

วจรรองความถี่แบบโหมตโวลเตจและโหมตกระแสด้วย CCCII  
VOLTAGE AND CURRENT FILTER USING CCCII



เลขหมึก.....  
เลขทะเบียน.....42350  
วัน, เดือน, ปี 17 พ.ศ. 2545

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

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญาบัตร

โดย	นางสาว โปทมา สุวรรณ
	นาย สุวัฒน์ สายกระชับ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. กนก เจนจิระพงศ์เวช
ภาควิชา	เทคนิคอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2543

คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 อนุมัติให้ปริญญาบัตรฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอุตสาหกรรม  
 ศาสตร์บัณฑิต

คณะกรรมการสอบปริญญาบัตร



- ( ) ประธานกรรมการ
- ( ) กรรมการ
- ( ) กรรมการ
- ( ) กรรมการ
- ( ) กรรมการ
- ( ) กรรมการ
- ( ) กรรมการ
- ( ) กรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วงจรรองความถี่แบบโหมดโวลเตจ และ โหมดกระแสด้วย CCCII

โดย นางสาวปัทมา สุบรรณ  
 นายสุวัฒน์ สายกระชัย  
 อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. กนก เจนจิระพงศ์เวช  
 ปีการศึกษา 2543

### บทคัดย่อ

ปริณญาานิพนธ์ฉบับนี้แนะนำเสนอวิธีการประยุกต์ใช้งานวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแสซึ่งเป็นอุปกรณ์ประเภท 3 ขั้ว ที่สามารถทำงานได้สองโหมดการทำงาน กล่าวคือ โหมดกระแสเป็นการจ่ายสัญญาณเข้าเป็นกระแสและได้สัญญาณออกเป็นกระแสส่วนในโหมดแรงดันเป็นการจ่ายสัญญาณเข้าเป็นแรงดันและได้สัญญาณออกเป็นแรงดัน วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแสนี้ให้ผลตอบสนองทางความถี่กว้างสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในวงจรประเภทความถี่สูงได้ การประยุกต์ใช้งานที่ได้แนะนำในปริณญาานิพนธ์ฉบับนี้ คือ วงจรรองความถี่และวงจรรีควอล์ไลน์เซอร์ที่ได้จากการประยุกต์ของวงจรรองความถี่ที่ได้ออกแบบในโหมดแรงดัน โดยวงจรทั้งสองมีข้อดีคือสามารถปรับค่าความต้านทานภายในได้โดยกระแสไบอัสของวงจร นอกจากนี้วงจรที่แนะนำยังไม่ยุ่งยากและไม่มีความซับซ้อนของวงจรซึ่งประกอบขึ้นจากวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส และตัวเก็บประจุเท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีความเหมาะสมในการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้โดยง่ายอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## VOLTAGE AND CURRENT MODE FILTER USING CCCII

**By** Miss. Pattama subun  
Mr. Suwat Saykrasib  
**Avisor** Associate.Prof.Dr.Kanok Jenchitrapongvej  
**Year** 2000

### ABSTRACT

This project describes the applications of current controlled conveyor circuit (CCCII). Which has 3- terminals. CCCII has two mode of applications that is current mode and voltage mode. The circuit response can be applied for a high – frequency purposed. Hence, the applications of this project are filter and equalizer circuit by using voltage mode and current mode. Both circuits have advantage that can be adjusted the internal resistance by control the current bias. Furthermore, it own these circuit employ few CCCIIS and capacitors, hence they are suitable for monolithic implementation in IC technology.

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ รศ.ดร.กนก เจนจิระพงษ์เวช ที่ให้คำแนะนำในการทำปริญญานิพนธ์ให้คำปรึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการทำปริญญานิพนธ์ในสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีและบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับปริญญานิพนธ์ที่ได้กล่าวนามในที่นี้ด้วยที่ลืมไม่ได้ก็คือบิดามารดาที่ให้การสนับสนุนการศึกษาตลอดมา

ขอขอบพระคุณอย่างสูง

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์	2
1.2 เนื้อหาปริญญาานิพนธ์	2
1.3 ประโยชน์ที่จะได้รับจากปริญญาานิพนธ์	3
บทที่ 2 วงจรสายพานกระแสร่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส	4
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 วงจรสายพานกระแสร่นที่หนึ่ง	5
2.3 วงจรสายพานกระแสร่นที่สอง	6
2.4 วงจรสายพานกระแสร่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส	7
2.5 หลักการทรานสลิเนียร์	11
2.6 วงจรสะท้อนกระแส	15
2.7 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายในของวงจร CCCII	18
บทที่ 3 หลักการทั่วไปของวงจรกรองความถี่	22
3.1 กล่าวนำ	22
3.2 หลักการทั่วไปของวงจรกรองความถี่	22
3.3 รูปแบบสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่แบบไบควอด	27
3.4 ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับอิลควอลไลน์เซอร์	29
บทที่ 4 การออกแบบวงจรกรองความถี่ด้วย CCCII	32
4.1 วงจรกรองความถี่อันดับหนึ่ง (First Order)	32
4.2 วงจรกรองความถี่อันดับสอง (Second Order)	34
บทที่ 5 การจำลองการทำงานของวงจรด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	45
5.1 ผลการจำลองวงจรกรองความถี่แบบ โหมคแรงดัน	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ผลการจำลองวงจรกรองความถี่แบบโหมดกระแส	53
5.3 วงจรกรองความถี่แบบ โหมดกระแสแบบที่ 1	53
5.4 วงจรกรองความถี่แบบ โหมดกระแสแบบที่ 2	58
บทที่ 6 การประยุกต์	
6.1 พิจารณาด้านเสียงแหลมหรือด้านความถี่สูง	65
6.2 พิจารณาด้านเสียงทุ้มหรือด้านความถี่ต่ำ	67
6.3 ผลการจำลองการทำงานของวงจรอิกควอลไลเซอร์	70
บทสรุปและวิจารณ์ผล	77
บรรณานุกรม	78
ภาคผนวก	79
- ค่าพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน	80



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 บล็อกโคอะแกรมของวงจร CCI	5
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลย์ของวงจร CCII	6
รูปที่ 2.3 สัญลักษณ์ของวงจร CCII	7
รูปที่ 2.4 แสดงโคอะแกรมของวงจร CCCII แบบบวก (CCCII+)	8
รูปที่ 2.5 แสดงโคอะแกรมของวงจร CCCII แบบลบ (CCCII-)	9
รูปที่ 2.6 แสดงสัญลักษณ์ของวงจร CCCII	9
รูปที่ 2.7 แสดงวงจรสมมูลย์ของวงจร CCCII	10
รูปที่ 2.8 แสดงวงจรทรานสลิเนียร์ที่ประกอบอยู่ภายในของวงจร	12
รูปที่ 2.9 แสดงวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 2 ตัว	15
รูปที่ 2.10 แสดงองค์ประกอบของวงจร CCCII ในส่วนของขั้ว X และขั้ว Y	18
รูปที่ 3.1 ระบบของวงจรรองความถี่	22
รูปที่ 3.2 การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน ในอุดมคติ	25
รูปที่ 3.3 การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรรองความถี่แบบความถี่สูงผ่าน ในอุดมคติ	25
รูปที่ 3.4 การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน ในอุดมคติ	26
รูปที่ 3.5 การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรรองความถี่แบบแถบความถี่หยุด ในอุดมคติ	27
รูปที่ 3.6 วงจรปรับทูนแบบทั่วไปและกราฟแสดงคุณสมบัติของการปรับเพิ่ม-ลด	30
รูปที่ 3.7 วงจรปรับทูนแบบลดเสียงทูนได้มากและกราฟแสดงคุณสมบัติของการปรับเพิ่ม-ลด	30
รูปที่ 3.8 แสดงคุณสมบัติการปรับแต่งเสียงทูนและเสียงแหลมของวงจรอิกวอไลน์เซอร์ แบบแอ็คทีฟ	31
รูปที่ 4.1 วงจรรองความถี่โหมคแรงดัน	34
รูปที่ 4.2 วงจรรองความถี่โหมคกระแส(แบบที่ 1)	38
รูปที่ 4.3 วงจรรองความถี่โหมคกระแส(แบบที่ 2)	41
รูปที่ 5.1 วงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์ห้วงจรรองความถี่ในโหมคแรงดัน	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(CUT) ด้านความถี่สูง	72
รูปที่ 6.7 ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Pspice ของวงจรขยายขนาดของสัญญาณ (Boost) ด้านความถี่ต่ำ	74
รูปที่ 6.8 ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Pspice ของวงจรลดขนาดของสัญญาณ (CUT) ด้านความถี่ต่ำ	75
รูปที่ 6.9 ผลการจำลองการทำงานขอด้านความถี่สูงทั้งสองแบบ	76
รูปที่ 6.10 ผลการจำลองการทำงานขอด้านความถี่ต่ำทั้งสองแบบ	76



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

วงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง ( first generation current conveyor : CCI ) ได้ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกโดย A.S. Sedra และ K.C. Smith ในปี ค.ศ.1968และต่อมาก็ได้ปรับปรุงพัฒนางจรให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นและนำเสนอวงจรสายพานกระแสยุคที่สอง (second generation current conveyor : CCII ) ขึ้นในปี ค.ศ. 1970 ซึ่งได้พัฒนามาจกวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง จะเห็นได้ว่าวงจรไฟฟ้าทางด้านอนาล็อกในโหมดกระแส ( current mode ) เป็นวงจรที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายซึ่งจะพิจารณาได้จากผลงานวิจัยหลายผลงานที่การนำเสนอ วงจรต่างๆที่ทำงานในโหมดกระแสขึ้นและวงจร CCII นี้ก็ได้ใช้เป็นอุปกรณ์เบื้องต้นของผลงานวิจัยเหล่านั้น เช่น วงจรกำเนิดสัญญาณ ( oscillator ) วงจรกรองความถี่ (filter) หรือวงจรขยาย (amplifier) เป็นต้น ซึ่งบทความในลักษณะเช่นนี้ได้รับการตีพิมพ์อย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาที่ล่วงเลยผ่านมา ทั้งนี้ก็เนื่องจากความคล่องตัวและความสามารถในการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายของวงจร CCII วงจร CCII จึงได้รับการยอมรับเป็นวงจรแอคทีฟ ( active ) รุ่นใหม่ทั้งในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติอย่างรวดเร็ว มูลเหตุของใจหลักอีกประการหนึ่งที่ทำให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานในโหมดกระแสนี้ได้รับความนิยมก็คือ ข้อดีของวงจรในด้านความถูกต้องแม่นยำของค่าอัตราขยายสัญญาณ (gain) และมีย่านความถี่ในการทำงานของวงจรที่ใช้ได้กว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรประเภทเดียวกันที่ทำงานในโหมดแรงดัน (voltage mode )

ต่อมาเมื่อไม่นานมานี้ในปี ค.ศ. 1995 ได้มีการนำเสนอวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส (second generation current controlled conveyor: CCCII) ขึ้นโดยกลุ่มบุคคลอันได้แก่ A.Fabre,O. Saaid,F.Wiest, และ C. Boucheron ซึ่งเป็นวงจรที่ได้รับการปรับปรุงจากวงจร CCII เดิมโดยมีการพิจารณาถึงความสำคัญของคุณลักษณะด้านทานภายในที่เกิดขึ้นของวงจรเข้ามาเกี่ยวข้องกับวงจร CCCII นี้มีข้อดีที่น่าสนใจอย่างหนึ่งคือความต้านทานภายในนั้นสามารถปรับค่าได้โดยใช้กระแสไบอัสของวงจรเข้ามาควบคุม ทำให้วงจร CCCII สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้หลายรูปแบบโดยไม่จำเป็นต้องมีการใช้ความต้านทานจากภายนอก จากข้อดีของวงจรในโหมดกระแสและข้อดีของวงจรกระแส CCCII ที่กล่าวมาข้างต้นจึงเป็นเหตุจูงใจให้ผู้เขียนคิดทำการวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานของวงจร CCCII ขึ้นซึ่งเป็นเหตุทำให้เกิดวงจรที่นำเสนอเป็นเรื่องหลักในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้คือเป็นเรื่องเกี่ยวกับการพัฒนางจรกรองความถี่และวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหตุทำให้เกิดวงจรที่นำเสนอเป็นเรื่องหลักในปฏิญญาฉบับนี้คือเป็นเรื่องเกี่ยวกับการพัฒนา วงจรกรองความถี่และวงจรอิกวอไลน์เซอร์ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ โดยวงจรกรองความถี่ที่นำเสนอเป็นวงจรกรองความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์แบบหลายหน้าที่ คือ มีทั้งวงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่าน วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน วงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านและวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุดอยู่ในวงจรเดียวกันและวงจรเดียวกันนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้งานปรับเป็นวงจรอิกวอไลน์เซอร์ได้โดยง่ายซึ่งก็ประสบผลสำเร็จตามที่ได้กล่าวไว้ในปฏิญญาฉบับนี้ ข้อดีของวงจรที่พัฒนามาเสนอนั้นนอกจากจะสามารถทำงานทำงานได้ในย่านความถี่สูงอันเนื่องมาจากข้อดีของการทำงานในโหมดกระแสและโหมดโวลต์เตจแล้ววงจรที่นำเสนอนี้ยังปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ เช่น ค่าตำแหน่งความถี่ศูนย์กลาง (center frequency :  $f_0$ ) และค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ (quality factor : Q) ของวงจรเป็นต้น โดยการปรับค่ากระแสไบอัสซึ่งทำให้เกิดความสะดวกในการควบคุมเชิงอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้วงจรที่นำเสนอ ยังมีข้อดีที่ประกอบด้วยวงจร CCCII สองชุดและตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับกราวด์ (ground) อีกเพียงสองตัวเท่านั้น จึงนับได้ว่าเป็นวงจรที่ใช้อุปกรณ์น้อยซึ่งจากความไม่ยุ่งยากและไม่ซับซ้อนของวงจรนี้ จึงทำให้วงจรที่นำเสนอมีความเหมาะสมสำหรับการที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม (integrated circuit : IC) โดยสามารถที่จะใช้ประโยชน์ของพื้นที่ในวงจรรวมอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับกราวด์ไม่ได้เป็นตัวเก็บประจุชนิดลอยตัว

### 1.1 วัตถุประสงค์ปฏิญญาฉบับนี้

1. เพื่อศึกษาวิธีการทางคณิตศาสตร์ และคุณสมบัติของวงจรสายพารกระแสรุ่นที่สองที่ใช้กระแสควบคุม(CCCII)เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานในวงจรกรองความถี่และวงจรอิกวอไลน์เซอร์
2. เพื่อศึกษาแนวทางการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบต่างๆและวงจรอิกวอไลน์เซอร์ โดยใช้วงจรสายพารกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส( CCCII)
3. เพื่อศึกษาการจำลองการทำงาน ( Simulate ) ของวงจรด้วยซอฟต์แวร์ โดยใช้โปรแกรม Pspice และ MATLAB

### 1.2 เนื้อหาปฏิญญาฉบับนี้

ปฏิญญาฉบับนี้ได้นำทฤษฎีของวงจรสายพารกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแสมาใช้ในการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบต่างๆ และประยุกต์การใช้งานของวงจรกรองความถี่ในโหมดแรงดันมาใช้ในการออกแบบวงจรอิกวอไลน์เซอร์ ซึ่งเนื้อหาในปฏิญญาฉบับนี้ ในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีของวงจรสายพานกระแสในยุคต่างๆ คือ วงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่ง ( CCI ) , วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง ( CCII ) และวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส และหลักการต่างๆที่ใช้ในทฤษฎีของวงจรอิควอไลเซอร์ กล่าวคือ หลักการทรานสลิเนียร์ ( translinear principle ) และหลักการของวงจรสะท้อนกระแส ( Current mirror)

ในบทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีของวงจรกรองความถี่ รูปแบบสมการฟังก์ชันการถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่แบบไบควอด และทฤษฎีของวงจรอิควอไลเซอร์

ในบทที่ 4 เป็นการแสดงการออกแบบทั้งสองโหมดการทำงานคือโหมดกระแสและโหมดโวลต์เตจ ซึ่งในวงจรกรองความถี่ที่ได้ทำการออกแบบมีอยู่ 5 แบบ คือ วงจรกรองความถี่ต่ำ วงจรกรองความถี่สูง วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน วงจรกรองความถี่แถบความถี่ออก และ วงจรกรองความถี่ผ่านตลอด

ในบทที่ 5 เป็นการจำลองการทำงานของวงจรด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในบทที่ 6 เป็นการประยุกต์วงจรกรองความถี่ให้เป็นวงจรอิควอไลไนเซอร์

### 1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากปริญญานิพนธ์

1. สามารถนำทฤษฎีของวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแสมาใช้ในการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบต่างๆ ทั้งในโหมดกระแสและโหมดแรงดัน
2. เกิดทักษะในการออกแบบวงจรและแก้ไขปัญหาซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาหรือประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางและมีประสิทธิภาพ

## บทที่ 2

### วงจรสายพานกระแสแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส

#### 2.1 กล่าวนำ

วงจรสายพานกระแส (current conveyor) เป็นวงจรปฏิบัติการเกี่ยวกับสัญญาณทางด้านอนาล็อก ที่สามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ เพื่อออกแบบวงจรที่ประมวลผลสัญญาณแบบอนาล็อกใน โหมดกระแสและใน โหมดโวลต์เตจที่เป็นประโยชน์ได้อีกมากมาย ลักษณะของวงจรสายพานกระแสจะมีความคล้ายคลึงกับวงจรออปแอมป์ (opamp) ซึ่งเป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไป ในด้านมุมมองที่เป็นวงจรที่ถูกสร้างขึ้นเป็นวงจรสำเร็จแบบวงจรรวม (Integrated circuits) ข้อแตกต่างระหว่างวงจรสายพานกระแสกับออปแอมป์ที่มีความเด่นชัดก็คือ วงจรออปแอมป์เป็นวงจรทางด้านอนาล็อกที่ทำงานใน โหมดแรงดันซึ่งเป็น โหมดการทำงานของวงจรที่คุ้นเคยกันและใช้กันอย่างแพร่หลายอยู่โดยทั่วไป สำหรับวงจรสายพานกระแส นั้นวงจรปฏิบัติการแบบอนาล็อกที่ทำงานได้ทั้งใน โหมดกระแสและ โหมดแรงดัน ซึ่งวงจรที่ทำงานใน โหมดกระแสมีข้อดีคือ ให้ความถูกต้องและแม่นยำของอัตราขยายสัญญาณของวงจรและมีย่านความถี่ในการทำงานของวงจรที่กว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรประเภทเดียวกันที่ทำงานใน โหมดแรงดัน วงจรสายพานกระแสเป็นวงจรที่ได้รับการพัฒนามาเป็นลำดับ โดยเริ่มจากวงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่ง (CCI), วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง (CCII), วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส (CCCII) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามวงจรรองความถี่ที่ได้นำเสนอในปริยญาณีพนธ์เล่มนี้มีพื้นฐานของการใช้วงจร CCCII แบบบวก จึงขอกล่าวถึงวงจร CCCII แบบบวกเป็นประเด็นหลักโดยจะกล่าวถึงที่มาของวงจร CCCII, รายละเอียดเกี่ยวกับคุณสมบัติพื้นฐานของวงจร, การวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายในที่สามารถควบคุมได้ด้วยกระแสของวงจร, หลักการของวงจรสะท้อนกระแสและหลักการทรานสลิเนียร์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญของวงจร CCCII เป็นลำดับและจะได้มีการกล่าวถึงในเรื่องต่างๆเหล่านี้ในบทนี้ทั้งที่จะนำไปประกอบความเข้าใจหลักการพื้นฐานการทำงานของวงจรรองความถี่ที่ได้นำเสนอในปริยญาณีพนธ์ฉบับนี้ต่อไป

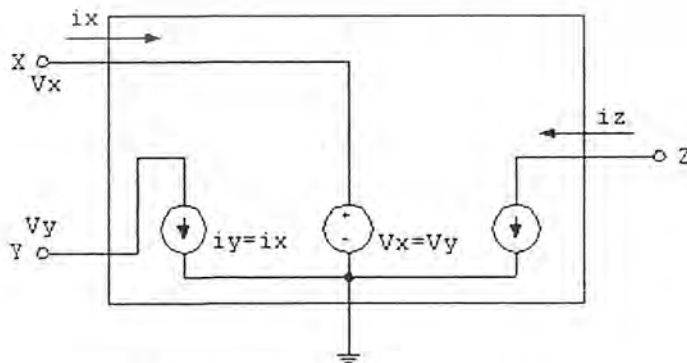
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 วงจรสายพานกระแสที่หนึ่ง ( first generation current conveyor : CCI )

วงจรสายพานกระแสที่หนึ่ง เป็นวงจรที่ได้ถูกนำเสนอขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1968 โดย K.C.Smitch และ A.S. Sedra วงจร CCI จัดเป็นประเภท 3 ขั้ว (port) คือมีขั้ว X , Y เป็นขั้วของจุดสัญญาณทางด้านขาเข้าและขั้ว Z เป็นขั้วของจุดสัญญาณทางด้านขาออกตามลำดับซึ่งโดยหลักการพื้นฐานของวงจร CCI ก็คือ ถ้ามีศักดาไฟฟ้า (V) ตกคร่อมจุดสัญญาณทางขาเข้าที่ขั้ว y แล้วจะปรากฏศักดาไฟฟ้าเท่ากันที่ขั้ว x และในขณะเดียวกันถ้ามีกระแสไฟฟ้า ( $i_x$ ) ไหลผ่านจุดสัญญาณทางขาเข้าที่ขั้ว x ก็จะปรากฏให้มีกระแสไหลเท่ากันที่ไหลผ่านที่ขั้ว y และกระแสค่าเดียวกันนี้จะถูกนำพา (convey) ไปเป็นกระแส ณ จุดสัญญาณขาออกที่ขั้ว z ซึ่งเป็นขั้วของอุปกรณ์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ ( impedance) สูงค้ำยนอกจากนี้ค่าศักดาไฟฟ้าที่ปรากฏขึ้นที่ขั้ว x ( ซึ่งถูกกำหนดโดยเกี่ยวเนื่องกับค่าศักดาทางไฟฟ้าทางด้านขั้ว y ) นั้นจะไม่ขึ้นกับค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้ว x และค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้ว y ( ซึ่งถูกกำหนดค่าโดยกระแสไฟฟ้าทางขั้ว (x) ) นั้นจะไม่ขึ้นกับค่าศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่ขั้ว y เช่นเดียวกัน จากความสัมพันธ์ของตัวแปรทางไฟฟ้าดังกล่าวมาสามารถแสดงในรูปของความสัมพันธ์ของเมตริกซ์ได้ดังสมการเมตริกซ์ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

จากคุณสมบัติตามสมการที่ 1 นี้สามารถที่จะนำไปเขียนเป็นวงจรสมมูลย์ในรูปของบล็อกไดอะแกรมของวงจร CCI ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจร CCI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

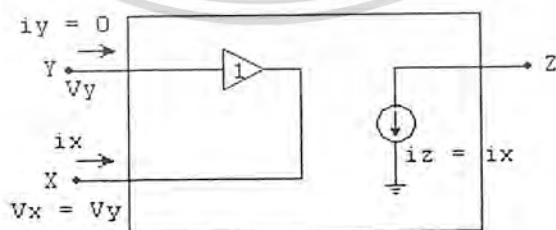
หลังจากวงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่งนี้เกิดขึ้นได้ไม่นานนั้น บุคคลทั้งสองก็ได้มีการคิดค้นและทำการพัฒนาจากวงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่งและได้นำเสนอเป็นวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองขึ้นซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

### 2.3 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง (second generation current conveyor : CCII)

ในปี ค.ศ. 1970 ซึ่งเป็นระยะเวลา 2 ปีต่อมาหลังจากที่ K.C. Smit และ A.S. Sedra ได้นำเสนอแนวความคิดของวงจร CCI บุคคลทั้งสองได้ทำการปรับปรุงวงจรและได้นำเสนอแนวความคิดของหลักการวงจรสายพานกระแสขึ้นใหม่ ซึ่งมีคุณสมบัติที่แตกต่างและสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายกว่าแนวความคิดของ CCI เดิม เรียกว่าวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองนี้ใช้สัญลักษณ์ตัวอักษรแทนด้วย CCII โดยคุณสมบัติของวงจร CCII สามารถแสดงได้ตามความสัมพันธ์เมตริกซ์ของตัวแปรไฟฟ้าต่างๆดังต่อไปนี้คือ

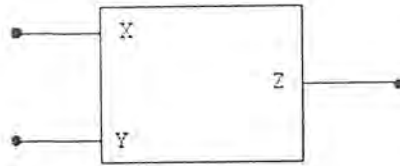
$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

จากสมการที่ 2.2 สามารถนำไปเขียนวงจรสมมูลย์ของวงจรได้ดังรูปที่ 2.2 และกำหนดใช้สัญลักษณ์เป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลย์ของวงจร CCII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 สัญลักษณ์ของวงจร CCII

จากแนวความคิดและหลักการของวงจร CCII นี้ ได้มีผู้นำไปคิดสร้างวงจรในทางปฏิบัติที่ทำงานในโหมดกระแสได้หลายรูปแบบ ดังจะเห็นได้จากบทความต่างๆ ที่ได้รับการตีพิมพ์ขึ้นจำนวนมาก ซึ่งในการพัฒนานี้ก็ได้โดยมีการนำเสนอการสร้างวงจร CCII ในลักษณะของวงจรทรานสลิเนียร์ (translinear) ขึ้นด้วยวิธีหนึ่งโดย A. Fabre และ โดยการวิเคราะห์ห้วงจรของ A. Fabre นี้อย่างละเอียดจึงได้พบคุณสมบัติบางประการใน CCII จนทำให้มีการบัญญัตินิยามของคำว่า วงจรสายพานรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแสขึ้นอีกนอกเหนือจาก CCII ซึ่งใช้สัญลักษณ์ตัวอักษรแทนด้วย CCCII โดยรายละเอียดของวงจร CCCII จะได้นำกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

#### 2.4 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส (second generation current controlled conveyor : CCCII)

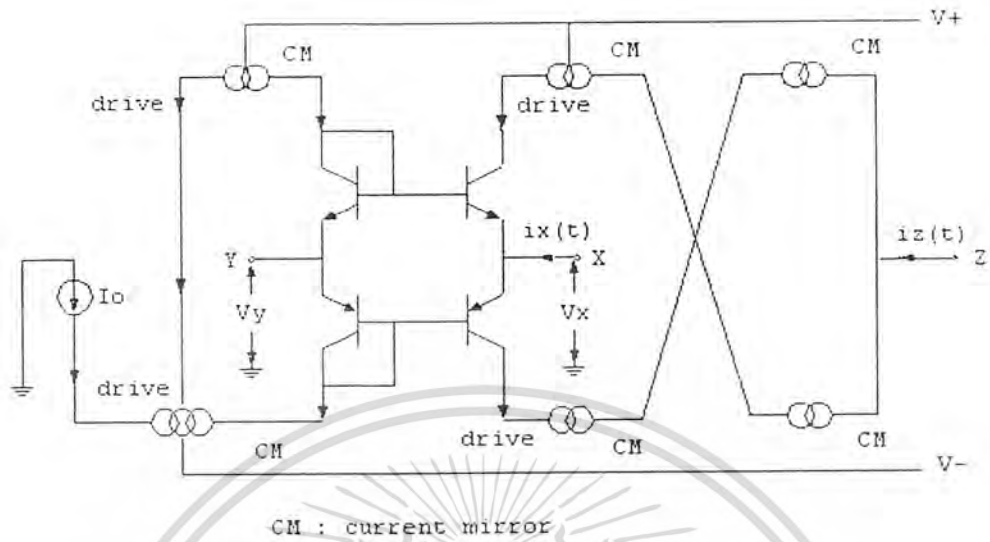
วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแสเป็นวงจรที่ได้ถูกนำเสนอขึ้นมาในปี ค.ศ. 1995 ซึ่งคุณสมบัติพื้นฐาน โดยทั่วไปของวงจรดังกล่าวนั้นก็จะมีคล้ายคลึงกันกับวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง (CCII) ที่คุ้นเคยกัน แต่สำหรับวงจร CCCII จะมีค่าความต้านทานภายในทางด้านขั้ว  $x$  ซึ่งค่าความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นนี้สามารถควบคุมได้ด้วยกระแสไบอัสของวงจรถ้าคือ วงจร CCCII เป็นอุปกรณ์ประเภท 3 ขั้ว ได้แก่  $x$ ,  $y$  และ  $z$  โดยขั้ว  $x$  จะเป็นขั้วที่มีค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านขาเข้า (input impedance) ขึ้นกับกระแสไบอัส  $I_o$ , ขั้ว  $y$  จะเป็นขั้วที่มีค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านขาเข้าสูง และขั้ว  $z$  จะเป็นขั้วที่มีค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านขาออกสูง

องค์ประกอบของวงจร CCCII นั้นเป็นวงจรที่สร้างขึ้นมาจากวงจรทรานซิสเตอร์ที่ประกอบขึ้นมาจากทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ ( bipolar transistor ) ที่ต่ออยู่ในลักษณะรูปประกอบร่วมกับวงจรสะท้อนกระแส ( current mirror : CM ) วงจร CCCII จะมีกระแสทางด้านเข้า  $z$  คือ  $i_z$  เท่ากับกระแสทางด้านเข้า  $x$  ซึ่งเขียนแทนด้วย  $i_x$  ถ้าทิศทางของกระแส  $i_x$  และ  $i_z$  มีทิศทางเดียวกันนั้นคือไหลออกจากวงจรเหมือนกันจะจัดเป็นวงจร CCCII แบบบวก ( noninverting ) ใช้สัญลักษณ์ตัวอักษรย่อว่า CCCII+ ส่วนในกรณีที่กระแสทั้งสองกลับทิศทางกันวงจรจะถูกจัดเป็น CCCII แบบลบ ( inverting ) นิยมเขียนแทนด้วยอักษรย่อว่า CCCII- ซึ่งไดอะแกรมของวงจร CCCII แบบบวกและแบบลบมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.4 และ รูปที่ 2.5 ตามลำดับ



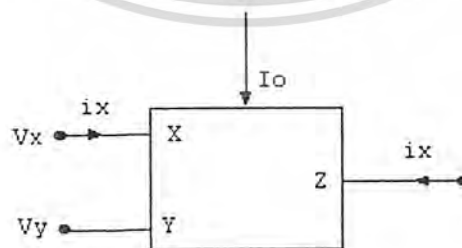
รูปที่ 2.4 แสดงไดอะแกรมของวงจร CCCII แบบบวก ( CCCII+ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



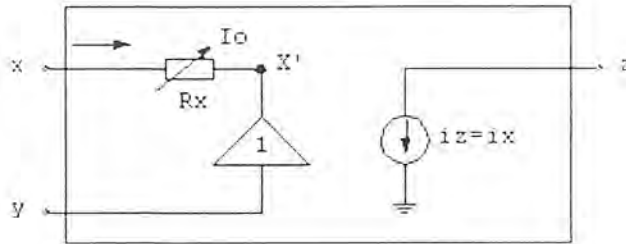
รูปที่ 2.5 แสดงไดอะแกรมของวงจร CCCII แบบลบ (CCCII-)

เนื่องจากวงจรกรองความถี่ที่ได้นำเสนอในปริยญาณีพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้วงจร CCCII แบบบวกเป็นหลักในการสร้างวงจรดังกล่าวเพื่อเป็นการให้กระชับความในปริยญาณีพนธ์ฉบับนี้ เมื่อมีการกล่าวถึง CCCII+ ก็จะใช้สัญลักษณ์ย่อแทนว่า CCCII เพียงเท่านั้น สัญลักษณ์และวงจรสมมูลย์ของวงจร CCCII แสดงในรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 แสดงสัญลักษณ์ของวงจร CCCII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงวงจรสมมูลย์ของวงจร CCCII

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วว่า คุณสมบัติที่แตกต่างระหว่างวงจร CCCII และวงจร CCII ที่เป็นที่ยุ่กันคืออย่างหนึ่งคือ วงจร CCCII จะคำนึงถึงค่าความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นทางด้านขั้ว \$x\$ โดยจะใช้สัญลักษณ์แทนด้วย \$R\_x\$ ( ดังรูปที่ 2.7 ) ซึ่งค่าความต้านทานดังกล่าวจะมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นกับกระแสไบอัส (\$i\_o\$) ของวงจร จากรูปวงจรสมมูลย์ตามรูปที่ 2.7 จะเขียนแสดงความสัมพันธ์เชิงเมตริกซ์ของวงจร CCCII ได้ดังสมการที่ 3

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & R_x & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

ซึ่งถ้าพิจารณาเพียงจุด \$x\$ ภายในของวงจร CCCII โดยหากละทิ้ง \$R\_x\$ ออกจากวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งในที่นี้จะได้ความสัมพันธ์เชิงเมตริกซ์ที่สมมูลย์กับความสัมพันธ์ซึ่งแสดงคุณสมบัติของวงจร CCII แบบปกติเท่านั้นซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์เชิงเมตริกซ์ได้ คือ

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_{x'} \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

สำหรับการวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายใน (\$R\_x\$) นั้น จะมีการกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 หลักการทรานสลิเนียร์ (translinear principle)

หลักการทรานสลิเนียร์เป็นหลักการทางานที่เป็นหัวใจสำคัญของวงจร CCCII หลักการนี้ได้ถูกค้นพบและนำเสนอโดย B. Gilbert ในปี ค.ศ. 1975 จากการค้นพบคุณสมบัติของความสัมพันธ์ในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นกันระหว่างค่าทรานสคอนดักแตนซ์ (transconductance) กับกระแสในไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (translinear ย่อมาจาก transconductance linear with collector current) ซึ่งจะสอดคล้องกันกับความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลระหว่างกระแสกับแรงดัน ความสัมพันธ์ดังกล่าวอธิบายได้ตามสมการต่อไปนี้

$$g = \frac{dI}{dV} = aI \quad (2.5)$$

เมื่อ  $g$  คือ ค่าทรานสคอนดักแตนซ์ และ  $a$  คือ ค่าคงที่ทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.5 จะได้

$$\int \frac{dI}{dV} = \int aI$$

$$\int \frac{1}{I} dI = a \int dV$$

$$\ln I = aV + c$$

$$I = b \cdot \exp(aV)$$

(2.6)

โดย  $b$  เป็นค่าคงที่

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวตามสมการที่ (2.6) ได้นำไปสู่เงื่อนไขของวงจรทรานสลิเนียร์คือ วงจรทรานสลิเนียร์เป็นวงจรที่มีการต่อกันในลักษณะรูปโดยรูปแบบของอุปกรณ์จะต้องมีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลดังสมการที่ (2.6) ซึ่งจะเห็นได้ว่าทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์เป็นอุปกรณ์ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ ( $I_C$ ) กับแรงดันตกคร่อมเบสอีมิเตอร์ ( $V_{BE}$ ) เป็นไปตามสมการดังกล่าวเช่นกัน กล่าวคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_C = I_S \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \quad (2.7)$$

หรือ 
$$V_{BE} = V_T \ln\left(\frac{I_C}{I_S}\right) \quad (2.8)$$

เมื่อ  $I_S$  คือ กระแสอิ่มตัว (saturation current) ซึ่งมีค่าคงที่แปรผันตามพื้นที่อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์

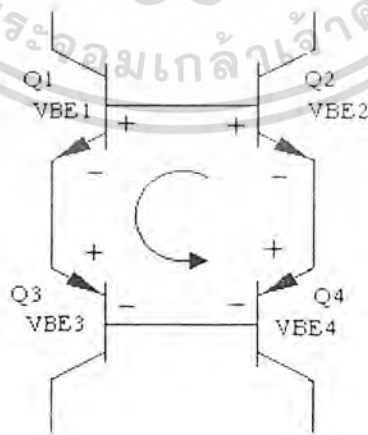
$V_T$  คือ แรงดันอุณหภูมิ (thermal voltage) มีค่าเท่ากับ  $\frac{KT}{q}$  ซึ่งจะพบว่ามียุคประมาณ  $26mV$  ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส

$K$  คือ ค่าคงที่โบลท์ซแมนน์ (Boltzmann) =  $1.38 \times 10^{-23}$  จูลต่อองศาเคลวิน (Kelvin)

$T$  คือ ค่าอุณหภูมิในหน่วยองศาเคลวิน

$q$  คือ ค่าประจุไฟฟ้า =  $1.602 \times 10^{-19}$  คูลอมป์

วงจรทรานซิสเตอร์ที่ประกอบขึ้นจากทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของวงจร CCCII นั้น จะมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งเราจะวิเคราะห์พฤติกรรมความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ (parameter) ของวงจร CCCII ได้ดังต่อไปนี้คือ



รูปที่ 2.8 แสดงวงจรทรานซิสเตอร์ที่ประกอบอยู่ในของวงจร CCCII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ ( Kirchhoff voltage law ) จะได้ว่า

$$V_{BE1} + V_{BE3} = V_{BE2} + V_{BE4} \quad (2.9)$$

$$V_{T1} \ln \left( \frac{I_{C1}}{I_{S1}} \right) + V_{T3} \ln \left( \frac{I_{C3}}{I_{S3}} \right) = V_{T2} \ln \left( \frac{I_{C2}}{I_{S2}} \right) + V_{T4} \ln \left( \frac{I_{C4}}{I_{S4}} \right) \quad (2.10)$$

หรือแสดงในรูปความหนาแน่นของกระแส (J) จะได้ความสัมพันธ์คือ

$$V_{T1} \ln \left( \frac{J_{C1}}{J_{S1}} \right) + V_{T3} \ln \left( \frac{J_{C3}}{J_{S3}} \right) = V_{T2} \ln \left( \frac{J_{C2}}{J_{S2}} \right) + V_{T4} \ln \left( \frac{J_{C4}}{J_{S4}} \right) \quad (2.11)$$

เมื่อสมมติให้ Q1- Q4ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการที่ทำในเวลาเดียวกัน และทำงานที่อุณหภูมิเท่ากัน ซึ่งจะทำให้ได้  $V_{T1} = V_{T2} = V_{T3} = V_{T4} = V_T$  และเมื่อกำหนดให้  $J_S$  ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวมีค่าเท่ากัน คือ  $J_{S1} = J_{S2} = J_{S3} = J_{S4} = J_S$  ดังนั้นจะได้ว่า  $V_T$  และ  $J_S$  จากสมการจะถูกกำจัดออกไป ทำให้ได้ความสัมพันธ์

$$\ln J_{C2} + \ln J_{C4} = \ln J_{C1} + J_{C3} \quad (2.12)$$

หรือเมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้เป็น

$$J_{C2} \cdot J_{C4} = J_{C1} \cdot J_{C3} \quad (2.13)$$

ซึ่งเมื่อแสดงความสัมพันธ์ของสมการในรูปทั่วไประหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับพื้นที่ของอิมิตเตอร์ (A) จะได้

$$\frac{I_{C2} I_{C4}}{A_2 A_4} = \frac{I_{C1} I_{C3}}{A_1 A_3} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 14 จะเห็นได้ว่าวงจรทรานสลิเนียร์ ที่คิดการทำงานในโหมดกระแสเป็นหลัก จะให้หน้าที่การทำงานของวงจรที่มีความแน่นอน โดยจะไม่ถูกกระทบกระเทือนจากอิทธิพลของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิจากความสัมพันธ์ต่างๆดังกล่าวแล้วนี้เงื่อนไขของหลักการทรานสลิเนียร์สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้คือ

1. อุปกรณ์ที่มาประกอบร่วมกันในลักษณะคู่ของวงจรถานสลิเนียร์นั้น จะต้องความสัมพันธ์ของตัวแปรทางไฟฟ้าเป็นไปตามสมการ

$$V = V_T \ln \left( \frac{J}{J_s} + 1 \right) \quad (2.15)$$

$$\text{หรือ} \quad J = J_s \exp \left( \frac{V}{V_T} - 1 \right) \quad (2.16)$$

2. ความหนาแน่นของกระแส  $J$  จะต้องมีค่ามากกว่าความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัว  $J_s$  มากๆ จึงจะทำให้ละทิ้งค่า  $-1$  ในพจน์ของลอการิทึมได้โดยไม่เกิดความผิดพลาดที่สามารถสังเกตได้
3. ในทรานสลิเนียร์คู่ จะต้องประกอบด้วยอุปกรณ์ที่มีเงื่อนไขตามข้อ 1 เป็นจำนวนคู่ โดยมีอุปกรณ์ดังกล่าวจำนวนเท่าๆกันต่ออยู่ในรูปในทิศทางที่สวนกันภายในคู่
4. คู่ของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่ในลักษณะตรงกันข้ามกันจะต้องใช้เป็นอุปกรณ์ที่มีความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวเท่ากัน
5. อุปกรณ์ภายในคู่ทุกตัวทำงานที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน

จากเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์หลักการทรานสลิเนียร์นั้นค่าพารามิเตอร์  $J_s$  และ  $V_T$  ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีค่าขึ้นกับอุณหภูมิและกระบวนการในการสร้างอุปกรณ์ประเภทสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) จะถูกขจัดออกไปจากความสัมพันธ์ของกระแสที่ต้องการซึ่งทำได้โดยการกำหนดให้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิของอุปกรณ์แต่ละตัวมีค่าเท่ากันและอุปกรณ์ภายในคู่ทำงานที่อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งจะได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของอุปกรณ์ภายในคู่เป็นไปตามสมการที่ 2.14 โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นความสัมพันธ์ที่มีแม่นยำโดยไม่ถูกกระทบกระเทือนจากอิทธิพลของอุณหภูมิ เพราะฉะนั้นหลักการทรานสลิเนียร์นี้จึงเป็นหลักการที่เหมาะสมสำหรับใช้กับเทคโนโลยีการสร้างเป็นวงจรรวมเป็นอย่างยิ่ง

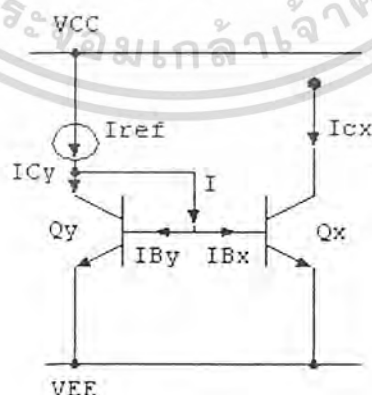
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 วงจรสะท้อนกระแส ( current mirror )

วงจรสะท้อนกระแสโดยใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์นั้น มีคุณสมบัติที่สำคัญคือจะให้ค่าความต้านทานทางด้านขาเข้าต่ำและความต้านทานทางด้านขาออกสูงซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ ได้แก่ วงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 2 ตัว หรือแบบไดโอดทรานซิสเตอร์ ( diode transistor current mirror ) ซึ่งเป็นวงจรพื้นฐานที่ใช้กันมากเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายกระแสหรือคิ่งกระแสในวงจรรวมแบบอนาล็อก ( analog integrated circuit ) อัตราขยายของวงจรชนิดนี้จะมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเล็กน้อยเนื่องจากผลของเบส-วิดท์ มอดูเลชัน ( based -width modulation ) ดังนั้นต่อมาได้มีการพัฒนาวงจรสะท้อนกระแสโดยใช้ทรานซิสเตอร์ 3 ตัว หรือแบบวิลสัน ( wilson ) เพื่อต้องการให้ผลของเบส-วิดท์ มอดูเลชันของวงจรลดลงทำให้อัตราขยายกระแสใกล้เคียงหนึ่งมากกว่าและให้ค่าความต้านทานที่จุดสัญญาณขาออกสูงกว่าวงจรแบบทรานซิสเตอร์แบบ 2 ตัว วงจรสะท้อนกระแสแบบวิลสันชนิดปรับปรุงเป็นวงจรซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ 4 ตัว เพื่อลดผลของเบส - วิดท์ มอดูเลชัน ที่มีต่อวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ซึ่งวงจรจะให้อัตราขยายกระแสเป็นหนึ่งได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตาม สำหรับวงจรสะท้อนกระแสที่ประกอบด้วยวงจรทรานซิสต์เนียน์อยู่ในวงจร CCCII ตามแบบของ A. Fabre นั้น เป็นวงจรทรานซิสเตอร์ 2 ตัว หรือแบบไดโอดทรานซิสเตอร์ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการลดความซับซ้อนของวงจรรวมลงเพราะใช้อุปกรณ์น้อยจึงจะขอกกล่าวถึงแต่ในรายละเอียดของวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 2 ตัวเท่านั้น ซึ่งวงจรมีลักษณะแสดงได้ดังรูปที่

2.9



รูปที่ 2.9 แสดงวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาคูณสมบัติทางกระแสไฟตรงของวงจรในรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าทรานซิสเตอร์  $Q_1$  ถูกต่ออยู่ในลักษณะของไดโอด โดยการต่อขาเบสกับขาคอลเลกเตอร์เข้าด้วยกัน ทำให้แรงดันตกคร่อมคอลเลกเตอร์เบส ( $V_{BE}$ ) มีค่าเป็นศูนย์ แต่อย่างไรก็ดีทรานซิสเตอร์  $Q_1$  นี้ยังมีการทำงานที่อยู่ในช่วงของการทำงานในย่านแอกทีฟ ( active region ) เพราะแรงดันตกคร่อมคอลเลกเตอร์อีมิเตอร์ ( $V_{CE}$ ) ที่มีค่าเพียง  $V_{BE}$  อย่างเดียวก็พอที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่ในย่านการทำงานแบบแอกทีฟ

โดยการกำหนดให้ทรานซิสเตอร์  $Q_x$  และ  $Q_y$  มีคุณสมบัติที่เหมือนกันทุกประการแล้วจากสมการที่ 2.8 จะได้ว่า -

$$V_{BE_x} = V_{T_x} \ln \left( \frac{I_{C_x}}{I_{S_x}} \right) \quad (2.17)$$

และ

$$V_{BE_y} = V_{T_y} \ln \left( \frac{I_{C_y}}{I_{S_y}} \right) \quad (2.18)$$

ซึ่งจากรูปที่ 2.9 คิวมีการต่อขาเบสและขาอีมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ทั้งสองร่วมกันจะทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองมีค่าแรงดันเบสอีมิเตอร์เท่ากัน ดังนั้นดังนั้นโดยการเทียบสมการที่ 2.17 และสมการที่ 2.18 เราจะได้ความสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์ทั้งสองคือ

$$I_{C_x} = I_{C_y} \quad (2.19)$$

และเมื่อพิจารณากระแสตรงที่คอลเลกเตอร์ของ  $Q_y$  จะพบว่า

$$I_{ref} - I_{C_y} - I = 0 \quad (2.20)$$

ซึ่ง  $I$  ในที่นี้คือผลรวมของกระแสเบส  $I_{B_x}$  และ  $I_{B_y}$  และ  $\beta_F$  คืออัตราขยายกระแสไฟตรง  $\left( \frac{I_C}{I_B} \right)$

ของทรานซิสเตอร์ ดังนั้นถ้าให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองมีค่า  $\beta_F$  เท่ากันแล้วจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{ref} - I_{Cy} - 2 \frac{I_{Cy}}{\beta_F} = 0 \quad (2.21)$$

ดังนั้นเมื่อจัดเทอมใหม่จะได้ว่า

$$I_{Cy} = \frac{I_{ref}}{1 + 2 / \beta_F} = I_{Cx} \quad (2.22)$$

หรือ

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{I_{Cx}}{I_{ref}} = \frac{1}{1 + 2 / \beta_F} = 1 - \frac{2}{2 + \beta_F} \quad (\text{สมการ 23})$$

ถ้า  $\beta_F$  มีค่าสูงมาก ( โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 200 ) จะทำให้กระแสขาออก ( $I_{Cx}$ ) มีค่าโดยประมาณเท่ากับกระแสขาเข้า ( $I_{ref}$ ) ได้ดังสมการที่ 23

จากการวิเคราะห์วงจรสะท้อนกระแสดังกล่าวนี้ จะเห็นได้ว่ากรณีที่ทรานซิสเตอร์  $Q_x$  และ  $Q_y$  มีคุณสมบัติเหมือนกันจะได้อัตราการขยายกระแสประมาณหนึ่ง หากทรานซิสเตอร์  $Q_x$  และ  $Q_y$  มีคุณสมบัติต่างกันก็จะทำให้วงจรสะท้อนกระแสมีค่าอัตราการขยายกระแสแตกต่างจากหนึ่งมาก โดยจากสมการที่ 8 ถ้าหากพื้นที่อิมิตเตอร์ของและ  $Q_x, Q_y$  แตกต่างกันซึ่งจะทำให้พจน์ของ IS ของทรานซิสเตอร์ทั้งสองต่างกัน แต่มีค่าเท่ากัน  $V_{BE}$  เป็นผลให้อัตราการขยายกระแสแปรผันตามพื้นที่อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ทั้งสอง นอกจากนี้แรงดันตกคร่อมคอลเลคเตอร์อิมิตเตอร์ของ  $Q_x$  และที่  $Q_y$  ตกต่างกัน จะให้อัตราการขยายกระแสที่คลาดเคลื่อนออกไปเนื่องจากผลของเบส-วิดท์มอดูเลชัน ทำให้กระแสคอลเลคเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปซึ่งในกรณีนี้กระแสคอลเลคเตอร์จะเกี่ยวข้องกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในรูสมการดังต่อไปนี้คือ

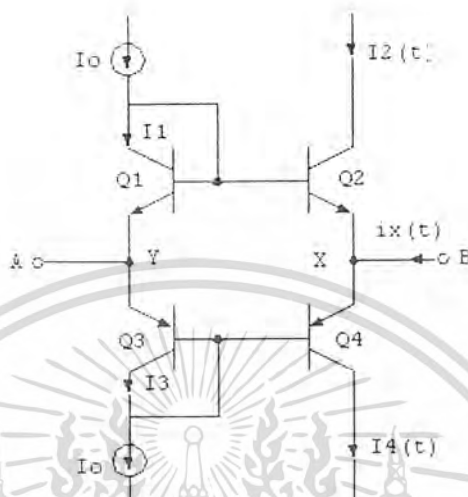
$$I_C = I_S \left[ \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \right] \left[ 1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right] \quad (2.24)$$

เมื่อ  $V_A$  คือค่าแรงดันเออร์ลี่ ( Early voltage ) ของทรานซิสเตอร์ โดยทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วง

ระหว่าง 50-100 โวลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. การวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายในของวงจร CCCII



รูปที่ 2.10 แสดงองค์ประกอบของวงจร CCCII ในส่วนของขั้ว x และขั้ว y

จากการวิเคราะห์หลักการทรานซิสเตอร์ในหัวข้อ 5 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์  $Q_1, Q_2, Q_3$  และ  $Q_4$  ดังนี้คือ

$$I_1 I_3 = I_2 I_4 \quad (2.25)$$

แต่  $I_1 = I_3 \approx I_0$  ดังนั้นจะได้

$$I_0^2 = I_2 I_4 \quad (2.26)$$

จากวงจรรูปที่ 2.10 นั้นเมื่อพิจารณาถึงผลต่างของแรงดันระหว่างจุด A และ B คือ

$$V_{xy} = V_{BE1} - V_{BE2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= V_T \ln \frac{I_1}{I_2} - V_T \ln \frac{I_2(t)}{I_S}$$

$$= V_T \ln \frac{i_o}{I_S} - V_T \ln \frac{I_2(t)}{I_S}$$

$$= V_T \ln \frac{I_o}{I_2(t)}$$

$$= -V_T \ln \frac{I_2(t)}{I_o}$$

และ  $I_4(t) = I_2(t) + i_X(t)$  เมื่อนำไปแทนในสมการที่ 2.26 จะได้

$$I_o^2 = I_2(t) [I_2(t) + i_X(t)]$$

$$= I_2^2(t) + I_2(t) i_X(t)$$

$$I_o^2(t) + I_2(t) i_X(t) - I_o^2 = 0$$

$$I_2(t) = \frac{i_X(t) \pm \left( i_X^2(t) + 4I_o^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{2}$$

$$I_2(t) = \frac{1}{2} \left[ \left( i_X^2(t) + 4I_o^2 \right)^{\frac{1}{2}} - i_X(t) \right], \quad i_X(t) > 0 \quad (2.28)$$

และในทำนองเดียวกัน เมื่อนำ  $I_2(t) = I_4(t) - i_X(t)$  แทนลงในสมการที่ 2.26 จะได้

$$I_o^2 = I_4(t) [I_4(t) - i_X(t)]$$

$$= I_4^2(t) - I_4(t) i_X(t)$$

$$I_4^2(t) - I_4(t) i_X(t) - I_o^2 = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_4(t) = \frac{i_X(t) \pm (i_X^2(t) + 4I_0^2)^{\frac{1}{2}}}{2}$$

$$I_4(t) = \frac{1}{2} \left[ (i_X^2(t) + 4I_0^2)^{\frac{1}{2}} + i_X(t) \right], (I_4(t) > 0)$$

จากสมการที่ 26 เมื่อกำหนดเงื่อนไขให้ขนาดของกระแส  $i_X(t)$  น้อยกว่า  $2I_0$  มากๆ คือ  $i_X(t) \ll 2I_0$  จะได้ว่า

$$I_2(t) = \frac{1}{2}(2I_0 - i_X(t)) \quad (2.30)$$

ดังนั้นเมื่อแทนสมการที่ 30 ลงในสมการที่ 2.27 จะได้

$$\begin{aligned} V_{XY} &= -v_T \ln \left( \frac{2I_0 - i_X(t)}{2I_0} \right) \\ &= -V_T \ln \left( 1 - \frac{i_X(t)}{2I_0} \right) \end{aligned} \quad (2.31)$$

โดยการนำอนุกรมของ  $\ln(1+X) = x + \frac{X^2}{2} + \frac{X^3}{3} + \frac{X^4}{4} + \dots$  มาประยุกต์ใช้

$$\text{จะได้ } \ln \left( 1 - \frac{i_X(t)}{2I_0} \right) = -\frac{i_X(t)}{2I_0} - \frac{1}{2} \left( \frac{i_X(t)}{2I_0} \right)^2 - \frac{1}{3} \left( \frac{i_X(t)}{2I_0} \right)^3 - \frac{1}{4} \left( \frac{i_X(t)}{2I_0} \right)^4 + \dots$$

และเพราะสมมติฐาน  $\frac{i_X(t)}{2I_0} \ll 1$  จะทำให้สามารถละทิ้งพจน์ที่มีกำลังมากกว่า 1 ได้นั้นคือเราสามารถประมาณการเงื่อนไข

$$\ln \left( 1 - \frac{i_X(t)}{2I_0} \right) \approx -\frac{i_X(t)}{2I_0} \quad (2.32)$$

โดยการแทนสมการที่ 2.32 ลงในสมการที่ 2.31 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{XY} = V_T \frac{i_X(t)}{2I_0} \quad (2.33)$$

และด้วยการหารตลอดสมการที่ 2.33 ด้วย  $i_X(t)$  จะเป็นผลให้ได้

$$R_X(t) = \frac{V_{XY}}{i_X(t)} = \frac{V_T}{2I_0} \quad (2.34)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.34 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความต้านทานทางด้านขาเข้าของสัญญาณขนาดเล็ก ( small signal ) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแสไบอัสของวงจรซึ่งค่าความต้านทานดังกล่าวนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวงจรที่มีการปรับค่าในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ได้ ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบสร้างวงจรกรองความถี่ที่ควบคุมได้ด้วยกระแสไฟฟ้าที่ได้นำเสนอในบทต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### หลักการทั่วไปของวงจรกรองความถี่

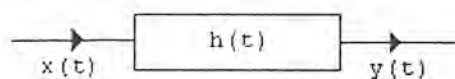
#### 3.1 กล่าวนำ

วงจรกรองความถี่เป็นวงจรที่มีบทบาทสำคัญวงจรหนึ่งในทางวิศวกรรมไฟฟ้าในสาขาต่างๆ มากมายและเป็นวงจรที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบสื่อสารโทรคมนาคมต่างๆ เช่น ในระบบกระจายเสียง (broadcasting systems), ระบบดาวเทียมสื่อสาร (satellite systems) เป็นต้น วงจรกรองความถี่สามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ได้สองแบบ แบบแรกเป็นวงจรกรองความถี่ที่เรียกว่า วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล (digital filter) เป็นวงจรกรองความถี่ที่ถูกใช้กับสัญญาณดิจิทัล (digital signal) หรือสัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทางเวลา (discrete-time signals) และวงจรกรองความถี่แบบที่สองคือวงจรกรองความถี่ที่เรียกว่า วงจรกรองความถี่แบบอนาล็อก (analog filter) ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ที่ถูกใช้กับสัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลา (continuous-time signals) โดยวงจรกรองความถี่แบบอนาล็อกนั้นยังสามารถแบ่งย่อยๆ ได้อีกสองประเภท คือ วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ (passive filter) ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ที่สร้างมาจากอุปกรณ์พาสซีฟ

เช่น ขดลวดตัวนำหรือตัวต้านทานหรือสร้างมาจากตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ และวงจรกรองความถี่อีกประเภทหนึ่งคือ วงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ (active filter) เป็นวงจรกรองความถี่ที่สร้างมาจากอุปกรณ์แอคทีฟ เช่น ออปแอมป์ เป็นต้น เพิ่มขึ้นร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟ เช่น ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ เป็นต้น

#### 3.2 หลักการทั่วไปของวงจรกรองความถี่

ระบบของวงจรกรองความถี่จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบของวงจรกรองความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $x(t)$  คือ สัญญาณทางด้านขาเข้า

$y(t)$  คือ สัญญาณทางด้านขาออก

และ  $h(t)$  คือ สัญญาณตอบสนองต่อสัญญาณแบบอิมพัลส์ ( impulse response ) ของระบบซึ่งถ้าให้วงจรกรองความถี่ภายใต้การพิจารณาเป็นระบบที่มีคุณสมบัติเป็นแบบคอซอล (causal) เป็นแบบเชิงเส้น(linear) และเป็นระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ( time- invariant) แล้ว  $y(t)$  จะสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของสมการดังต่อไปนี้

$$y(t) = \int h(t - \tau) x(\tau) d\tau \quad (3.1)$$

หรือเมื่อทำการแปลงลาปลาซของสมการที่ (3.1) จะได้ผลการแปลงลาปลาซ คือ

$$Y(s) = H(s)X(s) \quad (3.2)$$

โดย  $Y(s)$ ,  $X(s)$  และ  $H(s)$  คือผลการแปลงลาปลาซของ  $y(t)$ ,  $x(t)$  และ  $h(t)$  ตามลำดับ

เมื่อพิจารณามนแดนความถี่  $s = j\omega$  สมการที่ (2) สามารถเขียนแสดงอยู่ในรูปส่วนประกอบของขนาดและเฟสได้ดังนี้ คือ

$$|Y(j\omega)| = |H(j\omega)| |X(j\omega)| \quad (3.3)$$

$$\text{และ } \phi_Y(j\omega) = \phi_H(j\omega) + \phi_X(j\omega) \quad (3.4)$$

โดย  $\phi_Y(j\omega)$  คือค่าเฟสของ  $Y(j\omega)$  ,

$\phi_H(j\omega)$  คือค่าเฟสของ  $H(j\omega)$

และ  $\phi_X(j\omega)$  คือค่าเฟสของ  $X(j\omega)$

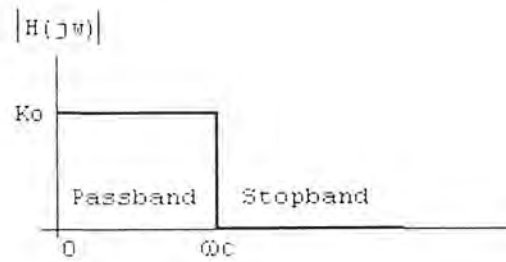
หลักการทั่วไปของวงจรกรองความถี่นั้นก็คือ ทำหน้าที่ในการแยกสัญญาณที่ไม่ต้องการออกจากสัญญาณที่ต้องการตัวอย่างที่เห็นได้ชัดก็คือ ในการรับสัญญาณวิทยุซึ่งสัญญาณที่ส่งมาจากสถานีส่งนั้นเป็นสัญญาณที่มาจากทุกๆ สถานีที่ทำการกระจายเสียงรวมทั้งสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นขณะทำการกระจายเสียง การปรับค่าความถี่ที่รับฟังรายการจากสถานีใดสถานีหนึ่งนั้นจะทำได้โดยเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญาติเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกรองเอาสัญญาณของสถานีอื่นๆที่ไม่ต้องการรับฟังรวมทั้งสัญญาณรบกวนออกให้เหลือเพียงสัญญาณของสถานีที่ต้องการจะรับฟังเท่านั้น โดยเมื่อพิจารณาสมการที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าขนาดของสัญญาณทางด้านขาออกนั้นเป็นผลคูณของค่าขนาดของสัญญาณขาเข้ากับขนาดของฟังก์ชันของการตอบสนองในเชิงความถี่ ( frequency response function ) ของวงจรกรองความถี่ ถ้าหากค่าฟังก์ชันขนาด ( magnitude function ) ของ  $H(j\omega)$  มีค่าเท่ากับศูนย์ในช่วงแถบความถี่ระหว่าง  $\omega_{s1}$  และ  $\omega_{s2}$  ก็แสดงสัญญาณทางด้านขาออกจะมีขนาดเท่ากับศูนย์ ไม่ว่าสัญญาณทางด้านขาเข้านั้นจะมีค่าเท่าไรอยู่ในช่วง  $(\omega_{s1}, \omega_{s2})$  ซึ่งโดยทั่วไปช่วงความถี่  $(\omega_{s1}, \omega_{s2})$  จะเรียกว่าแถบหยุด ( stopband ) ของวงจร  $H(j\omega)$  นั้นในทำนองเดียวกันเมื่อค่าฟังก์ชันขนาดของ  $H(j\omega)$  มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ในช่วงแถบความถี่ระหว่าง  $\omega_{p1}$  และ  $\omega_{p2}$  ก็จะทำให้สัญญาณทางด้านขาออกจะมีขนาดเป็นไปตามสมการที่ 3.3 ในช่วงความถี่  $(\omega_{p1}, \omega_{p2})$  ซึ่งในช่วงความถี่นี้มีชื่อเรียกว่าแถบผ่าน ( passband ) ของวงจร  $H(j\omega)$  นั้นจากธรรมชาติการตอบสนองของฟังก์ชันขนาดของ  $H(j\omega)$  ในช่วงความถี่ที่แตกต่างกันของวงจร ทำให้วงจรกรองความถี่สามารถแบ่งออกเป็นแบบย่อยๆได้อีก 5 แบบตามคุณลักษณะของแถบหยุดและแถบผ่านของวงจร ซึ่งเพื่อให้สะดวกในการอธิบายจึงขอสมมติให้วงจรกรองความถี่ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นวงจรกรองความถี่ในเชิงอุดมคติ นั่นคือ การตอบสนองทางเฟสเป็นแบบเชิงเส้นและมีการสูญเสียทางขนาดเป็นศูนย์ในแถบความถี่ผ่านของวงจรและให้การสูญเสียในแถบหยุดของวงจรมีค่าเป็นอนันต์

$$(|H(j\omega)| = 0)$$

### 3.2.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)

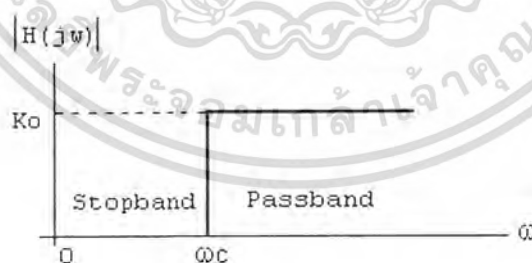
วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรกรองความถี่ที่มีแถบความถี่ผ่านอยู่ในระหว่าง 0 ถึงความถี่คัทออฟ ( cutoff frequency)  $\omega_c$  ในขณะที่ช่วงความถี่ที่สูงกว่าความถี่คัทออฟจะเป็นช่วงแถบความถี่หยุดของวงจร ในกรณีเช่นนี้ค่าแบนด์วิธ ( bandwidth ) ของวงจรมีค่าเท่ากับ  $\omega_c$  เราจะพบว่า การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านในอุดมคติจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านในแบบอุดมคติ

### 3.2.2 วงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่าน (high-pass filter)

วงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่านเป็นวงจรกรองความถี่ที่มีแถบหยุดอยู่ในช่วงความถี่ต่ำระหว่าง 0 และความถี่คutoff  $\omega_c$  ในขณะที่วงจรจะยอมให้ความถี่สูงกว่าความถี่คutoff ผ่านวงจรไปได้ ซึ่งการตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่แบบความถี่สูงผ่านในแบบอุดมคตินั้นจะแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่านในแบบอุดมคติ

### 3.2.3 วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน ( band pass filter )

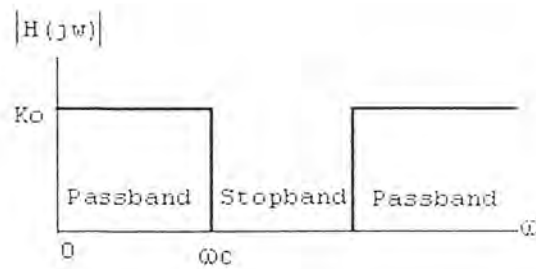
วงจรกรองความถี่แบบความถี่ผ่าน เป็นวงจรกรองความถี่ที่มีแถบความถี่ผ่านของวงจรในช่วงระหว่างความถี่คัทออฟสองความถี่ คือ  $\omega_1$  และ  $\omega_u$  ( $\omega_u > \omega_1$ ) ในขณะที่แถบหยุดของวงจรจะมีอยู่สองแถบคือ ในช่วงระหว่างความถี่ 0 ถึงความถี่คัทออฟ  $\omega_1$  และในช่วงของความถี่สูงกว่าความถี่คัทออฟ  $\omega_u$  ซึ่งผลการตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านในแบบอุดมคตินั้นจะแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านในแบบอุดมคติ

### 3.2.4 วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุด ( band stop filter )

วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุดเป็นวงจรกรองความถี่ที่มีแถบหยุดในช่วงระหว่างความถี่คัทออฟสองความถี่คือ  $\omega_1$  และ  $\omega_u$  ( $\omega_u > \omega_1$ ) ในขณะที่แถบความถี่ผ่านของวงจรจะมีสองแถบคือ ในระหว่าง 0 ถึงความถี่คัทออฟ  $\omega_1$  และในช่วงความถี่ที่สูงกว่าความถี่คัทออฟ  $\omega_u$  สำหรับผลการตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุดในแบบอุดมคติแสดงรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุดในแบบอุดมคติ

วงจรกรองความถี่ที่มีการตอบสนองเชิงความถี่ตามอุดมคตินั้น ไม่สามารถสร้างขึ้นได้จริงซึ่งในทางปฏิบัตินั้นคงใช้วงจรที่มีการตอบสนองเชิงความถี่ประมาณคล้ายกับผลตอบสนองในอุดมคติมาปฏิบัติการต่างๆ เท่านั้น วงจรทางปฏิบัติเบื้องต้นแบบง่ายๆคือ วงจรกรองความถี่ชนิดที่เรียกว่า วงจรกรองความถี่แบบไบควอดซึ่งคุณสมบัติของวงจรไบควอดนั้นจะมีคั้งที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้

### 3.3 รูปแบบสมการฟังก์ชันการถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่แบบไบควอด

สมการแสดงฟังก์ชันการถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่แบบไบควอดนั้นจะมีรูปแบบมาตรฐานดังนี้คือ

$$H(s) = K \frac{s^2 + \frac{\omega_z}{Q_z} + \omega_z^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} s + \omega_p^2} \quad (3.5)$$

โดย  $\omega_z, Q_z, \omega_p$  และ  $Q_p$  คือค่าพารามิเตอร์ที่แสดงถึงค่าความถี่ของซีโร (zero), ค่าควอดิตี้แฟกเตอร์ของซีโร, ค่าความถี่ของโพลและค่าควอดิตี้แฟกเตอร์ของโพลของฟังก์ชันการถ่ายโอน  $H(s)$  ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ (3.5) เปลี่ยนไป จะทำให้ได้วงจรกรองความถี่ชนิดต่างๆ คือ วงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน, วงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่าน, วงจรกรองความถี่แบบ แลบบความถี่ผ่าน และวงจรกรองความถี่แบบความถี่หยุด ได้ซึ่งรูปแบบของฟังก์ชันการถ่ายโอนของ วงจรกรองสัญญาณแบบต่างๆ ดังกล่าวนั้นมีตามลำดับดังต่อไปนี้คือ

สมการฟังก์ชันการถ่าย โอนแบบไปควดของวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน จะมีรูปแบบดังสมการดังต่อไปนี้คือ

$$H(s) = K \frac{\omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} s + \omega_p^2} \quad (3.6)$$

สมการฟังก์ชันการถ่าย โอนแบบไปควดของวงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่านนั้น จะมีลักษณะต่อไปนี้ คือ

$$H(s) = K \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} s + \omega_p^2} \quad (3.7)$$

สมการฟังก์ชันการถ่าย โอนแบบไปควดของวงจรกรองความถี่แบบแลบบความถี่ผ่าน จะมีรูปแบบของสมการ โดยเฉพาะเป็น

$$H(s) = K \frac{\frac{\omega_p}{Q_p} s}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} s + \omega_p^2} \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบไบควอดของวงจรรองความถี่แบบแถบความถี่หยุด จะมีลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างจากฟังก์ชันการถ่ายโอนอื่นๆ ดังนี้คือ

$$H(s) = K \frac{s^2 + \omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p}s + \omega_p^2} \quad (3.9)$$

### 3.4 ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับอีควอลไลเซอร์

อีควอลไลเซอร์ทำหน้าที่เพิ่มหรือลดความดังของความถี่ต่ำ (เสียงทุ้ม) และความดังของความถี่สูง (เสียงแหลม) ในระดับต่างๆตามคสามพอใจของผู้ฟัง โดยไม่ทำให้ความถี่เสียงผ่านภาคนี้อเปลี่ยนแปลงหรือความถี่แปลกปลอมออกไปโดยปรับปุ่มที่อยู่หน้าอีควอลไลเซอร์ตัวอีควอลไลเซอร์จะมีปุ่มปรับอยู่ 2 ปุ่ม คือ

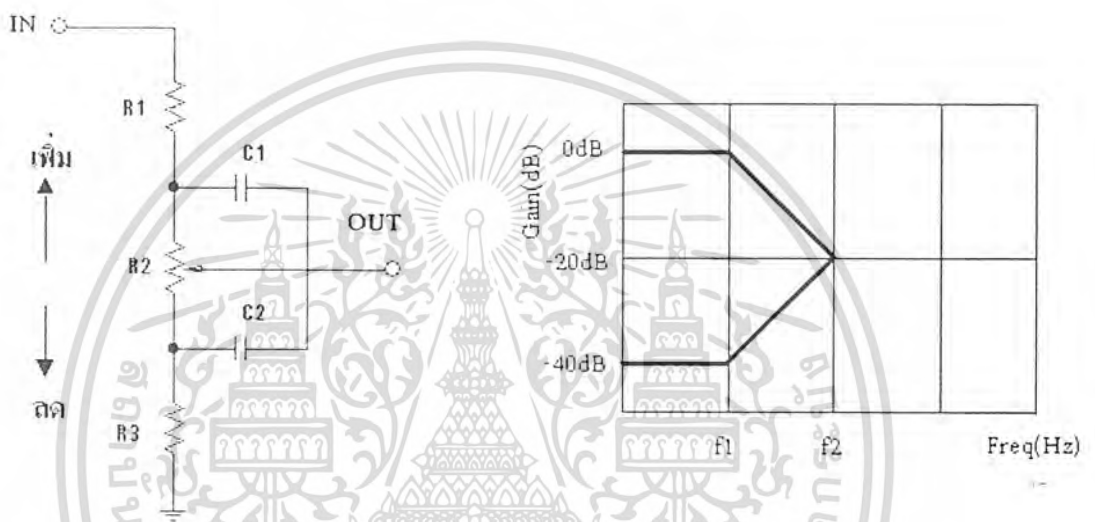
1. ปุ่มปรับเสียงทุ้มหรือเบส (Bass) ทำหน้าที่เพิ่มหรือลดความแรงสัญญาณเสียงความถี่ต่ำ ประมาณ 20 Hz-500Hz ให้ส่งออกเอาท์พุตมากหรือน้อยตามความต้องการ
2. ปุ่มปรับเสียงแหลมหรือทริเบิล (TREBLE) ที่ทำหน้าที่เพิ่มหรือลดความแรงสัญญาณเสียงความถี่สูงประมาณ 2KHz-20KHz ให้ส่งออกเอาท์พุตมากหรือน้อยตามความต้องการ

วงจรออีควอลไลเซอร์โดยทั่วไปจะมีอยู่ 2 แบบคือ แบบพาสซีฟและแบบแอ็กทีฟ

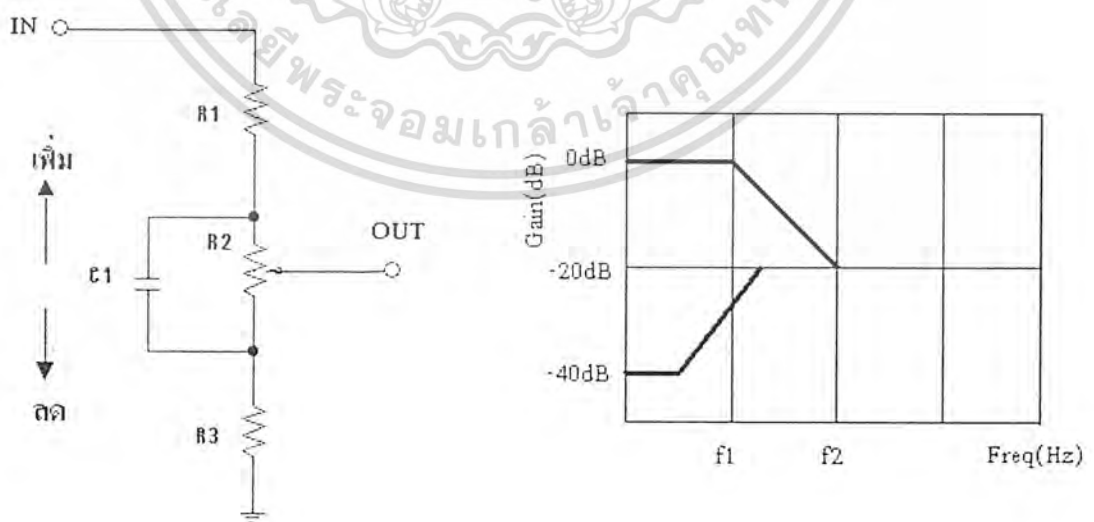
#### 3.4.1 อีควอลไลเซอร์แบบพาสซีฟ (Passive Equalizer)

อีควอลไลเซอร์แบบพาสซีฟ จะถูกกรองผ่านอุปกรณ์ R,L,C โดยไม่มีอัตราขยายส่วนใหญ่นิยมใช้ R,C เป็นตัวควบคุมเพิ่มหรือลดระดับความแรงของสัญญาณช่วงความถี่ที่ต้องการแบ่งปรับเสียงทุ้มและเสียงแหลม

3.4.1.1 อีควอไลเซอร์สำหรับปรับเสียงทุ้ม(Bass) อีควอไลเซอร์ปรับเสียงทุ้มแบบพาสซีฟ ยังแบ่งย่อยแบบปรับทุ้มแบบทั้งไปกับแบบปรับเสียงลดทุ้มได้มาก โดยความแตกต่างกันอยู่ที่การต่อ คาปาซิเตอร์เข้าในวงจรปรับเสียงทุ้มโดยใช้คาปาซิเตอร์ตัวเดียวหรือสองตัวต่อขนานกับตัวต้านทานปรับค่าได้ดังรูป



รูปที่ 3.6 วงจรปรับทุ้มแบบทั่วไป และ กราฟแสดงคุณสมบัติของการปรับเพิ่ม-ลด

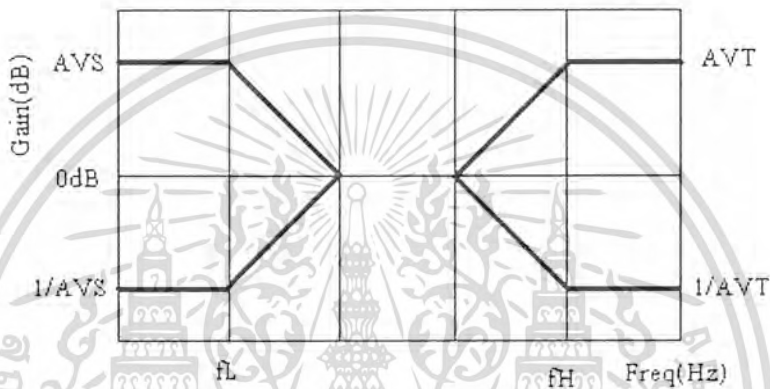


รูปที่ 3.7 วงจรปรับทุ้มแบบลดเสียงทุ้มได้มาก และ กราฟแสดงคุณสมบัติของการปรับเพิ่ม-ลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 คิวไลน์เซอร์แบบเอ็คทีฟ

วงจรคิวไลน์เซอร์แบบเอ็คทีฟ เป็นแบบที่นิยมใช้งานกันโดยทั่วไป เพราะเป็นวงจรคิวไลน์เซอร์ที่มีการขยายสัญญาณเสียงทุ้มเสียงแหลมที่ถูกปรับแต่งแล้วก่อนส่งออกเอาท์พุทและมีวงจรป้อนกลับแบบลบช่วยควบคุมอัตราขยายและป้องกันการออสซิลเลทของวงจร



รูปที่ 3.8 แสดงคุณสมบัติการปรับแต่งเสียงทุ้มและเสียงแหลมของวงจรคิวไลน์เซอร์แบบเอ็คทีฟ

จากรูป 3.8 เป็นกราฟของคิวไลน์เซอร์ ซึ่งมีทั้งทางด้านเสียงทุ้ม(Bass)และเสียงแหลม (Trebel)ซึ่งจะเหมือนกับวงจรคิวไลน์เซอร์แบบพาสซีฟนั่นเองเพียงแต่คิวไลน์เซอร์แบบเอ็คทีฟจะเพิ่มวงจรขยายเข้าไป

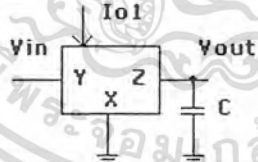
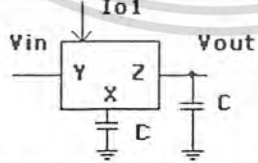
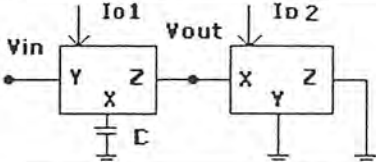
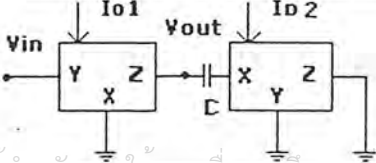
## บทที่ 4

### การออกแบบวงจรกรองความถี่ด้วย CCCII

ในบทนี้จะแสดงการออกแบบวงจรกรองความถี่ในแบบต่างๆและในที่นี่จะแสดงการออกแบบทั้งสองโหมดการทำงานซึ่งในวงจรกรองความถี่ที่ได้ทำการออกแบบมีอยู่ 5 แบบ คือ วงจรกรองความถี่ต่ำ วงจรกรองความถี่สูง วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน วงจรกรองความถี่แถบความถี่ออก และ วงจรกรองความถี่ผ่านตลอด

#### 4.1 วงจรกรองความถี่อันดับหนึ่ง (First Order)

จากตารางรูปแบบข้างล่างนี้จะเป็นวงจรอันดับหนึ่ง (First Order) จะมีทั้งแบบโหมดแรงดันและโหมดกระแสการไบอัสกระแสของ CCCII จะสามารถควบคุม โพล ซีโร หรือ อัตราขยายได้ดังในตารางต่อไปนี้

รูปแบบ	ลักษณะของวงจร	ฟังก์ชันถ่ายโอน $F(s) = V_{out}/V_{in}$
1		$\frac{1}{RxCS}$
2		$\frac{1}{1 + RxCS}$
3		$\frac{Rx2}{Rx1} \frac{Rx1CS}{1 + Rx1CS}$
4		$\frac{Rx2}{Rx1} \frac{1 + Rx2CS}{Rx2CS}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบ	ลักษณะของวงจร	ฟังก์ชันถ่ายโอน $F(s) = V_{out}/V_{in}$
5		$\frac{C1}{C2} \frac{1 - Rx}{1 + Rx} \frac{2C2S}{1C1S}$

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรอันดับหนึ่งในโหมคแรงดัน

รูปแบบ	ลักษณะของวงจร	ฟังก์ชันถ่ายโอน $F(s) = V_{out}/V_{in}$
1		$\frac{1}{RxCs}$
2		$\frac{1}{1 + RxCs}$
3		$\frac{R_x}{R_x} \frac{1 - R_x}{2} \frac{2Cs}{1 + R_x 2Cs}$
4		$\frac{R_x}{R_x} \frac{1 - R_x}{2} \frac{1 + R_x Cs}{R_x Cs}$
5		$\frac{C2}{C1} \frac{1 - R_x}{1 + R_x} \frac{1C2S}{2C1S}$

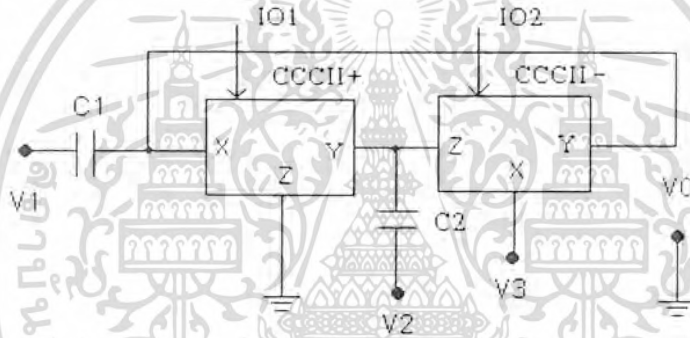
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรอันดับหนึ่งในโหมคกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 วงจรกรองความถี่อันดับสอง (Second Order)

การออกแบบวงจรกรองความถี่อันดับสองสามารถนำวงจรกรองความถี่อันดับหนึ่งมาต่อลำดับกัน(Cascade)ในการออกแบบได้จากสมการคุณสมบัติของ CCCII มาใช้ในการคำนวณซึ่งวงจรที่ได้ออกแบบมีสองแบบคือ โหมดแรงดันและโหมดกระแสซึ่งจะเป็นข้อๆดังนี้

### 4.2.1.การออกแบบวงจรกรองความถี่แบบ โหมดแรงดัน



รูปที่ 4.1 วงจรกรองความถี่โหมดแรงดัน

วงจรกรองความถี่ในโหมดกระแสจะประกอบด้วย CCCII สองตัวและตัวเก็บประจุสองตัวมีสามสัญญาณอินพุตและหนึ่งสัญญาณเอาต์พุต และสามารถหาสมการถ่ายโอนความถี่ดังนี้

โหนดที่ 1

$$I_{c1} + I_{y2} + I_{x1} = 0 \quad (4.1)$$

โหนดที่ 2

$$I_{c2} + I_{y1} + I_{z2} = 0 \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการ (4.1) จากสมการคุณสมบัติ

$$\begin{aligned} Sc_1(V_{x1} - V_1) + \frac{V_{x1}}{R_{x1}} - \frac{V_{y1}}{R_{x1}} &= 0 \\ Sc_1V_{x1} - Sc_1V_1 + \frac{V_{x1}}{R_{x1}} - \frac{V_{y1}}{R_{x1}} &= 0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

แทนค่าสมการที่ (4.2) จากสมการคุณสมบัติ

$$\begin{aligned} Sc_2(V_{y1} - V_2) + \frac{V_{x2}}{R_{x2}} - \frac{V_{y2}}{R_{x2}} &= 0 \\ Sc_2V_{y1} - Sc_2V_2 + \frac{V_{x2}}{R_{x2}} - \frac{V_{y2}}{R_{x2}} &= 0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

จากวงจรเมื่อ  $V_{x1} = V_{y2} = V_0$  แทนค่าในสมการ (4.3)

$$\begin{aligned} Sc_1V_0 - Sc_1V_1 + \frac{V_0}{R_{x2}} - \frac{V_{y1}}{R_{x2}} &= 0 \\ \therefore V_{y1} &= -Sc_1R_{x2}V_1 + V_0(Sc_1R_{x2} + 1) \end{aligned} \quad (4.5)$$

แทนค่าสมการที่ (4.5) ใน สมการที่ (4.4)

$$V_0 = \frac{V_2 + \frac{V_3}{Sc_1R_{x2}} + Sc_1R_{x1}V_1}{Sc_1R_{x2} + \frac{1}{Sc_2R_{x2}} + 1}$$

$$V_0 = \frac{S^2C_1C_2R_{x1}R_{x2}V_1 + Sc_2R_{x2}V_2 + V_3}{S^2C_1C_2R_{x1}R_{x2} + Sc_2R_{x2} + 1} \quad (4.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนความถี่ที่ได้ในสมการที่สามารถนำไปทำเป็นวงจรกรองความถี่ได้ 5 แบบ โดยกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าดังต่อไปนี้

1. ถ้า  $V1=V2=0$  และ  $Vin=V3$  จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการ (4.6) ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองซึ่งจะมีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{Vo}{Vin} = \frac{1}{S^2C1C2Rx1Rx2 + Sc2Rx2 + 1} \quad (4.7)$$

2. ถ้า  $V2=V3=0$  และ  $Vin=V1$  จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการ (4.6) ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับสองซึ่งจะมีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{Vo}{Vin} = \frac{S^2C1C2Rx1Rx2}{S^2C1C2Rx1Rx2 + Sc2Rx2 + 1} \quad (4.8)$$

3. ถ้า  $V1=V3=0$  และ  $V2=Vin$  จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการ (4.6) ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองแถบความถี่อันดับสองซึ่งจะมีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{Vo}{Vin} = \frac{Sc2Rx2}{S^2C1C2Rx1Rx2 + Sc2Rx2 + 1} \quad (4.9)$$

4. ถ้า  $V2=0$  และ  $V1=V3=Vin$  จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการ (4.6) ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองแถบความถี่ออกอันดับสองซึ่งจะมีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{Vo}{Vin} = \frac{S^2C1C2Rx1Rx2 + 1}{S^2C1C2Rx1Rx2 + Sc2Rx2 + 1} \quad (4.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ถ้า  $V_1 = -V_2 = V_3 = V_{in}$  จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการ (4.6) ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่ผ่านตลอดอันดับสองซึ่งจะมีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} - S c_2 R_{x2} + 1}{S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} + S c_2 R_{x2} + 1} \quad (4.11)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่สร้างขึ้นจะพบสมการเหล่านี้จะมีรูปสมการที่มีส่วนเหมือนกันกล่าวคือทุกสมการจะมีส่วนเป็นดังนี้

$$S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} + S c_2 R_{x2} + 1 \quad (4.12)$$

ดังนั้นแสดงว่าวงจรกรองความถี่ทั้ง 5 แบบที่สร้างขึ้นจะมีค่า โพล (poles) และค่า Q ของโพลที่เท่ากัน ซึ่งรูปแบบมาตรฐานของส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนจะเป็นดังนี้

$$S^2 + \frac{\omega_o S}{Q} + \omega_o^2 \quad (4.13)$$

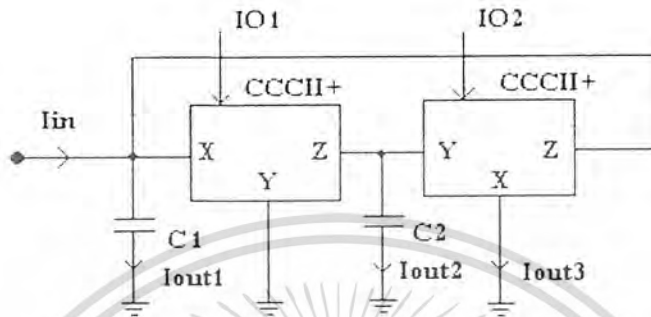
เมื่อทำการเปรียบเทียบสมการที่คำนวณ (4.12) กับสมการรูปแบบมาตรฐาน (4.13) จะได้ค่าของความถี่เชิงมุม ( $\omega_o$ ) และ ค่าแฟกเตอร์ (Q) ดังนี้

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_{x1} R_{x2}}}$$

$$Q = \sqrt{\frac{C_1 R_{x1}}{C_2 R_{x2}}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่โหมดกระแส



รูป 4.2 วงจรกรองความถี่โหมดกระแส (แบบที่ 1)

วงจรกรองความถี่โหมดกระแสจะประกอบด้วย CCCII สองตัวและตัวเก็บประจุสองตัวมีหนึ่งสัญญาณอินพุตและสามสัญญาณเอาต์พุต และสามารถหาสมการถ่ายโอนความถี่ดังนี้

โหนดที่ 1

$$I_{in} + I_{x1} + I_{z2} + I_{c1} = 0 \quad (4.14)$$

โหนดที่ 2

$$I_{c2} + I_{z1} + I_{y2} = 0 \quad (4.15)$$

จากสมการ (4.14) แทนค่าจากคุณสมบัติ

$$I_{in} + V_{x1}/R_x - V_{y1}/R_x + V_{x2}/R_x - V_{y2}/R_x + S_c1R_x = 0$$

$$I_{in} + V_{x1}/R_x - V_{y2}/R_x + S_c1R_x = 0$$

$$I_{in}R_x + V_{x1}(S_c1 + 1) = V_{y2} \quad (4.16)$$

จากสมการที่ (4.15) แทนค่าจากคุณสมบัติ

$$S_c2V_{y2} + I_{z2} + I_{y2} = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{y2} = -V_{x1} / S c_2 R_x \quad (4.17)$$

แทนค่าสมการ (4.17) ใน สมการ (4.15) จะได้

$$I_{in} S c_2 R_x + V_{x1} (S^2 c_1 c_2 R_x + S c_2 R_x + 1) = 0 \quad (4.18)$$

จากสมการที่ (4.18) สามารถนำไปใช้เป็นวงจรองความถี่แบบต่างๆ ได้ 3 แบบคือวงจรองความถี่ต่ำ วงจรองความถี่สูง และ วงจรองแถบความถี่ผ่าน ซึ่งจะกำหนดสัญญาณออกซึ่งจะกล่าวต่อไปนี้

1. จากสมการ (4.18) แทนค่า  $S c_1 V_{x1} = I_{c1}$  จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการ (4.18) ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองซึ่งจะมีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{I_{c1}}{I_{in}} = \frac{S^2 c_1 c_2 R_x^2}{S^2 c_1 c_2 R_x^2 + S c_2 R_x + 1} \quad (4.19)$$

2. จากสมการ (4.18) แทนค่า  $V_{x1} = V_{y1} + I_{x1} R_x$  และ  $I_{x1} = I_{Z1} = -I_{c2}$  จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนตาม สมการ (4.18) ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรองความถี่สูงผ่านอันดับสองซึ่งจะมีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{I_{c2}}{I_{in}} = \frac{S c_2 R_x}{S^2 c_1 c_2 R_x^2 + S c_2 R_x + 1} \quad (4.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จากสมการ (4.18) แทนค่า  $V_{x1} = -V_{y2} S C_2 R_X$  แต่  $V_{y2} = V_{x2} - I_{x2} R_X$  จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการ (4.18) ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่แถบผ่านอันดับสองซึ่งจะมีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{I_{x2}}{I_{in}} = \frac{1}{S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} + S C_2 R_{x2} + 1} \quad (4.21)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่สร้างขึ้นจะพบสมการเหล่านี้จะมีรูปสมการที่มีส่วนเหมือนกันกล่าวคือทุกสมการจะมีส่วนเป็นดังนี้

$$S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} + S C_2 R_{x2} + 1 \quad (4.22)$$

ดังนั้นแสดงว่าวงจรกรองความถี่ทั้ง 3 แบบที่สร้างขึ้นจะมีค่า โพล (poles) และค่า Q ของโพลที่เท่ากัน ซึ่งรูปแบบมาตรฐานของส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนจะเป็นดังนี้

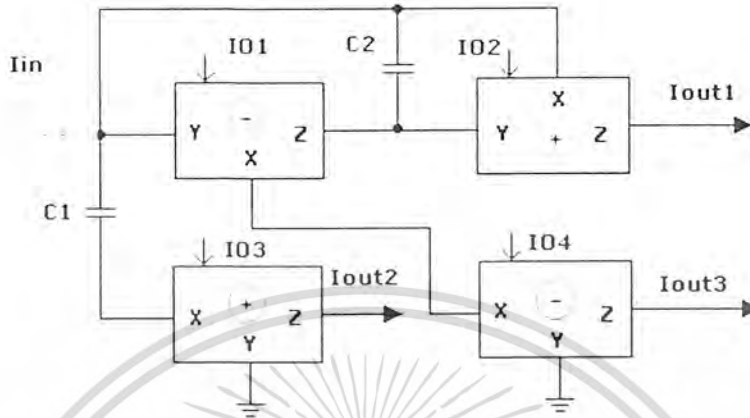
$$S^2 + \frac{\omega_0 S}{Q} + \omega_0^2 \quad (4.23)$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมการที่คำนวณ (4.22) กับสมการรูปแบบมาตรฐาน (4.23) จะได้ค่าของความถี่เชิงมุม ( $\omega_0$ ) และ ค่าแฟกเตอร์ (Q) ดังนี้

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_{x1} R_{x2}}}$$

$$Q = \sqrt{\frac{C_1 R_{x1}}{C_2 R_{x2}}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 วงจรกรองความถี่ใน โหนดกระแส (แบบที่ 2)

จากวงจรกรองความถี่ในแบบที่ 2 นี้ได้มีการปรับให้สามารถสร้างวงจรกรองได้ทั้ง 5 แบบ โดยใช้ CCCII จำนวน 4 ตัวและตัวเก็บประจุ 2 ตัว ซึ่งจะรับสัญญาณอินพุตหนึ่งอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตสามเอาต์พุต ซึ่งในวงจรกำหนดให้โวลต์เดจที่ขา X ตัวที่ 3 และ 4 มีค่าใกล้เคียงศูนย์ดังรูป และ สามารถหาสมการถ่ายโอนความถี่ได้ดังนี้

โหนดที่ 1

$$I_{in} + I_{c1} + I_{c2} + I_{x2} = 0 \quad (4.24)$$

โหนดที่ 2

$$I_{z2} + I_{c2} = 0 \quad (4.25)$$

แทนค่าสมการ (4.24) จากสมการคุณสมบัติ

$$I_{in} + sC_1 V_{y1} + sC_2 (V_{x2} - V_{y2}) + \frac{V_{x2}}{R_{x2}} - \frac{V_{y2}}{R_{x2}} = 0 \quad (4.26)$$

แทนค่าสมการ (4.25) จากสมการคุณสมบัติ

$$\text{จากวงจร } V_{x2} = V_{y1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-\frac{V_{x1}}{R_{x1}} + \frac{V_{y1}}{R_{x1}} + S c_2 (V_{y2} - V_{x2}) = 0$$

$$\therefore V_{y2} = V_{y1} - \frac{V_{y1}}{S C_2 R_{x1}} \quad (4.27)$$

แทนค่าสมการ (4.27) ใน สมการ (4.26) จะได้

$$I_{in} + S c_1 V_{y1} + S c_2 (V_{y1} - V_{y1} + \frac{V_{y1}}{S c_2 R_{x1}}) + \frac{V_{y1}}{R_{x2}} - \frac{V_{y1}}{R_{x2}} + \frac{V_{y1}}{S c_2 R_{x1} R_{x2}} = 0$$

$$I_{in} S c_2 R_{x1} R_{x2} + V_{y1} (S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} + S c_2 R_{x2} + 1) = 0 \quad (4.28)$$

จากสมการที่ (4.28) สามารถนำไปใช้เป็นวงจรองความถี่ใน โหมดกระแสแบบต่างๆ ได้ 5 แบบคือ วงจรองความถี่ต่ำ วงจรองความถี่สูง และ วงจรองแถบความถี่ผ่าน ซึ่งจะกำหนดสัญญาณออกซึ่งจะกล่าวต่อไปนี้

1. จากสมการ (4.28) แทนค่า  $V_{y1} = S c_2 R_{x1} R_{x2}$  จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ทำหน้าที่เป็นวงจรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองซึ่งจะมีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\therefore \frac{I_{out 1}}{I_{in}} = \frac{1}{S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} + S c_2 R_{x2} + 1} \quad (4.29)$$

2. จากสมการ (4.28) แทนค่า  $V_{y1} = I_{c1} / S c_1$  จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ทำหน้าที่เป็นวงจรองความถี่สูงผ่านอันดับสองซึ่งจะมีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\therefore \frac{I_{out 2}}{I_{in}} = \frac{S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2}}{S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} + S c_2 R_{x2} + 1} \quad (4.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จากสมการ (4.28) แทนค่า  $V_{y1} = I_{x1} R_{x1}$  จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองแถบความถี่ผ่านอันดับสองซึ่งจะมีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\therefore \frac{I_{out3}}{I_{in}} = \frac{-SC^2R_{x2}}{S^2C_1C_2R_{x1}R_{x2} + Sc^2R_{x2} + 1} \quad (4.31)$$

4. เมื่อต่อสัญญาณเอาต์พุต  $I_{out1}$  กับ  $I_{out2}$  รวมกันจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองแถบความถี่ออกอันดับสองซึ่งจะมีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\therefore \frac{I_{out4}}{I_{in}} = \left[ \frac{S^2C_1C_2R_{x1}R_{x2} + 1}{S^2C_1C_2R_{x1}R_{x2} + Sc^2R_{x2} + 1} \right] \quad (4.32)$$

5. เมื่อต่อสัญญาณเอาต์พุต  $I_{out1}$   $I_{out2}$  และ  $I_{out3}$  รวมกันจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่ผ่านตลอดอันดับสองซึ่งจะมีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\therefore \frac{I_{out5}}{I_{in}} = \left[ \frac{S^2C_1C_2R_{x1}R_{x2} - Sc^2R_{x2} + 1}{S^2C_1C_2R_{x1}R_{x2} + Sc^2R_{x2} + 1} \right] \quad (4.33)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่สร้างขึ้นจะพบสมการเหล่านี้จะมีรูปสมการที่มีส่วนเหมือนกันกล่าวคือทุกสมการจะมีส่วนเป็นดังนี้

$$S^2C_1C_2R_{x1}R_{x2} + Sc^2R_{x2} + 1 \quad (4.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นแสดงว่าวงจรสองความถี่ที่ 5 แบบที่สร้างขึ้นจะมีค่า โพล (poles) และค่า Q ของ โพลที่เท่ากัน ซึ่งรูปแบบมาตรฐานของส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนจะเป็นดังนี้

$$S^2 + \frac{\omega_0 S}{Q} + \omega_0^2 \quad (4.35)$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมการที่คำนวณ (4.34) กับสมการรูปแบบมาตรฐาน (4.35) จะได้ค่าของความถี่เชิงมุม ( $\omega_0$ ) และ ค่าแฟกเตอร์ (Q) ดังนี้

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_{x1} R_{x2}}}$$

$$Q = \sqrt{\frac{C_1 R_{x1}}{C_2 R_{x2}}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การจำลองการทำงานของวงจรด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

#### ผลการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice

Pspice เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองผลการทำงานของวงจรเป็นโปรแกรมที่ตรวจสอบความถูกต้องในการทำงานว่าวงจรที่เราออกแบบของวงจรตรงกับทฤษฎีหรือไม่

ในบทนี้ได้นำ Pspice มาใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรองความถี่ทั้ง 2 โหมดที่เราได้ออกแบบมาเป็นข้อๆดังนี้

#### 5.1 ผลการจำลองวงจรองความถี่แบบโหมดแรงดัน

วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรองความถี่โหมดแรงดันมีแสดงดังรูปที่ 5.1 ซึ่งในวงจรที่นำเสนอตั้งค่ากำหนด  $C1=C2=0.22\mu F$  และ กระแสไบอัส  $IO1=IO2=50\mu A$  เพื่อการยืนยันว่าการวิเคราะห์ที่ตามทฤษฎี ซึ่งวงจรจะใช้พารามิเตอร์ของไบโพล่าทรานซิสเตอร์เบอร์ NX1(NPN) และ PX1(PNP) ใช้ไฟเลี้ยงวงจร  $\pm 5V$

จากสมการความต้านทานแฝง

$$R_x = \frac{VT}{2IO} = \frac{26mV}{2IO} = \frac{26mV}{2(50\mu A)} = 260\Omega$$

จากสมการความถี่ศูนย์กลาง

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{C1C2Rx1Rx2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า

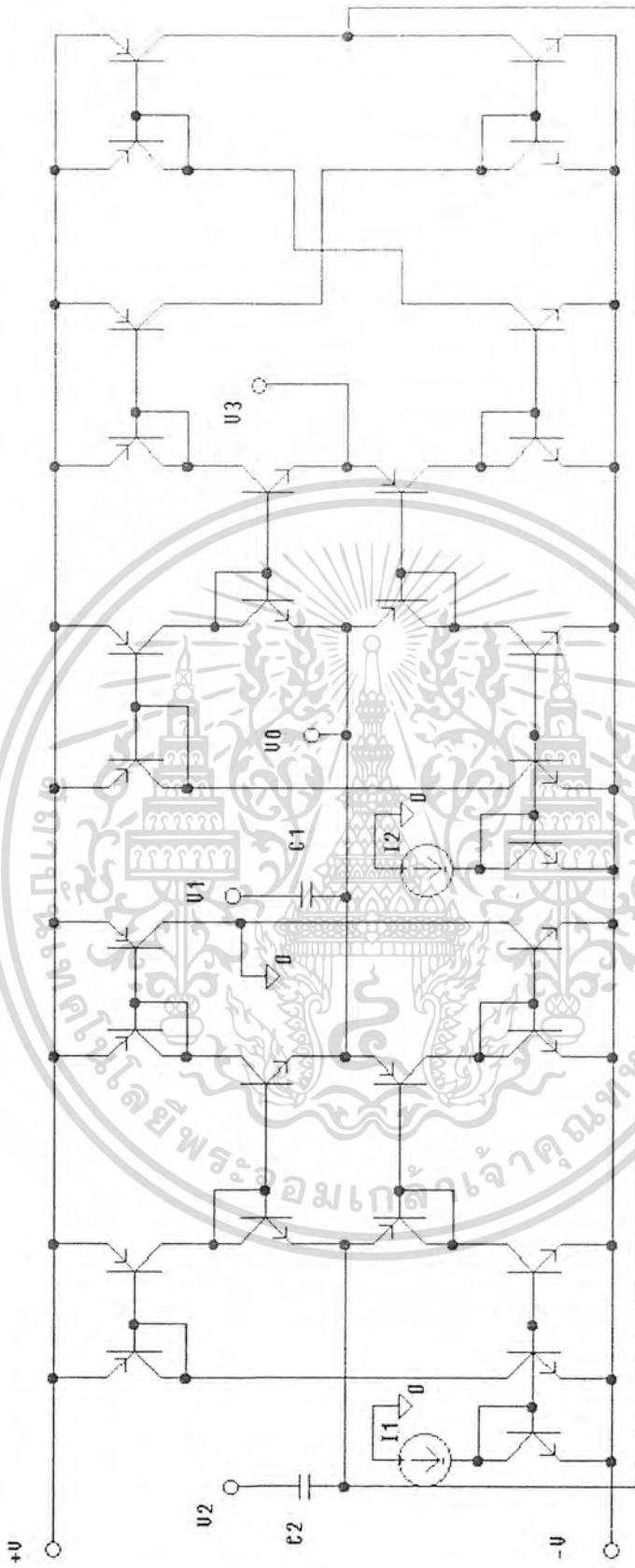
$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{0.22\mu F \times 0.22\mu F \times 260\ \Omega \times 260\ \Omega}} = 17482.517$$

$$f_o = \frac{17482.517}{2\pi} = 2.782\text{ KHz}$$

ซึ่งจะได้ผลการจำลองการทำงานทั้งด้านขนาดและเฟสตามลำดับดังต่อไปนี้

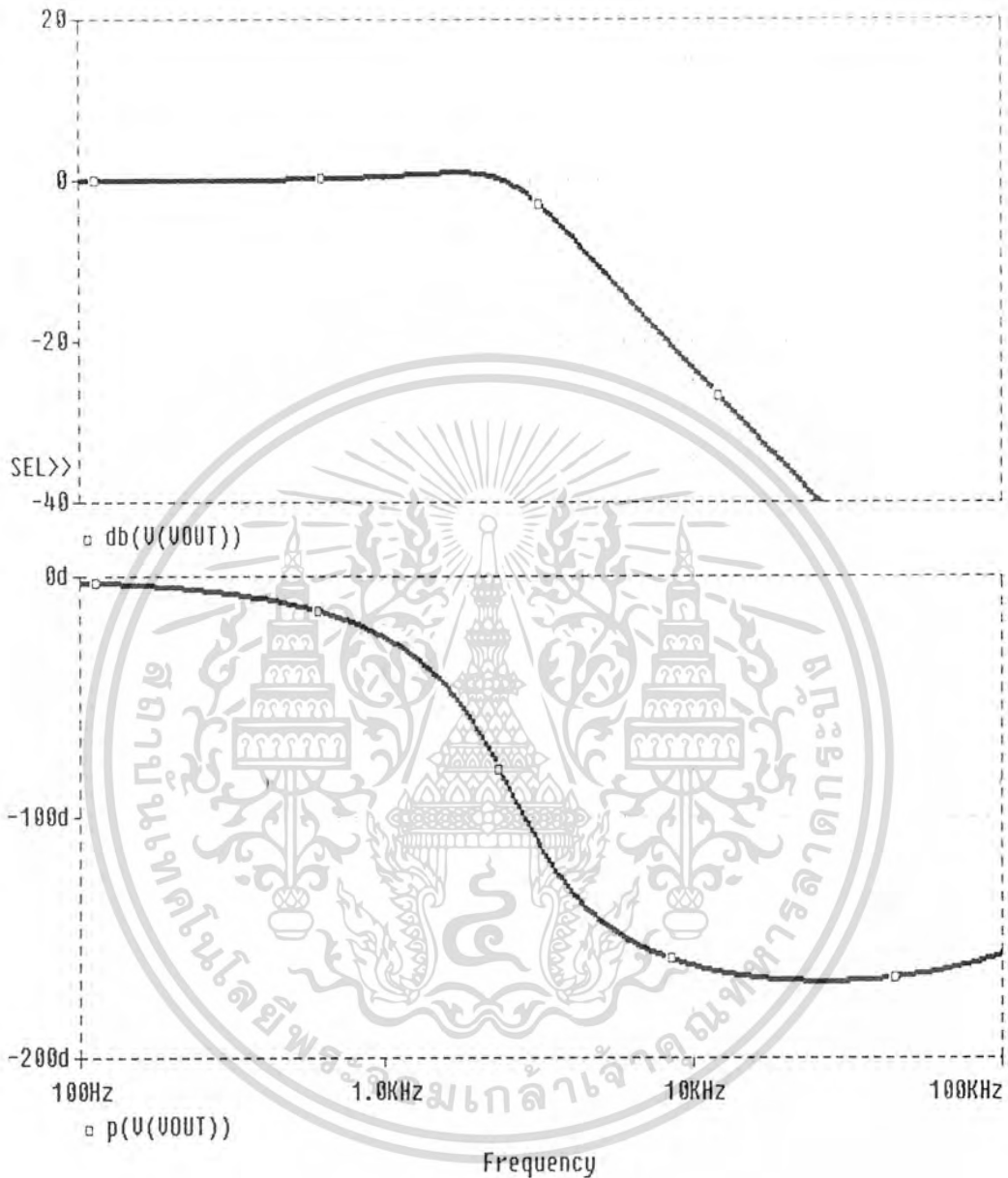


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



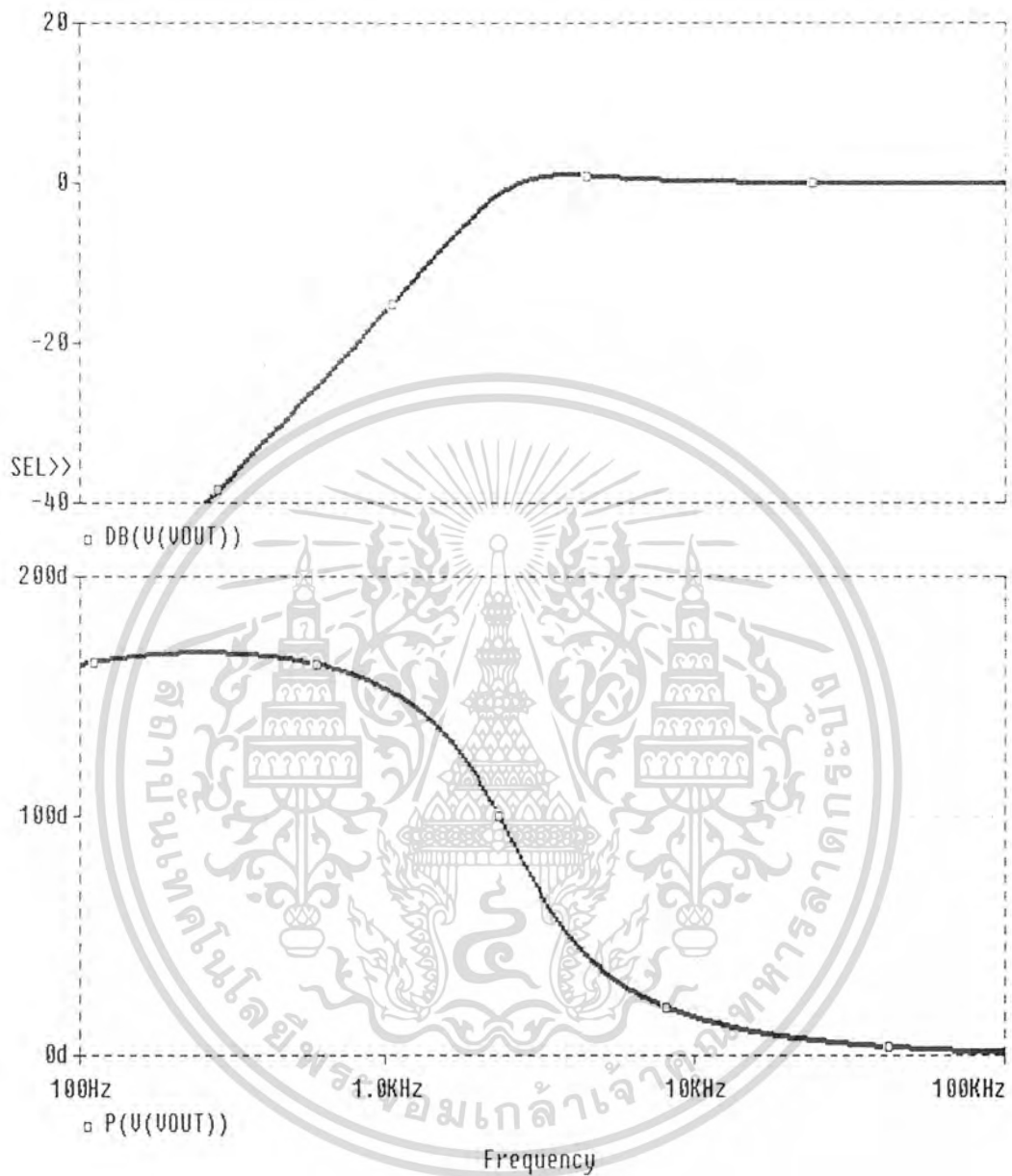
รูปที่ 5.1 วงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟังก์ชันของความถี่โมเมนต์แรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



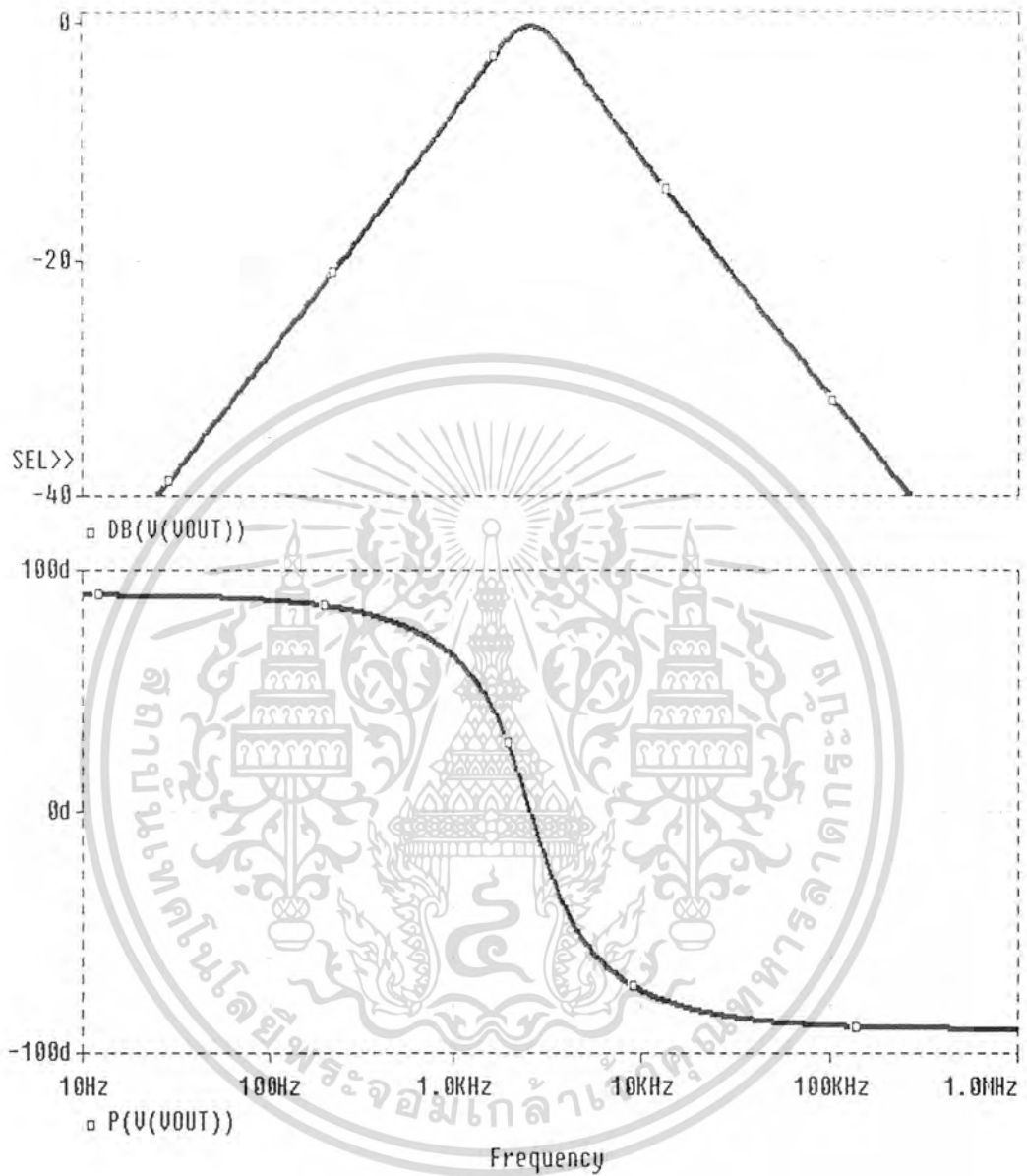
รูปที่ 5.1.1 ผลการจำลองการทำงานของวงจรองความถี่ต่ำทั้งด้านขนาดและเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



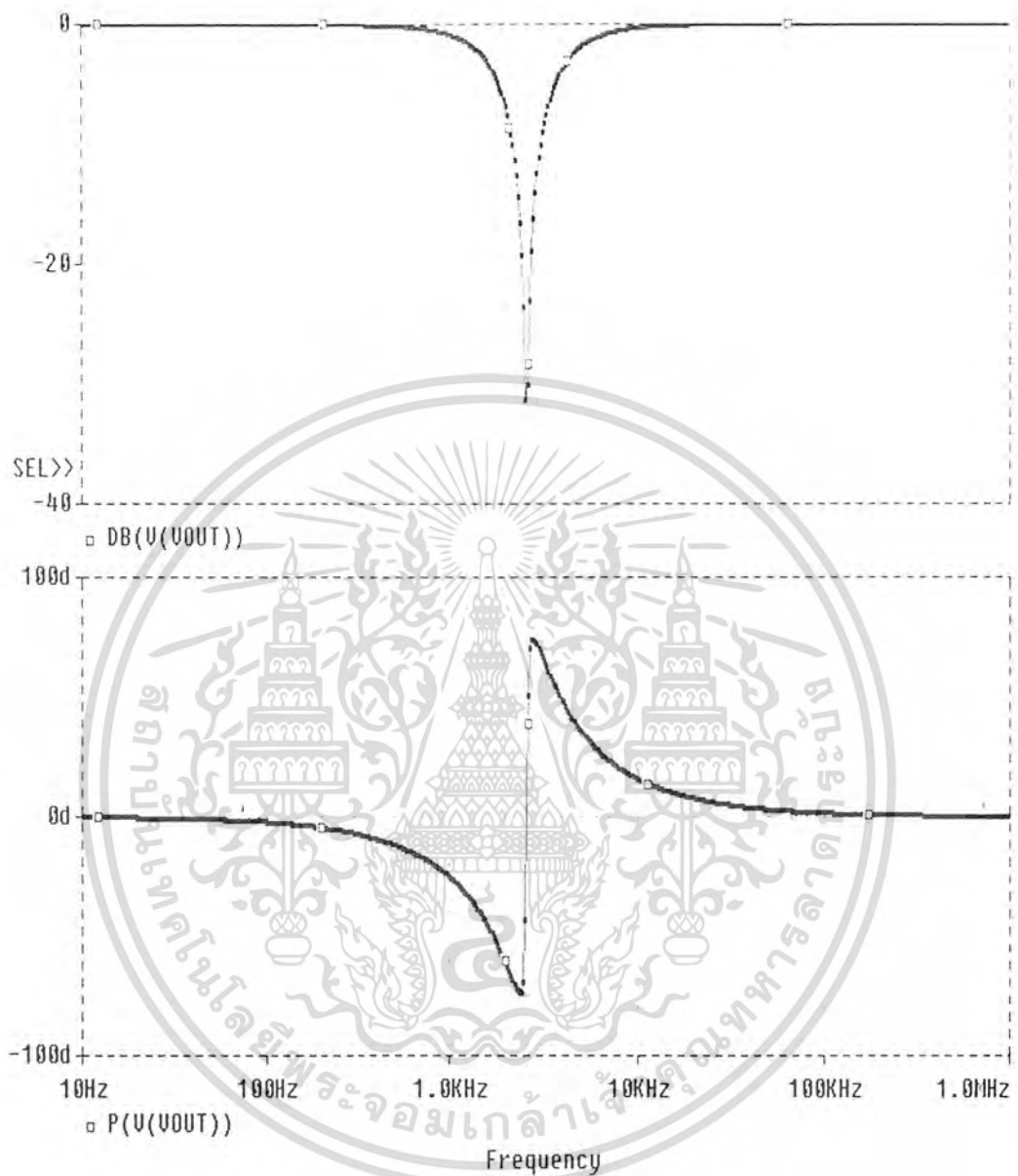
รูปที่ 5.1.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่สูงทั้งด้านขนาดและเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



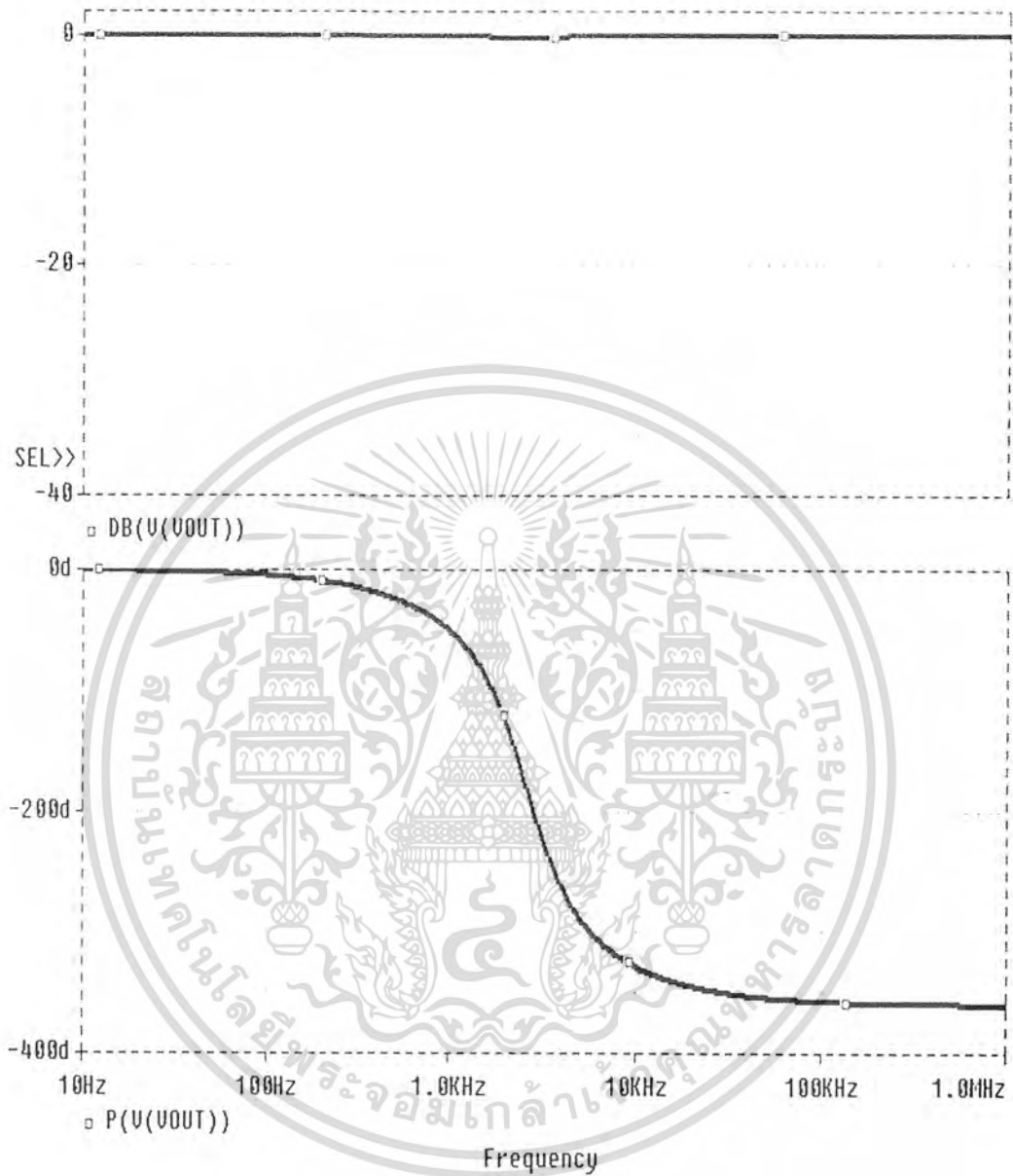
รูปที่ 5.1.3 ผลการจำลองการทำงานของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านด้านขนาดและเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1.4 ผลการจำลองการทำงานของวงจรกรองแถบความถี่ออกทั้งด้านขนาดและเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1.5 ผลการจำลองการทำงานของวงจรความถี่ผ่านตลอดทั้งด้านขนาดและเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 การจำลองวงจรกรองความถี่แบบโหมดกระแส

### 5.2.1 วงจรกรองความถี่แบบโหมดกระแสแบบที่ 1

วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่โหมดกระแสมีแสดงดังรูปที่ 5.2 ซึ่งในวงจรที่นำเสนอตั้งค่ากำหนด  $C1=C2=0.22\mu F$  และ กระแสไบอัส  $IO1=IO2=50\mu A$  เพื่อการยืนยันว่าการวิเคราะห์ตามทฤษฎี ซึ่งวงจรจะใช้พารามิเตอร์ของไบโพล่าทรานซิสเตอร์เบอร์ NX1(NPN)และPX1(PNP)ใช้ไฟเลี้ยงวงจร $\pm 5V$

จากสมการความต้านทานแฝง

$$R_x = \frac{VT}{2IO} = \frac{26mV}{2IO} = \frac{26mV}{2(50\mu A)} = 260\Omega$$

จากสมการความถี่ศูนย์กลาง

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{C1C2Rx1Rx2}}$$

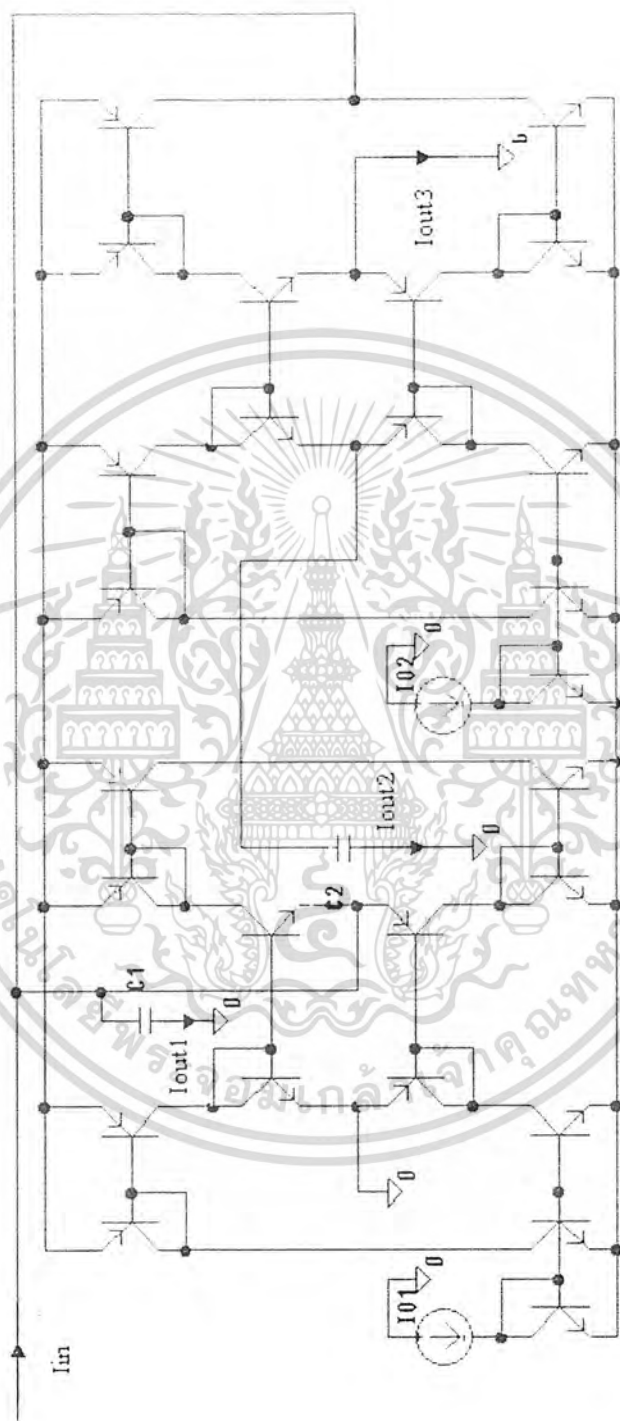
แทนค่า

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{0.22\mu F \times 0.22\mu F \times 260\Omega \times 260\Omega}} = 17482.517$$

$$f_o = \frac{17482.517}{2\pi} = 2.782\text{ KHz}$$

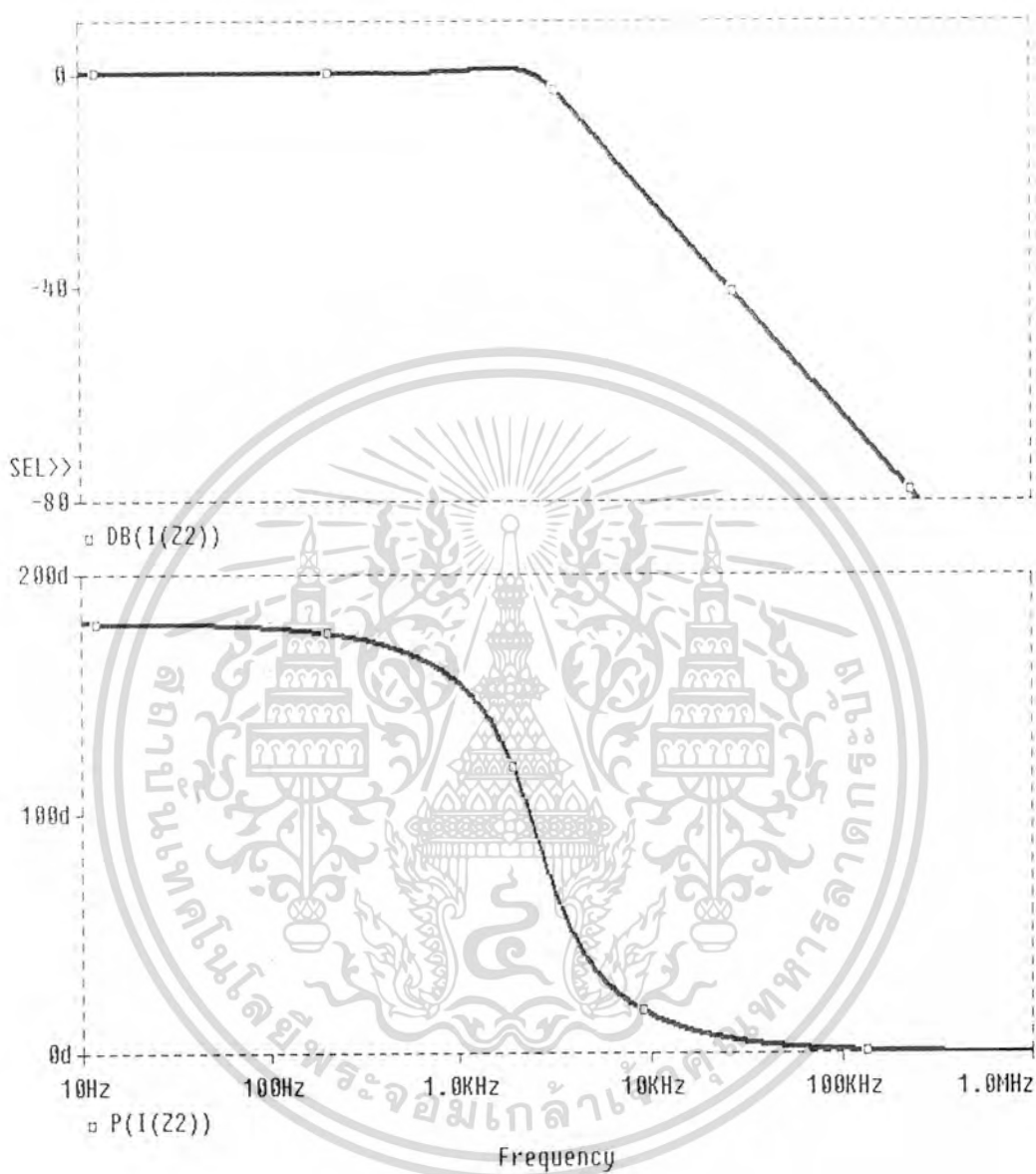
ซึ่งจะได้ผลการจำลองการทำงานทั้งด้านขนาดและเฟสตามลำดับดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



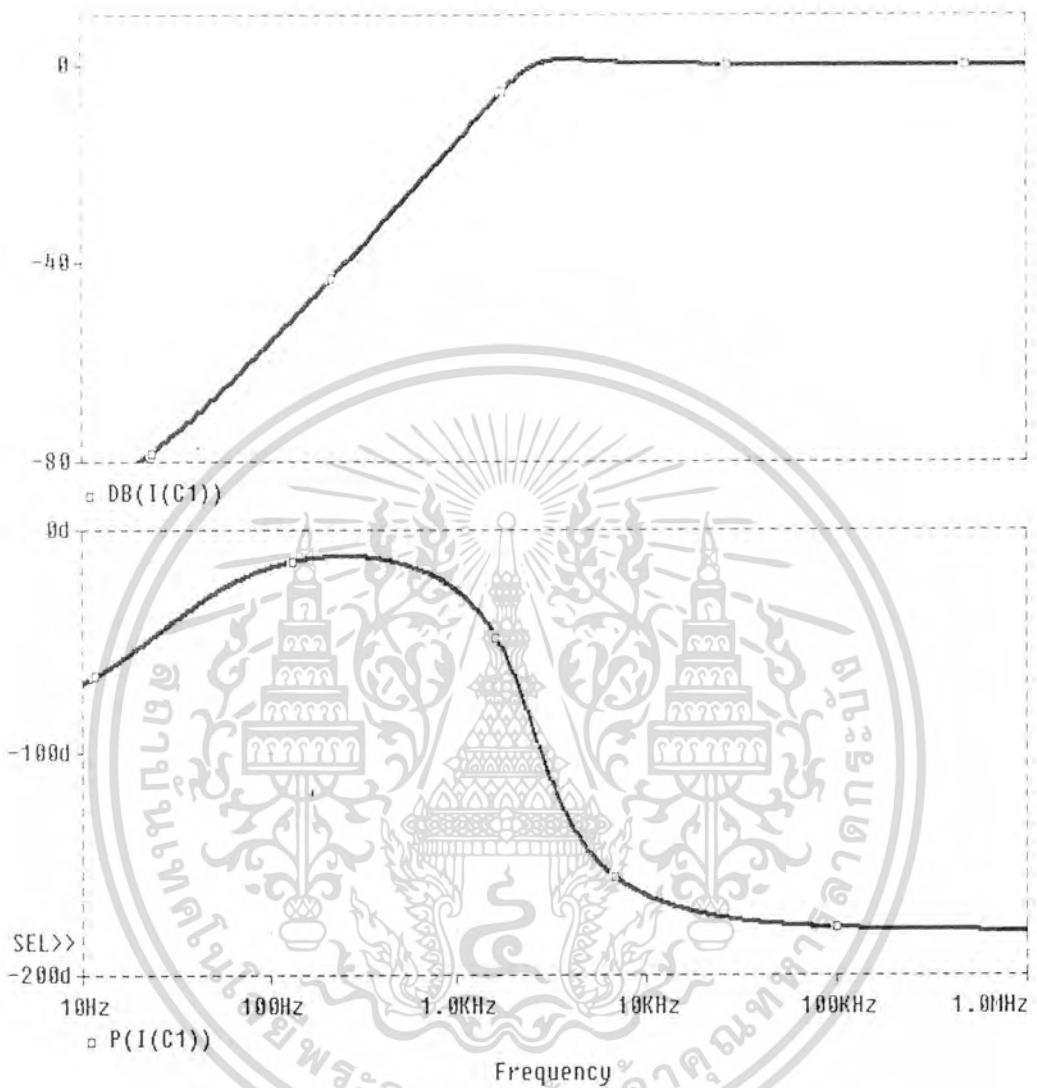
รูปที่ 5.2 วงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางจกรรองความถี่ใน โหมดกระแส (แบบที่ 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



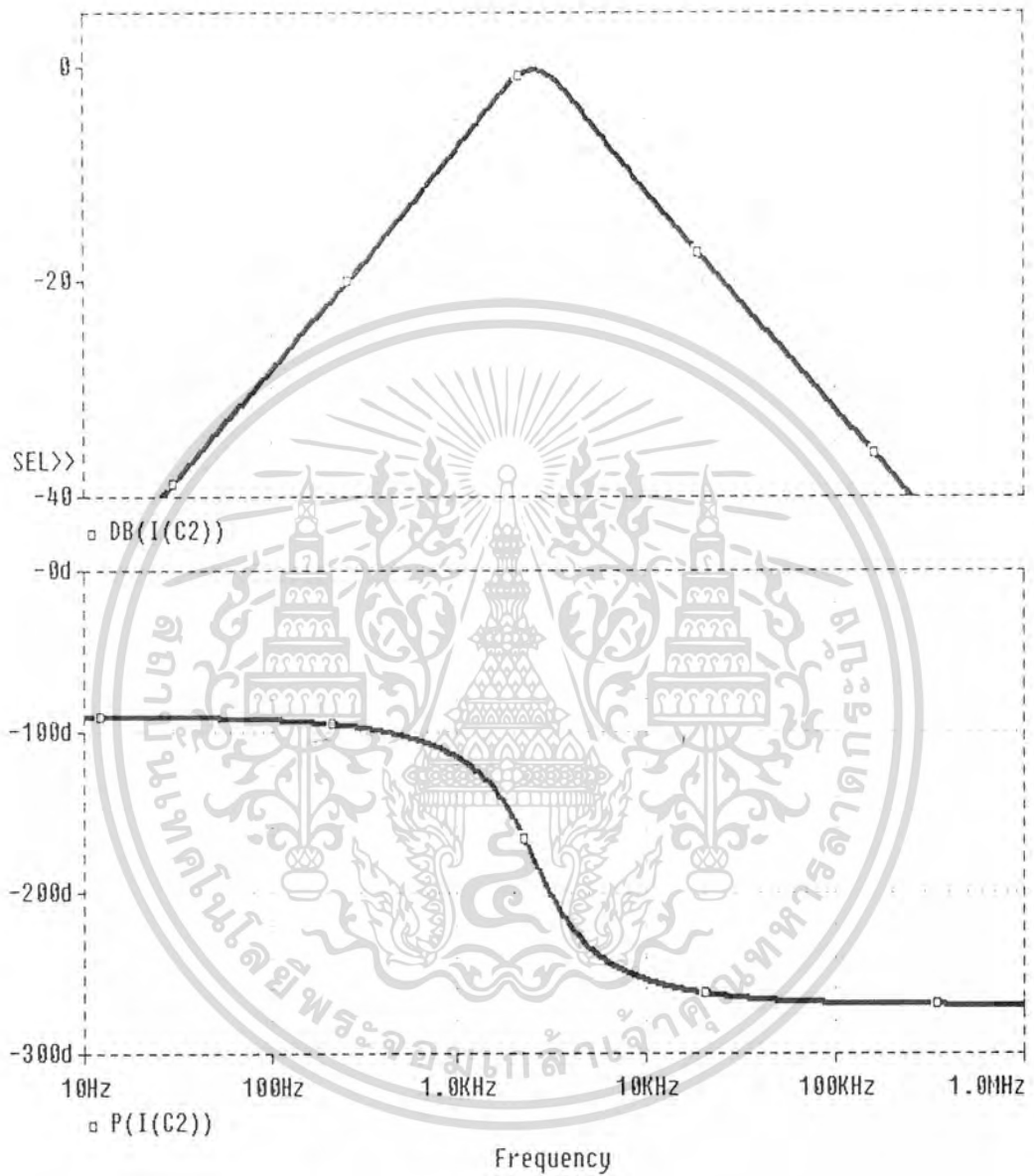
รูปที่ 5.2.1 ผลการจำลองการทำงานของวงจรความถี่ต่ำ โหมดกระแสแบบที่ 1 ทั้งด้านขนาด และ เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรความถี่สูง โหมดกระแสแบบที่ 1 ทั้งด้านขนาด และเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรความถี่สูงโหมคระแสบแบบที่ 1 ทั้งด้านขนาด

และเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2 วงจรกรองความถี่แบบโหมดกระแสแบบที่ 2

วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่โหมดกระแสมีแสดงดังรูปที่ 5.3 ซึ่งในวงจรที่นำเสนอตั้งค่ากำหนด  $C1=C2=0.22\mu F$  และ กระแสไบอัส  $IO1=IO2=50\mu A$  เพื่อการยืนยันว่าการวิเคราะห์หาค่าตามทฤษฎี ซึ่งวงจรจะใช้พารามิเตอร์ของไบโพล่าทรานซิสเตอร์เบอร์ NX1(NPN) และ PX1(PNP) ใช้ไฟเลี้ยงวงจร  $\pm 5V$

จากสมการความต้านทานแฝง

$$R_x = \frac{VT}{2IO} = \frac{26mV}{2IO} = \frac{26mV}{2(50\mu A)} = 260\Omega$$

จากสมการความถี่ศูนย์กลาง

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C1C2Rx1Rx2}}$$

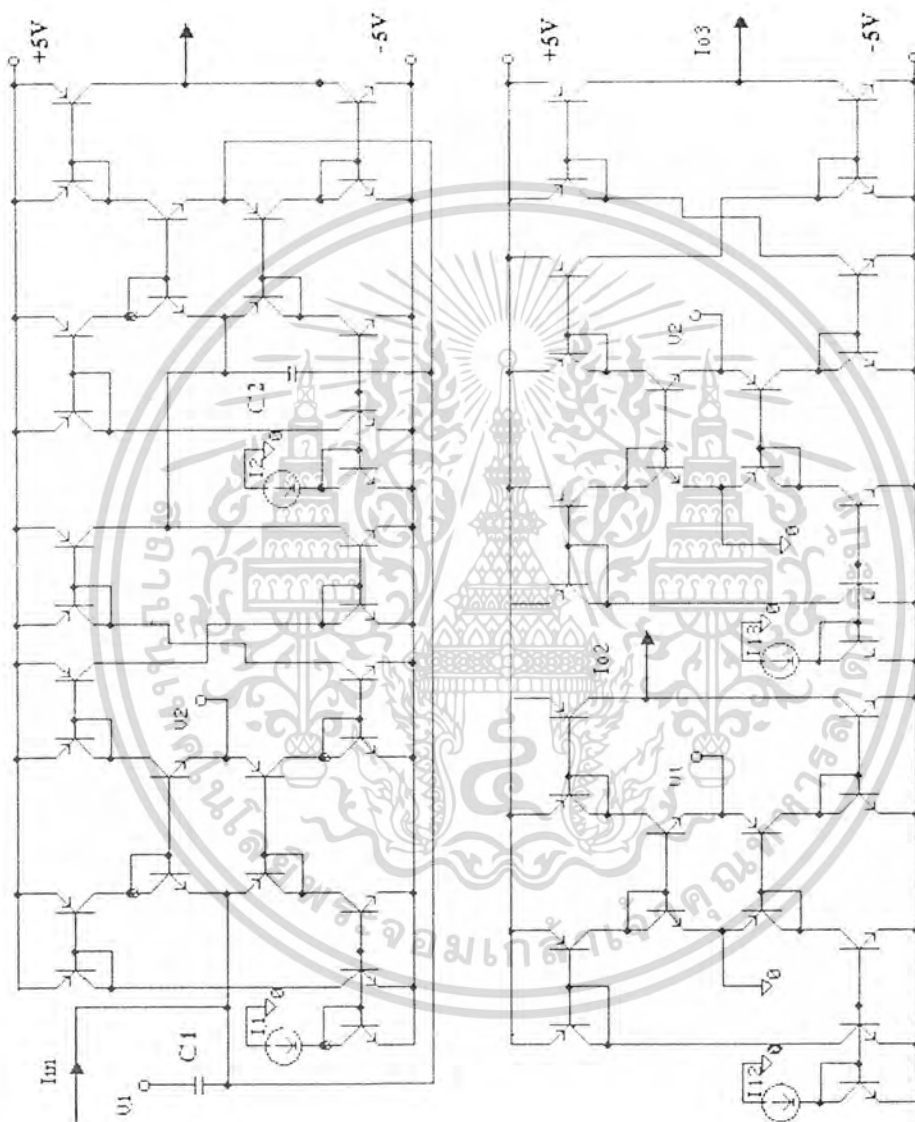
แทนค่า

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{0.22\mu F \times 0.22\mu F \times 260\Omega \times 260\Omega}} = 17482.517$$

$$f_0 = \frac{17482.517}{2\pi} = 2.782 \text{ KHz}$$

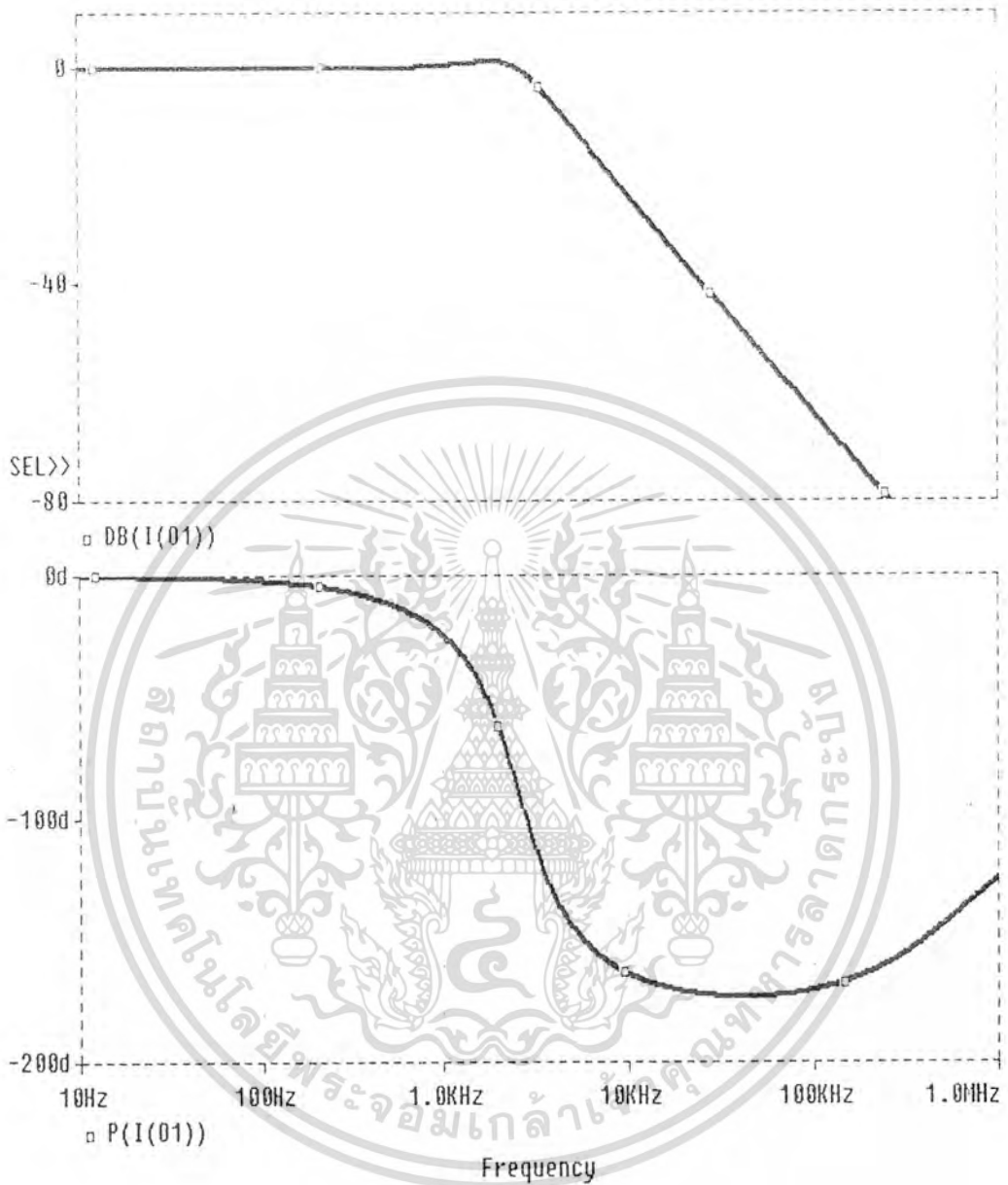
ซึ่งจะได้ผลการจำลองการทำงานทั้งด้านขนาดและเฟสตามลำดับดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



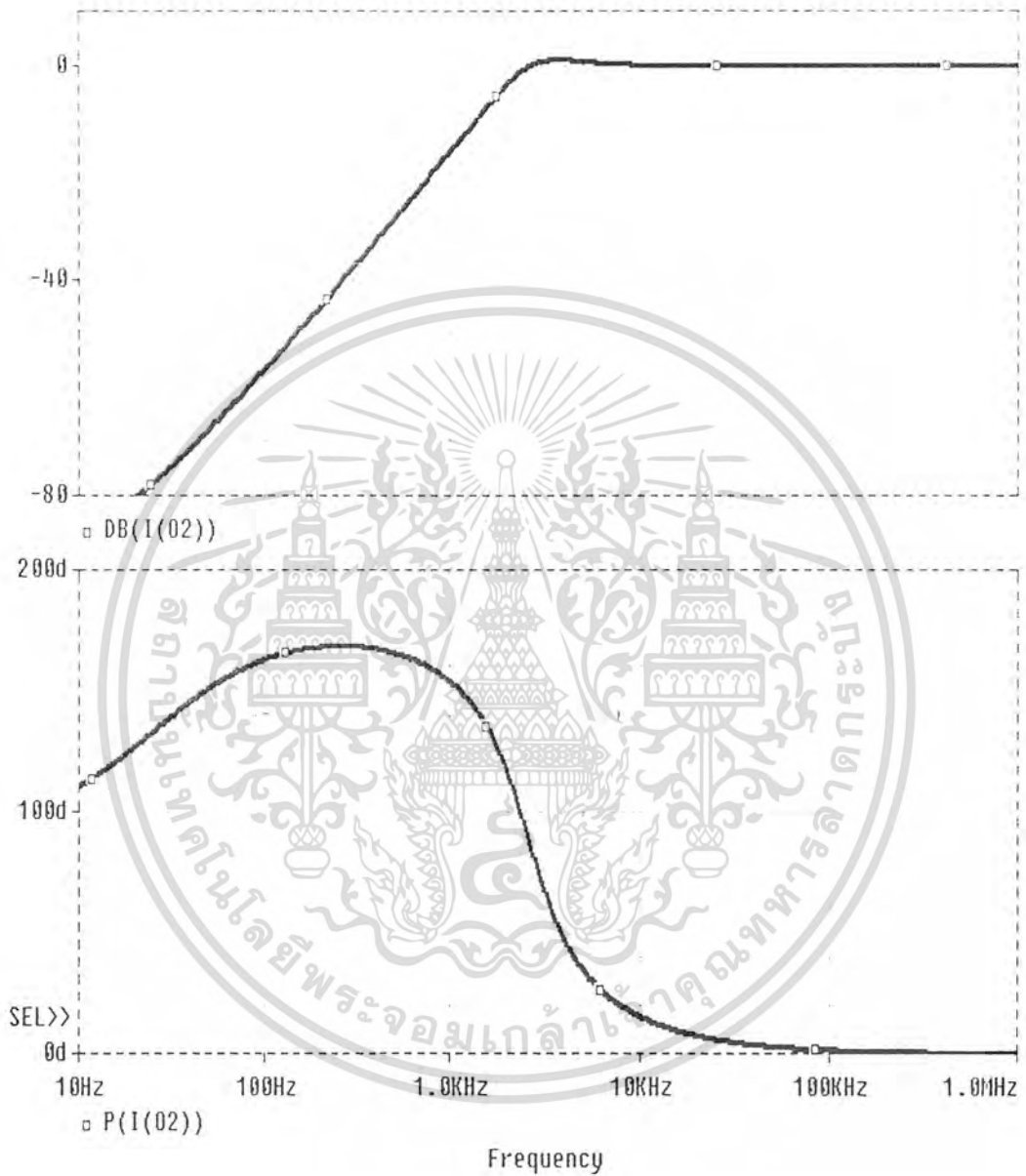
รูปที่ 5.3 วงจรที่ใช้ในการจำลองผลการทำงานของวงจรองศาเต็มโหมตกระแส (แบบที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



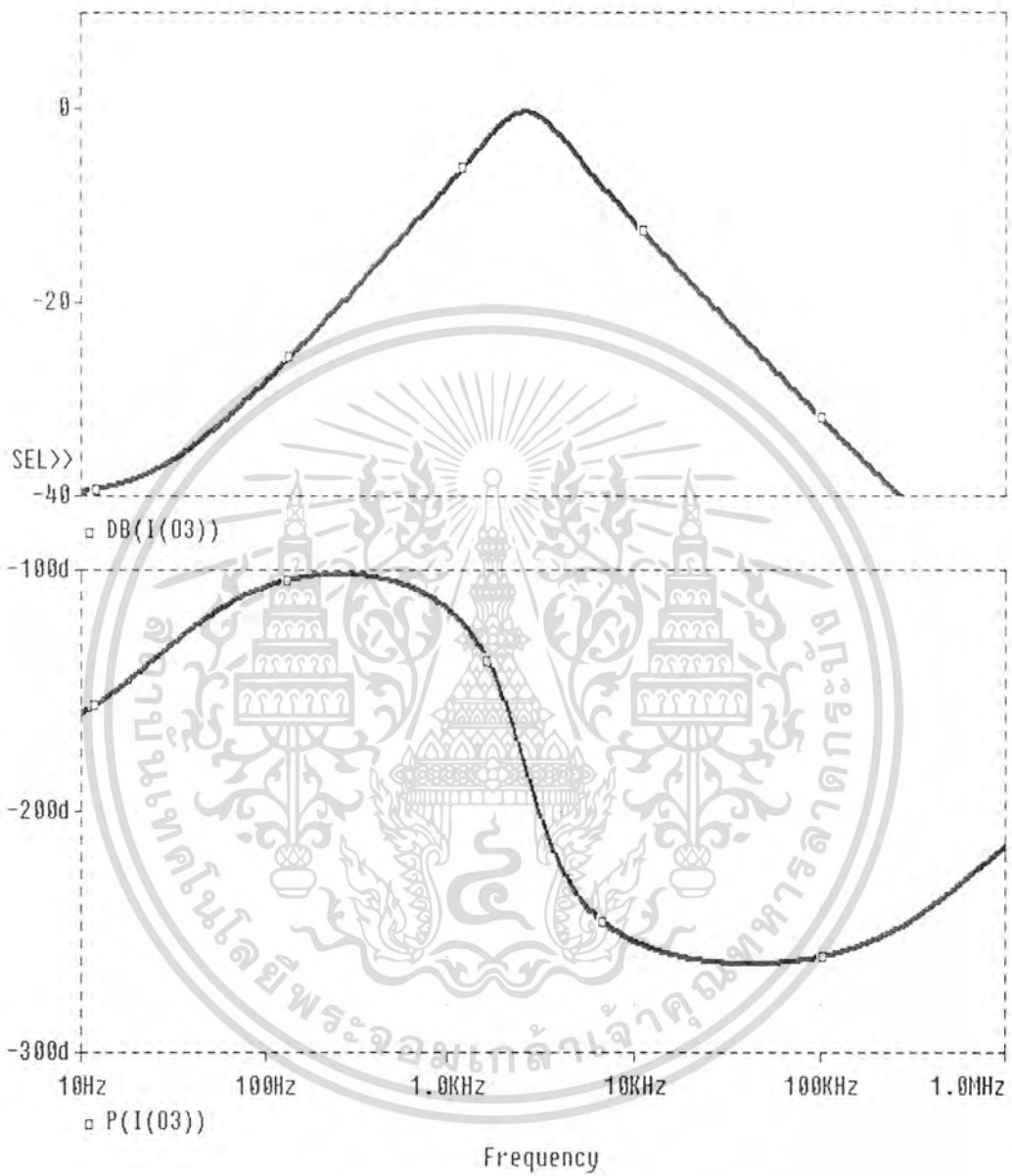
รูปที่ 5.3.1 ผลการจำลองการทำงานของวงจรความถี่ต่ำโหมคระแสแบบที่ 2 ทั้งด้านขนาด และเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



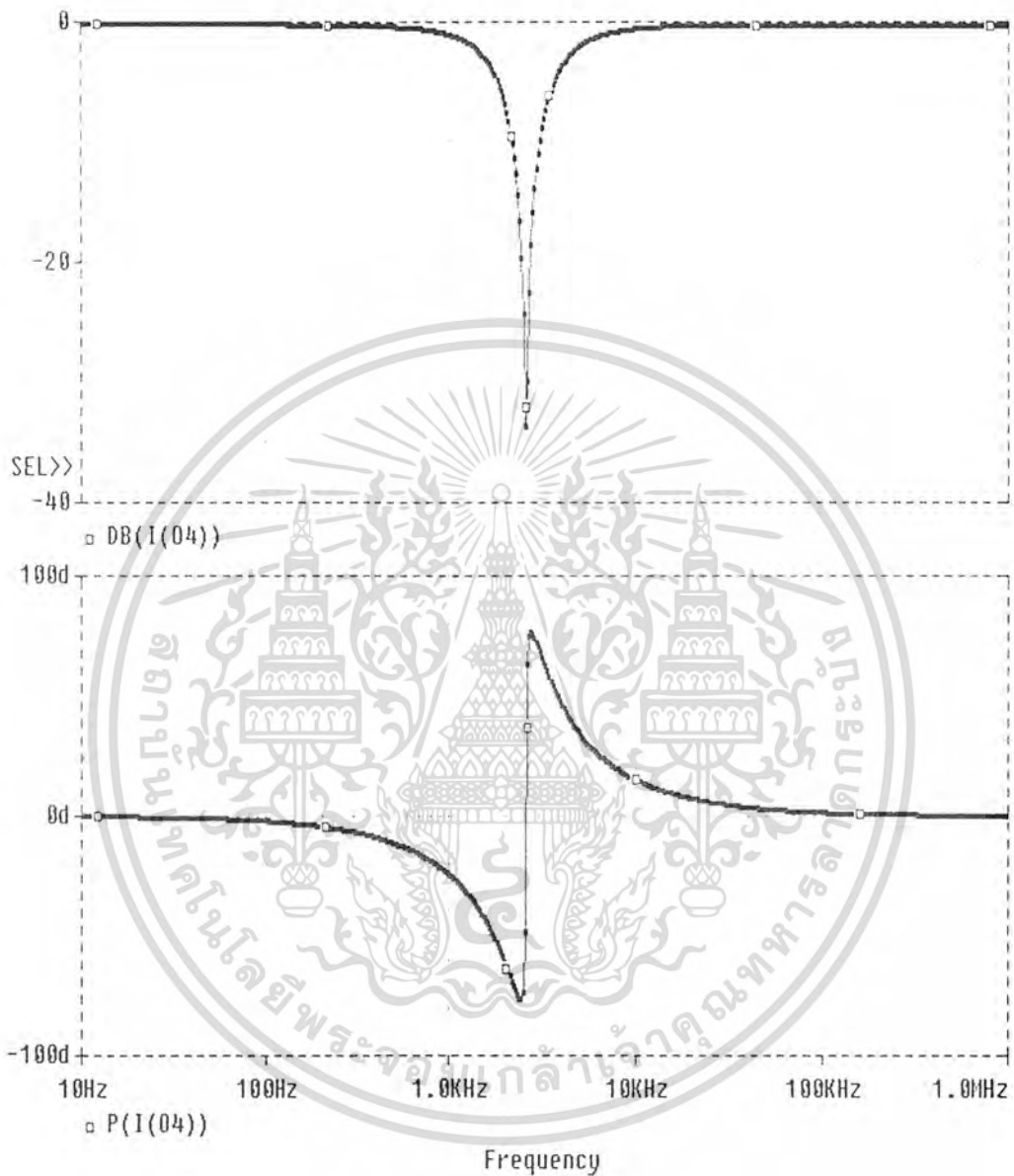
รูปที่ 5.3.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรความถี่สูงโหมคระแสบแบบที่ 2 ทั้งด้านขนาดและเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



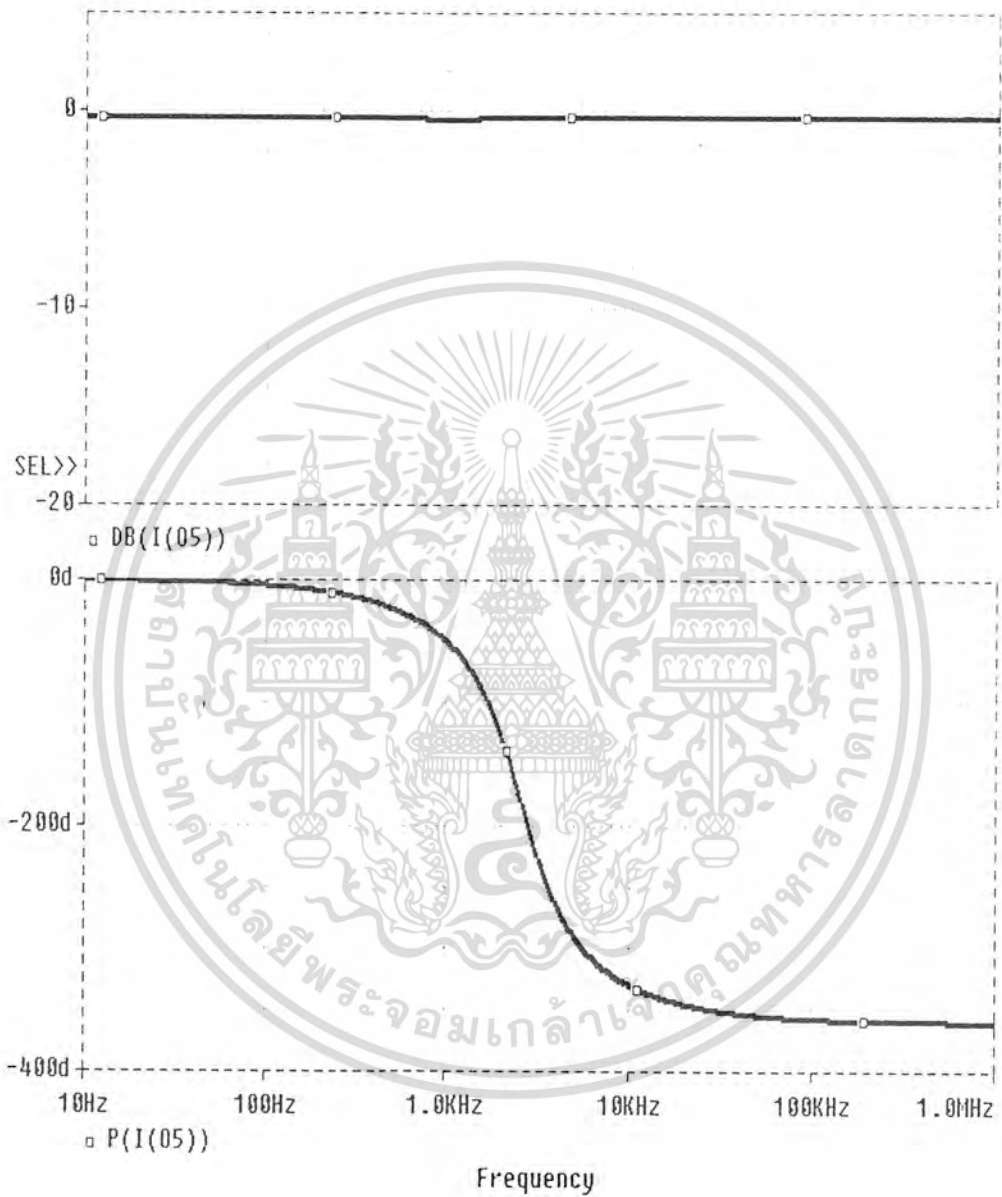
รูปที่ 5.3.3 ผลการจำลองการทำงานของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน โหมดกระแสแบบที่ 2 ทั้งด้านขนาดและเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.4 ผลการจำลองการทำงานของวงจรกรองแถบความถี่ออกโฮมดกระแสบแบบที่ 2 ทั้งด้านขนาดและเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.5 ผลการจำลองการทำงานของวงจรความถี่ผ่านตลอดโหมคระแสแบบที่ 2 ทั้งด้านขนาดและเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### การประยุกต์วงจรรองความถี่ให้เป็นวงจรอ็ควอไลเซอร์

จากทฤษฎีอ็ควอไลเซอร์ที่ได้กล่าวมาในบทต้นๆถ้าเราเพิ่มจำนวนอันดับของวงจรให้สูงขึ้นมากเท่าไรก็จะทำให้เส้นกราฟผลตอบแทนของวงจรชันมากขึ้น

ในการวิเคราะห์วงจรได้นำหลักการพื้นฐานของสมการวงจรรองความถี่ต่ำและสมการวงจรรองความถี่สูงนำมาใช้ในการพิจารณาออกแบบวงจร

#### 6.1 พิจารณาด้านเสียงแหลมหรือด้านความถี่สูง

##### 6.1.1 พิจารณาช่วงการขยายขนาดสัญญาณ (Boost)

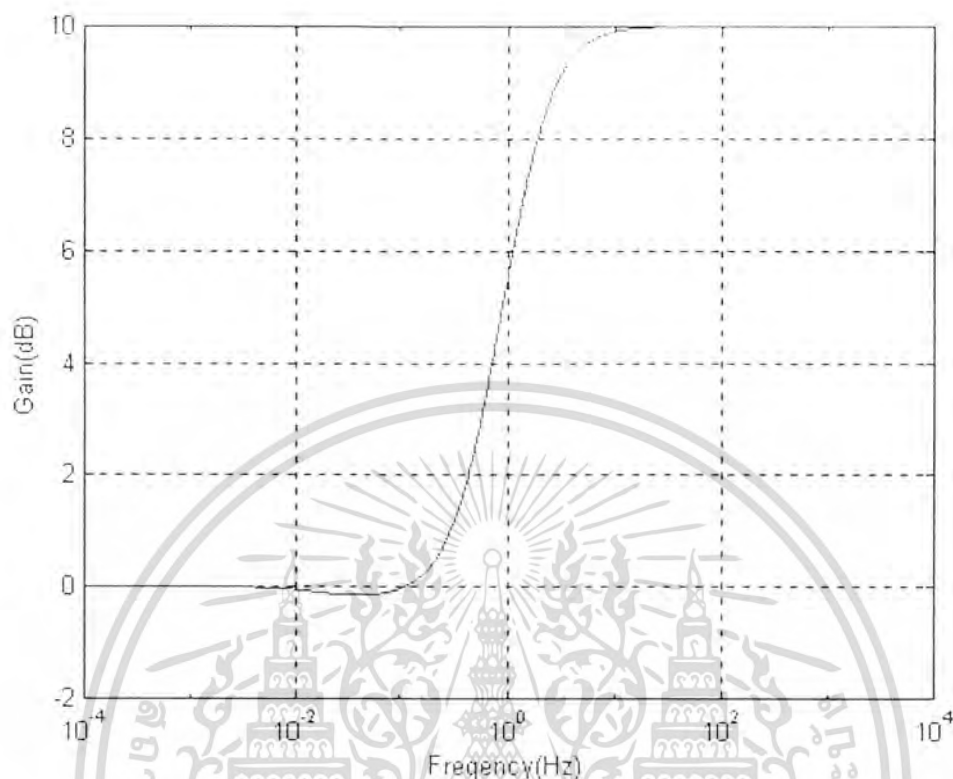
เมื่อเราต้องการให้ขนาดของการขยายสัญญาณสูงสุดเท่ากับ +10dB

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร } |T(j\omega)|_{dB} &= 20 \log |T(j\omega)| \\ |T(j\omega)| &= 3.162 \end{aligned}$$

และจากการทดลองพบว่า  $\omega b = 10$  เป็นค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง  
จะได้สมการขยายขนาดสัญญาณด้านความถี่สูงดังนี้

$$T(S) = \frac{3.162S^2 + 10S + 1}{S^2 + 10S + 1} \quad (6.1)$$

เมื่อนำสมการไปพล็อตใน MATLAB จะได้รูปกราฟดังนี้



รูปที่ 6.1 แสดงการพล็อตกราฟจากสมการ (6.1)

### 6.1.2 พิจารณาช่วงการลดขนาดสัญญาณ (Cut)

เมื่อเราต้องการให้ขนาดของการขยายสัญญาณสูงสุดเท่ากับ -10dB

$$\text{จากสูตร } |T(j\omega)|_{dB} = 20\log|T(j\omega)|$$

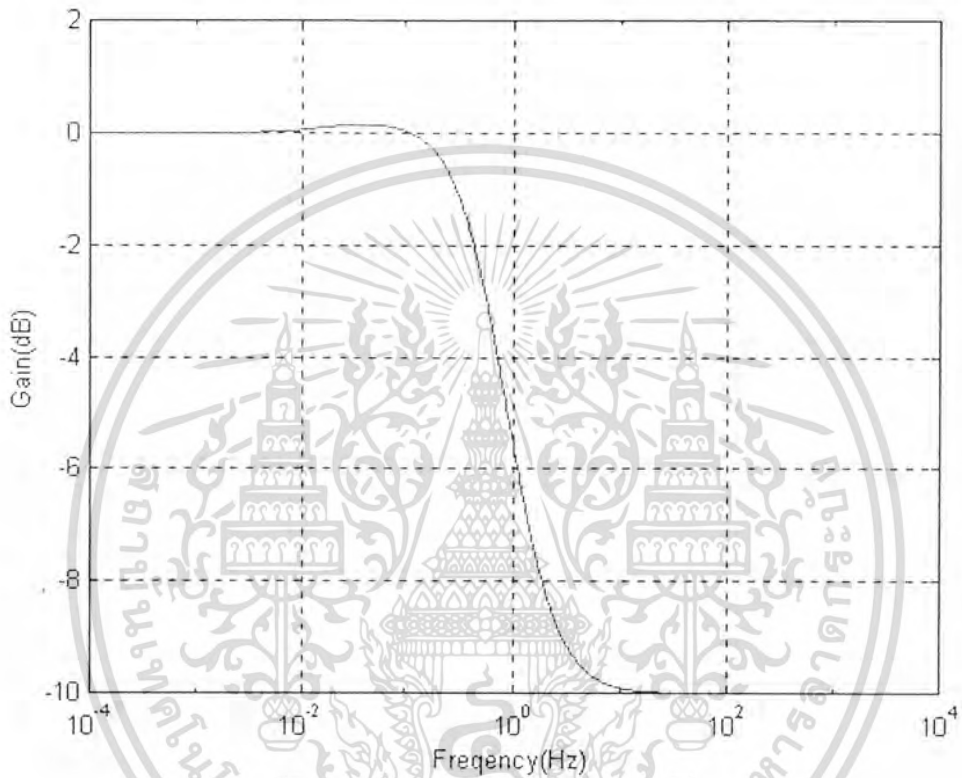
$$|T(j\omega)| = 0.3162$$

และจากการทดลองพบว่า  $\omega b = 10$  เป็นค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง  
จะได้สมการขยายขนาดสัญญาณด้านความถี่สูงดังนี้

$$T(S) = \frac{S^2 + 10S + 1}{3.162S^2 + 10S + 1} \quad (6.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสมการไปพล็อตใน MATLAB จะได้รูปกราฟดังนี้



รูปที่ 6.2 แสดงการพล็อตกราฟจากสมการ (6.2)

## 6.2 พิจารณาด้านเสียงรบกวนหรือด้านถี่ต่ำ

### 6.2.1 พิจารณาช่วงการขยายขนาดสัญญาณ (Boost)

เมื่อเราต้องการให้ขนาดของการขยายสัญญาณสูงสุดเท่ากับ +10dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

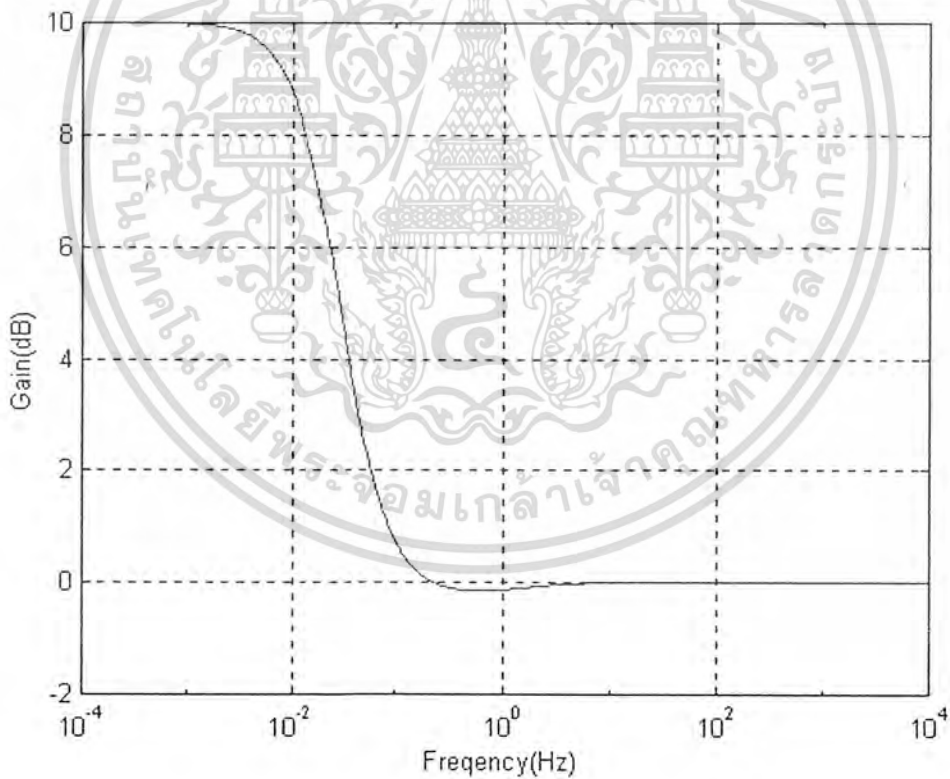
$$\text{จากสูตร } |T(j\omega)|_{dB} = 20\log|T(j\omega)|$$

$$|T(j\omega)| = 3.162$$

และจากการทดลองพบว่า  $\omega b = 10$  เป็นค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง  
จะได้สมการขยายขนาดสัญญาณด้านความถี่สูงดังนี้

$$T(S) = \frac{S^2 + 10S + 3.162}{S^2 + 10S + 1} \quad (6.3)$$

เมื่อนำสมการไปพล็อตใน MATLAB จะได้รูปกราฟดังนี้



รูปที่ 6.3 แสดงการพล็อตกราฟจากสมการ (6.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.2.2 พิจารณาช่วงการลดขนาดสัญญาณ (Cut)

เมื่อเราต้องการให้ขนาดของการขยายสัญญาณสูงสุดเท่ากับ  $-10\text{dB}$

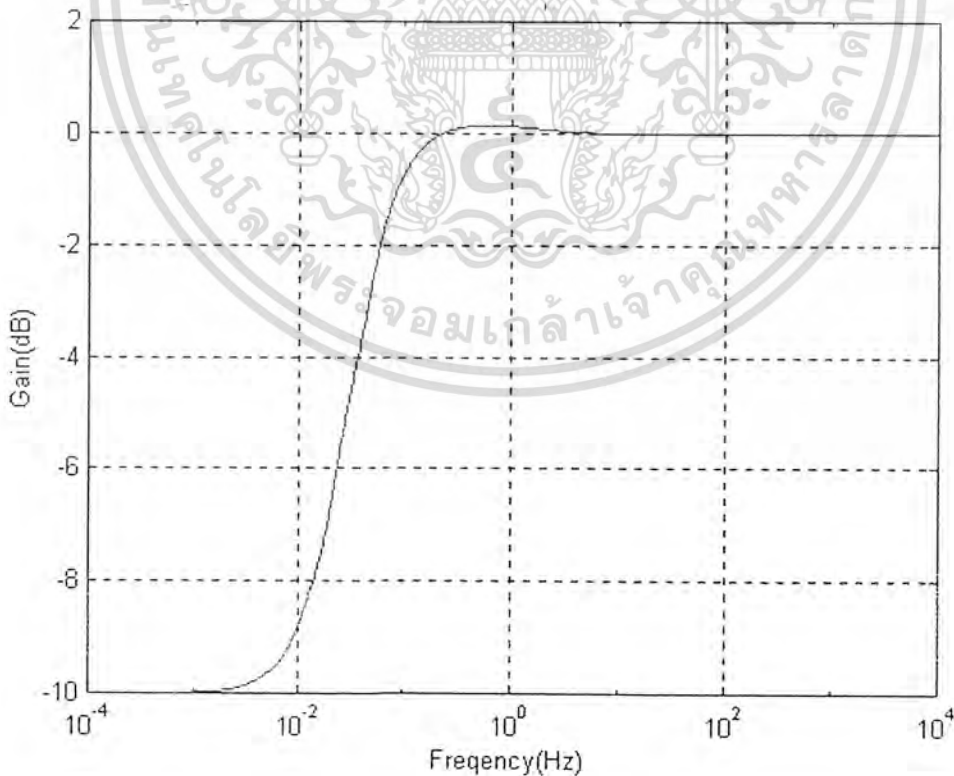
$$\text{จากสูตร } |T(j\omega)|_{\text{dB}} = 20\log|T(j\omega)|$$

$$|T(j\omega)| = 0.3162$$

และจากการทดลองพบว่า  $\omega b = 10$  เป็นค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง  
จะได้สมการขยายขนาดสัญญาณด้านความถี่สูงดังนี้

$$T(S) = \frac{S^2 + 10S + 1}{S^2 + 10S + 3.162} \quad (6.4)$$

เมื่อนำสมการ ไปพล็อตใน MATLAB จะได้รูปกราฟดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประกอบการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้เขียนได้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3 ผลการจำลองการทำงานของวงจรอ็ควอไลเซอร์โดยใช้โปรแกรม Pspice

#### 6.3.1 การจำลองการทำงานช่วงการขยายขนาดของสัญญาณ (Boost) ด้านความถี่สูง

จากสมการของวงจรรองความถี่โหมดแรงดัน

$$V_o = \frac{V_1 S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} + V_2 S C_2 R_{x2} + V_3}{S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} + S C_2 R_{x2} + 1}$$

จากสมการ(6.1)เปรียบเทียบกับสมการวงจรรองความถี่ที่เป็นส่วนของสมการซึ่งจะได้ค่าดังนี้

กำหนดให้  $C_1 = C_2 = 1F$

$$C_2 R_{x2} = 10$$

$$S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} = 1$$

$$\therefore R_{x2} = 10\Omega$$

$$\therefore R_{x1} = 0.1\Omega$$

ค่าที่ได้มาซึ่งไม่ได้สเกลดังนั้นกำหนดค่าสเกลทางขนาดเท่ากับ  $10^3$  และสเกลทางความถี่เท่ากับ  $10^5$  จากการสเกลจะได้

$$C_1 = 0.01\mu F$$

$$C_2 = 0.01\mu F$$

$$R_{x1} = 1.K\Omega$$

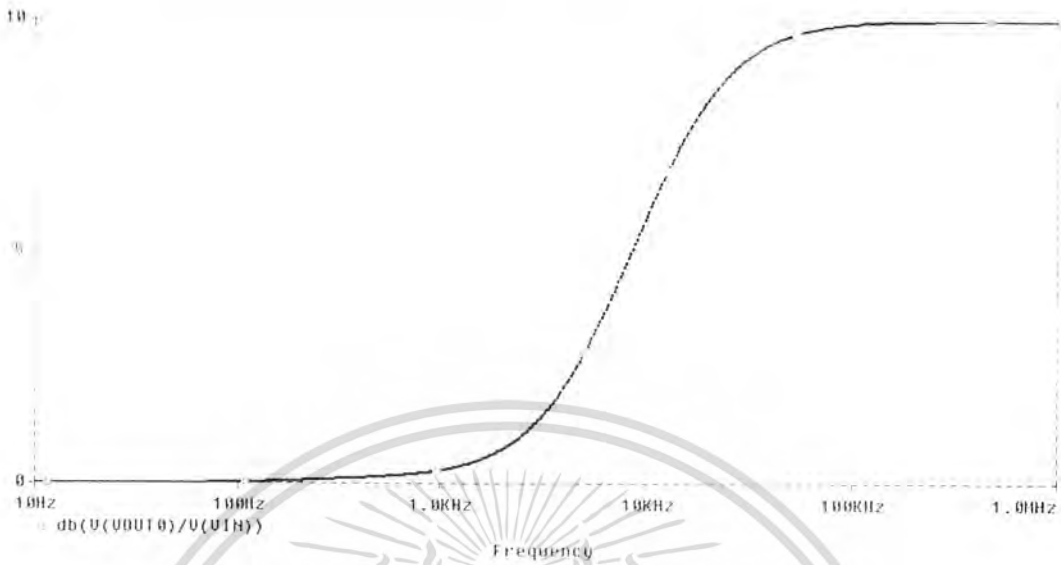
$$R_{x2} = 100K\Omega$$

ดังนั้น  $I_{O1} = 13\mu A$  ,  $I_{O2} = 0.13\mu A$

และ  $V_1 = 3.162V_{in}$  ,  $V_2 = V_{in}$  ,  $V_3 = V_{in}$

ผลการแสดงการจำลองการทำงานจะแสดงดังรูปที่ 6.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Pspice ของวงจรขยายขนาดของสัญญาณ (Boost) ด้านความถี่สูง

### 6.3.2 การจำลองการทำงานช่วงการลดขนาดของสัญญาณ (CUT) ด้านความถี่สูง

จากสมการของวงจรรองความถี่โหมคแรงดัน

$$V_o = \frac{V_1 S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} + V_2 S C_2 R_{x2} + V_3}{S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} + S C_2 R_{x2} + 1}$$

จากสมการ(6.2)เปรียบเทียบกับสมการวงจรรองความถี่ที่เป็นส่วนของสมการซึ่งจะได้ค่าดังนี้  
กำหนดให้  $C_1 = C_2 = 1F$

$$C_2 R_{x2} = 10$$

$$S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} = 3.162$$

$$\therefore R_{x2} = 10\Omega$$

$$\therefore R_{x1} = 0.3162\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่ได้มายังไม่ได้สเกลดังนั้นกำหนดค่าสเกลทางขนาดเท่ากับ  $10^3$  และสเกลทางความถี่เท่ากับ  $10^5$  จากการสเกลจะได้

$$C1 = 0.01 \mu F$$

$$C2 = 0.01 \mu F$$

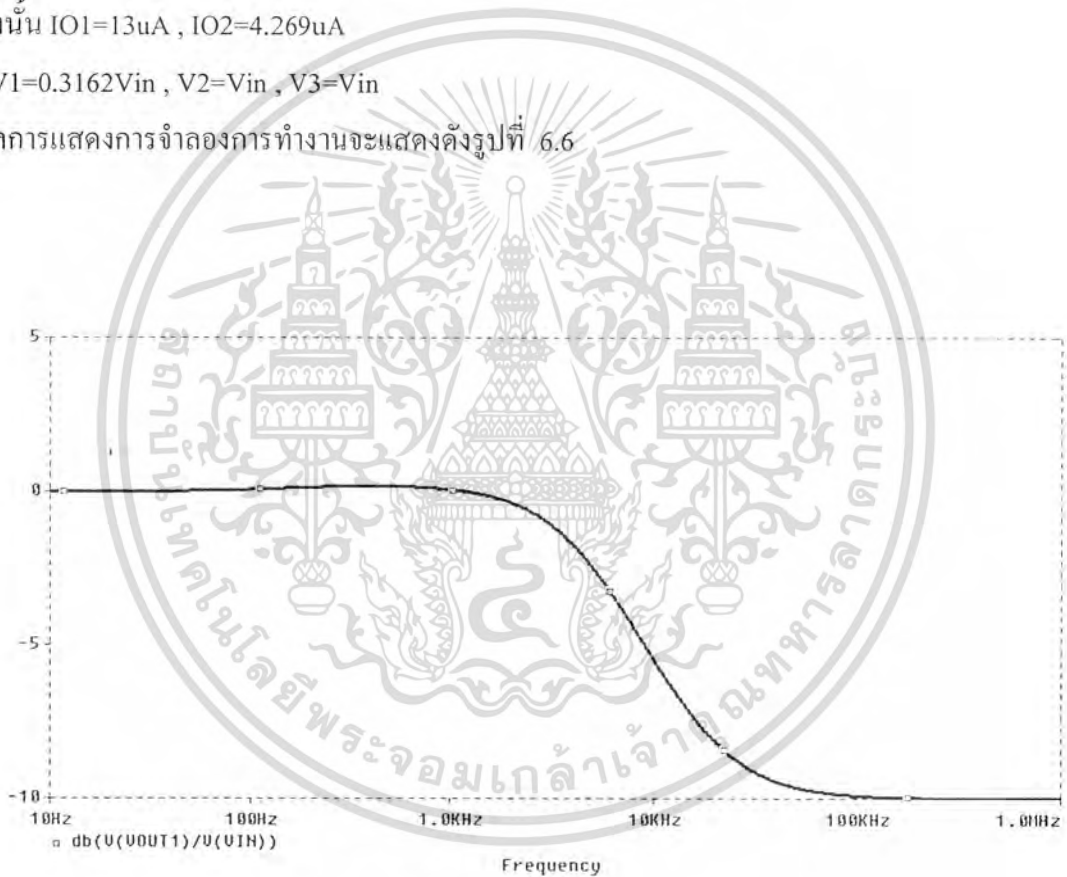
$$Rx1 = 1. K\Omega$$

$$Rx2 = 3.162 K\Omega$$

ดังนั้น  $IO1=13\mu A$  ,  $IO2=4.269\mu A$

$$V1=0.3162V_{in} , V2=V_{in} , V3=V_{in}$$

ผลการแสดงการจำลองการทำงานจะแสดงดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 ผลการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม Pspice ของวงจรลดขนาดของสัญญาณ (CUT) ด้านความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3.3 การจำลองการทำงานช่วงการขยายขนาดของสัญญาณ (Boost) ด้านความถี่ต่ำ

จากสมการของวงจรกรองความถี่โหมดแรงดัน

$$V_o = \frac{V_1 S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} + V_2 S C_2 R_{x2} + V_3}{S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} + S C_2 R_{x2} + 1}$$

จากสมการ(6.3)เปรียบเทียบกับสมการวงจรกรองความถี่ที่เป็นส่วนของสมการซึ่งจะได้ค่าดังนี้

กำหนดให้  $C_1 = C_2 = 1F$

$$C_2 R_{x2} = 10$$

$$S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} = 1$$

$$\therefore R_{x2} = 10\Omega$$

$$\therefore R_{x1} = 0.1\Omega$$

ค่าที่ได้มายังไม่ได้สเกลดังนั้นกำหนดค่าสเกลทางขนาดเท่ากับ  $10^3$  และสเกลทางความถี่เท่ากับ  $10^5$  จากการสเกลจะได้

$$C_1 = 0.01\mu F$$

$$C_2 = 0.01\mu F$$

$$R_{x1} = 1.K\Omega$$

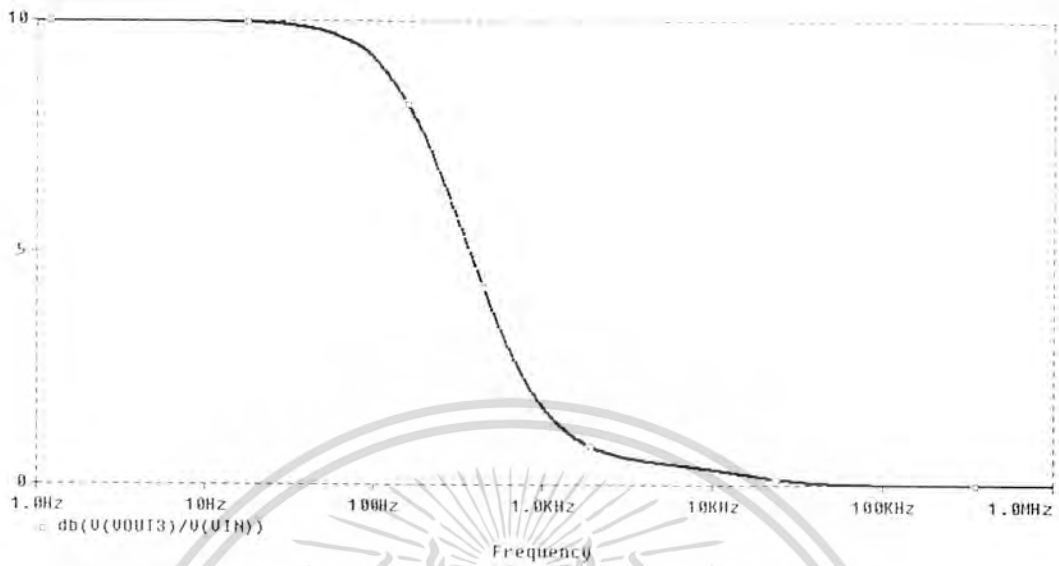
$$R_{x2} = 100.K\Omega$$

ดังนั้น  $I_{O1} = 13\mu A$  ,  $I_{O2} = 0.13\mu A$

และ  $V_1 = V_{in}$  ,  $V_2 = V_{in}$  ,  $V_3 = 3.162V_{in}$

ผลการแสดงการจำลองการทำงานจะแสดงดังรูปที่ 6.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7 ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Pspice ของวงจรขยายขนาดของสัญญาณ (Boost) ด้านความถี่ต่ำ

#### 6.3.4 การจำลองการทำงานช่วงการลดขนาดของสัญญาณ (CUT) ด้านความถี่ต่ำ

จากสมการของวงจรกรองความถี่โหมดแรงดัน

$$V_o = \frac{V_1 S^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + V_2 S C_2 R_2 + V_3}{S^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + S C_2 R_2 + 1}$$

จากสมการ (6.4) เปรียบเทียบกับสมการวงจรกรองความถี่ที่เป็นส่วนของสมการซึ่งจะได้ค่าดังนี้  
กำหนดให้  $C_1 = C_2 = 1F$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หารตลอดด้วย 3.162

$$C2R_{x2} = \frac{10}{3.162}$$

$$S^2 C1 C2 R_{x1} R_{x2} = 1$$

$$\therefore R_{x2} = 3.162 \Omega$$

$$\therefore R_{x1} = 0.1 \Omega$$

ค่าที่ได้มายังไม่ได้สเกลดังนั้นกำหนดค่าสเกลทางขนาดเท่ากับ  $10^3$  และสเกลทางความถี่เท่ากับ  $10^5$  จากการสเกลจะได้

$$C1 = 0.01 \mu F$$

$$C2 = 0.01 \mu F$$

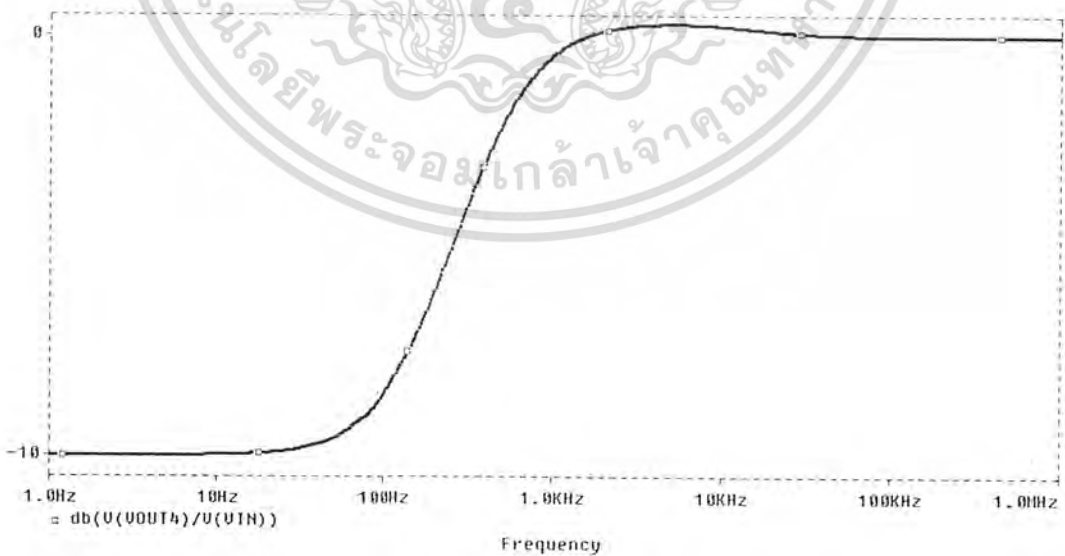
$$R_{x1} = 1. K \Omega$$

$$R_{x2} = 31.62 K \Omega$$

ดังนั้น  $I_{O1} = 13 \mu A$ ,  $I_{O2} = 0.4111 \mu A$

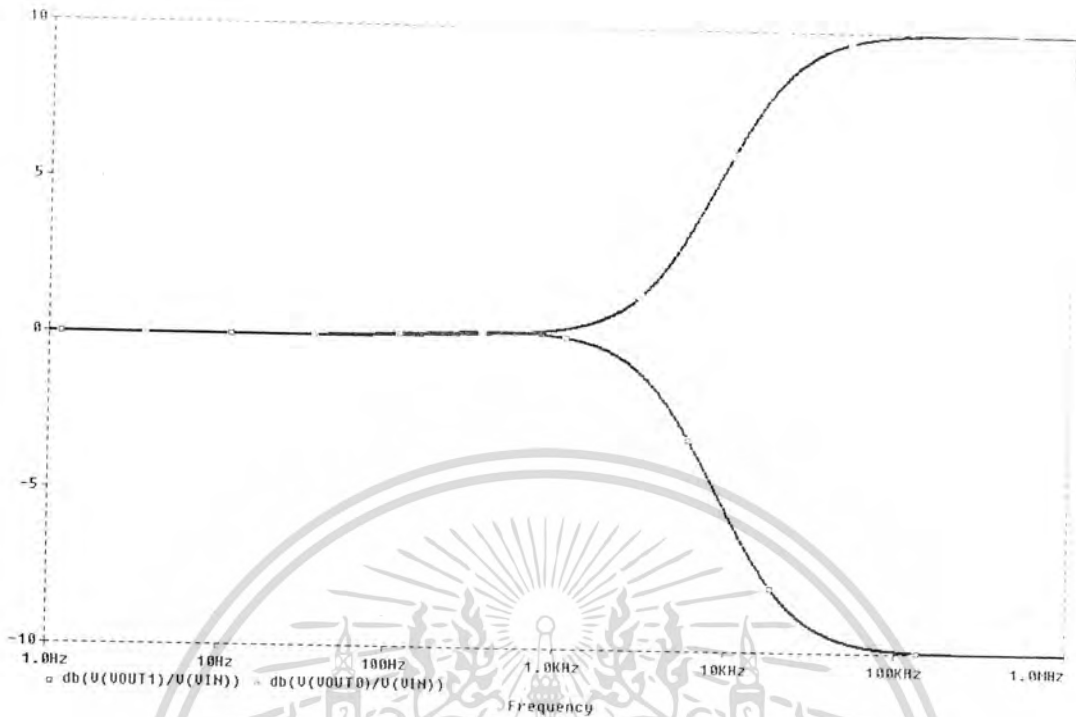
$V1 = V_{in}$ ,  $V2 = V_{in}$ ,  $V3 = 0.3162 V_{in}$

ผลการแสดงการจำลองการทำงานจะแสดงดังรูปที่ 6.6

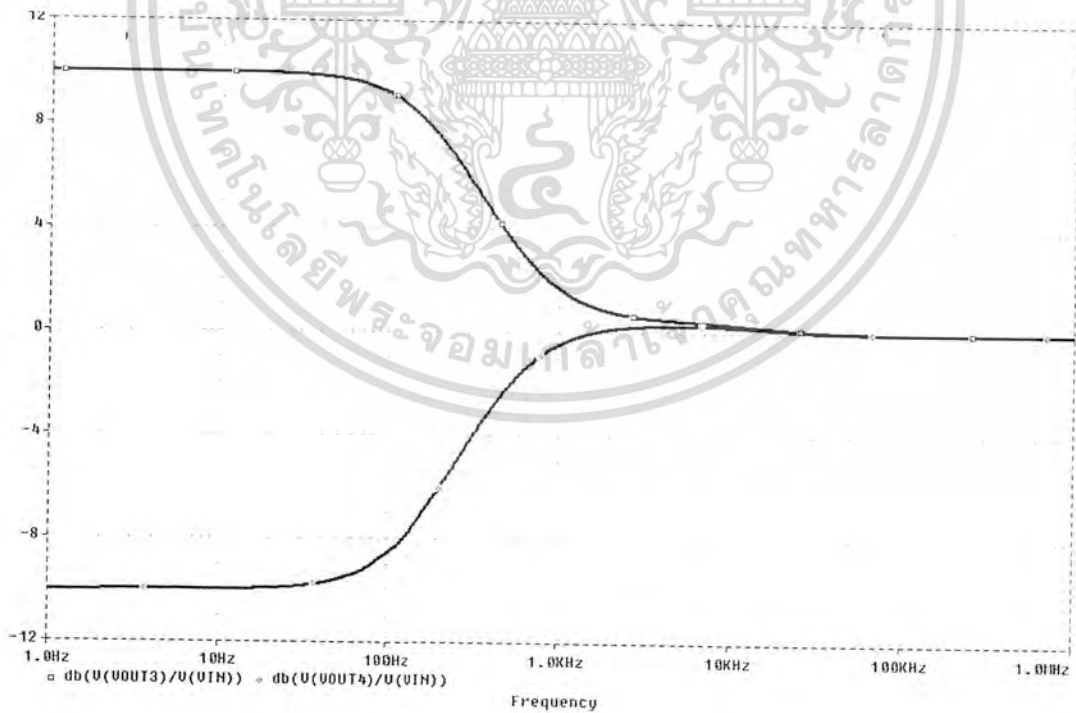


รูปที่ 6.8 ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Pspice ของวงจรลดขนาดของสัญญาณ (CUT) ด้านความถี่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.9 ผลการจำลองการทำงานด้านความถี่สูงทั้งสองแบบ



รูปที่ 6.10 ผลการจำลองการทำงานด้านความถี่ต่ำทั้งสองแบบ

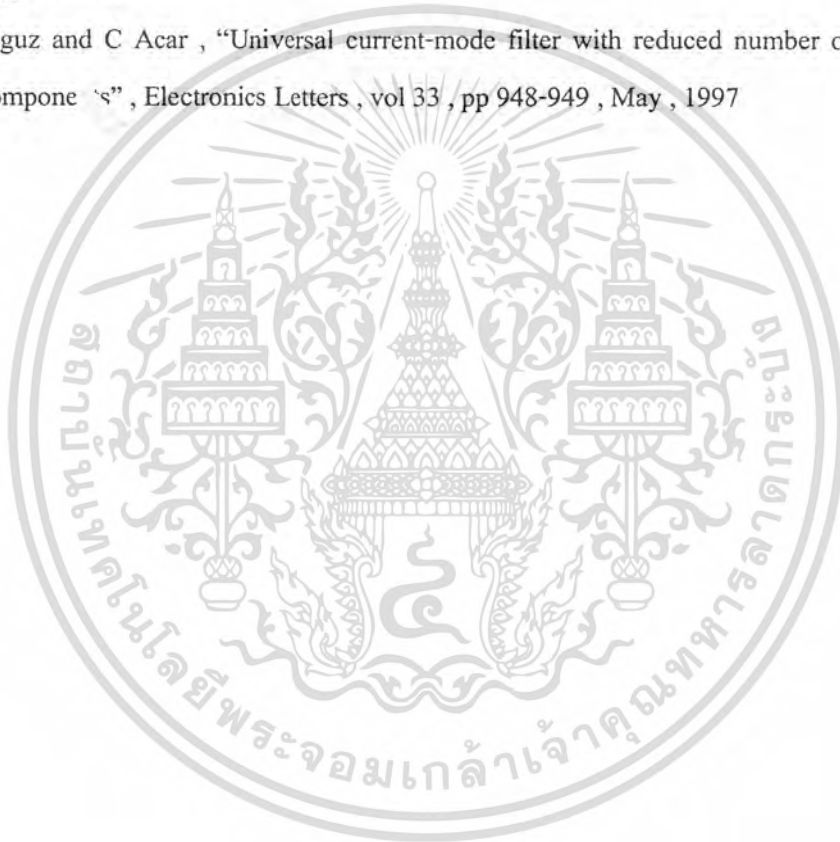
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทสรุปและวิจารณ์ผล

ปริญญาบัตรฉบับนี้ได้ทำการนำเสนอการประยุกต์ใช้งานวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง ที่ควบคุมด้วยกระแสหรือวงจรถูก CCCII เป็นวงจรรองความถี่และวงจรรีควอไลเซอร์ โดยมุ่งเหตุ จูงใจในการทำปริญญาบัตรฉบับนี้ก็เนื่องมาจากข้อดีของวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุม ด้วยกระแส คือค่าความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นของวงจรถูกที่สามารถปรับค่าได้ด้วยกระแสไบอัสของ วงจร และข้อดีอีกประการหนึ่งคือสามารถทำงานได้ทั้งในโหมดกระแสและโหมดแรงดัน วงจรร องความถี่ที่นำเสนอในปริญญาบัตรฉบับนี้เป็นวงจรรองความถี่แบบหลายหน้าที่ คือ สามารถ ทำหน้าที่เป็นวงจรรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน , วงจรรองความถี่แบบความถี่สูงผ่าน, วงจรร องความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน , วงจรรองความถี่แบบแถบความถี่หยุด และวงจรรองความถี่ แบบความถี่ผ่านตลอด วงจรรองความถี่และวงจรรีควอไลเซอร์ที่ได้ออกแบบในปริญญาบัตร ฉบับนี้ทั้งใน โหมดกระแสและ โหมดแรงดันเป็นวงจรถูกที่ไม่มี ความซับซ้อนของวงจร คือ ใน โหมด แรงดันจะใช้วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแสเพียงสองตัวประกอบกับคาปาซิ เตอร์สองตัว และใน โหมดกระแสจะมีการออกแบบสองแบบ กล่าวคือ แบบแรกจะใช้วงจรสาย พานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแสสองตัวประกอบกับคาปาซิเตอร์สองตัว แบบที่สองจะใช้ วงจรสายพานกระแสสี่ตัวประกอบกับคาปาซิเตอร์สองตัว จากความไม่ซับซ้อนของวงจรถูกได้ออก แบบดังกล่าวจึงเหมาะสมสำหรับเทคโนโลยีการสร้างวงจรรวม ( Integrated Circuit )

### บรรณานุกรม

- [1] A.S.Sedra and K.C.Smith , “A second genertoin current conveyor and applicatoins,” IEEE Trans Circuit Thoery , vol CT-17 , pp. 132-134 , Feb , 1970
- [2] Alain Frbre , “High Frequency Applications Based on a New Current Conttrolled Conveyor ,” IEEE Transaction on Circuit and system , vol 43 , pp. 82-90 ,Feb , 1996
- [3] Robert B. , and Louis N . , Electronic Devices and Circuit Theory , Prentice Hall International Editions , pp. 579-582
- [4] S.Ozoguz and C Acar , “Universal current-mode filter with reduced number of active and passive compone ‘s” , Electronics Letters , vol 33 , pp 948-949 , May , 1997



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ค่าพารามิเตอร์ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

.MODEL NX1 NPN( RB=524.6 IRB=0 RBM=25 RC=50 RE=1 IS=121E-18 EG=1.206  
 XTI=2 XTB=1.538 BF=137.5 IKF=6.974E-3 NF=1 VAF=159.4 ISC=36E-16 NE=1.713  
 BR=0.7258 IKR=2.198E-3 NR=1 VAR=10.73 ISC=0 NC=2 TF=0.425E-9 TR=0.425E-8  
 CJE=0.214E-12 VJE=0.5 MJE=0.28 CJC=0.983E-13 VJC=0.5 MJC=0.3 XCJC=0.034  
 CJS=0.913E-12 VJS=0.64 MJS=0.4 FC=0.5)

.MODEL PX1 PNP( RB=327 IRB=0 RBM=24.55 RC=50 RE=3 IS=73.5E-18 EG=1.206  
 XTI=1.7 XTB=1.866 BF=110 IKF=2.359E-3 NF=1 VAF=51.8 ISE=25.1E-16 NE=1.650  
 BR=0.4745 IKR=6.478E-3 NR=1 VAR=9.96 ISC=0 NC=2 TF=0.610E-9 TR=0.610E-8  
 CJE=0.18E-12 VJE=0.5 MJE=0.28 CJC=0.164E-12 VJC=0.8 MJC=0.4 XCJC=0.037  
 CJS=1.03E-12 VJS=0.55 MJS=0.35 FC=0.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้