลงผันแบบบัสค์สองวงจร สำหรับจ่ายไฟให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ และวงจรสนาม ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ขับเคลื่อนรถไฟฟ้า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้รับการพิสูจน์ จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งเป็นแบบจำลอง ที่เหมาะกับการนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ระบบที่ได้รับการวิเคราะห์ใน งานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ ระบบการควบคุมความเร็วรถไฟฟ้าแบบวงเปิด และ ระบบการควบคุมแบบวงปิด ซึ่งทั้งสองระบบจะได้รับการพิสูจน์เพื่อหาแบบจำลองที่สามารถ อธิบายพฤติกรรมของระบบ ทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัวได้ การตรวจสอบความถูกต้อง ของแบบจำลอง อาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อแบบจำลองผ่านการตรวจสอบ ความถูกต้องแล้ว จะดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และทำการ ยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เช่นเดียวกัน จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ สรุปได้ว่า แบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์ในงานวิจัยนี้ สามารถ นำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งผลการวิเคราะห์ สามารถยืนยันได้ว่า ชุดขับเคลื่อนรถไฟฟ้าแบบวงเปิดและแบบวงปิด ยังคงรักษาเสถียรภาพของ ระบบไว้ได้ ภายใต้การทำงานที่พิกัดของระบบ

## Abstract

The research presents the mathematical model of an electric vehicle system. The studied system consists of battery, buck converters for armature and field circuits of DC motor. The proposed mathematical model is derived from the generalized state-space averaging method to achieve the time-invariant model. The derived model in the research is suitable for the stability analysis. The considered systems in this research are divided into two parts. The first is the electric vehicle system operated under an open-loop speed control. The second part is the system in which the speed of the electric car is automatically controlled. The proposed models are validated by using the intensive time-domain simulation. The validation results show that the derived model can describe the behavior of the studied systems in both transient and steady-state responses. The validated models are then used for the stability analysis via the eigenvalue theorem. The results show that the electric vehicle systems, both open-loop and closed-loop controls, are stable during the rated operation. The stability results are confirmed by the time-domain simulation in which a good agreement between theoretical and simulation results is achieved.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบรถไฟฟ้า สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้ต้องขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารเครื่องมือ 3 ที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และสถานที่

ก้องพັນ อารีรักษ์

กันยายน 2555



## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	ก
Abstract.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย.....	3
<b>2 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....</b>	<b>5</b>
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ระบบที่พิจารณา.....	5
2.3 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	7
2.4 ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น.....	8
2.5 การออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบ.....	10
2.6 ผลการจำลองสถานการณ์.....	13
2.7 สรุป.....	16
<b>3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง</b>	
<b>กรณีไม่มีตัวควบคุม.....</b>	<b>17</b>

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.1	บทนำ .....	17
3.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทำให้เป็นเชิงเส้น .....	17
3.3	การคำนวณค่าในสถานะคงตัว .....	24
3.4	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง .....	25
3.5	การวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	27
3.6	สรุป .....	29
4	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง .....	30
4.1	บทนำ .....	30
4.2	ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง .....	30
4.3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเส้นและการทำให้เป็นเชิงเส้น .....	32
4.4	การคำนวณค่าในสถานะคงตัว.....	35
4.6	การวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	39
4.7	สรุป .....	40
5	สรุปและข้อเสนอแนะ .....	41
5.1	สรุป .....	41
5.2	ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต .....	42
	รายการอ้างอิง.....	43
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB .....	46
	ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับตีพิมพ์เผยแพร่.....	48

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	พารามิเตอร์ของระบบ .....	13
3.1	พารามิเตอร์ของระบบ .....	25
4.1	พารามิเตอร์ของระบบ .....	37





## สารบัญรูป

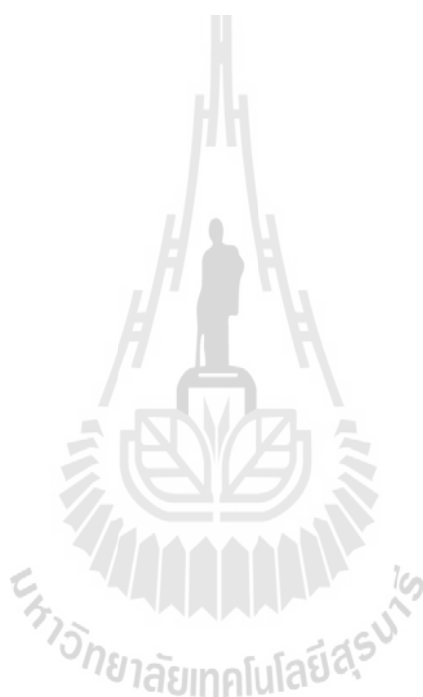
รูปที่	หน้า
2.1	รถกอล์ฟที่พิจารณา .....5
2.2	ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ .....6
2.3	ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกรณีที่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ .....7
2.4	วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น .....8
2.5	แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น .....10
2.6	ระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง .....11
2.7	แผนภาพโบลคของระบบขณะที่ไม่พิจารณาตัวควบคุมแบบพีไอ .....12
2.8	การเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดจาก 5 N.m เป็น 8 N.m กรณีระบบไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ .....14
2.9	การเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดจาก 5 N.m เป็น 8 N.m กรณีระบบมีการควบคุมที่ความเร็วรอบ $\omega^* = 800 \text{ rpm}$ .....15
3.1	ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ .....18
3.2	ฟังก์ชันการสวิตช์ .....19
3.3	การเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดจาก 5 N.m เป็น 10 N.m กรณีระบบไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ .....26
3.4	ค่าเจาะจง .....28
3.5	การจำลองสถานการณ์ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ค่าพิกัด .....28
4.1	ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ .....31
4.2	โครงสร้างตัวควบคุมแบบพีไอ .....31
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์กับแรงบิดโหลดที่ความเร็วรอบ $\omega^* = 800 \text{ rpm}$ ..36
4.4	การเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดจาก 5 N.m เป็น 7 N.m เมื่อ $\omega^* = 800 \text{ rpm}$ .....38
4.5	การเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดจาก 7 N.m เป็น 9 N.m เมื่อ $\omega^* = 800 \text{ rpm}$ .....38
4.6	ค่าเจาะจง .....39
4.7	การจำลองสถานการณ์ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ค่าพิกัด .....40

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

- ก.1 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง กรณีไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ .....47
- ก.2 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ .....47



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันวงจรแปลงผันกำลัง (power converter circuits) ที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นส่วนประกอบ มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมของประเทศไทย (รวมถึงรถไฟฟ้) การใช้งานของวงจรมักต้องอาศัยตัวควบคุมเพื่อให้วงจรได้ทำงานตามวัตถุประสงค์ของวิศวกรผู้ออกแบบ เช่น วงจรควบคุมความเร็วให้คงที่ของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าทางกล วงจรควบคุมแรงดันให้คงที่ เป็นต้น โดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังจะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying model) งานวิจัยในปัจจุบันได้นำเสนอวิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) ซึ่งง่ายต่อการนำไปใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบ โดยวิธีการที่ใช้สำหรับการกำจัดพฤติกรรมการทำงานของสวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลัง เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลานั้น มีหลายวิธี เช่น วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป (generalized state-space averaging method) [1]-[3] วิธีการแปลงดีคิว (DQ transformation method) [4]-[6] วิธีค่าเฉลี่ยไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear average value model) [7]-[9] เป็นต้น งานวิจัยนี้จะนำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบรถไฟฟ้ ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ เนื่องจากวิธีการดังกล่าวเป็นที่นิยมอย่างมากสำหรับการหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี

เมื่อศึกษาถึงผลกระทบของระบบทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการควบคุม งานวิจัยใน [10] รายงานว่า วงจรแปลงผันกำลังที่มีตัวควบคุมจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงที่ (constant power load: CPL) ซึ่งโหลดดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบได้ [11]-[14] และเนื่องจากระบบรถไฟฟ้ที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ อาศัยวงจรแปลงผันแบบบัคค์ควบคุมแรงดันที่ฝั่งวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนาม ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่คำรอบการทำงาน (duty cycle) และค่าแรงบิดที่โหลด (load torque) ที่ค่าต่าง ๆ ตลอดย่านการทำงาน โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง (eigenvalue theorem) และวิธีการทำให้ระบบเป็นเชิงเส้น (linearization method) ด้วยเทคนิคการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series expansion) การกระจายจะดำเนินการรอบ ๆ จุดปฏิบัติงานโดยพิจารณาเฉพาะพจน์อันดับหนึ่งของ

อนุกรมเทย์เลอร์ [4]-[6] ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากทฤษฎี จะได้รับการยืนยันจากผลการจำลองสถานการณ์ระบบในคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบรถไฟฟ้า
- 1.2.2 เพื่อสร้างองค์ความรู้ในการหาแบบจำลองของระบบ สำหรับใช้วิเคราะห์กับระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในอนาคต เช่น ระบบเครื่องบิน ระบบเรือดำ เป็นต้น
- 1.2.3 เพื่อยืนยันเสถียรภาพของการทำงานของรถไฟฟ้าให้ครอบคลุมตลอดย่านการทำงาน

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.3.1 การจำลองสถานการณ์ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB
- 1.3.1 การพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป
- 1.3.2 การทำให้แบบจำลองเป็นเชิงเส้น ใช้อนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง
- 1.3.3 การทำงานของวงจรแปลงผันแบบบักก์ จะทำงานภายใต้โหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง
- 1.3.4 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบรถไฟฟ้าที่พิจารณา จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ระบบที่ทำการวิเคราะห์เป็นระบบที่ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันกระแสตรง วงจรแปลงผันแบบบักก์ ถูกเชื่อมต่ออยู่กับโพลคอมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก
- 1.4.1 วงจรแปลงผันแบบบักก์ทำงานในโหมดการทำงานนำกระแสต่อเนื่องเท่านั้น (continuous conduction mode: CCM)
- 1.4.2 การยืนยันผลการตอบสนองของระบบ จะใช้การจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Power System Block Set ใน SIMULINK

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ด้านการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่พิสูจน์มาจากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป

1.5.2 ได้โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับการตรวจสอบผลการตอบสนองของระบบ

1.5.3 ได้องค์ความรู้ด้านการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบรถไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นส่วนประกอบ โดยอาศัยแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์มาจากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป

1.5.4 บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ และ/หรือ นานาชาติ

1.5.5 ผลที่ได้จากการวิจัย จะนำไปสอนนักศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้า ทั้งระดับปริญญาตรี และปริญญาโท เพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับการวิจัยต่อไปในอนาคต

## 1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย

รายงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 5 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

**บทที่ 1** เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ รวมทั้งขอบเขตของการวิจัย

**บทที่ 2** กล่าวถึง ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้งานในรถกอล์ฟ การออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักก์ ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น การออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบ และผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

**บทที่ 3** นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกรณีไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังกล่าวอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปและการทำให้เป็นเชิงเส้น การคำนวณค่าในสภาวะคงตัว การตรวจสอบความถูกต้อง และการวิเคราะห์เสถียรภาพ

**บทที่ 4** นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปและการทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยทฤษฎีค่าเจาะจงและการยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

บทที่ 5 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีอยู่ด้วยกัน 1 ส่วน คือ ภาคผนวก ก. แสดงรายละเอียดชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง  
ร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB



## บทที่ 2

### ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

#### 2.1 บทนำ

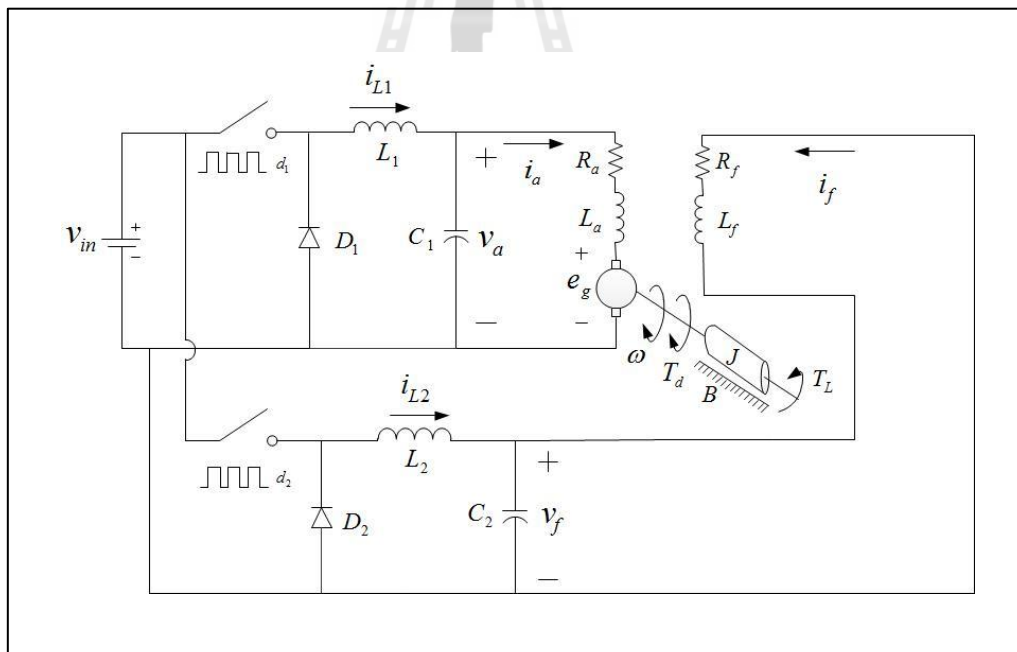
ปัจจุบันระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เช่น รถไฟฟ้า รถกอล์ฟ และตามโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น ซึ่งในโครงการวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นเกี่ยวกับการศึกษาและวิจัยระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงของรถไฟฟ้าเป็นสำคัญ สำหรับรถไฟฟ้าที่พิจารณาในโครงการวิจัยนี้เป็นรถกอล์ฟประเภท 2 ที่นั่ง[15] ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.1 ระบบการขับเคลื่อนของรถกอล์ฟประกอบด้วย วงจรแปลงผันแบบบัคส์สองวงจรทำหน้าที่จำหน่ายแรงดันไฟฟ้าให้แก่่วงจรสนามและวงจรรีเมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยใช้แหล่งจ่ายร่วมกัน การเลือกระบบดังกล่าวเนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการปรับความเร็วรอบ นั่นคือ สามารถปรับความเร็วรอบในย่านต่ำ ๆ จนกระทั่งถึงความเร็วรอบที่พิกัดได้ ซึ่งได้นำเสนอภายในบทนี้ นอกจากนี้ยังได้มีการนำเสนอการออกแบบตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัคส์ ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น รวมถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ และผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม SIMULINK ใน MATLAB ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ และกรณีที่ระบบมีตัวควบคุมความเร็วรอบอีกด้วย



รูปที่ 2.1 รถไฟฟ้าที่พิจารณา

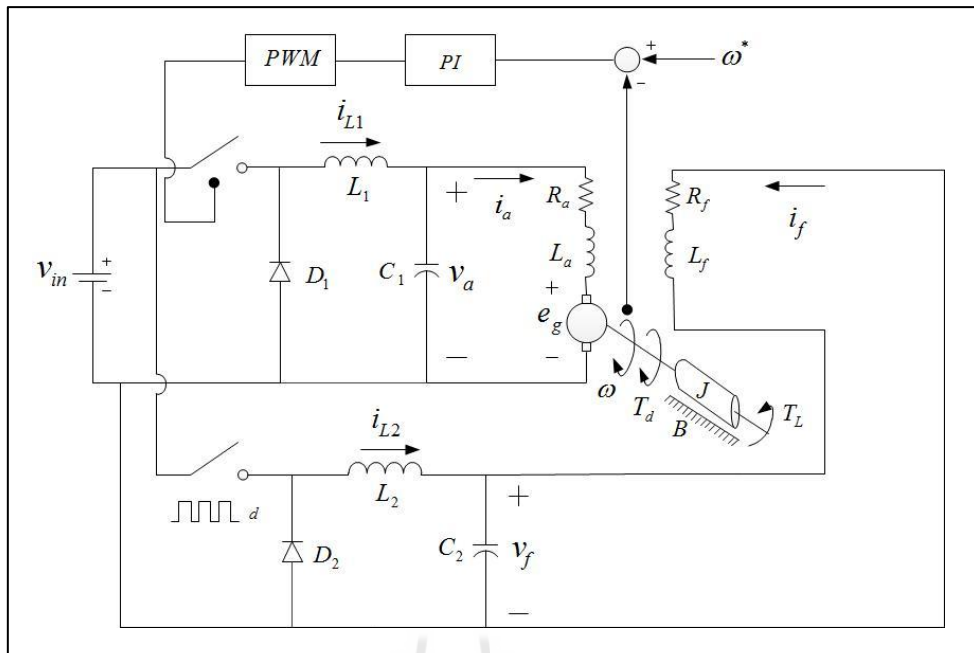
## 2.2 ระบบที่พิจารณา

ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงของรถกอล์ฟในรูปที่ 2.1 ที่พิจารณาในโครงการวิจัยนี้ประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง วงจรแปลงผันแบบบัคค์ ซึ่งเชื่อมต่อกับวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรถ่านของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยทั้งสองวงจรใช้แหล่งจ่ายร่วมกัน กรณีระบบไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ จะมีลักษณะของวงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 2.2 สำหรับรูปที่ 2.3 แสดงระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกรณีมีตัวควบคุมความเร็วรอบ ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งทำหน้าที่รักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ โดยการควบคุมจะพิจารณาให้แรงดันไฟฟ้านำด้านวงจรถ่านมีค่าคงที่ ดังนั้นวงจรแปลงผันที่เชื่อมต่อกับวงจรถ่านจึงไม่มีตัวควบคุมและถูกกำหนดความถี่ของการสวิตซิงให้คงที่ ส่วนวงจรแปลงผันที่เชื่อมต่อกับวงจรอาร์เมเจอร์จะถูกควบคุมการ สวิตซิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ เพื่อให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นไปตามที่กำหนด



รูปที่ 2.2 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ





รูปที่ 2.3 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกรณีที่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ

### 2.3 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ซึ่งใช้เป็นวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าดังที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 2.2 โดยการออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-1) และ สมการที่ (2-2) ดังนี้

$$L = \frac{V_o(V_s - V_o)}{f_s \Delta I V_s} \quad (2-1)$$

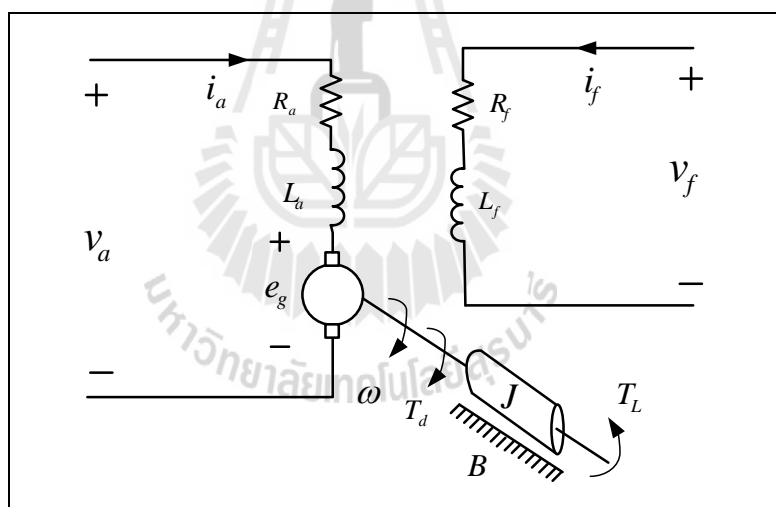
$$C = \frac{V_o(V_s - V_o)}{8L\Delta V f_s^2 V_s} \quad (2-2)$$

เมื่อ	$\Delta I$	คือ	กระแสพลัว (ripple current)
	$\Delta V$	คือ	แรงดันไฟฟ้าพลัว (ripple voltage)
	$V_s$	คือ	แรงดันไฟฟ้าอินพุต
	$V_o$	คือ	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต
	$f_s$	คือ	ความถี่สวิตช์

สำหรับในโครงการวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่ากระแสพริ้ว (ripple current :  $\Delta I$ )  $\leq 15$  A [17] แรงดันพริ้ว (ripple voltage :  $\Delta V$ )  $\leq 1$  V แรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ( $V_s$ ) เท่ากับ 48 V แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ( $V_o$ ) เท่ากับ 24 V ความถี่สวิตช์ ( $f_s$ ) เท่ากับ 10 kHz ซึ่งจากการคำนวณตามสมการที่ (2-1) และ (2-2) จะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ 0.08 mH และตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 187.5  $\mu$ F

## 2.4 ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่พิจารณาในโครงการวิจัยนี้ [18] มีวงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งมอเตอร์ชนิดนี้นิยมใช้กันมากในภาคอุตสาหกรรม ด้วยคุณสมบัติที่เหมาะสมในการควบคุมความเร็วในการขับเคลื่อนและมีแรงบิดเริ่มเดินเครื่องสูงเหมาะกับงานยกของ [19]งานจุดลากและงานขับเคลื่อน เป็นต้น



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

เมื่อ	$v_a$	คือ	แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ (V)
	$v_f$	คือ	แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ทางด้านวงจรสนาม (V)
	$i_a$	คือ	กระแสอาร์เมเจอร์ (A)
	$i_f$	คือ	กระแสสนาม (A)
	$L_a$	คือ	ความเหนี่ยวนำทางด้านอาร์เมเจอร์ (H)

$L_f$	คือ	ความเหนี่ยวนำทางดำนสนาม (H)
$R_a$	คือ	ความต้านทานอาร์มเจอร์ (Ω)
$R_f$	คือ	ความต้านทานสนาม (Ω)
$\omega$	คือ	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)
$J$	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของมอเตอร์ (kg · m <sup>2</sup> )
$B$	คือ	ค่าคงที่เนื่องจากความเสียดทานความหนืด (N · m/rad)
$e_g$	คือ	แรงดันย้อนกลับ (V)
$T_L$	คือ	แรงบิดของโหลด (N · m)
$T_d$	คือ	แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น (N · m)

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.4 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของแรงดันทางด้านอาร์มเจอร์ได้ดังสมการที่ (2-3)

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_g \quad (2-3)$$

พิจารณากรณีกระแสสนามมีค่าคงที่ และเมื่อ  $e_g = k_e \omega$  ดังนั้นสมการของแรงดันทางด้านอาร์มเจอร์จะได้ดังสมการที่ (2-4)

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + k_e \omega \quad (2-4)$$

เมื่อพิจารณาสมการการหมุนของมอเตอร์จะได้ดังสมการที่ (2-5)

$$T_d = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (2-5)$$

จากสมการที่ (2-5) เมื่อกระแสสนามมีค่าคงที่ ดังนั้น เมื่อแทนค่า  $T_d = k_t i_a$  ในสมการที่ (2-5) จะได้ดังสมการที่ (2-6) ดังนี้

$$k_t i_a = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (2-6)$$

จากสมการที่ (2-4) และ (2-6) เมื่อจัดรูปสมการใหม่ และเขียนให้อยู่ในรูปของสมการสถานะ (state equation) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังสมการที่ (2-7)

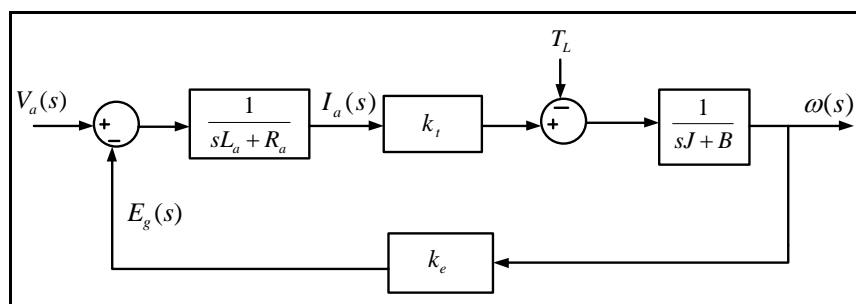
$$\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{k_e}{L_a} \\ \frac{k_t}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ T_L \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น[17] สามารถพิจารณาจากสมการทางไฟฟ้าและสมการทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จากสมการที่ (2-4) และ (2-6) โดยทำการแปลงสมการที่ (2-4) และ (2-6) ให้อยู่ในรูปโดเมนเอสโดยใช้การแปลงลาปลาซ พร้อมทั้งพิจารณาค่าเริ่มต้นต่าง ๆ เป็นศูนย์ และจัดรูปสมการใหม่ให้อยู่ในรูปของกระแสอาร์เมเจอร์และความเร็วเชิงมุม จะได้ดังสมการที่ (2-8) และ (2-9) ดังนี้

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - k_e \omega(s)}{sL_a + R_a} \quad (2-8)$$

$$\omega(s) = \frac{k_t I_a(s) - T_L(s)}{(sJ + B)} \quad (2-9)$$

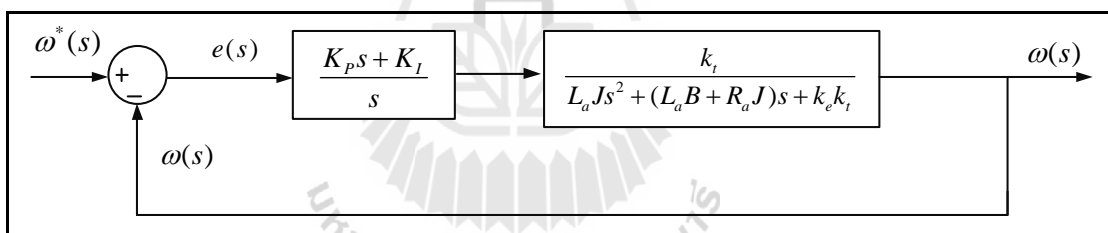
จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (2-8) และ (2-9) สามารถนำมาเขียนเป็นแผนภาพบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

## 2.5 การออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบ

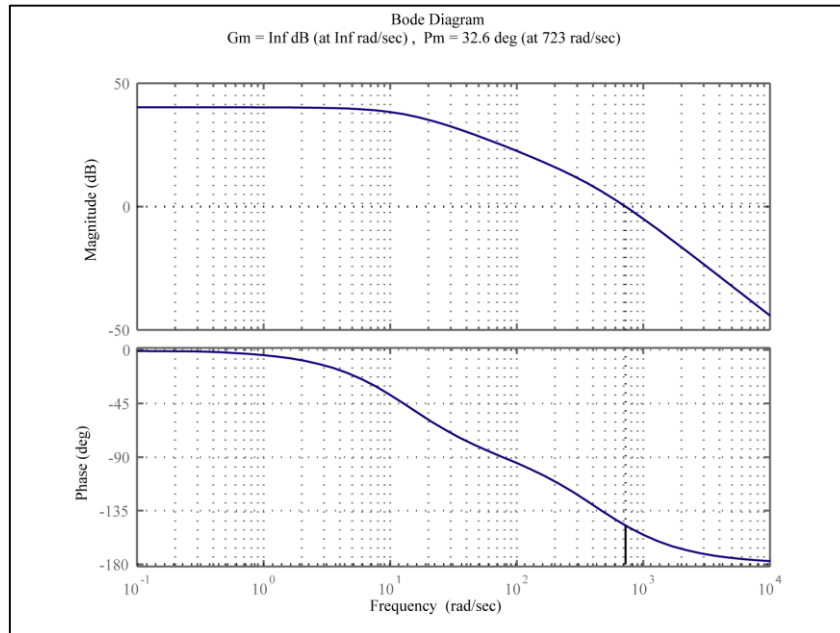
ในส่วนนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยในโครงการวิจัยนี้ได้เลือกระบบควบคุมที่มีโครงสร้างตามแผนภาพบล็อกดังรูปที่ 2.6 ระบบจะรับสัญญาณอ้างอิงความเร็วรอบ  $\omega^*(s)$  ซึ่งเป็นสัญญาณคำสั่งให้มอเตอร์ไฟฟ้ามีความเร็วรอบตาม  $\omega^*(s)$  ความเร็วรอบของมอเตอร์  $\omega(s)$  ซึ่งเป็นผลตอบสนองของระบบจะถูกวัดและป้อนกลับเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง  $\omega^*(s)$  ซึ่งได้เป็นสัญญาณผิดพลาด  $e(s)$  สำหรับป้อนให้ตัวควบคุม ซึ่งตัวควบคุมจะนำสัญญาณค่าความผิดพลาดดังกล่าวไปดำเนินการตามกระบวนการ เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมสำหรับส่งไปปรับความถี่สวิตชิงของวงจรแปลงผันแบบบักคัด้านที่เชื่อมต่อกับวงจรอาร์เมเจอร์ เพื่อควบคุมความเร็วรอบให้มีค่าเท่ากับ  $\omega^*(s)$  ตามที่ต้องการ สำหรับชนิดของตัวควบคุมที่เลือกใช้ในโครงการวิจัยนี้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอ การออกแบบตัวควบคุมอาศัยวิธีการออกแบบดั้งเดิม ซึ่งดำเนินการในโดเมนความถี่ โดยพึ่งพาแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและมีพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ามีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.6 ระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

พารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบประกอบด้วย  $R_a = 0.081\Omega$   $L_a = 0.194\text{mH}$   $k_e = k_t = 9.75 \times 10^{-3} \text{ N.m/A}$   $B = 5.89 \times 10^{-3} \text{ N.m/rad}$  และ  $J = 8.2 \times 10^{-5} \text{ Kg.m}^2$  การออกแบบกำหนดให้ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว  $ess \leq 1\%$  การพุ่งเกิน  $P.O. \leq 5\%$  และเพื่อเป็นการประกันว่าระบบจะไม่ขาดเสถียรภาพเมื่อนำไปใช้งานจริง จึงกำหนดให้ระบบควบคุมวงปิด มีส่วนเพื่ออัตรายาย  $GM \geq 8\text{dB}$  และส่วนเพื่อเฟส  $PM \geq 50^\circ$  จากแผนภาพบล็อกของระบบวงปิดในรูปที่ 2.6 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบขณะที่ไม่พิจารณาตัวควบคุมพีไอได้ดังสมการที่ (2-10) และสามารถสร้างเป็นแผนภาพโพลได้ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุม โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

$$GH(s) = \frac{612,900}{s^2 + 456s + 5,976} \quad (2-10)$$



รูปที่ 2.7 แผนภาพโบดของระบบขณะที่ไม่พิจารณาตัวควบคุมแบบพีไอ

**ขั้นตอนที่ 1** หาค่าความถี่วิกฤต  $\omega_1$  ที่ทำให้มุมของ  $G(j\omega_1)H(j\omega_1)$  มีค่าเท่ากับ  $-180^\circ + \phi_m + 5^\circ$  เมื่อ  $\phi_m$  คือ ค่าส่วนเฟสที่ต้องการ ซึ่งกำหนดให้  $\phi_m = 50^\circ$  จึงคำนวณมุมได้เท่ากับ  $-125^\circ$  จะได้ค่าความถี่วิกฤต  $\omega_1 = 362 \text{ rad/sec}$  โดยอาศัยข้อมูลจากแผนภาพโบดในรูปที่ 2.7

**ขั้นตอนที่ 2** นำค่า  $\omega_1 = 362 \text{ rad/sec}$  ไปคำนวณอัตราขยาย  $K_p$  และ  $K_I$  โดยอาศัยสมการที่ (2-11) และ (2-12) ตามลำดับ

$$K_p = \frac{1}{|G(j\omega_1)H(j\omega_1)|} \quad (2-11)$$

$$K_I = 0.1\omega_1 K_p \quad (2-12)$$

ซึ่งจะได้ค่า  $K_p = 0.2987$  และ  $K_I = 9.8863$

**ขั้นตอนที่ 3** คำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอได้จากสมการที่ (2-13)

$$G_C = \frac{K_p s + K_I}{s} \quad (2-13)$$

ดังนั้น สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอ สำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังสมการที่ (2-14)

$$G_C = \frac{0.2987s + 9.8863}{s} \quad (2-14)$$

## 2.6 ผลการจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในหัวข้อนี้แบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังต่อไปนี้

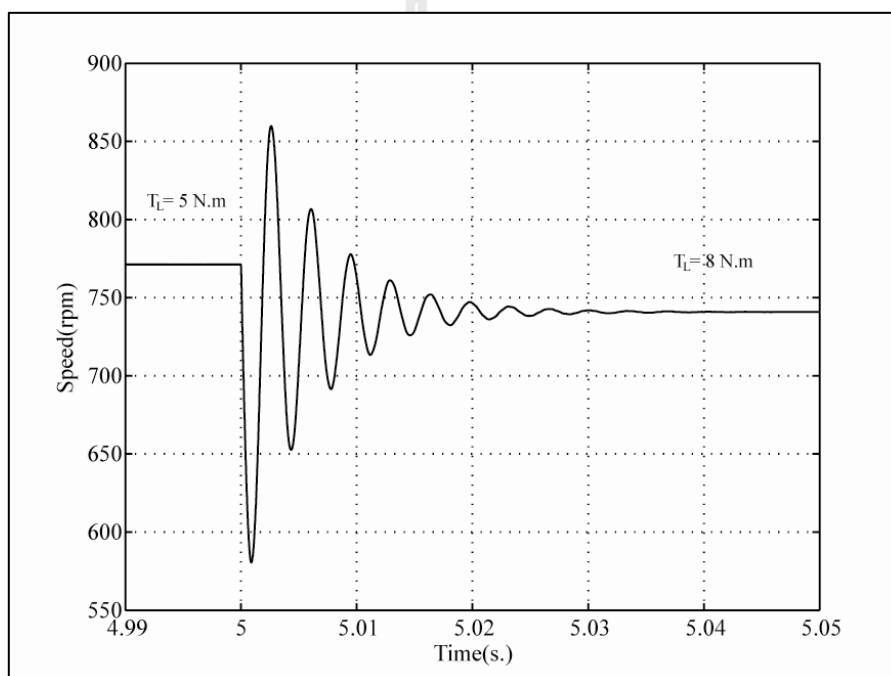
**กรณีที่ 1** ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าที่ไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ ซึ่งระบบไฟฟ้าดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 โดยมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบดังตารางที่ 2.1[17] การจำลองสถานการณ์พิจารณาให้ค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตเท่ากับ 24 โวลต์ ทั้งวงจรมอเตอร์และวงจรรีเมเจอร์ และกำหนดให้แรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 8 N.m ที่เวลา  $t = 5$  วินาที ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 2.8

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของระบบ

พารามิเตอร์	รายละเอียด
$R_a$	0.081 $\Omega$
$L_a$	$1.944 \times 10^{-4}$ H
$J$	$8.2 \times 10^{-5}$ kg.m <sup>2</sup>
$B_m$	$5.89 \times 10^{-3}$ N.m/rad
$C_1$	187.5 $\mu$ F
$L_1$	0.08 mH
$C_2$	187.5 $\mu$ F
$L_2$	0.08 mH

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของระบบ(ต่อ)

พารามิเตอร์	รายละเอียด
$R_f$	1.35 $\Omega$
$L_f$	0.396 H
$L_{af}$	0.0156
$d_1$	0.5
$d_2$	0.5



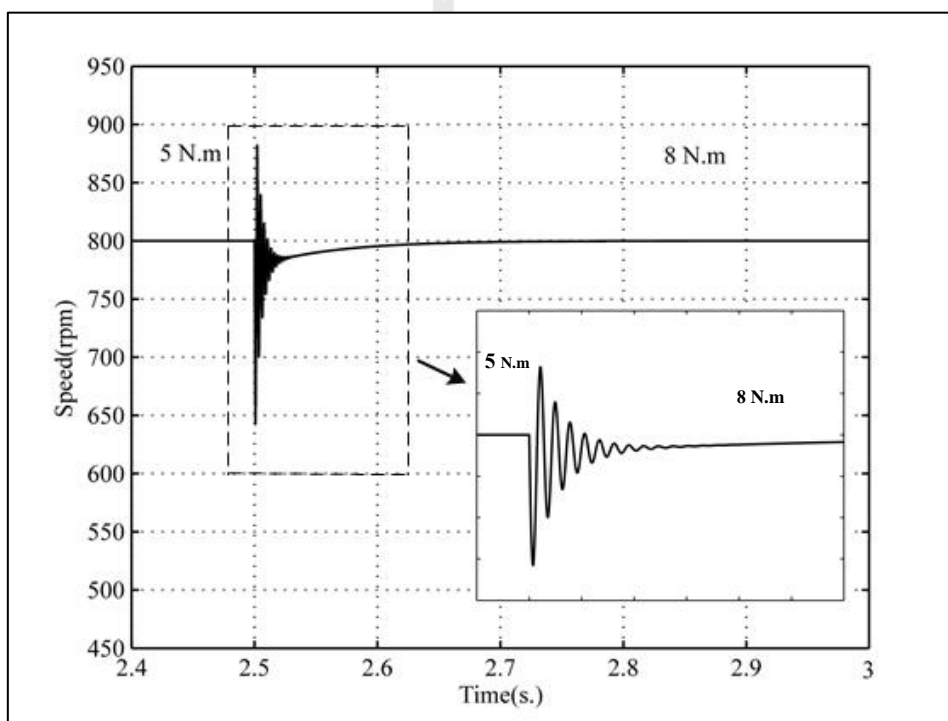
รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดจาก 5 N.m เป็น 8 N.m  
กรณีระบบไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 2.8 พบว่า ขณะที่ช่วงเวลา  $t = 0 - 5$  วินาที แรงบิดโหลดของมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 5 N.m และความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าประมาณ 771 rpm เมื่อแรงบิดโหลดของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 8 N.m ที่เวลา  $t = 5$  วินาที พบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงแกว่งไปมาและเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ความเร็วรอบประมาณ 740 rpm จากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะสังเกตได้ว่า เมื่อแรงบิดโหลดของมอเตอร์มีค่า



เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าลดลง สำหรับกรณีระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ

**กรณีที่ 2** ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ ซึ่งมีระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 2.3 และมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่นเดียวกับกับกรณีที่ 1 สำหรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้นำเสนอไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.5 ในทำนองเดียวกันกับกรณีที่ 1 การจำลองสถานการณ์กำหนดให้แรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 8 N.m ที่  $t = 2.5$  วินาที และกำหนดให้ความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 800 rpm ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดจาก 5 N.m เป็น 8 N.m  
กรณีระบบมีการควบคุมที่ความเร็วรอบ  $\omega^* = 800$  rpm

สำหรับรูปที่ 2.9 แสดงผลตอบสนองสัญญาณความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า กรณีที่มีตัวควบคุมความเร็วรอบซึ่งจะพบว่า ความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 8 N.m ระบบดังกล่าวสามารถรักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าให้คงที่ตามที่กำหนดไว้ได้

## 2.7 สรุป

เนื้อหาในบทนี้เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งอาศัยวงจรแปลงผันแบบบัลค์สองวงจร ทำหน้าที่ในการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่วงจรสนามและวงจรอาร์เมเจอร์ โดยวงจรแปลงผันทั้งสองใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกันซึ่งในที่นี้คือ แบตเตอรี่ของรถกอล์ฟขนาด 48 โวลต์ พร้อมทั้งรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัลค์ ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น และการออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์บนโดเมนความถี่ด้วยวิธีแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ยังได้นำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบและกรณีที่ระบบมีตัวควบคุมความเร็วรอบ โดยเนื้อหาที่นำเสนอในบทนี้ถือเป็นองค์ความรู้และข้อมูลในการนำศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ระบบต่อไป



## บทที่ 3

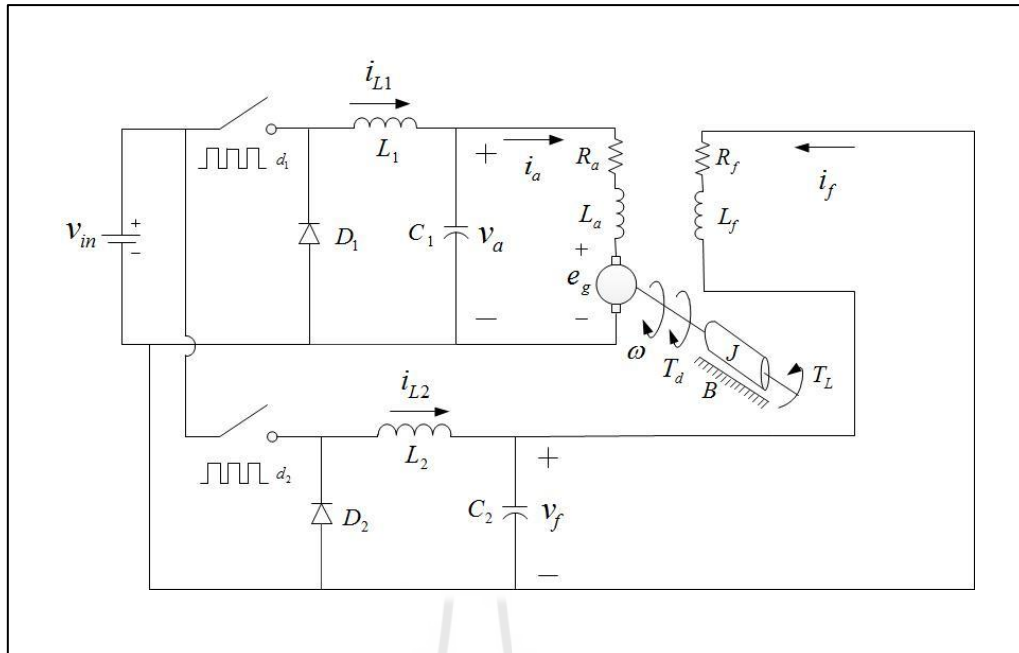
### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง กรณีไม่มีตัวควบคุม

#### 3.1 บทนำ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังมีความสำคัญอย่างยิ่ง สำหรับการจำลองสถานการณ์เพื่อการวิเคราะห์และออกแบบระบบไฟฟ้า ก่อนนำไปใช้งานจริง ซึ่งในบทนี้จะนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ ซึ่งระบบที่พิจารณาดังกล่าวมีการใช้งานกันในระบบขับเคลื่อนของรถกอล์ฟ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอาศัยวิธีการค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป (generalized state-space averaging method) [1] ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถทำให้แบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาเปลี่ยนเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาได้ ทำให้ช่วยลดระยะเวลาในการจำลองสถานการณ์ และลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์ระบบ ซึ่งระบบดังกล่าวถือเป็นพื้นฐานสำหรับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ ซึ่งภายในบทนี้ได้มีการนำเสนอ การทำให้เป็นเชิงเส้น การคำนวณค่าในสภาวะคงตัว การตรวจสอบความถูกต้อง รวมถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพและการอภิปรายผล

#### 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทำให้เป็นเชิงเส้น

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง วงจรแปลงผันแบบบับคั้สองวงจรเชื่อมต่อกับวงจรสนามและวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น และวงจรแปลงผันแบบบับคั้ทั้งสองวงจรจะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกัน [17] ซึ่งระบบไฟฟ้าดังกล่าวเป็นระบบขับเคลื่อนในรถกอล์ฟ กรณีที่ไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ แบบจำลองของระบบอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปมักเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา เนื่องจากผลการสวิตชิงของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งมีความซับซ้อนและยุ่งยากต่อการวิเคราะห์ระบบ ดังนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณาจะใช้วิธีการค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะขจัดผลการสวิตชิงของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา



รูปที่ 3.1 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 ที่อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไปสามารถอธิบายได้ดังนี้ โดยวิธีการดังกล่าวจะพิจารณาสัญญาณ  $f(t)$  ใดๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ ซึ่งมีคาบเป็น  $T$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (complex Fourier series) ดังสมการที่ (3-1)

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_k(t) e^{jk\omega_s t} \tag{3-1}$$

เมื่อ  $\omega_s = \frac{2\pi}{T}$  และกำหนดให้  $\langle x \rangle_k(t)$  คือ สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อน (complex Fourier coefficient) ได้ดังสมการที่ (3-2)

$$\langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t) e^{-jk\omega_s t} dt \tag{3-2}$$

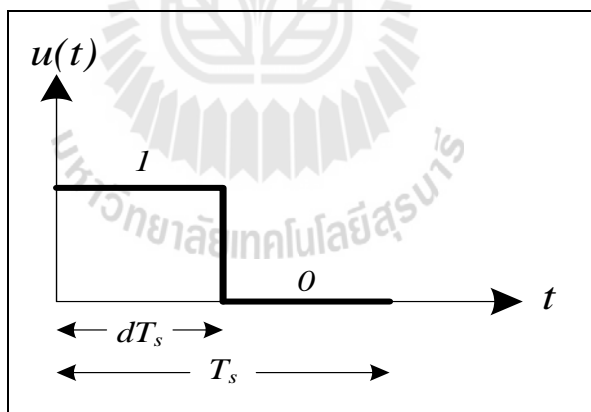
คุณสมบัติของสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อน เมื่อ  $T$  คือ คาบทางเวลา  $k$  คือ ค่าอันดับ และการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ ใช้คุณสมบัติของการคำนวณดังสมการที่ (3-3)

$$\frac{d\langle x \rangle_k}{dt} = \left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_k - jk\omega_s \langle x \rangle_k \quad (3-3)$$

พิจารณาสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของฟังก์ชันการสวิตช์ได้ดังสมการที่ (3-4)

$$\langle u \rangle_k = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) e^{-jk\omega_s t} dt \quad (3-4)$$

ฟังก์ชันการสวิตช์ของระบบมีลักษณะของรูปสัญญาณดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ฟังก์ชันการสวิตช์

เงื่อนไขของฟังก์ชันการสวิตช์เป็นดังสมการที่ (3-5)

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (3-5)$$

จากเงื่อนไขของฟังก์ชันการสวิตช์ข้างต้น สามารถพิจารณาสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของฟังก์ชันการสวิตช์ได้ดังสมการที่ (3-6)

$$\langle u \rangle_k = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u(t) e^{-jk\omega_s t} dt \quad (3-6)$$

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้ค่า  $k = 0$  นั่นคือ ไม่พิจารณาการสั่นไกวของสัญญาณ หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นการประมาณค่าอันดับศูนย์ (zero-order approximation) ดังนั้นแทนค่า  $k = 0$  ในสมการที่ (6) จะได้สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของฟังก์ชันการสวิตช์ดังสมการที่ (3-7)

$$\langle u \rangle_0 = d \quad (3-7)$$

เมื่อ  $d$  คือ วัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ของฟังก์ชันการสวิตช์ และกำหนดให้ สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของฟังก์ชันการสวิตช์ทางด้านวงจรรออาร์เมเจอร์ และวงจรถนอมเป็นดังสมการที่ (3-8) และ (3-9) ตามลำดับ

$$\langle u_1 \rangle_0 = d_1 \quad (3-8)$$

$$\langle u_2 \rangle_0 = d_2 \quad (3-9)$$

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.1 มีตัวแปรสถานะของวงจร คือ  $i_{L1}$ ,  $v_a$ ,  $i_a$ ,  $\omega$ ,  $i_{L2}$ ,  $v_f$  และ  $i_f$  เมื่อพิจารณาหาสมการอนุพันธ์จากวงจรสมมูลโดยใช้กฎแรงดันและกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ได้ตามสมการที่ (3-10) ถึง (3-16)

$$i_{L1} = -\frac{v_a}{L_1} + \frac{1}{L_1} v_{in} u(t) \quad (3-10)$$

$$\dot{v}_a = \frac{1}{C_1} i_{L1} - \frac{1}{C_1} i_a \quad (3-11)$$

$$i_a = \frac{1}{L_a} v_a - \frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{k i_f}{L_a} \omega \quad (3-12)$$

$$\dot{\omega} = \frac{k i_f}{J} i_a - \frac{B}{J} \omega - \frac{1}{J} T_L \quad (3-13)$$

$$i_{L2} = -\frac{v_f}{L_2} + \frac{1}{L_2} v_{in} u(t) \quad (3-14)$$

$$\dot{v}_f = \frac{1}{C_2} i_{L2} - \frac{1}{C_2} i_f \quad (3-15)$$

$$i_f = \frac{1}{L_f} v_f - \frac{R_f}{L_f} i_f \quad (3-16)$$

การใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะหาแบบจำลอง คือ การใช้สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของตัวแปรสถานะ  $i_{L1}$ ,  $\dot{v}_a$ ,  $i_a$ ,  $\dot{\omega}$ ,  $i_{L2}$ ,  $\dot{v}_f$  และ  $i_f$  เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง พิจารณาจากสมการที่ (3) โดยแทนค่า  $k = 0$  จะได้  $i_{L1} = \langle i_{L1} \rangle_0 = x_1$ ,  $v_a = \langle v_a \rangle_0 = x_2$ ,  $i_a = \langle i_a \rangle_0 = x_3$ ,  $\omega = \langle \omega \rangle_0 = x_4$ ,  $i_{L2} = \langle i_{L2} \rangle_0 = x_5$ ,  $v_f = \langle v_f \rangle_0 = x_6$  และ  $i_f = \langle i_f \rangle_0 = x_7$  โดยที่  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$ ,  $x_5$ ,  $x_6$  และ  $x_7$  เป็นตัวแปรสถานะของระบบที่พิจารณา และจากนั้นแทนตัวแปรสถานะของระบบที่พิจารณาลงในสมการอนุพันธ์ของแบบจำลองในสมการที่ (10) ถึง (16) จะได้ดังสมการที่ (3-17) ถึง (3-23) ดังนี้

$$x_1 = -\frac{1}{L_1} x_2 + \frac{d_1}{L_1} \quad (3-17)$$

$$x_2 = \frac{1}{C_1} x_1 - \frac{1}{C_1} x_3 \quad (3-18)$$

$$x_3 = \frac{1}{L_a} x_2 - \frac{R_a}{L_a} x_3 - \frac{k}{L_a} x_4 x_7 \quad (3-19)$$

$$x_4 = \frac{k}{J} x_3 x_7 - \frac{B}{J} x_4 - \frac{1}{J} T_L \quad (3-20)$$

$$x_5 = -\frac{1}{L_2} x_6 + \frac{d_2}{L_2} \quad (3-21)$$

$$x_6 = \frac{1}{C_2} x_5 - \frac{1}{C_2} x_7 \quad (3-22)$$

$$x_7 = \frac{1}{L_f} x_6 - \frac{R_f}{L_f} x_7 \quad (3-23)$$

จากสมการที่ (3-17) ถึง (3-23) พบว่า เป็นสมการอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถเรียกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมีความยุ่งยากและซับซ้อนมากต่อการนำไปจำลองสถานการณ์หรือการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องทำให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์ที่พิจารณาเทอมแรกเท่านั้น สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณารอบจุดปฏิบัติการหรือจุดการทำงานของระบบได้ดังสมการที่ (3-24) ถึง (3-25) ตามลำดับ

$$\dot{\delta \mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) \delta \mathbf{u} \quad (3-24)$$

$$\delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) \delta \mathbf{u} \quad (3-25)$$



$$\text{เมื่อกำหนดให้ } \delta x = [\delta x_1 \ \delta x_2 \ \delta x_3 \ \delta x_4 \ \delta x_5 \ \delta x_6 \ \delta x_7]^T$$

$$\delta u = [\delta v_{in} \ \delta T_L]^T$$

$$\delta y = [\delta x_4]$$

สำหรับเมตริกซ์  $A(x_o, u_o)$ ,  $B(x_o, u_o)$ ,  $C(x_o, u_o)$  และ  $D(x_o, u_o)$  แสดงได้ดังสมการที่ (3-26) ถึง

(3-29) ตามลำดับ

$$A(x_o, u_o) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_1} & 0 & \frac{-1}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_a} & \frac{-R_a}{L_a} & \frac{-(ki_{fo})}{L_a} & 0 & 0 & \frac{-(k\omega_o)}{L_a} \\ 0 & 0 & \frac{(ki_{fo})}{J} & \frac{-B}{J} & 0 & 0 & \frac{(ki_{ao})}{J} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & 0 & \frac{-1}{C_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_f} & \frac{-R_f}{L_f} \end{bmatrix} \quad (3-26)$$

$$B(x_o, u_o) = \begin{bmatrix} \frac{d_1}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{J} \\ \frac{d_2}{L_2} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-27)$$

$$C(x_o, u_o) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-28)$$

$$D(x_o, u_o) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-29)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3-24) ถึง (3-29) ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นแล้ว สังเกตได้ว่า แบบจำลองดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติการของระบบ โดยการระบุสถานะของจุดการทำงานของระบบจะขึ้นอยู่กับแรงบิดโหลดของมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งในที่นี้คือ  $T_L$

### 3.3 การคำนวณค่าในสถานะคงตัว

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 3.2 เป็นแบบจำลองที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นที่พิจารณารอบจุดปฏิบัติการ ซึ่งต้องทราบค่าของ  $i_{a,o}$   $i_{f,o}$  และ  $\omega_o$  เพื่อใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-30) ถึง (3-32) ตามลำดับ

$$i_{a,o} = \frac{V_a - \omega(ki_f)}{R_a} \quad (3-30)$$

$$i_{f,o} = \frac{V_f}{R_f} \quad (3-31)$$

$$\omega_o = \frac{V_a ki_f - R_a T_L}{(ki_f)^2 + R_a B} \quad (3-32)$$

### 3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

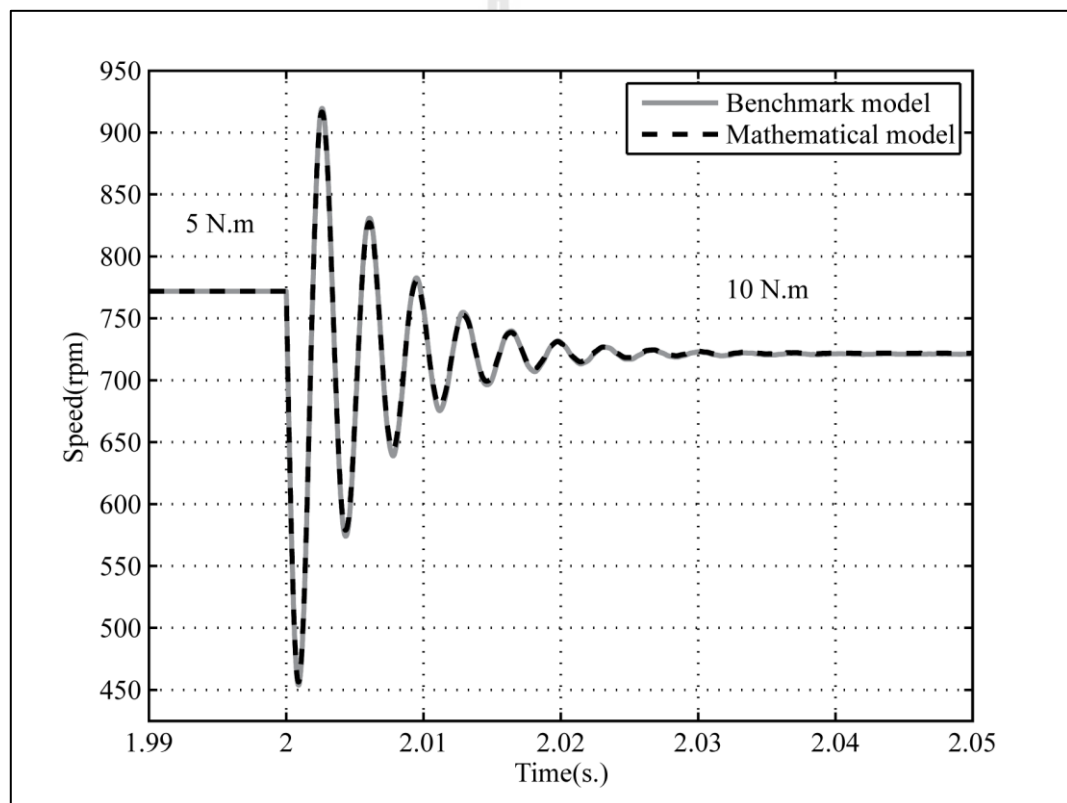
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองมีความสำคัญมาก ก่อนที่จะนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้ในการจำลองสถานการณ์ การวิเคราะห์หรือการออกแบบระบบไฟฟ้า ดังนั้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3-24) ถึง (3-29) ซึ่งเป็นแบบจำลองของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 ซึ่งได้มาจากการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป และการทำให้เป็นเชิงเส้น สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่า Benchmark model โดยที่ Benchmark model ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 แสดงไว้ในภาคผนวก ข ในรูปที่ ข.1 ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์จะนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเรียกว่า Mathematical model โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบดังตารางที่ 3.1 มอเตอร์ที่ใช้ในรถกอล์ฟเป็นมอเตอร์กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 48 V และพิกัดกำลังไฟฟ้า 8 Hp การจำลองสถานการณ์กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าอินพุตเท่ากับ 24 โวลต์ ทั้งวงจรสนามและวงจรรีเมเจอร์ โดยกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดของมอเตอร์จาก 5 N.m เป็น 10 N.m ที่เวลา 2 วินาที ผลตอบสนองสัญญาณความเร็วรอบของมอเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของระบบ

พารามิเตอร์	รายละเอียด
$R_a$	0.081 $\Omega$
$L_a$	$1.944 \times 10^{-4}$ H
$J$	$8.2 \times 10^{-5}$ kg.m <sup>2</sup>
$B_m$	$5.89 \times 10^{-3}$ N.m/rad
$C_1$	187.5 $\mu$ F
$L_1$	0.08 mH
$C_2$	187.5 $\mu$ F
$L_2$	0.08 mH

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของระบบ(ต่อ)

พารามิเตอร์	รายละเอียด
$R_f$	1.35 $\Omega$
$L_f$	0.396 H
$L_{af}$	0.0156
$d_1$	0.5
$d_2$	0.5



รูปที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงแรงบิด โหลดจาก 5 N.m เป็น 10 N.m  
กรณีระบบไม่มีการควบคุมความเร็วรอบ

ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่า ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน พบว่า ผลการจำลองมีแนวโน้มเดียวกัน ทั้งสถานะชั่วครู่และสถานะคงตัว ซึ่งแสดงว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุด

ขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่ไม่มีตัวควบคุมที่พิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไปมีความถูกต้องสามารถที่จะนำไปใช้สำหรับการออกแบบและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ ซึ่งจะได้นำเสนอในหัวข้อที่ 3.5 ต่อไป

### 3.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพ

การวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 เนื่องจากแรงบิดโหลดของมอเตอร์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไปมาประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ โดยอาศัยทฤษฎีบทการหาค่าเจาะจง[4] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากเมตริกซ์  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  ตามสมการที่ (3-33)

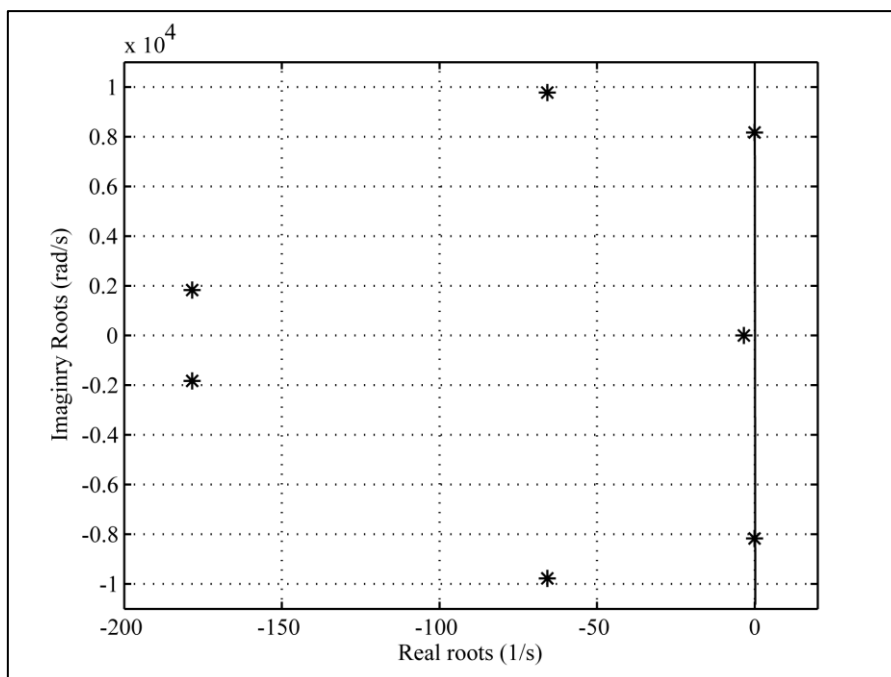
$$\det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \quad (3-33)$$

ระบบจะยังคงมีเสถียรภาพ ถ้า

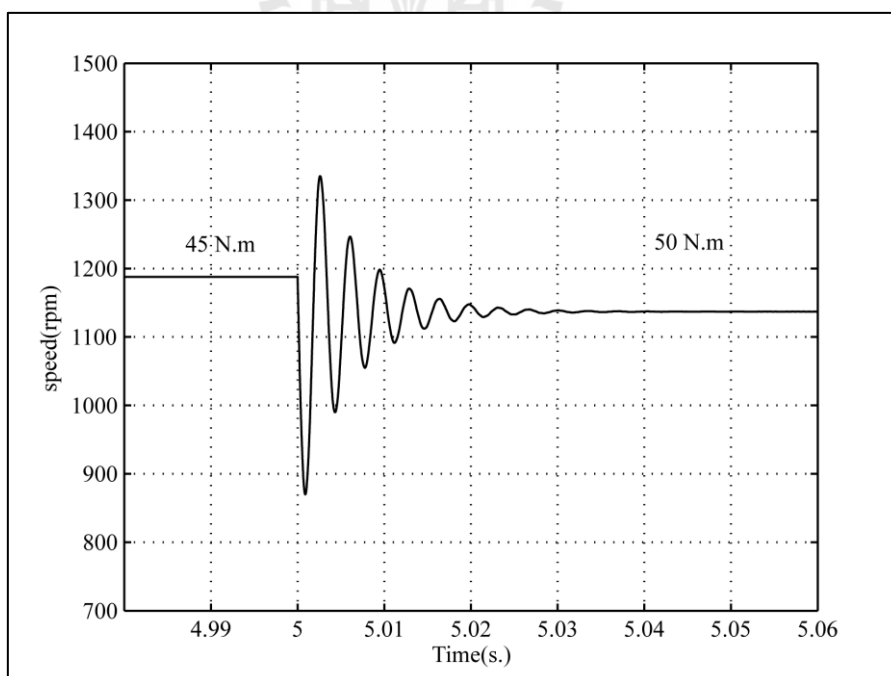
$$\text{real } \lambda_i < 0 \quad (3-34)$$

เมื่อ  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  ( $n =$  จำนวนตัวแปรสถานะ)

การวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 ซึ่งอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น คำนวณค่าเจาะจงของเมตริกซ์  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  โดยมีค่าพารามิเตอร์ของระบบดังตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบดังกล่าว พิจารณาให้แรงบิดโหลดเปลี่ยนแปลงจากสถานะไร้โหลดจนถึงค่าโหลดพิกัด การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะทำให้ค่า  $i_{a,o}$  และ  $\omega_o$  ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีการเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งพบว่า ระบบมีเสถียรภาพ และค่าเจาะจงไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยการยืนยันผลการวิเคราะห์ได้จำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ที่ค่าโหลดพิกัด ซึ่งกำหนดให้ค่าแรงดันอินพุตด้านวงจรรอาร์เมเจอร์มีค่าเท่ากับ 48 โวลต์ และแรงบิดโหลดที่ค่าพิกัดเท่ากับ 50 N.m พบว่า ระบบยังคงมีเสถียรภาพ กล่าวคือระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงยังคงสามารถรักษาความเร็วรอบให้คงตัวได้ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ค่าเจาะจง



รูปที่ 3.5 การจำลองสถานการณ์ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ค่าพิกัด

### 3.6 สรุป

เนื้อหาในบทนี้เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งเป็นระบบขับเคลื่อนของรถกอล์ฟ โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไปและการทำให้เป็นเชิงเส้น โดยการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์กับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องทั้งสถานะชั่วครู่และสถานะคงตัว สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ด้วยทฤษฎีค่าเจาะจง และยืนยันผลการวิเคราะห์ดังกล่าวด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่า ระบบมีเสถียรภาพ ค่าเจาะจงมีค่าคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ในบทนี้ สรุปได้ว่า การทำงานของรถกอล์ฟจะมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงานตั้งแต่ในสถานะไร้โหลดจนถึงพิกัดของรถกอล์ฟ แต่อย่างไรก็ตามการใช้งานรถกอล์ฟจะใช้งานในสถานะการควบคุมแบบวงปิด ดังนั้นในบทต่อไป จะทำการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบการขับเคลื่อนรถกอล์ฟที่มีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ เพื่อทำการยืนยันการที่เสถียรภาพของระบบที่มีการควบคุมผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รายละเอียดดังกล่าวจะนำเสนอในบทที่ 4 นอกจากนี้ผลงานวิจัยในบทที่ 3 ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่มีดัชนีผลกระทบเท่ากับ 0.4 และอยู่ในฐานข้อมูลสากล ซึ่งมีรายละเอียดของบทความดังต่อไปนี้

- Phurich Ngamkong, Pijit Kochcha, Kongpan Areerak, Sarawut Sujitjorn, and Kongpol Areerak, “Applications of the generalized state-space averaging method to modelling of DC–DC power converters”, *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems* Vol. 18, No. 3, June 2012, pp. 243–260

## บทที่ 4

### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

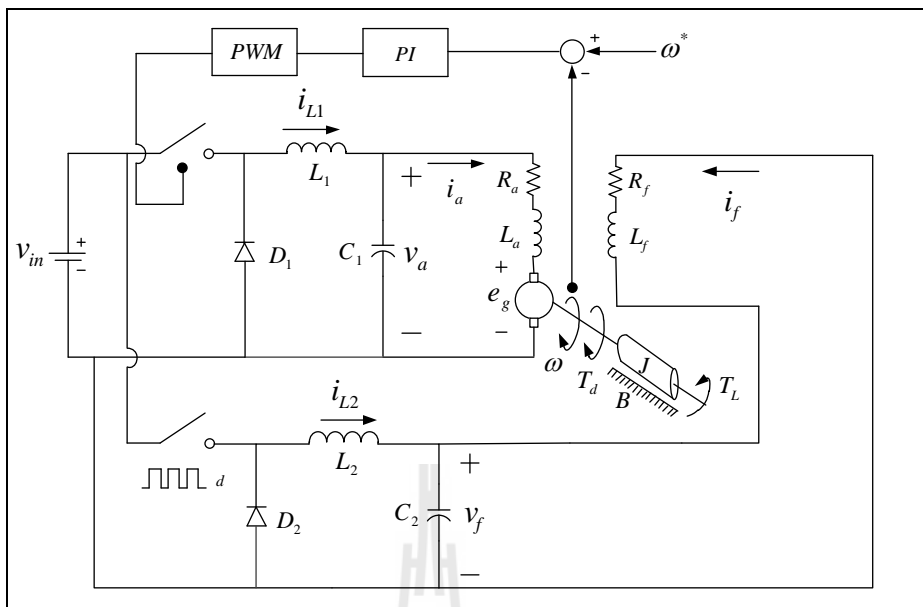
#### 4.1 บทนำ

การจำลองสถานการณ์ การออกแบบและการวิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลัง ซึ่งมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นส่วนประกอบก่อนการนำไปใช้งานจริงมีความสำคัญมาก เพื่อให้ระบบทำงานตามวัตถุประสงค์ของวิศวกรผู้ออกแบบ โดยการวิเคราะห์และการออกแบบมีความจำเป็นที่จะต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์ระบบ แบบจำลองของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยทั่วไปมักเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาเนื่องจากการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งมีความซับซ้อนมากไม่สามารถนำทฤษฎีพื้นฐานเข้ามาวิเคราะห์ได้ การกำจัดปัญหาดังกล่าวมีหลายวิธีด้วยกัน โดยในงานวิจัยนี้จะอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมอย่างมากสำหรับการหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี และเนื่องจากระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ใช้วงจรแปลงผันแบบบัก์ในการควบคุมแรงดัน สำหรับเนื้อหาที่จะนำเสนอในบทนี้ประกอบด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ การทำให้เป็นเชิงเส้น การคำนวณค่าในสถานะคงตัว การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง รวมถึงการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของระบบที่มีตัวควบคุม ซึ่งจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ ดังนั้น ภายในบทนี้จึงได้นำเสนอ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยทฤษฎีค่าเฉลี่ย ผลการวิเคราะห์จะได้รับการยืนยันด้วยการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

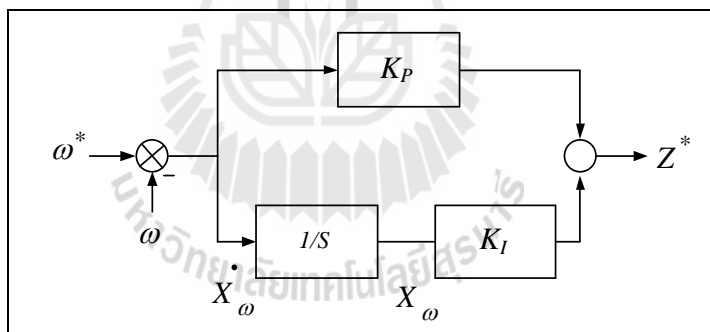
#### 4.2 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษาในส่วนนี้แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง วงจรแปลงผันแบบบัก์ ซึ่งมีตัวควบคุมแบบพีไอ และเชื่อมต่อกับวงจรอาร์เมเจอร์ โดยมีวงจรแปลงผันแบบบัก์อีกวงจรเชื่อมต่อกับขั้วขดลวดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น วงจรแปลงผันทั้งสองวงจรใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกัน ระบบไฟฟ้างี้ได้กล่าวมานี้เป็นระบบขับเคลื่อนของรถกอล์ฟที่มีตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์





รูปที่ 4.1 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ



รูปที่ 4.2 โครงสร้างตัวควบคุมแบบพีไอ

ตัวควบคุมของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 ทำหน้าที่รักษาระดับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าให้คงที่  $\omega^*$  ตามที่กำหนด โครงสร้างของตัวควบคุมแบบพีไอแสดงในรูปที่ 4.2 โดยที่  $K_p$  และ  $K_i$  เป็นพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอ สำหรับการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 2 วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไปเมื่อนำมาประยุกต์ใช้เพื่อพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 รายละเอียดดังกล่าวได้รับการอธิบายไว้แล้วในบทที่ 3

### 4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเส้นและการทำให้เป็นเชิงเส้น

จากรูปที่ 4.2 เอาต์พุต  $Z^*$  ของตัวควบคุมแบบพีไอ และสมการอนุพันธ์ของ  $X_\omega$  สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4-1) และ (4-2) ตามลำดับ[5]

$$Z^* = -K_p \omega + K_I X_\omega + K_p \omega^* \quad (4-1)$$

$$\dot{X}_\omega = -\omega + \omega^* \quad (4-2)$$

จากรูปที่ 4.1 เป็นวงจรมูลของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าแสดตรงชนิดแยกกระตุ้น เมื่อวงจรแปลงผันแบบบักที่เชื่อมต่อกับวงจรอาร์เมเจอร์ถูกควบคุมการสวิตซิงผ่านทางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (IGBT) แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม  $R_a$  และ  $L_a$  จะมีค่าเท่ากับ  $Z^*$  ด้วยเหตุนี้แรงดันไฟฟ้างกล่าวสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4-3)

$$R_a i_a + L_a \dot{i}_a = Z^* \quad (4-3)$$

แทน  $Z^*$  ในสมการที่ (4-1) ลงในสมการที่ (4-3) ทำให้สามารถเขียนสมการอนุพันธ์ของ  $i_a$  ได้ดังสมการที่ (4-4)

$$\dot{i}_a = -\frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{K_p}{L_a} \omega + \frac{K_I}{L_a} X_\omega + \frac{K_p}{L_a} \omega^* \quad (4-4)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยกฎแรงดันและกระแสของเคอร์ชอฟที่กับวงจรมูลในรูปที่ 4.1 ร่วมกับสมการที่ (4-2) ซึ่งทำให้ได้สมการอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนี้

$$\dot{i}_{L1} = -\frac{v_a}{L_1} + \frac{1}{L_1} v_{in} u(t) \quad (4-5)$$

$$\dot{v}_a = \frac{1}{C_1} i_{L1} - \frac{1}{C_1} i_a \quad (4-6)$$

$$\dot{i}_a^* = -\frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{K_p}{L_a} \omega + \frac{K_l}{L_a} X_\omega + \frac{K_p}{L_a} \omega^* \quad (4-7)$$

$$\dot{\omega} = \frac{L_{af} i_f}{J} i_a - \frac{B}{J} \omega - \frac{1}{J} T_L \quad (4-8)$$

$$\dot{i}_{L2} = -\frac{v_f}{L_2} + \frac{1}{L_2} v_{in} u(t) \quad (4-9)$$

$$\dot{v}_f = \frac{1}{C_2} i_{L2} - \frac{1}{C_2} i_f \quad (4-10)$$

$$\dot{i}_f = \frac{1}{L_f} v_f - \frac{R_f}{L_f} i_f \quad (4-11)$$

$$\dot{X}_\omega^* = -\omega + \omega^* \quad (4-12)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-5) ถึง (4-12) ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีพื้นฐานได้ ดังนั้น การจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์เสถียรภาพจึงต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น โดยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของเทย์เลอร์ ซึ่งพิจารณาเทอมแรกเท่านั้น ทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นที่พิจารณารอบจุดการทำงานของระบบ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นของสมการที่ (4-5) ถึง (4-12) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \quad (4-13)$$

$$\delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \quad (4-14)$$

$$\text{เมื่อกำหนดให้ } \delta \mathbf{x} = [\delta x_1 \ \delta x_2 \ \delta x_3 \ \delta x_4 \ \delta x_5 \ \delta x_6 \ \delta x_7 \ \delta x_8]^T$$

$$\delta \mathbf{u} = [\delta v_{in} \ \delta T_L \ \delta \omega^*]^T$$

$$\delta \mathbf{y} = [\delta x_4]$$

สำหรับเมตริกซ์  $A(x_0, u_0)$ ,  $B(x_0, u_0)$ ,  $C(x_0, u_0)$  และ  $D(x_0, u_0)$  เป็นดังสมการที่ (4-15) ถึง สมการที่ (4-18) ตามลำดับ

$$A(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_1} & 0 & \frac{-1}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-R_a}{L_a} & \frac{-K_p}{L_a} & 0 & 0 & 0 & \frac{K_I}{L_a} \\ 0 & 0 & \frac{(L_{af} i_{f,o})}{J} & \frac{-B}{J} & 0 & 0 & \frac{(L_{af} i_{a,o})}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & 0 & \frac{-1}{C_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_f} & \frac{-R_f}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4-15)$$

$$B(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} \frac{d_{1,o}}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_p}{L_a} \\ 0 & \frac{-1}{J} & 0 \\ \frac{d_2}{L_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4-16)$$

$$C(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4-17)$$

$$D(x_o, u_o) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4-18)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นที่พิจารณารอบจุดการทำงานในสมการที่ (4-13) และ (4-14) จะสังเกตได้ว่า แบบจำลองดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับจุดการทำงาน ซึ่งการระบุสถานการณ์ทำงานของระบบนั้นจะขึ้นอยู่กับแรงบิดโหลดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งการคำนวณค่าในสถานะคงตัวแต่ละจุดการทำงานจะได้รับการอธิบายในหัวข้อที่ 4.4 ต่อไป

#### 4.4 การคำนวณค่าในสถานะคงตัว

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งได้รับการทำให้เป็นเชิงเส้นทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นที่พิจารณารอบจุดการทำงาน ซึ่งต้องกำหนดค่า  $i_{a,o}$   $i_{f,o}$  และ  $d_{1,o}$  ในสถานะคงตัวสำหรับการจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปในคอมพิวเตอร์สามารถนำมาใช้ในการหาค่า  $i_{a,o}$  ได้ โดยในการจำลองสถานการณ์กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมวงจรมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 24 โวลต์ และกำหนดค่าความเร็วรอบ เท่ากับ 800 rpm โดยมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่ใช้ทดสอบดังตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $i_{a,o}$  กับ  $T_L$  ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยสมการเชิงเส้นดังสมการที่ (4-19) ส่วนการคำนวณค่า  $i_{f,o}$  และ  $d_{1,o}$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-20) และ (4-21) ตามลำดับ

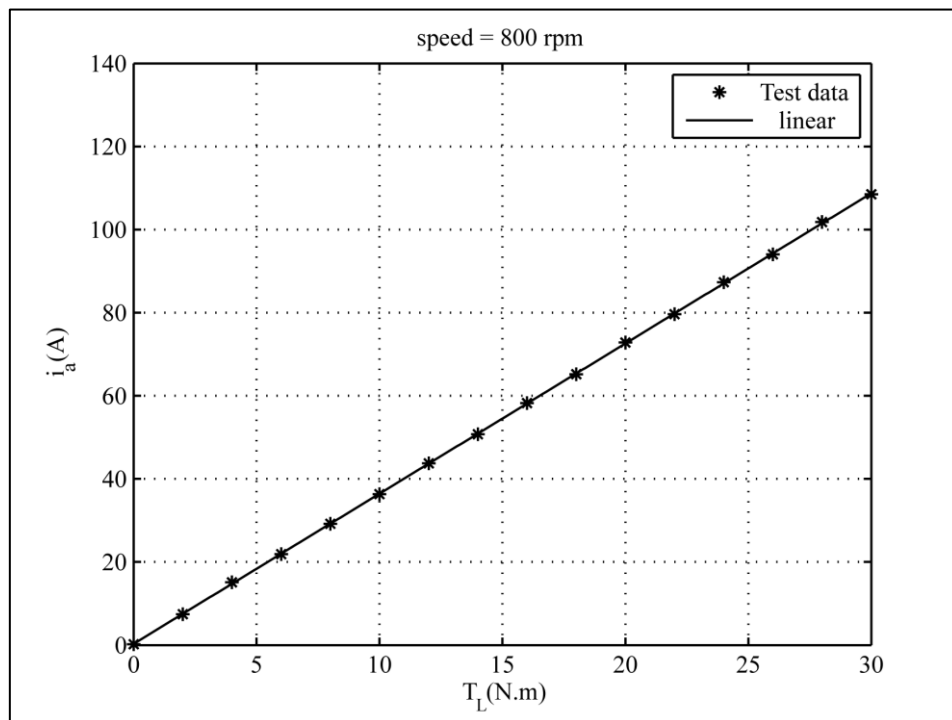
$$i_{a,o} = 3.614T_L + 0.301 \quad (4-19)$$

$$i_{f,o} = \frac{V_f}{R_f} \quad (4-20)$$

$$d_{1,o} = \frac{V_a}{V_{in}} \quad (4-21)$$

โดยที่  $\omega_o = \omega_{ref}$

$$V_a = \frac{\omega_o ((L_{af} i_{f,o})^2 + R_a B_m)}{L_{af} i_{f,o}} + \frac{R_a T_L}{L_{af} i_{f,o}}$$



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์กับแรงบิดโหลดที่ความเร็วรอบ  $\omega^* = 800$  rpm

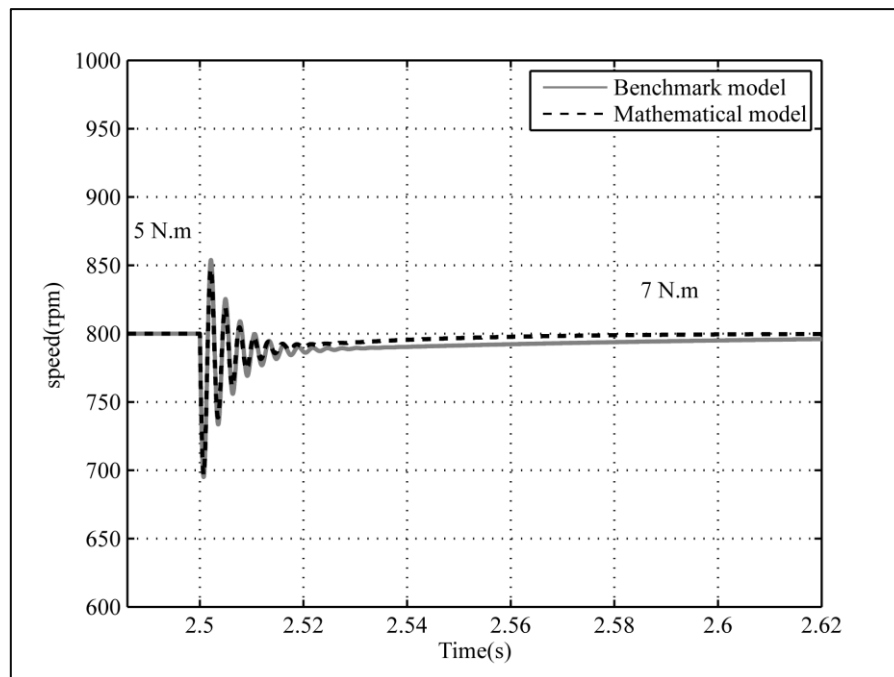
#### 4.5 การตรวจสอบความถูกต้อง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 ก่อนการนำไปประยุกต์ใช้ในการจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์มีความสำคัญมาก ซึ่งในหัวข้อนี้จะนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-13) ถึง (4-18) ซึ่งเป็นแบบจำลองของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 ที่ได้มาจากการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไปและการทำให้เป็นเชิงเส้น การตรวจสอบความถูกต้องอาศัยผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ (Benchmark model) โดยที่ Benchmark model ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 แสดงไว้ในภาคผนวก ก ในรูปที่ ก.2 เปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

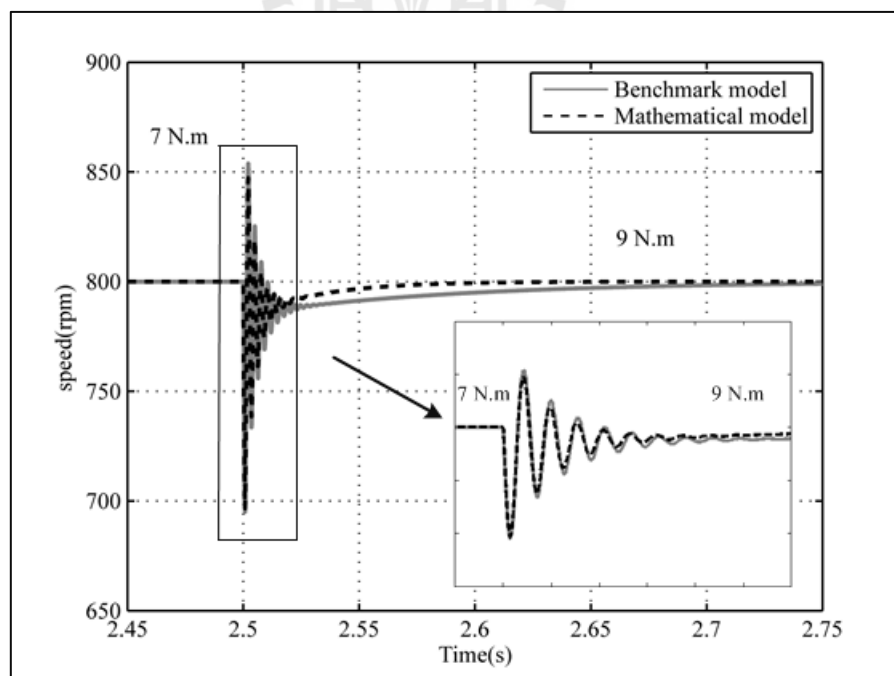
(Mathematical model) โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบดังตารางที่ 4.1 และพิกัดมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เท่ากับ 8 Hp การจำลองสถานการณ์กำหนดให้แรงบิดโหลดมีการ เปลี่ยนแปลงจาก 5 N.m เป็น 7 N.m ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 800 rpm ผลตอบสนองสัญญาณความเร็ว รอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ในทำนองเดียวกันในรูปที่ 4.5 แสดงผลตอบสนองสัญญาณความเร็วรอบ เมื่อแรงบิดโหลดเปลี่ยนแปลงจาก 7 N.m เป็น 9 N.m

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของระบบ

พารามิเตอร์	รายละเอียด
$R_a$	0.081 $\Omega$
$L_a$	$1.944 \times 10^{-4}$ H
$J$	$8.2 \times 10^{-5}$ kg.m <sup>2</sup>
$B_m$	$5.89 \times 10^{-3}$ N.m/rad
$C_1$	187.5 $\mu$ F
$L_1$	0.08 mH
$C_2$	187.5 $\mu$ F
$L_2$	0.08 mH
$R_f$	1.35 $\Omega$
$L_f$	0.396 H
$L_{af}$	0.0156
$d_2$	0.5
$K_p$	0.2987
$K_I$	9.8863
$\omega^*$	800 rpm



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงแรงบิด โหลดจาก 5 N.m เป็น 7 N.m เมื่อ  $\omega^* = 800 \text{ rpm}$



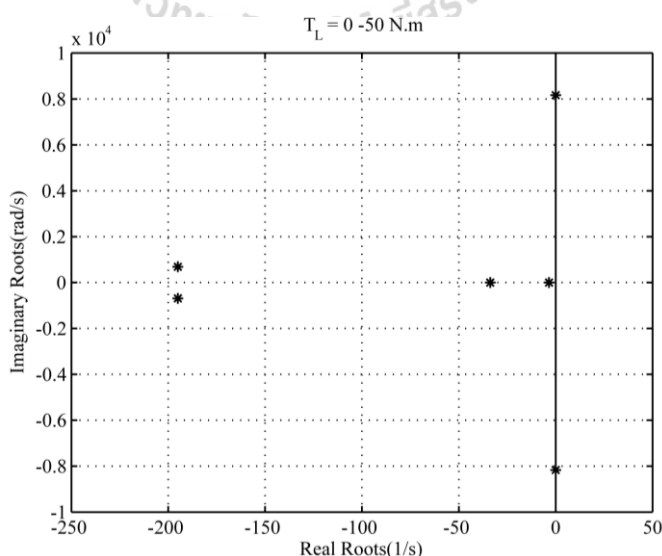
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงแรงบิด โหลดจาก 7 N.m เป็น 9 N.m เมื่อ  $\omega^* = 800 \text{ rpm}$



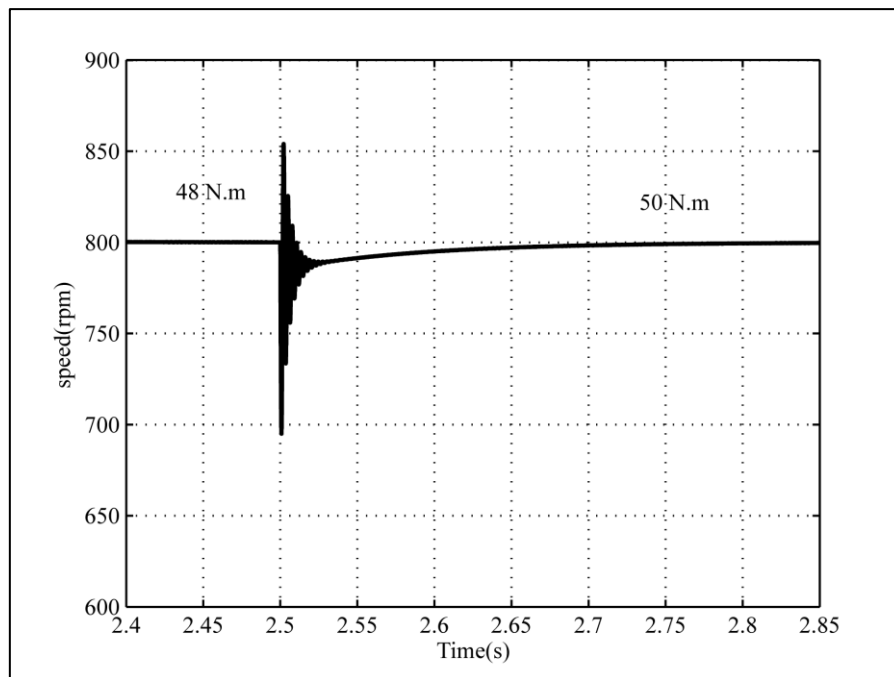
ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 4.4 และ 4.5 จะเห็นได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีตัวควบคุมความเร็วรอบด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้รับการพิสูจน์โดยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไปและการทำให้เป็นเชิงเส้น มีความถูกต้องสามารถอธิบายผลตอบสนองพลวัตของระบบได้

#### 4.6 การวิเคราะห์เสถียรภาพ

การวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 เนื่องระบบที่มีการควบคุมมักประพุดตัวเป็นโพลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 1 สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นเพื่อใช้ในการคำนวณค่าเจาะจงจากเมตริกซ์  $A(x_0, u_0)$  ในสมการที่ (4-14) โดยมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบดังตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบดังกล่าวกำหนดให้แรงบิดโพลดของมอเตอร์ไฟฟ้ามักค่าจากสถานะไร้โพลดแปรเปลี่ยนค่าจนกระทั่งถึงค่าพิคคของมอเตอร์ สำหรับค่าเจาะจงที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งจะพบว่า ระบบมีเสถียรภาพตลอดสถานะการทำงานที่พิคคของมอเตอร์ สำหรับรูปที่ 4.7 แสดงผลการจำลองสถานการณ์ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่พิคคโพลดด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากทฤษฎี ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์พบว่า ระบบยังคงมีเสถียรภาพขณะทำงานในสถานะโพลดพิคค ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากทฤษฎีค่าเจาะจงที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ค่าเจาะจง



รูปที่ 4.7 การจำลองสถานการณ์ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ค่าพิกัด

#### 4.7 สรุป

เนื้อหาในบทนี้เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่มีตัวควบคุมความเร็วรอบด้วยตัวควบคุมแบบฟิว ซึ่งเป็นระบบขับเคลื่อนของรถออลฟ์ โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไปและการทำให้เป็นเชิงเส้น การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอาศัยการเปรียบเทียบจากผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์กับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้อง นำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ด้วยทฤษฎีค่าเจาะจง ซึ่งคำนวณค่าเจาะจงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น การยืนยันผลการวิเคราะห์ดังกล่าวอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ จากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบมีความถูกต้อง กล่าวคือ ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ ขณะทำงานที่สภาวะโหลดพิกัด ยังคงมีเสถียรภาพ ดังนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ถูกต้องสามารถนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเป็นระบบของรถกอล์ฟ โดยงานวิจัยนี้ได้เริ่มจากการศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าของรถกอล์ฟ ซึ่งมีชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทำหน้าที่ในการควบคุมความเร็วของรถกอล์ฟ ระบบขับเคลื่อนของรถกอล์ฟประกอบด้วย วงจรแปลงผันแบบบักต์สองวงจรเชื่อมต่อกับวงจรสนามและวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น วงจรแปลงผันทั้งสองใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกัน ซึ่งในที่นี้คือ แบตเตอรี่ รายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักต์ ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น และการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอบนโดเมนความถี่ด้วยวิธีแบบดั้งเดิม รวมถึงผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกรณีไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ และกรณีที่มีตัวควบคุมความเร็วรอบได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง กรณีไม่มีตัวควบคุม โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบได้อย่างถูกต้อง เพื่อนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้วิธีการเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ ที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไปมีความถูกต้อง ทั้งสภาวะชั่วครู่และสภาวะคงตัว สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ด้วยทฤษฎีค่าเจาะจง และยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพดังกล่าวด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งจากการวิเคราะห์และยืนยันผลดังกล่าว สรุปได้ว่า การทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกรณีไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานตั้งแต่สภาวะไร้โหลดจนถึงพิกัดของรถกอล์ฟ รายละเอียดต่าง ๆ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3

อย่างไรก็ตามระบบควบคุมรถกอล์ฟ จำเป็นต้องมีตัวควบคุมความเร็วรอบ เพื่อใช้ในการควบคุมแบบอัตโนมัติ ดังนั้น จึงมีความจำเป็น สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้อย่างถูกต้อง ซึ่งพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้อง การดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการคำนวณค่าเจาะจง โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป และการยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ สามารถยืนยันได้ว่าระบบไฟฟ้าของรถกอล์ฟ ซึ่งมีระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีตัวควบคุมความเร็วรอบมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงาน ตั้งแต่สภาวะไร้โหลดจนถึงค่าพิกัดของรถกอล์ฟ รายละเอียดต่าง ๆ แสดงไว้ในบทที่ 4

## 5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นการพิจารณาภายใต้เงื่อนไข วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าต้องทำงานในโหมดนำกระแสแบบต่อเนื่อง ดังนั้น เพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะดำเนินการภายใต้เงื่อนไขโหมดนำกระแสแบบไม่ต่อเนื่อง

## รายการอ้างอิง

- [1] J. Mahdavi, A. Emadi, M.D. Bellar, and M. Ehsani, "Analysis of Power Electronic Converters Using the Generalized State-Space Averaging Approach," *IEEE Trans. on Circuit and Systems.*, vol. 44, pp.767-770, August 1997.
- [2] A. Emadi, "Modeling and Analysis of Multiconverter DC Power Electronic Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method," *IEEE Trans. on Indus. Elect.*, vol. 51, no. 3, pp. 661-668, June 2004.
- [3] A. Emadi, M. Ehsani, and J.M. Miller, "Vehicular Electric Power Systems: Land, Sea, Air, and Space Vehicles," Marcel Dekker, Inc, 2004.
- [4] K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher, and D.W.P. Thomas, "Stability Analysis and Modelling of AC-DC System with Mixed Load Using DQ-Transformation Method," in *Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08)*., Cambridge, UK, 29 June-2 July 2008, pp. 19-24.
- [5] K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher, and D.W.P. Thomas, "DQ-Transformation Approach for Modelling and Stability Analysis of AC-DC Power System with Controlled PWM Rectifier and Constant Power Loads," in *Proc. 13<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008)*., Poznan, Poland, 1-3 September 2008.
- [6] K-N. Areerak, S. Bozhko, G. Asher, L.de Lillo, A. Watson, T. Wu, and D.W.P. Thomas, "The Stability Analysis of AC-DC Systems including Actuator Dynamics for Aircraft Power Systems," *13<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2009)*, Barcelona, Spain, 8-10 September 2009.

- [7] S.D. Sudhoff, and O. Wasynczuk, "Analysis and Average-Value Modeling of Line-Commutated Converter-Synchronous Machine Systems," *IEEE Trans. on Energy Conversion.*, vol. 8, no. 1, pp. 92-99, March 1993.
- [8] S.D. Sudhoff, "Waveform Reconstruction from the Average-Value Model of Line-Commutated Converter-Synchronous Machine Systems," *IEEE Trans. on Energy Conversion.*, vol. 8, no. 3, pp. 404-410, September 1993.
- [9] S.D. Sudhoff, "Analysis and Average-Value Modeling of Dual Line-Commutated Converter-6-Phase Synchronous Machine Systems," *IEEE Trans. on Energy Conversion.*, vol. 8, no. 3, pp. 411-417, September 1993.
- [10] R.D. Middlebrook, "Input Filter Considerations in Design and Application of Switching Regulators," in *Proc. IEEE Industry Application Society Annual Meeting*, Chicago, Illinois, October 1976, pp.366-382.
- [11] A. Emadi, B. Fahimi, and M. Ehsani, "On the Concept of Negative Impedance Instability in the More Electric Aircraft Power Systems with Constant Power Loads," *Soc. Automotive Eng. J.*, pp.689-699, 1999.
- [12] C. Rivetta, G.A. Williamson, and A. Emadi, "Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Sea and Undersea Vehicles: Statement of the Problem and Comprehensive Large-Signal Solution," in *Proc. IEEE Electric Ship Tech. Symposium.*, Philadelphia, PA USA, July 2005, pp.313-320.
- [13] A. Emadi, A. Khaligh, C.H. Rivetta, and G.A. Williamson, "Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Automotive Systems: Definition, Modeling, Stability, and Control of Power Electronic Converters and Motor Drives," *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, vol. 55, no. 4, pp.1112-1125, July 2006.
- [14] A. B. Jusoh, "The Instability Effect of Constant Power Loads," in *Proc. IEEE National Power & Energy Conference (PECon 2004)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 29-30 November 2004, pp.175-179.

- [15]บริษัท รถไฟฟ้าประเทศไทย จำกัด มหาชน, <http://www.รถกอล์ฟ.com/2010-07-04-12-17-40.html>
- [16]B. Kuhn, S. Komperda and M. Leuschke, “ Micro Urban Electric Vehicle Phase II – Modeling” Bradley University, 12 May 2010.
- [17]M. H. Rashid, POWER ELECTRONICS CIRCUITD, DEVICES, AND APPLICATIONS , Third Edition Pearson Education, 2004.
- [18]S. J. Chapman, *ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS*. Boston : McGraw-Hill, 1999.
- [19]R. C. Dorf and R. H. Bishop, *Modern Control System*. Massachussetts : Pearson Education, 2008.



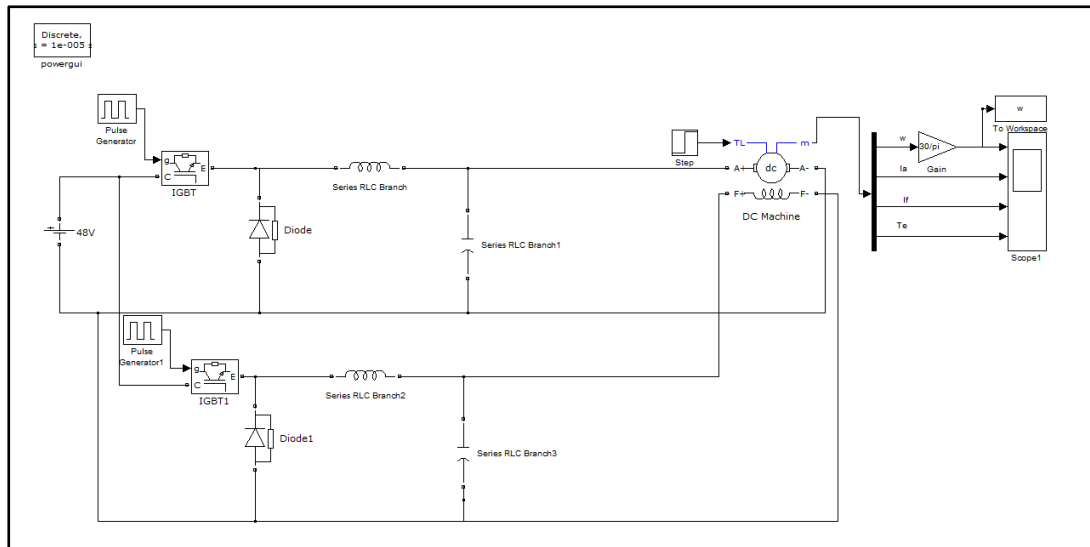


ภาคผนวก ก

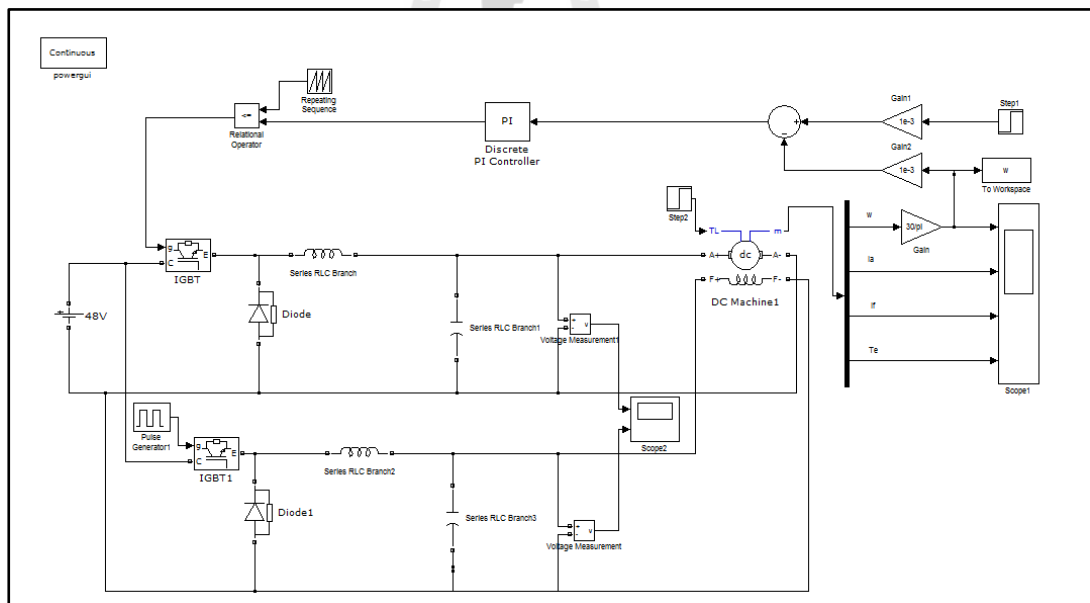
ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





รูปที่ ก.1 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง กรณีไม่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ



รูปที่ ก.2 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Phurich Ngamkong, Pijit Kochcha, Kongpan Areerak, Sarawut Sujitjorn, and Kongpol Areerak, “Applications of the generalized state-space averaging method to modelling of DC–DC power converters”, *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, vol. 18, no. 3, June 2012, pp. 243–260. **(ISI: Impact Factor 0.4)**



## ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

กองพัน อารีรักษ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี และปริญญาโททางด้านวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2543 และ 2544 ตามลำดับ สำเร็จการศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยทุนกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จากมหาวิทยาลัยนอตติงแฮม ประเทศอังกฤษ เมื่อปี พ.ศ. 2552 ด้วยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยเน้นทางด้านระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน ภายหลังจากสำเร็จการศึกษา ได้ดำเนินงานวิจัยอย่างต่อเนื่อง ซึ่งงานวิจัยที่มีความชำนาญ จะเน้นไปทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ การประยุกต์วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับปัญหาทางวิศวกรรม ระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้า ตลอดจนทฤษฎีระบบควบคุม ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ และหัวหน้ากลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เครื่องจักรกล และการควบคุม ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

