

2102331: การทดลองระบบควบคุมป้อนกลับ  
ห้องปฏิบัติการพื้นฐานระบบควบคุม  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลอง CS04: การควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรง

วัตถุประสงค์

ศึกษาผลของการป้อนกลับแบบสัดส่วน (proportional) และแบบอนุพันธ์ (derivative) ในการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์

1 บทนำ

ระบบควบคุมตำแหน่งมอเตอร์

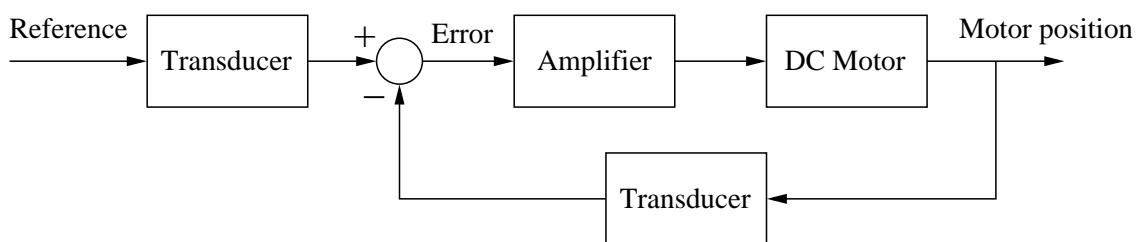


Figure 1: ระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรง

ระบบควบคุมตำแหน่งมอเตอร์แสดงดังรูป 1 ระบบนี้เป็นระบบควบคุมวงปิด มีการเปรียบเทียบตำแหน่งอ้างอิงของมอเตอร์กับตำแหน่งของมอเตอร์ที่วัดได้จากทรานสดิวเซอร์ (transducer) ผลการเปรียบเทียบเป็นสัญญาณคลาดเคลื่อน ถ้าตำแหน่งทั้งสองไม่ตรงกัน จะเกิดสัญญาณคลาดเคลื่อนที่ไม่เป็นศูนย์เข้าสู่ระบบทำให้มอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้

เมื่อเราพิจารณาส่วนป้อนกลับจากตำแหน่งมอเตอร์ผ่านทรานสดิวเซอร์ ถ้าทรานสดิวเซอร์ให้สัญญาณออกเป็นสัดส่วนกับตำแหน่งมอเตอร์ จะเรียกว่าการป้อนกลับแบบสัดส่วน (proportional feedback) หรือการป้อนกลับตำแหน่ง (position feedback) และถ้าหากทรานสดิวเซอร์ให้สัญญาณออกเป็นอนุพันธ์ของตำแหน่งมอเตอร์ จะเรียกว่าการป้อนกลับแบบ D (derivative feedback) หรือการป้อนกลับความเร็ว (velocity feedback) ในกรณีนี้การป้อนกลับสัญญาณความเร็วมอเตอร์ทำผ่านทรานสดิวเซอร์ที่เรียกว่า แทคโคเจนเนอเรเตอร์ (tachogenerator)

โดยทั่วไป ในการควบคุมมอเตอร์มักให้ความสนใจกับเขตไร้มลสนอง (deadband) ซึ่งหมายถึงค่าขนาดของสัญญาณเข้า ที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้ระบบเริ่มทำงาน (มอเตอร์เริ่มหมุน) นอกจากนี้สำหรับการควบคุมตำแหน่งจะพิจารณาถึงความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว (steady state error) และผลตอบสนองชั่วคราว (transient response) จากส่วนพุ่งเกิน (overshoot) และช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) ด้วย

สำหรับการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ในลักษณะวงปิดที่มีการป้อนกลับแบบสัดส่วน จะพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราขยายสูงขึ้นไป จะทำให้เขตไร้มลสนองมีผลกระทบน้อยลง แต่จะทำให้เกิดส่วนพุ่งเกินมากขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่นานขึ้น ส่วนการป้อนกลับแบบอนุพันธ์หรือการป้อนกลับความเร็ว ช่วยทำให้ผลตอบสนองชั่วคราวดีขึ้นกล่าวคือส่วนพุ่งเกินลดลงและช่วงเวลาเข้าที่สั้นลง แต่หากป้อนกลับแบบอนุพันธ์มากเกินไป ระบบก็จะตอบสนองช้า การป้อนกลับสัญญาณทั้งสองเป็นตัวอย่างของการใช้ข้อมูลของผลตอบสนองสองชุดคือข้อมูลตำแหน่งและความเร็วมาใช้ในการตัดสินใจสัญญาณควบคุมร่วมกับสัญญาณเข้า (input) ระบบการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงดังรูป 2(a)-2(c)

## พรีแอมป์ (pre-amplifier)

พรีแอมป์ (pre-amp) ทำหน้าที่ปรับสัญญาณเข้าให้สามารถควบคุมมอเตอร์ให้หมุนได้ทั้งสองทิศทาง มีลักษณะแสดงดังรูป 3

พรีแอมป์มีขั้วออก 2 ขั้ว เมื่อมีสัญญาณเข้าเป็นบวกจะได้สัญญาณขยายออกมีค่าเป็นบวกที่ขั้วหนึ่ง และเมื่อสัญญาณเข้าเป็นลบจะได้สัญญาณขยายออกมีค่าบวกที่อีกขั้วหนึ่ง เราสามารถตั้งค่าสัญญาณออกของพรีแอมป์ได้ถึงแม้ว่าจะไม่มีสัญญาณเข้า โดยใช้ปุ่มปรับค่าศูนย์ (zero adjust) เป็นตัวปรับค่าออฟเซต (offset) เป็นสัญญาณออก สัญญาณออกจากพรีแอมป์นี้ปรับให้ได้ค่าประมาณ +1 โวลต์ ทั้งนี้เพราะสัญญาณขนาดต่ำสุดที่ทำให้มอเตอร์เริ่มหมุนได้คือ 1.5 โวลต์ ส่วนอัตราขยายของพรีแอมป์จะมีค่าประมาณ 25 เท่า

นอกจากนี้ ยังมีอุปกรณ์อื่นๆในชุดทดลอง ได้แก่ Input potentiometer และ Output potentiometer ซึ่งเป็นทรานส์ดิวเซอร์ ทำหน้าที่เปลี่ยนตำแหน่งอ้างอิงและตำแหน่งจริงของมอเตอร์ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ตามลำดับ ส่วนออปแอมป์ (op-amp) ทำหน้าที่เป็นเปรียบเทียบสัญญาณตำแหน่งอ้างอิงและตำแหน่งจริงของมอเตอร์

## 2 อุปกรณ์การทดลอง

1. ชุด Modular servo MS150
2. เครื่องกำเนิดสัญญาณ
3. โวลต์มิเตอร์
4. คอมพิวเตอร์ และ A/D card สำหรับบันทึกสัญญาณ X-Y

## 3 วิธีทดลอง

### การทดลอง 1 ศึกษาลักษณะสมบัติของตัวตรวจจับความผิดพลาด

1. ต่อ Input potentiometer IP150H, Output potentiometer OP150K และออปแอมป์ OA150A เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับความผิดพลาดดังรูป 4 ตรวจสอบให้แน่ใจว่าขั้วของไฟตรง  $\pm 15$  โวลต์จากแหล่งจ่ายไฟไปยังโพเทนซีโอเมตอร์นั้น ต่อในทิศสลับกันเพื่อให้สัญญาณออกเกิดการหักล้าง
2. หมุน feedback selector switch ที่ตัว OA150A ให้เป็นการป้อนกลับไปที่ 100k โดยในลักษณะนี้ OA150A จะเป็น inverting summer ดังในแผนภาพ 4(b) ให้คงตำแหน่งนี้ไว้ตลอดการทดลอง
3. หมุนหน้าปัดของ IP150H ไปที่ 0 องศา โดยตำแหน่ง 0 องศาต้องเป็นตำแหน่งที่วัดแรงดันเทียบกับกราวด์แล้วมีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ หากไม่ได้ 0 โวลต์ ให้หมุนตัวปรับสวิตช์ (dial) หน้าแผ่นงานของ IP150H จนกว่าจะอ่านได้ใกล้เคียงกับศูนย์ แล้วคงค่าตำแหน่งนี้ไว้
4. หมุนหน้าปัดของ IP150H จากตำแหน่ง 0 องศา (ต่อไปนี้จะหมายถึง 0 องศา ที่ปรับแก้แล้ว) ไปครั้งละ 30 องศา ในทิศทางต่างกัน คือทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกา จากนั้นวัดแรงดันของ IP150H และแรงดันที่ออกจาก OA150A บันทึกลงในตารางผลการทดลอง
5. วิเคราะห์หาความไว (sensitivity) ของตัวตรวจจับความผิดพลาด (หน่วยเป็นโวลต์/องศา)

### การทดลอง 2 ศึกษาเขตไร้ผลสนอง

1. ต่อชุดทดลองเป็นดังรูป 5 ปรับปุ่ม feedback selector บน OA150A ให้ไปที่ 100 k $\Omega$
2. ตั้ง IP150H และ OP150K ให้ไปที่มุม 0 องศา และตั้งค่า zero set ของ OA150A โดยใช้โวลต์มิเตอร์วัด

3. ปรับค่าอัตราขยายบน AU150B (ซึ่งในที่นี้ขยายสัญญาณความแตกต่างของมุมระหว่างสัญญาณเข้าและมุมของมอเตอร์) ให้ไปที่ตำแหน่ง 0 องศา จากนั้นให้ปรับค่า zero set บน PA150C ที่ทำให้มอเตอร์ไม่หมุนไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ให้คงค่า zero set ที่ตำแหน่งนี้ไว้
4. ให้ตรวจสอบสายจาก PA150C สองเส้นที่เข้าไปที่ขั้ว 1 และ 2 บน SA150D ว่าต่อถูกต้องหรือไม่ โดยตรวจการจากเพิ่มอัตราขยายบน AU150B และถ้าหากเราหมุน IP150H ไปในทิศทางใด ตัว OP150K ก็ควรหมุนไปในทิศทางนั้นด้วย หากไม่เป็นเช่นนั้น ให้สลับสายที่ขั้ว 1 กับขั้ว 2 บน SA150D
5. ปรับอัตราขยายบน AU150B ให้เป็น 5% แล้วหมุน IP150H ในทิศทางเข็มนาฬิกา ซ้ำๆ จนกระทั่งสังเกตเห็นว่า OP150K ก็เริ่มหมุน ให้บันทึกค่ามุมเริ่มต้นบน IP150H ค่านี้ มุมที่วัดได้นี้คือเซตไรต์ผลสนอง
6. ทำซ้ำข้อ 5 แต่ให้หมุน IP150H เปลี่ยนทิศเป็นทิศทวนเข็มนาฬิกา
7. ทำซ้ำข้อ 5 และ 6 สำหรับค่าอัตราขยาย 10% และ 20% หากมุมที่ได้จากการทดลองมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้ ให้หาแนวโน้มของขนาดของมุม เมื่อมีการปรับอัตราขยายเพิ่มขึ้น บันทึกค่าลงในตาราง

ในการทดลองระบบควบคุมตำแหน่งมอเตอร์อีก 2 การทดลองถัดไปนั้น ให้ศึกษาและต่อวงจรดังรูป 6 จากรูป บนตัว OA150A ให้ปรับ feedback selector ไปที่ 100kΩ เพื่อทำหน้าที่รวมสัญญาณจาก 3 แหล่ง คือ 1) ค่ามู่อ้างอิงจาก IP150H 2) ค่ามุมของมอเตอร์ที่วัดจาก OP150K 3) สัดส่วนของความเร็วมอเตอร์ ดังนั้นสัญญาณออกจาก OA150A จะเป็นสัญญาณสัดส่วนกับค่าความผิดพลาดเชิงมุมของมอเตอร์ (P) รวมกับสัญญาณความเร็วมอเตอร์ (D)

$$u = -K_p((\theta_{ref} - \theta) + K_d\dot{\theta})$$

โดย  $K_p$  คืออัตราขยายวงรอบ (จากในรูป ปรับจากส่วนบนของ AU150B) และ  $K_d$  คืออัตราขยายของส่วนป้อนกลับความเร็ว (จากในรูป ปรับจากส่วนล่างของ AU150B) โดยการรวมสัญญาณดังกล่าว ควรจะต่อเป็นลักษณะที่เป็น negative feedback สำหรับการตรวจสอบการป้อนกลับตำแหน่งว่าเป็น negative feedback หรือไม่นั้น ทำได้โดยการตั้ง IP150H ที่ 0 องศา และ OP150K ที่ 45 องศา แล้วค่อยๆ เพิ่มอัตราขยายบน AU150B ถ้าหากมอเตอร์หมุนเข้าสู่ตำแหน่งเดียวกับ IP150H แสดงว่าการป้อนกลับเป็นแบบลบถูกต้อง แต่ถ้ามอเตอร์หมุนออก ให้สลับสายที่ต่อเข้าขั้ว 1 และ 2 ของ SA150D (การที่มอเตอร์หมุนออกนั้น แสดงว่าเป็นการป้อนกลับแบบบวก)

### การทดลอง 3 การป้อนกลับแบบสัดส่วนหรือการป้อนกลับตำแหน่ง (P)

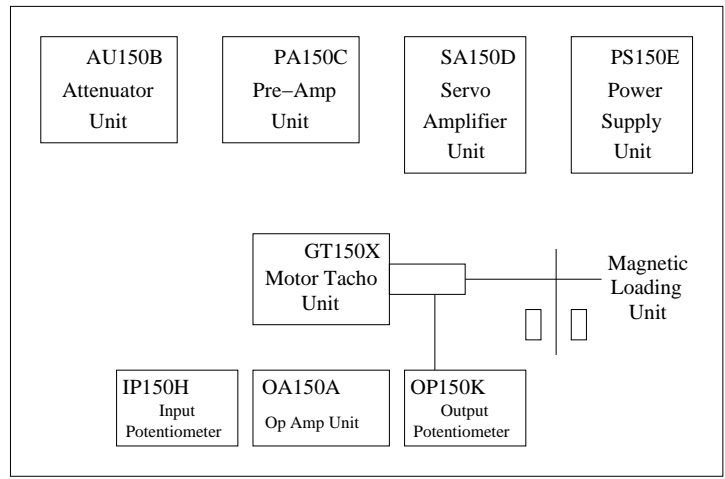
1. ให้ต่อวงจรดังรูป 6 ดังที่อธิบายข้างต้น แต่ปลดสายป้อนกลับความเร็วออก (สายที่มาจากแทคโคเจนเนอเรเตอร์ GT150X)
2. ตั้งอัตราขยายวงรอบที่ 5% ใส่สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (square wave) ขนาดประมาณ 2 โวลต์ ที่ความถี่ 0.05 Hz เข้าที่ OA150A เพื่อเป็นสัญญาณอ้างอิงแทนที่สัญญาณจาก IP150H บันทึกผลตอบสนองของตำแหน่งมอเตอร์ เทียบกับสัญญาณอ้างอิงสี่เหลี่ยม
3. ต่อสายจาก NI card แล้วบันทึกสัญญาณผลตอบที่ได้ลงในคอมพิวเตอร์ผ่านทาง `getdata.mdl` ที่เตรียมไว้ให้
4. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1 และ 2 ที่อัตราขยายวงรอบเท่ากับ 10% และ 20%
5. เปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลตอบสนองที่ค่าอัตราขยายต่างๆ ในเชิงของช่วงเวลาขาขึ้น (rise time), ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time), ค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว (steady-state error) และส่วนพุ่งเกิน (overshoot)

## การทดลอง 4 การป้อนกลับแบบอนุพันธ์หรือการป้อนกลับความเร็ว (PD)

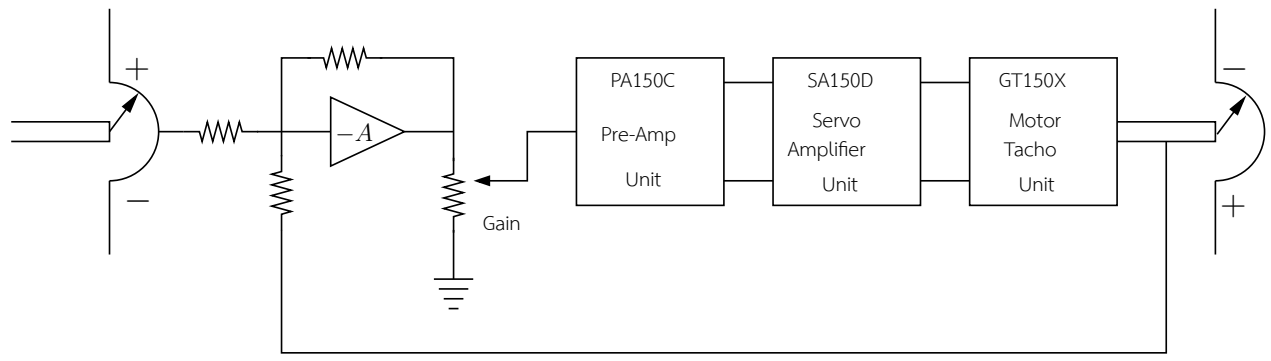
1. ให้ต่อวงจรดังรูป 6 และต่อสายป้อนกลับความเร็ว (สัญญาณที่ออกจาก GT150X) เข้าวงจรแล้วตรวจสอบว่าต่อเข้าถูกต้องหรือไม่โดยตั้งอัตราขยายของส่วนป้อนกลับความเร็ว บน AU150B ไปที่ศูนย์ ปรับปุ่มปรับ zero set ของ PA150C ให้มอเตอร์หมุน แล้วค่อยๆเพิ่มอัตราขยายของส่วนป้อนกลับความเร็วบน AU150B ถ้าต่อทิศทางถูกมอเตอร์จะหมุนช้าลง ถ้าผิดให้สลับสายที่ต่อเข้าขั้วหมายเลข 1 และ 2 บนแท็คโคเจนเนอเรเตอร์ (Tachogenerator) GT150X (เมื่อตรวจสอบเรียบร้อยแล้วอย่าลืมปรับปุ่มปรับ zero set ของ PA150C กลับมาที่เดิม)
2. ตั้งอัตราขยายวงรอบ ที่ 80% ใส่สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2 โวลต์ ความถี่ 0.05 Hz เข้าที่ OA150A แทนที่สัญญาณจาก IP150H บันทึกผลตอบสนองของตำแหน่งมอเตอร์ที่อัตราขยายป้อนกลับความเร็ว 20% บน AU150B
3. ต่อสายจาก NI card แล้วบันทึกสัญญาณผลตอบที่ได้ลงในคอมพิวเตอร์ผ่านทาง `getdata.mdl` ที่เตรียมไว้ให้
4. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2 และ 3 ที่อัตราขยายป้อนกลับความเร็วเท่ากับ 30% และ 50%
5. เปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลตอบสนองที่ค่าอัตราขยายต่างๆ ในเชิงของช่วงเวลาขาขึ้น (rise time), ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time), ค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว (steady-state error) และส่วนพุ่งเกิน (overshoot)

## References

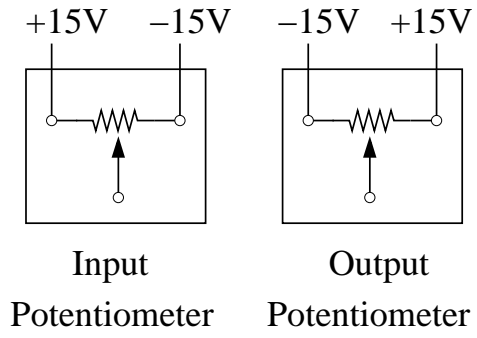
- [1] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 3rd edition, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1997.
- [2] B.C. Kuo, *Automatic Control Systems*, 7th edition, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1991.
- [3] *Modular Servo Type MS150 Part I-II*, Feedback Instruments Limited, Crowborough Sussex, England.



(a) ชุดการทดลอง Modular servo MS150



(b) แผนภาพการต่อวงจรสำหรับระบบควบคุมตำแหน่ง



(c) วงจรรับเข้าของตัวตรวจจับความผิดพลาด

Figure 2: ระบบควบคุมมอเตอร์

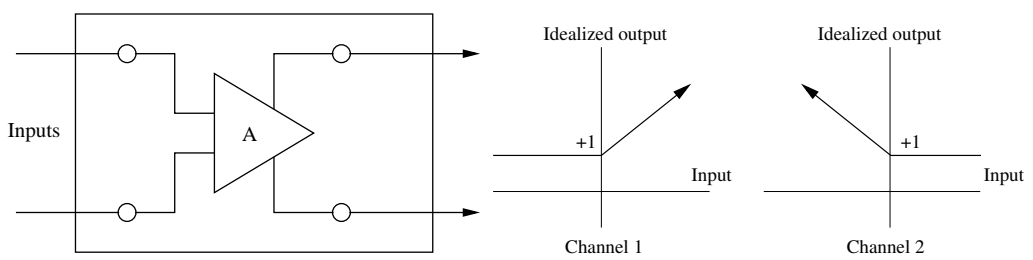
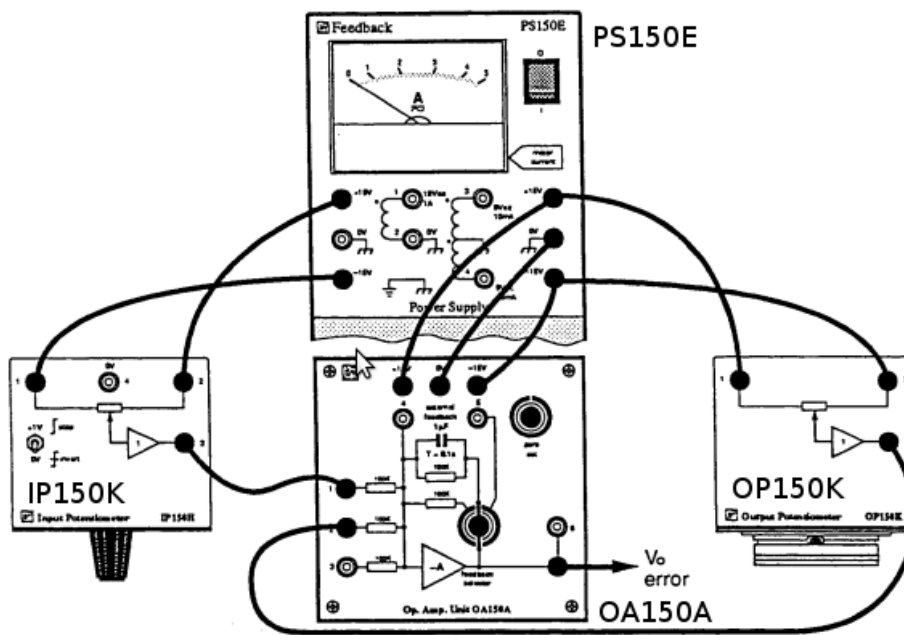
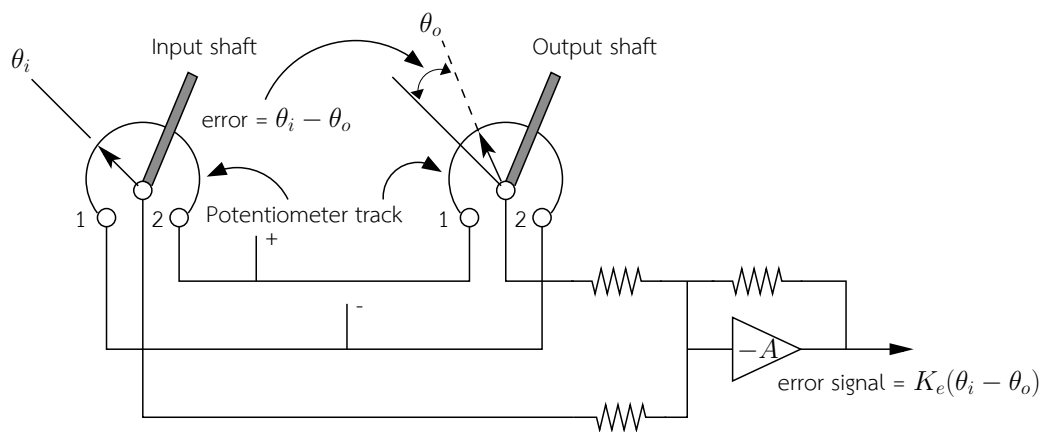


Figure 3: ลักษณะของพีแอมป์



(a) การต่อวงจรตรวจจับความผิดพลาด



(b) แผนผังตัวตรวจจับความผิดพลาด

Figure 4: ตัวตรวจจับความผิดพลาด

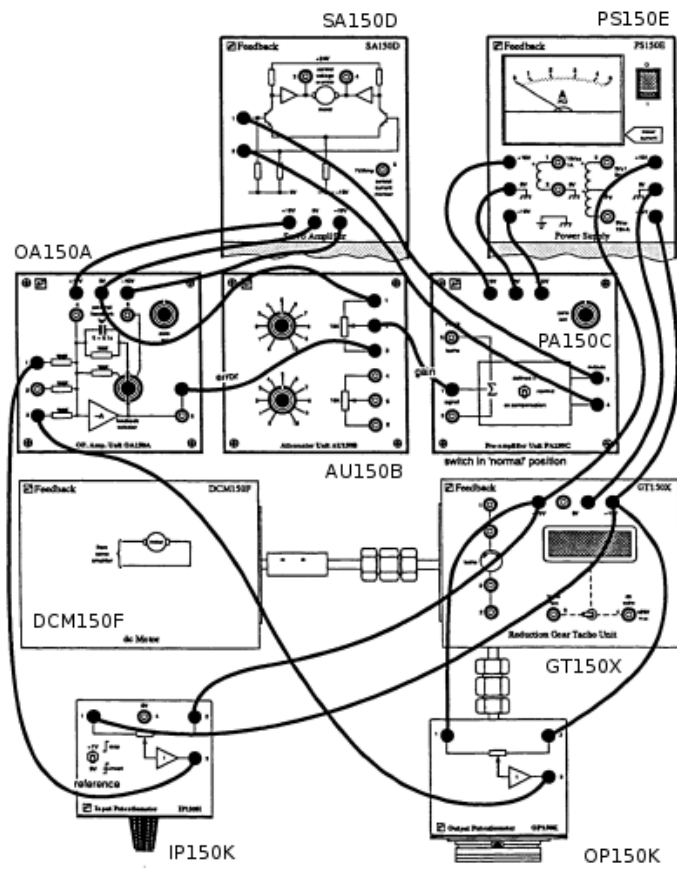


Figure 5: การต่อวงจรเพื่อศึกษาเซตไร้มลตอบสนอง

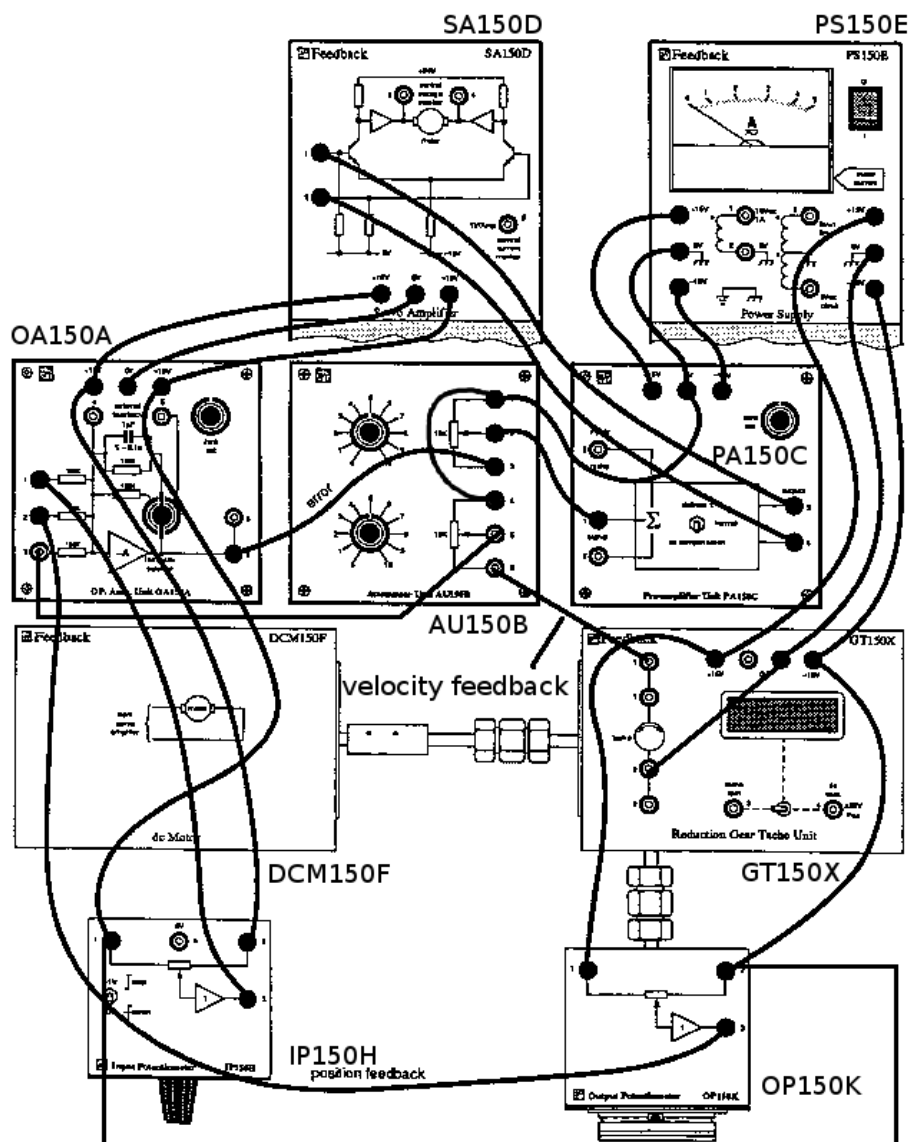


Figure 6: วงจรของระบบควบคุมตำแหน่งมอเตอร์