

เอกสารประกอบการเรียนวิชา 2102436

ปฏิบัติการควบคุมและวัดคุม

Control and Instrumentation Laboratory

ศ.ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย

ผศ.ดร.มานพ วงศ์สายสุวรรณ

ผศ.ดร.สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์

รศ.ดร.จิตโกมุท ส่งศิริ

สาขาระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

March 12, 2021

สารบัญรูป

2.1	CE110 servo trainer และ CE120 controller	10
2.2	CE110 front panel	11
2.3	ระบบมอเตอร์และโหลด	12
2.4	ระบบควบคุมมอเตอร์วงปิด	13
2.5	ระบบควบคุมมอเตอร์กับคัลท์	14
2.6	แผนภาพระบบควบคุมมอเตอร์ที่แสดงตัวขับเร้าและเซนเซอร์	15
2.7	แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเซอร์โวมอเตอร์โดยมีสัญญาณออกเป็นมุมมอเตอร์ที่ผ่านเซนเซอร์	15
2.8	แผนภาพระบบมอเตอร์วงปิด	15
2.9	องค์ประกอบไม่เชิงเส้นแบบต่างๆ ในระบบเซอร์โวมอเตอร์	17
2.10	กระบวนการความร้อน	18
2.11	CE103 Thermal process	19
2.12	การวัดอุณหภูมิ	20
2.13	Relay amplifier	20
2.14	ระบบตัวทำความร้อน	21
2.15	ระบบป้อนกลับตัวทำความร้อน	21
2.16	แผนภาพระบบควบคุมป้อนกลับของกระบวนการความร้อน	22
2.17	แบบจำลองการถ่ายเทความร้อน	22
2.18	แผนภาพลักษณะสมบัติของตัวทำความร้อนและตัววัดอุณหภูมิ	23
2.19	ลักษณะสมบัติของ relay	25
2.20	สัญญาณออกของ relay amplifier	25
2.21	CE105MV ระบบควบคุมของเหลวในถังเชื่อม (Multivariable coupled tanks)	26
2.22	กระบวนการถังเดี่ยว	26
2.23	เส้นสัมผัสที่จุด H'_1	28
2.24	ระบบถังเดี่ยวโดยรวม	29
2.25	ลักษณะเฉพาะของป้อนน้ำ	29
2.26	ลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดระดับของเหลว	30
2.27	ผลตอบจากสัญญาณขึ้น	31
2.28	กระบวนการถังคู่	32
2.29	CE120 ตัวควบคุมแบบแอนะล็อก (analog controller)	35

2.30	หน้าจออุปกรณ์ CE120: analog controller	35
2.31	CE122 Digital Interface	36
3.1	ระบบควบคุมป้อนกลับ	38
3.2	การหาค่าอัตราขยายที่ทำให้ระบบเริ่มแกว่ง	40
3.3	การแกว่งด้วยค่าแอมพลิจูดคงที่สำหรับวิธีวงปิด	40
3.4	ผลตอบสนองสัญญาณขั้นหนึ่งหน่วยของกระบวนการ	41
3.5	ผลของการปรับอัตราขยายที่มีต่อผลตอบเชิงเวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว	43
3.6	ผลตอบกระบวนการเมื่อใช้ตัวควบคุม PI	44
4.1	ส่วนประกอบย่อยในตัวควบคุมแบบแอนะล็อก CE120	47
4.2	การต่ออุปกรณ์ CE110 เพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการหาเอกลักษณ์ของระบบ	49
4.3	การทดสอบ calibrate มอเตอร์	50
4.4	การทดสอบตัววัดสัญญาณความเร็วมอเตอร์	51
5.1	Area A ของตัวควบคุม CE120: ส่วนกำเนิดสัญญาณและโวลต์มิเตอร์	55
5.2	โปรแกรม CE2000 สำหรับใช้เป็น chart recorder	56
5.3	ส่วนรวมสัญญาณ อัตราขยายสัดส่วน P และอัตราขยายอินทิเกรต I	56
5.4	แผนภาพการควบคุมป้อนกลับของความเร็วมอเตอร์	56
5.5	การทดสอบตัววัดสัญญาณความเร็วมอเตอร์	57
6.1	การควบคุมป้อนกลับตำแหน่งเชิงมุม	60
6.2	แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับระบบควบคุมมอเตอร์ที่มีองค์ประกอบการอิมตัว	63
6.3	แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับระบบควบคุมมอเตอร์ที่มีองค์ประกอบ hysteresis	64
7.1	แบบจำลองการถ่ายเทความร้อน	66
7.2	แผนภาพลักษณะสมบัติของตัวทำความร้อนและอุณหภูมิภายในชุดการทดลอง	66
7.4	การทดสอบลักษณะสมบัติเบื้องต้นของตัวทำความร้อนเมื่อใช้ร่วมกับโปรแกรม CE2000	71
8.1	แผนภาพการควบคุมของกระบวนการความร้อน	73
8.2	การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าของกระบวนการความร้อน	74
9.1	CE105 General Layout	79
9.2	แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับระบบควบคุมระดับน้ำโดยใช้ตัวควบคุมสัดส่วน อินทิกรัล	81
9.3	การเชื่อมต่อวงจรสำหรับระบบควบคุมระดับน้ำแบบเปิด	84
10.1	การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองด้วย residual analysis และตำแหน่งโพลและศูนย์ของแบบจำลองที่ประมาณได้	92
11.1	การหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองอันดับหนึ่งที่มีค่าประวิงเวลาจากกราฟตอบสนองของกระบวนการ	99

สารบัญตาราง

2.1	รายการและรหัสอุปกรณ์การทดลองที่ใช้ในวิชา 2102436	9
3.1	ตารางสรุปวิธีการปรับจูนพารามิเตอร์ตัวควบคุม PID จากวิธีวงเปิด	45
3.2	ตารางสรุปวิธีการปรับจูนพารามิเตอร์ตัวควบคุม PID จากวิธีวงปิด	45
4.1	การเปรียบเทียบแรงดันขับมอเตอร์ (เมื่อไม่มีโหลด)	52
4.2	การเปรียบเทียบเซนเซอร์วัดความเร็ว	53
11.1	ตัวเลือกการกำหนดเงื่อนไขของพารามิเตอร์ในฟังก์ชันถ่ายโอนที่กำหนดโครงสร้างจากคำสั่ง <code>idtf</code> . . .	102
11.2	ตัวเลือกการกำหนดเงื่อนไขของพารามิเตอร์ในฟังก์ชันถ่ายโอนที่กำหนดโครงสร้างจากคำสั่ง <code>idproc</code> .	103
11.3	พารามิเตอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่งที่มีค่าประวิงเวลาของระบบความร้อน	105

สารบัญ

1	บทนำ	7
2	อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง	9
2.1	Servo trainer	9
2.1.1	รายละเอียดอุปกรณ์	9
2.1.2	หลักการควบคุม	11
2.1.3	แบบจำลองของระบบ	14
2.1.4	องค์ประกอบไม่เชิงเส้น	16
2.2	Thermal process	18
2.2.1	รายละเอียดอุปกรณ์	18
2.2.2	หลักการควบคุม	19
2.2.3	แบบจำลองระบบ	21
2.3	Multivariable coupled tanks	25
2.3.1	แบบจำลองของระบบถังเดี่ยว	25
2.3.2	ลักษณะเฉพาะของป้อนน้ำและเซนเซอร์วัดระดับของเหลว	29
2.3.3	การวัดลักษณะเฉพาะของระบบถังเดี่ยว	30
2.3.4	แบบจำลองของระบบถังคู่	32
2.3.5	การวัดลักษณะเฉพาะของระบบถังคู่	34
2.4	Controller	34
2.5	Digital interface	36
3	ตัวควบคุมพีไอดี	37
3.1	คุณสมบัติของตัวควบคุมแบบ PID	38
3.2	การปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม	39
3.3	จุดประสงค์ในการปรับจูนตัวควบคุม	42
3.4	วิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี	43
3.4.1	Proportional-only mode (P control)	44
3.4.2	Proportional-plus-integral mode (PI control)	44
3.4.3	Proportional, integral and derivative mode (PID)	45

สารบัญ	5
4 การทดลอง M1: การศึกษาระบบมอเตอร์	46
4.1 บทนำ	46
4.2 สิ่งที่ต้องเตรียมมา	47
4.3 วิธีทดลอง	48
สรุปผลการผลการทดลองที่ต้องส่ง	52
5 การทดลอง M2: การควบคุมความเร็วมอเตอร์	54
5.1 บทนำ	54
5.2 สิ่งที่ต้องเตรียมมา	55
5.3 วิธีทดลอง	55
สรุปผลการผลการทดลองที่ต้องส่ง	58
6 การทดลอง M3: การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ที่มีองค์ประกอบไม่เชิงเส้น	59
6.1 บทนำ	59
6.1.1 การออกแบบตัวควบคุมสำหรับการควบคุมตำแหน่งเชิงมุม	59
6.1.2 องค์ประกอบไม่เชิงเส้น	60
6.2 การทดลอง 1: การควบคุมตำแหน่งและผลกระทบของการอิมิตัวในวงจรถยายสัญญาณ	60
6.3 การทดลอง 2: การควบคุมตำแหน่งและผลกระทบของฮิสเทอรีซิส	61
สรุปผลการผลการทดลองที่ต้องส่ง	62
7 การทดลอง P1: การศึกษากระบวนการความร้อน	65
7.1 บทนำ	65
7.2 สิ่งที่ต้องเตรียมมา	67
7.3 วิธีทดลอง	67
สรุปผลการผลการทดลองที่ต้องส่ง	70
8 การทดลอง P2: การควบคุมแบบพีไอดีของกระบวนการความร้อน	72
8.1 บทนำ	72
8.1.1 การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control)	72
8.1.2 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feedforward control)	73
8.2 สิ่งที่ต้องเตรียมมา	73
8.3 วิธีทดลอง	74
8.3.1 การทดลอง 1: การตามรอยสัญญาณอ้างอิง	74
8.3.2 การทดลอง 2: การกำจัดสัญญาณรบกวน	75
8.3.3 การทดลอง 3: การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า	76
สรุปผลการผลการทดลองที่ต้องส่ง	77

9	การทดลอง T1: การควบคุมระดับของเหลวในถังน้ำ	78
9.1	บทนำ	78
9.2	ข้อปฏิบัติในการใช้อุปกรณ์	78
9.3	การทดลอง 1: การปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน อินทิกรัล	80
9.3.1	การควบคุมระดับน้ำโดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน	80
9.3.2	การควบคุมระดับน้ำโดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน อินทิกรัล	82
9.4	การทดลอง 2: การปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโดยใช้วิธี Ziegler Nichols	83
9.4.1	การทดสอบผลตอบสนองขั้นของระบบวงเปิด	83
9.4.2	การปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน อินทิกรัลโดยใช้วิธีวงเปิด	85
	สรุปรายการผลการทดลองที่ต้องส่ง	86
10	การทดลอง S1: การหาเอกลักษณ์ของระบบมอเตอร์	87
10.1	บทนำ	87
10.2	สิ่งที่ต้องเตรียมมา	92
10.3	วิธีทดลอง	93
	สรุปรายการผลการทดลองที่ต้องส่ง	96
11	การทดลอง S2: การหาเอกลักษณ์ของกระบวนการความร้อน	98
11.1	บทนำ	98
11.2	สิ่งที่ต้องเตรียมมา	104
11.3	วิธีทดลอง	104
	สรุปรายการผลการทดลองที่ต้องส่ง	107
	เอกสารอ้างอิง	110

บทที่ 1

บทนำ

คู่มือวิชาปฏิบัติการแลบนี้ใช้เพื่อประกอบการสอนวิชา 2102436 ปฏิบัติการควบคุมและวัดคุม ที่มีวัตถุประสงค์การเรียนรู้เพื่อให้

1. นิสิตเข้าใจหลักการและลักษณะสมบัติของตัวขับเร็วและเซนเซอร์ในระบบควบคุมเช่น ระบบเซอร์โวมอเตอร์ ภาระบวมการความร้อน และระบบควบคุมระดับของเหลวในถังน้ำ
2. นิสิตสามารถทดลองหาเอกลักษณ์ของระบบด้วยข้อมูลเชิงเวลาได้
3. นิสิตสามารถออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่เหมาะสม และเข้าใจถึงผลของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่มีต่อสมรรถนะของระบบ
4. นิสิตเข้าใจปัจจัยที่ส่งผลต่อการควบคุมแบบดิจิทัลและสามารถออกแบบตัวควบคุมแบบดิจิทัลที่เหมาะสม

ในการเรียนการสอนนั้น จะมีระบบควบคุมที่นิสิตได้ทดลอง 3 ระบบ อันได้แก่

1. ระบบเซอร์โวมอเตอร์
2. ภาระบวมการความร้อน
3. ระบบควบคุมระดับของเหลวในถังน้ำ

รายละเอียดของอุปกรณ์ และแบบจำลองพลวัตของระบบดังกล่าวข้างต้น จะอธิบายในบทที่ 2 ในการทดลองแลบวิชานี้จะใช้นิสิิตควบคุมพีไอดีเป็นหลัก ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดในบทที่ 3 เนื้อหาในสองหัวข้อดังกล่าวเป็นเนื้อหาที่นิสิตสามารถทบทวนหรืออ่านเชื่อมโยงได้ จากหลักการที่เรียนมาจากวิชา 2102333 ระบบควบคุมเชิงเส้น I

การทดลองที่พิจารณาในวิชานี้จะประกอบไปด้วยทั้งส่วนการเรียนรู้คุณลักษณะสมบัติของระบบ การหาเอกลักษณ์ของระบบ และการควบคุมด้วยพีไอดี ที่อธิบายในบทที่ 4 ถึงบทที่ 11 ดังนี้

1. M1 การศึกษาระบบมอเตอร์
2. M2 การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์
3. M3 การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ที่มีองค์ประกอบไม่เชิงเส้น
4. P1 การศึกษาภาระบวมการความร้อน

5. P2 การควบคุมแบบพีไอดีของกระบวนการความร้อน
6. T1 การควบคุมระดับของเหลวในถังน้ำ
7. S1 การหาเอกลักษณ์ของระบบมอเตอร์
8. S2 การหาเอกลักษณ์ของกระบวนการความร้อน

ในแต่ละบท จะอธิบายจุดประสงค์ หลักการใช้ สิ่งที่ต้องเตรียมมา วิธีการทดลอง และสรุปผลการผลการทดลองของการทดลองนั้นๆ เนื้อหาในคู่มือปฏิบัติการนี้ ส่วนใหญ่จะสรุปมาจากคู่มือชุดทดลองต่างๆ ของบริษัท TecQuipment [Tec13c, Tec13a, Tec13b, Tec13d] คู่มือเล่มนี้สามารถเข้าถึงได้จาก <http://jitkomut.eng.chula.ac.th/ee436.html>

ในการจัดทำคู่มือปฏิบัติการแลบวิชา 2102436 นี้ คณะอาจารย์ผู้จัดทำขอขอบคุณนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา 2 คน อันได้แก่ นาย ธีชนนท์ ชุ่มแอน (นิสิตปริญญาเอก) และนายศตายุ ชุณวงษ์ (นิสิตปริญญาโท) อันเป็นผู้ช่วยสอนวิชา 2102436 ที่ช่วยจัดเตรียมการทดลอง และจัดเตรียมเนื้อหาบางส่วนของคู่มือปฏิบัติการนี้

ศ. ดร.เดวิด บรรณเจตพงศ์ชัย

ผศ. ดร.มานพ วงศ์สายสุวรรณ

ผศ. ดร.สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์

รศ. ดร.จิตโกมุท ส่องศิริ

March 12, 2021

บทที่ 2

อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

ในวิชา 2102436 นั้น จะมีการทดลองกับ 3 ระบบ อันได้แก่ ระบบเซอร์โวมอเตอร์ (servo motor) กระบวนการความร้อน (thermal process) และระบบควบคุมระดับของเหลวในถังเชื่อม (coupled tank) ในการควบคุมระบบดังกล่าว จะมีอุปกรณ์ต่อเชื่อม อันได้แก่ ตัวควบคุมแบบแอนะล็อก (analog controller) และ digital interface ที่ทำหน้าที่เชื่อมรับส่งข้อมูลระหว่างระบบกับคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ทั้งหมดนั้น จะมีชื่อเรียกและรหัสดังนี้

ตาราง 2.1: รายการและรหัสอุปกรณ์การทดลองที่ใช้ในวิชา 2102436

รหัส	ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด	จำนวน
CE110	Servo trainer	ระบบเซอร์โวมอเตอร์	3
CE103	Thermal process control	กระบวนการความร้อน	3
CE105MV	Multivariable coupled tanks	ระบบควบคุมของเหลวในถังเชื่อม	1
CE120	Controller	ตัวควบคุมแบบแอนะล็อก	5
CE122	Digital interface	อุปกรณ์ต่อประสานดิจิทัล	2

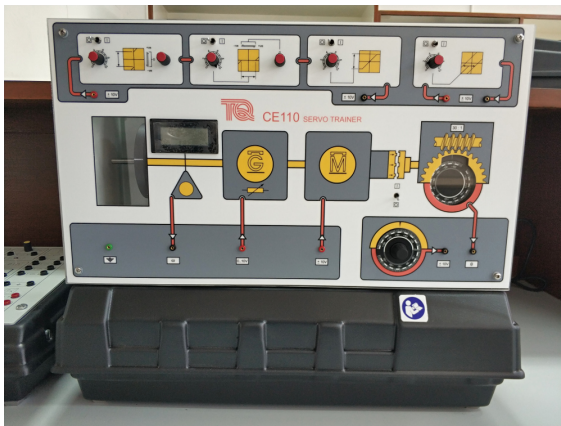
ในบทนี้จะบรรยายรายละเอียดของระบบควบคุมทั้ง 3 ระบบ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และรายละเอียดของอุปกรณ์ต่อเชื่อม

2.1 Servo trainer

2.1.1 รายละเอียดอุปกรณ์

CE110 Servo trainer นั้นแสดงดัง รูปที่ 2.1 อันประกอบไปด้วยเพลาหมุนที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ ในรูปอุปกรณ์จากซ้ายไปขวานั้นจะประกอบด้วย

1. โหลดเฉื่อย มีลักษณะเป็นแผ่นจาน (inertial load flywheel)
2. มาตรวัดความเร็ว (tachometer) ที่วัดความเร็วเชิงมุมของเพลา



(a) CE110 servo trainer



(b) การติดตั้ง CE110 servo trainer และ CE120 controller เข้าด้วยกัน

รูป 2.1: CE110 servo trainer และ CE120 controller

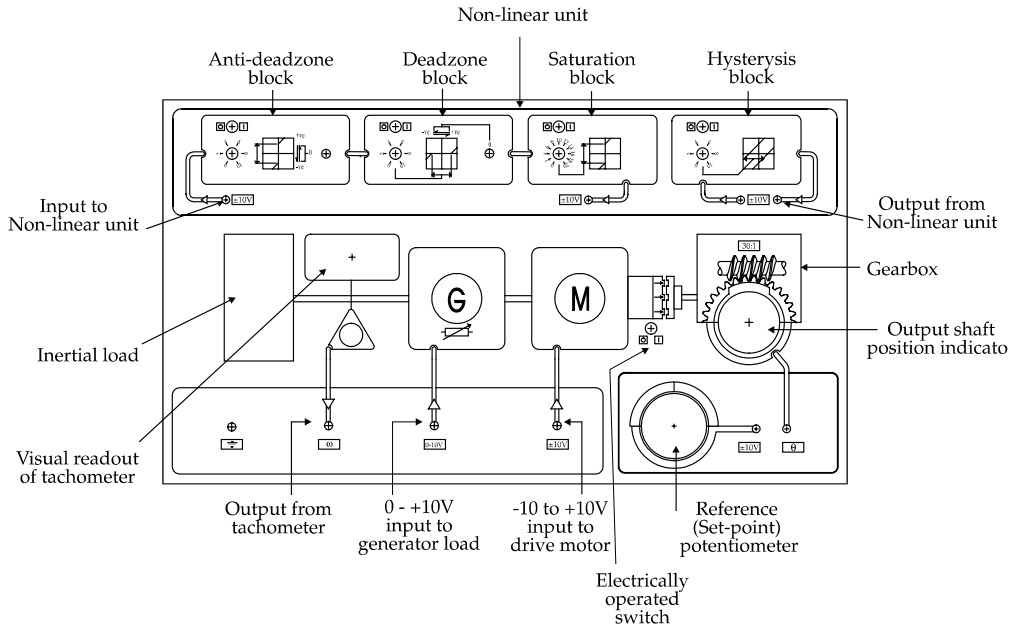
3. เครื่องจำลองโหลด (generator)
4. มอเตอร์ที่ส่งกำลังไปหมุนเฟลา
5. คลัทช์ไฟฟ้า (electrically operated clutch) ที่เป็นตัวส่งให้เฟลาที่หมุนด้วยมอเตอร์นั้นไปต่อกับเฟลาดำแหน่ง (จะเรียกว่า position output shaft)
6. เกียร์ทด (reduction gearbox) ด้วยสัดส่วน 30:1 เป็นเกียร์ที่ต่อกับเฟลาดำแหน่ง
7. เซนเซอร์วัดสัญญาณตำแหน่งและตัวบอกตำแหน่งที่ปรับได้ (calibrated visual indicator) จะมีปุมหมุนที่สามารถปรับค่าตำแหน่งที่ต้องการได้ (เมื่อต้องการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมของเฟลา)

อุปกรณ์ CE110 นั้นจะรวมไปถึงตัวขยายกำลัง (power amplifier) สำหรับมอเตอร์, generator, ตัวจ่ายกำลัง, วงจรทางไฟฟ้าต่างๆ สำหรับเซนเซอร์ความเร็ว ความเร็วของมอเตอร์นั้นจะแปรไปตามสัญญาณแรงดันที่จ่ายมายัง input socket ของ amplifier บนแผงหน้าจอบ ส่วน generator load นั้นจะกำหนดจาก external load input สัญญาณเข้าทั้งหมดนั้นสามารถจ่ายได้ในช่วง $\pm 10V$ (และเป็น 0 ถึง 10V สำหรับ generator load) เซนเซอร์ความเร็วของเฟลาและเซนเซอร์ตำแหน่งของเฟลาสัญญาณออกจะมีค่าสัญญาณที่ปรับอยู่ในช่วง $\pm 10V$ ทางด้านหลังขวาของ CE110 จะมีช่องเปิดให้เราสามารถปรับ inertial load ได้โดยการเพิ่ม inertia disc เข้าไป หากเราไม่ปิดช่องดังกล่าวปรับเพิ่มโหลด วงจรขับจะไม่ทำงานเพื่อความปลอดภัย

นอกจากเหนือจากส่วนประกอบของการหมุนมอเตอร์ดังที่อธิบายข้างต้น อุปกรณ์ CE110 ยังมีองค์ประกอบไม่เชิงเส้นที่แสดงไว้ส่วนเหนือของ front panel ดัง รูปที่ 2.2 เมื่อเรียงจากซ้ายไปขวา อันได้แก่

1. anti-dead-zone block: สร้างสัญญาณเพื่อกำจัดหรือหักล้างผลของ dead-zone ที่เกิดขึ้นจริงในอุปกรณ์ CE110 มอเตอร์
2. dead-zone block: สร้างภาวะ dead-zone ที่ปรับความกว้างได้ เพื่อจำลองและศึกษาผลที่เกิดขึ้น

3. saturation block: สร้างชั้นระดับที่ servo-drive amplifier จะอึดตัว เพื่อจำลองและศึกษาผลที่เกิดขึ้น
4. hysteresis block: สร้างภาวะ hysteresis ที่เกิดจากเกียร์ทดและ servo-drive train backlash เพื่อจำลองและศึกษาผลที่เกิดขึ้น



รูป 2.2: CE110 front panel

การต่ออุปกรณ์ CE110 ดัง รูปที่ 2.2 สามารถทำได้ง่ายโดยต่อสายไฟผ่าน 2mm sockets โดยให้สังเกตลูกศรบนแผงหน้าจอบอก หากเป็นลูกศรชี้เข้าไปที่อุปกรณ์จะหมายถึงสายไฟที่เสียบเข้าไปเป็นการส่งสัญญาณเข้าไปที่อุปกรณ์ ในทางกลับกัน หากเป็นลูกศรชี้ออกจากอุปกรณ์ จะหมายถึงการเสียบสายไฟออกมาเป็นการวัดค่าสัญญาณจากอุปกรณ์ จากรูปวงจรถ้าเราจึงเห็นว่า ส่วนที่เป็นสัญญาณเข้านั้นจะมี i) input to generator ii) input to drive motor ส่วนการวัดสัญญาณออกจากมาจาก sensor นั้นจะมี i) tachometer ii) output shaft position

2.1.2 หลักการควบคุม

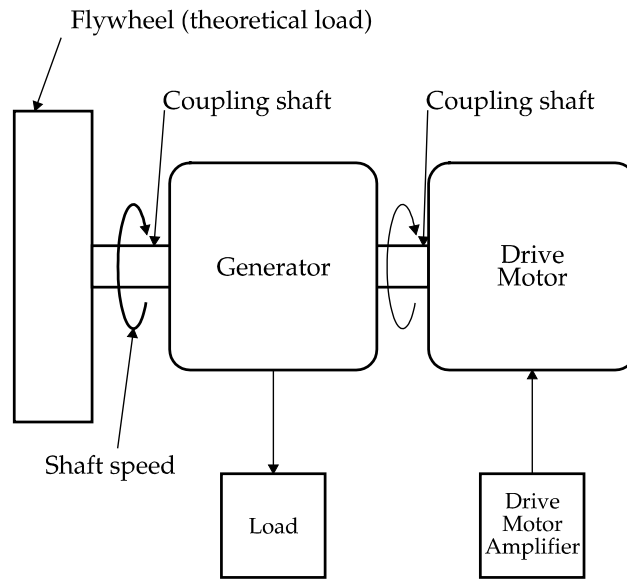
ในการควบคุมระบบเซอร์โวมอเตอร์ดัง รูปที่ 2.3 มอเตอร์จะใช้หมุนเพลาคู่ที่ติดกับโหลดด้วยความเร็วหนึ่งๆ องค์ประกอบของโหลดนั้นจะมีส่วนสำคัญ 2 ส่วน อันได้แก่

1. โหลดเฉื่อยจากจานหมุน (inertial load) เป็นจานหมุน หรือ flywheel ที่จะช่วยลดการกระเด้งของความเร็วมอเตอร์
2. โหลดทางไฟฟ้าที่เกิดจากเครื่องจำลองโหลด (electrical generator)

ภายใต้เงื่อนไขความสมดุลเมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่หนึ่งๆ เราจะได้ว่า

$$\text{พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามอเตอร์} = \text{พลังงานทางกลที่ generator รับเข้าไป} + \text{พลังงานที่สูญเสียไปความเสียดทาน} \quad (2.1)$$

ถ้าหากสัญญาณเข้ามอเตอร์ หรือโหลดเปลี่ยนไป ความเร็วมอเตอร์ก็จะถูกปรับไปที่ค่าใหม่เพื่อขยับไปสู่ภาวะสมดุลใหม่ กล่าวคือ ความเร็วมอเตอร์จะเพิ่มขึ้น ถ้าหากพลังงานเข้ามอเตอร์เกินกว่าพลังงานสูญเสีย หรือ ความเร็วมอเตอร์จะลดลง หากการสูญเสีย



รูป 2.3: ระบบมอเตอร์และโหลด

เสียดังกล่าวเกินค่าพลังงานเข้ามอเตอร์ การทำงานดังที่อธิบายมา เป็นการทำงานแบบวงเปิด เนื่องจากไม่มีข้อมูลป้อนกลับจากความเร็วเพลานำไปใช้กับวงจรขับมอเตอร์ เพื่อที่จะชดเชยการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเพลาลง

ในงานประยุกต์จริงที่ระบบเซอร์โวมอเตอร์เป็นองค์ประกอบย่อยหนึ่งๆ ของระบบใหญ่ที่ซับซ้อนมากขึ้น การมีโหลดและภาวะการสูญเสียนั้นอาจจะแปรไปตามหลายปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้โดยตรง ในภาวะดังกล่าว ผู้ใช้งานจำเป็นต้องสังเกตความเร็วเพลามอเตอร์ และปรับกลไกในการขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อชดเชยกับความเร็วที่เปลี่ยนไปดังกล่าว ในภาวะเช่นนั้น ผู้ใช้งานจะต้องมีการเตรียมข้อมูล อันได้แก่ i) ค่าวัดของความเร็วมอเตอร์ผ่านทางเซนเซอร์ หรือมาตรวัดหนึ่งๆ ii) การคำนวณของการปรับสัญญาณเข้ามอเตอร์ ว่าควรเป็นปริมาณเท่าใด เพิ่มหรือลดอย่างไร iii) การปรับ (อาจจะแบบ manual) เพื่อจะชดเชยกับภาวะโหลดที่เปลี่ยนไป โดยมุ่งหมายให้สมรรถนะของระบบคงเดิม

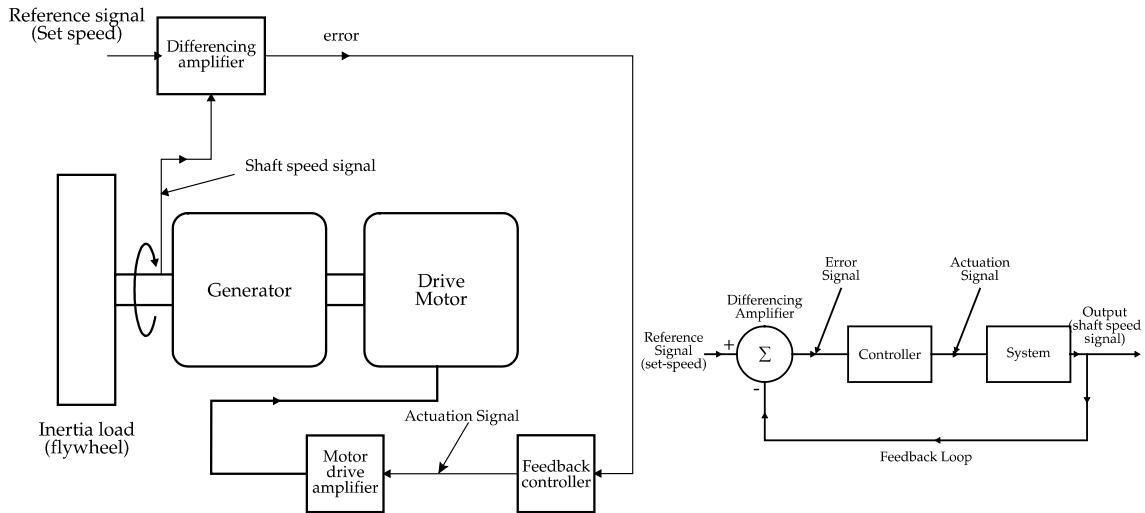
กลไกการปรับดังกล่าว สามารถทำได้ด้วยการควบคุมแบบอัตโนมัติ แสดงใน รูปที่ 2.4 ที่ต้องอาศัย i) เซนเซอร์วัดค่าสัญญาณทางไฟฟ้า ที่แปรผันโดยตรงกับความเร็วเพลามอเตอร์ ii) วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างสัญญาณความผิดพลาด (error signal) ระหว่างค่าวัด และค่าอ้างอิง (reference signal or set point) ค่าอ้างอิงดังกล่าวก็คือค่าความเร็วเพลามอเตอร์ที่ต้องการ จากนั้นค่าความผิดพลาดจะนำมาผ่านวงจรรขยายและนำค่าที่ได้ไปขับมอเตอร์ และเพื่อปรับสมรรถนะของระบบอย่างอัตโนมัติ กระบวนการปรับที่อธิบายไปข้างต้น ด้วยการใช้สัญญาณออกจากระบบเพื่อควบคุม หรือปรับสมรรถนะของระบบให้เป็นไปตามต้องการ ก็คือกระบวนการป้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 2.4

การควบคุมความเร็วมอเตอร์

ในรูปที่ 2.5 (a) แสดงการต่อระบบควบคุมมอเตอร์เมื่อไม่ต่อคัลท์ซ์ ในรูปแบบนี้คือการควบคุมความเร็วมอเตอร์ เราจะพบว่าแรงบิดที่มอเตอร์ผลิตได้ (τ_m) จะจ่ายให้กับ load generator, flywheel และแรงเสียดทาน ดังนี้

$$\tau_m = \tau_l + \text{inertial torque} + \text{frictional torque} \quad (2.2)$$

โดยที่ τ_l หมายถึงแรงบิดของโหลด (load torque) ที่เกิดจากเครื่องจำลองโหลด และแปรผันโดยตรงกับ load control voltage (v_l) ในขณะที่แรงเสียดทานจะแปรผันตรงกับความเร็วเพล ส่วน inertial torque นั้นจะแปรไปตามขนาดของ flywheel inertia และแปรตามความเร่งเชิงมุมของเพล จากข้อมูลดังกล่าว เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดมอเตอร์กับปริมาณต่างๆ



รูป 2.4: ระบบควบคุมมอเตอร์วงปิด

ได้เป็น

$$\tau_m = b\omega + K_l v_l + I \frac{d\omega}{dt} \quad (2.3)$$

โดยที่ b คือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของส่วนประกอบที่หมุน K_l คือค่าคงที่ของ load และ I คือค่า inertial of flywheel ส่วนวงจรทางไฟฟ้าหรือวงจร อาร์เมเจอร์ของมอเตอร์นั้น เมื่อกำหนดให้ R คือค่าความต้านทาน i คือกระแส L คือค่าความเหนี่ยวนำ $v(t)$ คือสัญญาณแรงดันเข้ามอเตอร์ และ v_{emf} คือแรงดัน back emf แล้วนั้น จะได้ว่า

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di}{dt} + v_{emf}(t) \quad (2.4)$$

จากผลลัพธ์ที่ว่า back emf แปรผันตรงกับความเร็วมอเตอร์: $v_{emf} = K_b\omega$ และแรงขับมอเตอร์นั้นแปรผันตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์: $\tau_m = K_m i$ เมื่อแปลงสมการพลวัต (2.3)-(2.4) ด้วย Laplace transform และกำจัดตัวแปร (หรืออาจจะใช้การยู่ block diagram) เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง ω กับ v และ v_l เป็น

$$\omega(s) = \frac{K_m}{(Is + b)(Ls + R) + K_m K_b} V(s) - \frac{K_l(Ls + R)}{(Is + b)(sL + R) + K_m K_b} V_l(s) \quad (2.5)$$

หากเราละเลยผลของความเหนี่ยวนำในวงจรอาร์เมเจอร์ นั่นคือ $L \approx 0$ เราจะประมาณฟังก์ชันถ่ายโอนของความเร็วมอเตอร์ได้เป็นฟังก์ชันอันดับหนึ่ง ดังนี้

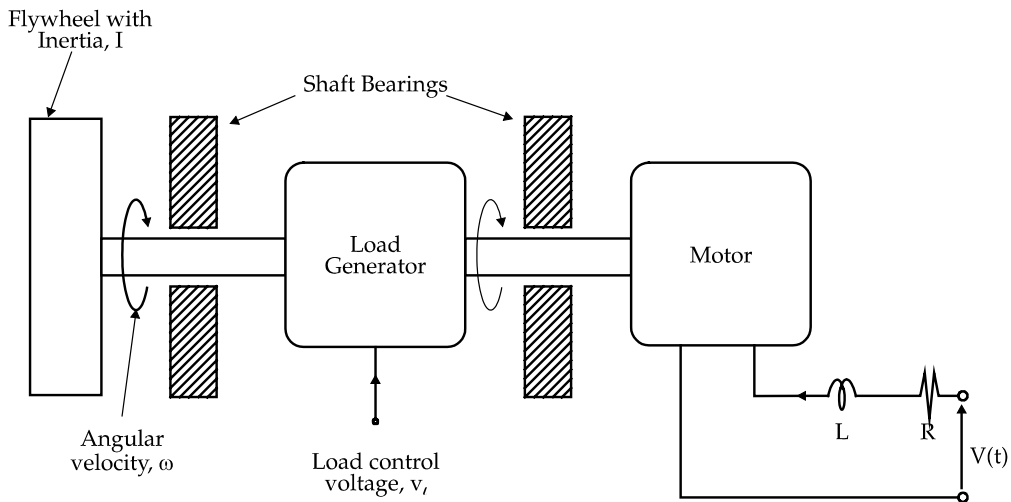
$$\omega(s) = \frac{K_1}{(\tau s + 1)} V(s) - \frac{K_2}{(\tau s + 1)} V_l(s) \quad (2.6)$$

โดยที่

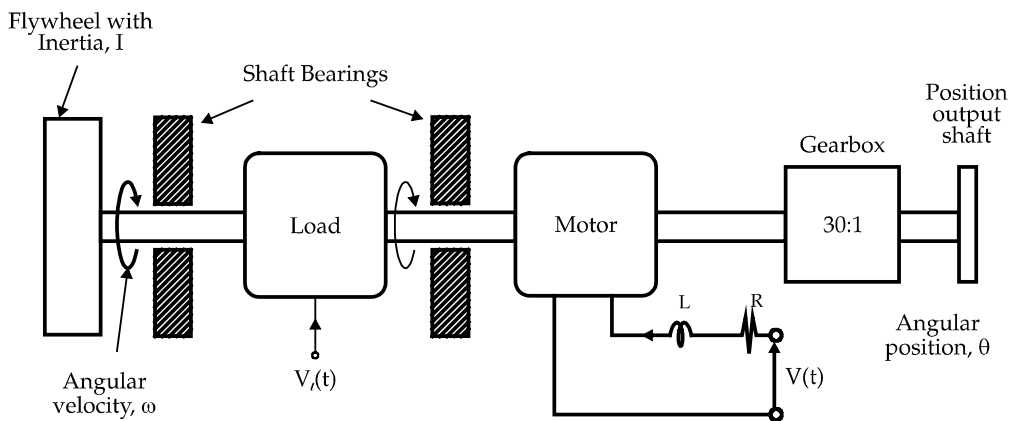
$$K_1 = \frac{K_m}{(bR + K_m K_b)}, \quad K_2 = \frac{K_l R}{(bR + K_m K_b)}$$

ดังนั้น ในภาวะทั่วไป เราอาจจะคำนึงถึงแต่โพลเดี่ยว เมื่อ $v_l = 0$ เราจึงได้ว่า ความเร็วมอเตอร์สัมพันธ์กับสัญญาณแรงดันเข้ามอเตอร์ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่ง ดังนี้

$$\omega(s) = \frac{K_1}{(\tau s + 1)} V(s) \quad (2.7)$$



(a) ไม่ต่อคลัทช์



(b) ต่อคลัทช์

รูป 2.5: ระบบควบคุมมอเตอร์กับคลัทช์

การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์

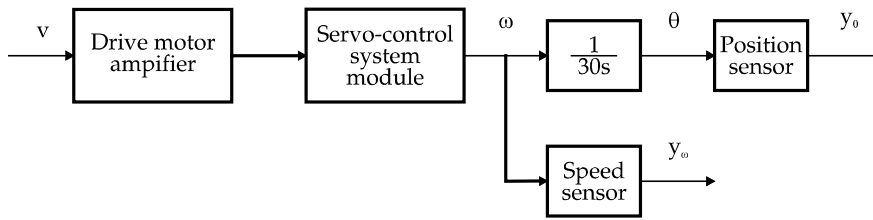
สำหรับรูปที่ 2.5 (b) เมื่อระบบคลัทช์ได้เชื่อมต่อนั้นคือ เกียร์ทดและเฟลาตำแหน่งได้ต่อกับเฟลามอเตอร์ เราจะได้ว่าตำแหน่งเฟลาของสัญญาณออก θ นั้น สัมพันธ์กับความเร็วเชิงมุมของเฟลามอเตอร์ ด้วยสมการ

$$\Theta(s) = \frac{\omega(s)}{30s} \quad (2.8)$$

ค่าคงที่ 30 นั้นมาจากอัตราเกียร์ทด 30 : 1 ที่ทำให้ความเร็วมอเตอร์ลดลง 30 เท่าเมื่อผ่านเกียร์ทด นอกจากนี้ เราจะเห็นว่าการเพิ่มโพลด์เกียร์ทดเข้ามา จะทำให้ค่าอัตราขยายและค่าคงตัวเวลาของระบบนั้นเปลี่ยนไปด้วย ดังสมการ (2.6) และ (2.7)

2.1.3 แบบจำลองของระบบ

ขณะใช้งานระบบควบคุมมอเตอร์วงปิด เราจะควบคุมความเร็ว หรือตำแหน่งของมอเตอร์โดยการปรับสัญญาณแรงดันเข้ามอเตอร์ ซึ่งทั้งความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์จะถูกวัดโดยเซนเซอร์ ที่มีให้ค่าเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าที่แปรผันตรงกับความเร็ว หรือตำแหน่ง ดังกล่าว จากรูปที่ 2.6 เมื่อกำหนดให้ y_θ , y_ω คือค่าวัดจากเซนเซอร์ของตำแหน่งและความเร็วมอเตอร์ตามลำดับ (ที่เป็นสัญญาณ



รูป 2.6: แผนภาพระบบควบคุมมอเตอร์ที่แสดงตัวขับเคลื่อนและเซนเซอร์

ไฟฟ้า หน่วยเป็นโวลต์) เราจะได้ว่าสมบัติของเซนเซอร์นั้นมีลักษณะเป็นเชิงเส้น กล่าวคือ

$$y_\theta = k_\theta \theta, \quad y_\omega = k_\omega \omega \tag{2.9}$$

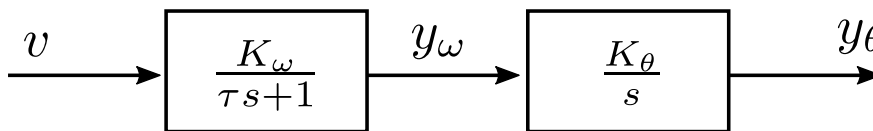
โดยที่ k_θ, k_ω คือค่าอัตราขยายของเซนเซอร์ตำแหน่งและความเร็ว ตามลำดับ จาก (2.7) ในกรณีที่ไม่มีโหลด v_l จากความสัมพันธ์ (2.7), (2.8) และ (2.9) จึงได้ว่า y_ω สัมพันธ์กับสัญญาณแรงดันเข้ามอเตอร์ v เป็น

$$Y_\omega(s) = \frac{k_\omega K_1}{\tau s + 1} V(s) \triangleq \frac{K_\omega}{\tau s + 1} V(s) \tag{2.10}$$

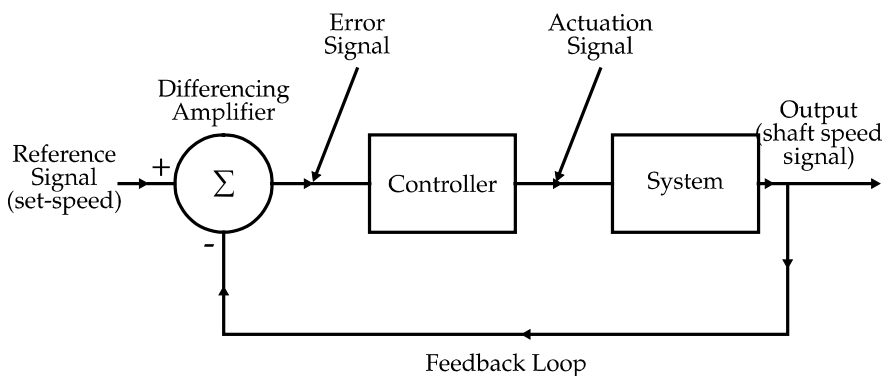
และในทำนองเดียวกัน y_θ สัมพันธ์กับ y_ω และสัมพันธ์กับ v ดังนี้

$$Y_\theta(s) = \frac{k_\theta}{30s} \omega(s) = \frac{k_\theta}{30k_\omega s} Y_\omega(s) \triangleq \frac{K_\theta}{s} Y_\omega(s) \triangleq \frac{K_\theta K_\omega}{s(\tau s + 1)} V(s) \tag{2.11}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนจาก v ไปยัง y_ω และ y_θ สามารถแสดงได้ดังแผนภาพในรูปที่ 2.7



รูป 2.7: แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเซอร์โวมอเตอร์โดยมีสัญญาณออกเป็นมุมมอเตอร์ที่ผ่านเซนเซอร์



รูป 2.8: แผนภาพระบบมอเตอร์วงปิด

2.1.4 องค์ประกอบไม่เชิงเส้น

การแก้ปัญหาการควบคุมเซอร์โว (servo-control) ในทางปฏิบัติจะมีองค์ประกอบไม่เชิงเส้นต่างๆ อยู่ด้วย ดังนี้

1. Amplifier saturation
2. Amplifier dead-zone
3. Anti-dead-zone
4. Hysteresis

องค์ประกอบไม่เชิงเส้นที่พบบ่อยที่สุดจะรวมอยู่ในระบบเซอร์โวในบล็อกของแบบจำลองขององค์ประกอบไม่เชิงเส้น เราสามารถเชื่อมต่อองค์ประกอบไม่เชิงเส้นต่างๆ เข้ากับกับเซอร์โวมอเตอร์แบบอนุกรม เพื่อศึกษาผลกระทบขององค์ประกอบไม่เชิงเส้นต่างๆ ที่มีต่อสมรรถนะของระบบในทางปฏิบัติ สำหรับในคู่มือนี้ จะอธิบายรายละเอียดขององค์ประกอบไม่เชิงเส้นดังนี้

การอิ่มตัวในวงจรรขยาย

ในวงจรรขยายอิเล็กทรอนิกส์สำหรับขับเซอร์โวมอเตอร์ในทางปฏิบัติจะมีค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดที่กำหนดสำหรับจำกัดแรงดันขาออก ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดนี้เกิดจากขีดจำกัดที่ถูกกำหนดโดยค่าของวงจรรขยาย ตัวอย่างเช่น ถ้ากำลังที่จ่ายให้วงจรรขยายให้แรงดัน ± 15 โวลต์ สัญญาณขาออกของวงจรรขยายจะไม่สามารถเกินจากขีดจำกัดนี้ไม่ว่าอัตราขยายของวงจรรจะมีค่าเท่าใดก็ตาม เราเรียกสิ่งที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้ว่า การอิ่มตัว (saturation) ดังแสดงในรูปที่ 2.9a

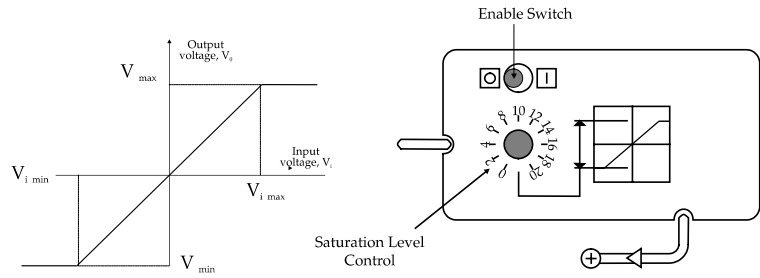
วงจรรขยายที่มีขีดจำกัดการอิ่มตัวจะทำงานตามปกติด้วยความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างแรงดันขาเข้า V_i และแรงดันขาออก V_o สำหรับแรงดันขาเข้าที่มีค่าในช่วง V_{min} ถึง V_{max} ในกรณีที่แรงดันขาเข้ามีค่าไม่อยู่ช่วงนี้ แรงดันขาออก V_o จะเป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ V_{max} หรือ V_{min}

วงจรรขยายขับเซอร์โวมอเตอร์จะอิ่มตัวที่ ± 10 โวลต์ แต่เพื่อแสดงผลกระทบของการอิ่มตัวแยกต่างหาก บล็อกขององค์ประกอบไม่เชิงเส้นจะมีองค์ประกอบการอิ่มตัวรวมอยู่ด้วย บล็อกการอิ่มตัวจะเชื่อมต่อเข้ากับวงจรรโดยใช้สวิตช์เปิดทาง หากปิดสวิตช์ สัญญาณขาเข้าจะผ่านบล็อกการอิ่มตัวโดยไม่มีกรปรับแต่ง อัตราขยายของวงจรรขยายมีค่าเป็นหนึ่ง เราสามารถปรับแรงดันอิ่มตัวของวงจรรขยายได้โดยหมุนปุ่ม 'saturation level control'

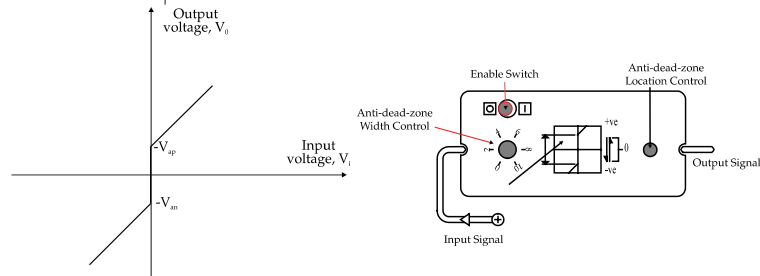
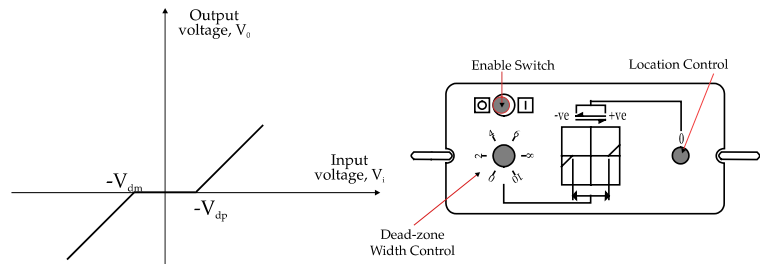
ฮิสเทอรีซิส (ระยะคลอน)

องค์ประกอบไม่เชิงเส้นในวงจรรขับทางกลที่พบบ่อยและไม่เป็นที่ต้องการคือฮิสเทอรีซิส (hysteresis) หรือระยะคลอน (backlash) รูปแบบขององค์ประกอบไม่เชิงเส้นนี้เป็นผลมาจากการขบกันหรือความไม่พอดีกันของข้อต่อเชิงกล (มักเกิดในเกียร์ทด) ซึ่งอุปกรณ์สองชิ้นของข้อต่อสูญเสียการสัมผัสกันชั่วคราวตามทิศทางของการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ การเกิดฮิสเทอรีซิสสามารถแสดงดังรูปที่ 2.9c ซึ่งเกียร์ที่ขบกันไม่พอดีสูญเสียการสัมผัสกันชั่วคราวระหว่างการเปลี่ยนทิศของเกียร์ขับ ทำให้เกียร์ที่ถูกขับ (เกียร์ขาออก) หยุดนิ่งจนกระทั่งเกียร์ขับ (เกียร์ขาเข้า) เคลื่อนไปจนสัมผัสกับเกียร์ที่ถูกขับอีกครั้ง ช่องว่างที่ไม่มีสัมผัสกันเรียกว่า ช่องว่างระยะคลอน (backlash gap)

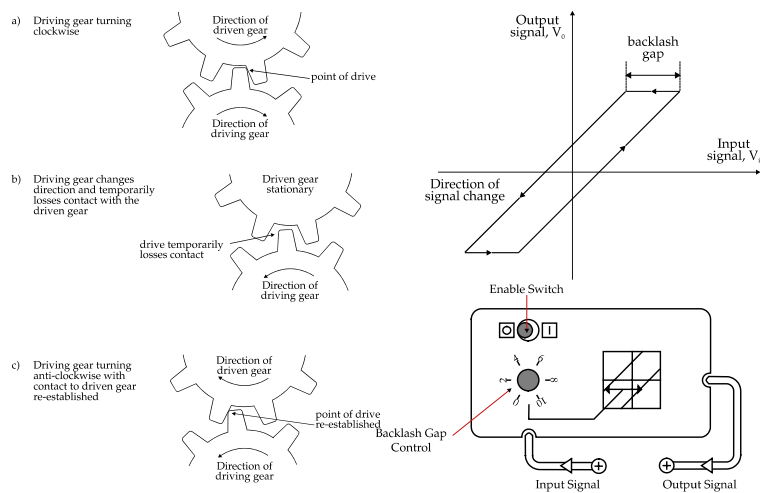
ลักษณะเฉพาะการรับเข้า/ส่งออก (input/output characteristic) ของอุปกรณ์ฮิสเทอรีซิสแสดงในรูปที่ 2.9c จะสังเกตเห็นว่าฮิสเทอรีซิสเป็นองค์ประกอบไม่เชิงเส้นแบบมีทิศทาง ซึ่งสัญญาณขาออกขึ้นอยู่กับทิศทางการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาเข้าและทิศทางภายหลังของการเปลี่ยนแปลง เกียร์ทดในระบบเซอร์โวจะถูกเลือกให้ลักษณะเฉพาะของฮิสเทอรีซิสมีขนาดเล็ก ซึ่งจะทำให้ระยะคลอนในระบบเซอร์โวไม่ก่อให้เกิดปัญหา อย่างไรก็ตาม เพื่อแสดงผลกระทบของฮิสเทอรีซิส บล็อกขององค์ประกอบไม่เชิง



(a) saturation



(b) anti-deadzone



(c) hysteresis

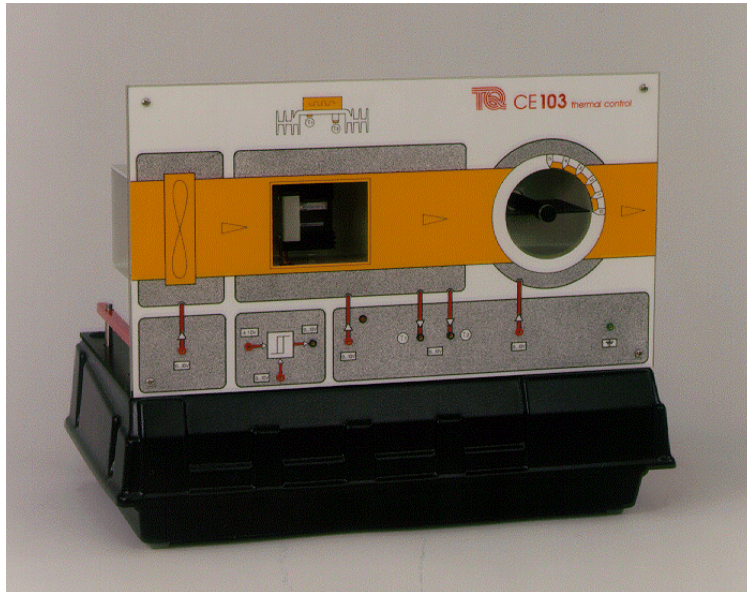
รูป 2.9: องค์ประกอบไม่เชิงเส้นแบบต่างๆ ในระบบเซอร์โวมอเตอร์

เส้นจะมีองค์ประกอบฮิสเทอรีซิสรวมอยู่ด้วย บล็อกฮิสเทอรีซิสจะเชื่อมต่อเข้ากับวงจรโดยใช้สวิตช์เปิดทาง หากปิดสวิตช์ สัญญาณขาเข้าจะผ่านบล็อกฮิสเทอรีซิสโดยไม่มีการปรับแต่ง เราสามารถปรับขนาดของฮิสเทอรีซิสได้โดยหมุนปุ่ม 'backlash gap control' ดังแสดงในรูปที่ 2.9c

2.2 Thermal process

2.2.1 รายละเอียดอุปกรณ์

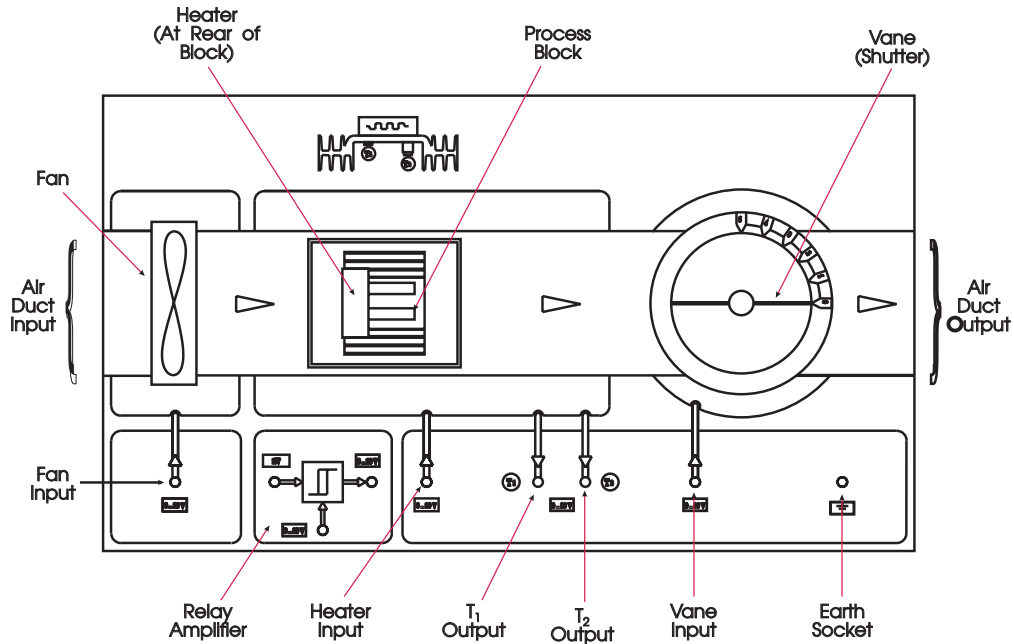
CE103 thermal process ดัง รูปที่ 2.10 เป็นระบบที่ไว้ใช้แสดงปัญหาควบคุมอุณหภูมิที่แปรเปลี่ยนไปจากการแลกเปลี่ยนความร้อน อุณหภูมิของ block ที่แปรเปลี่ยนนั้นเกิดจากการใส่พลังงานความร้อน และการระบายความร้อนที่เกิดจากการปรับความเร็วพัดลมของพัดลมระบายอากาศ ในระบบยังมีการปรับองศาพัดลมที่กั้นอากาศ ทำให้การหมุนเวียนของอากาศต่างกันและส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของ block ที่วัดได้ในที่สุด



รูป 2.10: กระบวนการความร้อน

อุปกรณ์ CE103 นั้นประกอบไปด้วยส่วนประกอบดัง รูปที่ 2.11

1. air duct input หรือ ท่ออากาศเข้า ที่ติดกับพัดลม เป็นช่องที่อากาศเข้าและสามารถระบายได้ด้วยการปรับความเร็วพัดลม
2. สัญญาณเข้าพัดลม (fan input) รับสัญญาณในช่วง 0 ถึง 10V เพื่อให้ปรับความเร็วพัดลม สัญญาณแรงดันที่ใส่จะต้องมีเกินค่าระดับหนึ่ง (threshold) จึงจะทำให้มอเตอร์พัดลมหมุนได้ พัดลมนั้นไม่มีระบบป้องกัน กล่าวคือ หากมีโพลต์เกิดขึ้น เช่น การปิดพัดลมระบายอากาศ จะไม่มีการป้องกันทำให้พัดลมหมุนเร็วขึ้น นอกจากนี้ การใส่แรงดันค่าลบ จะไม่มีผลใดๆ เกิดขึ้นกับพัดลม
3. heated process block ที่ติดอยู่ในช่องท่อทางเดินของอากาศ block นี้จะติดตั้งทำความร้อน (heater) ที่มีขดลวดความร้อน และผู้ใช้สามารถใส่สัญญาณเข้าความร้อน (heat input) ได้
4. heat input จะรับสัญญาณแรงดัน 0 ถึง 10V และจะควบคุมกำลังความร้อนไปยัง heater โดยการปรับ duty cycle ของ pulse width modulated heater amplifier
5. ตัวขยายรีเลย์ (relay amplifier) ใช้สำหรับการควบคุมแบบเปิด/ปิด (on/off control) นั่นคือสัญญาณเข้าของรีเลย์จะเป็นค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิที่ต่างไปจากค่าที่ตั้งไว้ และสัญญาณออกของรีเลย์จะเป็นสัญญาณควบคุม (ที่จะต่อไปยังช่อง heat input ต่อไป) ในตัวขยายรีเลย์นั้น สามารถปรับให้มีลักษณะไม่เชิงเส้นแบบ hysteresis ได้ (อันเป็นลักษณะ



รูป 2.11: CE103 Thermal process

สมบัติที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์หรืองานประยุกต์จริง ตัวขยายรีเลย์จะรับสัญญาณแรงดันเข้าในช่วง -10 ถึง 10V และสัญญาณออกจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 10V ดัง รูปที่ 2.13 และสามารถปรับความกว้างของ hysteresis ได้จากช่องสัญญาณแรงดันเข้า ในช่วง 0 ถึง 10V

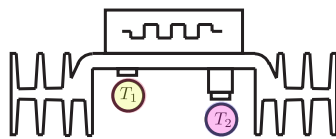
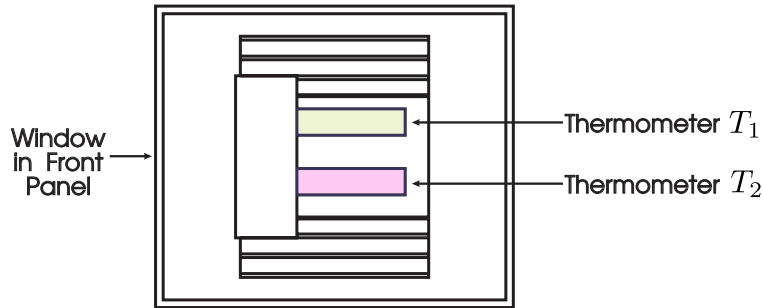
6. platinum resistance thermometers จะมีเทอร์มิสเตอร์วัดอุณหภูมิ 2 จุด ดังแสดงใน รูปที่ 2.12 คือ อุณหภูมิของ block ที่วัดโดยตรงจากผิวสัมผัส (T_1) กับอุณหภูมิของตำแหน่งที่กั้นด้วยช่องว่างฉนวน (T_2) เพื่อให้ศึกษาผลของความเฉื่อยเชิงความร้อน (thermal inertia) กับค่าคงตัวเวลาที่เปลี่ยนไปเมื่อทำการควบคุม เทอร์มิสเตอร์นี้ถูกปรับให้ค่าสัญญาณแรงดันที่แปรตามอุณหภูมิด้วยอัตรา 100mV/C
7. ชัตเตอร์ช่องลมที่ปรับองศาได้ (vane/shutter) เพื่อให้ศึกษาผลกระทบจากการระบายอากาศที่ท่ออากาศออกว่าส่งผลกับอุณหภูมิอย่างไร ชัตเตอร์นี้จะเป็นระบบเซอร์โวที่ปรับโดยใส่สัญญาณแรงดันเข้าที่ช่อง vane input ในช่วง 0 ถึง 10V ที่จะทำให้ชัตเตอร์หมุนจากตำแหน่งเปิด (0) ไปยังตำแหน่งที่ปิด (5) อย่างไรก็ตาม ตำแหน่งที่ชัตเตอร์ปิดหมดนั้นจะยังมีช่องว่างเล็กน้อย เพื่อไม่ให้เกิดภาวะร้อนเกิน (overheat) ได้

จุดประสงค์หลักของการจำลองระบบความร้อนด้วยอุปกรณ์ CE103 นั้น คือการควบคุมระบบแลกเปลี่ยนความร้อน ที่ต้องการควบคุมให้อุณหภูมิของระบบอยู่ที่ค่าๆ หนึ่ง ระบบนี้เป็นตัวอย่างในงานประยุกต์ เช่น การควบคุมอุณหภูมิของห้องที่มีเครื่องปรับอากาศ หรือเครื่องทำความร้อน เป็นต้น

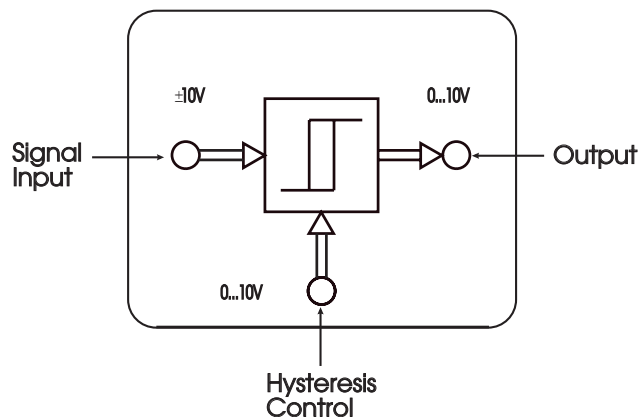
2.2.2 หลักการควบคุม

พิจารณาระบบที่มีเครื่องทำความร้อนจ่ายพลังงานความร้อนดัง รูปที่ 2.14 สมมติว่ามี finned block และมีเครื่องจ่ายความร้อนด้วยอัตราคงที่ หากเรามีพัดลมระบายอากาศที่สามารถปรับความเร็วได้ ความร้อนจะถูกพัดพาออกจากระบบ ทำให้เมื่อเวลาผ่านไปประยะหนึ่ง อุณหภูมิของ block จะเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ภายใต้เงื่อนไขนั้น เราจะกล่าวว่า

$$\text{ความร้อนที่จ่ายจากเครื่องทำความร้อน} = \text{ความร้อนที่ถูกดูดออกไปด้วยตัวทำความเย็น}$$



รูป 2.12: การวัดอุณหภูมิ



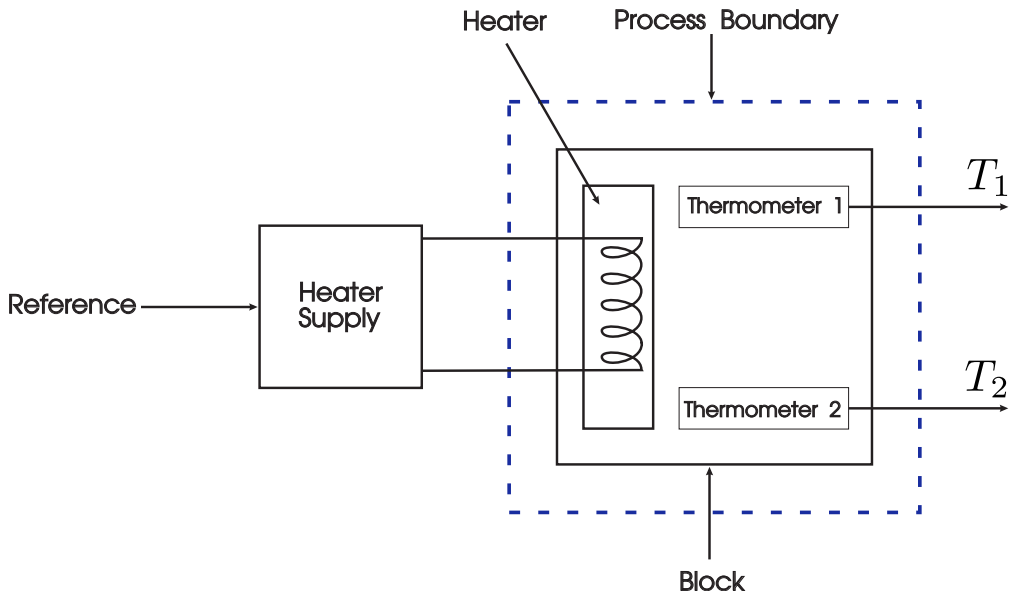
รูป 2.13: Relay amplifier

หรือ พลังงานเข้า เท่ากับ พลังงานออก นั่นเอง

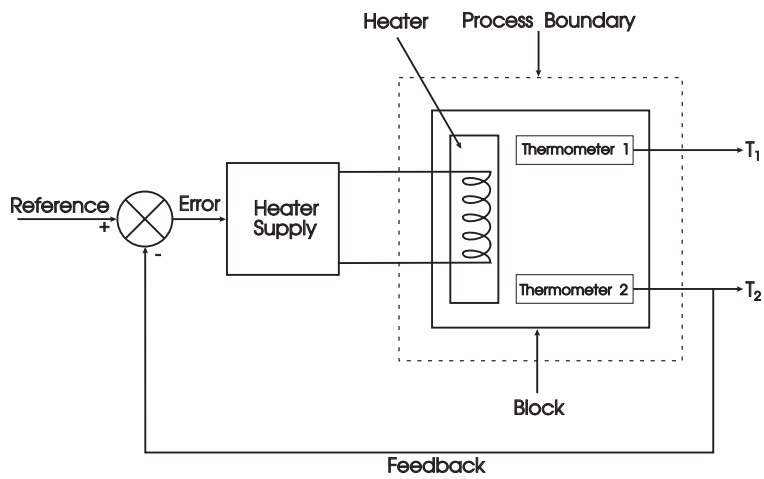
เมื่อเงื่อนไขดังกล่าวเป็นจริง ระบบจะเข้าสู่ภาวะสมดุล นั่นคือ อุณหภูมิของระบบจะมีค่าคงที่ ตรวจจับที่ทั้งตัวทำความร้อน และพัดลมระบายอากาศไม่ได้ถูกเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ใดๆ หากเราปรับค่าตัวทำความร้อน (เช่น เพิ่มความร้อน) หรือปรับความเร็วพัดลม จะทำให้อุณหภูมิของระบบปรับตัวไปยังค่าสมดุลค่าใหม่

ในระบบอุตสาหกรรมที่มีระบบแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นส่วนย่อย เราจะพบว่าอัตราการระบายความร้อนนั้น อาจไม่ได้ถูกควบคุมได้โดยตรง ทำให้อุณหภูมิของระบบเปลี่ยนไปจากค่าที่ต้องการ ผู้ใช้งานจึงจำเป็นต้อง i) วัดค่าอุณหภูมิของระบบผ่านทางเซนเซอร์หนึ่งๆ ii) คำนวณว่าให้ตัวจ่ายความร้อนเพิ่มหรือลดความร้อนเป็นปริมาณเท่าใด จึงจะทำให้อุณหภูมิของระบบนั้นเป็นไปตามค่าที่ต้องการ การกระทำดังกล่าว คือการใช้หลักการป้อนกลับดังรูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.16 นั่นคือ เราจะมีเซนเซอร์ที่ให้ค่าสัญญาณไฟฟ้าที่แปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิ และมีวงจรถอดรหัสที่คำนวณผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ต้องการ กับอุณหภูมิที่วัดได้ เรียกว่า ค่าความผิดพลาด จากนั้นตัวควบคุมที่มีค่าความผิดพลาดเป็นสัญญาณเข้า จะคำนวณสัญญาณควบคุมจะจ่ายให้กับระบบเพื่อจะชดเชยให้อุณหภูมิของระบบนั้นเท่ากับค่าที่ต้องการในที่สุด

ตัวอย่างของผลการป้อนกลับ เช่น ระบบอยู่ในภาวะสมดุลหนึ่งๆ มีอุณหภูมิของระบบปัจจุบันที่ค่าหนึ่ง หากเราปรับให้พัดลมหมุนเร็วขึ้น และเราไม่ได้ทำอะไรกับตัวจ่ายความร้อน เราจะพบว่าอุณหภูมิของระบบจะลดลง ทำให้ค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิ



รูป 2.14: ระบบตัวทำความร้อน

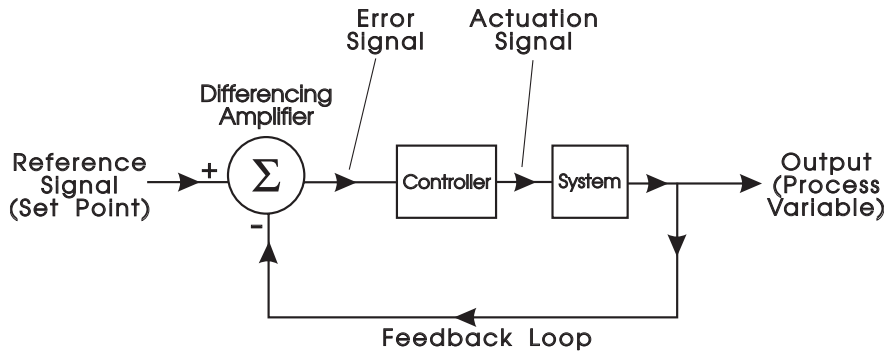


รูป 2.15: ระบบป้อนกลับตัวทำความร้อน

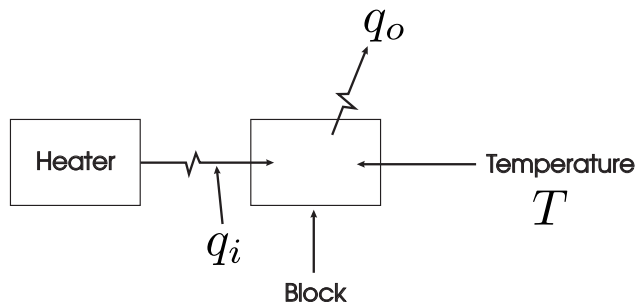
นั้นสูงขึ้น จากนั้น หากใช้ตัวควบคุมเช่น ตัวควบคุมอัตราขยาย จะได้ว่าสัญญาณควบคุมจะมีค่าเป็นบวก ทำให้ตัวทำความร้อนให้พลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นแก่ระบบ ส่งผลให้อุณหภูมิของระบบสูงขึ้นอัตโนมัติ จากนั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงค่าอ้างอิงที่ต้องการ จะให้ค่าความผิดพลาดลดลง และส่งผลให้พลังงานความร้อนที่จ่ายโดยตัวทำความร้อนมีค่าลดลง จนถึงภาวะสมดุลใหม่ที่อัตราการให้ความร้อนเท่ากับอัตราการระบายความร้อนออก ณ ภาวะสมดุลใหม่นั้นค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิก็จะมีค่าคงที่ใหม่ค่าหนึ่ง

2.2.3 แบบจำลองระบบ

ในการอธิบายพลวัตของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนนั้น พิจารณา รูปที่ 2.17 กำหนดให้ q_i เป็นอัตราพลังงานความร้อนไหลเข้าจากตัวทำความร้อน (kcal/sec) และ block สามารถทำให้เย็นลงได้โดยอาศัยการพาความร้อน (convection) หรือการแผ่รังสีความร้อน (radiation) ด้วยอัตราจ่ายพลังงานความร้อน q_o ดังนั้น เราจะได้ความสัมพันธ์ว่า ผลต่างของอัตราความร้อนไหลเข้า กับไหลออกนั้น ส่งผลกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังนี้



รูป 2.16: แผนภาพระบบควบคุมป้อนกลับของกระบวนการความร้อน



รูป 2.17: แบบจำลองการถ่ายเทความร้อน

$$q_i - q_o = C \frac{dT}{dt} \tag{2.12}$$

โดยที่ T คืออุณหภูมิของ block ($^{\circ}\text{C}$) และ C เรียกว่าค่าความจุความร้อนของ block หรือ thermal capacitance ($\text{kcal}/^{\circ}\text{C}$) ที่ขึ้นกับมวลดังสมการ $C = mc_e$ เมื่อ c_e คือค่า specific heat of the block

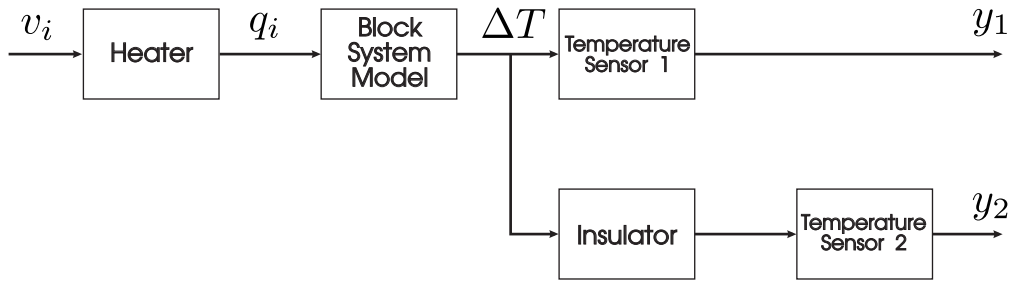
โดยทั่วไปแล้ว ความร้อนจะไหลจากสารหนึ่งไปยังอีกสารหนึ่งได้ด้วย 3 วิธี อันได้แก่ การนำความร้อน (conduction), การพาความร้อน (convection) และการแผ่ความร้อน (radiation) สำหรับการแผ่รังสีนั้นจะมีผลอย่างมีนัยยะสำคัญ เมื่ออุณหภูมิของตัวส่งความร้อนนั้นสูงมากเมื่อเทียบกับตัวรับความร้อน ดังนั้น กระบวนการความร้อนส่วนใหญ่ที่พิจารณาในอุตสาหกรรมจึงมักไม่พิจารณาผลจากการแผ่รังสี หากเราสมมติว่า block นั้นสูญเสียความร้อนไปจากการพาความร้อน เราจะได้ว่า q_o จะเป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นแบบซับซ้อนของตัวแปรอุณหภูมิของ block (T), อุณหภูมิห้อง (T_a), พื้นที่หน้าตัดของ block และพารามิเตอร์อื่นๆ อย่างไรก็ตาม เรามีสมมติฐานว่า จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยในอุปกรณ์ CE103 ที่ใช้นี้ และสมมติให้ q_o เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของผลต่างอุณหภูมิของ block กับอุณหภูมิห้อง ดังนี้

$$q_o = hA\Delta T \tag{2.13}$$

เมื่อ h คือสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน (convection coefficient) มีหน่วยเป็น $\text{kcal}/\text{m}^2 \text{ sec } ^{\circ}\text{C}$ และ A คือพื้นที่ผิวของ block ที่เปิดสู่การไหลของความร้อน (m^2) และ $\Delta T = T - T_a$ คืออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปรอบๆ T_a (หรืออุณหภูมิ ณ จุดทำงานหนึ่งๆ)

สมการดุลความร้อน (heat balance equation) สำหรับระบบนี้ (2.12) เมื่อรวมกับ (2.13) จึงเขียนได้ว่าเป็น

$$C \frac{dT}{dt} + hA\Delta T = q_i \tag{2.14}$$



รูป 2.18: แผนภาพลักษณะสมบัติของตัวทำความร้อนและตัววัดอุณหภูมิ

ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับหนึ่ง ฟังก์ชันถ่ายโอนจาก q_i ไปยัง ΔT คือ

$$\frac{\Delta T(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{Cs + hA} = \frac{(1/hA)}{(C/hA)s + 1} \triangleq \frac{R}{RCs + 1} \quad (2.15)$$

โดยที่เราสามารถมองได้ว่า $R = 1/hA$ คือค่าความต้านทานความร้อน (thermal resistance) มีหน่วยเป็น $C^\circ \text{ sec/kcal}$

เซนเซอร์และสัญญาณเข้า

จาก (2.14) เราสมมติว่าอัตราการระบายความร้อนออก q_o นั้นเป็นค่าคงที่ ในทางปฏิบัติ ตัวอย่างเช่น หากพัดลมระบายอากาศมีการปรับความเร็ว จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน h นั้นมีค่าเปลี่ยนไป ที่ประมาณได้ด้วยความสัมพันธ์ดังนี้

$$h = h_0 + k_f v_f \quad (2.16)$$

เมื่อ h_0 คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสำหรับอากาศที่อยู่นิ่ง (still air) และ k_f คือค่าสัมประสิทธิ์ของการระบายความร้อนจากพัดลม และ v_f คือสัญญาณแรงดัน (โวลต์) ที่ใช้ในปรับความเร็วพัดลม จาก (2.16) เราจึงเห็นว่า เมื่อจ่ายสัญญาณแรงดันให้พัดลมหมุนเร็วขึ้น จะทำให้ค่า h เพิ่มขึ้น และจาก (2.15) เราจึงเห็นว่า ระบบจะมีค่าคงตัวเวลาและ DC gain ที่ลดลง

สำหรับลักษณะสมบัติของตัวทำความร้อนดังรูปที่ 2.18 ตัวทำความร้อนจะจ่ายพลังงานความร้อน ด้วยอัตราไหลที่แปรไปอย่างเชิงเส้นตามสัญญาณแรงดัน ที่จ่ายให้กับตัวทำความร้อน กล่าวคือ

$$q_i = k_i v_i \quad (2.17)$$

เมื่อ k_i คือค่าคงที่ และ v_i คือสัญญาณแรงดันที่จ่ายให้กับตัวทำความร้อน หน่วยเป็นโวลต์ ในทำนองเดียวกันกับลักษณะสมบัติของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิดังรูปที่ 2.18 T_1 นั่นคือ สัญญาณแรงดันที่วัดได้จะแปรผันเชิงเส้นกับอุณหภูมิของระบบ

$$T_1 = k_1 \Delta T \quad (2.18)$$

ที่มี T_1 หน่วยเป็นโวลต์ k_1 เป็นค่าคงที่ และ ΔT หน่วยเป็น C° เมื่อพิจารณาพร้อมกับ (2.15) และ (2.17) เราจะได้ว่า สัญญาณอุณหภูมิ T_1 นั้น สัมพันธ์กับสัญญาณแรงดันที่จ่ายเข้าตัวทำความร้อน ดังนี้

$$T_1 = k_1 k_i \frac{R}{RCs + 1} V_i(s) \triangleq \frac{K_1}{\tau_1 s + 1} V_i(s) \quad (2.19)$$

ส่วนเซนเซอร์วัดอุณหภูมิของ T_2 เนื่องจากเป็นตำแหน่งวัดที่มีฉนวนมากกั้น ดังนั้นอุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้จะมีพลวัตเกิดขึ้นที่ต่างกับ T_1 เหมือนมีตัวกรองอันดับหนึ่งมาผ่าน เราจึงสรุปได้ว่า สัญญาณแรงดัน T_2 (หน่วยเป็นโวลต์) จะสัมพันธ์กับ v_i ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสอง ดังนี้

$$T_2 = \frac{K_2}{(\tau_2 s + 1)(\tau_1 s + 1)} V_i(s) \quad (2.20)$$

หมายเหตุ: เราจะเห็นว่าตัวแปรอุณหภูมิ T_1, T_2 ใน (2.19)-(2.20) นั้นคือสัญญาณแรงดันที่แปรไปตาม ΔT (ความต่างระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับอุณหภูมิของจุดทำงาน) ในอุปกรณ์ CE103 นั้น สัญญาณแรงดันของตัวแปรอุณหภูมิที่วัดได้จากเซนเซอร์นั้นจะสะท้อนค่าอุณหภูมิจริง ดังนั้น เมื่อเราทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลตามทฤษฎี เราจึงควรใช้ค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเซนเซอร์แล้วลบออกจากค่าที่จุดทำงานก่อน

แบบจำลองของกระบวนการความร้อนในหัวข้อที่ 2.2.3 อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง ส่งผลให้ฟังก์ชันถ่ายโอนจากตัวทำความร้อน (ที่เป็นสัญญาณแรงดัน) ไปยังอุณหภูมิ T_1 นั้นมีอันดับหนึ่ง เราจะเห็นว่าสมการพลวัตดังกล่าว มีการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้น โดยการพิจารณาจุดทำงานที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยจากจุดทำงาน เราจึงอาจกล่าวได้ว่า ในทางปฏิบัติจริง พลวัตที่เราสังเกตได้จริงจาก T_1 อาจมีคุณสมบัติที่ต่างออกไปจากระบบอันดับหนึ่ง หรือมีผลตอบที่สอดคล้องกับระบบที่มีอันดับสูงขึ้น เราสามารถประมาณระบบอันดับสูงระบบหนึ่งๆ ด้วยแบบจำลองที่อันดับต่ำลง แต่ยังคงไว้ที่พลวัตที่ใกล้เคียงเดิม การใช้แบบจำลองต่ำจะมีความสะดวกในการวิเคราะห์ระบบ หรือออกแบบตัวควบคุม [SMED11, §5.2] วิธีหนึ่งในการประมาณกระบวนการที่มีอันดับสูง คือการใช้แบบจำลองอันดับหนึ่งที่มีค่าประวิงเวลา (first-order-plus-time-delay model – FOPTD)

$$H(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{\tau s + 1} \quad (2.21)$$

โดยมี L คือค่าประวิงเวลา และ τ เป็นค่าคงตัวเวลา (τ ยิ่งมาก โพลของ H อยู่ใกล้จุดกำเนิด ผลตอบของระบบยิ่งช้า) และ K คือค่าอัตราขยายของระบบ และเท่ากับ DC gain สำหรับระบบ H นี้ การมีค่าประวิงเวลาดังกล่าวนั้นสัมพันธ์กับการไหลของอากาศในท่อ กล่าวคือ เมื่ออากาศไหลจากจุด A ไปยังจุด B ภายในท่อใช้เวลา L วินาทีด้วยความเร็วหนึ่งๆ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่จุด B จะยังไม่ปรากฏจนกว่าจะผ่านไป L วินาที หรือเกิดการประวิง เราจึงได้ว่า

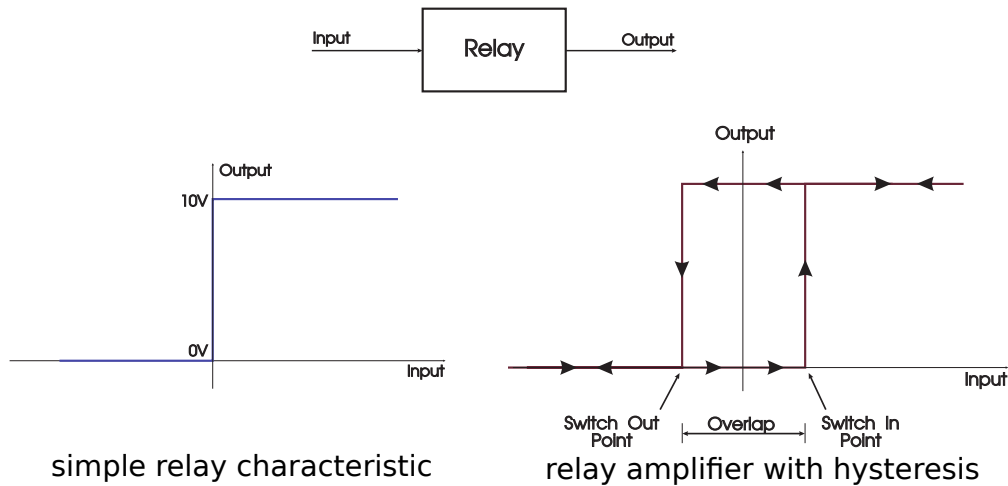
$$L = \frac{\text{ปริมาตรของท่อ}}{\text{อัตราการไหลเชิงปริมาตร}}$$

ปรากฏการณ์เช่นนี้ เรียกอีกแบบว่า การหน่วงเวลา (transportation lag) บางครั้ง L เรียกว่า deadtime หรือ distance/velocity lag

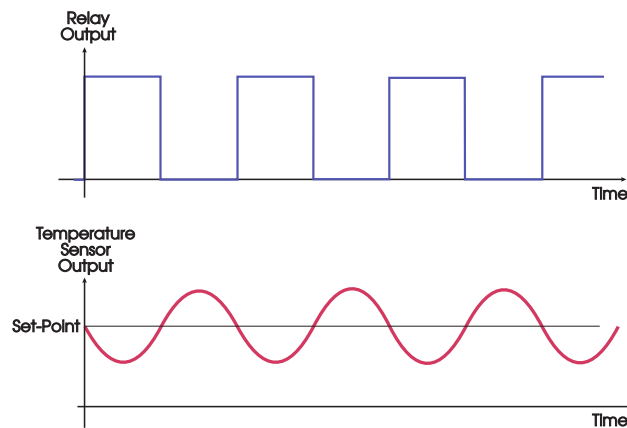
ตัวขยายรีเลย์

ตัวขยายรีเลย์นั้นเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแบบเปิด/ปิด ที่ใช้อย่างแพร่หลายในระบบทำความร้อน เช่น ตัวควบคุมอุณหภูมิ (thermostat) ในห้องควบคุมหรือ อุปกรณ์ต้มน้ำในกระบวนการทางอุตสาหกรรม ลักษณะสมบัติอย่างง่ายของรีเลย์แสดงใน รูปที่ 2.19 (ซ้าย) นั่นคือ รีเลย์จะให้ค่าสัญญาณควบคุมเป็นบวก (on control) เมื่อสัญญาณเข้ามีค่าเป็นบวก และจะให้ค่าสัญญาณควบคุมเป็นศูนย์ (off control) เมื่อสัญญาณเข้าเป็นลบ ถึงแม้ว่ารีเลย์จะใช้อย่างแพร่หลายเนื่องด้วยราคาของอุปกรณ์ไม่แพง แต่รีเลย์ก็มีข้อด้อย นั่นคือ อุปกรณ์จะมีสมบัติไม่เชิงเส้นแบบ hysteresis แสดงได้ดัง รูปที่ 2.19 (ขวา) เมื่อสัญญาณเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเกินกว่าจุด switch-on รีเลย์จึงเริ่มให้ค่าสัญญาณออกเป็นบวก และเมื่อลดสัญญาณเข้าลงเรื่อยๆ จะต้องลดลงจนต่ำกว่าจุด switch-off จึงจะทำให้รีเลย์ให้ค่าสัญญาณออกเป็นศูนย์ ค่าความต่างระหว่างจุด switch-on และ switch-off จะเรียกว่าความกว้างของ hysteresis หรือ relay overlap ในอุปกรณ์ CE103 นั้น เราสามารถจำลองการปรับความกว้างของ hysteresis ได้จากปรับสัญญาณแรงดันเข้าในช่วง 0 ถึง 10V ของช่อง hysteresis control ใน รูปที่ 2.13

ใน รูปที่ 2.20 แสดงสัญญาณออกของรีเลย์ที่ใช้เป็นสัญญาณควบคุมแบบเปิด/ปิด และแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิ เราจะเห็นว่าตัวควบคุมด้วยรีเลย์นั้นจะให้สมรรถนะการควบคุมที่ไม่เที่ยงตรงเท่าตัวควบคุมพีไอดี เนื่องจากจะเห็นว่าสัญญาณออก (อุณหภูมิ) จะมีการแกว่งรอบๆ ค่าอ้างอิงตลอดเวลา (บางครั้งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า hunting) หากเราปรับความกว้างของ hysteresis นี้ให้กว้างขึ้น การแกว่งของผลตอบอาจจะเห็นผลมากขึ้นและนำไปสู่สถานะไม่เสถียร



รูป 2.19: ลักษณะสมบัติของ relay



รูป 2.20: สัญญาณออกของ relay amplifier

2.3 Multivariable coupled tanks

พิจารณาลังเชื่อมในรูปที่ 2.21 อุปกรณ์นี้ใช้เพื่อสาธิตระบบหลายตัวแปร (multivariable system) ที่มีสองสัญญาณเข้า (แรงดันขับปั๊มทั้งสอง) และสองสัญญาณออก (ระดับน้ำในถังทั้งสอง) พลวัตของตัวแปรขาออกทั้งสองมีความเกี่ยวข้องกันเนื่องจากถังทั้งสองเชื่อมต่อกัน

2.3.1 แบบจำลองของระบบถังเดี่ยว

ขั้นตอนแรกในการควบคุมระบบคือการทำความเข้าใจพลวัตของระบบ ซึ่งสมรรถนะของระบบอาจแสดงและวิเคราะห์ได้ในทางคณิตศาสตร์ กระบวนการนี้เรียกว่าการจำลองระบบ

ในขั้นต้น เราพิจารณาลังเชื่อมโดยปิดวาล์ว A และเปิดวาล์ว B ระบบนี้คือกระบวนการถังเดี่ยวดังแสดงในรูปที่ 2.22.

เราสามารถหาแบบจำลองของระบบได้โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเข้าไปในถัง (แทนด้วย Q_i) กับอัตรา

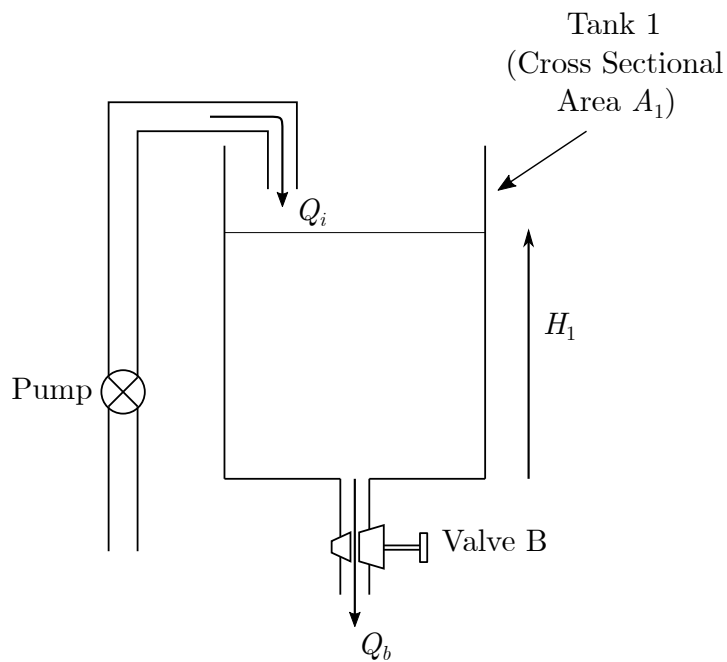


(a) ด้านซ้าย

(b) ด้านหน้า

(c) ด้านขวา

รูป 2.21: CE105MV ระบบควบคุมของเหลวในถังเชื่อม (Multivariable coupled tanks)



รูป 2.22: กระบวนการถังเดียว

การไหลออกผ่านวาล์ว B (แทนด้วย Q_b) ซึ่งจะได้ว่า

$Q_i - Q_b =$ อัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของของเหลวในถังที่ 1

$$Q_i - Q_b = \frac{dV_1}{dt} = A \frac{dH_1}{dt} \quad (2.22)$$

โดยที่

- A คือพื้นที่หน้าตัดของถังที่ 1
- H_1 คือระดับของเหลวในถังที่ 1
- V_1 คือปริมาตรของของเหลวในถังที่ 1 ($V_1 = AH_1$)

- Q_i คืออัตราการไหลของป้อนน้ำ
- Q_b คืออัตราการไหลออกผ่านวาล์ว B

ถ้าสมมติให้วาล์ว B มีออริฟิสแบบขอบคมมาตรฐาน (standard sharp edged orifice) อัตราการไหล Q_b จะมีความสัมพันธ์กับระดับของเหลว H_1 ตามสมการ

$$Q_b = C_{db} a_b \sqrt{2gH_1} \quad (2.23)$$

โดยที่ a_b , C_{db} และ g มีนิยามดังนี้

- a_b คือพื้นที่หน้าตัดของออริฟิส (ในทางปฏิบัติ ค่า a_b จะใช้แทนขนาดของวาล์ว B และช่องทางการไหลซึ่งติดกัน) เนื่องจากขนาดพื้นที่หน้าตัดของออริฟิสเปลี่ยนแปลงตลอดช่องทางการไหล เราจึงพิจารณา a_b เป็นค่าเฉลี่ย
- C_{db} คือสัมประสิทธิ์การไหลออก (discharge coefficient) ของวาล์ว B (สัมประสิทธิ์นี้พิจารณาจากลักษณะเฉพาะของของเหลว ความเสียหาย และความผิดปกติในระบบ ซึ่งทำให้สมการทั้งสองข้างสมดุลกัน)
- g คือค่าคงตัวความโน้มถ่วง มีค่าเท่ากับ 980 cm/sec^2

ในสมการ (2.23) เราสมมติให้ C_{db} เป็นค่าคงที่ ดังนั้น Q_b จะแปรผันตรงกับรากที่สองของระดับของเหลว H_1 สำหรับทุกๆ เงื่อนไขการทำงานที่เป็นไปได้ ในวาล์วที่ใช้ในทางปฏิบัติ (เช่น วาล์วในอุปกรณ์ CE105) อัตราการไหล Q_b จะเป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นของระดับของเหลว H_1 นั่นคือ

$$Q_b = f(H_1) \quad (2.24)$$

เมื่อรวมสมการ (2.22) และ (2.24) จะได้

$$A \frac{dH_1}{dt} + f(H_1) = Q_i \quad (2.25)$$

สมการ (2.25) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายพฤติกรรมของระบบ

แบบจำลองของระบบในสมการ (2.25) เป็นสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเข้า Q_i กับระดับของเหลวขาออก H_1 เพื่อวัตถุประสงค์ในการควบคุม เราต้องทำสมการให้เป็นเชิงเส้นโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กรอบจุดทำงานของระดับของเหลวในถัง กำหนดให้

$$H_1 = H'_1 + h_1$$

โดยที่

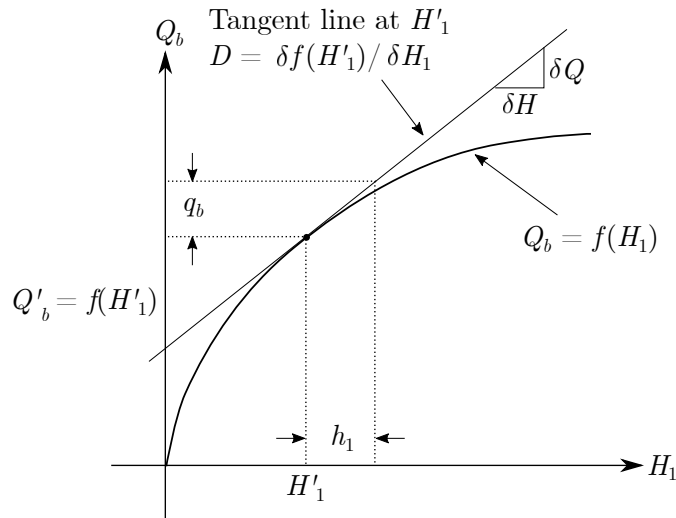
- H'_1 คือจุดทำงานปกติของระดับของเหลว
- h_1 คือการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กรอบจุดทำงาน H'_1

สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กน้อยของ h_1 รอบจุดทำงาน H'_1 เราจะสามารถประมาณค่าฟังก์ชัน $f(H_1)$ ด้วยเส้นตรงที่สัมผัสจุด H'_1 ดังแสดงในรูปที่ 2.23

กำหนดให้

$$Q_i = Q'_i + q_i \quad \text{และ} \quad Q_b = Q'_b + q_b$$

โดยที่



รูป 2.23: เส้นสัมผัสที่จุด H'_1

- Q'_i คืออัตราการไหลเข้าในสถานะอยู่ตัวที่สอดคล้องกับ H'_1
- q_i คือการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กของอัตราการไหลเข้าที่สอดคล้องกับ h_1
- Q'_b คืออัตราการไหลออกในสถานะอยู่ตัวที่สอดคล้องกับ H'_1
- q_b คือการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กของอัตราการไหลออกที่สอดคล้องกับ h_1

เราจะเขียนสมการ (2.25) ใหม่ได้ดังสมการ

$$A \frac{dh_1}{dt} + Q'_b + q_b = Q'_i + q_i \quad (2.26)$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่โดยอิงจากรูปที่ 2.23 ได้ดังสมการ

$$A \frac{dh_1}{dt} + f(H'_1) + h_1 D = Q'_i + q_i \quad (2.27)$$

โดยที่ D คือความชันของเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่าง Q_b กับ H_1 ที่จุด H'_1 นั่นคือ

$$D = \frac{\delta f(H'_1)}{\delta H_1} \quad (2.28)$$

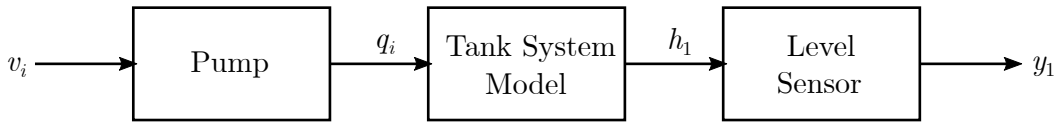
เมื่อระดับของเหลวคงที่ด้วยค่า $q_i = 0$ และ $h_1 = 0$ สมการ (2.27) จะให้ความสัมพันธ์ที่สถานะอยู่ตัวระหว่างอัตราการไหลและระดับของเหลวดังนี้

$$f(H'_1) = Q'_i \quad (2.29)$$

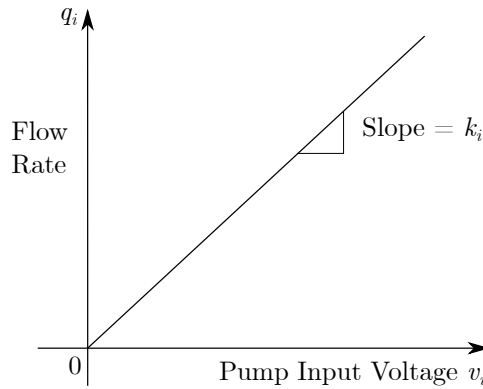
เมื่อนำสมการ (2.27) ลบออกด้วยสมการ (2.29) แล้วจัดรูป เราจะได้สมการอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับหนึ่งสำหรับระบบถึงได้ดังสมการ

$$T \frac{dh_1}{dt} + h_1 = k_b q_i \quad (2.30)$$

โดยที่



รูป 2.24: ระบบถังเดียวโดยรวม



รูป 2.25: ลักษณะเฉพาะของปั้มน้ำ

- T คือค่าคงตัวเวลาของระบบ โดยมีค่า

$$T = \frac{A}{D} \tag{2.31}$$

- k_b มีค่า

$$k_b = \frac{1}{D} \tag{2.32}$$

ในขั้นสุดท้าย เมื่อทำการแปลงลาปลาซทั้งสองข้างของสมการ (2.30) แล้วจัดรูป เราจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบถังเดียวดังนี้

$$\frac{h_1(s)}{q_i(s)} = \frac{k_b}{Ts + 1} \tag{2.33}$$

2.3.2 ลักษณะเฉพาะของปั้มน้ำและเซนเซอร์วัดระดับของเหลว

เมื่อระบบถังเชื่อมถูกใช้ในระบบควบคุม อัตราการไหลเข้า q_i จะถูกควบคุม (หรือถูกขับ) โดยการปรับแรงดันที่ป้อนให้กับวงจรรขยายมอเตอร์ของปั้มน้ำ (แทนด้วย v_i) ในทำนองเดียวกัน ระดับของเหลวจะถูกส่งโดยทรานส์ดิวเซอร์ความดันซึ่งจะสร้างแรงดันขาออก y_1 ซึ่งแปรผันตรงกับระดับของเหลว h_1 ระบบโดยรวมสามารถอธิบายเป็นแผนผังดังแสดงในรูปที่ 2.24

อัตราการไหลของปั้ม q_i และแรงดันขาเข้า v_i จะสัมพันธ์กันด้วยลักษณะเฉพาะของตัวขับเร้าซึ่งถูกสมมติให้เป็นเชิงเส้น (ดูรูปที่ 2.25) เราสมมติลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดระดับให้เป็นเชิงเส้นเช่นกัน (ดูรูปที่ 2.26)

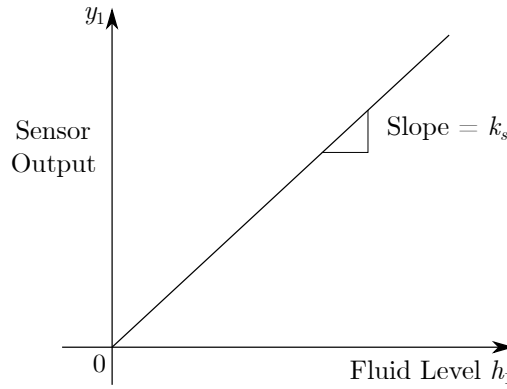
เมื่อกำหนดให้ k_i และ k_s เป็นค่าอัตราขยายของปั้มและเซนเซอร์ตามลำดับ จะได้ว่า

$$q_i = k_i v_i \quad \text{และ} \quad y_1 = k_s h_1 \tag{2.34}$$

เมื่อรวมสมการ (2.34) เข้ากับสมการฟังก์ชันถ่ายโอน (2.33) เราจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่งในรูปแบบมาตรฐาน

$$\frac{y_1(s)}{v_i(s)} = \frac{G}{Ts + 1} \tag{2.35}$$

โดยที่



รูป 2.26: ลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดระดับของเหลว

- G คืออัตราขยายของระบบ ซึ่งมีค่า

$$G = k_i k_s k_b \tag{2.36}$$

- T คือค่าคงตัวของเวลาของระบบ ซึ่งมีค่าตามสมการ (2.31)

2.3.3 การวัดลักษณะเฉพาะของระบบถึงเดี่ยว

ลักษณะเฉพาะของปั้มน้ำและเซนเซอร์วัดระดับของเหลว

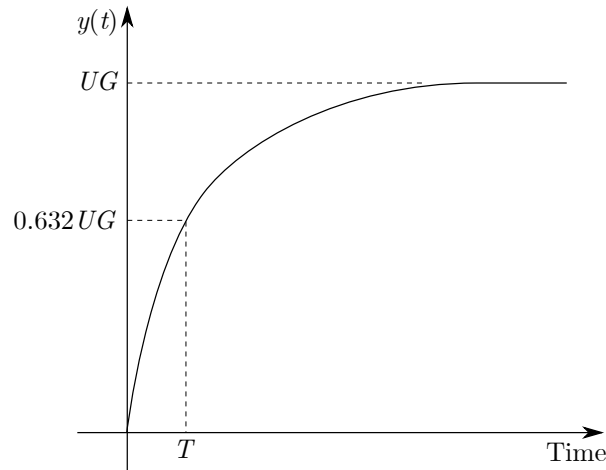
เราสามารถหาลักษณะเฉพาะของปั้มน้ำได้โดยการวัดอัตราการไหลเข้าสำหรับค่าแรงดันขับปั้มหลายๆ ค่า และสามารถหาลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดระดับของเหลวได้โดยการวัดสัญญาณออกจากเซนเซอร์สำหรับระดับของเหลวหลายๆ ค่า แล้วนำค่าที่ได้มาพลอตเพื่อหาลักษณะเฉพาะดังแสดงในรูปที่ 2.25 และ 2.26 ค่าอัตราขยาย k_s และ k_i คือค่าความชันของค่าลักษณะเฉพาะของปั้มน้ำและเซนเซอร์วัดระดับ ที่จุดทำงานระดับ H_1 และอัตราการไหลเข้า Q'_i

สังเกตเห็นว่า ลักษณะเฉพาะของตัวขับปั้มและเซนเซอร์วัดระดับสำหรับถึงเชื่อมเป็นเชิงเส้นโดยประมาณ อย่างไรก็ตาม สัญญาณออกทั้งสองอาจมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงเวลาหนึ่งโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลว ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเลื่อน (drift) ซึ่งสามารถพบได้ในเซนเซอร์และตัวขับเร็วในอุตสาหกรรม ในทางปฏิบัติ เราจึงควรยืนยันความถูกต้องของลักษณะเฉพาะเป็นช่วงๆ โดยใช้การสุ่มตรวจสอบ (spot checking) หนึ่งหรือสองค่าแรงดันปั้มและระดับของเหลว

ลักษณะเฉพาะของพลวัตของระบบ: วิธีผลตอบจากสัญญาณขั้น (step response method)

สำหรับระบบอันดับหนึ่ง (เช่น ระบบถึงเดี่ยว) เราสามารถหาอัตราขยาย G และค่าคงตัวของเวลา T ได้จากผลตอบจากสัญญาณขั้นดังต่อไปนี้ พิจารณารูปที่ 2.27 อัตราขยาย G สามารถหาได้จากการใส่สัญญาณเปลี่ยนแปลงแบบขั้น (step change) ด้วยขนาด U ไปที่สัญญาณขาเข้าของระบบ ค่าสุดท้าย (หรือค่าที่สถานะอยู่ตัว) ของสัญญาณออกจะเปลี่ยนไปเท่ากับ $U \cdot G$ ซึ่งจะทำให้สามารถหาอัตราขยาย G ได้ ค่าคงตัวของเวลา T หาได้จากระยะเวลาที่สัญญาณออกเริ่มเปลี่ยนแปลง ไปจนถึงค่า 63.2% ของสัญญาณออกค่าสุดท้าย

วิธีการวัดนี้สามารถใช้ได้ง่าย และให้ผลที่แม่นยำพอสมควรในกรณีที่รู้ว่าลักษณะเฉพาะของระบบเป็นอันดับหนึ่ง



รูป 2.27: ผลตอบจากสัญญาณขั้น

ลักษณะเฉพาะของพลวัตของระบบ: วิธีคำนวณโดยตรง (direct calculation)

วิธีหาลักษณะเฉพาะของพลวัตของระบบอีกวิธีคือการวัดลักษณะเฉพาะของระบบโดยเฉพาะ แล้วทำการคำนวณอัตราขยายและค่าคงตัวของระบบ

การใช้วิธีนี้ จำเป็นต้องมีความเข้าใจแบบจำลองของระบบ และขีดความสามารถในการสร้างระบบการวัดพื้นฐานสำหรับหาพารามิเตอร์ของระบบ ในกรณีของระบบดังกล่าว เราสามารถหาค่าอัตราขยาย G ได้จากสมการ

$$G = \frac{k_i k_s}{D} \tag{2.37}$$

ซึ่งได้มาจากสมการ (2.36) และ (2.32) และสามารถหาค่าคงตัวเวลา T ได้จากสมการ (2.31) ดังนั้นเราสามารถหาพารามิเตอร์ G และ T ได้จากการวัดอัตราขยายของเซนเซอร์ k_s อัตราขยายของปั๊ม k_i พื้นที่หน้าตัดของถัง A และความชื้น D (สมการ (2.28)) ที่จุดทำงานปกติของระดับของเหลว H'_1

ค่าความชื้น D สามารถหาได้จากการวัดค่าในสถานะอยู่ตัวดังนี้ เมื่อระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ทำให้ระดับของเหลวคงที่ที่จุดทำงาน H'_1 จะได้ว่า

$$Q_i = Q_b$$

ซึ่งทำให้เขียนสมการ (2.28) ได้ว่า (ดูรูปที่ 2.23)

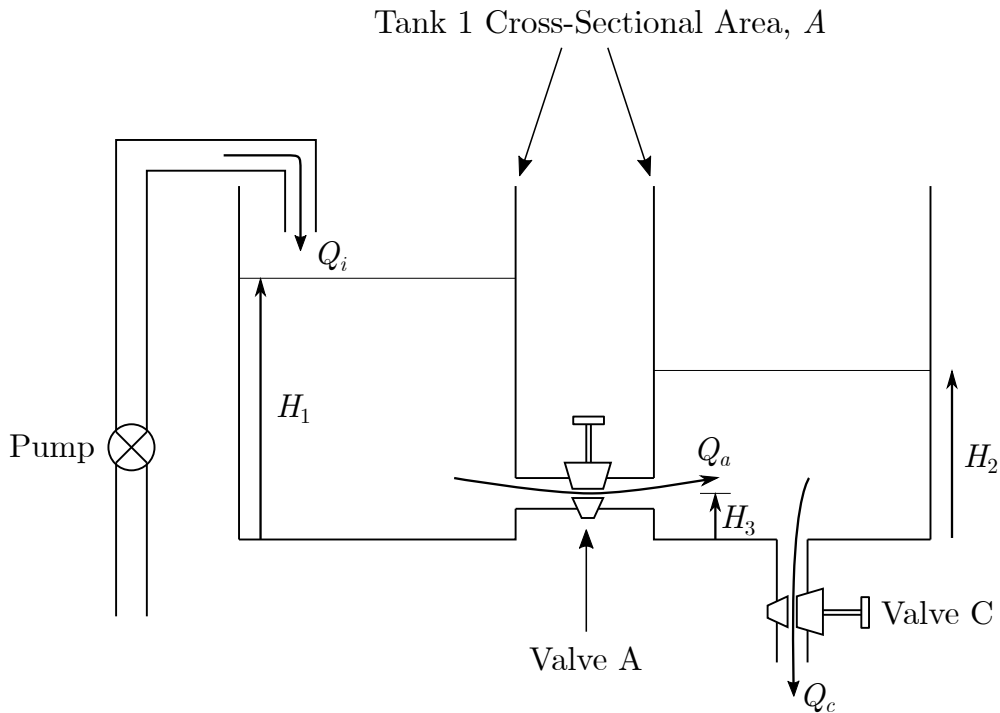
$$D = \frac{\delta f(H'_1)}{\delta} H_1 = \frac{\delta Q_b}{\delta H_1} = \frac{\delta Q_i}{\delta H_1} \tag{2.38}$$

โดยที่ Q_i คืออัตราการไหลของปั๊มที่ทำให้ระดับน้ำคงที่ และจะเท่ากับ Q_b ในสถานะอยู่ตัว เราจึงหา D ได้จากการพลอตความสัมพันธ์ในสถานะอยู่ตัวระหว่าง Q_i และ H_1 แล้วทำการวัดค่าความชื้นที่จุดทำงาน H'_1 ดังนั้น ค่า G และ T จะหาได้จาก (2.36) และ (2.32)

หมายเหตุ: วิธีการคำนวณลักษณะเฉพาะของระบบวิธีนี้ขึ้นกับความแม่นยำในการวัดค่าความชื้น D ค่าอัตราขยายของเซนเซอร์ k_s และค่าอัตราขยายของปั๊ม k_i อย่างมาก ด้วยเหตุนี้ วิธีนี้จึงมีความน่าเชื่อถือน้อยกว่าวิธีผลตอบจากสัญญาณขั้น

2.3.4 แบบจำลองของระบบถังคู่

พิจารณาลังเชื่อมโดยเปิดวาล์ว A และปิดวาล์ว B ระบบในรูปแบบนี้คือกระบวนการถังคู่ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.28 เราสมมติให้ ความสูงจากพื้นของวาล์ว A มีค่าน้อย



รูป 2.28: กระบวนการถังคู่

สำหรับถังที่ 1

$Q_i - Q_a =$ อัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของของเหลวในถังที่ 1

$$Q_i - Q_a = \frac{dV_1}{dt} = A \frac{dH_1}{dt} \quad (2.39)$$

โดยที่

- V_1 คือปริมาตรของของเหลวในถังที่ 1
- H_1 คือระดับของเหลวในถังที่ 1
- A คือพื้นที่หน้าตัดของถังที่ 1 และถังที่ 2
- Q_i คืออัตราการไหลของปั๊มน้ำ
- Q_a คืออัตราการไหลจากถังที่ 1 ไปยังถังที่ 2 ผ่านวาล์ว A

สำหรับถึงที่ 2

$Q_a - Q_c =$ อัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของของเหลวในถึงที่ 2

$$Q_a - Q_c = \frac{dV_2}{dt} = A \frac{dH_2}{dt} \quad (2.40)$$

โดยที่

- V_2 คือปริมาตรของของเหลวในถึงที่ 2
- H_2 คือระดับของเหลวในถึงที่ 2
- Q_c คืออัตราการไหลออกจากถึงที่ 2 ผ่านวาล์ว C

อัตราการไหล Q_a และ Q_c จะเป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นของระดับของเหลว H_1 และ H_2 นั่นคือ

$$Q_a = f_a(H_1 - H_2) \quad (2.41)$$

$$Q_c = f_c(H_2) \quad (2.42)$$

ดังนั้น จากสมการ (2.39) เราจะได้

$$A \frac{dH_1}{dt} + f_a(H_1 - H_2) = Q_i \quad (2.43)$$

และจากสมการ (2.40) เราจะได้

$$A \frac{dH_2}{dt} + f_c(H_2) = f_a(H_1 - H_2) \quad (2.44)$$

สมการ (2.43) และ (2.44) อธิบายพลวัตในรูปแบบไม่เชิงเส้นที่แท้จริงของระบบ สำหรับการศึกษาระบบควบคุม มีความจำเป็นที่จะต้องทำให้สมการเป็นเชิงเส้นโดยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก q_i ใน Q_i , q_c ใน Q_c , h_1 ใน H_1 และ h_2 ใน H_2 (ค่าทุกค่าไว้รอบๆ ระดับของเหลวเฉลี่ย H'_1 และ H'_2)

จากแนวความคิดที่ใช้ในการทำแบบจำลองเชิงเดียวให้เป็นเชิงเส้น เราสามารถใช้สมการ (2.43) และ (2.44) เพื่อให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองดังนี้

$$\frac{h_2(s)}{q_i(s)} = \frac{G}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \quad (2.45)$$

โดยที่ $q_i(s)$ คือการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กของอัตราการไหลของปั๊ม และ $h_2(s)$ คือการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กใน H_2 นอกจากนี้ ค่าคงตัวเวลา T_1 และ T_2 มีความสัมพันธ์กับลักษณะเฉพาะของระบบดังสมการ

$$\begin{aligned} G &= \frac{1}{D_3} \\ T_1 T_2 &= \frac{A^2}{D_1 D_3} \\ T_1 + T_2 &= \frac{A(D_1 - D_2 + D_3)}{D_1 D_3} \end{aligned} \quad (2.46)$$

โดยที่

- D_1 คือความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Q_a กับ H_1 ที่จุด $H'_1 - H'_2$ โดยหาได้จากสมการ

$$D_1 = \frac{\delta Q_a}{\delta H_1} \quad (2.47)$$

- D_2 คือความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Q_a กับ H_2 ที่จุด $H'_1 - H'_2$ โดยหาได้จากสมการ

$$D_2 = \frac{\delta Q_a}{\delta H_2} \quad (2.48)$$

- D_3 คือความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Q_c กับ H_2 ที่จุด H'_2 โดยหาได้จากสมการ

$$D_3 = \frac{\delta Q_c}{\delta H_2} \quad (2.49)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองในสมการ (2.45) คือฟังก์ชันถ่ายโอนจากการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กในอัตราการไหลเข้า $q_i(s)$ ไปยังการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กในความสูง $h_2(s)$ ในถังที่ 2 ฟังก์ชันถ่ายโอนนี้ควรถูกเปรียบเทียบกับฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่ง (สมการ (2.35)) สำหรับระบบถังเดียว

2.3.5 การวัดลักษณะเฉพาะของระบบถังคู่

ลักษณะเฉพาะของป้อนน้ำและเซนเซอร์วัดระดับของเหลว

ลักษณะเฉพาะของป้อนน้ำและเซนเซอร์วัดระดับสามารถหาได้โดยใช้วิธีในบทที่ 2.3.3

ลักษณะเฉพาะของพลวัตของระบบ: วิธีผลตอบจากสัญญาณขั้น (step response method)

สำหรับระบบอันดับสองที่มีค่าคงตัวเวลา T_1 และ T_2 ค่าคงตัวเวลาทั้งสองมักจะหาจากผลตอบจากสัญญาณขั้นได้ยาก มีหลายวิธีที่สามารถใช้หาค่าดังกล่าวได้ (ดูตัวอย่างใน หน้า 160–162, 'Introduction to Dynamics and Control', H.M. Power and R.J. Simpson, McGraw Hill, 1978) อย่างไรก็ตาม วิธีเหล่านั้นมีความน่าเชื่อถือไม่มากนัก ถ้าเป้าหมายคือการออกแบบตัวควบคุม วิธีปรับแต่งพารามิเตอร์โดยอิงจากผลตอบจากสัญญาณขั้นมักจะเป็นวิธีที่ดีกว่า

ลักษณะเฉพาะของพลวัตของระบบ: วิธีคำนวณโดยตรง (direct calculation)

ค่าคงตัวเวลา T_1 และ T_2 ในฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบถังเชื่อม (สมการ (2.45)) สามารถหาได้จากสมการ (2.46) โดยค่า D_1 , D_2 และ D_3 สามารถหาได้จากการคำนวณความชันของลักษณะเฉพาะของอัตราการไหลในสถานะอยู่ตัว (ดูสมการ (2.47)–(2.49)) อย่างไรก็ตาม วิธีนี้มีแนวโน้มที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดค่าความชันต่างๆ ให้แม่นยำทำได้ยาก

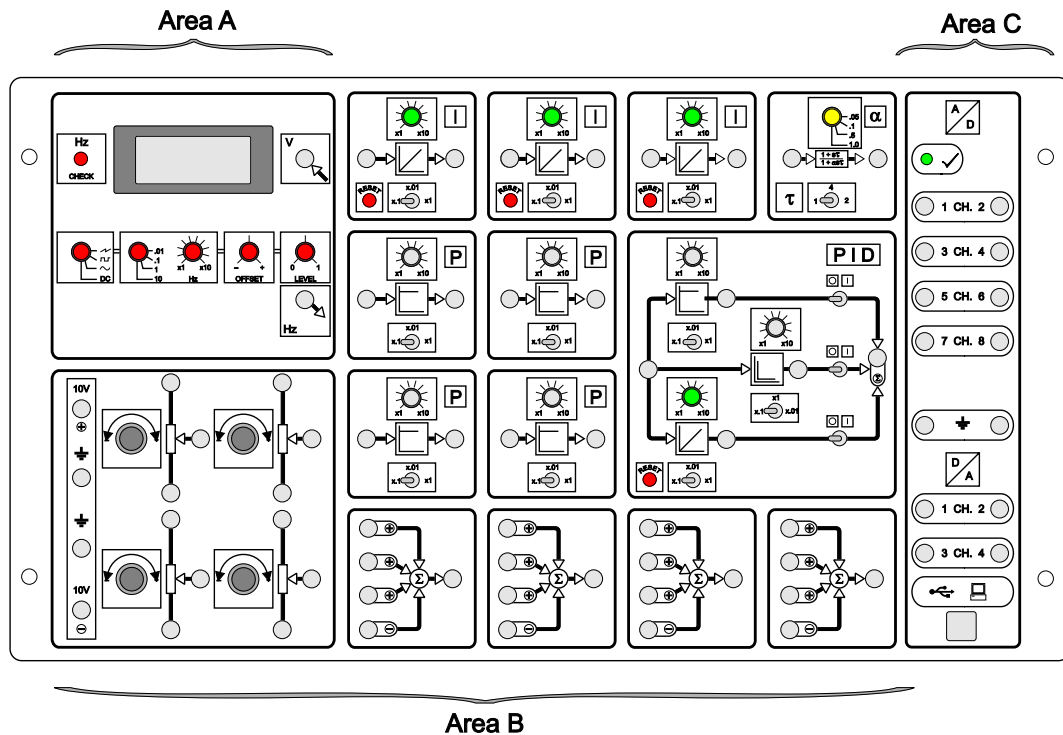
2.4 Controller

ชุดตัวควบคุม CE120 Controller อันแสดงในรูปที่ 2.29 มีการทำงานที่แบ่งได้เป็น 3 ส่วนดังแผนภาพในรูปที่ 2.30

Area A จะเป็นส่วนของการวัดและการกำเนิดสัญญาณ สามารถวัดแรงดันและความถี่ของสัญญาณ (ขณะที่กดปุ่ม Hz check) และสามารถกำเนิดสัญญาณไซน์ (sine) สี่เหลี่ยม (square) ฟันเลื่อย (sawtooth) ในช่วงความถี่ 0.01–100 Hz ได้



รูป 2.29: CE120 ตัวควบคุมแบบแอนะล็อก (analog controller)



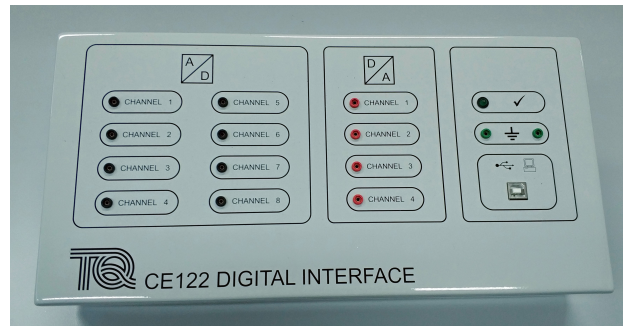
รูป 2.30: หน้าจออุปกรณ์ CE120: analog controller

Area B เป็นส่วนการควบคุมแบบแอนะล็อก มีแหล่งกำเนิดกำลังกระแสตรง (D.C. Power Supply) +10 V และ -10 V ความต้านทานปรับค่าได้ (Potentiometers) เพื่อใช้แบ่งแรงดันระหว่าง ± 10 V มีจุดรวมสัญญาณ (Summing amplifier) ซึ่งสามารถรวมสัญญาณเข้าด้วยกัน ตัวขยายสัญญาณแบบสัดส่วน (Proportional amplifier) ตัวขยายสัญญาณแบบอินทิเกรต (Integrating amplifier) ตัวควบคุมสามเทอมหรือพีไอดี (Three-term or PID controller) และตัวควบคุมเฟสล้ำหน้า (Phase-lead network)

Area C เป็นส่วนการควบคุมแบบดิจิทัล ใช้ต่อผ่านพอร์ต USB ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ PC เพื่อใช้ร่วมกับซอฟต์แวร์ CE2000 ในการควบคุม

2.5 Digital interface

ชุด CE122 Digital interface ดังแสดงในรูปที่ 2.31 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับระบบควบคุมหนึ่งๆ (CE110 servo trainer หรือ CE103 thermal process หรือ CE105 coupled tank) เพื่อรับส่งระหว่างข้อมูลแอนาล็อกจากระบบ กับข้อมูลดิจิทัลจากคอมพิวเตอร์ และใช้ร่วมกับ software CE2000



รูป 2.31: CE122 Digital Interface

บทที่ 3

ตัวควบคุมพีไอดี

เนื้อหาในบทนี้ได้นำมาจากคู่มือปฏิบัติการแลบของวิชา 2102331 [WAB⁺11] ของสาขาระบบควบคุม โดยทั่วไป การทำงานของระบบควบคุมควรพิจารณาลักษณะสมบัติต่างๆ ดังนี้คือ

1. เสถียรภาพ (Stability)
2. ผลตอบสนองชั่วคราว (Transient response)
3. ความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว (Steady state error)

สิ่งสำคัญอันดับแรกของระบบควบคุมก็คือเสถียรภาพ เพราะถ้าระบบไม่มีเสถียรภาพเราก็ไม่สามารถควบคุมระบบได้ สำหรับลักษณะผลตอบสนองนั้น เรามักต้องการให้ได้ผลตอบสนองที่เร็ว นั่นคือ ช่วงเวลาขึ้น (Rise time) ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling time) ส่วนพุงเกิน (Overshoot) ที่ยอมรับได้ ส่วนความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัวนั้นต้องให้มีค่าเป็นศูนย์ หรือต่ำที่สุดเท่าที่สามารถทำได้ ลักษณะอื่นๆ นอกเหนือจากนี้จะระบุเฉพาะในแต่ละระบบ

ในระบบควบคุมที่พลานต์ (Plant) ได้ถูกกำหนดแล้ว เราไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ภายในเพื่อปรับปรุงระบบเพื่อให้ทำงานได้ตามต้องการ ดังนั้นในขั้นแรก ผู้ออกแบบอาจปรับค่าอัตราขยายของวงรอบการควบคุม ในเชิงปฏิบัติมักพบว่า การปรับอัตราขยายอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะทำให้ระบบมีลักษณะตามต้องการได้ เช่นถ้าเราเพิ่มอัตราขยายจะทำให้ความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัวลดลง แต่ก็อาจมีผลทำให้ผลตอบสนองเลวลง การแก้ไขในกรณีเช่นนี้ทำได้โดยออกแบบตัวควบคุม (Controller) เสริมเข้าไปในระบบ โดยสมรรถนะของตัวควบคุมที่ใช้นั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน ดังนี้

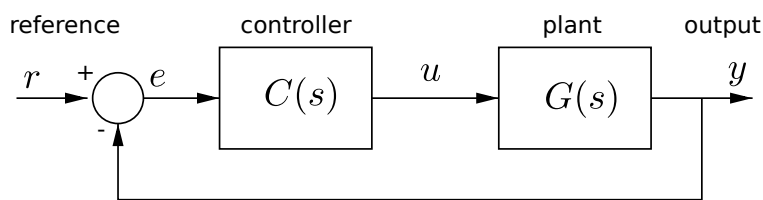
1. การตามรอยสัญญาณอ้างอิง (Reference tracking) หมายถึงการที่ผลตอบของระบบสามารถติดตามสัญญาณเข้าอ้างอิง (Reference input) ได้ เช่น การที่โรเตอร์ของมอเตอร์สามารถหมุนไปตรงตำแหน่งที่ต้องการหรือการที่อุณหภูมิขาออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าตรงกับค่าที่กำหนดที่ตั้งไว้ การตามรอยสัญญาณอ้างอิงแบ่งการพิจารณาเป็น 2 ช่วง ดังนี้
 - (a) ผลตอบสนองของระบบ พิจารณาผลตอบ ณ เวลาเริ่มต้นที่สัญญาณอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลง จนกระทั่งผลตอบสนองเข้าสู่สถานะอยู่ตัวและส่วนพุงเกินที่เกิดขึ้นจากการปรับตัวเข้าสู่สถานะอยู่ตัวของระบบ
 - (b) ผลตอบอยู่ตัวของระบบ พิจารณาความคลาดเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัวของระบบ
2. การกำจัดสัญญาณรบกวน (Disturbance rejection) หมายถึง การที่ระบบสามารถแก้ไขผลกระทบที่เกิดจากสิ่งรบกวนภายนอกได้ เช่น เมื่อมีปริมาณไหลตของมอเตอร์ที่เปลี่ยนไป ตัวควบคุมมีหน้าที่ทำให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็วคงที่ค่าเดิมได้ หรือสำหรับระบบทำความร้อน เมื่อปรับ shutter ทำให้ปริมาณอากาศที่สามารถไหลออกจากท่อเปลี่ยนไป ตัวควบคุมมีหน้าที่ทำให้อุณหภูมิขาออกกลับสู่ค่าที่ต้องการได้

ดังนั้น ตัวควบคุมที่ดีสามารถรักษาเสถียรภาพและสมรรถนะที่พึงประสงค์ไว้ได้ ส่วนจะเน้นส่วนใดนั้นขึ้นอยู่กับระบบที่ควบคุมและการนำไปใช้งาน เราจะพิจารณาการออกแบบตัวควบคุมของระบบ ดังต่อไปนี้

1. ระบบเซอร์โวมอเตอร์ ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับตำแหน่งและความเร็ว โดยนำแรงดันคลาดเคลื่อนที่เป็นผลต่างระหว่างแรงดันอ้างอิงกับกับแรงดันตำแหน่งเชิงมุมของมอเตอร์ รวมกับแรงดันที่ได้จากการป้อนกลับความเร็วของมอเตอร์ไปผ่านตัวควบคุมเพื่อสร้างเป็นสัญญาณควบคุมต่อไป ทั้งนี้การป้อนกลับตำแหน่งและความเร็วเปรียบเสมือนกับการใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนและอนุพันธ์ (Proportional and Derivative, PD) นั้นเอง
2. กระบวนการความร้อน ใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน อินทิกรัล และอนุพันธ์ (Proportional-Integral-Derivative, PID) โดยนำเอาแรงดันคลาดเคลื่อนที่ได้จากผลต่างระหว่างแรงดันอ้างอิงกับแรงดันป้อนกลับไปผ่านตัวควบคุมเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมต่อไป

3.1 คุณสมบัติของตัวควบคุมแบบ PID

ตัวควบคุมในระบบควบคุมมีหลายชนิด แต่ที่ใช้ในระบบควบคุมกระบวนการส่วนใหญ่ เป็นตัวควบคุมแบบ PID



รูป 3.1: ระบบควบคุมป้อนกลับ

เมื่อพิจารณา รูปที่ 3.1 เรากำหนดให้ $R(s)$ คือสัญญาณอ้างอิง $Y(s)$ คือสัญญาณออกที่วัดได้ $E(s)$ คือ สัญญาณคลาดเคลื่อนออกจากค่าอ้างอิง

$$E(s) = R(s) - Y(s)$$

และ $U(s)$ คือ สัญญาณควบคุมที่ออกจากตัวควบคุม เมื่อใช้ตัวควบคุม PID เราจะได้ว่า

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

ดังนั้น สัญญาณควบคุมสามารถบรรยายในโดเมนเวลาได้ดังนี้

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

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) รายละเอียดของการควบคุมพื้นฐานแต่ละแบบมีดังนี้

1. **Proportional Action (P)** เป็นเทคนิคที่ง่ายที่สุด หลักการก็คือสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมป้อนเข้ากระบวนการ มีค่าเป็นสัดส่วนกับความผิดพลาด (error = setpoint-output) ที่เกิดขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง Proportional Action ทำหน้าที่เป็นอัตราขยายเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ K_p

การควบคุมเชิงสัดส่วนนี้สามารถควบคุมระบบได้ระดับหนึ่ง เหมาะสมกับกระบวนการที่ต้องการผลตอบสนองรวดเร็ว ในขณะที่เดียวกันยอมให้เกิดความคลาดเคลื่อนขนาดคงที่ค่าหนึ่ง ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานหรือพารามิเตอร์บางตัวในระบบ ก็อาจทำให้เกิดปัญหาขึ้นได้ เช่น ความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว (steady state error) หรือที่เรียกว่า “offset” ตัวควบคุมแบบ P ไม่สามารถแก้ไขให้หมดไปได้ แต่สามารถลดผลได้ โดยเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุมเพื่อเพิ่มขนาดของสัญญาณควบคุม ทำให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยลง อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุมมากเกินไปก็อาจจะทำให้ผลตอบแวงได้ เนื่องจากระบบจะไวต่อการเปลี่ยนแปลง

2. **Integral Action (I)** สัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแบบ PI สามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) E(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) E(s)$$

เมื่อ T_i คือ Integral time (วินาที) วิธีนี้จะสามารถแก้ความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวได้ เนื่องจากเสมือนเพิ่มขั้วที่จุดกำเนิดให้กับระบบวงเปิด แต่ก็จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ลดลง โดยทั่วไปแล้วระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PI จะมีช่วงเวลากว้างนานกว่าช่วงเวลาที่ใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน 50% หรือ

$$T_{PI} = 1.5T_P$$

เมื่อ T_{PI} คือ ช่วงเวลาในการแกว่งของระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PI และ T_P คือ ช่วงเวลาในการแกว่งของระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบ P

อย่างไรก็ตาม สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลา (time constant) น้อย ปัญหานี้จะไม่มีผลมากนัก แต่สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลามาก ปัญหานี้จะใหญ่มากและอาจทำให้ระบบเข้าสู่จุดวิกฤติที่ไม่สามารถยอมรับได้ (เช่น ระบบควบคุมระดับ)

3. **Derivative Action (D)** การควบคุมแบบสัดส่วนและอินทิกรัลต่างก็มีข้อจำกัด และอาจทำให้เกิดปัญหาต่อการควบคุมกระบวนการเนื่องจากการแกว่งมาก อย่างไรก็ตาม ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขด้วยการเพิ่มตัวอนุพันธ์ สัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแบบ PID สามารถอธิบายได้ดังสมการ

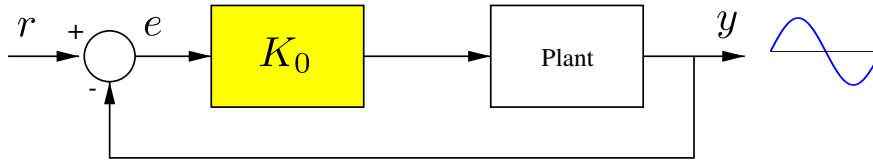
$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) E(s)$$

ในทฤษฎีระบบควบคุม Derivative action ทำหน้าที่เสมือนกับการเพิ่มศูนย์ (zero) หนึ่งตัวให้กับระบบ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่ม K_d มากเกินไปอาจจะทำให้ระบบมีผลตอบที่ช้า

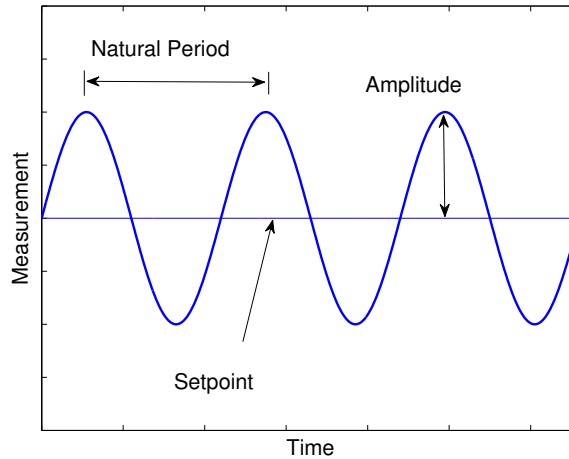
3.2 การปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

ในตอนนี้จะมุ่งเน้นวิธีการตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยอาศัยลักษณะสมบัติของกระบวนการและระบบควบคุม ลักษณะสมบัติที่ว่ามีได้แก่

1. ลักษณะของความจุของระบบ (capacitance) ซึ่งก่อให้เกิดการล่าช้าแบบ exponential



รูป 3.2: การหาค่าอัตราขยายที่ทำให้ระบบเริ่มแกว่ง



รูป 3.3: การแกว่งด้วยค่าแอมพลิจูดคงที่สำหรับวิธีวงปิด

2. deadtime (distance/velocity lag)
3. ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency)

ในการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม (Controller Parameter Tuning) เริ่มจากการหาลักษณะของวงรอบการควบคุมเดิม เทคนิคต่างๆในการหาลักษณะของกระบวนการมีความสำคัญมาก นำไปสู่การตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ตัวควบคุม PID เป็นแบบที่นิยมใช้ ในปัจจุบันแบ่งการปรับแต่งตัวควบคุมเป็น 2 วิธีคือ อันได้แก่

1. วิธีวงเปิด (open-loop step response method/ reaction curve method)
2. วิธีวงปิด (closed-loop method /ultimate sensitivity method)

วิธีวงปิด

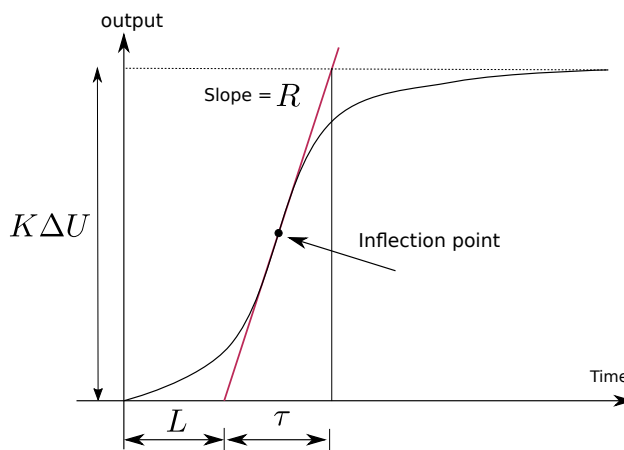
วิธีวงปิด เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะว่ามีค่าพารามิเตอร์จากผลตอบสนองทางเวลาเพียงค่าเดียว วิธีนี้เริ่มจากการปรับอัตราขยายวงรอบ K_0 ดังรูปที่ 3.2 จนทำให้ผลตอบสนองเริ่มแกว่งด้วยแอมพลิจูดคงที่และมีคาบเวลาคงที่ดังในรูปที่ 3.3 หลังจากนั้นให้อ่านหรือคำนวณคาบเวลาทางธรรมชาติ (natural period, T_0) ของการแกว่ง ตัวอย่างของการวัดวิธีนี้แสดงในรูปที่ 3.3 เวลาจากยอดถึงยอดวัดได้ 2.2 วินาที ดังนั้น T_0 มีค่าเท่ากับ 2.2 วินาที อย่างไรก็ตาม วิธีวงปิดนี้มีข้อเสียเปรียบอยู่คือ กระบวนการบางอย่างที่มีลักษณะออนไลน์ (online) ไม่สามารถจะทำให้เกิดการแกว่งได้ ถึงแม้ว่าจะเป็นช่วงเวลาเพียงสั้นๆ

วิธีวงเปิด

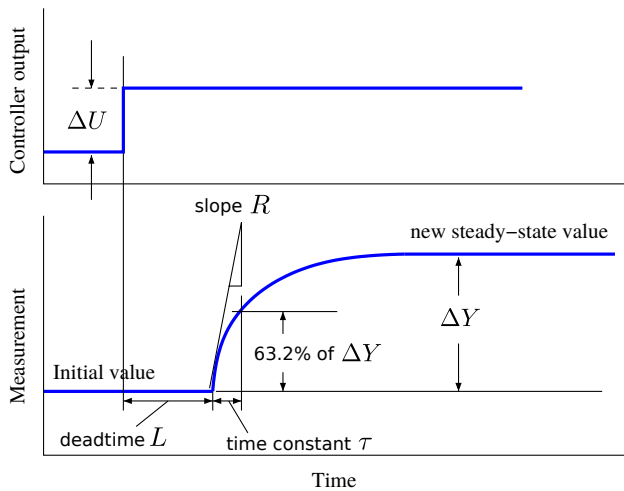
วิธีนี้เริ่มมาจากความคิดที่ว่า ผลตอบจากสัญญาณขั้น (step response) ของกระบวนการส่วนใหญ่ ที่อาจจะเป็นระบบอันดับสูงมีลักษณะกราฟคล้าย รูปที่ 3.4a ซึ่งเรียกว่า *process reaction curve* รูปกราฟลักษณะดังกล่าวสามารถประมาณได้ว่าเป็นผลตอบสัญญาณขั้นของระบบล่าช้าอันดับหนึ่ง (*first-order lag*) ดังรูปที่ 3.4b ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นดังนี้

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

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



(a) Process reaction curve



(b) ผลตอบวงเปิดของกระบวนการอันดับหนึ่งที่มี deadtime

รูป 3.4: ผลตอบต่อสัญญาณขั้นหนึ่งหน่วยของกระบวนการ

วิธีนี้เริ่มต้นด้วยการหาค่าคงตัวทางเวลา, *deadtime* และอัตราการตอบสนอง (*response rate*) โดยอาศัยผลตอบสนองวงเปิด (*open-loop response*) หากระบบเป็นแบบการล่าช้าอันดับหนึ่ง (*first-order lag*) ดังรูปที่ 3.4b ขั้นตอนการทดสอบเป็นดังนี้

1. ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบขั้น (step change) ด้วยขนาด ΔU ที่สัญญาณออกของตัวควบคุม (ซึ่งเป็นสัญญาณเข้าของระบบ) ในขณะเดียวกันก็ให้เครื่องบันทึกทำการบันทึกค่าเพื่อหาค่า *deadtime* ดัง ค่า *deadtime* (หน่วยเป็นวินาที)

จะเป็นระยะเวลานับจากจุดที่เริ่มการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นของสัญญาณเข้า ไปยังจุดที่ระบบเริ่มตอบสนองต่อสัญญาณเข้า นั้น

2. จากนั้นสัญญาณออกที่วัดได้จะมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ค่าใหม่ ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นที่สัญญาณออกของตัวควบคุม เส้นโค้งแสดงดังรูปที่ 3.4b เป็นผลตอบสำหรับระบบที่เป็น single capacitance อาจประมาณได้ว่าผลตอบที่มีลักษณะเป็นการล่าหลังอันดับหนึ่ง (*first-order lag*)
3. ค่าคงตัวทางเวลา τ หาได้จากระยะเวลาที่สัญญาณออกเริ่มเปลี่ยนแปลง ไปจนถึงค่า 63.2% ของ ΔY (หรือเป็นสัดส่วน $1 - e^{-1}$ ของ ΔY) โดย ΔY คือการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณออก เมื่อเทียบกับค่าเดิม
4. ค่า K ซึ่งบ่งบอกถึงอัตราขยายของระบบในภาวะอยู่ตัว หากจากได้ $K = \Delta Y / \Delta U$
5. ค่าความชันของกราฟสัญญาณออก ณ inflection point จะมีค่าเท่ากับ K/τ เราจะเรียกค่าความชันนี้ว่า process reaction rate = R

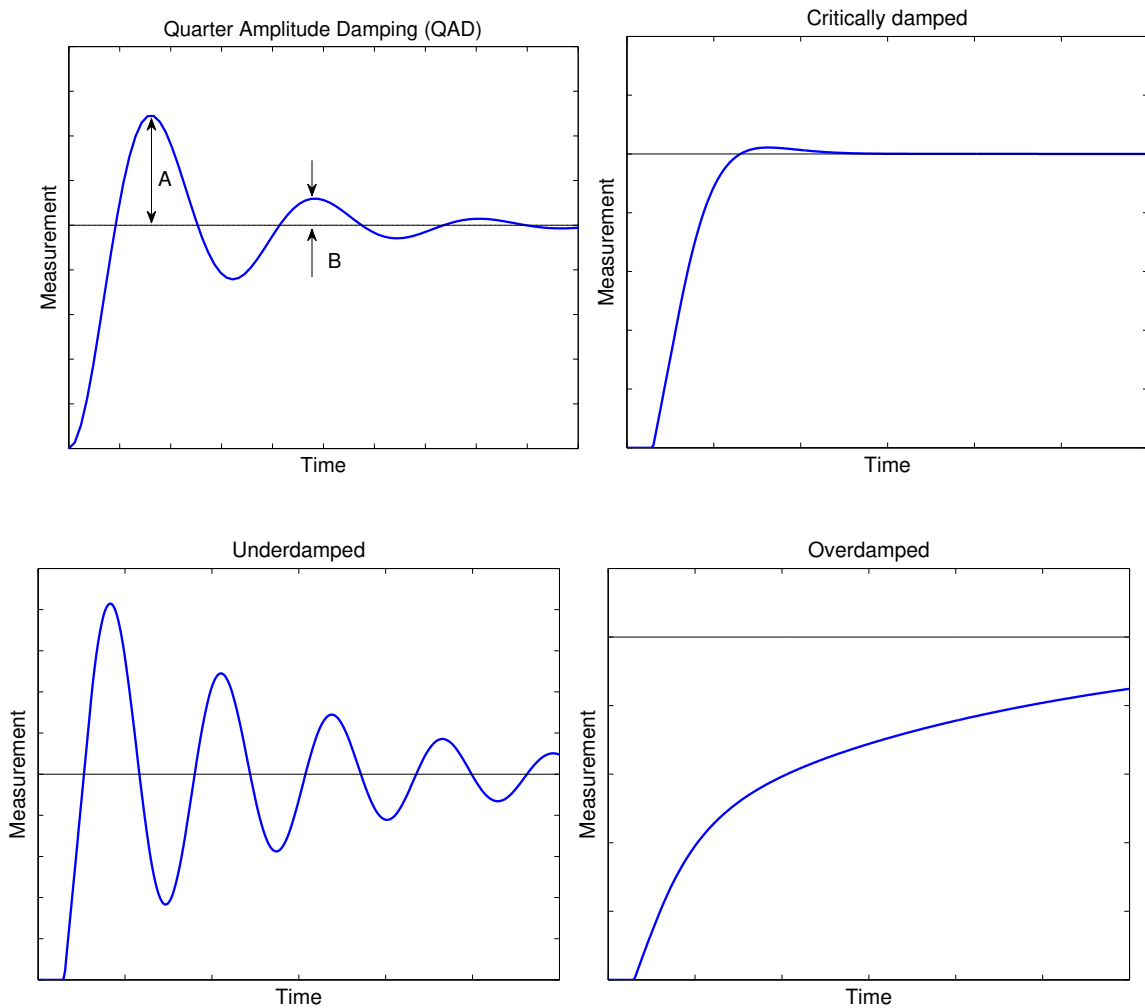
หากระบบมีอันดับสูง และมีกราฟผลตอบเป็นดังรูปที่ 3.4a ซึ่งเราจะประมาณด้วยแบบจำลองอันดับหนึ่งที่มี deadtime นั้น การหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทำได้โดย [SMED11, §6.2]

1. อัตราขยาย K หาได้จากค่าภาวะอยู่ตัวของผลตอบ ΔY หารด้วยค่า ΔU
2. หาจุด inflection point ซึ่งคือจุดที่กราฟผลตอบ f ใดๆ เปลี่ยนจากฟังก์ชัน convex ($f''(x) > 0$) เป็นฟังก์ชัน concave ($f''(x) < 0$) (หรือกลับกัน) และลาก tangent line ผ่านจุด inflection point นั้นตัดแกน x และผ่านค่าสภาวะอยู่ตัวในแกน y เราเก็บค่าความชันของ tangent line นี้ไว้เท่ากับ R
3. จุดที่ tangent line ลากผ่าน inflection point จะตัดแกน x ที่ค่า deadtime L
4. ค่าเวลาที่สอดคล้องกับจุดตัดระหว่าง tangent line กับค่าสภาวะอยู่ตัวของแกน y จะเท่ากับ $L + \tau$ ดังนั้น เราสามารถคำนวณ τ ได้จากการลบค่า L ออกจากค่าเวลาจุดตัดที่ได้

3.3 จุดประสงค์ในการปรับจูนตัวควบคุม

หลังจากการวัดคาบเวลาทางธรรมชาติแล้ว การปรับจูนตัวควบคุม (controller tuning) ก็สามารถทำได้ด้วยวิธี Ziegler-Nichols หรือ Shinskey หรือวิธีอื่นๆ วัดจุดประสงค์ก็เพื่อจะหาตัวควบคุมที่ทำให้ผลรวมของความคลาดเคลื่อนในช่วงเวลาทำงานมีค่าต่ำสุด ในทางปฏิบัติการปรับจูนที่เหมาะสมวิธีหนึ่งคือ การปรับจูนให้ได้ผลตอบที่มีลักษณะการหน่วงแอมพลิจูดหนึ่งในสี่ (quarter amplitude damping, QAD) ในรูปที่ 3.5 ที่แสดงลักษณะสมบัติของ QAD สัดส่วนของส่วนพุงเกินที่สอง B ต่อส่วนพุงเกินที่หนึ่ง A เป็น 1 : 4 หรือ ผลตอบลักษณะนี้เกี่ยวข้องโดยตรงกับผลตอบที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำสุด

ในบางกระบวนการไม่อาจยอมรับการแกว่งของสัญญาณได้ เพราะอาจทำให้อุปกรณ์ชำรุดเสียหาย ดังนั้น จึงต้องเลือกการปรับจูนตัวควบคุมให้ได้ผลตอบในลักษณะอื่น เช่น ผลตอบสนองแบบหน่วงวิกฤต (critically damped) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ถ้าหากเพิ่มอัตราขยายแก่ตัวควบคุมอีกเพียงเล็กน้อย ผลตอบก็จะแกว่งรอบๆค่าอ้างอิงหลายครั้ง ตัวควบคุมที่ให้ผลตอบแบบหน่วงวิกฤต จะให้ค่าคลาดเคลื่อนมีขนาดใหญ่มากกว่าตัวควบคุมที่ให้ผลตอบแบบ QAD แต่ยอมรับได้มากขึ้น และตรงกับความต้องการ อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มค่าอัตราขยายของตัวควบคุมให้สูงขึ้นอีก ระบบก็จะเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง ผลตอบลักษณะนี้เรียกว่าหน่วงขาด (underdamped) และจะมีความคลาดเคลื่อน (วัดเทียบกับค่าอ้างอิง) เล็กน้อย ในทางกลับกันหากลดอัตราขยายของตัวควบคุม



รูป 3.5: ผลของการปรับอัตราขยายที่มีต่อผลตอบเชิงเวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว

ลง การรบกวนจะส่งผลกระทบต่อผลตอบทำให้การแกว่งลดลง แต่ทำให้ความคลาดเคลื่อนมากขึ้น ผลตอบในลักษณะนี้เรียกว่าหน่วงเกิน (overdamped)

3.4 วิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี

ตัวควบคุม PID สามารถเขียนได้ในรูปต่อไปนี้

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

โดยที่ K_p คือค่าอัตราขยายสัดส่วน (proportional gain) T_i คือเวลารีเซต (reset time) มีหน่วยเป็นวินาที และ T_d คืออัตราอนุพันธ์ (derivative rate) มีหน่วยเป็นวินาที ลักษณะสมบัติและการปรับจูนตัวควบคุมแบบ P, PI, และ PID มีรายละเอียดการปรับจูนด้วยวิธีต่างๆ เช่น Ziegner-Nichols, Shinsky, หรือ Cohen-Coon

สูตร Ziegler-Nichols นั้นให้ผลตอบที่ดีสำหรับกระบวนการที่มีค่าคงตัวทางเวลาที่มากกว่าค่าประวิงเวลา และวงจรรควบคุมระบบของเหลว อย่างไรก็ตามวิธีนี้อาจให้ผลที่ไม่ดีมากนักกับการควบคุมการไหลหรือความดันของของเหลว หรือการควบคุมวงรอบ

อื่นที่ต้องการปรับตัวอย่างรวดเร็ว การปรับค่าด้วยสูตร Cohen-Coon นั้นจะให้ผลโดยรวมที่ดีสำหรับกระบวนการแบบ self-regulating [Pay]

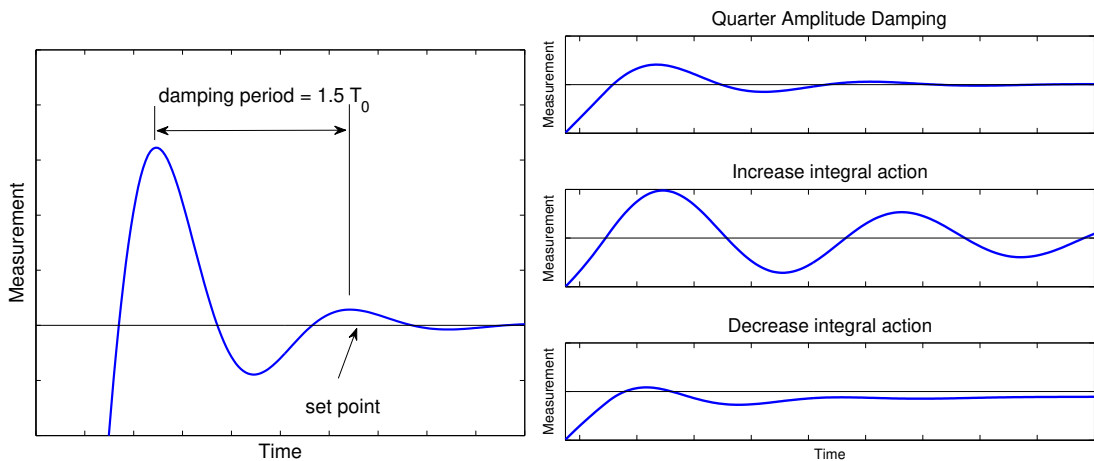
3.4.1 Proportional-only mode (P control)

ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (P control) จะได้จากการกำหนดค่า $T_i = \infty$ และ $T_d = 0$ และเลือกค่า K_p ที่เหมาะสม ตัวควบคุมแบบนี้เหมาะในการใช้งานกับกระบวนการที่ต้องการผลตอบที่รวดเร็ว ในขณะที่เดียวกันก็ยอมให้เกิดความคลาดเคลื่อนขนาดคงที่ค่าหนึ่ง ตัวควบคุมแบบสัดส่วนจะมีพารามิเตอร์ที่ต้องปรับจูนเพียงตัวเดียว ส่วนวิธีการปรับจูนพารามิเตอร์ สามารถเริ่มใช้จากสูตรดังตารางที่ 3.1 หรือตารางที่ 3.2 เพื่อเป็นค่าเริ่มต้น

หากไม่ต้องการ QAD การลด K_p จะทำให้เกิดการหน่วงวิกฤต และหากยังคงลด K_p ต่อไปอีกจะเกิดการหน่วงเกิน ในทางตรงกันข้าม การเพิ่ม K_p จากการตั้งโดยวิธี QAD จะทำให้เกิดการหน่วงขาด

3.4.2 Proportional-plus-integral mode (PI control)

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนและอินทิกรัล (หรือ PI) จะได้จากการกำหนดค่า $T_d = 0$ และเลือกค่า K_p และ T_i ที่เหมาะสม มีข้อได้เปรียบกว่าตัวควบคุมเชิงสัดส่วนอย่างเดียวคือ ให้ผลตอบที่เร็วและให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ วิธีการปรับจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PI จะยุ่งยากขึ้นเนื่องจากมีพารามิเตอร์ที่ต้องเลือกจำนวน 2 ตัว



(a) ผลตอบของตัวควบคุม PI ที่ให้ค่า $T_{PI} = 1.5T_0$

(b) ผลตอบเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ T_i

รูป 3.6: ผลตอบกระบวนการเมื่อใช้ตัวควบคุม PI

Shinsky เสนอค่า damped period ที่เหมาะสมกับตัวควบคุมแบบ PI คือเท่ากับ $1.5T_0$ โดยประมาณ สำหรับกระบวนการที่ไม่สามารถหาค่า natural period (T_0) จากวิธีวงปิดได้โดยง่ายนั้น ก็สามารถหาค่า τ และค่า L ที่หาจากวิธีวงเปิด จากนั้นก็สามารถหาค่า T_0 ในรูปที่ 3.6a ได้แสดงผลตอบของตัวควบคุม PI ที่คาบเท่ากับ $1.5T_0$ โดยมี quarter amplitude damping (QAD) (ในรูป T_{PI} คือ damped period ของผลตอบกระบวนการเนื่องจากตัวควบคุม PI และ $T_{PI} = 1.5T_0$) การเพิ่มตัวอินทิกรัล ดังรูปที่ 3.6b ให้กับตัวควบคุมทำให้ค่า damped period เพิ่มขึ้นและการแกว่งรอบค่าสุดท้ายนานขึ้น การลดผลจากตัวอินทิกรัลลง จะทำให้กระบวนการใช้ระยะเวลานานขึ้นกว่าที่จะให้ผลตอบกลับเข้าสู่ค่ากำหนด การปรับจูนอาศัยค่า T_0 หรือค่า τ และค่า L หรือใช้ทั้งสองอย่าง

ตาราง 3.1: ตารางสรุปวิธีการปรับจูนพารามิเตอร์ตัวควบคุม PID จากวิธีวงเปิด

ชนิดตัวควบคุม	ค่าพารามิเตอร์	
	Ziegler-Nichols	Shinskey
P	$K_p = 1/RL$	$K_p = 1/RL$
PI	$K_p = 0.9/RL$ $T_i = L/0.3$	
PID	$K_p = 1.2/RL$ $T_i = 2L$ $T_d = 0.5L$	

ตาราง 3.2: ตารางสรุปวิธีการปรับจูนพารามิเตอร์ตัวควบคุม PID จากวิธีวงปิด

ชนิดตัวควบคุม	ค่าพารามิเตอร์		
	Ziegler-Nichols	Cohen-Coon	Shinskey
P	$K_p = 0.5K_0$	$K_p = \frac{1}{RL} \left(1 + \frac{L}{3\tau}\right)$	$K_p = 0.5K_0$
PI	$K_p = 0.45K_0$ $T_i = T_0/1.2$	$K_p = \frac{1}{RL} \left(0.9 + \frac{L}{12\tau}\right)$ $T_i = L \left(\frac{30+3L/\tau}{9+20L/\tau}\right)$	$K_p = 0.5K_0$ $T_i = 0.43T_0$
PID	$K_p = 0.6K_0$ $T_i = 0.5T_0$ $T_d = T_0/8$	$K_p = \frac{1}{RL} \left(\frac{4}{3} + \frac{L}{4\tau}\right)$ $T_i = L \left(\frac{32+6L/\tau}{13+8L/\tau}\right)$ $T_d = \frac{4L}{11+2L/\tau}$	$K_p = K_0/4$ $T_i = 0.5T_0$ $T_d = 0.12T_0$

หมายเหตุ T_0 คือ natural period และ K_0 คือค่าอัตราขยายที่ทำให้เกิดการแกว่งของสัญญาณแบบแอมพลิฟูดคงที่

3.4.3 Proportional, integral and derivative mode (PID)

ตัวควบคุมแบบ PID จะใช้กับกระบวนการที่มีการตอบสนองช้า และมีคาบเวลาที่ค่อนข้างนาน เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้กับกระบวนการควบคุมอุณหภูมิ เมื่อค่าอุณหภูมิที่วัดได้เริ่มเปลี่ยนแปลง heat rate อาจต้องเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว Derivative action จะลดคาบเวลาของผลตอบให้สั้นลงเมื่อเกิดการรบกวน (upset) อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมแบบ PID ไม่สามารถใช้กับระบบที่มีสัญญาณรบกวนการวัดหรือการเปลี่ยนแปลงแบบฉับพลัน

การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีต่างๆ สามารถสรุปได้ในตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 [FPEN02, S4]

บทที่ 4

การทดลอง M1: การศึกษาระบบมอเตอร์

มานพ วงศ์สายสุวรรณ

วัตถุประสงค์

เพื่อให้นิสิตรู้จักส่วนประกอบของชุดทดลองมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการและใช้งานได้อย่างถูกต้อง

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. เพื่อให้นิสิตเรียนรู้ส่วนประกอบและการทำงานของชุดทดลอง CE110 Servo trainer และ CE120 Controller
2. เพื่อให้นิสิตเก็บข้อมูลสัญญาณเข้าและสัญญาณออกจากชุดทดลองในแบบวงรอบเปิดได้ โดยเปลี่ยนประเภทของสัญญาณเข้า

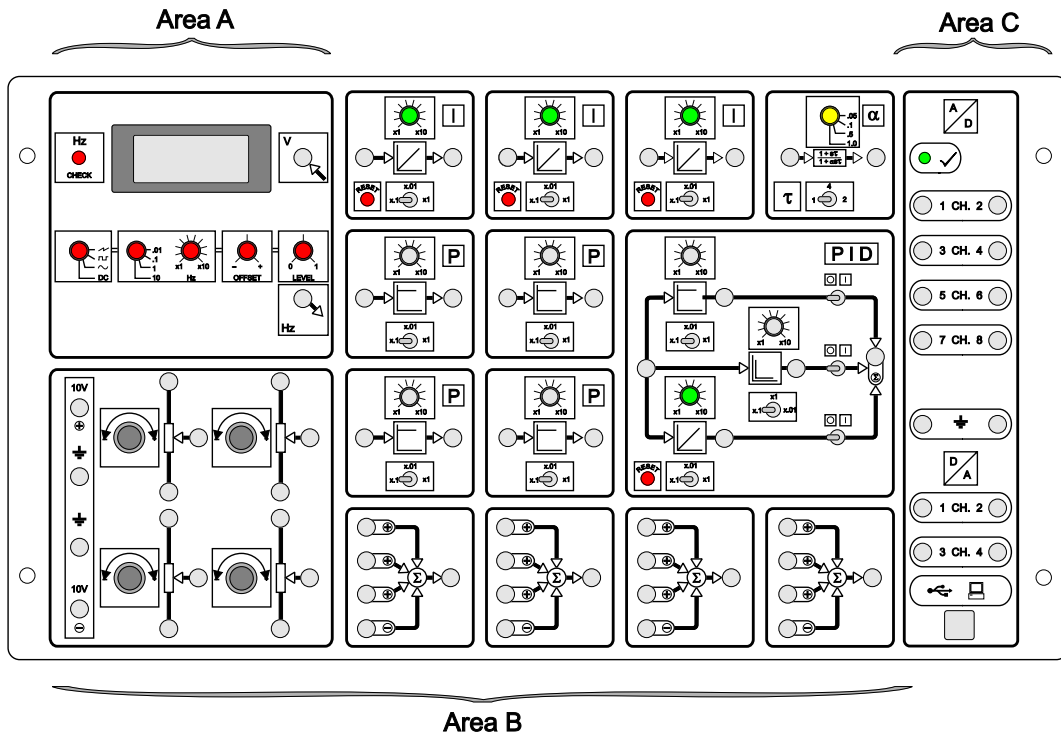
อุปกรณ์ที่ใช้

1. ระบบเซอร์โวมอเตอร์ CE110 Servo trainer
2. ตัวควบคุมแบบแอนะล็อก CE120 Controller
3. คอมพิวเตอร์และโปรแกรม CE2000

4.1 บทนำ

ในการทดลองนี้ เราจะศึกษาการทำงานของชุดทดลองมอเตอร์ CE110 Servo trainer ผ่านชุดตัวควบคุม CE120 Controller ซึ่งพัฒนาขึ้นสำหรับการศึกษาระบบควบคุมโดยมี 3 ส่วนการทำงาน ดังแสดงในรูป

Area A จะเป็นส่วนของการวัดและการกำเนิดสัญญาณ สามารถวัดแรงดันและความถี่ของสัญญาณ (ขณะที่กดปุ่ม Hz check) และสามารถกำเนิดสัญญาณไซน์ (sine) สี่เหลี่ยม (square) ฟันเลื่อย (sawtooth) ในช่วงความถี่ 0.01–100 Hz ได้



รูป 4.1: ส่วนประกอบย่อยในตัวควบคุมแบบแอนะล็อก CE120

Area B เป็นส่วนการควบคุมแบบแอนะล็อก มีแหล่งกำเนิดกำลังกระแสตรง (D.C. Power Supply) +10 V และ -10 V ความต้านทานปรับค่าได้ (Potentiometers) เพื่อใช้แบ่งแรงดันระหว่าง ± 10 V มีจุดรวมสัญญาณ (Summing amplifier) ซึ่งสามารถรวมสัญญาณเข้าด้วยกัน ตัวขยายสัญญาณแบบสัดส่วน (Proportional amplifier) ตัวขยายสัญญาณแบบอินทิเกรต (Integrating amplifier) ตัวควบคุมสามเทอมหรือพีไอดี (Three-term or PID controller) และตัวควบคุมเฟสล้ำหน้า (Phase-lead network)

Area C เป็นส่วนการควบคุมแบบดิจิทัล ใช้ต่อผ่านพอร์ต USB ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ PC เพื่อใช้ร่วมกับซอฟต์แวร์ CE2000 ในการควบคุม

กำหนดให้ $G_1(s)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนจากสัญญาณแรงดันมอเตอร์ไปยังความเร็ว (ที่วัดเป็นแรงดัน) ดัง (4.1) จะได้ว่า

$$Y_\omega(s) = G_1(s)V(s) = \frac{K_\omega}{\tau s + 1}V(s) \quad (4.1)$$

4.2 สิ่งที่ต้องเตรียมมา

อ่านหัวข้อที่ 2.1 Servo trainer

4.3 วิธีทดลอง

การทดลอง 1: ลักษณะสมบัติของมอเตอร์

ปลดโหลดและคลัทช์ออกจากมอเตอร์ในชุดทดลอง CE110 ต่อชุดทดลอง CE110 และ CE120 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ปรับค่า potentiometer เพื่อให้ได้แรงดันขับเคลื่อนมอเตอร์ (อ่านค่าจาก voltmeter ของ CE120) ให้เป็นค่า 0, ± 1 , ± 2 , ± 3 , ..., ± 10 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 บันทึกค่าความเร็วมอเตอร์หน่วยเป็นรอบต่อนาที (rpm) ที่อ่านได้จาก CE110 พร้อมทั้งหาค่า Deadzone ของมอเตอร์โดยเริ่มจากแรงดันขับเคลื่อนมอเตอร์เป็น 0 ปรับเพิ่มขึ้นทีละน้อย และบันทึกค่าแรงดันขับเคลื่อนที่มากที่สุดที่ยังไม่ทำให้มอเตอร์หมุนทั้งค่าบวกและค่าลบ จดบันทึกลงในตาราง

การทดลอง 2: ลักษณะสมบัติของเซนเซอร์วัดความเร็ว

ปลดโหลดและคลัทช์ออกจากมอเตอร์ในชุดทดลอง CE110 ต่อชุดทดลอง CE110 และ CE120 ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ปรับค่า potentiometer เพื่อให้ได้แรงดันที่วัดจากเซนเซอร์ความเร็วของมอเตอร์ (อ่านค่าจาก voltmeter ของ CE120) ให้เป็นค่า ± 1 , ± 2 , ± 3 , ..., ± 9 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 บันทึกค่าความเร็วมอเตอร์หน่วยเป็นรอบต่อนาที (rpm) ที่อ่านได้จาก CE110 จดบันทึกลงในตาราง

การทดลอง 3: การเก็บข้อมูลเพื่อหาเอกลักษณ์ของระบบ

กำหนดให้ระบบในภาวะปกติ (default) คือระบบเมื่อไม่ได้จ่ายโหลดจำลอง (electrical load) และเมื่อไม่ได้ต่อคลัทช์ การใส่สัญญาณแรงดันเข้าจะสร้างจากไฟล์ `motor_iden.ict` และให้นิสิตต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 4.2

นิสิตตั้งค่าอุปกรณ์เพื่อเก็บข้อมูลสัญญาณเข้า u และสัญญาณออก ω จากระบบภายใต้ 3 สภาวะดังรายการข้างล่าง บันทึกสัญญาณเป็นเวลา 60 วินาที

1. ภาวะปกติ: ให้ใส่สัญญาณแรงดันเข้าเป็น Gaussian noise ที่มี offset เป็น 1V ค่า level เป็น 2V และค่า standard deviation ประมาณ 0.1 เพื่อกระตุ้นระบบ ตั้งชื่อไฟล์ดังนี้

`data_motor_noclutch.txt`

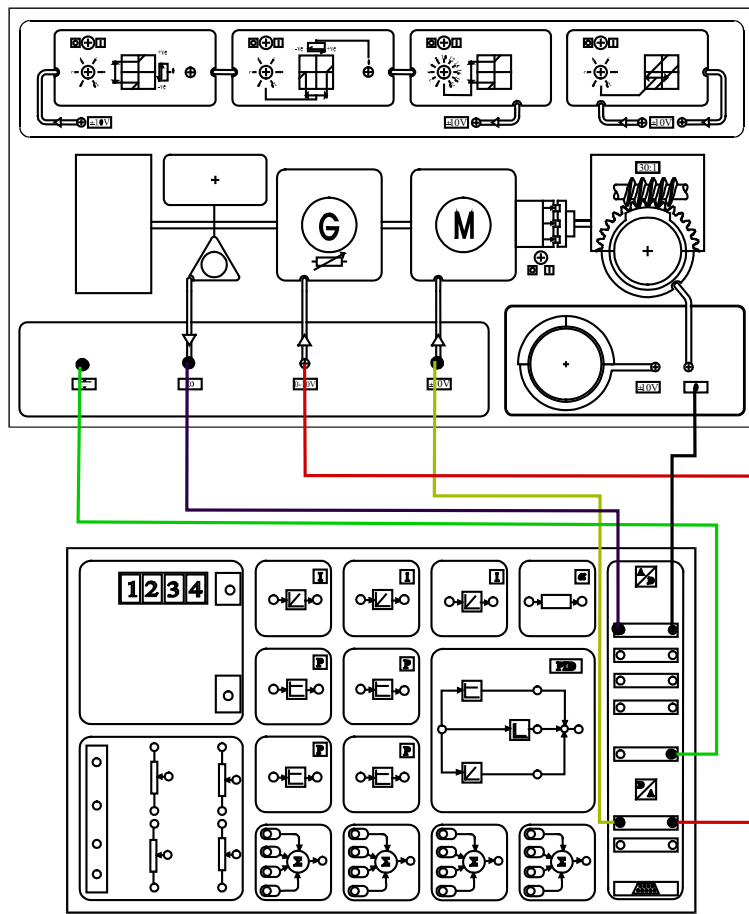
2. ภาวะมีโหลดจำลอง: ให้ใส่สัญญาณแรงดันเข้าเป็น Gaussian noise ที่มี offset เป็น 1V และค่า level เป็น 2V และค่า standard deviation ประมาณ 0.1 และใส่สัญญาณแรงดันที่จำลองโหลดเป็น sine wave ความถี่ 0.1Hz ที่มี offset เป็น 0.5V และค่า level เป็น 0.5V ตั้งชื่อไฟล์ดังนี้

`data_motor_sine_load.txt`

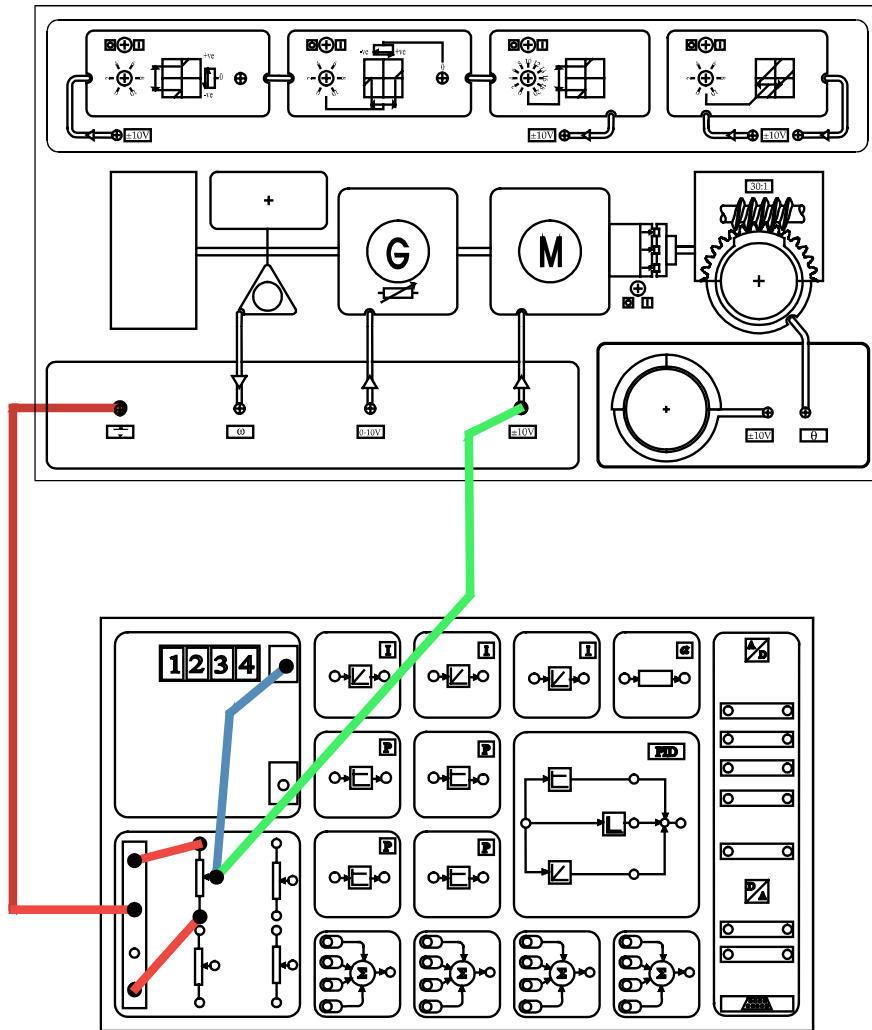
3. เมื่อระบบต่อคลัทช์: ให้กดสวิทช์เพื่อต่อระบบกับคลัทช์ แล้วให้ใส่สัญญาณแรงดันเข้าเป็น Gaussian noise ที่มี offset เป็น 2V ค่า level เป็น 2V และค่า standard deviation ประมาณ 0.1 เพื่อกระตุ้นระบบ ตั้งชื่อไฟล์ดังนี้

`data_motor_clutch.txt`

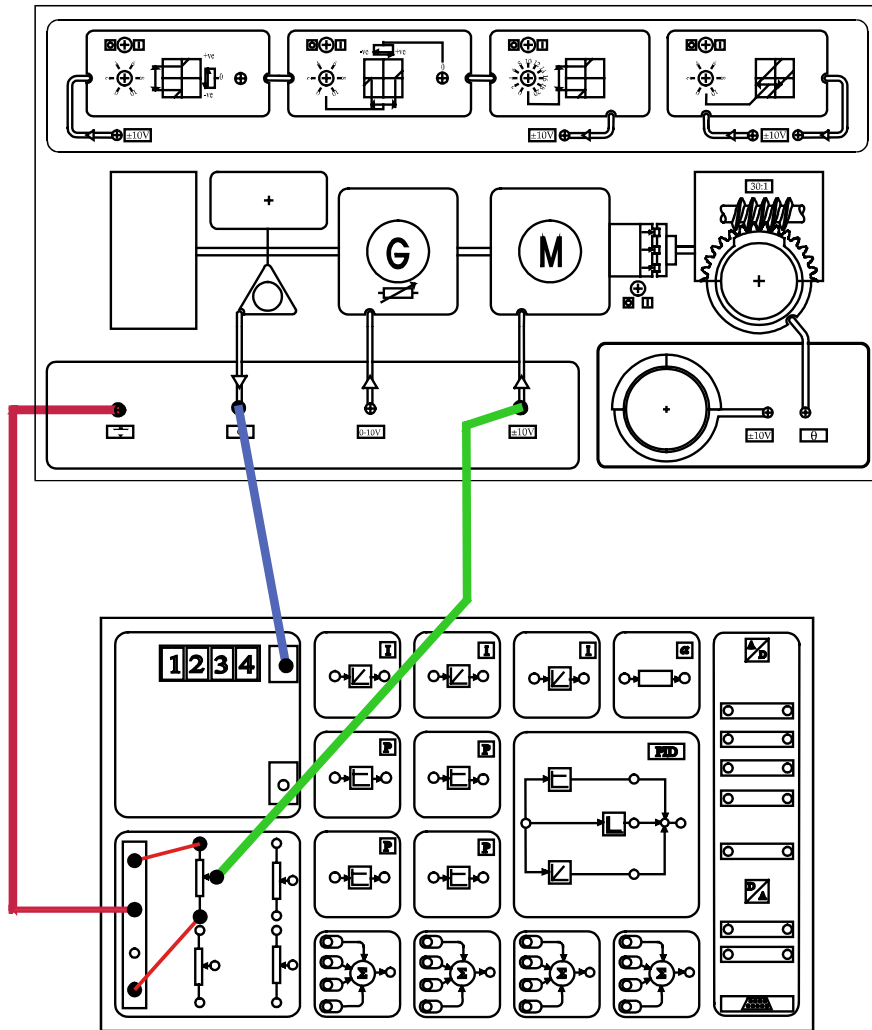
จุดประสงค์การเก็บข้อมูลคือหาเอกลักษณ์ของระบบภายใต้ 3 สภาวะดังกล่าว นิสิตควรพิจารณาขณะเก็บข้อมูลว่า ผลตอบของระบบที่ได้ควรเปลี่ยนไปอย่างไรภายใต้สภาวะนั้นๆ หากเก็บข้อมูลที่ไม่ถูกต้องไป อาจจะทำให้ผลการทดลอง S1 ผิดเพี้ยนได้ (นิสิตจะไม่สามารถมาเก็บข้อมูลได้อีกในสัปดาห์ที่ทำการทดลอง S1)



รูป 4.2: การต่ออุปกรณ์ CE110 เพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการหาเอกลักษณ์ของระบบ



รูป 4.3: การทดสอบ calibrate มอเตอร์



รูป 4.4: การทดสอบตัววัดสัญญาณความเร็วมอเตอร์

สรุปผลการทดลองที่ต้องส่ง

นิสิตเขียนรายงานที่มีหน้าปกที่มี ชื่อการทดลอง รหัสอุปกรณ์ วันที่ทำการทดลอง วันที่ส่งรายงาน ชื่อและรหัสนิสิตในกลุ่ม ภายในเนื้อหากรายงานให้แยกหัวข้อตามการทดลอง พร้อมด้วยผลการทดลองตามรายการดังต่อไปนี้ (คะแนนของความสมบูรณ์รายงาน จะให้ตามรายการข้างล่าง)

การทดลอง 1: ลักษณะสมบัติของมอเตอร์

1. ตาราง 4.1
2. ถ้าพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนจากแรงดันขั้วมอเตอร์ v ไปยังความเร็วของมอเตอร์ y , DC gain ควรจะมีค่าเป็นอย่างไร
3. จงอภิปรายว่าเราสามารถสังเกตความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearities) ของระบบได้อย่างไรบ้าง

แรงดันขั้วเคลื่อน มอเตอร์ v (volts) (ค่าบวก)	ความเร็วมอเตอร์ (rpm)	แรงดันขั้วเคลื่อน มอเตอร์ v (volts) (ค่าลบ)	ความเร็วมอเตอร์ (rpm)
0	0	0	0
ขนาด Deadzone = volts		ขนาด Deadzone = volts	
1		-1	
2		-2	
3		-3	
4		-4	
5		-5	
6		-6	
7		-7	
8		-8	
9		-9	
10		-10	

ตาราง 4.1: การเปรียบเทียบแรงดันขั้วมอเตอร์ (เมื่อไม่มีโหลด)

การทดลอง 2: ลักษณะสมบัติของเซนเซอร์วัดความเร็ว

1. ตาราง 4.2

2. ใช้คำสั่ง `spline` ในโปรแกรม Matlab พล็อตเส้นโค้งสอบเทียบ (calibration curve) ของเซนเซอร์ความเร็ว โดยให้แกนนอนเป็นแรงดันและแกนตั้งเป็นความเร็วมอเตอร์ (แนบ Matlab code ที่ใช้ในการพล็อตด้วย)
3. ถ้าพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนจากแรงดันขับมอเตอร์ v ไปยังแรงดันจากเซนเซอร์ความเร็ว v_{ω} DC gain จะมีหน่วยเช่นเดียวกับ DC gain ของการทดลอง 1 หรือไม่
4. จงอภิปรายความเป็นเชิงเส้นหรือความไม่เป็นเชิงเส้นของเซนเซอร์ความเร็ว จากผลการทดลองที่ได้

ความเร็วมอเตอร์ (rpm) (ค่าบวก)	แรงดันจาก เซนเซอร์วัดความเร็ว (volt)	ความเร็วมอเตอร์ (rpm) (ค่าลบ)	แรงดันจาก เซนเซอร์วัดความเร็ว (volt)
	1		-1
	2		-2
	3		-3
	4		-4
	5		-5
	6		-6
	7		-7
	8		-8
	9		-9

ตาราง 4.2: การปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร็ว

การทดลอง 3: การเก็บข้อมูลเพื่อหาเอกลักษณ์ของระบบ

รายการไฟล์ข้อมูลที่ต้องบันทึก (ในไฟล์หนึ่งๆ ต้องประกอบไปด้วยตัวแปร เวลา สัญญาณแรงดันเข้ามอเตอร์ สัญญาณแรงดันจำลองโหลด (ถ้ามี)) ระยะเวลาของข้อมูลควรมีประมาณ 6 คาบ นั่นคือ 60 วินาที

`data_motor_step_noclutch.txt`

`data_motor_step_clutch.txt`

`data_motor_sine_load.txt`

บทที่ 5

การทดลอง M2: การควบคุมความเร็วมอเตอร์

มานพ วงศ์สายสุวรรณ

วัตถุประสงค์

เพื่อให้นิสิตเข้าใจการทำงานและสามารถปรับจูนของตัวควบคุมพีไอของความเร็วของมอเตอร์อย่างง่าย

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. เพื่อให้นิสิตเรียนรู้การทำงานของตัวควบคุมพีไอผ่านการควบคุมความเร็วมอเตอร์
2. เพื่อให้นิสิตปรับจูนตัวควบคุมพีไออย่างง่ายได้

อุปกรณ์ที่ใช้

1. ระบบเซอร์โวมอเตอร์ CE110 servo trainer
2. ตัวควบคุมแบบแอนะล็อก CE120 controller
3. คอมพิวเตอร์และโปรแกรม CE2000

5.1 บทนำ

ตัวควบคุมพีไอ (PI controller) เป็นกรณีพิเศษของตัวควบคุมพีไอดี (PID controller) ดังอธิบายโดยละเอียดใน บทที่ 3 ตัวควบคุมพีไอเหมาะสำหรับระบบที่มี type ของแพลนที่น้อยกว่า 1 เช่น ระบบควบคุมความเร็ว ซึ่งจำเป็นต้องใช้การรีเซ็ตหรือ I action ช่วยลดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (steady-state error) ให้เป็นศูนย์ ในกรณีที่สัญญาณอ้างอิงเป็นแบบขั้น (step-type input)

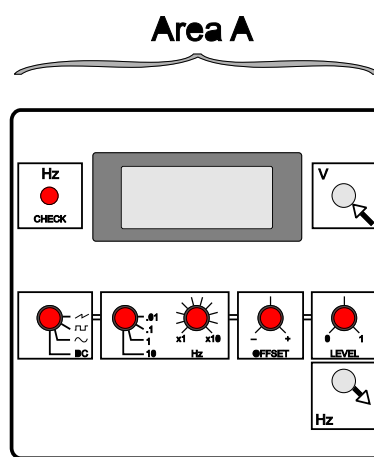
ในการทดลองนี้ นิสิตจะได้มุ่งความสนใจไปยังการปรับจูนตัวควบคุมพีไอแบบแอนะล็อก ซึ่งเป็นหนึ่งในตัวควบคุมที่มีใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรม และสามารถปรับจูนได้โดยไม่ต้องใช้แบบจำลองของแพลนท์ที่แม่นยำ นิสิตจะทำความเข้าใจและคุ้นเคยกับ P action และ I action และสามารถปรับจูนได้อย่างเหมาะสมเมื่อต้องใช้งานจริง

5.2 สิ่งที่ต้องเตรียมมา

อ่านบทที่ 3

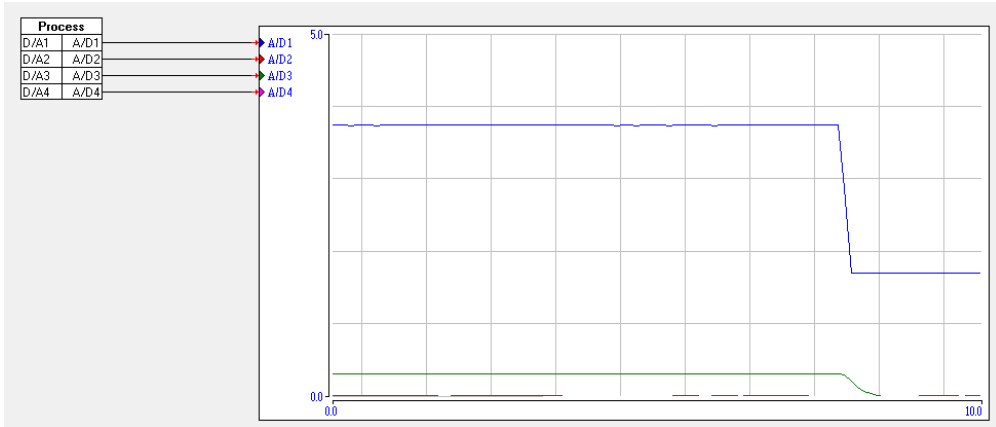
5.3 วิธีทดลอง

การทดลอง 1: ส่วนกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมและส่วนขยาย

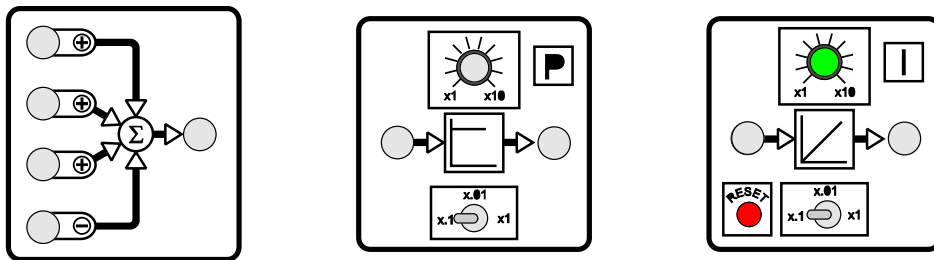


รูป 5.1: Area A ของตัวควบคุม CE120: ส่วนกำเนิดสัญญาณและโวลต์มิเตอร์

1. ศึกษาการทำงานของส่วนกำเนิดสัญญาณบนอุปกรณ์ CE120 โดยให้กำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมขนาดระหว่าง 2-4 โวลต์ ความถี่ 0.05 Hz
2. ต่อวงจรมโปรแกรม CE2000 เพื่อให้ทำงานเป็น chart recorder ตามรูปข้างล่าง และตั้งช่วงเวลา (แกนนอน) ของ recorder ไว้อย่างน้อย 10 วินาที วัดสัญญาณที่ได้จากข้อ 1. ที่ CH. 1
3. ป้อนสัญญาณจากข้อ 1. เข้าอัตราขยายสัดส่วนและวัดสัญญาณออกที่ CH. 2
4. ป้อนสัญญาณจากข้อ 1. เข้าอัตราขยายอินทิเกรตและวัดสัญญาณออกที่ CH. 3
5. บันทึกกราฟที่ได้จาก recorder สังเกตรูปกราฟเมื่อมีการกดปุ่ม Reset ที่อัตราขยายอินทิเกรต
6. ศึกษาการทำงานของอัตราขยาย P และอัตราขยาย I และใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณตรง (อาจใช้ potentiometer แบ่งค่าแรงดัน) เพื่อประมาณค่า P และ I ที่ใช้บันทึกกราฟสัญญาณ



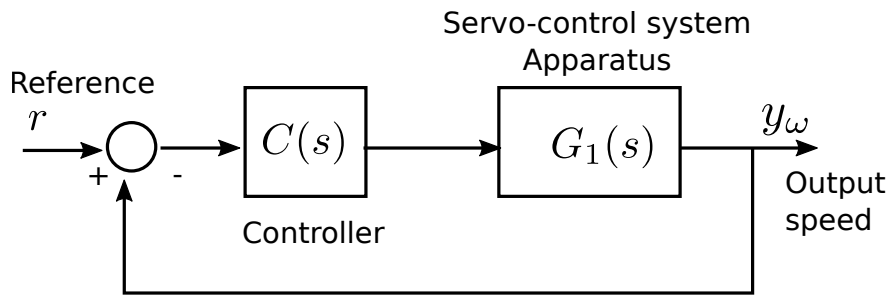
รูป 5.2: โปรแกรม CE2000 สำหรับใช้เป็น chart recorder



รูป 5.3: ส่วนรวมสัญญาณ อัตราขยายสัดส่วน P และอัตราขยายอินทิเกรต I

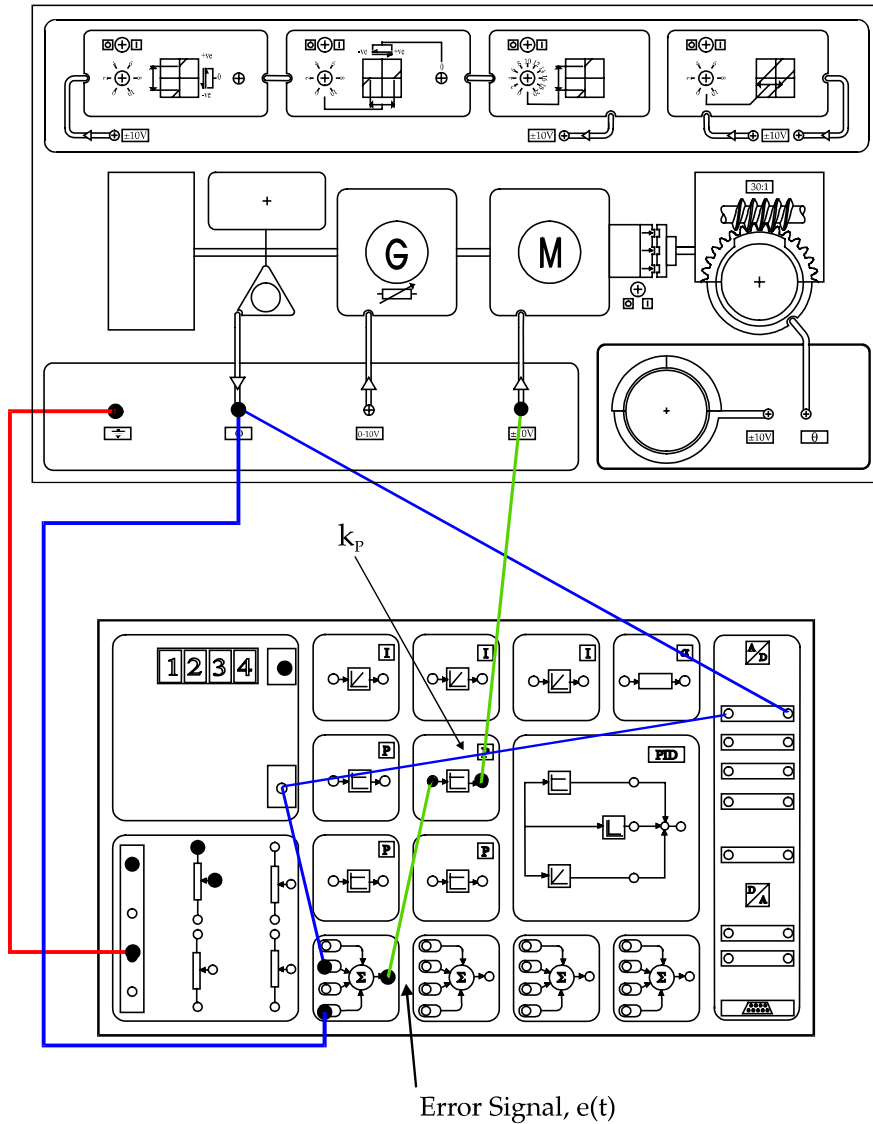
การทดลอง 2: ระบบควบคุมวงเปิดและวงปิด

ใส่แผ่นจานโพล (flywheel) เพื่อตั้งโพลของมอเตอร์ให้เป็น 2 ก้อน (ถ้าเดิมมีอยู่เพียง 1 ก้อน) และปลดคัลท์ซ็อก



รูป 5.4: แผนภาพการควบคุมป้อนกลับของความเร็วมอเตอร์

1. ตั้งแรงดันขับของมอเตอร์ให้เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม 0.05 Hz ขนาด 2-4 โวลต์ บันทึกกราฟแรงดันเข้าและออกที่ CH. 1 และ CH. 2
2. ใส่คัลท์ซ (เกียร์ 30:1 สำหรับวัดตำแหน่ง) บันทึกกราฟแรงดันเข้าและออกที่ CH. 1 และ CH. 2
3. ต้องวงจรควบคุมแบบสัดส่วน (P control) ดังรูป 5.5 ตั้งค่าอัตราขยายที่ $K_p = 5$ โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม 0.05 Hz ขนาด 2-4 โวลต์ บันทึกกราฟแรงดันอ้างอิงที่ CH. 1 แรงดันออก (ความเร็ว) ที่ CH. 2 แรงดันขับมอเตอร์ที่ CH. 3 และค่าผิดพลาด (error signal, $e(t)$) ที่ CH. 4 ทั้งขณะปลดคัลท์ซและใส่คัลท์ซ



รูป 5.5: การทดสอบตัววัดสัญญาณความเร็วมอเตอร์

การทดลอง 3: ระบบควบคุมวงปิดพีไอ

ตั้งสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม 0.05 Hz ขนาด 2-4 โวลต์ ตลอดทั้งการทดลอง

1. ปลดคัลท์ซ์ออก และใช้ตัวควบคุมแบบพี (P control) ต่อจากการทดลอง 2 พยายามปรับค่า K_p จนผลตอบเป็นที่น่าพอใจที่สุด บันทึกค่า K_p ที่ปรับจนได้ และรูปสัญญาณทั้ง 4 สัญญาณ
2. คงค่า K_p ไว้เท่าเดิม ใส่คัลท์ซ์ บันทึกกรุปสัญญาณทั้ง 4 สัญญาณ
3. ปลดคัลท์ซ์ออก เปลี่ยนตัวควบคุมเป็นแบบพีไอ (PI control) ปรับจนค่า K_p และ K_i จนผลตอบเป็นที่น่าพอใจที่สุด บันทึกค่า K_p และ K_i ที่ปรับจนได้ และรูปสัญญาณทั้ง 4 สัญญาณ
4. คงค่า K_p และ K_i ไว้เท่าเดิม ใส่คัลท์ซ์ บันทึกกรุปสัญญาณทั้ง 4 สัญญาณ

สรุปรายการผลการทดลองที่ต้องส่ง

นิสิตเขียนรายงานที่มีหน้าปกที่มี ชื่อการทดลอง รหัสอุปกรณ์ วันที่ทำการทดลอง วันที่ส่งรายงาน ชื่อและรหัสนิสิตในกลุ่ม ภายในเนื้อหารายงานให้แยกหัวข้อตามการทดลอง พร้อมด้วยผลการทดลองตามรายการดังต่อไปนี้ (คะแนนของความสมบูรณ์รายงานจะให้ตามรายการข้างล่าง)

การทดลอง 1: ส่วนกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมและส่วนขยาย

1. กราฟของสัญญาณที่ได้จาก 3 ช่องสัญญาณ โดยให้บันทึกขณะที่มีการกดปุ่มรีเซ็ตด้วย
2. อัตราขยายสัดส่วนที่วัดได้และที่คำนวณได้
3. อัตราขยายอินทิเกรตที่วัดได้และที่คำนวณได้
4. ปุ่มรีเซ็ตของอัตราขยายอินทิเกรตทำงานอย่างไร
5. การอิ่มตัว (saturation) ของส่วนอินทิเกรตคืออะไร และจะมีปุ่มต่อการทำงานของตัวควบคุมอย่างไร

การทดลอง 2: ระบบควบคุมวงเปิดและวงปิด

1. กราฟแรงดัน 2 เส้นของระบบควบคุมวงเปิด ขณะปลดคัลท์ซ์และขณะใส่คัลท์ซ์
2. คำนวณหาอัตราขยายกระแสตรง DC gain ของระบบความเร็วมอเตอร์ ขณะปลดคัลท์ซ์และขณะใส่คัลท์ซ์
3. กราฟแรงดัน 4 เส้นของระบบควบคุมวงปิด ขณะปลดคัลท์ซ์และขณะใส่คัลท์ซ์
4. อภิปรายเกี่ยวกับผลตอบชั่วขณะ (transient response) ของระบบวงเปิดกับระบบวงปิด
5. ค่าผิดพลาดขณะอยู่ตัว (steady-state error) ของทั้งสองกรณีเป็นอย่างไร สัมพันธ์กับค่า K_p และอัตราขยายกระแสตรงอย่างไร

การทดลอง 3: ระบบควบคุมวงปิดพีไอ

1. ค่า K_p ที่ปรับจนได้ กราฟแรงดัน 4 เส้นของระบบควบคุมวงเปิด ขณะปลดคัลท์ซ์และขณะใส่คัลท์ซ์
2. ค่า K_p และ K_i ที่ปรับจนได้ กราฟแรงดัน 4 เส้นของระบบควบคุมวงเปิด ขณะปลดคัลท์ซ์และขณะใส่คัลท์ซ์
3. อภิปรายข้อดีข้อเสียของ PI control เมื่อเปรียบเทียบกับ P control

บทที่ 6

การทดลอง M3: การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ที่มีองค์ประกอบไม่เชิงเส้น

สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์

วัตถุประสงค์

เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบในทางปฏิบัติจากองค์ประกอบไม่เชิงเส้นที่มีต่อการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์

อุปกรณ์ที่ใช้

1. ระบบเซอร์โวมอเตอร์ CE110 servo trainer
2. ตัวควบคุมแบบแอนะล็อก CE120 controller
3. คอมพิวเตอร์และโปรแกรม CE2000 Software

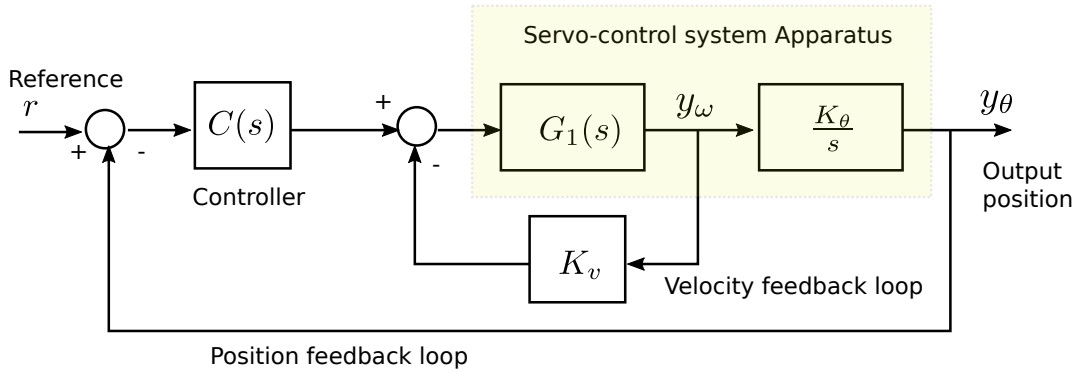
6.1 บทนำ

6.1.1 การออกแบบตัวควบคุมสำหรับการควบคุมตำแหน่งเชิงมุม

พิจารณาแบบจำลองระบบเซอร์โวมอเตอร์ในหัวข้อที่ 2.1.3 ประกอบกับรูปที่ 2.7 เมื่อกำหนดให้

$$G_1(s) = \frac{K_w}{\tau s + 1}$$

คือฟังก์ชันถ่ายโอนจากสัญญาณแรงดันไปยังความเร็วของมอเตอร์ รูปที่ 6.1 แสดงแผนภาพระบบควบคุมป้อนกลับตำแหน่งเชิงมุม ระบบนี้มีวงจรถูกป้อนกลับสองวงจรถ่วงรวมในป้อนกลับความเร็ว y_w ผ่านอัตราขยาย K_v ขณะที่วงจรรวมนอกป้อนกลับตำแหน่งขาออก y_θ วงจรรวมนี้มีบทบาทในการปรับปรุงสมรรถนะของระบบในภาวะชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้จากการพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอน



รูป 6.1: การควบคุมป้อนกลับตำแหน่งเชิงมุม

วงปิดของระบบที่การควบคุมแบบสัดส่วนโดยที่ $C(s) = K_p$

$$\frac{Y_\theta(s)}{r(s)} = \frac{K_p K_\omega K_\theta}{\tau s^2 + (1 + K_v K_\omega)s + K_p K_\omega K_\theta} \quad (6.1)$$

เมื่อเทียบตัวเศษของสมการ (6.1) กับตัวเศษของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองในรูปแบบมาตรฐาน

$$\frac{Y_\theta(s)}{r(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

จะได้ว่า

$$\omega_n^2 = \frac{K_p K_\omega K_\theta}{\tau} \quad \text{และ} \quad 2\zeta\omega_n = \frac{1 + K_v K_\omega}{\tau} \quad (6.2)$$

การเลือกค่า K_p และ K_v อย่างเหมาะสมจะทำให้ได้สมรรถนะที่ต้องการตามที่กำหนดโดยค่า ω_n and ζ สังเกตเห็นว่าเมื่อ $K_v = 0$ (ไม่มีการป้อนกลับความเร็ว) จะไม่สามารถกำหนดค่าตัวประกอบการหน่วง (damping factor) ได้ ซึ่งอาจทำให้ระบบเกิดการแกว่งอย่างมากเมื่ออัตราขยายสัดส่วนเพิ่มขึ้น

6.1.2 องค์ประกอบไม่เชิงเส้น

การแก้ปัญหการควบคุมเซอร์โว (servo-control) มักมีการพิจารณาในระบบที่เป็นเชิงเส้น อย่างไรก็ตาม ระบบเซอร์โวในทางปฏิบัติจะมีองค์ประกอบไม่เชิงเส้นต่างๆ อยู่ด้วย องค์ประกอบไม่เชิงเส้นที่พบบ่อยที่สุดจะรวมอยู่ในระบบเซอร์โวในบล็อกของแบบจำลองขององค์ประกอบไม่เชิงเส้น เราสามารถเชื่อมต่อองค์ประกอบไม่เชิงเส้นต่างๆ เข้ากับกับเซอร์โวมอเตอร์แบบอนุกรมเพื่อศึกษาผลกระทบขององค์ประกอบไม่เชิงเส้นต่างๆ ที่มีต่อสมรรถนะของระบบในทางปฏิบัติ สำหรับการทดลองนี้ เราจะพิจารณาองค์ประกอบไม่เชิงเส้น 2 แบบ คือการอิ่มตัวในวงจรถยาย (amplifier saturation) และระยะคลอนในเกียร์ทด (gearbox backlash) ขอให้ศึกษารายละเอียดจากหัวข้อที่ 2.1.4

6.2 การทดลอง 1: การควบคุมตำแหน่งและผลกระทบของการอิ่มตัวในวงจรถยายสัญญาณ

วิธีทดลอง ในการทดลองต่อไปนี้จะพิจารณาในระบบที่มีองค์ประกอบการอิ่มตัวที่ช่องสัญญาณขาเข้าของมอเตอร์

1. เชื่อมต่ออุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 6.2a (การเชื่อมต่อนี้จะสอดคล้องกับแผนภาพการควบคุมในรูปที่ 6.2b)

2. การติดตั้งอุปกรณ์ CE105 ขึ้นต้น:

- ต่อคัลท์ซ์
- ใส่แผ่นงานโหลดให้เป็น 3 ก้อน
- ปิดประตูด้านหลังให้แน่นหนา
- ตั้งสัญญาณตำแหน่งอ้างอิงให้เป็น 0 องศา
- เปิดสวิตช์องค์ประกอบการอิมตัวแล้วปรับค่า level เป็น 10 โวลต์ และปิดสวิตช์องค์ประกอบไม่เชิงเส้นอื่นๆ ทั้งหมด

3. เปิดโปรแกรม CE2000 แล้วเปิดไฟล์ 'servo_saturation.ict' การเชื่อมต่อในไฟล์แสดงในรูปที่ 6.2c

4. การปรับค่าตัวแปรขึ้นต้นในโปรแกรม CE2000:

- อัตราขยายสัดส่วน $K_p = 5$
- อัตราขยายการป้อนกลับความเร็ว $K_v = 0.02$
- ปรับเครื่องกำหนดสัญญาณให้เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม 0.05 Hz ที่มีค่า offset เป็น 0 โวลต์ ค่า level เป็น 1 โวลต์

5. พล็อตกราฟสัญญาณขับมอเตอร์และสัญญาณตำแหน่งมอเตอร์ที่ได้จากการใช้สัญญาณขาเข้าสี่เหลี่ยมจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ

6. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5 โดยปรับค่า level ของการอิมตัวเป็น 8 โวลต์ 5 โวลต์ และ 3 โวลต์ ให้สังเกตว่าเกิดอะไรขึ้นกับระบบเมื่อปรับค่า level ของการอิมตัวเป็น 1 โวลต์ และวิเคราะห์หว่านเป็นเพราะเหตุใด

7. ปรับค่า level ของการอิมตัวเป็น 4 โวลต์ พล็อตสัญญาณขับมอเตอร์และสัญญาณตำแหน่งมอเตอร์ที่ได้จากการใช้สัญญาณขาเข้าสี่เหลี่ยม 0.05 Hz ที่มี offset เป็น 0 โวลต์ ค่า level เป็น 0.5 โวลต์ 2 โวลต์ และ 5 โวลต์

หมายเหตุ: นิสิตต้องปรับค่าตำแหน่งมอเตอร์ให้มีค่าเริ่มต้น (initial condition) เป็น 0 องศา ก่อนรันโปรแกรมทุกครั้ง

6.3 การทดลอง 2: การควบคุมตำแหน่งและผลกระทบของฮิสเทอรีซิส

Procedure ในการทดลองต่อไปนี้จะพิจารณาในระบบที่มีองค์ประกอบฮิสเทอรีซิสที่ช่องสัญญาณขาออกของมอเตอร์

1. เชื่อมต่ออุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 6.3a (การเชื่อมต่อนี้จะสอดคล้องกับแผนภาพการควบคุมในรูปที่ 6.3b) บล็อกฮิสเทอรีซิสจะถูกเชื่อมต่อระหว่างสัญญาณตำแหน่งเชิงมุมกับตัวควบคุม ซึ่งเป็นการจำลองระยะคลอนในเกียร์ทด
2. ติดตั้งอุปกรณ์ CE105 ขึ้นต้นเหมือนการทดลอง 1 ยกเว้นปิดสวิตช์องค์ประกอบการอิมตัว และเปิดสวิตช์องค์ประกอบฮิสเทอรีซิส โดยปรับค่า level เป็น 0 โวลต์
3. เปิดโปรแกรม CE2000 แล้วเปิดไฟล์ 'servo_hysteresis.ict' การเชื่อมต่อในไฟล์แสดงในรูปที่ 6.3c.
4. ปรับค่าตัวแปรขึ้นต้นในโปรแกรมเหมือนการทดลอง 1 ยกเว้นความถี่ของสัญญาณสี่เหลี่ยมให้ปรับเป็น 0.02 Hz.
5. พล็อตกราฟสัญญาณขับมอเตอร์และสัญญาณตำแหน่งมอเตอร์ที่ได้จากการใช้สัญญาณขาเข้าสี่เหลี่ยมจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ
6. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5 โดยปรับค่า level ของ hysteresis เป็น 1 โวลต์ 3 โวลต์ และ 7 โวลต์

หมายเหตุ: นิสิตต้องปรับค่าตำแหน่งมอเตอร์ให้มีค่าเริ่มต้น (initial condition) เป็น 0 องศา ก่อนรันโปรแกรมทุกครั้ง

สรุปผลการทดลองที่ต้องส่ง

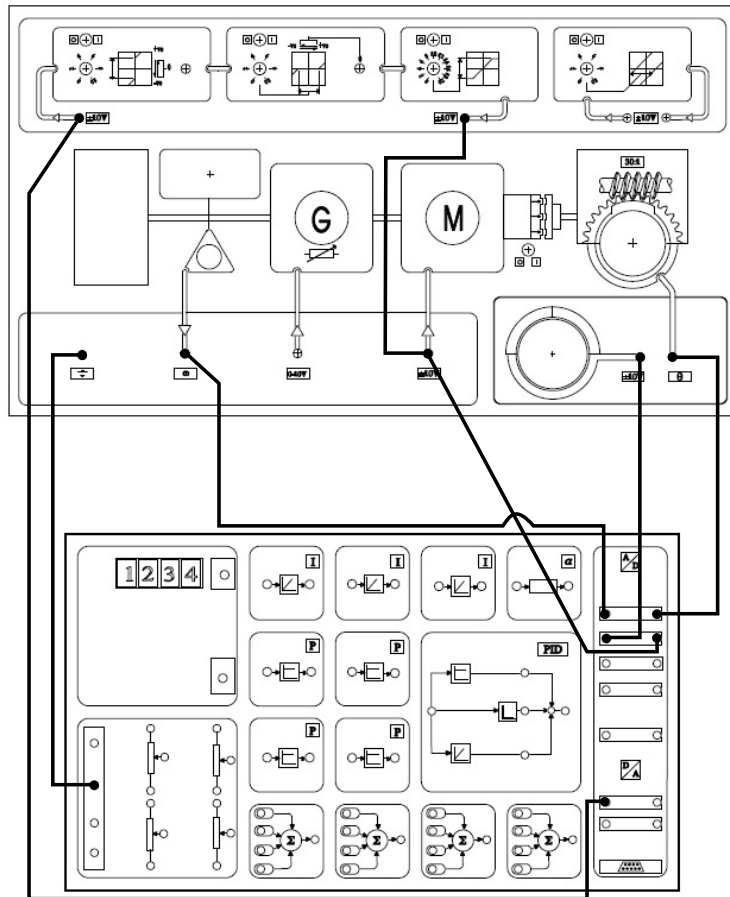
นิสิตเขียนรายงานที่มีหน้าปกที่มีชื่อการทดลอง รหัสอุปกรณ์วันที่ทำการทดลอง วันที่ส่งรายงาน ชื่อและรหัสนิสิตในกลุ่ม ภายในเนื้อหารายงานให้แยกหัวข้อตามการทดลอง พร้อมด้วยผลการทดลองตามรายการดังต่อไปนี้ (คะแนนของความสมบูรณ์รายงานจะให้ตามรายการข้างล่าง)

การทดลอง 1: การควบคุมตำแหน่งและผลกระทบของการอิมิตัวในวงจรถยายสัญญาณ

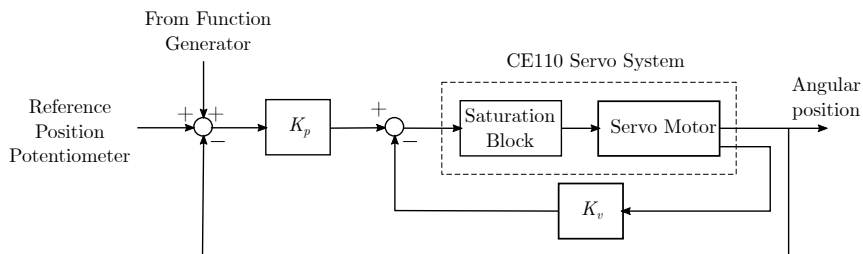
1. กราฟสัญญาณสี่เหลี่ยมขาเข้า สัญญาณขับมอเตอร์ และสัญญาณตำแหน่งมอเตอร์ (ใช้สัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีค่า level 1 โวลต์) ในกรณีที่มีการอิมิตัวมีค่า level เป็น 10 โวลต์ 8 โวลต์ 5 โวลต์ และ 3 โวลต์
2. กราฟสัญญาณสี่เหลี่ยมขาเข้า สัญญาณขับมอเตอร์ และสัญญาณตำแหน่งมอเตอร์ (ปรับค่า level ของการอิมิตัวเป็น 4 โวลต์) ในกรณีที่สัญญาณสี่เหลี่ยมมีค่า level เป็น 0.5 โวลต์ 2 โวลต์ และ 5 โวลต์
3. อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

การทดลอง 2: การควบคุมตำแหน่งและผลกระทบของ hysteresis

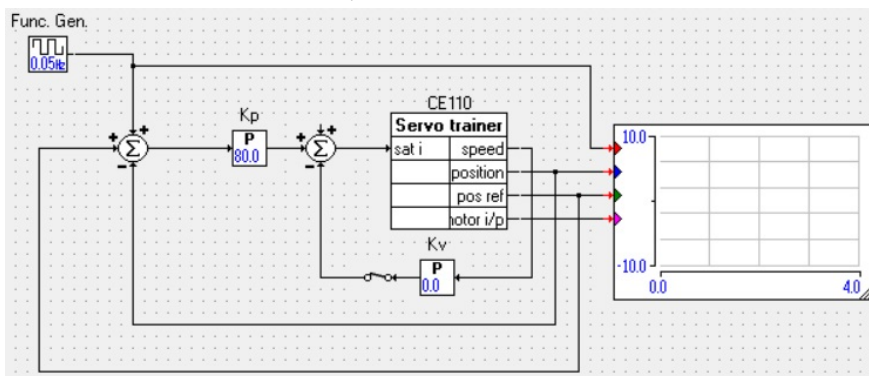
1. กราฟสัญญาณสี่เหลี่ยมขาเข้า สัญญาณขับมอเตอร์ และสัญญาณตำแหน่งมอเตอร์ (ใช้สัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีค่า level 1 โวลต์) ในกรณีที่ฮิสเทอรีซิสมีค่า level เป็น 0 โวลต์ 1 โวลต์ 3 โวลต์ และ 7 โวลต์
2. อภิปรายและสรุปผลการทดลอง



(a) การเชื่อมต่อวงจรสำหรับระบบควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ที่มีองค์ประกอบการอิมิตัว

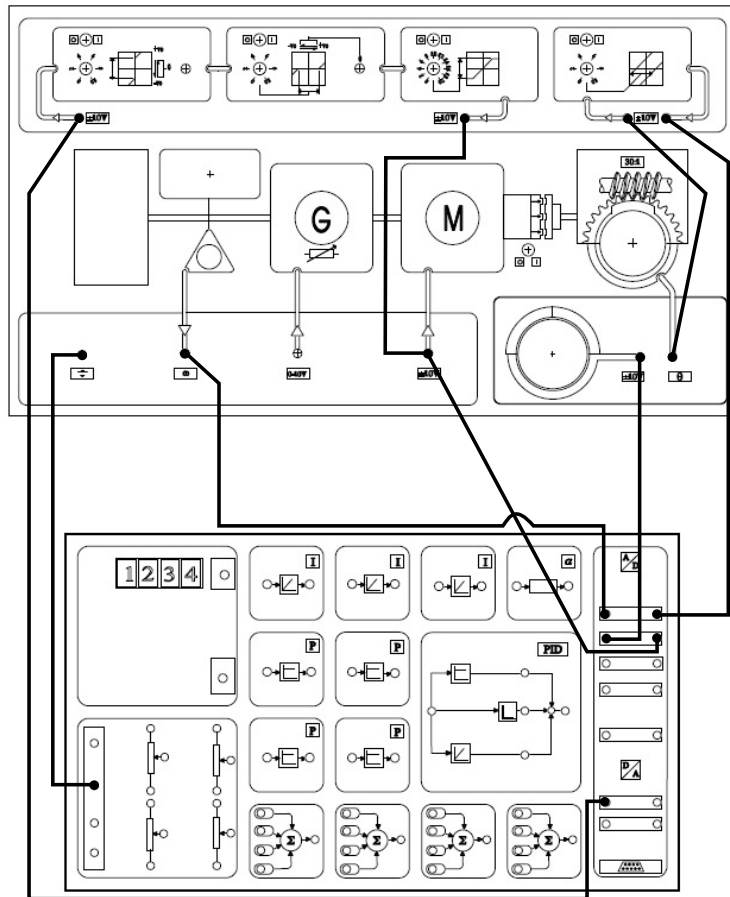


(b) แผนภาพระบบควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ที่มีองค์ประกอบการอิมิตัว

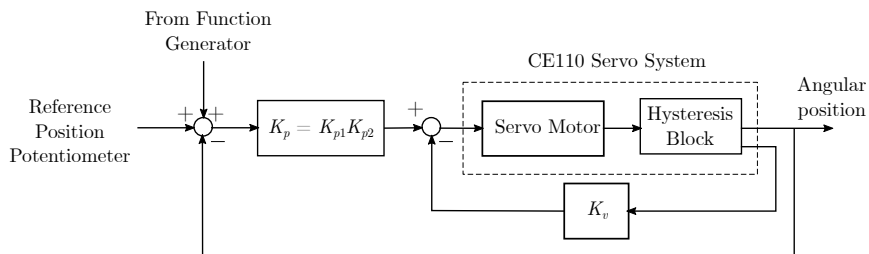


(c) แผนภาพการเชื่อมต่อในไฟล์ 'servo_saturation.ict'

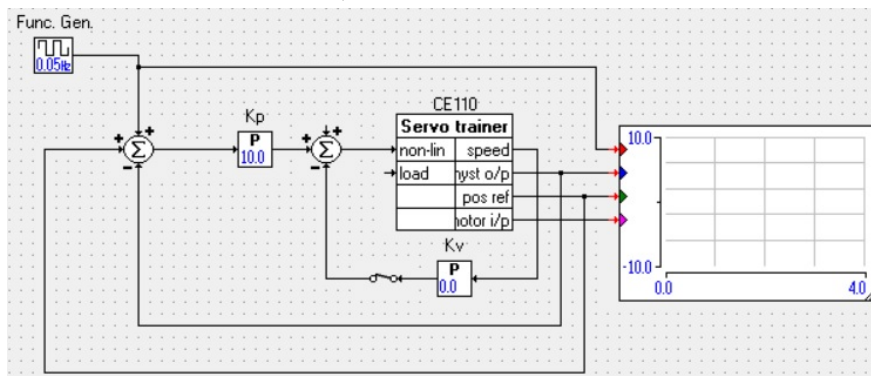
รูป 6.2: แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับระบบควบคุมมอเตอร์ที่มีองค์ประกอบการอิมิตัว



(a) การเชื่อมต่อวงจรสำหรับระบบควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ที่มีองค์ประกอบ hysteresis



(b) แผนภาพระบบควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ที่มีองค์ประกอบ hysteresis



(c) แผนภาพการเชื่อมต่อในไฟล์ 'servo_hysteresis'

รูป 6.3: แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับระบบควบคุมมอเตอร์ที่มีองค์ประกอบ hysteresis

บทที่ 7

การทดลอง P1: การศึกษากระบวนการความร้อน

เดวิด บรรณเจตพงศ์ชัย

วัตถุประสงค์

เพื่อทดลองการใช้งานเครื่องควบคุมกระบวนการความร้อน และ เพื่อทดสอบการตอบสนองของกระบวนการต่อสัญญาณขั้นยัด

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. เพื่ออธิบายลักษณะสมบัติของกระบวนการความร้อนวงรอบเปิด
2. เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนอย่างง่ายของกระบวนการความร้อน

อุปกรณ์ที่ใช้

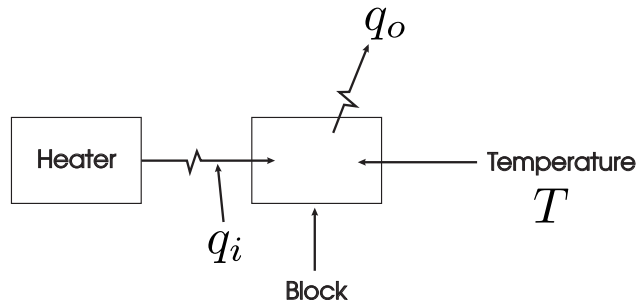
อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลองมีดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์ CE103 thermal process
2. อุปกรณ์ CE120 controller

7.1 บทนำ

ในการทดลองนี้ จะเป็นการทดลองที่เกี่ยวกับพลวัตในการแลกเปลี่ยนความร้อน ตามแผนภาพแสดงดังรูปที่ 7.1 จะได้ความสัมพันธ์ของ ผลต่างระหว่างอัตราความร้อนไหลเข้า (q_i) กับอัตราความร้อนไหลออก (q_o) ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบระบบอันดับหนึ่ง ดังนี้

$$q_i - q_o = C \frac{dT}{dt} \quad (7.1)$$



รูป 7.1: แบบจำลองการถ่ายเทความร้อน

เมื่อ T คืออุณหภูมิภายในระบบ และ C คือค่าความจุความร้อนภายในระบบ สามารถหาได้จาก $C = mc_c$ เมื่อ c_c คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของระบบ

เมื่อมีการรบกวนเล็กน้อยภายในอุปกรณ์ CE103 เราจึงสมมติให้ตัวทำความร้อนจ่ายพลังงานความร้อน โดยมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับแรงดัน กล่าวคือ

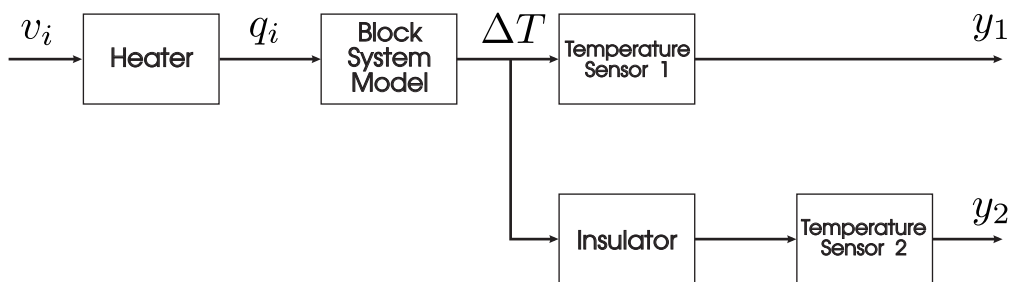
$$q_i = k_i v_i \tag{7.2}$$

เมื่อ k_i เป็นค่าคงที่ และ v_i คือสัญญาณแรงดันที่จ่ายให้กับตัวทำความร้อน หน่วยเป็นโวลต์ สำหรับ q_o จะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของผลต่างของอุณหภูมิภายในระบบ และอุณหภูมิห้องดังนี้

$$q_o = hA\Delta T \tag{7.3}$$

เมื่อ h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน มีหน่วยเป็น $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{C}^\circ$ ในขณะที่ A คือพื้นที่ผิวของระบบที่ความร้อนสามารถไหลออกไปได้ (m^2) และ $\Delta T = T - T_a$ คืออุณหภูมิผลต่างระหว่างอุณหภูมิในระบบ (T) และอุณหภูมิภายในห้อง (T_a) ในการทดลองนี้ กำหนดให้พดลมทำงานที่ความเร็วคงที่ จะได้ว่า h เป็นค่าคงตัว

แผนภาพลักษณะสมบัติของตัวทำความร้อนและอุณหภูมิภายใน CE103 แสดงในรูปที่ 7.2



รูป 7.2: แผนภาพลักษณะสมบัติของตัวทำความร้อนและอุณหภูมิภายในชุดการทดลอง

จะเห็นได้ว่า แบบจำลองอย่างง่ายของกระบวนการความร้อนเป็นสมการอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับหนึ่ง โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนจาก q_i ไปยัง ΔT คือ

$$\frac{\Delta T(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{Cs + hA} = \frac{(1/hA)}{(C/hA)s + 1} \triangleq \frac{R}{RCs + 1} \tag{7.4}$$

โดยที่ $R = 1/hA$ คือค่าความต้านทานความร้อน จากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ จะได้ว่า สัญญาณอุณหภูมิ T_1 สัมพันธ์กับสัญญาณแรงดันที่จ่ายเข้าตัวทำความร้อน ดังนี้

$$T_1 = k_1 k_i \frac{R}{RCs + 1} V(s) \triangleq \frac{K_1}{\tau_1 s + 1} V_i(s) \tag{7.5}$$

เมื่อ k_1 เป็นค่าคงตัวของเซนเซอร์อุณหภูมิ ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอุณหภูมิของระบบ

ในขณะที่เซนเซอร์อุณหภูมิของ T_2 มีอุณหภูมิความร้อนมากขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิที่ตำแหน่งดังกล่าวจึงมีลักษณะเหมือนกับ การที่มีตัวกรองอันดับหนึ่งมาผ่าน T_1 อีกที จึงสรุปได้ว่า T_2 จะสัมพันธ์กับ v_i ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสอง

$$T_2 = \frac{K_2}{(\tau_2 s + 1)(\tau_1 s + 1)} V_i(s) \quad (7.6)$$

หมายเหตุ: จะเห็นว่า ตัวแปรอุณหภูมิ T_1, T_2 ในสมการทั้งสอง นั้นคือสัญญาณแรงดันที่แปรไปตาม ΔT (ความต่างระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับอุณหภูมิของจุดทำงาน) ในอุปกรณ์ CE103 นั้น สัญญาณแรงดันของอุณหภูมิที่วัดได้จากเซนเซอร์จะสะท้อนค่าอุณหภูมิจริง ดังนั้น เมื่อทดลองวิเคราะห์ผลตามทฤษฎี เราจึงควรใช้ค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเซนเซอร์แล้วลบออกจากค่าอุณหภูมิที่จุดทำงานก่อน

7.2 สิ่งที่ต้องเตรียมมา

1. นิสิตทบทวนเนื้อหากระบวนการความร้อนในหัวข้อที่ 2.2
2. นิสิตดูวิดีโอการใช้อุปกรณ์เบื้องต้นจาก web resource ใน CourseVille

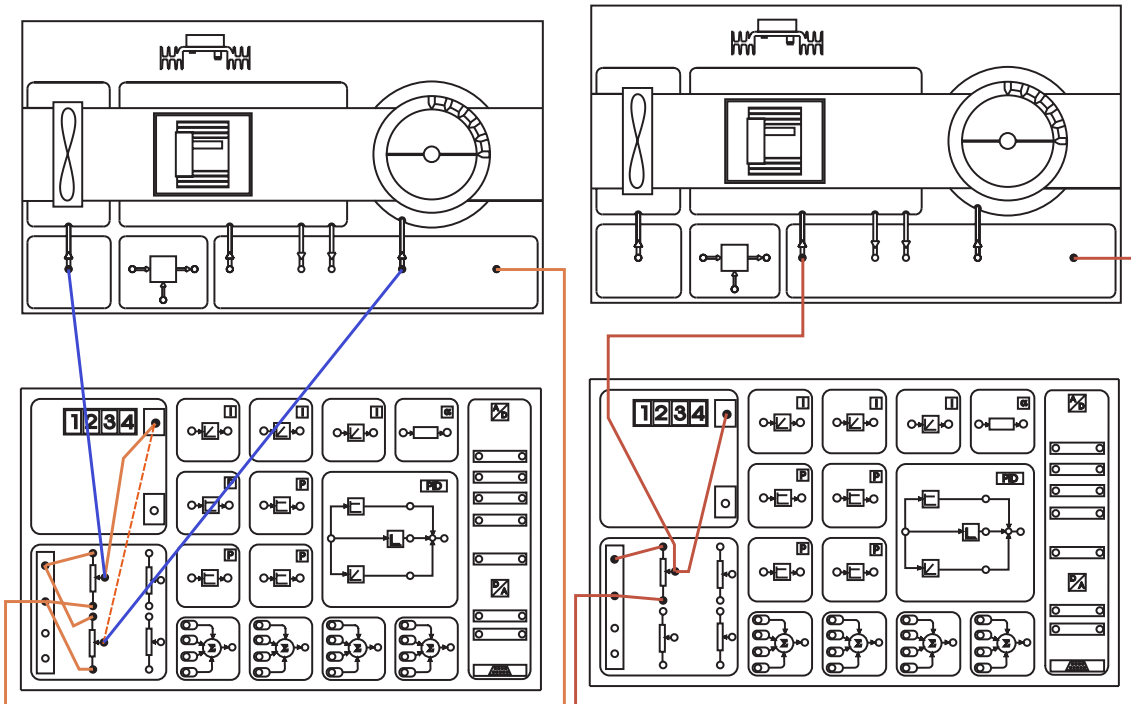
7.3 วิธีทดลอง

การเชื่อมต่ออุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 7.3b คือการใช้สัญญาณแรงดันจากอุปกรณ์ CE120 controller เพื่อนำมาเป็น heat input ให้ระบบ หรือการเชื่อมต่ออุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 7.3a คือการใช้สัญญาณแรงดันจากอุปกรณ์ CE120 controller เพื่อนำมาเป็นสัญญาณปรับความเร็วพัดลม และปรับขนาดของชัตเตอร์ ในการต่อลักษณะนี้ สัญญาณเข้าจะเป็นไฟตรงที่ขนาดปรับได้ และนิสิตสามารถสังเกตสัญญาณแรงดันที่สะท้อนค่าอุณหภูมิได้จากช่อง T1 หรือ T2 จากการใช้มิเตอร์

ในการทดลองต่อไปนี้จะศึกษาผลต่ออุณหภูมิทั้งในภาวะชั่วคราวและภาวะอยู่ตัว จึงมีการต้องบันทึกข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์ การต่ออุปกรณ์จึงจะใช้สัญญาณเข้าที่เป็น heat input และสัญญาณปรับชัตเตอร์ มาจากคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม CE2000 ส่วนสัญญาณปรับความเร็วพัดลมนั้น จะต่อมาจาก CE120 controller

การทดลอง 1: ลักษณะสมบัติของระบบวงเปิด

1. เชื่อมต่ออุปกรณ์ดังรูป 7.4 และใช้โปรแกรม CE2000 เพื่อเปิดไฟล์ thermal_labp1.ict
2. บันทึกค่าที่ของ T_1, T_2 เป็นตัวแทนของอุณหภูมิในห้อง
3. ปรับแรงดันความเร็วพัดลม ไปที่ 10 V
4. ปรับค่าแรงดันเข้า (heat input) ใน circuit file ให้ได้ค่า 1 V สังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว
5. ปรับค่าแรงดันเข้า (heat input) ใน circuit file ให้ได้ค่า 2 V สังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว บันทึกค่าแรงดันที่วัด T_1, T_2 จากโปรแกรม CE2000 โดยตั้งชื่อไฟล์



(a) การทดสอบลักษณะสมบัติของพัลลวมและตำแหน่งซีตเตอร์ (b) การทดสอบลักษณะสมบัติเบื้องต้นของตัวทำความร้อน

data_thermal_labp1_setpoint.txt

- ปรับค่าแรงดันเข้า (heat input) ให้เหลือ 0 V จากนั้นเปิดพัลลวมเพื่อให้อุณหภูมิภายในระบบกลับมาเป็นอุณหภูมิห้อง (ค่าที่วัดได้จาก T_1 ควรจะมีค่าประมาณ 2.6-2.7 V) ก่อนที่จะทำการทดลองในขั้นตอนถัดไป
- อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

การทดลอง 2: สมบัติระบบเมื่อปรับตำแหน่งซีตเตอร์

- บันทึกค่าอุณหภูมิที่วัดได้จาก T_1 เป็นตัวแทนของอุณหภูมิห้อง
- เชื่อมต่ออุปกรณ์ดังรูป 7.4 และใช้โปรแกรม CE2000 เพื่อเปิดไฟล์ thermal_labp1.ict จากนั้นให้ต่อสัญญาณแรงดันเพื่อปรับความเร็วพัลลวมจากอุปกรณ์ CE120 เข้าไปยัง CE103
- สำหรับค่าสัญญาณเข้าต่างๆ ให้ปรับค่าแรงดันดังต่อไปนี้ :
 - แรงดันความเร็วพัลลวม : ตั้งค่าไว้ที่ 10 V
 - แรงดัน heat input V_{input} : ตั้งค่าไว้ที่ 1 V
 - แรงดันปรับตำแหน่งซีตเตอร์ : ตั้งค่าไว้ที่ 0 V
- ปรับแรงดันขาเข้า V_{input} ไปที่ 1 V จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว บันทึกค่า T_1

5. ปรับแรงดันชัตเตอร์ไปที่ 5 V จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว บันทึกค่าของ T_1
6. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5 โดยเปลี่ยนแรงดันชัตเตอร์ ไปที่ 10 V บันทึกค่าของ T_1 จากการเปลี่ยนแรงดันชัตเตอร์ทั้ง 3 ระดับนั้น ด้วยโปรแกรม CE2000 และตั้งชื่อไฟล์

data_thermal_labp1_shutter.txt

7. ปรับแรงดันขาเข้า V_{input} ลงมาที่ 0 V เพื่อให้อุณหภูมิกลับมาเป็นอุณหภูมิห้อง
8. อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

การทดลอง 3: การเก็บข้อมูลเพื่อหาเอกลักษณ์ระบบ

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเก็บข้อมูลสัญญาณเข้า (heat input) และสัญญาณออกอันได้แก่ T_1, T_2 เพื่อใช้ในการทดลองหาเอกลักษณ์ของระบบ S2 ให้นำนิตทำตามขั้นตอนดังนี้

1. ใช้สัญญาณแรงดันเพื่อปรับพัลลวมจาก controller (CE120) ปรับสัญญาณแรงดันพัลลวมที่ 10 V
2. เปิดไฟล์ thermal_iden.ict ในโปรแกรม CE2000 ปรับสัญญาณเข้า (heat input) ให้เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมมีคาบ 500 วินาที มี offset เท่ากับ 0.5 V และระดับ (level) เท่ากับ 0.5 V (นั่นคือเราจะได้สัญญาณสี่เหลี่ยมมีค่าตั้งแต่ 0 V ถึง 1 V)
3. ต่อสัญญาณเข้าที่สร้างได้ในคอมพิวเตอร์ผ่าน D/A เพื่อใช้เป็นสัญญาณเข้าที่ระบบ CE103 ที่ช่อง heat input
4. ต่อสัญญาณออก T_1, T_2 จาก CE103 เข้าช่อง A/D
5. ในไฟล์ thermal_iden.ict ส่วนของ Recorder ให้กำหนดมีการแสดงกราฟ T_1, T_2 และสัญญาณเข้า (Ref)
6. ก่อนเริ่มบันทึกสัญญาณให้อ่านค่า T_1, T_2 ว่าควรเริ่มอยู่ที่อุณหภูมิห้อง (นั่นคือควรอ่านค่าแรงดันได้ประมาณ 2.5-2.6V จากมิเตอร์วัด) จากนั้นให้สั่งรันในโปรแกรม เพื่อบันทึกผลตอบ T_1, T_2 เป็นเวลา 3 คาบ ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 25 นาที
7. ในไฟล์ thermal_iden.ict ให้ export data ชื่อว่า data_thermal_pulse.txt

สรุปรายการผลการทดลองที่ต้องส่ง

นิสิตเขียนรายงานที่มีหน้าปกที่มี ชื่อการทดลอง รหัสอุปกรณ์ วันที่ทำการทดลอง วันที่ส่งรายงาน ชื่อและรหัสนิสิตในกลุ่ม ภายในเนื้อหากรายงานให้แยกหัวข้อตามการทดลอง พร้อมด้วยผลการทดลองตามรายการดังต่อไปนี้ (คะแนนของความสมบูรณ์รายงาน จะให้ตามรายการข้างล่าง)

ไฟล์ผลการทดลอง

data_thermal_labp1_setpoint.txt

data_thermal_labp1_shutter.txt

data_thermal_pulse.txt

ส่งไฟล์แรก เพื่อสรุปผลการทดลอง 1 และ 2 ส่วนไฟล์ที่สามสำหรับการทดลองหาเอกลักษณ์ระบบในแลบ S2 ไฟล์ข้อมูล

data_thermal_pulse.txt

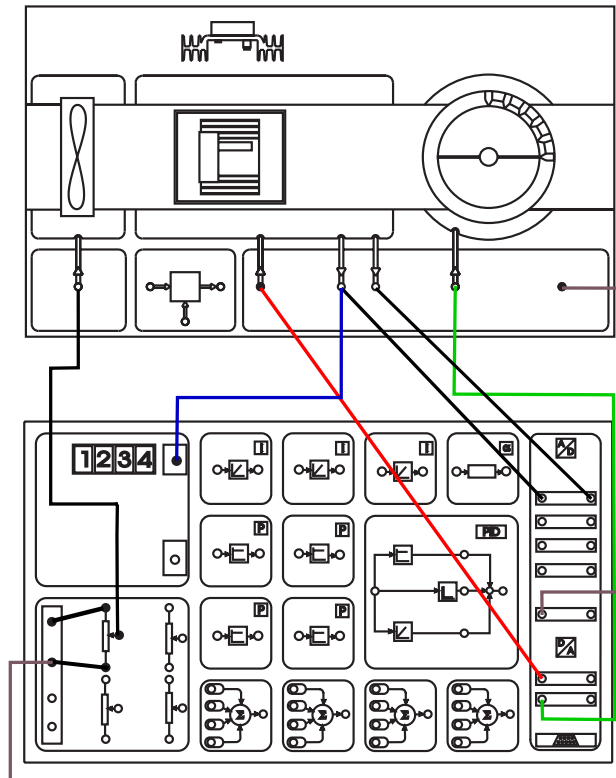
ประกอบไปด้วย 4 คอลัมน์ อันได้แก่ เวลา, T_1 , T_2 , และสัญญาณเข้า (Ref) ข้อมูลนี้ควรมีระยะเวลาเก็บได้ 3 คาบ ประมาณ 1500 วินาที หรือประมาณ 25 นาที

การทดลอง 1: ลักษณะสมบัติของระบบวงเปิด

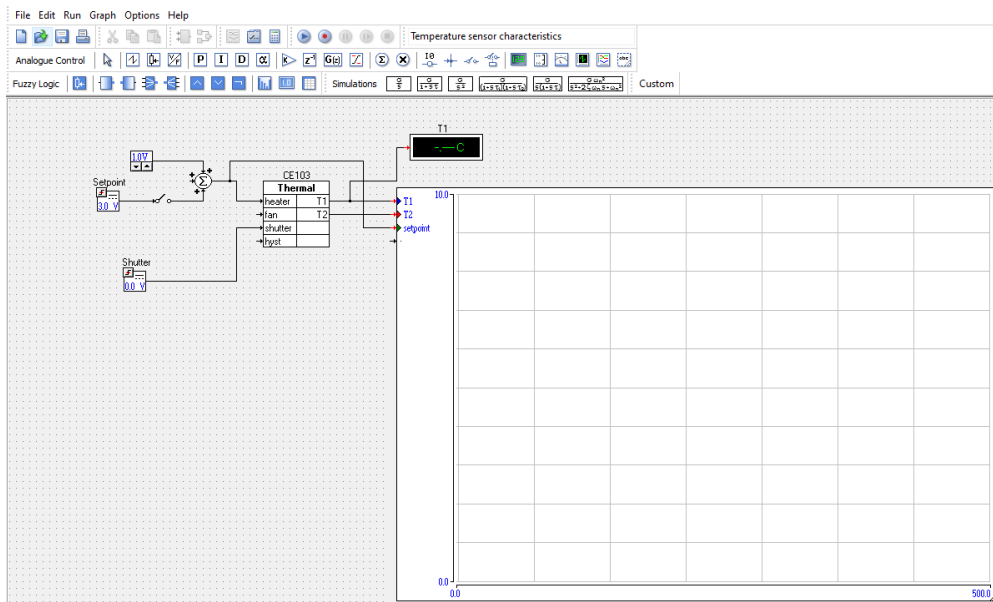
1. ตารางค่าอัตราขยาย เวลาประวิง เวลาคงตัว เมื่อปรับค่าสัญญาณขาเข้า
2. กราฟสัญญาณขาเข้า และสัญญาณอุณหภูมิ T_1
3. อภิปรายผลการทดลองลักษณะสมบัติของกระบวนการกับจุดทำงาน (แรงดันขาเข้า)

การทดลอง 2: สมบัติระบบเมื่อปรับตำแหน่งชัตเตอร์

1. ตารางค่าอัตราขยาย เวลาประวิง เวลาคงตัว เมื่อปรับตำแหน่งชัตเตอร์
2. กราฟสัญญาณขาเข้า แรงดันชัตเตอร์ และสัญญาณอุณหภูมิ T_1
3. อภิปรายผลการทดลองลักษณะสมบัติของกระบวนการกับตำแหน่งชัตเตอร์ (แรงดันชัตเตอร์)



(a) การต่ออุปกรณ์ CE103 ร่วมกับ CE120



(b) Connection diagram of thermal_lab1.ict

รูป 7.4: การทดสอบลักษณะสมบัติเบื้องต้นของตัวทำความร้อนเมื่อใช้ร่วมกับโปรแกรม CE2000

บทที่ 8

การทดลอง P2: การควบคุมแบบพีไอดีของกระบวนการความร้อน

เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย

วัตถุประสงค์

เพื่อออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี และประยุกต์ใช้กับชุดการทดลองกระบวนการความร้อน เพื่อควบคุมอุณหภูมิขาออก ให้ตามรอยสัญญาณอ้างอิงและกำจัดการรบกวน

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. ออกแบบตัวควบคุมพีไอดี กับชุดการทดลองกระบวนการความร้อน และวิเคราะห์สมรรถนะของระบบควบคุมวงปิด
2. เปรียบเทียบขีดความสามารถและข้อจำกัดของการควบคุมแบบพีไอกับการควบคุมแบบพีไอ

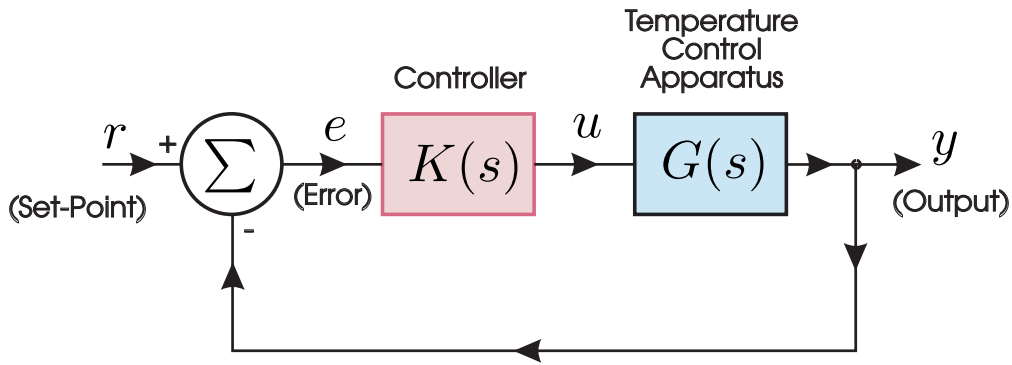
อุปกรณ์ที่ใช้

1. CE103 thermal process
2. CE120 controller

8.1 บทนำ

8.1.1 การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control)

รูปที่ 8.1 แสดงถึงแผนภาพการควบคุมของกระบวนการความร้อน โดยที่แรงดันอ้างอิง (setpoint) คือแรงดันขาเข้าที่กำหนดอุณหภูมิของระบบที่ต้องการ แรงดันป้อนกลับในแผนภาพคือ ค่าแรงดันขาออกในหน่วยโวลต์ ของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ T_1, T_2 โดยระบบควบคุมแบบป้อนกลับดังกล่าว คำนวณผลต่างระหว่างแรงดันอ้างอิง กับแรงดันป้อนกลับ ได้เป็น แรงดันคลาดเคลื่อน



รูป 8.1: แผนภาพการควบคุมของกระบวนการความร้อน

และส่งต่อผ่านตัวควบคุมเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมต่อไป

ตัวควบคุมในการทดลองนี้ จะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ด้วยวิธีออกแบบวงเปิด กล่าวคือ ใช้ข้อมูลของผลตอบจากสัญญาณขั้นบันไดที่ประมาณเป็นระบบอันดับหนึ่ง มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นดังนี้

$$\frac{T_1(s)}{v_i(s)} = \frac{K e^{-sL}}{\tau s + 1}$$

สังเกตเห็นว่า ฟังก์ชันถ่ายโอนนี้ เป็นมีเวลาประวิง (time delay) คือ L วินาที และมีค่าคงตัวเวลา คือ τ วินาที การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี คือการวิเคราะห์หาความชันของกราฟสัญญาณออก R มีค่าเท่ากับ K/τ และเวลาประวิง L จากนั้น นำค่าพารามิเตอร์ของระบบวงเปิด เพื่อไปคำนวณหาค่าของ K_p, K_i และ K_d การปรับจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี มีหลายวิธี ในการทดลองนี้จะใช้วิธีของ Ziegler-Nichols ตามตารางดังนี้

	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{1}{RL}$	-	-
PI	$\frac{0.9}{RL}$	$\frac{L}{0.3}$	-
PID	$\frac{1.2}{RL}$	$2L$	$0.5L$

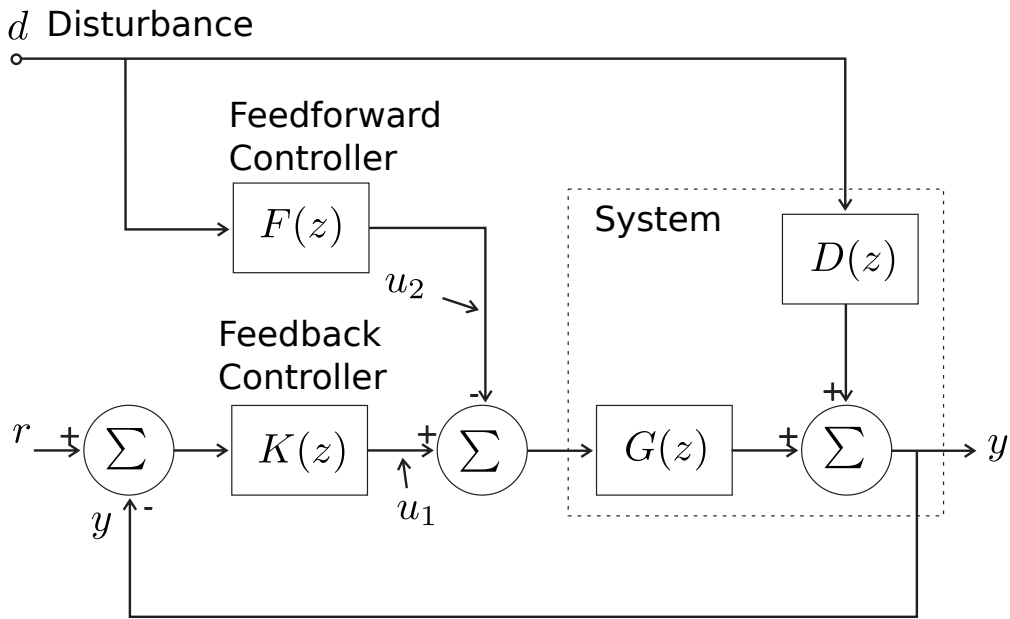
8.1.2 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feedforward control)

การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า เป็นการควบคุมเพื่อใช้ควบคู่ไปกับการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยส่วนของการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า จะช่วยลดผลกระทบของผลตอบสนองที่เกิดจากสัญญาณรบกวนได้ดีกว่า ระบบควบคุมแบบป้อนกลับเพียงอย่างเดียว

จากรูปที่ 8.2 แสดงการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าของกระบวนการความร้อน โดยที่ สัญญาณรบกวน d คือ แร่งดันปรับช่องลม (shutter)

8.2 สิ่งที่ต้องเตรียมมา

1. นิสิตทบทวนเนื้อหากระบวนการความร้อนในหัวข้อที่ 2.2



รูป 8.2: การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าของกระบวนการความร้อน

2. นิสิตทบทวนเนื้อหาตัวควบคุมพีไอดี วิธีวงเปิด
3. นิสิตดูวิดีโอการใช้อุปกรณ์เบื้องต้นจาก web resource ใน CourseVile
4. ข้อมูลสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออกจากการทดลอง P1

data_thermal_labp1_setpoint.txt

8.3 วิธีทดลอง

ก่อนทำการทดลอง นิสิตหาค่า K_p และ K_i โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองที่ 1 กล่าวคือ วิเคราะห์สมบัติของกระบวนการ ด้วยผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันได เมื่อ setpoint เปลี่ยนจาก 1 V เป็น 2 V ให้นิสิตพล็อตกราฟและหาความชันของกราฟ สัญญาณออก R และเวลาประวิง L จากนั้น คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ปรับจูนแบบพีและแบบพีไอ ด้วยวิธี Ziegler-Nichols แบบวงเปิด บันทึกค่าที่คำนวณได้

- P-Control: $K_p =$
- PI-Control: $K_p = \dots, T_i = \dots, K_i = \dots$

หมายเหตุ ในการทดลองที่ 1 และ 2 ให้นิสิตทดลองการควบคุมแบบพี (P-Control) และการควบคุมแบบพีไอ (PI-Control)

8.3.1 การทดลอง 1: การตามรอยสัญญาณอ้างอิง

1. เชื่อมต่ออุปกรณ์ดังรูป และใช้โปรแกรม CE2000 เพื่อเปิดไฟล์ thermal_labp2.ict
2. กำหนดแรงดันเพื่อปรับความเร็วพัดลมเท่ากับ 10 V

3. ตั้งค่าใน circuit file ดังต่อไปนี้

- ปรับค่าแรงดันอ้างอิง (setpoint) ใน circuit file เท่ากับ 4 V
- กำหนดแรงดันเพื่อปรับตำแหน่งชัตเตอร์ เท่ากับ 0 V
- ทดลองการควบคุมแบบพี ตั้งค่า K_p ตามที่ได้คำนวณล่วงหน้า

4. รันโปรแกรม จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล บันทึกค่าแรงดันที่วัด T_1

5. ปรับค่าแรงดันอ้างอิง (setpoint) ใน circuit file ให้ได้ 5 V จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล บันทึกค่าแรงดันที่วัด T_1 ด้วยโปรแกรม CE2000

6. บันทึกข้อมูล โดยตั้งชื่อไฟล์เป็น

data_thermal_labp2_setpoint_p.txt

7. ทดลองการควบคุมแบบพีไอ ตั้งค่า K_p และ K_i ตามที่ได้คำนวณล่วงหน้า

8. รันโปรแกรม จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล บันทึกค่าแรงดันที่วัด T_1

9. ปรับค่าแรงดันอ้างอิง (setpoint) ใน circuit file ให้ได้ 5 V จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล บันทึกค่าแรงดันที่วัด T_1 ด้วยโปรแกรม CE2000

10. บันทึกข้อมูล และ Integral Block output ด้วย โดยตั้งชื่อไฟล์เป็น

data_thermal_labp2_setpoint_pi.txt

11. อภิปรายผลการทดลอง และสรุปผล

8.3.2 การทดลอง 2: การกำจัดสัญญาณรบกวน

1. เชื่อมต่ออุปกรณ์ดังรูป และใช้โปรแกรม CE2000 เพื่อเปิดไฟล์ thermal_labp2.ict

2. กำหนดแรงดันเพื่อปรับความเร็วพัดลมเท่ากับ 10 V

3. ตั้งค่าใน circuit file ดังต่อไปนี้

- ปรับค่าแรงดันขาเข้า (setpoint) ใน circuit file ให้ได้ 5V
- กำหนดแรงดันเพื่อปรับตำแหน่งชัตเตอร์เป็น 0 V
- ทดลองการควบคุมแบบพี ตั้งค่า K_p ตามที่ได้คำนวณล่วงหน้า

4. รันโปรแกรม จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล บันทึกค่าแรงดันที่วัด T_1

5. ปรับแรงดันของตำแหน่งชัตเตอร์ ใน circuit file เป็น 10V จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล บันทึกแรงดันที่วัด T_1 และแรงดันของ controller output ด้วยโปรแกรม CE2000 ตั้งชื่อไฟล์เป็น

data_thermal_labp2_shutter_p.txt

6. ทดลองการควบคุมแบบพีไอ ตั้งค่า K_p และ K_i ตามที่ได้คำนวณล่วงหน้า
7. รันโปรแกรม และสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล บันทึกแรงดันที่วัด T_1 และแรงดันของ controller output
8. ปรับค่าแรงดันปรับตำแหน่งซีตเตอร์ ใน circuit file เป็น 10 V จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล บันทึกค่าแรงดันที่วัด T_1 และแรงดันของ controller output ด้วยโปรแกรม CE2000 ตั้งชื่อไฟล์เป็น

data_thermal_labp2_shutter_pi.txt

9. อภิปรายผลการทดลอง และสรุปผล

8.3.3 การทดลอง 3: การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

1. เชื่อมต่ออุปกรณ์ดังรูป และใช้โปรแกรม CE2000 เพื่อเปิดไฟล์ thermal_labp2_ffw.ict
2. กำหนดแรงดันเพื่อปรับความเร็วพัดลมเท่ากับ 10 V
3. ตั้งค่าใน circuit file ดังต่อไปนี้
 - ปรับค่าแรงดันอ้างอิง (setpoint) ใน circuit file เท่ากับ 5 V
 - กำหนดแรงดันเพื่อปรับตำแหน่งซีตเตอร์ เท่ากับ 0 V
 - ตั้งค่า K_p และ K_i ตามที่ได้คำนวณล่วงหน้า
 - ปรับค่า k_f เท่ากับ 0.1
4. รันโปรแกรม จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล บันทึกค่าแรงดันที่วัด T_1 และแรงดันของ controller output
5. ปรับแรงดันของตำแหน่งซีตเตอร์ ใน circuit file เป็น 10 V จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล บันทึกค่าแรงดันที่วัด T_1 และแรงดันของ controller output ด้วยโปรแกรม CE2000 ตั้งชื่อไฟล์

data_thermal_labp2_ffw_kf0p1.txt

6. ปรับค่า $K_f = 0.4$ แล้วทดลองซ้ำอีกครั้ง
7. บันทึกข้อมูล ตั้งชื่อไฟล์

data_thermal_labp2_ffw_kf0p4.txt

8. อภิปรายผลการทดลอง และสรุปผล

สรุปรายการผลการทดลองที่ต้องส่ง

นิสิตเขียนรายงานที่มีหน้าปกที่มี ชื่อการทดลอง รหัสอุปกรณ์ วันที่ทำการทดลอง วันที่ส่งรายงาน ชื่อและรหัสนิสิตในกลุ่ม ภายในเนื้อหาารายงานให้แยกหัวข้อตามการทดลอง พร้อมด้วยผลการทดลองตามรายการดังต่อไปนี้ (คะแนนของความสมบูรณ์รายงาน จะให้ตามรายการข้างล่าง)

การทดลอง 1: การตามรอยสัญญาณอ้างอิง

1. ตารางเปรียบเทียบสมรรถนะ t_r, t_s, M_p, e_{ss} ของผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได เมื่อใช้การควบคุมแบบพี และแบบพีไอ
2. กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได และแรงดันควบคุมเมื่อใช้การควบคุมแบบพี และการควบคุมแบบพีไอ
3. อภิปรายผลลัพธ์การตามรอยสัญญาณอ้างอิง เมื่อใช้การควบคุมแบบพีและแบบพีไอ

การทดลอง 2: การกำจัดสัญญาณรบกวน

1. ตารางเปรียบเทียบสมรรถนะ t_r, t_s, M_p, e_{ss} ของผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนตำแหน่งชุดเตอร์ เมื่อใช้การควบคุมแบบพี และแบบพีไอ
2. กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนตำแหน่งชุดเตอร์ และแรงดันควบคุมเมื่อใช้การควบคุมแบบพี และการควบคุมแบบพีไอ
3. อภิปรายผลลัพธ์การกำจัดสัญญาณอ้างอิง เมื่อใช้การควบคุมแบบพีและแบบพีไอ

การทดลอง 3: การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

1. ตารางเปรียบเทียบสมรรถนะ t_r, t_s, M_p, e_{ss} ของผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนตำแหน่งชุดเตอร์ เมื่อใช้การควบคุมแบบพีไอ ร่วมกับการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า
2. กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนตำแหน่งชุดเตอร์ และแรงดันควบคุมเมื่อใช้การควบคุมแบบพีไอ ร่วมกับการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า $K_f = 0.1, 0.4$
3. อภิปรายผลลัพธ์การกำจัดสัญญาณอ้างอิง เมื่อใช้การควบคุมแบบพีไอ ร่วมกับการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

บทที่ 9

การทดลอง T1: การควบคุมระดับของเหลวในถังน้ำ

สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน อินทิกรัล และประยุกต์ใช้กับการควบคุมระดับของเหลวในถังน้ำ
2. เพื่อวัดค่าผลตอบจากสัญญาณขั้นของระบบควบคุมระดับของเหลวในถังน้ำแบบวงเปิด และนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบสัดส่วน อินทิกรัล โดยใช้วิธีการปรับแต่งตัวควบคุมแบบวงเปิด (reaction curve method)

อุปกรณ์ที่ใช้

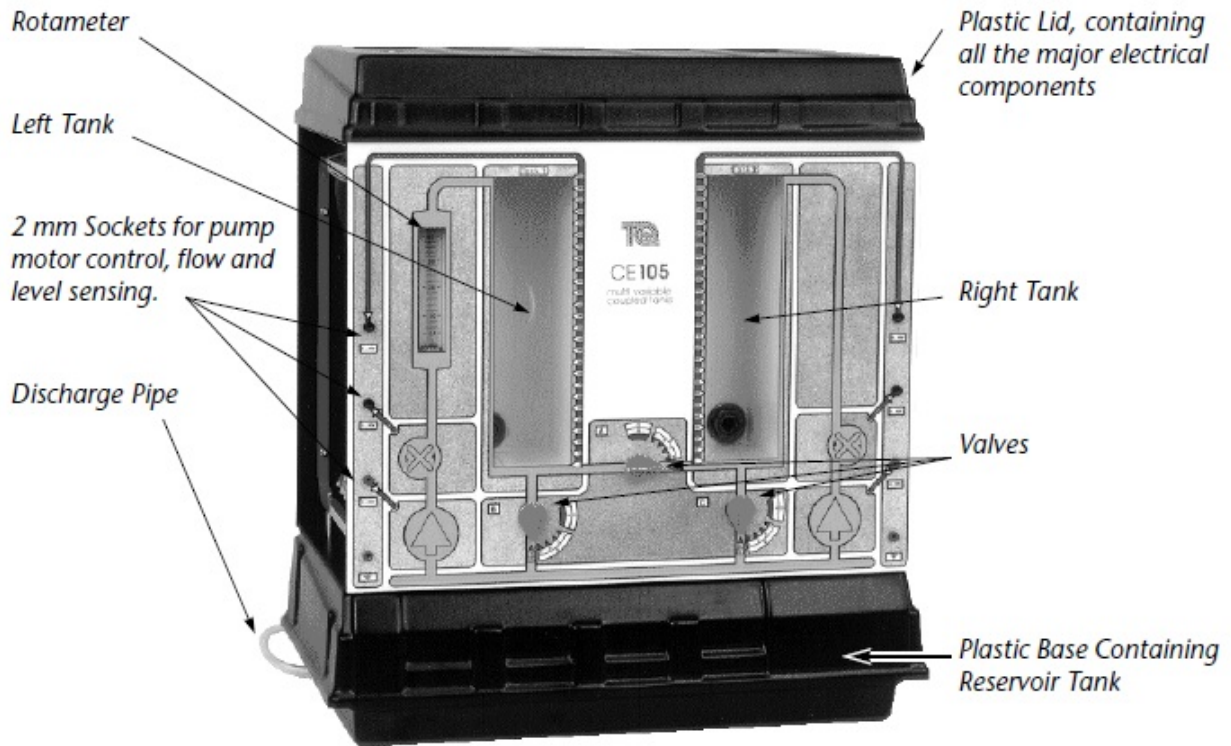
1. ระบบเซอร์โวมอเตอร์ CE110 servo trainer
2. ตัวควบคุมแบบแอนะล็อก CE120 controller
3. คอมพิวเตอร์และโปรแกรม CE2000 software

9.1 บทนำ

ดูรายละเอียดของอุปกรณ์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทที่ 2.3

9.2 ข้อปฏิบัติในการใช้อุปกรณ์

1. ตรวจสอบและเติมน้ำที่ล้นออกจากถังเก็บน้ำให้แห้ง
2. ตรวจสอบระดับน้ำในถังเก็บน้ำ
3. ตรวจสอบว่ามีการต่อแหล่งจ่ายไฟอย่างถูกต้องและปลอดภัยหรือไม่



รูป 9.1: CE105 General Layout

4. ต่ออุปกรณ์ CE105 เข้ากับตัวควบคุม (แนะนำให้ใช้อุปกรณ์ TecEquipment CE120)
5. เปิดสวิตช์ของอุปกรณ์ CE105 ที่อยู่บริเวณใต้ฝาครอบ

ข้อควรระวัง

อย่าใช้อุปกรณ์ในขณะที่ถังเก็บน้ำมีระดับน้ำไม่เหมาะสม เพราะจะทำให้เครื่องสูบน้ำเสียหาย

คำเตือน

ตัดการจ่ายไฟให้อุปกรณ์ CE105 ทันทีหากมีน้ำรั่วขณะใช้งาน การไม่ใช้อุปกรณ์ตามข้อปฏิบัติ อาจทำให้ระบบป้องกันทำงานไม่ถูกต้อง

6. ปิดสวิตช์และตัดการจ่ายไฟให้อุปกรณ์ CE105 และตัวควบคุมเมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง

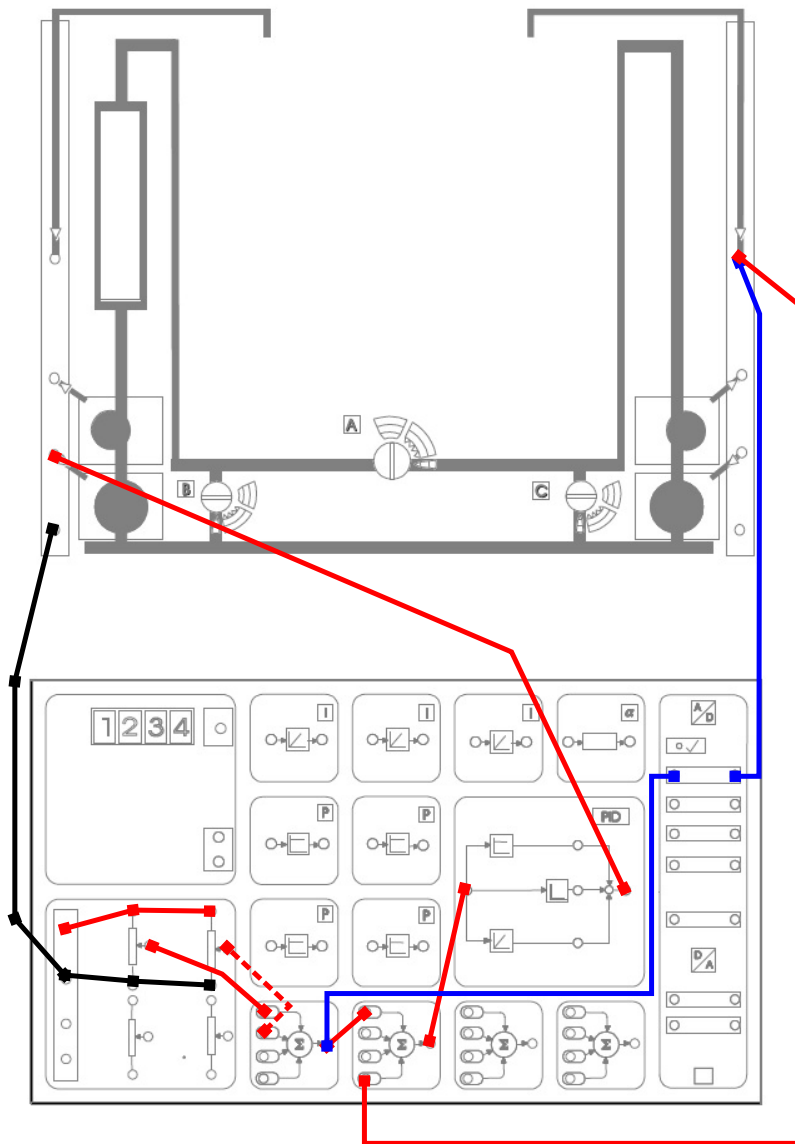
9.3 การทดลอง 1: การปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน อินทิกรัล

9.3.1 การควบคุมระดับน้ำโดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน

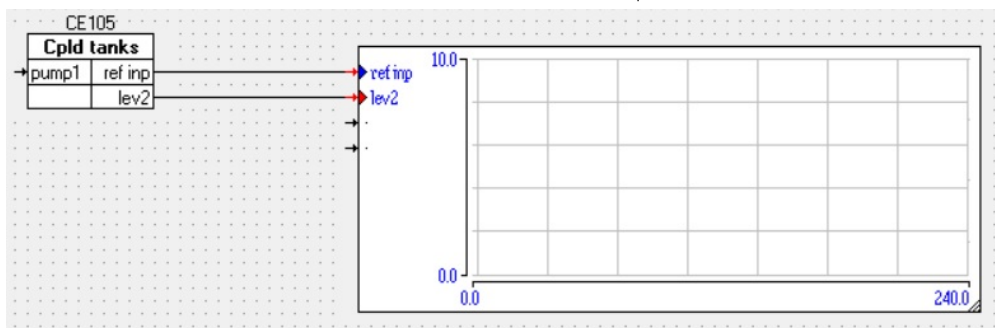
วิธีทดลอง

1. เปิดวาล์ว A เต็มที่ (ตำแหน่ง 5) ปิดวาล์ว B และเปิดวาล์ว (ตำแหน่ง 0) C ที่ระดับ 3
2. การปรับค่าพารามิเตอร์ในอุปกรณ์ CE120 ขั้นต้น:
 - ปรับโพเทนซิโอมิเตอร์ตัวซ้ายเป็น 4 โวลต์
 - ปรับโพเทนซิโอมิเตอร์ตัวขวาเป็น 1 โวลต์
 - ในส่วนตัวควบคุม PID เปิดสวิตช์การควบคุมแบบสัดส่วนและปรับค่า K_p เป็น 4 ปิดสวิตช์การควบคุมแบบอินทิกรัลและอนุพันธ์
3. เชื่อมต่ออุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 9.2a (ไม่ต้องเชื่อมต่อวงจรตามเส้นประ)
4. รอให้ระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัว
5. เปิดไฟล์ 'coupletank_labt1.ict' การเชื่อมต่อในไฟล์แสดงในรูปที่ 9.2b
6. เริ่มบันทึกสัญญาณแล้วเชื่อมต่อวงจรตามเส้นประ จะทำให้ได้สัญญาณอ้างอิงแบบขั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงจาก 4 โวลต์ เป็น 5 โวลต์ รอจนระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัว แล้วพลอตสัญญาณระดับน้ำในถังที่ 2 และบันทึกค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัวลงในตาราง
7. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 โดยปรับค่า K_p เป็น 7 และ 10

อัตราขยาย K_p	ค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว
4	
7	
10	



(a) การเชื่อมต่อวงจรสำหรับระบบควบคุมระดับน้ำ



(b) แผนภาพการเชื่อมต่อในไฟล์ 'coupletank_labt1.ict'

รูป 9.2: แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับระบบควบคุมระดับน้ำโดยใช้ตัวควบคุมสัดส่วน อินทิกรัล

9.3.2 การควบคุมระดับน้ำโดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน อินทิกรัล

วิธีทดลอง

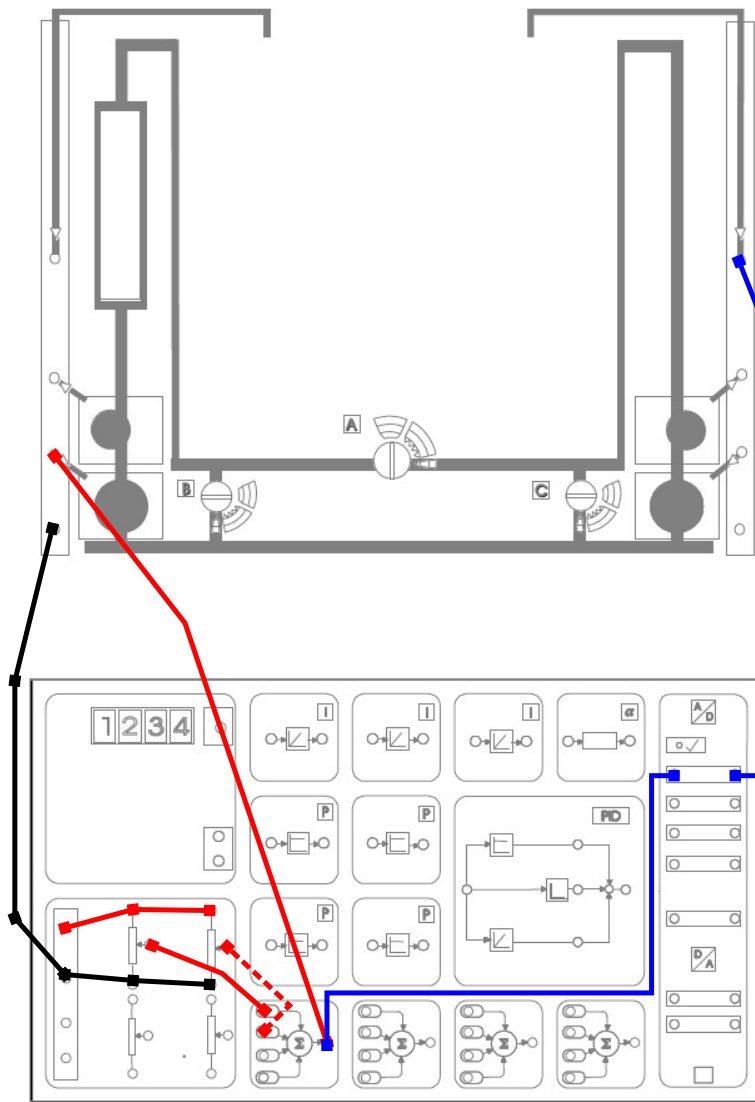
1. เปิดวาล์ว A เต็มที่ ปิดวาล์ว B และเปิดวาล์ว C ที่ตำแหน่ง 3
2. การปรับค่าพารามิเตอร์ในอุปกรณ์ CE120 ขึ้นดังนี้:
 - ปรับโพเทนซิโอมิเตอร์ตัวซ้ายเป็น 4 โวลต์
 - ปรับโพเทนซิโอมิเตอร์ตัวขวาเป็น 1 โวลต์
 - ในส่วนตัวควบคุม PID เปิดสวิตช์การควบคุมแบบสัดส่วนและปรับค่า K_p เป็น 4 ปรับค่า K_i เป็น 0.05 (ยังไม่ต้องเปิดสวิตช์การควบคุมแบบอินทิกรัล) ปิดสวิตช์การควบคุมแบบอนุพันธ์
3. เชื่อมต่ออุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 9.2a (ไม่ต้องเชื่อมต่อวงจรตามเส้นประ)
4. เชื่อมต่อการควบคุมส่วนอินทิกรัลโดยกดปุ่ม reset แล้วเปิดสวิตช์การควบคุมแบบอินทิกรัล รอจนระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัว
5. เปิดไฟล์ 'coupletank_labt1.ict'
6. เริ่มบันทึกสัญญาณ ต่อโพเทนซิโอมิเตอร์ตัวขวาตามเส้นประ จะทำให้ได้สัญญาณอ้างอิงแบบขั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงจาก 4 โวลต์ เป็น 5 โวลต์ รอจนระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัว แล้วพลอตสัญญาณระดับน้ำในถังที่ 2
7. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 โดยปรับค่า K_i เป็น 0.1 และ 0.3

9.4 การทดลอง 2: การปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโดยใช้วิธี Ziegler Nichols

9.4.1 การทดสอบผลตอบสนองขั้นของระบบวงเปิด

วิธีทดลอง

1. เปิดวาล์ว A เต็มที่ ปิดวาล์ว B และเปิดวาล์ว C ที่ตำแหน่ง 3
2. การปรับค่าพารามิเตอร์ในอุปกรณ์ CE120 ขั้นต้น:
 - ปรับโพเทนชิโอมิเตอร์ตัวซ้ายเป็น 4 โวลต์
 - ปรับโพเทนชิโอมิเตอร์ตัวขวาเป็น 1 โวลต์
3. เชื่อมต่ออุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 9.3 (ไม่ต้องเชื่อมต่อวงจรตามเส้นประ)
4. ปรับโพเทนชิโอมิเตอร์ตัวซ้ายเล็กน้อยจนระดับน้ำในถังที่ 1 และ 2 มีค่าประมาณ 60 และ 40 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ใช้เวลาประมาณ 15 นาทีเพื่อให้ระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัว)
5. เปิดไฟล์ 'coupletank_labt1.ict'
6. เริ่มบันทึกสัญญาณ ต่อโพเทนชิโอมิเตอร์ตัวขวาตามเส้นประ จะทำให้ได้สัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันไดที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด 1 โวลต์จากค่าที่ปรับไว้ในขั้นตอนที่ 4 รอจนระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัว แล้วพลอตสัญญาณระดับน้ำในถังที่ 2



รูป 9.3: การเชื่อมต่อวงจรสำหรับระบบควบคุมระดับน้ำแบบเปิด

9.4.2 การปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน อินทิกรัลโดยใช้วิธีวงเปิด

วิธีทดลอง

1. ใช้วิธีการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบวงเปิดของ Ziegler-Nichols คำนวณค่าอัตราขยาย K_p และ K_i โดยใช้ผลตอบสนองขั้นของระบบวงเปิดที่ได้จากการทดลอง 9.4.1
2. เปิดวาล์ว A เต็มที่ ปิดวาล์ว B และเปิดวาล์ว C ที่ตำแหน่ง 3
3. การปรับค่าพารามิเตอร์ในอุปกรณ์ CE120 ขั้นต้น:
 - ปรับโพเทนชิโอมิเตอร์ตัวซ้ายเป็น 4 โวลต์
 - ปรับโพเทนชิโอมิเตอร์ตัวขวาเป็น 1 โวลต์
 - ปรับแต่งตัวควบคุม โดยใช้ค่า K_p และ K_i ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 รอจนระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัว
4. เชื่อมต่ออุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 9.2a (ไม่ต้องเชื่อมต่อวงจรตามเส้นประ)
5. เปิดไฟล์ 'coupletank_labt1.ict'
6. เริ่มบันทึกสัญญาณ ต่อโพเทนชิโอมิเตอร์ตัวขวาตามเส้นประ จะทำให้ได้สัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันไดที่มีการเปลี่ยนแปลงจาก 4 โวลต์ เป็น 5 โวลต์ รอจนระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัว แล้วพลอตสัญญาณระดับน้ำในถังที่ 2

สรุปผลการผลการทดลองที่ต้องส่ง

นิสิตเขียนรายงานที่มีหน้าปกที่มีชื่อการทดลอง รหัสอุปกรณ์วันที่ทำการทดลอง วันที่ส่งรายงาน ชื่อและรหัสนิสิตในกลุ่ม ภายในเนื้อหารายงานให้แยกหัวข้อตามการทดลอง พร้อมด้วยผลการทดลองตามรายการดังต่อไปนี้ (คะแนนของความสมบูรณ์รายงานจะให้ตามรายการข้างล่าง)

การทดลอง 1: การปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน อินทิกรัล

การควบคุมระดับน้ำโดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน

1. ตารางค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัวเมื่อสัญญาณอ้างอิงเปลี่ยนจาก 4 โวลต์ เป็น 5 โวลต์ สำหรับ $K_p = 4, 7, 10$
2. กราฟสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณระดับน้ำในถังที่ 2 สำหรับ $K_p = 4, 7, 10$.
3. อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

การควบคุมระดับน้ำโดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน อินทิกรัล

1. กราฟสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณระดับน้ำในถังที่ 2 (ปรับ $K_p = 4$) สำหรับ $K_i = 0.05, 0.1, 0.3$.
2. อภิปรายและสรุปผลการทดลอง
3. เลือกค่า K_p และ K_i ที่คิดว่าเหมาะสม พร้อมให้เหตุผล

การทดลอง 2: การปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโดยใช้วิธีใช้วิธี Ziegler Nichols

1. กราฟแรงดันขับปั๊มและสัญญาณระดับน้ำในถังที่ 2 ของระบบวงเปิด เมื่อแรงดันขับปั๊มเป็นสัญญาณแบบขั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด 1 โวลต์
2. แสดงวิธีการคำนวณค่าอัตราขยาย K_p และ K_i โดยใช้วิธี Ziegler-Nichols แบบวงเปิด
3. กราฟระดับน้ำในถังที่ 2 ของระบบวงปิดเมื่อปรับแต่งตัวควบคุมโดยใช้ค่า K_p และ K_i ที่ได้จากการคำนวณ
4. อภิปรายเกี่ยวกับความแม่นยำในการใช้วิธี Ziegler-Nichols แบบวงเปิดกับระบบที่ไม่มีเวลาหน่วง และอภิปรายผลเกี่ยวกับการวัดค่า L

บทที่ 10

การทดลอง S1: การหาเอกลักษณ์ของระบบมอเตอร์

จิตโกมุท ส่งศิริ

วัตถุประสงค์

เพื่อให้นิสิตประยุกต์ใช้วิธีประมาณแบบจำลองด้วยวิธีกำลังสองต่ำสุด วิธีปริภูมิย่อย และการเลือกแบบจำลอง ในการหาแบบจำลองเชิงเส้นที่เหมาะสมสำหรับระบบเซอร์โวมอเตอร์

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. นิสิตสามารถประยุกต์ใช้วิธีการหาเอกลักษณ์ของระบบในการประมาณแบบจำลองของระบบเซอร์โวมอเตอร์ได้

อุปกรณ์ที่ใช้

1. คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง/นิสิต (นิตินำมาเอง)
2. installed MATLAB ที่มี system identification toolbox

10.1 บทนำ

การทดลองนี้พิจารณาแบบจำลองของระบบมอเตอร์ที่มีสัญญาณเข้าเป็นแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ x และมีสัญญาณออกเป็นความเร็วมอเตอร์ y_w (ที่วัดผ่านเซนเซอร์ ออกมาเป็นหน่วยแรงดันแล้ว) ข้อมูลสัญญาณเข้าและสัญญาณออกที่บันทึกมาจากระบบนั้นผ่าน A/D ข้อมูลจึงอยู่ในรูปแบบสัญญาณเวลาไม่ต่อเนื่อง เราจึงพิจารณาแบบจำลองเวลาไม่ต่อเนื่องก่อน แล้วจึงแปลงแบบจำลองที่ประมาณได้เป็นแบบจำลองเวลาต่อเนื่อง

แบบจำลองและหลักการประมาณ

แบบจำลองแรกที่พิจารณาคือ แบบจำลอง autoregressive with exogenous input หรือ ARX ที่มีสมการดังนี้

$$y(t) + a_1y(t - 1) + a_2y(t - 2) + \dots + a_p y(t - p) = b_1u(t - T_d) + b_2u(t - T_d - 1) + \dots + b_q u(t - T_d - q + 1) + e(t) \quad (10.1)$$

เมื่อ y คือสัญญาณออกของแบบจำลอง ARX, u คือสัญญาณเข้าที่กระตุ้นระบบ และ e คือสัญญาณรบกวนของระบบ หรือเราอาจมอง e ว่าเป็นตัวแปรที่บ่งบอกความไม่แน่นอนที่แบบจำลองไม่สามารถจะอธิบายได้ เรากำหนดให้ (T_d, p, q) คืออันดับของแบบจำลองที่ใช้ต้องกำหนด (ทั้งหมดเป็นเลขจำนวนเต็มบวก) ค่า T_d จะบ่งบอกค่าประวิงเวลาของระบบ หาก $T_d \geq 1$ หมายถึงว่า ระบบในเวลา t จะตอบสนองต่อสัญญาณเข้าในเวลาก่อนหน้า t เราจะเรียก p ว่าเป็น autoregressive order (หรือ lag order) ที่บ่งชี้ว่า $y(t)$ จะขึ้นกับค่าของตนเอง ที่เวลาในอดีตเป็นจำนวน lag เท่าใด ในทำนองเดียวกัน q จะบ่งชี้ว่า $y(t)$ นั้นจะขึ้นกับค่าในอดีตของ u เป็นจำนวน lag เท่าใด พารามิเตอร์ของระบบที่ต้องประมาณนั้นได้แก่ $\theta = (a_1, \dots, a_p, b_1, \dots, b_q)$ จากข้อมูล $\{(y(t), u(t))\}_{t=1}^N$ เราสามารถแสดงให้เห็นได้ว่า ปัญหาการประมาณ θ สามารถประยุกต์ใช้วิธีกำลังสองต่ำสุดได้ โดยที่มีรูปแบบปัญหาเป็น

$$\text{minimize}_{\theta} \|z - A\theta\|_2^2 \quad (10.2)$$

ที่มีฟังก์ชันจุดประสงค์สามารถแจกแจงได้เป็น

$$\|z - A\theta\|_2^2 = \sum_{t=T_1}^N (y(t) - [a_1y(t - 1) + \dots + a_p y(t - p) + b_1u(t - T_d) + \dots + b_q u(t - T_d - q + 1)])^2$$

ตัวแปร $z - A\theta$ จะบ่งชี้ค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณออกที่วัดได้จริงจากข้อมูลกับสัญญาณออกของแบบจำลอง การหา θ ด้วยวิธีกำลังสองต่ำสุดจึงเป็นวิธีเหมาะสมที่สุดวิธีหนึ่ง พารามิเตอร์ที่ประมาณได้มีความหมายว่าเป็นค่าที่ทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดน้อยที่สุดนั่นเอง เราสามารถแสดงให้เห็นได้ว่า คำตอบอยู่ในรูป $\theta = (A^T A)^{-1} A^T z$ ส่วนการหาคำตอบเชิงเลขนั้น ทำได้โดยใช้คำสั่ง `theta = A \setminus z` นอกจากนี้ เราจะพบว่าใน sysiden toolbox การประมาณพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ARX สามารถทำได้ด้วยคำสั่ง `arx` ดังตัวอย่าง

```
Ts = 0.06; % set sampling time to 0.06 sec
estdat = iddata(y,u,Ts); % estimation data set in sysiden format
m = arx(estdat,[2 2 1]); % estimate ARX model of order p = 2, q = 2, Td = 1
```

แบบจำลอง m นั้น นอกจากจะมีค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้แล้ว ยังเก็บค่าอื่นๆ ที่สำคัญเกี่ยวกับแบบจำลอง เช่น ค่าเกณฑ์การเลือกแบบจำลอง (BIC,AIC,FPE) การหา step response, โพล/ศูนย์, DC gain ก็ทำได้โดยง่ายจาก model object m นอกจากนี้ เมื่อต้องการเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ บนข้อมูลชุดใหม่ ก็ยังสามารถทำได้ด้วยคำสั่ง `compare`

แบบจำลองอีกหนึ่งกลุ่มคือแบบจำลองปริภูมิย่อย (state-space model) ที่จะใช้วิธีปริภูมิย่อย (subspace identification) ในการประมาณ วิธีดังกล่าว อ้างอิงกับสมการสถานะดังนี้

$$x(t + 1) = Ax(t) + Bu(t) + Ke(t), \quad y(t) = Cx(t) + Du(t) + e(t) \quad (10.3)$$

โดยมี x, y, u เป็นตัวแปรสถานะ สัญญาณออก และสัญญาณเข้าของระบบ ตามลำดับ e คือสัญญาณรบกวนของค่าวัด (additive measurement noise) เราจะเห็นว่า Ke จะเป็นสัญญาณรบกวนในสมการสถานะและแปรผันโดยตรงกับ e นั่นคือ แบบ

จำลองที่ใช้มีสมมติฐานว่า สัญญาณรบกวนของกระบวนการ (process noise) นั้นมีค่าสหสัมพันธ์ (correlation) กับสัญญาณรบกวนของค่าวัด สำหรับ (A, B, C, D) นั่นคือเมทริกซ์ปริภูมิสถานะ และ K จะเป็นพารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณด้วยวิธีปริภูมิย่อยนี้ หลักการโดยย่อของวิธีนี้ กำหนดให้มีข้อมูล $\{y(t), u(t)\}_{t=1}^N$ (เราไม่มีตัวแปรสถานะ) เมื่อผู้ใช้กำหนดอันดับของระบบที่ต้องการ (n) วิธีการประมาณจะเป็นไปตามขั้นตอน [OM12, Son] คือ

- แบ่งข้อมูลที่วัดได้ออกเป็นสองท่อนใหญ่ๆ เรียกว่าข้อมูลในอดีตกับข้อมูลในอนาคต
- ประมาณตัวแปรสถานะ ด้วยวิธี oblique projection อันเป็นการถ่ายภาพฉายของข้อมูลสัญญาณออกในอนาคตลงบนสมการระนาบที่แผ่ไปด้วยข้อมูลในอดีตและสัญญาณเข้าในอนาคต และถ่ายภาพฉายของผลลัพธ์ที่ได้อีกครั้งลงบนแกนของสัญญาณเข้าในอนาคต ผลลัพธ์ของการทำ oblique projection นี้ คือผลคูณระหว่าง extended observability matrix กับสัญญาณสถานะในอนาคต
- ประมาณตัวแปรสถานะ ด้วยการหาอินเวอร์สของ extended observability matrix (ที่แยกเป็น SVD decomposition)
- จาก (10.3) เราจะเห็นว่าเมื่อทราบค่า $x(t)$ การประมาณ (A, B, C, D) สามารถทำได้โดยใช้วิธีกำลังสองต่ำสุด

สำหรับ sysiden toolbox นั้น การประมาณด้วยวิธีปริภูมิย่อย สามารถทำได้โดยใช้คำสั่ง `n4sid` โดยผู้ใช้ต้องกำหนดอันดับของแบบจำลอง

```
Ts = 0.06; % set sampling time to 0.06 sec
estdat = iddata(y,u,Ts); % estimation data set in sysiden format
m = n4sid(estdat,2); % estimate state-space model of order 2
```

และเช่นเดียวกันกับคำสั่งอื่นๆ ในการประมาณแบบจำลอง ตัวแปร `m` ที่เป็นแบบจำลองที่ประมาณได้ จะเก็บค่าพารามิเตอร์ ค่าเกณฑ์การเลือกแบบจำลอง และอื่นๆ ไว้ใน `m` ตัวเดียว

แบบจำลองเวลาต่อเนื่องและเวลาไม่ต่อเนื่อง

พิจารณาสมการปริภูมิสถานะทั้งแบบเวลาต่อเนื่อง

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

และแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

$$x[t + 1] = \Phi x[t] + \Gamma u[t], \quad y[t] = Fx[t] + Gu[t]$$

ตัวอย่างความเกี่ยวข้องระหว่างระบบแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง กับระบบเวลาต่อเนื่อง คือ การใช้ A/D ในการชักอย่างข้อมูลจากระบบจริงด้วยเซนเซอร์ รวมไปถึงการใช้ D/A ในการส่งข้อมูลที่คำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ให้เป็นสัญญาณแอนาล็อก เช่น สัญญาณควบคุมไปยังระบบจริงต่อไป วิธีหนึ่งในการแปลงพารามิเตอร์ปริภูมิสถานะระหว่างของระบบเวลาต่อเนื่องกับระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง คือวิธี zero-order hold ที่มีสมมติฐานว่า ภายในเวลาช่วงของการชักตัวอย่างที่คาบ h นั้น สัญญาณเข้าจะมีค่าคงที่ นั่นคือ

$$u(t) = u[k] \quad (\text{ค่าคงที่}), \quad kh \leq t < (k + 1)h, \quad k = 0, 1, 2, \dots,$$

เราจะสามารถแสดงให้เห็นได้ว่า พารามิเตอร์ (Φ, Γ, F, G) จะสัมพันธ์กับ (A, B, C, D) และคาบซีกตัวอย่าง h ดังนี้ [Won20]

$$\Phi = e^{Ah}, \quad \Gamma = \int_0^h e^{A\tau} B d\tau, \quad F = C, \quad G = D$$

นอกจากนี้ ยังมีการประมาณอินทิกรัลเชิงเลข ด้วยวิธีอื่นๆ อีก [Won20] เช่น

- Forward Euler: $s = \frac{z-1}{h}$
- Backward Euler: $s = \frac{z-1}{hz}$
- Tustin or Bilinear: $s = \frac{2}{h} \frac{z-1}{z+1}$
- Frequency prewarping: วิธีที่ทำให้ผลตอบสนองเชิงความถี่จากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบทั้งเวลาต่อเนื่องกับเวลาไม่ต่อเนื่องมีค่าเท่ากันที่ ω_1

$$s = \frac{\omega_1}{\tan(\omega_1 h/2)} \cdot \frac{z-1}{z+1}$$

ในการทดลองหาเอกลักษณ์ของระบบนั้น เราใช้ข้อมูลจากระบบที่ได้นซีกตัวอย่างมา จึงเป็นการหาพารามิเตอร์ใน $G[z]$ หากเราต้องการหา $G(s)$ จึงสามารถทำการแปลงระบบทั้งสองเวลา ด้วยคำสั่ง MATLAB c2d หรือ d2c ที่มีตัวเลือกของวิธีที่ใช้ตั้งรายการข้างต้นได้

การเลือกแบบจำลอง

การเลือกแบบจำลองเป็นประเด็นสำคัญหัวข้อหนึ่ง เนื่องจากเราอาจจะมีแบบจำลองหลายโครงสร้าง หรือหลายอันดับ ที่พิจารณาใช้อธิบายพลวัตของระบบ ตัวอย่างเช่น การใช้แบบจำลอง ARX ที่มี autoregressive order p ที่ต่างๆ กัน เราสามารถแสดงให้เห็นได้ว่า คุณสมบัติการประมาณข้อมูลเมื่อใช้แบบจำลองโครงสร้างหนึ่งๆ นั้น จะดีขึ้นเมื่อเลือกอันดับของแบบจำลองให้สูงขึ้น ตัวอย่างเช่น หากใช้วิธีกำลังสองต่ำสุดกับแบบจำลอง ARX จะได้ว่า ค่าผิดพลาดในการประมาณจะลดต่ำลง เมื่อใช้อันดับ p ที่สูงขึ้น สมมติเช่น M1 M2 คือแบบจำลอง ARX ที่มี $p = 1$ และ $p = 2$ ตามลำดับ เรามองได้ว่า M1 เป็น nested model ของ M2 เพราะว่า M1 ก็เป็นกรณีเฉพาะของ M2 เมื่อตอนที่ $a_2 = 0$ ดังนั้นเมื่อพิจารณารูปแบบปัญหา (10.2) กับการประมาณ M1 จึงเป็นเรื่องเดียวกันกับการประมาณ M2 ด้วยวิธีกำลังสองต่ำสุด ที่บวกเงื่อนไขบังคับว่า $a_2 = 0$ ดังนั้น จากที่เราทราบว่า ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด (optimization) เมื่อมีเงื่อนไขบังคับ ย่อมให้ค่าเหมาะที่สุด (optimal value) ที่สูงขึ้น จึงเป็นเหตุให้ค่าผิดพลาดการประมาณด้วยการใช้ M1 จึงสูงกว่า M2 นั่นเอง

ภาวะความสอดคล้องกันระหว่างข้อมูลกับแบบจำลอง (fitting) ที่สามารถวัดได้จากเช่น MSE จากการใช้แบบจำลองอันดับสูงเกินไป อาจจะไม่ได้ดีขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญเสมอไป เนื่องจากว่า หากแบบจำลองมีความซับซ้อนเกินจำเป็น (เช่นระบบจริง อันดับหนึ่ง แต่ใช้แบบจำลองอันดับ 5) แบบจำลองนั้นจะพยายามเรียนรู้รายละเอียดของพลวัตระบบ ที่อาจจะเริ่มมาจากความไม่แน่นอนของสัญญาณรบกวนที่เข้ามาทางสัญญาณออกของระบบ ในภาวะเช่นนั้น ภาวะความสอดคล้องกันอาจจะไม่ได้ดีขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ และหากใช้แบบจำลองซับซ้อนนี้ในการอธิบายข้อมูลชุดใหม่ (ที่ไม่ได้ใช้ในการประมาณแบบจำลอง) เราอาจจะเห็นสภาวะที่ค่าความสอดคล้องของแบบจำลองกับข้อมูลชุดใหม่มีค่าลดลง เนื่องจากแบบจำลองถูกปรับให้อธิบายรายละเอียดอันมาจากสัญญาณรบกวนในชุดข้อมูลฝึกสอน แต่เมื่อมาใช้อธิบายข้อมูลชุดใหม่ที่มีรูปแบบของสัญญาณรบกวนแบบใหม่ (จากความไม่แน่นอน) ก็ย่อมอธิบายได้ไม่ดี ในสถานการณ์เช่นนี้ จะเรียกว่าเกิด overfitting

ด้วยเหตุนี้ การเลือกแบบจำลองจึงไม่สามารถมองเฉพาะความสามารถในการประมาณของแบบจำลอง (goodness of fit) เพียงอย่างเดียวเท่านั้น ผู้ใช้จึงควรพิจารณาความซับซ้อนของแบบจำลองประกอบ วิธีหนึ่ง คือ การใช้เกณฑ์การเลือกแบบจำลอง

ที่ประกอบด้วยสองเทอมบวกกัน อันได้แก่ ค่าบ่งชี้ภาวะความสอดคล้องระหว่างข้อมูลกับแบบจำลอง และความซับซ้อนของแบบจำลอง (เช่น จำนวนพารามิเตอร์ในแบบจำลอง) เกณฑ์ดังกล่าวมีใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านสถิติ ซึ่งต้องใช้พารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ กำหนดให้ k คือจำนวนพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแบบจำลอง N คือจำนวนข้อมูลตัวอย่างที่ใช้ n_y คือจำนวนสัญญาณออก และ $e(t, \hat{\theta})$ คือค่าความผิดพลาดของการประมาณด้วยแบบจำลองที่มีพารามิเตอร์เป็น $\hat{\theta}$ เมื่อเทียบกับ $y(t)$ เราสามารถแสดงให้เห็นได้ว่า ค่าบ่งชี้ภาวะความสอดคล้องกันระหว่างข้อมูลกับแบบจำลอง สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{neglog} = N \log \det \left(\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N e(t, \hat{\theta}) e(t, \hat{\theta})^T \right) \quad (10.4)$$

ซึ่งจะเรียกอีกชื่อว่าเป็น ค่าลบของลอการิทึมความน่าจะเป็น (negative log-likelihood) จะเห็นว่า หาก e มีค่าต่ำ (ประมาณได้ดี) ค่า (10.4) จะมีค่าต่ำเช่นกัน ด้วยปริมาณที่เกี่ยวข้องดังข้างต้น ตัวอย่างคะแนนการเลือกแบบจำลอง เช่น `aicc`, `bic`, `fpe` ที่อ้างอิงสูตรมาจาก MATLAB คือ

- BIC (Bayesian information criterion)

$$\text{BIC} = \text{neglog} + k \log N + N(n_y \log(2\pi) + 1)$$

- AICc (sample-size corrected Akaike information criterion)

$$\text{AICc} = \text{neglog} + 2k \left(\frac{k+1}{N-k-1} \right)$$

- FPE (Akaike's Final prediction error)

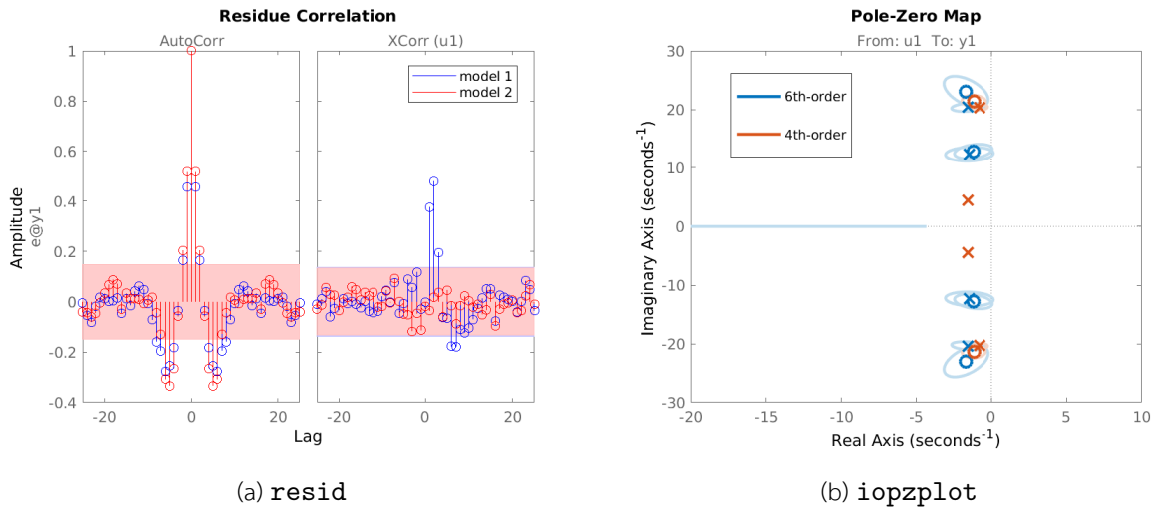
$$\text{FPE} = \det \left(\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N e(t, \hat{\theta}) e(t, \hat{\theta})^T \right) \left(\frac{1+k/N}{1-k/N} \right)$$

เราจะเห็นว่า คะแนนการเลือกแบบจำลองข้างต้น จะให้น้ำหนักกับทั้งความสามารถในการอธิบายข้อมูล กับความซับซ้อนของแบบจำลอง กล่าวคือ แบบจำลองอย่างง่าย จะมีความสามารถในการอธิบายข้อมูลต่ำ (neglog มีค่าสูง) แต่จะมีความซับซ้อนของแบบจำลองต่ำ ดังนั้น หากเราใช้เกณฑ์ว่า เลือกแบบจำลองที่มีคะแนนการเลือกแบบจำลองต่ำสุด จึงเป็นการถ่วงน้ำหนักระหว่างสองประเด็นอย่างเหมาะสมที่สุดนั่นเอง โดยที่แต่ละคะแนนจะมีคุณสมบัติทางสถิติที่ต่างกันไป

การตรวจสอบความสมเหตุสมผลของแบบจำลอง

จากการใช้เกณฑ์การเลือกแบบจำลอง เราอาจจะยังมีแบบจำลองให้พิจารณาจำนวนหนึ่ง เช่น M1, M2, M3 ซึ่งแต่ละแบบจำลองนั้นอาจจะต่างกันไปตามโครงสร้าง (แบบจำลอง ARX กับแบบจำลอง ARMAX) หรือ อาจจะเป็นแบบจำลองโครงสร้างเดียวกัน แต่ว่าคะแนนการเลือกแบบจำลองไม่ได้ต่างกันมากอย่างมีนัยยะสำคัญ ในสถานการณ์เช่นนี้ การใช้ข้อมูลชุดตรวจสอบ (validation set) ในการพิจารณาประเด็นด้านความสามารถในการอธิบายระบบ ด้านความซับซ้อนของแบบจำลอง จึงมีความสำคัญเพื่อใช้ตัดสินใจว่า แบบจำลองที่เลือกมานั้น เมื่อไปใช้กับข้อมูลชุดใหม่จะมีความสามารถเช่นใด

ประเด็นแรก คือการทดสอบว่า ค่าตกค้าง (residual error) ระหว่างสัญญาณออกของระบบจริง กับสัญญาณออกของแบบจำลอง จะใช้สัญลักษณ์ว่า $e(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ สมมติว่า ระบบจริงที่ประมาณนั้น มีโครงสร้างเป็น $y = Gu + Hv$ โดย u เป็นสัญญาณเข้า และ v เป็นสัญญาณรบกวน และผู้ใช้ได้มีสมมติฐานของโครงสร้างแบบจำลองคือ $\hat{y} = \tilde{G}u + \tilde{H}v$ ตาม



รูป 10.1: การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองด้วย residual analysis และตำแหน่งโพลและศูนย์ของแบบจำลองที่ประมาณได้

หลักการประมาณแล้ว หาก e กับ u ยังมีค่าสหสัมพันธ์ (correlation) ที่ไม่เป็นศูนย์ แสดงว่า \tilde{G} ในสมมติฐานของผู้ออกแบบนั้น ยังไม่ซับซ้อนเพียงพอในการประมาณ G จริง เนื่องจากค่าตกค้างหรือ e นั้นยังมีบางส่วนของพลวัตจาก u ที่แบบจำลองยังไม่ได้รวมไว้ e จึงยังเหลือว่าเป็นฟังก์ชันของ u อยู่ ทำให้ค่าสหสัมพันธ์ไม่เป็นศูนย์ นอกจากนี้ หาก e ยังมีค่าสหสัมพันธ์ตนเอง (auto-correlation) ที่สูงอยู่ แสดงว่า \tilde{H} ในสมมติฐานนั้น ยังไม่ซับซ้อนเพียงพอในการประมาณ H [SS89, Son] เพราะหาก H อธิบายพลวัตที่มาจาก ν ได้ดีพอ ค่าตกค้างหรือ e นั้นควรจะมีสมบัติเหมือน white noise ซึ่งจะมีฟังก์ชันสหสัมพันธ์ตนเองเป็น impulse function หลักการดังกล่าว จึงสามารถตรวจสอบได้ในรูปของการทดสอบเชิงสถิติ โดยการดูกราฟสหสัมพันธ์ว่ามีค่าสูงเกินช่วงนัยยะสำคัญทางสถิติหรือไม่ ใน MATLAB สามารถทดสอบได้จากคำสั่ง `resid` ดังรูป 10.1a เป็นตัวอย่างการเปรียบเทียบ residual analysis จากสองแบบจำลอง ที่แบบจำลองแรกมีค่า fitting error ที่สูงกว่าแบบจำลองที่สอง และจากกราฟ เราจะเห็นว่าค่าตกค้างจากทั้งสองแบบจำลองยังมีค่าสหสัมพันธ์ในบาง lag ที่สูงกว่าระดับนัยยะสำคัญทางสถิติอยู่ (พื้นที่สีแดง) ดังนั้นเราอาจปรับปรุง H ให้ซับซ้อนขึ้น เมื่อดูค่าสหสัมพันธ์ของ e กับ u ในด้านขวา จะพบว่า แบบจำลองที่สองมีค่าสหสัมพันธ์อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ทั้งหมดทุก lag (หมายถึง มีค่าใกล้เคียงศูนย์อย่างมีนัยยะสำคัญ) ดังนั้น หมายถึงว่า G ของแบบจำลองที่สองนั้น เลือกได้ซับซ้อนเหมาะสมแล้ว

ประเด็นที่สอง คือ การทดสอบวิธีหนึ่งว่า แบบจำลองที่ได้นั้นมีตำแหน่งโพลกับศูนย์อยู่ที่ใด หากแบบจำลองที่อันดับสูง มีค่าตำแหน่งโพลและศูนย์อยู่ใกล้กันมาก เราอาจจะสมมติฐานได้ว่า อาจเกิดการหักล้างระหว่างโพลกับศูนย์ขึ้น หรือแบบจำลองมีอันดับสูงเกินความจำเป็นนั่นเอง กราฟนี้ดังตัวอย่างในรูป 10.1b ที่เปรียบเทียบตำแหน่งโพลและศูนย์ของระบบที่ประมาณมา ซึ่งเป็นแบบจำลองอันดับ 4 และอันดับ 6 โดยการใช้คำสั่ง `iopzplot` ใน MATLAB ซึ่งจะช่วยให้ผู้ใช้ได้ทราบอีกว่า แบบจำลองที่ได้นั้นมีเสถียรภาพหรือไม่

10.2 สิ่งที่ต้องเตรียมมา

1. นิสิตทุกคนต้องนำคอมพิวเตอร์มา นิสิตหนึ่งคนสามารถให้ใช้คอมพิวเตอร์ 1 เครื่องในห้องแล็บได้
2. นิสิตทบทวนระบบเซอร์โวมอเตอร์ และเนื้อหาในหัวข้อที่ 2.1

3. นิสิตอ่านหลักการของวิธีกำลังสองต่ำสุด วิธีปริภูมิย่อย และการเลือกแบบจำลองมาให้เข้าใจ
4. นิสิตทำความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้คำสั่งใน system identification toolbox ใน MATLAB เช่น `iddata`, `compare`, `arx`, `n4sid`, `iopzplot`, `resid`
5. รายการข้อมูลสัญญาณเข้าและสัญญาณออกจากระบบมอเตอร์ ที่เก็บจากแล็บ M1 ดังรายการต่อไปนี้

```
data_motor_noclutch.txt
data_motor_clutch.txt
data_motor_sine_load.txt
```

10.3 วิธีทดลอง

ในการทดลอง สำหรับไฟล์ .txt ใดๆ ที่เก็บมาจากซอฟต์แวร์ CE2000 นั้นจะบันทึกข้อมูลเป็นหลายคอลัมน์ ตัวอย่างเช่น

Data export from TecQuipment CE2000

Data series 1

Time	speed	position	pos ref	load
0.00	2.035	7.670	4.000	1.672
0.07	2.275	7.670	4.000	1.692
0.13	2.470	7.670	4.000	1.711
0.20	2.640	7.670	4.000	1.729
0.26	2.780	7.670	4.000	1.747
0.33	2.900	7.670	4.000	1.765

การอ่านไฟล์ข้อมูลเข้าไปใน MATLAB สามารถทำได้โดยใช้คำสั่ง

```
x = readtable('filename.txt')
```

ตัวแปร x ดังกล่าวจะมีรูปแบบเป็น table โดยที่ x จะมีหลาย fields และเราสามารถเลือก field ที่สอดคล้องกันกับตัวแปร Time, speed, position, pos ref, load ที่เราจะเห็นเป็น `x.Var1`, `x.Var2`, ..., ที่เก็บไว้ในข้อมูลได้ การประมาณแบบจำลองแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง ต้องมีการกำหนดเวลาชักตัวอย่าง (sampling time) ให้เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งเรียกว่า T_s เราจะเห็นว่าเวลาของข้อมูลนั้นมี time step ที่ไม่คงที่ (0.06-0.07) วินาที นิสิตสามารถเลือกใช้ 0.06, 0.07 หรือจะใช้ค่าเฉลี่ยได้ตามแต่เห็นว่าเหมาะสม

จากนั้นเมื่อได้ table variable x มาแล้ว ให้เก็บข้อมูลอยู่ในรูปแบบที่ system identification toolbox จะไปประมวลผลต่อด้วยการใช้คำสั่ง

```
datamotor = iddata(y,u,Ts)
```

(โดยที่ y และ u นั้นคือตัวแปรสัญญาณออกและสัญญาณเข้า ที่นิสิตต้องเลือกมาจาก x) ในการทดลอง เราจะใช้ข้อมูลประมาณ 4 คาบแรกจาก `datamotor` เป็นข้อมูลในการประมาณ (training data) และใช้ 2 คาบที่เหลือในการตรวจสอบแบบจำลอง

(validation) อัตราส่วนนี้ นิสิตสามารถเลือกเป็นค่าอื่นได้อย่างเหมาะสม เช่น 80:20 หรือ 70:30 แต่ควรให้ข้อมูลในการประมาณมีมากพอ

แบบจำลองทั้งหมดที่พิจารณาในการทดลองนี้ มีสัญญาณเข้าเป็นแรงดันมอเตอร์ v และมีสัญญาณออกเป็นความเร็วมอเตอร์ y_ω (ที่วัดผ่านเซนเซอร์ ออกมาเป็นหน่วยแรงดันแล้ว)

การทดลอง 1: การเลือกแบบจำลอง

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ นิสิตเข้าใจวิธีการเลือกโครงสร้างแบบจำลอง การประมาณ การเลือก และการตรวจสอบแบบจำลอง จากไฟล์ข้อมูล

`data_motor_noclutch.txt`

เราจะพิจารณาแบบจำลอง ARX และแบบจำลองปริภูมิย่อย ให้ นิสิตทดลองตามขั้นตอนดังนี้

1. แปลงข้อมูลจากทั้งสองไฟล์ ให้อยู่ในรูปแบบของ sysiden toolbox ด้วยคำสั่ง `iddata`
2. ประมาณค่าประวิงเวลา (delay) ในแบบจำลอง โดยใช้คำสั่ง `delayest` และตรวจสอบความเหมาะสมด้วยการดูผลตอบสนองอิมพัลส์ที่ประมาณจาก Finite impulse response model ด้วยคำสั่ง `impulseest` การพล็อตผลตอบสนองอิมพัลส์จากแบบจำลองใดๆ สามารถใช้คำสั่ง `impulseplot` อภิปรายว่าค่าประวิงเวลาที่ประมาณได้นั้น (กำหนดให้เป็น T_d) สมเหตุสมผลหรือไม่ อย่างไร
3. ใช้ค่า T_d, T_s ที่กำหนดไว้ ในการประมาณแบบจำลอง ARX ที่อันดับต่างๆ กัน

$$(p, q) = (1, 1), (2, 1), (2, 2), (3, 2)$$

แบบจำลองทั้งหมด 5 แบบจำลอง เรียกว่า A_1, A_2, \dots, A_5 ให้ นิสิตเลือกแบบจำลอง A_5 เองว่าจะมีอันดับอย่างไร คำนวณค่า BIC, AICc, FPE

4. ใช้ค่า T_d, T_s ที่กำหนดไว้ ในการประมาณแบบจำลองปริภูมิย่อย ที่อันดับ $n = 1, 2, \dots, 5$ จำนวน 5 แบบจำลอง เรียกว่า S_1, S_2, \dots, S_5 คำนวณค่า BIC, AICc, FPE
5. เลือกแบบจำลอง ARX ที่เหมาะสมที่สุด และเลือกแบบจำลองปริภูมิย่อยที่เหมาะสมที่สุด จากเกณฑ์การเลือกแบบจำลอง BIC, AICc, FPE
6. ตรวจสอบความสมเหตุสมผลของแบบจำลอง ARX และแบบจำลองปริภูมิย่อย โดยดูจาก zero-pole plot, fitting กับข้อมูลชุด validation, และ residual analysis บันทึกกราฟเป็น 2 ชุด สำหรับแบบจำลอง ARX และแบบจำลองปริภูมิย่อย
7. สรุปแบบจำลอง ARX ที่เลือก ทั้งแบบจำลองเวลาไม่ต่อเนื่อง กับแบบจำลองที่แปลงไปเป็นเวลาต่อเนื่องแล้ว หากค่าคงตัวเวลาและ DC gain ของระบบ
8. สรุปแบบจำลองปริภูมิย่อย ที่เลือก ทั้งแบบจำลองเวลาไม่ต่อเนื่อง กับแบบจำลองที่แปลงไปเป็นเวลาต่อเนื่องแล้ว หากค่าคงตัวเวลาและ DC gain ของระบบ อภิปรายว่าแบบจำลอง ARX กับแบบจำลองปริภูมิย่อยที่เลือกนั้น มีลักษณะสมบัติเหมือนหรือต่างกันอย่างไร ด้วยเหตุใด

การทดลอง 2: แบบจำลองเมื่อกำลังมอเตอร์ต่อคลัทช์

จากการทดลอง 1 เมื่อเราได้ทราบอันดับของแบบจำลองที่เลือกได้แล้ว ในการทดลอง 2 นี้ มีจุดประสงค์เพื่อให้ทดลองหาแบบจำลองเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์อีกครั้ง เมื่อสถานะของระบบเปลี่ยนไปนั่นคือมีการต่อคลัทช์กับมอเตอร์ขึ้น และศึกษาว่าพารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยนไปอย่างไร ตามหลักการหรือไม่ การทดลองนี้จะใช้ข้อมูล

data_motor_clutch.txt

ทดลองประมาณแบบจำลอง ตามขั้นตอนดังนี้

1. ใช้ค่า T_d, T_s และอันดับของแบบจำลอง ARX ที่เลือกตามการทดลอง 1 และประมาณแบบจำลอง
2. เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองในการทดลอง 1 (เมื่อระบบไม่ได้ต่อคลัทช์) และแบบจำลองในข้อ 1 (เมื่อระบบต่อคลัทช์) ค่าคงตัวเวลา ในประเด็นต่างๆ อันได้แก่ ค่าคงตัวเวลา, DC gain, zero-pole plot, step response และอภิปรายผล

การทดลอง 3: แบบจำลองเมื่อกำลังมอเตอร์มีโหลด

ในการทดลอง 3 นี้ มีจุดประสงค์เพื่อให้หาแบบจำลองของระบบที่พิจารณาได้ว่ามีสัญญาณเข้า 2 สัญญาณ อันได้แก่ v (สัญญาณแรงดันเข้ามอเตอร์) และ v_l (โหลด) ตามสมการ (2.6) นั่นคือ

$$\omega(s) = \frac{K_1}{(\tau s + 1)}V(s) - \frac{K_2}{(\tau s + 1)}V_l(s) \quad (10.5)$$

ที่จะเห็นว่าฟังก์ชันถ่ายโอนจากสองสัญญาณเข้านั้นมีโพลที่เหมือนกัน (ขึ้นกับค่าคงตัวเวลา τ) แต่จะต่างกันที่ DC gain นั่นคือ K และ K_l การทดลองนี้มีจุดประสงค์ให้หาค่า τ, K, K_l จากไฟล์ข้อมูล

data_motor_sine_load.txt

และทดลองตามขั้นตอนดังนี้

1. เขียนรูปแบบโครงสร้างของแบบจำลอง ARX (2 สัญญาณเข้า) ที่สอดคล้องกับแบบจำลองเวลาต่อเนื่องตาม (10.5)
2. จัดรูปแบบปัญหาการประมาณพารามิเตอร์แบบจำลอง ARX ที่เขียนไว้ในข้อ 1 ด้วยวิธีกำลังสองต่ำสุด ในรูปปัญหา

$$\text{minimize}_{\theta} \|y - A\theta\|_2$$

โดยที่ θ แทนพารามิเตอร์ทั้งหมดของแบบจำลอง เขียน y, A, θ ให้ชัดเจนกับรูปแบบปัญหาที่ได้

3. ประมาณพารามิเตอร์ของแบบจำลอง และแปลงแบบจำลองไปเป็นแบบจำลองเวลาต่อเนื่อง

สรุปรายการผลการทดลองที่ต้องส่ง

นิสิตเขียนรายงานที่มีหน้าปกที่มี ชื่อการทดลอง รหัสอุปกรณ์ วันที่ทำการทดลอง วันที่ส่งรายงาน ชื่อและรหัสนิสิตในกลุ่ม ภายในเนื้อหาารายงานให้แยกหัวข้อตามการทดลอง พร้อมด้วยผลการทดลองตามรายการดังต่อไปนี้ (คะแนนของความสมบูรณ์รายงานจะให้ตามรายการข้างล่าง)

การจัดการข้อมูล

อธิบายรายละเอียดของข้อมูล การจัดการข้อมูล (เช่น pre-processing ใดๆ) การแบ่งข้อมูล หรือ pre-analysis ใดๆ ที่นิสิตดูแลเบื้องต้น ก่อนจะทำการทดลอง

การทดลอง 1: การเลือกแบบจำลอง

1. กราฟแสดงผลการประมาณ (fitting) กับข้อมูลของกลุ่มแบบจำลอง ARX
2. กราฟแสดงผลการประมาณ (fitting) กับข้อมูลของกลุ่มแบบจำลอง state-space
3. ตารางแสดงค่า BIC, AICc, FPE ของแบบจำลอง S_1, \dots, S_5 และ A_1, \dots, A_5 พร้อมทั้งค่า T_s, T_d ที่ใช้
4. กราฟการตรวจสอบความสมเหตุสมผลของแบบจำลอง ARX 2 แบบจำลองแรกที่พิจารณา ในกราฟนี้ให้แสดง zero-pole plot, fitting กับข้อมูลชุด validation, และ residual analysis อภิปรายว่าแบบจำลองใดถูกเลือก ด้วยเหตุผลอะไร
5. กราฟการตรวจสอบความสมเหตุสมผลของแบบจำลองปริภูมิย่อย 2 แบบจำลองแรกที่พิจารณา ในกราฟนี้ให้แสดง zero-pole plot, fitting กับข้อมูลชุด validation, และ residual analysis อภิปรายว่าแบบจำลองใดถูกเลือก ด้วยเหตุผลอะไร
6. แสดงแบบจำลอง ARX และแบบจำลองปริภูมิย่อยที่ถูกเลือก ทั้งในเวลาต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง หาค่า DC gain และค่าคงตัวเวลา อภิปรายผลความแตกต่างระหว่างแบบจำลอง ARX และปริภูมิย่อย ว่าเหมือนกันหรือต่างกัน ด้วยเหตุผลใด
7. MATLAB codes ที่ใช้ในการทดลอง (เขียนตัวแปรให้สื่อความได้ดี และมี comment ให้อ่านรู้เรื่อง)

การทดลอง 2: แบบจำลองระบบที่ต่อคลัทช์

1. แสดงแบบจำลองเวลาไม่ต่อเนื่องของระบบที่ไม่ต่อคลัทช์ และระบบที่ต่อคลัทช์ แสดงค่าคงตัวเวลา และ DC gain
2. กราฟ zero-pole plot ของระบบที่ต่อ/ไม่ต่อคลัทช์ (ใน 1 กราฟ)
3. กราฟ step response ของระบบที่ต่อ/ไม่ต่อคลัทช์ (ใน 1 กราฟ)
4. อภิปรายผลความแตกต่างของแบบจำลองที่ได้สองแบบจำลองว่าเหมือนกัน หรือต่างกันอย่างใด ด้วยเหตุผลใด
5. MATLAB codes ที่ใช้ในการทดลอง (เขียนตัวแปรให้สื่อความได้ดี และมี comment ให้อ่านรู้เรื่อง)

การทดลอง 3: แบบจำลองระบบที่มีโพล

1. แสดงรูปแบบปัญหาการประมาณพารามิเตอร์แบบจำลอง ARX ที่มี 2 สัญญาณเข้า ด้วยวิธีกำลังสองต่ำสุด
2. ผลการประมาณพารามิเตอร์ K , K_I , τ ที่ได้
3. อภิปรายผลการทดลองกับค่า K_I ที่ได้ว่ามีความหมายอย่างไร ค่า K , τ ที่ได้ ต่างจากแบบจำลองที่ประมาณเมื่อตอนระบบไม่มีโพล (ในการทดลอง 1) หรือไม่ ด้วยเหตุใด
4. นิสิตเสนอวิธีการประมาณแบบจำลองที่มีโพล ด้วยวิธีอื่น หรือโครงสร้างแบบจำลองอื่น ได้หรือไม่ ให้นำเสนอ
5. MATLAB codes ที่ใช้ในการทดลอง (เขียนตัวแปรให้สื่อความได้ดี และมี comment ให้อ่านรู้เรื่อง)

บทที่ 11

การทดลอง S2: การหาเอกลักษณ์ของกระบวนการความร้อน

จิตโกมุท ส่งศิริ

วัตถุประสงค์

เพื่อให้นิสิตประยุกต์ใช้วิธีการประมาณฟังก์ชันถ่ายโอนเวลาต่อเนื่องเพื่อหาเอกลักษณ์ของระบบความร้อน

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. นิสิตสามารถประยุกต์ใช้วิธีการหาเอกลักษณ์กับระบบความร้อนได้

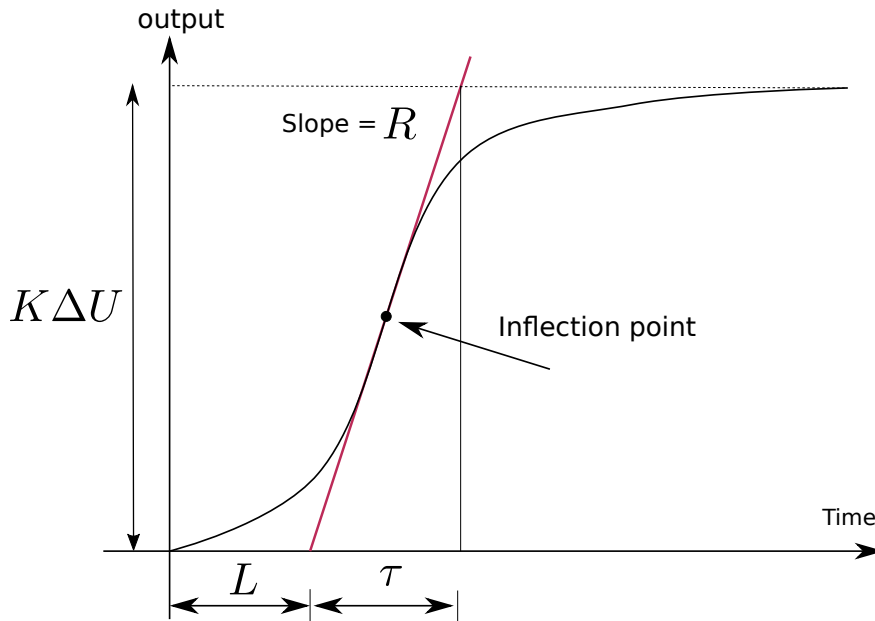
อุปกรณ์ที่ใช้

1. คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง/นิสิต (นิสิตนำมาเอง)
2. installed MATLAB ที่มี system identification toolbox

11.1 บทนำ

การทดลองหาเอกลักษณ์ของกระบวนการความร้อนนั้น เราจะอ้างอิงการใช้แบบจำลองอันดับหนึ่งที่มีค่าประวิงเวลา (2.21) ที่เป็นวิธีหนึ่งในการประมาณระบบอันดับสูงด้วยแบบจำลองอย่างง่าย ในการหาค่าพารามิเตอร์ K , τ , L อย่างง่าย คือการดูผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้น หรือเรียกอีกอย่างว่า กราฟตอบสนองของกระบวนการ (process reaction curve) ในรูปที่ 11.1 ด้วยการทำตามขั้นตอนดังนี้ [SMED11, §6]

1. กำหนดให้สัญญาณเข้าแบบขั้นมีขนาดเท่ากับ $\Delta U = M$ ค่าอัตราขยาย K จึงหาได้จากอัตราส่วนของค่าในภาวะอยู่ตัวของสัญญาณออกกับค่า M



รูป 11.1: การหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองอันดับหนึ่งที่มีค่าประวิงเวลาจากกราฟตอบสนองกระบวนการ

2. ลากเส้นสัมผัสผ่านจุดเปลี่ยนความชันของกราฟ จุดที่เส้นสัมผัสนี้ลากตัดกับแกนเวลาจะเป็นค่า L
3. ลากเส้นสัมผัสให้ไปตัดกับค่าภาวะอยู่ตัวของสัญญาณออก (ที่ $y = KM$) เราจะได้ว่าจุดตัดนี้จะสอดคล้องกับเวลา $t = \tau + L$ ดังนั้น ค่า τ จึงได้จากการลบ L ออกจากค่าที่จุดตัดแกนเวลานี้

การอ่านค่าพารามิเตอร์จากกราฟดังกล่าวข้างต้น อาจจะมีผลผิดพลาดจากการหาจุดเปลี่ยนความชัน ใน [SMED11, S6] ได้เสนอวิธีที่สองของ Sundaresan และ Krishnaswamy ที่เสนอให้หาเวลา t_1 และ t_2 ที่มีค่า 35% และ 85.3% ของเวลาตอบสนองตามลำดับ จากนั้นพารามิเตอร์ L กับ τ หาได้จาก

$$L = 1.3t_1 - 0.29t_2 \tag{11.1}$$

$$\tau = 0.67(t_2 - t_1) \tag{11.2}$$

วิธีที่สาม เป็นการใช้ข้อมูลจากผลตอบหลายจุดมาประมาณพารามิเตอร์ด้วยวิธีกำลังสองต่ำสุด สมมติให้ $\{t_i, y(t_i)\}_{i=1}^N$ คือคู่ลำดับเวลาและค่าผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นขนาด M จะเห็นว่า $y(t)$ มีผลตอบเป็น

$$y(t) = KM(1 - e^{-(t-L)/\tau})$$

ดังนั้น เมื่อสมมติให้ $y(\infty)$ หมายถึงค่า y ที่สถานะอยู่ตัวนั่นคือเท่ากับ KM เมื่อเราเลื่อนแกนเวลา $t - L$ และจัดรูปสมการ $y(t)$ ใหม่ เราจะได้ว่า

$$\log \left(\frac{y(\infty) - y(t_i)}{y(\infty)} \right) = -\frac{t_i - L}{\tau}, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

สมการดังกล่าวข้างต้นนั้นเป็นสมการเชิงเส้นในพารามิเตอร์ $1/\tau$ และ L/τ จึงสามารถแก้หาได้ด้วยวิธีกำลังสองต่ำสุดเชิงเส้น

การประมาณฟังก์ชันถ่ายโอน

โครงสร้างของแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปของระบบเชิงเส้นไม่แปรผันตามเวลา คือ

$$y = Gu + He \tag{11.3}$$

โดยที่ u, y, e คือสัญญาณเข้า (ที่ทราบค่า) สัญญาณออก และสัญญาณรบกวน ตามลำดับ ในการหาเอกลักษณ์ของระบบนั้น ผู้ใช้จำเป็นต้องสมมติโครงสร้างของแบบจำลองที่จะใช้ หากเราใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเวลาต่อเนื่องเป็นแบบจำลองนั้น ใน system identification toolbox ของ MATLAB ที่กำหนดโครงสร้างโดยคำสั่ง `idtf` จะมีรูปแบบ

$$y(t) = Gu(t) + e(t) \tag{11.4}$$

นั่นคือ ในแบบจำลองนี้ จะสมมติให้ $H = I$ กล่าวคือสัญญาณรบกวนเข้ามามีผลต่อระบบแบบบวกเชิงเส้น โดยที่ไม่มีผลพลวัตเพิ่มเติมเข้ามา นอกจากนี้ $G(s) = N(s)/D(s)$ และพารามิเตอร์ใน $N(s), D(s)$ คือสิ่งที่ต้องประมาณ โดยจะใช้คำสั่ง `tfest` สำหรับแบบจำลองในกลุ่มนี้

การประมาณแบบจำลองกระบวนการ

จากโครงสร้างทั่วไป (11.3) การใช้แบบจำลองของกระบวนการ (process model) ใน system identification toolbox ที่กำหนดโครงสร้างด้วยคำสั่ง `idproc` จะมีรูปแบบดัง (11.3) โดยที่ G จะเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนที่บรรยายด้วยตำแหน่งโพลและศูนย์กับค่าประวิงเวลา ส่วน H นั้นจะอยู่ในรูป $H(s) = C(s)/A(s)$ เมื่อ $C(s)$ และ $A(s)$ ต่างก็เป็นพหุนามที่มีอันดับเท่ากันและต้องทำให้ $H(0) = I$ (นั่นคือเทอมในค่าคงที่ของพหุนามจะมีค่าเท่ากับหนึ่ง) การ parametrize $H(s)$ ดังกล่าวจะทำให้เราสามารถสมมติพลวัตของสัญญาณรบกวน ให้เสมือนเป็น ARMA process (ที่ผู้ใช้จะเลือกให้เป็นอันดับหนึ่งหรือสอง) ตัวอย่างเช่น ผู้ใช้กำหนดโครงสร้างแบบจำลองกระบวนการให้มี 1 โพล ไม่มีศูนย์ มีค่าประวิงเวลา และให้สัญญาณรบกวนเป็น ARMA process อันดับหนึ่ง เราจะได้ว่าแบบจำลองอยู่ในรูป

$$Y(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{\tau s + 1}U(s) + \frac{(1 + c_1s)}{(1 + d_1s)}E(s) \tag{11.5}$$

และการประมาณพารามิเตอร์อันได้แก่ ค่าประวิงเวลา ค่าอัตราขยาย ตำแหน่งศูนย์และโพล รวมไปถึงพารามิเตอร์ใน ARMA process จะใช้จากคำสั่ง `procest` สำหรับแบบจำลองในกลุ่มนี้

หลักการประมาณแบบจำลอง

ในหัวข้อนี้จะบรรยายหลักการประมาณแบบจำลองที่ system identification toolbox ใน [Mat] กำหนดให้ θ คือพารามิเตอร์ของแบบจำลอง และ $e(t, \theta)$ คือค่าผิดพลาดของการประมาณด้วยแบบจำลองที่มีพารามิเตอร์ θ ณ เวลา t การประมาณพารามิเตอร์ในแบบจำลองเป็นปัญหาค่าเหมาะที่สุดที่หาค่า θ ที่ทำให้ฟังก์ชันสูญเสีย (loss function)

$$V(\theta) = (1/N) \sum_{t=1}^N e^T(t, \theta)W(\theta)e(t, \theta) \tag{11.6}$$

มีค่าน้อยที่สุด โดยที่ $W(\theta)$ เรียกว่าเมทริกซ์ถ่วงน้ำหนักและเป็นเมทริกซ์บวก (positive definite) ที่กำหนดโดยผู้ใช้ (default mode คือ $W = I$)

เราจะเห็นว่า V เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นใน θ การหาค่า θ จึงใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุด (optimization) ที่ต้องอาศัยวิธีการปรับค่า θ (search method) และค่าคาดเดาเริ่มต้น (initial guess) สำหรับ default mode ใน System Identification Toolbox นั้นใช้ค่า θ เริ่มต้น ที่แก้มาจากวิธีการประมาณแบบ instrument variable method (รายละเอียดอ่านเพิ่มเติมได้ใน [Son]) และการปรับค่า θ ใช้การลองหลายวิธีตามลำดับ ดังรายการ

- **gn** Subspace Gauss-Newton least squares search
- **lm** Levenberg-Marquardt least squares search (เป็นวิธีประมาณ Hessian matrix แบบหนึ่ง)
- **gna** Adaptive subspace Gauss-Newton search
- **grad** Steepest descent least squares search

และเมื่อ search direction ทิศทางใดให้ค่าฟังก์ชันสูญเสียที่ลดลง ก็จะใช้วิธีนั้น

สำหรับค่าประวิงเวลาในแบบจำลอง (ที่ผู้ใช้จะกำหนดว่ามี หรือไม่มีก็ได้) ถ้าหากแบบจำลองมีค่าประวิงเวลา ผู้ใช้ก็สามารถกำหนดได้ว่าจะกำหนดเป็นค่าที่ทราบ (จากความรู้ทฤษฎีเบื้องต้น จากผลการทดลองก่อนหน้านี้ หรืออื่นๆ) หรือจะให้เป็นค่าที่ต้องการประมาณ ใน toolbox นี้ การประมาณค่าประวิงเวลาที่เป็นส่วนหนึ่งของการประมาณฟังก์ชันถ่ายโอนหรือแบบจำลองกระบวนการ (ด้วยคำสั่ง **tfest**, **procest** จะใช้คำสั่ง **delayest** ที่ประมาณ T_d จากการใช้แบบจำลอง ARX

$$y(t) + a_1y(t-1) + a_2y(t-2) + \dots + a_p y(t-p) = b_1u(t-T_d) + b_2u(t-T_d-1) + \dots + b_q u(t-T_d-q+1) + e(t) \quad (11.7)$$

ในคำสั่ง **delayest** นั้นจะแปรค่า T_d ไปหลายค่า สำหรับ p, q ค่าหนึ่งๆ (ที่มี default $p = q = 2$) แล้วดูว่าค่า T_d ใดทำให้ฟังก์ชันสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด อนึ่ง การประมาณค่าประวิงเวลา ยังมีวิธีการอื่นที่ไม่อิงกับแบบจำลอง ดังเช่น การประมาณ FIR (finite impulse response) แล้วดูว่าผลตอบอิมพัลส์ที่ sequence ใดเริ่มมีค่าไม่เป็นศูนย์อย่างมีนัยยะสำคัญ เช่น เราประมาณ FIR ได้ว่า $h(0) = 0.001, h(1) = 0.0003, h(2) = 1.5, h(3) = 3, \dots$, เราอาจสรุปได้ว่าระบบมีค่าประวิงเวลาเท่ากับ 2 การใช้หลักการเช่นนี้อยู่ในคำสั่ง **impulseeest** ที่จะพลอตกราฟผลตอบอิมพัลส์จาก FIR และแสดงช่วงนัยยะสำคัญให้พิจารณา

เมื่อใดที่ผู้ใช้มีเงื่อนไขเพิ่มเติมของพารามิเตอร์ในแบบจำลอง ตัวอย่างเช่นในแบบจำลอง (11.5) ที่ค่า K, τ และ L ควรมีค่าเป็นบวก (เพราะเป็นอัตราขยาย ค่าคงตัวเวลา และค่าประวิงเวลา ตามลำดับ) เราสามารถจัดรูปแบบปัญหาเป็นการประมาณแบบมีเงื่อนไข โดยการใส่ช่วงค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าคาดเดาเริ่มต้นของพารามิเตอร์ดังกล่าวได้ ด้วยการกำหนดโครงสร้างของแบบจำลอง ตัวอย่างเช่น การกำหนดแบบจำลองเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนและจะประมาณด้วย **tfest** เรากำหนดตัวแปร **sysInit** ให้เป็นตัวกำหนดของแบบจำลอง **idtf** ที่มี $N(s) = n_1, D(s) = 1 + d_1s$ และมีค่าประวิงเวลาที่ต้องประมาณ (NaN จะหมายถึง พารามิเตอร์ที่ต้องประมาณ)

```
sysInit.idtf(NaN, [1 NaN], 'ioDelay', NaN);
```

จากนั้น ให้กำหนด structure ของ **sysInit** ตามที่ต้องการดังตารางที่ 11.1 แล้วใช้คำสั่ง

```
M = tfest(estdata, sysInit);
```

ที่จะหมายความว่า **M** เป็น model object ที่ประมาณแบบจำลองที่มีข้อกำหนดจาก **sysInit** กับข้อมูล **estdata** สำหรับตัวอย่างการใช้แบบจำลองกระบวนการใน (11.5) เรากำหนดโครงสร้างแบบจำลอง ด้วยคำสั่ง

```
sysInit = idproc('P1D','TimeUnit','minutes');
opt = procestOptions('DisturbanceModel','ARMA1'); % first-order ARMA
```

ที่เป็นการบอกว่า `sysInit` จะเป็นแบบจำลองกระบวนการที่มีโพล 1 ตัวและมีค่าประวิงเวลา (P1D) และมีตัวเลือกเสริมที่บอกว่า กระบวนการนี้มีสัญญาณรบกวนเป็น ARMA อันดับหนึ่ง เก็บไว้ใน `opt` จากนั้นให้กำหนด structure ของ `sysInit` ตามที่ต้องการดังตารางที่ 11.2 แล้วใช้คำสั่ง

```
M = procest(estdata,sysInit,opt);
```

ที่จะหมายความว่า `M` เป็น model object ที่ประมาณแบบจำลองที่มีข้อกำหนดจาก `sysInit` กับข้อมูล `estdata` ด้วยตัวเลือกเสริม `opt`

ตาราง 11.1: ตัวเลือกการกำหนดเงื่อนไขของพารามิเตอร์ในฟังก์ชันถ่ายโอนที่กำหนดโครงสร้างจากคำสั่ง `idtf`

Field	ความหมาย
<code>sysInit.Structure.num.Value</code>	ค่าคาดเดาเริ่มต้นของ numerator สำหรับการประมาณ
<code>sysInit.Structure.num.Minimum</code>	ค่าต่ำสุดของ numerator ที่จะบังคับ
<code>sysInit.Structure.num.Maximum</code>	ค่าต่ำสุดของ numerator ที่จะบังคับ
<code>sysInit.Structure.den.Value</code>	ค่าคาดเดาเริ่มต้นของ denominator สำหรับการประมาณ
<code>sysInit.Structure.den.Minimum</code>	ค่าต่ำสุดของ denominator ที่จะบังคับ
<code>sysInit.Structure.den.Maximum</code>	ค่าต่ำสุดของ denominator ที่จะบังคับ
<code>sysInit.Structure.ioDelay.Value</code>	ค่าคาดเดาเริ่มต้นของค่าประวิงเวลาสำหรับการประมาณ
<code>sysInit.Structure.ioDelay.Minimum</code>	ค่าต่ำสุดของค่าประวิงเวลาที่จะบังคับ
<code>sysInit.Structure.ioDelay.Maximum</code>	ค่าต่ำสุดของค่าประวิงเวลาที่จะบังคับ

ตาราง 11.2: ตัวเลือกการกำหนดเงื่อนไขของพารามิเตอร์ในฟังก์ชันถ่ายโอนที่กำหนดโครงสร้างจากคำสั่ง `idproc`

Field	ความหมาย
<code>sysInit.Structure.Kp.Value</code>	ค่าคาดเดาเริ่มต้นของ K_p สำหรับการประมาณ
<code>sysInit.Structure.Kp.Minimum</code>	ค่าต่ำสุดของ K_p ที่จะบังคับ
<code>sysInit.Structure.Kp.Maximum</code>	ค่าต่ำสุดของ K_p ที่จะบังคับ
<code>sysInit.Structure.Tp1.Value</code>	ค่าคาดเดาเริ่มต้นของค่าคงตัวเวลา (ตัวแรก) สำหรับการประมาณ
<code>sysInit.Structure.Tp1.Minimum</code>	ค่าต่ำสุดของค่าคงตัวเวลา (ตัวแรก) ที่จะบังคับ
<code>sysInit.Structure.Tp1.Maximum</code>	ค่าต่ำสุดของค่าคงตัวเวลา (ตัวแรก) ที่จะบังคับ
<code>sysInit.Structure.Td.Value</code>	ค่าคาดเดาเริ่มต้นของค่าประวิงเวลาสำหรับการประมาณ
<code>sysInit.Structure.Td.Minimum</code>	ค่าต่ำสุดของค่าประวิงเวลาที่จะบังคับ
<code>sysInit.Structure.Td.Maximum</code>	ค่าต่ำสุดของค่าประวิงเวลาที่จะบังคับ

สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมของตัวเลือกในการประมาณฟังก์ชันถ่ายโอนด้วย `tfest` สามารถดูได้จาก `tfestoptions` <https://www.mathworks.com/help/ident/ref/tfestoptions.html> หรือตัวเลือกของการประมาณแบบจำลองกระบวนการด้วย `procest` สามารถดูได้จาก `procestoptions` <https://www.mathworks.com/help/ident/ref/procestoptions.html>

การวัดคุณภาพของการประมาณ

ใน `system identification toolbox` จะใช้ตัวชี้วัดต่างๆ ดังนี้

- **FitPercent** เปอร์เซ็นต์การประมาณ จะให้ค่า

$$\text{FitPercent} = 100 \left(1 - \frac{\|y - \hat{y}\|_2}{\|y - \bar{y}\|_2} \right)$$

โดยที่ y คือค่าวัดของสัญญาณออก \bar{y} คือค่าเฉลี่ยของค่าวัด และ \hat{y} คือค่าสัญญาณออกจากแบบจำลอง ค่า **FitPercent** นี้มีค่าได้ตั้งแต่ $-\infty$ ถึง 100 ซึ่งหากมีค่าเป็นลบ หมายความว่าแบบจำลองประมาณผลตอบจริงได้แย่มาก หาก **FitPercent** มีค่าเป็นศูนย์ หมายความว่าแบบจำลองนั้นทำได้ดีเพียงแต่เท่ากับการใช้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับค่าเฉลี่ยของ y (แบบจำลองง่าย)

- **LossFcn** ค่าฟังก์ชันสูญเสีย ซึ่งถ้าหากผู้ใช้กำหนดค่าเมทริกซ์ถ่วงค่าน้ำหนัก หรือการทำ regularization ค่าฟังก์ชันสูญเสียจะรวมผลของตัวเลือกเหล่านี้ไปด้วย
- **MSE** ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง

$$\text{MSE} = (1/N) \sum_{t=1}^N e^T(t, \theta)e(t, \theta)$$

11.2 สิ่งที่ต้องเตรียมมา

1. นิสิตทบทวนระบบความร้อนและเนื้อหาในหัวข้อที่ 2.2
2. นิสิตอ่านหลักการของการประมาณแบบจำลองในบทนี้
3. นิสิตทำความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้คำสั่งใน system identification toolbox ใน MATLAB เช่น `iddata`, `tfest`, `procest`, `compare`
4. รายการข้อมูลสัญญาณเข้าและสัญญาณออกจากระบบมอเตอร์ ที่เก็บจากแล็บ P1 ดังรายการต่อไปนี้

`data_thermal_labp1_setpoint.txt`

`data_thermal_pulse.txt`

11.3 วิธีทดลอง

การทดลองนี้จะประมาณฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบความร้อนด้วยวิธีต่างๆ จากหัวข้อที่ 2.2 ในหัวข้อที่ 2.2.3 แบบจำลองของระบบความร้อนนั้นมีสัญญาณออกที่สนใจสองตัวแปร อันได้แก่ T_1 และ T_2 (อุณหภูมิของ block และอุณหภูมิที่ตำแหน่งมีฉนวนมากัน) ทั้งสองตัวแปรคืออุณหภูมิที่อยู่ในรูปสัญญาณแรงดันที่วัดจากเซนเซอร์ เราจะพิจารณาการประมาณฟังก์ชันถ่ายโอน 2 ฟังก์ชัน ดังนี้

1. $G_1(s)$ ฟังก์ชันถ่ายโอนจาก v_i ไปยัง T_1 (หน่วยเป็นโวลต์ทั้งคู่)
2. $G_2(s)$ ฟังก์ชันถ่ายโอนจาก v_i ไปยัง T_2 (หน่วยเป็นโวลต์ทั้งคู่)

โดยที่จะมีสมมติฐานของโครงสร้างฟังก์ชันถ่ายโอน และวิธีที่ใช้ประมาณ ต่างกันไปในแต่ละการทดลอง ในการทดลองนั้น ขอให้ นิสิตพึงระลึกว่า T_1, T_2 ที่พิจารณาในสมการพลวัตนั้น คือสัญญาณแรงดันที่แปรไปตาม $\Delta T = T - T_a$ (ผลต่างของอุณหภูมิ จริงกับอุณหภูมิ ณ จุดทำงาน) แต่เซนเซอร์ที่วัดได้นั้น จะอ่านค่า T_1 กับ T_2 เป็นค่าสัญญาณแรงดันที่แปรไปตามอุณหภูมิ (ไม่ได้ลบค่าอุณหภูมิ ณ จุดทำงาน) และขอให้ใช้หน่วยของเวลาเป็นนาที เนื่องจากกระบวนการความร้อนมีพลวัตที่ช้า สำหรับข้อมูลที่ใช้ในการทดลองนั้น ให้แบ่งข้อมูลชุดประมาณและชุดตรวจสอบ (training:validation) ด้วยอัตราส่วน 50:50 (หากเก็บข้อมูลมาครบถ้วนตามที่กำหนดไว้ใน P1) แต่หากข้อมูลมีน้อยให้แบ่งอัตราส่วนใหม่ตามความเหมาะสม

การทดลอง 1: การประมาณพารามิเตอร์จากกราฟ

จากผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นของทั้ง T_1, T_2 ที่ได้จาก

`data_thermal_labp1_setpoint.txt`

ให้พลอตผลตอบทั้งสองในกราฟเดียวกัน และหากจะประมาณทั้ง G_1 กับ G_2 ให้เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่งที่มีค่าประวิงเวลาดัง (2.21) ให้ประมาณพารามิเตอร์ K, τ, L จากกราฟผลตอบสนอง (ทั้งสามวิธี) และบันทึกค่าลงในตาราง

ตาราง 11.3: พารามิเตอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่งที่มีค่าประวิงเวลาของระบบความร้อน

ระบบ	K	τ (นาที)	L (นาที)
G_1			
G_2			

การทดลอง 2: การประมาณ G_1

ในการทดลองนี้จะใช้ข้อมูล

`data_thermal_pulse.txt`

ที่มีสัญญาณเข้าเป็น pulse ในการกระตุ้นระบบ เพื่อประมาณ G_1 ที่มีโครงสร้างต่างกัน หรือด้วยวิธีที่ต่างกัน ดังรายการต่อไปนี้ ขอให้ตั้งชื่อตัวแปรแบบจำลองตามรายการที่ให้ไว้

1. **sysTF**: ให้สร้าง G_1 ด้วย `idtf` ที่เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนมีโพล 1 ตัว ไม่มีศูนย์ และมีค่าประวิงเวลา และประมาณพารามิเตอร์ด้วยคำสั่ง `tfest`
2. **sysTF_init**: ให้ G_1 มีโพล 1 ตัว ไม่มีศูนย์ และมีค่าประวิงเวลา และกำหนดเงื่อนไขบังคับของพารามิเตอร์ที่จะประมาณ ดังในตารางที่ 11.1 ด้วยความรู้เบื้องต้นจากผลการประมาณพารามิเตอร์ในตารางที่ 11.3
 - กำหนดค่าคาดเดาเริ่มต้น และค่าต่ำสุดของ Numerator of G_1
 - กำหนดค่าคาดเดาเริ่มต้น และค่าต่ำสุดของ Denominator of G_1
 - กำหนดค่าคาดเดาเริ่มต้น ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของค่าประวิงเวลาใน G_1
3. **sysP1D**: ให้สร้าง G_1 ด้วย `idproc` ที่เป็นกระบวนการที่มีโพล 1 ตัว มีค่าประวิงเวลา และประมาณพารามิเตอร์ด้วยคำสั่ง `procest`
4. **sysP1D_noise**: ให้สร้าง G_1 เหมือน `sysP1D` และกำหนดเงื่อนไขบังคับของจะประมาณ ดังในตารางที่ 11.2 ด้วยความรู้เบื้องต้นจากผลการประมาณพารามิเตอร์ในตารางที่ 11.3
 - กำหนดค่าคาดเดาเริ่มต้น และค่าต่ำสุดของอัตราขยายของ G_1
 - กำหนดค่าคาดเดาเริ่มต้น และค่าต่ำสุดของค่าคงตัวเวลาใน G_1
 - กำหนดค่าคาดเดาเริ่มต้น และค่าต่ำสุดของค่าประวิงเวลาใน G_1

นอกจากนี้ เพิ่มส่วนพลวัตของสัญญาณรบกวนด้วยการใส่ตัวเลือกของแบบจำลอง ARMA อันดับ 1 ด้วยการใช้คำสั่ง

```
opt = procestOptions('DisturbanceModel','ARMA1'); % first-order ARMA
sysP1D_noise = procest(estdata,sysInit,opt)
```

(เมื่อ `estdata` คือข้อมูลที่ใช้ประมาณ `sysInit` คือตัวเลือกโครงสร้างแบบจำลอง และ `opt` คือตัวเลือกของกระบวนการ)

ให้สังเกตผลของ residual analysis จากแต่ละแบบจำลอง และแสดงผลของการประมาณด้วยข้อมูล training และ validation แสดงกราฟผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นของทุกแบบจำลอง (ใน 1 กราฟ) อภิปรายว่าแบบจำลองใดเหมาะสมกับการอธิบาย T_1

การทดลอง 3: การประมาณ G_2

ในการทดลองนี้จะใช้ข้อมูล

`data_thermal_pulse.txt`

ที่มีสัญญาณเข้าเป็น pulse ในการกระตุ้นระบบ เพื่อประมาณ G_2 ที่มีโครงสร้างต่างกัน หรือด้วยวิธีที่ต่างกัน ดังรายการต่อไปนี้ ขอให้ตั้งชื่อตัวแปรแบบจำลองตามรายการที่ให้ไว้

1. **sysTF**: ให้สร้าง G_2 ด้วย `idtf` ที่เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนมีโพล 2 ตัว ไม่มีศูนย์ และมีค่าประวิงเวลา และประมาณพารามิเตอร์ด้วยคำสั่ง `tfest`
2. **sysTF_init**: ให้ G_2 มีโพล 2 ตัว ไม่มีศูนย์ และมีค่าประวิงเวลา และกำหนดเงื่อนไขบังคับของพารามิเตอร์ที่จะประมาณ ดังในตารางที่ 11.1 ด้วยความรู้เบื้องต้นจากผลการประมาณพารามิเตอร์ในตารางที่ 11.3
 - กำหนดค่าคาดเดาเริ่มต้น และค่าต่ำสุดของ Numerator of G_2
 - กำหนดค่าคาดเดาเริ่มต้น และค่าต่ำสุดของ Denominator of G_2
 - กำหนดค่าคาดเดาเริ่มต้น ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของค่าประวิงเวลาใน G_2
3. **sysP1D**: ให้สร้าง G_2 ด้วย `idproc` ที่เป็นกระบวนการที่มีโพล 1 ตัว มีค่าประวิงเวลา และประมาณพารามิเตอร์ด้วยคำสั่ง `procest`
4. **sysP2D**: ให้สร้าง G_2 ด้วย `idproc` ที่เป็นกระบวนการที่มีโพล 2 ตัว มีค่าประวิงเวลา และประมาณพารามิเตอร์ด้วยคำสั่ง `procest`
5. **sysP2D_noise**: ให้สร้าง G_2 เหมือน `sysP2D` และกำหนดเงื่อนไขบังคับของจะประมาณ ดังในตารางที่ 11.2 ด้วยความรู้เบื้องต้นจากผลการประมาณพารามิเตอร์ในตารางที่ 11.3
 - กำหนดค่าคาดเดาเริ่มต้น และค่าต่ำสุดของอัตราขยายของ G_2
 - กำหนดค่าคาดเดาเริ่มต้น และค่าต่ำสุดของค่าคงตัวเวลาทั้งสองตัวใน G_2
 - กำหนดค่าคาดเดาเริ่มต้น และค่าต่ำสุดของค่าประวิงเวลาใน G_2

นอกจากนี้ เพิ่มส่วนพลวัตของสัญญาณรบกวนด้วยการใส่ตัวเลือกของแบบจำลอง ARMA อันดับ 1 ด้วยการใช้คำสั่ง

```
opt = procestOptions('DisturbanceModel','ARMA1'); % first-order ARMA
sysP2D_noise = procest(estdata,sysInit,opt)
```

(เมื่อ `estdata` คือข้อมูลที่ใช้ประมาณ `sysInit` คือตัวเลือกโครงสร้างแบบจำลอง และ `opt` คือตัวเลือกของกระบวนการ)

ให้สังเกตผลของ residual analysis จากแต่ละแบบจำลอง แสดงผลของการประมาณด้วยข้อมูล training และ validation แสดงกราฟผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นของทุกแบบจำลอง (ใน 1 กราฟ) อภิปรายว่าแบบจำลองใดเหมาะสมกับการอธิบาย T_2

สรุปรายการผลการทดลองที่ต้องส่ง

นิสิตเขียนรายงานที่มีหน้าปกที่มี ชื่อการทดลอง รหัสอุปกรณ์ วันที่ทำการทดลอง วันที่ส่งรายงาน ชื่อและรหัสนิสิตในกลุ่ม ภายในเนื้อหากรายงานให้แยกหัวข้อตามการทดลอง พร้อมด้วยผลการทดลองตามรายการดังต่อไปนี้ (คะแนนของความสมบูรณ์รายงานจะให้ตามรายการข้างล่าง)

การจัดการข้อมูล

อธิบายรายละเอียดของข้อมูล การจัดการข้อมูล (เช่น pre-processing ใดๆ) การแบ่งข้อมูล หรือ pre-analysis ใดๆ ที่นิสิตดูผลเบื้องต้น ก่อนจะทำการทดลอง

การทดลอง 1: การประมาณพารามิเตอร์จากกราฟ

1. กราฟผลตอบสนองต่อสัญญาณชั้นของ T_1 และ T_2
2. ตารางพารามิเตอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่งที่มีค่าประวิงเวลาของระบบความร้อนดังตารางที่ 11.3
3. อธิบายว่า T_2 มีผลตอบที่เร็วหรือช้ากว่า T_1 ที่สังเกตได้จากพารามิเตอร์ใด และด้วยเหตุผลใด

การทดลอง 2: การประมาณ G_1

1. ตารางแสดงแบบจำลองที่ประมาณได้
2. กราฟ residual analysis ของทุกแบบจำลอง (ใน 1 กราฟและใช้หลาย subplot)
3. กราฟแสดงผลการประมาณของทุกแบบจำลองกับข้อมูลชุดประมาณ (ใน 1 plot)
4. กราฟแสดงผลการประมาณของทุกแบบจำลองกับข้อมูลชุดตรวจสอบ (ใน 1 plot)
5. กราฟผลตอบสนองต่อสัญญาณชั้นของทุกแบบจำลอง (ใน 1 plot)
6. อธิบายความเกี่ยวข้องของผลจากทุกตารางและทุกกราฟว่าสัมพันธ์กันอย่างไร อธิบายว่าแบบจำลองใดเหมาะสมกับการอธิบาย T_1
7. MATLAB codes ที่ใช้ในการทดลอง

การทดลอง 3: การประมาณ G_2

1. ตารางแสดงแบบจำลองที่ประมาณได้
2. กราฟ residual analysis ของทุกแบบจำลอง (ใน 1 กราฟและใช้หลาย subplot)
3. กราฟแสดงผลการประมาณของทุกแบบจำลองกับข้อมูลชุดประมาณ (ใน 1 plot)
4. กราฟแสดงผลการประมาณของทุกแบบจำลองกับข้อมูลชุดตรวจสอบ (ใน 1 plot)

5. กราฟผลตอบแทนต่อสัญญาณชั้นของทุกแบบจำลอง (ใน 1 plot)
6. อภิปรายความเกี่ยวข้องของผลจากทุกตารางและทุกกราฟว่าสัมพันธ์กันอย่างไร อภิปรายว่าแบบจำลองใดเหมาะสมกับการอธิบาย T_2
7. MATLAB codes ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [FPEN02] G.F. Franklin, J.D. Powell, and A. Emami-Naeini. *Feedback control of dynamic systems*. Pearson Prentice Hall, 4 edition, 2002.
- [Mat] Mathworks. System identification toolbox user's guide. https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/ident/index.html. Accessed: January 13, 2020.
- [OM12] P. Van Overschee and B. De Moor. *Subspace identification for linear systems: Theory–Implementation–Applications*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [OY10] K. Ogata and Y. Yang. *Modern control engineering*, volume 17. Pearson Upper Saddle River, NJ, 2010.
- [Pay] L. Payne. Tuning PID control loops for fast response. <https://www.controleng.com/articles/tuning-pid-control-loops-for-fast-response/>. Accessed: January 13, 2020.
- [SMED11] D.E. Seborg, D.A. Mellichamp, T.F. Edgar, and F.J. Doyle. *Process dynamics and control*. John Wiley and Sons, 2011.
- [Son] J. Songsiri. EE531 system identification handouts. <http://jitkomut.eng.chula.ac.th/ee531.html>. Accessed: January 13, 2020.
- [SS89] T. Söderström and P. Stoica. *System Identification*. Prentice Hall International, London, 1989.
- [Tec13a] TecEquipment Ltd. *CE103 Thermal process*, 2013. <https://www.tecequipment.com/thermal-control-process-apparatus>.
- [Tec13b] TecEquipment Ltd. *CE105MV Coupled tanks*, 2013. <https://www.tecequipment.com/coupled-tanks-apparatus>.
- [Tec13c] TecEquipment Ltd. *CE110 Servo trainer*, 2013. <https://www.tecequipment.com/servo-trainer>.
- [Tec13d] TecEquipment Ltd. *CE120 Controller*, 2013. <https://www.tecequipment.com/controller>.

[WAB⁺11] M. Wongsaisuwan, S. Arunsawatwong, D. Banjerdpongchai, W. Khovidhungij, and J. Songsiri. 2102331 feedback control laboratory handouts. <http://jitkomut.eng.chula.ac.th/ee331.html>, 2011. Accessed: January 13, 2020.

[Won20] M. Wongsaisuwan. EE433 digital control systems handouts, 2020. Chulalongkorn University.