ปฏิบัติการระบบควบคุม

การควบคุมความเร็วรอบสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

(Speed Control of DC Motor with PID Controller)

1. วัตถุประสงค์

1.1 เพื่อศึกษาการควบคุมแบบวงเปิด (Open-loop control) และการควบคุมแบบวงปิด (Closed-loop control) ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID: Proportional, Integral and Derivative)

1.2 เพื่อศึกษาการควบคุมความเร็วรอบสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1.3 เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้งานโปรแกรม MATLAB/Simulink และ RAPCON platform

2. ระบบควบคุม

มนุษยเชื่อวาระบบทางกายภาพใดๆ ก็ตาม สามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตไดอยางสมบูรณดวยสมการทางคณิตศาสตร และมนุษยก็สามารถพยากรณสิ่งที่จะเกิดขึ้นกับระบบได้จากสมการคณิตศาสตรดังกลาวรวมทั้งบังคับควบคุมใหสิ่งที่จะเกิดขึ้นตอไปนั้น เปนไปตามความตองการอยางอัตโนมัติ เราเรียกสมการคณิตศาสตรดังกลาววา “**แบบจำลองทางคณิตศาสตร (Mathematical models)**” การควบคุมสั่งการใหระบบมีพฤติกรรมที่ตองการนั้นจะอาศัยตัวควบคุม (controller) ที่ไดรับการออกแบบบนพื้นฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตรของระบบกายภาพ

ระบบ (System) คือ การทำงานร่วมกันเพื่อจุดประสงค์เดียวกันให้เกิดผลสำเร็จ

ระบบควบคุม (Control System) คือ การจัดองค์ประกอบส่วนต่างๆ ให้มีการทำงานสัมพันธ์กัน เพื่อบังคับหรือปรับปรุงให้ระบบทำงานตามที่ต้องการ

พลานต์ (Plant) คือ สิ่งที่จะถูกควบคุม อาจเป็นเครื่องมือ เครื่องจักร หรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงาน

การรบกวน (Disturbance) คือ สัญญาณการรบกวนที่เข้ามาในระบบ ทำให้ค่าเอาต์พุตของระบบเปลี่ยนไป

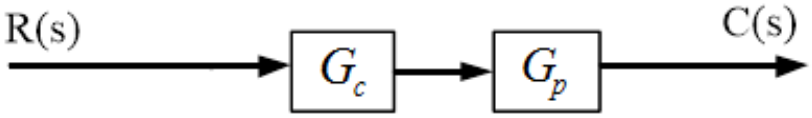
การควบคุมป้อนกลับ (Feedback) คือ การพยายามลดค่าแตกต่างระหว่างเอาต์พุตกับค่าอ้างอิง (Set point) หรืออินพุต

ระบบการควบคุมป้อนกลับ (Feedback Control System) คือ ระบบการควบคุมที่รักษาค่าเอาต์พุตได้ใกล้เคียงกับค่าอินพุต โดยมีการเปรียบเทียบสัญญาณทั้งสองนี้ ผลจากการเปรียบเทียบจะเป็นค่าผิดพลาด (Error) ซึ่งเป็นสัญญาณที่ใช้ป้อนเข้าสู่ตัวควบคุม (Controller)

โครงสรางของการควบคุมจะแบงออกเปน 2 ลักษณะ ดังนี้

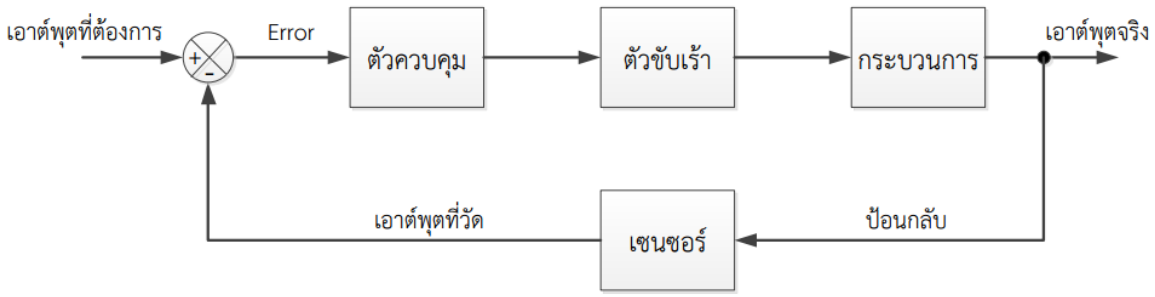
2.1 ระบบควบคุมแบบเปิด (Open-loop control system) เป็นระบบที่ค่าเอาต์พุตไม่มีผลต่อการควบคุมขบวนการของระบบ คือ ไม่มีการนำเอาค่าเอาต์พุตที่ได้กลับมาเปรียบเทียบกับค่าอินพุตที่ป้อนให้กับระบบ ดังนั้นจะต้องมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานที่คงที่สำหรับอินพุตอ้างอิงแต่ละตัว ทำให้ความแม่นยำของระบบขึ้นอยู่กับการปรับแต่ง (Calibration) ถ้ามีการรบกวนในระบบวงเปิด ระบบจะไม่สามารถทำงานตามที่ต้องการได้ การควบคุมแบบวงเปิดในทางปฏิบัติจะเหมาะกับงานที่รู้ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต และต้องไม่มีการรบกวน

ทั้งภายในและภายนอก เพราะระบบไม่มีการป้อนกลับ แสดงได้ดังรูปที่ 1 ข้อสังเกตว่าระบบควบคุมใดก็ตามที่มีการทำงานบนพื้นฐานของเวลาหรือทำงานตามเวลาที่กำหนดจะเป็นการควบคุมแบบวงเปิด ตัวอย่างการควบคุมในลักษณะนี้ที่เห็นได้ชัดได้แก่ เครื่องซักผ้า คือ การแช่ผ้า การซัก และการล้าง โดยเครื่องจะทำงานตามเวลา เครื่องไม่ได้มีการวัดเอาต์พุตซึ่งคือ ความสะอาดของเสื้อผ้า หรือการควบคุมสัญญาณไฟจราจรก็เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของการควบคุมแบบวงเปิด



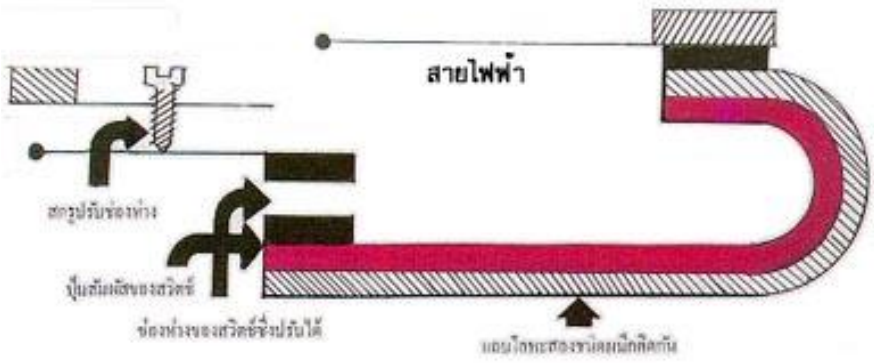
รูปที่ 1 ระบบควบคุมแบบเปิด

2.2 ระบบควบคุมแบบปิด (Closed-loop control system) เป็นระบบที่นำสัญญาณจากเอาต์พุตของระบบ ป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับระบบ ซึ่งผลต่างระหว่างสัญญาณทั้งสองที่นำมาเปรียบเทียบนั้นจะเป็นค่าผิดพลาด (Error) เพื่อที่จะใช้เป็นสัญญาณป้อนเข้าตัวควบคุม (Controller) ให้ตัวควบคุมนำไปสร้างสัญญาณควบคุมใหม่เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบและทำให้เอาต์พุตของระบบเข้าสู่ค่าที่ต้องการ (Set point) แสดงระบบควบคุมแบบปิดได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระบบควบคุมแบบปิด

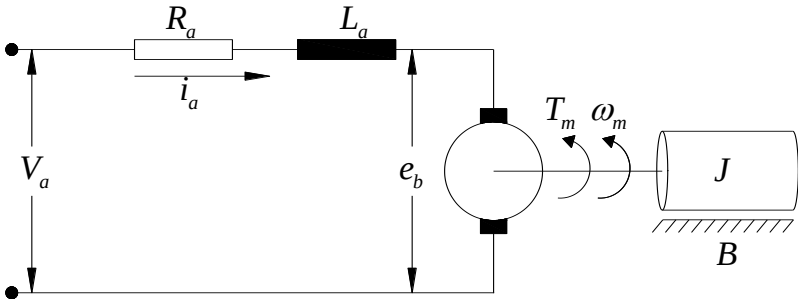
ตัวอย่างการควบคุมแบบวงปิดได้แก่ ระบบควบคุมอุณหภูมิภายในห้อง อุณหภูมิจริงภายในห้องจะถูกวัดและนำมาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอ้างอิงหรืออุณหภูมิที่ต้องการ แล้วสั่งการให้เทอร์มอสแตต (Thermostat) เปิดหรือปิดอุปกรณ์ทำความร้อนหรือทำความเย็น เพื่อรักษาอุณหภูมิภายในห้องไว้ในระดับต้องการโดยไม่ต้องคำนึงถึงสภาพอุณหภูมิภายนอกห้อง หรือจะเป็นการควบคุมด้วยวิธีไฮดรอลิก ได้แก่ การใช้ทุ่นลอย สำหรับควบคุมระดับน้ำ หรือ วิธีควบคุมด้วยความร้อน ได้แก่ การใช้แถบโลหะสองชนิดผนึกติดกัน สำหรับควบคุมความร้อน เนื่องจากโลหะต่างชนิดกัน จะยืดหดไม่เท่ากัน แต่เมื่อถูกผนึกติดกันแล้วมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ทำให้แถบโลหะนี้โก่งงอ เมื่อตรึงปลายหนึ่งเอาไว้แล้ว การโก่งงอนี้ทำให้อีกปลายหนึ่งใช้เป็นสวิตช์ไฟฟ้าได้ เครื่องแบบนี้มักจะใช้ควบคุมอุณหภูมิในตู้เย็นหรือห้องปรับอากาศให้มีอุณหภูมิคงที่ เมื่ออุณหภูมิลดลงจนเย็นเกินไปปลายแถบโลหะจะถ่างออกจากปุ่มสัมผัส ทำให้กระแสไฟฟ้าหยุด แสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การใช้แถบโลหะสองชนิดผนึกติดกัน สำหรับควบคุมความร้อน

3. การวิเคราะห์วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet DC motor) สามารถเขียนเป็นวงจรที่ประกอบไปด้วยโครงสร้างทางไฟฟ้าและโครงสร้างทางกล แสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 Permanent magnet DC motor model

ซึ่งสามารถแยกโครงสร้างต่างๆ ได้ ตามสัญลักษณ์ ต่อไปนี้

V_a armature voltage (V) R_a armature resistance (Ω) L_a armature inductance (H)

i_a armature current (A) ω_m rotation speed (rad/s) J moment of inertia (kg.m^2)

e_b back electromotive force voltage (V) T_m motor torque (N.m)

K_b back electromotive force coefficient (V.s/rad) K_t torque coefficient (N.m/A)

B coefficient of viscous friction (N.m.s/rad) T_d external load disturbance (N.m)

สมการทางไฟฟ้าและสมการทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แสดงได้ดังสมการที่ (1)-(4)

$$V_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \quad (1)$$

$$e_b(t) = K_b \omega_m(t) \quad (2)$$

$$T_m(t) = K_t i_a(t) \quad (3)$$

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

การแปลงลาปลาส (Laplace transform) สมการที่ (1)-(4) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5)-(8) ตามลำดับ

$$V_a(s) = R_a I_a(s) + sL_a I_a(s) + E_b(s) \quad (5)$$

$$E_b(s) = K_b \omega_m(s) \quad (6)$$

$$T_m(s) = K_t I_a(s) \quad (7)$$

$$sJ\omega_m(s) + B\omega_m(s) + T_L(s) = T_m(s) \quad (8)$$

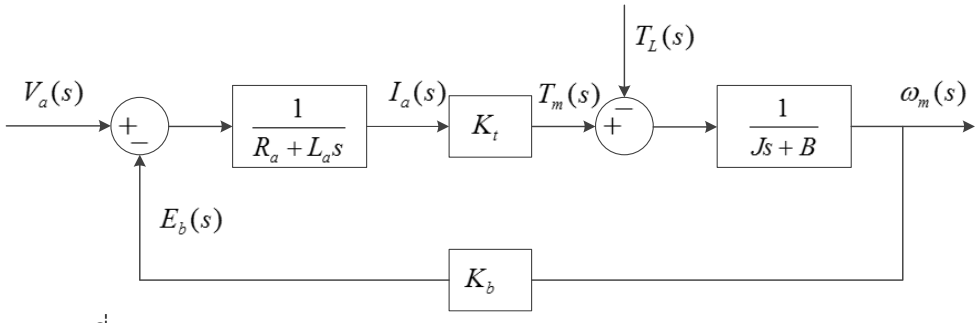
ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและแรงดันไฟฟ้าอินพุต แสดงได้ดังสมการที่ (9)

$$\frac{\omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{L_a Js^2 + (R_a J + L_a B)s + (R_a B + K_b K_t)} \quad (9)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่มีความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเชิงมุมและแรงดันไฟฟ้าอินพุต แสดงได้ดังสมการที่(10)

$$\frac{\theta_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{s(L_a Js^2 + (R_a J + L_a B)s + (R_a B + K_b K_t))} \quad (10)$$

บล็อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็วรอบสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงเปิด แสดงได้ดังรูปที่ 5

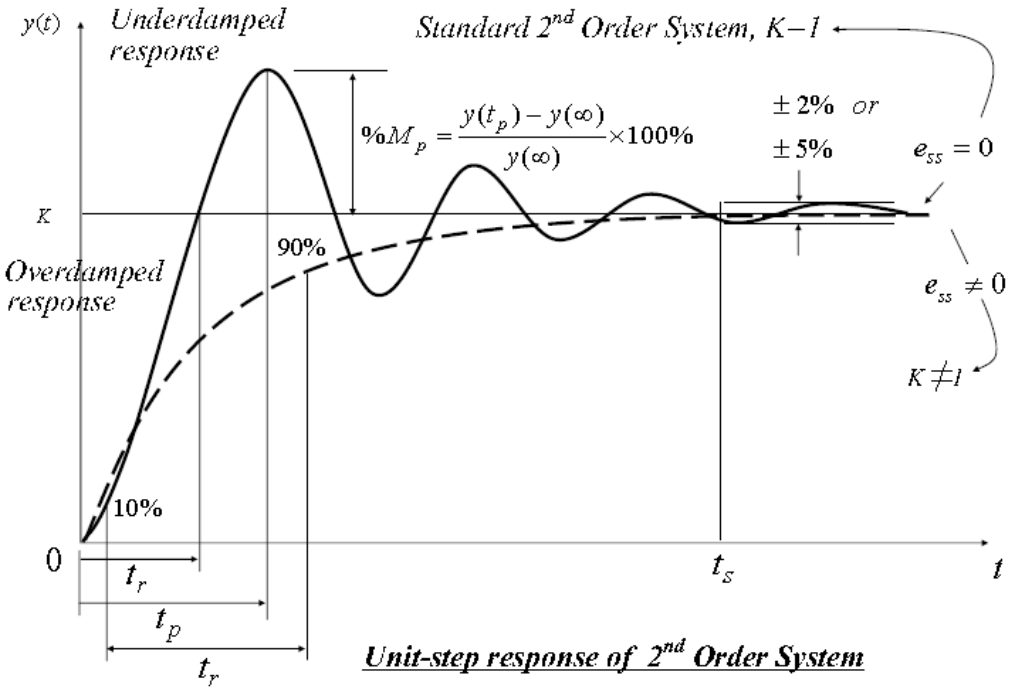


รูปที่ 5 Block diagram of open-loop speed control of the DC motor

4. การตอบสนองชั่วครู่และการตอบสนองในสภาวะคงตัว

การออกแบบระบบควบคุมให้มีสมรรถนะที่ดีตามต้องการจะกำหนดผลการตอบสนองไว้ก่อน โดยทั่วไประบบไม่สามารถตอบสนองได้อย่างทันที โดยจะแสดงการตอบสนองชั่วครู่ซึ่งอาจมีการสั่นไกวหรือมีการหน่วงในช่วงแรกก่อนที่จะเข้าสู่การตอบสนองในสภาวะคงตัวเมื่อเวลาผ่านไป การตอบสนองของระบบควบคุมขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานระบบเป็นหลัก ซึ่งโดยทั่วไประบบควรมีการตอบสนองที่รวดเร็วและมีอัตราการหน่วงที่เหมาะสม การกำหนดคุณลักษณะของการตอบสนองชั่วครู่ต่ออินพุต แสดงได้ดังรูปที่ 3 และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีดังนี้

1. Rise time (t_r) ช่วงเวลาที่การตอบสนองไต่ระดับจาก 10% ถึง 90% ของค่าสุดท้าย
2. Maximum Overshoot (M_p) ค่าสูงสุดของการตอบสนองที่วัดจากค่าสุดท้าย
3. Settling time (t_s) ช่วงเวลาที่การตอบสนองเริ่มเข้าสู่ค่าสุดท้ายภายในช่วงที่กำหนด 2% หรือ 5%
4. Delay time (t_d) ช่วงเวลาที่การตอบสนองมีค่าครึ่งหนึ่งของค่าท้ายสุด
5. Peak time (t_p) ช่วงเวลาที่การตอบสนองมีค่าสูงสุด
6. Steady-state error (e_{ss}) ค่าผิดพลาดของการตอบสนองในสภาวะคงตัวเทียบกับค่าอ้างอิง



รูปที่ 6 Response and transient characteristics of 2nd order system

4. ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID-controller)

การควบคุมระบบแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (P-controller) สัญญาณควบคุมจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสัญญาณความผิดพลาดที่เกิดจากผลต่างระหว่างค่าสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตของระบบที่ต้องการควบคุม จะมีคุณสมบัติของระบบควบคุมดังนี้

- ลดค่า Rise Time (tr) ทำให้ระบบทำงานเร็วขึ้นในช่วงแรก
- เพิ่ม Over Shoot (Mp) ทำให้ระบบแกว่งในช่วงเริ่มต้น แต่ส่งผลให้ค่า Steady State Error ลดลง

ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (I-controller) จะขึ้นอยู่กับค่าในอดีตไม่เหมือนกับตัวควบคุมแบบสัดส่วนซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าปัจจุบัน ตัวควบคุมแบบอินทิกรัลใช้เพื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว ขณะเดียวกันเสถียรภาพของระบบก็จะลดน้อยลงด้วย การควบคุมแบบอินทิกรัลเป็นการเพิ่มอันดับให้กับระบบ

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (D-controller) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจากกระบวนการนั้น

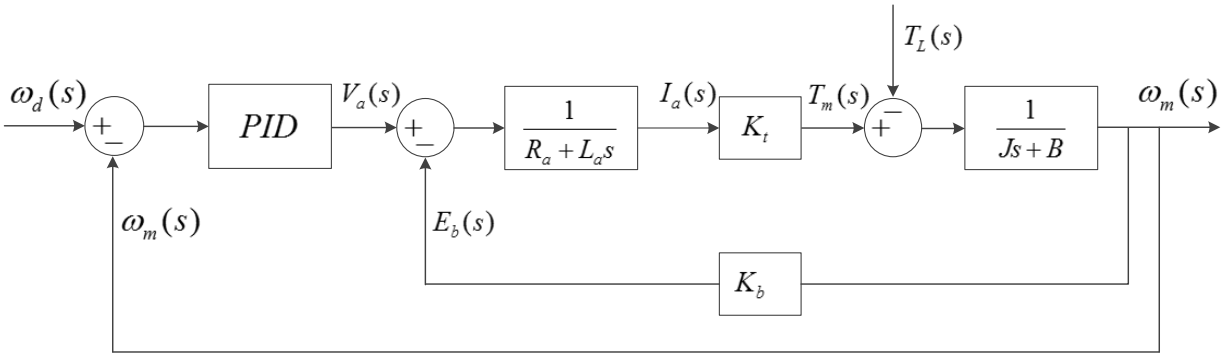
การใช้ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ร่วมกับตัวควบคุมแบบสัดส่วน เราเรียกว่า PD-controller ถ้าตัวควบคุมแบบสัดส่วนใช้ร่วมกับอินทิกรัลเรียกว่า PI-controller และถ้าใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับตัวควบคุมแบบอินทิกรัลและตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ จะเรียกว่า PID-controller โดยตัวควบคุมแบบอนุพันธ์จะช่วยเพิ่มค่าความหน่วงให้กับระบบที่ต้องการจะควบคุม ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น ขณะเดียวกันจะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมแบบอนุพันธ์เป็นสัญญาณที่เกิดจากการหาอนุพันธ์ของสัญญาณความผิดพลาด ดังนั้น ถ้าสัญญาณความผิดพลาดนั้นมีสัญญาณการรบกวนมาก สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจะกระเพื่อมค่อนข้างมากเนื่องจากค่าความชันของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงแปลงค่อนข้างมาก ซึ่งจะทำให้ระบบควบคุมของเราไม่มีเสถียรภาพได้

สมการของตัวควบคุมแบบสัดส่วน ตัวควบคุมแบบอินทิกรัลและตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ ที่มีอินพุตเป็นสัญญาณความผิดพลาด แสดงได้ดังสมการที่ (11) และการแปลงลาปลาส สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (12)

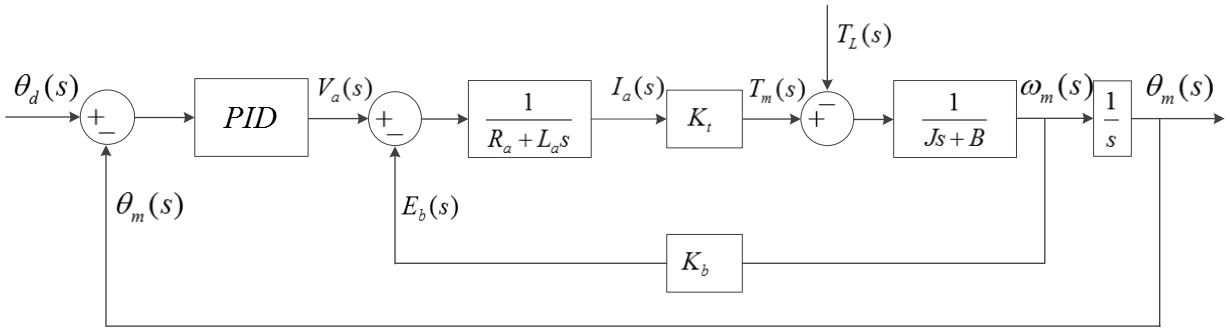
บล็อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็วรอบสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิดที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี แสดงได้ดังรูปที่ 7 และบล็อกไดอะแกรมการควบคุมเชิงตำแหน่งสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิดที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี แสดงได้ดังรูปที่ 8

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t)dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (11)$$

$$U(s) = \left(K_P(s) + \frac{K_I}{s} + K_D s \right) E(s) \quad (12)$$



รูปที่ 7 Block diagram of closed-loop speed control of the DC motor



รูปที่ 8 Block diagram of closed-loop position control of the DC motor

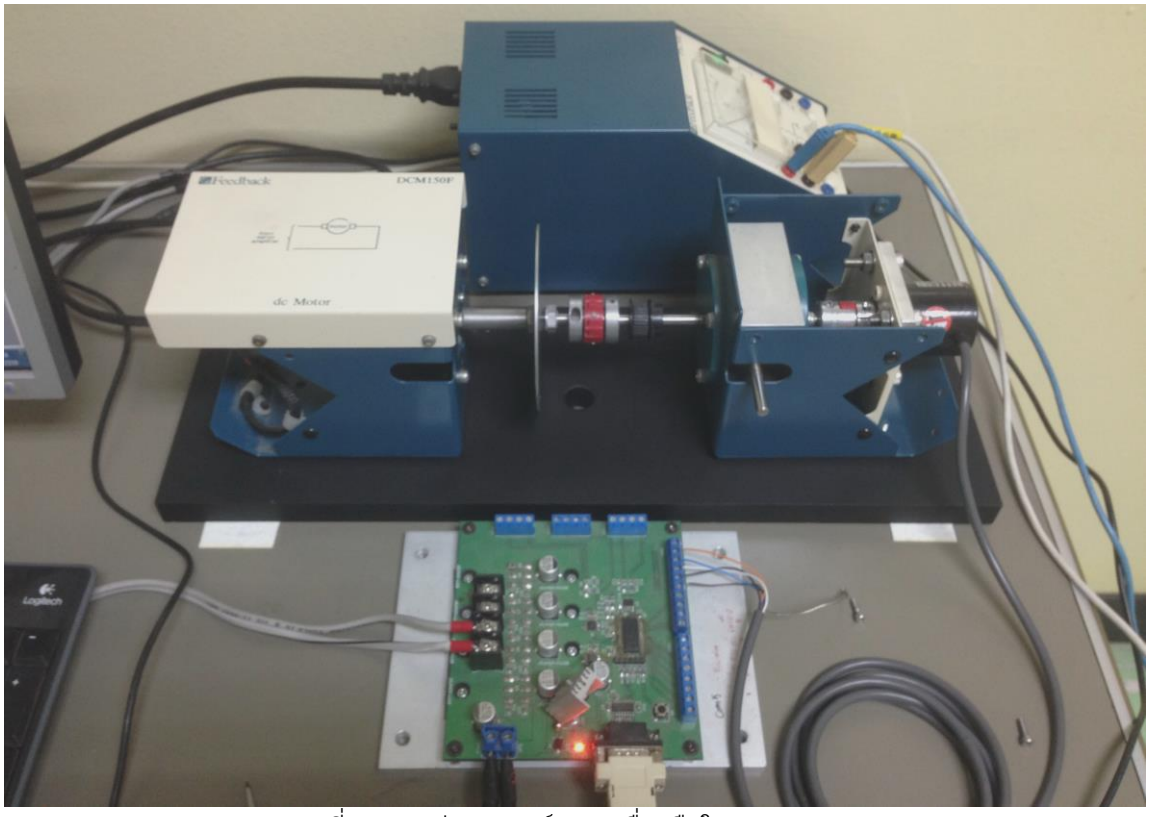
5. เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1.	เครื่องคอมพิวเตอร์	4	ชุด
	(โปรแกรม MATLAB/Simulink และโปรแกรม RAPCON)		
2.	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร	1	ชุด
3.	Rotary encoder	1	ชุด
4.	RAPCON platform	1	ชุด
5.	แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง	1	ชุด

ค่าตัวแปรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดลอง

R_a = 2.5 (Ω) K_b = 0.057 (V.s/rad) K_t = 0.052 (N.m/A)

L_a = 0.0025 (H) J = 140x10^{-7} (kg.m^2) B = 1x10^{-6} (N.m.s/rad)



รูปที่ 9 การต่ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง

6. ขั้นตอนการทดลอง

ตอนที่ 1 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงเปิด

1. เปิดโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อสร้างบล๊อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงเปิด ตามรูปที่ 5 และต่ออุปกรณ์การทดลองตามรูปที่ 9
2. ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่ 3V , 4V , 5V และ 6V ตามลำดับ บันทึกผลการทดลองลงในตารางที่-1 และบันทึกกราฟผลการทดลอง ในระหว่างการทดลองให้นักศึกษาสังเกตความเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุต (ความเร็วรอบ) ต่ออินพุต (แรงดัน) แล้วตอบคำถามท้ายการทดลองข้อ 1
3. ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงเปิดที่ 600 rpm ในกรณีมีภาระโหลด บันทึกผลการทดลองลงในตารางที่-2 และบันทึกกราฟผลการทดลอง แล้วตอบคำถามท้ายการทดลองข้อ 2

ตอนที่ 2 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิด

1. เปิดโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อสร้างบล๊อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิด ตามรูปที่ 7 และต่ออุปกรณ์การทดลองตามรูปที่ 9

2. ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิดใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี บันทึกผลการทดลองลงในตารางที่-3 และบันทึกกราฟผลการทดลอง แล้วตอบคำถามท้ายการทดลองข้อ 3
3. ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ 600 rpm แล้วทำการปรับแต่งอัตราขยายให้ได้ผลตอบสนองดังนี้ Setting time < 1 sec , Maximum overshoot ≈ 0% , Steady-state error ≈ 0% บันทึกค่าอัตราขยายที่ได้จากการทดลองลงในช่องว่างตารางที่-4 และบันทึกกราฟผลการทดลอง
4. จากการทดลองตอนที่ 2 ข้อ 3 ให้นักศึกษาทำการทดลองในกรณี**มี**ภาระโหลด บันทึกผลการทดลองลงในตารางที่-4 และบันทึกกราฟผลการทดลอง แล้วตอบคำถามท้ายการทดลองข้อ 4

ตารางที่-1 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงเปิด

Input voltage V_a (Volt)	Output speed ω_m (rpm) (Simulation)	Output speed ω_m (rpm) (measured)
3 V		
4 V		
5 V		
6 V		

ตารางที่-2 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงเปิดที่ 500 rpm ในกรณีมีภาระโหลด

Load	Input voltage V_a (Volt) (Simulation)	Input voltage V_a (Volt) (measured)

ตารางที่-3 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิด และใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี

ลักษณะการควบคุมความเร็วรอบ 500 (rpm)	Rise time (t_r) (sec)	Maximum Overshoot (M_p) (%)	Setting time (t_s) (sec)	Steady-state error (e_{ss}) (%)
P-control (Kp=0.01)				
P-control (Kp=0.05)				

P-control (Kp=0.10)				
PI-control (Kp=0.05, Ki=0.05)				
PI-control (Kp=0.05, Ki=0.20)				
PI-control (Kp=0.05, Ki=1.00)				
PD-control (Kp=0.05, Kd=0.0001)				
PD-control (Kp=0.05, Kd=0.0005)				
PD-control (Kp=0.05, Kd=0.0025)				
PID-control (Kp=0.05,Ki=0.20, Kd=0.0001)				
PID-control (Kp=0.05,Ki=0.20, Kd=0.0005)				
PID-control (Kp=0.05,Ki=0.20, Kd=0.0025)				

ตารางที่-4 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ความเร็วรอบ 600 rpm

Kp =_____Ki =_____Kd =_____

Load	Input voltage V_a (Volt)	Rise time t_r (sec)	Maximum Overshoot M_p (%)	Setting time t_s (sec)	Steady-state error e_{ss} (%)

7. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

8. คำถามท้ายการทดลอง

1. จงอธิบายการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงเปิดในกรณีในไม่มีภาระโหลด เมื่ออินพุต (แรงดัน) มีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลต่อระบบอย่างไร

2. ภาระโหลดที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงเปิดอย่างไร

3. จงอธิบายอิทธิพลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ Kp , Ki และ Kd ว่ามีผลต่อระบบควบคุมแบบวงปิดอย่างไร

4. จงอธิบายความแตกต่างระหว่างการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงเปิด และวงปิด

เอกสารอ้างอิง

1. จิระพล ศรีเสริฐผล, "Control system laboratory", Suranaree University of Technology, 2013.
2. สราวุฒิ สุจิตรจร, "การควบคุมอัตโนมัติ", Pearson, 2003.
3. Katsuhiko Ogata, "Modern control engineering fifth edition", Pearson, 2010.