

การออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์

DESIGN OF RESOLVER SIGNAL CONDITIONER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-080-038

การออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์

DESIGN OF RESOLVER SIGNAL CONDITIONER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-080-038

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF RESOLVER SIGNAL CONDITIONER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018

KMITL-2018-EN-M-080-038

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

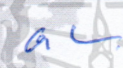




FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

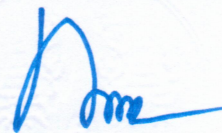
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์
Thesis Title Design of Resolver Signal Conditioner
นักศึกษา นายจักรพันธ์ ทองเจริญ
รหัสประจำตัว 56601475
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมระบบควบคุม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วรรณดี เพชรหมณีล้ำค่า
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-080-038

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อนุชา	แก้วพลสุข	
ศ.ดร.วันชัย	ริ้วรุจา	
ดร.อภิไฉย	ฤกษ์รัตน์	
ผศ.ดร.สิริชัย	ธรรมารักษ์วัฒน์	
ผศ.ดร.วรรณดี	เพชรหมณีล้ำค่า	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-302 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์
นักศึกษา	นายจักรพันธ์ ทองเจริญ
รหัสประจำตัว	56601475
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมระบบควบคุม
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. วรณดี เพชรมณีล้ำค่า

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรปรับแต่งสัญญาณเป็นสัญญาณดีซีที่มีความเป็นเชิงเส้นกับตำแหน่งมุมของอุปกรณ์ที่มีแกนหมุน วงจรปรับแต่งสัญญาณที่นำเสนอประกอบด้วย วงจรดีมอดูเลตสัญญาณ วงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรควบคุมลอจิก และวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย โดยวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมที่ออกแบบขึ้นใช้เทคนิคการป้อนกลับเพื่อให้ได้สัญญาณที่มีความเพี้ยนต่ำ วงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่นำเสนอมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน นอกจากนี้อุปกรณ์ที่ใช้สร้างวงจรสามารถหาซื้อได้ในท้องตลาด อีกทั้งมีราคาถูก เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะการทำงานของวงจร ได้ทำการทดสอบด้วยการต่อวงจรจริงอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Design of Resolver Signal Conditioner
Student	Mr. Jakkapun Tongcharoen
Student ID.	56601475
Degree	Master of Engineering
Program	Control Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Wandee Petchmaneelumka

ABSTRACT

A simple technique for implementation of resolver signal conditioner is presented in this thesis. The obtained output signal in the form of DC voltage is linearly proportional to the position of rotor shaft angle. The proposed conditioner consists of a demodulator, a sine-to-triangular wave converter, a logic control circuit and a triangular-to-sawtooth converter. The proposed sine-to-triangular wave converter utilizes feedback technique for minimize the error of it. The resolver signal conditioner provides the simple configuration and low cost. Moreover, the commercial available devices are used to implement the proposed converter. Experimental results confirming the circuit performance are also detailed in this thesis.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.วรรณดี เพชรมณีล้ำค่า ที่ได้ให้ความรู้และแนะนำแนวทางการวิเคราะห์เนื้อหาสาระของงานวิจัยที่เคยนำเสนอในอดีตเพื่อให้เกิดความเข้าใจในการทำงานและศึกษางานวิจัย ตลอดจนให้คำปรึกษาและแก้ปัญหาต่างๆ เพื่อนำความรู้และทฤษฎีต่างๆ มาประยุกต์ให้เกิดประโยชน์เพื่อนำมาใช้ในการงานวิจัยฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.วันชัย ธีรรัฐ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาในเชิงความคิด วิเคราะห์ หลักเหตุผล ตลอดจนแนะนำความรู้พร้อมให้คำปรึกษาแนะนำที่ดียิ่งเสมอมา

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อนุชา แก้วพลูสุข รองหัวหน้าภาคฟิสิกส์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ในการแนะนำแนวทางหลักคิดทฤษฎีต่างๆ เพื่อนำมาปรับปรุงแก้ไขการศึกษาพัฒนางานวิจัยฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้ให้โอกาสและมอบสถานที่ในการศึกษาวิจัย ตลอดจนเหล่าคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุมที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนเสมอมา

ขอขอบพระคุณ ดร.อภินิย ฤกษ์รัตน์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม และน้องๆ ทีมวิจัยห้องปฏิบัติการ CS-Lab ทุกคน ที่ได้ให้กำลังใจและช่วยเหลือสำหรับการทดลองพัฒนาแก้ปัญหาาร่วมกัน ตลอดจนน้ำใจเอื้อเฟื้อที่มีให้ในทุกๆ ด้าน และคอยเป็นกำลังใจ ให้คำแนะนำที่ดีในหลายๆ ด้าน จนผ่านอุปสรรคได้ด้วยดี

ขอบคุณน้องๆ บริษัท ควาร์ค ซิสเต็ม ทุกคน ที่ช่วยเหลือสนับสนุนให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณสุพินดา จารุมณีโรจน์ และบุคคลสำคัญในครอบครัวอีกหลายท่าน ที่คอยเป็นกำลังใจ เป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมา ด้วยความซาบซึ้งและยินดียิ่ง

จักรพันธ์ ทองเจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 หลักการใหม่ที่น่าสนใจในวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 หลักการทำงานของรีโซลเวอร์.....	4
2.3 การติมอดูเลตสัญญาณ.....	7
2.3.1 การติมอดูเลตสัญญาณแบบตรงจับขอบ.....	7
2.3.2 การติมอดูเลตสัญญาณแบบซิงโครนัส.....	8
2.4 เทคนิคการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์.....	8
2.4.1 เทคนิคการปรับแต่งสัญญาณโดยใช้หลักการเฟสล็อกกลูบ.....	9
2.4.2 เทคนิคการปรับแต่งสัญญาณโดยใช้วิธีการเปิดตาราง.....	10
2.4.3 เทคนิคการปรับแต่งสัญญาณโดยการกลับสถานะการทำงานของ โรเตอร์และสเตเตอร์.....	10
2.5 วงจรโอทีเอ.....	11
2.5 สรุป.....	15
บทที่ 3 บล็อกวงจรที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	16
3.1 กล่าวนำ.....	16
3.2 วงจรติมอดูเลตสัญญาณ.....	16
3.3 วงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยผู้เขียนให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และคั่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4 วงจรควบคุมลอจิก	21
3.5 วงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย	22
3.6 สรุป	28
บทที่ 4 วงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่น่าเสนอ	29
4.1 กล่าวนำ	29
4.2 หลักการทำงานของวงจร.....	29
4.3 สมรรถนะการทำงานของวงจร	33
4.4 การทดสอบและผลการทดสอบการทำงานของวงจร.....	35
4.5 สรุป	41
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะแนวทางการวิจัยต่อ	42
5.1 บทสรุป	42
5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางการวิจัยต่อ	42
เอกสารอ้างอิง	44
ภาคผนวก.....	47
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์คุณสมบัติการทำงานของวงจรโอทีเอ	48
ภาคผนวก ข บทความวิจัยที่ได้เผยแพร่และตีพิมพ์.....	51
ประวัติผู้เขียน.....	62

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 อุปกรณ์แอกทีฟที่ใช้ในการทดสอบวงจร	35
4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบวงจร	35
4.3 ค่าแอมพลิจูดขององค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณไซน์ที่สังเคราะห์ได้	38
4.4 ค่าแอมพลิจูดขององค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณ V_{in}	40



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างภายนอกของรีโซลเวอร์ 5
2.2	วงจรสมมูลของรีโซลเวอร์ 5
2.3	สัญญาณ V_{ex} V_{s1} และ V_{s2} 6
2.4	วงจรตีมอดูเลตสัญญาณแบบตรวจขอบอย่างง่าย 7
2.5	สัญญาณที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.4 7
2.6	หลักการตีมอดูเลตสัญญาณแบบซิงโครนัส 8
2.7	สัญญาณที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.6 8
2.8	เทคนิคการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์โดยใช้เฟสล็อกกลูป 9
2.9	เทคนิคการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์โดยใช้วิธีการเปิดตาราง 10
2.10	เทคนิคการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์โดยใช้การกลับสถานะการทำงานของ ขดลวดโรเตอร์และขดลวดสเตเตอร์ 11
2.11	ไอทีเอ 12
2.12	วงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณไซน์ 13
3.1	บล็อกไดอะแกรมของวงจรปรับแต่งสัญญาณที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ 16
3.2	วงจรตีมอดูเลตสัญญาณ 17
3.3	การทำงานของสัญญาณแต่ละจุดของวงจรในรูปที่ 3.2 18
3.4	บล็อกไดอะแกรมของหลักการแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมที่นำเสนอ 19
3.5	วงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม 20
3.6	วงจรควบคุมลอจิก 21
3.7	สัญญาณลอจิกที่ได้จากวงจรควบคุมลอจิก 22
3.8	วงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย 22
3.9	วงจรที่ลดรูปเพื่อใช้ในการหาค่า V_{out} ในกรณีที่ 1 23
3.10	วงจรร้อยเพื่อใช้ในการหาค่า V_{out1} ในกรณีที่ 1 24
3.11	วงจรที่ลดรูปเพื่อใช้ในการหาค่า V_{out} ในกรณีที่ 2 25
3.12	วงจรร้อยเพื่อใช้ในการหาค่า V_{out2} ในกรณีที่ 2 27
4.1	วงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่นำเสนอ 29
4.2	กราฟสัญญาณการทำงานของวงจรตีมอดูเลตสัญญาณ 31
4.3	กราฟสัญญาณการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม 32
4.4	กราฟสัญญาณการทำงานของวงจรสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย 32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ความผิดพลาดที่เกิดจากสัญญาณพัลส์ควมมีขนาดที่กว้างเกินไป.....	33
4.6 กราฟการทำงานของสัญญาณ V_{ex} V_1 V_2 และ V_c	36
4.7 ผลการทดสอบวงจรตีมอดูเลตสัญญาณ	36
4.8 สัญญาณ V_{ex} และ V_c ที่ทำการขยายกราฟ.....	37
4.9 สัญญาณไซน์ที่สังเคราะห์ได้จากวงจรรูปที่ 2.12	37
4.10 สัญญาณไซน์และองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.12.....	38
4.11 สัญญาณไซน์ V_{sin} และสัญญาณสามเหลี่ยม V_{tri} ของวงจรในรูปที่ 3.5.....	39
4.12 สัญญาณสามเหลี่ยม V_{tri} และองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณ.....	39
4.13 ผลการทดสอบวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย	40
4.14 กราฟพล็อตระหว่างมุม θ กับสัญญาณแรงดันเอาต์พุต V_{out}	41
ก1 โครงสร้างภายในวงจรโอทีเอ.....	48

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

รีโซลเวอร์ (resolver) เป็นทรานสดิวเซอร์ (transducer) ชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับวัดมุมหรือตำแหน่งมุมของอุปกรณ์ที่มีแกนหมุน ซึ่งมีการนำมาใช้งานในระบบการวัดและควบคุมอย่างกว้างขวาง จุดเด่นของรีโซลเวอร์ คือ เป็นทรานสดิวเซอร์ที่มีความน่าเชื่อถือสูงในการทำงานที่สภาวะแวดล้อมแปรปรวน อาทิเช่น อุณหภูมิ ฝุ่นละออง และความสั่นสะเทือน นอกจากนี้รีโซลเวอร์ยังมีความทนทานสูง อีกทั้งยังมีการบำรุงรักษาที่ต่ำ [1-2] การประยุกต์ใช้งานของรีโซลเวอร์ ตัวอย่างเช่น ระบบหุ่นยนต์ในโรงงาน ระบบควบคุมการยิง ระบบเสาอากาศติดตามดาวเทียม และระบบอากาศยาน [2-4] เป็นต้น โครงสร้างของรีโซลเวอร์คล้ายกับมอเตอร์ประกอบด้วยขดลวดโรเตอร์ (rotor) จำนวนหนึ่งขด และขดลวดสเตเตอร์ (stator) จำนวนสองขดซึ่งวางตั้งฉากกัน หลักการทำงานของรีโซลเวอร์เริ่มจากการป้อนสัญญาณกระตุ้น (excitation signal) ที่เป็นสัญญาณไซน์นอยด์ (sinusoidal signal) เข้าที่ขดลวดโรเตอร์ สัญญาณเอาต์พุตของรีโซลเวอร์ที่ขดลวดสเตเตอร์ทั้งสองขดจะเป็นการมอดูเลต (modulation) ของสัญญาณกระตุ้นกับค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ โดยสัญญาณที่ขดลวดสเตเตอร์ทั้งสองต่างกันอยู่ 90 องศา หรือกล่าวได้ว่า สัญญาณที่ขดลวดแรกเป็นการคูณกันของสัญญาณกระตุ้นกับค่ามุมแกนหมุนที่อยู่ในรูปของสัญญาณไซน์ (sine) ส่วนสัญญาณที่ขดลวดที่สองเป็นการคูณกันของสัญญาณกระตุ้นกับค่ามุมแกนหมุนที่อยู่ในรูปของสัญญาณโคไซน์ (cosine) จากคุณสมบัติของรีโซลเวอร์ที่ได้กล่าวไปข้างต้น จะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตของรีโซลเวอร์มีความไม่เป็นเชิงเส้นกับค่ามุมแกนหมุน ซึ่งทำให้การนำรีโซลเวอร์ไปประยุกต์ใช้งานจำเป็นต้องทำการปรับแต่งสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณที่มีความสัมพันธ์แบบเป็นเชิงเส้นกับค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์อยู่หลายวิธีด้วยกัน ตัวอย่างเช่น วงจรแปลงสัญญาณรีโซลเวอร์เป็นสัญญาณดิจิตอล [5-8] และวงจรแปลงสัญญาณรีโซลเวอร์เป็นสัญญาณดิจิตอล [3-4, 9-11] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยในเชิงพาณิชย์ที่นำไปสร้างเป็นไอซีสำเร็จรูปอีกด้วย [12-14] ซึ่งส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างที่ยุ่งยากและซับซ้อน [4, 8-9] หรือมีขนาดของวงจรที่ใหญ่ [8, 12]

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ ที่ให้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสัญญาณที่นำเสนออยู่ในรูปของสัญญาณดิจิตอลที่มีความสัมพันธ์อย่างเป็นเชิงเส้นกับค่ามุมของรีโซลเวอร์ตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา โดยวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่นำเสนอมีโครงสร้างที่เรียบง่าย ไม่ซับซ้อน นอกจากนี้ในการสร้างวงจรยังใช้อุปกรณ์ที่สามารถหาซื้อได้ในท้องตลาด อีกทั้งอุปกรณ์ยังมีราคาถูกอีกด้วย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาการออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีความสัมพันธ์อย่างเป็นเชิงเส้นกับค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์โดยมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ซึ่งวงจรปรับแต่งสัญญาณที่ออกแบบประกอบด้วย วงจรติมอดูเลตสัญญาณ วงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรควบคุมลอจิก และวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย นอกจากนี้อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรสามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด อีกทั้งมีราคาที่ถูกอีกด้วย

1.3 หลักการใหม่ที่น่าสนใจในวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่ประกอบด้วย วงจรติมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์ วงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย และวงจรควบคุมสัญญาณลอจิก โดยวงจรติมอดูเลตสัญญาณที่ใช้เป็นการนำวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณแทนการใช้วงจรคูณสัญญาณและวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (low-pass filter) [14-15] ส่วนวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม ได้มีการออกแบบขึ้นโดยใช้เทคนิคการป้อนกลับตัวแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณไซน์มาทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์ที่ต้องการแปลง เพื่อให้ได้เอาต์พุตที่เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถูกต้องมากขึ้น ซึ่งตัวแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณไซน์ที่ออกแบบจะใช้คุณสมบัติของวงจรโอทีเอทีที่มีพฤติกรรมของฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์แฝงอยู่ สำหรับวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อยและวงจรควบคุมสัญญาณลอจิก ได้มีการพัฒนางจรให้มีโครงสร้างที่เรียบง่ายและการใช้จำนวนอุปกรณ์น้อยลงจากที่เคยมีการนำเสนอในอดีต [16] ทำให้วงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่ออกแบบขึ้นมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน สัญญาณดิจิทัลเอาต์พุตมีความถูกต้องมากขึ้นจากการใช้เทคนิคการป้อนกลับสัญญาณเพื่อลดความผิดพลาดในการแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม อีกทั้งยังสามารถลดจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรปรับแต่งสัญญาณอีกด้วย

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำการทบทวนเทคนิคการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ และนำเสนอการพัฒนาและออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่มีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน โดยได้อธิบายการทำงานในแต่ละวงจรย่อยที่ใช้งาน ทำการวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวงจร อีกทั้งทำการทดสอบการทำงานของวงจรด้วยการต่อวงจรจริง เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการนำวงจรที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้งานจริงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จัดแบ่งเนื้อหาทั้งหมด 5 บท และภาคผนวกอีก 2 ภาค โดยจะมีเนื้อหาที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ มีเนื้อหาเกี่ยวกับความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ หลักการใหม่ที่น่าสนใจ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมถึงรายละเอียดของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบท

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึง คุณสมบัติและหลักการทำงานของตัวรีโซลเวอร์ เทคนิคการดีมอดูเลตสัญญาณ เทคนิคและวิธีการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่มีกรนำเสนอในอดีต รวมถึงหลักการทำงานของวงจรอทีเอ เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาพัฒนาต่อไป

บทที่ 3 บล็อกวงจรที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ กล่าวถึง วงจรย่อยที่ใช้ในการออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่น่าสนใจในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วย วงจรดีมอดูเลตสัญญาณ วงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรควบคุมลอจิก และวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย

บทที่ 4 วงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่น่าสนใจ กล่าวถึง รายละเอียดของหลักการทำงานของวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ รวมถึงวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวงจร และทำการทดสอบการทำงานของวงจรด้วยการต่อวงจรจริง

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะแนวทางการวิจัย เป็นการสรุปงานวิจัยที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ และข้อเสนอแนะแนวทางการวิจัยในอนาคต รวมถึงการวิจัยต่อยอด

ในส่วนท้ายของวิทยานิพนธ์นี้ คือ ภาคผนวก ซึ่งกล่าวถึงการวิเคราะห์สมการต่างๆ ของแต่ละบท รวมทั้งบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ภาคผนวก ก การวิเคราะห์คุณสมบัติการทำงานของวงจรอทีเอ

ภาคผนวก ข บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมระดับนานาชาติ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ สำหรับเทคนิคการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ จุดประสงค์เพื่อให้ได้สัญญาณเอาต์พุตที่เป็นเชิงเส้นกับตำแหน่งหรือมุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ ซึ่งในการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ใช้การตีมอดูเลตสัญญาณเพื่อให้ได้ตำแหน่งหรือมุมแกนหมุน แต่ทว่าสัญญาณที่ได้ติดอยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ จึงจำเป็นต้องมีการนำสัญญาณที่ได้มาทำให้เป็นเชิงเส้นกับตำแหน่งหรือมุมแกนหมุนก่อนนำไปประยุกต์ใช้งาน เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและเข้าใจในการออกแบบ ในบทนี้ขอกกล่าวถึงหลักการการทำงานของรีโซลเวอร์สัญญาณที่ได้จากรีโซลเวอร์ และเทคนิคการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์โดยขอกกล่าวถึง การตีมอดูเลตสัญญาณและเทคนิคการปรับแต่งสัญญาณไซน์หรือโคไซน์ให้เป็นเชิงเส้นกับตำแหน่งหรือมุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ที่มีการนำเสนอในอดีต รวมถึงหลักการการทำงานของวงจรโอทีเอ ซึ่งนำมาใช้ในการสร้างวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสามเหลี่ยมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2.2 หลักการทำงานของรีโซลเวอร์

รีโซลเวอร์เป็นทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้สำหรับวัดตำแหน่งหรือมุมของอุปกรณ์ที่มีแกนหมุน โครงสร้างภายนอกของรีโซลเวอร์มีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้าดังแสดงรูปที่ 2.1 สำหรับการนำรีโซลเวอร์มาใช้งานทำได้โดยการต่อแกนหมุนของรีโซลเวอร์เข้ากับแกนหมุนของอุปกรณ์ที่ต้องการวัดตำแหน่งมุม วงจรสมมูลภายในของรีโซลเวอร์แสดงในรูปที่ 2.2 โดยในรูปที่ 2.2(ก) แสดงวงจรสมมูลแบบสมบรูณ์ ประกอบด้วยขดลวด R_1 R_2 R_3 S_1 และ S_2 เมื่อป้อนแรงดันสัญญาณไซน์ V_{ex} กระตุ้นเข้าที่ขดลวด R_1 ทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำที่ขดลวด R_2 และ R_3 ซึ่งขดลวด R_2 และ R_3 สามารถหมุนได้เนื่องจากมีแกนยึดกับแกนของรีโซลเวอร์ ขดลวด R_3 ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไปยังขดลวด S_1 และ S_2 ซึ่งเป็นขดลวดที่วางตั้งฉากกันและเป็นขดลวดที่อยู่กับที่ทำให้เกิดแรงดัน V_{s1} และ V_{s2} ตามลำดับ โดยขนาด (amplitude) ของแรงดัน V_{s1} และ V_{s2} จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งมุมของขดลวด R_3 ที่ทำกับขดลวด S_1 และ S_2 ซึ่งขดลวด R_3 ต่ออยู่กับแกนของรีโซลเวอร์ จึงสามารถกล่าวได้ว่า ขนาดของแรงดัน V_{s1} และ V_{s2} จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งมุมของแกนรีโซลเวอร์ จากลักษณะการทำงานที่ได้กล่าวมานั้น ขดลวด R_1 R_2 และ R_3 มีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงที่มีขดลวดด้านหนึ่งที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (rotor transformer) ในขณะที่ขดลวด S_1 และ S_2 อยู่กับที่และวางในตำแหน่งที่ตั้งฉากกัน จึงเรียกขดลวดทั้งสองว่า ขดลวดสเตเตอร์ (stator winding) เพื่อให้สะดวกในการอธิบายและเข้าใจการทำงานของรีโซลเวอร์มากขึ้น กำหนดให้ขดลวด R_1 R_2 และ R_3 แทนด้วยขดลวดโรเตอร์ (rotor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

winding) R ซึ่งเป็นส่วนของการเคลื่อนที่แกว่งของรีโซลเวอร์เพียงขดเดียว ส่วนขดลวดสเตเตอร์ยังคงเดิม ซึ่งวงจรสมมูลอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 2.2(ข) จากรูปที่ 2.2(ข) เมื่อป้อนแรงดันกระตุ้น V_{ex} ด้วยสัญญาณไซน์เข้าที่ขดลวดโรเตอร์ R โดยแรงดันกระตุ้น V_{ex} สามารถเขียนสมการได้เป็น

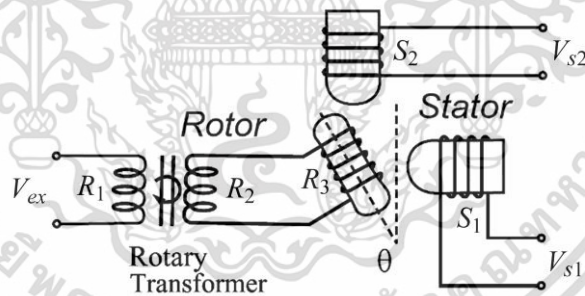
$$V_{ex} = A_{ex} \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

เมื่อ A_{ex} คือ ขนาดหรือแอมพลิจูดของสัญญาณกระตุ้น V_{ex} มีหน่วยเป็น volt

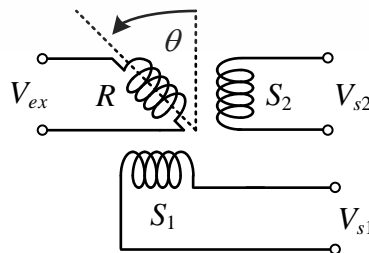
ω คือ ความเร็วเชิงมุมของสัญญาณกระตุ้น V_{ex} มีหน่วยเป็น rad./s

t คือ ค่าเวลาใด มีหน่วยเป็น s

รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายนอกของรีโซลเวอร์



(ก) แบบสมบูรณ์



(ข) แบบอย่างง่าย

รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของรีโซลเวอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่ขดลวดสเตเตอร์ S_1 และ S_2 จะได้

$$V_{s1} = A \sin(\omega t) \sin(\theta) \quad (2.2)$$

และ

$$V_{s2} = A \sin(\omega t) \cos(\theta) \quad (2.3)$$

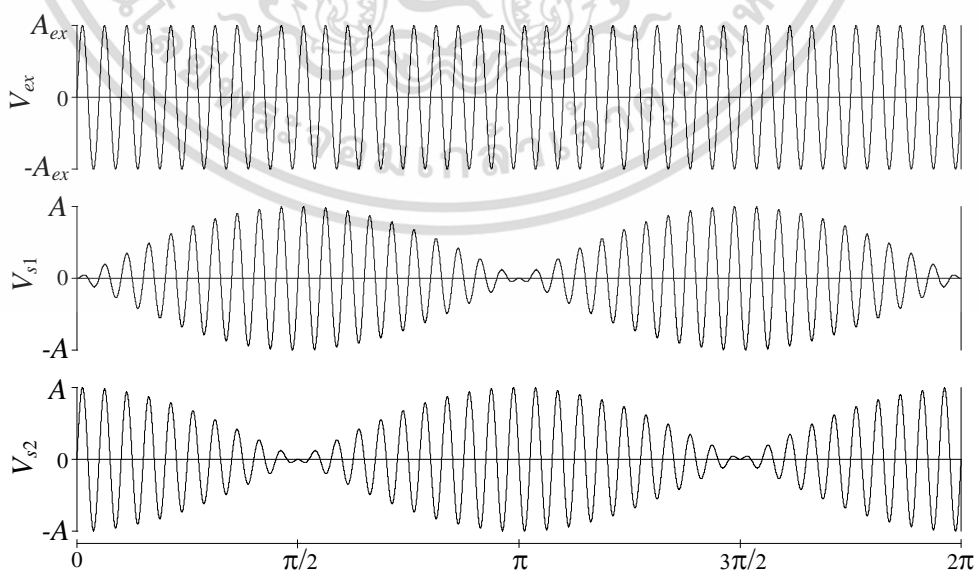
เมื่อ V_{s1} คือ สัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ขดแรก มีหน่วยเป็น volt

V_{s2} คือ สัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ขดที่สอง มีหน่วยเป็น volt

θ คือ ค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ มีหน่วยเป็น rad.

A คือ ค่าคงที่ ที่เกิดจากแอมพลิจูด A_{ex} ของสัญญาณกระตุ้นกับอัตราการส่งผ่าน k ระหว่างขดลวดโรเตอร์กับขดลวดสเตเตอร์ มีค่าเท่ากับ kA_{ex} มีหน่วยเป็น volt

จากสมการที่ (2.2) และ (2.3) จะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากรีโซลเวอร์ทั้ง V_{s1} และ V_{s2} อยู่ในรูปของฟังก์ชันตรีโกณมิติ (trigonometric function) ซึ่งมีลักษณะเป็นสัญญาณที่มีการมอดูเลตเชิงขนาด (amplitude modulation) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ θ ไม่ได้มีความเป็นเชิงเส้นกับสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ ดังนั้นการนำสัญญาณรีโซลเวอร์มาประยุกต์ใช้งานจึงจำเป็นต้องทำการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ให้มีความเป็นเชิงเส้นกับค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ θ เสียก่อน ซึ่งต้องทำการตีมอดูเลตสัญญาณเพื่อดึงค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ θ ที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ออกมา จากนั้นจึงทำการปรับแต่งสัญญาณที่ได้ให้เป็นเชิงเส้นต่อไป โดยการตีมอดูเลตสัญญาณและการปรับแต่งสัญญาณนั้นได้มีการอธิบายถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.3 สัญญาณ V_{ex} V_{s1} และ V_{s2}

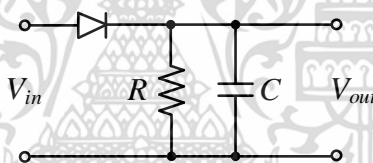
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การดีมอดูเลตสัญญาณ

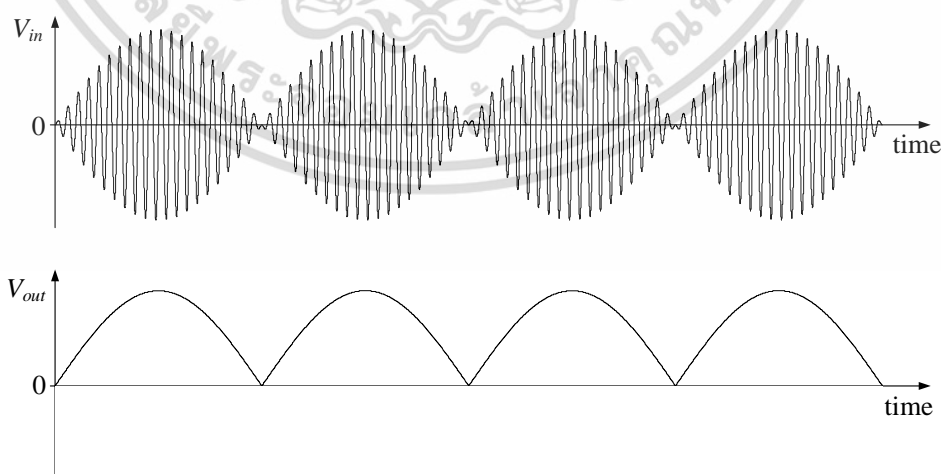
จากหลักการทำงานของรีไซเคิลเวอร์ที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 2.2 สัญญาณที่ได้จากรีไซเคิลเวอร์เป็นสัญญาณมอดูเลตเชิงขนาด ซึ่งเป็นการมอดูเลตระหว่างสัญญาณกระตุ้น V_{ex} กับค่ามุมแกนหมุน θ ที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์หรือโคไซน์ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงขอกล่าวถึงหลักการดีมอดูเลตสัญญาณเชิงขนาดที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ การดีมอดูเลตสัญญาณแบบตรวจจับขอบ (envelope demodulation) และการดีมอดูเลตสัญญาณแบบซิงโครนัส (synchronous demodulation)

2.3.1 การดีมอดูเลตสัญญาณแบบตรวจจับขอบ

การดีมอดูเลตสัญญาณแบบตรวจจับขอบเป็นการดีมอดูเลตสัญญาณเชิงขนาดอย่างง่าย ไม่ซับซ้อน เนื่องจากวงจรประกอบด้วยไดโอด ตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน [17] ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยเมื่อสัญญาณมอดูเลตผ่านไดโอดซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (half-wave rectifier) ทำให้ได้เฉพาะสัญญาณด้านบวก และสัญญาณที่ได้เมื่อผ่านวงจร RC ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filter) เพื่อตัดสัญญาณพาหะที่มีความถี่สูงออก เหลือเพียงสัญญาณที่เป็นข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 วงจรดีมอดูเลตสัญญาณแบบตรวจจับขอบอย่างง่าย



รูปที่ 2.5 สัญญาณที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.4

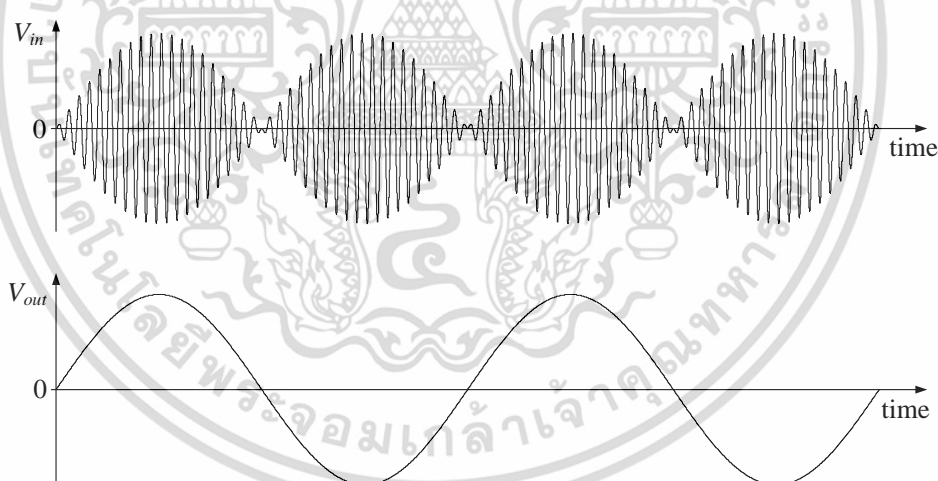
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การตีความสัญญาณแบบซิงโครนัส

การตีความสัญญาณแบบซิงโครนัสหรือการตีความสัญญาณแบบโคฮีเรนต์ (coherent demodulation) [18-19] เป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการตีความสัญญาณรีโซลเวอร์ เนื่องจากสัญญาณที่ได้มีความถูกต้องและแม่นยำกว่าการตีความสัญญาณแบบตรวจจับขอบ หลักการตีความสัญญาณแบบซิงโครนัสแสดงในรูปที่ 2.6 เป็นการนำสัญญาณมอดูเลตเชิงขนาดมาทำการคูณกับสัญญาณพาห้หรือสัญญาณกระตุ้น จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ผ่านเข้าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อตัดเทอมของสัญญาณพาห้ที่มีความถี่สูงออก ทำให้ได้สัญญาณข้อมูลที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 หลักการตีความสัญญาณแบบซิงโครนัส



รูปที่ 2.7 สัญญาณที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.6

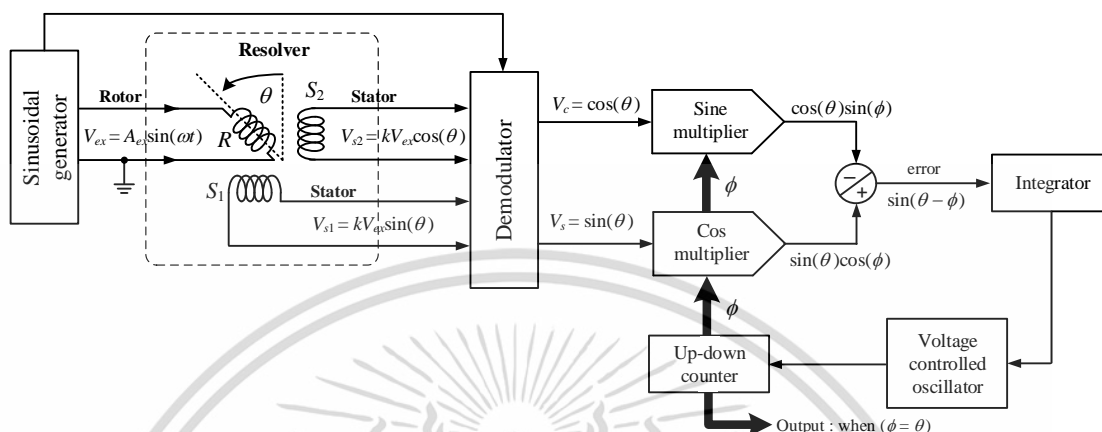
2.4 เทคนิคการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์

สัญญาณรีโซลเวอร์เมื่อทำการตีความสัญญาณ จะได้สัญญาณมอดูเลตของรีโซลเวอร์ออกมา แต่ทว่าค่ามอดูเลตที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์หรือโคไซน์ซึ่งสัญญาณที่ได้ยังไม่เป็นเชิงเส้นกับค่ามอดูเลตของรีโซลเวอร์ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงของกล่าวถึงเทคนิคการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่มีการนำเสนอในอดีต เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนางจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 เทคนิคการปรับแต่งสัญญาณโดยใช้หลักการเฟสล็อกกลูป

เทคนิคการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์โดยใช้หลักการเฟสล็อกกลูป (phase-lock loop) [4, 11] แสดงในรูปที่ 2.8 ทำงานของเทคนิคนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้

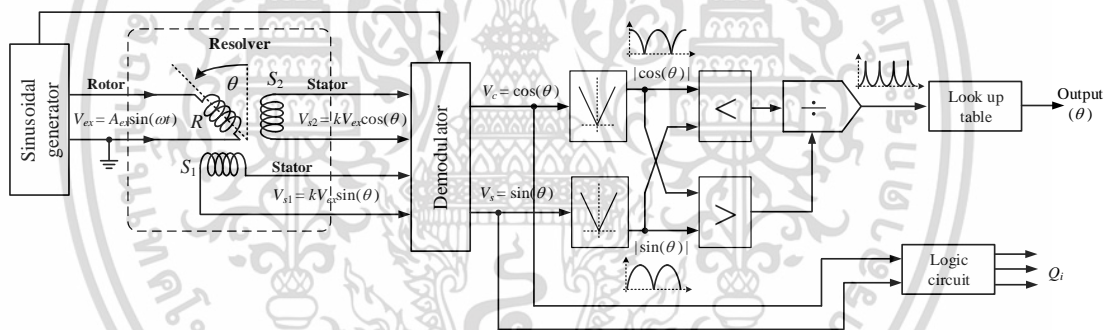


รูปที่ 2.8 เทคนิคการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์โดยใช้เฟสล็อกกลูป

เมื่อป้อนสัญญาณกระตุ้น V_{ex} ที่เป็นสัญญาณไซน์เข้าที่ขดลวดโรเตอร์ของรีโซลเวอร์ ทำให้ได้สัญญาณ V_{s1} และ V_{s2} ที่ขดลวดสเตเตอร์ S_1 และ S_2 ดังสมการที่ (2.2) และ (2.3) ตามลำดับ เมื่อนำสัญญาณ V_{s1} และ V_{s2} ผ่านวงจรดีมอดูเลตสัญญาณโดยใช้สัญญาณกระตุ้น V_{ex} เป็นสัญญาณอ้างอิง ทำให้ได้สัญญาณมุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ (θ) ในรูปของฟังก์ชันไซน์ V_s และฟังก์ชันโคไซน์ V_c ด้วยหลักการของเฟสล็อกกลูปซึ่งเป็นการนำค่ามุมเอาต์พุตกลับมาเปรียบเทียบกับค่ามุมอินพุต และนำค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมาทำการปรับแต่งวงจรเพื่อให้ได้ค่ามุมเอาต์พุตมีค่าใกล้เคียงกับค่ามุมอินพุต ดังนั้นในรูปที่ 2.8 สัญญาณ V_s ($\sin \theta$) ถูกนำมาคูณกับมุมอ้างอิงในรูปของฟังก์ชันโคไซน์ ($\cos \phi$) และสัญญาณ V_c ($\cos \theta$) ถูกนำมาคูณกับมุมอ้างอิงในรูปของฟังก์ชันไซน์ ($\sin \phi$) จากนั้นนำสัญญาณทั้งสองมาลบกัน ทำให้ได้ผลต่างของค่ามุมทั้งสองในรูปของฟังก์ชันไซน์ ($\sin(\theta - \phi)$) ซึ่งเมื่อมุมทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันจะทำให้ ($\sin(\theta - \phi)$) มีค่าน้อยมาก ในกรณีที่มุม θ และ ϕ มีค่าไม่เท่ากัน ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดขึ้นและค่าความผิดพลาดดังกล่าวถูกส่งไปยังวงจรรวมอินทิเกรต (integrator) เพื่อทำหน้าที่สร้างสัญญาณที่ใช้ควบคุมตัวกำเนิดสัญญาณชนิดแรงดันควบคุม (voltage controlled oscillator) โดยตัวกำเนิดสัญญาณชนิดแรงดันควบคุมทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์เพื่อส่งไปยังวงจรรนับที่สามารถทำงานได้ทั้งนับขึ้นและนับลง (up down counter) ซึ่งวงจรรนับจะเป็นตัวกำเนิดค่ามุมอ้างอิง ϕ เพื่อนำไปใช้เปรียบเทียบกับค่ามุม θ การทำงานของเทคนิคนี้จะดำเนินการจนกระทั่งค่ามุมอ้างอิง ϕ มีค่าเท่ากับมุม θ ซึ่งจะทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือ ($\sin(\theta - \phi) = 0$) โดยที่ $\phi = \theta$ จะเป็นค่าเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่ได้จากวงจรรนับ

2.4.2 เทคนิคการปรับแต่งสัญญาณโดยใช้วิธีการเปิดตาราง

การปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์โดยวิธีการเปิดตาราง [20-21] เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ยังคงมีการนำมาประยุกต์ใช้ในปัจจุบันเนื่องจากเป็นเทคนิคพื้นฐานเทคนิคหนึ่ง หลักการทำงานของเทคนิคนี้เริ่มจากการนำสัญญาณรีโซลเวอร์ผ่านวงจรดีมอดูเลตสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณมุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ ซึ่งคล้ายกับเทคนิคการใช้หลักการเฟสล็อกคอป จากรูปที่ 2.9 สัญญาณรีโซลเวอร์ที่ผ่านการดีมอดูเลตจะได้สัญญาณ $V_s = \sin \theta$ และ $V_c = \cos \theta$ สัญญาณทั้งสองถูกนำไปผ่านวงจรหาค่าสัมบูรณ์ (absolute value circuit) จากนั้นนำไปผ่านวงจรเปรียบเทียบ โดยสัญญาณที่มีค่าน้อยทำหน้าที่เป็นตัวตั้ง และสัญญาณที่มีค่ามากทำหน้าที่เป็นตัวหาร เพื่อหลีกเลี่ยงกรณีที่ตัวหามีค่าน้อยมากๆ หรือมีค่าเป็นศูนย์ ผลลัพธ์ที่ได้จากการหารจะนำไปใช้ในการเปิดตารางเพื่อหาค่ามุม θ ซึ่งได้มีการกำหนดค่าไว้แล้ว แต่หว่าค่าอินพุตที่ใช้ในการเปิดตารางตลอด 360 องศา หรือ $0 - 2\pi$ ยังมีส่วนที่ค่าที่ซ้ำกันอยู่ จึงมีการนำสัญญาณ $V_s = \sin \theta$ และ $V_c = \cos \theta$ มาใช้ในการสร้างวงจรควบคุมลอจิก เพื่อใช้ในการจำแนกค่ามุมว่าอยู่ในควอดแดรนต์ (quadrant) ใด และมีทิศทางการหมุนของรีโซลเวอร์อย่างไร



รูปที่ 2.9 เทคนิคการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์โดยใช้วิธีการเปิดตาราง

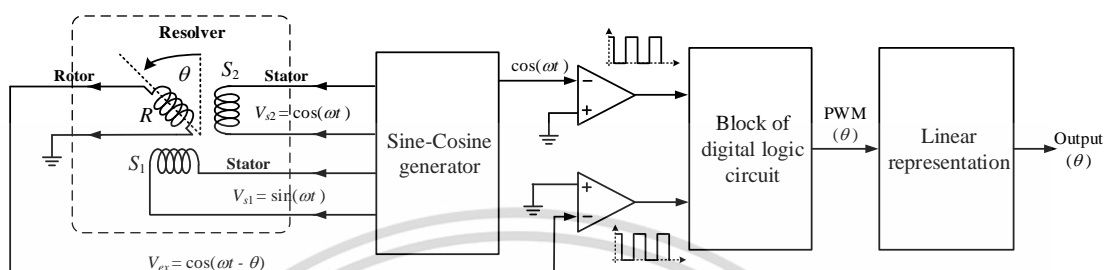
2.4.3 เทคนิคการปรับแต่งสัญญาณโดยการกลับสถานะการทำงานของโรเตอร์และสเตเตอร์

เทคนิคนี้เป็นการกลับสถานะการทำงานของขดลวดโรเตอร์กับขดลวดสเตเตอร์ [22-23] โดยทำการป้อนสัญญาณไซน์เข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ทั้งสอง สัญญาณไซน์ที่ป้อนให้กับขดลวดสเตเตอร์ต้องมีขนาดและความถี่ที่เท่ากัน แต่มีเฟสต่างกันอยู่ 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.10 สัญญาณที่ขดลวดสเตเตอร์ $V_{s1} = \sin \omega t$ และ $V_{s2} = \cos \omega t$ ทำให้ได้แรงดันที่ขดลวดโรเตอร์มีค่าเป็น $V_r = \cos(\omega t - \theta)$ ซึ่งเทคนิคนี้จะนำสัญญาณที่ได้จากขดลวดโรเตอร์ $V_r = \cos(\omega t - \theta)$ กับสัญญาณที่ขดลวดสเตเตอร์ $V_{s2} = \cos \omega t$ ไปผ่านวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (zero crossing detector) เพื่อสร้างเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม โดยสัญญาณสี่เหลี่ยมทั้งสองมีความต่างเฟสกันอยู่ 90 องศา จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ผ่านเข้าไปยังวงจรดิจิทัลลอจิก จะได้สัญญาณที่มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณมอดูเลตแบบความกว้างพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ถูกตู่เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(pulse width modulator, PWM) โดยสัญญาณ PWM ที่ได้จะมีค่าคือดีไซเคิล (duty cycle) ขึ้นกับค่ามุมแกนหมุน θ ของรีโซลเวอร์ สัญญาณ PWM นี้จะไปผ่านวงจรกรองสัญญาณและปรับแต่งสัญญาณเพื่อให้มีความเป็นเชิงเส้น (linear representation) ทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตของเทคนิคนี้เป็นค่ามุมแกนหมุน θ ของรีโซลเวอร์ที่เป็นแบบแอนะล็อก



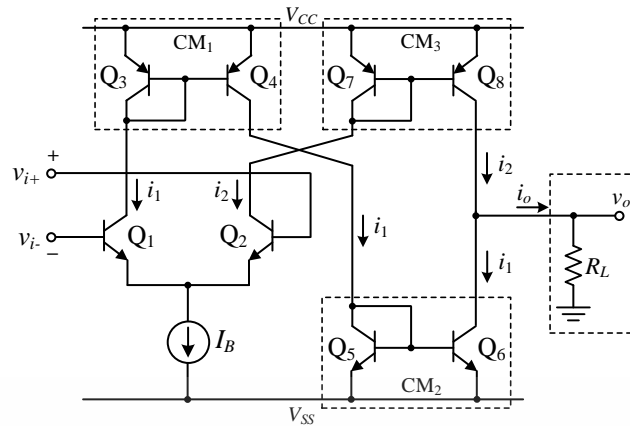
รูปที่ 2.10 เทคนิคการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์โดยใช้การกลับสถานะการทำงานของขดลวดโรเตอร์และขดลวดสเตเตอร์

จากการทบทวนเทคนิคการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ในงานวิจัยที่มีการนำเสนอในอดีตในหัวข้อที่ 2.4.1 – 2.4.3 สามารถสรุปได้ว่า เทคนิคในหัวข้อที่ 2.4.1 และ 2.4.2 จำเป็นต้องใช้วงจรดีมอดูเลตสัญญาณก่อนการปรับแต่งสัญญาณ และสัญญาณเอาต์พุตที่ได้เป็นสัญญาณดิจิทัลทั้งคู่ อีกทั้งยังมีขนาดของวงจรที่ใหญ่ แต่ผลตอบสนองทางเวลาของเทคนิคในหัวข้อที่ 2.4.1 จะช้ากว่าเทคนิคในหัวข้อที่ 2.4.2 สำหรับเทคนิคในหัวข้อที่ 2.4.3 มีความแตกต่างจาก 2 เทคนิคแรกตรงที่ไม่จำเป็นต้องใช้วงจรดีมอดูเลตสัญญาณ แต่เป็นการป้อนสัญญาณเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ทั้งสอง และนำสัญญาณที่ได้ทางขดลวดโรเตอร์มาเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ป้อนเข้าขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งสัญญาณที่ได้จากเทคนิคนี้เป็นสัญญาณแอนะล็อก

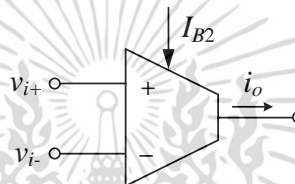
2.5 วงจรโอทีเอ

วงจรโอทีเอหรือวงจรรขยายค่าความนำ (operational transconductance amplifier) เป็นอุปกรณ์แอกทีฟชนิดหนึ่งที่มีการนำมาประยุกต์ใช้งานในการออกแบบวงจรประมวลผลสัญญาณแบบแอนะล็อกอยู่มากมาย เช่น วงจรกำเนิดสัญญาณ (oscillator) [24] วงจรสังเคราะห์ค่าความต้านทาน [25] และวงจรกรองสัญญาณแบบแอกทีฟ (active filter) [26] เป็นต้น หลักการทำงานเบื้องต้นของโอทีเอจะให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณกระแสที่เป็นสัดส่วนกับผลต่างของแรงดันอินพุต ทำให้กล่าวได้ว่า โอทีเอเป็นแหล่งจ่ายกระแสชนิดควบคุมด้วยแรงดัน (voltage controlled current source, VCCS) นอกจากนี้ยังสามารถแปรค่าอัตราขยายค่าความนำ (transconductance gain, g_m) ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โครงสร้างพื้นฐานและสัญลักษณ์ของโอทีเอแสดงในรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) โครงสร้างภายใน



(ข) สัญลักษณ์

รูปที่ 2.11 โอทีเอ

จากรูปที่ 2.11(ก) วงจรโอทีเอประกอบด้วยวงจรคู่ผลต่าง (differential pair) $Q_1 - Q_2$ ต่อกับวงจรสะท้อนกระแส (current mirror, CM) $CM_1 - CM_3$ และมีแหล่งจ่ายกระแสภายนอก I_B การทำงานของวงจรโอทีเอสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ [27] ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ต่อกันเป็นวงจรคู่ผลต่างซึ่งถูกไบแอสด้วยแหล่งจ่ายกระแส I_B ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของกระแส i_1 และ i_2 เป็น [ภาคผนวก ก]

$$i_1 = \frac{I_B e^{-(v_{i+} - v_{i-})/2v_T}}{e^{-(v_{i+} - v_{i-})/2v_T} + e^{(v_{i+} - v_{i-})/2v_T}} \quad (2.4)$$

$$i_2 = \frac{I_B e^{(v_{i+} - v_{i-})/2v_T}}{e^{-(v_{i+} - v_{i-})/2v_T} + e^{(v_{i+} - v_{i-})/2v_T}} \quad (2.5)$$

เมื่อ v_T คือ แรงดันเชิงอุณหภูมิ (thermal voltage) มีค่าเท่ากับ kT/q (หน่วย volt)

K คือ ค่าคงที่โบลท์แมน (Boltzman's constant) มีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} J/K

T คือ ค่าอุณหภูมิแวลด์ลอม (หน่วย K)

q คือ ค่าประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน (electron charge) มีค่าเท่ากับ 1.605×10^{-19} C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

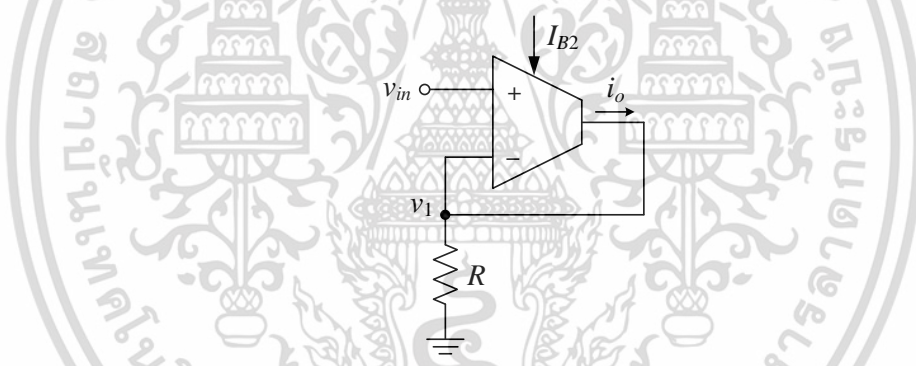
ทรานซิสเตอร์ ($Q_3 - Q_4$) ($Q_5 - Q_6$) และ ($Q_7 - Q_8$) ทำหน้าที่เป็นวงจรสะท้อนกระแส CM_1 CM_2 และ CM_3 ตามลำดับ ที่มีอัตราขยายเท่ากับหนึ่ง จากการทำงานของวงจรสะท้อนกระแส CM_1 CM_2 และ CM_3 กระแส i_1 และ i_2 ถูกสำเนาไปยังโหนดเอาต์พุตของวงจร ทำให้ได้กระแสเอาต์พุต i_o ของวงจรโอทีเอมีสมการเป็น

$$i_o = i_1 - i_2 = I_B \frac{e^{((v_{i+} - v_{i-})/2v_T)} - e^{-(v_{i+} - v_{i-})/2v_T}}{e^{((v_{i+} - v_{i-})/2v_T)} + e^{-(v_{i+} - v_{i-})/2v_T}} \quad (2.6)$$

หรือ

$$i_o = I_B \tanh\left(\frac{(v_{i+} - v_{i-})}{2v_T}\right) \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.7 จะเห็นได้ว่ากระแสเอาต์พุต i_o ติดอยู่ในรูปของฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ (hyperbolic tangent function) ของผลต่างแรงดันอินพุต ($v_{i+} - v_{i-}$) เมื่อนำโอทีเอมาต่อดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณไซน์

จากรูปที่ 2.12 แรงดัน $v_1 = i_o R$ ดังนั้นกระแสเอาต์พุต i_o ของวงจรในรูปที่ 2.12 สามารถเขียนได้เป็น

$$i_o = I_B \tanh\left(\frac{(v_{in} - i_o R)}{2v_T}\right) \quad (2.8)$$

ทำการจัดสมการที่ 2.8 ใหม่จะได้

$$v_{in} = 2v_T \tanh^{-1}\left(\frac{i_o}{I_B}\right) + i_o R \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายอนุกรมเทเลอร์ (Taylor's series) ของฟังก์ชันอินเวอร์สไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์มีสมการดังนี้

$$\tanh^{-1}(x) = x + \frac{1}{3}x^3 + \frac{1}{5}x^5 + \frac{1}{7}x^7 + \dots \quad (2.10)$$

เมื่อทำการแทนอนุกรมเทเลอร์ในสมการที่ 2.10 ลงในสมการที่ 2.9 จะได้

$$v_{in} = 2v_T \left(\frac{i_o}{I_B} + \frac{1}{3} \left(\frac{i_o}{I_B} \right)^3 + \frac{1}{5} \left(\frac{i_o}{I_B} \right)^5 + \frac{1}{7} \left(\frac{i_o}{I_B} \right)^7 + \dots \right) + i_o R \quad (2.11ก)$$

$$v_{in} \cong \left(2v_T \frac{i_o}{I_B} + i_o R \right) + \frac{2v_T}{3} \left(\frac{i_o}{I_B} \right)^3 + \frac{2v_T}{5} \left(\frac{i_o}{I_B} \right)^5 + \dots \quad (2.11ข)$$

$$v_{in} \cong (2v_T + I_B R) \left(\frac{i_o}{I_B} + \frac{2v_T}{3(2v_T + I_B R)} \left(\frac{i_o}{I_B} \right)^3 + \frac{2v_T}{5(2v_T + I_B R)} \left(\frac{i_o}{I_B} \right)^5 + \dots \right) \quad (2.11ค)$$

การกระจายอนุกรมเทเลอร์ (Taylor's series) ของฟังก์ชันอินเวอร์สไซน์มีสมการดังนี้

$$\sin^{-1}(x) = x + \frac{1}{6}x^3 + \frac{3}{40}x^5 + \dots \quad (2.12)$$

กำหนดให้ $I_B R / 2v_T = 1.35$ ทำให้สมการที่ 2.11ค สามารถประมาณได้เป็น

$$v_{in} \cong (2v_T + I_B R) \sin^{-1} \left(\frac{i_o}{I_B} \right) \quad (2.13)$$

หรือ

$$i_o \cong I_B \sin \left(\frac{v_{in}}{(2v_T + I_B R)} \right) \quad (2.14)$$

ทำให้ได้แรงดันเอาต์พุต v_1 ของวงจรในรูปที่ 2.12 เป็น

$$v_1 = R i_o = R I_B \sin \left(\frac{v_{in}}{(2v_T + I_B R)} \right) \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าวงจรในรูปที่ 2.12 สามารถสังเคราะห์เป็นฟังก์ชันไซน์โดยใช้การประมาณค่าด้วยอนุกรมเทเลอร์ วงจรสังเคราะห์ฟังก์ชันไซน์ในรูปที่ 2.12 ถูกนำไปใช้ในวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยจะนำไปใช้ในส่วนของวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม

2.6 สรุป

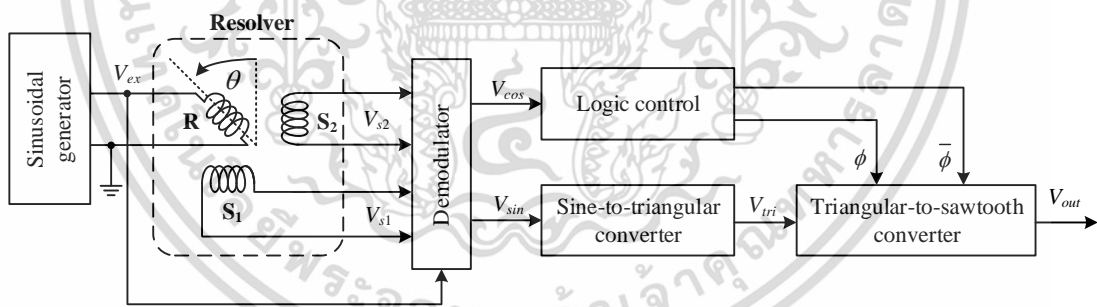
ในบทนี้ได้นำเสนอหลักการการทำงานของรีโซลเวอร์ ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากรีโซลเวอร์อยู่ในรูปของการมอดูเลตเชิงขนาดระหว่างสัญญาณกระตุ้นรีโซลเวอร์กับสัญญาณมอดูเลชันของรีโซลเวอร์ รวมถึงได้อธิบายการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ โดยกล่าวถึงการตีโมเลตสัญญาณเชิงขนาดซึ่งจะได้สัญญาณมอดูเลชันของรีโซลเวอร์ที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ออกมา นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงเทคนิคการปรับแต่งสัญญาณไซน์ให้มีความเป็นเชิงเส้นกับค่ามุม อีกทั้งได้อธิบายการทำงานของวงจรโอทีเอและการนำมาสังเคราะห์เป็นฟังก์ชันไซน์เพื่อนำไปใช้ในวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม หลักการที่ได้อธิบายในบทนี้จะนำไปใช้ในพัฒนาการออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ซึ่งได้กล่าวถึงในบทถัดไป

บทที่ 3

บล็อกวงจรที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

3.1 กล่าวนำ

จากที่ได้กล่าวถึงการทำงานของรีโซลเวอร์และสัญญาณที่ได้จากรีโซลเวอร์ในบทที่ 2 รวมถึงเทคนิคต่างๆ ในการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ให้เป็นเชิงเส้นกับค่ามุมแกนหมุนของอุปกรณ์ ในบทนี้ขอกกล่าวถึงบล็อกวงจรที่ใช้ในการออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อให้สามารถเข้าใจถึงการทำงานในแต่ละส่วนของวงจรที่นำเสนอได้ง่ายขึ้น โดยบล็อกไดอะแกรมของวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย วงจรตีมอดูเลตสัญญาณ วงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรควบคุมลอจิก และวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย โดยสัญญาณรีโซลเวอร์ที่ได้ถูกป้อนเข้าไปยังวงจรตีมอดูเลตสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณมุมในรูปแบบของสัญญาณไซน์และสัญญาณโคไซน์ จากนั้นสัญญาณไซน์ถูกนำมาแปลงเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม สัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้ถูกนำมาแปลงเป็นสัญญาณฟันเลื่อยโดยใช้สัญญาณควบคุมลอจิกที่สร้างมาจากการนำสัญญาณโคไซน์ผ่านเข้าสู่วงจรควบคุมลอจิกเป็นตัวจัดการสัญญาณ สำหรับการทำงานของแต่ละบล็อกวงจรได้ถูกอธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรปรับแต่งสัญญาณที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

3.2 วงจรตีมอดูเลตสัญญาณ

จากรูปที่ 3.1 เมื่อป้อนสัญญาณกระตุ้น $V_{ex} = A_{ex} \sin(\omega t)$ เข้าที่รีโซลเวอร์ ทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตของรีโซลเวอร์ V_{s1} และ V_{s2} มีสมการดังนี้

$$V_{s1} = A \sin(\omega t) \sin \theta \quad (3.1)$$

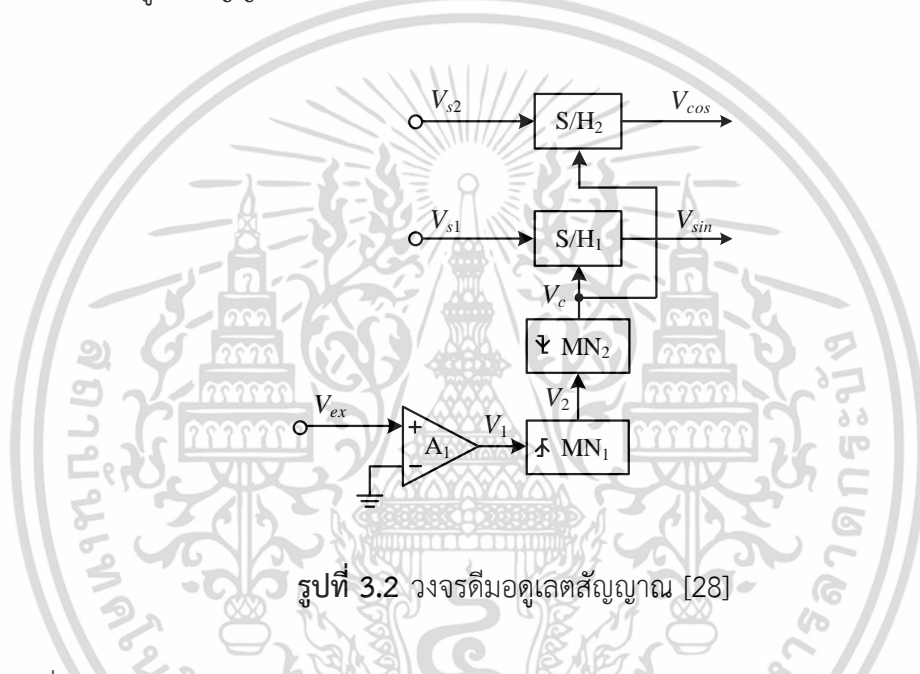
และ

$$V_{s2} = A \sin(\omega t) \cos \theta \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ A_{ex} คือ แอมพลิจูดของสัญญาณ V_{ex}
 ω คือ ความถี่เชิงมุมของสัญญาณ V_{ex}
 θ คือ ค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์
 A คือ ค่าคงที่ที่เกิดจากการมอดูเลตของสัญญาณกระตุ้นกับสัญญาณมุมของรีโซลเวอร์

จะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตของรีโซลเวอร์ V_{s1} และ V_{s2} อยู่ในรูปของการมอดูเลตสัญญาณ ซึ่งต้องทำการดีมอดูเลตสัญญาณก่อน เพื่อให้ได้สัญญาณมุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้วงจรดีมอดูเลตสัญญาณ [28] ซึ่งมีการทำงานดังนี้



รูปที่ 3.2 วงจรดีมอดูเลตสัญญาณ [28]

จากรูปที่ 3.2 สัญญาณเอาต์พุตของรีโซลเวอร์ V_{s1} และ V_{s2} ถูกนำมาผ่านวงจรสุ่มและคงค่า (sample and hold circuit) S/H₁ และ S/H₂ ตามลำดับ ส่วนสัญญาณกระตุ้นรีโซลเวอร์ V_{ex} ถูกนำมาใช้สร้างสัญญาณควบคุมวงจรสุ่มและคงค่า โดยนำไปผ่านวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (zero crossing detector) A₁ เพื่อให้ได้สัญญาณสี่เหลี่ยม V_1 จากนั้นนำสัญญาณ V_1 ที่ได้ป้อนเข้าวงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ (monostable multivibrator) MN₁ ซึ่งทำงานที่ขอบขาขึ้นของสัญญาณ V_1 และสร้างสัญญาณสี่เหลี่ยม V_2 ที่มีความกว้างพัลส์ขนาด 1/4 ของคาบเวลาสัญญาณ V_1 จากนั้นสัญญาณสี่เหลี่ยม V_2 ถูกป้อนให้กับวงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ MN₂ ซึ่งทำงานที่ขอบขาลงของสัญญาณ V_2 และสร้างสัญญาณพัลส์ขนาดเล็ก V_c เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ ซึ่งสัญญาณพัลส์ V_c จะตรงกับตำแหน่งสูงสุดของสัญญาณกระตุ้น V_{ex} และมีขนาดความกว้างพัลส์ที่เล็กที่สุดที่ยังคงทำให้วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณทำงานได้ สัญญาณพัลส์ V_c จะควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณโดยทำการสุ่มค่าของสัญญาณรีโซลเวอร์ V_{s1} และ V_{s2} ที่ตำแหน่งสูงสุดของสัญญาณกระตุ้น V_{ex} และทำการคงค่าสัญญาณรีโซลเวอร์ V_{s1} และ V_{s2} ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

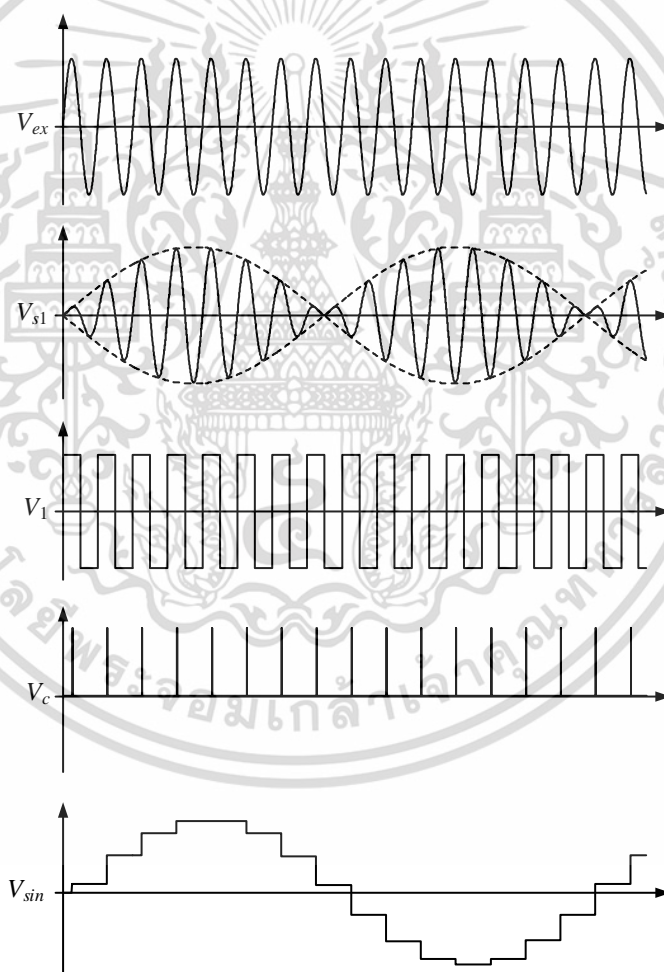
สัญญาณเอาต์พุต V_{sin} และ V_{cos} ที่ได้เป็นสัญญาณมอดูเลตของรีโซลเวอร์ที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์และฟังก์ชันโคไซน์ ตามลำดับ โดยสามารถเขียนสมการของสัญญาณเอาต์พุต V_{sin} และ V_{cos} ได้เป็น

$$V_{sin} = A_d \sin \theta \quad (3.3)$$

และ

$$V_{cos} = A_d \cos \theta \quad (3.4)$$

เมื่อ A_d คือ แอมพลิจูดของสัญญาณ V_{sin} และ V_{cos} ที่เกิดจากการดีมอดูเลตสัญญาณ V_{s1} และ V_{s2} สำหรับการทำงานของสัญญาณแต่ละจุดที่ได้กล่าวถึงแสดงในรูปที่ 3.3

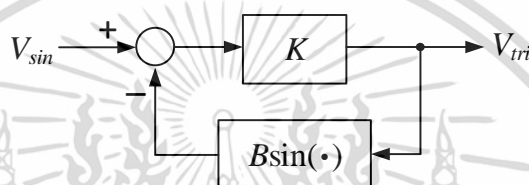


รูปที่ 3.3 การทำงานของสัญญาณแต่ละจุดของวงจรในรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม

วงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมที่ออกแบบขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้หลักการการป้อนกลับเพื่อนำสัญญาณเอาต์พุตที่ได้กลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต ทำให้ความผิดพลาดของการแปลงสัญญาณลดลง บล็อกไดอะแกรมของหลักการแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมแสดงในรูปที่ 3.4 สัญญาณไซน์ V_{sin} เป็นอินพุตให้กับบล็อกไดอะแกรม สัญญาณเอาต์พุตที่เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม V_{tri} ถูกนำมาผ่านเข้าวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณไซน์ และนำมาป้อนกลับเพื่อทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์ที่เป็นอินพุต จากบล็อกไดอะแกรมสามารถอธิบายหลักการได้ดังนี้



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมของหลักการแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมที่นำเสนอ

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.4 สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ V_{sin} และ V_{tri} ได้ดังนี้

$$V_{tri} = KV_{sin} - KB \sin(V_{tri}) \quad (3.5ก)$$

หรือ

$$KV_{sin} = V_{tri} + KB \sin(V_{tri}) \quad (3.5ข)$$

เมื่อ B คือ ค่าคงที่ในการแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณไซน์ จากการกระจายอนุกรมเทเลอร์ของฟังก์ชันไซน์

$$\sin \theta = \theta - K_1 \theta^3 + K_2 \theta^5 - \dots \quad (3.6)$$

แทนสมการที่ (3.6) ลงในสมการที่ (3.5ข) จะได้

$$KV_{sin} = V_{tri} + KBV_{tri} - KBK_1 V_{tri}^3 + KBK_2 V_{tri}^5 - \dots \quad (3.7)$$

จัดสมการใหม่จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$KV_{sin} = (1 + KB)V_{tri} - KBK_1V_{tri}^3 + KBK_2V_{tri}^5 - \dots \quad (3.8)$$

จะได้สัญญาณ V_{sin} เป็น

$$V_{sin} = \frac{1}{K}V_{tri} + BV_{tri} - BK_1V_{tri}^3 + BK_2V_{tri}^5 - \dots \quad (3.9)$$

กำหนดให้ $1/K \ll B$ จะสามารถประมาณค่าสัญญาณ V_{sin} ได้เป็น

$$V_{sin} \cong BV_{tri} - BK_1V_{tri}^3 + BK_2V_{tri}^5 - \dots \quad (3.10)$$

ดังนั้นจากอนุกรมเทเลอร์ของฟังก์ชันไซน์ สมการที่ 3.10 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

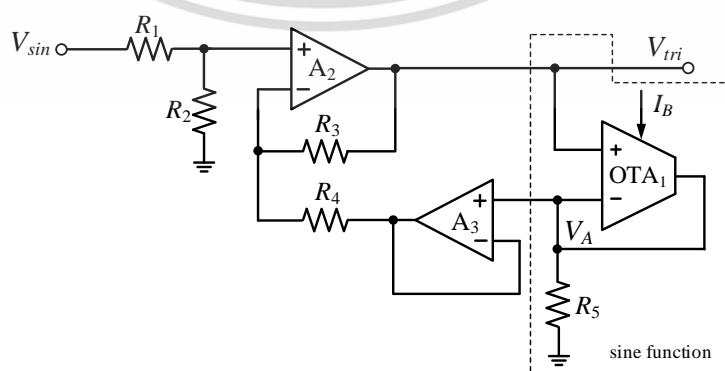
$$V_{sin} \cong B \sin(V_{tri}) \quad (3.11)$$

หรือ

$$V_{tri} \cong \sin^{-1}\left(\frac{V_{sin}}{B}\right) \quad (3.12)$$

จากสมการที่ 3.12 จะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุต V_{tri} ของบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.4 เป็นฟังก์ชันอินเวอร์สไซน์ของสัญญาณ V_{sin} หรือสัญญาณสามเหลี่ยม

รูปที่ 3.5 แสดงวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมของบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.4 โดยส่วนของการป้อนกลับที่อาศัยการแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณไซน์ได้นำวงจรที่นำเสนอในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.5 มาใช้



รูปที่ 3.5 วงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.15 สามารถนำมาหาความสัมพันธ์กับวงจรในรูปที่ 3.5 ได้สมการดังนี้

$$V_A = R_5 I_B \sin \left(\frac{V_{tri}}{(2v_T + I_B R_5)} \right) \quad (3.13)$$

เมื่อ $B = R_5 I_B$ ดังนั้นสามารถหาสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมในรูปที่ 3.5 ได้เป็น

$$V_{tri} \cong (2v_T + I_B R_5) \sin^{-1} \left(\frac{V_{sin}}{R_5 I_B} \right) \quad (3.14)$$

จากสมการที่ 3.14 จะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุต V_{tri} ของวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมอยู่ในรูปของฟังก์ชันอินเวอร์สไซน์ของสัญญาณอินพุต V_{sin}

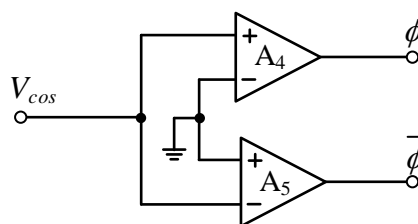
3.4 วงจรควบคุมลอจิก

วงจรควบคุมลอจิกทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณลอจิก ϕ และ $\bar{\phi}$ เพื่อควบคุมวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย โดยการนำสัญญาณมอดูแลนในรูปของฟังก์ชันโคไซน์ V_{cos} มาใช้ในการสร้างสัญญาณลอจิก ϕ และ $\bar{\phi}$ วงจรควบคุมลอจิกประกอบด้วยออปแอมป์ 2 ตัว (A_4 และ A_5) ต่อกันดังรูปที่ 3.6 สัญญาณลอจิก ϕ และ $\bar{\phi}$ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\phi = \begin{cases} "1" & ; V_{cos} > 0 \\ "0" & ; V_{cos} < 0 \end{cases} \quad (3.15ก)$$

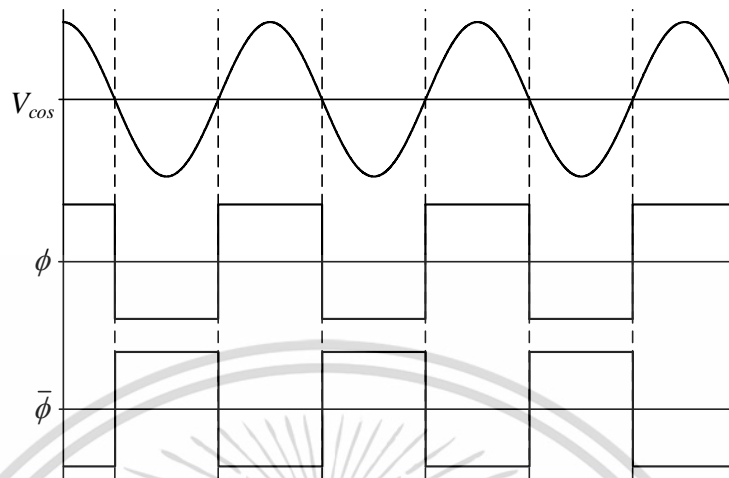
และ

$$\bar{\phi} = \begin{cases} "0" & ; V_{cos} > 0 \\ "1" & ; V_{cos} < 0 \end{cases} \quad (3.15ข)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รูปที่ 3.6 วงจรควบคุมลอจิก
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

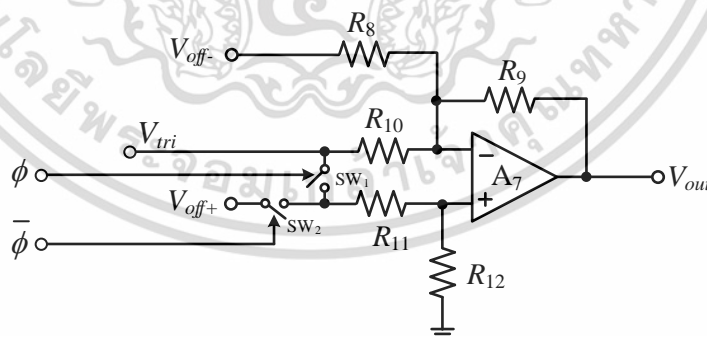
จากสมการที่ 3.15 สัญญาณลอจิก ϕ และ $\bar{\phi}$ มีสถานะตรงข้ามกันดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 สัญญาณลอจิกที่ได้จากวงจรควบคุมลอจิก

3.5 วงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย

วงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อยแสดงดังในรูปที่ 3.8 ประกอบด้วย ออปแอมป์ A_7 ตัวต้านทาน $R_8 - R_{12}$ และสวิตช์ sw_1 และ sw_2 สัญญาณลอจิก ϕ และ $\bar{\phi}$ ทำหน้าที่ควบคุมสวิตช์ sw_1 และ sw_2 ตามลำดับ



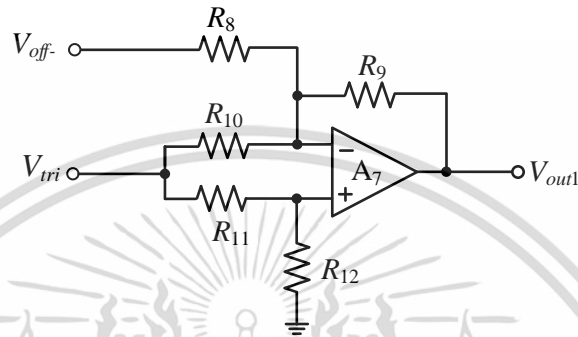
รูปที่ 3.8 วงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย

สัญญาณสามเหลี่ยม V_{tri} เป็นอินพุตให้กับวงจร สัญญาณ V_{off+} และ V_{off-} ทำหน้าที่เลื่อนระดับสัญญาณอินพุต V_{tri} กำหนดให้ค่าตัวต้านทาน $R_8 = R_9 = R_{10} = R_{12} = R_{11}/2 = R$ การทำงานของวงจรในรูปที่ 3.8 สามารถอธิบายโดยแบ่งได้ออกเป็น 2 กรณีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 1 $\phi = "1"$ และ $\bar{\phi} = "0"$

การทำงานของวงจรในรูปที่ 3.8 เมื่อลอจิก $\phi = "1"$ และ $\bar{\phi} = "0"$ สามารถเขียนวงจรใหม่ได้ดังในรูปที่ 3.9 จากวงจรในรูปที่ 3.9 การวิเคราะห์หาสมการของสัญญาณเอาต์พุต V_{out1} ทำได้โดยการวิเคราะห์แยกเป็น 3 อินพุต ซึ่งวงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์ในแต่ละอินพุตแสดงในรูปที่ 3.9 สามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 3.9 วงจรที่ลดรูปเพื่อใช้ในการหาค่า V_{out} ในกรณีที่ 1

อินพุตที่ 1

พิจารณาที่อินพุต V_{off-} และกำหนดให้อินพุต V_{tri} เป็นศูนย์ สามารถเขียนวงจรได้ดังรูปที่ 3.10(ก) จากรูปที่ 3.10(ก) หาสมการของสัญญาณเอาต์พุต V_{out11} ได้ดังนี้

$$V_{out11} = -\frac{R_9}{R_8} V_{off-} = -V_{off-} \quad (3.16)$$

อินพุตที่ 2

พิจารณาอินพุต V_{tri} ที่ขากลับเฟส (inverting input) ของออปแอมป์ และกำหนดให้อินพุต V_{tri} ที่ขาไม่กลับเฟส (non-inverting input) ของออปแอมป์และอินพุต V_{off-} เป็นศูนย์ สามารถเขียนวงจรได้ดังรูปที่ 3.10(ข) จากรูปที่ 3.10(ข) หาสมการของสัญญาณเอาต์พุต V_{out12} ได้ดังนี้

$$V_{out12} = -\frac{R_9}{R_{10}} V_{tri} = -V_{tri} \quad (3.17)$$

อินพุตที่ 3

พิจารณาอินพุต V_{tri} ที่ขาไม่กลับเฟสของออปแอมป์ และกำหนดให้อินพุต V_{tri} ที่ขากลับเฟสของออปแอมป์และอินพุต V_{off-} เป็นศูนย์ สามารถเขียนวงจรได้ดังรูปที่ 3.10(ค) จากรูปที่ 3.10(ค) หาสมการของสัญญาณเอาต์พุต V_{out13} ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{out13} = \left(1 + \frac{R_9}{R_8 // R_{10}}\right) \left(\frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}}\right) V_{tri} \quad (3.18ก)$$

หรือ

$$V_{out13} = \left(1 + \frac{R}{R/2}\right) \left(\frac{R}{(3/2)R}\right) V_{tri} = 2V_{tri} \quad (3.18ข)$$

จากรูปที่ 3.10(ก) – 3.10(ค) จะได้สมการของสัญญาณเอาต์พุต V_{out1} ของวงจรในรูปที่ 3.9 เป็น

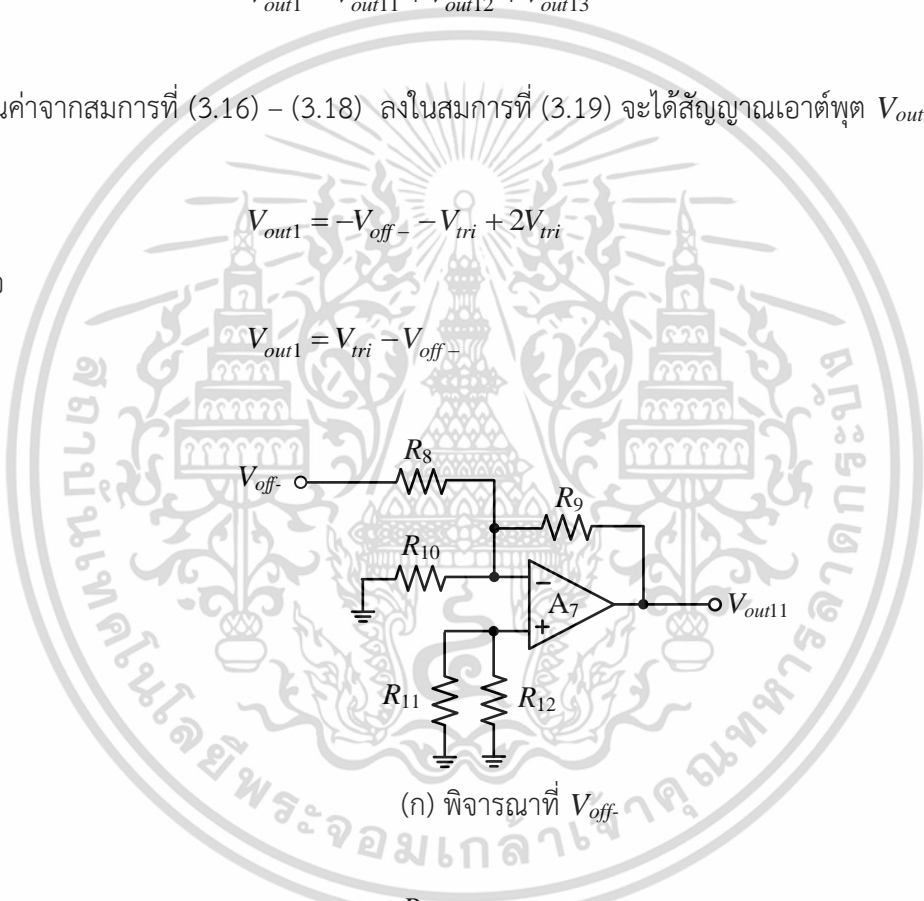
$$V_{out1} = V_{out11} + V_{out12} + V_{out13} \quad (3.19)$$

แทนค่าจากสมการที่ (3.16) – (3.18) ลงในสมการที่ (3.19) จะได้สัญญาณเอาต์พุต V_{out1} เป็น

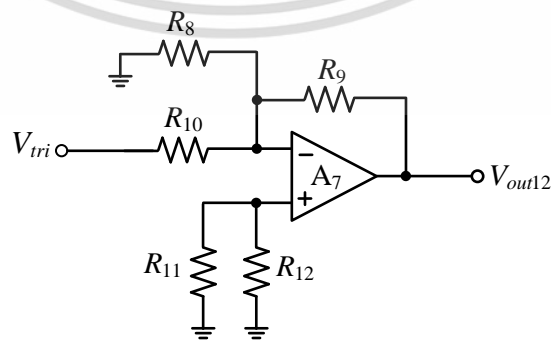
$$V_{out1} = -V_{off-} - V_{tri} + 2V_{tri} \quad (3.20ก)$$

หรือ

$$V_{out1} = V_{tri} - V_{off-} \quad (3.20ข)$$

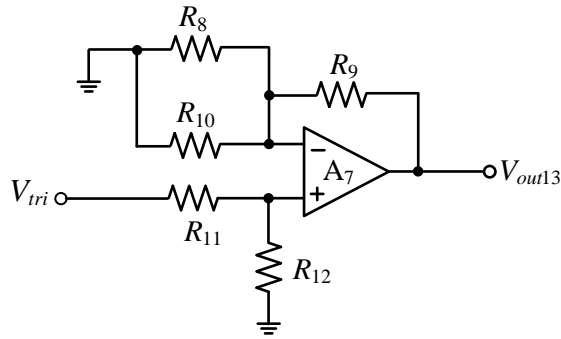


(ก) พิจารณาที่ V_{off-}



(ข) พิจารณา V_{tri} ที่ขากลับเฟสของออปแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 3.10 วงจรย่อยเพื่อใช้ในการหาค่า V_{out1} ในกรณีที่ 1 ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

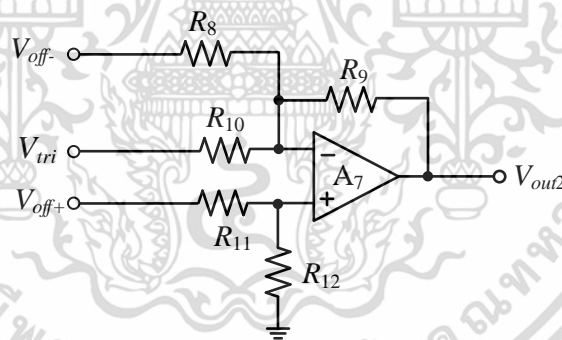


(ค) พิจารณา V_{tri} ที่ขาไม่กลับเฟสของออปแอมป์

รูปที่ 3.10 วงจรย่อยเพื่อใช้ในการหาค่า V_{out1} ในกรณีที่ 1 (ต่อ)

กรณีที่ 2 $\phi = "0"$ และ $\bar{\phi} = "1"$

การทำงานของวงจรในรูปที่ 3.8 เมื่อลอจิก $\phi = "0"$ และ $\bar{\phi} = "1"$ สามารถเขียนวงจรใหม่ได้ดังในรูปที่ 3.11 จากวงจรในรูปที่ 3.11 การวิเคราะห์หาสมการของสัญญาณเอาต์พุต V_{out2} ทำได้โดยการวิเคราะห์แยกเป็น 3 อินพุตเช่นเดียวกับกรณีที่ 1 ซึ่งวงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์ในแต่ละอินพุตแสดงในรูปที่ 3.12 สามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 3.11 วงจรที่ลดรูปเพื่อใช้ในการหาค่า V_{out} ในกรณีที่ 2

อินพุตที่ 1

พิจารณาที่อินพุต V_{off-} และกำหนดให้อินพุต V_{tri} กับ V_{off+} เป็นศูนย์ สามารถเขียนวงจรได้ดังรูปที่ 3.12(ก) จากรูปที่ 3.12(ก) หาสมการของสัญญาณเอาต์พุต V_{out21} ได้เช่นเดียวกับสมการที่ 3.16 ดังนี้

$$V_{out21} = -\frac{R_9}{R_8} V_{off-} = -V_{off-} \quad (3.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินพุตที่ 2

พิจารณาอินพุต V_{tri} ที่ขากลับเฟสของออปแอมป์ และกำหนดให้อินพุต V_{off+} ที่ขาไม่กลับเฟสของออปแอมป์และอินพุต V_{off-} เป็นศูนย์ สามารถเขียนวงจรได้ดังรูปที่ 3.12(ข) จากรูปที่ 3.12(ข) หาสมการของสัญญาณเอาต์พุต V_{out22} ได้เช่นเดียวกับสมการที่ 3.17 ดังนี้

$$V_{out22} = -\frac{R_9}{R_{10}} V_{tri} = -V_{tri} \quad (3.22)$$

อินพุตที่ 3

พิจารณาอินพุต V_{off+} ที่ขาไม่กลับเฟสของออปแอมป์ และกำหนดให้อินพุต V_{tri} ที่ขากลับเฟสของออปแอมป์และอินพุต V_{off-} เป็นศูนย์ สามารถเขียนวงจรได้ดังรูปที่ 3.12(ค) จากรูปที่ 3.12(ค) หาสมการของสัญญาณเอาต์พุต V_{out23} ได้เช่นเดียวกับสมการที่ 3.18 ดังนี้

$$V_{out23} = 2V_{off+} \quad (3.23)$$

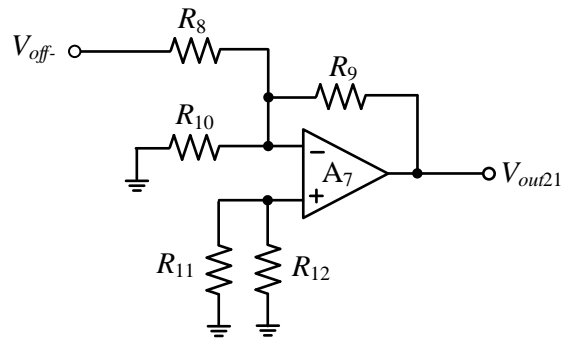
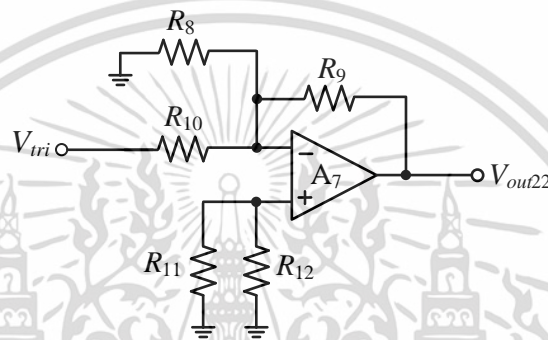
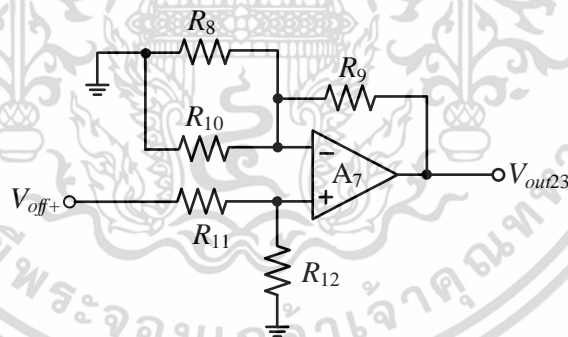
จากรูปที่ 3.12(ก) – 3.12(ค) จะได้สมการของสัญญาณเอาต์พุต V_{out2} ของวงจรในรูปที่ 3.9 เป็น

$$V_{out2} = V_{out21} + V_{out22} + V_{out23} \quad (3.24)$$

แทนค่าจากสมการที่ (3.21) – (3.23) ลงในสมการที่ (3.24) จะได้สัญญาณเอาต์พุต V_{out2} เป็น

$$V_{out2} = -V_{off-} - V_{tri} + 2V_{off+} \quad (3.25)$$

จากที่ได้อธิบายการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อยสามารถสรุปการทำงานได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 เมื่อ $\phi = "1"$ และ $\bar{\phi} = "0"$ สัญญาณเอาต์พุต V_{out} เป็นไปตามสมการที่ (3.20) สำหรับกรณีที่ 2 เมื่อ $\phi = "0"$ และ $\bar{\phi} = "1"$ สัญญาณเอาต์พุต V_{out} เป็นไปตามสมการที่ (3.25)

(ก) พิจารณาอินพุต V_{off+} (ข) พิจารณาอินพุต V_{tri} ที่ขากลับเฟสของออปแอมป์(ค) พิจารณาอินพุต V_{tri} ที่ขาไม่กลับเฟสของออปแอมป์

รูปที่ 3.12 วงจรย่อยเพื่อใช้ในการหาค่า V_{out2} ในกรณีที 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอข้อกวางจรที่ใช้ในการออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วย วงจรดีมอดูเลตสัญญาณ วงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมที่อาศัยหลักการป้อนกลับเพื่อลดค่าความผิดพลาดในการแปลงสัญญาณ วงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย และวงจรถบคุมลอจิกซึ่งใช้ในการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย โดยการทำงานของวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวถึงในบทถัดไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

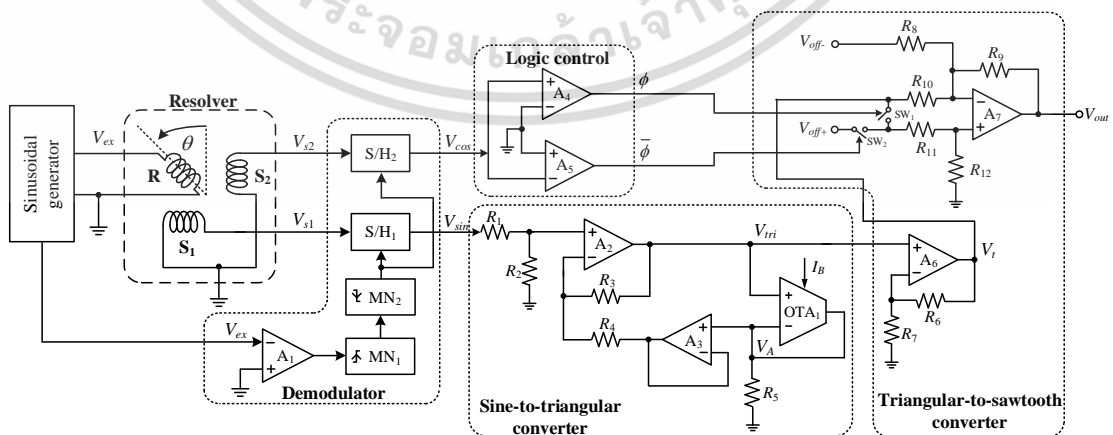
วงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่นำเสนอ

4.1 กล่าวนำ

ในบทที่ 3 ได้อธิบายการทำงานของแต่ละบล็อกวงจรย่อยที่นำมาใช้งานในการออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบด้วยวงจรตีมอดูเลตสัญญาณ วงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรควบคุมลอจิก และวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย โดยสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์เป็นสัญญาณดีซีที่มีความเป็นเชิงเส้นกับค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ตลอดช่วง 0 – 360 องศา ในบทนี้จะขอกกล่าวถึงการทำงานของวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงการวิเคราะห์สมรรถนะของวงจร อีกทั้งทำการทดสอบการทำงานของวงจรที่ออกแบบขึ้นด้วยการต่อวงจรจริง

4.2 หลักการทำงานของวงจร

การทำงานของวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่นำเสนอ เป็นการทำงานร่วมกันของวงจรย่อยหลายวงจร ซึ่งบล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ได้แสดงอยู่ในบทที่ 3 รูปที่ 3.1 และการทำงานของแต่ละบล็อกวงจรย่อยได้อธิบายอยู่ในบทที่ 3 สำหรับวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่นำเสนอแสดงในรูปที่ 4.1 ประกอบด้วย วงจรตีมอดูเลตสัญญาณ วงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรควบคุมลอจิก และวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย โดยสามารถอธิบายการทำงานของวงจรได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 วงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อป้อนสัญญาณกระตุ้น $V_{ex} = A_{ex}\sin(\omega t)$ ซึ่งเป็นสัญญาณไซน์เข้าที่ขดลวดโรเตอร์ของรีโซลเวอร์ ได้สัญญาณเอาต์พุตที่ขดลวดสเตเตอร์ (S_1 และ S_2) ของรีโซลเวอร์ 2 สัญญาณเป็น

$$V_{s1} = A \sin(\omega t) \sin(\theta) \quad (4.1)$$

และ

$$V_{s2} = A \sin(\omega t) \cos(\theta) \quad (4.2)$$

เมื่อ A คือ แอมพลิจูดของสัญญาณ V_{s1} และ V_{s2}

ω คือ ความถี่เชิงมุมของสัญญาณกระตุ้น V_{ex}

θ คือ ค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์

สัญญาณ V_{s1} และ V_{s2} ถูกทำการตีมอดูเลตด้วยวงจรตีมอดูเลตสัญญาณ ทำให้ได้สัญญาณมุมแกนหมุนที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ดังสมการที่ 4.3 และ 4.4

$$V_{sin} = A_d \sin(\theta) \quad (4.3)$$

และ

$$V_{cos} = A_d \cos(\theta) \quad (4.4)$$

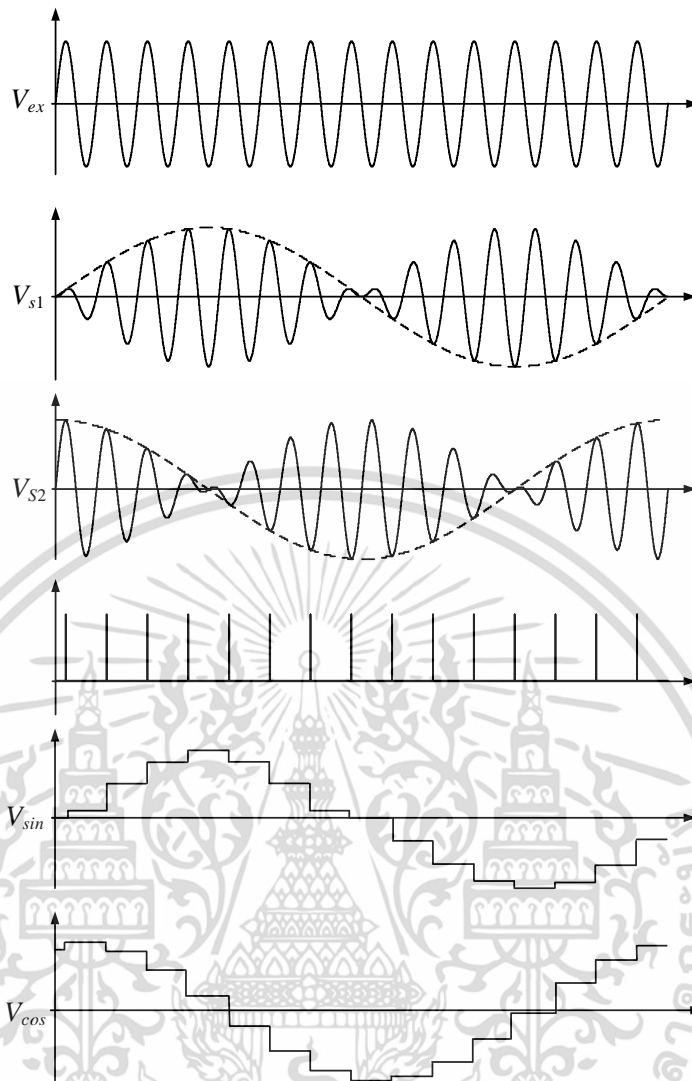
เมื่อ A_d คือ แอมพลิจูดของสัญญาณ V_{sin} และ V_{cos} ที่เกิดจากการตีมอดูเลตสัญญาณ V_{s1} และ V_{s2} กราฟสัญญาณการทำงานของวงจรตีมอดูเลตแสดงในรูปที่ 4.2

สัญญาณมุมแกนหมุนที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์ V_{sin} ถูกป้อนเข้าไปยังวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม จากบทที่ 3 หัวข้อ 3.3 สัญญาณเอาต์พุต V_{tri} ที่ได้จากวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมมีสมการเป็น

$$V_{tri} = (2v_T + I_B R_S) \sin^{-1} \left(\frac{V_{sin}}{R_S I_B} \right) \quad (4.5)$$

กราฟสัญญาณการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมแสดงในรูปที่ 4.3 ในเวลาเดียวกันสัญญาณมุมแกนหมุนที่ได้จากวงจรตีมอดูเลตสัญญาณที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันโคไซน์ V_{cos} ถูกนำไปสร้างเป็นสัญญาณลอจิกเพื่อใช้ควบคุมวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย ซึ่งให้สัญญาณลอจิก 2 สัญญาณคือ ϕ และ $\bar{\phi}$ โดยมีความสัมพันธ์กับสัญญาณ V_{cos} ดังสมการที่ 3.15ก และ 3.15ข ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟสัญญาณการทำงานของวงจรตีมอดูเลตสัญญาณ

สัญญาณสามเหลี่ยม V_{tri} ที่ได้จากวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมถูกนำมาปรับอัตราขยายให้มีแอมพลิจูดสูงสุดเท่ากับ 500mV ด้วยออปแอมป์ A_6 และตัวต้านทาน R_6 และ R_7 เพื่อให้ได้สัญญาณสามเหลี่ยม V_t ที่มีขนาดพร้อมนำไปแปลงในวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย กำหนดให้แรงดัน $V_{off+} = 500\text{mV}$ และ $V_{off-} = -500\text{mV}$ ดังนั้นแรงดันเอาต์พุต V_{out} ของวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อยจากสมการที่ 3.23 และ 3.25 เขียนใหม่ได้โดยแบ่งเป็น 2 กรณีคือ

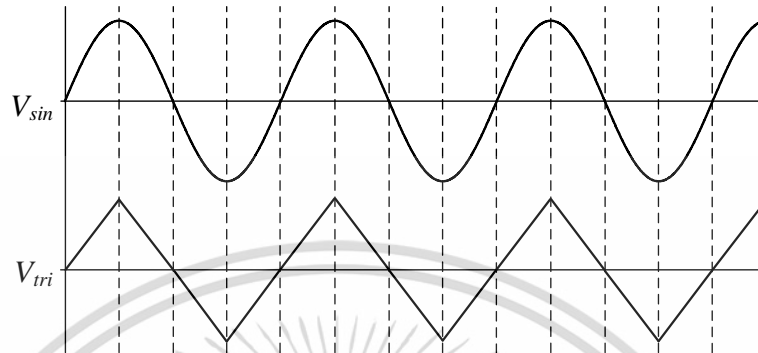
กรณี $\phi = "1"$ และ $\bar{\phi} = "0"$

$$V_{out} = V_t - V_{off-} \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

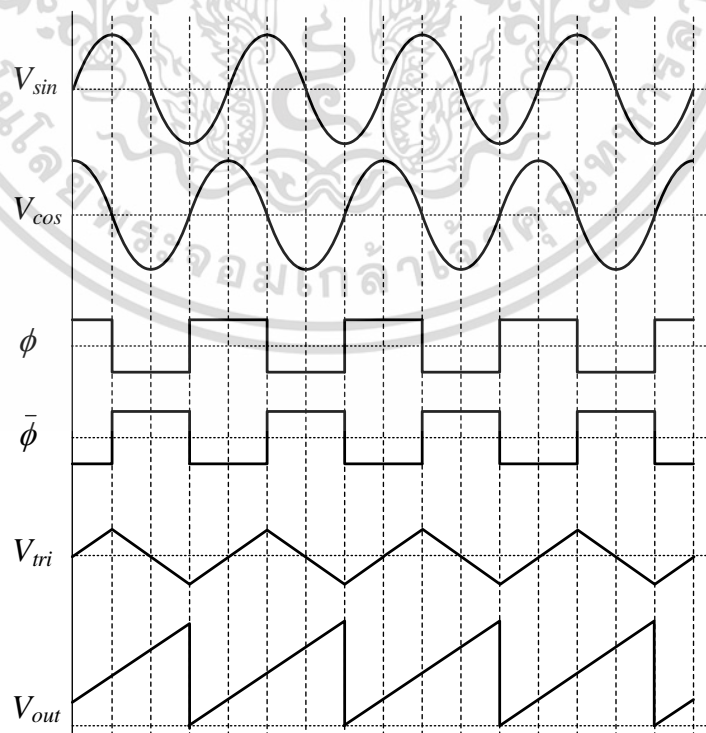
กรณี $\phi = "0"$ และ $\bar{\phi} = "1"$

$$V_{out} = -V_t + 3V_{off+} \quad (4.6)$$



รูปที่ 4.3 กราฟสัญญาณการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม

กราฟสัญญาณการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อยแสดงในรูปที่ 4.4 จากการดำเนินงานของวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย สัญญาณสามเหลี่ยม V_t ที่ทำการปรับแอมพลิจูดให้มีค่าเท่ากับ 500mV ถูกนำมาต่อเป็นสัญญาณฟันเลื่อยโดยแบ่งเป็นช่วงคือ $0-\pi/2$ $\pi/2-\pi$ $\pi-3\pi/2$ และ $3\pi/2-2\pi$ จะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุต V_{out} ที่ได้มีความสัมพันธ์อย่างเป็นเชิงเส้นกับค่ามุมแกมมาของรีโวลเวอร์ตั้งแต่ 0 ถึง 2π



รูปที่ 4.4 กราฟสัญญาณการทำงานของวงจรสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิชาหรือการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำมาเผยแพร่เป็นประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 สมรรถนะการทำงานของวงจร

วงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วยวงจรย่อยหลายวงจร ซึ่งวงจรย่อยที่มีผลต่อสมรรถนะหลักของวงจรปรับแต่งสัญญาณมีอยู่ 2 วงจรด้วยกันคือ วงจรตีมอดูเลตสัญญาณเนื่องจากใช้วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณทำการสุ่มค่าที่ตำแหน่งสูงสุดหรือ 90 องศาของสัญญาณกระตุ้น ซึ่งถ้าวงจรสุ่มและคงค่าไม่ได้สุ่มค่าที่ตำแหน่ง 90 องศา ทำให้ค่ามมที่ได้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้ และวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมซึ่งเกิดจากการประมาณค่าของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ได้วิเคราะห์ความผิดพลาดโดยแบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้

ความผิดพลาดจากวงจรตีมอดูเลตสัญญาณ

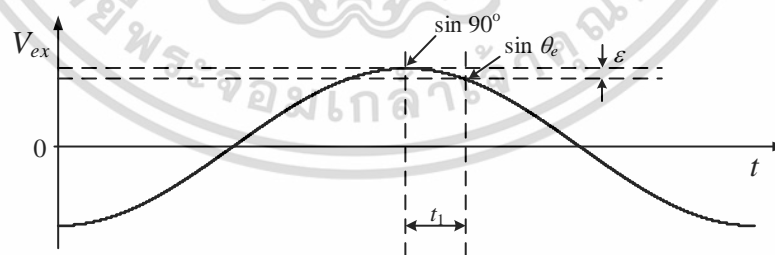
ความผิดพลาดนี้เกิดจากการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า โดยวงจรจะทำการสุ่มค่าที่ตำแหน่งขอบกลางของสัญญาณพัลส์ควม V_c ดังนั้นถ้าสัญญาณพัลส์ควม V_c มีความกว้างพัลส์มาก จะทำให้การสุ่มค่าของวงจรสุ่มและคงค่ามีความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่ง 90 องศาหรือตำแหน่งสูงสุดของสัญญาณกระตุ้น V_{ex} เมื่อกำหนดค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณกระตุ้น V_{ex} มีค่าเท่ากับ 1 ค่าความผิดพลาดของวงจรสุ่มและคงค่า (ε_1) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [28]

$$\varepsilon_1 = \frac{\sin 90^\circ - \sin \theta_e}{\sin 90^\circ} \times 100\% \quad (4.7ก)$$

หรือ

$$\varepsilon_1 = (1 - \sin \theta_e) \times 100\% \quad (4.7ข)$$

เมื่อ θ_e คือ ตำแหน่งมุมที่วงจรสุ่มและคงค่าทำการสุ่มสัญญาณ



รูปที่ 4.5 ความผิดพลาดที่เกิดจากสัญญาณพัลส์ควมมีขนาดที่กว้างเกินไป

จากรูปที่ 4.5 ค่า t_1 คือช่วงความกว้างของสัญญาณพัลส์ควม ซึ่งถ้ามีค่ามากเกินไปจะทำให้เกิดความผิดพลาด ε_1 มากขึ้น ในการทดสอบการทำงานของวงจรที่นำเสนอ กำหนดให้สัญญาณกระตุ้น V_{ex} มีความถี่ 3kHz สัญญาณพัลส์ควม V_c มีความกว้างพัลส์ 2 μ s ดังนั้นมุม θ_e มีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

92.16 องศา เมื่อทำการแทนค่า θ_e ลงในสมการที่ 4.7x ทำให้ได้ค่าความผิดพลาดของวงจรมุมและคงค่า ε_1 มีค่าเท่ากับ 0.071%

ความผิดพลาดจากวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม

ค่าความผิดพลาดนี้เกิดจากการประมาณค่าซึ่งมีอยู่ 2 ส่วนคือ การประมาณค่าของฟังก์ชันอินเวอร์สไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์เพื่อนำมาสังเคราะห์เป็นฟังก์ชันไซน์ ซึ่งเป็นส่วนป้อนกลับของวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม โดยวิเคราะห์จากค่าผลรวมความเพี้ยนฮาร์มอนิก (total harmonic distortion, THD)

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\alpha} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (4.8)$$

เมื่อ V_1 คือ แร่งดันที่ความถี่ฐาน

V_h คือ แร่งดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h

ส่วนที่สองเกิดจากการประมาณค่าของฟังก์ชันไซน์เพื่อนำมาสังเคราะห์เป็นฟังก์ชันอินเวอร์สไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ โดยวิเคราะห์จากค่าผลรวมความผิดพลาดแต่ละองค์ประกอบทางความถี่ในรูปของรากที่สองกำลังสองเฉลี่ยแบบคิดค่าถ่วงน้ำหนัก (root weighted mean square), ε_2

$$\varepsilon_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^q w_i \left(\frac{f'' - f_i}{f_i} \right)^2} \times 100\% \quad (4.9)$$

เมื่อ f'' และ f_i คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square, rms) ขององค์ประกอบความถี่ลำดับที่ i จากสัญญาณที่วัดได้และค่าในอุดมคติ ตามลำดับ q คือ องค์ประกอบความถี่ที่สูงสุดท้ายที่ต้องการคำนวณ และ w_i คือ ค่าน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบความถี่ที่ประกอบขึ้นเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม สำหรับค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณค่าได้ทำการหาจากผลการทดสอบจริงในหัวข้อที่ 4.4

4.4 การทดสอบและผลการทดสอบการทำงานของวงจร

ในการทดสอบการทำงานของวงจร ได้ทำการต่อวงจรจริงโดยเลือกใช้อุปกรณ์แอดคทีฟตามตารางที่ 4.1 และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงในตารางที่ 4.2 ตัวอุปกรณ์รีโซลเวอร์เป็นของบริษัท SANYO DENKI รุ่น 101-4100 ใช้สัญญาณกระตุ้นที่มีความถี่ 3kHz แอมพลิจูด $5V_{pp}$ ใช้มอเตอร์กระแสตรงเป็นตัวขับแกนรีโซลเวอร์ที่ความเร็วรอบ 600rpm

ตารางที่ 4.1 อุปกรณ์แอดคทีฟที่ใช้ในการทดสอบวงจร

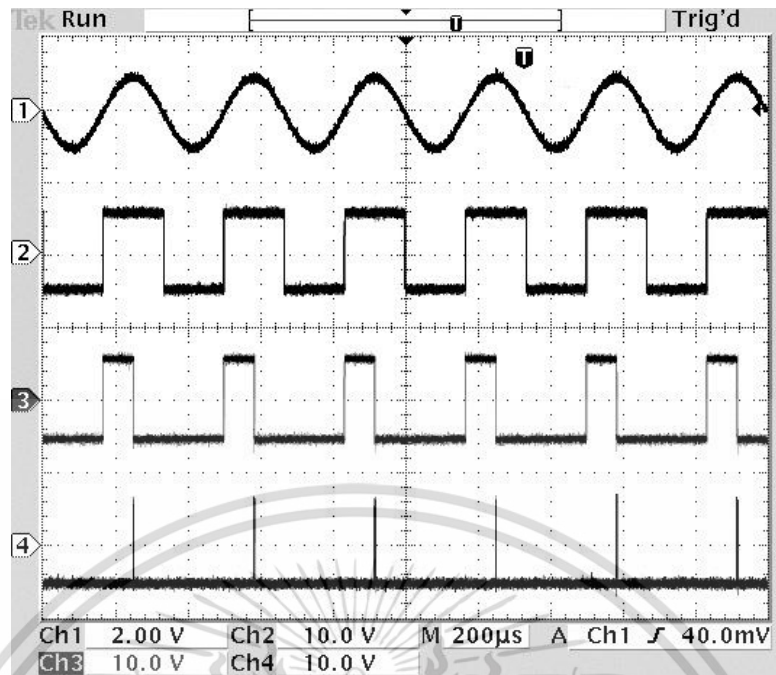
อุปกรณ์	เบอร์
Switch (sw ₁ , sw ₂) และ S/H ₁ , S/H ₂	CD4066
MN ₁ และ MN ₂	CD4528
Opamp (A ₁ , A ₄ , A ₅)	LM339
Opamp (A ₂ , A ₃ , A ₆ , A ₇)	LF353
OTA ₁	CA3280

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบวงจร

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
แหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} และ $-V_{SS}$	5V
R_1, R_4, R_5	1k Ω
$R_2, R_3, R_6, R_7, R_8, R_9, R_{10}, R_{12}$	10k Ω
R_{11}	5k Ω
I_B	100 μ A
แรงดันคงที่ V_{off+} และ $-V_{off-}$	500mV

รูปที่ 4.6 แสดงกราฟการทำงานของสัญญาณ V_1 V_2 และ V_c ที่ใช้ควบคุมของวงจรสุ่มและคงค่าในวงจรตีมอดูเลตในรูปที่ 3.2 โดยนำสัญญาณกระตุ้น V_{ex} มาเป็นสัญญาณอ้างอิง ความกว้างพัลส์ของสัญญาณ V_2 ถูกสร้างให้มีค่าเท่ากับ 1/4 ของคาบเวลาสัญญาณกระตุ้นหรือ 83 μ s สัญญาณ V_c ถูกสร้างที่ขอบกลางของสัญญาณ V_2 ด้วยความกว้างพัลส์เท่ากับ 2 μ s ซึ่งเป็นตำแหน่งสูงสุดของสัญญาณกระตุ้น V_{ex} รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบวงจรตีมอดูเลต สัญญาณ V_{sin} และ V_{cos} ที่ได้จากวงจรตีมอดูเลตมีความถี่ 10Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



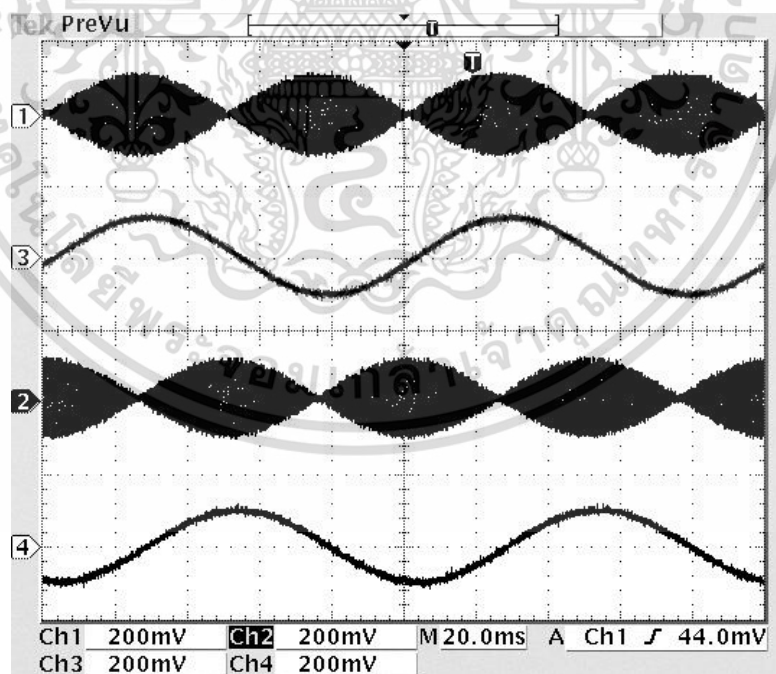
รูปที่ 4.6 กราฟการทำงานของสัญญาณ V_{ex} V_1 V_2 และ V_c

CH1: สัญญาณ V_{ex}

CH2: สัญญาณ V_1

CH3: สัญญาณ V_2

CH4: สัญญาณ V_c



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบวงจรตีมอดูเลตสัญญาณ

CH1: สัญญาณ V_{s1}

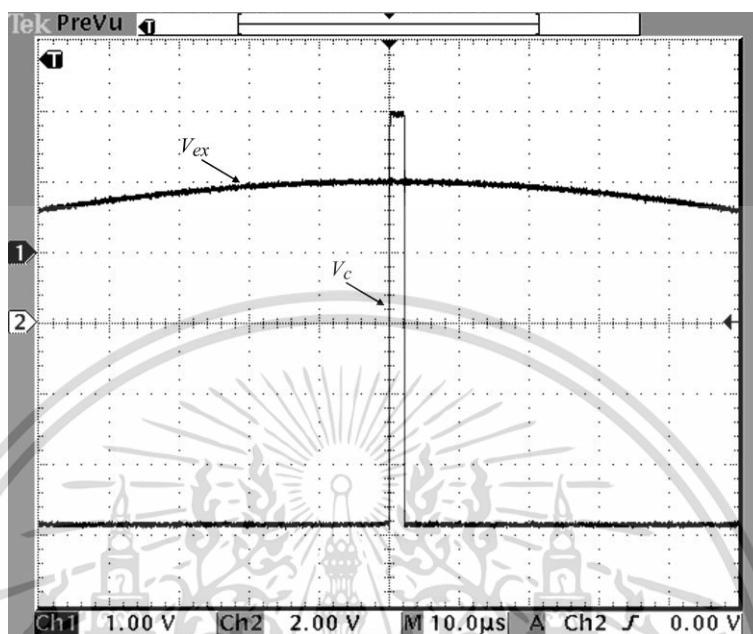
CH2: สัญญาณ V_{sin}

CH3: สัญญาณ V_{s2}

CH4: สัญญาณ V_{cos}

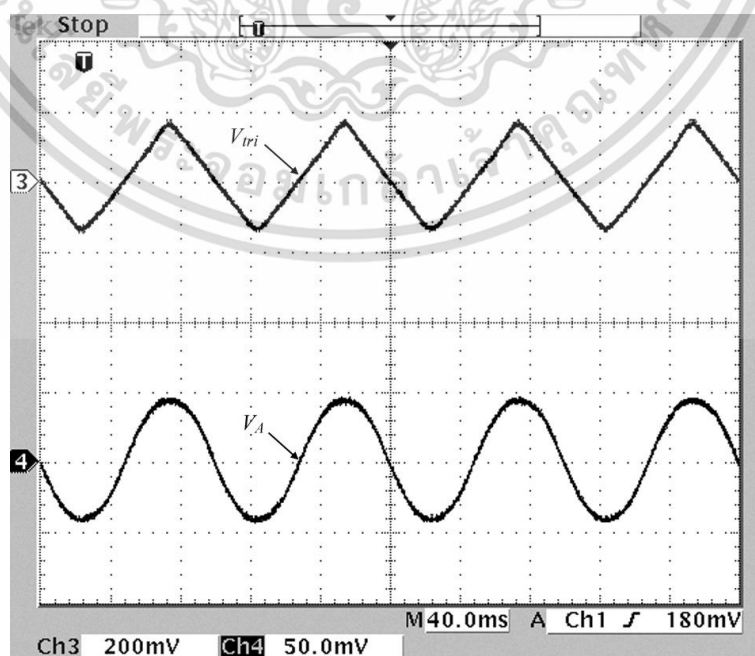
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ความผิดพลาดที่เกิดจากวงจรตีอูเลตสัญญาณในหัวข้อที่ 4.3 ได้ทำการวัดสัญญาณกระตุ้น V_{ex} และสัญญาณพัลส์ควบคุม V_c เพื่อให้เห็นผลการทดสอบจากการต่อวงจรจริง โดยทำการขยายกราฟเพื่อให้เห็นความกว้างพัลส์ของสัญญาณ V_c ที่ $2\mu s$

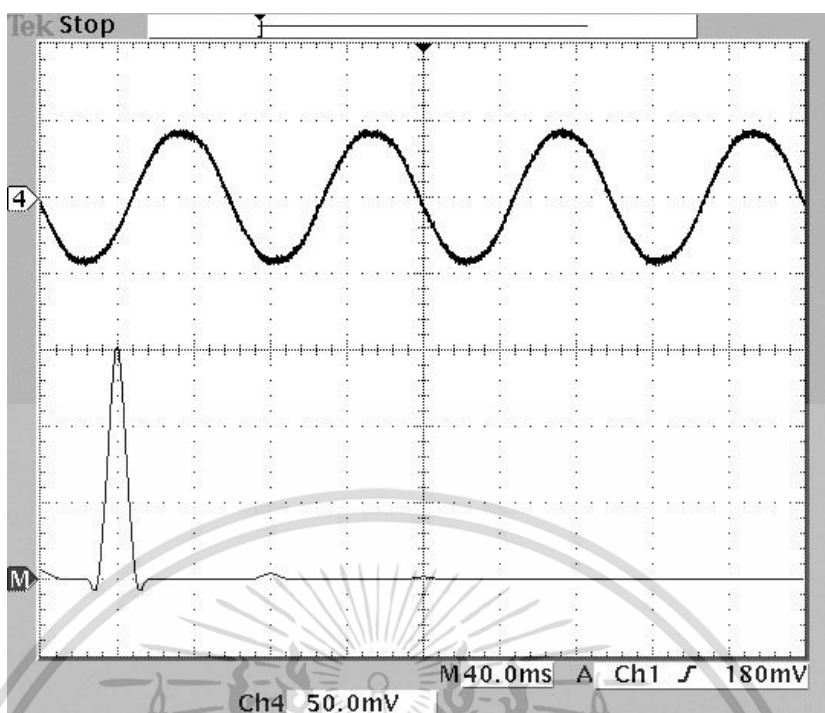


รูปที่ 4.8 สัญญาณ V_{ex} และ V_c ที่ทำการขยายกราฟ

รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณไซน์ในรูปที่ 2.12 องค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณไซน์ที่สังเคราะห์ได้จากรูปที่ 2.12 แสดงในรูปที่ 4.10 สำหรับตารางที่ 4.3 แสดงค่าแอมพลิจูดขององค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณไซน์ที่ได้จากรูปที่ 4.10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้: รูปที่ 4.9 สัญญาณไซน์ที่สังเคราะห์ได้จากวงจรรูปที่ 2.12
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 สัญญาณไซน์และองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.12

ตารางที่ 4.3 ค่าแอมพลิจูดขององค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณไซน์ที่สังเคราะห์ได้

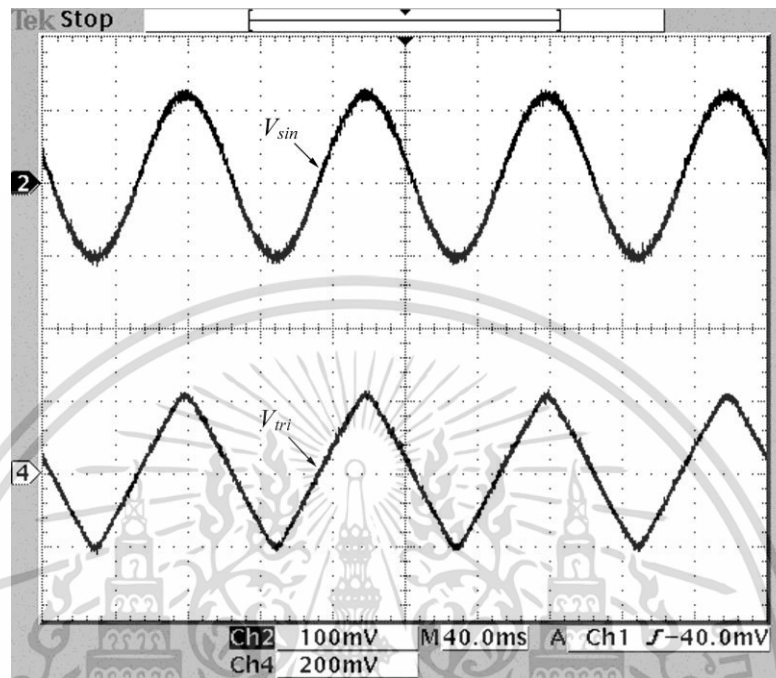
Frequency component	10Hz	20Hz	30Hz	40Hz	50Hz
Magnitude (V_{rms})	30.5m	0 μ	700 μ	0 μ	500 μ

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณไซน์ที่ได้มีแอมพลิจูดเกิดขึ้นที่ฮาร์มอนิกที่เป็นเลขคี่ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่เกิดจากสัญญาณสามเหลี่ยม ทำให้สามารถกล่าวได้ว่าวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณไซน์ยังมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งยังมีองค์ประกอบของสัญญาณสามเหลี่ยมติดออกมาด้วย จากสมการที่ 4.8 และตารางที่ 4.3 สามารถคำนวณหาค่า THD ของสัญญาณไซน์ที่สังเคราะห์ได้ดังนี้

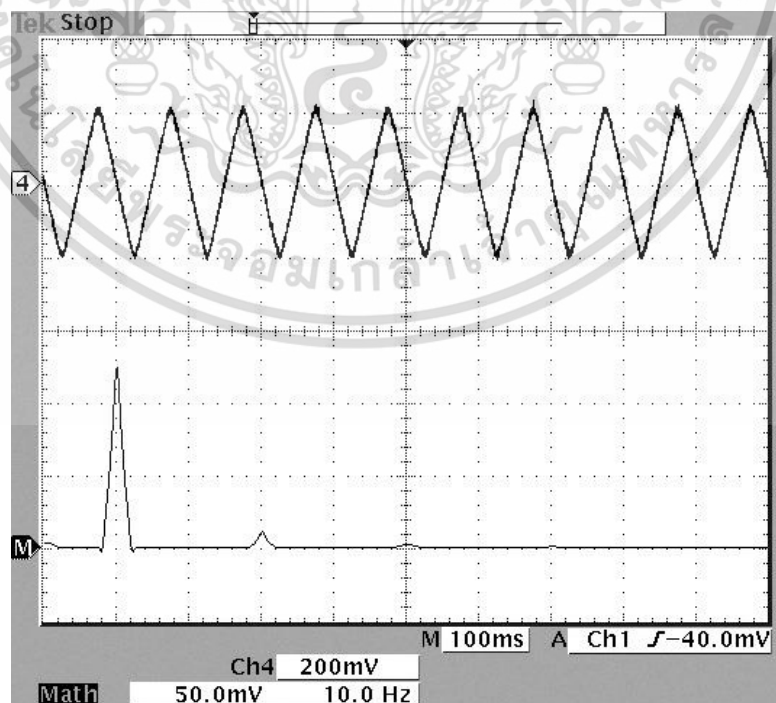
$$THD = \frac{\sqrt{(700\mu)^2 + (500\mu)^2}}{30.5m} \times 100\% = 2.82\% \quad (4.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมแสดงในรูปที่ 4.11 สัญญาณสามเหลี่ยม V_{tri} และองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณ V_{tri} แสดงในรูปที่ 4.12 โดยค่าองค์ประกอบทางความถี่แสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.11 สัญญาณไซน์ V_{sin} และสัญญาณสามเหลี่ยม V_{tri} ของวงจรในรูปที่ 3.5



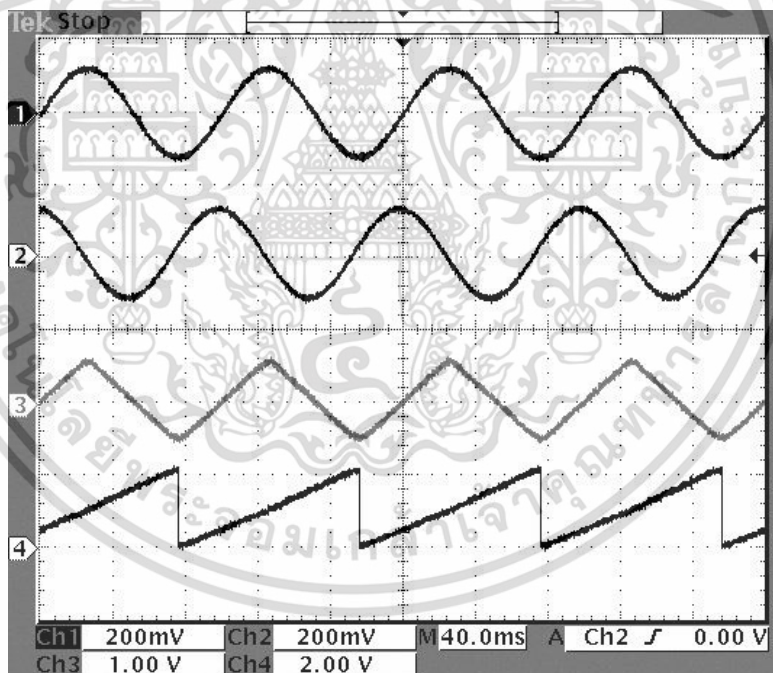
รูปที่ 4.12 สัญญาณสามเหลี่ยม V_{tri} และองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่าแอมพลิจูดขององค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณ V_{tri}

Frequency component	Ideal triangle wave (V_{rms})	Measured triangle wave (V_{rms})
10Hz	127m	127m
30Hz	14.11m	11.1m
50Hz	5.08m	4.6m

จากตารางที่ 4.4 และสมการที่ 4.9 สามารถนำมาคำนวณหาค่าผลรวมความผิดพลาดของแต่ละองค์ประกอบความถี่ที่อยู่ในรูปของรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักได้ โดยมีค่าเท่ากับ $\delta = 7.35\%$

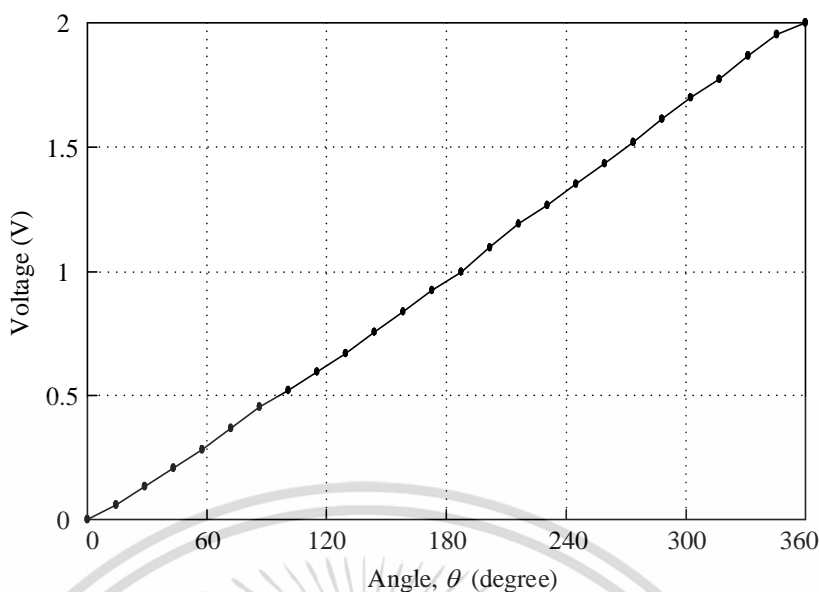
รูปที่ 4.13 แสดงผลการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยม V_t เป็นสัญญาณฟันเลื่อย V_{out} โดยสัญญาณสามเหลี่ยม V_t เป็นสัญญาณ V_{tri} ที่ปรับให้แอมพลิจูดมีขนาด 500mV ได้ทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุม θ ของแกนรีโซลเวอร์กับสัญญาณแรงดันเอาต์พุต V_{out} ที่ได้จากวงจรปรับแต่งสัญญาณที่นำเสนอตั้งแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย

CH1: สัญญาณ V_{sin} CH2: สัญญาณ V_{cos}
 CH3: สัญญาณ V_t CH4: สัญญาณ V_{out}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างมุม θ ของแกนรีโซลเวอร์กับสัญญาณแรงดันเอาต์พุต V_{out}

จากผลการทดสอบการทำงานของวงจรในรูปที่ 4.6 – 4.14 จะเห็นได้ว่าวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถให้สัญญาณเอาต์พุต 0 – 2V ที่มีความเป็นเชิงเส้นกับค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ตลอดช่วงการหมุน 0 – 360 องศา

4.5 สรุป

ในบทนี้นำเสนอวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โครงสร้างของวงจรประกอบด้วย 4 วงจร ได้แก่ วงจรติมอดูเลตสัญญาณ วงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรควบคุมลอจิก และวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย ได้ทำการทดสอบการทำงานของวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ด้วยการต่อวงจรจริง เพื่อเป็นการยืนยันการว่าวงจรที่นำเสนอสามารถทำงานได้จริง สัญญาณเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่นำเสนอมีความเป็นเชิงเส้นกับค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะแนวทางการวิจัยต่อ

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตที่ได้เป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีความเป็นเชิงเส้นกับค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ โครงสร้างของวงจรประกอบด้วยวงจรร้อยย 4 วงจร คือ วงจรติมอดูเลตสัญญาณ วงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรควบคุมลอจิก และวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย โดยวงจรติมอดูเลตสัญญาณเป็นการนำงานวิจัย [28] มาใช้เนื่องจากเป็นวงจรที่ไม่ซับซ้อนและใช้งานง่าย แต่มีข้อเสียตรงที่ความถี่ของสัญญาณควบคุมการทำงานของวงจรมุมและคงค่าไม่สามารถเปลี่ยนได้ตามความถี่ของสัญญาณกระตุ้น ทว่ารีโซลเวอร์แต่ละตัวจะใช้ความถี่ของสัญญาณกระตุ้นที่ค่าเดียว จึงทำให้สามารถคงค่าความถี่ของสัญญาณควบคุมการทำงานของวงจรมุมและคงค่าได้ หลังจากทำการติมอดูเลตสัญญาณรีโซลเวอร์ ทำให้ได้สัญญาณมุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ 2 สัญญาณ คือ สัญญาณที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์และฟังก์ชันโคไซน์ โดยสัญญาณมุมแกนหมุนที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์ถูกนำไปแปลงเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมด้วยวงจรที่ออกแบบขึ้น โดยใช้หลักการการป้อนกลับของฟังก์ชันไซน์ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยอาศัยคุณสมบัติของฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ของวงจรมุมผลต่างแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นวงจรภายในของโอทีเอ สัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้จากวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสามเหลี่ยมที่ออกแบบขึ้นถูกนำไปขยายให้มีแอมพลิจูดที่ 500mV เพื่อให้พร้อมสำหรับนำไปแปลงเป็นสัญญาณฟันเลื่อย วงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อยถูกควบคุมด้วยสัญญาณลอจิกที่สร้างขึ้นจากการนำสัญญาณมุมแกนหมุนที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันโคไซน์มาทำการเปรียบเทียบกับกราวด์ โดยสัญญาณลอจิกที่ได้นำมาใช้ควบคุมสวิตช์ของวงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณฟันเลื่อย ซึ่งสัญญาณฟันเลื่อยที่ได้นี้เป็นสัญญาณเชิงเส้นที่มีความสัมพันธ์กับค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ โดยความผิดพลาดของการปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์อยู่ที่ 2 องศาหลักคือ วงจรติมอดูเลตสัญญาณซึ่งเกิดจากการสุ่มค่าของวงจรมุมและคงค่าที่ไม่ใช่ตำแหน่งสูงสุดหรือ 90 องศาของสัญญาณกระตุ้นจริง และวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมซึ่งเกิดจากการประมาณค่าของฟังก์ชันในการสังเคราะห์สัญญาณสามเหลี่ยม

5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางการทำวิจัยต่อ

จากวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ยังมีประเด็นที่น่าสนใจในการวิจัยและพัฒนาวงจรให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ในประเด็นแรก วงจรติมอดูเลตสัญญาณเป็นการนำสัญญาณกระตุ้นซึ่งเป็นสัญญาณที่ป้อนเข้าทางด้านอินพุตของรีโซลเวอร์มาเป็นสัญญาณอ้างอิงในการเอกสการนี้เป็นเอกสการที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างสัญญาณควบคุมการสุมของวงจรสุมและคงค่า ซึ่งในความเป็นจริงสัญญาณด้านอินพุตและเอาต์พุตของรีโซลเวอร์มีเฟสที่ต่างกันอยู่ (phase shift) เนื่องจากโครงสร้างภายในของรีโซลเวอร์คือตัวเหนี่ยวนำ ทำให้การนำสัญญาณกระตุ้นมาเป็นสัญญาณอ้างอิงดังกล่าวจึงเกิดความผิดพลาดในการตีמודูเลตสัญญาณ งานวิจัยที่น่าสนใจในการพัฒนา คือ การนำสัญญาณเอาต์พุตของรีโซลเวอร์มาเป็นสัญญาณอ้างอิงในการตีמודูเลตสัญญาณรีโซลเวอร์ ซึ่งจะทำให้ปัญหาที่เกิดจากความแตกต่างของเฟสหมดไป ประเด็นที่สอง การออกแบบวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม ซึ่งเป็นการประมาณค่าของสมการเพื่อนำมาสังเคราะห์เป็นสัญญาณฟังก์ชันอินเวอร์สไซน์ หากต้องการให้วงจรปรับแต่งสัญญาณมีความผิดพลาดที่ต่ำ วงจรสังเคราะห์สัญญาณฟังก์ชันอินเวอร์สไซน์ต้องมีความถูกต้องสูง งานวิจัยที่น่าสนใจและยังคงมีการพัฒนากันอย่างต่อเนื่อง คือ การสังเคราะห์ฟังก์ชันอินเวอร์สไซน์ให้มีความถูกต้อง

นอกจากนี้ยังมีแนวคิดในการทำวิจัยต่อยอดโดยการนำรีโซลเวอร์มาใช้ในการหามุมแกนหมุนทั้ง 3 แกน คือ X Y และ Z ซึ่งงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการหามุมแกนหมุนในระนาบเดียว ถ้าสามารถนำวงจรปรับแต่งสัญญาณรีโซลเวอร์มาทำการหามุมแกนหมุนได้ทั้ง 3 แกนทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ประโยชน์อย่างมาก

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Gasking, R. Agosti, D. Dayton, A. Freilich, W. Grandner, F. Haber and J. Petry, “**Synchro and resolver conversion**” Memory Devices Ltd., Central Avenue, East Molesey, Surrey, KT8 0SN. United Kingdom, 1980.
- [2] The Moog Components Group engineering staff, **Synchro and Resolver Engineering Handbook**, 2005.
- [3] C. Attaianesi and G. Tomasso, “Position measurement in industrial drives by means of low-cost resolver-to-digital converter,” **IEEE Trans. on Instrumentation and measurement**, vol. 56, no. 6, Dec. 2007, pp. 2155 – 2159.
- [4] C. H. Yim, I. J. Ha and M. S. Ko, “A resolver-to-digital conversion method for fast tracking,” **IEEE Trans. Ind. Electron.**, vol. 39, no.5, Oct. 1992, pp. 369-378.
- [5] M. Benammar, L. Ben-Brahim, and M. A. Alhamadi, “A high precision resolver-to-DC converter,” **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, vol. 54, no. 6, Dec. 2005, pp. 2289–2296.
- [6] A. Kaewpoonsuk, T. Kamsri, W. Petchmaneelumka, and V. Riewruja, “A full-range-360° resolver-to-DC converter,” **International Conference on Control, Automation, and Systems (ICCAS2007)**, Seoul, Korea, Oct. 17-20, 2007, pp. 802-805.
- [7] A. Kaewpoonsuk, W. Petchmaneelumka, A. Rerkratn, S. Tammaruckwattana, and V. Riewruja, “A novel resolver-to-DC converter based on OTA-based inverse-sine function circuit,” **Proceedings of SICE Annual Conference 2008**, Tokyo, Japan, Aug. 2008, pp. 609–614.
- [8] M. Benammar, L. Ben-Brahim and M. A. Alhamadi, “A Novel Resolver-to-360° Linearized Converter,” **IEEE Sensors Journal**, vol. 4, no. 1, Feb. 2004, pp. 96-101.
- [9] J. Bergas-Jane, C. Ferrater-Simon, G. Gross, R. Ramirez-Pisco, S. Galceran-Arellano and J. Rull-Duran, “High-Accuracy All-Digital Resolver-to-Digital Conversion,” **IEEE Trans. on Industrial electronics**, vol. 59, no. 1, Jan 2012, pp. 326-333.
- [10] D. A. Khaburi, “Software-based resolver-to-digital converter for DSP-based drives using an improved angle-tracking observer,” **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, vol. 61, no. 4, Apr. 2012, pp. 922–929.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] D. C. Hanselman, "Techniques for improving resolver-to-digital conversion accuracy," **IEEE Trans. Ind. Electron.**, vol. 38, no. 6, Dec. 1991, pp. 501-504.
- [12] A. Verma and A. Chellamuthu, "Design considerations for resolver-to-digital converters in electric vehicles," *Analog Applications Journal*, (SLYT661), Texas Instruments, 2016.
- [13] M. Staebler and A. Verma, "TMS320F240 DSP solution for obtaining resolver angular position and speed," Application Report, (SPRA605A), Texas Instruments, Aug. 2017.
- [14] M. Konghirun, "A resolver-based vector control drive of permanent magnet synchronous motor on a fixed-point digital signal processor," **IEEE Region Ten Conference (TENCON 2004)**, vol. 4, pp. 167-170, 2004.
- [15] L. Ben-Brahim, M. Benammar and M.A. Alhamadi, "A resolver angle estimator based on its excitation signal," **IEEE Trans. Ind. Electron.**, vol. 56, no. 2, 2009, pp. 574-580.
- [16] อนุชา แก้วพลสุข. "การสังเคราะห์วงจรแปลงสัญญาณรีโซลเวอร์เป็นสัญญาณดิจิตอล." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [17] R. Pallas-Areny and J.G. Webster, **Sensor and Signal Condition**, John Wiley & Sons, 2001.
- [18] A. Drumea, A. Vasile, M. Comes and M. Blejan, "System on Chip Signal Conditioner for LVDT Sensors," **Electronics System Integrator Technology Conference**, Dresden, Germany, 2006, pp. 629-634.
- [19] R. M. Ford, R. S. Weissbash and D. R. Loker, "A DSP-based Modified Costas Receiver for LVDT Position Sensors," **IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement**, vol. 3, 2000, pp. 1448-1452.
- [20] S. P. Vlahu, "Direct Resolver to Digital Converter," **U.S. Patent no. 5912638**, 1999.
- [21] C. Attaianesi, G. Tomasso and D. DeBonis, "A Low-cost Resolver-to-Digital Converter," **IEEE International Electric Machines and Drives Conference**, Cambridge, MA, USA, June 17-20, 2000, pp. 917-921.
- [22] Alhorn, D. C., Howard, D. E. and Smith, D. A. "**Resolver to 360 Linear Analog Converter and Method**," U.S. Patent no. 6104328, 2000.

- [23] Ono, T. “**Resolver-Type Rotational Positioning Arrangement**,” U.S. Patent no. 4529922, 1985.
- [24] H. Kuntman and A. Ozpinar, “On the realization of DO-OTA-C oscillators,” **Microelectronics Journal**, vol. 29, 1998, pp. 991-997.
- [25] V. Riewruja and W. Petchmaneelumka, “Floating current-controlled resistance converters using OTAs,” **AEU-International Journal of Electronics and Communications**, vol. 62, no. 10, 2008, pp. 725-731.
- [26] M.T. Abuelma’atti and A. Bentrchia, “A novel mixed-mode OTA-C universal filter,” **International Journal of Electronics**, vol. 92, no. 7, 2005, pp. 375-383.
- [27] วรณดี เพชรณีนีล้าค่า. “การออกแบบวงจรแปลงความต้านทานแบบลอยตัวโดยใช้โอทีเอและการประยุกต์ใช้งาน.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [28] A. Ota, W. Petchmaneelumka, A. Rerkratn and V. Riewruja, “Simple Resolver Demodulation,” **JSST 2013 International Conference on Simulation Technology**, Meiji Univ. Suguradai Campus, Japan, Sep. 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

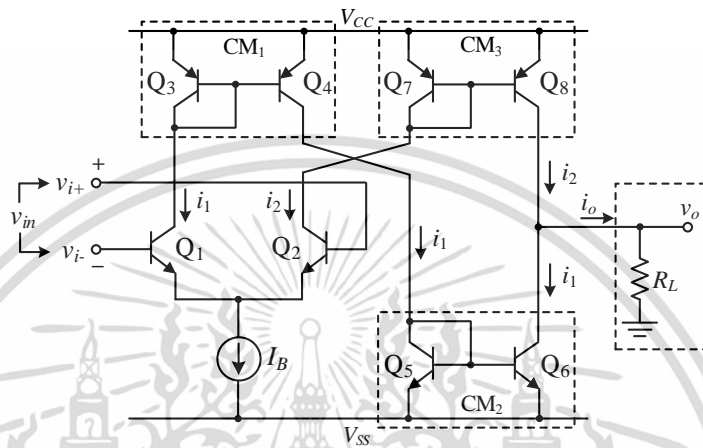


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์คุณสมบัติการทำงานของวงจรโอทีเอ

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสเอาต์พุต i_o กับค่าแรงดันอินพุต v_{in} ของโอทีเอ



รูปที่ ก1 โครงสร้างภายในวงจรโอทีเอ

จากโครงสร้างภายในวงจรโอทีเอในรูปที่ ก1 ความสัมพันธ์ของผลต่างแรงดันอินพุต $v_{in} = (v_{i+}) - (v_{i-})$ กับแรงดันตกคร่อมขาเบส-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 สามารถเขียนได้เป็น

$$v_{in} = v_{i+} - v_{i-} = v_{be2} - v_{be1} \quad (ก1.1)$$

เมื่อ v_{be1} และ v_{be2} คือค่าแรงดันตกคร่อมขาเบส-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ตามลำดับ จากคุณสมบัติการทำงานของทรานซิสเตอร์ จะได้แรงดัน v_{be1} และ v_{be2} มีค่าเท่ากับ

$$v_{be1} = v_T \ln \left(\frac{i_{c1}}{I_s} \right) \quad (ก1.2)$$

และ

$$v_{be2} = v_T \ln \left(\frac{i_{c2}}{I_s} \right) \quad (ก1.3)$$

เมื่อ i_{c1} และ i_{c2} คือค่ากระแสที่ไหลผ่านขาคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ตามลำดับ I_s คือ ค่ากระแสอิ่มตัวเมื่อทำการไบอัสกลับ (reverse saturation current)

v_T คือ แรงดันเชิงอุณหภูมิตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการที่ (ก1.2) และ (ก1.3) ลงในสมการที่ (ก1.1) จะได้

$$v_{in} = v_T \ln \left(\frac{i_{c2}}{I_s} \right) - v_T \ln \left(\frac{i_{c1}}{I_s} \right) \quad (\text{ก1.4})$$

หรือ

$$\frac{i_{c2}}{i_{c1}} = e^{(v_{in}/v_T)} \quad (\text{ก1.5})$$

จากสมการที่ (ก1.5) กระแส i_{c1} และ i_{c2} จะมีค่าเท่ากับ

$$i_{c1} = i_{c2} e^{(-v_{in}/v_T)} \quad (\text{ก1.6})$$

$$i_{c2} = i_{c1} e^{(v_{in}/v_T)} \quad (\text{ก1.7})$$

กระแสไบอัส I_B จากวงจรในรูปที่ ก1 ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 สามารถเขียนได้เป็น

$$I_B = i_{e1} + i_{e2} = \frac{i_{c1}}{\alpha_F} + \frac{i_{c2}}{\alpha_F} \quad (\text{ก1.8})$$

เมื่อ i_{e1} และ i_{e2} คือค่ากระแสที่ไหลผ่านขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ตามลำดับ α_F คืออัตราส่วนระหว่างค่ากระแสคอลเล็กเตอร์ต่อค่ากระแสอิมิตเตอร์

กำหนดให้ทรานซิสเตอร์แต่ละตัวมีค่าอัตราขยายกระแสระหว่างกระแสคอลเล็กเตอร์กับกระแสเบสมีค่าสูงมาก ทำให้สามารถประมาณค่า α_F ให้มีค่าเท่ากับ 1 เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (ก1.8) เขียนใหม่ได้เป็น

$$I_B = i_{e1} + i_{e2} = i_{c1} + i_{c2} \quad (\text{ก1.9})$$

นำค่ากระแส i_{c2} จากสมการที่ (ก1.7) แทนลงในสมการที่ (ก1.9) ทำให้ได้ค่ากระแส i_{c1} หรือ i_1 เป็น

$$i_1 = i_{c1} = \frac{I_B}{1 + e^{(v_{in}/v_T)}} = \frac{I_B e^{(-v_{in}/2v_T)}}{e^{(-v_{in}/2v_T)} + e^{(v_{in}/2v_T)}} \quad (\text{ก1.10})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่ากระแส i_{c1} จากสมการที่ (ก1.6) แทนลงในสมการที่ (ก1.9) ทำให้ได้ค่ากระแส i_{c2} หรือ i_2 เป็น

$$i_2 = i_{c2} = \frac{I_B}{1 + e^{(-v_{in}/v_T)}} = \frac{I_B e^{(v_{in}/2v_T)}}{e^{(-v_{in}/2v_T)} + e^{(v_{in}/2v_T)}} \quad (\text{ก1.11})$$

เนื่องจากกำหนดให้วงจรสะท้อนกระแส (CMi) ทุกตัวมีค่าอัตรากระแสสะท้อนกระแสเท่ากับ 1 ดังนั้นจะได้กระแสเอาต์พุต i_o มีค่าเท่ากับ

$$i_o = i_2 - i_1 \quad (\text{ก1.12})$$

แทนค่ากระแส i_1 จากสมการที่ (ก1.10) และค่ากระแส i_2 จากสมการที่ (ก1.11) ลงในสมการที่ (ก1.12) จะได้

$$i_o = \frac{I_B \left[e^{(v_{in}/2v_T)} - e^{(-v_{in}/2v_T)} \right]}{\left[e^{(v_{in}/2v_T)} + e^{(-v_{in}/2v_T)} \right]} \quad (\text{ก1.13})$$

จาก

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (\text{ก1.14})$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ (ก1.13) กับสมการที่ (ก1.14) จะได้

$$i_o = I_B \tanh\left(\frac{v_{in}}{2v_T}\right) \quad (\text{ก1.15})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

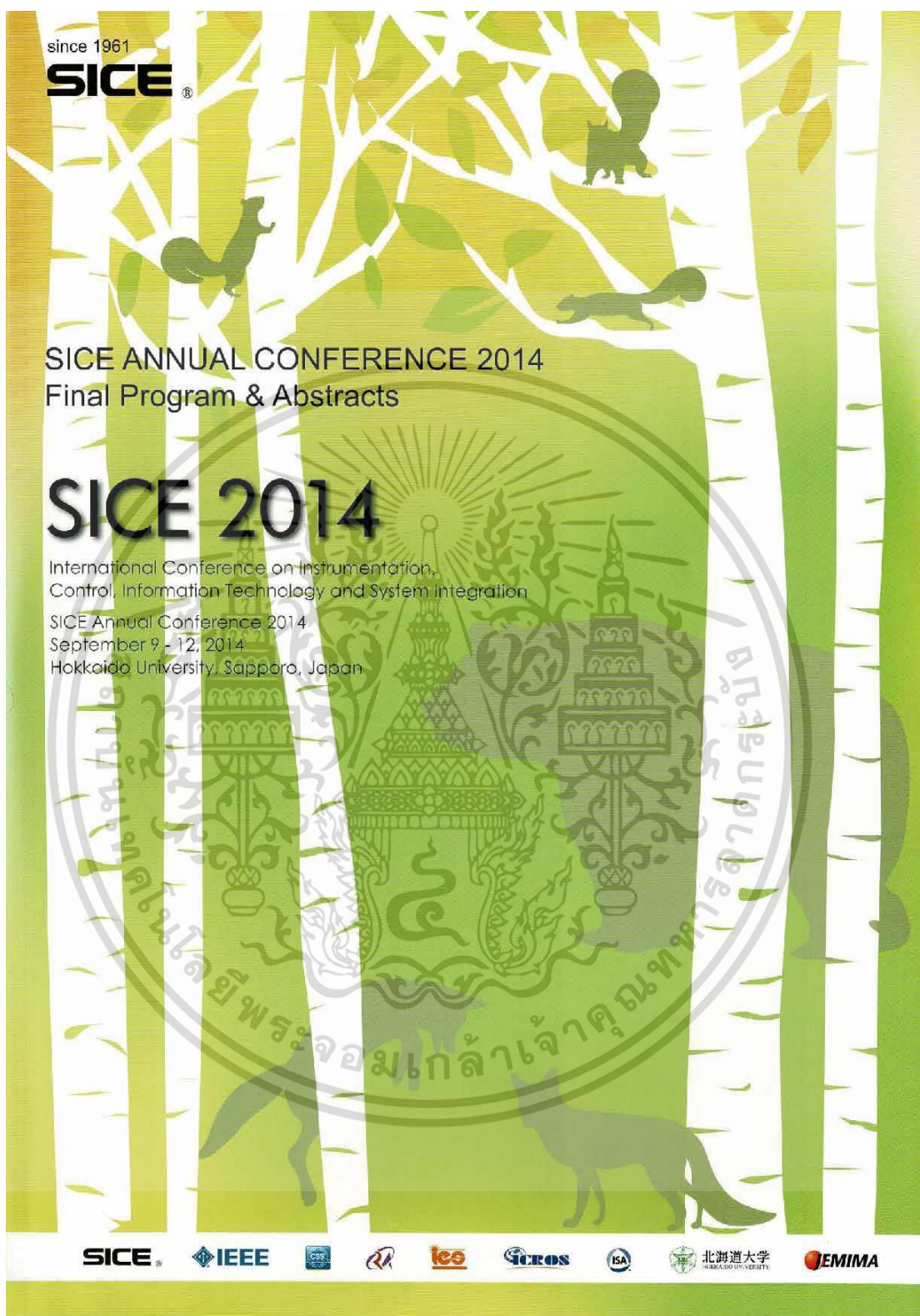
ภาคผนวก ข
บทความวิจัยที่ได้เผยแพร่และตีพิมพ์

บทความวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่และการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการและการประชุมวิชาการระดับนานาชาติในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีรายละเอียดดังนี้

- [1] Jakkapun Tongcharoen, Wandee Petchmaneelumka, Thepjit Cheypoca and Vanchai Riewruja, “Resolver-to-Triangular Wave Converter,” **SICE Annual Conference 2014**, Hokkaido University, Sapporo, Japan, Sep. 9-12, 2014, pp. 1181-1184.
- [2] Jakkapun Tongcharoen, Wandee Petchmaneelumka and Vanchai Riewruja, “Low-Cost Resolver-to-DC Converter” **15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2015)**, BEXCO, Busan, Korea, Oct. 13-16, 2015, pp. 1699-1702.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Resolver-to-Triangular Wave Converter

Jakkapun Tongcharoen[†], Wandee Petchmaneelumka^{*},

Thepjit Cheypoca, and Vanchai Riewruja

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
(Tel : +66-2-739-0758; E-mail: kpwandee@kmitl.ac.th)* Corresponding author

Abstract: An implementation of resolver-to-triangular wave converter to measure the position of motor shaft angle is presented. The resolver signals are demodulated using sample-and-hold (S/H). The control signal of S/H is stated at the peak of excitation signal for high accuracy of demodulated signals. The demodulated signals are converted to triangular signals using an inverse-sine function. The realization technique of the inverse-sine function is based on the use of an inverse operation of a simple triangular-to-sine function formed by operational transconductance amplifier (OTA) which is connected in feedback path of a closed-loop amplifier. Experimental results confirmed the performance of the proposed converter are agreed with the theoretical expectation.

Keywords: Resolver; Inverse sine function; Triangular-to-sine function; Sample and hold.

1. INTRODUCTION

An angle measurement for a rotating machine is one of the most applications in instrumentation and control systems. Many applications such as CNC, aircraft and industrial robot [1-3] require the performance of position transducer in terms of high reliability robustness and maintenance free. The resolver is the transducer provided the output signals depended on the position of machine shaft angle, which accepts the requirement mentioned above [4-5]. The resolver is transformer like configuration where rotor winding and two perpendicular stator windings are formed primary and secondary, respectively. The excitation signal applied to primary is transferred to secondary with the amplitude of the secondary signals proportion to the position of rotor shaft angle. Therefore, the secondary signals are in the form of amplitude modulation with suppressed carrier (AM-SC). The angular signals demodulated from secondaries are in the form of sine and cosine waves. In the past, synchronous detector is used to demodulate the shaft angular signal. However, synchronous detector requires time dependent devices to remove the excitation signal from shaft angular signal. Demodulation of two secondary signals, sine and cosine waves, requires two matched synchronous detectors for determination the position of shaft angle [6-7]. The mismatch of synchronous detectors causes the phase shift on angular signal and provides an error of resulting shaft angular readout. Recently, the methods to achieve the angular signal are introduced using mixed-signal technique [8-9]. Unfortunately, these methods obtain large circuit topology and specific devices. The simple technique to implement the demodulation of resolver signal based on mixed-signal principle is proposed in this article. The proposed technique comprises S/H, voltage comparator and one-shot timer. The resulting signals are in the form of sine wave with the amplitude related to the rotor shaft angle. The sine wave signals are fed to inverse sine function circuit to produce

triangular waveform. The inverse sine function circuit also knows as a sine-to-triangular wave converter. Therefore the slope of triangular wave is linear proportion to the rotor shaft angle. The proposed technique for realization sine-to-triangular converter is based on the use of triangular-to-sine wave converter connected in feedback path of the closed-loop amplifier. The triangular-to-sine wave converter can be provided from OTA and resistor [10]. The triangular wave can be directly determined the position of rotor shaft angle by divide into four sections, i.e. $0 - \pi/2$, $\pi/2 - \pi$, $\pi - 3\pi/4$, $3\pi/4 - 2\pi$. The advantage of the proposed resolver-to-triangular wave converter is that the time dependent devices such as low-pass filters are unnecessary. Therefore the high response time and high accuracy of the proposed scheme are obtained. In addition, the proposed scheme uses only commercially available device and low cost.

2. CIRCUIT DESCRIPTION

2.1 Resolver signal demodulation

The resolver signals are generated in the form of AM-SC as shown in Fig. 1(a). The tradition demodulation of AM-SC signal provides by a synchronous demodulation method as shown in Fig. 1(b). It can be seen that the low-pass filter in signal path will cause the phase shift of the resulting signal. The determination of rotor shaft angle requires two secondary demodulated signals. Then the low-pass filter used in Fig. 1(b) must be closely matched. There are unpractical implementations for closely matched low-pass filter. To overcome the above mention, the principle of the simple demodulator is shown in Fig. 2(a) [4]. From Fig. 2(a), the Sample and Hold (S/H) control signal provides from positive peak time or quarter cycle of carrier signal. The carrier signal is converted to square wave by zero-crossing detector. The rising edge of square wave signal is used to trig monostable multivibrator MN1 for quarter cycle delay. The output of MN1 forces MN2 to generate the control signal for S/H to hold the peak amplitude of carrier

[†] Jakkapun Tongcharoen is the presenter of this paper.

signal. Therefore, the angular signal is achieved at output of S/H. The operating signal waveforms of each output point (i, ii, \dots, v) are shown in Fig. 2(b). It should be noted that the demodulation technique is in the form of under sampling technique. The proposed demodulator circuit is shown in Fig 2(c)

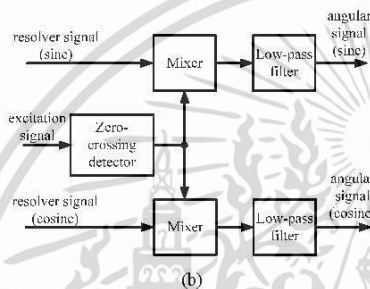
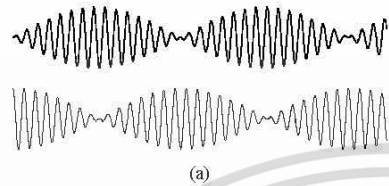
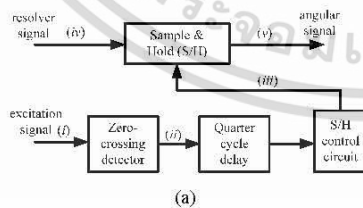


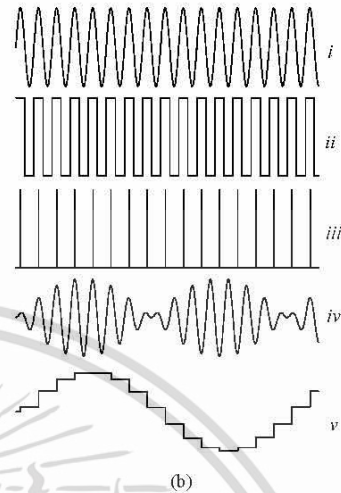
Fig. 1 Conventional resolver demodulator.
(a) resolver signals
(b) synchronous demodulator

2.2 Proposed resolver-to-triangular wave converter

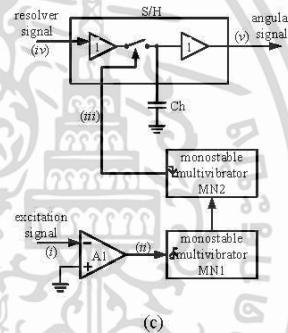
The resolver-to-triangular wave converter comprises two sections, resolver signal demodulator and sine-to-triangular wave converter. The resolver signal demodulator has been mentioned in section 2.1. The block diagram of sine-to-triangular wave converter is shown in Fig. 3(a). The technique is based on the use of triangular-to-sine converter connected in the feedback path. Angular signal v_a is compared with sinusoidal signal v_r generated from triangular-to-sine converter, where the resulting signal gained by K , v_b , is used to drive the triangular-to-sine converter in feedback path. It can be seen that the signal v_c is triangular signal. Fig. 3(b) shows a simple triangular-to-sine wave converter using OTA and resistor [10].



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 Simple resolver demodulator.
(a) block diagram
(b) signal waveforms of each point
(c) proposed demodulator circuit

The large signal behavior of differential amplifier in the term of hyperbolic tangent, which is the input stage of OTA, is utilized to convert a triangular signal to sinusoidal signal. The distortion of sinusoidal signal can be minimized by adjust the OTA bias current I_B to the appropriate value. The proposed sine-to-triangular wave converter is depicted in Fig. 3(c). From Fig. 3(c), operational amplifier (opamp) A_1 and resistors $R_1 - R_4$ function the summing amplifier. If the resistors $R_1 = R_4$ and $R_2 = R_3$ are set. Then, the voltage gain K of summing amplifier is equal to R_2/R_1 . Opamp A_2 acts as voltage follower to prevent loading effect for OTA₁ and R . For constant value of angular signal, the closed loop gain of Fig. 3(a) can be stated as

SICE Annual Conference 2014
September 9-12, 2014, Sapporo, Japan

$$\frac{v_T}{v_a} = \frac{K}{1 + k_{st}K} \quad (1)$$

where k_{st} is conversion gain of triangular-to-sine converter.

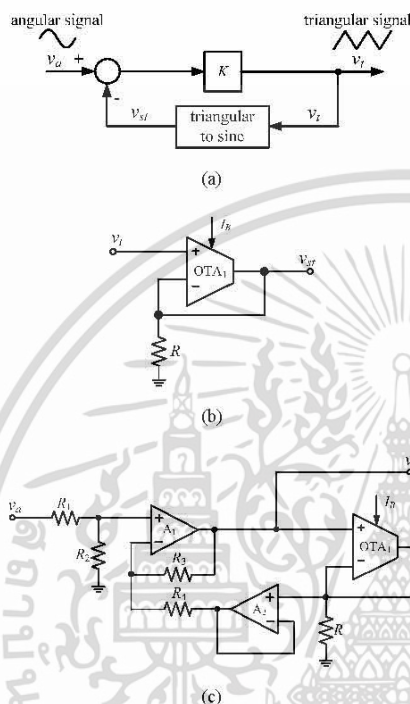


Fig. 3 Proposed sine-to-triangular wave converter.

- (a) block diagram
(b) simple triangular-to-sine converter
(c) proposed circuit

3. EXPERIMENTAL RESULTS

The circuit of resolver-to-triangular wave converter is breadboard using LF398 for S/H, CD4528 for monostable multivibrators, CA3080 for OTA, LF351 for opamps, resistors $R_1 = R_4 = 1k\Omega$ and $R_2 = R_3 = 10k\Omega$. The voltage gain K of summing amplifier is determined to 10. The bias current of OTA and resistor R are set to $100\mu A$ and $1k\Omega$, respectively. The conversion gain of triangular-to-sine converter is expected to 0.45 [11]. Therefore, the closed loop gain can be calculated from Eq. (1) as 1.82. The resolver of SANYO DENKI 101-4100 is used with 3kHz excitation signal of 5Vpp and driven by dc motor at 3600rpm. The frequency of sine wave signal from demodulator is equivalent to

60Hz. Resolver signal and angular signal from the demodulator of Fig. 2(c) are shown in Fig. 4. Fig. 5 shows behavior of simple triangular-to-sine converter of Fig. 3(b). Resulting signal of Fig. 4 is used as the input signal of the proposed sine-to-triangular wave converter in Fig. 3(c).

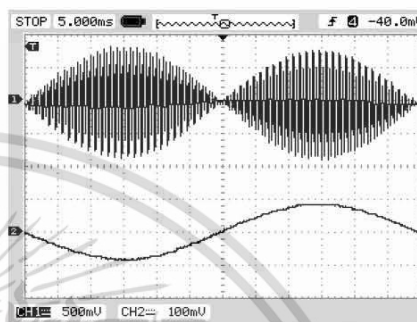


Fig. 4 Response of the proposed demodulator.

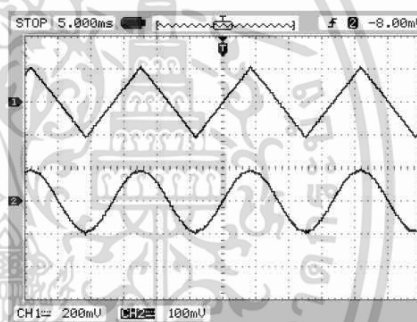
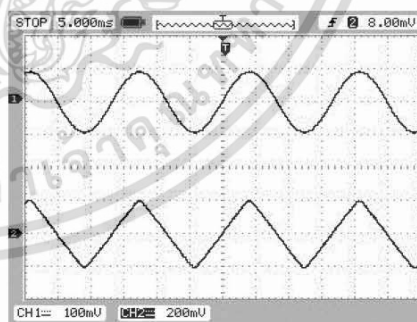


Fig. 5 Behavior of circuit in Fig. 3(b).



(a)

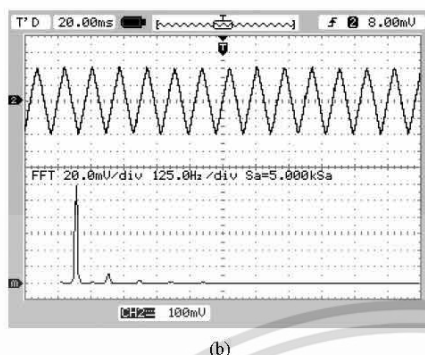


Fig. 6 Experimental results of proposed circuit.
(a) behavior of proposed circuit
(b) frequency spectrum

Experimental result of the proposed resolver-to-triangular wave converter is shown in Fig. 6(a). It should be noted that the closed loop gain about 2 is deviated from the expect value. This is due to nonideal devices used in the circuit. Frequency spectrum of triangular wave provided from the proposed scheme is shown in Fig. 6(b). It can be seen that second harmonic occurs with small value. The second harmonic will cause an error at upper and lower peak amplitude of triangular wave in term of nonlinearity. This error can be minimized by fine tune the OTA bias current to an appropriated value.

4. CONCLUSION

Simple method to implement resolver-to-triangular wave converter has been proposed. Resolver-to-triangular wave converter consists of S/H based demodulator and the proposed sine-to-triangular wave converter using OTA. The proposed circuit provides a simple implementation and low cost. The position of rotor shaft angle can determine by the magnitude of triangular wave. The proposed circuit performance is confirmed by experimental implementation.

5. ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to acknowledge the support by a grant No. KREF115701 from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang of Thailand.

REFERENCES

- [1] A. Kaewpoonsuk, R. Katman, A. Rerkratn and V. Riewruja, "Resolver-signal demodulator using phase shifter," ITC-CSCC 2011, Gyeongju, Korea, June 19-22, 2011.
- [2] A. Kaewpoonsuk, R. Katman, T. Kamsri, A. Rerkratn and V. Riewruja, "A simple amplitude detector-based demodulator for resolver," ICCAS 2010, Kintex, gyeonggi-do, Korea, Oct. 27-30, 2010.
- [3] L. Ben-Brahim, M. Benammar, M. A. Alhamadi, N. Alemadi and M. Alhitni, "A new low cost linear resolver converter," IEEE Sensors J., vol. 8, no. 10, pp. 1620-1627, 2008.
- [4] A. Ota, W. Petchmaneelumka, A. Rerkratn, and Vanchai Riewruja, "Simple Resolver Demodulation" JSST 2013, Tokyo, Japan, Sep. 11-13, 2013.
- [5] W. Petchmaneelumka, P. Mano, A. Ota, and V. Riewruja, "Resolver demodulator using phase locked loop as time management" ICEAST 2013, Bangkok, Thailand, Aug. 21-24, 2013.
- [6] S. Chandra Mohan Reddy and K. Nagabhushan Raju, "Inverse tangent based resolver to digital converter – a software approach," International Journal of Advances in Engineering & Technology, vol. 4, issue 2, pp. 228-235, 2012.
- [7] L. Ben-Brahim, M. Benammar and M. A. Alhamadi, "A resolver angle estimator based on its excitation signal," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 2, pp. 574-580, 2009.
- [8] Joan Bergas-Jane, Coia Ferrater-Simon, Gabriel Gross, Rodrigo Ramirez-Pisco, Samuel Galceran-Arellano and Joan Rull-Duran, "High-Accuracy All-Digital Resolver-to-Digital Conversion" IEEE Trans. on Industrial electronics, vol. 59, no. 1, Jan 2012.
- [9] Ciro Attaianesi and Giuseppe Tomasso, "Position measurement in industrial drives by means of low-cost resolver-to-digital converter" IEEE Trans. on Instrumentation and measurement, vol. 56, no. 6, Dec 2007.
- [10] A. Kaewpoonsuk, S. Khunkong, A. Rerkratn, W. Petchmaneelumka, and N. Kanjanapart, "OTA-Based Triangular-to-Sine and Sine-to-Triangular Waveform Converters" JSST 2013, Tokyo, Japan, Sep. 11-13, 2013.
- [11] V. Riewruja and A. Kaewpoonsuk, "OTA-Based sine-to-triangular wave converter" Circuits Systems Signal Processing, vol. 25, no. 6, pp. 753-765, 2006.

Final Program & Digest

ICROS SICE IEEE AGA AIAA ISA CTC

ICCAS 2015

2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems

October 13(TUE)~16(FRI), 2015
BEXCO, Busan, Korea

The poster features a night cityscape of Busan, South Korea, with several circular inset images showing local landmarks and a large ICROS logo watermark in the background. The inset images include: a modern building at night, a traditional Korean temple, a rocky coastline with a bridge, and a large stadium or arena.

ICROS
Institute of Control, Robotics and Systems

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Low-Cost Resolver-to-DC Converter

Jakkapun Tongcharoen, Wandee Petchmaneeelumka*, and Vanchai Riewruja

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, 10520, Thailand (kpwandee@kmitl.ac.th) * Corresponding author

Abstract: A simple technique for implementation of resolver-to-DC converter is presented in this paper. The obtained output in form of DC voltage is linearly proportional to the position of motor shaft angle. The configuration of proposed converter consists of commercial available circuit building blocks such as demodulator, sine-to-triangular wave converter, logic control, and triangular-to-sawtooth converter. The proposed approach is obtained the economical attraction. Experimental results confirming the circuit performance are agreed with the expected values.

Keywords: Resolver, Demodulator, Sample and hold circuit, sine-to-triangular wave converter.

1. INTRODUCTION

The resolver is the transducer provided the output signals depended on the position of machine shaft angle. Its applications can be found in instrumentation and control system such as CNC, aircraft and industrial robot [1-2]. There are many techniques to convert the resolver signals, which are the trigonometric function, into linear signals. Based on the use of phase-locked loop [3-4] or look-up table [5] techniques to implement resolver converter have been introduced. Alternatively, resolver-to-DC converter without a processor or look-up table technique has been reported [6-7]. However, these approaches have complex structure.

The aim of this paper is to present a resolver-to-DC converter using commercial available circuit building blocks. Thus the proposed converter provides economical attraction. The circuit configuration is simple. The output signal of proposed converter is linearly proportional to resolver shaft angle.

2. PRINCIPLE

Principle of the proposed resolver-to-DC converter is shown as diagram in Fig. 1. The configuration of principle consists of four circuit building blocks i.e. demodulator, logic control, sine-to-triangular converter and triangular-to-sawtooth converter. From Fig. 1, voltage $V_r = A \sin(\omega t)$ from sinusoidal generator is the excitation signal applied into rotor winding of resolver where A is the peak amplitude, $\omega = 2\pi f$ and f denotes the

frequency. V_{s1} and V_{s2} are the output signals from two stator windings produced by modulation of excitation signal at rotor winding and rotor shaft angle in function of sine and cosine, respectively, which can be expressed as

$$V_{s1} = \alpha A \sin(\omega t) \sin(\theta) \quad (1)$$

$$V_{s2} = \alpha A \sin(\omega t) \cos(\theta) \quad (2)$$

Where θ and α are the angular position of resolver shaft and transformation ratio between rotor and stator windings, respectively. The excitation signal V_r is also employed in demodulator to detect the rotor shaft angle signals of both V_{s1} and V_{s2} . The output signals of demodulator, V_{sm} and V_{cos} , can be given by

$$V_{sm} = \sin(\theta) \quad (3)$$

$$V_{cos} = \cos(\theta) \quad (4)$$

The angle signal V_{sm} in form of sine function is applied into sine-to-triangular converter while V_{cos} in form of cosine function is employed to produce logic control signals, ϕ and $\bar{\phi}$ for control the operation of triangular-to-sawtooth converter. The obtained triangular signal V_{tri} is rearranged by using triangular-to-sawtooth converter with logic control signals to produce the sawtooth signal related linearly with angular position of resolver. It should be noted that the achieved output signal V_{out} of the proposed converter is proportional to rotor shaft angle θ .

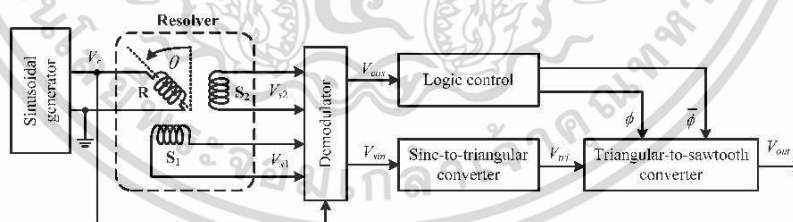


Fig. 1 Principle of the proposed resolver-to-DC converter.

3. CIRCUIT DESCRIPTION

The proposed converter using commercial available circuit building blocks demonstrates in Fig. 2. Each of building blocks can be explained as follows.

3.1 Demodulator

Demodulator [8] used in this paper comprises comparator A_1 , two monostable multivibrators (MN_1 and MN_2) and two sample and hold circuits (S/H_1 and S/H_2). A_1 is employed for comparison between excitation signal V_r and ground potential to generate square wave signal. The rising edge of square wave signal is used to trigs MN_1 for generating for quarter cycle delay. The falling edge of output of MN_1 forces MN_2 to generate the control signal for S/H_1 and S/H_2 to hold the peak amplitude of angular signals from V_{s1} and V_{s2} , respectively. Therefore, angular signals, V_{sin} and V_{cos} , in form of sine and cosine functions are achieved at the output of S/H_1 and S/H_2 , respectively. Details of the demodulation are reported in [8].

3.2 Sine-to-triangular converter and logic control

V_{sin} and V_{cos} are applied simultaneously into sine-to-triangular converter and logic control circuit, respectively. Sine-to-triangular converter [9] used in this paper is based on the use of triangular-to-sine converter [10] connected in the feedback path. Angular signal V_{sin} is compared to voltage V_A generated from triangular-to-sine converter. Sine-to-triangular converter consists of summing amplifier, triangular-to-sine converter and voltage follower formed by operational amplifier (opamp) A_2 and resistors $R_1 - R_4$, operational transconductance amplifier OTA_1 and resistor R_5 , and opamp A_3 , respectively. The output V_{tri} of sine-to-triangular converter is in the form of triangular signal. Opamps A_4 and A_5 function logic control circuit. Voltage V_{cos} in form of cosine function is used to

generate two control logic signals, ϕ and $\bar{\phi}$, which have only the logic state either "0" and "1".

3.3 Triangular-to-sawtooth converter

Voltage V_{tri} in form of triangular function is piecewise-linear function of rotor shaft angle by divide into four sections, i.e. $0 - \pi/2$, $\pi/2 - \pi$, $\pi - 3\pi/2$ and $3\pi/2 - 2\pi$. To improve results of resolver converter, V_{tri} is applied into triangular-to-sawtooth converter to produce the linear function of rotor shaft angle over $0 - 2\pi$. The proposed triangular-to-sawtooth converter consists of opamp A_7 , resistors R_8 and R_{11} , and analog switch sw_1 and sw_2 . In order to obtain the ease of design, voltage V_{tri} is fed into voltage amplifier formed by opamp A_6 and resistors R_6 and R_7 to set the maximum amplitude of V_{tri} equal to 500mV. The output V_i of voltage amplifier is transferred to triangular-to-sawtooth converter. Analog switch sw_1 and sw_2 are controlled by ϕ and $\bar{\phi}$, respectively. The constant voltages $V_{off-} = +500mV$ and $V_{off+} = -500mV$ are used to shift level of V_i . Resistors $R_8 = R_9 = R_{10} = R_{12} = 2R_{11} = R$ are assigned. In the case of $\phi = "1"$ and $\bar{\phi} = "0"$, the output V_{out} can be expressed as

$$V_{out} = V_i - V_{off-} \quad (5)$$

Case of $\phi = "0"$ and $\bar{\phi} = "1"$, the output V_{out} can be given by

$$V_{out} = -V_i + 3V_{off+} \quad (6)$$

The signal waveforms of operating in each case are shown in Fig. 3. It can be seen that the output of triangular-to-sawtooth converter is linearly proportional to rotor shaft angle θ of resolver signal referred to cosine function.

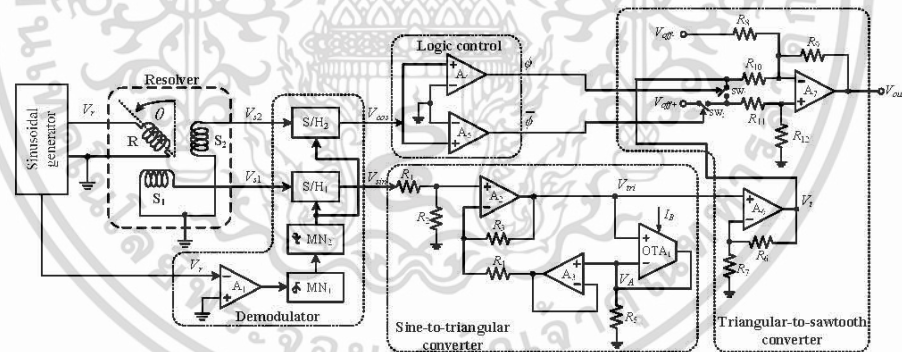


Fig. 2 The proposed converter using commercial available devices.

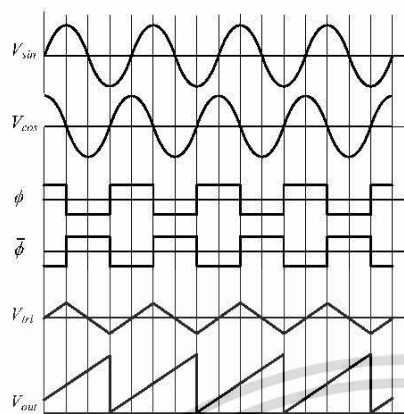


Fig. 3 Signal waveforms of operating in each case.

4. EXPERIMENTAL RESULTS

To verify the performance of the proposed resolver-to-DC converter, the circuit in Fig. 2 is experimentally implemented using commercially available devices and circuit parameters as summarized in Table 1 and Table 2. The resolver of SANYO DENKI 101-4100 is used with 3kHz excitation signal of 5Vpp and driven by dc motor at 3000rpm.

Table 1 Devices used for implementation of Fig. 2.

Device	Part Number
Switch (sw_1, sw_2) and S/H ₁ , S/H ₂	CD4066
Monostable (MN ₁ , MN ₂)	CD4528
Opamp (A ₁ - A ₇)	LF353
OTA ₁	CA3280

Table 2 Parameters set in practical realization of Fig. 2.

Parameter	Value
Supply voltages, $V_{cc}, -V_{ss}$	5V
R_1, R_4, R_5	1k Ω
$R_2, R_3, R_6, R_7, R_8, R_9, R_{10}, R_{12}$	10k Ω
R_{11}	5k Ω
I_B	100 μ A
Constant voltages $V_{ref}, -V_{ref}$	500mV

The frequency of sine wave signal from demodulator is equivalent to 50Hz. The results of demodulator of resolver signal and sine-to-triangular converter have been detailed in [8] and [9], respectively. The performance of triangular-to-sawtooth converter shown in the form of error between the expected and obtained sawtooth signals in full range of 0 – 360 degree sinusoidal signal is demonstrated in Fig. 4. From Fig. 4, the maximum

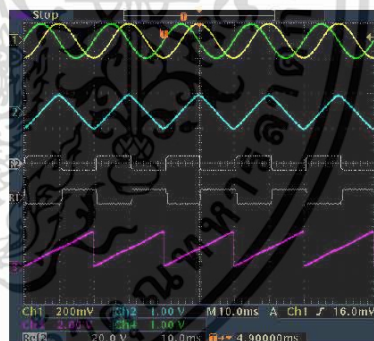
error of triangular-to-sawtooth converter about 50mV is observed. Fig. 5(a) and 5(b) illustrate the related signals of V_{sin} , V_{cos} , V_t , V_{out} and logic control state ϕ and $\bar{\phi}$. In Fig. 5(b), the obtained sawtooth signal can be achieved closely the expected value by adjusting parameter of sine-to-triangular converter [9].

5. CONCLUSION

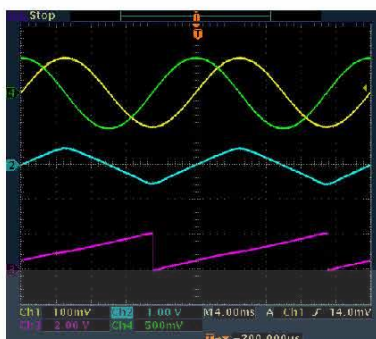
The paper presents resolver-to-DC converter using only commercial available devices. Therefore, the proposed circuit provides the economical attraction. The output of the proposed converter can be achieved to proportion to the position of rotor shaft angle. The proposed circuit performance is confirmed by experimental implementation.



Fig. 4 The error of triangular-to-sawtooth converter.



(a) Ch1: voltage V_{sin} Ch2: voltage V_t
Ch3: voltage V_{out} Ch4: voltage V_{cos}
Ref2: state ϕ Ref1: state $\bar{\phi}$



(b) Ch1: voltage V_{sm} Ch2: voltage V_T
Ch3: voltage V_{out} Ch4: voltage V_{cos}

Fig. 5 The related signals of triangular-to-sawtooth converter

6. ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to acknowledge the support by a grant No. KREF115701 from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang of Thailand.

REFERENCES

- [1] The Moog Components Group engineering staff, *Synchro and Resolver Engineering Handbook*, 2005.
- [2] C. Attianese and G. Tomasso, "Position measurement in industrial drives by means of low-cost resolver-to-digital converter," *IEEE Trans. on Instrumentation and measurement*, vol. 56, no. 6, Dec 2007.
- [3] C. H. Yim, I. J. Ha, and M. S. Ko, "A resolver-to-digital conversion method for fast tracking," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 39, pp. 369-378, Oct, 1992.
- [4] Lazhar Ben-Brahim and Mohieddine Benammar, "A New PLL Method for Resolvers," *The 2010 International Power Electronics Conference*, pp. 299-305, 2010.
- [5] P.G. Serev, "Microcontroller based resolver-to-digital converter," *U.S. Patent 4 989 001*, 1991.
- [6] M. Benammar, L. Ben-Brahim, and M.A. Alhamadi, "A novel resolver-to-360° Linearized converter," *IEEE Sensors Journal*, vol. 4, no. 1, Feb., pp. 96-101, 2004.
- [7] A. Kaewpoonsuk, T. Kamsri, W. Petchmaneelumka, and V. Riewruja, "A full-range-360° resolver-to-DC converter," *ICCAS2007*, COEX, Seoul, Korea, Oct. 17-20, pp. 802-805, 2007.
- [8] A. Ota, W. Petchmaneelumka, A. Rerkratn, and Vanchai Riewruja, "Simple Resolver Demodulation" *JSST 2013*, Tokyo, Japan, Sep. 11-13, 2013.

- [9] J. Tongcharoen, W. Petch maneelumka, T. Cheypoca, and V. Riewruja, "Resolver-to-Triangular Wave Converter," *SICE2014*, Nagoya, Japan, Sep. 9-12, pp. 1181-1184, 2014.
- [10] A. Kaewpoonsuk, S. Khunkong, A. Rerkratn, W. Petchmaneelumka, and N. Kanjanapart, "OTA-Based Triangular-to-Sine and Sine-to-Triangular Waveform Converters" *JSST 2013*, Tokyo, Japan, Sep. 11-13, 2013.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายจักรพันธ์ ทองเจริญ
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 8 สิงหาคม 2520
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ประยุกต์ จากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542 และในปี 2556 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับ ปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้