

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

วงจรมคูณด้วยสามสี่ควอดเรนต์โดยอาศัยหลักการ PWAM  
ที่ปราศจากอิทธิพลของความถี่และดัชนีการมอดูเลทของ PWM

FOUR QUADRANT MULTIPLIER BASED ON PWAM  
WITHOUT EFFECT OF FREQUENCY AND MODULATION INDEX OF PWM



พรเทพ จันทรคุณาภาส  
PORNTHPE CHANCUNAPAS

อพ.  
ว. ๒๕๕๖  
น. ๕

เลขหน้.....  
เลขทะเบียน..... 44955  
วัน, เดือน, ปี 16 ส.ค. 2546

b..... 1126๖๖17  
i..... 12240965

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2545

ISBN 974-324-098-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**FOUR QUADRANT MULTIPLIER BASED ON PWAM  
WITHOUT EFFECT OF FREQUENCY AND MODULATION INDEX OF PWM**



**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**

**2002**

**ISBN 974-324-098-5**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2002**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรรูณสัญญาณสี่ควอดแรนต์โดยอาศัยหลักการ PWAM ที่ปราศจากอิทธิพลของความถี่และดัชนีการมอดูเลทของ PWM
นักศึกษา	นายพรเทพ จันทร์คุณภาส
รหัสประจำตัว	41061131
ปริญญา	วิศวกรรมมหาบัณฑิต
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอโครงสร้างวงจรรูณสัญญาณโดยใช้หลักการของ PWAM 2 โครงสร้าง โดยโครงสร้างแบบแรกใช้ PWM 2 ตัวที่มีความถี่เดียวกัน มอดูเลท ด้วยสัญญาณอินพุตที่กลับเฟสกัน 180 องศา แล้วนำ PWM ทั้งสอง ไปเป็นคลื่นพาห้ให้กับ PAM ส่วนโครงสร้างที่สอง เป็นการปรับปรุงโครงสร้างให้เสถียรโดยทำให้เหลือ PWM เพียงตัวเดียวด้วยเทคนิคของการกลับเฟส PWM ทำให้ได้โครงสร้างวงจรรูณที่ปราศจากอิทธิพลของความถี่และดัชนีการมอดูเลทของ PWM และสามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ต้องทำการปรับแต่งสัญญาณเพื่อหาจุดการทำงานที่เหมาะสม

<b>Thesis Title</b>	Four quadrant multiplier based on PWAM without effect of frequency and modulation index of PWM
<b>Student</b>	Mr.Pornthep Chancunapas
<b>Student ID</b>	41061131
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2002
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Pramote Wadkien

### ABSTARCT

In this thesis , we present two models of four quadrant analog multiplier based on PWAM. The first model uses 2 PWM modulated with input signal that have phase different 180 degree for creating cairrer in PAM. Second model was reform by using one PWM with inverse phase of PWM exist multiplier with out effect of frequency and modulation index of PWM

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นได้ก็เนื่องมาจากความอนุเคราะห์ของ รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้เสียสละเวลาและให้ความกรุณาชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญญารวมไปถึงได้ให้กำลังใจผู้เขียนด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ ศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์ ผศ.ดร.จริยา วงศ์เดชะธรรม ผ.ศ.วิภา แสงพิลิตีร์ พร้อมทั้ง พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทุกคน สำหรับในส่วนของคำแนะนำ การช่วยเหลือ และความร่วมมือในด้านต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ สำหรับการทำวิทยานิพนธ์นี้ คุณค่าหรือประโยชน์อันพึงมีอันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พรเทพ จันทรคุณาภาส

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
บทที่ 2 การมอดูเลตพัลส์.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 ทฤษฎีการชักตัวอย่าง.....	4
2.3 การมอดูเลตพัลส์เชิงแอมพลิจูด.....	9
2.4 การมอดูเลตความกว้างพัลส์.....	11
บทที่ 3 วงจรคูณสัญญาณอนาล็อก 4 ควอดแดรนต์.....	16
3.1 กล่าวนำ.....	16
3.2 วงจรคูณของกิลเบิร์ต (Gilbert Multiplier).....	17
3.3 วงจรคูณโดยอาศัยหลักการทรานสลิเนียร์.....	20
3.4 วงจรคูณโดยอาศัยหลักการควอดเตอร์-สแควร์โดยใช้ CMOS.....	23
3.5 วงจรคูณโดยอาศัยหลักการควอดเตอร์-สแควร์โดยใช้ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์.....	26
3.6 วงจรคูณโดยอาศัยหลักการล็อก-แอนติล็อก.....	29
3.7 วงจรคูณโดยอาศัยหลักการมัลติพลายสัญญาณสามเหลี่ยม.....	32
3.8 วงจรคูณโดยอาศัยหลักการ compound pulse-time modulation.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.9 วงจรคูณ โดยอาศัยหลักการ pulse-interval amplitude modulation.....	38
บทที่ 4 วงจรคูณสัญญาณ 4 ควอดแรนซ์โดยอาศัยหลักการ PWAM ที่นำเสนอ.....	43
4.1 กล่าวนำ.....	43
4.2 วงจรคูณที่นำเสนอ โครงสร้างที่ 1.....	45
4.3 วงจรคูณที่นำเสนอ โครงสร้างที่ 2.....	48
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	52
5.1 วงจรคูณสัญญาณ 4 ควอดแรนซ์ ที่นำเสนอ โครงสร้างที่ 1.....	52
5.1.1 การทดลองโดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE.....	52
5.1.2 การทดลองโดยการต่อวงจรจริง.....	68
5.2 วงจรคูณสัญญาณ 4 ควอดแรนซ์ ที่นำเสนอ โครงสร้างที่ 2.....	79
5.2.1 การทดลองโดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE.....	79
5.2.2 การทดลองโดยการต่อวงจรจริง.....	95
บทที่ 6 บทสรุป.....	107
เอกสารอ้างอิง.....	108
ภาคผนวก.....	111
ประวัติผู้เขียน.....	123

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 การชักตัวอย่างด้วยวงจรสวิตช์.....	5
รูปที่ 2.2 การแปลความหมายการชักตัวอย่างกับการคูณ.....	5
รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของสัญญาณที่เกิดจากการชักค่าสัญญาณ.....	8
รูปที่ 2.4 สัญญาณและสเปกตรัมของสัญญาณในขบวนการมอดูเลตแบบพีเอเอ็ม.....	10
รูปที่ 2.5 แผนผังวงจรระบบสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม.....	11
รูปที่ 2.6 สัญญาณในขบวนการมอดูเลตพีดับบลิวเอ็ม.....	12
รูปที่ 3.1 วงจรคูณสัญญาณอนาลอก.....	16
รูปที่ 3.2 วงจรขยายผลต่าง.....	17
รูปที่ 3.3 วงจรคูณ 4 ควอดแรนต์โดยอาศัยของกิลเบิร์ต.....	18
รูปที่ 3.4 วงจรคูณ โดยอาศัยหลักการทรานสลิเนียร์.....	22
รูปที่ 3.5 วงจรกำลังสอง.....	24
รูปที่ 3.6 วงจรคูณแบบควอดเตอร์-สแควร์โดยใช้ CMOS.....	25
รูปที่ 3.7 วงจรขยายผลต่างซึ่งทรานซิสเตอร์มีพื้นที่อิมิตอร์ไม่เท่ากัน.....	26
รูปที่ 3.8 วงจรกำลังสองจากวงจรขยายผลต่าง.....	27
รูปที่ 3.9 วงจรคูณ โดยอาศัยหลักการควอดเตอร์-สแควร์โดยใช้ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์.....	28
รูปที่ 3.10 วงจรคูณสัญญาณหนึ่งควอดแรนต์ที่อาศัยหลักการล็อก-แอนติล็อก.....	29
รูปที่ 3.11 วงจรคูณสัญญาณสี่ควอดแรนต์ที่อาศัยหลักการล็อก-แอนติล็อก.....	31
รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรม วงจรคูณ โดยอาศัยหลักการมัลติพลายสัญญาณสามเหลี่ยม.....	32
รูปที่ 3.13 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรถับทิศทางกระแส.....	33
รูปที่ 3.14 วงจรสมบูรณ์ของวงจรถับทิศทาง โดยอาศัยหลักการมัลติพลายสัญญาณสามเหลี่ยม.....	35
รูปที่ 3.15 บล็อกไดอะแกรม วงจรคูณ โดยอาศัยหลักการ compound pulse-time modulation.....	36
รูปที่ 3.16 สัญญาณที่เกิดจากฟังก์ชันเกท.....	37
รูปที่ 3.17 วงจรสมบูรณ์ของวงจรถับทิศทาง โดยอาศัยหลักการ compound pulse-time modulation.....	38
รูปที่ 3.18 การมอดูเลตแบบ PIM.....	39
รูปที่ 3.19 บล็อกไดอะแกรมของวงจรถับทิศทาง โดยอาศัย pulse-interval amplitude modulation.....	41
รูปที่ 3.20 วงจรสมบูรณ์ของวงจรถับทิศทาง โดยอาศัย pulse-interval amplitude modulation.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมวงจรถูกสัญญาณ โดยอาศัยหลักการ PWAM ของนาย R.S.FYATH..	43
รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมวงจรถูกสัญญาณ โดยอาศัยหลักการ PWAM โครงสร้างที่ 1.....	45
รูปที่ 4.3 สัญญาณไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆของวงจร โครงสร้างที่ 1.....	47
รูปที่ 4.4 บล็อกไดอะแกรมวงจรถูกสัญญาณ โดยอาศัยหลักการ PWAM โครงสร้างที่ 2.....	48
รูปที่ 4.5 สัญญาณไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆของวงจร โครงสร้างที่ 2 .....	50
รูปที่ 5.1 วงจรถูกสัญญาณ 4 ควอเตอร์ โครงสร้างที่ 1.....	53
รูปที่ 5.2 ผลการทดลองของวงจรถูกสัญญาณ โครงสร้างที่1 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตในรูปแบบต่างๆ.....	55
รูปที่ 5.3 ค่าแรงดันออฟเซตของวงจรถูกสัญญาณ โครงสร้างที่ 1.....	55
รูปที่ 5.4 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรถูกสัญญาณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเลียนแบบ วงจรด้วยโปรแกรมPSPICE.....	56
รูปที่ 5.5 ผลการทดลองของวงจรถูกสัญญาณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 10 kHz.....	57
รูปที่ 5.6 ผลการทดลองของวงจรถูกสัญญาณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 20 kHz.....	58
รูปที่ 5.7 ผลการทดลองของวงจรถูกสัญญาณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 30 kHz.....	59
รูปที่ 5.8 ผลการทดลองของวงจรถูกสัญญาณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 40 kHz.....	60
รูปที่ 5.9 ผลการทดลองของวงจรถูกสัญญาณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 50 kHz.....	61
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %THD กับความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการ มอดูเลท PWM ของวงจรถูกสัญญาณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE.....	62
รูปที่ 5.11 ผลการทดลองของวงจรถูกสัญญาณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้มอดูเลชันอินเด็กซ์ในการมอดูเลทPWM = 30 %.....	63
รูปที่ 5.12 ผลการทดลองของวงจรถูกสัญญาณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้มอดูเลชันอินเด็กซ์ในการมอดูเลท PWM = 40 %.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.13 ผลการทดลองของวงจรถูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเขียนแบบวงจรถูด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้มอดูเลชันอินเด็กซ์ในการมอดูเลท PWM = 50 %.....	65
รูปที่ 5.14 ผลการทดลองของวงจรถูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเขียนแบบวงจรถูด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้มอดูเลชันอินเด็กซ์ในการมอดูเลท PWM = 60 %.....	66
รูปที่ 5.15 ผลการทดลองของวงจรถูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเขียนแบบวงจรถูด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้มอดูเลชันอินเด็กซ์ในการมอดูเลท PWM = 70 %.....	67
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %THD กับดัชนีการมอดูเลท ของ PWM ของวงจรถูณ โครงสร้างที่ 1 ทำการทดลองโดยการเขียนแบบด้วยโปรแกรม PSPICE....	68
รูปที่ 5.17 วงจรสมบูรณข์ของวงจรถูณที่อาศัยหลักการ PWAM ที่นำเสนอ โครงสร้างที่ 1.....	69
รูปที่ 5.18 อุปกรณ์และบอร์ดที่ใช้ในการทดลอง.....	69
รูปที่ 5.19 ผลการทดลองของวงจรถูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรถูจริง เมื่อป้อนสัญญาณ อินพุตในรูปแบบต่างๆ.....	71
รูปที่ 5.20 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรถูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรถูจริง...72	
รูปที่ 5.21 ผลการทดลองของวงจรถูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรถูจริง เมื่อใช้ความถี่ของ สัญญาณพาห้ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 10 kHz.....	73
รูปที่ 5.22 ผลการทดลองของวงจรถูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรถูจริง เมื่อใช้ความถี่ของ สัญญาณพาห้ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 20 kHz.....	73
รูปที่ 5.23 ผลการทดลองของวงจรถูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรถูจริง เมื่อใช้ความถี่ของ สัญญาณพาห้ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 30 kHz.....	74
รูปที่ 5.24 ผลการทดลองของวงจรถูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรถูจริง เมื่อใช้ความถี่ของ สัญญาณพาห้ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 40 kHz.....	74
รูปที่ 5.25 ผลการทดลองของวงจรถูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรถูจริง เมื่อใช้ความถี่ของ สัญญาณพาห้ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 50 kHz.....	75
รูปที่ 5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %THD กับความถี่ของสัญญาณพาห้ที่ใช้ในการ มอดูเลท PWM ของวงจรถูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรถูจริง.....	75
รูปที่ 5.27 ผลการทดลองของวงจรถูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรถูจริง เมื่อใช้มอดูเลชัน อินเด็กซ์ในการมอดูเลท PWM = 30 %.....	76

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.28 ผลการทดลองของวงจรถูก โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้มอดูเลชัน อินดิเคชันในการมอดูเลท PWM = 40 %.....	77
รูปที่ 5.29 ผลการทดลองของวงจรถูก โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้มอดูเลชัน อินดิเคชันในการมอดูเลท PWM = 50 %.....	77
รูปที่ 5.30 ผลการทดลองของวงจรถูก โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้มอดูเลชัน อินดิเคชันในการมอดูเลท PWM = 60 %.....	78
รูปที่ 5.31 ผลการทดลองของวงจรถูก โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้มอดูเลชัน อินดิเคชันในการมอดูเลท PWM = 70 %.....	78
รูปที่ 5.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %THD กับค่าดัชนีการมอดูเลทของ PWM ของวงจรถูก โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรจริง.....	79
รูปที่ 5.33 วงจรถูกสัญญาณ 4 ควอดเรนต์ โครงสร้างที่ 2.....	80
รูปที่ 5.34 ผลการทดลองของวงจรถูก โครงสร้างที่ 2 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตในรูปแบบต่างๆ.....	82
รูปที่ 5.35 ค่าแรงดันออฟเซตของวงจรถูก โครงสร้างที่ 2.....	82
รูปที่ 5.36 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรถูก โครงสร้างที่ 2 โดยการเลียนแบบ วงจรด้วยโปรแกรม PSPICE.....	83
รูปที่ 5.37 ผลการทดลองของวงจรถูก โครงสร้างที่ 2 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 10 kHz.....	84
รูปที่ 5.38 ผลการทดลองของวงจรถูก โครงสร้างที่ 2 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 20 kHz.....	85
รูปที่ 5.39 ผลการทดลองของวงจรถูก โครงสร้างที่ 2 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 30 kHz.....	86
รูปที่ 5.40 ผลการทดลองของวงจรถูก โครงสร้างที่ 2 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 40 kHz.....	87
รูปที่ 5.41 ผลการทดลองของวงจรถูก โครงสร้างที่ 2 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 50 kHz.....	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %THD กับความถี่ของสัญญาณพาร์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM ของวงจรถูก โครงสร้างที่ 2 โดยการเลียนแบบวงจรถ้วยโปรแกรม PSpice.....	89
รูปที่ 5.43 ผลการทดลองของวงจรถูก โครงสร้างที่ 2 โดยการเลียนแบบวงจรถ้วยโปรแกรม PSpice เมื่อใช้มอดูเลชันอินเด็กซ์ในการมอดูเลท PWM = 30 %.....	90
รูปที่ 5.44 ผลการทดลองของวงจรถูก โครงสร้างที่ 2 โดยการเลียนแบบวงจรถ้วยโปรแกรม PSpice เมื่อใช้มอดูเลชันอินเด็กซ์ในการมอดูเลท PWM = 40 %.....	91
รูปที่ 5.45 ผลการทดลองของวงจรถูก โครงสร้างที่ 2 โดยการเลียนแบบวงจรถ้วยโปรแกรม PSpice เมื่อใช้มอดูเลชันอินเด็กซ์ในการมอดูเลท PWM = 50 %.....	92
รูปที่ 5.46 ผลการทดลองของวงจรถูก โครงสร้างที่ 2 โดยการเลียนแบบวงจรถ้วยโปรแกรม PSpice เมื่อใช้มอดูเลชันอินเด็กซ์ในการมอดูเลท PWM = 60 %.....	93
รูปที่ 5.47 ผลการทดลองของวงจรถูก โครงสร้างที่ 2 โดยการเลียนแบบวงจรถ้วยโปรแกรม PSpice เมื่อใช้มอดูเลชันอินเด็กซ์ในการมอดูเลท PWM = 70 %.....	94
รูปที่ 5.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %THD กับดัชนีการมอดูเลท ของ PWM ของวงจรถูก โครงสร้างที่ 2 ทำการทดลองโดยการเลียนแบบด้วยโปรแกรม PSpice.....	95
รูปที่ 5.49 วงจรสมบูรณ์ของวงจรถูกที่อาศัยหลักการ PWM ที่นำเสนอ โครงสร้างที่ 2.....	96
รูปที่ 5.50 ผลการทดลองของวงจรถูก โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตในรูปแบบต่างๆ.....	98
รูปที่ 5.51 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรถูก โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง.....	99
รูปที่ 5.52 ผลการทดลองของวงจรถูก โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาร์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 10 kHz.....	100
รูปที่ 5.53 ผลการทดลองของวงจรถูก โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้ความถี่ของ สัญญาณพาร์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 20 kHz.....	100
รูปที่ 5.54 ผลการทดลองของวงจรถูก โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาร์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 30 kHz.....	101

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.55 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 40 kHz.....	101
รูปที่ 5.56 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 50 kHz.....	102
รูปที่ 5.57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %THD กับความถี่ของสัญญาณพาห์ ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM ของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง.....	102
รูปที่ 5.58 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้มอดูเลชันอินเด็กซ์ในการมอดูเลท PWM = 30 %.....	103
รูปที่ 5.59 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้มอดูเลชันอินเด็กซ์ในการมอดูเลท PWM = 40 %.....	104
รูปที่ 5.60 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้มอดูเลชันอินเด็กซ์ในการมอดูเลท PWM = 50 %.....	104
รูปที่ 5.61 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้มอดูเลชันอินเด็กซ์ในการมอดูเลท PWM = 60 %.....	105
รูปที่ 5.62 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้มอดูเลชันอินเด็กซ์ในการมอดูเลท PWM = 70 %.....	105
รูปที่ 5.63 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %THD กับค่าดัชนีการมอดูเลทของ PWM ของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง.....	106
รูปที่ ผ.1 บล็อกไดอะแกรมการมอดูเลทความกว้างของพัลส์และการกลับเฟสสัญญาณ โครงสร้างที่1.....	112
รูปที่ ผ.2 สัญญาณไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างที่ 1 เมื่อค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ของ PWM = 50%.....	113
รูปที่ ผ.3 สัญญาณไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างที่ 1 เมื่อค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ของ PWM = 30%.....	113
รูปที่ ผ.4 บล็อกไดอะแกรมการมอดูเลทความกว้างของพัลส์และการกลับเฟสสัญญาณ โครงสร้างที่2.....	114
รูปที่ ผ.5 สัญญาณไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างที่ 2 เมื่อค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ของ PWM = 50%.....	115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

รูปที่ ผ.3 สัญญาณไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างที่ 2 เมื่อค่ามอดุลชันอินเด็กซ์ของ

PWM = 30%.....114



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วงจรถวลสัญญาณ นับได้ว่าเป็นวงจรที่มีความสำคัญอย่างมากวงจรหนึ่งในการประมวลผลสัญญาณทางไฟฟ้าในระบบต่างๆ อาทิเช่น ทางด้านการสื่อสาร ระบบควบคุม และเครื่องมือวัด ฯลฯ ตัวอย่างเช่นในด้านการสื่อสารใช้วงจรถวลสำหรับการมอดูเลตและดีมอดูเลตสัญญาณ การนำวงจรถวลไปประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรถวลควบคุมอัตราขยายอัตโนมัติ (automatic gain control) การใช้วงจรถวลมาประยุกต์เป็นวงจรถวลกำลังสองในเครื่องมือวัดเพื่อหาค่า RMS หรือการเปลี่ยน RMS เป็น DC (RMS to DC converter) โดยที่วงจรถวลนั้นสามารถสร้างขึ้นมาได้หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งแต่ละวิธีต่างก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับวิธีการที่นำมาใช้

ในปี คศ.1968 Barie Gibert ได้นำเสนอวงจรถวลสัญญาณอนาล็อก 4 ควอดแรนต์ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในชื่อวงจรถวลของกิลเบิร์ต (Gilbert multiplier) [1] และเป็นวงจรถวลที่ได้รับความนิยมมาจนถึงปัจจุบัน โดยมีหลักการพื้นฐานเป็นวงจรถวลผลต่างซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์มาทำการไบแอสด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ การออกแบบเป็นวงจรถวลนั้นทำได้โดยใช้อินพุตของวงจรถวลผลต่างเป็นอินพุตแรกและให้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ซึ่งทำหน้าที่ไบแอสเป็นอินพุตที่สอง ด้วยเหตุผลที่สามารถปรับความนำ (transconductance) ของวงจรถวลผลต่างได้จากการปรับแหล่งจ่ายกระแสคงที่ แต่เนื่องจากคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถวลผลต่างทำให้วงจรถวลมีขีดจำกัดที่แรงดันอินพุตต้องเป็นสัญญาณขนาดเล็กเท่านั้นถ้าสัญญาณอินพุตมีขนาดใหญ่ขึ้นจำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานมาต่ออนุกรมที่อินพุตเพื่อขยายช่วงรับแรงดันอินพุตหรือใช้การต่อวงจรถวลเพิ่มเติมในส่วนของสัญญาณอินพุต ทำให้เกิดความยุ่งยากและไม่สะดวกในการนำไปใช้งานเนื่องจากจำเป็นต้องทำการปรับแต่งวงจรเพื่อหาจุดการทำงานที่เหมาะสมให้แก่วงจรเสียก่อน

เมื่อการออกแบบวงจรด้วยเทคโนโลยี CMOS ได้รับความนิยมมากขึ้นจึงได้มีการนำเสนอวงจรถวลที่ใช้ทรานซิสเตอร์แบบ MOS โดยอาศัยโครงสร้างของวงจรถวลของกิลเบิร์ต [2-4] และมีหลาย วงจรที่ออกแบบขึ้น โดยอาศัยคุณสมบัติกำลังสองของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ที่ไบแอสให้ทำงานอยู่ในช่วงอิ่มตัว (saturation) [5-11] หรือทำงานในช่วงไม่อิ่มตัว (non-saturation) [12-18] ซึ่งมีข้อดีก็คือมีอัตราการใช้พื้นที่งานต่ำและสามารถรับแรงดันอินพุตได้กว้างขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องอาศัยความต้านทานสำหรับขยายแรงดันอินพุต แต่ช่วงการทำงานของสัญญาณอินพุตก็ยังไม่สามารถทำได้กว้างมากนัก เนื่องจากข้อจำกัดอยู่ที่ย่านการทำงานของ MOS มีจำกัด ขึ้นอยู่กับว่ามีการออกแบบให้มีการไบแอสให้ MOS ทำงานอยู่ในช่วงใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในกรณีของวงจรถูกที่อาศัยหลักการของ PWAM และ PWM-PWM [19-22] เป็นวงจรถูกที่อาศัยการนำเอาสัญญาณอินพุตมาทำการมอดูเลทกับสัญญาณพาห์แบบ PWM และ PAM จากนั้นนำเอา สัญญาณที่ได้จากการมอดูเลทมารวมกัน องค์ประกอบสัญญาณความถี่ต่ำของสัญญาณที่ได้จะอยู่ในรูปของผลคูณของสัญญาณอินพุต ซึ่งมีข้อดีคือมีย่านการทำงานของสัญญาณอินพุตที่กว้าง สัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีความเป็นเชิงเส้น และ มีความแม่นยำสูงกว่าแบบอื่นที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ แต่ข้อเสียก็คือวงจรต้องใช้วงจรกรองความถี่ต่ำเพื่อกรองเอาเฉพาะผลคูณ ส่งผลทำให้เกิดความผิดพลาดในการคูณสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่สูงๆและการทำเป็นวงจรถูกสัญญาณแบบ 4 ควอดเรนต์ทำได้ค่อนข้างยุ่งยาก ดังแสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [22] นำเสนอโดย นาย R.S.FYATH และคณะ ซึ่งเป็นวงจรถูกแบบ 4 ควอดเรนต์ ที่อาศัยหลักการ PWAM หรือ PWIM แต่ข้อเสียของการทำงานของวงจรถูกนี้คือ เมื่อมีการเปลี่ยนมอดูเลชันอินเด็กซ์หรือความถี่ของคลื่นพาห์ของ PWM จำเป็นจะต้องปรับค่าตัวแปรต่างๆเพื่อให้วงจรทำงานเป็นวงจรถูก 4 ควอดเรนต์ที่สมบูรณ์

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอ วงจรถูกสัญญาณ 4 ควอดเรนต์ โดยอาศัยหลักการของ PWAM แต่วงจรถูกยุ่งยากน้อยกว่าของนาย R.S.FYATH และเมื่อมีการปรับเปลี่ยนมอดูเลชันอินเด็กซ์หรือความถี่ของคลื่นพาห์ของ PWM วงจรถูกยังทำงานได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้ได้วงจรถูกที่มีย่านการทำงานของระดับอินพุตที่กว้าง ผลการตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตมีความเป็นเชิงเส้น และ ความแม่นยำสูง อีกทั้งยังไม่ต้องทำการปรับแต่งวงจรเพื่อหาจุดการทำงานที่เหมาะสมก่อนนำไปใช้งาน ทำให้ลดค่าความผิดพลาดของวงจรถูกเนื่องจากการปรับแต่งสัญญาณที่ไม่ถูกต้อง และ ทำให้สะดวกในการนำไปใช้งาน

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ทำการวิเคราะห์และสร้างวงจรถูกโดยอาศัยหลักการ PWAM ที่ปราศจากอิทธิพลของของความถี่และดัชนีการมอดูเลทของ PWM เพื่อให้ได้วงจรถูกสัญญาณ 4 ควอดเรนต์ที่มีข้อดีคือ มีช่วงการปฏิบัติของสัญญาณอินพุตที่กว้าง ผลการตอบสนองต่อสัญญาณเอาต์พุตมีความเป็นเชิงเส้นและความแม่นยำสูงและไม่ต้องทำการปรับแต่งวงจรเพื่อหาจุดการทำงานที่เหมาะสมก่อนนำไปใช้งาน

## 1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในส่วนของวิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอ วงจรถูกสัญญาณ 4 ควอดเรนต์ โดยอาศัยการมอดูเลทสัญญาณอินพุตตัวแรกแบบ PWM จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ไปเป็นสัญญาณพาห์ในการมอดูเลทแบบ PAM ให้กับสัญญาณอินพุตตัวที่สอง ทำให้สัญญาณที่ได้มีความกว้างของพัลส์ขึ้นอยู่กับ

กับขนาดของสัญญาณอินพุตตัวแรกและขนาดของพัลส์ขึ้นอยู่กับสัญญาณอินพุตตัวที่สอง ซึ่งการมอดูเลตแบบนี้เรียกว่า Pulse width-Amplitude Modulation (PWAM) จากนั้นทำการมอดูเลตแบบ PWAM ขึ้นมาอีกชุดหนึ่ง โดยนำสัญญาณอินพุตตัวแรกที่ถูกกลับเฟส  $180^\circ$  มาทำการมอดูเลตแบบ PWM จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ไปเป็นสัญญาณพาห์ในการมอดูเลตแบบ PAM ให้กับสัญญาณอินพุตตัวที่สอง เมื่อนำเอาสัญญาณ PWAM ทั้งสองชุดมารวมกันแล้วนำไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ ก็จะได้สัญญาณที่อยู่ในรูปของผลคูณของสัญญาณอินพุต โดยที่ไม่ต้องทำการปรับค่าตัวแปรต่างๆแต่อย่างใด

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการเสนอผลการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับวงจรคูลัมที่อาศัยหลักการ PWAM ที่ปราศจากอิทธิพลของความถี่และดัชนีการมอดูเลตของ PWM วิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทคือ บทที่ 1 จะเป็นบทนำ ซึ่งจะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดและขอบเขตการวิจัย ในบทที่ 2 จะกล่าวถึง ทฤษฎีเบื้องต้นของการมอดูเลตพัลส์ ประกอบด้วย ทฤษฎีการซีกค่าสัญญาณ การมอดูเลตเชิงขนาดของพัลส์ การมอดูเลตความกว้างของพัลส์ บทที่ 3 จะกล่าวถึงวงจรคูลัมสัญญาณ 4 ควอดแรนต์ ในแบบต่างๆ บทที่ 4 จะกล่าวถึงวงจรคูลัมสัญญาณโดยอาศัยหลักการ PWAM ที่ปราศจากอิทธิพลของความถี่และดัชนีการมอดูเลตของ PWM ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ บทที่ 5 จะเป็นการทดลองและผลการทดลอง ประกอบด้วย การทดลองด้วยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม Spice และการทดลองโดยการต่อวงจรจริง บทที่ 6 จะกล่าวถึงเนื้อหาโดยสรุปทั้งหมด

## บทที่ 2

# การมอดูเลตพัลส์

### 2.1 กล่าวนำ

การมอดูเลตสัญญาณ หมายถึง การฝากข้อมูลของสัญญาณข่าวสารในแบนด์พื้นฐาน (Baseband) ไปกับคลื่นพาห้ที่เป็นสัญญาณเชิงโคโรไนซ์ โดยใช้ค่าความแรงของสัญญาณข่าวสารเป็นตัวควบคุมค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของคลื่นพาห้ ถึงแม้ว่าจะมีเทคนิคในการมอดูเลตมากมาย แต่เมื่อกล่าวโดยสรุปแล้ว เราอาจแบ่งการมอดูเลตออกเป็นชนิดมูลฐานได้ 2 ชนิด โดยขึ้นอยู่กับชนิดของคลื่นพาห้ คือการมอดูเลตคลื่นต่อเนื่อง (Continuous wave หรือ CW) สำหรับคลื่นพาห้ที่เป็นรูปคลื่นไซน์ซอซด์ และการมอดูเลตพัลส์ สำหรับคลื่นพาห้ที่เป็นขบวนพัลส์

สำหรับการมอดูเลตพัลส์นั้น รูปคลื่นของคลื่นพาห้จะเป็นรูปคลื่นพัลส์และพารามิเตอร์ของรูปคลื่นพัลส์จะเปลี่ยนไปโดยเป็นสัดส่วนกับสัญญาณข่าวสาร เมื่อใช้การซัดตัวอย่าง (Sampling) เข้ามาช่วย ซึ่งจำเป็นที่จะต้องกล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องต่อไป

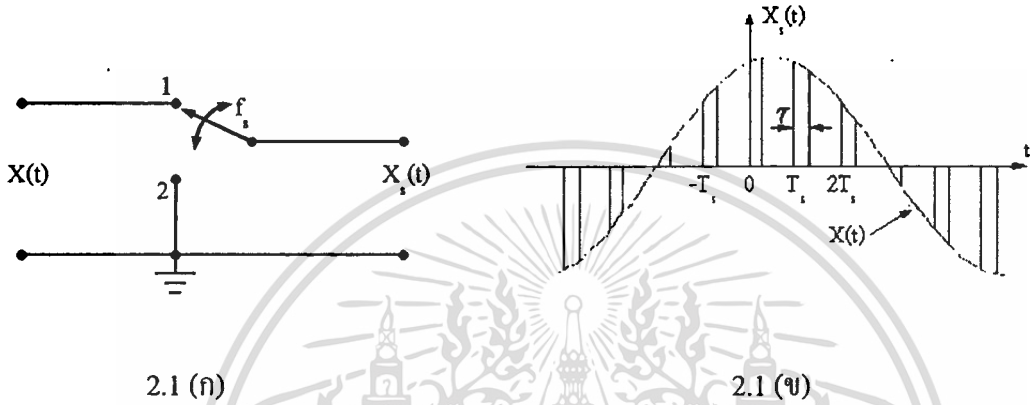
### 2.2 ทฤษฎีการซัดตัวอย่าง

ในระบบสื่อสารสัญญาณบางชนิดโดยธรรมชาติของมันแล้วถือได้ว่าเป็นสัญญาณดิจิทัลหรือสัญญาณดิสครีต (Discrete signal) อยู่แล้วเนื่องจากเป็นสัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทางเวลา เช่นสัญญาณโทรเลข, สัญญาณเรดาร์, ข้อมูลของเครื่องคอมพิวเตอร์ ฯลฯ แต่ก็ยังมีสัญญาณอยู่อีกเป็นจำนวนมากที่มีความต่อเนื่องทางเวลาหรือเรียกอีกอย่างว่าสัญญาณอนาลอก (Analog signal) เราสามารถแปลงสัญญาณอนาลอกให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณดิสครีตได้โดยการเลือกซัดค่าตัวอย่างสัญญาณ ในจังหวะหรืออัตราที่เหมาะสมโดยที่ข้อมูลของข่าวสารไม่มีการสูญหาย เกณฑ์การตัดสินใจว่าการแปลงสัญญาณที่กล่าวมานี้จะดีหรือไม่เพียงใดขึ้นอยู่กับว่าเราจะสามารถสร้างสัญญาณเดิมกลับคืนจากสัญญาณดิสครีตได้ครบถ้วนสมบูรณ์เพียงไร ทฤษฎีที่จะบอกความสัมพันธ์ ในการกำหนดคาบเวลาสำหรับการซัดค่าตัวอย่างสัญญาณอนาลอก เพื่อสร้างสัญญาณดิสครีตที่มีข้อมูลสำหรับสัญญาณอนาลอกอยู่ครบถ้วนคือ ทฤษฎีการซัดตัวอย่าง (Sampling theorem) [23] ซึ่งมีความสำคัญดังต่อไปนี้คือ

ถ้าสัญญาณใดๆ ที่มีค่าฟังก์ชันมีความหนาแน่นสเปกตรัมอยู่ในช่วงความถี่ที่มีแบนด์วิธไม่เกิน  $B$  เฮิรตซ์ แล้วการซัดค่าตัวอย่างของสัญญาณนั้น ที่ขณะเวลาที่ห่างกันอย่างสม่ำเสมอเป็นคาบไม่เกิน  $\frac{1}{2B}$  วินาที จะทำให้สามารถกู้เอาค่าสัญญาณอนาลอกเดิมกลับคืนมาได้จากค่าตัวอย่างสัญญาณเหล่านั้น

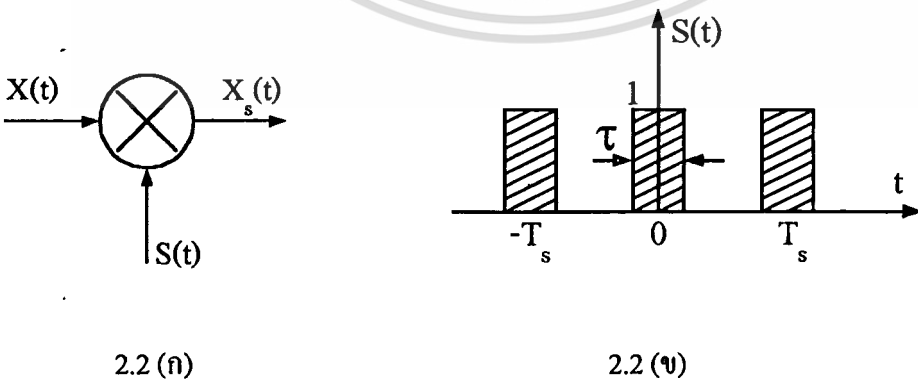
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาทฤษฎีการซัดตัวอย่างด้วยวิธีการง่ายๆคือ การใช้วงจรสวิตช์สัญญาณดังแสดงในรูป 2.1(ก) สวิตช์จะเปลี่ยนตำแหน่งสัมผัสเป็นคาบๆ ระหว่างหน้าสัมผัสทั้งสอง ด้วยความถี่  $f_s = \frac{1}{T_s}$  เฮิรตซ์ โดยสวิตช์จะอยู่ตำแหน่งที่ 1 ซึ่งเป็นตำแหน่งของสัญญาณเข้าเป็นเวลา  $\tau$  วินาที และจะอยู่ที่ตำแหน่งที่ 2 ซึ่งเป็นตำแหน่งลงดินตลอดช่วงเวลาที่เหลือในแต่ละคาบ สัญญาณเอาต์พุต  $X_s(t)$  จะประกอบด้วย เซกเมนต์สั้นๆ ของสัญญาณอินพุต  $X(t)$  ดังแสดงในรูป 2.1(ข)



รูปที่ 2.1 การซัดตัวอย่างด้วยวงจรสวิตช์

จากกรรมวิธีที่ได้กล่าวมาสามารถอธิบายในเชิงคณิตศาสตร์ได้ โดยกำหนดให้  $S(t)$  เป็นฟังก์ชันการสวิตช์ที่ทำให้การดำเนินการซัดตัวอย่างที่กล่าวมาแล้วจะกลายมาเป็นการคูณสัญญาณ  $X(t)$  ด้วยสัญญาณ  $S(t)$  ดังแสดงในรูป 2.2(ก) โดยที่  $S(t)$  ก็คือขบวนพัลส์เป็นคาบตามรูป 2.2(ข) และเขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังสมการ (2.1)



รูปที่ 2.2 การแปลความหมายการซัดตัวอย่างกับการคูณ

$$X_s(t) = X(t)S(t) \quad (2.1)$$

เนื่องจาก  $S(t)$  เป็นสัญญาณเป็นคาบ ที่มีคาบเท่ากับ  $T_s$  มันจึงสามารถแทนด้วยการแปลงอนุกรมฟูริเยร์ [24] สำหรับสัญญาณขบวนพัลส์ที่มีขนาดของแอมพลิจูดเท่ากับ 1 และมีคาบเวลาเท่ากับ  $T_s$  เราจะได้

$$\begin{aligned} S(t) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\frac{\tau}{T_s}\right) \text{sinc}\left(\frac{n\tau}{T_s}\right) e^{j2\pi n t / T_s} \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_n e^{j2\pi n t / T_s} \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$= S_0 + \sum_{n=1}^{\infty} 2S_n \cos(2\pi n t / T_s)$$

$$= S_0 + \sum_{n=1}^{\infty} 2S_n \cos(2\pi n f_s t)$$

โดยที่  $S_0 = \frac{\tau}{T_s}$  เรียกว่า ค่าตัวชี้ไขเคลิด (Duty cycle)

$$S_n = f_s \tau \text{sinc}(n f_s \tau)$$

เมื่อนำสมการ (2.2) แทนลงในสมการ (2.1) จะได้

$$\begin{aligned} X_s(t) &= S_0 X(t) + \sum_{n=1}^{\infty} 2S_n X(t) \cos(2\pi n f_s t) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_n X(t) e^{j2\pi n f_s t} \end{aligned} \quad (2.3)$$

ถ้าสเปกตรัมหรือผลการแปลงฟูริเยร์ของ  $X(t)$  คือ  $X(f)$  และอาศัยคุณสมบัติการเลื่อนทางความถี่ คือ

$$X(t) \cos(2\pi n f_s t) \longleftrightarrow 0.5X(f + f_s) + 0.5X(f - f_s)$$

หรือ

$$X(t) e^{j2\pi n f_s t} \longleftrightarrow X(f - n f_s)$$

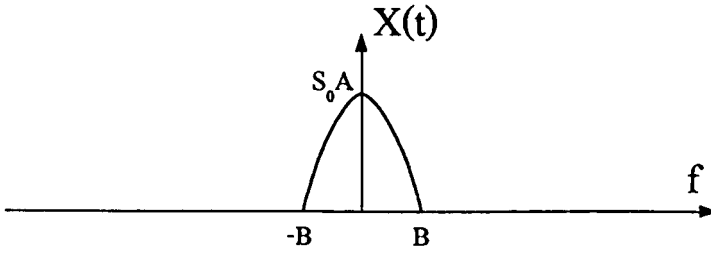
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปกตรัมหรือผลการแปลงฟูริเยร์ของ  $X_s(t)$  จะเป็น

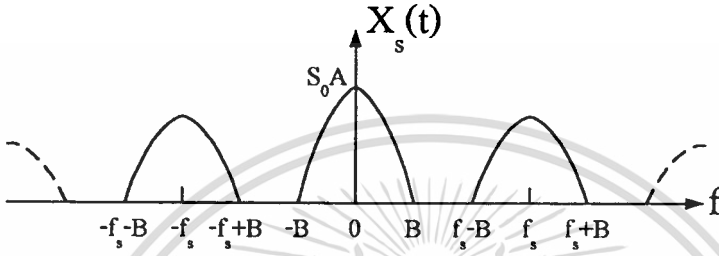
$$\left. \begin{aligned} X_s(t) &= S_0 X(f) + \sum_{n=1}^{\infty} S_n [X(f + nf_s) + X(f - nf_s)] \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_n X(f - nf_s) \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

จากสมการ (2.4) แสดงให้เห็นว่าสัญญาณ  $X_s(t)$  หรือสัญญาณที่เกิดจากซีกตัวอย่างของ  $X(t)$  จะมีฟังก์ชันความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมที่มีรูปร่างเหมือนกับสัญญาณ  $X(t)$  และมีการเกิดขึ้นซ้ำเป็นคาบในโดเมนความถี่ด้วยความถี่เท่ากับ  $f_s$  แต่ขนาดจะถูกลดทอนลงไปเท่ากับค่าคิวดี้ไซเคิล  $S_0 = \frac{\tau}{T_s}$  เมื่อ  $X(t)$  มีองค์ประกอบของความถี่สูงสุดคือ  $B$  เฮิรตซ์ ดังแสดงในรูป 2.3(ก) และ 2.3(ข) เนื่องจากการซีกตัวอย่างยังคงสามารถรักษาสเปกตรัมของสัญญาณข่าวสารไว้ได้แต่จะเกิดซ้ำกันอยู่ทุกคาบความถี่  $f_s$  และถ้า  $f_s > 2B$  หรือ  $T_s < \frac{1}{2B}$  แล้ว  $X_s(f)$  จะมีลักษณะเหมือนกับการเอา  $X(f)$  มาเรียงห่างๆบนแกนความถี่ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ข) แต่เมื่อ  $f_s = 2B$  หรือ  $T_s = \frac{1}{2B}$  จะพบว่า  $X_s(f)$  มีลักษณะเหมือนกับการเอา  $X(f)$  มาเรียงชิดติดกันพอดีบนแกนความถี่ดังแสดงในรูป 2.1.3(ค) แต่ถ้า  $f_s < 2B$  หรือ  $T_s > \frac{1}{2B}$  แล้ว จะทำให้  $X_s(f)$  มีลักษณะเหมือนกับการเอา  $X(f)$  มาเรียงเหลื่อมทับกันดังแสดงในรูปที่ 2.3(ง) ปรากฏการณ์ที่เกิดการเหลื่อมทับกันขององค์ประกอบสเปกตรัมนี้เรียกว่า เอเลียซิง(aliasing)

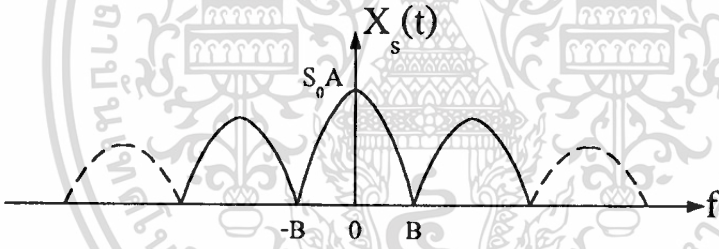
จากรูป 2.3 จะเห็นว่าหากคาบเวลาของการซีกตัวอย่างสัญญาณ  $T_s \leq \frac{1}{2B}$  วินาทีแล้ว เราสามารถไขว้จรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบอุดมคติ มาแยกเอาเฉพาะส่วนที่มีความถี่ต่ำของ  $X_s(f)$  ที่ มีองค์ประกอบเหมือนกับ  $X(f)$  ออกมาได้ ซึ่งเท่ากับว่าสามารถนำเอาสัญญาณ  $X(t)$  กลับคืนมาได้จากสัญญาณที่เกิดจากการซีกตัวอย่างสัญญาณ  $X_s(t)$  ด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แต่ถ้า  $T_s > \frac{1}{2B}$  แล้วจะเกิดการทับซ้อนกันขององค์ประกอบความถี่ทำให้ไม่สามารถที่แยก  $X(f)$  ออกจาก  $X_s(f)$  ได้ ดังนั้นคาบเวลาในการซีกตัวอย่างสัญญาณจะต้องมีค่าไม่เกิน  $\frac{1}{2B}$  วินาที



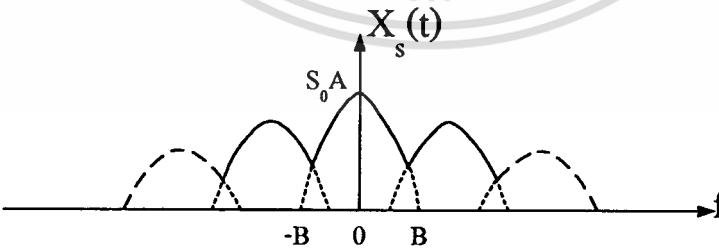
2.3 (ก)



2.3 (ข)



2.3 (ค)



2.3 (ง)

รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของสัญญาณที่เกิดจากการซัดค่าสัญญาณ (ก) สเปกตรัมของ  $X(t)$

(ข) สเปกตรัมของ  $X_s(t)$  เมื่อ  $f_s > 2B$  (ค) สเปกตรัมของ  $X_s(t)$  เมื่อ  $f_s = 2B$

(ง) สเปกตรัมของ  $X_s(t)$  เมื่อ  $f_s < 2B$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาบเวลาในการชักตัวอย่างสูงสุด  $T_s = \frac{1}{2B}$  วินาที นี้เรียกว่า ช่วงเวลาไนควิสต์ (Nyquist interval) และค่าความถี่ต่ำสุดในการชักตัวอย่าง  $f_s = 2B$  เรียกว่า ความถี่การชักตัวอย่างไนควิสต์ (Nyquist sampling frequency)

### 2.3 การมอดูเลตพัลส์เชิงแอมพลิจูด

ในระบบการมอดูเลตพัลส์เชิงแอมพลิจูด (Pulse amplitude modulation) หรือที่เรียกย่อว่า พีเอเอ็ม (PAM) ค่าแอมพลิจูดของพัลส์ในขบวนพัลส์ จะถูกควบคุมให้แปรเปลี่ยนไปตามค่าความแรงของสัญญาณข่าวสาร ในขณะที่ความกว้างของพัลส์ในขบวนพัลส์นั้นมีค่าคงที่ กรรมวิธีในการมอดูเลตสามารถสามารถสร้างขึ้นมาได้โดยการนำสัญญาณข่าวสาร  $m(t)$  ที่เป็นสัญญาณที่มีแบนด์ที่จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ก) โดยมีค่าองค์ประกอบความถี่สูงสุดคือ  $f_m$  ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ข) นำไปทำการชักตัวอย่างสัญญาณด้วยขบวนพัลส์  $p(t)$  ที่มีความกว้างของพัลส์เท่ากับ  $\tau$  โดยที่  $\tau \ll T_s$  ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ค) ขบวนพัลส์มีความถี่  $f_s = \frac{1}{T_s}$  โดยที่  $f_s \geq 2f_m$  และสเปกตรัมของสัญญาณ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.4(ง) จากทฤษฎีการชักตัวอย่าง จะได้ว่า

$$V_{PAM}(t) = m(t)p(t) \quad (2.5)$$

อาศัยคุณสมบัติการแปลงฟูรีเยร์ เมื่อกำหนดคู่การแปลงฟูรีเยร์ดังนี้

$$V_{PAM}(t) \longleftrightarrow V_{PAM}(f)$$

$$m(t) \longleftrightarrow m(f)$$

$$p(t) \longleftrightarrow p(f)$$

จะได้

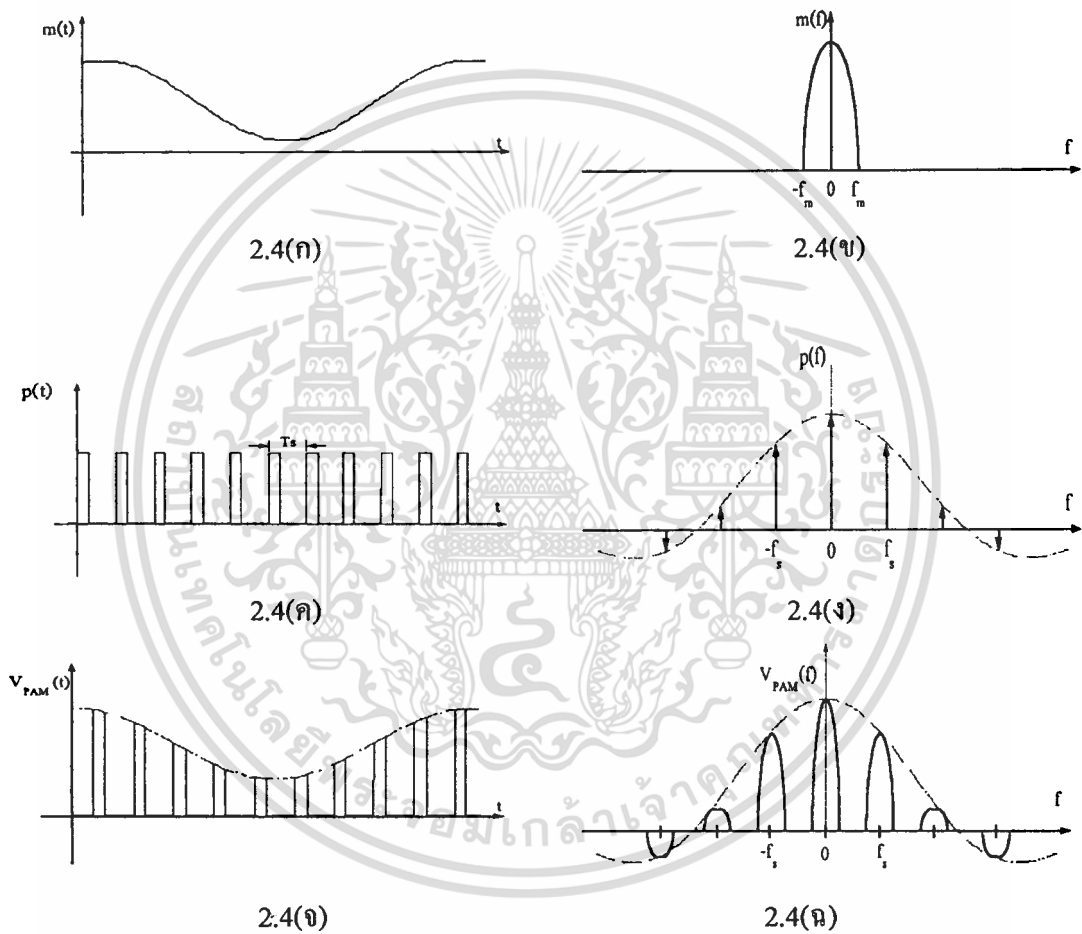
$$V_{PAM}(f) = m(f)p(f) \quad (2.6)$$

จากสมการ (2.4) สมการ (2.6) จะเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$V_{PAM}(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_n m(f - nf_s) \quad (2.7)$$

โดยที่

$$S_n = f_s \tau \operatorname{sinc}(nf_s \tau)$$



รูปที่ 2.4 สัญญาณและสเปกตรัมของสัญญาณในขบวนการมอดูเลตแบบพีเอเอ็ม

(ก) สัญญาณ  $m(t)$  (ข) สเปกตรัมของสัญญาณ  $m(t)$  (ค) สัญญาณ  $p(t)$

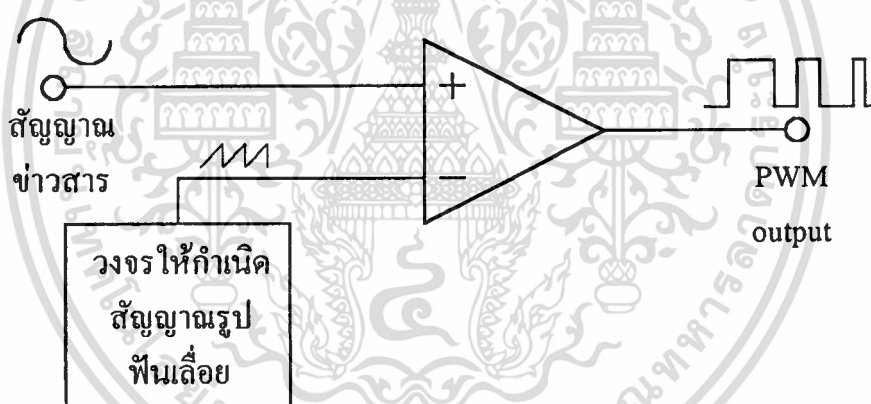
(ง) สเปกตรัมของสัญญาณ  $p(t)$  (จ) สัญญาณพีเอเอ็ม (ฉ) สเปกตรัมของสัญญาณพีเอเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปความสัมพันธ์ของสัญญาณตามขั้นตอนต่างๆ ในการวิเคราะห์สัญญาณพีเอเอ็มแสดงในรูป 2.4 ในกรณีที่ทำการเลือกค่า  $f_s \geq 2f_m$  เราจะได้สัญญาณของ  $V_{PAM}(t)$  ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ง) และสเปกตรัมของสัญญาณจะเหมือนกับสเปกตรัมของสัญญาณ  $m(t)$  แต่จะมีการเกิดซ้ำเป็นคาบทุกความถี่  $f_s$  โดยมีเอนVELOปหรือกรอบของ  $p(f)$  กั้นบังคับอยู่ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ฉ) ดังนั้นถ้าเราใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบอุดมคติที่มีความถี่คัทออฟเท่ากับ  $f_c$  มากรองสัญญาณ  $V_{PAM}(t)$  เราก็จะได้สัญญาณข่าวสาร  $m(t)$  กลับคืนมาได้

## 2.4 การมอดูเลตความกว้างพัลส์

ในระบบการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse-width modulation) หรือที่เรียกขานว่า พัลส์บวริเอชัน (PWM) เป็นการมอดูเลตโดยความกว้างของพัลส์ในขบวนการพัลส์จะถูกควบคุมให้แปรเปลี่ยนไปตามค่าความแรงของสัญญาณข่าวสาร ในขณะที่ค่าแอมพลิจูดของแต่ละพัลส์ในขบวนการพัลส์นั้นจะมีค่าคงที่ โดยทั่วไปแล้วกรรมวิธีในการมอดูเลตสัญญาณแบบพัลส์บวริเอชัน จะใช้การมอดูเลตแบบ Natural sampling (NPWM) ดังแสดงในรูปที่ 2.5

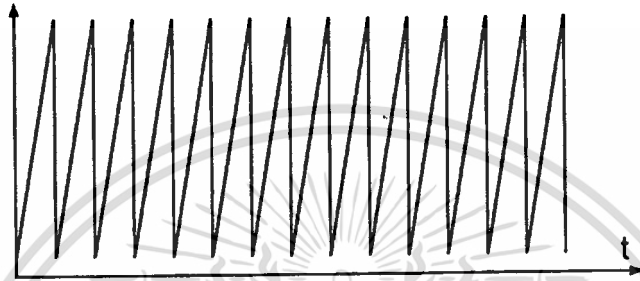


รูปที่ 2.5 แผนผังวงจรระบบสร้างสัญญาณพัลส์บวริเอชัน

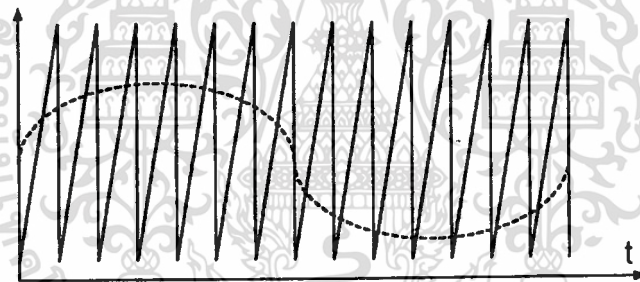
ในการสร้างสัญญาณพัลส์บวริเอชัน แบบ NPWM นั้น ระบบจะประกอบด้วย วงจรสร้างสัญญาณรูปฟันเลื่อยและวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ เริ่มต้นโดยการนำสัญญาณข่าวสาร  $m(t)$  ดังแสดงในรูปที่ 2.6(ก) มาทำการเปรียบเทียบระดับสัญญาณกับสัญญาณรูปฟันเลื่อย ที่มีค่าของแอมพลิจูดมากกว่าค่าขนาดจากยอดถึงยอด (peak to peak) ของสัญญาณ  $m(t)$  เล็กน้อย ด้วยวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 2.6(ข) และ 2.6(ค) เอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณก็คือสัญญาณพัลส์บวริเอชันดังแสดงในรูปที่ 2.6(ง)



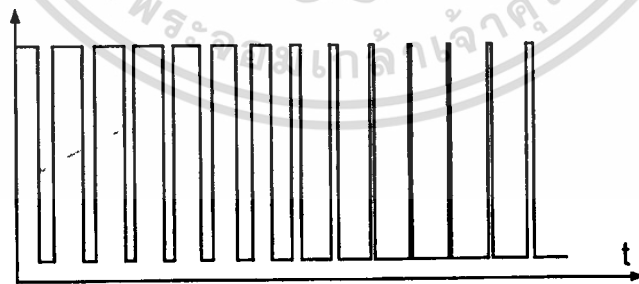
2.6(ก)



2.6(ข)



2.6(ค)



2.6(ง)

รูปที่ 2.6 สัญญาณในขบวนการมอดูเลตพีคดับทิวเอ็ม (ก) สัญญาณข่าวสาร (ข) สัญญาณพาห้  
รูปฟันเลื่อย (ค) การเปรียบเทียบระดับสัญญาณระหว่างสัญญาณข่าวสารกับสัญญาณพาห้  
(ง) สัญญาณพีคดับทิวเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเอกสารอ้างอิงที่ [25] ได้นำเสนอการวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม โดยอาศัยหลักการและแนวคิดที่ว่า การมอดูเลตสัญญาณพีดับบลิวเอ็มก็คือการทำให้ช่วงเวลาหรือความกว้างของพัลส์มีการแปรผันโดยตรงกับสัญญาณข่าวสาร คือ  $\Delta t_i \propto m(t)$  โดยที่  $m(t)$  คือสัญญาณข่าวสาร และ  $\Delta t_i$  คือช่วงเวลาหรือความกว้างของพัลส์ลูกที่  $i$  โดยที่  $i$  เป็นจำนวนเต็มบวก ( $i=0,1,2,\dots$ ) และเนื่องจากแนวคิดที่ว่าสัญญาณพีดับบลิวเอ็มเป็นสัญญาณที่เป็นคาบเวลา ดังนั้น ในการวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบของสัญญาณจึงได้ใช้ อนุกรมฟูรีเยร์ในรูปแบบเอกโปเนนเชียล มาทำการวิเคราะห์ โดยกำหนดให้  $\phi_{PWM}(t)$  เป็นสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม ดังนั้นเราจะได้รูปสมการของ  $\phi_{PWM}(t)$  ดังสมการ (2.8)

$$\phi_{PWM}(t+T) = \phi_{PWM}(t) = F_0 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{jn\omega_0 t} \quad (2.8)$$

โดยที่  $n$  คือ เลขจำนวนเต็มบวก

$F_n$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของฟูรีเยร์ในรูปแบบเอกโปเนนเชียล และ

$$F_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \phi_{PWM}(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \quad (2.9)$$

เนื่องจาก  $\omega_0$  คือ ความถี่มูลฐานของสัญญาณ มีค่าเท่ากับ  $\frac{2\pi}{T}$  โดยที่  $T$  คือคาบเวลาของสัญญาณและด้วยการพิจารณาคาบที่  $i$  สมการที่ (2.3.2) จะเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} F_n &= \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_i} A e^{-jn\omega_0 t} dt \\ &= \frac{A}{T} \int_0^{\Delta t_i} e^{-jn\omega_0 t} dt \\ &= \frac{A}{2jn\pi} [1 - e^{jn\omega_0 \Delta t_i}] \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

และค่า

$$\left. \begin{aligned}
 F_0 &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \phi_{PWM}(t) dt \\
 &= \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_i} A dt \\
 &= \frac{A \Delta t_i}{T}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

นำสมการ (2.10) และ (2.11) แทนลงในสมการ (2.8) จะได้

$$\left. \begin{aligned}
 \phi_{PWM}(t) &= \frac{A \Delta t_i}{T} + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{A}{2jn\pi} [1 - e^{-jn\omega_0 \Delta t_i}] e^{jn\omega_0 t} \\
 &= \frac{A \Delta t_i}{T} + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ \left\{ \frac{A}{2jn\pi} \right\} e^{jn\omega_0 t} + \left\{ \frac{-A}{2jn\pi} e^{-jn\omega_0 \Delta t_i} \right\} e^{jn\omega_0 t} \right] \\
 &= \frac{A \Delta t_i}{T} + \frac{A}{2j\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left\{ \frac{e^{jn\omega_0 t}}{n} + \frac{e^{-jn\omega_0 t}}{-n} \right\} - \left\{ \frac{e^{jn\omega_0 t(t-\Delta t_i)}}{n} + \frac{e^{-jn\omega_0(t-\Delta t_i)}}{-n} \right\} \right] \\
 &= \frac{A \Delta t_i}{T} + \frac{A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sin(n\omega_0 t)}{n} - \frac{\sin(n\omega_0(t-\Delta t_i))}{n} \right\}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

เนื่องจาก  $\Delta t_i$  แปรผันโดยตรงกับ  $m(t)$  และ  $\Delta t_i = \beta[1+m(t)]$  โดยที่  $\beta$  คือค่านิจของการมอดูเลตซึ่งมีค่าคงที่ดังนั้น

$$\phi_{PWM}(t) = \frac{A\beta}{T} [1+m(t)] + \frac{A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sin(n\omega_0 t)}{n} - \frac{\sin[n\omega_0(t-\beta(1+m(t)))]}{n} \right\} \quad (2.13)$$

จากสมการ (2.13) พบว่าเทอมแรกทางขวามือของสมการนั้นคือเทอม  $\frac{A\beta}{T}[1+m(t)]$  ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างข่าวสาร  $m(t)$  กับค่าคงที่  $\frac{A\beta}{T}$  และบวกกับค่าคงที่  $\frac{A\beta}{T}$  ส่วนเทอมที่สองซึ่งเป็นองค์ประกอบของสัญญาณความถี่สูงที่ทำหน้าที่เป็นคลื่นพาห์ ดังนั้นดังนั้นถ้าเรานำวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีความถี่คutoffที่เหมาะสม มาทำการกรองสัญญาณพีคดับทิวเอ็ม ก็จะได้สัญญาณข่าวสารกลับคืนมาได้



### บทที่ 3

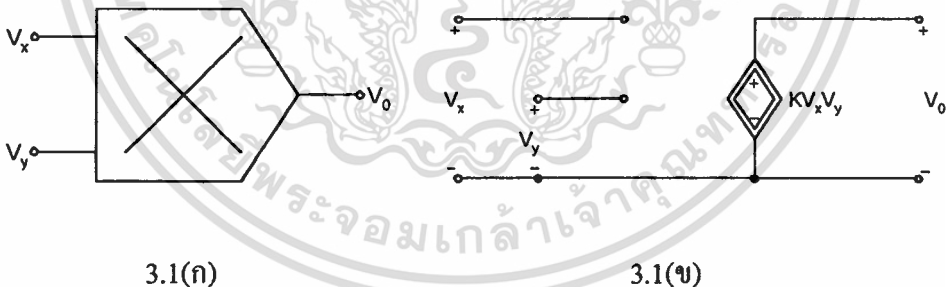
## วงจรรคูณสัญญาณอนาล็อก 4 ควอดแรนต์

### 3.1 กล่าวนำ

วงจรรคูณสัญญาณอนาล็อก นับได้ว่าเป็นวงจรหนึ่งที่มีความสำคัญเนื่องจากเป็นวงจรพื้นฐาน ในการประมวลผลสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบต่าง ๆ เช่น การคูณ การยกกำลัง การหาร และการถอดรากที่สอง ของสัญญาณ สัญลักษณ์ที่ใช้แสดงแทนวงจรรคูณแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 (ก) วงจรสมมูลของวงจรรคูณ แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 (ข) และ สมการทางคณิตศาสตร์ของวงจรรคูณแสดงไว้ในสมการ (3.1)

$$v_o = K v_x v_y \quad (3.1)$$

เมื่อ  $v_o$  คือ สัญญาณไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต  
 $v_x, v_y$  คือ สัญญาณไฟฟ้าทางด้านอินพุต  
 $K$  คือ ค่าคงที่



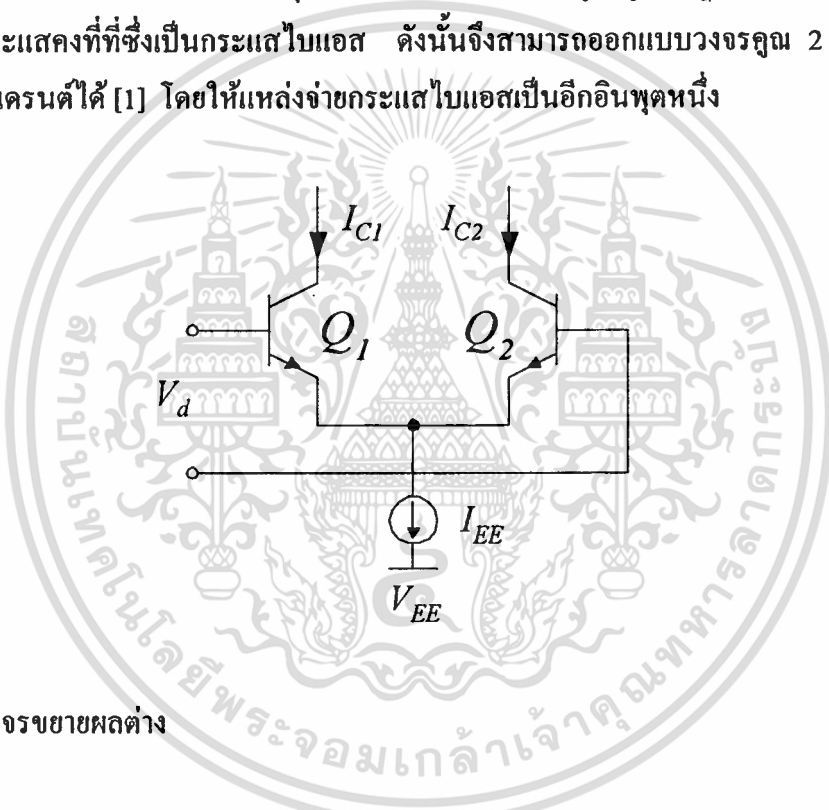
รูปที่ 3.1 วงจรรคูณสัญญาณอนาล็อก (ก) สัญลักษณ์ของวงจรรคูณ (ข) วงจรสมมูลของวงจรรคูณ

การแบ่งชนิดของวงจรรคูณสัญญาณ จะแบ่งโดยใช้ ขั้วสัญญาณไฟฟ้าของสัญญาณอินพุต เป็นตัวกำหนด กล่าวคือ ถ้าขั้วของสัญญาณอินพุตทั้งสอง มีขั้วของสัญญาณไฟฟ้าเพียงขั้วเดียวเท่านั้น ที่วงจรรคูณสามารถทำงานได้ เราเรียกว่าเป็นวงจรรคูณแบบ หนึ่งควอดแรนต์ (One Quadrant Multiplier) ถ้า สัญญาณอินพุตตัวใดตัวหนึ่งถูกจำกัดให้เป็นขั้วบวกหรือลบเพียงขั้วเดียว ส่วน สัญญาณอินพุตตัวที่เหลือ ไม่ถูกจำกัดขั้วของสัญญาณสามารถเป็น ได้ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ เราเรียก

ว่าเป็นวงจรมัลติพลายแบบ สองควอดแรนต์ (Two Quadrant Multiplier) และ ถ้าขั้วของสัญญาณอินพุตทั้งสองตัวสามารถเป็นได้ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ เราเรียกว่าเป็นวงจรมัลติพลายแบบ สี่ควอดแรนต์ (Four Quadrant Multiplier) ซึ่งวงจรมัลติพลายแบบนี้เป็นวงจรที่นิยมนำไปใช้งานมากกว่าสองแบบแรก และ วงจรมัลติพลายอนาล็อกแบบ สี่ควอดแรนต์ สามารถสร้างขึ้นมาจากใช้งานได้หลายวิธีการด้วยกัน ซึ่งแต่ละวิธีต่างก็มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน

### 3.2 วงจรมัลติพลายของกิลเบิร์ต (Gilbert Multiplier)

วงจรมัลติพลายของกิลเบิร์ตมีพื้นฐานการออกแบบมาจากวงจรมัลติพลายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์จากหลักการที่กระแสเอาต์พุตของวงจรมัลติพลายผลต่างอยู่ในรูปผลคูณของแรงดันอินพุตกับแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ซึ่งเป็นกระแสไบแอส ดังนั้นจึงสามารถออกแบบวงจรมัลติพลาย 2 ควอดแรนต์ และ 4 ควอดแรนต์ได้ [1] โดยให้แหล่งจ่ายกระแสไบแอสเป็นอีกอินพุตหนึ่ง



รูปที่ 3.2 วงจรมัลติพลายผลต่าง

ในรูปที่ 3.2 วงจรมัลติพลายผลต่างถูกไบแอสด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่  $I_{EE}$  เมื่อทรานซิสเตอร์  $Q_1$  และ  $Q_2$  มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ การไบแอสกำหนดให้ทำงานในช่วงแอกทีฟ (active) เมื่อไม่คิดผลของอัตราขยายกระแส ( $\beta$ ) และ แรงดันเออร์ลี (early voltage) กำหนดให้ผลต่างของกระแสคอลเลกเตอร์  $I_{C1}$  และ  $I_{C2}$  เป็นกระแสเอาต์พุตจะได้

$$I_{C1} - I_{C2} = \tanh\left(\frac{V_d}{2V_T}\right) \quad (3.2)$$

$V_T$  คือ แรงดันเทอร์มัล (thermal voltage)

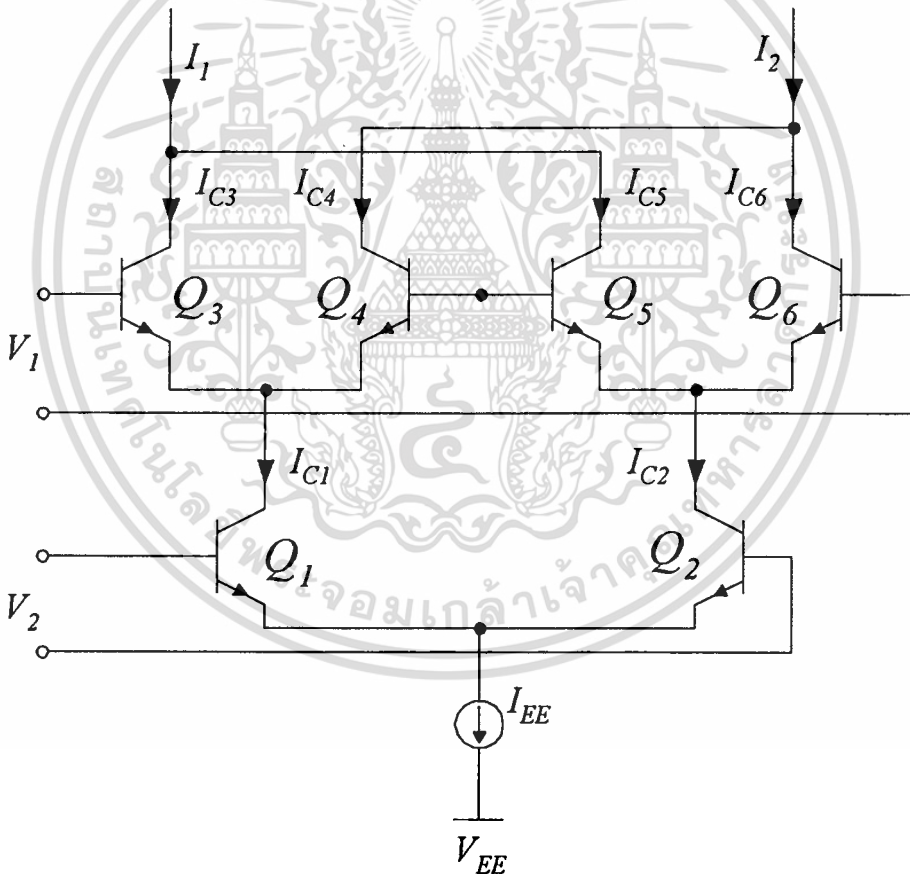
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน 44955 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหานี้ และแจ้งไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $|V_d|$  มีค่าน้อยกว่า  $2V_T$  และ  $\left| \frac{V_d}{2V_T} \right| \ll 1$  จะได้  $\tanh \frac{V_d}{2V_T} \cong \frac{V_d}{2V_T}$  ดังนั้น

$$I_{C1} - I_{C2} = I_{EE} \left( \frac{V_d}{2V_T} \right) \quad (3.3)$$

จากวงจรรูปที่ 3.2 สมการ (3.3) เราพบว่ากระแสเอาต์พุตอยู่ในรูปผลคูณระหว่างแหล่งจ่ายกระแสคงที่และแรงดันอินพุตของวงจรขยายผลต่าง เพื่อให้ทรานซิสเตอร์มีจุดการทำงานที่ถูกต้อง แหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่จะต้องมีความมากกว่าศูนย์เท่านั้น จึงจะทำให้วงจรคูณที่ได้เป็นวงจรคูณแบบ 2 ควอดแรนต์ และสามารถออกแบบเป็นวงจรคูณ 4 ควอดแรนต์ได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรคูณ 4 ควอดแรนต์

วงจรรวม 4 ควอดแรนด์ ในรูปที่ 3.3 ประกอบด้วยวงจรรวมผลต่าง ซ้อนกันสองชั้น โครงสร้างคล้ายกับวงจรรวม 2 ควอดแรนด์ โดยกระแสคอลเลกเตอร์ของ  $Q_1$  และ  $Q_2$  ทำให้ความนำของวงจรรวมผลต่างด้านบนเปลี่ยนแปลง เมื่อไบแอสให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วง แอ็กทีฟ เราสามารถหาค่ากระแสคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์  $Q_3, Q_4, Q_5$  และ  $Q_6$  ซึ่งสัมพันธ์กับแรงดันอินพุต  $V_1$  ได้ดังนี้

$$I_{C3} = \frac{I_{C1}}{1 + \exp(-V_1/V_T)} \quad (3.4)$$

$$I_{C4} = \frac{I_{C1}}{1 + \exp(V_1/V_T)} \quad (3.5)$$

$$I_{C5} = \frac{I_{C2}}{1 + \exp(V_1/V_T)} \quad (3.6)$$

$$I_{C6} = \frac{I_{C2}}{1 + \exp(-V_1/V_T)} \quad (3.7)$$

ด้วยวิธีการเดียวกันสามารถหาค่ากระแสคอลเลกเตอร์ของ  $Q_1$  และ  $Q_2$  ซึ่งสัมพันธ์กับแรงดันอินพุต  $V_2$  ได้เป็น

$$I_{C1} = \frac{I_{EE}}{1 + \exp(-V_2/V_T)} \quad (3.8)$$

$$I_{C2} = \frac{I_{EE}}{1 + \exp(V_2/V_T)} \quad (3.9)$$

กำหนดให้กระแสเอาต์พุตของวงจรรวม  $\Delta I_C$  ได้จากผลต่างระหว่าง  $I_1$  กับ  $I_2$  ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_C &= I_1 - I_2 = (I_{C3} - I_{C6}) - (I_{C4} - I_{C5}) \\ &= I_{EE} \left\{ \tanh\left(\frac{V_1}{2V_T}\right) \right\} \left\{ \tanh\left(\frac{V_2}{2V_T}\right) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

โดยที่  $|V_1|, |V_2| \ll 2V_T$  จะได้กระแสเอาต์พุตเป็น

$$\Delta I_C = I_{EE} \left( \frac{V_1}{2V_T} \right) \left( \frac{V_2}{2V_T} \right) \quad (3.11)$$

จากรูปวงจรที่ 3.3 และสมการ (3.11) เราได้วงจรคูณแบบ 4 ควอดแรนต์ โดยมีเงื่อนไขว่า อินพุตทั้งสองจะต้องเป็นสัญญาณขนาดเล็กๆ ซึ่งอาจแก้ไขให้วงจรมีช่วงการปฏิบัติงานสัญญาณอินพุต ให้กว้างขึ้นมากกว่านี้ได้โดยการต่อวงจรชดเชยเพิ่มเติมในวงจร [26-27]

### 3.3 วงจรคูณโดยอาศัยหลักการทรานสลิเนียร์

ปัจจุบันการออกแบบวงจรด้วยหลักการทรานสลิเนียร์ได้รับความนิยมมาก หลักการนี้นำเสนอโดย Barrie Gilbert ในปี ค.ศ.1975 พบว่าคุณสมบัติของความสัมพันธ์ในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นระหว่างค่าความนำกับกระแสคอลเล็กเตอร์ในทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ ซึ่งคำว่าทรานสลิเนียร์ ย่อมาจาก *Transconductance Linear With Collector Current* ความสัมพันธ์ดังกล่าวอธิบายได้จาก สมการต่อไปนี้

$$g_m = \frac{dI}{dV} = aI \quad (3.12)$$

เมื่อ  $g_m$  คือ ค่าความนำ

$a$  คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของ  $I$  และ  $V$

ทำการอินทิเกรตสมการ(3.12) จะได้

$$\frac{dI}{I} = a dV \quad (3.13)$$

$$\int \frac{1}{I} dI = a \int dV \quad (3.14)$$

$$\ln I = aV + c \quad (3.15)$$

$$I = be^{aV} \quad (3.16)$$

โดย  $b$  เป็นค่าคงที่ ความสัมพันธ์ดังกล่าวนำไปสู่เงื่อนไขของวงจรถานสลิเนียร์ซึ่งถ้าพิจารณาสมการ (3.16) พบว่ามีรูปแบบเหมือนสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่คร่อมเบส-อิมิตเตอร์ ( $V_{BE}$ ) กับกระแสคอลเลกเตอร์ ( $I_C$ ) ดังนี้

$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T} \quad (3.17)$$

$$V_{BE} = V_T \ln \frac{I_C}{I_S} \quad (3.18)$$

เมื่อ  $I_S$  คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (saturation current)

$V_T$  คือ แรงดันเทอร์มัล (thermal voltage) มีค่าเท่ากับ  $\frac{kT}{q}$  โดยที่

$k$  คือ ค่าคงที่ของโบลท์แมนน์ (Boltzmann's constant) มีค่าประมาณ  $1.38 \times 10^{-23}$  จูลต่อองศาเคลวิน

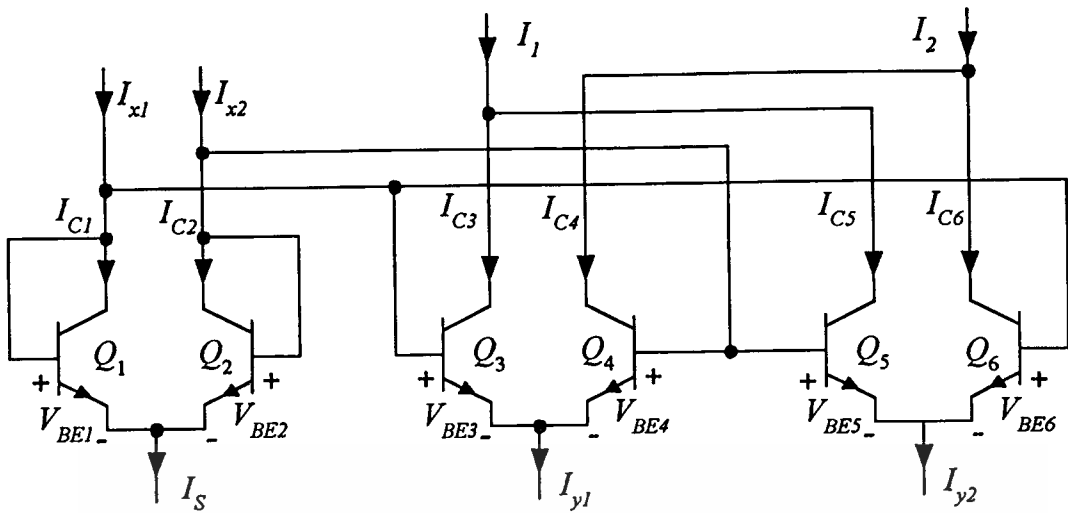
$T$  คือ อุณหภูมิในหน่วยองศาเคลวิน

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

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (3.15) และ (3.16) พบว่ามีลักษณะที่สอดคล้องกับสมการ (3.17) และ (3.18) จึงสามารถนำความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์  $I_C$  กับความต่างศักย์ที่เบส-อิมิตเตอร์  $V_{BE}$  ของทรานซิสเตอร์สร้างเป็นวงจรถานสลิเนียร์ซึ่งมีหลักการดังนี้

“ในรูปปิดที่ไบแอสรอยต่อซึ่งเป็นจำนวนคู่ให้กระแสไหลผ่านรอยต่อที่มีทิศทางตามและทวนเข็มนาฬิกาเท่ากัน จะทำให้ผลคูณความหนาแน่นของกระแสในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและความหนาแน่นของกระแสในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเท่ากัน”

จากหลักการของวงจรถานสลิเนียร์ดังที่ได้อธิบายมาแล้ว ได้มีผู้ออกแบบวงจรถานสลิเนียร์ด้วยหลักการนี้อย่างแพร่หลายรวมถึงวงจรถานที่แสดงในรูปที่ 3.4 [28]



รูปที่ 3.4 วงจรคูณโดยอาศัยหลักการทรานสลิเนียร์

พิจารณาวงจรจากรูปที่ 3.4 พบว่าทรานซิสเตอร์  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  เป็นวงจรถานสลิเนียร์รูปที่ 1 และ  $Q_5, Q_6$  เป็นวงจรถานสลิเนียร์รูปที่ 2 เมื่อทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงแอกทีฟ และไม่คิดผลของแรงดันเออร์ลีและอัตราขยายกระแส สามารถเขียนความสัมพันธ์ของ  $V_{BE}$  ในวงจรถานสลิเนียร์รูปที่ 1 ได้ดังนี้

$$V_{BE1} + V_{BE4} = V_{BE2} + V_{BE3} \quad (3.19)$$

$$\frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \frac{I_{C3}}{I_{C4}} \quad (3.20)$$

จากวงจรเมื่อไม่คิดกระแสเบส และ  $I_{C1} = I_{x1}, I_{C2} = I_{x2}$  ดังนั้น

$$\frac{I_{x1}}{I_{x2}} = \frac{I_{C3}}{I_{C4}} \quad (3.21)$$

ด้วยหลักการเดียวกันในวงจรถานสลิเนียร์รูปที่ 2 จะได้

$$\frac{I_{x1}}{I_{x2}} = \frac{I_{C6}}{I_{C5}} \quad (3.22)$$

เมื่อ  $(I_1 - I_2)$  เป็นกระแสเอาต์พุตของวงจรคูณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_1 - I_2 = I_{C3} + I_{C5} - I_{C4} - I_{C6} \quad (3.23)$$

$$I_{y1} = I_{C3} + I_{C4} \quad (3.24)$$

$$I_{y2} = I_{C5} + I_{C6} \quad (3.25)$$

แทนสมการ (3.24) และ (3.25) ลงในสมการ (3.23) เราจะได้

$$I_1 - I_2 = I_{y1} + I_{y2} - 2(I_{C4} + I_{C6}) \quad (3.26)$$

จากสมการ (3.26) เราสามารถเขียน  $I_{C4}$  และ  $I_{C6}$  ให้อยู่ในรูปของ  $I_{x1}, I_{x2}, I_{y1}$  และ  $I_{y2}$  ดังนั้น

$$I_1 - I_2 = \frac{(I_{y1} - I_{y2})(I_{x1} - I_{x2})}{(I_{x1} + I_{x2})} \quad (3.27)$$

กำหนดให้  $I_x = I_{x1} - I_{x2}, I_y = I_{y1} - I_{y2}$  และ  $I_s = I_{x1} + I_{x2}$  จะได้สมการกระแสเอาต์พุต ดังสมการ (3.28)

$$I_1 - I_2 = \frac{I_x I_y}{I_s} \quad (3.28)$$

ในสมการ (3.28) เราพบว่าวงจรทำงานเชิงกระแส มีความเป็นเชิงเส้นที่ดี กระแสอินพุตไม่จำเป็นต้องมีขนาดเล็ก และสามารถทำงานได้ที่แหล่งจ่ายแรงดันต่ำเนื่องจากใช้วงจรขยายผลต่างเพียงชั้นเดียว อย่างไรก็ตามหากต้องการใช้กับอินพุตที่เป็นแรงดันก็จำเป็นต้องใช้วงจรเปลี่ยนแรงดันให้เป็นกระแส ทำให้วงจรมีขนาดใหญ่ขึ้นและความเป็นเชิงเส้นของวงจรอาจเสียไปเพราะความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสก็ได้

### 3.4 วงจรคูณโดยอาศัยหลักการควอเตอร์-สแควร์โดยใช้ CMOS

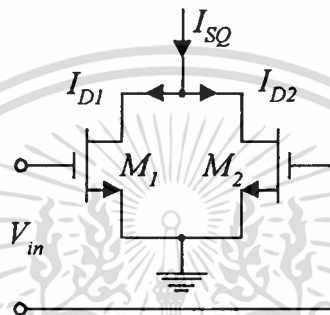
เมื่อการออกแบบวงจรรวมโดยใช้เทคโนโลยีของ CMOS ได้รับความนิยมมากขึ้นจึงได้มีผู้ออกแบบวงจรคูณโดยใช้ทรานซิสเตอร์แบบ MOS บางวงจรได้เปลี่ยนทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ในวงจรคูณของกิลเบิร์ตเป็นทรานซิสเตอร์แบบ MOS ซึ่งยังคงใช้หลักการปรับเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความน่าแต่วิธีการที่ได้รับความนิยมจะเป็นการออกแบบโดยใช้หลักการควอเตอร์-สแควร์ตามสมการ (3.29)

$$z = (x + y)^2 - (x - y)^2 = 4xy \quad (3.29)$$

วงจรคูณที่ใช้หลักการการควอเตอร์-สแควร์ [8-9] จำเป็นต้องใช้วงจรกำลังสองจำนวนสองวงจร ซึ่งนิยมใช้วงจรกำลังสองอย่างง่ายดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรกำลังสอง

การทำงานของวงจรกำลังสองอย่างง่าย เป็นการอาศัยคุณสมบัติกำลังสองของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ที่ทำงานในช่วงอิ่มตัว (saturation) จากสมการคุณลักษณะการส่งผ่านระหว่างความต่างศักย์ที่ระหว่างขามเกต-ซอส ( $V_{GS}$ ) กับกระแสเดรน ( $I_D$ ) เมื่อไม่คิดผลของ channel-length modulation ( $\lambda = 0$ )

$$I_D = k \frac{W}{2L} (V_{GS} - V_{th})^2 \quad (3.30)$$

โดยที่

$$|V_{DS}| > |V_{GS}| - |V_{th}| > 0$$

และ

$k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความนำ (transconductance parameter) มีค่าเท่ากับ  $\mu_n C_{ox}$  เมื่อ

$\mu_n$  คือ ค่าสภาพความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (electron mobility)

$C_{ox}$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าต่อพื้นที่ของเกตออกไซด์ (oxide capacitance)

$W$  คือ ความกว้างของแชนแนล (channel width)

$L$  คือ ความยาวของแชนแนล (channel length)

$V_{th}$  คือ แรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage)

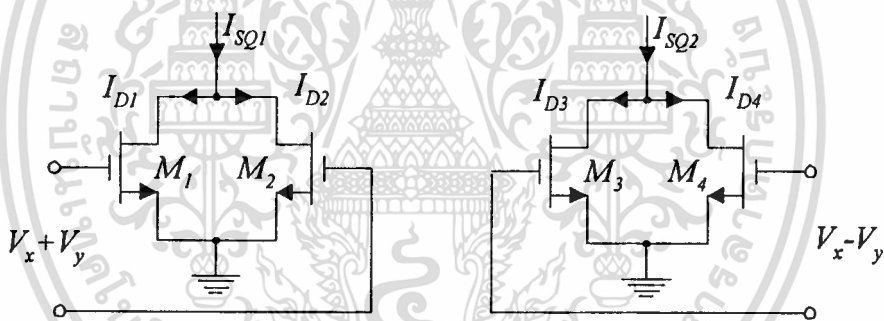
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.5 เอาต์พุตของวงจรถูกอยู่ในรูปของกระแส ( $I_{SQ}$ ) ที่ได้จากผลรวมกระแสเดรนของทรานซิสเตอร์ทั้งสอง ( $I_{D1} + I_{D2}$ ) และจากสมการ(3.29)เราสามารถหาค่ากระแสเอาต์พุต  $I_{SQ}$  ได้เป็น

$$I_{SQ} = k \frac{W}{L} (V_{in} - V_{th})^2 \quad (3.31)$$

จากสมการ (3.29) และ (3.31) สามารถออกแบบวงจรถูกได้ดังรูปที่ 3.6 เมื่อให้แรงดันอินพุตของวงจรถูกทั้งสองอย่างง่ายอยู่ในรูปของผลบวก-ลบของ  $V_x$  และ  $V_y$  กระแสเอาต์พุตของวงจรถูก ( $\Delta I_{SQ}$ ) นั้นได้จากผลต่างของวงจรถูกทั้งสอง ( $I_{SQ1} - I_{SQ2}$ ) ดังสมการ(3.32)

$$\Delta I_{SQ} = I_{SQ1} - I_{SQ2} = 4k \frac{W}{L} V_x V_y \quad (3.32)$$

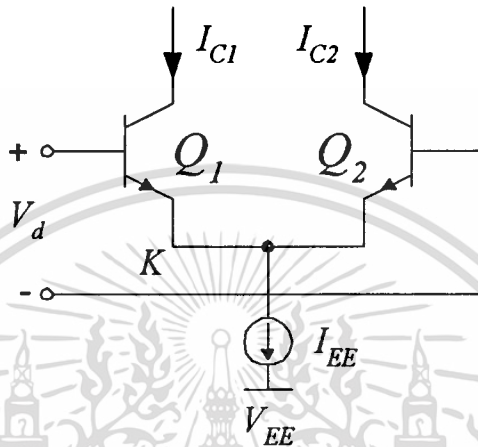


รูปที่ 3.6 วงจรถูกแบบควอเตอร์-สแควร์โดยใช้ CMOS

เนื่องจากหลักการทํางานของวงจรถูกชนิดนี้ใช้คุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นของทรานซิสเตอร์แบบ MOS เพื่อออกแบบเป็นวงจรถูกทั้งสองดังนั้นแรงดันอินพุตจึงไม่จำเป็นต้องเป็นสัญญาณขนาดเล็กและสามารถกำหนดช่วงการรับแรงดันอินพุตได้จากการเลือกอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว ( $W/L$ ) ของทรานซิสเตอร์ให้เหมาะสม

### 3.5 วงจรคูณโดยอาศัยหลักการควอเตอร์-สแควร์โดยใช้ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์

การออกแบบวงจรคูณโดยอาศัยหลักการควอเตอร์-สแควร์ไม่จำเป็นต้องอาศัยคุณสมบัติกำลังสองของทรานซิสเตอร์แบบ MOS เสมอไป ดังเช่น K.Kimura [29] ใช้วงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ซึ่งมีพื้นที่อิมิตอร์ไม่เท่ากันเป็นวงจรถ่วงกำลังสอง

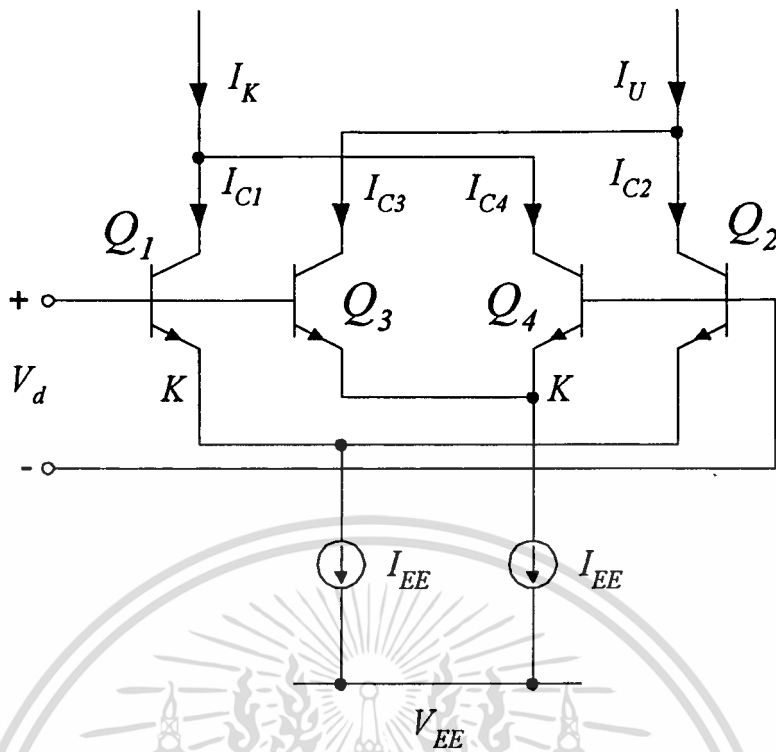


รูปที่ 3.7 วงจรขยายผลต่างซึ่งทรานซิสเตอร์มีพื้นที่อิมิตอร์ไม่เท่ากัน

จากวงจรรูปที่ 3.7 กำหนดให้พื้นที่อิมิตอร์ของทรานซิสเตอร์  $Q_1, Q_2$  มีขนาดต่างกันเท่ากับอัตราส่วน  $K$  ไบแอสวงจรด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่  $I_{EE}$  ให้อยู่ในช่วงแอกทีฟ ให้แรงดัน  $V_d$  เป็นแรงดันอินพุต เมื่อไม่คิดผลของอัตราขยายกระแสและแรงดันออร์ที จะสามารถเขียนสมการกระแสเอาต์พุตซึ่งเป็นผลต่างของกระแสคอลเลกเตอร์  $I_{C1}, I_{C2}$  ได้ดังสมการ(3.33)

$$I_{C1} - I_{C2} = I_{EE} \tanh\left(\frac{V_d + V_K}{2V_T}\right) \quad (3.33)$$

เมื่อ  $V_K$  เป็นแรงดันคงที่หรือแรงดันออฟเซตที่เกิดขึ้นจากการทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองในวงจรขยายผลต่างมีพื้นที่อิมิตอร์ต่างกันเท่ากับอัตราส่วน  $K$  โดย  $V_K = V_T \ln K$  จากรูปที่ 3.7 และสมการ(3.33) สามารถออกแบบวงจรถ่วงกำลังสองได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรกำลังสองจากวงจรขยายผลต่าง

ให้กระแสเอาต์พุต ( $I_o$ ) เป็นกระแสผลต่างระหว่าง  $I_K$  กับ  $I_U$  ดังสมการ (3.34)

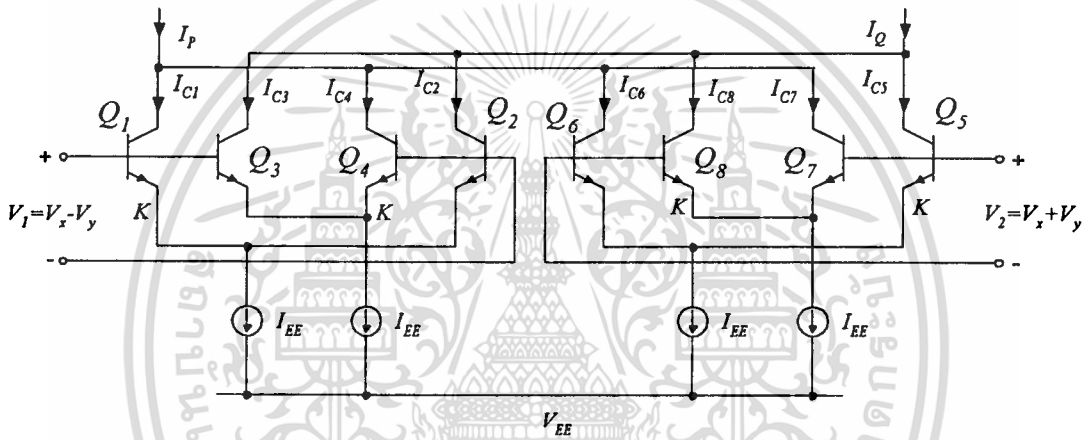
$$\begin{aligned}
 I_o &= I_K - I_U \\
 &= (I_{C1} - I_{C4}) - (I_{C2} + I_{C3}) \\
 &= I_{EE} \left\{ \tanh \left( \frac{V_d + V_K}{2V_T} \right) - \tanh \left( \frac{V_d - V_K}{2V_T} \right) \right\}
 \end{aligned} \tag{3.34}$$

จากอนุกรมเทย์เลอร์ เราสามารถประมาณให้  $\tanh x = x - \frac{x^3}{3}$  ได้เมื่อ  $|x| \ll 1$  ดังนั้น

กำหนดให้  $\left| \frac{V_d + V_K}{2V_T} \right|$  และ  $\left| \frac{V_d - V_K}{2V_T} \right| \ll 1$  กระแสเอาต์พุต  $I_o$  จะเป็น

$$\begin{aligned}
 I_0 &= \left\{ \frac{V_K}{V_T} - \frac{V_K}{4V_T^3} V_d^2 - \frac{2}{3} \left( \frac{V_K}{2V_T} \right)^3 \dots \right\} \\
 &= I_{EE} \ln K \left\{ 1 - \frac{1}{4V_T^2} V_d^2 - \frac{1}{12} (\ln K)^2 - \dots \right\}
 \end{aligned}
 \tag{3.35}$$

จากวงจรกำลังสองในรูปที่ 3.8 และสมการ(3.35) สามารถออกแบบวงจรคูณแบบควอเตอร์-สแควร์ โดยใช้วงจรกำลังสองจากวงจรขยายผลต่างที่มีพื้นที่อิมิตอร์ต่างกันเท่ากับอัตราส่วน  $K$  สองวงจร ซึ่งอินพุตทั้งสองอยู่ในรูปของแรงดันผลบวก-ลบ ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรคูณโดยอาศัยหลักการควอเตอร์-สแควร์โดยใช้ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์

เมื่อไบแอสทรานซิสเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่  $I_{EE}$  ให้ทำงานในช่วงแอกทีฟ กระแสเอาต์พุตของวงจรคูณ ( $I_{out}$ ) ได้จากผลต่างของกระแส ( $I_P - I_Q$ ) เมื่อ

$$I_P = I_{EE} \left\{ \tanh \left( \frac{V_1 + V_K}{2V_T} \right) - \tanh \left( \frac{V_1 - V_K}{2V_T} \right) \right\}
 \tag{3.36}$$

$$I_Q = I_{EE} \left\{ \tanh \left( \frac{V_2 + V_K}{2V_T} \right) - \tanh \left( \frac{V_2 - V_K}{2V_T} \right) \right\}
 \tag{3.37}$$

$$I_{out} = I_P - I_Q
 \tag{3.38}$$

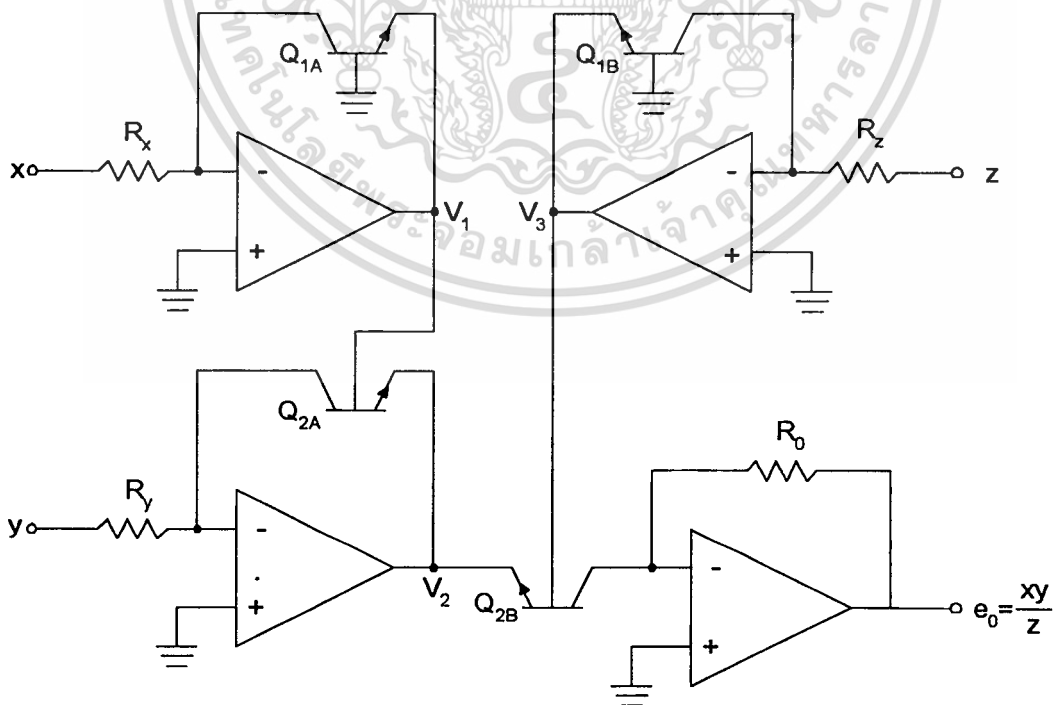
จากการประมาณอนุกรมอันดับสอง(second-order approximation) ของสมการ(3.36)และ (3.37)จะได้สมการกระแสเอาต์พุต ดังสมการ(3.39)

$$I_{out} = \frac{I_{EE} \ln K}{V_T^2} V_x V_y \quad (3.39)$$

สมการ(3.39) แสดงให้เห็นว่าวงจรขยายผลต่างที่มีพื้นที่อิมิตอร์ไม่เท่ากันสามารถนำมา ออกแบบเป็นวงจรถคูณด้วยหลักการควอเทอร์-สแควร์ ได้ภายใต้เงื่อนไขการประมาณ ฟังก์ชัน  $\tanh x$  โดยมีข้อกำหนดว่า  $x$  จะต้องมีค่าน้อยกว่าหนึ่งมากๆ ด้วยเหตุนี้ทำให้แรงดันอินพุตของ วงจรจึงมีขนาดเล็กมาก

### 3.6 วงจรถคูณโดยอาศัยหลักการล็อก-แอนติล็อก

การออกแบบวงจรถคูณโดยอาศัยหลักการล็อก-แอนติล็อก(log-antilog multiplier) อาศัย คุณสมบัติความเป็นฟังก์ชันเชิงล็อกของศักย์ค่าไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างขาเบส-อิมิตอร์ของ ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ โดยที่รูปวงจรถคูณสัญญาณแบบหนึ่งควอแครนต์ที่อาศัยหลักการล็อก-แอนติล็อกแสดงไว้ในรูปที่ 3.10 และสมการฟังก์ชันเชิงล็อกของทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์เขียนได้ดัง สมการ(3.40)



รูปที่ 3.10 วงจรถคูณสัญญาณหนึ่งควอแครนต์ที่อาศัยหลักการล็อก-แอนติล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_c}{I_s} \quad (3.40)$$

จากสมการ(3.40) แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาเบส-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์  $Q_{1A}$  และ  $Q_{1B}$  คือ

$$0 - V_1 = \frac{kT_{1A}}{q} \ln \frac{V_x / R_x}{I_{S1A}} \quad (3.41)$$

$$0 - V_3 = \frac{kT_{1B}}{q} \ln \frac{V_z / R_z}{I_{S1B}} \quad (3.42)$$

ถ้ากำหนดให้ทรานซิสเตอร์  $Q_{1A}$  และ  $Q_{1B}$  มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ ดังนั้น  $T_{1A} = T_{1B} = T_1$  และ  $I_{S1A} = I_{S1B} = I_{S1}$  นำสมการที่ (3.42) ลบออกจากสมการ(3.41) จะได้

$$-V_1 + V_3 = \frac{kT_1}{q} \ln \frac{V_x R_z}{z R_x} \quad (3.43)$$

ในทำนองเดียวกันถ้าทรานซิสเตอร์  $Q_{2A}$  และ  $Q_{2B}$  มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ จากสมการที่(3.40) เราจะได้

$$V_1 - V_2 = \frac{kT_2}{q} \ln \frac{y / R_y}{I_{S2}} \quad (3.44)$$

$$V_3 - V_2 = \frac{kT_2}{q} \ln \frac{V_0 / R_0}{I_{S2}} \quad (3.45)$$

นำสมการ (3.44) ลบออกจากสมการ (3.45) จะได้

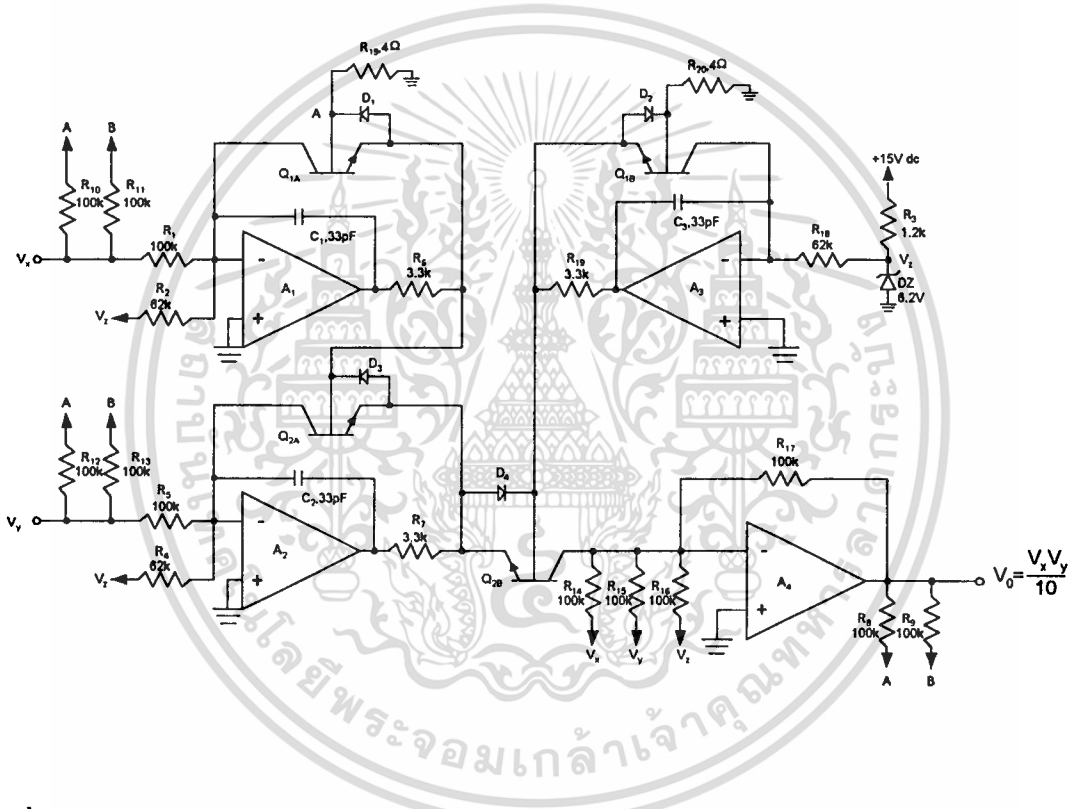
$$-V_1 + V_3 = \frac{kT_2}{q} \ln \frac{V_0 R_y}{y R_0} \quad (3.46)$$

และถ้า  $T_1 = T_2 = T$  จากสมการที่ (3.43) และ (3.46) จะได้

$$\frac{kT}{q} \ln \frac{V_x R_z}{V_z R_x} = \frac{kT}{q} \ln \frac{V_0 R_y}{V_y R_0} \quad (3.47)$$

$$V_0 = \frac{V_x V_y}{V_z} \frac{R_0 R_z}{R_x R_y} \quad (3.48)$$

จากรูปที่ 3.10 และสมการ (3.48) ถ้า  $V_z$  เป็นแรงดันไฟตรงที่มีค่าคงที่และมีค่ามากกว่าศูนย์ เราจะได้วงจรคูณแบบหนึ่งควอดแรนต์ จากหลักการที่ได้กล่าวมาแล้วเราสามารถออกแบบให้เป็น วงจรคูณสี่ควอดแรนต์ ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรคูณสัญญาณสี่ควอดแรนต์ที่อาศัยหลักการล็อก-แอนติล็อก

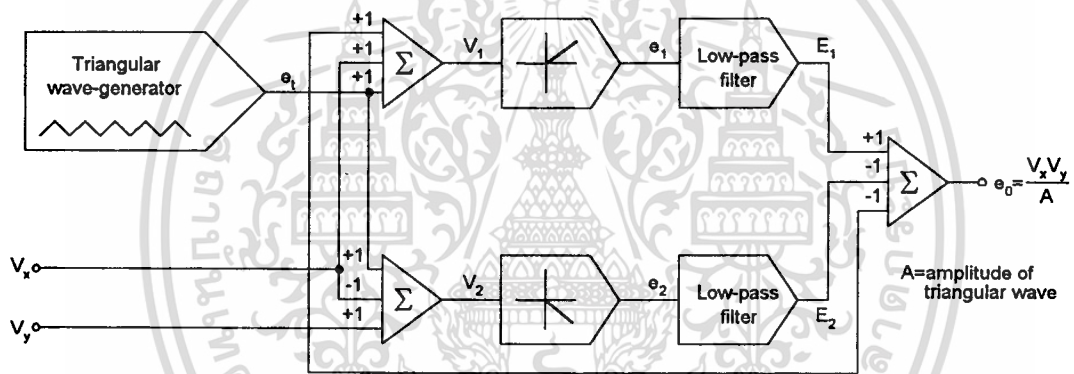
วงจรมคูณสี่ควอดแรนต์ ในรูปที่ 3.11 จะประกอบไปด้วย  $R_2, R_4, R_6, R_5$  และ  $R_6$  ทำหน้าที่เป็นตัวกระจัดสัญญาณสำหรับการแปลงวงจรมคูณหนึ่งควอดแรนต์ไปเป็นสี่ควอดแรนต์ ซีเนอร์ไดโอด ZD ทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายแรงดันคงที่ให้กับสัญญาณอินพุต  $V_z$ ,  $C_1/R_6$ ,  $C_2/R_7$ ,  $C_3/R_9$  ทำหน้าที่เป็นตัวชดเชยเฟสให้กับวงจรมคูณที่เกิดจากตัวขยายสัญญาณ  $A_1, A_2, A_3$  ไดโอด  $D_1, D_2, D_3$  และ  $D_4$  ทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันการไหลย้อนกลับของกระแสที่ขาเบส-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์  $Q_{1A}, Q_{1B}, Q_{2A}, Q_{2B}$  และ  $R_{19}, R_{20}, R_{10}/R_{11}, R_{12}/R_{13}$  ทำหน้าที่เป็นตัวชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นของสัญญาณอินพุต  $V_x$  และ  $V_y$  ส่วน  $R_8/R_9$  ทำหน้าที่เป็นตัวชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นของอัตราขยายสัญญาณของ  $A_d$  จุดเด่นของวงจรคูณที่ใช้หลักการนี้คือมีความแม่นยำสูง โดยที่มีค่าความผิดพลาดของวงจรอยู่ที่ 0.1% , มีผลตอบสนองทางความถี่สูง , มีราคาถูก แต่มีข้อเสียคือ การสร้างเป็นวงคูณสี่ควอดรนต์ทำได้ค่อนข้างยุ่งยาก จำเป็นต้องมีการปรับแต่งวงจรเพื่อหาจุดการทำที่เหมาะสมก่อนนำไปใช้งาน และมีผลทางอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้องกับค่อนข้างสูง

### 3.7 วงจรคูณโดยอาศัยหลักการมัธยฐานสัญญาณสามเหลี่ยม

บล็อกไดอะแกรมแสดงหลักการทำงานของวงจรคูณ โดยอาศัยหลักการมัธยฐานสัญญาณสามเหลี่ยม (Triangle-averaging multiplier) [30] แสดงไว้ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งจะประกอบไปด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม , วงจรกลับทิศทางกระแส (rectifiers) , วงจรรวมสัญญาณ และ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรม วงจรคูณ โดยอาศัยหลักการมัธยฐานสัญญาณสามเหลี่ยม

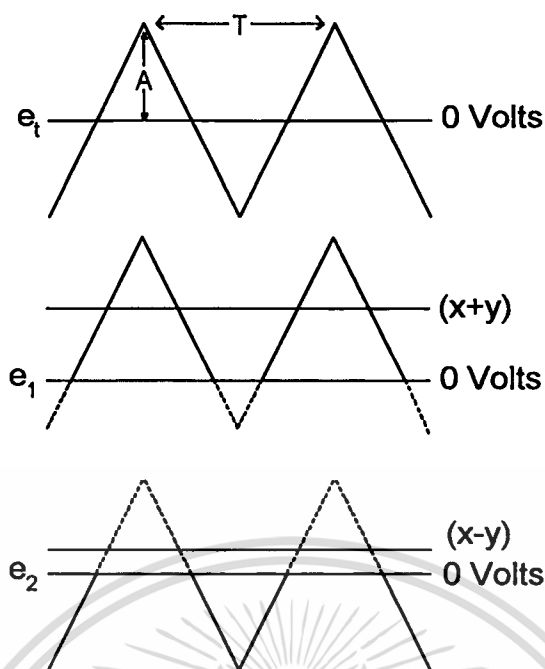
การทำงานของวงจรเริ่มต้นจากนำเอาสัญญาณอินพุต  $v_x$  และ  $v_y$  มาบวกและลบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม  $e_t$  ดังรูปที่ 3.12 ทำให้ได้สัญญาณ  $v_1$  และ  $v_2$  ดังสมการที่ (3.49) และ (3.50)

$$v_1 = e_t + v_x + v_y \quad (3.49)$$

และ

$$v_2 = e_t + v_x - v_y \quad (3.50)$$

เมื่อสัญญาณ  $v_1$  ผ่านวงจรกลับทิศทางกระแส ซึ่งจะยอมให้สัญญาณที่เป็นขั้วบวกเท่านั้นที่จะผ่านไปได้ ทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกลับทิศทางกระแส  $e_1$  ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกัมพิสทางกระแส

เมื่อนำสัญญาณที่ได้ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำเพื่อกำจัดองค์ประกอบของสัญญาณไฟกระแสดตรงของ  $e_1$  จะได้สัญญาณเอาต์พุต  $E_1$  คือ

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \frac{1}{T} \int_0^T e_1(t) dt \\ &= \frac{1}{4A} (x+y+A)^2 \end{aligned} \right\} \quad (3.51)$$

เมื่อ  $A$  คือ แอมพลิจูดของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม และ ในทำนองเดียวกัน สัญญาณเอาต์พุต  $E_2$  ก็จะได้เป็น

$$E_2 = \frac{1}{4A} (-v_x + v_y + A)^2 \quad (3.52)$$

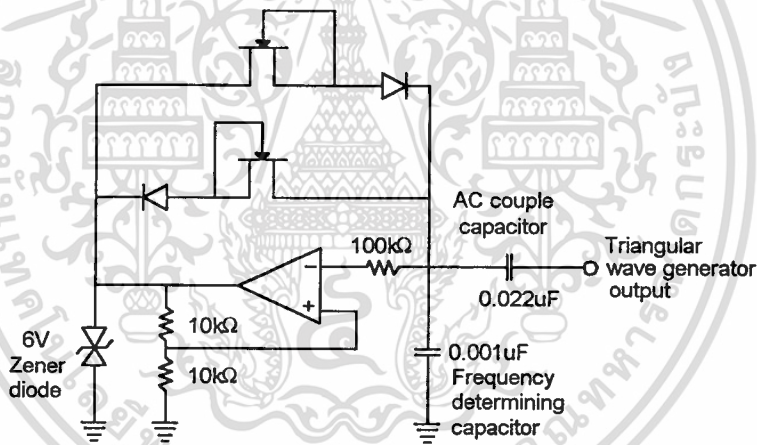
จากนั้นนำเอาสัญญาณ  $E_1$  ,  $-E_2$  และ  $-v_x$  มารวมกันสัญญาณเอาต์พุตของวงจรคุณ  $e_0$  จะกลายเป็น

$$e_0 = E_1 - E_2 - x \quad (3.53)$$

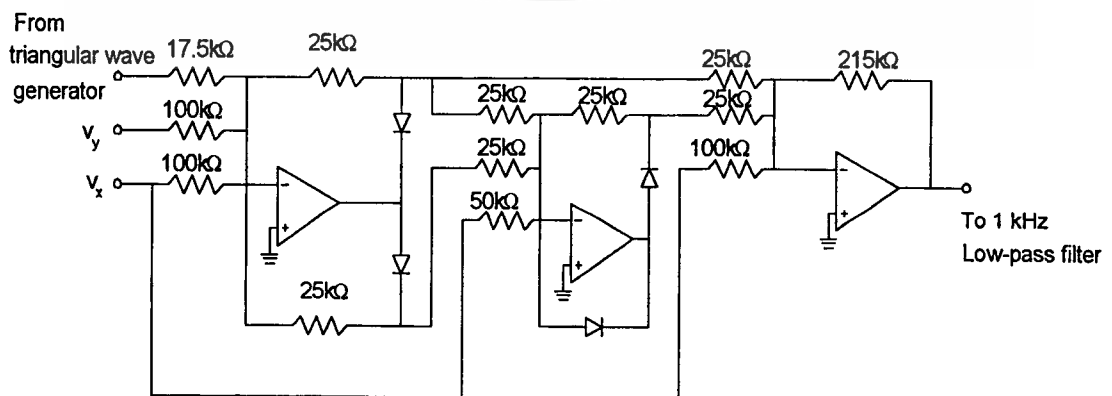
และ

$$e_0 = \frac{v_x v_y}{A} \quad (3.54)$$

วงจรสมบูรณ์ของวงจรคุณ โดยอาศัยหลักการมัลติเพล็กซ์สัญญาณสามเหลี่ยม แสดงไว้ในรูปที่ 3.14 (ข) , วงจรกำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมความถี่ 12 kHz แสดงไว้ในรูปที่ 3.14 (ก) และ วงจรกรองความถี่ต่ำ ความถี่คัทออฟ 1 kHz แสดงไว้ในรูปที่ 3.14 (ค) โดยที่เราสามารถใช้วงจรกรองความถี่ต่ำเพียงตัวเดียว โดยการที่นำเอาวงจรกรองความถี่ต่ำมาต่อหลังวงจรรวมสัญญาณ ในขณะที่การทำงานของวงจรยังคงเหมือนเดิม จุดเด่นของวงจรที่ใช้หลักการนี้คือ มีค่าความผิดพลาดของการคูณอยู่ที่ 0.25 % ผลของการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิที่มีต่อวงจรคุณคือ  $\pm 0.03\%/^{\circ}\text{C}$

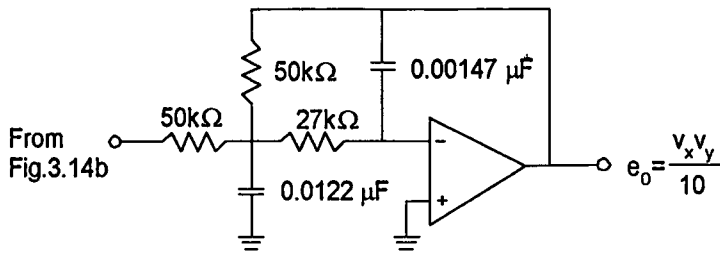


3.14 (ก)



3.14 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3.14 (ค)

รูปที่ 3.14 วงจรสมบูรณของวงจรคูณ โดยอาศัยหลักการมธขฐานสัญญาณสามเหลี่ยม

(ก) วงจรกำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมความถี่ 12 kHz (ข) วงจรคูณ โดยอาศัยหลักการมธขฐานสัญญาณสามเหลี่ยม (ค) วงจรกรองความถี่ต่ำ ความถี่คัทออฟ 1 kHz

### 3.8 วงจรคูณโดยอาศัยหลักการ compound pulse-time modulation

บล็อกไดอะแกรมแสดงหลักการทํางานของวงจรคูณโดยอาศัยหลักการ compound pulse-time modulation หรือ PWM-PWM [21] แสดงไว้ดังรูปที่ 3.15 เริ่มค่นจากนำสัญญาณอินพุต  $y(t)$  มาทําการมอดูเลท แบบ PWM กับสัญญาณพาห้ที่มีรูปสัญญาณเป็นคลื่นสามเหลี่ยม มีความถี่  $f_{s1}$  ซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้าง  $\tau_1$  มีแอมพลิจูดเท่ากับ  $A_1$  และมีความถี่เท่ากับ  $f_{s1}$  และเราจะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ได้ค่นนี้

$$\tau_1(t) = \tau_{01}[1 + m_1 y(t)] \quad (3.55)$$

เมื่อ

$\tau_{01}$  คือ ความกว้างของพัลส์ก่อนการมอดูเลท

$m_1$  คือ ค่าค่นที่ของตัวมอดูเลท โดยมีเงื่อนไข คือ  $|m_1 y(t)| < 1$

อาศัยค่นสัมบัตการแปลงของอนุกรมฟูริเยร์ สมการที่ (3.55) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

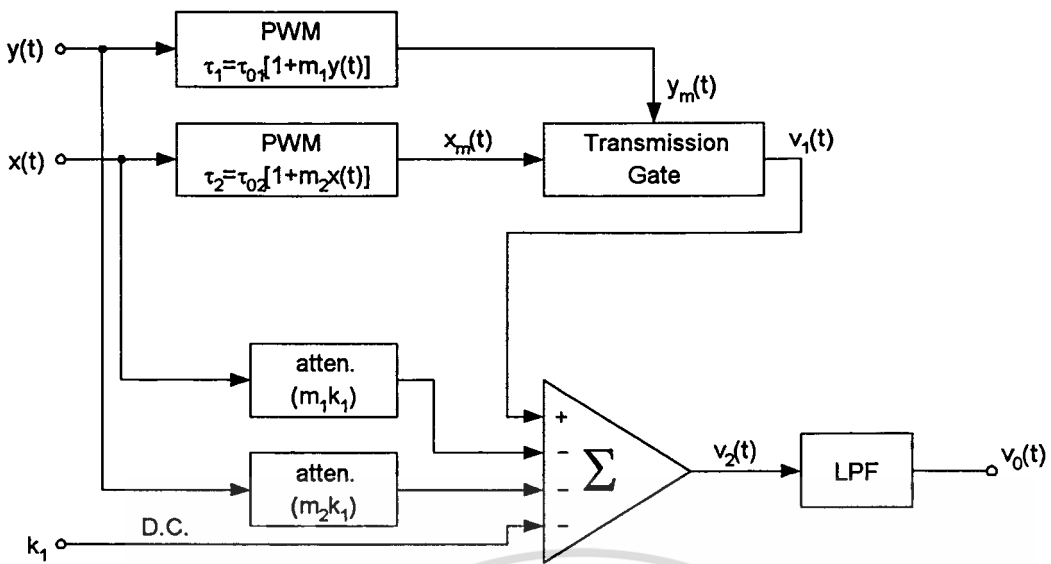
$$y_m(t) = A_1 \tau_{01} f_{s1} [1 + m_1 y(t)] + A_1 Q_1(t) \quad (3.56)$$

เมื่อ

$$Q_1(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (2n\pi) \sin\{n\pi\tau_{01} f_{s1} [1 + m_1 y(t)]\} \cos 2\pi n f_{s1} t$$

โดยที่  $Q_1(t)$  คือเทอมขององค์ประกอบความถี่สูงของสัญญาณ PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไวสำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกคร้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 บล็อก โคเดแกรม วงจรคูณ โดยอาศัยหลักการ compound pulse-time modulation

จากนั้นนำสัญญาณอินพุตตัวที่สอง  $x(t)$  มาทำการมอดูเลตแบบ PWM กับสัญญาณพาห်ที่มีความถี่  $f_{s2}$  โดยที่  $f_{s2} > f_{s1}$  ทำให้ได้สัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างของพัลส์เท่ากับ  $\tau_2$  มีแอมพลิจูดเท่ากับ  $A_2$  และมีความถี่เท่ากับ  $f_{s2}$  ในทำนองเดียวกันกับสมการที่ (3.55) และ (3.56) เราจะสามารถเขียนสมการของ  $x_m(t)$  ได้คือ

$$x_m(t) = A_2 \tau_{02} f_{s2} [1 + m_2 x(t)] + A_2 Q_2(t) \quad (3.57)$$

เมื่อ  $\tau_{02}$  คือความกว้างของพัลส์ก่อนการมอดูเลต,  $m_2$  เป็นค่าคงที่ โดยที่  $|m_2 x(t)| < 1$  และ  $Q_2(t)$  เป็นเทอมขององค์ประกอบความถี่สูงของสัญญาณ PWM โดยที่

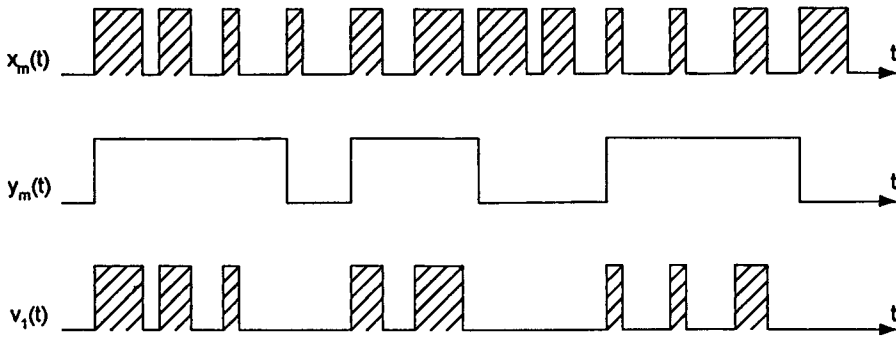
$$Q_2(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (2n\pi) \sin\{n\pi\tau_{02}f_{s2}[1 + m_2x(t)]\} \cos 2\pi n f_{s2} t$$

สัญญาณพัลส์ที่เกิดจากการมอดูเลตสัญญาณอินพุตตัวแรก  $y_m(t)$  จะทำหน้าที่เป็นสวิทช์ให้กับฟังก์ชันเกท โดยมีสัญญาณอินพุตคือ  $x_m(t)$  ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตของฟังก์ชันเกท ก็คือ

$$v_1(t) = g(t)x_m(t) \quad (3.58)$$

โดยที่สัญญาณของฟังก์ชันเกทแสดงไว้ดังรูปที่ 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 สัญญาณที่เกิดจากฟังก์ชันเกท

เมื่อ  $g(t)$  คือ ฟังก์ชันเกท มีค่าเท่ากับ  $\frac{y_m(t)}{A_1}$  สมการที่ (3.58) จะสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$v_1(t) = k_1 + m_1 k_1 y(t) + m_2 k_1 x(t) + k_2 x(t)y(t) + Q(t) \quad (3.59)$$

เมื่อ

$$k_1 = A_2 \tau_{01} \tau_{02} f_{s1} f_{s2}$$

$$k_2 = m_1 m_2 k_1$$

และ

$$Q(t) = A_2 \tau_{01} f_{s1} [1 + m_1 y(t)] Q_2(t) + A_2 \tau_{02} f_{s2} [1 + m_2 x(t)] Q_1(t) + A_2 Q_1(t) Q_2(t)$$

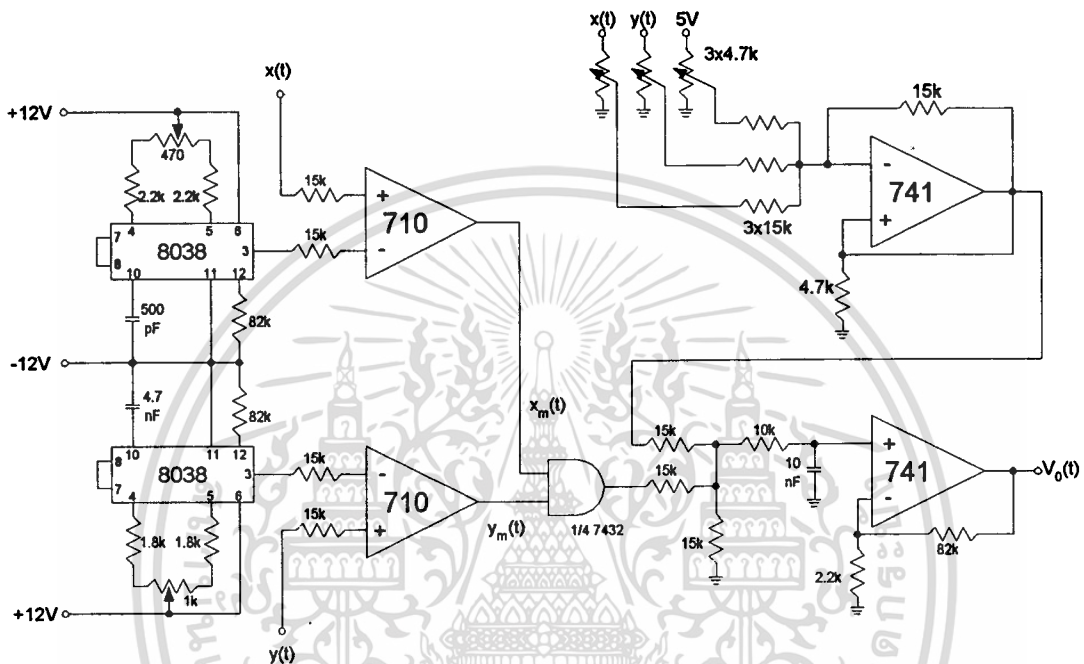
จากสมการ (3.59) สมการสามเทอมแรกจะประกอบไปด้วย สัญญาณไฟตรง , เทอมย่อยของ  $y(t)$  และ เทอมย่อยของ  $x(t)$  ดังนั้นถ้าหากเราตัดสมการทั้งสามตัวในเทอมแรกของสมการออกไป เราจะได้

$$v_2(t) = k_2 x(t)y(t) + Q(t) \quad (3.60)$$

จากนั้นนำสมการ (3.60) ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ เพื่อขจัดเทอม  $Q(t)$  ซึ่งเป็นเทอมขององค์ประกอบความถี่สูง ก็จะได้วงจรคูณสี่ควอดแรนต์ที่สมบูรณ์คือ

$$v_0(t) = k_2 x(t)y(t) \quad (3.61)$$

วงจรมอดูเลชันโดยอาศัยหลักการนี้มีข้อดีคือมีช่วงการปฏิบัติงานของสัญญาณอินพุตกว้างและมีความเป็นเชิงเส้นสูง กว่าแบบอื่นๆที่ได้กล่าวมา แต่การที่จะทำให้อัตราส่วนระหว่างความถี่ของพัลส์ก่อนการมอดูเลชันกับคาบเวลาของคลื่นพาห์ของตัวมอดูเลชันทั้งสองจะต้องมีอัตราส่วนที่เท่ากันนั่นคือ  $\tau_{01}f_{s1} = \tau_{02}f_{s2} = 0.5$  ,  $k_1 = 0.25A_1$  และ  $k_2 = 0.25m_1m_2A_2$  วงจรสมบูรณ์แสดงไว้ในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 วงจรสมบูรณ์ของวงจรมอดูเลชันโดยอาศัยหลักการ compound pulse-time modulation

### 3.9 วงจรมอดูเลชันโดยอาศัยหลักการ pulse-interval amplitude modulation

วงจรมอดูเลชันสัญญาณอนาล็อกโดยอาศัยหลักการการมอดูเลชันพัลส์ กรรมวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ก็คือ วงจรมอดูเลชันโดยอาศัยหลักการ pulse-width amplitude modulation [19-20] มีหลักการทำงานคือความกว้างของพัลส์จะแปรผันตามสัญญาณอินพุตตัวที่หนึ่งและแอมพลิจูดของพัลส์จะแปรผันตามสัญญาณอินพุตตัวที่สอง ค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่เกิดจากการมอดูเลชันก็คือสัญญาณเอาต์พุตของวงจรมอดูเลชัน วงจรมอดูเลชันที่อาศัยหลักการนี้จะมีคุณสมบัติเหมือนกับวงจรมอดูเลชันที่อาศัยหลักการการมอดูเลชันพัลส์แบบอื่นๆ คือ มีความแม่นยำ และ ความเป็นเชิงเส้นสูง จากนั้นนาย R.S.FYATH และคณะ ได้นำเสนอ วงจรมอดูเลชันโดยอาศัยหลักการ pulse-interval amplitude modulation (PIAM) [22] ซึ่งเป็นการนำเอาการมอดูเลชันระยะห่างของพัลส์ (pulse-interval modulation) หรือ เรียกย่อว่า PIM แทนในส่วนของการมอดูเลชันความกว้างของพัลส์ (PWM) ซึ่งมีหลักการทำงานที่คล้ายกัน โดยที่การมอดูเลชันระยะห่างของพัลส์ (PIM) มีข้อดีก็คือไม่ต้องใช้ตัวกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมจากภายนอก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่บล็อกไดอะแกรมแสดงการมอดูเลตแบบ PIM แสดงไว้ดังรูปที่ 3.18 (ก) และ รูปคลื่นสัญญาณที่เกิดจากขบวนการมอดูเลตแสดงไว้ดังรูปที่ 3.18 (ข) การมอดูเลตระยะห่างของพัลส์เป็นการทำให้ระยะห่างของพัลส์ที่เกิดจากการ มอดูเลตแปรผันตามขนาดของสัญญาณอินพุต  $x(t)$  นั่นคือ

$$T_i = \tau_0 + T_0[1 + mx(t)] \quad (3.62)$$

เมื่อ

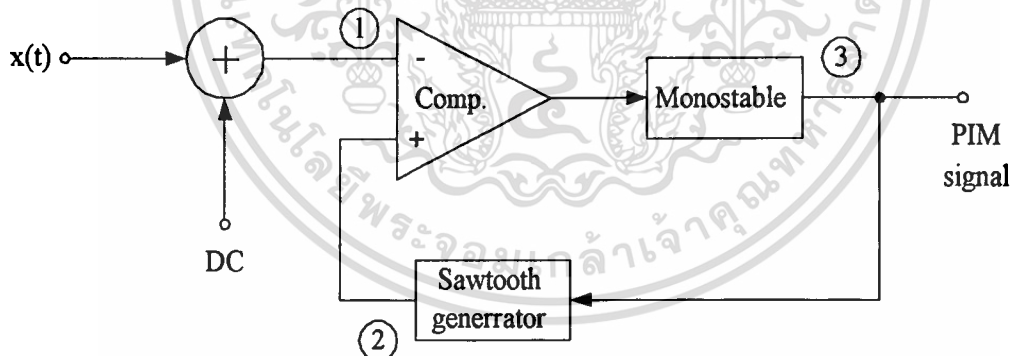
$T_i$  คือ ระยะห่างของพัลส์ที่เวลาใดๆของการมอดูเลต

$\tau_0$  คือ ความกว้างของพัลส์

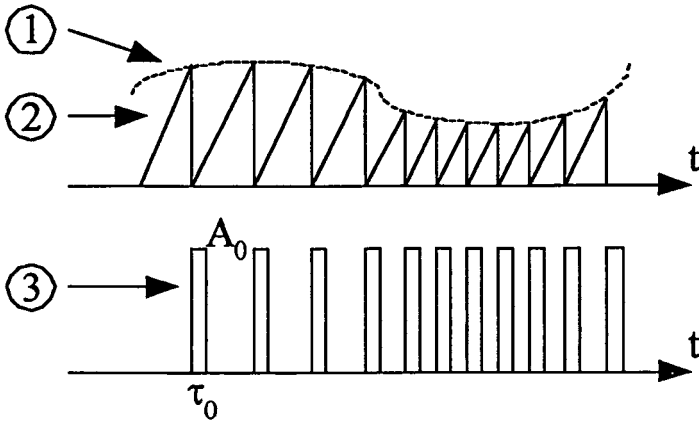
$T_0$  คือ ค่าคงที่

และ

$m$  คือ ค่าคงที่โดยมีเงื่อนไขว่า  $|mx(t)| < 1$



3.18(ก)



3.18(ข)

รูปที่ 3.18 การมอดูเลตแบบ PIM (ก)บล็อกไดอะแกรม (ข)รูปคลื่นสัญญาณที่เกิดจากขบวนการมอดูเลต

อาศัยคุณสมบัติการแปลงของอนุกรมฟูรีเยร์ สมการที่ (3.62) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$P_m(t) = R[1 - (1 - R)mx(t)] + Q(t) \quad (3.63)$$

เมื่อ

$R$  คือ ค่าคิดค่าใช้จ่ายเกิดของขบวนพัลส์ก่อนการมอดูเลต โดยที่  $R = \tau_0 / (\tau_0 + T_0) = \tau_0 f_s$

และ

$Q(t)$  คือ องค์ประกอบความถี่สูงของขบวนพัลส์

โดยที่

$$Q(t) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{\pi n} \right) \sin(\pi n \tau_0 f_i) \cdot \cos 2\pi n f_s \left[ t - m' \int x(t) dt \right]$$

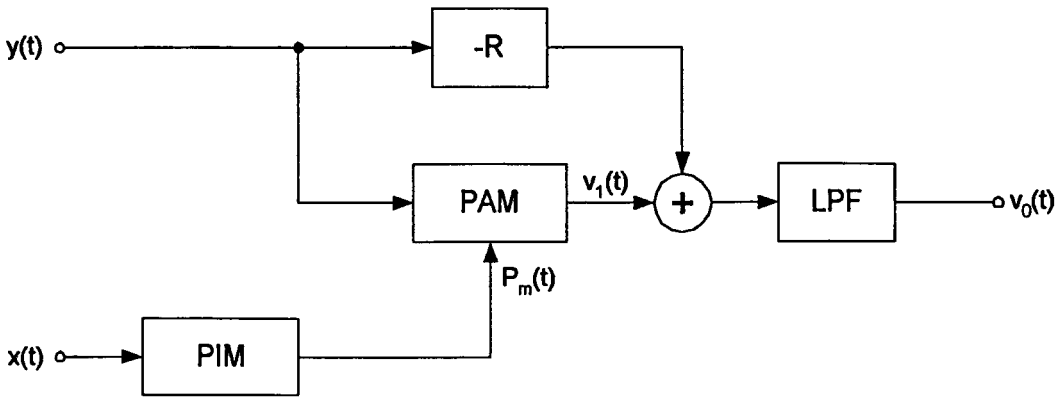
เมื่อ

$$f_i = f_s [1 + m' x(t)]$$

$$m' = (1 - R)m$$

สัญญาณพัลส์ที่เกิดจากการมอดูเลตแบบ PIM ของสัญญาณอินพุต  $x(t)$  ที่ได้จากสมการ (3.63) จะถูกนำมาเป็นตัวห้ค่าตัวอย่างสัญญาณในการมอดูเลตแบบ PAM ให้กับสัญญาณอินพุต  $y(t)$  สัญญาณเอาต์พุตที่แสดงไว้ในสมการ (3.64) และบล็อกไดอะแกรมของวงจรจรรจนโดยอาศัย pulse-interval amplitude modulation แสดงไว้ดังรูปที่ 3.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 บล็อกไดอะแกรมของวงจรคูณ โดยอาศัยหลักการ pulse-interval amplitude modulation

$$\begin{aligned} v_1(t) &= P_m(t)y(t) \\ &= Ry(t) - R(1-R)mx(t)y(t) + Q(t)y(t) \end{aligned} \quad (3.64)$$

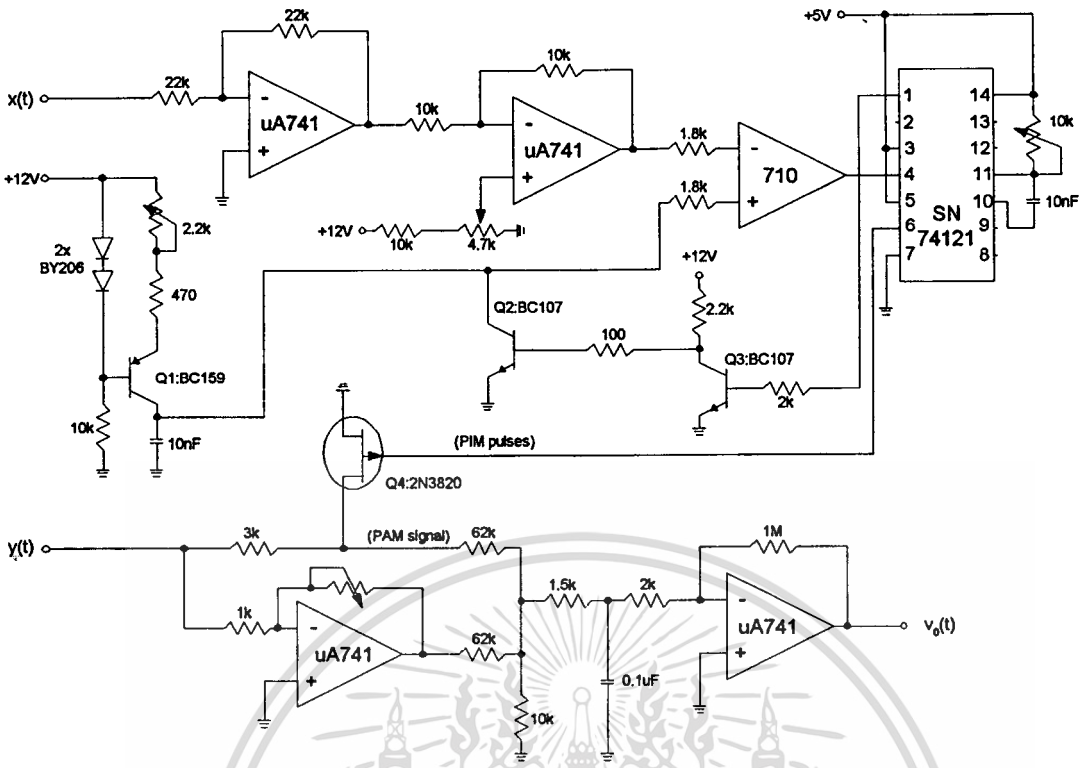
สมการ (3.64) เทอมแรกของสมการคือส่วนย่อยของสัญญาณอินพุต  $y(t)$  เทอมที่สองเป็นผลคูณระหว่างสัญญาณอินพุต  $x(t)$  และ  $y(t)$  เทอมที่สามเป็นเทอมขององค์ประกอบสัญญาณความถี่สูงของขบวนพัลส์ ดังนั้นเมื่อเอาสัญญาณ  $y(t)$  ที่มีอัตราขยายเท่ากับ  $R$  มาลบออกจากสมการ แล้วนำไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ จะได้สัญญาณเอาต์พุต คือ

$$\begin{aligned} v_0(t) &= R(1-R)mx(t)y(t) \\ &= Kx(t)y(t) \end{aligned} \quad (3.65)$$

เมื่อ

$$K = R(1-R)m \text{ ซึ่งเป็นค่าคงที่}$$

สมการ (3.65) ค่า  $K$  เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับค่าคิวดี้ไซเคิล  $R$  ซึ่งจะมีค่ามากที่สุดเมื่อ  $R = 0.5$  นั่นคือ  $K_{\max} = 0.25m$  วงจรสมบูรณ์แสดงไว้ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 วงจรสมรรถนะของวงจรคูณโดยอาศัยหลักการ pulse-interval amplitude modulation

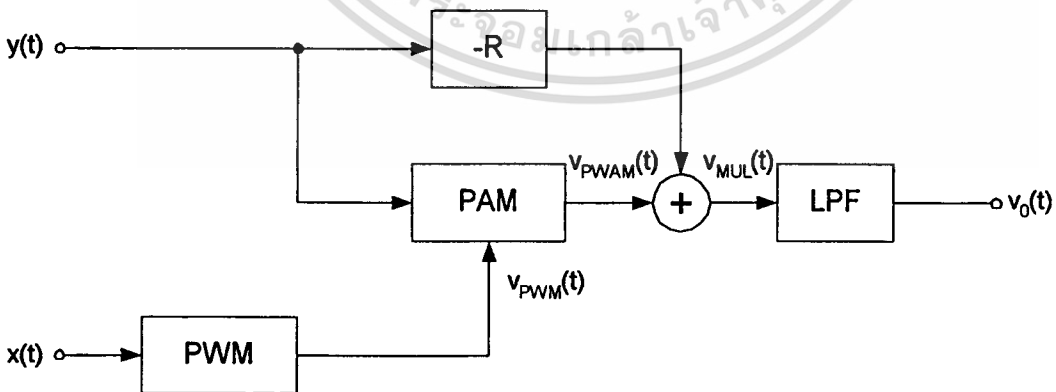
## บทที่ 4

# วงจรมอดูเลชัน 4 ควอดแรนตซ์ โดยอาศัยหลักการ PWAM ที่นำเสนอ

### 4.1 กล่าวนำ

ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงวงจรมอดูเลชันอนาล็อก 4 ควอดแรนตซ์ โดยอาศัยหลักการในการสร้างในแบบต่างๆ กัน รวมถึงวงจรมอดูเลชันที่อาศัยหลักการของการมอดูเลทขบวนพัลส์ ที่นำเสนอโดย นาย R.S.FYATH และคณะ นั่นคือวงจรมอดูเลชันที่อาศัยหลักการ PWM-PWM และ วงจรมอดูเลชันที่อาศัยหลักการ PIAM ซึ่งวงจรมอดูเลชันทั้งสองแบบนี้มีข้อดีคือ มีย่านการทำงานของสัญญาณอินพุตที่กว้าง สัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นและมีแอมป์สูง แต่ก็ยังมีข้อเสียอยู่ก็คือการที่จะทำให้เป็นวงจรมอดูเลชัน 4 ควอดแรนตซ์ที่สมบูรณ์นั้นทำได้ค่อนข้างยุ่งยากเนื่องจากจำเป็นต้องทำการปรับแต่งวงจรเพื่อจุดทำงานที่เหมาะสมให้แก่วงจรเสียก่อน อีกทั้งเมื่อมีการเปลี่ยนค่ามอดูเลชันอินเด็คซ์หรือความถี่ของคลื่นพาห์ของ PWM จะต้องปรับค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อให้วงจรทำงานเป็นวงจรมอดูเลชัน 4 ควอดแรนตซ์ที่สมบูรณ์ ทำให้เกิดความไม่สะดวกในการทำไปใช้งาน อีกทั้งยังอาจทำให้การทำงานของวงจรเกิดความผิดพลาดอันเนื่องมาจากปรับแต่งวงจรที่ไม่เหมาะสมอีกด้วย

ก่อนที่จะทำความเข้าใจโครงสร้างวงจรที่นำเสนอ เราจะมาพิจารณาลักษณะของ วงจรมอดูเลชัน 4 ควอดแรนตซ์ ที่ใช้เทคนิค PWAM โดยอาศัยโครงสร้างของวงจรมอดูเลชันที่อาศัยหลักการ PIAM ที่นำเสนอโดยนาย R.S.FYATH เสียก่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรมอดูเลชัน 4 ควอดแรนตซ์ โดยอาศัยหลักการ PWAM ของนาย R.S.FYATH

จากการพิจารณารูปสัญญาณ  $v_{PWM}(t)$  ในรูปที่ 4.1 จาก (2.13) เมื่อมี  $x(t)$  เป็นสัญญาณอินพุตจะได้ว่า

$$v_{PWM}(t) = \frac{A\beta}{T}[1+x(t)] + Q_1(t) \quad (4.1)$$

โดยที่  $A$  คือ แอมพลิจูด,  $\beta$  คือค่าคงที่ ที่ขึ้นอยู่กัสดัชนีการมอดูเลทของ  $PWM$ ,  $T$  คือ คาบเวลาของสัญญาณ  $PWM$  และ

$$Q_1(t) = \frac{A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sin(n\omega_0 t)}{n} - \frac{\sin[n\omega_0(t - \beta(1+x(t)))]}{n} \right\}$$

ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสัญญาณความถี่สูง จากนั้นนำสัญญาณ  $PWM$  ที่ได้ไปทำการชักค้ำตัวอย่างสัญญาณอินพุต  $y(t)$  จะได้

$$v_{PWAM}(t) = \frac{A\beta}{T} y(t)[1+x(t)] + y(t)Q_1(t) \quad (4.2)$$

และ

$$v_{MUL}(t) = y(t) \left( \frac{A\beta}{T} - R \right) + \frac{A\beta}{T} [x(t)y(t)] + y(t)Q_1(t) \quad (4.3)$$

จาก (4.3) เมื่อ  $R = \frac{A\beta}{T}$  และ  $Q_1(t)$  ซึ่งเป็นเทอมขององค์ประกอบความถี่สูง ถูกกรองด้วย LPF ที่มีความถี่ค้ดออฟที่เหมาะสม จะได้

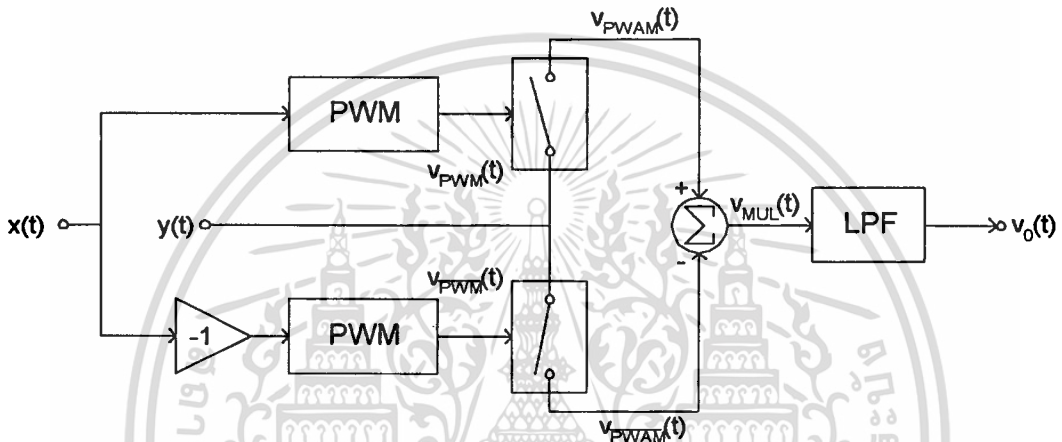
$$v_o(t) = \frac{A\beta}{T} x(t)y(t) \quad (4.4)$$

ซึ่งจะได้วงจรทวน 4 คอวแตรนค้ที่สมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตามถ้าเราพิจารณาถึงเงื่อนไขการได้มาของสมการที่ (4.4) เราพบว่า  $R = \frac{A\beta}{T}$  โดยที่  $T$  คือคาบเวลาของสัญญาณ  $PWM$  และ  $\beta$  คือค่าคงที่ ที่ขึ้นอยู่กัสดัชนีการมอดูเลทของ  $PWM$  ดังนั้นถ้ามีการเปลี่ยนความถี่ หรือ ดัชนีการมอดูเลทของ  $PWM$  จะส่งผลกระทบต่อวงจรทวน ทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นมาได้ เพื่อเป็นการ

จำกัดปัญหาเหล่านี้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการปรับปรุงวงจรถูกที่อาศัยหลักการนี้เสียใหม่ โดยได้ทำการออกแบบวงจรไว้ 2 โครงสร้างด้วยกัน

## 4.2 โครงสร้างที่ 1

บล็อกไดอะแกรมแสดงหลักการทำงานของวงจรถูกสัญญาณโดยอาศัยหลักการ PWAM โครงสร้างที่ 1 ที่นำเสนอ แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 และ สัญญาณไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ของวงจรแสดงไว้ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมวงจรถูกสัญญาณ โดยอาศัยหลักการ PWAM โครงสร้างที่ 1

จากรูปที่ 4.2 และ สมการ (2.13) สัญญาณ  $x(t)$  ซึ่งเป็นสัญญาณอินพุตของวงจรถูกตัวที่ 1 เมื่อทำการมอดูเลตความกว้างของพัลส์กับสัญญาณพาหะที่มีความถี่  $\omega_0$  สมการที่ได้หลังการมอดูเลต คือ

$$v_{PWM}(t) = \frac{A\beta}{T} [1 + x(t)] + Q_1(t) \quad (4.5)$$

เมื่อ  $A$  คือ แอมพลิจูดของสัญญาณพาหะ

$\beta$  คือ ค่าดัชนีการมอดูเลต ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าเดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) ของขบวนพัลส์ที่เกิดจากการมอดูเลตเมื่อสัญญาณอินพุตมีขนาดเป็นศูนย์

$T$  คือ คาบเวลาของสัญญาณพาหะ

จากนั้นทำการชักราค่าสัญญาณ  $y(t)$  โดยอาศัย  $v_{PWM}(t)$  เป็นสัญญาณพาด

$$v_{PWAM}(t) = v_{PWM}(t)y(t), \quad (4.6)$$

$$v_{PWAM}(t) = \frac{A\beta}{T} y(t) + \frac{A\beta}{T} x(t)y(t) + Q_2(t) \quad (4.7)$$

โดยที่

$$Q_2(t) = \frac{A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{y(t) \sin(n\omega_0 t)}{n} - \frac{y(t) \sin[n\omega_0(t - \beta(1 + x(t)))]}{n} \right]$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อทำการมอดูเลทความกว้างของพัลส์กับสัญญาณ  $-x(t)$  จะได้

$$v_{\overline{PWM}}(t) = \frac{A\beta}{T} [1 - x(t)] + Q_3(t) \quad (4.8)$$

โดยที่

$$Q_3(t) = \frac{A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sin(n\omega_0 t)}{n} - \frac{\sin[n\omega_0(t - \beta(1 - x(t)))]}{n} \right\}$$

จากนั้นทำการชักราค่าสัญญาณ  $y(t)$  โดยอาศัย  $v_{\overline{PWM}}(t)$  เป็นสัญญาณพาด

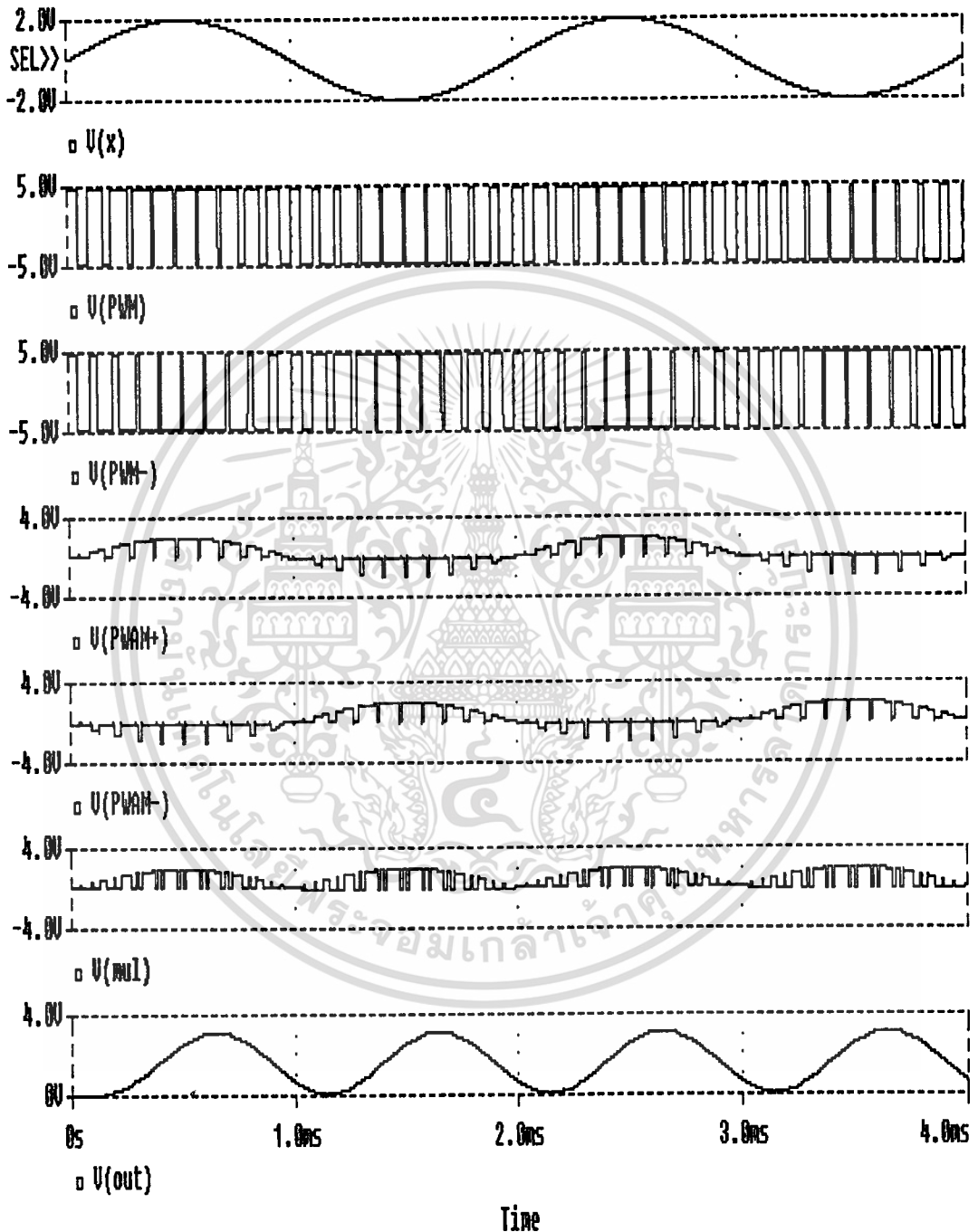
$$v_{\overline{PWAM}}(t) = \frac{A\beta}{T} y(t) - \frac{A\beta}{T} x(t)y(t) + Q_4(t) \quad (4.9)$$

โดยที่

$$Q_4(t) = \frac{A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{y(t) \sin(n\omega_0 t)}{n} - \frac{y(t) \sin[n\omega_0(t - \beta(1 - x(t)))]}{n} \right\}$$

นำเอา (4.7)-(4.9)

$$v_{MUL}(t) = \frac{2A\beta}{T} x(t)y(t) + [Q_2(t) - Q_4(t)] \quad (4.10)$$



### รูปที่ 4.3 สัญญาณไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (4.10) เทอมแรกคือผลคูณของ  $x(t)$  และ  $y(t)$  ที่คูณกับค่าคงที่ ส่วนในเทอมที่สองเป็นองค์ประกอบของสัญญาณความถี่สูง ถ้านำไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ จะทำให้สมการในเทอมที่สองหายไป ทำให้ได้

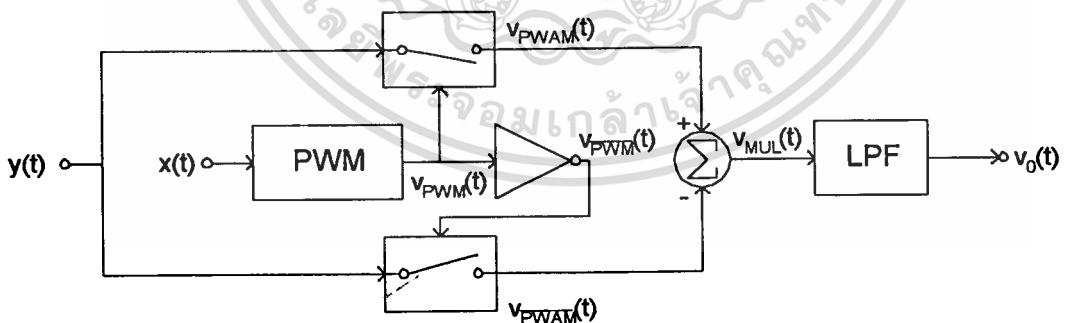
$$v_o(t) = Kx(t)y(t) \quad (4.11)$$

เมื่อ  $K = \frac{2A\beta}{T}$  ซึ่งเป็นค่าคงที่

จากสมการ(4.11) เราจะได้วงจรคูณ 4 ควอดแรนต์ที่สมบูรณ์ โดยไม่จำเป็นต้องนำเอาสัญญาณอินพุต  $x(t)$  และ  $y(t)$  ที่มีค่าอัตราขยายที่ขึ้นอยู่กับดัชนีการมอดูเลทและความถี่ของสัญญาณ  $PWM$  มาลบออกจากสัญญาณ  $v_{MUL}(t)$  จากสมการ(4.10) แต่อย่างไรก็ตาม ทำให้ไม่จำเป็นต้องทำการปรับแต่งสัญญาณเพื่อหาจุดการทำงานที่เหมาะสมให้แก่วงจร ทำให้ลดความผิดพลาดของวงจรที่อาจจะเกิดการปรับแต่งวงจรที่ไม่เหมาะสมลงได้

### 4.3 โครงสร้างที่ 2

บล็อกไดอะแกรมแสดงหลักการทำงานของวงจรคูณสัญญาณ โดยอาศัยหลักการ PWAM โครงสร้างที่ 2 ที่นำเสนอ แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 สัญญาณไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ของวงจรแสดงไว้ในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 บล็อกไดอะแกรมวงจรคูณสัญญาณ โดยอาศัยหลักการ PWAM โครงสร้างที่ 2

จากรูปที่ 4.3 และ สมการ (2.13) สัญญาณ  $x(t)$  ซึ่งเป็นสัญญาณอินพุตของวงจรคูณตัวที่ 1 เมื่อทำการมอดูเลทความกว้างของพัลส์กับสัญญาณพาหะที่มีความถี่  $\omega_0$  สมการที่ได้หลังการมอดูเลท คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_{PWM}(t) = \frac{A\beta}{T} [1 + x(t)] + Q_1(t) \quad (4.12)$$

เมื่อ  $A, \beta, T$  เป็นค่าคงที่ จากนั้นทำการซัดค่าตัวอย่างสัญญาณ  $y(t)$  โดยอาศัย  $v_{PWM}(t)$  เป็นสัญญาณพาห้

$$v_{PWAM}(t) = v_{PWM}(t)y(t) \quad (4.13)$$

$$v_{PWAM}(t) = \frac{A\beta}{T} y(t) + \frac{A\beta}{T} x(t)y(t) + Q_2(t) \quad (4.14)$$

โดยที่

$$Q_2(t) = \frac{A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{y(t) \sin(n\omega_0 t)}{n} - \frac{y(t) \sin[n\omega_0(t - \beta(1 + x(t)))]}{n} \right]$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อทำการกลับ(Inverse) ค่าสัญญาณ  $v_{PWM}(t)$  จากสมการ (4.12) จะได้

$$v_{\overline{PWM}}(t) = \frac{A}{T} [(1 - \beta) - \beta x(t)] + Q_3(t) \quad (4.15)$$

โดยที่

$$Q_3(t) = \frac{A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{y(t) \sin(n\omega_0 t)}{n} - \frac{y(t) \sin[n\omega_0(t - \beta(1 - x(t)))]}{n} \right]$$

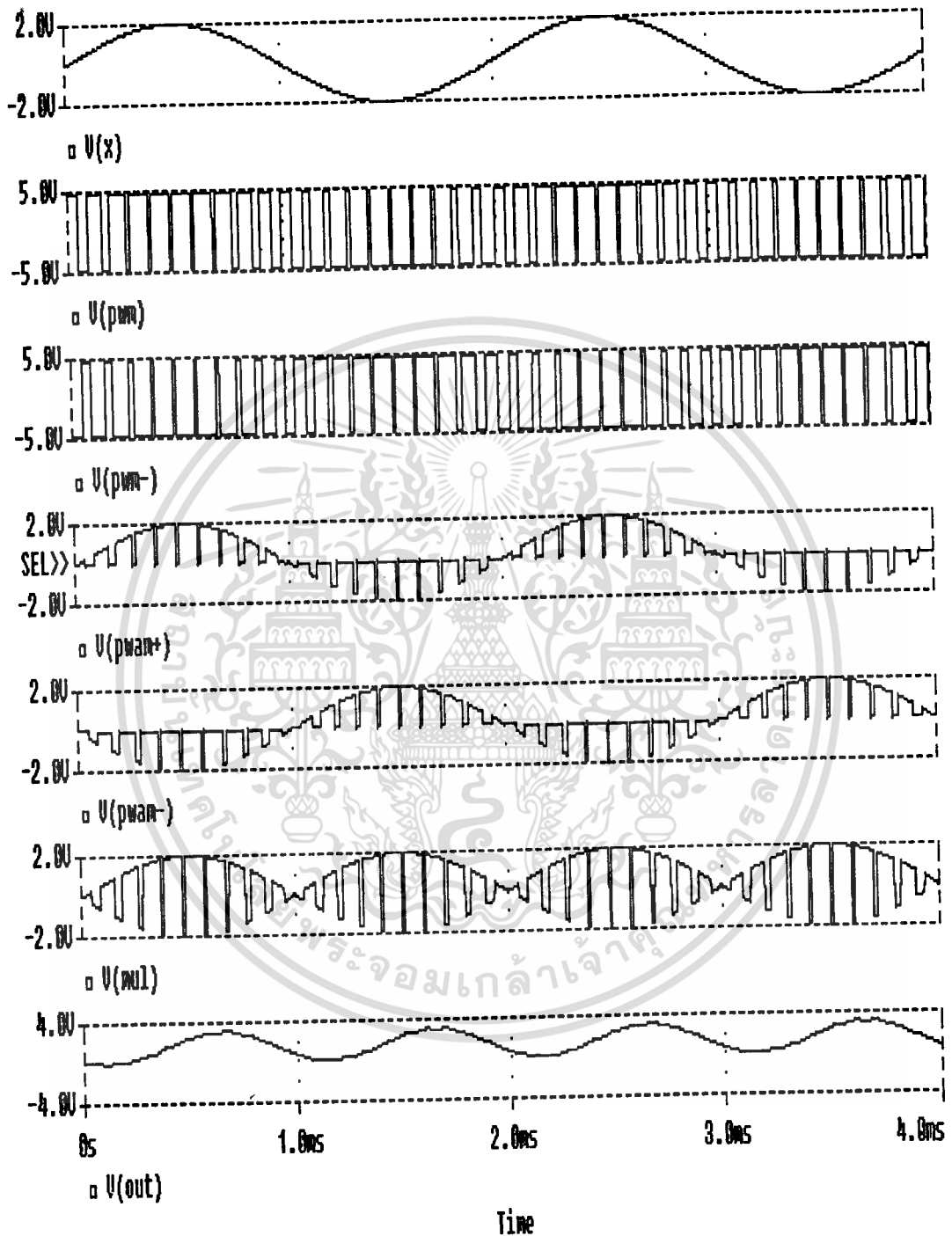
จากนั้นทำการซัดค่าสัญญาณ  $y(t)$  โดยอาศัย  $v_{\overline{PWM}}(t)$  เป็นสัญญาณพาห้

$$v_{\overline{PWAM}}(t) = \frac{A}{T} y(t)[(1 - \beta) - \beta x(t)] + y(t)Q_3(t) \quad (4.16)$$

นำเอา(4.14)-(4.16)

$$v_{MUL}(t) = \frac{A}{T} y(t)(2\beta - 1) + \frac{2A\beta}{T} x(t)y(t) + y(t)[Q_1(t) - Q_3(t)] \quad (4.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



#### รูปที่ 4.5 สัญญาณไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ(4.17) ถ้ากำหนดให้  $\beta = 0.5$  จะทำให้สมการเทอมแรกทางขวามือ หายไปส่วนในทอมที่สามเป็นองค์ประกอบของสัญญาณความถี่สูง ถ้านำไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ จะทำให้สมการในทอมที่สามหายไป จะได้

$$v_o(t) = Kx(t)y(t) \quad (4.18)$$

เมื่อ  $K = \frac{2A\beta}{T}$  ซึ่งเป็นค่าคงที่

จากสมการ(4.18) เราจะได้วงจรคูณ 4 ควอแดรนต์ที่สมบูรณ์ โดยมีเงื่อนไขคือค่าดัชนีของการมอดูเลทของสัญญาณ  $PWM$  จะต้องมามีค่าเท่ากับ 50 % ( $\beta = 0.5$ ) แต่ยังคงข้อดีคือไม่จำเป็นต้องทำการปรับแต่งสัญญาณเพื่อหาจุดการทำงานที่เหมาะสมให้แก่วงจร ทำให้โครงสร้างของวงจรมีขนาดเล็กและปราศจากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความถี่คลื่นพาห์



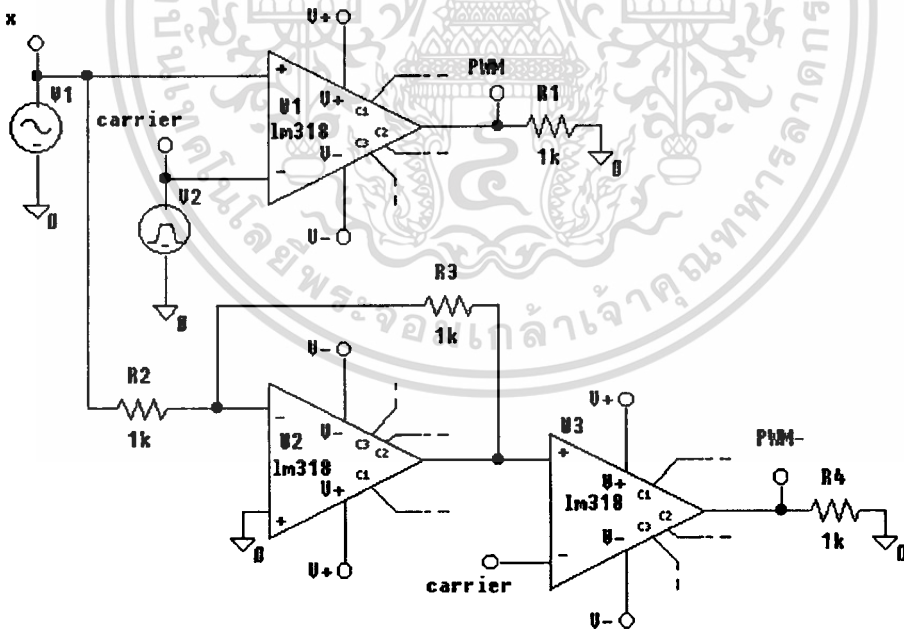
## บทที่ 5

### การทดลองและผลการทดลอง

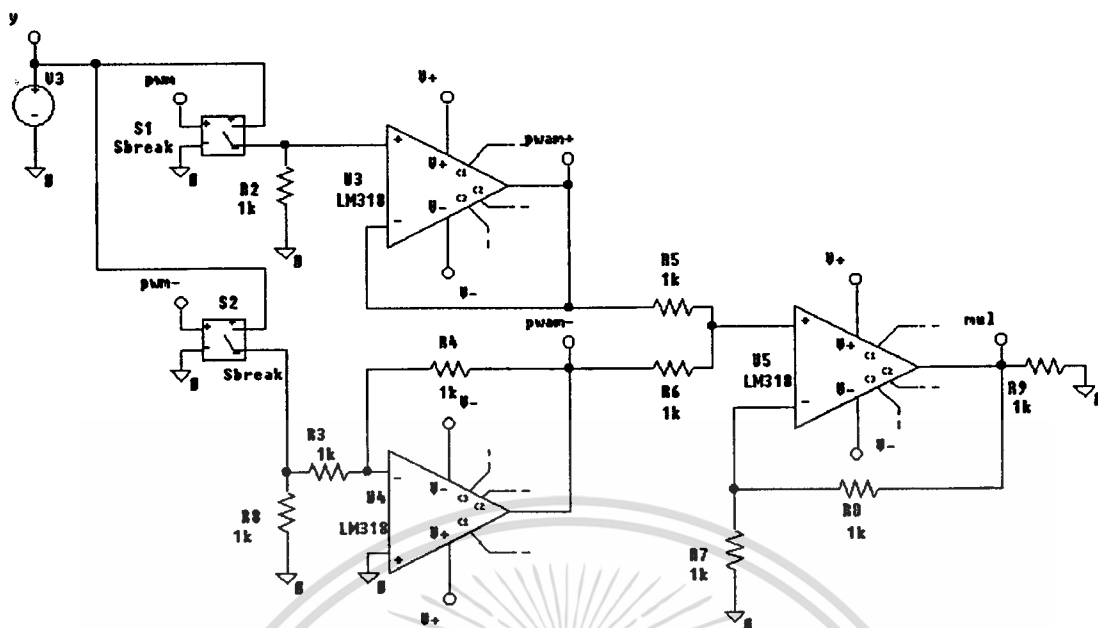
#### 5.1 วงจรคุณสัญญาณ 4 ควอดแรนต์ ที่นำเสนอ โครงสร้างที่ 1

##### 5.1.1 การทดลองโดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE

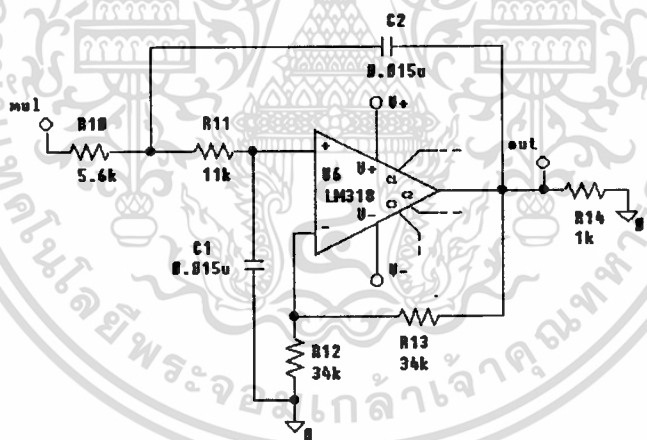
ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดลองการทำงานของวงจรที่ได้ออกแบบไว้ ในหัวข้อที่ 4.2 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เพื่อเป็นการยืนยันผลการทำงานของวงจรที่ออกแบบไว้ โดยอาศัยโครงสร้างของวงจรในรูปที่ 4.2 สามารถออกแบบวงจรได้เป็นส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และในการทดลองเรากำหนดให้แรงดันไฟเลี้ยงของวงจรมีค่าเท่ากับ  $\pm 5V$  , สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่ใช้ทำหน้าที่เป็นคลื่นพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลตความกว้างของพัลส์ มีความถี่เท่ากับ 10 kHz และ วงจรกรองความถี่ต่ำเป็นแบบบัตเตอร์เวิร์ธ อันดับที่ 2 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 1.2 kHz



5.1(ก)



5.1(ข)

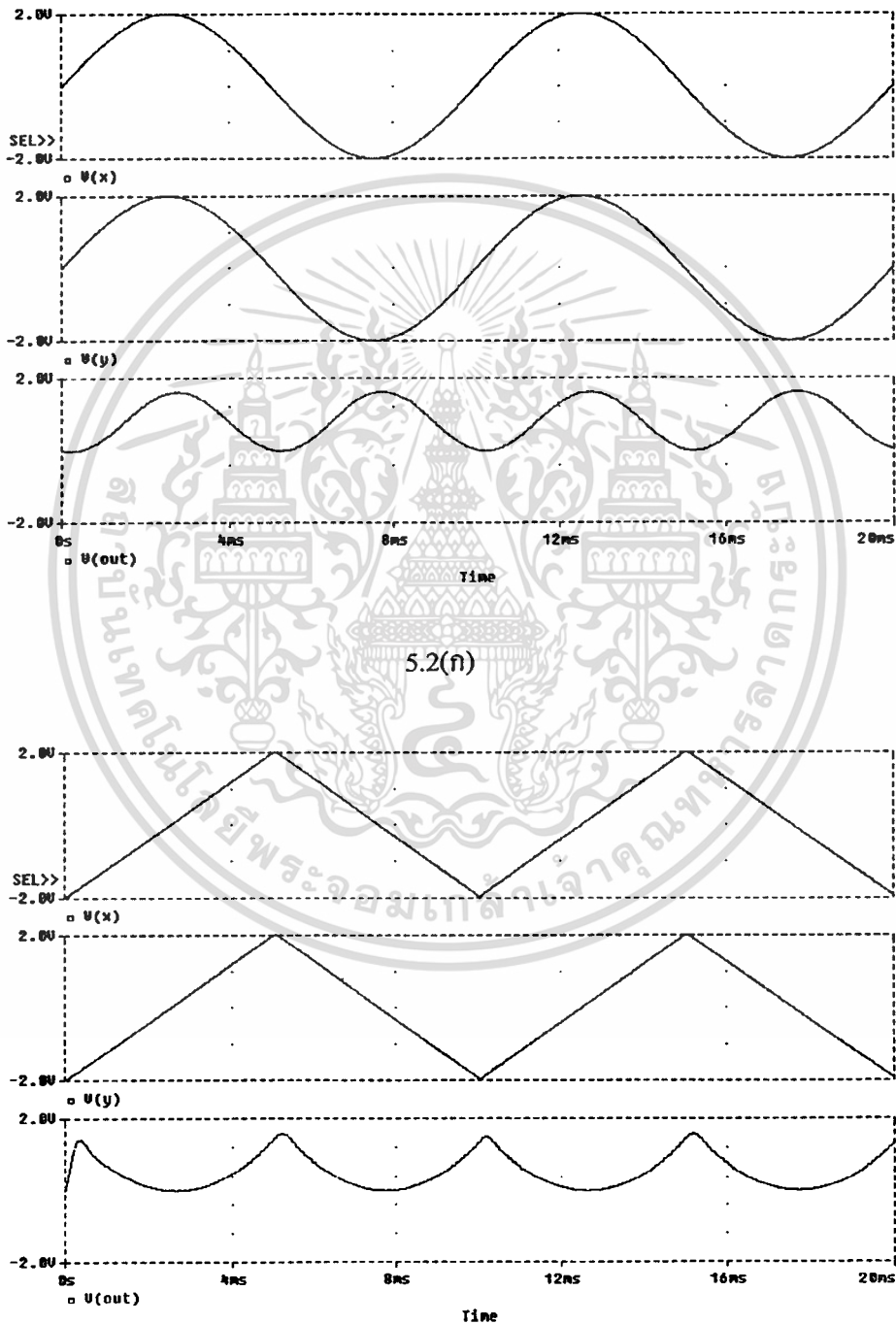


5.1(ค)

รูปที่ 5.1 วงจรคูณสัญญาณ 4 ควอดแรนต์ โครงสร้างที่ 1 (ก)วงจรมอดูลความกว้างของพัลส์และ ส่วนกลับของสัญญาณ (ข)วงจรชั้ค่าตัวอย่างสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณ (ค)วงจรรองความถี่ต่ำแบบบัทเตอร์เวิร์ธ อันดับที่ 2 ความถี่คัทออฟ 1.2 kHz

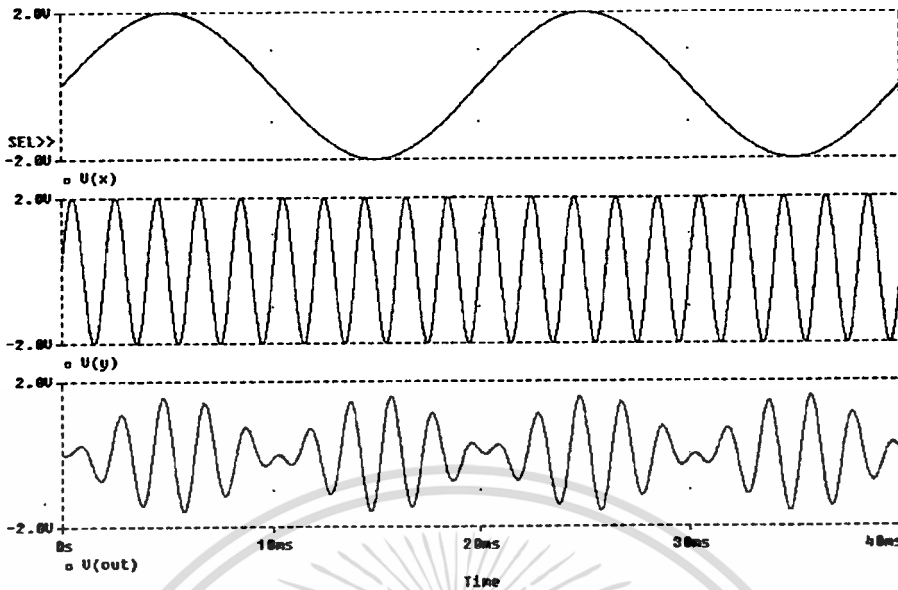
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการทดลองโดยการป้อนสัญญาณอินพุต  $x(t)$  และ  $y(t)$  เป็นสัญญาณตัวเดียวกัน 2 รูปแบบคือคลื่นรูปไซน์และสามเหลี่ยม มีความถี่ 100 Hz ผลที่ได้ออกมาอยู่ในรูปยกกำลังสองดังแสดงในรูปที่ 5.2(ก) และ 5.2(ข) จากนั้นทำการป้อนสัญญาณอินพุตที่มีความถี่ต่างกัน 10 เท่าโดยที่  $x(t) = 50$  Hz และ  $y(t) = 500$  Hz ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 5.2(ค)



5.2(ข)

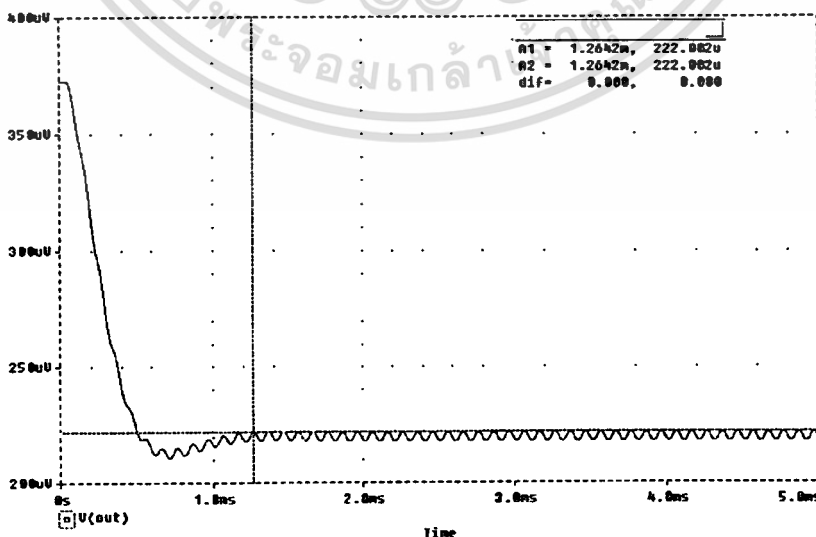
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5.2(ค)

รูปที่ 5.2 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตในรูปแบบต่างๆ (ก) ผลคูณของสัญญาณอินพุตคลื่นรูปไซน์ (ข) ผลคูณของสัญญาณอินพุตคลื่นรูปสามเหลี่ยม (ค) ผลคูณของสัญญาณอินพุตคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่ต่างกัน 10 เท่า

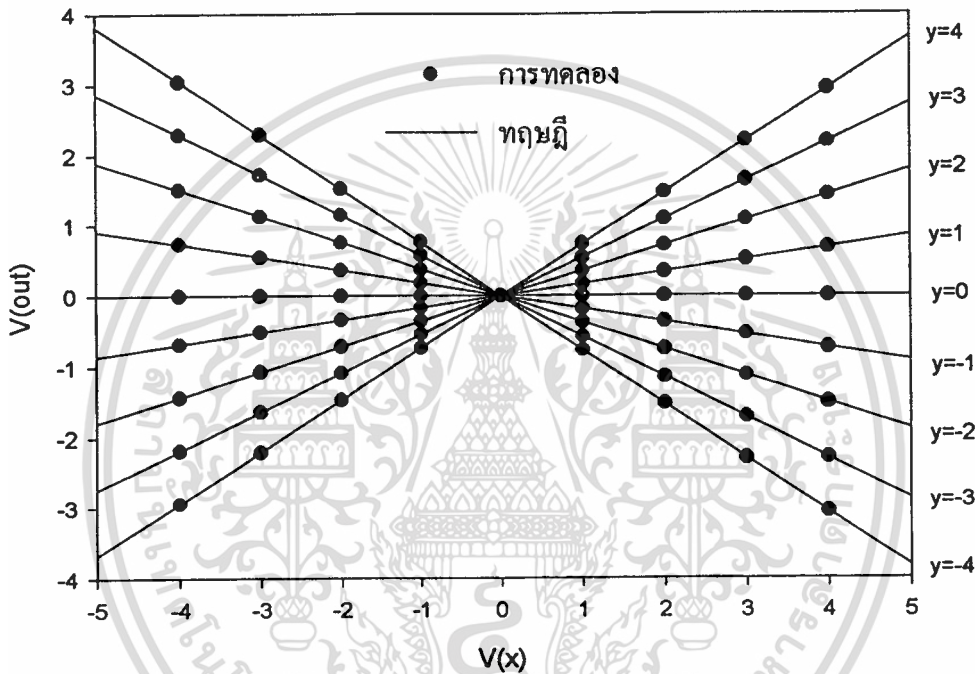
ทำการวิเคราะห์ค่าแรงดันออฟเซต(dc Offset) ของวงจร โดยการต่อสัญญาณอินพุต  $x(t)$  และ  $y(t)$  มีขนาด ศูนย์ โวลต์ ผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ค่าแรงดันออฟเซตของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

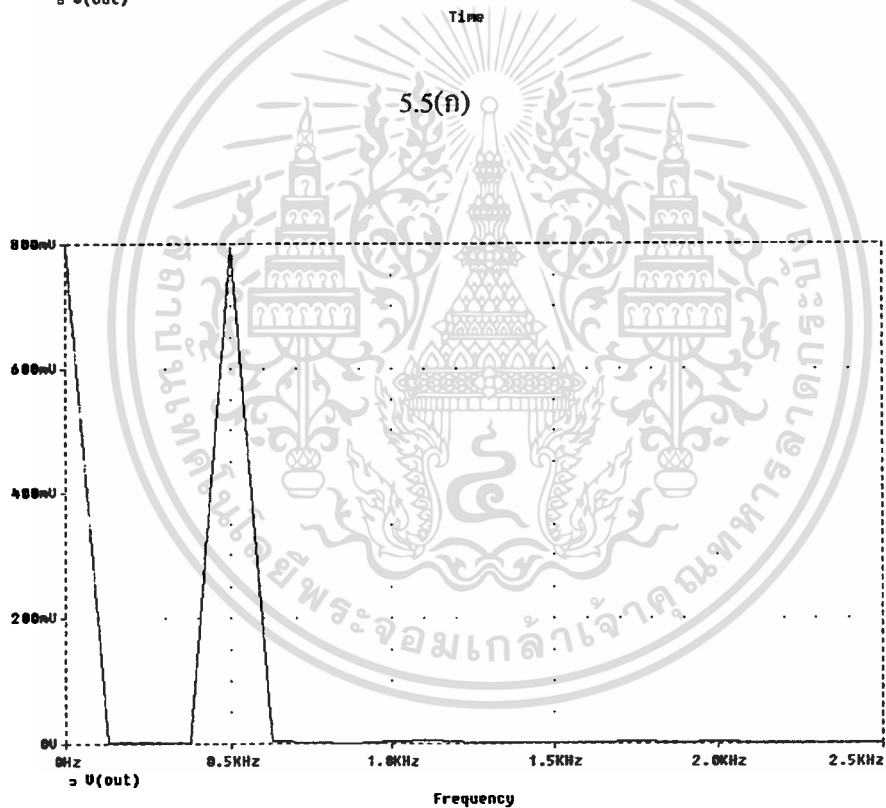
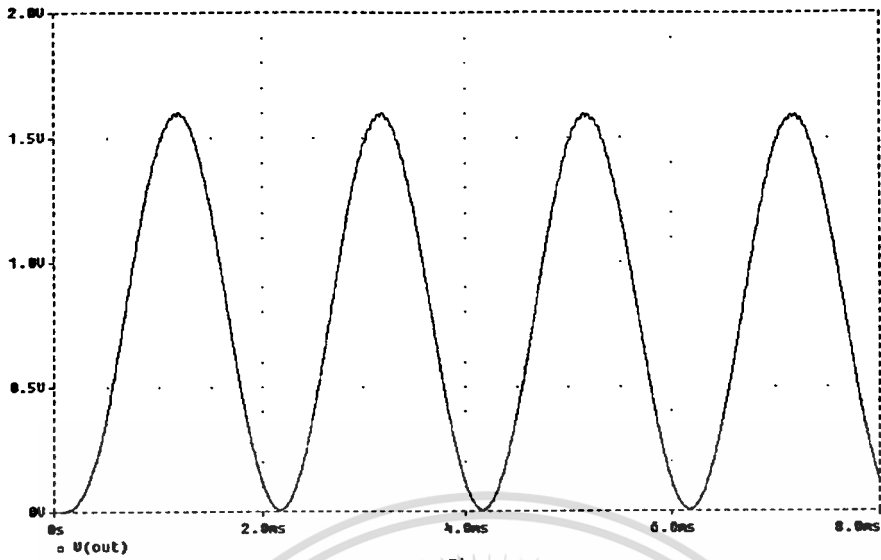
ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติการตอบสนองต่อสัญญาณไฟกระแสดตรงโดยการป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไฟกระแสดตรง ทำการปรับแรงดันอินพุต  $v_x$  จาก  $-4V$  ถึง  $4V$  และปรับ  $v_y$  จาก  $-4V$  ถึง  $4V$  ครั้งละ  $1V$  ผลที่ได้พบว่าวงจรสามารถรับสัญญาณอินพุตขนาดใหญ่ได้และมีช่วงการปฏิบัติงานได้กว้างถึง 80 % เมื่อเทียบกับขนาดของไฟเลี้ยงที่จ่ายให้แก่วงจร และผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE

ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติการตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตเมื่อมีการเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM โดยการป้อนสัญญาณอินพุต  $x(t)$  และ  $y(t)$  เป็นสัญญาณตัวเดียวกันคือสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 250 Hz มีขนาด 2 โวลต์ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะอยู่ในรูปของสัญญาณ ไซน์ที่ถูกยกกำลังสองและความถี่ที่ได้จะมีค่าเป็นสองเท่าของสัญญาณอินพุตทำการทดลองโดยปรับความถี่ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM จาก 10 kHz ถึง 50 kHz ครั้งละ 10 kHz จากผลการทดลองพบว่าวงจรยังคงสามารถทำงานได้ ผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.5 – 5.9 และความสัมพันธ์ระหว่าง %THD ของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้กับความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการ มอดูเลท PWM แสดงไว้ในรูปที่ 5.10

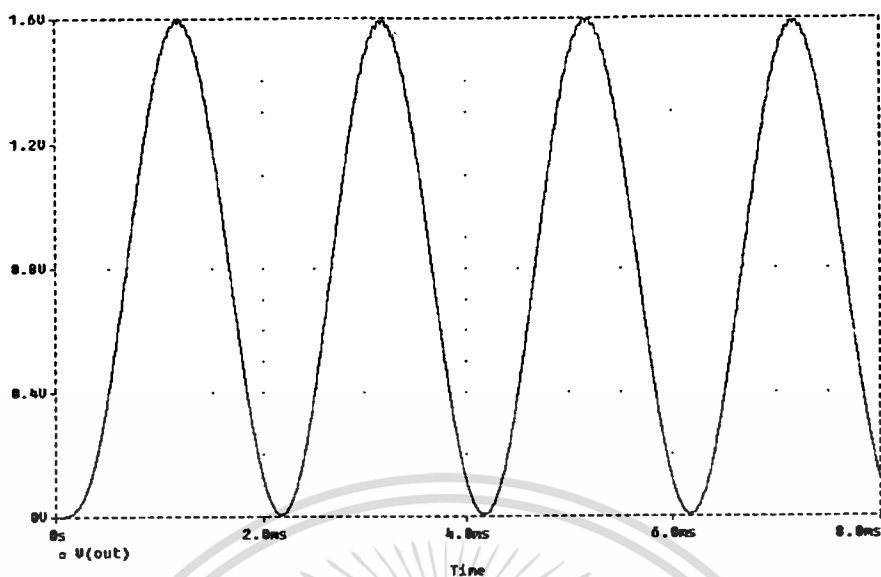
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



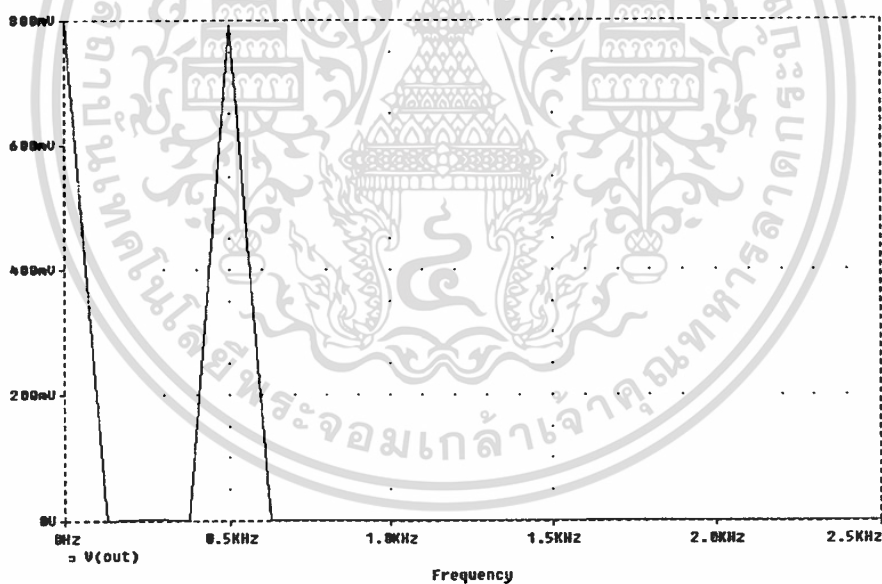
5.5(ข)

รูปที่ 5.5 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลต PWM = 10 kHz (ก) สัญญาณเอาต์พุต (ข) สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



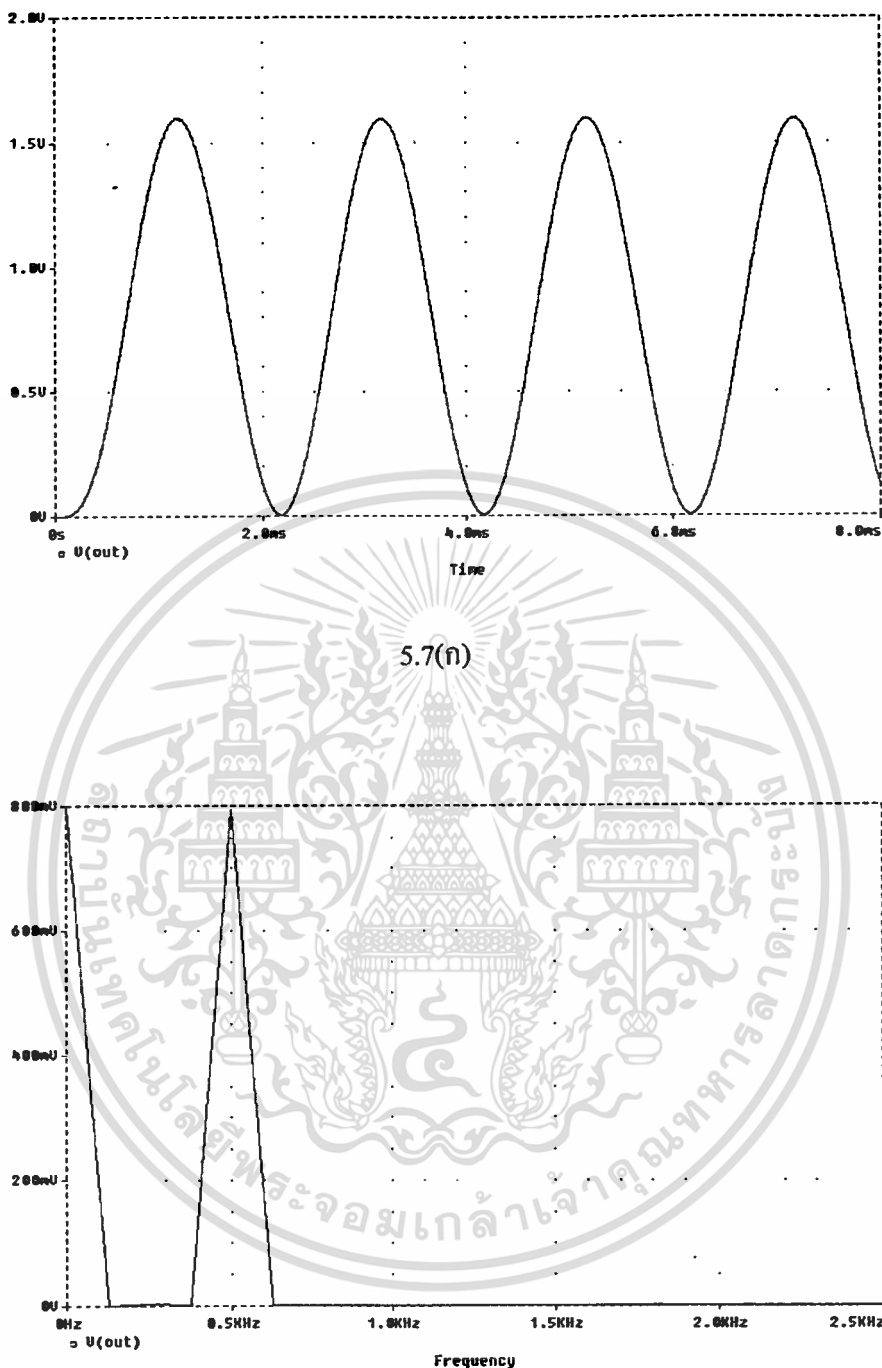
5.6(ก)



5.6(ข)

**รูปที่ 5.6 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลต  $PWM = 20 \text{ kHz}$**   
**(ก) สัญญาณเอาต์พุต (ข) สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต**

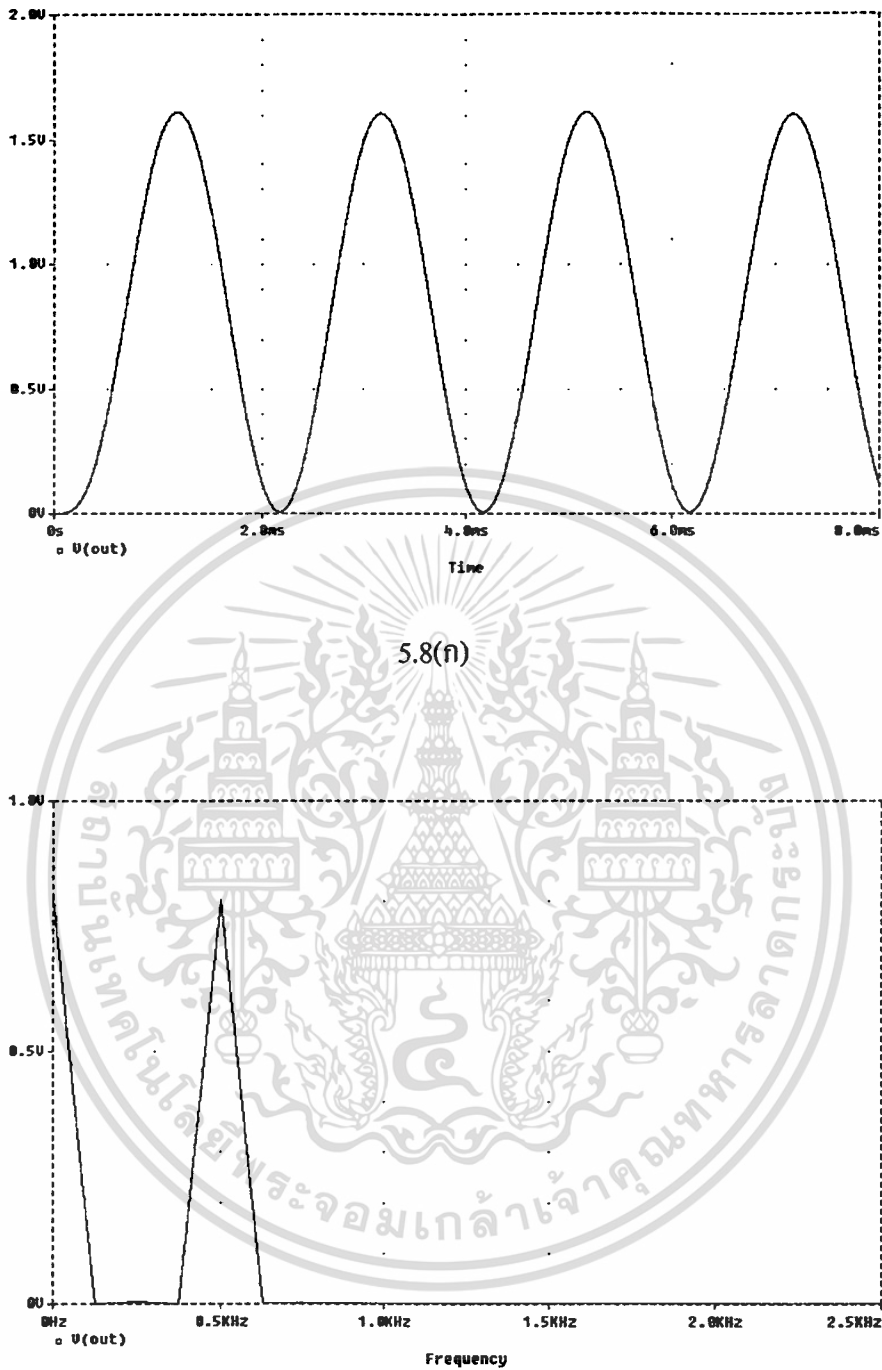
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5.7(ข)

รูปที่ 5.7 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลต  $PWM = 30 \text{ kHz}$   
 (ก) สัญญาณเอาต์พุต (ข) สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

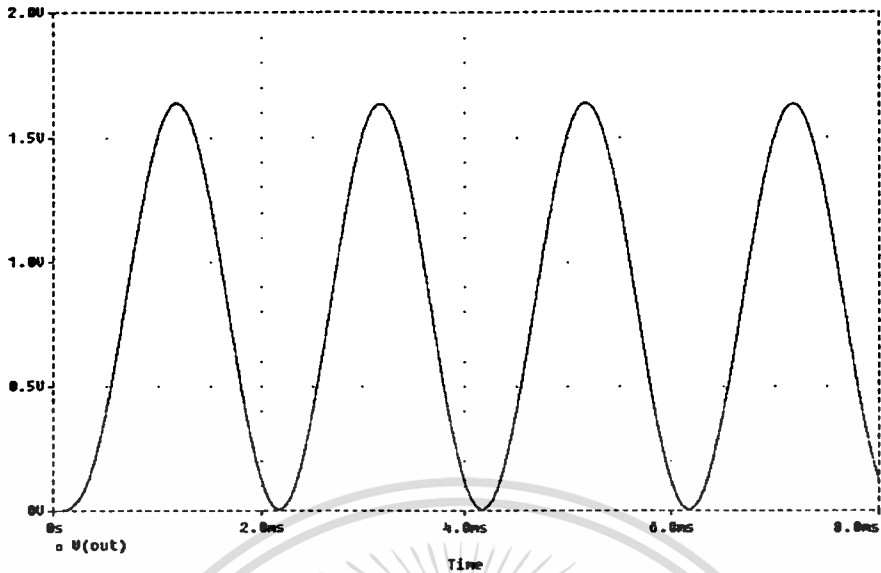
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



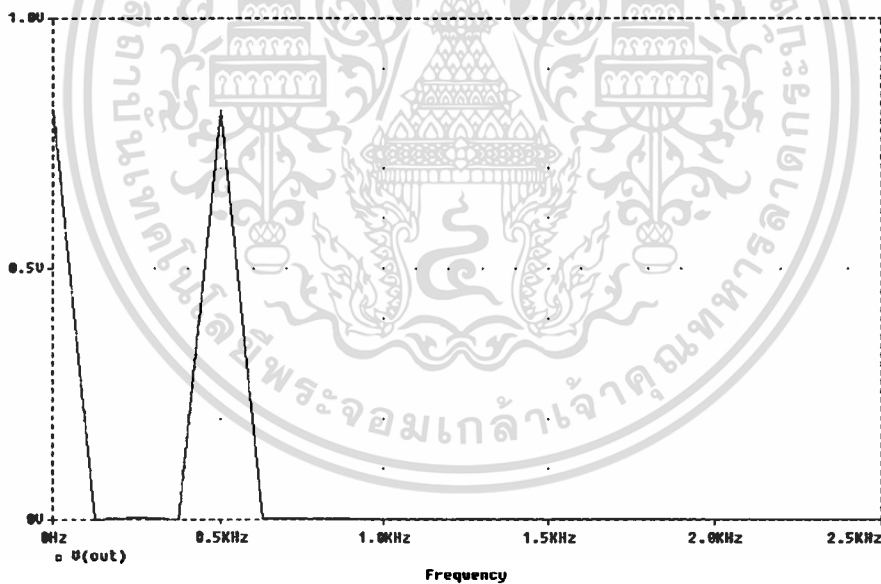
5.8(ข)

**รูปที่ 5.8 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลต  $PWM = 40 \text{ kHz}$  (ก) สัญญาณเอาต์พุต (ข) สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



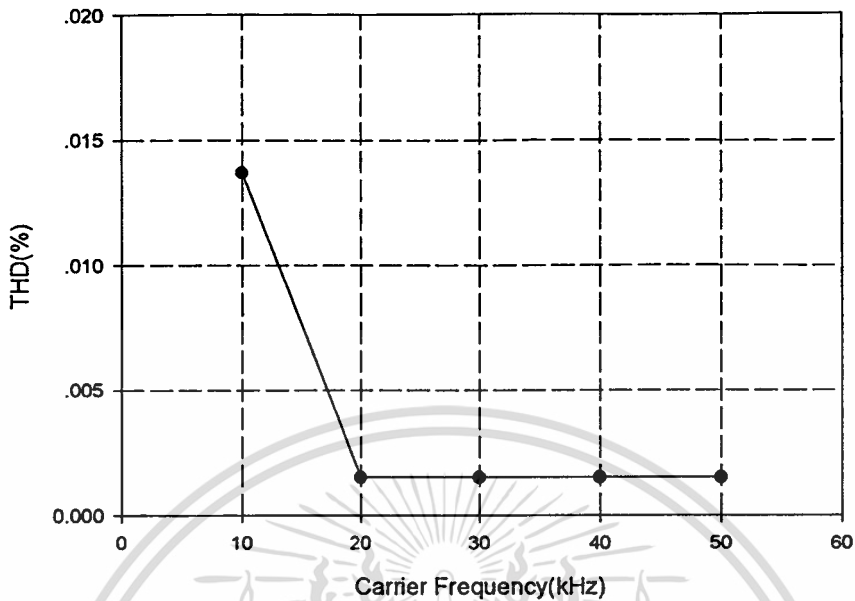
5.9(ก)



5.9(ข)

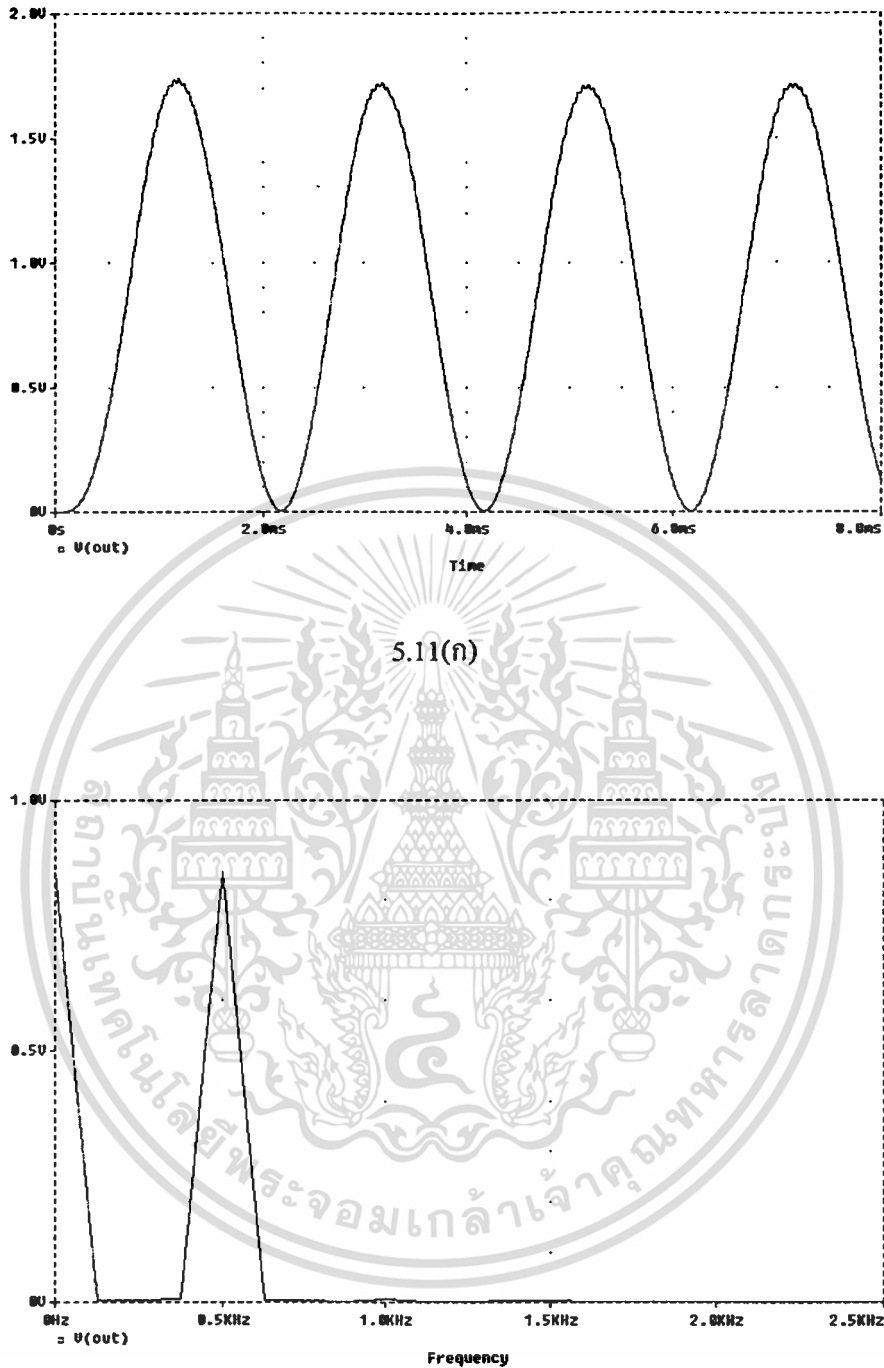
รูปที่ 5.9 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลต  $PWM = 50 \text{ kHz}$   
 (ก) สัญญาณเอาต์พุต (ข) สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %THD กับความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลต PWM ของวงจรถูก โครงสร้างที่ 1 โดยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE

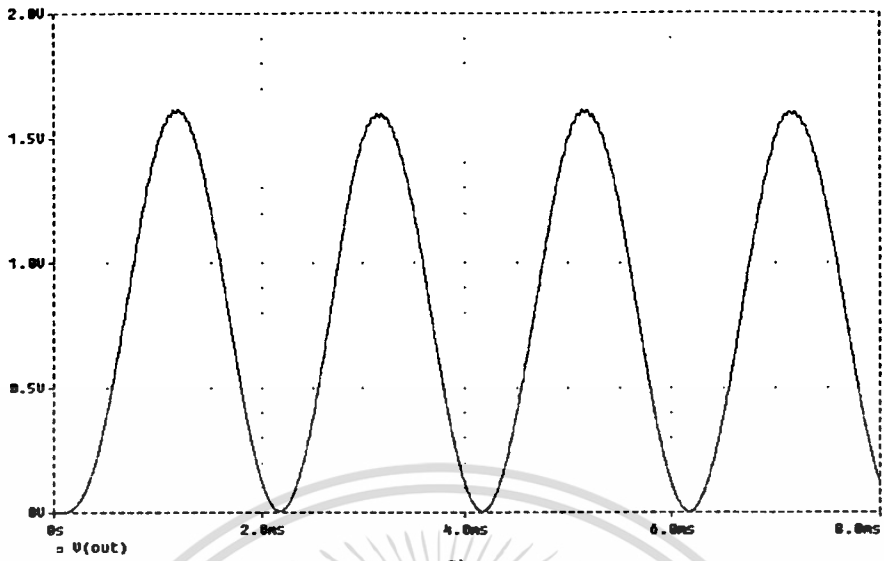
ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติการตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุต เมื่อมีการเปลี่ยนมอดูเลชันอินเด็คซ์ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลต PWM โดยการป้อนสัญญาณอินพุต  $x(t)$  และ  $y(t)$  เป็นสัญญาณตัวเดียวกันคือสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 250 Hz มีขนาด 2 โวลต์ ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลต PWM มีความถี่เท่ากับ 10 kHz สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะอยู่ในรูปสัญญาณไซน์ที่ถูกยกกำลังสองและความถี่ที่ได้จะมีค่าเป็นสองเท่าของสัญญาณอินพุต จากนั้นทำการปรับค่ามอดูเลชันอินเด็คซ์ จาก 30 % ถึง 70 % จากผลการทดลองพบว่าวงจรยังคงสามารถทำงานได้ถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนค่ามอดูเลชันอินเด็คซ์ ส่วนของผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.11 – 5.15 และความสัมพันธ์ระหว่าง %THD ของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้กับค่ามอดูเลชันอินเด็คซ์ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลต PWM แสดงไว้ในรูปที่ 5.16



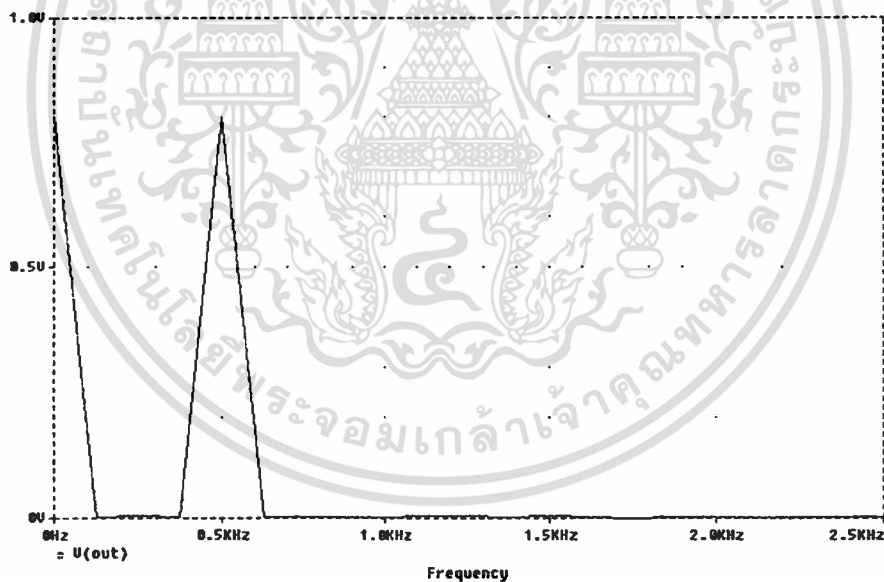
5.11(ข)

**รูปที่ 5.11 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้มอดูเลชันอินดิเคซ์ในการมอดูเลต PWM = 30 % (ก) สัญญาณเอาต์พุต (ข) สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



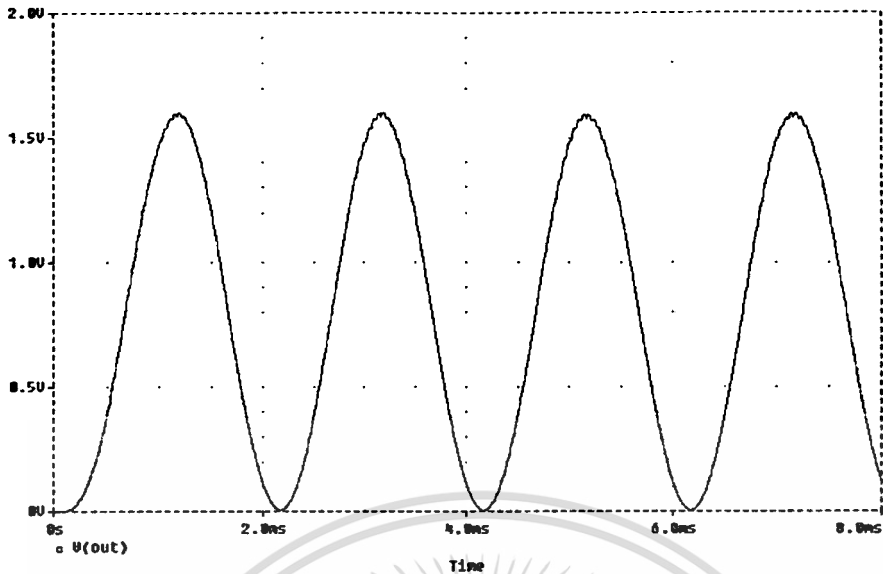
5.12(ก)



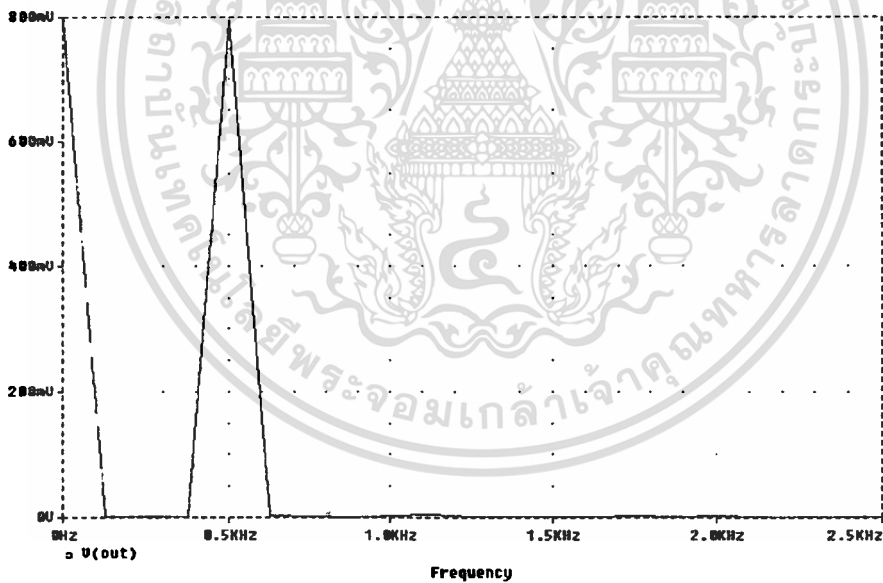
5.12(ข)

รูปที่ 5.12 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้มอดูเลชันอินดิเคซ์ในการมอดูเลต PWM = 40 % (ก) สัญญาณเอาต์พุต (ข) สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



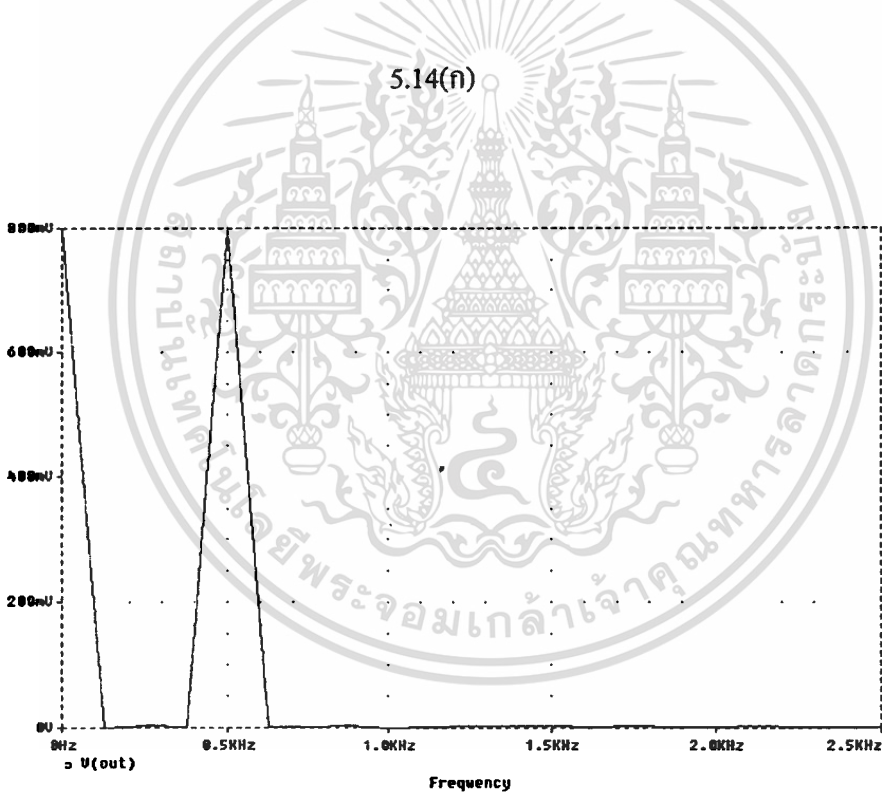
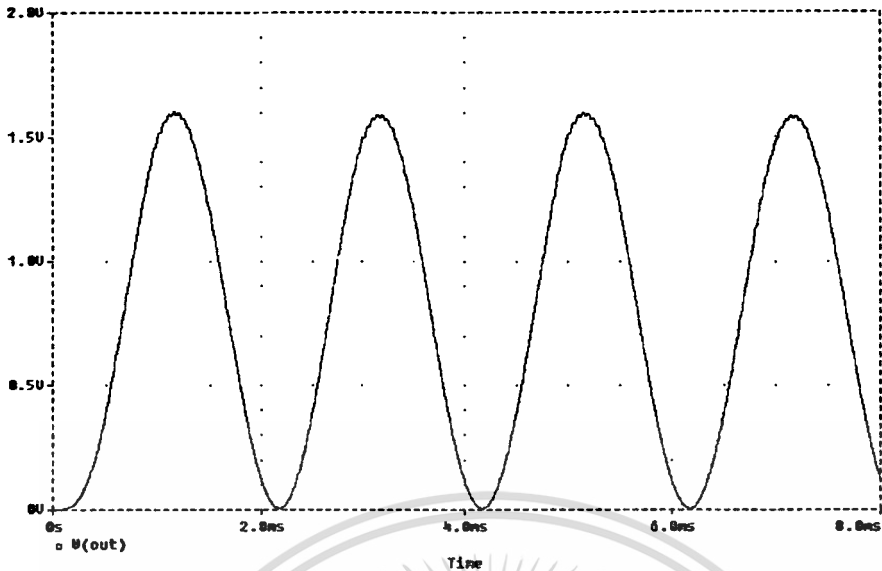
5.13(ก)



5.13(ข)

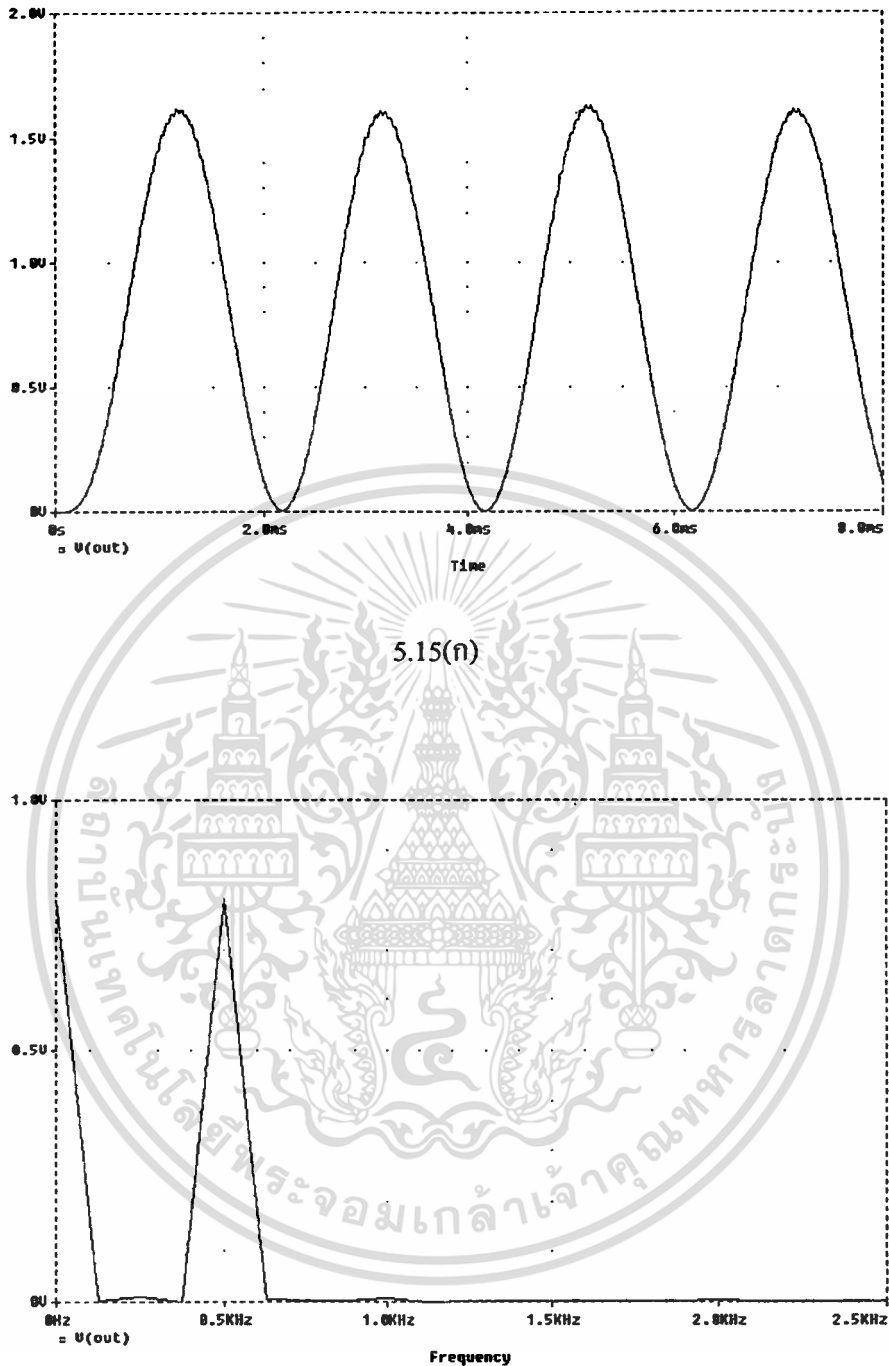
รูปที่ 5.13 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้มอดูเลชันอินดิเคซ์ในการมอดูเลต PWM = 50 % (ก) สัญญาณเอาต์พุต (ข) สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5.14(ข)

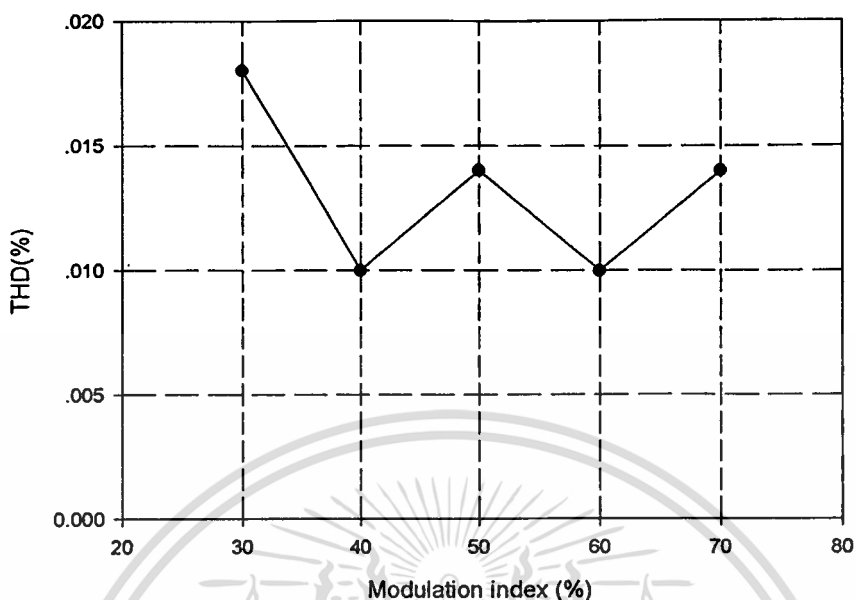
รูปที่ 5.14 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้มอดูเลชันอินดิเคชันในการมอดูเลท PWM = 60 % (ก) สัญญาณเอาต์พุต (ข) สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต



5.15(ข)

**รูปที่ 5.15** ผลการทดลองของวงจรชุด โครงสร้างที่ 1 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้มอดูเลชันอินดิเคชันในการมอดูเลท PWM = 70 % (ก) สัญญาณเอาต์พุต (ข) สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

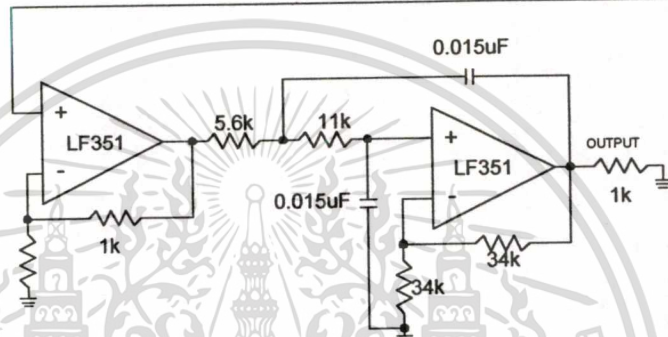
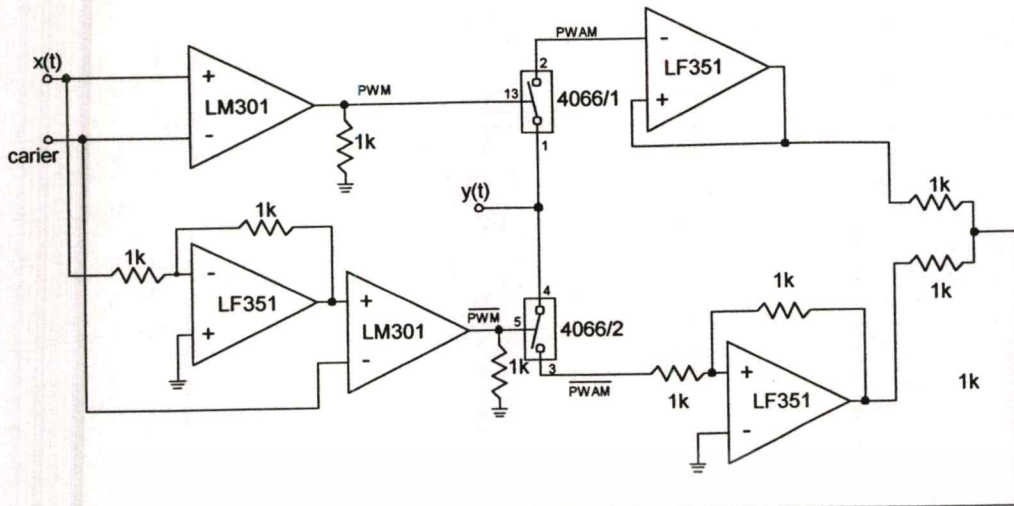


รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %THD กับดัชนีการมอดูเลท ของ PWM ของวงจรถูก  
โครงสร้างที่ 1 ทำการทดลองโดยการเขียนแบบด้วยโปรแกรม PSPICE

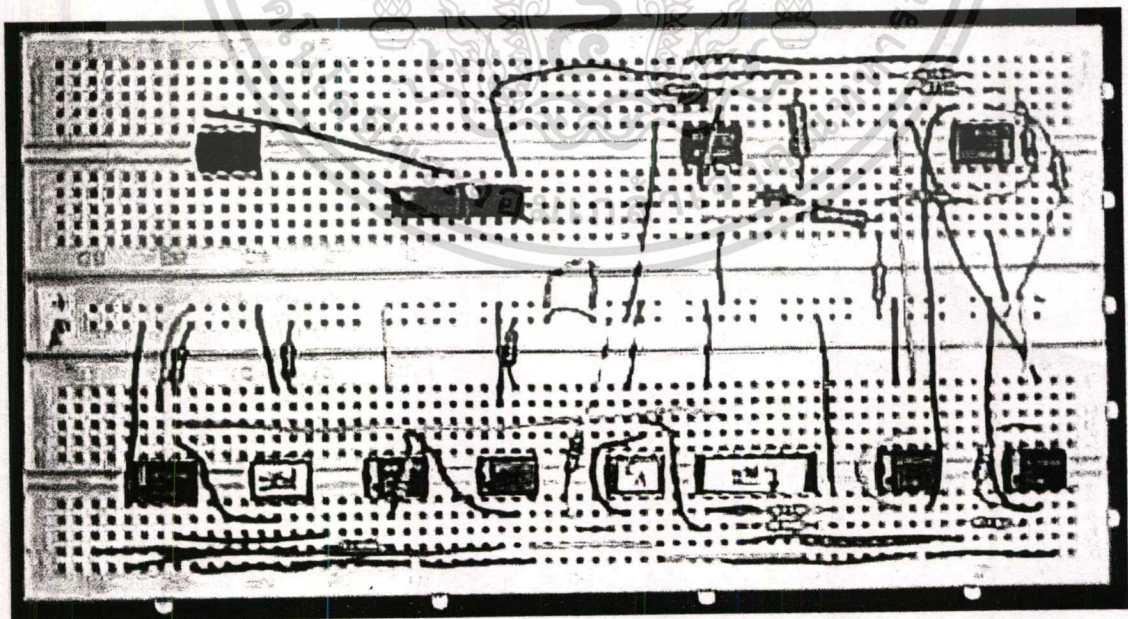
### 5.1.2 การทดลองโดยการต่อวงจรจริง

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดลองการทำงานของวงจรถูกที่ได้ทำการออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 4.2 โดยการต่อวงจรจริง เพื่อเป็นการยืนยันผลการทำงานของวงจรถูกที่ออกแบบไว้ โดยอาศัยโครงสร้างของวงจรถูกในรูปที่ 4.2 และวงจรถูกที่ออกแบบไว้ในรูปที่ 5.1 โดยในส่วนของวงจรถูกมอดูเลทความกว้างของพัลส์ ใช้โอปแอมป์ เบอร์ LM301 ส่วนวงจรถูกกลับเฟสสัญญาณและวงจรถูกรวมสัญญาณใช้โอปแอมป์ เบอร์ LF351 และไอซีที่ทำหน้าที่ในการชักราค่าตัวอย่างสัญญาณ ใช้ไอซีเบอร์ 4066 โดยที่วงจรถูกที่ใช้ทำการทดลองของวงจรถูกที่นำเสนอในโครงสร้างที่ 1 แสดงไว้ในรูปที่ 5.17 และ ในส่วนของอุปกรณ์และบอร์ดที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 5.18

จากนั้นทำการกำหนดค่าให้แรงดันไฟเลี้ยงของวงจรถูกมีค่าเท่ากับ  $\pm 5V$  , สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่ใช้ทำหน้าที่เป็นคลื่นพาห้ที่ใช้ในการมอดูเลทความกว้างของพัลส์ มีความถี่เท่ากับ 10 kHz และ วงจรถูก ความถี่ต่ำเป็นแบบบัคเคอร์เวิร์ท อันดับที่ 2 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 1.2 kHz



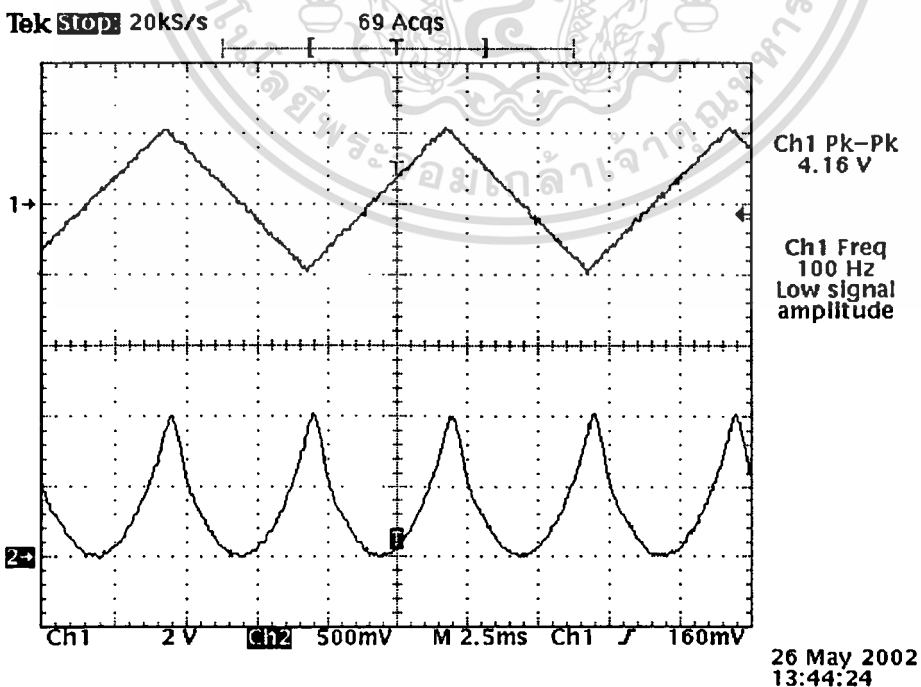
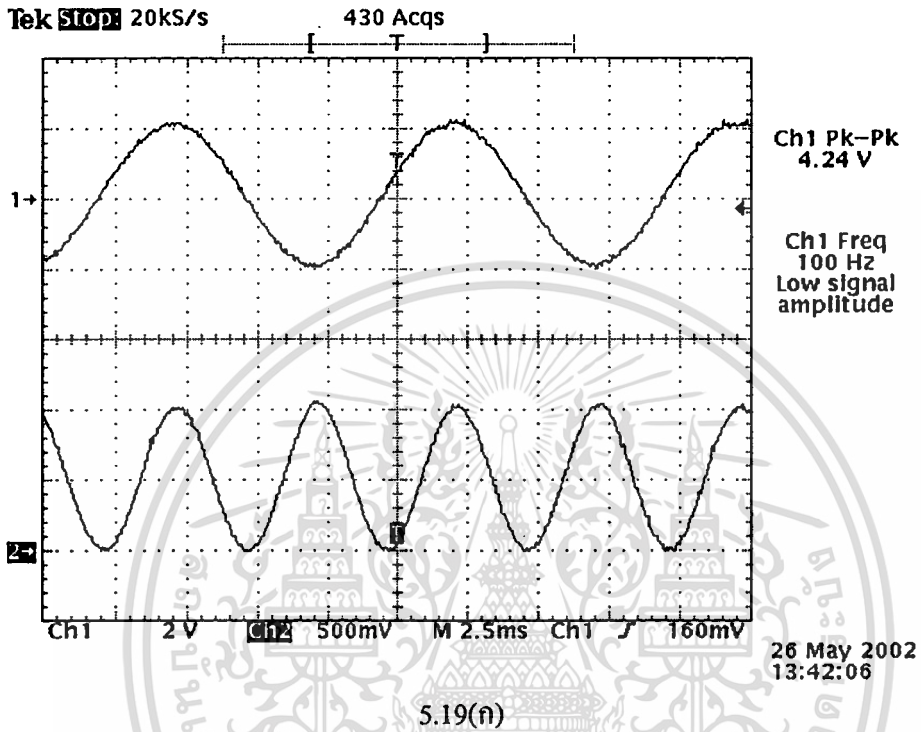
รูปที่ 5.17 วงจรสมบูรณของวงจรคุณที่อาศัยหลักการ PWAM ที่นำเสนอ โครงสร้างที่ 1



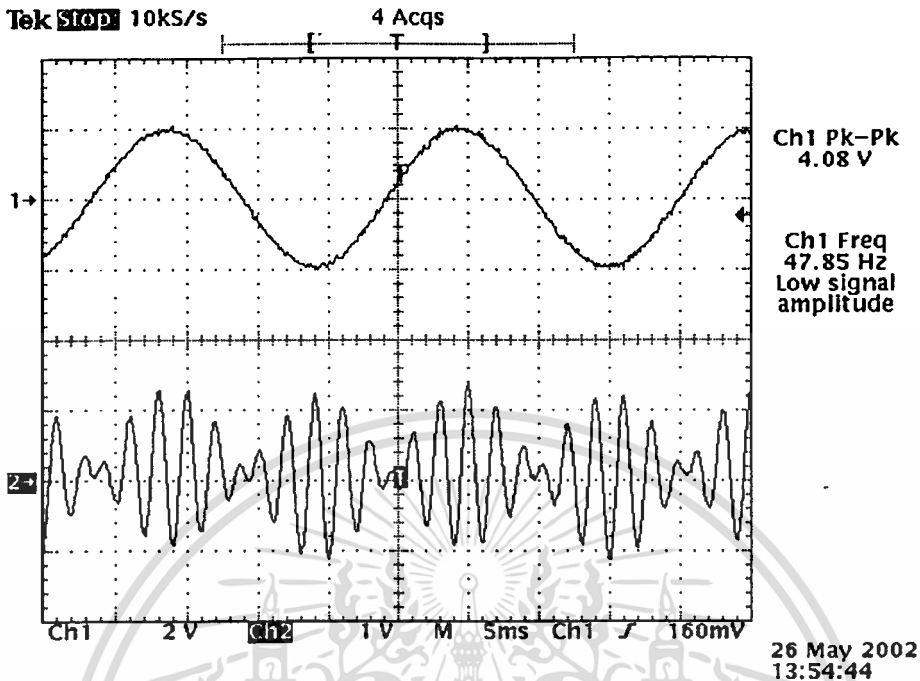
รูปที่ 5.18 อุปกรณ์และบอร์ดที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการทดลองโดยการป้อนสัญญาณอินพุต  $x(t)$  และ  $y(t)$  เป็นสัญญาณตัวเดียวกัน 2 รูปแบบคือคลื่นรูปไซน์และสามเหลี่ยม มีความถี่ 100 Hz ผลที่ได้ออกมาอยู่ในรูปยกกำลังสองดังแสดงในรูปที่ 5.19(ก) และ 5.19(ข) จากนั้นทำการป้อนสัญญาณอินพุตที่มีความถี่ต่างกัน 10 เท่าโดยที่  $x(t) = 50$  Hz และ  $y(t) = 500$  Hz ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 5.17(ค)



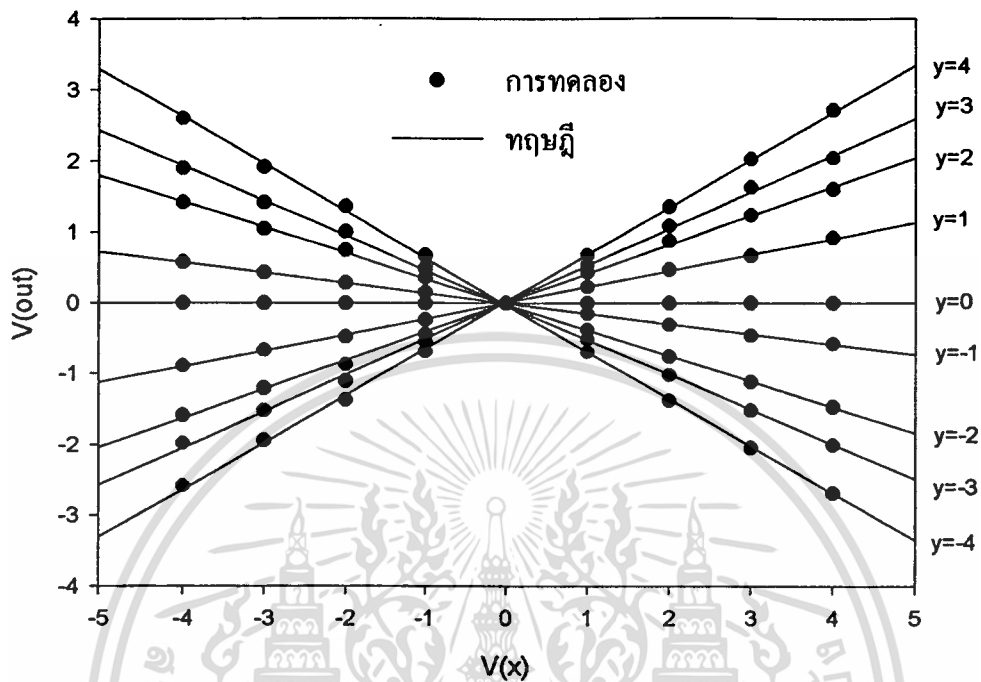
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5.19(ค)

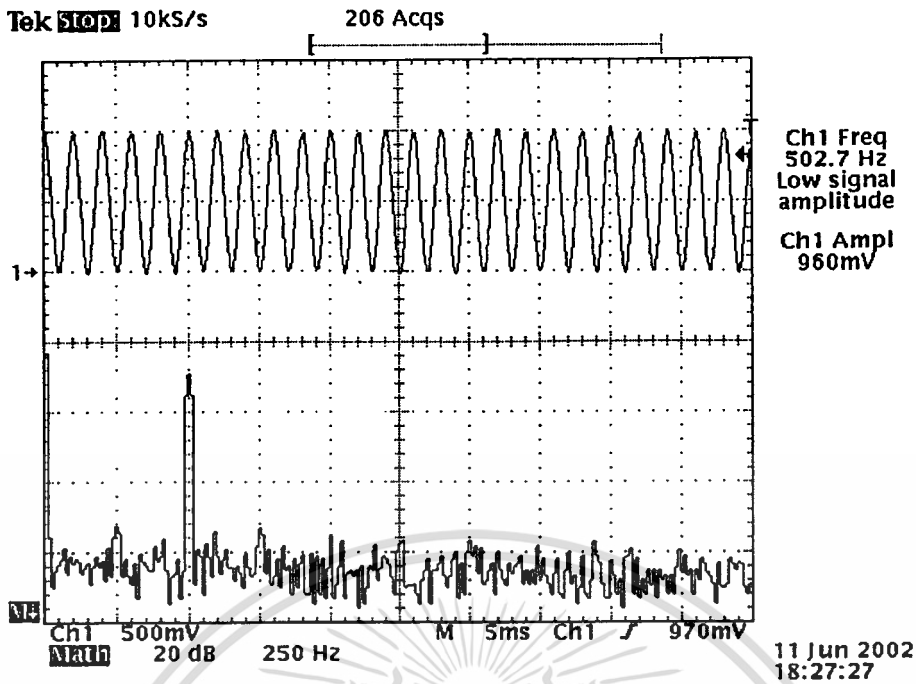
รูปที่ 5.19 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตในรูปแบบต่างๆ (ก) ผลคูณของสัญญาณอินพุตคลื่นรูปไซน์ (ข) ผลคูณของสัญญาณอินพุตคลื่นรูปสามเหลี่ยม (ค) ผลคูณของสัญญาณอินพุตคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่ต่างกัน 10 เท่า โดยที่สัญญาณช่องที่ 1 คือสัญญาณอินพุต และ สัญญาณช่องที่ 2 คือ สัญญาณเอาต์พุต

ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติการตอบสนองต่อสัญญาณไฟกระแสดตรงโดยการป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไฟกระแสดตรง ทำการปรับแรงดันอินพุต  $v_x$  จาก  $-4V$  ถึง  $4V$  และปรับ  $v_y$  จาก  $-4V$  ถึง  $4V$  ครั้งละ  $1V$  ผลที่ได้พบว่าวงจรคูณสามารถรับสัญญาณอินพุตขนาดใหญ่ได้และมีช่วงการปฏิบัติงานได้กว้างถึง 80 % เมื่อเทียบกับขนาดของไฟเลี้ยงที่จ่ายให้แก่วงจร และผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.20

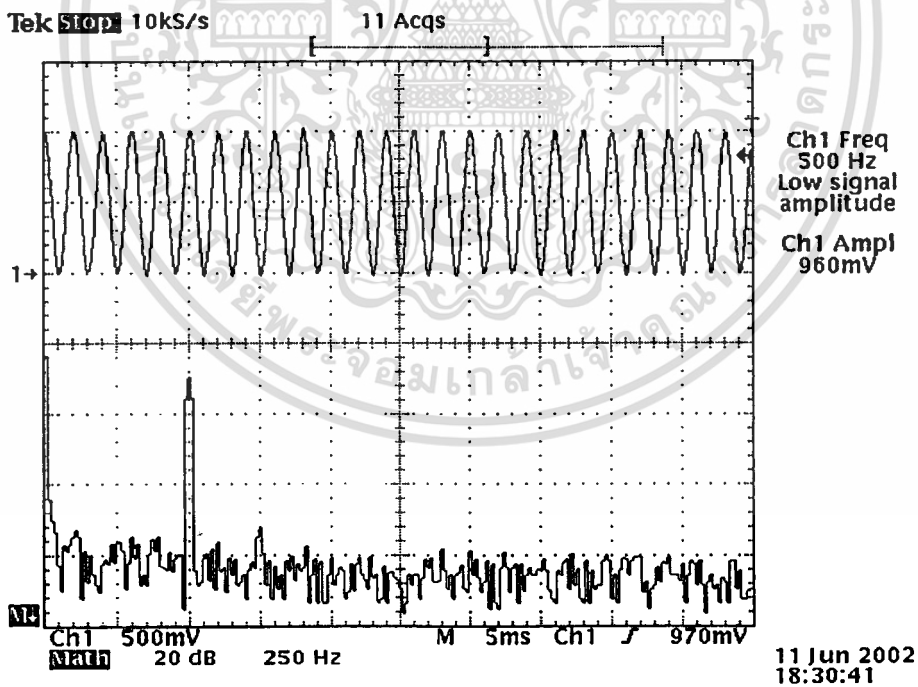


รูปที่ 5.20 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรจริง

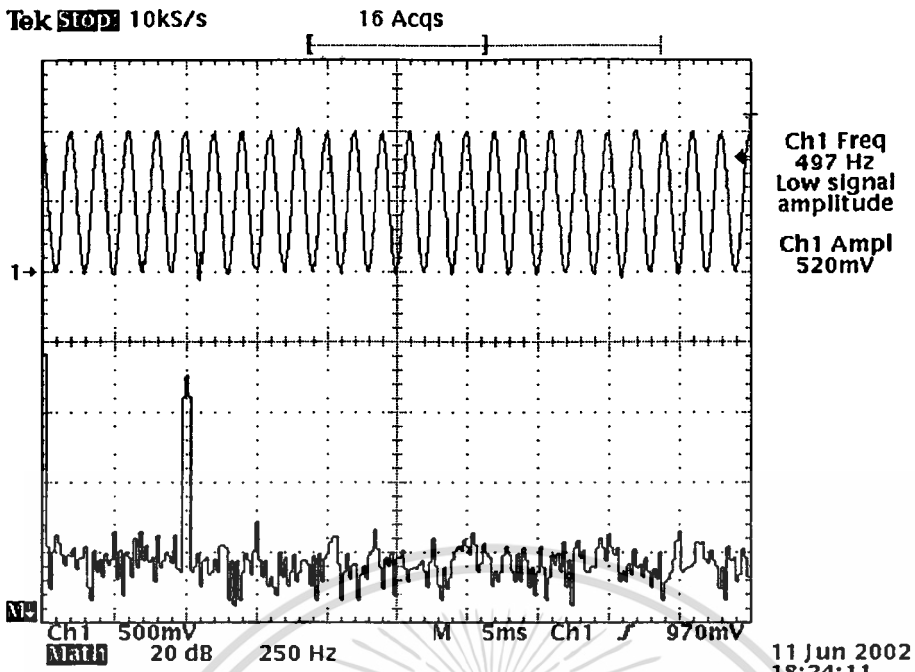
ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติการตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตเมื่อมีการเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณพาที่ใช้ในการมอดูเลท PWM โดยการป้อนสัญญาณอินพุต  $x(t)$  และ  $y(t)$  เป็นสัญญาณตัวเดียวกันคือสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 250 Hz มีขนาด 2 โวลต์ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะอยู่ในรูปสัญญาณไซน์ที่ถูกยกกำลังสองและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าเป็นสองเท่าของสัญญาณอินพุต ทำการปรับความถี่ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM จาก 10 kHz ถึง 50 kHz ครึ่งละ 10 kHz จากผลการทดลองพบว่าวงจรยังคงสามารถทำงานได้ ผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.21 – 5.25 และความสัมพันธ์ระหว่าง %THD ของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้กับความถี่ของสัญญาณพาที่ใช้ในการ มอดูเลท PWM แสดงไว้ในรูปที่ 5.26



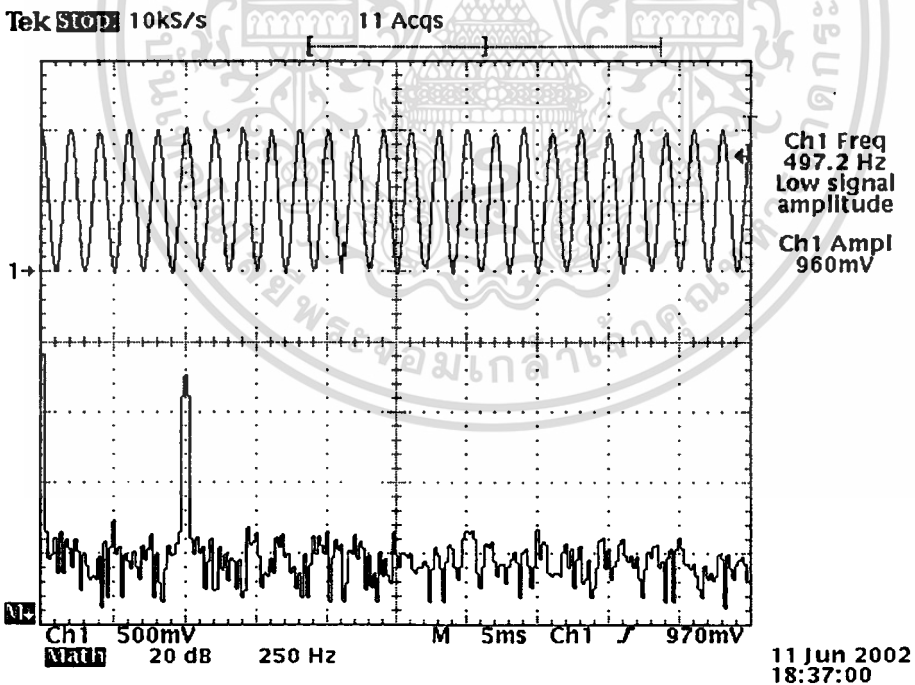
รูปที่ 5.21 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 10 kHz กราฟเส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุต และกราฟเส้นล่างคือสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต



รูปที่ 5.22 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 20 kHz กราฟเส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุต และกราฟเส้นล่างคือสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

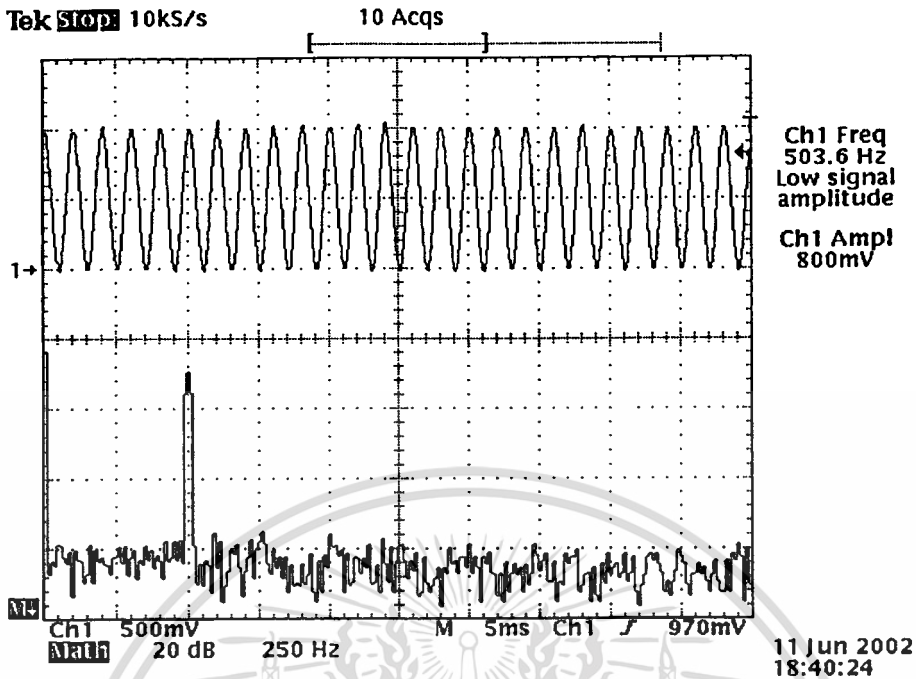


รูปที่ 5.23 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลต PWM = 30 kHz กราฟเส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุต และกราฟเส้นล่างคือสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

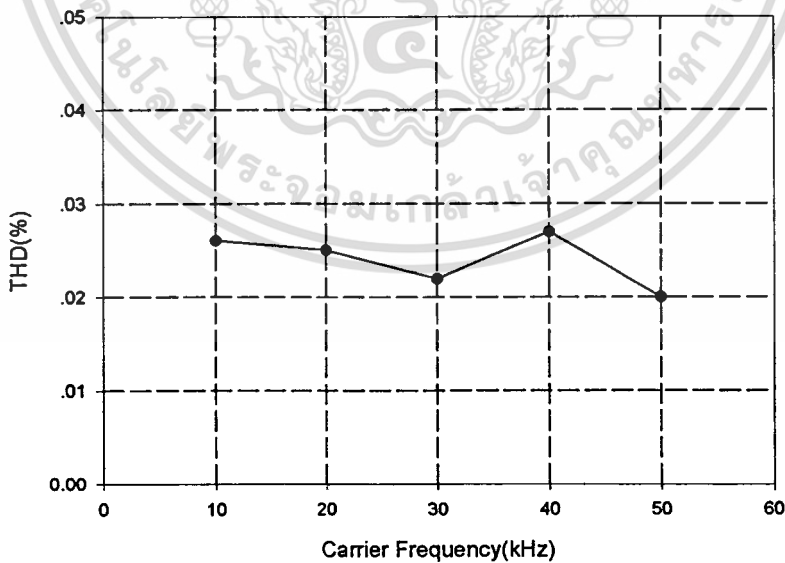


รูปที่ 5.24 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลต PWM = 40 kHz กราฟเส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุต และกราฟเส้นล่างคือสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



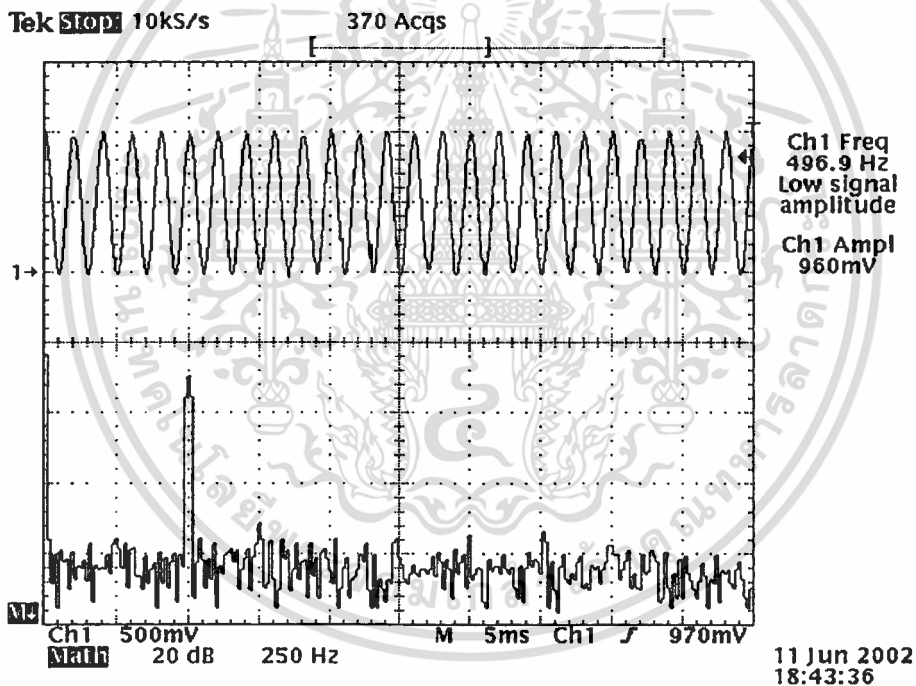
รูปที่ 5.25 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 50 kHz กราฟเส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุต และกราฟเส้นล่างคือสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต



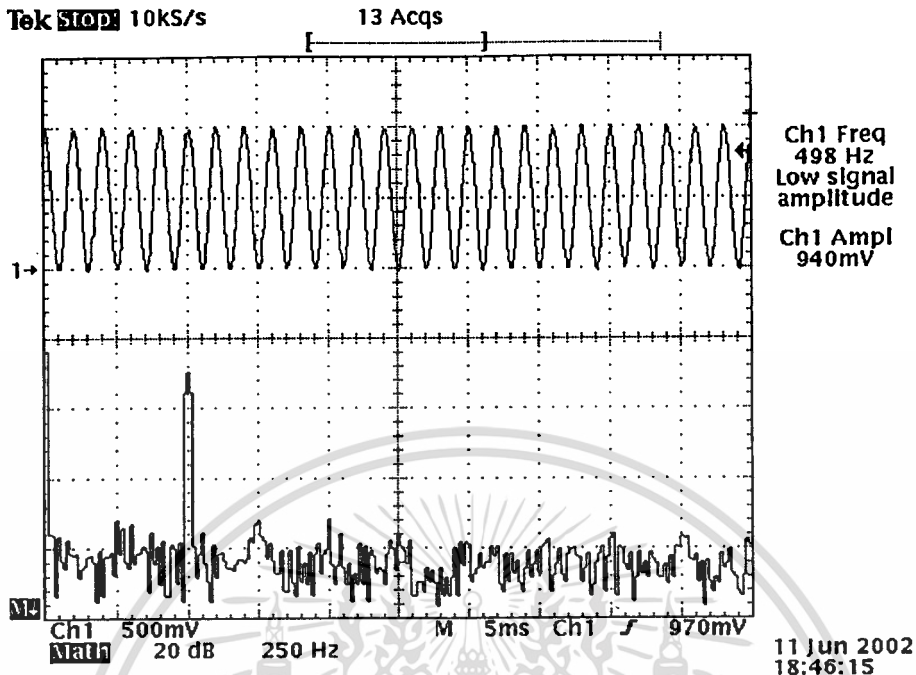
รูปที่ 5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %THD กับความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM ของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

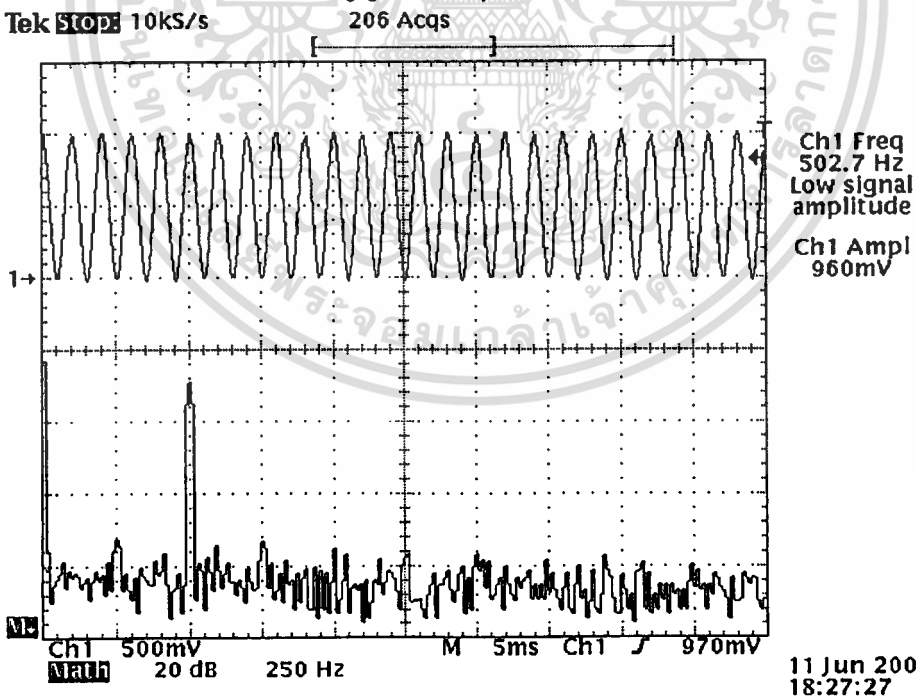
ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติการตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุต เมื่อมีการเปลี่ยนมอดูเลชันอินเด็คซ์ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM โดยการป้อนสัญญาณอินพุต  $x(t)$  และ  $y(t)$  เป็นสัญญาณตัวเดียวกันคือสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 250 Hz มีขนาด 2 โวลต์ ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM มีความถี่เท่ากับ 10 kHz สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะอยู่ในรูปสัญญาณไซน์ที่ถูกยกกำลังสองและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าเป็นสองเท่าของสัญญาณอินพุต จากนั้นทำการปรับค่ามอดูเลชันอินเด็คซ์ จาก 30 % ถึง 70 % จากผลการทดลองพบว่าวงจรยังคงสามารถทำงานได้ ในส่วนของผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.27 – 5.31 และความสัมพันธ์ระหว่าง %THD ของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้กับค่ามอดูเลชันอินเด็คซ์ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM แสดงไว้ในรูปที่ 5.32



รูปที่ 5.27 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้มอดูเลชันอินเด็คซ์ในการมอดูเลท PWM = 30 % กราฟเส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุตและกราฟเส้นล่างคือสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

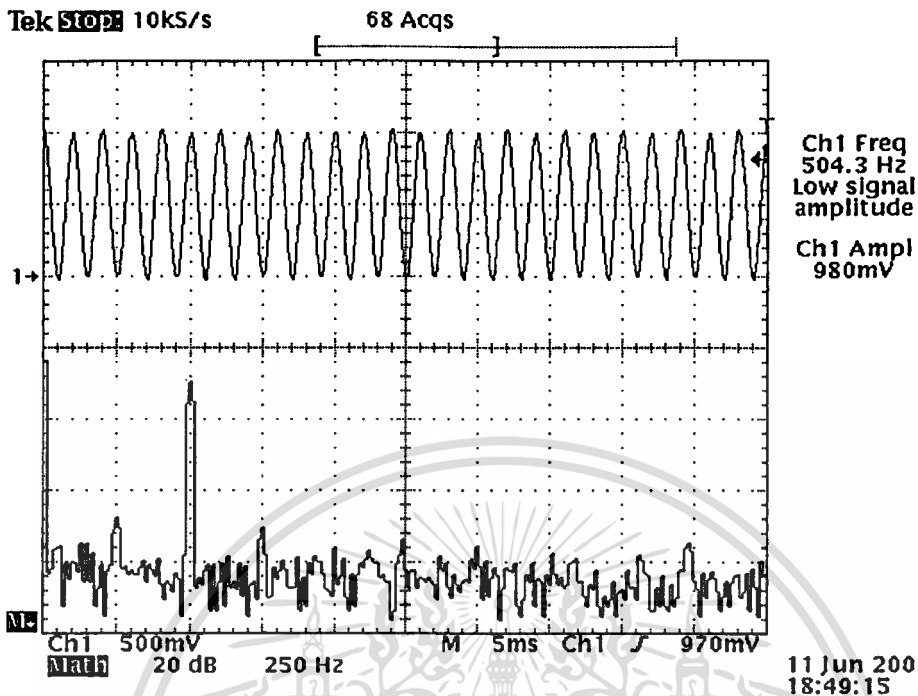


รูปที่ 5.28 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้มอดูเลชันอินดิเคซ์ในการมอดูเลท PWM = 40 % กราฟเส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุตและกราฟเส้นล่างคือสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

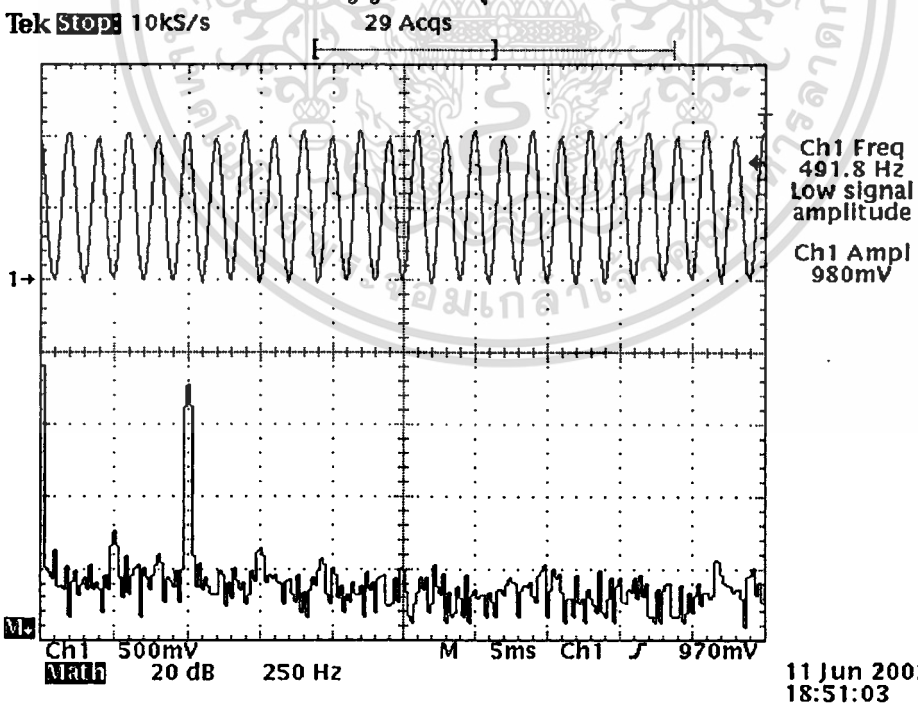


รูปที่ 5.29 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้มอดูเลชันอินดิเคซ์ในการมอดูเลท PWM = 50 % กราฟเส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุตและกราฟเส้นล่างคือสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

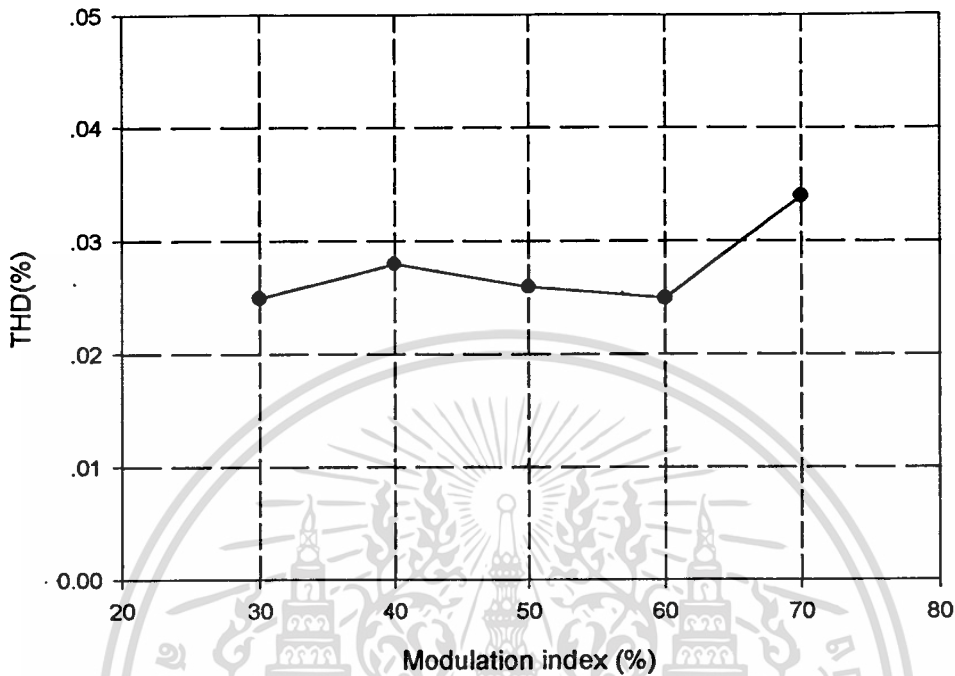


รูปที่ 5.30 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้มอดูเลชันอินเด็กซ์ในการมอดูเลต PWM = 60 % กราฟเส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุตและกราฟเส้นล่างคือสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต



รูปที่ 5.31 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้มอดูเลชันอินเด็กซ์ในการมอดูเลต PWM = 70 % กราฟเส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุตและกราฟเส้นล่างคือสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

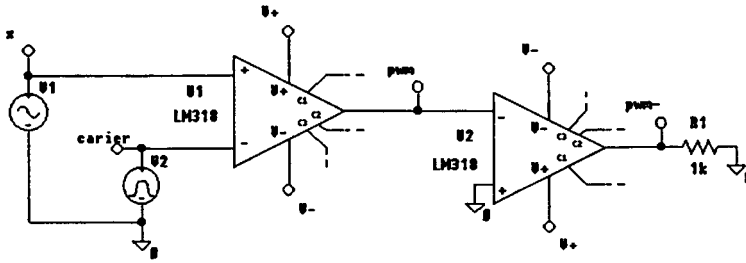


รูปที่ 5.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %THD กับค่าดัชนีการมอดูเลทของ PWM ของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 1 โดยการต่อวงจรจริง

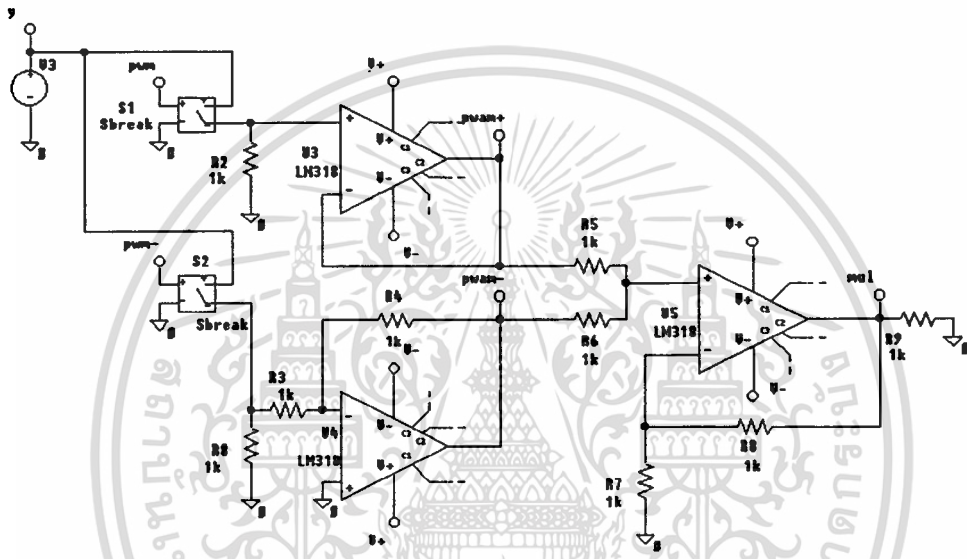
## 5.2 วงจรคูณสัญญาณ 4 ควอดแรนต์ ที่นำเสนอ โครงสร้างที่ 2

### 5.2.1 การทดลองโดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE

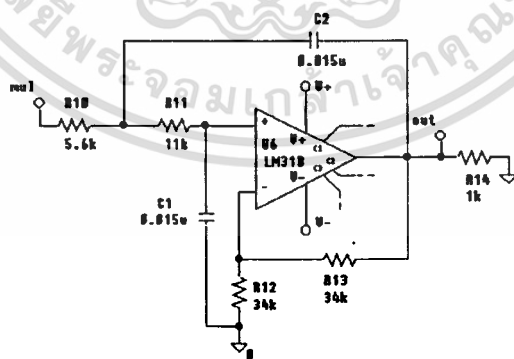
ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดลองการทำงานของวงจรคูณที่ได้ทำการออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 4.3 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เพื่อเป็นการยืนยันผลการทำงานของวงจรที่ออกแบบไว้ โดยอาศัยโครงสร้างของวงจรในรูปที่ 4.4 สามารถออกแบบวงจรได้เป็นส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.33 และในการทดลองเรากำหนดให้แรงดันไฟเลี้ยงของวงจรมีค่าเท่ากับ  $\pm 5V$  , สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่ใช้ทำหน้าที่เป็นคลื่นพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลทความกว้างของพัลส์มีความถี่เท่ากับ 10 kHz และ วงจรกรองความถี่ต่ำเป็นแบบบัตเตอร์เวิร์ท อันดับที่ 2 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 1.2 kHz



5.33(ก)



5.33(ข)



5.33(ค)

รูปที่ 5.33 วงจรคุณสัญญาณ 4 ควอดเรนต์ โครงสร้างที่ 2 (ก) วงจรมอดูลความกว้างของ

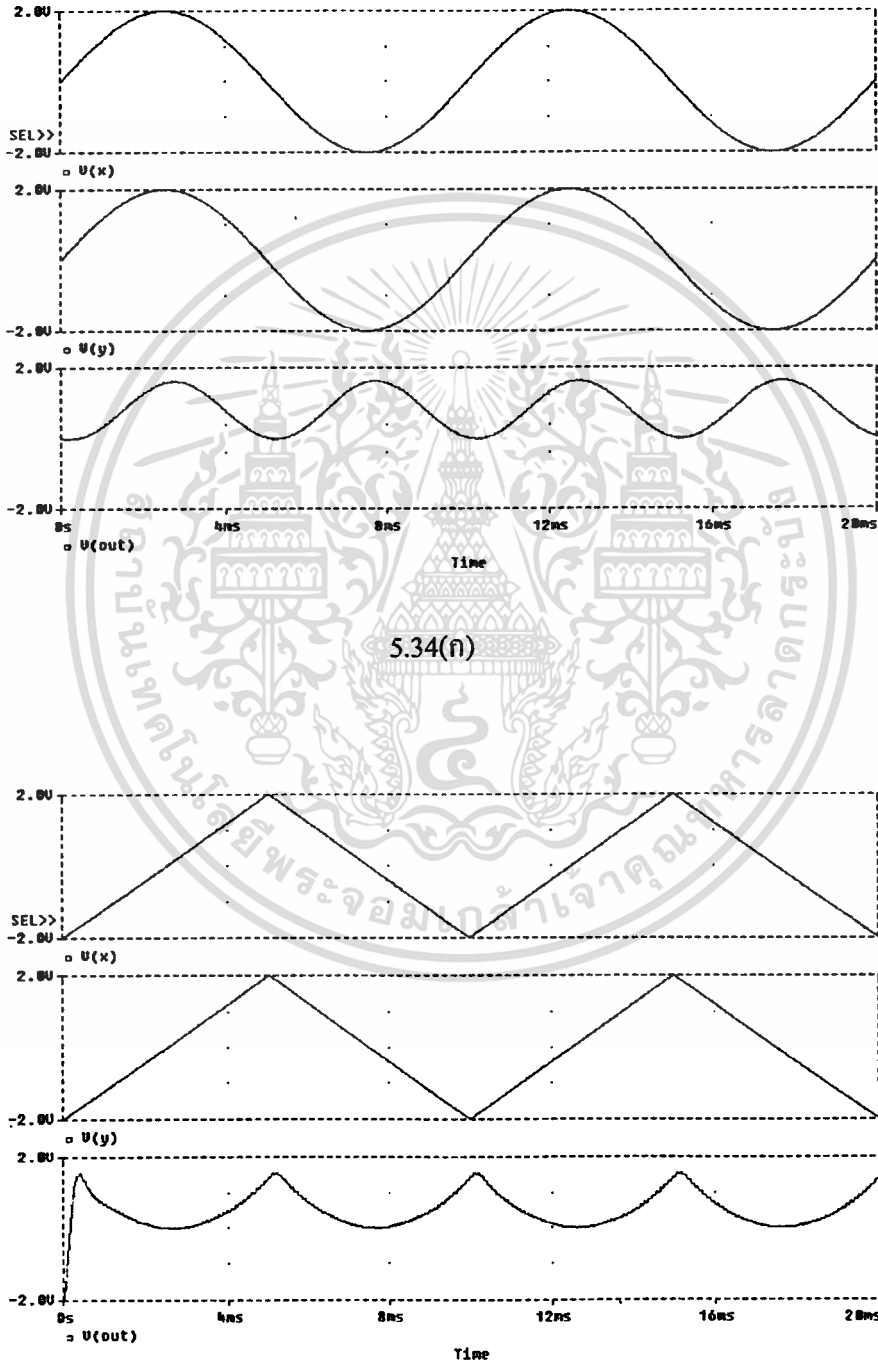
พัลส์และส่วนกลับของสัญญาณ (ข) วงจรซักราค่าตัวอย่างสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณ

(ค) วงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัทเทอร์เวิร์ธ อันดับที่ 2 ความถี่คัทออฟ 1.2 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

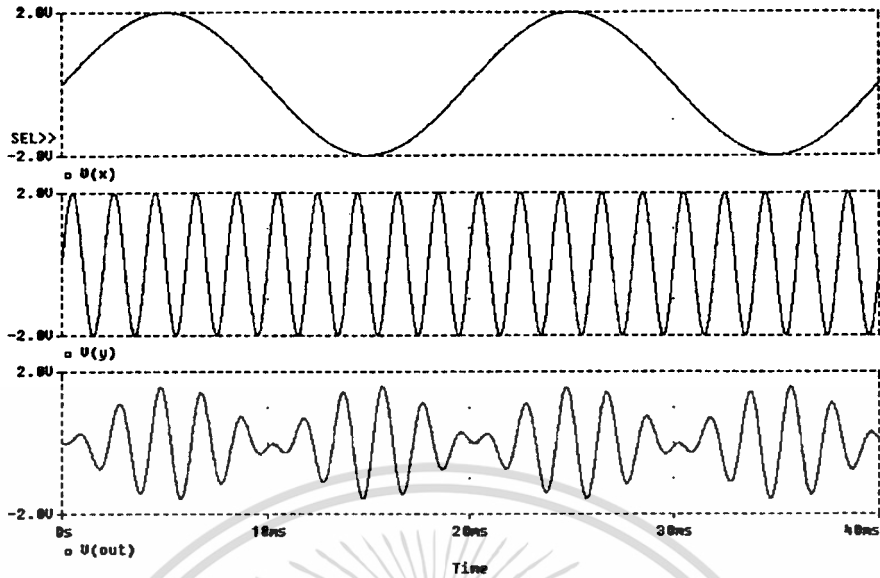
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการทดลองโดยการป้อนสัญญาณอินพุต  $x(t)$  และ  $y(t)$  เป็นสัญญาณตัวเดียวกัน 2 รูปแบบคือคลื่นรูปไซน์และสามเหลี่ยม มีความถี่ 100 Hz ผลที่ได้ออกมาอยู่ในรูปยกกำลังสองดังแสดงในรูปที่ 5.34(ก) และ 5.34(ข) จากนั้นทำการป้อนสัญญาณอินพุตที่มีความถี่ต่างกัน 10 เท่าโดยที่  $x(t) = 50$  Hz และ  $y(t) = 500$  Hz ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 5.34(ค)



5.34(ข)

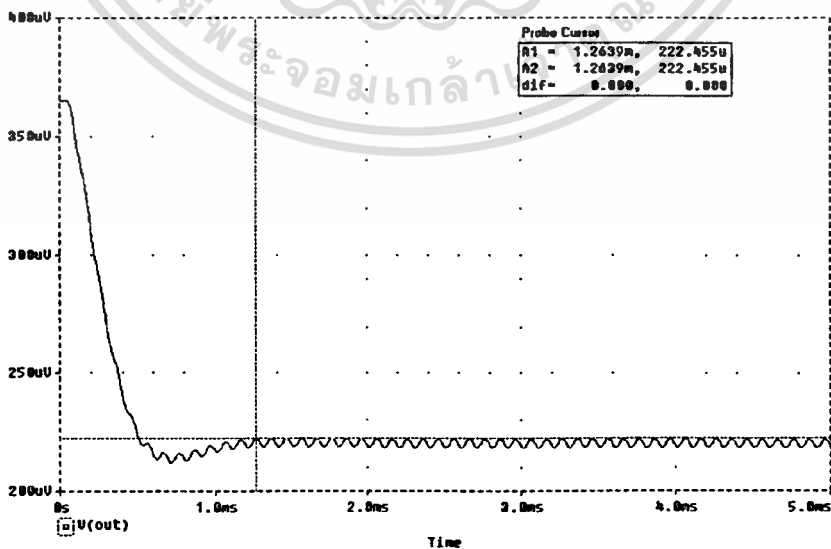
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5.34(ค)

รูปที่ 5.34 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตในรูปแบบต่างๆ (ก) ผลคูณของสัญญาณอินพุตคลื่นรูปไซน์ (ข) ผลคูณของสัญญาณอินพุตคลื่นรูปสามเหลี่ยม (ค) ผลคูณของสัญญาณอินพุตคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่ต่างกัน 10 เท่า

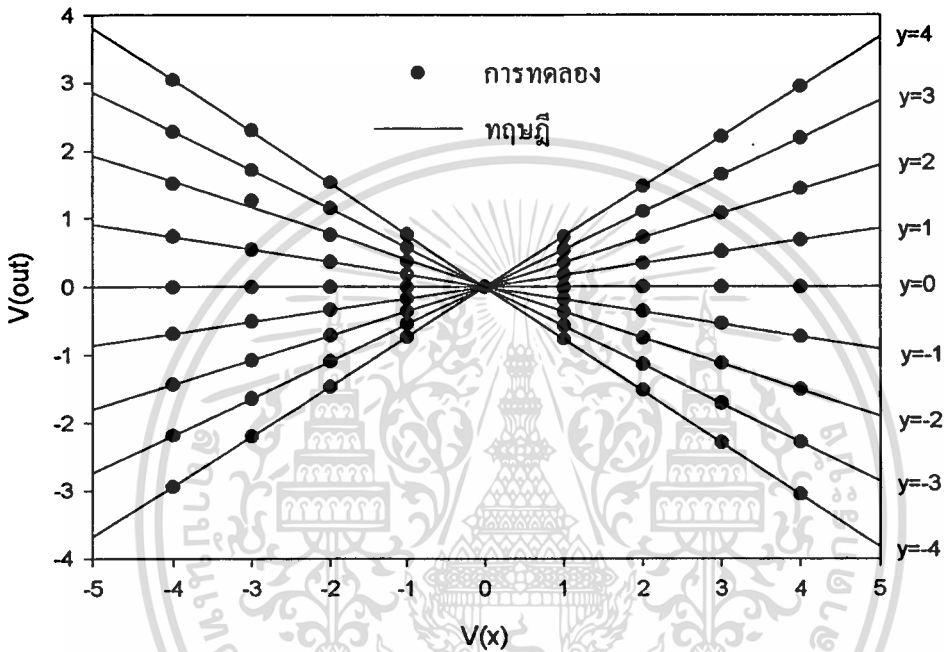
ทำการวิเคราะห์ค่าแรงดันออฟเซต(dc Offset) ของวงจร โดยการต่อสัญญาณอินพุต  $x(t)$  และ  $y(t)$  มีขนาด ศูนย์ โวลต์ ผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.35



รูปที่ 5.35 ค่าแรงดันออฟเซตของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

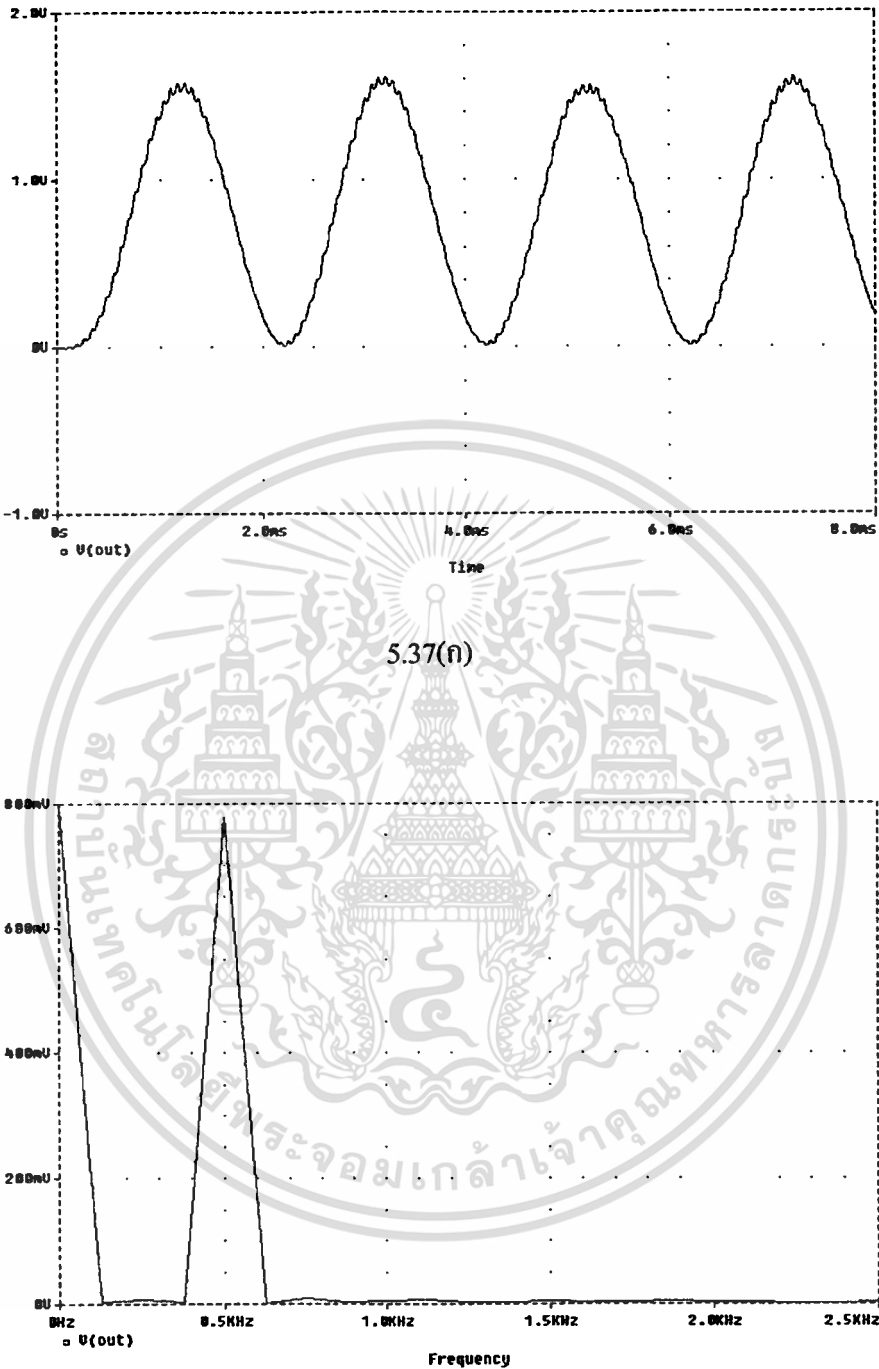
ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติการตอบสนองต่อสัญญาณไฟกระแสดตรงโดยการป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไฟกระแสดตรง ทำการปรับแรงดันอินพุต  $v_x$  จาก  $-4V$  ถึง  $4V$  และปรับ  $v_y$  จาก  $-4V$  ถึง  $4V$  ครั้งละ  $1V$  ผลที่ได้พบว่าวงจรสามารถรับสัญญาณอินพุตขนาดใหญ่ได้และมีช่วงการปฏิบัติงานได้กว้างถึง 80 % เมื่อเทียบกับขนาดของไฟเลี้ยงที่จ่ายให้แก่วงจร และผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.36



รูปที่ 5.36 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE

ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติการตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตเมื่อมีการเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณพาร์ที่ใช้ในการมอดูเลต PWM โดยการป้อนสัญญาณอินพุต  $x(t)$  และ  $y(t)$  เป็นสัญญาณตัวเดียวกันคือสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 250 Hz มีขนาด 2 โวลต์ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะอยู่ในรูปยกกำลังสองและความถี่ที่ได้จะมีค่าเป็นสองเท่าของสัญญาณอินพุต ทำการทดลองโดยปรับความถี่ที่ใช้ในการมอดูเลต PWM จาก 10 kHz ถึง 50 kHz ครั้งละ 10 kHz จากผลการทดลองพบว่าวงจรยังคงสามารถทำงานได้ ผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.37 – 5.41 และความสัมพัทธ์ระหว่าง %THD ของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้กับความถี่ของสัญญาณพาร์ที่ใช้ในการมอดูเลต PWM แสดงไว้ในรูปที่ 5.42

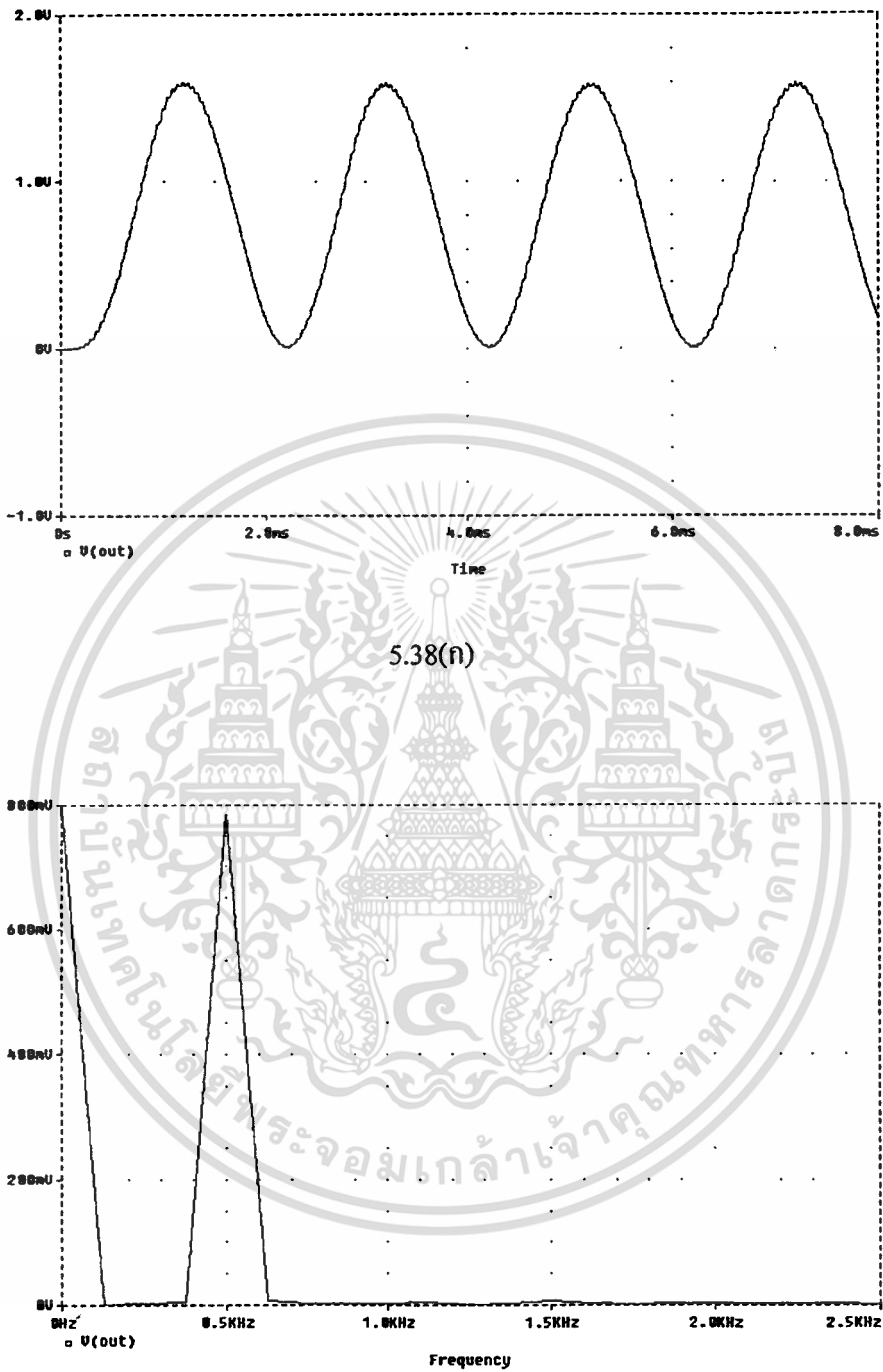
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5.37(ข)

รูปที่ 5.37 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 10 kHz  
(ก) สัญญาณเอาต์พุต (ข) สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

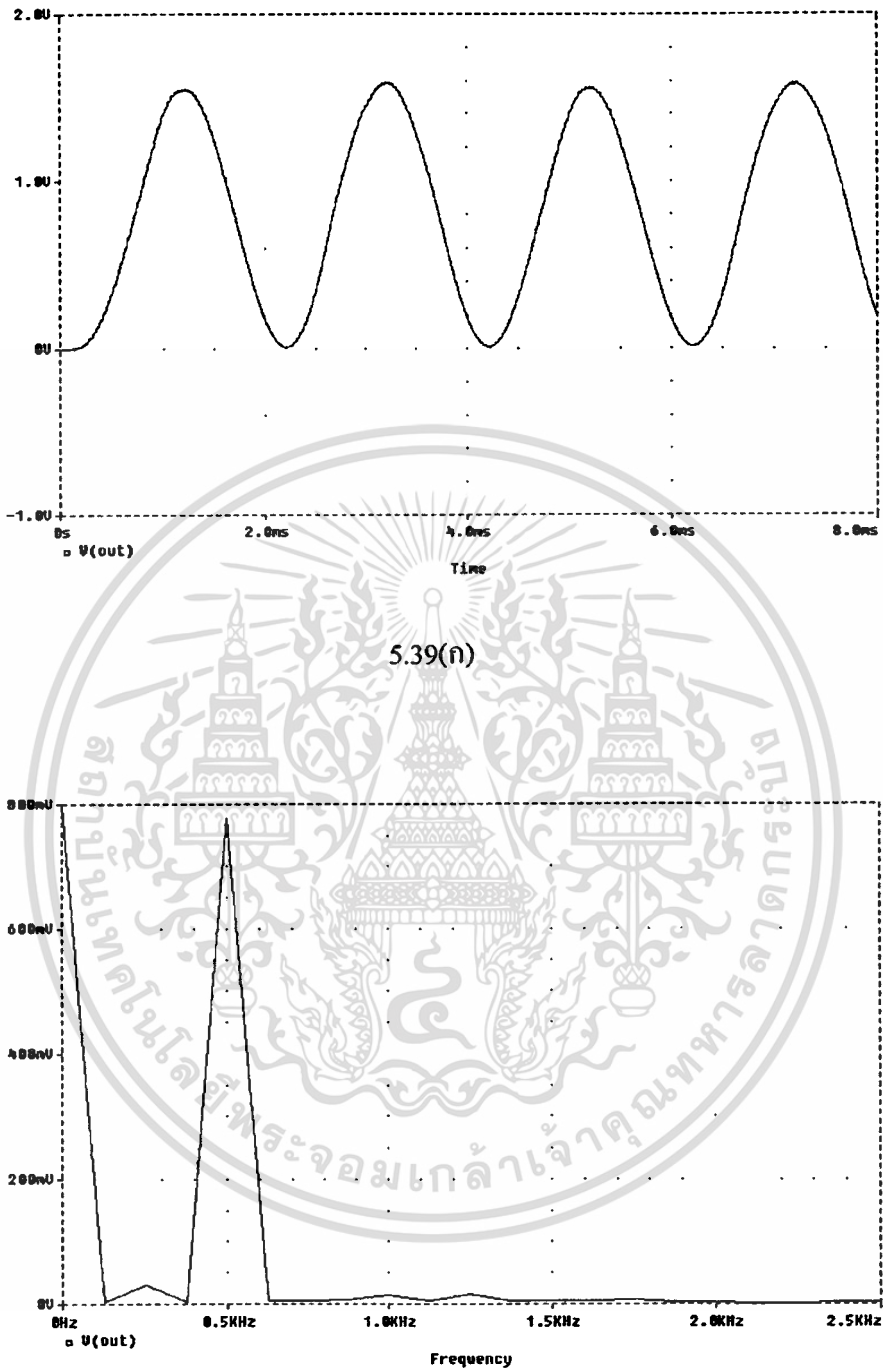
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5.38(ข)

รูปที่ 5.38 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาที่ใช้ในการมอดูเลต  $PWM = 20 \text{ kHz}$   
 (ก) สัญญาณเอาต์พุต (ข) สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

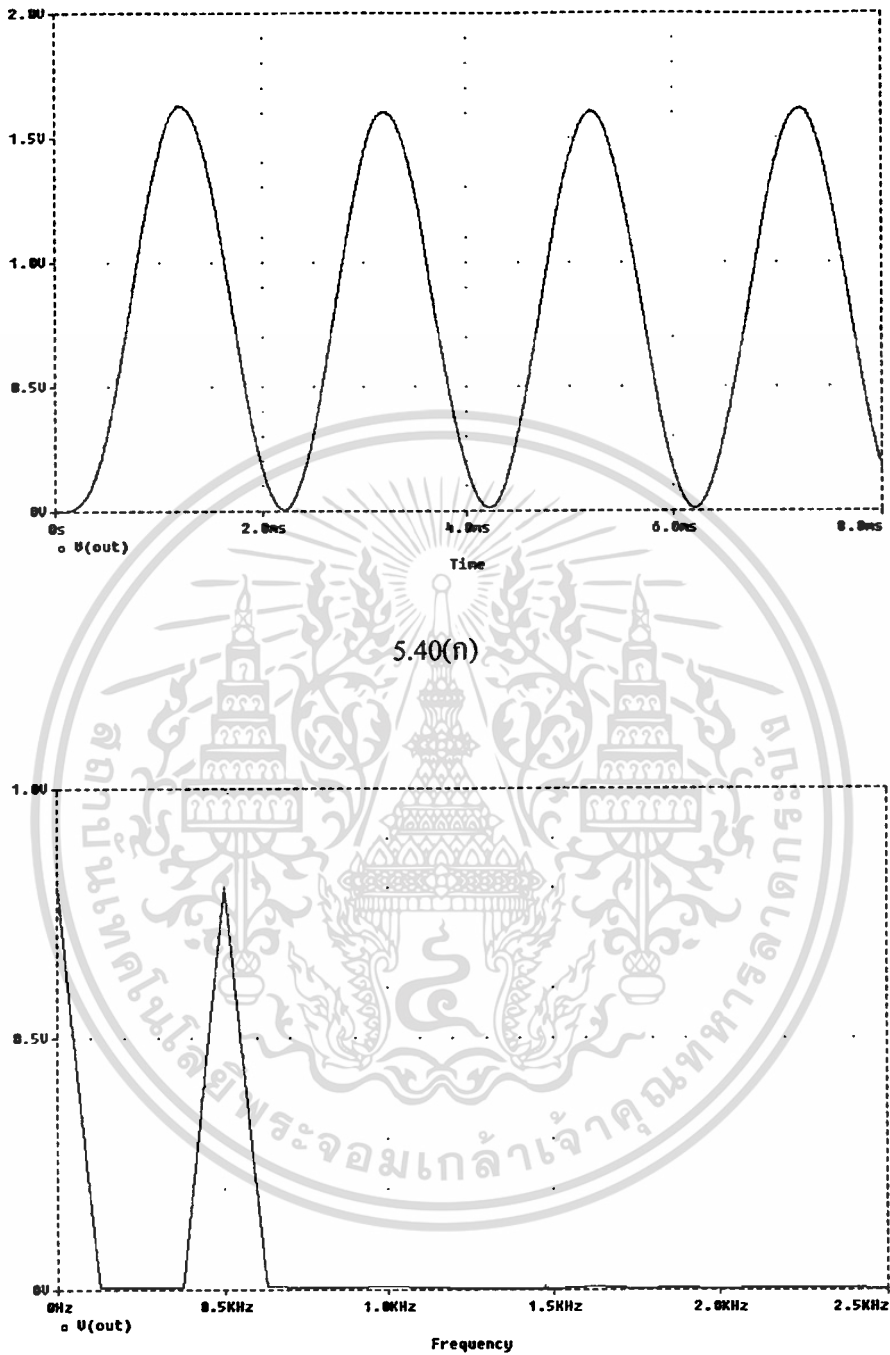
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5.39(ข)

รูปที่ 5.39 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลต  $PWM = 30 \text{ kHz}$   
 (ก) สัญญาณเอาต์พุต (ข) สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

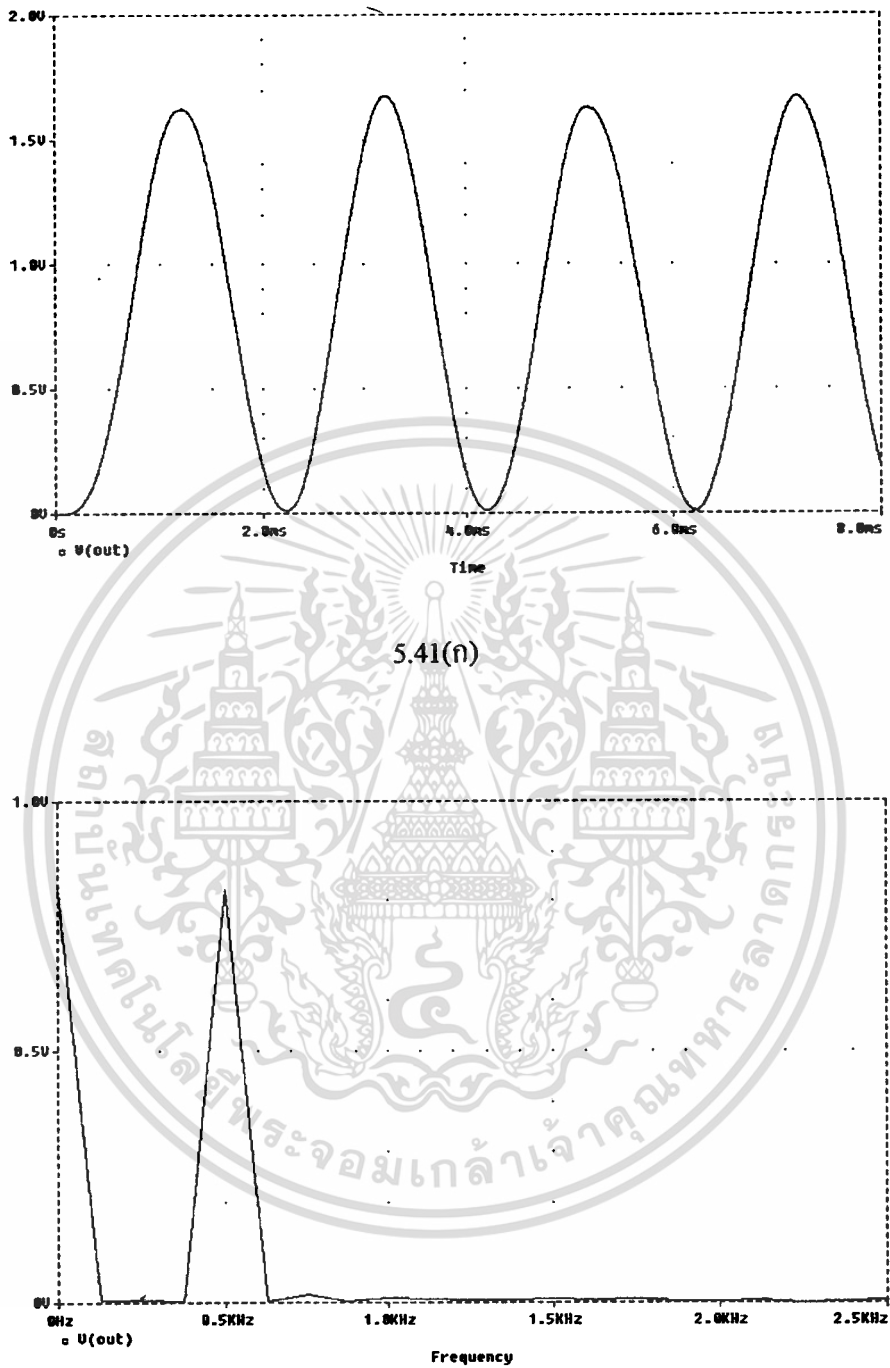
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5.40(ข)

**รูปที่ 5.40** ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลต  $PWM = 40 \text{ kHz}$   
 (ก) สัญญาณเอาต์พุต (ข) สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

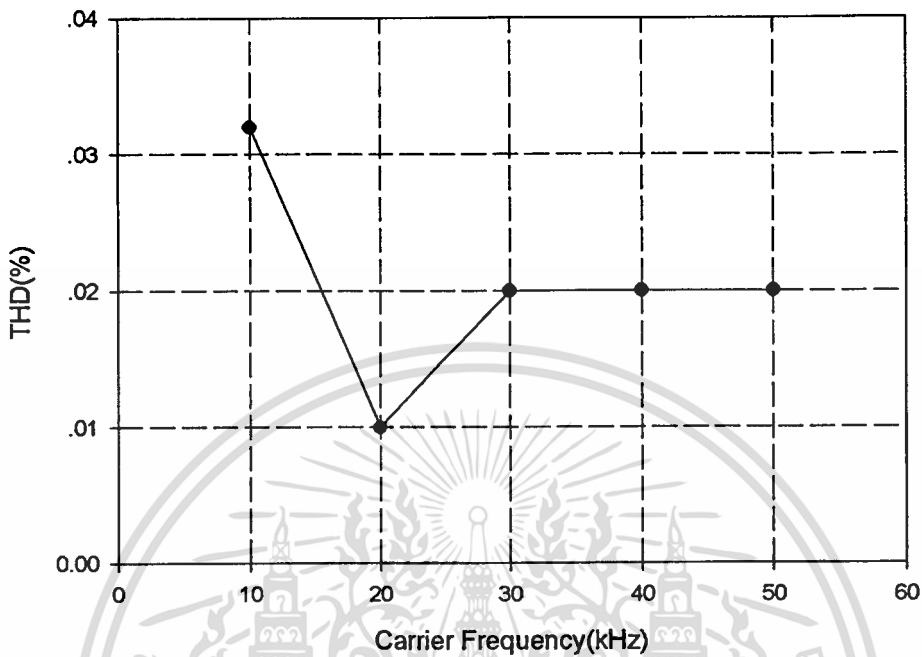
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5.41(ข)

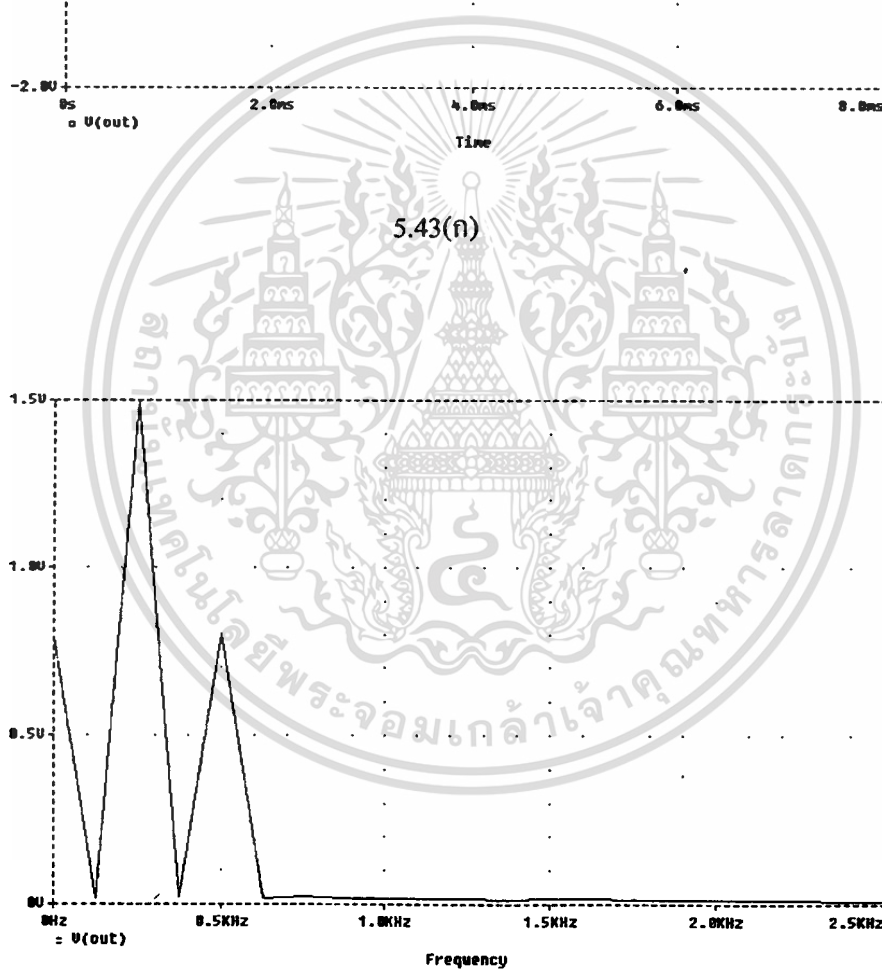
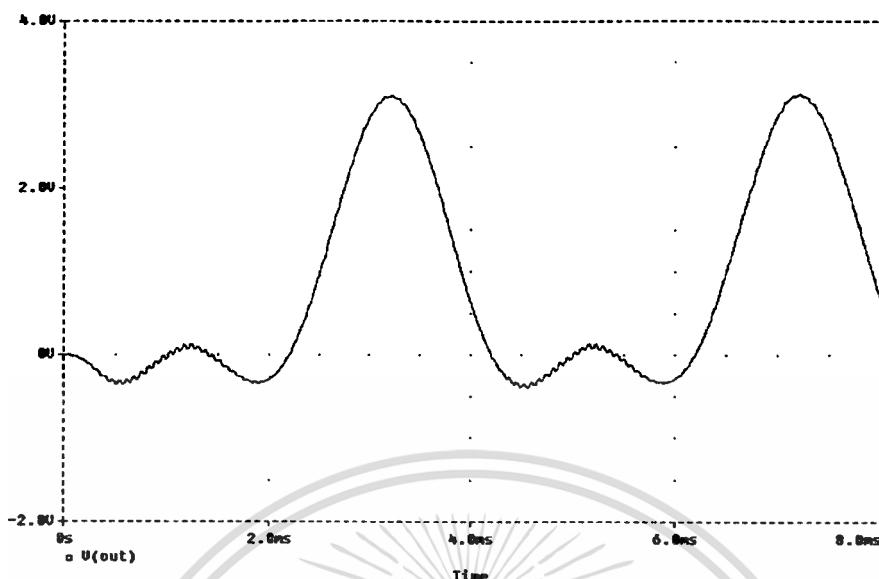
รูปที่ 5.41 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห้ที่ใช้ในการมอดูเลท  $PWM = 50 \text{ kHz}$   
 (ก) สัญญาณเอาต์พุต (ข) สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %THD กับความถี่ของสัญญาณพาห้ที่ใช้ในการมอดูเลต PWM ของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE

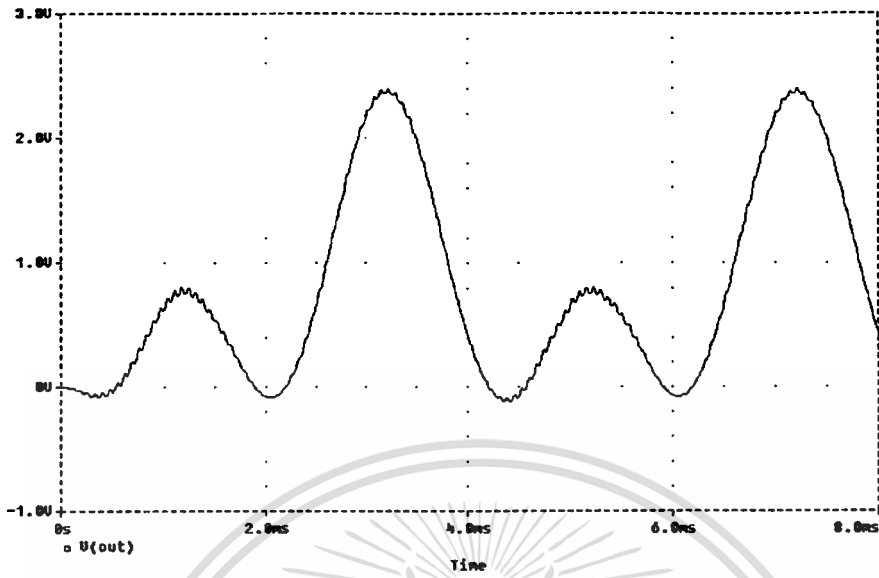
ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติการตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุต เมื่อมีการเปลี่ยนมอดูเลชันอินเด็คซ์ของสัญญาณพาห้ที่ใช้ในการมอดูเลต PWM โดยการป้อนสัญญาณอินพุต  $x(t)$  และ  $y(t)$  เป็นสัญญาณตัวเดียวกันคือสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 250 Hz มีขนาด 2 โวลต์ ความถี่ของสัญญาณพาห้ที่ใช้ในการมอดูเลต PWM มีความถี่เท่ากับ 10 kHz จากนั้นทำการปรับค่ามอดูเลชันอินเด็คซ์ จาก 30 % ถึง 70 % จากผลการทดลองพบว่า วงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 นี้ ถ้าหากค่ามอดูเลชันอินเด็คซ์ของ PWM ไม่เท่ากับ 50 % แล้วจะส่งผลทำให้สัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีค่าผิดพลาดไป และผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.43 – 5.47 และความสัมพันธ์ระหว่าง %THD ของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้กับค่ามอดูเลชัน อินเด็คซ์ของสัญญาณพาห้ที่ใช้ในการมอดูเลต PWM แสดงไว้ในรูปที่ 5.48



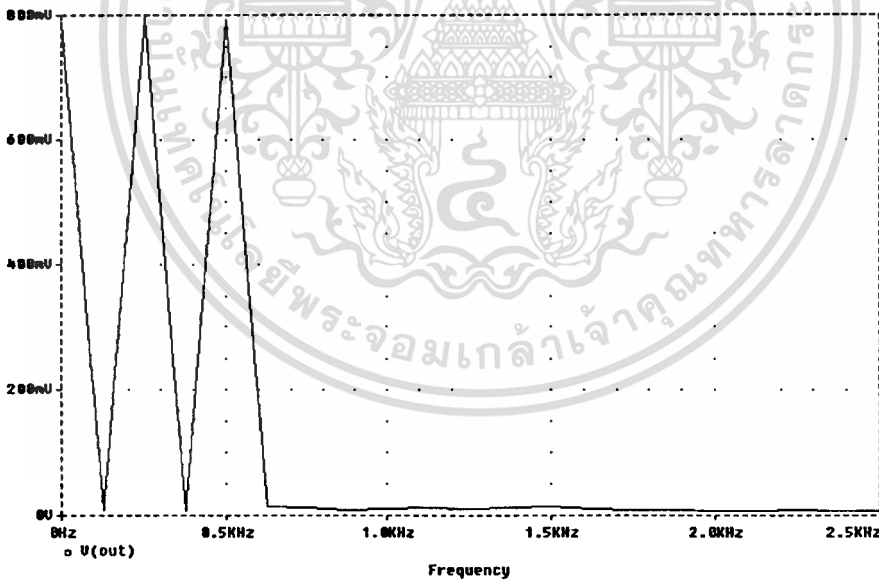
5.43(ข)

รูปที่ 5.43 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้มอดูเลชันอินดิเคซ์ในการมอดูเลต PWM = 30 % (ก) สัญญาณเอาต์พุต (ข) สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



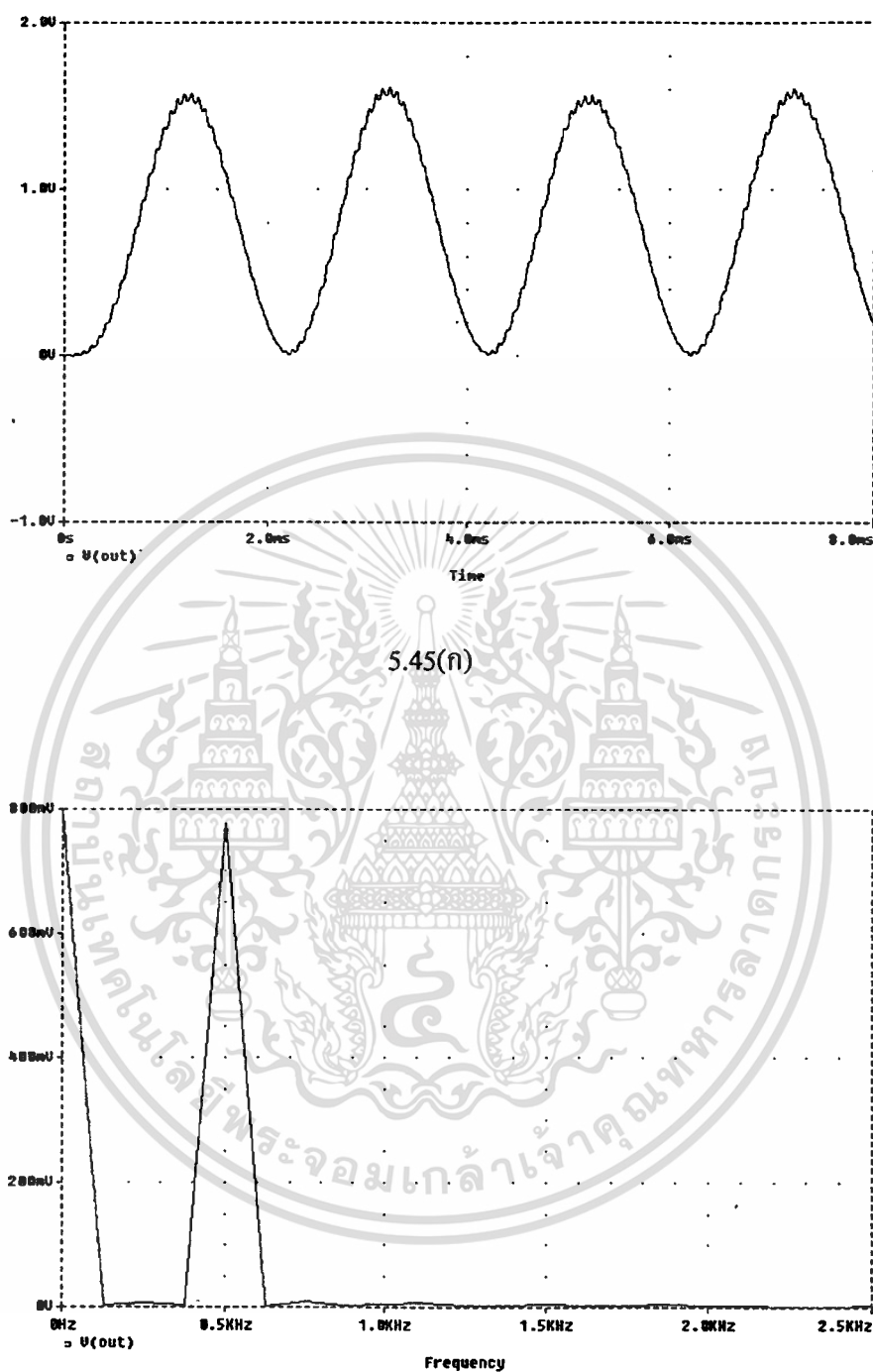
5.44(ก)



5.44(ข)

รูปที่ 5.44 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้มอดูลชั่งอินเต็กซ์ในการมอดูล PWM = 40 % (ก) สัญญาณเอาต์พุต (ข) สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

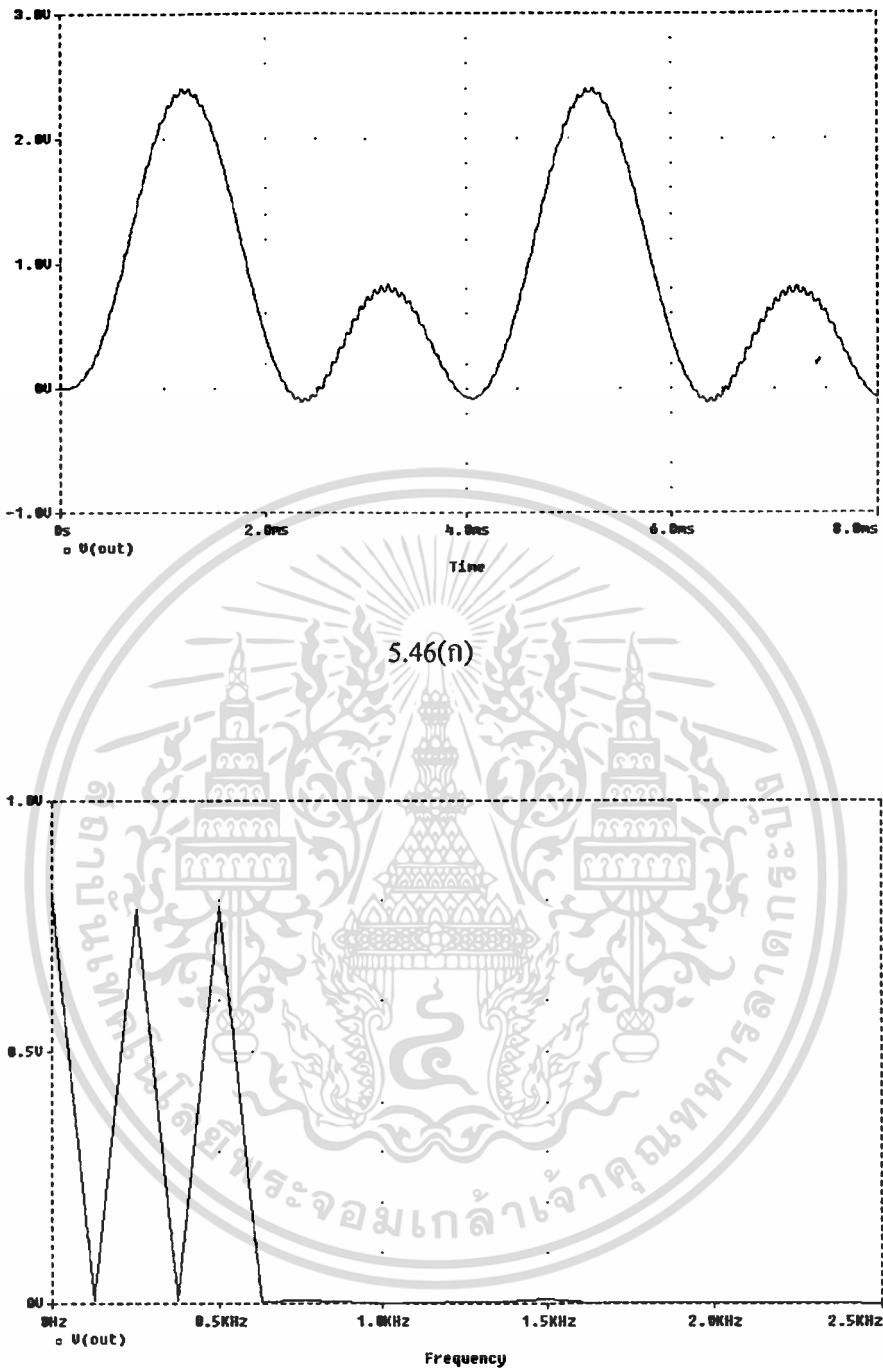
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5.45(ข)

**รูปที่ 5.45 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้มอดูเลชันอินดิเคซ์ในการมอดูเลท PWM = 50 % (ก) สัญญาณเอาต์พุต (ข) สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต**

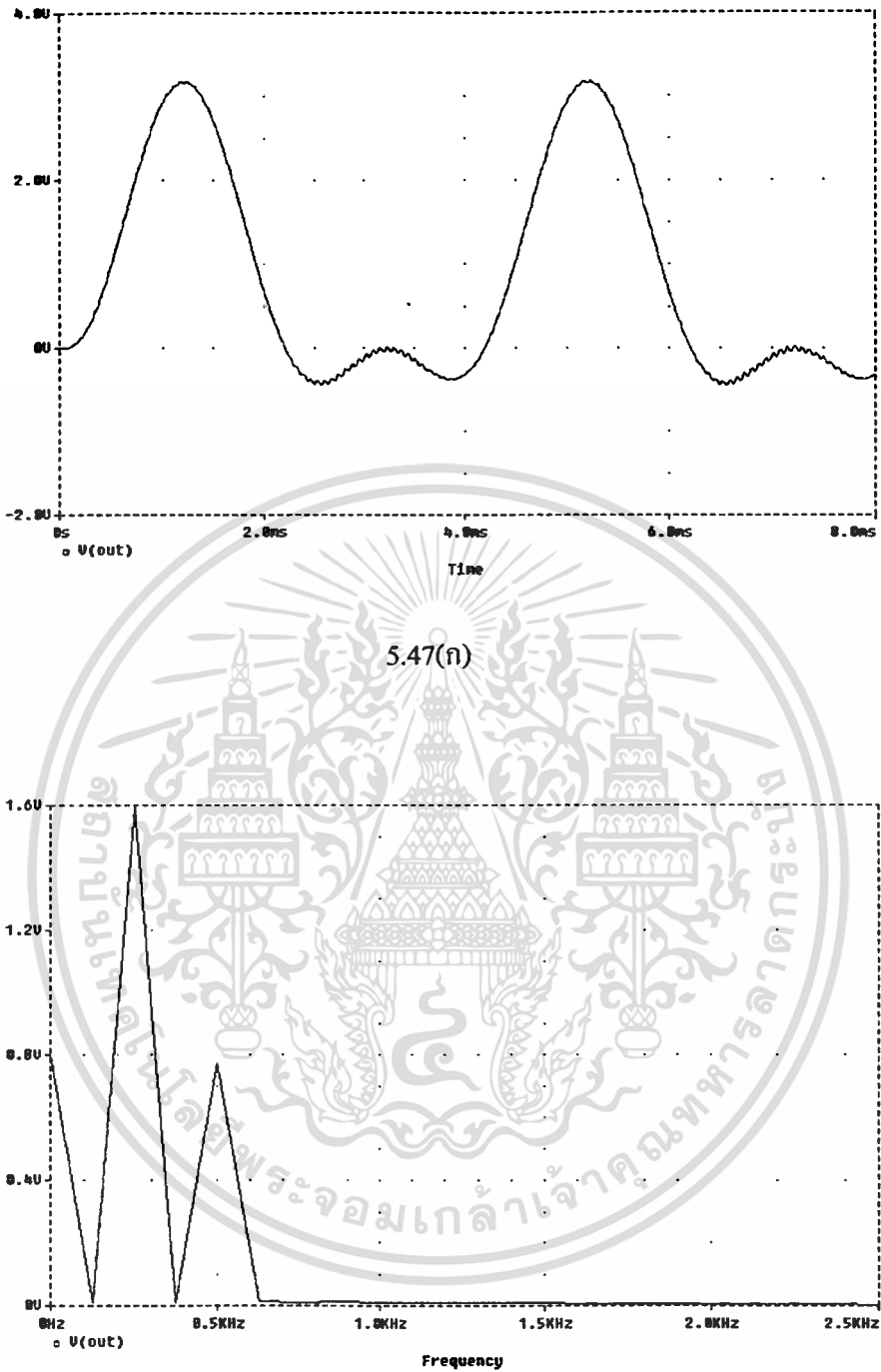
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5.46(ข)

**รูปที่ 5.46** ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้มอดูเลชันอินดิเคซ์ในการมอดูเลท PWM = 60 % (ก) สัญญาณเอาต์พุต (ข) สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

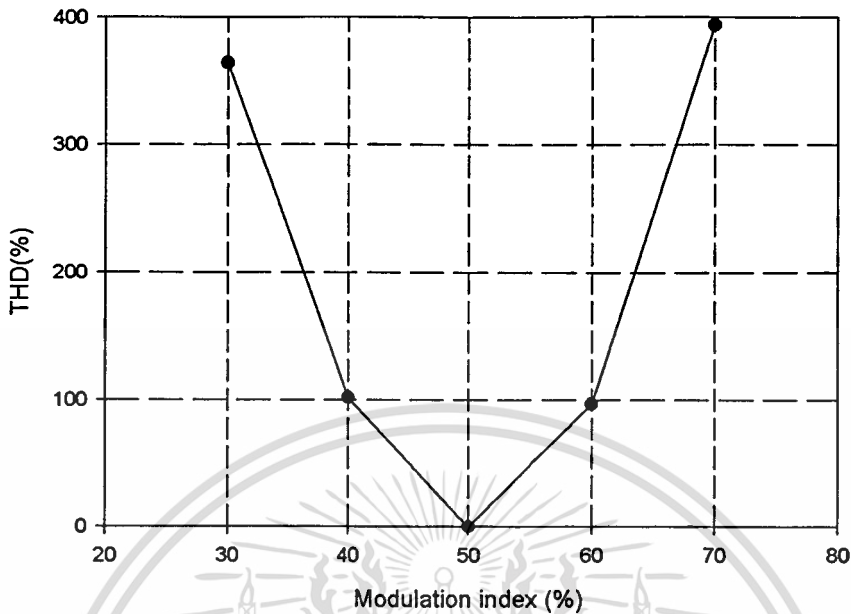
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5.47(ข)

**รูปที่ 5.47 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการเขียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อใช้มอดูเลชันอินดิเคซ์ในการมอดูเลท PWM = 70 % (ก) สัญญาณเอาต์พุต (ข) สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

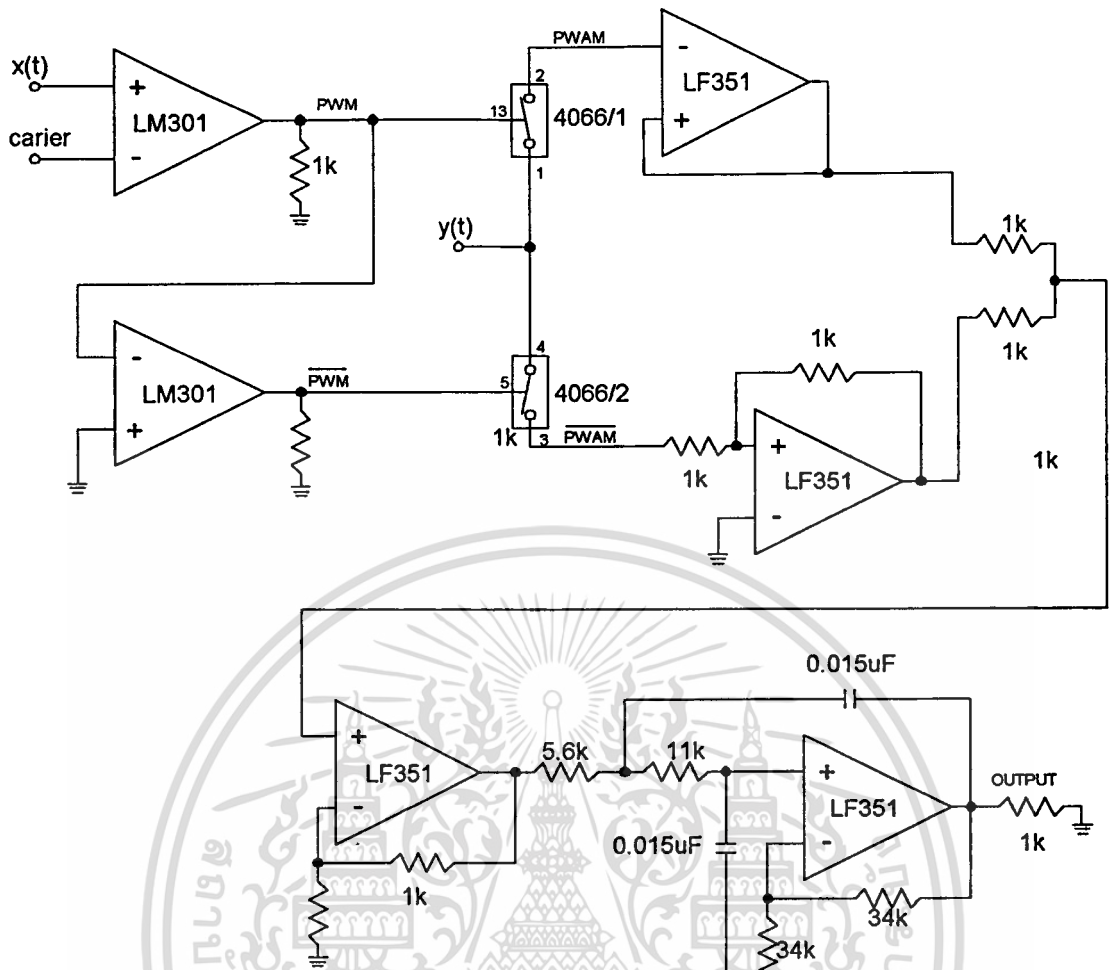


รูปที่ 5.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %THD กับดัชนีการมอดูเลท ของ PWM ของวงจรคูณโครงสร้างที่ 2 ทำการทดลองโดยการเลียนแบบด้วยโปรแกรม PSPICE

### 5.2.2 การทดลองโดยการต่อวงจรจริง

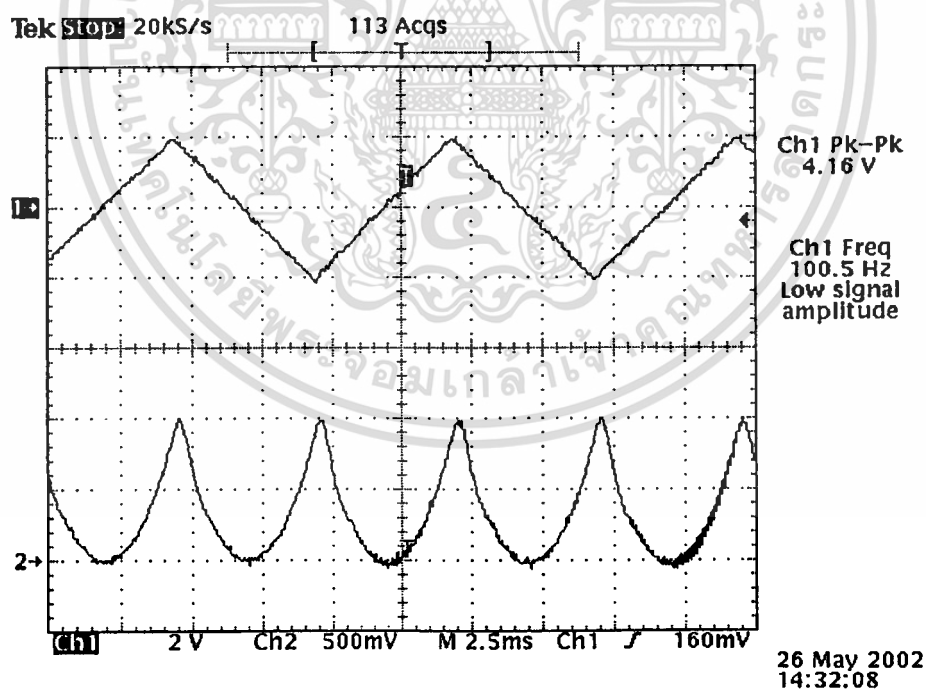
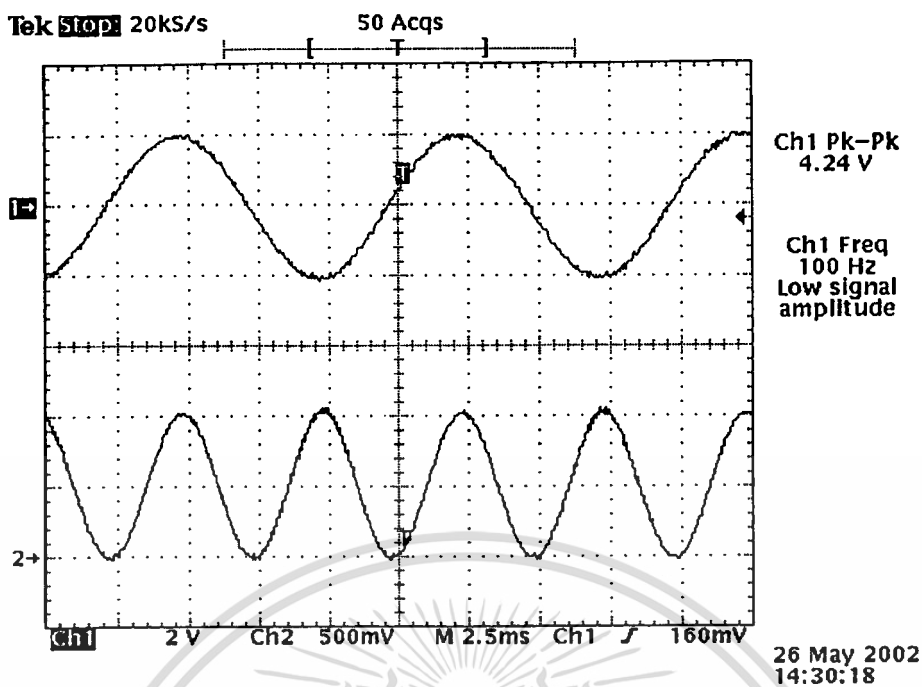
ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดลองการทำงานของวงจรคูณที่ได้ทำการออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 4.3 โดยการต่อวงจรจริง เพื่อเป็นการยืนยันผลการทำงานของวงจรที่ออกแบบไว้ โดยอาศัยโครงสร้างของวงจรในรูปที่ 4.4 และวงจรที่ออกแบบไว้ในรูปที่ 5.33 โดยในส่วนของวงจรมอดูเลทความกว้างของพัลส์ ใช้ออปแอมป์ เบอร์ LM301 ส่วนวงจรการกลับเฟสสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณ ใช้ออปแอมป์ เบอร์ LF351 และไอซีที่ทำหน้าที่ในการซักราค่าตัวอย่างสัญญาณ ใช้ไอซีเบอร์ 4066 โดยที่วงจรที่ใช้ทำการทดลองของวงจรคูณที่นำเสนอในโครงสร้างที่ 2 แสดงไว้ในรูปที่ 5.49

จากนั้นทำการกำหนดให้แรงดันไฟเลี้ยงของวงจรมีค่าเท่ากับ  $\pm 5V$  , สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่ใช้ทำหน้าที่เป็นคลื่นพาหะที่ใช้ในการมอดูเลทความกว้างของพัลส์ มีความถี่เท่ากับ 10 kHz และ วงจรกรองความถี่ต่ำเป็นแบบบัตเตอร์เวิร์ท อันดับที่ 2 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 1.2 kHz



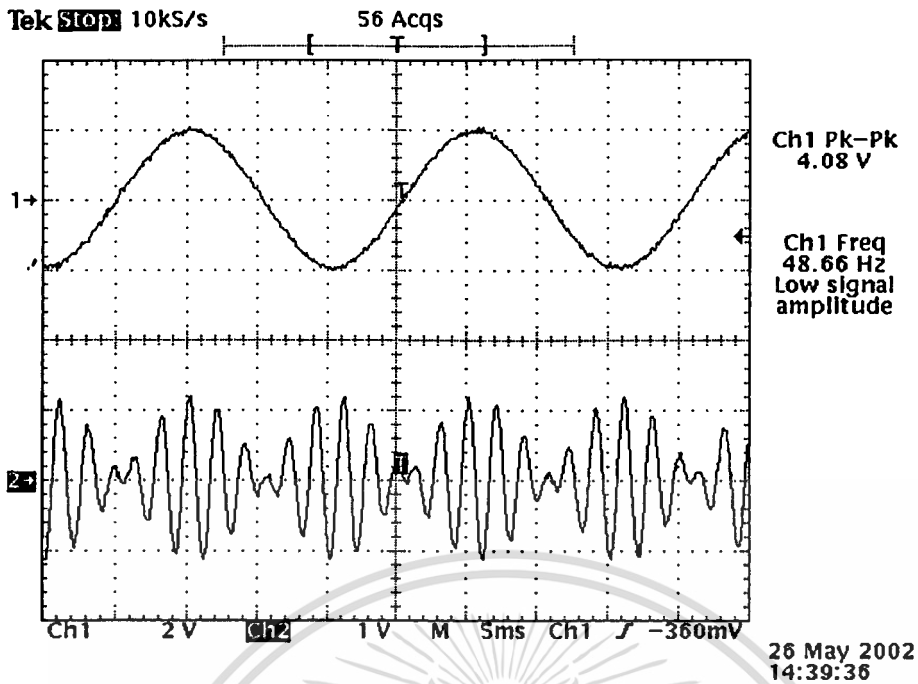
รูปที่ 5.49 วงจรสมมูลของวงจรคูณที่อาศัยหลักการ PWM ที่นำเสนอ โครงสร้างที่ 2

จากนั้นทำการทดลองโดยการป้อนสัญญาณอินพุต  $x(t)$  และ  $y(t)$  เป็นสัญญาณตัวเดียวกัน 2 รูปแบบคือคลื่นรูปไซน์และสามเหลี่ยม มีความถี่ 100 Hz ผลของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ออกมาอยู่ในรูปของสัญญาณอินพุตที่ยกกำลังสองดังแสดงในรูปที่ 5.50(ก) และ 5.50(ข) จากนั้นทำการป้อนสัญญาณอินพุตที่มีความถี่ต่างกัน 10 เท่าโดยที่  $x(t) = 50$  Hz และ  $y(t) = 500$  Hz ผลของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้เป็นรูปสัญญาณ เอเอ็มแบบดับเบิลไซด์แบนด์ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 5.50(ค)



5.50(ข)

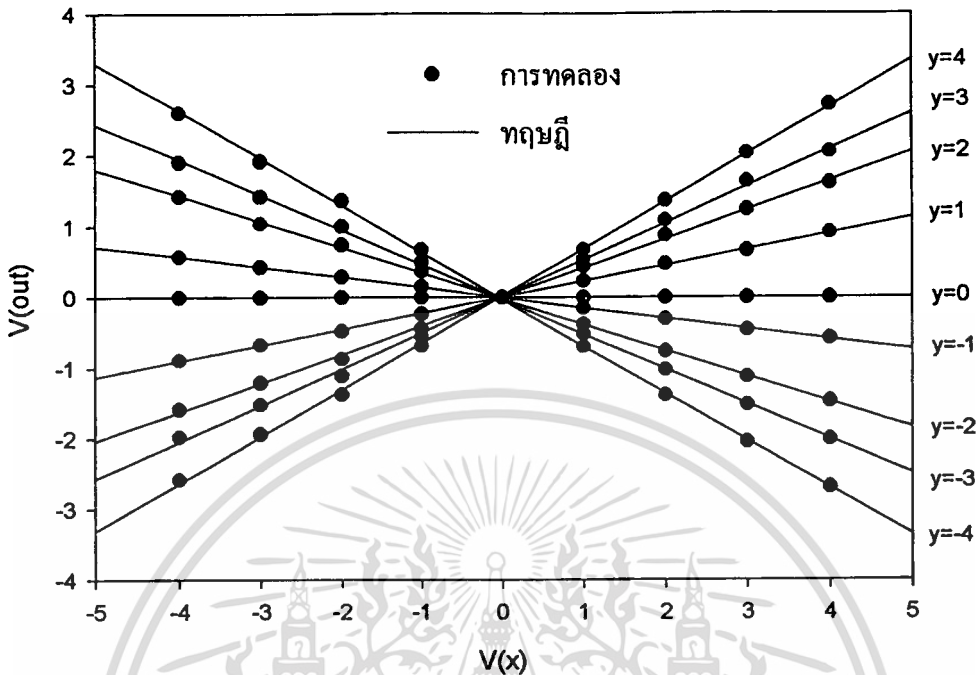
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5.50(ค)

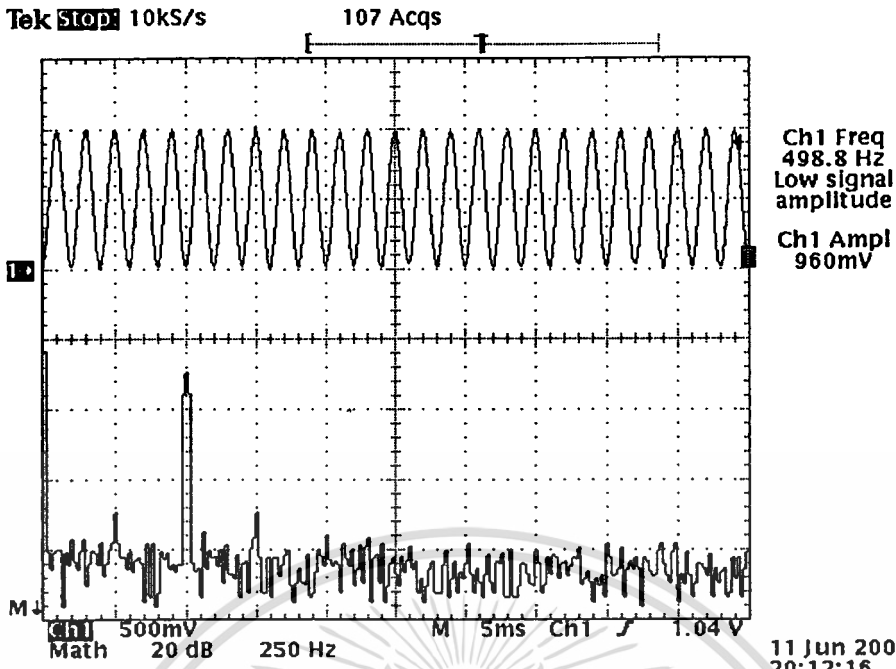
รูปที่ 5.50 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตในรูปแบบต่างๆ (ก) ผลคูณของสัญญาณอินพุตคลื่นรูปไซน์ (ข) ผลคูณของสัญญาณอินพุตคลื่นรูปสามเหลี่ยม (ค) ผลคูณของสัญญาณอินพุตคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่ต่างกัน 10 เท่าโดยที่สัญญาณช่องที่ 1 คือสัญญาณอินพุต และ สัญญาณช่องที่ 2 คือ สัญญาณเอาต์พุต

ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติการตอบสนองต่อสัญญาณไฟกระแสดตรงโดยการป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไฟกระแสดตรง ทำการปรับแรงดันอินพุต  $v_x$  จาก  $-4V$  ถึง  $4V$  และปรับ  $v_y$  จาก  $-4V$  ถึง  $4V$  ครั้งละ  $1V$  ผลที่ได้พบว่าวงจรคูณสามารถรับสัญญาณอินพุตขนาดใหญ่ได้และมีช่วงการปฏิบัติงานได้กว้างถึง 80 % เมื่อเทียบกับขนาดของไฟเลี้ยงที่จ่ายให้แก่วงจร และผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.51

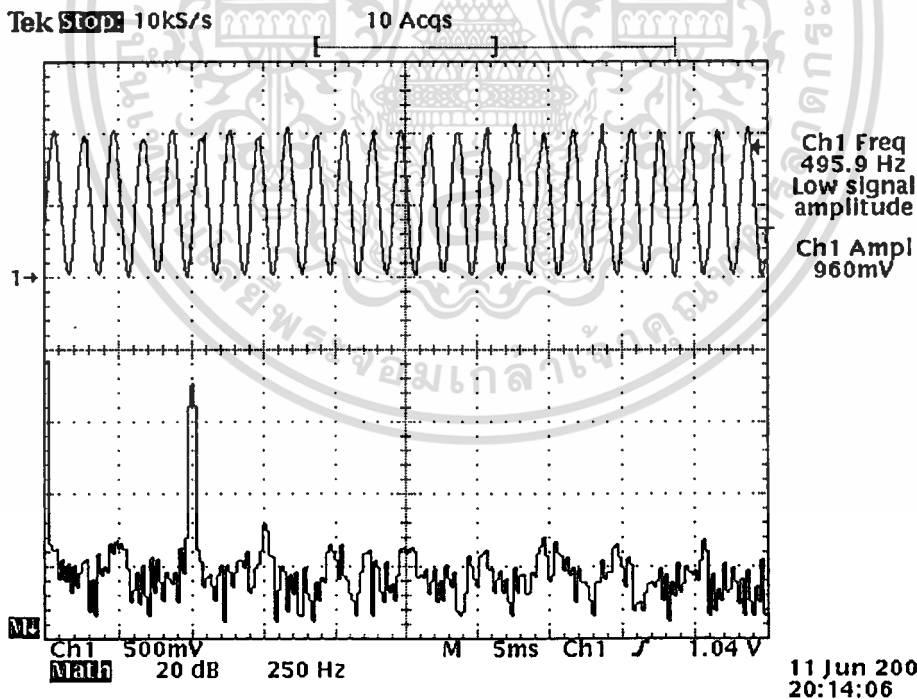


รูปที่ 5.51 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง

ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติการตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตเมื่อมีการเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณพาที่ใช้ในการมอดูเลต PWM โดยการป้อนสัญญาณอินพุต  $x(t)$  และ  $y(t)$  เป็นสัญญาณตัวเดียวกันคือสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 250 Hz มีขนาด 2 โวลต์ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะอยู่ในรูปของสัญญาณไซน์ที่ถูกยกกำลังสองและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าเป็นสองเท่าของสัญญาณอินพุต ทำการทดลองโดยปรับความถี่ที่ใช้ในการมอดูเลต PWM จาก 10 kHz ถึง 50 kHz ทำการปรับเปลี่ยนความถี่ที่ใช้ในการมอดูเลต PWM เพิ่มขึ้นครั้งละ 10 kHz จากผลการทดลองพบว่าวงจรยังคงสามารถทำงานได้ และผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.52 - 5.56 และความสัมพันธ์ระหว่าง %THD ของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้กับความถี่ของสัญญาณพาที่ใช้ในการมอดูเลต PWM แสดงไว้ในรูปที่ 5.57

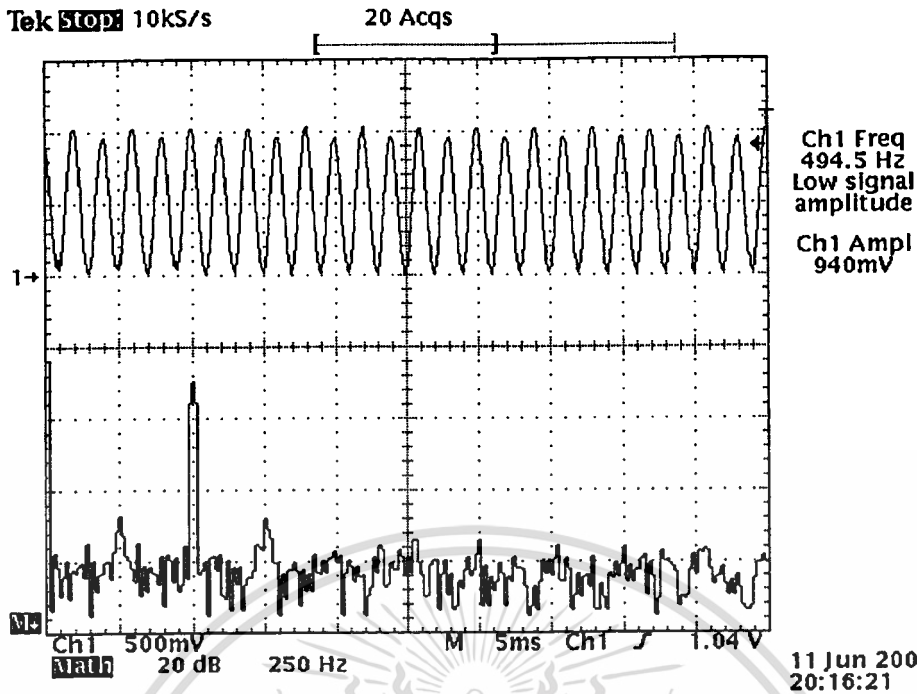


รูปที่ 5.52 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาที่ใช้ในการมอดูเลต PWM = 10 kHz กราฟเส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุต และกราฟเส้นล่างคือสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

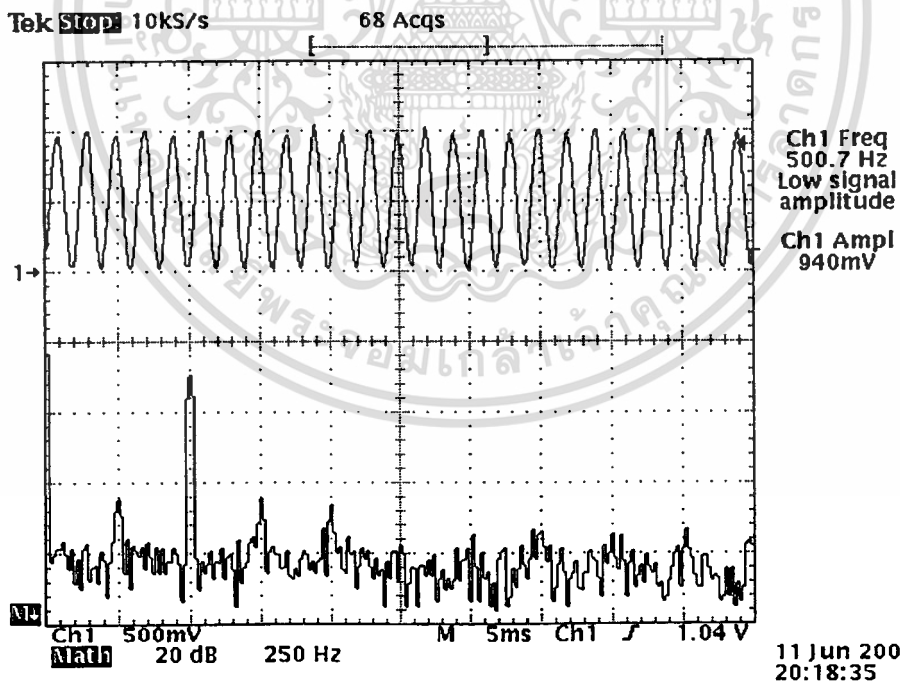


รูปที่ 5.53 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาที่ใช้ในการมอดูเลต PWM = 20 kHz กราฟเส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุต และกราฟเส้นล่างคือสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

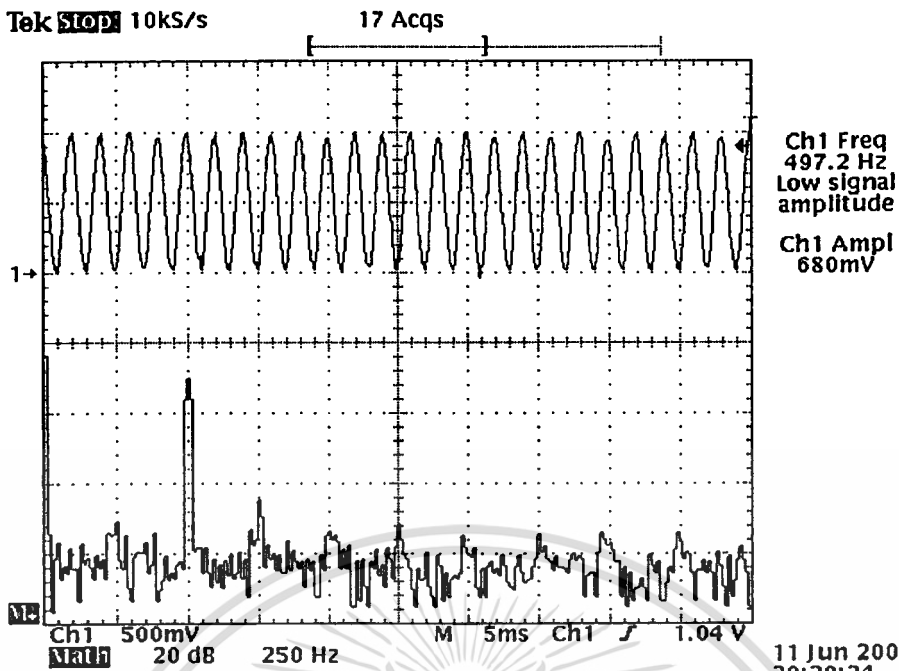
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



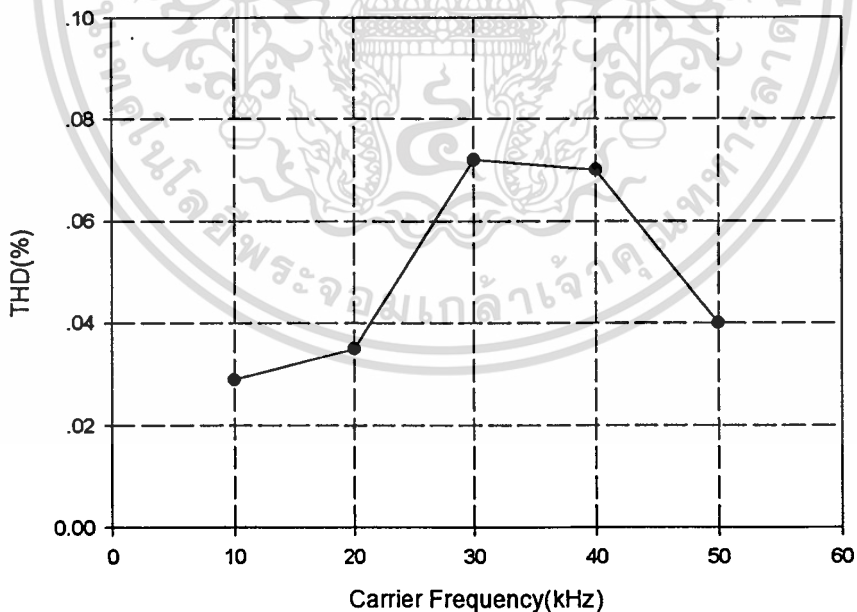
รูปที่ 5.54 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 30 kHz กราฟเส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุต และกราฟเส้นล่างคือสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต



รูปที่ 5.55 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 40 kHz กราฟเส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุต และกราฟเส้นล่างคือสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

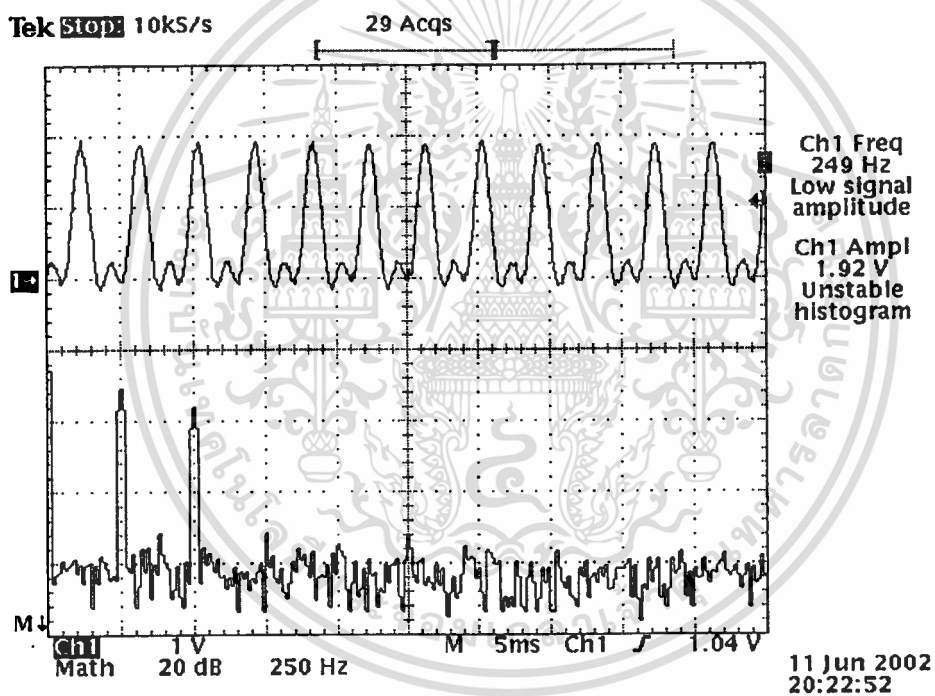


รูปที่ 5.56 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้ความถี่ของสัญญาณพาห้ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM = 50 kHz กราฟเส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุต และกราฟเส้นล่างคือสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

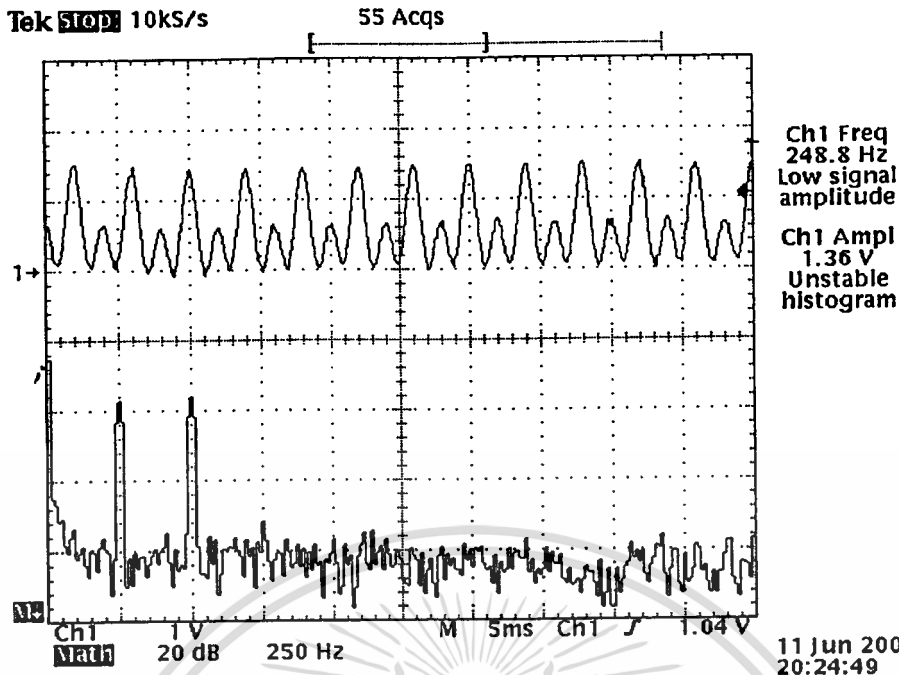


รูปที่ 5.57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %THD กับความถี่ของสัญญาณพาห้ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM ของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง

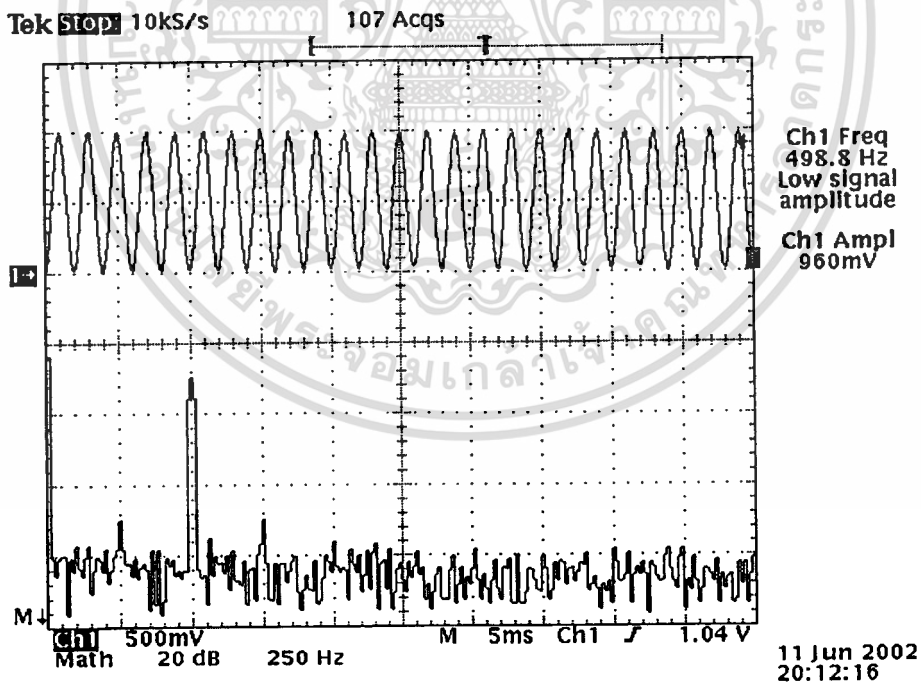
ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติการตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุต เมื่อมีการเปลี่ยนมอดูเลชันอินเด็กซ์ของสัญญาณพาห้ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM โดยการป้อนสัญญาณอินพุต  $x(t)$  และ  $y(t)$  เป็นสัญญาณตัวเดียวกันคือสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 250 Hz มีขนาด 2 โวลต์ ความถี่ของสัญญาณพาห้ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM มีความถี่เท่ากับ 10 kHz จากนั้นทำการปรับค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ จาก 30 % ถึง 70 % จากผลการทดลองพบว่า วงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 นี้ ถ้าหากค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ของ PWM ไม่เท่ากับ 50 % แล้วจะส่งผลทำให้สัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีค่าผิดพลาดไป และผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.58 – 5.62 และความสัมพันธ์ระหว่าง %THD ของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้กับค่ามอดูเลชัน อินเด็กซ์ของสัญญาณพาห้ที่ใช้ในการมอดูเลท PWM แสดงไว้ในรูปที่ 5.63



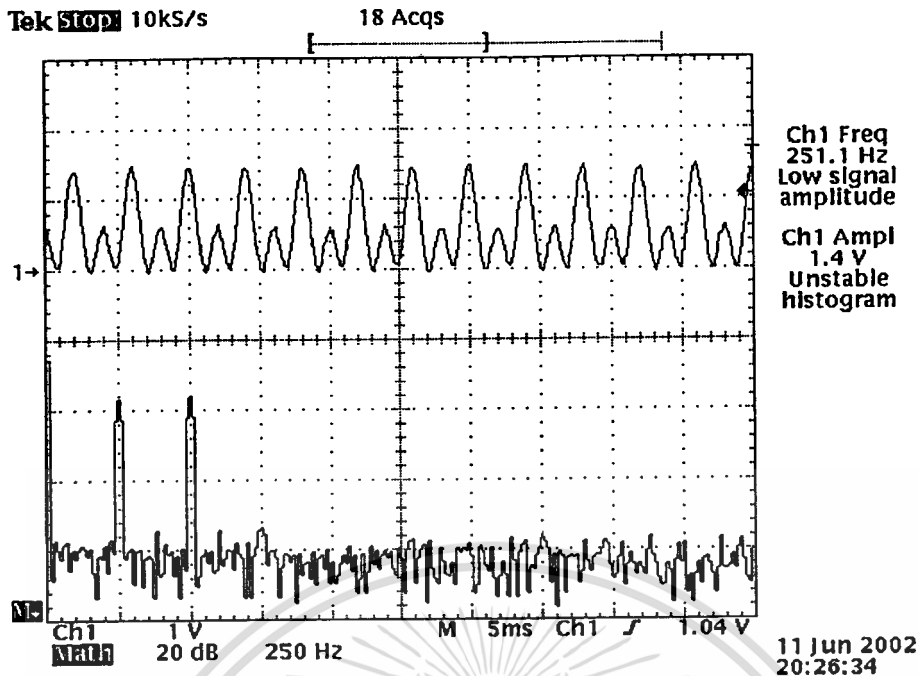
รูปที่ 5.58 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้มอดูเลชันอินเด็กซ์ในการมอดูเลท PWM = 30 % กราฟเส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุตและกราฟเส้นล่างคือสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต



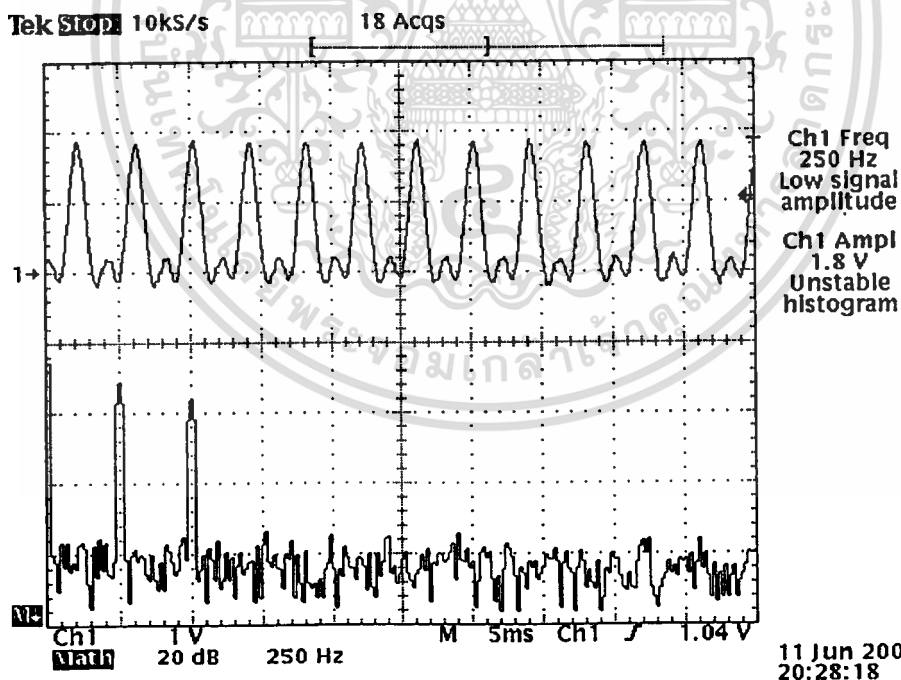
รูปที่ 5.59 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้มอดูเลชันอินดิเคซ์ในการมอดูเลต PWM = 40 % กราฟเส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุตและกราฟเส้นล่างคือสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต



รูปที่ 5.60 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้มอดูเลชันอินดิเคซ์ในการมอดูเลต PWM = 50 % กราฟเส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุตและกราฟเส้นล่างคือสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

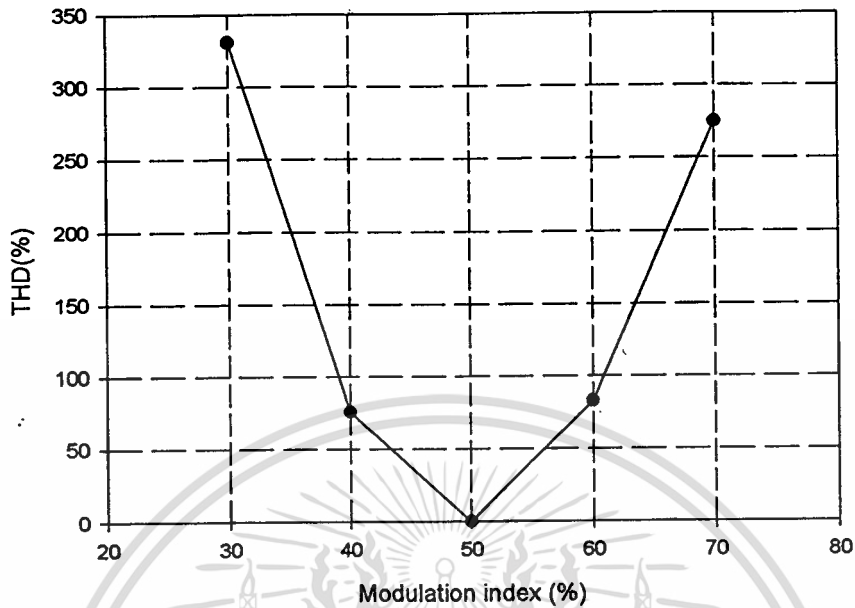


รูปที่ 5.61 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้มอดูเลชันอินดิเคซ์ในการมอดูเลท PWM = 60 % กราฟเส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุตและกราฟเส้นล่างคือสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต



รูปที่ 5.62 ผลการทดลองของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง เมื่อใช้มอดูเลชันอินดิเคซ์ในการมอดูเลท PWM = 70 % กราฟเส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุตและกราฟเส้นล่างคือสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.63 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %THD กับค่าดัชนีการมอดูเลตของ PWM ของวงจรคูณ โครงสร้างที่ 2 โดยการต่อวงจรจริง

## บทที่ 6

### บทสรุป

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวงจรรูณโดยอาศัยหลักการ Pulse Width Amplitude Modulation (PWAM) ซึ่งเป็นวงจรถูกพัฒนามาจากโครงสร้างของวงจรถูกนำเสนอโดย R.S.FYATH จากผลการทดลองโดยการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE และ การต่อวงจรจริง แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของวงจรรูณโดยอาศัยหลักการ PWAM ที่นำเสนอ นั้นสามารถทำงานโดยยังคงจุดเด่นของวงจรรูณเหมือนกับโครงสร้างของ R.S.FYATH คือ มีย่านการทำงานของสัญญาณอินพุตที่กว้าง สัญญาณเอาต์พุตมีความเป็นเชิงเส้นและมีความแม่นยำสูง แต่โครงสร้างของวงจรรูณโดยอาศัยหลักการ PWAM ที่นำเสนอ ให้ผลการทำงานที่ดีกว่าโครงสร้างของ R.S.FYATH กล่าวคือ การทำงานของวงจรรูณสามารถทำการคูณแบบสี่ควอดแรนต์ได้สมบูรณ์ โดยไม่ต้องทำการปรับแต่งวงจรเพื่อหาจุดการทำงานที่เหมาะสมแต่อย่างใด

วงจรรูณที่นำเสนอ โครงสร้างที่ 1 เป็นการใช้กรรมวิธีในการกลับค่าของสัญญาณของสัญญาณอินพุต  $x(t)$  เป็น  $-x(t)$  ทำให้ได้วงจรรูณสัญญาณแบบสี่ควอดแรนต์ที่สมบูรณ์ โดยที่ไม่ต้องทำการปรับแต่งวงจรและวงจรรูณยังคงสามารถทำงานได้แม้ว่าจะเปลี่ยนความถี่ของคลื่นพาห์ของ PWM หรือ เปลี่ยนค่าดัชนีการมอดูเลทของ PWM ไปที่ค่าต่างๆก็ตาม ในขณะที่โครงสร้างของ R.S.FYATH ไม่สามารถทำได้

วงจรรูณที่นำเสนอ โครงสร้างที่ 2 อาศัยกรรมวิธีในการกลับเฟสของ PWM ทำให้เสมือนเป็นการกลับเฟสสัญญาณอินพุต  $x(t)$  เป็น  $-x(t)$  ซึ่งจะได้อัตราการสลับที่มากกว่า โครงสร้างที่ 1 เพราะใช้เกตอินเวอร์เตอร์แทนที่จะเป็นวงจรรูณแบบกลับเฟส แต่วงจรรูณจะทำงานเป็นวงจรรูณแบบสี่ควอดแรนต์ ได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์ ก็คือเมื่อใช้ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ของ PWM มีค่าเท่ากับ 50% เท่านั้น แต่ก็ยังคงข้อดีอยู่ก็คือไม่ว่าเราจะเปลี่ยนความถี่ของคลื่นพาห์ของ PWM วงจรรูณยังสามารถทำงาน และ ไม่ต้องทำการปรับแต่งวงจรเพื่อหาจุดการทำงานที่เหมาะสมแต่อย่างใด ทำให้เกิดความสะดวกในการใช้งาน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] B.Gilbert , “A Precision Four-Quadrant Multiplier With Subnanosecond Response,” IEEE J.Solid-State Circuits, vol. SC-9, pp.364-373, Dec.1968
- [2] D.C.Soo and R.G.Meyer, “A Four-Quadrant NMOS Analog Multiplier,” IEEE J.Solid-State Circuits, vol. SC-17, pp.1174-1178, Dec.1982
- [3] S.C.Qin and R.L.Geiger, “A  $\pm 5$ -V CMOS Analog Multiplier,” IEEE J.Solid-State Circuits, vol. SC-22, pp.1143-1146, Dec.1987
- [4] พงษ์ศักดิ์ พร้อมวงศ์ และ กอบชัยเดชหาญ, “วงจรถนุณสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแรนต์แบบซีมอสที่ระดับแรงดันต่ำ,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมทางไฟฟ้า ครั้งที่ 21, หน้า 715-718, พ.ศ. 2541
- [5] J.N.Banezhad and G.C. Temes, “A 20-V Four-Quadrant CMOS Analog Multiplier,” IEEE J.Solid-State Circuits, vol.SC-20, pp.1158-1168, Dec.1985
- [6] K.Bult and H.Wallinga, “A CMOS Four-Quadrant Analog Multiplier,” IEEE J.Solid-State Circuits, vol.SC-21, pp.430-435, June.1986
- [7] C.W.Kim and S.B.Park, “New Four-Quadrant CMOS Multiplier,” Electronics Letters., vol.23, pp.1268-1270, Nov.1987
- [8] J.S.Pena-Finol and J.A.Connelly, “A MOS Four-Quadrant Analog Multiplier Using the Quarter-Square Technique,” IEEE J.Solid-State Circuits, vol.SC-22, pp.1064-1073, Dec.1982
- [9] H.J.Song and C.K.Kim, “An MOS Four-Quadrant Analog Multiplier Using Simple Two-Input Squaring Circuits With Source Followers,” IEEE J.Solid-State Circuits, vol.25, pp.841-848, June.1990
- [10] Y.H.Kim and S.B.Park, “Four-Quadrant CMOS Analogue Multiplier,” Electronics Letters, vol.28, pp.649-650, Mar.1992
- [11] อธิพิงศ์ ชัยสาขันธ์ นฤต สุวรรณชาติ สมเกียรติ พรานทอง และ กอบชัย เดชหาญ , “วงจรถนุณสัญญาณที่ใช้แรงดันไฟเลี้ยงต่ำ,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21, หน้า 293-296, พ.ศ.2541
- [12] T.Botha , “CMOS Analogue Current-Steering Multiplier,” Electronics Letters , vol.28, pp.649-650, Mar.1992
- [13] J.Ramirez-Angulo, “Highly Linear Four Quadrant Analogue BiMOS Multiplier For  $\pm 1.5$  V Supply Operation,” Electronics Letters , vol.28, pp.1783-1785, Sep.1992

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] A.L.Coban and P.E.Allen, "Low-Voltage Four-Quadrant analogue CMOS Multiplier," *Electronics Letters*, vol.28, pp.649-650, Mar.1992
- [15] S.I.Liu, "Low Voltage COMS Four-Quadrant Multiplier," *Electronics Letters*, vol.30, pp.2125-2126, Dec.1994
- [16] J.H.Tsay S.I.Liu J.J.Chen and Y.P.Wu, "CMOS Four-Quadrant Multiplier Using Triode Transistors Based on Regulated Cascode Structure," *Electronics Letters*, vol.31, pp.962-963, Mar.1992
- [17] อธิพิงศ์ บุศบงกรศ กอบชัย เชนหาญ และ สุชาติ คุณทวีเทพ, "วงจรรคูณสัญญาณแบบ 4 ควอดเรนต์ โดยใช้ซีมอสช่วงไม้อิมิตัว," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18, หน้า 642-645, พ.ศ.2538
- [18] อธิพิงศ์ ชัยสาขันธ์ ชานี ใจประดิษฐ์ธรรม และ กอบชัย เชนหาญ, "วงจรรคูณสัญญาณที่มี ช่วงปฏิบัติการกว้างโดยใช้แหล่งจ่ายเดียว," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20, หน้า 55-59, พ.ศ.2540
- [19] J.G.Holt, "A Two-Quadrant Analog Multiplier Integrated Circuit," *IEEE J.Solid-State Circuits*, vol.SC-8, pp.434-439, Dec.1973
- [20] S.A.Krishna, "An Economic Multiplier Based on The PWAM Principle," *INT.J.Eelectronics*, vol.49, pp.261-264, 1980
- [21] R.S.Fyath and S.A.Abdullah, "Analogue Multiplier Using Compound Pulse-Time Modulation," *INT.J.Eelectronics*, vol.59, pp.603-608, 1985
- [22] R.S.Fyath and S.A.Abdullah, "Analogue Multiplier Using Pulse-Interval Modulation," *INT.J.Eelectronics*, vol.59, pp.471-476, 1985
- [23] วิวัฒน์ กิรานนท์, วิศวกรรมสื่อสาร, กรุงเทพฯ, อักษรสยามการพิมพ์, พ.ศ.2540
- [24] สุรศักดิ์ ทองธรรมชาติ, คณิตศาสตร์สำหรับวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร, กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ.2539
- [25] ณรงค์ฤทธิ์ มณีจิระปราการ ปราโมทย์ วาดเขียน และ อธิรัชย์ อรุณศรีแสงชัย, "การวิเคราะห์ ทางคณิตศาสตร์ของสเปกตรัม PWM และ PPM เพื่อการคิมอดูเลชันอย่างง่าย," *วิศวกรรมสาร* กระบี่, vol.15, pp.142-147, Dec.1998
- [26] P.R.Gray and R.G.Meyer, *Analysis And Design Of Integrated Circuits*, New York, John Wiley & Sons, 1977
- [27] A.B.Williams, *Designer's Handbook Of Integrated Circuits*, New York, McGraw-Hill, 1984

- [28] C.F.Chan H.Ling and O.Choy, "A One Volt Four-Quadrant Analog Current Mode Multiplier Cell," IEEE J.Solid-State Circuits, vol.30, pp.1018-1019, Sep.1995
- [29] K.Kimura , "A Bipolar Four-Quadrant Analog Quarter-Square Multiplier Consisting Of Unbalanced Emitter-Coupled Pair and Expansions Of Its Input Ranges, "IEEE J.Solid-State Circuits, vol.29, pp.43-55, Jan.1994
- [30] Y.J.Wong and W.E.Ott , **Function Circuits Design and Applications** , New York , McGraw-Hill , 1976



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



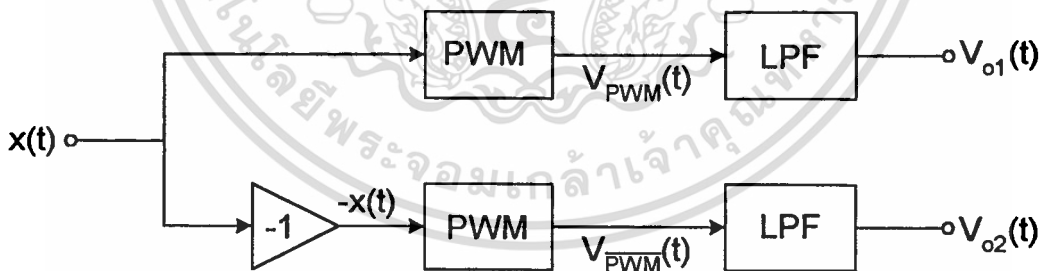
## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

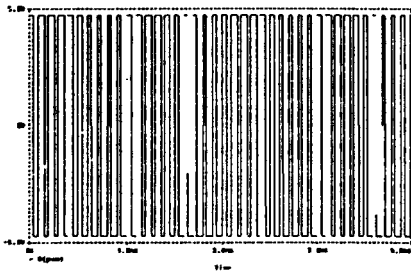
## การมอดูเลทความกว้างของพัลส์ และการกลับเฟสสัญญาณ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการนำเอาการมอดูเลทความกว้างของพัลส์และการกลับเฟสสัญญาณมาเป็นส่วนประกอบของวงจรคุณ โดยที่วงจรคุณ โครงสร้างที่ 1 อาศัยการมอดูเลท PWM กับสัญญาณอินพุตที่กลับเฟสกัน 180 องศา ในขณะที่ โครงสร้างที่ 2 อาศัยการกลับเฟสสัญญาณ PWM ซึ่งกรรมวิธีทั้งสองที่ได้กล่าวมานี้ ให้ผลที่เหมือนและแตกต่างกันบางประการเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ของ PWM

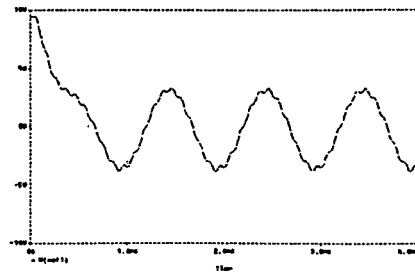
กรณีของโครงสร้างที่ 1 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานแสดงไว้ในรูปที่ ผ.1 ส่วนรูปสัญญาณไฟฟ้าที่ตำแหน่ง ต่างๆของวงจรเมื่อใช้ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ของ PWM = 50 % แสดงไว้ในรูปที่ ผ.2 และเมื่อใช้ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ของ PWM = 30 % แสดงไว้ในรูปที่ ผ.3 จากรูปสัญญาณไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ของการมอดูเลทความกว้างของพัลส์และการกลับเฟสสัญญาณ ของโครงสร้างที่ 1 ในรูปที่ ผ.2 และ ผ.3 จะเห็นว่าค่า  $V_{o1}(t)$  และ  $V_{o2}(t)$  จะมีความแตกต่างกันเฉพาะเฟสที่ต่างกัน 180 องศาเท่านั้นว่าค่าดัชนีการมอดูเลทของ PWM จะมีค่าเป็นเท่าไรก็ตาม



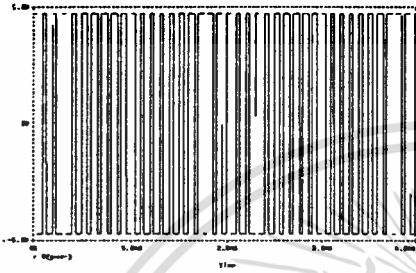
รูปที่ ผ.1 บล็อกไดอะแกรมการมอดูเลทความกว้างของพัลส์และการกลับเฟสสัญญาณ  
โครงสร้างที่ 1



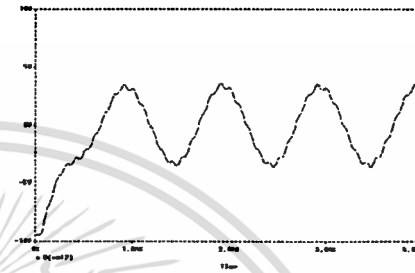
ผ.2(ก)



ผ.2(ข)



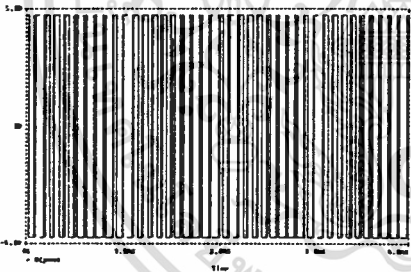
ผ.2(ค)



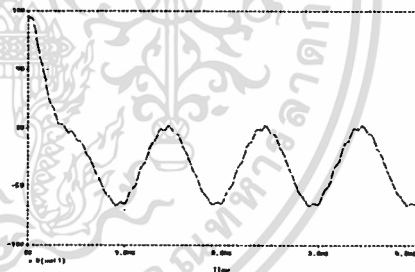
ผ.2(ง)

รูปที่ ผ.2 สัญญาณ ไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างที่ 1 เมื่อค่านอตุเลขชั้นอินเด็กซ์ของ

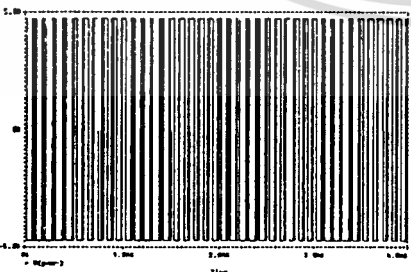
PWM = 50% (ก)  $V_{PWM}(t)$  (ข)  $V_{O1}(t)$  (ค)  $V_{PWM}(t)$  (ง)  $V_{O2}(t)$



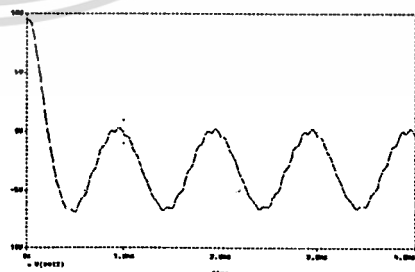
ผ.3(ก)



ผ.3(ข)



ผ.3(ค)



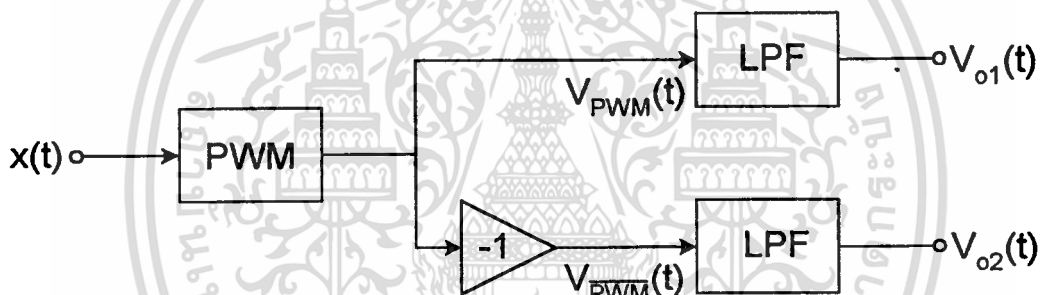
ผ.3(ง)

รูปที่ ผ.3 สัญญาณ ไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างที่ 1 เมื่อค่านอตุเลขชั้นอินเด็กซ์ของ

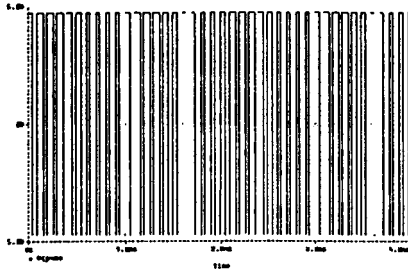
PWM = 30% (ก)  $V_{PWM}(t)$  (ข)  $V_{O1}(t)$  (ค)  $V_{PWM}(t)$  (ง)  $V_{O2}(t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

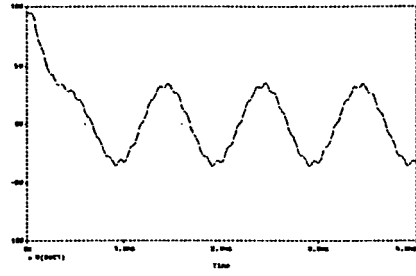
กรณีของโครงสร้างที่ 2 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานแสดงไว้ในรูปที่ ผ.4 ส่วนรูปสัญญาณไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆของวงจรเมื่อใช้ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ของ PWM = 50 % แสดงไว้ในรูปที่ ผ.5 และเมื่อใช้ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ของ PWM = 30 % แสดงไว้ในรูปที่ ผ.6 จากรูปสัญญาณไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ของการมอดูเลทความกว้างของพัลส์และการกลับเฟสสัญญาณ ของโครงสร้างที่ 2 ในรูปที่ ผ.5 และ ผ.6 จะเห็นว่าค่า  $V_{o1}(t)$  และ  $V_{o2}(t)$  นอกจากจะมีความแตกต่างกันที่เฟสมีความกันต่างกัน 180 องศาแล้ว ค่าแรงดันออฟเซตยังมีค่าที่ตรงข้ามกันอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ ผ.6 ในกรณีเมื่อใช้ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ของ PWM = 50 % ค่าแรงดันออฟเซตของ  $V_{o1}(t)$  มีค่าเป็นศูนย์จึงทำให้  $V_{o2}(t)$  มีความแตกต่างจาก  $V_{o1}(t)$  เฉพาะเฟสที่ต่างกัน 180 องศาเท่านั้น จึงทำให้โครงสร้างที่ 2 ทำงานได้ผลเหมือนกับ โครงสร้างที่ 1 เมื่อใช้ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ของ PWM = 50 % เท่านั้น



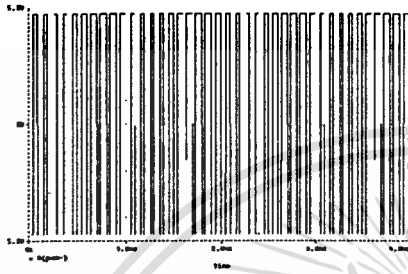
รูปที่ ผ.4 บล็อก ไดอะแกรมการมอดูเลทความกว้างของพัลส์และการกลับเฟสสัญญาณ  
โครงสร้างที่ 2



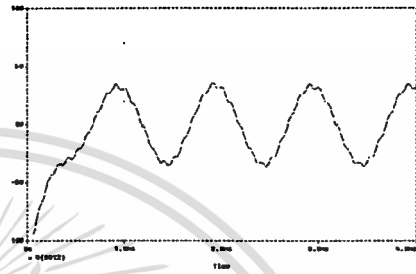
ผ.5(ก)



ผ.5(ข)

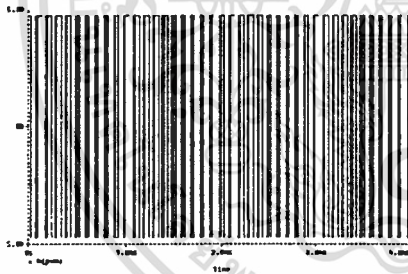


ผ.5(ค)

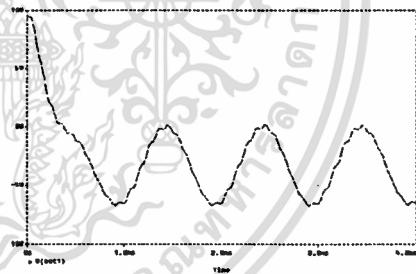


ผ.5(ง)

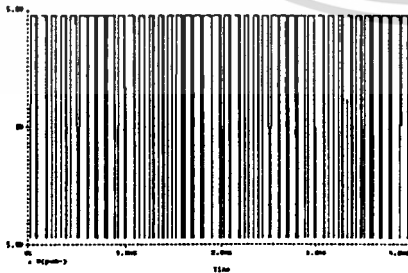
รูปที่ ผ.5 สัญญาณไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างที่ 2 เมื่อค่ามอดูเลชันอินดิเคซ์ของ PWM = 50% (ก)  $V_{PWM}(t)$  (ข)  $V_{O1}(t)$  (ค)  $V_{\overline{PWM}}(t)$  (ง)  $V_{O2}(t)$



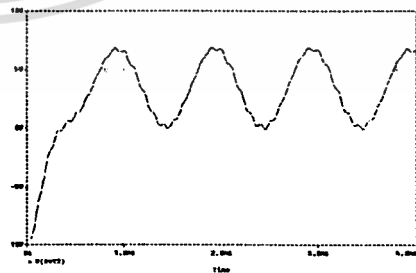
ผ.6(ก)



ผ.6(ข)



ผ.6(ค)



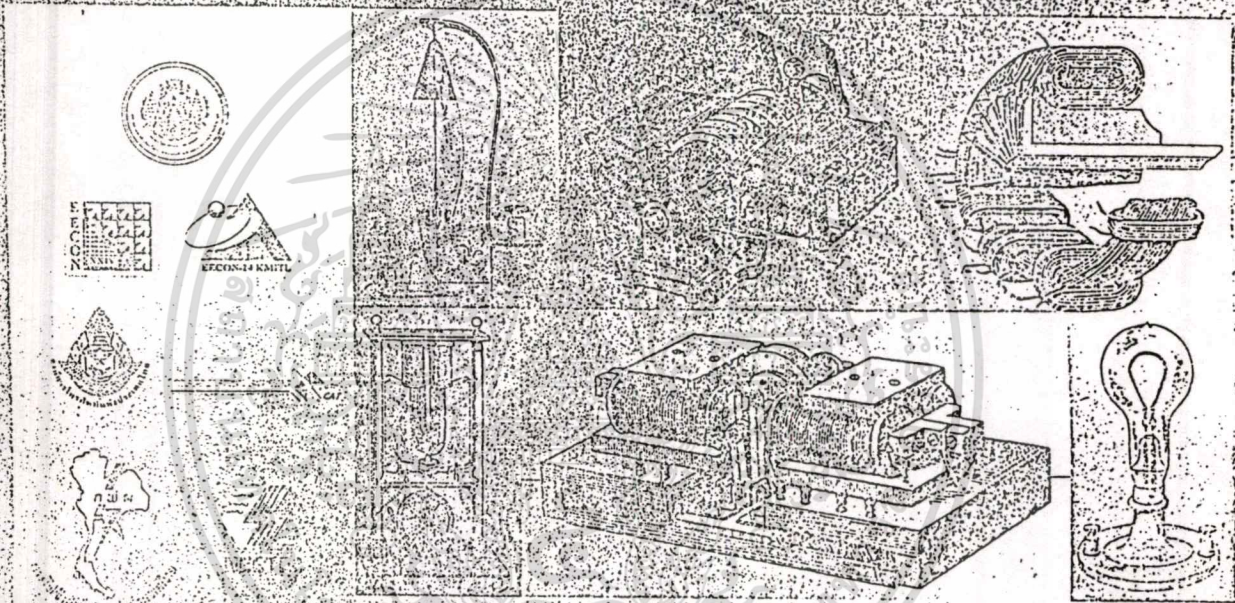
ผ.6(ง)

รูปที่ ผ.6 สัญญาณไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างที่ 2 เมื่อค่ามอดูเลชันอินดิเคซ์ของ PWM = 30% (ก)  $V_{PWM}(t)$  (ข)  $V_{O1}(t)$  (ค)  $V_{\overline{PWM}}(t)$  (ง)  $V_{O2}(t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24

## 24<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-24)



Volume 2

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 2544

ดำเนินการโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

22-23 พฤศจิกายน 2544

โทร : 0-2739-2359 โทรสาร : 0-2326-9965  
<http://www.ladkrabang.com>

วงจรคูณสัญญาณสี่ควอดแรนต์โดยการใช้เทคนิคการ PWM ที่ปราศจากอิทธิพลของความถี่และดัชนีการมอดูเลตของ PWM.

Four quadrant multiplier based on PWM without effect of frequency and modulation index of PWM

รศ.ดร. จันทร์คุณภาส<sup>1</sup> ปราโมทย์ วาดเขียน<sup>1</sup> และ พงษ์ชัย มณีบุเกศ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

<sup>2</sup>ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ พิษณุโลก

โทร (01)8061801 E-mail : jomulbcp@dmns.moph.go.th

**บทคัดย่อ**

ในบทความนี้ ได้นำเสนอโครงสร้างวงจรคูณสัญญาณโดยใช้เทคนิคการของ PWM 2 โครงสร้าง โดยโครงสร้างแบบแรกใช้ PWM 2 ตัวที่มีความถี่เดียวกัน มอดูเลตด้วยสัญญาณอินพุตที่ต่างกัน 180 องศา แล้วนำ PWM ทั้งสอง ไปเป็นคลื่นพาห้ให้กับ PAM ส่วนโครงสร้างที่สอง เป็นการปรับปรุงโครงสร้างให้แตกต่างโดยทำให้เหลือ PWM เพียงตัวเดียวด้วยเทคนิคของการกลับเฟส PWM ทำให้ได้โครงสร้างวงจรคูณที่ปราศจากอิทธิพลของความถี่และดัชนีการมอดูเลตของ PWM ทำให้ได้วงจรคูณที่สามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ต้องทำการปรับแต่งสัญญาณที่เอาเข้าการทำงานที่แน่นอน

**Abstract**

In this paper , we present two models of four quadrant multiplier based on PWM. The first model uses 2 PWM modulated with input signal that have phase different 180 degree for creating carrier in PAM. Second model was reform by using one PWM with inverse phase of PWM exist multiplier with out effect of frequency and modulation index of PWM

**บทนำ**

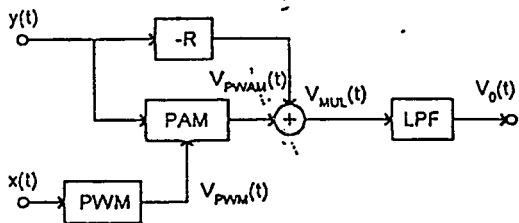
ในปัจจุบัน กระบวนการในการประมวลผลสัญญาณ นับได้ว่าเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการทำงานของระบบต่างๆ มากมาย อาทิเช่น ระบบการสื่อสาร, ระบบวัดคุม ฯลฯ และฟังก์ชันการคูณกันของสัญญาณ ก็เป็นฟังก์ชันหนึ่งซึ่งจำเป็นที่ถูกลำเลียงเข้ามาในการประมวลผลสัญญาณกันอย่างกว้างขวาง ซึ่งฟังก์ชันการคูณกันสามารถสร้างขึ้นได้ด้วยหลายเทคนิค อาทิเช่น ใช้หลักการการคูณเชิงอนุพันธ์ของ DFT Process [1], หลักการผลต่างกำลังสองโดยใช้ CMOS [2], หลักการใช้ฟังก์ชันเชิงตรรก [3] และหลักการ PWM เทคนิค (4-6)

โดยหลักการที่ใช้กล่าวมาแล้วมีข้อดีซึ่งแตกต่างกัน เช่น หลักการ ทารบลิเนียร์ , หลักการผลต่างกำลังสอง , และ ฟังก์ชันเชิงตรรก มีข้อเสียที่ย่านการทำงานขณะ โวลเตจอินพุตทุกตัว และมีผลของอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง ในขณะที่เทคนิคของ PWM และ PWM-PWM [7] มีข้อเสียที่ย่านการทำงานขณะระดับอินพุตทุกตัวและมีอิทธิพลของอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้องน้อยกว่า 3 แบบแรกที่ถูกกล่าวมาแล้วแต่ข้อดีก็เกิดขึ้นคือ ต้องใช้วงจรกรองความถี่ต่ำเพื่อกรองเอาแต่เฉพาะผลคูณต่างผลทำให้เกิดความผิดพลาด ในการคูณสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่สูงๆ และ การทำเป็นวงจรคูณสี่ควอดแรนต์ที่สมบูรณ์ทำได้กับสัญญาณคลื่นแสดงในขดสารเชิงยิ่งที่ [6] นำเสนอโดย R.S.FYATHI และ คณะ ซึ่งอาศัยหลักการ PWM หรือ PIAM แต่ข้อเสียของการทำงานขณะจริงก็เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนมอดูเลชันอินพุตหรือการที่คลื่นพาห้ของ PWM จะต้องปรับกำลังความแปรปรวนๆ เพื่อให้วงจรทำงานเป็นวงจรคูณสี่ควอดแรนต์ที่สมบูรณ์

ดังนั้นในบทความนี้ จึงได้นำเสนอ วงจรคูณสัญญาณสี่ควอดแรนต์ โดยอาศัยหลักการของ PWM แล้ววงจรกรองความถี่ของ R.S.FYATHI และเมื่อมีการปรับค่าอินพุตอินพุตของ PWM วงจรคูณยังคงทำงานได้อย่างสมบูรณ์ส่วนวงจร PIAM ใช้เพียงตัวเดียว ซึ่งโครงสร้างวงจรที่ได้มีขั้นตอนมี 2 รูปแบบ ดังจะได้กล่าวในบทต่อไป สำหรับรายละเอียดที่อธิบายในบทความนี้จะประกอบไปด้วย หลักการทำงานของวงจรคูณแบบ PWM ของ R.S.FYATHI และโครงสร้างวงจรคูณที่ได้มีเสนอทั้งแบบวงจร จากนั้นเป็นการลดขนาดและผลสุดท้ายเป็นการสรุปการทำงานวงจรและผล

**หลักการทํางาน**

ก่อนที่จะทำความเข้าใจโครงสร้างวงจรที่นำเสนอ เราจะมาพิจารณาหลักการของ วงจรคูณ สี่ควอดแรนต์ ที่ใช้เทคนิค PWM โดยอาศัยโครงสร้างของ R.S.FYATHI เทียบก่อน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภูมิการทำงาน วงจรจุดที่ควมแครนซ์ ของ R.S.FYATH

จากการพิจารณารูปสัญญาณ  $v_{PWM}(t)$  ในรูปที่ 1 จาก [9] เมื่อมี  $x(t)$  เป็นสัญญาณอินพุตจะได้ว่า

$$v_{PWM}(t) = \frac{Ak}{T} [1 + x(t)] + Q_1(t) \quad (1)$$

โดยที่  $A$  คือแอมพลิจูด,  $k$  คือค่าคงที่ ที่ขึ้นอยู่กับดัชนีการมอดูเลทของ PWM,  $T$  คือ คาบเวลาของสัญญาณ PWM และ

$$Q_1(t) = \frac{A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sin(n\omega_0 t)}{n} - \frac{\sin(n\omega_0(t - kx(t)))}{n} \right\}$$

ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสัญญาณความถี่สูง จากนั้นนำสัญญาณ PWM ที่ได้ไปทำการซีกค่าสัญญาณอินพุต  $y(t)$  จะได้

$$v_{PAM}(t) = \frac{Ak}{T} y(t) [1 + x(t)] + y(t) Q_1(t) \quad (2)$$

และ

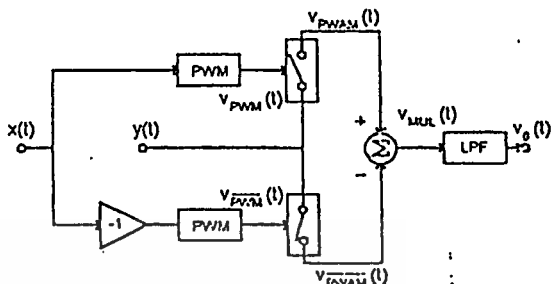
$$v_{MUL}(t) = y(t) \left( \frac{Ak}{T} - R \right) + \frac{Ak}{T} [x(t)y(t)] + y(t) Q_1(t) \quad (3)$$

จาก (3) เมื่อ  $\frac{Ak}{T} = R$  และ  $Q_1(t)$  ซึ่งเป็นเทอมขององค์ประกอบความถี่สูง เมื่อถูกกรองด้วย LPF มีความถี่คัตออฟที่เหมาะสม จะได้

$$v_o(t) = \frac{Ak}{T} x(t)y(t) \quad (4)$$

ซึ่งจะได้วงจรจุดที่ควมแครนซ์ที่สมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตามถ้าเราพิจารณาถึงเงื่อนไขการได้มาของสมการที่ (4) เราพบว่า  $\frac{Ak}{T} = R$  โดยที่  $T$  คือคาบเวลาของสัญญาณ PWM และ  $k$  คือค่าคงที่ ที่ขึ้นอยู่กับดัชนีการมอดูเลทของ PWM ดังนั้นถ้ามีการเปลี่ยน  $T$  หรือ  $k$  จะส่งผลกระทบต่อวงจรจุดที่ควมแครนซ์ทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นมาได้ เพื่อ

เป็นการจำกัดปัญหาเหล่านี้ เราจะพิจารณาวงจรใหม่ที่ได้ นำเสนอในแบบที่ 1



รูปที่ 2 แผนภูมิการทำงาน วงจรจุดที่ควมแครนซ์โดยขยายหลักการ PWM

จาก [9] สัญญาณ  $x(t)$  ซึ่งเป็นสัญญาณอินพุตของวงจรจุดที่ 1 เมื่อทำการมอดูเลทความกว้างของพัลส์กับสัญญาณพาหะที่มีความถี่  $\omega_0$  ผลการที่ได้คือถึงการมอดูเลท ก็

$$v_{PWM}(t) = \frac{Ak}{T} [1 + x(t)] + Q_1(t) \quad (5)$$

เมื่อ  $A, k, T$  เป็นค่าคงที่ จากนั้นทำการซีกค่าสัญญาณ  $y(t)$  โดยขยาย  $v_{PWM}(t)$  เป็นสัญญาณพาหะ

$$v_{PAM}(t) = v_{PWM}(t)y(t) \quad (6)$$

$$v_{MUL}(t) = \frac{Ak}{T} y(t) + \frac{Ak}{T} x(t)y(t) + Q_2(t) \quad (7)$$

โดยที่

$$Q_2(t) = \frac{A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{y(t) \sin(n\omega_0 t)}{n} - \frac{y(t) \sin(n\omega_0(t - kx(t)))}{n} \right]$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อทำการมอดูเลทความกว้างของพัลส์กับสัญญาณ  $-x(t)$  จะได้

$$v_{PWM}(t) = \frac{Ak}{T} [1 - x(t)] + Q_3(t) \quad (8)$$

โดยที่

$$Q_3(t) = \frac{A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sin(n\omega_0 t)}{n} - \frac{\sin(n\omega_0(t + kx(t)))}{n} \right\}$$

จากนั้นทำการชักค่าสัญญาณ  $y(t)$  โดยอาศัย  $v_{PWM}(t)$  เป็นสัญญาณพาหะ

$$v_{PWM}(t) = \frac{Ak}{T} y(t) - \frac{Ak}{T} x(t)y(t) + Q_1(t) \quad (9)$$

โดยที่

$$Q_1(t) = \frac{A}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \frac{y(t) \sin(n\omega_0 t)}{n} - \frac{y(t) \sin(n\omega_0(t+kx(t)))}{n} \right\}$$

นำเอา (7)-(9)

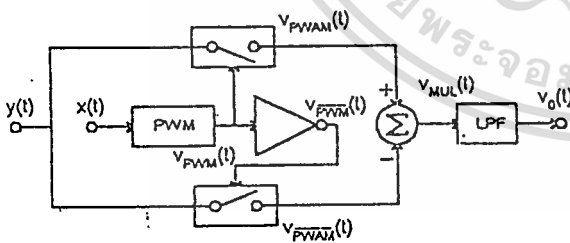
$$v_{MUL}(t) = \frac{2Ak}{T} x(t)y(t) + [Q_2(t) - Q_1(t)] \quad (10)$$

จาก (10) เทอมแรกคือผลคูณของ  $x(t)$  และ  $y(t)$  ที่คูณกับค่าคงที่ ส่วนในเทอมที่สองเป็นองค์ประกอบของสัญญาณความถี่สูง ถ้านำไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ จะทำให้เทอมการในเทอมที่สองหายไป ทำให้ได้

$$v_o(t) = Kx(t)y(t) \quad (11)$$

เมื่อ  $K = \frac{2Ak}{T}$  ซึ่งเป็นค่าคงที่

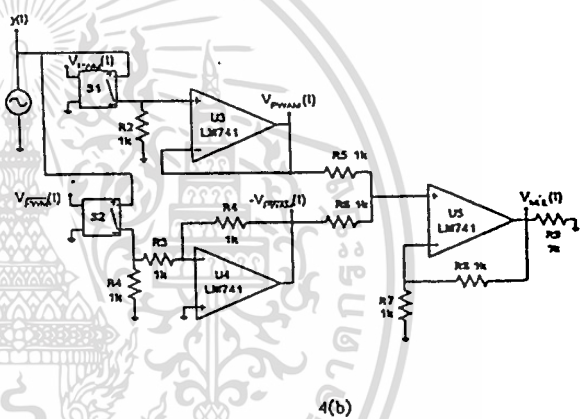
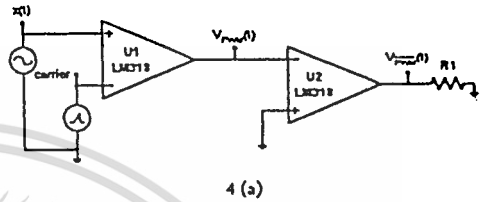
ในส่วนของการมอดูเลตความถี่สูงของพัลส์กับสัญญาณ  $-x(t)$  สามารถทำได้โดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ต่อเข้ากับสัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตความถี่สูงของพัลส์กับสัญญาณ  $x(t)$  ดังนั้นเราสามารถเขียนบล็อกการทำงานของหลักการนี้ได้ใหม่ดังนี้



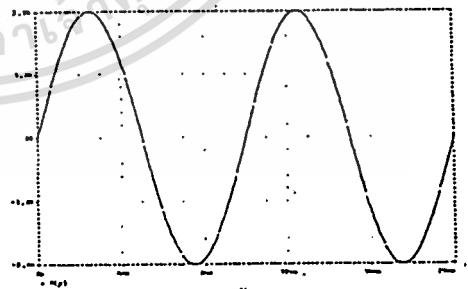
รูปที่ 3 แผนภูมิการทำงานของวงจรจนถึงจากการปรับปรุง

การทดลองและเขียนแบบ

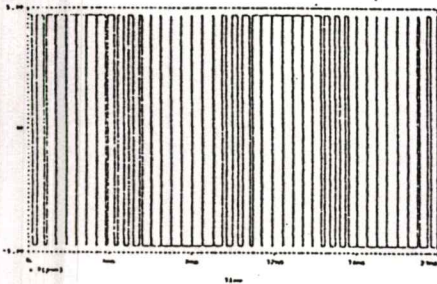
จากหลักการที่ได้กล่าวมา เราได้ทำการทดลองเขียนแบบวงจรโดยโปรแกรมสไปซ์ โดยอาศัยโครงสร้างวงจรตามรูปที่ 3 และตามรูป 4 โดยที่การทดลองเป็นต้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยทำการทดลองป้อนอินพุตที่มีค่าคือเป็นคลื่นรูป sine มีความถี่ 100 Hz และใช้สัญญาณรูปตามเหลี่ยมมีความถี่ 4 kHz ทำหน้าที่เป็นคลื่นพาหะในการมอดูเลตความถี่สูงของพัลส์ผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5



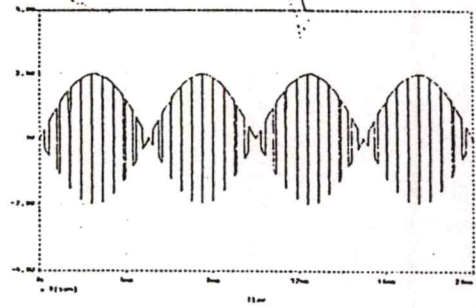
รูปที่ 4 (a) วงจรมอดูเลตความถี่สูงของพัลส์และส่วนกลับของสัญญาณ 4(b) วงจรชักค่าสัญญาณและรวมสัญญาณ



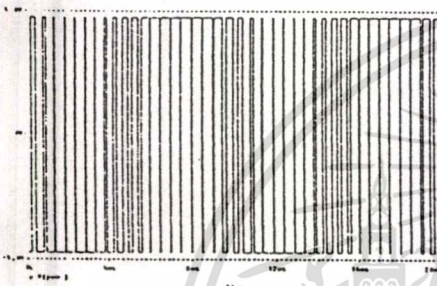
5(a)



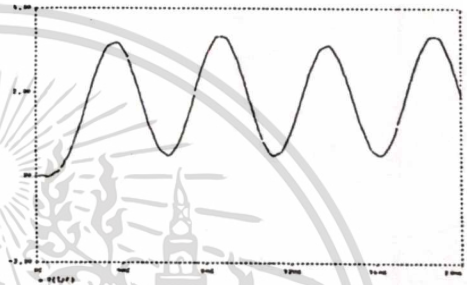
5(b)



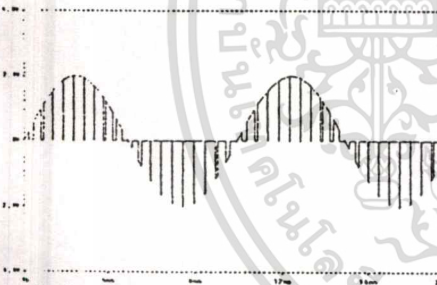
5(f)



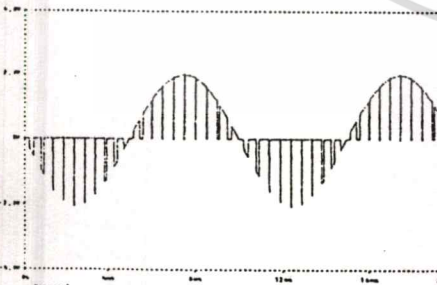
5(c)



5(g)



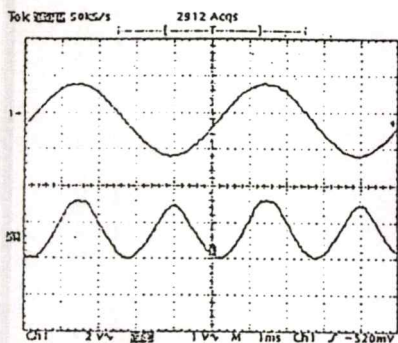
5(d)



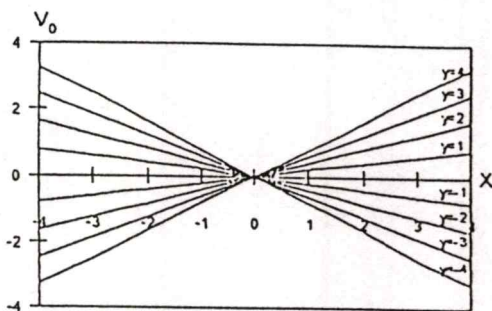
5(e)

- รูปที่ 5 (a) สัญญาณ อินพุต  $x(t)$  และ  $y(t)$  มีความถี่ 100 Hz เท่ากัน  
 (b) สัญญาณ  $v_{PWM}(t)$  (c) สัญญาณ  $v_{PWM}(t)$  (d) สัญญาณ  $v_{PWM}(t)$  (e) สัญญาณ  $v_{PWM}(t)$  (f) สัญญาณ  $v_{PWM}(t)$   
 (g) สัญญาณที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำ  $v_o(t)$

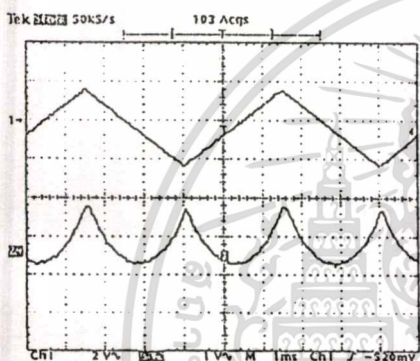
จากวงจรในรูปที่ 4 เราได้ทำการทดลองจริง โดยใช้ไฟเลี้ยงวงจร  $\pm 6V$  ในส่วนของ PWM และส่วนกลับของ PWM ใช้ชิปแอนาไลเซอร์ LM318 ตัววัดที่ใช้วัดค่าสัญญาณใช้โอสิลอสโคป 4066 และในส่วนวงจรรวมสัญญาณใช้ชิปแอนาไลเซอร์ LM741 สัญญาณตามเทอมที่ใช้เป็นสัญญาณพาหะในการมอดูเลตความกว้างของพัลส์มีความถี่ 40 kHz โดยทำการป้อนอินพุตค่าเดียวกัน 2 รูปแบบ ก็คือรูปไซน์และตามแนบเส้น มีความถี่ 200 Hz ผลที่ได้ยกมาอยู่ในรูปยกกำลังสองข้างแสดงในรูป 6(a) และ 6(b) จากนั้นทำการป้อนสัญญาณอินพุตที่มีความถี่ต่างกัน 10 เท่า โดยที่  $x(t) = 20$  Hz และ  $y(t) = 200$  Hz ผลที่ได้แสดงในรูป 6(c) รูปที่ 7 แสดงคุณสมบัติทางไฟตรงของ วงจรลด ส่วนในรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า THD กับความถี่ของคลื่นพาหะและดัชนีการมอดูเลตของ PWM



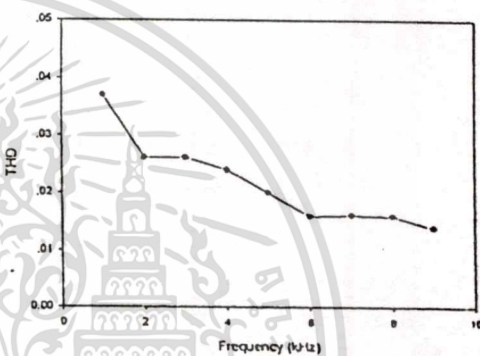
6(a)



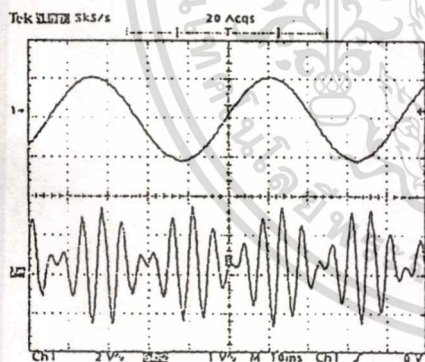
รูปที่ 7 ฤดูสมบัติทางไฟตรงของวงจรถูก



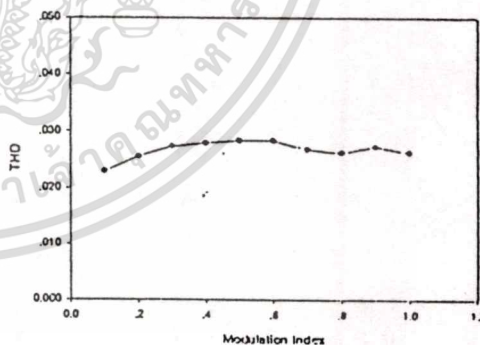
6(b)



8(a)



6(c)



8(b)

รูปที่ 6 (a) ผลคูณของสัญญาณอินพุตคลื่นรูป sine (b) ผลคูณของสัญญาณอินพุตคลื่นรูปสามเหลี่ยม (c) ผลคูณของสัญญาณคลื่นรูป sine ที่มี ความถี่ต่างกัน 10 เท่า

รูปที่ 8 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า THD กับความถี่คลื่นพาห้ของ PWM (b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า THD กับดัชนีการมอดูเลตของ PWM

**สรุปผลการทดลอง**

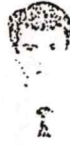
จากผลการทดลองและผลการเขียนแบบแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างของวงจรถูกแบบ PWM ที่เราได้นำเสนอขึ้นนี้ให้ผลการทำงานที่ดี

กล่าวโครงสร้างของ R.S.FYATH กล่าวคือ การทำงานของวงจรสามารถทำการคูณแบบที่ควอดเรนต์ได้สมบูรณ์แม้ว่าจะเปลี่ยน ค่าความถี่ของคลื่นพาห์ของ PWM หรือเปลี่ยนค่าความถี่การมอดูเลทของ PWM ไปที่ค่าต่างๆก็ตาม ซึ่งผลการทดลองอินพุตได้รูปที่ 8(a) และ 8(b) ในขณะที่โครงสร้างของ R.S. FYATH ไม่สามารถทำได้ นอกจากนี้แล้วโครงสร้างที่เราได้นำเสนอทั้งสองแบบ โดยแบบแรกจะคือใช้วงจรกับค่าของอินพุต  $x(t)$  เป็น  $-x(t)$  ในขณะที่ โครงสร้างแบบที่สองเราอาศัยเทคนิคการกลับเฟสของ PWM ทำให้เหมือนเป็นการกลับเฟสสัญญาณ  $x(t)$  เป็น  $-x(t)$  ดังได้อธิบายมาแล้ว ซึ่งจะได้อิงจรที่เล็กกว่าเพราะใช้เกตซีโวลต์เจอร์ แทนที่จะเป็นวงจรถายแบบกลับเฟส ในขณะที่การทำงานทั้งสองโครงสร้างยังคงเหมือนเดิม

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] B.Gilbert, " A precise four quadrant multiplier with subnanosecond response ", IEEE J.Solid-State Circuit, vol Sc-3, no.4, pp.365-375, Dec 1968
- [2] พรเทพ จันทร์ฤมาภาส ธงชัย มณีชูเกตุ วิชา แสงพิสิทธิ์ ปราโมทย์ วาดเขียน และ วิวัฒน์ กิรานนท์, " วงจรคูณสัญญาณ ด้วยหลักการควอดเรนต์-สแควร์โคไซน์มอด ", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19, vol 2, pp. EL174-177, 1996
- [3] Ferrel G. Stremier, " Introduction to Communication System ", Addison-Wesley, pp213-214
- [4] James G. Holt, " A two quadrant analog multiplier integrated circuit ", IEEE J.Solid-State Circuits, vol.SC-8, no.6, pp434-439, Dec1973
- [5] S.SASHOKA KRISHNA BHAT, " An economic multiplier base on the PWAM principle ", INT. J.ELECTRONICS, vol49, no.3, pp261-264, 1980
- [6] R.S. FYATH and S.A. ABDULLAH, " Analogue multiplier using pulse-interval modulation " INT. J.ELECTRONICS, vol.59, no.4, pp.471-476, 1985.
- [7] R.S. FYATH and S.A. ABDULLAH, " Analogue multiplier using pulse-time modulation " INT. J.ELECTRONICS, vol.59, no.5, pp.603-608, 1985.
- [8] C.A. KARYBAKAS and C.A. BARBARGIRES, " New sampled-data analogue multiplier " INT. J.ELECTRONICS, vol.68, no.4, pp.539-545, 1990.
- [9] ณรงค์ฤทธิ์ มณีจิระปราการ ปราโมทย์ วาดเขียน และ อธิชัย อรุณศรีแสงชัย, " การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของสเปกตรัม PWM และ PPM เพื่อการคิมอดูเลชันอย่าง

ง่าย ", วิศวกรรมสารฉบับที่ 15, no.2, pp 142-147, December 1998



เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)



เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) เมื่อปี 2533 และ 2540 คามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. รับผิดชอบงานสอนและวิจัยทางด้านวิศวกรรมสื่อสารทั้งระบบอนาลอกและดิจิทัล การประมวลผลสัญญาณอนาลอกและดิจิทัล วงจรรวมแบบอนาลอก



ธงชัย มณีชูเกตุ ดำรงการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พิษณุโลก ปี 2531 และ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) เมื่อปี 2539 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแคว้น พิษณุโลก รับผิดชอบงานสอนและวิจัยทางด้านกรออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์

## ประวัติผู้เขียน

นายพรเทพ จันทร์คุณากาส เกิดวันที่ 1 เมษายน พ.ศ.2511 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วิทยาเขตพิษณุโลก ในปีการศึกษา 2533 ประสบการณ์ในการทำงาน เริ่มรับราชการในตำแหน่งนักฟิสิกส์รังสี 3 สังกัดกองรังสีและเครื่องมือแพทย์ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข ในปี 2533 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง นักฟิสิกส์รังสี 6ว.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้