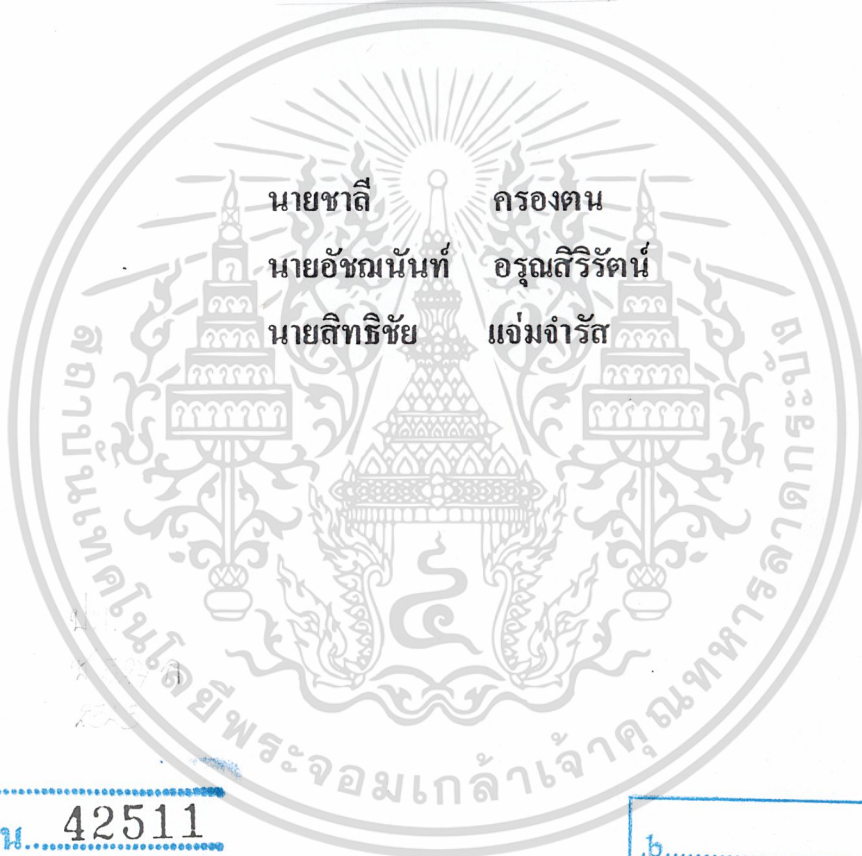


การควบคุมความเร็วของระบบ 2 ความเฉื่อย
SPEED CONTROL OF TWO-INERTIA RESONANT SYSTEMS



นายชาติ ครอบตน
นายอชฌนันท์ อรุณศิริรัตน์
นายสิทธิชัย แจ่มจำรัส

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 42511
วัน, เดือน, ปี 24 พ.ค. 2545

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

611204586

SPEED CONTROL OF TWO-INERTIA RESONANT SYSTEMS





**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
DEPARTMENT OF INDUSTRIAL INSTRUMENTATION TECHNOLOGY
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท การควบคุมความเร็วของระบบ 2 ความเฉื่อย
SPEED CONTROL OF TWO-INERTIA RESONANT SYSTEMS
นักศึกษาผู้จัดทำ นายชาติ ครองตน รหัสประจำตัว 41012086
นายอชฌนนท์ อรุณศิริรัตน์ รหัสประจำตัว 41012096
นายสิทธิชัย แจ่มจำรัส รหัสประจำตัว 41012106
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
ปีการศึกษา 2543

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท	ลายมือชื่อ
อาจารย์ไสว พงศ์สวัสดิ์	
อาจารย์อานินต์ น่วมสำราญ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 10 เมษายน พ.ศ. 2544
สถานที่สอบ ณ ห้องสอบปริญญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

ภาควิชารับรองแล้ว



(ผศ.ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์)

หัวหน้าภาควิชา ฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมความเร็วของระบบ 2 ความเฉื่อย
SPEED CONTROL OF TWO-INERTIA RESONANT SYSTEMS

นักศึกษาผู้จัดทำ นายชาติ ครองตน
นายอัฒนันท์ อรุณศิริรัตน์
นายสิทธิชัย แจ่มจำรัส

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ไสว พงศ์สวัสดิ์
อาจารย์อาจินต์ น่วมตำราญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวชดเชย เพื่อให้สามารถบรรลุวัตถุประสงค์การกำจัดรีโซแนนซ์การบิดในระบบ 2 มวลที่ต่อกันด้วยเพลาขั้วระหว่างมอเตอร์กับโหลด ซึ่งทำให้ระบบควบคุมเป็นโครงสร้าง 2 ระดับชั้นของความถี่ ตัวชดเชยได้ถูกออกแบบจากแบบจำลองของระบบ 2 มวลที่ได้จากวิธีการหาแบบจำลองระบบโดยใช้วิธีหาสมการคุณลักษณะของระบบควบคุม และตัวชดเชยจะถูกตั้งเคราะห์ขึ้นโดยใช้การดัดแปลงสัญญาณนอกเป็นสัญญาณดิจิทัล และสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณนอกเชื่อมต่อกันด้วยคอมพิวเตอร์และใช้ซอฟต์แวร์ Matlab ในการออกแบบตัวควบคุมระบบ

Thesis Title SPEED CONTROL OF TWO-INERTIA RESONANT SYSTEMS

Authers Mr. Chalee Krongton
 Mr. Achanant Aroonsirirat
 Mr. Sittichai Jamchumrus

Thesis Advisor Mr. Sawai Pongswatd
 Mr. Arjin Numsomran

Year 2000

Abstract

This project describes the reduction of torsional resonance in a 2-mass system via pole-zero placement technique. The system consists of a motor coupled to an inertia load via a long shaft. The proposed compensation is of 2-DOF type. The design of the compensators uses the system model obtained from nonparametric identification. Implementation of the compensators uses op-amp technology. The compensators structure is biquad circuit plus PI-element. Simulation and experimental results confirm the effectiveness of this approach. The torsional resonance can be reduced dramatically with fast transient obtained. Disturbance rejection is also achieved. The compensated response shows infinitesimal steady-state error.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับคำปรึกษาและ ความอนุเคราะห์ จาก อาจารย์ไสว พงศ์สวัสดิ์ และอาจารย์อาจินต์ น่วมสำราญ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ได้ให้การสนับสนุนและคำปรึกษาในงานวิจัย จนสำเร็จตามจุดประสงค์

ขอขอบพระคุณภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรมและอาจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรมทุกท่าน ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง และความช่วยเหลือให้กำลังใจต่อผู้วิจัยจนสามารถทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้นลงตาม วัตถุประสงค์

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่บิดาและมารดา

คณะผู้จัดทำ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขต.....	1
1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน.....	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	3
2.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	3
2.1.1 ส่วนที่หยุดนิ่งอยู่กับที่.....	3
2.1.2 ส่วนที่เคลื่อนที่.....	4
2.2 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	6
2.2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดกระตุ้น.....	6
2.2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน.....	7
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็ว.....	8
2.4 แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ.....	10
2.5 ไคนามิกเบรกกิ้ง.....	12
2.6 ความเฉื่อย.....	13
2.7 ระบบอันดับ 1.....	15
2.8 ระบบอันดับ 2.....	17
2.9 การออกแบบระบบควบคุมในโดเมนเวลา.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การสร้างตัวควบคุม	36
3.1 กล่าวนำ	36
3.2 ฮาร์ดแวร์	38
3.2.1 การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A	38
3.2.2 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน	39
3.2.3 ชุดขับ	44
3.2.4 วงจรแหล่งจ่ายแรงดัน	48
3.3 โปรแกรมควบคุมที่ใช้ในโครงการ	51
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	53
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	64
5.1 บทสรุป	64
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	64
บรรณานุกรม	66
ภาคผนวก	67

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	5
2.2 แสดงวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดกระตุ้น	6
2.3 แสดงวงจรมวลย์ของมอเตอร์กระแสไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Shunt.....	7
2.4 แสดงวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	8
2.5 วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน	10
2.6 (a) การเบรกมอเตอร์.....	12
2.6 (b) การเบรกมอเตอร์	13
2.7 ระบบเชิงกลแบบหมุน	14
2.8 (a) An Inertia – damper system	15
2.8 (b) Free- body diagram	15
2.9 Step-response	17
2.10 (a) An Inertia –spring-damper system	18
2.10 (b) Free- body diagram	18
2.11 Step-response curves of a second-order system (ω_n)	21
2.12 ค่า Time constant ของ curve ที่ล้อมรอบ	23
2.13 (a) Two- inertia model	25
2.13 (b) Two- inertia model.....	25
2.13 (c) Two- inertia model.....	25
2.14 Block diagram of two-inertia resonant model	29
2.15 Block diagram of two-inertia resonant model.....	30
2.16 Process reaction curve	34
2.17 Ultimate method	35
3.1 รูปแบบ Project.....	36
3.2 รูปชุดโครงการ	37
3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ DC Motor กับ Encoder.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

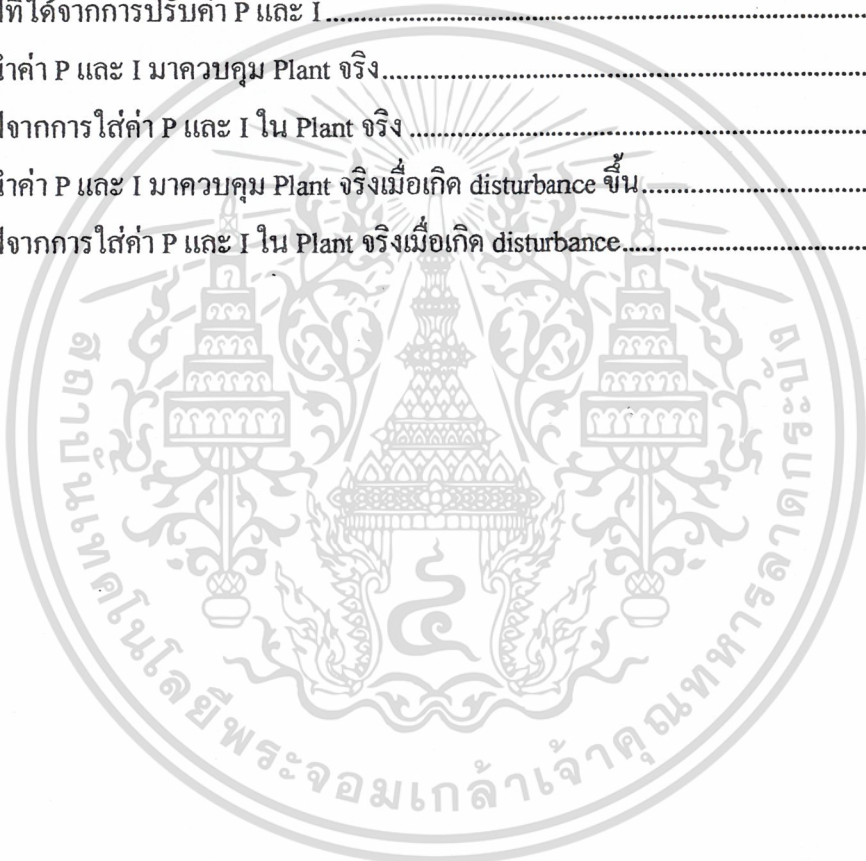
สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 การ์ดวงจร A/D และ D/A.....	38
3.5 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดัน	39
3.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานภายในของ IC LM 2917 N	40
3.7 แผ่นวงจร F/V	42
3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของวงจร Frequency to voltage.....	42
3.9 วงจร Frequency to voltage	43
3.10 ลูกคลื่นลักษณะ TL 494	44
3.11 แสดงการต่อสัญญาณทางด้าน Output	45
3.12 แผ่นวงจร Driver	46
3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของวงจร Driver	46
3.14 วงจร Driver	47
3.15 แผ่นวงจร Supply.....	48
3.16 วงจร Supply	49
3.16 วงจร Supply(ต่อ)	50
3.17 แสดงการเซตค่าพารามิเตอร์ของบล็อก Adapter.....	51
3.18 แสดงการเซตค่าพารามิเตอร์ของ RT_In.....	52
3.19 แสดงการเซตค่าพารามิเตอร์ของ RT_Out.....	52
4.1 Block diagram ของ Plant.....	53
4.2 การต่อ Simulink หาค่า τ_M และ τ_L	54
4.3 กราฟการหาค่า τ_M	54
4.4 กราฟการหาค่า τ_L	55
4.5 Block diagramของ Plant.....	56
4.6 ส่วนหนึ่งของ Block diagram เมื่อ $T_L = 0$	56
4.7 Block diagramของ Plant.....	57
4.8 Block diagramของ Plant.....	57
4.9 การ Simulink แบบ Closed loop	58
4.10 กราฟ Closed loop	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 การ Simulink ที่เกิด disturbance ขึ้น	59
4.12 กราฟที่เกิด disturbance	59
4.13 การ Simulink ที่มีการปรับค่า P	60
4.14 กราฟที่ได้จากการปรับค่า P	60
4.15 การ Simulink ที่มีการปรับค่า P และ I	61
4.16 กราฟที่ได้จากการปรับค่า P และ I	61
4.17 การนำค่า P และ I มาควบคุม Plant จริง	62
4.18 กราฟจากการใส่ค่า P และ I ใน Plant จริง	62
4.19 การนำค่า P และ I มาควบคุม Plant จริงเมื่อเกิด disturbance ขึ้น	63
4.20 กราฟจากการใส่ค่า P และ I ใน Plant จริงเมื่อเกิด disturbance	63



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความแตกต่างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้า.....	11
2.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของวิธี Process reaction curve	34
2.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ของวิธี Ultimate method	35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในวงการอุตสาหกรรมระบบเชิงกลที่มีความยืดหยุ่นนั้น โดยเฉพาะในงานที่ต้องการความเร็วในการตอบสนองสูง มักจะประสบปัญหาเนื่องมาจากรีโซแนนซ์การบิด (torsional resonance) อันอาจเป็นเหตุให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างทางกลและส่งผลเสียต่อเสถียรภาพของระบบ

รีโซแนนซ์การบิดเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับระบบเชิงกลที่การต่อคู่ควบภายในไม่สามารถจับโหลดได้อย่างสมบูรณ์แบบรีโซแนนซ์ การบิดมักเกิดขึ้นกับทุกระบบหมุนที่แหล่งกำเนิดพลังงานกับโหลดต่อคู่ควบกันด้วยเพลายาว ความยืดหยุ่นของเพลาส่งผลให้เกิดการบิดของเพลและการสั่นของระบบนอกจากนี้ความยืดหยุ่นของเพลและผลกระทบจากการสั่นจะมีผลต่อลักษณะการควบคุมความเร็วของโหลดด้วย

ในระบบเชิงกล พารามิเตอร์ของระบบจะถูกออกแบบให้มีค่าตายตัว ซึ่งเป็นการยากที่จะไปเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไข วิธีการหนึ่งซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวคือ ทำการชดเชยระบบโดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไขโครงสร้างทางกลและการเชื่อมต่อ เนื่องจากการยากที่จะกำหนดรายละเอียดทางเทคนิคให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาถึงสาเหตุการเกิดรีโซแนนซ์การบิดในระบบ 2 มวล
2. เพื่อค้นคว้าหาเทคนิคการออกแบบตัวชดเชย

1.3 ขอบเขต

1. จัดสร้างระบบ 2 มวล ประกอบด้วยมอเตอร์ 2 ตัวที่ต่อคู่ควบกันด้วย coupling
2. ออกแบบและสร้างตัวชดเชย

1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน

1. ศึกษาและดำเนินการจัดสร้างระบบ 2 มวล
2. ศึกษาและออกแบบตัวชดเชย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สร้างและทดสอบตัวชดเชย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถแก้ไขปัญหาการเกิดรีโซแนนซ์การบิดในระบบเชิงกล
2. สามารถประยุกต์วิธีการหาแบบจำลองของระบบกับงานทางด้านวิศวกรรมได้
3. สามารถนำวิธีการออกแบบตัวชดเชยไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

มอเตอร์ไฟฟ้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแตกต่างกันที่มอเตอร์ไฟฟ้าจะป้อนพลังงานไฟฟ้าเข้าไปและให้พลังงานกลออกมา แต่ตรงกันข้ามกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะให้พลังงานกลเข้าไปและจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมา นอกจากนี้ทิศทางของกระแสไฟฟ้าก็แตกต่างกันด้วย คือ มอเตอร์ไฟฟ้ารับกระแสไฟฟ้าจากภายนอก ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะจ่ายกระแสไฟฟ้าออกไปภายนอก

2.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ส่วนประกอบที่สำคัญของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงนั้นเหมือนกัน ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.1 โดยมีส่วนประกอบต่างๆดังนี้

2.1.1 ส่วนที่หยุดนิ่งอยู่กับที่ (Stator) ประกอบด้วย

2.1.1.1 เปลือกนอก (Frame หรือ Yoke) เป็นตัวยึดขั้วแม่เหล็กของส่วนที่อยู่กับที่พร้อมทั้งทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขั้วแม่เหล็กสามารถวิ่งได้ครบวงจร นอกจากนี้เปลือกนอกยังทำหน้าที่เป็นตัวยึดสำหรับติดตั้งเครื่องจักรรวมถึงเป็นแป้นยึดลูกปืน (Bearing) สำหรับเพลลาของตัวหมุน การทำเปลือกนอกทำได้โดยการขึ้นรูป การใช้เหล็กหล่อขึ้นหรือใช้วิธีม้วนเหล็กแผ่นแล้วเชื่อมเป็นวง

2.1.1.2 แกนเหล็กของขั้วเหล็กและขั้วแม่เหล็ก (Pole-core and Pole-shoe) ทั้งสองส่วนนี้ประกอประกอขึ้นกันขึ้นมาเพื่อทำหน้าที่เป็นแกนของขั้วแม่เหล็ก เพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นหลังจากที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำที่พันรอบแกนเหล็ก

2.1.1.3 ขดลวดที่พันรอบแกนเหล็ก (Pole Coils) ก็คือ Field Coil ที่ประกอบด้วยลวดกลมหรือลวดแบนที่ทำด้วยทองแดงหลายๆเส้น นำมาทำให้เป็นรูปร่างของขดตัวนำที่ต้องการแล้วนำขดลวดตัวนำนี้สวมทับลงไปบนแกนเหล็กของขั้วแม่เหล็ก ดังนั้นเมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดนี้ก็จะทำให้ขั้วแม่เหล็กมีอำนาจเป็นแม่เหล็กขึ้นมาโดยการผลิตเส้นแรงแม่เหล็กให้เกิดขึ้น เส้นแรงแม่เหล็กนี้จะถูกตัดผ่านโดยตัวนำภายในอาร์เมเจอร์อีกทีหนึ่ง

2.1.2 ส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotor) ประกอบด้วย

2.1.2.1 แกนเหล็กของอาร์เมเจอร์ (Armature Core) ทำจากแผ่นซิลิกอนหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร ผิวทั้ง 2 ข้างจะฉาบด้วยฉนวน แล้วนำมาอัดซ้อนเป็นรูปทรงกระบอก เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอรีซิสและกระแสไหลวนในแกนเหล็กผิวด้านนอกของทรงกระบอก จะทำเป็นร่อง(Slot)เรียงตามแนวเส้นรอบนอกของแกนเหล็กเพื่อให้พันขดลวดอาร์เมเจอร์ ส่วนตรงกลางก็เจาะรูเป็นวงกลมเพื่อเอาไว้ใส่แกนเหล็ก (Shaft) แล้วก็บากเป็นช่องสี่เหลี่ยมของรูที่เจาะนั้นร่องหนึ่งเพื่อใส่ คัวยึด (Lock) หรือกุญแจ (Key) ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้นระหว่างตัวอาร์เมเจอร์กับแกนเหล็ก นอกจากนี้ยังเจาะรูอากาศ (Air hole) เล็กๆทะลุผ่านอาร์เมเจอร์เพื่อระบายความร้อนด้วย

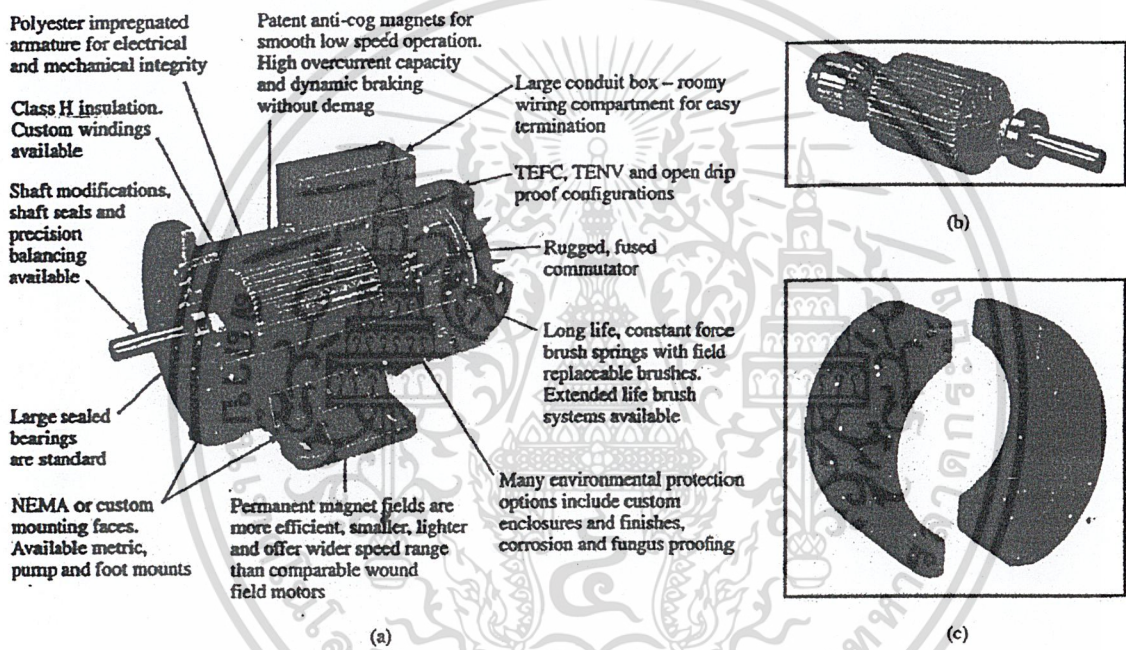
2.1.2.2 ขดลวดอาร์เมเจอร์(Armature winding)คือขดลวดที่พันอยู่ในร่องของอาร์เมเจอร์ ซึ่งมีการพันอยู่สองแบบหลักๆ คือ แบบLap winding แบบWave winding

2.1.2.3 คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) มีหน้าที่คือเป็นตัวที่เพิ่มความสะดวกในการนำกระแสออกมาจากตัวนำที่พันอยู่ในอาร์เมเจอร์ และเป็นตัวกลับกระแสไฟสลับที่เกิดขึ้นภายในอาร์เมเจอร์ให้เป็นกระแสไฟตรงหรือกระแสที่ไหลไปยังวงจรภายในทิศทางเดียวกัน รูปร่างของมันเป็นทรงกระบอกที่ประกอบด้วยซี่ทองแดงหลายซี่มาต่อรวมกันเป็นรูปทรงกระบอก ซี่ต่อซี่ที่ต่อชิดกันนั้นคั่นไว้ด้วยฉนวนหนาที่แข็งแรง แต่ละซี่ต่อไปยังขั้วต่อของคอมมิวเตเตอร์ เพื่อให้ตัวนำที่ฝังอยู่ใน อาร์เมเจอร์ยึดเกาะได้มั่นคงอีกทีหนึ่ง การป้องกันไม่ให้ซี่คอมมิวเตเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ต้องกระเด็นหลุดไปอันเนื่องมาจากแรงหนีศูนย์กลาง จึงใช้ห่วงวงแหวนที่ทำด้วยไม้ก้ำ ยึดซี่คอมมิวเตเตอร์ทั้งหมดไว้

2.1.2.4 แกนหมุน (Shaft) เป็นตัวรับน้ำหนักในส่วนต่างๆของโรเตอร์ทั้งหมด โดยถ่ายน้ำหนักนี้ไปยังลูกปืน (Bearing) ที่รองรับแกนนี้อีกทีหนึ่ง และมีหน้าที่เป็นตัวรับหรือถ่ายถอดการหมุนหรือการเคลื่อนที่ต่างๆที่เกิดขึ้นกับ โรเตอร์ แกนหมุนนี้เป็นที่ยึดเกาะของคอมมิวเตเตอร์ด้วย โดยมีฉนวนที่ทำด้วยไม้ก้ำกั้นไว้ระหว่างคอมมิวเตเตอร์กับแกนหมุน

2.1.2.5 แปรงถ่านและลูกปืน (Brushes and Bearings) แปรงถ่านมีหน้าที่เป็นตัวรวบรวมกระแสที่ได้จากคอมมิวเตเตอร์เพื่อส่งต่อไปยังวงจรภายนอก รูปร่างของแปรงถ่านเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งทำด้วยผงถ่านอันเป็นก้อนแปรงถ่านเหล่านี้ถูกยึดติดอยู่กับที่จับแปรงถ่าน (Brush Holder) ซึ่งเป็นกล่องสำหรับใส่แปรงถ่านลงไป ที่ยึดนี้ยึดติดกับเปลือกนอกอีกทีหนึ่ง ฉะนั้นหน้าสัมผัสของแปรงถ่านด้านหนึ่งก็จะสัมผัสกับซี่คอมมิวเตเตอร์ ส่วนด้านตรงข้ามก็ถูกกดจากสปริงอีกทีหนึ่ง ตรงด้านที่ถูกกดของแปรงถ่านต่อเข้ากับเส้นลวดทองแดงเล็กๆที่ถักเป็นเปีย

เพื่อส่งต่อกระแสที่ได้ จากแท่งถ่านไปยังวงจรรภายนอก จำนวนแท่งถ่านที่ใช้จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับว่ากระแสที่ได้รับจากคอมมิวเตเตอร์นั้นมีมากหรือน้อยเพียงใด ส่วนลูกป็นนั้นเป็นตัวที่ใช้สำหรับรับน้ำหนักทั้งหมด ที่ได้จากตัวหมุน และยังช่วยลดแรงเสียดทานที่แกนหมุนของตัวหมุนกระทำกับลูกป็นนั้น ปกติแล้ว ลูกป็นนี้จะยึดติดอยู่ที่ฝาครอบทั้งสองด้าน ที่จะต้องยึดติดกับเปลือกนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกทีหนึ่ง



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบ่งเป็น 4 ชนิด ดังนี้

2.2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดกระตุ้น (Separately Excited DC Motor)

2.2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน (Shunt DC Motor)

2.2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม (Series DC Motor)

2.2.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม (Compound Dc Motor) แบ่งเป็น

2.2.4.1 Short Shunt Compound DC Motor

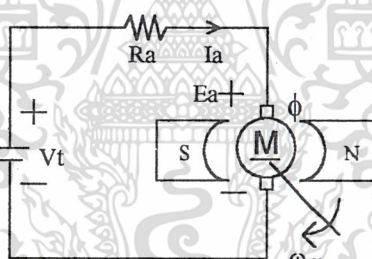
2.2.4.2 Long Shunt Compound DC Motor

แต่ในที่นี่จะกล่าวถึงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพียง 2 ชนิดซึ่งเป็นมอเตอร์ที่เราใช้

ในโครงการนี้ได้แก่

2.2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดกระตุ้น (Separately Excited DC Motor)

ซึ่งมีวงจรมูลยด์ังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดกระตุ้น

จากรูปที่ 2.2 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E_a = V_t - I_a R_a \quad \text{Volts} \quad (2.1)$$

$$E_a = K_a \phi \omega_m \quad \text{Volts} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

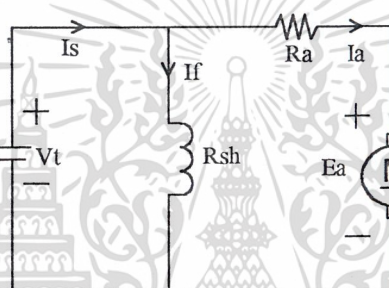
จาก (2.1) และ (2.2)

$$K_a \phi \omega_m = V_t - I_a R_a \quad (2.3)$$

$$\omega_m = \frac{V_t - I_a R_a}{K_a \phi} \quad \text{rps} \quad (2.4)$$

2.2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน (Shunt DC Motor) ซึ่งมีวงจรมุมลย์

ผังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงวงจรมุมลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ shunt

จากรูปที่ 2.3 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E_a = V_t - I_a R_a \quad \text{Volts} \quad (2.5)$$

$$E_a = K_a \phi \omega_m \quad \text{Volts} \quad (2.6)$$

จาก (2.5) และ (2.6)

$$K_a \phi \omega_m = V_t - I_a R_a \quad (2.7)$$

$$\omega_m = \frac{V_t - I_a R_a}{K_a \phi} \quad \text{rps} \quad (2.8)$$

$$I_s = I_f + I_a \quad \text{A} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็ว

ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แรงบิดทางไฟฟ้า (electromagnetic torque) เกิดจากฟลักซ์กระตุ้น (field flux) ϕ_f และกระแสอาร์เมเจอร์ i_a ส่วนแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) เกิดจากการหมุนของอาร์เมเจอร์ที่ความเร็วเชิงมุม ω_m และฟลักซ์กระตุ้น ϕ_f แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ซึ่งมีสมการดังนี้

$$T_{em} = k_t \phi_f i_a \quad (2.10)$$

$$e_a = k_e \phi_f \omega_m \quad (2.11)$$

จากสมการ (2.10) และ (2.11) จะได้

$$P_m = \omega_m T_{em} = k_t \phi_f \omega_m i_a \quad (2.12)$$

$$P_e = e_a i_a = k_e \phi_f \omega_m i_a \quad (2.13)$$

เมื่อ k_t คือ ค่าคงที่ของแรงบิด (torque constant)

k_e คือ ค่าคงที่ของโวลต์เตจ (voltage constant)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- e_a คือ แรงดันไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์
- i_a คือ กระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์
- ω_m คือ ความเร็วเชิงมุม
- ϕ_f คือ ฟลักซ์กระตุ้น
- P_m คือ กำลังทางกล
- P_e คือ กำลังทางไฟฟ้า

ที่สถานะคงตัว (steady state) เนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้ตัวกระตุ้นเป็นแบบแม่เหล็ก ϕ_f จะมีค่าคงที่ดังนี้ $k_T = k_t \phi_f$ และ $k_E = k_e \phi_f$ จะได้

$$T_{em} = k_T i_a \quad (2.14)$$

$$E_a = k_E \omega_m \quad (2.15)$$

จากวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขดกระตุ้นเป็นแม่เหล็กถาวร ความเร็วเชิงมุมมีค่าเท่ากับ

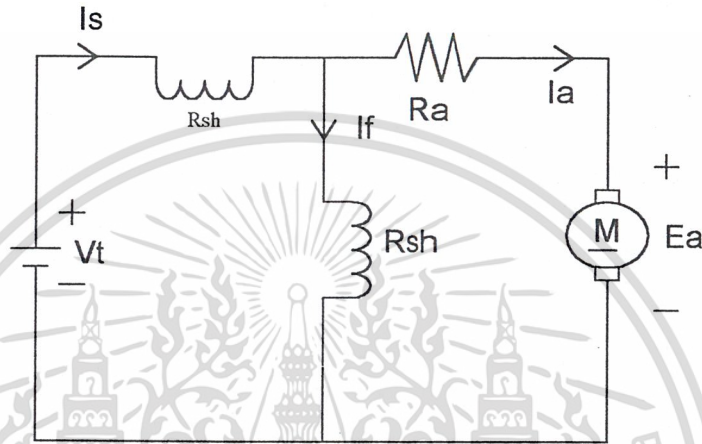
$$E_a = k_E \omega_m \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \omega_m &= \frac{1}{k_E} E_a \\ &= \frac{1}{k_E} (V_t - R_a I_a) \\ &= \frac{1}{k_E} \left(V_t - \frac{R_a T_{em}}{k_t} \right) \end{aligned} \quad (2.17)$$

ขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำการขับภาระทางกล ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของโรเตอร์กับแรงบิดที่ขับภาระซึ่งความเร็วของมอเตอร์จะลดลงเมื่อมอเตอร์มีภาระเพิ่มขึ้นหรือเพิ่มแรงบิดขึ้นที่มอเตอร์ตัวขับ แต่จะลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างของมอเตอร์

2.4 แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (Back EMF)

ถ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับอาร์เมเจอร์ จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในอาร์เมเจอร์ ซึ่งจะสร้างแรงและส่งผลให้เกิดแรงบิด จึงทำให้มอเตอร์หมุนได้ ขณะที่มอเตอร์หมุน มีแรงดันไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ ส่วนหนึ่งที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ เราเรียกว่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (Back EMF , E'_g)



รูปที่ 2.5 วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน

จากสมการ $\alpha = \frac{T}{J}$ ทำให้ทราบว่าแรงบิดที่จะทำให้มอเตอร์หมุนได้นั้นต้องมีอัตราเร่ง (α) มากกว่าความเฉื่อย เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำและเกิดแรงบิด ส่งผลให้มีอัตราเร่งเพื่อหมุนอาร์เมเจอร์อย่างต่อเนื่องเช่นกัน จนกระทั่งมอเตอร์มีความเร็วรอบคงที่คืออัตราเร่งเท่ากับศูนย์ แรงบิดจะเป็นศูนย์ด้วย เมื่อเป็นเช่นนี้จึงสันนิษฐานตาม สมการ $T = K\Phi I_a$ ได้ว่า กระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์กลายเป็นศูนย์ แต่เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าจ่ายให้กับมอเตอร์อยู่ เราจึงสันนิษฐานว่า มีแรงดันไฟฟ้าอื่นที่เกิดขึ้นในขดลวดอาร์เมเจอร์มีขนาดเท่ากันแต่มีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเราเรียกว่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (Back EMF , E'_g)

ในข้อสมมติฐานของเราคือ ขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์ต้องเป็นศูนย์นั้น ในความเป็นจริงแล้วกระแสไฟฟ้าส่วนนี้ไม่เป็นศูนย์ แต่ยังมีกระแสไฟฟ้าจำนวนหนึ่งเพื่อสร้างแรงบิดมาหักล้างความฝืดของมอเตอร์ ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ (V_t) ต้องมากกว่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (E'_g) ดังสมการต่อไปนี้

$$E'_g = V'_t - I_a R_a \quad (2.18)$$

- เมื่อ E'_g = แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ
 V'_t = แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วที่จ่ายให้มอเตอร์
 I_a = กระแสไฟฟ้าที่อาร์มเจอร์
 R_a = ความต้านทานของขดลวดอาร์มเจอร์

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าทิศทางของ E'_g จะสวนกับทิศทางของ I_a เมื่อ I_a เป็นส่วนประกอบของสมการแรงบิด คือ $T = K\phi I_a$ จึงสรุปได้ว่า E'_g เป็นตัวต้านแรงบิดหรือตัวต้านการหมุนของมอเตอร์นั่นเอง

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้า

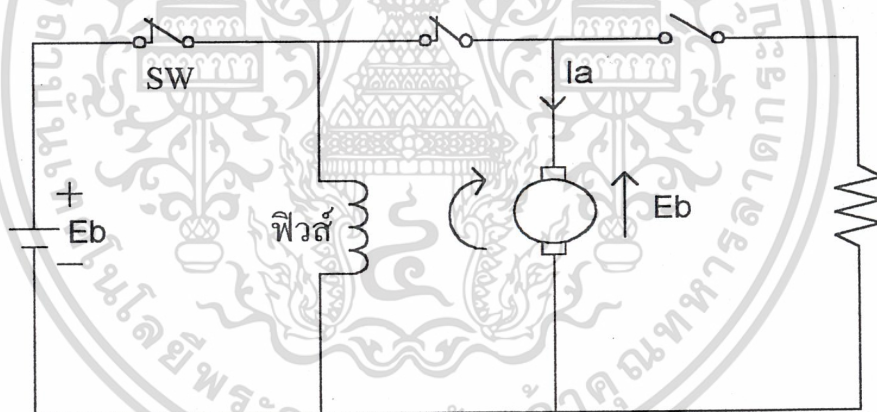
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	มอเตอร์ไฟฟ้า
1. แรงดันไฟฟ้าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดจากพลังงานกลไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้วทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า (Generated e.m.f.) ออกมา	1. แรงดันไฟฟ้าในมอเตอร์เกิดจากการจ่ายพลังงานไฟฟ้า (V'_t) ให้มอเตอร์แล้วทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (E'_g) ขึ้น
2. แรงต้านการเกิดแรงดันไฟฟ้า (E'_g) จะเป็นแรงต้านจากฟลักแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขั้วแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	2. แรงต้านการหมุนของมอเตอร์จะเป็นแรงต้านจากพลังงานไฟฟ้า นั่นคือแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (E'_g)
3. สมการแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ $E_g = V_t + I_a R_a$	3. สมการแรงดันไฟฟ้าต้านกลับของมอเตอร์ คือ $E'_g = V'_t - I_a R_a$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

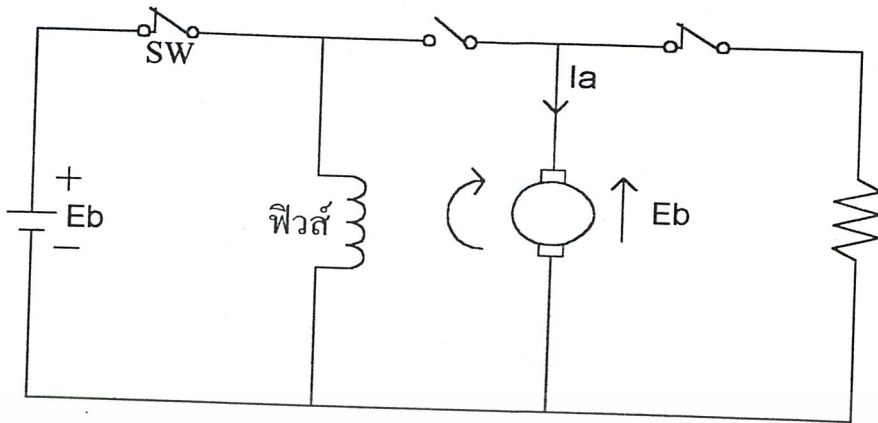
<p>4. สมการกระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์คือ</p> $I_a = I_L + I_f$ <p>เมื่อ $I_L =$ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายไป ยังโหลด</p>	<p>4. สมการกระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์</p> <p>คือ $I_a = I'_L - I_f$</p> <p>เมื่อ $I'_L =$ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์</p>
--	---

2.5 ไดนามิกเบรกกิ้ง (Dynamic braking)

เกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นวิธีการเบรกมอเตอร์ด้วยการทำให้พลังงานจลน์ในมอเตอร์กลายเป็นความร้อนที่ตัวของมอเตอร์หรือในตัวความต้านทานภายนอกแล้วกระจายหายไป เมื่อกระแสที่เกิดขึ้นไหลผ่านเข้าไปในตัวต้านทานภายนอกและวนกลับครบวงจรผ่านขดลวดของมอเตอร์ก็จะทำให้มีความร้อนเกิดขึ้นแล้วกระจายหายไปและพร้อมกันนั้นจะมีแรงหมุน หมุนกลับที่สลับกับการหมุนของมอเตอร์ วิธีนี้เห็นได้ว่าถ้าเป็น DC. Motor ดังรูปที่ 2.6



(a)



(b)

รูปที่ 2.6 การเบรกมอเตอร์

เมื่อต้องการเบรกมอเตอร์ให้ยกสวิทช์ของวงจรอาร์มเจอร์ให้เปิดออกและปิดสวิทช์ของวงจรตัวต้านทานภายนอกทดลอง แต่ยังคงค้างสวิทช์ในวงจรฟิวส์ไว้ตามเดิม มอเตอร์จะยังคงหมุนต่อไปด้วยความเฉื่อยจึงทำให้เปลี่ยนหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และจ่ายกระแสให้ตัวต้านทานภายนอก โดยมีทิศของกระแสกลับกับกระแสเดิม โดยกฎมือซ้ายของ Fleming จะทำให้เราเห็นว่าแรงหมุนที่เกิดขึ้นใหม่ในตัวมอเตอร์ จะมีทิศทางกลับทางหมุนกับของเดิมและจะมีความร้อนเกิดขึ้นกระจายหายไปทำให้มอเตอร์หยุดลงอย่างรวดเร็ว แล้วจึงยก SW ออก

2.6 ความเฉื่อย (Inertia)

ความเฉื่อย (J) นี้จะพบในระบบเชิงกลแบบหมุน แสดงคุณสมบัติของอุปกรณ์ซึ่งสะสมพลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่แบบหมุน

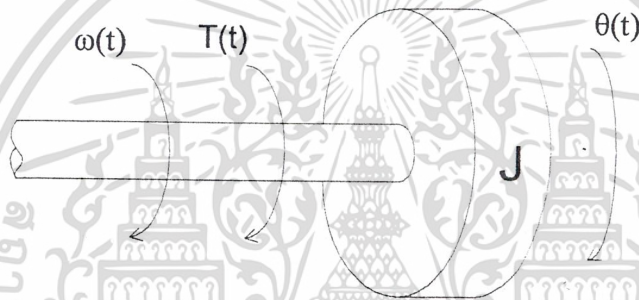
$$J = \frac{1}{2} mr^2 \tag{2.19}$$

- โดยที่
- m = มวลของจาน (Disk) หรือเพลา (Shaft)
 - r = รัศมีของจาน (Disk)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเฉื่อยมีผลกระทบต่อแรงบิดดังนี้

$$\begin{aligned}
 T(t) &= J\alpha(t) \\
 &= J \frac{d\omega(t)}{dt} \\
 &= J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} \quad (2.20)
 \end{aligned}$$



รูปที่ 2.7 ระบบเชิงกลแบบหมุน

โดยที่ ω = ความเร็วเชิงมุม

α = ความเร่งเชิงมุม

$T(t)$ = แรงบิด

$\theta(t)$ = ระยะแทนที่เชิงมุม

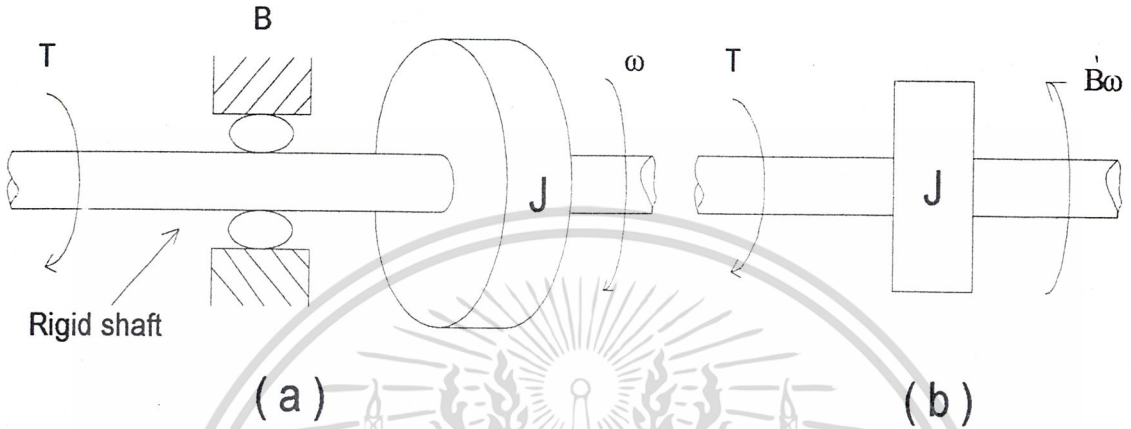
ความเฉื่อยที่เกิดขึ้นในระบบเชิงกลแบบหมุนเรียกว่า โมเมนต์ความเฉื่อยก็ได้เมื่อวัตถุมีโมเมนต์ความเฉื่อยมากขึ้นเท่าไรก็จะมี การต้านต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมมากขึ้นเท่านั้น

ถ้าระบบหนึ่งประกอบด้วยระบบเชิงกลแบบหมุน 2 ระบบ ซึ่งในแต่ละระบบเชิงกลแบบหมุนจะมีโมเมนต์ความเฉื่อยในตัวเอง ดังนั้นโมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของระบบเท่ากับโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบเชิงกลแบบหมุนทั้ง 2 ระบบรวมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ระบบอันดับ 1 (First - order)

พิจารณารูปที่ 2.8a เป็นตัวอย่างระบบเชิงกลแบบหมุนที่เป็นแบบ First-order รูปที่ 2.8b Free-body diagram โดยมีแรงบิด $T(t)$ เป็นอินพุตและความเร็วเชิงมุม $\omega(t)$ คือเอาต์พุต



รูปที่ 2.8 (a) An inertia-damper system

(b) Free-body diagram

จาก Free-body diagram จะได้สมการของแรงบิดคือ

$$T(t) - B\omega(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (2.21)$$

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) = T(t) \quad (2.22)$$

จากสมการที่ 2.22 นี้คือ สมการค่าสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของสมการดิฟเฟอเรนเชียลของ First-order ทำการ Take Laplace ในแต่ละเทอม โดยให้ค่าเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ จะได้

$$Js\omega(s) + B\omega(s) = T(s) \quad (2.23)$$

ดังนั้นทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{T(s)} = \frac{1}{Js + B} = \frac{1/J}{s + 1/J} \quad (2.24)$$

โดยที่ J = โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia), N-m/(rad/sec²)

B = ค่าสัมประสิทธิ์ตัวหน่วง (Damping coefficient), N-m/(rad/sec²)

จากสมการที่ 2.24 เป็นทรานเฟอร์ฟังก์ชัน First-order ของระบบเชิงกล โดย Pole ที่ $s = -B/J$ ไม่มี Zero และ Gain = $1/J$ โดยทั่วไปทรานเฟอร์ฟังก์ชันของ First-order คือ

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2.25)$$

พิจารณาระบบเชิงกลจะได้

$$G(s) = \frac{1/B}{J/B s + 1} \quad (2.26)$$

ให้ $\tau = J/B$ และ $K = 1/B$

$$\frac{\omega(s)}{T(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2.27)$$

ก็ได้ Time response จากสมการ 2.27 โดยใช้ Step signal โดยให้ค่า K และ τ เปลี่ยนไป จากอินพุท Unit-step $T(t) = \mu(t)$

$$T(s) = \frac{1}{s} \quad (2.28)$$

$$\omega(s) = \frac{K}{s(\tau s + 1)} = K \left[\frac{1}{s} - \frac{\tau}{\tau s + 1} \right] \quad (2.29)$$

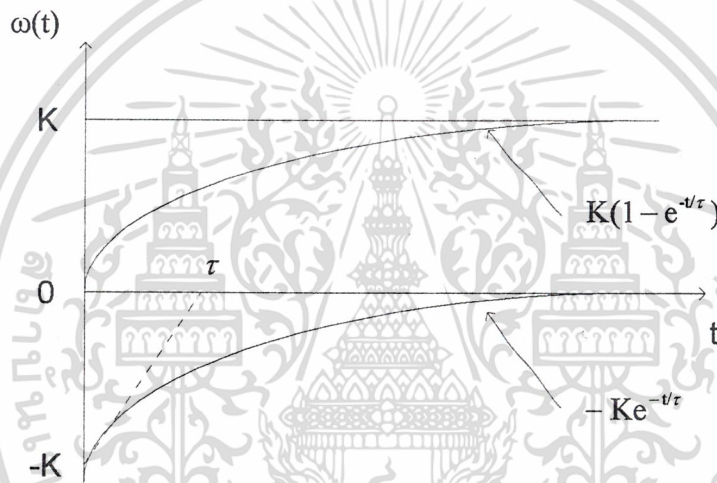
$$\omega(t) = K \left(1 - e^{-t/\tau} \right); t \geq 0 \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.30 จะได้ Step-response ดังรูปที่ 2.9 เป็นแบบ exponentially ในส่วนเริ่มต้นของ Slope ของ K/τ

$$\frac{d}{dt}(-Ke^{-t/\tau})|_{t=0} = \frac{K}{\tau} e^{-t/\tau}|_{t=0} = \frac{K}{\tau} \quad (2.31)$$

ในทอม Exponential ไม่ได้เป็น Zero ในขอบเขตของเวลา แม้ว่าจะเป็นทอมเริ่มต้นมาถึงค่าของ Zero ที่ $t = \tau$ พารามิเตอร์ τ ของระบบเรียกว่าค่า Time-constant

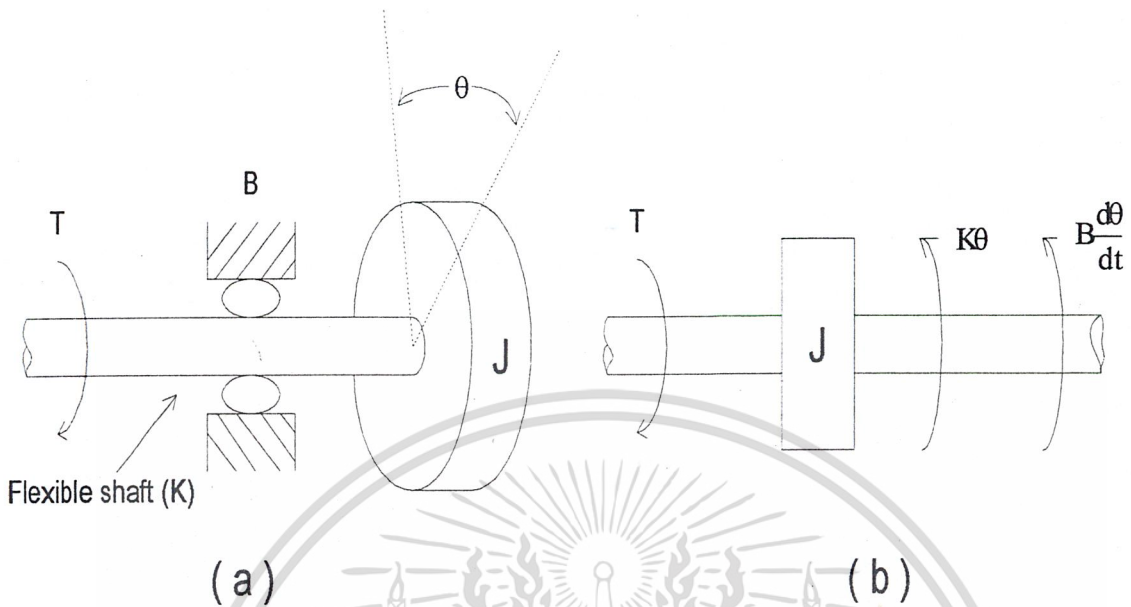


รูปที่ 2.9 step-response

2.8 ระบบอันดับ 2 (Second - order)

พิจารณาระบบเชิงกลในรูป 2.10a เป็นตัวอย่างของระบบ Second-order สมมติให้การหมุนของเพลา (shaft) ที่มีการบิดแบบสปริง รูปที่ 2.10b แสดง Free-body diagram โดยให้ แรงบิด $T(t)$ เป็นอินพุท และมุมของการเคลื่อนที่ $\theta(t)$ เป็นเอาท์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 (a) An inertia-spring-damper system

(b) A free-body diagram

จาก Free-body diagram จะ ได้สมการแรงบิดดังนี้

$$T(t) - B \frac{d\theta}{dt} - K\theta(t) = J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} \tag{2.32}$$

$$J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + K\theta(t) = t(t) \tag{2.33}$$

J,B,K คือค่าสัมประสิทธิ์คงที่ของสมการ Differential ของ Second-order ทำการ Take Laplace ในแต่ละเทอมของสมการ 2.33 (ให้ค่าเริ่มต้นที่ 0) จะ ได้

$$Js^2\theta(s) + Bs\theta(s) + K\theta(s) = T(s) \tag{2.34}$$

เพราะฉะนั้นทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{1}{Js^2 + Bs + K} = \frac{1/J}{s^2 + \frac{B}{J}s + \frac{K}{J}} \quad (2.35)$$

โดยที่ J = โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia), N-m/(rad/sec²)

B = ค่าสัมประสิทธิ์ตัวหน่วง (Damping coefficient), N-m/(rad/sec²)

K = ค่าคงที่ของสปริง , N-m/rad

จากสมการที่ 2.35 เป็น Second-order ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบเชิงกล โดยระบบมี 2 Pole ค่ารากสัมประสิทธิ์ polynomial ของ Second-order คือ B/J และ K/J ไม่มีค่า Zero และ Gain คือ $1/J$

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันมาตรฐานของ Second-order คือ

$$G(s) = \frac{K}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + 2\frac{\zeta}{\omega_n} s + 1} \quad (2.36)$$

ค่า parameters K, ζ, ω_n เราสามารถเห็นได้ในระยะสั้น พิจารณาระบบเชิงกลในสมการที่ 2.35

$$G(s) = \frac{1/K}{\frac{J}{K} s^2 + \frac{B}{K} s + 1} \quad (2.37)$$

ให้

$$K = \frac{1}{K}, \omega_n = \sqrt{\frac{K}{J}}, \zeta = \frac{1}{2} \frac{B}{\sqrt{BJ}} \quad (2.38a)$$

$$\frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.38b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า parameters ของระบบเชิงกล J, B, K สามารถที่จะแบ่งออกเป็น 4 สภาวะดังนี้

1. Undamped systems ($\zeta = 0$)

กรณีนี้รากของสมการคุณลักษณะ (Pole ของดูปปีด) จะอยู่บนแกน Imaginary ในระบบ s ซึ่งเอาที่พหุของระบบจะเกิดการแกว่ง (Oscillate) อย่างต่อเนื่องกันไป เนื่องจาก $B = 0$ (ไม่มีการหน่วง)

$$\frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{1/J}{s^2 + K/J} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + \omega_n^2} \quad (2.39)$$

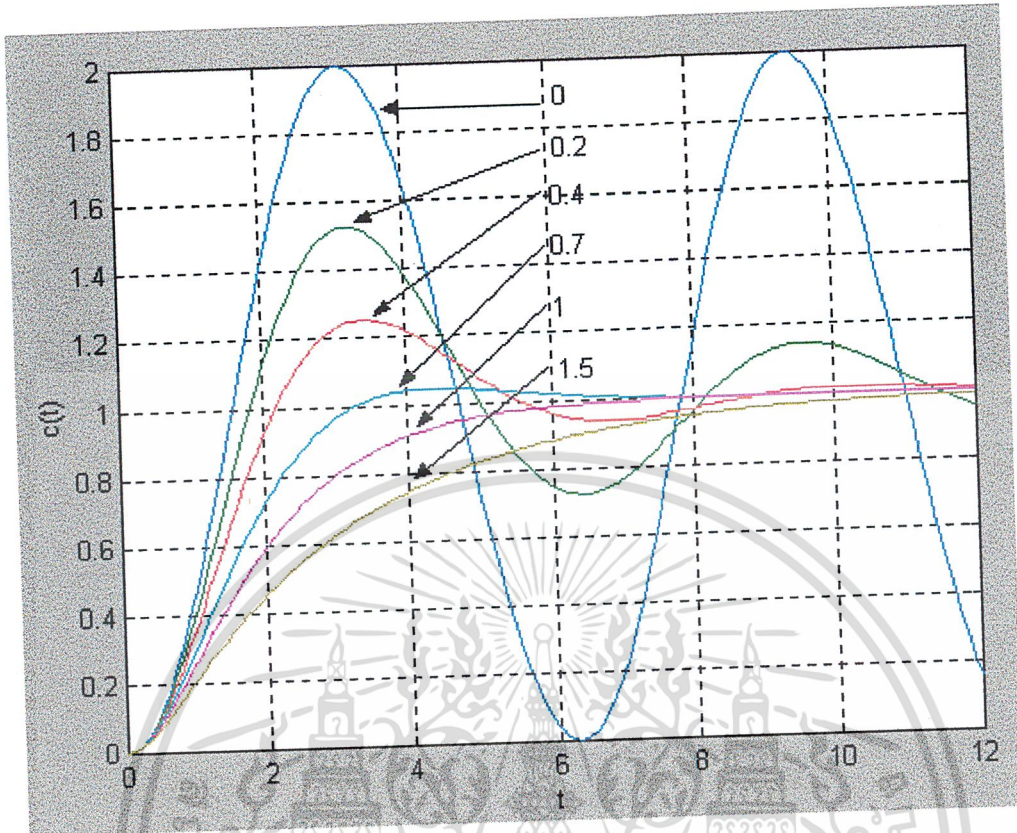
จากสมการที่ 2.38a จะได้ค่า K และ ω_n ที่ $\zeta = 0$

ให้ $T(t) = \mu(t)$ หรือ $T(s) = \frac{1}{s}$ จะได้

$$\theta(s) = \frac{K\omega_n^2}{s(s^2 + \omega_n^2)} = K \left[\frac{1}{s} - \frac{s}{s^2 + \omega_n^2} \right] \quad (2.40)$$

$$\theta(t) = K(1 - \cos\omega_n t); t \geq 0 \quad (2.41)$$

รูป Curve ที่ $\zeta = 0$ แสดงดังรูปที่ 2.11 โดยเราจะเรียก ω_n ว่า Undamped natural frequency



รูปที่ 2.11 Step-response curves of a second-order system ($\omega_n = 1$)

2. Underdamped system ($0 < \zeta < 1$)

กรณีนี้รากของสมการคุณลักษณะจะเป็นปริมาณเชิงซ้อน (Complex conjugate) และอยู่ทางครึ่งซ้ายในระนาบ S และระบบจะเป็นแบบ Underdamped ซึ่งผลตอบสนองชั่วครู่ของระบบ จะเกิดการแกว่งภายใต้การหน่วง
พิจารณากรณีที่การหน่วง (Damped) $B \neq 0$ ภายใต้สภาวะ

$$\frac{K}{J} > \left(\frac{B}{2J}\right)^2 \quad (2.43)$$

ในเทอมของพารามิเตอร์ ζ ในสมการที่ 2.35 ใช้ค่าเท่ากันคือ $0 < \zeta < 1$ พารามิเตอร์ ζ เรียกว่า Damping ratio โดยจะนำค่าที่ได้ไปใช้ในสมการที่ 2.35 โดย $T(t) = \mu(t)$ หรือ $\frac{1}{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$= K \left[\frac{1}{s} - \frac{s + \zeta\omega_n}{(s + \omega_n)^2 + \omega_d^2} - \frac{\zeta\omega_n}{(s + \zeta\omega_n + \omega_d^2)} \right] \quad (2.43a)$$

เมื่อ $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$

$$\theta(t) = K \left[1 - e^{-\zeta\omega_n t} \left(\cos\omega_d t + \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin\omega_d t \right) \right]$$

$$= K \left[1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin \left(\omega_d t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta} \right) \right]; t \geq 0 \quad (2.43b)$$

Step response ที่ได้จากสมการ 2.43b แสดงในรูปที่ 2.11 โดยใช้ค่า ζ ($0 < \zeta < 1$) และให้ค่า ω_n คงที่ กราฟที่ได้เป็นของค่า พารามิเตอร์ ζ ในช่วง $0 < \zeta < 1$ ของระบบ โดยแสดงถึงการเกิดการแกว่งของความถี่ $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ เรียก ω_d ว่า Damped natural frequency ถ้า $\zeta = 0$ จะทำให้ $\omega_d = \omega_n$ ทำให้ Response เข้าสู่ค่าสุดท้ายโดยไม่มี Overshooting และไม่มีการแกว่ง

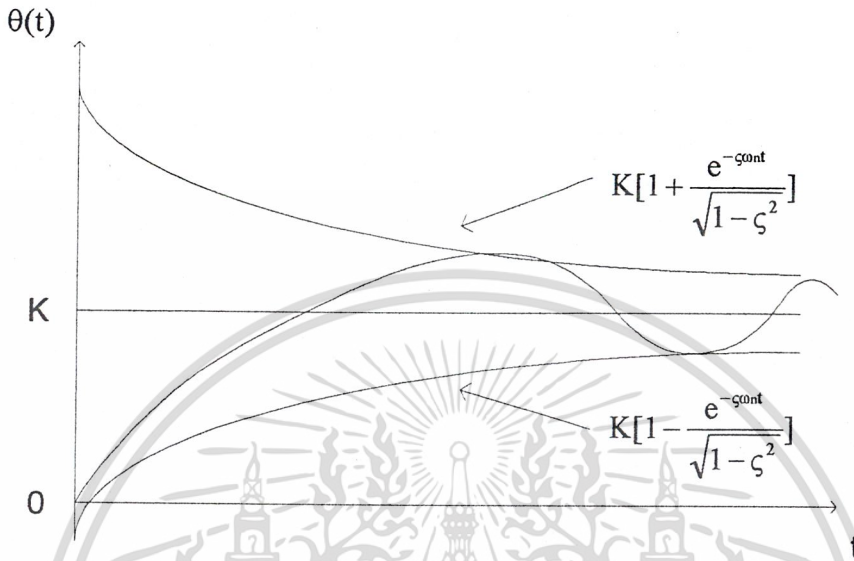
Curves $K \left[1 \pm \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \right]$ เป็น Curves ที่ล้อมรอบ Step response

โดยทั่วไป Response จะต้องอยู่ใน Curves ที่ล้อมรอบเสมอ ดังรูปที่ 2.12 ค่า Time constant ของ Curves ที่ล้อมรอบ คือ $\frac{1}{\zeta\omega_n}$

$$\zeta = \frac{1}{\zeta\omega_n} \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

K เป็นตัวกำหนด Steady-state ของ system response ที่มีอินพุทเป็นแบบ Unit step ค่าพารามิเตอร์นี้คือ System gain จะเป็นตัวเปลี่ยนค่าเอาต์พุทที่ Steady-state ใน response ที่มีผลมาจากการเปลี่ยนค่าอินพุท



รูปที่ 2.12 ค่า Time constant ของ curve ที่ล้อมรอบ

3. Critically damped system ($\zeta = 1$)

กรณีนี้รากของสมการคุณลักษณะจะมีค่าเท่ากัน และอยู่บนแกน Real ทางครึ่งซ้ายในระนาบ s ซึ่งผลตอบสนองต่อเวลาของระบบจะเหมือนหรือคล้ายกับผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งและไม่มีแกว่ง

กรณีการหน่วง $B \neq 0$ ภายใต้เงื่อนไข $\frac{K}{J} = \left[\frac{B}{2J} \right]^2$ เมื่อ $\zeta = 1$

ให้ $T(t) = \mu(t)$ หรือ $T(s) = 1/s$

$$\begin{aligned} \theta(s) &= \frac{K\omega_n^2}{s(s^2 + 2\omega_n s + \omega_n^2)} \\ &= K \left[\frac{1}{s} - \frac{\omega_n}{(s + \omega_n)^2} - \frac{1}{(s + \omega_n)} \right] \end{aligned} \tag{2.45}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta(t) = K[1 - e^{-\zeta\omega_n t} - \omega_n t e^{-\zeta\omega_n t}]; t \geq 0 \quad (2.46)$$

Curves ที่แสดง $\zeta = 1$ แสดงในรูปที่ 2.11 จากสมการที่ 2.46 Response ที่ $\zeta = 1$ จะไม่เกิด Overshoot และไม่เกิดการแกว่ง แต่ที่ค่า $\zeta < 1$ Response จะเกิดการแกว่ง

4. Overdamped system ($\zeta > 1$)

กรณีนี้รากของสมการคุณลักษณะจะมีค่าไม่เท่ากัน แต่จะอยู่บนแกน Real ทางครึ่งซ้าย ในระนาบ s ทั้งหมด และผลตอบสนองต่อเวลาของระบบจะเหมือนหรือคล้ายกับผลตอบสนองของอันดับหนึ่งและไม่มีการแกว่ง

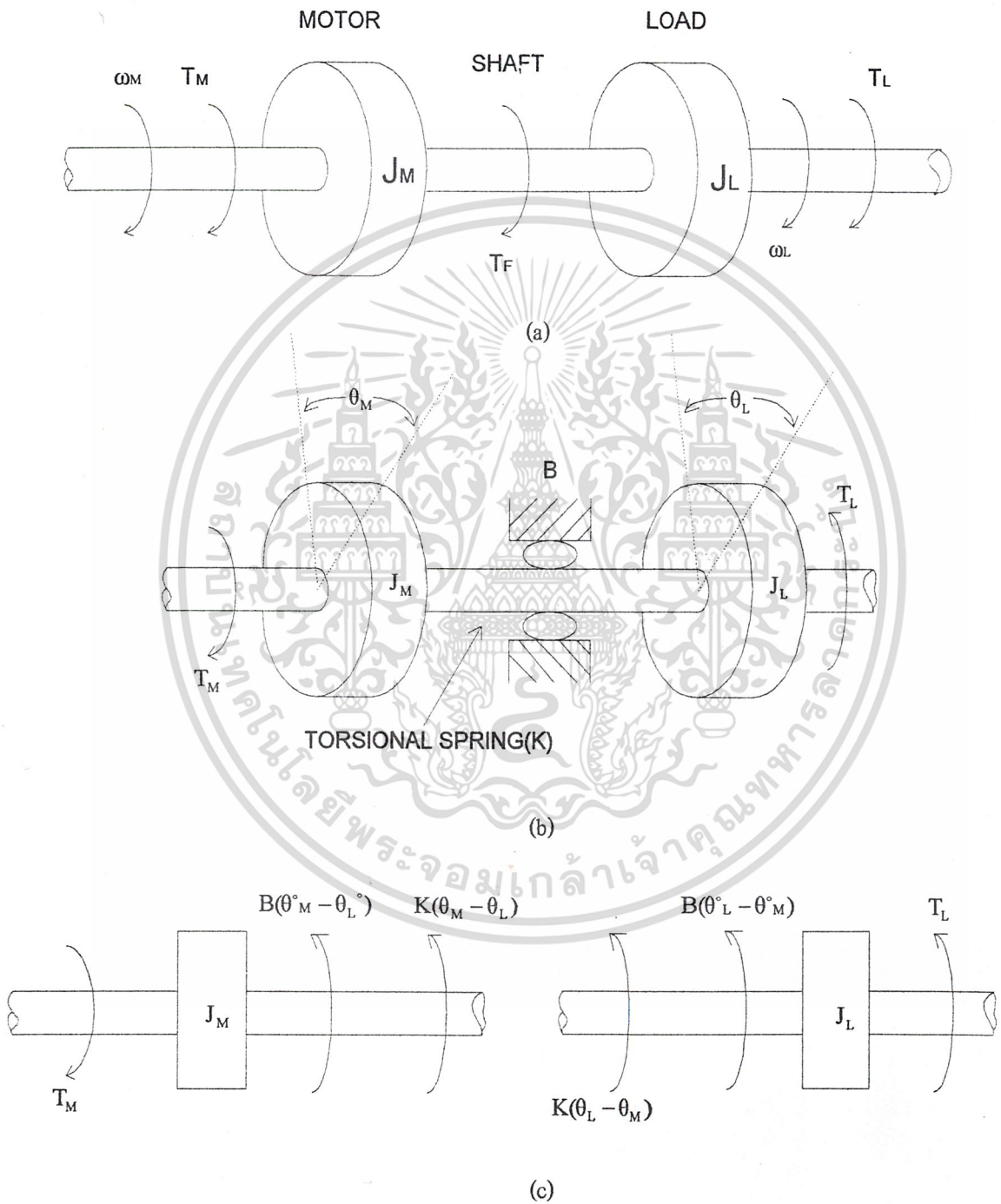
กรณีการหน่วง $B \neq 0$ ภายใต้เงื่อนไข $\frac{K}{J} < \left(\frac{B}{2J}\right)^2$, เมื่อ $\zeta > 1$

$$\begin{aligned} \theta(s) &= \frac{K\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \\ &= \frac{K\omega_n^2}{s(s + \zeta\omega_n + \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1})(s + \zeta\omega_n - \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1})} \\ &= K \left[\frac{1}{s} + \frac{1}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})} \left(\frac{1}{s + \zeta\omega_n + \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}} \right) - \frac{1}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})} \left(\frac{1}{s + \zeta\omega_n - \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}} \right) \right] \quad (2.47) \end{aligned}$$

$$\theta(t) = K \left[1 + \frac{1}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})} e^{-(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} - \frac{1}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})} e^{-(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} \right]; t \geq 0 \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Response ของ $\zeta > 1$ แสดงดังรูปที่ 2.13 เป็นผลมาจากการเพิ่มการหน่วงมากขึ้น เรือระบบที่ $\zeta > 1$ นี้ว่า Over damped systems



รูปที่ 2.13 Two-inertia model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณา Free-body diagram ดังรูปที่ 2.13c จะได้สมการสถานะสมดุลดังนี้

$$T_M(t) = J_M \frac{d^2}{dt^2} \theta_M(t) + B \left(\frac{d}{dt} \theta_M(t) - \frac{d}{dt} \theta_L(t) \right) + K(\theta_M(t) - \theta_L(t)) \quad (2.49)$$

$$T_L(t) = -J_L \frac{d^2}{dt^2} \theta_L(t) - B \left(\frac{d}{dt} \theta_L(t) - \frac{d}{dt} \theta_M(t) \right) - K(\theta_L(t) - \theta_M(t)) \quad (2.50)$$

$$J_L \frac{d^2}{dt^2} \theta_L(t) = -T_L(t) + B \left(\frac{d}{dt} \theta_M(t) - \frac{d}{dt} \theta_L(t) \right) + K(\theta_M(t) - \theta_L(t)) \quad (2.51)$$

ทำการ Take Laplace ในสมการ 2.49 และ 2.51 ได้ ให้ค่าเริ่มต้นเท่ากับศูนย์จะได้

$$T_M(s) = J_M s^2 \theta_M(s) + B(s\theta_M(s) - s\theta_L(s)) + K(\theta_M(s) - \theta_L(s)) \quad (2.52)$$

$$(J_M s^2 + Bs + K)\theta_M(s) = (Bs + K)\theta_L(s) + T_M(s) \quad (2.53)$$

$$J_L s^2 \theta_L(s) = -T_L(s) + B(s\theta_M(s) - s\theta_L(s)) + K(\theta_M(s) - \theta_L(s)) \quad (2.54)$$

$$(J_L s^2 + Bs + K)\theta_L(s) = (Bs + K)\theta_M(s) - T_L(s) \quad (2.55)$$

ให้ $T_L(s) = 0$; $T_L(s)$ คือ แรงบิดรบกวนจากภายนอก

$$\theta_L(s) = \frac{(Bs + K)}{J_L s^2 + Bs + K} \theta_M(s) \quad (2.56)$$

แทน 2.56 ลงใน 2.53 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} (J_M s^2 + Bs + K)\theta_M(s) &= (Bs + K) \frac{(Bs + K)}{J_L s^2 + Bs + K} \theta_M(s) + T_M(s) \\ &= \left(\frac{B^2 s^2 + 2BKs + K^2}{J_L s^2 + Bs + K} \right) \theta_M(s) + T_M(s) \quad (2.57) \end{aligned}$$

$$\left[(J_M s^2 + Bs + K) - \left(\frac{B^2 s^2 + 2BKs + K^2}{J_L s^2 + Bs + K} \right) \right] \theta_M(s) = T_M(s) \quad (2.58)$$

$$\left[\frac{J_M J_L s^4 + (J_L + J_M)Bs^3 + (J_L + J_M)Ks^2}{J_L s^2 + Bs + K} \right] \theta_M(s) = T_M(s) \quad (2.59)$$

$$\frac{\theta_M(s)}{T_M(s)} = \frac{J_L s^2 + Bs + K}{J_M J_L s^4 + (J_L + J_M)Bs^3 + (J_L + J_M)Ks^2} \quad (2.60)$$

เนื่องจากมอเตอร์ของระบบมีความเร็วสูงจึงไม่พิจารณาการหน่วงเวลาให้ $B=0$ ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} \frac{\theta_M(s)}{T_M(s)} &= \frac{J_L s^2 + K}{J_M J_L s^4 + (J_L + J_M)Ks^2} \\ &= \frac{J_L s^2 + K}{s(J_M J_L s^3 + (J_M + J_L)Ks)} \quad (2.61) \end{aligned}$$

$$\frac{s\theta_M(s)}{T_M(s)} = \frac{\left(\frac{1}{K} J_L \right) s^2 + 1}{\frac{1}{K} J_M J_L s^3 + (J_M + J_L)s} \quad (2.62)$$

จาก

$$\frac{d}{dt} \theta(t) = \omega(t)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Take Laplace จะ ได้

$$s\theta(s) = \omega(s)$$

แทนใน 2.62 จะได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบคือ

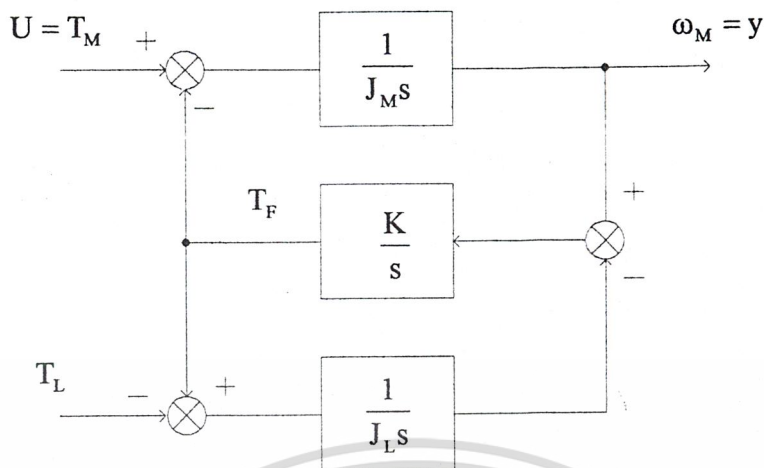
$$\begin{aligned} \frac{\omega_M(s)}{T_M(s)} &= \frac{\left(\frac{1}{K} J_L\right) s^2 + 1}{\frac{1}{K} J_M J_L s^3 + (J_M + J_L) s} \\ &= \frac{s^2 + \frac{K}{J_L}}{J_M s \left[s^2 + \left(\frac{K}{J_L} + \frac{K}{J_M} \right) \right]} \end{aligned} \quad (2.63)$$

จากทรานเฟอร์ฟังก์ชันค่าตำแหน่งของ Zero คือ $\pm J \sqrt{\frac{K}{J_L}}$

ค่า Pole คือ $0, \pm \sqrt{K \left(\frac{1}{J_L} + \frac{1}{J_M} \right)}$

จะเห็นได้ว่า ค่า Pole และ Zero ของทรานเฟอร์ฟังก์ชันจะอยู่บนแกน Imaginary ในระนาบ s ซึ่งเอาที่พหุของระบบจะเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่องกันไป

พิจารณารูปที่ 2.13a จะได้บล็อกไดอะแกรมของระบบดังนี้



รูปที่ 2.14 Block diagram of two-inertia resonant model

- เมื่อ T_M คือ แรงบิดของมอเตอร์
- T_F คือ แรงบิดของเพลา (Shaft)
- T_L คือ แรงบิดของโหลด
- ω_M คือ ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์
- J_M คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์
- J_L คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโหลด
- K คือ ค่าคงที่การยืดหยุ่นได้ของเพลา(Torsional spring)

จากรูป 2.14

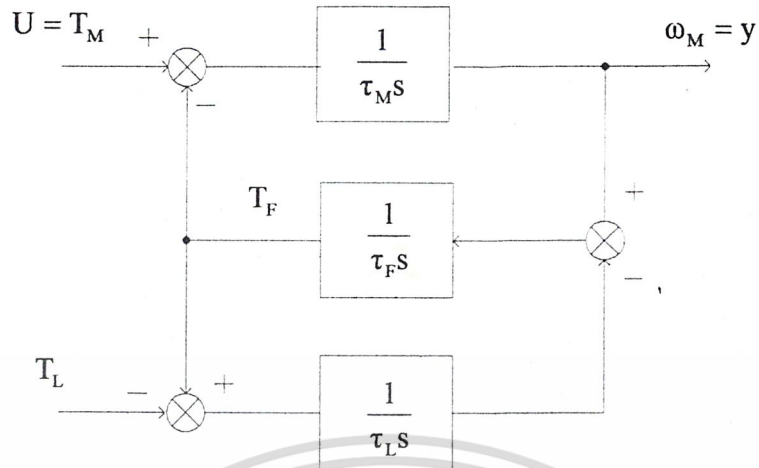
$$\tau_M = J_M \tag{2.64}$$

$$\tau_L = J_L \tag{2.65}$$

$$\tau_F = \frac{1}{K} \tag{2.66}$$

- เมื่อ τ_M คือ ค่า Time constant ของมอเตอร์
- τ_L คือ ค่า Time constant ของโหลด
- τ_F คือ ค่า Time constant ของแกนเพลา

จากสมการที่ 2.64 ถึง 2.66 นำไปแทนในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.15 Block diagram of two-inertia resonant model

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบคือ

$$\begin{aligned} \frac{\omega_M}{J_M} &= \frac{\tau_F \tau_L s^2 + 1}{\tau_F \tau_M \tau_L s^3 + (\tau_M + \tau_L) s} \\ &= \frac{\left(s^2 + \frac{1}{\tau_F \tau_L} \right)}{\tau_M s \left(s^2 + \frac{1}{\tau_F \tau_L} + \frac{1}{\tau_M \tau_F} \right)} \end{aligned} \quad (2.67)$$

Zero คือ $\pm J \frac{1}{\sqrt{\tau_L \tau_F}}$

Pole คือ $0, \pm J \sqrt{\frac{1}{\tau_F} \left(\frac{1}{\tau_M} + \frac{1}{\tau_L} \right)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 การออกแบบระบบควบคุมในโดเมนเวลา

จะมีขั้นตอนออกแบบระบบดังนี้

1. ศึกษาและวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมของระบบนั้นๆ ว่ามีผลตอบสนองของเวลาต่ออินพุตที่มีเสถียรภาพสัมพันธ์หรือไม่ มีความเที่ยงตรงหรือไม่ และในการใช้งานนั้นต้องการให้มีผลตอบสนองอย่างไร

2. เลือกข้อกำหนดเพื่อให้ระบบมีสมรรถนะตามต้องการ การเลือกข้อกำหนดเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการออกแบบ ข้อกำหนดต่างๆ ได้แก่ ความเที่ยงตรง เสถียรภาพสัมพันธ์ ความเร็วของผลตอบสนองต่อเวลาที่ได้จากค่า Rise time , Setting time และ undamped natural frequency

3. การออกแบบระบบชดเชย เมื่อเราทราบข้อกำหนดต่างๆ แล้วขั้นต่อไปจะต้องทำให้ระบบมีคุณสมบัติสอดคล้องกับข้อกำหนด ในทางปฏิบัติจะใช้วิธีลองผิดลองถูก ปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบโดยปรับค่าอัตราขยาย (Gain) ของระบบก่อน อย่างไรก็ตามการปรับค่าอัตราขยายอย่างเดียวยังไม่สามารถทำให้ระบบมีค่าคุณสมบัติตามที่ต้องการได้ เช่นเมื่อเพิ่มอัตราขยายขึ้นจะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะคงที่ลดลง แต่ก็จะทำให้เสถียรภาพของระบบแย่ลงด้วย หรืออาจทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพได้ จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบระบบเพื่อให้ระบบมีคุณสมบัติตามที่ต้องการหรือเพิ่มอุปกรณ์เข้าไปในระบบ

4. การเพิ่มตัวควบคุมหรือตัวชดเชยเข้าไปในระบบ ถ้าเพิ่มตัวควบคุมหรือตัวชดเชย $G_c(s)$ เข้าไปในระบบโดยต่ออนุกรมกับระบบที่ถูกควบคุมจะเรียกว่าเป็นการชดเชยแบบอนุกรมหรือ Cascade แต่ถ้าต่ออยู่แบบป้อนกลับจะเรียกว่าการชดเชยแบบขนาน (Parallel) หรืออาจต่อแบบ Forward หรือต่อหลายๆแบบรวมกันก็ได้ โดยเราจะต้องพิจารณาว่าจะต่อเข้าไปแบบอนุกรมหรือแบบขนาน โดยพิจารณาจากธรรมชาติของสัญญาณของระบบ ระดับของสัญญาณที่จุดต่างๆ อุปกรณ์ที่สามารถจัดหาได้ ประสิทธิภาพและอื่นๆ

5. เมื่อต้องเพิ่มตัวควบคุมหรือตัวชดเชยเข้าไปในระบบ ผู้ออกแบบจะต้องสามารถหาอุปกรณ์ทางกายภาพที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเหมือนกับฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมหรือตัวชดเชย ที่ต้องการได้ที่นิยมใช้กันมากคือ ตัวควบคุมแบบ Proportional (P) , ตัวควบคุมแบบ Proportional+Derivative (PD) , ตัวควบคุมแบบ Proportional+Integral (PI) , ตัวควบคุมแบบ Proportional+Integral+Derivative (PID) , ตัวควบคุมแบบ Lead , ตัวควบคุมแบบ Lag , ตัวควบคุมแบบ Lag+Lead และอื่นๆ

6. วิเคราะห์ระบบรวมในโดเมนเวลาเพื่อตรวจสอบว่าระบบที่ถูกออกแบบมานั้นมีสมรรถนะตามที่ต้องการ

ตัวควบคุมแบบ Proportional+Integral (PI)

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมคือ

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2.68)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบรูปเปิดของระบบที่ถูกควบคุม โดยรวมคือ

$$G(s) = G_c(s)G_p(s) = \frac{\omega_n^2 (K_p s + K_i)}{s^2 (s + 2\zeta\omega_n)} \quad (2.69)$$

ซึ่งก็คือการเพิ่ม Zero ที่ $s = -\frac{K_i}{K_p}$ และเพิ่ม Pole ที่ $s = 0$ ให้กับฟังก์ชันถ่ายโอนแบบรูปเปิด และมีผลทำให้ชนิดของระบบเปลี่ยนไป

ก่อนที่จะเพิ่มตัวควบคุมแบบอินทิกรัลเข้าไป ค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงที่ของระบบนี้ต่ออินพุทแบบ Step จะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อใส่ตัวควบคุมแบบอินทิกรัลเข้าไป ชนิดของระบบจะเปลี่ยนไป นั่นคือค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงที่ของระบบนี้ต่ออินพุทแบบ Step จะมีค่าเป็นศูนย์ จึงกล่าวได้ว่าผลของตัวควบคุมแบบอินทิกรัลทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงที่ลดลง

การที่เราใส่ตัวควบคุมแบบ PI เข้าไป จะทำให้ระบบเปลี่ยนจากอันดับ 2 เป็นระบบอันดับ 3 ซึ่งส่งผลให้เสถียรภาพของระบบลดลงหรือกลายเป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพได้ ขณะที่ระบบเดิมนั้นมีเสถียรภาพ สำหรับทุกค่าของอัตราขยาย K_p ดังนั้นค่าของ K_p และ K_i จะต้องมีความเหมาะสม

การปรับค่าของตัวควบคุม PID

การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID เป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อให้ได้การควบคุมที่ดีที่สุด ซึ่งทำได้หลายวิธี โดยบางวิธีจะพิจารณาจากผลตอบสนองของระบบและอาศัยประสบการณ์ บางวิธีจะอาศัยคณิตศาสตร์ โดยจะพิจารณาจากโดเมนเวลามากกว่าโดเมนความถี่

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมแบบ PID ดังนี้

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.70)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ K_p = Proportional Gain

T_i = Integral Time

T_d = Derivative Time

เมื่อ $e(t)$ และ $u(t)$ คืออินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุม

$$\mu(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_{-\infty}^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.71)$$

วิธีปรับค่า PID ของ Ziegler-Nichols

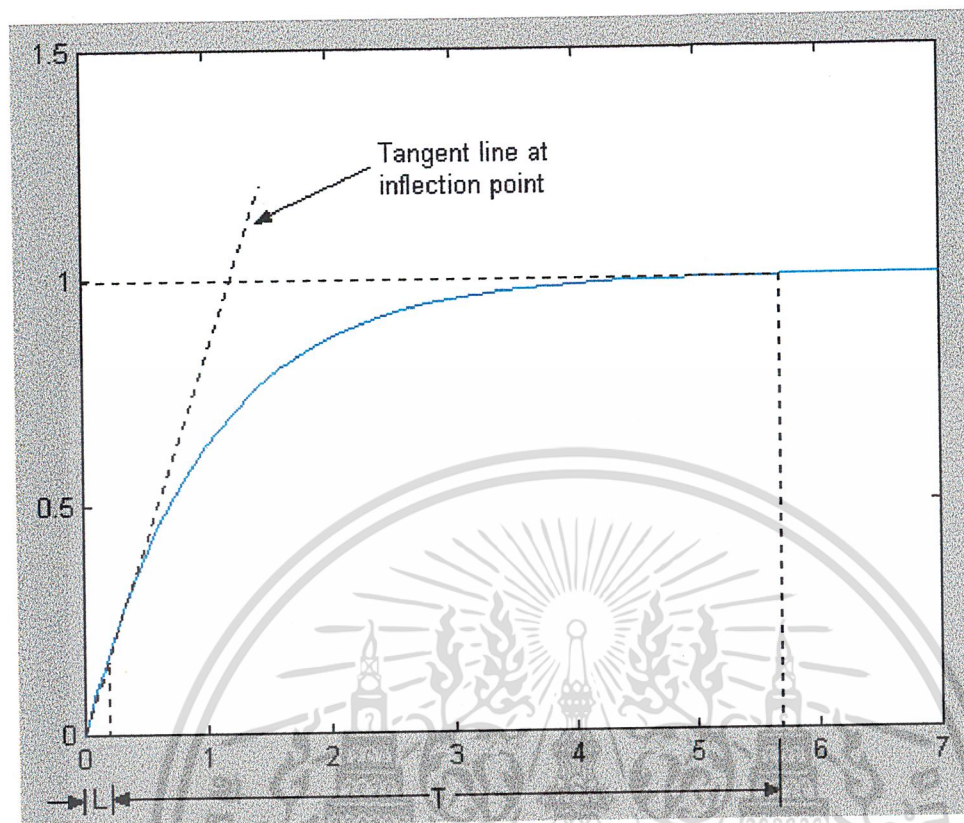
วิธีของ Ziegler-Nichols ในการหาค่า K_p, T_i, T_d จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของผลตอบสนองชั่วคราวของระบบที่ถูกควบคุม ซึ่งมีอยู่ 2 วิธี โดยมีจุดมุ่งหมายที่ทำให้ผลตอบสนองของเวลาของระบบต่ออินพุตแบบ Unit step มีค่าของ Maximum Overshoot ไม่เกิน 25%

วิธีที่ 1 Process Reaction Curve

วิธีนี้หาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม PID จากผลตอบสนองของเวลาโดยต่ออินพุตแบบ Unit step โดยที่ระบบหรือกระบวนการในกรณีนี้จะไม่มี Pole ที่จุด Origin หรือไม่มี Dominant Complex Conjugate Pole และไม่มีตัวควบคุมต่อรวมอยู่ ดังนั้นผลตอบสนองเวลาจะเป็นรูปตัว s ซึ่งจะสามารถพิจารณาเป็นค่าคงที่ 2 ตัว คือค่าของ Delay Time (L) และเวลาคงที่ Time Constant (T) จากนั้นให้ลากเส้นสัมผัสกับจุดที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดเส้นนี้จะตัดกับแกนเวลาและเส้นตรงของเอาต์พุต $c(t)$ ที่ $c(t) = K$

ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนจะประมาณได้ด้วยระบบอันดับที่หนึ่งที่มี Transport lag คือ

$$\frac{c(s)}{\mu(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (2.72)$$



รูปที่ 2.16 Process reaction curve

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของวิธี Process reaction curve

ตัวควบคุมแบบ	K_p	T_i	T_d
P	T/L	-	-
PI	$0.9T/L$	$L/0.3$	-
PID	$1.2T/L$	$2L$	$0.5L$

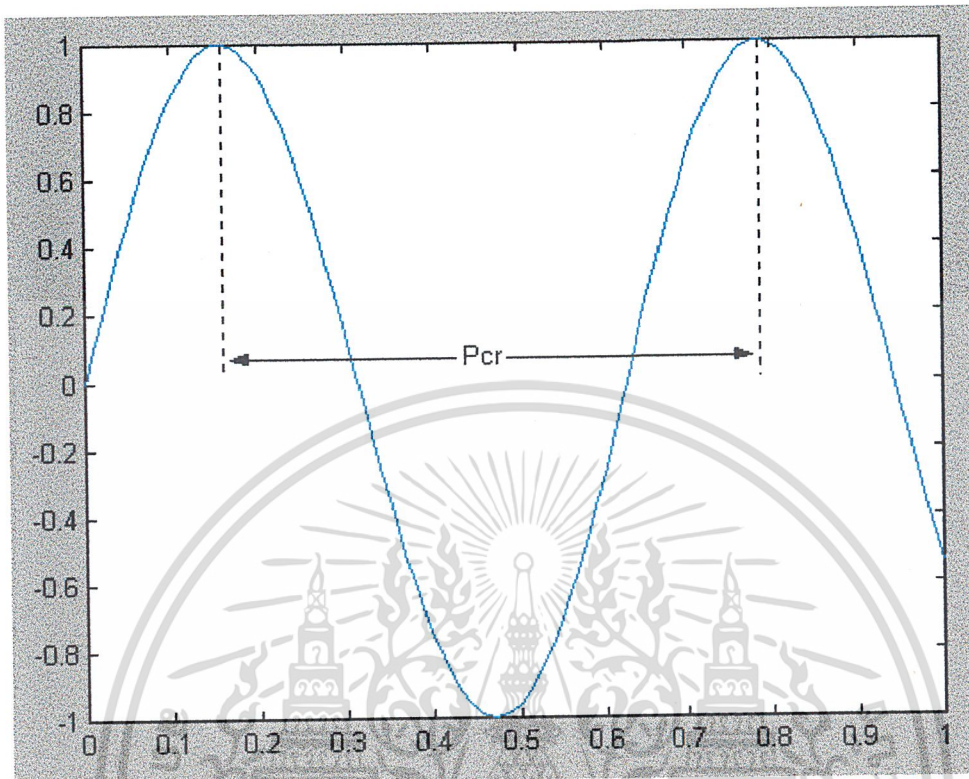
วิธีที่ 2 Ultimate Method

วิธีนี้จะหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID จากผลตอบสนองเวลาของระบบหรือกระบวนการที่ถูกควบคุมแบบ P ต่ออินพุตแบบ Unit step โดยปรับค่า ไปจนผลตอบสนองเวลาเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง จากนั้นหาค่าของ

K_{cr} (Critical Gain) เป็นอัตราขยายที่ทำให้ผลตอบสนองเวลาเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง

P_{cr} (Oscillation Period) เป็นคาบเวลาของการแกว่งอย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 Ultimate method

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ของวิธี Ultimate method

ตัวควบคุมแบบ	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	-	-
PI	$0.45K_{cr}$	$P_{cr}/1.2$	-
PD	$0.6K_{cr}$	-	$0.125P_{cr}$
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

การคำนวณค่าจากค่าพารามิเตอร์โดยวิธีของ Ziegler-Nichols นั้น ไม่ใช่ค่าที่เที่ยงตรงที่จะนำไปใช้งานได้ทันทีและมี Maximum Overshoot 25% ตามที่กล่าวไว้ แต่จะเป็นเพียงค่าที่ใกล้เคียงเท่านั้น ผู้ควบคุมจะต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์เหล่านี้แบบละเอียดอีกครั้งหนึ่ง

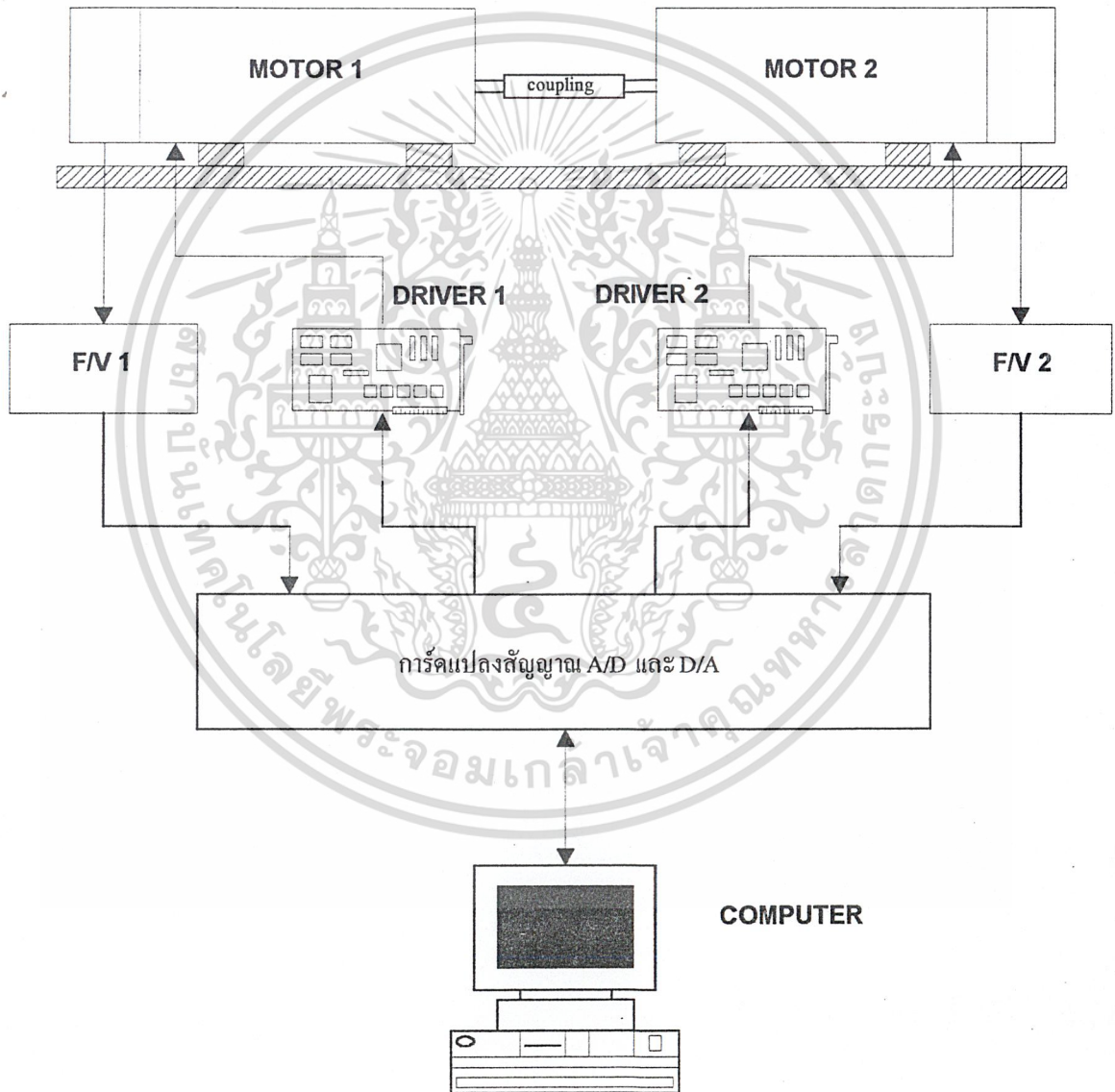
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การสร้างตัวควบคุม

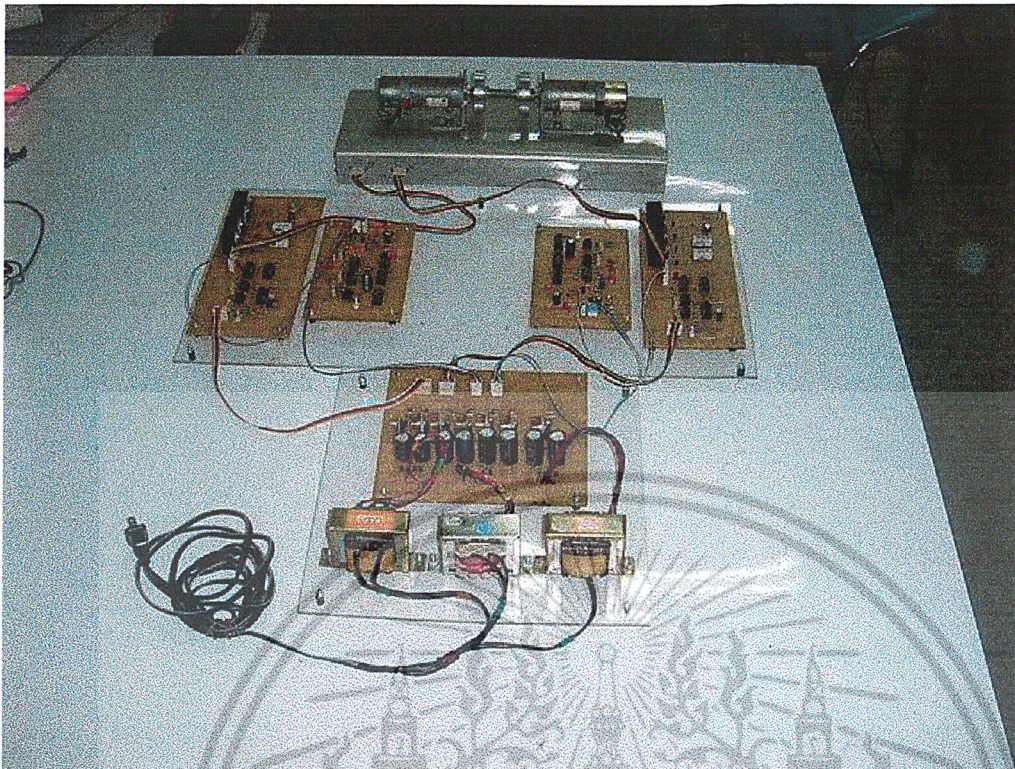
3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและการสร้างระบบควบคุมความเร็วของ 2 ความเฉื่อย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1

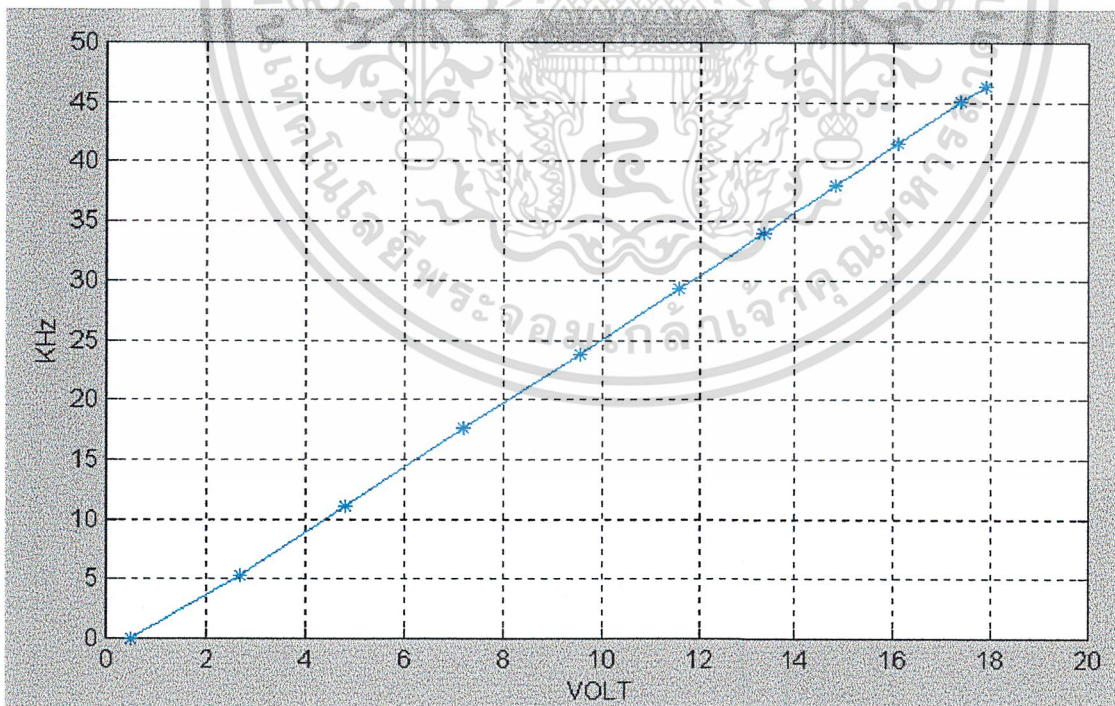


รูปที่ 3.1 รูปแบบ Project

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ชุดโครงงาน



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ DC Motor กับ Encoder

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ฮาร์ดแวร์

3.2.1 การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A

การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A ที่ใช้ในโครงการ มีรายละเอียดในสำคัญดังนี้

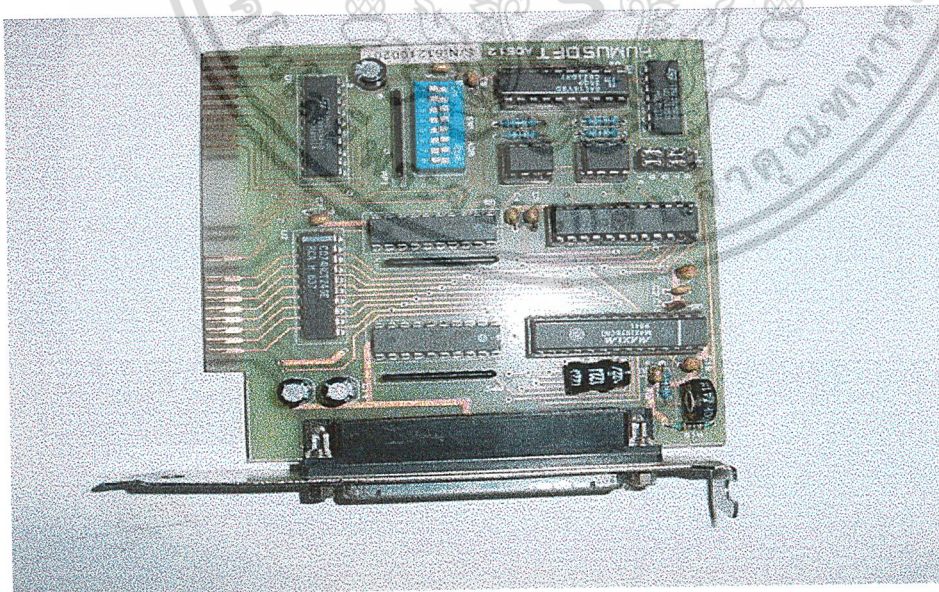
- วงจรในส่วนของ การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 12 bit 8 ช่องสัญญาณ
- อัตราการสุ่มสูงสุด 100 KHz
- สามารถโปรแกรมย่านการใช้งานด้วยโปรแกรมตั้งแต่ $\pm 10V$, $\pm 5V$, 0 - 10V , 0 - 5V
- มีวงจรมหาพีคและแรงดันอ้างอิงภายใน
- มีเอาต์พุต 2 ช่อง มีย่านใช้งานตั้งแต่ $\pm 10V$, $\pm 5V$, 0 - 10V , 0 - 5V โดยการเซตที่

จัมเปอร์บนแผ่นวงจร

- มี DIP switch ในการตั้ง Address ในการนำข้อมูลเข้าและส่งข้อมูลออกจากคอมพิวเตอร์
- อัตราการใช้พลังงานที่ 5V ใช้ 100 mA และที่ 12V ใช้ 50 mA และที่ -12 V ใช้ 50 mA

อุณหภูมิใช้งาน 0 C จนถึง +70 C

ในวงจรนี้จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิตอลจากคอมพิวเตอร์ให้เป็นสัญญาณอนาลอก 0 – 5 V เพื่อส่งไปยังชุดวงจรขับ (Driver) และรับสัญญาณ 0 – 5 V จากชุดแปลงความถี่ให้เป็นแรงดัน (F/V) ให้เป็นสัญญาณดิจิตอลเพื่อส่งไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ต่อไป การ์ดแปลงสัญญาณ D/A และ A/D แสดงดังรูปที่ 3.4

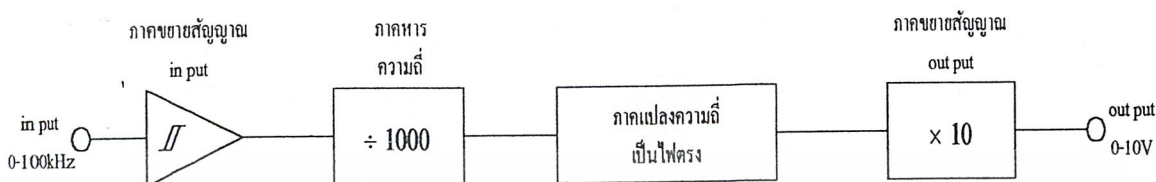


รูปที่ 3.4 การ์ดวงจร D/A และ A/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน (Frequency to Voltage ; F/V)

วงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดัน สามารถรับสัญญาณอินพุตเป็นความถี่ 0-100KHz และให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นแรงดัน 0-10 V สามารถแบ่งการทำงานออกเป็นบล็อกไดอะแกรมได้

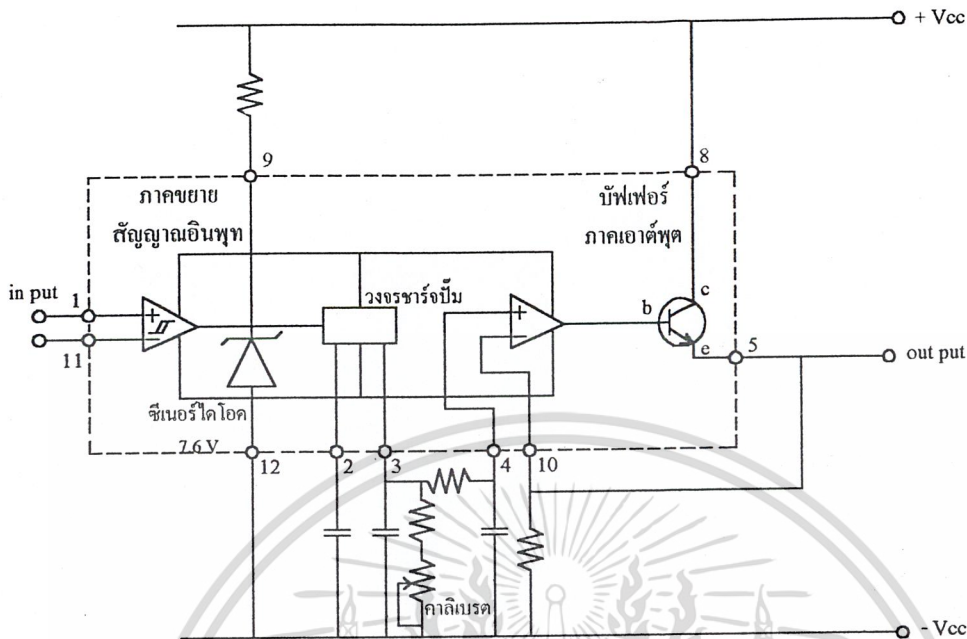


รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดัน

เริ่มต้นเมื่อสัญญาณอินพุตความถี่ที่ต้องการถูกป้อนเข้าวงจร ในส่วนของภาคอินพุต จะทำการขยายสัญญาณซึ่งอาจเป็นสัญญาณลักษณะใดก็ตาม จะถูกปรับรูปคลื่นใหม่เป็นรูปคลื่นพัลส์ ที่มีช่วงเวลาของขอบขาสัญญาณแคบมากและมีความถี่เท่ากับสัญญาณอินพุต หลังจากนั้นสัญญาณพัลส์ จะถูกส่งเข้าสู่ภาคหารความถี่ 1000 เท่า (÷1000) ซึ่งทำให้สัญญาณพัลส์ลดลงเป็นสัดส่วน

จากนั้นสัญญาณพัลส์ที่ผ่านการหารค่าแล้วจะถูกป้อน ไปยังภาคแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟตรง โดยค่าแรงดันไฟตรงที่ได้จะแปรผันเป็นสัดส่วนกับความถี่ที่ได้รับ ในส่วนนี้จะใช้ IC เบอร์ LM2917N ทำหน้าที่นี้ ซึ่งถือเป็นหัวใจหลักของวงจรนี้ ภายใน IC LM2917N มีการจัดวงจร ดังรูปที่ 3.4 โดยมีขา 1 และขา 11 เป็นขาอินพุตของภาคขยายสัญญาณอินพุต จากนั้นจึงป้อนเข้าสู่ภาคชาร์จปั๊ม (Charge pump) ซึ่งถือว่าเป็นหัวใจการทำงานของ IC เบอร์นี้ โดยจะทำการส่งประจุ ค่าคงที่ออกทางขา 3 แปรผันตามจำนวนความถี่ที่ขาอินพุต โดยกำหนดจำนวนประจุได้จากค่าตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับขา 2 ในส่วนของภาคเอาต์พุตของ IC จะมีโอปแอมป์และทรานซิสเตอร์ ทำหน้าที่เป็นวงจรบัฟเฟอร์ด้านเอาต์พุต ซึ่งการจัดวงจรภายในแบบนี้มีข้อดีคือ สามารถให้เอาต์พุตเป็นกระแสหรือแรงดันก็ได้ แต่ในภาควงจรนี้ใช้เอาต์พุตแบบแรงดันจะได้เอาต์พุตจากภาควงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟตรงคือ 0-10V

ภาคขยายสัญญาณเอาต์พุต 10 เท่า (×10) จะทำการขยายสัญญาณแรงดัน 0-1 Volt ที่ได้ จากภาคแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟตรงเป็นแรงดันเอาต์พุต 0-10 Volt เป็นการขยายสัญญาณอย่าง เป็นสัดส่วน



รูปที่ 3.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานภายในของ IC LM2917N

การทำงานของวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดัน

วงจรสมบรูณ์ของวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดัน แสดงดังรูปที่ 3.7 วงจรในส่วนของภาคอินพุตเริ่มต้นจากสัญญาณอินพุตที่ต้องการวัดจะถูกคัปปลิ่ง โดยผ่าน C1 และป้อนไปยังขา G ของ Q1 ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ D1,D2,R1-R3 ทำหน้าที่ควบคุมระดับแรงดันไฟที่ป้อนไปยังขา G ของ Q1 ให้อยู่ในช่วงสูงสุดมีค่าไม่เกิน 1.2 Volt (peak to peak) โดยมี C3 ทำหน้าที่ชดเชยที่ชดเชยผลของค่าตัวเก็บประจุของ D1 และ D2 ที่ความถี่สูง สำหรับ Q2 ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายแรงดัน โดยมีอัตราขยายประมาณ 10 เท่า สัญญาณที่ผ่านการขยายแล้วจะถูกป้อนไปยังขั้วมีดต์ทริกเกอร์ และวงจรบัฟเฟอร์ซึ่งใช้ IC 1 ทำหน้าที่นี้ จากนั้นสัญญาณพัลส์ที่ผ่านวงจรบัฟเฟอร์จะถูกป้อนเข้าสู่ วงจรหารความถี่ โดยใช้ IC2 และ IC3 จำนวน 3 ภาคๆละ 10 เท่า ดังนั้นภาคนั้นจะหารสัญญาณได้ 1000 เท่า เอาท์พุทที่ได้จากการหาร 1000 เท่าส่ง ไปให้กับ IC5 ทำการแปลงความถี่เป็นค่าแรงดันไฟตรง

วงจรในส่วนของภาคแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟตรงหรือ IC4 จะใช้ C10 ทำหน้าที่ร่วมกับ วงจรชาร์จปั้มภายใน IC5 เพื่อทำการเก็บประจุ โดยมีวงจรต่อร่วมในการปรับแต่ง (calibration) R18 และ VR1 ต่อคร่อมอยู่ แรงดันไฟตรงที่ C10 นี้จะมีค่าเป็น 1 V ที่ Full scale ซึ่งจะต่อผ่านวงจร ปรองความถี่ค่าผ่าน R19 และ C11 และป้อน ไปยังขา 4 ของ IC4 ซึ่งเป็นอินพุทของบัฟเฟอร์ออปแอมป์

ใน IC4 ส่วนขาอินพุทของบัฟเฟอร์ออปแอมป์อีกขาหนึ่งคือขา 10 ของ IC4 จะถูกต่อกราวด์โดยผ่าน R20 สัญญาณแรงดันที่ได้จาก IC4 มีค่า 0-1 V ที่ Full scale

วงจรภาคขยายสัญญาณเอาต์พุทจะขยายสัญญาณที่ได้จาก IC4 เพิ่มอีก 10 เท่า ($\times 10$) ดังนั้นจะได้แรงดันเอาต์พุท 0 - 10 V ที่ Full scale หัวใจหลักของภาคนี้ก็คือออปแอมป์เบอร์ 741 จะต่อวงจรออปแอมป์แบบอินเวอร์ตติ้ง (Inverting) 2 วงจรคือวงจรอินเวอร์ตติ้งที่มีอัตราขยายเท่ากับ -10 ต่อร่วมกับอินเวอร์ตติ้งที่มีอัตราขยายเท่ากับ -1 ทำให้ได้อัตราขยายทั้งหมดเท่ากับ 10 โดย R_{21}, R_{24}, VR_2 เป็นตัวกำหนดอัตราขยายเท่ากับ -10 ดังสมการ

$$-10 = \frac{(VR_2 + R_{24})}{R_{21}} \quad (3.1)$$

เมื่อ VR_2 เป็นตัวปรับแต่ง (calibration) เพื่อให้ได้เท่ากับ -10

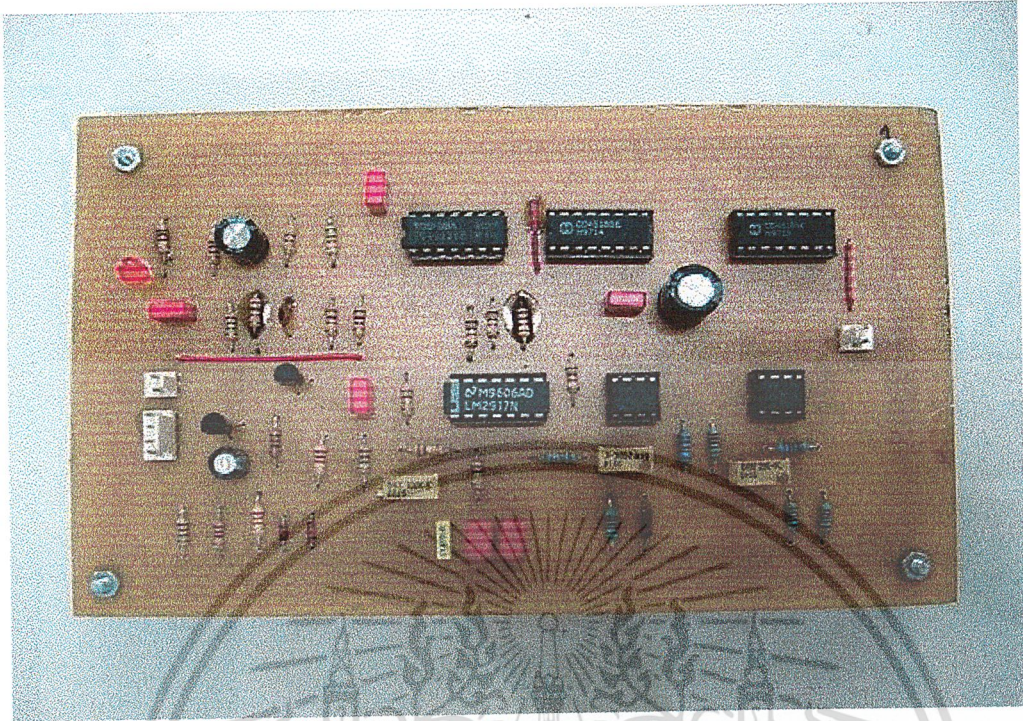
R_{25}, R_{28}, VR_3 เป็นตัวกำหนดอัตราขยายเท่ากับ -1 ดังสมการ

$$-1 = \frac{(VR_3 + R_{28})}{R_{25}} \quad (3.2)$$

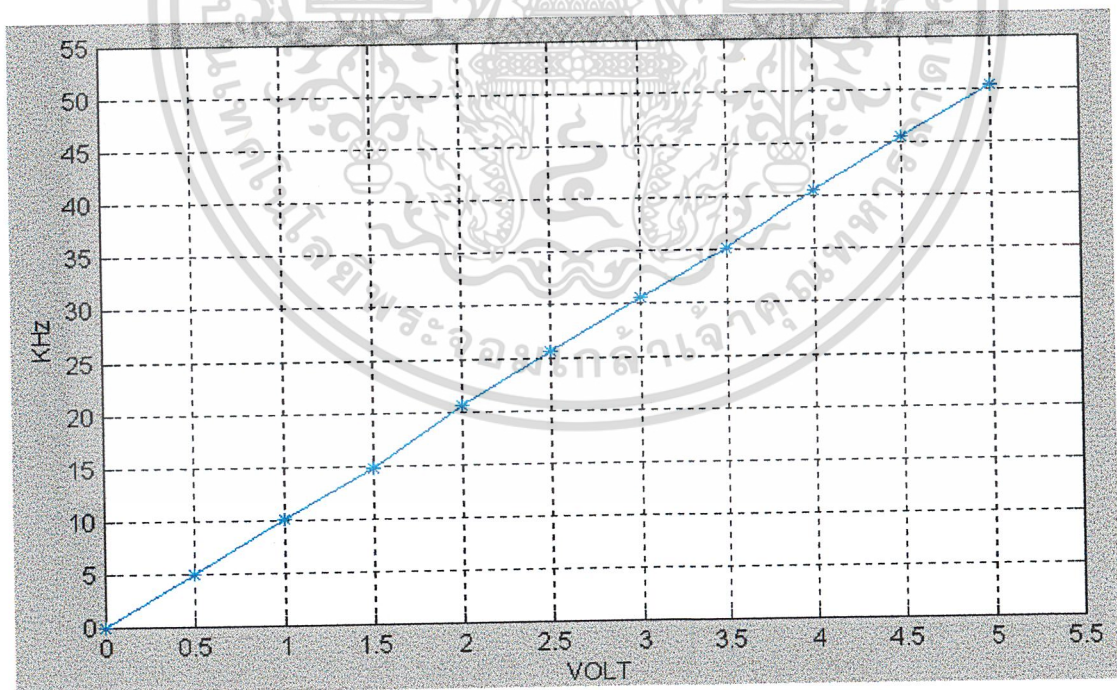
เมื่อ VR_3 เป็นตัวปรับแต่ง (calibration) เพื่อให้ได้เท่ากับ -1

$R_{22}, R_{23}, R_{26}, R_{27}$ ทำหน้าที่ชดเชยผลกระทบจากกระแสไบแอสของออปแอมป์ในแต่ละวงจร

จากวงจรนี้จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณความถี่ 0 - 50 KHz จากมอเตอร์ ให้เป็นสัญญาณแรงดัน 0-5 V เพื่อจ่ายไปยังวงจร A/D ต่อไป



รูปที่ 3.7 แผ่นวงจร Frequency to voltage



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของวงจร Frequency to voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 ชุดขับ (Driver)

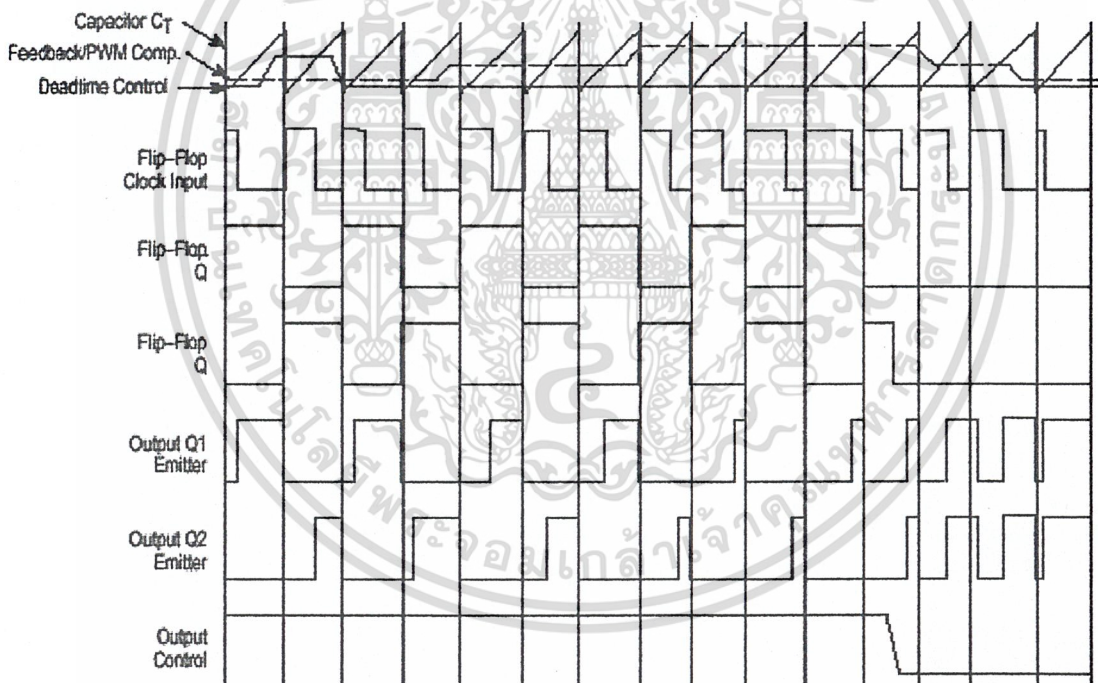
ในโครงงานนี้ได้จัดทำชุดขับขึ้นมาโดยใช้หลักการของมอดูเลตตามความกว้าง (Pulse Width Modulation ; PWM) โดยใช้ IC เบอร์ TL 494

กำหนดคาบเวลาทำงาน

วงจร TL 494 เป็นวงจร PWM ที่มีความถี่คงที่ คาบเวลาทำงานของเอาต์พุตพัลส์ กำหนดโดยค่าของ R_t และ C_t จากภายนอกที่ขา 6 ของ IC ค่าคาบเวลาการทำงานจะกำหนดได้จาก

$$T = \frac{R_t C_t}{1.1} \quad (3.3)$$

ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามรูปที่ 3.10



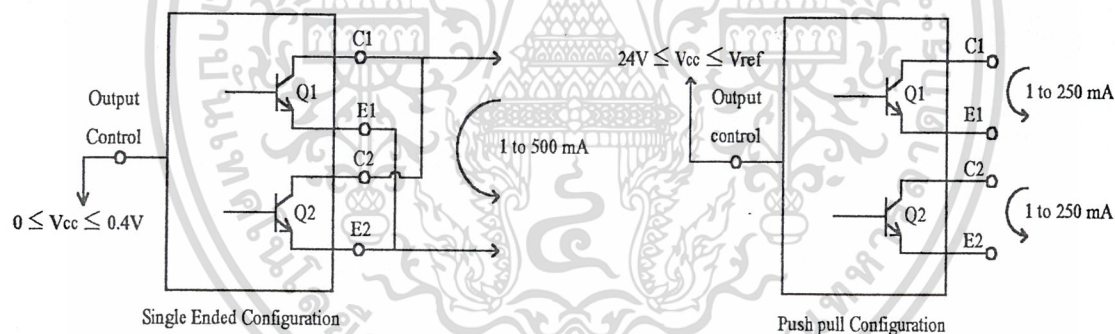
รูปที่ 3.10 รูปคลื่นลักษณะ TL 494

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนด Delay time ; Td

TL 494 สามารถให้ผู้ใช้กำหนดเวลาเพื่อ Td ของวงจรได้เองด้วยการต่อแรงดันระหว่าง 0 ถึง 3.3 V ที่ขา 4 ของ IC อย่างไรก็ตามหากแรงดันที่ขา 4 มีค่าเท่ากับ 0 V ค่าเวลาเพื่อต่ำสุดของ IC จะต่ำกว่า 4% ของค่าคาบเวลาทำงานเนื่องจากมีแรงดันออฟเซต 120 mV ต่ออยู่ใน ดังนั้นช่วงเวลา t_{on} สูงสุดของคอนเวอร์เตอร์ที่ได้จาก IC จะเท่ากับ 48% ของค่าคาบเวลาที่ต่อขา 13 (output control) เข้าที่ขา (+5 Vref) และมีค่าเท่ากับ 96% ของค่าคาบเวลาเมื่อต่อขา 13 ลงกราวด์

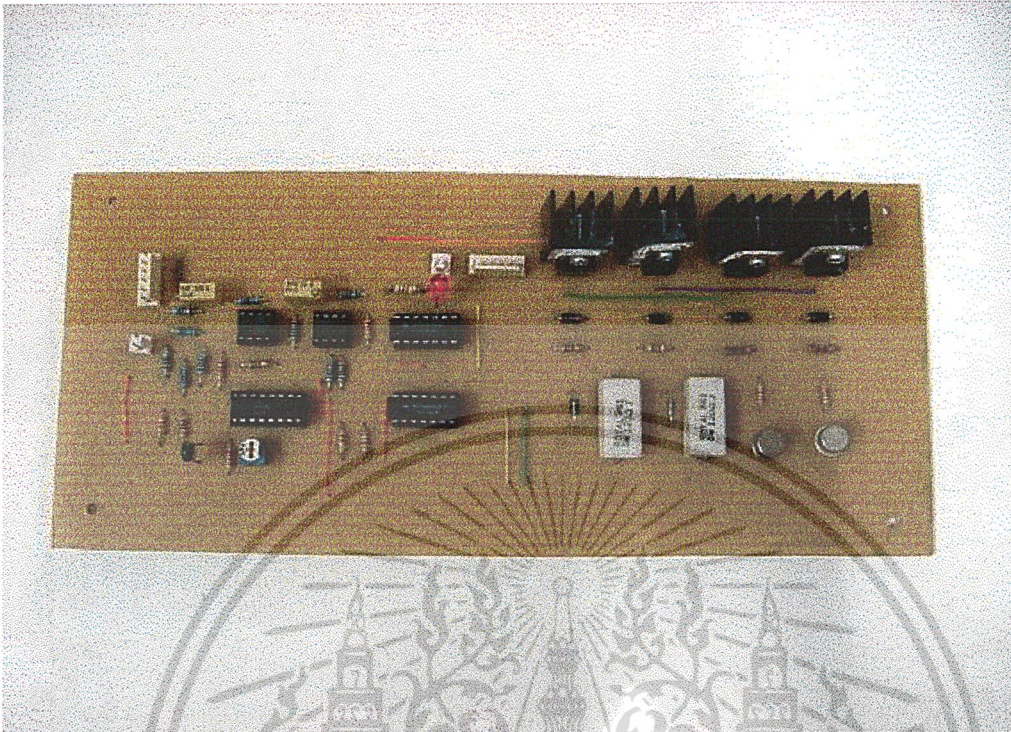
การเลือกใช้ Q1 และ Q2 ของ IC สามารถทำงานได้ 2 โหมด คือ ทำงานพร้อมกันหรือสลับกันทำงาน ซึ่งสามารถเลือกการทำงานได้ที่ขา 13 (output control) โดยขณะที่ C₁ คิศจาร์จเอาท์พุทของ Dead Time Comparator จะให้พัลส์ออกมา ขา C₁ จะมีสถานะเป็น High โดยการต่อเข้ากับ ขา 4 (+5 Vref) Q1 และ Q2 ถ้ากำหนดให้ขา 13 มีสถานะเป็น Low โดยการต่อลงกราวด์ (ขกเล็ก flip Flop) Q1 และ Q2 จะทำงานพร้อมกันและสามารถขนาน Q1 และ Q2 เข้าด้วยกันได้ ถ้าต้องการให้นำกระแสได้มากขึ้น ในกรณีนี้ค่าคาบเวลาการทำงานจะมีค่าเท่ากับค่าคาบเวลาของสัญญาณพื้นเลื้อยของ IC (ช่วงเวลานำกระแสสูงสุดเท่ากับ 96% ของค่าคาบเวลา)



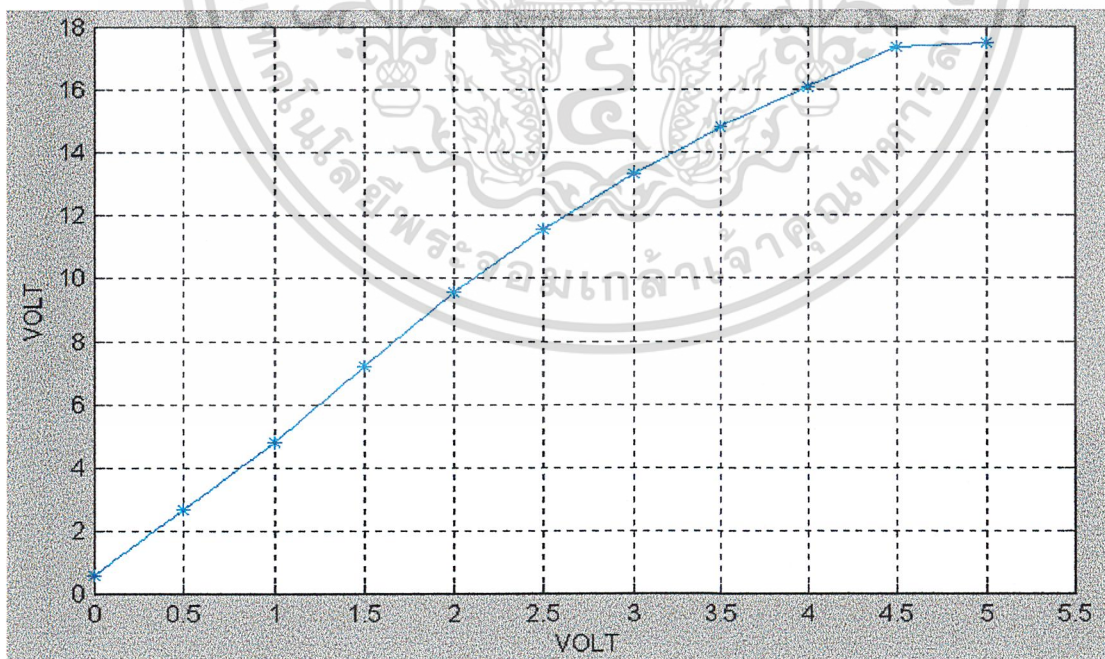
รูปที่ 3.11 แสดงการต่อสัญญาณทางด้านเอาท์พุท

TL 494 ต้องการไฟเลี้ยงในช่วง $7 \leq V_{cc} \leq 40 V$ มีแรงดันอ้างอิงภายใน $V_{ref} = 5 V$ และสามารถจ่ายกระแสได้ถึง 10 mA เพื่อใช้กับวงจรภายนอกได้โดยมีค่าความถูกต้องเท่ากับ 15% ความคลาดเคลื่อนทางอุณหภูมิมีค่าน้อยกว่า 50 mV เมื่อทำงานในช่วง 0 ถึง 70 °C

ในวงจรนี้จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาลอก 0 – 5 V จากวงจร D/A ให้เป็นแรงดันเพื่อนำไปขับมอเตอร์ต่อไป

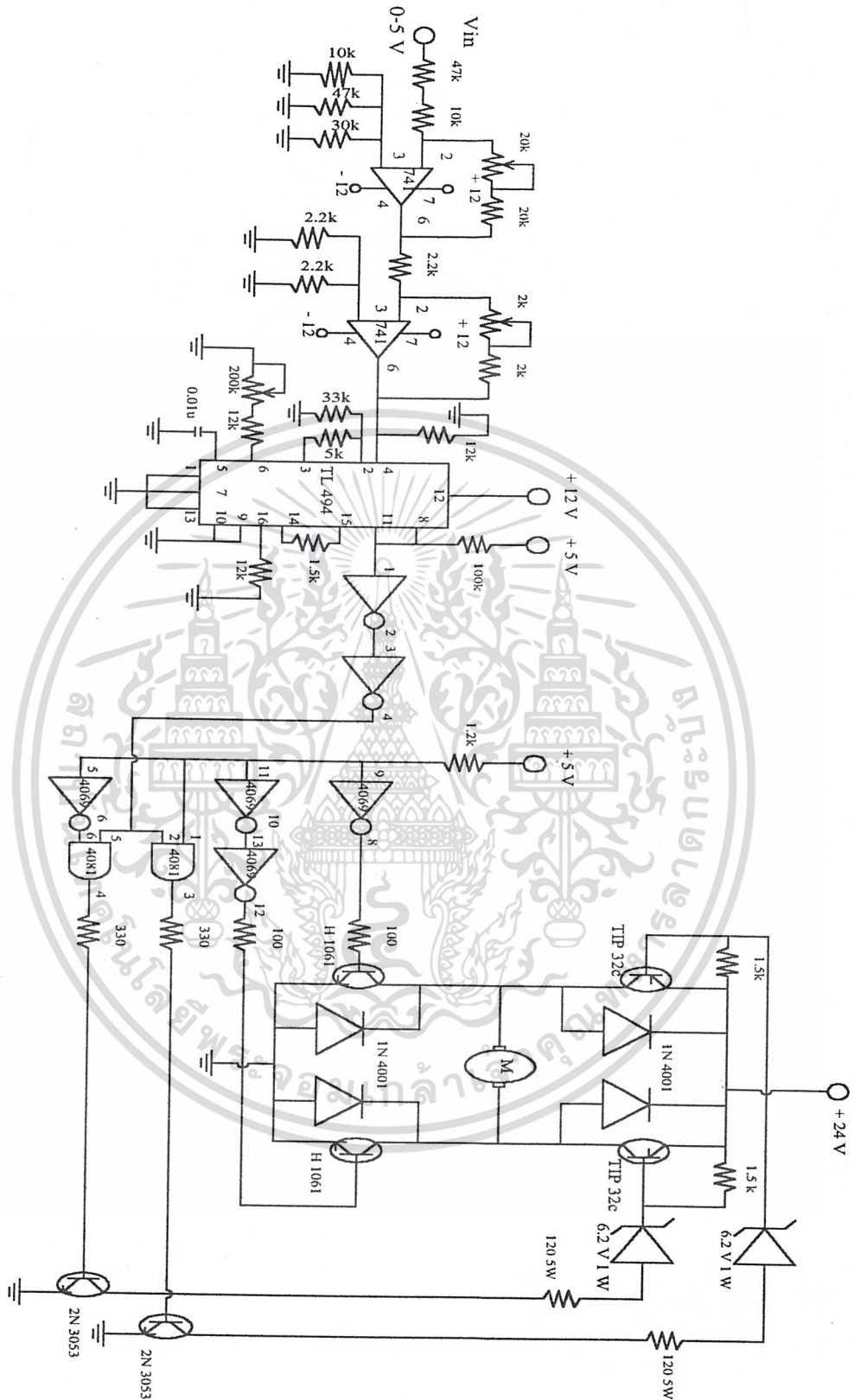


รูปที่ 3.12 แผ่นวงจร Driver



รูปที่ 3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของวงจร Driver

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

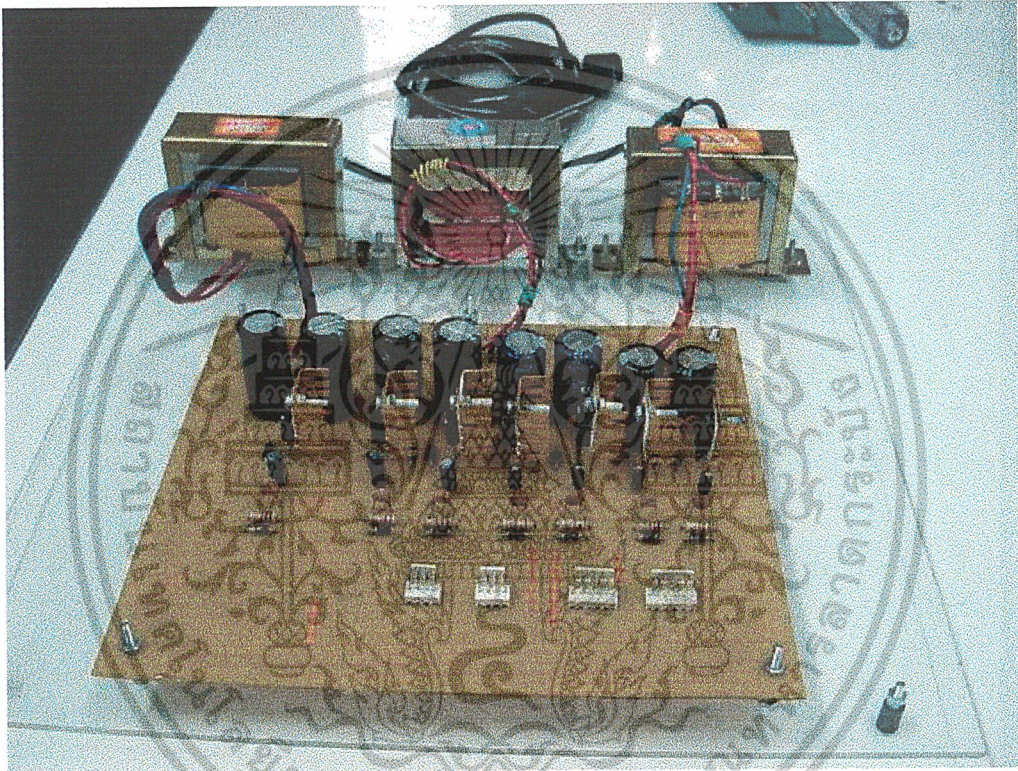


รูปที่ 3.14 วงจร Driver

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

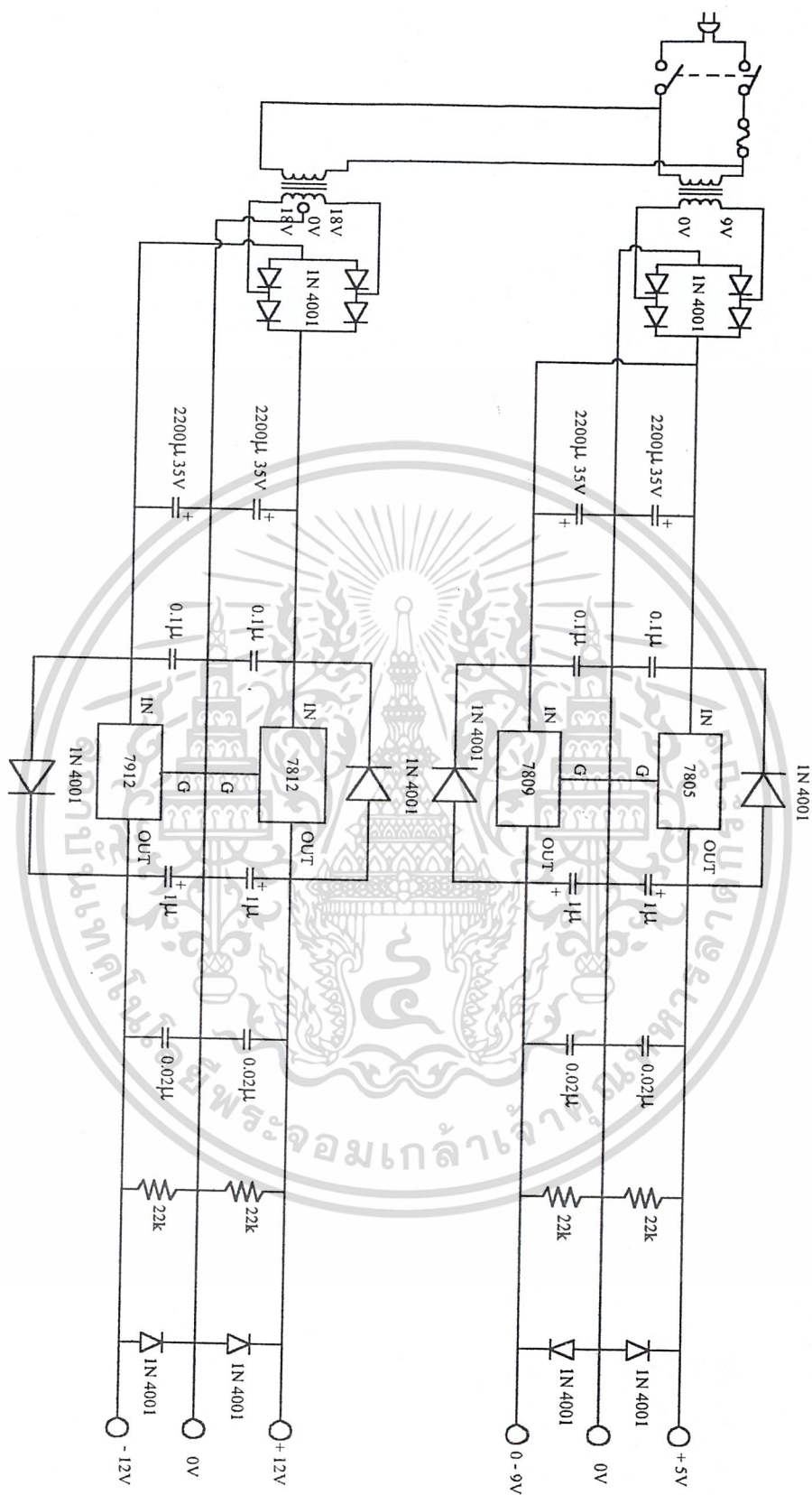
3.2.4 วงจรแหล่งจ่ายแรงดัน (Supply)

ในโครงการนี้จะใช้แหล่งจ่ายแรงดันหลายระดับที่จะป้อนให้กับวงจร ได้แก่ +5V , +9V, +12V , -12V , +10V , -10V



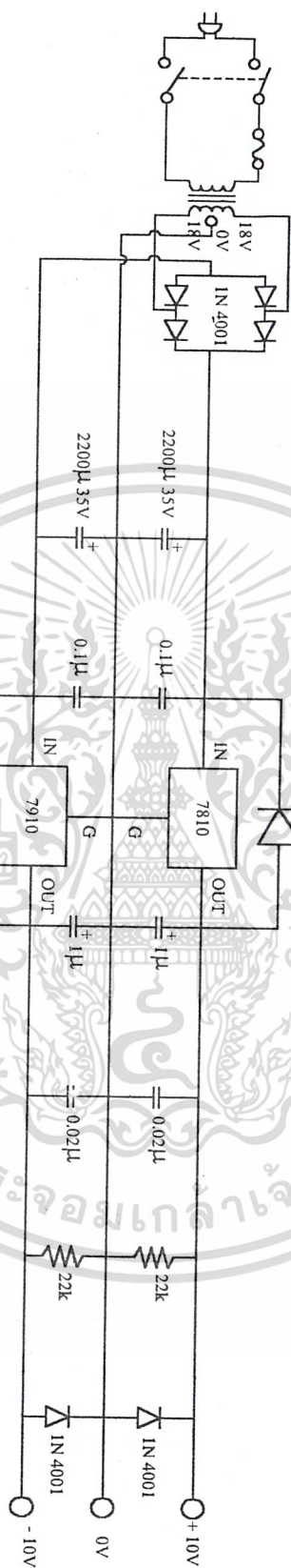
รูปที่ 3.15 แผ่นวงจร Supply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 วงจร Supply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



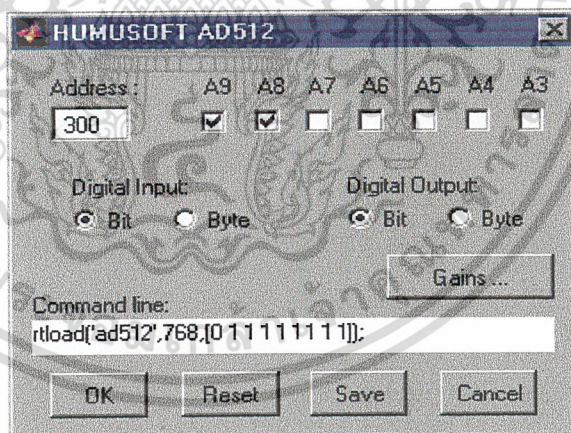
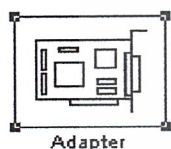
รูปที่ 3.16 วงจร Supply (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 โปรแกรมควบคุมที่ใช้ในโรงงาน

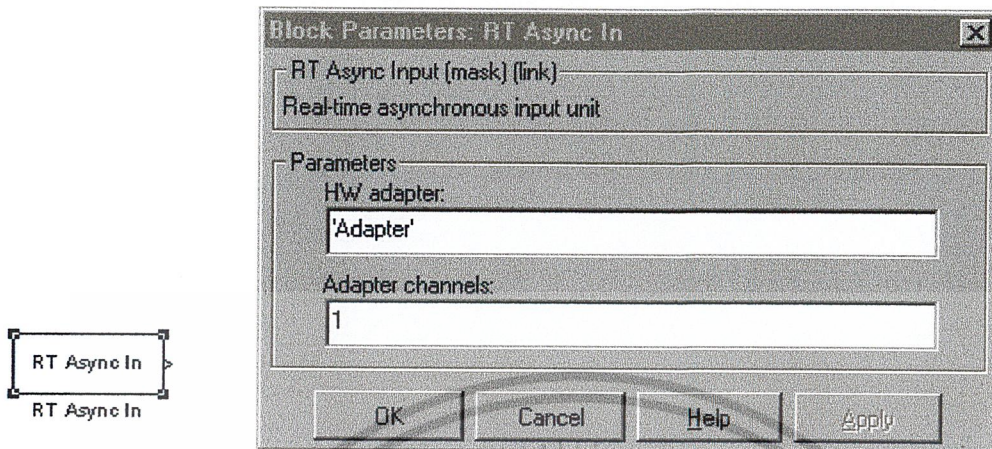
โปรแกรมที่ใช้ในโรงงานอาศัย Tool box ของโปรแกรม Matlab ซึ่งกันอย่างกว้างขวางในหมู่วิศวกรหรือนักออกแบบระบบ ดังในส่วนนี้จะกล่าวถึงส่วนเพิ่มเติมในการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกคือ ติดต่อกับการ์ด A/D และ D/A ซึ่งขอแบ่งเป็น 2 ส่วนเพื่อง่ายต่อการเข้าใจ

- รายละเอียด Tool box ที่ใช้งาน
เป็น Tool box ที่ช่วยในการติดต่อกับแผ่นการ์ดซึ่งอยู่ใน Slot ของคอมพิวเตอร์เพื่อนำค่าสู่อุปกรณ์ภายนอก
- เป็น Tool box ที่ช่วยในการนำค่าจากบล็อก Adapter สู่ตัวควบคุมในโปรแกรม
- เป็น Tool box ที่ช่วยในการนำค่าออกจากบล็อกคำนวณ Adapter
- การติดตั้งโปรแกรมสามารถเซตค่าบล็อกต่างๆดังรูปที่ 3.17, 3.18, 3.19

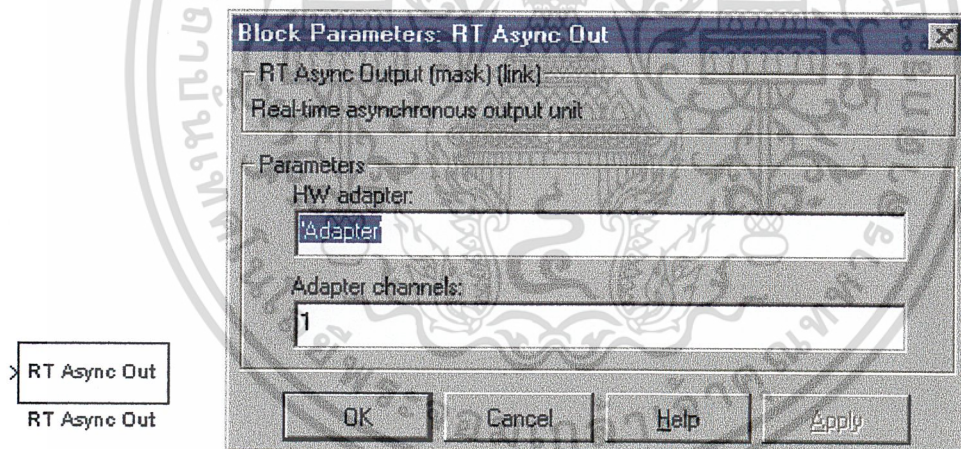


รูปที่ 3.17 แสดงการเซตค่าพารามิเตอร์ของบล็อก Adapter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 แสดงการเซตค่าพารามิเตอร์ของบล็อก RT_In



รูปที่ 3.19 แสดงการเซตค่าพารามิเตอร์ของบล็อก RT_Out

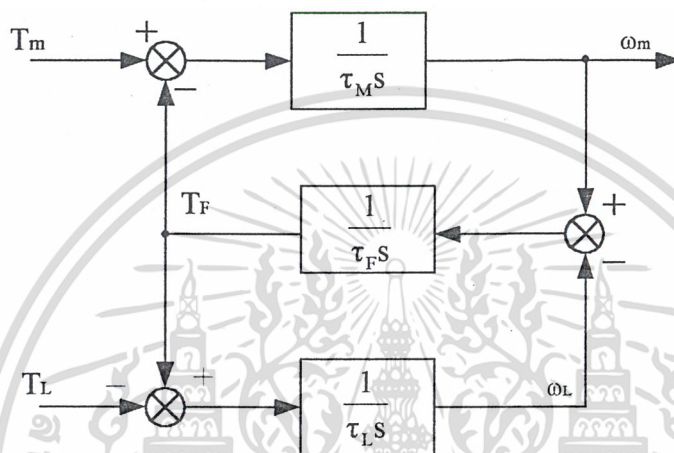
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

การหา Transfer function ของ plant speed control of two-inertia

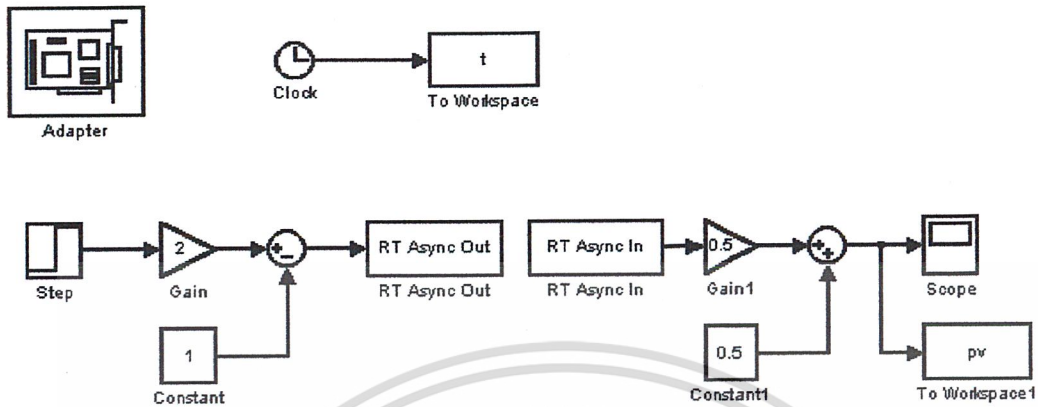
1. เขียน Block diagram ของกระบวนการ



รูปที่ 4.1 Block diagram ของกระบวนการ

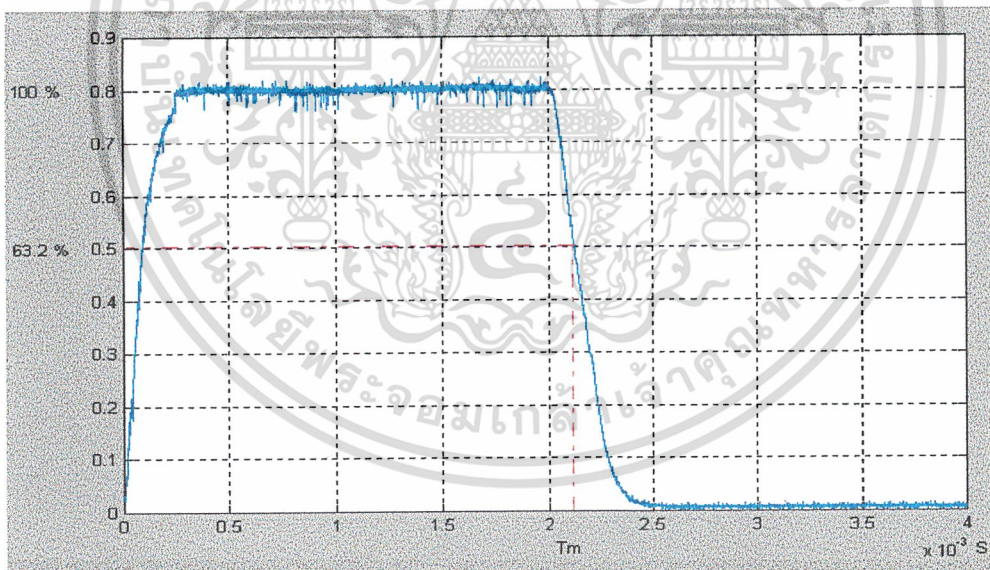
2. หาค่า Time constant ของ Motor (τ_m) , Time constant ของ Load (τ_L) และค่า Time constant ของ Shaft (τ_f) (ค่า Time constant ของ Motor จะมีค่าเท่ากับค่า Time constant ของ Load เพราะกระบวนการที่เราทำขึ้น Motor กับ Load เป็นแบบเดียวกัน)

2.1 หาค่า Time constant ของ Motor (τ_m) โดยการถอด Shaft ที่ต่ออยู่กับ Load ออก แล้วป้อน Input ให้เป็นแบบ Unit step เท่ากับ 0.8



รูปที่ 4.2 การต่อ simulink หาค่า τ_M และ τ_L

จากนั้นเราจะปรับเอาท์พุทที่ได้ เข้ามา Plot กราฟ ทาง Matlab ดังรูปที่ 4.3

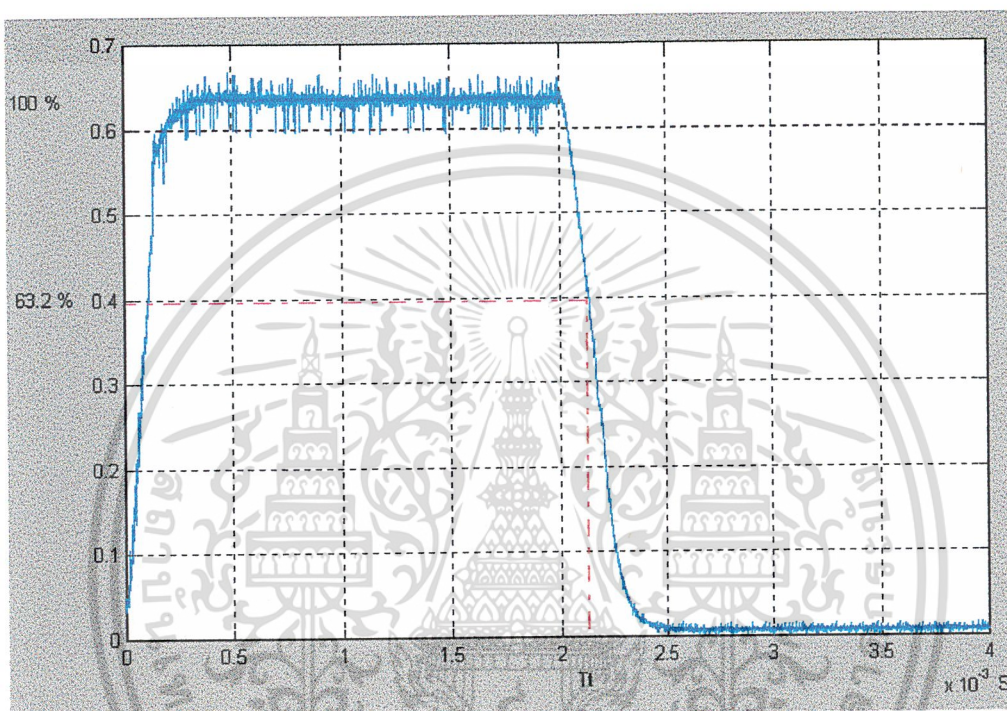


รูปที่ 4.3 กราฟการหาค่า τ_M

และวัดค่า Time constant ของ Motor (τ_m) โดยค่า Time constant ของ Motor (τ_m) จะอยู่ที่จุดที่กราฟขึ้นไปได้ 63.2% ของค่าที่เข้าสู่ Steady state ดังนั้น $\tau_m = \tau_L = 0.124 \text{ ms}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 หาค่า Time constant รวมของระบบ (τ_T) หรือขณะที่ต่อ Shaft เข้ากับ Motor และ Load โดยป้อนอินพุตให้เป็นแบบ Unit step เท่ากับ 0.8 ตามการ simulink ในรูปที่ 4.2 จากนั้นเราจะรับอินพุตเข้ามา Plot กราฟทาง Matlab ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟหาค่า τ_T

และวัดค่า Time constant รวมของระบบ (τ_T) โดยค่า Time constant รวมของระบบ จะอยู่ที่กราฟขึ้นไปได้ 63.2% ของค่าที่เข้าสู่ steady state ดังนั้น $\tau_T = 0.1355$ mS

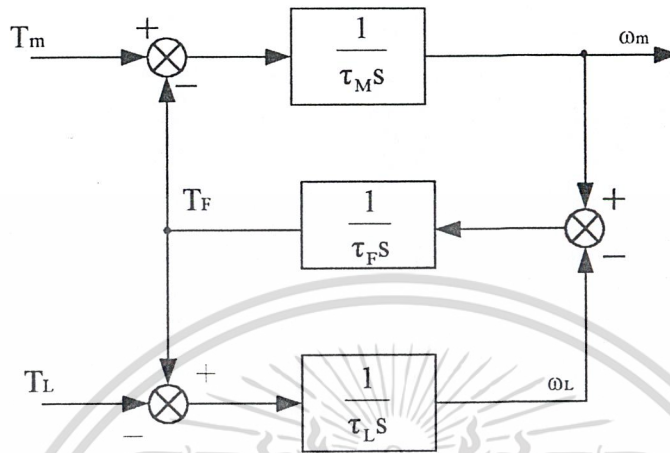
2.3 หาค่า Time constant ของ Shaft (τ_f) ค่า Time constant ของ Shaft จะมีค่าเท่ากับ

Time constant รวมของระบบ (τ_T) ลบกับค่า Time constant ของ Motor (τ_m) $\tau_f = \tau_T - \tau_m$

ดังนั้น $\tau_f = 0.0115$ mS

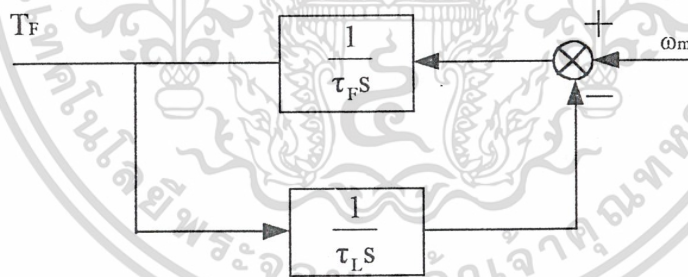
3. ทำการรวม Block Diagram ของกระบวนการ เพื่อหา Transfer function โดยให้ Disturbance มีค่าเท่ากับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 Block diagram ของกระบวนการ

ให้ $T_L = 0$



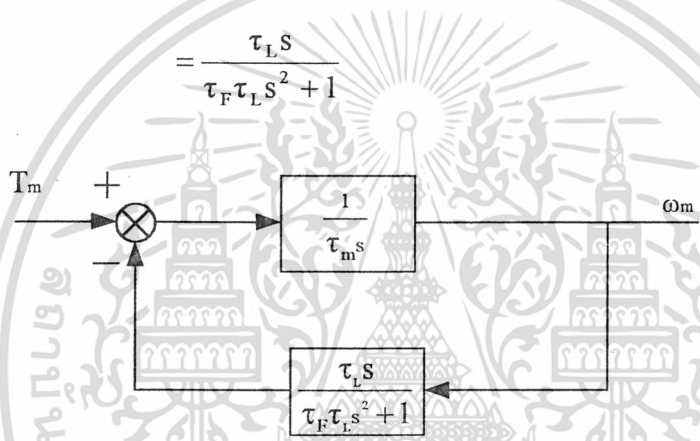
รูปที่ 4.6 ส่วนหนึ่งของ Block diagram ของกระบวนการเมื่อ $T_L = 0$

ทำการชุบ Block diagram จะได้

$$\frac{T_F}{\omega_m} = \frac{\frac{1}{\tau_F s}}{1 + \left(\frac{1}{\tau_F s}\right)\left(\frac{1}{\tau_L s}\right)}$$

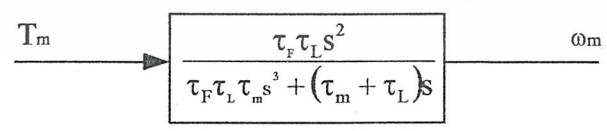
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{\tau_F s} \\ &= \frac{\tau_F \tau_L s^2 + 1}{\tau_F \tau_L s^2} \\ &= \left(\frac{1}{\tau_F s} \right) \left(\frac{\tau_F \tau_L s^2}{\tau_F \tau_L s^2 + 1} \right) \end{aligned}$$



รูปที่ 4.7 Block diagram ของกระบวนการ

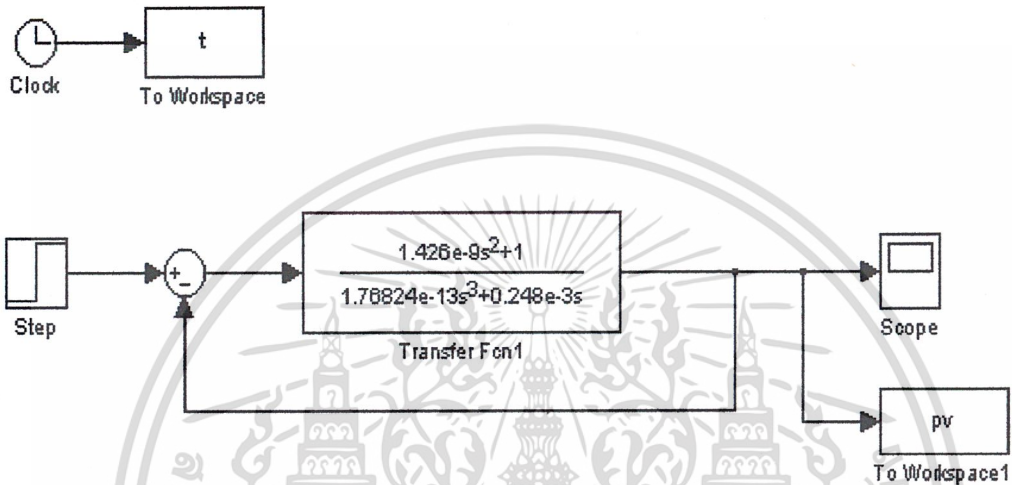
$$\frac{\omega_m}{T_m} = \frac{\tau_F \tau_L s^2 + 1}{\tau_F \tau_L \tau_m s^3 + (\tau_m + \tau_L) s}$$



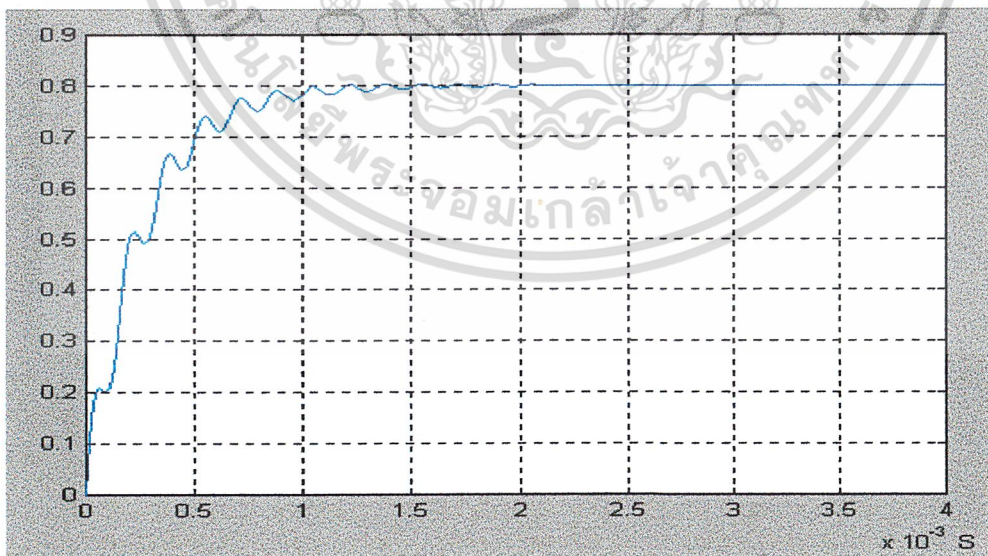
รูปที่ 4.8 Block diagram ของกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการ Closed-loop ของ Transfer function แล้วแทนค่า Time constant ของ Motor (τ_m) Time constant ของ Load (τ_L) Time constant ของ Shaft (τ_F) แล้วทำทดลอง Sim ใน Simulink ของ Matlab โดยป้อน Input ให้เป็นแบบ Unit step เท่ากับ 0.8 แล้ว Plot กราฟดูดังรูปที่ 4.10



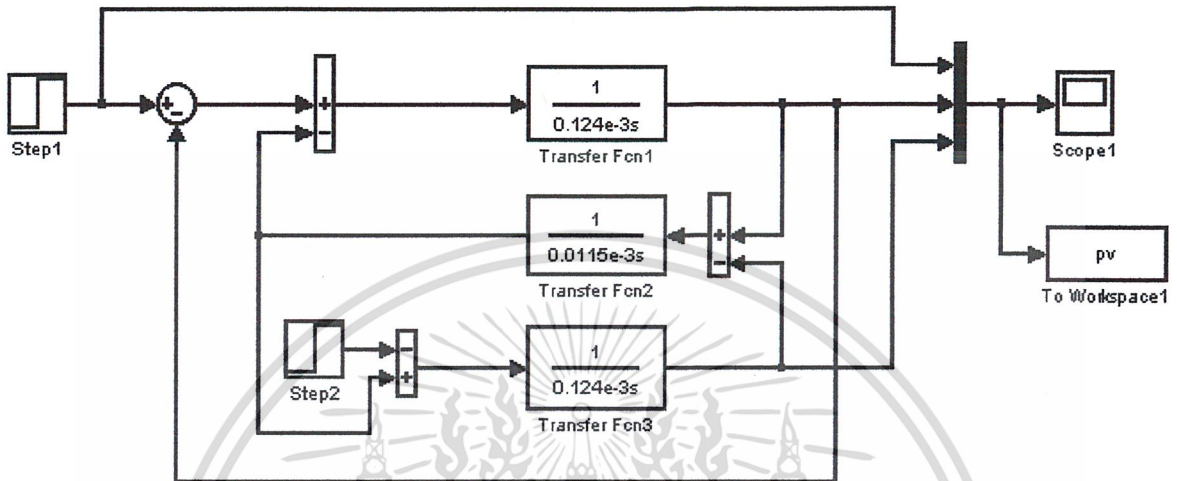
รูปที่ 4.9 การ simulink แบบ closed loop



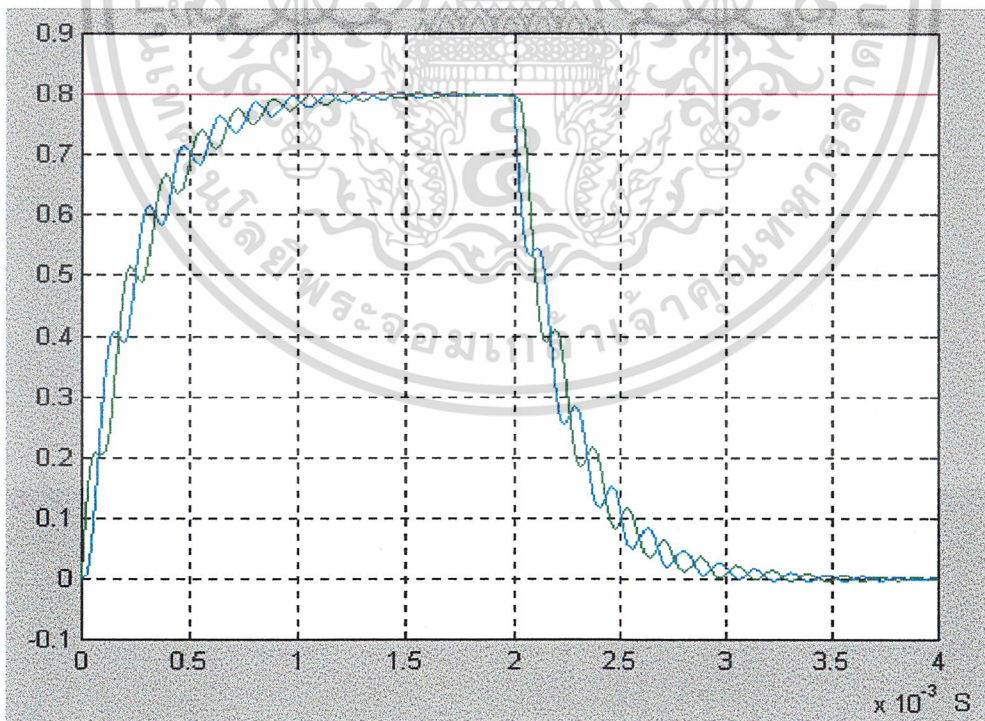
รูปที่ 4.10 กราฟ closed loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ระบบที่เกิด disturbance และยังไม่มีการปรับค่าใดๆ set point = 0.8 , disturbance = 0.8



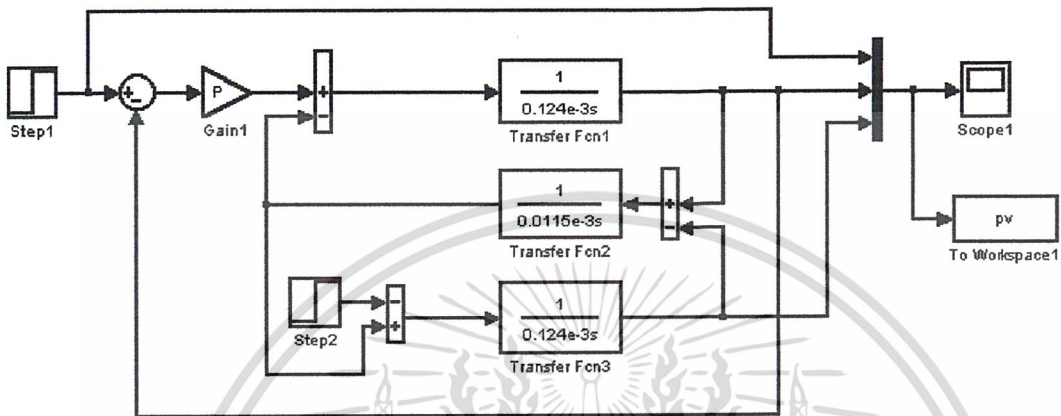
รูปที่ 4.11 การ simulink ที่เกิด disturbance ขึ้น



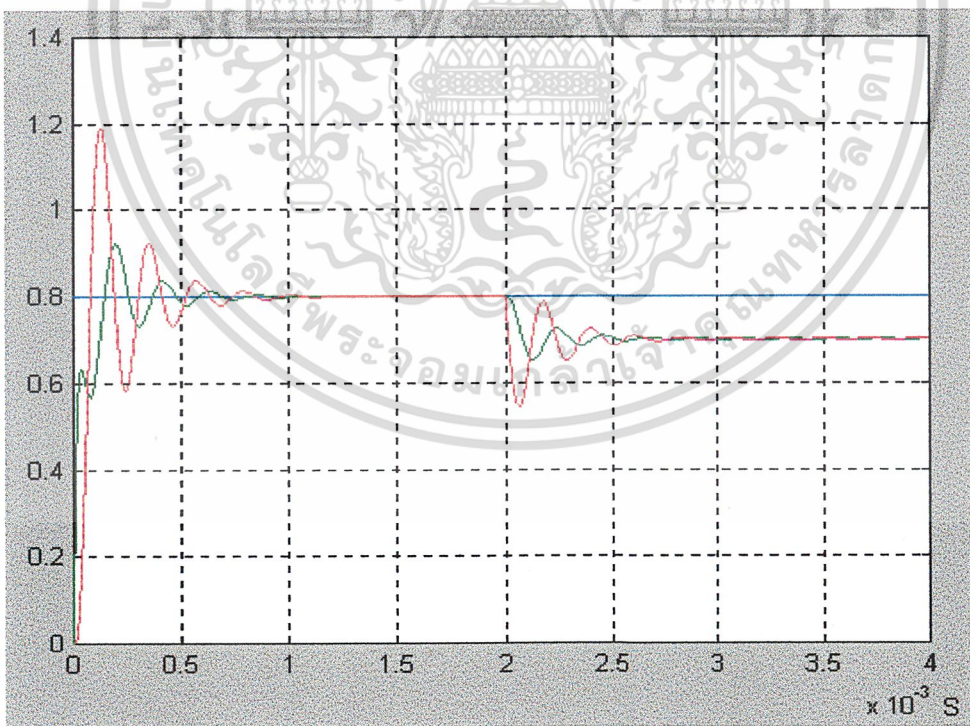
รูปที่ 4.12 กราฟที่เกิด disturbance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ใส่ค่า Proportional (P) ให้กับระบบที่จำลองกระบวนการโดยป้อน Disturbance ให้กับกระบวนการด้วย โดยป้อน set point = 0.8 , disturbance = 0.8 , proportional = 8



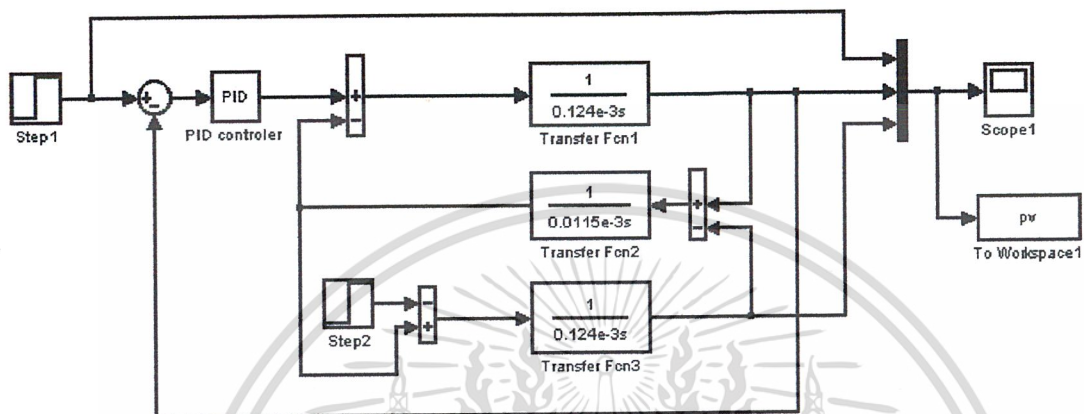
รูปที่ 4.13 การ simulink ที่มีการปรับค่า P



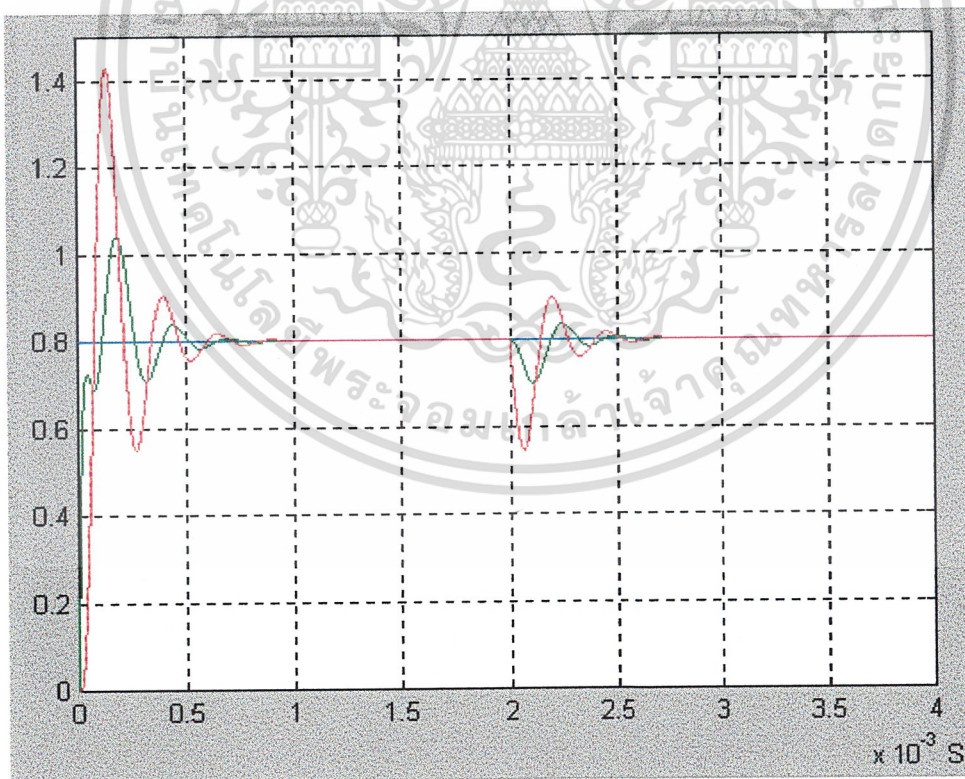
รูปที่ 4.14 กราฟที่ได้จากการปรับค่า P

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ใส่ค่า Integral (I) ให้กับจำลองกระบวนการ โดยป้อน Disturbance ให้กับกระบวนการ ด้วย โดยป้อน Set point = 0.8 , Disturbance = 0.8 , proportion = 8 , integral = 100000



รูปที่ 4.15 การ simulink ที่มีการปรับค่า P และ I

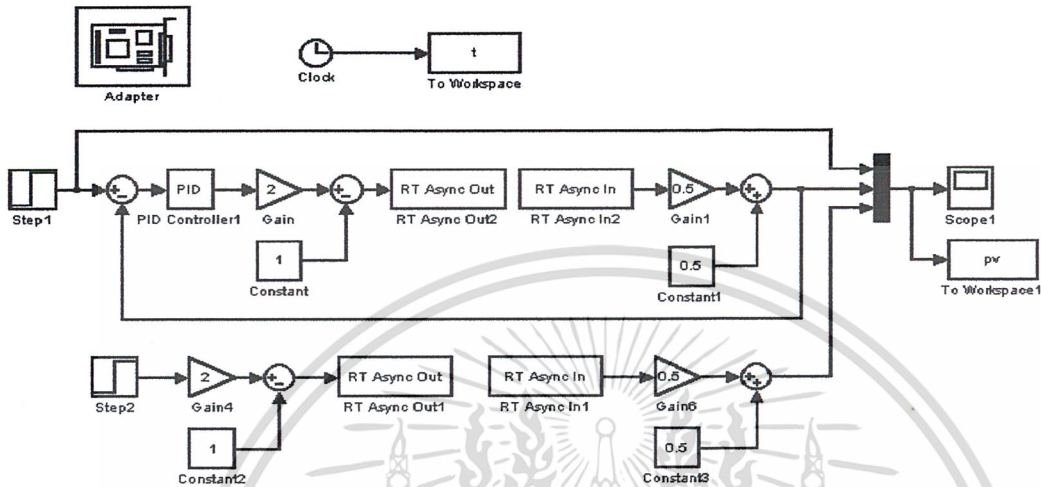


รูปที่ 4.16 กราฟที่ได้จากการปรับค่า P และ I

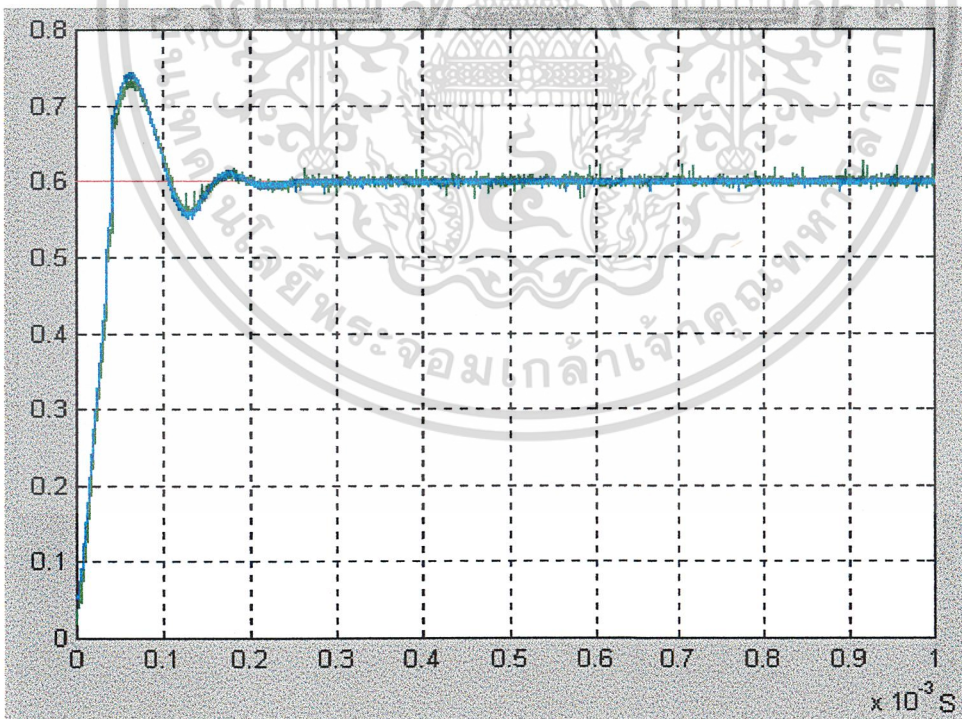
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ใส่ค่า Proportional + Integral (PI) ที่ได้ในกระบวนการจริง โดยป้อน Set point = 0.6

Disturbance = 0



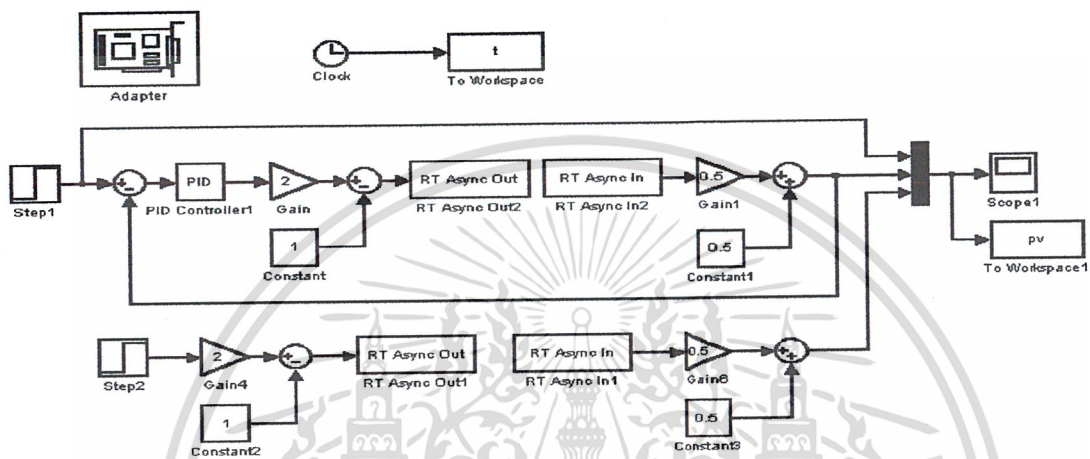
รูปที่ 4.17 การนำค่า P และ I มาควบคุมกระบวนการจริง



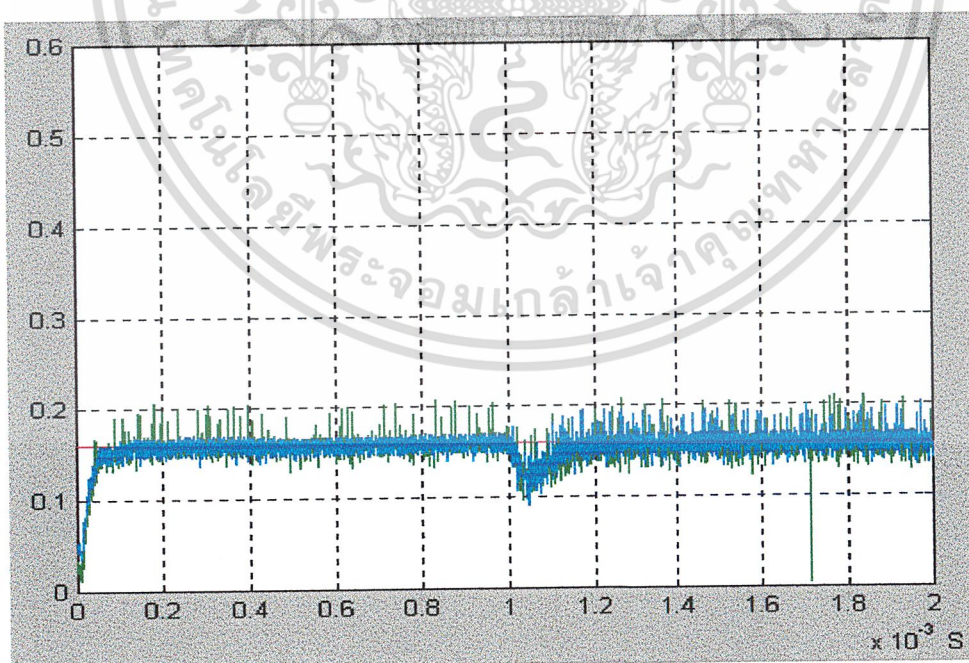
รูปที่ 4.18 กราฟจากการใส่ค่า P และ I ในกระบวนการจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ทดลองใส่ค่า Proportional + Integral (PI) ในกระบวนการจริง โดยป้อน Disturbance ให้กับกระบวนการแบบเดียวกับการ Sim โดยป้อน set point = 0.16 , disturbance = 0.2 , P = 8 , I = 100000



รูปที่ 4.19 การนำค่า P และ I มาควบคุมกระบวนการจริง เมื่อเกิด disturbance ขึ้น



รูปที่ 4.20 กราฟจากการใส่ค่า P และ I ใน plant จริง เมื่อเกิด disturbance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอการควบคุมความเร็วของระบบ 2 ความเฉื่อย โดยใช้มอเตอร์ 2 ตัวมาจำลองเป็นระบบที่ต้องการควบคุมซึ่งเป็นกระบวนการอันดับสาม ที่นี้โพลและซีโรของกระบวนการอยู่บนแกนจินตภาพทั้งหมด เป็นผลมาจากค่าความเฉื่อยของระบบทำให้เกิดการแกว่งอยู่ตลอดเวลา ระบบที่มีพฤติกรรมดังกล่าวมีอยู่มากมายในเขตอุตสาหกรรม เช่น เครื่องรีดเหล็กที่มีโรลิ่ง 2 ตัว ใช้รีดเหล็กที่มีความร้อน โดยสัญญาณรบกวนของระบบก็คือ อุณหภูมิของเหล็ก และสัญญาณรบกวนของระบบที่นำเสนอคือความเร็วของมอเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นโพล โดยทำการขับมอเตอร์ที่เป็นโพลให้หมุนสวนทางกัน ทำให้ความเร็วของระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง การควบคุมระบบดังกล่าวจะใช้การควบคุมแบบ PI ซึ่งการควบคุมแบบ PI นี้สามารถควบคุมระบบดังกล่าวให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ และจะเกิดสัญญาณรบกวนเข้ามาแล้วจะเกิดการแกว่งตลอดเวลาจะเป็นการแกว่งในช่วงแคบๆ รอบค่าเป้าหมาย

ในการทดลองทางทฤษฎีและปฏิบัติได้ผลเป็นที่น่าพอใจ คือสามารถควบคุมความเร็วของระบบดังกล่าวได้จริง แม้ว่าจะเกิดสัญญาณรบกวน

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ไม่ทราบข้อจำกัดของมอเตอร์ทำให้การออกแบบวงจร PWM และวงจร Driver มอเตอร์ไม่สามารถควบคุมได้ที่ความเร็วรอบสูงๆหรือที่มีโพลด์เข้ามามากๆ จะควบคุมได้สูงสุดที่ความเร็วรอบ 480 rpm และที่โพลด์สูงสุด 600 rpm เพราะมอเตอร์ที่เป็นโพลด์ถูกขับ ทำให้กลายเป็นเครื่องกำเนิดทำให้เกิดสถานะเบรกไดนามิกส์ และเกิดแรงดัน Back EMF ที่มอเตอร์ตัว Driver ด้วย ซึ่งความถี่จะสามารถควบคุมระบบในช่วงความเร็วที่สูงและโพลด์ที่มากกว่านี้ได้ หวังวงจร Driver ที่เราออกแบบต้องป้อนแรงดันมากกว่าแรงดัน Back EMF และแรงบิดที่ได้จากมอเตอร์ต้องมากกว่าแรงบิดที่เกิดจากเบรกไดนามิกส์

การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A ที่ใช้อยู่ เมื่อไม่มีสัญญาณป้อนให้กับการ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A ทำให้มีค่าเริ่มต้นของแรงดันเอาท์พุทที่ 2.5 V ออกมาตลอดเวลาทำให้เราไม่สามารถควบคุมระบบที่ต้องการความต่อเนื่องได้ ต้องทำการหยุดระบบก่อนหรือให้ค่าเริ่มต้นเป็น 0 V ก่อนจึงจะควบคุมต่อไปได้

ระบบควบคุมแบบ PI ไม่สามารถควบคุมระบบไม่ให้เกิดการแกว่งได้ ทำให้ระบบเกิดการแกว่งอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงต้องใช้ในการควบคุมแบบอื่นมาใช้ในการควบคุมแทนระบบ PI เช่น การควบคุมแบบ CDM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. A.E. Fitzgerald , Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, “ Electric Machinery ”, 5th Edition., McGraw Hill, Inc., Singapore, 1992
2. Robert H. Bishop , “Modern Control System Analysis And Design Using MATLAB”, เอกสารประกอบการเรียนวิชา Control System, The University of Texas at Austin
3. รศ.ดร. มนัส ตั้งวรศิลป์, วรรัตน์ ภัทรอมรกุล, “ คู่มือการใช้ MATLAB ฉบับสมบูรณ์ ”, ศูนย์การพิมพ์พลชัย, 2543
4. พิชิต ถ้ายอง “ เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 ”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537
5. รศ. กิตติ ศีรเศรษฐ , รศ. วิทยา ทิพย์สุวรรณพร, “ วิศวกรรมระบบควบคุมและระบบควบคุมป้อนกลับ ”, เอกสารประกอบการเรียนวิชา Control System, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SWITCHMODE™ Pulse Width Modulation Control Circuit

The TL494 is a fixed frequency, pulse width modulation control circuit designed primarily for SWITCHMODE power supply control.

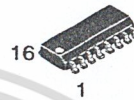
- Complete Pulse Width Modulation Control Circuitry
- On-Chip Oscillator with Master or Slave Operation
- On-Chip Error Amplifiers
- On-Chip 5.0 V Reference
- Adjustable Deadtime Control
- Uncommitted Output Transistors Rated to 500 mA Source or Sink
- Output Control for Push-Pull or Single-Ended Operation
- Undervoltage Lockout



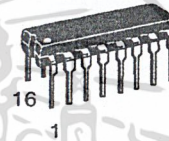
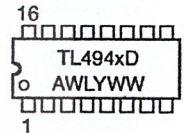
ON Semiconductor

<http://onsemi.com>

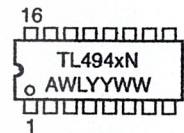
MARKING DIAGRAMS



SO-16
D SUFFIX
CASE 751B



PDIP-16
N SUFFIX
CASE 648



x = C or I
A = Assembly Location
WL, L = Wafer Lot
YY, Y = Year
WW, W = Work Week

ORDERING INFORMATION

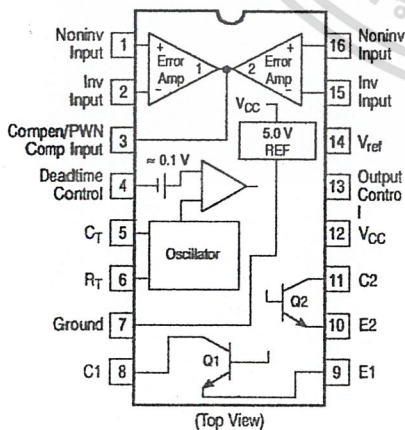
Device	Package	Shipping
TL494CD	SO-16	48 Units/Rail
TL494CDR2	SO-16	2500 Tape & Reel
TL494CN	PDIP-16	500 Units/Rail
TL494IN	PDIP-16	500 Units/Rail

MAXIMUM RATINGS (Full operating ambient temperature range applies, unless otherwise noted.)

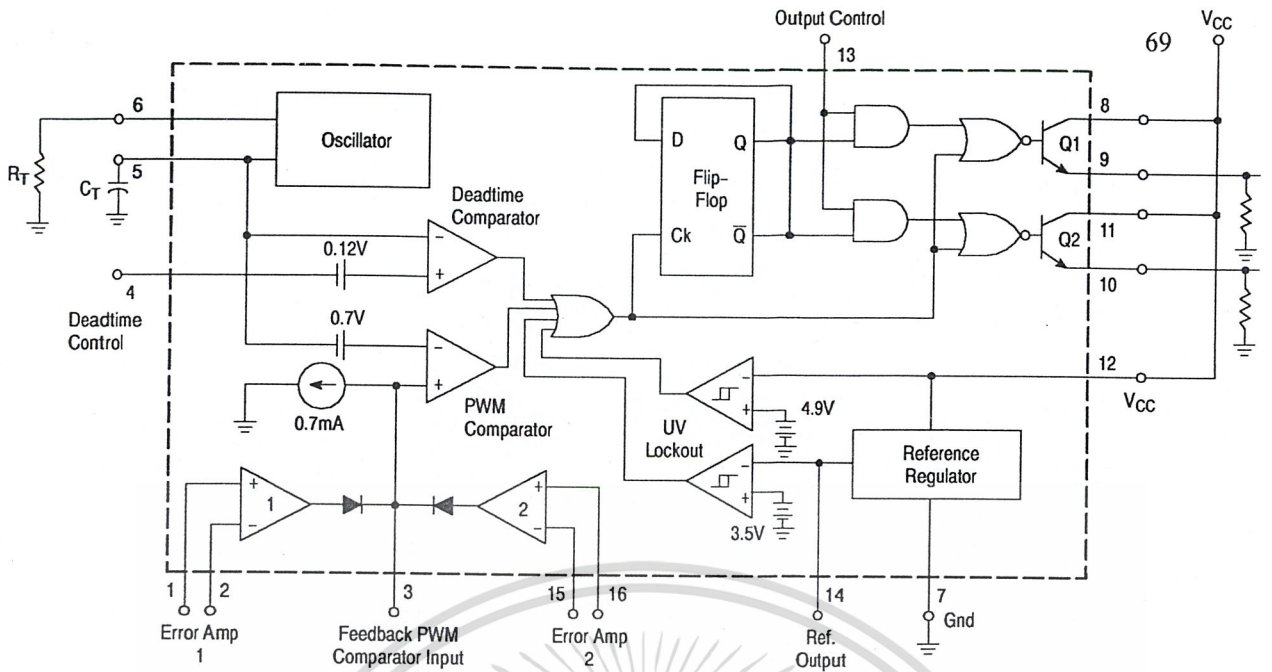
Rating	Symbol	TL494C	TL494I	Unit
Power Supply Voltage	V_{CC}	42		V
Collector Output Voltage	V_{C1}, V_{C2}	42		V
Collector Output Current (Each transistor) (Note 1.)	I_{C1}, I_{C2}	500		mA
Amplifier Input Voltage Range	V_{IR}	-0.3 to +42		V
Power Dissipation @ $T_A \leq 45^\circ\text{C}$	P_D	1000		mW
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	80		$^\circ\text{C}/\text{W}$
Operating Junction Temperature	T_J	125		$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-55 to +125		$^\circ\text{C}$
Operating Ambient Temperature Range TL494C TL494I	T_A	0 to +70 -40 to +85		$^\circ\text{C}$
Derating Ambient Temperature	T_A	45		$^\circ\text{C}$

1. Maximum thermal limits must be observed.

PIN CONNECTIONS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



This device contains 46 active transistors.

Figure 1. Representative Block Diagram

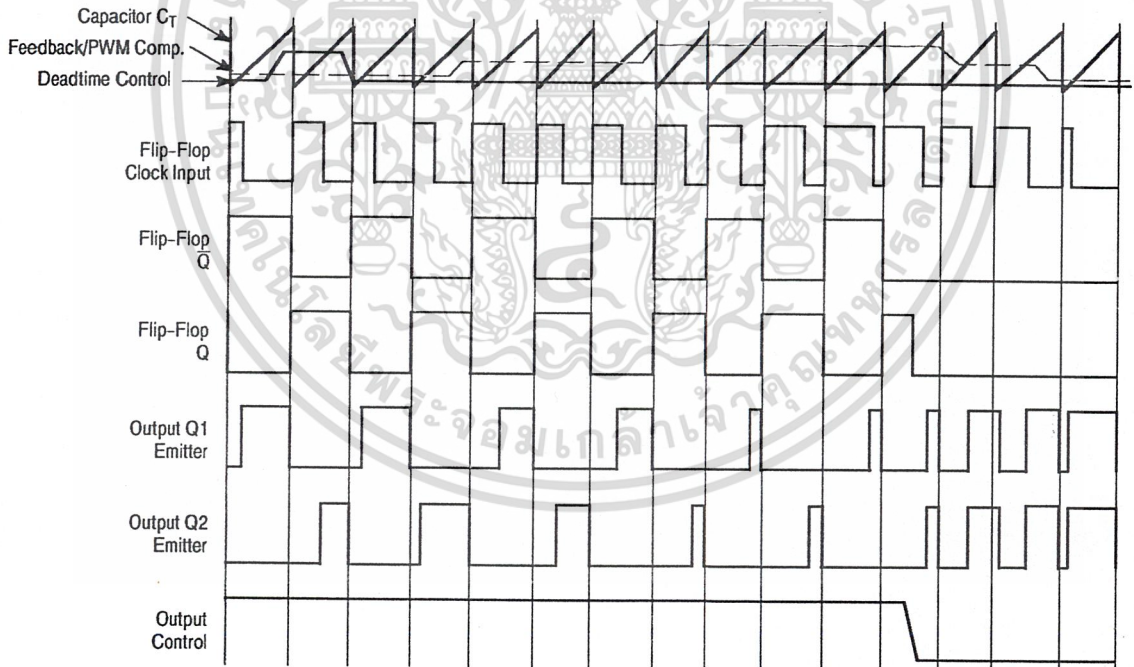


Figure 2. Timing Diagram

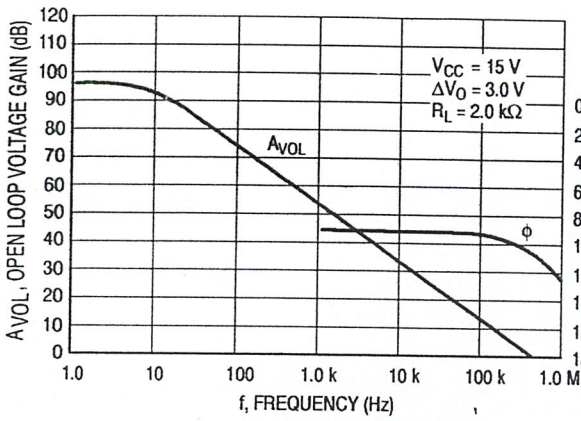


Figure 4. Open Loop Voltage Gain and Phase versus Frequency

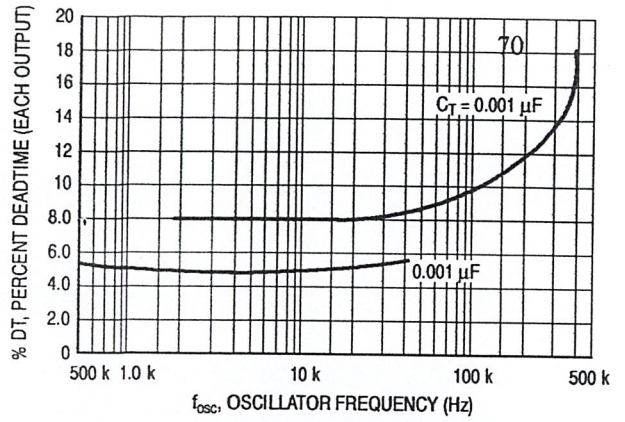


Figure 5. Percent Deadtime versus Oscillator Frequency

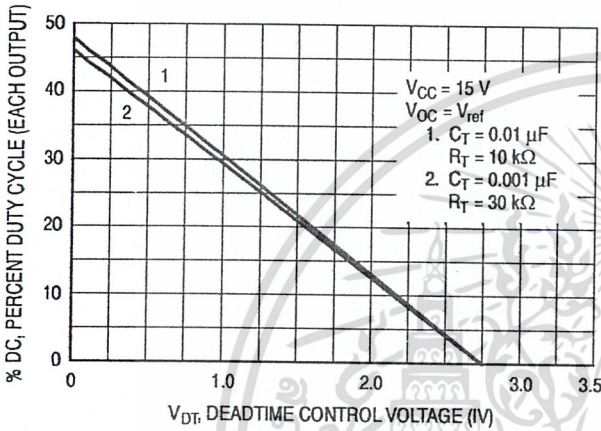


Figure 6. Percent Duty Cycle versus Deadtime Control Voltage

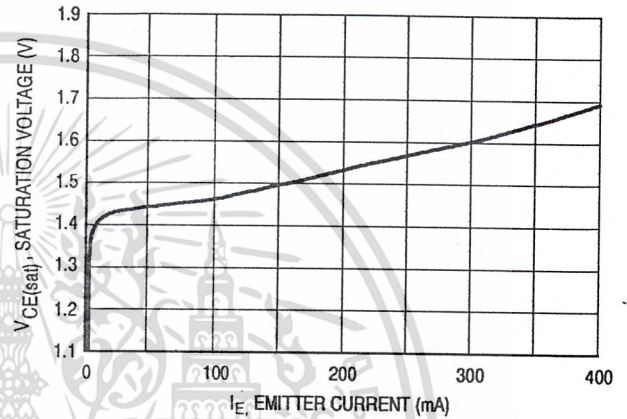


Figure 7. Emitter-Follower Configuration Output Saturation Voltage versus Emitter Current

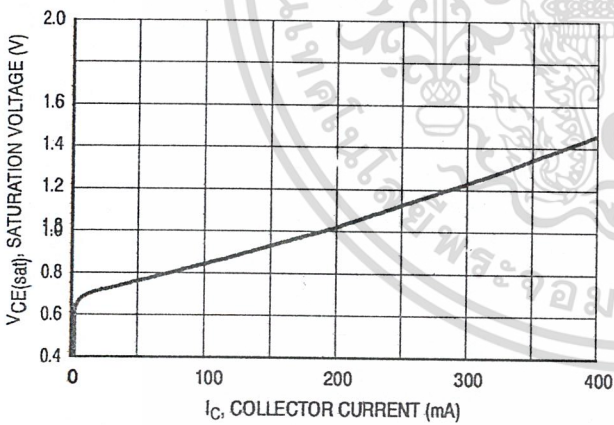


Figure 8. Common-Emitter Configuration Output Saturation Voltage versus Collector Current

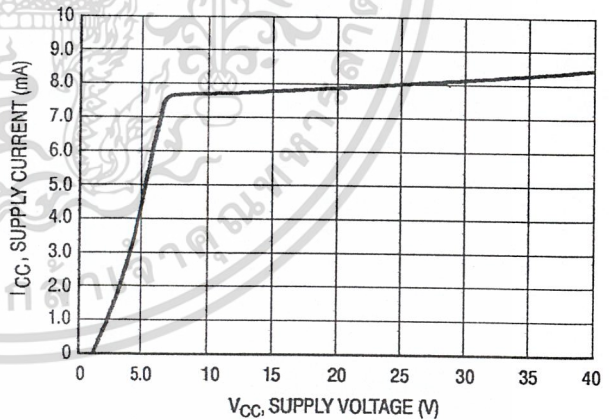


Figure 9. Standby Supply Current versus Supply Voltage

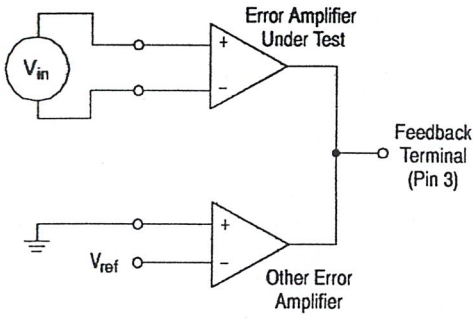


Figure 10. Error-Amplifier Characteristics

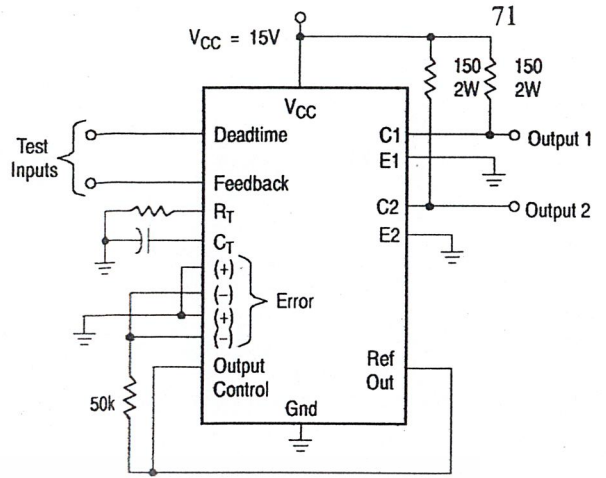


Figure 11. Deadtime and Feedback Control Circuit

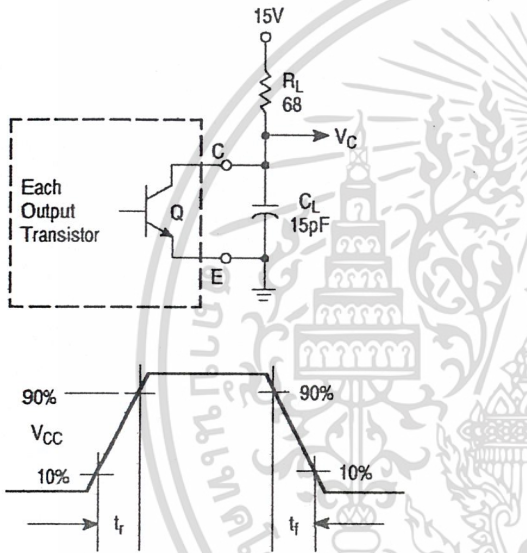


Figure 12. Common-Emitter Configuration Test Circuit and Waveform

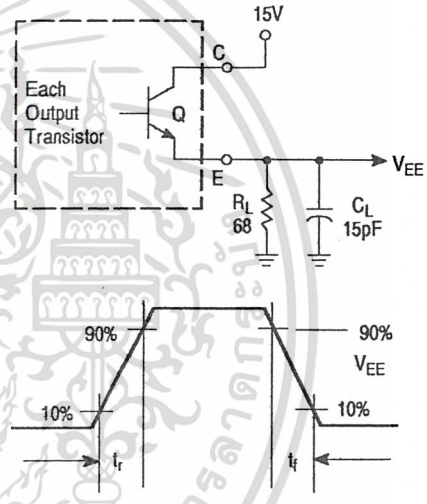


Figure 13. Emitter-Follower Configuration Test Circuit and Waveform