

การพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า



นาย ณัฐวุฒิ วิริยะกิติกุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

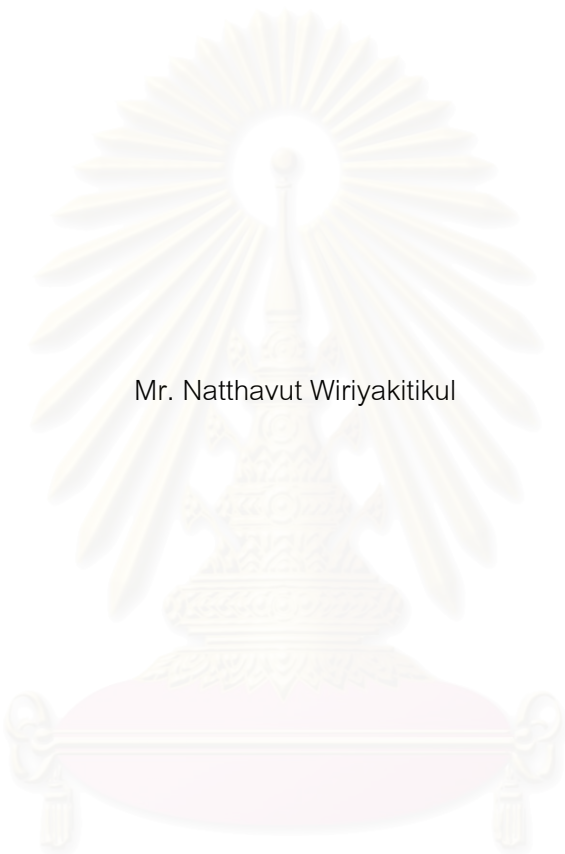
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6397-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROTOTYPE DEVELOPMENT OF AN ELECTRIC CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION



Mr. Natthavut Wiriyakitikul

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6397-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า
โดย	นาย ณัฐวุฒิ วิริยะกิติกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ศุภวุฒิ จันทรานูวัฒน์)

ณัฐวุฒิ วิริยะกิติกุล : การพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า.
(PROTOTYPE DEVELOPMENT OF AN ELECTRIC CONTINUOUSLY VARIABLE
TRANSMISSION) อ. ที่ปรึกษา: อ.ดร. วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม: อ.ดร. สมบูรณ์
แสงวงศ์วานิชย์, 80 หน้า. ISBN 974-17-6397-2.

ในงานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอแนวคิดใหม่ในการพัฒนาอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า โดยทำการศึกษาระบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจัดสร้างระบบทางกลสำหรับทดสอบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดนี้ พร้อมทั้งนำเสนอผลการทดลองจากระบบที่จัดสร้างเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แนวคิดเบื้องต้นของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าคือการใช้ทรานส์ควิเซอร์กลไฟฟ้าจำนวนสองตัวขึ้นไปนำมาต่อกันให้ได้พฤติกรรมทางกลเหมือนกับอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดอื่นๆ ในที่นี้ได้นำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้นมาใช้เป็นทรานส์ควิเซอร์กลไฟฟ้า การควบคุมอัตราทดทำได้โดยการควบคุมค่าสนามแม่เหล็กจากขดลวดสนามของทรานส์ควิเซอร์กลไฟฟ้า งานวิจัยชิ้นนี้จัดทำเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าสำหรับเป็นต้นแบบซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับระบบทางกลที่เกี่ยวข้อง ประโยชน์ของการนำอุปกรณ์ไฟฟ้าเข้ามาใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ทางกลในระบบทดกำลังทำให้เกิดข้อดีในการลดชิ้นส่วนทางกลในการส่งกำลังโดยทดแทนด้วยสายไฟ ซึ่งข้อดีนี้ทำให้ลดโมเมนต์ความเฉื่อย แรงเสียดทาน รวมทั้งขยายขอบเขตการออกแบบของหุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์ เช่น หุ่นยนต์โคบอท และระบบทางกลอื่นๆ ไปสู่โครงสร้างที่มีความซับซ้อนหรือจำนวนองศาความอิสระสูงๆได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2547..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4470303121 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: ELECTRIC CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION/ CVT / COBOT/ BOND GRAPH

NATTHAVUT WIRIYAKITIKUL: PROTOTYPE DEVELOPMENT OF AN ELECTRIC CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION. THESIS ADVISOR: Dr.WITAYA WANNASUPHOPRASIT, THESIS COADVISOR :Dr.SOMBOON SANGWONGWANICH, 100 pp. ISBN 974-17-6397-2.

This research presents a new concept for developing the Electric Continuously Variable Transmission (ECVT). Mathematics model of ECVT is developed. In additional, a test bed is built to verify the model and study its behavior. The fundamental idea of the ECVT is to connect at least two electric transducers together. Here two separately excited dc motors (SEDC motors) are used as transducers. A transmission ratio of the ECVT can be adjusted by controlling magnetic flux of the winding field of each transducer. One objective of this thesis is to build the ECVT equipment which can be applied to related mechanical system especially Collaborative Robot (Cobot). The main advantage of using ECVTs instead of the mechanical CVTs is that they provide flexibility in designing complex and high degree of freedom mechanisms.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department ...Mechanical Engineering... Student's signature.....

Field of study...Mechanical Engineering... Advisor's signature.....

Academic year ...2004..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อ.ดร. วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาสำหรับคำแนะนำดีๆ ทั้งเรื่องงานวิจัยและวิธีการคิดต่างๆ อ.ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม สำหรับคำแนะนำต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้ด้านไฟฟ้า ตลอดจนท่านอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ต่อผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ภายในห้องปฏิบัติสหวิทยาการหุ่นยนต์และมนุษย์สำหรับบรรยากาศภายในห้องเป็นบรรยากาศแห่งการเรียนรู้ด้วยความสนุกสนาน ขอขอบคุณคณะกรรมการอุดมศึกษาแห่งชาติสำหรับเงินทุนวิจัย ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และที่ขาดเสียมิได้คือขอขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่สำหรับกำลังใจและการสนับสนุนต่างๆ ที่มีให้อย่างดีเสมอมา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 ปัญหาและที่มาของงานวิจัย.....	2
1.3 จุดประสงค์.....	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.7 ระยะเวลาการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 ความรู้ที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความรู้ทางกลที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 หลักการของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง.....	4
2.1.2 ตัวอย่างของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง.....	5
1. อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดโคน.....	5
2. อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดสายพานตัววี	6
3. อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไร้สายพาน..	6
2.1.3 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องที่มีใช้ในหุ่นยนต์โคบอท	7
1. อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดล้อ.....	7
2. อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดทรงกลม....	8
3. อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดของไหล.....	9
2.1.4 หุ่นยนต์โคบอท.....	10
1. การทำงานแบบอิสระ.....	11
2. การทำงานแบบสร้างกำแพงเสมือน.....	12

	หน้า
2.1.5 ตัวอย่างการสร้างหุ่นยนต์โคบอทที่ผ่านมา.....	12
1. หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว.....	12
2. หุ่นยนต์โคบอทแบบสกรูเตอร์.....	13
3. หุ่นยนต์โคบอทแบบแขนกล.....	14
4. หุ่นยนต์โคบอทแบบจอยสติ๊ก.....	15
5. หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวสองแขน.....	16
6. หุ่นยนต์โคบอทแบบระนาบเอกซ์-วายชนิดใช้ชีวิทีของไหล....	16
7. หุ่นยนต์โคบอทแบบสามมิติ.....	17
2.2 ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.2.1 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า.....	18
2.2.2 แรงดันเหนี่ยวนำ.....	19
2.2.3 แรงบิดเหนี่ยวนำ.....	20
2.2.4 หลักการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง.....	21
1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบสร้างสนามแม่เหล็กจากขดลวด	21
ก. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้น..	21
ข. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดต่อขนาน.....	22
ค. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดต่ออนุกรม....	22
ง. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดต่อผสม.....	23
2. เจเนอเรเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบสร้างสนามแม่เหล็กจากขดลวด	23
2.2.5 ทฤษฎีสถิตวเซอร์กัลไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย.....	24
บทที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	26
3.1 หลักการของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า.....	26
3.2 รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดทดสอบชีวิทีชนิดไฟฟ้า.....	26
3.3 แบบจำลองด้วยวิธีบอนด์กราฟของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวด แยกกระตุ้น.....	30
3.4 สมการความสัมพันธ์ต่างๆของแบบจำลองบอนด์กราฟของชีวิทีชนิดไฟฟ้า	33

สารบัญ (ต่อ)

ณ

หน้า

บทที่ 4 การออกแบบชุดทดสอบ.....	38
4.1 ชุดสอบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้ารูปแบบอิสระ	38
4.2 ชุดสอบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าแบบระนาบ เอกซ์-วาย.....	40
4.2.1 การออกแบบโมดูลอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง ชนิดไฟฟ้า.....	41
4.2.2 การออกแบบตัวปรับความตึงของสลิง.....	44
4.2.3 การออกแบบวงจรแบ่งสัดส่วนโวลเทจ.....	44
บทที่ 5 ผลการจำลองและผลการทดลอง.....	46
5.1 การทดลองหาค่าแอมดาของทรานส์ดีวเซอร์.....	46
5.2 ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองของชุดทดสอบแบบอิสระ.....	49
5.3 ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองของชุดทดสอบแบบโต๊ะระนาบ เอกซ์-วาย.....	54
บทที่ 6 วิเคราะห์สรุปและข้อเสนอแนะ.....	63
6.1 วิเคราะห์สรุปผลของชุดการทดลองซีวีทีชนิดไฟฟ้าแบบอิสระ.....	63
6.2 วิเคราะห์สรุปผลของชุดทดสอบซีวีทีชนิดไฟฟ้าแบบโต๊ะระนาบเอกซ์-วาย.	64
6.3 ข้อเสนอแนะและงานที่จะทำต่อไปในอนาคต.....	64
รายการอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	67
ก. รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	68
ข. แบบขึ้นส่วนสำคัญ.....	72
ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	83
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	90

สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดจาน.....	5
รูปที่ 2.2	อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดโคน.....	5
รูปที่ 2.3	อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดสายพานตัววี.....	6
รูปที่ 2.4	อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไร้สายพาน.....	7
รูปที่ 2.5	ส่วนประกอบของซีวีที่ชนิดล้อและการตั้งแกนอ้างอิง.....	8
รูปที่ 2.6	ส่วนประกอบของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดทรงกลม	9
รูปที่ 2.7	อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดทรงกลม.....	9
รูปที่ 2.8	ไดอะแกรมโครงสร้างของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง ชนิดของไหล.....	10
รูปที่ 2.9	อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดของไหล.....	10
รูปที่ 2.10	หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว.....	11
รูปที่ 2.11	การเคลื่อนที่ของล้อ (ซ้าย), ทิศทางของแรงขณะล้อเคลื่อนที่ (ขวา).....	12
รูปที่ 2.12	พื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว.....	13
รูปที่ 2.13	หุ่นยนต์โคบอทแบบสกรูเตอร์.....	14
รูปที่ 2.14	การทำงานร่วมกันระหว่างคนกับหุ่นยนต์โคบอทในการประกอบประตู รถยนต์โดยใช้หุ่นยนต์โคบอทแบบสกรูเตอร์.....	14
รูปที่ 2.15	หุ่นยนต์โคบอทแบบแขนกล.....	15
รูปที่ 2.16	หุ่นยนต์โคบอทแบบจอยสติ๊ก.....	16
รูปที่ 2.17	หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวสองแขน.....	16
รูปที่ 2.18	หุ่นยนต์โคบอทแบบระนาบเอกซ์-วายชนิดซีวีที่ของไหล.....	17
รูปที่ 2.19	หุ่นยนต์โคบอทสามมิติ.....	17
รูปที่ 2.20	โครงสร้างของแกนเหล็กสนามแม่เหล็กอย่างง่าย.....	18
รูปที่ 2.21	ไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอย่างง่าย.....	20
รูปที่ 2.22	โครงสร้างของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง.....	21
รูปที่ 2.23	ไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้น.....	22
รูปที่ 2.24	ไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดต่อขนาน.....	22
รูปที่ 2.25	ไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดต่ออนุกรม.....	23
รูปที่ 2.26	ไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดต่อผสม.....	23

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ฎ

หน้า

รูปที่ 2.27	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้นที่ใช้ในการทดลอง..	24
รูปที่ 2.28	วงจรไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้น.....	25
รูปที่ 3.1	ไดอะแกรมทางไฟฟ้าของชุดทดสอบ.....	27
รูปที่ 3.2	บล็อกไดอะแกรมของชุดทดสอบ.....	30
รูปที่ 3.3	อีลีเมนต์ไจเรเตอร์แทนทรานส์ดีวเซอร์.....	31
รูปที่ 3.4	วงจรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้น.....	31
รูปที่ 3.5	อีลีเมนต์ทางบอนด์กราฟของมอดูเลตไจเรเตอร์.....	32
รูปที่ 3.6	บอนด์กราฟของทรานส์ดีวเซอร์กลไฟฟ้า.....	32
รูปที่ 3.7	บอนด์กราฟโมเดลของชุดทดสอบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบ ต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า.....	34
รูปที่ 4.1	ไดอะแกรมของชุดทดสอบแบบอิสระ.....	39
รูปที่ 4.2	ภาพชุดทดสอบแบบอิสระ.....	39
รูปที่ 4.3	โต๊ะระนาบเอกซ์-วาย.....	40
รูปที่ 4.4	พู่เลี่ยมมิ่งตัวใหญ่.....	42
รูปที่ 4.5	พู่เลี่ยมมิ่งตัวเล็ก.....	42
รูปที่ 4.6	โมดูลชุดทดกำลังแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า.....	43
รูปที่ 4.7	การประกอบโมดูลเข้ากับโต๊ะระนาบเอกซ์-วาย.....	43
รูปที่ 4.8	ชุดการทดลองที่ประกอบเสร็จ.....	43
รูปที่ 4.9	ชุดการทดสอบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดชนิดไฟฟ้าแบบโต๊ะระนาบ เอกซ์-วาย.....	44
รูปที่ 4.10	วงจรแบ่งสัดส่วนโวลเทจ.....	45
รูปที่ 4.11	การวัดค่าโวลเทจสำหรับทดสอบวงจรแบ่งสัดส่วนโวลเทจ.....	45
รูปที่ 5.1	ไดอะแกรมการทดลองหาค่าแลมดา.....	47
รูปที่ 5.2	ผลการทดลองหาค่าแลมดา.....	47
รูปที่ 5.3	ความสัมพันธ์ระหว่างแลมดากับกระแสสนาม.....	49
รูปที่ 5.4	ไดอะแกรมของชุดทดสอบแบบอิสระ.....	50
รูปที่ 5.5	ผลการทดลองของชุดทดสอบแบบอิสระแบบที่ 1.....	50

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ฎ

		หน้า
รูปที่ 5.6	ผลการจำลองการทำงานของชุดทดสอบแบบอิสระแบบที่ 1.....	51
รูปที่ 5.7	ผลการทดลองของชุดทดสอบแบบอิสระแบบที่ 2.....	52
รูปที่ 5.8	ผลการจำลองการทำงานของชุดทดสอบแบบอิสระแบบที่ 2.....	52
รูปที่ 5.9	อัตราทดกับอัตราส่วนแลมดา.....	53
รูปที่ 5.10	แรงบิดเสียดทานเทียบกับกระแสสนาม.....	54
รูปที่ 5.11	ไดอะแกรมของการทดลองบนโต๊ะระนาบเอ็กซ์-วาย.....	55
รูปที่ 5.12	การทดลองบนชุดการทดสอบแบบโต๊ะระนาบเอ็กซ์-วาย.....	55
รูปที่ 5.13	บล็อกการจำลองการทำงานของระบบซีวีทีชนิดไฟฟ้าในโปรแกรม แมทแล็บ.....	56
รูปที่ 5.14	ผลการทดลองในกรณีตุ้มน้ำหนัก 15 ก.ก. และกระแสสนาม 0.4 แอมแปร์.....	57
รูปที่ 5.15	ผลการจำลองการทำงานกรณีตุ้มน้ำหนัก 15 ก.ก. และกระแสสนาม 0.4 แอมแปร์.....	57
รูปที่ 5.16	ผลการทดลองในกรณีตุ้มน้ำหนัก 15 ก.ก. และกระแสสนาม 0.8 แอมแปร์.....	58
รูปที่ 5.17	ผลการจำลองการทำงานกรณีตุ้มน้ำหนัก 15 ก.ก. และกระแสสนาม 0.8 แอมแปร์.....	59
รูปที่ 5.18	ผลการทดลองในกรณีตุ้มน้ำหนัก 20 ก.ก. และกระแสสนาม 0.4 แอมแปร์.....	60
รูปที่ 5.19	ผลการจำลองการทำงานกรณีตุ้มน้ำหนัก 20 ก.ก. และกระแสสนาม 0.4 แอมแปร์.....	60
รูปที่ 5.20	ผลการทดลองในกรณีตุ้มน้ำหนัก 20 ก.ก. และกระแสสนาม 0.8 แอมแปร์.....	61
รูปที่ 5.21	ผลการจำลองการทำงานกรณีตุ้มน้ำหนัก 20 ก.ก. และกระแสสนาม 0.8 แอมแปร์.....	62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ระบบทดกำลังแบบต่างๆมีใช้แพร่หลายมานานในระบบทางกลทั่วไปและระบบไฟฟ้า เช่น ระบบทางกลอย่างในรถยนต์ใช้ระบบทดกำลังคือ ชุดเกียร์ ระบบไฟฟ้ามีทรานส์ฟอร์มเมอร์เป็นระบบทดกำลัง เป็นต้น โดยความหมายแล้วระบบทดกำลังคือระบบปรับเปลี่ยนค่าอินพุตที่ใส่เข้าไปในระบบทดกำลังโดยคุณด้วยค่าอัตราทดของระบบทดกำลังกลายเป็นค่าเอาต์พุตค่าหนึ่งออกมา ค่าอินพุตที่ใส่เข้าไปและค่าเอาต์พุตที่ออกมาจากระบบทดกำลังสามารถเป็นตัวแปรเชิงกำลังต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น ความเร็ว แรงบิด กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ เป็นต้น ส่วนใหญ่ของระบบทดกำลังซึ่งสามารถเรียกในอีกชื่อหนึ่งว่าอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดมีค่าอัตราทดกำลังคงที่หรือปรับเปลี่ยนค่าในลักษณะขั้นบันไดทำให้ระบบเกิดความไม่ต่อเนื่อง ช่วงการปรับเปลี่ยนค่าอัตราทดของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบเดิมมีช่วงการปรับค่าจำกัดและแคบๆ จากเหตุผลดังกล่าวทำให้เกิดแนวความคิดใหม่ในการพัฒนาอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดที่สามารถให้ค่าอัตราทดที่ต่อเนื่อง ระบบทดกำลังชนิดใหม่นี้มีชื่อเรียกว่า อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง(Continuously Variable Transmission, CVT) หรือซีวีที

หลายปีที่ผ่านมาได้มีการนำหุ่นยนต์มาใช้งานต่างๆเพื่อทดแทนแรงงานจากมนุษย์ หุ่นยนต์มีข้อดีคือ ความถูกต้องแม่นยำสูง และสามารถทำงานซ้ำๆกันได้เป็นอย่างดี แต่ถึงอย่างไรก็ตามหุ่นยนต์มีข้อเสียคือต้องทำงานในสภาวะที่ได้รับการออกแบบไว้หรือบริเวณที่จัดไว้เฉพาะ เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการนำหุ่นยนต์มาใช้งาน โรงงานต้องจัดบริเวณเฉพาะสำหรับการทำงานของหุ่นยนต์ คนไม่สามารถเข้าไปบริเวณนั้นได้เพราะอาจเกิดอันตรายขึ้นได้จากการทำงานที่ผิดพลาดของหุ่นยนต์ จึงได้เกิดแนวคิดออกแบบหุ่นยนต์ที่สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ได้อย่างปลอดภัยในพื้นที่การทำงานเดียวกัน เรียกหุ่นยนต์แบบใหม่นี้ว่า หุ่นยนต์โคบอท(Collaborative Robot, Cobot) [1] หุ่นยนต์โคบอทใช้อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเป็นส่วนประกอบสำคัญในการทดกำลังจากผู้ใช้งาน อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องที่ผ่านมาก็มีใช้ในหุ่นยนต์โคบอทนั้นมีข้อจำกัดต่อการออกแบบสร้างหุ่นยนต์โคบอทที่มีโครงซับซ้อนหรือมีองศาความอิสระสูง จึงได้มีแนวความคิดนำอุปกรณ์ทางไฟฟ้ามาออกแบบใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ทางกลในการออกแบบจัดสร้างอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า(Electric Continuously Variable Transmission, ECVT) หรือ ซีวีทีชนิดไฟฟ้า เพื่อลดจำนวนชิ้นส่วนทางกลโดยทดแทนด้วยสายไฟฟ้าสำหรับการส่งกำลัง

1.2 ปัญหาและที่มาของงานวิจัย

จากปัญหาของการใช้ชิ้นส่วนทางกลในระบบปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดต่างๆ ทั้งในเรื่องผลกระทบของโมเมนต์ความเฉื่อยและอุปสรรคต่อการออกแบบสร้างระบบทางกล โครงสร้างซับซ้อนที่ใช้ชีวิตที่เป็นส่วนประกอบในการทดกำลัง เช่น โครงสร้างที่ต้องการส่งกำลังในระยะไกล โครงสร้างที่มีองศาความอิสระสูงๆ เป็นต้น จากปัญหาเหล่านี้นำมาสู่นำแนวคิดนำอุปกรณ์ทางไฟฟ้ามาใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ทางกลเพื่อการทดแทนชิ้นส่วนทางกลในการพัฒนาอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า

1.3 จุดประสงค์

ศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และพฤติกรรมของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าเพื่อขยายขอบเขตการออกแบบสร้างหุ่นยนต์โคบอทและระบบทางกลอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องไปสู่โครงสร้างแบบใหม่ๆ ที่ซับซ้อนหรือมีองศาความอิสระสูงๆ

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า
2. ออกแบบชุดทดลองสำหรับทดสอบแบบจำลองของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า
3. วิเคราะห์ผลการทดลองและเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลที่ได้จากชุดการทดลอง

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องและอุปกรณ์ทางไฟฟ้า
2. ศึกษาหาแบบจำลองของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า
3. ออกแบบและสร้างชุดการทดลองเพื่อทดสอบแบบจำลอง
4. จำลองการทำงานของแบบจำลอง
5. ทดลองการทำงานของชุดการทดลอง
6. สรุปและวิเคราะห์ผล พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการจำลองทำงานจากแบบจำลองกับผลการทดลองจากชุดการทดลอง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางพัฒนาอุปกรณ์เปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดใหม่ที่ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้ามาเป็นส่วนประกอบเพื่อเพิ่มขอบเขตการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์โคบอทรูปแบบใหม่และระบบทางกลอื่นๆ ในอนาคต
2. สามารถนำหลักการของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้านี้ไปออกแบบสร้างหุ่นยนต์โคบอทได้

1.7 ระยะเวลาการดำเนินงาน

Title \ Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Literature Review	←→											
Find System Model		←→										
Design & Build Testbed			←→									
Simulate System Model						←→						
Experiment on Testbed								←→				
Analysis & Conclusion											↔	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

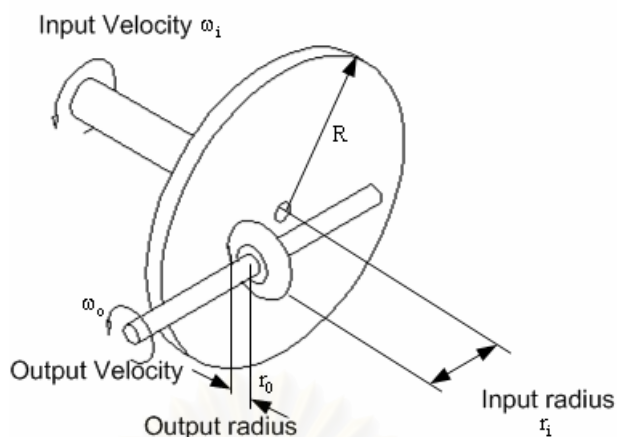
ความรู้ที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนางานวิจัยชิ้นนี้เริ่มต้นด้วยการศึกษารวบรวมข้อมูลและความรู้ที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องและอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการพัฒนา โดยแบ่งแยกเป็นหัวข้อใหญ่ๆ 2 หัวข้อ คือ ความรู้ทางกลที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีพื้นฐานทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า

2.1 ความรู้ทางกลที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 หลักการของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง

ระบบทดกำลังแบบต่างๆมีใช้แพร่หลายกันมาเป็นเวลานานทั้งในระบบทางกลทั่วไปและระบบไฟฟ้า ยกตัวอย่างเช่น รถยนต์มีระบบทดกำลังคือ ชุดเกียร์ ระบบทางไฟฟ้ามีทรานส์ฟอর্মเมอร์เป็นระบบทดกำลัง เป็นต้น ระบบทดกำลังคือระบบปรับเปลี่ยนค่าอินพุตโดยการคูณกับค่าอัตราทดของระบบทดกำลังกลายเป็นเอาต์พุตของระบบ อินพุตและเอาต์พุตของระบบทดกำลังสามารถเป็นตัวแปรเชิงกำลังต่างๆอย่างเช่น ความเร็ว แรงบิด กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ เป็นต้น ระบบทดกำลังหรือในอีกชื่อหนึ่งคืออุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทด ส่วนใหญ่อัตราทดจะเปลี่ยนเป็นขั้นบันไดข้ามจากค่าหนึ่งไปยังอีกค่าหนึ่งทำให้ระบบเกิดความไม่ต่อเนื่อง อีกทั้งช่วงการปรับค่าอัตราตดยังเป็นแค่ช่วงแคบๆ จากเหตุผลดังกล่าวทำให้เกิดแนวความคิดสร้างอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าอัตราทดได้อย่างต่อเนื่องในช่วงที่กำหนด ระบบทดกำลังชนิดใหม่นี้มีชื่อเรียกว่า อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องหรือซีวีที อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องมีด้วยกันหลายชนิด เช่น ชนิดกรวย ชนิดสายพาน ชนิดสายพานตัววี และชนิดไร้สายพาน เป็นต้น รูปที่ 2.1 เป็นอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดจาน นำมาแสดงเพื่ออธิบายหลักการการทำงานของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องอย่างง่าย ซีวีทีชนิดนี้ประกอบด้วยจานสำหรับรับค่าอินพุตเข้ามาและเพลลาซึ่งมีล้อสัมผัสกับจานติดอยู่ เพลลาสามารถเคลื่อนที่ได้ตามแนวแกนของเพลลา หลักการทำงานของซีวีทีชนิดนี้คือเมื่อใส่ค่าความเร็วเชิงมุมอินพุต (ω_i) เข้าไปหมุนจาน ล้อจะหมุนตามด้วยความเร็วเชิงมุมเอาต์พุต (ω_o) อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดนี้ปรับเปลี่ยนอัตราทดโดยการเคลื่อนที่เพลลาเพื่อให้ระยะจากจุดศูนย์กลางจานถึงจุดสัมผัสระหว่างล้อกับจาน (r_j) เปลี่ยนไป โดยสามารถปรับเปลี่ยนอัตราทดได้ตั้งแต่ 0 ถึง $\frac{R}{r_0}$ อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบทางกลอื่นๆได้



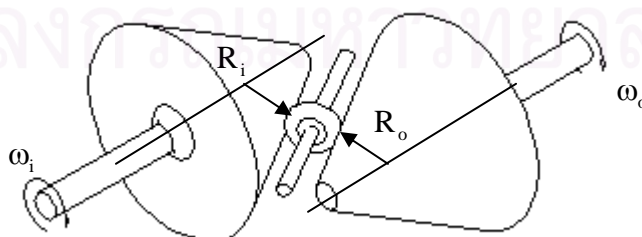
รูปที่ 2.1 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดจาน

$$\frac{\omega_o}{\omega_i} = \frac{r_i}{r_o} \quad (2.1)$$

2.1.2 ตัวอย่างของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง

1. อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดโคน (Cone CVT)

อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดนี้มีโครงสร้างประกอบด้วย โคนจำนวน 2 ตัวสำหรับรับค่าอินพุตและส่งออกที่พุท เพลากลางทำหน้าที่เป็นตัวส่งกำลังจากโคนตัวหนึ่งไปยังโคนอีกตัวหนึ่งซึ่งสามารถปรับเคลื่อนที่ได้ตามแนวแกนของเพลาเพื่อปรับเปลี่ยนจุดสัมผัสระหว่างล้อกับโคนทั้งสอง การปรับเปลี่ยนจุดสัมผัสทำให้เส้นรอบวงของโคนทั้งสอง ณ จุดสัมผัสกับล้อเปลี่ยนแปลงไป โดยที่ R_i คือ รัศมีเส้นรอบวงของโคนอินพุท R_o คือ รัศมีเส้นรอบวงของโคนเอาต์พุท อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดโคนมีปรับเปลี่ยนอัตราทดโดยการเคลื่อนที่เพลากลางเพื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างเส้นรอบวงของโคนทั้งสอง ณ จุดสัมผัสกับล้อ

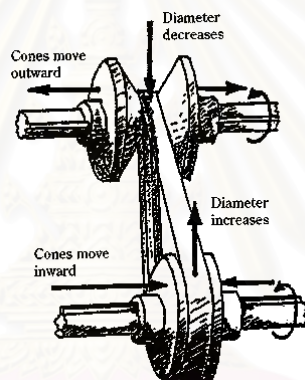


รูปที่ 2.2 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดโคน

$$\frac{\omega_o}{\omega_i} = \frac{R_i}{R_o} \quad (2.2)$$

2. อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดสายพานตัววี(V-Belt CVT)

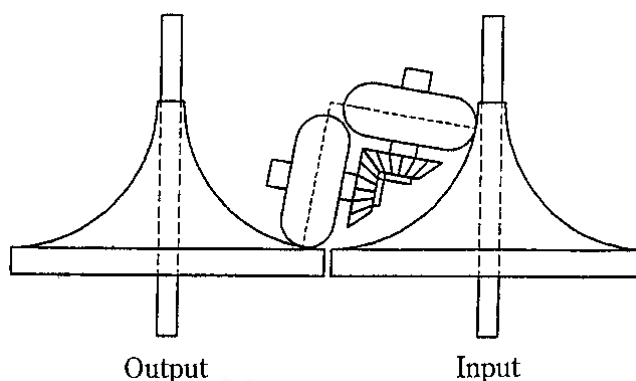
อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดนี้ประกอบด้วยพูลเลย์ซึ่งสามารถปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องสายพานจำนวน 2 ชุด และสายพาน อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดสายพานตัววีแสดงดังรูปที่ 2.3 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดสายพานตัววีทำการปรับเปลี่ยนอัตราทดโดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพูลเลย์ทั้งสอง การปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพูลเลย์ทำได้โดยอาศัยการเคลื่อนที่เข้าออกของเพลลาซึ่งยึดติดกับโคนของพูลเลย์ รอยนต๋บางรุ่นได้นำอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้ในระบบเกียร์ทด



รูปที่ 2.3 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดสายพานตัววี ที่มา [2]

3. อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไร้สายพาน(Belt-less CVT)

อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดนี้ประกอบด้วยโคนจำนวน 2 ชุดซึ่งมีลักษณะพื้นผิวเป็นส่วนหนึ่งของวงกลม และชุดล้อส่งกำลังซึ่งประกอบด้วยล้อสองล้อทำมุมกัน 90 องศาโดยส่งกำลังระหว่างล้อผ่านชุดเฟืองด้วยอัตราทด 1:1 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไร้สายพานแสดงดังรูปที่ 2.4 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดนี้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราทดโดยเคลื่อนที่ชุดล้อส่งกำลังให้มีจุดสัมผัสกับโคนที่เปลี่ยนไป ซึ่งทำให้ค่าสัดส่วนระหว่างเส้นรอบวง ณ จุดสัมผัสโคเนอาร์ทพุทเทียบเส้นรอบวง ณ จุดสัมผัสของโคนอินพุทเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไร้สายพาน ที่มา [2]

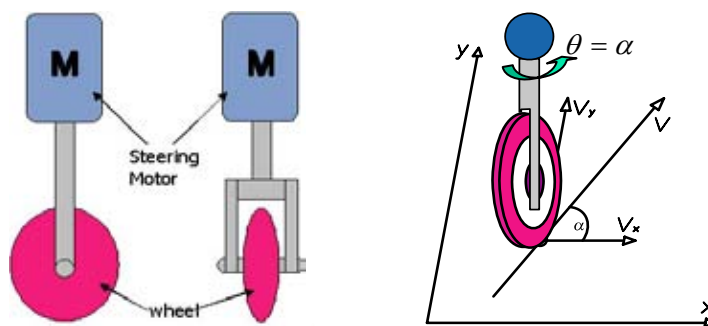
2.2.3 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องที่มีใช้ในหุ่นยนต์โคบอท

หุ่นยนต์โคบอทได้นำอุปกรณ์เปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องมาใช้พัฒนาเป็นส่วนประกอบสำคัญในการทดกำลังจากผู้ใช้งาน อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องที่ใช้ในการสร้างหุ่นยนต์โคบอทมีด้วยกันหลายชนิดดังนี้

1. อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดล้อ (Wheel CVT)

อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดล้อนี้อุปกรณ์ที่ใช้ปรับเปลี่ยนอัตราทดของความเร็วเชิงเส้นโดยอาศัยล้อและพื้น ส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดล้อนี้อประกอบด้วย ล้อ, มอเตอร์สำหรับใช้บังคับมุมของล้อเทียบกับแกนอ้างอิงดังรูปที่ 2.5 ชุดมือจับใช้ยึดล้อและมอเตอร์เข้าด้วยกัน อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดนี้มีล้อเป็นตัวปรับเปลี่ยนอัตราทดโดยการปรับเปลี่ยนมุมของล้อซึ่งทำมุมกับแกนอ้างอิงบนพื้นสัมผัสโดยอาศัยแรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นสัมผัส ดังนั้นแรงเสียดทานระหว่างพื้นกับล้อจึงเป็นตัวบ่งบอกประสิทธิภาพของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดชนิดนี้ ซึ่งที่ชนิดนี้ได้ถูกนำมาใช้สร้างหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว (Unicycle Cobot) [3] และพัฒนาต่อมาเป็นหุ่นยนต์โคบอทแบบสกูตเตอร์ (Scooter Cobot) [1] อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดล้อนี้อสามารถปรับเปลี่ยนอัตราทดได้ตามสมการ 2.3 โดยปรับเปลี่ยนได้จาก $-\alpha$ ถึง α ข้อดีของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดล้อนี้อคือความง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์โคบอทและระบบทางกลต่างๆ อีกทั้งประสิทธิภาพของอุปกรณ์ชนิดนี้มีสูง ส่วนข้อเสียคือความจำเป็นในการใช้พื้นระนาบสำหรับการสร้างอัตราทดจึงเป็นอุปสรรคสำหรับสำหรับการออกแบบจัดสร้างหุ่นยนต์โคบอทหรือระบบทางกลอื่นๆที่ต้องการโครงสร้างที่ซับซ้อนหรือมีข้อจำกัดเรื่องระยะทาง

$$\frac{V_y}{V_x} = \tan \alpha \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของซีวีทีชนิดล้อและการตั้งแกนอ้างอิง ที่มา [3]

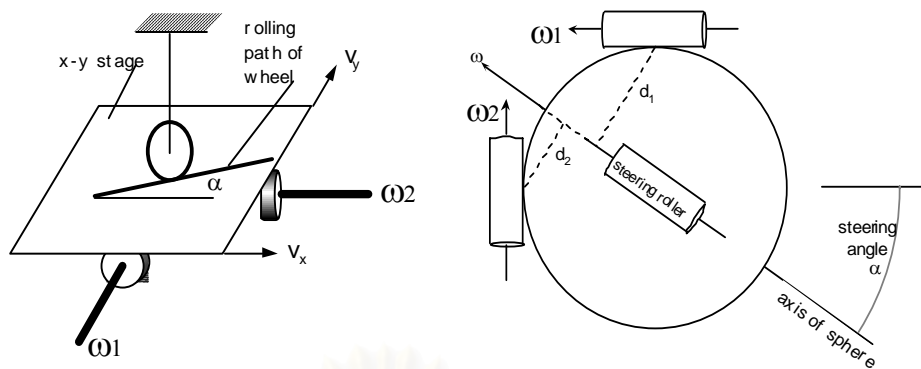
2. อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดทรงกลม (Spherical CVT)

อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดทรงกลมนี้ถูกการคิดค้นและพัฒนาโดย Moore [4] อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดนี้สามารถปรับเปลี่ยนอัตราทดของความเร็วเชิงมุมซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นข้อต่อแบบหมุน (Revolute Joint) และสามารถนำไปใช้พัฒนาหุ่นยนต์โคบอทแบบแขนอนุกรม (Serial-Link Cobot) โครงสร้างของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดทรงกลมดังรูปที่ 2.6 ประกอบไปด้วย ลูกทรงกลมติดตั้งอยู่ตรงกลาง, ชุดโรลเลอร์ขับเคลื่อน (Drive Roller) เป็นล้อหมุนสัมผัสกับทรงกลมซึ่งมีจำนวน 2 ตัว สำหรับความเร็วอินพุตกับความเร็วเอาต์พุต นอกจากนั้นยังใช้ชุดโรลเลอร์แบบสตีयर (Steering Roller) สำหรับทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนแกนหมุนของทรงกลม เมื่อมุมการหมุนของทรงกลมเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลให้ค่าระยะห่างจากแกนหมุนของทรงกลมกับจุดสัมผัสระหว่างชุดโรลเลอร์ขับเคลื่อนกับทรงกลม (d_1, d_2) เปลี่ยนแปลงไปด้วย อัตราทดของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดนี้มีความสัมพันธ์กับค่าระยะ d_1, d_2 ซึ่งแปรผันไปตามมุมสตีयर (Steering Angle) โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ 2.4 และ 2.5

$$\frac{d_2}{d_1} = \tan(\phi_s) \rightarrow \frac{\omega_2}{\omega_1} = \tan(\phi_s) \quad (2.4)$$

หรือ

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\sin \theta - \sqrt{2} \cos \theta}{\sin \theta + \sqrt{2} \cos \theta} \quad (2.5)$$



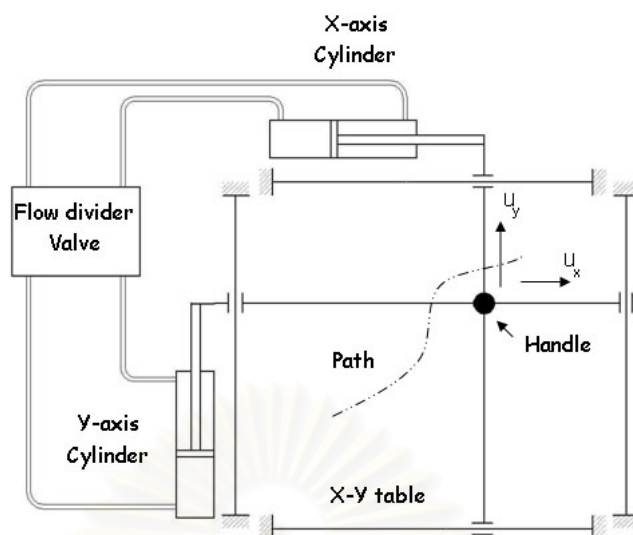
รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดทรงกลม ที่มา [1]



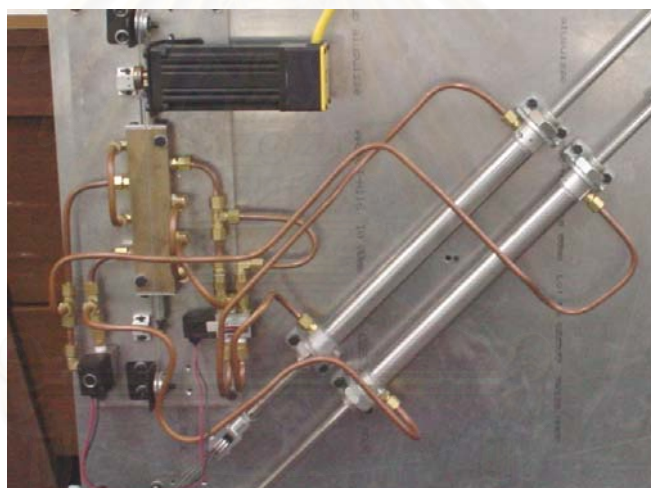
รูปที่ 2.7 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดทรงกลม ที่มา [4]

3. อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดของไหล (Fluid CVT) [6]

การพัฒนาอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดใหม่ได้นำไปสู่การนำความรู้เกี่ยวกับของไหลมาใช้งานร่วมกับชิ้นส่วนทางกลเพื่อออกแบบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดของไหลซึ่งอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดนี้ประกอบด้วยวาล์วแบ่งการไหลของของไหลและกระบอกสูบ ลักษณะและส่วนประกอบของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.8 และ 2.9 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดปรับเปลี่ยนอัตราทดโดยอาศัยการสัดส่วนอัตราการไหลในแต่ละกระบอกสูบ วาล์วแบ่งการไหลทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของของไหลในแต่ละกระบอก อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดของไหลหนึ่งตัวจำเป็นต้องใช้กระบอกสูบสองตัวเพื่อสร้างค่าอัตราทดหนึ่งค่า



รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมโครงสร้างของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดชนิดของไหล ที่มา [6]

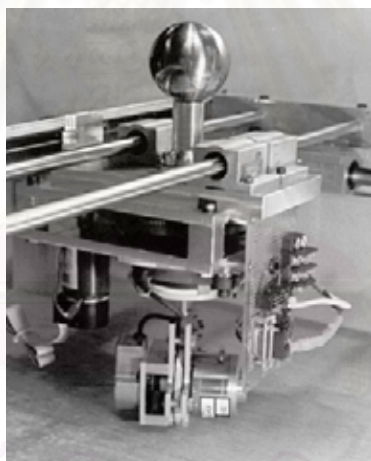


รูปที่ 2.9 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดของไหล ที่มา [6]

2.1.4 หุ่นยนต์โคบอท

หุ่นยนต์โคบอทเป็นหุ่นยนต์รูปแบบใหม่ที่สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ได้อย่างปลอดภัย เนื่องจากหุ่นยนต์โคบอทมีพฤติกรรมเป็นอุปกรณ์แบบพาสซีฟโดยธรรมชาติ (Intrinsically Passive) ความหมายคือหุ่นยนต์โคบอทไม่ออกแรงกระทำต่อผู้ใช้โดยตรงเพราะหุ่นยนต์โคบอทไม่ใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อน(Actuator)ให้กำลังที่ข้อต่อโดยตรงเหมือนในหุ่นยนต์ทั่วไป แต่อาศัยอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องสำหรับการควบคุมอัตราทดที่ข้อต่อต่างๆ จากเหตุผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าหุ่นยนต์โคบอทจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยตัวเอง การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทต้องอาศัยแรงกระทำจากผู้ใช้งานโดยที่หุ่นยนต์โคบอทเพียงช่วยกำหนดทิศทางเคลื่อนที่เท่านั้น

หุ่นยนต์โคบอทจะทำงานในลักษณะช่วยนำทางให้ผู้ใช้งานเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดขึ้น การทำงานของหุ่นยนต์โคบอทเปรียบเสมือนกับการใช้ไม้บรรทัดขีดเส้นตรง ไม้บรรทัดนั้นไม่สามารถบังคับมือผู้ใช้งานได้ให้ขีดเส้น แต่ไม้บรรทัดเป็นเพียงตัวช่วยให้เราขีดเส้นได้ตรงอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากกว่าการขีดเส้นด้วยมือเปล่า หลักการทำงานของหุ่นยนต์โคบอทอาศัยการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อต่อต่างๆเพื่อกำหนดทิศทางและการเคลื่อนที่โดยอาศัยอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง การทำความเข้าใจการทำงานของหุ่นยนต์โคบอทโดยพิจารณาการทำงานของหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว หุ่นยนต์โคบอทแบบนี้มีลักษณะเป็นหุ่นยนต์โคบอทแบบใช้ล้อเดียวในการเคลื่อนที่ในระนาบ เอกซ์-วาย แกนของล้อจะตั้งตรงอยู่ตลอดเวลา โดยอาศัยมอเตอร์คอยปรับเปลี่ยนทิศทางของล้อ มอเตอร์นี้ไม่สามารถส่งกำลังให้หุ่นยนต์โคบอทเคลื่อนที่ได้ หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวมีอุปกรณ์ตรวจวัดแรง (Force Sensor) ซึ่งติดตั้งเพื่อตรวจวัดขนาดและทิศทางแรงกระทำจากผู้ใช้งาน ลักษณะของหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวแสดงดังรูป 2.10 รูปแบบการทำงานของหุ่นยนต์โคบอทโดยทั่วไปจะมีลักษณะการทำงานที่เหมือนกัน การทำงานของหุ่นยนต์โคบอทสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะดังนี้



รูปที่ 2.10 หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว ที่มา [1]

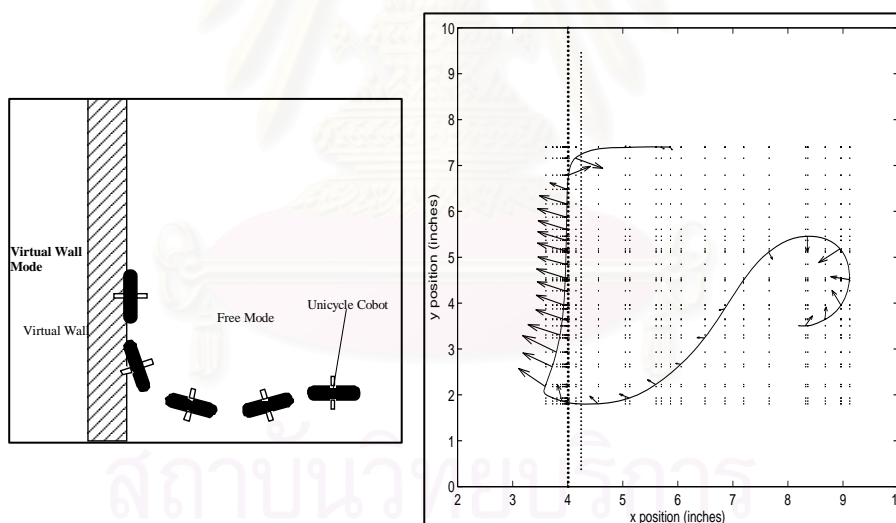
1. การทำงานแบบเคลื่อนที่อิสระ (Free Mode)

การทำงานในลักษณะนี้ผู้ใช้งานสามารถพาหุ่นยนต์โคบอทเคลื่อนที่อิสระ ถ้าพิจารณาหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวในการทำงานแบบเคลื่อนที่อิสระ ล้อของหุ่นยนต์โคบอทจะมีพฤติกรรมเสมือนกับล้อรถเข็นทั่วไปโดยความหมายคือทิศทางของล้อจะขนานตามทิศทางของแรงจากผู้ใช้งาน การทำงานลักษณะนี้ทำได้โดยหุ่นยนต์โคบอทจะวัดแรงที่กระทำในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของล้อ จากนั้นจะพยายามทำให้แรงนั้นเป็นศูนย์โดยการหมุนแกนเพลลาขับเพื่อเปลี่ยนทิศ

ของล้อให้เป็นไปตามทิศทางที่ผู้ใช้งานออกแรงกระทำ วิธีการนี้ทำให้แรงที่ส่งกลับไปยังผู้ใช้เป็นศูนย์ ผู้ใช้งานจึงรู้สึกเสมือนกับว่าได้เคลื่อนที่อย่างอิสระ

2. การทำงานในแบบสร้างกำแพงเสมือน (Virtual Wall Mode)

การทำงานในโหมดนี้จะเกิดขึ้นเมื่อตำแหน่งของหุ่นยนต์โคบอทอยู่ ณ ตำแหน่งของกำแพงเสมือนที่กำหนดขึ้นในโปรแกรม ถ้าพิจารณาหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวเมื่อตำแหน่งของอยู่บริเวณแนวกำแพงเสมือนหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวจะทำการเปลี่ยนทิศทางของแรงจากผู้ใช้ซึ่งคือทิศทางของการเคลื่อนที่ให้ชนานกับกำแพงเสมือน โดยหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวจะปรับมุมล้อของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดล้อซึ่งคือการปรับเปลี่ยนอัตราทดนั่นเองให้ความเร็วในแนวตั้งฉากกับกำแพงเสมือนกลายเป็นศูนย์ การปรับมุมของล้อให้ชนานกับกำแพงเสมือนทำให้ผู้ใช้งานรู้สึกเหมือนกับไกลไปตามกำแพงที่ไม่มีความผิด ถ้าหากผู้ใช้งานยังคงออกแรงบังคับให้หุ่นยนต์โคบอทเคลื่อนที่เข้าไปในกำแพงเสมือนจะถูกต้านแรงไว้ด้วยแรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นผิวสัมผัส เมื่อทิศทางของแรงจากผู้ใช้มีทิศทางออกจากกำแพงหุ่นยนต์โคบอทจะเปลี่ยนรูปแบบการทำงานจากแบบสร้างกำแพงเสมือนเป็นแบบเคลื่อนที่อิสระ รูปที่ 2.11 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์โคบอทในรูปแบบการทำงานแบบสร้างกำแพงเสมือน



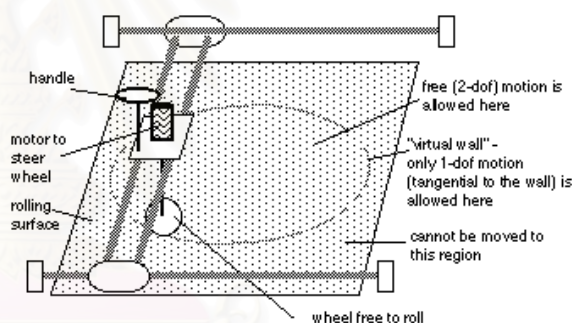
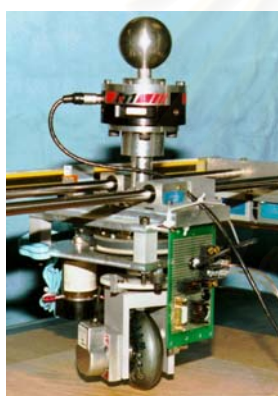
รูปที่ 2.11 การเคลื่อนที่ของล้อ (ซ้าย), ทิศทางของแรงขณะเคลื่อนที่ (ขวา) ที่มา [5]

2.1.5 ตัวอย่างการสร้างหุ่นยนต์โคบอทที่ผ่านมา

1. หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว (Unicycle Cobot)

หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวเป็นหุ่นยนต์โคบอทตัวแรกของโลกซึ่งจัดสร้างโดย Wannasupoprasit [1] หุ่นยนต์โคบอทแบบนี้ทำงานโดยอาศัยอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดล้อสำหรับปรับเปลี่ยนอัตราทด โครงสร้างหุ่นยนต์โคบอทแบบนี้ประกอบด้วย ชุด

มือจับซึ่งประกอบไปด้วย ล้อโดยที่ชนิดของล้อเป็นชนิดเดียวกับล้อโรลเลอร์เบลด (Roller Blade Wheel) ข้อดีของล้อโรลเลอร์เบลดคือ แรงเสียดทานด้านทานการไถล(Slip)สูง อีกทั้งยังถูกออกแบบให้สามารถใช้งานหนักได้ รวมไปถึงขนาดของล้อยังเหมาะสมกับการสร้างหุ่นยนต์โคบอทตัวล้อติดตั้งเอนโคเดอร์ (Encoder) สำหรับวัดความเร็วของหุ่นยนต์โคบอท ส่วนประกอบต่อมาก็คือ มอเตอร์ชุดขับ(Steering Motor)ใช้สำหรับบังคับการหมุนของล้อให้ได้มุมตามต้องการ แต่ไม่ได้ใช้หมุนล้อเพื่อเคลื่อนที่หุ่นยนต์โคบอทเพราะว่าผู้ใช้เป็นผู้ออกแรงนำพาหุ่นยนต์โคบอทเคลื่อนที่ได้เท่านั้น ส่วนประกอบต่อมาก็คืออุปกรณ์ตรวจจับแรงซึ่งติดตั้งใกล้กับที่มือจับเพื่อหาทิศทางของแรงจากผู้ใช้งาน ส่วนประกอบสำคัญชิ้นสุดท้ายคือ ราง(Rail) เนื่องจากหุ่นยนต์โคบอทแบบนี้มีเพียงล้อเดียวจึงไม่สามารถตั้งตรงอยู่ได้ด้วยตัวเอง ดังนั้นหุ่นยนต์โคบอทแบบนี้จำเป็นต้องมีรางช่วยยึดจับหุ่นยนต์โคบอทให้ตั้งตรงได้ พร้อมทั้งติดตั้งโพเทนชิโอมิเตอร์(Potentiometer)บริเวณตัวรางเพื่อวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์โคบอทอีกด้วย

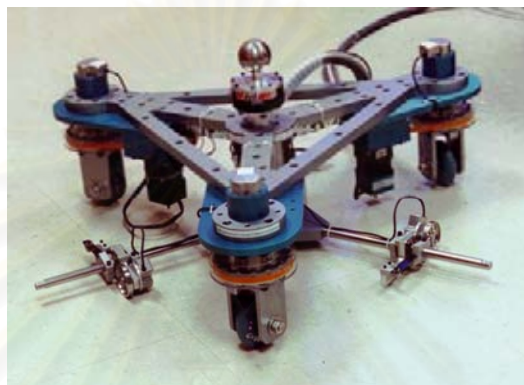


รูปที่ 2.12 พื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว ที่มา [1]

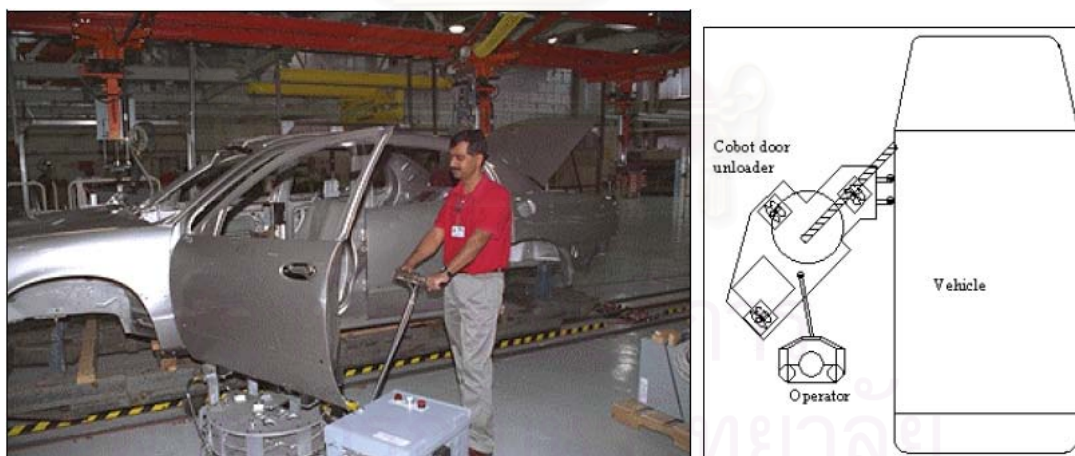
2. หุ่นยนต์โคบอทแบบสกูตเตอร์(Scooter Cobot)

หลังจากสร้างหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวเสร็จแล้ว ได้มีการพัฒนาให้หุ่นยนต์โคบอทที่มีจำนวนล้อเพิ่มขึ้นจาก 1 ล้อกลายเป็นหุ่นยนต์โคบอทแบบ 3 ล้อ[1] หุ่นยนต์ชนิดนี้สามารถเพิ่มจำนวนมิติการทำงาน (Dimension Workspace) เป็น 3 มิติคือ เอกซ์-วาย-ทีตา(X-Y- θ) โดยที่มิติที่เพิ่มขึ้นมาจากเดิมนั้นเป็นการหมุนรอบจุดศูนย์กลางการหมุน ซึ่งจุดศูนย์กลางการหมุนนี้สามารถหาได้จากจุดตัดของแกนหมุนของล้อแต่ละล้อ แต่โครงสร้างล้อบางแบบเช่น กรณี 2 ล้ออยู่ในแนวเดียวกัน จะไม่สามารถหาจุดตัดของแกนล้อได้ เรียกปัญหาแบบนี้ว่า ซิงกูลาริตี (Singularity) หุ่นยนต์โคบอทแบบสกูตเตอร์โครงสร้างเป็นสามเหลี่ยมระนาบเดียวกัน มีมิติการทำงาน 3 มิติ การเพิ่มล้อที่ 3 เข้ามา นอกจากจะแก้ปัญหาล้อซิงกูลาริตีได้แล้ว ยังทำให้หุ่นยนต์โคบอทแบบนี้สามารถ

ตั้งอยู่ได้ด้วยตัวเอง ทำให้พื้นที่การทำงานเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม ง่ายต่อการนำไปใช้งานจริง หุ่นยนต์โคบอทแบบสกูตเตอร์ประกอบด้วยชิ้นส่วนสำคัญดังนี้ ล้อจำนวน 3 ล้อ เป็นล้อชนิดเดียวกับล้อโรลเลอร์เบลต มีมอเตอร์บังคับทิศทางแกนหมุนของล้อ พร้อมทั้งติดเอนโคเดอร์เพื่อวัดมุมแกนหมุนของแต่ละล้อ มีชุดมือจับและติดตั้งเซ็นเซอร์วัดแรงไว้บนโครงสร้าง หุ่นยนต์โคบอทแบบนี้ได้ถูกนำไปใช้งานจริงโดยบริษัท เจนเนอรัล มอเตอร์ (General Motor) ในงานประกอบประตูเข้าตัวถังรถยนต์ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 หุ่นยนต์โคบอทแบบสกูตเตอร์ ที่มา [1]

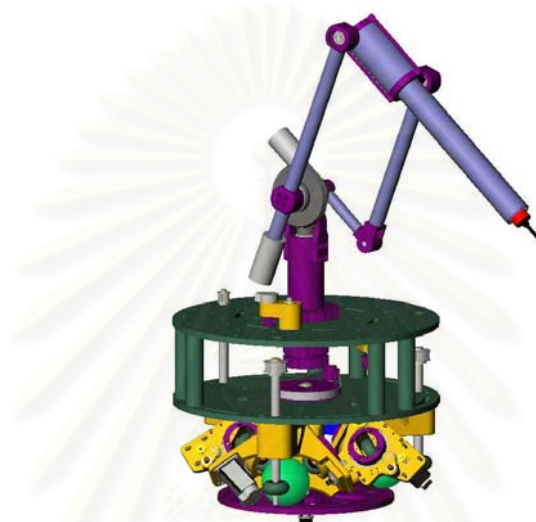


รูปที่ 2.14 การทำงานร่วมกันระหว่างคนกับหุ่นยนต์โคบอทในการประกอบประตูรถยนต์โดยใช้หุ่นยนต์โคบอทแบบสกูตเตอร์ ที่มา [5]

3. หุ่นยนต์โคบอทแบบแขนกล (Arm Cobot)

Moore [4] ได้พัฒนาออกแบบสร้างอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดทรงกลมเพื่อนำมาใช้ปรับเปลี่ยนความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงมุมของข้อต่อของหุ่นยนต์โคบอท ทำให้

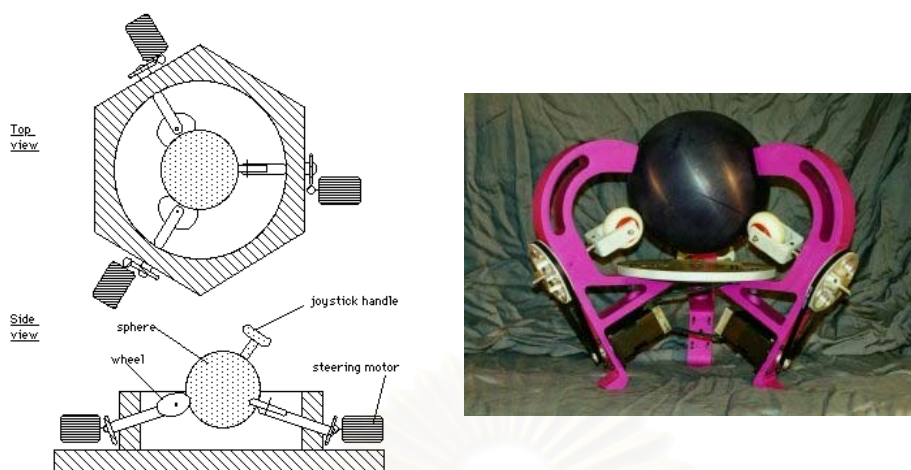
หุ่นยนต์โคบอท สามารถมีพื้นที่ทำงานได้เหมือนกับหุ่นยนต์แขนกลทั่วไป คือมีมิติการทำงาน X-Y-Z โครงสร้างของหุ่นยนต์โคบอทแบบนี้ประกอบไปด้วย แขนกลต่อแบบขนานจำนวน 4 แขน และมีซีวีทีจำนวน 3 ชุด เพื่อลดความเร็วให้กับ 3 ข้อต่อ ลักษณะการส่งกำลังจากซีวีทีให้กับข้อต่อที่ 1 ใช้วิธี ต่อเพลากับซีวีที แล้วส่งผ่านกำลังไปให้เพลาก่อนที่ต่อกับข้อต่อ ด้วยสายพาน(Timing Belt) ลักษณะของการส่งกำลังให้กับข้อต่อที่ 2 เป็นเช่นเดียวกับข้อที่ 1 ส่วนการส่งกำลังให้กับข้อต่อที่ 3 ใช้การส่งกำลังจากซีวีทีด้วยเพลาดโดยตรง



รูปที่ 2.15 หุ่นยนต์โคบอทแบบแขนกล ที่มา [7]

4. หุ่นยนต์โคบอทแบบจอยสติค (Joystick Cobot)

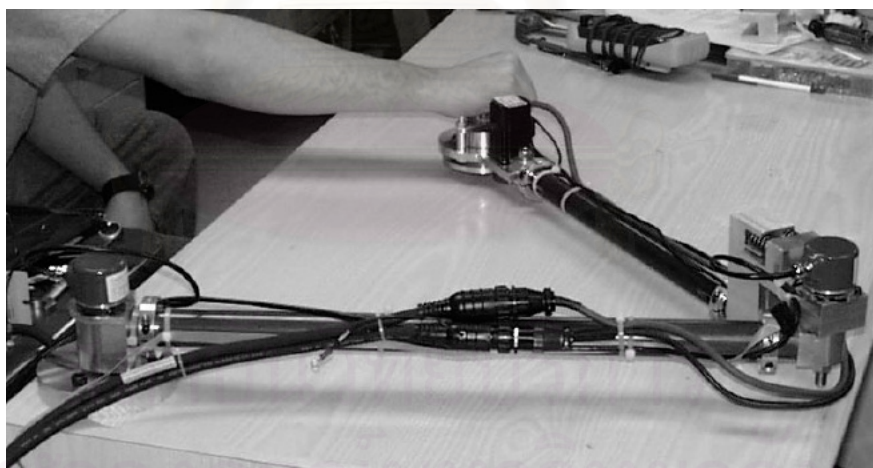
หุ่นยนต์โคบอทแบบนี้เป็นการประยุกต์ใช้หลักการของหุ่นยนต์โคบอทแบบเดิม หุ่นยนต์โคบอทแบบจอยสติคใช้อุปกรณ์ปรับอัตราทดต่อเนื่องชนิดล้อย มาใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของลูกทรงกลม โดยที่กำหนดให้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของลูกทรงกลมไม่เคลื่อนที่ ทำให้เราสามารถที่จะควบคุมการหมุนรอบแกนทั้งสามของลูกทรงกลมได้ด้วยการควบคุมทิศทางของล้อยเท่านั้น หุ่นยนต์โคบอทแบบนี้มีมิติการทำงานเป็น เอกซ์, วาย, ซี



รูปที่ 2.16 หุ่นยนต์โคบอทแบบจอยสติค ที่มา [8]

5. หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดี่ยวสองแขน(Unicycle Two-Arm Cobot)

หุ่นยนต์โคบอทชนิดนี้ที่ได้รับการพัฒนามาจากหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดี่ยว โดยใช้แขน 2 แขน มาทำการยึดจับตัวชุดล้อแทนที่รางของหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดี่ยว โดยที่มีมิติการทำงาน 2 มิติคือ เอกซ์-วาย

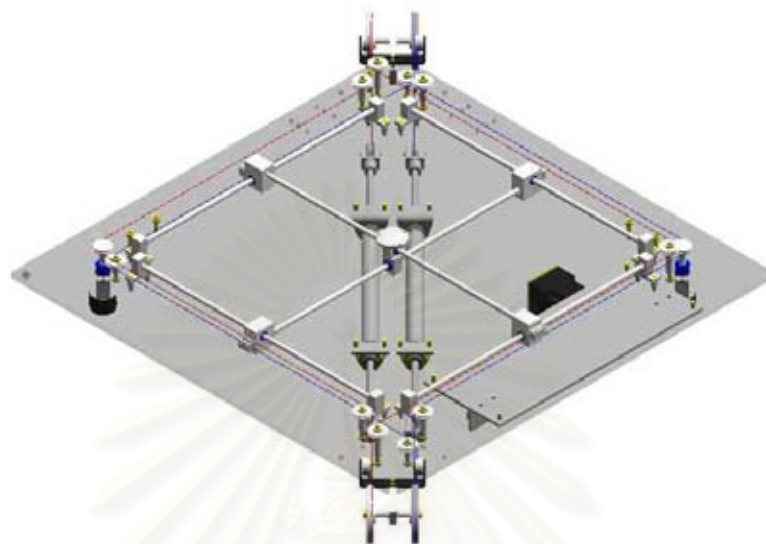


รูปที่ 2.17 หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดี่ยวสองแขน ที่มา [4]

6. หุ่นยนต์โคบอทแบบระนาบเอกซ์-วายชนิดซีวีทีของไหล(Fluid CVT X-Y Table Cobot)

หุ่นยนต์โคบอทชนิดนี้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อเป็นต้นแบบในการทดสอบและพัฒนาอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดของไหล หุ่นยนต์โคบอทชนิดนี้ทำงานในระนาบเอกซ์-วาย

ส่งผ่านกำลังจากผู้ใช้งานไปยังอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดของไหลด้วยเส้น
ลวดสลิง หุ่นยนต์รูปแบบนี้อยู่ระหว่างการพัฒนาและปรับปรุง



รูปที่ 2.18 หุ่นยนต์โคบอทแบบระนาบเอกซ์-วายชนิดซีวีวีทีของไหล ที่มา [6]

7. หุ่นยนต์โคบอทสามมิติ(3 Dimensional Cobot)

หุ่นยนต์โคบอทชนิดนี้ใช้อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดล้อจากระนาบ
เอกซ์-วายไปสู่ระนาบสามมิติโดยอาศัยทรงกลมมาช่วยเปลี่ยนการเคลื่อนที่เชิงเส้นเป็นการ
เคลื่อนที่เชิงมุม นอกจากนี้ทรงกลมยังช่วยให้ซีวีวีทีเชิงเส้นทั้งสามสามารถติดตั้งอยู่บนฐานของ
หุ่นยนต์ได้ โดยไม่จำเป็นต้องเคลื่อนที่ไปตามข้อต่อของแขนกล



รูปที่ 2.19 หุ่นยนต์โคบอทสามมิติ [10]

2.2 ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง

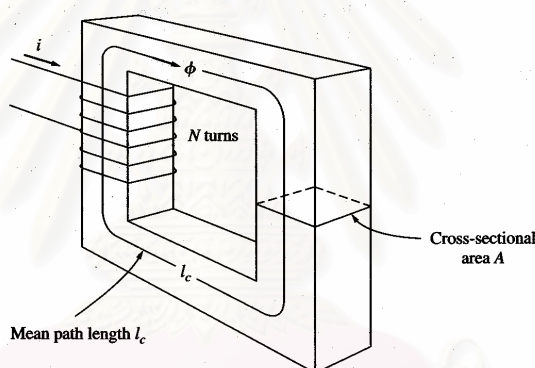
พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่นได้ เช่น พลังงานกล พลังงานความร้อน เป็นต้น การเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลนิยมใช้อย่างแพร่หลายโดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานของการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าดังต่อไปนี้

2.2.1 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า

จากกฎของแอมแปร์ กระแสไฟรวมหาได้จากผลคูณของความเข้มของสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟ้อยย ดังสมการที่ (2.6)

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{\text{Net}} \quad (2.6)$$

โดยที่ \vec{H} คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น แอมแปร์·รอบ/เมตร พิจารณาจากรูปที่ 2.20 จะสามารถเขียนสมการของแอมแปร์ได้ใหม่ได้ดังสมการ 2.7



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของแกนเหล็กสนามแม่เหล็กอย่างง่าย ที่มา [12]

$$H \cdot l_c = N \cdot i \quad (2.7)$$

เมื่อ H คือขนาดความเข้มของสนามแม่เหล็ก, l_c คือความยาวของแกนเหล็ก, N คือ จำนวนรอบของขดลวดที่พันรอบแกนเหล็ก ดังนั้นขนาดความเข้มของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็กเนื่องจากกระแสไฟไหลผ่านขดลวดแสดงตามสมการที่ 2.8

$$H = \frac{Ni}{l_c} \quad (2.8)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสนามแม่เหล็กกับความเข้มของฟลักซ์สนามแม่เหล็ก(\vec{B}) แสดงได้ดังนี้

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.9)$$

โดยที่ μ คือ ความซึมซาบได้ (Permeability) ซึ่งเป็นตัวกำหนดว่าสารชนิดหนึ่งๆ จะยอมให้ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux) ผ่านได้ยากหรือง่าย ขนาดของความเข้มของฟลักซ์สนามแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการที่ 2.10

$$B = \mu H = \frac{\mu Ni}{l_c} \quad (2.10)$$

ผลรวมของฟลักซ์ที่พื้นที่ใดๆ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.11

$$\phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.10 และ 2.11 จะได้สมการผลรวมของฟลักซ์ในแกนเหล็กของรูปที่ 2.20 แสดงได้ดังนี้

$$\phi = B A = \frac{\mu Ni A}{l_c} \quad (2.12)$$

2.2.2 แรงดันเหนี่ยวนำ

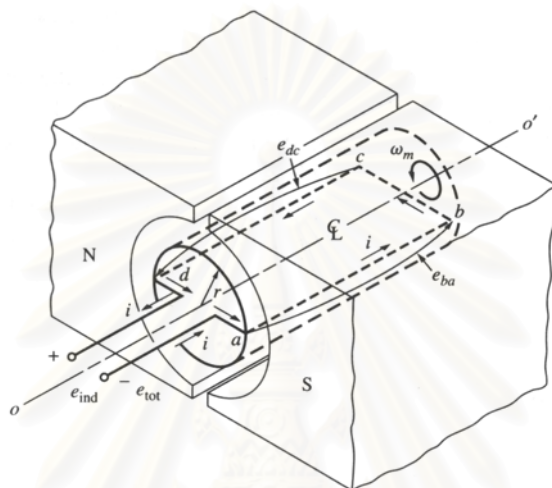
แรงดันจะถูกเหนี่ยวนำบนขดลวด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ (Flux) แม่เหล็กบนขดลวด ซึ่งเกิดขึ้นจากการหมุนขดลวดตัดผ่านสนามแม่เหล็ก สมการแรงดันเหนี่ยวนำแสดงดังสมการที่ (2.13)

$$e_{\text{ind}} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} \quad (2.13)$$

โดยที่ \vec{v} คือ ความเร็ว (เมตร/วินาที), \vec{B} คือ ความเข้มของฟลักซ์สนามแม่เหล็ก (เวเบอร์/เมตร²), \vec{l} คือ ความยาวของขดลวด (เมตร)

เมื่อรวมแรงดันเหนี่ยวนำในแต่ละส่วนของขดลวดในรูปที่ 2.21 จะได้สมการของแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับฟลักซ์ (ϕ) มีหน่วยเป็น เวเบอร์, ความเร็วเชิงมุมของขดลวด (ω) มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที และค่าคงที่ของมอเตอร์ของแรงดันเหนี่ยวนำ (Motor Voltage Constant, K_v) ดังนี้

$$e_{\text{ind}} = K_v \phi \omega \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.21 ไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอย่างง่าย ที่มา [12]

2.5.3 แรงบิดเหนี่ยวนำ

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าไปในขดลวดภายใต้สนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดแรงเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวดตามสมการที่ 2.15

$$\vec{F} = i(\vec{l} \times \vec{B}) \quad (2.15)$$

เมื่อ \vec{F} คือแรงเหนี่ยวนำ (นิวตัน), i คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในขดลวด (แอมแปร์), \vec{l} คือความยาวของขดลวด (เมตร), \vec{B} คือความเข้มของสนามแม่เหล็ก (เวเบอร์/เมตร²) หลังจากรวมแรงบิดเหนี่ยวนำของแต่ละส่วนของขดลวดในรูปที่ 2.21 จะได้สมการสัมพันธ์ของแรงบิดขึ้นอยู่กับฟลักซ์ (ϕ), กระแสไฟ (i) และค่าคงที่ของมอเตอร์ของแรงบิดเหนี่ยวนำ (Motor Torque Constant, K_t) ดังนี้

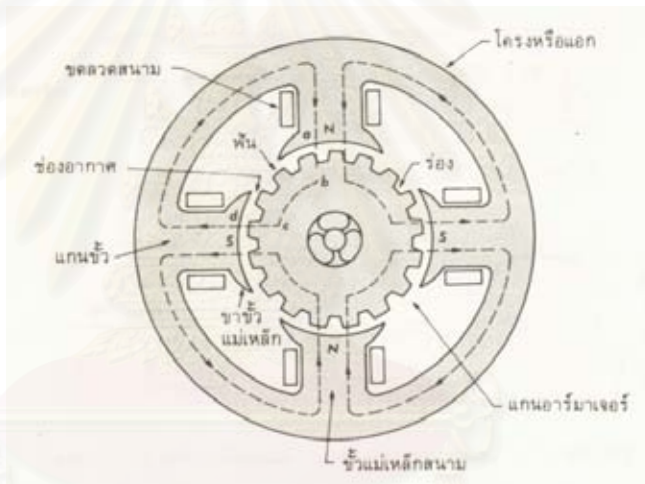
$$\tau_{\text{ind}} = K_t \phi i \quad (2.16)$$

2.2.4 หลักการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปพลังงานระหว่างพลังงานไฟฟ้ากับพลังงานกลเรียกว่าทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้า(Electromechanical transducer) อุปกรณ์ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า เรียกว่า เจเนอเรเตอร์ ส่วนอุปกรณ์ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เรียกว่า มอเตอร์ ทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าสามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้งมอเตอร์และเจเนอเรเตอร์ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน

1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบสร้างสนามแม่เหล็กจากขดลวด

มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล มอเตอร์ไฟฟ้ามีส่วนประกอบสำคัญ คือ โรเตอร์, สเตเตอร์, คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) และแปรงถ่าน (Brush) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature winding) อยู่บนโรเตอร์ และขดลวดสนาม (Field winding) อยู่บนสเตเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.22

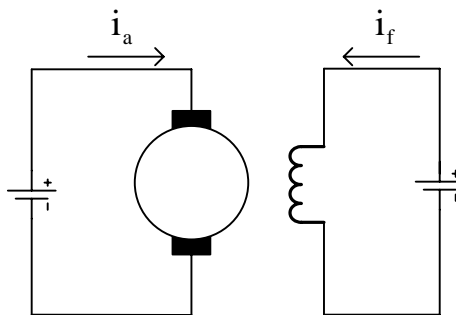


รูปที่ 2.22 โครงสร้างของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง ที่มา [12]

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำงานเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปในขดลวดทั้งสอง ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กจากขดลวดสนามและเกิดแรงเหนี่ยวนำขึ้นบนขดลวดอาร์เมเจอร์ตามสมการที่ 2.15 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถแบ่งชนิดได้ตามลักษณะการสร้างสนามแม่เหล็ก ดังนี้

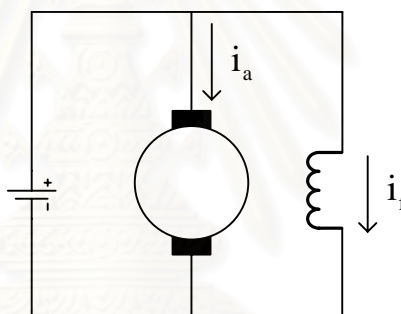
ก. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้น (Separately Excited Motor)

มอเตอร์ชนิดนี้แยกจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขดลวดสนามกับขดลวดอาร์เมเจอร์อิสระจากกัน วงจรของมอเตอร์ชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.23



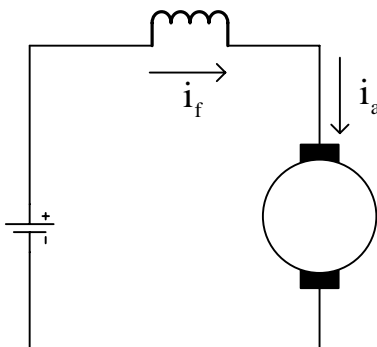
รูปที่ 2.23 ไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้น

ข. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดต่อขนาน(Shunt Motor) ลักษณะของมอเตอร์แบบนี้สามารถเขียนเป็นวงจรได้ดังรูปที่ 2.24 แรงดันไฟของขดลวดสนามแม่เหล็กและขดลวดอาร์เมเจอร์เท่ากัน ความเร็วของมอเตอร์แบบนี้จะไม่ตกลงมามากนักเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น



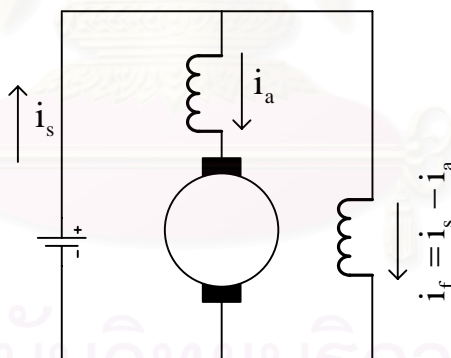
รูปที่ 2.24 ไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดต่อขนาน

ค. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดต่ออนุกรม(Series Motor) มีลักษณะวงจรอนุกรมระหว่างขดลวดอาร์เมเจอร์กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 2.25 กรณีโหลดเพิ่มขึ้น กระแสสนามแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้ความเร็วมอเตอร์ลดลงเพื่อทำให้เกิดสมดุลระหว่างแรงดันจากแหล่งจ่ายกับแรงดันเหนี่ยวนำ และเพิ่มแรงบิดเหนี่ยวนำให้กับมอเตอร์ มอเตอร์แบบนี้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการแรงบิดสูงขณะเริ่มหมุน



รูปที่ 2.25 ไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดต่ออนุกรม

ง. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดต่อผสม (Compound Motor) มีการต่อขดลวดทั้งแบบอนุกรมกับแบบขนาน ในการต่อวงจรของมอเตอร์ชนิดนี้มีทั้งแบบต่อต้านกันและแบบต่อเสริมกัน แต่เนื่องจากการต่อวงจรแบบต้านกันจะก่อให้เกิดปัญหาเรื่องเสถียรภาพในการทำงาน ดังนั้นการต่อแบบต้านกันจึงไม่นิยมใช้ ข้อดีของมอเตอร์แบบนี้คือให้แรงบิดสูงคล้ายกับมอเตอร์แบบต่ออนุกรม แต่ไม่มีปัญหาเรื่องความเร็วสูงเกินขีดปลอดภัยเมื่อโหลดต่ำเหมือนมอเตอร์แบบต่อขนาน วงจรของมอเตอร์แบบนี้ได้แสดงดังรูป 2.26



รูปที่ 2.26 ไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดต่อผสม

2. เจเนเรเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบสร้างสนามแม่เหล็กจากขดลวด

โครงสร้างของเจเนเรเตอร์ส่วนใหญ่เหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 2.22 ขดลวดอาร์เมเจอร์ของเจเนเรเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอยู่บนโรเตอร์ โดยกระแสที่ไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ต่อกับวงจรรภายนอกผ่านทางคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน ส่วนขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอยู่บนสเตเตอร์ โดยที่จะมีกระแสไฟไหลผ่านขดลวดสนาม ดังนั้นขดลวดสนามจึง

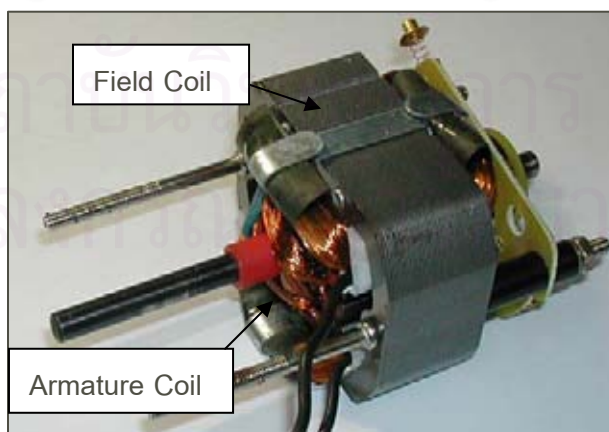
ต้องต่อกับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงเสมอ โดยทั่วไปขดลวดสนามนี้ได้รับกระแสไฟตรงจากแหล่งจ่ายไฟกระแส 2 แบบ คือ

1. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงซึ่งแยกเป็นอิสระทางไฟฟ้าจากเจนเนอเรเตอร์ เรียกเจนเนอเรเตอร์ชนิดนี้ว่า เจเนอเรเตอร์ชนิดแยกกระตุ้น (Separately Excited Generator) ลักษณะของเจนเนอเรเตอร์แบบนี้มีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้น

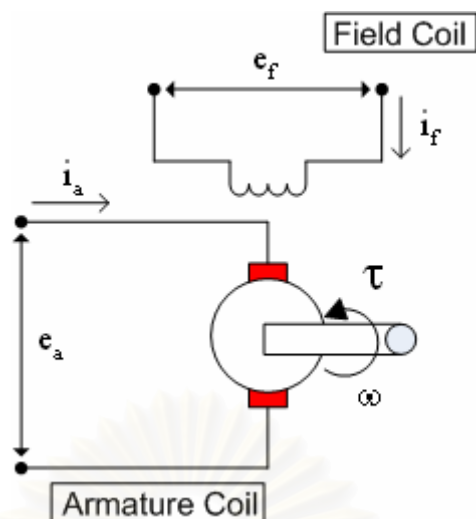
2. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงให้กับขดลวดสนามได้มาจากขดลวดอาร์เมเจอร์ โดยขดลวดสนามมีการต่อกับขดลวดอาร์เมเจอร์โดยตรง เจเนอเรเตอร์ลักษณะนี้เป็นชนิด เจเนอเรเตอร์กระตุ้นด้วยตัวเอง(Self-Excited Generator) เจเนอเรเตอร์ชนิดนี้จะต้องมีอำนาจแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กจึงจะทำงานได้

2.2.5 ทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย

ทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นทั้งมอเตอร์และเจนเนอเรเตอร์ในตัวเดียวกัน ในงานวิจัยชิ้นนี้นำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้น ดังรูปที่ 2.27 ทำหน้าที่เป็นทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้นมีขดลวด 2 ชนิด คือ ขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Coil) และ ขดลวดสนาม (Field Coil) ดังแสดงด้วยวงจรมตามรูปที่ 2.28 สองขดลวดทั้งสองนี้ทำหน้าที่แตกต่างกัน โดยขดลวดอาร์เมเจอร์ทำหน้าที่รับกระแสเหนี่ยวนำทำให้โรเตอร์หมุนในกรณีทรานส์ดิวเซอร์ทำหน้าที่เป็นมอเตอร์ หรือส่งกระแสจากการหมุนโรเตอร์ตัดสนามแม่เหล็กในกรณีที่ทรานส์ดิวเซอร์ทำหน้าที่เป็นเจนเนอเรเตอร์ ส่วนขดลวดสนามทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก โดยสามารถปรับขนาดของฟลักซ์ได้ตามค่ากระแสที่จ่ายให้ขดลวดสนาม ตัวอย่างอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดกระตุ้น เช่น เครื่องปั่นน้ำผลไม้ เครื่องจักรเย็บผ้าไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 2.27 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้นที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 2.28 วงจรไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากแนวความคิดการพัฒนารูปแบบปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากขึ้นส่วนทางกล โดยการลดจำนวนขึ้นส่วนทางกลแทนที่ด้วยอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถส่งกำลังผ่านทางสายไฟ โดยในบทนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีบล็อกไดอะแกรมและวิธีบอนด์กราฟ

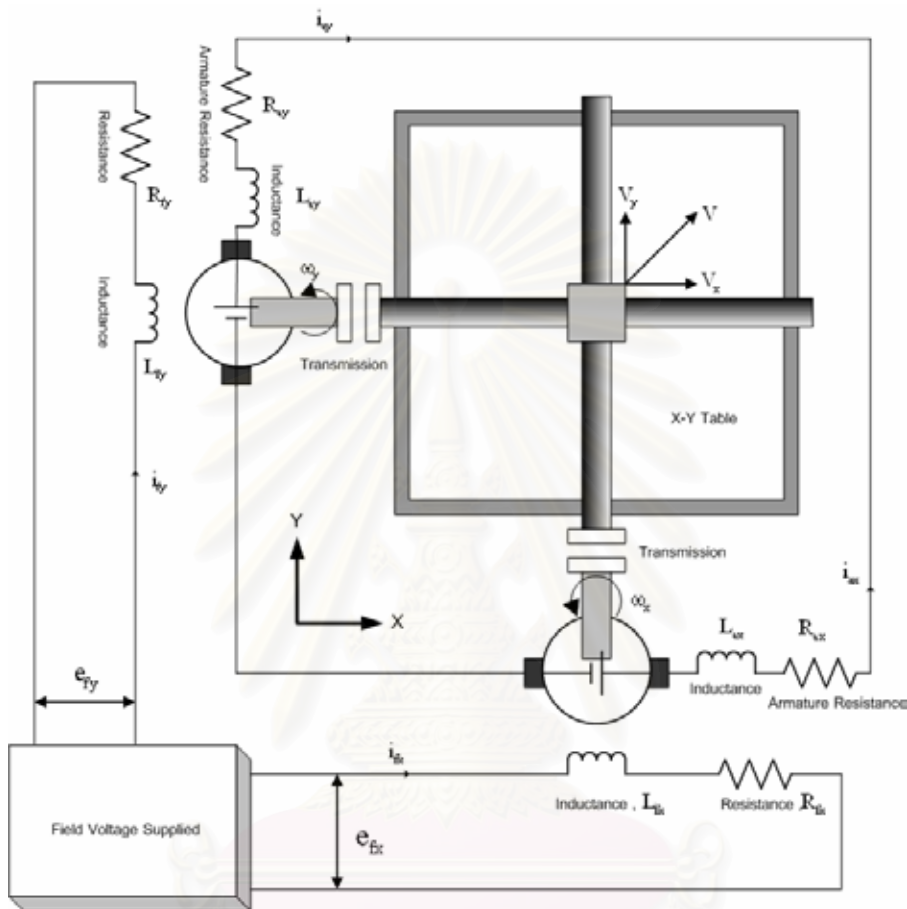
3.1 หลักการของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า

แนวคิดเบื้องต้นของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าคือการนำทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าจำนวนอย่างน้อยสองตัวมาต่อส่วนวงจรรอาร์เมเจอร์ของทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าเข้าด้วยกัน โดยสามารถปรับเปลี่ยนอัตราทดจากการปรับอัตราส่วนสนามแม่เหล็กของทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าทั้งสองให้ได้พฤติกรรมทางกลเหมือนกับระบบทดกำลังแบบอื่นๆ งานวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้นเป็นทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้า ซึ่งอาจใช้อุปกรณ์ลักษณะอื่นที่มีพฤติกรรมเหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้นทดแทนได้ ทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าสามารถแสดงพฤติกรรมเป็นได้ทั้งมอเตอร์และเจนเนอเรเตอร์ในตัวเดียวกัน

3.2 รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดทดสอบชีวิตชนิดไฟฟ้า

จากหลักการแนวคิดเบื้องต้นของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้านำมาสู่การหารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระบบที่ใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือโต๊ะระนาบเอกซ์-วาย เหตุผลในการใช้โต๊ะระนาบเอกซ์-วายในการหาแบบจำลองคือความต้องการศึกษาพฤติกรรมเบื้องต้นเพื่อนำไปเป็นพื้นฐานในการออกแบบและพัฒนาเป็นหุ่นยนต์โคบอตระนาบเอกซ์-วายแบบชีวิตชนิดไฟฟ้า โดยใช้ทรานส์ดิวเซอร์จำนวนสองตัว ซึ่งเป็นจำนวนที่น้อยที่สุดในการออกแบบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า ไดอะแกรมทางไฟฟ้าของระบบนี้แสดงดังรูป 3.1 แบบจำลองนี้มีอินพุตจำนวน 2 ตัวคือ แรงดันตกคร่อม (Voltage Drop) ซึ่งจ่ายให้ขดลวดสนามหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “แรงดันสนาม” และแรงภายนอก ส่วนเอาต์พุตคือความเร็วเชิงเส้น ขดลวดอาร์เมเจอร์และขดสนามสามารถพิจารณาแทนด้วยวงจรตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ การหมุนของขดลวดอาร์เมเจอร์ตัดผ่านสนามแม่เหล็กจากขดลวดสนามทำให้เกิดกระแสไหลในวงจรรอาร์เมเจอร์เรียกว่า “กระแสอาร์เมเจอร์” ซึ่งทำให้ทรานส์ดิวเซอร์ตัวนี้มีประพฤติกรรมเป็นแหล่งจ่ายไฟหรือเจ

เนอเรเตอร์นั้นเอง ในกรณีเริ่มแรกสมมุติให้ทิศทางการไหลของกระแสจากทรานส์ดีวเซอร์ทั้งสองสวนทางกันดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมของระบบที่ใช้ในการหาแบบจำลอง

พิจารณาไดอะแกรมรูป 3.1 เมื่อแหล่งจ่าย (Field Voltage Supplied) จ่ายแรงดันตกคร่อม (e_f) ให้กับขดลวดสนามซึ่งส่งผลทำให้เกิดกระแสสนาม (i_f) ไหลในวงจรมอเตอร์ผ่านตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของขดลวดสนาม แหล่งจ่ายแรงดันนั้นจ่ายแรงดันให้กับขดลวดสนามแต่ละแกนอิสระจากกัน ความสัมพันธ์ต่าง ๆ นี้สามารถนำมารวมกันเพื่อพิจารณาและอธิบายความสัมพันธ์ภายในวงจรของขดลวดสนามโดยแทนความสัมพันธ์ต่าง ๆ ลงในกฎแรงดัน (Voltage law) แสดงดังสมการ 3.1

$$L_f \frac{di_f}{dt} = e_f - R_f i_f \tag{3.1}$$

กระแสสนามไหลผ่านขดลวดสนามทำให้เกิดฟลักซ์ (Flux, ϕ) โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการ 3.2

$$\phi = K_f i_f \quad (3.2)$$

เมื่อมีความเร็วหมุนโรเตอร์ของขดลวดอาร์เมเจอร์ตัดผ่านสนามแม่เหล็กจากขดลวดสนามทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ (Back EMF, e_g) สำหรับพฤติกรรมนี้ทรานส์ดิวเซอร์ทำหน้าที่เป็นเจนเนอเรเตอร์นั่นเอง สมการแรงดันเหนี่ยวนำสามารถเขียนดังสมการ 3.3

$$e_g = K_g \phi \omega_m \quad (3.3)$$

เนื่องจากการวัดค่าฟลักซ์ของทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้ากระทำได้ยาก ดังนั้นจึงทำการตั้งค่าตัวแปรใหม่เป็นแลมดา (Lamda, λ) เพื่อใช้แทนค่าฟลักซ์จากขดลวดสนาม โดยแลมดาที่มีความสัมพันธ์กับฟลักซ์ของขดลวดตามสมการ 3.4 สมการแลมดานี้สามารถหาได้จากการทดลองโดยการประยุกต์ใช้สมการ 3.3 ร่วมกับสมการ 3.4

$$\lambda = K_g \phi \quad (3.4)$$

จากการตั้งตัวแปรแลมดาเพื่อใช้แทนค่าฟลักซ์จากขดลวดสนามสามารถเขียนสมการแรงดันเหนี่ยวนำได้ใหม่โดยมีความสัมพันธ์อยู่ในรูปของแลมดากับความเร็วของโรเตอร์ดังสมการ 3.5

$$e_g = \lambda \omega \quad (3.5)$$

แรงบิดเหนี่ยวนำของทรานส์ดิวเซอร์ (T_g) เกิดจากการเหนี่ยวนำระหว่างสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากกระแสสนามกับกระแสที่ไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ที่โรเตอร์ สมการแรงบิดเหนี่ยวนำแสดงดังสมการ 3.6

$$T_g = \lambda i_a \quad (3.6)$$

แรงบิดสุทธิ (T_t) เกิดขึ้นจากผลรวมของแรงบิดเหนี่ยวนำจากทรานส์ดิวเซอร์กับแรงบิดอินพุทจากภายนอก (T_F) ที่กระทำกับโรเตอร์ของทรานส์ดิวเซอร์ แรงบิดอินพุทจากภายนอกจะต้องคูณกับอัตราทดของชุดทดกำลังด้วย เนื่องจากแรงบิดภายนอกกระทำกับชุดมือจับแต่แรงบิดสุทธิกระทำกับโรเตอร์ แรงบิดสุทธินี้คืออินพุทสำหรับใช้ในการจำลองระบบทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้านั่นเอง

$$T_t = T_g + T_F \quad (3.7)$$

แรงบิดสุทธิที่กระทำกับโรเตอร์ของทรานส์ดิวเซอร์จากสมการ 3.7 มีความสัมพันธ์กับความเร็วของโรเตอร์ตามสมการ 3.8 ดังนั้นสามารถหาความเร็วของโรเตอร์ได้จากค่าแรงบิดสุทธิซึ่งเป็นอินพุทของระบบด้วยวิธีอินทิกรัล

$$T_t = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (3.8)$$

เมื่อ J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์

ω_r คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์

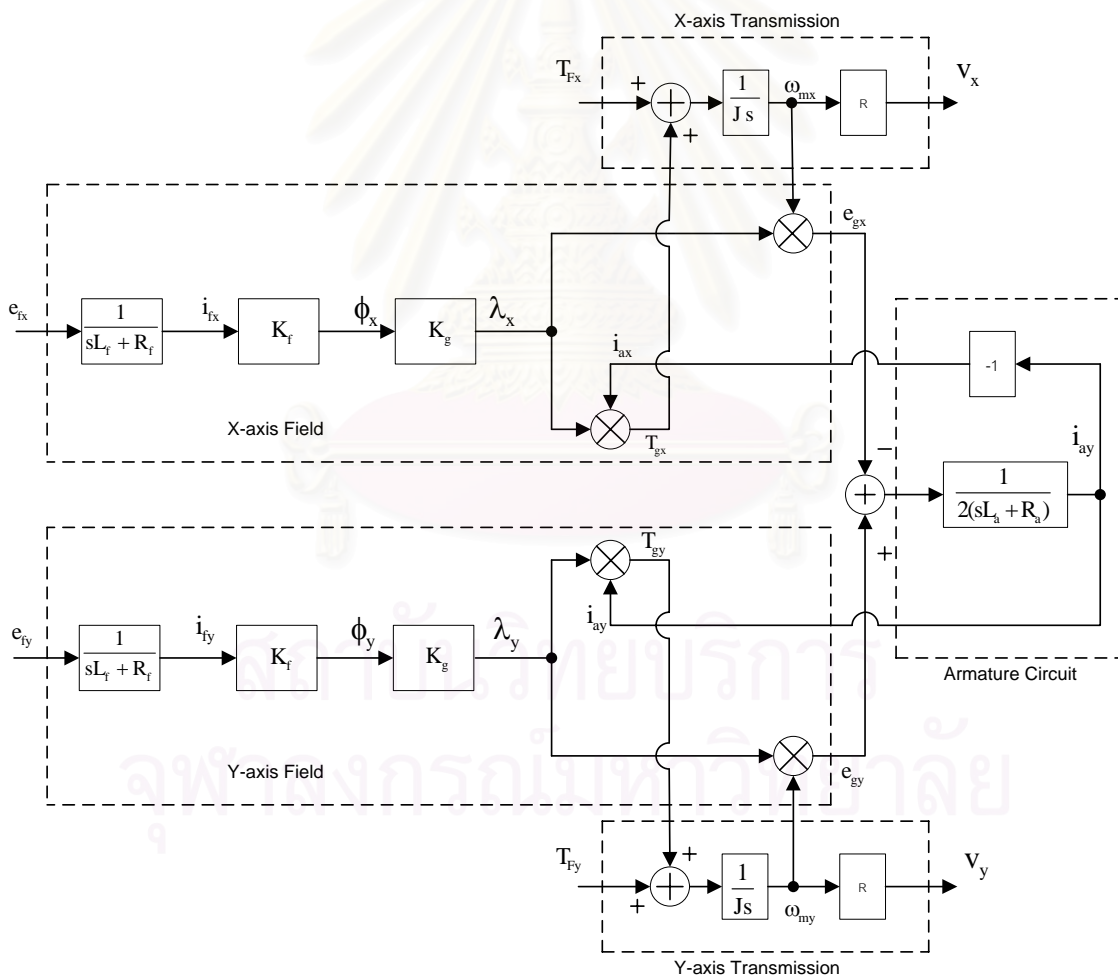
ความเร็วเชิงเส้นของชุดมือจับเป็นเอาต์พุทของระบบ ความเร็วเชิงนี้สามารถหาจากการคำนวณเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ของทรานส์ดิวเซอร์ โดยความเร็วเชิงเส้นต้องผ่านชุดทดกำลังและพูลเลย์ด้านข้าง สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ดังตามสมการ 3.9

$$V = \omega_r R \quad (3.9)$$

เมื่อ R คือ ผลคูณของอัตราทดของชุดทดกำลังกับรัศมีของพูลเลย์ด้านข้าง

จากการพิจารณาไดอะแกรมรูปที่ 3.1 และสมการทางคณิตศาสตร์ข้างต้นทั้งหมดในบทนี้สามารถนำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมของชุดทดสอบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าได้ ดังรูปที่ 3.2 การเขียนบล็อกไดอะแกรมทำให้เข้าใจถึงอินพุทและเอาต์พุทของแต่ละส่วนของระบบ

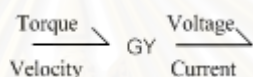
ไดอะแกรมนี้ได้แบ่งเป็นส่วนๆ คือ ขดลวดสนาม ขดลวดอาร์เมเจอร์ โรเตอร์และระบบทดกำลังโดยแยกเป็นแนวแกน ไดอะแกรมนี้จะพิจารณาอยู่ในโดเมนลาปลาซ (Laplace Domain) สมการที่ใช้กับส่วนขดลวดสนามคือสมการ 3.1, 3.2, 3.4, 3.5 และ 3.6 อินพุทของขดลวดสนามคือแรงดันสนามและความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ เอาท์พุทของขดลวดสนามคือ แรงบิดเหนี่ยวนำของทรานส์ดิวเซอร์และแรงดันเหนี่ยวนำ ส่วนขดลวดอาร์เมเจอร์ใช้กฎแรงดันในการพิจารณาวงจร โดยที่รับค่าอินพุทซึ่งคือแรงดันเหนี่ยวนำจากส่วนขดลวดสนามของแต่ละแนวแกน จากนั้นนำผลต่างของแรงดันเหนี่ยวนำที่ตกคล่อมขดลวดอาร์เมเจอร์ไปคิดหากระแสอาร์เมเจอร์ซึ่งคือเอาท์พุทของส่วนขดลวดอาร์เมเจอร์ โดยสมมุติให้แรงดันเหนี่ยวนำของแกนเอกซ์มีค่าติดลบก่อนเนื่องจากแรงดันเหนี่ยวนำจากทั้งสองแกนในไดอะแกรมรูปที่ 3.1 มีทิศทางสมมุติสวนทางกัน



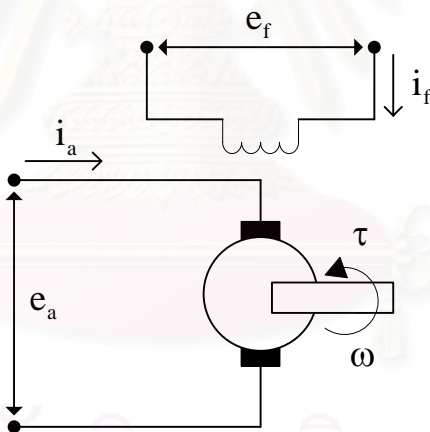
รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมของชุดทดสอบ

3.3 แบบจำลองด้วยวิธีบอนด์กราฟของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้น

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและเจนเนอเรเตอร์คืออีลิเมนต์ไจเรเตอร์(Gyrator Element)ในบอนด์กราฟ [13] ความหมายของไจเรเตอร์ในบอนด์กราฟคืออีลิเมนต์ที่เปลี่ยนพลังจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่น อย่างเช่น มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ส่วนเจนเนอเรเตอร์จะเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยที่อีลิเมนต์ไจเรเตอร์มีค่าคงที่หนึ่งตัวสำหรับการเปลี่ยนรูปพลังงานซึ่งเรียกว่า ไจเรเตอร์โมดูลัส(Gyrator Modulus, GY) บอนด์กราฟอีลิเมนต์ไจเรเตอร์แทนทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.3 ไจเรเตอร์โมดูลัสแทนค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสชนิดแม่เหล็กถาวรมีความเข้มของสนามแม่เหล็กคงที่ ดังนั้นไจเรเตอร์โมดูลัสจึงมีค่าคงที่ด้วย



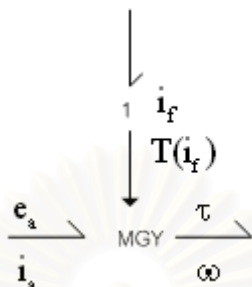
รูปที่ 3.3 อีลิเมนต์ไจเรเตอร์แทนทรานส์ดิวเซอร์



รูปที่ 3.4 วงจรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้น

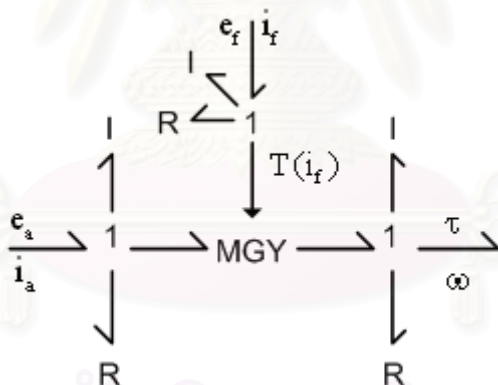
สนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้นมีค่าไม่คงที่ สนามแม่เหล็กนี้เป็นฟังก์ชันเปลี่ยนแปลงตามกระแสสนาม โดยที่ $T(i_f)$ คือ ฟังก์ชันของสนามแม่เหล็ก รูปวงจรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้นแสดงดังรูปที่ 3.4 ไจเรเตอร์แบบธรรมดาไม่สามารถแทนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้นได้เพราะสนามแม่เหล็กไม่คงที่ ดังนั้นจึงใช้มอดูเลตไจเรเตอร์ (Modulated Gyrator, MGY) แทนทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้า บอนด์กราฟของมอดูเลต

ไจเรเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.5 โดยในรูปนี้แสดงการทำงานของทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าในรูปแบบมอเตอร์ ส่วนในรูปแบบเจนเนอเรเตอร์มีทิศทางกรไหลกลับด้านกับมอเตอร์



รูปที่ 3.5 อีลีเมนต์ทางบอนด์กราฟของมอเตอร์ไจเรเตอร์

เมื่อพิจารณาขดลวดอาร์เมเจอร์และขดลวดสนามเป็นวงจรของตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ พร้อมทั้งคิดโมเมนต์ความเฉื่อยของเพลลา มอเตอร์ไจเรเตอร์แทนทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าสามารถเขียนเป็นบอนด์กราฟได้ดังรูป 3.6



รูปที่ 3.6 บอนด์กราฟของทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้า

สมการความสัมพันธ์ของมอเตอร์ไจเรเตอร์ของทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าในรูปแบบมอเตอร์แสดงดังสมการ 3.10 และ 3.11

$$e_a = T(i_f)\omega \quad (3.10)$$

$$T(i_f)i_a = \tau \quad (3.11)$$

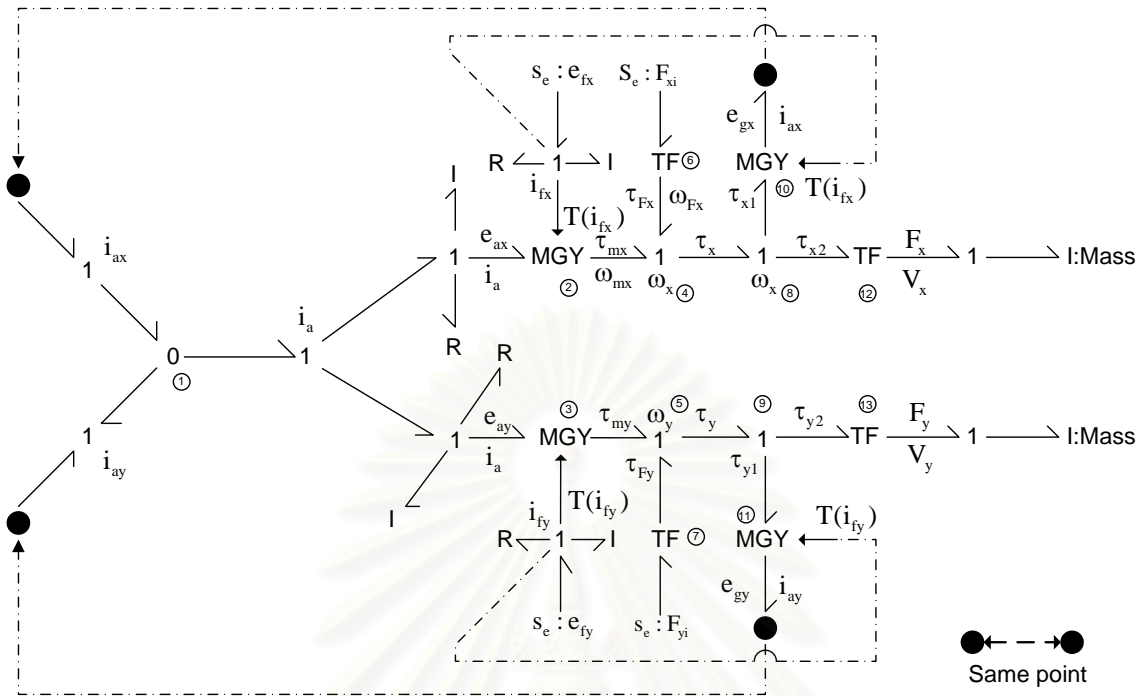
ส่วนบอนด์กราฟแทนทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าในรูปแบบजेनेरेเตอร์มีความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนรูปแบบพลังงานดังสมการ 3.12 และ 3.13 ซึ่งเป็นส่วนกลับกับสมการความสัมพันธ์ของมอเตอร์เจเนเรเตอร์ของทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าในรูปแบบजेनेरेเตอร์

$$\omega = T(i_f)e_a \quad (3.12)$$

$$i_a = T(i_f)\tau \quad (3.13)$$

3.4 สมการความสัมพันธ์ต่างๆของแบบจำลองบอนด์กราฟของซีวีทีชนิดไฟฟ้า

วิธีบอนด์กราฟเป็นวิธีการหาโมเดลของระบบด้วยการพิจารณาการไหลเข้าออกของพลังงานผ่านอิลิเมนต์ต่างๆของระบบ ซึ่งอิลิเมนต์ต่างๆนี้แทนอุปกรณ์ต่างๆและจุดเชื่อมต่อ(Junction)ต่างๆที่มีอยู่ในระบบ เช่น ทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าแทนด้วยอิลิเมนต์มอเตอร์เจเนเรเตอร์โดยต้องแยกเป็นมอเตอร์และ เจเนเรเตอร์ ชุดมือจับและขึ้นแทนด้วยอิลิเมนต์สะสมพลังงาน (Energy Storage, I) แบบจลน์ ส่วนตัวต้านทานของทรานส์ดิวเซอร์แทนด้วยอิลิเมนต์ปลดปล่อยพลังงาน (Energy Dissipater, R) ตัวเหนี่ยวนำแทนด้วยอิลิเมนต์สะสมพลังงานแบบคักย์ ระบบทดกำลังแทนด้วยอิลิเมนต์ทรานส์ฟอร์มเมอร์ (TF) อินพุทของระบบมีทั้งแรงภายนอกและโวลเทจที่จ่ายพิจารณาเป็นอิลิเมนต์แหล่งจ่าย (S_e) ข้อดีของการนำวิธีบอนด์กราฟมาประยุกต์ใช้ในการหารูปแบบจำลองและอธิบายอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าคือ การพิจารณาในเชิงพลังงานเหมือนกันไม่ว่าจะเป็นระบบทางกล, ระบบไฟฟ้า หรือระบบอื่นๆ ดังนั้นทำให้การหาโมเดลของระบบที่มีระบบหลายๆแบบผสมกันทำได้ง่ายขึ้น เช่น ระบบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าเป็นผสมกันระหว่างระบบทางไฟฟ้าและระบบทางกล จากการพิจารณาการแทนด้วยอิลิเมนต์ต่างๆของอุปกรณ์ต่างๆในระบบข้างต้นสามารถนำอิลิเมนต์มอเตอร์เจเนเรเตอร์และอิลิเมนต์แหล่งจ่ายนั้นของชุดทดสอบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าเขียนเป็นบอนด์กราฟโมเดลดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 บอนด์กราฟโมเดลของชุดทดสอบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า

จากแบบจำลองของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าด้วยวิธีบอนด์กราฟดังรูปที่ 3.8 สามารถหาความสัมพันธ์ของอิลิเมนต์ต่างได้ดังนี้ พิจารณามายเลข 1 คือจังก์ชันศูนย์ทำหน้าที่แทนสมการความสัมพันธ์ของกระแสไฟภายในวงจรรีเมเจอร์ กระแสไฟนี้ได้มาจากแรงดันเหนี่ยวนำซึ่งเกิดจากอิลิเมนต์มอดูเลตไจเรเตอร์ที่หมายเลข 10 กับ 11 ซึ่งทำหน้าที่เป็นเจเนอเรเตอร์โดยสมการความสัมพันธ์กระแสไฟและสมการความสัมพันธ์ของโวลเทจแสดงดังสมการ 3.15 และ 3.16 ตามลำดับ

$$i_a = i_{ax} - i_{ay} \tag{3.15}$$

$$v_a = v_{ax} = v_{ay} \tag{3.16}$$

หมายเลข 2 และ 3 คืออิลิเมนต์มอดูเลตไจเรเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่รับกระแสและแรงดันจากจังก์ชันหนึ่งต่อจากนั้นอิลิเมนต์มอดูเลตไจเรเตอร์นี้จะแปลงกระแสไฟและโวลเทจเป็นแรงบิดกับความเร็วเชิงมุมตามสมการสัมพันธ์โดยอาศัยอัตราทด อัตราทดไม่คงที่เนื่องจากอัตราทอนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามแม่เหล็กซึ่งฟังก์ชันของกระแสสนาม กระแสสนามนี้ได้มาจากการจ่ายแรงดันตกคร่อมตัว

ต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำซึ่งพิจารณาแทนขดลวดสนาม แรงดันหรือกระแสสนามนี้คืออินพุทของระบบ สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับความเร็วเชิงมุมและสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแสแสดงดังนี้ โดยแยกเป็นสองแนวแกนเนื่องจากแนวความคิดเบื้องต้นของอุปกรณ์ อัตราปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าคือการนำทรานสดิวเซอร์จำนวนสองตัวขึ้นไปนำมาต่อกัน ในเบื้องต้นนี้ได้นำทรานสดิวเซอร์เพียงสองตัวเท่านั้นมาใช้ในการออกแบบ

$$e_{ax} = T(i_{fx}) \times \omega_{mx} \quad (3.17)$$

$$\tau_{mx} = T(i_{fx}) \times i_{ax} \quad (3.18)$$

$$e_{ay} = T(i_{fy}) \times \omega_{my} \quad (3.19)$$

$$\tau_{my} = T(i_{fy}) \times i_{ay} \quad (3.20)$$

หมายเลข 4 และ 5 คือจังก์ชันหนึ่งซึ่งทำหน้าที่รวมแรงบิดที่เกิดจากแรงบิดของมอเตอร์และแรงบิดภายนอก โดยที่จังก์ชันนี้มีความเร็วคงที่ แรงบิดภายนอกนี้ได้มาจากทรานส์ฟอร์มเมอร์หมายเลข 6 และ 7 ซึ่งเป็นระบบทดกำลังจากชุดมือของโต๊ะระนาบเอกซ์-วายนั่นเอง สมการความสัมพันธ์ของแรงบิดและสมการของความเร็วเชิงมุมที่จังก์ชันหนึ่งแสดงดังนี้ โดยแยกแนวแกนเหมือนกับสมการที่ผ่านมา

$$\tau_x = \tau_{mx} + \tau_{Fx} \quad (3.19)$$

$$\omega_{mx} = \omega_{Fx} = \omega_x \quad (3.20)$$

$$\tau_y = \tau_{my} + \tau_{Fy} \quad (3.21)$$

$$\omega_{my} = \omega_{Fy} = \omega_y \quad (3.22)$$

หมายเลข 6 และหมายเลข 7 คืออีลิเมนต์ทรานส์ฟอร์มเมอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแรงภายนอกเป็นแรงบิด พร้อมทั้งเปลี่ยนความเร็วเชิงเส้นเป็นความเร็วเชิงมุมด้วยอัตราทดคงที่(R) แรงภายนอกนี้คืออินพุทของระบบ ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับแรงและสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับความเร็วเชิงเส้นดังนี้

$$\tau_{Fx} = F_{xi} \times R \quad (3.23)$$

$$v_{Fx} = \omega_{Fx} \times R \quad (3.24)$$

$$\tau_{F_y} = F_{y_i} \times R \quad (3.25)$$

$$v_{F_y} = \omega_{F_y} \times R \quad (3.26)$$

หมายเลข 8 และ 9 คือจังก์ชันหนึ่ง จังก์ชันนี้ทำหน้าที่กระจายแรงบิดที่ได้รับ โดยความเร็วเชิงมุมที่จังก์ชันนี้คงที่ แรงบิดส่วนแรกกระจายให้มอเตอร์เจเนอเรเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นเจเนอเรเตอร์ แรงบิดอีกส่วนกระจายไปที่ทรานส์ฟอร์มเมอร์แปลงกลับเป็นแรงที่มือจับ สมการสัมพันธ์ที่จังก์ชันนี้แสดงดังนี้

$$\tau_x = \tau_{x1} + \tau_{x2} \quad (3.27)$$

$$\omega_x = \omega_{x1} = \omega_{x2} \quad (3.28)$$

$$\tau_y = \tau_{y1} + \tau_{y2} \quad (3.29)$$

$$\omega_y = \omega_{y1} = \omega_{y2} \quad (3.30)$$

ทรานส์มิชชันกลไฟฟ้าของระบบชีวิตชีวนิดไฟฟ้าสามารถทำหน้าที่ได้สองแบบ คือ มอเตอร์กับเจเนอเรเตอร์ โดยที่ทรานส์มิชชันกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นเจเนอเรเตอร์ในบอนด์กราฟของระบบชีวิตชีวนิดไฟฟ้าคือมอเตอร์เจเนอเรเตอร์ที่หมายเลข 10 กับ 11 ซึ่งผลิตแรงดันเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไฟไหลในวงจรขดลวดอาร์เมเจอร์ โดยมีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$e_{gx} = T(i_{fx}) \times \omega_x \quad (3.31)$$

$$\tau_{x1} = T(i_{fx}) \times i_{ax} \quad (3.32)$$

$$e_{gy} = T(i_{fy}) \times \omega_y \quad (3.33)$$

$$\tau_{y1} = T(i_{fy}) \times i_{ay} \quad (3.34)$$

ความเร็วเชิงมุมของทรานส์มิชชันกลไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นความเร็วเชิงเส้นด้วยทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่หมายเลข 12 และ 13 ความเร็วเชิงเส้นนี้คือเอาต์พุทของระบบ โดยมีสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับความเร็วเส้นดังนี้

$$v_x = \omega_x \times R \quad (3.35)$$

$$\tau_{x1} = F_{x0} \times R \quad (3.36)$$

$$v_y = \omega_y \times R \quad (3.37)$$

$$\tau_{y1} = F_{y0} \times R \quad (3.38)$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

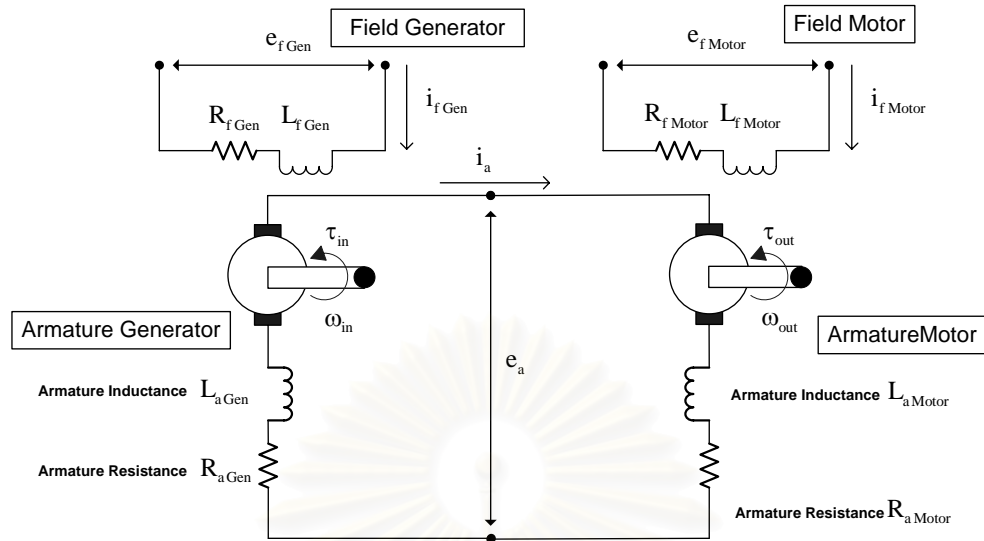
บทที่ 4

การออกแบบชุดทดสอบ

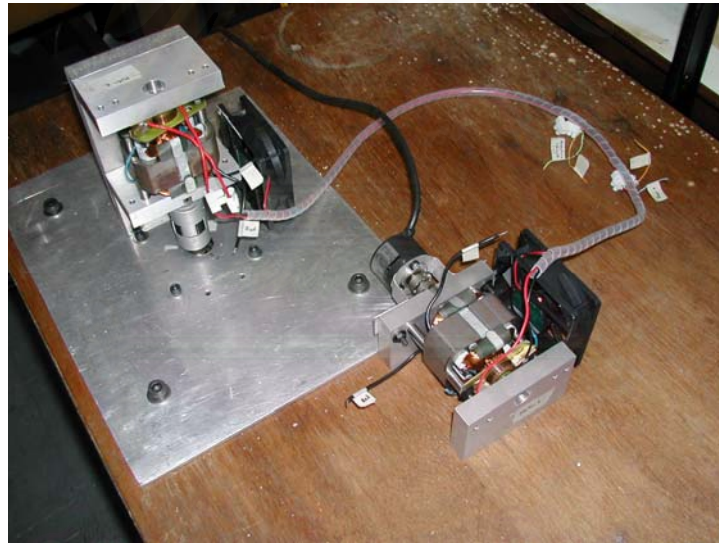
จากแนวคิดเบื้องต้นของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดนำมาสู่การหารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งวิธีบอนด์กราฟและบล็อกไดอะแกรม การพัฒนาอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าในระยะแรกนั้นได้มุ่งเน้นเพื่อขยายขอบเขตการออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์โคบอท แต่โดยหลักการของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดนี้นั้นสามารถประยุกต์ใช้ได้กับการออกแบบระบบทางกลชนิดอื่นๆได้ ในบทนี้จะนำเสนอการออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าซึ่งชุดทดสอบนี้มีจำนวน 2 ชุด คือชุดทดสอบแบบอิสระ (Non-Coupled ECVT Test bed) และชุดการทดสอบแบบโต้ะระนาบเอ็กซ์-วาย จุดประสงค์ของการออกแบบจัดสร้างชุดทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมในรูปแบบต่างๆของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าและทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากบทที่ 3

4.1 ชุดทดสอบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าแบบอิสระ

การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าได้เริ่มต้นด้วยการออกแบบชุดทดสอบแบบอิสระ(Non-Coupled ECVT Test bed) หลักการของชุดทดสอบแบบอิสระคือการนำทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าจำนวนสองตัวมาต่อส่วนวงจรขดลวดอาร์เมเจอร์เข้าด้วยกัน วงจรขดลวดสนามของทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าแต่ละตัวต่อกับอุปกรณ์จ่ายกระแสสนาม (Power Supply) อย่างอิสระ หน้าที่ของทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าแต่ละตัวถูกกำหนดเฉพาะ รูปไดอะแกรมของชุดทดสอบแบบอิสระแสดงดังรูปที่ 4.1 วงจรกระแสสนามของทรานส์ดิวเซอร์แทนด้วยวงจรตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ส่วนวงจรอาร์เมเจอร์แทนด้วยวงจรตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำเช่นกัน จุดประสงค์ของชุดทดสอบแบบนี้คือศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราทดกับกระแสสนามในกรณีทรานส์ดิวเซอร์แต่ละตัวมีหน้าที่เฉพาะตัว ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีลักษณะแบบเดียวกับการทำงานของระบบทดกำลังต่างๆไปที่มีทิศทางของอินพุทที่แน่นอน ส่วนเอาต์พุทก็เช่นกัน อินพุทของชุดการทดสอบคือความเร็วจากตัวขับ (Actuator) ซึ่งในการทดสอบจริงใช้มอเตอร์เป็นตัวต้นกำลัง, กระแสสนามจากอุปกรณ์จ่ายกระแสสนาม ส่วนเอาต์พุทของชุดทดสอบคือความเร็วทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้สำหรับการจัดสร้างนี้คือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้น ส่วนมอเตอร์ต้นกำลังใช้มอเตอร์แบบเซอร์โวไฟฟ้ากระแสลับซึ่งสามารถควบคุมความเร็วรอบผ่านการ์ดควบคุมการเคลื่อนที่



รูปที่ 4.1 ไดอะแกรมของชุดทดสอบแบบอิสระ



รูปที่ 4.2 ภาพชุดทดสอบแบบอิสระ

จากรูปที่ 4.2 แสดงการติดตั้งชุดทดสอบแบบอิสระ โดยมีมอเตอร์ส่งความเร็วผ่านคัปปลิง (Coupling) ให้ทรานส์ดิวเซอร์ที่ทำหน้าที่เป็นเจเนอเรเตอร์ ทรานส์ดิวส์ดังกล่าวจะผลิตแรงดันเหนี่ยวนำ ในวงจรอาร์เมเจอร์ ซึ่งทำให้มีแรงดันตกคร่อมโรเตอร์ของทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นมอเตอร์ ชุดทดสอบได้ติดตั้งพัดลมเพื่อระบายความร้อนจากขดลวดสนามและขดลวดอาร์เมเจอร์ การวัดความเร็วรอบของทรานส์ดิวเซอร์ทั้งสองโดยใช้การรับสัญญาณพัลส์ (Pulse Signal) จากเอนโคเดอร์

(Encoder) ที่ติดตั้งเพิ่มและเอนโคเดอร์จากมอเตอร์ต้นกำลังส่งไปยังการ์ดรับส่งข้อมูล (Data Acquisition Card) บนคอมพิวเตอร์โดยใช้เวลาของระบบปฏิบัติการวินโดวส์ในการคำนวณความเร็วจุดประสงค์ในการสร้างชุดทดสอบชุดนี้คือศึกษาพฤติกรรมของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าในกรณีที่ทรานส์ดิวเซอร์แต่ละตัวมีหน้าที่เฉพาะตัวซึ่งมีลักษณะคล้ายกับระบบทดกำลังทั่วไป

4.2 ชุดทดสอบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าแบบระนาบเอกซ์-วาย

จากประสงค์ของงานวิจัยขึ้นเพื่อขยายขอบเขตการออกหุ่นยนต์โคบอทออกไปสู่โครงสร้างที่ซับซ้อน ดังนั้นจึงได้นำอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้ามาออกแบบและจัดสร้างหุ่นยนต์โคบอทระนาบเอกซ์-วาย ซึ่งอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องที่ใช้ในหุ่นยนต์นั้นมีทิศทางอินพุทและเอาต์พุทสลับกันได้ขึ้นอยู่กับลักษณะและทิศทางการควบคุมการเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงใช้โต๊ะระนาบเอกซ์-วายเพื่อสามารถทำการทดลองหลักการของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าได้อย่างเห็นภาพได้ชัดเจนและง่าย ชุดการทดสอบชุดนี้ประกอบด้วยทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าจำนวน 2 ตัว โดยทรานส์ดิวเซอร์ทั้งสองนี้ไม่มีหน้าที่เฉพาะเจาะจงซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งมอเตอร์และเจเนอเรเตอร์ขึ้นอยู่กับลักษณะการควบคุมหุ่นยนต์โคบอท หุ่นยนต์โคบอทระนาบเอกซ์-วายชนิดใช้อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าออกแบบเป็นโมดูล (Module) จำนวน 2 ชุด สำหรับใช้สำหรับแกนเอกซ์และแกนวายเพื่อนำไปติดตั้งกับโต๊ะระนาบเอกซ์-วาย ซึ่งได้มีการจัดสร้างไว้แล้วดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 โต๊ะระนาบเอกซ์-วาย

4.2.1 การออกแบบโมดูลอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า

การออกแบบโมดูลเริ่มต้นด้วยจัดหาอุปกรณ์สำหรับใช้เป็นทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้า ซึ่งในการวิจัยชิ้นนี้ได้นำมามอเตอร์ของจักรเย็บผ้าไฟฟ้ามาใช้เป็นทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้า ลักษณะของมอเตอร์ของจักรเย็บผ้าเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดต่ออนุกรม จากนั้นทำการแยกขดลวดอาร์เมเจอร์กับขดลวดสนามออกจากกัน มอเตอร์นี้จึงกลายเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้นเพื่อให้กระแสที่ใช้สำหรับขดลวดสนามและขดลวดอาร์เมเจอร์แยกอิสระจากกันตามแบบจำลองที่ออกแบบไว้ ต่อมานำทรานส์ดิวเซอร์ที่ได้มาออกแบบส่วนระบบทดกำลัง จากข้อมูลพิกัดของมอเตอร์แบบเดียวกันนั้นจะทำงานที่ความเร็วรอบประมาณ 4000 ถึง 7000 รอบต่อนาที แต่ความเร็วของการเคลื่อนที่ของชุดมือจับประมาณ 1 เมตรต่อวินาที ดังนั้นจึงต้องใช้การทดกำลังเพื่อให้ความเร็วจากชุดมือจับส่งมาหมุนมอเตอร์เพียงพอกับพิกัดของมอเตอร์ ระบบทดกำลังที่ใช้ต้องมีประสิทธิภาพในการทดกำลังในกรณีเปลี่ยนทิศทางของอินพุตและเอาต์พุต และยังสามารถส่งกำลังต่างระนาบกันได้ ดังนั้นจึงทำการออกแบบระบบทดกำลังโดยใช้ชุดทดกำลังแบบสายพานไทมมิ่ง (Timing Belt) จำนวน 2 ชั้น เหตุผลที่ใช้ระบบกำลังแบบสายพานไทมมิ่ง 2 ชั้น เนื่องจากข้อจำกัดของขนาดของพูลเลย์ ข้อดีของสายพานไทมมิ่งคือลดการสั่นไถลระหว่างสายพานกับพูลเลย์ เหตุผลในการออกแบบชุดทดกำลัง 2 ชั้นคือต้องการให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ด้วยความเร็วที่ต้องเมื่อเคลื่อนที่ชุดมือจับด้วยเร็ว 1 เมตรต่อวินาที ชุดโมดูลรับความเร็วมาจากพูลเลย์ด้านข้าง (Side Pulley) เมื่อชุดมือจับเคลื่อนที่จะทำให้สลิงที่ยึดอยู่กับชุดลูกปืนเคลื่อนที่เชิงเส้น (Linear Bearing) ตามแต่ละแนวแกนเคลื่อนที่ด้วย การเคลื่อนที่ของสลิงส่งผลให้พูลเลย์ด้านข้างหมุนด้วยความเร็วเชิงเส้นค่าหนึ่ง (ω_0) โดยมีการคำนวณดังต่อไปนี้ ในกรณีที่ความเร็วชุดมือ (V) มีค่าเท่ากับ 1 เมตรต่อวินาทีในแกนใดแกนหนึ่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพูลเลย์ด้านข้าง (r) เท่ากับ 38.5 มิลลิเมตร

$$V = \omega_0 r \quad (4.1)$$

$$\omega_0 = 25.94 \text{ Rad/s หรือ } 247.7 \text{ rpm}$$

ความเร็วเชิงมุมของพูลเลย์ด้านข้างถูกส่งไปยังโมดูลผ่านเพลลาไปยังพูลเลย์ไทมมิ่งตัวใหญ่ (Large Timing Pulley) ของชุดทดกำลังชั้นที่ 1 ลักษณะของพูลเลย์ไทมมิ่งตัวใหญ่แสดงดังรูปที่ 4.4 มีจำนวนฟัน 60 ฟัน และทำการลดโมเมนต์ความเฉื่อยลงด้วยการเจาะรูและลดขนาดด้านข้างลงทำให้มวลของพูลเลย์น้อยลง ความเร็วของพูลเลย์ไทมมิ่งตัวใหญ่เท่ากับความเร็วของพูลเลย์ด้านข้าง



รูปที่ 4.4 พูเลย์ไทมมิ่งตัวใหญ่

ความเร็วของพูเลย์ไทมมิ่งตัวใหญ่ถูกทอดไปยังพูเลย์ไทมมิ่งตัวเล็ก(Small Timing Pulley) ลักษณะของพูเลย์ไทมมิ่งตัวเล็กแสดงดังรูปที่ 4.5 พูเลย์ไทมมิ่งตัวเล็กมีจำนวนฟัน 12 ฟัน ดังนั้นชุดทดกำลังชั้นที่ 1 จึงมีอัตราทด (T) เท่ากับ 1: 5 ความเร็ว (ω_1) ที่ทอดผ่านชุดทดกำลังชั้นที่ 1 มีค่าเท่ากับ

$$\omega_1 = \omega_0 T \quad (4.2)$$

$$\omega_1 = 247.7 \times 5 = 1238.5 \text{ rpm}$$



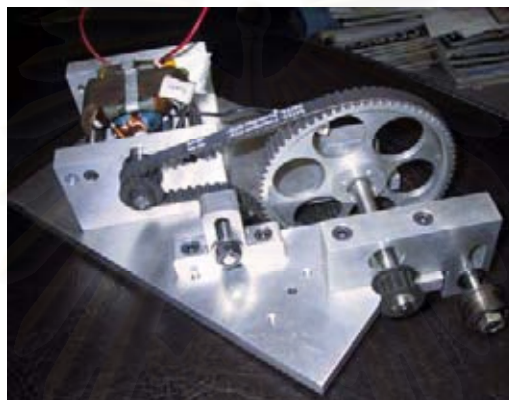
รูปที่ 4.5 พูเลย์ไทมมิ่งตัวเล็ก

ความเร็วที่ได้จากชุดทดกำลังชั้นที่ 1 น้อยเกินไป จึงทำการออกแบบชุดทดกำลังชั้นที่ 2 เพิ่มเข้าไป โดยใช้ชุดพูเลย์แบบเดียวกับชุดพูเลย์ของชุดทดกำลังชั้นที่ 1 อัตราทดของชุดทดกำลังชั้นที่ 2 เท่ากับ 1: 5 คำนวณความเร็วสุดท้าย (ω_2) ที่ใช้ไปหมุนทรานส์มิชชั่นเท่ากับ

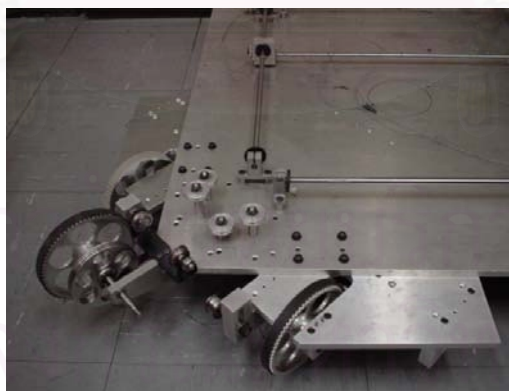
$$\omega_2 = \omega_1 T \quad (4.3)$$

$$\omega_2 = 1238.5 \times 5 = 6192.5 \text{ rpm}$$

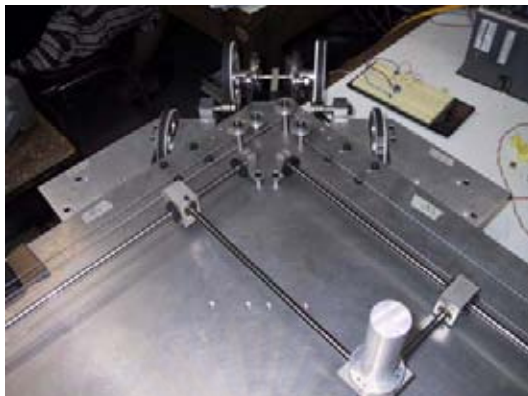
เมื่อออกแบบและคำนวณอัตราทดของชุดทดกำลังของทรานสดิวเซอร์เพื่อใช้ทดความเร็วให้กับทรานสดิวเซอร์แล้วจึงออกแบบและจัดสร้างชิ้นส่วนอื่นเพื่อสร้างโมดูลชุดทดกำลังแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.6 จากนั้นนำโมดูลดังกล่าวมาประกอบกับโต๊ะระนาบเอกซ์-วาย ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งเมื่อประกอบเสร็จจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.6 โมดูลชุดทดกำลังแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า



รูปที่ 4.7 การประกอบโมดูลเข้ากับโต๊ะระนาบเอกซ์-วาย



รูปที่ 4.8 ชุดการทดลองที่ประกอบเสร็จ



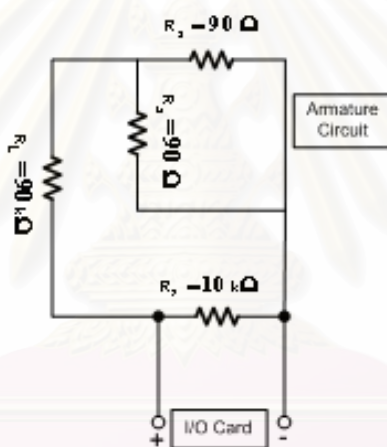
รูปที่ 4.9 ชุดการทดสอบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดชนิดไฟฟ้าแบบไต่ระนาบเอกซ์-วาย

4.2.2 การออกแบบตัวปรับความตึงของสลิง

เนื่องจากการส่งผ่านกำลังจากชุดมือจับมาที่พู่เล่ย์ด้านข้างอาศัยสลิง ข้อดีของการส่งกำลังผ่านสลิงคือความง่ายต่อการออกแบบระบบส่งกำลังไปในระนาบต่างๆ สามารถบังคับทิศทางของสลิงด้วยพู่เล่ย์ แต่ข้อเสียของการส่งกำลังด้วยสลิงคือการลื่นไถลระหว่างสลิงกับพู่เล่ย์ ซึ่งจำเป็นต้องแก้ไขด้วยการทำให้สลิงมีความตึงมากอยู่เสมอและเลือกขนาดสลิงให้เหมาะสม สลิงที่ใช้ในการสร้างชุดทดสอบนี้มีขนาด 1.5 มิลลิเมตร ในการทำให้สลิงมีความตึงสูงอยู่เสมอต้องทำการออกแบบตัวปรับความตึงของสลิง

4.2.3 วงจรแบ่งสัดส่วนแรงดัน

จากข้อจำกัดของการรับข้อมูลที่ใช้ในการทดลองนี้สามารถรับค่าแรงดัน(สัญญาณอนาล็อก) ได้แค่ในช่วง 10 ถึง -10 เท่านั้น แต่บางครั้งสัญญาณอนาล็อกจากทรานส์ดิวเซอร์เกินกว่าช่วงที่การ์ดรับข้อมูลได้ ดังนั้นการรับอนาล็อกจะแสดงข้อมูลไม่ตรงกับค่าข้อมูลจริง ในวงจรอาร์เมเจอร์แรงดันมีค่ามากกว่า 10 โวลต์ แต่ไม่เกิน 100 โวลต์ ด้วยเหตุผลนี้จึงทำการออกแบบสร้างวงจรแบ่งสัดส่วนแรงดัน หลักการของวงจรแบ่งสัดส่วนแรงดันคือต่อตัวต้านทานจำนวนสองตัวคร่อมวงจรอาร์เมเจอร์ โดยที่สัดส่วนระหว่างตัวต้านทานทั้งสองตัวคือ 1:9 และต้องให้ค่าความต้านทานรวมของตัวต้านทานที่เพิ่มเข้าไปมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ วงจรแบ่งสัดส่วนแรงดันแสดงดังรูปที่ 4.10 แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 10 โอห์ม (R_s) จะเป็นสัดส่วน 1 ต่อ 10 ของแรงดันในวงจรอาร์เมเจอร์ ทดสอบวงจรแบ่งสัดส่วนแรงดันโดยวัดค่าแรงดันทั้งสองได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.10 วงจรแบ่งสัดส่วนแรงดัน

อาร์เมเจอร์
โวลเทจ



สำหรับไอโอ
การ์ด

รูปที่ 4.11 การวัดค่าแรงดันสำหรับทดสอบวงจรแบ่งสัดส่วนแรงดัน

บทที่ 5

ผลการจำลองและผลการทดลอง

บทนี้จะอธิบายถึงการออกแบบการทดลองและผลการทดลองบนชุดทดลองทั้ง 2 แบบ ซึ่งได้ออกแบบและจัดสร้างแล้ว พร้อมทั้งเขียนโปรแกรมจำลองการทำงานของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง

5.1 การทดลองหาสมการแลมดาของทรานส์ดิวเซอร์

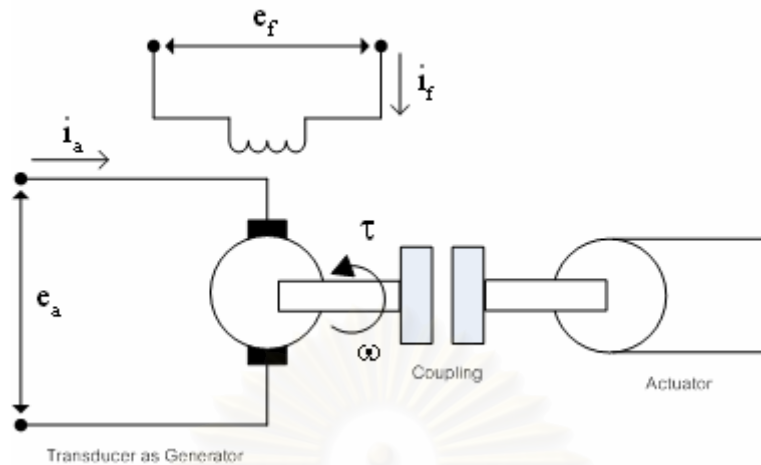
จากสมการ 3.3 ปรากฏค่าฟลักซ์อยู่ในสมการด้วย ค่าฟลักซ์ดังกล่าวนี้มีความสำคัญต่อการหาค่าคงที่ของทรานส์ดิวเซอร์และใช้ในเขียนโปรแกรมจำลองการทำงานของระบบ แต่การวัดหาค่าฟลักซ์ที่ค่ากระแสสนามต่างๆกระทำได้ยาก ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงทำการตั้งตัวแปรขึ้นมาใหม่คือ 'แลมดา' (λ) เพื่อใช้แทนค่าฟลักซ์โดยทางอ้อม จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับแลมดาดังสมการ 3.4 และสมการฟลักซ์กับกระแสสนามตามสมการ 3.2 ดังนั้นแลมดาจึงมีความสัมพันธ์กับกระแสสนามด้วย สมการแลมดาที่ขึ้นอยู่กับกระแสสนามสามารถเขียนได้ตามสมการ 5.1 การทดลองหาสมการแลมดาเริ่มต้นด้วยการตั้งสมการขึ้นมาใหม่โดยการนำสมการแรงดันเหนี่ยวนำสมการที่ 3.3 มาเขียนใหม่เป็นสมการ 5.2 การทดลองหาสมการแลมดาสามารถกระทำได้โดยการจัดอุปกรณ์การทดลองตามไดอะแกรมรูปที่ 5.1 การทดลองนี้วัดแรงดันเหนี่ยวนำของทรานส์ดิวเซอร์ที่ทำหน้าที่เป็นเจเนอเรเตอร์ที่ค่ากระแสสนามต่างๆโดยให้ความเร็วคงที่ วิธีการทดลองเริ่มต้นจากการจ่ายกระแสสนามให้กับขดลวดสนามของทรานส์ดิวเซอร์เจเนอเรเตอร์จากค่า 0.1 แอมแปร์ ถึง 0.8 แอมแปร์ โดยเพิ่มครั้งละ 0.1 แอมแปร์ และหมุนโรเตอร์ด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่ง จากนั้นวัดค่าแรงดันที่กระแสสนามต่างๆ ผลการทดลองแรงดันและกระแสสนามถูกนำมาเขียนเป็นกราฟดังรูปที่ 5.2

$$\lambda_f = K_\lambda i_f \quad (5.1)$$

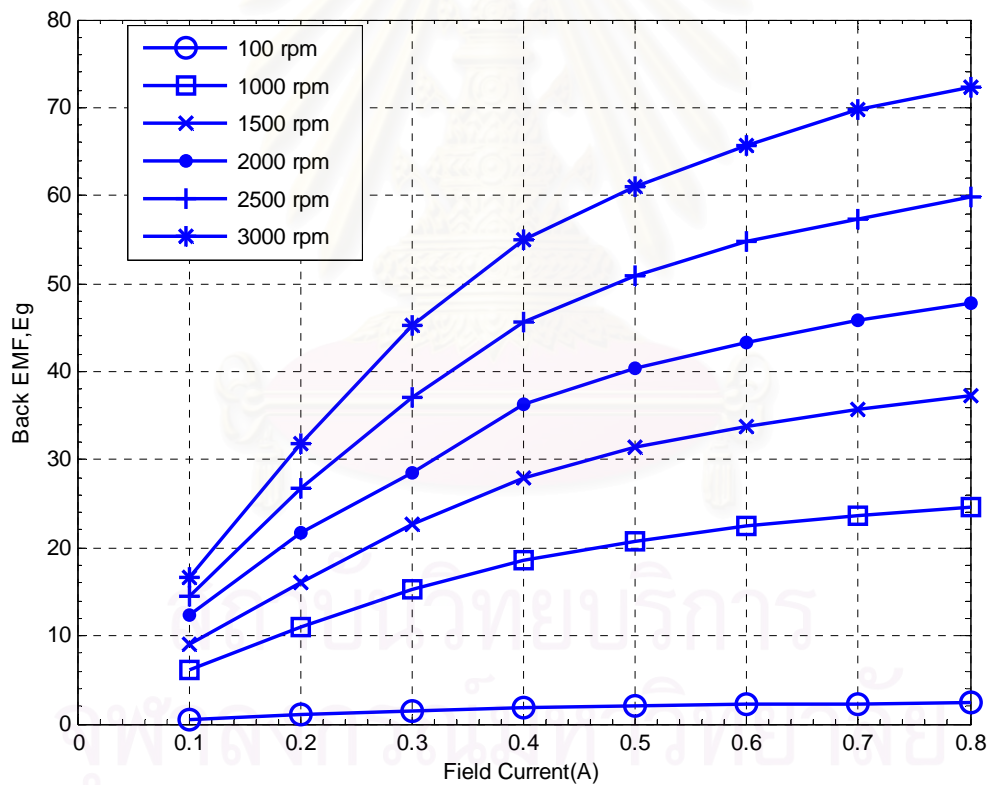
เมื่อ K_λ คือค่าคงที่ของแลมดาโดยเกิดจากการคูณค่าคงที่ K_g กับค่าคงที่ K_f

$$e_g = K i_f \omega_m \quad (5.2)$$

เมื่อ K คือค่าคงที่ของแรงดันเหนี่ยวนำ



รูปที่ 5.1 ไดอะแกรมของการทดลองหาค่าแลมดา



รูปที่ 5.2 ผลการทดลองหาค่าแลมดา

เส้นกราฟแต่ละเส้นในรูปที่ 5.2 แสดงถึงค่าความเร็วรอบคงที่ของมอเตอร์ต้นกำลังสำหรับการทดลอง ค่าความเร็วรอบนี้เริ่มต้นด้วยค่าความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที จากนั้นเพิ่มค่าจนถึงค่าความเร็วรอบ

3000 รอบต่อนาที เส้นกราฟในรูปที่ 5.2 นี้จะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเหนี่ยวนำที่ค่าความเร็วรอบค่าที่ค่าหนึ่ง โดยที่เส้นแต่ละเส้นมีความเร็วรอบของการหมุนที่แตกต่างกัน จากเส้นกราฟเหล่านี้สามารถนำหาสมการแลมดาของทรานสดิวเซอร์สำหรับใช้ในการทดลองและการจำลองการทำงาน การเปลี่ยนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสนามกับแรงดันเหนี่ยวนำเป็นความสัมพันธ์ของกระแสสนามกับแลมดาสามารถทำได้ตามสมการ 5.3 โดยที่ ω_0 คือความเร็วรอบคงที่ของเส้นกราฟแต่ละเส้น จากนั้นนำความเร็วรอบของเส้นกราฟหารค่าแรงดันเหนี่ยวนำของเส้นกราฟนั้นตามสมการ 5.4 ซึ่งจะได้กราฟดังรูปที่ 5.3

$$e_g = K i_f \omega_0 \quad (5.3)$$

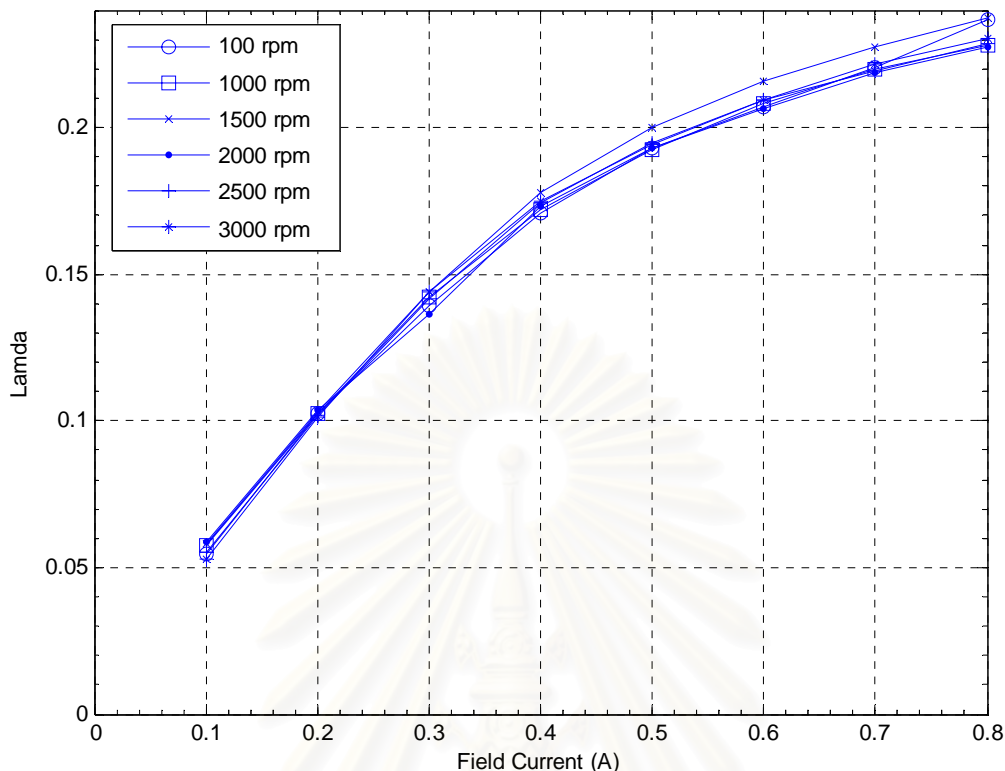
$$\frac{e_g}{\omega_0} = K i_f = \lambda \quad (5.4)$$

จากความรู้เกี่ยวกับแม่เหล็กในขดลวดทำให้รู้ว่าเมื่อไม่มีกระแสสนามไหลในขดลวดสนามขดลวดสนามนั้นยังคงมีแลมดาตกค้าง ($\lambda_{residual}$) อยู่เนื่องจากฟลักซ์ที่ตกค้างในแกนเหล็ก ดังนั้นสมการผลรวมของแลมดาจึงเกิดจากผลรวมระหว่างแลมดาตกค้างกับแลมดาที่เกิดขึ้นขณะจ่ายกระแสสนามซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ 5.2

$$\lambda = \lambda_{residual} + \lambda_f(i_f) \quad (5.5)$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่างแลมดากับกระแสสนามสามารถหาจากการนำกราฟในรูปที่ 5.3 ไปทำการฟิตเส้นโค้ง (Curve Fitting) ด้วยโปรแกรมแมทแลป (Matlab) รูปแบบสมการที่ใช้สำหรับการฟิตเส้นโค้งนี้เป็นรูปแบบสมการกำลังสอง (Second order equation) การใช้สมการกำลังสองสำหรับฟิตเส้นโค้งเพราะเส้นโค้งเป็นลักษณะพาราโบลา สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแลมดากับกระแสสนามแสดงดังสมการที่ 5.3 โดยช่วงของค่ากระแสสนามที่ใช้ได้สำหรับสมการนี้อยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 0 แต่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.8 สมการแลมดา 5.3 นี้ใช้ได้สำหรับทรานสดิวเซอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้เท่านั้น

$$\lambda = -0.3525i_f^2 + 0.558i_f + 0.004442 \quad ; \quad 0 \leq i_f \leq 0.8 \quad (5.6)$$

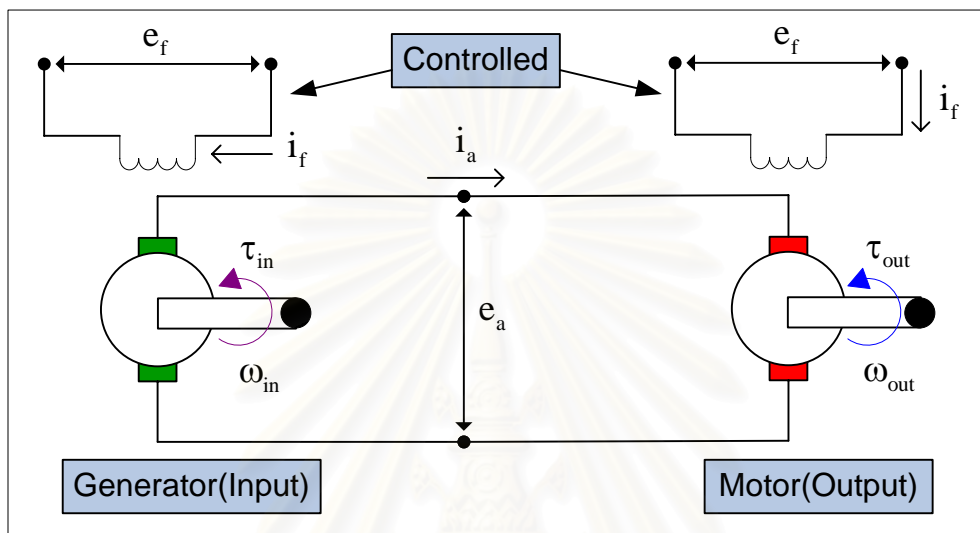


รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแลมดากับกระแสสนาม

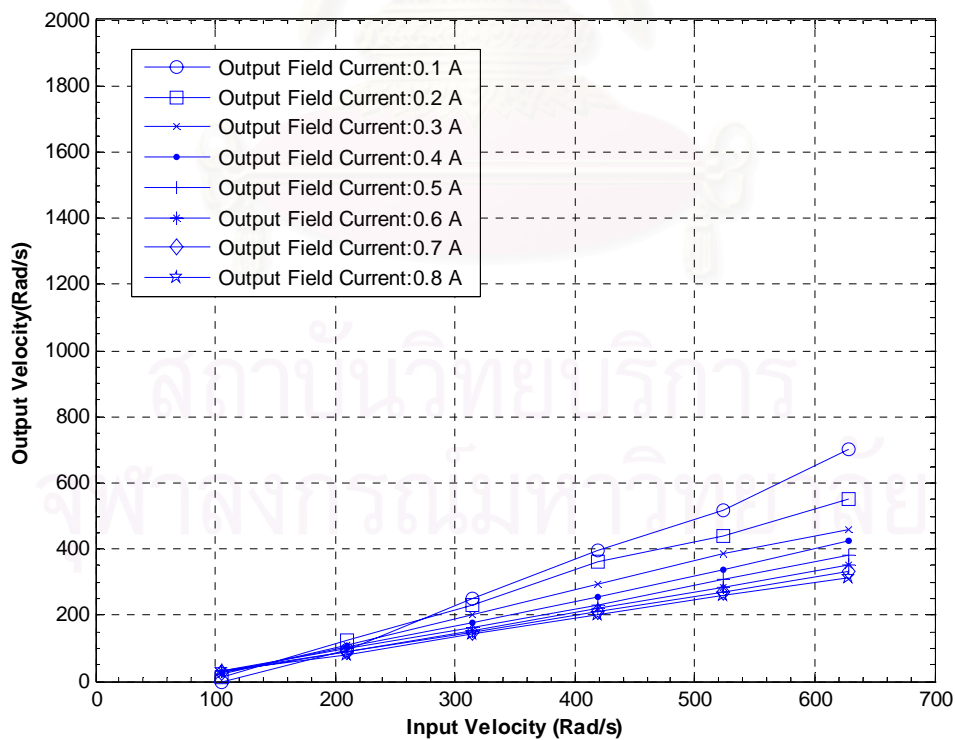
5.2 ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองของชุดทดสอบแบบอิสระ

จากการออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าแบบอิสระสำหรับการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของซีวีทีชนิดไฟฟ้าในกรณีให้ทรานส์ดิวเซอร์แต่ละตัวทำหน้าที่เฉพาะตัวไม่เกี่ยวเนื่องกัน(Non-Coupled) ซึ่งจะเหมือนกับระบบทดกำลังทั่วไป ไดอะแกรมของชุดการทดสอบนี้แสดงดังรูปที่ 5.4 วิธีการทดลองแบ่งออกเป็น 2 แบบ การทดลองแบบที่ 1 จ่ายกระแสสนามคงที่ 0.4 แอมแปร์และให้ความเร็วอินพุตกับทรานส์ดิวเซอร์ที่ทำหน้าที่เป็นเจเนอเรเตอร์หรืออินพุต พร้อมทั้งเปลี่ยนแปลงกระแสสนามของมอเตอร์ทรานส์ดิวเซอร์หรือเอาท์พุตจาก 0.1 แอมแปร์ ถึง 0.8 แอมแปร์ บันทึกค่าความเร็วเอาท์พุตของมอเตอร์ทรานส์ดิวเซอร์ ค่าความเร็วของมอเตอร์นี้เป็นค่าความเร็วในช่วงสภาวะอยู่ตัว (Steady State) ผลการทดลองของการทดลองแบบที่ 1 แสดงดังรูปที่ 5.5 การทดลองแบบที่ 2 มีวิธีการคล้ายกับการทดลองแบบที่ 1 แต่แตกต่างกันที่ค่ากระแสสนาม โดยค่ากระแสสนามอินพุตของเจเนอเรเตอร์จะเพิ่มเป็น 0.8 แอมแปร์ ส่วนค่ากระแสสนามของมอเตอร์ยังคงเปลี่ยนแปลงเหมือนกับการทดลองแบบที่ 1 ผลการทดลองแบบที่ 2 แสดงดังรูปที่ 5.7 พร้อมทั้งมีผลการจำลองการทำงานภายใต้เงื่อนไขแบบเดียวกันซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.8 จาก

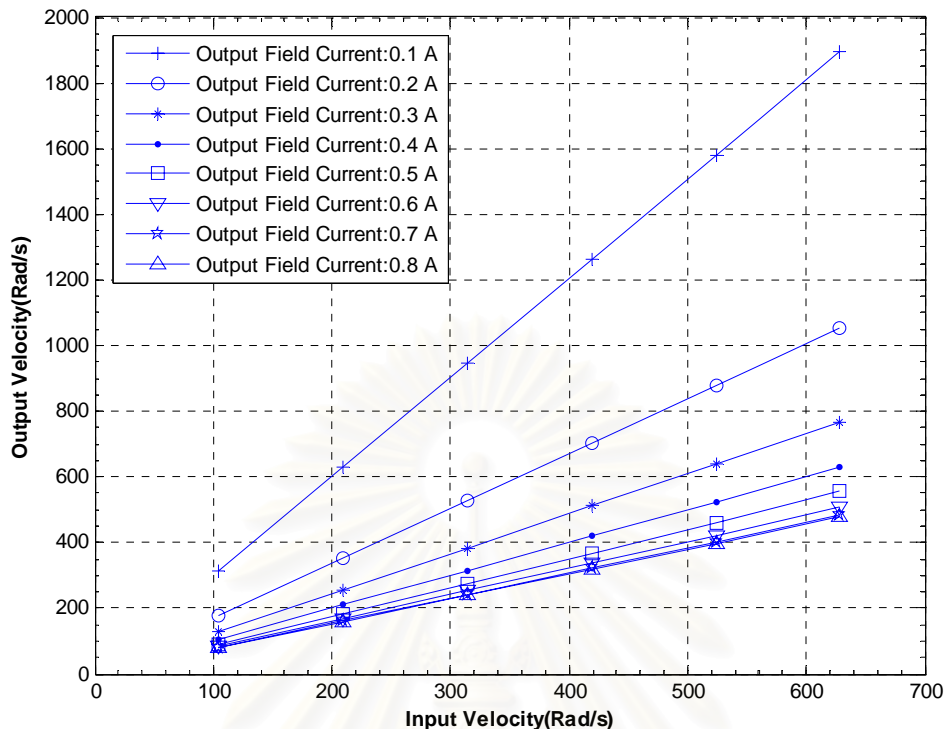
ค่ากระแสสนามสามารถนำมาหาอัตราส่วนแลมดาโดยการแทนค่ากระแสสนามลงในสมการความสัมพันธ์ระหว่างแลมดากับกระแสสนาม จุดประสงค์ของการมีการทดลอง 2 แบบ คือเพื่อต้องการศึกษาว่าอัตราส่วนแลมดาเดียวกันแต่กระแสสนามต่างกันจะให้อัตราทดเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งอัตราทอนี้คืออัตราส่วนความเร็วของมอเตอร์เทียบกับความเร็วเจเนอเรเตอร์



รูปที่ 5.4 ไดอะแกรมของชุดทดสอบแบบอิสระ

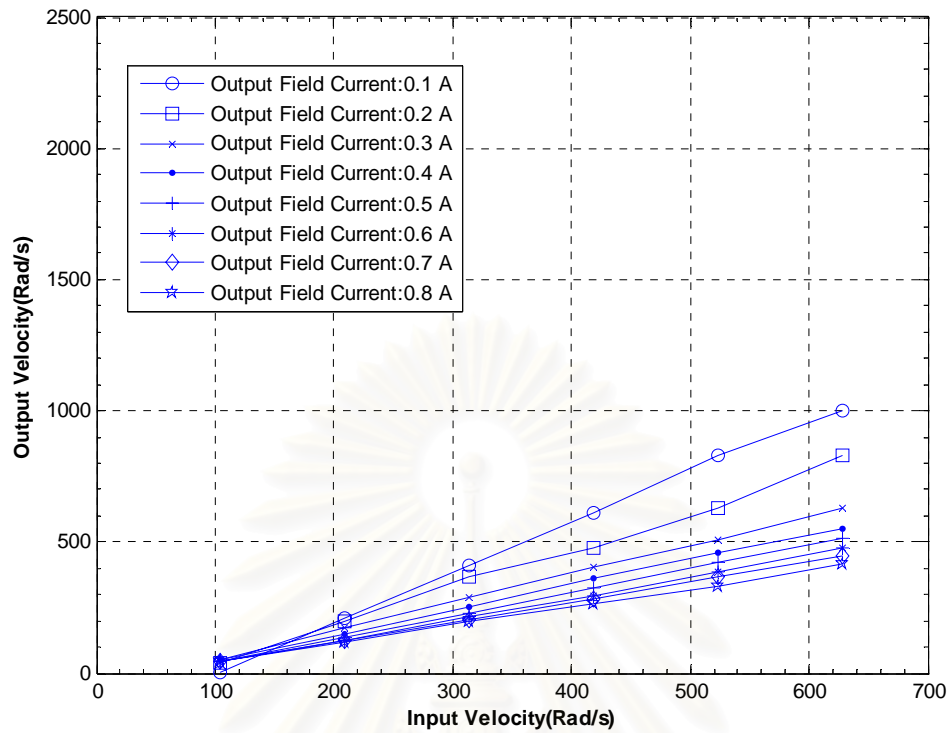


รูปที่ 5.5 ผลการทดลองของชุดทดสอบแบบอิสระแบบที่ 1 (กระแสสนามอินพุตคงที่ 0.4 A)

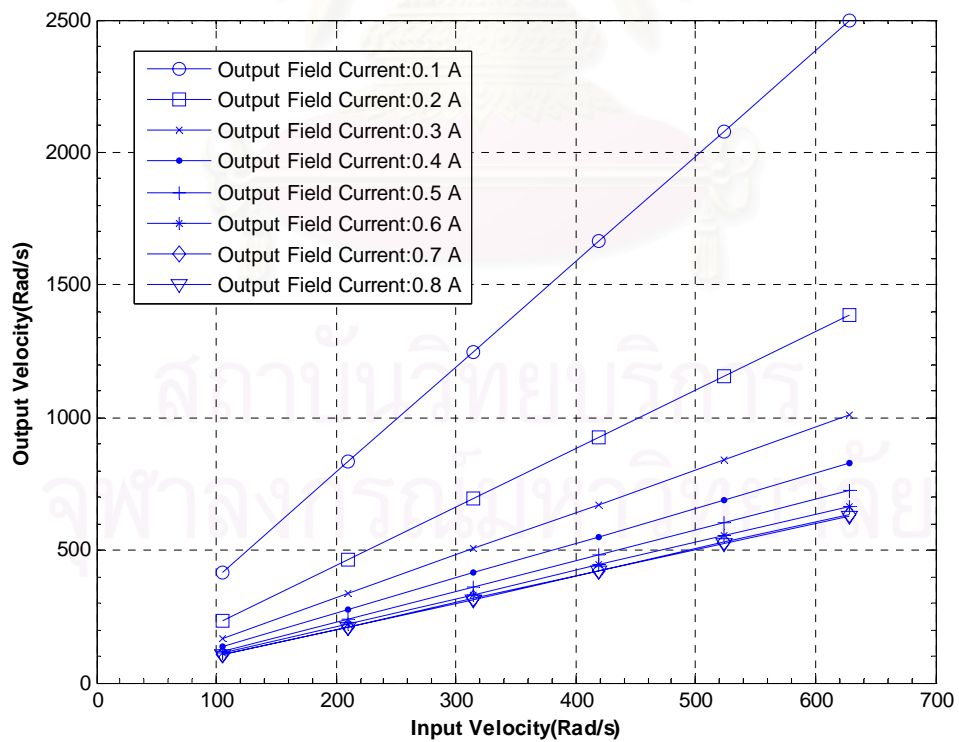


รูปที่ 5.6 ผลการจำลองการทำงานของชุดทดสอบแบบอิสระแบบที่ 1 (กระแสสนามอินพุตคงที่ 0.4 A)

ค่ากระแสสนามอินพุตและเอาต์พุตของเส้นกราฟแต่ละเส้นแสดงถึงอัตราส่วนแลมดา อัตราส่วนแลมดาสามารถให้ได้จากแทนค่ากระแสสนามลงในสมการ 5.6 ลักษณะของกราฟของผลการทดลองของกรณีอัตราแลมดาสูงๆ เช่น อัตราส่วนแลมดาของกระแสสนามอินพุต 0.4 แอมแปร์กับกระแสสนามเอาต์พุต 0.4 แอมแปร์ จนถึงอัตราส่วนแลมดาของกระแสสนามอินพุต 0.4 แอมแปร์กับกระแสสนามเอาต์พุต 0.8 แอมแปร์ มีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรงเพราะกระแสสนามที่จ่ายมีค่าสูงเพียงพอเมื่อเทียบกับการสูญเสียในตัวต้านทานของขดลวด ส่งผลทำให้ระบบนั้นแสดงพฤติกรรมออกมาได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับเส้นกราฟของอัตราส่วนแลมดาต่ำกว่า เมื่อลากเส้นกราฟทุกเส้นของการทดลองนี้ตัดกับแกนเอกซ์จะสังเกตเห็นว่าเส้นกราฟทั้งหมดไม่ตัดที่จุดศูนย์เนื่องจากระบบมีการสูญเสียทั้งในส่วนทางไฟฟ้าและทางกล อีกทั้งเมื่อเทียบกับผลการจำลองการทำงานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ปรับแปรอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าจะเห็นได้ชัดว่าเส้นกราฟทุกเส้นเมื่อลากเส้นไปตัดแกนเอกซ์ทุกเส้นจะตัดที่จุดศูนย์เพราะการจำลองการทำงานนี้ไม่ได้คิดการสูญเสียในรูปแบบต่างๆภายในระบบ เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองการทำงานจะสรุปได้ว่ามีแนวโน้มระหว่างอัตราส่วนแลมดากับอัตราทดในลักษณะแบบเดียวกัน

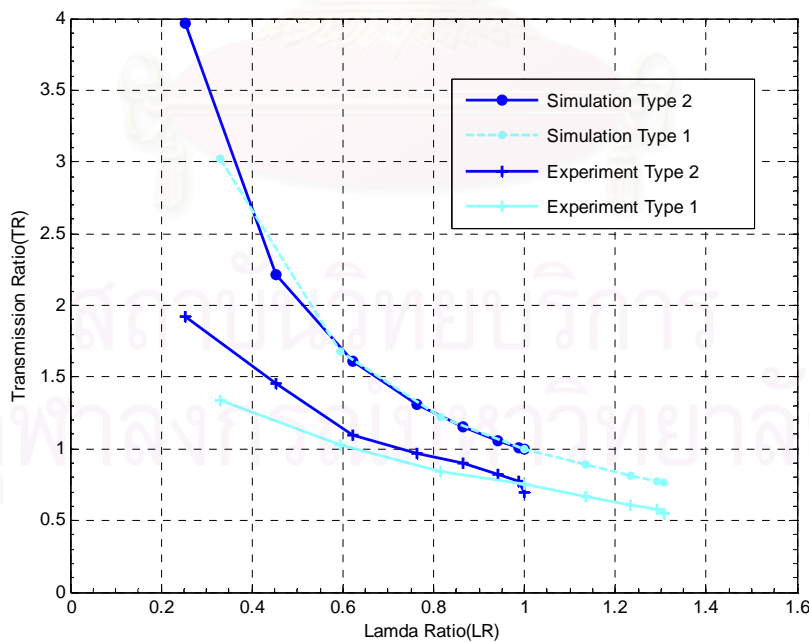


รูปที่ 5.7 ผลการทดลองของชุดทดสอบแบบอิสระแบบที่ 2 (กระแสสนามอินพุตคงที่ 0.8 A)



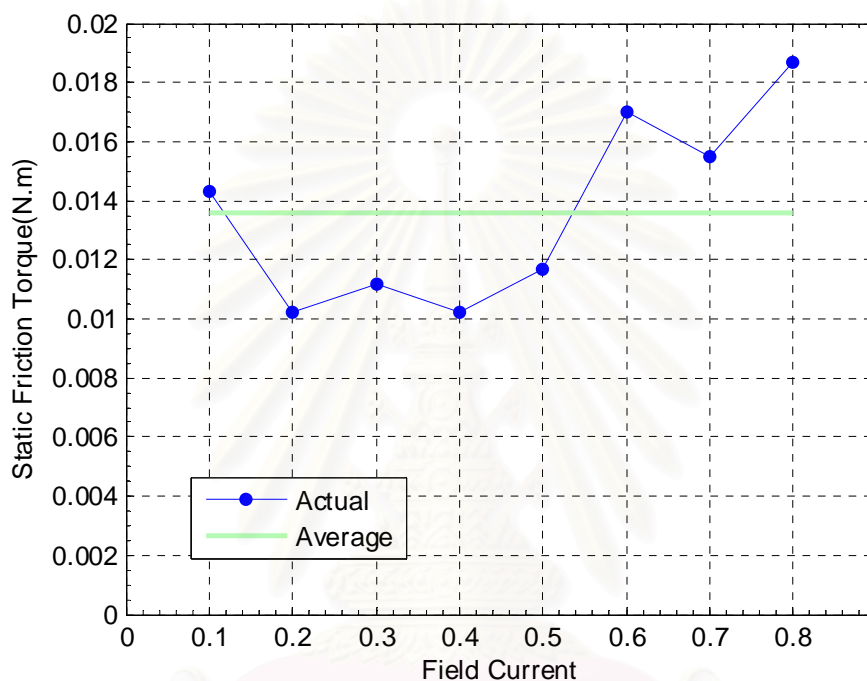
รูปที่ 5.8 ผลการจำลองการทำงานของชุดทดสอบแบบอิสระแบบที่ 2 (กระแสสนามอินพุตคงที่ 0.8 A)

ผลการทดลองของชุดทดสอบแบบอิสระแบบที่ 2 มีเส้นกราฟลักษณะคล้ายคลึงกับผลการทดลองแบบที่ 1 แต่ความแตกต่างระหว่างเส้นกราฟจะมีให้เห็นได้อย่างชัดเจนมากกว่าเพราะกระแสสนามอินพุทมีค่ามากกว่า การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองการทำงานมีแนวโน้มของกราฟในลักษณะเดียวกัน ลักษณะดังกล่าวคือเมื่อค่าอัตราส่วนแลมดาเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราทดลองเส้นกราฟแต่ละเส้นผลการทดลองไม่ตัดแกนเอกซ์ที่จุดศูนย์เนื่องจากชุดการทดสอบมีแรงเสียดทานและการสูญเสียที่ชัดเจน การสูญเสียที่ชัดเจนนี้ทำให้แรงดันตกคร่อมของขดลวดอาร์เมเจอร์ทั้งสองไม่เท่ากัน ส่วนการจำลองการทำงานของชุดทดสอบไม่ได้คิดแรงเสียดทานดังนั้นเส้นกราฟทุกเส้นจึงตัดแกนเอกซ์จุดศูนย์เพราะแรงดันตกคร่อมขดลวดอาร์เมเจอร์ทั้งสองจะเท่ากัน ส่วนการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองแบบที่ 2 แสดงดังรูป 5.7 กับผลการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 5.8 ซึ่งมีแนวโน้มลักษณะแบบเดียวกันกับการทดลองแบบที่ 1 จากนั้นนำค่าอัตราส่วนแลมดาที่อัตราทดลองทั้งสองการทดลองและผลการจำลองนำมาเขียนเป็นเส้นกราฟเปรียบเทียบกันระหว่างอัตราส่วนแลมดาที่อัตราทดลองแสดงดังรูป 5.9 จากกราฟอัตราทดลองกับอัตราส่วนแลมดาของการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนแลมดาเดียวกันของการทดลองทั้งสองแบบแต่กระแสสนามต่างกันจะให้ผลอัตราทดลองใกล้เคียงหรือเท่ากันในช่วง ส่วนเส้นกราฟของผลการจำลองทั้งสองแบบนั้นแสดงเป็นเส้นที่ทับกันซึ่งหมายความว่าที่อัตราส่วนแลมดาเดียวกันจะให้ค่าอัตราทดลองเดียวกันแม้กระแสสนามจะต่างกันก็ตาม



รูปที่ 5.9 อัตราทดลองกับอัตราส่วนแลมดา (โดยที่ $TR = \frac{\omega_{out}}{\omega_{in}}$, $LR = \frac{\lambda_{Out}}{\lambda_{in}} = \frac{f(i_{f_Out})}{f(i_{f_in})}$)

เส้นกราฟระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองการทำงานมีลักษณะเดียวกันแต่มีระยะห่างกัน เนื่องจากชุดการทดสอบมีแรงเสียดทานเกิดขึ้น แรงเสียดทานนี้สามารถวัดค่าประมาณได้ด้วยการทำการทดลองแบบง่าย วิธีการทดลองคือออกแรงดึงทรานส์ดิวเซอร์ด้วยตาชั่งสปริงแล้วอ่านค่าจากตาชั่งสปริงขณะทรานส์ดิวเซอร์เริ่มหมุนเทียบกับกระแสสนามต่างๆ ผลการทดลองแรงเสียดทานเทียบกับกระแสสนามแสดงดังรูป 5.10 โดยสามารถหาค่าเฉลี่ยของแรงเสียดทานอยู่ที่ 0.0135 นิวตัน·เมตร

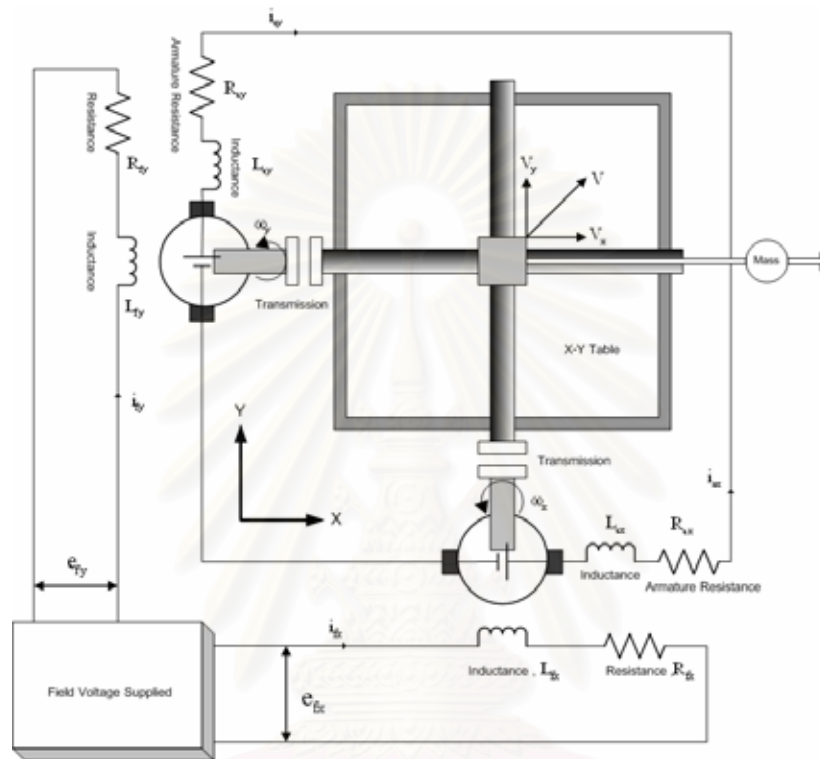


รูปที่ 5.10 แรงบิดเสียดทานเทียบกับกระแสสนาม

5.3 ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองของชุดการทดสอบแบบไต้ระนาบเอกซ์-วาย

จุดประสงค์ของการทดลองบนชุดการทดสอบแบบไต้ระนาบเอกซ์-วายเป็นเพื่อศึกษาอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าในลักษณะเกี่ยวเนื่องกัน (Couple) ในการเคลื่อนที่ของชุดมือจับบนระนาบเอกซ์-วาย ไดอะแกรมของการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.11 ลักษณะเกี่ยวเนื่องกันหมายความว่าทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้ในการทดลองจะไม่ได้มีหน้าที่เป็นมอเตอร์หรือเจเนอเรเตอร์อย่างใดอย่างหนึ่งเฉพาะเจาะจง ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้จะเป็นลักษณะของชุดทดกำลังแบบต่อเนื่องที่สามารถประยุกต์ใช้งานกับหุ่นยนต์โคบอทและระบบทางกลอื่นๆได้ วิธีการทดลองเริ่มต้นด้วยการแขวนตุ้มน้ำหนักกับชุดมือจับในแนวแกนเอกซ์ (อินพุท) เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวแกนเอกซ์และจ่ายกระแสสนามให้กับทรานส์ดิวเซอร์ทั้งสองแกน โดยค่ากระแสสนามของทรานส์ดิวเซอร์แกนวายเปลี่ยนแปลงตามค่าที่กำหนด ส่วนค่ากระแสสนามของทรานส์ดิวเซอร์แกนเอกซ์มีค่าคงที่ ค่ากระแสสนามของทั้ง

สองแกนส่งผลทำให้อัตราส่วนแลมดาคงที่ ผลที่ได้รับคือระยะทางในแนวแกนวาย(เอชท์พุก) ระยะทางการเคลื่อนที่ในแนวแกนเอกซ์และวายถูกคำนวณเป็นความเร็วอินพุทและความเร็วเอชท์พุกตามลำดับ แสดงรูปการทดลองดังรูปที่ 5.12 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.14, 5.16, 5.18 และ 5.20 พร้อมทั้งเขียนโปรแกรมจำลองการทำงานภายใต้เงื่อนไขแบบเดียวกับการทดลอง



รูปที่ 5.11 ไดอะแกรมของการทดลองบนโต๊ะระนาบเอกซ์-วาย



รูปที่ 5.12 การทดลองบนชุดทดสอบแบบโต๊ะระนาบเอกซ์-วาย

การเขียนโปรแกรมจำลองการทำงานของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรอาร์เมเจอร์ของไดอะแกรมชุดการทดลองโต๊ะระนาบเอ็กซ์-วาย ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรอาร์เมเจอร์สามารถหาได้โดยการพิจารณาจากแรงดันวงจรรอาร์เมเจอร์ (e_a), กระแสอาร์เมเจอร์ (i_a), ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์ (L_a) และค่าความต้านทานของวงจรรอาร์เมเจอร์ (R_a) โดยใช้กฎแรงดันดังนี้

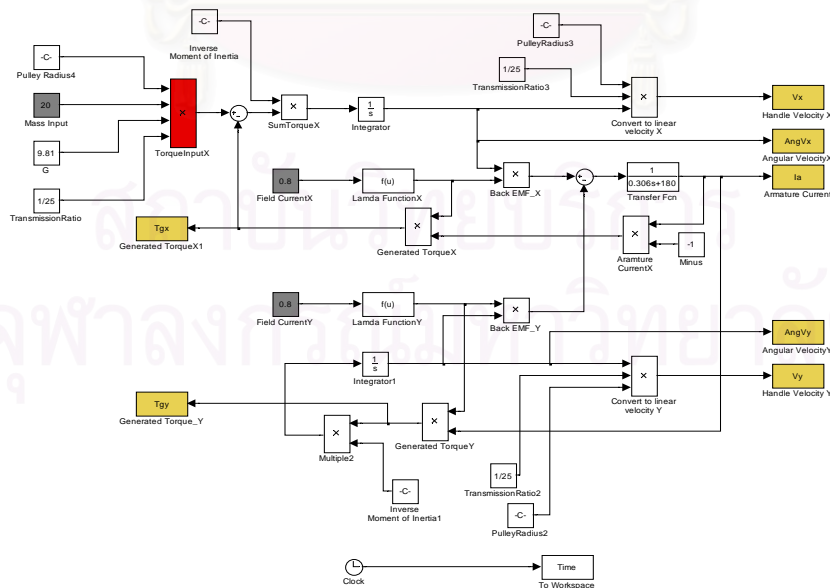
$$2L_a \frac{di_a}{dt} = e_a - 2R_a i_a \tag{5.7}$$

$$2L_a i_a(s) s = e_a(s) - 2R_a i_a \tag{5.8}$$

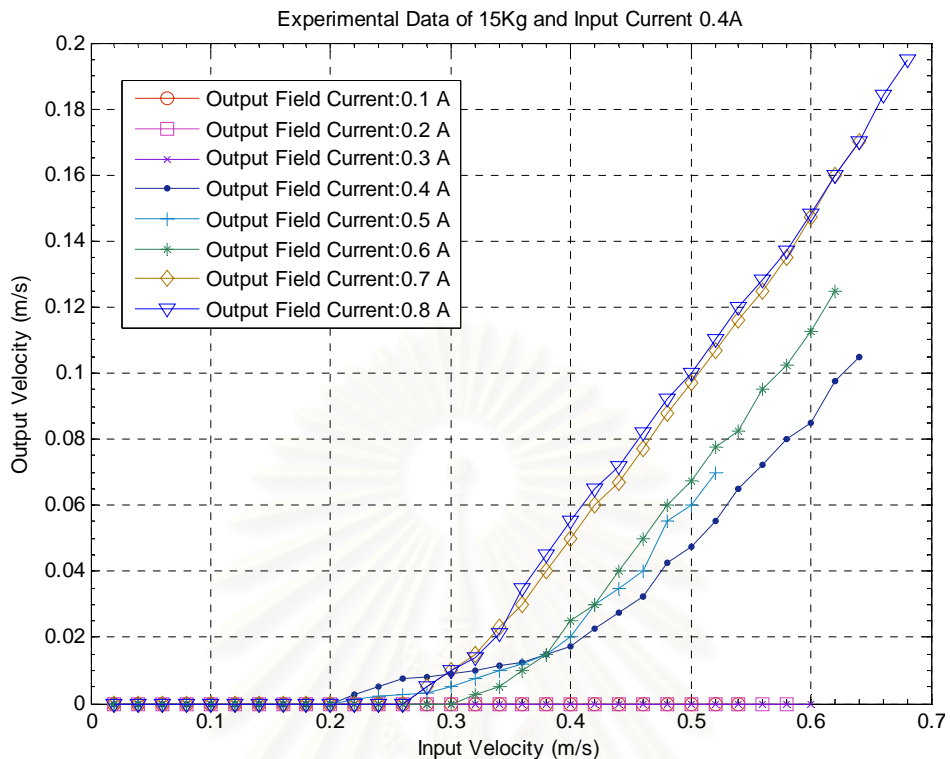
ค่าความต้านทานและค่าเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์ของทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้ในการทดลองคือ 90 โอห์ม และ 0.153 เฮนรี ตามลำดับ ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรอาร์เมเจอร์แสดงดังสมการ 5.3

$$i_a(s) = \frac{e_a(s)}{0.306s + 180} \tag{5.9}$$

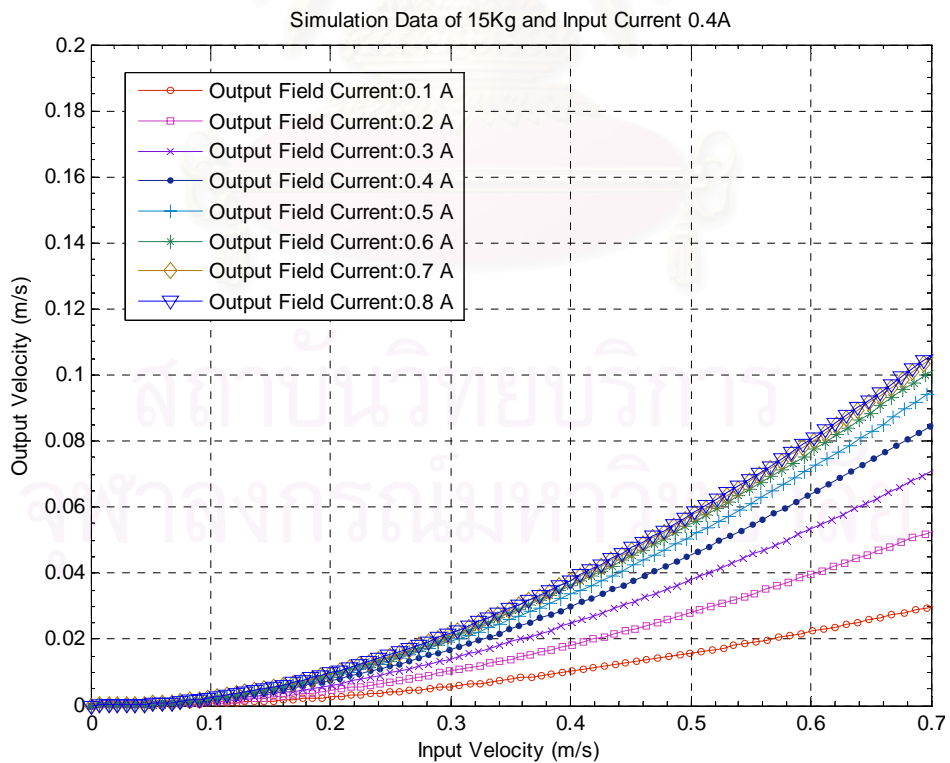
การเขียนโปรแกรมจำลองการทดลองทำงานของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าได้นำไดอะแกรมของการทดลองบนโต๊ะระนาบเอ็กซ์-วายมาวิเคราะห์เพื่อเขียนบล็อกไดอะแกรมในโปรแกรมแมทแล็บ แสดงดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 บล็อกการจำลองการทำงานของระบบซีวีทีชนิดไฟฟ้าในโปรแกรมแมทแล็บ

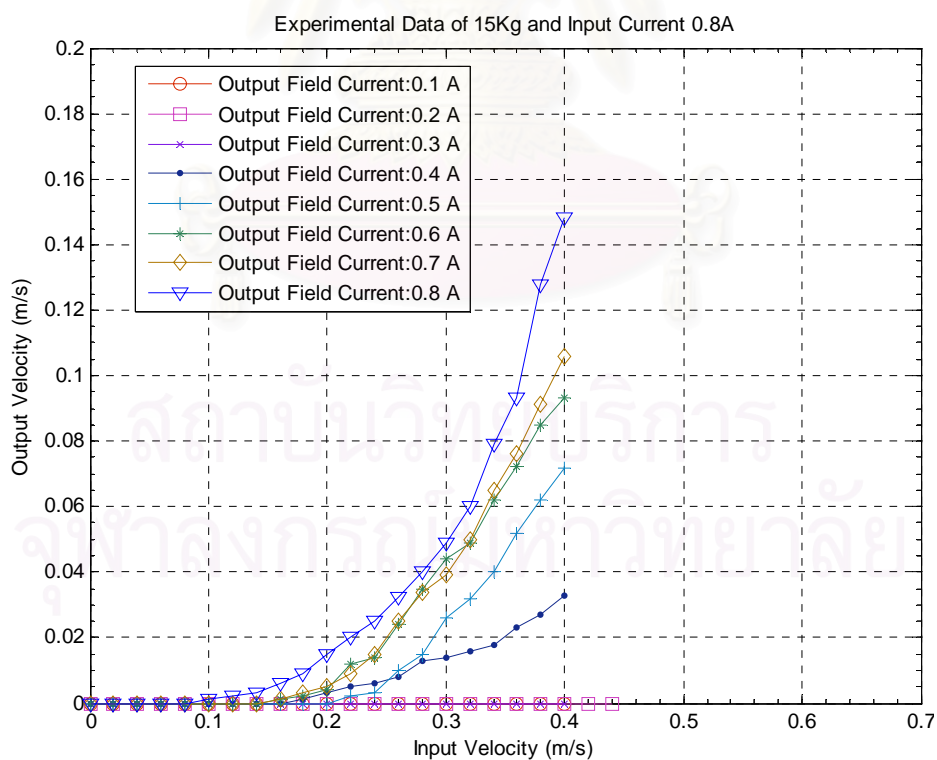


รูปที่ 5.14 ผลการทดลองในกรณีตุ้มน้ำหนัก 15 ก.ก. และกระแสสนามอินพุต 0.4 แอมแปร์

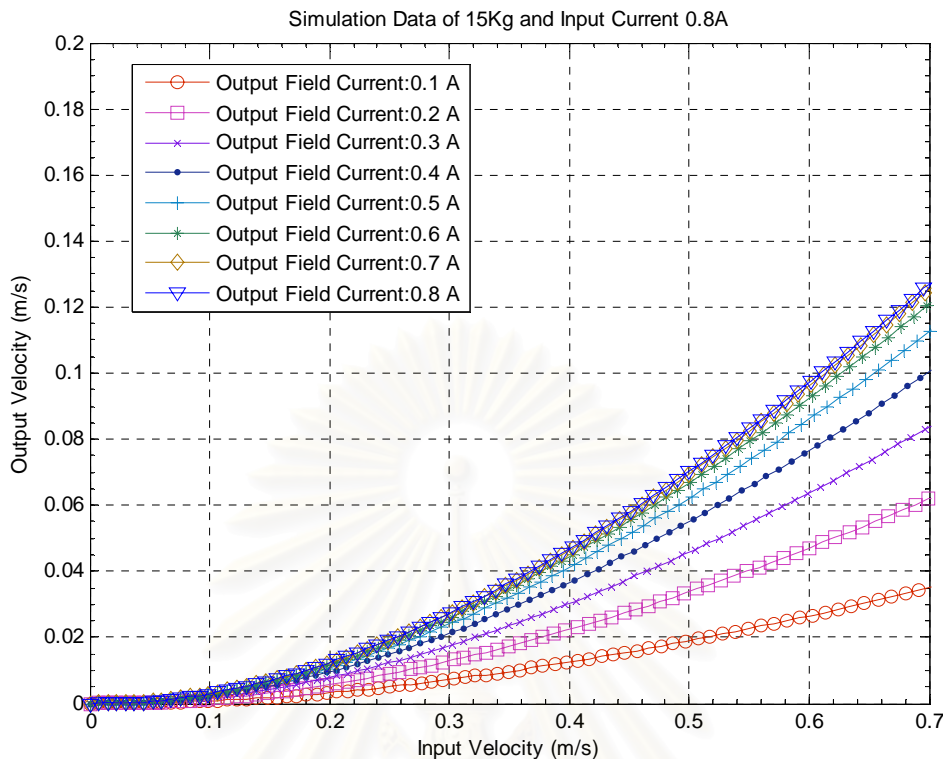


รูปที่ 5.15 ผลการจำลองการทำงานกรณีตุ้มน้ำหนัก 15 ก.ก. และกระแสสนามอินพุต 0.4 แอมแปร์

การทดลองของชุดการทดสอบแบบโต๊ะระนาบเอกซ์-วายใช้ตุ้มน้ำหนักเริ่มต้นที่ค่า 15 กิโลกรัม เนื่องจากที่ค่าน้ำหนักต่ำกว่านี้นั้นให้ค่าความเร็วเอาท์พุทน้อยมากจนไม่สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ ผลการทดลองในกรณีใช้ตุ้มน้ำหนัก 15 กิโลกรัมเป็นแรงดึงภายนอกและกระแสสนามอินพุทคงที่ 0.4 แอมแปร์แสดงดังรูปที่ 5.14 โดยที่เส้นกราฟแต่ละเส้นนั้นมีค่ากระแสสนามเอาท์พุทแตกต่างกันไปดังแสดงในคำอธิบายเส้นกราฟซึ่งทำค่าอัตราส่วนแลมดาคาที่แตกต่างกัน ความเร็วอินพุทคือความเร็วในแนวแกนเอกซ์ของชุดทดสอบ ส่วนความเร็วเอาท์พุทคือความเร็วในแนวแกนวายของชุดทดสอบ เส้นกราฟที่มีค่าอัตราส่วนแลมดาคาต่ำๆ เช่น เส้นกราฟของกระแสสนามเอาท์พุท 0.1, 0.2 และ 0.3 แอมแปร์ นั้นมีค่าความเร็วเอาท์พุทน้อยมากจนไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างได้ เหตุผลเนื่องจากความเสียดทานทางกลและการสูญเสียในความต้านทานของขดลวดของทรานส์ดิวเซอร์ ส่วนเส้นกราฟนอกเหนือจากนั้นมีความชันแตกต่างกันเล็กน้อย โดยความชันหรืออัตราหาคจะแปรผันตามอัตราส่วนแลมดาคา เส้นกราฟทุกเส้นของผลการทดลองรูปที่ 5.14 ไม่ตัดแกนเอกซ์ที่จุดศูนย์ แต่กราฟของผลจำลองรูปที่ 5.15 ตัดแกนเอกซ์ที่จุดศูนย์เพราะการทดลองมีการสูญเสียต่างๆ ส่วนการจำลองการทำงานไม่คิดการสูญเสียใดๆ เส้นกราฟของผลการจำลองมีความชันสูงขึ้นไปตามอัตราส่วนแลมดาคา

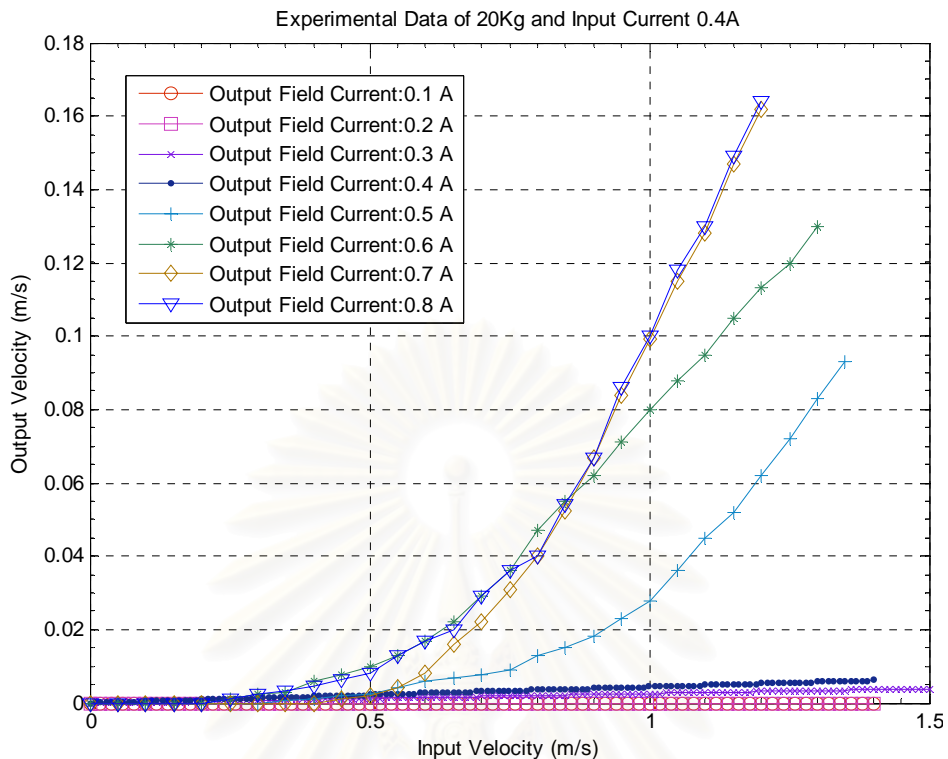


รูปที่ 5.16 ผลการทดลองในกรณีใช้ตุ้มน้ำหนัก 15 ก.ก. และกระแสสนามอินพุท 0.8 แอมแปร์

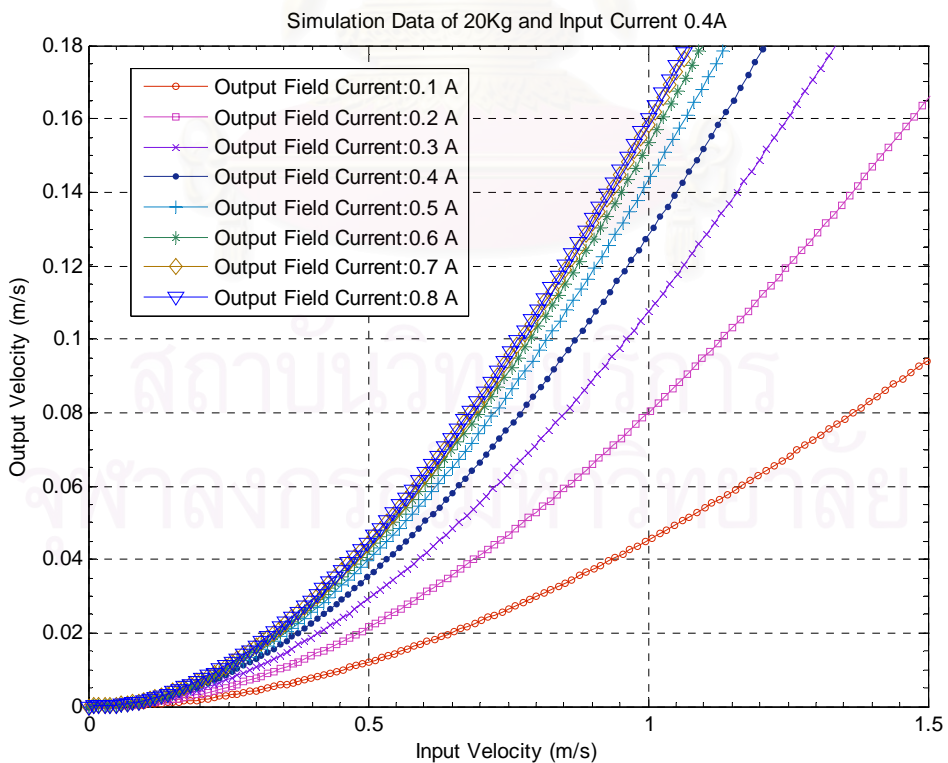


รูปที่ 5.17 ผลการจำลองการทำงานกรณีตุ้มน้ำหนัก 15 ก.ก. กระแสสนามอินพุต 0.8 แอมแปร์

ผลการทดลองของชุดทดสอบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าแบบโตะระนาบ เอกซ์-วายในกรณีตุ้มน้ำหนัก 15 ก.ก. และกระแสสนามอินพุต 0.8 แอมแปร์ แสดงดังรูป 5.16 เส้นกราฟแต่ละเส้นมีค่าอัตราส่วนแลมดาแตกต่างกันโดยแปรผันตั้งแต่ 0.33 ถึง 1 ความแตกต่างของเส้นกราฟผลการทดลองนั้นมีความชันที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนเพราะค่ากระแสสนามอินพุตเพิ่มมากขึ้นกว่าการทดลองที่ผ่านมา เส้นกราฟทุกเส้นยังคงไม่ตัดแกนเอกซ์ที่จุดศูนย์เนื่องจากการสูญเสียทางกลและการสูญเสียทางไฟฟ้า ผลการทดลองที่แล้วในรูปที่ 5.14 แสดงเส้นกราฟของการทดลองที่กระแสสนามอินพุต 0.8 แอมแปร์ ซึ่งตัดแกนเอกซ์ที่จุดใกล้ศูนย์มากกว่าเส้นกราฟของการทดลองที่กระแสสนามอินพุต 0.4 แอมแปร์ สรุปได้ว่ากระแสสนามอินพุตที่เพิ่มขึ้นทำให้ระบบเอาชนะแรงเสียดทานและการสูญเสียต่างๆได้มากขึ้น การเปรียบเทียบผลการทดลองของกรณีตุ้มน้ำหนัก 15 Kg และกระแสสนาม 0.8 แอมแปร์แสดงดังรูปที่ 5.16 กับผลการจำลองการทำงานดังรูปที่ 5.17 ในกรณีตุ้มน้ำหนัก 15 ก.ก. และกระแสสนามอินพุต 0.8 แอมแปร์ มีอัตราทดแปรผันตามอัตราส่วนแลมดาเหมือนกันซึ่งมีลักษณะเดียวกับการทดลองของกระแสสนาม 0.4 แอมแปร์ เส้นกราฟของผลการจำลองการทำงานในกรณีอัตราส่วนแลมดาสูงๆนั้นให้ค่าอัตราทดแตกต่างกันน้อยมากเพราะค่าแลมดาที่กระแสเข้าใกล้ 0.8 แอมแปร์นั้นใกล้เคียงกัน

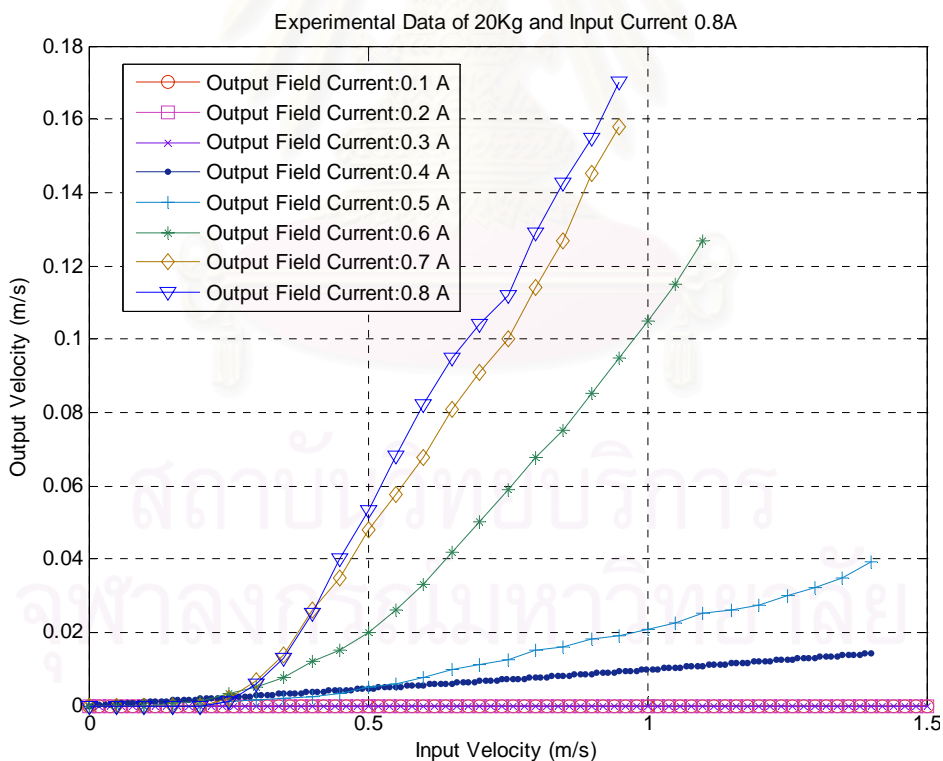


รูปที่ 5.18 ผลการทดลองในกรณีตุ้มน้ำหนัก 20 ก.ก. และกระแสสนามอินพุต 0.4 แอมแปร์

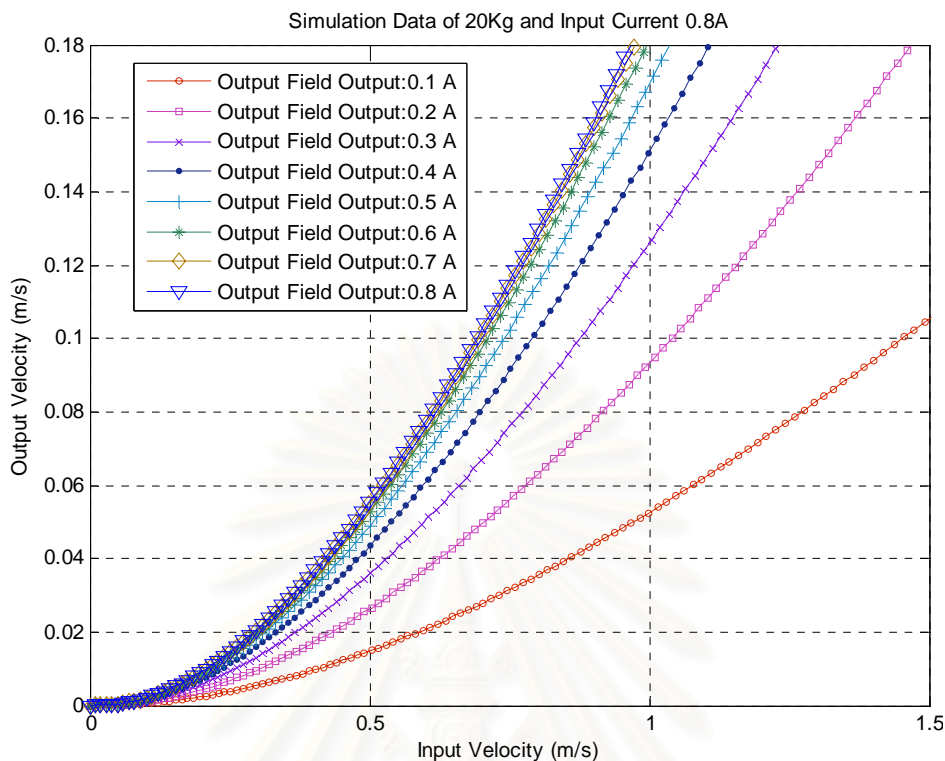


รูปที่ 5.19 ผลการจำลองการทำงานกรณีตุ้มน้ำหนัก 20 ก.ก. กระแสสนามอินพุต 0.4 แอมแปร์

จากการทดลองที่ผ่านมาใช้ตุ้มน้ำหนัก 15 ก.ก. เป็นแรงดึงอินพุทสำหรับหมุนโมดูลของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า ได้ผลการทดลองที่ยังเห็นความแตกต่างยังไม่ชัดเจน ดังนั้นจึงเพิ่มน้ำหนักของตุ้มเป็น 20 ก.ก. ผลการทดลองของกรณีตุ้มน้ำหนัก 20 ก.ก. และกระแสสนามอินพุทเท่ากับ 0.4 แอมแปร์ แสดงดังรูปที่ 5.18 เส้นกราฟแต่ละเส้นของผลการทดลองมีค่าอัตราส่วนแลมดาที่แตกต่างกัน โดยที่ความชันของเส้นกราฟแต่ละเส้นเริ่มแตกต่างกันโดยเฉพาะในกรณีของเส้นของอัตราส่วนแลมดาต่างๆ เช่น กราฟของกระแสสนามเอาท์พุท 0.1, 0.2 และ 0.3 เป็นต้น ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราทดกับอัตราส่วนแลมดาผลการทดลองเหมือนกับผลการจำลองการทำงานในดังรูปที่ 5.19 โดยความสัมพันธ์นี้คืออัตราทดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนแลมดาเพิ่ม กราฟของผลการทดลองระหว่างอัตราส่วนแลมดาของกระแสสนามเอาท์พุท 0.7 แอมแปร์ และอัตราส่วนแลมดาของกระแสสนามเอาท์พุท 0.8 แอมแปร์ มีลักษณะเส้นเกือบจะทับกันเนื่องจากค่าแลมดาที่กระแสสนามใกล้เคียงค่า 0.8 แอมแปร์มีค่าใกล้เคียงกันมาก จุดตัดแกนเอกซ์ของเส้นกราฟของผลการทดลองยังคงไม่ตัดที่จุดศูนย์เนื่องจากการสูญเสียในรูปแบบต่างๆเมื่อเทียบกับกราฟของผลการจำลองการทำงาน



รูปที่ 5.20 ผลการทดลองในกรณีตุ้มน้ำหนัก 20 ก.ก. และกระแสสนามอินพุท 0.8 แอมแปร์



รูปที่ 5.21 ผลการจำลองการทำงานกรณีตุ้มน้ำหนัก 20 ก.ก. กระแสสนามอินพุต 0.8 แอมแปร์

ผลการทดลองในกรณีตุ้มน้ำหนัก 20 ก.ก. และกระแสสนามอินพุต 0.8 แอมแปร์ แสดงดังรูปที่ 5.21 ความชันของกราฟของผลการทดลองนี้ถูกแยกแยะได้อย่างชัดเจนที่สุดในการทดลองบนชุดการทดสอบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าเพราะแรงดึงภายนอกสูงและกระแสสนามอินพุตมีค่าสูงด้วย แนวโน้มของอัตราทดแปรผันตามอัตราส่วนแลมดา เมื่อเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่ามีแนวโน้มในลักษณะแบบเดียวกัน ผลการทดลองของการทดลองนี้ยังคงมีผลกระทบจากการสูญเสียจากความเสียดทานและการสูญเสียทางไฟฟ้าอยู่ ชุดการทดสอบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้ารับตุ้มน้ำหนักไม่เกิน 20 ก.ก. เนื่องจากเพลลาของโต๊ะระนาบเอกซ์-วายมีขนาด 10 มิลลิเมตร ทำให้เกิดการโก่งตัวของเพลลา ดังนั้นจึงไม่สามารถทดลองในกรณีตุ้มน้ำหนักมากกว่า 20 ก.ก. ได้

บทที่ 6

วิเคราะห์สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 วิเคราะห์สรุปผลของชุดการทดลองซีวีทีชนิดไฟฟ้าแบบอิสระ

เมื่อจ่ายกระแสสนามให้กับเจเนอเรเตอร์และมอเตอร์พร้อมทั้งใส่ความเร็วหมุนโรเตอร์ของเจเนอเรเตอร์ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำซึ่งส่งผลให้เกิดแรงดันตกคัลล์มที่ตัวต้านทานของวงจรรออาร์เมเจอร์และเกิดกระแสไหลในวงจรรออาร์เมเจอร์ตามกฎของเคอร์ซอพ แต่เนื่องจากในวงจรมีตัวเหนี่ยวนำอยู่ด้วยจึงทำให้เกิดการต้านการไหลของกระแส ซึ่งเป็นเหตุผลทำให้แรงดันเหนี่ยวนำของโรเตอร์ของมอเตอร์เกิดขึ้นน้อยกว่าไวเทจอีเอ็มเอฟของโรเตอร์ของเจเนอเรเตอร์ การหน่วงกระแสของตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าลดลงจนไปศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป การหน่วงที่ลดลงนี้ทำให้กระแสไหลในวงจรรออาร์เมเจอร์มากขึ้นจนถึงค่ากระแสที่สามารถไหลผ่านตัวต้านทานตามกฎของโอห์ม มอเตอร์จะหมุนเร็วขึ้นซึ่งทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำมากขึ้นจนเท่ากับแรงดันเหนี่ยวนำของเจเนอเรเตอร์ ตรงจุดนี้จะไม่มีความดันตกคัลล์มที่ตัวต้านทานในวงจรรออาร์เมเจอร์เนื่องจากกระแสในวงจรรออาร์เมเจอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ จากการพิจารณาไดอะแกรมของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าเมื่อใส่กระแสสนามขนาดเท่ากันให้กับเจเนอเรเตอร์และมอเตอร์พร้อมทั้งใส่ความเร็วหมุนโรเตอร์ของเจเนอเรเตอร์ มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของเจเนอเรเตอร์ก็ต่อเมื่อแรงดันเหนี่ยวนำของทรานส์ดีวเซอร์ทั้งสองเท่ากัน แรงดันเหนี่ยวนำของทรานส์ดีวเซอร์ทั้งสองจะเท่ากันในกรณีไม่คิดการสูญเสียในรูปแบบต่างๆ เช่น แรงเสียดทาน ความร้อน เป็นต้น จากกราฟของรูปที่ 5.9 แนวโน้มของผลการทดลองกับผลการจำลองการทำงานมีลักษณะคล้ายกัน ลักษณะดังกล่าวคืออัตราส่วนแลมดาแปรผกผันกับอัตราทด ส่วนที่แตกต่างของผลการทดลองกับผลการจำลองการทำงานคือกราฟทั้งสองขยับห่างจากกัน เมื่อพิจารณาที่บริเวณอัตราส่วนสูงๆนั้น ระยะห่างนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน แรงเสียดทานจลน์เป็นปัจจัยหนึ่งของการขยับห่างกันของกราฟทั้งสอง ส่วนบริเวณอัตราส่วนแลมดาน้อยๆนั้นระยะของการขยับห่างกันมีค่ามากขึ้นกว่าบริเวณอัตราส่วนแลมดาหลายๆเพราะการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานสถิตย์และแรงเสียดทานจลน์ เป็นต้น เมื่อพิจารณาผลการทดลองทั้งสองการทดลองดังรูปที่ 5.9 จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนแลมดาเท่ากันมีค่าอัตราทดแตกต่างกัน ค่าอัตราส่วนแลมดาเท่ากันแต่มีกระแสสนามไม่เท่ากัน อย่างเช่น ที่อัตราส่วนแลมดาเท่ากับ 0.5 ของการทดลองที่ 1 มาจากการกระแสสนาม 0.8 กับ 0.2262 แอมแปร์ของเจเนอเรเตอร์และมอเตอร์ตามลำดับ ส่วนการทดลองที่สองอัตราส่วนแลมดาเท่ากับ 0.5 ได้มาจากการจ่ายกระแสสนามเท่ากับ 0.4 กับ 0.1629 แอมแปร์ ค่าอัตราทดจากการทดลองที่ให้

กระแสสนาม 0.8 แอมแปร์มีค่ามากกว่าค่าอัตราทดที่ได้จากการทดลองที่ใช้กระแสสนาม 0.4 แอมแปร์ เพราะแรงเสียดของระบบเป็นค่าใกล้เคียงกันแต่แรงดันเหนี่ยวนำแตกต่างกัน แรงดันเหนี่ยวนำที่กระแสสนาม 0.8 แอมแปร์มีมากกว่าแรงดันเหนี่ยวนำของกระแสสนาม 0.4 แอมแปร์ ความเร็วสุดท้ายของทรานส์ดิวเซอร์ที่ทำหน้าที่เป็นมอเตอร์ที่กระแสสนาม 0.8 แอมแปร์ จึงมีค่าใกล้เคียงกับผลการจำลองการทำงานของระบบมากกว่าผลการทดลองที่ใช้กระแสสนาม 0.4 แอมแปร์

6.2 วิเคราะห์สรุปผลของชุดทดสอบซีวีทีชนิดไฟฟ้าแบบโตะระนาบเอกซ์-วาย

ผลการทดลองของชุดทดลองอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดชนิดไฟฟ้ามีแนวโน้มแบบเดียวกับผลการจำลองการทำงาน ลักษณะดังกล่าวคืออัตราทดจะเพิ่มขึ้นตามอัตราแลมดาซึ่งแตกต่างกับแนวโน้มของผลการทดลองบนชุดการทดสอบซีวีทีชนิดไฟฟ้าแบบอิสระเพราะความเร็วอินพุทเนื่องจากแรงดึงของตุ้มน้ำหนักมีค่าน้อยกว่ามากและโครงสร้างของชุดการทดลองที่ต้องการชุดทดกำลังเพื่อทดความเร็วระหว่างชุดมือจับกับชุดอุปกรณ์ทดกำลังแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าทำให้เกิดการสูญเสียทางกลรวมไปถึงการสูญเสียแรงดันเหนี่ยวนำตกคร่อมในความต้านทานขดลวดอาร์เมเจอร์มีสูงเพราะค่าความต้านทานของขดลวดนั้นมีสูงทำให้แรงดันเหนี่ยวนำที่ใช้สำหรับหมุนโรเตอร์มีน้อยลง ดังนั้นระบบจึงแสดงพฤติกรรมออกมาได้อย่างไม่ชัดเจน

6.4 ข้อเสนอแนะและงานที่จะทำต่อไปในอนาคต

เนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้เป็นทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้ามีโครงสร้างที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานมาก และต้องทำงานที่ความเร็วรอบสูงเพราะมอเตอร์ถูกออกแบบมาใช้งานกับจักรเย็บผ้าไฟฟ้า อีกทั้งความต้านทานของขดลวดมีค่าสูง ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการทดลองอุปกรณ์ทดกำลังแบบต่อเนื่องไฟฟ้าแบบโตะระนาบเอกซ์-วาย ดังนั้นการพัฒนาอุปกรณ์ทดกำลังแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าจึงควรเน้นไปที่การออกแบบโครงสร้างของมอเตอร์ใหม่เพื่อให้สามารถทำงานได้ที่ความเร็วรอบต่ำๆ มีแรงเสียดทานน้อยๆ โมเมนต์ความเฉื่อยมีค่าน้อยๆ และความต้านทานของขดลวดต่ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Wannasuphoprasit, W. Cobot: Collaborative Robots. Doctoral Dissertation, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, 1999.
- [2] Gogovitz, N., Cleghorn, W.L., Hing, A.C., and Daniel, C. The Belt-less Continuously Variable Transmission. Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, 1996.
- [3] Peshkin, M., Colgate, J.E., Akella, P., Wannasuphoprasit, W., Gillespie, B., and Moore, C. Cobot Architecture. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 17, No. 4, August 2001.
- [4] Moore, C. Continuously Variable Transmission for Serial Link Cobot Architectures. Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, 1997.
- [5] Wannasuphoprasit, W., Colgate, J.E., Peshkin, M., and Akella, P. Cobots: Hybrid Automation Technology for General Assembly. Proceedings of the 11th International Pacific Conference on Automotive Engineering (IPC-11), 2001.
- [6] สุภพน จันทรพัฒน์. การพัฒนาข้อต่อของหุ่นยนต์โคโบริกแบบของไหล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [7] Moore, C, Peshkin, M., and Colgate, J.E. Design of a 3R Cobot Using Continuously Variable Transmissions. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999.
- [8] Santos, M.J. Extreme Joystick: A Cobot with Stored Energy. Ph.D Proposal, Mechanical Engineering Department, Northwestern University.
- [9] Worsnopp, T., Peshkin, M., Colgate, J.E., and Lynch, K. Controlling the Apparent Inertia of Passive Human-Interactive Robots. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2004.
- [10] ศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข. การออกแบบและพัฒนารุ่นยนต์โคบอทสามมิติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

- [11] Chapman, S.J. Electric machinery fundamentals. 3 rd ed. Singapore: McGraw-Hill, 1999.
- [12] พิชิต สุขเจริญพงษ์ และ สุวิทย์ เจิมสวัสดิพงษ์. วิศวกรรมไฟฟ้าเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดเคชั่น, 2539.
- [13] Dean C. Karnopp, Donald L.Margolis and Ronald C.Rosenberg. System Dynamics: Modeling and Simulation of Mechatronic Systems 3 rd ed. United State of America: John Wiley & Sons,Inc, 2000



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ก.1 การ์ดรับส่งข้อมูลยี่ห้อ Sensoray



รายละเอียดเฉพาะของการ์ด

- ช่องรับสัญญาณจากแอน โคลเดอร์จำนวน 6 ช่อง ความละเอียด 24 บิต
- สามารถให้สัญญาณนาฬิกาขนาด 24 บิต
- 4 ช่องรับสัญญาณอนาล็อก (Analog Signal) ความละเอียด 14 บิต ด้วยเวลาการรับ (Sampling Time) สูงสุด 15 kHz
- 16 ช่องสัญญาณส่งอนาล็อกความละเอียด 16 บิต
- 48 สัญญาณดิจิทัลอินพุตเอาต์พุต

การใช้งาน

ในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้การ์ดนี้สำหรับรับค่าแอน โคลเดอร์เพื่อใช้ในการหาค่าความเร็ว นอกจากนี้การ์ดยังส่งสัญญาณอนาล็อกสำหรับควบคุมความเร็วของมอเตอร์

เว็บไซต์ผู้ผลิต

www.sensoray.com

ก.2 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ยี่ห้อ Parker รุ่น GV-U3



รายละเอียดเฉพาะของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์รุ่น GV-U3

- รับสัญญาณคำสั่งอนาล็อก +10/-10 โวลต์
- ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ชนิดไร้แปรงถ่านยี่ห้อ Parker รุ่น N0343FE
- บรรจุโปรแกรมควบคุมผ่านทางพอร์ต RS232
- สามารถควบคุมมอเตอร์ในรูปแบบการทำงานทั้งแบบควบคุมความเร็วและควบคุมแรงบิด

การใช้งานในงานวิจัยชิ้นนี้

การควบคุมความเร็วอินพุตสำหรับการทดลองของชุดทดสอบอาศัยการส่งสัญญาณไปให้ชุดขับ ชุดขับจะแปลงสัญญาณที่ได้เป็นแรงดันหรือกระแสซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบการควบคุมแรงดันหรือกระแสนี้จะส่งไปให้มอเตอร์ พร้อมทั้งรับสัญญาณเอนโคเดอร์จากมอเตอร์เพื่อนำไปคำนวณหาตำแหน่งหรือความเร็ว

เว็บไซต์ผู้ผลิต

www.parker.com

ก.3 มอเตอร์ยี่ห้อ Parker รุ่น N0343FE



รายละเอียดเฉพาะของมอเตอร์ยี่ห้อ Parker รุ่น N0343FE

- แรงบิดสูงสุด 5.3 นิวตัน.เมตร
- ความเร็วรอบสูงสุด 6800 รอบต่อนาที
- แรงบิดต่อเนื่อง 1.21 นิวตัน เมตร
- แรงบิดแรงเสียดสถิตย์ 16.8 มิลลินิวตัน เมตร
- โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ 0.0000271 กิโลกรัม เมตร²
- ความละเอียดของเอนโคเดอร์ 1000 พัลส์ต่อรอบ

การใช้งาน

มอเตอร์ชนิดนี้ให้ความเร็วอินพุตสำหรับการทดลองของชุดทดสอบแบบอิสระ นอกเหนือจากนี้มอเตอร์ยังส่งสัญญาณเอนโคเดอร์ออกมาเพื่อเป็นสัญญาณป้อนกลับซึ่งใช้ในการควบคุม

เว็บไซต์ผู้ผลิต

www.parker.com

ก.4 เอนโคเดอรีห้อ Koyo รุ่น TRD-S2500VA



รายละเอียดเฉพาะของเอนโคเดอรีห้อ Koyo รุ่น TRD-S2500VA

- ความละเอียดของเอนโคเดอรี 2500 พัลส์ต่อรอบ
- ส่งสัญญาณพัลส์แบบไลน์ไดรเวอร์ (Line Driver)
- ใช้กระแสไฟสูงสุด 30 มิลลิแอมป์
- ใช้โวลเทจขนาด 5 โวลต์
- ความเร็วสูงสุดที่ใช้หมุนเอนโคเดอรี 6000 รอบต่อนาที

การใช้งาน

เอนโคเดอรีชนิดนี้ใช้สำหรับติดตั้งกับทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าของชุดการทดลองแบบอิสระและใช้สำหรับวัดตำแหน่งของชุดมือจับของชุดทดสอบระนาบเอกซ์-วาย เอนโคเดอรีจะส่งสัญญาณกลับมาที่การ์ดรับส่งข้อมูลเพื่อคำนวณหาตำแหน่งหรือความเร็วรอบสำหรับเป็นสัญญาณป้อนกลับในระบบควบคุม

เว็บไซต์ผู้ผลิต

www.koyoencoder.com

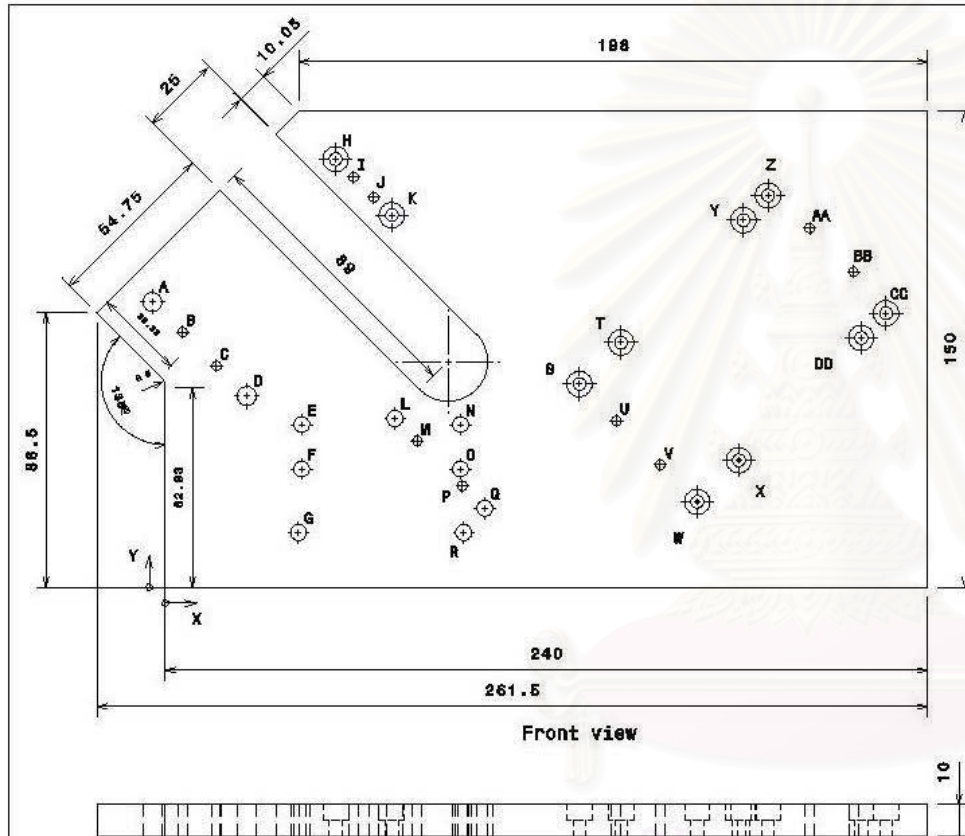
ภาคผนวก ข

แบบขึ้นส่วนสำคัญ

การออกแบบขึ้นส่วนต่างๆของงานวิจัยชิ้นนี้เริ่มต้นด้วยการออกแบบด้วยโปรแกรมCatia
การออกแบบด้วยโปรแกรมเขียนแบบทำให้ง่ายต่อการออกแบบและแก้ไข



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

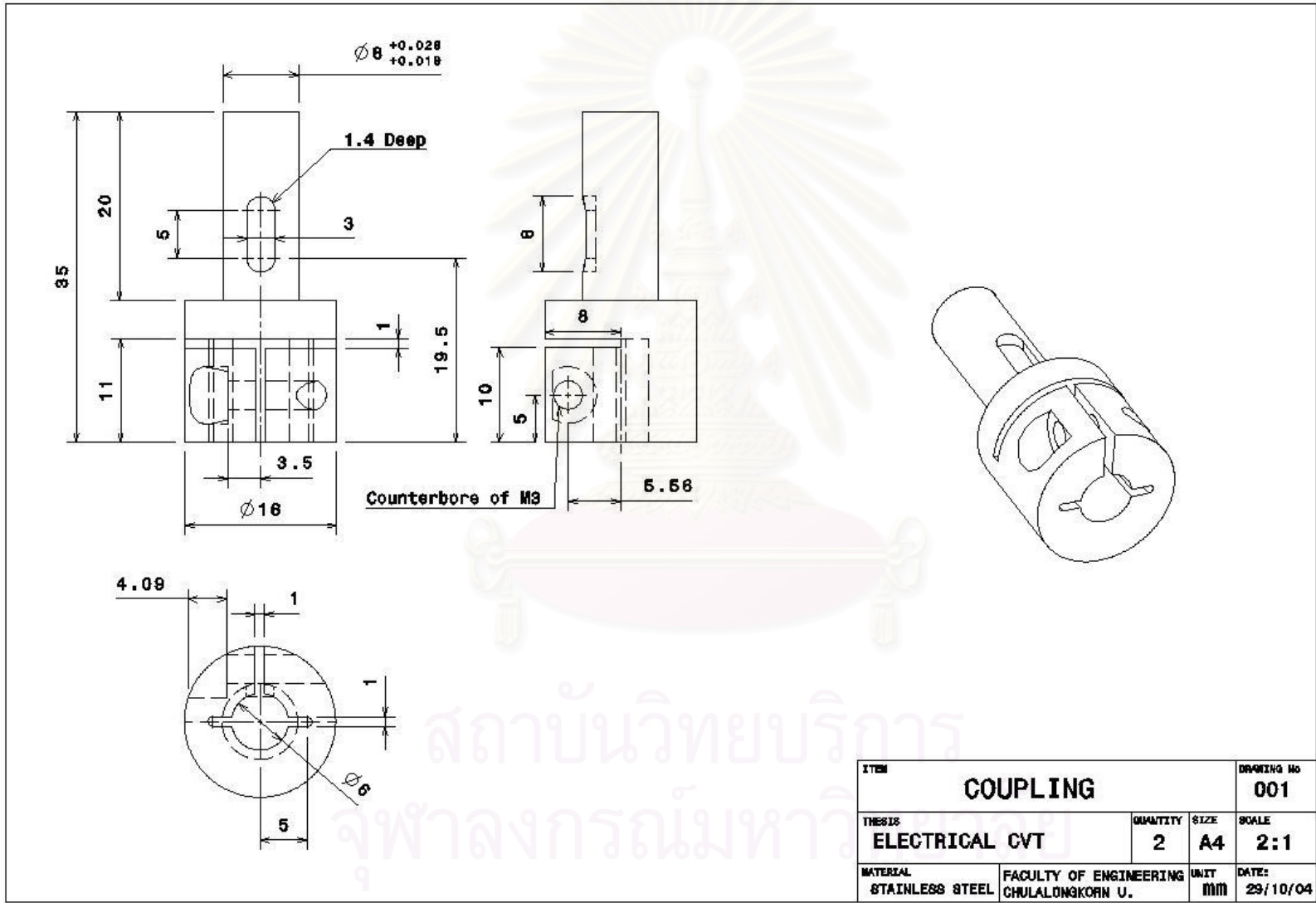


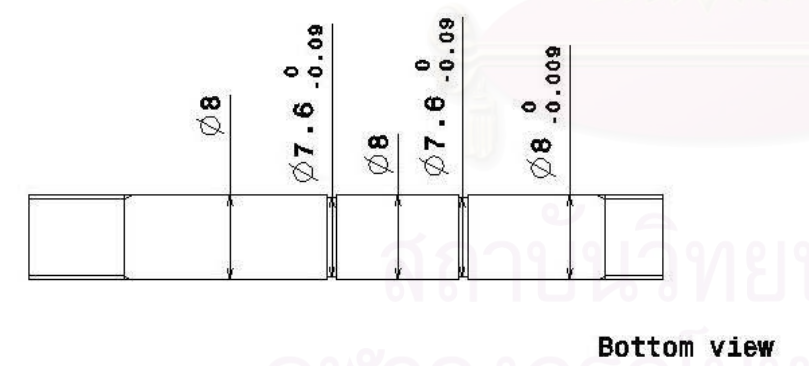
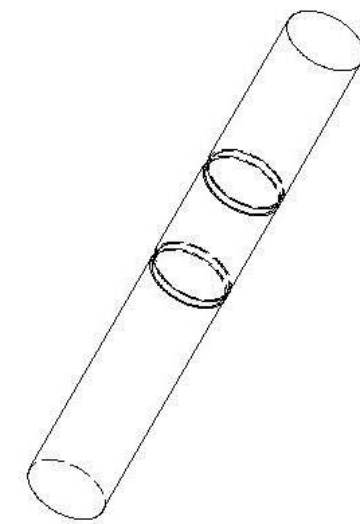
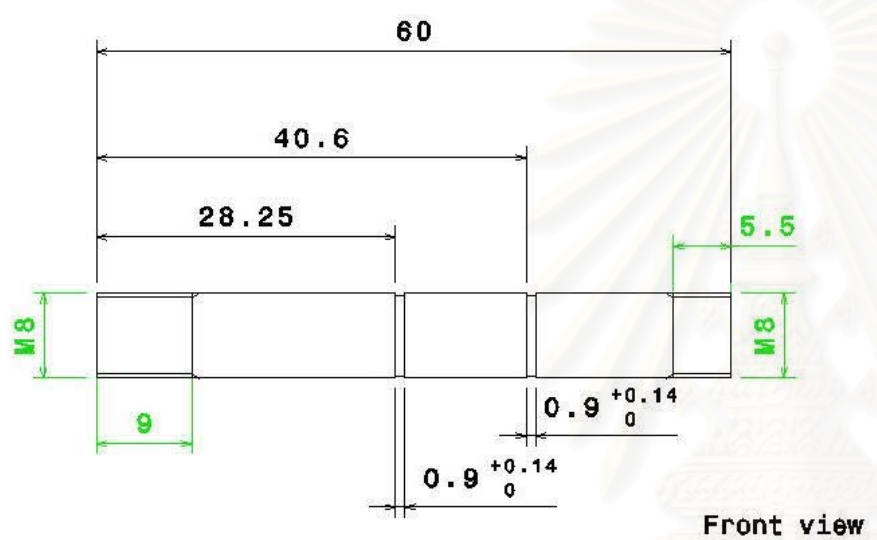
REF.	X	Y	Diameter
A	-4.06	88.91	M8
B	6.5±0.02	80.37±0.02	∅S H7 for down Pin
C	18.1±0.02	89.76±0.02	∅S H7 for down Pin
D	25.65	60.22	M6
E	42.94	51.25	M5
F	42.94±0.02	37.26±0.02	∅6 H7 for down Pin
G	41.94	17.25	M5
H	63.63	134.9	Counterbore of M4
I	59.29±0.02	129.24±0.02	∅S H7 for down Pin
J	65.66±0.02	122.88±0.02	∅S H7 for down Pin
K	71.32	117.28	Counterbore of M4
L	72.3	63.16	M5
M	78.37±0.02	48.08±0.02	∅S H7 for down Pin
N	92.94	61.25	M5
O	92.94±0.02	37.26±0.02	∅6 H7 for down Pin
P	93.51±0.02	31.94±0.02	∅S H7 for down Pin
Q	100.69	24.87	M5
R	93.94	17.25	M5
S	130.36	84.04	Counterbore of M4
T	143.44	77.12	Counterbore of M4
U	142.03±0.02	62.37±0.02	∅S H7 for down Pin
V	155.82±0.02	88.58±0.02	∅S H7 for down Pin
W	167.49	26.92	Counterbore of M4
X	180.57	40	Counterbore of M4
Y	181.98	115.66	Counterbore of M4
Z	189.76	123.44	Counterbore of M4
AA	202.84±0.02	113.18±0.02	∅S H7 for down Pin
BB	218.63±0.02	88.38±0.02	∅S H7 for down Pin
CC	226.88	86.31	Counterbore of M4
DD	218.1	78.63	Counterbore of M4

Front view

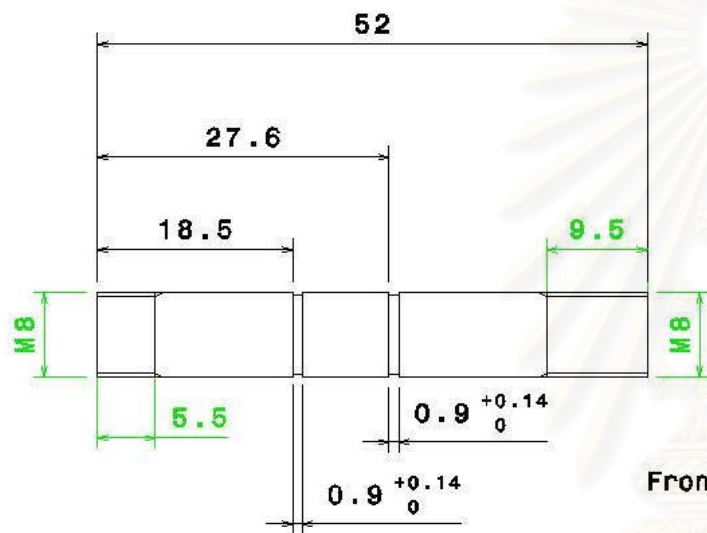
Bottom view

ITEM		MODULE PLATE 1		DRAWING NO	001
THESES		QUANTITY	SIZE	SCALE	
ELECTRICAL CVT		1	A4	3:5	
MATERIAL		UNIT	DATE:		
ALUMINIUM ALLOY		FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN U.	MM	27/3/2004	

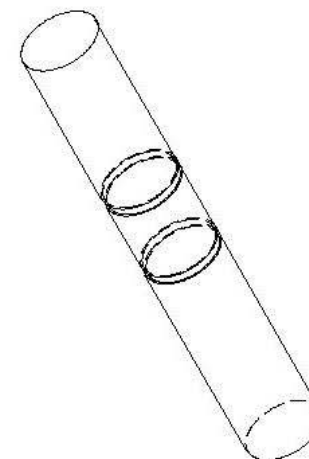




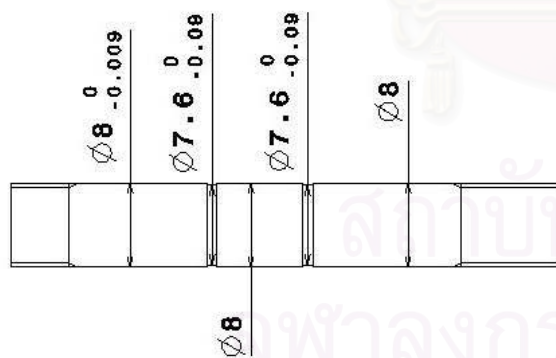
ITEM		ROD OF TIMING BELT TENSIONER 1		DRAWING No	006
THESES		QUANTITY	SIZE	SCALE	
ELECTRICAL CVT		2	A4	2:1	
MATERIAL		FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN U.		UNIT	DATE:
STAINLESS STEEL				MM	18/3/2004



Front view

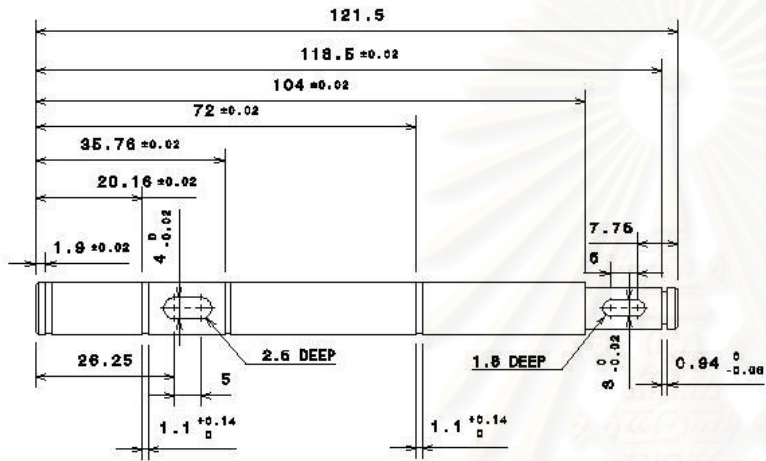


Isometric view

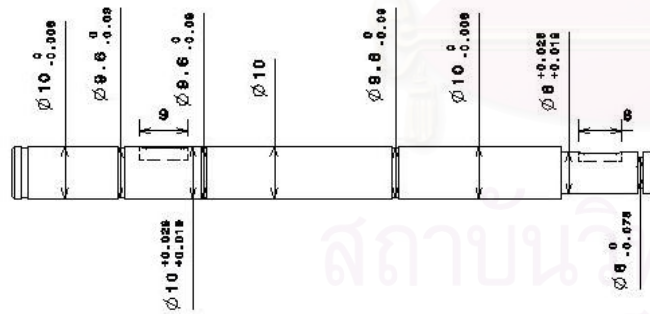


Bottom view

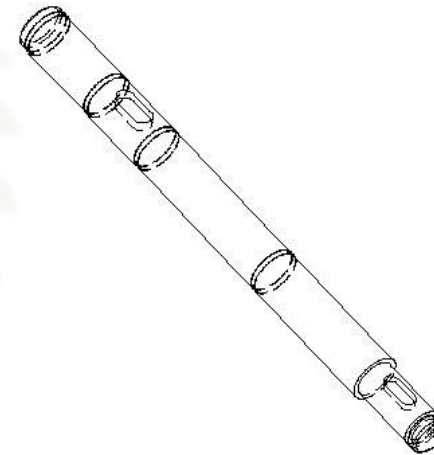
ITEM		ROD OF TIMING BELT TENSIONER 2		DRAWING No	007
THESES		ELECTRICAL CVT	QUANTITY	SIZE	SCALE
			2	A4	2:1
MATERIAL		FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN U.		UNIT	DATE:
STAINLESS STEEL				MM	18/3/2004



Front view

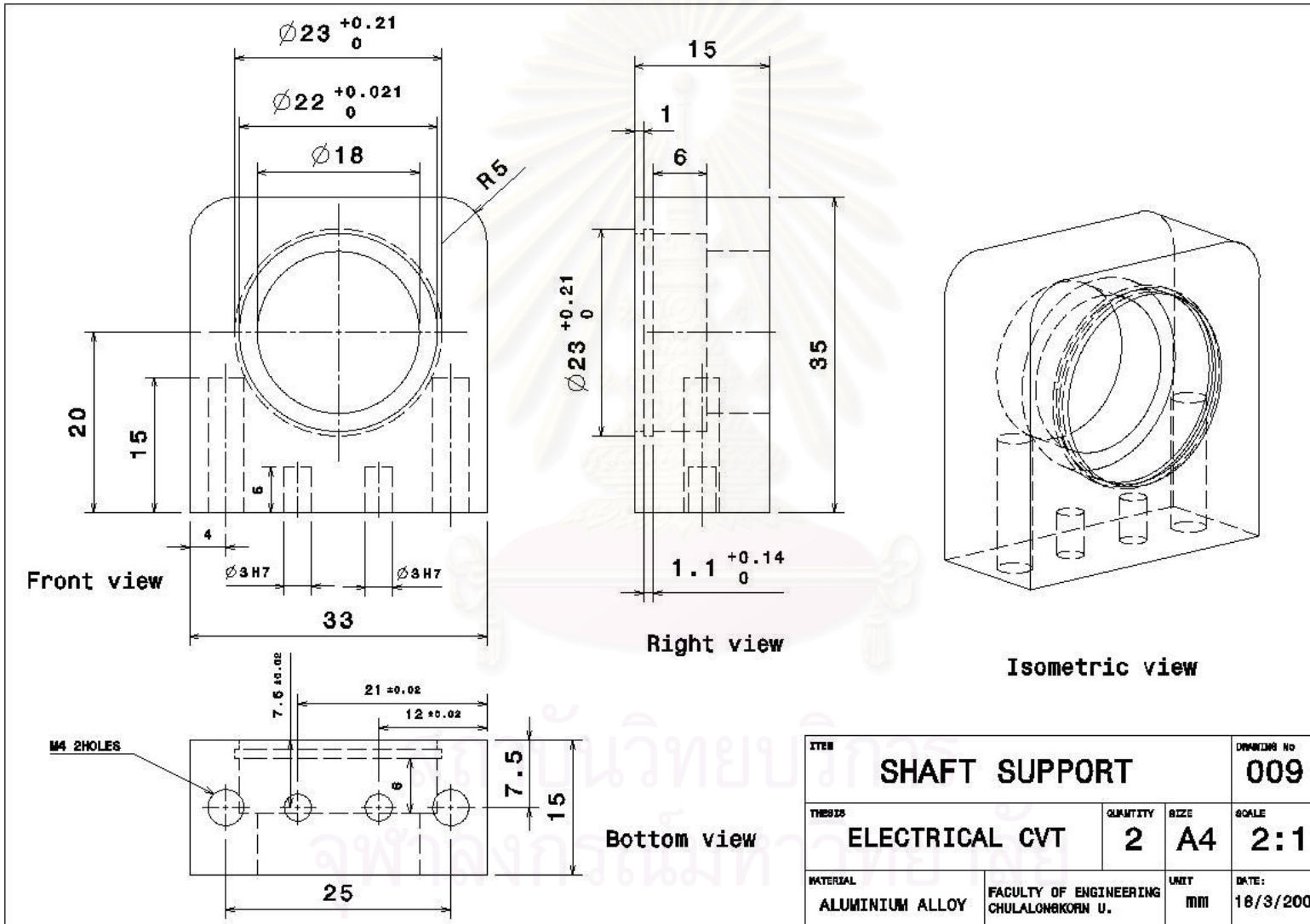


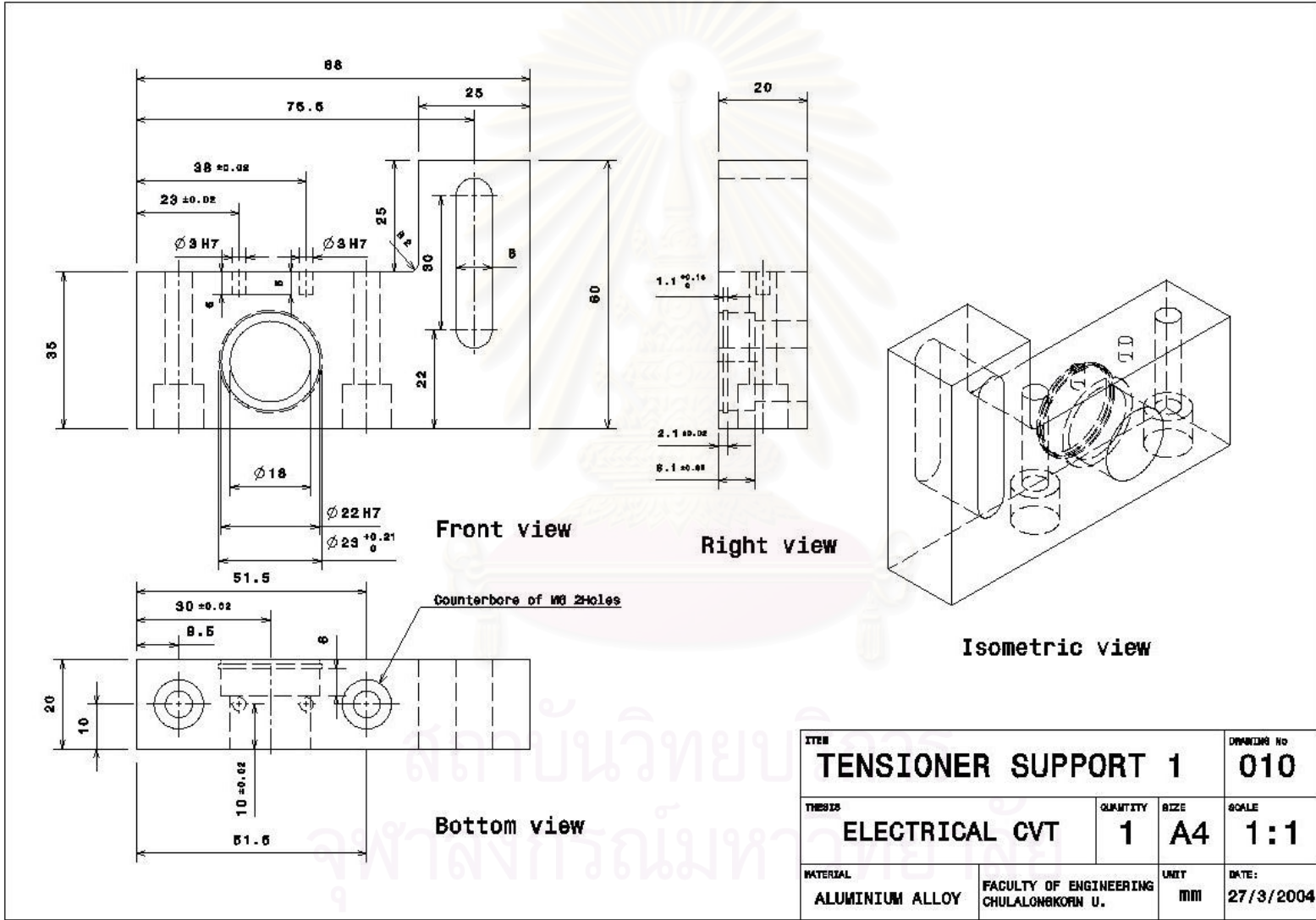
Bottom view



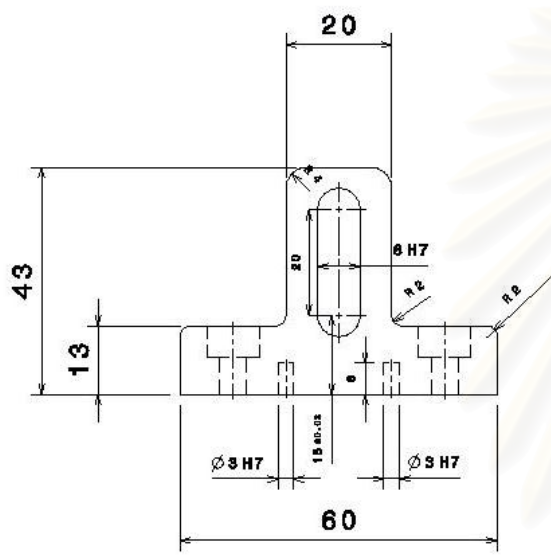
Isometric view

ITEM		SHAFT FOR TRANSMISSION		DRAWING No	008
THESES		ELECTRICAL CVT	QUANTITY	SIZE	SCALE
			2	A4	1:1
MATERIAL		FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN U.		UNIT	DATE:
STAINLESS STEEL				MM	18/3/2004

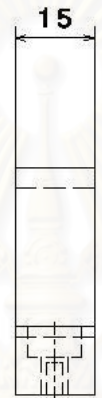




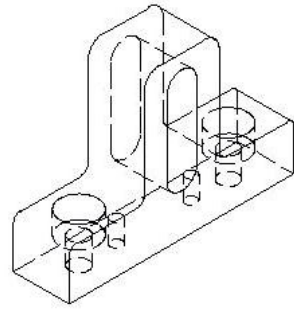
ITEM		DRAWING NO	
TENSIONER SUPPORT 1		010	
THESES	QUANTITY	SIZE	SCALE
ELECTRICAL CVT	1	A4	1:1
MATERIAL	UNIT	DATE:	
ALUMINIUM ALLOY	FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN U.	MM	27/3/2004



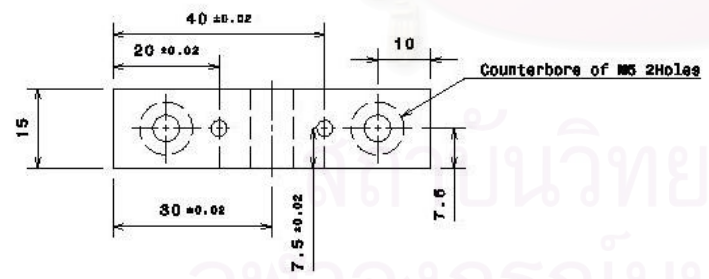
Front view



Right view

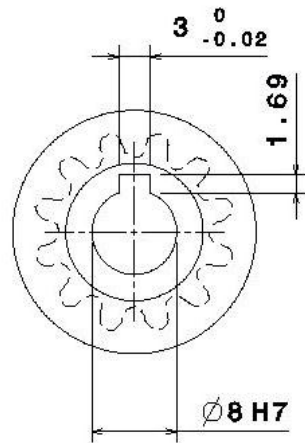


Isometric view

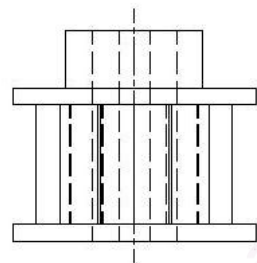


Bottom view

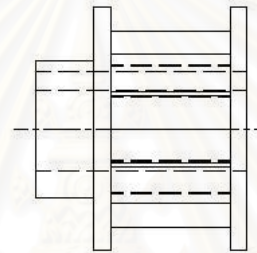
ITEM		DRAWING NO	
TENSIONER SUPPORT 2		011	
THESES	QUANTITY	SIZE	SCALE
ELECTRICAL CVT	2	A4	1:1
MATERIAL	UNIT		DATE:
ALUMINIUM ALLOY	FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN U.		18/3/2004
		MM	



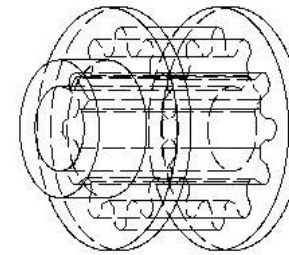
Front view



Bottom view



Right view

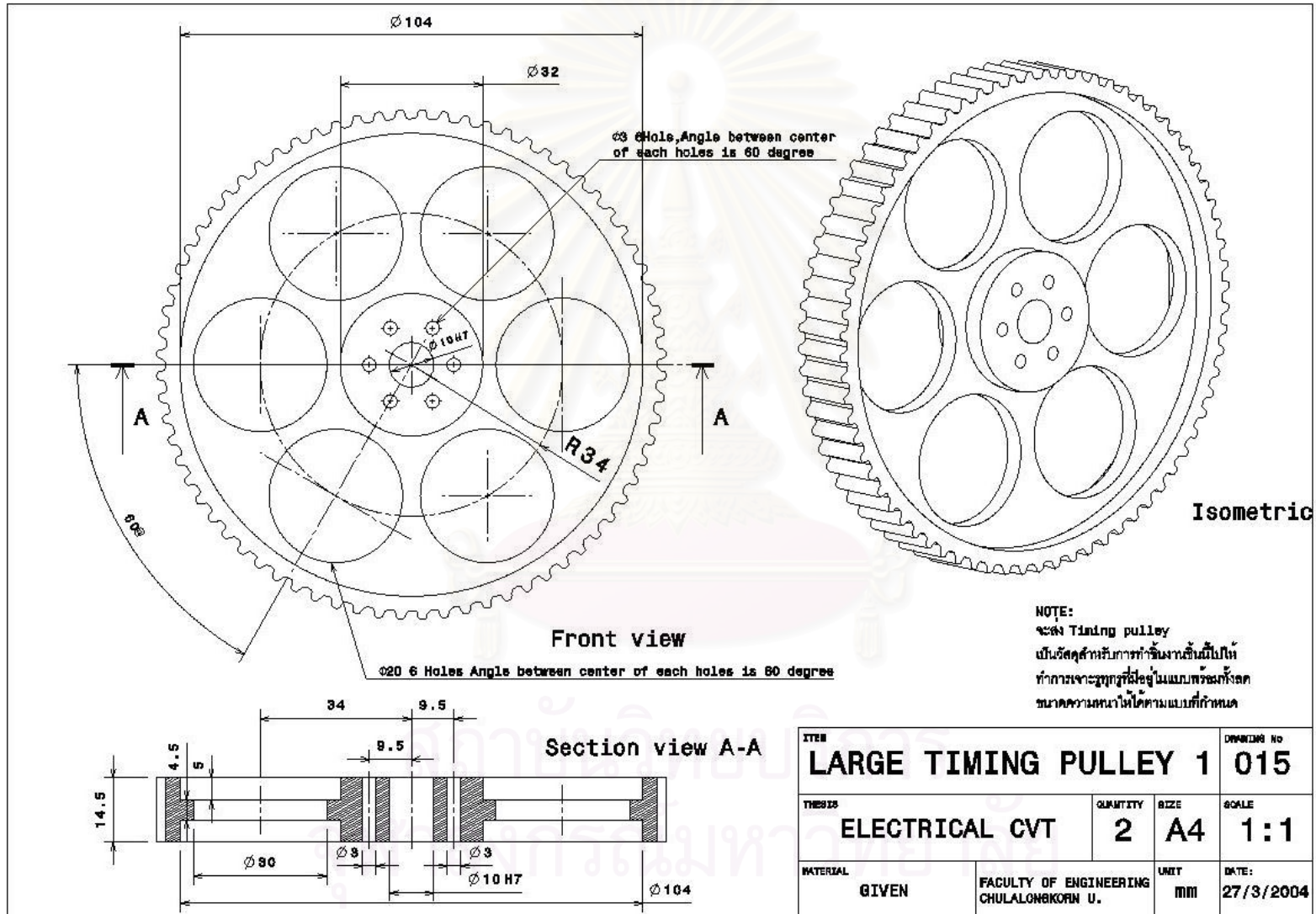


Isometric view

NOTE:

จะส่ง Timing pulley เป็นวัสดุสำหรับทำชิ้นงานอื่นที่ไม่ใช่
ทำเฉพาะจะระบุและวงล้อมขนาดที่
กำหนดเท่านั้น

ITEM			DRAWING NO
SMALL TIMING PULLEY 1			013
THESES	QUANTITY	SIZE	SCALE
ELECTRICAL CVT	2	A4	2:1
MATERIAL	UNIT	DATE:	
GIVEN	FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN U.	MM	27/3/2004



ภาคผนวก ค

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า

Mathematics Model of Electrical Continuously Variable Transmission

วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์, ณัฐวุฒิ วิริยะกิติกุล
ห้องปฏิบัติการสหวิทยาการมนุษย์และหุ่นยนต์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 โทร 0-2218-6610-1 โทรสาร 0-2252-8889
E-Mail: Fmewwn@kankrow.eng.chula.ac.th , Natthavut.w@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอแนวคิดใหม่ในการพัฒนาอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า โดยเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า แนวคิดเบื้องต้นของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าคือการใช้ทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าจำนวนสองตัวขึ้นไปนำมาต่อกันให้ได้พฤติกรรมทางกลเหมือนกับอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดอื่นๆ ตัวอย่างในที่นี้ได้นำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้นมาใช้เป็นทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้า การควบคุมสัดส่วนอัตราทดจะปรับโดยการควบคุมส่วนวงจรไฟฟ้าของทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าของแต่ละแกน การนำอุปกรณ์ไฟฟ้าเข้ามาใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ทางกลในระบบทดกำลังทำให้เกิดข้อดีในการลดชิ้นส่วนทางกลโดยถูกทดแทนด้วยสายไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า โดยใช้วิธีบอนด์กราฟและนอกเหนือจากนั้นที่มิวิจัยได้นำเสนอบล็อกไดอะแกรมของระบบอีกด้วย

Abstract

This paper presents a new concept and a mathematic model of the electrical-continuously variable transmission (ECVT). The fundamental idea of electrical-continuously variable transmission is presented. In this research, separately excited dc motor (SEDC motor) is used as the transducer. A transmission ratio of the system is adjusted by the transducer's circuit controller of each axis. It proposes a block diagram, derived by the mathematics modeling, of the X-Y table cobot that uses the 2 ECVTs. Additional, it has the model of X-Y table cobot that obtained from the bond graph method.

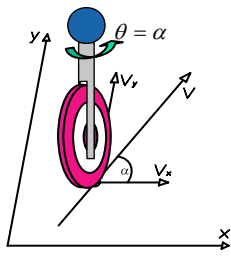
1. บทนำ

ระบบทดกำลังแบบต่างๆมีใช้แพร่หลายมานานในระบบทางกลทั่วไปและระบบไฟฟ้า อย่างเช่น รถยนต์มีระบบทดกำลังคือ ชุดเกียร์

ระบบทางไฟฟ้ามีทรานส์ฟอร์มเมอร์เป็นระบบทดกำลัง เป็นต้น โดยความหมายแล้วระบบทดกำลังคือระบบปรับเปลี่ยนค่าอินพุตด้วยค่าอัตราทดของระบบทดกำลังกลายเป็นเอาต์พุตของระบบ อินพุตและเอาต์พุตในที่นี้สามารถเป็นค่าต่างๆอย่างเช่น ความเร็ว แรงบิด กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ เป็นต้น ระบบทดกำลังหรือในอีกชื่อหนึ่งคืออุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทด ส่วนใหญ่อัตราทดจะเปลี่ยนเป็นขั้นบันไดข้ามจากค่าหนึ่งไปยังอีกค่าหนึ่งทำให้ระบบเกิดความไม่ต่อเนื่อง อีกทั้งช่วงการปรับค่าอัตราทดยังเป็นแค่ช่วงแคบๆ จากเหตุผลดังกล่าวทำให้เกิดแนวความคิดสร้างอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าอัตราทดได้อย่างต่อเนื่องในช่วงที่กำหนด ระบบทดกำลังชนิดใหม่นี้มีชื่อเรียกว่า อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง(Continuously Variable Transmission) หรือเรียกย่อๆว่า ซีวีที (CVT) ซีวีทีมีด้วยกันหลายแบบ อย่างเช่น แบบกรวย แบบสายพาน แบบรูปตัววี แบบไร้สาย เป็นต้น แต่ในงานวิจัยชิ้นนี้จะเน้นไปที่ซีวีทีสำหรับใช้ในหุ่นยนต์โคบอท (Collaborative Robot, COBOT) [1]

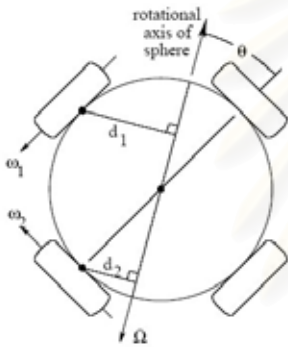
2. ซีวีทีในหุ่นยนต์โคบอท

หุ่นยนต์โคบอทเป็นหุ่นยนต์รูปแบบใหม่ที่ถูกออกแบบมาเพื่อทำงานร่วมกับมนุษย์ในพื้นที่ทำงานเดียวกันได้อย่างปลอดภัย หุ่นยนต์โคบอทเป็นอุปกรณ์แบบพาสซีฟ (Passive) เพราะหุ่นยนต์โคบอทไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยตัวเองเนื่องจากตัวหุ่นยนต์โคบอทไม่ได้ใช้แรงจากอุปกรณ์ขับเคลื่อน (Actuator) ขับโดยตรง แต่ใช้ซีวีทีที่ทดกำลังจากผู้ใช้งาน ดังนั้นหุ่นยนต์โคบอทจะเคลื่อนที่ได้ก็ต่อเมื่อมีผู้ใช้งานออกแรงพา หุ่นยนต์โคบอทเคลื่อนที่ไปเท่านั้น เมื่อผู้ใช้หยุดออกแรง หุ่นยนต์โคบอทจะหยุดการเคลื่อนที่ในทันที ซีวีทีเป็นส่วนประกอบสำคัญของหุ่นยนต์โคบอท ที่ผ่านมามีการนำซีวีที 3 ชนิดมาใช้สร้างหุ่นยนต์โคบอท ชนิดแรกคือ ซีวีทีแบบล้อ[2] หลักการของซีวีทีแบบล้อคือปรับเปลี่ยนอัตราทดโดยใช้การปรับมุมของล้อซึ่งเทียบกับแกนอ้างอิงในระนาบตั้งรูปที่ 1 ข้อดีของซีวีทีแบบนี้คือปรับเปลี่ยนอัตราได้ง่ายและสามารถสร้างได้ง่าย ข้อเสียคือต้องใช้พื้นที่ระนาบในการทดกำลัง ดังนั้นการพัฒนาสร้างหุ่นยนต์โคบอทที่มีโครงสร้างซับซ้อนหรือมีองศาความอิสระสูง เช่น หุ่นยนต์โคบอทแบบ 3 มิติ โดยใช้ซีวีทีแบบนี้ทำได้ยาก



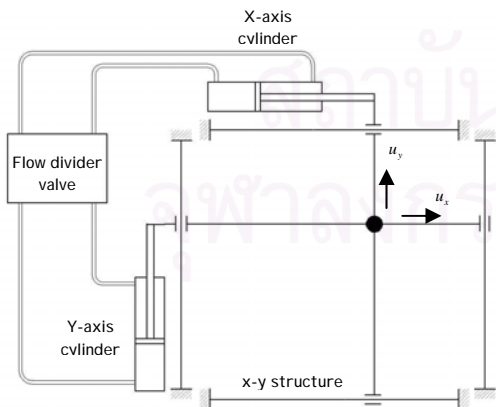
รูปที่ 1 ซีวีทีแบบล้อ [3]

ซีวีทีอีกประเภทหนึ่งที่ใช้ในการสร้างหุ่นยนต์โคบอทคือซีวีทีแบบทรงกลม[4] ดังในรูปที่ 2 หลักการทำงานของซีวีทีแบบนี้คือการปรับเปลี่ยนแกนหมุนของลูกทรงกลมด้วยล้อซึ่งทำให้ระยะจากแกนหมุนถึงจุดสัมผัสของล้ออินพุทเปลี่ยนไป ข้อดีของซีวีทีแบบทรงกลมคือการนำไปใช้พัฒนาสร้างเป็นหุ่นยนต์โคบอทแบบ 3 มิติได้ ข้อเสียคือจำเป็นต้องมีหนึ่งลูกทรงกลมต่อหนึ่งค่าอัตราทดของซีวีทีซึ่งจะทำให้เป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาสร้างหุ่นยนต์โคบอทที่มีโครงสร้างซับซ้อน



รูปที่ 2 ซีวีทีแบบทรงล้อ [4]

ซีวีทีในงานวิจัยล่าสุดที่ใช้ในการสร้างหุ่นยนต์โคบอทคือซีวีทีแบบของไหล[5] ดังแสดงในรูปที่ 3 หลักการทำงานของซีวีทีแบบของไหลคือปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของของไหลในกระบอกสูบ รายละเอียดของงานวิจัยซีวีทีแบบของไหลดูได้จากเอกสารอ้างอิง [5]



รูปที่ 3 ซีวีทีแบบของไหล [5]

ซีวีที 2 แบบแรกที่ใช้ในการสร้างหุ่นยนต์โคบอทที่ผ่านมาจะทำการทดกำลังทางกลเป็นหลักและต้องมีการเชื่อมต่อทางกล ทำให้เป็นอุปสรรค

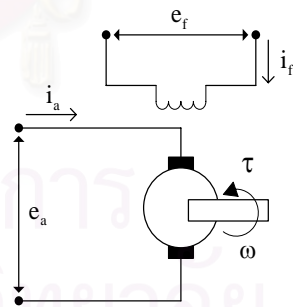
ต่อการพัฒนาสร้างหุ่นยนต์โคบอทหรือการประยุกต์ใช้กับระบบทางกลที่มีโครงสร้างซับซ้อนหรือมีจำนวนองศาความอิสระสูงๆ จากปัญหาตรงจุดนี้ทำให้เกิดแนวความคิดการนำอุปกรณ์ทางไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์ทางกลในการสร้างอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า (Electrical Continuously Variable Transmission, ECVT) หรืออีซีวีที ข้อดีของการนำระบบไฟฟ้ามาใช้ข้อหนึ่งคือการทดแทนการใช้ชิ้นส่วนทางกลในการส่งกำลังจากซีวีทีตัวหนึ่งไปยังซีวีทีอีกตัวหนึ่งด้วยสายไฟ

3.ซีวีทีชนิดไฟฟ้า

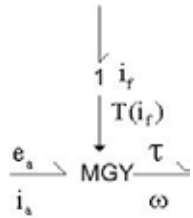
หลักการทำงานของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าคือการนำทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าตั้งแต่สองตัวขึ้นไปมาต่อกันโดยปรับเปลี่ยนอัตราทดด้วยการควบคุมส่วนวงจรไฟฟ้าของทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้า ในงานวิจัยชิ้นนี้ทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าคือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ่น ซึ่งอาจจะใช้อุปกรณ์ลักษณะอื่นก็ได้ ทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าสามารถทำหน้าที่เป็นทั้งมอเตอร์และเจนเนอเรเตอร์ในตัวเดียวกัน

4. แบบจำลองทางบอนด์กราฟของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ่น

งานวิจัยชิ้นนี้ได้หาวิธีการหาโมเดลแบบบอนด์กราฟ[6] ซึ่งวิธีการหาโมเดลแบบบอนด์กราฟสามารถอธิบายให้เข้าใจถึงระบบได้ง่าย เพราะอธิบายด้วยพลังงานที่ไหลเข้าออกระบบไม่ว่าจะเป็นระบบทางกล, ระบบไฟฟ้า หรือระบบอื่นๆ สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ่น (รูปที่ 4) เป็นระบบผสมกันระหว่างระบบทางกลกับระบบไฟฟ้า ในบอนด์กราฟพิจารณามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ่นเป็นทรานส์ดิวเซอร์ชนิดไจเรเตอร์แบบมอดูเลต (Modulated Gyrator, MGY) [6] ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 รูปวงจรเปรียบเทียบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ่น



รูปที่ 5 บอนด์กราฟของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดไจเรเตอร์แบบมอดูเลต

การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดแยกกระตุ้นคือเปลี่ยนพลังงานของขดลวดอาร์เมเจอร์ ($e_a i_a$) ไปเป็นพลังงานของเพลลา ($\tau \omega$) ภายใต้การเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้นจะไม่คงที่ ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันของกระแสที่ไหลในขดลวดสนาม มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้นเขียนเป็นโมเดลแบบบอนด์กราฟดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 โมเดลบอนด์กราฟของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้น

สมการความสัมพันธ์ของไจเรเตอร์แบบมอดูเลตสามารถเขียนได้เป็น

$$e_a = T(i_r)\omega \tag{10}$$

$$T(i_r)i_a = \tau \tag{11}$$

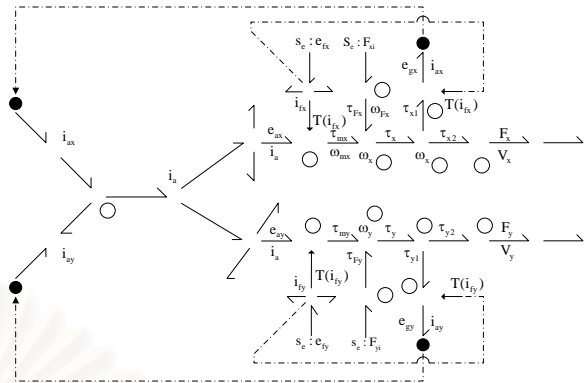
เมื่อ $T(i_r)$ คือค่าสัมประสิทธิ์ของทรานส์ดิวเซอร์ สามารถสมมุติให้ $T(i_r)$ เป็นสัดส่วนกับกระแสที่ไหลในขดลวดสนาม โดยที่ A คือค่าคงที่

$$T(i_r) = Ai_r \tag{12}$$

5. แบบจำลองของระบบ ECVT

จากแนวความคิดพื้นฐานของระบบ ECVT ที่ได้กล่าวมาแล้ว งานวิจัยได้ใช้บอนด์กราฟในการออกแบบจำลองของระบบ ECVT ซึ่งจะได้บอนด์กราฟไดอะแกรมของระบบ ECVT ดังแสดงในรูปที่ 7 ระบบประกอบด้วยมอดูเลตไจเรเตอร์ (MGY) สองตัว ซึ่งคือทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้า ขดลวดของมอเตอร์ทั้งสองเชื่อมต่อกัน (Coupled) โดยที่ค่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับขดลวดสนามของมอเตอร์ทั้งสอง (e_{ix}, e_{iy}) นั้นถูกควบคุมอย่างอิสระ อัตราส่วนของสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ทั้งสอง ทำให้เอาท์พุท (ทางกลจากเพลลามอเตอร์) ทั้งสองเป็นค่าอัตราทด ดังนั้นการควบคุมสนามแม่เหล็กทำให้สามารถควบคุมอัตราทดของระบบได้

ในบอนด์กราฟไดอะแกรมของระบบ ECVT มีอินพุทคือแรง (F_x, F_y) และเอาท์พุทคือความเร็ว (V_x, V_y)



รูปที่ 7 บอนด์กราฟไดอะแกรมของระบบ ECVT

จากบอนด์กราฟไดอะแกรมของระบบ ECVT ในรูปที่ 7 สามารถสร้างความสัมพันธ์ของแต่ละอิลิเมนต์ของจังก์ชันและทรานส์ฟอร์มเมอร์สามารถหาได้ดังนี้ จังก์ชันหนึ่ง (One Junction) [6] หมายเลข 1 ทำหน้าที่สร้างความสัมพันธ์ของแรงดัน Back EMF จากมอดูเลตไจเรเตอร์หมายเลข 10 และ 11 โดยมีสมการ

$$i_a = i_{ax} - i_{ay} \tag{13}$$

$$v_a = v_{ax} - v_{ay} \tag{14}$$

มอดูเลตไจเรเตอร์หมายเลข 2(แกน x) และ 3(แกน y) คือทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าที่ทำหน้าเป็นมอเตอร์ ซึ่งรับกระแสและความต่างศักย์จากจังก์ชันหนึ่ง แล้วแปลงเป็นแรงบิดกับความเร็วเชิงมุม โดยอาศัยอัตราทดที่แปรผันตามกระแสของขดลวดจากค่าอินพุทที่จ่ายเข้าไปเป็นความต่างศักย์ สมการความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความเร็วเชิงมุมและสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแสของแต่ละแกนได้ดังนี้

$$e_{ax} = T(i_{fx}) \times \omega_{mx} \tag{15}$$

$$\tau_{mx} = T(i_{fx}) \times i_{ax} \tag{16}$$

$$e_{ay} = T(i_{fy}) \times \omega_{my} \tag{17}$$

$$\tau_{my} = T(i_{fy}) \times i_{ay} \tag{18}$$

พิจารณาจังก์ชันหนึ่งหมายเลข 4(แกน x) และ 5(แกน y) ได้สมการความสัมพันธ์ของแรงบิดที่เข้าออกและสมการของความเร็วเชิงมุมที่เข้าออกจังก์ชันหนึ่ง

$$\tau_x = \tau_{mx} + \tau_{Fx} \tag{19}$$

$$\omega_{mx} = \omega_{Fx} = \omega_x \tag{20}$$

$$\tau_y = \tau_{my} + \tau_{Fy} \tag{21}$$

$$\omega_{my} = \omega_{Fy} = \omega_y \quad (22)$$

พิจารณาทรานส์ฟอร์มเมอร์หมายเลข 6(แกน x) และทรานส์ฟอร์มเมอร์ หมายเลข 7(แกน y) สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับแรงและสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับความเร็วเชิงเส้นของแต่ละแนวแกน โดยที่ R คืออัตราทดของทรานส์ฟอร์มเมอร์

$$\tau_{Fx} = F_x \times R \quad (23)$$

$$v_{Fx} = \omega_{Fx} \times R \quad (24)$$

$$\tau_{Fy} = F_y \times R \quad (25)$$

$$v_{Fy} = \omega_{Fy} \times R \quad (26)$$

จากจังก์ชันหนึ่งหมายเลข 8(แกน x) และหมายเลข 9(แกน y) ทำหน้าที่แบ่งแรงบิดเป็นสองส่วน ส่วนแรกจ่ายให้มอเตอร์ดูเลตไจเรเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นเจนเนอเรเตอร์ผลิตแรงดัน Back EMF ในวงจรอาร์เมเจอร์ ส่วนสุดท้ายส่งเข้าไปในทรานส์ฟอร์มเมอร์ซึ่งถูกแปลงไปเป็นแรงที่มีข้อจับ เขียนสมการได้ดังนี้

$$\tau_x = \tau_{x1} + \tau_{x2} \quad (27)$$

$$\omega_x = \omega_{x1} = \omega_{x2} \quad (28)$$

$$\tau_y = \tau_{y1} + \tau_{y2} \quad (29)$$

$$\omega_y = \omega_{y1} = \omega_{y2} \quad (30)$$

เมื่อทรานส์เวิร์กัลไฟฟ้าที่ทำหน้าเป็นเจนเนอเรเตอร์โมเดลของหุ่นยนต์โคบอทคือมอเตอร์ดูเลตไจเรเตอร์ที่หมายเลข 10(แกน x) กับหมายเลข 11(แกน y) สมการสัมพันธ์ดังนี้

$$e_{gx} = T(i_{fx}) \times \omega_x \quad (31)$$

$$\tau_{x1} = T(i_{fx}) \times i_{ax} \quad (32)$$

$$e_{gy} = T(i_{fy}) \times \omega_y \quad (33)$$

$$\tau_{y1} = T(i_{fy}) \times i_{ay} \quad (34)$$

และความเร็วเชิงมุมของทรานส์เวิร์กัลไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเป็นความเร็วเชิงเส้นโดยทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่หมายเลข 12 และ 13 มีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$v_x = \omega_x \times R \quad (35)$$

$$\tau_{x1} = F_{x0} \times R \quad (36)$$

$$v_y = \omega_y \times R \quad (37)$$

$$\tau_{y1} = F_{y0} \times R \quad (38)$$

6. บล็อกไดอะแกรมของ ECVT

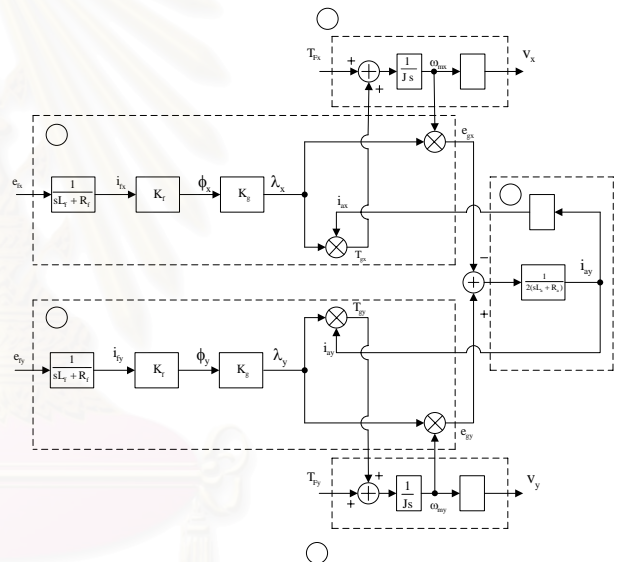
จากบอนด์กราฟไดอะแกรมที่นำเสนอ สามารถสร้างบล็อกไดอะแกรมของระบบ ECVT ซึ่งทำให้เห็นกายภาพของระบบมากขึ้น

โดยแยกส่วนของไฟฟ้ากับส่วนทางกลออกจากกันดังรูปที่ 8 ส่วนไฟฟ้าประกอบด้วยสองส่วนคือส่วนขดลวดสนามแม่เหล็กกับขดลวดอาร์เมเจอร์ของทรานส์เวิร์กัลไฟฟ้า ขดลวดแต่ละขดนี้สามารถคิดเป็นวงจรรอนุกรมของตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ ส่วนทางกลประกอบด้วย ชุดทดกำลังและโรเตอร์ของทรานส์เวิร์กัลไฟฟ้า

บล็อกหมายเลข 1 และ 2 คือขดลวดสนามในแต่ละแนวแกน ซึ่งมีอินพุตคือความต่างศักย์ตกคร่อมขดลวด, ความเร็วเชิงมุมจากชุดทดกำลังและกระแสไฟที่เกิดจากแรงดันไฟ Back EMF จากขดลวดสนามตกคร่อมขดลวดอาร์เมเจอร์ ส่วนเอาต์พุตคือแรงบิดเหนี่ยวนำที่โรเตอร์และแรงดันไฟ Back EMF

บล็อกหมายเลข 3 และ 4 คือส่วนทางกล โดยมีอินพุตเป็นแรงบิดและแรงบิดเหนี่ยวนำจากโรเตอร์ ซึ่งจะให้ความเร็วเชิงมุมออกมา แล้วนำมาผ่านระบบทดกำลัง ทำให้ได้ความเร็ว ซึ่งเป็นเอาต์พุตของบล็อกนี้

บล็อกหมายเลข 5 คือขดลวดอาร์เมเจอร์ ซึ่งรับเอาแรงดันไฟ Back EMF จากขดลวดสนามผ่านวงจรของตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไฟไหลผ่านไปยังขดลวดสนาม



รูปที่ 8 บล็อกไดอะแกรมของระบบ

7. รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ ECVT

เมื่อมีความต่างศักย์ตกคร่อมวงจรรอนุกรมของตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำของขดลวดสนามทำให้เกิดกระแสไฟไหลในวงจรซึ่งนำมาพิจารณาด้วยกฎความต่างศักย์ของเคอร์ชอฟฟ์(Kirchhoff's Voltage Law) ดังนี้

$$L_f \frac{di_f}{dt} = e_f - R_f i_f \quad (1)$$

กระแสไฟไหลผ่านวงจรถดลวดสนามทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถนำมาคิดเป็นความสัมพันธ์กับฟลักซ์(Flux, ϕ) โดยที่ K_f เป็นค่าคงที่ของขดลวดสนาม

$$\phi = K_f i_f \quad (2)$$

และเมื่อขดลวดอาร์เมเจอร์หมุนตัดผ่านสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำให้เกิดความต่างศักย์ที่เรียกว่า Back EMF, e_g มีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ของขดลวดอาร์เมเจอร์ (K_g) และความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (ω_m) ดังนี้

$$e_g = K_g \phi \omega_m \quad (3)$$

แต่เนื่องจากการวัดค่าฟลักซ์ทำได้ยาก จึงทำการตั้งตัวแปรใหม่เป็น λ โดยที่ตัวแปรใหม่นี้สามารถหาค่าได้จาก การทดลองจากสมการของ Back EMF

$$\lambda = K_g \phi \quad (4)$$

จัดรูปสมการ Back EMF ใหม่ได้เป็น

$$e_g = \lambda \omega_m \quad (5)$$

กระแสไหล (i_g) ในขดลวดอาร์เมเจอร์เหนี่ยวนำทำให้โรเตอร์หมุน ซึ่งทำให้เกิดแรงบิด (T_g) ตามสมการดังนี้

$$T_g = \lambda i_g \quad (6)$$

แรงบิดสุทธิ (T_t) ของหุ่นยนต์โคบอลทแบบระนาบ X-Y นี้คือผลรวมของแรงบิดจากทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้า (T_g) กับแรงบิดอินพุตจากมือผู้ใช้งาน (T_f)

$$T_t = T_g + T_f \quad (7)$$

ความเร็วของมอเตอร์สามารถหาได้จากแรงบิดสุทธิและโมเมนต์ของไจเรเตอร์ (J) และความเร็ว (V) ที่มีจ็บเกิดจากความเร็วเชิงมุม (ω) ของมอเตอร์กับอัตราทด (R)

$$T_t = J \frac{d\omega}{dt} \quad (8)$$

$$V = \omega R \quad (9)$$

8. สรุปและงานวิจัยที่กำลังดำเนินการอยู่

งานวิจัยนี้นำเสนอรูปแบบใหม่ของระบบปรับเปลี่ยนอัตราทดอย่างต่อเนื่องชนิด (ECVT) โดยใช้บอนด์กราฟและบล็อกไดอะแกรมในการออกแบบระบบทางคณิตศาสตร์ ปัจจุบันกำลังทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ λ เพื่อนำไปสู่การจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์ (Simulation) ให้มีความเที่ยงตรงมากขึ้นและทดลองจริงกับหุ่นยนต์โคบอลทระนาบ X-Y แบบใช้ชีวิที่ชนิดไฟฟ้าเพื่อนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

9. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อ.ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับคำแนะนำทางด้านไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wannasuphprasit, W., (1999), "Cobot: Collaborative Robots", Ph.D. Dissertation, Northwestern University
- [2] M. Peshkin, J.E. Colgate, P. Akella, W. Wannasuphprasit, B. Gillespie, C. Moore, "Cobot architecture", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 17, No. 4, August 2001
- [3] ศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข, "การออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์โคบอลทสามมิติ," วิทยานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [4] C. Moore, "Continuously Variable Transmission for Serial Link Cobot Architectures," Master Thesis, Mechanical Engineering, Northwestern University.
- [5] W. Wannasuphprasit, S.Chanphat, "A Novel Fluid Haptic Interface," Industrial Technology, 2002. IEEE ICIT '02. 2002 IEEE International Conference on, Volume: 1, 11-14 Dec. 2002 Pages: 359 - 364 vol.1
- [6] Dean C. Karnopp, Donald L. Margolis, Ronald C. Rosenberg, System Dynamics Modeling and Simulation of Mechatronic Systems, JOHN WILEY & SONS, INC., 2000

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ณัฐวุฒิ วิริยะกิติกุล เกิดวันที่ 18 ธันวาคม พ.ศ.2520 ณ. จังหวัดสุราษฎร์ธานี ศึกษา
ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนท่าชนะ และนั่นเข้าศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายที่
โรงเรียนกุนนทีรุทธารามวิทยาคม จากนั้นเข้าศึกษาต่อที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดลและสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2542 ศึกษาต่อในระดับ
ปริญญาโทที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและสำเร็จการศึกษาวิศวกรรม
ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย