

วงจรมายเชิงลอการิทึม และ แอนติลอการิทึม
ที่มีการทำงานในรูปกระแส

CURRENT-MODE LOGARITHMIC
AND ANTI-LOGARITHMIC AMPLIFIERS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-528-8

วงจรรขยายเชิงลอคการิชมิก และ แอนติลอคการิชมิก
ที่มีการทำงานในรูปกระแส

CURRENT-MODE LOGARITHMIC
AND ANTI-LOGARITHMIC AMPLIFIERS



ภัทรชัย อูปริปุทธิกุล

PATTARACHAI OUPPARIPUTTIKUL

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 41514
วัน, เดือน, ปี 9 ก.พ. 2545

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

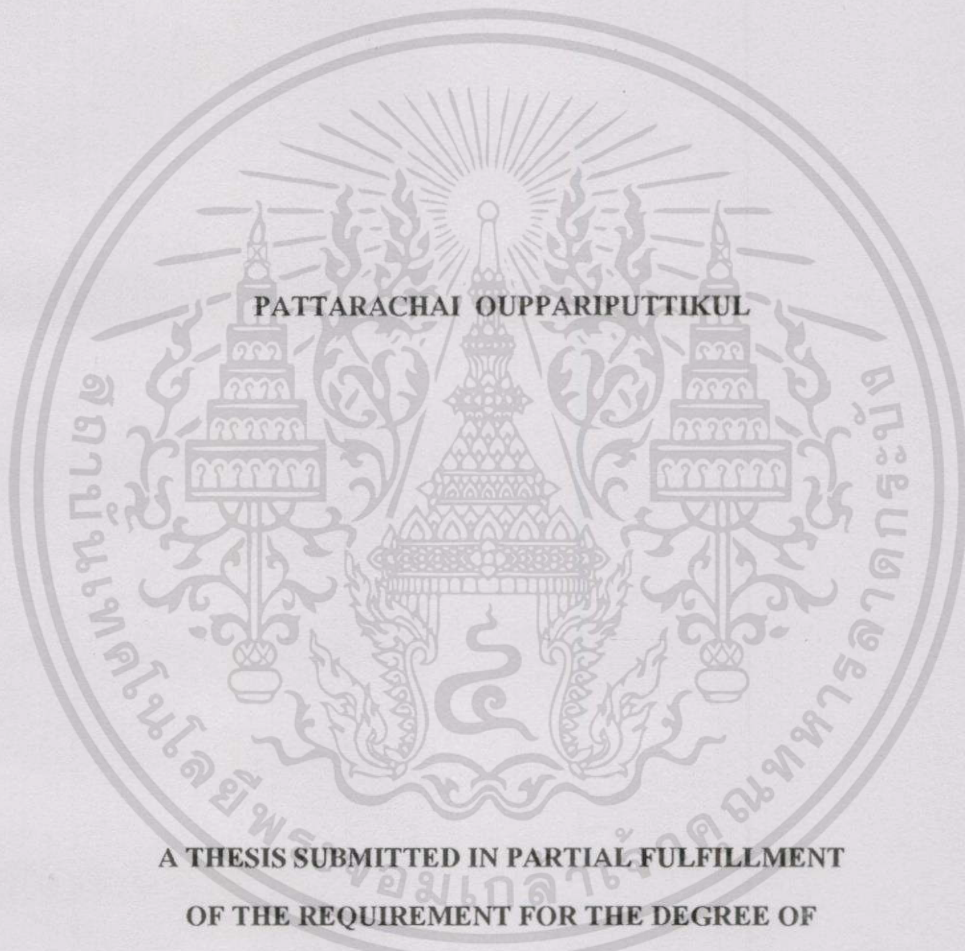
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2544

ISBN 974-648-528-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**CURRENT-MODE LOGARITHMIC
AND ANTI-LOGARITHMIC AMPLIFIERS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2001

ISBN 974-648-528-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วงจรขยายเชิงลอกการิทึมิก และแอนติลอกการิทึมิกที่มีการทำงานในรูปกระแส
CURRENT-MODE LOGARITHMIC AND ANTI-LOGARITHMIC
AMPLIFIERS

ชื่อนักศึกษา นายภัทรชัย อูปริพุทธิกุล
รหัสประจำตัว 42061064
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.เกียรติศักดิ์ คมวัชระ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วันชัย ธีรวิภา	
รศ.จิรวัดน์ ปานกลาง	
อาจารย์วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์	
ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ	
ผศ.ดร.เกียรติศักดิ์ คมวัชระ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 25 ตุลาคม 2544 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)



วันที่..... ๒1เดือน..... ๕.๑๐.๒๕๔๔ พ.ศ. ๒๕๔๔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรรบายเชิงลอกการริวมิก และแอนติลอกการริวมิกที่มีการทำงานในรูปกระแส
นักศึกษา	นายภัทรชัย อุปรีพุทธิกุล
รหัสประจำตัว	42061064
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. เกียรติศักดิ์ คมวัชระ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอวงจรรบายเชิงลอกการริวมิกและแอนติลอกการริวมิก ที่มีการทำงานในรูปของกระแสซึ่งวงจรดังกล่าวออกแบบโดยอาศัยพื้นฐานของวงจรรทรานส์ลีนีเยร์ที่สร้างจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ โดยให้สัญญาณเอาต์พุตออกมาในรูปของกระแสที่เป็นฟังก์ชันลอกการริวมิกและฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลกับกระแสอินพุตตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการชดเชยผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในวงจรทั้งสอง และตัวอย่างการประยุกต์นำวงจรทั้งสองไปสังเคราะห์เป็นวงจรอื่นด้วย ในการทดสอบถึงสมรรถนะของวงจรได้ใช้โปรแกรม PSPICE ทำการเขียนแบบเพื่อนำผลดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับทฤษฎีที่ได้นำเสนอ ซึ่งผลที่ได้มีความใกล้เคียงและเป็นไปตามหลักการที่นำเสนอ

Thesis Title	Current-Mode Logarithmic and Anti-Logarithmic Amplifiers
Student	Mr. Pattarachai Ouppariputtikul
Student ID.	42061064
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2001
Thesis Advisor	Assist.Prof.Dr.Kiattisak Kumwachara

ABSTRACT

In this thesis, the circuit designing techniques for realizing current-mode logarithmic and anti-logarithmic amplifiers based on a translinear loop implemented from bipolar transistors are described. The proposed circuits have gave output signal in logarithm function and anti-logarithm function to their input signals. Temperature compensation methods and application of both circuits are described too. PSPICE simulation results are also included to demonstrate the characteristics of the proposed techniques.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีอาจสำเร็จได้ หากไม่ได้รับความรู้ และ ความช่วยเหลือเป็นอย่างยิ่งจาก อาจารย์ที่ปรึกษา ศศ.ดร. เกียรติศักดิ์ คมวัชระ ซึ่งท่านได้ให้การอบรมและสั่งสอนมาตลอด จึงขอกราบ ขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ นอกจากนี้ขอกราบขอบพระคุณถึงคุณแม่สุภัทรา-คุณพ่อชูชาติ อุปริพุทธิกุล ที่ มอบความรักและกำลังใจ อีกทั้งครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้มา ขอขอบคุณ พี่ๆ และ เพื่อนๆ ที่ให้คำชี้แนะ และความช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา

ภัทรชัย อุปริพุทธิกุล



III

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	2
1.3 หลักการของวิทยานิพนธ์	2
1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์	2
บทที่ 2 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์	3
2.1 กล่าวนำ	3
2.2 ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์	3
2.2.1 วงจรสมมูลและแบบจำลองของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์	3
2.2.2 สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์	5
2.3 บทสรุป	9
บทที่ 3 หลักการพื้นฐานของวงจรทรานส์ลีนีเยอร์ และวงจรพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง	11
3.1 กล่าวนำ	11
3.2 หลักการพื้นฐานของวงจรทรานส์ลีนีเยอร์	11
3.3 วงจรพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง	14
3.3.1 วงจรสะท้อนกระแส	14
3.3.1.1 วงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐาน	15
3.3.1.2 วงจรสะท้อนกระแสแบบวิลสัน	16

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.2 วงจรขยายทรานส์คอนคัคแดนซ์.....	17
3.4 บทสรุป.....	25
บทที่ 4 การออกแบบวงจรขยายเชิงลอคการริวมิก และแอนติลอคการริวมิกที่มีการทำงานในรูปกระแส.....	26
4.1 กล่าวนำ.....	26
4.2 การออกแบบวงจรขยายเชิงลอคการริวมิกที่มีการทำงานในรูปกระแส.....	26
4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติการทำงานของวงจรขยายเชิงลอคการริวมิก.....	28
4.3.1 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานอินพุท.....	28
4.3.2 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานเอาต์พุท.....	30
4.3.3 การวิเคราะห์ค่าแหล่งจ่ายไฟคงที่.....	32
4.3.4 การวิเคราะห์ค่าช่วงปฏิบัติการของกระแสอินพุท.....	32
4.4 การชดเชยผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในวงจรขยายเชิงลอคการริวมิก โดยใช้วงจรขยายโอทีเอ.....	32
4.5 การชดเชยผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในวงจรขยายเชิงลอคการริวมิก โดยใช้วงจรที่มีเทอม V_T	34
4.6 การออกแบบวงจรขยายเชิงแอนติลอคการริวมิกที่มีการทำงานในรูปของกระแส.....	37
4.7 การวิเคราะห์คุณสมบัติการทำงานของวงจรขยายเชิงแอนติลอคการริวมิก.....	39
4.7.1 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานอินพุท.....	39
4.7.2 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานเอาต์พุท.....	41
4.7.3 การวิเคราะห์ค่าแหล่งจ่ายไฟคงที่.....	43
4.7.4 การวิเคราะห์ค่าช่วงปฏิบัติการของกระแสอินพุท.....	43
4.8 การชดเชยผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในวงจรขยายเชิงแอนติลอคการริวมิก โดยใช้วงจรที่มีเทอม V_T	43
4.9 บทสรุป.....	45

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการจำลองการทำงานของวงจรและตัวอย่างการใช้งาน.....	46
5.1 กล่าวนำ.....	46
5.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจร.....	46
5.2.1 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเชิงลอคการริวมิก.....	46
5.2.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเชิงลอคการริวมิก เมื่อมีการชดเชยผล ของอุนหภูมิด้วยวงจรขยายโอทีเอ.....	48
5.2.3 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเชิงลอคการริวมิก เมื่อมีการชดเชยผล ของอุนหภูมิด้วยวงจรที่มีเทอม V_T	50
5.2.4 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเชิงแอนคิลอการริวมิก.....	55
5.2.5 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเชิงแอนคิลอการริวมิก เมื่อมีการชด เชยผลของอุนหภูมิด้วยวงจรที่มีเทอม V_T	56
5.3 ตัวอย่างการใช้งาน.....	61
5.3.1 วงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง.....	61
5.3.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง.....	64
5.4 บทสรุป.....	66
บทที่ 6 บทสรุป.....	67
เอกสารอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	71
ประวัติผู้เขียน.....	84

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์.....	4
2.2 วงจรสมมูลของวงจรมิตเตอร์ร่วม.....	4
2.3 วงจรสมมูลของวงจรเบสร่วม.....	9
3.1 รูปแบบพื้นฐานของวงจรถานส์คอนดัคเตอร์ซึ่งประกอบด้วยไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์.....	12
3.2 วงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐาน.....	15
3.3 วงจรสะท้อนกระแสแบบวิลสัน.....	17
3.4 วงจรสมมูลทางอุดมคติของวงจรรขยายโอทีเอ.....	18
3.5 สัญลักษณ์ของวงจรรขยายโอทีเอ.....	18
3.6 วงจรรขยายความแตกต่าง.....	19
3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุตกับแรงดันอินพุตของวงจรรขยายความแตกต่าง.....	21
3.8 วงจรรขยายโอทีเอ.....	23
4.1 วงจรรขยายเชิงลอคการิธึมที่มีการทำงานในรูปของกระแส.....	26
4.2 วงจรเสมือนสำหรับวิเคราะห์ค่าความต้านทานอินพุตของวงจรรขยายเชิงลอคการิธึม.....	28
4.3 วงจรเสมือนสำหรับวิเคราะห์ค่าความต้านทานเอาต์พุตของวงจรรขยายเชิงลอคการิธึม.....	30
4.4ก การต่อวงจรรขยายโอทีเอ สังเคราะห์เป็นความต้านทานเสมือน R_{IC}	33
4.4ข การใช้วงจรรขยายโอทีเอ ต่อเป็นความต้านทานเสมือน R_{IC} เพื่อลดผลของอุณหภูมิ.....	33
4.5 วงจรคูณ/หารกระแส.....	35
4.6 การชดเชยผลของอุณหภูมิในวงจรรขยายเชิงลอคการิธึม โดยใช้วงจรที่มีเทอม V_T	36
4.7 วงจรรขยายเชิงแอนติลอคการิธึมที่มีการทำงานในรูปของกระแส.....	37
4.8 วงจรเสมือนสำหรับวิเคราะห์ค่าความต้านทานอินพุตของวงจรรขยายเชิงแอนติลอคการิธึม.....	40
4.9 วงจรเสมือนสำหรับวิเคราะห์ค่าความต้านทานเอาต์พุตของวงจรรขยายเชิงแอนติลอคการิธึม.....	41
4.10 การชดเชยผลของอุณหภูมิในวงจรรขยายเชิงแอนติลอคการิธึม โดยใช้วงจรที่มีเทอม V_T	44
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{IL} กับ I_{OL} ของวงจรรขยายเชิงลอคการิธึม.....	47

VII

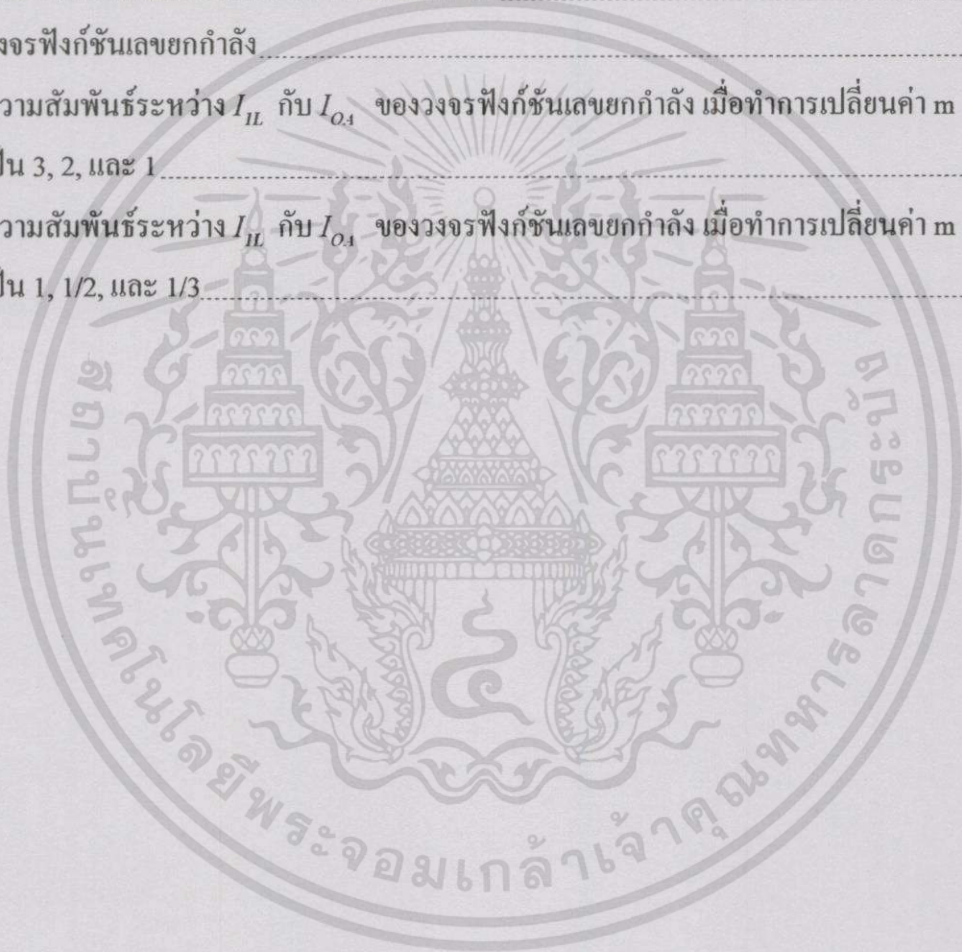
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{IL} กับ I_{OL} ของวงจรถยายเชิงลอคการิริมิก เมื่อมีการแปรค่าอุณหภูมิ เป็น 0°C , 50°C และ 100°C	48
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{IL} กับ I_{OL} ของวงจรถยายเชิงลอคการิริมิก เมื่อใช้วงจรถยายโอทีเอ เพื่อชดเชยผลของอุณหภูมิ ตามรูปที่ 4.4.....	49
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และค่ากระแส I_{OL} จากวงจรถยายเชิงลอคการิริมิกที่ไม่มี การชดเชย และที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิโดยใช่วงจรถยายโอทีเอ เมื่อวงจรรูปที่ 4.1 และวงจรรูปที่ 4.4x มีค่า I_{IL} เท่ากับ $180\mu\text{A}$ และค่า I_{ZL} เท่ากับ $40\mu\text{A}$	50
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{IL} กับ I_{OM} ของวงจรถยายเชิงลอคการิริมิก เมื่อใช้วงจรมีเทอม V_T เพื่อชดเชยผลของอุณหภูมิ ตามรูปที่ 4.6.....	51
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และค่ากระแส I_{OL} และ I_{OM} จากวงจรถยายเชิงลอคการิริมิก ที่ไม่มีการชดเชย และที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิโดยใช่วงจรมีเทอม V_T เมื่อ I_{IL} ของ วงจรรูปที่ 4.1 และวงจรรูปที่ 4.6 มีค่าเป็น $150\mu\text{A}$	52
5.7 ค่าความต้านทานอินพุทของวงจรถยายเชิงลอคการิริมิก.....	53
5.8 ค่าความต้านทานเอาต์พุทของวงจรถยายเชิงลอคการิริมิก.....	54
5.9 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรถยายเชิงลอคการิริมิก.....	54
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{IA} กับ I_{OA} ของวงจรถยายเชิงแอนคิลลอคการิริมิก.....	55
5.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{IA} กับ I_{OA} ของวงจรถยายเชิงแอนคิลลอคการิริมิก เมื่อมีการแปรค่า อุณหภูมิเป็น 0°C , 50°C และ 100°C	56
5.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{IM} กับ I_{OA} ของวงจรถยายเชิงแอนคิลลอคการิริมิก เมื่อใช้วงจรมี เทอม V_T เพื่อชดเชยผลของอุณหภูมิ ตามรูปที่ 4.10.....	57
5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และค่ากระแส I_{OA} จากวงจรถยายเชิงแอนคิลลอคการิริมิก ไม่มีการชดเชย และที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิโดยใช่วงจรมีเทอม V_T เมื่อวงจร รูปที่ 4.7 มีค่า I_{IA} เท่ากับ $100\mu\text{A}$ และวงจรรูปที่ 4.10 มีค่า I_{IM} เท่ากับ $25\mu\text{A}$	58

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14 ค่าความต้านทานอินพุทของวงจรถายเชิงแอนติลอคการิริมิก.....	59
5.15 ค่าความต้านทานเอาต์พุทของวงจรถายเชิงแอนติลอคการิริมิก.....	60
5.16 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรถายเชิงแอนติลอคการิริมิก.....	60
5.17 บล็อกไดอะแกรมของวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง.....	61
5.18 วงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง.....	62
5.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{IL} กับ I_{O1} ของวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง เมื่อทำการเปลี่ยนค่า m เป็น 3, 2, และ 1.....	65
5.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{IL} กับ I_{O1} ของวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง เมื่อทำการเปลี่ยนค่า m เป็น 1, 1/2, และ 1/3.....	65



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในความจำเป็นที่จะต้องนำสัญญาณอินพุต (Input) ที่มีช่วงปฏิบัติการที่กว้าง ๆ เข้ามาใช้งานเพื่อปฏิบัติการในช่วงการใช้งานหนึ่ง ๆ จำเป็นจะต้องมีการบีบอัด (Compression) สัญญาณข้อมูลดังกล่าวให้มีขนาดแคบลง ซึ่งคุณสมบัตินี้เป็นที่ทราบดีว่าจะต้องใช้คุณสมบัติของวงจรขยายเชิงลอการิทึม (Logarithmic Amplifier) [1-3] มาช่วยเป็นส่วนอินพุตให้กับวงจร ในส่วนของวงจรขยายเชิงแอนติลอการิทึม (Anti-Logarithmic Amplifier) นั้นจะช่วยกระจายสัญญาณข้อมูล (Expand) ที่ผ่านการบีบอัดสัญญาณข้อมูลมาจากวงจรขยายเชิงลอการิทึม โดยวงจรขยายเชิงลอการิทึมและแอนติลอการิทึมกันนั้น เป็นวงจรที่ให้สัญญาณเอาต์พุต (Output) ออกมาในรูปของฟังก์ชันลอการิทึม (Logarithm) และฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential) กับสัญญาณอินพุตตามลำดับ ซึ่งวงจรทั้งสองได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในหลายๆด้าน เช่น นำไปตั้งคราะห์เป็นวงจรที่ให้สัญญาณเอาต์พุตอยู่ในรูปของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ [1-3], ใช้ในระบบวัดคุม (Instrumentation) หรือใช้ในด้านการสื่อสาร [4] เป็นต้น ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอวงจรขยายเชิงลอการิทึม และแอนติลอการิทึม โดยอาศัยหลักการที่แตกต่างกันไป [1-6] และโดยส่วนมากจะเป็นการนำเสนอการทำงานของวงจรในรูปของแรงดัน เช่น ออกแบบวงจรขยายเชิงลอการิทึม และแอนติลอการิทึมโดยใช้โอปี่แอมป์ (Operation Amplifier) คู่ร่วมกับ ตัวต้านทานและ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (Bipolar Transistor) เป็นพื้นฐาน [1-4], ใช้วงจรสายพานกระแส (Current Conveyor) [5] หรือ ใช้วิธีการสร้างฟังก์ชันเลียนแบบการทำงานฟังก์ชันลอการิทึม (Pseudologarithmic) [6] สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ จะเป็นการนำเสนอวงจรขยายเชิงลอการิทึม และแอนติลอการิทึมที่มีการทำงานในรูปกระแส (Current-Mode) ซึ่งมีข้อดีกว่าการทำงานแบบแรงดัน (Voltage-Mode) ในด้านแหล่งจ่ายไฟ เนื่องจากการทำงานในรูปแบบแรงดัน จะต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟที่สูงกว่า การออกแบบวงจรทั้งสองจะอาศัยหลักการคุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่รอยต่อของไดโอด และหลักการพื้นฐานของวงจรทรานส์ลิเนียร์ (Translinear Circuit) [7-9] วงจรทั้งสองออกแบบโดยใช้เทคโนโลยีของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ซึ่งเหมาะสำหรับนำไปทำเป็นวงจรรวม (Integrated Circuit หรือ IC)

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

จากเหตุผลที่กล่าวข้างต้น วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอวงจรมายเชิงลอคการิชมิค และแอนติลอคการิชมิคที่มีการทำงานในรูปกระแส โดยอาศัยหลักการคุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่รอยต่อของไดโอด และหลักการพื้นฐานของวงจรถรานส์ลิเนียร์ อีกทั้งยังได้นำเสนอวิธีการชดเชยผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในวงจร และตัวอย่างการใช้งานวงจรทั้งสองอีกด้วย

1.3 หลักการของวิทยานิพนธ์

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้มีการนำเสนอแนวความคิดและหลักการไว้คือ

1. วงจรมายเชิงลอคการิชมิคที่ออกแบบขึ้น จะให้ค่ากระแสเอาต์พุตเป็นฟังก์ชันลอคการิชมิคกับกระแสอินพุต
2. วงจรมายเชิงแอนติลอคการิชมิคที่ออกแบบขึ้น จะให้ค่ากระแสเอาต์พุตเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลกับกระแสอินพุต
3. วงจรทั้งสอง จะมีการนำเสนอการชดเชยผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในวงจร
4. เนื่องจากวงจรทั้งสองทำงานในรูปของกระแส จึงควรออกแบบให้วงจรทั้งสองมีความต้านทานอินพุตต่ำ และมีความต้านทานเอาต์พุตสูง

1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งออกเป็น 6 บท โดยในแต่ละบทมีรายละเอียดดังนี้

- บทที่ 1 เป็นบทนำจะเป็นการกล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา, วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์, หลักการของวิทยานิพนธ์ และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบท
- บทที่ 2 กล่าวถึง การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ วงจรสมมูลย์ และแบบจำลองการทำงานของทรานซิสเตอร์
- บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการของวงจรถรานส์ลิเนียร์ ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบวงจรในวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งอธิบายหลักการของวงจรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบวงจร
- บทที่ 4 กล่าวถึงหลักการการออกแบบวงจรมายเชิงลอคการิชมิค และแอนติลอคการิชมิค รวมถึงนำเสนอวิธีการชดเชยผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในวงจร
- บทที่ 5 นำเสนอ ผลการจำลองการทำงานของวงจร และ ตัวอย่างการใช้งานวงจรทั้งสอง
- บทที่ 6 บทสรุป กล่าวสรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

2.1 กล่าวนำ

ในการออกแบบวงจรและการจำลองการทำงานของวงจรรวมประเภทไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ จะต้องเข้าใจถึงวงจรสมมูล และแบบจำลองที่ใช้แสดงพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ รวมทั้งสมการที่เป็นคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำประเภทแอกทิฟ จำพวกไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ และเพื่อเป็นแนวทางที่จะนำผลจากสมการของอุปกรณ์นั้น ๆ ไปใช้คำนวณกับวงจรรวมที่ออกแบบขึ้น เนื่องจากสมรรถนะของวงจรมานั้น จะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้แทนอุปกรณ์ตัวนั้น ซึ่งจะมีความสำคัญมาก ที่จะต้องเข้าใจคุณสมบัติของอุปกรณ์ ซึ่งจะนำไปสู่ผลที่คาดว่าจะเกิดขึ้นและใช้เป็นข้ออ้างอิงในการจำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป เช่น โปรแกรม PSPICE [10] เป็นต้น

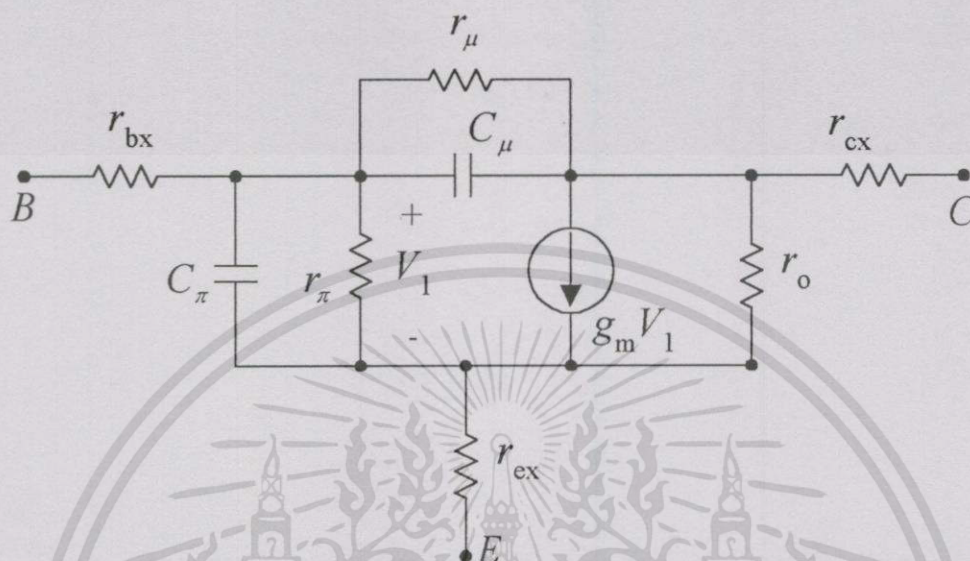
2.2 ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

2.2.1 วงจรสมมูลและแบบจำลองของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

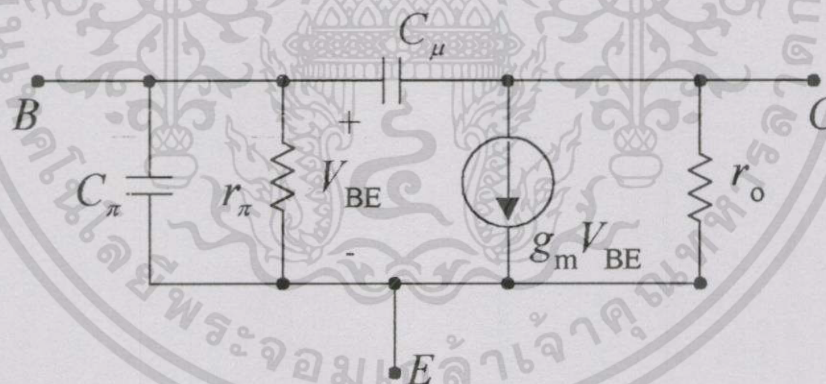
ในการทำงานของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์โดยทั่ว ๆ ไปนั้น [11-13] จะกำหนดให้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ มีการทำงานภายใต้การทำงานในช่วงเชิงเส้น (Linear) หรือการทำงานในช่วงแอกทิฟ (Active Mode) โดยที่รอยต่อของขาเบส (Base) กับขาอิมิตเตอร์ (Emitter) จะได้รับแรงดันไบอัสตรง (Forward Bias) และที่รอยต่อของขาเบส (Base) กับขาคอลเลคเตอร์ (Collector) จะได้รับแรงดันไบอัสกลับ (Reverse Bias) วงจรสมมูลของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ แสดงในรูปที่ 2.1

การพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นั้นจะประกอบด้วยค่าความต้านทาน r_{bx} , r_{cx} และ r_{ex} คือค่าความต้านทานที่เกิดจากหน้าสัมผัสของจุดต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำและโลหะที่เชื่อมต่อออกมายังจุดต่อภายนอก ซึ่งจะมีค่าน้อยมาก จึงสามารถที่จะตัดทิ้งไปได้ ส่วนค่า r_{μ} และ r_o คือค่าความต้านทานที่เกิดจากการไบอัสกลับ ของขาเบสกับขาคอลเลคเตอร์ และขาคอลเลคเตอร์กับขาอิมิตเตอร์ ตามลำดับ สำหรับความต้านทาน r_{μ} จะมีค่าสูงมากเสมือนกับว่าเป็นวงจรเปิด จึงสามารถตัดทิ้งไปได้ ในส่วนค่าความต้านทาน r_{π} คือค่าความต้านทานที่เกิดจากการไบอัสตรงของขาเบสกับขาอิมิตเตอร์ สำหรับ ค่าคาปาซิแตนซ์ (Capacitance) ในไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ C_{μ} และ C_{π} คือค่าคาปาซิแตนซ์ที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของขาเบสกับขาคอลเลคเตอร์ และขาเบสกับขาอิมิตเตอร์ ตามลำดับ ดังนั้น วงจรสม

มูลของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์สำหรับสัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal) โดยประมาณ ของวงจรอิมิตเตอร์ร่วม (Common Emitter) สามารถเขียนใหม่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของวงจรอิมิตเตอร์ร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

เนื่องจากทฤษฎีการทำงานและสมการโดยละเอียดของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ได้มีการนำเสนอไว้แล้วในเอกสารอ้างอิง [8,9,11] ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะขออ้างอิงและกล่าวถึงเฉพาะสมการสำคัญ ๆ ที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์และอ้างผลการจำลองการทำงานของวงจรเท่านั้น ซึ่งในการใช้งานของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ในวิทยานิพนธ์นี้ จะไบอัสให้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ มีการทำงานอยู่ในช่วงแอกทีฟ ซึ่งจะไบอัสให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่รอยต่อของขาเบสกับขาอิมิตเตอร์ หรือ V_{BE} จะต้องเป็นไบอัสตรง และจะไบอัสให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่รอยต่อของขาเบสกับขาคอลเลคเตอร์ หรือ V_{BC} เป็น ไบอัสกลับ ซึ่งจะพบว่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของช่วงปฏิบัติการสำหรับสัญญาณขนาดใหญ่ (Large Signal) ของค่ากระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) ที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (2.1)

$$I_C = \frac{qD_B n_i^2 A_E}{Q_B} \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) \tag{2.1}$$

จากสมการที่ (2.1) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$I_C = I_s \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) = I_s \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \tag{2.2}$$

โดยที่

$$I_s = \frac{qD_B n_i^2 A_E}{Q_B}$$

$$I_s = JA_E$$

และ

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

เมื่อ

q = ค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน (Electron Charge) มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

D_B = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอนหรือโฮลในขาเบส (cm^2/s)

n_i = ค่าความหนาแน่นของประจุพาหะชนิดหนึ่งชนิดใดของสารกึ่งตัวนำอินทรีซิค (cm^{-3})

A_E = ค่าพื้นที่อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ (cm^2)

Q_B = ค่าจำนวนอะตอมของสารเจือในเบสต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่อิมิตเตอร์ (cm^{-3})

V_{BE} = ค่าแรงดันไฟฟ้าที่รอยต่อขา B กับขา E (V)

k = ค่าคงที่ของ Boltzmann's Constant มีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} J/K

T = ค่าอุณหภูมิรอบข้าง ($^{\circ}\text{K}$)

I_S = ค่ากระแสอิ่มตัว (Saturation Current) (A)

J = ค่าความหนาแน่นของกระแส (A/cm^2)

V_T = ค่าแรงดันความร้อน (Thermal Voltage) (V)

จากสมการที่ (2.2) พบว่าค่ากระแส I_C จะขึ้นอยู่กับค่าแรงดัน V_T โดยที่ค่าของ V_T มีค่าประมาณ 26mV ที่อุณหภูมิ 27 $^{\circ}\text{C}$ จะเห็นได้ว่าสมการดังกล่าวมีคุณลักษณะเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

จากความสัมพันธ์ของค่ากระแส I_C กับค่าแรงดัน V_{CE} การทำงานของแบบจำลองจะให้ค่ากระแส I_C คงที่เทียบกับค่าแรงดัน V_{CE} เมื่อทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงแอกทีฟ แต่ในทางปฏิบัติเมื่อค่ากระแส I_C เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ค่าแรงดัน V_{CE} เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากผลของ Base-Width Modulation ทำให้ค่ากระแส I_C เป็นดังสมการที่ (2.3)

$$I_C = I_S \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right) \quad (2.3)$$

เมื่อ V_A คือ ค่าแรงดันซีดริ่ม (Early Voltage) ของทรานซิสเตอร์ โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 130 โวลต์ จากสมการที่ (2.2) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัน V_{BE} กับค่ากระแส I_C ได้ดังนี้

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

จากวงจรสมมูลของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์สำหรับสัญญาณขนาดเล็กในวงจรอิมิตเตอร์ร่วม ที่แสดงดังรูปที่ 2.2 สามารถหาสมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

จากสมการที่ (2.2) สามารถหาค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ (Transconductance) g_m ได้จากความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงค่ากระแส I_C กับค่าแรงดัน V_{BE} ซึ่งจะได้ดังสมการที่ (2.5)

$$\begin{aligned} g_m &= \left. \frac{dI_C}{dV_{BE}} \right|_{V_{BE}=0} \\ &= \frac{qI_C}{kT} \\ &= \frac{I_C}{V_T} \end{aligned} \quad (2.5)$$

โดยที่ g_m คือ ค่าความนำของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะขึ้นกับค่าอุณหภูมิรอบข้าง V_T และจะมีความเป็นเชิงเส้น โดยขึ้นอยู่กับค่ากระแสไบอัสของกระแสคอลเลคเตอร์ในไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ และในส่วนของความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงค่ากระแส I_B กับค่าแรงดัน V_{BE} จะได้ว่า

$$\begin{aligned} g_\pi &= \left. \frac{dI_B}{dV_{BE}} \right|_{V_{BE}=0} \\ &= \frac{1}{\beta_F} \frac{dI_C}{dV_{BE}} \\ &= \frac{g_m}{\beta_F} \end{aligned} \quad (2.6)$$

เมื่อ

β_F คือ ค่าอัตราขยายกระแสของวงจรอิมิตเตอร์ร่วม

g_{π} คือ ค่าความนำที่ขาเบสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

หรือสามารถแสดงอยู่ในรูปของค่าความต้านทาน (r_{π}) ได้ดังสมการที่ (2.7)

$$r_{\pi} = \frac{1}{g_{\pi}} = \frac{\beta_F}{g_m} \quad (2.7)$$

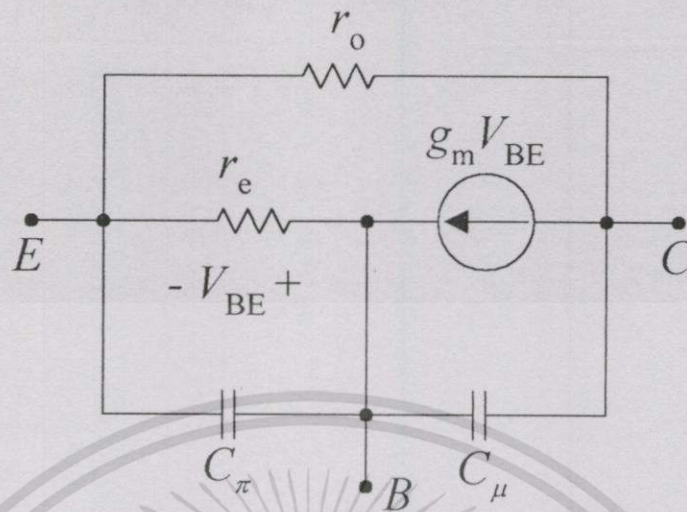
ส่วนความต้านทานเอาต์พุต (r_o) จะได้จากความสัมพันธ์ของอัตราการผลิตกระแสของค่ากระแส I_C กับค่าแรงดัน V_{CE} โดยจากสมการที่ (2.3) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_o} = g_o &= \left. \frac{dI_C}{dV_{CE}} \right|_{I_B = 0} \\ &= \frac{I_S}{V_A} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \\ &= \frac{I_C}{V_A} \end{aligned} \quad (2.8)$$

หรือ

$$r_o = \frac{V_A}{I_C} \quad (2.9)$$

จากวงจรสมมูลที่ใช้ในวงจรอิมิตเตอร์ร่วม สามารถเขียนวงจรสมมูลให้อยู่ในวงจรเบสรวม (Common Base) ได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของวงจรเบสร่วม

ซึ่งค่าความต้านทานที่ขาอิมิตเตอร์ (r_e) ของวงจรเบสร่วมนั้น จะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 r_e &= \frac{1}{g_m + \frac{1}{r_\pi}} \\
 &= \frac{1}{g_m + (1 + \beta_F)} \\
 &= \frac{\alpha_F}{g_m} \\
 &= \frac{V_T}{I_C}
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

α_F คือ ค่าอัตราขยายกระแสของวงจรเบสร่วม

2.3 บทสรุป

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการทำงานพื้นฐานของวงจรสมมูล และสมการที่เป็นคุณลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉพาะของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังกล่าวที่ได้จากสมการ มาใช้ในการออกแบบวงจรต่อไป และจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลที่คาดว่าจะเกิดขึ้น และเพื่อให้นำไปอ้างอิง หรือเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจร โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป PSPICE ว่าจะมีสมรรถนะและการทำงานเป็นไปตามหลักการที่ได้ทำการออกแบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการพื้นฐานของวงจรถานสัณเญร์ และวงจรพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้อธิบายถึงหลักการพื้นฐานของวงจรถานสัณเญร์ ซึ่งเป็นหลักการที่ใช้ในการออกแบบวงจรในวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งอธิบายถึงวงจรพื้นฐานอื่นๆ ที่จะนำไปรวมใช้ในการออกแบบวงจรขยายเชิงลอกการริสมิก และวงจรขยายเชิงแอนคิลลอกการริสมิก โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2 หลักการพื้นฐานของวงจรถานสัณเญร์

วงจรถานสัณเญร์ หมายถึงกลุ่มวงจรที่ใช้ประโยชน์ของความสัมพัทธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างค่าอัตรการส่งผ่านความนำ หรือค่าทรานส์คอนคักแดนซ์ กับค่าของกระแสของทรานซิสเตอร์ โดยในช่วงแรกจะมีการออกแบบวงจรถานสัณเญร์โดยอาศัยไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เป็นส่วนมาก [7,9] ต่อมาจึงมีการพัฒนาเป็นการใช้มอสทรานซิสเตอร์ (MOS Transistor) ด้วย [9,12] สำหรับวงจรประเภทนี้จะต้องสร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีของวงจรรวมเท่านั้น เนื่องจากว่าความใกล้เคียงกันของอุณหภูมิขณะปฏิบัติการ ความเข้ากันของโครงสร้างของอุปกรณ์ และความเท่ากันของความเข้มข้นของสารเจือมิผลอย่างมากต่อการทำงานของวงจร

ในการออกแบบวงจรจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ จะอาศัยความสัมพัทธ์เชิงเส้นระหว่างค่าทรานส์คอนคักแดนซ์ กับค่ากระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ดังนี้ [7,9]

$$g_m = \frac{dI}{dV} = aI \quad (3.1)$$

เมื่อ a คือค่าคงที่ (I หรือ V)

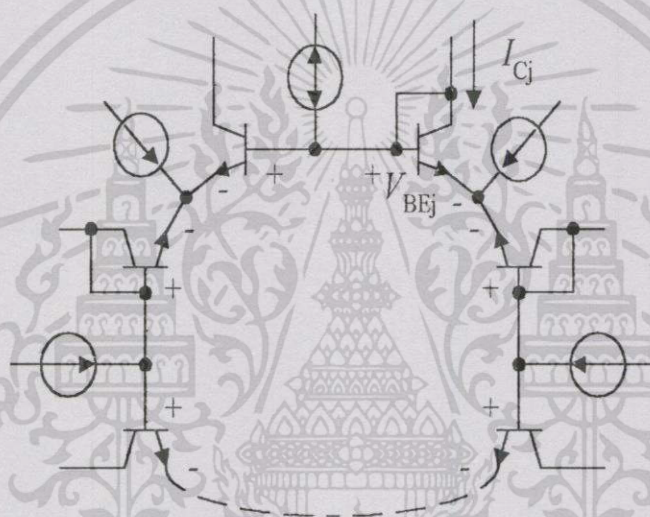
ทำการอินทิเกรตสมการที่ (3.1) จะได้ว่า

$$I = b \exp(aV) \quad (3.2)$$

เมื่อ b คือค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.2) จะอธิบายถึงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับแรงดัน ซึ่งเหมือนกับสมการที่ (2.2) ที่ได้อธิบายถึงคุณสมบัติระหว่างกระแส I_C กับแรงดัน V_{BE} ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ จากคุณสมบัตินี้เมื่อนำไปประยุกต์ใช้เข้ากับวงจรที่ประกอบด้วยรอยต่อของสารพี-เอ็น (p-n junction) เป็นจำนวนคู่ และต่อกันอยู่ในลักษณะไบอัสตรง โดยที่รอยต่อพี-เอ็น แต่ละตัวจะถูกต่อเข้ากับขั้วของรอยต่อตัวอื่น ๆ เรียงกันไปเป็นลูป (Loop) จะเรียกววงจรในลักษณะแบบนี้ว่าวงจรทรานส์ลิเนียร์ลูป โดยปกติวงจรทรานส์ลิเนียร์ทั่ว ๆ ไป จะมีเพียงหนึ่งลูป แต่ตามหลักการแล้วสามารถจะมีกี่ลูปก็ได้ โดยที่รอยต่อพี-เอ็นเหล่านี้จะเป็นรอยต่อพี-เอ็น ของไดโอด หรือรอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ก็ได้



รูปที่ 3.1 รูปแบบพื้นฐานของวงจรทรานส์ลิเนียร์ซึ่งประกอบด้วยไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

พิจารณาลูปปิดที่ประกอบด้วยการไบอัสตรงของรอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ จะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ในส่วนแรกแรงดันเบส-อิมิตเตอร์ที่มีทิศทางตามเข็มนาฬิกา (Clockwise : CW) และส่วนที่สองแรงดันเบส-อิมิตเตอร์ที่มีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (Counterclockwise : CCW) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยที่แหล่งจ่ายกระแสต่าง ๆ จะมีค่าคงที่ พร้อมทั้งแสดงการเชื่อมต่อของกระแสคอลเลกเตอร์เป็นทั้งอินพุตและเอาต์พุต ดังนั้นผลรวมของแรงดันเบส-อิมิตเตอร์ รอบลูปปิดในรูปที่ 3.1 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\sum_{j=1}^N V_{BEj} = 0 \quad (3.3)$$

หรือ

$$\sum_{CW} V_{BEj} = \sum_{CCW} V_{BEj} \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (2.4) ทราบว่า

$$V_{BEj} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{Cj}}{I_{Sj}}\right) \quad (3.5)$$

หรือ

$$V_{BEj} = V_T \ln\left(\frac{I_{Cj}}{A_j J}\right) \quad (3.6)$$

โดยที่

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

และ

$$I_{Sj} = A_j J$$

แทนค่าสมการที่ (3.6) ลงในสมการที่ (3.4) จะได้

$$\sum_{CW} V_T \ln\left(\frac{I_{Cj}}{A_j J}\right) = \sum_{CCW} V_T \ln\left(\frac{I_{Cj}}{A_j J}\right) \quad (3.7)$$

เมื่อ

V_T คือ ค่าแรงดันความร้อน (Thermal Voltage) (V)

I_{Cj} คือ ค่ากระแสคอลเลกเตอร์ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ตัวใด ๆ (A)

I_{Sj} คือ ค่ากระแสอิ่มตัวของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ตัวใด ๆ (A)

A_j คือ พื้นที่อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ (cm^2)

J คือ ค่าความหนาแน่นของกระแสต่อพื้นที่อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ (A/cm^2)

ถ้าทรานซิสเตอร์ทุกตัวมีค่าความหนาแน่นของกระแสต่อพื้นที่อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ และอุณหภูมิที่รอยต่อทุกตัวมีค่าเท่ากัน จะทำให้ผลของแรงดันความร้อนหรืออุณหภูมิรอบข้างมีการชดเชยกัน ไปหมด ดังนั้นจากสมการที่ (3.7) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sum_{CW} \ln\left(\frac{I_{Cj}}{A_j}\right) = \sum_{CCW} \ln\left(\frac{I_{Cj}}{A_j}\right) \quad (3.8)$$

จะสังเกตเห็นว่าจากสมการที่ (3.8) จะไม่มีเทอมไหนที่ขึ้นอยู่กับผลของอุณหภูมิรอบข้าง จากสมการที่ (3.8) จะอยู่ในรูปของผลบวกของอนุกรมในเทอมลอการิทึม ดังนั้นสามารถที่จะจัดสมการใหม่ให้อยู่ในเทอมของผลคูณ ได้ดังสมการที่ (3.9)

$$\prod_{CW} \left(\frac{I_{Cj}}{A_j}\right) = \prod_{CCW} \left(\frac{I_{Cj}}{A_j}\right) \quad (3.9)$$

ถ้าทรานซิสเตอร์ทุกตัวถูกสร้างขึ้นโดยให้มีพื้นที่อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์มีค่าเท่ากันจากสมการที่ (3.9) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\prod_{CW} I_{Cj} = \prod_{CCW} I_{Cj} \quad (3.10)$$

จากสมการที่ (3.10) จะแสดงหลักการของวงจรทรานส์ลิเนียร์สำหรับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ซึ่งกล่าวได้ว่า คือ ผลคูณของกระแสทิศทางตามเข็มนาฬิกาจะมีค่าเท่ากับผลคูณของกระแสทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งจากสมการข้างต้นนี้ สามารถนำไปสังเคราะห์วงจรที่ทำงานในโหมดกระแสได้หลากหลาย

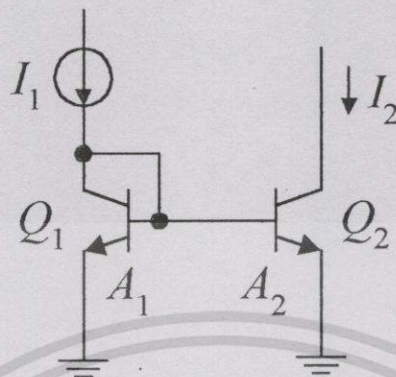
3.3 วงจรพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อต่อไป จะเป็นการนำเสนอวงจรพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในการออกแบบวงจรขยายเชิงลอการิทึมิก และแอนติลอการิทึมิก

3.3.1 วงจรสะท้อนกระแส (Current Mirror)

วงจรสะท้อนกระแสเป็นวงจรที่เป็นที่รู้จักกันเป็นอย่างดี ใช้ในการทำสำเนากระแสจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งตามที่ต้องการ และมักจะถูกใช้ประกอบในการออกแบบวงจรเสมอ โดยในที่นี้จะพิจารณาวงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐาน และวงจรสะท้อนกระแสแบบวิลสัน (Wilson Current Mirror)

3.3.1.1 วงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐาน [7]



รูปที่ 3.2 วงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐาน

$$I_C = I_S \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right) \quad (3.11)$$

ในวงจรสะท้อนกระแสจะได้ว่าทรานซิสเตอร์ทั้งสองมีค่า V_{BE} และ I_S เท่ากัน ทำให้ได้ว่า

$$\frac{I_{C1}}{A_1(1+V_{BE}/V_A)} = \frac{I_{C2}}{A_2(1+V_{CE2}/V_A)} \quad (3.12)$$

ซึ่ง A_1 และ A_2 คือพื้นที่อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ตามลำดับ จากวงจรจะได้ว่า

$$I_1 = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} \quad (3.13)$$

$$I_1 = I_{C1} + \frac{I_{C1}}{\beta_F} + \frac{I_{C2}}{\beta_F} \quad (3.14)$$

$$I_1 \approx I_{C1} + \frac{I_{C1}}{\beta_F} + \frac{A_2}{A_1} \frac{I_{C1}}{\beta_F} \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_1 = I_{C1} \left[1 + \frac{1}{\beta_F} \left(1 + \frac{A_2}{A_1} \right) \right] \quad (3.16)$$

จากสมการที่ (3.12) จะได้ค่า I_2 คือ

$$I_2 = \frac{A_2}{A_1} I_1 \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{\beta_F} \left(1 + \frac{A_2}{A_1} \right)} \right) \left(\frac{1 + V_{CE2}/V_A}{1 + V_{BE}/V_A} \right) \quad (3.17)$$

เนื่องจาก $\beta_F \gg 1$ และ $V_A \gg V_{CE}$ จะได้

$$I_2 \approx \frac{A_2}{A_1} I_1 \quad (3.18)$$

ถ้ากำหนดให้ ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวมีพื้นที่อิมิตเตอร์เท่ากัน หรือ $A_1 = A_2$ จะได้ว่า

$$I_2 \approx I_1 \quad (3.19)$$

3.3.1.2 วงจรสะท้อนกระแสแบบวิลสัน [7,13]

วงจรสะท้อนกระแสแบบวิลสันซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.3 ปรับปรุงมาจากวงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐาน โดยเพิ่มทรานซิสเตอร์ Q_3 ทำหน้าที่เป็นตัวป้อนกลับแบบลบทางด้านเอาต์พุตของวงจร ซึ่งจะปรับให้ I_2 มีค่าใกล้เคียงกับกระแส I_1 มากยิ่งขึ้น

จากรูปที่ 3.3 จะได้ค่ากระแส I_2 คือ

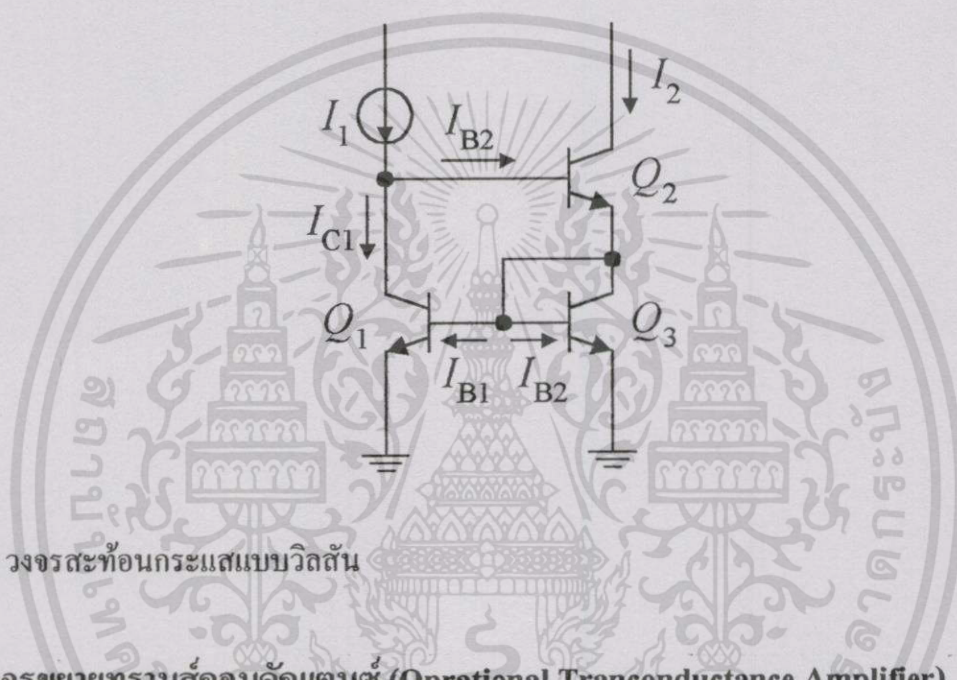
$$I_2 = I_1 + I_{B1} + I_{B3} - 2I_{B2} \approx I_1 \quad (3.19)$$

ถ้าตัดค่ากระแส I_B ทิ้ง และ เนื่องจากโดยทั่วไป ค่า $V_A \gg 1$ จะทำให้

$$I_2 = I_1 \left(1 - \frac{2}{\beta_F^2 + 2\beta_F + 2} \right) \approx I_1 \left(1 - \frac{2}{\beta_F^2} \right) \quad (3.20)$$

ถ้าค่า $\beta_F \gg 1$ จะทำให้ค่ากระแส I_2 ใกล้เคียง I_1 มากยิ่งขึ้น ดังนั้นจะได้ว่า

$$I_2 \approx I_1 \quad (3.21)$$



รูปที่ 3.3 วงจรสะท้อนกระแสแบบวิลสัน

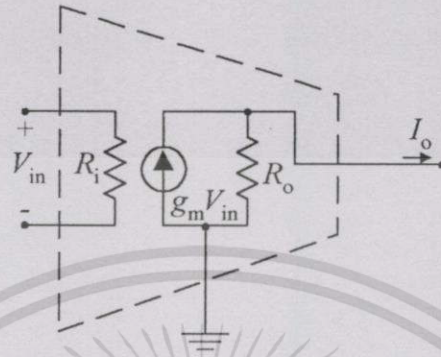
3.3.2 วงจรขยายทรานส์คอนดักแตนซ์ (Operational Transconductance Amplifier)

วงจรรขยายทรานส์คอนดักแตนซ์ หรือ เรียกสั้น ๆ ว่า วงจรรขยายโอทีเอ (OTA) เป็นวงจรรวมสำเร็จรูปชนิดหนึ่งที่มีขั้วขาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยจะทำหน้าที่เปลี่ยนค่าแรงดันที่อินพุทให้เป็นกระแสที่เอาท์พุท ได้มีการนำเอาวงจรรขยายโอทีเอมาประยุกต์ใช้งานในหลายด้าน เช่น วงจรแอกทีฟฟิลเตอร์ [14-16] วงจรสังเคราะห์ความถี่ [17] และวงจรรขยายสัญญาณแบบอินสทรูเมนต์ (Instrument Amplifier) [18] เป็นต้น สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวงจรรขยายโอทีเอแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เท่านั้น

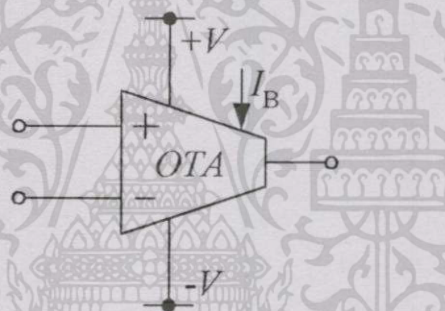
วงจรรขยายโอทีเอจะมีการทำงานในลักษณะของแรงดันควบคุมกระแส (Voltage Controlled Current Source : VCCS) โดยอัตราการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแส เรียกว่า ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ หรือ g_m คุณสมบัติของวงจรรขยายโอทีเอ คือ ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ของวงจรรขยายโอทีเอสามารถควบคุมได้โดยกระแสไบอัสจากภายนอก และมีค่าความต้านทานขาเข้า (Input Impedance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ ความต้านทานขาออก (Output Impedance) สูง รูปที่ 3.4 และ 3.5 แสดงวงจรสมมูลทางอุดมคติ และสัญลักษณ์ของวงจรขยายโอทีเอ



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลทางอุดมคติของวงจรขยายโอทีเอ

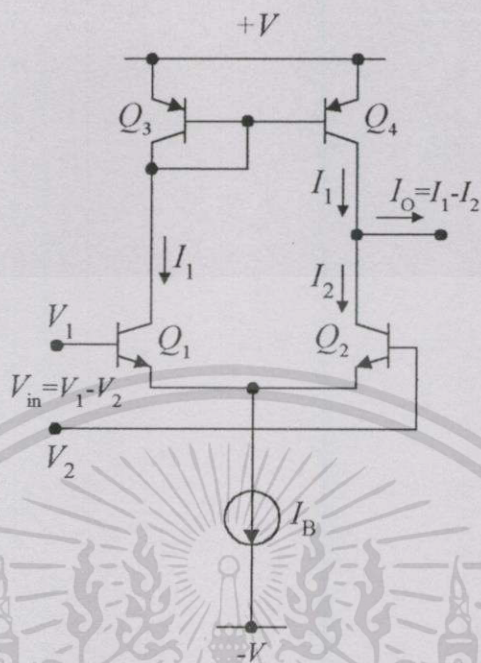


รูปที่ 3.5 สัญลักษณ์ของวงจรขยายโอทีเอ

วงจรขยายโอทีเอมีพื้นฐานมาจากวงจรขยายความแตกต่าง (Differential Amplifier) [19] ซึ่งประกอบไปด้วย ทรานซิสเตอร์ 4 ตัว และแหล่งจ่ายกระแสคงที่ 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.6

จากวงจรรูปที่ 3.6 ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 เป็นวงจรขยายความแตกต่าง ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส ส่วนทรานซิสเตอร์ Q_3 และ Q_4 เป็นวงจรสะท้อนกระแส ซึ่งมีอัตรากระแสผ่านกระแสเป็นหนึ่ง โดยมีกระแส I_B เป็นกระแสไบอัสให้กับวงจร จากวงจรในรูปที่ 3.6 จะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$I_B = I_1 + I_2 \quad (3.22)$$



รูปที่ 3.6 วงจรขยายความแตกต่าง

จาก สมการที่ (2.2) $I_c = I_s \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)$ จะได้ความสัมพันธ์ของกระแส I_1 และ I_2 ว่า

$$I_1 = I_s \exp\left(\frac{V_1}{V_T}\right) \tag{3.23}$$

และ

$$I_2 = I_s \exp\left(\frac{V_2}{V_T}\right) \tag{3.24}$$

จากสมการที่ (3.23) จะได้ว่า

$$V_1 = V_T \ln\left(\frac{I_1}{I_s}\right) \tag{3.25}$$

จากสมการที่ (3.24) จะได้ว่า

$$V_2 = V_T \ln\left(\frac{I_2}{I_s}\right) \tag{3.26}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปวงจร เราทราบว่า

$$V_{in} = V_1 - V_2 \quad (3.27)$$

แทนค่า V_1 และ V_2 จากสมการที่ (3.25) และ(3.26) ลงในสมการที่ (3.27) จะได้ว่า

$$V_{in} = V_T \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad (3.28)$$

หรือ

$$\frac{I_1}{I_2} = \exp\left(\frac{V_{in}}{V_T}\right) \quad (3.29)$$

จากสมการที่ (3.29) และ (3.22) จะได้ว่า

$$I_1 = \frac{I_B}{1 + \exp\left(-\frac{V_{in}}{V_T}\right)} \quad (3.30)$$

และ

$$I_2 = \frac{I_B}{1 + \exp\left(\frac{V_{in}}{V_T}\right)} \quad (3.31)$$

จากรูปวงจร กระแส I_1 จะถูกสะท้อนกระแสจากวงจรถ่อนกระแสไปหักลบออกจากค่ากระแส I_2 จะได้กระแสออก มีค่าเป็น

$$I_o = I_1 - I_2 \quad (3.32)$$

แทนค่า I_1 จาก สมการที่ (3.30) และค่า I_2 จากสมการที่ (3.31) ลงในสมการที่ (3.32) จะได้ว่า

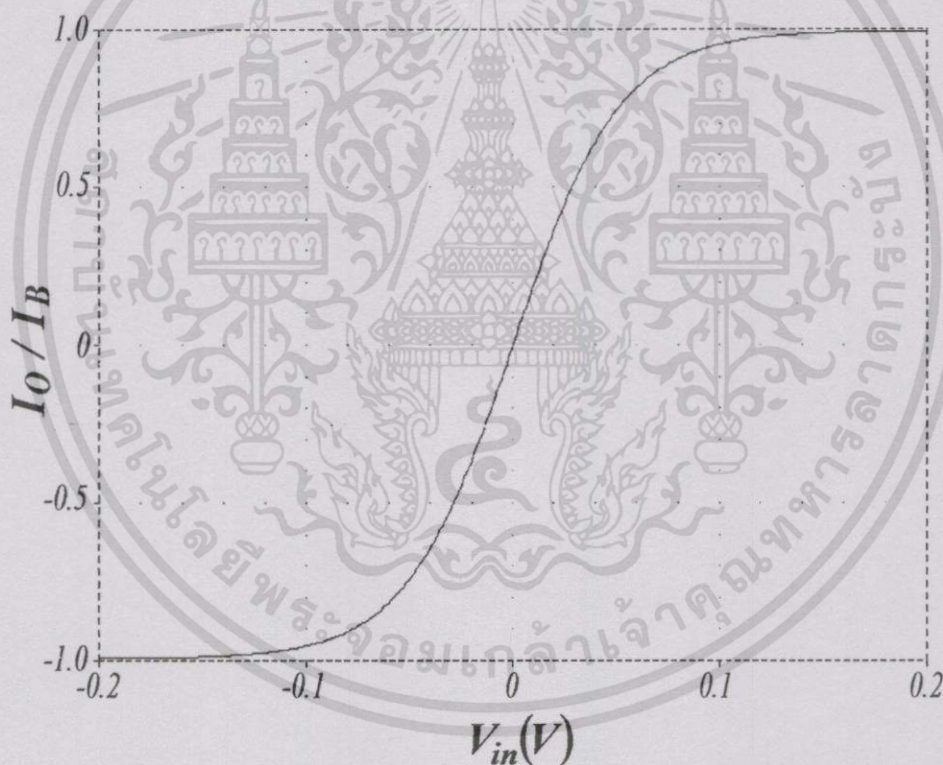
$$I_o = I_B \left(\frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{V_{in}}{V_T}\right)} - \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{V_{in}}{V_T}\right)} \right) \quad (3.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันไฮเพอร์โบล่าแทนเจนต์ (Hyperbolic-Tangent) ได้คือ

$$I_O = I_B \tanh\left(\frac{V_{in}}{2V_T}\right) \quad (3.34)$$

จากสมการที่ (3.34) จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส I_O และแรงดัน V_{in} ดังรูปที่ 3.7 โดยจะมีช่วงที่เป็นเชิงเส้นในช่วงแคบๆ จากนั้นก็จะเข้าสู่ช่วงอิ่มตัว โดยทั่วไปจะนำวงจรขยายโอทีเอไปใช้งานเฉพาะช่วงที่เป็นเชิงเส้น หรืออาจเขียนได้ว่า ค่า V_{in} ที่ทำให้วงจรขยายโอทีเอทำงานในช่วงที่เป็นเชิงเส้น คือ $-2V_T \leq V_{in} \leq 2V_T$



รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุตกับแรงดันอินพุตของวงจรขยายความแตกต่าง

สำหรับค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ของวงจร สามารถหาได้โดย

$$g_m = \left. \frac{dI_o}{dV_{in}} \right|_{V_{in}=0} \quad (3.35)$$

$$= \frac{I_B}{2V_T} \sec^2 h \left(\frac{V_{in}}{2V_T} \right)$$

แทน $V_{in} = 0$ ตามนิยามลงในสมการที่ (3.35) จะได้

$$g_m = \frac{I_B}{2V_T} \quad (3.36)$$

ดังนั้นจะได้

$$I_o = g_m V_{in} \quad (3.37)$$

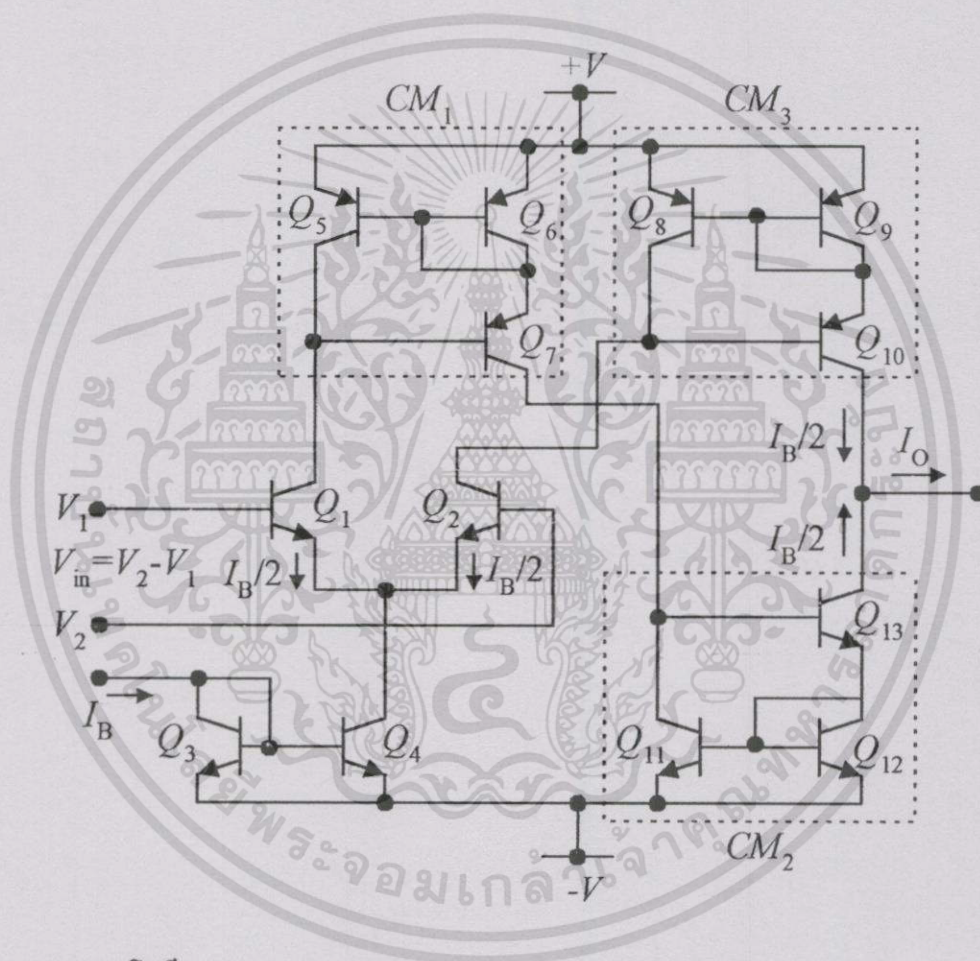
หรือ

$$I_o = \frac{I_B}{2V_T} V_{in} \quad (3.38)$$

จะเห็นได้ว่า ค่า g_m ของวงจรสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการปรับค่าของกระแส I_B ซึ่งทำให้วงจรดังกล่าวสามารถที่จะควบคุมค่า g_m ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์นั่นเอง

เนื่องจากเอาต์พุตของวงจรในรูปที่ 3.6 จะมีช่วงปฏิบัติการที่แคบ ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงวงจรขยายโอทีเอขึ้นใหม่แสดงดังรูปที่ 3.8 [9] กำหนดให้ค่าอัตราขยายกระแส (β) ของทรานซิสเตอร์ทุกตัวมีค่าสูงมาก ๆ และกระแสเบสของทรานซิสเตอร์ทุกตัวมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับกระแสคอลเลกเตอร์ สำหรับวงจรจะประกอบด้วยไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ 13 ตัว มีทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายความแตกต่าง เปลี่ยนแรงดันขาเข้าเป็นกระแส ส่วนทรานซิสเตอร์ Q_3 และ Q_4 ทำหน้าที่เป็นวงจรสะท้อนกระแสซึ่งมีอัตราการส่งผ่านกระแสเป็นหนึ่งในสี่ สะท้อนกระแสไบอัสของวงจรขยายโอทีเอ I_B ส่งผ่านไปยัง Q_1 และ Q_2 โดยกระแส I_B นี้จะแยกไหลผ่านทรานซิสเตอร์ทั้งสอง ทำให้เกิด I_{C1} และ I_{C2} ตามลำดับ สำหรับกระแส I_{C1} จะไหลเข้าสู่ชุดของทรานซิสเตอร์ Q_5 ถึง Q_8 ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรสะท้อนกระแสแบบวิลสัน ที่มีอัตราการส่งผ่านกระแสเป็นหนึ่งในห้า ทำการสะท้อนกระแส I_{C1}

ไปยัง I_{C7} กระแส I_{C7} จะไหลเข้าสู่ขั้วของทรานซิสเตอร์ Q_{11} ถึง Q_{13} ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรสะท้อนกระแสแบบวิลสัน ที่มีอัตราสัณฐานผ่านกระแสเป็นหนึ่ง ทำการสะท้อนกระแส I_{C7} ไปยัง I_{C13} ซึ่งจะได้ว่ากระแส I_{C13} มีค่าเท่ากับกระแส I_{C1} นั้นเอง ส่วนกระแส I_{C2} จะไหลเข้าสู่ขั้วของทรานซิสเตอร์ Q_8 ถึง Q_{10} ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรสะท้อนกระแสแบบวิลสัน ที่มีอัตราสัณฐานผ่านกระแสเป็นหนึ่ง ทำการสะท้อนกระแส I_{C2} ไปยัง I_{C10} จากรูปที่ 3.8 เราจะได้กระแสที่จุดออกของวงจรขยายโอทีเอ หรือกระแส I_O มีค่าเท่ากับ $I_{C10} - I_{C13}$ หรือจะได้ว่ากระแส I_O มีค่าเท่ากับ $I_{C2} - I_{C1}$ นั้นเอง



รูปที่ 3.8 วงจรขยายโอทีเอ

ในกรณีที่แรงดันขาเข้า V_{in} มีค่าเป็น 0 กระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 จะมีค่าเท่ากันคือมีค่าเท่ากับ $I_B/2$ ในกรณีนี้จะไม่มีการไหลของกระแส I_O ออกมา นั่นคือ I_O มีค่าเป็น 0 นั้นเอง

ในกรณีที่แรงดันขาเข้า V_m มีค่าไม่เป็นศูนย์ จะทำให้กระแส I_{C1} และ I_{C2} มีค่าไม่เท่ากัน โดยกระแส I_{C1} และ I_{C2} จะมีค่าเป็น

$$I_{C1} = I_s \exp\left(\frac{V_1}{V_T}\right) \quad (3.39)$$

และ

$$I_{C2} = I_s \exp\left(\frac{V_2}{V_T}\right) \quad (3.40)$$

โดยแรงดันขาเข้า V_m คือ

$$V_m = V_2 - V_1 \quad (3.41)$$

ถ้าทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 มีคุณสมบัติในการทำงานเหมือนกัน นั่นคือมีค่ากระแส I_s เท่ากัน จะได้ความสัมพันธ์จากสมการที่ (3.39), (3.40) และ (3.41) คือ

$$V_m = V_T \ln\left(\frac{I_{C2}}{I_{C1}}\right) \quad (3.42)$$

ถ้าแรงดันขาเข้า V_m มีขนาดเล็กน้อยมาก ๆ ค่าอัตราส่วนของกระแสในเทอม $\ln(I_{C2}/I_{C1})$ จะมีค่าเข้าใกล้ 1 โดยการกระจายอนุกรมของเทย์เลอร์ (Taylor's Series) ของสมการที่ (3.42) จะได้

$$\ln x = 2 \left\{ \frac{x-1}{x+1} + \frac{1}{3} \left(\frac{x-1}{x+1}\right)^3 + \frac{1}{5} \left(\frac{x-1}{x+1}\right)^5 + \dots \right\} \quad (3.43)$$

จะประมาณค่าเทอม $\ln(I_{C2}/I_{C1})$ ได้ว่า

$$\ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}} = 2 \left\{ \left(\frac{I_{C2} - I_{C1}}{I_{C2} + I_{C1}}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{I_{C2} - I_{C1}}{I_{C2} + I_{C1}}\right)^3 + \frac{1}{5} \left(\frac{I_{C2} - I_{C1}}{I_{C2} + I_{C1}}\right)^5 + \dots \right\} \quad (3.44)$$

โดยตั้งแต่เทอมที่ 2 เป็นต้นไป จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสองเทอมแรก ซึ่งสมการที่ (3.44) จะประมาณค่าเท่ากับ

$$\ln\left(\frac{I_{C2}}{I_{C1}}\right) = \frac{I_{C2} - I_{C1}}{I_{C1}} \quad (3.45)$$

แทนสมการที่ (3.45) ลงในสมการที่ (3.42) จะได้

$$\begin{aligned} V_m &= V_T \left(\frac{I_{C2} - I_{C1}}{I_{C1}} \right) \\ &= V_T \left(\frac{I_{C2} - I_{C1}}{I_B / 2} \right) \end{aligned} \quad (3.46)$$

โดยค่ากระแส I_O นั้น มีค่าเท่ากับ $I_{C2} - I_{C1}$ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_O และแรงดัน V_m คือ

$$V_m = \frac{2V_T}{I_B} I_O \quad (3.47)$$

หรือ

$$I_O = \frac{I_B}{2V_T} V_m \quad (3.48)$$

โดย

$$g_m = \frac{I_B}{2V_T} \quad (3.49)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่า g_m ของวงจรรขยายโอทีเอ สามารถปรับได้โดยการปรับค่ากระแสไบอัส จากภายนอกที่ป้อนให้กับโอทีเอนั่นเอง

3.4 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของวงจรรทรานส์ลีนีเยอร์ ซึ่งจะนำไปใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์วงจรในวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งยังได้อธิบายถึงหลักการพื้นฐานของวงจรถะท้อนกระแสและวงจรรขยายโอทีเอ ที่จะนำไปรวมใช้ในการออกแบบวงจรรขยายเชิงลอคการริทมิก และวงจรรขยายเชิงแอนติลอคการริทมิกในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

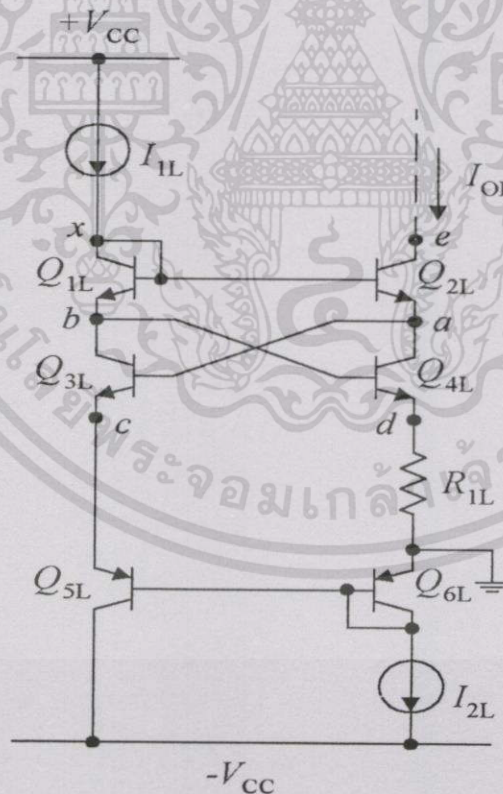
บทที่ 4

การออกแบบวงจรขยายเชิงลอคการริวมิก และแอนติลอคการริวมิกที่มีการทำงานในรูปกระแส

4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะนำเสนอหลักการและการออกแบบวงจรขยายเชิงลอคการริวมิก และแอนติลอคการริวมิก โดยอาศัยหลักการของวงจรทรานส์ซิสเตอร์ที่ได้เสนอไปแล้วในบทที่ 3 มาเป็นแนวทางในการออกแบบวงจร รวมถึงนำเสนอการชดเชยผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในวงจรทั้งสองอีกด้วย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2 การออกแบบวงจรขยายเชิงลอคการริวมิกที่มีการทำงานในรูปกระแส [20]



รูปที่ 4.1 วงจรขยายเชิงลอคการริวมิกที่มีการทำงานในรูปของกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรขยายเชิงลอคการิริมิกที่ทำงานในรูปของกระแสแสดงในรูปที่ 4.1 วงจรประกอบด้วยไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN 4 ตัว คือ $Q_{IL} - Q_{4L}$, ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP 2 ตัว คือ Q_{5L} กับ Q_{6L} , ตัวต้านทาน R_{IL} และแหล่งจ่ายกระแสคงที่ I_{2L} โดยกระแส I_{IL} และ I_{OL} เป็นกระแสอินพุทและกระแสเอาต์พุทของวงจร ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.1 สามารถหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นในวงจร โดยใช้การวิเคราะห์แบบทรานส์ลิเนียร์ได้ดังนี้

$$V_{BE1L} + V_{BE4L} + I_{OL}R_{IL} + V_{EB6L} = V_{BE2L} + V_{BE3L} + V_{EB5L} \quad (4.1)$$

จากสมการที่ (2.4) จะได้ค่าแรงดันเบส-อิมิตเตอร์ คือ

$$V_{BEi} = V_T \ln \frac{I_{Ci}}{I_{Si}} \quad (4.2)$$

แทนค่า V_{BE} จากสมการที่ (4.2) ลงในสมการ (4.1) จะได้

$$V_T \ln \left[\frac{I_{C1L} I_{C4L} I_{C6L}}{I_{S1L} I_{S4L} I_{S6L}} \right] + I_{OL} R_{IL} = V_T \ln \left[\frac{I_{C2L} I_{C3L} I_{C5L}}{I_{S2L} I_{S3L} I_{S5L}} \right] \quad (4.3)$$

ถ้าทรานซิสเตอร์ $Q_{IL} - Q_{4L}$ และ Q_{5L} กับ Q_{6L} ทุกตัวมีคุณสมบัติในการทำงานเหมือนกันนั่นคือ $I_{S1L} = I_{S2L} = I_{S3L} = I_{S4L} = I_{S5L} = I_{S6L} = I_{SN}$ และ $I_{S1L} = I_{S2L} = I_{S3L} = I_{S4L} = I_{S5L} = I_{S6L} = I_{SP}$ จึงทำให้สมการที่ (4.3) เขียนใหม่ได้เป็น

$$I_{OL} R_{IL} = V_T \ln \left[\frac{I_{C2L} I_{C3L} I_{C5L}}{I_{C1L} I_{C4L} I_{C6L}} \right] \quad (4.4)$$

จากวงจรในรูปที่ 4.1 เราทราบว่า $I_{IL} = I_{C1L} = I_{C3L} = I_{C5L}$, $I_{OL} = I_{C2L} = I_{C4L}$ และ $I_{C6L} = I_{2L}$ ดังนั้นจะได้

$$I_{OL} = \frac{V_T}{R_{IL}} \ln \left[\frac{I_{1L}}{I_{2L}} \right] \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.5) จะเห็นว่าวงจรมิติเชิงลอคการิริมิกที่นำเสนอในรูปที่ 4.1 นั้น ให้ กระแสเอาต์พุตเป็นความสัมพันธ์ของฟังก์ชันลอคการิริมิกกับกระแสอินพุต

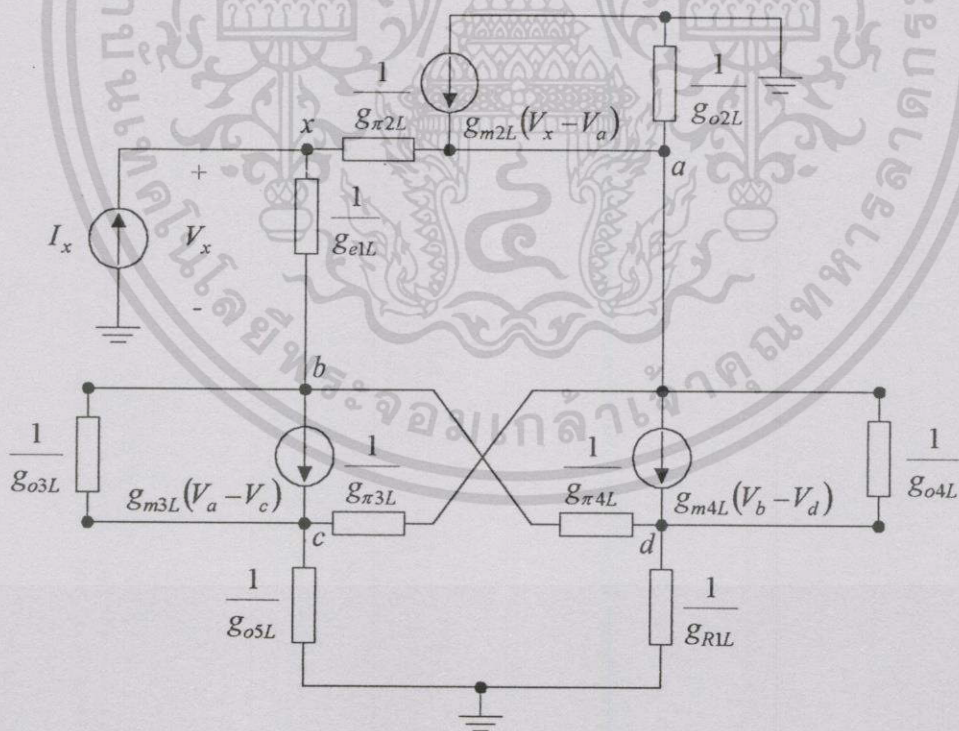
4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติการทำงานของวงจรมิติเชิงลอคการิริมิก

ในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติการทำงานของวงจรมิติเชิงลอคการิริมิกที่ได้ออกแบบในหัวข้อที่ 4.2 ซึ่งได้แก่ ค่าความต้านทานอินพุต และ เอาต์พุต ค่าช่วงแหล่งจ่ายไฟคงที่ ค่าช่วงปฏิบัติการของกระแสอินพุต

4.3.1 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานอินพุต

จากวงจรที่รูปที่ 4.1 ในการวิเคราะห์ค่าความต้านทานอินพุตของวงจรมิติเชิงลอคการิริมิก สามารถทำได้โดยการแทนวงจรมิติที่ 4.1 ด้วยวงจรมิติสำหรับสัญญาณขนาดเล็กโดยไม่พิจารณาผลของตัวเก็บประจุแฝง ดังแสดงในรูปที่ 4.2

สำหรับการวิเคราะห์ค่าความต้านทานอินพุต สามารถทำได้โดยป้อนกระแสทดสอบ I_x ที่จุด x จากนั้นพิจารณาหาค่าของศักดา V_x ที่จุด x



รูปที่ 4.2 วงจรสมมติสำหรับวิเคราะห์ค่าความต้านทานอินพุตของวงจรมิติเชิงลอคการิริมิก

จากวงจรรูปที่ 4.2 พิจารณาที่จุดต่างๆ ซึ่งสามารถใช้กฎของ (KCL Kirchhoff's Current Law) สร้างเป็นสมการได้ดังนี้

ที่จุด a จะได้

$$\begin{aligned} g_{\pi 2L}(v_a - v_x) + g_{m4L}(v_b - v_d) + g_{\pi 3L}(v_d - v_c) \\ + g_{o2L}(v_a) + g_{o4L}(v_a - v_d) - g_{m2L}(v_x - v_d) = 0 \end{aligned} \quad (4.6)$$

ที่จุด b จะได้

$$g_{eL}(v_b - v_x) + g_{\pi 4L}(v_b - v_d) + g_{m3L}(v_d - v_c) + g_{o3L}(v_b - v_c) = 0 \quad (4.7)$$

ที่จุด c จะได้

$$g_{o3L}(v_c - v_b) + g_{\pi 3L}(v_c - v_a) - g_{m3L}(v_d - v_c) + g_{o5L}(v_c) = 0 \quad (4.8)$$

ที่จุด d จะได้

$$g_{rL}(v_d) + g_{\pi 4L}(v_d - v_b) - g_{m4L}(v_b - v_d) + g_{o4L}(v_d - v_c) = 0 \quad (4.9)$$

ที่จุด x จะได้

$$g_{eL}(v_x - v_b) + g_{\pi 2L}(v_x - v_d) = i_x \quad (4.10)$$

เมื่อ g_{oIL} ค่าความนำซึ่งเป็นส่วนกลับของค่า r_o ของทรานซิสเตอร์ Q_{IL}

เมื่อ g_{eIL} ค่าความนำซึ่งเป็นส่วนกลับของค่า r_e ของทรานซิสเตอร์ Q_{IL}

เมื่อ $g_{\pi 4L}$ ค่าความนำซึ่งเป็นส่วนกลับของค่า r_{π} ของทรานซิสเตอร์ Q_{IL}

เมื่อ g_{rIL} ค่าความนำซึ่งเป็นส่วนกลับของค่าความต้านทาน R_{IL}

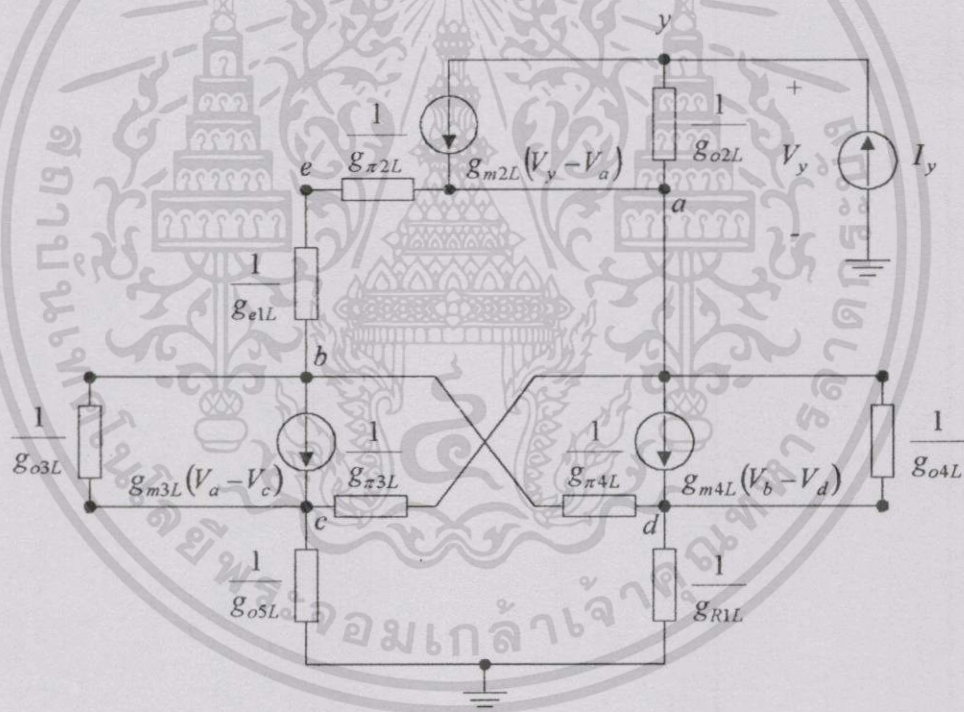
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.6) ถึง (4.10) สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานอินพุทของวงจรขยายเชิงลอคการิริมิก ที่จุด x ได้ซึ่งมีค่าเป็น

$$R_{in} = \frac{V_x}{I_x} \approx \frac{((g_{m2L} - g_{\pi3L})(-g_{m4L}g_{\pi4L}) + g_{e1L}(g_{m4L} + g_{r1L}))}{\begin{pmatrix} g_{m2L}g_{m4L}g_{\pi2L}g_{\pi4L} - g_{e1L} & \begin{pmatrix} g_{m2L}g_{m4L}(g_{\pi2L} + g_{\pi4L}) \\ + g_{m2L}g_{\pi2L}g_{r1L} \\ - g_{m4L}(g_{\pi3L}g_{\pi4L} + g_{\pi2L}g_{r1L}) \end{pmatrix} \end{pmatrix}} \quad (4.11)$$

4.3.2 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานเอาต์พุท

จากวงจรที่รูปที่ 4.1 ในการวิเคราะห์ค่าความต้านทานเอาต์พุทของวงจรขยายเชิงลอคการิริมิก สามารถทำได้โดยการแทนวงจรรูปที่ 4.1 ด้วยวงจรเสมือนสำหรับสัญญาณขนาดเล็กโดยไม่พิจารณาผลของตัวเก็บประจุแฝง ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรเสมือนสำหรับวิเคราะห์ค่าความต้านทานเอาต์พุทของวงจรขยายเชิงลอคการิริมิก

สำหรับการวิเคราะห์ค่าความต้านทานเอาต์พุท สามารถทำได้โดยป้อนกระแสทดสอบ I_y ที่จุด y จากนั้นพิจารณาหาค่าของศักดา V_y ที่จุด y

จากวงจรรูปที่ 4.3 พิจารณาที่จุดต่างๆ ซึ่งสามารถใช้กฎของ (KCL Kirchhoff's Current Law) สร้างเป็นสมการได้ดังนี้

ที่จุด a จะได้

$$\begin{aligned} g_{\pi 2L}(v_a - v_e) + g_{m4L}(v_b - v_d) + g_{\pi 3L}(v_a - v_c) \\ + g_{o2L}(v_a - v_y) + g_{o4L}(v_a - v_d) - g_{m2L}(v_e - v_a) = 0 \end{aligned} \quad (4.12)$$

ที่จุด b จะได้

$$g_{o1L}(v_b - v_e) + g_{\pi 4L}(v_b - v_d) + g_{m3L}(v_a - v_e) + g_{o3L}(v_b - v_e) = 0 \quad (4.13)$$

ที่จุด c จะได้

$$g_{o3L}(v_c - v_b) + g_{\pi 3L}(v_c - v_a) - g_{m3L}(v_a - v_e) + g_{o5L}(v_c) = 0 \quad (4.14)$$

ที่จุด d จะได้

$$g_{r1L}(v_d) + g_{\pi 4L}(v_d - v_b) - g_{m4L}(v_b - v_d) + g_{o4L}(v_d - v_a) = 0 \quad (4.15)$$

ที่จุด e จะได้

$$g_{\pi 2L}(v_e - v_a) + g_{e1L}(v_e - v_b) = 0 \quad (4.16)$$

ที่จุด y จะได้

$$g_{o2L}(v_y - v_a) + g_{m2L}(v_e - v_a) = i_y \quad (4.17)$$

เมื่อ g_{oi} ค่าความนำซึ่งเป็นส่วนกลับของค่า r_o ของทรานซิสเตอร์ Q_i

เมื่อ g_{eIL} ค่าความนำซึ่งเป็นส่วนกลับของค่า r_e ของทรานซิสเตอร์ Q_{IL}

เมื่อ $g_{\pi i}$ ค่าความนำซึ่งเป็นส่วนกลับของค่า r_{π} ของทรานซิสเตอร์ Q_i

เมื่อ g_{rIL} ค่าความนำซึ่งเป็นส่วนกลับของค่าความต้านทาน R_{IL}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.12) ถึง (4.17) สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานเอาต์พุตของวงจรขยายเชิงลอคการิริมิก ที่จุด y ได้ซึ่งมีค่าเป็น

$$R_{out} = \frac{V_y}{I_y} \approx \frac{1}{g_{o2L}} \quad (4.18)$$

4.3.3 การวิเคราะห์ค่าแหล่งจ่ายไฟคงที่

จากวงจรที่รูปที่ 4.1 จะได้ค่าแหล่งจ่ายไฟคงที่ต่ำสุดที่ทำให้วงจรขยายเชิงลอคการิริมิกยังคงทำงานได้ คือ

$$V_{CC\ min} \geq 2V_{BE} + V_{CE(Sat)} + I_{OL} R_{1L} \quad (4.19)$$

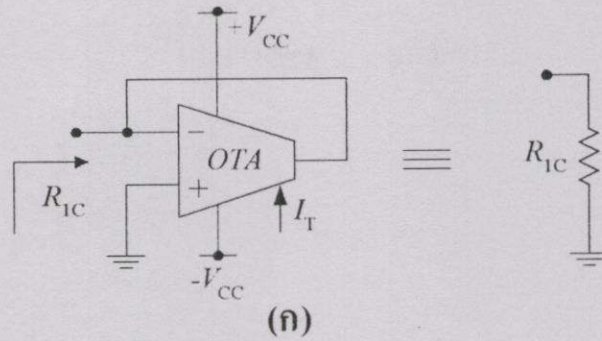
4.3.4 การวิเคราะห์ค่าช่วงปฏิบัติการของกระแสอินพุท

จากสมการที่ (4.5) จะเห็นได้ว่า ถ้ากระแสอินพุท I_{IL} มีค่าน้อยกว่า กระแสไบอัส I_{2L} จะทำให้ค่า $\ln \left[\frac{I_{1L}}{I_{2L}} \right]$ มีค่าเป็นลบ ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสเอาต์พุท มีค่าผิดไปจากความเป็นจริง ดังนั้นกระแสอินพุทต่ำสุดที่ทำให้วงจรทำงานได้ถูกต้อง คือ

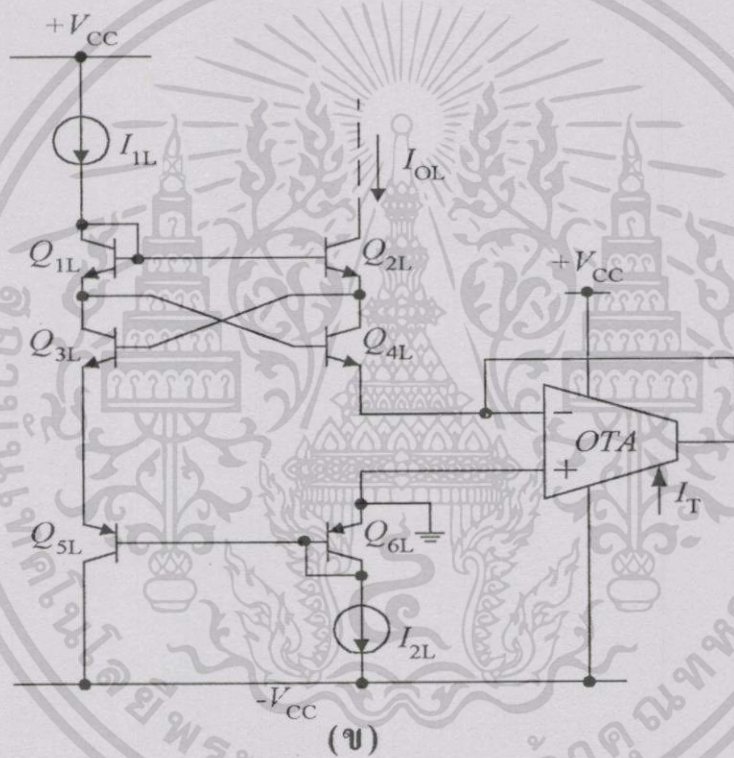
$$I_{1L} \geq I_{2L} \quad (4.20)$$

4.4 การชดเชยผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในวงจรขยายเชิงลอคการิริมิก โดยใช้วงจรขยายโอทีเอ

จากสมการที่ (4.5) จะเห็นว่าการทำงานของวงจรขยายเชิงลอคการิริมิกนั้นยังขึ้นกับอุณหภูมิคือมีค่าของ V_T ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเสนอการชดเชยผลของอุณหภูมิในวงจร โดยใช้วงจรขยายโอทีเอ สังเคราะห์เป็นความต้านทานเสมือน R_{1C} ดังรูปที่ 4.4ก และนำไปต่อแทน R_{1L} ในวงจรขยายเชิงลอคการิริมิก ดังแสดงการต่อวงจรขยายโอทีเอ กับวงจรขยายเชิงลอคการิริมิกในรูปที่ 4.4ข



รูปที่ 4.4ก การต่อวงจรขยายโอทีเอ สัมเคราะห์เป็นความต้านทานเสมือน R_{1C}



รูปที่ 4.4ข การใช้วงจรถ่ายโอทีเอ ต่อเป็นความต้านทานเสมือน R_{1C} เพื่อลดผลของอุณหภูมิ

จากสมการที่ (3.49) จะได้ว่าค่าความต้านทานเสมือน R_{1C} มีค่าเป็น

$$R_{1C} = \frac{1}{g_m} = \frac{2V_T}{I_T} \quad (4.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า R_{IC} จากสมการที่ (4.21) ลงไปแทน R_{IL} ในสมการที่ (4.5) สำหรับวงจรขยายเชิงลอคการิธิมิก จะได้

$$I_{OL} = \frac{I_T}{2} \ln \frac{I_{1L}}{I_{2L}} \quad (4.22)$$

จากสมการที่ (4.22) จะเห็นได้ว่าขณะนี้การทำงานของวงจรขยายเชิงลอคการิธิมิกนั้น ได้มีการชดเชยผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในวงจร

4.5 การชดเชยผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในวงจรขยายเชิงลอคการิธิมิก โดยใช้วงจรที่มี

เทอม V_T

ในหัวข้อนี้จะเสนอการชดเชยผลของอุณหภูมิในวงจรอีกวิธีหนึ่ง เนื่องจากการชดเชยผลของอุณหภูมิโดยใช้วงจรขยายโอทีเอในหัวข้อที่แล้วนั้น ยังมีข้อจำกัดทางด้านช่วงปฏิบัติงานที่เป็นเชิงเส้นของวงจรขยายโอทีเออยู่ ดังที่ได้นำเสนอไปแล้วในบทที่ 3 โดยในหัวข้อนี้จะใช้วงจรที่มีเทอม V_T และวงจรคูณ/หารกระแส (Multiplier/Divider) เข้ามาต่อร่วมกันเพื่อชดเชยผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในวงจรขยายเชิงลอคการิธิมิก

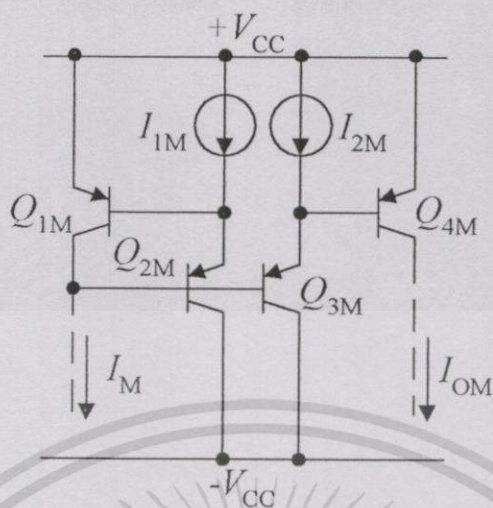
สำหรับวงจรที่มีเทอม V_T นั้น ดัดแปลงมาจากวงจรขยายเชิงลอคการิธิมิกนั่นเอง โดยจากสมการที่ (4.5) จะเห็นได้ว่าเอาท์พุทของวงจรขยายเชิงลอคการิธิมิกมีเทอมของ V_T อยู่ซึ่งเราสามารถทำให้เอาท์พุทเหลือเฉพาะเทอมของ V_T โดยให้กำหนดให้ แหล่งจ่ายกระแสคงที่ $I_{1T}/I_{2T} = e$ หรือมีกระแส I_{1T} มีค่าประมาณ 2.7183 เท่าของกระแส I_{2T} จะทำให้สมการที่ (4.5) เป็น

$$I_{OT} = \frac{V_T}{R_T} \quad (4.23)$$

โดยนำวงจรดังกล่าวมาประกอบกับวงจรคูณ/หารกระแส ดังแสดงรูปที่ 4.5 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของวงจรคูณ/หารกระแสได้ คือ

$$V_{BE1M} + V_{BE2M} = V_{BE3M} + V_{BE4M} \quad (4.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 วงจรคูลม/หารกระแส

แทนค่า แรงดันเบส - อิมิตเตอร์ จากสมการที่ (2.4) ลงในสมการที่ (4.24) จะได้ว่า

$$V_T \ln \left[\frac{I_{C1M} I_{C2M}}{I_{S1M} I_{S2M}} \right] = V_T \ln \left[\frac{I_{C3M} I_{C4M}}{I_{S3M} I_{S4M}} \right] \tag{4.25}$$

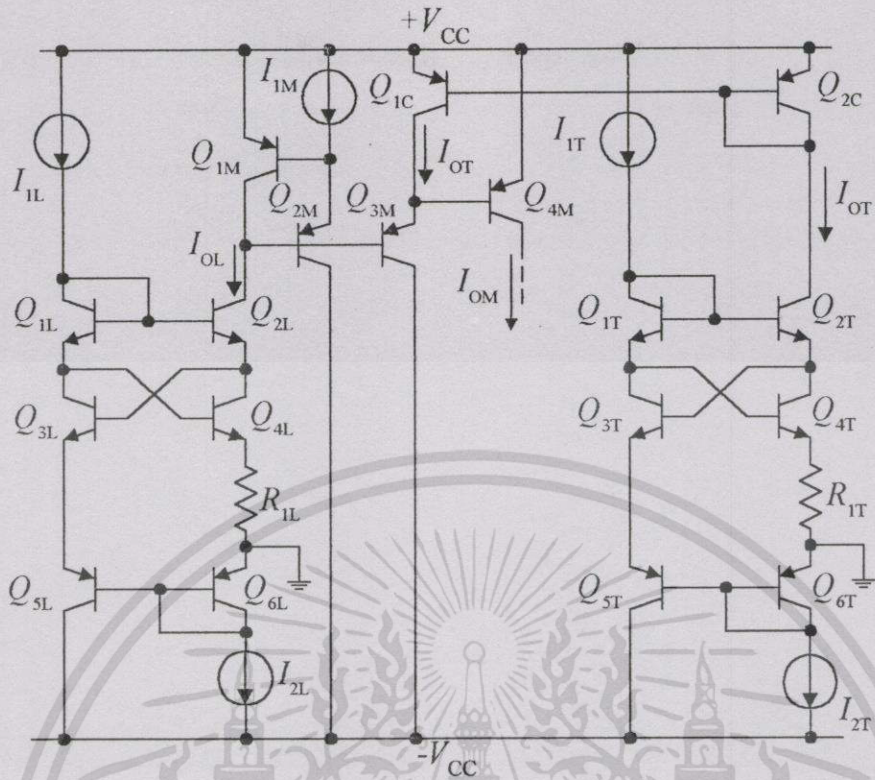
ถ้าทรานซิสเตอร์ Q_{1M} ถึง Q_{4M} ทุกตัวมีคุณสมบัติในการทำงานเหมือนกันนั่นคือ $I_{S1M} = I_{S2M} = I_{S3M} = I_{S4M} = I_{SP}$ จึงทำให้สมการที่ (4.25) เขียนใหม่ได้เป็น

$$V_T \ln \left[\frac{I_{C1M} I_{C2M}}{I_{C3M} I_{C4M}} \right] = 0 \tag{4.26}$$

และจากวงจรในรูปที่ 4.5 จะได้ $I_{C1M} = I_M$, $I_{C2M} = I_{1M}$, $I_{C3M} = I_{2M}$ และ $I_{C4M} = I_{OM}$ จะได้ความสัมพันธ์ของวงจรคูลม/หารกระแส คือ

$$I_{OM} = \frac{I_M I_{1M}}{I_{2M}} \tag{4.27}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 การชดเชยผลของอุณหภูมิในวงจรขยายเชิงลอคการริทิก โดยใช้วงจรที่มีเทอม V_T

นำวงจรที่มีเทอม V_T และวงจรคูณ/หารกระแส ไปต่อร่วมกับวงจรขยายเชิงลอคการริทิก ดังรูปที่ 4.6 โดยแทนกระแส I_M ด้วยกระแส I_{OL} และแทนกระแส I_{2M} ด้วยกระแส I_{OT} จากสมการที่ (4.5), (4.23) และ (4.27) จะได้ว่า

$$I_{OM} = \frac{\frac{V_T}{R_{IL}} \ln \left[\frac{I_{1L}}{I_{2L}} \right] I_{1M}}{\frac{V_T}{R_{IT}}} \tag{4.28}$$

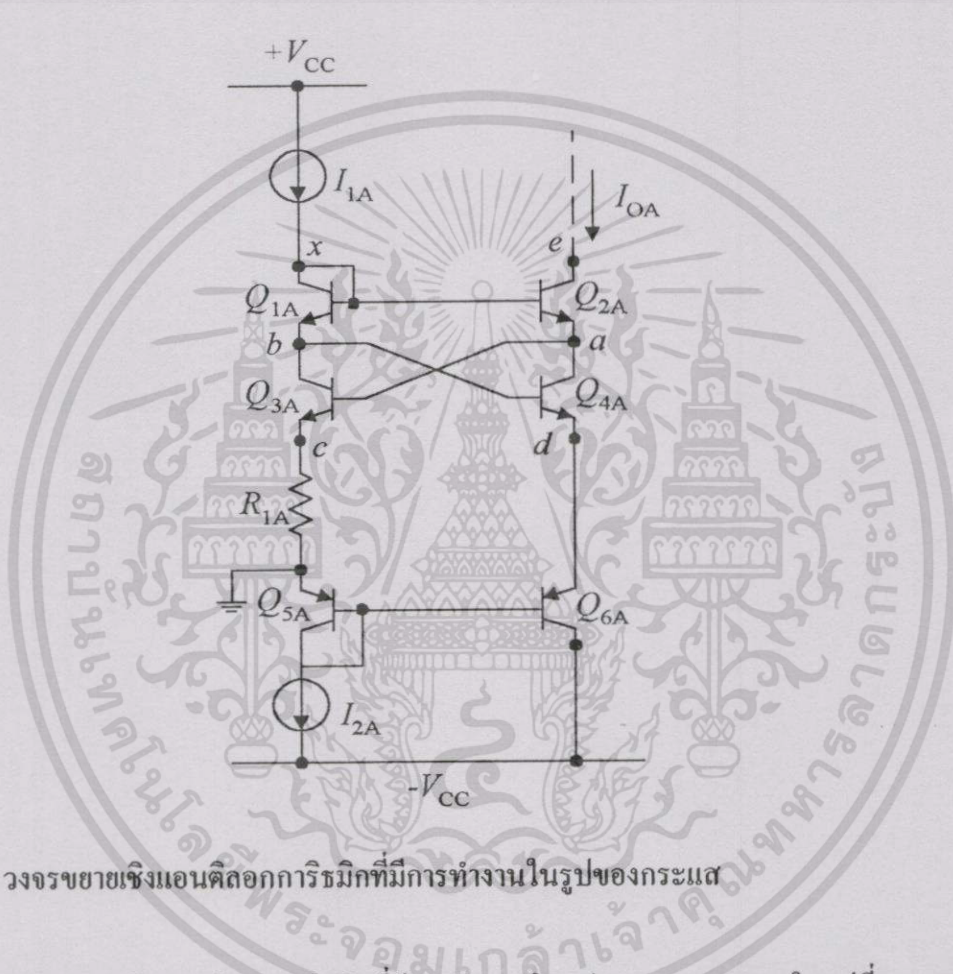
กำหนดให้ $R_{IL} = R_{IT}$ จะได้ว่า

$$I_{OM} = I_{1M} \ln \left[\frac{I_{1L}}{I_{2L}} \right] \tag{4.29}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.29) จะเห็นได้ว่า กระแสเอาต์พุต I_{MO} เป็นฟังก์ชันลอการิทึมกับค่ากระแสอินพุต ซึ่งในที่นี้คือ I_{IL} และจะเห็นได้ว่าขณะนี้การทำงานของวงจรมายเชิงลอการิทึมได้มีการชดเชยผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในวงจร

4.6 การออกแบบวงจรมายเชิงแอนติลอการิทึมที่มีการทำงานในรูปของกระแส [21]



รูปที่ 4.7 วงจรมายเชิงแอนติลอการิทึมที่มีการทำงานในรูปของกระแส

วงจรมายเชิงแอนติลอการิทึมที่มีการทำงานในรูปของกระแสแสดงในรูปที่ 4.7 วงจรประกอบด้วย ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN 4 ตัว คือ Q_{1A} - Q_{4A} , ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP 2 ตัว คือ Q_{5A} กับ Q_{6A} , ตัวต้านทาน R_{1A} และแหล่งจ่ายกระแสคงที่ I_{2A} โดยกระแส I_{1A} และ $I_{O,A}$ เป็นกระแสอินพุตและกระแสเอาต์พุตของวงจร ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.7 สามารถหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นในวงจร โดยใช้การวิเคราะห์แบบทรานส์ลิเนียร์ได้ดังนี้

$$V_{BE1A} + V_{BE4A} + V_{BE6A} = V_{BE2A} + V_{BE3A} + V_{BE5A} + I_{1A} R_{1A} \quad (4.30)$$

จากสมการที่ (2.4) จะได้ค่าแรงดันเบส-อิมิตเตอร์ คือ

$$V_{BEi} \cong V_T \ln \frac{I_{Ci}}{I_{Si}} \quad (4.31)$$

แทนค่า V_{BE} จากสมการที่ (4.31) ลงใน (4.30) จะได้

$$V_T \ln \left[\frac{I_{C1A} I_{C4A} I_{C6A}}{I_{S1A} I_{S4A} I_{S6A}} \right] = V_T \ln \left[\frac{I_{C2A} I_{C3A} I_{C5A}}{I_{S2A} I_{S3A} I_{S5A}} \right] + I_{1A} R_{1A} \quad (4.32)$$

ถ้าทรานซิสเตอร์ Q_{1A} ถึง Q_{4A} และ Q_{5A} กับ Q_{6A} ทุกตัวมีคุณสมบัติในการทำงานเหมือนกันนั่นคือ $I_{S1A} = I_{S2A} = I_{S3A} = I_{S4A} = I_{S5A} = I_{S6A} = I_{SN}$ และ $I_{S5A} = I_{S6A} = I_{SP}$ จึงทำให้สมการที่ (4.32) เขียนใหม่ได้เป็น

$$I_{1A} R_{1A} = V_T \ln \left[\frac{I_{C1A} I_{C4A} I_{C6A}}{I_{C2A} I_{C3A} I_{C5A}} \right] \quad (4.33)$$

และจากวงจรในรูปที่ 4.7 เราทราบว่า $I_{1A} = I_{C1A} = I_{C3A}$, $I_{O4A} = I_{C2A} = I_{C4A} = I_{C6A}$ และ $I_{C5A} = I_{2A}$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$I_{1A} R_{1A} = V_T \ln \left[\frac{I_{O4A}}{I_{2A}} \right] \quad (4.34)$$

หรือ

$$I_{O4A} = I_{2A} e^{I_{1A} R_{1A} / V_T} \quad (4.35)$$

จากสมการที่ (4.35) จะเห็นว่าวงจรขยายเชิงแอนติลอกการริสมิกที่นำเสนอในรูปที่ 4.7 นั้น กระแสเอาต์พุตอยู่ในรูปของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลกับกระแสอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การวิเคราะห์คุณสมบัติการทำงานของวงจรขยายเชิงแอนติลอคการริทมิค

ในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติการทำงานของวงจรขยายเชิงแอนติลอคการริทมิคที่ได้ออกแบบในหัวข้อที่ 4.7 ซึ่งได้แก่ ค่าความต้านทานอินพุท และ เอาท์พุท ค่าช่วงแหล่งจ่ายไฟคงที่ ค่าช่วงปฏิบัติการของกระแสอินพุท

4.7.1 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานอินพุท

จากวงจรรูปที่ 4.7 ในการวิเคราะห์ค่าความต้านทานอินพุทของวงจรขยายเชิงแอนติลอคการริทมิค สามารถทำได้โดยการแทนวงจรรูปที่ 4.7 ด้วยวงจรเสมือนสำหรับสัญญาณขนาดเล็กโดยไม่พิจารณาผลของตัวเก็บประจุแฝง ดังแสดงในรูปที่ 4.8

สำหรับการวิเคราะห์ค่าความต้านทานอินพุท สามารถทำได้โดยป้อนกระแสทดสอบ I_x ที่จุด x จากนั้นพิจารณาหาค่าของศักดา V_x ที่จุด x

จากวงจรรูปที่ 4.8 พิจารณาที่จุดต่างๆ ซึ่งสามารถใช้กฎของ (KCL Kirchhoff's Current Law) สร้างเป็นสมการได้ดังนี้

ที่จุด a จะได้

$$g_{\pi 2A}(v_a - v_x) + g_{m4A}(v_b - v_d) + g_{\pi 3A}(v_a - v_c) + g_{o2A}(v_a) + g_{o4A}(v_a - v_d) - g_{m2A}(v_x - v_a) = 0 \quad (4.36)$$

ที่จุด b จะได้

$$g_{c1A}(v_b - v_x) + g_{\pi 4A}(v_b - v_d) + g_{m3A}(v_a - v_c) + g_{o3A}(v_b - v_c) = 0 \quad (4.37)$$

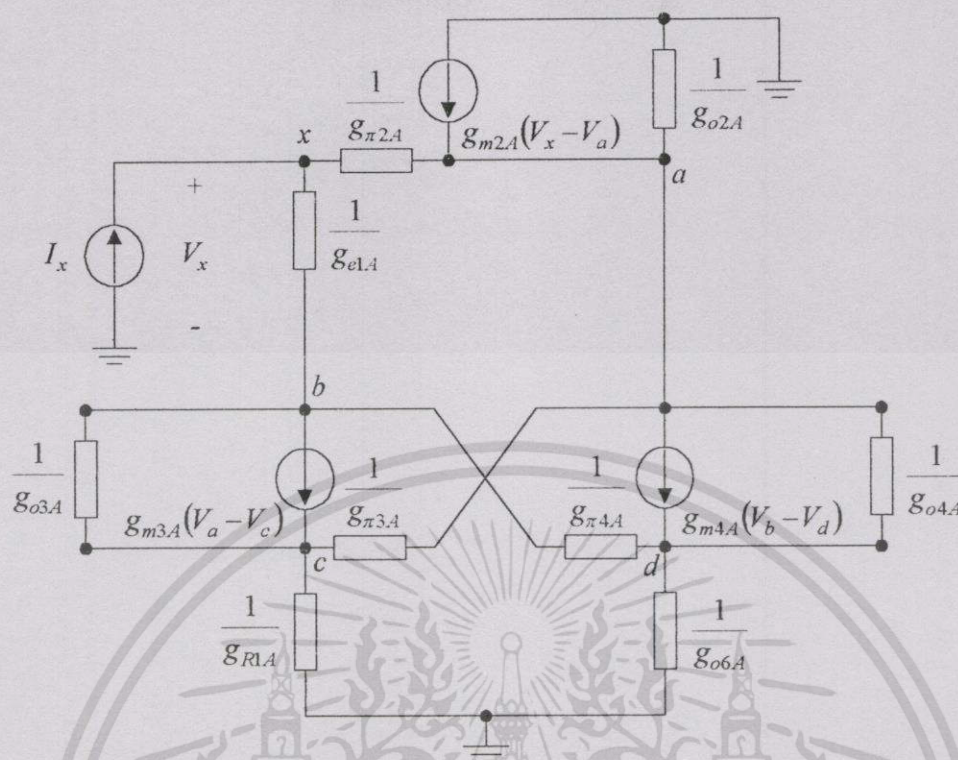
ที่จุด c จะได้

$$g_{o3A}(v_c - v_b) + g_{\pi 3A}(v_c - v_a) - g_{m3A}(v_a - v_c) + g_{r1A}(v_c) = 0 \quad (4.38)$$

ที่จุด d จะได้

$$g_{o6A}(v_d) + g_{\pi 4A}(v_d - v_b) - g_{m4A}(v_b - v_d) + g_{o4A}(v_d - v_c) = 0 \quad (4.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 วงจรเสมือนสำหรับวิเคราะห์ค่าความต้านทานอินพุทของวงจรขยายเชิงแอนติลอกการิมิก

ที่จุด x จะได้ว่า

$$g_{e1A}(v_x - v_b) + g_{\pi2A}(v_x - v_a) = i_x \quad (4.40)$$

เมื่อ g_{oiA} ค่าความนำซึ่งเป็นส่วนกลับของค่า r_o ของทรานซิสเตอร์ Q_{iA}

เมื่อ g_{e1A} ค่าความนำซึ่งเป็นส่วนกลับของค่า r_e ของทรานซิสเตอร์ Q_{1A}

เมื่อ g_{π} ค่าความนำซึ่งเป็นส่วนกลับของค่า r_{π} ของทรานซิสเตอร์ Q_i

เมื่อ g_{r1A} ค่าความนำซึ่งเป็นส่วนกลับของค่าความต้านทาน R_{1A}

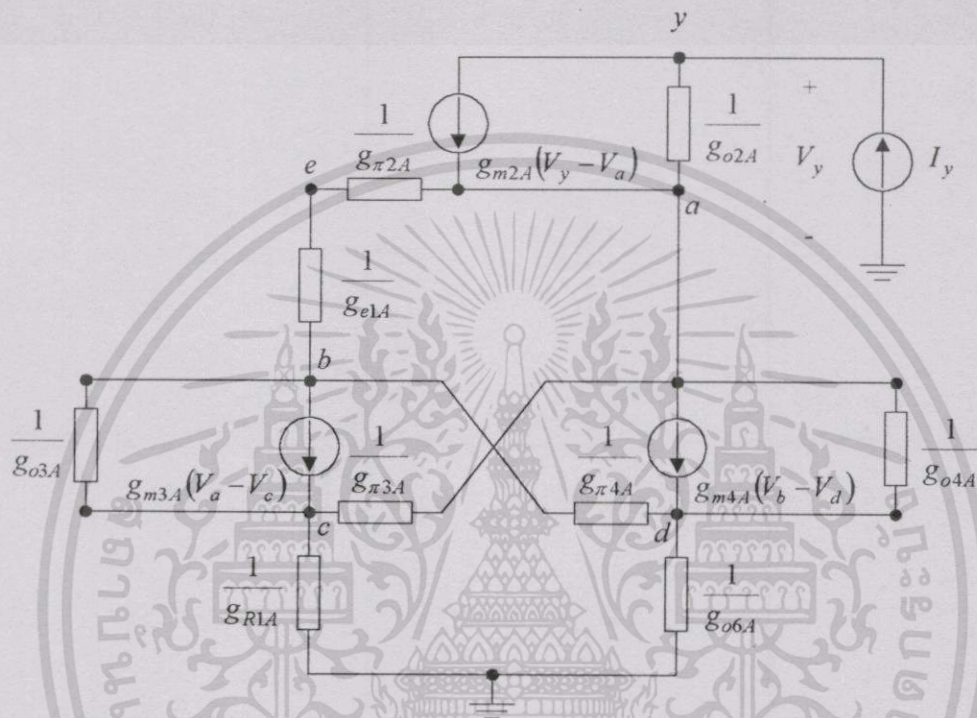
จากสมการที่ (4.36) ถึง (4.40) สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานอินพุทของวงจรขยายเชิงแอนติลอกการิมิก ที่จุด x ได้ซึ่งมีค่าเป็น

$$R_m = \frac{V_x}{I_x} \approx \frac{((g_{e1A} - g_{\pi4A})(-g_{m3A}g_{\pi3A}) + g_{m2A}(g_{m3A} + g_{r1A}))}{\left(\begin{aligned} &(g_{e1A}g_{m3A}(-g_{\pi3A}g_{\pi4A}) + g_{m2A}(g_{\pi2A} + g_{\pi4A})) \\ &+ g_{e1A}g_{m2A}(g_{m3A} - g_{\pi2A} - g_{\pi4A})g_{r1A} \\ &+ g_{m2A}g_{\pi2A}g_{\pi4A}(g_{m3A} + g_{r1A}) \end{aligned} \right)} \quad (4.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.2 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานเอาต์พุต

จากวงจรที่รูปที่ 4.7 ในการวิเคราะห์ค่าความต้านทานเอาต์พุตของวงจรขยายเชิงแอนคล็อกการิชมิก สามารถทำได้โดยการแทนวงจรรูปที่ 4.9 ด้วยวงจรเสมือนสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก โดยไม่พิจารณาผลของตัวเก็บประจุแฝง ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 วงจรเสมือนสำหรับวิเคราะห์ค่าความต้านทานเอาต์พุตของวงจรขยายเชิงแอนคล็อกการิชมิก

จากวงจรรูปที่ 4.9 พิจารณาที่จุดต่างๆ ซึ่งสามารถใช้กฎของ (KCL Kirchhoff's Current Law) สร้างเป็นสมการได้ดังนี้

ที่จุด a จะได้

$$\begin{aligned} &g_{\pi 2A}(v_a - v_e) + g_{m4A}(v_b - v_d) + g_{\pi 3A}(v_a - v_c) \\ &+ g_{o2A}(v_a - v_y) + g_{o4A}(v_a - v_d) - g_{m2A}(v_e - v_a) = 0 \end{aligned} \quad (4.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จุด b จะได้

$$g_{e1A}(v_b - v_e) + g_{\pi4A}(v_b - v_d) + g_{m3A}(v_a - v_c) + g_{o3A}(v_b - v_c) = 0 \quad (4.43)$$

ที่จุด c จะได้

$$g_{o3A}(v_c - v_b) + g_{\pi3A}(v_c - v_a) - g_{m3A}(v_a - v_c) + g_{r1A}(v_c) = 0 \quad (4.44)$$

ที่จุด d จะได้

$$g_{o6A}(v_d) + g_{\pi4A}(v_d - v_b) - g_{m4A}(v_b - v_d) + g_{o4A}(v_d - v_a) = 0 \quad (4.45)$$

ที่จุด e จะได้

$$g_{\pi2L}(v_e - v_a) + g_{o1L}(v_e - v_b) = 0 \quad (4.46)$$

ที่จุด y จะได้

$$g_{o2L}(v_y - v_a) + g_{m2L}(v_e - v_a) = i_y \quad (4.47)$$

เมื่อ g_{o1A} ค่าความนำซึ่งเป็นส่วนกลับของค่า r_o ของทรานซิสเตอร์ Q_{1A}

เมื่อ g_{e1A} ค่าความนำซึ่งเป็นส่วนกลับของค่า r_e ของทรานซิสเตอร์ Q_{1A}

เมื่อ $g_{\pi4A}$ ค่าความนำซึ่งเป็นส่วนกลับของค่า r_{π} ของทรานซิสเตอร์ Q_{1A}

เมื่อ g_{r1A} ค่าความนำซึ่งเป็นส่วนกลับของค่าความต้านทาน R_{1A}

จากสมการที่ (4.42) ถึง (4.47) สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานเอาต์พุตของวงจรถ่ายเชิงแอนะล็อกการริวมิก ที่จุด y ได้ซึ่งมีค่าเป็น

$$R_{out} = \frac{V_y}{I_y} \approx \frac{1}{g_{o2A}} \quad (4.48)$$

4.7.3 การวิเคราะห์ค่าแหล่งจ่ายไฟคงที่

จากวงจรที่รูปที่ 4.7 จะได้ค่าแหล่งจ่ายไฟคงที่ต่ำสุดที่ทำให้วงจรขยายเชิงแอนติลอคการริมิกยังคงทำงานได้ คือ

$$V_{CC\ min} \geq 2V_{BE} + V_{CE(Sat)} + I_{L1} R_{L1} \quad (4.49)$$

4.7.4 การวิเคราะห์ค่าช่วงปฏิบัติการของกระแสอินพุท

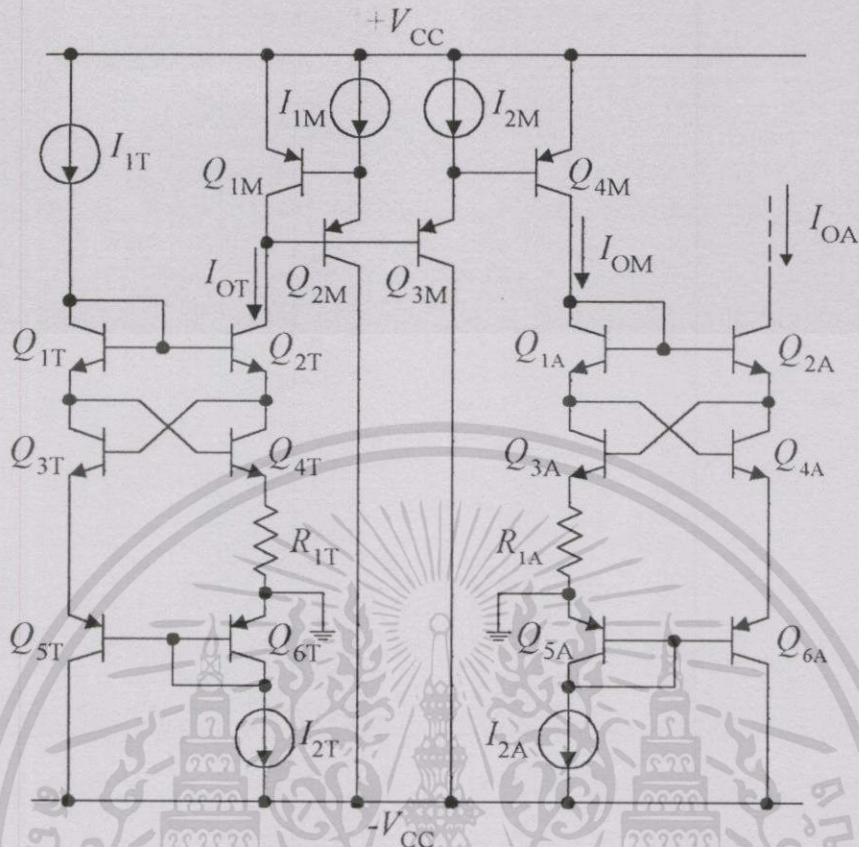
จากรูปที่ 4.7 จะได้ค่ากระแสอินพุทต่ำสุดที่ทำให้วงจรทำงานได้ถูกต้อง คือ

$$I_{L1} > 0 \quad (4.50)$$

4.8 การชดเชยผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในวงจรขยายเชิงแอนติลอคการริมิก โดยใช้วงจรที่มีเทอม V_T

จากสมการที่ (4.35) จะเห็นว่าการทำงานของวงจขยายเชิงแอนติลอคการริมิกนั้นยังขึ้นกับอุณหภูมิ คือมีค่าของ V_T ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเสนอการชดเชยผลของอุณหภูมิในวงจรโดยใช้วงจรที่มีเทอม V_T และวงจรคูณ/หารกระแส (Multiplier/Divider) เข้ามาต่อร่วมกับวงจขยายเชิงแอนติลอคการริมิก เช่นเดียวกับที่นำเสนอไปในหัวข้อ 4.5

นำวงจรที่มีเทอม V_T และวงจรคูณ/หารกระแส ไปต่อร่วมกับวงจขยายเชิงแอนติลอคการริมิก ดังรูปที่ 4.10 โดยแทนกระแส I_M ด้วยกระแส I_{OL} และแทนกระแส I_{L1} ด้วยกระแส I_{OM} จากสมการที่ (4.35), (4.23) และ (4.27) จะได้ว่า



รูปที่ 4.10 การชดเชยผลของอุณหภูมิในวงจรขยายเชิงแอนติลอกการริมิก โดยใช้วงจรที่มีเทอม V_T

$$I_{OA} = I_{2A} e^{\frac{R_{1A} I_{1M}}{R_{1T} I_{2M}}} \tag{4.51}$$

กำหนดให้ $R_{1T} = R_{1A}$ จะได้ว่า

$$I_{OA} = I_{2A} e^{\frac{I_{1M}}{I_{2M}}} \tag{4.52}$$

จากสมการที่ (4.52) จะเห็นได้ว่า กระแสเอาต์พุต I_{OA} เป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลกับค่ากระแสอินพุต ซึ่งในที่นี้คือ I_{1M} และจะเห็นได้ว่าขณะนี้การทำงานของวงจรขยายเชิงแอนติลอกการริมิกนั้น ได้มีการชดเชยผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในวงจร

4.9 บทสรุป

สำหรับบทนี้ ได้นำเสนอหลักการและการออกแบบวงจรขยายเชิงลอคการิธิมิก และแอนติลอคการิธิมิก โดยอาศัยหลักการของวงจรถานส์ลิเนียร์ รวมถึงนำเสนอการชดเชยผลของอุมหุมิที่เกิเกิดขึ้นในวงจรทั้งสองอีกด้วย ซึ่งจากหลักการในบทที่ 4 นี้ และจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลที่คาดว่าจะเกิดขึ้น และเพื่อให้นำไปอ้างอิง หรือเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป PSPICE ในบทต่อไป ว่าจะมีสมรรถนะและการทำงานเป็นไปตามหลักการที่ได้ทำการออกแบบหรือไม่



บทที่ 5

ผลการจำลองการทำงานของวงจรและตัวอย่างการใช้งาน

5.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะนำเสนอผลการจำลองการทำงานของวงจร เพื่อทดสอบคุณสมบัติการทำงานของวงจรว่าเป็นไปตามทฤษฎีที่นำเสนอมาแล้วหรือไม่ โดยใช้โปรแกรม PSPICE ในการจำลองการทำงานของวงจร และในตอนท้ายยังได้นำเสนอตัวอย่างการใช้งานของวงจร ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจร

สำหรับแบบจำลอง (Model) ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ที่ใช้จำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE ในวิชานีพนธ์นี้ ใช้แบบจำลองของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP เบอร์ Q2N3904 และเบอร์ Q2N3906 ตามลำดับ โดยแบบจำลองทั้งสองมีรายละเอียดดังนี้ [22]

* Q2N3904 NPN TRANSISTOR NATIONAL

.MODEL Q2N3904 NPN (IS=6.734e-16 XTI=3 EG=1.11 VAF=60 BF=916.4
+ NE=1.259 ISE=6.734e-16 IKF=10m XTB=1.5 BR=.7371 NC=2 ISC=0 IKR=0
+ RC=1 CJC=0.01p MJC=.3085 VJC=.75 FC=.5 CJE=0.01p MJE=.2593 VJE=.75
+ TR=239.5n TF=325.2p ITF=4 VTF=4 XTF=2 RB=10)

* Q2N3906 PNP TRANSISTOR NATIONAL

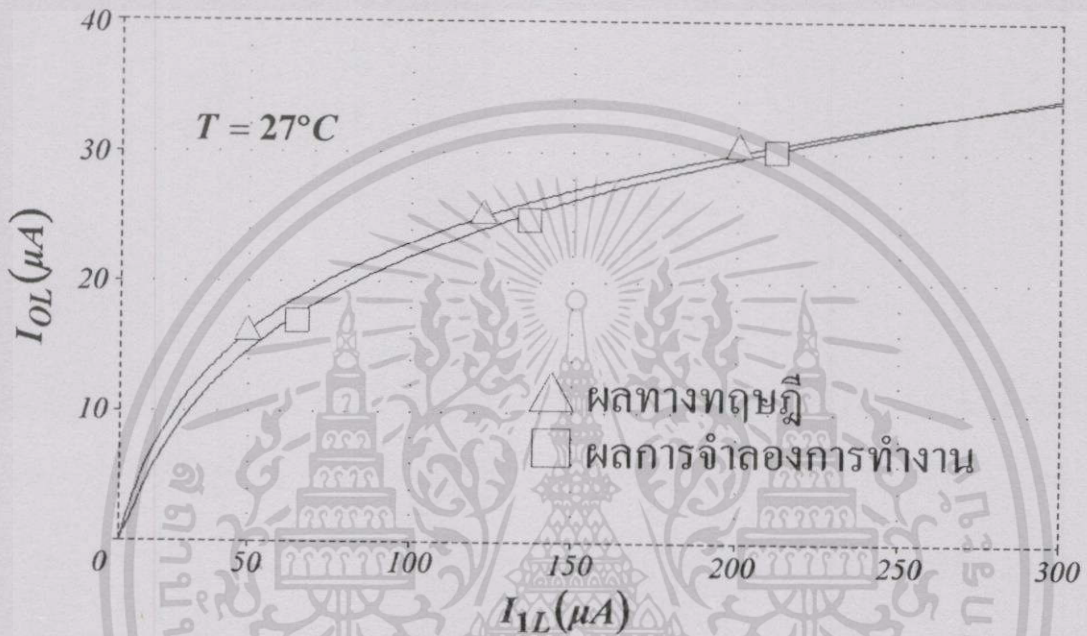
.MODEL Q2N3906 PNP (IS=1.41e-16 XTI=3 EG=1.11 VAF=15 BF=680.7 NE=1.5
+ ISE=0 IKF=20m XTB=1.5 BR=4.977 NC=2 ISC=0 IKR=0 RC=2.5 CJC=0.01p
+ MJC=.5776 VJC=.75 FC=.5 CJE=0.01p MJE=.3677 VJE=.75 TR=33.42n TF=110.3p
+ ITF=4 VTF=4 XTF=6 RB=10)

5.2.1 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเชิงลอคการริธึมิก

จากรูปวงจรขยายเชิงลอคการริธึมิก รูปที่ 4.1 ได้ทำการจำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม PSPICE โดยกำหนดให้ แหล่งจ่ายไฟคงที่ $+V_{CC} = -V_{CC} = 3\text{ V}$, กระแสไบอัส $I_{BQ} = 10\mu\text{A}$, ค่าความต้านทาน $R_{LQ} = 2600\Omega$ และให้จำลองการทำงานที่อุณหภูมิห้อง 27°C ซึ่งจะได้ $V_T \cong 26\text{mV}$

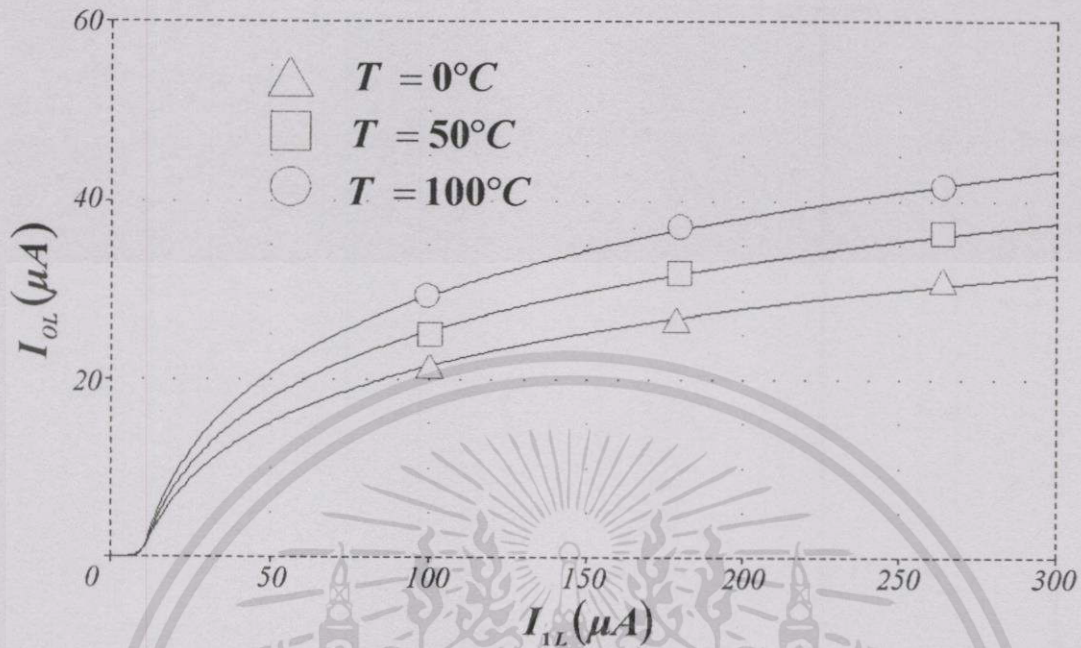
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการแปรค่ากระแสอินพุท I_{IL} จาก $10\mu A$ จนถึง $300\mu A$ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุท I_{IL} กับกระแสเอาต์พุท I_{OL} ของ วงจรขยายเชิงลอคการิริมิกดังรูปที่ 5.1 พบว่ากระแสเอาต์พุท I_{OL} มีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันลอคการิริมิกกับกระแสอินพุท I_{IL} และมีแนวโน้มเป็นไปตามทฤษฎีดังสมการที่ (4.5)



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{IL} กับ I_{OL} ของวงจรขยายเชิงลอคการิริมิก

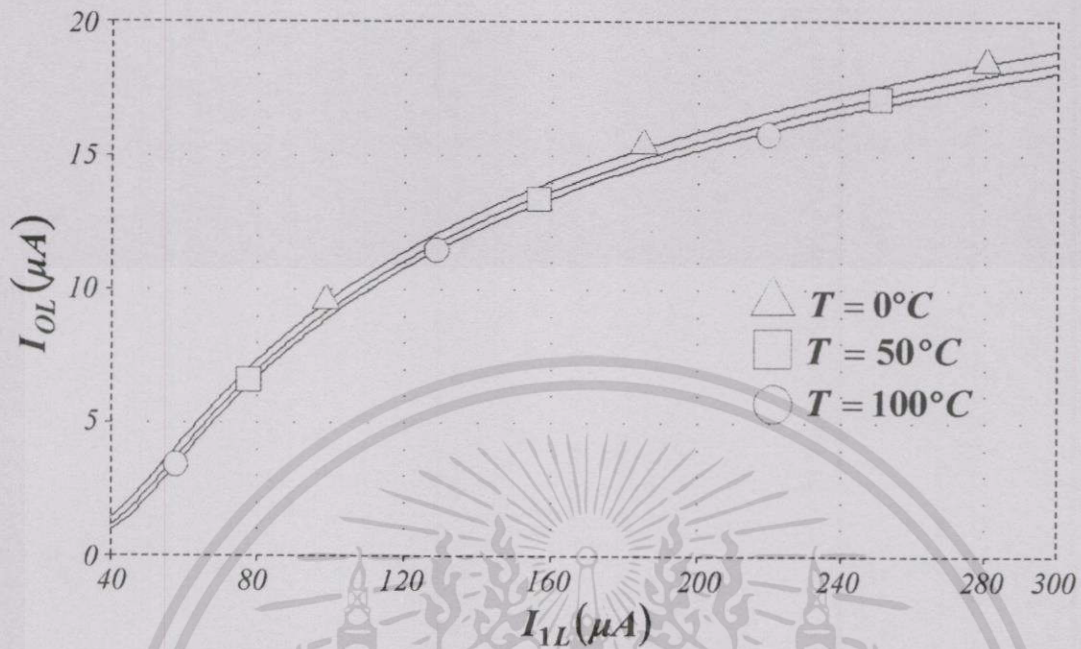
จากนั้นทำการแปรค่าอุณหภูมิเป็น $0^{\circ}C$, $50^{\circ}C$ และ $100^{\circ}C$ ตามลำดับ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุท I_{IL} กับกระแสเอาต์พุท I_{OL} เมื่อมีการแปรค่าอุณหภูมิดังรูปที่ 5.2 พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อกระแสเอาต์พุท I_{OL} ที่เกิดขึ้นในวงจรด้วย



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{IL} กับ I_{OL} ของวงจรรขยายเชิงลอคการิริมิก เมื่อมีการแปรค่าอุณหภูมิ เป็น $0^\circ C$, $50^\circ C$ และ $100^\circ C$

5.2.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรรขยายเชิงลอคการิริมิก เมื่อมีการชดเชยผลของอุณหภูมิ ด้วยวงจรรขยายโอทีเอ

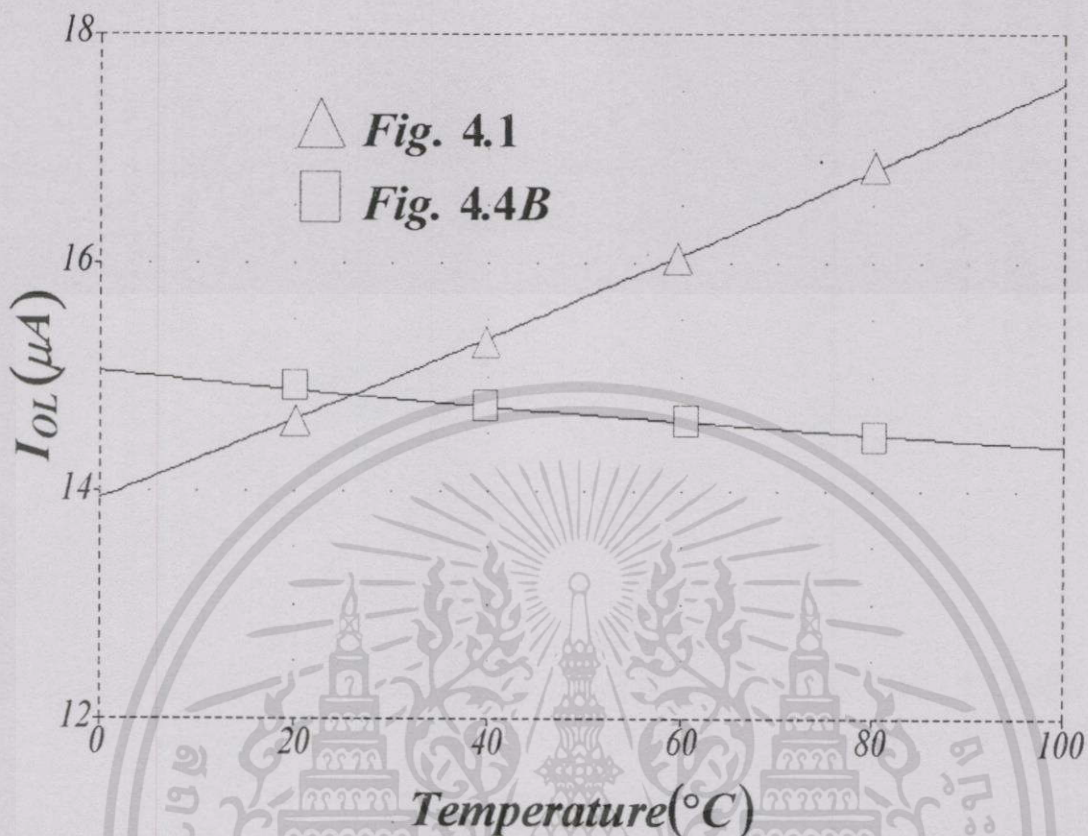
เมื่อนำเอาวงจรรขยายโอทีเอ ไปต่อร่วมกับวงจรรขยายเชิงลอคการิริมิก เพื่อชดเชยผลของอุณหภูมิของวงจรรนั้น ดังรูปที่ 4.4 ข นั้น โดยกำหนดให้ กระแสไบอัส $I_{IL} = 40\mu A$, $I_T = 20\mu A$ ทำการแปรค่ากระแสอินพุท I_{IL} จาก $40\mu A$ จนถึง $300\mu A$ เพื่อให้ค่าของฟังก์ชันลอคการิริมิก มีค่าเช่นเดียวกับหัวข้อ 5.2.1 โดยทำการแปรค่าอุณหภูมิเป็น $0^\circ C$, $50^\circ C$ และ $100^\circ C$ ตามลำดับ ปรากฏผลดังแสดงในรูปที่ 5.3 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจรรได้ถูกชดเชยและมีผลลดลงไปมาก แต่ยังมีผลที่ขึ้นจากอุณหภูมิอยู่บ้าง ทั้งนี้เนื่องมาจากวงจรรขยายโอทีเอนั้นมีช่วงที่เป็นเชิงเส้นที่จำกัดนั่นเอง



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{IL} กับ I_{OL} ของวงจรถ่ายเชิงลอคการิริมิก เมื่อใช้วงจรถ่ายโอทีเอ เพื่อชดเชยผลของอุณหภูมิ ตามรูปที่ 4.4ข

เมื่อนำผลการจำลองการทำงานของวงจรถ่ายเชิงลอคการิริมิกที่ไม่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ และ มีการชดเชยผลของอุณหภูมิโดยใช้วงจรถ่ายโอทีเอมาแสดงรวมกัน จะได้กราฟดังรูปที่ 5.4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และค่ากระแส I_{OL} จากวงจรถ่ายเชิงลอคการิริมิกที่ยังไม่ได้มีการชดเชย และที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิโดยใช้วงจรถ่ายโอทีเอ เมื่อวงจรรูปที่ 4.1 และวงจรรูปที่ 4.4ข มีค่า I_{IL} เท่ากับ $180\mu A$ และค่า I_{2L} เท่ากับ $40\mu A$

จะเห็นได้ว่า ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเอาท์พุท I_{OL} เทียบกับอุณหภูมิ หรือ ค่าอัตราความชันของกราฟในรูปที่ 5.4 กราฟของวงจรมีการชดเชยผลของอุณหภูมินั้น มีความชันน้อยกว่าวงจรมีการชดเชยผลของอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการชดเชยผลของอุณหภูมิโดยใช้วงจรถ่ายโอทีเอแล้ว ทำให้อุณหภูมิมิมีผลต่อกระแสเอาท์พุทวงจรถ่ายเชิงลอคการิริมิกลดลง

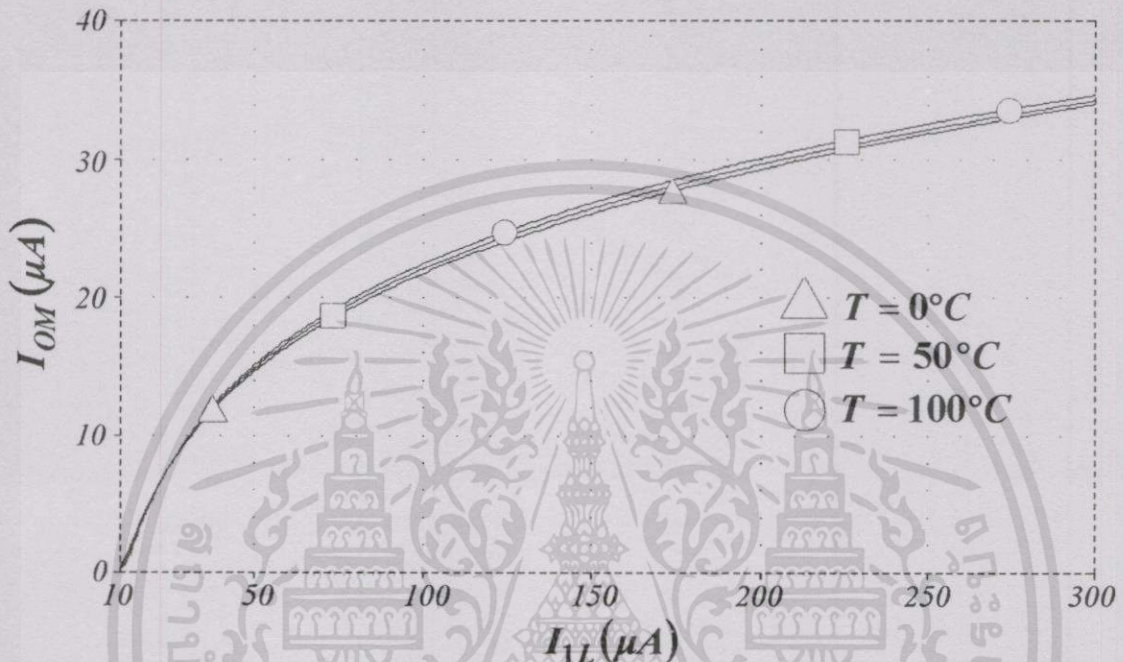


รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่ากระแส I_{OL} จากวงจรขยายเชิงลอคการิริมิกที่ไม่มีการชดเชย และที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิโดยใช้วงจรขยายโอทีเอ เมื่อวงจรรูปที่ 4.1 และวงจรรูปที่ 4.4x มีค่า I_{IL} เท่ากับ $180\mu A$ และค่า I_{2L} เท่ากับ $40\mu A$

5.2.3 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเชิงลอคการิริมิก เมื่อมีการชดเชยผลของอุณหภูมิด้วยวงจรที่มีเทอม V_T

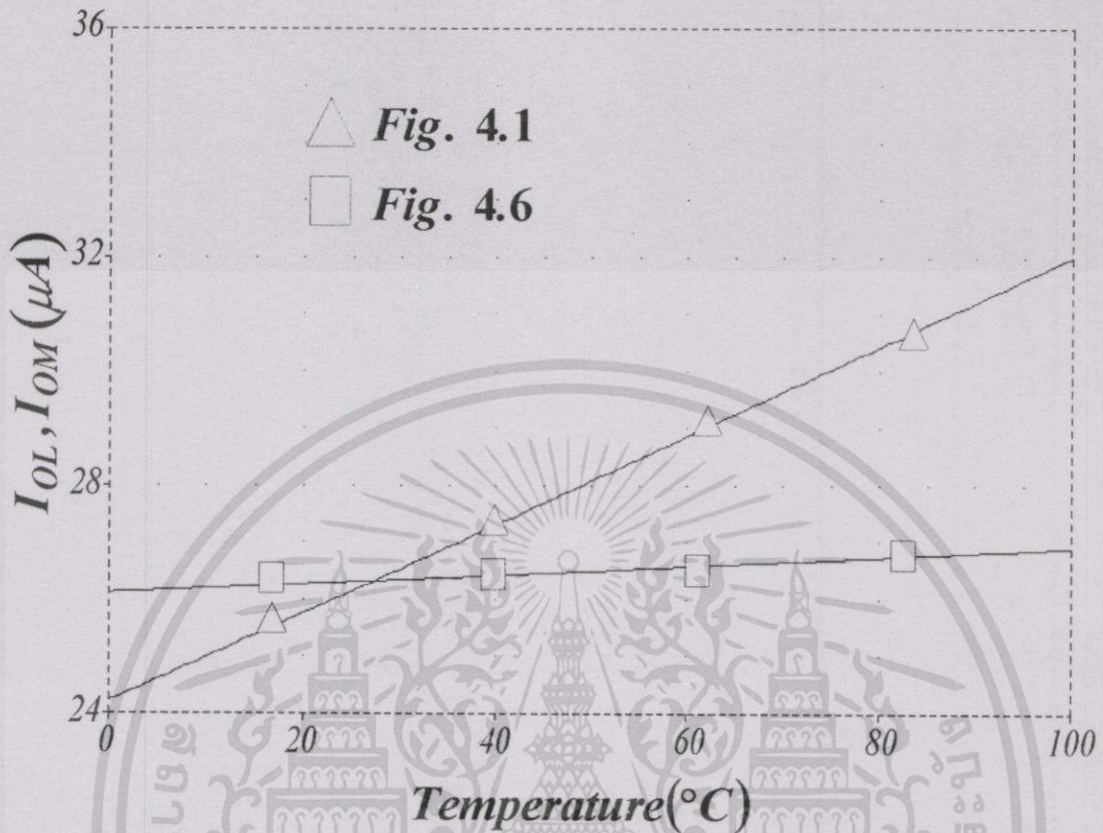
เมื่อนำเอาวงจรที่มีเทอม V_T และวงจรคูณ/หารกระแส ไปต่อร่วมกับวงจรขยายเชิงลอคการิริมิก ดังรูปที่ 4.6 เพื่อชดเชยผลของอุณหภูมิของวงจรมันนั้น กำหนดให้กระแสไบอัส $I_{2L} = I_{1M} = 10\mu A$, ปรับค่ากระแส I_{IT}/I_{2T} ให้ มีค่า = e และความต้านทาน $R_{IL} = R_{IT} = 2600\Omega$ ทำการแปรค่ากระแสอินพุท I_{IL} จาก $10\mu A$ จนถึง $300\mu A$ เพื่อให้ค่าของฟังก์ชันลอคการิริมิก มีค่าเช่นเดียวกับหัวข้อ 5.2.1 โดยแปรค่าอุณหภูมิเป็น $0^\circ C$, $50^\circ C$ และ $100^\circ C$ ตามลำดับ ปรากฏผลดังแสดงในรูปที่ 5.5 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจรได้ถูกชดเชยและลดลงไปได้มาก แต่ยังมี

ผลที่ขึ้นจากอุณหภูมิอยู่บ้าง ทั้งนี้เนื่องมาจากในวงจรนั้นยังมีตัวต้านทาน R_{IL} และ R_{IT} ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน แต่ค่าความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อวงจรน้อยกว่า เมื่อเทียบกับเทอมของ V_T



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{IL} กับ I_{OM} ของวงจรขยายเชิงลอคการิริมิก เมื่อใช้วงจรที่มีเทอม V_T เพื่อชดเชยผลของอุณหภูมิ ตามรูปที่ 4.6

เมื่อนำผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเชิงลอคการิริมิกที่ไม่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ และ มีการชดเชยผลของอุณหภูมิโดยใช้วงจรที่มีเทอม V_T มาแสดงรวมกัน จะได้กราฟดังรูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และค่ากระแส I_{OL} และ I_{OM} จากวงจรขยายเชิงลอคการิริมิกที่ยังไม่ได้มีการชดเชย และที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิโดยใช้วงจรที่มีเทอม V_T เมื่อวงจรรูปที่ 4.1 และวงจรรูปที่ 4.6 มีค่า I_{IL} มีค่าเท่ากับ $150\mu A$

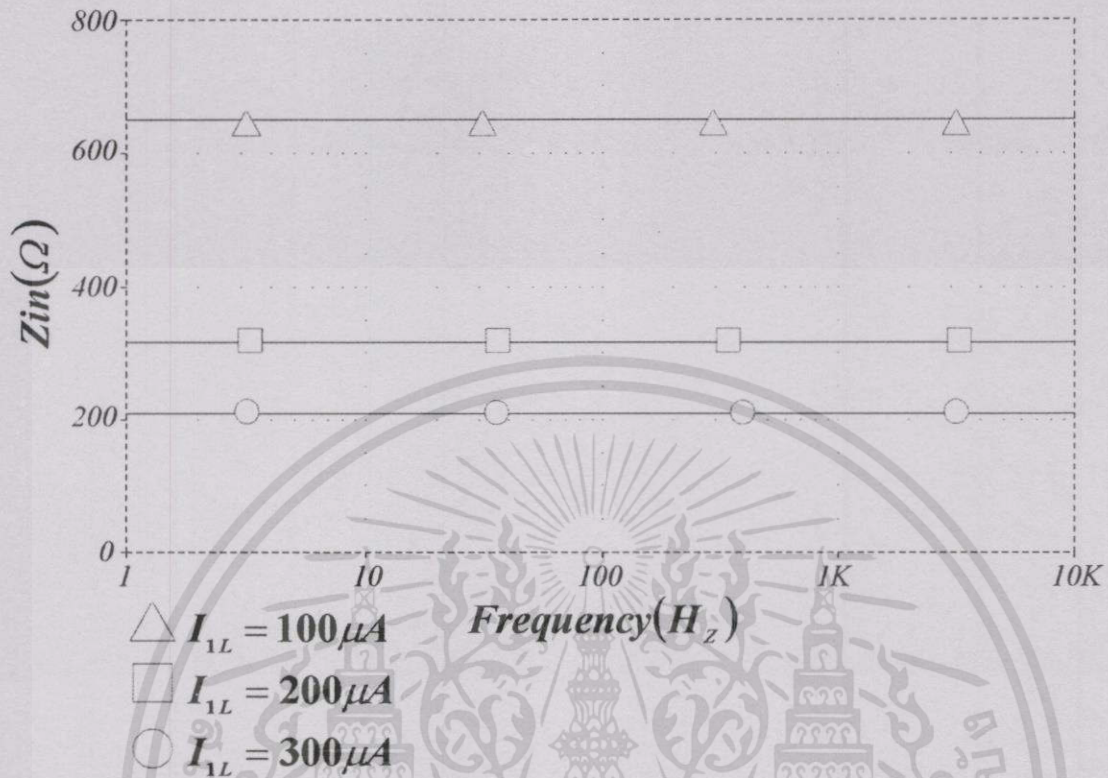


รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และค่ากระแส I_{OL} และ I_{OM} จากวงจรขยายเชิงลอคการิริมิก ที่ไม่มีการชดเชย และที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิโดยใช้วงจรที่มีเทอม V_T เมื่อ I_{IL} ของ วงจรรูปที่ 4.1 และวงจรรูปที่ 4.6 มีค่าเป็น $150\mu A$

จะเห็นได้ว่า ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเอาต์พุต I_{OL} เทียบกับอุณหภูมิ หรือ ค่า อัตราความชันของกราฟในรูปที่ 5.6 กราฟของวงจรที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมินั้น มีความชันน้อยกว่าวงจรที่ไม่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการชดเชยผลของอุณหภูมิโดยใช้วงจร ที่มีเทอม V_T แล้ว ทำให้อุณหภูมิมิมีผลต่อกระแสเอาต์พุตของวงจรขยายเชิงลอคการิริมิกลดลง

ค่าความต้านทานอินพุทของวงจรขยายเชิงลอคการิริมิก แสดงดังรูปที่ 5.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการเปลี่ยนค่ากระแสอินพุท I_{IL} เป็น $100\mu A$, $200\mu A$ และ $300\mu A$ จะได้ค่าความต้านทานอินพุทของวงจรขยายเชิงลอคการิริมิกมีค่าประมาณ 650Ω , 300Ω และ 200Ω ตามลำดับ

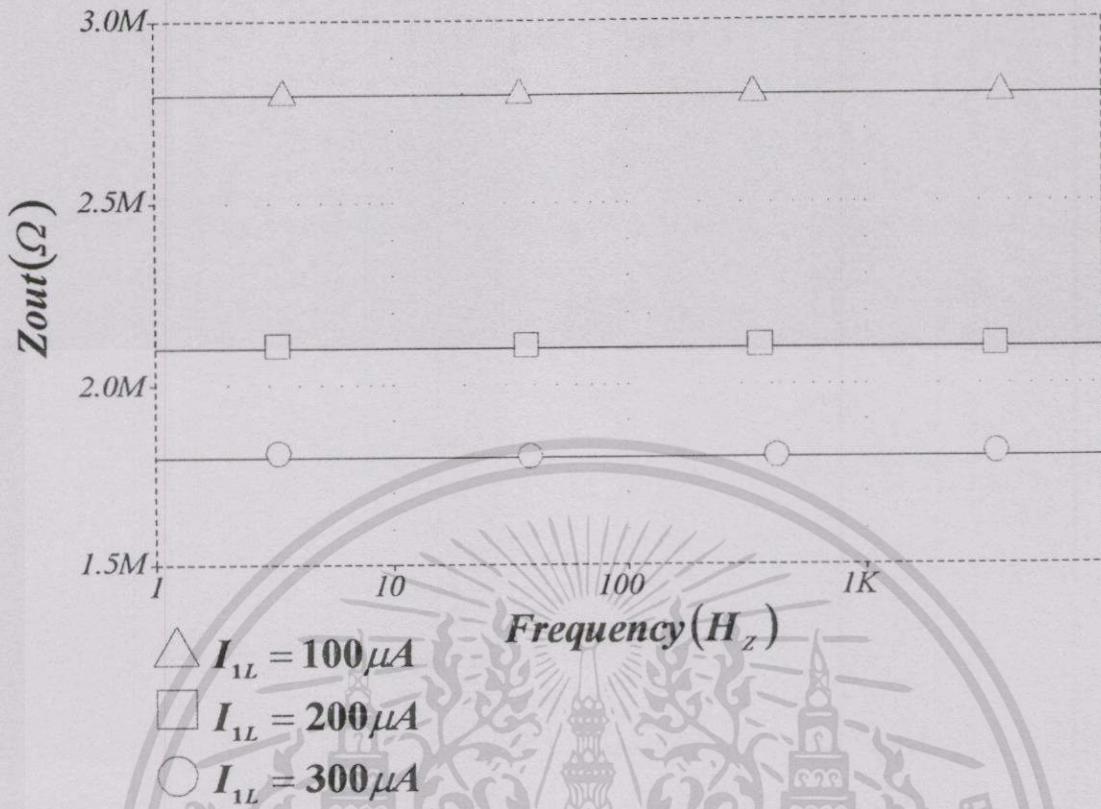
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 ค่าความต้านทานอินพุทของวงจรขยายเชิงลอคการิธิมิก

ค่าความต้านทานเอาต์พุทของวงจรขยายเชิงลอคการิธิมิก แสดงดังรูปที่ 5.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการเปลี่ยนค่ากระแสแอสอินพุท I_{IL} เป็น $100 \mu A$, $200 \mu A$ และ $300 \mu A$ จะได้ค่าความต้านทานเอาต์พุทของวงจรขยายเชิงลอคการิธิมิกมีค่าประมาณ $2.8 M\Omega$, $2.1 M\Omega$ และ $1.75 M\Omega$ ตามลำดับ

สำหรับผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายเชิงลอคการิธิมิก เมื่อทำการแปรค่าความถี่จาก 10 Hz ไปจนถึง 10 GHz ได้ผลลัพธ์แสดงดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.8 ค่าความต้านทานเอาต์พุตของวงจรขยายเชิงลอคการริวมิก

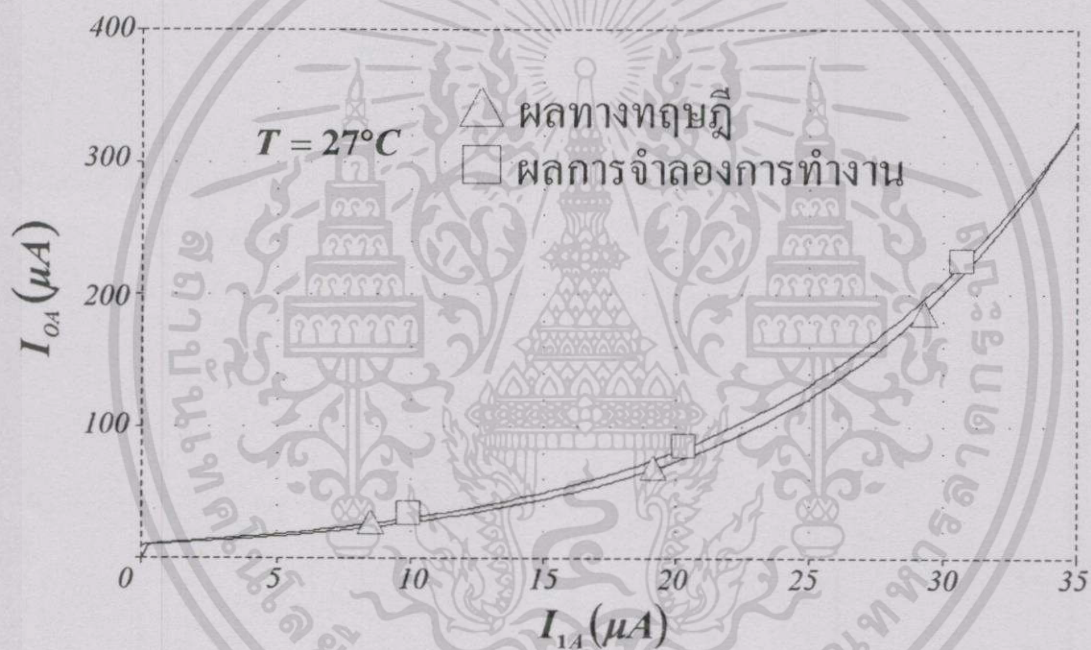


รูปที่ 5.9 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายเชิงลอคการริวมิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

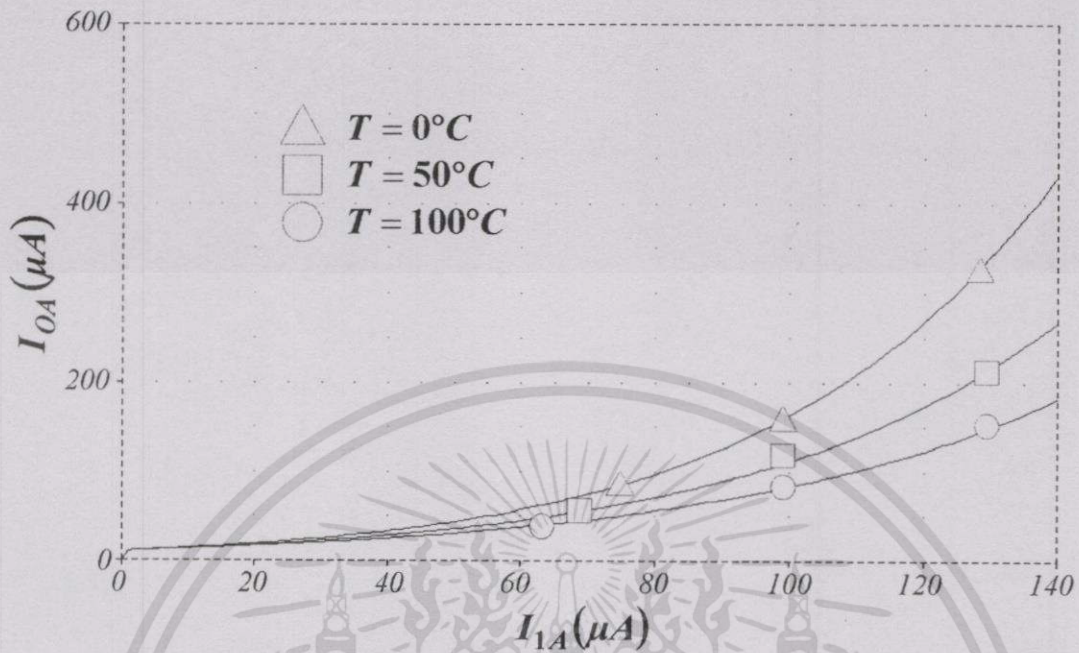
5.2.4 ผลการจำลองการทำงานของวงจรถยายเชิงแอนติลอคการิริมิก

จากรูปวงจรถยายเชิงแอนติลอคการิริมิก รูปที่ 4.7 ได้ทำการจำลองการทำงานของวงจรถยายโดยใช้โปรแกรม PSPICE โดยกำหนดให้ แหล่งจ่ายไฟคงที่ $+V_{CC} = -V_{CC} = 3V$, กระแสไบอัส $I_{2A} = 10\mu A$, ค่าความต้านทาน $R_{1A} = 650\Omega$ และให้จำลองการทำงานที่อุณหภูมิห้อง $27^{\circ}C$ ซึ่งจะได้ $V_T \cong 26mV$ ทำการแปรค่ากระแสอินพุต I_{1A} จาก $0\mu A$ จนถึง $140\mu A$ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุต I_{1A} กับกระแสเอาต์พุต I_{OA} ของ วงจรถยายเชิงแอนติลอคการิริมิกดังรูปที่ 5.10 พบว่ากระแสเอาต์พุต I_{OA} มีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลกับกระแสอินพุต I_{1A} และมีแนวโน้มเป็นไปตามสมการที่ (4.36)



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{1A} กับ I_{OA} ของวงจรถยายเชิงแอนติลอคการิริมิก

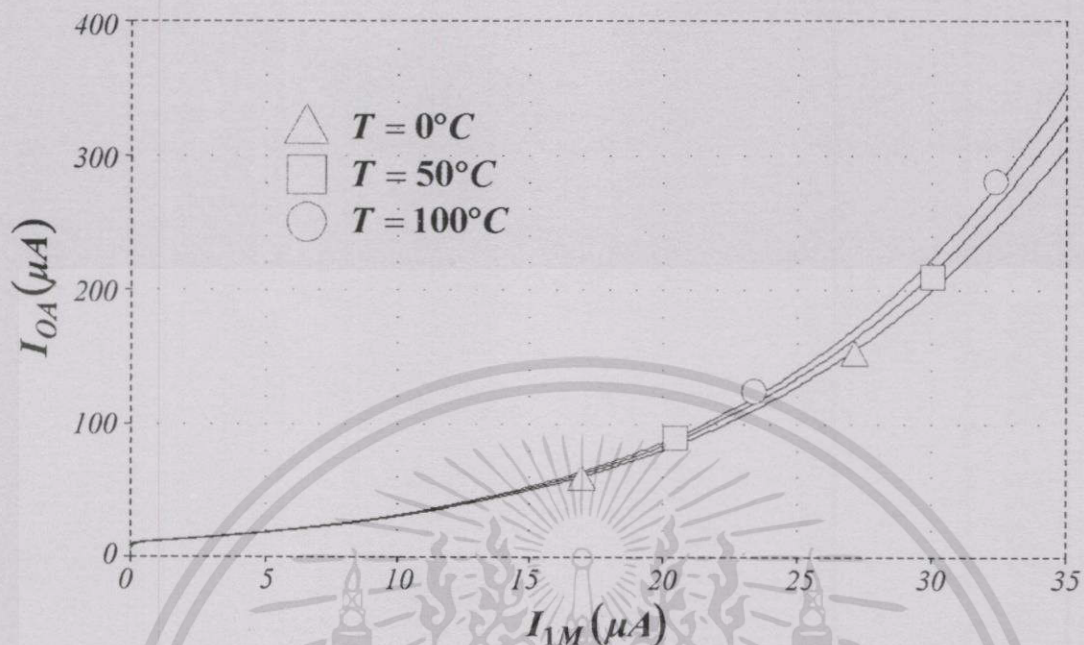
จากนั้นทำการแปรค่าอุณหภูมิเป็น $0^{\circ}C$, $50^{\circ}C$ และ $100^{\circ}C$ ตามลำดับ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุต I_{1A} กับกระแสเอาต์พุต I_{OA} เมื่อมีการแปรค่าอุณหภูมิดังรูปที่ 5.11 พบว่าอุณหภูมิมิผลต่อกระแสเอาต์พุต I_{OA} ที่เกิดขึ้นในวงจรถยาย



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{IA} กับ I_{OA} ของวงจรขยายเชิงแอนติลอคการิริมิก เมื่อมีการแปรค่าอุณหภูมิเป็น $0^\circ C$, $50^\circ C$ และ $100^\circ C$

5.2.5 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเชิงแอนติลอคการิริมิก เมื่อมีการชดเชยผลของอุณหภูมิด้วยวงจรที่มีเทอม V_T

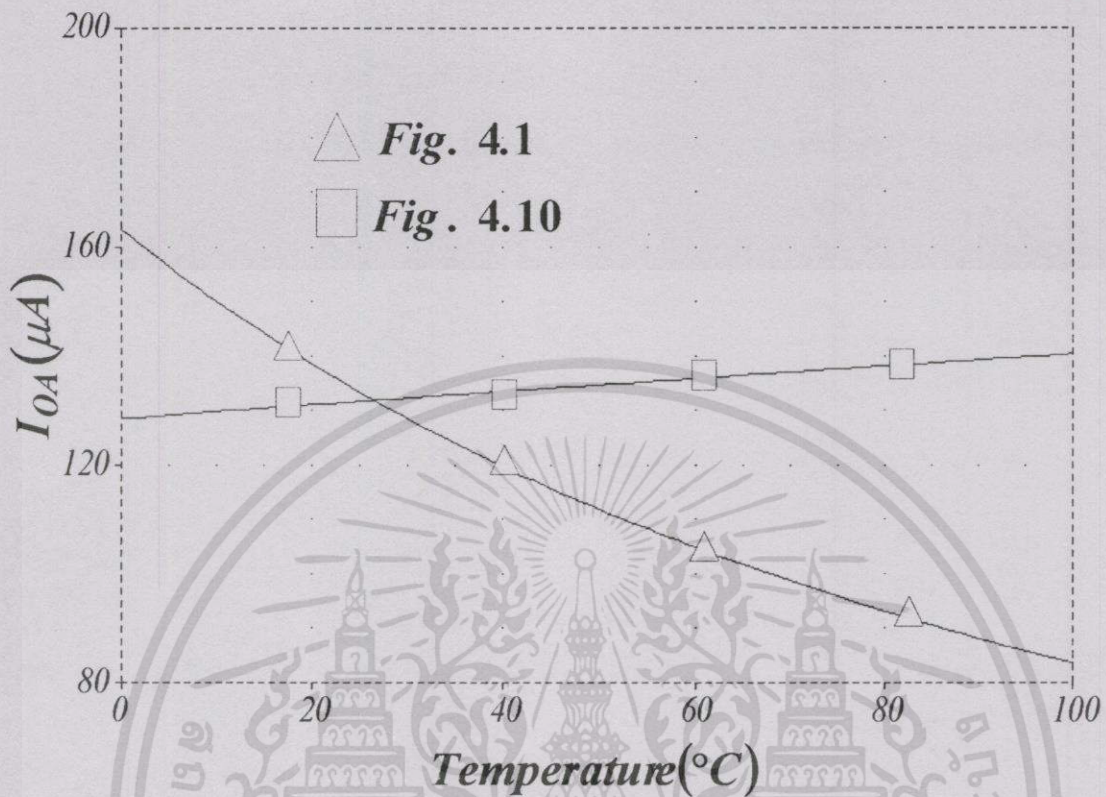
เมื่อนำเอาวงจรที่มีเทอม V_T และวงจรคูณ/หารกระแส ไปต่อร่วมกับวงจรขยายเชิงแอนติลอคการิริมิก ดังรูปที่ 4.10 เพื่อชดเชยผลของอุณหภูมิของวงจรมานั้น กำหนดให้กระแสไบอัส $I_{2A} = I_{2M} = 10 \mu A$, ปรับค่ากระแส I_{IT}/I_{IT} ให้ มีค่า = e และความต้านทาน $R_{IT} = R_{IA} = 650 \Omega$ ทำการแปรค่ากระแสอินพุท I_{IM} จาก $0 \mu A$ จนถึง $35 \mu A$ โดยแปรค่าอุณหภูมิเป็น $0^\circ C$, $50^\circ C$ และ $100^\circ C$ ตามลำดับ ปรากฏผลดังแสดงในรูปที่ 5.12 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจรได้ถูกชดเชยและลดลงไปมาก แต่ยังมีผลที่ขึ้นจากอุณหภูมิอยู่บ้าง ทั้งนี้เนื่องมาจากในวงจรมันยังมีตัวต้านทาน R_{IA} และ R_{IT} ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน แต่ค่าความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อวงจรมีน้อยกว่า เมื่อเทียบกับเทอมของ V_T



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{1M} กับ I_{OA} ของวงจรรขยายเชิงแอนติลอคการิธิมิก เมื่อใช้วงจรมีเทอม V_T เพื่อชดเชยผลของอุณหภูมิ ตามรูปที่ 4.10

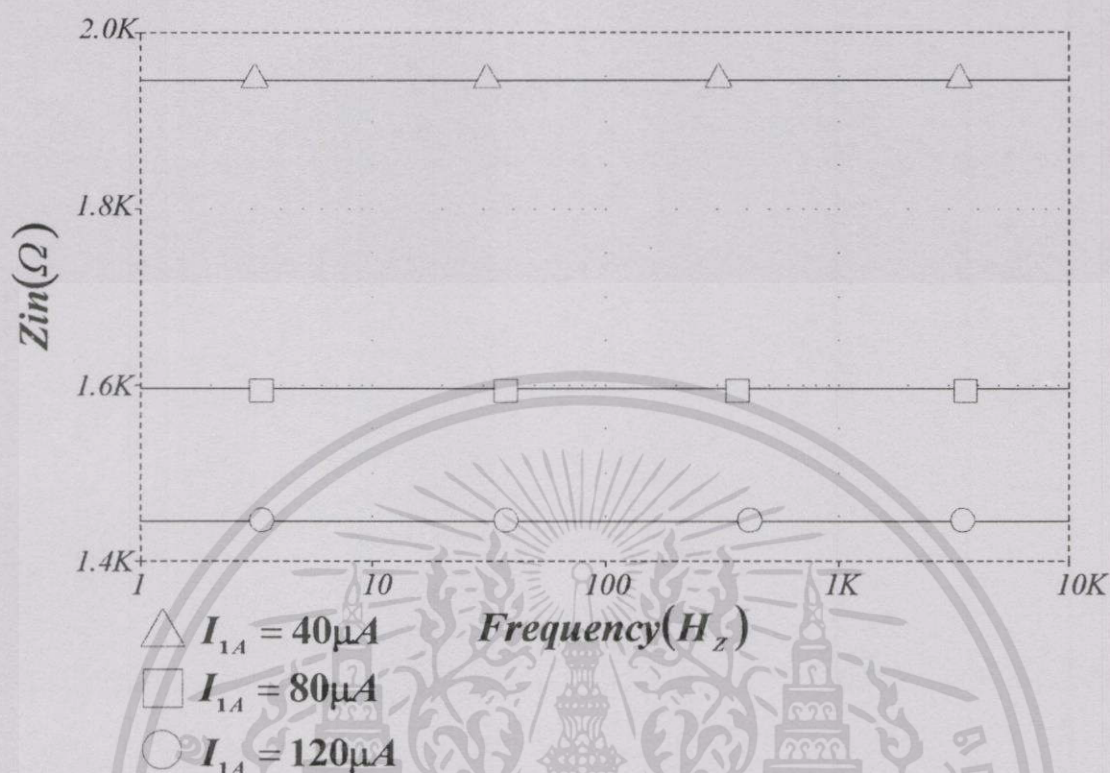
เมื่อนำผลการจำลองการทำงานของวงจรรขยายเชิงแอนติลอคการิธิมิกที่ไม่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ และ มีการชดเชยผลของอุณหภูมิโดยใช้วงจรมีเทอม V_T มาแสดงรวมกัน จะได้กราฟดังรูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และค่ากระแส I_{OA} จากวงจรรขยายเชิงแอนติลอคการิธิมิกที่ยังไม่ได้มีการชดเชย และที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิโดยใช้วงจรมีเทอม V_T เมื่อวงจรรูปที่ 4.7 มีค่า I_{1A} เท่ากับ $100\mu A$ และวงจรรูปที่ 4.10 มีค่า I_{1M} เท่ากับ $25\mu A$

จะเห็นได้ว่า ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเอาต์พุต I_{OA} เทียบกับอุณหภูมิ หรือ ค่าอัตราความชันของกราฟในรูปที่ 5.13 กราฟของวงจรมีการชดเชยผลของอุณหภูมินั้น มีความชันน้อยกว่าวงจรมีการชดเชยผลของอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการชดเชยผลของอุณหภูมิโดยใช้วงจรมีเทอม V_T แล้ว ทำให้อุณหภูมิมีผลต่อกระแสเอาต์พุตของวงจรรขยายเชิงแอนติลอคการิธิมิกลดลง



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และค่ากระแส I_{OA} จากวงจรขยายเชิงแอนติลอคการริวมิกที่ไม่มี การชดเชย และที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิโดยใช้วงจรที่มีเทอม V_T เมื่อวงจรรูปที่ 4.7 มีค่า I_{IA} เท่ากับ $100\mu A$ และวงจรรูปที่ 4.10 มีค่า I_{IM} เท่ากับ $25\mu A$

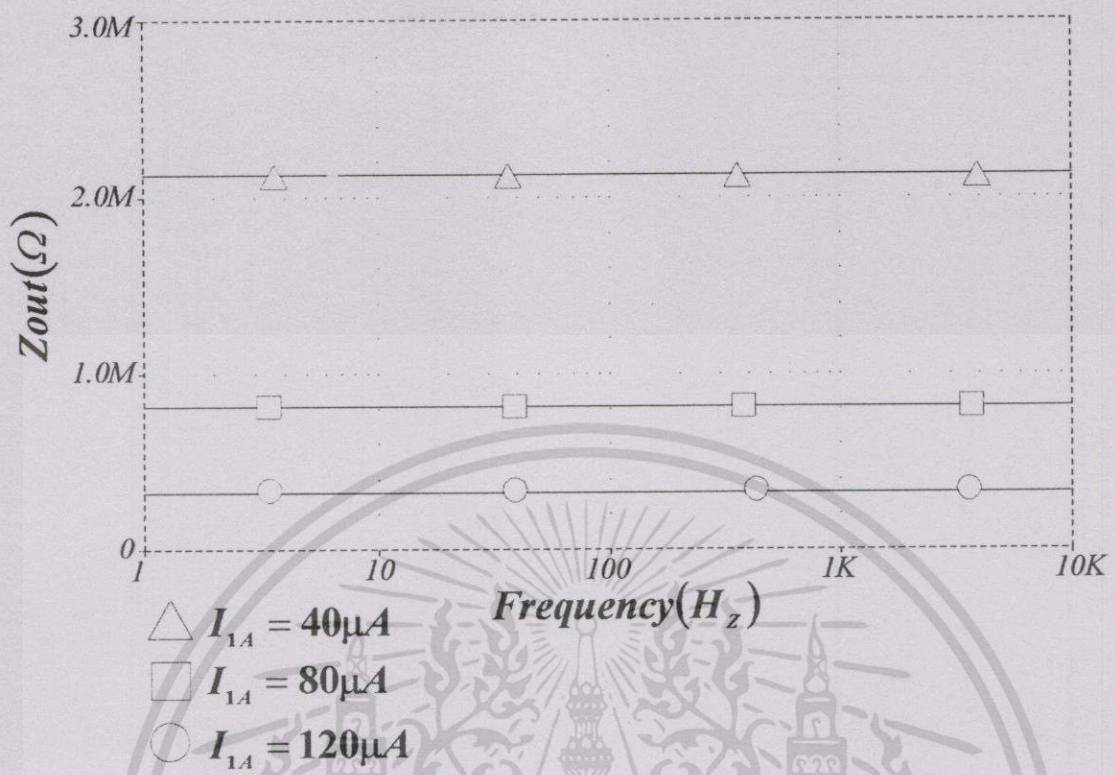
ค่าความต้านทานอินพุทของวงจรขยายเชิงแอนติลอคการริวมิก แสดงดังรูปที่ 5.14 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการเปลี่ยนค่ากระแสอินพุท I_{IA} เป็น $40\mu A$, $80\mu A$ และ $120\mu A$ จะได้ค่าความต้านทานอินพุทของวงจรขยายเชิงแอนติลอคการริวมิกมีค่าประมาณ $1.95K\Omega$, $1.6K\Omega$ และ $1.45K\Omega$ ตามลำดับ



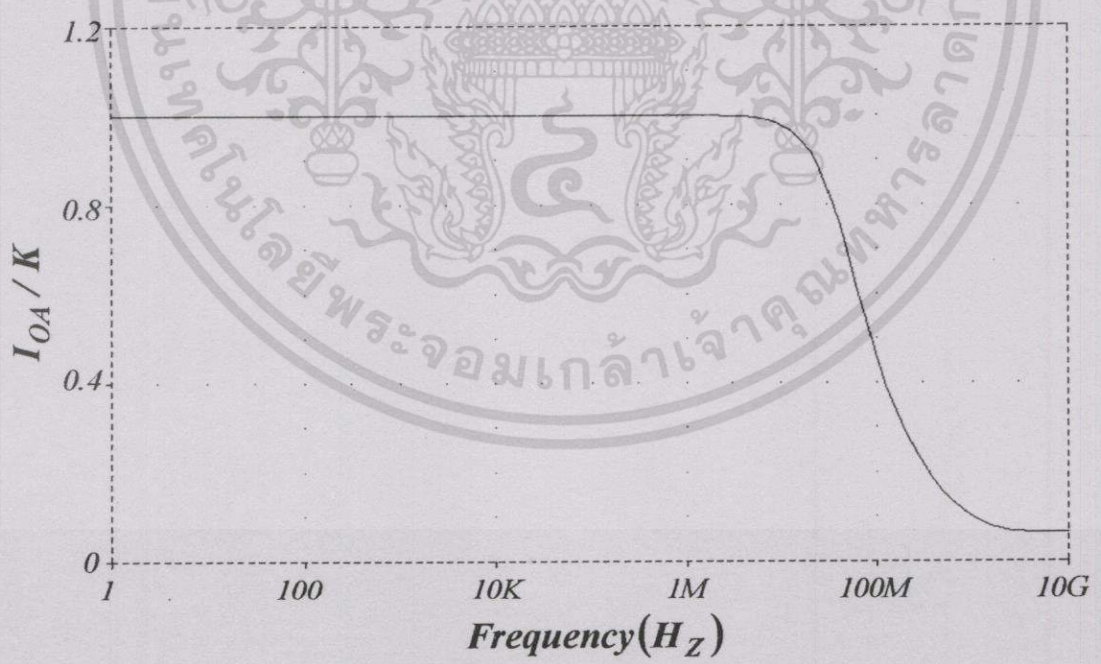
รูปที่ 5.14 ค่าความต้านทานอินพุทของวงจรขยายเชิงแอนติลอคการิริมิก

ค่าความต้านทานเอาต์พุทของวงจรขยายแอนติลอคการิริมิก แสดงคั่งรูปที่ 5.15 ซึ่ง จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการเปลี่ยนค่ากระแสอินพุท I_{1A} เป็น $40 \mu A$, $80 \mu A$ และ $120 \mu A$ จะได้ค่าความ ต้านทานเอาต์พุทของวงจรขยายเชิงแอนติลอคการิริมิกมีค่าประมาณ $1.97 M\Omega$, $0.7 M\Omega$ และ $0.3 M\Omega$ ตามลำดับ

สำหรับผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายเชิงแอนติลอคการิริมิก เมื่อทำการแปรค่าความถี่จาก 1Hz ไปจนถึง 10GHz ได้ผลลัพธ์แสดงคั่งรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.15 ค่าความต้านทานเอาต์พุตของวงจรมัลติพลายเออร์เชิงแอนะล็อกการริวมิก



รูปที่ 5.16 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรมัลติพลายเออร์เชิงแอนะล็อกการริวมิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ตัวอย่างการใช้งาน

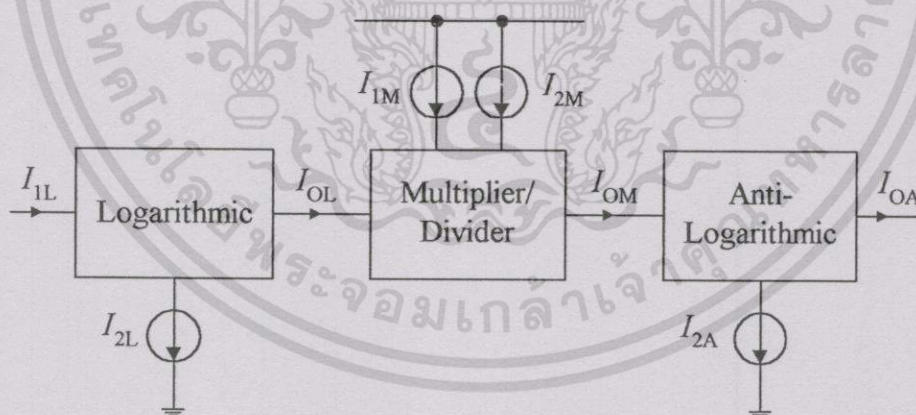
สำหรับในหัวข้อนี้ จะเป็นการนำเอาวงจรมัลติเพล็กซ์เชิงลอการิทึม และวงจรมัลติเพล็กซ์เชิงแอนติลอการิทึม มาต่อรวมกันเพื่อประยุกต์เป็นวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง

5.3.1 วงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง [21]

สำหรับในหัวข้อนี้ จะได้นำเอาวงจรมัลติเพล็กซ์เชิงลอการิทึม และวงจรมัลติเพล็กซ์เชิงแอนติลอการิทึม มาต่อรวมกับวงจรมัลติเพล็กซ์/หารกระแส โดยมีจุดมุ่งหมายเป็นสร้างเป็นวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง กล่าวคือให้กระแสเอาต์พุตของวงจรมัลติเพล็กซ์อยู่ในรูปของฟังก์ชันเลขยกกำลังกับกระแสอินพุตนั่นเอง โดย

$$\text{Output} = \left[\frac{A}{B} \right]^{\left[\frac{C}{D} \right]} \quad (5.1)$$

โดยในการสังเคราะห์ที่สมการที่ (5.4) วงจรจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ วงจรมัลติเพล็กซ์เชิงลอการิทึม, วงจรมัลติเพล็กซ์/หารกระแส และวงจรมัลติเพล็กซ์เชิงแอนติลอการิทึม ดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 5.17



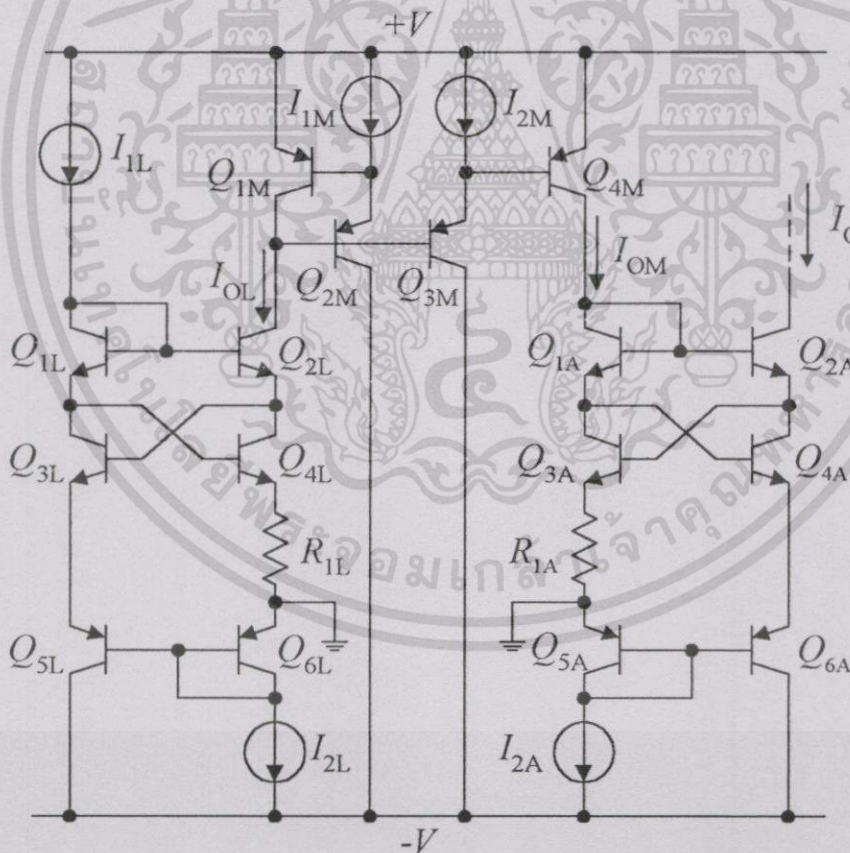
รูปที่ 5.17 บล็อกไดอะแกรมของวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง

สำหรับรูปวงจรมัลติเพล็กซ์เลขยกกำลังที่ได้ออกแบบขึ้นแสดงไว้ดังรูปที่ 5.18 ซึ่งจะเห็นว่าวงจรมัลติเพล็กซ์เลขยกกำลังนั้น มีลักษณะเดียวกับวงจรรูปที่ 4.10 แต่จะมีรายละเอียดที่ต่างกัน กล่าวคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรรูปที่ 4.10 นั้น จะกำหนดให้ แหล่งจ่ายกระแส I_{1L} และ I_{2L} มีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายกระแส คงที่ให้กับวงจร โดยกำหนดให้ $I_{1L}/I_{2L} = e$ หรือ I_{1L} มีค่าประมาณ 2.7183 เท่าของกระแส I_{2L} และมี กระแส I_{1M} เป็นกระแสอินพุท แต่สำหรับวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลังนั้นจะพิจารณาให้ กระแส I_{1L} , I_{2L} , I_{1M} และ I_{2M} เป็นกระแสอินพุทที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้จากภายนอก

จากรูปที่ 5.18 ทำการต่อวงจรทั้งสามโดยให้กระแสอินพุทของวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง นี้คือ I_{1L} โดย I_{1L} จะเป็นกระแสอินพุทของวงจรถ่ายลอกการริมหกเดิม ได้กระแสเอาต์พุทของวงจรถ่ายลอกการริมหกเป็น I_{OL} ซึ่ง I_{OL} จะกลายเป็นกระแสอินพุทให้กับวงจรคูณ/หารกระแส จะได้กระแสเอาต์พุทของวงจรถ่ายลอกการริมหกเป็น I_{OM} ก็จะนำกระแส I_{OM} ไปเป็นกระแสอินพุทให้กับวงจรถ่ายลอกการริมหกอีกทีหนึ่ง สุดท้ายจะได้ I_{OA} เป็นค่ากระแสเอาต์พุทของวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง ตามต้องการ ดังจะแสดงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของวงจร ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.18 วงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง

จากสมการที่ (4.5) เราทราบว่ากระแสเอาต์พุตของวงจรขยายเชิงลอคการิช คือ

$$I_{OL} = \frac{V_T}{R_{1L}} \ln \left[\frac{I_{1L}}{I_{2L}} \right] \quad (5.2)$$

จากสมการที่ (4.28) ความสัมพันธ์ของวงจรคูณ/หารกระแส คือ

$$I_{OM} = \frac{I_M I_{1M}}{I_{2M}} \quad (5.3)$$

เมื่อนำกระแสเอาต์พุตของวงจรขยายเชิงลอคการิชมิก ไปต่อเป็นกระแสอินพุตของวงจรคูณ/หารกระแส จากสมการที่ (5.2) และ (5.3) จะได้ว่า

$$I_{OM} = \frac{V_T}{R_{1L}} \frac{I_{1M}}{I_{2M}} \ln \left[\frac{I_{1L}}{I_{2L}} \right] \quad (5.4)$$

จากนั้นนำกระแสเอาต์พุตของวงจรคูณ/หารกระแส ไปต่อเป็นกระแสอินพุตของวงจรขยายเชิงแอนติลอคการิชมิก ซึ่งมีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (4.36) คือ

$$I_{OA} = I_{2A} e^{I_{1A} R_{1A} / V_T} \quad (5.5)$$

จากสมการที่ (5.4) และ (5.5) จะได้กระแสเอาต์พุตของวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง คือ

$$I_{OA} = I_{2A} e^{\frac{R_{1A}}{R_{1L}} \frac{I_{1M}}{I_{2M}} \ln \left[\frac{I_{1L}}{I_{2L}} \right]} \quad (5.6)$$

จากสมการที่ (5.6) ถ้ากำหนดให้ $R_{1L} = R_{1A}$ สุดท้ายจะได้

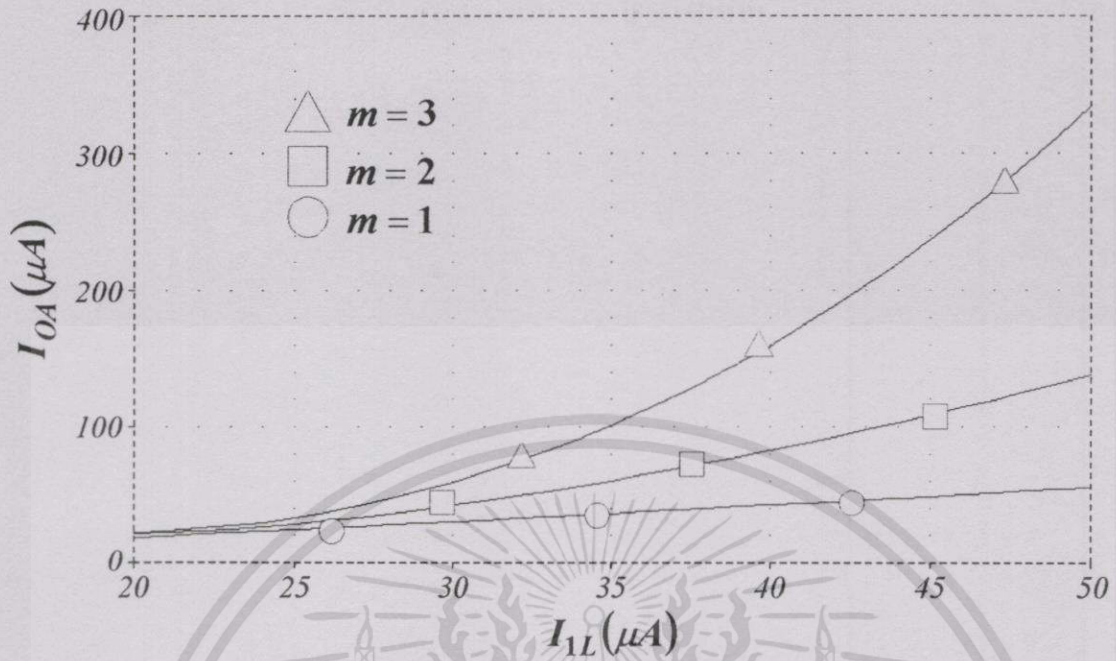
$$I_{OA} = I_{2A} \left[\frac{I_{1L}}{I_{2L}} \right]^{\left[\frac{I_{1M}}{I_{2M}} \right]} \quad (5.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

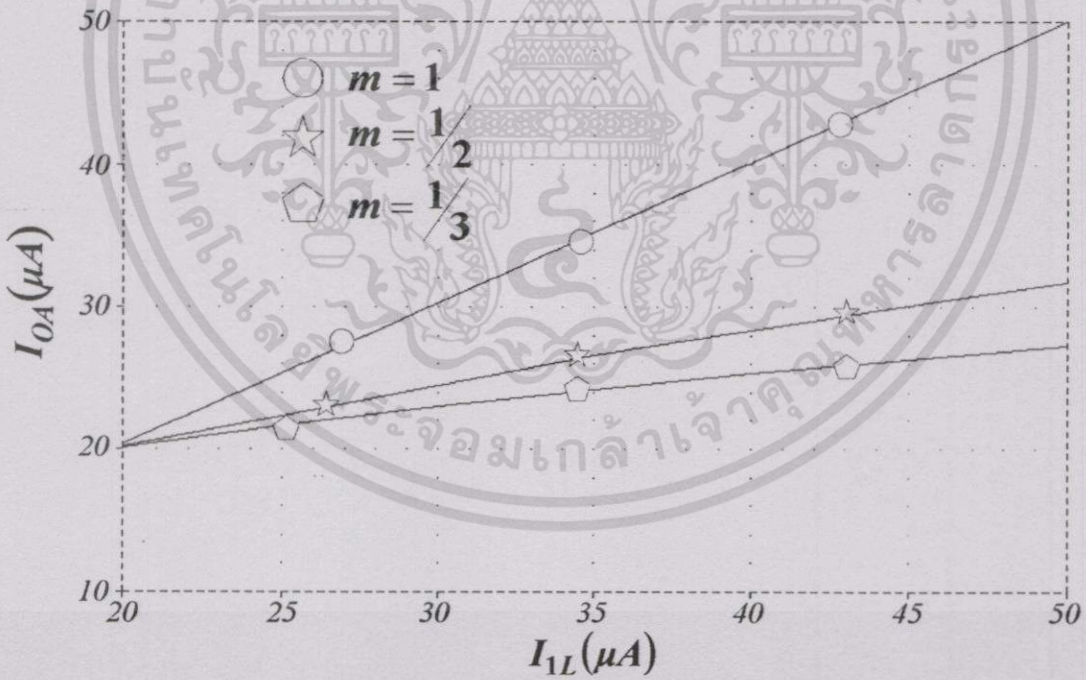
ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสเอาต์พุตของวงจรมีลักษณะเหมือนสมการที่ (5.1) ซึ่งเป็นฟังก์ชันเลขยกกำลังที่เราต้องการ จากรูปแบบของสมการที่ (5.7) ที่เราสังเคราะห์ได้ ค่าของสมการทั้งหมดอยู่ในรูปแบบอัตราส่วนของกระแสที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นข้อดีในการนำไปใช้งาน ทำให้มีความเหมาะสมในการนำไปออกแบบสร้างเป็นวงจรรวม

5.3.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง

จากรูปวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง รูปที่ 5.18 ได้ทำการจำลองการทำงานของวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง โดยใช้โปรแกรม PSPICE กำหนดให้ แหล่งจ่ายไฟคงที่ $+V_{CC} = -V_{CC} = 3V$, ค่าความต้านทาน $R_{I1} = R_{I2} = 650\Omega$, ค่ากระแสไบอัสในวงจรให้ $I_{L2} = I_{A2} = 20\mu A$ สำหรับค่ากำลังหรือ m ซึ่งมีค่าเท่ากับ I_{I1}/I_{I2} เมื่อต้องการให้ $m = 1, 2$ และ 3 จะกำหนดให้ $I_{M2} = 12\mu A$ ส่วนค่าของ I_{M1} กำหนดให้มีค่า เป็น $12\mu A, 24\mu A$ และ $36\mu A$ เพื่อให้ได้ค่า m ตามที่ต้องการ และเมื่อต้องการให้ m มีค่า เป็น $1/3, 1/2$ จะกำหนดให้ $I_{M2} = 36\mu A$ ส่วนค่าของ I_{M1} กำหนดให้มีค่า เป็น $12\mu A, 18\mu A$ จากนั้นทำการแปรค่ากระแสอินพุต I_{IL} จาก $20\mu A$ จนถึง $50\mu A$ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุต I_{IL} กับกระแสเอาต์พุต I_{OA} ของ วงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง ดังรูปที่ 5.19 และ 5.20 พบว่ากระแสเอาต์พุต I_{OA} มีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันเลขยกกำลังกับกระแสอินพุต I_{IL} และมีแนวโน้มเป็นไปตามสมการที่ (5.7)



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{IL} กับ I_{OA} ของวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง เมื่อทำการเปลี่ยนค่า m เป็น 3, 2, และ 1



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{IL} กับ I_{OA} ของวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง เมื่อทำการเปลี่ยนค่า m เป็น 1, 1/2, และ 1/3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 บทสรุป

หลังจากที่ได้มีการออกแบบวงจรรขยายเชิงลอคการิริมิก, วงจรรขยายเชิงแอนติลอคการิริมิก และนำเสนอการชดเชยผลของอุมหุมิที่เกิดขึ้นในด้วยวิธีต่าง ๆ ในบทที่ 4 สำหรับในบทนี้จึงได้ทำการจำลองการทำงานของวงจร เพื่อทดสอบคุณสมบัติการทำงานของวงจรว่าเป็นไปตามหลักการที่นำเสนอมาแล้วหรือไม่ โดยใช้โปรแกรม PSPICE ในการจำลองการทำงานของวงจร ซึ่งผลการจำลองการทำงานดังกล่าว ให้ผลใกล้เคียงและเป็นไปตามหลักการที่ได้นำเสนอไว้ นอกจากนี้ในตอนท้ายยังได้นำเสนอตัวอย่างการใช้งานของวงจร โดยนำวงจรรขยายเชิงลอคการิริมิก และวงจรรขยายเชิงแอนติลอคการิริมิกมาต่อร่วมกันเพื่อประยุกต์เป็นวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลังอีกด้วย



บทที่ 6

บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบวงจรขยายเชิงลอคการิริมิกและวงจขยายเชิงแอนติลอคการิริมิกที่มีการทำงานในรูปของกระแส ซึ่งการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ได้จัดแบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท

โดยบทที่ 1 ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา, วัตถุประสงค์, ขอบเขต และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นเหตุจูงใจให้มีการนำเสนอ การออกแบบวงจรขยายเชิงลอคการิริมิกและวงจขยายเชิงแอนติลอคการิริมิกที่มีการทำงานในรูปของกระแสในวิทยานิพนธ์นี้ได้

หลังจากนั้นในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ออกแบบวงจรในวิทยานิพนธ์นี้ เพื่ออธิบายลักษณะการทำงานของวงจรมีไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เป็นส่วนประกอบ

ส่วนในบทที่ 3 นั้นกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของวงจรถานส์ลิเนียร์ ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบวงจรในวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งอธิบายหลักการของวงจรถานส์ลิเนียร์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบวงจรขยายเชิงลอคการิริมิก และแอนติลอคการิริมิก เพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ลักษณะการทำงานของวงจรถานส์ลิเนียร์

สำหรับในบทที่ 4 เป็นเนื้อหาที่สำคัญของวิทยานิพนธ์นี้ ได้กล่าวถึงการออกแบบวงจรขยายเชิงลอคการิริมิก และแอนติลอคการิริมิก โดยอาศัยหลักการพื้นฐานของวงจรถานส์ลิเนียร์ที่กล่าวมาในบทที่ 3 และแสดงการวิเคราะห์ค่าความสั้มพันธ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในวงจรถานส์ลิเนียร์พื้นฐานในบทที่ 3 มาช่วยในการชดเชยผลของอุนทวมิตที่เกิดขึ้นในวงจรถานส์ลิเนียร์ทั้งสองอีกด้วย

สำหรับในบทที่ 5 ได้ทำการจำลองผลการทำงานของวงจรถานส์ลิเนียร์ทั้งสองตามที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 เพื่อเปรียบเทียบและยืนยันกับหลักการที่ได้นำเสนอไว้ ซึ่งผลการจำลองการทำงานสอดคล้องกับหลักการที่ได้นำเสนอไว้ ทั้งยังได้นำเสนอตัวอย่างการใช้งานของวงจรถานส์ลิเนียร์ โดยนำวงจรถานส์ลิเนียร์ขยายเชิงลอคการิริมิก และแอนติลอคการิริมิก ไปดัดแปลงเพื่อทำเป็นวงจรถานส์ลิเนียร์ฟังก์ชันเลขยกกำลังอีกด้วย

จากวิทยานิพนธ์นี้จะเห็นได้ว่าวงจรถานส์ลิเนียร์ขยายเชิงลอคการิริมิก และวงจรถานส์ลิเนียร์ขยายเชิงแอนติลอคการิริมิกที่ได้นำเสนอนั้น วงจรถานส์ลิเนียร์ทั้งสองออกแบบโดยใช้เทคโนโลยีของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ มีความซับซ้อนน้อย เหมาะสมสำหรับนำไปทำเป็นวงจรถานส์ลิเนียร์รวม และมีข้อดีกว่าการออกแบบวงจรถานส์ลิเนียร์ให้ทำงานในรูปแบบของแรงดัน ในด้านของแหล่งจ่ายไฟไบอัส ซึ่งตรงกับจุดประสงค์ของการนำเสนองานวิทยานิพนธ์นี้

สำหรับแนวทางในการพัฒนาต่อ นั้น การที่วงจรขยายเชิงลอคการริมิก และแอนคิลอการริมิก ได้ให้กระแสเอาท์พุทออกมาในรูปของฟังก์ชันลอคการริมิก และฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลกับกระแสอินพุท รวมถึงวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง ซึ่งกระแสเอาท์พุทของฟังก์ชันทั้งสามมีเป็นลักษณะฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำวงจรทั้งสามไปสังเคราะห์ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์อื่นๆ โดยอาศัยฟังก์ชันดังกล่าวเป็นแนวทางในการออกแบบต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Peyton A.J. and Walsh V. **Analog Electronics with Op-Amps.** Cambridge : Cambridge University Press. 1993.
- [2] Franco S. **Design with Operational Amplifier and Analog Integrated Circuits.** New York: McGraw-Hill. 1988.
- [3] Toumazou C., Lidgley F.G. and Haigh D.G. **Analogue IC Design : The Current Mode Approach.** London : Peter Peregrinus. 1990.
- [4] Chadwick P.E. "Advances In Logarithmic Amplifiers." IEE Radio Receivers and Associated Systems International Conference, 1990. pp. 51-58.
- [5] Bergouignan F., Abouchi N., Grisel R., Caille G. and Caranana J. "Designs of a Logarithmic and Exponential Amplifiers Using Current Conveyor." ICECS, 1996. pp. 61-64.
- [6] Koli K. and Halonen K. "A 2.5 V Temperature Compensated CMOS Logarithmic Amplifier." IEEE Proc. Custom Integrated Circuit Conference, 1997. pp. 79-82
- [7] Gilbert B. "Translinear Circuit : A Propose Classification." Electron. Lett., vol. 11, Jan. 1975. pp.14-16.
- [8] Gray P.R. and Meyer R.G. **Analysis and Design of Analog Integrated Circuits.** Third Edition John Wiley & Sons, Inc. 1993.
- [9] Greeneich E.W. **Analog Integrated Circuits.** Chapman & Hall 1997.
- [10] Microsim Corp. "PSPICE" [Computer Program]. USA : Microsim Corp. 1994.
- [11] Sedra A.S. and Smith K.C. **MicroElectronic Circuits.** Fourth Edition. New York : Oxford University Press. 1982.
- [12] Seevinck E. and Wiegerrink R.J. "Generalized Tranlinear Circuit Principal." IEEE J. Solid-State Circuits., vol. 26, Aug. 1991. pp. 1098-1102.
- [13] Wilson G.R. "A Monolithic Junction FET-NPN Operation Amplifier." IEEE J. Solid-State Circuits., vol. SC-3, 1968. pp. 341-348.
- [14] Geiger R.L. and Sanchez-Sinencio E. "Active Filter Design using Operational Transconductance Amplifier : A tutorial." IEEE Circuits Devices Mag., Mar. 1985. pp. 22-32.

- [15] Malvar H.S. "Electronically Tunable Active Filter with Operational Transconductance Amplifier." IEEE Tran. CAS-29, 1982. pp. 333-336.
- [16] Schade O.H. and Kramer E.J. "A Low-Voltage BIMOS Op Amp." IEEE J. Solid-State Circuits., SC-16, Dec. 1981. pp. 661-668.
- [17] Surakamponorn W., Jutaviriya S. and Riewruja V. "OTA-Base Electronically Tunable Voltage-Controlled Resistance Converter." Int. J. Electron., vol. 67, no. 1, 1989. pp. 81-85.
- [18] Surakamponorn W., Riewruja V., Surawatpunya C. and Yodladda S. "Instrumentation Amplifiers using Operational Transconductance Amplifiers." Int. J. Electron., vol. 71, no. 3, 1991. pp. 551-515.
- [19] Giacoletto L.J. "Differential Amplifiers." New York. Wiley. 1970.
- [20] กัทรชัย อุปริพทุทธิกุล, เกียรติศักดิ์ คมวัชระ, วรพงษ์ ตั้งศรีรัตน์, สุมาลี อุนหวนิชย์, ชีรศิลป์ ทุมวิภาต. "วงจรถอดการรบกวนแบบทำงานในรูปของกระแสสองควอดแดรนต์." การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 22, พ.ศ. 2542. หน้า 319-322.
- [21] กัทรชัย อุปริพทุทธิกุล, เกียรติศักดิ์ คมวัชระ, วัลลภ สุระกำพลธร, สุมาลี อุนหวนิชย์, ชีรศิลป์ ทุมวิภาต. "วงจรรอดการรบกวนและวงจรมีฟังก์ชันเลขยกกำลัง." วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 17, ฉบับที่ 3, กันยายน 2543. หน้า 22-27.
- [22] National Semiconductor. "Linear Data Book Semiconductor Corporation." 1982.

ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. กัทรชัย อุปริพุทธิกุล, เกียรติศักดิ์ คมวัชระ, วัลลภ สุระกำพลธร, สุมาลี อุณหวนิชย์, ชีรศิลป์ ทุมวิภาต. “วงจรแอนติลอกการิธมิกและวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง.” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 17, ฉบับที่ 3, กันยายน 2543. หน้า 22-27.
2. กัทรชัย อุปริพุทธิกุล, เกียรติศักดิ์ คมวัชระ, วรพงษ์ ตั้งศรีรัตน์, สุมาลี อุณหวนิชย์, ชีรศิลป์ ทุมวิภาต. “วงจรถอกการิธมิกแบบทำงานในรูปของกระแสสองควอดแดรนต์.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 22, พ.ศ. 2542. หน้า 319-322.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 17 ฉบับที่ 3

กันยายน 2543

1. วงจรกำลังสองสัญญาณกระแสแบบ CMOS ที่ใช้แรงดันไฟเลี้ยงต่ำและอิสระจาก body effect สมนึก หัวหาญ สุพจน์ Һุ่นย่อง กอบชัย เคนหาญ อธิพิงศ์ ชัยสายัณห์	1
2. วงจรคูณสัญญาณที่ใช้แรงดันไฟเลี้ยงต่ำ วัลลภ เทียมวาทิต นกุล สุวรรณภาควรี กอบชัย เคนหาญ อธิพิงศ์ ชัยสายัณห์	5
3. วงจรคูณสัญญาณกระแสกับสัญญาณแรงดัน สุวีร์ บุญศรี ชัยวัฒน์ สากุล กอบชัย เคนหาญ อธิพิงศ์ ชัยสายัณห์	10
4. ความต้านทานแบบลอยตัวที่ควบคุมด้วยแรงดันไวซีมอลทรานซิสเตอร์ สุพจน์ Һุ่นย่อง สมนึก หัวหาญ กอบชัย เคนหาญ อธิพิงศ์ ชัยสายัณห์	14
5. วงจรคูณสัญญาณอนาล็อกแบบ 1 ควอดแรนต์อย่างง่าย ชัยวัฒน์ สากุล สุวีร์ บุญศรี กอบชัย เคนหาญ อธิพิงศ์ ชัยสายัณห์	18
6. วงจรแอนติลอคเกอริซึมิกและวงจรมิกซ์อินเลย์ชกกำลัง ภัทรชัย อุปริพุทธกุล เกียรติศักดิ์ คมวิริยะ วัลลภ สุระก่าพลธร สมภาณี อุณหวัฒน์ อธิพิงศ์ ชัยสายัณห์	22
7. วงจรวีซีไอที่ชดเชยให้เกิดเสถียรภาพของความถี่เนื่องมาจากอุณหภูมิ อธิภู มงคลชจิต วิวัฒน์ กิรานนท์ วิภา แสงพิสิทธิ์ จริญญา เลิศจรัสรัมย์ดี	28
8. การปกป้องข้อมูลด้วยการเข้ารหัสบล็อกโคตและสัญญาณรบกวนแบบลำดับสุ่มเทียมที่สร้างบน FPGA โกศล ทราย พุฒิกัด ชัยสุวิทย์	34
9. การออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพวงจรสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมโดยใช้เทคโนโลยี FPGA เจนวิทย์ ศรีหารักษา พรัชช เอี่ยมเศรษฐกุล สมศักดิ์ มิตตะภา กอบชัย เคนหาญ	40
10. ตรวจสอบการจ่ายไฟของจุดหมายโดยอาศัยพื้นฐานของซินแทกติก ไพโรจน์ ชิวพุดตินันท์ กอบชัย เคนหาญ นภัทร สระเอี่ยม	46
11. การแทนความรู้โดยใช้ตารางการตัดสินใจแบบพีซีซี พิริยะ เขาวาณี เอี่ยม ปิ่นเงิน	52
12. การออกแบบและสร้างไมโครชิคเคอร์เพื่อศึกษาการกระจายความร้อนบนโต๊ะแฟรมของซิลิกอน รังสรรค์ เมืองเหลือ สมศักดิ์ เขียวศิริกุล สมเกียรติ สุขเวช	58
13. ศึกษาการถ่ายเทแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัสระหว่างสายในและระบบไฟฟ้าแรงต่ำของ กฟน. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ ยโสธร สุขประสงค์	64
14. การปรับปรุงตัวประกอบกำลังในทางเรียงกระแสแบบ 3 เฟส อนุวัฒน์ จางวณิชเลิศ กัภาพ ศิริจันทร์พงศ์	70
15. การคำนวณสมรรถนะของสัญญาณรบกวน Audible Noise ของโคโรน่าในสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแรงจุม 230 kv. วรรณนัย โรจนวิรุฬห์ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์	76
16. การศึกษาชั้นของผนังภายนอกที่มีผลต่อค่าบำรุงรักษาในระยะยาว วิบูลย์ วุฒิญาณ ชัยพัฒน์ หล่อศิริรัตน์ นพนนท์ ราชบานนท์	82
17. โปรแกรมคำนวณการไหลเบื้องต้นโดยวิธีการปริมาตรสืบเนื่อง จารวัตร เจริญสุข อรรณพ ผาบุเพ็ง	87
18. สมรรถนะการหล่อลื่นของเบริงสลักลูกสูบ มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อมรชัย ฉัตรสง่า	93
19. การศึกษาสมรรถนะของใบพัดลมแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง อัครเดช สินธุภัก อภิชาติ เสมศรี	99
20. การออกแบบแคลคูลัสอัตโนมัติ อัครเดช สินธุภัก ทวีศักดิ์ ปิยะทัศนานนท์	105
21. การจำลองผลของตำแหน่งฉีดต่อเส้นทางเดินอนุภาคในขบวนการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จารวัตร เจริญสุข นิตินัย ปัญญาบุศยกุล	109
22. การศึกษาผลกระทบของขนาดต่อเส้นทางเดินของอนุภาคเคลือบคาร์บอนในห้องเผาไหม้ถ่านหินผง จารวัตร เจริญสุข สนธยา มิเลียง	115
23. กรณีศึกษาการใช้หมักก๊าซชีวภาพผลิตแก๊สชีวภาพในหน่วยกำจัดกำมะถันในน้ำมันดีเซลเพื่อหาปริมาณการใช้ก๊าซชีวภาพและ วางแผนการผลิตที่เหมาะสมในโรงกลั่นน้ำมัน ภาณุเดช สุขเขตต์ อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ	121
24. การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่มีต่อการเกิดผลึกและสมบัติเชิงกลของโพลีเอทิลีน วิรัตน์ Һุ่นเจริญ มิ่ง โลกิงแสงทอง	127
25. ผลกระทบจาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงดีเซลกับน้ำมันพืชในเชื้อเพลิงผสมต่อการสันดาปและสมรรถนะ ของเครื่องยนต์ดีเซล สมชัย นรเศรษฐโสภณ ปิ่น ประมาพันธ์	132



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรวมแอนติลอการิทึมและวงจรรฟังก์ชันเลขยกกำลัง

An Anti – Logarithmic Circuit and a Power Factor Function Circuit

ภัทรชัย อุปริพทุทธิกุล เกียรติศักดิ์ คมวิษระ วัลลภ สุระกำพลธร

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุมาลี อุณหวนิชย์ อีริศิณี ทุมวิภาดา

ภาควิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นกรรมสิทธิ์ของวงจรรวมแอนติลอการิทึมที่มีการทำงานในรูปของกระแส วงจรดังกล่าวออกแบบโดยอาศัยพื้นฐานของวงจรรวมสลิเนียร์ที่สร้างจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ โดยให้สัญญาณเอาต์พุตออกมาในรูปของกระแสที่เป็นฟังก์ชันแอนติลอการิทึมกับกระแสอินพุต ในคอนทักซ์ยังได้นำเสนอการนำวงจรรวมแอนติลอการิทึมนี้ไปประยุกต์ใช้เป็นวงจรรฟังก์ชันเลขยกกำลัง โดยนำวงจรรวมลอการิทึม วงจรรวมหารกระแส และวงจรรวมแอนติลอการิทึมมาประกอบกัน ในการทดสอบถึงสมรรถนะของวงจรรวมได้ใช้โปรแกรม PSPICE ทำการเลียนแบบเพื่อนำผลดังกล่าวไปเปรียบเทียบและยืนยันกับทฤษฎีที่ได้นำเสนอ ซึ่งผลที่ได้มีความใกล้เคียงและเป็นไปตามหลักการที่นำเสนอ

Abstract

A simple circuit design technique for realizing an current-mode anti-logarithmic circuit based on a translinear loop implemented from bipolar transistors is described. The proposed circuit can provide anti-logarithm output signal. This paper also shows how to realize a power factor function circuit by uses logarithmic current multiplier/divider and anti-logarithmic circuits. Some PSPICE simulation results are also included to demonstrate the characteristics of the proposed technique.

1. บทนำ

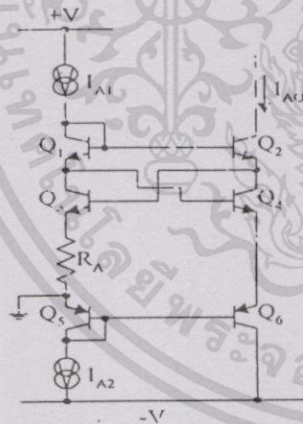
วงจรรวมแอนติลอการิทึมเป็นที่รู้จักกันดีว่า สมการที่เกิดขึ้นเป็นพื้นฐานตามกฎของเอ็กโปเนนเชียล (Exponential – Law) และเป็นวงจรรวมหนึ่งที่ช่วยกระจายสัญญาณข้อมูล (Expander) ออกจากวงจรรวมลอการิทึมที่มีการบีบอัดสัญญาณข้อมูล (Compression) มาอย่างมาก [1-2] ในการประยุกต์ใช้งานของวงจรรวมแอนติลอการิทึม มักจะร่วมกับวงจรรวม

ลอการิทึมในการออกแบบเป็นวงจรรวมคูณ, วงจรรวมหาร, วงจรรวมลอการิทึม หรือวงจรรวมยกกำลัง เป็นต้น ซึ่งได้มีการผลิตในรูปวงจรรวมหรือ IC สำเร็จรูปจำหน่ายในท้องตลาดแล้ว เช่น เบอร์ LH0094 ของ NS หรือ เบอร์ 4302 ของ Burr – Brown แต่ IC ที่กล่าวมามีขนาดวงจรที่ใหญ่ เพราะสร้างขึ้นจากการใช้ออปแอมป์เป็นหลักในการออกแบบ และในการเปลี่ยนแปลงค่าเลขยกกำลังภายในวงจรในแต่ละการทำงานนั้นๆ ต้องมีการจัดและ

ปรับเปลี่ยนรูปแบบใหม่อยู่ตลอดเวลาซึ่งทำให้ไม่สะดวกในการใช้งานที่ต้องการความไวสูง ดังนั้นในบทความนี้จึงได้นำเสนองจรฟังก์ชันเลขยกกำลังขึ้นมาภายใต้การใช้ไมโครโพลีเทคโนโลยีในการออกแบบ โดยประกอบด้วยทรานซิสเตอร์เพียง 16 ตัว แหล่งจ่ายกระแสที่ 4 ตัว และความต้านทานค่าเท่ากัน 2 ตัวเท่านั้น ส่วนหน้าที่การทำงานนั้น สามารถทำงานเป็นวงจรถคูณหาร ถอดรากและยกกำลังได้โดยง่ายภายในวงจรเดียวกัน และขึ้นตรงกับอุณหภูมิบ้างเพียงเล็กน้อย อีกทั้งวงจรมีความสามารถที่จะควบคุมค่าเลขยกกำลังได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ได้อีกเช่นกัน เนื่องจากสมการที่สังเคราะห์ขึ้นอยู่ภายใต้รูปแบบของกระแสทั้งหมด และ วงจรดังกล่าวยังถูกสร้างขึ้นภายใต้การทำงานของกระแสทั้งหมด ทำให้วงจรมีความต้านทานไฟต่ำและมีการเปลี่ยนแปลงความถี่หลายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2. หลักการทำงานของวงจรถคูณหาร

วงจรถคูณหารมีโครงสร้างดังรูปที่ 1 ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ของวงจรมีได้ดังนี้



รูปที่ 1 วงจรถคูณหาร

$$V_{BE1} + V_{BE4} + V_{BE6} = V_{BE2} + V_{BE3} + V_{BE5} + I_{A1}R_A \quad (1)$$

$$\text{เมื่อ } V_{BEi} \cong V_T \ln \frac{I_{Ci}}{I_{Si}} \quad (2)$$

โดยที่ V_T คือ thermal voltage และ I_{Si} คือ saturation current ดังนั้นแทนค่าสมการที่ (2) ลงใน (1) จะได้

$$V_T \ln \left[\frac{I_{C1}I_{C4}I_{C6}}{I_{S1}I_{S4}I_{S6}} \right] = V_T \ln \left[\frac{I_{C2}I_{C3}I_{C5}}{I_{S2}I_{S3}I_{S5}} \right] + I_{A1}R_A \quad (3)$$

ถ้าทรานซิสเตอร์ Q_1 ถึง Q_6 และ Q_5 กับ Q_6 ทุกตัวมีคุณสมบัติในการทำงานเหมือนกันนั่นคือ $I_{S1} = I_{S2} = I_{S3} = I_{S4} = I_{S5} = I_{S6}$ และ $I_{S5} = I_{S6} = I_{SP}$ จึงทำให้สมการที่ (3) เขียนใหม่ได้เป็น

$$I_{A1}R_A = V_T \ln \left[\frac{I_{C1}I_{C4}I_{C6}}{I_{C2}I_{C3}I_{C5}} \right] \quad (4)$$

และจากวงจรมีในรูปที่ 1 จะได้ $I_{A1} = I_{C1} = I_{C3} \cdot I_{A0} = I_{C2} = I_{C4} = I_{C6}$ และ $I_{C5} = I_{A2}$ ดังนั้น

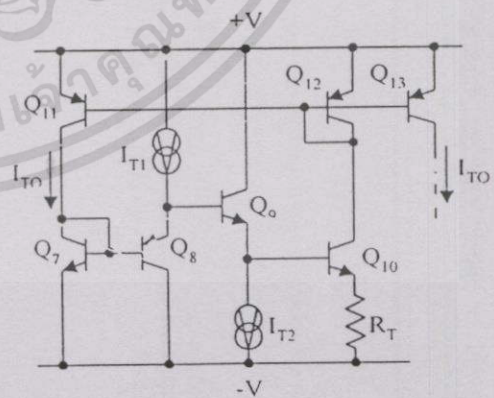
$$I_{A1}R_A = V_T \ln \left[\frac{I_{A0}}{I_{A2}} \right] \quad (5)$$

$$\text{จะได้ว่า } I_{A0} = I_{A2} e^{I_{A1}R_A/V_T} \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) จะเห็นว่าวงจรมีที่นำเสนอในรูปที่ 1 นั้นให้กระแสเอาท์พุตอยู่ในรูปของฟังก์ชันเลขยกกำลัง

3. การลดผลของอุณหภูมิในวงจรมี

จากสมการที่ (6) จะเห็นได้ว่าวงจรมีมีผลของอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นในหัวข้อนี้ จะนำเสนอวิธีการลดผลของอุณหภูมิโดยนำ วงจรแหล่งจ่ายกระแสที่ขึ้นกับอุณหภูมิซึ่งอ้างอิงมาจาก [3] ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2 มาต่อใช้ร่วมกับวงจรมี Multiplier/Divider



รูปที่ 2 วงจรแหล่งจ่ายกระแสที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2) ของ (3) จะได้สมการของวงจรรูปที่ 2 คือ

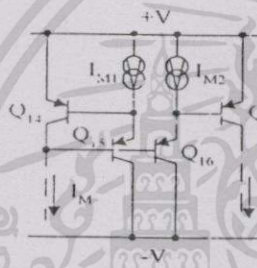
$$I_{T0} = \frac{V_T}{R_T} \ln K \left[\frac{I_{T1}}{I_{T2}} \right] \quad (7)$$

โดยค่า $K = I_{S07}/I_{S08} = A_{EQ7}/A_{EQ8}$ ซึ่งในที่นี้จะกำหนดให้ $K = 1$ ซึ่งทำได้โดยปรับเปลี่ยนค่าพื้นที่อิมิตเตอร์ (A_E) ของ Q_7 และ Q_8 จากนั้นกำหนดให้ $I_{T1} = 2.718 * I_{T2}$ ซึ่งจะทำให้สมการที่ (7) มีค่าเป็น

$$I_{T0} = \frac{V_T}{R_T} \quad (8)$$

สำหรับวงจร Multiplier/Divider แสดงดังรูปที่ 3 จะได้

ความสัมพันธ์ของวงจรรูปที่ 3 ดังนี้



รูปที่ 3 วงจร Multiplier/Divider

$$V_{BE14} + V_{BE15} = V_{BE16} + V_{BE17} \quad (9)$$

แทนค่า V_{BE} จากสมการที่ (2) ลงในสมการที่ (9) จะได้ว่า

$$V_T \ln \left[\frac{I_{C14} I_{C15}}{I_{S14} I_{S15}} \right] = V_T \ln \left[\frac{I_{C16} I_{C17}}{I_{S16} I_{S17}} \right] \quad (10)$$

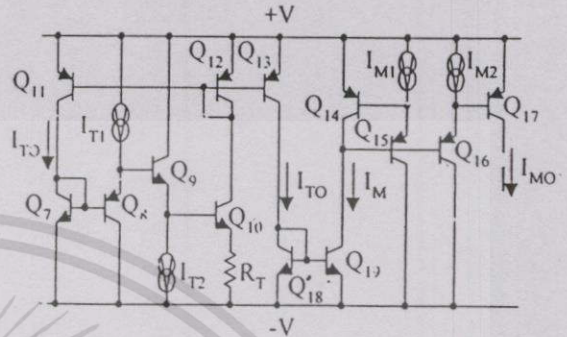
ถ้าทรานซิสเตอร์ Q_{14} ถึง Q_{17} ทุกตัวมีคุณสมบัติในการทำงานเหมือนกันนั่นคือ $I_{S14} = I_{S15} = I_{S16} = I_{S17} = I_{SP}$ จึงทำให้สมการที่ (10) เขียนใหม่ได้เป็น

$$V_T \ln \left[\frac{I_{C14} I_{C15}}{I_{C16} I_{C17}} \right] = 0 \quad (11)$$

และจากวงจรในรูปที่ 3 จะได้ $I_{C14} = I_M$, $I_{C15} = I_{M1}$, $I_{C16} = I_{M2}$ และ $I_{C17} = I_{M0}$ เมื่อแก้สมการที่ (11) สุดท้ายจะได้ว่า

$$I_{M0} = \frac{I_M I_{M1}}{I_{M2}} \quad (12)$$

เมื่อนำวงจรรูปที่ 2 และ รูปที่ 3 มาต่อร่วมกัน โดยมี Q_{10} และ Q_{19} ทำหน้าที่สะท้อนกระแส ซึ่งทำให้ $I_{T0} = I_M$ จะได้วงจรซึ่งนำไปใช้ลดผลของอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรที่นำไปใช้ลดผลของอุณหภูมิในวงจรแอนติลอค

การิซึมิก

จากสมการที่ (12) แทน I_M ด้วย I_{T0} จะได้

$$I_{M0} = \frac{I_{T0} I_{M1}}{I_{M2}} \quad (13)$$

แทนค่า I_{T0} จากสมการที่ (8) ลงในสมการที่ (13) จะได้

$$I_{M0} = \frac{V_T I_{M1}}{R_T I_{M2}} \quad (14)$$

เปลี่ยนเอา I_{M2} ไปคูณแทน I_A ในสมการที่ (6) จะได้

$$I_{M0} = I_{A2} e^{\frac{R_T I_{M1}}{R_T I_{M2}}} \quad (15)$$

กำหนดให้ $R_T = R_T$ สุดท้ายจะได้ว่า

$$I_{M0} = I_{A2} e^{\frac{I_{M1}}{I_{M2}}} \quad (16)$$

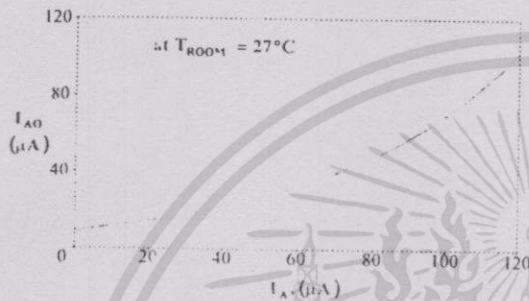
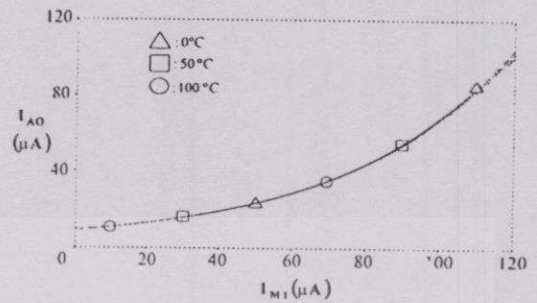
จากสมการที่ (16) แสดงให้เห็นว่าขณะนี้การทำงานของวงจรรแอนติลอคการิซึมิกได้มีการชดเชยและไม่ขึ้นกับผลของอุณหภูมิอีกต่อไป

4. ผลการเขียนแบบการทำงานของวงจรรแอนติลอคการิซึมิก

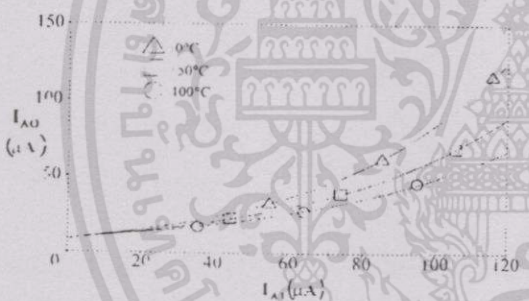
ริซึมิก

ในที่นี้ใช้โปรแกรม PSPICE [4] ทำการเขียนแบบการทำงานของวงจรร โดยทรานซิสเตอร์ NPN และ PNP ได้ใช้เบอร์ Q2N3904 และ Q2N3906 ตามลำดับ แหล่งจ่ายไฟ +V และ -V = ± 5V และกำหนดให้กระแสไบอัส $I_{A2} = 10 \mu A$ ผลการเขียนแบบความสัมพันธ์ระหว่าง I_{M1} กับ I_{M0} ของวงจรรูปที่ 1 เมื่อใช้

ค่าความต้านทาน $R_A = 520\Omega$ และทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 27°C ซึ่งจะได้ค่า $V_T \cong 26\text{mV}$ โดยแปรค่า I_{A1} จาก 0 ถึง $120\mu\text{A}$ ปรากฏผลดังรูปที่ 5 พบว่ากระแส I_{AO} มีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ (6) ส่วนรูปที่ 6 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง I_{A1} กับ I_{AO} ของวงจรรูปที่ 1 เมื่อมีการแปรค่าอุณหภูมิเป็น 0°C , 50°C และ 100°C ตามลำดับ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{A1} กับ I_{AO} ของวงจรรูปที่ 1



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{A1} กับ I_{AO} ของวงจรรูปที่ 1 เมื่ออุณหภูมิแปรค่าเป็น 0°C , 50°C และ 100°C

ในการเขียนแบบการทำงานการนำเอาวงจรถลผลของอุณหภูมิ จากรูปที่ 4 ไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรถลลอการิทึมในรูปที่ 1 โดยนำ I_{MO} ไปคั่นแทน I_{A1} เพื่อลดผลของอุณหภูมิของวงจรมันได้เลือกใช้ $I_{M2} = 50\mu\text{A}$ ส่วน I_{M1} นั้นทำการแปรค่าจาก 0 ถึง $120\mu\text{A}$ และทำการทดสอบโดยแปรค่าอุณหภูมิเป็น 0°C , 50°C และ 100°C ตามลำดับ ปรากฏผลดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจรมันได้ถูกชดเชยและลดลงไปได้มาก

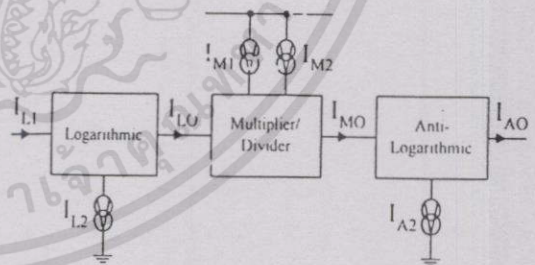
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{M1} กับ I_{AO} เมื่อใช้วงจรถลผลของอุณหภูมิรูปที่ 4 ต่อร่วมกับวงจรรูปที่ 1

๕. การประยุกต์การใช้งานป่วงจรรฟังก์ชันเลขยกกำลัง

ในวงจรมันนี้จุดมุ่งหมายคือพยายามทำให้เอาท์พุทของวงจรมันอยู่ในรูปของฟังก์ชันเลขยกกำลังคือ

$$Output = \frac{\left[\frac{A}{B} \right]^{\left[\frac{C}{D} \right]}}{\quad} \quad (17)$$

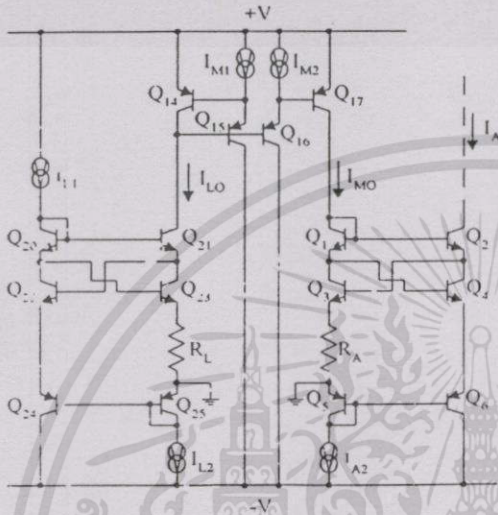
โดยในการสังเคราะห์ที่สมการที่ (17) วงจรมันจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ วงจรถลลอการิทึม วงจรมัลติพลาย/ดิไวด์ และวงจรถลลอการิทึม หั่งง่าเลือกไดอะแกรมรูปที่ 8 ส่วนรูปวงจรมันที่ได้ออกแบบขึ้นแสดงไว้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 บล็อกไดอะแกรมของวงจรมันฟังก์ชันเลขยกกำลัง

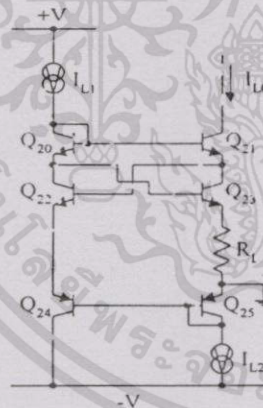
จากรูปที่ 8 จะเห็นได้อินพุทของวงจรมันนี้คือ I_{L1} โดย I_{L1} จะเป็นอินพุทของวงจรถลลอการิทึม เอาท์พุทของวงจรถลลอการิทึมเป็น I_{LO} ซึ่ง I_{LO} จะเป็นอินพุทให้กับวงจรมัลติพลาย/ดิไวด์ และเมื่อได้กระแสเอาท์พุทของวงจรมัลติพลาย/ดิไวด์ เป็น

I_{AO} ก็จะนำไปเป็นอินพุตให้กับวงจรแอนติล็อกการิธึมอีกทีหนึ่ง สุดท้ายจะได้ I_{AO} เป็นค่ากระแสเอาต์พุตของวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลังตามต้องการ ดังจะแสดงการอธิบายรายละเอียดในแต่ละส่วนของวงจรดังต่อไปนี้



รูปที่ 9 วงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง

5.1 วงจรล็อกการิธึม



รูปที่ 10 วงจรล็อกการิธึม

จากรูปที่ 9 ในส่วนแรกประกอบด้วกลุ่มของ Q_{20} ถึง Q_{25} และ R_L คือวงจรถอดการิธึมซึ่งอ้างอิงมาจาก [5] โดยจากวงจรนี้จะได้สมการของเอาต์พุตว่า

$$I_{LO} = \frac{V_T}{R_L} \ln \left[\frac{I_{L1}}{I_{L2}} \right] \quad (18)$$

5.2 วงจร Multiplier/Divider

จากรูปที่ 9 ในส่วนที่สองที่ประกอบด้วยกลุ่มของ Q_{14} ถึง Q_{17} คือ วงจร Multiplier/Divider ซึ่งจะได้สมการดังที่เทียบวิเคราะห์ไว้ คือ

$$I_{AO} = \frac{I_{LO} I_{M1}}{I_{M2}} \quad (19)$$

5.3 วงจรแอนติล็อกการิธึม

จากรูปที่ 9 ในส่วนสุดท้ายที่ประกอบด้วยกลุ่มของ Q_1 ถึง Q_6 และ R_A คือวงจรถอดการิธึมที่เลขได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2 ข้างต้น ซึ่งมีสมการเป็น

$$I_{AO} = I_{A2} e^{I_{M0} R_A / V_T} \quad (20)$$

5.4 วิเคราะห์วงจรทั้งหมด

จากสมการที่ (18) และ (19) เอาต์พุตของวงจรถอดการิธึมเป็นอินพุตของวงจร Multiplier/Divider จึงได้ว่า

$$I_{AO} = \frac{V_T}{R_L} \frac{I_{M1}}{I_{M2}} \ln \left[\frac{I_{L1}}{I_{L2}} \right] \quad (21)$$

จากสมการที่ (20) และ (21) เอาต์พุตของวงจร Multiplier/Divider เป็นอินพุตของวงจรถอดการิธึม จึงได้ว่า

$$I_{AO} = I_{A2} e^{\frac{R_A I_{M1}}{R_L I_{M2}} \ln \left[\frac{I_{L1}}{I_{L2}} \right]} \quad (22)$$

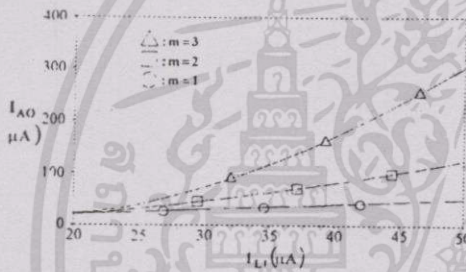
จากสมการที่ (22) ถ้ากำหนดให้ $R_A = R_L$ สุดท้ายจะได้

$$I_{AO} = I_{A2} \left[\frac{I_{L1}}{I_{L2}} \right]^{\left[\frac{I_{M1}}{I_{M2}} \right]} \quad (23)$$

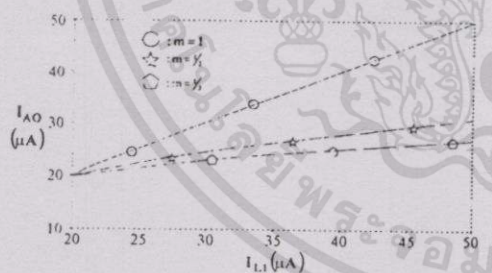
ซึ่งจะเห็นได้ว่าเอาต์พุตของวงจรมีลักษณะเหมือนสมการที่ (17) ซึ่งเป็นฟังก์ชันเลขยกกำลังที่เราต้องการ ดังแสดงรูปวงจรมบูรณไว้ในรูปที่ 9 จากรูปแบบของสมการที่ (23) ที่เราสังเคราะห์ได้ ค่าของสมการทั้งหมดอยู่ในรูปแบบอัตราส่วนของกระแสที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นข้อดีในการนำไปใช้งาน อีกทั้งวงจรยังปราศจากผลของอุณหภูมิอีกด้วย ทำให้มีความเหมาะสมในการนำไปออกแบบสร้างเป็นวงจรรวม

5.5 ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง ใช้โปรแกรม PSPICE [4] เลียนแบบการทำงานของวงจร โดยทรานซิสเตอร์ NPN และ PNP ได้ใช้เบอร์ Q2N3904 และ Q2N3906 ตามลำดับ แหล่งจ่ายไฟ +V และ -V = ± 5V ค่าความต้านทาน $R_A = R_L = 520\Omega$ ค่ากระแสในวงจรให้ $I_{L2} = I_{A2} = 20\mu A$ และ $I_{M2} = 12\mu A$ ส่วนค่าของ I_{M1} จะทำการเปลี่ยนค่าจาก 4 μA , 6 μA , 12 μA , 24 μA และ 36 μA ซึ่งจะทำให้ m มีค่าเป็น 1/3, 1/2, 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดย m คือ I_{M1}/I_{M2} จากสมการที่ (23) ทำการแปรค่า I_{L1} จาก 20 μA ถึง 50 μA ปรากฏผลของ I_{A1} ที่รูปที่ 11(ก) และ 11(ข)

ซึ่งจากรูปที่ 11(ก) และ 11(ข) จะเห็นได้ว่า เอกลักษณ์ I_{A0} มีลักษณะของฟังก์ชันเลขยกกำลัง เป็นไปตามสมการที่ (23)



รูปที่ 11(ก) ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{L1} กับ I_{A0} ของวงจรรูปที่ 9 เมื่อทำการเปลี่ยนค่า m เป็น 3, 2 และ 1



รูปที่ 11(ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{L1} กับ I_{A0} ของวงจรรูปที่ 9 เมื่อทำการเปลี่ยนค่า m เป็น 1, 1/2 และ 1/3

6. สรุป

ในบทความนี้ได้นำเสนอวงจรแอนคล็อกการิชมิก ซึ่งมีการทำงานอยู่ในรูปของกระแส วงจรดังกล่าวนี้สามารถนำไปประยุกต์ร่วมกับวงจรลอคการิชมิก วงจรคูณและวงจรรหาร

กระแส เพื่อทำเป็นวงจรฟังก์ชันเลขยกกำลัง ผลที่ได้จากการเลียนแบบการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม PSPICE ให้ผลการแปลงค่าเลขยกกำลังใดๆ ใกล้เคียงและเป็นไปตามหลักการที่นำเสนอ

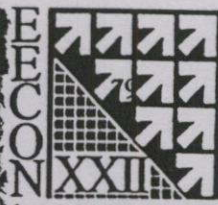
7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้รับทุนอุดหนุน และ เครื่องมือในการทำวิจัยจาก Japan International Cooperation Agency (JICA) ซึ่งคณะผู้จัดทำวิจัย ขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] A.J. Pulton and V. Walsh, "Analog Electronics with Op-Amps, Source Book of Practical Circuits," Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1993
- [2] S. Franco, "Design with Operational Amplifier and Analog Integrated Circuits," McGraw-Hill, New York, 1988.
- [3] K. Kumwachara, N. Fujii and W. Surakamponorn, "Low voltage bipolar translinear-based temperature dependent current source and its application," Proc. IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and System, pp. 9-12, 1998.
- [4] Microsim Corp., "PSPICE," Laguna Hills, CA92653, USA., 1994.
- [5] กัทรชัย อุปริพุทธิกุล, เกียรติศักดิ์ คมวัชระ, วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์, ตุมลธิ อุณหวนิชย์, อธิศศิลป์ ทุมวิภาค, "วงจรรลอคการิชมิกแบบทำงานในรูปของกระแสสองควอดแรนซ์," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 22, หน้า 319 - 322, พ.ศ. 2542.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุม
Electrical Engineering Conference
(EECON 22)

วันที่ 2-3 ธันวาคม 2542

ณ อาคารสถิตยบันคันทวีและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดำเนินการจัดประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปีการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรถอดการริธึมิกแบบทำงานในรูปของกระแสสองควอดแรนท์

An Integrable Two-Quadrant Current-Mode Logarithmic Circuit

ภัทรชัย อุปัทพธิกุล* เกียรติศักดิ์ กมวิษระ* วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์* สุมาลี อุณหวนษ์** ชีรศิลป์ ทุมวิภาค**

* ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ สำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนจตุพลวิทยาคาร ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร. 326-9989

** ภาควิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ถนนพิบูลสงคราม บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทร. 587-4334

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นงานนำเสนอวงจรถอดการริธึมิกที่มีการทำงานในรูปของกระแส วงจรดังกล่าวออกแบบโดยอาศัยพื้นฐานของวงจรรานส์ลิเนียร์ที่สร้างจากโพลาร์ทรานซิสเตอร์และวงจรถอดค่าสัมบูรณ์ของกระแส วงจรที่นำเสนอสามารถทำงานได้สองควอดแรนท์โดยให้สัญญาณเอาต์พุตออกมาในรูปของกระแสที่เป็นฟังก์ชันลอการิทึมกับกระแสอินพุตและเนื่องจากวงจรถอดแบบโดยอาศัยหลักการของวงจรรวมที่มีการทำงานในรูปกระแสและทำงานได้สองควอดแรนท์จึงทำให้วงจรมีช่วงปฏิบัติงานที่กว้าง เหมาะในการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมในการทดสอบถึงสมรรถนะของวงจรรวมได้ใช้โปรแกรม PSPICE ทำการเลียนแบบเพื่อนำผลดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับทฤษฎีที่ได้นำเสนอซึ่งผลที่ได้มีความใกล้เคียงและเป็นไปตามหลักการที่นำเสนอ

Abstract

A simple circuit design technique for realizing an integrable current-mode logarithmic circuit based on a current absolute value circuit and a translinear loop implemented from bipolar transistors is described. The proposed circuit can provide two-quadrant logarithm output signal, wide dynamic range and the circuit are readily integrable. Some PSPICE simulation results are also included to demonstrate the characteristics of the proposed technique.

1. บทนำ

ในความจำเป็นที่จะต้องนำสัญญาณอินพุตที่มีช่วงปฏิบัติงานที่กว้างๆเข้ามาใช้งาน เพื่อปฏิบัติงานในช่วงการใช้นางหนึ่งๆจะต้องมีการบีบอัด (compression) สัญญาณข้อมูลดังกล่าวให้มีขนาดแคบลง ซึ่งคุณสมบัตินี้เป็นที่ทราบดีว่าจะต้องใช้คุณสมบัติของวงจรถอดการริธึมิก [1,2] มาช่วยเป็นส่วนอินพุตให้กับวงจร อีกทั้งยังพบว่าวงจรถอดการริธึมิกมีการนำไปประยุกต์ใช้งานได้มากมายในด้านอื่นๆ เช่น ทำเป็นวงจรถอดค่าหรือออกแบบฟังก์ชันเลขยกกำลังใดๆ [1,2] เป็นต้น และยัง

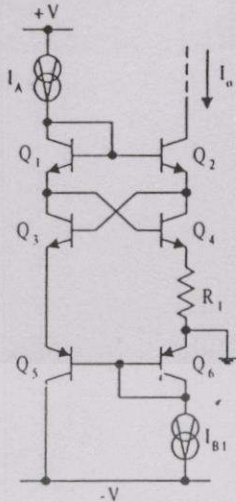
ปัจจุบันถ้าได้มีการติดตามงานวิจัยพบว่า D.R.Frey [3] คือผู้ที่ได้นำเสนอหลักการของลอกโดเมน (log-domain) ขึ้นมาและแสดงให้เห็นจริงถึงการประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆอย่างมากมาย ดังนั้นจึงได้มีการทำให้ความสนใจและพัฒนางวงจรถอดการริธึมิกฟังก์ชันขึ้นมาเรื่อยๆขึ้นเป็นลำดับ วงจรถอดการริธึมิกโดยทั่วไปสามารถสร้างขึ้นได้จากออปแอมป์ (operational amplifier) ที่ต่อร่วมกับความต้านทานและทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์อย่างละหนึ่งตัว [1,2] ซึ่งรูปแบบดังกล่าวจัดอยู่ในรูปแบบของการทำงานแบบแรงดัน (voltage-mode) จากหลักการดังกล่าวจะต้องใช้แหล่งจ่ายไฟไบโอสให้กับวงจรในช่วงแรงดันสูง ช่วงปฏิบัติงานทางด้านความถี่ของวงจรถอดค่าไม่กว้างนัก และปกติจะทำงานได้เพียงควอดแรนท์เดียวเท่านั้น อีกทั้งยังไม่แสดงการลดผลของอุณหภูมิที่ขึ้นตรงกับวงจรให้หมดไป ดังนั้นจึงสมควรที่จะกล่าวมาข้างต้นในบทความนี้จึงได้นำเสนอถึงหลักการออกแบบวงจรถอดการริธึมิกที่มีการจัดรูปแบบการทำงานในรูปของกระแส (current-mode) และยังสามารถทำงานได้สองควอดแรนท์อีกด้วย ซึ่งหมายถึงสามารถปฏิบัติงานในการรับสัญญาณอินพุตที่เข้ามาได้เพิ่มขึ้นอีกเท่าตัว พร้อมทั้งแสดงให้เห็นถึงวิธีการลดผลของอุณหภูมิที่ขึ้นตรงกับวงจรให้หมดไปโดยสิ้นเชิง ทั้งหมดของวงจรถอดการริธึมิกในรูปของวงจรรวม (Integrated Circuit หรือ IC) ภายใต้การใช้โพลาร์เทคโนโลยีในการออกแบบ ดังนั้นคุณลักษณะการทำงานของวงจรถอดการริธึมิกดังกล่าวข้างต้นจะได้นำไปทดสอบผลเพื่อให้งานใจได้ว่าวงจรถอดการริธึมิกที่นำเสนอไปใช้งานได้จริงโดยใช้โปรแกรม PSPICE ขึ้นจนถึงการทำงานและสมรรถนะของวงจรถอดการริธึมิกที่ได้นำเสนอไว้และให้ผลสอดคล้องกับทฤษฎี

2. หลักการทำงานพื้นฐาน

2.1 วงจรถอดการริธึมิกที่มีการทำงานในรูปของกระแสแบบควอดแรนท์เดียว

วงจรถอดการริธึมิกที่ทำงานในรูปของกระแสแบบควอดแรนท์เดียวแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแรงดันเบสกับอิมิตเตอร์ (base-emitter voltage) ได้ดังนี้

วงจรลอการิทึมิกแบบทำงานในรูปของกระแสสองควอแตรนซ์



รูปที่ 1 วงจรลอการิทึมิกที่ทำงานในรูปของกระแสแบบทวอแตรนซ์เดี่ยว

$$V_{BE1} + V_{BE4} + I_o R_1 + V_{EB6} = V_{BE2} + V_{BE3} + V_{EB5} \quad (1)$$

เมื่อ
$$V_{BEi} = V_T \ln \frac{I_{Ci}}{I_{Si}} \quad (2)$$

โดยที่ V_T คือ thermal voltage และ I_{Si} คือ saturation current ดังนั้นแทนค่าสมการที่ (2) ลงใน (1) จะได้

$$V_T \ln \left[\frac{I_{C1} I_{C4} I_{C6}}{I_{S1} I_{S4} I_{S6}} \right] + I_o R_1 = V_T \ln \left[\frac{I_{C2} I_{C3} I_{C5}}{I_{S2} I_{S3} I_{S5}} \right] \quad (3)$$

ถ้าทรานซิสเตอร์ Q_1 ถึง Q_6 ทุกตัวมีคุณสมบัติในการทำงานเหมือนกัน นั่นคือ $I_{S1} = I_{S2} = I_{S3} = I_{S4} = I_{S5} = I_{S6}$ และ $I_{S5} = I_{S6} = I_{SP}$ จึงทำให้สมการที่ (3) เขียนใหม่ได้เป็น

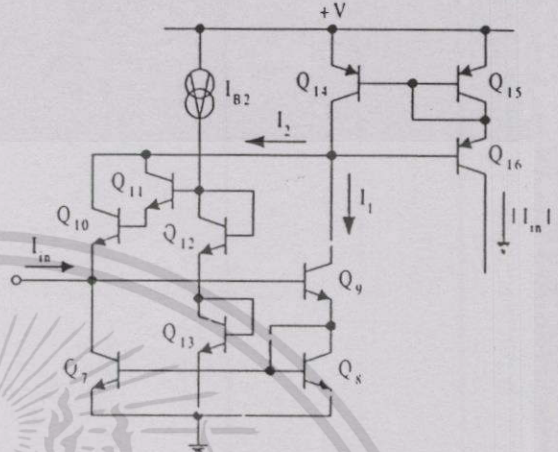
$$I_o R_1 = V_T \ln \left[\frac{I_{C2} I_{C3} I_{C5}}{I_{C1} I_{C4} I_{C6}} \right] \quad (4)$$

และจากวงจรในรูปที่ 1 จะได้ $I_A = I_{C1} = I_{C3} = I_{C5}$, $I_o = I_{C2} = I_{C4}$ และ $I_{C6} = I_{BI}$ ดังนั้นจะได้

$$I_o = \frac{V_T}{R_1} \ln \left[\frac{I_A}{I_{BI}} \right] \quad (5)$$

จากสมการจะเห็นว่าวงจรที่นำเสนอในรูปที่ 1 นั้นให้กระแสเอาต์พุตเป็นความสัมพันธ์ของฟังก์ชันลอการิทึมิกและวงจรมีสามารถทำงานได้เพียงควอแตรนซ์เดี่ยว

2.2 วงจรหาค่าสัมบูรณ์ของกระแส



รูปที่ 2 วงจรหาค่าสัมบูรณ์ของกระแส

เนื่องจากวงจรลอการิทึมิกที่นำเสนอในรูปที่ 1 นั้นสามารถทำงานได้เพียงควอแตรนซ์เดี่ยวเท่านั้น ดังนั้นเมื่อต้องการนำวงจรไปใช้ทำงานให้ได้ทั้งสองควอแตรนซ์ที่คือสามารถรับสัญญาณกระแสอินพุตได้ทั้งเชิงบวกและเชิงลบจำเป็นต้องมีส่วนของวงจรที่หาค่าสัมบูรณ์ของกระแสอิมพิท (absolute value) เสียก่อนซึ่งวงจรที่กล่าวมาแสดงได้ดังรูปที่ 2 วงจรประกอบด้วย Q_1-Q_4 และ Q_5-Q_8 ทำหน้าที่เป็นวงจระสะท้อนกระแสแบบวิลสัน (Wilson current mirror) แหล่งจ่ายกระแส I_{BI} และ Q_5-Q_8 ทำหน้าที่ไบอัสให้กับ Q_1-Q_4 ทำงานในช่วงกึ่งของกลาส AB และหรือที่ทำงานตลอดเวลา หากทรานซิสเตอร์ทุกตัวในวงจรมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการแล้วเมื่อป้อนกระแสอินพุต I_{in} ให้กับวงจร โดยที่ I_{in} มีค่ามากกว่าศูนย์วงจระสะท้อนกระแส Q_1-Q_4 จะสะท้อนกระแสไปเป็นกระแส I_1 และในทางกลับกันถ้า I_{in} มีค่าน้อยกว่าศูนย์ Q_5-Q_8 จะนำกระแสเป็น I_2 ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$I_1 = \begin{cases} I_{in} & ; I_{in} > 0 \\ 0 & ; I_{in} < 0 \end{cases} \quad (6a)$$

และ
$$I_2 = \begin{cases} 0 & ; I_{in} > 0 \\ I_{in} & ; I_{in} < 0 \end{cases} \quad (6b)$$

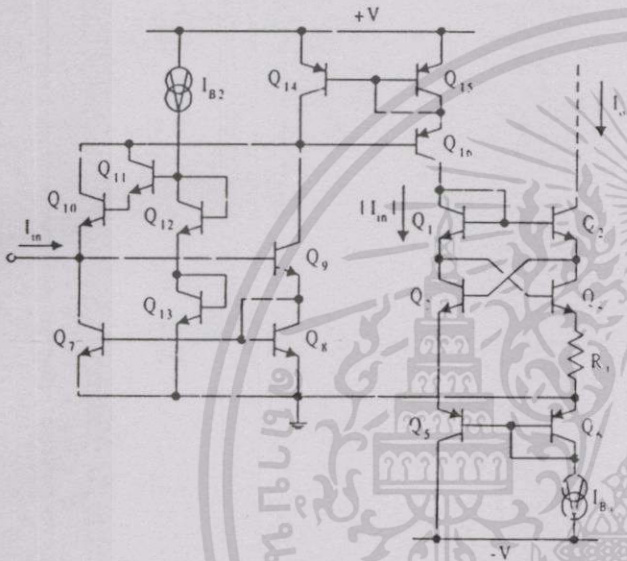
และเนื่องจากผลรวมของกระแส $I_1 + I_2$ จะถูกวงจระสะท้อนกระแส Q_9-Q_{16} ส่งผ่านไปเป็นกระแสเอาต์พุตของวงจรทำให้

$$I_{out} = I_{C16} = I_1 + I_2 \quad (7)$$

แต่ I_1 และ I_2 เป็นกระแสที่ครั้งหนึ่งของกระแสอินพุท I_{in} ของวงจรถอดการอิทธิมิค ดังนั้นจะได้กระแสเอาต์พุทของวงจรถอดการอิทธิมิคเท่ากับ

$$I_{out} = |I_{in}| \quad (8)$$

3. วงจรถอดการอิทธิมิคที่มีการทำงานในรูปของกระแสแบบสองควอแดรนต์



รูปที่ 3 วงจรถอดการอิทธิมิคที่ทำงานในรูปของกระแสแบบสองควอแดรนต์

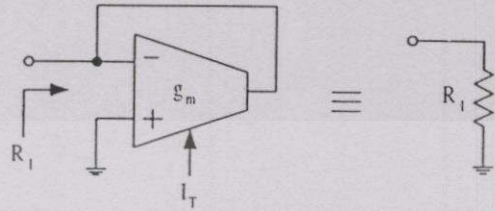
รูปที่ 3 แสดงวงจรถอดการอิทธิมิคที่ทำงานในรูปของกระแสแบบสองควอแดรนต์ที่ประกอบด้วยวงจรถอดการอิทธิมิคพื้นฐานในรูปที่ 1 และ 2 คือใช้ทำงานร่วมกัน โดยที่กระแสเอาต์พุทที่ได้จากวงจรถอดการอิทธิมิคจะถูกส่งผ่านมาเป็นกระแส I_o ให้กับวงจรถอดการอิทธิมิค ดังนั้นจากสมการที่ (5) และ (8) จะได้กระแสเอาต์พุทของวงจรถอดการอิทธิมิคเท่ากับ

$$I_o = \frac{V_T}{R_1} \ln \frac{|I_{in}|}{I_{B1}} \quad (9)$$

จะเห็นว่าวงจรถอดการอิทธิมิคที่นำเสนอนี้ให้คุณสมบัติระหว่างกระแสอินพุทกับกระแสเอาต์พุทเป็นไปตามความสัมพันธ์ของฟังก์ชันลอการิทึม

4. การลดผลของอุณหภูมิในวงจรถอดการอิทธิมิคโดยใช้ OTA

จากสมการที่ (9) จะเห็นว่าการทำงานของวงจรถอดการอิทธิมิคขึ้นกับอุณหภูมิด้วยคือค่าของ V_T ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเสนอการลดผลของอุณหภูมิโดยการใช้องค์ประกอบ OTA ต่อแทน R_1 ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งจากการต่อดังกล่าวโดยใช้องค์ประกอบ OTA ทำให้ได้ค่าความต้านทานเสมือนมีค่าเท่ากับ



รูปที่ 4 การใช้ OTA ต่อแทน R_1 เพื่อลดผลของอุณหภูมิ

$$R_1 = \frac{I}{g_m} = \frac{2V_T}{I_T} \quad (10)$$

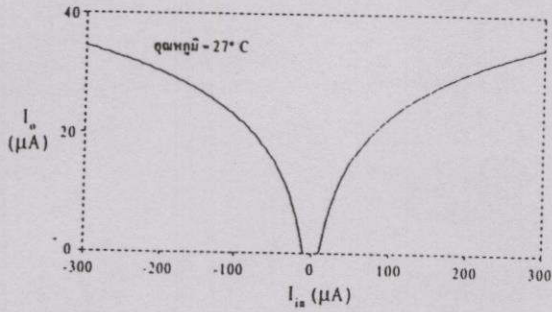
แทนค่าสมการที่ (10) ลงใน (9) จะได้

$$I_o = \frac{I_T}{2} \ln \frac{|I_{in}|}{I_{B1}} \quad (11)$$

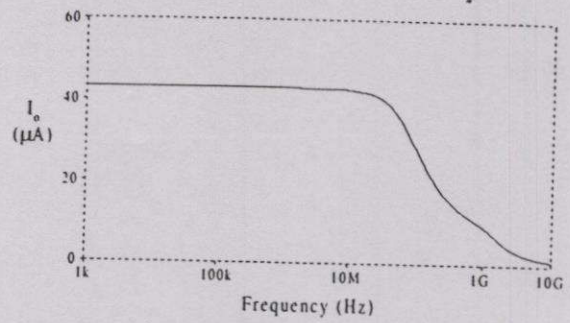
จากสมการที่ (11) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการทำงานของวงจรถอดการอิทธิมิคและ ไม่ขึ้นกับผลของอุณหภูมิ

5. ผลการเลียนแบบการทำงานและสมรรถนะของวงจรถอดการอิทธิมิค

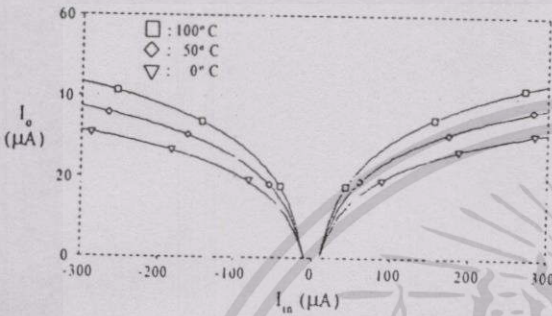
ในที่นี้ได้ใช้โปรแกรม PSPICE [4] ทำการเลียนแบบการทำงานของวงจรถอดการอิทธิมิคทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP ได้ใช้โมเดลของ AT&T ALA400 (CBICR MODELS) เบอร์ NR100N และ PR100N ซึ่งมีรายละเอียดของโมเดลตามเอกสารอ้างอิงที่ 3 ส่วนแหล่งจ่ายไฟเลือกใช้ $+V = -V = 3V$ และกำหนดให้กระแสไบอัส $I_{B1} = 10 \mu A$, $I_{B2} = 100 \mu A$ ผลการเลียนแบบความสัมพันธ์ระหว่าง I_o กับ I_{in} ของวงจรถอดการอิทธิมิคที่ 3 เมื่อใช้ค่าความต้านทาน $R_1 = 2600 \Omega$ และทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง $27^\circ C$ ซึ่งจะได้ $V_T \cong 26 mV$ โดยแปรค่า I_{in} จาก $-300 \mu A$ จนถึง $300 \mu A$ ปรากฏผลดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่ากระแส I_o ของวงจรถอดการอิทธิมิคมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ (9) ส่วนรูปที่ 6 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง I_o กับ I_{in} ของวงจรถอดการอิทธิมิคที่ 3 เมื่อมีการแปรค่าอุณหภูมิเป็น $0^\circ C$, $50^\circ C$ และ $100^\circ C$ ตามลำดับ



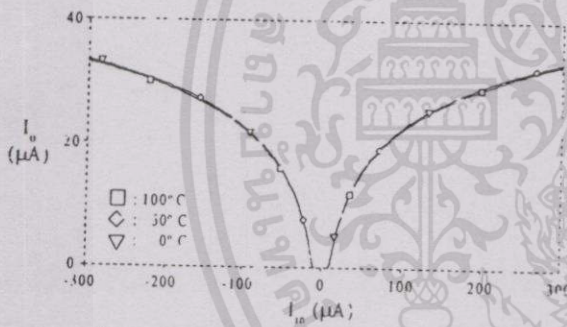
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{in} กับ I_o ของวงจรรูปที่ 3



รูปที่ 8 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรถอด



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{in} กับ I_o ของวงจรรูปที่ 3 เมื่ออุณหภูมิแปรค่าเป็น 0°C , 50°C และ 100°C



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{in} กับ I_o ของวงจรรูปที่ 3 เมื่อใช้ OTA คอแทน R_1

ในการเขียนแบบการทำงานการนำเอาวงจรถอดการริบิกแบบทำงานในรูปของกระแสสองควอแตรนที จากรูปที่ 4 ไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรถอดการริบิกในรูปที่ 3 เพื่อลดผลของอุณหภูมิของวงจรถอดการริบิกได้เลือกใช้ $I_T = 20 \mu\text{A}$ และทำการทดสอบโดยแปรค่าอุณหภูมิเป็น 0°C , 50°C และ 100°C ตามลำดับ ปรากฏผลดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจรถอดการริบิกและลดลงไปได้มาก รูปที่ 8 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรถอดการริบิกจากการเขียนแบบทำให้พบว่าวงจรถอดการริบิกมีช่วงปฏิบัติงานทางความถี่ได้สูงกว่า 10 MHz

6. บทสรุป

เนื่องจากว่าวงจรถอดการริบิกสามารถปฏิบัติงานได้ถึงสองควอแตรนทีทำให้มีช่วงการใช้งานกับสัญญาณอินพุตได้กว้างขึ้นกว่าเดิมที่ปฏิบัติงานได้เพียงควอแตรนทีเดียวเท่านั้น วงจรมีความเหมาะสมอย่างมากในการนำไปใช้งานเพราะการทำงานอยู่ในรูปแบบของกระแสซึ่งต้องการแหล่งจ่ายไฟที่เหมาะสมในการนำไปสร้างวงจรรวม และยังสามารถปฏิบัติงานที่ความถี่ได้สูงถึง 10 MHz อีกทั้งได้แสดงให้เห็นถึงการลดผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับวงจรถอดการริบิกฟังก์ชันที่ออกแบบให้หมดไปโดยใช้ OTA ผลที่ได้จากการเขียนแบบการทำงานของวงจรถอดการริบิกโดยใช้โปรแกรม PSpice ให้ผลใกล้เคียงและเป็นไปตามหลักการที่ได้นำเสนอ

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้รับทุนอุดหนุนและเครื่องมือในการทำวิจัยจาก Japan International Cooperation Agency (JICA) ซึ่งคณะผู้ทำการวิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] A.J.Pylton and V.Walsh, "Analog Electronics with Op-Amps, Source Book of Practical Circuits", Cambridge University Press., Cambridge, U.K., 1993.
- [2] S.Franco, "Design with Operational Amplifier and Analog Integrated Circuits", McGraw-Hill, New York, 1988.
- [3] D.R.Frey, "Log-Domain Filtering : An Approach to Current-Mode Filtering", IEE Proceeding-G, vol.140, no.6, pp.406-416, 1993.
- [4] Microsim Corp., "PSpice", Laguna Hills, CA92653, USA., 1994.

ประวัติผู้เขียน

นายภัทรชัย อุปริพุทธิกุล เกิดเมื่อวันที่ 4 กุมภาพันธ์ 2521 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2541



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้