

วงจรรขยายสัญญาณกระแสโดยใช้ CCCII และการประยุกต์

CURRENT AMPLIFIER CIRCUIT USING CCCII AND ITS APPLICATIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-D-018-150

วงจรรขยายสัญญาณกระแสโดยใช้ CCCII และการประยุกต์

CURRENT AMPLIFIER CIRCUIT USING CCCII AND ITS APPLICATIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2558

KMITL-2015-EN-D-018-150

12524683

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CURRENT AMPLIFIER CIRCUIT USING CCCII AND ITS APPLICATIONS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015
KMITL-2015-EN-D-018-150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วงจรขยายสัญญาณกระแสโดยใช้ CCCII และการประยุกต์
Thesis Title Current Amplifier Circuit Using CCCII and Its Applications
นักศึกษา นางวิจิตรา เพ็ชรกิจ
รหัสประจำตัว 50060008
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) ศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-D-018-150

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ศ.ดร.วันชัย	ธีรวิรุจ	
รศ.ดร.พิพัฒน์	พรหมมี	
รศ.ดร.มนตรี	ศิริปรัชญานันท์	
รศ.ดร.จิรสุดา	โกษิยาภรณ์	
รศ.ดร.ปราโมทย์	วาดเขียน	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 เวลา 11.00-13.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติใหม่ HM-304

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
วันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2558
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรรขยายสัญญาณกระแสโดยใช้ CCCII และการประยุกต์
นักศึกษา	นางวิจิตรรา เพ็ชรกิจ
รหัสประจำตัว	50060008
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอหลักการออกแบบวงจรรขยายสัญญาณกระแสโดยใช้ CCCII และการประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรถอดรหัสดิจิทัลสอง วงจรยกกำลังสอง วงจรหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ วงจรคูณและหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ วงจรรขยายสัญญาณกระแสที่นำเสนอนอกแบบขึ้นโดยนำความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่เกี่ยวข้องกับตัวต้านทานลงกราวด์จำนวนสองตัวมาประยุกต์ใช้ แล้วแทนตัวต้านทานลงกราวด์แต่ละตัวเหล่านั้นด้วยตัวต้านทานที่สร้างด้วย CCCII

วงจรถูกเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ทำงานอยู่ในโหมดกระแส ใช้อุปกรณ์แอคทีฟประเภท CCCII เพียงอย่างเดียว ไม่ต้องมีอุปกรณ์พาสซีฟมาเชื่อมต่อเพิ่มเติมภายนอก ทุกวงจรถูกทดสอบที่นำเสนอสนใจคือ มีโครงสร้างที่ง่าย ใช้อุปกรณ์น้อย ปรับค่าขนาดของสัญญาณเอาต์พุตได้ด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์ และเหมาะกับการนำไปผลิตเป็นวงจรรวม

ผลการเลียนแบบการทำงานของทุกวงจรถูกเสนอด้วยโปรแกรม PSPICE ให้ค่าที่สามารถใช้ยืนยันการวิเคราะห์ทางทฤษฎีได้เป็นอย่างดี

Thesis	Current Amplifier Circuit Using CCCII and Its Applications
Student	Mrs.Wijittra Petchakit
Student ID	50060008
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Paramote Wardkein
Thesis Co-advisor	Prof.Dr.Wiwat Kiranon

ABSTRACT

This thesis presents the design principles of the current amplifier circuits using CCCII. Its applications such as a square-rooter, squarer, a four-quadrant divider and a four-quadrant multiplier/divider are also proposed. The proposed current amplifiers are designed by using the relationship between current and voltage associated with two parallel ground resistors and then replaced two ground resistors by the resistance created by CCCII.

All proposed circuits operate in current-mode and employ active-only element without any external passive components. Their interested properties are simple structure, low component count, electronically adjustable output magnitude, and also well suited for IC fabrication.

PSpice simulation results show that they are good agreement with theoretical analysis as expected in the design idea.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนต้องขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์ เป็นอย่างยิ่ง ที่มีความตั้งใจอย่างมากในการผลักดันให้ผู้เขียนสามารถเรียนให้สำเร็จได้ ไม่ว่าจะในฐานะที่ปรึกษาร่วมหรือที่ปรึกษาหลักก็ตาม และได้พยายามให้กำลังใจผู้เขียนตลอดมา

นอกจากนี้ผู้เขียนต้องขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน รองศาสตราจารย์ ดร.จรรยา วงศ์เตชธรรม และรองศาสตราจารย์ ดร.วิภา แรงพิสิทธิ์ สำหรับคำแนะนำ และความช่วยเหลือต่างๆ ที่ได้หยิบยื่นให้ รวมถึงเพื่อนๆ และน้องๆ ร่วมชั้นเรียนที่ทำให้บรรยากาศการเรียนมีสีสันมากขึ้น

สำหรับบุคคลที่ไม่อาจลืมได้เลย ในการขอบคุณครั้งนี้ คือบิดาและมารดาผู้ซึ่งทำให้ผู้เขียนเลือกเรียนโดยใช้การเดินทางไป-กลับ นครศรีธรรมราช-กรุงเทพฯ รวมถึงคุณสิทธิพร เพ็ชรกิจ ที่ยินยอมให้ทำภารกิจนี้

ขอขอบคุณ คณาจารย์ทุกคนที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้ด้านวิศวกรรมศาสตร์แก่ผู้เขียนตั้งแต่ระดับปริญญาตรีเป็นต้นมา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญรูป.....	vii
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.5 โครงประกอบของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 วงจรสายพานกระแสแบบทรานส์ลีนีเยร์.....	4
2.1 ความเป็นมาและคุณสมบัติของวงจรสายพานกระแส.....	4
2.2 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าที่พอร์ตต่างๆ ของ CCCII.....	7
2.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่พอร์ต Y.....	8
2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่พอร์ต X.....	10
2.2.3 การส่งผ่านกระแสจากพอร์ต X ไปยังพอร์ต Z.....	15
2.3 การประมาณการทำงานของวงจรสายพานกระแสเมื่อวงจรมีการทำงานแบบไม่เป็นอุดมคติ.....	19
2.4 สรุป.....	20
บทที่ 3 วงจรขยายสัญญาณกระแส.....	21
3.1 แนวคิดและหลักการเบื้องต้น.....	21
3.1.1 แนวคิดและหลักการของวงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 1.....	22
3.1.2 แนวคิดและหลักการของวงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 2.....	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 วงจรขยายกระแสที่สร้างด้วย CCCII.....	24
3.2.1 วงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 1 ที่สร้างด้วย CCCII.....	26
3.2.2 วงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 2 ที่สร้างด้วย CCCII.....	27
3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจร.....	28
3.3.1 การวิเคราะห์ช่วงกระแสอินพุตปฏิบัติงาน.....	29
3.3.2 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด.....	33
3.3.3 การวิเคราะห์ช่วงความถี่ปฏิบัติงาน.....	34
3.4 ผลการเลียนแบบการทำงาน.....	37
3.5 สรุป.....	38
บทที่ 4 วงจรถอดรอกที่สองและวงจรรยกกำลังสอง.....	43
4.1 แนวคิดและหลักการในการสร้างวงจรถอดรอกที่สองและวงจรรยกกำลังสอง.....	43
4.2 การสร้างวงจร.....	45
4.2.1 วงจรถอดรอกที่สองของสัญญาณ.....	45
4.2.2 วงจรรยกกำลังสองของสัญญาณ.....	46
4.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจร.....	50
4.4 ผลการจำลองการทำงาน.....	51
4.4.1 วงจรถอดรอกที่สองของสัญญาณ.....	51
4.4.2 วงจรรยกกำลังสองของสัญญาณ.....	54
4.5 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้.....	58
4.5.1 ผลการจำลองการทำงาน.....	59
4.6 สรุป.....	60
บทที่ 5 วงจรคูณและหารสัญญาณ.....	61
5.1 การออกแบบวงจร.....	61
5.1.1 วงจรหารสัญญาณ.....	61
5.1.2 วงจรคูณและหารสัญญาณ.....	64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ผลการจำลองการทำงาน.....	60
5.2.1 ผลการจำลองของวงจรหารสัญญาณ.....	67
5.2.2 ผลการจำลองของวงจรคูณ/หารสัญญาณ.....	68
5.3 สรุป.....	70
บทที่ 6 บทสรุป.....	71
เอกสารอ้างอิง.....	73
ประวัติผู้เขียน.....	76



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแสรั้นที่หนึ่ง.....	4
2.2 (ก) สัญลักษณ์ของวงจร CCCII.....	6
2.2 (ข) วงจรสมมูลระหว่างพอร์ต X และพอร์ต Y ของวงจร CCCII.....	6
2.3 โครงสร้างของวงจรสายพานกระแสที่สร้างจากหลักการของวงจรทรานสลิเนียร์.....	6
2.4 ความสัมพันธ์ของกระแส i_v และแรงดันที่พอร์ต Y.....	8
2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่พอร์ต X และแรงดันอินพุต v_{XY}	12
2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน v_{XY} และกระแสที่พอร์ต X.....	14
2.7 รูปประกอบการวิเคราะห์ค่ากระแสที่จะส่งจากพอร์ต X ไปยังพอร์ต Z.....	16
2.8 รูปประกอบการวิเคราะห์การส่งผ่านกระแสจากพอร์ต X ไปยังพอร์ต Z.....	17
2.9 วงจรสมมูลของวงจรสายพานกระแสเมื่อมีการทำงานแบบไม่เป็นอุดมคติ [23].....	19
3.1 แนวคิดและหลักการเบื้องต้นของวงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 1.....	22
3.2 แนวคิดและหลักการเบื้องต้นของวงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 2.....	23
3.3 วงจรตัวต้านทานลงกราวด์ชนิดค่าลบ.....	25
3.4 วงจรตัวต้านทานลงกราวด์ชนิดค่าบวก.....	25
3.5 วงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 1 ที่สร้างด้วย CCCII.....	26
3.6 วงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 2 ที่สร้างด้วย CCCII.....	28
3.7 วงจรสมมูลของ CCCII ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์หาช่วงความถี่ปฏิบัติงาน.....	35
3.8 วงจรสมมูลของวงจรขยายสัญญาณกระแสที่ใช้วิเคราะห์หาช่วงความถี่ปฏิบัติงาน.....	35
3.9 ผลการจำลองการส่งผ่านสัญญาณกระแสเมื่อ I_{o2} มีค่าต่างๆ กัน.....	37
3.10 ผลการจำลองการส่งผ่านสัญญาณกระแสเมื่อ I_{o1} มีค่าต่างๆ กัน.....	38
3.11 ผลการจำลองการส่งผ่านสัญญาณกระแสเมื่อแปรค่า I_{o1} และ i_{in} มีค่าต่างๆ กัน.....	38
3.12 ผลตอบสนองสัญญาณในโดเมนเวลาของวงจรขยายสัญญาณกระแสในรูปแบบที่ 3.5(ข).....	39
3.13 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายสัญญาณกระแสในรูปแบบที่ 3.5(ข).....	39
3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส i_A กับกระแสอินพุต i_{in1}	40
3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส i_B กับกระแสอินพุต i_{in1}	41
3.16 ผลการเลียนแบบเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไซน์ความถี่ 1 kHz.....	41
3.17 ผลการเลียนแบบเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมความถี่ 1 kHz.....	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 แนวคิดเบื้องต้นของวงจรถอดรากลที่สองและวงจรรยกกำลังสอง.....	45
4.2 วงจรที่ทำหน้าที่เป็นฟังก์ชันถอดรากลที่สองของสัญญาณเพียงอย่างเดียว.....	45
4.3 วงจรรยกกำลังสองของสัญญาณเพียงอย่างเดียว.....	46
4.4 วงจรรยกกำลังสองที่อินพุต i_{in} เป็นได้ทั้งค่าบวกและลบ โดยมีเงื่อนไขว่า $ i_{in} \leq I_0$	48
4.5 วงจรรยกกำลังสองที่อินพุตเป็นได้ทั้งค่าบวกและลบได้โดยไม่มีเงื่อนไข $ i_{in} \leq I_0$	49
4.6 ผลการจำลองทางไฟตรงของวงจรถอดรากลที่สอง.....	51
4.7 ผลการจำลองการทำงานของวงจรถอดรากลที่สองเมื่อแปรค่ากระแสไบอัส I_{01}	52
4.8 ผลการจำลองการทำงานของวงจรถอดรากลที่สองกรณีสัญญาณอินพุตเป็นรูปสามเหลี่ยม.....	52
4.9 ผลการจำลองการทำงานของวงจรถอดรากลที่สองกรณีสัญญาณอินพุตเป็นรูปไซน์.....	53
4.10 ผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนค่าอุมหุมิของวงจรถอดรากลที่สองของสัญญาณ.....	53
4.11 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรถอดรากลที่สอง.....	54
4.12 ผลการจำลองการทำงานของวงจรรยกกำลังสองเมื่อใช้วงจรตามรูปที่ 4.4.....	55
4.13 ผลการจำลองการทำงานของวงจรรยกกำลังสองเมื่อใช้วงจรตามรูปที่ 4.5.....	55
4.14 ผลการจำลองของวงจรรยกกำลังสองในรูปที่ 4.4 เมื่อแปรค่ากระแสไบอัส I_0	56
4.15 ผลการจำลองของวงจรรยกกำลังสองในรูปที่ 4.5 เมื่อแปรค่ากระแสไบอัส I_0	56
4.16 ผลการจำลองเมื่อสัญญาณกระแสอินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมของวงจรรยกกำลังสอง.....	57
4.17 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรยกกำลังสอง.....	57
4.18 โครงสร้างของวงจรหาผลรวมของเวกเตอร์ที่มีอินพุตจำนวน N เวกเตอร์.....	59
4.19 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรผลรวมเวกเตอร์ขนาด 2 อินพุต.....	59
5.1 วงจรหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ที่กระแสเอาต์พุตเป็น i_{out1}	63
5.2 วงจรหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ที่กระแสเอาต์พุตเป็น i_{out2}	64
5.3 วงจรคูณและหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ที่ประยุกต์มาจากวงจรหารในรูปที่ 5.1.....	66
5.4 วงจรคูณและหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ที่ประยุกต์มาจากวงจรหารในรูปที่ 5.2.....	67
5.5 ผลการจำลองการทำงานของวงจรหารสัญญาณในรูปที่ 5.1(ก).....	68
5.6 ผลการจำลองการทำงานของวงจรรูปที่ 5.3(ก) ในลักษณะการคูณ/หารสัญญาณ.....	68
5.7 ผลการจำลองการทำงานของวงจรรูปที่ 5.3(ก) ในลักษณะการหารสัญญาณ.....	69
5.8 ผลการจำลองการทำงานของวงจรรูปที่ 5.3(ก) ในลักษณะการคูณสัญญาณ.....	69

VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 ผลการจำลองการทำงานของวงจรรูปที่ 5.3(ก) ในลักษณะการคูณสัญญาณ.....	70



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคนิคการออกแบบวงจรให้สามารถทำงานได้ในโหมดกระแสกำลังได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากได้มีการศึกษา ค้นคว้า วิจัย และยืนยันมาแล้วจากบทความวิชาการต่างๆ ว่า วงจรที่ออกแบบโดยใช้เทคนิคและอุปกรณ์แอกทีฟที่ทำงานในโหมดกระแส จะให้คุณสมบัติที่เหนือกว่าวงจรที่ทำหน้าที่แบบเดียวกัน ที่ถูกออกแบบด้วยเทคนิคและใช้อุปกรณ์แอกทีฟที่ทำงานในโหมดแรงดัน ในด้านต่างๆ หลายด้าน ดังเช่น มีช่วงการทำงานที่มีความเป็นเชิงเส้นสูง มีช่วงแบนด์วิดธ์ของสัญญาณที่กว้าง มีโครงสร้างวงจรที่ง่าย และมีการใช้กำลังงานน้อย ดังนี้เป็นต้น [1-2]

อุปกรณ์แอกทีฟที่ได้รับความนิยมอย่างมากชนิดหนึ่ง สำหรับนำไปใช้เพื่อออกแบบวงจรให้ทำงานได้ในโหมดกระแสคือ วงจรสายพานกระแสที่สร้างขึ้นโดยใช้หลักการของวงจรทรานสลิเนียร์ที่มีชื่อเรียกเฉพาะว่า วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส (Second Generation Current Controlled Conveyor: CCCII) ซึ่งวงจรที่ออกแบบด้วยอุปกรณ์แอกทีฟชนิดนี้นอกจากจะมีข้อดีตามคุณสมบัติทั่วไปของวงจรที่ทำงานในโหมดกระแสแล้ว ยังมีข้อดีเพิ่มเติมคือ สามารถลดจำนวนตัวต้านทานภายนอกที่ใช้ประกอบวงจรลงได้ถึงระดับ ที่ไม่ต้องใช้ตัวต้านทานจากภายนอกเลยสำหรับบางวงจร และยังสามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของวงจรด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ได้อีกด้วย ดังตัวอย่างงานวิจัยที่ได้นำเสนอไว้ในเอกสารอ้างอิง [3-6] ในงานลักษณะเดียวกันนี้ยังมีอุปกรณ์แอกทีฟอีกประเภทหนึ่งที่ได้รับความนิยมค่อนข้างมากเช่นกันคือวงจรขยายความนำ (Operational Transconductance Amplifier: OTA) เนื่องจาก OTA มีการผลิตออกจำหน่ายทางการค้า อย่างไรก็ตามวงจรที่ออกแบบด้วย OTA ที่มีการนำค่าความนำหรือความต้านทานภายในมาประยุกต์ใช้จะมีช่วงพิสัยพลวัต (dynamic range) จำกัดกว่าวงจรที่ออกแบบด้วยอุปกรณ์แอกทีฟประเภท CCCII [7]

การประมวลผลสัญญาณในระบบต่างๆ เช่นระบบโทรคมนาคม ระบบอิเล็กทรอนิกส์และระบบเครื่องมือวัด ฯลฯ วงจรพื้นฐานที่มีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายได้แก่ วงจรถอดรอกที่สอง วงจรยกกำลังสอง วงจรคูณ/หารสัญญาณ และวงจรที่ทำหน้าที่ได้ทั้งการคูณและหารสัญญาณ ตัวอย่างเช่น ได้มีการนำวงจรถอดรอกที่สองและวงจรรยกกำลังสองมาประกอบร่วมกันเป็นวงจรสำหรับคำนวณหาค่า RMS จากรูปคลื่นสัญญาณใดๆ [8] หรือประกอบร่วมกันเพื่อทำหน้าที่เป็นวงจรรวมทางเวกเตอร์ [9] ส่วนวงจรหารสัญญาณ วงจรคูณและหารสัญญาณ ก็สามารถนำมาใช้ในการมอดูเลต และดีมอดูเลตสัญญาณได้ [10-11] ดังนี้เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการสืบค้นและศึกษาวงจรพื้นฐานเหล่านี้ที่ได้มีการนำเสนอไว้ ทั้งวงจรขยายสัญญาณกระแส วงจรถอดราก็สอง วงจรยกกำลังสอง รวมถึงวงจรคูณและหารสัญญาณ ผู้เขียนบทความส่วนใหญ่ ไม่ได้อธิบายหลัก ในการได้มาของวงจรที่ชัดเจน ทำให้บางครั้งนำไปพัฒนาต่อยอดได้ยาก

ด้วยเหตุผลดังกล่าวเหล่านี้ กลายเป็นเหตุจูงใจให้สนใจที่จะนำเสนอแนวคิดและวิธีการออกแบบ และพัฒนางจรประมวลผลสัญญาณพื้นฐาน อันได้แก่ วงจรขยายสัญญาณกระแส วงจรยกกำลังสอง วงจรถอดราก็สอง วงจรหาร วงจรคูณและหารสัญญาณ ที่ประยุกต์ใช้ CCCII โดยให้ทุกวงจรทำงานได้ในโหมดกระแสขึ้น ซึ่งรายละเอียดของการออกแบบ ข้อดี และข้อจำกัดของแต่ละวงจรที่ได้จากการออกแบบและพัฒนาจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดแต่ละบทต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ เพื่อนำเสนอเทคนิคหรือวิธีการออกแบบและพัฒนางจรประมวลผลสัญญาณที่สามารถทำงานได้ในโหมดกระแสและใช้อุปกรณ์ประเภทแอกทีฟเพียงอย่างเดียว โดยไม่ต้องการอุปกรณ์พาสซีฟใดๆ มาเชื่อมต่อเพิ่มเติมภายนอก นอกจากนี้ยังมุ่งหมายให้วงจรที่ออกแบบได้มีโครงสร้างที่ง่าย ใช้อุปกรณ์น้อย สามารถปรับค่าอัตราขยายของแต่ละวงจรได้ด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์ และตัดทอนของผลที่เกิดจากแรงดันเชิงอุณหภูมิออกจากฟังก์ชันการทำงานของแต่ละวงจรที่นำเสนอได้

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

แนวความคิดที่นำมาใช้ในการออกแบบวงจรประมวลผลสัญญาณที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการนำหลักการของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่สัมพันธ์กับตัวต้านทานลงกราวด์สองตัว โดยตัวต้านทานลงกราวด์ที่นำมาใช้นั้นเป็นแบบแอกทีฟทั้งชนิดค่าบวกและชนิดค่าลบ การประยุกต์ใช้หลักการนี้ทำให้เกิดคุณสมบัติของการขยายกระแสขึ้น และโดยการแทนตัวต้านทานลงกราวด์ทั้งสองด้วยตัวต้านทานที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แอกทีฟประเภททวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมได้ด้วยกระแส ทำให้ได้วงจรขยายกระแสที่ใช้เพียงอุปกรณ์แอกทีฟเท่านั้น จากนั้นนำวงจรขยายกระแสที่ออกแบบได้นี้มาปรับแต่งและพัฒนาต่อเป็นวงจรถอดราก็สอง วงจรยกกำลังสอง วงจรหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ และวงจรที่ทำหน้าที่ได้ทั้งการคูณ/หารสัญญาณ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ ศึกษาวิจัยเพื่อให้สามารถออกแบบ พัฒนาและประยุกต์ใช้หลักความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของตัวต้านทานขนานกันลงกราวด์สองตัวเพื่อออกแบบเป็นวงจรขยายสัญญาณกระแสเป็นลำดับแรก จากนั้นได้มุ่งความสนใจไปที่การนำวงจรขยายสัญญาณกระแสที่เสนอไปออกแบบและพัฒนาเป็นวงจรประมวลผลสัญญาณในแบบของวงจรถอดราก็สอง วงจรยกกำลัง

สอง วงจรหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ วงจรคูณและหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ และเน้นการใช้
อุปกรณ์แอคทีฟประเภทวงจรสายพานกระแสแบบทรานสลิเนียร์ที่ควบคุมได้ด้วยกระแส CCCII เพียง
ชนิดเดียว ไม่ต้องการใช้อุปกรณ์พาสซีฟใดๆ มาเชื่อมต่อเพิ่มเติมภายนอก นอกจากนั้นการศึกษาวิจัยนี้
ได้แสดงผลของการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เพื่อดูคุณสมบัติพื้นฐานของ
วงจรที่น่าเสนอด้วย

1.5 โครงประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท โดยแต่ละบทมีรายละเอียดเป็นดังต่อไปนี้
บทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและ
วัตถุประสงค์ของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการทำวิจัย และโครงประกอบของวิทยานิพนธ์
บทที่ 2 กล่าวถึงพฤติกรรมและคุณสมบัติต่างๆ ของวงจรสายพานกระแสแบบทรานสลิเนียร์ที่
ควบคุมได้ด้วยกระแสหรือ Second Generation Current Controlled Current Conveyor
(CCCII) ซึ่งเป็นอุปกรณ์แอคทีฟหลักที่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบและพัฒนาเป็นวงจรต่างๆ ที่นำเสนอ
ในวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 กล่าวถึงแนวคิดและหลักการในการออกแบบวงจรรขยายกระแสที่สร้างด้วย CCCII โดย
เริ่มอธิบายจากการนำความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่เกี่ยวข้องกับตัวต้านทานลงกราวด์ทั้งสอง
ตัวที่สามารถพัฒนาต่อเป็นวงจรรขยายสัญญาณกระแสที่สร้างด้วย CCCII ได้ รวมถึงได้แสดงผลการ
วิเคราะห์และผลการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรประกอบไว้ด้วย ซึ่งวงจรรขยายกระแสที่ออกแบบ
ได้นี้จะถูกนำไปประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบและพัฒนาต่อเป็นวงจรถอดรอกที่สอง วงจรรยกกำลังสอง
วงจรรหาร วงจรคูณและหารสัญญาณที่จะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

บทที่ 4 กล่าวถึงเทคนิควิธีการนำวงจรรขยายสัญญาณกระแสมาออกแบบและพัฒนาเป็นวงจร
ถอดรอกที่สอง และวงจรรยกกำลังสองของสัญญาณ รวมถึงได้แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้วงจรทั้ง
สองที่ประกอบร่วมกันเป็นวงจรวกเวกเตอร์ และได้แสดงผลการจำลองการทำงานประกอบไว้ด้วย
เพื่อใช้ช่วยยืนยันประสิทธิภาพของวงจรที่น่าเสนอไว้

บทที่ 5 กล่าวถึงเทคนิควิธีการนำวงจรรขยายสัญญาณกระแสมาออกแบบและพัฒนาเป็นวงจรร
หารสัญญาณ วงจรคูณและหารสัญญาณ ซึ่งวงจรที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นในบทนี้มุ่งหมายให้สามารถ
รับสัญญาณอินพุตได้ทั้งสี่ควอดแดรนต์ และได้แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรรดังกล่าว
ประกอบไว้ด้วย

บทที่ 6 เป็นบทสรุปที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ทั้งหมด

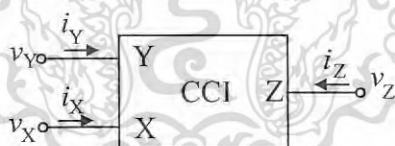
บทที่ 2

วงจรสายพานกระแสแบบทรานสลิเนียร์

2.1 ความเป็นมาและคุณสมบัติของวงจรสายพานกระแส

วงจรสายพานกระแส (current conveyor) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทแอกทีฟชนิดหนึ่งที่มีเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ แล้วสามารถทำให้เกิดการประมวลผลสัญญาณอนาล็อกในรูปแบบต่างๆ ได้อย่างมากมาย ทั้งในโหมดกระแสและแรงดัน ตัวอย่างเช่น การนำมาสร้างเป็นวงจรที่ทำหน้าที่กรองสัญญาณ [12] กำเนิดสัญญาณ [13] เลียนแบบขดลวดหรือกลับค่าอิมพีแดนซ์ [14] ดังนี้ เป็นต้น หลักการพื้นฐานของวงจรสายพานกระแสอันเป็นเหตุที่มาของคำว่าสายพานกระแส นั่นก็คือ การที่ทำให้เกิดการส่งผ่านของกระแสระหว่างพอร์ตสองพอร์ต ที่มีระดับค่าอิมพีแดนซ์ที่มีค่าต่างกันมากๆ กล่าวคือพอร์ตทางด้านอินพุตของวงจรจะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ ส่วนพอร์ตทางด้านเอาต์พุตจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูง โดยในทางทฤษฎีนั้นแม้ว่าค่าการส่งผ่านกระแสระหว่างพอร์ตทั้งสองนี้จะมีค่าต่างๆ ได้ก็ตาม แต่ที่นิยมใช้กันทั่วไปคือมีค่าการส่งผ่านเท่ากับหนึ่ง

วงจรสายพานกระแสถูกนำเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1968 โดย A. Sedra และ K.C. Smith โดยได้กำหนดชื่อให้ว่า วงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่ง (first generation current conveyor: CCI) [15] ซึ่งจัดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิด 3 พอร์ต กล่าวคือมีพอร์ตที่ทำหน้าที่เป็นพอร์ตอินพุตสองพอร์ต ที่แทนด้วยพอร์ต X และ Y และมีพอร์ตที่ทำหน้าที่เป็นพอร์ตเอาต์พุตหนึ่งพอร์ตซึ่งแทนด้วยพอร์ต Z โดยมีสัญลักษณ์ของวงจรแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่ง

วงจร CCI มีหลักการทำงานพื้นฐานคือ ค่าแรงดันที่ตกคร่อมที่พอร์ต X จะเท่ากับค่าแรงดันที่ตกคร่อมที่พอร์ต Y ค่ากระแสที่ไหลเข้าที่พอร์ต Y จะมีค่าเท่ากับค่ากระแสที่ไหลเข้าที่พอร์ต X และกระแสค่าเดียวกันนี้จะถูกลำเลียงไปยังพอร์ต Z ที่มีทิศทางไหลเข้าพอร์ตด้วย ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางไฟฟ้าต่างๆ ในรูปของสมการเชิงเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_Y \\ v_X \\ i_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_Y \\ i_X \\ v_Z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อจากนั้นไม่นาน ได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติของวงจร CCI ขึ้นใหม่เพื่อให้เกิดความคล่องตัว และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายกว่าเดิม โดยได้กำหนดชื่อให้กับวงจรที่ปรับปรุง คุณสมบัติขึ้นใหม่นี้ว่า วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง (second generation current conveyor: CCII) [16] ซึ่งวงจรนี้ได้รับความสนใจและถูกนำไปใช้ประยุกต์ในงานวิจัยต่างๆ เป็นจำนวนมาก ดังตัวอย่างในบทความ [17-18] โดยวงจร CCII มีคุณสมบัติพื้นฐานที่ต่างไปจากวงจร CCI คือ ที่พอร์ต Y มีการปรับปรุงค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุตให้มีค่าสูงเป็นอนันต์ ส่งผลให้กระแสไม่สามารถไหลผ่านเข้าที่พอร์ต Y ได้ ส่วนค่าแรงดันที่พอร์ต X และพอร์ต Y ยังคงมีค่าที่เท่ากันเสมอและกระแสที่พอร์ต X ก็ยังคงส่งผ่านไปยังพอร์ต Z ได้ ซึ่งสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางไฟฟ้าต่างๆ ในเชิงเมตริกซ์ของ CCII แสดงได้ดังนี้

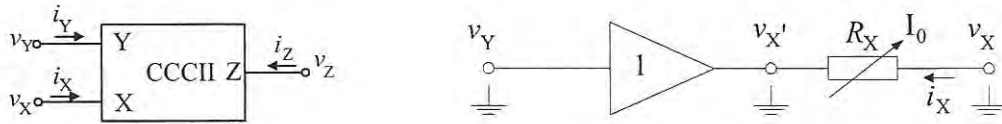
$$\begin{bmatrix} i_Y \\ v_X \\ i_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_Y \\ i_X \\ v_Z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

สำหรับโครงสร้างของวงจร CCII นั้น ได้มีการนำเสนอเกี่ยวกับโครงสร้างของวงจรไว้ในหลายรูปแบบ ดังเช่นใน [19-20] โดยที่สำคัญนั้นแต่ละรูปแบบจะมีส่วนของวงจรร้อยหลักสองส่วนคือ ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นวงจรตามแรงดัน และส่วนที่ทำหน้าที่เป็นวงจรสะท้อนกระแส ซึ่งโครงสร้างแต่ละรูปแบบจะมีเพียงวงจรร้อยที่ทำหน้าที่เป็นวงจรตามแรงดันเท่านั้นที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น วงจร CCII ในบทความที่ [21] ได้อาศัยออปแอมป์ทำงานร่วมกับวงจรสะท้อนกระแส แต่อย่างไรก็ตาม วงจร CCII แบบนี้ไม่ค่อยได้รับความนิยมมากนัก เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องของความเร็วใช้งานอันเกิดจากข้อจำกัดของออปแอมป์

วงจร CCII ที่มีความน่าสนใจและได้รับความนิยมอย่างมากคือวงจร CCII ที่มีโครงสร้างภายในที่สร้างขึ้นจากทรานซิสเตอร์ที่ประกอบกันโดยใช้หลักการทรานสลิเนียร์ ที่นำเสนอโดย Fabre A. [22] เนื่องจากวงจร CCII แบบนี้ให้ผลตอบสนองทางความเร็วที่กว้างกว่าวงจร CCII ที่สร้างจากออปแอมป์ อีกทั้งยังใช้อุปกรณ์น้อยกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อทำการวิเคราะห์วงจร CCII ชนิดนี้ออย่างละเอียดแล้วจะพบว่าวงจรมีความคลาดเคลื่อนในการทำงานที่พอร์ต X เมื่อใช้ค่ากระแสไบอัสของวงจรมาน้อยๆ ผลของความคลาดเคลื่อนนี้ได้แสดงตัวคล้ายกับมีความต้านทานแฝงอยู่ที่พอร์ต X และเนื่องจากผลของความต้านทานแฝงที่พอร์ต X นี้สามารถควบคุมได้โดยการควบคุมกระแสไบอัส I_0 ของวงจร จึงทำให้เกิดเป็นจุดที่น่าสนใจขึ้นอย่างมาก ทั้งนี้เพราะเมื่อนำไปใช้ในการออกแบบและพัฒนาเป็นวงจรประมวลผลสัญญาณแล้วทำให้เกิดวงจรแบบใหม่ๆ ที่สามารถลดความต้องการตัวต้านทานภายนอกได้มากมายและยังส่งผลให้วงจรที่ได้จากการออกแบบโดยใช้ CCII ที่มีค่าความต้านทานเกิดขึ้นที่พอร์ต X นี้มีโครงสร้างง่ายขึ้น พร้อมทั้งยังสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ในวงจรด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ได้อีกด้วย จึงได้เกิดมีการนิยามเรียกววงจร CCII ที่มีค่าความต้านทานภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี่ใหม่ว่า วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมได้ด้วยกระแส (second generation current controlled conveyor : CCCII) และยังสามารถเป็นวงจรสายพานกระแสอีกแบบหนึ่งที่ได้รับค่านิยมมากด้วย สำหรับสัญลักษณ์และวงจรสมมูลที่มีค่า R_X อยู่ที่พอร์ต X ของ CCCII แสดงดังรูปที่ 2.2



(ก) สัญลักษณ์

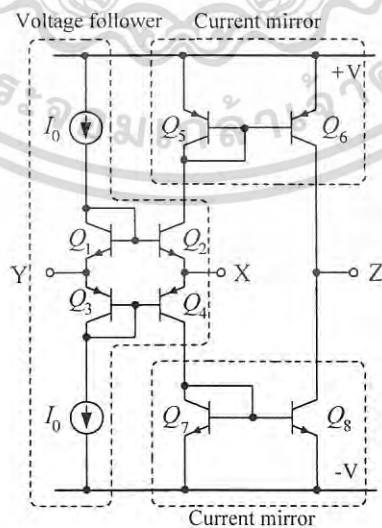
(ข) วงจรสมมูลระหว่างพอร์ต X และพอร์ต Y

รูปที่ 2.2 สัญลักษณ์และวงจรสมมูลของ CCCII

ในวิทยานิพนธ์นี้เน้นการนำ CCCII ที่สร้างขึ้นจากหลักการของลูปทรานสลิเนียร์ต่อร่วมกับวงจรสะท้อนกระแสที่ออกแบบโดย A. Fabre ไปประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบและสร้างเป็นวงจรประมวลผลสัญญาณในแบบของวงจรรขยายสัญญาณกระแส วงจรถอดรากที่สอง วงจรรยกกำลังสอง วงจรหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ วงจรคูณและหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ ดังนั้นเพื่อที่จะได้ง่ายต่อการทำความเข้าใจในเทคนิควิธีการออกแบบวงจรต่างๆ เหล่านี้ที่จะกล่าวถึงในบทต่อไป จึงขอกล่าวถึงรายละเอียดการวิเคราะห์ของ CCCII ไว้ในบทนี้ด้วย ดังต่อไปนี้

2.2 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าที่พอร์ตต่างๆ ของ CCCII

วงจรสายพานกระแสแบบทรานสลิเนียร์หรือ CCCII ที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ประกอบขึ้นจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ที่ออกแบบโดย A. Fabre



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของวงจรสายพานกระแสที่สร้างจากหลักการของวงจรรานสลิเนียร์

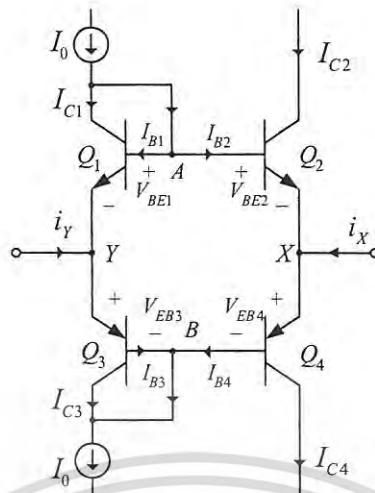
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรในรูปที่ 2.3 นี้ประกอบด้วยวงจรร้อยยที่สำคัญอยู่สองวงจรตามเส้นประที่แบ่งไว้ คือวงจรถามแรงดัน (voltage follower) และวงจรถสะท้อนกระแส (current mirror) โดยในส่วนของวงจรถามแรงดัน ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ $Q_1 - Q_4$ ที่ประกอบกันเป็นรูปปิดตามหลักการของวงจรถามแรงดัน โดยที่ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 เป็นชนิดเอ็นพีเอ็น (NPN) ส่วนทรานซิสเตอร์ Q_3 และ Q_4 เป็นชนิดพีเอ็นพี (PNP) ทรานซิสเตอร์ Q_1 มีการเชื่อมต่อระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และขาเบส ดังนั้นทรานซิสเตอร์ Q_1 จึงมีการทำงานคล้ายกับไดโอด เมื่อถูกป้อนด้วยกระแสไบอัส I_0 จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมระหว่างขาเบสและขาอีมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 ซึ่งแรงดันค่านี้ส่งผลให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 ทำงานด้วย และจากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าจุดเชื่อมต่อระหว่างขาอีมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 และขาอีมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_3 นี้ จะถูกเชื่อมต่อออกมาให้เป็นพอร์ต Y และจุดเชื่อมต่อระหว่างขาอีมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_2 และขาอีมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_4 จะถูกเชื่อมต่อออกมาให้เป็นพอร์ต X

ในส่วนของวงจรถสะท้อนกระแส (Current mirror) นั้น ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ $Q_5 - Q_6$ ซึ่งเป็นชนิดพีเอ็นพี และทรานซิสเตอร์ $Q_7 - Q_8$ ซึ่งเป็นชนิดเอ็นพีเอ็น โดยทรานซิสเตอร์ $Q_5 - Q_6$ และ $Q_7 - Q_8$ นั้นต่อประกอบกันโดยเป็นวงจรถามแรงดันสองวง ทำให้สามารถส่งผ่านกระแสจากพอร์ต X ไปยังพอร์ต Z ได้ สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของวงจรถสะท้อนกระแสจะได้อธิบายโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่พอร์ต Y

การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส i_y และแรงดันที่พอร์ต Y จะพิจารณาที่วงจรร้อยยที่ทำหน้าที่เป็นวงจรถามแรงดันของวงจรถามแรงดันในรูปที่ 2.3 โดยนำมาวาดใหม่อีกครั้งและเขียนตัวแปรเพิ่มเติมเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ตามที่แสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของกระแส i_y และแรงดันที่พอร์ต Y

จากรูปที่ 2.4 เมื่อคิดผลรวมของแรงดันภายในลูปปิด จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา เป็นดังนี้

$$V_{BE2} + V_{BE4} = V_{BE1} + V_{BE3} \quad (2.3)$$

จากคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์ที่ว่า

$$V_{BE} = V_T \ln \left(\frac{I_C}{I_S} \right) \quad (2.4)$$

เมื่อแทนค่าสมการนี้ในสมการที่ (2.3) จะได้

$$V_{T2} \ln \left(\frac{I_{C2}}{I_{S2}} \right) + V_{T4} \ln \left(\frac{I_{C4}}{I_{S4}} \right) = V_{T1} \ln \left(\frac{I_{C1}}{I_{S1}} \right) + V_{T3} \ln \left(\frac{I_{C3}}{I_{S3}} \right) \quad (2.5)$$

โดยที่ V_T คือค่าแรงดันเชิงอุณหภูมิที่มีค่าเท่ากับ kT/q

เมื่อสมมติให้ทรานซิสเตอร์ทั้งหมดถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการที่ทำในเวลาเดียวกัน มีค่าพื้นที่อิมิตเตอร์ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ทั้งชนิดพีเอ็นพีและเอ็นพีเอ็นเท่ากัน และทำงานในสภาวะอุณหภูมิแวดล้อมเดียวกัน ดังนั้น $I_{S1} = I_{S2} = I_{S3} = I_{S4} = I_S$ และ $V_{T1} = V_{T2} = V_{T3} = V_{T4} = V_T$ ส่งผลให้ค่า V_T และ I_S ในสมการ (2.5) ถูกขจัดออกไปได้ และได้ความสัมพันธ์ของสมการที่อยู่ในเทอมของกระแสคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวเป็นดังสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{C2}I_{C4} = I_{C1}I_{C3} \quad (2.6)$$

จากสมการ (2.6) จะเห็นว่าผลรวมของแรงดันระหว่างเบส-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ภายในลูปนั้นส่งผลทำให้เกิดเป็นผลคูณของกระแสคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ที่อยู่ภายในลูปเดียวกัน โดยในที่นี้ผลคูณของกระแสคอลเล็กเตอร์ Q_2 และ Q_4 จะมีค่าเท่ากับผลคูณของกระแสคอลเล็กเตอร์ของ Q_1 และ Q_3 ซึ่งเป็นหลักการของวงจรทรานสลิเนียร์

เมื่อพิจารณาผลรวมของกระแสไฟตรงที่โหนด A และ โหนด B ตามลำดับ จะพบว่าผลรวมของกระแสเป็นดังนี้

$$I_0 - I_{C1} - I_{B1} - I_{B2} = 0 \quad (2.7)$$

และ

$$I_0 - I_{C3} - I_{B3} - I_{B4} = 0 \quad (2.8)$$

ถ้ากำหนดให้ β_F คืออัตราขยายไฟตรงของทรานซิสเตอร์ และกำหนดให้ทรานซิสเตอร์ทั้งหมดมีค่า β_F เท่ากันทุกตัวแล้ว จัดรูปสมการ (2.7) และ (2.8) ใหม่ก็ได้

$$I_0 - I_{C1} - 2\frac{I_{C1}}{\beta_F} = 0 \quad (2.9)$$

และ

$$I_0 - I_{C3} - 2\frac{I_{C3}}{\beta_F} = 0 \quad (2.10)$$

และเมื่อจัดรูปสมการ (2.9) และ (2.10) ใหม่อีกครั้ง จะได้

$$I_{C1} = \frac{I_0}{1 + 2/\beta_F} \quad (2.11)$$

และ

$$I_{C3} = \frac{I_0}{1 + 2/\beta_F} \quad (2.12)$$

สังเกตสมการ (2.11) และ (2.12) พบว่าหากใช้ค่า β_F ที่มีค่าสูงมากพอ ก็จะทำให้กระแส I_{C1} และ I_{C3} มีค่าประมาณเท่ากับ I_0 ได้ และส่งผลให้กระแส i_V ไม่สามารถไหลผ่านเข้าไปที่พอร์ต Y ได้ ซึ่งทำให้พิจารณาได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ในทางทฤษฎีที่มองจากพอร์ต Y มีค่าสูงเป็นอนันต์ ดังนั้นเมื่อนาวจร CCCII ไปสังเคราะห์เป็นวงจรชนิดต่างๆ พอร์ต Y ของวงจร CCCII จึงเหมาะสมสำหรับใช้

รับสัญญาณแรงดัน เนื่องจากสามารถลดผลกระทบของการโหลด (loading effect) กับสัญญาณที่มีเข้ามาได้

2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่พอร์ต X

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่พอร์ต X สามารถหาได้โดยการวิเคราะห์วงจรในรูปที่ 2.4 เช่นเดียวกับกรณีการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่พอร์ต Y ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เมื่อพิจารณาลูปทรานสลิเนียนในรูปที่ 2.4 โดยกำหนดให้ทรานซิสเตอร์ทุกตัวมีความสมพหุกัน และมีอัตราขยายกระแสมากกว่าหนึ่งมากๆ ($\beta_F \gg 1$) จากการสมมตินี้ทำให้สามารถลดผลของกระแสเบสออกไปได้ และทำให้สามารถเขียนค่ากระแสในสมการที่ (2.11) และ (2.12) ใหม่ได้เป็น

$$I_{C1} = I_{C3} = I_0 \quad (2.13)$$

ส่วนค่ากระแส i_x สามารถพิจารณาเป็นลำดับได้ดังนี้ เริ่มจากการคิดผลรวมของกระแสที่จุด X ซึ่งจะได้ว่า

$$i_x = I_{C4} - I_{C2} \quad (2.14)$$

โดยค่ากระแสที่ไหลผ่านขาคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_2 หรือ I_{C2} สามารถหาได้จากรูปที่ 2.4 ซึ่งมีค่าแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาเบส-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_2 เป็น

$$V_{BE2} = V_{BE1} + v_Y - v_X \quad (2.15)$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันเบส-อิมิตเตอร์ของ Q_2 มีค่าเป็น

$$I_{C2} = I_S \exp\left(\frac{V_{BE1} + v_Y - v_X}{V_T}\right) \quad (2.16)$$

$$I_{C2} = I_S \exp\left(\frac{V_T \ln\left(\frac{I_0}{I_S}\right) + v_Y - v_X}{V_T}\right) \quad (2.17)$$

$$I_{C2} = I_0 \exp\left(\frac{v_{YX}}{V_T}\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

I_S คือ ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (reverse saturation current) ซึ่งมีค่าแปรผันตามพื้นที่อิมิตเตอร์ของ BJT

V_T คือ ค่าแรงดันเชิงอุณหภูมิต (thermal voltage)

$$v_{YX} = v_Y - v_X$$

ทำนองเดียวกัน สามารถหาค่ากระแสคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_4 หรือ I_{C4} ได้เป็น

$$I_{C4} = I_0 \exp\left(\frac{v_{XY}}{V_T}\right) \quad (2.18)$$

ซึ่งเมื่อนำค่าในสมการ (2.17) และ (2.18) แทนใน (2.14) จะได้

$$i_X = I_0 \exp\left(\frac{-v_{YX}}{V_T}\right) - I_0 \exp\left(\frac{v_{YX}}{V_T}\right) \quad (2.19)$$

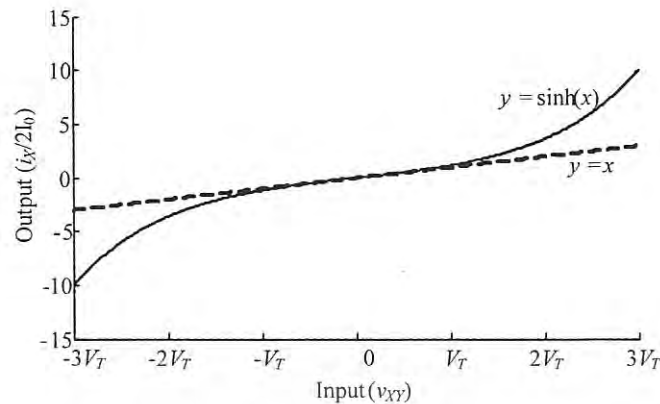
หรือ

$$i_X = 2I_0 \left\{ \frac{\exp\left(\frac{v_{XY}}{V_T}\right) - \exp\left(\frac{-v_{XY}}{V_T}\right)}{2} \right\} \quad (2.20)$$

และจากความสัมพันธ์ที่ว่า $\frac{\exp(x) - \exp(-x)}{2} = \sinh x$ ดังนั้นสมการ (2.20) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$i_X = 2I_0 \sinh\left(\frac{v_{XY}}{V_T}\right) \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.21) จะเห็นว่า กระแส i_X สัมพันธ์กับแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างพอร์ต X และ Y อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิก ซึ่งเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นชนิดหนึ่ง กราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันนี้มีดังแสดงในรูปที่ 2.5 ในรูปนี้ได้วาดกราฟเส้นตรง $y = x$ เพิ่มเข้าไปด้วยเพื่อประมาณเปรียบเทียบความเป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์ให้ชัดเจนขึ้น



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่พอร์ต X และแรงดันอินพุต v_{XY}

จากกราฟจะเห็นได้ว่ากระแส i_x แม้จะมีความสัมพันธ์กับแรงดัน v_{XY} ในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นตลอดช่วงของแรงดันอินพุตอยู่ก็ตาม แต่ในช่วงเริ่มต้นที่ขนาดของอินพุตมีค่าน้อยเส้นกราฟนั้นมีความสัมพันธ์ที่สามารถประมาณเป็นแบบเชิงเส้นได้ คือเป็นช่วงที่กราฟทั้งสองเส้นทับกันพอดีและเป็นช่วงที่แรงดันอินพุต v_{XY} มีค่าไม่เกินค่า V_T ดังนั้นในช่วงแรงดันอินพุตค่านี้อาจกล่าวได้ว่าเป็นช่วงที่ผลตอบสนองของวงจรมีความเป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถยืนยันได้อีกวิธีหนึ่งโดยใช้การกระจาย Taylor's Series ของฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกที่มีค่าตามสมการต่อไปนี้

$$\sinh(x) = x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \frac{x^7}{7!} + \dots \quad ; -\infty < x < \infty \quad (2.22)$$

ดังนั้นสมการ (2.22) จึงประมาณค่าได้เป็น

$$i_x = 2I_o \left\{ \frac{v_{XY}}{V_T} + \frac{1}{3!} \left(\frac{v_{XY}}{V_T} \right)^3 + \frac{1}{5!} \left(\frac{v_{XY}}{V_T} \right)^5 + \dots \right\} \quad (2.23)$$

จากสมการ (2.23) จะเห็นได้ว่า ถ้า v_{XY} มีค่าน้อยกว่า 1 มากๆ หรือค่า $v_{XY} \ll V_T$ มากๆ แล้วจะทำให้เทอมที่มีกำลังมากกว่าหนึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพจน์แรก จึงสามารถละทิ้งเทอมที่มีกำลังมากกว่าหนึ่งของอนุกรม $\sinh\left(\frac{v_{XY}}{V_T}\right)$ ได้ ดังนั้นในกรณีดังกล่าวนี้ จึงประมาณได้ว่า

$$\sinh\left(\frac{v_{XY}}{V_T}\right) \cong \frac{v_{XY}}{V_T} \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนค่าสมการ (2.24) ลงในสมการ (2.21) จะได้

$$i_x = 2I_0 \frac{v_{xy}}{V_T} \quad (2.25)$$

สังเกตจากสมการ (2.25) จะเห็นได้ว่า ถ้าแรงดันอินพุตของวงจรมีค่าน้อยกว่า V_T จะทำให้วงจรถูกประมาณว่าสามารถทำงานอย่างเป็นเชิงเส้นได้ แต่อย่างไรก็ตามถ้าสัญญาณอินพุตมีค่ามากๆ แล้วการประมาณดังกล่าวก็จะทำให้เกิดค่าที่คลาดเคลื่อนไปจากค่าที่แท้จริงได้ เพราะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันตามสมการ (2.25) จะใช้ไม่ได้จริง อีกประการหนึ่งที่พึงพิจารณาด้วย คือว่าถ้าอินพุตของวงจรสายพานกระแสมีองค์ประกอบของความถี่ด้วยแล้วก็จะทำให้สัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีความถี่ฮาร์โมนิกที่ไม่พึงประสงค์ด้วย และสาเหตุดังกล่าวนี้จะเป็นที่มาของข้อจำกัดในการทำงานของวงจรสายพานกระแส เมื่อถูกนำไปใช้สังเคราะห์เป็นวงจรมวลสัญญาณประเภทเชิงเส้นด้วย

ในทำนองเดียวกัน ถ้าหากนำวงจรสายพานกระแสมารับสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณกระแส วงจรสายพานกระแสก็จะมีข้อจำกัดของขนาดกระแสอินพุตเช่นกัน ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการ (2.21) โดยทำการจัดรูปสมการใหม่เป็นดังนี้

$$v_{xy} = V_T \sinh^{-1} \left(\frac{i_x}{2I_0} \right) \quad (2.26)$$

สมการ (2.26) แสดงให้เห็นว่าแรงดัน v_{xy} สัมพันธ์กับกระแส i_x ในรูปแบบของอินเวอร์สฟังก์ชันไซน์ไฮเพอร์โบลิก ซึ่งฟังก์ชันนี้สามารถกระจายโดยใช้ Taylor's Series ได้ดังนี้

$$\sinh^{-1}(x) = x - \left(\frac{1}{2}\right)\frac{x^3}{3} + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)\frac{x^5}{5} - \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)\frac{x^7}{7} + \dots \quad (2.27)$$

ส่งผลให้สมการ (2.27) เขียนได้อีกแบบหนึ่งคือ

$$v_{xy} = V_T \left\{ \left(\frac{i_x}{2I_0}\right) - \left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{i_x}{6I_0}\right)^3 + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)\left(\frac{i_x}{10I_0}\right)^5 - \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)\left(\frac{i_x}{14I_0}\right)^7 + \dots \right\} \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

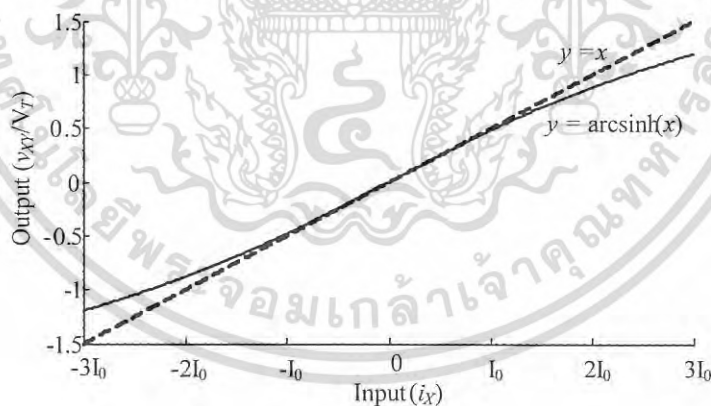
จากสมการที่ (2.28) พบว่า ถ้า $\frac{i_x}{2I_0}$ มีค่าน้อยกว่า 1 มากๆ ก็จะทำให้เทอมที่มีกำลังมากกว่าหนึ่งมีค่าน้อยจนสามารถที่จะละทิ้งเทอมที่มีกำลังมากกว่าหนึ่งของอนุกรม $\sinh^{-1}\left(\frac{i_x}{2I_0}\right)$ ได้ ดังนั้นจึงประมาณได้ว่า

$$\sinh^{-1}\left(\frac{i_x}{2I_0}\right) \cong \frac{i_x}{2I_0} \quad (2.29)$$

ดังนั้นจากสมการ (2.29) จึงส่งผลให้สามารถเขียนสมการ (2.28) ใหม่ได้เป็น

$$v_{xy} = V_T \left(\frac{i_x}{2I_0} \right) \quad (2.30)$$

จากการได้มาของสมการ (2.30) ส่งผลทำให้ทราบว่าถ้าหากนำวงจรสายพานกระแสไปปรับสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณกระแสนั้น กระแสอินพุตของวงจรดังกล่าวต้องมีค่าน้อยกว่า $2I_0$ มาก จึงจะทำให้วงจรถูกประมาณว่าสามารถทำงานอย่างเป็นเชิงเส้นได้ สำหรับกราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่มีดังแสดงในรูปที่ 2.6 ในรูปนี้ได้วาดกราฟเส้นตรง $y = x$ เพิ่มเข้าไปด้วยเพื่อประมาณเปรียบเทียบความเป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์ให้ชัดเจนขึ้น



รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน v_{xy} และกระแสที่พอร์ต X

สังเกตจากกราฟจะพบว่า ค่าแรงดัน v_{xy} จะสัมพันธ์กับค่ากระแส i_x ในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นตลอดช่วงกระแสอินพุต แต่อย่างไรก็ตาม บางช่วงของเส้นกราฟมีความสัมพันธ์ที่สามารถประมาณเป็นแบบเชิงเส้นได้ ซึ่งเป็นช่วงที่กราฟทั้งสองเส้นทับกันพอดีและเป็นช่วงที่กระแสอินพุต i_x

มีค่าไม่เกินค่า $2I_0$ เท่านั้น ดังนั้นในช่วงกระแสอินพุตค่านี้จึงกล่าวได้ว่าเป็นช่วงที่ผลตอบสนองของวงจรมีความเป็นเชิงเส้น

วงจรสายพานกระแสที่มีการทำงานตามเงื่อนไขของสมการ (2.25) และ (2.30) นั้น จะพิจารณาได้ว่ามีการทำงานเป็นเชิงเส้นและสามารถประมาณค่าความต้านทานภายในที่พอร์ต X ของวงจร ได้เป็น

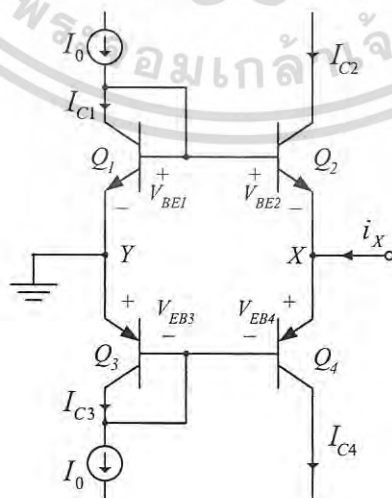
$$\frac{v_{XY}}{i_X} = R_X \approx \frac{V_T}{2I_0} \quad (2.31)$$

เมื่อพิจารณาสมการ (2.31) จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานภายในที่พอร์ต X จะมีค่าขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ตัว คือ ตัวแปรของแรงดันเชิงอุณหภูมิ V_T ที่มีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและตัวแปรกระแสไบอัส I_0 ของลูปทรานสลิเนียร์ โดยค่ากระแสไบอัสนี้สามารถปรับเปลี่ยนได้ ส่งผลให้ได้ค่าความต้านทานภายในที่พอร์ต X ที่สามารถปรับค่าได้ โดยการปรับค่ากระแสไบอัส I_0 ของลูปทรานสลิเนียร์ และนำไปใช้งานเป็นค่าความต้านทานที่ประกอบรวมในวงจรได้โดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้ค่าความต้านทานที่เป็นอุปกรณ์พาสซีฟจากภายนอก

2.2.3 การส่งผ่านกระแสจากพอร์ต X ไปยังพอร์ต Z

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าวงจรสายพานกระแสเป็นวงจรที่สามารถลำเลียงค่ากระแสจากพอร์ต X ออกไปยังพอร์ต Z ได้ ซึ่งในทางทฤษฎีมีอัตราการใช้ที่เท่ากับหนึ่ง ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้กล่าวถึงหลักการส่งผ่านกระแสจากพอร์ต X ไปยังพอร์ต Z ของวงจรประกอบไว้พอเป็นที่เข้าใจได้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การวิเคราะห์การส่งผ่านกระแสจากพอร์ต X ไปยังพอร์ต Z และการวิเคราะห์หาค่าอัตราขยายกระแส สามารถทำได้โดยการต่อพอร์ต Y ลงกราวด์ และป้อนกระแสอินพุตเข้าที่พอร์ต X ซึ่งในที่นี้กระแสอินพุตเขียนแทนด้วย i_X ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 รูปประกอบการวิเคราะห์ค่ากระแสที่จะส่งจากพอร์ต X ไปยังพอร์ต Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของกระแสที่พอร์ต X จะได้

$$I_{C4} = I_{C2} + i_x \quad (2.32)$$

หรือ

$$I_{C2} = I_{C4} - i_x \quad (2.33)$$

และจากความสัมพันธ์ของกระแสในสมการ (2.7) ทำให้ทราบว่าค่ากระแส I_{C2} หรือ I_{C4} สัมพันธ์กับค่ากระแสในเทอมของ I_0 ดังนี้

$$I_{C2} = \frac{I_0^2}{I_{C4}} \quad (2.34)$$

หรือ

$$I_{C4} = \frac{I_0^2}{I_{C2}} \quad (2.35)$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าสมการ (2.34) ลงในสมการ (2.33) จะได้

$$I_{C4} - i_x I_{C4} - I_0^2 = 0 \quad (2.36)$$

และจากสมการ (2.36) นี้สามารถหาค่ากระแส I_{C4} ได้เป็น

$$I_{C4} = \frac{i_x \pm \sqrt{i_x^2 + 4I_0^2}}{2} \quad (2.37)$$

พิจารณาสมการ (2.37) พบว่า ถ้ากำหนดให้ $i_x \ll 2I_0$ มาก จะสามารถประมาณได้ว่า

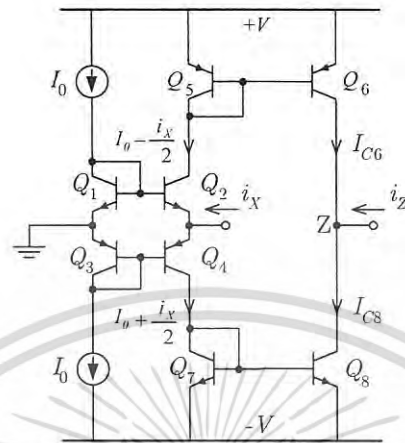
$$I_{C4} \cong I_0 + \frac{i_x}{2} \quad (2.38)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อนำสมการ (2.35) แทนในสมการ (2.33) ก็จะประมาณได้ว่า

$$I_{C2} \cong I_0 - \frac{i_x}{2} \quad (2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่ากระแส I_{C4} ในสมการ (2.38) และ I_{C2} ในสมการ (2.39) จะถูกส่งผ่านออกไปยังพอร์ต Z ตามการเชื่อมต่อของวงจรที่แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 รูปประกอบการวิเคราะห์การส่งผ่านกระแสจากพอร์ต X ไปยังพอร์ต Z

จากรูปที่ 2.8 กระแส I_{C4} จะถูกส่งผ่านไปยังพอร์ต Z โดยอาศัยการทำงานของทรานซิสเตอร์ $Q_7 - Q_8$ และกระแส I_{C2} จะส่งผ่านไปสู่พอร์ต Z โดยอาศัยการทำงานของทรานซิสเตอร์ $Q_5 - Q_6$ ซึ่งทรานซิสเตอร์ทั้งสองกลุ่มนี้ ($Q_5 - Q_6$ และ $Q_7 - Q_8$) ประกอบร่วมกันเป็นวงจรสะท้อนกระแส (Current Mirror) การวิเคราะห์หาค่ากระแส I_{C6} และ I_{C8} ทำได้โดยคิดผลรวมของแรงดันภายในลูบที่ประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ $Q_5 - Q_6$ และ $Q_7 - Q_8$ ที่ประกอบกันเป็นวงรอบโดยอาศัยหลักการของวงจรทรานสลิเนียร์ ตามลำดับ

จากรูปทำให้ทราบว่า

$$i_Z = I_{C8} - I_{C6} \quad (2.40)$$

โดยค่ากระแส I_{C6} ที่ได้จากการพิจารณารูปที่ 2.8 ได้ความสัมพันธ์เป็น

$$V_{BE5} = V_{BE6} \quad (2.41)$$

หรือ

$$V_T \ln \left(\frac{I_0 - \frac{i_X}{2}}{I_S} \right) = V_T \ln \left(\frac{I_{C6}}{I_S} \right) \quad (2.42)$$

ดังนั้นทำให้ได้ค่ากระแสคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์ I_{C6} มีค่าเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{C6} = I_0 - \frac{i_X}{2} \quad (2.43)$$

ในการทำงานเดียวกันสามารถหาค่ากระแส I_{C8} ได้จากความสัมพันธ์ของแรงดันระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ในลูบที่ประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ $Q_7 - Q_8$ ดังนี้คือ

$$V_{BE7} = V_{BE8} \quad (2.44)$$

หรือ

$$V_T \ln \left(\frac{I_0 + \frac{i_X}{2}}{I_S} \right) = V_T \ln \left(\frac{I_{C8}}{I_S} \right) \quad (2.45)$$

ดังนั้นทำให้ได้ค่ากระแสคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ I_{C8} มีค่าเป็น

$$I_{C8} = I_0 + \frac{i_X}{2} \quad (2.46)$$

เมื่อนำค่าสมการ (2.43) และสมการ (2.46) แทนค่าในสมการ (2.40) แล้วจะได้ผลลัพธ์เป็น

$$i_Z = i_X \quad (2.47)$$

โดยในที่นี้การส่งผ่านกระแสระหว่างพอร์ต X และพอร์ต Z มีอัตราการส่งผ่านเท่ากับหนึ่ง โดยมีเงื่อนไขว่าทรานซิสเตอร์ทุกตัวมีความสมพงษ์กัน และมีอัตราขยายกระแสมากกว่าหนึ่งมากๆ ($\beta_F \gg 1$) นอกจากนี้ยังสังเกตพบว่าทิศทางของกระแสที่พอร์ต X และพอร์ต Z อยู่ในทิศทางเดียวกันด้วย ซึ่งจัดว่าเป็นวงจรสายพานกระแสชนิดบวก

จากการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าที่พอร์ตต่างๆ ของ CCCII ดังที่ได้แสดงมาแล้วทำให้สามารถเขียนสรุปเป็นความสัมพันธ์ในเชิงเมตริกซ์ได้ดังนี้

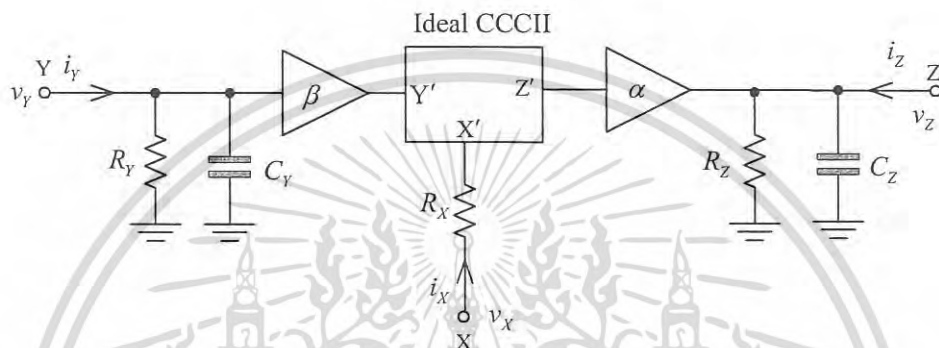
$$\begin{bmatrix} i_Y \\ v_X \\ i_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & R_X & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_Y \\ i_X \\ v_Z \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

ในที่นี้ R_X เป็นค่าความต้านทานเสมือนภายในที่พอร์ต X ของ CCCII โดยมีสัญลักษณ์และวงจรสมมูลตามที่ได้แสดงไว้แล้วตามรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การประมาณการทำงานของวงจรสายพานกระแสเมื่อวงจรมีการทำงานแบบไม่เป็นอุดมคติ

วงจรสายพานกระแสในทางปฏิบัติที่พอร์ตต่างๆ ของวงจรจะมีอิมพีแดนซ์แฝงที่ไม่ต้องการปรากฏขึ้น อีกทั้งอัตราการส่งผ่านของแรงดันและอัตราการส่งผ่านของกระแสที่เกิดขึ้นระหว่างพอร์ตของวงจรก็มีค่าขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้งานด้วย ซึ่งวงจรสายพานกระแสเมื่อมีการทำงานแบบไม่เป็นอุดมคติสามารถแทนได้ด้วยวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.9 [23]



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของวงจรสายพานกระแสเมื่อมีการทำงานแบบไม่เป็นอุดมคติ [23]

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลในรูปที่ 2.9 พบว่า ที่พอร์ต Y และพอร์ต Z นั้นมีอิมพีแดนซ์แฝงที่เกิดจากตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเก็บประจุ ในขณะที่พอร์ต X ก็มีตัวต้านทาน R_X แฝงอยู่เช่นกัน

ค่า β ในที่นี้คืออัตราการส่งผ่านของแรงดัน ระหว่างพอร์ต Y ไปที่พอร์ต X ในทำนองเดียวกัน α ในที่นี้กำหนดให้เป็นอัตราการส่งผ่านของกระแสจากพอร์ต X ไปยังพอร์ต Z ของวงจร จะสังเกตว่าพารามิเตอร์ทั้งสองนี้โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณเท่ากับหนึ่ง

วงจรสมมูลตามรูปที่ 2.9 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่พอร์ตต่างๆ เป็นสมการเชิงเมตริกซ์ได้ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_Y \\ v_X \\ i_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/(R_Y \parallel Z_{C_Y}) & 0 & 0 \\ \beta & R_X & 0 \\ 0 & \pm\alpha & 1/(R_Z \parallel Z_{C_Z}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_Y \\ i_X \\ v_Z \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

ค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุแฝงที่พอร์ตต่างๆของวงจรสายพานกระแส รวมทั้งอัตราการส่งผ่านสัญญาณแรงดันและอัตราการส่งผ่านสัญญาณกระแส สามารถหาค่าประมาณได้หลังจาก

เลือกใช้ทรานซิสเตอร์ที่ประกอบเป็นวงจร CCCII ซึ่งการเลือกใช้ทรานซิสเตอร์ต่างกันก็จะส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานแฝงในวงจรที่ต่างกันด้วย

2.4 สรุป

เนื้อหาสาระสำคัญในบทนี้ได้กล่าวรวบรวมเกี่ยวกับเรื่องของวงจรสายพานกระแส ซึ่งจะใช้เป็นวงจรพื้นฐานที่จะได้นำมาประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นหลัก ซึ่งได้มีการกล่าวถึงโครงสร้างวงจรที่สำคัญ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางไฟฟ้าที่พอร์ตต่างๆ การทำงานที่ไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรภาคอินพุตไว้ และได้แสดงถึงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่สัมพันธ์กันอยู่ในแบบไฮเปอร์โบลิกฟังก์ชัน การได้มาของค่าความต้านทานอินพุตที่พอร์ต Y และพอร์ต X รวมทั้งได้แสดงถึงวงจรสมมูล ความสัมพันธ์เชิงเมตริกซ์ และสัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแสทั้งในกรณีที่วงจรมีการทำงานแบบเป็นอุดมคติและแบบไม่เป็นอุดมคติอันเป็นพื้นฐานที่สำคัญที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในบทต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วงจรรขยายสัญญาณกระแส

วงจรรขยายสัญญาณกระแสเป็นวงจรหนึ่ง ที่มีบทบาทสำคัญในงานด้านการประมวลผลสัญญาณ และมีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบการสื่อสาร ระบบการวัด ระบบเครื่องมือวัด และระบบอิเล็กทรอนิกส์ วงจรรขยายสัญญาณกระแสส่วนใหญ่มักสร้างขึ้นโดยการนำอุปกรณ์พาสซีฟประเภทตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุมาประกอบร่วมกับ อุปกรณ์แอคทีฟ เช่นออปแอมป์ หรือทรานซิสเตอร์ เป็นต้น ซึ่งวิธีการเช่นนี้มีข้อจำกัดในการที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม เนื่องจากต้องใช้พื้นที่ในการสร้างวงจรรวมค่อนข้างมาก เพื่อลดปัญหานี้จึงได้มีการนำเสนอการออกแบบวงจรรขยายสัญญาณกระแสที่ใช้เพียงอุปกรณ์แอคทีฟอย่างเดียวขึ้นมามีดังเช่นในบทความ [24-26] สำหรับการออกแบบวงจรรขยายสัญญาณกระแสที่ผ่านมา แม้จะมีการประยุกต์ใช้ CCCII มาเป็นอุปกรณ์แอคทีฟบ้างแล้ว [27] แต่ก็ยังไม่ปรากฏว่ามีบทความที่นำเสนอวิธีการออกแบบวงจรรขยายสัญญาณกระแสผ่านความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ตัวต้านทานขนานกันสองตัวต่อกราวด์ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบที่เข้าใจง่ายและยังส่งผลให้วงจรที่ออกแบบได้สามารถทำงานได้ในโหมดกระแส มีโครงสร้างที่ง่าย ใช้อุปกรณ์น้อย และใช้อุปกรณ์แอคทีฟเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้วงจรรขยายสัญญาณกระแสที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ยังสามารถวิเคราะห์ได้โดยตรงโดยไม่ต้องทำการวิเคราะห์ผ่านการแทนที่ด้วยตัวต้านทาน นั้นหมายความว่าวงจรรขยายสัญญาณกระแสที่นำเสนอไม่ได้มีข้อจำกัดที่เกิดจากการประมาณค่าผ่าน R_x ของ CCCII และสามารถนำไปออกแบบและพัฒนาต่อเป็นวงจรถอดกราฟที่สอง วงจรรยกกำลังสอง วงจรหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ วงจรคูณและหารสัญญาณได้ง่ายอีกด้วย

เพื่อให้การอธิบายวิธีการนำวงจรรขยายสัญญาณกระแสไปประยุกต์ใช้ในบทต่อๆ ไป ทำได้ง่ายและสะดวกขึ้น ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงแนวความคิดและหลักการเบื้องต้นในการออกแบบวงจรรขยายสัญญาณกระแสในลักษณะต่างๆ ไว้เป็นลำดับแรก จากนั้นจะนำเสนอแนวทางในการพัฒนาและปรับแต่งวงจรรขยายสัญญาณกระแสให้มีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน แล้วตามด้วยการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจรรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบต่างๆ ที่ได้ออกแบบไว้ และในตอนท้ายของเนื้อหาในบทนี้จะแสดงผลการทดสอบการทำงานของวงจรรขยายสัญญาณกระแสประกอบไว้ด้วย

3.1 แนวคิดและหลักการเบื้องต้น

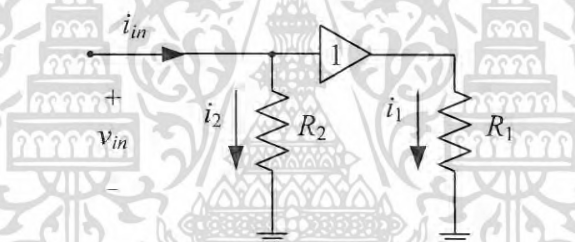
วงจรรขยายสัญญาณกระแสที่จะนำไปใช้ในการออกแบบและพัฒนาเป็นวงจรต่างๆ ในวิทยานิพนธ์นี้มีสองรูปแบบ รูปแบบแรกเป็นวงจรรขยายสัญญาณกระแสที่ให้ฟังก์ชันการขยายสัญญาณที่จุดเอาต์พุตแบบเดียวคือ เป็นได้เพียงการขยายแบบกลับเฟส (inverting type) หรือการขยายแบบไม่กลับเฟส (non-inverting type) ลักษณะใดลักษณะหนึ่งเท่านั้น ส่วนวงจรรขยายสัญญาณกระแส

รูปแบบที่สองนั้น ที่จุดเอาต์พุตเดียวกันสามารถให้ฟังก์ชันการทำงานเป็นได้ทั้งการขยายแบบกลับเฟส และไม่กลับเฟส ซึ่งกำหนดเลือกได้ โดยที่โครงสร้างของวงจรยังคงเดิม

วงจรรขยายกระแสทั้งสองรูปแบบที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้มีแนวความคิดเบื้องต้นมาจากการนำความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานที่ต่อลงกราวด์มาประยุกต์ใช้ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่เกิดจากตัวต้านทานสองตัว โดยวงจรรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบแรกเป็นการประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ที่เกิดจากตัวต้านทานชนิดค่าบวกทั้งคู่ ส่วนวงจรรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่สองเกิดจากการประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ของตัวต้านทานที่เป็นชนิดค่าบวกหนึ่งตัวและชนิดค่าลบอีกหนึ่งตัว โดยมีรายละเอียดของแนวคิดและหลักการของแต่ละรูปแบบเป็นดังต่อไปนี้

3.1.1 แนวคิดและหลักการของวงจรรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 1

วงจรรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 1 มีแนวความคิดเบื้องต้นแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งมีตัวต้านทานที่ต่อลงกราวด์จำนวนสองตัวประกอบร่วมกับวงจรที่ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ (buffer) ที่มีอัตราการส่งผ่านเท่ากับหนึ่ง 1 ตัว โดยตัวต้านทานที่นำมาใช้ในกรณีนี้เป็นชนิดค่าบวกทั้งคู่



รูปที่ 3.1 แนวคิดและหลักการเบื้องต้นของวงจรรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 1

พิจารณาวงจรในรูปที่ 3.1 จะได้ว่า

$$i_2 = i_{in} \quad (3.1)$$

$$v_{in} = i_{in} R_2 \quad (3.2)$$

และ

$$i_1 = \frac{v_{in}}{R_1} = \frac{R_2}{R_1} i_{in} \quad (3.3)$$

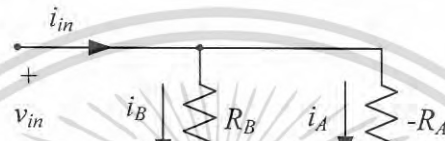
สมการที่ (3.3) แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกระแส i_1 กับสัญญาณกระแส i_{in} ที่สามารถปรับค่าความสัมพันธ์ได้ด้วยการปรับอัตราส่วนของตัวต้านทาน R_2/R_1 ดังนั้นจึงสามารถนำแนวคิดนี้ไปประยุกต์เพื่อสร้างเป็นวงจรรขยายสัญญาณกระแสได้ โดยการกำหนดให้กระแส i_1 เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสเอาต์พุต และให้กระแส i_{in} เป็นกระแสอินพุต ซึ่งสามารถควบคุมขนาดของกระแสเอาต์พุตได้ โดยการปรับอัตราส่วนของค่าความต้านทาน R_2/R_1

3.1.2 แนวคิดและหลักการของวงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 2

สำหรับแนวคิดและหลักการในการสร้างวงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 2 นั้น ในเบื้องต้นมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยวงจรประกอบด้วยตัวความต้านทานที่ต่อแบบขนานกันลงกราวด์จำนวนสองตัว โดยเลือกกำหนดให้เป็นตัวความต้านทานชนิดค่าลบหนึ่งตัว และชนิดค่าบวกอีกหนึ่งตัว



รูปที่ 3.2 แนวคิดและหลักการเบื้องต้นของวงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 2

เมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 3.2 จะได้ว่า

$$v_{in} = i_{in} \left(\frac{-R_A R_B}{R_B - R_A} \right) \quad (3.4)$$

$$i_A = \frac{v_{in}}{-R_A} = i_{in} \left(\frac{R_B}{R_B - R_A} \right) = i_{in} \left(\frac{1}{1 - \frac{R_A}{R_B}} \right) \quad (3.5)$$

และ

$$i_B = \frac{v_{in}}{R_B} = i_{in} \left(\frac{-R_A}{R_B - R_A} \right) = i_{in} \left(\frac{1}{1 - \frac{R_B}{R_A}} \right) \quad (3.6)$$

สมการที่ (3.5) แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกระแส i_A กับสัญญาณกระแส i_{in} ที่สามารถปรับค่าความสัมพันธ์ได้ ด้วยการปรับอัตราส่วนของตัวต้านทาน R_A/R_B และจะให้ความสัมพันธ์ที่เป็นบวกเมื่อ $R_A < R_B$ ส่วนในทางกลับกันจะให้ค่าเป็นลบ ส่วนสมการที่ (3.6) แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกระแส i_B กับสัญญาณกระแส i_{in} ที่สามารถปรับค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ได้ ด้วยการปรับอัตราส่วนของตัวต้านทาน R_B/R_A และจะให้ค่าความสัมพันธ์ที่เป็นบวกเมื่อ $R_A > R_B$ และในทางกลับกันจะให้ค่าเป็นลบ ดังนั้นจึงสามารถนำความสัมพันธ์ของสมการทั้งสองไปประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเป็นวงจรขยายสัญญาณกระแสได้ โดยสามารถเลือกใช้กระแสเอาต์พุตได้สองสัญญาณ คือ สัญญาณกระแส i_A และสัญญาณกระแส i_B ในขณะที่กำหนดให้สัญญาณกระแส i_{in} เป็นสัญญาณกระแสอินพุต ซึ่งไม่ว่าจะเลือกใช้สัญญาณกระแสตัวใดเป็นสัญญาณเอาต์พุต ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตก็สามารถปรับได้ด้วยการปรับค่า R_A หรือ R_B และสามารถให้ค่าเป็นได้ทั้งค่าบวก (เฟสตรงกัน) และค่าลบ (เฟสตรงข้าม) เมื่อเทียบกับสัญญาณกระแสอินพุต i_{in}

สำหรับการนำแนวคิดนี้ไปใช้ในการออกแบบเป็นวงจรขยายสัญญาณกระแสนั้น มีจุดที่ควรระวังคือจะต้องไม่เลือกให้ $R_B = R_A$ เนื่องจากการเลือกใช้ค่าตามเงื่อนไขนี้จะทำให้ตัวหารเป็นศูนย์ซึ่งจะก่อให้เกิดความผิดพลาดในการทำงานของวงจรขึ้น

3.2 วงจรขยายสัญญาณกระแสที่สร้างด้วย CCCII

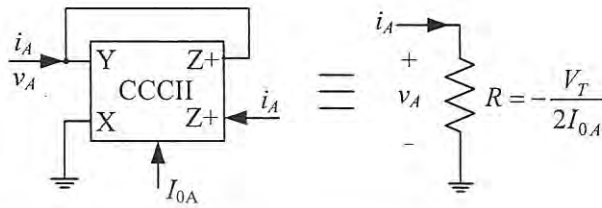
จากเอกสารอ้างอิง [24-27] ที่ได้แสดงให้เห็นว่า วงจรประมวลผลสัญญาณอนาล็อกที่ใช้องค์ประกอบเป็นเพียงอุปกรณ์แอคทีฟ ปราศจากอุปกรณ์พาสซีฟประเภทตัวต้านทานและตัวเก็บประจุมาเชื่อมต่อเพิ่มเติมภายนอก ให้คุณสมบัติหลายอย่างที่น่าสนใจ เช่น ให้วงจรที่ง่ายต่อการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม ง่ายต่อการควบคุมและปรับค่าพารามิเตอร์ในวงจร แล้วยังมีช่วงความถี่การทำงานที่กว้างอีกด้วย ซึ่งได้กลายเป็นเหตุผลที่สำคัญประการหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้ ที่ต้องการพัฒนาแนวคิดและหลักการในการออกแบบวงจรขยายกระแสในหัวข้อที่ผ่านมา ให้สามารถสร้างเป็นวงจรขยายสัญญาณกระแสที่ใช้อุปกรณ์ประเภทแอคทีฟเพียงอย่างเดียว

สำหรับแนวทางในการออกแบบเป็นวงจรขยายสัญญาณกระแส ที่ใช้อุปกรณ์แอคทีฟเพียงอย่างเดียว นั้น ทำโดยนำตัวต้านทานแบบลงกราวด์ทั้งชนิดค่าบวกและชนิดค่าลบที่ออกแบบด้วยอุปกรณ์แอคทีฟมาแทนที่ตำแหน่งของตัวต้านทานทุกตัวที่แสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2

วงจรตัวต้านทานทั้งชนิดค่าบวกและค่าลบแบบลงกราวด์ที่สร้างด้วยอุปกรณ์แอคทีฟนั้น มีบทความวิจัยที่มีการนำเสนอไว้แล้วหลายบทความ ซึ่งมีทั้งนำเสนอรูปแบบที่สร้างด้วยอุปกรณ์แอคทีฟประเภทตัวขยายความนำ (Operational Transconductance Amplifier: OTA) นำเสนอรูปแบบที่สร้างด้วยทรานซิสเตอร์ชนิดมอส นำเสนอรูปแบบที่สร้างด้วยทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ และนำเสนอรูปแบบที่สร้างด้วยวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส (Second Generation Current Controlled Current Conveyor: CCCII) เป็นต้น ซึ่งการเลือกใช้โครงสร้างวงจรตัวต้านทานที่ต่างกัน จะทำให้วงจรขยายสัญญาณกระแสที่ออกแบบได้ให้คุณสมบัติที่ต่างกันไปขึ้นกับความต้องการของผู้ออกแบบ

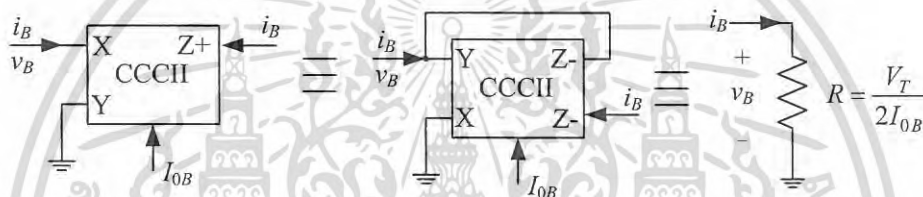
ในวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการสร้างวงจรด้วยอุปกรณ์แอคทีฟประเภท CCCII เป็นหลัก ตามเหตุผลดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทนำ ดังนั้นตัวต้านทานแบบลงกราวด์ทั้งชนิดค่าบวกและชนิดค่าลบที่ออกแบบ

ด้วย CCCII จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ ซึ่งวงจรของตัวต้านทานทั้งสองกรณีที่สร้างด้วย CCCII ที่นำมาใช้นั้นแสดงดังในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ตามลำดับ



(ก) วงจรที่สร้างด้วย CCCII (ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 3.3 วงจรตัวต้านทานลงกราวด์ชนิดค่าลบ



(ก) วงจรแบบที่ 1 (ข) วงจรแบบที่ 2 (ค) วงจรสมมูล

รูปที่ 3.4 วงจรตัวต้านทานลงกราวด์ชนิดค่าบวก

วงจรตัวต้านทานลงกราวด์ชนิดค่าลบที่สร้างด้วย CCCII ที่แสดงในรูปที่ 3.3(ก) แทนด้วยวงจรสมมูลเป็นดังรูปที่ 3.3(ข) และสามารถหาค่าความต้านทานสมมูลได้จากคุณสมบัติของ CCCII โดยในที่นี่มีค่าเป็น

$$R = \frac{v_A}{i_A} = -\frac{V_T}{2I_{0A}} \tag{3.7}$$

สำหรับวงจรตัวต้านทานลงกราวด์ชนิดค่าบวกที่สร้างด้วย CCCII มีการเชื่อมต่อได้สองแบบดังแสดงในรูปที่ 3.4(ก) และ (ข) ซึ่งทั้งสองแบบให้ค่าความต้านทานสมมูลเท่ากันและเขียนแทนได้ดังรูปที่ 3.4(ค) ซึ่งค่าความต้านทานสมมูลหาได้จากคุณสมบัติของ CCCII และมีค่าเป็น

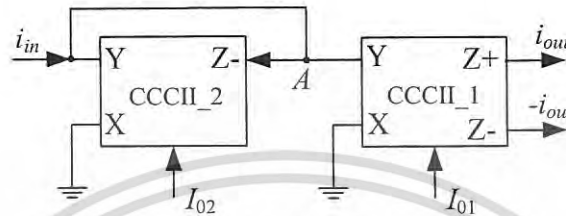
$$R = \frac{v_B}{i_B} = \frac{V_T}{2I_{0B}} \tag{3.8}$$

รายละเอียดเกี่ยวกับการนำวงจรตามรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ไปประยุกต์สร้างเป็นวงจรขยายสัญญาณกระแสในแต่ละรูปแบบมีดังนี้

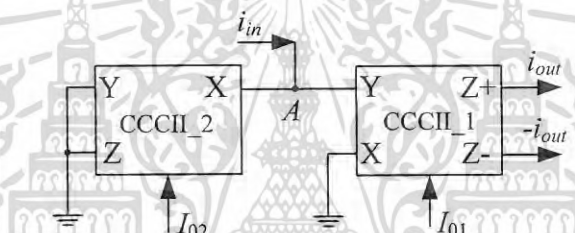
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 วงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 1 ที่สร้างด้วย CCCII

จากแนวคิดและหลักการเบื้องต้นของวงจรขยายกระแสรูปแบบที่ 1 ที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.1.1 ตามรูปที่ 3.1 เมื่อแทนที่ตัวต้านทานทุกตัวในรูปด้วยตัวต้านทานที่สร้างด้วย CCCII จะได้วงจรที่ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายสัญญาณกระแสที่มีลักษณะการเชื่อมต่อที่แตกต่างกัน 2 วงจร ดังแสดงในรูปที่ 3.5



(ก) วงจรที่ 1



(ข) วงจรที่ 2

รูปที่ 3.5 วงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 1 ที่สร้างด้วย CCCII

วงจรที่ 1 ที่แสดงในรูปที่ 3.5(ก) ได้มาจากการแทนค่าตัวต้านทาน R_2 ด้วยวงจรของตัวต้านทานในรูปที่ 3.4(ก) ในขณะที่วงจรที่ 2 ที่แสดงในรูปที่ 3.5(ข) ได้มาจากการแทนค่าตัวต้านทาน R_2 ด้วยวงจรของตัวต้านทานในรูปที่ 3.4(ข) และทั้งสองวงจรมีได้แทนบัพเฟอร์และตัวต้านทาน R_1 ด้วยวงจรสมมูลของ CCCII ที่มีค่า $R_1 = R_{X1} = \frac{V_T}{2I_{01}}$ ซึ่งเมื่อนำค่าความต้านทาน R_1 และ R_2 นี้แทนค่าลงในสมการ (3.3) ทำให้สามารถเขียนค่าของสัญญาณกระแส i_1 ได้ใหม่เป็นดังนี้

$$i_1 = \frac{I_{01}}{I_{02}} i_{in} \quad (3.9)$$

เนื่องจากการออกแบบวงจรขยายกระแสในที่นี้นั้น ต้องการนำค่าสัญญาณกระแส i_1 ไปเป็นสัญญาณกระแสเอาต์พุต และหากสังเกตจากรูปที่ 3.5 จะพบว่าสัญญาณกระแส i_1 นี้เป็นสัญญาณกระแสที่ไหลออกจากขั้ว X ของ CCCII_1 ดังนั้นจึงสามารถนำออกมาใช้งานเป็นสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} ได้ด้วยการนำคุณสมบัติของ CCCII ที่ว่า $i_Z = \pm i_X$ มาใช้ โดยหากต้องการสัญญาณกระแสเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอาต์พุต i_{out} ในทิศทางเดียวกับสัญญาณกระแส i_1 ซึ่งขณะนี้คือสัญญาณกระแส i_x ให้ใช้ i_{out} ที่มาจากขั้ว $Z+$ แต่หากต้องการสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} ในทิศตรงข้ามจะทำได้โดยให้เลือกใช้สัญญาณกระแส i_{out} ที่มาจากขั้ว $Z-$ ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.5 ซึ่งค่าสัญญาณกระแส i_{out} ของวงจรตามรูปนี้มีค่าเป็น

$$i_{out} = i_1 = \frac{I_{01}}{I_{02}} i_{in} \quad (3.10)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกระแส i_{out} และ i_{in} ในสมการ (3.10) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าสามารถควบคุมขนาดของสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} ได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนของกระแส I_{01}/I_{02} ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้เป็นวงจรขยายกระแสที่สามารถปรับค่าขนาดของสัญญาณกระแสเอาต์พุตด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ได้

สังเกตสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} ของทั้งวงจรที่ 1 และวงจรที่ 2 ที่แสดงในรูปที่ 3.5 พบว่าสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} นี้มีค่าเท่ากัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากวงจรทั้งสองถูกออกแบบขึ้นด้วยหลักการเดียวกัน อย่างไรก็ตามหากพิจารณาอย่างละเอียดจะพบว่าวงจรตามรูปที่ 3.5(ก) จะใช้จำนวนไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ภายใน CCCII มากกว่าวงจรตามโครงสร้างของรูปที่ 3.5(ข)

3.2.2 วงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 2 ที่สร้างด้วย CCCII

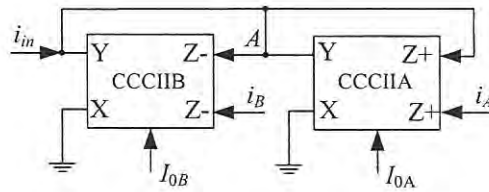
การสร้างวงจรขยายสัญญาณกระแสในหัวข้อนี้ทำได้ในทำนองเดียวกับการสร้างวงจรขยายสัญญาณกระแสในหัวข้อที่ 3.2.1 กล่าวคือเริ่มจากนำแนวคิดของการออกแบบวงจรขยายกระแสรูปแบบที่ 2 ที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 มาแทนที่ตัวต้านทานทุกตัวที่อยู่ในรูปดังกล่าวด้วยตัวความต้านทานที่สร้างด้วย CCCII ซึ่งทำให้เกิดวงจรขยายกระแสที่มีการเชื่อมต่อที่ต่างกัน 2 วงจรดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยวงจรที่ 1 ที่แสดงในรูปที่ 3.6(ก) ได้มาจากการแทนตัวต้านทาน R_B ด้วยวงจรของตัวต้านทานในรูปที่ 3.4(ก) และแทนตัวต้านทาน R_A ด้วยวงจรตามรูปที่ 3.3(ก) ในขณะที่วงจรที่ 2 ที่แสดงในรูปที่ 3.6(ข) นั้น ได้มาจากการแทนตัวต้านทาน R_B ด้วยวงจรของตัวต้านทานในรูปที่ 3.4(ข) และแทนตัวต้านทาน R_A ด้วยวงจรตามรูปที่ 3.3(ก) และเมื่อนำค่าความต้านทานเหล่านี้ แทนลงในสมการ (3.5) และสมการ (3.6) ทำให้เขียนสมการของสัญญาณกระแส i_A และ i_B ใหม่ได้เป็นดังนี้

$$i_A = \frac{i_{in}}{1 - \frac{I_{0B}}{I_{0A}}} \quad (3.11)$$

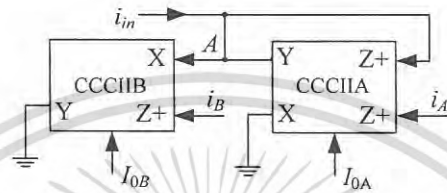
และ

$$i_B = \frac{i_{in}}{1 - \frac{I_{0A}}{I_{0B}}} \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) วงจรที่ 1



(ข) วงจรที่ 2

รูปที่ 3.6 วงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 2 ที่สร้างด้วย CCCII

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส i_A และ i_{in} ในสมการ (3.11) และความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส i_B และ i_{in} ในสมการ (3.12) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าสัญญาณกระแสทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กับสัญญาณกระแส i_{in} ที่สามารถควบคุมขนาดได้ โดยการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนของกระแส I_{0A} และ I_{0B} ดังนั้นค่าสัญญาณกระแสทั้ง i_A และ i_B นี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสัญญาณกระแสเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณกระแสได้ โดยวงจรขยายกระแสในกรณีนี้ยังสามารถกำหนดเฟสของสัญญาณเอาต์พุตให้มีค่าตรงกับเฟสของสัญญาณอินพุตหรือตรงข้ามกับเฟสของสัญญาณอินพุตได้ด้วยการกำหนดจากค่าของกระแสไบอัส I_{0A} และ I_{0B} อีกด้วย

วงจรขยายสัญญาณกระแสในรูปแบบที่ 3.6(ก) และรูปที่ 3.6(ข) ให้ค่าสัญญาณกระแส i_A และ i_B ด้วยสมการความสัมพันธ์ที่เหมือนกัน แม้ว่าจะมีลักษณะการเชื่อมต่อที่ต่างกัน อย่างไรก็ตามหากพิจารณาวจรทั้งสองอย่างละเอียดจะพบว่าวจรตามรูปที่ 3.6(ก) จะใช้จำนวนโพลาร์ทรานซิสเตอร์ภายใน CCCII มากกว่าวจรตามโครงสร้างของรูปที่ 3.6(ข)

3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจร

การศึกษาเกี่ยวกับขีดความสามารถและข้อจำกัดของวงจรขยายสัญญาณกระแสที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา เป็นสิ่งที่มีความสำคัญอีกประการหนึ่งที่เราควรกล่าวถึง ซึ่งจะมีผลทำให้ทราบขีดความสามารถเบื้องต้นของวงจรที่จะออกแบบในบทต่อไป ด้วย ในส่วนนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาช่วงกระแสอินพุตปฏิบัติงานรวมถึงทำการวิเคราะห์เพื่อศึกษาผลของความไม่เป็นอุดมคติของ CCCII ที่มีต่อวงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบต่างๆ ที่ได้ออกแบบไว้แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การวิเคราะห์ช่วงกระแสอินพุตปฏิบัติงาน

เพื่อหาช่วงขนาดของสัญญาณกระแสอินพุตที่วงจรขยายกระแสสามารถรับได้ และยังคงให้ผลการขยายที่ถูกต้อง วงจรขยายสัญญาณกระแสที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 3.2 จึงถูกนำมาวิเคราะห์ใหม่ซ้ำอีกครั้ง โดยการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้จะวิเคราะห์โดยนำคุณสมบัติของ CCCII ที่ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรทางไฟฟ้าที่พอร์ตต่างๆ ของ CCCII ที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 มาใช้โดยตรง ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวเหล่านั้นได้นำมาเขียนสรุปใหม่ในหัวข้อนี้อีกครั้ง ดังนี้

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตที่ไหลเข้าพอร์ต X หรือ i_X กับแรงดันระหว่างพอร์ต XY หรือ v_{XY} ของ CCCII ให้ค่าความสัมพันธ์เป็นดังนี้

$$i_X = 2I_0 \sinh\left(\frac{v_{XY}}{V_T}\right) \quad (3.13)$$

หรือ

$$v_{XY} = V_T \sinh^{-1}\left(\frac{i_X}{2I_0}\right) \quad (3.14)$$

รวมถึงกระแสที่ไหลเข้าที่พอร์ต Y หรือ i_Y ซึ่งได้ว่า

$$i_Y = 0 \quad (3.15)$$

และความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของพอร์ต X หรือ i_X และพอร์ต Z หรือ i_Z เป็นดังนี้

$$i_Z = \pm i_X \quad (3.16)$$

จากนั้นนำคุณสมบัติของ CCCII ที่แสดงในสมการที่ (3.13) ถึงสมการที่ (3.16) ไปวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณกระแสที่แสดงในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตและกระแสเอาต์พุต ซึ่งรายละเอียดของการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี เป็นดังนี้

3.3.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตและกระแสเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 1

วงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 1 ที่ได้กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้มีสองวงจรซึ่งได้แสดงไว้แล้วในรูปที่ 3.5 เมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 3.5(ก) โดยเริ่มจากการหาผลรวมของกระแสที่จุด A จะได้ว่า

$$i_{in} = i_{Z2} = -i_{X2} \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเมื่อนำคุณสมบัติของ CCCII มาใช้ จะได้

$$i_{in} = -2I_{02} \sinh\left(\frac{-v_A}{V_T}\right) \quad (3.18)$$

หรือ

$$-v_A = V_T \sinh^{-1}\left(\frac{i_{in}}{-2I_{02}}\right) \quad (3.19)$$

และเมื่อพิจารณาค่ากระแสเอาต์พุต i_{out} ของวงจรตามรูปนี้ จะได้ว่า

$$i_{out} = i_{Z1} = i_{X1} = 2I_{01} \sinh\left(\frac{-v_A}{V_T}\right) \quad (3.20)$$

ซึ่งเมื่อแทนค่า v_A ที่แสดงในสมการที่ (3.19) ลงในสมการที่ (3.20) นี้ จะได้ค่ากระแสเอาต์พุตเป็น

$$i_{out} = i_{Z1} = i_{X1} = \frac{I_{01}}{I_{02}} i_{in} \quad (3.21)$$

ทำในทำนองเดียวกันนี้ก็วงจรขยายสัญญาณกระแสที่แสดงในรูปที่ 3.5(ข) ซึ่งเมื่อพิจารณาผลรวมของกระแสที่จุด A ของวงจรถัดกล่าว จะได้ว่า

$$i_{in} = i_{X2} = 2I_{02} \sinh\left(\frac{v_A}{V_T}\right) \quad (3.22)$$

หรือ

$$v_A = V_T \sinh^{-1}\left(\frac{i_{in}}{2I_{02}}\right) \quad (3.23)$$

และเมื่อพิจารณาค่ากระแสเอาต์พุต i_{out} ของวงจร จะได้

$$i_{out} = i_{Z1} = i_{X1} = 2I_{01} \sinh\left(\frac{v_A}{V_T}\right) \quad (3.24)$$

ซึ่งเมื่อแทนค่า v_A ที่แสดงในสมการที่ (3.23) ลงในสมการที่ (3.24) นี้ จะทำให้เขียนสมการของกระแสเอาต์พุตใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_{out} = i_{Z1} = i_{X1} = \frac{I_{01}}{I_{02}} i_{in} \quad (3.25)$$

3.3.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตและกระแสเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 2

สำหรับวงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 2 นั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.6 ซึ่งมีลักษณะการเชื่อมต่อที่แตกต่างกัน 2 วงจร เมื่อพิจารณาวงจรที่แสดงในรูปที่ 3.6(ก) โดยการเขียนสมการของผลรวมกระแสที่จุด A ของวงจร จะได้ว่า

$$\begin{aligned} i_{in} &= i_{ZA} + i_{ZB} = i_{XA} - i_{XB} \\ &= 2I_{0A} \sinh\left(\frac{-v_A}{V_T}\right) - 2I_{0B} \sinh\left(\frac{-v_A}{V_T}\right) \end{aligned} \quad (3.26)$$

หรือ

$$v_A = V_T \sinh^{-1}\left(\frac{i_{in}}{2(I_{0A} - I_{0B})}\right) \quad (3.27)$$

ซึ่งจากรูปนี้จะได้กระแส i_A และ i_B มีค่าเป็นตามลำดับดังนี้

$$i_A = i_{ZA} = i_{XA} = 2I_{0A} \sinh\left(\frac{-v_A}{V_T}\right) \quad (3.28)$$

$$i_B = i_{ZB} = -i_{XB} = -2I_{0B} \sinh\left(\frac{-v_A}{V_T}\right) = 2I_{0B} \sinh\left(\frac{v_A}{V_T}\right) \quad (3.29)$$

และเมื่อนำค่า v_A ที่มีค่าดังสมการที่ (3.27) มาแทนค่าในสมการที่ (3.29) นี้จะได้ว่า

$$i_A = \left(\frac{I_{0A}}{I_{0A} - I_{0B}}\right) i_{in} = \frac{i_{in}}{1 - \frac{I_{0B}}{I_{0A}}} \quad (3.30)$$

และ

$$i_B = \left(\frac{I_{0B}}{I_{0B} - I_{0A}}\right) i_{in} = \frac{i_{in}}{1 - \frac{I_{0A}}{I_{0B}}} \quad (3.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนกรณีของวงจรถยายสัญญาณกระแสที่แสดงในรูปที่ 3.6(ข) เมื่อพิจารณาผลรวมของกระแสที่จุด A จะได้ว่า

$$i_{in} = i_{ZA} + i_{XB} = 2I_{0A} \sinh\left(\frac{-v_A}{V_T}\right) + 2I_{0B} \sinh\left(\frac{v_A}{V_T}\right) \quad (3.32)$$

หรือ

$$v_A = V_T \sinh^{-1}\left(\frac{i_{in}}{2(I_{0B} - I_{0A})}\right) \quad (3.33)$$

และจากรูปนี้จะได้กระแส i_A และ i_B มีค่าเป็นตามลำดับดังนี้

$$i_A = i_{XA} = 2I_{0A} \sinh\left(\frac{-v_A}{V_T}\right) \quad (3.34)$$

และ

$$i_B = i_{ZB} = i_{XB} = 2I_{0B} \sinh\left(\frac{v_A}{V_T}\right) \quad (3.35)$$

ซึ่งเมื่อนำค่า v_A ในสมการที่ (3.33) มาแทนค่าลงในสมการของกระแส i_A และ i_B ดังกล่าวนี้ จะสามารถเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$i_A = \left(\frac{I_{0A}}{I_{0A} - I_{0B}}\right) i_{in} = \frac{i_{in}}{1 - \frac{I_{0B}}{I_{0A}}} \quad (3.36)$$

และ

$$i_B = \left(\frac{I_{0B}}{I_{0B} - I_{0A}}\right) i_{in} = \frac{i_{in}}{1 - \frac{I_{0A}}{I_{0B}}} \quad (3.37)$$

3.3.1.3 สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์วงจรถยายสัญญาณกระแสทั้ง 2 รูปแบบ

เป็นที่น่าสังเกตว่า วงจรถยายสัญญาณกระแสที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ แม้จะนำมาโดยการออกแบบด้วยการพิจารณา CCCII เป็นเสมือนตัวต้านทาน ซึ่งต้องมีการประมาณค่าในการนำความต้านทาน R_X ไปใช้งานตามที่ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 2 กล่าวคือหากต้องการให้ค่าความต้านทานค่านี้มีความเป็นเชิงเส้นที่ดี สัญญาณแรงดัน v_{XY} ที่ CCCII ต้องมีค่าอยู่ในช่วง $\pm V_T$ และค่ากระแสอินพุต i_X อยู่ในช่วง $\pm I_0$ แต่จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 3.3.1.1 และ 3.3.1.2 พบว่าวงจรถยายสัญญาณกระแสทั้งสองรูปแบบสามารถทำการวิเคราะห์หาค่าได้โดยตรง โดยไม่ต้องมีการประมาณค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านค่าความต้านทาน R_x ได้ นั้นหมายความว่าหากวงจรสายพานกระแสมีการทำงานเป็นอุดมคติแล้ว ช่วงการทำงานที่เป็นเชิงเส้นของวงจรรขยายสัญญาณกระแสเหล่านี้จะมีค่าไม่จำกัด กล่าวคือวงจรรสามารถรับกระแสอินพุตได้โดยไม่มีข้อจำกัดทางขนาด แต่ในทางปฏิบัติแล้วขนาดของกระแสอินพุตจะถูกจำกัดโดยกระแสอิ่มตัว (Saturation current) ของทรานซิสเตอร์ที่ประกอบเป็นวงจรรขยายพานกระแส ทั้งนี้ขึ้นกับคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ที่ใช้และรูปแบบของวงจรรสะท้อนสัญญาณกระแสเป็นสำคัญ และเนื่องจากโครงสร้างของวงจรรขยายพานกระแสที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้มีการทำงานเป็นแบบคลาส เอบีจึงทำให้วงจรรขยายสัญญาณกระแสนี้ยังสามารถทำงานได้เมื่อกระแสอินพุตของวงจรมีค่ามากกว่ากระแสไบอัส

3.3.2 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด

ในการอธิบายพฤติกรรมการทำงานของวงจรรขยายสัญญาณกระแสที่ผ่านมาทั้งหมดนั้น พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกระแสเอาต์พุตและสัญญาณกระแสอินพุตของวงจรรโดยสมมติให้ CCCII มีคุณสมบัติทางอุดมคติ ซึ่งหาก CCCII มีความไม่เป็นอุดมคติขึ้นแล้วก็จะทำให้เกิดมีค่าความคลาดเคลื่อนขึ้นในวงจรรขยายสัญญาณกระแสที่ได้ออกแบบไว้ ในทางปฏิบัติการทำงานของวงจรรขยายพานกระแสจะเกิดความคลาดเคลื่อนไปจากอุดมคติได้จากหลากหลายสาเหตุด้วยกัน อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์นี้จะขอกล่าวถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราการส่งผ่านสัญญาณแรงดันและกระแสซึ่งส่งผลกระทบต่อชัดเจนในส่วนของอัตราขยายของวงจรรขยายสัญญาณกระแส และค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์แฝงที่ขั้วต่างๆ ของวงจรร CCCII ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจรรที่เสนอ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบอันเกิดจากความไม่เป็นอุดมคติของ CCCII ในประเด็นดังกล่าวนี้ จึงได้ทำการวิเคราะห์ห้วงจรรขยายสัญญาณกระแสที่แสดงในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 อีกครั้งโดยนำคุณสมบัติของ CCCII ที่ไม่เป็นอุดมคติที่แทนด้วยวงจรรสมมูลดังในรูปที่ 2.9 ที่ให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางไฟฟ้าที่พอร์ตต่างๆ เป็นตามสมการที่ (2.50) มาใช้ ซึ่งรายละเอียดของการวิเคราะห์สำหรับแต่ละวงจรรเป็นดังนี้

เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุตและกระแสอินพุตของวงจรรขยายสัญญาณกระแส อันเกิดจากความไม่เป็นอุดมคติของ CCCII ที่มีผลมาจากความคลาดเคลื่อนของอัตราการส่งผ่านสัญญาณแรงดันและกระแส สมการความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรที่ขั้วต่างๆ ของ CCCII ที่แทนด้วยสมการที่ (2.50) นำมาเขียนใหม่ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} i_Y \\ v_X \\ i_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \alpha & R_x & 0 \\ 0 & \beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_Y \\ i_X \\ v_Z \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $\alpha = 1 - \varepsilon$, $|\varepsilon| \ll 1$ แสดงค่า voltage tracking error และ $\beta = 1 - \delta$, $|\delta| \ll 1$ แสดงค่า current tracking error ความสัมพันธ์ต่างๆ ในสมการนี้จะคิดค่าความไม่เป็นอุดมคติเฉพาะในกรณี ที่อัตราการส่งผ่านของสัญญาณกระแสและแรงดันไม่เท่ากับหนึ่ง โดยยังไม่ศึกษาถึงผลกระทบอันเกิด จากค่าพารามิเตอร์แฝงที่ขั้วต่างๆ ของ CCCII

เมื่อทำการวิเคราะห์วงจรรขยายสัญญาณกระแสที่แสดงในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 อีกครั้งโดยนำ คุณสมบัติของ CCCII ที่ไม่เป็นอุดมคติที่ให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางไฟฟ้าที่พอร์ตต่างๆ เป็น ตามสมการที่ (3.38) มาใช้ ได้ผลของการวิเคราะห์ของแต่ละวงจรเป็นตามลำดับ ดังนี้

ผลการวิเคราะห์ของวงจรจากรูปที่ 3.5(ก)

$$i_{out} = \frac{\alpha_1 \beta_1 I_{01}}{\alpha_2 \beta_2 I_{02}} i_{in} \quad (3.39)$$

ผลการวิเคราะห์ของวงจรจากรูปที่ 3.5(ข)

$$i_{out} = \alpha_1 \beta_1 \frac{I_{01}}{I_{02}} i_{in} \quad (3.40)$$

ผลการวิเคราะห์ของวงจรจากรูปที่ 3.6(ก)

$$i_A = \frac{i_{in}}{1 - \frac{\alpha_B \beta_B I_{0B}}{\alpha_A \beta_A I_{0A}}} \quad (3.41)$$

และ

$$i_B = \frac{i_{in}}{1 - \frac{\alpha_A \beta_A I_{0A}}{\alpha_B \beta_B I_{0B}}} \quad (3.42)$$

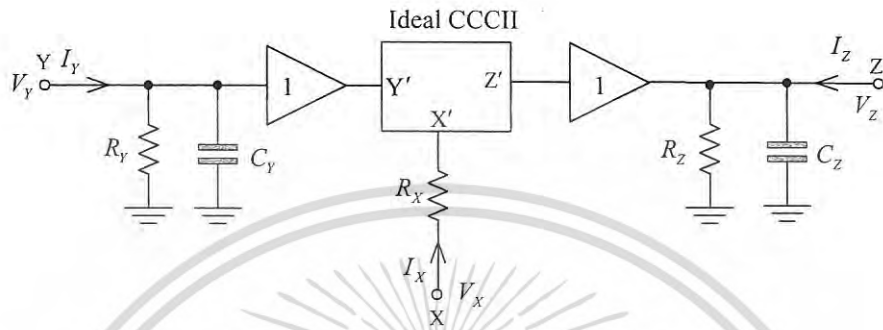
สังเกตผลการวิเคราะห์ จากสมการ (3.39) ถึงสมการ (3.42) เห็นได้อย่างชัดเจนว่าโครงสร้างของ วงจรรขยายสัญญาณกระแสทั้งรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 นั้น จะมีความผิดพลาดทางขนาดเกิดขึ้น หาก CCCII มีคุณสมบัติไม่เป็นอุดมคติอันเกิดจากการส่งผ่านของแรงดันและกระแส

3.3.3 การวิเคราะห์ช่วงความถี่ปฏิบัติงาน

ช่วงความถี่ในการปฏิบัติงานของวงจรรขยายกระแสที่เสนอ ขึ้นกับทรานซิสเตอร์ที่นำมา ประกอบรวมเป็นวงจร CCCII ซึ่งแสดงออกมาในเทอมของพารามิเตอร์แฝงที่อยู่ภายในวงจรของ CCCII ดังนั้นเพื่อให้การวิเคราะห์หาค่าช่วงความถี่ปฏิบัติงานของวงจรรขยายกระแสที่เสนอทำได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

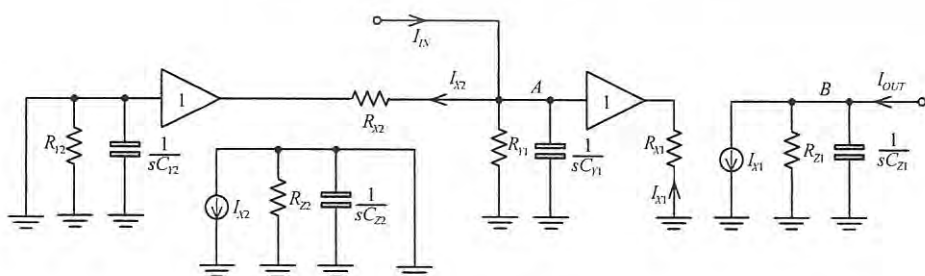
ในที่นี้จึงได้นำแบบจำลองของ CCCII ที่มีความไม่เป็นอุดมคติที่แทนด้วยวงจรสมมูลตามรูปที่ 2.9 ซึ่งเขียนแทนด้วยสมการที่ (2.49) และคำนึงถึงผลที่เกิดจากพารามิเตอร์แฝงภายในวงจรเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงได้กำหนดให้อัตราการส่งผ่านของแรงดันและกระแสมีค่าเป็น 1 วงจรสมมูลและสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้จึงเขียนใหม่ได้ เป็นดังรูปที่ 3.7 และสมการที่ (3.43) ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลของ CCCII ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์หาช่วงความถี่ปฏิบัติการ

$$\begin{bmatrix} I_Y \\ V_X \\ I_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/(R_Y // Z_{C_Y}) & 0 & 0 \\ 1 & R_X & 0 \\ 0 & \pm I & 1/(R_Z // Z_{C_Z}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Y \\ I_X \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

สำหรับการวิเคราะห์เพื่อหาช่วงความถี่ปฏิบัติการของวงจรขยายสัญญาณกระแสแต่ละวงจรสามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน กล่าวคือเขียนวงจรใหม่โดยนำวงจรสมมูลของ CCCII ที่มีค่าพารามิเตอร์แฝงมาแทนที่วงจรของ CCCII ในอุดมคติ แล้วทำการวิเคราะห์โดยใช้หลักการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าทั่วไป เพื่อหาทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันของกระแสเอาต์พุตต่อกระแสอินพุต I_{OUT}/I_{IN} ดังนั้นในบทนี้จึงแสดงรายละเอียดของการวิเคราะห์ไว้เป็นตัวอย่างเพื่อเป็นแนวทางเพียงหนึ่งวงจร คือ วงจรขยายสัญญาณกระแสที่ออกแบบด้วยวิธีการที่ 1 วงจรที่ 2 ซึ่งวงจรสมมูลของวงจรขยายสัญญาณกระแสในกรณีนี้แสดงดังในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลของวงจรขยายสัญญาณกระแสที่ใช้วิเคราะห์หาช่วงความถี่ปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรตามรูปที่ 3.8 เมื่อพิจารณาที่จุด A จะได้ว่า

$$I_{IN} = \frac{V_A}{R_{X2}} + \frac{V_A}{R_{Y1} // Z_{C_{Y1}}} \quad (3.44)$$

และ

$$V_A = I_{OUT} R_{X1} \quad (3.45)$$

และเมื่อพิจารณาที่จุด B ในกรณีนี้พิจารณาที่ $V_B = 0$ ตามเงื่อนไขของวงจรสองพอร์ตในกรณีต้องการทราบค่า I_{OUT}/I_{IN} ดังนั้นจะได้ว่า

$$I_{OUT} = I_{X1} \quad (3.46)$$

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุตและกระแสอินพุตของวงจรในรูปที่ 3.8 มีค่า เป็นดังนี้

$$\frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{1}{\left(\frac{R_{X1}}{R_{X2}} + R_{X1} s C_{Y1} + \frac{R_{X1}}{R_{Y1}} \right)} \quad (3.47)$$

โดยทั่วไปค่า $R_{Y1} \gg R_{X1}$ ดังนั้นจึงประมาณได้ว่า

$$\frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{1}{\left(\frac{R_{X1}}{R_{X2}} + R_{X1} s C_{Y1} \right)} \quad (3.48)$$

ดังนั้นจึงได้ตำแหน่งโพลอยู่ที่

$$\omega = \frac{1}{R_{X2} C_{Y1}} = \frac{2I_{02}}{V_T C_{Y1}} \quad (3.49)$$

หรือ

$$f = \frac{I_{02}}{\pi V_T C_{Y1}} \quad (3.50)$$

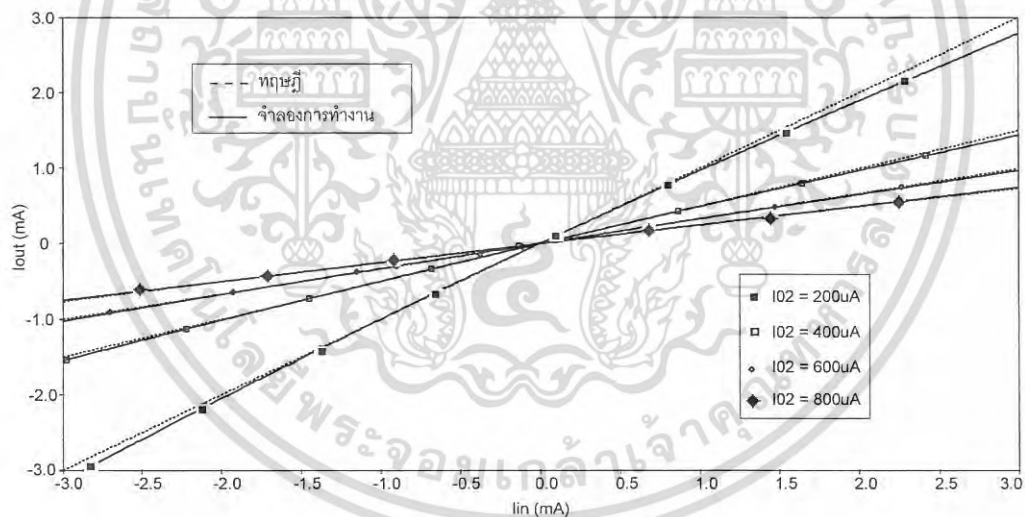
สมการที่ (3.50) ทำให้ทราบว่าการทำงานที่ความถี่สูงของวงจรขึ้นกับค่าของ C_{Y1} ซึ่งขึ้นกับทรานซิสเตอร์ที่นำมาใช้ประกอบเป็น CCCII และกระแสไบอัส I_{02}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

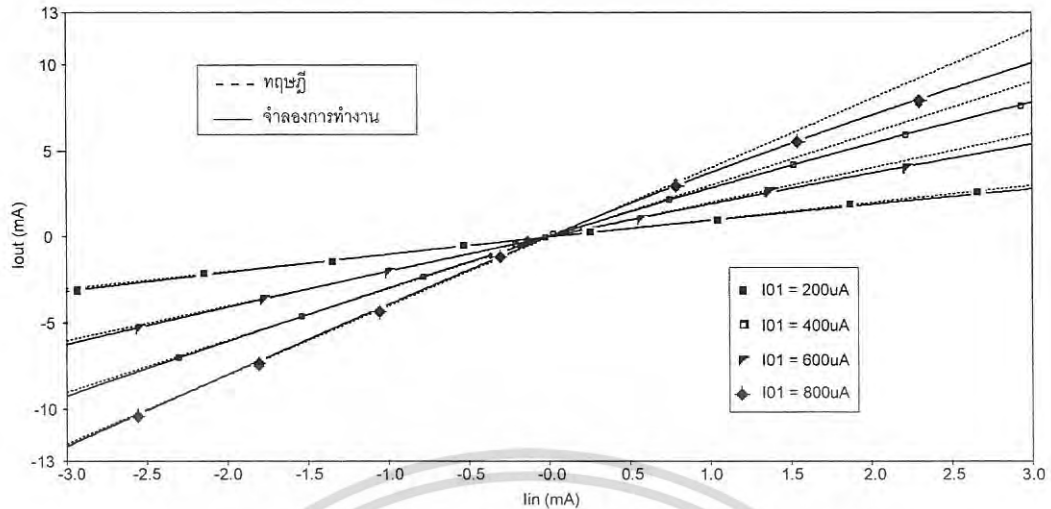
3.4 ผลการเลียนแบบการทำงาน

เพื่อยืนยันการวิเคราะห์ของวงจรรขยายสัญญาณกระแสที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ในส่วนนี้จึงได้นำโปรแกรม PSPICE มาใช้เป็นเครื่องมือเพื่อเลียนแบบการทำงานของวงจรรขยายสัญญาณกระแส โดยในที่นี้ได้นำวงจรที่ได้ออกแบบไว้ในรูปที่ 3.5(ข) และรูปที่ 3.6(ก) มาใช้เป็นตัวอย่างในการเลียนแบบการทำงาน โดยมีรายละเอียดในการจำลองการทำงานของแต่ละวงจรเป็นดังนี้

ในการจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 3.5(ข) ใช้ CCCII ที่ประกอบขึ้นจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ โดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP เป็นเบอร์ 2N3904 และ 2N2907 ตามลำดับ และใช้ไฟเลี้ยงวงจร $\pm 1.5V$ ผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 3.9 เป็นการส่งผ่านสัญญาณกระแสเมื่อแปรค่ากระแสอินพุต i_{in} จาก $-3mA$ ถึง $3mA$ เมื่อ $I_{O1} = 200\mu A$ ที่กระแส I_{O2} มีค่าต่างๆ กัน และเมื่อสังเกตจะพบว่าค่ากระแสเอาต์พุตจะมีค่าผิดพลาดลดลงเมื่อกระแสอินพุต i_{in} มีค่าเหมาะสมกับค่ากระแสไบอัส I_{O1} ส่วนรูปที่ 3.10 แสดงให้เห็นถึงการส่งผ่านสัญญาณกระแสเมื่อแปรค่ากระแสอินพุต i_{in} จาก $-3mA$ ถึง $3mA$ เมื่อ $I_{O1} = 200\mu A$ ที่กระแส I_{O2} ค่าต่างๆ กัน เป็นที่น่าสังเกตว่าค่ากระแสเอาต์พุตจะมีค่าผิดพลาดลดลงเมื่อกระแส I_{O2} มีค่าเพิ่มขึ้นหรือค่าอัตราขยายที่ลดลง

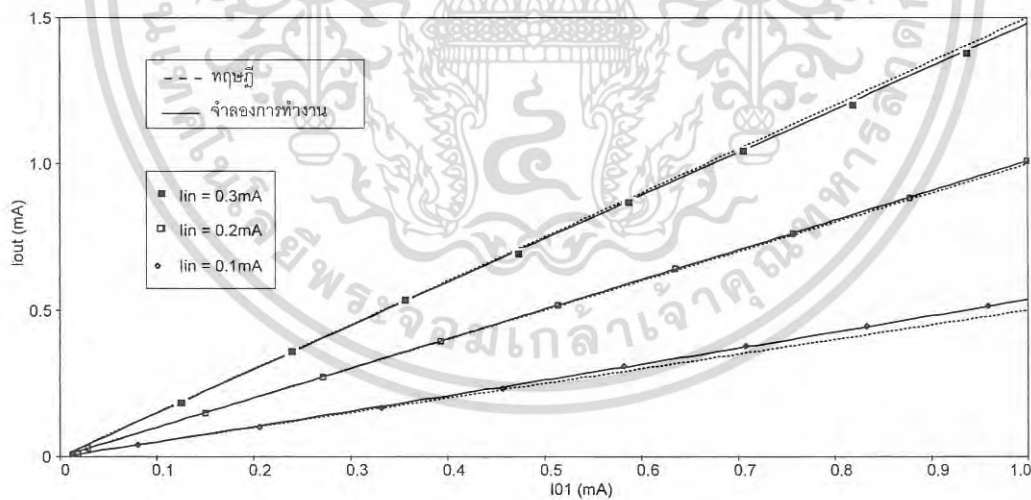


รูปที่ 3.9 ผลการจำลองการส่งผ่านสัญญาณกระแสเมื่อ I_{O2} มีค่าต่างๆ กัน



รูปที่ 3.10 ผลการจำลองการส่งผ่านสัญญาณกระแสเมื่อ I_{01} มีค่าต่างๆ กัน

การส่งผ่านสัญญาณกระแสเมื่อแปรค่ากระแสไบแอส I_{02} จาก 0 ถึง 1mA เมื่อ $I_{01} = 200\mu\text{A}$ ที่กระแสอินพุต i_{in} มีค่าต่างๆ กัน ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.11 และเมื่อสังเกตจากผลการเลียนแบบการทำงาน พบว่าค่ากระแสเอาต์พุตจะมีค่าผิดพลาดน้อยลงเมื่อกระแส I_{01} มีค่าไม่เกิน 0.6mA แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นกับขนาดของสัญญาณกระแสอินพุตที่ป้อนด้วย

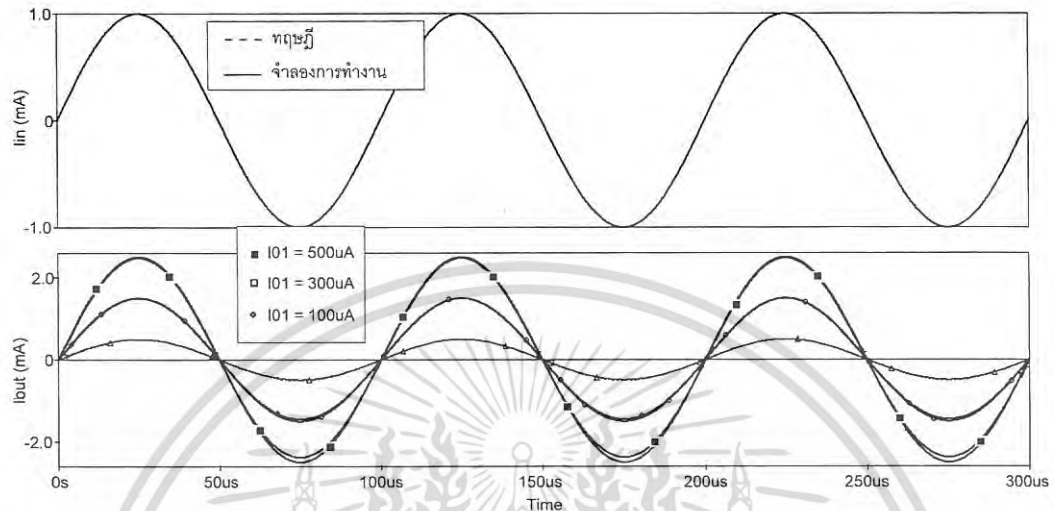


รูปที่ 3.11 ผลการจำลองการส่งผ่านสัญญาณกระแสเมื่อแปรค่า I_{01} และ i_{in} มีค่าต่างๆ กัน

จากนั้นได้ทำการจำลองการทำงาน โดยการป้อนอินพุตเป็นสัญญาณคลื่นไซน์ขนาด 1 mA ความถี่ 10kHz เมื่อ $I_{02} = 200\mu\text{A}$ และ I_{01} มีค่าต่างๆ กัน ได้ผลการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.12 ผลการจำลองการทำงานให้ผลที่แสดงไว้อย่างชัดเจนว่ากระแสเอาต์พุตของวงจรสามารถปรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

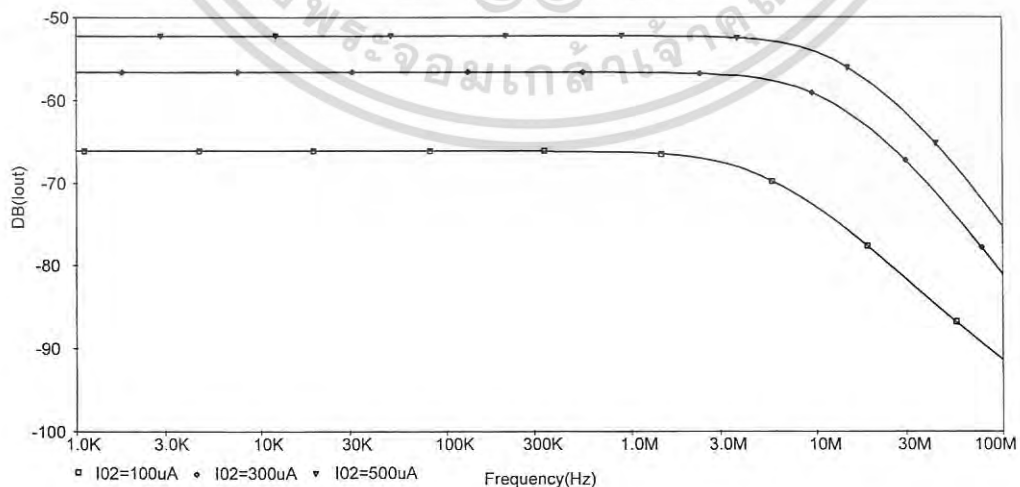
ขนาดได้ด้วยการปรับค่ากระแสไบอัส I_{O1} และเมื่อ I_{O1} มีค่าเพิ่มขึ้น ขนาดของกระแสเอาต์พุตก็มีขนาดเพิ่มขึ้นทั้งนี้แปรตามค่าของสัญญาณกระแสอินพุตด้วย ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (3.10) เป็นอย่างดี



รูปที่ 3.12 ผลตอบสนองสัญญาณในโดเมนเวลาของวงจรขยายสัญญาณกระแสในรูปที่ 3.5(ข)

สังเกตจากผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 3.9 ถึงรูปที่ 3.12 พบว่าการทำงานด้านอินพุตเป็นบวกและอินพุตเป็นลบทำให้ค่าความผิดพลาดที่แตกต่างกัน สาเหตุประการหนึ่งที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเลือกใช้ทรานซิสเตอร์ที่นำมาประกอบเป็นวงจร CCCII ที่นำมาใช้ในการเลียนแบบการทำงานชนิด NPN และ PNP ให้ค่าอัตราขยายกระแสที่แตกต่างกัน

สำหรับการทดสอบย่านความถี่การใช้งานของวงจรขยายสัญญาณกระแสที่แสดงในรูปที่ 3.5(ข) ทำโดยใช้กระแส $I_{O1} = 200 \mu\text{A}$ ในขณะที่ I_{O2} มีค่าต่างๆ กัน ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.13



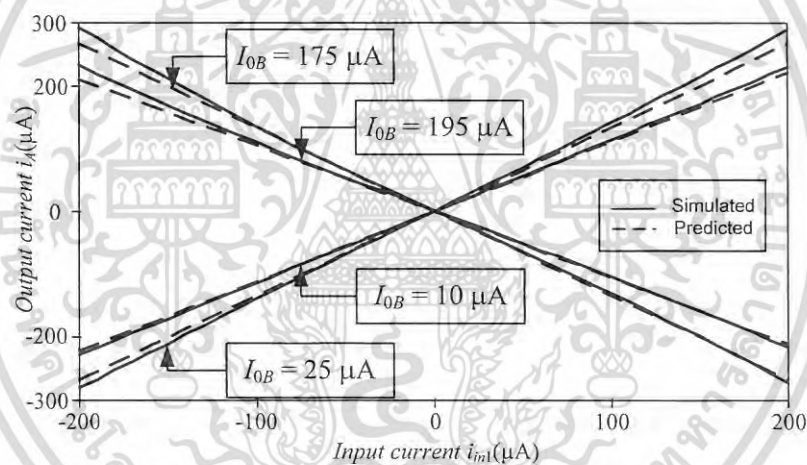
รูปที่ 3.13 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายสัญญาณกระแสในรูปที่ 3.5(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลตอบสนองทางความถี่ที่แสดงในรูปที่ 3.13 แสดงให้เห็นว่าช่วงของค่าความถี่ใช้งานขึ้นกับค่ากระแสไบอัส I_{O2} ที่ใช้ในวงจรด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีตามสมการที่ 3.47

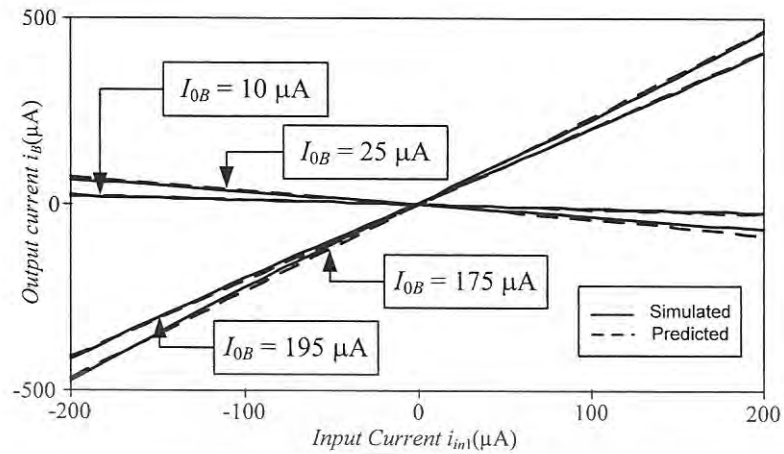
ในกรณีที่นำวงจรในรูปที่ 3.6(ก) มาจำลองการทำงาน โดยใช้ CCCII ที่ประกอบขึ้นจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เบอร์ PR100N แทนชนิด PNP และเบอร์ NR100N แทนชนิด NPN โดยผลการจำลองการทำงานทั้งหมดกระทำภายใต้ไฟเลี้ยงวงจรค่า $\pm 2\text{ V}$ ค่ากระแส $I_{O_A} = 100\mu\text{A}$ และค่ากระแส I_{O_B} มีค่าเป็น $195\mu\text{A}$ $175\mu\text{A}$ $25\mu\text{A}$ และ $10\mu\text{A}$ ตามลำดับ ได้ผลการเลียนแบบการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.14 ถึงรูปที่ 3.17

ผลที่แสดงในรูปที่ 3.14 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_A กับสัญญาณกระแสอินพุต i_{in1} เมื่อ i_{in1} แปรค่าจาก $-200\mu\text{A}$ ถึง $200\mu\text{A}$ สังเกตจากผลการเลียนแบบการทำงานพบว่าเมื่อค่ากระแส $I_{O_A} > I_{O_B}$ จะให้ค่ากระแสเอาต์พุต i_A เฟสเดียวกับสัญญาณ i_{in1} และหาก $I_{O_A} < I_{O_B}$ จะให้ค่ากระแสเอาต์พุต i_A เฟสตรงข้ามกับสัญญาณ i_{in1} ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎีตามสมการที่ (3.11)



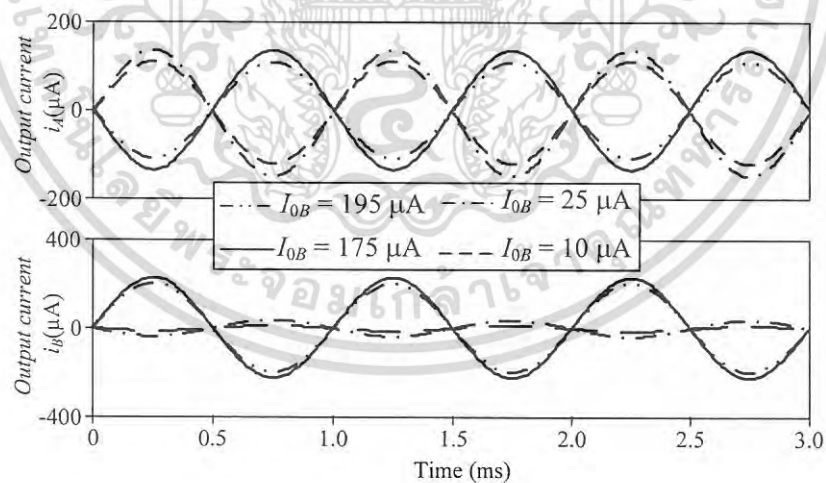
รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส i_A กับกระแสอินพุต i_{in1}

ผลที่แสดงในรูปที่ 3.15 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_B เมื่อสัญญาณกระแสอินพุต i_{in1} แปรค่าอยู่ในจาก $-200\mu\text{A}$ ถึง $200\mu\text{A}$ สังเกตจากผลการเลียนแบบการทำงานพบว่าเมื่อค่ากระแส $I_{O_A} < I_{O_B}$ จะให้ค่ากระแสเอาต์พุต i_B เฟสเดียวกับสัญญาณ i_{in1} และหาก $I_{O_A} > I_{O_B}$ จะให้ค่ากระแสเอาต์พุต i_B เฟสตรงข้ามกับสัญญาณ i_{in1} ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎีตามสมการที่ (3.12)



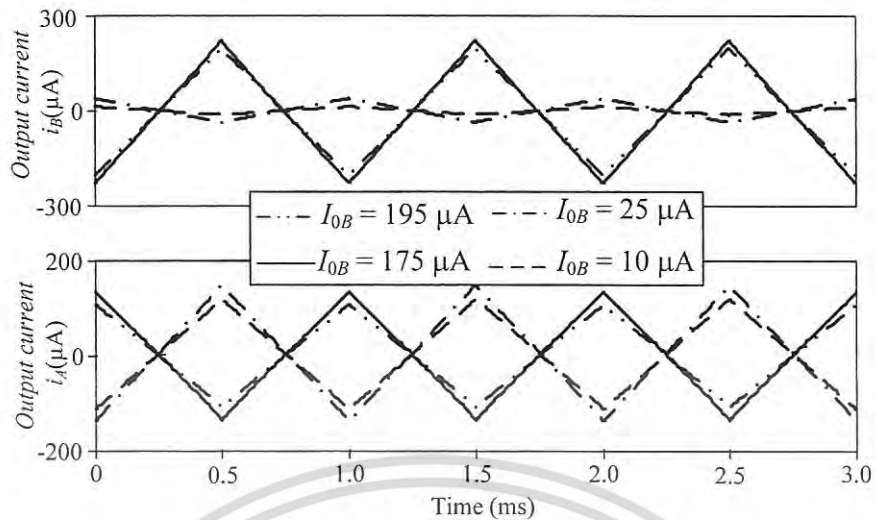
รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส i_B กับกระแสอินพุต i_{in}

ผลการเลียนแบบการทำงานที่แสดงในรูปที่ 3.16 เป็นการเลียนแบบการทำงานของวงจรเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ความถี่ 1 kHz ส่วนผลการเลียนแบบการทำงานที่แสดงในรูปที่ 3.17 เป็นการเลียนแบบการทำงานของวงจรเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณคลื่นรูปสามเหลี่ยมความถี่ 1 kHz และผลการจำลองการทำงานยังแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าสามารถเลือกกำหนดเฟสของสัญญาณเอาต์พุตให้มีเฟสเดียวกันหรือเฟสตรงข้ามได้จากการกำหนดค่ากระแสไบอัสซึ่งสอดคล้องตามสมการที่ (3.11) และสมการที่ (3.12) เป็นอย่างดี



รูปที่ 3.16 ผลการเลียนแบบเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไซน์ความถี่ 1 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 ผลการเลียนแบบเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมความถี่ 1 kHz

3.5 สรุป

บทนี้นำเสนอวิธีการออกแบบวงจรขยายสัญญาณกระแสผ่านความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ตัวต้านทานขนานกันสองตัวต่อกราวด์ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบที่เข้าใจง่ายและส่งผลให้วงจรที่ออกแบบได้สามารถทำงานได้ในโหมดกระแส มีโครงสร้างที่ง่าย ใช้อุปกรณ์น้อย และใช้อุปกรณ์แอคทีฟเพียงอย่างเดียว นอกจากนั้นวงจรขยายสัญญาณกระแสที่นำเสนอในบทนี้ยังสามารถวิเคราะห์ได้โดยตรงคือไม่ต้องทำการวิเคราะห์ผ่านการแทนที่ด้วยตัวต้านทาน นั้นหมายความว่าวงจรขยายสัญญาณกระแสที่นำเสนอไม่ได้มีข้อจำกัดที่เกิดจากการประมาณค่าผ่าน R_x ของ CCCII และผลการเลียนแบบการทำงานให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์เป็นอย่างดี

บทที่ 4

วงจรถอดราก็สองและวงจรรยกกำลังสอง

วงจรถอดราก็สองและวงจรรยกกำลังสองของสัญญาณมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบการสื่อสาร ระบบเครื่องมือวัด ระบบการวัด และระบบอิเล็กทรอนิกส์ ดังตัวอย่างการใช้งานใน [10-11] และได้มีการนำเสนอวิธีการออกแบบมาแล้วหลายวิธี เช่นใน [28] วงจรรยกกำลังสองและวงจรถอดราก็สองที่มีวิธีการออกแบบที่เป็นระบบโดยใช้ OTA เป็นองค์ประกอบหลัก ใน [29] เป็นการนำเสนอการออกแบบที่เป็นระบบเช่นกันโดยได้ปรับให้วงจรสามารถรับสัญญาณอินพุตขนาดใหญ่ได้โดยออกแบบผ่านชุดของวงจรถอดราก็สอง ส่วนใน [30] เป็นการออกแบบโดยใช้ CMOS สำหรับใน [31] เป็นการนำวงจรรายพานกระแสมาออกแบบวงจรถอดราก็สองด้วย และเป็นที่น่าสนใจว่าวงจรถอดราก็สองที่กล่าวถึงใน [28-31] ทำงานในโหมดแรงดัน หากต้องการนำวงจรถอดราก็สองมาใช้ในโหมดกระแสจะต้องเพิ่มวงจรถอดราก็สองในส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสและกระแสเป็นแรงดัน ทำให้เป็นการเพิ่มความยุ่งยากซับซ้อนให้กับวงจรมากยิ่งขึ้น สำหรับวงจรรยกกำลังสองและวงจรถอดราก็สองที่สร้างโดย CCCII ได้มีการนำเสนอมาบ้างแล้ว ดังเช่นในบทความ [32]

วงจรถอดราก็สองและวงจรรยกกำลังสองของสัญญาณกระแส ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ออกแบบและสร้างขึ้นจากการนำวงจรรายพานกระแสรูปแบบที่ 1 ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 มาประยุกต์ใช้ ซึ่งวงจรถอดราก็สองที่ได้นั้นมีข้อดีที่น่าสนใจคือ ใช้อุปกรณ์แอคทีฟจำนวนน้อย ไม่ต้องใช้อุปกรณ์พาสซีฟจากภายนอก ให้ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูงเนื่องจากกระแสเอาต์พุตเป็นค่ากระแสที่พอร์ต Z ของ CCCII และให้ฟังก์ชันการทำงานที่ไม่มีเทอมของแรงดันเชิงอนุกรม

การอธิบายการได้มาของวงจรถอดราก็สองและวงจรรยกกำลังสองของสัญญาณกระแสในบทนี้จะเริ่มด้วยการกล่าวถึงแนวคิดที่นำมาใช้ในการออกแบบวงจร ตามด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเมื่อ CCCII มีความไม่เป็นอุดมคติ จากนั้นแสดงตัวอย่างการนำวงจรถอดราก็สองและวงจรรยกกำลังสองมาประกอบรวมกันเพื่อประยุกต์ใช้เป็นวงจรถอดราก็สองและวงจรรยกกำลังสองของสัญญาณกระแส เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของวงจรถอดราก็สองที่เสนอ ได้แสดงผลการทดสอบการทำงานของวงจรถอดราก็สองและวงจรรยกกำลังสองของสัญญาณกระแส

4.1 แนวคิดในการสร้างวงจรถอดราก็สองและวงจรรยกกำลังสอง

แนวคิดเบื้องต้นสำหรับการออกแบบวงจรถอดราก็สองและวงจรรยกกำลังสองที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้ เริ่มจากการพิจารณาสมการที่ (3.10) ซึ่งเป็นค่าของสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} ของวงจรรายพานกระแสที่แสดงในรูปที่ 3.5 และเพื่อความสะดวกในการอธิบายจึงนำสมการที่ (3.10) มาเขียนซ้ำอีกครั้ง ดังนี้

$$i_{out} = \frac{I_{01}}{I_{02}} i_{in} \quad (4.1)$$

สังเกตจากสมการ (4.1) พบว่าหากกำหนดให้ $I_{02} = i_{out}$ แล้วสมการที่ (4.1) นี้สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$i_{out} = \sqrt{I_{01}} \sqrt{i_{in}} \quad (4.2)$$

ซึ่งค่าสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} ในกรณีนี้ ให้ค่าที่สัมพันธ์กับสัญญาณกระแสอินพุต i_{in} ในรูปแบบฟังก์ชันของการถอดรากที่สองของสัญญาณกระแส ที่สามารถปรับขนาดของสัญญาณกระแสเอาต์พุตได้ด้วยกระแสไบอัส I_{01}

ทำนองเดียวกัน เมื่อกลับไปพิจารณาสมการที่ (4.1) อีกครั้งจะพบว่าหากกำหนดให้ $I_{01} = i_{in}$ แล้วสมการที่ (4.1) นี้จะเขียนใหม่ได้เป็น

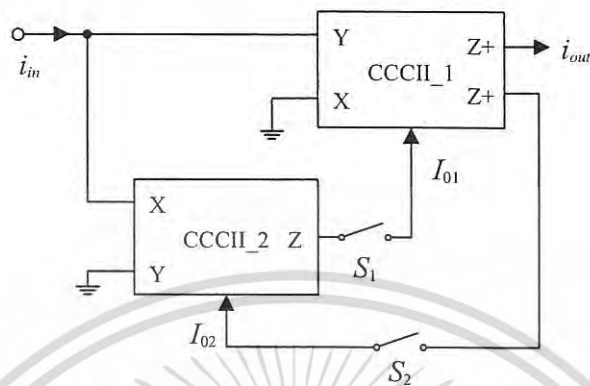
$$i_{out} = \frac{(i_{in})^2}{I_{02}} \quad (4.3)$$

ซึ่งค่าสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} ที่แสดงในสมการที่ (4.3) นี้ ให้ค่าที่สัมพันธ์กับสัญญาณกระแสอินพุต i_{in} ในรูปแบบฟังก์ชันของการยกกำลังสองของสัญญาณ ที่สามารถปรับขนาดของสัญญาณกระแสเอาต์พุตได้ด้วยกระแสไบอัส I_{02}

จากการได้มาของสมการที่ (4.2) และสมการที่ (4.3) ทำให้ทราบว่าวงจรขยายสัญญาณกระแสที่แสดงในรูปที่ 3.5 สามารถทำหน้าที่เป็นวงจรถอดรากที่สองของสัญญาณได้หากสามารถกำหนดให้ $I_{02} = i_{out}$ และสามารถทำหน้าที่เป็นวงจรกกำลังสองของสัญญาณได้หากสามารถกำหนดให้ $I_{01} = i_{in}$ ดังนั้นเพื่อให่วงจรมีเงื่อนไขเหล่านี้เกิดขึ้นได้จริงจึงได้ทำการปรับแต่งการเชื่อมต่อวงจรที่แสดงในรูปที่ 3.5 ใหม่ ซึ่งในที่นี้ประยุกต์ใช้กับวงจรขยายสัญญาณกระแสที่แสดงในรูปที่ 3.5(ข) โดยได้นำสวิตช์มาใช้ควบคุมสัญญาณกระแสที่ต้องการด้วย

วงจรที่ทำการปรับแต่งแล้วแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งวงจรในรูปนี้ เมื่อสวิตช์ทั้งสองตัวถูกเปิดออก วงจรจะมีลักษณะการเชื่อมต่อและคุณสมบัติเหมือนกับวงจรขยายสัญญาณกระแสที่แสดงในรูปที่ 3.5 และจากรูปที่ 4.1 นี้เมื่อสวิตช์ S_1 ปิดและสวิตช์ S_2 เปิดจะทำให้เงื่อนไข $I_{01} = i_{in}$ เป็นจริง เป็นผลให้สัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} ให้ฟังก์ชันที่สัมพันธ์กับสัญญาณกระแส i_{in} ในฟังก์ชันของการถอดรากที่สองของสัญญาณ ส่วนในขณะสวิตช์ S_1 เปิดและสวิตช์ S_2 ปิดจะทำให้เงื่อนไข $I_{02} = i_{out}$ เป็นจริงและเป็นผลให้สัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} ให้ฟังก์ชันที่สัมพันธ์กับสัญญาณกระแสอินพุต i_{in} ที่เป็นฟังก์ชันของการยกกำลังสองของสัญญาณ ดังนั้นวงจรที่แสดงในรูปที่ 4.1 จึงสามารถทำ

หน้าที่เป็นได้ทั้งวงจรถอดรหักรหัสที่สองและวงจรรยกกำลังสองของสัญญาณ ขึ้นกับการควบคุมการปิดเปิดของสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 อย่างเหมาะสม

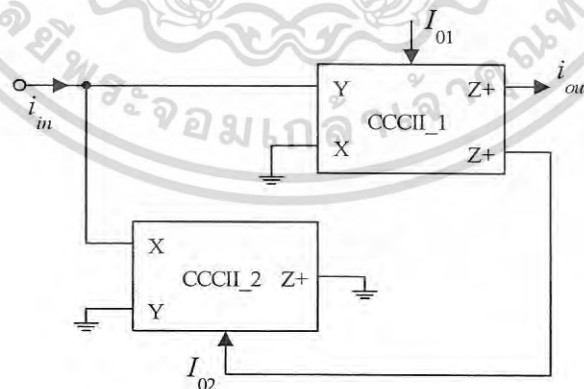


รูปที่ 4.1 แนวคิดเบื้องต้นของวงจรถอดรหักรหัสที่สองและวงจรรยกกำลังสอง

4.2 การสร้างวงจร

4.2.1 วงจรถอดรหักรหัสที่สองของสัญญาณ

ทราบมาแล้วในเบื้องต้นว่าวงจรถอดรหักรหัสที่สองที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ออกแบบได้จากสมการที่ (4.1) โดยการกำหนดให้ $I_{02} = i_{out}$ ซึ่งการกำหนดเงื่อนไขแบบนี้เป็นผลให้ทราบว่า หากต้องการนำวงจรตามรูปที่ 4.1 ไปใช้งานในฟังก์ชันของการถอดรหักรหัสที่สองของสัญญาณสามารถทำได้โดยการกำหนดให้สวิตช์ S_1 เปิด ส่วนสวิตช์ S_2 ปิด ดังนั้นในกรณีที่ต้องการวงจรทำหน้าที่เป็นวงจรถอดรหักรหัสที่สองเพียงหน้าที่เดียว ไม่จำเป็นต้องนำสวิตช์มาใช้และวงจรในกรณีนี้สามารถเขียนได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 วงจรที่ทำหน้าที่เป็นฟังก์ชันถอดรหักรหัสที่สองของสัญญาณกระแสเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรตามรูปที่ 4.2 นี้มีความกระชับและยังคงให้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} และสัญญาณกระแสอินพุต i_{in} เป็น

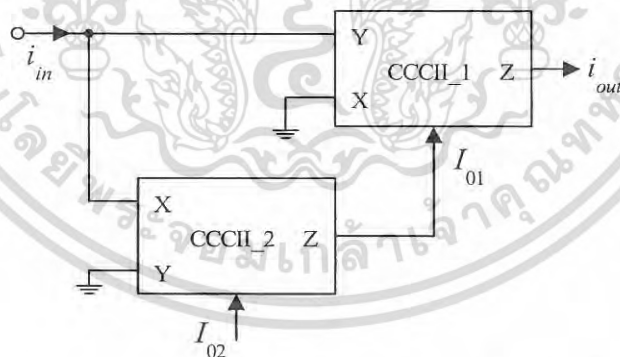
$$i_{out} = \sqrt{I_{01}} \sqrt{i_{in}} \quad (4.4)$$

สังเกตจากสมการที่ (4.4) พบว่าสัญญาณกระแส i_{out} ให้ความสัมพันธ์ในลักษณะที่เป็นฟังก์ชันการถอดรากที่สองของสัญญาณกระแสอินพุต i_{in} และสามารถปรับขนาดของสัญญาณกระแส i_{out} ได้จากการปรับค่ากระแสไบอัส I_{01} ของ CCCII นอกจากนี้สมการที่ (4.4) นี้ยังแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าค่าของสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} ไม่มีเทอมของ V_T ซึ่งเป็นเทอมที่แปรค่าตามผลของอุณหภูมิปรากฏในสมการ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระบบไม่ได้ส่งผลโดยตรงต่อการทำงานของวงจรที่เสนอ

4.2.2 วงจรยกกำลังสองของสัญญาณ

ในหัวข้อที่ 4.1 ได้แสดงให้เห็นมาแล้วว่าวงจรยกกำลังสองสามารถออกแบบได้โดยการกำหนดเงื่อนไขให้ $I_{01} = i_{in}$ ซึ่งเมื่ออ้างอิงกับรูปที่ 4.1 เงื่อนไขนี้เกิดขึ้นเมื่อทำการปิดสวิตช์ S_1 และเปิดสวิตช์ S_2

สำหรับในกรณีที่ต้องการวงจรทำหน้าที่เป็นวงจรยกกำลังสองของสัญญาณเพียงหน้าที่เดียว ไม่จำเป็นต้องนำสวิตช์มาใช้ วงจรในกรณีนี้สามารถเขียนได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรยกกำลังสองของสัญญาณเพียงอย่างเดียว

วงจรตามรูปที่ 4.3 นี้ ให้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} และสัญญาณกระแสอินพุต i_{in} เป็นตามสมการที่ 4.3 กล่าวคือ

$$i_{out} = \frac{(i_{in})^2}{I_{02}} \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการนี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ากระแส i_{out} อยู่ในฟังก์ชันของสัญญาณกระแส i_{in} ยกกำลังสอง ดังนั้นวงจรตามรูปที่ 4.3 จึงทำหน้าที่เป็นวงจรยกกำลังสองของสัญญาณ i_{in} ตามต้องการได้ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาวงจรตามรูปที่ 4.3 จะพบข้อจำกัดอันเนื่องมาจากคุณสมบัติของ CCCII ที่ว่าวงจรจะทำงานได้อย่างถูกต้องเมื่อกระแส DC ไบอัส I_0 ต้องเป็นไปตามเงื่อนไข $I_0 \geq 0$ หรือ $I_0 \leq 0$ กล่าวคือกระแสไบอัสของ CCCII เป็นได้ทิศทางเดียว ดังนั้นเมื่อพิจารณาวงจรตามรูปที่ 4.3 พบว่าวงจรตามรูปนี้จะทำงานได้ถูกต้องตามสมการ (4.3) ก็ต่อเมื่อกระแส i_{in} มีค่าด้านบวกหรือด้านลบ สอดคล้องกับกระแสไบอัส I_0 เท่านั้น หากสัญญาณ i_{in} มีค่าไม่สอดคล้องกับ I_0 วงจรจะไม่สามารถทำงานได้หรือให้ค่ากระแส i_{out} เป็นศูนย์ ดังนั้นเพื่อแก้ไขข้อจำกัดนี้ จึงต้องมีการปรับปรุงและพัฒนา วงจรเพิ่มเติม ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ใช้แนวคิดพื้นฐานดังนี้

เริ่มต้นโดยการพิจารณาจากสมการที่ 4.1 ที่มีค่าของสมการเป็น

$$i_{out} = \frac{I_{01}}{I_{02}} i_{in} \quad (4.6)$$

เมื่อพิจารณาว่า $I_{01} = i_{in} + I_0$ จะเขียนสมการ (4.6) ใหม่ได้เป็น

$$i_{out} = \frac{i_{in} + I_0}{I_{02}} i_{in} = \frac{i_{in}^2}{I_{02}} + \frac{I_0 i_{in}}{I_{02}} \quad (4.7)$$

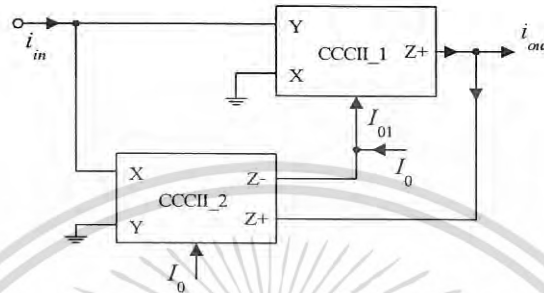
เพื่อให้ง่ายในการจัดการสัญญาณ จึงกำหนดให้ $I_{02} = I_0$ จากการกำหนดเงื่อนไขนี้ทำให้สมการที่ (4.7) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$i_{out} = \frac{i_{in}^2}{I_0} + i_{in} \quad (4.8)$$

จุดมุ่งหมายในการออกแบบนั้น ต้องการให้ได้สัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} ที่ให้ความสัมพันธ์ของสัญญาณกระแสอินพุต i_{in} เป็นฟังก์ชันยกกำลังสองเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงต้องกำจัดเทอมของสัญญาณกระแสอินพุต i_{in} ที่เป็นส่วนเกินในสมการที่ (4.8) ออกด้วย ซึ่งในที่นี้ใช้วิธีนำค่าสัญญาณกระแส i_{in} มาหักล้างที่จุดกระแสเอาต์พุต ส่งผลให้สมการที่ (4.8) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$i_{out} = \frac{i_{in}^2}{I_0} \quad (4.9)$$

สมการที่ (4.9) ยังคงแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ากระแส i_{out} อยู่ในฟังก์ชันของสัญญาณกระแส i_{in} ยกกำลังสองเช่นเดิม และเพื่อทำให้สมการที่ (4.9) เป็นจริง จึงได้ทำการปรับการเชื่อมต่อวงจรจรรยาในรูปที่ 4.3 ใหม่ ได้ดังรูปที่ 4.4 วงจรที่แสดงในรูปนี้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องเมื่อสัญญาณกระแสอินพุต i_{in} เป็นไปตามเงื่อนไข $|i_{in}| \leq I_0$ โดยที่สัญญาณกระแสอินพุต i_{in} เป็นได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ



รูปที่ 4.4 วงจรยกกำลังสองที่อินพุต i_{in} เป็นได้ทั้งค่าบวกและลบ โดยมีเงื่อนไขว่า $|i_{in}| \leq I_0$

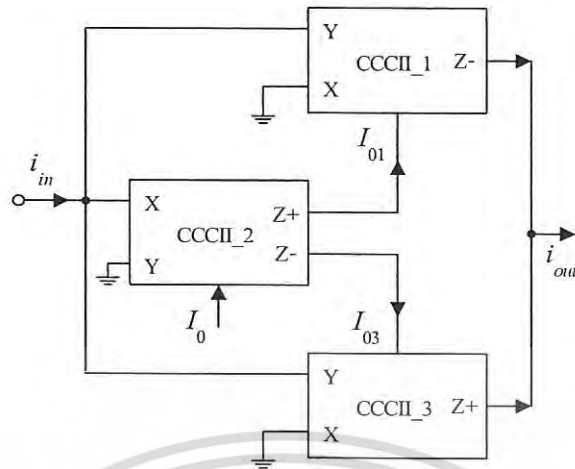
หากพิจารณาวงจรในรูปที่ 4.4 อย่างละเอียดอีกครั้งจะพบว่ายังมีข้อจำกัดในการทำงาน นั่นคือ $|i_{in}| \leq I_0$ ทำให้เกิดแนวคิดที่จะปรับปรุงวงจรรยกกำลังสองตามรูปที่ 4.4 ให้สามารถเอาชนะเงื่อนไขหรือข้อจำกัดนี้ โดยมีแนวคิดในการพัฒนาวงจรเป็นดังต่อไปนี้

เริ่มต้นด้วยการพิจารณาจากสมการที่ 4.4 ซึ่งเป็นค่ากระแสเอาต์พุตของวงจรในรูปที่ 4.3 และมีสมการเป็น

$$i_{out} = \frac{(i_{in})^2}{I_{02}} \quad (4.10)$$

ซึ่งได้มาเมื่อในช่วงที่กระแส DC ไบอัส I_0 ของ CCCII เป็นไปตามเงื่อนไข $I_0 \geq 0$ และเนื่องจากทราบว่ากระแสไบอัสของ CCCII เป็นได้ทิศทางเดียว ดังนั้นในกรณีที่ต้องการให้วงจรสามารถทำงานได้ในช่วงที่อินพุต i_{in} เป็นค่าลบ ก็สามารถทำได้โดยการกำหนดให้กระแสไบอัสของวงจรเป็น $I_0 \leq 0$

การปรับปรุงให้วงจรสามารถทำให้สมการที่ (4.10) ทำงานได้ทั้งกรณีที่สัญญาณกระแสอินพุต i_{in} เป็นค่าบวกและลบ จึงได้นำวงจรรยกกำลังสองของสัญญาณที่แสดงในรูปที่ 4.3 นี้มาใช้ 2 วงจร วงจรหนึ่งทำงานในช่วงสัญญาณกระแสอินพุตเป็นค่าบวก อีกวงจรหนึ่งทำงานในช่วงสัญญาณกระแสอินพุตเป็นค่าลบแล้วนำค่าสัญญาณกระแสเอาต์พุตของทั้งสองวงจรที่ได้จากการยกกำลังสองมารวมกัน จึงได้วงจรที่ให้ค่ากระแสเอาต์พุต i_{out} เป็นการยกกำลังสองของสัญญาณกระแสอินพุตที่เป็นได้ทั้งค่าบวกและลบตามต้องการ วงจรที่ได้จากการปรับปรุงตามแนวคิดนี้ได้แสดงไว้ดังในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 วงจรยกกำลังสองที่อินพุตเป็นได้ทั้งค่าบวกและลบได้โดยไม่มีเงื่อนไข $|i_{in}| \leq I_0$

สำหรับการอธิบายในเชิงการวิเคราะห์วงจรของรูปที่ 4.5 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณกระแสอินพุต i_{in} และสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} ทำได้ดังนี้คือ

ซึ่ง
$$i_{out} = i_{Z_1} + i_{Z_3} \tag{4.11}$$

และ
$$i_{Z_1} = \frac{(i_{in})^2}{I_0} ; i_{in} \geq 0 \tag{4.12}$$

และ
$$i_{Z_3} = \frac{(i_{in})^2}{I_0} ; i_{in} \leq 0 \tag{4.13}$$

ส่งผลทำให้ได้ค่ากระแสเอาต์พุต i_{out} เป็น

$$i_{out} = \frac{(i_{in})^2}{I_0} \tag{4.14}$$

การได้มาของของสมการ (4.14) แสดงได้อย่างชัดเจนว่าสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} อยู่ในฟังก์ชันของสัญญาณกระแสอินพุต i_{in} ยกกำลังสอง ส่งผลให้สามารถสรุปได้ว่าวงจรยกกำลังสองของสัญญาณกระแสที่แสดงในรูปที่ 4.5 มีข้อดีที่ชัดเจนเมื่อเทียบกับสองวงจรที่ผ่านมา คือสามารถรับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสอินพุตที่เป็นได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ และยังไม้ขึ้นกับเงื่อนไขการจัดกระแส DC ไบอัสของ CCCII ด้วย

เมื่อพิจารณาค่าสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} ของวงจรถูกกำลังสองของสัญญาณที่ได้กล่าวมาแล้วทั้งสามวงจร พบว่าสามารถปรับขนาดของสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} ได้โดยการปรับค่ากระแสไบอัส I_0 ของ CCCII และสมการสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} ของวงจรถูกำลังสองนี้ยังไม่มีเทอมของ V_T ซึ่งเป็นเทอมที่แปรค่าตามผลของอุณหภูมิปรากฏในสมการด้วย ทำให้สรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระบบไม่ได้ส่งผลโดยตรงต่อการทำงานของวงจรถูกำลังสอง

4.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจรถูกำลังสอง

ในการอธิบายพฤติกรรมการทำงานของวงจรถูกำลังสองและยกกำลังสองของสัญญาณที่ผ่านมาทั้งหมดนั้นพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกระแสเอาต์พุตและสัญญาณกระแสอินพุตของวงจรถูกำลังสองโดยสมมติให้ CCCII มีคุณสมบัติทางอุดมคติ ซึ่งหาก CCCII มีความไม่เป็นอุดมคติขึ้นแล้วก็จะทำให้เกิดมีค่าความคลาดเคลื่อนขึ้นในวงจรถูกำลังสองที่ได้ออกแบบไว้ ในทางปฏิบัติการทำงานของวงจรถูกำลังสองจะเกิดความคลาดเคลื่อนไปจากอุดมคติได้จากหลากหลายสาเหตุด้วยกัน อย่างไรก็ตามในหัวข้อนี้จะขอกกล่าวถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากค่าความคลาดเคลื่อนของอัตรากระแสผ่านสัญญาณแรงดันและกระแสซึ่งส่งผลกระทบที่ชัดเจน

เมื่อทำการวิเคราะห์วงจรถูกำลังสองและยกกำลังสองของสัญญาณที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2 โดยนำคุณสมบัติของ CCCII ที่ไม่เป็นอุดมคติที่ให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางไฟฟ้าที่พอร์ตต่างๆ เป็นตามสมการที่ (2.50) มาใช้ ได้ผลของการวิเคราะห์ของแต่ละวงจรถูกำลังสองเป็นตามลำดับ ดังนี้

ผลการวิเคราะห์ของวงจรถูกำลังสองจากรูปที่ 4.3

$$i_{out} = \sqrt{\alpha_1 \beta_1} \sqrt{I_{01}} \sqrt{i_{in}} \quad (4.15)$$

ผลการวิเคราะห์ของวงจรถูกำลังสองจากรูปที่ 4.4

$$i_{out} = \alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \frac{i_{in}^2}{I_{02}} \quad (4.16)$$

และ

$$i_{out} = \alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \frac{i_{in}^2}{I_{02}} + \alpha_1 \beta_1 i_{in} - \alpha_2 i_{in} \quad (4.17)$$

ผลการวิเคราะห์ของวงจรถูกำลังสองจากรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_{out} = \alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \frac{i_{in}^2}{I_{O2}} ; i_{in} > 0 \tag{4.18}$$

และ

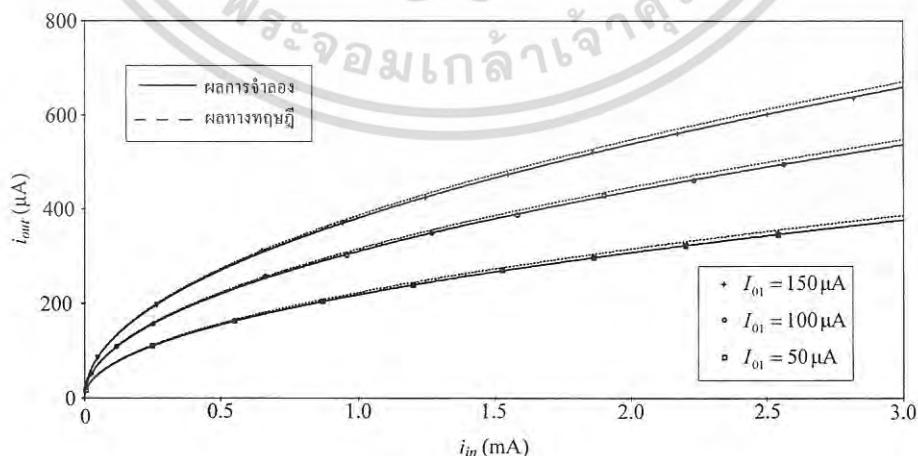
$$i_{out} = \alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \frac{i_{in}^2}{I_{O2}} ; i_{in} < 0 \tag{4.19}$$

สังเกตผลการวิเคราะห์จากสมการ (4.15) ถึงสมการ (4.19) ถ้า $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1$ และ $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 1$ สมการเหล่านี้จะมีค่าเท่ากับสมการที่ (4.4) สมการที่ (4.10) และสมการที่ (4.14) ตามลำดับ ดังนั้นผลการวิเคราะห์ที่แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าผลของความไม่เป็นอุดมคติของ CCCII จะทำให้ค่าอัตราขยายของวงจรถลาดเคลื่อนรวมทั้งมีค่า offset เกิดขึ้นที่กระแสเอาต์พุตด้วย และเป็นที่น่าสังเกตว่าประสิทธิภาพของวงจรถกกำลังสองที่แสดงในรูปที่ 4.5 ให้ประสิทธิภาพของการทำงานดีกว่าวงจรถกกำลังสองในรูปที่ 4.4

4.4 ผลการจำลองการทำงาน

4.4.1 วงจรถอดรอกที่สองของสัญญาณ

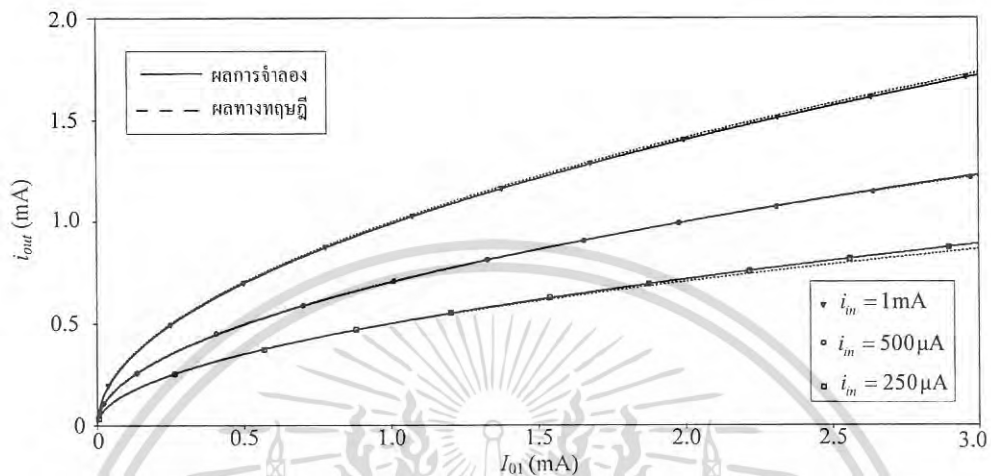
เพื่อยืนยันการวิเคราะห์ตามทฤษฎี ได้นำวงจรถอดรอกที่สองที่เสนอมาลำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE โดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP เป็นเบอร์ 2N3904 และ 2N2907 ตามลำดับ และใช้ไฟเลี้ยงวงจร $\pm 1.5V$ เมื่อทำการจำลองการทำงานของวงจรถอดรอกในรูปที่ 4.2 เพื่อหาคุณลักษณะการถ่ายโอนทางไฟตรงหรือความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} กับสัญญาณกระแสอินพุต i_{in} ที่มีค่ากระแสไบแอส I_{O1} ค่าต่างๆ กัน ให้ผลการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 4.6 โดยในรูปนี้เป็นการเปรียบเทียบการคำนวณทางทฤษฎีร่วมกับผลการจำลองการทำงานในกรณีที่สัญญาณกระแสอินพุต i_{in} มีค่าจาก 0 ถึง 3mA และกระแสไบแอส I_{O1} มีค่าเท่ากับ 50 μA , 100 μA และ 150 μA



รูปที่ 4.6 ผลการจำลองทางไฟตรงของวงจรถอดรอกที่สอง

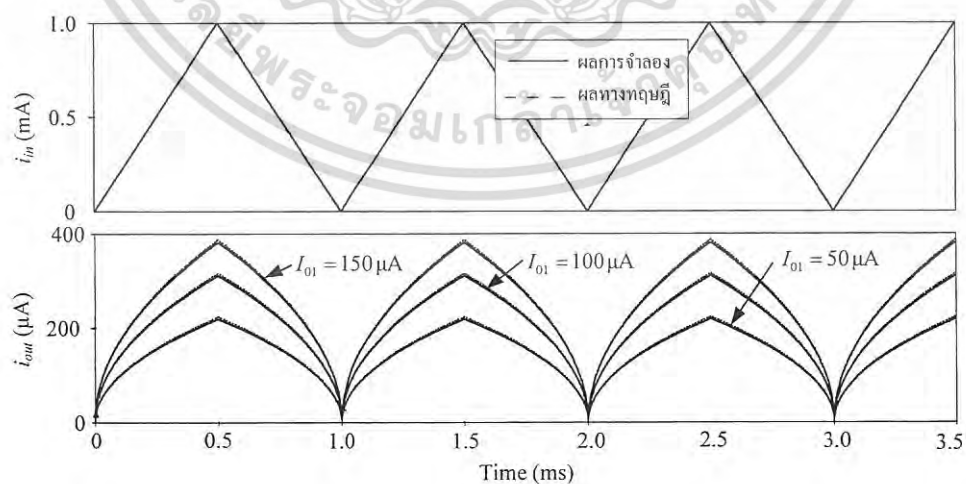
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการจำลองการทำงานในกรณีที่แปรค่ากระแสไบอัส I_{O1} จาก 0 ถึง 3mA และป้อนสัญญาณกระแสอินพุต i_{in} มีค่าเท่ากับ 250 μ A 500 μ A และ 1mA ได้ผลการจำลองการทำงานที่เปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 4.7



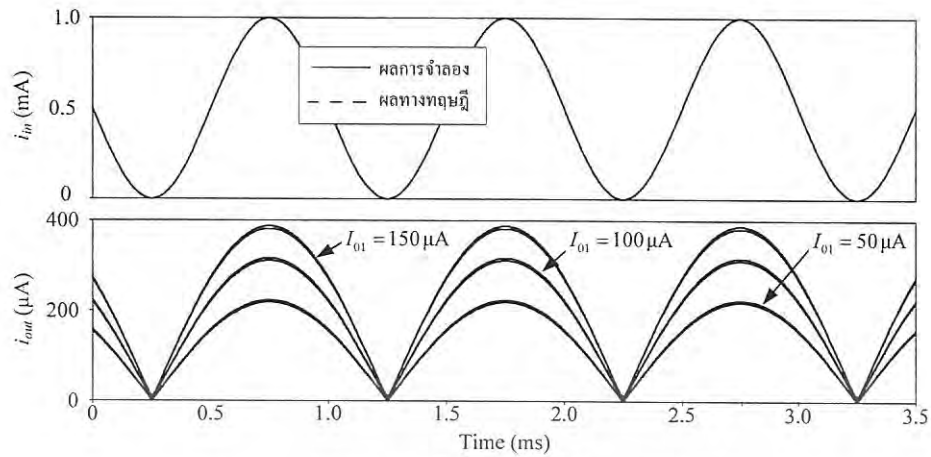
รูปที่ 4.7 ผลการจำลองการทำงานของวงจรถอดรากที่สองเมื่อแปรค่ากระแสไบอัส I_{O1}

จากนั้นได้จำลองการทำงานวงจรถอดรากที่สองของสัญญาณที่เสนอ เพื่อดูผลตอบสนองเชิงเวลาโดยการป้อนสัญญาณกระแสอินพุตเป็นสัญญาณที่มีความถี่ 1 kHz และมีขนาดเท่ากับ 1mA โดยการแปรค่ากระแสไบอัส I_{O1} มีค่าเท่ากับ 50 μ A 100 μ A และ 150 μ A กรณีที่สัญญาณกระแสอินพุตเป็นรูปสัญญาณสามเหลี่ยมได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.8 ส่วนกรณีที่สัญญาณอินพุตเป็นคลื่นรูปไซน์แสดงดังรูปที่ 4.9 ทั้งสองรูปแสดงทั้งผลการจำลองการทำงานและผลการคำนวณทางทฤษฎีเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองการทำงานของวงจรถอดรากที่สองกรณีสัญญาณอินพุตเป็นรูปสามเหลี่ยม

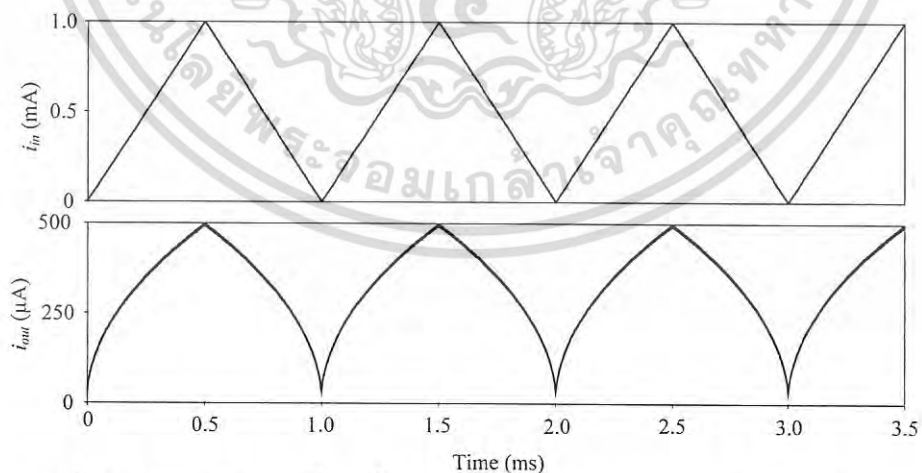
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองการทำงานของวงจรถอดรากที่สองกรณีสัญญาณอินพุตเป็นรูปไซน์

เมื่อพิจารณาผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 จะพบว่าเมื่อค่ากระแสไบอัส I_{01} มีค่าเพิ่มขึ้น จะให้ค่ากระแสเอาต์พุต i_{out} เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีตามสมการที่ (4.4)

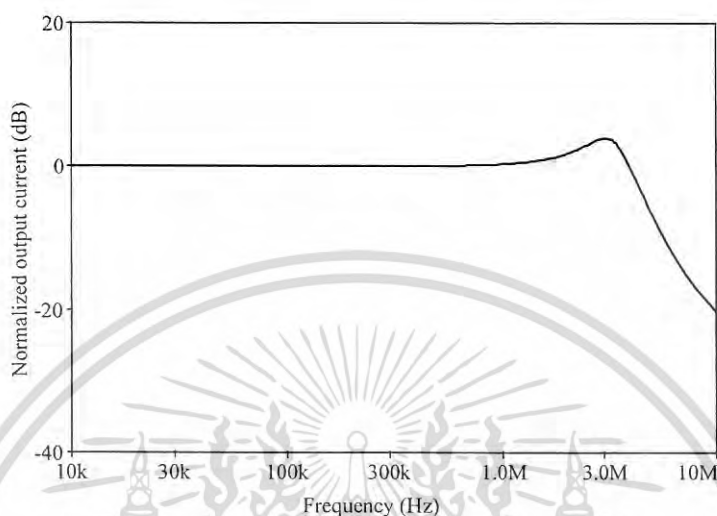
เพื่อยืนยันว่าการทำงานของวงจรถอดรากที่สองที่เสนอในด้านการมีเสถียรภาพต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ได้ทำการจำลองการทำงานโดยกำหนดค่าอุณหภูมิเป็น 27°C 50°C และ 100°C ตามลำดับ ซึ่งใช้กระแส I_{01} เท่ากับ $100\mu\text{A}$ ได้ผลการจำลองการทำงานเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 4.10 ซึ่งผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิส่งผลถึงค่ากระแสเอาต์พุต i_{out} น้อยมาก



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนค่าอุณหภูมิของวงจรถอดรากที่สองของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรถอดรากที่สอง ได้ผลตอบสนองการทำงานดังแสดงในรูปที่ 4.11 ที่มีค่าแบนด์วิดท์ที่สามารถใช้งานได้ประมาณ 5 MHz โดยเป็นผลการจำลองการทำงานกรณีกระแสไบอัส $I_0 = 200\mu\text{A}$

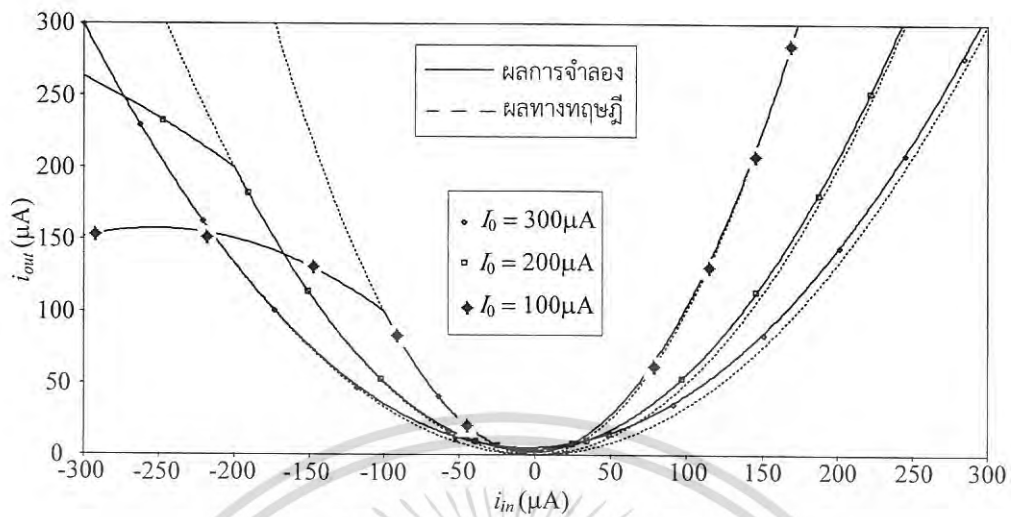


รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรถอดรากที่สอง

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับผลการคำนวณทางทฤษฎีของวงจรถอดรากที่สองที่ได้แสดงมาแล้วทั้งหมดสามารถใช้ยืนยันได้ว่าวงจรถอดรากที่สองของสัญญาณที่เสนอสามารถทำหน้าที่เป็นวงจรถอดรากที่สองของสัญญาณกระแส i_{in} ได้เป็นอย่างดี

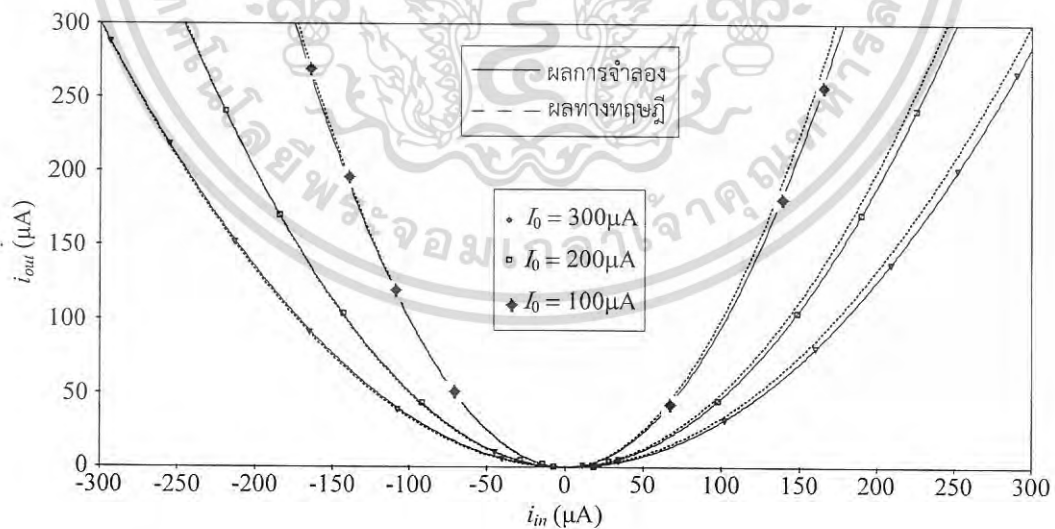
4.4.2 วงจรรยกกำลังสองของสัญญาณ

ในทำนองเดียวกันเพื่อยืนยันการวิเคราะห์ตามทฤษฎี ได้นำวงจรรยกกำลังสองของสัญญาณที่เสนอมาจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE โดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP เป็นเบอร์ 2N3904 และ 2N2907 ตามลำดับ และใช้ไฟเลี้ยงวงจร $\pm 1.5\text{V}$ เมื่อทำการจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5 เพื่อหาคุณลักษณะการถ่ายโอนทางไฟตรงหรือความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} กับสัญญาณกระแสอินพุต i_{in} ที่อยู่ในช่วง $-300\mu\text{A}$ ถึง $300\mu\text{A}$ ที่มีค่ากระแสไบอัส I_0 มีค่าเท่ากับ $100\mu\text{A}$, $200\mu\text{A}$ และ $300\mu\text{A}$ ให้ผลการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ผลการจำลองการทำงานของวงจรกกำลังสองเมื่อใช้วงจรตามรูปที่ 4.4

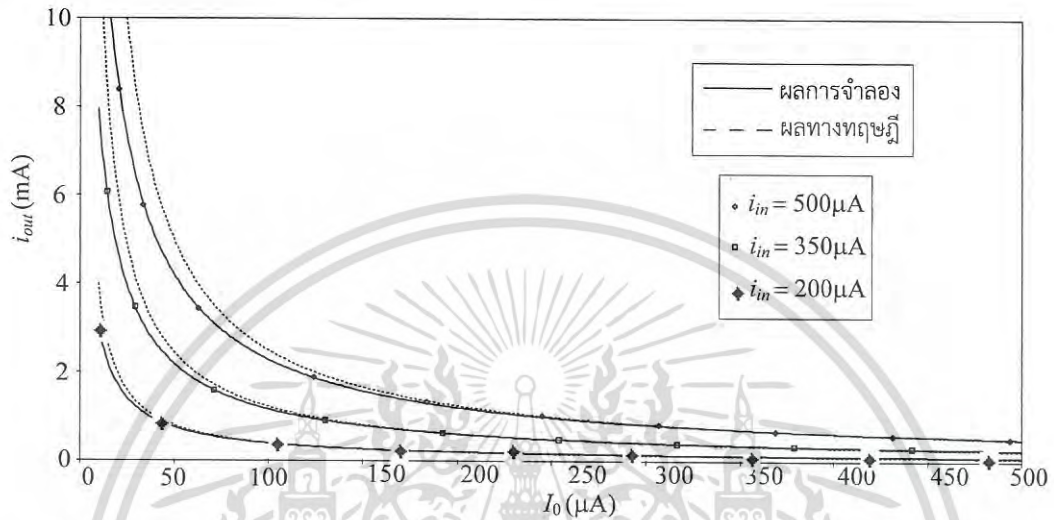
ผลการจำลองการทำงานที่แสดงในรูปที่ 4.12 เป็นผลของวงจรกกำลังสองที่แสดงในรูปที่ 4.4 ที่แม้ว่าจะรับสัญญาณกระแสอินพุต i_{in} ได้ทั้งค่าบวกและลบ แต่วงจรยังมีข้อจำกัดที่ว่า $|i_{in}| \leq I_0$ ผลการจำลองแสดงอย่างชัดเจนว่าเมื่อขนาดของกระแสอินพุต i_{in} ด้านลบมีค่ามากเกินไปค่ากระแสไบอัส I_0 ค่ากระแสเอาต์พุตของวงจร i_{out} ก็ให้ผลการจำลองที่ผิดพลาด ในขณะที่วงจรตามรูปที่ 4.5 นั้นสามารถแก้จุดอ่อนนี้ได้ ตามผลการจำลองการทำงานที่ยืนยันได้ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.13



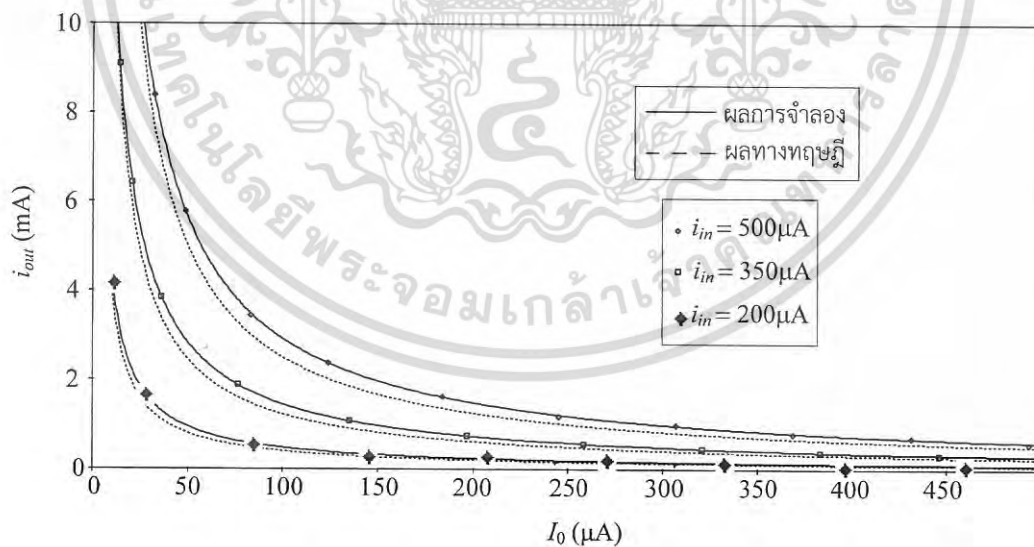
รูปที่ 4.13 ผลการจำลองการทำงานของวงจรกกำลังสองเมื่อใช้วงจรตามรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังได้พิจารณาการทำงานของวงจรรยอกำลังสองของสัญญาณในรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 โดยการจำลองการทำงานในกรณีที่แปรค่ากระแสไบอัส I_0 จาก 0 ถึง 500 μA และป้อนสัญญาณกระแสอินพุต i_{in} มีค่าเท่ากับ 200 μA 350 μA และ 500 μA ได้ผลการจำลองการทำงานที่เปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 ผลการจำลองของวงจรรยอกำลังสองในรูปที่ 4.4 เมื่อแปรค่ากระแสไบอัส I_0

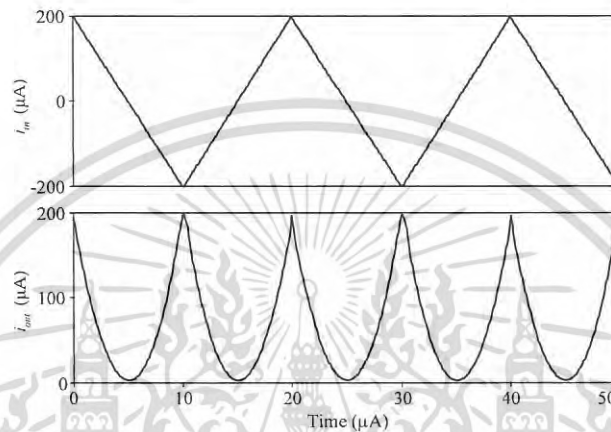


รูปที่ 4.15 ผลการจำลองของวงจรรยอกำลังสองในรูปที่ 4.5 เมื่อแปรค่ากระแสไบอัส I_0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

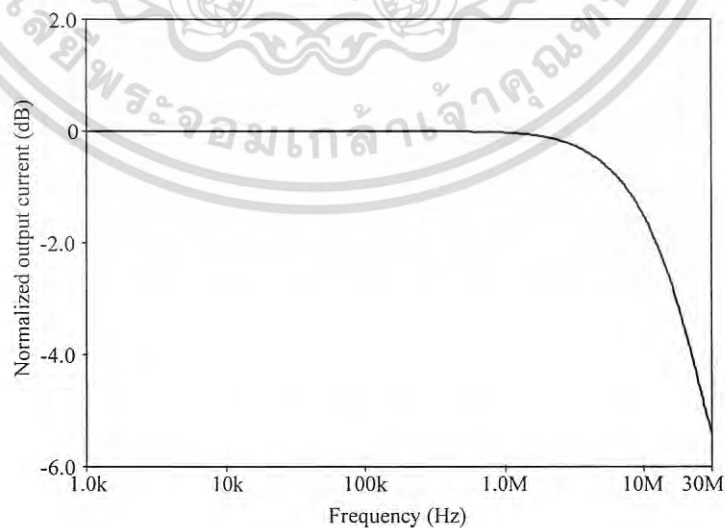
ผลการจำลองการทำงานที่แสดงในรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 เป็นการแปรค่ากระแสไบอัส I_0 แสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้ค่ากระแสไบอัสที่เหมาะสมกับค่ากระแสอินพุต จะให้ค่ากระแสเอาต์พุตที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี

เพื่อทดสอบการทำงานของวงจรรยกกำลังสอง ในการตอบสนองกระแสอินพุตที่แปรตามเวลา จึงได้ทำการทดสอบวงจรโดยการป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีขนาด $200\mu\text{A}$ ความถี่ 500kHz ในขณะที่กระแสไบอัส $I_0 = 200\mu\text{A}$ ให้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ผลการจำลองเมื่อสัญญาณกระแสอินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมของวงจรรยกกำลังสอง

สำหรับผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรยกกำลังสอง ได้ผลตอบสนองการทำงานดังแสดงในรูปที่ 4.17 ได้ค่าแบนด์วิธที่สามารถใช้งานได้เท่ากับ 17 MHz โดยเป็นผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้กระแสไบอัส $I_0 = 200\mu\text{A}$



รูปที่ 4.17 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรยกกำลังสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองการทำงานของวงจรยกกำลังสองของสัญญาณกระแสที่แสดงมาแล้วทั้งหมด สามารถใช้ยืนยันได้ว่าวงจรที่เสนอทั้ง 3 วงจร สามารถทำหน้าที่เป็นวงจรยกกำลังสองของสัญญาณกระแส i_m ได้ตามที่เสนอ

4.5 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้

เพื่อแสดงสมรรถนะของวงจรถอดรหัสดิจิทัลและวงจรยกกำลังสองที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้นำมาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเป็นวงจรหาผลรวมของเวกเตอร์ (Vector Summation) ซึ่งวงจรหาผลรวมของเวกเตอร์นี้มีการประยุกต์ใช้ในหลายระบบเช่น ในระบบการสื่อสาร ระบบการวัด และระบบฟัซซี (Fuzzy) เป็นต้น โดยทั่วไปการหาผลรวมของเวกเตอร์สามารถทำได้โดยการนำฟังก์ชันของการถอดรหัสดิจิทัลมาประกอบร่วมกับวงจรยกกำลังสอง ในกรณีที่มีอินพุต N เวกเตอร์จะเขียนความสัมพันธ์ของกระแสเอาต์พุต i_{out} กับกระแสอินพุต i_{in} เป็นตามสมการต่อไปนี้

$$i_{out} = \sqrt{i_{in1}^2 + i_{in2}^2 + \dots + i_{inN}^2} \quad (4.20)$$

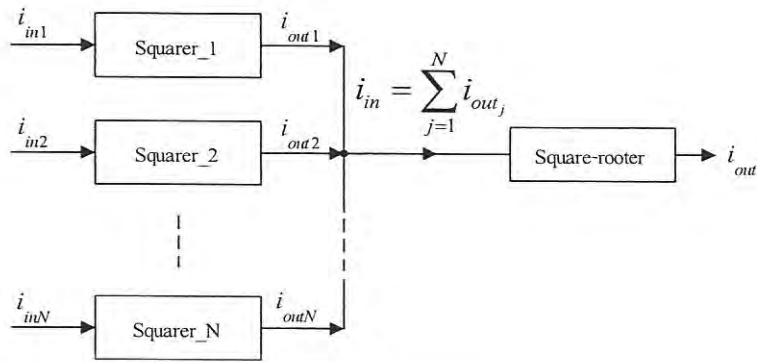
ซึ่งจากสมการที่ (4.20) เมื่อนำไปวาดเป็นวงจรจะได้ดังรูปที่ 4.18 และได้ความสัมพันธ์ของสัญญาณกระแสที่จุดต่างๆ เป็นดังนี้

$$i_{out} = \sqrt{\frac{i_{in1}^2}{I_0} + \frac{i_{in2}^2}{I_0} + \dots + \frac{i_{inN}^2}{I_0}} = \sqrt{i_{in}} \quad (4.21)$$

โดยที่

$$i_{in} = \sum_{j=1}^N i_{outj} \quad (4.22)$$

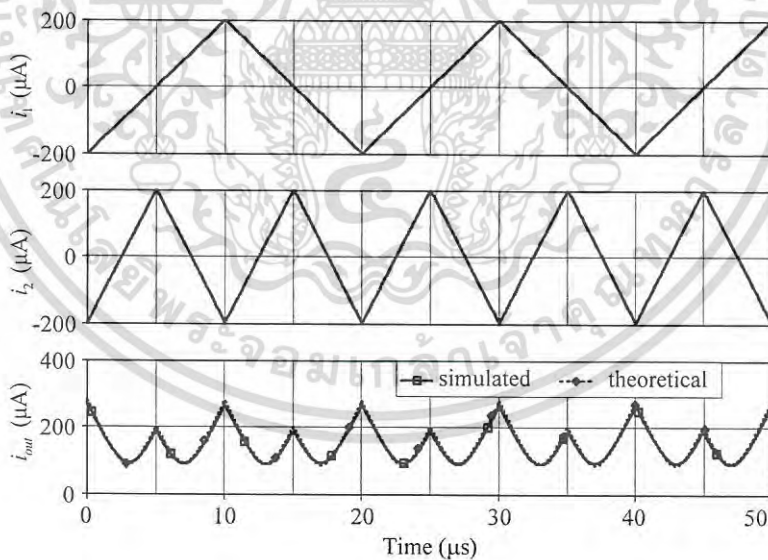
ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าวงจรถอดรหัสดิจิทัลและวงจรยกกำลังสองของสัญญาณที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้สามารถนำไปประยุกต์เป็นวงจรหาผลรวมของเวกเตอร์ได้โดยตรง ไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์มาเชื่อมต่อเพิ่มเติม



รูปที่ 4.18 โครงสร้างของวงจรหาผลรวมของเวกเตอร์ที่มีอินพุตจำนวน N เวกเตอร์

4.5.1 ผลการจำลองการทำงาน

สำหรับการทดสอบการทำงานของวงจรหาผลรวมของเวกเตอร์ ในที่นี้ทำโดยการจำลองการทำงานวงจรเป็นการหาผลรวมของ 2 เวกเตอร์หรือ 2 อินพุต โดยในการจำลองการทำงานนั้นได้กำหนดให้สัญญาณอินพุตเป็นคลื่นรูปสามเหลี่ยมที่มีขนาดเท่ากับ $200\mu\text{A}$ โดยสัญญาณ i_1 มีความถี่ 50kHz และสัญญาณ i_2 มีความถี่ 100kHz ส่วนค่ากระแสไบอัส $I_0 = 200\mu\text{A}$ สัญญาณกระแสอินพุต i_1 และ i_2 และสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} แสดงดังในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรผลรวมเวกเตอร์ขนาด 2 อินพุต

จากรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการจำลองการทำงานมีค่าสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีเป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 สรุป

ในบทนี้ของวิทยานิพนธ์ ได้นำวงจรขยายสัญญาณกระแสที่ได้กล่าวไว้ ในบทที่ 3 มาประยุกต์ใช้ โดยเน้นไปที่การนำไปสร้างเป็นวงจรถอดรหัสดิจิทัล และวงจรยกกำลังสองเป็นหลัก นอกจากนั้นยังได้ทำการพัฒนางจรยกกำลังสองที่นำเสนอให้สามารถใช้งานได้ทั้งสองช่วงของสัญญาณกระแสอินพุต คือทำงานได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ รวมทั้งได้แสดงการนำวงจรยกกำลังสองและวงจรถอดรหัสดิจิทัลมาประยุกต์สร้างเป็นวงจรบวกเวกเตอร์ประกอบไว้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วงจรคุณและหารสัญญาณ

วงจรคุณและหารสัญญาณเป็นวงจรพื้นฐานที่สำคัญอีกวงจรหนึ่งในระบบต่างๆ ได้แก่ ระบบการควบคุม ระบบเครื่องมือวัด และระบบการสื่อสาร ตัวอย่างการใช้งานของวงจรมีทั้งที่เป็นองค์ประกอบของวงจรต่างๆ ได้แก่ วงจรมอดูเลเตอร์/วงจรมอดูเลเตอร์ วงจรทวีความถี่ และวงจรเรียงกระแส เป็นต้น เทคนิคในการออกแบบวงจรคุณและหารสัญญาณมีทั้งในโหมดแรงดันและโหมดกระแส แต่เนื่องจากในปัจจุบันการประมวลผลสัญญาณในโหมดกระแสกำลังได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางมากขึ้น เนื่องจากวงจรมีทั้งที่ทำงานในโหมดกระแสมีข้อดีที่เด่นชัดเหนือกว่าวงจรมีทั้งที่ทำงานในโหมดแรงดันหลายประการ ตัวอย่างเช่น ให้ช่วงความถี่การใช้งานที่กว้างกว่า กินกำลังไฟฟ้าที่ต่ำกว่า และมีโครงสร้างของวงจรมีง่ายกว่า [1-2] เป็นต้น

สำหรับวงจรคุณและหารสัญญาณในโหมดกระแสที่สร้างขึ้นโดยใช้อุปกรณ์แอคทีฟประเภทต่างๆ โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์พาสซีฟ ประกอบพร้อมในวงจรมีการนำเสนอมาแล้ว ได้แก่ วงจรที่ใช้โอทีเอ (OTA) [33] วงจรที่ใช้ CFA [34] และวงจรมีทั้งที่ใช้งานสายพานกระแสที่ควบคุมได้ด้วยกระแส (CCII) [35] อย่างไรก็ตามแม้ว่าวงจรมีเหล่านี้จะสามารถคุณสัญญาณได้ทั้งสี่ควอดแรนต์ แต่ทว่าวงจรมีไม่สามารถทำหน้าที่เป็นวงจรมีหารสัญญาณสี่ควอดแรนต์ได้ และถึงแม้จะมีบทความที่นำเสนอวงจรมีคุณและหารสัญญาณที่สามารถรับสัญญาณอินพุตได้ทั้งสี่ควอดแรนต์แล้วก็ตาม [36] แต่โครงสร้างของวงจรมีที่เสนอใช้แหล่งจ่ายกระแสหลายชุด เป็นผลให้วงจรมีสิ้นเปลืองพลังงานมาก วิทยานิพนธ์นี้จึงได้เสนองจรคุณและหารสัญญาณกระแสที่สามารถรับอินพุตได้ทั้งสี่ควอดแรนต์ซึ่งสามารถนำมาเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

ในบทนี้จึงจะอธิบายถึงวิธีการได้มาของวงจรมีหารสัญญาณสี่ควอดแรนต์ และวงจรมีทำหน้าที่ได้ทั้งการคุณและหารสัญญาณสี่ควอดแรนต์ ที่ประยุกต์ใช้วงจรมีขยายสัญญาณกระแสที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยการอธิบายการออกแบบวงจรมีดังกล่าว เริ่มด้วยการนำวงจรมีขยายสัญญาณกระแสที่เสนอไว้ มาดัดแปลงและพัฒนาต่อเพื่อให้ได้วงจรมีที่สามารถทำหน้าที่เป็นวงจรมีหารสัญญาณ วงจรมีคุณและหารสัญญาณที่สามารถรับอินพุตได้ทั้งสี่ควอดแรนต์ และได้นำวงจรมีที่ได้ออกแบบไว้เหล่านี้ไปจำลองการทำงานเพื่อยืนยันการวิเคราะห์ในทางทฤษฎี โดยได้ยืนยันผ่านผลการจำลองการทำงานของวงจรมีในลักษณะต่างๆ โดยใช้โปรแกรม PSPICE ประกอบไว้ด้วย

5.1 การออกแบบวงจรมี

5.1.1 วงจรมีหารสัญญาณ

วงจรมีหารสัญญาณที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ถูกออกแบบและพัฒนามาจากวงจรมีขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 2 ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำวงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 2 มาดัดแปลงและพัฒนาเพื่อให้ได้วงจรที่สามารถทำหน้าที่เป็นวงจรหารสัญญาณที่รับสัญญาณอินพุตได้ทั้งสี่ควอดแดรนต์นั้น เริ่มต้นจากการพิจารณาสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุต i_A หรือ i_B และกระแสอินพุต i_{in} ของวงจรขยายสัญญาณกระแสในรูปที่ 3.6 ที่ให้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดังกล่าวเป็นตามสมการที่ (3.11) และ (3.12) กล่าวคือ

$$i_A = \frac{i_{in}}{1 - \frac{I_{0B}}{I_{0A}}} \quad (5.1)$$

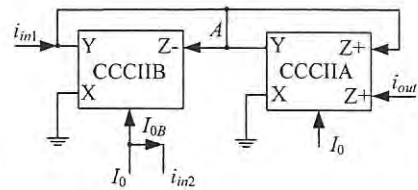
และ

$$i_B = \frac{i_{in}}{1 - \frac{I_{0A}}{I_{0B}}} \quad (5.2)$$

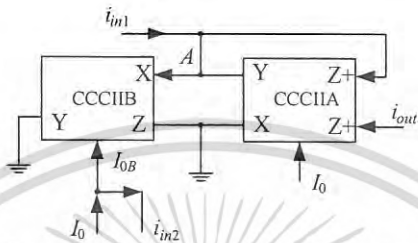
พิจารณาสมการที่ (5.1) โดยการกำหนดตัวแปรใหม่เพื่อความสะดวกในการออกแบบวงจรซึ่งได้กำหนดให้ i_{in} เป็นกระแสอินพุตและเขียนแทนด้วย i_{in1} ในขณะที่ i_A เป็นกระแสเอาต์พุตและเขียนแทนด้วย i_{out1} นอกจากนี้ยังได้กำหนดให้กระแส $I_{0A} = I_0$ และ $I_{0B} = I_0 - i_{in2}$ ด้วย เมื่อนำค่าตัวแปรกระแสต่างๆ ที่กำหนดขึ้นใหม่นี้ แทนลงในสมการที่ (5.1) ทำให้สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุต i_{out1} กับกระแสอินพุต i_{in1} และ i_{in2} ได้ดังนี้

$$i_{out1} = I_0 \frac{i_{in1}}{i_{in2}} \quad (5.3)$$

สมการที่ (5.3) นี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ากระแส i_{out1} ให้ความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับผลจากการหารของสัญญาณกระแส i_{in1} และ i_{in2} ที่สามารถปรับอัตราการทำงานได้จากค่ากระแส I_0 และเป็นที่น่าสังเกตว่าค่ากระแสอินพุต i_{in1} และ i_{in2} สามารถเป็นได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ เพียงแต่ค่ากระแสอินพุต i_{in2} ต้องสอดคล้องตามเงื่อนไขที่ว่า $|i_{in2}| \leq I_0$ เพื่อให้วงจร CCCII ทำงานได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นการออกแบบให้วงจรสอดคล้องตามเงื่อนไขการได้มาของสมการที่ (5.3) จึงทำให้ได้วงจรที่สามารถทำหน้าที่เป็นวงจรหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ได้ ซึ่งวงจรที่สอดคล้องตามเงื่อนไขดังกล่าวนี้แสดงดังในรูปที่ 5.1



(ก) วงจรที่สร้างจากวงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 2 วงจรที่ 1



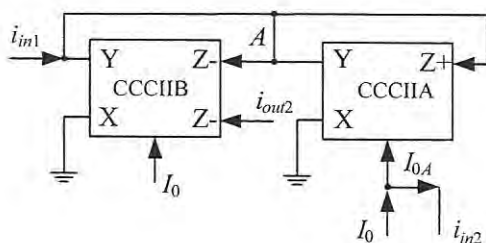
(ข) วงจรที่สร้างจากวงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 2 วงจรที่ 2
รูปที่ 5.1 วงจรหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ที่กระแสเอาต์พุตเป็น i_{out1}

การได้มาของวงจรรหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์สามารถทำได้อีกลักษณะหนึ่ง ซึ่งมีวิธีการที่คล้ายกับการได้มาของวงจรในรูปที่ 5.1 ที่ได้กล่าวไว้แล้ว ซึ่งเป็นการนำความสัมพันธ์ของค่ากระแส i_B มาประยุกต์ใช้เป็นค่ากระแสเอาต์พุตแทนค่ากระแส i_A นั่นเอง

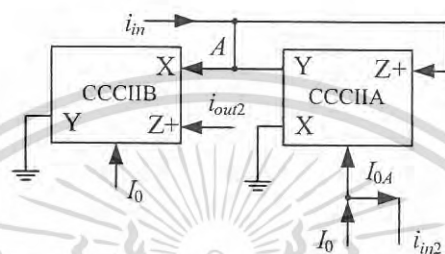
ในกรณีที่นำค่ากระแส i_B มาใช้เป็นค่ากระแสเอาต์พุตนี้ได้กำหนดค่าตัวแปรกระแสต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบเป็นดังต่อไปนี้ $i_{in} = i_{in1}$ โดย $i_B = i_{out2}$ ในขณะที่ $I_{0A} = I_0 - i_{in2}$ และ $I_{0B} = I_0$ ด้วย เมื่อนำค่าตัวแปรกระแสต่างๆ ที่กำหนดขึ้นใหม่เหล่านี้ แทนลงในสมการที่ (5.2) ทำให้สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุต i_{out2} กับกระแสอินพุต i_{in1} และ i_{in2} ได้ดังนี้

$$i_{out2} = I_0 \frac{i_{in1}}{i_{in2}} \quad (5.4)$$

สมการที่ (5.4) นี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนเช่นกันว่า สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวงจรรหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ได้ โดยวงจรที่สามารถทำได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดในสมการที่ (5.4) แสดงดังรูปที่ 5.2



(ก) วงจรที่สร้างจากวงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 2 วงจรที่ 1



(ข) วงจรที่สร้างจากวงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 2 วงจรที่ 2 รูปที่ 5.2 วงจรหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ที่กระแสเอาต์พุตเป็น i_{out2}

วงจรหารสัญญาณที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 นอกจากจะสามารถรับกระแสอินพุตได้ทั้งสี่ควอดแดรนต์แล้วยังมีข้อดีเพิ่มเติมคือ วงจรมีเสถียรภาพต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ดี ใช้เพียงอุปกรณ์แอคทีฟประเภท CCCII เพียงสองชุดและสามารถปรับขนาดของสัญญาณเอาต์พุตได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วย

5.1.2 วงจรคูณและหารสัญญาณ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึง การออกแบบวงจรที่ทำหน้าที่ได้ทั้งการคูณและการหารสัญญาณที่สามารถรับกระแสอินพุตได้ทั้งสี่ควอดแดรนต์ โดยวงจรมีเสถียรภาพต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ดี วงจรหารสัญญาณที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ดังนั้นจากตัวอย่างการเชื่อมต่อของวงจรหารสัญญาณที่มีสี่รูปแบบจึงทำให้ได้วงจรคูณและหารสัญญาณที่มีลักษณะการเชื่อมต่อที่แตกต่างกันสี่รูปแบบเช่นกัน ตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5 ตามลำดับ โดยทั้งสองวงจรมีหลักในการออกแบบที่คล้ายกันดังนั้นการอธิบายหลักการของการออกแบบวงจรเหล่านี้จึงขอกกล่าวถึงอย่างละเอียดเพียงวงจรเดียวเท่านั้น ซึ่งในที่นี้จะอธิบายการได้มาของวงจรคูณและหารสัญญาณที่แสดงในรูปที่ 5.4 (ก) ส่วนการวิเคราะห์ทั้งวงจรที่เหลืออีกสามวงจรมัน สามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน

สำหรับการออกแบบวงจรคูณและหารสัญญาณของวงจรในรูปที่ 5.4 (ก) มีรายละเอียดเป็นดังนี้ เริ่มต้นจากการพิจารณาค่าแรงดันที่จุด A ของรูปที่ 5.4(ก) ซึ่งค่าของแรงดันที่จุด A ของวงจรในรูปนี้

สามารถหาค่าได้จาก การนำคุณสมบัติของ CCCII มาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการวิเคราะห์วงจรพื้นฐานทั่วไป ทำให้ได้ค่าแรงดันที่จุด A หรือ v_A มีค่าเป็นดังนี้

$$v_A = -\frac{i_{in1} V_T}{i_{in2} 2} \quad (5.5)$$

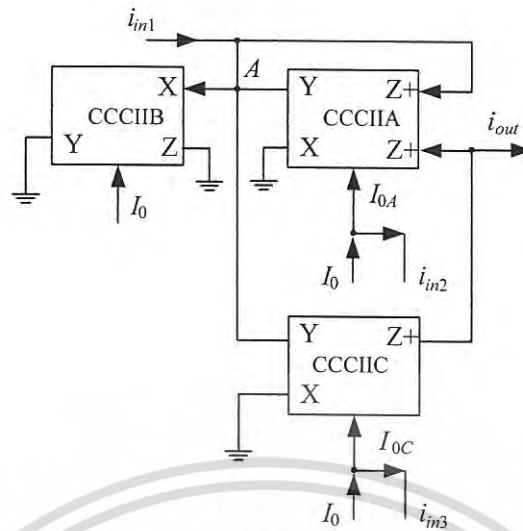
จากนั้นทำการแปลงค่าแรงดัน v_A นี้เป็นค่ากระแส โดยนำ CCCIIC มาประยุกต์ใช้อีก 1 ชุด ซึ่งมีลักษณะการเชื่อมต่อและการป้อนกระแสไบแอสเป็นดังรูปที่ 5.4(ก) ซึ่งจากการเชื่อมต่อลักษณะนี้ จะได้ค่ากระแสที่พอร์ต Z ของ CCCIIC มีค่าเป็นดังนี้

$$i_{ZC} = i_{XC} = \frac{-v_A}{R_{XC}} = \frac{i_{in1} I_0}{\underbrace{i_{in2}}_1} + \frac{i_{in1} i_{in3}}{\underbrace{i_{in2}}_2} \quad (5.6)$$

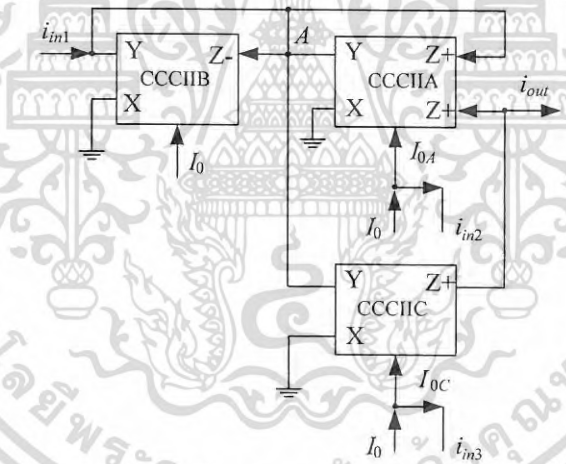
สมการที่ (5.6) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าค่ากระแส v_A ประกอบด้วย 2 เทอม แต่เทอมที่ต้องการนั้นเป็นเฉพาะเทอมที่ 2 เท่านั้น ซึ่งหากสังเกตเทอมที่ 1 อีกครั้งจะพบว่า มีค่าเท่ากับค่าของกระแสเอาต์พุตของวงจรหารสัญญาณที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่ากระแสเอาต์พุตเป็นเทอมที่ 2 เพียงเทอมเดียว ดังนั้นจึงจัดสมการกระแสเอาต์พุตใหม่ได้เป็น

$$i_{out} = i_{ZC} - i_{out1} = \frac{i_{in1} i_{in3}}{i_{in2}} \quad (5.7)$$

ซึ่งเพื่อให้ได้สมการที่ (5.7) นี้ วงจรจึงมีการเชื่อมต่อดังแสดงในรูปที่ 5.4(ก) ส่วนรูปวงจรอื่นๆ ก็สามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน



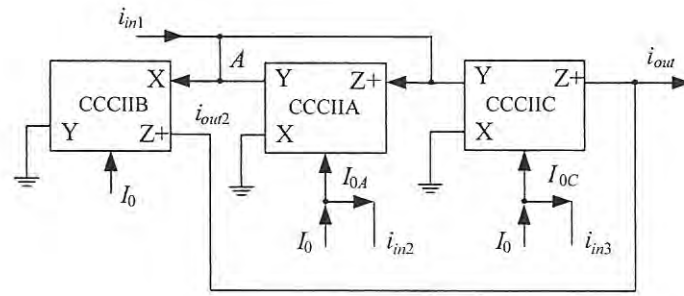
(ก) วงจรที่สร้างจากวงจรขยายกระแสรูปแบบที่ 2 วงจรที่ 1



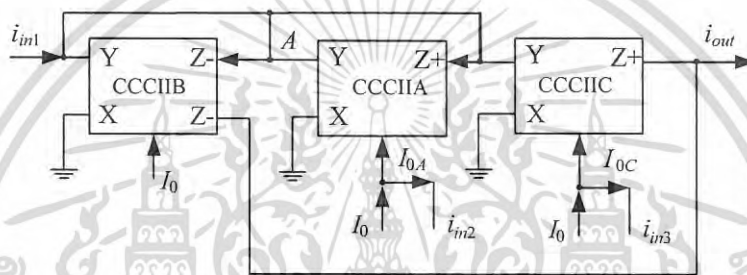
(ข) วงจรที่สร้างจากวงจรขยายกระแสรูปแบบที่ 2 วงจรที่ 2

รูปที่ 5.3 วงจรคุณและหารสัญญาณสี่ควอดเตรนท์ที่ประยุกต์มาจากวงจรหารในรูปที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) วงจรที่สร้างจากวงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 2 วงจรที่ 1



(ข) วงจรที่สร้างจากวงจรขยายสัญญาณกระแสรูปแบบที่ 2 วงจรที่ 2

รูปที่ 5.4 วงจรคูณและหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ที่ประยุกต์มาจากวงจรหารในรูปที่ 5.2

5.2 ผลการจำลองการทำงาน

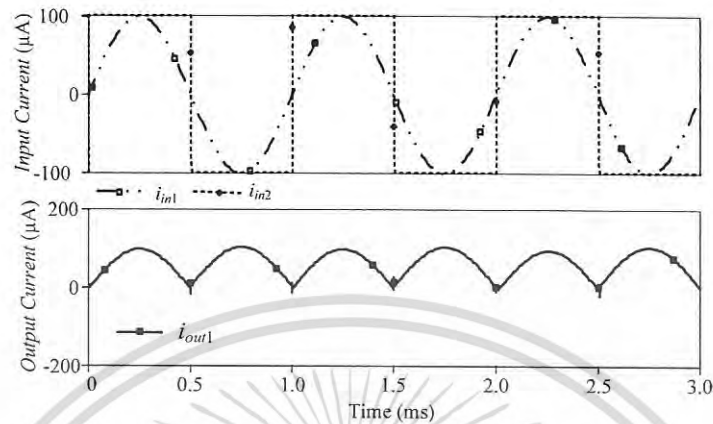
เพื่อยืนยันการวิเคราะห์ทางทฤษฎี รวมถึงตรวจสอบการทำงานและคุณลักษณะของวงจรหารสัญญาณ วงจรคูณและหารสัญญาณ ในรูปแบบกระแสที่ได้เสนอไว้ ได้นำโปรแกรม Pspice มาใช้ในการจำลองการทำงาน โดยในการจำลองการทำงานนี้ นำ CCCII ที่ประกอบขึ้นจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์มาใช้ และนำทรานซิสเตอร์เบอร์ PR100N มาใช้เป็นชนิด PNP และเบอร์ NR100N แทนชนิด NPN และผลการจำลองการทำงานทั้งหมดกระทำภายใต้ไฟเลี้ยงวงจรค่า $\pm 2\text{V}$ สำหรับการจำลองการทำงานของแต่ละวงจรมีรายละเอียดเป็นดังต่อไปนี้

5.2.1 ผลการจำลองของวงจรหารสัญญาณ

เพื่อแสดงตัวอย่างการจำลองการทำงานในฟังก์ชันของการหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ ได้นำวงจรหารสัญญาณที่แสดงในรูปที่ 5.1(ก) มาจำลองการทำงาน โดยกำหนดค่ากระแสไบอัส $I_0 = 100\mu\text{A}$ และให้สัญญาณกระแสอินพุต i_{in1} เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ในขณะที่สัญญาณกระแสอินพุต i_{in2} เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม โดยทั้งสองสัญญาณมีค่าความถี่เท่ากับ 1 kHz และขนาดของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

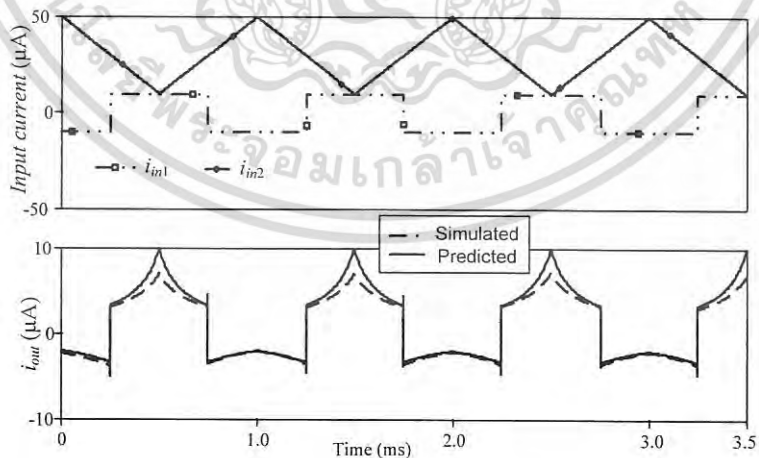
สัญญาณเท่ากับ $100\mu\text{A}$ ได้ผลการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 5.5 ซึ่งสามารถจินตนาการผลการจำลองการทำงานในกรณีนี้ได้เทียบเท่ากับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น (full wave rectifier)



รูปที่ 5.5 ผลการจำลองการทำงานของวงจรหารสัญญาณในรูปที่ 5.1(ก)

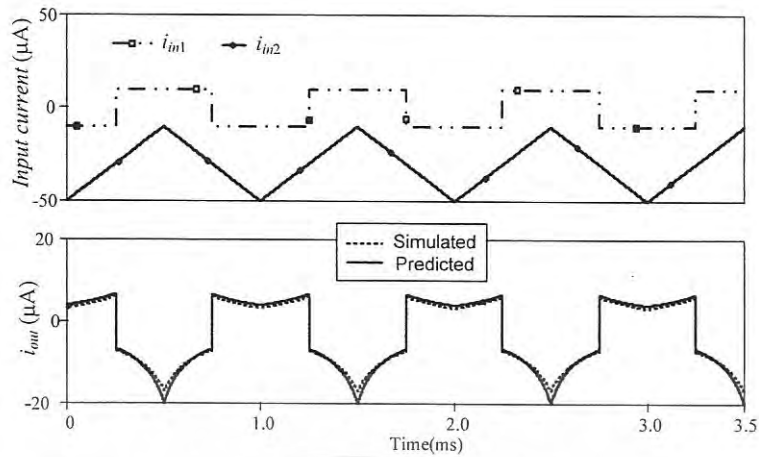
5.2.2 ผลการจำลองของวงจรคูณ/หารสัญญาณ

ในวิทยานิพนธ์นี้ยังได้นำวงจรที่สามารถทำหน้าที่ได้ทั้งการคูณ/หารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ ที่แสดงในรูปที่ 5.3(ข) มาจำลองการทำงาน โดยได้ทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่ว่ากระแสอินพุต i_{in1} เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ 1kHz ขนาด $10\mu\text{A}$ ส่วนกระแสอินพุต i_{in2} เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมความถี่ 1 kHz กระแสอินพุต i_{in3} เป็นค่ากระแสที่คงที่ และค่ากระแสไบอัส $I_0 = 50\mu\text{A}$ ได้ผลการจำลองการทำงานแสดงดังในรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7



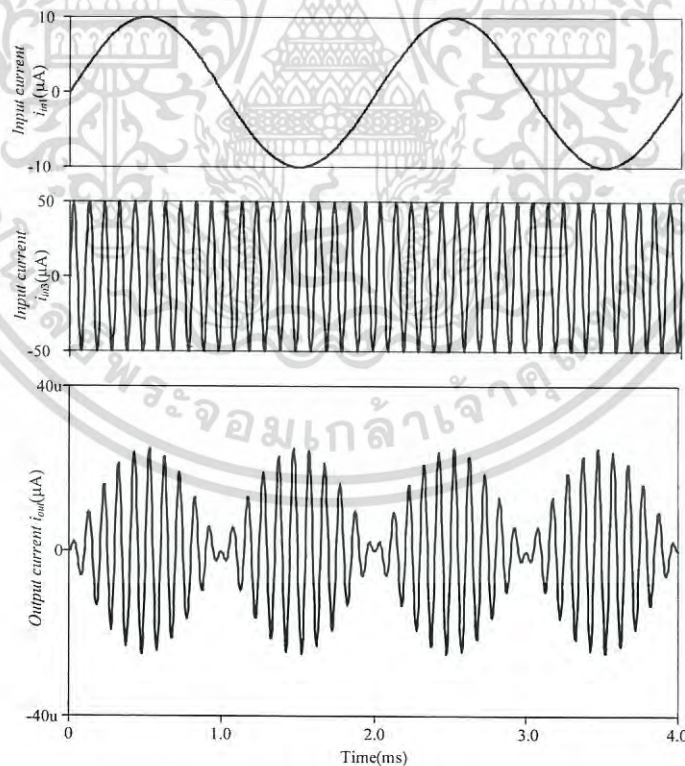
รูปที่ 5.6 ผลการจำลองการทำงานของวงจรรูปที่ 5.3(ก) ในลักษณะการคูณ/หารสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 ผลการจำลองการทำงานของวงจรรูปที่ 5.3(ก) ในลักษณะการหารสัญญาณ

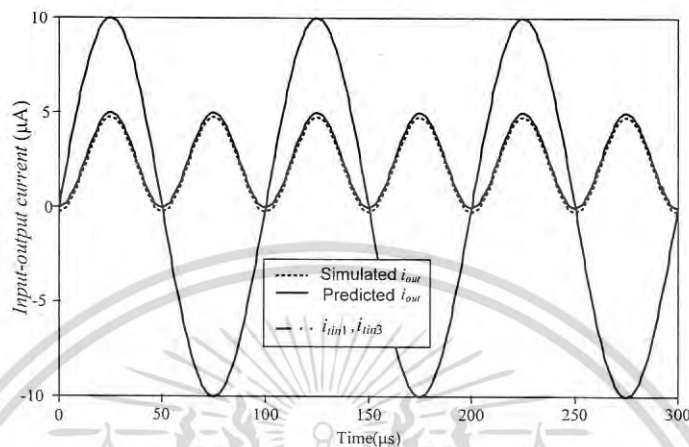
เพื่อทดสอบฟังก์ชันการคูณของวงจรที่นำเสนอ ได้กำหนดกระแสอินพุต $i_{in2} = 20 \mu\text{A}$ ส่วนกระแสอินพุต $i_{in1} = 10 \sin(2\pi 10^3 t) \mu\text{A}$ และ $i_{in3} = 50 \sin(2\pi 10^4 t) \mu\text{A}$ ลักษณะของสัญญาณกระแสอินพุตและสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} แสดงดังในรูปที่ 5.8 ซึ่งการจำลองการทำงานลักษณะนี้วงจรคูณสัญญาณทำหน้าที่เสมือนวงจรมอดูเลตสัญญาณ



รูปที่ 5.8 ผลการจำลองการทำงานของวงจรรูปที่ 5.3(ก) ในลักษณะการคูณสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกตัวอย่างสำหรับจำลองการทำงานของวงจรในลักษณะการคูณสัญญาณ เมื่อป้อนอินพุตเป็นคลื่นรูปไซน์ที่เหมือนกันสองอินพุตกล่าวคือ $i_{in1} = i_{in3} = 10 \sin(2\pi 10^4 t) \mu\text{A}$ ได้ผลดังรูปที่ 5.9 ซึ่งเป็นลักษณะเทียบเท่ากับวงจรยกกำลังสองของสัญญาณอาจจะมองเป็นวงจรทวีค่าความถี่ได้ด้วย



รูปที่ 5.9 ผลการจำลองการทำงานของวงจรรูปที่ 5.3(ก) ในลักษณะการคูณสัญญาณ

ผลการจำลองการทำงานทุกรูปที่แสดงไว้ในบทนี้ให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเป็นอย่างดี

5.3 สรุป

บทนี้ของวิทยานิพนธ์ ได้ทำการศึกษาเพื่อออกแบบและพัฒนาเป็นวงจรหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ วงจรคูณและหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ โดยเน้นหลักการที่ออกแบบโดยประยุกต์ใช้หลักการของวงจรมัลติพลายสัญญาณกระแสที่นำเสนอในบทที่ 3 เป็นหลัก และเน้นการใช้อุปกรณ์แอคทีฟประเภท CCCII และได้ยืนยันผลการวิเคราะห์โดยนำวงจรที่ออกแบบได้มาจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Pspice เพื่อตรวจสอบสมบัติพื้นฐานของวงจรที่นำเสนอประกอบซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์เป็นอย่างดี

บทที่ 6

บทสรุป

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาเพื่อออกแบบและพัฒนางจรขยายสัญญาณกระแสที่นำความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่เกี่ยวข้องกับตัวต้านทานลงกราวด์จำนวนสองตัวมาประยุกต์ใช้ แล้วแทนตัวต้านทานลงกราวด์เหล่านั้นด้วยตัวต้านทานที่สร้างด้วย CCCII ทำให้ได้วงจรขยายสัญญาณกระแสที่ใช้ CCCII และนำวงจรขยายกระแสนี้ไปประยุกต์ใช้ต่อเป็นวงจรประมวลผลสัญญาณในแบบของวงจรถอดรากที่สอง วงจรยกกำลังสอง วงจรหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ วงจรคูณและหารสัญญาณสี่ควอดแดรนต์ จากนั้นได้นำวงจรที่ออกแบบได้มาจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เพื่อตรวจสอบสมบัติพื้นฐานของวงจรที่นำเสนอ และยังได้แสดงถึงการนำวงจรถอดรากที่สอง และวงจรรยกกำลังสอง ไปประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเป็นวงจรรวมเวกเตอร์ประกอบ วิทยานิพนธ์นี้ ได้จัดทำขึ้นโดยแบ่งเนื้อหาที่สำคัญแยกออกเป็นบทๆ ดังนี้

บทที่ 1 ได้กล่าวถึงเหตุจูงใจในการศึกษาวิจัยในเรื่องนี้ ส่วนบทที่ 2 ได้รวบรวมเกี่ยวกับเรื่องของวงจรสายพานกระแส ซึ่งใช้เป็นวงจรรพื้นฐานในการนำมาประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นหลัก โดยได้กล่าวถึงโครงสร้างวงจรที่สำคัญ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางไฟฟ้าที่พอร์ตต่างๆ การทำงานที่ไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรรภาคอินพุต การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่สัมพันธ์กันอยู่ในแบบไฮเปอร์โบลิกฟังก์ชัน การได้มาของค่าความต้านทานอินพุตที่พอร์ต Y และพอร์ต X รวมทั้งได้แสดงถึงวงจรมุมูล ความสัมพันธ์เชิงเมตริกซ์ และสัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแสทั้งในกรณีที่มีวงจรมีการทำงานแบบเป็นอุดมคติและแบบไม่เป็นอุดมคติอันเป็นพื้นฐานที่สำคัญที่นำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและพัฒนางจรในวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 ได้กล่าวถึงแนวความคิดและหลักการเบื้องต้นในการออกแบบวงจขยายสัญญาณกระแสในลักษณะต่างๆ ไว้เป็นลำดับแรก จากนั้นเป็นการเสนอแนวทางในการพัฒนาและปรับแต่งวงจขยายสัญญาณกระแสให้มีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน แล้วตามด้วยการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจขยายสัญญาณกระแสรูปแบบต่างๆ ที่ได้ออกแบบไว้ และในตอนท้ายได้แสดงผลการทดสอบการทำงานของวงจขยายสัญญาณกระแสประกอบไว้ด้วย โดยวงจขยายสัญญาณกระแสลักษณะต่างๆ ที่กล่าวไว้ในบทนี้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบและพัฒนาต่อเพื่อให้วงจรสามารถทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณในรูปแบบต่างๆ ตามที่ต้องการได้

บทที่ 4 และบทที่ 5 เป็นบทที่ได้นำวงจขยายสัญญาณกระแสมาออกแบบและพัฒนาต่อเป็นวงจรรยกกำลังสอง วงจรถอดรากที่สอง วงจรคูณ/หารสัญญาณที่สามารถรองรับสัญญาณอินพุตได้ทั้งสี่ควอดแดรนต์ ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของสองบทนี้คือ เพื่อนำเสนอเทคนิคหรือวิธีการออกแบบและพัฒนางจรประมวลผลสัญญาณที่สามารถประมวลผลสัญญาณได้ในโหมดกระแสและใช้อุปกรณ์ประเภทแอกทีฟเพียงอย่างเดียว โดยไม่ต้องการอุปกรณ์พาสซีฟใดๆมาเชื่อมต่อเพิ่มเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายนอก ส่งผลให้วงจรที่ออกแบบได้มีโครงสร้างที่ง่าย ใช้อุปกรณ์น้อย สามารถปรับค่าอัตราขยายของแต่ละวงจรได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ และตัดเทอมของผลที่เกิดจากแรงดันเชิงอนุกรมออกจากฟังก์ชันการทำงานของแต่ละวงจรที่นำเสนอได้

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดในการทำงานของวงจรอันเนื่องมาจากความไม่เป็นอุดมคติของวงจรสายพานกระแส ที่มีอยู่เป็นธรรมชาตินั้นจะหลีกเลี่ยงเสียมิได้ และเนื่องจากวงจรสายพานกระแสมีการทำงานอยู่ในคลาสิกเอบี ดังนั้นจึงเป็นธรรมดาที่วงจรขยายกระแสที่สร้างจากวงจรสายพานกระแสย่อมจะสามารถทำงานได้ดีในช่วงที่กระแสอินพุตของวงจรมีค่าขึ้นกับกระแสไบอัสของวงจร

สำหรับความคลาดเคลื่อนของค่าอัตราขยายกระแสของวงจรขยายกระแสที่นำเสนอ เนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของวงจร วงจรขยายกระแสที่สร้างจากวงจรสายพานกระแส มีค่าความคลาดเคลื่อนในการส่งผ่านกระแสจากพอร์ต X ไปยังพอร์ต Z เป็นสาเหตุสำคัญสำหรับความคลาดเคลื่อน ซึ่งสามารถทำให้ลดน้อยลงไปได้ โดยการเลือกใช้ทรานซิสเตอร์ที่มีค่าอัตราขยายไฟตรงที่มีค่าสูงๆ และในกรณีที่น่าทรานซิสเตอร์แบบแยกเป็นตัว (discrete) มาใช้ควรเลือกคู่ของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP ที่มีคุณสมบัติค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ใกล้เคียงกัน



เอกสารอ้างอิง

- [1] Toumazou C., Lidgey F.J., Haigh D.G. *Analogue IC design: the current-mode approach*. London: Peter Peregrinus, 1990.
- [2] Fabre A., Saaid O., Wiest F. and Boucheron C. "High frequency applications based on a new current controlled conveyor." *IEEE Trans. on Cir. & Syst. I*, vol.43, 1996. pp. 82-91
- [3] Kiranon W. and Pawarangkoon P. "Floating inductance simulation based on current conveyors." *Electron Lett.*, vol.33, 1997. Pp. 1748-1749
- [4] Abuelma'atti MT. and Tasadduq NA. "Electronically tunable capacitance multiplier and frequency-dependent negative-resistance simulator using the current-controlled current conveyor." *Microelectron.*, vol.30, 1999. pp. 869-873
- [5] Abuelma'atti MT. "A novel analogue current-mode current-controlled frequency divider/multiplier." *Int. J. Electron.*, vol.89, 2002. pp. 455-65
- [6] Minaei S. and Clicekoglu O. "A resistorless realization of the first-order all-pass filter." *Int. J. Electron.*, vol.93, 2006. pp. 177-183
- [7] Sanchez-Sinencio E., Ramirez-Angulo J., Linares-Barranco B. and Rodriguez-Vazquez A. "Operational transconductance amplifier-based nonlinear function syntheses." *IEEE J. Solid-State Circuits.*, vol.24, 1989. pp. 1576-1586
- [8] Wang Z. "Novel pseudo RMS current converter for sinusoidal signals using a CMOS precision current rectifier." *IEEE Trans Instrum. Meas.*, vol.39, 1990. pp. 670-671
- [9] Liu Sl. "Square-rooting and vector summation circuits using current conveyors." *IEE Proc. Circuits Device Syst.*, vol. 142, 1995. pp. 223-226
- [10] Kiranon W. and Wardkien P. "A novel FM demodulation scheme." *IEEE Trans Consu.Electron.*, vol. 41, 1995. pp. 1103-1107
- [11] Sangpisit W., Wardkien P., Kiranon W. and Loescharataramdee C. "A novel derivative envelope detector." *IEEE Trans Consu.Electron.*, vol. 44, 1998. pp. 1103-1107
- [12] Minaei S. and Clicekoglu O. "A resistorless realization of the first-order all-pass Filter." *Int. J. Electron.*, vol.93, 2006. pp. 177-183
- [13] Abuelma'atti MTAL-Qahtani MA. "A new current-controlled multiphase sinusoidal oscillator using translinear current conveyors." *IEEE Trans. Circuits Syst. II.*,

- vol.45, 1998. pp. 881-885
- [14] Sedef H., Sagbas M. and C. Acar, "Current-controllable fully-integrated inductor simulator using CCCIs," *Int. J. Electron.*, vol.95, 2008. pp.425-429
- [15] Toumazou C., Lidgey F. J. and Haigh D. G. *Analog IC Design: The Current Mode Approach*. London : Peter Peregrinus. 1990.
- [16] Sedra A. S. and Smith K. C. "A second-generation current conveyor and its applications." *IEEE Trans. Cir. & Syst.*, Vol. 17, 1970. pp. 132-134
- [17] Sedra A., Roberts G. and Gohh F. "The current conveyor: history, progress and new results." *Proc. IEE Part G.*, vol. 137, 1990. pp. 78-87
- [18] Wilson B. "Recent developments in current conveyors and current mode circuits." *Proc. IEE Part G.*, vol. 137, 1990. pp. 63-77
- [19] Fabre A. "Translinear current conveyors implementation." *Int. J. Electron.*, vol. 59, 1985. pp. 619-623
- [20] Singh V. "An implementation of CCI-current conveyor, with application." *IEEE Trans. Cir. & Syst.*, vol. 36, 1989. pp. 1250-1251
- [21] Wilson B. "High-performance current-conveyor implementation." *Electron. Lett.*, vol. 20, 1984. pp. 990-991
- [22] Fabre A., Saaid O., Wiest F. and Boucheron C. "High frequency applications based on a new current controlled conveyor." *IEEE Trans. Cir. & Syst. I*, vol. 43, 1996. pp. 82-91
- [23] Fabre A., Saaid O. and Barthelemy H. "On the frequency limitations of the circuits based on second generation current conveyors." *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, Kluwer Academic Publishers, vol. 7, 1995. pp. 113-129
- [24] Kaewdang K., Surakamponorn W. and Fujii N., "A design of CMOS tunable current amplifiers", *ISCIT*, 2004. pp.519-520
- [25] Fabre A. and Mimeche N., "Class A/AB second generation current conveyor with controlled current gain," *Electronic Letter*, vol.30, 1990. pp.1267-1269
- [26] Duncan R.A., Chan K.M. and A.S. Sedra, "Designs of a wideband current amplifier and a current conveyor," *IEEE Trans. Circ&Syst.*, Vol.41, no.4, 1994. pp. 272-280
- [27] Abuelma'atti M.T. and Al-Qahtani M.A. "On the realization of the current

- controlled current-mode amplifier using the current controlled conveyor," *Int.J. Electron.*, vol.86, 1999. pp.1333-1340
- [28] Sen TK., Ray A. and Ray BN. "An arbitrary power law device based on operational transconductance amplifiers." *IEEE Trans Instrum. Meas.*, vol. 42, 1993. pp. 948-952
- [29] Kiranon W., Loescharataramdee W., Petchakit W. and Sangpisit W. "An arbitrary power law device based on integrators." *IEEE Trans Instrum. Meas.*, vol. 49, 2000. pp. 1176-1182
- [30] Filanovsky IM. and Baltès HP. "Simple CMOS analog square-rooting and squaring circuit." *IEEE Trans. Circuits Syst-I*, vol.39, 1992. pp. 312-315
- [31] Dejhan K. and Netbut C. "New simple square-rooting circuits based on translinear current conveyors." *Int. J. Electron.*, vol. 94, 2007. pp. 707-723
- [32] วิภา แสงพิลิตธี, อนุรี หล่อสวัสดิ์ศิริ, ปราโมทย์ วาดเขียน และวิวัฒน์ กิรานนท์ "วงจรถอดกรณีสอง และวงจรวกเวคเตอร์ โดยใช้วงจรสายพานกระแสร่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส." เอกสารรวมเล่มการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20, พ.ศ. 2540.
- [33] Kaewdang K., Fongsamut C., and Surakampontorn W. "A wide-band current-mode OTA-based analog multiplier-divider," *IEEE Proc. Int. Symp. on Cir. & Syst.*, 2003. pp. 349-352
- [34] Bajaj N. and Govil J. "Realization of a Differential Multiplier-Divider based on Current Feedback Amplifiers," *ICSE2006 Proc. 2006*, 2006. pp.708-712
- [35] Abuelma'atti M.T. and Al-Qahtani M.A. "A current-mode current controlled current conveyor based analogue multiplier/divider," *Int. J. Electron.*, vol. 85, 1998. pp.71-77
- [36] Pawarangkoon P., Intaudom V. and Kiranon W. "Four-quadrant current-mode divider based on current conveyors," *Proc. of TENCON 2004*, 2004. pp.380-383

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางวิจิตรา เพ็ชรกิจ
ภูมิลำเนาเดิม	นครศรีธรรมราช
อาชีพ	อาจารย์ประจำมหาวิทยาลัย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 – ปัจจุบัน
สถานที่ทำงาน	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาโท (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542 ระดับปริญญาตรี (วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต : วศ.บ.) สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2536
งานวิจัยที่สนใจ	การนำความรู้ด้านการประมวลสัญญาณทั้งด้านอนาล็อกและดิจิทัลไป ควบคุมระบบให้สามารถทำงานได้แบบอัตโนมัติ
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	<p>[1] Petchakit W., Lorsawatsiri A., Kiranon W., Wongtaychatham C., Wardkein P. “Current-mode squaring, square-rooting and vector summation circuits” AEU- International Journal of Electronics and Communications, vol. 64, no. 5, May. 2010. pp. 443-449.</p> <p>[2] Petchakit W., Kiranon W., Wardkein P., Petchakit S. “Design of current amplifier, divider and multiplier/divider based on current division technique” The 25th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2010), Pattaya, Thailand, July, 2010. pp. 379-382.</p> <p>[3] Petchakit W., Kiranon W., Wardkein P., Petchakit S. “A current-mode CCCII-based analog multiplier/divider”, The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Chiang Mai, Thailand, May 2010, pp.250-253.</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้