แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า

Mathematics Model of Electrical Continuously Variable Transmission

วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์, 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 การควบคุมสัดส่วนอัตราทดจะปรับโดยการควบคุมส่วนวงจรไฟฟ้าของทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าของแต่ละแนวแกน การนำอุปกรณ์ไฟฟ้าเข้ามาใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ทางกลในระบบทดกำลังทำให้เกิดข้อดีในการลดชิ้นส่วนทางกลโดยถูกทดแทนด้วยสายไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าโดยใช้วิธีบอนด์กราฟและนอกเหนือจากนั้นทีมวิจัยได้นำเสนอบล็อกไดอะแกรมของระบบอีกด้วย

Abstract

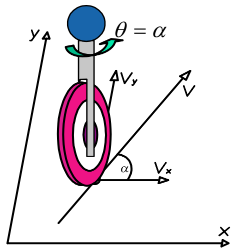
This paper presents a new concept and a mathematic model of the electrical-continuously variable transmission (ECVT). The fundamental idea of electrical-continuously variable transmission is presented. In this research, separately excited dc motor (SEDC motor) is used as the transducer. A transmission 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 โดยความหมายแล้วระบบทดกำลังคือระบบปรับเปลี่ยนค่าอินพุทด้วยค่าอัตราทดของระบบทดกำลังกลายเป็นเอาท์พุทของระบบ อินพุทและเอาท์พุทในที่นี้สามารถเป็นค่าต่างๆอย่างเช่น 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]

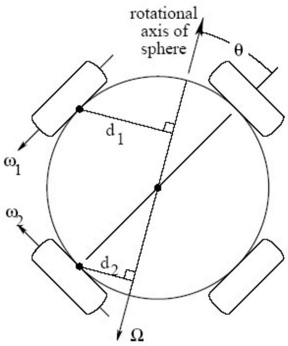
2.ซีวีทีในหุ่นยนต์โคบอท

หุ่นยนต์โคบอทเป็นหุ่นยนต์รูปแบบใหม่ที่ถูกออกแบบมาเพื่อทำงานร่วมกับมนุษย์ในพื้นที่ทำงานเดียวกันได้อย่างปลอดภัย หุ่นยนต์โคบอทเป็นอุปกรณ์แบบแพสซีฟ (Passive) เพราะหุ่นยนต์โคบอทไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยตัวเองเนื่องจากตัวหุ่นยนต์โคบอทไม่ได้ใช้แรงจากอุปกรณ์ขับ (Actuator) ขับโดยตรง แต่ใช้ซีวีทีทดกำลังจากผู้ใช้งาน ดังนั้นหุ่นยนต์โคบอทจะเคลื่อนที่ได้ก็ต่อเมื่อมีผู้ใช้งานออกแรงพาหุ่นยนต์โคบอทเคลื่อนที่ไปเท่านั้น เมื่อผู้ใช้หยุดออกแรง หุ่นยนต์โคบอทจะหยุดการเคลื่อนที่ในทันที ซีวีทีเป็นส่วนประกอบสำคัญของหุ่นยนต์โคบอท ที่ผ่านมาได้มีการนำซีวีที 3 ชนิดมาใช้สร้างหุ่นยนต์โคบอท ชนิดแรกคือ ซีวีทีแบบล้อ[2] หลักการของซีวีทีแบบล้อคือปรับเปลี่ยนอัตราทดโดยใช้การปรับมุมของล้อซึ่งเทียบกับแกนอ้างอิงในระนาบดังรูปที่ 1 ข้อดีของซีวีทีแบบนี้คือปรับเปลี่ยนอัตราได้ง่ายและสามารถสร้างได้ง่าย ข้อเสียคือต้องใช้พื้นระนาบในการทดกำลัง ดังนั้นการพัฒนาสร้างหุ่นยนต์โคบอทที่มีโครงสร้างซับซ้อนหรือมีองศาความอิสระสูง เช่น หุ่นยนต์โคบอทแบบ 3 มิติ โดยใช้ซีวีทีแบบนี้ทำได้ยาก



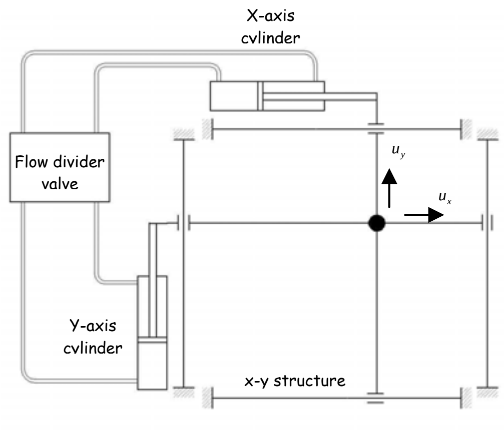
รูปที่ 1 ซีวีทีแบบล้อ [3]

ซีวีทีอีกประเภทหนึ่งที่ใช้ในการสร้างหุ่นยนต์โคบอทคือซีวีทีแบบทรงกลม[4] ดังในรูปที่ 2 หลักการทำงานของซีวีทีแบบนี้คือการปรับเปลี่ยนแกนหมุนของลูกทรงด้วยล้อซึ่งทำให้ระยะจากแกนหมุนถึงจุดสัมผัสของล้ออินพุทเปลี่ยนไป ข้อดีของซีวีทีแบบทรงกลมคือการนำไปใช้พัฒนาสร้างเป็นหุ่นยนต์โคบอทแบบ 3 มิติได้ ข้อเสียคือจำเป็นต้องมีหนึ่งลูกทรงกลมต่อหนึ่งค่าอัตราทดของซีวีทีซึ่งจะทำให้เป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาสร้างหุ่นยนต์โคบอทที่มีโครงสร้างซับซ้อน



รูปที่ 2 ซีวีทีแบบทรงล้อ [4]

ซีวีทีในงานวิจัยล่าสุดที่ใช้ในการสร้างหุ่นยนต์โคบอทคือซีวีทีแบบของไหล[5] ดังแสดงในรูปที่ 3 หลักการทำงานของซีวีทีแบบของไหลคือปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของของไหลในกระบอกสูบ รายละเอียดของงานวิจัยซีวีทีแบบของไหลดูได้จากเอกสารอ้างอิง [5]



รูปที่ 3 ซีวีทีแบบของไหล [5]

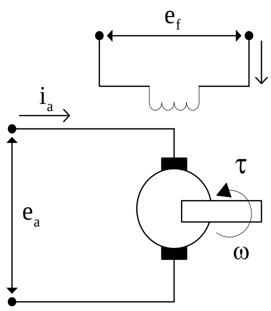
ซีวีที 2 แบบแรกที่ใช้ในการสร้างหุ่นยนต์โคบอทที่ผ่านมาจะใช้การทดกำลังทางกลเป็นหลักและต้องมีการเชื่อมต่อทางกล ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาสร้างหุ่นยนต์โคบอทหรือการประยุกต์ใช้กับระบบทางกลที่มีโครงสร้างซับซ้อนหรือมีจำนวนองศาความอิสระสูงๆ จากปัญหาตรงจุดนี้ทำให้เกิดแนวความคิดการนำอุปกรณ์ทางไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์ทางกลในการสร้างอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้า(Electrical Continuously Variable Transmission, ECVT) หรืออีซีวีที ข้อดีของการนำระบบไฟฟ้ามาใช้อีกข้อหนึ่งคือการทดแทนการใช้ชิ้นส่วนทางกลในการส่งกำลังจากซีวีทีตัวหนึ่งไปยังซีวีทีอีกตัวหนึ่งด้วยสายไฟ

3.ซีวีทีชนิดไฟฟ้า

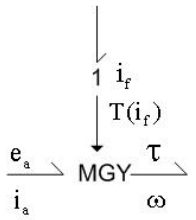
หลักการทำงานของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดไฟฟ้าคือการนำทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าตั้งแต่สองตัวขึ้นไปมาต่อกัน โดยปรับเปลี่ยนอัตราทดด้วยการควบคุมส่วนวงจรไฟฟ้าของทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้า ในงานวิจัยชิ้นนี้ทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าคือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้น ซึ่งอาจจะใช้อุปกรณ์ลักษณะอื่นก็ได้ ทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้าสามารถทำหน้าเป็นทั้งมอเตอร์และเจเนอเรเตอร์ในตัวเดียวกัน

4. แบบจำลองทางบอนด์กราฟของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้น

งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำวิธีการหาโมเดลแบบบอนด์กราฟ[6] ซึ่งวิธีการหาโมเดลแบบบอนด์กราฟสามารถอธิบายให้เข้าใจถึงระบบได้ง่าย เพราะอธิบายด้วยพลังงานที่ไหลเข้าออกระบบไม่ว่าจะเป็นระบบทางกล, ระบบไฟฟ้า หรือระบบอื่นๆ สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้น (รูปที่ 4) เป็นระบบผสมกันระหว่างระบบทางกลกับระบบไฟฟ้า ในบอนด์กราฟพิจารณามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้นเป็นทรานส์ดิวเซอร์ชนิดไจเรเตอร์แบบมอดูเลต (Modulated Gyrator, MGY) [6] ดังรูปที่ 5

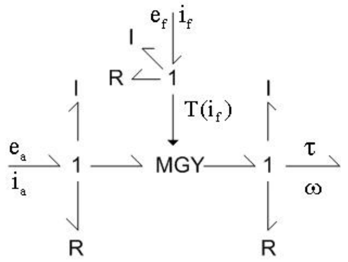


รูปที่ 4 รูปวงจรเปรียบเทียบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้น



รูปที่ 5 บอนด์กราฟของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดไจเรเตอร์แบบมอดูเลต

การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดแยกกระตุ้นคือเปลี่ยนพลังงานของขดลวดอาร์เมเจอร์($e_a i_a$) ไปเป็นพลังงานของเพลา ($\tau\omega$) ภายใต้การเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสนาม สนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้นจะไม่คงที่ ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชั่นของกระแสที่ไหลในขดลวดสนาม มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้นเขียนเป็นโมเดลแบบบอนด์กราฟดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 โมเดลบอนด์กราฟของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้น

สมการความสัมพันธ์ของไจเรเตอร์แบบมอดูเลตสามารถเขียนได้เป็น

$$e_a = T(i_f)\omega \quad (10)$$

$$T(i_f)i_a = \tau \quad (11)$$

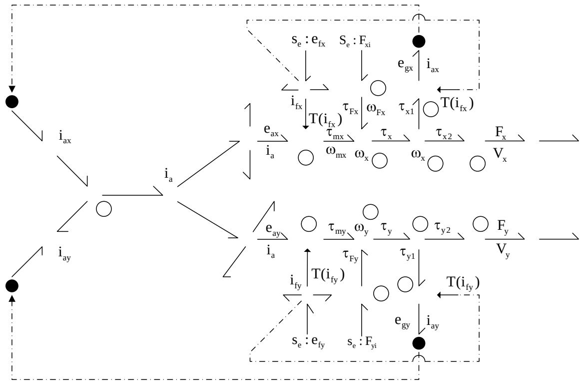
เมื่อ $T(i_f)$ คือค่าสัมประสิทธิ์ของทรานส์ดิวเซอร์ สามารถสมมุติให้ $T(i_f)$ เป็นสัดส่วนกับกระแสที่ไหลในขดลวดสนาม โดยที่ A คือค่าคงที่

$$T(i_f) = Ai_f \quad (12)$$

5. แบบจำลองของระบบ ECVT

จากแนวความคิดพื้นฐานของระบบ ECVT ที่ได้กล่าวมาแล้ว งานวิจัยได้ใช้บอนด์กราฟในการออกแบบจำลองของระบบ ECVT ซึ่งจะได้บอนด์กราฟไดอะแกรมของระบบ ECVT ดังแสดงในรูปที่ 7 ระบบประกอบด้วยมอดูเลตไจเรเตอร์ (MGY) สองตัว ซึ่งคือทรานสดิวเซอร์กลไฟฟ้า ขดลวดของมอเตอร์ทั้งสองเชื่อมต่อกัน (Coupled) โดยที่ค่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับขดลวดสนามของมอเตอร์ทั้งสอง (e_{fx}, e_{fy}) นั้นถูกควบคุมอย่างอิสระ อัตราส่วนของสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ทั้งสอง ทำให้เอาท์พุท (ทางกลจากเพลามอเตอร์) ทั้งสองมีอัตราทดค่าดังนั้นการควบคุมสนามแม่เหล็กทำให้สามารถควบคุมอัตราทดของระบบได้

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


รูปที่ 7 บอนด์กราฟไดอะแกรมของระบบ ECVT

จากบอนด์กราฟไดอะแกรมของระบบ ECVT ในรูปที่ 7 สามารถสร้างความสัมพันธ์ของแต่ละอิลิเมนต์ของจังก์ชั่นและทรานสฟอร์เมอร์ สามารถหาได้ดังนี้ จังก์ชั่นหนึ่ง (One Junction) [6] หมายเลข 1 ทำหน้าที่สร้างความสัมพันธ์ของแรงดัน Back EMF จากมอตดูเลตไจเรเตอร์หมายเลข 10 และ 11 โดยมีสมการ

$$i_a = i_{ax} - i_{ay} \quad (13)$$

$$v_a = v_{ax} - v_{ay} \quad (14)$$

มอดูเลตไจเรเตอร์หมายเลข 2(แกน x) และ 3(แกน y) คือทรานสดิวเซอร์กลไฟฟ้าที่ทำหน้าเป็นมอเตอร์ ซึ่งรับกระแสและความต่างศักย์จากจังก์ชั่นหนึ่ง แล้วแปลงเป็นแรงบิดกับความเร็วเชิงมุม โดยอาศัยอัตราทดที่แปรผันตามกระแสของขดลวดจากค่าอินพุทที่จ่ายเข้าไปเป็นความต่างศักย์ สมการความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความเร็วเชิงมุมและสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแสของแต่ละแกนได้ดังนี้

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

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

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

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

พิจารณาจังก์ชั่นหนึ่งหมายเลข 4(แกน x) และ 5(แกน y) ได้สมการความสัมพันธ์ของแรงบิดที่เข้าออกและสมการของความเร็วเชิงมุมที่เข้าออกจังก์ชั่นหนึ่ง

$$\tau_x = \tau_{mx} + \tau_{Fx} \quad (19)$$

$$\omega_{mx} = \omega_{Fx} = \omega_x \quad (20)$$

$$\tau_y = \tau_{my} + \tau_{Fy} \quad (21)$$

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

พิจารณาทรานสฟอร์เมอร์หมายเลข 6(แกน x) และทรานสฟอร์เมอร์ หมายเลข 7(แกน y) สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับแรงและสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับความเร็วเชิงเส้นของแต่ละแนวแกน โดยที่ R คืออัตราทดของทรานสฟอร์เมอร์

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

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

$$\tau_{Fx} = F_x \times R \quad (25)$$

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

จากจังก์ชั่นหนึ่งหมายเลข 8(แกน x) และหมายเลข 9(แกน y) ทำหน้าที่แบ่งแรงบิดเป็นสองส่วน ส่วนแรกจ่ายให้มอตดูเลตไจเรเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นเจนเนอเรเตอร์ผลิตแรงดัน Back EMF ในวงจรอาร์เมเจอร์ ส่วนสุดท้ายส่งเข้าไปในทรานสฟอร์เมอร์ซึ่งถูกแปลงไปเป็นแรงที่มือจับ เขียนสมการได้ดังนี้

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

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

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

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

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

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

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

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

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

และความเร็วเชิงมุมของทรานสดิวเซอร์กลไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นความเร็วเชิงเส้นโดยทรานสฟอร์เมอร์ที่หมายเลข 12 และ 13 มีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

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

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

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

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

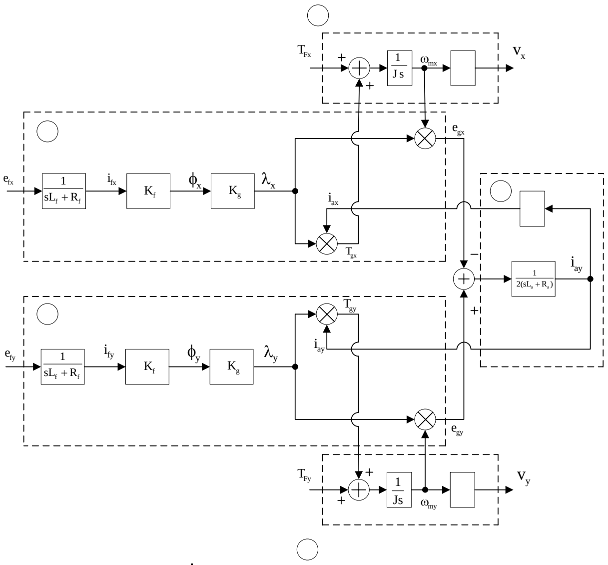
6. บล๊อกไดอะแกรมของ ECVT

จากบอนด์กราฟไดอะแกรมที่นำเสนอ สามารถสร้างบล๊อกไดอะแกรมของระบบ ECVT ซึ่งทำให้เห็นกายภาพของระบบมากขึ้น โดยแยกส่วนของไฟฟ้ากับส่วนทางกลออกจากกันดังรูปที่ 8 **ส่วนไฟฟ้า**ประกอบด้วยสองส่วนคือส่วนขดลวดสนามแม่เหล็กกับขดลวดอาร์เมเจอร์ของทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้า ขดลวดแต่ละขดนี้สามารถคิดเป็นวงจรอนุกรมของตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ **ส่วนทางกล**ประกอบด้วยชุดทดกำลังและโรเตอร์ของทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้า

บล็อกหมายเลข 1 และ 2 คือขดลวดสนามในแต่ละแนวแกน ซึ่งมีอินพุทคือความต่างศักย์ตกคล่อมขดลวด, ความเร็วเชิงมุมจากชุดทดกำลังและกระแสไฟที่เกิดจากแรงดันไฟ Back EMF จากขดลวดสนามตกคล่อมขดลวดอาร์เมเจอร์ ส่วนเอาท์พุทคือแรงบิดเหนี่ยวนำที่โรเตอร์และแรงดันไฟ Back EMF

บล็อกหมายเลข 3 และ 4 คือส่วนทางกล โดยมีอินพุทเป็นแรงบิดและแรงบิดเหนี่ยวนำจากโรเตอร์ ซึ่งจะได้ความเร็วเชิงมุมออกมา แล้วนำมาผ่านระบบทดกำลัง ทำให้ได้ความเร็ว ซึ่งเป็นเอาท์พุทของบล็อกนี้

บล็อกหมายเลข 5 คือขดลวดอาร์เมเจอร์ ซึ่งรับเอาแรงดันไฟ Back EMF จากขดลวดสนามผ่านวงจรของตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไฟไหลผ่านไปยังขดลวดสนาม



รูปที่ 8 บล๊อกไดอะแกรมของระบบ

7.รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ ECVT

เมื่อมีความต่างศักย์ตกคล่อมวงจรอนุกรมของตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำของขดลวดสนามทำให้เกิดกระแสไฟไหลในวงจรซึ่งนำมาพิจารณาด้วยกฎความต่างศักย์ของเคอร์ชอฟฟ์(Kirchhoff's Voltage Law) ดังนี้

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

กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรขดลวดสนามทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถนำมาคิดเป็นความสัมพันธ์กับฟลักซ์(Flux, ϕ) โดยที่ K_f เป็นค่าคงที่ของขดลวดสนาม

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

และเมื่อขดลวดอาร์เมเจอร์หมุนตัดผ่านสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำให้เกิดความต่างศักย์ที่เรียกว่า Back EMF, e_g มีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ของ

ขดลวดอาร์เมเจอร์ (K_g) และความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (ω_m) ดังนี้

$$e_g = K_g \phi \omega_m \tag{3}$$

แต่เนื่องจากการวัดหาค่าฟลักซ์ทำได้ยาก จึงทำการตั้งตัวแปรใหม่เป็น λ โดยที่ตัวแปรใหม่นี้สามารถหาค่าได้จากการทดลองจากสมการของ Back EMF

$$\lambda = K_g \phi \tag{4}$$

จัดรูปสมการ Back EMF ใหม่ได้เป็น

$$e_g = \lambda \omega_m \tag{5}$$

กระแสไหล(i_a)ในขดลวดอาร์เมเจอร์เหนี่ยวนำทำให้โรเตอร์หมุน ซึ่งทำให้เกิดแรงบิด(T_g) ตามสมการดังนี้

$$T_g = \lambda i_a \tag{6}$$

แรงบิดสุทธิ(T_t)ของหุ่นยนต์โคบอทแบบระนาบ X-Y นี้คือผลรวมของแรงบิดจากทรานส์ดิวเซอร์กลไฟฟ้า (T_g) กับแรงบิดอินพุทจากมือผู้ใช้งาน (T_F)

$$T_t = T_g + T_F \tag{7}$$

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

$$T_t = J\frac{d\omega}{dt} \tag{8}$$

$$V = \omega R \tag{9}$$

8. สรุปและงานวิจัยที่กำลังดำเนินงานอยู่

งานวิจัยนี้นำเสนอรูปแบบใหม่ของระบบปรับเปลี่ยนอัตราทดอย่างต่อเนื่องชนิด (ECVT) โดยใช้บอนด์กราฟและบล๊อกไดอะแกรมในการออกแบบระบบทางคณิตศาสตร์ ปัจจุบันกำลังทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ λ เพื่อนำไปสู่การจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์ (Simulation) ให้มีความเที่ยงตรงมากขึ้นและทดลองจริงกับหุ่นยนต์โคบอทระนาบ X-Y แบบใช้ซีวีทีชนิดไฟฟ้าเพื่อนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

9. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อ.ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วาณิชย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับคำแนะนำทางด้านไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

[1] Wannasuphoprasit, W., (1999), “Cobot: Collaborative Robots”, Ph.D. Dissertation, Northwestern University

[2] M. Peshkin, J.E. Colgate, P. Akella, W. Wannasuphoprasit, B. Gillespie, C. Moore, “Cobot architecture’’, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 17, No. 4, August 2001

[3] ศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข, “การออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์โคบอทสามมิติ,’’ วิทยานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[4] C. Moore, “Continuously Variable Transmission for Serial Link Cobot Architectures,’’ Master Thesis, Mechanical Engineering, Northwestern University.

[5] W. Wannasuphoprasit, 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