บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การควบคุมอัตโนมัติ

การควบคุมอัตโนมัติในระบบกายภาพใดๆ คือ การบังคับให้ระบบนั้นทำงานในลักษณะที่จะนำมาซึ่งผลงาน (Output) ที่มีคุณสมบัติสอดคล้องหรือเป็นไปตามเป้าหมาย (Input) ด้วยตัวของมันเอง

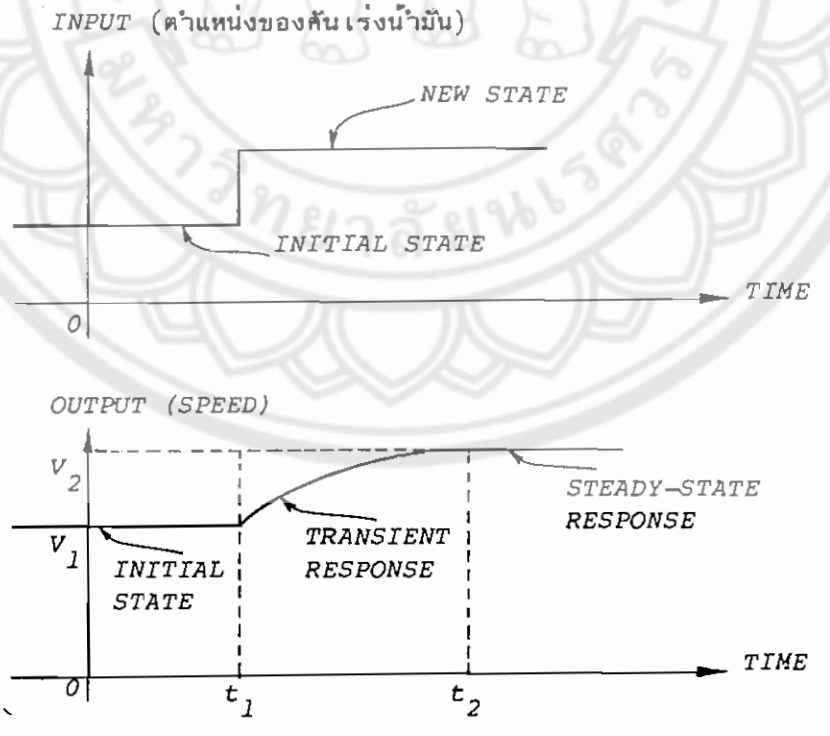
ในระบบควบคุมอัตโนมัติอย่างง่ายๆ ผลงานหรือสิ่งที่ระบบให้ เราจะเรียกว่า Output และเป้าหมายของระบบหรือข้อกำหนดที่เข้าสู่ระบบ เรียกว่า Input ซึ่งแสดงได้โดยการเขียนหัวลูกศรออกและเข้าสู่ระบบตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

รูปที่ 2.1 OUTPUT และ INPUT ของระบบควบคุมอัตโนมัติ

เนื่องจากการควบคุมอัตโนมัติเป็นการบังคับให้ระบบทำงานให้Output ที่เป็นไปในลักษณะที่สอดคล้องกับ Input จึงอาจจะกล่าวได้ว่า การศึกษาการควบคุมอัตโนมัตินั้นจะเป็นการศึกษาถึงการตอบสนองของระบบ (System Response) ซึ่งได้แก่ ลักษณะของ Output ต่อเป้าหมาย หรือข้อกำหนดหรือ Input ที่เข้าสู่ระบบ การตอบสนองของระบบต่อ Input ที่เข้ามาสู่ระบบ ดังที่ได้กล่าวมานี้เราสามารถแบ่งการตอบสนองออกได้เป็นดังนี้ คือ การตอบสนองที่เปลี่ยนแปรตามเวลาหรือที่ เรียกว่า Transient Response กับคือ การตอบสนองที่ไม่เปลี่ยนแปรตามเวลา หรือที่ เรียกว่า Steady State Response ซึ่งโดยทั่วไปการศึกษาการควบคุมอัตโนมัติจะเน้นไปที่คือ การตอบสนองที่เปลี่ยนแปรตามเวลา หรือ Transient Response ทำให้การวิเคราะห์ วิจัย ระบบควบคุมอัตโนมัติเสมือนเป็นการวิเคราะห์ วิจัย ระบบพลศาสตร์ (Dynamics System) และในบางครั้งจะพบว่า ทฤษฎีและหลักการของการควบคุมอัตโนมัติบางอย่าง สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบพลศาสตร์อื่นๆ เช่น ระบบสั่นสะเทือนหรือในทางกลับกันได้เป็นอย่างดี

2.2 การตอบสนองของระบบควบคุมอัตโนมัติ

ในระบบเพิ่มความเร็วของรถยนต์ หรือยานพาหนะอื่นๆ Input ของระบบคือ ตำแหน่งของคันเร่งน้ำมัน Output ของระบบ คือ ความเร็วของรถยนต์ เมื่อผู้ขับขี่ต้องการจะเพิ่มความเร็วของรถยนต์ เขาจะส่งสัญญาณความต้องการอันนี้เข้าสู่ระบบ โดยการเหยียบคันเร่งน้ำมันมากขึ้น (Input ของระบบเปลี่ยนไป) ระบบจะทำงานด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งที่จะทำให้ลูกล้อของรถยนต์หมุนเร็วขึ้น อันจะทำให้ความเร็ว (Output) ของรถยนต์เพิ่มสูงขึ้น การตอบสนองของระบบขณะนี้เรียกว่า เป็นการตอบสนองที่เปลี่ยนแปรตามเวลา หรือ Transient Response และเมื่อเวลาผ่านไปชั่วขณะหนึ่ง ความเร็วของยานพาหนะ (Output) จะคงที่ไม่เพิ่มหรือลดต่อไปอีก การตอบสนองของระบบตั้งแต่นี้ไป เป็นการตอบสนองที่ไม่เปลี่ยนแปรตามเวลา หรือ Steady State Response ยกเว้นเสียแต่ Input ของระบบ คือ ตำแหน่งของคันเร่งน้ำมันเปลี่ยนไปเป็นค่าใหม่ (ตำแหน่งใหม่) หรือระบบถูกรบกวนจากภายนอก เช่น รถขึ้นหรือลงเนิน หรือถูกลมกระโชกแรงขึ้น ฯลฯ เหตุการณ์ในระบบตัวอย่างที่ได้กล่าวมานี้ อาจแสดงให้เข้าใจถึงการตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น โดยรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การตอบสนองของระบบเพิ่มความเร็วในยานพาหนะ

2.3 คุณภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติ

ในการเปรียบเทียบคุณภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติที่เหมือนกัน 2 ระบบว่าระบบใดดีกว่ากัน จะต้องพิจารณาสิ่งต่อไปนี้ ได้แก่

ก. ความแม่นยำ (Accuracy)

ระบบควบคุมที่ขาดความแม่นยำย่อมนำไปใช้ประโยชน์ไม่ได้ และเรายังถือว่าเป็นระบบการควบคุมที่สร้างขึ้น หรือ ทำขึ้นโดยผิดวัตถุประสงค์ของการควบคุม และแน่นอนความแม่นยำในที่นี้รวมไปถึงความสม่ำเสมอ คงเส้นคงวา (Consistency) ในการตอบสนองด้วย

ข. ความรวดเร็ว (Speed)

ระบบที่มีการตอบสนองที่แม่นยำไม่มีความคาดเคลื่อนเลยแต่ใช้เวลานานมากกว่าจะถึง Steady State ก็ย่อมเป็นระบบที่นำไปใช้งานไม่ได้

ค. ความเสถียร (Stability)

ระบบควบคุมอัตโนมัติที่มีความรวดเร็วและแม่นยำในการตอบสนองแต่ในบางขณะหรือกับบางลักษณะของ Input ไม่สามารถให้การตอบสนองที่เสถียร ระบบควบคุมนั้นก็จะใช้งานไม่ได้และชำรุดไป

ดังนั้นเราจะพบว่าในการออกแบบระบบควบคุมจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบทั้ง 3 ด้วยเนื่องจากเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับสำหรับระบบควบคุมอัตโนมัติทุกระบบ โดยจะขาดอันใดอันหนึ่งไม่ได้

2.4 ส่วนประกอบของระบบควบคุมอัตโนมัติ

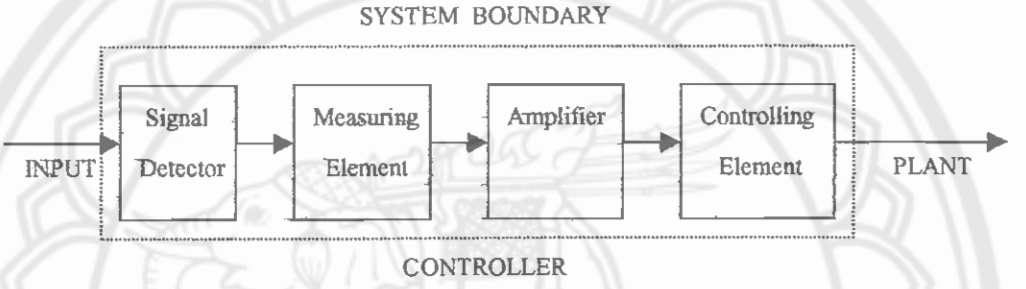
ระบบควบคุมอัตโนมัติ ประกอบด้วย ระบบย่อยหรือส่วนประกอบใหญ่ๆ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นตัวควบคุม (Controller or Process) และส่วนที่เป็นต้นกำลัง (Plant)

2.4.1 ส่วนที่เป็นตัวควบคุม (Controller or Process)

ส่วนที่เป็นตัวควบคุม หมายถึง ส่วนที่ทำหน้าที่แปรสัญญาณภายนอกที่ ส่งเข้ามาสู่ระบบหรือInput ให้เป็นสัญญาณที่เหมาะสมและมีกำลังพอ เพื่อไปบังคับให้ส่วนที่เป็นต้นกำลังทำงานดังที่ได้กล่าวมาแล้วในระบบควบคุมความเร็วของรถยนต์ โดยส่วนที่เป็นตัวควบคุม จะเริ่มต้นจากคันเร่งน้ำมัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณ (Signal Detector) จากภายนอกและตัววัดระดับสัญญาณ (Measuring Device) ไปในตัวด้วย แล้วส่งสัญญาณไปที่คาบูเรเตอร์หรือหัวฉีด โดยอาศัยสายคันเร่งหรือ Linkages ต่างๆ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวขยายสัญญาณ (Signal Amplifier) คาบูเรเตอร์หรือหัวฉีดก็จะทำงาน โดยเปิดลิ้นให้ส่วนผสมของน้ำมันและอากาศไหลลงสู่ Intake Manifold

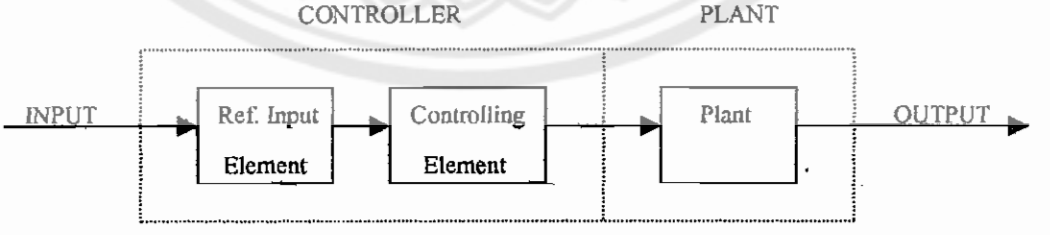
หรือในกรณีของหัวฉีดก็จะฉีดน้ำมันเข้าสู่ห้องเผาไหม้มากขึ้น คาบุเรเตอร์หรือหัวฉีด จึงทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม (Controlling Element)

จึงอาจกล่าวได้ว่าโดยทั่วไปส่วนที่เป็นตัวควบคุมประกอบด้วยตัวรับสัญญาณหรือ Signal Detector , ตัววัดระดับสัญญาณ หรือ Measuring Device , ตัวขยายสัญญาณ หรือ Signal Amplifier หรือ Amplifier และ ตัวควบคุม (Controlling Element) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนรูป หรือ ลักษณะของสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



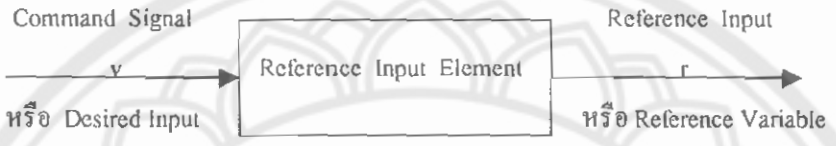
รูปที่ 2.3 ส่วนที่เป็นตัวควบคุมและส่วนประกอบต่างๆ

ในการแทนระบบควบคุมด้วยรูป (Diagram) ตัวรับสัญญาณหรือ Signal Detector , ตัววัดระดับสัญญาณ หรือ Measuring Device , ตัวขยายสัญญาณ หรือ Signal Amplifier หรือ Amplifier อาจแสดงโดยรวมเข้าด้วยกันเรียกว่า Reference Input Element ฉะนั้น ส่วนที่เป็นตัวควบคุมหรือ Controllerดังแสดงในรูปที่ 2.3 จึงนิยมแทนด้วยรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ส่วนที่เป็นตัวควบคุมและระบบควบคุมทั่วไป

และเรียกสัญญาณที่เข้าสู่ระบบที่ Reference Input Element ว่า Command Signal หรือ Command Variable หรือ Desired Input ซึ่งโดยทั่วไปใช้ v เป็นสัญลักษณ์ และเรียกสัญญาณที่ออกไปจาก Reference Input Element ว่า Reference Input หรือ Reference Variable ซึ่งใช้สัญลักษณ์คือ r ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สัญญาณที่เข้าและออก ของ Reference Input Element

ส่วนสัญญาณที่ออกไปจาก Controller และเข้าสู่ส่วนที่เป็นต้นกำลังหรือ Plant ของระบบซึ่งในระบบควบคุมความเร็ว ได้แก่ น้ำมันที่ไหลออกจากคาบุเรเตอร์ หรือหัวฉีดเข้าสู่เครื่องยนต์นั้น เรียกว่า Manipulating Variable และใช้ m เป็นสัญลักษณ์ ดังนั้น สัญญาณที่เข้าและออกจากส่วนที่เป็นตัวควบคุม จึงอาจแสดงได้ดังรูปที่ 2.6

รูปที่ 2.6 สัญญาณที่เข้าและออกของส่วนที่เป็นตัวควบคุม

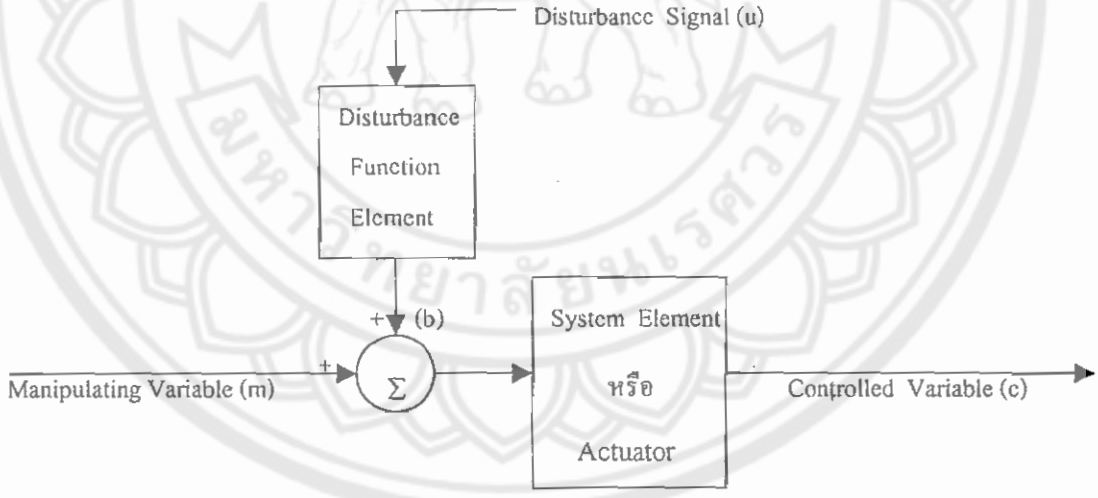
2.4.2 <u>ส่วนที่เป็นต้นกำลัง (Plant)</u>

ส่วนที่เป็นต้นกำลัง คือ ส่วนของระบบควบคุมอัตโนมัติที่รับสัญญาณที่ออกมาจาก Controller (Manipulating Variable (m)) แล้วทำงานให้ Output หรือ Controlled Variable ซึ่งใช้สัญลักษณ์ c ของทั้งระบบ

ดังนั้นในส่วนของส่วนที่เป็นตัวต้นกำลังจึงอาจเขียนแสดงได้ดังรูปที่ 2.7

รูปที่ 2.7 สัญญาณที่เข้าและออกของส่วนที่เป็นต้นกำลัง

เนื่องจากในระบบควบคุมทั่วๆไป สัญญาณที่เข้าสู่ตัวทำงาน ซึ่งเรียกว่า System Element หรือ Actuator มักจะประกอบด้วยสัญญาณอื่น เนื่องมาจากการรบกวนจากภายนอกระบบซึ่งเรียกว่า External Disturbance ส่วนที่เป็นต้นกำลังจึงประกอบด้วย ตัวรวมสัญญาณ หรือ Signal Summing Element ซึ่งทำหน้าที่รวมสัญญาณจากภายนอกระบบเข้ากับ Manipulating Variable (m) แล้วส่งต่อไปยัง Actuator ดังแสดงในรูปที่ 2.8

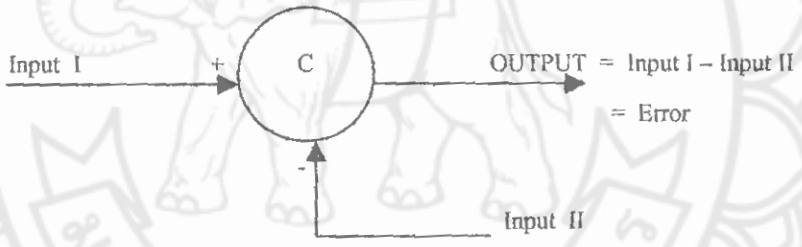


รูปที่ 2.8 ส่วนที่เป็นต้นกำลังของระบบควบคุมที่มีการรบกวนจากภายนอก

โดยที่ Disturbance Function Element หรือ Disturbance Element ทำหน้าที่เช่นเดียวกับ Reference Input Element คือ ส่ง วัด และขยาย (หรือลด) ขนาด หรือเปลี่ยนรูป Disturbance Signal (u) ส่วนสัญญาณที่ออกจาก Disturbance Element ซึ่งจะรวมกับ Manipulating Variable (m) เรียกว่า Disturbance Variable ที่ใช้สัญลักษณ์ b

จะเห็นว่า ข้อแตกต่างของส่วนที่เป็นตัวควบคุม (Controller) กับส่วนที่เป็นต้นกำลัง (Plant) ก็คือ ส่วนที่เป็นตัวควบคุม จะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของทั้งระบบ ให้เป็นไปตามเป้าหมายของระบบควบคุม แต่ Output ในส่วนนี้ คือ Manipulating Variable (m) ไม่สามารถทำงานให้ระบบได้ จึงต้องอาศัยในส่วนของต้นกำลังอีกต่อหนึ่ง สำหรับส่วนที่เป็นต้นกำลังจะทำหน้าที่ผลิตกำลังให้เป็นไปตามลำดับความแรงของสัญญาณ Manipulating Variable (m) จากส่วนที่เป็นตัวควบคุม เพื่อให้ได้ Output ของระบบ หรือ Controlled Variable (c) กล่าวคือ ส่วนที่เป็นต้นกำลังหรือ Plant จะทำงานในลักษณะแปรรูปหรือส่งผ่านพลังงาน

อุปกรณ์อื่นที่ใช้ในระบบควบคุมที่พบเสมอและสำคัญอันหนึ่ง ได้แก่ ตัวเปรียบเทียบค่าหรือ Comparator ซึ่งทำหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณ ที่มาเปรียบเทียบเป็น Output ซึ่งเรียกว่า Error ตัวเปรียบเทียบสัญญาณทำงานโดยอาศัยหลักการ และใช้สัญลักษณ์เป็นวงกลม เช่นเดียวกับตัวรวมสัญญาณ เพียงแต่ใช้สัญลักษณ์หลักเป็นบวก และให้สัญญาณที่นำมาเปรียบเทียบเป็นลบ และเขียนอักษร C แทน Σ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ตัวเปรียบเทียบค่าหรือ Comparator ของระบบควบคุม

ตัวเปรียบเทียบค่าหรือ Comparator จะพบเสมอในระบบควบคุมประเภท วงจรปิด (Closed - loop Control System) หรือที่เรียกว่า ระบบควบคุมอัตโนมัติประเภทที่มีการป้อนกลับ (Feedback Control System)

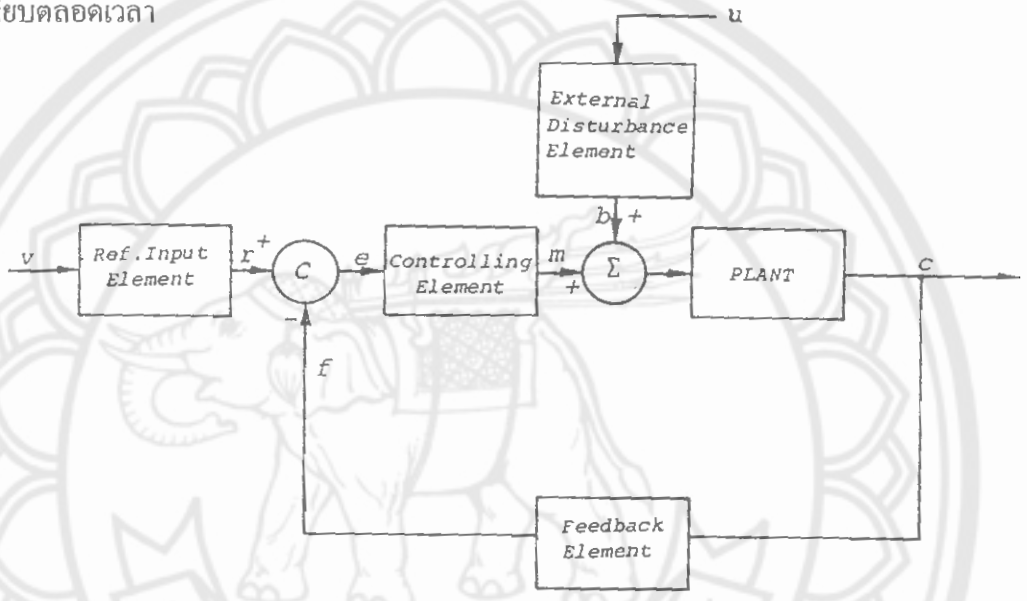
2.5 ประเภทของระบบควบคุมอัตโนมัติ

การควบคุมอัตโนมัติในระบบกายภาพต่างๆ ซึ่งเรียกว่า ระบบควบคุมอัตโนมัติซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ระบบควบคุมประเภทวงจรเปิด (Open-loop Control System) หรือที่เรียกว่า ระบบควบคุมอัตโนมัติประเภทที่ไม่มีการป้อนกลับ กับระบบควบคุมประเภทวงจรปิด (Close-loop Control System) หรือที่เรียกว่า ระบบควบคุมอัตโนมัติประเภทที่มีการป้อนกลับ (Feedback Control System)

2.5.1 ระบบควบคุมอัตโนมัติประเภทวงจรปิด หรือ ประเภทที่มีการป้อนกลับ

(Closed – loop หรือ (Feedback Control System)

ระบบการควบคุมประเภทนี้ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เป็นระบบการควบคุมที่ Output ของระบบหรือ Controlled Variable (c) จะถูกป้อนกลับมายังส่วนที่เป็นตัวควบคุม (Controller) ของระบบ เพื่อที่จะนำมาเปรียบเทียบกับ Reference Variable (r) โดยจะอาศัยตัวเปรียบเทียบค่าทำการเปรียบเทียบตลอดเวลา



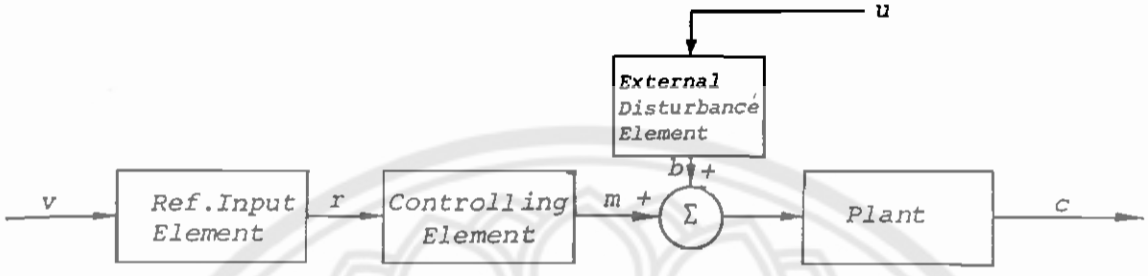
รูปที่ 2.10 ระบบควบคุมอัตโนมัติประเภทวงจรปิดหรือประเภทที่มีการป้อนกลับ

และเนื่องจากโดยทั่วไปแล้ว ลักษณะของ Controlled Variable (c) และ Reference Variable (r) จะไม่เหมือนกันใน Feedback Loop จึงมักประกอบด้วย Feedback Element ซึ่งทำหน้าที่ รับ วัด ขยาย หรือ ลด หรือ เปลี่ยนรูป Controlled Variable (c) ให้เป็น Feedback Variable (f)

2.5.2 ระบบควบคุมอัตโนมัติประเภทวงจรเปิด หรือ ประเภทที่ไม่มีการป้อนกลับ

(Open-loop Control System)

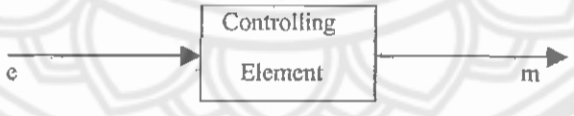
ระบบควบคุมประเภทนี้สามารถที่จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 โดยจะเป็นการควบคุมที่ไม่มีการเปรียบเทียบสภาพของ Output ของระบบ หรือ Controlled Variable (c) กับ Input Variable (r) ของระบบ กล่าวคือ Actuating Signal หรือ Error (e) มีค่าคงที่ตลอดเวลา และโดยทั่วไป Plant จะทำงานที่อัตราคงที่ ข้อสังเกตที่สำคัญของระบบควบคุมประเภทนี้คือ ความคาดเคลื่อนของ Output ของระบบ เพราะในทางปฏิบัติ ระบบจะถูกรบกวนจากภายนอกเสมอ ทำให้ส่วนที่เป็นต้นกำลังไม่สามารถทำงานได้ตามที่ Controller สั่งมา แต่จะนำเอาค่ารบกวนเข้ามาด้วย และไม่มีการแก้ไขกลับไป (Feedback) ที่ส่วนที่เป็นตัวควบคุมแต่อย่างไร



รูปที่ 2.11 ระบบควบคุมอัตโนมัติประเภทวงจรเปิด หรือ ประเภทที่ไม่มีการป้อนกลับ

2.6 ชนิดของการควบคุม (Control Action or mode of Control Action)

ชนิดของการควบคุม หรือ Control Action หมายถึงชนิดหรือวิธีการทำงานของส่วนที่เป็นตัวควบคุมโดย Controlling Element หรือ Controller เพื่อแก้ไขความคาดเคลื่อน(Corrective Action) ระหว่าง Output Variable (c) กับ Input Variable (r) ของทั้งระบบ ซึ่งได้แก่ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ออกจาก Controlling Element คือ Manipulating Variable (m) กับสัญญาณที่เข้าสู่ Controlling Element คือ Actuating Error หรือ Error Variable (e) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 Controlling Element หรือ Controller ของระบบควบคุมอัตโนมัติ

โดยชนิดของการควบคุม อาจแบ่งออกได้เป็นชนิดต่างๆ ดังนี้

2.6.1 <u>การควบคุมแบบสัดส่วน หรือ Proportional Control (P-Control)</u>

ในกรณีที่ชนิดของการควบคุมเป็นแบบสัดส่วน การทำงานของ Controlling Element หรือ Controller จะเป็นไปในลักษณะของสัดส่วน คือ Manipulating Variable (m) จะมีค่ามากน้อยตามความมากน้อยของ Error หรือ Actuating Error (e) กล่าวคือ

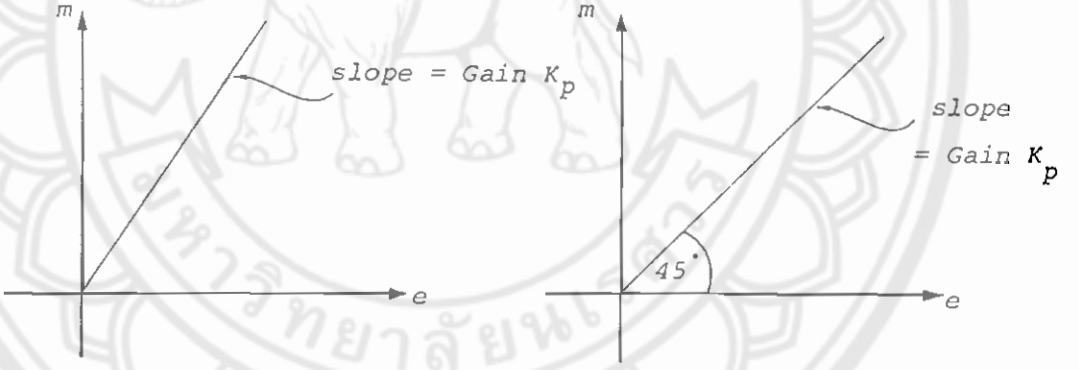
$$m = Kp.e \quad \text{.....(2.1)}$$

โดยที่ m = การเปลี่ยนแปลงของ Manipulating Variable

Kp = Gain หรือกำลังขยายของ Proportional Controller

และ e = การเปลี่ยนแปลงของค่า Error หรือ Actuating Error

และอาจแสดงความสัมพันธ์นี้ได้ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งจะเห็นว่าเป็นเส้นตรง ในบางครั้งจึงเรียก Controller ชนิดนี้ว่า Amplifier



ก) Gain $K_p > 1$ ข) Gain $K_p = 1$

รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Output กับ Input ของ Proportional Controller

และการควบคุมแบบนี้ สัญญาณวัดของ Controlled Variable จะมีค่าเท่ากับค่าเป้าหมายที่สภาวะการทำงานและสภาพแวดล้อมค่าใดค่าหนึ่งเท่านั้น ถ้าสภาวะการทำงานและสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไปจากค่านี้ (เกิด Disturbance) สัญญาณวัดจะมีค่าต่างไปจากค่าเป้าหมายที่สภาวะ Steady State ใหม่ ค่าความแตกต่างระหว่าง สัญญาณวัดกับค่าเป้าหมายที่สภาวะ Steady State นี้เรียกว่า offset ขนาดของ offset จะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของ Disturbance และยิ่งค่า Kp มีค่ามาก offset จะมีค่าน้อยลง แต่อย่างไรก็ดี ถ้าค่า Kp มีค่ามากจนเกินไป สัญญาณวัดจะเกิดการแกว่ง (Oscillate)

คุณสมบัติที่สำคัญของการควบคุมแบบสัดส่วน หรือ Proportional Control นี้ก็คือ ถ้าหาก Input ของ Controller คือ Error หรือ Actuating Error (e) มีมาก, Output ของ Controller ซึ่งได้แก่ Manipulating Variable (m) ก็จะมีค่าสูงตามไปด้วย ในทางปฏิบัติก็คือมีผลทำให้ระบบควบคุมทั้งระบบตอบสนองได้เร็ว

2.6.2 การควบคุมแบบรวม หรือ Integral Control (I-Control)

Controller มีลักษณะการทำงาน (Control Action) เป็นแบบรวม หรือ Integral Control คือ Controller ที่ให้การแก้ไขความคาดเคลื่อน m ในลักษณะที่เป็นสัดส่วนกับ Time Integral ของ Actuating Variable หรือ Actuating Error (e) ซึ่งสามารถแสดงดังสมการด้านล่างต่อไปนี้

$$m \propto \int e dt$$

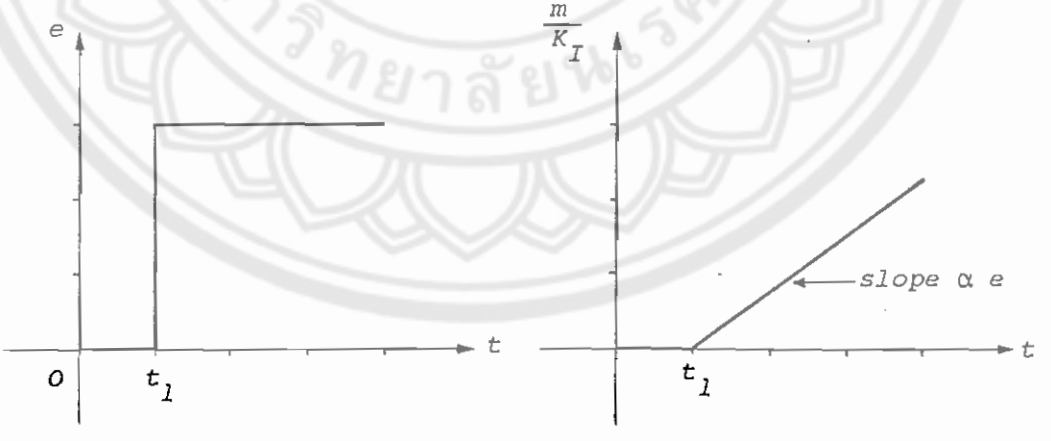
$$\text{หรือ} \quad m = K_I \int e dt \quad \text{.....(2.2)}$$

โดยที่ m = การเปลี่ยนแปลงของ Manipulating Variable

K_I = ตัวคงค่า หรือ Constant of Proportionality เรียกว่า Gain หรือ กำลังขยายของ Integral Controller

และ e = การเปลี่ยนแปลงของค่า Error หรือ Actuating Error

และอาจแสดงความสัมพันธ์นี้ได้ดังรูปที่ 2.14

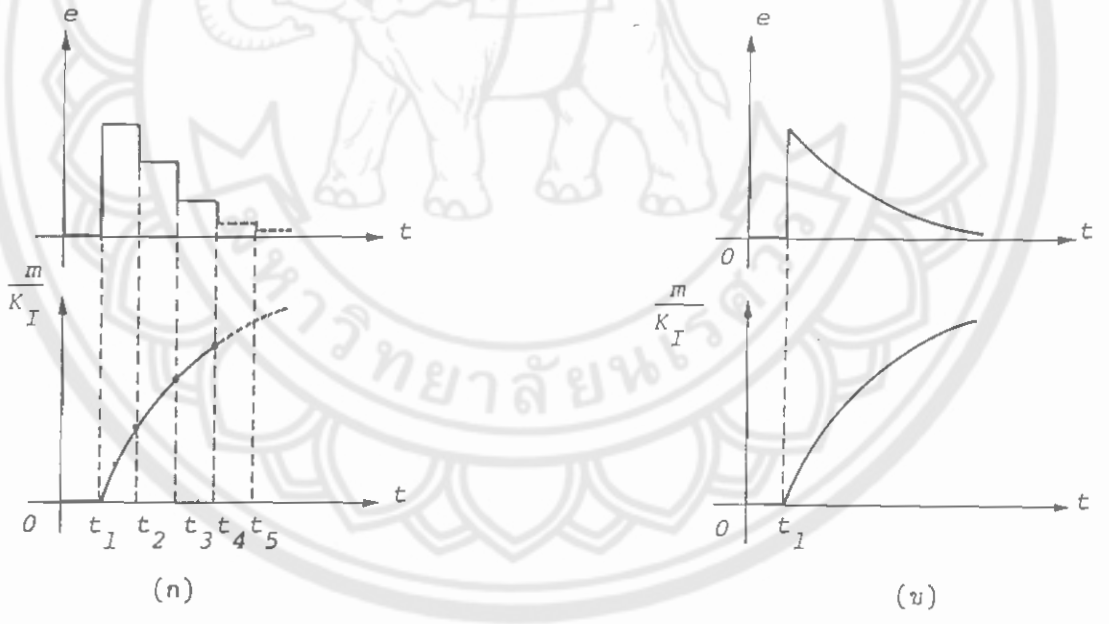


รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Output กับ Input ของ Integral Control

กล่าวคือ หาก Actuating Error เป็น Step Change Manipulating Variable (Scaled) จะเป็น Ramp function ซึ่งมีความลาดชัน หรือ Slope ขึ้นอยู่กับขนาดของ Actuating Error (e) ดังสมการ (2.3) ซึ่งได้จากการ Differentiate สมการ (2.2) เทียบกับเวลา

$$\frac{\dot{m}}{K_I} = e \quad \text{.....(2.3)}$$

จากความสัมพันธ์ในสมการ (2.3) จะเห็นได้ว่าเมื่อ Actuating Error มีค่าน้อยลง ค่าของ $\frac{\dot{m}}{K_I}$ หรือ Slope ของ $\frac{m}{K_I}$ จะใกล้แนวระดับ (Flat ขึ้นทุกที และกลับมาอยู่ในแนวระดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 เมื่อ e = 0 ซึ่งในทางคณิตศาสตร์กล่าว



รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงค่าของ Input และ Output ของ Integral Controller

ก) Definite Time Interval (Discrete form)

ข) Infinisimal Time Interval (Continuous form)

ได้ว่า e จะเท่ากับศูนย์ หรือ Slope ของ $\frac{1}{K_I} \cdot m$ จะอยู่ในแนวระดับ (Flat) เมื่อเวลาผ่านไปนานมาก คือ $t \to \infty$

ข้อสังเกตที่เห็นได้ชัดอีกประการก็คือ เมื่อ e กลับมา = 0 (เมื่อ $t \to \infty$) แล้ว0ค่าของ m / K_I ไม่จำเป็นว่าจะกลับมา = 0 เลย (เฉพาะ Slope ของ $\frac{m}{K_I}$ เท่านั้นที่กลับมา = 0) จึงอาจสรุปได้ว่า Manipulating Variable (m) ของ Integral Controller จะมีค่าที่ลอยตัว (Floating Value) ผิดกับใน Proportional Controller ดังแสดงในสมการ (2.1)

$$m = K_P \cdot e \quad \text{.....(2.1)}$$

กล่าวคือ m จะ = 0 เสมอทุกครั้งที่ e = 0

จากกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นใน Integral Controller ทำให้สามารถสรุปคุณสมบัติโดยทั่วไปของ Controller ชนิดนี้ได้ดังนี้

1) มี Infinite Gain as $t \to \infty$ (คือที่ Steady-state) นั่นคือ
2) Steady-state Error e_{ss} ของทั้งระบบมีค่า = 0 คือการควบคุมชนิดนี้ ให้ Output ของระบบที่ไม่มีความคลาดเคลื่อนเลย หากแต่ต้องใช้เวลานานมาก ($t \to \infty$) กล่าวคือมีการตอบสนอง (Response) ที่ช้ามาก

2.6.3. <u>การควบคุมแบบอัตรา หรือ Derivative Control (D – Control)</u>

การควบคุมแบบอัตรา หรือ D-Control เป็นการควบคุม ซึ่งมีการแก้ไขความคาดเคลื่อนหรือ Corrective Action ของระบบในลักษณะที่เป็นสัดส่วนกับ อัตราการเปลี่ยนแปลงของ Actuation Error (e) กล่าวคือ

$$m \ \alpha \ \frac{de}{dt}$$

หรือ $$m = K_d \cdot \frac{de}{dt}$$

โดยที่ K_d = ตัวคงค่า หรือ Constant of Proportionality เรียกว่า Derivative Gain

m = การเปลี่ยนแปลงของ Manipulating Variable

และ e = การเปลี่ยนแปลงของค่า Error หรือ Actuating Error

ซึ่งจะเห็นได้ว่า Controlling Element หรือ Controller ชนิดนี้จะให้ Manipulating Variable (m) ทันทีที่ค่าของ Actuating Error (e) มีการเปลี่ยนแปลงผิดกับการควบคุมชนิดอื่นๆ ซึ่งจะให้การแก้ไขความคาดเคลื่อน (Corrective Action) จากปริมาณของความคาดเคลื่อน e

การควบคุมแบบอัตรา หรือ Derivative Control จึงมีประโยชน์มาก เพราะทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวเฝ้าความเคลื่อนไหวของ Actuating Error หรือ Error โดยจะให้การแก้ไขโดยทันทีที่สภาพของ Error เปลี่ยนไป จึงเท่ากับการแก้ความคาดเคลื่อนของระบบล่วงหน้า (Anticipator Effect)

แทนที่จะให้การแก้ไขหลังจากมีความคาดเคลื่อนเกิดขึ้นแล้ว เหมือนการควบคุมแบบสัดส่วน และแบบรวม ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ข้อเสียของการควบคุมแบบอัตรา หรือ Derivative Control นี้ก็คือ ถ้าหาก Error มีค่าคงที่ ไม่ว่ามากหรือน้อยเท่าใด Controlling Element ของ Controller ชนิดนี้จะไม่ให้ Manipulating Variable (m) กล่าวคือ

$$m = K_d \cdot \frac{de}{dt} \quad \text{.....(2.4)}$$

$= 0$ เมื่อ c เท่ากับค่าคงที่

นั้นคือมันจะไม่ตอบสนองต่อ Steady State Error ใด ๆ ในทางปฏิบัติจึงไม่ใช้การควบคุมชนิดนี้เพียงชนิดเดียวในระบบควบคุมอัตโนมัติ (Pure Derivative Control) แต่จะถูกนำไปใช้ร่วมกับการควบคุมชนิดอื่น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วเป็นการควบคุมแบบผสม (Mixed Mode of Control Action) เสมอ

2.6.4 การควบคุมแบบผสม หรือ Mixed–Mode of Control Action

การควบคุมแบบผสม หรือ Mixed–Mode of Control Action เป็นการควบคุมซึ่งมีการแก้ไขความคลาดเคลื่อน หรือ Corrective Action ของระบบเป็นแบบผสม คือให้ Manipulating Variable m ในลักษณะที่เหมือนกับเอาลักษณะการทำงานของการควบคุมชนิดต่าง ๆ มาผสมกัน เช่น การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวม หรือ Proportional–Plus–Integral หรือ P & I Control และ การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวมผสมแบบอัตรา หรือ Proportional–Plus–Integral–Plus Derivative control หรือ P & I & D Control

จุดประสงค์ของการนำเอาการควบคุมแบบต่าง ๆ มาผสมกัน เป็นการควบคุมแบบผสมเพื่อทำให้การตอบสนองของระบบดียิ่งขึ้น กล่าวคือเพื่อทำการปรับปรุงความรวดเร็ว ความแม่นยำและความเสถียรของระบบให้ดียิ่งขึ้น โดยนำเอาข้อดีของการควบคุมแต่ละแบบมารวมกัน

ก. การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวม หรือ Proportional-Plus Integral Control

$$m(t) = k_p(e + \frac{1}{T_i}\int edt)$$

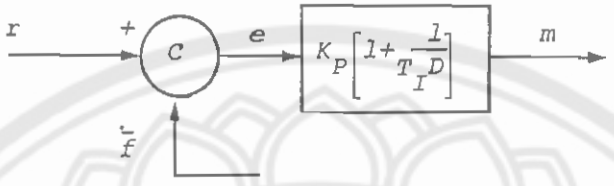
โดย $K_p \equiv$ Gain ของ Proportional Controller

$K_i \equiv$ Gain ของ Integral Controller

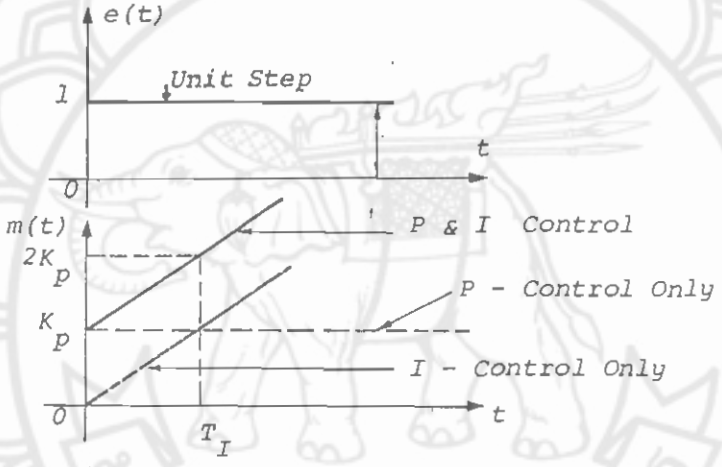
$T_i \equiv$ Integral Action Time $= \frac{K_p}{Ki}$

= ระยะเวลาที่ Integral Controller ให้การตอบสนองเท่ากับการตอบสนองของ Proportional Controller (ส่วนกลับของ T_i คือ Reset Rate)

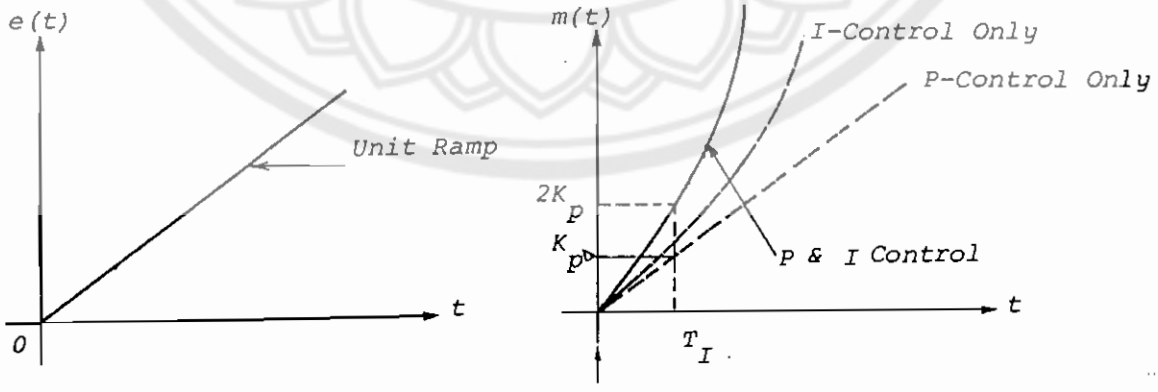
ซึ่งอาจแทนได้ด้วยไดอะแกรมกล่องดังแสดงในรูปที่ 2.16 และการตอบสนองของ Manipulating Variable m ที่มีต่อ Actuating Error e ในกรณีที่ Actuating Error เป็น Step Function และ Ramp Function อาจแสดงได้ดังรูปที่ 2.17 และ 2.18 ตามลำดับ



รูปที่ 2.16 ไดอะแกรมกล่องของ P & I Controller



รูปที่ 2.17 การตอบสนอง P&I Controller ต่อ Unit Step Actuating Error



รูปที่ 2.18 การตอบสนองของ P&I Controller ต่อ Unit Ramp Actuation Error

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า P-Control จะเกิด offset ถ้ามีสิ่งรบกวน process เกิดขึ้น ดังนั้นเพื่อที่จะกำจัดค่า offset นี้ เราจำเป็นต้องทำให้ตัวควบคุมสามารถปรับค่าไบแอสโดยอัตโนมัติ ตัวควบคุมดังกล่าวได้แก่ PI-Controller ซึ่งมี Integral Action เพิ่มเติมจากเดิมเพื่อทำหน้าที่กำจัด offset และความไวในการกำจัด offset จะขึ้นกับค่า T_i

การเพิ่ม Integral Action จะเสมือนเป็นการเพิ่ม Capacity Lag เข้าไปในระบบควบคุม ซึ่งทำให้ process variable เปลี่ยนแปลงเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ช้าลง ระบบควบคุมแบบ PI จึงเหมาะสำหรับ process ที่ค่อนข้างไวอยู่แล้ว คือระบบที่มี dead time น้อย และมี capacity lag ขนาดไม่มากนัก (ระบบที่มี time constant น้อย)

ข. การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบอัตรา หรือ Proportional-Plus-Derivative Control

ความสัมพันธ์ของ Manipulating Variable m กับ Actuating Error e ของการควบคุมแบบผสมชนิดนี้ คือ

$$\begin{aligned} m &= K_P \cdot e + K_D \cdot \frac{de}{dt} \\ &\equiv K_P \cdot e + K_P \cdot T_d \frac{de}{dt} \\ &= K_p[1 + T_d \cdot D]\, e \end{aligned} \qquad \text{.....(2.5)}$$

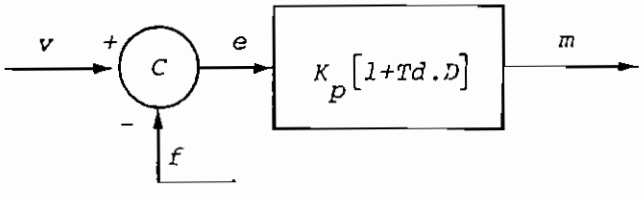
โดยที่ $K_P \equiv$ Gain ของ Proportional Controller

$K_D \equiv$ Gain ของ Derivative Controller

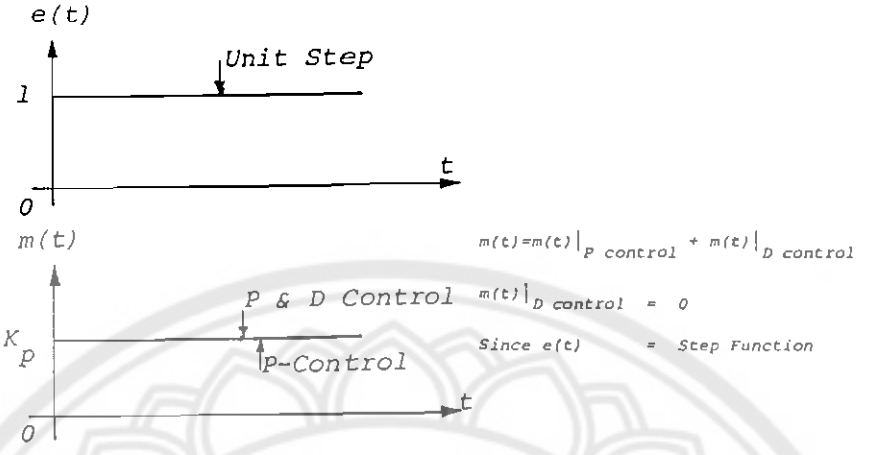
$T_d \equiv$ Derivative time

= ระยะเวลาที่ Derivative Controller ให้การตอบสนองนำการตอบสนอง ของ Proportional Controller

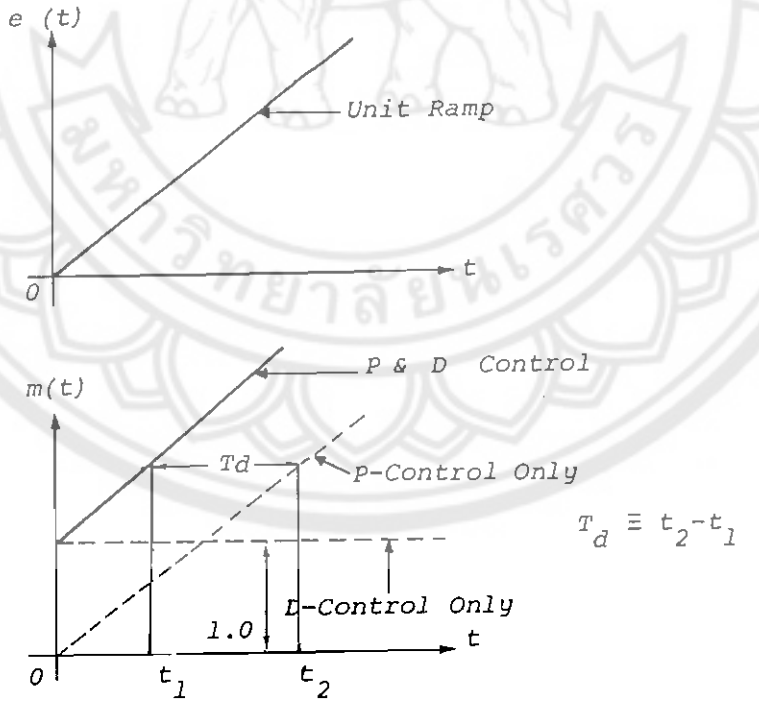
ซึ่งอาจแทนได้ด้วยไดอะแกรมกล่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.19 และการตอบสนองของ Manipulating Variable m ที่มีต่อ Actuating Error e ในกรณีที่ Actuating Error เป็น Step Function และ Ramp Function อาจแสดงได้ดังรูปที่ 2.20 และ 2.21 ตามลำดับ



รูปที่ 2.19 ไดอะแกรมกล่อง P&D Controller



รูปที่ 2.20 การตอบสนองของ P&D Controller ที่มีต่อ Unit Step Actuating Error



รูปที่ 2.21 การตอบสนองของ P&D Controller ที่มีต่อ Unit Ramp Actuating Error

PD-Controller จะใช้ในการควบคุม process แบบเดียวกับ P-Controller โดย PD-Controller จะให้ค่า offset น้อยกว่า P-Controller การเพิ่ม Derivative Action เข้าไปใน PI-Control จะทำให้ผลตอบสนองของระบบต่อสิ่งรบกวนไวขึ้น สัญญาณวัดเปลี่ยนแปลงสู่ค่าเป้าหมายไวขึ้น และจะไวขึ้นมากน้อยเพียงใด จะขึ้นกับค่าของ Td

ในระบบควบคุมที่สัญญาณวัดมีสัญญาณรบกวน (noise) เราไม่ควรใช้ Derivative Action แม้ว่าสัญญาณรบกวนจะมีขนาดเล็ก แต่อัตราการเปลี่ยนแปลง (ความถี่) มักจะมีค่าสูง Derivative Action ซึ่งมีขนอดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลง อาจจะทำให้สัญญาณ output ของ controller ผิดพลาดไปอย่างมากมาย เพื่อจะแก้ปัญหาของ noiseในทางปฏิบัติจึงมักจะเพิ่มการกรองความถี่ (Filtering) ด้วยค่า time constant ใน Derivative Action

ค. การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวมผสมแบบอัตรา หรือ Proportional-Plus-Integral-Plus-Derivative Control

ความสัมพันธ์ของ Manipulating Variable m กับ Actuating Error e ของ การควบคุมแบบผสมชนิดนี้ คือ

$$m = K_p \cdot e + K_I \int_0^t e\,dt + K_d \cdot \frac{de}{dt}$$

$$K_p \cdot e + \frac{K_p}{T_I} \int_0^t e\,dt + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de}{dt}$$

$$K_p \left[1 + \frac{1}{T_I D} + T_d \cdot D \right] e \qquad \text{.....(2.6)}$$

โดยที่ $K_p \equiv$ Gain ของ Proportional Controller

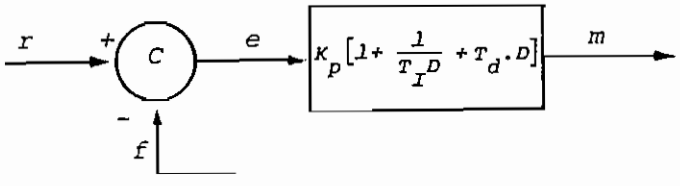
$K_I \equiv$ Gain ของ Integral Controller

$K_D \equiv$ Gain ของ Derivative Controller

$T_I \equiv$ Integral Action Time

$T_d \equiv$ Derivative Action Time

ซึ่งอาจแทนได้ด้วยไดอะแกรมกล่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.22 และการตอบสนองของ Manipulating



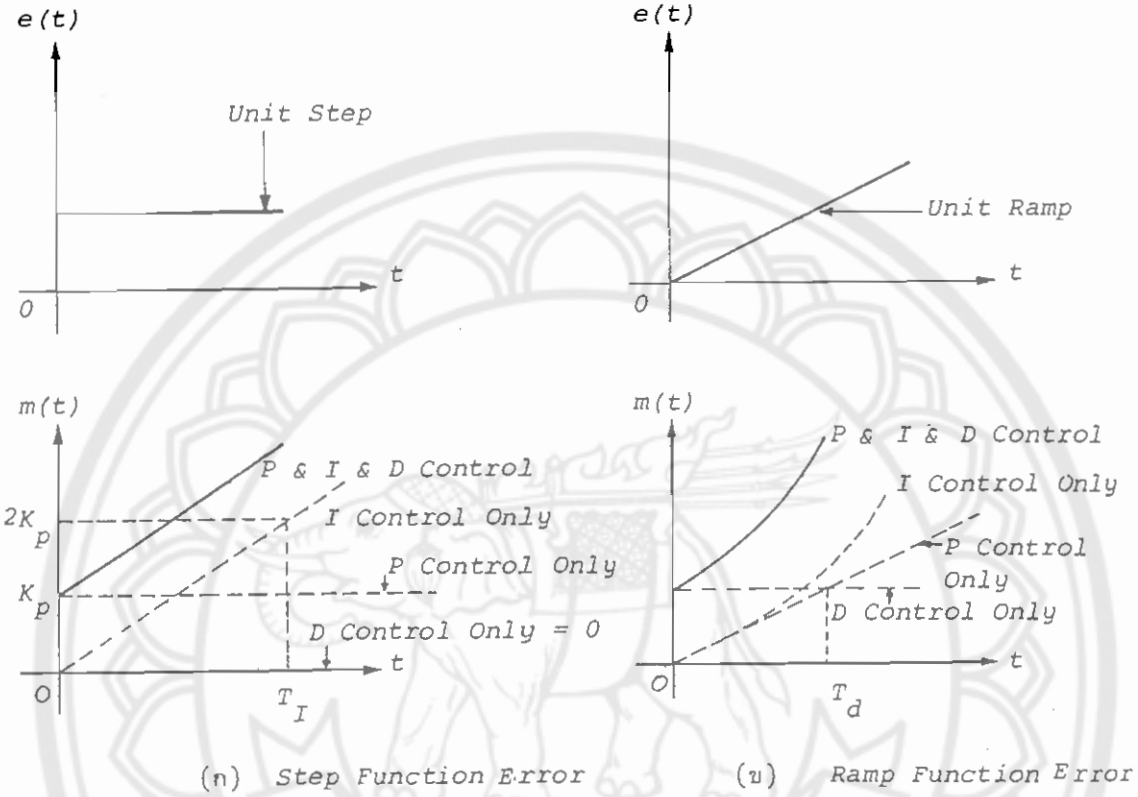
รูปที่ 2.22 ไดอะแกรมกล่องของ P&I&D Controller

ป
TL
152.8
ส1410
2546

- 6 ก.ค. 2541
4140296

สำนักหอสมุด

Variable m ที่มีต่อ Actuating Error e ในกรณีที่ Actuating Error เป็น Step Function และ Ramp Function อาจแสดงได้ดังรูปที่ 2.23



(ก) Step Function Error (ข) Ramp Function Error

รูปที่ 2.23 การตอบสนองของ P & I & D Controller

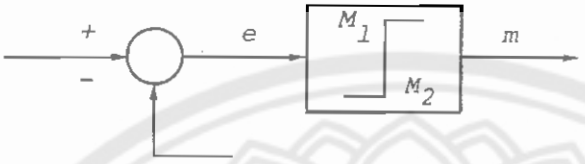
กล่าวโดยสรุป ข้อดีของ PID-Control คือระบบควบคุมจะตอบสนองต่อสิ่งรบกวน (Disturbance) ไวขึ้น ทำให้เสถียรภาพในการควบคุมดีขึ้นกว่าแบบ PI-Control สำหรับ process ที่ตอบสนองช้า การควบคุมชนิดนี้เหมาะกับ process ที่มี capacity lag โต ๆ (time constant มาก) และ dead time ขนาดไม่มากนัก

2.6.5 การควบคุมแบบเปิด-ปิด หรือ On-off Control Action

การควบคุมแบบเปิด-ปิด หรือ On-off Control เป็นการควบคุมที่ Controlling Element มีเพียง 2 ตำแหน่ง ซึ่งโดยทั่งไปได้แก่ตำแหน่งเปิดกับตำแหน่งปิด (On and Off) ในบางครั้งจึงเรียกการควบคุมชนิดนี้ว่า Two-Position Control ตำแหน่งของ Controlling Element นี้จะอยู่ที่เปิด (On) หรือปิด (Off) แล้วแต่ปริมาณของ Actuating Error e ว่ามากกว่าหรือน้อยกว่าศูนย์ ตามลำดับ กล่าวคือ

$$\left.\begin{aligned} M(t) &= M_1 \quad \text{for } e(t) > 0 \\ &= M_2 \quad \text{for } e(t) < 0 \end{aligned}\right] \qquad \text{.....} \qquad (2.7)$$

ซึ่งโดยทั่งไป M_1 และ M_2 คือค่า Maximum และ Minimum ของ m(t) ตามลำดับ สมการ (2.7) อาจแทนด้วย Block Diagram ได้ด้วยสัญลักษณ์ของ Control ชนิดนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 Controlling Element ของ On-off Controller

การควบคุมแบบ 2 จังหวะ หรือแบบเปิด-ปิด (Two-Position or On-off Control) นี้เป็นการควบคุมที่ง่าย และราคาไม่แพง จึงเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป ข้อมูลที่สำคัญของการควบคุมแบบนี้ คือ Differential Gap ซึ่งได้แก่ปริมาณของ Actuating Error e(t) ที่จะทำให้เกิดการ Switching คือย้ายตำแหน่ง หรือเปลี่ยนตำแหน่งของ Controlling Element ซึ่งจะเห็นว่า หาก Differential Gap มีมาก ความแม่นยำของระบบจะเสียไป แต่ถ้าหาก Differential Gap มีค่าต่ำ ถึงแม้ความแม่นยำของการควบคุมจะดี แต่ระบบก็จะทำงานคือเปิดปิดบ่อยครั้งขึ้น อาจทำให้สึกหรอ และอายุการใช้งานลดลง