

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์สำหรับอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย

THERMOELECTRIC GENERATOR FOR WIRELESS TRANSMITTERS



T123112



นฤชิต ธาระธนะผล

NARUCHIT TARATANAPHOL

รพ.  
16269ท  
2555

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 123112  
วัน,เดือน,ปี 18 ต.ค. 2555

b. 18439ท49  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในห้องสมุดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# THERMOELECTRIC GENERATOR FOR WIRELESS TRANSMITTERS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2012-EN-M-060-055



**COPYRIGHT 2012**

**FACULTY OF ENGINEERING**

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์สำหรับอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย  
Thesis Title Thermolectric Generator for Wireless Transmitters  
นักศึกษา นายณฤชิต ธาระชนผล  
รหัสประจำตัว 50060806  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2012-EN-M-060-055

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ฟูศักดิ์	ชีวิสุวิทย์	
รศ.ดร.อัมพวัน	จุลเสวีวงศ์	
รศ.จิระศักดิ์	ชาญวุฒิจรรรม	
รศ.ประภาช	อุคคคิมาพันธ์	
รศ.ประสิทธิ์	จุลเสวีวงศ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 6 มีนาคม พ.ศ. 2555 เวลา 13.30-15.30 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 6 มีนาคม พ.ศ. 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญาานิพนธ์	เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์สำหรับอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย
ชื่อนักศึกษา	นาย นฤชิต ธาระธนผล
รหัสนักศึกษา	50060806
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ที่ใช้หลักการของซีเบ็ค โวลต์เตจเพื่อเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย โดยเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ประกอบไปด้วยแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์แบบแรงดันอินพุตต่ำ วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์แบบประสิทธิภาพสูง และวงจรอิเล็กทรอนิกส์สวิตช์สำหรับเลือกแหล่งจ่ายอัตโนมัติซึ่งต่ออนุกรมกัน พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์นี้นำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานร่วมกับแบตเตอรี่ภายในของอุปกรณ์ส่งสัญญาณ โดยเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานหลักและมีแบตเตอรี่ภายในเป็นแหล่งพลังงานสำรอง วิธีการนี้ทำให้อุปกรณ์คุ้มราคาด้วยอัตราสูงได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถเปลี่ยนแบตเตอรี่ภายในได้โดยไม่จำเป็นต้องปิดอุปกรณ์ นอกจากนี้ยังเป็นการยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่รวมถึงการประหยัดค่าใช้จ่ายในการลดจำนวนการใช้งานของแบตเตอรี่ การวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้อุปกรณ์ส่งสัญญาณความดัน (Pressure Transmitter) แบบไร้สายของบริษัท Emerson Process Management (Rosemount) เป็นกรณีศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Thermoelectric Generator for Wireless Transmitters
<b>Student</b>	Mr. Naruchit Taratanaphol
<b>Student ID.</b>	50060806
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Instrumentation Engineering
<b>Year</b>	2012
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof. Prasit Julsereewong

## ABSTRACT

This thesis describes thermoelectric generator using Seebeck voltage theory to covert processing heat into electric energy for wireless transmitters. Thermoelectric generator consists of thermoelectric module, low input voltage boost converter, high efficiency boost converter, and automatic power source selector switch, connected in series. Thermoelectric generator is used as a primary power source in combination with internal battery used as a back-up supply. The proposed method can use continuously high sampling rate of wireless devices as well as replace new battery under power. Moreover, extending internal battery lifetime and saving battery costs can be obtained. This research used Emerson Process Management (Rosemount) wireless pressure transmitter for case study.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ดีด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์และบุคคลหลายท่านดังนี้

รองศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาและรองศาสตราจารย์ ดร. อัมพวัน จุลเสรีวงศ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ อย่างเต็มที่ และฝึกฝนให้ผู้เขียนมีความสามารถในการทำงานวิจัยและพัฒนาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตลอดจนการอบรมสั่งสอนให้แนวความคิดต่าง ๆ ในการดำเนินชีวิต รวมทั้งยังเป็นแบบอย่างที่ดีให้กับผู้เขียนให้สามารถเป็นนักวิจัยที่ดี ผู้เขียนจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ดร. ธีรวัฒน์ เทพมณี สาขาวิศวกรรมการวัดและควบคุม (หลักสูตรวิศวกรรมอัตโนมัติ) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุน และให้คำปรึกษาแก้ไข ตลอดจนชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งประสบการณ์อันมีค่าที่ได้จากการทำงานวิจัยร่วมกัน

ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทุกท่าน และขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ ในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้คำแนะนำต่าง ๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ส่วนงานบริหารวิชาการและบัณฑิตศึกษา และเจ้าหน้าที่วิศวกรรมลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุก ๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นฤชิต ธาระธณผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 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 .....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา .....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย .....	2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน .....	2
1.6 ขอบเขตการวิจัย .....	3
1.7 ขั้นตอนของการศึกษา .....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย .....	4
2.1 กล่าวนำ .....	4
2.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริก .....	4
2.2.1 กฎของการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเนื่องจากความร้อน .....	6
2.2.2 หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริก .....	7
2.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง .....	9
2.3.1 วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ .....	9
2.3.2 วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ .....	18
2.3.3 วงจรบั๊ก-บูสคอนเวอร์เตอร์ .....	26
2.3.4 วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ .....	32
2.4 ไดโอด .....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบระบบ.....	39
3.1 กล่าวนำ .....	39
3.2 อุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย.....	39
3.2.1 การทำงานของระบบไร้สาย .....	40
3.2.2 ข้อเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบมีสายและแบบไร้สาย .....	42
3.3 แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก.....	43
3.4 การออกแบบวงจรบวกรวมคอนเวอร์เตอร์ .....	45
3.4.1 วงจรบวกรวมคอนเวอร์เตอร์แบบแรงดันอินพุตต่ำ.....	45
3.4.2 วงจรบวกรวมคอนเวอร์เตอร์แบบประสิทธิภาพสูง.....	46
3.5 วงจรสวิตช์เลือกแหล่งจ่ายอัตโนมัติ.....	47
3.6 โครงสร้างของระบบที่นำเสนอ .....	48
บทที่ 4 ผลการทดลอง .....	49
4.1 กล่าวนำ.....	49
4.2 ผลการทดสอบแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก.....	49
4.3 ผลการทดสอบบวกรวมคอนเวอร์เตอร์ .....	51
4.3.1 การทดสอบค่ากำลังทางเอาต์พุต.....	51
4.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพรวมของวงจร.....	55
4.4 ผลการทดลองการต่อเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับบวกรวมคอนเวอร์เตอร์.....	56
4.5 การต่อใช้งานจริงกับอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย .....	57
4.6 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ และระบบแบตเตอรี่เดิม .....	58
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยต่อ.....	61
5.1 บทสรุป.....	61
5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยต่อ.....	61
เอกสารอ้างอิง.....	63
ประวัติผู้เขียน .....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 อัตราขยายแรงดันของวงจรบวสคอนเวอร์เตอร์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่า $D$ .....	23
2.2 เปรียบเทียบการทำงานของวงจรบวสคอนเวอร์เตอร์ วงจรบวสคอนเวอร์เตอร์ วงจรบวส-บวสคอนเวอร์เตอร์ และวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์.....	36
3.1 ตัวอย่างอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายชนิดต่าง ๆ โดยพิจารณาจากอายุการใช้งานของแบตเตอรี่.....	42
4.1 เปรียบเทียบระหว่างผลต่างอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก .....	50
4.2 การวัดผลค่ากำลังเอาต์พุตโดยใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 4.4 เมื่อ $V_1 = 1\text{ V}$ .....	52
4.3 การวัดผลค่ากำลังเอาต์พุตโดยใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 4.4 เมื่อ $V_1 = 2\text{ V}$ .....	52
4.4 การวัดผลค่ากำลังเอาต์พุตโดยใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 4.4 เมื่อ $V_1 = 3\text{ V}$ .....	53
4.5 ผลของการทดสอบประสิทธิภาพของวงจร .....	55
4.6 ผลของการเปรียบเทียบระหว่างผลต่างอุณหภูมิและค่ากระแสเอาต์พุตสูงสุด .....	56
4.7 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของการใช้แบตเตอรี่ภายในอุปกรณ์แบบเดิมด้วยอัตรา การสู่วัดค่าที่ 4 s , 8 s , 32 s และ 60 s ตามลำดับ .....	59
4.8 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของการใช้ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์เป็น แหล่งจ่ายพลังงานร่วมกับแบตเตอรี่ด้วยอัตราการสู่วัดค่าที่ 4 s .....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	วงจรการทดลองของซีเบ็ค .....	4
2.2	วงจรการทำงานของเพลเทียร์ .....	5
2.3	กฎของโลหะแทรก .....	6
2.4	กฎของอุณหภูมิแทรก .....	7
2.5(ก)	การผันกระแสไฟฟ้าเป็นความเย็น .....	8
2.5(ข)	การผันความร้อนเป็นกระแสไฟฟ้า .....	8
2.6	หลักการการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริก .....	8
2.7	วงจรสมมูลการทำงานของวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์ .....	10
2.8	วงจรสมมูลในกรณีที่สวิตช์นำกระแส .....	11
2.9	วงจรสมมูลในกรณีที่สวิตช์ไม่นำกระแส .....	11
2.10	รูปคลื่นการทำงานของวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์ .....	14
2.11	รูประลอกคลื่นของวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์ .....	16
2.12	วงจรสมมูลของวงจรบูกอนเวอร์เตอร์ .....	18
2.13	วงจรสมมูลในกรณีที่สวิตช์นำกระแส .....	19
2.14	แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ .....	20
2.15	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ .....	20
2.16	วงจรสมมูลในกรณีที่สวิตช์ไม่นำกระแส .....	20
2.17	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันกับ $D$ .....	23
2.18	กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ .....	25
2.19	วงจรสมมูลการทำงานของวงจรบีก-บูกอนเวอร์เตอร์ .....	27
2.20	วงจรสมมูลในกรณีที่สวิตช์นำกระแส .....	27
2.21	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ .....	28
2.22	วงจรสมมูลในกรณีที่สวิตช์ไม่นำกระแส .....	28
2.23	วงจรสมมูลของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ .....	32
2.24	ไดโอด .....	37
2.25	ไดโอดขณะหยุดนำกระแสไฟฟ้า .....	38
3.1	ตัวอย่างอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายชนิดต่าง ๆ .....	40
3.2	การทำงานของระบบไร้สาย .....	40
3.3	ตัวอย่างการใช้งานอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายกับระบบถังเก็บน้ำมัน .....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 ตัวอย่างการใช้งานอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายกับระบบกระบวนการผลิต ก๊าซและน้ำมันนอกชายฝั่ง .....	41
3.5 อุปกรณ์เสริมแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับอุปกรณ์ที่ติดตั้งกลางแจ้ง .....	43
3.6 ขนาดของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก .....	44
3.7 เทอร์โมอิเล็กทริกที่ใช้ในการทดลอง .....	44
3.8 วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบแรงดันอินพุตต่ำ .....	45
3.9 วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบประสิทธิภาพสูง .....	46
3.10 วงจรสวิตช์เลือกแหล่งจ่ายอัตโนมัติ .....	47
3.11 โครงสร้างของระบบที่นำเสนอ .....	48
4.1 การวัดแรงดันเอาต์พุตของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก .....	49
4.2 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลต่างอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก .....	50
4.3 วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ต้นแบบที่สร้างขึ้น .....	51
4.4 การต่ออนุกรมวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ .....	51
4.5 ผลการทดสอบกำลังทางเอาต์พุตของวงจร เมื่อ $V_1 = 1\text{ V}$ .....	52
4.6 ผลการทดสอบกำลังทางเอาต์พุตของวงจร เมื่อ $V_1 = 2\text{ V}$ .....	53
4.7 ผลการทดสอบกำลังทางเอาต์พุตของวงจร เมื่อ $V_1 = 3\text{ V}$ .....	54
4.8 ผลรวมการทดสอบกำลังทางเอาต์พุตของวงจร .....	54
4.9 ผลการทดสอบประสิทธิภาพรวมของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ .....	56
4.10 ผลการทดลองการเปรียบเทียบผลต่างและค่ากระแสเอาต์พุตสูงสุด .....	57
4.11 ผลการทดลองต่อใช้งานจริงกับอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย .....	58
4.12 ผลการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์เป็น พลังงานร่วมและการใช้ระบบแบตเตอรี่แบบเดิม .....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีไร้สาย (Wireless Technology) [1] ถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีที่กำลังมีบทบาทและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะการใช้งานในทางอุตสาหกรรมมีการนำประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไร้สายในการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์เครื่องมือวัดและระบบควบคุมส่วนกลาง (Central Control System) ทำให้สามารถลดข้อจำกัดบางอย่างที่ไม่สามารถทำได้ในอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบใช้สายได้หลายประการ เช่น การวัดค่าบนระบบเครื่องจักรที่มีการหมุนรอบตัวเอง (Rotating Machine) เครื่องจักรที่มีการสั่นสะเทือน (Vibrating Machine) การวัดค่าในตำแหน่งที่ยากต่อการเข้าถึง และง่ายต่อการย้ายตำแหน่งการติดตั้ง เป็นต้น นอกจากนี้อุปกรณ์ไร้สายนี้ยังสามารถลดค่าใช้จ่ายของสายสัญญาณในการเชื่อมต่อระหว่างตัวอุปกรณ์และระบบควบคุม แต่เนื่องจากแหล่งพลังงานที่ใช้จ่ายไฟให้กับอุปกรณ์มาจากแบตเตอรี่ภายในเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะต้องคอยเปลี่ยนเมื่อแบตเตอรี่ใกล้หมด สำหรับอุปกรณ์ส่งสัญญาณที่ติดตั้งในพื้นที่โล่งสามารถติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์หรือโซลาร์เซลล์ (Solar Cell) [2] เพิ่มเข้าไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยอุปกรณ์นี้จะใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ในช่วงเวลาที่มีแสงแดดแทนการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ แต่สำหรับอุปกรณ์ส่งสัญญาณที่ติดตั้งอยู่ในอาคารหรือบริเวณที่ไม่สามารถรับแสงอาทิตย์ได้โดยตรง และอุปกรณ์นั้นจำเป็นต้องอาศัยพลังงานจากแบตเตอรี่ภายในตัวเพียงอย่างเดียว

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาแหล่งพลังงานทางเลือกนอกเหนือจากการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ภายในตัวอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการสุ่มวัดค่านั้นควรสุ่มวัดให้ได้เร็วมากที่สุดเพื่อที่จะได้ค่าข้อมูลที่ใกล้เคียงกับค่าเวลาจริงมากที่สุด แต่ข้อจำกัดของการส่งสัญญาณแบบไร้สาย คือเมื่อทำการสุ่มวัดค่าเร็วมากเท่าไรก็จะทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานและค่าแรงดันเอาต์พุตของแบตเตอรี่จะลดลงเร็วมากเท่านั้น กล่าวคืออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของอุปกรณ์จะขึ้นอยู่กับอัตราการสุ่มวัดค่าของอุปกรณ์ ( $T_s$ ) นั่นเอง ดังนั้นเรื่องพลังงานจึงเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งที่ทำให้ไม่สามารถใช้อุปกรณ์ไร้สายได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ นอกจากนี้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ (Thermoelectric Generator) [3] ยังจัดได้ว่าเป็นพลังงานที่สะอาด เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถลดจำนวนขยะพิษจากแบตเตอรี่ลงได้

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

จากการติดตามงานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ที่ผ่านมาพบว่า มีการนำเสนอหลักการออกแบบดังกล่าวในการใช้เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหรือการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบกำเนิดพลังงาน [4] เท่านั้น แต่ยังไม่มีการนำเสนอเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานร่วมกับอุปกรณ์ไร้สายในวงการอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงเกิดแนวความคิดในการออกแบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์สำหรับอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานร่วมกับแหล่งจ่ายจากแบตเตอรี่ภายใน และยังสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแบตเตอรี่ได้อีกทางหนึ่งด้วย

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

โดยส่วนมากในระบบอุตสาหกรรมจะมีความร้อนเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต จึงได้มีแนวคิดที่จะใช้ประโยชน์จากความร้อนนี้โดยอาศัยหลักความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวของเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าสำหรับการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ แต่เนื่องจากค่าแรงดันที่ออกมาจากแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าไม่คงที่และยังมีแรงดันไม่เพียงพอ จึงต้องมีการขยายแรงดันด้วยวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้แรงดันคงที่และมีค่าเพียงพอสำหรับอุปกรณ์ไร้สายชนิดนั้น ๆ โดยมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์สวิตช์สำหรับเลือกแหล่งจ่ายอัตโนมัติในภาคสุดท้าย เพื่อให้อุปกรณ์สามารถกลับมาใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ภายในได้ในกรณีที่เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์เกิดความเสียหายหรือแหล่งพลังงานความร้อนมีไม่เพียงพอ อุปกรณ์จะยังคงสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีผลกระทบแต่อย่างใด

### 1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

เมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่ใช้แบตเตอรี่ภายในอย่างเดียว พบว่าเมื่อใช้อัตราการส่งสัญญาณที่เร็วจะมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานมาก หากนำอุปกรณ์ส่งสัญญาณไร้สายต่อกับแบตเตอรี่ภายในร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ที่ออกแบบ จะช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ได้นอกจากนี้เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ที่นำเสนอยังสามารถใช้งานเป็นแหล่งจ่ายไฟสำหรับการเปลี่ยนแบตเตอรี่ใหม่โดยไม่ต้องปิดอุปกรณ์ส่งสัญญาณ เพื่อเป็นการทดสอบความสามารถในการจ่ายไฟของเจเนอเรเตอร์ที่นำเสนอ จึงได้เลือกใช้อุปกรณ์ส่งสัญญาณความดัน (Pressure Transmitter) แบบไร้สายของบริษัท Emerson Process Management (Rosemount) เป็นกรณีศึกษา

## 1.6 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์เจนเนอเรเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย แผ่นเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ และวงจรอิเล็กทรอนิกส์สวิตช์ การทดลองแสดงให้เห็นถึงค่าพลังงานไฟฟ้าเทียบกับผลต่างของอุณหภูมิจากแผ่นเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ ค่าประสิทธิภาพ ผลการรักษา ระดับแรงดัน และค่าการจ่ายกระแสสูงสุดของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ จากการทดสอบพบว่าเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์เจนเนอเรเตอร์สามารถเป็นแหล่งจ่ายพลังงานร่วมกับแบตเตอรี่ของอุปกรณ์ไร้สายได้เป็นอย่างดี

## 1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่นำมาศึกษา ได้แก่ เทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter) วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ (Buck-Boost Converter) วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ (Cuk Converter) และไดโอด (Diode)

บทที่ 3 กล่าวถึงโครงสร้างของระบบที่นำมาศึกษา ได้แก่ เทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบแรงดันอินพุตต่ำ (Low-Input Voltage Boost Converter) [5] วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบประสิทธิภาพสูง (High-Efficiency Boost Converter) [6] และวงจรอิเล็กทรอนิกส์สวิตช์เลือกแหล่งจ่ายอัตโนมัติ

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบระบบต่าง ๆ ที่นำมาศึกษา ได้แก่ ผลการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ ผลการทดสอบวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ ผลการทดลองการต่อเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ร่วมกับวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ และการต่อใช้งานจริงกับอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายเพื่อทดสอบและยืนยันประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์เจนเนอเรเตอร์

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอไว้ภายในวิทยานิพนธ์ และข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ

## บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

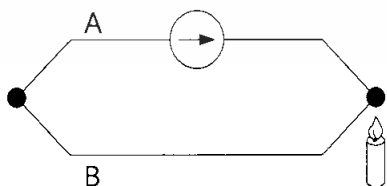
### 2.1 กล่าวนำ

การติดต่อสื่อสารและการส่งสัญญาณระหว่างอุปกรณ์เครื่องมือวัดและระบบควบคุม ส่วนกลางมีด้วยกันหลายระบบ เช่น การส่งสัญญาณแบบ 4-20 มิลลิแอมป์ ดิจิตอลฟิลด์บัส (Digital Fieldbus) [7] เป็นต้น แต่การส่งสัญญาณดังกล่าวยังเป็นระบบติดต่อสื่อสารแบบมีสายอยู่ เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการผนวกเทคโนโลยีไร้สายเข้ากับอุปกรณ์เครื่องมือวัด ทำให้สะดวกในการส่งสัญญาณมากขึ้น แต่อุปกรณ์แบบไร้สายอาศัยไฟเลี้ยงจากแบตเตอรี่ภายในเพียงอย่างเดียว ซึ่งแบตเตอรี่ราคาค่อนข้างสูงและมีอายุการใช้งานที่จำกัด ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์สำหรับอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานร่วมกับพลังงานจากแบตเตอรี่ภายในตัวอุปกรณ์

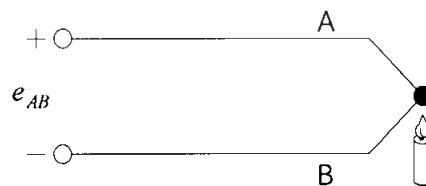
การออกแบบระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์นั้นจำเป็นต้องทราบถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ของระบบ ได้แก่ เทอร์โมอิเล็กทริก หลักการของซีเบ็ค วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ และไดโอด

### 2.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริก

ในปี ค.ศ. 1821 นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน โทมัส โจแฮนน์ ซีเบ็ค (Thomas Johann Seebeck) ทำการศึกษาพบว่าเมื่อนำขดลวดโลหะ 2 เส้นที่ทำด้วยโลหะต่างชนิดกันมาเชื่อมต่อกันทั้งสองเข้าด้วยกัน ถ้าปลายจุดต่อทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกัน จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรขดลวดทั้งสองแสดงดังรูปที่ 2.1 ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามผลต่างอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสอง และถ้าเปิดปลายจุดต่อด้านหนึ่งออกจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ปลายด้านเปิดแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้เรียกว่า “ซีเบ็คโวลต์เตจ”



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 วงจรการทดลองของซีเบ็ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.1 (ก) เมื่อเป็นวงจรปิดจะเกิดกระแสไหลวน เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อจากตัวนำที่ต่างกันทั้งสอง A และ B และรูปที่ 2.1 (ข) เมื่อเป็นวงจรเปิดจะเกิดแรงดันเปลี่ยนแปลงไปตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสอง สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$e_{AB} = \alpha \Delta T \quad (2.1)$$

เมื่อ  $e_{AB}$  คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้ว A และ B

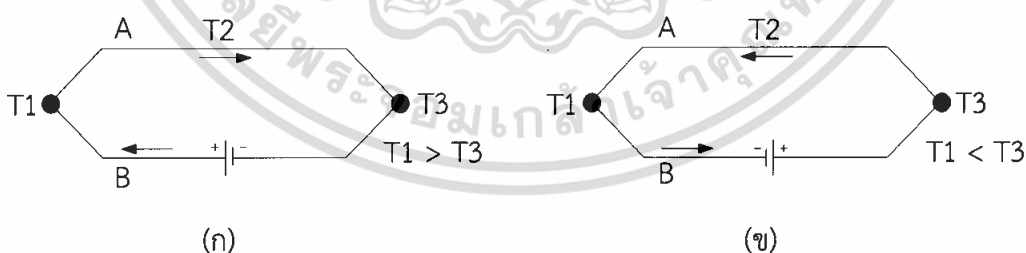
$\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค (Seebeck Coefficient) เป็นค่าคงที่ มีหน่วยเป็น Volt/K

$\Delta T$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิ

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบ็คของรอยต่อระหว่างวัสดุทั้งสองจะเท่ากับความแตกต่างระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สองวัสดุ A และ B นั่นคือ

$$\alpha = \alpha_A - \alpha_B \quad (2.2)$$

ต่อมาในปี ค.ศ. 1834 ฌอง ซี. เอ. เพลเทียร์ (Jean C. A. Peltier) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสพบว่า เมื่อผ่านไฟฟ้ากระแสให้กับวงจรลักษณะเดียวกับที่ซีเบ็คสร้างขึ้น จะทำให้เกิดอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองข้างของจุดต่อแตกต่างกัน โดยปลายข้างหนึ่งจะร้อนขึ้นและปลายข้างหนึ่งจะเย็นลง วงจรการทดลองของเพลเทียร์เป็น ดังรูปที่ 2.2 ลวดทั้งสองทำมาจากบิสมัท (Bismuth) และแอนติโมนี (Antimony)



รูปที่ 2.2 วงจรการทำงานของเพลเทียร์

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอกไหลผ่านเข้าไปในวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) จะทำให้จุดต่อ T1 มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดต่อ T3 เมื่อมีกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอกไหลผ่านเข้าไปในวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข) จะทำให้จุดต่อ T3 มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดต่อ T1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ของเพลเทียร์เป็นปรากฏการณ์หนึ่งซึ่งคู่กับปรากฏการณ์ของซีเบ็ค และถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการทำระบบหล่อเย็นจากการผันความร้อนจากไฟฟ้า ซึ่งในที่นี่อัตราของการดูดกลืนความร้อนแบบกลับได้ (Rate of Reversible Heat Absorption,  $Q$ ) คือ

$$Q = \alpha_{AB} I \quad (2.3)$$

เมื่อ  $I$  คือ กระแสไฟฟ้าเมื่อผ่านรอยต่อ

$\alpha_{AB}$  คือ สัมประสิทธิ์ของเพลเทียร์ของรอยต่อ

### 2.2.1 กฎของการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเนื่องจากความร้อน (Thermoelectric Laws)

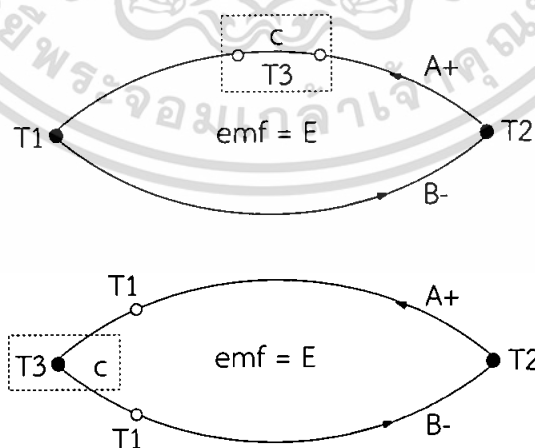
#### ก. กฎของวงจรโลหะชนิดเดียวกัน (Law of the Homogeneous Circuit)

ในวงจรที่ประกอบขึ้นด้วยโลหะชนิดเดียวกัน จะไม่เกิดกระแสไฟฟ้าในวงจรเมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ ณ ปลายจุดต่อ

กระแสไฟฟ้าจะเกิดขึ้นในกรณีที่ลวดทั้งสองเป็นโลหะต่างชนิดกัน แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสอง

#### ข. กฎของโลหะแทรก (Law of the Intermediate Metals)

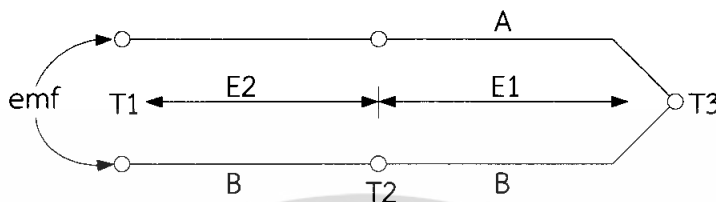
ถ้ามีโลหะแทรกอยู่ในส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจร หากจุดต่อของปลายโลหะแทรกทั้งสองมีอุณหภูมิเท่ากันแล้ว โลหะแทรกนี้จะไม่ผลต่อเรื่องของเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น แต่ในทางปฏิบัติมีอยู่เสมอ เช่น ข้อต่อ (Connectors) หรือสายทองแดงที่ใช้ต่อเข้ามิเตอร์



รูปที่ 2.3 กฎของโลหะแทรก

### ค. กฎของอุณหภูมิแทรก (Law of the Intermediate Temperature)

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่จุดใด ๆ ที่มีอุณหภูมิที่จุดต่อต่างกัน มีค่าเท่ากับผลบวกทางพีชคณิตของแรงเคลื่อนไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.4 กล่าวคือ ผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่าเท่ากับผลรวมทั้งหมด ( $\text{emf} = E_1 + E_2$ )



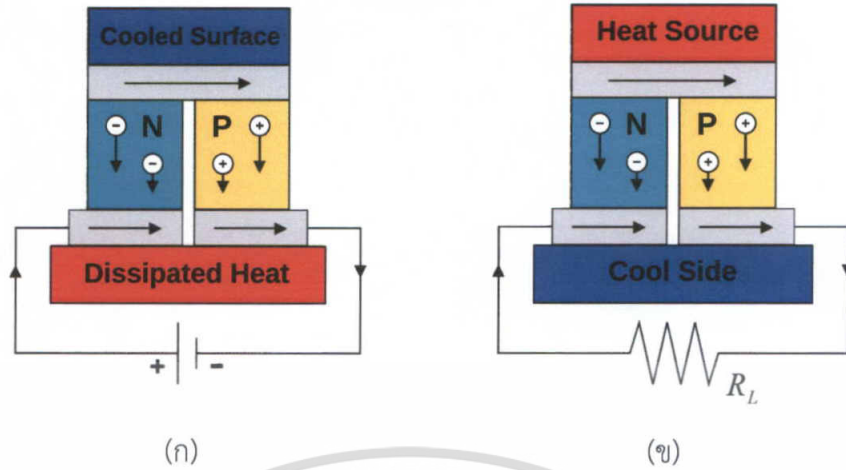
รูปที่ 2.4 กฎของอุณหภูมิแทรก

#### 2.2.2 หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริก

วัสดุของเทอร์โมอิเล็กทริกประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำสองชนิด คือ สารชนิดพี (p-type Semiconductor) และสารชนิดเอ็น (n-type Semiconductor) ต่อกันเป็นขั้ว p - n แบบอนุกรม ดังแสดงในรูปที่ 2.5

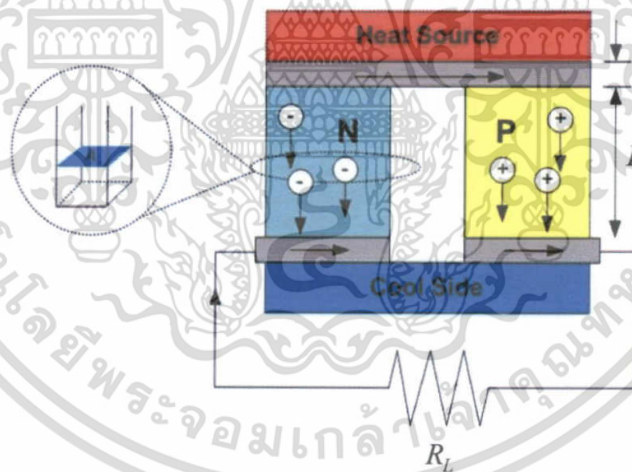
รูปที่ 2.5 (ก) เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวัสดุที่ทำจากสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน ทำให้มีความแตกต่างกันของอุณหภูมิเกิดขึ้นระหว่างขั้วทั้งสอง โดยเกิดการถ่ายเทอุณหภูมิจากด้านเอ็นสู่ด้านพี ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าปรากฏการณ์ของเพลเทียร์ นำไปสู่การประยุกต์ใช้ด้านเย็นในการทำความเย็นและด้านร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำความเย็นจะถูกระบายทิ้งให้กับบรรยากาศแวดล้อม

รูปที่ 2.5 (ข) ในด้านการผลิตกระแสไฟฟ้า เมื่อให้ความร้อนแก่ระบบ ความร้อนจะถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ความแตกต่างของอุณหภูมิจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างด้านร้อนและด้านเย็น จึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าออกมา



รูปที่ 2.5 (ก) การผันกระแสไฟฟ้าเป็นความเย็น  
(ข) การผันความร้อนเป็นกระแสไฟฟ้า

จากการค้นพบของซีเบ็คและเพลเทียร์ทำให้เกิดการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้เพียงหลักการซีเบ็คโวลต์ตรงเท่านั้น



รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริก

โดยกำลังไฟที่เกิดขึ้นนั้นหาได้จากสมการ

$$P = \frac{\alpha^2 \sigma}{2} \cdot \frac{NA}{(L+n)(1+2rL_c/L)^2} \cdot (T_h - T_c)^2 \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ ค่าความนำไฟฟ้าของสาร

$N$  คือ จำนวนของเทอร์โมอิเล็กทริกต่อโมดูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $L$  คือ ความสูงของเทอร์โมอีลีเมนต์ (mm)  
 $L_C$  คือ ความหนาของคอนแทคในโมดูล (mm)  
 $n$  คือ พารามิเตอร์ของคอนแทค  
 $T_h$  คือ อุณหภูมิทางด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก  
 $T_c$  คือ อุณหภูมิทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเทอร์โมอีลีเมนต์

## 2.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง [8]

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง หรืออาจเรียกกว่าวงจรชอปเปอร์ (Chopper Circuit) เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป มีทั้งหมดสี่แบบ คือ วงจรบีกคอนเวอร์เตอร์ วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ วงจรบีก-บูสคอนเวอร์เตอร์ และวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์

### 2.3.1 วงจรบีกคอนเวอร์เตอร์

วงจรบีกคอนเวอร์เตอร์หรือวงจรลดทอนระดับ คือ วงจรที่ทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่าแรงดันอินพุต และเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตที่มีค่าความเป็นกระแสดตรงมาก ๆ จะนิยมใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) ซึ่งโดยมากจะใช้วงจรกรองแบบ LC เพราะมีอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการผกผันกับกำลังสองของความถี่

#### เงื่อนไขของการทำงานของวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์

การวิเคราะห์การทำงานของบีกคอนเวอร์เตอร์ ในช่วงที่เป็นสภาวะอยู่ตัวจะมีค่าการกำหนดเงื่อนไขของการทำงานของบีกคอนเวอร์เตอร์ ดังนี้

1. กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลามีค่าเท่ากัน

$$i_L(t+T) = i_L(t)$$

ซึ่งหมายถึงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากัน ณ ตำแหน่งเดียวกันในทุกคาบ

2. แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลามีค่าเท่ากับศูนย์

$$V_L = \frac{1}{T} \int_0^{+T} V_L(\lambda) d\lambda = 0$$

ซึ่งหมายถึงผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา (Volt-Second) ในเอกสารแต่ละคาบเวลามีค่าเท่ากับศูนย์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวเก็บประจุในแต่ละคาบเวลามีค่าเท่ากับศูนย์

$$I_C = \frac{1}{T} \int^{+T} i_C(t) dt = 0$$

ซึ่งหมายถึงประจุที่ถูกเก็บ (Charged) และที่คาย (Discharged) ของตัวเก็บประจุในแต่ละคาบเวลาต้องเท่ากัน

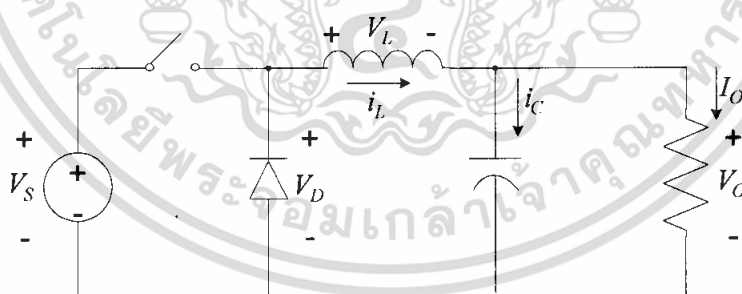
4. กำลังไฟฟ้าด้านอินพุตเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุต

$$P_S = P_O$$

ในกรณีนี้ถ้ากำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นแบบอุดมคติทำให้ไม่มีการสูญเสียจากการทำงานของวงจร ประสิทธิภาพของวงจรจึงเท่ากับร้อยเปอร์เซ็นต์

### 2.3.1.1 หลักการทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์

หลักการทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตตามที่ต้องการ คือ ต้องเริ่มต้นจากเงื่อนไขที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาเท่ากับศูนย์ จากนั้นก็จะสามารถหากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้ การวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด ต้องวิเคราะห์ในสภาวะอยู่ตัว (Steady State) ดังนี้

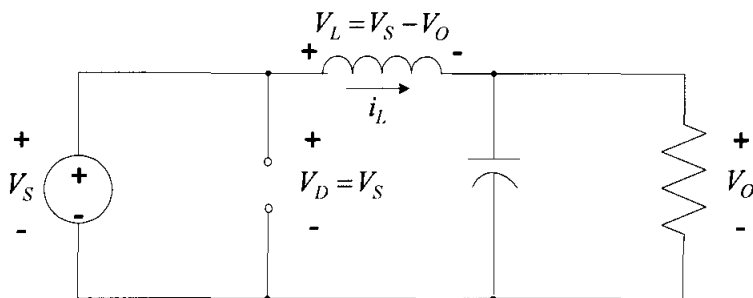


รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลการทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์

#### กรณีที่สวิตช์นำกระแส

จากรูปที่ 2.8 กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านสวิตช์ ผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังโหลด โดยที่กระแสส่วนหนึ่งจะไปเก็บประจุที่ตัวเก็บประจุ จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Law) จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลในกรณีที่สวิตช์นำกระแส

$$-V_S + V_L + V_O = 0$$

$$V_L = V_S - V_O$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L}$$

ดังนั้น

(2.5)

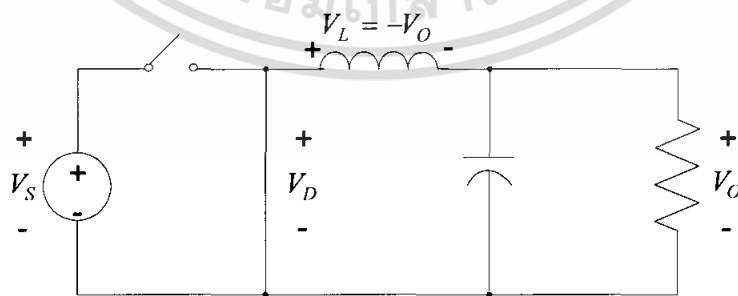
$dt$  ในกรณีอยู่ในช่วงเวลานำกระแส คือ  $dt = DT$

เมื่อ  $D$  คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างช่วงที่สวิตช์นำกระแสต่อหนึ่งคาบเวลา

$$\Delta i_{L,on} = \left( \frac{V_S - V_O}{L} \right) DT$$

(2.6)

กรณีที่สวิตช์ไม่นำกระแส



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลในกรณีที่สวิตช์ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส ไดโอดจะถูกไบแอส (Bias) ให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน  
 เอกสารตัวเหนี่ยวนำเกิดการไหลอย่างต่อเนื่อง และจากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าที่  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_L = -V_O \quad (2.7)$$

$$V_L = -V_O = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.8)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_{L,off}}{\Delta t} = -\frac{V_O}{L} \quad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.9) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะค่อย ๆ มีค่าลดลง เพราะการเปลี่ยนแปลงกระแสตัวเหนี่ยวนำต่อเวลามีค่าเป็นลบ

$dt$  ในกรณีอยู่ในช่วงเวลาหยุดนำกระแส คือ  $dt = (1 - D)T$  ดังนั้นจากสมการ (2.9) สามารถจัดรูปแบบใหม่ได้เป็น

$$\Delta i_{L,off} = \left( \frac{-V_O}{L} \right) (1 - D)T \quad (2.10)$$

### 2.3.1.2 การหาค่าอัตราการขยายของแรงดันวงจรถักคอนเวอร์เตอร์

ในช่วงสภาวะอยู่ตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะที่สวิตช์นำกระแส จะมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นเท่ากับการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ในขณะที่สวิตช์ไม่นำกระแส หรืออาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเป็นศูนย์

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad (2.11)$$

$$\left( \frac{V_S - V_O}{L} \right) DT + \left( \frac{-V_O}{L} \right) (1 - D)T = 0 \quad (2.12)$$

$$\left( \frac{V_S - V_O}{L} \right) DT + \left( \frac{-V_O}{L} \right) (1 - D)T = 0$$

$$(V_S - V_O)D - V_O(1 - D) = 0$$

$$\frac{V_O}{V_S} = D \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการที่ (2.13) อัตราขยายแรงดันจะมีค่าสูงสุดไม่เกิน 100 % ตามค่า  $D$  วงจรบิกคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่ทำให้แรงดันด้านเอาต์พุตน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต ทั้งนี้ขึ้นกับค่า  $D$  โดยการปรับค่า  $D$  สามารถปรับได้ตั้งแต่ศูนย์ถึงหนึ่ง

จากการหาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตต่อแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต หรือที่เรียกว่าอัตราขยายแรงดัน สามารถหาได้อีกหนึ่งวิธี คือ

$$V_{L.av} = V_{L.on}(t_{on}) + V_{L.off}(t_{off}) = 0 \quad (2.14)$$

$$V_{L.av} = (V_S - V_O)(t_{on}) + (-V_O)(t_{off}) = 0 \quad (2.15)$$

$$(V_S - V_O)(DT) - V_O(1 - D)T = 0$$

$$\frac{V_O}{V_S} = D$$

เมื่อ  $V_{L.av}$  คือ แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ  
 $V_{L.on}$  คือ แรงดันเฉลี่ยตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแส  
 $V_{L.off}$  คือ แรงดันเฉลี่ยตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์ไม่นำกระแส

### 2.3.1.3 การหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของแรงดันวงจรบิกคอนเวอร์เตอร์

การหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดที่จะทำให้วงจรบิกคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง โดยเริ่มต้นจากการหาค่าเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจะเท่ากับกระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านโหลด เนื่องจากขณะที่อยู่ในสภาวะการทำงานอยู่ตัว กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะได้

$$I_L = I_O = \frac{V_O}{R} \quad (2.16)$$

จากรูปที่ 2.10 สามารถหากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุด ได้จากสมการในช่วงที่สวิตช์ไม่นำกระแส ดังนี้

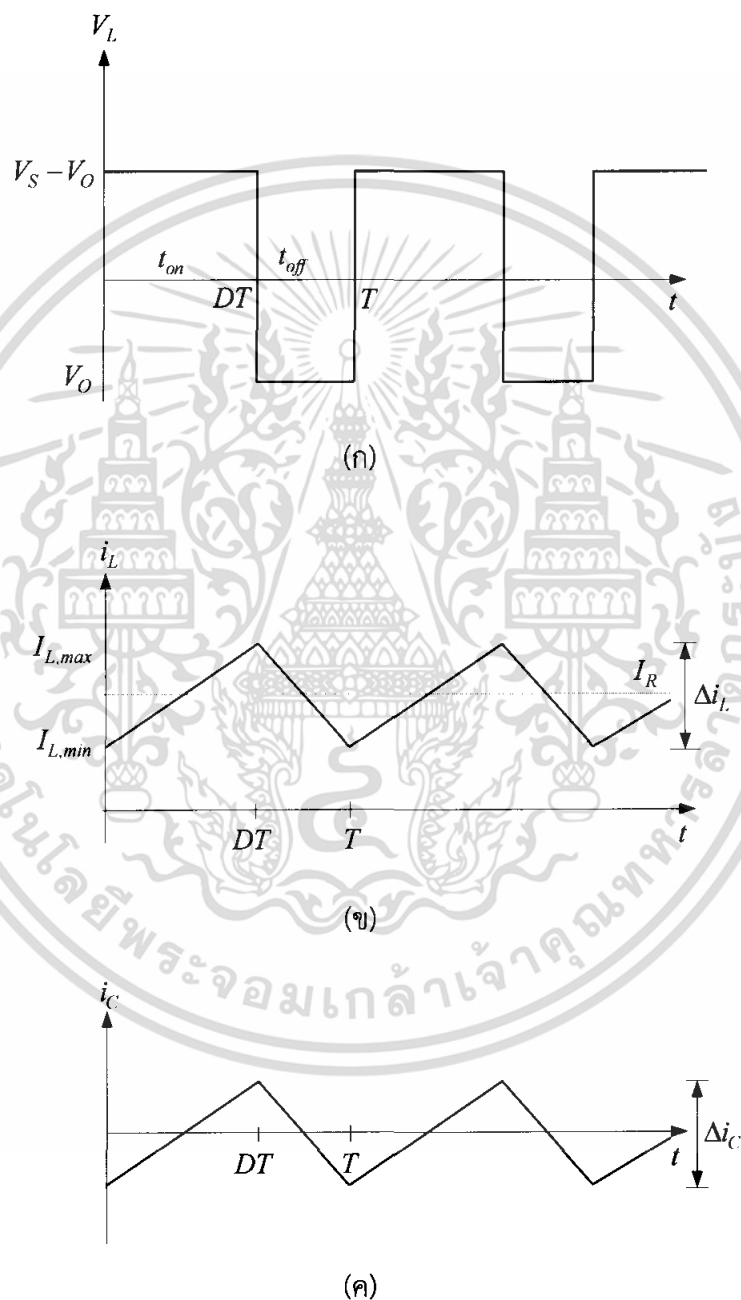
$$I_{L,max} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{L,max} = \frac{V_O}{R} + \frac{1}{2} \left[ \frac{V_O}{L} (1-D)T \right]$$

เมื่อจัดรูปสมการใหม่ จะได้ว่า

$$I_{L,max} = V_O \left[ \frac{1}{R} + \frac{(1-D)}{2Lf} \right] \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.10 รูปคลื่นการทำงานของวงจร buck คอนเวอร์เตอร์

(ก) แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ

(ข) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

(ค) กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นค่ากระแสตัวเหนี่ยวนำต่ำสุด คือ

$$I_{L,min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2}$$

$$I_{L,min} = \frac{V_O}{R} - \frac{1}{2} \left[ \frac{V_O}{L} (1-D) T \right] \quad (2.19)$$

$$I_{L,min} = \frac{V_O}{R} - \frac{V_O}{2} \left[ \frac{(1-D) T}{L} \right]$$

$$I_{L,min} = V_O \left[ \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right] \quad (2.20)$$

เงื่อนไขที่สำคัญสำหรับการทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะต้องเป็นกระแสบวกเสมอ สมการที่ (2.20) สามารถนำมาใช้ในการหาค่าความเหนี่ยวนำและความถี่ในการสวิตช์ (Switching Frequency) และหากเท่ากับศูนย์พอดี คือ เป็นช่วงต่อระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

$$I_{L,min} = V_O \left[ \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right] = 0 \quad (2.21)$$

$$\left[ \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right] = 0$$

$$\frac{1}{R} = \frac{(1-D)}{2Lf}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (2.22)$$

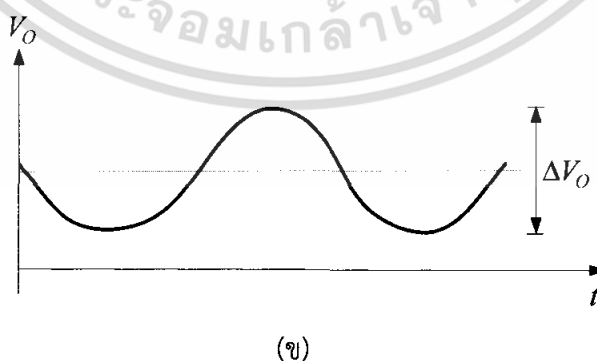
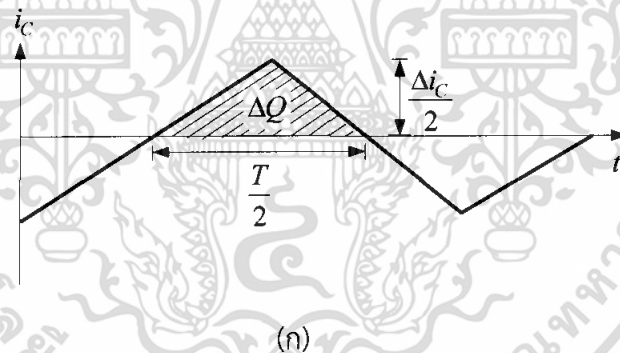
$$f = \frac{(1-D)R}{2L_{min}} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.21) ใช้ในการหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด ( $L_{min}$ ) ที่ทำให้วงจรยังสามารถทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง ซึ่งจะได้ค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดดังสมการที่ (2.22) ดังนั้นหากต้องการจะออกแบบให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดโดยที่วงจรยังคงทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง ก็จะสามารถเลือกได้สองแนวทาง คือ กรณีที่หนึ่งการพยายามทำให้เศษในสมการที่ (2.22) มีค่าน้อยที่สุดโดยการทำให้  $D$  มีค่าเข้าใกล้หนึ่งหรือการทำให้โหลด  $R$  มีค่าน้อย ๆ แต่ผลกระทบที่เกิดขึ้นคือ โหลดจะมีค่าสูง อีกหนึ่งกรณีคือการพยายามให้ค่าส่วนในสมการที่ (2.22) มีค่ามาก ๆ เช่นการเพิ่มความถี่ในการสวิตซ์ซึ่ง ส่วนสมการที่ (2.23) ใช้สำหรับการพิจารณาหาค่าความถี่ในการสวิตซ์ที่เหมาะสมเมื่อตัวเหนี่ยวนำถูกกำหนดค่าความเหนี่ยวนำ

#### 2.3.1.4 ค่าระลอกคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุต

โดยปกติวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน หรือวงจรกรองแบบ LC ที่อยู่ในวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ จะมีตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ แต่ในทางปฏิบัติจะไม่สามารถเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่มากได้เนื่องจากมีราคาแพงและใช้พื้นที่มาก จึงควรเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสมและให้ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งโดยทั่วไปมีค่า 50 mVpp ถึง 100 mVpp โดยประมาณ



รูปที่ 2.11 รูประลอกคลื่นของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

(ก) กระแสตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ(ข) ระลอกคลื่นแรงดันที่ตัวเก็บประจุอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่าเป็นบวก ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวตัวเก็บประจุจะสะสมประจุ โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$Q = CV_o$$

$$\Delta Q = C\Delta V_o$$

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} \tag{2.24}$$

เมื่อ  $C$  คือ ค่าตัวเก็บประจุ

$\Delta V_o$  คือ ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุต

$\Delta Q$  คือ พื้นที่สามเหลี่ยมที่เกิดจากกระแสตัวเก็บประจุคูณกับเวลา โดยที่

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left( \frac{T}{2} \right) \left( \frac{\Delta i_L}{2} \right) = \left( \frac{T\Delta i_L}{8} \right) \tag{2.25}$$

แทนค่าสมการที่ (2.25) ลงในสมการที่ (2.24)

$$\Delta V_o = \frac{T\Delta i_L}{8C} \tag{2.26}$$

แทนค่า  $\Delta i_{L,off} = \left( \frac{V_o}{L} \right) (1-D)T$  จากสมการที่ (2.10) ลงในสมการที่ (2.26) จะได้

$$\Delta V_o = \frac{T}{8C} \frac{V_o}{L} (1-D)T \tag{2.27}$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{T}{8C} \left( \frac{1}{L} \right) (1-D)T \tag{2.28}$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{T^2}{8C} \left( \frac{1}{L} \right) (1-D)$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{(1-D)}{8LCf^2} \tag{2.29}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.29) เรียกว่าค่าอัตราระลอกคลื่น (Ripple Ratio) เป็นการแสดงอัตราส่วนของอัตราระลอกคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตระหว่างยอดถึงยอดกับค่าแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต (อัตราระลอกคลื่นยิ่งน้อยแสดงให้เห็นว่าได้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เรียบขึ้น)

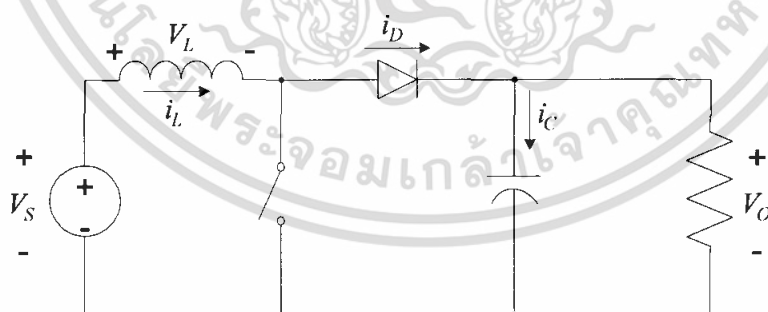
### 2.3.2 วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์

การทำงานของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์จะมีคุณสมบัติ คือ เพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้มีระดับแรงดันสูงกว่าแรงดันอินพุตเสมอ

#### เงื่อนไขการทำงานของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ในช่วงสภาวะอยู่ตัว จะมีการกำหนดเงื่อนไขในการทำงานของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ ดังนี้

1. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละคาบจะมีค่าเท่ากันและมีค่าเป็นบวกเสมอ
2. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์ หมายถึงผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลาในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์
3. ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ทำให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าคงที่
4. กำลังไฟฟ้าอินพุตเท่ากับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต กรณีนี้ไม่คำนึงถึงการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจร โดยกำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้สรุปได้ว่าประสิทธิภาพของวงจรเป็นหนึ่งในร้อยเปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์

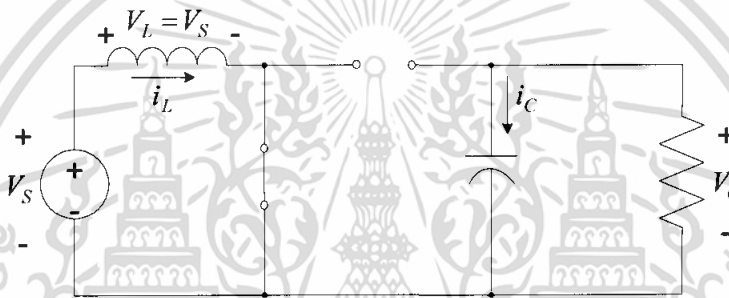
ในวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2.12 ประกอบไปด้วย แรงดันอินพุต  $V_S$  จ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่วงจรคอนเวอร์เตอร์ แรงดันเอาต์พุต  $V_O$  จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลด อุปกรณ์สวิตซ์ ไดโอด ขดลวดเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน

### 2.3.2.1 หลักการทำงานของวงจรรบสคอนเวอร์เตอร์

หลักการทำงานของวงจรรบสคอนเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตตามต้องการ จะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกรวมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ และสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำโดยวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด ทั้งนี้การทำงานต้องอยู่ในสภาวะอยู่ตัว ดังนี้

#### ในกรณีสวิตช์นำกระแส

จากรูปที่ 2.12 กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำโดยผ่านสวิตช์ ขณะเดียวกันไดโอดจะถูกไบแอสย้อนกลับทำให้ไม่สามารถนำกระแสได้ดังแสดงในรูป 2.13 จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าดังนี้



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลในกรณีที่สวิตช์นำกระแส

$$-V_S + V_L = 0 \quad (2.30)$$

$$V_L = V_S = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.31)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S}{L}$$

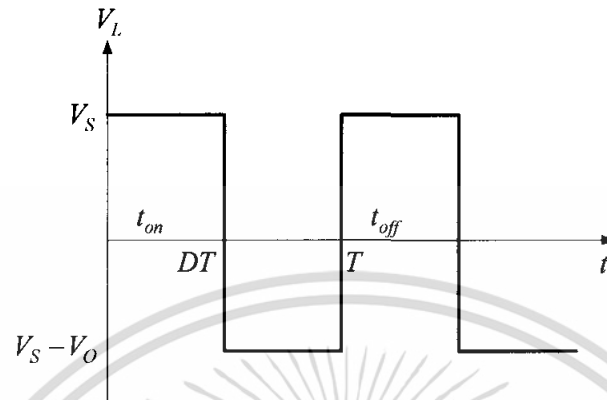
ขณะที่สวิตช์นำกระแส  $dt = DT$  เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสคงที่ อาจจะถือว่าการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นแบบเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_S}{L} \quad (2.32)$$

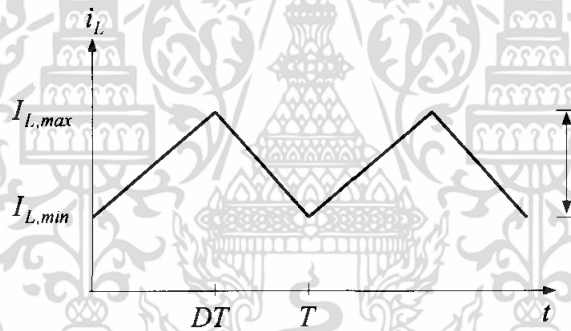
$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_S DT}{L} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\Delta i_{L,on}$  หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะสวิตช์  
นำกระแส

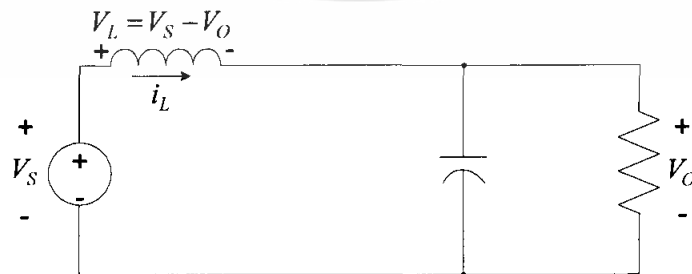


รูปที่ 2.14 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.15 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

ในกรณีสวิตช์ไม่นำกระแส



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลในกรณีที่สวิตช์ไม่นำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีไม่ได้ ไดโอดจะถูกไบแอสให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง สมมติแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตมีค่าคงที่ จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ดังนี้

$$-V_S + V_L + V_O = 0 \quad (2.34)$$

$$V_L = V_S - V_O$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L} \quad (2.35)$$

ในกรณีที่สวิตช์ไม่นำกระแส  $dt = (1-D)T$  อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ และจะถือว่าการลดลงของกระแสเป็นแบบเชิงเส้น ดังรูปที่ 2.15 ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta i_{L,off} = \left( \frac{V_S - V_O}{L} \right) (1-D)T \quad (2.36)$$

ที่สภาวะอยู่ตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์ จากสมการที่ (2.33) และสมการที่ (2.36) จะได้ว่า

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad (2.37)$$

$$\left( \frac{V_S}{L} \right) DT + \frac{(V_S - V_O)(1-D)T}{L} = 0 \quad (2.38)$$

$$V_S D + (V_S - V_O)(1-D) = 0$$

$$V_S D + V_S - V_S D - V_O - V_O D = 0$$

$$V_S - V_O(1-D) = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{1}{(1-D)} \quad (2.39)$$

จากการหาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตต่อแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่เรียกว่า อัตราการขยายแรงดัน สามารถหาได้โดยวิธีที่ง่าย โดยใช้สมการแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกร่วมตัว เหนี่ยวนำในแต่ละคาบ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และได้ผลเช่นเดียวกับสมการที่ (2.39) ดังนี้

$$V_{L,av} = V_{L,on}(t_{on}) + V_{L,off}(t_{off}) = 0 \quad (2.40)$$

จากสมการที่ (2.31)

$$V_{L,on} = V_S$$

จากสมการที่ (2.34)

$$V_{L,off} = V_S - V_O$$

$$V_{L,av} = (V_S)(t_{on}) + (V_S - V_O)(t_{off}) = 0$$

$$(V_S)(DT) + (V_S - V_O)(1-D)T = 0$$

$$V_S D + (V_S - V_O)(1-D) = 0$$

$$V_S D + V_S - V_S D - V_O + V_O D = 0$$

$$V_S - V_O(1-D) = 0$$

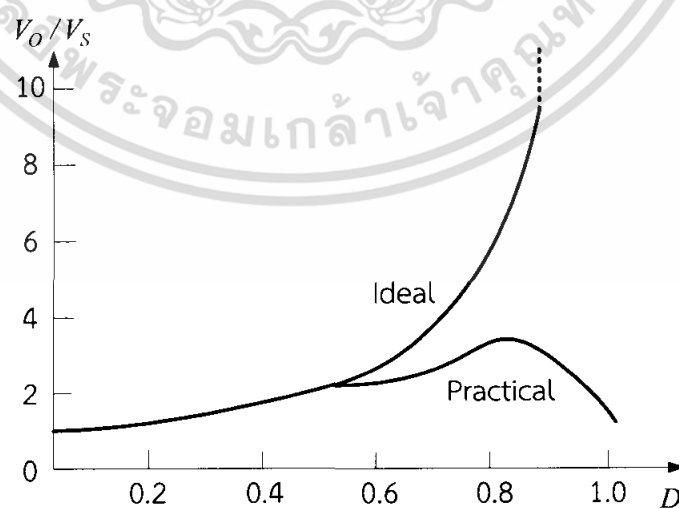
$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{1}{(1-D)} \quad (2.41)$$

การได้มาซึ่งสมการอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตต่อแรงดันไฟฟ้าอินพุต จากสมการที่ (2.39) และสมการที่ (2.41) แท้จริงแล้วมีหลักการทำงานอันเดียวกัน ทำให้สามารถคำนวณค่าอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตต่อแรงดันไฟฟ้าอินพุตได้จากการปรับค่า  $D$  ดังสมการในตารางที่ เอกส.2.1 เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 อัตราขยายแรงดันของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่า  $D$

Duty Ratio ( $D$ )	อัตราขยายแรงดัน (Voltage Gain) $V_o/V_s$
0.0	1.00
0.1	1.10
0.2	1.25
0.3	1.43
0.4	1.67
0.5	2.00
0.6	2.50
0.7	3.33
0.8	5.00
0.9	10.00
1.0	Infinity

จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.17 ค่า  $D$  เพิ่มขึ้น ค่าอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้น ในทางปฏิบัตินิยมปรับอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 4 เท่า ทั้งนี้เพื่อให้วงจรมีความเสถียรภาพ โดยอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าขั้นต่ำสุดคือ 1 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับแรงดันไฟฟ้าอินพุตในทางทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตเล็กน้อย เนื่องจากมีแรงดันไฟฟ้ตกคร่อมไดโอด และตัวอุปกรณ์สวิตซ์



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันกับ  $D$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2.2 การหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์

ถ้ากำหนดให้การสูญเสียภายในวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ กำลังไฟฟ้าที่ออกจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับ เงื่อนไขนี้ จะได้

$$P_S = P_O = \frac{V_O^2}{R} \quad (2.42)$$

$$P_S = V_S I_S = V_S I_L \quad (2.43)$$

$$V_S I_L = \frac{V_O^2}{R}$$

$$V_O = \frac{V_S}{1-D}$$

$$V_S I_L = \frac{\left(\frac{V_S}{1-D}\right)^2}{R}$$

$$I_L = \frac{V_S}{(1-D)^2 R}$$

(2.44)

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุด หาได้จากค่าเฉลี่ยและการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า ในช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแส ดังในสมการที่ (2.33)

$$\Delta i_{L.on} = \frac{V_S DT}{L}$$

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุด คือ

$$I_{L,max} = i_L + \frac{\Delta i_L}{2}$$

$$I_{L,max} = \frac{V_S}{(1-D)^2 R} + \frac{1}{2} \left( \frac{V_S DT}{L} \right) \quad (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{L.min} = \frac{V_S}{(1-D)^2 R} - \frac{1}{2} \left( \frac{V_S DT}{L} \right) \quad (2.46)$$

สมมติให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและมีค่าบวก ดังนั้นจะหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดที่ทำให้วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ทำงานได้ในขอบเขตระหว่างโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องได้ จากการกำหนดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์ ดังสมการที่ (2.47)

$$I_{L.min} = \frac{V_S}{(1-D)^2 R} - \frac{1}{2} \left( \frac{V_S DT}{L_{min}} \right) = 0 \quad (2.47)$$

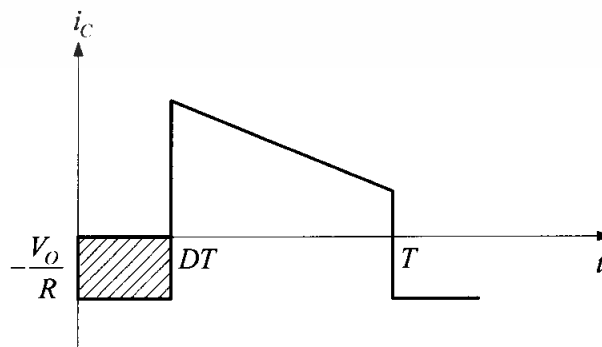
$$\frac{V_S}{(1-D)^2 R} = \frac{1}{2} \left( \frac{V_S DT}{L_{min}} \right)$$

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (2.48)$$

การปรับค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดจากสมการที่ (2.48) สามารถทำได้โดยการปรับที่ค่า  $D$  หรือที่ค่าความต้านทานโหลด  $R$  หรือค่าความถี่สวิตซิ่ง  $f$

### 2.3.2.3 ค่าระลอกคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

การที่มีตัวเก็บประจุขนาดใหญ่จะสามารถรักษาแรงดันให้ไฟฟ้าเอาต์พุตคงที่ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่มากได้เนื่องจากมีราคาแพงและใช้พื้นที่มาก จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสม และค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอยู่ในระดับที่ยอมรับได้



รูปที่ 2.18 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากยอดถึงยอด สามารถหาได้จาก กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 2.18

$$|\Delta Q| = C\Delta V_O = I_O\Delta t_{on} \quad (2.49)$$

$$I_O = \frac{V_O}{R}$$

$$\Delta t_{on} = DT$$

$$\Delta V_O = \frac{I_O\Delta t_{on}}{C} = \frac{V_ODT}{RC}$$

$$\frac{\Delta V_O}{V_O} = \frac{DT}{RC} \quad (2.50)$$

หรือ

$$\frac{\Delta V_O}{V_O} = \frac{D}{RCf} \quad (2.51)$$

เมื่อต้องการลดอัตราระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต สามารถทำได้โดยการลดค่า  $D$  ให้เข้าใกล้ศูนย์ หรือการเพิ่มค่าโหลด  $R$  หรือการเพิ่มค่าของตัวเก็บประจุ หรือเพิ่มค่าความถี่ในการ สวิตช์  $f$  ให้สูงขึ้น

### 2.3.3 วงจรบั๊ก-บูสคอนเวอร์เตอร์

วงจรบั๊ก-บูสคอนเวอร์เตอร์หรือวงจรลดทอน-ทบแรงดันไฟฟ้า คือวงจรที่สามารถทำการลด หรือเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้ต่ำหรือสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตได้

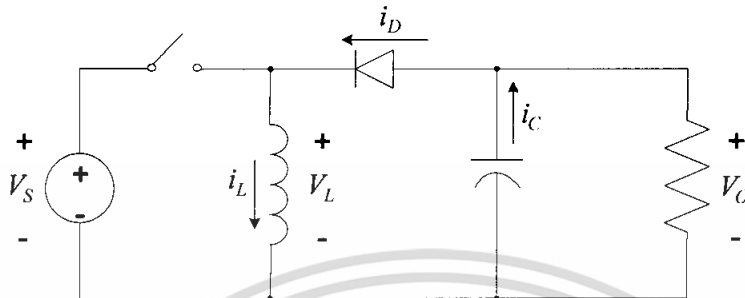
#### เงื่อนไขการทำงานของวงจรบั๊ก-บูสคอนเวอร์เตอร์

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรบั๊ก-บูสคอนเวอร์เตอร์ในช่วงสภาวะอยู่ตัว ได้มีการกำหนด เงื่อนไขในการทำงานของวงจรบั๊ก-บูสคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ ดังนี้

1. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละคาบ จะมีค่าเท่ากันและมีค่าเป็นบวกเสมอ
2. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์ หมายถึงผลรวมของ ผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา ในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. กำลังไฟฟ้าอินพุตเท่ากับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต กรณีนี้ไม่คำนึงถึงการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจร โดยกำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้สรุปได้ว่าประสิทธิภาพของวงจรเป็นหนึ่งในร้อยเปอร์เซ็นต์



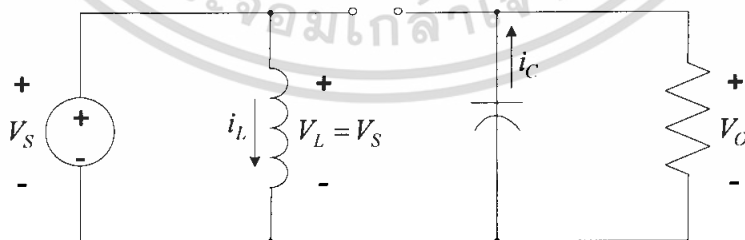
รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลการทำงานของวงจรบัก-บูสคอนเวอร์เตอร์

2.3.3.1 หลักการทำงานของวงจรบัก-บูสคอนเวอร์เตอร์

หลักการการทำงานของวงจรบัก-บูสคอนเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต มีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นตามต้องการ โดยจะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ โดยวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด ทั้งนี้การทำงานต้องอยู่ในสภาวะอยู่ตัว ดังนี้

ในกรณีที่สวิตช์นำกระแส

จากรูปที่ 2.20 กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านสวิตช์และผ่านตัวเหนี่ยวนำ ขณะที่ไดโอดจะถูกไบแอสย้อนกลับ จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ดังนี้



รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลในกรณีที่สวิตช์นำกระแส

$$-V_S + V_L = 0 \tag{2.52}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้  $V_L = V_S = L \frac{di_L}{dt}$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (2.53)

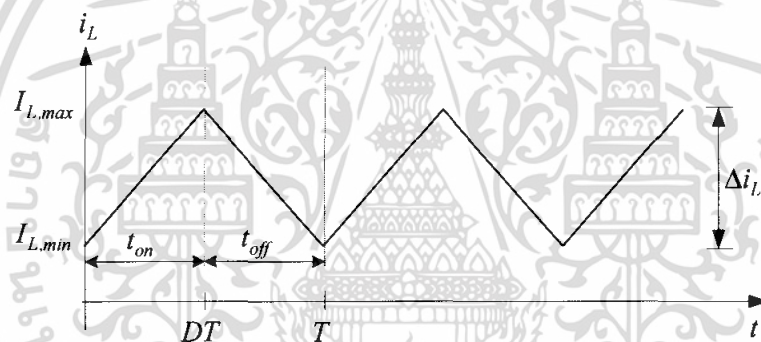
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S}{L}$$

ขณะที่สวิตช์นำกระแส  $dt = DT$  เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสคงที่ อาจจะถือว่า การเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_S}{L} \quad (2.54)$$

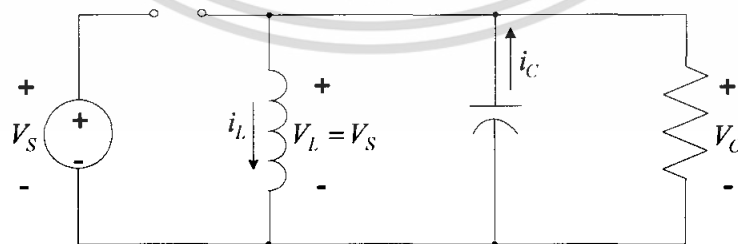
$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_S DT}{L} \quad (2.55)$$

เมื่อ  $\Delta i_{L,on}$  หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีที่สวิตช์นำกระแส



รูปที่ 2.21 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

ในกรณีที่สวิตช์ไม่นำกระแส



รูปที่ 2.22 วงจรสมมูลในกรณีที่สวิตช์ไม่นำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ไดโอดจะถูกไบแอสให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง สมมติให้แรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตมีค่าคงที่ จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ดังนี้

$$-V_L + V_O = 0 \quad (2.56)$$

$$V_L = V_O$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_O}{L} \quad (2.57)$$

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส  $dt = (1-D)T$  อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ และจะถือว่าการลดลงของกระแสเป็นเชิงเส้น ดังรูปที่ 2.21 ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta i_{L,off} = \left( \frac{V_O}{L} \right) (1-D)T \quad (2.58)$$

ที่สภาวะอยู่ตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์ จากสมการที่ (2.55) และสมการที่ (2.58) จะได้ว่า

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad (2.59)$$

จะได้ว่า

$$\frac{V_O}{V_S} = -(D) \frac{1}{(1-D)} \quad (2.60)$$

จากสมการที่ (2.60) พบว่าอัตราการขยายของแรงดันไฟฟ้าของวงจรบัก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ เป็นผลคูณของอัตราการขยายแรงดันของวงจรบักและวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรบัก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าอินพุต

### 2.3.3.2 การหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจรบัก-บูสคอนเวอร์เตอร์

สมมติการสูญเสียภายในวงจรบัก-บูสคอนเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ กำลังที่จ่ายจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับเงื่อนไขได้เป็น

$$P_S = P_O = \frac{V_O^2}{R} \quad (2.61)$$

$$V_S I_L = \frac{V_O^2}{R} \quad (2.62)$$

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ออกจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

$$I_L = \frac{V_S D}{R(1-D)^2}$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุดหาได้จากการรวมค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยกับค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในช่วงเวลาขณะนำกระแส

$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_S DT}{L}$$

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุด คือ

$$I_{L,max} = i_L + \frac{\Delta i_L}{2}$$

$$I_{L,max} = \frac{V_S D}{(1-D)^2 R} + \frac{1}{2} \left( \frac{V_S DT}{L} \right) \quad (2.63)$$

$$I_{L,min} = \frac{V_S D}{(1-D)^2 R} - \frac{1}{2} \left( \frac{V_S DT}{L} \right) \quad (2.64)$$

สมมติให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและมีค่าบวก ดังนั้นจะหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด ที่ทำให้วงจรบัก-บูสคอนเวอร์เตอร์ทำงานได้ในขอบเขตระหว่างโหมดเอกสารต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง คือการกำหนดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{L.min} = \frac{V_s D}{(1-D)^2 R} - \frac{1}{2} \left( \frac{V_s D T}{L_{min}} \right) = 0$$

$$\frac{V_s D}{(1-D)^2 R} = \frac{1}{2} \left( \frac{V_s D T}{L_{min}} \right)$$

$$\frac{1}{(1-D)^2 R} = \frac{1}{2 L_{min} f}$$

$$L_{min} = \frac{(1-D)^2 R}{2f} \quad (2.65)$$

การปรับค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดจากสมการที่ (2.65) สามารถทำได้โดยการปรับที่ค่า  $D$  หรือที่ค่าความต้านทานโหลด  $R$  หรือค่าความถี่ในการสวิตช์  $f$

### 2.3.3.3 ค่าระลอกคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะคล้ายกับวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์ ยกเว้น การต่อขั้วของตัวเก็บประจุจะตรงข้ามกันเพราะแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีขั้วตรงข้ามกับแรงดันไฟฟ้าอินพุต

การคำนวณหาค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากยอดถึงยอด สามารถหาได้จาก กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

$$\Delta Q = C \Delta V_O = I_O \Delta t_{on}$$

$$I_O = \frac{V_O}{R}$$

$$\Delta t_{on} = DT$$

$$\frac{\Delta V_O}{V_O} = \frac{DT}{RC} \quad (2.66)$$

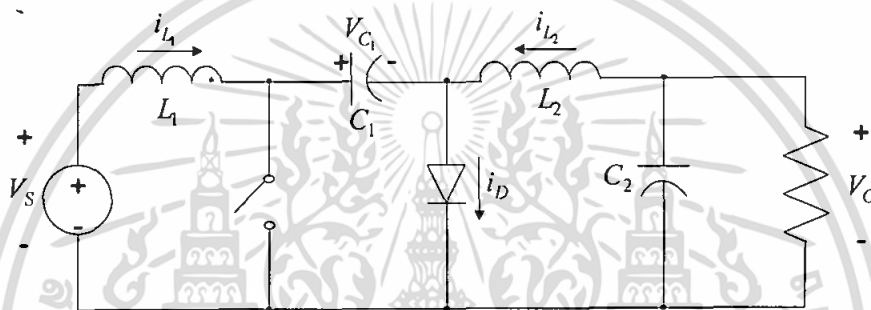
$$\frac{\Delta V_O}{V_O} = \frac{D}{RCf} \quad (2.67)$$

เมื่อต้องการลดอัตราระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต จะทำได้โดยการลดค่า  $D$  หรือ การเพิ่มค่าโหลด  $R$  การเพิ่มค่าของตัวเก็บประจุ หรือเพิ่มค่าความถี่ในการสวิตช์  $f$  ให้สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้บนอินเทอร์เน็ตเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์

วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์มีการทำงานแบบเพิ่มแรงดันหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้า โดยที่แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าอินพุต เช่นเดียวกับวงจรบั๊ก-บัสต์คอนเวอร์เตอร์ แต่ปัญหาของวงจรถูกกล่าวคือ มีขนาดกระแสฮาร์โมนิก (Harmonic) สูงเนื่องจากไม่มีตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่กรองกระแสอินพุต ดังนั้นวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์จึงถูกออกแบบมาเพื่อแก้ปัญหานี้ โดยการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำในอินพุต และมีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านชนิด LC ทางเอาต์พุต ส่วนการเชื่อมต่อระหว่างเอาต์พุตและอินพุตของวงจรจะใช้ตัวเก็บประจุ ซึ่งจะเห็นได้ว่าวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์จะมีจำนวนตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเพิ่มอย่างละหนึ่งตัว ดังวงจรในรูปที่ 2.23



รูป 2.23 วงจรสมมูลของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์

#### เงื่อนไขการทำงาน of วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ในช่วงสภาวะอยู่ตัว จะมีการกำหนดเงื่อนไขในการทำงานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ ดังนี้

1. ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่เป็นผลให้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่
2. ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่เป็นผลให้ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าคงที่
3. กระแสและแรงดันไฟฟ้า ณ เวลาซ้ำกันในแต่ละคาบจะมีค่าเท่ากัน
4. กำลังไฟฟ้าอินพุตเท่ากับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต กรณีนี้ไม่คำนึงถึงการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจร โดยกำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้สรุปได้ว่าประสิทธิภาพของวงจรเป็นหนึ่งในร้อยเปอร์เซ็นต์

5. ช่วงเวลานำกระแสคือ  $DT$  และช่วงเวลาหยุดนำกระแสคือ  $(1-D)T$

#### 2.3.4.1 หลักการทำงานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์

หลักการทำงานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ขั้นตอนที่หนึ่งคือ การหาค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_1$  โดยพิจารณาจากสมการแรงดันวงนอกสุดในรูปที่ 2.23 โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์  $V_{L_1} = V_{L_2} = 0$  และแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_1$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.68)

$$-V_S + V_{L_1} + V_{L_2} + V_O = 0 \quad (2.68)$$

$$V_{C_1} = V_S - V_O \quad (2.69)$$

หลักการการทำงานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ขั้นตอนที่สอง เริ่มเมื่อสวิตช์นำกระแส ไดโอดจะไม่นำกระแส ซึ่งสามารถหาสมการของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_1$  ได้ดังนี้

$$i_{C_1, on} = -I_{L_2} \quad (2.70)$$

หลักการการทำงานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ขั้นตอนที่สาม เริ่มเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองจะไหลในทิศทางที่ทำให้ไดโอดนำกระแส ดังนั้นกระแสไฟฟ้าในตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะมีค่าเท่ากับ

$$i_{C_1, off} = I_{L_1} \quad (2.71)$$

หลักการการทำงานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ขั้นตอนที่สี่ คิดเงื่อนไขการทำงานข้อที่ 4 คือ กำลังไฟฟ้าอินพุตเท่ากับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต กรณีนี้จะไม่คำนึงถึงการสูญเสียการทำงานของวงจร เนื่องจากอุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้สมมติได้ว่าประสิทธิภาพของวงจรเป็นร้อยเปอร์เซ็นต์

$$V_S I_{L_1} = V_O (-I_{L_2}) \quad (2.72)$$

หลักการการทำงานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ขั้นตอนที่ห้า มาจากเงื่อนไขการทำงานข้อที่ 3 คือ กระแสและแรงดันไฟฟ้าหากเทียบที่จุดใด ๆ ในแต่ละคาบจะมีค่าเท่ากัน เพราะเป็นสภาวะอยู่ตัว กระแสเฉลี่ยในตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยมาจากสมการที่ (2.70) เมื่อพิจารณาในขณะที่สวิตช์นำกระแส และสมการที่ (2.71) เมื่อพิจารณาในขณะที่สวิตช์ไม่นำกระแส

$$i_{C_1, on} (DT) + i_{C_1, off} (1-D)T = 0$$

$$(-I_{L_2})(DT) + (I_{L_1})(1-D)T = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{I_{L_1}}{I_{L_2}} = \frac{D}{1-D} \quad (2.73)$$

หลักการทํางานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ ขั้นตอนทีหก มาจากเงื่อนไขการทํางานข้อที่ 4 คือ กำลังไฟฟ้าอินพุตเท่ากับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต

$$P_S = P_O \quad (2.74)$$

$$V_S I_{L_1} = V_O (-I_{L_2})$$

$$\frac{I_{L_1}}{I_{L_2}} = \frac{V_O}{-V_S}$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.73) และ (2.74) จะได้อัตราการขยายแรงดันในสมการที่ (2.75) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับสมการการขยายแรงดันของวงจรบัก-บูสคอนเวอร์เตอร์ ดังนี้

$$\frac{V_O}{V_S} = -\frac{D}{1-D} \quad (2.75)$$

#### 2.3.4.2 คําระลอกคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

เนื่องจากในส่วนของวงจรเอาต์พุตของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์จะคล้ายกับวงจรบัก-คอนเวอร์เตอร์ คือ มีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ LC และมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ เช่นเดียวกับวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ ดังนั้นการคํานวณหาค่าอัตราระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต จึงเหมือนวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ คือ

$$\frac{\Delta V_O}{V_O} = \frac{(1-D)}{8LCf^2} \quad (2.76)$$

เมื่อคํานวณแรงดันระลอกคลื่นใน  $C_1$  เมื่อสวิตช์ไม่นํากระแส กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะเท่ากัน และจากเงื่อนไขการทํางานในข้อที่สองคือตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าคงที่ ดังนั้นสมการที่ (2.76) จึงสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (2.77)

$$\Delta V_{C_1} \approx \frac{1}{C_1} \int_{DT}^T I_{L_1} d(t) \quad (2.77)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนตัวเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta V_{C_1} \approx \frac{1}{C_1} I_{L_1} (1-D) T \quad (2.78)$$

จากสมการที่ (2.75) จัดรูปแบบใหม่เพื่อหาค่า  $I_{L_1}$  และ  $V_O$  ได้ดังนี้

$$I_{L_1} = \frac{-V_O I_{L_2}}{V_S}$$

$$V_O = -V_S \left( \frac{D}{1-D} \right) \quad (2.79)$$

จะได้สมการที่ (2.78) เป็น

$$\Delta V_{C_1} \approx -\frac{1}{C_1} \left( \frac{V_O I_{L_2}}{V_S} \right) \frac{(1-D)}{f} \quad (2.80)$$

และเมื่อกระแสไหลดมีขนาดเท่ากับกระแส  $I_{L_2}$  แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน

$$I_{L_2} = -\frac{V_O}{R}$$

$$\Delta V_{C_1} \approx -\frac{1}{C_1} \left( \frac{1}{V_S} \right) \left( -\frac{V_O}{R} \right) (V_S) \left( -\frac{D}{1-D} \right) \frac{(1-D)}{f}$$

$$\Delta V_{C_1} \approx \frac{V_S}{C_1 R f} \left( \frac{D^2}{1-D} \right) \quad (2.81)$$

หรือกล่าวได้ว่าระลอกคลื่นของแรงดันใน  $C_1$  คือ

$$\Delta V_{C_1} \approx \frac{V_O D}{C_1 R f} \quad (2.82)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อทำการหาระลอกคลื่นของกระแส จะหาได้จากสมการแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$V_{L_1} = V_S = L_1 \frac{di_{L_1}}{dt} \quad (2.83)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้  $\frac{\Delta i_{L_1}}{\Delta T} = \frac{V_S}{L_1}$  ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta i_{L_1} = \frac{V_S}{L_1} DT = \frac{V_S D}{L_1 f} \quad (2.84)$$

ทำนองเดียวกันเมื่อทำการคำนวณกระแสระลอกคลื่นใน  $L_2$  เมื่อสวิตช์นำกระแส จะทำให้จากสมการแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  สามารถเขียนได้ว่า

$$V_{L_2} = V_O + (V_S - V_O) = L_2 \frac{di_{L_2}}{dt} \quad (2.85)$$

การทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง เงื่อนไขที่ทำให้ได้ตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบได้เล็กที่สุดและทำงานโหมดกระแสต่อเนื่อง จะคำนวณทำนองเดียวกับในวงจรบัก วงจรบูส และวงจรบัก-บูสคอนเวอร์เตอร์ คือจะได้ตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  และ  $L_2$  ที่เล็กที่สุด ดังนี้

$$L_{1,min} = \frac{(1-D)^2 R}{2Df} \quad (2.86)$$

$$L_{2,min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (2.87)$$

จากที่ได้กล่าวถึงการทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ วงจรบัก-บูสคอนเวอร์เตอร์ และวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ สามารถสรุปอัตราการขยายแรงดัน อัตราระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ค่าเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดที่ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องของวงจรคอนเวอร์เตอร์แต่ละแบบได้ดังแสดงในตารางที่ 2.2

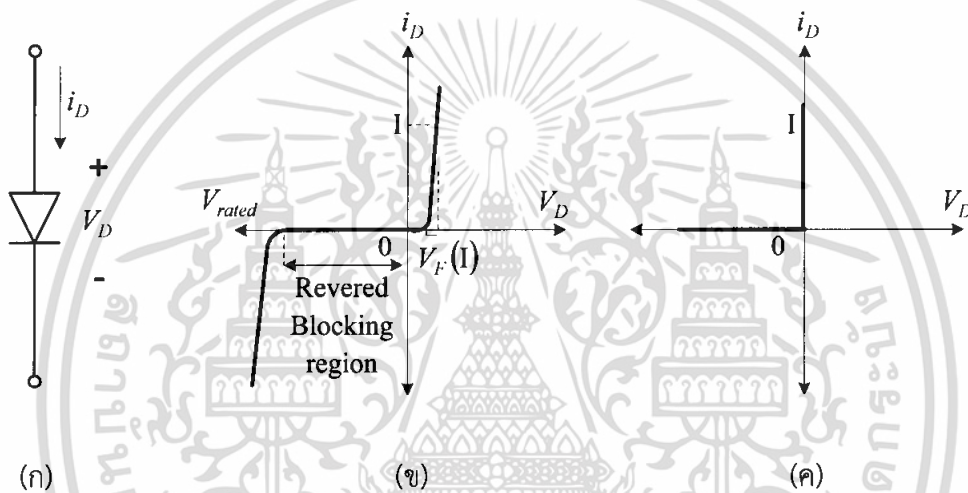
**ตารางที่ 2.2** เปรียบเทียบการทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ วงจรบัก-บูสคอนเวอร์เตอร์ และวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์

	วงจรบัก คอนเวอร์เตอร์	วงจรบูส คอนเวอร์เตอร์	วงจรบัก-บูส คอนเวอร์เตอร์	วงจรชุก คอนเวอร์เตอร์
อัตราการขยายแรงดัน	$D$	$\frac{1}{1-D}$	$\frac{D}{1-D}$	$\frac{D}{1-D}$
อัตราระลอกคลื่นของ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต	$\frac{1-D}{8LCf^2}$	$\frac{D}{LCf}$	$\frac{D}{LCf}$	$\frac{1-D}{8LCf^2}$
ค่าเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด	$\frac{(1-D)R}{2f}$	$\frac{D(1-D)^2 R}{2f}$	$\frac{(1-D)^2 R}{2f}$	$L_{1,min} = \frac{(1-D)^2 R}{2Df}$ $L_{2,min} = \frac{(1-D)R}{2f}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ไดโอด

ไดโอดเป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ง่ายที่สุด ในรูปที่ 2.24 (ก) และ รูปที่ 2.24 (ข) แสดงถึงสัญลักษณ์ของไดโอดและคุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้า ขณะที่อยู่ใ้ในสภาวะทำงานอยู่ตัว เมื่อไดโอดถูกไบแอสให้นำกระแส (Forward Biased) ไดโอดจะนำกระแสโดยมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเล็กน้อย และเมื่อไดโอดถูกไบแอสย้อนกลับ (Reverse Biased) จะมีกระแสไฟฟ้ารั่วขนาดเล็กน้อยมาก อาจถือว่าไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวไดโอด จนกระทั่งถึงจุดแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ย้อนกลับ (Reverse Breakdown Voltage) ซึ่งในทางปฏิบัติจะต้องออกแบบให้ได้ไดโอดไม่ทำงานจนถึงจุดแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ย้อนกลับเพื่อความปลอดภัย



รูปที่ 2.24 ไดโอด (ก) สัญลักษณ์

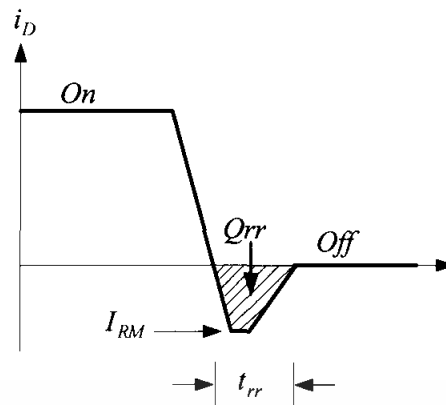
(ข) คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้า

(ค) คุณลักษณะในอุดมคติ

คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าสามารถพิจารณาแบบอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ค) เช่น ขณะที่ไดโอดนำกระแส แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอดจะมีค่าเป็นศูนย์ในทางอุดมคติ และขณะที่ไดโอดไม่นำกระแสหรือในช่วงไดโอดถูกไบแอสกลับ ไดโอดสามารถทนแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับได้สูงมาก สำหรับคุณลักษณะในทางอุดมคตินั้นเหมาะสำหรับใช้ในการวิเคราะห์การทำงานของวงจร แต่ไม่เหมาะสำหรับการพิจารณาออกแบบใช้งานจริง

เมื่อไดโอดเริ่มนำกระแส อาจพิจารณาได้ว่าเป็นการสวิตช์ชิ่งในอุดมคติ เพราะช่วงเวลาเริ่มนำกระแส (Turn-On Time) จะเร็วมาก เมื่อเทียบกับช่วงเวลาสภาวะชั่วคราว (Transient) ในวงจรกำลัง แต่ในช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส (Turn-Off Time) จะมีช่วงเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (Reverse Recovery Time,  $t_{rr}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.25 ก่อนกลับสู่สภาวะศูนย์ โดยกระแสฟื้นตัวย้อนกลับจะ

เอกสารทำให้ประจุในไดโอดหมดไป ทรัพยากรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 ไดโอดขณะหยุดนำกระแสไฟฟ้า

เมื่อ  $I_{RM}$  คือ ค่ากระแสคืนตัวย้อนกลับ (Reverse Recovery Current)  
 $Q_{rr}$  คือ ค่าประจุคืนตัวย้อนกลับ (Reverse Recovery Charges)

ถ้าหากจะแบ่งชนิดของไดโอดตามความต้องการในการประยุกต์ใช้งาน จะแบ่งออกเป็นสามกลุ่มด้วยกัน คือ

1. ซอตต์กีไดโอด (Schottky Diode)

ซอตต์กีไดโอดมักจะใช้เมื่อต้องการแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมและเวลาฟื้นตัวย้อนกลับน้อย แรงดันขณะนำกระแสจะมีค่าประมาณ 0.3 V ในขณะที่เวลาฟื้นตัวย้อนกลับโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในหน่วยนาโนวินาที มักจะใช้ในวงจรแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตต่ำ

2. ไดโอดฟื้นตัวเร็ว (Fast-Recovery Diodes หรือ High Speed Diode)

ไดโอดฟื้นตัวเร็ว มักใช้ในวงจรสวิตซ์ซึ่งความถี่สูงที่ต้องการเวลาฟื้นตัวกลับน้อย

3. ไดโอดความถี่ต่ำ (Line-Frequency Diodes หรือ General Purpose Diode)

ไดโอดชนิดนี้ถูกออกแบบสำหรับใช้งานที่ความถี่ต่ำ เช่น ความถี่ไฟฟ้าในบ้าน ผลของไดโอดใช้งานที่ความถี่ต่ำ ทำให้มีช่วงเวลาฟื้นตัวกลับยาว แต่ช่วงเวลาฟื้นตัวย้อนกลับของไดโอดดังกล่าวจะสั้นเมื่อเทียบกับคาบของเวลาความถี่ไฟฟ้าในบ้าน

## บทที่ 3

### การออกแบบระบบ

#### 3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบระบบเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์เจเนอเรเตอร์ซึ่งใช้เป็นแหล่งพลังงานร่วมกับแบตเตอรี่สำหรับระบบอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย โดยระบบนี้จะประกอบด้วยแผ่นเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ และวงจรสวิตช์เลือกแหล่งจ่ายอัตโนมัติ ซึ่งอาศัยการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าจากแผ่นเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ นำแรงดันไฟฟ้าที่ได้ผ่านวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์เพื่อเพิ่มและรักษาระดับของแรงดันให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ ในการเลือกใช้แหล่งพลังงานจะมีวงจรสวิตช์เลือกแหล่งจ่ายอัตโนมัติเพื่อเลือกแหล่งจ่ายพลังงานระหว่างแบตเตอรี่กับเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์เจเนอเรเตอร์

#### 3.2 อุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย

ในปัจจุบันอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้กับกระบวนการทางอุตสาหกรรมมากขึ้น เนื่องจากข้อได้เปรียบในหลายด้านของอุปกรณ์เอง ยกตัวอย่างเช่น ระบบส่งสัญญาณแบบมีสายจะมีการส่งข้อมูลของการวัดในรูปแบบสัญญาณแอนะล็อกแบบกระแสหรือแรงดัน ทำให้สามารถส่งข้อมูลค่าการวัดของอุปกรณ์ได้เพียงอย่างเดียว แต่อุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายจะมีการส่งข้อมูลแบบเข้ารหัสในระบบสัญญาณดิจิทัล (Data Protocol) จึงทำให้มีการรับส่งค่าข้อมูลได้มากกว่าหนึ่งค่า เช่น ค่าการวัด ค่าความผิดพลาดหรือการแจ้งเตือนต่าง ๆ ของอุปกรณ์ รวมถึงค่าระดับพลังงานของแบตเตอรี่ เป็นต้น นอกจากนี้การย้ายตำแหน่งหรือการเพิ่มจำนวนอุปกรณ์ในระบบไร้สายจะไม่มีผลกระทบในเรื่องของการย้ายหรือเพิ่มจำนวนของระบบสายไฟ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพ สะดวกและคล่องตัวในการทำงาน แสดงตัวอย่างของอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายในรูปที่ 3.1 ประกอบไปด้วย อุปกรณ์วัดความดัน อุณหภูมิ อัตราการไหล วัดระดับ และวัดการสั่นสะเทือน เป็นต้น อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถติดตั้งและเชื่อมต่อเข้ากับระบบควบคุมส่วนกลางได้อย่างรวดเร็ว โดยในระบบจำเป็นต้องมีไวร์เลสเกตเวย์ (Wireless Gateway) อย่างน้อยหนึ่งตัวเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดช่องทางในติดต่อสื่อสารและส่งผ่านข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ลูกข่ายไร้สายและระบบควบคุมส่วนกลาง



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายชนิดต่าง ๆ

### 3.2.1 การทำงานของระบบไร้สาย

ระบบอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายจะมีการติดต่อสื่อสารจากระบบควบคุมกลางผ่านทาง ไร้เลสเกตเวย์ไปยังอุปกรณ์ลูกข่ายไร้สาย อุปกรณ์แต่ละตัวจะทำการค้นหาสัญญาณและติดต่อกับ อุปกรณ์ไร้สายรอบข้างเป็นลักษณะตาข่าย (Mesh Network) อุปกรณ์ที่อยู่ใกล้กับ ไร้เลสเกตเวย์ก็จะ สามารถติดต่อกับระบบได้โดยตรง แต่สำหรับอุปกรณ์ที่อยู่ห่างออกไปและไม่สามารถส่งสัญญาณ ติดต่อกับ ไร้เลสเกตเวย์ได้ จะใช้วิธีการส่งผ่านข้อมูลต่อกันระหว่างอุปกรณ์ไปยัง ไร้เลสเกตเวย์ทำให้ ระบบไม่จำเป็นต้องติดตั้ง ไร้เลสเกตเวย์ให้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของอุปกรณ์ไร้สาย



รูปที่ 3.2 การทำงานของระบบไร้สาย

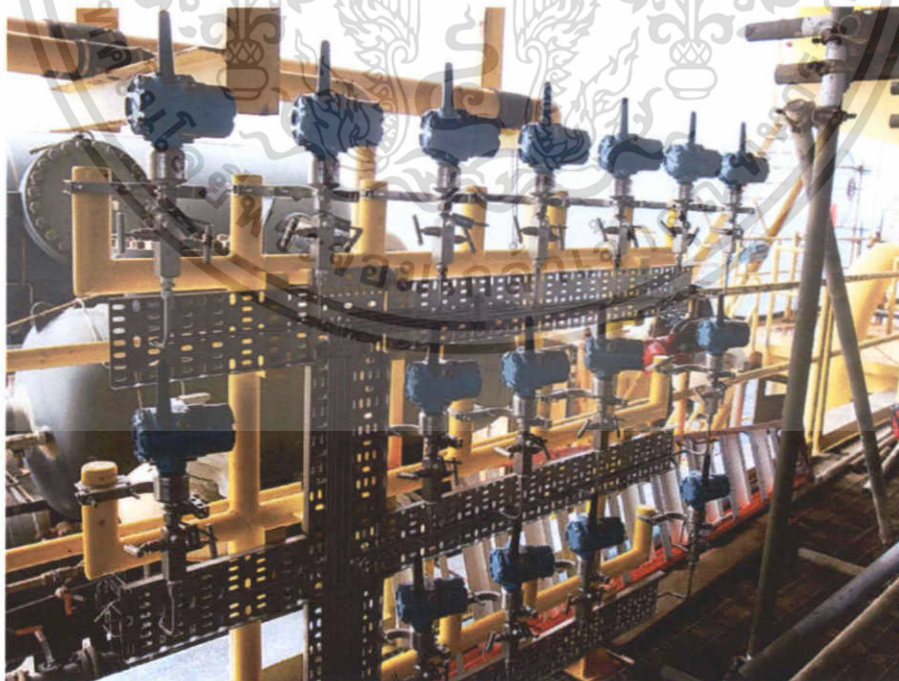
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการใช้งานบนฝั่งของอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายกับระบบถังกักเก็บน้ำมัน



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการใช้งานอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายกับระบบถังกักเก็บน้ำมัน

ตัวอย่างการใช้งานนอกชายฝั่งของอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายกับระบบกระบวนการผลิตก๊าซและน้ำมัน



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการใช้งานอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายกับระบบกระบวนการผลิตก๊าซ

และน้ำมันนอกชายฝั่งนี้ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 ข้อเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบมีสายและแบบไร้สาย

#### 1. อุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบมีสาย

ข้อดี คือ อุปกรณ์มีราคาถูกลงกว่า และมีอัตราการส่งข้อมูลสูง อุปกรณ์สามารถใช้งานในแบบควบคุม (Control) หรือการแสดงผล (Monitoring) ก็ได้

ข้อเสีย คือ เสียค่าใช้จ่ายในการออกแบบระบบและติดตั้งสูง ใช้เวลาในการติดตั้งนาน

#### 2. อุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย

ข้อดี คือ เสียค่าใช้จ่ายในการออกแบบระบบต่ำ ติดตั้งได้อย่างรวดเร็วและไม่มีค่าใช้จ่ายของสายไฟ สามารถติดตั้งบนพื้นที่ที่ยากต่อการเข้าถึงหรือเครื่องจักรที่มีการหมุนรอบตัวเองได้ และง่ายต่อการย้ายตำแหน่งการติดตั้งหรือเพิ่มจำนวนอุปกรณ์

ข้อเสีย คือ อุปกรณ์มีราคาค่อนข้างสูง มีอัตราการส่งข้อมูลต่ำ อุปกรณ์สามารถใช้งานเพื่อการแสดงผลได้เพียงอย่างเดียว และมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง (เปลี่ยนแบตเตอรี่)

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายชนิดต่าง ๆ โดยพิจารณาจากอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

อัตราส่งวัตต์ค่า	4 s	8 s	32 s	60 s
เครื่องมือวัด				
อุปกรณ์ส่งสัญญาณ ความดันแบบไร้สาย Model 3051	1.5 ปี	3.1 ปี	8 ปี	10 ปี
อุปกรณ์ส่งสัญญาณ อุณหภูมิแบบไร้สาย Model 648	2.2 ปี	4.4 ปี	10 ปี	10 ปี
อุปกรณ์ส่งสัญญาณ ประเภทสวิตช์แบบไร้สาย Model 702	2.2 ปี	4.4 ปี	10 ปี	10 ปี

\* ข้อมูลจาก Emerson Process Management (Thailand) Ltd.

สำหรับแหล่งพลังงานภายในที่ใช้จ่ายไฟให้กับวงจรนั้นจะมาจากแบตเตอรี่ภายในตัวอุปกรณ์ ส่วนแหล่งจากพลังงานภายนอกสำหรับอุปกรณ์ที่ติดอยู่กลางแจ้งอาจจะติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มเข้าไปเพื่อใช้ไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในขณะที่มีแสงเพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ให้นานขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์เสริมแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับอุปกรณ์ที่ติดตั้งกลางแจ้ง

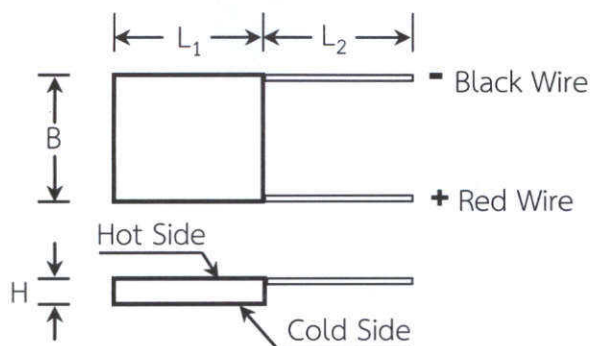
ในกรณีที่อุปกรณ์ติดตั้งอยู่ในอาคารหรือบริเวณที่ไม่สามารถรับแสงอาทิตย์ได้โดยตรง โดยทั่วไปอุปกรณ์จะอาศัยพลังงานจากแบตเตอรี่ภายในตัวเพียงอย่างเดียว พิจารณาตารางที่ 3.1 เห็นได้ว่า ถ้าหากอุปกรณ์มีอัตราการสูมค่าการวัดมากจะทำให้แบตเตอรี่หมดลงอย่างรวดเร็ว และเสียค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแบตเตอรี่ในแต่ละครั้งค่อนข้างสูง เมื่อสังเกตถึงกระบวนการผลิตมักจะมีพลังงานความร้อนเกิดขึ้นภายในกระบวนการ จึงได้เกิดแนวความคิดที่จะนำเอาพลังงานดังกล่าวมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานให้กับอุปกรณ์ ดังนั้นจึงได้เลือกใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในการแปลงความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้กับระบบต่อไป

### 3.3 แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก

ลักษณะของเทอร์โมอิเล็กทริกมีรูปแบบหลากหลาย ทั้งขนาดและรูปร่าง รวมไปถึงคุณสมบัติหลายอย่างให้เลือกตามลักษณะการใช้งาน เช่น ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้าและความสามารถในการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น คุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริกที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานนั้นควรจะต้องจ่ายแรงดันและกระแสออกมาได้สูง การทดลองนี้ได้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริก Model CP1-12726 [9] ซึ่งมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

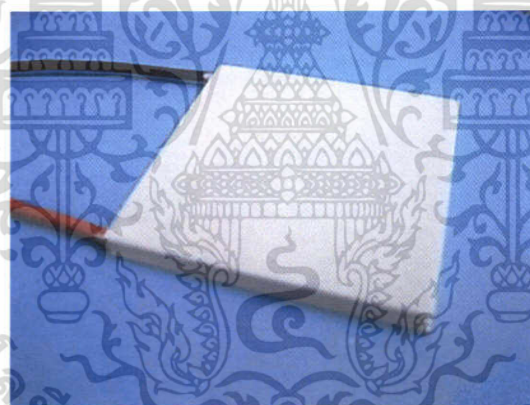
- มีขนาดความยาว ( $L_1$ ) 50 mm
- มีขนาดความกว้าง (B) 50 mm
- มีขนาดความสูง (H) 3.64 mm
- ความยาวของสาย ( $L_2$ ) 150 mm
- มีขนาดกำลังไฟฟ้า 400 W ที่ 15.4 V, 26 A (ขณะใช้งานแบบเพลเทียร์)
- มีย่านอุณหภูมิใช้งานอยู่ที่  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $+175\text{ }^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ขนาดของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก

การต่อเทอร์โมอิเล็กทริกหลายแผ่นให้ทำงานร่วมสามารถทำได้ 3 ลักษณะคือ ต่อแบบอนุกรม ต่อแบบขนาน และต่อแบบผสม ในการทดลองนี้ได้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มขนาดของแรงดันไฟฟ้าและป้องกันความร้อนให้เกิดผลต่างอุณหภูมิอยู่ที่  $0\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าจากแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกอยู่ในช่วง  $0\text{-}3\text{ V}$



รูปที่ 3.7 เทอร์โมอิเล็กทริกที่ใช้ในการทดลอง

เนื่องจากค่าแรงดันออกมาจากเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าไม่คงที่และต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการของอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย ดังนั้นจึงต้องเพิ่มแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าเหมาะสมกับอุปกรณ์ก่อนนำไปต่อใช้งานจริง

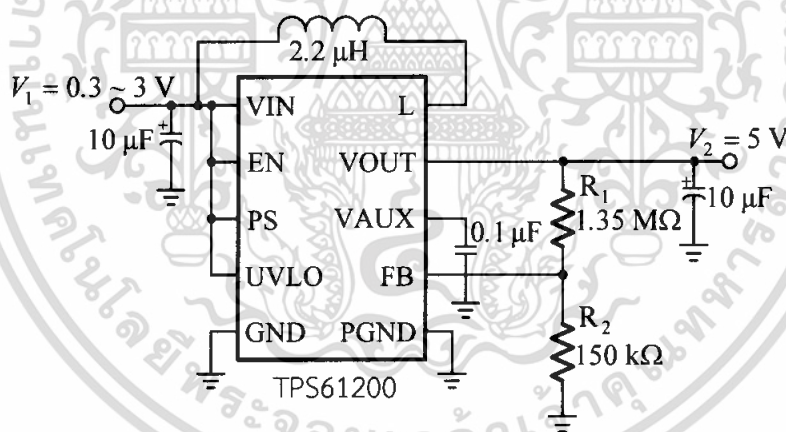
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การออกแบบวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์

การออกแบบวงจรขยายแรงดันได้เลือกใช้วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบแรงดันอินพุตต่ำและวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบประสิทธิภาพสูง ในการเพิ่มแรงดันเอาต์พุตถึงสองครั้ง โดยในครั้งแรกวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบแรงดันอินพุตต่ำจะให้ค่าแรงดันเอาต์พุตออกมา 5 V แล้วจึงนำแรงดันไฟฟ้าที่ได้ไปขยายแรงดันอีกครั้งด้วยวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบประสิทธิภาพสูง เพื่อให้มีแรงดันเอาต์พุต 12 V ซึ่งค่าแรงดันที่ได้จะนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานร่วมของระบบต่อไป

#### 3.4.1 วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบแรงดันอินพุตต่ำ

การออกแบบวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบแรงดันอินพุตต่ำได้ใช้ไอซีเบอร์ TPS61200 ดังแสดงในรูปที่ 3.8 อุปกรณ์สามารถให้กระแสเอาต์พุตได้ถึง 600 mA ที่ 5 V วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ใช้ความถี่คงที่ โดยใช้ Pulse Width Modulation (PWM) ควบคุมความถี่ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อโหลดกระแสต่ำ คอนเวอร์เตอร์จะอยู่ในโหมดประหยัดพลังงานเพื่อรักษาประสิทธิภาพและกระแสอินพุตเฉลี่ยสูงสุดถูกจำกัดอยู่ที่ 1500 mA แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสามารถตั้งได้จากภายนอกโดยใช้ตัวต้านทานต่อกันแบบแบ่งแรงดัน ไอซีถูกบรรจุอยู่ในตัวถัง 10 ขาแบบ QFN ขนาด 3×3 mm



รูปที่ 3.8 วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบแรงดันอินพุตต่ำ

วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์สามารถรับแรงดันอินพุตได้ตั้งแต่ 0.3 V ถึง 5.5 V ส่วนแรงดันที่จ่ายออกมาทางขา  $V_2$  นั้นสามารถเลือกได้จากค่า  $R_1$  และ  $R_2$  ที่ต่อกันเป็นวงจรแบ่งแรงดัน โดยค่าตัวต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

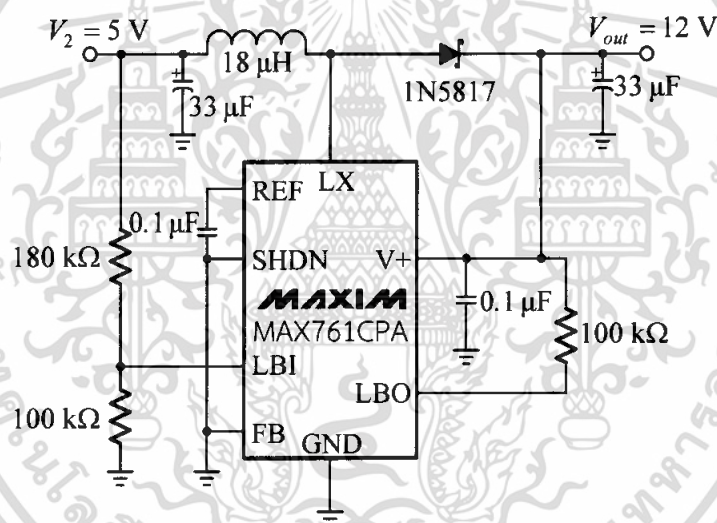
$$R_1 = R_2 \left( \frac{V_2}{V_{FB}} - 1 \right)$$

เมื่อ  $V_{FB}$  เป็นเอาต์พุตที่ออกแบบไว้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 500 mV อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบในระบบที่นำเสนอนี้ได้กำหนดค่า  $R_1$  และ  $R_2$  เท่ากับ  $1.35\text{ M}\Omega$  และ  $150\text{ k}\Omega$  ตามลำดับ ซึ่งทำให้ได้ค่าแรงดัน  $V_2 = 5\text{ V}$

### 3.4.2 วงจรบูตคอนเวอร์เตอร์แบบประสิทธิภาพสูง

การออกแบบวงจรบูตคอนเวอร์เตอร์แบบประสิทธิภาพสูงได้ใช้ไอซีเบอร์ MAX761CPA เป็นตัวแปลงแรงดันในส่วนที่สองนี้ ไอซีสามารถรับแรงดันอินพุตได้ตั้งแต่  $2\text{ V}$  ถึง  $16.5\text{ V}$  และให้ค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out} = 12\text{ V}$  ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ทั่วไปและอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย นอกจากนี้ยังมีขา Low-Battery Output อีกด้วย ซึ่งผู้ใช้งานสามารถนำจุดนี้ไปประยุกต์ใช้งานได้ คือ อาจจะนำขานี้ไปต่อกับอุปกรณ์เพื่อบอกให้รู้ว่าขณะนี้อุปกรณ์ได้ใช้พลังงานจากเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์หรือจากแบตเตอรี่ภายใน หรืออาจจะให้อุปกรณ์มีการสุมค่าวัดที่ต่างกันจากแหล่งพลังงานที่ต่างกัน เป็นต้น



รูปที่ 3.9 วงจรบูตคอนเวอร์เตอร์แบบประสิทธิภาพสูง

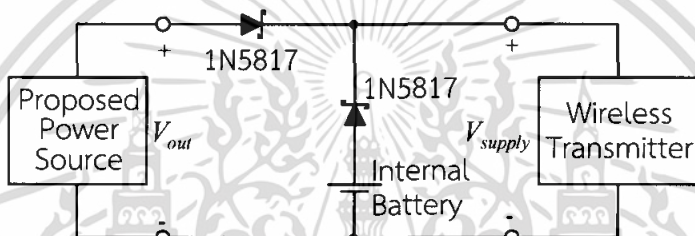
เมื่อนำวงจรดังกล่าวไปเป็นแหล่งพลังงานร่วมกับแบตเตอรี่ภายในของตัวอุปกรณ์ไร้สาย จึงจำเป็นต้องมีเลือกสวิทช์เลือกแหล่งจ่ายอัตโนมัติเพื่อให้อุปกรณ์สามารถเลือกใช้พลังงานจากเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์เป็นแหล่งพลังงานหลัก และเปลี่ยนกลับไปใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ภายในได้ ในขณะที่ไม่มีพลังงานจากเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์

### 3.5 วงจรสวิตช์เลือกแหล่งจ่ายอัตโนมัติ

จากคุณสมบัติของไดโอดแต่ละชนิด เมื่อพิจารณาแล้วจึงได้เลือกใช้ซอตต์กีไดโอดในการออกแบบเนื่องจากคุณสมบัติในการสวิตช์ที่รวดเร็วและมีอัตราการสูญเสียพลังงานต่ำซอตต์กีไดโอดมีคุณสมบัติในการนำกระแสได้ทางเดียวเช่นเดียวกับไดโอดแบบรอยต่อ pn แต่มีข้อแตกต่างคือ

1. ซอตต์กีไดโอดสามารถสวิตช์ on และ off ได้เร็วกว่าไดโอดแบบรอยต่อ pn มาก
2. แรงดันตกคร่อมซอตต์กีไดโอดมีค่าประมาณ 0.3-0.5 V ซึ่งต่ำกว่าของไดโอดแบบธรรมดา

โดยใช้ไดโอดเบอร์ 1N5817 [10] จำนวน 2 ตัวต่อกันแบบแคโทดรวม (Common Cathode) ดังรูปที่ 3.10 ทำให้เอาต์พุตสามารถรับแรงดันได้จากทั้งสองแหล่งจ่ายและอุปกรณ์จะเลือกต่อใช้งานกับแหล่งจ่ายที่มีค่าแรงดันมากกว่า

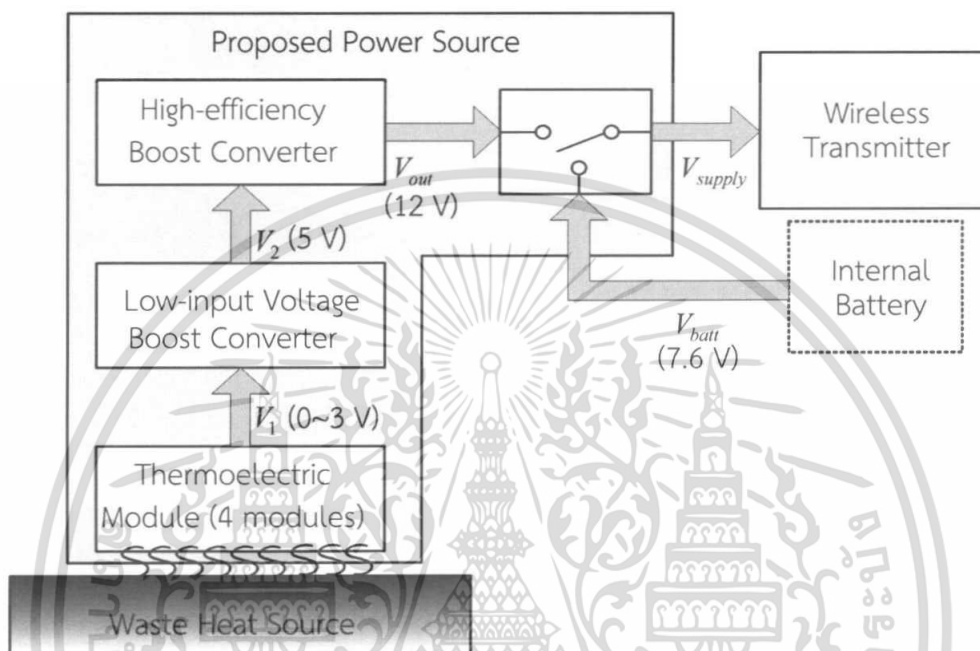


รูปที่ 3.10 วงจรสวิตช์เลือกแหล่งจ่ายอัตโนมัติ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบให้แรงดันเอาต์พุตของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ที่นำเสนอ มีค่ามากกว่าแรงดันของแบตเตอรี่เพื่อใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์เป็นแหล่งจ่ายไฟหลัก ในกรณีที่ค่าแรงดันของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์มีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันของแบตเตอรี่อาจเนื่องมาจากแหล่งความร้อนมีอุณหภูมิต่ำเกินไปหรือวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์มีปัญหา วงจรก็จะสวิตช์ให้แบตเตอรี่ภายในของตัวอุปกรณ์กลับมาเป็นแหล่งจ่ายให้อุปกรณ์โดยอัตโนมัติ

### 3.6 โครงสร้างของระบบที่นำเสนอ

การออกแบบสามารถสรุปให้เห็นโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.11 ประกอบด้วย เทอร์โมอิเล็กทริก วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์แบบแรงดันอินพุตต่ำ วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์แบบประสิทธิภาพสูง และวงจรสวิตช์เลือกแหล่งจ่ายอัตโนมัติ



รูปที่ 3.11 โครงสร้างของระบบที่นำเสนอ

จากโครงสร้างของระบบสรุปการทำงานของระบบได้ว่า เทอร์โมอิเล็กทริกจะทำหน้าที่แปลงความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งได้แรงดัน  $V_1$  ในช่วง 0~3 V จากนั้นจะทำการเพิ่มแรงดัน  $V_1$  โดยวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์แบบแรงดันอินพุตต่ำจนได้แรงดัน  $V_2$  ที่ 5 V แต่ค่าแรงดันนี้ยังต่ำเกินไปที่จะนำไปใช้งานจึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มแรงดันอีกครั้งหนึ่งโดยวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์แบบประสิทธิภาพสูง ทำให้ได้แรงดัน  $V_{out}$  ที่ 12 V ซึ่งเพียงพอสำหรับการใช้งานและเป็นค่าแรงดันที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ส่งสัญญาณ นอกจากนี้ยังมีวงจรสวิตช์เลือกแหล่งจ่ายอัตโนมัติเพื่อให้เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์สามารถเชื่อมต่อและใช้เป็นแหล่งพลังงานร่วมกับแบตเตอรี่เดิมได้

ในบทต่อไปจะทำการทดสอบวงจรและอุปกรณ์ที่ได้ทำการออกแบบทั้งหมด และนำอุปกรณ์มาทดสอบใช้งานจริงกับอุปกรณ์ไร้สาย เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบวงจรที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

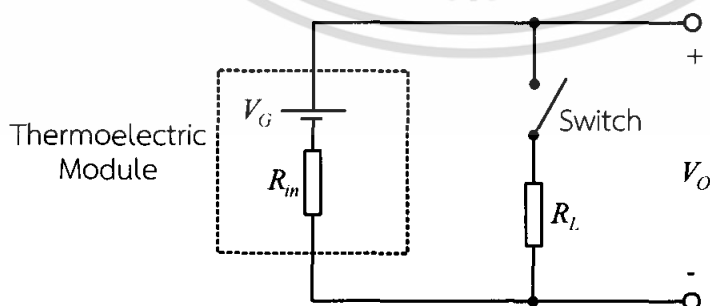
#### 4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบวงจรที่นำเสนอ ได้แก่ การทดสอบแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก การทดสอบค่ากำลังทางเอาต์พุตและการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์เมื่อนำวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 วงจรต่อกัน ผลการทดลองการต่อเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ การทดสอบการต่อใช้งานจริงกับอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย และการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์และระบบแบตเตอรี่เดิม

#### 4.2 ผลการทดสอบแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก

เป็นการอธิบายถึงคุณลักษณะของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก โดยทำการป้อนพลังงานความร้อนจากภายนอกให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อทดสอบประสิทธิภาพโดยใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิ ( $dT$ ) ระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นแล้ววัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ทดสอบในกรณีที่ไม่มีโหลด (No Load) และกรณีที่มีโหลดสูงสุด ในการทดลองได้กำหนดให้อุณหภูมิของแผ่นทั้งสองด้านต่างกันไม่เกิน  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  เพื่อความปลอดภัยและไม่ให้เทอร์โมอิเล็กทริกเกิดความเสียหาย โดยให้อุณหภูมิด้านเย็นคงที่อยู่ที่  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  และด้านร้อนอยู่ที่  $30\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจะทำให้เกิดผลต่างอุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่าง  $0\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

การวัดประสิทธิภาพของระบบนี้จะใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 4.1 เมื่อ  $V_G$  และ  $R_m$  แสดงถึงแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรและความต้านทานภายในแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ตามลำดับ และ  $R_L$  เป็นความต้านทานโหลด แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต  $V_O$  ถูกวัดด้วยโวลต์มิเตอร์ความต้านทานอินพุตสูงเพื่อลดผลกระทบทางด้านค่าความผิดพลาดของการวัด ให้ความต้านทาน  $R_L = R_m = 1\ \Omega$



รูปที่ 4.1 การวัดแรงดันเอาต์พุตของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก

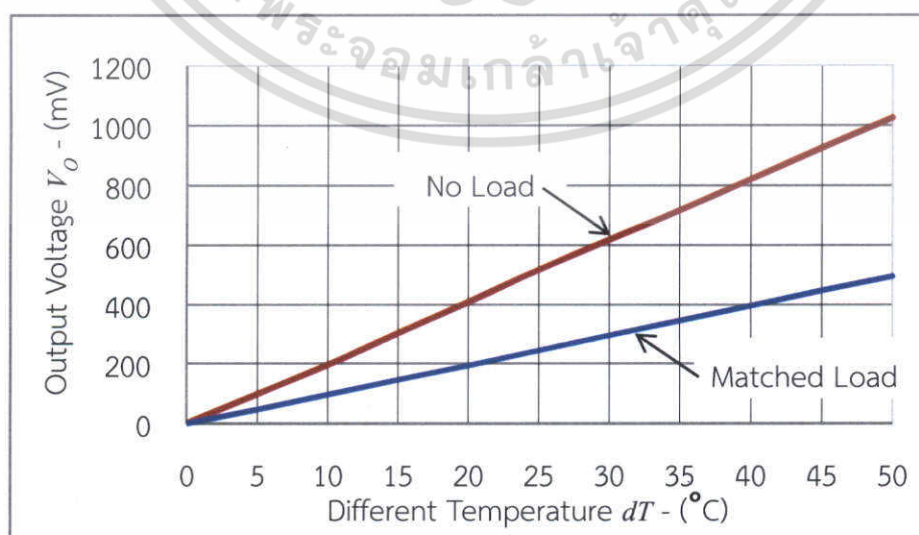
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการทดสอบวงจรเทอร์โมอิเล็กทริกโดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างความแตกต่างอุณหภูมิค่าและแรงดันไฟฟ้า  $V_o$  ในขณะที่ไม่มีโหลดและขณะที่มีโหลดแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบระหว่างผลต่างอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก

ผลต่างของอุณหภูมิ $dT$ ( $^{\circ}C$ )	แรงดันขณะที่ไม่มีโหลด $V_o$ (mV)	แรงดันขณะที่มีโหลด $V_o$ (mV)
0	0	0
5	98	48
10	195	97
15	302	146
20	408	194
25	516	245
30	617	296
35	715	346
40	820	397
45	924	448
50	1025	495

ผลของการทดสอบแผ่นเทอร์โมอิเล็กดังรูปที่ 4.2 เป็นการแสดงกราฟเปรียบเทียบผลต่างอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต  $V_o$  ของเทอร์โมอิเล็กทริกที่ได้จากการทดลอง ในขณะที่ไม่มีโหลดและขณะโหลดสูงสุด ( $R_L = 1 \Omega$ )

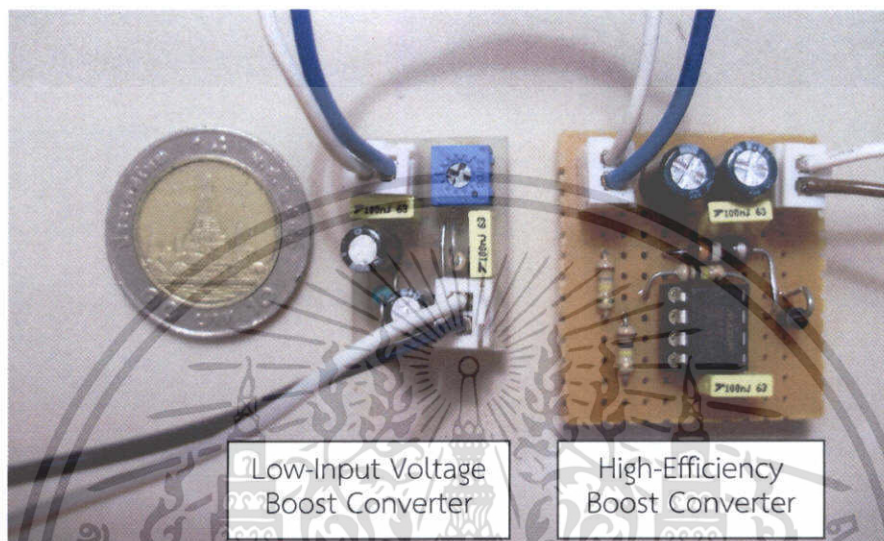


รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลต่างอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ได้ซึ่งได้รับความคุ้มครองลิขสิทธิ์และสงวนไว้เพื่อใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการทดสอบวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

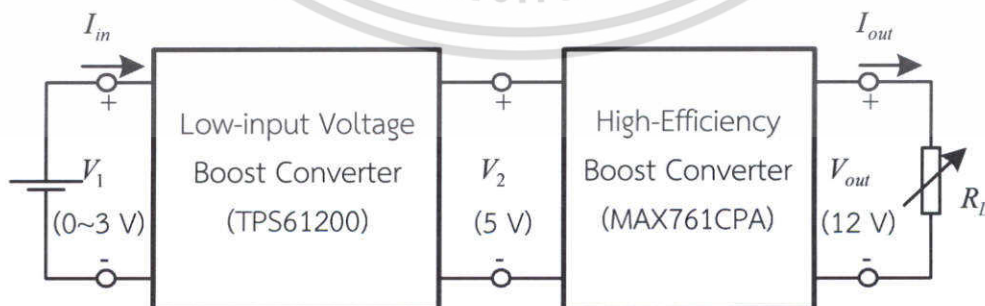
การทดสอบประสิทธิภาพของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองวงจรที่ต่ออนุกรมกันแสดงในรูปที่ 4.3 โดยการทดสอบจะแยกการทดลองออกเป็นสองส่วน คือ การทดสอบผลค่ากำลังทางเอาต์พุต และการทดสอบประสิทธิภาพรวมของวงจร



รูปที่ 4.3 วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ต้นแบบที่สร้างขึ้น

#### 4.3.1 การทดสอบค่ากำลังทางเอาต์พุต

การทดสอบค่ากำลังทางเอาต์พุตทำได้โดยการบ่อนค่าแรงดัน  $V$  ที่แตกต่างกันจำนวน 3 ค่า คือ 1 V, 2 V และ 3 V จากนั้นทำการปรับเพิ่มกำลังโหลดทางด้านเอาต์พุตให้มากขึ้นโดยการปรับลดค่าความต้านทาน  $R_L$  จนทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงเพื่อตรวจสอบผลการรักษาค่าระดับแรงดัน ซึ่งได้ผลการทดสอบค่ากำลังทางเอาต์พุตเมื่อใช้แรงดันที่ค่าต่าง ๆ ตามตารางที่ 4.2, 4.3 และ 4.4



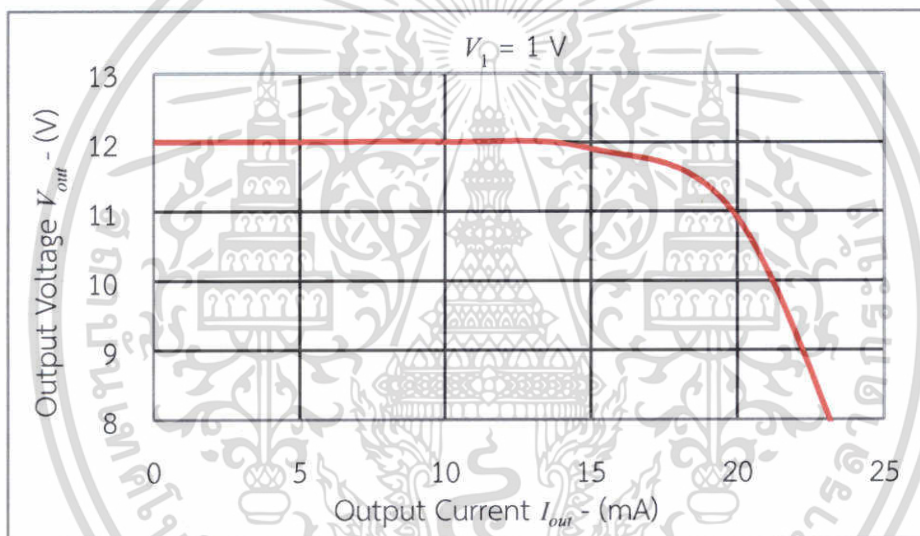
รูปที่ 4.4 การต่ออนุกรมวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การวัดผลค่ากำลังเอาต์พุตโดยใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 4.4 เมื่อ  $V_1 = 1\text{ V}$

กระแสอินพุต $I_{in}$ (mA)	กำลังงานอินพุต $P_{in}$ (mW)	โหลด $R_L$ ( $\Omega$ )	กระแสเอาต์พุต $I_{out}$ (mA)	โวลต์เอาต์พุต $V_{out}$ (V)	กำลังงานเอาต์พุต $P_{out}$ (mW)
150	150	$\infty$	0	12	0
457	457	2,400	5	12	60
680	680	1,200	10	12	120
848	848	800	15	11.9	178.5
900	900	600	20	10.9	218

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.2 มาแสดงในรูปแบบกราฟจะได้ผลดังรูปที่ 4.5 เมื่อ  $V_1 = 1\text{ V}$

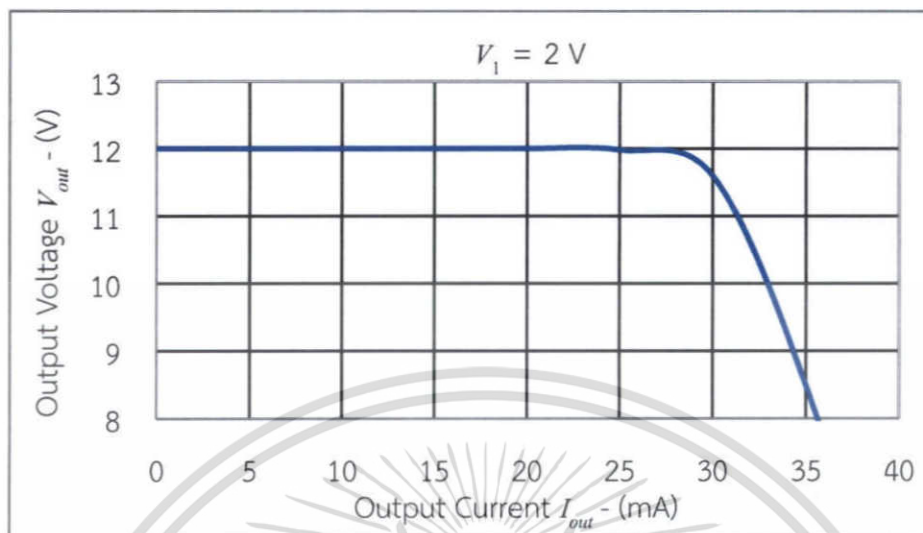


รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังทางเอาต์พุตของวงจร เมื่อ  $V_1 = 1\text{ V}$

ตารางที่ 4.3 การวัดผลค่ากำลังเอาต์พุตโดยใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 4.4 เมื่อ  $V_1 = 2\text{ V}$

กระแสอินพุต $I_{in}$ (mA)	กำลังงานอินพุต $P_{in}$ (mW)	โหลด $R_L$ ( $\Omega$ )	กระแสเอาต์พุต $I_{out}$ (mA)	โวลต์เอาต์พุต $V_{out}$ (V)	กำลังงานเอาต์พุต $P_{out}$ (mW)
36	72	$\infty$	0	12	0
75	150	2,400	5	12	60
118	236	1,200	10	12	120
165	330	800	15	12	180
217	434	600	20	12	240
268	536	480	25	11.99	300
320	640	400	30	11.7	351

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.3 มาแสดงในรูปแบบกราฟจะได้ผลดังรูปที่ 4.6 เมื่อ  $V_1 = 2\text{ V}$



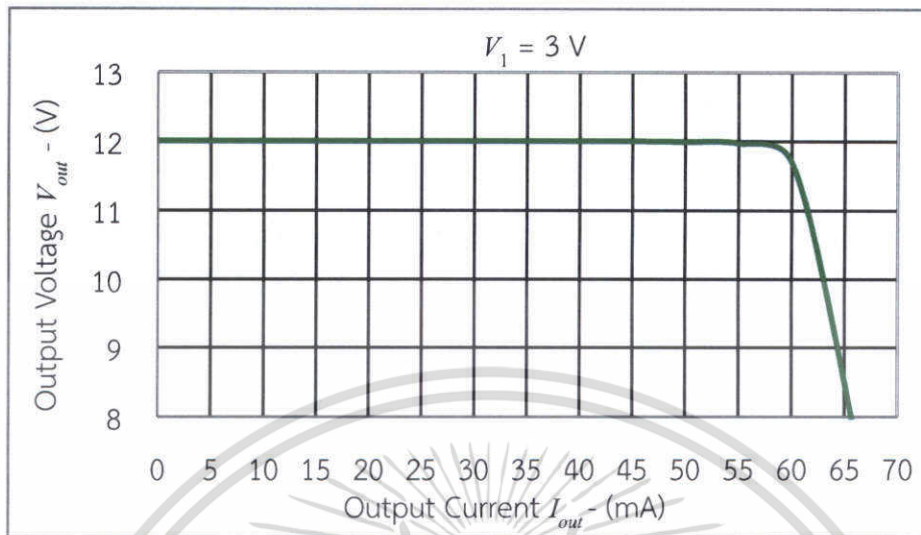
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบกำลังทางเอาต์พุตของวงจร เมื่อ  $V_1 = 2\text{ V}$

ตารางที่ 4.4 การวัดผลค่ากำลังเอาต์พุตโดยใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 4.4 เมื่อ  $V_1 = 3\text{ V}$

กระแสอินพุต $I_{in}$ (mA)	กำลังงานอินพุต $P_{in}$ (mW)	โหลด $R_L$ ( $\Omega$ )	กระแสเอาต์พุต $I_{out}$ (mA)	โวลต์เอาต์พุต $V_{out}$ (V)	กำลังงานเอาต์พุต $P_{out}$ (mW)
24	72	$\infty$	0	12	0
47	141	2,400	5	12	60
75	225	1,200	10	12	120
103	309	800	15	12	180
130	390	600	20	12	240
156	468	480	25	12	300
181	543	400	30	12	360
206	618	343	35	12	420
230	690	300	40	12	480
255	765	267	45	12	540
279	837	240	50	11.99	599.5
303	909	218	55	11.97	658.35
320	960	200	60	11.7	702

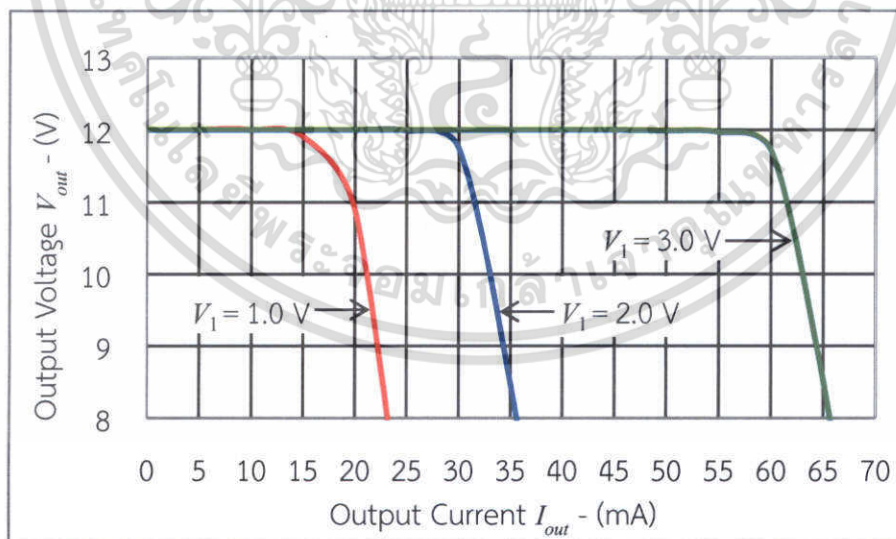
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.4 มาแสดงในรูปแบบกราฟจะได้ผลดังรูปที่ 4.7 เมื่อ  $V_1 = 3\text{ V}$



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบกำลังทางเอาต์พุตของวงจร เมื่อ  $V_1 = 3\text{ V}$

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสเอาต์พุต  $I_{out}$  และค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  จากทั้ง 3 กราฟ มาพิจารณาร่วมกันดังแสดงในรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสเอาต์พุต  $I_{out}$  จะแปรผันตามค่าแรงดันอินพุตที่ได้รับ นั่นคือค่ากระแสเอาต์พุต  $I_{out}$  จะมีค่าสูงขึ้นตามแรงดันอินพุต  $V_1$



รูปที่ 4.8 ผลรวมการทดสอบกำลังทางเอาต์พุตของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพรวมของวงจร

การทดสอบประสิทธิภาพโดยใช้วงจรที่แสดงในรูปที่ 4.4 โดยการเปรียบเทียบกำลังงานอินพุตเทียบกับกำลังงานเอาต์พุตดังสมการ (4.1)

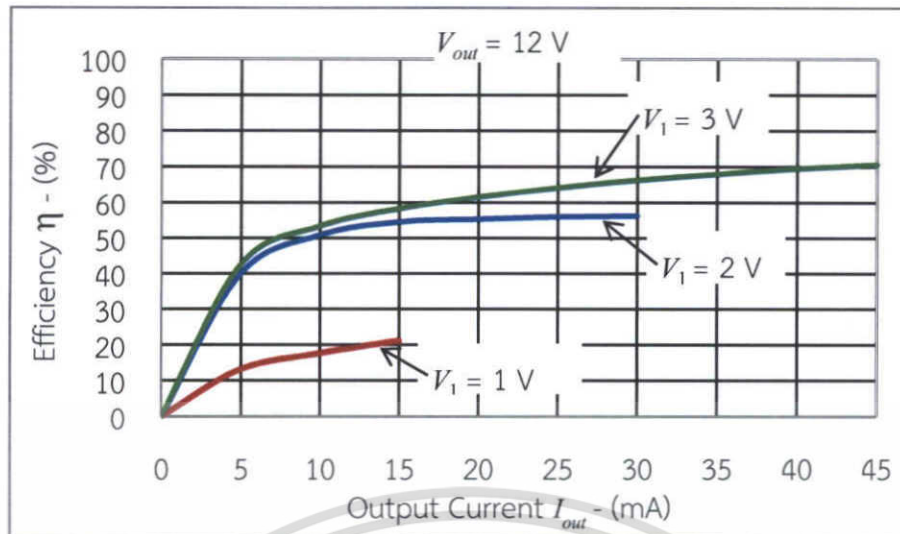
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (4.1)$$

โดยให้แรงดันเอาต์พุตคงที่  $V_{out} = 12 \text{ V}$  ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองอยู่ในรูปของค่ากระแสเอาต์พุต  $I_{out}$  เทียบกับค่าประสิทธิภาพ ( $\eta$ ) ในเทอมของเปอร์เซ็นต์ แสดงผลดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลของการทดสอบประสิทธิภาพของวงจร

ค่ากระแสเอาต์พุต $I_{out} \text{ (mA)}$	ค่าประสิทธิภาพของวงจร (%)		
	$V_1 = 1 \text{ V}$	$V_1 = 2 \text{ V}$	$V_1 = 3 \text{ V}$
0	0	0	0
5	13.1	41.7	42.6
10	17.6	50.8	53.3
15	21.2	54.5	58.3
20		55.3	61.5
25		56	64.1
30		56.3	66.3
35			68
40			69.6
45			70.6

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.5 มาแสดงในรูปแบบกราฟจะได้ผลดังรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าถ้าแรงดันทางด้านอินพุตมีค่าต่ำจะทำให้ประสิทธิภาพรวมของวงจรและค่ากระแสเอาต์พุตสูงสุดของวงจรมีค่าต่ำตามไปด้วย



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบประสิทธิภาพรวมของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์

#### 4.4 ผลการทดลองการต่อเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์

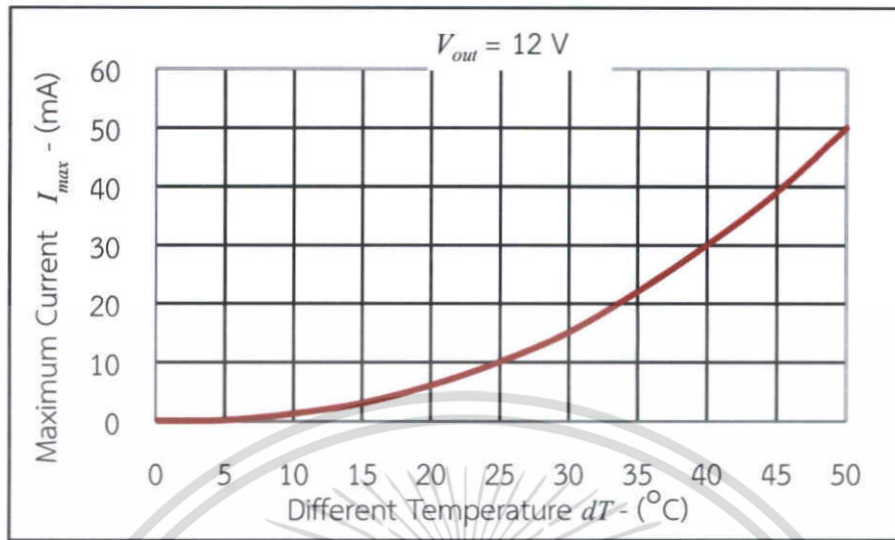
ในการทดลองส่วนนี้ได้ใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มขนาดของแรงดันไฟฟ้าและทำการป้องกันความร้อนให้เกิดผลต่างอุณหภูมิอยู่ที่  $0 \sim 50$  °C เพื่อวัดดูผลของการจ่ายกระแสสูงสุดของวงจร ผลการทดสอบนั้นอยู่ในรูปแบบของการเปรียบเทียบระหว่างผลต่างอุณหภูมิและค่ากระแสเอาต์พุตสูงสุด

ตารางที่ 4.6 ผลของการเปรียบเทียบระหว่างผลต่างอุณหภูมิและค่ากระแสเอาต์พุตสูงสุด

ผลต่างอุณหภูมิ $dT$ (°C)	ค่ากระแสเอาต์พุตสูงสุด $I_{out}$ (mA)
0	0.0
5	0.1
10	1.2
15	3.0
20	6.0
25	10.0
30	15.0
35	22.0
40	30.0
45	39.0
50	50.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.6 มาแสดงในรูปแบบกราฟจะได้ผลดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ผลการทดลองการเปรียบเทียบผลต่างและค่ากระแสเอาต์พุตสูงสุด

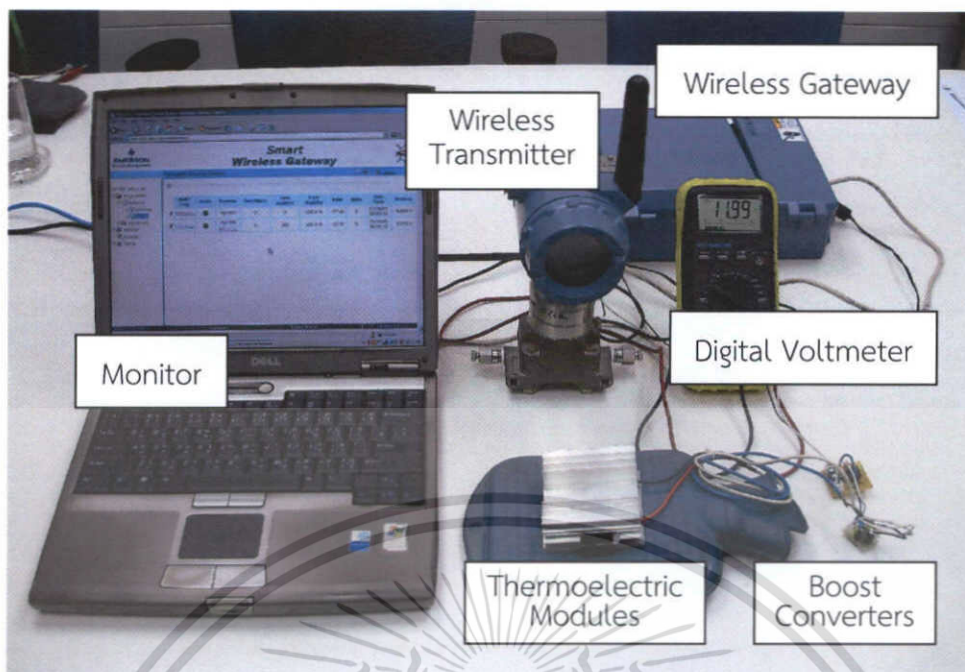
ดังกราฟในรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสเอาต์พุตสูงสุด  $I_{max}$  จะเปลี่ยนแปลงตามผลต่างอุณหภูมิ และวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์จะเริ่มทำงานและจ่ายกระแสได้ตั้งแต่ผลต่างอุณหภูมิ  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นจุดที่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าแรงดันเพียงพอที่จะจ่ายให้วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์เริ่มต้นทำงานได้นั่นเอง

สำหรับการใช้งานเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายนั้น ยิ่งเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าผลต่างอุณหภูมิสูงก็จะสามารถกำหนดอัตราการสุ่มวัดค่าของอุปกรณ์ให้สูงขึ้นตามไปด้วยได้ กล่าวคือ ความเร็วสูงสุดของอัตราการสุ่มวัดค่าของอุปกรณ์จะขึ้นอยู่กับค่าผลต่างอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกขณะใช้งานหรือค่ากระแสเอาต์พุตสูงสุด  $I_{max}$  นั้นเอง

#### 4.5 การต่อใช้งานจริงกับอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย

เพื่อทดสอบการต่อใช้งานจริงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ที่นำเสนอต่อร่วมกับอุปกรณ์ส่งสัญญาณความดันแบบไร้สาย (Wireless Pressure Transmitter) ของ Rosemount [11] เป็นกรณีศึกษาและใช้ถุงบรรจุน้ำร้อนแทนพลังงานความร้อนในกระบวนการผลิต ดังรูปที่ 4.11 พร้อมทั้งกำหนดให้อุปกรณ์ส่งสัญญาณสุ่มวัดค่าทุก ๆ 8 s ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้สำหรับวัดค่าเพื่อแสดงผล โดยอุปกรณ์ส่งสัญญาณใช้กระแสประมาณ 2 mA ดังรูปที่ 4.11 พบว่าระบบที่ออกแบบสามารถจ่ายไฟได้ดีและเพียงพอต่อความต้องการของอุปกรณ์ ซึ่งสังเกตได้จากสถานะที่แสดงหน้าจอแสดงผล โดยอุปกรณ์จะเริ่มทำงานได้ตั้งแต่ผลต่างอุณหภูมิ  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นต้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ผลการทดลองต่อใช้งานจริงกับอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย

#### 4.6 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์และระบบแบตเตอรี่เดิม

ในกรณีที่ใช้แบตเตอรี่ภายในอย่างเดียว จากข้อมูลอ้างอิงแบตเตอรี่ในพบว่าอายุการใช้งานแบตเตอรี่สูงสุด 10 ปี ถ้ากำหนด  $T_s = 60$  s, 32 s, 8 s, และ 4 s จะต้องเปลี่ยนแบตเตอรี่ทุก ๆ 10 ปี, 8 ปี, 3 ปี, และ 1.5 ปี ตามลำดับ โดยแบตเตอรี่ราคาก่อนละ 8,500 บาท ส่วนค่าใช้จ่ายของระบบที่นำเสนอประมาณ 16,500 บาท การใช้พลังงานจากเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์ร่วมกับแบตเตอรี่ภายในอุปกรณ์สามารถรองรับกับอัตราสู่มัดค่าได้ในช่วงกว้างตั้งแต่วินาทีจนถึงนาที่ ถ้าพิจารณาให้พลังงานความร้อนในระบบกระบวนการผลิตมีค่าเพียงพอที่จะทำให้เทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์ที่นำเสนอเป็นแหล่งจ่ายไฟหลักและแบตเตอรี่ภายในอุปกรณ์เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองซึ่งจะทำให้สามารถใช้งานแบตเตอรี่ได้ตลอดอายุการใช้งานสูงสุด การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในช่วง 20 ปีของการใช้แบตเตอรี่ภายในแบบเดิมและการใช้ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานร่วมแสดงดังตารางที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของการใช้แบตเตอรี่ภายในอุปกรณ์แบบเดิมด้วยอัตรา การ  
สู่มัดค่าที่ 4 s , 8 s , 32 s และ 60 s ตามลำดับ

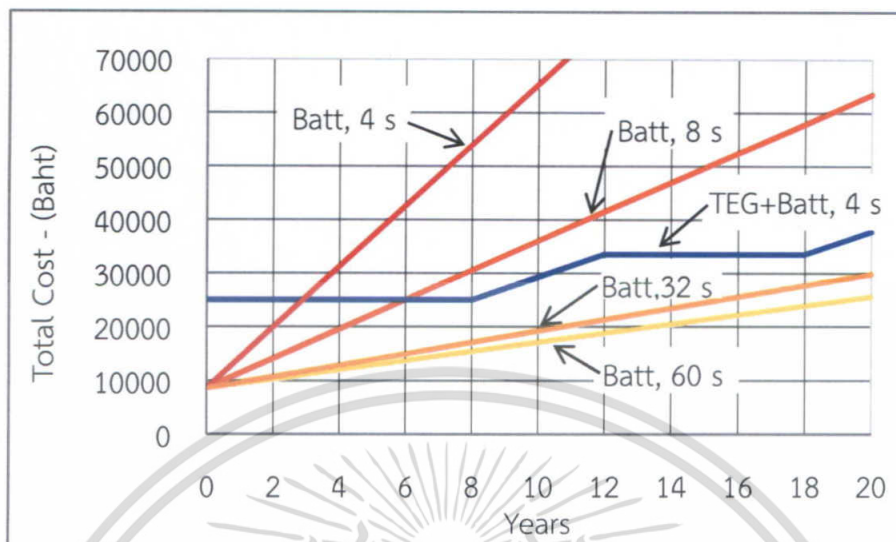
อัตราการสู่มัดค่า ปี	4 s	8 s	32 s	60 s
0	8,500 Baht	8,500 Baht	8,500 Baht	8,500 Baht
2	19,833 Baht	13,984 Baht	10,625 Baht	10,200 Baht
4	31,167 Baht	19,468 Baht	12,750 Baht	11,900 Baht
6	42,500 Baht	24,952 Baht	14,875 Baht	13,600 Baht
8	53,833 Baht	30,435 Baht	17,000 Baht	15,300 Baht
10	65,167 Baht	35,919 Baht	19,125 Baht	17,000 Baht
12	76,500 Baht	41,403 Baht	21,250 Baht	18,700 Baht
14	87,833 Baht	46,887 Baht	23,375 Baht	20,400 Baht
16	99,167 Baht	52,371 Baht	25,500 Baht	22,100 Baht
18	110,500 Baht	57,855 Baht	27,625 Baht	23,800 Baht
20	121,833 Baht	63,339 Baht	29,750 Baht	25,500 Baht

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของการใช้ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์เป็น  
แหล่งจ่ายพลังงานร่วมกับแบตเตอรี่ด้วยอัตราการสู่มัดค่าที่ 4 s

อัตราการสู่มัดค่า ปี	4 s
0	25,000 Baht
2	25,000 Baht
4	25,000 Baht
6	25,000 Baht
8	25,000 Baht
10	29,250 Baht
12	33,500 Baht
14	33,500 Baht
16	33,500 Baht
18	33,500 Baht
20	37,750 Baht

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.7 และ 4.8 มาแสดงในรูปแบบกราฟจะได้ผลดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์เป็นพลังงานร่วมและการใช้ระบบแบตเตอรี่แบบเดิม

จากรูปที่ 4.12 พบว่าระบบที่นำเสนอสมาารถลดค่าใช้จ่ายได้ในกรณีที่อุปกรณ์ไร้สายมีการส่งค่าวัดค่าสูง โดยพิจารณาการส่งค่าที่ 8 s และ 4 s ระบบที่ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์เป็นพลังงานร่วมจะคุ้มทุนในเวลา 6 ปี และ 3 ปี ตามลำดับ สังเกตได้ว่ายิ่งอุปกรณ์มีการส่งค่าวัดค่ามากเท่าไรระบบที่ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์เป็นพลังงานร่วมก็จะสามารถลดและประหยัดค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแบตเตอรี่ได้มากเท่านั้น

## บทที่ 5

# บทสรุปและข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยต่อ

### 5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นแนวทางหนึ่งที่ได้ทำการวิจัยและพัฒนาเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์สำหรับอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย โดยแบ่งเนื้อหาการนำเสนอออกเป็นสามส่วนคือ แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ และวงจรสวิตช์เลือกแหล่งจ่ายอัตโนมัติ ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาแหล่งพลังงานทางเลือกโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์เป็นพลังงานร่วมแทนที่การใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ภายในตัวอุปกรณ์ไร้สายเพียงอย่างเดียว การใช้พลังงานร่วมจากเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์นั้นทำให้อุปกรณ์สามารถทำการส่งข้อมูลด้วยอัตราสูงได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ภายใน จากการทดลองพบว่ายิ่งอุปกรณ์มีการส่งข้อมูลมากและสิ้นเปลืองพลังงานมากเท่าไรเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ก็จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแบตเตอรี่ได้มากเท่านั้น การใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์เป็นพลังงานร่วมโดยมีแบตเตอรี่ภายในเป็นพลังงานสำรองยังสามารถทำให้ผู้ใช้เปลี่ยนแบตเตอรี่ภายในของอุปกรณ์ได้โดยไม่ต้องปิดอุปกรณ์ นอกจากนี้เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ยังจัดได้ว่าเป็นพลังงานที่สะอาดเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจึงสามารถลดจำนวนขยะพิษจากแบตเตอรี่ลงได้

สมรรถนะในการทำงานของวงจรสามารถยืนยันได้ด้วยผลการทดลองต่อวงจรจริงซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ผลงานวิจัยทั้งหมดที่ได้พัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการพิจารณาเข้าร่วมในงานประชุมวิชาการ คือ

- ในการประชุมวิชาการ International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2010) ในปี 2553 ซึ่งจัดขึ้นระหว่างวันที่ 19-21 พฤษภาคม 2553 จ.เชียงใหม่ [12]

### 5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยต่อ

จากวงจรที่ได้ทำการออกแบบและพัฒนาไว้ในการทำวิจัยพบว่ายังมีประเด็นที่น่าสนใจอันจะเป็นแนวทางในการนำไปทำวิจัยและพัฒนาวงจรให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น อยู่ 3 ประการ

1) ประการแรก เนื่องจากประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกยังมีค่าค่อนข้างต่ำ จึงทำให้ต้องใช้เทอร์โมอิเล็กทริกจำนวนมากหลายแผ่นหรือต้องใช้ผลต่างอุณหภูมิมากจึงจะได้พลังงานเพียงพอสำหรับจ่ายเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ให้ทำงานได้

ในอนาคตอาจมีแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นหรือแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่ออกแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อใช้สำหรับการเป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ก็จะทำให้ประสิทธิภาพรวมของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ดีขึ้นและจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น

2) ประการที่สอง ในการออกแบบวงจรบวสคอนเวอร์เตอร์นั้นได้ใช้ IC สำเร็จรูป 2 ตัว อาจมีการออกแบบวงจรบวสคอนเวอร์เตอร์ใหม่ให้เหลือเพียง 1 วงจร เพื่อลดขนาดของวงจร ลดการสูญเสียพลังงาน และเพิ่มประสิทธิภาพรวมของวงจร

3) ประการที่สาม เนื่องจากตัวอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายยังไม่มีมาตรฐานรับสถานะไฟเลี้ยงของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ หากผู้ใช้งานปรับอัตราการส่งมอดูเลชันสูงซึ่งในขณะที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์นั้นก็จะมีปัญหาแต่อย่างใด แต่ถ้าหากอุปกรณ์มีการสวิตช์กลับมาใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ภายในอย่างเต็มเนื่องด้วยสาเหตุใดก็ตามก็จะทำให้แบตเตอรี่นั้นหมดอย่างรวดเร็ว โดยแนะนำให้มีการพัฒนาร่วมกันกับอุปกรณ์เพื่อทำให้อุปกรณ์นั้นสามารถปรับมอดูเลชันอัตราความถี่ต่างกันได้จากแหล่งพลังงานที่ต่างกัน หรือมีการแจ้งเตือนหากมีการสวิตช์กลับมาใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ภายใน เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Zurawski, The Industrial Communication Technology Handbook, CRC Press, 2005.
- [2] Emerson Process Management, “Product Datasheet of Rosemount 753R: Web Based Monitoring Indicator”, March 2008.
- [3] D.M. Rowe and G. Min, “Design theory of thermoelectric modules for electrical power generation,” IEE Proc.-Sci. Meas. Techno., pp. 351-356, vol. 143, no. 6, November 1996.
- [4] Hun Sik Han, Yun Ho Kim, Seo Young Kim, Sukkee Um, and Jae Min Hyun, “Performance measurement and analysis of a thermoelectric power generator”, Proceedings of 12th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), pp. 1 – 7, June 2010.
- [5] Texas Instruments, “Product Datasheet of Low Input Voltage Synchronous Boost Converter with 1.3-A Switches: TPS61200”, March 2007.
- [6] MAXIM, “Product Datasheet of Adjustable High-Efficiency Step-Up DC-DC Converters: MAX761”, November 1993.
- [7] Flavio Tolfo, White Paper FOUNDATION™ Fieldbus, “Tested Proven Available Today”.
- [8] Werachet Khan-ngern, Vuttipon Tarateeraseth, “Power Electronics”, 2004
- [9] Thermoelectric Datasheet Model CP1-12726, Thermal Enterprises.
- [10] Taiwan Semiconductor, “Product Datasheet of Diode: 1N5817”.
- [11] Emerson Process Management, “Product Datasheet of Rosemount 3051S Wireless series: Pressure Level and Flow Solutions”, January 2011.
- [12] Thepmanee, T., Julsereewong, P., and Taratanaphol, N., “Waste-Heat Thermoelectric Power Source for Industrial Wireless Transmitters”, International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2010), pp. 1277 – 1280, 2010.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นาย นฤชิต ธาระชนผล  
 วัน-เดือน-ปีเกิด วันที่ 11 พฤษภาคม 2525  
 ที่อยู่ 525 ถ.ลาดพร้าว 64 วังทองหลาง กรุงเทพฯ 10310  
 โทร. 02-932-7040, 089-160-4061  
 ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา  
 วิศวกรรมระบบเครื่องมือวัด จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี  
 พระจอมเกล้าเจ้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2548 และในปีการศึกษา  
 2550 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร  
 มหบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน  
 เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้