

บทที่ 2

การปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID โดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์

ในบทนี้กล่าวถึงวิธีการปรับจูนตัวควบคุม PID โดยอาศัยสูตรการปรับจูนแบบต่างๆ และใช้เทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์เพื่อหาข้อมูลจุดวิกฤตสำหรับการใช้ในการปรับจูนตัวควบคุม PID ด้วยสูตรการปรับจูนแบบต่างๆ

2.1 สูตรการปรับจูนตัวควบคุม PID แบบต่างๆ [18]

โครงสร้างของตัวควบคุม PID แบบปรับจูนตัวเองอาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์เพื่อหาข้อมูลที่จุดวิกฤต คือ อัตราขยายวิกฤต (critical gain) และคาบวิกฤต (critical period) แล้วนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ตามสูตรการปรับจูนแบบต่างๆ ที่อาศัยข้อมูลจุดวิกฤต เช่น สูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols สูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols แบบปรับปรุง (refined Ziegler-Nichols) เป็นต้น สามารถแสดงสมการของตัวควบคุม PID ซึ่งมีการปรับปรุงส่วนของกริยาอนุพันธ์ (derivative action) เพื่อแก้ไขปัญหาเนื่องจากความไวของกริยาอนุพันธ์ต่อสัญญาณรบกวน [18] ได้ดังนี้

$$u(t) = k_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt - T_d \frac{dy_f(t)}{dt} \right]; y_f(s) = \frac{1}{1 + sT_d / N} y(s), N = 10 \quad (2.1)$$

2.1.1 สูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols

จากค่าอัตราขยายวิกฤต k_u และคาบวิกฤต t_u ของกระบวนการ นำไปคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID จากสมการที่ (2.1) ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ดังนี้

$$\text{อัตราขยายสัดส่วน (proportional gain) } k_c = 0.6k_u$$

$$\text{เวลาอินทิกรัล (integral time) } T_i = 0.5t_u \quad (2.2)$$

$$\text{เวลาอนุพันธ์ (derivative time) } T_d = 0.125t_u$$

2.1.2 สูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols แบบปรับปรุง

ในงานวิจัยของ Hang, Astrom และ Ho [18] พบว่าผลตอบสนองภายใต้การควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยสูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols มีค่าพุ่งเกินสูง และสำหรับกระบวนการที่มีค่าประวิงเวลายาวนาน พบว่าผลตอบสนองจากการควบคุมมีค่าพุ่งใต้ (undershoot) สูง จึงมีความพยายามที่จะปรับปรุงสูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols โดย Hang, Astrom และ Ho ปรับปรุงโดยการเพิ่มค่าถ่วงน้ำหนักที่คูณกับจุดปรับตั้งในโครงสร้างของตัวควบคุม PID ดังนี้

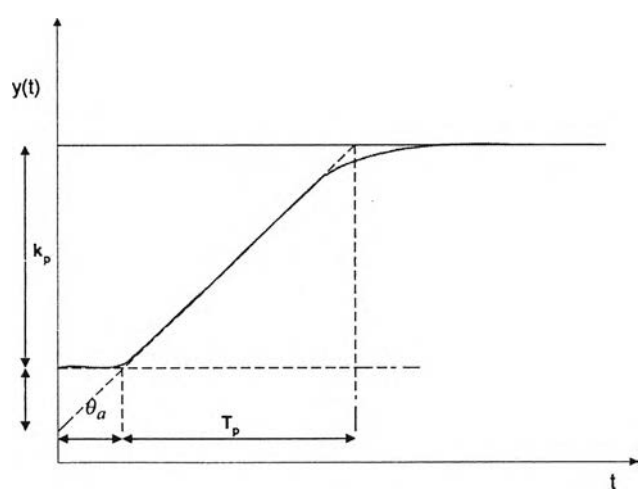
$$u(t) = k_c [\beta(y_r(t) - y(t)) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt - T_d \frac{dy_f(t)}{dt}]; y_f(s) = \frac{1}{1 + sT_d / N} y(s), N = 10 \quad (2.3)$$

โดยที่ β เป็นค่าถ่วงน้ำหนักที่คูณกับจุดปรับตั้ง (y_r) เมื่อค่า k_c, T_i, T_d หาจากสูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols และค่า β หาจากสูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols แบบปรับปรุง โดยพิจารณาจากค่าอัตราขยายของกระบวนการแบบบรรทัดฐาน (normalized process gain, κ) และ ค่าประวิงเวลาแบบบรรทัดฐาน (normalized dead-time, Θ) ซึ่งหาได้จากสมการดังนี้

$$\kappa = k_p k_u \quad (2.4)$$

$$\Theta = \frac{a}{k_p} = \frac{\theta_a}{T_p} \quad (2.5)$$

ค่า θ_a, T_p, a, k_p พิจารณาจากผลตอบสนองของระบบวงเปิดเมื่อมีสัญญาณเข้าเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (unit-step function)



รูปที่ 2.1 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดเมื่อมีสัญญาณเข้าเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย

กำหนดค่าถ่วงน้ำหนักที่คูณกับจุดปรับตั้ง β ของตัวควบคุม PID โดยพิจารณาจาก ค่า κ และ Θ ดังนี้

$$\beta = \frac{15-\kappa}{15+\kappa} \quad \text{เมื่อ } 2.25 < \kappa < 15 \text{ หรือ } 0.16 < \Theta < 0.57 \quad (2.6)$$

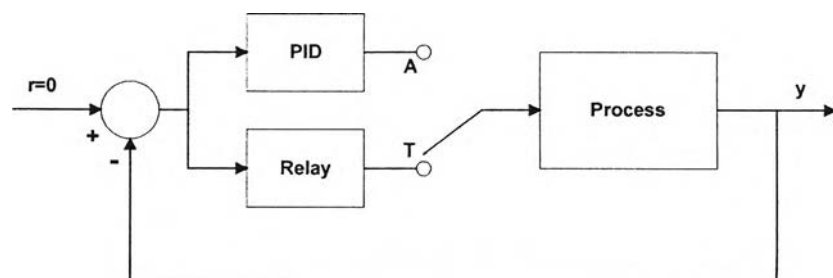
$$\beta = \frac{8}{17} \left(\frac{4}{9} \kappa + 1 \right) \quad \text{เมื่อ } 1.5 < \kappa < 2.25 \text{ หรือ } 0.57 < \Theta < 0.96 \quad (2.7)$$

จากการศึกษาของ Hang, Astrom และ Ho พบว่าในกรณีที่ค่า $1.5 < \kappa < 2.25$ หรือ $0.57 < \Theta < 0.96$ พบว่าผลตอบสนองจะมีค่าพุ่งได้ (undershoot) มาก และการขจัดผลการรบกวนจากภาระ (load disturbance) จะช้า จึงจำเป็นที่จะต้องลดค่า T_i โดยใช้อัตราส่วน μ โดยค่า T_i ใหม่มีค่าเป็น

$$T_i = 0.5 \mu t_u \quad (2.8)$$

Hang, Astrom และ Ho นำสูตรการปรับจูนตัวควบคุม PID ที่ปรับปรุงได้มาเปรียบเทียบกับผลการควบคุมกับตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยสูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols โดยทำการทดลองกับกระบวนการต่างๆ ได้แก่ กระบวนการอันดับหนึ่งที่มีการประวิงเวลา กระบวนการที่มีคุณสมบัติเฟสไม่ต่ำสุด (nonminimum-phase) และกระบวนการที่มีอันดับสูง (higher order) พบว่าผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยสูตรปรับปรุงที่เสนอมีค่าพุ่งเกินลดลงและสามารถลดค่าพุ่งได้สำหรับกระบวนการที่มีค่าประวิงเวลายาวนานได้ ผลตอบสนองมีช่วงเวลาเข้าที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยสูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols

2.2 การวิเคราะห์การปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID โดยใช้เทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์



รูปที่ 2.2 แสดงการปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID โดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์

ในการปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID โดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ เป็นวิธีที่ใช้ในการหาข้อมูลที่จุดวิกฤตในระบบวงปิด โดยใช้ฟังก์ชันพรรณนา (describing function) ในการประมาณส่วนประกอบที่มีความไม่เชิงเส้นแบบไม่แปรค่าตามเวลา ซึ่งในกรณีนี้คือรีเลย์ ภายใต้เงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์ระบบที่ประกอบด้วยส่วนประกอบไม่เชิงเส้น โดยใช้ฟังก์ชันพรรณนาอย่างง่ายว่า

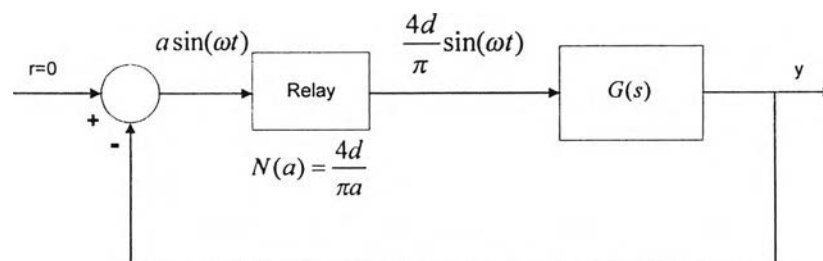
1. มีส่วนประกอบไม่เชิงเส้นในระบบเพียงตัวเดียว และมีลักษณะไม่เชิงเส้นแบบไม่แปรค่าตามเวลา (time invariant nonlinearity)
2. กระบวนการภายใต้การควบคุมมีลักษณะเป็นตัวกรองความถี่ต่ำ (low pass filter)
3. ส่วนประกอบไม่เชิงเส้นนั้นมีลักษณะคี่ (odd) แสดงได้ดังสมการ

$$\varphi(-x) = -\varphi(x) \quad (2.9)$$

โดยที่ $\varphi(x)$ คือฟังก์ชันของส่วนประกอบไม่เชิงเส้นนั้น ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดเราสามารถพิจารณาเฉพาะสัญญาณคาบซึ่งเป็นรูปคลื่นไซน์ในฮาร์โมนิกที่หนึ่ง เนื่องจากคุณสมบัติของกระบวนการที่เป็นตัวกรองความถี่ต่ำ และใช้อัตราส่วนระหว่างขนาดของสัญญาณเอาต์พุตกับขนาดสัญญาณอินพุตของส่วนประกอบไม่เชิงเส้นมาประมาณฟังก์ชันของส่วนประกอบไม่เชิงเส้นนั้น จากการใช้ฟังก์ชันพรรณนาสามารถประมาณตัวรีเลย์ได้ด้วยค่าอัตราขยายซึ่งขนาดขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของรีเลย์และแอมพลิจูดของสัญญาณคาบที่เป็นสัญญาณอินพุตของรีเลย์ ดังนี้

$$N(a) = \frac{4d}{\pi a} \quad (2.10)$$

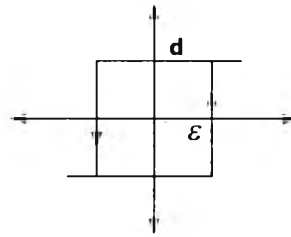
โดยที่ d คือค่าแอมพลิจูดของรีเลย์ และ a คือแอมพลิจูดของสัญญาณคาบที่เป็นสัญญาณอินพุตของรีเลย์



รูปที่ 2.3 แสดงการหาจุดวิกฤตโดยประมาณรีเลย์ด้วยฟังก์ชันพรรณนา

จุดประสงค์ของการนำเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์มาประยุกต์ใช้ในการปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID เพื่อหาข้อมูลที่จุดวิกฤตของกระบวนการ และนำไปใช้ในการปรับจูนตัวควบคุม PID โดยใช้กฎการปรับแบบต่างๆ ที่อาศัยข้อมูลที่จุดวิกฤต เช่น สูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols หรือสูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols แบบปรับปรุง โดยใช้เทคนิคฟังก์ชันพรรณนาในการประมาณตัวรีเลย์ด้วยค่าอัตราขยายค่าหนึ่ง เนื่องจากการปรับจูนตัวเองด้วยวิธีการป้อนกลับด้วยรีเลย์นี้ สามารถควบคุมขอบเขตในการแกว่งของผลตอบสนองของระบบในระหว่างที่มีการปรับจูนไม่ทำให้กระบวนการเสียหาย

หากในระบบที่จะทำการปรับจูนตัวควบคุม PID มีสัญญาณรบกวน จะต้องใช้รีเลย์ที่มีฮิสเตอร์รีซิส (hysteresis, ϵ) เพื่อไม่ให้งานของรีเลย์มีความผิดพลาดอันเนื่องมาจากผลของสัญญาณรบกวน Astrom และ Hagglund [3] เสนอแนะว่าควรกำหนดขนาดของฮิสเตอร์รีซิสประมาณ 2 เท่าของขนาดสูงสุดของสัญญาณรบกวน



รูปที่ 2.4 ลักษณะของรีเลย์ที่มีฮิสเตอร์รีซิส

2.3 การปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID โดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์

ทำการทดลองการปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID โดยอาศัยการป้อนกลับด้วยรีเลย์ จากการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อนำผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้โดยอาศัยการป้อนกลับด้วยรีเลย์ไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีการปรับจูนที่จะกล่าวถึงในบทที่ 4 โดยทำการทดลองกับกระบวนการที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนต่างๆ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 1. \quad G_1(s) &= \frac{e^{-s}}{s+1} \\
 2. \quad G_2(s) &= \frac{e^{-2s}}{s+1} \\
 3. \quad G_3(s) &= \frac{e^{-3s}}{s+1} \\
 4. \quad G_4(s) &= \frac{-1.4s+1}{(s+1)^3} \\
 5. \quad G_5(s) &= \frac{1}{(s+1)^5}
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

ในการเลือกฟังก์ชันถ่ายโอนแบบต่างๆ มีจุดประสงค์ ดังนี้

1. ในการกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการที่ 1-3 เพื่อพิจารณาผลของค่าประวิงเวลาต่อผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีต่างๆ โดยเพิ่มค่าประวิงเวลาจาก 1 วินาที เป็น 2 และ 3 วินาทีตามลำดับ เพื่อความง่ายในการกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ จะกำหนดให้โพล (pole) ของกระบวนการทั้ง 3 อยู่ที่ -1

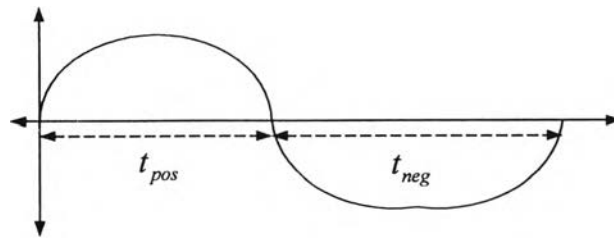
2. ในการกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการที่ 2, 4 และ 5 เพื่อพิจารณาผลการควบคุมกระบวนการที่มีลักษณะพลวัตแบบต่างๆ ด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีต่างๆ เนื่องจากลักษณะพลวัตของกระบวนการที่ 2, 4 และ 5 ครอบคลุมลักษณะพลวัตของกระบวนการโดยทั่วไป โดยประกอบด้วยกระบวนการที่ 2 ซึ่งมีค่าประวิงเวลา กระบวนการที่ 4 เป็นกระบวนการที่มีคุณสมบัติเฟสไม่ต่ำสุด (nonminimum-phase) และกระบวนการที่ 5 เป็นกระบวนการที่มีอันดับสูง เพื่อความง่ายในการกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ จะกำหนดให้โพล (pole) ทั้งหมดของกระบวนการทั้ง 3 อยู่ที่ -1 [17]

การปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID โดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ [3],[5] ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีขั้นตอนดังนี้

1. ควบคุมให้ผลตอบสนองของกระบวนการเข้าสู่ค่าคงที่ที่จุดทำงานปกติ
2. หลังจากผลตอบสนองเข้าสู่ค่าคงที่แล้ว ทำการปรับจูนตัวควบคุม PID โดยอาศัยการป้อนกลับด้วยรีเลย์ เพื่อให้เกิดการแกว่งของผลตอบสนองในระบบวงปิดที่มีการป้อนกลับด้วยรีเลย์ ดังนี้
 - กำหนดขนาดการแกว่งของผลตอบสนองให้อยู่ภายในขอบเขตการทำงานของกระบวนการ และควรกำหนดให้มีขนาดมากกว่าขนาดสูงสุดของสัญญาณรบกวนในระบบ เพื่อป้องกันไม่ให้ขนาดการแกว่งของผลตอบสนองที่วัดได้มีความผิดพลาดเนื่องจากผลของสัญญาณรบกวน ในที่นี้จุดทำงานปกติคืออยู่ที่สัญญาณค่าปรับตั้งขนาด 1 หน่วย กำหนดขนาดการแกว่งของผลตอบสนองที่ต้องการเท่ากับ 0.1 หรือ 10% ของค่าปรับตั้งที่จุดทำงานปกติ กำหนดขนาดเริ่มต้นของรีเลย์เท่ากับ 0.1 เนื่องจากในการทดลองไม่มีสัญญาณรบกวน จึงไม่ได้ใช้รีเลย์ที่มีฮิสเตอร์ริซิส
 - หากผลตอบสนองไม่มีการแกว่งภายในช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งในการทดลองกำหนดเท่ากับ 20 วินาที จะมีกลไกในการเพิ่มขนาดของรีเลย์โดยอัตโนมัติ โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 % ของขนาดรีเลย์เดิม
 - หากการแกว่งของผลตอบสนองมีความไม่สมมาตรรอบค่าคงที่ที่จุดทำงานปกติ ต้องมีการปรับแก้ค่าไบแอสของสัญญาณควบคุมที่ป้อนให้กระบวนการ ดังสมการ

$$b = d \frac{t_{pos} - t_{neg}}{t_{pos} + t_{neg}} \quad (2.12)$$

โดยที่ b คือค่าไบแอสซึ่งเพิ่มให้กับสัญญาณควบคุมที่ออกจากรีเลย์ d คือขนาดของรีเลย์ t_{pos} คือช่วงเวลาที่การแกว่งของผลตอบสนองมีค่าสูงกว่าค่าคงที่ที่จุดทำงานปกติ t_{neg} คือช่วงเวลาที่การแกว่งของผลตอบสนองมีค่าต่ำกว่าค่าคงที่ที่จุดทำงานปกติ



รูปที่ 2.5 ลักษณะการแกว่งของผลตอบสนองที่ไม่สมมาตร

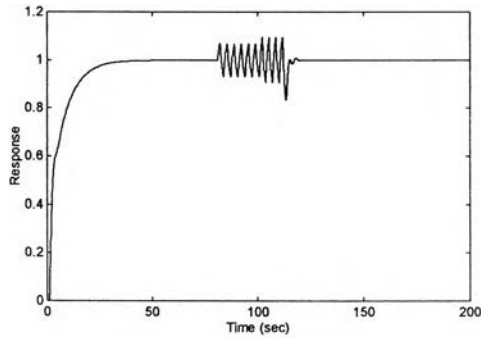
- หากการแกว่งของผลตอบสนองมีลักษณะสมมาตร แต่ขนาดการแกว่งไม่เท่ากับขนาดที่กำหนด จะปรับขนาดของรีเลย์ ดังนี้

$$d_{new} = d \frac{a_{ref}}{a} \quad (2.13)$$

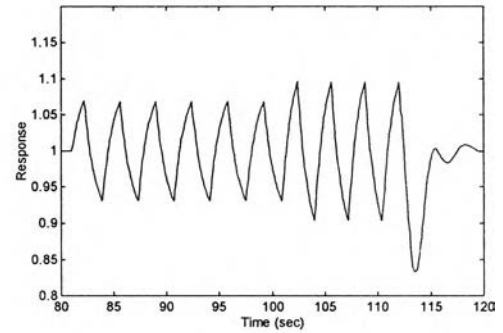
โดยที่ d_{new} คือขนาดของรีเลย์ใหม่ d คือขนาดของรีเลย์เดิม a_{ref} คือขนาดการแกว่งของผลตอบสนองที่ต้องการ และ a คือขนาดการแกว่งของผลตอบสนองที่เกิดขึ้น

3. เมื่อได้การแกว่งของผลตอบสนองที่มีขนาดตามที่กำหนดแล้ว หาค่าอัตราขยายวิกฤตและความถี่วิกฤตจากผลตอบสนองที่มีการแกว่ง และนำมาใช้ในการปรับจูนตัวควบคุม PID ตามสูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols แบบปรับปรุง เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID แล้ว จึงหยุดการป้อนกลับด้วยรีเลย์ และใช้ตัวควบคุม PID ที่ได้จากการปรับจูนตัวเองในการควบคุมผลตอบสนองของกระบวนการ จากขั้นตอนต่างๆข้างต้น ได้ทำการทดลองกับกระบวนการที่ 1-5 ดังแสดงในรูปที่ 2.6 - รูปที่ 2.10

$$1. G_1(s) = \frac{e^{-s}}{s+1}$$



(ก)



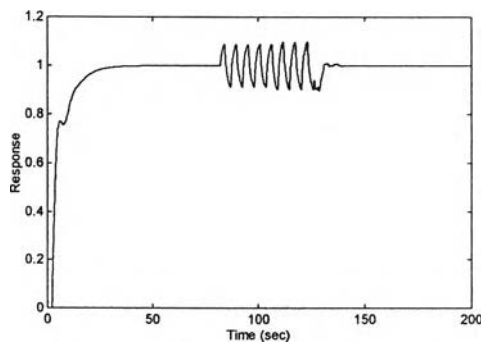
(ข)

รูป (ก) ผลตอบสนองในช่วงเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID

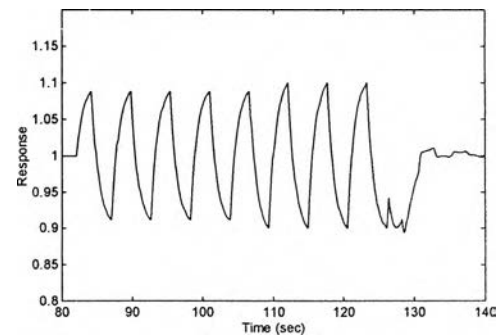
รูป (ข) ผลตอบสนองในช่วงที่มีการป้อนกลับด้วยรีเลย์

รูปที่ 2.6 ผลตอบสนองที่มีการแกว่งระหว่างการปรับจูนของกระบวนการที่ 1

$$2. G_2(s) = \frac{e^{-2s}}{s+1}$$



(ก)



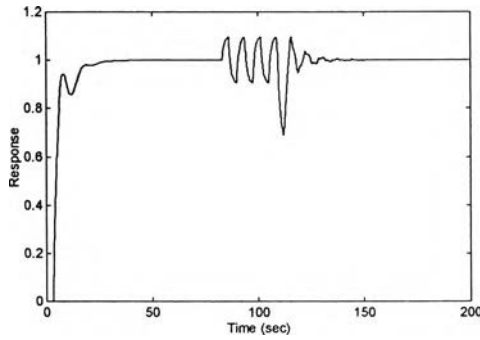
(ข)

รูป (ก) ผลตอบสนองในช่วงเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID

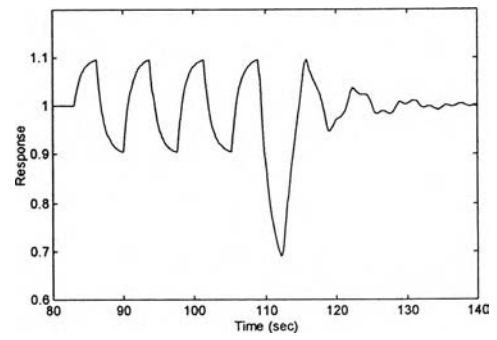
รูป (ข) ผลตอบสนองในช่วงที่มีการป้อนกลับด้วยรีเลย์

รูปที่ 2.7 ผลตอบสนองที่มีการแกว่งระหว่างการปรับจูนของกระบวนการที่ 2

3. $G_3(s) = \frac{e^{-3s}}{s+1}$



(ก)



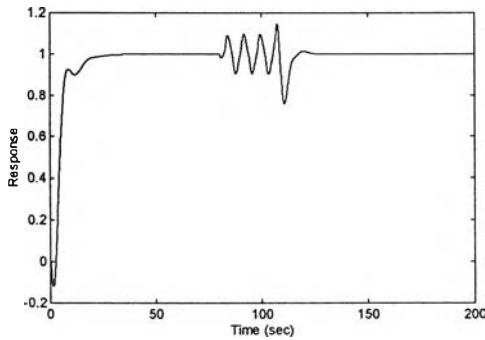
(ข)

รูป (ก) ผลตอบสนองในช่วงเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID

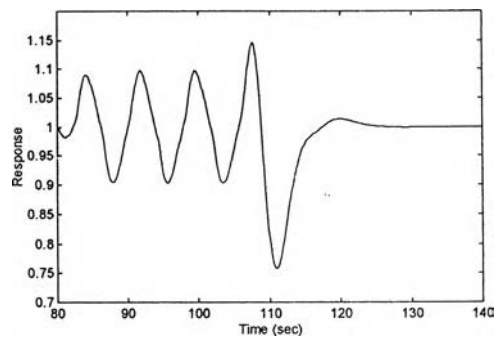
รูป (ข) ผลตอบสนองในช่วงที่มีการป้อนกลับด้วยรีเลย์

รูปที่ 2.8 ผลตอบสนองที่มีการแกว่งระหว่างการปรับจูนของกระบวนการที่ 3

4. $G_4(s) = \frac{-1.4s+1}{(s+1)^3}$



(ก)



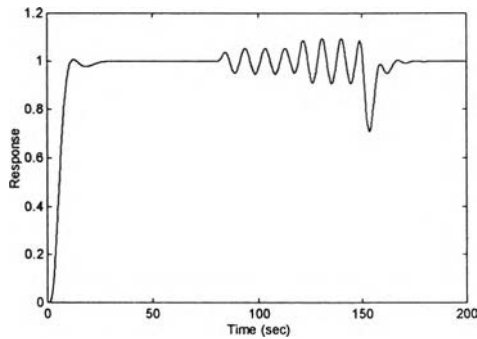
(ข)

รูป (ก) ผลตอบสนองในช่วงเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID

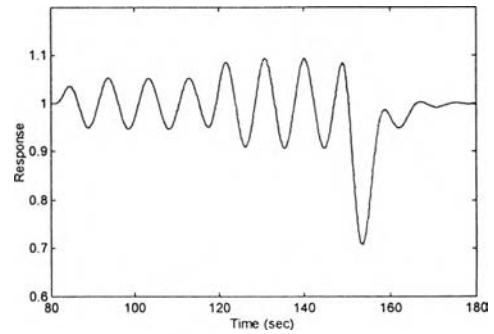
รูป (ข) ผลตอบสนองในช่วงที่มีการป้อนกลับด้วยรีเลย์

รูปที่ 2.9 ผลตอบสนองที่มีการแกว่งระหว่างการปรับจูนของกระบวนการที่ 4

$$5. G_s(s) = \frac{1}{(s+1)^5}$$



(ก)



(ข)

รูป (ก) ผลตอบสนองในช่วงเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID

รูป (ข) ผลตอบสนองในช่วงที่มีการป้อนกลับด้วยรีเลย์

รูปที่ 2.10 ผลตอบสนองที่มีการแกว่งระหว่างการปรับจูนของกระบวนการที่ 5

จากค่าประมาณของอัตราขยายวิกฤต k_u และคาบวิกฤตของกระบวนการ t_u โดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ นำไปคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID คือ β , \hat{k}_c , \hat{T}_i และ \hat{T}_d เปรียบเทียบผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนค่าพารามิเตอร์ β , k_c , T_i และ T_d โดยอาศัยอัตราขยายวิกฤต k_u และคาบวิกฤต t_u ที่แท้จริงของกระบวนการ ที่หาจากแผนภาพเชิงขั้ว (polar plot) ของกระบวนการที่ความถี่ตัดข้ามเฟส (phase crossover frequency) ω_{pc} ซึ่งสามารถคำนวณหาความถี่วิกฤต ω_u และอัตราขยายวิกฤต k_u ได้ดังนี้

$$k_u = \frac{1}{k_{pc}} \quad (2.14)$$

$$\omega_u = \omega_{pc}$$

โดยที่ k_{pc} คืออัตราขยายของกระบวนการที่ความถี่ตัดข้ามเฟส ω_{pc} การเปรียบเทียบผลการควบคุมกับกระบวนการต่างๆแสดงในรูปที่ 2.11

ตารางที่ 2.1 ผลการปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID โดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์และ
สูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols แบบปรับปรุง

การทดลอง	\hat{k}_u	\hat{t}_u	\hat{k}_c	\hat{T}_i	\hat{T}_d	$\hat{\beta}$
1. $G_1(s) = \frac{e^{-s}}{s+1}$	1.93	3.20	1.16	1.37	0.40	0.87
2. $G_2(s) = \frac{e^{-2s}}{s+1}$	1.44	5.60	0.86	1.79	0.70	0.77
3. $G_3(s) = \frac{e^{-3s}}{s+1}$	1.33	7.60	0.80	2.25	0.95	0.75
4. $G_4(s) = \frac{-1.4s+1}{(s+1)^3}$	1.32	7.80	0.79	2.28	0.97	0.75
5. $G_5(s) = \frac{1}{(s+1)^5}$	2.57	9.20	1.54	4.60	1.15	0.71

ตารางที่ 2.2 ผลการปรับจูนตัวควบคุม PID โดยสูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols แบบปรับปรุง
เมื่อทราบข้อมูลอัตราขยายวิกฤตและคาบวิกฤตที่ถูกต้องของกระบวนการ

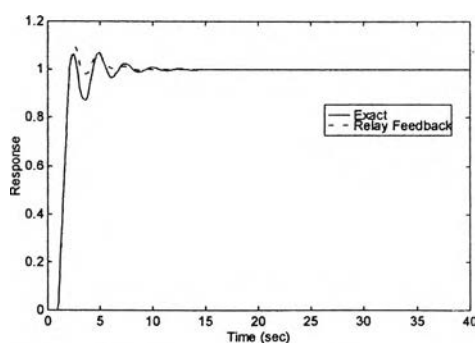
การทดลอง	k_u	t_u	k_c	T_i	T_d	β
1. $G_1(s) = \frac{e^{-s}}{s+1}$	2.26	3.10	1.36	1.55	0.39	0.74
2. $G_2(s) = \frac{e^{-2s}}{s+1}$	1.52	5.44	0.91	1.84	0.68	0.79
3. $G_3(s) = \frac{e^{-3s}}{s+1}$	1.29	7.68	0.77	2.20	0.96	0.74
4. $G_4(s) = \frac{-1.4s+1}{(s+1)^3}$	1.53	6.82	0.92	2.32	0.85	0.79
5. $G_5(s) = \frac{1}{(s+1)^5}$	2.89	8.61	1.73	4.30	1.08	0.68

ตารางที่ 2.3 ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลจุดวิกฤตจากการใช้เทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์

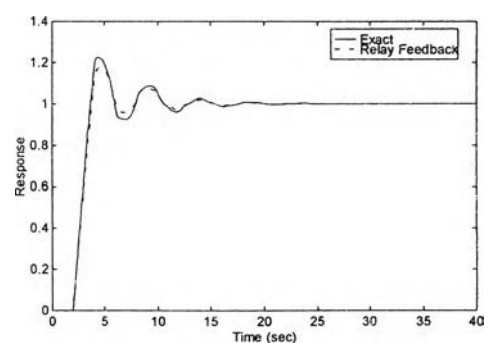
การทดลอง	k_u	t_u	\hat{k}_u	\hat{t}_u	% ความผิดพลาดของ k_u	% ความผิดพลาดของ t_u
1. $G_1(s) = \frac{e^{-s}}{s+1}$	2.26	3.10	1.93	3.20	14.22	3.23
2. $G_2(s) = \frac{e^{-2s}}{s+1}$	1.52	5.44	1.44	5.60	5.26	2.94
3. $G_3(s) = \frac{e^{-3s}}{s+1}$	1.29	7.68	1.33	7.60	3.10	1.04
4. $G_4(s) = \frac{-1.4s+1}{(s+1)^3}$	1.53	6.82	1.32	7.80	13.73	14.37
5. $G_5(s) = \frac{1}{(s+1)^5}$	2.89	8.61	2.57	9.20	11.07	6.85

จากผลการทดลองพบว่าเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ สามารถนำมาใช้ในการหาข้อมูลจุดวิกฤตของกระบวนการได้ดี โดยสามารถควบคุมผลตอบสนองของกระบวนการระหว่างที่มีการหาข้อมูลจุดวิกฤตให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดได้ จากการทดลองมีความผิดพลาดของข้อมูลจุดวิกฤตน้อยกว่า 15 % ซึ่งอยู่ในขอบเขตของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้จากการใช้เทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ในการหาข้อมูลจุดวิกฤต [25]

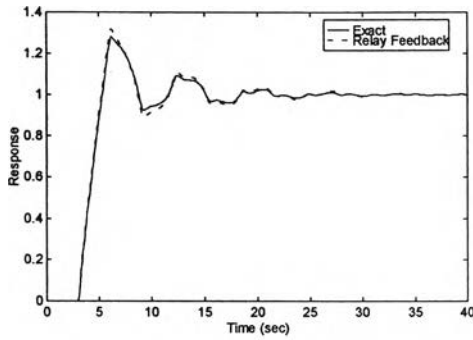
พิจารณาผลของความคลาดเคลื่อนของข้อมูลจุดวิกฤตที่ประมาณได้จากเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์เมื่อนำไปใช้ในการปรับจูนตัวควบคุม PID โดยทำการเปรียบเทียบผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนโดยอาศัยข้อมูลจุดวิกฤตที่แท้จริง และข้อมูลจุดวิกฤตที่ได้จากเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ ทั้งสองวิธีใช้สูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols แบบปรับปรุง ได้ผลดังนี้



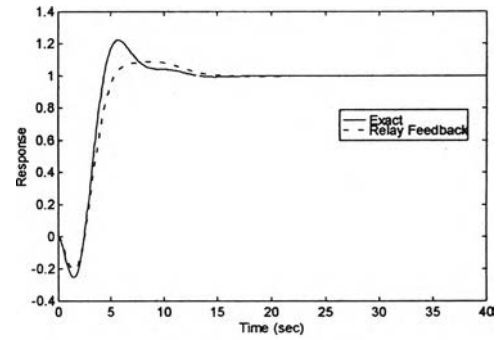
(ก) กระบวนการที่ 1



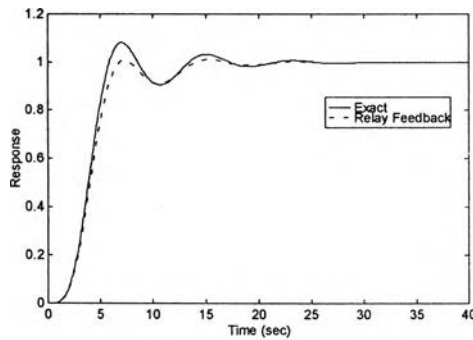
(ข) กระบวนการที่ 2



(ค) กระบวนการที่ 3



(ง) กระบวนการที่ 4

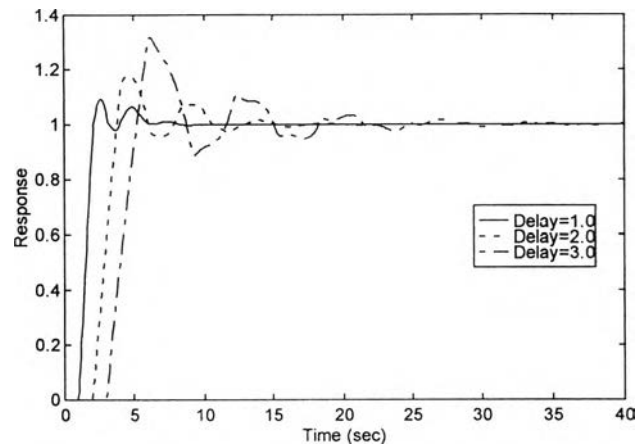


(จ) กระบวนการที่ 5

รูปที่ 2.11 ผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนโดยอาศัยข้อมูลจุดวิกฤตที่แท้จริง และ ข้อมูลจุดวิกฤตที่ได้จากเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์

จากการเปรียบเทียบผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนโดยอาศัยข้อมูลจุดวิกฤตที่แท้จริง และข้อมูลจุดวิกฤตที่ได้จากเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ พบว่ามีผลตอบสนองภายใต้การควบคุมใกล้เคียงกัน พิจารณาจากค่าพุงเกิน ช่วงเวลาเข้าที่ และช่วงเวลาขาขึ้นที่ใกล้เคียงกัน และยังทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

รูปที่ 2.12 เป็นการพิจารณาผลของค่าประวิงเวลาต่อผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีการปรับจูนตัวเองโดยอาศัยการป้อนกลับด้วยรีเลย์ เมื่อกำหนดค่าปรับตั้งเป็นสัญญาณขั้นขนาดหนึ่งหน่วย พบว่าเมื่อค่าประวิงเวลาของกระบวนการเพิ่มขึ้น จะทำให้ผลตอบสนองมีค่าพุงเกิน และช่วงเวลาเข้าที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.12 ผลของค่าประวิงเวลาต่อผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีการปรับจูนตัวเองโดยอาศัยการป้อนกลับด้วยรีเลย์

2.4 สรุปผล

จากผลการทดลองพบว่าเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ สามารถนำมาใช้ในการหาข้อมูลจุดวิกฤตของกระบวนการได้ดี โดยสามารถควบคุมผลตอบสนองของกระบวนการระหว่างที่มีการหาข้อมูลที่จุดวิกฤตโดยการป้อนกลับด้วยรีเลย์ให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดได้

จากการพิจารณาผลของค่าประวิงเวลาต่อผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้พบว่าผลการควบคุมแยกลง เมื่อค่าประวิงเวลาของกระบวนการเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาจากค่าพุ่งเกินและช่วงเวลาเข้าที่เพิ่มขึ้น