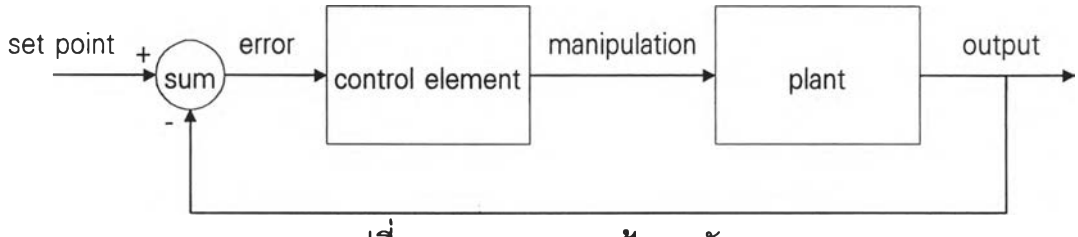
บทที่ 4

การควบคุมแบบป้อนกลับ

การจัดการกับสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน (error signal) โดยส่งเข้าตัวควบคุม (control element) แล้วผลิตสัญญาณควบคุม (manipulate) ออกมาควบคุมระบบหรือกระบวนการต่อไป สัญญาณที่ออกจากระบบหรือกระบวนการ (process output) จะนำมาหักล้างกับค่าที่ตั้งเป็นเป้าหมายไว้ (set point) จะได้สัญญาณความคลาดเคลื่อน

กฎการควบคุม (control laws) จะทำให้ค่าสัญญาณความคลาดเคลื่อนอยู่ใกล้กับศูนย์มากที่สุด หรือ การควบคุมระบบหรือกระบวนการให้ได้ค่าสัญญาณควบคุมที่ถูกต้อง



รูปที่ 4.1 วงจรควบคุมป้อนกลับ

การควบคุมดังกล่าว สามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะตอบสนองคงตัว (steady state response) ให้น้อยลง หรือ หมดไป , ลดค่าเวลาเข้าที่ (settling time) และให้ผลการตอบสนองชั่วครู่ (transient response) มีลักษณะตามที่ถูกออกแบบไว้ เช่น ต้องการทำให้ค่าโอเวอร์ชูต (overshoot) มีค่าน้อยที่สุด

คุณสมบัติของตัวควบคุม

ระบบควบคุมที่ใช้ในงานควบคุมมีมากมาย แต่พื้นฐานของการควบคุมมีด้วยกัน 3 แบบคือ

1. การควบคุมแบบสัดส่วน (proportional control , P control) การเปลี่ยนแปลงโหลด จะเกิดค่าออฟเซ็ท (ค่าความคลาดเคลื่อนหรือค่าผิดพลาด) ของสัญญาณกระบวนการ ที่สภาวะตอบสนองคงตัว โดยเฉพาะกับกระบวนการที่มีไทม์แล็ก (lag time) มาก ๆ การแก้ไขด้วยการลดค่าปร็อปพอร์ชั่นนัลแบนด์ (PB) แต่ก็ไม่สามารถกำจัดค่าได้หมด เพราะถ้าค่าเกน Kp สูงเกินไป การควบคุมจะเกิดการแกว่งตัว (oscillate) การควบคุมแบบสัดส่วน จะใช้งานได้เฉพาะในระบบที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดมากนัก หรือระบบที่มีกระบวนการที่มีไทม์แล็กน้อย ๆ หมายถึงระบบจะต้องมี PB น้อย (Kp มีค่ามาก) ซึ่งจะทำให้ค่าออฟเซ็ทเออร์เรอร์ลดลง

2. การควบคุมแบบอินทิกรัล (integral control , I control) เวลาที่ใช้ในการเพิ่มค่าของสัญญาณควบคุม หรือ integral time Ti ดังนั้น ถ้าค่า Ti น้อย การกระทำจะเกิดเร็ว ทำให้สัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนเข้าสู่ศูนย์เร็ว แต่มีข้อเสียที่ว่าถ้าค่า Ti น้อยเกินไป จะทำให้ค่าอัตราหน่วง หรือ damping ξ ของกระบวนการมีค่าต่ำ อาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ แต่ถ้าให้ค่า Ti มากเกินไป ค่าเวลาเสถียรภาพ (stabilizing time) ของกระบวนการจะยาวนานเกินไป ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด จะลดลงเป็นไซเคิล แต่ไม่มีออฟเซ็ท ถ้ากระบวนการที่มีไทม์แล็ก มีค่ามาก จะทำให้ผลการตอบสนองของระบบเกิดการแกว่งได้ ดังนั้น การควบคุมแบบอินทิกรัล จะไม่ถูกนำไปใช้โดดเดี่ยว แต่ถ้าจะนำไปใช้ก็จะใช้กับกระบวนการที่มีไทม์แล็กน้อย

3. การควบคุมแบบอนุพันธ์ (derivative control , D control) การควบคุมแบบนี้เหมาะกับกระบวนการที่มีไทม์แล็กมาก ๆ เพราะสามารถแก้ค่าผิดพลาด โดยการกระทำล่วงหน้าก่อนที่จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น การควบคุมแบบอนุพันธ์นี้ไม่สามารถนำไปใช้งานแบบเดี่ยวโดด ๆ ได้ เพราะว่า เมื่อค่าสัญญาณความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์หรือมีค่าคงที่ (ไม่เปลี่ยนแปลง) ตัวควบคุมจะไม่ผลิตสัญญาณควบคุมออกมาเลย เวลาที่สัญญาณควบคุมนำหน้า (lead) สัญญาณความคลาดเคลื่อนอยู่ หรือ derivative time Td ค่าสัญญาณความคลาดเคลื่อนที่เป็นยูนิตแรมพ์ (ramp unit) ที่เกิดจากกระบวนการที่มีไทม์แล็กมาก ๆ ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ จะมีผลต่อเมื่อสัญญาณความคลาดเคลื่อนมีการเปลี่ยนแปลงเท่านั้น ถ้าสัญญาณความคลาดเคลื่อนคงที่ ตัวควบคุมดังกล่าวจะ

หมดปฏิกริยาทันที กล่าวคือสามารถควบคุมระบบที่มีโหลดเปลี่ยนแปลงรวดเร็วได้ สัญญาณควบคุมของตัวควบคุมจะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณความคลาดเคลื่อน และจะไม่ขึ้นอยู่กับค่าสัญญาณความคลาดเคลื่อนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ข้อเสียของการควบคุมแบบอนุพันธ์ คือ มีความไวต่อสัญญาณความคลาดเคลื่อนมาก โดยเฉพาะกรณี Td มีค่ามากจะทำให้ระบบไม่เสถียรภาพ จึงไม่เหมาะกับกระบวนการที่มีค่าไทม์แล็กน้อย ๆ

ในการควบคุมจะใช้คอมพิวเตอร์ ทำการคำนวณหาค่าควบคุม จะใช้เวลาน้อยเมื่อทำการเทียบกับช่วงเวลาในการอ่านค่าและส่งค่าออก อีกทั้งต้องประวิงเวลาให้รอจนถึงเวลาในกระบวนการถัดไป ช่วงเวลาทั้งหมดดังกล่าวทุก ๆ กระบวนการจะใช้เวลาเท่ากันตลอด หรือ คาบการสุ่ม (sampling period) ตัวควบคุมจึงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบเพื่อการคำนวณดังนี้

1. การควบคุมแบบสัดส่วน

การควบคุมแบบนี้ ค่าที่ได้จากตัวควบคุมจะเป็นอัตราส่วนกับค่าความผิดพลาด

$$m(t) = Kp\, e(t) \qquad (4.1)$$

เมื่อ $m(t)$ =ค่าการควบคุมแบบสัดส่วน

Kp =ค่าเกนตัวควบคุม

$e(t)$ =ค่าความคลาดเคลื่อน

เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปแบบไม่ต่อเนื่องได้ดังนี้

$$m_n = Kp\, e_n \qquad (4.2)$$

และเมื่อย้อนถอยหลัง 1 คาบการสุ่มจะได้

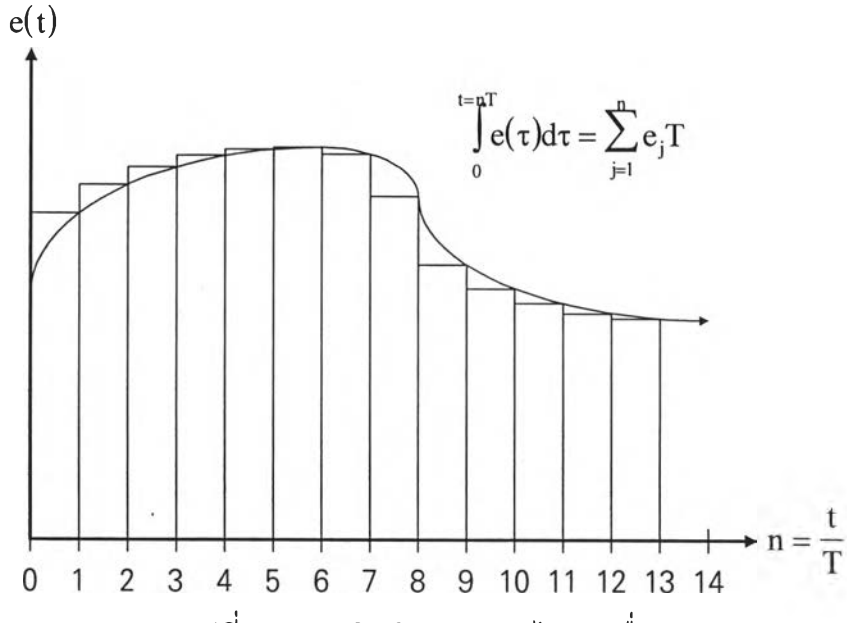
$$m_{n-1} = Kp\, e_{n-1} \qquad (4.3)$$

ค่าส่วนเปลี่ยนการควบคุม แสดงดังนี้

$$\Delta m_n = m_n - m_{n-1} = Kp(e_n - e_{n-1}) \qquad (4.4)$$

2. การควบคุมแบบอินทิกรัล

การควบคุมแบบนี้ ค่าที่ได้จากตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับผลรวมของความคลาดเคลื่อนเทียบกับเวลา



รูปที่ 4.2 การอินทิเกรตแบบไม่ต่อเนื่อง

$$m(t) = Ki \int_0^t e(\tau)\, d\tau \qquad (4.5)$$

เมื่อ Ki =ค่าเกนการควบคุมแบบอินทิกรัล

พื้นที่ใต้เส้นโค้ง ในรูป 4.2 เป็นค่าความผิดพลาดแบบต่อเนื่อง และใช้พื้นที่สี่เหลี่ยมพื้นผ้าโดยมีช่วงเวลาสุ่ม T เท่ากันตลอดแทน

$$m_n = Ki \sum_{j=1}^{n} T e_j \qquad (4.6)$$

และสามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$m_n = Ki \sum_{j=1}^{n-1} T e_j + Ki\, T\, e_n \qquad (4.7)$$

เมื่อย้อนถอยหลัง 1 คาบการสุ่ม จะได้

$$m_{n-1} = Ki \sum_{j=1}^{n-1} T e_j \qquad (4.8)$$

ค่าส่วนเปลี่ยนการควบคุม แสดงดังนี้

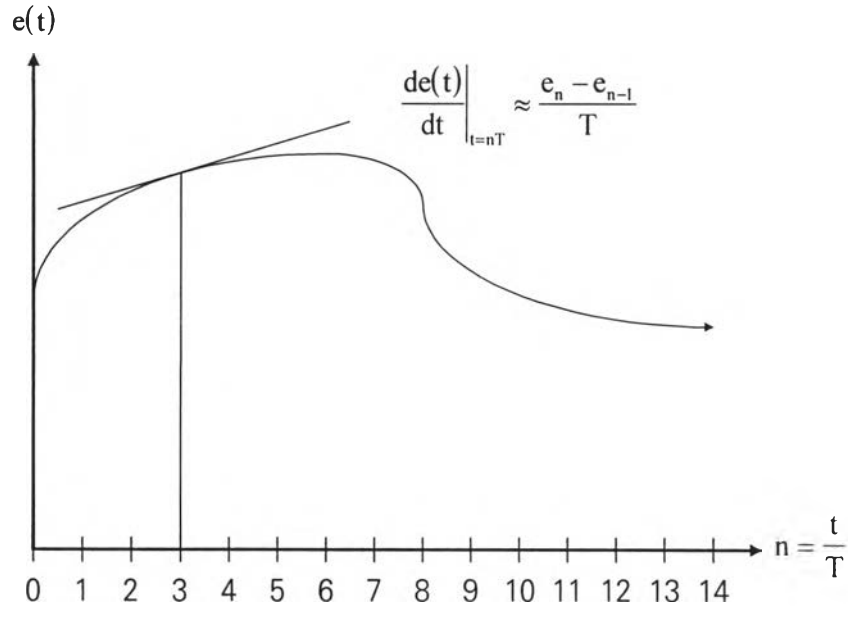
$$\Delta m_n = m_n - m_{n-1} = Ki\, T\, e_n \qquad (4.9)$$

3. การควบคุมแบบอนุพันธ์

การควบคุมแบบนี้ ค่าที่ได้จากตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับค่าอนุพันธ์ของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับเวลา

$$m(t) = Kd \frac{de(t)}{dt} \qquad (4.10)$$

เมื่อ Kd =ค่าเกนการควบคุมแบบอนุพันธ์



รูปที่ 4.3 การอนุพันธ์แบบไม่ต่อเนื่อง

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบไม่ต่อเนื่องดังนี้

$$m_n = Kd\ \frac{e_n - e_{n-1}}{T} \tag{4.11}$$

เมื่อย้อนถอยหลัง 1 คาบการสุ่ม จะได้

$$m_{n-1} = Kd\ \frac{e_{n-1} - e_{n-2}}{T} \tag{4.12}$$

ค่าส่วนเปลี่ยน การควบคุม แสดงดังนี้

$$\Delta m_n = m_n - m_{n-1} = \frac{Kd}{T}\left(e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}\right) \tag{4.13}$$

การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัลและบวกกับแบบอนุพันธ์ (PID control)

การควบคุมแบบสัดส่วน , แบบอินทิกรัล และแบบอนุพันธ์ ซึ่งเราทราบคุณสมบัติของการควบคุมแต่ละแบบดังกล่าวมาข้างต้นแล้ว โดยกระบวนการบางอย่างควบคุมได้ยากมาก การใช้ตัวควบคุมทั้ง 3 ร่วมกัน จะทำให้ได้จุดประสงค์ที่ต้องการ การควบคุมแบบ PID จึงให้ผลตอบสนองต่อทุกแง่มุมของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้

การควบคุมลิ้นเข็มเซอร์โว , ตัวกระตุ้นแบบโซลินอยด์ และระบบ ABS บนแบบจำลอง จะทำการควบคุมด้วยแบบ PID ดังในสมการนี้

$$\Delta m_n = (\Delta m_n)_P + (\Delta m_n)_I + (\Delta m_n)_D \qquad (4.14)$$

โดยการรวมสมการที่ 4.4 , 4.9 และ 4.13 และเขียนใหม่ได้ว่า

$$\Delta m_n = m_n - m_{n-1} = K0\, e_n + K1\, e_{n-1} + K2\, e_{n-2} \qquad (4.15)$$

เมื่อ $K0 = Kp + Ki\,T + \frac{Kd}{T}$

$K1 = -Kp - 2\frac{Kd}{T}$

$K2 = \frac{Kd}{T}$

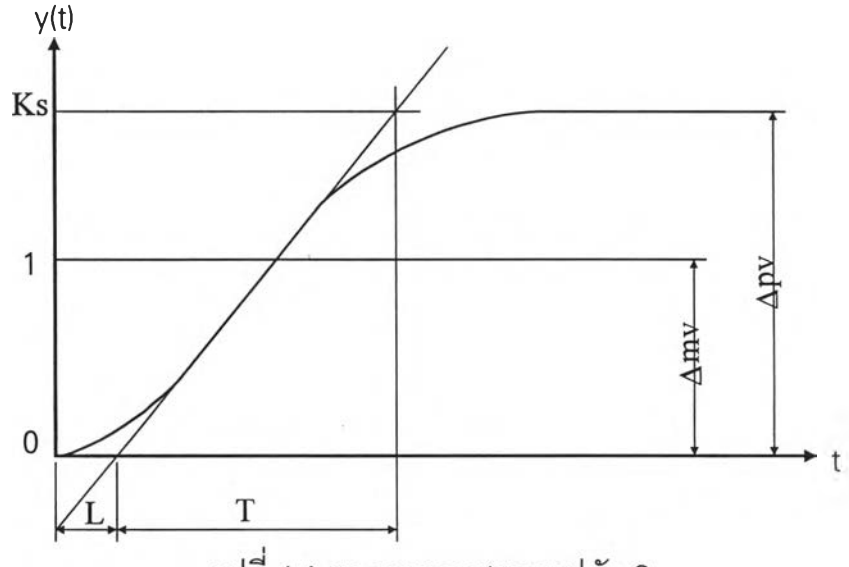
การปรับตัวควบคุมโดยซิกเลอร์ - นิโคลส์

ถ้าทราบพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแล้ว สามารถทำให้ทราบค่าเกนตัวควบคุมแบบ PID ได้โดยวิธีต่าง ๆ เพื่อให้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับมีสมรรถนะตามข้อกำหนดได้ แต่อย่างไรก็ตาม ระบบมีความซับซ้อนและไม่สามารถทราบพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้เลย เราจะใช้วิธีการปรับตัวควบคุมโดยซิกเลอร์ - นิโคลส์ (Ziegler - Nichols) ซึ่งใช้ได้ดีในทางปฏิบัติ

การปรับโดยวิธีของซิกเลอร์ - นิโคลส์ ใช้ในการปรับค่าเกนตัวควบคุม Kp , Ti และ Td อาศัยผลตอบสนองชั่วครู่ (transient response) ของระบบที่ได้จากการทดลอง มี 2 วิธี คือ วิธีพรอซเอช รีเอคชั่น (process reaction method) และวิธีอัลทิเมท ไซเคิล (ulimate cycle method)

การปรับโดยวิธีพรอซเอช รีเอคชั่น

ด้วยการป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นหนึ่งหน่วย ให้กับระบบลูปเปิด (open loop) โดยไม่มีตัวควบคุม จะพบว่าเมื่อทำการบันทึกค่าการตอบสนองนี้ออกมา การตอบสนองมีลักษณะคล้ายตัว S ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งเรียกว่าเส้นโค้งปฏิกริยาของกระบวนการ เส้นโค้งรูปตัว S มีค่าที่ต้องหาจากเส้นโค้งรูปตัว S คือ เวลาหน่วง L , ค่าคงตัวเวลา T , ค่าความแตกต่างของค่าที่ใส่ป้อนให้กับกระบวนการ Δmv และ ค่าความแตกต่างที่ตอบสนองจากกระบวนการ Δpv ซึ่งหาได้โดยการลากเส้นสัมผัสที่จุดการผันของเส้นโค้งรูปตัว S และหาจุดตัดของเส้นสัมผัสกับแกนเวลาและเส้นตรงที่เข้าสู่การตอบสนองคง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 สามารถหาค่าเกนของระบบได้โดย $Ks = \frac{\Delta pv}{\Delta mv}$



รูปที่ 4.4 ผลการตอบสนองรูปตัว S

ค่า Kp , Ti และ Td เป็นไปตามสูตรในตาราง 4.1

ตาราง 4.1 การปรับค่าของซิกเลอร์ - นิโคลส์ โดยวิธีพรอซเอซ รีเอคชั่น

ตัวควบคุม	Kp	Ti	Td
PID	$1.2\frac{1}{Ks}\frac{T}{L}$	2 L	0.5 L

การปรับโดยวิธีอัลทิเมทไซเคิล

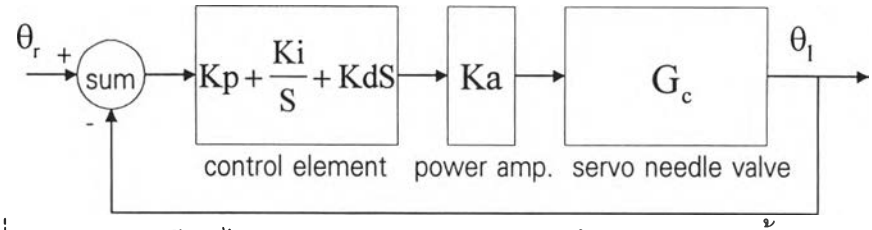
ทำการป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นหนึ่งหน่วย ให้กับระบบลูปปิด (closed loop) ที่มีตัวควบคุมแบบสัดส่วน เพิ่มค่าเกน Kp จนกระทั่งผลการตอบสนองมีการแกว่งตัว (oscillate) ตลอดเวลา ค่าเกน Kp นี้เรียกว่า ค่าเกนวิกฤต Ku และคาบของการแกว่ง (period of oscillation) Pu หาค่า Kp , Ti และ Td เป็นไปตามสูตรในตาราง 4.2

ตาราง 4.2 การปรับค่าของซิกเลอร์ - นิโคลส์ โดยวิธีอัลทิเมท ไซเคิล

ตัวควบคุม	Kp	Ti	Td
PID	0.6 Ku	0.5 Pu	0.125 Pu

การควบคุมแบบป้อนกลับของลิ้นเข็มเซอร์โว

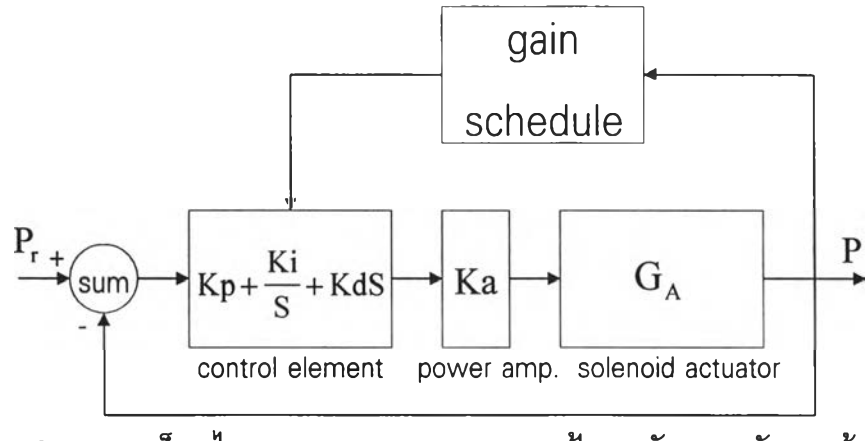
ในรูปที่ 4.5 เป็นการแสดงบล็อคไดอะแกรมการควบคุมแบบป้อนกลับของลิ้นเข็มเซอร์โว โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID ทำการผลิตสัญญาณออกมาควบคุมชุดเพาเวอร์แอมปลิไฟเออร์ Ka สัญญาณที่ถูกขับออกจากชุดเพาเวอร์แอมปลิไฟเออร์จะทำหน้าที่จ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าเพื่อควบคุมลิ้นเข็มเซอร์โวให้ทำงาน และทำการวัดค่าตำแหน่งป้อนกลับมายังจุดรวม เพื่อทำการหักล้างกับค่าที่ตั้งไว้ ออกมาเป็นค่าความคลาดคลื่อนส่งเข้าไปยังตัวควบคุมแบบ PID ต่อไป บล็อคไดอะแกรมของลิ้นเข็มเซอร์โว ในรูป 3.13 ซึ่งถูกนำมาแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงบล็อคไดอะแกรมการควบคุมแบบป้อนกลับ ของลิ้นเข็มเซอร์โว โดยตัวควบคุมแบบ PID

การควบคุมแบบป้อนกลับของตัวกระตุ้นแบบโซลินอยด์

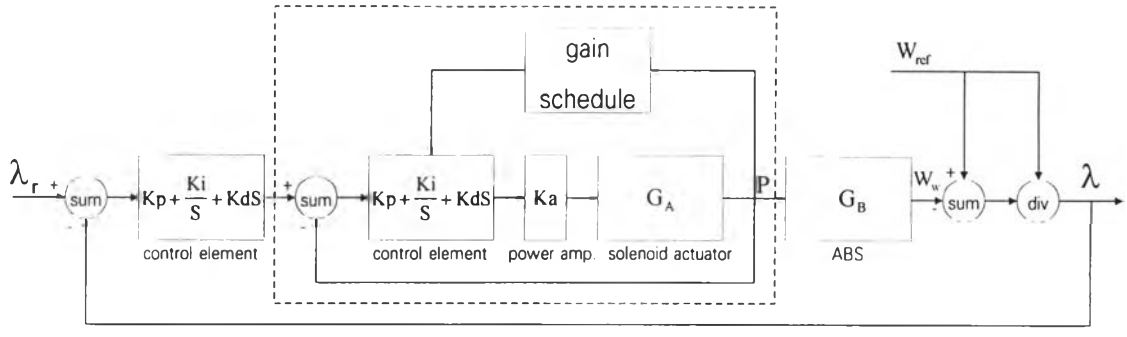
จากรูปที่ 3.6 เป็นการแสดงบล็อคไดอะแกรมของตัวกระตุ้นแบบโซลินอยด์ นำมาเขียนวงจรการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID ทำการควบคุม และเนื่องจากตัวกระตุ้นแบบโซลินอยด์มีสมการคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น จึงทำการให้เป็นเชิงเส้น (linearization) เป็นช่วง ๆ ใช้ตารางค่าเกน (gain schedule) เข้าช่วยในการปรับค่าเกนตัวควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงบล็อคไดอะแกรมการควบคุมแบบป้อนกลับ



รูปที่ 4.6 แสดงบล็อคไดอะแกรมการควบคุมแบบป้อนกลับ ของตัวกระตุ้นแบบโซลินอยด์ โดยใช้ตารางค่าเกนเข้าช่วยในการปรับค่าเกนตัวควบคุมแบบ PID

การควบคุมแบบป้อนกลับของระบบ ABS

จากรูป 2.13 แสดงบล็อคไดอะแกรม แบบจำลองยานยนต์ล้อเดียว เมื่อนำมาควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงบล็อคไดอะแกรม การควบคุมป้อนกลับของระบบ ABS โดยตัวควบคุมแบบ PID