

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การนำทฤษฎีเคออสไปใช้กับแพทย์แผนไทย

Application Chaotic Signal for Thai Medicine



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Application Chaotic Signal for Thai Medicine**

**BY**

**MR. JATSADA KAEWRUNGFA**

**MR. PHONSAK TORPHON**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF THE INFORMATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONK'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2007**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์      การประยุกต์ทฤษฎีเคออสกับแพทย์แผนไทย  
Application Chaotic Signal for Thai Medicine

ชื่อนักศึกษา              นายเจษฎา แก้วรุ่งฟ้า              รหัสประจำตัว 47015828  
   นายพลศักดิ์ ตอพล              รหัสประจำตัว 47015846

อาจารย์ที่ปรึกษา              รศ.ดร. ปิติเขต สุรักษา


ระดับการศึกษา              ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
   สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ

ภาควิชา                      วิศวกรรมสารสนเทศ

ปีการศึกษา                  2549

---

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

  
.....  
(รศ.ดร. ปิติเขต สุรักษา)  
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ทฤษฎีเคออสกับแพทย์แผนไทย		
ชื่อนักศึกษา	นายเจษฎา	แก้วรุ่งฟ้า	รหัสนักศึกษา 47015828
	นายพลศักดิ์	ตอพล	รหัสนักศึกษา 47015846
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. ปิติเขต สุรักษา		
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ		
ปีการศึกษา	2549		

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเป็นที่ทราบว่าการรักษาโรคแบบทางเลือกหรือแพทย์แผนไทยได้รับความสนใจจากประชาชนโดยทั่วไป โดยเฉพาะการบำบัดโรคหรือการผ่อนคลายความเครียดโดยการนวดแบบแผนไทย

และเป็นที่ทราบว่าการบำบัด ให้ผ่อนคลายนั้นได้มีผู้ผลิตเก้าอี้นวด (Massage chair) ออกจำหน่ายในท้องตลาดแต่ผลิตภัณฑ์จะนำเข้าจากต่างประเทศ และมีราคาสูงรวมทั้งถูกปิดโดยสิทธิบัตร

ดังนั้นในโครงการนี้จึงเสนอการสร้างเก้าอี้นวดโดยใช้ความรู้ของแพทย์แผนไทยมาประยุกต์และใช้องค์ความรู้ทางทฤษฎีเคออส (Chaos) มาควบคุมการทำงานเพื่อให้เกิดการสั่นสะเทือนตามทฤษฎีแพทย์แผนไทย

**PROJECT** APPLICATION CHAOSTIC SINGNAL FOR THAI MEDICINE  
**STUDENT** Mr. JATSADA KAEWRUNGFA No.47015828  
Mr. PHONSAK TORPHON No.47015846  
**ADVISOR** Assoc.Prof. Dr.PITIKHATE SOORAKSA  
**COURSE** BACHELOR OF INFORMATION ENGINEERING  
**DEPARTMENT** INFORMATION ENGINEERING  
**YEAR** 2006

## ABSTRACT

Now be that know that disease preservation receive the interest from people generally especially condemn the disease tension relaxation by massaging pattern Thai

And be the know that cure relax have person bud a chair massages go out sell in the market but the products will import from the foreign countries and tall valuable and have by the patent

Thus in this project then present building chair massages by use the knowledge of plan Thai doctor come to applied and use with the theory chaos for control the work for be born the trembler follows doctor plan Thai theory

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ทางผู้จัดทำ ได้ทำงานสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์ทางด้านต่าง ๆ ทั้งคำปรึกษาทางด้านต่าง ๆ คำปรึกษาทางด้านวิชาการ และคำแนะนำในการปฏิบัติงานรวมถึงการช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ จาก รศ.ดร. ปดิเขต สุรักษา และ อาจารย์กฤตภากร กล่อมการ ทางผู้จัดทำขอขอบคุณท่านอาจารย์มา ณ ที่นี้ด้วย ขอขอบพระคุณพี่ตี๋ พี่เจด พี่บั้ง และเพื่อนๆ ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆด้วยดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยห่วงใยและให้การสนับสนุนในการศึกษาด้วยดี มาโดยตลอด รวมทั้งเพื่อนๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำทางด้านวิชาการตลอดจนให้ยืมอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทำโครงการ

คุณประโยชน์ต่างๆที่เกิดขึ้นจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ทางผู้จัดทำขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายเกษญา แก้วรุ่งฟ้า  
นายพลศักดิ์ ตอพล  
ผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา	1
1.2 จุดประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ตารางแผนงาน	2
1.6 สถาปัตยกรรมหลักโครงการ	3
1.6.1 ฮาร์ดแวร์(Hardware)	3
1.6.2 ซอฟต์แวร์ (Software)	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 นิยามของเคออสติก	4
2.2 คุณลักษณะของเคออส	5
2.3 ประโยชน์ของเคออส	6
2.4 วงจร Chua (Chua's circuit)	6
2.5 วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบความถี่ต่ำ(Slow frequency chaotic oscillation)	10
2.6 Generalized Impedance Converter	12
2.7 Generalized Impedance Network	15
2.8 ตัวเหนี่ยวนำเสมือน (Inductance simulation)	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.9 วงจรขยาย (Amplifier)	19
2.10 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current motors: DC motors)	25
2.11 ความรู้เรื่องเส้นในร่างกาย	35
<b>บทที่ 3 วงจรที่สร้างขึ้น</b>	37
3.1 วงจร Chua	37
3.2 วงจร Summing Amplifier	37
3.3 PCB Drive Motor	39
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	40
4.1 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจร Chua	40
4.2 วงจรที่ใช้ในการปรับสัญญาณเข้าวงจร Drive Motor	43
4.3 ผลการทดลองเรื่องวงจขยายสัญญาณอลวน	45
4.4 ชุดตัวนำ	47
<b>บทที่ 5 สรุปผลที่ได้</b>	52
5.1 สรุปผลการทดลองจากวงจร Chua	52
5.2 สรุปผลการทดลองเรื่องวงจขยายสัญญาณอลวน	52
5.3 สรุปผลการทดลองเมื่อนำสัญญาณอลวน ไปขับมอเตอร์กระแสตรง	53
5.4 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลอง	53
5.5 แนวทางการพัฒนา	53

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.37 แสดงบล็อกไดอะแกรมของดีซีมอเตอร์โมเดล	31
รูปที่ 3.1 วงจร Chua ใช้ในการทดลอง	37
รูปที่ 3.2 วงจร Summing Amplifier	38
รูปที่ 3.3 PCB Layout Drive Motor	39
รูปที่ 4.1 วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลโลสโคปแบบความถี่ต่ำที่ใช้ในการทดลอง	40
รูปที่ 4.2 ผลการทดลอง 4.1.1	41
รูปที่ 4.3 ผลการทดลอง 4.1.1 ในแกน X และแกน Y	41
รูปที่ 4.4 ผลการทดลอง 4.1.2	42
รูปที่ 4.5 ผลการทดลอง 4.1.2 ในแกน X และแกน Y	43
รูปที่ 4.6 วงจรที่ใช้ในการปรับสัญญาณเข้าวงจร Drive Motor	44
รูปที่ 4.7 สัญญาณเคออสที่ยกระดับเป็นบวก	45
รูปที่ 4.8 Drive Motor	46
รูปที่ 4.9 ชุดนวดตรงส่วนนั่ง	48
รูปที่ 4.10 ลักษณะด้านข้าง	48
รูปที่ 4.11 ชุดนวดตรงส่วนหลัง	49
รูปที่ 4.12 ลักษณะทั้งตัวของเก้าอี้	49
รูปที่ 4.13 ชุดตัวนวดจริงส่วนหลัง	50
รูปที่ 4.14 ชุดตัวนวดจริงส่วนที่นั่ง	50
รูปที่ 4.15 ลักษณะจริงด้านข้าง	51

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 วงจร Chua	7
รูปที่ 2.2 i-v characteristic ของ Chua ไค โอค	8
รูปที่ 2.3 Chua ไค โอค	10
รูปที่ 2.7 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบความถี่ต่ำ	11
รูปที่ 2.8 สัญญาณอลวนจากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบความถี่ต่ำ	11
รูปที่ 2.9 สัญญาณอลวนแวนอน เป็นแกน Y และ แนวตั้งเป็นแกน X	12
รูปที่ 2.9 two - port network	13
รูปที่ 2.10 วงจร GIC	14
รูปที่ 2.11 วงจร GIN	15
รูปที่ 2.12 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน (Synthetic inductors)	16
รูปที่ 2.13 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน (Inductance simulation) ที่นำมาใช้แทนตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าสูง	17
รูปที่ 2.14 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบความถี่ต่ำ โดยใช้วงจร Chua	18
รูปที่ 2.23 สัญลักษณ์ของออปแอมป์	19
รูปที่ 2.24 คุณสมบัติด้านความต้านทานของออปแอมป์	20
รูปที่ 2.25 วงจร Buffer หรือ Voltage follower	21
รูปที่ 2.26 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส	21
รูปที่ 2.27 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส	22
รูปที่ 2.28 การป้อนสัญญาณอินพุตที่ชั่ววอก	23
รูปที่ 2.29 การป้อนสัญญาณอินพุตที่ชั่วพล	23
รูปที่ 2.30 การป้อนสัญญาณอินพุต 2 สัญญาณที่เป็นอิสระต่อกันให้กับออปแอมป์	24
รูปที่ 2.31 การขยายผลต่างของอินพุตทั้งสองของออปแอมป์	24
รูปที่ 2.32 การป้อนสัญญาณอินพุตร่วมให้กับขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์	24
รูปที่ 2.33 วงจรภายในของมอเตอร์กระแสตรง	27
รูปที่ 2.34 แสดงอินพุตและเอาต์พุตของ โมเดลทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์	28
รูปที่ 2.35 แสดง โมเดลของคิซิมอเตอร์แบบฟิลด์แยกกระตุ้น	28
รูปที่ 2.36 แสดงถึงแรงบิดต่างๆที่เกิดขึ้นต่อโหลดของมอเตอร์	30

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา

ในการส่งเสริมอุตสาหกรรมการท่องเที่ยวการนวดตัวแบบแผนไทยโบราณ และการนวดตัวแบบสปาได้รับความนิยมมากจากนักท่องเที่ยวต่างชาติ ดังนั้นเราได้นำแนวคิดของการนวดตัวแบบแผนไทย มาประยุกต์ใช้ กับเก้าอี้นั่งทั่วไปให้เกิดมูลค่าเพิ่ม เพื่อรองรับการใช้งานอย่างกว้างขวาง ทั้งการพักผ่อนส่วนตัว , เก้าอี้นวดบนยานพาหนะ, ในโรงภาพยนตร์ รวมทั้งในแผนกกายภาพบำบัดในโรงพยาบาล

ดังนั้นได้ทำการประยุกต์ใช้ในส่วนของสัญญาณเคออสติก(Chaotic) ซึ่งจะคล้ายกับสัญญาณแรนดัม (Random) แต่สามารถควบคุมการเกิดของสัญญาณได้ จึงเหมาะที่จะนำมาประยุกต์เข้ากับการนวดแบบแพทย์แผนไทยได้ และสามารถนำไปประยุกต์และพัฒนาให้เหมาะสมกับเทคโนโลยีในอนาคตที่จะเกิดขึ้น ได้อย่างเหมาะสมต่อไป

### 1.2 จุดประสงค์

1.2.1 สามารถนำสัญญาณเคออสติก มาประยุกต์เข้ากับเก้าอี้นวดแบบแพทย์แผนไทยเพื่อใช้ในการกายภาพบำบัดและผ่อนคลาย

1.2.2 เพื่อเป็นการพัฒนาของเก้าอี้ให้มีประสิทธิภาพและมีประโยชน์ให้มากยิ่งขึ้น

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 สร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมการหมุนของมอเตอร์

1.3.2 สร้างวงจรขยาย (Amplifier) เพื่อใช้ในการขยายของสัญญาณอลวนและนำสัญญาณที่ได้ไปขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงได้

1.3.3 สร้างแบบจำลองตัวนวดที่จะติดตั้งในเก้าอี้ที่สามารถรองรับกับสัญญาณอลวน ที่สร้างมาจากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนได้

1.3.4 นำแบบจำลองของตัวนวดข้างต้น มาทำการทดลองกับรูปแบบของเก้าอี้ขนาดต่างๆ

1.3.5 สุกท้ายนำแบบจำลองของเก้าอี้ หาข้อดี และข้อเสีย เพื่อเป็นต้นแบบสำหรับสร้าง “เก้าอี้นวดอลวนสำหรับงานนวดที่แท้จริงแบบแพทย์แผนไทย” ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถสร้างเก้าอี้ที่นวดอย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปใช้งานได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพ

1.4.2 สามารถนำสัญญาณเคออดิก มาประยุกต์ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมการนวดของเก้าอี้ที่ต้องการได้

## 1.5 ตารางแผนงาน

Mount – year step	7 - 49 (ก.ค.)	8 - 49 (ส.ค.)	9 - 49 (ก.ย.)	10 - 49 (ต.ค.)	11 - 49 (พ.ย.)	12 - 49 (ธ.ค.)	1 - 50 (ม.ค.)	2 - 50 (ก.พ.)
Step 1.								
Step 2.								
Step 3.								
Step 4.								
Step 5.								
Step 6.								

Retail	
Step 1	ค้นคว้าข้อมูล
Step 2	ออกแบบเครื่องมือ
Step 3	จัดหาอุปกรณ์
Step 4	สร้างเครื่องมือ
Step 5	ทดสอบ
Step 6	ทดสอบ, แก้ไขปรับปรุง และ สรุปผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 สถาปัตยกรรมหลักโครงการ

### 1.6.1 ฮาร์ดแวร์(Hardware)

- คอมพิวเตอร์ส่วนตัว                      จำนวน 1 เครื่อง
- บอร์ดวงจรทดลอง                        จำนวน 2 ชุด
- ออสซิลโลสโคป                              จำนวน 1 เครื่อง
- แหล่งจ่ายไฟ                                  จำนวน 1 เครื่อง
- มัลติมิเตอร์                                 จำนวน 1 เครื่อง
- แก้วน้ำ    จำนวน 1 ตัว

### 1.6.2 ซอฟต์แวร์ (Software)

- โปรแกรม PSPICE เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบวงจรและใช้ในการจำลองรูปแบบของสัญญาณ
- โปรแกรม POTEUS เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบวงจรและจำลองการทำงานของวงจร

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 นิยามของเคออสติก

เคออสติกตามความหมายในพจนานุกรมหมายถึง ความสับสนวุ่นวาย ไร้ระเบียบแต่เคออสที่เราได้ศึกษานั้นคือศึกษานั้นคือการศึกษาเกี่ยวกับเคออสในคณิตศาสตร์ หรือ Deterministic chaos โดยในความหมายในทางวิทยาศาสตร์ คือ สภาพหรือกระบวนการที่ไม่มีเสถียรภาพ (Unstable) หากมีการกระทบเพียงเล็กน้อย อาจจะทำให้เกิดสัญญาณที่ไม่เป็นเส้นตรง แต่เป็นเส้นทางคดเคี้ยววุ่นวายอลวน ในบางครั้งอาจเกิดการกระโดดข้าม ดังนั้นผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจึงไม่สามารถคาดเดาได้หรือทำนายให้ถูกต้องแม่นยำได้

พฤติกรรมแบบอลวน (Chaotic behavior) เป็นพฤติกรรมที่ดูไร้ระเบียบ ที่ดูเหมือนว่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างสะเปะสะปะหรือเชิงสุ่มเอา (random) แต่เป็น Deterministic ที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งที่จริงแล้วแฝงไปด้วยความเป็นระเบียบ (Order)

ระบบที่ประพัตต์ตัวแบบเคออส จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของเงื่อนไขเริ่มต้น (Sensitively dependent on initial condition) ทำให้ไม่สามารถทำนายได้ในระยะยาว (long-term unpredictable) โดยความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยที่เกิดจากการวัดเงื่อนไขเริ่มต้น จะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโปเนนเชียล (exponential) เมื่อเวลาผ่านไป เคออสได้มีการค้นพบมานานแล้วตั้งแต่สมัยของ J. H. Poincare (1854-1912) ซึ่งตอนนั้น Poincare ได้พิสูจน์ว่าระบบสุริยจักรวาล แบบเคออส แต่สมัยนั้นยังไม่ได้บัญญัติศัพท์อลวน chaos ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่าเป็น pathological case

และจากหลัก Uncertainty principle ของ Heisenberg ทำให้เราไม่สามารถวัดพารามิเตอร์ (Parameter) ทุกตัวได้อย่างถูกต้องแม่นยำเพราะการให้ความแม่นยำอย่างหนึ่งมากมักจะส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนในอีกอย่างหนึ่ง และถึงแม้ตัวแปรที่อธิบายระบบนี้มีเพียงตัวแปรเดียว ความแม่นยำของค่าที่วัดได้ก็จะจำกัดอยู่ค่าหนึ่ง ความไม่แน่นอนที่เหลืออยู่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งทำให้เราได้เลขนับสำคัญลดลงเรื่อยๆจนเราทำนายอะไรไม่ได้เลย ดังนั้นเคออสจึงเกิดขึ้นได้ทั้งในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ

สำหรับระบบที่เป็นเชิงเส้น จะเกิดความคลาดเคลื่อนเมื่อเวลาผ่านไป เป็นสัดส่วนกับความคลาดเคลื่อนเริ่มแรก เนื่องจากความสัมพันธ์แบบเป็นเชิงเส้นพฤติกรรมแบบอลวน (Chaotic behavior) จึงไม่มีในระบบที่เป็นเชิงเส้นเคออส เกิดขึ้นได้เฉพาะกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) แต่ไม่ใช่ว่าระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น จะเกิดความอลวนเสมอไป จะมีช่วงพารามิเตอร์ที่ทำให้ระบบประพัตต์ตัวแบบอลวน แต่ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นบางระบบก็เป็นเคออสตลอดเวลา

จุดที่เด่นประเด็นสำคัญอีกอย่างหนึ่งในทฤษฎีเคออส ความอ่อนไหวอย่างสูงของเงื่อนไขเริ่มต้น กับ Principle of weak ที่ถือว่าสาเหตุเบื้องต้นเพียงนิดเดียว สามารถก่อให้เกิดผลกระทบอย่างมากได้

## 2.2 คุณลักษณะของเคออส

ระบบที่เป็นเคออสจะต้องประกอบไปด้วยลักษณะดังต่อไปนี้

1) มีคุณสมบัติแบบไม่เป็นเชิงเส้น คุณสมบัติแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะมีคุณสมบัติตรงกันข้ามกับ คุณสมบัติเชิงเส้น โดยที่ฟังก์ชัน  $f$  จะมีคุณสมบัติเชิงเส้นก็ต่อเมื่อ  $f(x+y) = f(x) + f(y)$  นั่นก็คือ ในระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้นผลลัพธ์ของระบบทั้งหมดไม่เท่ากับผลรวมของผลลัพธ์ที่เกิดจากส่วนย่อยๆรวมกัน (โดยอาจจะมากหรือน้อยกว่าก็ได้) ความไม่เป็นเชิงเส้นนี่เองที่ทำให้ระบบที่แสดงความเป็นอลวนไม่ได้รับการศึกษามากในอดีต เพราะค่อนข้างยากในการศึกษาและเข้าใจข้อพึงระวังก็คือ การที่กล่าวว่าระบบเคออสจำเป็นต้องเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้น ไม่ได้หมายความว่าระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นทุกระบบจะเป็นเคออสเสมอไป

2) ไม่ใช่เกิดแบบสุ่ม(คือเป็น Deterministic ไม่ใช่ probabilistic) หรือกล่าวอีกแบบหนึ่งก็คือ ในระบบ chaos พฤติกรรมทั้งหลายเกิดขึ้นภายใต้กฎเกณฑ์ที่แน่นอน เหตุการณ์ที่ไม่สามารถทำนายล่วงหน้าได้แบบการทอดลูกเต๋า จึงไม่ใช่ ความเป็นเคออส แต่เป็นการสุ่มการแปลคำนี้เป็นภาษาไทยโดยใช้คำว่า “ทฤษฎีอลวน” จึงเป็นการแปลที่ไม่เหมาะสม เพื่อป้องกันการเข้าใจผิดว่าการเป็นเคออส ไม่ใช่การสุ่มจึงมีคนเรียกเคออสว่า deterministic chaos

3) ไวต่อสภาวะเริ่มต้น(sensitivity to initial conditions) การเริ่มต้นเงื่อนไขต่างกันนิดเดียวอาจทำให้ผลในตอนสุดท้ายต่างกันมากสาเหตุที่ระบบเคออสไวต่อสภาวะเริ่มต้นก็เพราะว่ามันจะขยายความแตกต่างให้เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น ที่พบบ่อยก็คือกายขยายความแตกต่างให้เร็วขึ้นในระดับยกกำลังสอง(exponential) ของเวลา

4) ไม่สามารถทำนายล่วงหน้าระยะยาวๆได้ (long-term prediction is impossible) ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องจากข้อ 3 เพราะการที่ไวต่อสภาวะเริ่มต้นจะทำให้เราไม่รู้ว่า ระบบที่เราสนใจอยู่จะเป็นอย่างไรในระยะยาวอย่างไรก็ตามคุณสมบัติข้อนี้ไม่ได้แปลว่าการทำนายระยะสั้น(short-term prediction)จะเป็นสิ่งที่เป็นไปได้

นอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้ว ระบบเคออส ยังมีอีกสมบัติอีกประการหนึ่ง คือ การแสดงลักษณะ “คล้ายกับตัวเอง” (self similarity) หรือที่เรียกว่า “แฟร็กทัล” (fractal) นั่นเองลักษณะนี้จะปรากฏขึ้นเมื่อเราพลอตเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบในระบบพิกัดที่บ่งถึงสภาวะ (phase space) ลักษณะคล้ายกับตัวเองนี้ หมายความว่า ไม่ว่า เราจะมองเส้นทางการเคลื่อนที่นี้จากสเกลเล็กหรือใหญ่แค่ไหน มันก็ยังมีลักษณะเหมือนเดิมอย่างไรก็ตามลักษณะคล้ายกับตัวเองแบบแฟร็กทัลนี้ ไม่ได้มีส่วนเกี่ยวข้องเป็นเงื่อนไขที่จำเป็นในการเกิดเคออสแต่อย่างใด เพียงแต่มักพบร่วมกันบ่อยครั้งเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ประโยชน์ของเคออส

ในการศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับเคออส มีประโยชน์อย่างน้อยใน 3 ทางด้วยกัน คือ ใช้ในการวิเคราะห์ระบบและทำนายอนาคต ใช้ในการสร้างระบบเคออส และใช้ในการควบคุม-สร้างความเสถียรให้กับระบบ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

### 1) ใช้ในการวิเคราะห์ระบบและทำนายอนาคต

อย่างที่กล่าวข้างต้นว่า แม้ว่าเราจะไม่สามารถทำนายอนาคตของระบบเคออส ในระยะยาวได้ แต่เราก็สามารถทำนายอนาคตของมันในระยะสั้นได้ หากเราสามารถหาโมเดลที่อธิบายพฤติกรรมของระบบนั้น และทราบสถานะเริ่มต้นอย่างแม่นยำพอสมควร เช่น ในปัจจุบัน ได้ใช้เคออส การวิจัยเพื่อทำนายอนุกรมตามลำดับเวลา(Time-series data)

### 2) ใช้ในการสร้างระบบเคออส

ทำไมเราต้องสร้างระบบเคออสขึ้นมาด้วยก็เพราะมีผู้เชื่อว่า”ในธรรมชาติ ความอลวนเป็นสิ่งที่ไม่สามารถคาดเดาได้และศึกษาระเบียบแบบง่าย ๆ” อย่างเช่น บริษัท มัทสึชิตะยังใช้ทฤษฎีเคออสควบคุมหัวฉีดของเครื่องล้างจานได้สะอาดโดยประหยัดน้ำได้ดีกว่าเครื่องล้างจานแบบอื่นๆ ทั้งนี้เพราะเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวฉีดที่ดูเหมือนไร้ระเบียบทำให้ครอบคลุมพื้นที่ดีกว่าการเคลื่อนที่ตามแบบแผนปกติ

### 3) ใช้ในการควบคุม-สร้างความเสถียรให้กับระบบ

การที่ระบบแบบเคออส นั้นไวต่อสภาวะเริ่มต้นมาก การรบกวนเพียงเล็กน้อยจึงอาจก่อให้เกิดผลขยายได้มากในงานด้านวิศวกรรมควบคุม(control engineering) การเติมสัญญาณรบกวนเพียงเล็กน้อยที่เหมาะสมสู่ระบบที่เป็นระบบเคออส จึงสามารถใช้ควบคุมให้ระบบนั้นอยู่ในสภาวะเสถียรหรือขับเคลื่อนให้ระบบนั้นอยู่ในสภาวะที่ต้องการ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

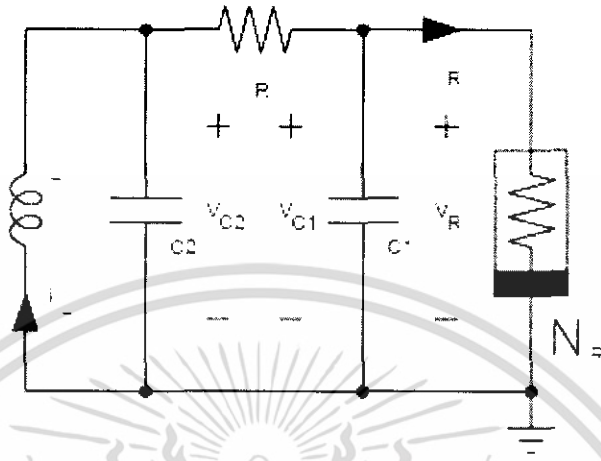
นอกจากการประยุกต์ใช้แบบหลักๆดังกล่าวข้างต้นแล้ว ทฤษฎีเคออสยังสามารถประยุกต์ใช้ได้ อีกในหลายสาขา เช่น ในด้านการสื่อสาร เราสามารถใช้สัญญาณแบบเคออสในการเข้ารหัสข้อมูล(encryption) เพื่อป้องกันการแอบดูข้อมูล หรือใช้หลักการของทฤษฎีนี้ช่วยให้การได้ค่าที่ดีที่สุด(optimization) ของฟังก์ชันหนึ่ง ได้ค่าที่ดีที่สุดที่แท้จริง(global optimum) ได้ง่ายขึ้นเพราะเคออสสามารถช่วยให้หลบการได้ค่าที่ดีที่สุดเฉพาะบริเวณ(local optimum) ได้

## 2.4 วงจร Chua (Chua's circuit)

วงจร chua เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถสร้างสัญญาณอลวนที่มีความหลากหลาย เนื่องจากความหลากหลาย และเป็นสากลวงจร chua จึงได้รับความสนใจอย่างมาก และกลายเป็นมาตรฐานสำหรับวงจรอลวน สาเหตุสำคัญที่ทำให้วงจร chua นี้ง่ายเพราะส่วนประกอบของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบไปด้วยอุปกรณ์เพียงแค่อุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 อุปกรณ์ และอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นอีก 1 อุปกรณ์



รูปที่ 2.1 วงจร Chua

วงจร Chua ได้แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 ตัว (ตัวเก็บประจุ 2 ตัว, ตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว, ตัวต้านทานเชิงเส้น 1 ตัว) และตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น 1 ตัว ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ตามสมการที่ (2.1)

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dv_{C_1}}{dt} &= G(v_{C_2} - v_{C_1}) - q(v_{C_1}) \\ C_2 \frac{dv_{C_2}}{dt} &= G(v_{C_1} - v_{C_2}) + iL \\ L \frac{diL}{dt} &= -v_{C_2} \end{aligned} \quad (2.1)$$

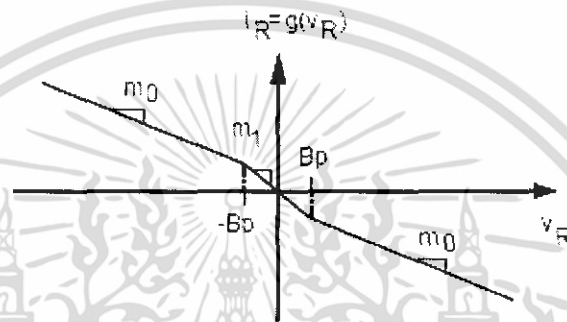
โดย  $G = \frac{1}{R}$  และ  $q(\cdot)$  คือ piecewise-linear function โดย

$$q(v_R) = m_0 v_R + \frac{1}{2}(m_1 - m_0)[|v_R + B_p| - |v_R - B_p|] \quad (2.2)$$

จากสมการที่(2.2)เป็นการแสดงคุณสมบัติของความต้านทานลบแบบ (3-Segment odd-symmetric voltage-current characteristic) ของตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Chua ไดโอด) โดยมีความชันเป็น  $m_1$ ,  $m_0$  และโดยจุดพังทลาย (breakpoint) อยู่ที่  $V_R = -B_p$  และ  $V_R = B_p$  โดยที่  $v-i$  characteristic ของ Chua ไดโอด แสดงดังรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการอนุพันธ์ (Differential equation) ดังที่แสดงในสมการที่ (2.1) จัดเป็น autonomous dynamical system ซึ่งแสดงว่าเมื่อไม่มีการส่งสัญญาณจากภายนอกเข้าสู่ระบบ ระบบจะดำเนินไปเรื่อยๆตามคุณสมบัติธรรมชาติ (natural dynamics) เมื่อ  $R$ ,  $L$  และ  $C_1$ ,  $C_2$  ในวงจร Chua มีค่าเป็นบวกจากจุดที่แสดงถึงพลังงานสะสม ตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะทำงานเพื่อกำเนิดสัญญาณ (oscillate) และเป็นตัวเดียวที่จะทำให้เกิดการอลวน โดยที่ตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะเป็ฯตัวจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ตัวอื่นในวงจร (passive linear elements) ในขณะที่ตัวต้านทานจะได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่



รูปที่ 2.2 i-v characteristic ของ Chua ไดโอด

เมื่อทำการเปลี่ยนตัวแปรในของสมการสถานะ (State equation) ในสมการที่ (2.1) ให้ อยู่ในรูปที่ไม่มีมิติ (dimensionless)

$$\frac{dx}{d\tau} = k\alpha(y - x + f(x)) \quad (2.3)$$

$$\frac{dy}{d\tau} = k(x - y + z) \quad (2.4)$$

$$\frac{dz}{d\tau} = -k\beta y \quad (2.5)$$

โดยที่

$$f(x) = bx + \frac{1}{2}(a - b)\{|x + 1| - |x - 1|\} \quad (2.6)$$

และ

$$x \triangleq \frac{v_1}{B_p}, \quad y \triangleq \frac{v_2}{B_p}, \quad z \triangleq i_3 \left( \frac{R}{B_p} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

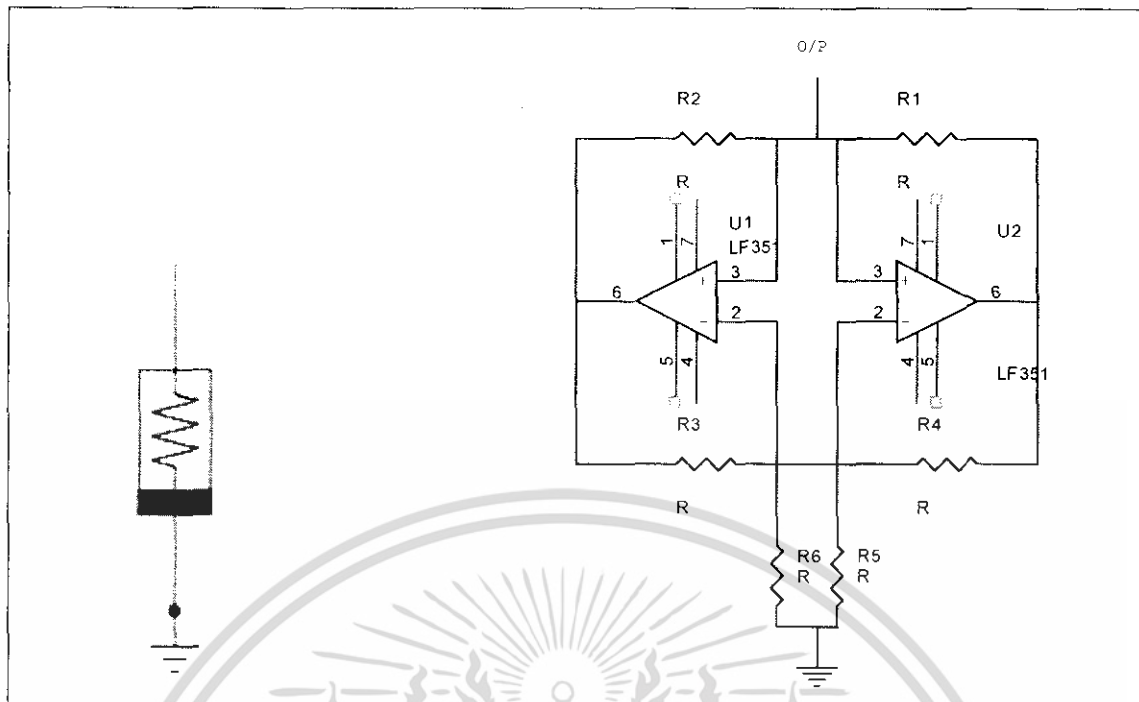
$$\alpha \triangleq \frac{C_2}{C_1}, \quad \beta \triangleq \frac{R^2 C_2}{L}, \quad k \triangleq \text{sgn}(RC_2) \quad (2.7)$$

$$\alpha \triangleq RG_a, \quad b \triangleq RG_b, \quad \tau \triangleq \frac{t}{|RC_2|}$$

ค่าพารามิเตอร์  $k$  มีค่าเท่ากับ 1 หรือ -1 โดยคำนวณตามทิศทางของเวลา โดยทั้งกรณีที่พารามิเตอร์  $k$  มีค่าเป็น 1 และ -1 จะมีได้ผลลัพธ์ที่เหมือนกัน ยกเว้นกรณีที่อินทิเกรตระบบ (สมการ(2.3)(2.5))ย้อนกลับในรูปของเวลา

จากที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าสัญญาณอลวนที่สร้างจากวงจร chua นั้น จะแปรตามค่าของอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 ตัว (ตัวเก็บประจุ 2 ตัว, ตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว, ตัวต้านทานเชิงเส้น 1 ตัว) และตัวต้านทานไม่เชิงเส้น 1 ตัว(chua ไดโอด) ซึ่งถ้าต้องการปรับเปลี่ยนสัญญาณก็สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่าต่างๆตามสมการที่ได้กล่าวมาข้างต้น

จากรูปที่ 2.1 วงจร Chua มีความต้านทานที่ไม่เชิงเส้น ซึ่งในวงจร chua ไดโอดจะมีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear characteristic) ซึ่งสามารถสร้างได้โดยสร้างได้โดยใช้ operation amplifier (OP-AMP) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.3 สำหรับตัวอย่างของวงจร Chua ที่ใช้ ออปแอมป์ (OP-AMP) แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้จริง โดยที่ความต่างศักย์ที่  $V_{c1}$ ,  $V_{c2}$  เทียบกลับเวลาจากวงจรรูปที่ 2.4 แสดงในรูปที่ 2.5 และเมื่อนำเอาความต่างศักย์  $V_{c1}$ ,  $V_{c2}$  มาเปรียบเทียบกันแสดงในรูปที่ 2.6

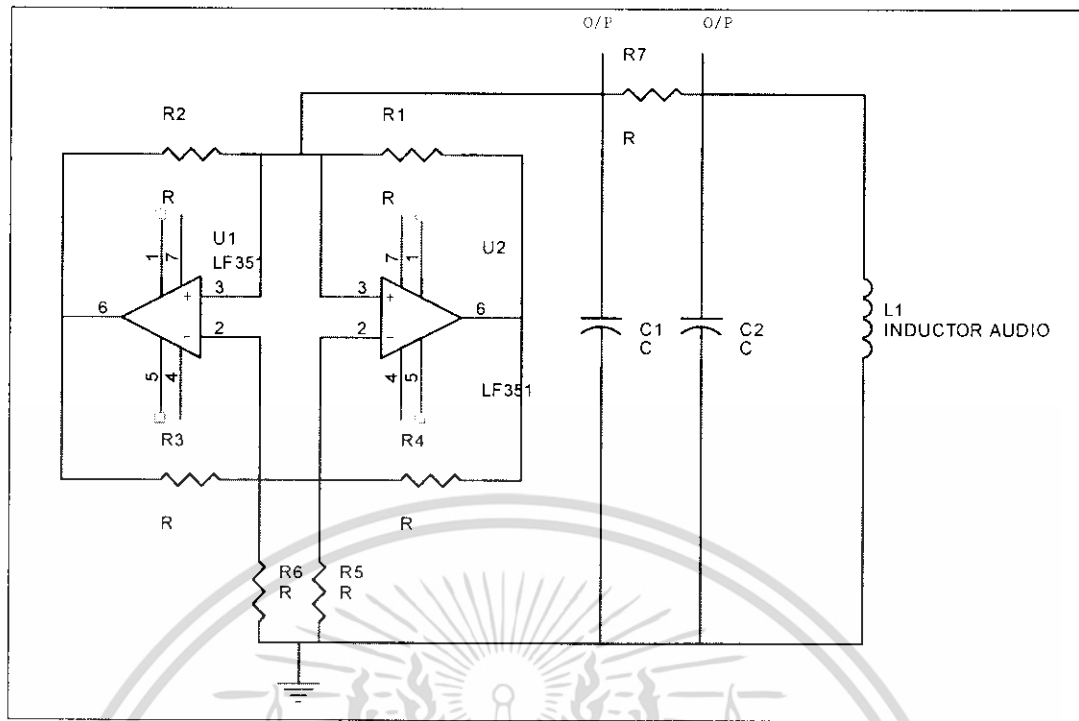


รูปที่ 2.3 Chua ไดโอด

## 2.5 วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบความถี่ต่ำ (Slow frequency chaotic oscillation)

เมื่อพิจารณาสัญญาณออสซิลเลชันในรูปที่ 2.5 จะสังเกตเห็นได้ว่าวงจรมีความถี่สูง ซึ่งเมื่อทำสัญญาณที่ได้ไปขับมอเตอร์กระแสตรง (DC motor) จะไม่สามารถทำได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วงจร Chua ที่มีความถี่ต่ำ ในการที่จะทำให้ออสซิลเลชัน (chaotic oscillation) นั้นมีความถี่ช้าลงนั้น จะต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถเก็บพลังงานได้เพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น การเพิ่มค่า  $C1, C2$  และ  $L$  ในสมการที่ (2.3) – (2.7) จากรูปที่ 2.7 และ 2.8 แสดงวงจร และสัญญาณเมื่อทำการเพิ่มค่า  $C1, C2$  และ  $L$  ซึ่งมีความถี่ต่ำมากเมื่อเทียบกับวงจรในรูปที่ 2.4

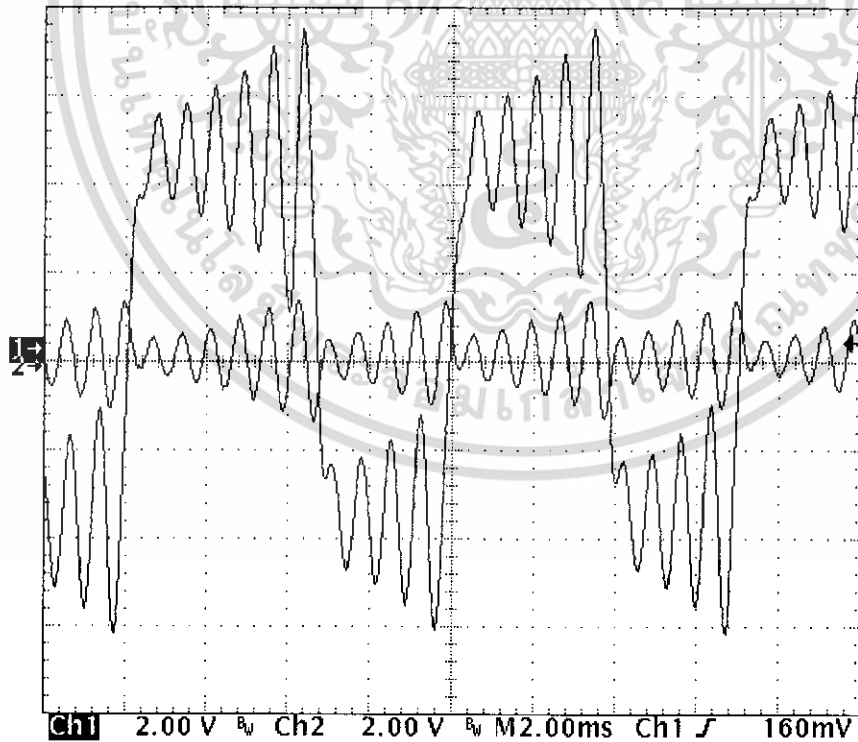
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 วงจรกำเนิดสัญญาณอกลวนแบบความถี่ต่ำ

Tek Stop: 25.0kS/s

193 Acqs

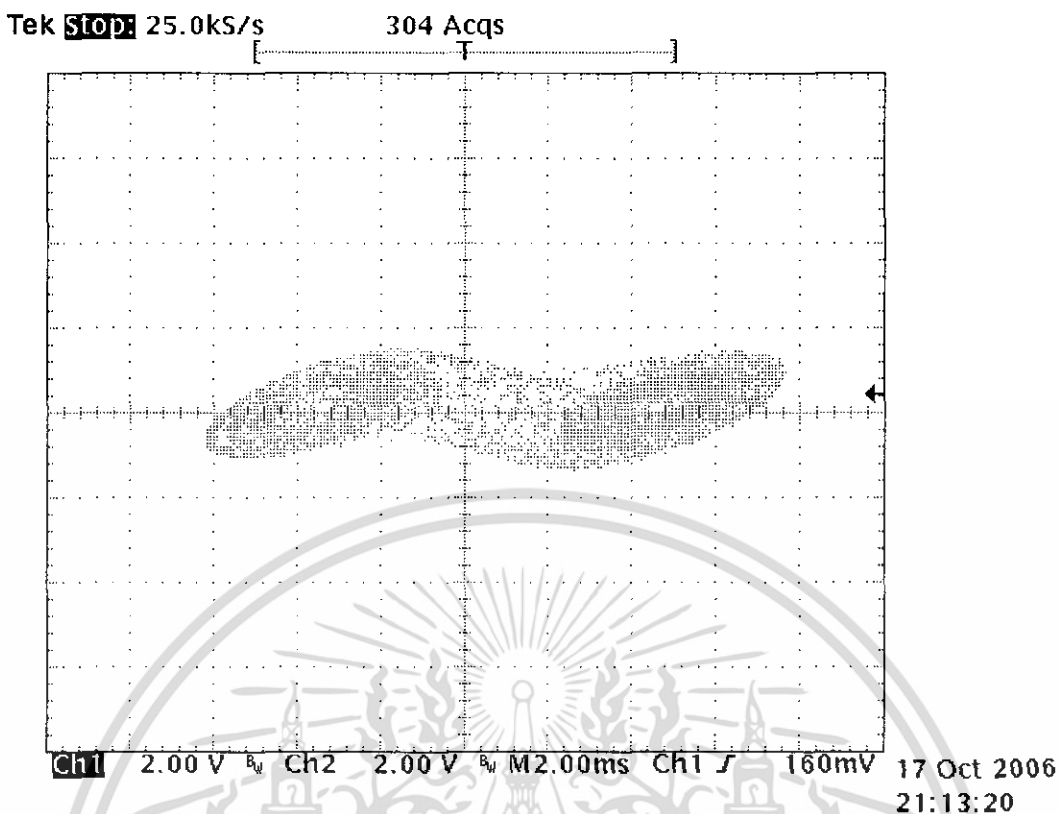


17 Oct 2006

21:05:52

รูปที่ 2.8 สัญญาณอกลวนจากวงจรกำเนิดสัญญาณอกลวนแบบความถี่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.9** สัญญาณอลวนแวนอน เป็นแกน Y และ แนวตั้งเป็นแกน X

จากวงจรในรูปที่ 2.7 ค่าตัวเก็บประจุ  $C_1 = 23.5 \mu F$ ,  $C_2 = 235.0 \mu F$  ซึ่งสามารถหาได้ตามท้องตลาด แต่ในขณะที่ค่าตัวเหนี่ยวนำ  $L = 42m H$  ซึ่งสร้างได้ยากในทางปฏิบัติ ถ้าเราทำการพันขดลวดขึ้นมานั้น ขนาดตัวเก็บประจุจะมีขนาดใหญ่ และไม่มีความเที่ยงตรงอีกด้วย ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือน (simulation) โดยนำทฤษฎี Generalized Impedance Converter เข้ามาใช้

### 2.6 Generalized Impedance Converter

ก่อนที่จะกล่าวถึงทฤษฎี Generalized Impedance Converter นั้นต้องกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ ABCD (transmission parameters) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของ two-port network เราสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.8)

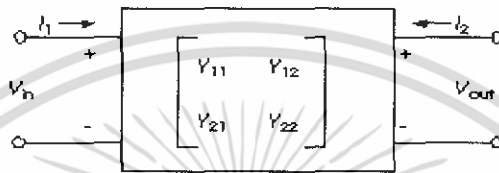
$$\begin{bmatrix} V_1(s) \\ I_1(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2(s) \\ -I_2(s) \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

โดยที่ค่าความต่างศักย์ และกระแสของ Two - port network ที่แสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งสามารถเขียนค่าพารามิเตอร์ได้ดังสมการที่ (2.9) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A(s) = \frac{V_1(s)}{V_2(s)} \Big|_{I_2(s) = 0} \quad B(s) = \frac{v_1(s)}{-I_2(s)} \Big|_{V_2(s) = 0}$$

(2.9)

$$C(s) = \frac{I_1(s)}{V_2(s)} \Big|_{I_2(s) = 0} \quad D(s) = \frac{I_1(s)}{-I_2(s)} \Big|_{V_2(s) = 0}$$



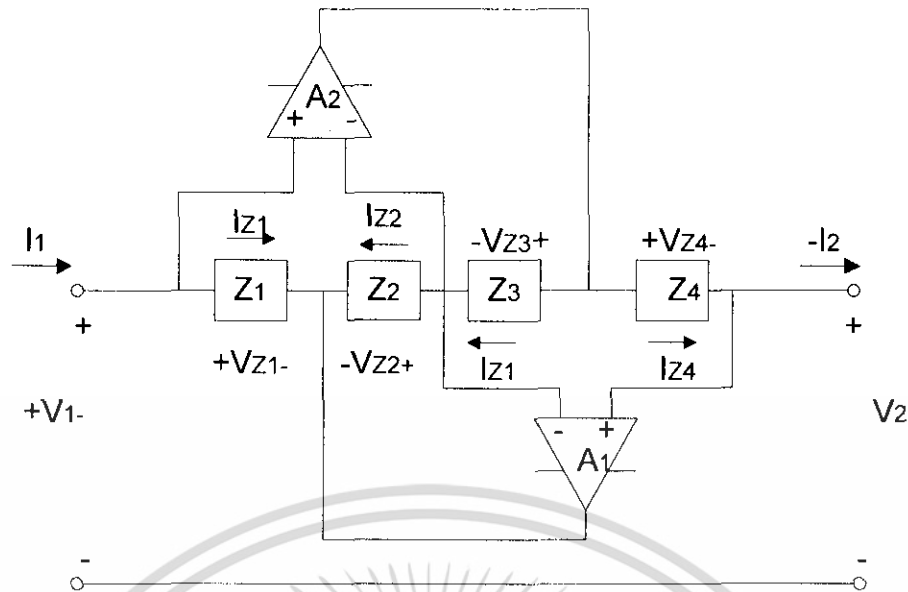
รูปที่ 2.9 two - port network

Generalized Impedance Converter (GIC) คือการนำ two-port active network ทำให้เป็น active RC passive network เสมือน ซึ่งสามารถทำได้หลายแบบ โดยวงจรแสดงในรูป ที่ 2.10 ซึ่งการวิเคราะห์วงจรนี้ ขั้นแรกต้องพิจารณาความต่างศักย์ระหว่างอินพุตของออปแอมป์ ซึ่งในอุดมคตินั้น มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นจึงเขียนเป็นสมการที่ (2.10) และสมการที่ (2.11)

$$V_{z1}(s) - V_{z2}(s) = 0 \quad \rightarrow \quad V_{z1}(s) = V_{z2}(s) \quad (2.10)$$

$$V_{z3}(s) - V_{z4}(s) = 0 \quad \rightarrow \quad V_{z3}(s) = V_{z4}(s) \quad (2.11)$$

ซึ่งทำให้  $V_1(s) = V_2(s)$  ดังนั้นค่า  $A(s) = 1$  และค่า  $B(s) = 0$  โดยค่า  $C(s)$  และค่า  $D(s)$  สามารถหาได้ตามขั้นตอนข้างล่างนี้



รูปที่ 2.10 วงจร GIC

ขั้นตอนการวิเคราะห์ GIC

- 1.)  $V_{Z4} = Z_4 I_{Z4} = Z_4 (-I_2)$
- 2.)  $V_{Z3} = Z_3 I_{Z3} = V_{Z4} = Z_4 (-I_2)$  [จากสมการที่ (2.11) และ 1.]
- 3.)  $I_{Z3} = \frac{Z_4}{Z_3} (-I_2)$  [จาก 2.]
- 4.)  $I_{Z2} = I_{Z3} = \frac{Z_4}{Z_3} (-I_2)$  [ไม่มีกระแสไหลเข้าขาอินพุตของออปแอมป์]
- 5.)  $V_{Z2} = Z_2 I_{Z2} = \frac{Z_2 Z_4}{Z_3} (-I_2)$  [จาก 4.]
- 6.)  $V_{Z1} = Z_1 I_{Z1} = V_{Z2} = \frac{Z_2 Z_4}{Z_3} (-I_2)$  [จาก สมการที่ (2.10) และ 5.]
- 7.)  $I_1 = I_{Z1} = \frac{Z_2 Z_4}{Z_1 Z_3} (-I_2)$  [จาก 6.]

จาก 7.) เป็นสมการ  $I_1(s)$  ในเทอมของ  $-I_2(s)$  และไม่ได้อยู่ในรูปของ  $V_2(s)$  ทำให้สามารถสรุปได้ว่า  $C(s) = 0$  และ  $D(s) = Z_2(s) Z_4(s) / Z_1(s) Z_3(s)$  จึงสรุปได้ว่าวงจรในรูปที่ 2.10 มีค่าพารามิเตอร์ ABCD (transmission parameters) แสดงได้ตามสมการที่ (2.12)

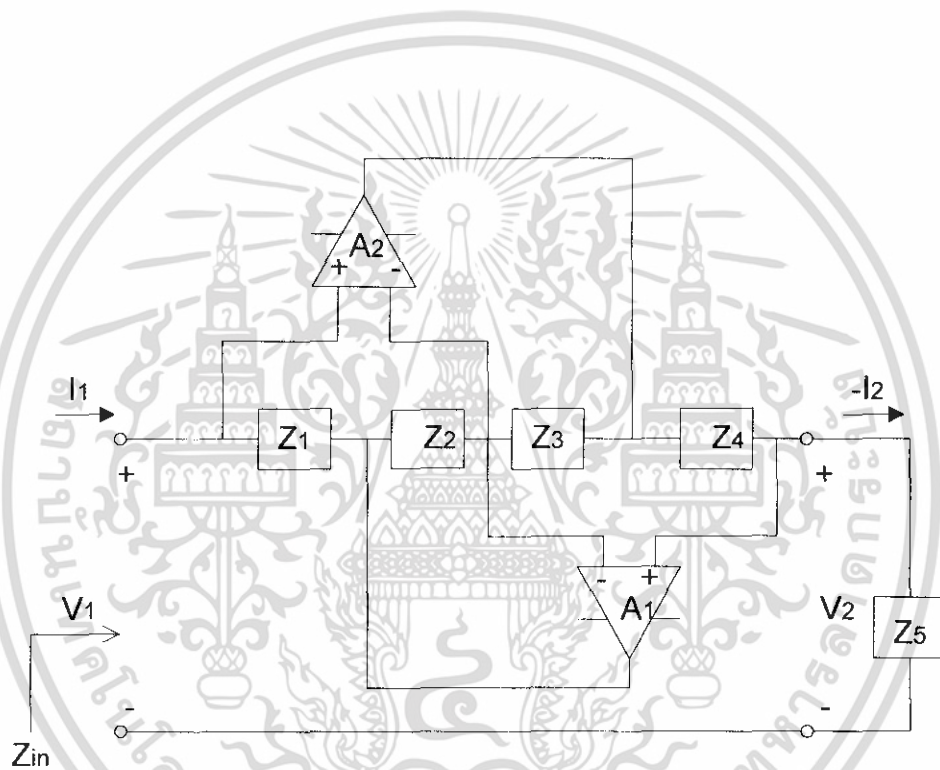
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{Z_2(s)Z_4(s)}{Z_1(s)Z_3(s)} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 Generalized Impedance Network

ถ้านำ impedance  $Z_5(s)$  มาต่อที่พอร์ตทางด้านขวา (พอร์ต 2) ของ network นั้นจะได้ one - port หรือ two - terminal network โดยแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต impedance  $Z_{in}(s) = V_1(s)/I_1(s)$ ,  $V_2(s) = Z_5(s)[-I_2(s)]$  และสมการที่ (2.8) แสดงได้ตามสมการที่ (2.13)

$$Z_{in}(s) = \frac{V_1(s)}{I_1(s)} = \frac{A(s)V_2(s) - B(s)I_2(s)}{C(s)V_2(s) - D(s)I_2(s)} = \frac{A(s)Z_5(s) + B(s)}{C(s)Z_5(s) + D(s)} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.11 วงจร GIN

จากรูปที่ 2.11 two - port network นั้นคือ GIN ที่ได้แสดงในรูปที่ 2.10 ดังนั้นถ้าใช้ ABCD พารามิเตอร์ ในสมการที่ (2.12) แสดงในรูปของ  $Z_{in}(s)$  ในสมการที่ (2.13) นั้นจะได้

$$Z_{in}(s) = \frac{Z_1(s)Z_3(s)Z_5(s)}{Z_2(s)Z_4(s)} \quad (2.14)$$

โดยที่  $Y(s) = 1/Z_{in}(s)$  จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y_{in}(S) = \frac{Y_1(s)Y_3(s)Y_5(s)}{Y_2(s)Y_4(s)} \quad (2.15)$$

โดยสมการที่ (2.14) และ (2.15) นั้นเรียกว่า Generalized Impedance Network (GIN)

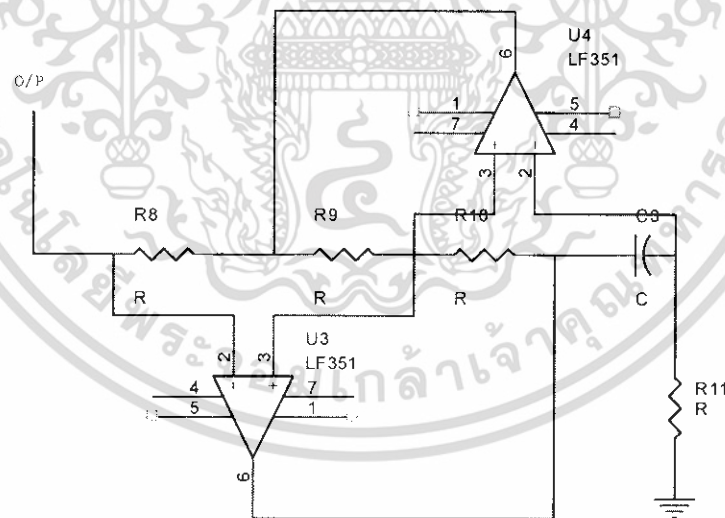
## 2.8 ตัวเหนี่ยวนำเสมือน (Inductance simulation)

ตัวเหนี่ยวนำในเน็ตเวิร์ค หรือ วงจรใดๆ สามารถใช้อุปกรณ์ RC แทนได้โดยไม่ต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำเลย ซึ่งวิธีนี้เรียกว่า การสังเคราะห์ความเหนี่ยวนำ (synthetic inductors)

### 2.8.1 การสังเคราะห์ความเหนี่ยวนำ (Synthetic inductors)

จากหัวข้อ GIN ที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น ถ้าทำการแทน  $Z_4(s)$  ด้วย ตัวเก็บประจุ C และทำการแทน  $Z_i$  ( $i = 1, 2, 3, 5$ ) ด้วย ตัวต้านทาน R จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.16)

$$Z_{in}(S) = \frac{sR_1R_3C_4R_5}{R_2} \quad L_{eq} = \frac{R_1R_3C_4R_5}{R_2} \quad (2.16)$$

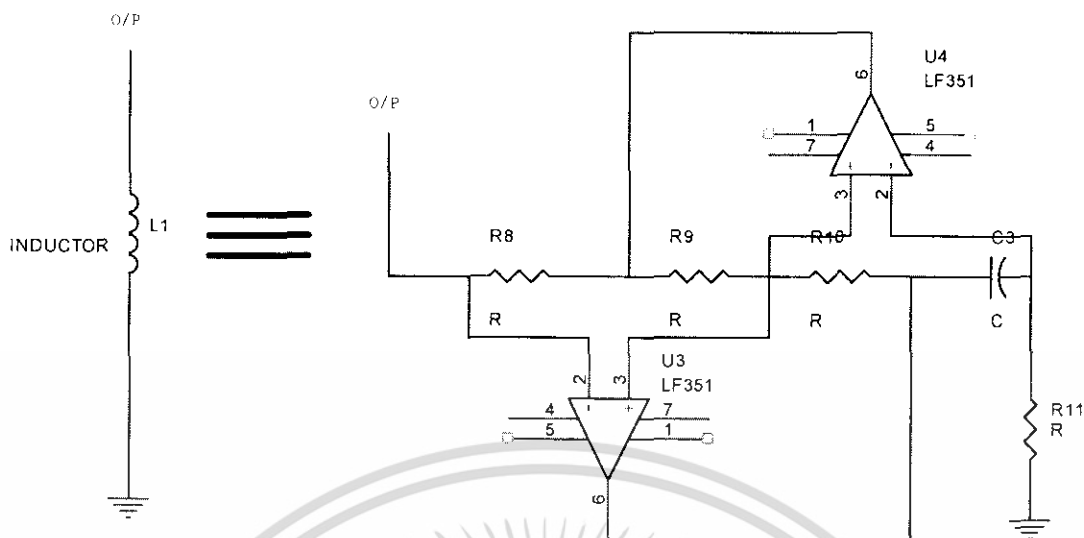


**รูปที่ 2.12** วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน (Synthetic inductors)

จากหัวข้อที่ผ่านมา นั้น เราต้องการวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน ซึ่งมี  $L = 42 \text{ H}$  สามารถใช้วงจรเหนี่ยวนำเสมือนได้ แสดงได้ดังรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.13 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน (Inductance simulation) ที่นำมาใช้แทนตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าสูง

ดังนั้นเราสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (2.17)

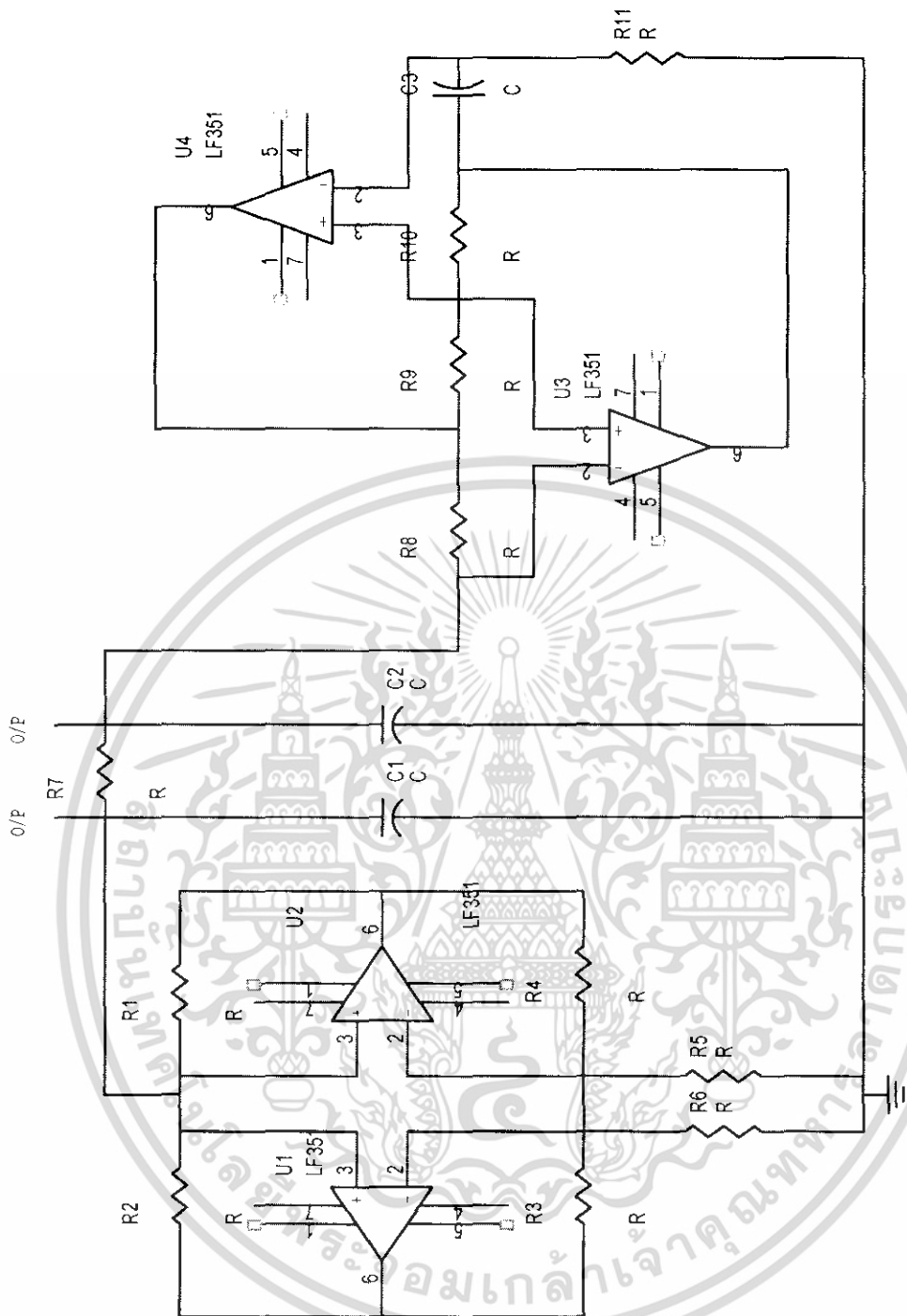
$$L_{eq} = \frac{R_7 R_9 C_3 R_{10}}{R_8} \tag{2.17}$$

จากสมการที่ (17) นั้นถ้าต้องการ  $L = L_{eq} = 42.3 \text{ H}$  แล้วค่า  $R_7 = 1.0 \text{ K}\Omega$ ,  $R_8 = 1.0 \text{ K}\Omega$ ,  $R_9 = 1.0 \text{ K}\Omega$ ,  $R_{10} = 1.8 \text{ K}\Omega$  และค่า  $C_3 = 23.5 \mu\text{F}$

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมด วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนที่มีความถี่ต่ำ โดยใช้วงจร Chua จะได้ดังสมการที่ 2.14

72984

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

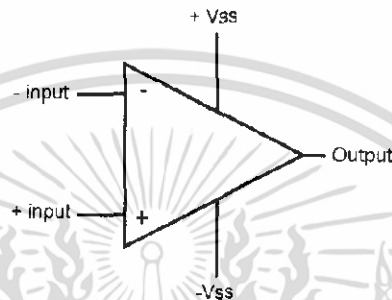


**รูปที่ 2.14** วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบความถี่ต่ำ โดยใช้วงจร Chua

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 วงจรขยาย (Amplifier)

ในวงจรขยาย โดยทั่วไปแล้ว มักจะมี Operational Amplifier (OP-AMP) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ เนื่องจากออปแอมป์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญสำหรับวงจรป้อนกลับสัญญาณ ซึ่งเป็นตัวกลางในการดำเนินการสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีทั้ง บวก, ลบ, ขยาย, อินทิเกรต, ดิฟเฟอเรนเชียล สัญลักษณ์ของออปแอมป์ ได้แสดงดังรูปที่ 2.23 ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของออปแอมป์อย่างคร่าวๆ เพื่อประกอบความเข้าใจในวงจรขยาย



รูปที่ 2.23 สัญลักษณ์ของออปแอมป์

จากรูปที่ 2.23

$V_{in} +$  คือ Non-inverting Amplifier

$V_{in} -$  คือ Inverting Amplifier

$+V_{ss}, -V_{ss}$  คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้า

### 2.9.1 หลักการพื้นฐานของออปแอมป์

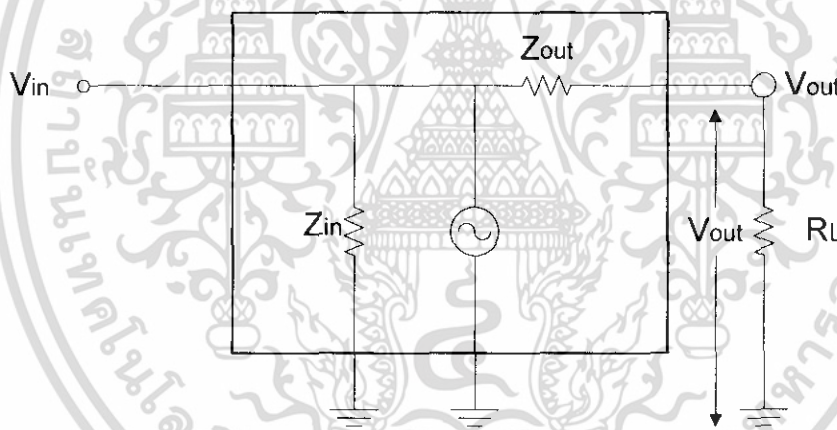
ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอัตราขยาย และอิมพีแดนซ์ อินพุต  $Z_i$  หรือ  $R_i$  สูงมากและมีอิมพีแดนซ์เอาต์พุต  $Z_o$  หรือ  $R_o$  ต่ำมาก

ถ้าจ่ายสัญญาณอินพุตให้กับขั้วบวกของออปแอมป์ จะได้สัญญาณเอาต์พุตมีมุมที่อินเฟสกับสัญญาณอินพุต แต่ถ้าจ่ายสัญญาณอินพุตให้กับขั้วลบของออปแอมป์ จะได้สัญญาณเอาต์พุตมีมุมที่ต่างเฟสกับสัญญาณอินพุต 180 องศา หรือมุมตรงกันข้าม

### 2.9.2 คุณสมบัติของออปแอมป์ในอุดมคติ(Ideal Op-Amp)

1. อัตราขยายของออปแอมป์แบบวงจรรอบเปิด (Open Loop Gain) มีค่าสูงมากจนเป็นอนันต์  $AV_{OL} = \infty$
2.  $Z_i$  มีค่าสูงมากจนถือได้ว่าเป็น infinity
3.  $Z_o$  มีค่าต่ำมากจนถือว่าเป็น 0
4. อัตราขยายของออปแอมป์ไม่ขึ้นกับความถี่
5. เมื่อ  $V_{in} = 0$  จะได้  $V_{out}$  เป็น 0 ด้วย

จากคุณสมบัติดังกล่าวมาแล้ว มีผลสืบเนื่องคือ  $i_i = 0$  เนื่องจาก  $Z_i$  สูงมาก ความต่างศักย์ระหว่างขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์เป็น 0 เนื่องจาก  $i_i$  และยังให้ค่า  $Z_{out}$  มีค่าต่ำมากจนประมาณได้ว่า  $Z_o = 0$  ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 คุณสมบัติด้านความต้านทานของออปแอมป์

### 2.9.3 การใช้ออปแอมป์ในวงจรรขยายสัญญาณ

1. วงจร BUFFER หรือ VOLTAGE FOLLOWER

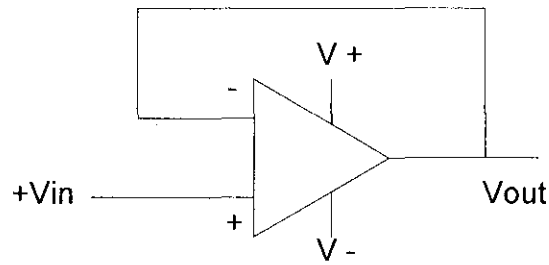
อัตราการขยายวงจรถชนิดนี้มีค่าประมาณ 1

นั่นคือ

$$AV = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 \quad (2.23)$$

$$V_{out} = V_{in} \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 วงจร Buffer หรือ Voltage follower

### 2. วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverter Amplifier)

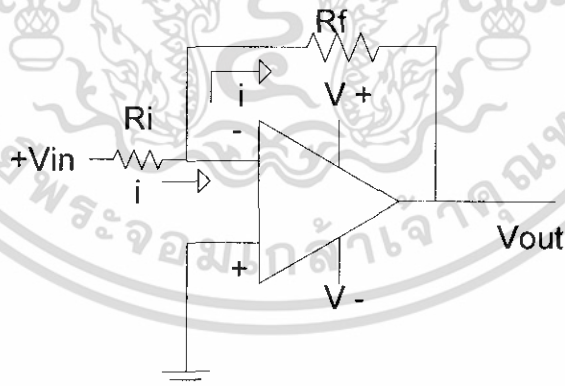
ความต่างศักย์ระหว่าง  $V_{in+}$  และ  $V_{in-} = 0$  ดังนั้น ศักย์ไฟฟ้าที่ขา  $V_{in-} = 0$  กระแสผ่าน  $R_f$  และ  $R_i$

มีค่า  $i$

$$AV = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-iR_f}{iR_i} = -\frac{R_f}{R_i} \quad (2.25)$$

เพราะฉะนั้น

$$AV = -\frac{R_f}{R_i} \quad (2.26)$$



รูปที่ 2.26 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

ดังนั้น

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_i} V_{in} \quad (2.27)$$

### 3. วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Amplifier)

จากรูปที่ 2.27 กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน  $R$  และ  $R$  มีค่า  $i$  เท่ากัน ดังนั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{in} = iR_i \quad (2.28)$$

$$V_{in} = i(R_i + R_f) \quad (2.29)$$

$$AV = i(R_i + R_f) / iR_i \quad (2.30)$$

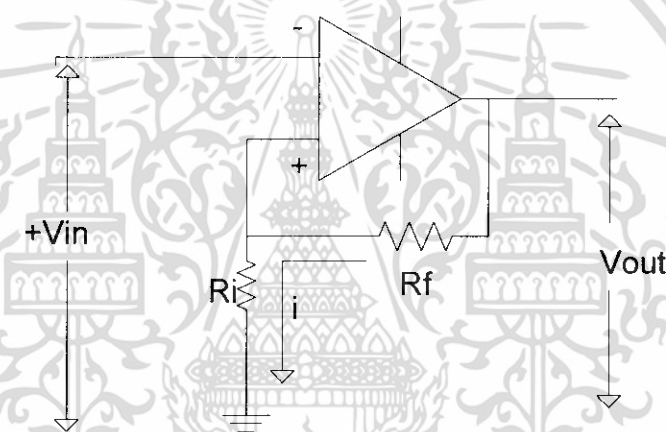
$$AV = (R_i + R_f) / R_i \quad (2.31)$$

หรือ

$$AV = 1 + \left( \frac{R_f}{R_i} \right) \quad (2.32)$$

ดังนั้น

$$V_{out} = \left( 1 + \frac{R_f}{R_i} \right) V_{in} \quad (2.33)$$

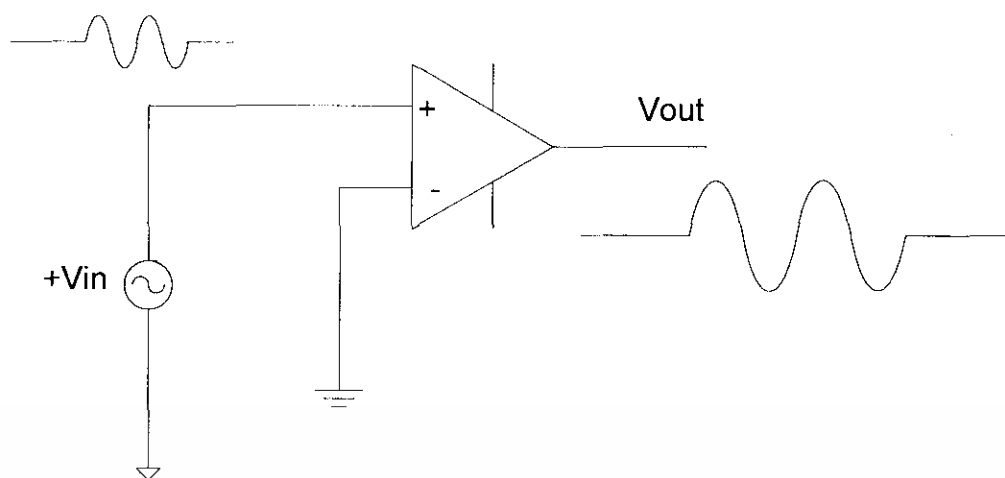


รูปที่ 2.27 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

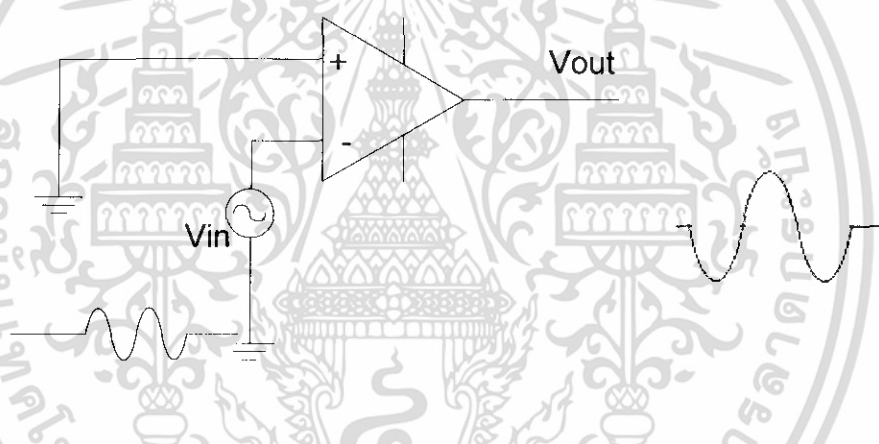
การทำงานของ OP-AMP แบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ การทำงานที่อินพุตด้านเดียว และการทำงานที่อินพุตสองพุตสองด้าน

#### 2.9.4 การทำงานที่อินพุตด้านเดียว (Single Ended Input)

การทำงานที่อินพุตด้านเดียว คือ การป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วใดขั้วหนึ่ง ส่วนขั้วอินพุตที่เหลือต่อลงกราวด์ ดังรูปที่ 2.28 และ 2.29



รูปที่ 2.28 การป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วลบ



รูปที่ 2.29 การป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วลบ

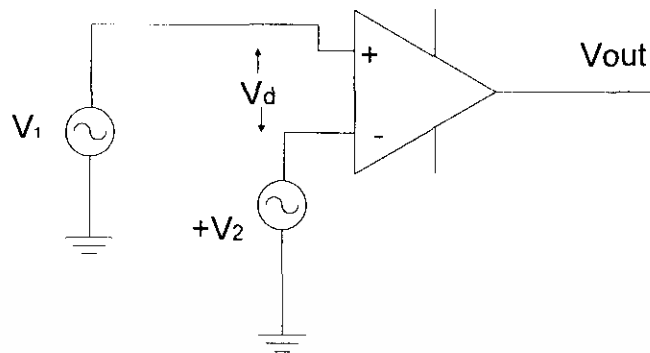
ถ้าป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วลบและต่อขั้วลบลงกราวด์ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้รับการขยายกับสัญญาณอินพุตจะมีมุมอินเฟสกัน ดังรูปที่ 2.28 ในทางตรงข้ามถ้าป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วลบและต่อขั้วลบลงกราวด์จะได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีมุมต่างเฟสกับสัญญาณอินพุต 180 องศา ดังรูปที่ 2.29

### 2.9.5 การทำงานที่อินพุตสองด้าน (Double Ended Input)

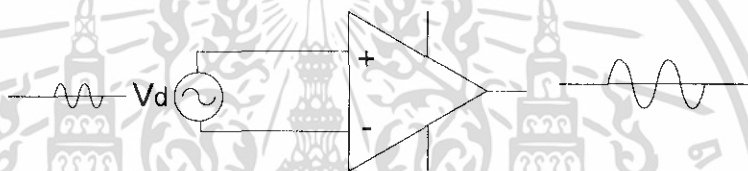
การทำงานที่อินพุตสองด้าน คือการป้อนสัญญาณอินพุตทั้งสองด้าน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential) และระบบโหมคร่วม (Common Mode)

การทำงานแบบดิฟเฟอเรนเชียล คือการป้อนสัญญาณอินพุต 2 สัญญาณที่เป็นอิสระต่อกันให้กับขั้วอินพุตทั้งสอง ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



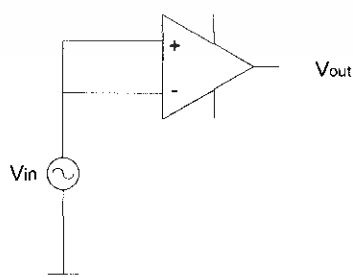
**รูปที่ 2.30** การป้อนสัญญาณอินพุต 2 สัญญาณที่เป็นอิสระต่อกันให้กับออปแอมป์



**รูปที่ 2.31** การขยายผลต่างของอินพุตทั้งสองของออปแอมป์

เนื่องจากขั้วอินพุตของออปแอมป์เป็นบวกและลบ สัญญาณอินพุตจึงหักล้างกัน ดังนั้น สัญญาณเอาต์พุตจึงเกิดจากการขยายผลต่างของสัญญาณอินพุต นั่นคือ  $V = V - V$  ซึ่งสามารถเขียนรูปใหม่เพื่อพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.31 ซึ่งสังเกตได้ว่า สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตอินเฟสกัน

การทำงานแบบโหมคร่วม คือ การป้อนสัญญาณอินพุตร่วมให้กับขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์ดังรูปที่ 2.32



**รูปที่ 2.32** การป้อนสัญญาณอินพุตร่วมให้กับขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางอุดมคติ สัญญาณอินพุตทั้ง 2 ขั้ว ต้องได้รับการขยายเท่ากัน ทำให้เกิดสัญญาณที่มี ขั้วตรงข้ามกันที่อินพุต สัญญาณเหล่านี้หักล้างกันแล้วหยุดหายไปสัญญาณเอาต์พุตจึงเป็น 0 V แต่ ในทางปฏิบัติยังมีสัญญาณเอาต์พุตเหลืออยู่เล็กน้อย โดยเราเรียกว่า “สัญญาณโหมคร่วม” ซึ่งในที่นี้ จะไม่กล่าวถึง

จากที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นนี้อุปแอมป์จะมีคุณสมบัติในการขยายแรงดัน ซึ่งถ้าต้องการ ขยายกระแสจะต้องใช้ทรานซิสเตอร์มาช่วยในการขยายกระแส ในการทดลองนี้เราได้ใช้วงจรขยาย ตามรูปที่ 2.33 ซึ่งมีอัตราขยายแรงดันเป็น  $1 + \frac{R_f}{R_i}$

## 2.10 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current motors: DC motors)

- มอเตอร์แบบวงจรขั้วแม่เหล็กขนาน (shunt motor)
- มอเตอร์แบบวงจรขั้วแม่เหล็กอนุกรม (series motor)
- มอเตอร์แบบวงจรขั้วแม่เหล็กผสม (compound motor)

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลาย เพราะมีความแข็งแรงทนทาน ราคา ถูก ประสิทธิภาพสูง ความแน่นอนในการใช้งานสูง และบำรุงรักษาสะดวกได้ง่าย ในปัจจุบันอาจ กล่าวได้ว่าอุตสาหกรรมเกือบทั้งหมดใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นต้นกำลังกล ขนาดมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามเฟสจะมีขนาดตั้งแต่ต่ำกว่า 1 แรงม้าที่แรงดันต่ำ (110-6600 โวลต์) จนกระทั่งถึงหลายพันแรงม้า ที่แรงดันสูง (3.0 กิโลโวลต์ หรือสูงกว่า)

### 2.10.1 โครงสร้างและการทำงานพื้นฐาน

มอเตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล การหมุนของมอเตอร์เกิดจาก แรงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic field) 2 ชุด คือที่สเตเตอร์ (stator) และโรเตอร์ (rotor) พยายามที่จะจัดเส้นแรงแม่เหล็กให้อยู่ในแนวเดียวกัน การที่สนามแม่เหล็กทั้งสองชุดกระทำ ลักษณะดังกล่าวทำให้มอเตอร์หมุนได้และมีมุมที่แตกต่างกันของแนวแกนของสนามแม่เหล็ก ทั้งที่ สเตเตอร์และโรเตอร์รวมทั้งความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มีค่ามากเท่าไร ก็ยังจะทำให้เกิดแรงทาง แม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำให้นิวสนามแม่เหล็กทั้ง 2 ชุดเคลื่อนที่เข้าหากันมากขึ้นเท่านั้น ผลลัพธ์ ของแรงกระทำอันนี้คือ แรงบิดของมอเตอร์หรือทอร์ก (torque) โดยปกติแล้วสนามแม่เหล็กใน มอเตอร์แบบต่างๆจะมีทั้งแบบที่หมุนไปรอบๆตัวมอเตอร์ และแบบที่หยุดนิ่งอยู่กับที่ ตัวอย่างแบบ สนามแม่เหล็กหมุน ได้แก่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกเป็นที่นิยมใช้ กันมากที่สุดเนื่องจากโครงสร้างที่ง่ายแข็งแรง และไม่ต้องใช้แปรงถ่าน (carbon brush) มีการทำงาน เกิดจากสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก (core) ที่เกิดจากขดลวดปฐมภูมิ (primary winding) หมุนแล้ว เหนี่ยวนำโรเตอร์ที่มีขดลวดทุติยภูมิ (secondary winding) ให้หมุนตาม หรือตัวนำในโรเตอร์เกิดจาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กที่มีค่าคงที่ แต่เคลื่อนที่หมุนไปรอบๆ สเตเตอร์ สนามแม่เหล็กจะถูกส่งผ่านช่องอากาศ (air gap) มาเหนี่ยวนำตัวนำที่โรเตอร์ ทำให้เกิดแรงดัน กระแส และ สนามแม่เหล็ก จากโรเตอร์ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนจากสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เกิดจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนเข้าทางสเตเตอร์ สำหรับระบบ 50 เฮิร์ตซ์ ที่ใช้กันในประเทศไทยจะทำให้สนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วที่ 750 1000 1,500 และ 3,000 รอบต่อวินาที สำหรับมอเตอร์แบบ 8 6 4 และ 2 ขั้ว ตามลำดับเราเรียกความเร็วนี้ว่าความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์ (synchronous speed)

### 2.10.2 ทฤษฎีมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor)

ดีซีมอเตอร์เป็นทรานส์ดิวเซอร์แรงบิดซึ่งมีการออกแบบให้มีคุณลักษณะพิเศษคือแรงบิดของเพลลาของดีซีมอเตอร์จะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับกระแสอาร์มาเจอร์ แรงบิดของเพลลาของดีซีมอเตอร์จะได้จากผลระหว่างสนามแม่เหล็กและขดลวดตัวนำ หลักการนี้แสดงได้ในรูปที่ 2.13 ในที่นี้กระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำจะสร้างฟิลด์ที่ประกอบด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก  $\phi$  และขดลวดตัวนำเหล่านั้นอยู่ห่างจากศูนย์กลางการหมุนเท่ากับ  $r$  ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของเพลลาและกระแสเท่ากับ

$$T = K \phi I \quad (2.34)$$

เมื่อ  $T$  คือแรงบิดของเพลลา มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร

$\phi$  คือเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์

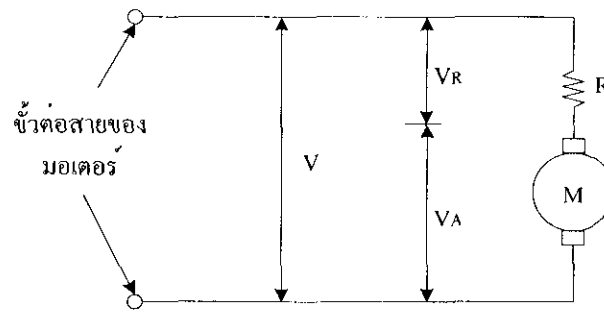
$I$  คือกระแสเป็น แอมแปร์

และ  $K$  คือตัวคงที่ ดังนั้นแรงบิดของเพลลาจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับผลคูณของเส้นแรงแม่เหล็กและกระแสเมื่อขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กก็จะทำให้เกิดโวลต์เตจตกคร่อมตัวมันเอง โวลต์เตจนี้จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วของเพลลาของมอเตอร์และด้านารไหลของกระแส ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจย้อนกลับนี้และความเร็วของเพลลามอเตอร์

### 2.10.3 คุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรง

ในการอธิบายคุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรงให้ละเอียดนั้นต้องพิจารณาแรงดันที่ป้อนและความต้านทานของโรเตอร์ด้วย วงจรภายในของมอเตอร์เขียนได้ดังรูปที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 วงจรภายในของมอเตอร์กระแสตรง

โดยสมมติให้ท่อนโรเตอร์ไม่มีความต้านทานอยู่เลย อนุกรมกับความต้านทานซึ่งในที่นี้ก็คือความต้านทานของขดลวดนั่นเอง แรงดันที่ขั้วต่อสายของมอเตอร์ก็คือผลบวกระหว่างแรงดันที่ท่อนโรเตอร์ ( $V_A$ ) และ แรงดันตกคร่อมความต้านทานขดลวด ( $V_R$ )

แรงดัน  $V_A$  ถูกเรียกว่า แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำป้อนกลับ (BACK EMF) ซึ่งเกิดขึ้นในโรเตอร์ขณะที่หมุนแรงดันที่เกิดขึ้นนี้เป็นไปตามกฎของการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่ของตัวนำในสนามแม่เหล็ก สัมพันธ์กับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำแม่เหล็ก และ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวนำ แรงดันที่เกิดขึ้นจะมีขั้วตรงกันข้ามกับแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ และ แปรผันตรงกับความเร็วในการหมุน ผลบวกของแรงดันที่ท่อนโรเตอร์ ( $V_A$ ) และแรงดันตกคร่อมขดลวด ( $V_R$ ) ต้องเท่ากับแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ( $V$ )

$$V = V_A + V_R \quad (V)$$

เมื่อพิจารณาตั้งแต่มอเตอร์หยุดนิ่ง ความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น  $V_A = 0$ ,  $V_R = V$  กระแสที่ไหลในมอเตอร์หาได้จาก

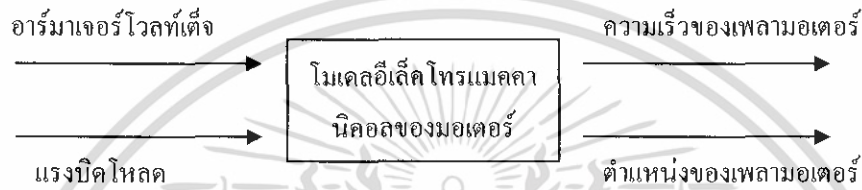
$$I = V_R / R \quad (A)$$

เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนจะมีความเร็ว และ  $V_A$  เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามความเร็ว  $V_R$  ซึ่งมีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่าง  $V_A$  และ  $V$  จะเริ่มลดลงกระแส  $I$  ก็จะเริ่มลดลงเช่นกันขณะที่มอเตอร์ยังมีความเร่งอยู่ ความเร็วจะเพิ่มขึ้น แรงบิดจะลดลงจนกว่าจะถึงจุดซึ่งแรงบิดของมอเตอร์รับภาระโหลดได้สมดุลพอดี ขณะที่มอเตอร์ไม่มีโหลด และ หมุนอย่างอิสระจะมีเพียงค่าความฝืดของแบร์ริง และ แรงต้านอากาศทำให้  $V_A$  เกือบเท่ากับค่า  $V$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.10.4 โมเดลคณิตศาสตร์ของดีซีมอเตอร์

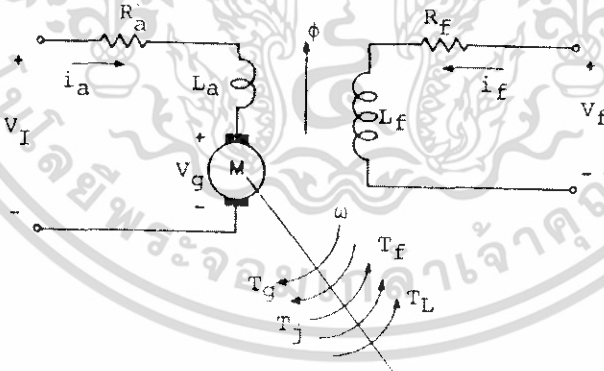
ดีซีมอเตอร์ที่ใช้ร่วมกับดีซีแอมพลิไฟ์ลท์ทั้งในระบบการบังคับตำแหน่งและการบังคับความเร็วมักจะได้รับการประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบสร้างกำลังงานในระบบการนำร่องและระบบบังคับต่างๆ และเนื่องจากวิทยาการเกี่ยวกับสารแม่เหล็กและการขยายด้วยโซลิดสเตททำให้ดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรได้รับความนิยมใช้เป็นส่วนประกอบการขับเคลื่อนในระบบการบังคับแบบปิดลูปต่างๆ มากขึ้น การออกแบบและการชดเชยระบบดังกล่าวได้อย่างเหมาะสมจะต้องใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ของส่วนประกอบทั้งหมดในระบบ



รูปที่ 2.34 แสดงอินพุตและเอาต์พุตของ โมเดลทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์

### 2.10.5 โมเดลอิเล็กทรอนิกส์โทรมแมคคานิคอล

ส่วนสำคัญของดีซีมอเตอร์แบบฟิลด์แยกกระตุ้นมีโมเดลดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.35 แสดงโมเดลของดีซีมอเตอร์แบบฟิลด์แยกกระตุ้น

$R_a$ : ความต้านทานของอาร์เมเจอร์

$L_a$ : อินдукเต้นซ์ของอาร์เมเจอร์

$V_a$ : โวลต์เตจกำเนิดในอาร์เมเจอร์ (โวลต์เตจย้อนกลับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_f$ : ความต้านทานของฟิลต์

$L_f$ : อินдукแตนซ์ของฟิลต์

$\phi$ : ช่องว่างอากาศของเส้นแรงสนามแม่เหล็ก

$\omega$ : ความเร็วของเพลอาร์เมเจอร์

$T_e$ : แรงบิดที่พัฒนาขึ้นในมอเตอร์

$T_f$ : แรงบิดเสียดทานของมอเตอร์

$T_j$ : แรงเฉื่อยของมอเตอร์

$T_L$ : แรงบิดโหลดบนเพลของมอเตอร์

ขั้นแรกเราจะหาสมการพื้นฐาน โมเดลของดีซีมอเตอร์ได้จากกฎของอาร์เมเจอร์

$$V_i(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + V_g(t) \quad (2.35)$$

เทอมโวลต์เต็จ  $V_g(t)$  ในสมการ (1) คือโวลต์เต็จย้อนกลับของมอเตอร์ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเส้นลวดตัวนำของอาร์มาเจอร์หมุนตัดเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งเกิดขึ้นในกระแสของฟิลต์ ( $i_f$ ) ตามกฎของฟาราเดย์ของเส้นลวดตัวนำหมุนในฟิลต์แม่เหล็กคงที่จะมีการเหนี่ยวนำโวลต์เต็จขึ้นในขดลวดนั้น

$$V_i(t) = \frac{d\lambda(t)}{dt} \quad (2.36)$$

เมื่อ  $\lambda(t)$  คือเส้นแรงแม่เหล็กที่ลิงเคจ(linkages) ไปยังขดลวดและ  $t$  คือเวลาในการหมุนของคีมนิวเทเตอร์ของมอเตอร์ การควบคุมวงจรของแต่ละส่วนของตัวนำในโรเตอร์จะเกิดโวลต์เต็จขึ้นในส่วนของตัวนำนั้นตามสมการ (2) เมื่อ  $\frac{d\lambda(t)}{dt}$  จะเป็นสัดส่วนต่อเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศและความเร็วเชิงมุม  $\omega(t)$  เราจะได้ว่า

$$V_g(t) = K\phi(t)\omega(t) \quad (2.37)$$

สมมติให้กระแสของฟิลต์มีค่าคงที่และไม่คิดถึงส่วนการเปลี่ยนแปลงในเส้นแรงฟิลต์ เนื่องจากอาร์เมเจอร์รีแอคชั่นเส้นแรงฟิลต์ก็จะมีค่าคงที่ดังนั้นสมการ (3) ก็จะเป็น

$$V_g(t) = K_e\omega(t) \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเราสมมติให้เส้นแรงของฟิล์มค้ำคองที่ แรงบิดของแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นแก่โรเตอร์ของมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนกับกระแสของอาร์มาเจอร์

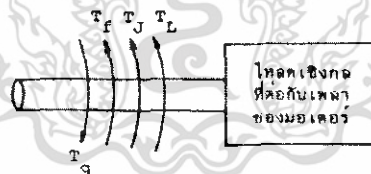
$$T_g(t) = K_t i_a(t) \quad (2.39)$$

เมื่อ  $K_t$  คือ ค่าคงที่ของแรงบิดของมอเตอร์

กำลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นใน โรเตอร์คือผลคูณของแรงบิดที่เกิดขึ้นและความเร็วเชิงมุม

$$P_g(t) = T_g(t) \omega(t) \quad (2.40)$$

กำลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นใน โรเตอร์ทั้งหมดนี้จะจ่ายไปยังโหลดที่ต่ออยู่กับเพลามอเตอร์แต่กำลังงานนี้บางส่วนจะสูญเสียไปในมอเตอร์ การสูญเสียจากแรงเสียดทาน หมายถึงความหน่วงเนื่องจากลมที่มีต่อโรเตอร์ แรงเสียดทานตัวรองรับโรเตอร์ กระแสที่ไหลวนในเหล็กของโรเตอร์และฮีสเทรีซิส โดยแรงบิดต่างๆแสดงดังนี้



รูปที่ 2.36 แสดงถึงแรงบิดต่างๆที่เกิดขึ้นต่อโหลดของมอเตอร์

$T_g(t)$ : แรงบิดของมอเตอร์

$T_r(t)$ : แรงบิดที่ต้องชนะการสูญเสียเนื่องจากการเสียดทาน

$T_f(t)$ : แรงบิดเพื่อใช้เพิ่มอัตราเร่งแก่ความเฉื่อยของโหลด

$T_L(t)$ : แรงบิด โหลด

ในช่วงเวลาใดๆก็ตาม แรงบิดของมอเตอร์จะต้องเท่ากับและมีทิศทางตรงข้ามกับผลรวมของแรงบิด  $T_r(t)$   $T_f(t)$  และ  $T_L(t)$  ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_g(t) = T_r(t) + T_L(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (2.41)$$

เมื่อ  $J$  คือผลรวมของโมเมนต์แรงเฉื่อยของโรเตอร์และโหลดที่ต่ออยู่ที่เพลาของมอเตอร์

ผลรวมของแรงบิดเสียดทานที่ประกอบกันขึ้นที่เพลาของมอเตอร์ซึ่งเป็นลิเนียร์ฟังก์ชันกับความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์เรียกว่า ส่วนประกอบของวิสกอสฟริกชันและมักจะอยู่ในเทอมที่แยกออกจากฟริกชันอื่นๆ ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$T_g(t) = T_r(t) + T_L(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \quad (2.42)$$

เมื่อ  $B$  คือสัมประสิทธิ์ของวิสกอสฟริกชันของมอเตอร์และโหลดที่ต่ออยู่กับเพลาของมอเตอร์  $T_r(t)$  คือผลรวมของฟริกชันของโหลดและมอเตอร์ทั้งหมด มีแรงต้านของลมและการสูญเสียกำลังในเหล็กของเพลามอเตอร์ยกเว้นวิสกอสฟริกชัน

สมการ (1) (4) (5) และ (8) เป็นชุดสมการพื้นฐานของดีซีมอเตอร์โมเดลและสมการเหล่านี้เราสามารถจะหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของดีซีมอเตอร์ได้ โดยใส่ลาปลาซทรานสฟอร์มทั้งสองข้างของชุดสมการพื้นฐานได้เป็น

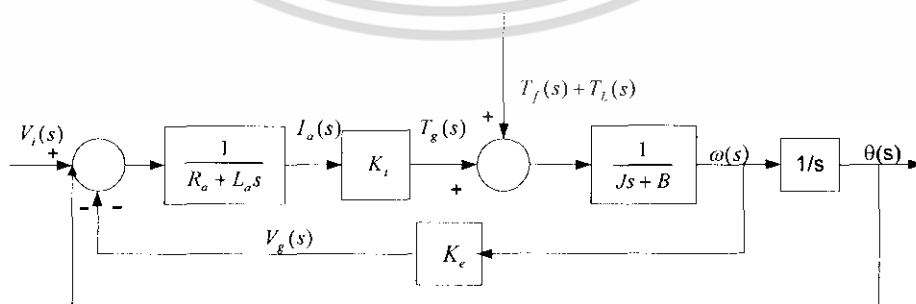
$$V_i(s) - V_g(s) = (R_a + sL_a) I_a(s) \quad (2.43)$$

$$V_g(s) = K_e \omega(s) \quad (2.44)$$

$$T_g(s) = K_t I_a(s) \quad (2.45)$$

$$T_g(s) - T_r(s) - T_L(s) = (B + sJ) \omega(s) \quad (2.46)$$

สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมที่แสดงสมการพื้นฐานเหล่านี้ได้ดังนี้



**รูปที่ 2.37** แสดงบล็อกไดอะแกรมของดีซีมอเตอร์โมเดล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข้อสังเกต

สมมติว่าโวลต์เตจที่ป้อนให้กับวงจรรออาร์มาเจอร์ของมอเตอร์มีค่าคงที่ดังนั้นมอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วคงที่คือทำงานอยู่ที่สภาวะสงบนิ่งด้วยโพลดที่คงที่ กำลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นโดยโรเตอร์จะหาได้จากสมการ (6) จะได้

$$P_g = T_g \omega = K_t I_a \omega \quad (2.47)$$

เมื่อทุกเทอมในสมการสุดท้ายมีค่าคงที่เนื่องจากมอเตอร์ทำงานอยู่ที่สภาวะสงบนิ่ง กำลังไฟฟ้าที่ถูกดูดกลืนโดยอาร์เมเจอร์ต้องเท่ากับ

$$P = V_g I_a = K_e \omega I_a \quad (2.48)$$

ดังนั้นเราจะได้ว่ากำลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นต้องเท่ากับกำลังงานไฟฟ้าที่ถูกดูดกลืนในโรเตอร์คือสรุปได้ว่า  $K_e = K_t$  ทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของดีซีมอเตอร์บล็อกไดอะแกรมของรูปที่ 5 แสดงถึงระบบที่มีสองอินพุท และมีเอาต์พุทเป็นความเร็วเชิงมุม  $\omega(s)$  และการเคลื่อนที่แบบเชิงมุม  $\theta(s)$  จากรูปที่ 5 ความเร็วเอาต์พุทของระบบเขียนได้เป็น

$$\omega(s) = G_1(s)V_f(s) + G_2(s)[T_f(s) + T_L(s)] \quad (2.49)$$

เมื่อ

$$G_1(s) = \left. \frac{\omega(s)}{V_f(s)} \right|_{T_f(s)+T_L(s)=0} \quad (2.50)$$

$$G_2(s) = \left. \frac{\omega(s)}{T_f(s) + T_L(s)} \right|_{V_f(s)=0} \quad (2.51)$$

$G_1(s)$  คือทรานสเฟอ์ฟังก์ชันระหว่างโวลต์เตจและความเร็ว

$$\begin{aligned} G_1(s) &= \frac{\omega(s)}{V_f(s)} = \frac{K_t}{(L_a s + R_a)(Js + B) + K_t K_e} \\ &= \frac{K_m}{\alpha s^2 + \beta s + 1} \end{aligned} \quad (2.52)$$

เมื่อ

$$K_m = \frac{K_t}{R_a B + K_t K_e}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = \frac{L_a J}{R_a B + K_t K_e}$$

$$\beta = \frac{R_a J + L_a B}{R_a B + K_t K_e}$$

สมการ (18) เป็น โวลต์เตจทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของดีซีมอเตอร์ในเมื่อสมมติว่า  $T_f$  และ  $T_L$  มีค่าเป็นศูนย์ สมการ (18) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$G_1(s) = \frac{K_t}{R_a B(1 + \tau_e s)(1 + \tau_m s) + K_t K_e}$$

เมื่อ  $\tau_e = \frac{L_a}{R_a}$  = ไทม์คอนสแตนต์ทางไฟฟ้า

$\tau_m = \frac{J}{B}$  = ไทม์คอนสแตนต์ทางเชิงกล

ถ้าอินดักเต้นซ์ของอาร์มาเจอร์มีค่าน้อย ไทม์คอนสแตนต์ทางไฟฟ้าสามารถตัดทิ้งได้และได้สมการเป็น

$$G_v(s) = \frac{\omega(s)}{V_i(s)} = \frac{K_t}{R_a(Js + B) + K_t K_e} \quad (2.53)$$

$$= \frac{K_m}{\tau s + 1}$$

เมื่อ  $\tau = \frac{R_a J}{R_a B + K_t K_e}$

ในสมการ (19) ค่าคงที่  $K_m$  อาจเรียกได้ว่าเป็นค่าคงที่ของมอเตอร์ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันแรงบิดโหลด  $G_2(s)$  หาได้เป็น

$$G_2(s) = \frac{\omega(s)}{T_f(s) + T_L(s)} = \frac{1}{1 + \frac{Js + B}{K_t K_e}}$$

$$= \frac{-\frac{R_a}{K_t} K_m \left[ \frac{L_a}{R_a} s + 1 \right]}{\alpha s^2 + \beta s + 1} \quad (2.54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งถ้าอินทิกรัลเริ่มต้นของอาร์มาเจอร์ไม่นำมาคิด จะทำให้ได้สมการ ดังนี้

$$G_L(s) = \frac{\omega(s)}{T_f(s) + T_l(s)} = \frac{-\frac{R_a}{K_t} K_m}{\tau s + 1}$$

ซึ่งจากสมการที่ (15) เมื่อให้ค่าของ  $T_f$  และ  $T_l$  มีค่าเป็นศูนย์จะทำให้ค่าทรานสเฟอร์ ฟังก์ชันมีค่าดังนี้

$$\omega(s) = G_v(s)V_i(s) = \frac{K_m}{\tau s + 1} V_i(s)$$

และจากรูปที่ 5 ตำแหน่งเอาต์พุทของระบบเป็นดังนี้

โมเดลคณิตศาสตร์ในการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ จาก transfer function ในหัวข้อที่ 3.3 โมเดลคณิตศาสตร์ของดีซีมอเตอร์ ซึ่งจะได้ model ของการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ในรูปของสมการอันดับหนึ่งเป็นดังนี้ คือ

$$\omega(s) = G_v(s)V_i(s) = \frac{K_m}{\tau s + 1} V_i(s)$$

จากสมการข้างต้นดังกล่าวนั้นจะเห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุม (output) และ ค่าแรงดันที่ป้อน (input)

และในการควบคุมตำแหน่งจะมีการผ่านตัว Integrator (1/s) ทำให้ได้เอาต์พุตคือ  $\Theta(s)$  ซึ่งจากรูปที่ 5. และ transfer function ที่ได้จากหัวข้อที่ 3.2 ข้างต้นนั้นเมื่อทำการผ่าน Integrator (1/s) เข้าไปจะทำให้ได้ค่าของ output เป็นมุมในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ ซึ่งเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\theta(s) = \frac{\omega(s)}{s} = \left[ \frac{1}{s} \right] \left[ \frac{K_m V_i(s)}{\tau s + 1} \right]$$

ส่วนในการหาโมเดลมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองนั้น เรากำหนดให้โมเดลของมอเตอร์เป็นโมเดลมอเตอร์อันดับหนึ่ง (First Order) ซึ่งเราได้ทำการทดลองเพื่อหาโมเดลที่เป็นลักษณะอันดับหนึ่งดังที่จะกล่าวถึงในบทที่ 5 หัวข้อที่ 5.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 ความรู้เรื่องเส้นในร่างกาย

เลือดลมที่เดินอยู่ในร่างกายของมนุษย์ตามเส้นเอ็นน้อยใหญ่ทั้งหลายการเจ็บป่วยจากการเป็นโรคเส้นเอ็นไม่ปกติสำหรับผู้สูงอายุ เรียกกันว่ากะษัยเส้น หรือเส้นตึง ต้องใช้วิธีบำบัดด้วยการกินยาสมุนไพร การออกกำลังกาย การอบเซาวาน้ำ แล่วนวด เส้น ถ้านวดถูกต้องก็จะทำให้ผู้ป่วยโรคกะษัยหายจากโรคเส้นตึงได้โดยเด็ดขาด

### การนวด

คือการรักษาโรคกะษัยผ่านกลายอาการประสาทเส้นเอ็นที่ตึงเครียดจากปัญหาต่างๆของชีวิต ผู้ที่จะเป็นหมอนวดจำเป็นจะต้องเรียนรู้ถึงสรีรศาสตร์ก็คือ จุดต่างๆของร่างกาย การเรียนรู้หัตถศาสตร์การใช้มือวางบนเส้นนวดให้ถูกจุด

### ภาคปฏิบัติการนวดเส้น

1. นวดให้ถูกเส้น
2. ที่นวดหรือการนวดต้องนุ่ม ไม่แข็งกระด้างจนเกินไป
3. การนวดถ้าให้ได้ผลดีควรนวดในตอนเช้าและไม่ควรกินอาหารจนแน่นเกินไป
4. การเริ่มนวด ควรเริ่มใช้มือกดเบาๆก่อน เพื่อไล่ความตึงเครียดของเส้นเอ็น

เลือดลมในร่างกายให้ปรับตัว

### เส้นประธานในร่างกายมี 10 เส้น

ความเจ็บป่วยของมนุษย์ที่เกิดจาก เส้นเอ็นระบบเลือดของคนเราที่เริ่มมีอายุมากขึ้น มีคำศัพท์ในภาษาบาลีและสันสกฤตเรียกว่า “**จตุรพฤต**”

หมายถึงครกที่เกิดจากธาตุทั้ง 4 คือ ระบบเลือดลมในร่างกายสาเหตุมาจาก เส้นใหญ่ทั้ง 10 เส้น ดึงจะทำให้มีอาการ เจ็บปวดเพราะเลือดลมไหลผ่านไม่สะดวก เส้นเอ็นใหญ่และเส้นเอ็นเล็กจะมีลักษณะเป็นรูให้เลือดลมไหลผ่านถ้ามีอาการเจ็บป่วยจะทำให้เกิดความรุ่มร้อนเป็นทุกข์ หงุดหงิดถ้าเลือดลมเดินดีจะทำให้สุขสบายจิตใจ

เส้นเอ็นใหญ่ที่สำคัญทั้ง 10 เส้น เรียกเป็นคำศัพท์ในภาษาบาลีสันสกฤต ตามภาษาศาสตร์พื้นฐานตามภาษาไทยยุคแรก จากเอ็นใหญ่ 10 เส้น จะแยกเป็ๆเส้น โลหิตฝอยทั่วร่างกายอีก 2, 700 เส้น เหมือนกับเส้นสายไฟรับข้อมูลสั่งการในระบบคอมพิวเตอร์และเอ็นใหญ่ทั้ง 10 เส้นเรียกว่า

1. **เส้นอิทา** เรียกว่า **เอ็นซ้าย** จากท้องใต้สะดือ ไปจรดหัวหน้าเลขลงไปทางต้นขาเบื้องซ้ายขึ้นไปตามเส้นหลังแบบไปตามกระดูกเบื้องซ้ายถึงศีรษะลงมาที่จมูกซ้ายเป็นหลายเส้น
2. **เส้นปิงคลา** เรียกว่า **เอ็นขวา** จากกลางสะดือไปยังหัวหน้าขวา วกขึ้นบน ผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระดุกสั้นหิ้งขวผ่านศรีสะเกกลับลงมาข้างหน้าสุดที่จมูกขวาและเอ็นซ้ายจะเรียกว่า เส้นลมหายใจ จากจมูกผ่านศรีษะลงสั้นหลังเข้าสู่ท้องก็ได้ ฉะนั้น การนวดไล่เลือดลมให้วิ่งไปตามจุดต่างๆนั้นจึง มีความสำคัญทั้งหมด

3. **เส้นสุมนา เรียกว่า เอ็นลิ้น** จากท่อนบนบนเหนือสะดือ ผ่านทรวงอก ขึ้นไปตาม ลำคอจรดปลายลิ้นหรือจะเรียกเอ็นส่งอาหารลงท้องอาหารจะอร่อยหรือไม่อร่อยลิ้นจะเป็นผู้สัมผัสรสชาตินั้นก่อนท้องจะรองรับทำหน้าที่ย่อยวิตามิน โปรตีนและธาตุต่างๆส่งไปเลี้ยงดับ ไต หัวใจ เส้นเอ็น ต่อไป

4. **เส้นกาะทารี เรียกว่า เอ็นขา** เอ็นแขนจากท้อง4เส้นแยกออกเป็นสองทางๆละ 2เส้น ไปตามราวนมทั้งซ้ายและขวา ตลอดใต้รักแร้ ไปตามแขนจรดปลายนิ้วมือทั้ง 2 ข้าง ไปสิ้นสุดที่ ปลายนิ้วเท้าทั้ง 10 นิ้ว

5. **เส้นหัตถังยี เรียกว่า เอ็นตาซ้าย** จากท้องไปจรดปลายเท้าซ้าย แล้วย้อนขึ้นบน ผ่านหน้าแข้งผ่านหน้าขาหน้าท้องผ่านหัวนมซ้ายขึ้นไปใต้คาง ต่อไปยังรากในตาซ้าย

6. **เส้นทวารี เรียกว่า เอ็นตาขวา** จากท้องไปจรดปลายเท้าขวา แล้วย้อนขึ้นบน ผ่านหน้าแข้งผ่านหน้าขาหน้าท้องผ่านหัวนมขวาขึ้นไปใต้คาง ต่อไปยังรากในตาขวา

7. **เส้นจันทกฐัง เรียกว่า เอ็นหูซ้าย** จากท้องขึ้นบนไปตามราวนมซ้ายไปจรด ปลายหูซ้าย

8. **เส้นรุทัง เรียกว่า เอ็นหูขวา** จากท้องขึ้นบนไปตามราวนมขวาไปจรดปลายหู ขวา

9. **เส้นสิจินี เรียกว่า เอ็นทวาร** จากท้องลงด้านข้างเบื้องหน้า ไปจรดที่ทวารหนัก และทวารเบา

10. **เส้นตุษุมัง เรียกว่า เอ็นเพศ** จากท้องไปทางหัวหน้าทั้ง 2 ข้าง และกลาง ข้างล่างจะจรดปลายลำองคค์ชาติ ถ้าเป็นหญิงก็จะจรดปลายเม็ดมณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 นิยามของเคออสติก

เคออสติกตามความหมายในพจนานุกรมหมายถึง ความสับสนวุ่นวาย ไร้ระเบียบแต่เคออสที่เราได้ศึกษานั้นคือศึกษานั้นคือการศึกษาเกี่ยวกับเคออสในคณิตศาสตร์ หรือ Deterministic chaos โดยในความหมายในทางวิทยาศาสตร์ คือ สภาพหรือกระบวนการที่ไม่มีเสถียรภาพ (Unstable) หากมีการกระทบเพียงเล็กน้อย อาจจะทำให้เกิดสัญญาณที่ไม่เป็นเส้นตรง แต่เป็นเส้นทางคดเคี้ยววุ่นวายอลวน ในบางครั้งอาจเกิดการกระโดดข้าม ดังนั้นผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจึงไม่สามารถคาดเดาได้หรือทำนายให้ถูกต้องแม่นยำได้

พฤติกรรมแบบอลวน (Chaotic behavior) เป็นพฤติกรรมที่ดูไร้ระเบียบ ที่ดูเหมือนว่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างสะเปะสะปะหรือเชิงสุ่มเอา (random) แต่เป็น Deterministic ที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งที่จริงแล้วแฝงไปด้วยความเป็นระเบียบ (Order)

ระบบที่ประพัตต์ตัวแบบเคออส จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของเงื่อนไขเริ่มต้น (Sensitively dependent on initial condition) ทำให้ไม่สามารถทำนายได้ในระยะยาว (long-term unpredictable) โดยความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยที่เกิดจากการวัดเงื่อนไขเริ่มต้น จะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโปเนนเชียล (exponential) เมื่อเวลาผ่านไป เคออสได้มีการค้นพบมานานแล้วตั้งแต่สมัยของ J. H. Poincare (1854-1912) ซึ่งตอนนั้น Poincare ได้พิสูจน์ว่าระบบสุริยจักรวาล แบบเคออส แต่สมัยนั้นยังไม่ได้บัญญัติศัพท์อลวน chaos ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่าเป็น pathological case

และจากหลัก Uncertainty principle ของ Heisenberg ทำให้เราไม่สามารถวัดพารามิเตอร์ (Parameter) ทุกตัวได้อย่างถูกต้องแม่นยำเพราะการให้ความแม่นยำอย่างหนึ่งมากมักจะส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนในอีกอย่างหนึ่ง และถึงแม้ตัวแปรที่อธิบายระบบนี้มีเพียงตัวแปรเดียว ความแม่นยำของค่าที่วัดได้ก็จะจำกัดอยู่ค่าหนึ่ง ความไม่แน่นอนที่เหลืออยู่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งทำให้เราได้เลขนับสำคัญลดลงเรื่อยๆจนเราทำนายอะไรไม่ได้เลย ดังนั้นเคออสจึงเกิดขึ้นได้ทั้งในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ

สำหรับระบบที่เป็นเชิงเส้น จะเกิดความคลาดเคลื่อนเมื่อเวลาผ่านไป เป็นสัดส่วนกับความคลาดเคลื่อนเริ่มแรก เนื่องจากความสัมพันธ์แบบเป็นเชิงเส้นพฤติกรรมแบบอลวน (Chaotic behavior) จึงไม่มีในระบบที่เป็นเชิงเส้นเคออส เกิดขึ้นได้เฉพาะกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) แต่ไม่ใช่ว่าระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น จะเกิดความอลวนเสมอไป จะมีช่วงพารามิเตอร์ที่ทำให้ระบบประพัตต์ตัวแบบอลวน แต่ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นบางระบบก็เป็นเคออสตลอดเวลา

จุดที่เด่นประเด็นสำคัญอีกอย่างหนึ่งในทฤษฎีเคออส ความอ่อนไหวอย่างสูงของเงื่อนไขเริ่มต้น กับ Principle of weak ที่ถือว่าสาเหตุเบื้องต้นเพียงนิดเดียว สามารถก่อให้เกิดผลกระทบอย่างมากได้

## 2.2 คุณลักษณะของเคออส

ระบบที่เป็นเคออสจะต้องประกอบไปด้วยลักษณะดังต่อไปนี้

1) มีคุณสมบัติแบบไม่เป็นเชิงเส้น คุณสมบัติแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะมีคุณสมบัติตรงกันข้ามกับ คุณสมบัติเชิงเส้น โดยที่ฟังก์ชัน  $f$  จะมีคุณสมบัติเชิงเส้นก็ต่อเมื่อ  $f(x+y) = f(x) + f(y)$  นั่นก็คือ ในระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้นผลลัพธ์ของระบบทั้งหมดไม่เท่ากับผลรวมของผลลัพธ์ที่เกิดจากส่วนย่อยๆรวมกัน (โดยอาจจะมากหรือน้อยกว่าก็ได้) ความไม่เป็นเชิงเส้นนี่เองที่ทำให้ระบบที่แสดงความเป็นอลวนไม่ได้รับการศึกษามากในอดีต เพราะค่อนข้างยากในการศึกษาและเข้าใจข้อพึงระวังก็คือ การที่กล่าวว่าระบบเคออสจำเป็นต้องเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้น ไม่ได้หมายความว่าระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นทุกระบบจะเป็นเคออสเสมอไป

2) ไม่ใช่เกิดแบบสุ่ม (คือเป็น Deterministic ไม่ใช่ probabilistic) หรือกล่าวอีกแบบหนึ่งก็คือ ในระบบ chaos พฤติกรรมทั้งหลายเกิดขึ้นภายใต้กฎเกณฑ์ที่แน่นอน เหตุการณ์ที่ไม่สามารถทำนายล่วงหน้าได้แบบการทอดลูกเต๋า จึงไม่ใช่ ความเป็นเคออส แต่เป็นการสุ่มการแปลคำนี้เป็นภาษาไทย โดยใช้คำว่า “ทฤษฎีอลวน” จึงเป็นการแปลที่ไม่เหมาะสม เพื่อป้องกันการเข้าใจผิดว่าการเป็นเคออส ไม่ใช่การสุ่มจึงมีคนเรียกเคออสว่า deterministic chaos

3) ไวต่อสภาวะเริ่มต้น (sensitivity to initial conditions) การเริ่มต้นเงื่อนไขต่างกันนิดเดียวอาจทำให้ผลในตอนสุดท้ายต่างกันมากสาเหตุที่ระบบเคออสไวต่อสภาวะเริ่มต้นก็เพราะว่ามันจะขยายความแตกต่างให้เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น ที่พบบ่อยก็คือการขยายความแตกต่างให้เร็วขึ้นในระดับยกกำลังสอง (exponential) ของเวลา

4) ไม่สามารถทำนายล่วงหน้าระยะยาวๆได้ (long-term prediction is impossible) ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องจากข้อ 3 เพราะการที่ไวต่อสภาวะเริ่มต้นจะทำให้เราไม่รู้ว่า ระบบที่เราสนใจอยู่จะเป็นอย่างไรในระยะยาวอย่างไรก็ตามคุณสมบัติข้อนี้ไม่ได้แปลว่าการทำนายระยะสั้น (short-term prediction) จะเป็นสิ่งที่เป็นไปได้

นอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้ว ระบบเคออส ยังมีอีกสมบัติอีกประการหนึ่ง คือ การแสดงลักษณะ “คล้ายกับตัวเอง” (self similarity) หรือที่เรียกว่า “แฟร็กทัล” (fractal) นั่นเองลักษณะนี้จะปรากฏขึ้นเมื่อเราพลอตเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบในระบบพิกัดที่บ่งถึงสภาวะ (phase space) ลักษณะคล้ายกับตัวเองนี้ หมายความว่า ไม่ว่า เราจะมองเส้นทางการเคลื่อนที่นี้จากสเกลเล็กหรือใหญ่แค่ไหน มันก็ยังมีลักษณะเหมือนเดิมอย่างไรก็ตามลักษณะคล้ายกับตัวเองแบบแฟร็กทัลนี้ ไม่ได้มีส่วนเกี่ยวข้องเป็นเงื่อนไขที่จำเป็นในการเกิดเคออสแต่อย่างใด เพียงแต่มักพบร่วมกันบ่อยครั้งเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ประโยชน์ของเคออส

ในการศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับเคออส มีประโยชน์อย่างน้อยใน 3 ทางด้วยกัน คือ ใช้ในการวิเคราะห์ระบบและทำนายอนาคต ใช้ในการสร้างระบบเคออส และใช้ในการควบคุม-สร้างความเสถียรให้กับระบบ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

### 1) ใช้ในการวิเคราะห์ระบบและทำนายอนาคต

อย่างที่กล่าวข้างต้นว่า แม้ว่าเราจะไม่สามารถทำนายอนาคตของระบบเคออส ในระยะยาวได้ แต่เราก็สามารถทำนายอนาคตของมันในระยะสั้นได้ หากเราสามารถหาโมเดลที่อธิบายพฤติกรรมของระบบนั้น และทราบสถานะเริ่มต้นอย่างแม่นยำพอสมควร เช่น ในปัจจุบัน ได้ใช้เคออส การวิจัยเพื่อทำนายอนุกรมตามลำดับเวลา(Time-series data)

### 2) ใช้ในการสร้างระบบเคออส

ทำไมเราต้องสร้างระบบเคออสขึ้นมาด้วยก็เพราะมีผู้เชื่อว่า"ในธรรมชาติ ความอลวนเป็นสิ่งที่ไม่สามารถคาดเดาได้และศึกษาระเบียบแบบง่าย ๆ" อย่างเช่น บริษัท มัทสึชิตะยังใช้ทฤษฎีเคออสควบคุมหัวฉีดของเครื่องล้างจานได้สะอาดโดยประหยัดน้ำได้ดีกว่าเครื่องล้างจานแบบอื่นๆ ทั้งนี้เพราะเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวฉีดที่ดูเหมือนไร้ระเบียบทำให้ครอบคลุมพื้นที่ดีกว่าการเคลื่อนที่ตามแบบแผนปกติ

### 3) ใช้ในการควบคุม-สร้างความเสถียรให้กับระบบ

การที่ระบบแบบเคออส นั้นไวต่อสถานะเริ่มต้นมาก การรบกวนเพียงเล็กน้อยจึงอาจก่อให้เกิดผลขยายได้มากในงานด้านวิศวกรรมควบคุม(control engineering) การเติมสัญญาณรบกวนเพียงเล็กน้อยที่เหมาะสมสู่ระบบที่เป็นระบบเคออส จึงสามารถใช้ควบคุมให้ระบบนั้นอยู่ในสถานะเสถียรหรือขับเคลื่อนให้ระบบนั้นอยู่ในสถานะที่ต้องการ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

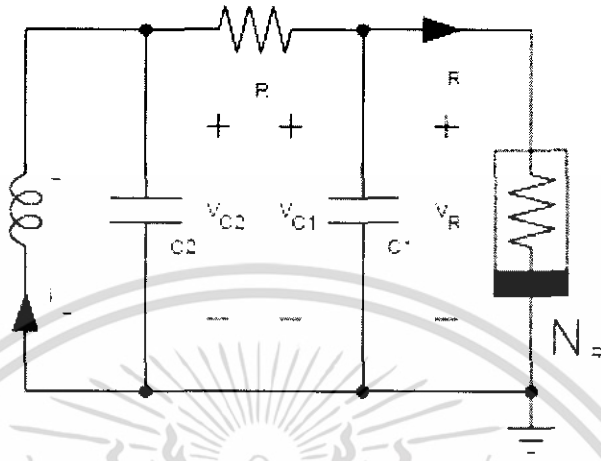
นอกจากการประยุกต์ใช้แบบหลักๆดังกล่าวข้างต้นแล้ว ทฤษฎีเคออสยังสามารถประยุกต์ใช้ได้ อีกในหลายสาขา เช่น ในด้านการสื่อสาร เราสามารถใช้สัญญาณแบบเคออสในการเข้ารหัสข้อมูล(encryption) เพื่อป้องกันการแอบดูข้อมูล หรือใช้หลักการของทฤษฎีนี้ช่วยให้การได้ค่าที่ดีที่สุด(optimization) ของฟังก์ชันหนึ่ง ได้ค่าที่ดีที่สุดที่แท้จริง(global optimum) ได้ง่ายขึ้นเพราะเคออสสามารถช่วยให้หลบการได้ค่าที่ดีที่สุดเฉพาะบริเวณ(local optimum) ได้

## 2.4 วงจร Chua (Chua's circuit)

วงจร chua เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถสร้างสัญญาณอลวนที่มีความหลากหลาย เนื่องจากความหลากหลาย และเป็นสากลวงจร chua จึงได้รับความสนใจอย่างมาก และกลายเป็นมาตรฐานสำหรับวงจรอลวน สาเหตุสำคัญที่ทำให้วงจร chua นี้ง่ายเพราะส่วนประกอบของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบไปด้วยอุปกรณ์เพียงแค่อุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 อุปกรณ์ และอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นอีก 1 อุปกรณ์



รูปที่ 2.1 วงจร Chua

วงจร Chua ได้แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 ตัว (ตัวเก็บประจุ 2 ตัว, ตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว, ตัวต้านทานเชิงเส้น 1 ตัว) และตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น 1 ตัว ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ตามสมการที่ (2.1)

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dv_{C_1}}{dt} &= G(v_{C_2} - v_{C_1}) - q(v_{C_1}) \\ C_2 \frac{dv_{C_2}}{dt} &= G(v_{C_1} - v_{C_2}) + iL \\ L \frac{diL}{dt} &= -v_{C_2} \end{aligned} \quad (2.1)$$

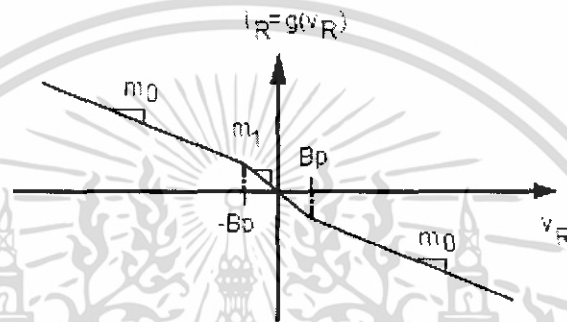
โดย  $G = \frac{1}{R}$  และ  $q(\cdot)$  คือ piecewise-linear function โดย

$$q(v_R) = m_0 v_R + \frac{1}{2} (m_1 - m_0) [|v_R + B_p| - |v_R - B_p|] \quad (2.2)$$

จากสมการที่(2.2)เป็นการแสดงคุณสมบัติของความต้านทานลบแบบ (3-Segment odd-symmetric voltage-current characteristic) ของตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Chua ไดโอด) โดยมีความชันเป็น  $m_1$ ,  $m_0$  และโดยจุดพังทลาย (breakpoint) อยู่ที่  $V_R = -B_p$  และ  $V_R = B_p$  โดยที่  $v-i$  characteristic ของ Chua ไดโอด แสดงดังรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการอนุพันธ์ (Differential equation) ดังที่แสดงในสมการที่ (2.1) จัดเป็น autonomous dynamical system ซึ่งแสดงว่าเมื่อไม่มีการส่งสัญญาณจากภายนอกเข้าสู่ระบบ ระบบจะดำเนินไปเรื่อยๆตามคุณสมบัติธรรมชาติ (natural dynamics) เมื่อ  $R$ ,  $L$  และ  $C_1$ ,  $C_2$  ในวงจร Chua มีค่าเป็นบวกจากจุดที่แสดงถึงพลังงานสะสม ตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะทำงานเพื่อกำเนิดสัญญาณ (oscillate) และเป็นตัวเดียวที่จะทำให้เกิดการอลวน โดยที่ตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะเป่าตัวจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ตัวอื่นในวงจร (passive linear elements) ในขณะที่ตัวต้านทานจะได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่



รูปที่ 2.2 i-v characteristic ของ Chua ไดโอด

เมื่อทำการเปลี่ยนตัวแปรในของสมการสถานะ (State equation) ในสมการที่ (2.1) ให้ อยู่ในรูปที่ไม่มีมิติ (dimensionless)

$$\frac{dx}{d\tau} = k\alpha(y - x + f(x)) \quad (2.3)$$

$$\frac{dy}{d\tau} = k(x - y + z) \quad (2.4)$$

$$\frac{dz}{d\tau} = -k\beta y \quad (2.5)$$

โดยที่

$$f(x) = bx + \frac{1}{2}(a - b)\{|x + 1| - |x - 1|\} \quad (2.6)$$

และ

$$x \triangleq \frac{v_1}{B_p}, \quad y \triangleq \frac{v_2}{B_p}, \quad z \triangleq i_3 \left( \frac{R}{B_p} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

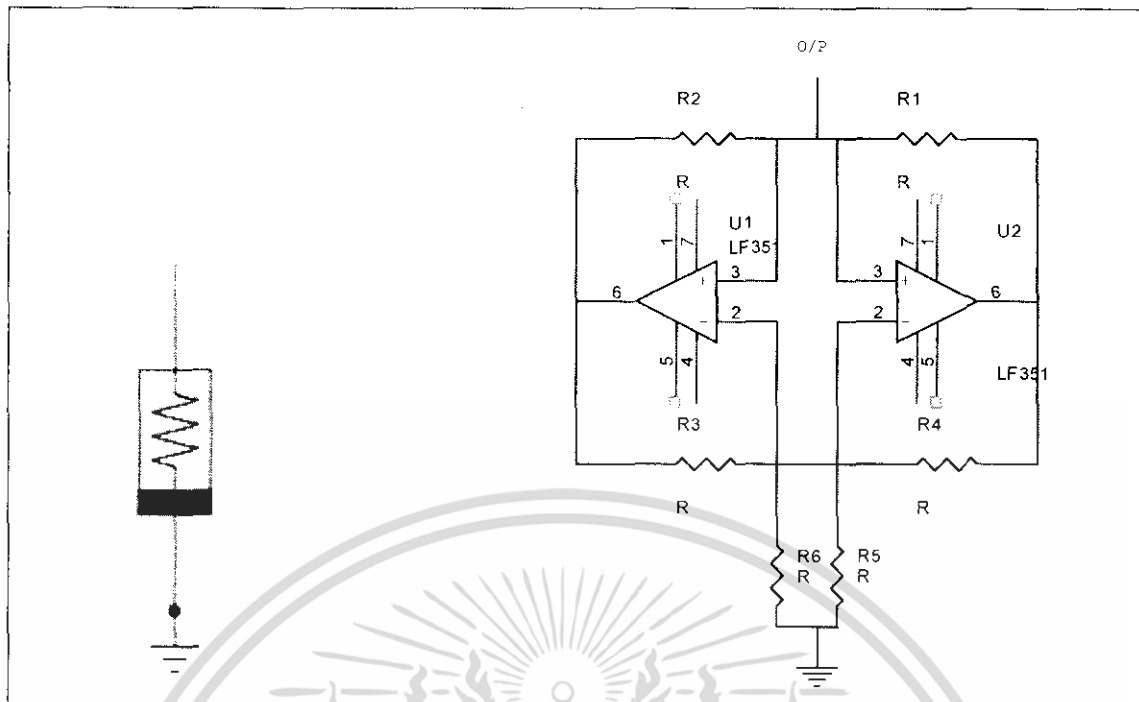
$$\alpha \triangleq \frac{C_2}{C_1}, \quad \beta \triangleq \frac{R^2 C_2}{L}, \quad k \triangleq \text{sgn}(RC_2) \quad (2.7)$$

$$\alpha \triangleq RG_a, \quad b \triangleq RG_b, \quad \tau \triangleq \frac{t}{|RC_2|}$$

ค่าพารามิเตอร์  $k$  มีค่าเท่ากับ 1 หรือ -1 โดยคำนวณตามทิศทางของเวลา โดยทั้งกรณีที่พารามิเตอร์  $k$  มีค่าเป็น 1 และ -1 จะมีได้ผลลัพธ์ที่เหมือนกัน ยกเว้นกรณีที่อินทิเกรตระบบ (สมการ(2.3)(2.5))ย้อนกลับในรูปของเวลา

จากที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าสัญญาณอลวนที่สร้างจากวงจร chua นั้น จะแปรตามค่าของอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 ตัว (ตัวเก็บประจุ 2 ตัว, ตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว, ตัวต้านทานเชิงเส้น 1 ตัว) และตัวต้านทานไม่เชิงเส้น 1 ตัว(chua ไดโอด) ซึ่งถ้าต้องการปรับเปลี่ยนสัญญาณก็สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่าต่างๆตามสมการที่ได้กล่าวมาข้างต้น

จากรูปที่ 2.1 วงจร Chua มีความต้านทานที่ไม่เชิงเส้น ซึ่งในวงจร chua ไดโอดจะมีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear characteristic) ซึ่งสามารถสร้างได้โดยสร้างได้โดยใช้ operation amplifier (OP-AMP) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.3 สำหรับตัวอย่างของวงจร Chua ที่ใช้ ออปแอมป์ (OP-AMP) แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้จริง โดยที่ความต่างศักย์ที่  $V_{c1}$ ,  $V_{c2}$  เทียบกลับเวลาจากวงจรรูปที่ 2.4 แสดงในรูปที่ 2.5 และเมื่อนำเอาความต่างศักย์  $V_{c1}$ ,  $V_{c2}$  มาเปรียบเทียบกันแสดงในรูปที่ 2.6

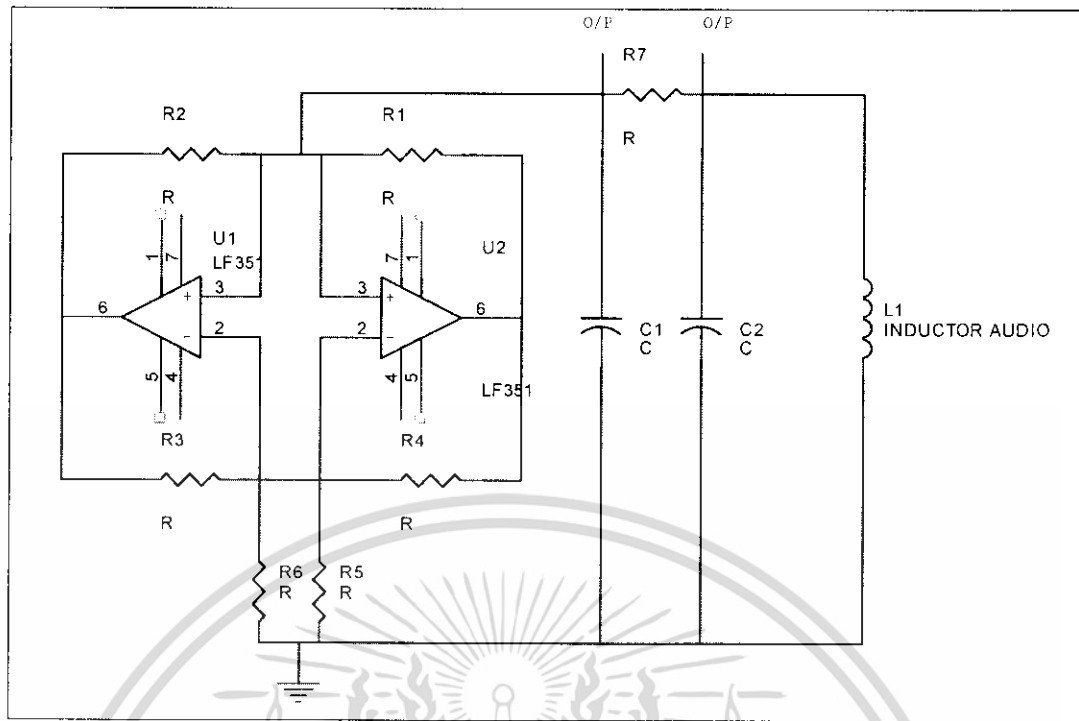


รูปที่ 2.3 Chua ไดโอด

## 2.5 วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบความถี่ต่ำ (Slow frequency chaotic oscillation)

เมื่อพิจารณาสัญญาณออสซิลเลชันในรูปที่ 2.5 จะสังเกตเห็นได้ว่าวงจรมีความถี่สูง ซึ่งเมื่อทำสัญญาณที่ได้ไปขับมอเตอร์กระแสตรง (DC motor) จะไม่สามารถทำได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วงจร Chua ที่มีความถี่ต่ำ ในการที่จะทำให้ออสซิลเลชัน (chaotic oscillation) นั้นมีความถี่ต่ำลงนั้น จะต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถเก็บพลังงานได้เพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น การเพิ่มค่า  $C1, C2$  และ  $L$  ในสมการที่ (2.3) – (2.7) จากรูปที่ 2.7 และ 2.8 แสดงวงจร และสัญญาณเมื่อทำการเพิ่มค่า  $C1, C2$  และ  $L$  ซึ่งมีความถี่ต่ำมากเมื่อเทียบกับวงจรในรูปที่ 2.4

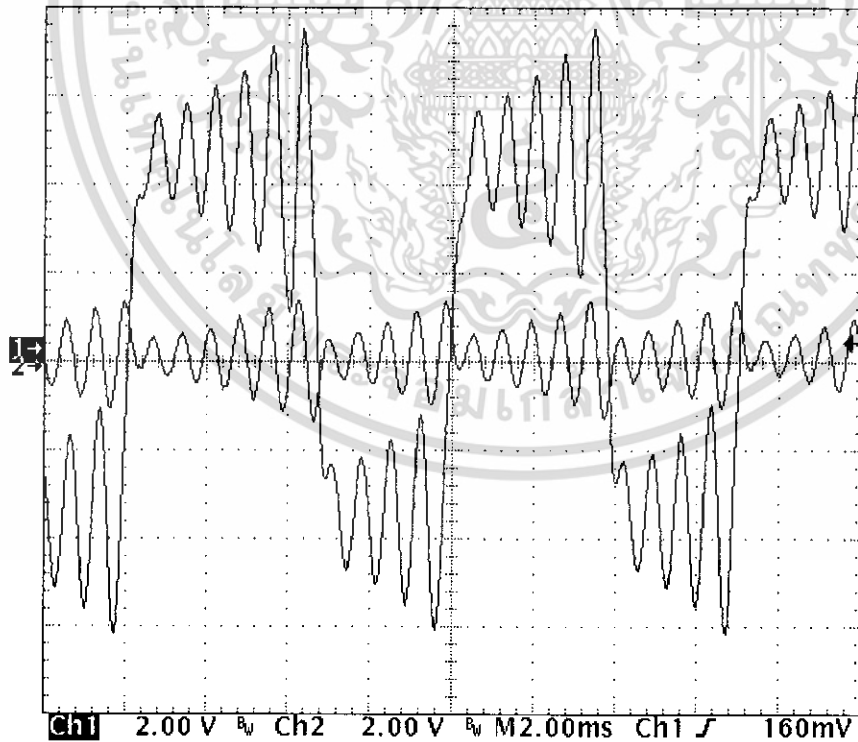
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 วงจรกำเนิดสัญญาณอกลวนแบบความถี่ต่ำ

Tek Stop: 25.0kS/s

193 Acqs

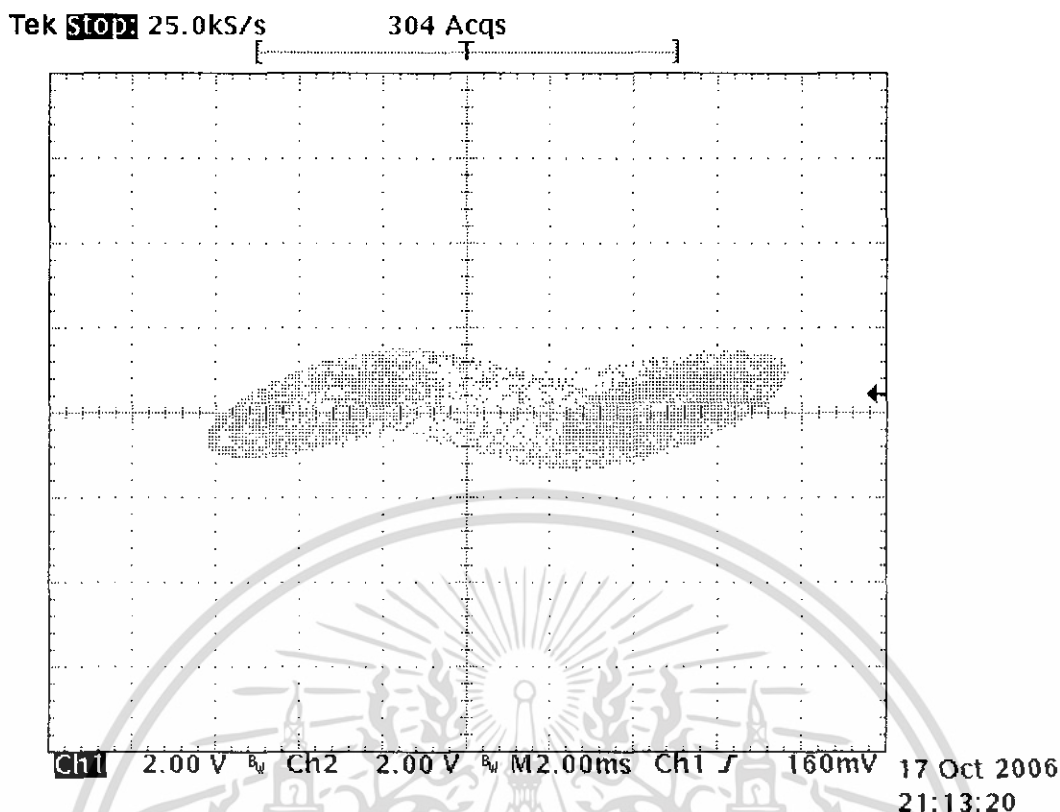


17 Oct 2006

21:05:52

รูปที่ 2.8 สัญญาณอกลวนจากวงจรกำเนิดสัญญาณอกลวนแบบความถี่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.9** สัญญาณอลวนแวนอน เป็นแกน Y และ แนวตั้งเป็นแกน X

จากวงจรในรูปที่ 2.7 ค่าตัวเก็บประจุ  $C_1 = 23.5 \mu F$ ,  $C_2 = 235.0 \mu F$  ซึ่งสามารถหาได้ตามท้องตลาด แต่ในขณะที่ค่าตัวเหนี่ยวนำ  $L = 42m H$  ซึ่งสร้างได้ยากในทางปฏิบัติ ถ้าเราทำการพันขดลวดขึ้นมานั้น ขนาดตัวเก็บประจุจะมีขนาดใหญ่ และไม่มีความเที่ยงตรงอีกด้วย ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือน (simulation) โดยนำทฤษฎี Generalized Impedance Converter เข้ามาใช้

### 2.6 Generalized Impedance Converter

ก่อนที่จะกล่าวถึงทฤษฎี Generalized Impedance Converter นั้นต้องกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ ABCD (transmission parameters) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของ two-port network เราสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.8)

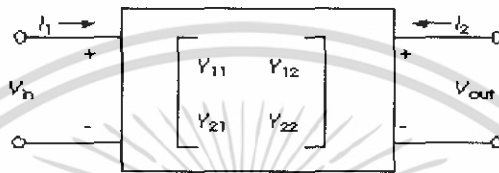
$$\begin{bmatrix} V_1(s) \\ I_1(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2(s) \\ -I_2(s) \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

โดยที่ค่าความต่างศักย์ และกระแสของ Two - port network ที่แสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งสามารถเขียนค่าพารามิเตอร์ได้ดังสมการที่ (2.9)  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A(s) = \frac{V_1(s)}{V_2(s)} \Big|_{I_2(s) = 0} \quad B(s) = \frac{v_1(s)}{-I_2(s)} \Big|_{V_2(s) = 0}$$

(2.9)

$$C(s) = \frac{I_1(s)}{V_2(s)} \Big|_{I_2(s) = 0} \quad D(s) = \frac{I_1(s)}{-I_2(s)} \Big|_{V_2(s) = 0}$$



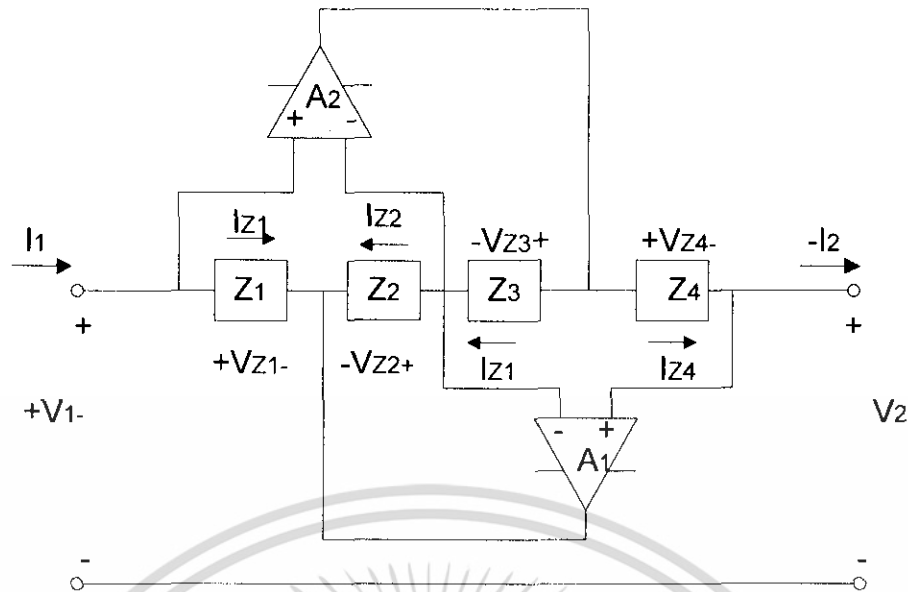
รูปที่ 2.9 two - port network

Generalized Impedance Converter (GIC) คือการนำ two-port active network ทำให้เป็น active RC passive network เสมือน ซึ่งสามารถทำได้หลายแบบ โดยวงจรแสดงในรูป ที่ 2.10 ซึ่งการวิเคราะห์วงจรนี้ ขั้นแรกต้องพิจารณาความต่างศักย์ระหว่างอินพุตของออปแอมป์ ซึ่งในอุดมคตินั้นมีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นจึงเขียนเป็นสมการที่ (2.10) และสมการที่ (2.11)

$$V_{z1}(s) - V_{z2}(s) = 0 \quad \rightarrow \quad V_{z1}(s) = V_{z2}(s) \quad (2.10)$$

$$V_{z3}(s) - V_{z4}(s) = 0 \quad \rightarrow \quad V_{z3}(s) = V_{z4}(s) \quad (2.11)$$

ซึ่งทำให้  $V_1(s) = V_2(s)$  ดังนั้นค่า  $A(s) = 1$  และค่า  $B(s) = 0$  โดยค่า  $C(s)$  และค่า  $D(s)$  สามารถหาได้ตามขั้นตอนข้างล่างนี้



รูปที่ 2.10 วงจร GIC

ขั้นตอนการวิเคราะห์ GIC

- 1.)  $V_{Z4} = Z_4 I_{Z4} = Z_4 (-I_2)$
- 2.)  $V_{Z3} = Z_3 I_{Z3} = V_{Z4} = Z_4 (-I_2)$  [จากสมการที่ (2.11) และ 1.]
- 3.)  $I_{Z3} = \frac{Z_4}{Z_3} (-I_2)$  [จาก 2.]
- 4.)  $I_{Z2} = I_{Z3} = \frac{Z_4}{Z_3} (-I_2)$  [ไม่มีกระแสไหลเข้าขาอินพุตของออปแอมป์]
- 5.)  $V_{Z2} = Z_2 I_{Z2} = \frac{Z_2 Z_4}{Z_3} (-I_2)$  [จาก 4.]
- 6.)  $V_{Z1} = Z_1 I_{Z1} = V_{Z2} = \frac{Z_2 Z_4}{Z_3} (-I_2)$  [จาก สมการที่ (2.10) และ 5.]
- 7.)  $I_1 = I_{Z1} = \frac{Z_2 Z_4}{Z_1 Z_3} (-I_2)$  [จาก 6.]

จาก 7.) เป็นสมการ  $I_1(s)$  ในเทอมของ  $-I_2(s)$  และไม่ได้อยู่ในรูปของ  $V_2(s)$  ทำให้สามารถสรุปได้ว่า  $C(s) = 0$  และ  $D(s) = Z_2(s) Z_4(s) / Z_1(s) Z_3(s)$  จึงสรุปได้ว่าวงจรในรูปที่ 2.10 มีค่าพารามิเตอร์ ABCD (transmission parameters) แสดงได้ตามสมการที่ (2.12)

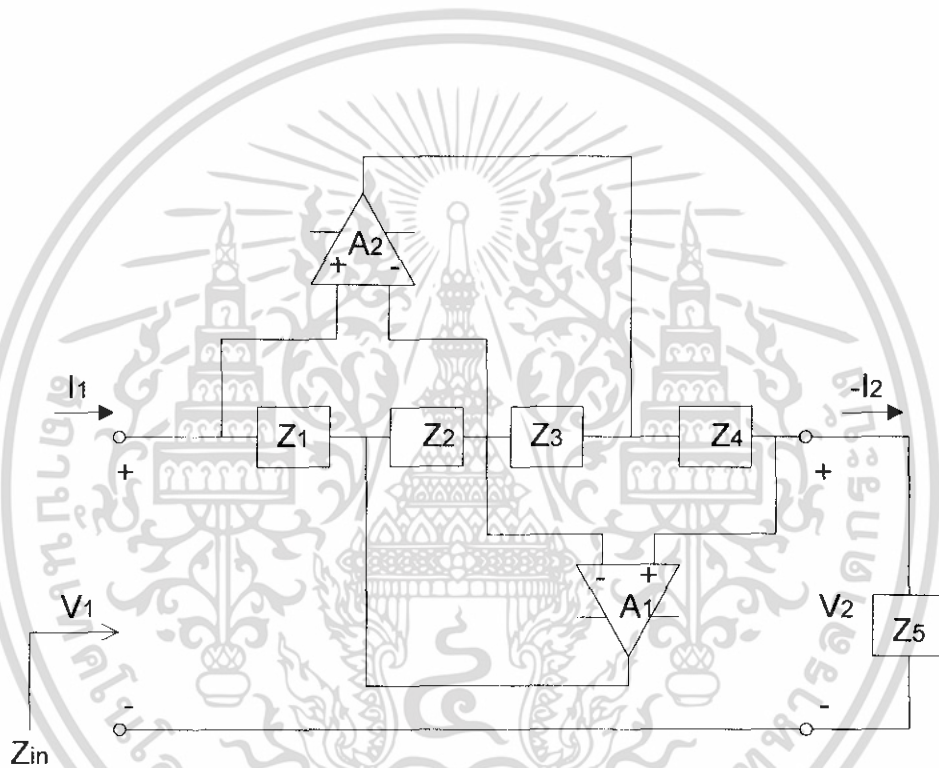
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{Z_2(s)Z_4(s)}{Z_1(s)Z_3(s)} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 Generalized Impedance Network

ถ้านำ impedance  $Z_5(s)$  มาต่อที่พอร์ตทางด้านขวา (พอร์ต 2) ของ network นั้นจะได้ one - port หรือ two - terminal network โดยแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต impedance  $Z_{in}(s) = V_1(s)/I_1(s)$ ,  $V_2(s) = Z_5(s)[-I_2(s)]$  และสมการที่ (2.8) แสดงได้ตามสมการที่ (2.13)

$$Z_{in}(s) = \frac{V_1(s)}{I_1(s)} = \frac{A(s)V_2(s) - B(s)I_2(s)}{C(s)V_2(s) - D(s)I_2(s)} = \frac{A(s)Z_5(s) + B(s)}{C(s)Z_5(s) + D(s)} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.11 วงจร GIN

จากรูปที่ 2.11 two - port network นั้นคือ GIN ที่ได้แสดงในรูปที่ 2.10 ดังนั้นถ้าใช้ ABCD พารามิเตอร์ ในสมการที่ (2.12) แสดงในรูปของ  $Z_{in}(s)$  ในสมการที่ (2.13) นั้นจะได้

$$Z_{in}(s) = \frac{Z_1(s)Z_3(s)Z_5(s)}{Z_2(s)Z_4(s)} \quad (2.14)$$

โดยที่  $Y(s) = 1/Z_{in}(s)$  จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y_{in}(S) = \frac{Y_1(s)Y_3(s)Y_5(s)}{Y_2(s)Y_4(s)} \quad (2.15)$$

โดยสมการที่ (2.14) และ (2.15) นั้นเรียกว่า Generalized Impedance Network (GIN)

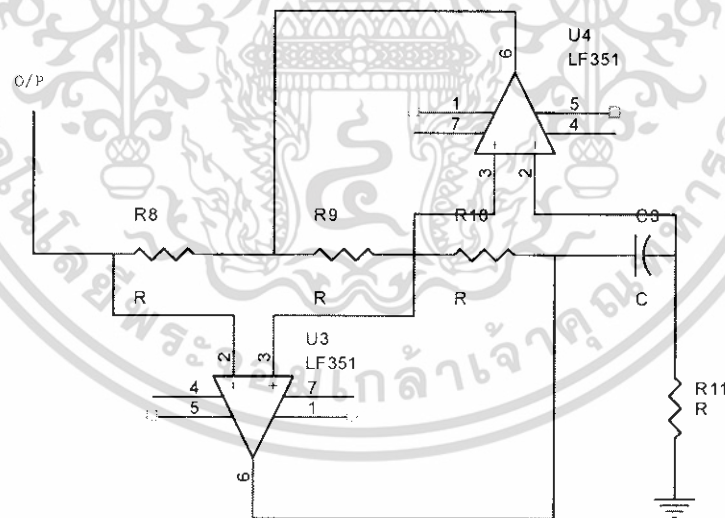
## 2.8 ตัวเหนี่ยวนำเสมือน (Inductance simulation)

ตัวเหนี่ยวนำในเน็ตเวิร์ค หรือ วงจรใดๆ สามารถใช้อุปกรณ์ RC แทนได้โดยไม่ต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำเลย ซึ่งวิธีนี้เรียกว่า การสังเคราะห์ความเหนี่ยวนำ (synthetic inductors)

### 2.8.1 การสังเคราะห์ความเหนี่ยวนำ (Synthetic inductors)

จากหัวข้อ GIN ที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น ถ้าทำการแทน  $Z_4(s)$  ด้วย ตัวเก็บประจุ C และทำการแทน  $Z_i$  ( $i = 1, 2, 3, 5$ ) ด้วย ตัวต้านทาน R จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.16)

$$Z_{in}(S) = \frac{sR_1R_3C_4R_5}{R_2} \quad L_{eq} = \frac{R_1R_3C_4R_5}{R_2} \quad (2.16)$$

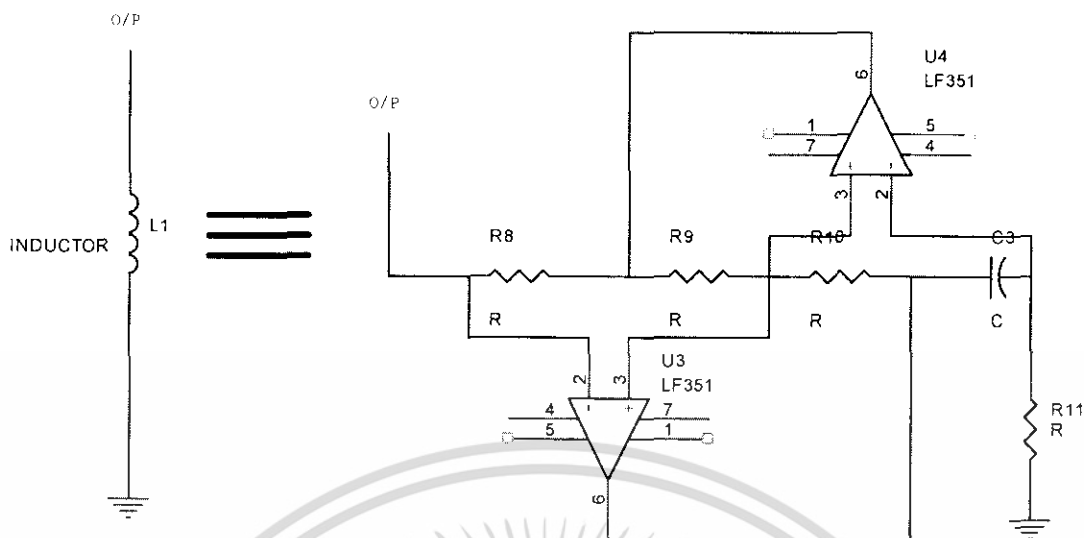


รูปที่ 2.12 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน (Synthetic inductors)

จากหัวข้อที่ผ่านมา นั้น เราต้องการวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน ซึ่งมี  $L = 42 \text{ H}$  สามารถใช้วงจรเหนี่ยวนำเสมือนได้ แสดงได้ดังรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



**รูปที่ 2.13** วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน (Inductance simulation) ที่นำมาใช้แทนตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าสูง

ดังนั้นเราสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (2.17)

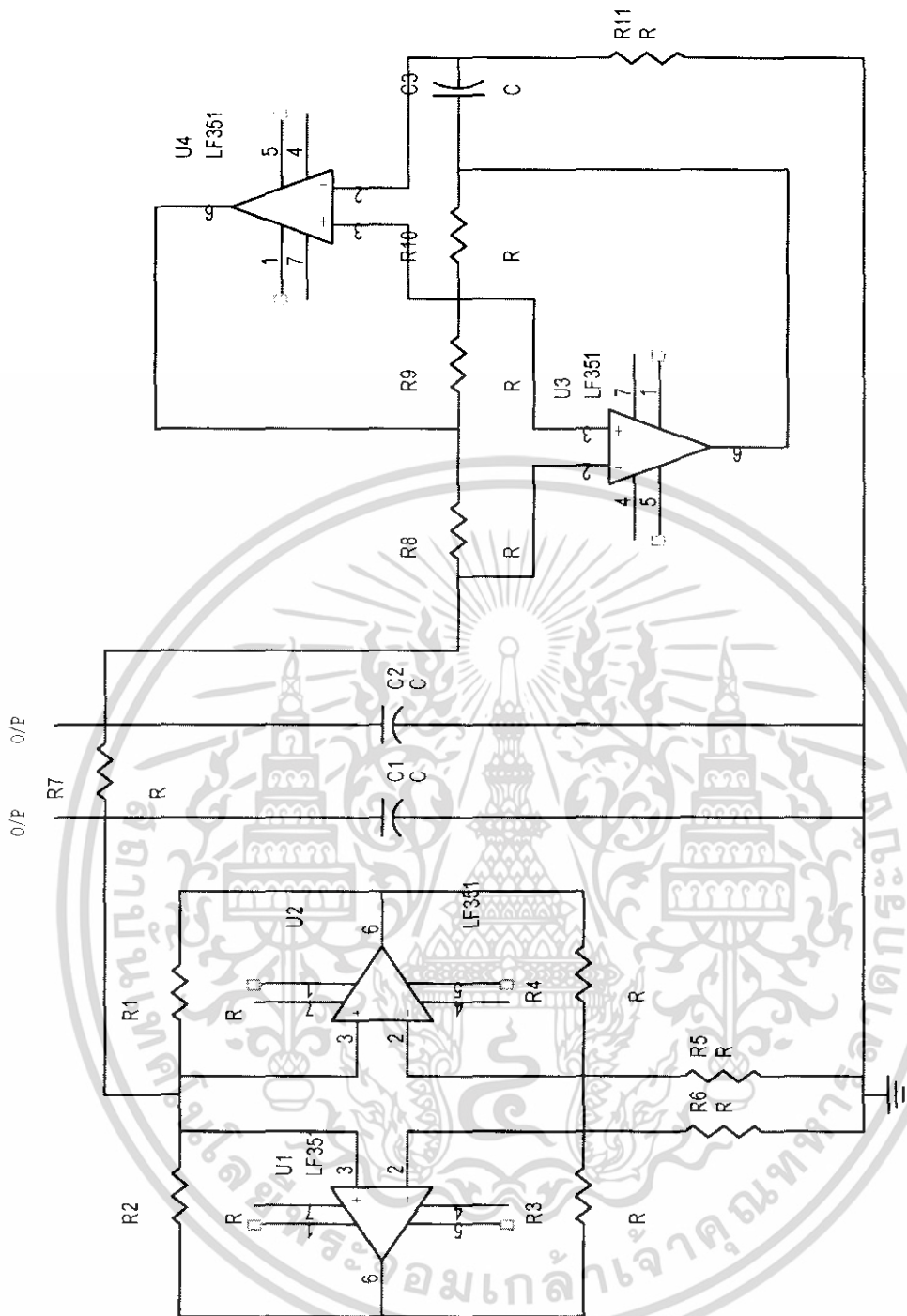
$$L_{eq} = \frac{R_7 R_9 C_3 R_{10}}{R_8} \tag{2.17}$$

จากสมการที่ (17) นั้นถ้าต้องการ  $L = L_{eq} = 42.3 \text{ H}$  แล้วค่า  $R_7 = 1.0 \text{ K}\Omega$ ,  $R_8 = 1.0 \text{ K}\Omega$ ,  $R_9 = 1.0 \text{ K}\Omega$ ,  $R_{10} = 1.8 \text{ K}\Omega$  และค่า  $C_3 = 23.5 \mu\text{F}$

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมด วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนที่มีความถี่ต่ำ โดยใช้วงจร Chua จะได้ดังสมการที่ 2.14

72984

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

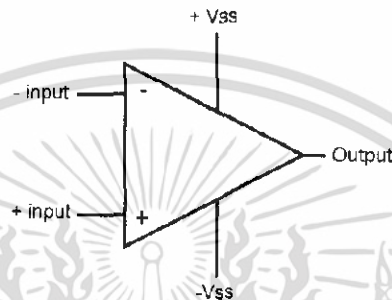


**รูปที่ 2.14** วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นแบบความถี่ต่ำ โดยใช้วงจร Chua

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 วงจรขยาย (Amplifier)

ในวงจรขยาย โดยทั่วไปแล้ว มักจะมี Operational Amplifier (OP-AMP) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ เนื่องจากออปแอมป์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญสำหรับวงจรป้อนกลับสัญญาณ ซึ่งเป็นตัวกลางในการดำเนินการสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีทั้ง บวก, ลบ, ขยาย, อินทิเกรต, ดิฟเฟอเรนเชียล สัญลักษณ์ของออปแอมป์ ได้แสดงดังรูปที่ 2.23 ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของออปแอมป์อย่างคร่าวๆ เพื่อประกอบความเข้าใจในวงจรขยาย



รูปที่ 2.23 สัญลักษณ์ของออปแอมป์

จากรูปที่ 2.23

$V_{in} +$  คือ Non-inverting Amplifier

$V_{in} -$  คือ Inverting Amplifier

$+V_{ss}, -V_{ss}$  คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้า

### 2.9.1 หลักการพื้นฐานของออปแอมป์

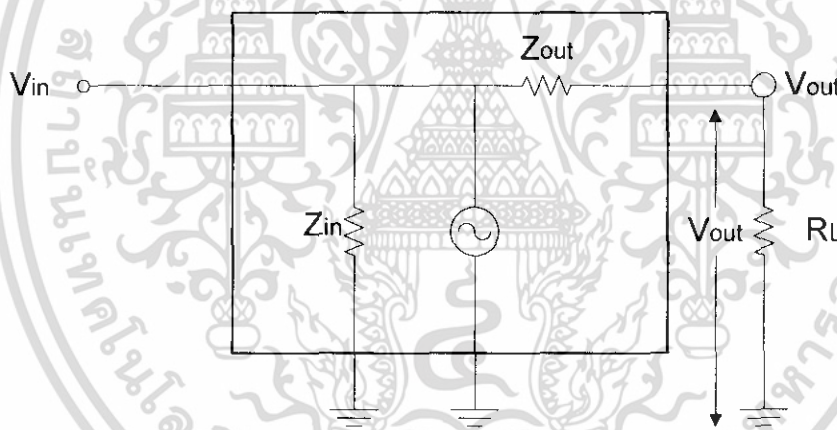
ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอัตราขยาย และอิมพีแดนซ์ อินพุต  $Z_i$  หรือ  $R_i$  สูงมากและมีอิมพีแดนซ์เอาต์พุต  $Z_o$  หรือ  $R_o$  ต่ำมาก

ถ้าจ่ายสัญญาณอินพุตให้กับขั้วบวกของออปแอมป์ จะได้สัญญาณเอาต์พุตมีมุมที่อินเฟสกับสัญญาณอินพุต แต่ถ้าจ่ายสัญญาณอินพุตให้กับขั้วลบของออปแอมป์ จะได้สัญญาณเอาต์พุตมีมุมที่ต่างเฟสกับสัญญาณอินพุต 180 องศา หรือมุมตรงกันข้าม

### 2.9.2 คุณสมบัติของออปแอมป์ในอุดมคติ(Ideal Op-Amp)

1. อัตราขยายของออปแอมป์แบบวงจรรอบเปิด (Open Loop Gain) มีค่าสูงมากจนเป็นอนันต์  $AV_{OL} = \infty$
2.  $Z_i$  มีค่าสูงมากจนถือได้ว่าเป็น infinity
3.  $Z_o$  มีค่าต่ำมากจนถือว่าเป็น 0
4. อัตราขยายของออปแอมป์ไม่ขึ้นกับความถี่
5. เมื่อ  $V_{in} = 0$  จะได้  $V_{out}$  เป็น 0 ด้วย

จากคุณสมบัติดังกล่าวมาแล้ว มีผลสืบเนื่องคือ  $i_i = 0$  เนื่องจาก  $Z_i$  สูงมาก ความต่างศักย์ระหว่างขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์เป็น 0 เนื่องจาก  $i_i$  และยังให้ค่า  $Z_{out}$  มีค่าต่ำมากจนประมาณได้ว่า  $Z_o = 0$  ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 คุณสมบัติด้านความต้านทานของออปแอมป์

### 2.9.3 การใช้ออปแอมป์ในวงจรรขยายสัญญาณ

1. วงจร BUFFER หรือ VOLTAGE FOLLOWER

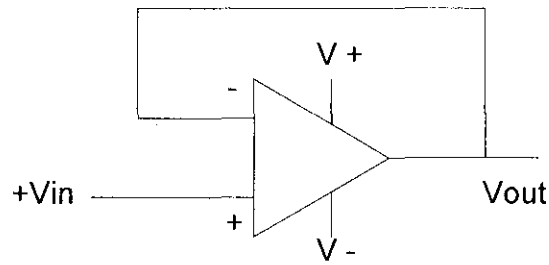
อัตราการขยายวงจรถชนิดนี้มีค่าประมาณ 1

นั่นคือ

$$AV = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 \quad (2.23)$$

$$V_{out} = V_{in} \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 วงจร Buffer หรือ Voltage follower

### 2. วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverter Amplifier)

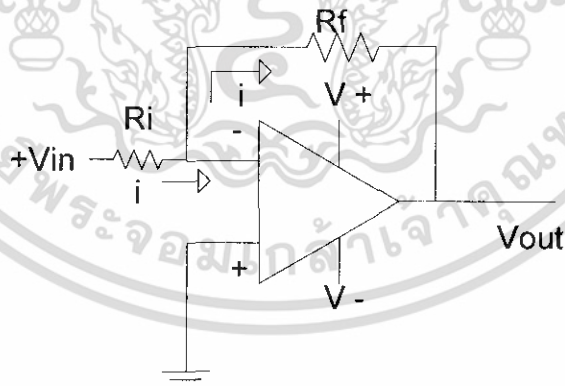
ความต่างศักย์ระหว่าง  $V_{in+}$  และ  $V_{in-} = 0$  ดังนั้น ศักย์ไฟฟ้าที่ขา  $V_{in-} = 0$  กระแสผ่าน  $R_f$  และ  $R_i$

มีค่า  $i$

$$AV = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-iR_f}{iR_i} = -\frac{R_f}{R_i} \quad (2.25)$$

เพราะฉะนั้น

$$AV = -\frac{R_f}{R_i} \quad (2.26)$$



รูปที่ 2.26 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

ดังนั้น

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_i} V_{in} \quad (2.27)$$

### 3. วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Amplifier)

จากรูปที่ 2.27 กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน  $R$  และ  $R$  มีค่า  $i$  เท่ากัน ดังนั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{in} = iR_i \quad (2.28)$$

$$V_{in} = i(R_i + R_f) \quad (2.29)$$

$$AV = i(R_i + R_f) / iR_i \quad (2.30)$$

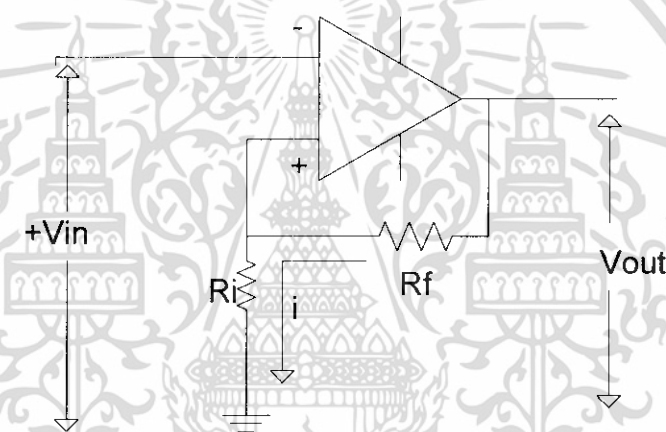
$$AV = (R_i + R_f) / R_i \quad (2.31)$$

หรือ

$$AV = 1 + \left( \frac{R_f}{R_i} \right) \quad (2.32)$$

ดังนั้น

$$V_{out} = \left( 1 + \frac{R_f}{R_i} \right) V_{in} \quad (2.33)$$

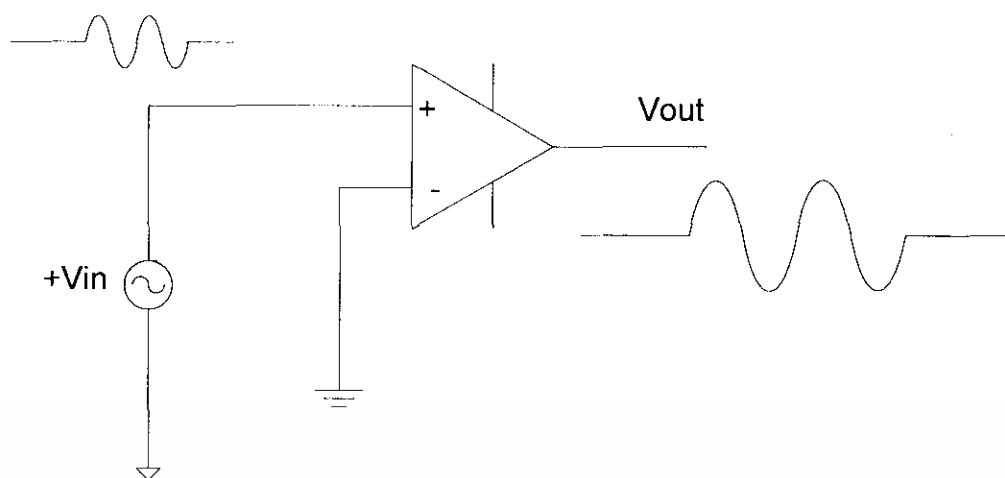


**รูปที่ 2.27** วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

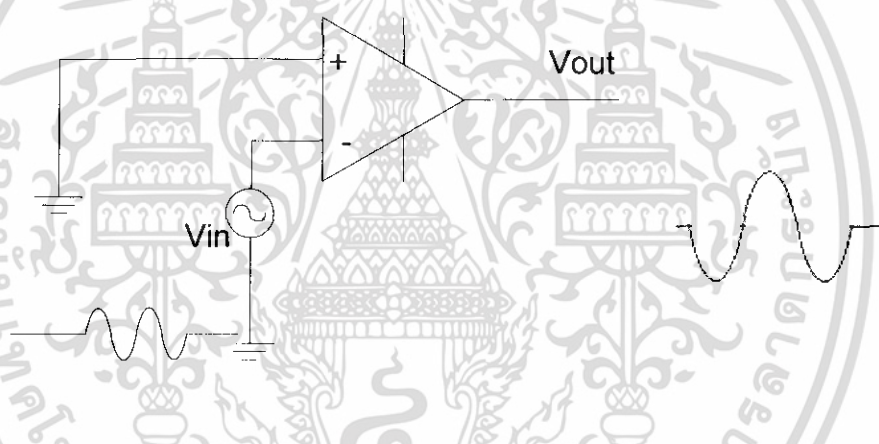
การทำงานของ OP-AMP แบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ การทำงานที่อินพุตด้านเดียว และการทำงานที่อินพุตสองพุตสองด้าน

#### 2.9.4 การทำงานที่อินพุตด้านเดียว (Single Ended Input)

การทำงานที่อินพุตด้านเดียว คือ การป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วใดขั้วหนึ่ง ส่วนขั้วอินพุตที่เหลือต่อลงกราวด์ ดังรูปที่ 2.28 และ 2.29



รูปที่ 2.28 การป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วลบ



รูปที่ 2.29 การป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วลบ

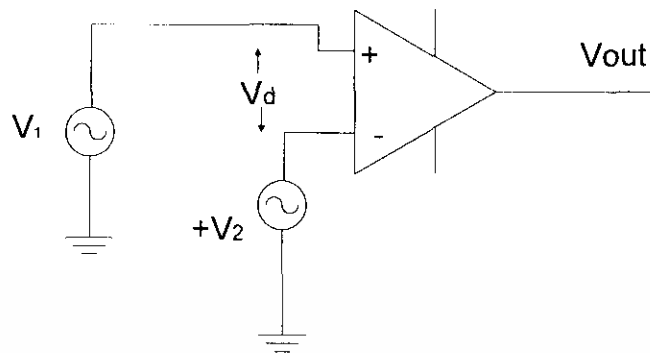
ถ้าป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วลบและต่อขั้วลบลงกราวด์ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้รับการขยายกับสัญญาณอินพุตจะมีมุมอินเฟสกัน ดังรูปที่ 2.28 ในทางตรงข้ามถ้าป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วลบและต่อขั้วลบลงกราวด์จะได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีมุมต่างเฟสกับสัญญาณอินพุต 180 องศา ดังรูปที่ 2.29

### 2.9.5 การทำงานที่อินพุตสองด้าน (Double Ended Input)

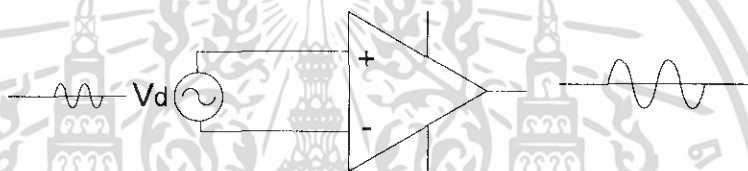
การทำงานที่อินพุตสองด้าน คือการป้อนสัญญาณอินพุตทั้งสองด้าน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential) และระบบโหมคร่วม (Common Mode)

การทำงานแบบดิฟเฟอเรนเชียล คือการป้อนสัญญาณอินพุต 2 สัญญาณที่เป็นอิสระต่อกันให้กับขั้วอินพุตทั้งสอง ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



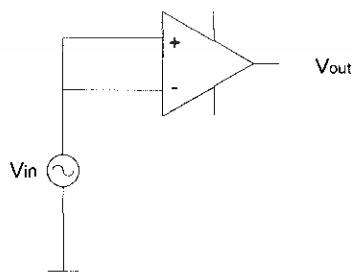
**รูปที่ 2.30** การป้อนสัญญาณอินพุต 2 สัญญาณที่เป็นอิสระต่อกันให้กับออปแอมป์



**รูปที่ 2.31** การขยายผลต่างของอินพุตทั้งสองของออปแอมป์

เนื่องจากขั้วอินพุตของออปแอมป์เป็นบวกและลบ สัญญาณอินพุตจึงหักล้างกัน ดังนั้น สัญญาณเอาต์พุตจึงเกิดจากการขยายผลต่างของสัญญาณอินพุต นั่นคือ  $V = V + V$  ซึ่งสามารถเขียนรูปใหม่เพื่อพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.31 ซึ่งสังเกตได้ว่า สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตอินเฟสกัน

การทำงานแบบโหมคร่วม คือ การป้อนสัญญาณอินพุตร่วมให้กับขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์ดังรูปที่ 2.32



**รูปที่ 2.32** การป้อนสัญญาณอินพุตร่วมให้กับขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่ในสื่อออนไลน์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางอุดมคติ สัญญาณอินพุตทั้ง 2 ขั้ว ต้องได้รับการขยายเท่ากัน ทำให้เกิดสัญญาณที่มี ขั้วตรงข้ามกันที่อินพุต สัญญาณเหล่านี้หักล้างกันแล้วหยุดหายไปสัญญาณเอาต์พุตจึงเป็น 0 V แต่ ในทางปฏิบัติยังมีสัญญาณเอาต์พุตเหลืออยู่เล็กน้อย โดยเราเรียกว่า “สัญญาณโหมคร่วม” ซึ่งในที่นี้ จะไม่กล่าวถึง

จากที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นนี้อุปแอมป์จะมีคุณสมบัติในการขยายแรงดัน ซึ่งถ้าต้องการ ขยายกระแสจะต้องใช้ทรานซิสเตอร์มาช่วยในการขยายกระแส ในการทดลองนี้เราได้ใช้วงจรขยาย ตามรูปที่ 2.33 ซึ่งมีอัตราขยายแรงดันเป็น  $1 + \frac{R_f}{R_i}$

## 2.10 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current motors: DC motors)

- มอเตอร์แบบวงจรขั้วแม่เหล็กขนาน (shunt motor)
- มอเตอร์แบบวงจรขั้วแม่เหล็กอนุกรม (series motor)
- มอเตอร์แบบวงจรขั้วแม่เหล็กผสม (compound motor)

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลาย เพราะมีความแข็งแรงทนทาน ราคา ถูก ประสิทธิภาพสูง ความแน่นอนในการใช้งานสูง และบำรุงรักษาสะดวกได้ง่าย ในปัจจุบันอาจ กล่าวได้ว่าอุตสาหกรรมเกือบทั้งหมดใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นต้นกำลังกล ขนาดมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามเฟสจะมีขนาดตั้งแต่ต่ำกว่า 1 แรงม้าที่แรงดันต่ำ (110-6600 โวลต์) จนกระทั่งถึงหลายพันแรงม้า ที่แรงดันสูง (3.0 กิโลโวลต์ หรือสูงกว่า)

### 2.10.1 โครงสร้างและการทำงานพื้นฐาน

มอเตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล การหมุนของมอเตอร์เกิดจาก แรงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic field) 2 ชุด คือที่สเตเตอร์ (stator) และโรเตอร์ (rotor) พยายามที่จะจัดเส้นแรงแม่เหล็กให้อยู่ในแนวเดียวกัน การที่สนามแม่เหล็กทั้งสองชุดกระทำ ลักษณะดังกล่าวทำให้มอเตอร์หมุนได้และมีมุมที่แตกต่างกันของแนวแกนของสนามแม่เหล็ก ทั้งที่ สเตเตอร์และโรเตอร์รวมทั้งความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มีค่ามากเท่าไร ก็ยังจะทำให้เกิดแรงทาง แม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำให้นิวสนามแม่เหล็กทั้ง 2 ชุดเคลื่อนที่เข้าหากันมากขึ้นเท่านั้น ผลลัพธ์ ของแรงกระทำอันนี้คือ แรงบิดของมอเตอร์หรือทอร์ก (torque) โดยปกติแล้วสนามแม่เหล็กใน มอเตอร์แบบต่างๆจะมีทั้งแบบที่หมุนไปรอบๆตัวมอเตอร์ และแบบที่หยุดนิ่งอยู่กับที่ ตัวอย่างแบบ สนามแม่เหล็กหมุน ได้แก่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกเป็นที่นิยมใช้ กันมากที่สุดเนื่องจากโครงสร้างที่ง่ายแข็งแรง และไม่ต้องใช้แปรงถ่าน (carbon brush) มีการทำงาน เกิดจากสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก (core) ที่เกิดจากขดลวดปฐมภูมิ (primary winding) หมุนแล้ว เหนี่ยวนำโรเตอร์ที่มีขดลวดทุติยภูมิ (secondary winding) ให้หมุนตาม หรือตัวนำในโรเตอร์เกิดจาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กที่มีค่าคงที่ แต่เคลื่อนที่หมุนไปรอบๆ สเตเตอร์ สนามแม่เหล็กจะถูกส่งผ่านช่องอากาศ (air gap) มาเหนี่ยวนำตัวนำที่โรเตอร์ ทำให้เกิดแรงดัน กระแส และ สนามแม่เหล็ก จากโรเตอร์ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนจากสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เกิดจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนเข้าทางสเตเตอร์ สำหรับระบบ 50 เฮิร์ตซ์ ที่ใช้กันในประเทศไทยจะทำให้สนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วที่ 750 1000 1,500 และ 3,000 รอบต่อวินาที สำหรับมอเตอร์แบบ 8 6 4 และ 2 ขั้ว ตามลำดับเราเรียกความเร็วนี้ว่าความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์ (synchronous speed)

### 2.10.2 ทฤษฎีมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor)

ดีซีมอเตอร์เป็นทรานส์ดิวเซอร์แรงบิดซึ่งมีการออกแบบให้มีคุณลักษณะพิเศษคือแรงบิดของเพลลาของดีซีมอเตอร์จะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับกระแสอาร์มาเจอร์ แรงบิดของเพลลาของดีซีมอเตอร์จะได้จากผลระหว่างสนามแม่เหล็กและขดลวดตัวนำ หลักการนี้แสดงได้ในรูปที่ 2.13 ในที่นี้กระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำจะสร้างฟิลด์ที่ประกอบด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก  $\phi$  และขดลวดตัวนำเหล่านั้นอยู่ห่างจากศูนย์กลางการหมุนเท่ากับ  $r$  ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของเพลลาและกระแสเท่ากับ

$$T = K \phi I \quad (2.34)$$

เมื่อ  $T$  คือแรงบิดของเพลลา มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร

$\phi$  คือเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์

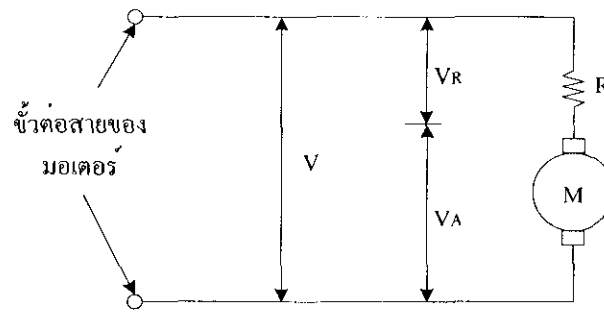
$I$  คือกระแสเป็น แอมแปร์

และ  $K$  คือตัวคงที่ ดังนั้นแรงบิดของเพลลาจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับผลคูณของเส้นแรงแม่เหล็กและกระแสเมื่อขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กก็จะทำให้เกิดโวลต์เตจตกคร่อมตัวมันเอง โวลต์เตจนี้จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วของเพลลาของมอเตอร์และด้านารไหลของกระแส ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจย้อนกลับนี้และความเร็วของเพลลาของมอเตอร์

### 2.10.3 คุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรง

ในการอธิบายคุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรงให้ละเอียดนั้นต้องพิจารณาแรงดันที่ป้อนและความต้านทานของโรเตอร์ด้วย วงจรภายในของมอเตอร์เขียนได้ดังรูปที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 วงจรภายในของมอเตอร์กระแสตรง

โดยสมมติให้ท่อนโรเตอร์ไม่มีความต้านทานอยู่เลย อนุกรมกับความต้านทานซึ่งในที่นี้ก็คือความต้านทานของขดลวดนั่นเอง แรงดันที่ขั้วต่อสายของมอเตอร์ก็คือผลบวกระหว่างแรงดันที่ท่อนโรเตอร์ ( $V_A$ ) และ แรงดันตกคร่อมความต้านทานขดลวด ( $V_R$ )

แรงดัน  $V_A$  ถูกเรียกว่า แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำป้อนกลับ (BACK EMF) ซึ่งเกิดขึ้นในโรเตอร์ขณะที่หมุนแรงดันที่เกิดขึ้นนี้เป็นไปตามกฎของการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่ของตัวนำในสนามแม่เหล็ก สัมพันธ์กับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำแม่เหล็ก และ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวนำ แรงดันที่เกิดขึ้นจะมีขั้วตรงกันข้ามกับแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ และ แปรผันตรงกับความเร็วในการหมุน ผลบวกของแรงดันที่ท่อนโรเตอร์ ( $V_A$ ) และแรงดันตกคร่อมขดลวด ( $V_R$ ) ต้องเท่ากับแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ( $V$ )

$$V = V_A + V_R \quad (V)$$

เมื่อพิจารณาตั้งแต่มอเตอร์หยุดนิ่ง ความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น  $V_A = 0$ ,  $V_R = V$  กระแสที่ไหลในมอเตอร์หาได้จาก

$$I = V_R / R \quad (A)$$

เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนจะมีความเร็ว และ  $V_A$  เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามความเร็ว  $V_R$  ซึ่งมีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่าง  $V_A$  และ  $V$  จะเริ่มลดลงกระแส  $I$  ก็จะเริ่มลดลงเช่นกันขณะที่มอเตอร์ยังมีความเร่งอยู่ ความเร็วจะเพิ่มขึ้น แรงบิดจะลดลงจนกว่าจะถึงจุดซึ่งแรงบิดของมอเตอร์รับภาระโหลดได้สมดุลพอดี ขณะที่มอเตอร์ไม่มีโหลด และ หมุนอย่างอิสระจะมีเพียงค่าความฝืดของแบร์ริง และ แรงต้านอากาศทำให้  $V_A$  เกือบเท่ากับค่า  $V$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.10.4 โมเดลคณิตศาสตร์ของดีซีมอเตอร์

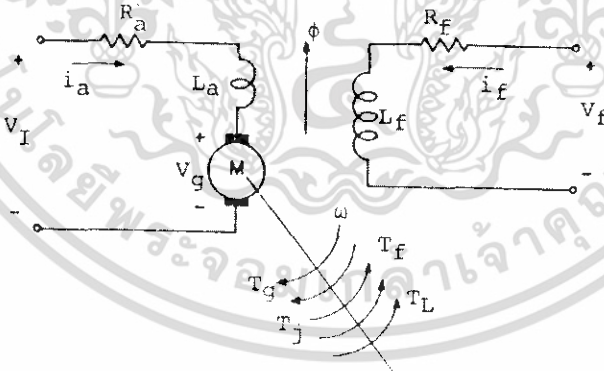
ดีซีมอเตอร์ที่ใช้ร่วมกับดีซีแอมพลิไฟ์ลท์ทั้งในระบบการบังคับตำแหน่งและการบังคับความเร็วมักจะได้รับการประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบสร้างกำลังงานในระบบการนำร่องและระบบบังคับต่างๆ และเนื่องจากวิทยาการเกี่ยวกับสารแม่เหล็กและการขยายด้วยโซลิดสเตททำให้ดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรได้รับความนิยมใช้เป็นส่วนประกอบการขับเคลื่อนในระบบการบังคับแบบปิดลูปต่างๆ มากขึ้น การออกแบบและการชดเชยระบบดังกล่าวได้อย่างเหมาะสมจะต้องใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ของส่วนประกอบทั้งหมดในระบบ



รูปที่ 2.34 แสดงอินพุตและเอาต์พุตของ โมเดลทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์

### 2.10.5 โมเดลอิเล็กทรอนิกส์โทรแมคคานิคอล

ส่วนสำคัญของดีซีมอเตอร์แบบฟีลด์แยกกระตุ้นมีโมเดลดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.35 แสดงโมเดลของดีซีมอเตอร์แบบฟีลด์แยกกระตุ้น

$R_a$ : ความต้านทานของอาร์เมเจอร์

$L_a$ : อินдукเต้นซ์ของอาร์เมเจอร์

$V_g$ : โวลต์เตจกำเนิดในอาร์เมเจอร์ (โวลต์เตจย้อนกลับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_f$ : ความต้านทานของฟิลต์

$L_f$ : อินดักเต้นซ์ของฟิลต์

$\phi$ : ช่องว่างอากาศของเส้นแรงสนามแม่เหล็ก

$\omega$ : ความเร็วของเพลอาอาร์เมเจอร์

$T_e$ : แรงบิดที่พัฒนาขึ้นในมอเตอร์

$T_f$ : แรงบิดเสียดทานของมอเตอร์

$T_j$ : แรงเฉื่อยของมอเตอร์

$T_L$ : แรงบิดโหลดบนเพลของมอเตอร์

ขั้นแรกเราจะหาสมการพื้นฐาน โมเดลของดีซีมอเตอร์ได้จากกฎของอาร์เมเจอร์

$$V_i(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + V_g(t) \quad (2.35)$$

เทอมโวลต์เต็จ  $V_g(t)$  ในสมการ (1) คือโวลต์เต็จย้อนกลับของมอเตอร์ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเส้นลวดตัวนำของอาร์มาเจอร์หมุนตัดเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งเกิดขึ้นในกระแสของฟิลต์ ( $i_f$ ) ตามกฎของฟาราเดย์ของเส้นลวดตัวนำหมุนในฟิลต์แม่เหล็กคงที่จะมีการเหนี่ยวนำโวลต์เต็จขึ้นในขดลวดนั้น

$$V_i(t) = \frac{d\lambda(t)}{dt} \quad (2.36)$$

เมื่อ  $\lambda(t)$  คือเส้นแรงแม่เหล็กที่ลิงเคจ(linkages) ไปยังขดลวดและ  $t$  คือเวลาในการหมุนของคี่อมนิวเทเตอร์ของมอเตอร์ การควบคุมวงจรของแต่ละส่วนของตัวนำในโรเตอร์จะเกิดโวลต์เต็จขึ้นในส่วนของตัวนำนั้นตามสมการ (2) เมื่อ  $\frac{d\lambda(t)}{dt}$  จะเป็นสัดส่วนต่อเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศและความเร็วเชิงมุม  $\omega(t)$  เราจะได้ว่า

$$V_g(t) = K\phi(t)\omega(t) \quad (2.37)$$

สมมติให้กระแสของฟิลต์มีค่าคงที่และไม่คิดถึงส่วนการเปลี่ยนแปลงในเส้นแรงฟิลต์ เนื่องจากอาร์เมเจอร์รีแอคชั่นเส้นแรงฟิลต์ก็จะมีค่าคงที่ดังนั้นสมการ (3) ก็จะเป็น

$$V_g(t) = K_e\omega(t) \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเราสมมติให้เส้นแรงของฟิล์มค่าคงที่ แรงบิดของแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นแก่โรเตอร์ของมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนกับกระแสของอาร์มาเจอร์

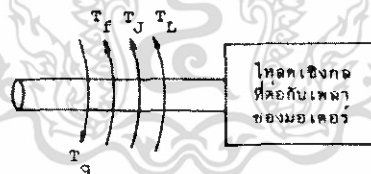
$$T_g(t) = K_t i_a(t) \quad (2.39)$$

เมื่อ  $K_t$  คือ ค่าคงที่ของแรงบิดของมอเตอร์

กำลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นใน โรเตอร์คือผลคูณของแรงบิดที่เกิดขึ้นและความเร็วเชิงมุม

$$P_g(t) = T_g(t) \omega(t) \quad (2.40)$$

กำลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นใน โรเตอร์ทั้งหมดนี้จะจ่ายไปยังโหลดที่ต่ออยู่กับเพลามอเตอร์แต่กำลังงานนี้บางส่วนจะสูญเสียไปในมอเตอร์ การสูญเสียจากแรงเสียดทาน หมายถึงความหน่วงเนื่องจากลมที่มีต่อโรเตอร์ แรงเสียดทานตัวรองรับโรเตอร์ กระแสที่ไหลวนในเหล็กของโรเตอร์และฮีสเทรีซิส โดยแรงบิดต่างๆแสดงดังนี้



รูปที่ 2.36 แสดงถึงแรงบิดต่างๆที่เกิดขึ้นต่อโหลดของมอเตอร์

$T_g(t)$ : แรงบิดของมอเตอร์

$T_r(t)$ : แรงบิดที่ दौरानะการสูญเสียเนื่องจากการเสียดทาน

$T_f(t)$ : แรงบิดเพื่อใช้เพิ่มอัตราเร่งแก่ความเฉื่อยของโหลด

$T_L(t)$ : แรงบิด โหลด

ในช่วงเวลาใดๆก็ตาม แรงบิดของมอเตอร์จะต้องเท่ากับและมีทิศทางตรงข้ามกับผลรวมของแรงบิด  $T_r(t)$   $T_f(t)$  และ  $T_L(t)$  ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_g(t) = T_r(t) + T_L(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (2.41)$$

เมื่อ  $J$  คือผลรวมของโมเมนต์แรงเฉื่อยของโรเตอร์และโหลดที่ต่ออยู่ที่เพลาของมอเตอร์

ผลรวมของแรงบิดเสียดทานที่ประกอบกันขึ้นที่เพลาของมอเตอร์ซึ่งเป็นลิเนียร์ฟังก์ชันกับความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์เรียกว่า ส่วนประกอบของวิสกอสฟริกชันและมักจะอยู่ในเทอมที่แยกออกจากฟริกชันอื่นๆ ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$T_g(t) = T_r(t) + T_L(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \quad (2.42)$$

เมื่อ  $B$  คือสัมประสิทธิ์ของวิสกอสฟริกชันของมอเตอร์และโหลดที่ต่ออยู่กับเพลาของมอเตอร์  $T_r(t)$  คือผลรวมของฟริกชันของโหลดและมอเตอร์ทั้งหมด มีแรงต้านของลมและการสูญเสียกำลังในเหล็กของเพลามอเตอร์ยกเว้นวิสกอสฟริกชัน

สมการ (1) (4) (5) และ (8) เป็นชุดสมการพื้นฐานของดีซีมอเตอร์โมเดลและสมการเหล่านี้เราสามารถจะหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของดีซีมอเตอร์ได้ โดยใช้ลาปลาซทรานสฟอร์มทั้งสองข้างของชุดสมการพื้นฐานได้เป็น

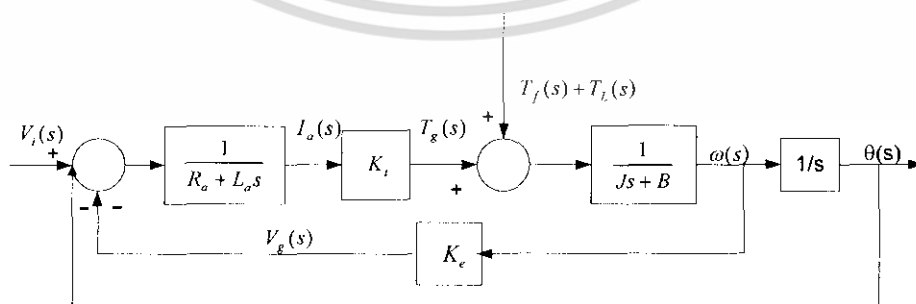
$$V_i(s) - V_g(s) = (R_a + sL_a) I_a(s) \quad (2.43)$$

$$V_g(s) = K_e \omega(s) \quad (2.44)$$

$$T_g(s) = K_t I_a(s) \quad (2.45)$$

$$T_g(s) - T_r(s) - T_L(s) = (B + sJ) \omega(s) \quad (2.46)$$

สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมที่แสดงสมการพื้นฐานเหล่านี้ได้ดังนี้



**รูปที่ 2.37** แสดงบล็อกไดอะแกรมของดีซีมอเตอร์โมเดล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข้อสังเกต

สมมติว่าโวลต์เต็จที่ป้อนให้กับวงจรรออาร์มาเจอร์ของมอเตอร์มีค่าคงที่ดังนั้นมอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วคงที่คือทำงานอยู่ที่สภาวะสงบนิ่งด้วยโหลดที่คงที่ กำลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นโดยโรเตอร์จะหาได้จากสมการ (6) จะได้

$$P_g = T_g \omega = K_t I_a \omega \quad (2.47)$$

เมื่อทุกเทอมในสมการสุดท้ายมีค่าคงที่เนื่องจากมอเตอร์ทำงานอยู่ที่สภาวะสงบนิ่ง กำลังไฟฟ้าที่ถูกดูดกลืนโดยอาร์เมเจอร์ต้องเท่ากับ

$$P = V_g I_a = K_e \omega I_a \quad (2.48)$$

ดังนั้นเราจะได้ว่ากำลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นต้องเท่ากับกำลังงานไฟฟ้าที่ถูกดูดกลืนในโรเตอร์คือสรุปได้ว่า  $K_e = K_t$  ทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของดีซีมอเตอร์บล็อกไดอะแกรมของรูปที่ 5 แสดงถึงระบบที่มีสองอินพุท และมีเอาต์พุทเป็นความเร็วเชิงมุม  $\omega(s)$  และการเคลื่อนที่แบบเชิงมุม  $\theta(s)$  จากรูปที่ 5 ความเร็วเอาต์พุทของระบบเขียนได้เป็น

$$\omega(s) = G_1(s)V_f(s) + G_2(s)[T_f(s) + T_L(s)] \quad (2.49)$$

เมื่อ

$$G_1(s) = \left. \frac{\omega(s)}{V_f(s)} \right|_{T_f(s)+T_L(s)=0} \quad (2.50)$$

$$G_2(s) = \left. \frac{\omega(s)}{T_f(s) + T_L(s)} \right|_{V_f(s)=0} \quad (2.51)$$

$G_1(s)$  คือทรานสเฟอ์ฟังก์ชันระหว่างโวลต์เต็จและความเร็ว

$$\begin{aligned} G_1(s) &= \frac{\omega(s)}{V_f(s)} = \frac{K_t}{(L_a s + R_a)(Js + B) + K_t K_e} \\ &= \frac{K_m}{\alpha s^2 + \beta s + 1} \end{aligned} \quad (2.52)$$

เมื่อ

$$K_m = \frac{K_t}{R_a B + K_t K_e}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = \frac{L_a J}{R_a B + K_t K_e}$$

$$\beta = \frac{R_a J + L_a B}{R_a B + K_t K_e}$$

สมการ (18) เป็น โวลต์เตจทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของดีซีมอเตอร์ในเมื่อสมมติว่า  $T_f$  และ  $T_L$  มีค่าเป็นศูนย์ สมการ (18) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$G_1(s) = \frac{K_t}{R_a B(1 + \tau_e s)(1 + \tau_m s) + K_t K_e}$$

เมื่อ  $\tau_e = \frac{L_a}{R_a}$  = ไทม์คอนสแตนต์ทางไฟฟ้า

$\tau_m = \frac{J}{B}$  = ไทม์คอนสแตนต์ทางเชิงกล

ถ้าอินดักเต้นซ์ของอาร์มาเจอร์มีค่าน้อย ไทม์คอนสแตนต์ทางไฟฟ้าสามารถตัดทิ้งได้และได้สมการเป็น

$$G_V(s) = \frac{\omega(s)}{V_i(s)} = \frac{K_t}{R_a(Js + B) + K_t K_e} \quad (2.53)$$

$$= \frac{K_m}{Ts + 1}$$

เมื่อ  $\tau = \frac{R_a J}{R_a B + K_t K_e}$

ในสมการ (19) ค่าคงที่  $K_m$  อาจเรียกได้ว่าเป็นค่าคงที่ของมอเตอร์ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันแรงบิดโหลด  $G_2(s)$  หาได้เป็น

$$G_2(s) = \frac{\omega(s)}{T_f(s) + T_L(s)} = \frac{1}{1 + \frac{Js + B}{K_t K_e}}$$

$$= \frac{-\frac{R_a}{K_t} K_m \left[ \frac{L_a}{R_a} s + 1 \right]}{\alpha s^2 + \beta s + 1} \quad (2.54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งถ้าอินทิกรัลเริ่มต้นของอาร์มาเจอร์ไม่นำมาคิด จะทำให้ได้สมการ ดังนี้

$$G_L(s) = \frac{\omega(s)}{T_f(s) + T_l(s)} = \frac{-\frac{R_a}{K_t} K_m}{\tau s + 1}$$

ซึ่งจากสมการที่ (15) เมื่อให้ค่าของ  $T_f$  และ  $T_l$  มีค่าเป็นศูนย์จะทำให้ค่าทรานสเฟอร์ ฟังก์ชันมีค่าดังนี้

$$\omega(s) = G_v(s)V_i(s) = \frac{K_m}{\tau s + 1} V_i(s)$$

และจากรูปที่ 5 ตำแหน่งเอาต์พุทของระบบเป็นดังนี้

โมเดลคณิตศาสตร์ในการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ จาก transfer function ในหัวข้อที่ 3.3 โมเดลคณิตศาสตร์ของดีซีมอเตอร์ ซึ่งจะได้ model ของการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ในรูปของสมการอันดับหนึ่งเป็นดังนี้ คือ

$$\omega(s) = G_v(s)V_i(s) = \frac{K_m}{\tau s + 1} V_i(s)$$

จากสมการข้างต้นดังกล่าวนั้นจะเห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุม (output) และ ค่าแรงดันที่ป้อน (input)

และในการควบคุมตำแหน่งจะมีการผ่านตัว Integrator (1/s) ทำให้ได้เอาต์พุตคือ  $\Theta(s)$  ซึ่งจากรูปที่ 5. และ transfer function ที่ได้จากหัวข้อที่ 3.2 ข้างต้นนั้นเมื่อทำการผ่าน Integrator (1/s) เข้าไปจะทำให้ได้ค่าของ output เป็นมุมในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ ซึ่งเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\theta(s) = \frac{\omega(s)}{s} = \left[ \frac{1}{s} \right] \left[ \frac{K_m V_i(s)}{\tau s + 1} \right]$$

ส่วนในการหาโมเดลมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองนั้น เรากำหนดให้โมเดลของมอเตอร์เป็นโมเดลมอเตอร์อันดับหนึ่ง (First Order) ซึ่งเราได้ทำการทดลองเพื่อหาโมเดลที่เป็นลักษณะอันดับหนึ่งดังที่จะกล่าวถึงในบทที่ 5 หัวข้อที่ 5.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 ความรู้เรื่องเส้นในร่างกาย

เลือดลมที่เดินอยู่ในร่างกายของมนุษย์ตามเส้นเอ็นน้อยใหญ่ทั้งหลายการเจ็บป่วยจากการเป็นโรคเส้นเอ็นไม่ปกติสำหรับผู้สูงอายุ เรียกกันว่ากะษัยเส้น หรือเส้นตึง ต้องใช้วิธีบำบัดด้วยการกินยาสมุนไพร การออกกำลังกาย การอบเซาวาน้ำ แล่วนวด เส้น ถ้านวดถูกต้องก็จะทำให้ผู้ป่วยโรคกะษัยหายจากโรคเส้นตึงได้โดยเด็ดขาด

### การนวด

คือการรักษาโรคกะษัยผ่านคลายอาการประสาทเส้นเอ็นที่ตึงเครียดจากปัญหาต่างๆของชีวิต ผู้ที่จะเป็นหมอนวดจำเป็นจะต้องเรียนรู้ถึงสรีรศาสตร์ก็คือ จุดต่างๆของร่างกาย การเรียนรู้หัตถศาสตร์การใช้มือวางบนเส้นนวดให้ถูกจุด

### ภาคปฏิบัติการนวดเส้น

1. นวดให้ถูกเส้น
2. ที่นวดหรือการนวดต้องนุ่ม ไม่แข็งกระด้างจนเกินไป
3. การนวดถ้าให้ได้ผลดีควรนวดในตอนเช้าและไม่ควรกินอาหารจนแน่นเกินไป
4. การเริ่มนวด ควรเริ่มใช้มือกดเบาๆก่อน เพื่อไล่ความตึงเครียดของเส้นเอ็น

เลือดลมในร่างกายให้ปรับตัว

### เส้นประธานในร่างกายมี 10 เส้น

ความเจ็บป่วยของมนุษย์ที่เกิดจาก เส้นเอ็นระบบเลือดของคนเราที่เริ่มมีอายุมากขึ้น มีคำศัพท์ในภาษาบาลีและสันสกฤตเรียกว่า “**จตุรพฤต**”

หมายถึงครกที่เกิดจากธาตุทั้ง 4 คือ ระบบเลือดลมในร่างกายสาเหตุมาจาก เส้นใหญ่ทั้ง 10 เส้น ดึงจะทำให้มีอาการ เจ็บปวดเพราะเลือดลมไหลผ่านไม่สะดวก เส้นเอ็นใหญ่และเส้นเอ็นเล็กจะมีลักษณะเป็นรูให้เลือดลมไหลผ่านถ้ามีอาการเจ็บป่วยจะทำให้เกิดความรุ่มร้อนเป็นทุกข์ หงุดหงิดถ้าเลือดลมเดินดีจะทำให้สุขสบายจิตใจ

เส้นเอ็นใหญ่ที่สำคัญทั้ง 10 เส้น เรียกเป็นคำศัพท์ในภาษาบาลีสันสกฤต ตามภาษาศาสตร์พื้นฐานตามภาษาไทยยุคแรก จากเอ็นใหญ่ 10 เส้น จะแยกเป็ๆเส้น โลหิตฝอยทั่วร่างกายอีก 2, 700 เส้น เหมือนกับเส้นสายไฟรับข้อมูลสั่งการในระบบคอมพิวเตอร์และเอ็นใหญ่ทั้ง 10 เส้นเรียกว่า

1. **เส้นอิทา** เรียกว่า **เอ็นซ้าย** จากท้องใต้สะดือ ไปจรดหัวหน้าเลขลงไปทางต้นขาเบื้องซ้ายขึ้นไปตามเส้นหลังแบบไปตามกระดูกเบื้องซ้ายถึงศีรษะลงมาที่จมูกซ้ายเป็นหลายเส้น
2. **เส้นปิงคลา** เรียกว่า **เอ็นขวา** จากกลางสะดือไปยังหัวหน้าขวา วกขึ้นบน ผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระดุกสั้นหิ้งขวผ่านศรีสะเกกลับลงมาข้างหน้าสุดที่จมูกขวาและเอ็นซ้ายจะเรียกว่า เส้นลมหายใจ จากจมูกผ่านศรีษะลงสั้นหลังเข้าสู่ท้องก็ได้ ฉะนั้น การนวดไล่เลือดลมให้วิ่งไปตามจุดต่างๆนั้นจึง มีความสำคัญทั้งหมด

3. **เส้นตุมมา เรียกว่า เอ็นลิ้น** จากท่อนบนบนเหนือสะดือ ผ่านทรวงอก ขึ้นไปตาม ลำคอจรดปลายลิ้นหรือจะเรียกเอ็นส่งอาหารลงท้องอาหารจะอร่อยหรือไม่อร่อยลิ้นจะเป็นผู้สัมผัสรสชาตินั้นก่อนท้องจะรองรับทำหน้าที่ย่อยวิตามิน โปรตีนและธาตุต่างๆส่งไปเลี้ยงตับ ไต หัวใจ เส้นเอ็น ต่อไป

4. **เส้นกาะทารี เรียกว่า เอ็นขา** เอ็นแขนจากท้อง4เส้นแยกออกเป็นสองทางๆละ 2เส้น ไปตามราวนมทั้งซ้ายและขวา ตลอดใต้รักแร้ ไปตามแขนจรดปลายนิ้วมือทั้ง 2 ข้าง ไปสิ้นสุดที่ ปลายนิ้วเท้าทั้ง 10 นิ้ว

5. **เส้นหัตถังยี เรียกว่า เอ็นตาซ้าย** จากท้องไปจรดปลายเท้าซ้าย แล้วย้อนขึ้นบน ผ่านหน้าแข้งผ่านหน้าขาหน้าท้องผ่านหัวนมซ้ายขึ้นไปใต้คาง ต่อไปยังรากในตาซ้าย

6. **เส้นทวารี เรียกว่า เอ็นตาขวา** จากท้องไปจรดปลายเท้าขวา แล้วย้อนขึ้นบน ผ่านหน้าแข้งผ่านหน้าขาหน้าท้องผ่านหัวนมขวาขึ้นไปใต้คาง ต่อไปยังรากในตาขวา

7. **เส้นจันทภูงัง เรียกว่า เอ็นหูซ้าย** จากท้องขึ้นบนไปตามราวนมซ้ายไปจรด ปลายหูซ้าย

8. **เส้นรุทัง เรียกว่า เอ็นหูขวา** จากท้องขึ้นบนไปตามราวนมขวาไปจรดปลายหู ขวา

9. **เส้นสิจินี เรียกว่า เอ็นทวาร** จากท้องลงด้านข้างเบื้องหน้า ไปจรดที่ทวารหนัก และทวารเบา

10. **เส้นตุษุมัง เรียกว่า เอ็นเพศ** จากท้องไปทางหัวหน้าทั้ง 2 ข้าง และกลาง ข้างล่างจะจรดปลายลำองคค์ชาติ ถ้าเป็นหญิงก็จะจรดปลายเม็ดมณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

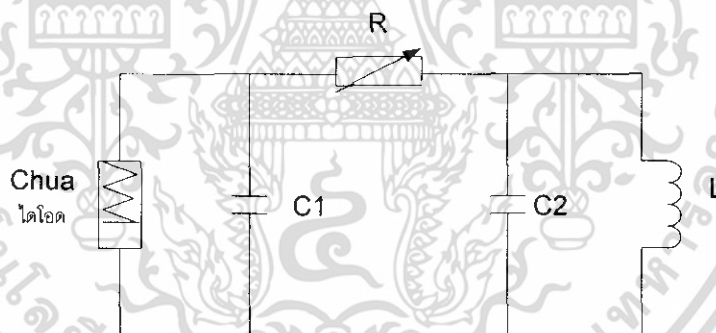
### บทที่ 3

## วงจรที่สร้างขึ้น

จากทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน เพื่อที่จะนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของการนำสัญญาณมาขับมอเตอร์ ดังนั้นเราได้มีการจัดทำวงจรขึ้นดังต่อไปนี้

#### 3.1 วงจร Chua

จากวง Chua แบบปรกติยังซับซ้อนไม่เพียงพอ ดังนั้นเทคนิคแรกที่จะนำเสนอคือ การใช้เทคนิคการเชื่อมต่อวงจร (Amplifier) ตามรูปข้างล่าง โดยที่เราจะทำการนำสัญญาณอลวนนั้นเป็นตัวที่จะกำหนดอัตราการหมุนของมอเตอร์ละเป็นสัญญาณที่ไม่คงที่โดยวงจรขยายจะขยายสัญญาณอลวน (Chua) ให้มีขนาดของความถี่ที่พอดีกับแรงของมอเตอร์ที่เราต้องการ ในการปรับค่าของสัญญาณอลวนนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าของตัวความต้านทานปรับค่าได้ที่เราต้องการเท่าไรในการขับมอเตอร์ในลักษณะทิศทางไหน

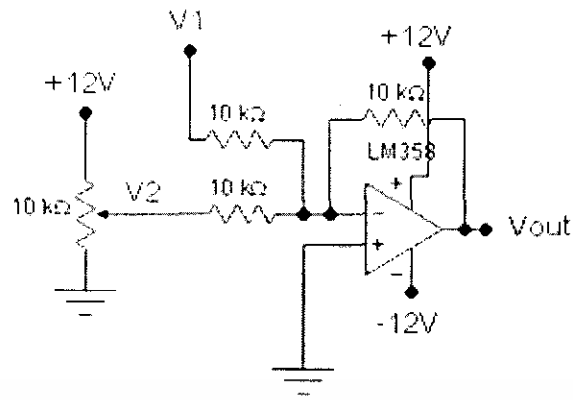


รูปที่ 3.1 วงจร Chua ใช้ในการทดลอง

#### 3.2 วงจร Summing Amplifier

ในการทำวงจร Summing Amplifier เพื่อที่จะยก ระดับสัญญาณจากวงจร Chua ให้มาอยู่ด้านบวกเพราะถ้าหากสัญญาณที่ป้อนให้กับมอเตอร์มีทั้งด้านบวกและลบนั้น ถ้าสัญญาณไม่ผ่านวงจร Summing Amplifier ก่อนที่จะเข้าสู่วงจร Drive Motor นั้นมอเตอร์ก็จะหมุนแล้วหยุดบางขณะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



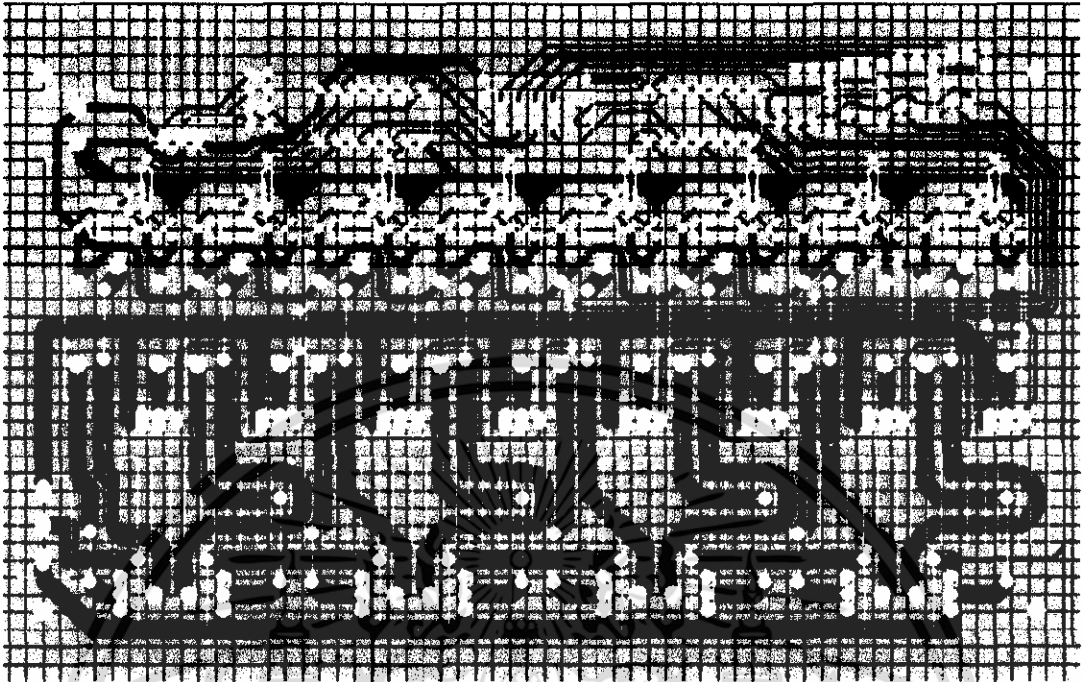
**รูปที่ 3.2** วงจร Summing Amplifier

เป็นวงจรที่ใช้รวม  $V_1$  และ  $V_2$  เข้าด้วยกัน จากสูตร

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_i} (V_1 + V_2)$$

$V_1$  เป็นแรงดันที่ได้จากวงจร Buffer,  $V_2$  เป็นแรงดันที่จะใช้รวมแรงดันกับ  $V_1$  เพื่อให้ได้  $V_{out}$  ตามที่ต้องการ แต่  $V_{out}$  จะให้แรงดันออกมาเป็นลบ ดังนั้นจึงต้องกลับสัญญาณอีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้สัญญาณเป็นบวก โดยใช้วงจร Inverting Amplifier

### 3.3 PCB Drive Motor



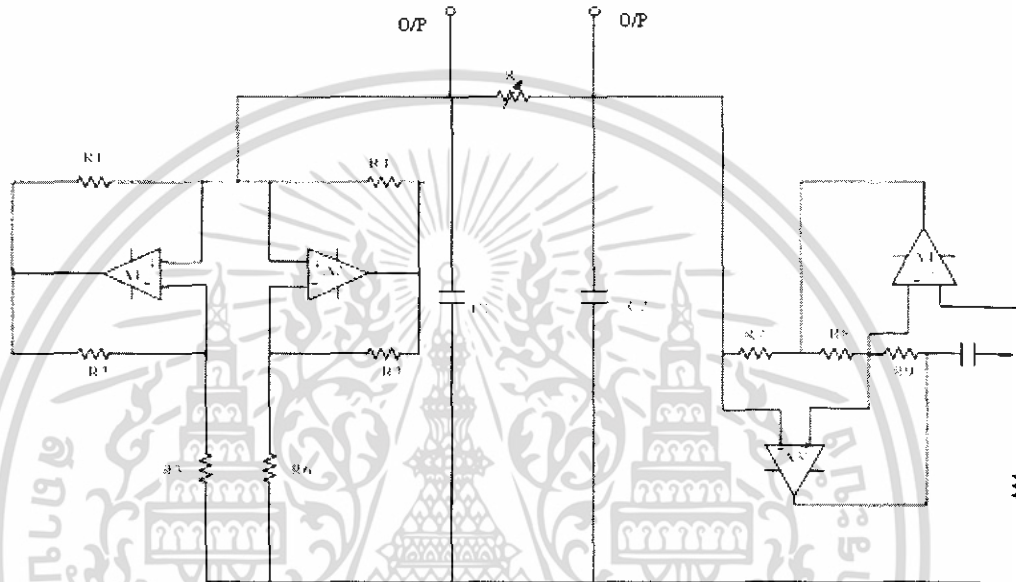
รูปที่ 3.3 PCB Layout Drive Motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจร Chua

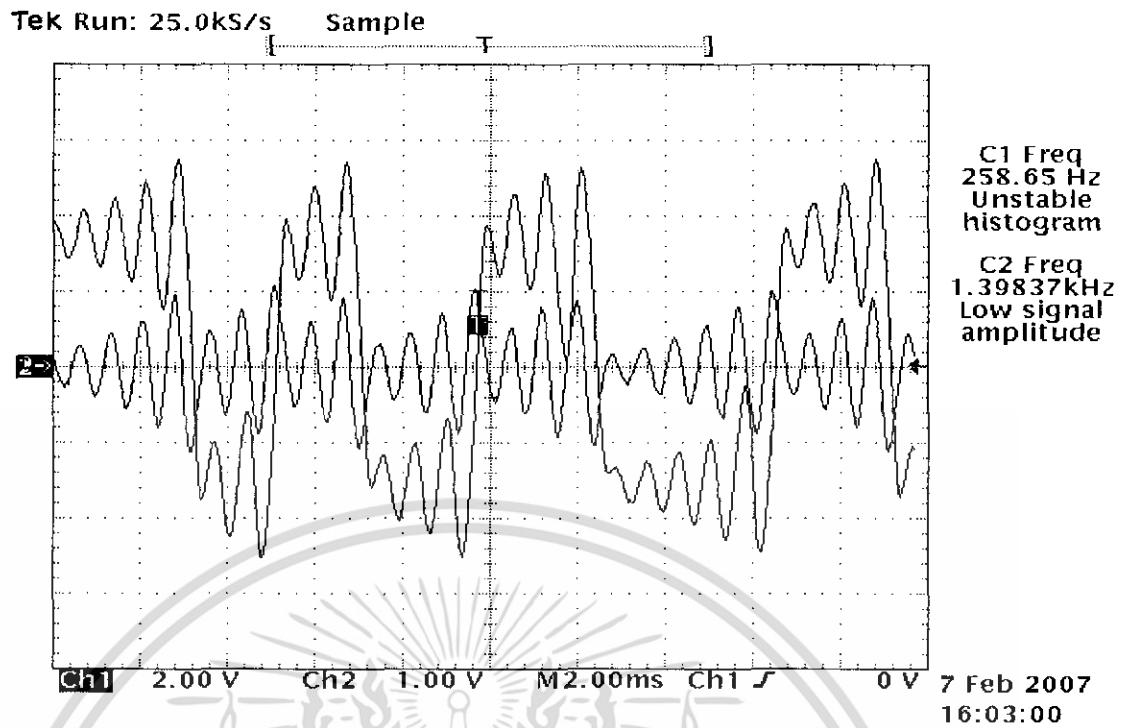


รูปที่ 4.1 วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบความถี่ต่ำที่ใช้ในการทดลอง

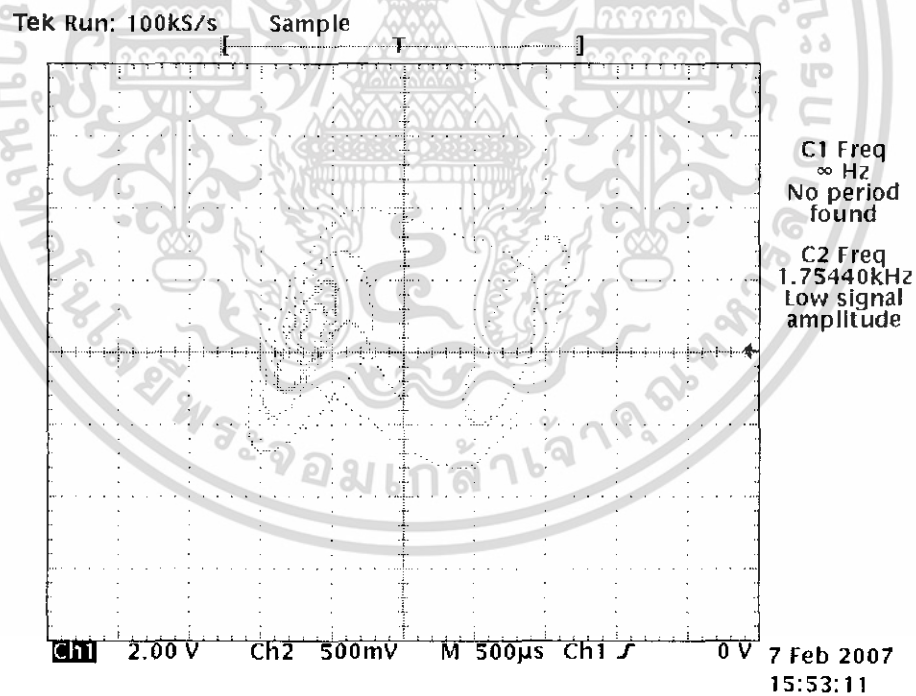
4.1.1 เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวงจรในรูป 4.1 เป็นดังนี้

$R1 = 220 \Omega$ ,  $R2 = 220 \Omega$ ,  $R3 = 2.2 \text{ k}\Omega$ ,  $R4 = 22 \text{ k}\Omega$ ,  $R5 = 22 \text{ k}\Omega$ ,  $R6 = 3.3 \text{ k}\Omega$ ,  $R7 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  
 $R8 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R9 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R10 = 1.8 \text{ k}\Omega$ ,  $C1 = 22 \mu\text{F}$ ,  $C2 = 220 \mu\text{F}$  และ  $C3 = 22 \mu\text{F}$  จะได้ผล  
จำลองสัญญาณจาก ออสซิลโลสโคป ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ผลการทดลอง 4.1.1

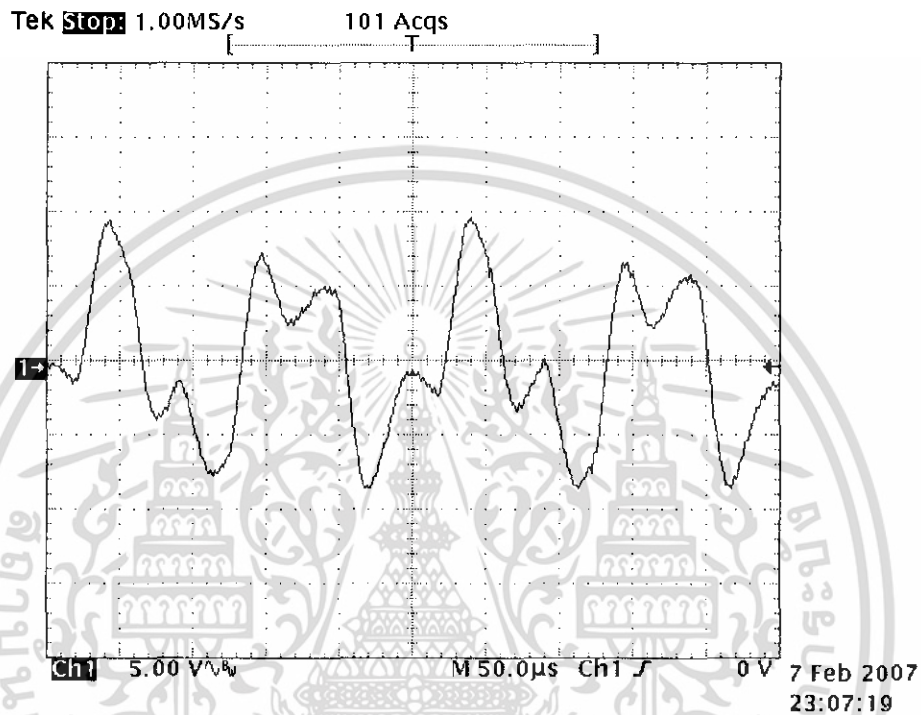


รูปที่ 4.3 ผลการทดลอง 4.1.1 ในแกน X และแกน Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

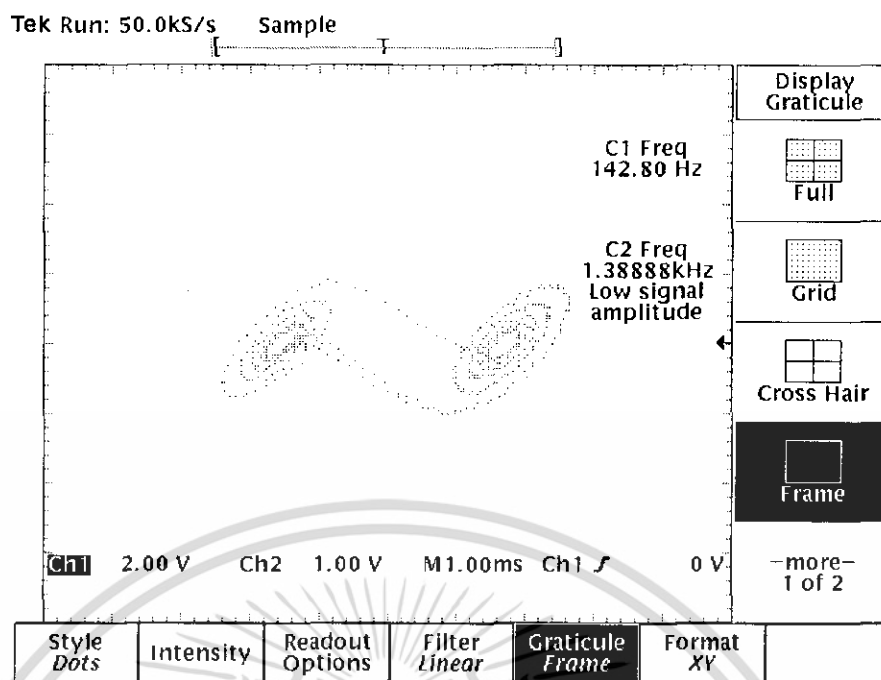
4.1.2 เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวงจรในรูป 4.1 เป็นดังนี้

$R_1 = 220 \Omega$ ,  $R_2 = 220 \Omega$ ,  $R_3 = 2.2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_4 = 22 \text{ k}\Omega$ ,  $R_5 = 22 \text{ k}\Omega$ ,  $R_6 = 3.3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_7 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  
 $R_8 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_9 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{10} = 1.8 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 22 \text{ pF}$ ,  $C_2 = 2.2 \mu\text{F}$  และ  $C_3 = 22 \mu\text{F}$  จะ ได้ผล  
 จำลองสัญญาณจาก ออสซิลโลสโคป ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 ผลการทดลอง 4.1.2

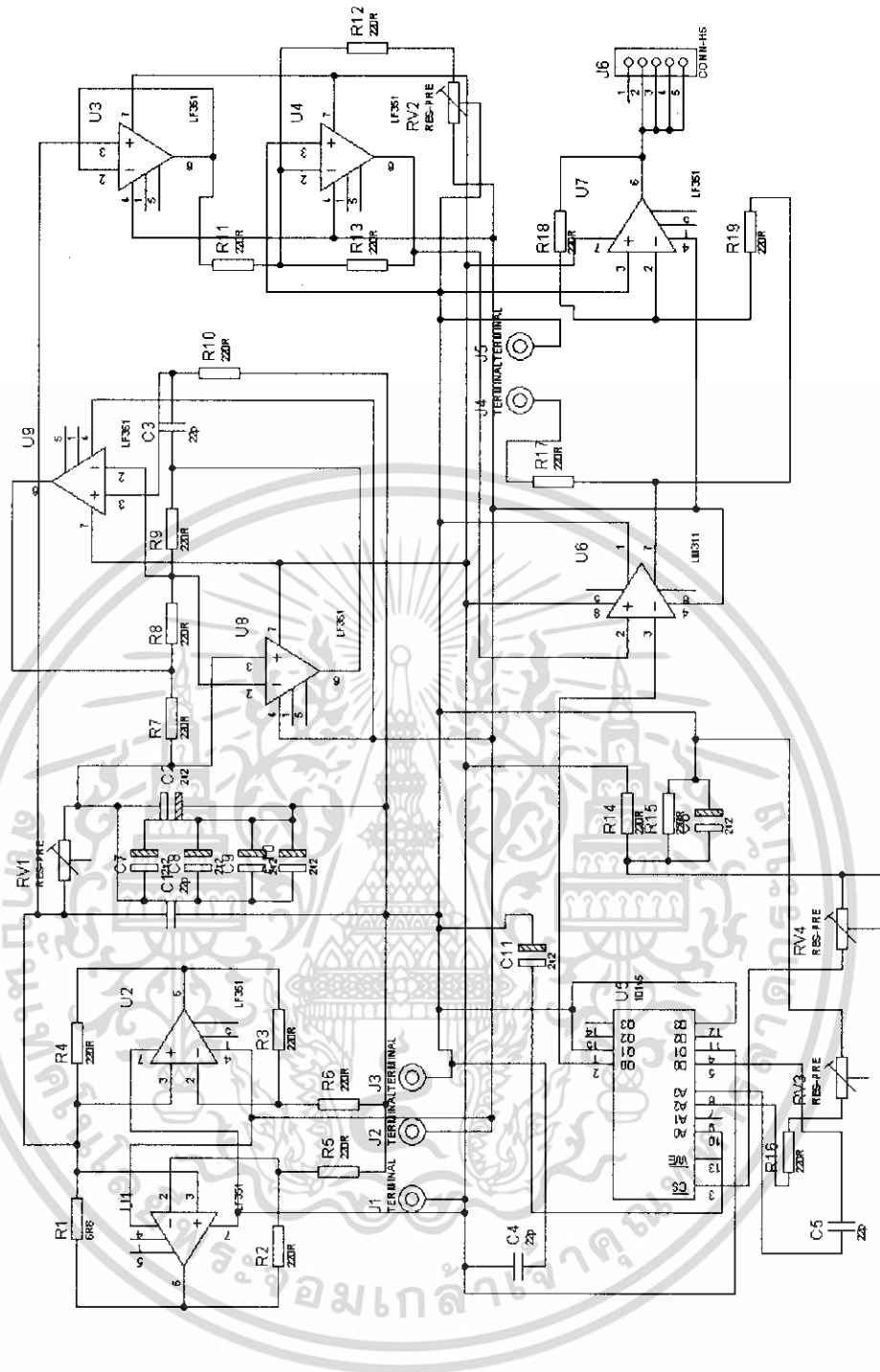
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ผลการทดลอง 4.1.2 ในแกน X และแกน Y

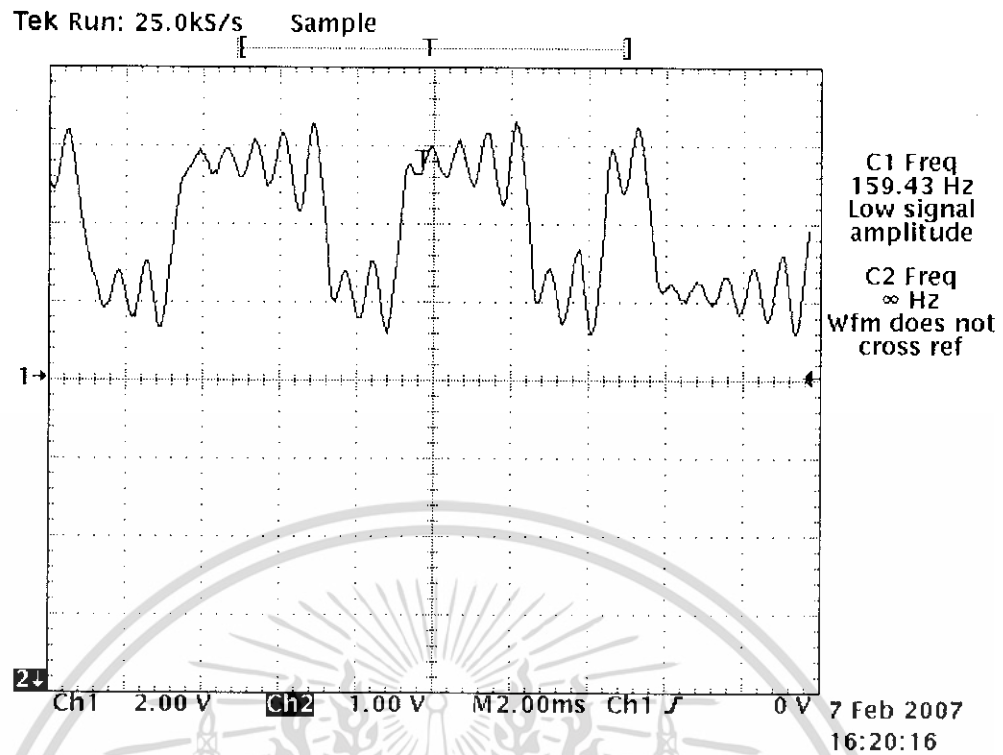
#### 4.2 วงจรที่ใช้ในการปรับสัญญาณเข้าวงจร Drive Motor

จากวงจรเคออสที่ได้สัญญาณออกมา ซึ่งสัญญาณที่ได้ออกมาไม่สามารถที่จะนำเอาไปขับมอเตอร์โดยตรงได้ เพราะมอเตอร์ต้องการสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมในการนำเอาไปขับมอเตอร์ให้หมุนได้ ดังนั้นจึงได้นำเอาวงจร Drive Motor มาปรับเปลี่ยนสัญญาณให้เป็นคลื่นสี่เหลี่ยมแต่สัญญาณเคออส จะมีอยู่สองค่าคือค่าบวกและค่าลบแต่ในที่นี้ต้องการเฉพาะค่าบวกเท่านั้นเลย ได้นำวงจรรวมสัญญาณ (Summing Amplifier) มาใช้เพื่อที่จะให้สัญญาณที่ได้นั้นอยู่เฉพาะฝั่งบวกเพื่อที่จะนำเอาไปเข้าวงจร Drive Motor ต่อไปดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 วงจรที่ใช้ในการปรับสัญญาณเข้าวงจร Drive Motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 สัญญาณที่ขั้วระดับเป็นบวก

### 4.3 ผลการทดลองเรื่องวงจรรขยายสัญญาณออสวน

#### วัตถุประสงค์

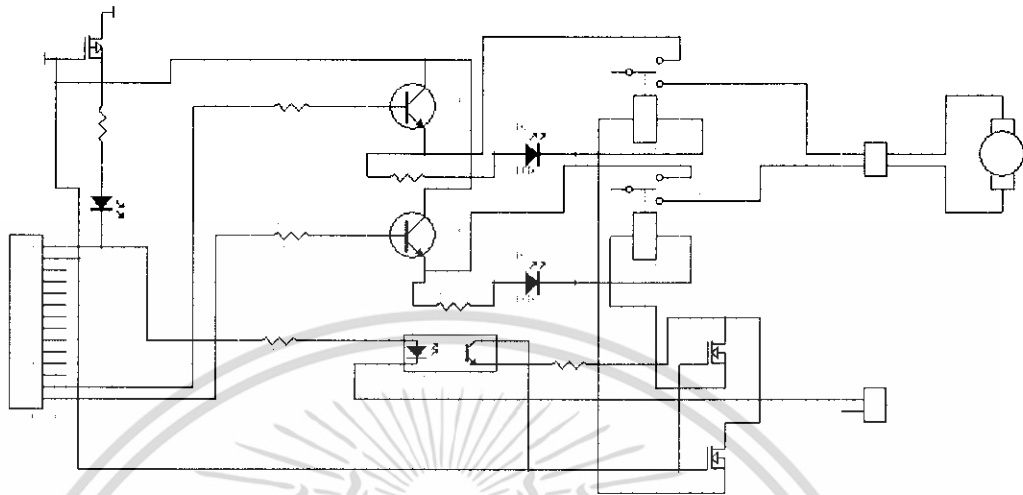
เพื่อศึกษาหลักการควบคุม และวงจรรขยายเพื่อนำไปขับมอเตอร์กระแสตรง  
อุปกรณ์

1. มอเตอร์กระแสตรง
2. แหล่งจ่ายแรงดัน +12V, -12V
3. IC LF 351
4. R, C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิธีการทดลอง

1. ต่อวงจรดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.8 Drive Motor

2. เปิดสวิตช์จ่ายไฟให้กับวงจร ปรับให้  $V_{in} = 0$  volt วัดค่า  $V_{out}$
3. ปรับ  $V_{in}$  ให้เป็น + และ - สลับกันหลายๆค่า วัด  $V_{out}$  และบันทึกผลที่ถูกต้อง

บันทึกผลการทดลอง

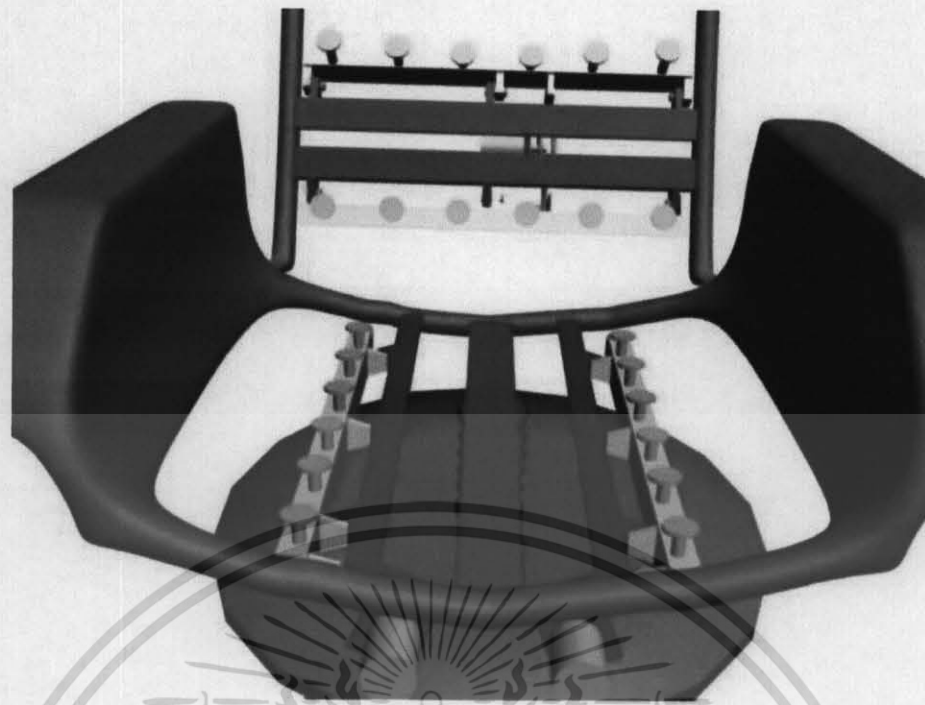
- จากวัดทดลองในข้อ 2.  $V_{out} = 0$  V
- จากวิธีการทดลองในข้อ 3.

ตารางแสดงการทดลองวงจรขยายกับมอเตอร์

$V_m$ (volt)	$V_{out}$ (volt)	ผลที่เกิดขึ้น
12	10.5	มอเตอร์หมุน
10	10	มอเตอร์หมุน
8	8	มอเตอร์หมุน
6	6	มอเตอร์หมุน
4	4	มอเตอร์หมุน
0	2	มอเตอร์หมุน
0	5, -8	ความเร็วไม่คงที่
-2	5, -8	ความเร็วไม่คงที่
-4		เกิดการกระตุก
-6	-6.6	มอเตอร์หมุน
-8	-8.8	มอเตอร์หมุน
-10	-10	มอเตอร์หมุน
-12	-12.5	มอเตอร์หมุน

#### 4.4 ชุดตัวนำ

ได้พัฒนาจากเก๊าอิฐรวมคาปคิตีให้สามารถนวดได้ซึ่งลักษณะการนวดจะนวดแบบการกดจุดโดยแบ่งออกเป็น 2 จุดใหญ่ๆด้วยกันที่สามารถติดตั้งตัวนำหรือออกแบบในการสร้างชุดนวดแล้วนำไปติดตั้งที่เก๊าอิฐ คือ ส่วนหลังและส่วนที่เป็นที่นั่ง และในแต่ละส่วนได้ทำการแบ่งออกเป็นส่วนละ 2 ชุดนวดเพื่อที่จะให้หัวนวดได้โดนกล้ามเนื้อในส่วนที่คนเราใช้งานมากๆ ก็คือกล้ามเนื้อส่วนหลังและบริเวณต้นขา

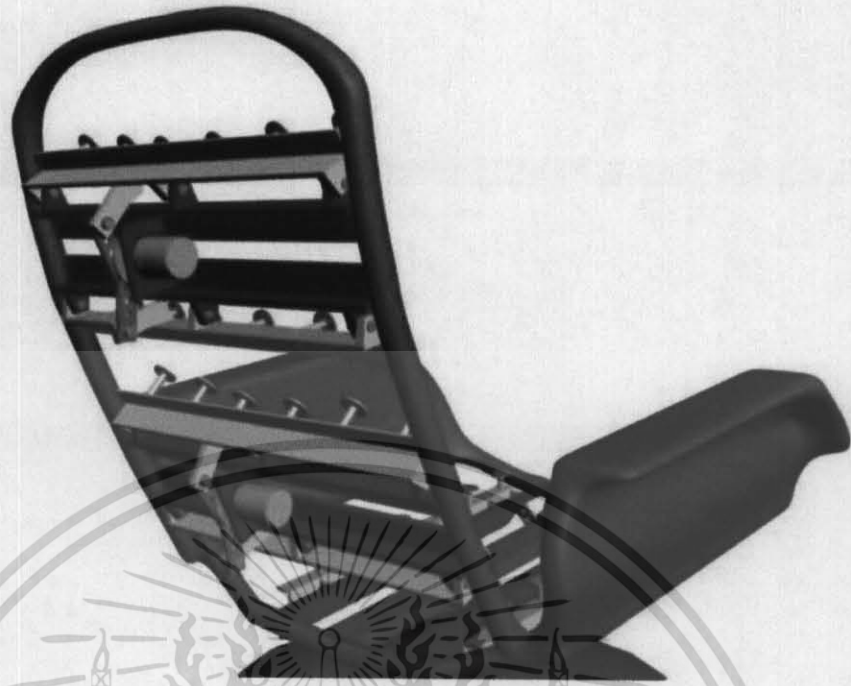


รูปที่ 4.9 ซุคนวดตรงส่วนนั่ง

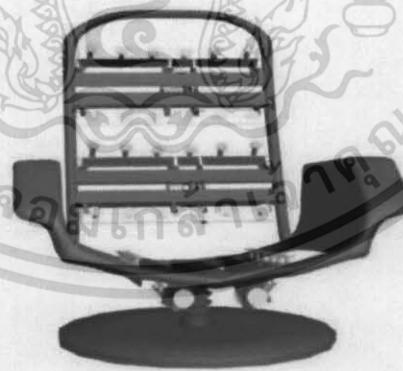


รูปที่ 4.10 ลักษณะด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

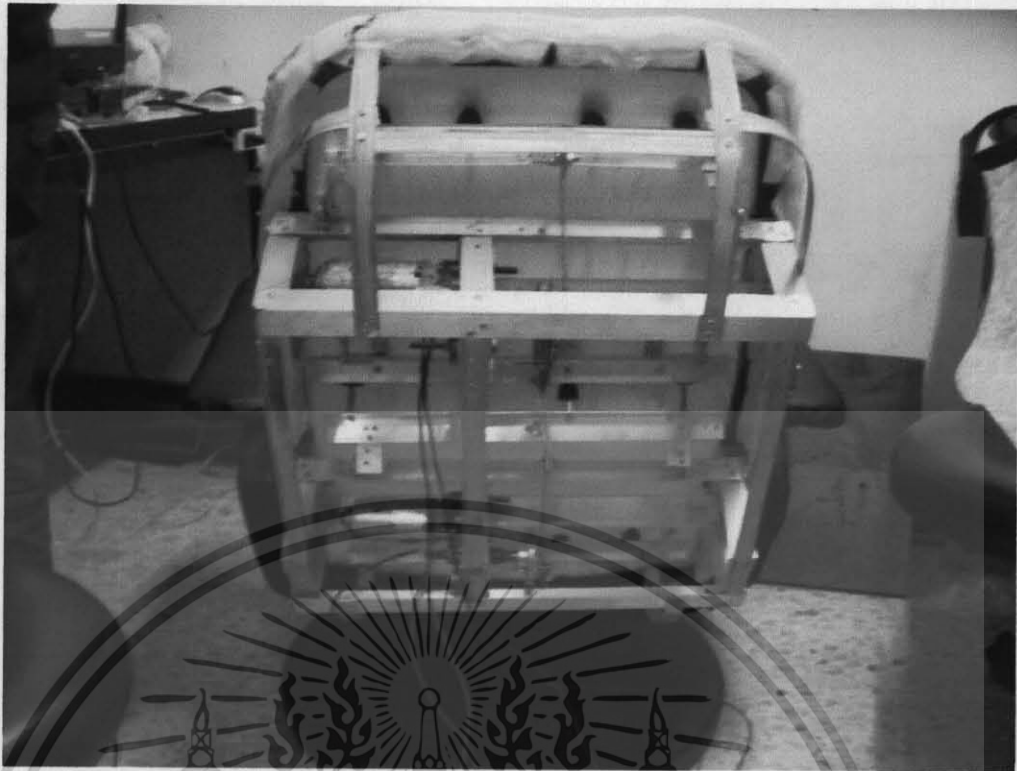


รูปที่ 4.11 ชุดนวดตรงส่วนหลัง

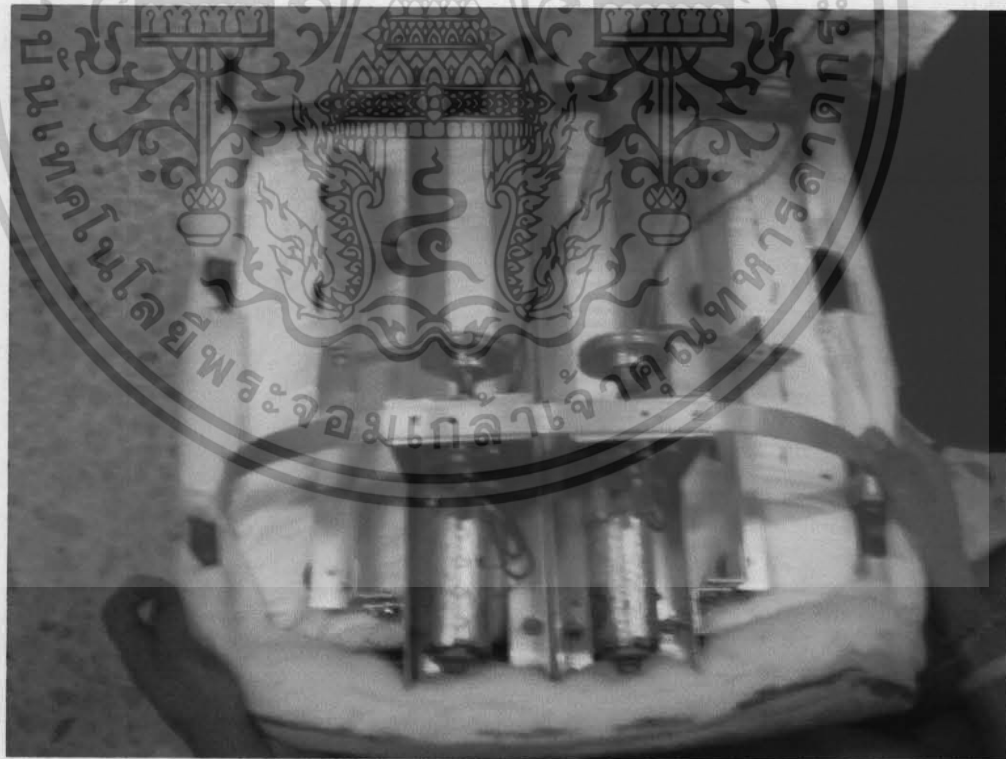


รูปที่ 4.12 ลักษณะทั้งตัวของเก้าอี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

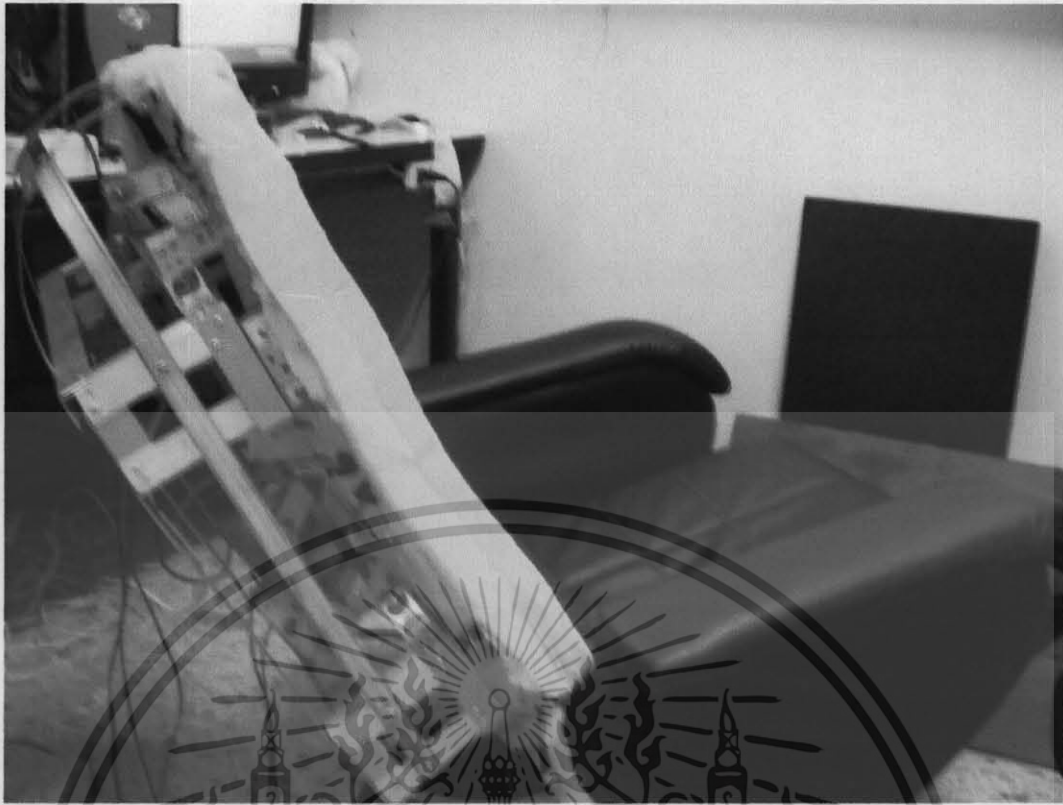


รูปที่ 4.13 ชุดตัวนวดจริงส่วนหลัง



รูปที่ 4.10 ชุดนวดจริงส่วนที่นั่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ลักษณะจริงด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลที่ได้

#### 5.1 สรุปผลการทดลองจากวงจร Chua

โครงการนี้เป็นการออกแบบและสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันซึ่งได้มีการสร้างสัญญาณออสซิลเลชัน

จากผลการทดลอง Chua สรุปได้ว่า สัญญาณออสซิลเลชันที่สร้างจากวงจร Chua นั้นจะแปรตามค่าของอุปกรณ์ต่างๆในวงจรที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เชิงเส้น 4 ตัว (ในที่นี้เราใช้วิธีการสังเคราะห์ความเหนียวนำ (synthetic inductors)), ตัวต้านทานเชิงเส้น 1 ตัว และตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น 1 ตัว (Chua ไดโอด) ซึ่งถ้าต้องการปรับเปลี่ยนสัญญาณก็สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่าต่างๆ ตามสมการที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2

#### 5.2 สรุปผลการทดลองเรื่องวงจรมอดูเลเตอร์กระแสตรง

จากการที่ได้ทดลองวงจรมอดูเลเตอร์กระแสตรง ที่ได้ผ่านวงจรแอมพลิฟายเออร์เพื่อขยายสัญญาณ เมื่อเราได้ทำการปรับค่า  $V_m$  ให้เป็น + และ - สลับกันหลายๆค่าวัด  $V_{out}$  จากนั้นบันทึกผลที่ได้ โดยวัดเทียบค่าความต่างศักย์ของมอดูเลเตอร์กระแสตรงเทียบกับกราวด์ของวงจรปรากฏว่า วงจรมอดูเลเตอร์กระแสตรงนั้นเอาท์พุทจะมีอัตราขยายที่ดีในช่วงที่ความต่างศักย์ต่ำเท่านั้น แต่ในช่วงที่ใช้ความต่างศักย์สูงๆนั้นจะมีอัตราขยายความต่างศักย์ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

จากนั้นเมื่อเราทำการต่อค่าความต้านทานเข้ากับ feedback แล้วทำให้เป็น non-inverting Amplifier จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าเราสามารถปรับค่าอัตราขยายได้ตามที่เราต้องการตามสมการของ Non-inverting Amplifier ที่เราได้กล่าวมาข้างต้นในบทที่ 2 และเมื่อนำทรานซิสเตอร์มาต่อ จะช่วยให้วงจรแอมพลิฟายเออร์สามารถขยายกระแสได้ดีขึ้นและมากยิ่งขึ้นเนื่องจากจะทำให้ทรานซิสเตอร์จะมาช่วยในการขยายกระแส

### 5.3 สรุปผลการทดลองเมื่อนำสัญญาณอลวนไปจับมอเตอร์กระแสตรง

จากการทดลองสรุปได้ว่า เมื่อนำสัญญาณที่สร้างจากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบความถี่ต่ำสามารถขยายสัญญาณซึ่งทำให้ตัวควบคุมสามารถวัดได้แต่เนื่องจากวงจขยายที่ทำมาใช้มีอัตราขยายมากไม่พอ อีกทั้งวงจขยายไม่สามารถตอบสนองสัญญาณอลวนได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นลักษณะการหมุนของมอเตอร์ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ

### 5.4 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลอง

ในการสร้างวงจกำเนิดสัญญาณอลวน ปัญหาที่พบโดยทั่วไปคือ ถ้าเราเอาค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทฤษฎี มาทำการปรับแต่งให้กับอุปกรณ์แล้วสัญญาณที่ได้ไม่ตรงตามทฤษฎี เป็นเพราะค่าอุปกรณ์ต่างๆ มีค่าความผิดพลาดอยู่ในตัวอุปกรณ์นั้นๆ อยู่แล้วภายใน และสัญญาณอลวนเป็นสัญญาณที่มีความละเอียดอ่อนมากในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับวงจร เพราะถ้าเราทำการปรับค่าพารามิเตอร์เพียงเล็กน้อยก็จะทำให้รูปแบบของสัญญาณเปลี่ยนแปลงไม่ออกมาตามทฤษฎี ต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่

อีกทั้งวงจขยายที่เรานำมาใช้ขยายสัญญาณอลวนนั้น ไม่สามารถขยายสัญญาณออกมาได้เกินค่าความต่างศักย์ที่ต่อเลี้ยงให้กับวงจขยาย ดังนั้นทำให้มีขอบเขตในการขยายสัญญาณอลวน ทำให้สัญญาณที่ได้จากวงจขยายสัญญาณอลวนไม่แรงพอที่จะไปจับมอเตอร์กระแสตรงได้และเนื่องจากสัญญาณอลวนเป็นสัญญาณที่ละเอียดและซับซ้อนสูงทำให้มอเตอร์กระแสตรงไม่สามารถตอบสนองต่อสัญญาณได้ดีพอ

### 5.5 แนวทางการพัฒนา

จากการที่ได้สร้างวงจสัญญาณอลวนและได้ทดลองกับมอเตอร์ ทำให้เห็นได้ว่าสัญญาณอลวนมีประโยชน์ในหลายด้านมากถ้าได้นำมาประยุกต์ใช้ ทั้งทางด้าน ทั้งทางด้านอุตสาหกรรมแบบต่างๆ ทางด้านการพาณิชย์

## บรรณานุกรม

1. Vasudev K Aatre, **Network Theory and Filter Design**, Wiley Eastem Limited, New Delhi Bombay Calcutta, 1983.
2. Rabinder N. Madan, **Chua's Circuit, A Paradigm for CHAOS**, World Scaientific series on nonlinear science, 1993.
3. Sundaram Natarajan, **Theory and Design of linear active networks**, McGrawhill Book Company, 1989.
4. Wai-Kai Chen, **Passive and Active Filters theory and implementations**, John Willy & Sons, 1986.
5. รศ.ดร โยธิน เปรมปราณีรัชต์, **วิเคราะห์และออกแบบระบบการควบคุมมอเตอร์**.
6. นาย วีระเดช พาณิชยวิสัย และ นาย อัคร ใจยงค์. 2547. “หุ่นยนต์ออสวนสำหรับงานภาคสนาม”, **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**.
7. วิสันต์ ท้าวสูงเนิน. 2540. **คัมภีร์แนวคิดแผนโบราณ**. สุพรรณบุรี: วีทีเอส.