

2102331: การทดลองระบบควบคุมป้อนกลับ
ห้องปฏิบัติการพื้นฐานระบบควบคุม
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลอง CS06: ลักษณะสมบัติของตัวควบคุม PID

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติและการปรับจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID

1 บทนำ

1.1 คุณสมบัติของตัวควบคุม

ในระบบควบคุมมีตัวควบคุมหลายชนิด ตัวควบคุมส่วนใหญ่ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการ เป็นแบบ PID โดยต่ออนุกรมกับระบบที่ต้องการควบคุม ดังแสดงในรูป 1 สัญญาณออกจากตัวควบคุม PID สามารถบรรยายได้ดังนี้

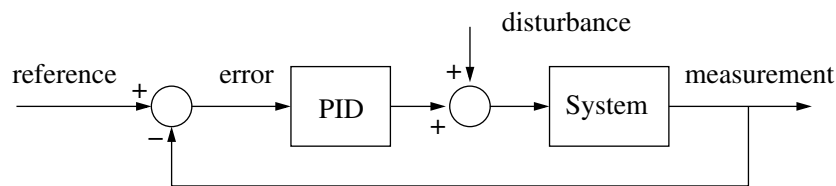


Figure 1: ตัวควบคุม PID ที่ต่อเข้าในระบบแบบอนุกรม

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

โดย $u(t)$ คือสัญญาณควบคุม $e(t)$ คือค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณออกจากค่ากำหนด ตัวควบคุม PID ประกอบไปเทคนิคการควบคุมพื้นฐาน 3 แบบ แบบสัดส่วน (Proportional หรือ P) แบบอินทิกรัล (Integral หรือ I) และแบบอนุพันธ์ (Derivative หรือ D) แต่ละแบบสามารถนำมาประกอบกันเพื่อให้ได้ตัวควบคุมที่ต้องการ ตัวควบคุมมีพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน (K_p) ค่า integral time (T_i) และ derivative time (T_d) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละแบบมีดังนี้

1.1.1 Proportional Action

การควบคุมแบบสัดส่วนเป็นเทคนิคที่ง่ายที่สุด หลักการคือสัญญาณควบคุม ($u(t)$) จากตัวควบคุมที่ส่งไปปรับกระบวนการ มีค่าเป็นสัดส่วนกับความคลาดเคลื่อน ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูป

$$u(t) = K_p e(t)$$

โดยที่ K_p คือค่าอัตราขยายและ

$$e(t) \triangleq \text{ความคลาดเคลื่อน} = \text{ค่ากำหนด} - \text{ค่าวัด}$$

ตัวควบคุมบางตัวสัญญาณเข้าและสัญญาณออกอาจมีหน่วยต่างกัน เช่นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดัน เพื่อหลีกเลี่ยงการแปลงหน่วย ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณออกและสัญญาณเข้าของตัวควบคุมอาจแสดงเป็นแถบสัดส่วน (Proportional Band หรือ %PB) โดยที่แถบสัดส่วนคือพิสัยของสัญญาณเข้าที่ทำให้ตัวควบคุมปฏิบัติงานเต็มพิสัยการทำงาน หรือถ้ามองจากตัวควบคุม แถบสัดส่วนคือช่วงความคลาดเคลื่อนที่ทำให้สัญญาณออกของตัวควบคุมเปลี่ยนแปลงจากค่าสูงสุดไปต่ำสุด โดยแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของพิสัยสัญญาณเข้าตัวควบคุม ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายและเปอร์เซ็นต์แถบสัดส่วนคือ

$$K_p = \frac{100}{\% PB}$$

ลักษณะสมบัติของการควบคุมแบบสัดส่วนแสดงไว้ในรูป 2

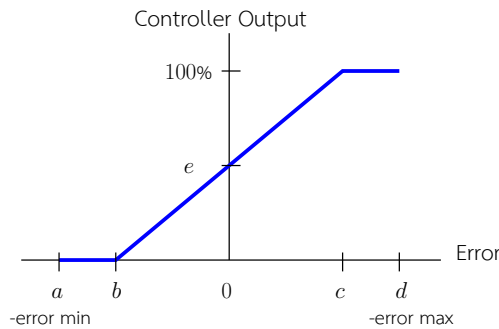


Figure 2: ลักษณะสมบัติของตัวควบคุมแบบสัดส่วน

จากรูป 2 ค่าเปอร์เซ็นต์แถบสัดส่วน (%PB) คือระยะ \overline{bc} แม้ความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ ยังมีสัญญาณค่าหนึ่ง ออกจากตัวควบคุมที่ป้อนให้กับกระบวนการ ค่านี้ทำหน้าที่เป็น *ไบแอส (bias)* ทำให้ระบบทำงานที่จุดทำงานต่อไปได้ โดยทั่วไปสัญญาณค่านี้มักจะถูกตั้งให้เท่ากับ 50% ของสัญญาณขาออกสูงสุดของตัวควบคุม นั่นคือ

$$\text{สัญญาณออก} = \frac{\% \text{ ความคลาดเคลื่อน}}{\% \text{ แถบสัดส่วน}} + 50\%$$

นอกจากนี้ ตัวควบคุมมีย่านทำงานที่เป็นเชิงเส้นช่วงหนึ่ง โดยทำหน้าที่เป็นตัวขยาย (amplifier) แต่ถ้าความคลาดเคลื่อนมีมากเกินไประดับหนึ่ง ตัวขยายจะอิ่มตัวทำให้สัญญาณออกมีค่าคงที่

การควบคุมแบบสัดส่วนนี้สามารถควบคุมระบบได้ดีพอสมควร เหมาะสมกับกระบวนการที่ต้องการผลตอบสนองรวดเร็ว และยอมให้เกิดความคลาดเคลื่อนขนาดคงที่ขนาดหนึ่ง อย่างไรก็ตาม หากในกระบวนการ เกิดมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ อาจทำให้เกิดปัญหา เช่น มีค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว (steady-state error) หรือที่เรียกว่า *ออฟเซต (offset)* ตัวควบคุมแบบสัดส่วน ไม่สามารถแก้ไขให้หมดได้ ตัวอย่างในกรณีนี้ก็ได้อะบบในรูป 3

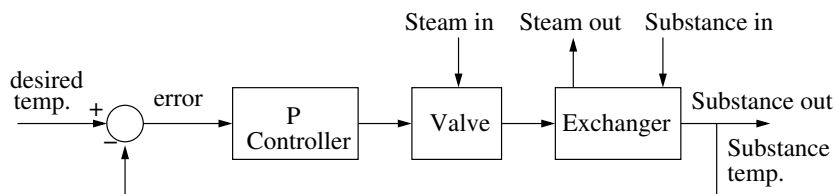


Figure 3: ระบบควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบใช้ไอน้ำ

จากรูป 3 ระบบเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบใช้ไอน้ำ โดยมีตัวควบคุมแบบสัดส่วน ทำหน้าที่ปรับวาล์วควบคุมปริมาณไอน้ำที่ผ่านไปให้ความร้อนกับสารที่ต้องการทำความร้อน ในสภาวะอยู่ตัว ถ้าประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำลง (เนื่องจากไอน้ำหรือสารที่ต้องการทำความร้อนทำให้เกิดสนิม หรือตะกรันบนผิวที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน หรือเนื่องจากสาเหตุอื่น) ผลที่ตามมาคืออุณหภูมิของสารที่ได้จะไม่ตรงกับค่าที่ตั้งไว้ ดังนั้นเพื่อให้ระบบ

เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวอีกครั้ง สัญญาณออกของตัวควบคุมจะต้องมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม เมื่อพิจารณาจากสมการของสัญญาณควบคุมข้างต้น สัญญาณออกจะมีค่าเพิ่มขึ้นได้ ความผิดพลาดจะต้องมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จึงทำให้เกิดความแตกต่างของระหว่างอุณหภูมิสารกับค่าที่ตั้งไว้ที่สภาวะสมดุลใหม่

แนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นทำได้ 2 วิธีคือ *วิธีแรก* คือ เพิ่มอัตราขยาย (gain) ของตัวควบคุมเพื่อเพิ่มผลของความคลาดเคลื่อนที่มีต่อระบบ ถึงแม้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยลงแต่ก็จะทำให้สัญญาณออกจากตัวควบคุมที่เหมาะสมกับกระบวนการขณะนั้นได้ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มผลของความคลาดเคลื่อนมากเกินไป ก็อาจทำให้ระบบแกว่งได้เนื่องจากระบบมีความไว *วิธีที่สอง* คือ ปรับค่าไบแอสของตัวควบคุมใหม่ด้วยมือ ซึ่งทำให้ตัวควบคุมเลื่อนจุดทำงาน ไปยังจุดที่ให้สัญญาณออกที่เหมาะสมกับกระบวนการในขณะนั้นได้ ปัญหาของวิธีหลังอยู่ตรงที่ต้องปรับค่าไบแอสของตัวควบคุมทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ

1.1.2 Integral Action

ผลตอบของการควบคุมแบบสัดส่วนรวมกับการควบคุมแบบอินทิกรัล สามารถอธิบายได้ในสมการ

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right)$$

เมื่อ K_p คืออัตราขยาย $e(t)$ คือความคลาดเคลื่อน และ T_i คือ integral time (วินาที)

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการของตัวควบคุมแบบสัดส่วน ความแตกต่างอยู่ตรงที่เทอมไบแอส นั่นคือตัวควบคุมแบบสัดส่วนถูกจำกัดด้วยส่วนไบแอสเป็นค่าคงที่ ส่วนการควบคุมแบบอินทิกรัล มีการสะสมความคลาดเคลื่อนในการปรับแต่งไบแอส (นั่นคือ ทำหน้าที่เป็นตัวอินทิกรัล) และจะหยุดสะสมเมื่อความคลาดเคลื่อนของระบบเป็นศูนย์ เมื่อผลตอบเข้าที่สมบูรณ์แล้ว เทอมไบแอสของระบบจะมีค่าน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับลักษณะของการรบกวน (disturbance) การทำงานในลักษณะเช่นนี้มีลักษณะคล้ายกับฟังก์ชันรีเซ็ตด้วยมือ (manual-reset function) ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกวินทิกรัลว่าฟังก์ชันรีเซ็ต (reset function)

คุณสมบัติของตัวอินทิกรัลในการกำจัดความคลาดเคลื่อน (หรือออฟเซต) เป็นข้อดีอย่างมาก จึงเป็นที่นิยมใช้กับระบบควบคุมป้อนกลับ อย่างไรก็ตาม ตัวอินทิกรัลก็มีข้อเสีย นั่นคือทำให้เกิดการล่าช้า (capacity-like lag) และทำให้ช่วงเวลาของการแกว่งยาวนานขึ้น โดยทั่วไป ระบบแบบสัดส่วนรวมกับอินทิกรัล จะมีช่วงเวลาของการแกว่งนานกว่าระบบเชิงสัดส่วนอย่างเดียว 50% หรือ $T_{pi} = 1.5T_p$ สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลา (time constant) น้อย (เช่น ระบบควบคุมอัตราการไหล) ปัญหาจึงจะไม่มีผลมากนัก แต่สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลามาก (เช่น ระบบควบคุมระดับ) ปัญหานี้อาจมีผลมาก จนทำให้ระบบเข้าสู่จุดวิกฤติที่ไม่สามารถยอมรับได้

การควบคุมแบบอินทิกรัล มีลักษณะเช่นเดียวกับการควบคุมสัดส่วนตรงผลกระทบของการเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุม หากอัตราขยายมีค่ามากเกินไปจะทำให้ผลตอบของระบบมีการแกว่ง โดยทั่วไป Integral time ($T_i = 1/K_i$ sec โดยที่ $K_i = \text{repeats/sec}$) เป็นตัวแสดงว่า อัตราการตอบสนองของกระบวนการต่อสัญญาณการควบคุม ค่า T_i ที่น้อยกว่า จะทำให้ตัวควบคุมมีการตอบสนองที่เร็วกว่าในระยะเริ่มต้น โดยที่ความคลาดเคลื่อนยังเป็นค่าบวกอยู่ ดังนั้นกว่าความคลาดเคลื่อนจะเป็นศูนย์ (ซึ่งทำให้เทอม $\int_0^t e(t) dt$ หยุดทำงาน) เทอมไบแอสก็จะมีค่าสูงกว่าที่ต้องการ ดังนั้นผลตอบสนองจึงเกิดส่วนพุ่งเกิน (overshoot) สูงกว่าค่ากำหนด เป็นผลให้ตัวอินทิกรัลทำหน้าที่ปรับให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลง การใช้ตัวอินทิกรัลในการควบคุม ควรระวังในเรื่องของความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ (เช่นเกิดการเปลี่ยนแปลงค่ากำหนดขนาดใหญ่) เพราะจะทำให้เกิดปัญหา integral windup ถึงแม้ว่า T_i มีค่าถูกต้องในสภาวะการทำงานธรรมดา แต่สัญญาณควบคุมอาจถึงจุดอิ่มตัวขณะผลตอบเกิดส่วนพุ่งเกิน

ข้อสรุปของตัวควบคุมอินทิกรัล

- ทำหน้าที่คล้ายรีเซ็ตด้วยมือ (manual reset) เพื่อกำจัดความคลาดเคลื่อน
- มีปัญหาการล่าช้า ยังผลให้เกิดการหักล้างทางเวลาในตัวควบคุม จึงไม่เหมาะกับระบบที่มีค่าคงตัวเวลายาวนาน
- ทำให้ช่วงเวลาในการแกว่งยาวนานขึ้น

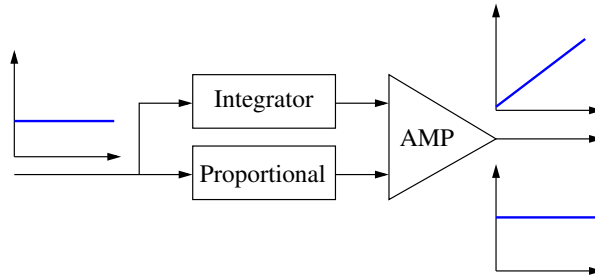


Figure 4: แผนภาพกรอบแสดงลักษณะตัวควบคุมแบบ PI

ในระบบควบคุม ค่าที่วัดได้และค่ากำหนดควรเป็นค่าเดียวกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวควรเป็นศูนย์ ถ้ามีความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว สัญญาณที่ออกจากอินทิเกรเตอร์ (เพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่ เมื่อสัญญาณเข้ามีค่าคงที่) ส่งต่อให้กับวงจรถยาย ดังแสดงในรูป 4 สังเกตว่า ความคลาดเคลื่อนเป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมทั้งสัดส่วนและอินทิกรัล โดยสัญญาณออกจะมารวมกันที่วงจรถยายและส่งสัญญาณไปควบคุมระบบ ตัวควบคุมจะทำให้ค่าที่วัดได้เพิ่มขึ้นจนเท่ากับค่ากำหนด นั่นคือทำให้ความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตาม หาก T_i มีค่าน้อยลง ผลตอบอาจเกิดการแกว่งได้

1.1.3 Derivative Action

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอินทิกรัล ต่างก็มีข้อจำกัดอยู่ที่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นปัญหาต่อการควบคุมกระบวนการ แต่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ สามารถรู้ได้ล่วงหน้าโดยพิจารณาจากแนวโน้มของความคลาดเคลื่อน หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณนั่นเอง ตัวอนุพันธ์มีหลักการทํางาน คือ ตัวควบคุมตอบสนองต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อน ถึงแม้ว่าความคลาดเคลื่อนมียังค่าเล็กน้อย สัญญาณออกของตัวอนุพันธ์ไม่ได้สัมพันธ์กับขนาดของความคลาดเคลื่อน แต่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อน ถ้าความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ ตัวอนุพันธ์จะให้สัญญาณออกเป็นศูนย์ คุณลักษณะข้อนี้มีผลดีคือ ตัวควบคุมจะมีผลตอบสนองที่เกิดก่อนที่ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มมากขึ้น และทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$u(t) = K_p \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

โดย derivative time (T_d) เป็นเวลาที่แสดงถึงผลตอบสนองเนื่องจากตัวอนุพันธ์ การเพิ่ม T_d จะทำให้ผลตอบสนองของตัวอนุพันธ์มีค่ามากขึ้น เนื่องจากตัวอนุพันธ์มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้กับค่าที่วัดได้เท่านั้น แต่ไม่ใช้กับค่ากำหนด เพราะการเปลี่ยนค่ากำหนดมักจะเป็นแบบขั้น (step) ทำให้ผลตอบสนองของตัวอนุพันธ์เป็นพัลส์ และทำให้เกิดการกระแทก (bump) ของอุปกรณ์ในกระบวนการ สำหรับค่ากำหนดใช้เฉพาะกับตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัล

ตัวอนุพันธ์คือตัวควบคุมที่ก่อให้เกิดผลตรงข้ามกับตัวอินทิกรัล ดังนั้นจึงใช้ในการปรับปรุงกระบวนการที่มีการล่าช้าทางเวลา (time lag) มากๆ ทำให้ผลตอบสนองรวดเร็วขึ้น และช่วงเวลาที่การแกว่งที่ลดลง ข้อเสียของตัวอนุพันธ์ คือ มีความไวต่อสัญญาณรบกวนเป็นอย่างมาก เพราะมีผลตอบสนองโดยตรง ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่วัดได้ ดังนั้น แม้สัญญาณรบกวนจะมีขนาดเล็ก แต่ก็อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อสัญญาณออกของตัวควบคุม จึงเป็นไปได้ที่จะใช้ตัวอนุพันธ์ในการควบคุมผลของสัญญาณรบกวน ยิ่งไปกว่านั้นระบบใดที่มีสัญญาณรบกวนมาก จะไม่สามารถใช้ตัวอนุพันธ์ในวงจรรูดสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้เพียงตัวควบคุม PI เท่านั้น

บทสรุปของการตัวอนุพันธ์

- เหมาะสำหรับกระบวนการที่ล่าช้าทางเวลามาก ทำให้การควบคุมถึงจุดที่ต้องการเร็วขึ้น
- ถ้า T_d มากเกินไป ผลของตัวอนุพันธ์จะทำให้ผลตอบสนองไวขึ้น จนกระทั่งระบบอาจขาดเสถียรภาพได้

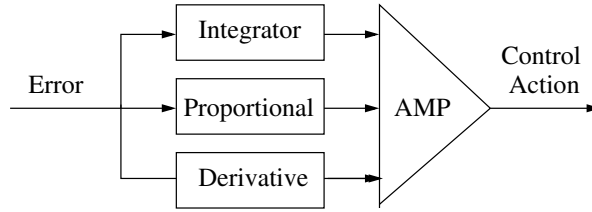


Figure 5: แผนภาพกรอบแสดงลักษณะตัวควบคุมแบบ PID

- ไม่เหมาะกับระบบที่มีตัวแปรกระบวนการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย หรือมีการล่าช้าหลังทางเวลาน้อย เพราะจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ (เช่นระบบควบคุมอัตราการไหล)
- ไม่ควรใช้กับระบบที่มีสัญญาณรบกวนมาก
- ใช้ชดเชยการล่าช้าที่เกิดจากตัวอินทิกรัลด้วยการนำหน้า (lead) ในตัวอนุพันธ์

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าที่กำหนดทันที ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างทันที และส่งผลต่อผลตอบสนองของระบบ ถ้านำอนุพันธ์ของความคลาดเคลื่อน นั่นคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อน แล้วไปรวมกับสัญญาณที่ได้จากตัวควบคุมแบบสัดส่วนและอินทิเกรเตอร์ ดังแสดงในรูป 5 จะทำให้การทำงานของระบบดีขึ้น การควบคุมเชิงอนุพันธ์ไม่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว แต่จะลดช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) โดยลดการแกว่งลง

จากรายละเอียดที่กล่าวมาจะพบว่าตัวควบคุม PID ยังคงมีจุดอ่อนบ้าง ดังนั้นในการใช้งานจริงจึงมีการต่อวงจรเพิ่มเติมสำหรับแก้จุดอ่อน ได้แก่

- วงจรสำหรับป้องกัน integral windup ที่เกิดจากตัวควบคุมแบบอินทิกรัล
- วงจรกรอง (filter) สำหรับลดผลเนื่องจากสัญญาณรบกวนที่มีกับตัวควบคุมแบบอนุพันธ์
- ปรับโครงสร้างให้ตัวควบคุมเชิงอนุพันธ์รับสัญญาณออกของระบบเท่านั้น เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงที่มีค่าเกินกว่าที่รับได้ (derivative overrun)

นอกจากปัญหาที่เกิดจากการควบคุมทั้ง 3 แบบแล้ว ยังมีปัญหาที่เกิดจากฟังก์ชันการทำงาน คือตัวควบคุมส่วนมากจะมีโหมดการทำงาน 2 โหมด คือ การควบคุมด้วยมือ (manual) และการควบคุมอัตโนมัติ (automatic) ในโหมดการควบคุมด้วยมือ สัญญาณที่ส่งออกจากตัวควบคุมจะขึ้นกับการปรับโดยตรงของผู้ใช้ หากมีการเปลี่ยนโหมดการทำงานกลับมาที่โหมดการควบคุมอัตโนมัติ ตัวควบคุมทำหน้าที่ส่งสัญญาณออกจากตัวควบคุมอาจเกิดปัญหาการกระแทก (bump) ขึ้นได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุมที่ออกจากตัวควบคุมอย่างเฉียบพลัน ดังนั้นในตัวควบคุม PID ส่วนมากจึงต้องมีวงจรลดการกระแทก (bumpless transfer) สำหรับแก้ปัญหานี้ไว้ด้วย

1.2 การปรับจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

การปรับจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุม (parameter tuning) เริ่มจากการหาลักษณะของวงควบคุมเดิม เทคนิคต่างๆ ในการวัดลักษณะของกระบวนการมีความสำคัญมาก เพราะจะนำไปสู่การตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โหมดการควบคุมที่นิยมจะพิจารณาใช้กันอยู่มาก คือแบบสัดส่วน แบบอินทิกรัลและแบบอนุพันธ์ ร่วมกัน

ในตอนนี้จะมุ่งเน้นวิธีการตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยอาศัยลักษณะสมบัติของกระบวนการและระบบควบคุม ลักษณะสมบัติที่พบบ่อยได้แก่

1. ลักษณะของความจุของระบบ (capacitance) ซึ่งก่อให้เกิดการล่าช้าแบบ exponential
2. deadtime (distance/velocity lag)
3. ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency)

วิธีการตั้งค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ใช้ทั่วไปแบ่งเป็น 3 วิธี คือ

1. วิธีวงเปิด (open-loop step response method/ reaction curve method)
2. วิธีวงปิด (closed-loop method /ultimate sensitivity method)
3. วิธีลองผิดลองถูก (trial-and-error method)

ในการศึกษาจะกล่าวถึง 2 วิธีแรกเนื่องจากมีหลักการที่ชัดเจน

1.2.1 วิธีวงเปิด

วิธีนี้เริ่มมาจากความคิดที่ว่า ผลตอบจากสัญญาณขั้น (step response) ของกระบวนการส่วนใหญ่ มีลักษณะกราฟคล้ายกับในรูป 6 ซึ่งเรียกว่า *process reaction curve* รูปกราฟลักษณะดังกล่าวสามารถประมาณได้จากผลตอบสัญญาณขั้นของระบบล่าช้าอันดับหนึ่ง (*first-order lag*) ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นดังนี้

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Me^{-sL}}{(\tau s + 1)}$$

นั่นก็คือเป็นระบบอันดับหนึ่งที่มี *deadtime* (หรือ *time delay*) เท่ากับ L วินาที มีค่าคงตัวทางเวลาเท่ากับ τ วินาที และผลตอบจากสัญญาณขั้นหนึ่งหน่วยจะลู่เข้าหาค่า M เมื่อ $t \rightarrow \infty$

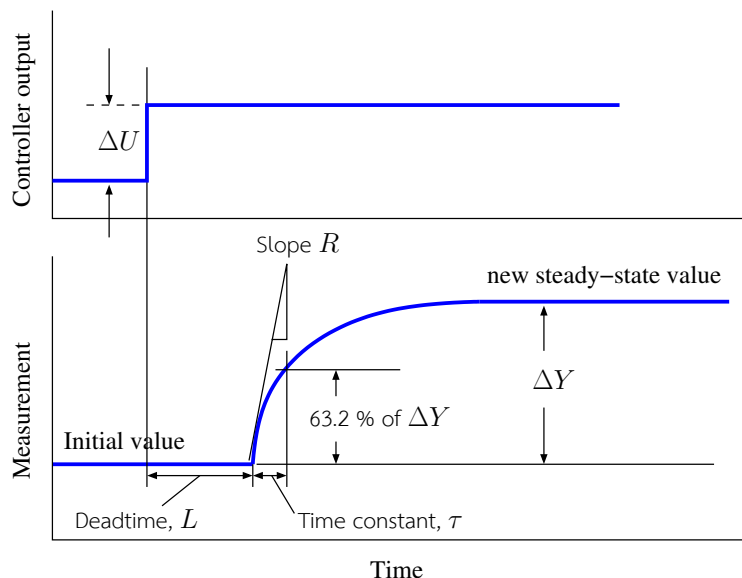


Figure 6: ผลตอบวงเปิดของกระบวนการที่มี *deadtime* และการล่าช้า

วิธีนี้เริ่มต้นด้วยการหาค่าคงตัวทางเวลา, *deadtime* และอัตราการตอบสนอง (response rate) โดยอาศัยผลตอบสนองวงเปิด (open-loop response) ให้ต่ออุปกรณ์บันทึกสัญญาณเข้ากับสัญญาณที่ต้องการวัด ขั้นตอนการทดสอบเป็นดังนี้

1. ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบขั้น (step change) ด้วยขนาด ΔU ที่สัญญาณออกของตัวควบคุม (ซึ่งเป็นสัญญาณเข้าของระบบ) ในขณะเดียวกันก็ให้เครื่องบันทึกทำการบันทึกค่าเพื่อหาค่า *deadtime* ดังรูป 6 ค่า *deadtime* (หน่วยเป็นวินาที) จะเป็นระยะเวลานับจากจุดที่เริ่มการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นของสัญญาณเข้า ไปยังจุดที่ระบบเริ่มตอบสนองต่อสัญญาณเข้านั้น
2. จากนั้นสัญญาณออกที่วัดได้จะมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ค่าใหม่ ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นที่สัญญาณออกของตัวควบคุม เส้นโค้งแสดงดังรูป 6 เป็นผลตอบสำหรับระบบที่เป็น *single capacitance* อาจประมาณได้ว่าผลตอบที่มีลักษณะเป็นการล่าช้าอันดับหนึ่ง (*first-order lag*)

- ค่าคงตัวทางเวลา τ หาได้จากระยะเวลาที่สัญญาณออกเริ่มเปลี่ยนแปลง ไปจนถึงค่า 63.2% ของ ΔY (หรือเป็นสัดส่วน $1 - e^{-1}$ ของ ΔY) โดย ΔY คือการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณออก เมื่อเทียบกับค่าเดิม
- ค่า M ซึ่งบ่งบอกถึงอัตราขยายของระบบในภาวะอยู่ตัว หากทำได้ $M = \Delta Y / \Delta U$
- ค่าความชันของกราฟสัญญาณออก ณ inflection point จะมีค่าเท่ากับ M/τ เราจะเรียกค่าความชันนี้ว่า process reaction rate = R

1.2.2 วิธีวงปิด

วิธีวงปิดนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะว่าการวัดค่าพารามิเตอร์เพียงค่าเดียวเท่านั้น แต่มีข้อเสียเปรียบอยู่คือ กระบวนการบางอย่างที่มีลักษณะออนไลน์ (online) ไม่สามารถจะทำให้เกิดการแกว่งได้ ถึงแม้ว่าจะเป็นช่วงเวลาเพียงสั้นๆ โดยการทำให้วงควบคุมแกว่งที่ค่าแอมพลิจูดคงที่และคาบเวลาคงที่ ทำให้สามารถหาคาบเวลาธรรมชาติ (natural period, T_0) ได้ ตัวอย่างของการวัดวิธีนี้แสดงในรูป 7 ซึ่งมีลักษณะการแกว่งเป็นแบบไซน์ (sinusoid)

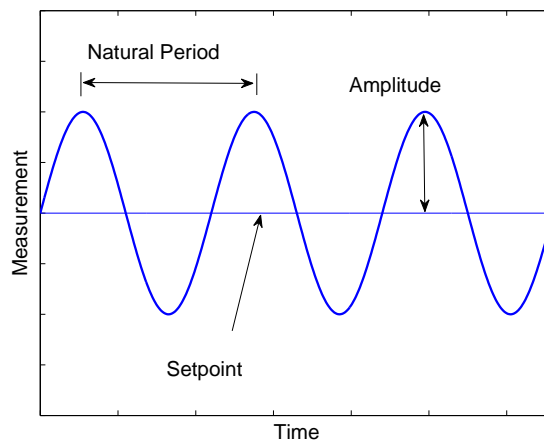


Figure 7: การแกว่งด้วยค่าแอมพลิจูดคงที่ของสัญญาณออกสำหรับวิธีวงปิด

เพื่อให้เกิดการแกว่งที่ค่าแอมพลิจูดคงที่ในวงควบคุมของกระบวนการจะต้องดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

- จัดระบบวงปิดดังรูป 8
- ตรวจสอบให้แน่ใจว่า วงควบคุมมีเสถียรภาพ
- ปรับส่วนอินทิกรัล (I) และ/หรือ ส่วนอนุพันธ์ (D) ให้มีค่าต่ำสุด (นั่นคือเหลือแต่ตัวควบคุมแบบสัดส่วน)
- ให้การเปลี่ยนแปลงแบบขั้นที่ค่ากำหนด (r) ของค่ากำหนด (set value) และสังเกตสัญญาณออกที่วัดได้
- ถ้าหากสัญญาณออกค่อยๆ ลดลงสู่ค่าที่สภาวะอยู่ตัวให้ลด %PB อีก (เพิ่มอัตราขยาย K)
- กลับไปทำขั้นที่ 3 และ 4 จนกระทั่งได้ผลตอบที่แกว่งด้วยแอมพลิจูดและคาบเวลาคงที่ ดังแสดงในรูป 7 บันทึกค่าอัตราขยาย ณ จุดนี้ให้เท่ากับ K_0 ตรวจสอบว่าตัวขับเร้าสุดท้าย (final actuator) ไม่ได้แกว่งอยู่ในพิกัด เพราะการแกว่งเช่นนี้ทำให้ผลลัพธ์ผิดพลาด
- วัดระยะทางระหว่างยอดถึงยอดของผลตอบ แปลงค่าที่วัดได้ให้เป็นเวลาโดยหารระยะที่วัดได้ด้วย chart speed

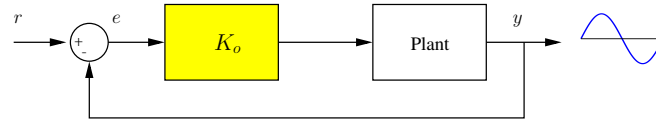


Figure 8: การหาค่าอัตราขยายที่ทำให้ระบบเริ่มแกว่ง

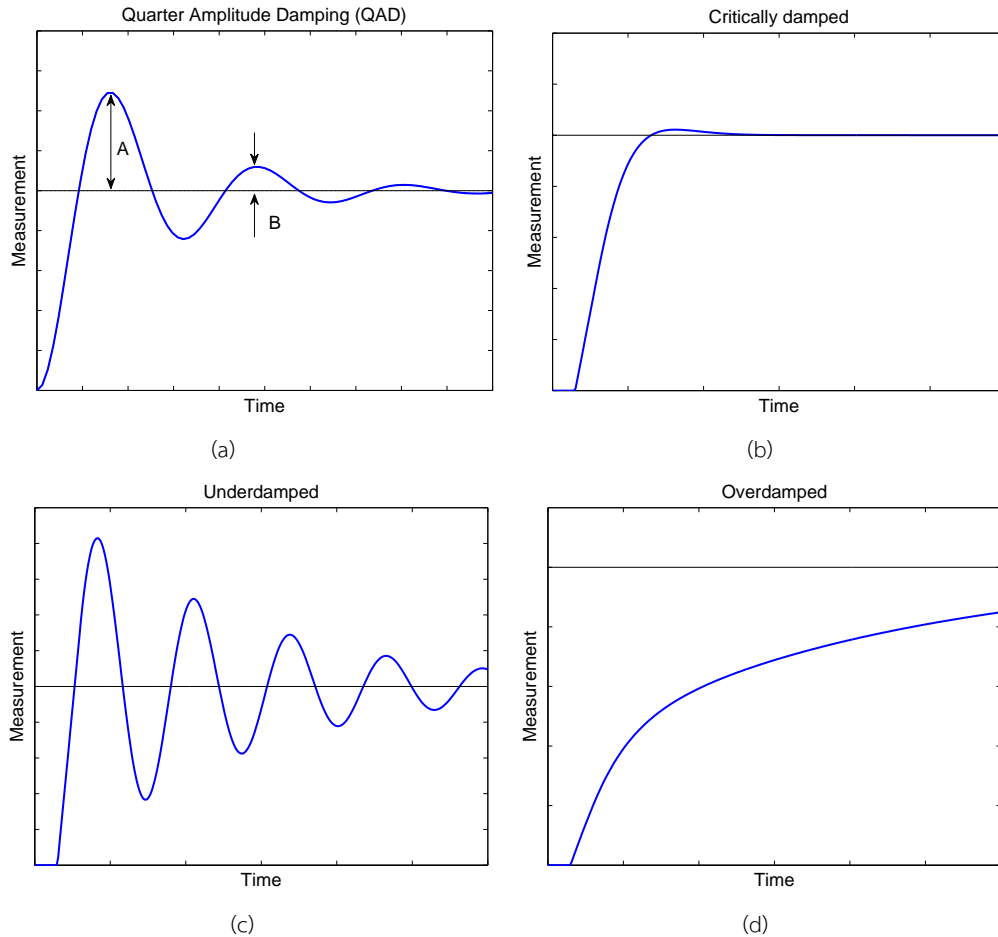


Figure 9: ลักษณะผลตอบสนองขึ้นอยู่กับค่าการปรับจูนค่า %PB

1.3 จุดประสงค์ในการปรับจูนพารามิเตอร์

หลังจากวัดค่าคาบเวลาธรรมชาติ และ/หรือ deadtime และค่าคงตัวเวลาแล้ว การปรับตั้งตัวควบคุม (controller setting) สามารถทำได้ด้วยวิธี Ziegler-Nichols หรือ Cohen-Coon หรือ Shinskey หรือวิธีอื่นๆ วัดจุดประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ผลรวมของความคลาดเคลื่อนในช่วงเวลาทำงานมีค่าต่ำสุด

ในทางปฏิบัติการปรับจูนที่เหมาะสมที่สุดวิธีหนึ่งคือ การปรับจูนเพื่อให้ได้ Quarter Amplitude Damping (QAD) ผลตอบลักษณะนี้เกี่ยวข้องกับผลตอบที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำสุด รูป 9(a) แสดงลักษณะสมบัติของ QAD

ในบางกระบวนการไม่สามารถยอมรับให้เกิดการแกว่งรอบค่าสุดท้ายได้ ดังนั้นต้องเลือกการปรับจูนให้ได้ผลตอบของระบบแบบอื่นดังในรูป 9(b) ซึ่งเรียกว่าผลตอบสนองหน่วงวิกฤติ (critically damped response) ถ้าเพิ่มอัตราขยายแก่ตัวควบคุม ผลตอบก็จะตัดผ่านค่าสุดท้ายของค่าวัดมากกว่าหนึ่งครั้ง ตัวควบคุมที่ให้ผลตอบสนองหน่วงวิกฤติ จะให้ค่าคลาดเคลื่อนมีขนาดใหญ่กว่าวิธี QAD แต่มักยอมรับได้ขึ้นกับความต้องการของกระบวนการเฉพาะอย่าง หากเพิ่มค่าอัตราขยายแก่ตัวควบคุมให้สูงขึ้นไปอีก ระบบก็จะเกิดการแกว่งที่ต่อเนื่องออกมา เมื่อมีการรบกวน ผลตอบลักษณะนี้เรียกว่าผลตอบสนองหน่วงขาด (underdamped response) และจะมีค่าความเบี่ยงเบน (เทียบกับค่ากำหนด) เล็กน้อย ดังรูป 9(c) ในทางกลับกัน หาก

ลดอัตราขยายที่ให้กับตัวควบคุมลง การรบกวนจะมีผลต่อผลตอบลดลง แต่จะให้ค่าความเบี่ยงเบนสูง และผลตอบลักษณะนี้เรียกว่าผลตอบสนองหน่วงเกิน (overdamped response) ดังรูป 9(d)

1.4 วิธีการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

ตัวควบคุมแบบ PID สามารถบรรยายได้ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right)$$

วิธีการปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ซึ่งได้แก่ K_p , T_i , T_d จะแบ่งออกเป็นแบบ P, PI, และ PID ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.4.1 Proportional mode (P)

ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนอย่างเดียวจะถูกใช้งานกับกระบวนการที่ต้องการผลตอบที่รวดเร็ว และในขณะเดียวกันก็ยอมให้เกิดการเบี่ยงเบนขนาดคงที่ขนาดหนึ่ง ขนาดของการเบี่ยงเบนจะเป็นฟังก์ชันของPB และไบแอส ตัวควบคุมชนิดเชิงสัดส่วนอย่างเดียวจะมีตัวที่ต้องปรับตั้งเพียงตัวเดียว ดังนั้นวิธี QAD เป็นวิธีที่ยอมรับได้ ส่วนวิธีการปรับจูนพารามิเตอร์ทำได้ดังนี้

วิธี	วงเปิด	วงปิด
Ziegler-Nichols/Shinskey	$K_p = \frac{1}{RL}$	$K_p = 0.5K_0$
Cohen-Coon	$K_p = \frac{1}{RL} \left(1 + \frac{L}{3\tau} \right)$	—

หากไม่ต้องการ QAD การเพิ่ม %PB (ลด K_p) จะทำให้เกิดการหน่วงวิกฤต และหากยังคงเพิ่มค่า %PB (ลด K_p) ขึ้นต่อไปอีกจะเกิดการหน่วงเกิน ในทางตรงกันข้าม การลด %PB จากการตั้งโดยวิธี QAD จะทำให้เกิดการหน่วงขาด

1.4.2 Proportional-plus-integral mode (PI)

ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนและอินทิกรัล (หรือ PI) มีข้อได้เปรียบกว่าตัวควบคุมเชิงสัดส่วนอย่างเดียวคือ ให้ผลตอบที่เร็วและให้ค่าการเบี่ยงเบนที่สภาวะอยู่ตัวเป็นศูนย์ วิธีการปรับตัวควบคุมแบบ PI จะยุ่งยากขึ้นเนื่องจากมีพารามิเตอร์ที่ต้องปรับ 2 ค่า

Shinskey เสนอค่า damped period ที่เหมาะสมกับตัวควบคุมแบบ PI คือเท่ากับ $1.5T_0$ โดยประมาณ สำหรับกระบวนการที่ไม่สามารถหาค่า natural period (T_0) จากวิธีวงปิดได้โดยง่ายนั้น ก็สามารถหาค่า τ และค่า L ที่หาจากวิธีวงเปิด จากนั้นก็สามารถหาค่า T_0 โดยประมาณได้จากรูป XXX ในรูป 10(a) ได้แสดงผลตอบของตัวควบคุม PI ที่คาบเท่ากับ $1.5T_0$ โดยมี quarter amplitude damping (QAD) (ในรูป T_{PI} คือ damped period ของผลตอบกระบวนการ เนื่องจากตัวควบคุม PI และ $T_{PI} = 1.5T_0$) การเพิ่มตัวอินทิกรัล ดังรูป 10(b) ให้กับตัวควบคุมทำให้ค่า damped period เพิ่มขึ้นและการแกว่งรอบค่าสุดท้ายนานขึ้น การลดผลจากตัวอินทิกรัลลง จะทำให้กระบวนการใช้ระยะเวลาเพิ่มขึ้นกว่าที่จะให้ผลตอบกลับเข้าสู่ค่ากำหนด การปรับจูนอาศัยค่า T_0 หรือค่า τ และค่า L หรือใช้ทั้งสองอย่าง

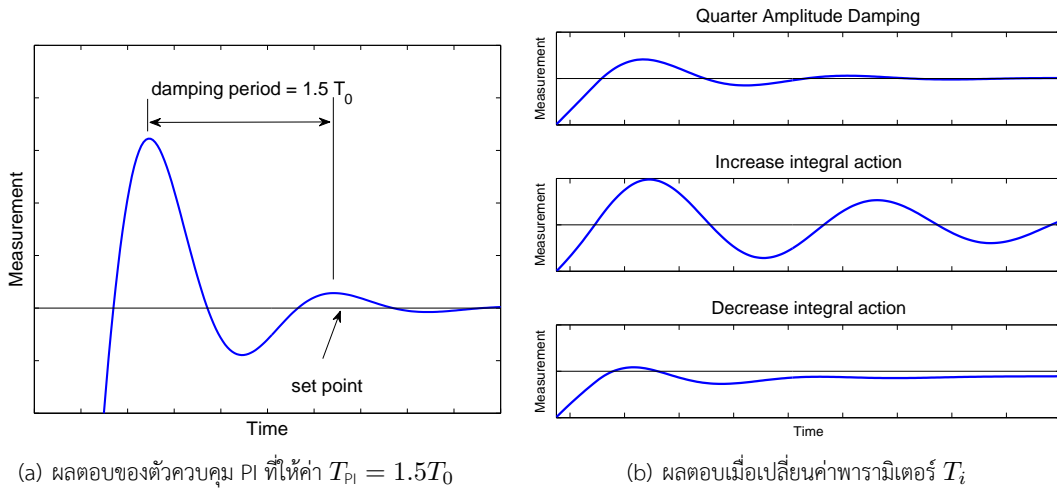


Figure 10: ผลตอบกระบวนการเมื่อใช้ตัวควบคุม PI

วิธี	วงเปิด	วงปิด
Ziegler-Nichols	$K_p = 0.9/RL$ $T_i = L/0.3$	$K_p = 0.5K_0$ $T_i = T_0/1.2$
Shinsky	—	$K_p = 0.5K_0$ $T_i = 0.43T_0$
Cohen-Coon	$K_p = \frac{1}{RL} (0.9 + L/12\tau)$ $T_i = L \left(\frac{30+3L/\tau}{9+20L/\tau} \right) L$	— —

1.4.3 Proportional, integral and derivative mode

ตัวควบคุมแบบ PID ไม่สามารถใช้กับระบบที่มีสัญญาณรบกวนการวัดมาก หรือการเปลี่ยนแปลงในลักษณะฉับพลันได้ เพราะส่วนที่เป็นอนุพันธ์อาศัยอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าวัด ตัวควบคุมแบบ PID จะใช้กับกระบวนการที่มีการตอบสนองช้า และมีคาบเวลาที่ค่อนข้างนาน ประยุกต์ใช้กับการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดี เมื่อค่าอุณหภูมิที่วัดได้เริ่มเปลี่ยนแปลง heat rate จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ตัวอนุพันธ์จะลดคาบเวลาของผลตอบให้สั้นลงเมื่อเกิดการรบกวน การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีต่างๆ สามารถแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

Table 1: ตารางสรุปวิธีการปรับจูนพารามิเตอร์ตัวควบคุม PID

ชนิดตัวควบคุม	ชนิดวงควบคุม	ค่าพารามิเตอร์		
		Ziegler-Nichols	Cohen-Coon	Shinsky
P	closed open	$K_p = 0.5K_0$ $K_p = 1/RL$	$K_p = \frac{1}{RL} \left(1 + \frac{L}{3\tau}\right)$	$K_p = 0.5K_0$ $K_p = 1/RL$
PI	closed open	$K_p = 0.5K_0$ $T_i = T_0/1.2$ $K_p = 0.9/RL$ $T_i = L/0.3$	$K_p = \frac{1}{RL} \left(0.9 + \frac{L}{12\tau}\right)$ $T_i = L \left(\frac{30+3L/\tau}{9+20L\tau}\right)$	$K_p = 0.5K_0$ $T_i = 0.43T_0$
PID	closed open	$K_p = 0.6K_0$ $T_i = 0.5T_0$ $T_d = T_0/8$ $K_p = 1.2/RL$ $T_i = 2L$ $T_d = 0.5L$	$K_p = \frac{1}{RL} \left(\frac{4}{3} + \frac{L}{4\tau}\right)$ $T_i = L \left(\frac{32+6L/\tau}{13+8L/\tau}\right)$ $T_d = \frac{4L}{11+2L/\tau}$	$K_p = K_0/4$ $T_i = 0.5T_0$ $T_d = 0.12T_0$

หมายเหตุ T_0 คือ natural period และ K_0 คือค่าอัตราขยายที่ทำให้เกิดการแกว่งของสัญญาณแบบแอมพลิจูดคงที่

วิธี	วงเปิด	วงปิด
Ziegler-Nichols	$K_p = 1.2/RL$ $T_i = 2L$ $T_d = 0.5L$	$K_p = 0.6K_0$ $T_i = 0.5T_0$ $T_d = T_0/8$
Shinsky	—	$K_p = 0.25K_0$ $T_i = 0.5T_0$ $T_d = 0.12T_0$
Cohen-Coon	$K_p = \frac{1}{RL} \left(\frac{4}{3} + \frac{L}{4\tau}\right)$ $T_i = L \left(\frac{32+6L/\tau}{13+8L/\tau}\right)$ $T_d = \frac{4L}{11+2L/\tau}$	—

2 อุปกรณ์การทดลอง

1. PCS327 Process Control Simulator
2. Function generator
3. Oscilloscope
4. NI card และ Real-Time Workshop Toolbox in MATLAB

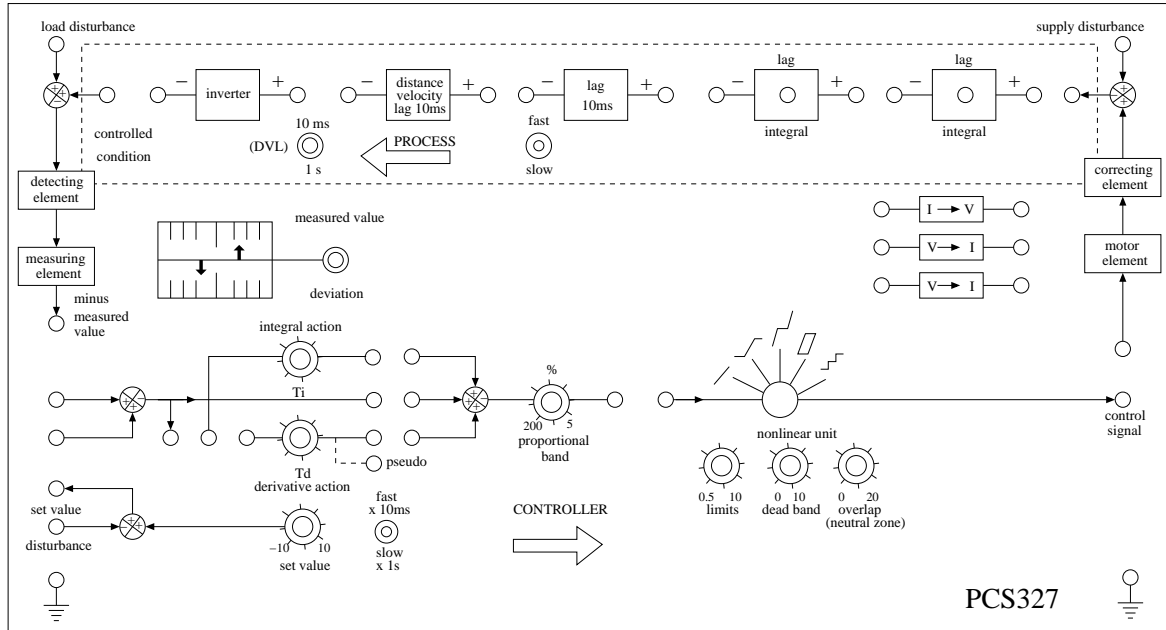


Figure 11: ชุดจำลองกระบวนการ PCS327

3 ชุดทดลอง PCS327

ชุดจำลองกระบวนการ PCS327 นั้น แสดงได้ดังรูป 11 ระบบกระบวนการนั้น ประกอบไปด้วยการต่อแบบอนุกรมของส่วนประกอบดังต่อไปนี้

- ระบบล่าช้า (lag) ที่มีค่าคงตัวเวลา 10 ms หรือ 1 s จำนวน 1 ตัว
- ระบบล่าช้าหรือตัวอินทิเกรเตอร์ (lag or integrator) (เลือกจากการสับสวิตช์) ที่มีค่าคงตัวทางเวลา 1 ms หรือ 1 s เป็นจำนวน 2 ตัว
- ตัวหน่วงเวลา (distance-velocity lag) ที่เลือกค่าหน่วงเวลาเป็น 10 ms หรือ 1 s จากการสับสวิตช์ เป็นจำนวน 1 ตัว
- ตัว inverter

เราสามารถต่ออนุกรม ส่วนประกอบข้างต้น ได้เป็นจำนวน 12 ระบบต่างๆ กัน โดยที่ระบบนั้นจะมีลักษณะเป็นระบบ type 0, 1, 2 ได้ตามที่เรเลือก จะเห็นว่าสัญญาณขาออกของแต่ละส่วนประกอบข้างต้น จะมีเครื่องหมายสลับกับสัญญาณเข้า (polarity inversion) ดังนั้นตัว inverter จึงอาจจะจำเป็นต้องใช้ เพื่อให้ระบบมีเครื่องหมายตามที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น ถ้าเราเชื่อมสายวงจรจาก ตัวล่าช้า กับตัวอินทิเกรเตอร์ และตัวหน่วงเวลา เราจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบกระบวนการเป็น

$$H(s) = -\frac{e^{-Ls}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s)}$$

โดยที่ L, τ_1, τ_2 คือค่าหน่วงเวลา และค่าคงตัวเวลา ที่ได้จากการสับสวิตช์

การจำลองสัญญาณรบกวนเข้าสู่ระบบ สามารถทำได้ ณ จุดที่เป็นสัญญาณขาเข้าของระบบ (supply disturbance) และ ณ สัญญาณขาออกของระบบ (load disturbance) สำหรับตัวควบคุมนั้น จะประกอบไปด้วย 5 ส่วนคือ

- ค่ากำหนด (set value) ซึ่งอยู่ในช่วง ± 10 volts
- ส่วนวัดความต่าง (comparing element)
- ตัวควบคุมส่วนอินทิเกรเตอร์ (integral action) ที่ปรับจาก integral action time (T_i)

Table 2: ตารางค่าพารามิเตอร์ต่างๆ บนชุดทดลอง PT327

Process	
1 Inverter	
1 Distance-velocity lag	
1 Lag	
2 Lag/Integrator, switch-selectable	
Time-constant of simple lags	10ms (FAST) or 1s (SLOW)
Time-constant of integrators	10ms (FAST) or 1s (SLOW)
Distance-velocity lag	10ms (FAST) or 1s (SLOW)
Useful frequency range of distance-velocity lag	0 to 30Hz (10ms)
Controller	
Set value range	0 to $\pm 10V$
Integral action time range (T_i)	250ms to 5ms (FAST), 25s to 0.5s (SLOW)
Derivative action time range (T_d)	0 to 20ms (FAST), 0 to 2s (SLOW)
Proportional band range (P)	200 % to 4 % corresponding to gain 0.5 to 25
Nonlinear unit	
Characteristics provided	linear, limits, deadband,backlash,relay
Slope of linear portions	Unity
Limit adjustment (L)	0.5 to 10V
Deadband adjustment (D)	0 to 10V
Overlap adjustment (H)	0 to 20V
Frequency range of backlash	3 to 60Hz (FAST), 0.03 to 0.6Hz (SLOW)

- ตัวควบคุมส่วนอนุพันธ์ (derivative action) ที่ปรับจาก derivative action time (T_d)
- ตัวควบคุมสัดส่วน ที่ปรับจาก proportional band (% PB)

เมื่อเราต่อสายวงจรจากค่าสัญญาณออก ที่โดนกลับเครื่องหมายเป็นลบ (minus measured value) กับค่ากำหนด (set value) ณ จุดวัดความต่าง จะทำให้เราได้ค่าความเบี่ยงเบนออกมา ซึ่งค่าที่ได้นี้ จะไปผ่านตัวควบคุมทั้งสามส่วน (integral, derivative, proportional) แล้วจะไปผ่านค่าอัตราขยาย (proportional band) เป็นจุดสุดท้าย ค่าสัญญาณออกที่ได้จากตัวควบคุมนี้ ยังสามารถนำไปผ่านส่วนประกอบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear unit) ชนิดต่างๆ เช่น การอิ่มตัว (saturation), deadzone, backlash, relay ได้ด้วยการสับสวิตช์ไปยังส่วนไม่เป็นเชิงเส้นนั้นๆ

สำหรับค่ากำหนดนั้น จะเป็นผลรวมของค่าหนดคงที่ ที่สามารถปรับได้จากปุ่ม set value ที่มีสเกลตั้งแต่ -10 ถึง 10 และสัญญาณอ้างอิงใดๆ ที่ใส่ไปในช่อง disturbance input

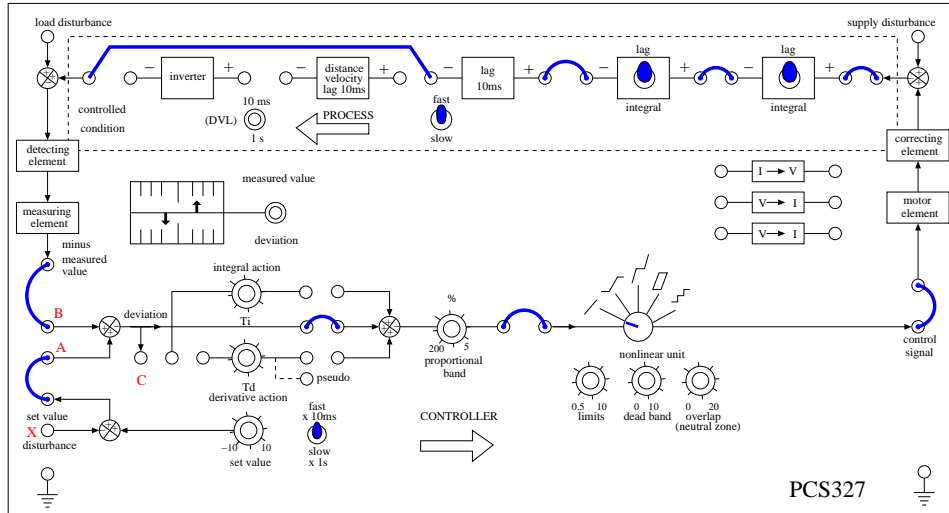


Figure 12: การต่อวงจรควบคุมแบบสัดส่วน

4 การทดลอง

การทดลอง 1 การควบคุมแบบสัดส่วน (P)

วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลการปรับอัตราขยายที่มีต่อผลตอบของระบบทั้ง transient และ steady state และเสถียรภาพของระบบ ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบสัดส่วนเป็นดังนี้

$$C(s) = K_p$$

การทดลอง

1. ต่อวงจรในรูป 12 ตั้งปุ่มสวิตช์ process และ controller อยู่ที่ fast
2. ตั้งค่า set value ไว้ที่ 0 ปรับค่า %PB ไปที่ 100
3. ใส่สัญญาณ square wave 2 Vpp ที่ 0.1 Hz ที่ช่องเสีย X ในรูป 12 ใช้ oscilloscope ดูรูปคลื่น วัด set value ที่ช่องเสีย A และ ดูรูปคลื่น measured value ที่ช่องเสีย B
4. บันทึกค่า measured value และ deviation ลงบนคอมพิวเตอร์
5. ทำการทดลองซ้ำโดยให้ %PB เป็น 50 และ 200
6. ให้ลด %PB จนกระทั่งเมื่อปรับ set value ใดๆ ระบบจะแกว่งตลอดเวลา บันทึกค่า %PB ณ จุดนั้น ($K_0 = 100/\%PB$) และคาบของการแกว่ง (T_0) และกราฟสัญญาณออกที่มีการแกว่งคงที่

การทดลอง 2 การควบคุมแบบสัดส่วนและอินทิกรัล (PI)

วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลการปรับอัตราขยาย K_p และ integral time T_i ที่มีผลต่อผลตอบของระบบทั้ง transient และ steady state และเสถียรภาพของระบบ ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบสัดส่วนและอินทิกรัลเป็นดังนี้

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

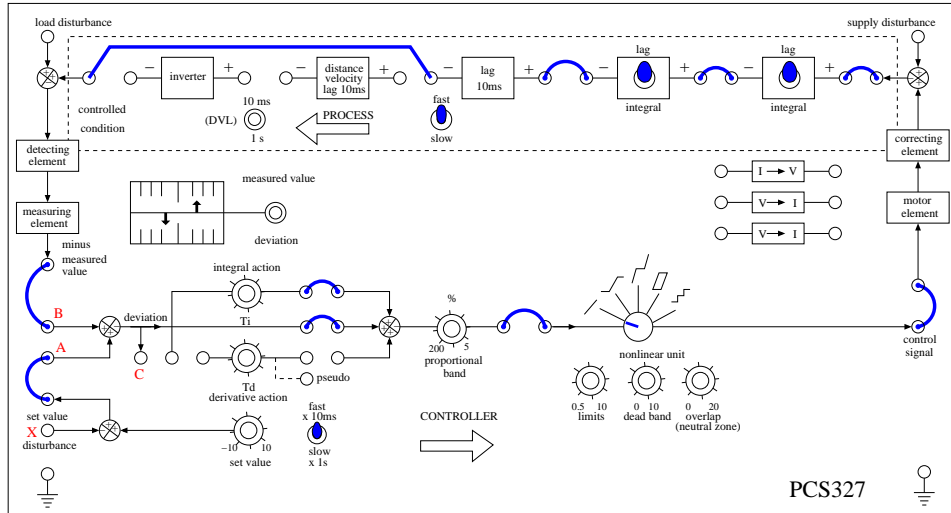


Figure 13: การต่อวงจรควบคุมแบบ PI

การทดลอง

1. ต่อวงจรดังรูป 13 ตั้งปุ่มสวิตช์ process และ controller อยู่ที่ fast
2. ตั้งค่า set value ไว้ที่ 0 ปรับค่า %PB ไว้ที่ 100
3. ใส่สัญญาณ square wave 2 Vpp ที่ 0.1 Hz ที่ช่องเสียบ X ในรูป 13 ใช้ oscilloscope ดูรูปคลื่น deviation จากช่อง C
4. ปรับ integral action (T_i) จนกระทั่ง deviation ลดลงจนเป็นศูนย์ และปรับ %PB จนกระทั่งได้ overshoot เป็นที่น่าพอใจ
5. บันทึกค่า measured value และ deviation ลงบนคอมพิวเตอร์

การทดลอง 3 การควบคุมแบบสัดส่วน อินทิกรัล และอนุพันธ์ (PID)

วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลการปรับ K_p , integral time T_i และ derivative time T_d ที่มีผลต่อผลตอบของระบบ ทั้ง transient และ steady state และเสถียรภาพของระบบ ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม PID เป็นดังนี้

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

การทดลอง

1. ต่อวงจรในรูป 14 ตั้งปุ่มสวิตช์ process และ controller อยู่ที่ fast
2. ตั้งค่า set value ไว้ที่ 0 ใส่สัญญาณ square wave 2 Vpp ที่ 0.1 Hz ที่ช่องเสียบ X ในรูป 14 ใช้ oscilloscope ดูรูปคลื่น วัด set value ที่ช่องเสียบ A และ ดูรูปคลื่น measured value ที่ช่องเสียบ B
3. ตั้งค่า %PB ซึ่งทำให้เกิดการพุ่งเกินประมาณ 4 ครั้งภายหลัง การเปลี่ยนแปลงสัญญาณของค่ากำหนด โดยตั้งค่า $T_i = \infty$ และ $T_d = 0$

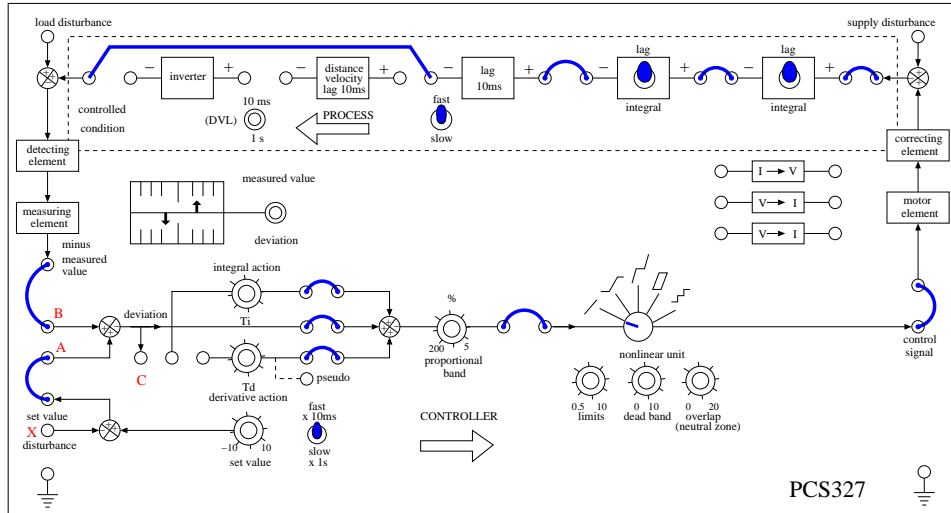


Figure 14: การต่อวงจรควบคุมแบบ PID

4. จากนั้น ปรับลด T_i ; จนกระทั่งได้ steady state error เป็นศูนย์
5. ปรับเพิ่ม derivative time T_d เพื่อคูณผลของ T_d ต่อผลตอบจนกระทั่งได้ผลตอบที่พอใจ
6. บันทึกค่า measured value และ deviation ลงบนคอมพิวเตอร์

การทดลอง 4 การปรับจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI และ PID

วัตถุประสงค์ เพื่อเปรียบเทียบการปรับจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI และ PID ด้วยวิธีต่างๆ

การทดลอง

1. ใช้ค่าอัตราขยายวิกฤต (K_0) และคาบของการแกว่ง (T_0) ที่ได้จากการทดลองที่ 1 มาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI และ PID โดยวิธีการของ Zeigler-Nichols หรือ Shinskey แบบวงปิด
2. ต่อวงจรและตั้งค่าสวิตช์ต่างๆ เหมือนการทดลองที่ 3 แต่ให้ลดความถี่ของ square wave ลงเหลือ 0.05 Hz และใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่คำนวณได้
3. ปรับจูนค่าจนได้ผลตอบที่น่าพอใจ บันทึกผลตอบลงบนคอมพิวเตอร์
4. ตั้งค่าสัญญาณแบบขั้นที่มีขนาด 10 % ของสัญญาณ square wave (ในที่นี้คือ 0.2 V) ใน `getdata.mdl` ให้ค่าสัญญาณนี้ส่งต่อผ่านออกจาก NI card ทาง analog output ทำสัญญาณที่ได้เสียบเข้าช่อง load disturbance บน PCS327
5. บันทึกผลตอบเมื่อระบบมีการรบกวน

References

- [1] D.E. Seborg, T.F. Edgar and D.A. Mellichamp, *Process Dynamics and Control*, John Wiley, New York, 1989.
- [2] G. Stephanopoulos, *Chemical Process Control*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1984.