วงจรทบระดับแรงดันแบบสามระดับสำหรับกังหันลม

THREE LEVEL BOOST DC TO DC CONVERTER FOR WIND TURBINE

สรรธพล คุ้มทรัพย์
SANTAPHON KOOMSAP

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พ.ศ. 2554

วงจรทบระดับแรงดันแบบสามระดับสำหรับกังหันลม

สรรธพล คุ้มทรัพย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พ.ศ. 2554

THREE LEVEL BOOST DC TO DC CONVERTER FOR WIND TURBINE

SANTAPHON KOOMSAP

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENTS FOR

THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING

IN ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

2011

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและข้อความต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

นายสรรธพล คุ้มทรัพย์

COPYRIGHT © 2011 ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2554
FACULTY OF ENGINEERING คณะวิศวกรรมศาสตร์
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วงจรทบระดับแรงดันแบบสามระดับสำหรับกังหันลม

THREE LEVEL BOOST DC TO DC CONVERTER FOR WIND TURBINE

ชื่อนักศึกษา นายสรรรธพล คุ้มทรัพย์

รหัสประจำตัว 114970402002-7

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์

วัน เดือน ปี ที่สอบ 26 เมษายน 2554

สถานที่สอบ ห้องประชุมชมพูพันธุ์ทิพย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เวคิน ปิยรัตน์)

.... กรรมการ

(ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์)

.... กรรมการ

(ดร.สุรินทร์ แหงมงาม)

.... กรรมการ

(ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์)

....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมหมาย ผิวสอาด)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรทบระดับแรงดันแบบสามระดับสำหรับงานกังหันลม
นักศึกษา	นายสรรธพล คุ้มทรัพย์
รหัสประจำตัว	114970402002-7
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบทบระดับแบบคาสเคดแรงดันสามระดับ โดยทดสอบร่วมกับแบบจำลองกังหันลม ทั้งนี้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงจะได้รับการควบคุมและแสดงผลสัญญาณผ่านบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอลรุ่น DS1104 ของบริษัท dSPACE GmbH. แบบจำลองกังหันลมในวิทยานิพนธ์นี้สามารถจำลองพฤติกรรมของกังหันลมได้ตามต้องการเช่น ค่าความเร็วลม ขนาดและชนิดใบกังหันลม ขนาดพิกัดกำลังของกังหันลม ตลอดจนความสูงของเสากังหันลม เป็นต้น

วงจรทบระดับแรงดันทำหน้าที่แปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงจากแรงดันขนาด 35-65 โวลต์ให้มีค่า 311 โวลต์คงที่ ซึ่งมีค่าสูงเพียงพอสำหรับผลิตแรงดันไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ โดยผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์แบบหนึ่งเฟส และระบบทั้งหมดในงานวิจัยนี้กระทำได้โดยการประยุกต์ใช้ซอฟแวร์ Orcad/Pspice และMatlab/Simulink ในการจำลองระบบทั้งหมดให้อยู่ในสภาวะเสถียรตามที่ต้องการ

จากการทดสอบระบบทั้งหมดในงานวิจัยจะเห็นว่า ขณะระบบอยู่ในสภาวะวงเปิด ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงจะตกลงทุกครั้งขณะที่มีโหลดต่อเข้าสู่ระบบอย่างทันที ในทางตรงข้าม ระบบในสภาวะวงปิดด้วยการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ จะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงจะมีค่าคงที่ที่ 311 โวลต์เสมอ ในขณะที่ต่อโหลดขนาด 200 วัตต์ เข้าสู่ระบบโดยทันที อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของระบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงนี้จะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 73% โดยประมาณ

คำสำคัญ : วงจรทบระดับแรงดันแบบสามระดับ กังหันลม เครื่องจำลองกังหันลม

Thesis Title : THREE LEVEL BOOST DC TO DC CONVERTER FOR WIND TURBINE

Student Name : Mr. Santaphon Koomsap

Student ID : 114970402002-7

Degree Award : Master of Engineering

Study Program : Electrical Engineering

Academic year : 2010

Thesis Advisor : Dr. Wanchai Subsingha

ABSTRACT

This paper presents the three level boost DC to DC converter for wind turbine which was tested together with wind turbine simulator which can controls and monitoring using a digital signal processing board DS1104 of dSPACE GmbH. The simulator can simulate any characteristics of wind turbine such as wind velocity, turbine's blade, sizing of wind turbine and height of turbine pole etc.

The function of the boost Converter converts DC voltage from 35-65 Vdc to 311 Vdc which is enough for a establish a 220 Vac 50 Hz output voltage through a single phase inverter circuit. Orcad/Pspice and Matlab/Simulink software are also used for simulating the overall system in order to stabilize the output voltage as desired.

The results of this thesis prove that output voltage will drop in every voltage level with sudden load change under the open loop control condition. When PI controller is applied in closed loop of the DC Boost converter control, DC output voltage of the converter is stabilized at 311 Vdc while the 200W load is injected into the converter output, However, the efficiency of the DC Converter system in this experiment is about 73%.

Keywords: Three level boost dc to dc converter, Wind turbine, Wind simulator.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ ที่แนะแนวทางและให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้มาโดยตลอด รวมทั้งคณาจารย์และบุคลากรในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และคำปรึกษา ผู้วิจัยซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ของท่านและกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ อาจารย์ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข ที่คอยให้ความอนุเคราะห์และช่วยเหลือแนะนำการออกแบบสร้างและแนวทางในการแก้ปัญหา และแนะแนวทางในการเขียนและนำเสนอบทความงานวิจัยทั้งยังคอยห่วงใยและให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่มอบทุนการศึกษาพร้อมทั้งอนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่ เครื่องวัดในการทำวิจัย

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และขอบคุณบุคคลในครอบครัวที่เห็นใจและคอยเป็นกำลังใจตลอดระยะเวลาในการศึกษาด้วยดีตลอดมาจนผู้วิจัยสามารถสำเร็จการศึกษา

ท้ายที่สุดนี้ขออาราธนาพระคุณแห่งพระศรีรัตนตรัย จงช่วยปกป้องคุ้มภัย ผู้มีพระคุณทุกท่านให้มีสุขภาพพลานามัยที่สมบูรณ์ ปราศจากโรคภัยทั้งปวง

สรรธพล คุ้มทรัพย์

26 เมษายน 2554

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ	2
1.5 เครื่องมือที่ใช้	3
1.6 ข้อจำกัดของการศึกษา	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหรือวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์	6
2.3 อุปกรณ์ที่ใช้งานในวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า	12
2.4 วงจรควบคุมวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า	14
2.5 วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับแบบคาสเคด	17
2.6 การวิเคราะห์แรงดันตกคร่อมที่สวิตช์และไดโอด	23
2.7 หลักการของพลังงานลม	25
2.8 ช่วงการทำงานของกังหันลม	27
2.9 สำรวจและเก็บข้อมูลลม	29
2.10 แบบจำลองกังหันลม	31
2.11 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น	33
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	34
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	34
3.2 โครงสร้างของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับ	35

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
3.3	วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับแบบคาสเคด	36
3.4	การออกแบบวงจรทบระดับ	44
3.5	วงจรที่ใช้ควบคุมแบบวงเปิด	45
3.6	วงจรที่ใช้ควบคุมแบบวงปิด	45
3.7	โครงสร้างของเครื่องจำลองกังหันลม	51
บทที่ 4	ผลการสร้างและการทดสอบ	56
4.1	วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับ	56
4.2	วงจรเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยการ์ดอินเตอร์เฟสdSPACE	67
4.3	การทดสอบวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับด้วยเครื่องจำลองกังหันลม	70
บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	74
5.1	สรุปผลการวิจัย	74
5.2	ข้อเสนอแนะในการวิจัย	75
เอกสารอ้างอิง		76
ภาคผนวก		
ก	รูปเครื่องต้นแบบ	78
ข	โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองของเครื่องจำลองกังหันลม	81
ค	ผลการทดสอบเครื่องจำลองกังหันลมจากโปรแกรม Control Desk กับวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับ	86
ง	ข้อมูลอุปกรณ์	90
จ	ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	118
ประวัติผู้เขียน		133

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ข้อมูลศักยภาพพลังงานลม กรุงเทพ รวมช่วงลมสงบ-เฉลี่ยรายปี 30

2.2 สถานที่เก็บข้อมูลความเร็วลม 30

3.1 เปรียบเทียบวงจรแปลงผันแต่ละแบบ 38

3.2 พารามิเตอร์ขดลวดทองแดง 42

3.3 ค่าของ C_p เปรียบเทียบกับ λ 54

4.1 การทดสอบดูค่าแรงดันและกระแสเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลดแบบทันทีทันใดที่แรงดันอินพุตคงที่ 50 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิลคงที่ 0.5 แบบวงเปิด 59

4.2 การทดสอบดูค่าแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุตคงที่ 50 โวลต์ ทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงโหลดลำดับ3 เมื่อเปลี่ยนค่าดิวตี้ไซเคิล แบบวงเปิด 60

4.3 การทดสอบดูค่าแรงดันค่ากระแสเอาต์พุตกระแสอินพุตและค่าดิวตี้ไซเคิลเมื่อปรับเปลี่ยนโหลดตามลำดับแบบทันทีทันใด โดยแรงดันอินพุตคงที่ 50 โวลต์ แบบวงปิด 62

4.4 การทดสอบดูค่าแรงดันเอาต์พุตและดิวตี้ไซเคิลเมื่อแรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงแบบวงปิด 64

4.5 ทดสอบหาค่าประสิทธิภาพโดยรักษาระดับแรงดันอินพุตคงที่ แบบวงปิด 66

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	บล็อกไดอะแกรมระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากกังหันลม	6
2.2	ก) วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า ข) วงจรสมมูลในช่วง T_{on} ค) วงจรสมมูลในช่วง T_{off}	7
2.3	กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำต่อเนื่อง	8
2.4	กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเริ่มไม่ต่อเนื่อง	9
2.5	กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไม่ต่อเนื่อง	10
2.6	กระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุ และ V_O	11
2.7	ไดโอดกำลัง	13
2.8	วงจรควบคุมวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าในโหมดควบคุมแรงดัน	15
2.9	รูปร่างสัญญาณที่จุดต่างๆของวงจรในรูปที่ 2.8	16
2.10	วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับแบบ $2N-1$	17
2.11	การทำงานของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับช่วงที่ (ก)	18
2.12	การทำงานของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับช่วงที่ (ข)	19
2.13	การทำงานของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับช่วงที่ (ค)	20
2.14	การทำงานของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับช่วงที่ (ง)	21
2.15	การทำงานของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับช่วงที่ (ฉ)	22
2.16	การทำงานของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับช่วงที่ (ช)	23
2.17	ขณะ C_4 ชาร์จจะมีแรงดันตกคร่อมที่ไดโอดและสวิตช์	24
2.18	ขณะ C_2 ชาร์จจะมีแรงดันตกคร่อมที่ไดโอดและสวิตช์	24
2.19	ปริมาตรการไหลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม	26
2.20	ก) กังหันทำงานตามปกติ ข) กังหันเกิดปรากฏการณ์สตอล	28
2.21	การทำงานของกังหันลม	28
2.22	แผนที่ศักยภาพพลังงานลม กรุงเทพ รวมช่วงลมสงบ-เฉลี่ยรายปี	29
2.23	ติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลมที่ชั้น11 ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมงคลกรุงเทพ	30
2.24	ผลการวัดความเร็วลมที่วัดได้จริง ณ.ชั้น11 ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	31
2.25	แบบจำลองกังหันลม	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.26	บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของกังหันลมนำ Matlab/Simulink ใช้ในการคำนวณ	32
2.27	วงจรภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแยกกระตุ้น	33
3.1	โครงสร้างวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับ	35
3.2	วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับ(2 สถานะ)	38
3.3	การจำลองวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับ	39
3.4	ผลจำลองวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับแบบวงเปิด	39
3.5	วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า เมื่อเทียบเคียงหม้อแปลงอุดมคติ	46
3.6	วงจรไฟฟ้าสมมูลของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า	47
3.7	จำลองวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Ocad/Pspice เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่	48
3.8	ผลของการจำลองวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Ocad/Pspice เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่	48
3.9	จำลองผลการตอบสนองวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Ocad/Pspice เพื่อหาผลตอบสนองทางแรงดันไฟฟ้าโดยใช้วิธีป้อนกลับแรงดัน	51
3.10	ผลการตอบสนองวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Ocad/Pspice เพื่อหาผลตอบสนองทางแรงดันไฟฟ้าโดยใช้วิธีป้อนกลับแรงดัน	51
3.11	โครงสร้างและส่วนประกอบเครื่องจำลองกังหันลม	52
3.12	บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองความเร็วลมและการกำหนดค่าตัวแปร	53
3.13	บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของกังหันลม	53
3.14	บล็อกของ Look-Up Table ในโปรแกรม Matlab/Simulink ในการคำนวณ ค่า C_p โดยใช้หลักการ Interpolation	54
3.15	กราฟค่าของ C_p เปรียบเทียบกับค่า λ ที่ได้	54
4.1	การทดสอบวงจรต้นแบบวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับ	57
4.2	วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับที่ใช้ในการทดสอบ	58
4.3	การเปรียบเทียบค่าจำลองด้วยโปรแกรม Orcad/Pspice กับที่ใช้ออสซิลโลสโคปวัดวงจรที่สร้างขึ้น	59
4.4	สัญญาณแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่ดิวตี้ไซเคิล 50%	60
4.5	สัญญาณแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่ดิวตี้ไซเคิล 60%	60
4.6	สัญญาณแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่ดิวตี้ไซเคิล 70%	61
4.7	สัญญาณแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุต ควบคุมแบบวงปิด	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.8	สัญญาณแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่ดิวตี้ไซเคิล 45% ที่การเปลี่ยนแปลงโหลดลำดับ 1 ควบคุมแบบวงปิด	62
4.9	สัญญาณแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่ดิวตี้ไซเคิล 50% ที่การเปลี่ยนแปลงโหลดลำดับ 2 ควบคุมแบบวงปิด	63
4.10	สัญญาณแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่ดิวตี้ไซเคิล 60% ที่การเปลี่ยนแปลงโหลดลำดับ 3 ควบคุมแบบวงปิด	63
4.11	สัญญาณแรงดันอินพุต 40 โวลต์และที่ดิวตี้ไซเคิล 60% ควบคุมแบบวงปิด	64
4.12	สัญญาณแรงดันอินพุต 50 โวลต์และที่ดิวตี้ไซเคิล 45% ควบคุมแบบวงปิด	65
4.13	สัญญาณแรงดันอินพุต 60 โวลต์และที่ดิวตี้ไซเคิล 35% ควบคุมแบบวงปิด	65
4.14	วงจรวัดค่าประสิทธิภาพ แบบวงปิด	66
4.15	เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE ที่สร้างขึ้น	68
4.16	เปรียบเทียบสัญญาณแรงบิดของมอเตอร์และสัญญาณแรงบิดอินเตอร์เฟสการ์ดที่ความเร็วลม 3 m/s	69
4.17	เปรียบเทียบสัญญาณแรงบิดของมอเตอร์และสัญญาณแรงบิดอินเตอร์เฟสการ์ดที่ความเร็วลม 4 m/s	69
4.18	สัญญาณแรงดันอินพุต 35 โวลต์ แรงดันเอาต์พุต 311 โวลต์ ที่ดิวตี้ไซเคิล 60% ควบคุมแบบวงปิด ที่ความเร็วลม 3 m/s และความแปรปรวนลม 2 %	70
4.19	สัญญาณแรงดันอินพุต 40 โวลต์ แรงดันเอาต์พุต 311 โวลต์ ที่ดิวตี้ไซเคิล 40% ควบคุมแบบวงปิด ที่ความเร็วลม 4 m/s และความแปรปรวนลม 2 %	71
4.20	สัญญาณแรงดันอินพุต 60 โวลต์ แรงดันเอาต์พุต 311 โวลต์ ที่ดิวตี้ไซเคิล 30% ควบคุมแบบวงปิด ที่ความเร็วลม 5 m/s และความแปรปรวนลม 2 %	71
4.21	สัญญาณแรงดันอินพุต 35 โวลต์ แรงดันเอาต์พุต 311 โวลต์ ที่ดิวตี้ไซเคิล 60% ควบคุมแบบวงปิด ที่ความเร็วลม 3 m/s และความแปรปรวนลม 5 %	72
4.22	สัญญาณแรงดันอินพุต 50 โวลต์ แรงดันเอาต์พุต 311 โวลต์ ที่ดิวตี้ไซเคิล 40% ควบคุมแบบวงปิด ที่ความเร็วลม 4 m/s และความแปรปรวนลม 5 %	72
4.23	สัญญาณแรงดันอินพุต 65 โวลต์ แรงดันเอาต์พุต 311 โวลต์ ที่ดิวตี้ไซเคิล 30% ควบคุมแบบวงปิด ที่ความเร็วลม 5 m/s และความแปรปรวนลม 5 %	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันได้มีการนำเอาพลังงานทดแทน มาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นพลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม หรือพลังงานความร้อนใต้พิภพ เป็นต้น ซึ่งพลังงานเหล่านี้เป็นพลังงานที่บริสุทธิ์ไร้มลพิษและไม่มีวันหมดสิ้น โดยจะนำเข้าสู่กระบวนการแปรสภาพ จากพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า

ไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ในยุคปัจจุบัน จากข้อมูลทางสถิติของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย [1] ตั้งแต่ปี 2540 – 2549 จะเห็นว่าปริมาณความต้องการไฟฟ้ามีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว คิดเป็นเกือบ 100% ในระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมา ทั้งนี้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตคาดว่าค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในปี 2554 จะอยู่ที่ประมาณ 30,587 เมกกะวัตต์ เมื่อเทียบกับปี 2549 จะเห็นว่าภายในระยะเวลาเพียง 5 ปีหลัง ความต้องการเพิ่มขึ้นประมาณ 50% ซึ่งการผลิตพลังงานไฟฟ้าในประเทศไทย ยังต้องอาศัยแหล่งพลังงานที่สำคัญคือ ก๊าซธรรมชาติ คิดเป็น 44% รองลงมาคือ น้ำมันเชื้อเพลิง 32% นอกจากนั้นได้มาจากแหล่งพลังงานอื่นๆ เช่น พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ ฯลฯ จะเห็นได้ว่าต้นทุนการผลิตส่วนใหญ่มีแนวโน้มที่จะสูงขึ้น เนื่องจากแหล่งก๊าซธรรมชาติมีน้อยลงและจะต้องนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาสูงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้นตามความต้องการพลังงาน ทางออกในการแก้ปัญหาวิกฤตพลังงานคือการจัดหาแหล่งพลังงานทดแทน และเพื่อให้ได้แหล่งพลังงานที่สามารถใช้งานได้จริง ต้นทุนการผลิตพลังงานจะต้องต่ำและสามารถผลิตได้ในประเทศ ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตลมมรสุม ในหลายจังหวัดของประเทศไทยเป็นพื้นที่มีลมพัดตลอดทั้งปี พลังงานลมจึงเป็นพลังงานที่สะอาดจึงเป็นทางเลือกที่น่าจะได้รับการพัฒนาให้เกิดประโยชน์ แต่กังหันลมจริงมีค่าใช้จ่ายสูงต้องการพื้นที่ในการติดตั้งมากไม่เหมาะกับการนำมาทดสอบระบบควบคุม ด้วยพฤติกรรมกังหันลมจะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วอยู่ตลอดเวลาไม่แน่นอน

ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยจะได้นำเสนอเครื่องจำลองกังหันลม(ต้นกำลัง)ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE โดยใช้วิธีการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้เสมือนกับแรงบิดที่เกิดจากกังหันลมจริง อาศัยวิธีการสร้างแรงบิดอ้างอิง(Torque Reference) ควบคุมผ่านโมเดลทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรม Matlab/Simulink และส่งข้อมูลผ่านอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACEไปที่ตัวอินเวอร์เตอร์สั่งให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสร้างแรงบิดตามความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิด (C_t) ของกังหันลม ซึ่งเป็นข้อดีที่สามารถจำลองเสมือน

การทำงานของกังหันลมได้และในการทดสอบได้ต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตที่ได้มีระดับแรงดันต่ำ ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับ(เครื่องทดสอบ) เพื่อเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าเป็น 311 โวลต์ โดยใช้ไอซีสำหรับสร้างสัญญาณ PWM และรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้คงที่โดยควบคุมแบบวงปิด(Phase Lead - Phase Lag) เพื่อสำหรับต่อร่วมเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีหน้าที่แปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาการจำลองกังหันลมโดยเปลี่ยนแปลงสภาวะของความเร็วลมด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์ควบคุมแรงบิดและแสดงผลด้วยอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE ที่สภาวะความเร็วลมต่างๆ

1.2.2 เพื่อออกแบบและสร้างระบบจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุม และแสดงผลด้วยอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE ที่สภาวะความเร็วลมต่างๆ

1.2.3 เพื่อศึกษาการทำงานวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับที่เปลี่ยนแปลงระดับแรงดันจาก 35 - 65 โวลต์เป็นแรงดัน 311 โวลต์พร้อมระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

1.2.4 เพื่อออกแบบและสร้างวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับที่เปลี่ยนแปลงระดับแรงดันจาก 35 - 65 โวลต์เป็นแรงดัน 311 โวลต์ เพื่อใช้กับเครื่องจำลองกังหันลมสำหรับต่อร่วมกับอินเวอร์เตอร์220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ออกแบบและสร้างเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE

1.3.2 ออกแบบและสร้างวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับที่เปลี่ยนแปลงระดับแรงดันจาก 35 - 65 โวลต์เป็นแรงดัน 311 โวลต์เพื่อใช้งานร่วมกับอินเวอร์เตอร์

1.3.3 ทดสอบแรงดันเอาต์พุตวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับขณะที่จ่ายโหลดตามความเร็วลมที่ได้เครื่องจำลองกังหันลม

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ

1.4.1 การศึกษาทฤษฎีและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้น

ก. ศึกษาการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมที่ความเร็วลมต่างๆในเขตกรุงเทพมหานคร

ข. ศึกษาและวัดปริมาณลมจริงด้วยเครื่องมือวัดลมที่อาคาร48 ชั้น 11 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

1.4.2 การวิเคราะห์แบบจำลอง

ก. วิเคราะห์แบบจำลองโปรแกรม Matlab/Simulink เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์ควบคุมแรงบิดและแสดงผลด้วยอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE ที่สภาวะความเร็วลมต่างๆ

ข. วิเคราะห์แบบจำลองโปรแกรม Orcad/Pspice วงจรทบระดับแรงดันแบบสามระดับที่เปลี่ยนแปลงระดับแรงดันจาก 35 - 65 โวลต์เป็นแรงดัน 311 โวลต์

1.4.3 การออกแบบ

ก. ออกแบบเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE ที่สภาวะความเร็วลมต่างๆ

ข. ออกแบบวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับที่เปลี่ยนแปลงระดับแรงดันจาก 35 - 65 โวลต์เป็นแรงดัน 311 โวลต์ที่ต่อร่วมกับอินเวอร์เตอร์220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์

1.4.4 การสร้างเครื่องจำลองกังหันลมและสร้างวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับ

ก. ทำการทดสอบเครื่องจำลองกังหันลมและทำการทดสอบวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับ

ข. เก็บผลการทดสอบเครื่องจำลองกังหันลมและเก็บผลการทดสอบวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับ

1.4.5 วิเคราะห์ผลจากการทดสอบ แล้วนำเสนอ

1.5 เครื่องมือที่ใช้

1.5.1 ดิจิตอลสตอเรจออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ Agilent Technologies Model DSO5014A

1.5.2 เครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE Model DS1104

1.5.3 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ELWE พิกัด 3 kW

1.5.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ELWE พิกัด 0.37 kW

1.5.5 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส Fuji Model Frenic mega พิกัด 3 kW

1.5.6 โปรแกรม Matlab/Simulink

1.5.7 โปรแกรม Orcad/Pspice

1.5.8 โปรแกรม Control Desk

1.5.9 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ Fluke 179

1.5.10 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 0 – 100 V, 20 A

1.5.11 ชุดโหลดหลอดไส้ขนาด 100W, 220V ต่ออนุกรมกัน2หลอด

1.5.12 ชุดโหลดตัวความต้านทาน 1.5 kΩ 50 W

1.6 ข้อจำกัดของการศึกษา

จากการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับระบบกังหันลม ได้ทำการศึกษา

1.7.1 ศึกษาการเก็บค่าปริมาณลมด้วยเครื่องมือวัดลมที่อาคาร48 ชั้น 11 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

1.7.2 การใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ต่อเชื่อมกับอินเวอร์เตอร์ควบคุมแรงบิดและการใช้โปรแกรม Orcad/Pspice วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับที่เปลี่ยนแปลงระดับแรงดันจาก 35 - 65 โวลต์เป็นแรงดัน 311 โวลต์

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.8.1 ได้เครื่องต้นแบบวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับสำหรับกังหันลม

1.8.2 สามารถนำไปประยุกต์วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับสู่อุตสาหกรรมหรือเชิงพาณิชย์ได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทที่ 2
วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันเราสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้จากหลายแหล่งพลังงานด้วยกัน เช่น พลังงาน พลังงานความร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น พลังงานลมก็เป็นอีกแหล่งพลังงานที่น่าสนใจในการนำมาผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นพลังงานธรรมชาติที่สะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม แต่พลังงานลมนั้นเราไม่สามารถที่จะควบคุมให้คงที่ได้ จึงนำเสนอวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ต่อร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องจำลองกังหันลม เพื่อที่จะควบคุมและเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้มีค่าคงที่

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันที่ทำหน้าที่ทบระดับแรงดันให้มากพอสำหรับอินเวอร์เตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์เชื้อเพลิง กังหันลม เป็นต้น ที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่านได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับวงจรทบระดับแรงดันที่มีอัตราขยายสูงมาก กระแสตัวเหนี่ยวนำต่อเนื่อง ไร้หม้อแปลงความถี่สูง และประสิทธิภาพสูงดังนี้

Middlebrook R.D. [2] และ Maksimovic D., CUK S. [3] ได้ริเริ่มนำเสนอวงจรแปลงผันแบบบูสที่มีอัตราการขยายสูงแบบไม่มีหม้อแปลงความถี่สูง เพื่อลดความสูญเสีย

Dongyan Z., Pietkiewic., Pietkiewicz A., CUK S. [4] ได้ดัดแปลงนำวงจรบักร่วมกับวงจรพุช-พูล เพื่อทบระดับแรงดันได้สูงมากขึ้นโดยมีข้อเสียคือมีการต่อวงจรกำลังสองภาค และกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำไม่ต่อเนื่อง

Abutbul O., Gherlitz A., Berkovich Y., Ioinovici A . [5] ได้นำเสนอวงจรบูสต่อคาสเคดสองภาค ใช้อุปกรณ์สวิตช์หนึ่งตัว กระแสตัวเหนี่ยวนำต่อเนื่อง แต่มีข้อด้อยคือต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำสองตัว

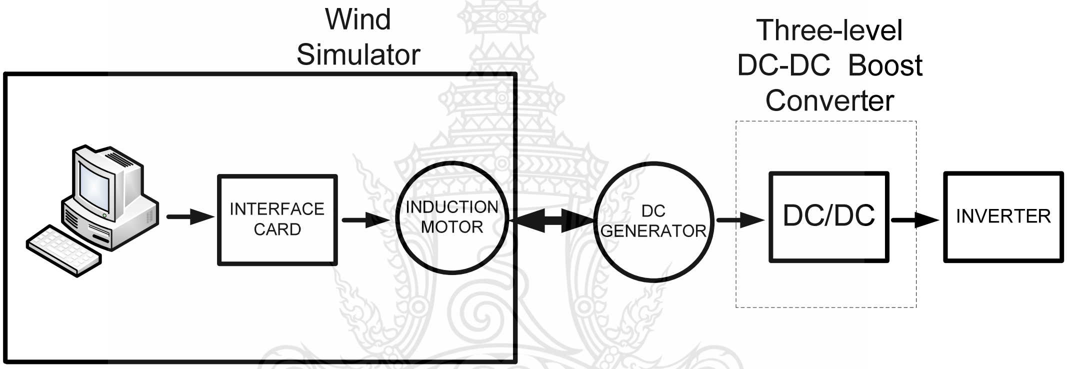
Yonetani S., KondoY., Akagi H., Fujita H . [6] และ Rodriguez J., Lai J.-S., Peng F.Z. [7] ได้นำเสนอวงจรอินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับด้วยเทคนิคไดโอดแคล้มป์(Diode clamped)สำหรับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนขนาดเล็กโดยไม่ใช้หม้อแปลง และสามารถต่อเข้าระบบโดยตรง แต่ยังมีข้อด้อยคือไม่สามารถสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุได้

Lai J.-S., Peng F.Z. [8] ได้รวบรวมและศึกษาข้อดีข้อด้อยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับเพื่อเป็นแนวทางสำหรับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน

Fan Z., Peng F.Z., Zhaoming Q. [9] ได้สร้างวงจรแปลงผันแบบบูสคอนเวอร์เตอร์สำหรับทบระดับแรงดันให้สูงพอสำหรับอินเวอร์เตอร์

Julio C.R.-C., Ramirez J.M., Dedro M.G.-V. [10] ได้นำเสนอวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์หลายระดับด้วยอุปกรณ์สวิตช์เพียงหนึ่งตัว ตัวเหนี่ยวนำหนึ่งตัว จำนวนไดโอด 2N-1 และจำนวนตัวเก็บประจุ2N-1 มีกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำต่อเนื่อง อัตราขยายแรงดันสูงแต่ผู้แต่งไม่ได้นำเสนอวงจรควบคุมแรงดันแบบวงปิดดังนั้น

ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอวงจรแปลงผันบูสคอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับที่แรงดัน 311 โวลต์ กระแสตัวเหนี่ยวนำต่อเนื่อง และมีการควบคุมแรงดันคงที่ด้วยตัวควบคุมแบบเฟสนำหน้า-ล้าหลัง (Phase Lead - Phase Lag) โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ใช้แทนเครื่องจำลองกังหันลมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 35 -65 โวลต์ ป้อนให้กับวงจรแรงดันเอาต์พุตมีการออกแบบและทดสอบทั้งในสภาวะอยู่ตัว และทรานเซี้ยนด้วยการเปลี่ยนแปลงโหลดทันทีทันใด



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากกังหันลม

2.2 วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหรือวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) [11]

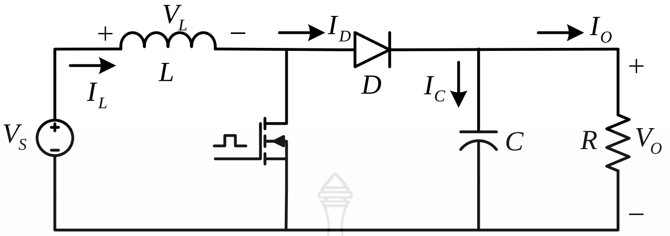
วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า คือวงจรที่เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตให้สูงกว่าแรงดันทางด้านอินพุต ที่เรียกวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ก็เพราะแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุตหรืออาจจะเรียกว่า Step up Converter ซึ่งจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆคือ ส่วนของวงจรกำลัง จะประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุต ไดโอดอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการสวิตช์ และอีกส่วนคือ วงจรควบคุมการทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต โดยมีเงื่อนไขในการทำงานของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ดังนี้

1) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละค่าจะมีค่าเท่ากันและมีค่าเป็นบวกเสมอ

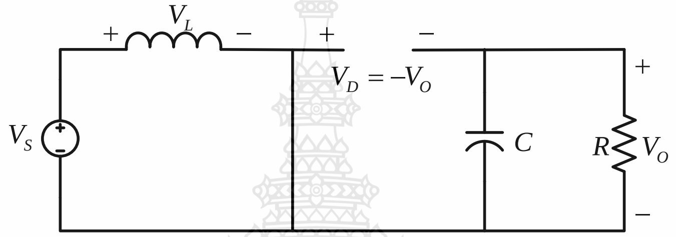
2) แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์

3) ตัวเก็บประจุต้องมีขนาดใหญ่เพื่อทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่

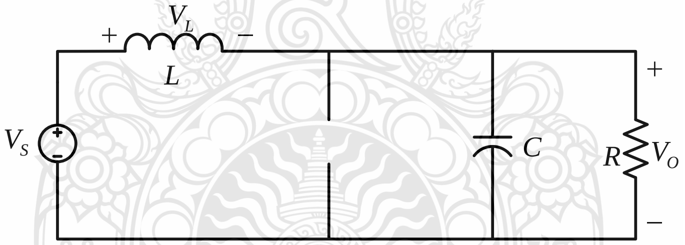
4) กำลังไฟฟ้าอินพุต เท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุต กรณีนี้ไม่คำนึงถึงการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจร



(ก)



(ข)



(ค)

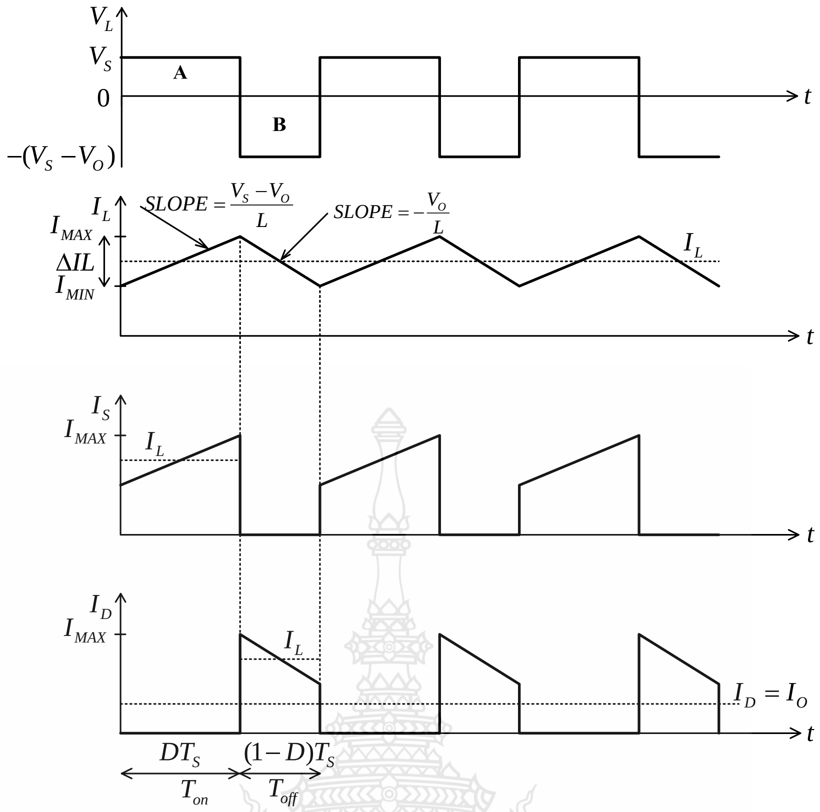
รูปที่ 2.2 ก) วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า

ข) วงจรสมมูลในช่วง T_{on}

ค) วงจรสมมูลในช่วง T_{off}

2.2.1 คุณสมบัติวงจรกรณีกระแสต่อเนื่อง

กระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) จะต่อเนื่อง เมื่อ $L > \frac{D(1-D)^2 R}{2 f_S}$ ลักษณะรูปคลื่นแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำต่อเนื่อง

ขณะช่วง T_{on} $\quad V_L = V_S$

ความชัน (Slope) ของกระแส $\quad i_L = \dfrac{\Delta I_L}{\Delta t} = \dfrac{-V_L}{L} = \dfrac{V_S}{L}$

ขณะช่วง T_{off} $\quad V_S - V_O = -(V_O - V_S)$

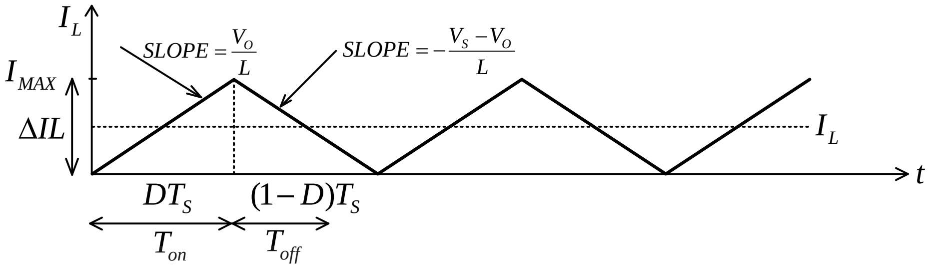
ความชัน (Slope) ของกระแส $\quad i_L = \dfrac{\Delta I_L}{\Delta t} = \dfrac{V_L}{L}$

จากรูปที่ 2.3 พื้นที่ A = พื้นที่ B

$$V_S DT_S = (V_0 - V_S)(1-D)T_S$$
$$V_S D = V_0(1-D) - V_S(1-D)$$
$$V_S = V_0(1-D)$$

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{1}{1-D} \tag{2.1}$$

2.2.2 จุดแบ่งระหว่างการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องกับไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 2.4 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเริ่มไม่ต่อเนื่อง

พิจารณาช่วง T_{on}

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{V_S DT_S}{L}$$

$$I_L = \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_S DT_S}{2L}, V_S = V_0(1-D)$$

$$I_L = \frac{V_O T_S}{2L} D(1-D) \qquad (2.2)$$

จากรูปที่ 2.4สังเกตว่า

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

จากรูปที่ 2.4

$$I_D = \frac{I_L (1-D)T_S}{T_S} = (1-D)I_L$$

$$I_L = \frac{V_O}{(1-D)R} \qquad (2.3)$$

จากสมการ (2.2)และ (2.3)

$$\frac{V_O}{(1-D)R} = \frac{V_O T_S}{2L} D(1-D)$$

$$L = \frac{D(1-D)^2 R}{2 f_S}$$

ดังนั้นจุดแบ่งระหว่างการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องกับกระแสไม่ต่อเนื่อง คือตำแหน่งที่ $L = \frac{D(1-D)^2 R}{2 f_S}$ เรียก L ค่านี้ว่า $L_{\min}$

$$L_{\min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2 f_S} \tag{2.4}$$

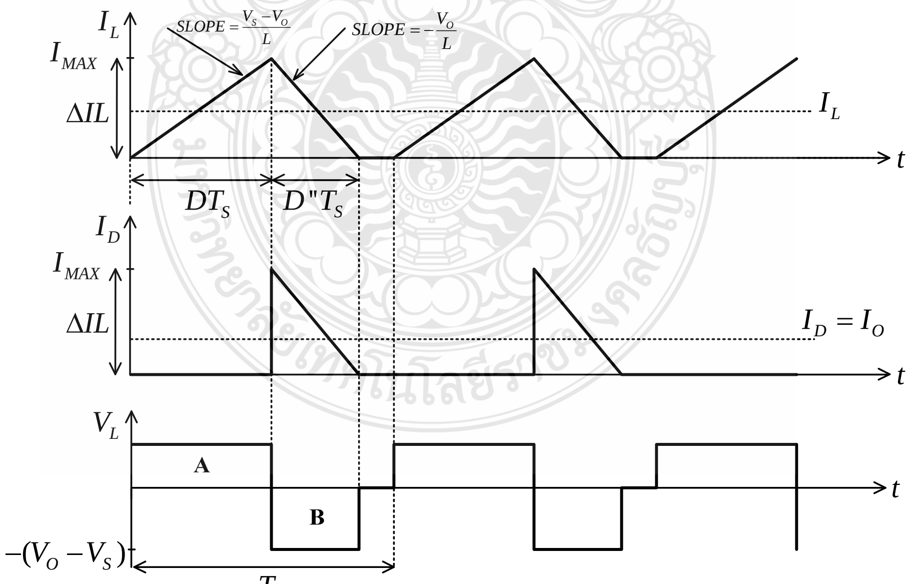
เมื่อ $L_{\min}$ คือค่าความเหนี่ยวนำต่ำสุดที่ยังคงทำให้กระแสไหลต่อเนื่อง

ถ้า $$L > \frac{D(1-D)^2 R}{2 f_S} \quad \text{เป็นกรณีกระแสต่อเนื่อง} \tag{2.5}$$

ถ้า $$L < \frac{D(1-D)^2 R}{2 f_S} \quad \text{เป็นกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง} \tag{2.6}$$

2.2.3 คุณสมบัติวงจรกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง

วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าจะทำงานเป็นแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง เมื่อ $L < \frac{D(1-D)^2 R}{2 f_S}$ มีลักษณะดังรูปที่ 2.5

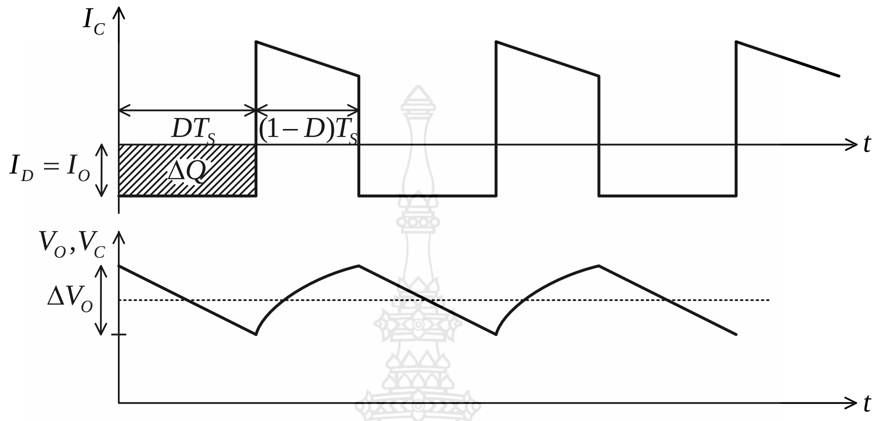


รูปที่ 2.5 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไม่ต่อเนื่อง

2.2.4 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุต (ΔV_O)

กระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุ ก็คือค่าระลอกคลื่นของกระแสที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์

$$\Delta V_O = \frac{V_O D T_S}{RCf_S} \tag{2.7}$$



รูปที่ 2.6 กระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุ และ V_O

2.2.5 การออกแบบวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า

การออกแบบวงจรทบระดับแรงดัน การออกแบบจะใช้คุณสมบัติกรณีกระแสต่อเนื่องเช่นเดียวกับวงจรบัก ซึ่งเป็นกรณีที่ $L > L_{\min}$ โดย $L_{\min}$

การหาขนาดของตัวเหนี่ยวนำ (L) หาได้โดยการพิจารณาจากรูปคลื่นกระแส i_L ขนาดของตัวเก็บประจุ (C)

พิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุจะต้องไม่ต่ำกว่าค่าแรงดัน V_O ค่าพิกัดแรงดันของอุปกรณ์ที่เป็นสวิตซ์และไดโอดต้องไม่ต่ำกว่าค่าแรงดัน V_O

พิกัดกระแสสูงสุดของอุปกรณ์ที่เป็นสวิตซ์และไดโอด ต้องไม่ต่ำกว่า $I_{\max} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2}$

พิกัดกระแสเฉลี่ยของอุปกรณ์ที่เป็นสวิตซ์ต้องไม่ต่ำกว่า DI_L

พิกัดกระแสเฉลี่ยของไดโอด ต้องไม่ต่ำกว่า I_O

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_L กับ I_O พิจารณาได้จากรูปคลื่นกระแส

$$I_D, I_L = \frac{I_O}{1-D}$$

2.3 อุปกรณ์ที่ใช้งานในวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า

2.3.1 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญ โดยมีการใช้งานกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป มีตั้งแต่ขนาดเล็กมาก ๆจนกระทั่งถึงขนาดใหญ่ ลักษณะของตัวเหนี่ยวนำจะเป็นการนำเอาลวดตัวนำมาพันเรียงกันเป็นขดลวด อาจมีจำนวนรอบไม่กี่รอบจนกระทั่งถึงพันรอบแล้วแต่ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการใช้งาน การพันขดลวดของตัวเหนี่ยวนำอาจพันบนแกนชนิดต่าง ๆ หรือเป็นแบบไม่มีแกน (แกนอากาศ) ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้นการที่จะเข้าถึงการออกแบบตัวเหนี่ยวนำจะต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.3.1.1 แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core)

เป็นวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) การเหนี่ยวนำแม่เหล็กในแกนเฟอร์ไรต์จะมีผลทำให้เกิดการเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กสูงกว่าการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนแกนอากาศมาก แกนเฟอร์ไรต์มีค่าอิ่มตัวสันแรงแม่เหล็กค่อนข้างสูง และเกิดการสูญเสียในตัวแกนเฟอร์ไรต์ต่ำที่ความถี่สูงๆ ดังนั้นตัวเหนี่ยวในการสวิตชิ่งจึงนิยมใช้แกนเฟอร์ไรต์มากที่สุด เฟอร์ไรต์ที่นำมาใช้ทำแกนตัวเหนี่ยวนำสวิตชิ่งจะมีรูปร่างที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับการใช้งานและมาตรฐานในการออกแบบแกนเฟอร์ไรต์

2.3.1.2 บ๊อบบิ้น (Bobbin)

ทำจากพลาสติกชนิดทนความร้อนสูง และไม่ติดไฟ บ๊อบบิ้นจะช่วยให้การพันขดลวดบนแกนเฟอร์ไรต์สะดวกขึ้น และป้องกันปัญหาการลัดวงจรระหว่างขดลวดและแกนเฟอร์

2.3.1.3 ลวดทองแดงอาบน้ำยา (Enamelled Copper Wire)

การพันขดลวดตัวเหนี่ยวนำสวิตชิ่งจะใช้ลวดทองแดงอาบน้ำยาพันบนแกนบ๊อบบิ้น เพื่อให้ได้จำนวนรอบตามที่คำนวณออกแบบไว้

2.3.1.4 เทปฉนวน (Insulation Tape)

เป็นตัวรองระหว่างชั้นของขดลวดในตัวเหนี่ยวนำสวิตชิ่ง เพื่อป้องกันความเสียหายของขดลวด และทำให้ขดลวดมีความแข็งแรง วัสดุที่ใช้ทำเทปฉนวนอาจเป็นพวกไมลาร์ (Mylar) หรือ โพลีเอสเตอร์ (Polyester) ที่มีความหนาอยู่ในช่วง 0.05-0.1 มิลลิเมตร

2.3.2 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าตัวเก็บประจุ มีหน้าที่เก็บพลังงานในรูปแบบประจุไฟฟ้าและทำการจ่ายแรงดันออกให้กับเอาต์พุต หรือคายประจุไฟฟ้าเมื่อมอสเฟทอยู่ในช่วงเวลา Turn On และเก็บประจุเมื่ออยู่ในช่วงเวลา Turn Off จะเลือกตัวเก็บประจุที่สามารถทนแรงดันได้เท่ากับแรงดันทางด้านเอาต์พุต หากเลือกตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะช่วยในส่วนของการลดแรงดันกระเพื่อมทางด้านเอาต์พุตให้ลดลงได้ ดูในโหมดกระแสต่อเนื่องของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าค่าของตัวตัว

เก็บประจุจะพิจารณาได้จากสมการแรงดันกระเพื่อมทางเอาต์พุต (ΔV_O) และกระแสเอาต์พุต (I_O) ที่ใช้งาน ค่าดิวตี้ไซเคิลสูงสุดที่ใช้งาน ความถี่ในการสับสวิตช์ของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า (f_s) ดังสมการที่ใช้คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่จะใช้งาน

$$C = \frac{I_{O(\max)} D_{(\max)}}{f \Delta V_O} \tag{2.8}$$

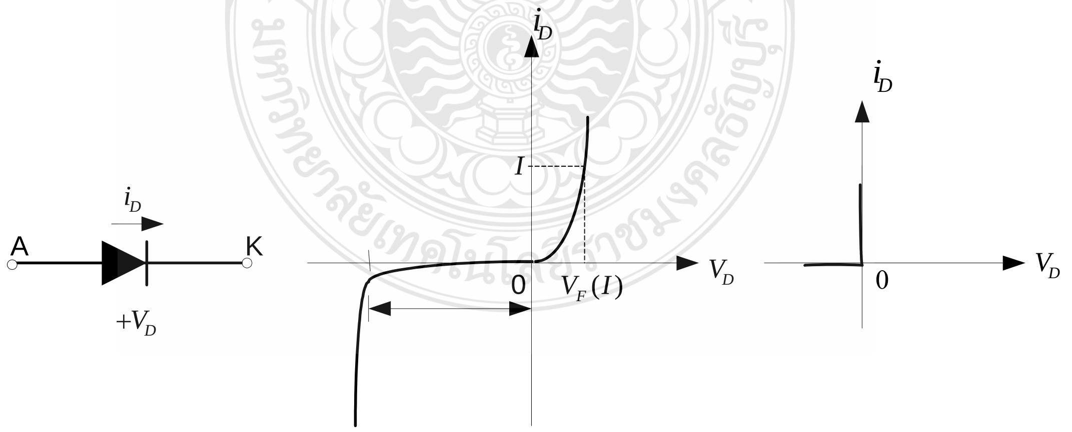
เมื่อ $I_{O(\max)}$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดทางด้านเอาต์พุต

$D_{(\max)}$ คือ ค่าดิวตี้ไซเคิลสูงสุด

2.3.3 ไดโอดกำลัง (Power Diode)

ไดโอดเริ่มนำกระแส เมื่อแรงดันตกคร่อม มีค่าเพียงเล็กน้อยประมาณ 1 โวลต์ ในทำนองเดียวกันเมื่อไดโอดถูกไบแอสย้อนกลับ กระแสจำนวนหนึ่งซึ่งน้อยมาก ก็สามารถไหลผ่านไดโอดตัวนี้ได้ และกระแสจำนวนนี้มีค่าคงที่ตลอดไป จนกระทั่งถึงค่าเบรกดาวน์ ดังนั้นการนำไปใช้งานแรงดันไบแอสย้อนกลับที่ป้อนไดโอดไม่ควรมีค่าเกินแรงดันเบรกดาวน์นี้ ซึ่งได้แสดงสัญลักษณ์และคุณลักษณะกระแสและแรงดันของไดโอดขณะไบแอสไปหน้า ดังรูปที่ 2.7 (ก) และ (ข)

เนื่องจากกระแสรั่วไหลของไดโอดขณะอยู่ในสถานะกั้นหรือไบแอสย้อนกลับมีค่าน้อยและแรงดันตกคร่อมในขณะนำกระแสหรือไบแอสไปหน้ามีค่าน้อยมากเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงเปรียบเสมือนเป็นไดโอดอุดมคติ ดังคุณลักษณะดังรูปที่ 2.7 (ค)



(ก) สัญลักษณ์ (ข)คุณลักษณะกระแสและแรงดัน (ค) คุณลักษณะในอุดมคติ

รูปที่ 2.7 ไดโอดกำลัง

การสวิตช์เพื่อนำกระแสของไดโอด เปรียบเสมือนกับเป็นการสวิตช์ทางอุดมคติได้ เนื่องจากใช้เวลาการสวิตช์น้อยมาก เมื่อเทียบกับสภาวะชั่วครู่ของวงจรกำลัง แต่ถ้าหากเป็นการสวิตช์เพื่อหยุดนำกระแสจะต้องเสียเวลาให้กับกระแสฟื้นตัวย้อนกลับ ดังรูปที่ 2.7 ดังนั้นอาจเป็นสาเหตุนำไปสู่การเกิดแรงดันเกินในวงจรที่มีตัวเหนี่ยวนำด้วย และในงานวิจัยนี้เลือกใช้ คือ

ฟาสต์-รีคัฟเวอรี่ไดโอด (Fast Recovery Diode) มีช่วงเวลาในการคืนตัวประมาณ 200-750 นาโนวินาที ซึ่งสั้นกว่าซิลิกอนไดโอดมาก มีอัตราทนแรงดันไบอัสกลับได้สูงถึง 1,000 โวลต์ ด้วยเหตุนี้ซิลิกอนไดโอดที่ใช้ในวงจรเร็กติไฟเออร์ทั่วไป จึงไม่สามารถนำมาใช้กับวงจรทบระดับแรงดันได้ เนื่องจากช่วงเวลาคืนตัวมาก กำลังสูญเสียในรูปความร้อนจะเกิดขึ้นสูงและประสิทธิภาพต่ำ

2.3.4 เพาเวอร์มอสเฟท (Metel-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor)

เพาเวอร์มอสเฟทกำลังเป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยแรงดันและต้องการกระแสอินพุตที่มีค่าต่ำมีความสามารถเป็นสวิตช์ที่มีความเร็วสูงและเวลาในการสวิตช์ที่มีความเร็วสูงและเวลาในการสวิตช์ต่ำอยู่ในระดับนาโนวินาที จึงถูกนำมาใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังมากขึ้น และมีแนวโน้มที่จะเข้ามาแทนทรานซิสเตอร์ ด้วยความแตกต่าง ทางฟิสิกส์และโครงสร้างทำให้มอสเฟทกำลัง ไม่มีปัญหาในเรื่องแรงดันพังทลายแบบที่สอง (Secondary Breakdown) เหมือนทรานซิสเตอร์ แต่อย่างไรก็ตามมอสเฟทกำลังยังมีจุดอ่อน ในเรื่องที่เกี่ยวกับไฟฟ้าสถิต การเก็บรักษา และมอสเฟทกำลังที่มีขายตามท้องตลาดยังมีอัตราทนกำลังต่ำอยู่เมื่อเทียบกับอุปกรณ์สวิตช์ประเภทอื่นๆ สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงตั้งแต่ 20 kHz ไปจนถึงประมาณ 200-400 kHz เวลาในการเปลี่ยนสถานะค่อนข้างสั้น

2.4 วงจรควบคุมวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า

การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า ทำได้โดยการควบคุมค่าอัตราดิวตี้ไซเคิลซึ่งที่ใช้ในการควบคุมแรงดันเอาต์พุต คือ

2.4.1 ควบคุมโดยให้ความถี่ในการสับสวิตช์คงที่

คือการใช้ความถี่การสับสวิตช์มีค่าคงที่และทำการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลของสวิตชิ่งเพื่อที่จะควบคุมค่าแรงดันขาออก การควบคุมชนิดนี้รู้จักกันในชื่อ พัลส์วิดมอดูเลชั่น (Pulse Width Modulation, PWM)

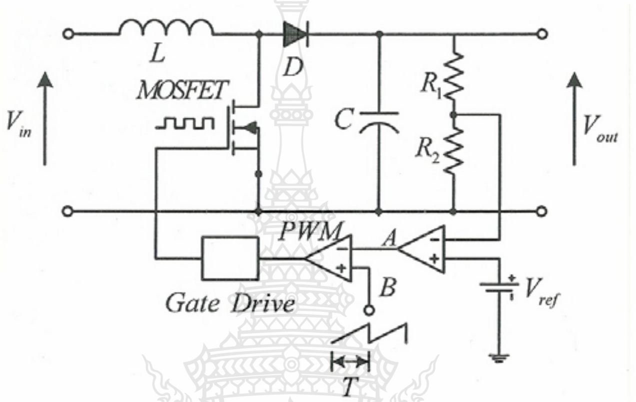
2.4.2 ควบคุมโดยให้ความถี่ในการสับสวิตช์เปลี่ยนแปลง

คือการใช้ความถี่ในการสับสวิตช์แปรเปลี่ยนไป โดยอาจให้ช่วงเวลาในการเปิดหรือปิดของสวิตชิ่งมีค่าคงที่ ซึ่งเรียกว่า พัลส์ ฟีเควนซี่มอดูเลชั่น (Pulse Frequency Modulation ; PFM) เนื่องจากวงจรแปลงผันเกือบทุกแบบจะคงค่าแรงดันเอาต์พุตได้ด้วยการควบคุมช่วงเวลานำกระแสของสวิตชิ่งวงจรควบคุมการทำงานของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า โดยทั่วไปใช้เทคนิคการพัลส์วิดมอดูเลชั่น เป็นหลักการใช้ PWM เพื่อควบคุมการนำกระแสค่าของสวิตช์ในวงจรแปลงผันสามารถทำ

ได้ใน 2 ลักษณะการทำงานของวงจรควบคุม คือ ในโหมดควบคุมวงจรแรงดันและในโหมดควบคุมกระแส

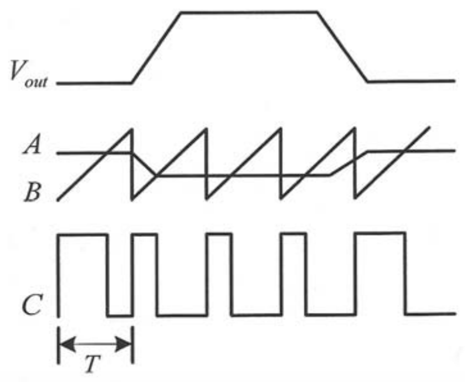
2.4.2.1 วงจรควบคุมในโหมดแรงดัน (Voltage Mode Control)

การทำงานของวงจรควบคุมในโหมดนี้จะใช้การตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันที่เอาต์พุตมาควบคุมช่วงเวลานำกระแสของสวิตชิ่งเพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตพื้นฐานของวงจรควบคุมในโหมดแรงดันดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรควบคุมวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าในโหมดควบคุมแรงดัน

วงจรควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตคงที่โดยจะอาศัยการป้อนกลับค่าแรงดันที่เอาต์พุต และการเปรียบเทียบแรงดันอ้างอิง V_{ref} ของวงจรเพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่เอาต์พุตค่าแตกต่างที่ได้จะถูกขยายความแตกต่าง (E/A) ก่อนที่จะส่งไปยังวงจร PWM โดยค่าแรงดันที่ได้จากวงจรขยายความแตกต่างที่ตำแหน่ง A จะถูกเปรียบเทียบแรงดันรูปฟันเลื่อยที่ตำแหน่ง B ของ PWM อีกครั้งหนึ่ง เอาต์พุตที่ได้จากวงจร PWM จะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยม ซึ่งมีคาบเวลาคงที่เท่ากับคาบเวลาของแรงดันรูปฟันเลื่อยและมีความกว้างของพัลส์เปลี่ยนไปตามผลการเปรียบเทียบของค่าแรงดันที่ตำแหน่ง A และ B ค่าความกว้างของพัลส์นี้จะเป็นตัวกำหนดช่วงเวลานำกระแสของสวิตช์ในวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากค่าแรงดันป้อนกลับจะถูกส่งมายังวงจรขยายความแตกต่างที่ขาอินเวอร์ติ้ง ผลต่างของแรงดันเอาต์พุตและแรงดันอ้างอิงที่จุด A จึงมีลักษณะต่างเฟสที่ 180 องศา กล่าวคือ เมื่อแรงดันเอาต์พุตมีค่ามากขึ้น แรงดันที่จุด A จะมีค่าลดลงความกว้างพัลส์ที่เอาต์พุตของวงจร PWM จึงมีค่าลดลงด้วย และช่วงเวลาการนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟทจะมีค่าลดลงถ้าแรงดันเอาต์พุตลดลงแรงดันที่จุด A จะมีค่าเพิ่มขึ้นความกว้างพัลส์ที่เอาต์พุตของวงจร PWM จึงมีค่าเพิ่มขึ้น (t_{on}) ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าสามารถคงค่าแรงดันไว้ได้



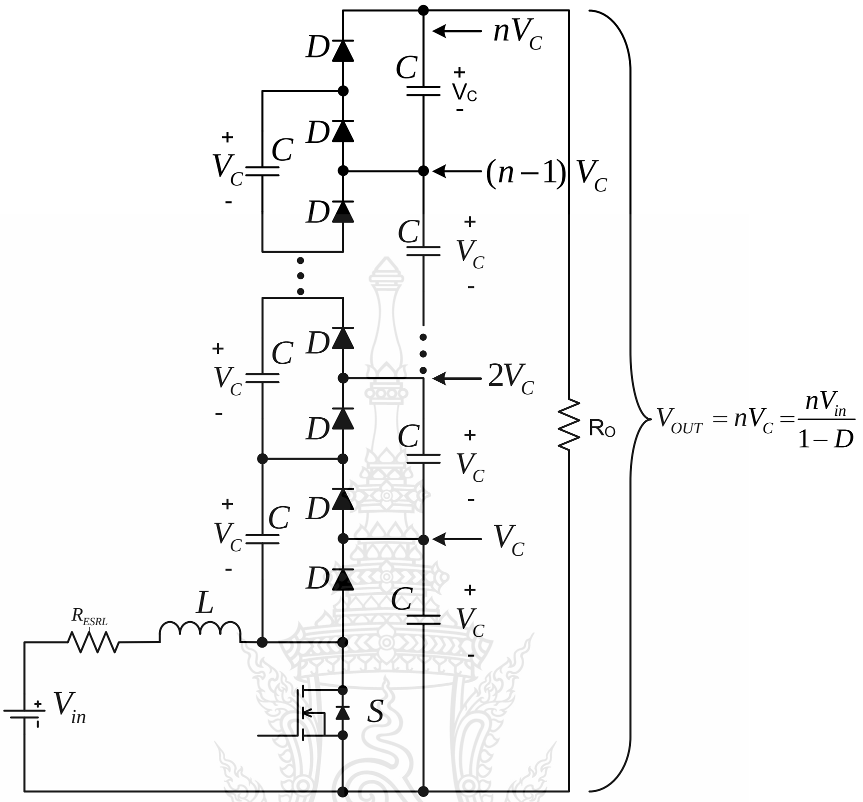
รูปที่ 2.9 รูปร่างสัญญาณที่จุดต่างๆของวงจรในรูปที่ 2.8

2.4.3 ไอซีที่ใช้ในการควบคุม

ไอซีเบอร์ UC3824 เป็นไอซีที่สามารถทำงานโหมดควบคุมแรงดันหรือโหลดกระแส โครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซีเบอร์ UC3824 อาศัยความกว้างของเอาต์พุตพัลส์ของไอซีมาเปรียบเทียบสัญญาณฟันเลื่อยที่ขา 7 กับแรงดันที่ได้จากวงจรขยายความต่าง (Error Amp) ถ้าแรงดันที่มาจากวงจรขยายความต่างมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ความกว้างของเอาต์พุตพัลส์ของไอซีลดลง ในทางกลับกันถ้าแรงดันจากวงจรขยายความต่างมีค่าลดลงจะทำให้ความกว้างเอาต์พุตของไอซีที่ขา 11 และขา 14โดยที่ขาทั้ง 2 นี้จะทำงานตรงข้ามกันเสมอโดยใช้การสลับการทำงานตามจังหวะของ Flip Flop เพื่อใช้ขับวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า

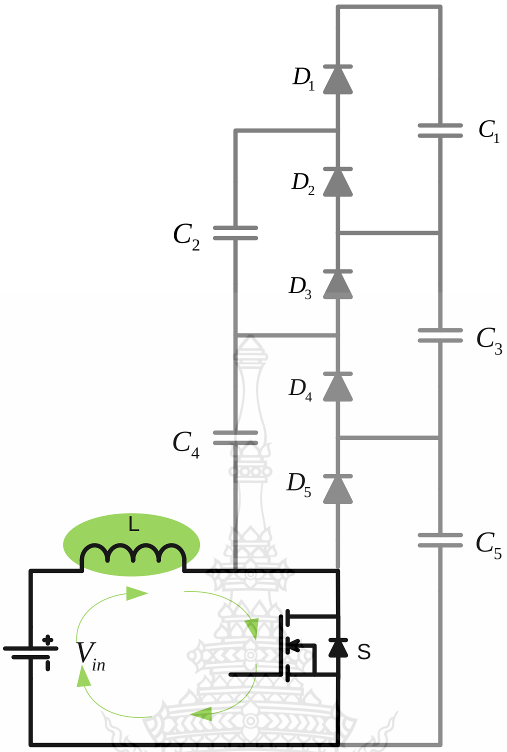
ไอซีเบอร์ UC3824 ต้องการไฟเลี้ยง 8-30 โวลต์ มีแรงดันอ้างอิงภายใน 5.1 โวลต์ และสามารถจ่ายกระแสได้ถึง 100 มิลลิแอมป์ เพื่อนำไปใช้กับวงจรภายนอกได้ โดยมีค่าความถูกต้อง ±15% ความคลาดเคลื่อนทางอุณหภูมิมีค่าน้อยกว่า 50 มิลลิโวลต์ เมื่อทำงานในช่วง 0-70 องศาเซลเซียส สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงสุด 1 MHz

2.5 วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับแบบคาสเคด (Cascade Multilevel DC - DC Boost converter) [12]



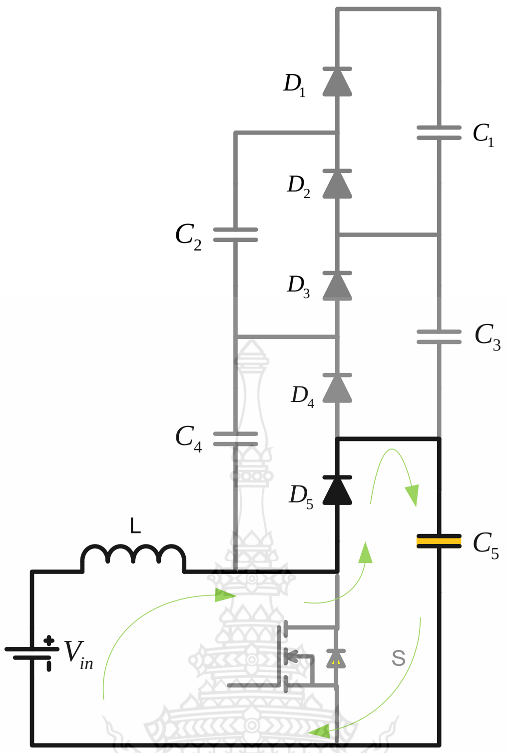
รูปที่ 2.10 วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับแบบ $2N-1$

โครงสร้าง ของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับ มีเพิ่มสวิตช์ควบคุม 1 ตัว จะมีไดโอด $2N-1$และ ตัวเก็บประจุ $2N-1$ โดย N คือ จำนวนระดับ งานวิจัยนี้เสนอใช้จำนวน 3ระดับ ฉะนั้นจำนวนตัวเก็บประจุและไดโอด จึงมีจำนวน 5 ตัว ซึ่งวงจรนี้จะมีข้อดีคือ สามารถเพิ่มจำนวนระดับชั้นของตัวเก็บประจุและไดโอดได้อีก ซึ่งการทำงานของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับนั่นจะแบ่งการทำงานออกเป็น 6 ช่วงการทำงาน ดังรูปที่ 2.11 - 2.16



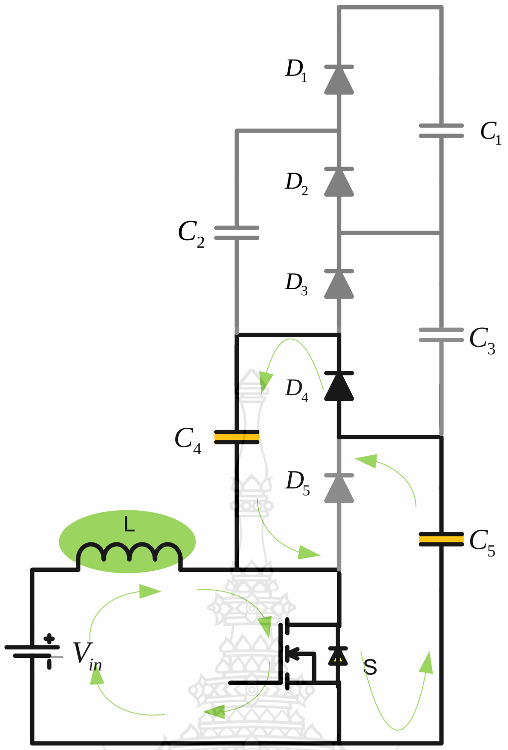
รูปที่ 2.11 การทำงานของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับช่วงที่ (ก)

การทำงานของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบหลายระดับ เมื่อพิจารณาตามลำดับการป้อนสัญญาณกระตุ้นให้กับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ จากรูปที่ 2.11 เมื่อสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งใช้ในวงจรคือเพาเวอร์มอสเฟท ได้รับสัญญาณในช่วงการนำกระแส ในครึ่งไซเคิลแรก สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์จะนำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านสวิตช์และตัวเหนี่ยวนำด้วย เมื่อพิจารณาให้สวิตช์ทำงานในอุดมคติ คือ ไม่มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับแหล่งจ่าย เมื่อเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ตัวเหนี่ยวนำก็จะเก็บสะสมพลังงานอยู่ในรูปของสนามแม่เหล็ก อยู่บริเวณโดยรอบของตัวเหนี่ยวนำหรือแกนที่ตัวเหนี่ยวนำนั้นพันอยู่



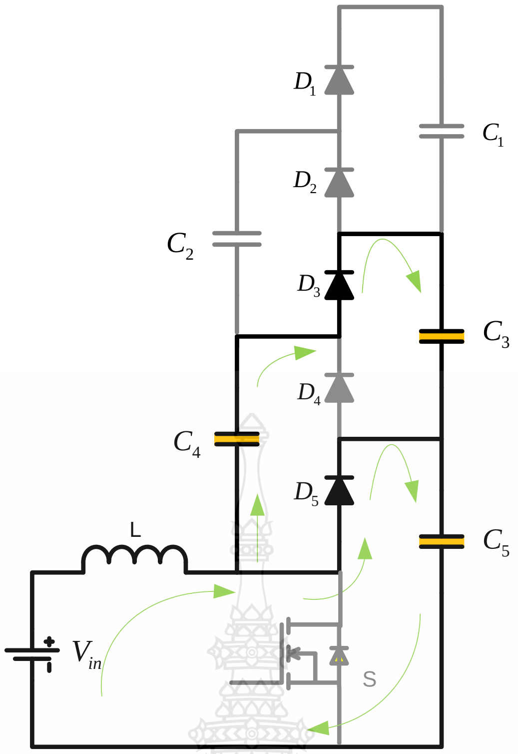
รูปที่ 2.12 การทำงานของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับช่วงที่ (ข)

เมื่อสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ได้รับสัญญาณกระตุ้นในช่วงครึ่งไซเคิลที่หยุดนำกระแส ทำให้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์หยุดนำกระแสเหมือนสวิตช์ที่เปิดวงจรออก ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ทำให้กระแสที่ไหลในวงจรลดลงทันทีทันใด จากคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำที่ไม่ยอมให้กระแสเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด เมื่อกระแสลดลงทันที พลังงานที่เก็บสะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำในรูปของสนามแม่เหล็กจะเกิดการเหนี่ยวนำออกมาในรูปของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวเหนี่ยวนำจะเสริมกับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย ทำให้มีระดับแรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น และไหลผ่านไดโอด D_5 ในลักษณะไบแอสไปหน้า อัดประจุยังตัวเก็บประจุ C_5 ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุ C_5 จึงมีค่าสูงกว่าแหล่งจ่าย



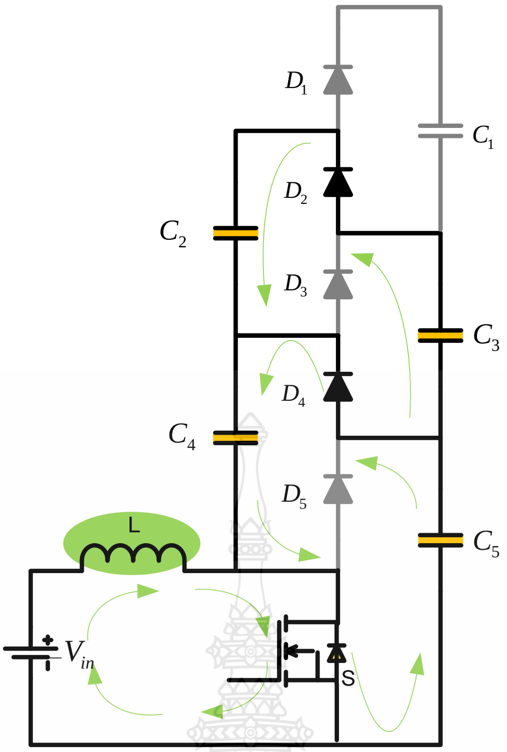
รูปที่ 2.13 การทำงานของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับช่วงที่ (ค)

เมื่อสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ได้รับสัญญาณกระตุ้นให้นำกระแสอีกครั้ง ในไซเคิลถัดไป สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์จะกลับมาอยู่ในสภาวะนำกระแส ดังในรูปที่ 2.13 จะเกิดการเก็บสะสมพลังงานในตัวเหนี่ยวนำอีกครั้ง เช่นเดียวกับที่แสดงในรูปที่ 2.11 ขณะเดียวกันแรงดันไฟฟ้าที่เก็บอยู่ในตัวเก็บประจุ C_5 จะคายประจุผ่านไดโอด D_4 ในลักษณะไบแอสไปหน้า อัดประจุยังตัวเก็บประจุ C_4 เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_4 มีค่าต่ำกว่า ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_5 มีค่าลดลง



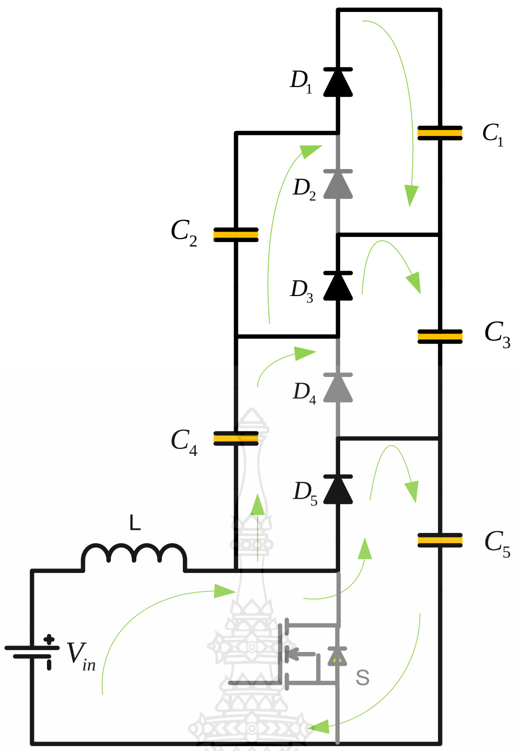
รูปที่ 2.14 การทำงานของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับช่วงที่ (ง)

เมื่อสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ได้รับสัญญาณกระตุ้นให้หยุดนำกระแส ในช่วงครึ่งไซเคิลถัดไป ดังในรูปที่ 2.14 ตัวเหนี่ยวนำจะคายพลังงานออกมาในรูปแรงดันไฟฟ้าเสริมกับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย ไหลผ่านไดโอด D_5 อัดประจุสะสมยังตัวเก็บประจุ C_5 อีกครั้ง เช่นเดียวกับในรูปที่ 2.12 ขณะเดียวกันแรงดันจากแหล่งจ่ายและแรงดันที่เกิดในตัวเหนี่ยวนำจะเสริมกับแรงดันที่ตกคร่อมอยู่ในคาปาซิเตอร์ C_4 ทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ C_4 มีค่าสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_3 และ C_5 กระแสไฟฟ้าจึงสามารถไหลผ่านไดโอด D_3 ไปอัดประจุยังตัวเก็บประจุ C_3 ได้



รูปที่ 2.15 การทำงานของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับช่วงที่ (ฉ)

เมื่อสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กลับมาทำงานในช่วงนำกระแส ดังในรูปที่ 2.15 จะเกิดการสะสมพลังงานในตัวเหนี่ยวนำและเกิดการถ่ายเทประจุจากตัวเก็บประจุ C_5 ไปยังตัวเก็บประจุ C_4 เช่นเดียวกับรูปที่ 2.13 ขณะเดียวกันแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างตัวเก็บประจุ C_3 และ C_5 จะสามารถไหลผ่านไดโอด D_2 ไปอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_2 ได้ เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่าง C_3 และ C_5 มีค่าสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอยู่ที่ตัวเก็บประจุ C_4 ทำให้ตัวเก็บประจุ C_2 มีประจุไฟฟ้าสะสมอยู่



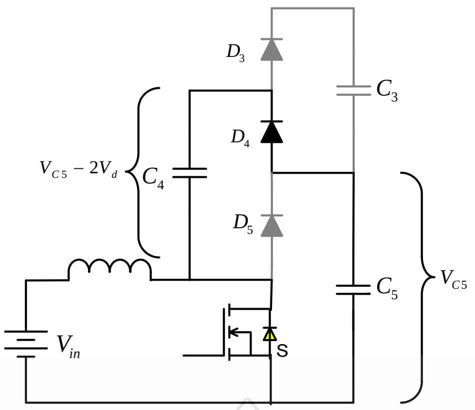
รูปที่ 2.16 การทำงานของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับช่วงที่ (ซ)

เมื่อสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์หยุดนำกระแสอีกครั้ง ดังในรูปที่ 2.16 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำและแหล่งจ่าย จะอัดประจุยังตัวเก็บประจุ C_5 ค่าแรงดันที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำรวมกับแหล่งจ่าย จะเสริมกับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_4 เกิดการถ่ายเทประจุไปยังตัวเก็บประจุ C_3 ขณะเดียวกันแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างตัวเก็บประจุ C_4 และแรงดันที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำกับแหล่งจ่าย จะเสริมให้ศักย์ไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ C_2 มีค่าสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม C_1, C_3 และ C_5 ทำให้ประจุสามารถไหลผ่านไดโอด D_1 ในลักษณะไบแอสไปหน้า อัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_1 เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 ขึ้น

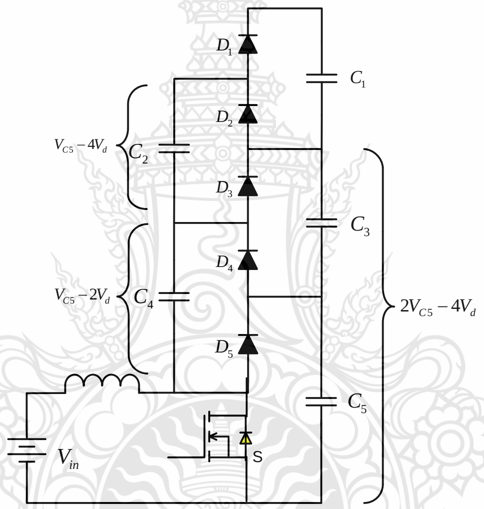
ดังนั้นเมื่อสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ถูกกระตุ้นให้ทำงานแบบต่อเนื่อง แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าคงที่ สามารถนำแรงดันที่ได้จากการยกระดับแรงดันสามระดับ ที่ตกคร่อม C_1, C_3 และ C_5 ไปใช้ได้

2.6 การวิเคราะห์แรงดันตกคร่อมที่สวิตช์และไดโอด

การใช้งานจริงแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์และไดโอดจะต้องนำมาพิจารณา เนื่องจากจะมีการเก็บประจุที่แรงดันในตัวเก็บประจุล่างสุด แรงดันที่ตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟท และไดโอดประมาณ 2 โวลต์ ในพลังงานที่ต่ำมากขนาดเล็ก ซึ่งประมาณปานกลาง และใช้กับไฟแรงสูงหลายร้อยโวลต์ แต่ถ้าเป็นแรงต่ำจะต้องนำมาพิจารณา แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมในสวิตช์และไดโอดจะเท่ากับ V_d



รูปที่ 2.17 ขณะ C_4 ชาร์จจะมีแรงดันตกคร่อมที่ไดโอดและสวิตช์



รูปที่ 2.18 ขณะ C_2 ชาร์จจะมีแรงดันตกคร่อมที่ไดโอดและสวิตช์

จากรูปที่ 2.17 และ2.18 สามารถเขียนสมการที่ผ่าน C_4 ได้ดังนี้

$$V_{C4} = V_{C5} - V_{switch} - V_{Diode}$$
$$V_{C4} = V_{C5} - 2V_d$$

จะสังเกตว่า

$$V_{C3} = V_{C5} - 4V_d \tag{2.9}$$

จะเห็นว่ากระแสที่อัดประจุ อยู่ใน C_3 จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ D_5 และ C_3 อยู่ในสภาวะนำกระแส กระแสที่ C_3 มาจาก ตัวเหนี่ยวนำและแรงดันอินพุท ในรูปที่ 2.18 จะเห็นว่าแรงดันที่ตก

คร่อมระหว่าง C_5 และ C_3 จะเป็นแรงดันที่คร่อมระหว่าง C_4 และ C_2 กับแรงดันที่ตกในไดโอด 2 ตัว แรงดันที่ตกอยู่ในวงจร ขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นของวงจรที่เพิ่มขึ้นหลังจาก 2 ชั้นขึ้นไป และแรงดันที่อัดประจุคาปาซิเตอร์ หลังจาก 2 ชั้นขึ้นไป จะมีค่า $V_{C5} - 4V_d$

2.7 หลักการของพลังงานลม [13,14]

พลังงานลม E_{wind} เป็นพลังงานจลน์ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ ดังนั้นอากาศที่มีมวล m ถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v จะก่อให้เกิดพลังงานจลน์

E_{wind} คือพลังงานจลน์

m คือมวล

v คือความเร็ว

ρ คือความหนาแน่นของอากาศ

A คือพื้นที่หน้าตัด

C_p คือค่าสัมประสิทธิ์กำลัง

C_t คือค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด

λ คืออัตราส่วนความเร็วรอบต่อความเร็วลม

W_w คือพลังงานที่กังหันลมสามารถสกัด

$$E_{wind} = \frac{1}{2}mv^2 \tag{2.10}$$

ถ้าลมเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดใดๆ (A) เราสามารถเขียนอัตราการไหลของอากาศเชิงมวลต่อเวลาดังนี้ว่า

$$m = \rho A v \tag{2.11}$$

แทนสมการ (2.10)ใน (2.11) จะได้สมการของพลังงานจลน์ต่อหน่วยเวลา ซึ่งก็คือสมการของกำลังงานลม นั้นเอง

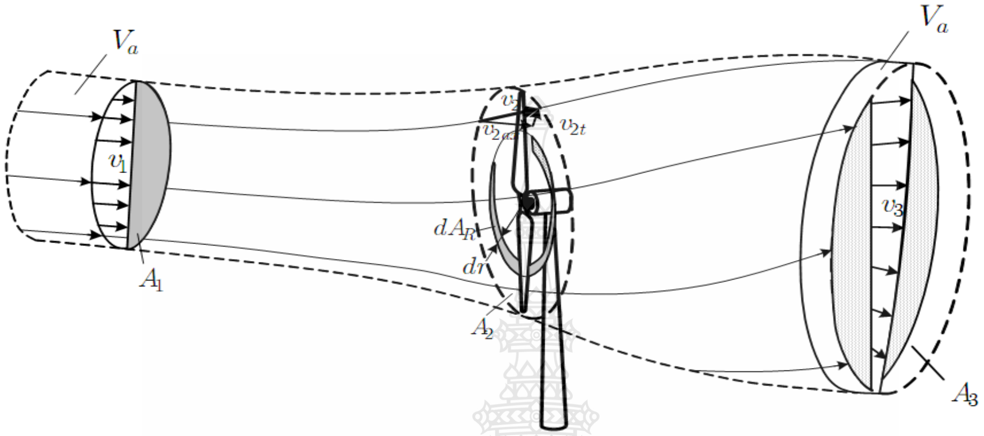
$$P_{wind} = \frac{1}{2}\rho A v^3 \tag{2.12}$$

โดย ρ คือความหนาแน่นของอากาศ (≈ 1.25 kg/m^3 ที่อุณหภูมิ $20^\circ C$)

จากรูปที่ 2.19 พลังงานลมที่สกัดได้จากปริมาตรของอากาศ V_a ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A_1 และมีความเร็วลม v_1 เมื่อเคลื่อนที่ผ่านกังหันลมทำให้ความเร็วลมถูกเปลี่ยนเป็น v_3 ซึ่งเห็นได้ว่า

ขนาดพื้นที่หน้าตัด A_3 ถูกขยายขึ้นเมื่อ V_a เคลื่อนที่ผ่านกังหัน สามารถเขียนสมการพลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้ดังนี้

$$W_w = V_a \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_3^2) \tag{2.13}$$



รูปที่ 2.19 ปริมาตรการไหลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม

จะได้สมการของพลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดต่อหน่วยเวลา

$$P_{turb} = V_a \frac{dW_w}{dt} = d\frac{V_a \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_3^2)}{dt} \tag{2.14}$$

ปริมาตรการไหลของอากาศในพื้นที่หน้าตัดของกังหันลม

$$\frac{dV_a}{dt} = A_{turb} v_2 \tag{2.15}$$

ฉะนั้นจะได้

$$P_{turb} = A_{turb} \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_3^2) v_2 \tag{2.16}$$

ปริมาณกำลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้ ขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่หน้าตัดของกังหันลม A_{turb} ความเร็วลม และลักษณะของใบของกังหันลม ตามทฤษฎีของเบทซ์ (Betz) กำลังงานสูงสุดที่กังหันลมสกัด ได้คือ

$$P_{turb}^{\max} = \frac{16}{27} A_{turb} \frac{\rho}{2} v_1^3 \tag{2.17}$$

โดยมีความสัมพันธ์ความเร็วลม

$$v_2 = \frac{3}{2} v_1 \quad \text{และ} \quad v_3 = \frac{1}{3} v_1 \tag{2.18}$$

C_p เป็นค่าสัมประสิทธิ์กำลังซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงสัดส่วนของกำลังงานที่กังหันลมสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยที่กราฟคุณลักษณะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของใบพัด

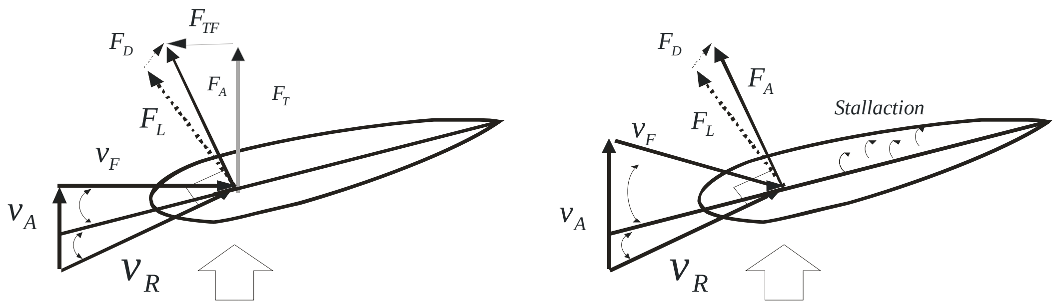
$$C_p = \frac{P_{turb}}{P_{Wind}} \tag{2.19}$$

จากสมการที่ 2.16 ซึ่งจะได้กำลังงานของลมที่ผ่านกังหัน แต่กำลังงานที่กังหันลมสกัดได้จริงนั้นจะแปรผันตาม ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง C_p ด้วย เพราะฉะนั้นสมมุติให้กังหันมีพื้นที่หน้าตัดที่รับลมเป็นวงกลม สมการกำลังอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Power, P_a) จะเป็นดังนี้

$$P_a = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v^3 C_p \tag{2.20}$$

2.8 ช่วงการทำงานของกังหันลม

ช่วงการทำงานของกังหันลม ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดว่า กังหันลมจะเริ่มและหยุดทำงานเมื่อใดก็คือพลังงานที่กังหันได้รับจากลมในขณะนั้นนั่นเอง

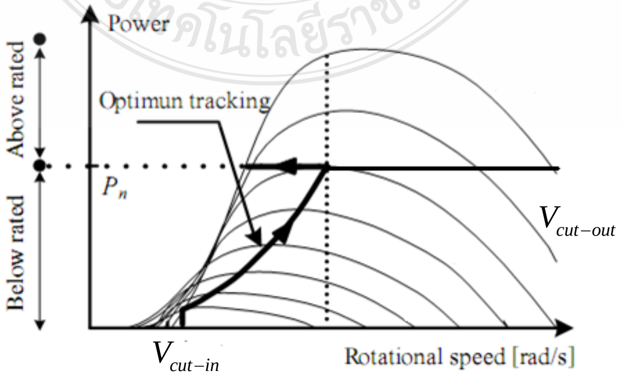


ก) ข)

รูปที่ 2.20 ก) กังหันทำงานตามปกติ
ข) กังหันเกิดปรากฏการณ์สตอล

ปรากฏการณ์สตอล[13,14] เป็นปรากฏการณ์ทางอากาศพลศาสตร์อย่างหนึ่ง ที่เกิดขึ้นกับวัตถุที่วางอยู่ในทางไหลของอากาศ เช่น ใบพัดกังหัน โดยจะทำให้อากาศที่กำลังไหลผ่านวัตถุทั้งด้านบนและด้านล่างนั้น เกิดการแยกตัวออกจากกัน ส่งผลให้แรงยกลดลง ถ้าปีกเครื่องบินเกิดการสตอล เครื่องบินจะตก แต่สำหรับใบพัดกังหันนั้น สามารถนำปรากฏการณ์นี้มาใช้ประโยชน์ในการจำกัดพลังงานได้ ซึ่งพบว่าปรากฏการณ์สตอลนี้ จะเกิดขึ้นเมื่อมุมกระทบ มีขนาดเพิ่มขึ้นจนถึงค่า ๆ หนึ่ง

โดยปกติใบกังหันลมจะยังไม่เริ่มรับลมจนกว่าพลังงานที่ได้รับจะมีค่ามากเพียงพอและจะหยุดรับพลังงานที่ได้รับมีค่ามากเกินไป อันเนื่องมาจากพลังงานแปรผันตามความเร็วลมที่กระทำต่อใบกังหันเมื่อลมมีความเร็วอยู่ในช่วงที่เรียกว่าความเร็วลมต่ำกว่าพิกัดซึ่งกำลังที่ผลิตได้จะแปรผันกับความเร็วลมกำลังสาม แต่เมื่อลมมีความเร็วอยู่ในช่วงที่ $V_{cut-out}$ จะเรียกช่วงนี้ว่าความเร็วลมสูงกว่าพิกัดซึ่งกำลังที่ผลิตได้จะต้องถูกจำกัดให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าพิกัดกำลังโดยใช้วิธีจำกัดพลังงานทางอากาศพลศาสตร์ แบบใดแบบหนึ่ง ระหว่างแบบควบคุมให้เกิดปรากฏการณ์การสตอล กับวิธีการปรับมุมพิช สำหรับงานวิจัยนี้จะสนใจเฉพาะกังหันแบบปรับความเร็วได้ ซึ่งใช้วิธีจำกัดพลังงานแบบสตอล



รูปที่ 2.21 การทำงานของกังหันลม

จากรูปที่ 2.21 จะเห็นได้ว่าในช่วงที่ความเร็วลมมีค่าน้อยกว่า V_{cut-in} จะทำให้กังหันไม่ทำงาน เช่นเดียวกันกับ ช่วงที่ ความเร็วลมมีค่าสูงเกินไปซึ่งอาจทำให้กังหันเกิดความเสียหายได้ กังหันจะถูกสั่งให้หยุดทำงานทันที กังหันจะทำงานเมื่อความเร็วลมมีค่ามากกว่า V_{cut-in} ถ้าลมมีความเร็วอยู่ในช่วง Optimum Tracking โดยที่พลังงานที่สกัดได้จะอยู่ ที่ 100 % คือค่าที่คำนวณไว้แล้วว่าเมื่อลมมีความเร็วเท่ากับค่า ดังกล่าว กำลังที่สกัดได้จะมีค่าเท่ากับพิกัดกำลังพอดี

โดยกังหันที่มีขนาดและลักษณะของใบพัดต่างกันก็จะมีกราฟคุณลักษณะต่างกันด้วย ดังนั้นจึงแสดงสมการกำลังที่กังหันสกัดได้จากลมดังสมการที่ 2.21

$$P_a = \frac{p}{2}\pi R^2 v^3 C_P(v,\omega,\beta) \qquad (2.21)$$

ในที่นี้พิจารณาเฉพาะกังหันลมที่ไม่มีการปรับมุมพิช ดังนั้นที่มุมพิชคงที่ค่าหนึ่ง C_P จะขึ้นอยู่กับ v และ ω เท่านั้น ถ้ากำหนดให้ λ คือ อัตราส่วนความเร็วรอบต่อความเร็วลม (Tip Speed Ratio) ซึ่งนิยามตามสมการที่ 2.22

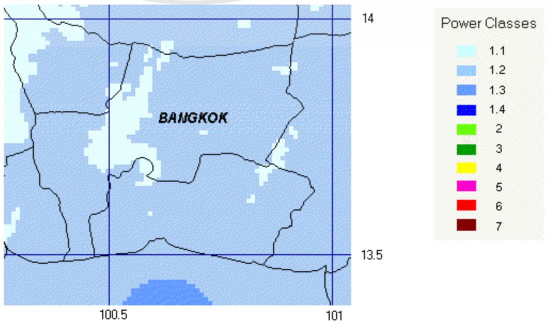
$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \qquad (2.22)$$

จะได้

$$P_a = \frac{p}{2}\pi R^2 v^3 C_P(\lambda) \qquad (2.23)$$

2.9 สำรวจและเก็บข้อมูลลม

จากการศึกษาจากแผนที่ศักยภาพพลังงานลมในเขตกรุงเทพ จะทราบถึงปริมาณพลังงานลมบริเวณกรุงเทพดังตารางข้อมูลศักยภาพพลังงานลม กรุงเทพ รวมช่วงลมสงบ-เฉลี่ยรายปี**[15]** เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับการเก็บข้อมูลความเร็วลมที่วัดได้บริเวณตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ ชั้นที่ 11 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



รูปที่ 2.22 แผนที่ศักยภาพพลังงานลม กรุงเทพ รวมช่วงลมสงบ-เฉลี่ยรายปี

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลศักยภาพพลังงานลม กรุงเทพ รวมช่วงลมสงบ-เฉลี่ยรายปี

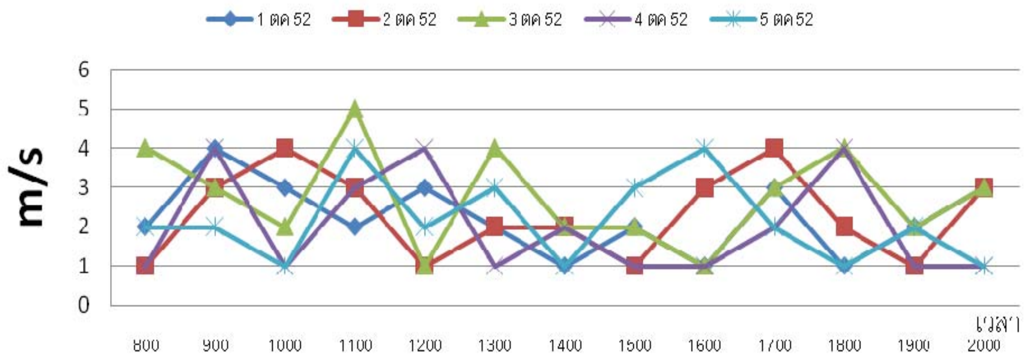
THAILAND WIND POWER CLASSES

Elevation		1.1	1.2	1.3	1.4	2	3	4	5	6	7	
10 m	m/s	0	2.8	3.6	4.0	4.4	5.1	5.6	6.0	6.4	7.0	9.4
	W/m^2	0	25	50	75	100	150	200	250	300	400	1,000
30 m	m/s	0	3.3	4.1	4.7	5.2	5.9	6.5	7.0	7.4	8.2	11.0
	W/m^2	0	40	80	120	160	240	320	400	480	640	1,600
50 m	m/s	0	3.6	4.4	5.1	5.6	6.4	7.0	7.5	8.0	8.8	11.9
	W/m^2	0	50	100	150	200	300	400	500	600	800	2,000

ตารางที่ 2.2 สถานที่เก็บข้อมูลความเร็วลม

สถานที่	ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ระดับความสูง	ชั้นที่ 11 ประมาณ 30 เมตร
ช่วงเวลา	09.00 - 19.00 น.
ระหว่างวันที่	5 ตุลาคม 2552 – 9 ตุลาคม 2552
ความถี่การเก็บข้อมูล	1 ชั่วโมง ต่อ ครั้ง

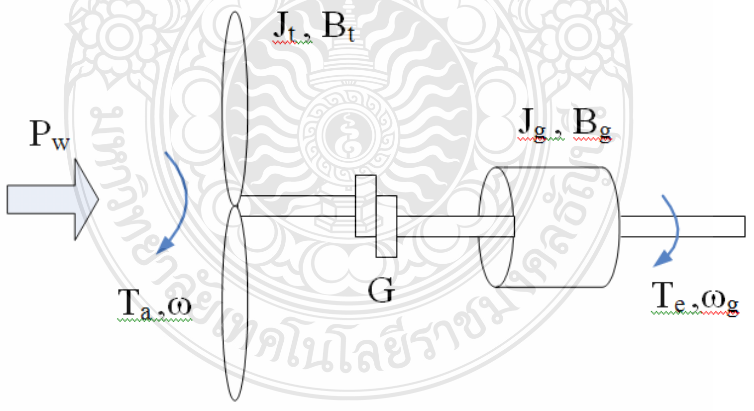
รูปที่ 2.23 ติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลมที่ชั้น11 ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมงคลกรุงเทพ



รูปที่ 2.24 ผลการวัดความเร็วลมที่วัดได้จริง ณ.ชั้น11 ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

จากการเก็บข้อมูลการวัดความเร็วลมจำนวน 5 วัน ทราบว่าความเร็วลมแต่ละวันมีค่าไม่สม่ำเสมอเมื่อคิดเป็นค่าเฉลี่ยประมาณ 3 เมตรต่อวินาที (3m/s) เมื่อนำข้อมูลที่ได้นี้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลศักยภาพพลังงานลม กรุงเทพ รวมช่วงลมสงบ-เฉลี่ยรายปี ณ ที่ระดับความสูง 30 เมตร จะทราบว่า ความเร็วลมมีค่าที่ใกล้เคียงกันคือที่ ประมาณ 3 เมตรต่อวินาที (3m/s) เช่นกัน

2.10 แบบจำลองกังหันลม (Wind Turbine Rotor Model) [13,14]



รูปที่ 2.25 แบบจำลองกังหันลม

สมมุติให้อัตราทดเกียร์ G = 1 เพราะฉะนั้น $\omega_g = \omega$ สามารถเขียนสมการไดนามิกของกังหันได้เป็นโดยที่ $J = J_t + J_g$ และ $B = B_t + B_g$ แปลงให้อยู่ในรูปแบบพีชคณิต

$$T_a - T_e = (JD + B)\omega \qquad (2.24)$$

โดยตัวดำเนินการ $D = \dfrac{d}{dt}$ แรงบิดอากาศพลศาสตร์ T_a เป็นค่าที่ได้รับผลส่วนหนึ่งจาก ω ดังต่อไปนี้

$$P_a = \frac{p}{2}\pi R^2 v^3 C_p(\lambda) \qquad (2.25)$$

แทนค่าใน $T_a = \dfrac{P_a}{\omega}$ จะได้ว่า

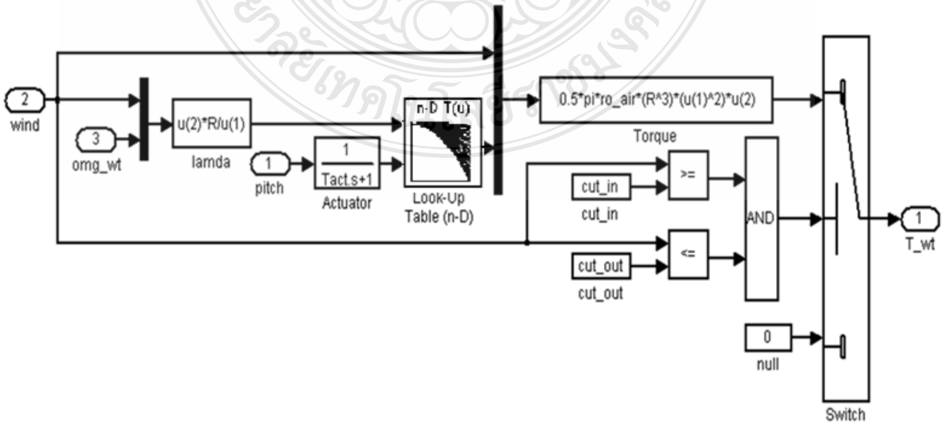
$$T_a = \frac{p}{2}\pi R^2 \frac{v^3}{\omega} C_p(\lambda) \qquad (2.26)$$

แทนค่าใน $\omega = \dfrac{\lambda v}{R}$ จะได้

$$T_a = \frac{p}{2}\pi R^3 v^2 \frac{1}{\lambda} C_p(\lambda) = \frac{p}{2}\pi R^3 v^2 C_T(\lambda) = \frac{p}{2}\pi R^3 v^2 C_T(v, \omega) \qquad (2.27)$$

โดยที่ค่าของ $C_T(\lambda) = \dfrac{C_p(\lambda)}{\lambda}$ เรียกว่าสัมประสิทธิ์แรงบิด

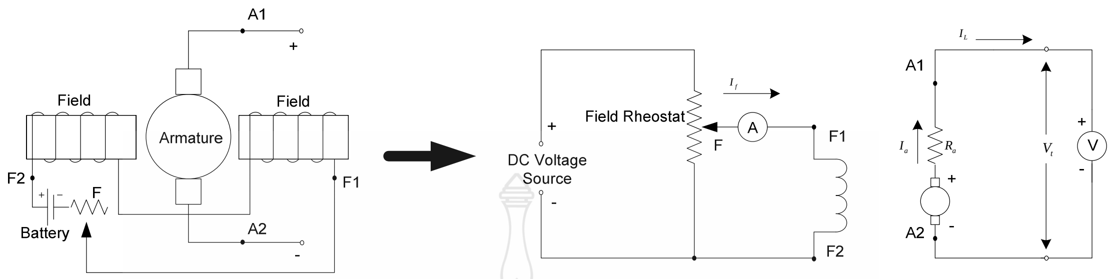
กังหันลมมีอินพุต (Input) คือแรงบิดของกังหันลม มีเอาต์พุตคือ ความเร็วรอบถือว่าลมที่กระทำต่อกังหันคือสัญญาณรบกวน (Disturbance) จึงเขียนบล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของกังหันได้



รูปที่ 2.26 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของกังหันลมนำ Matlab/Simulink ใช้ในการคำนวณ

2.11 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแยกกระตุ้น เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้รับการกระตุ้นให้เกิดสนามแม่เหล็กจากแหล่งจ่ายภายนอก



รูปที่ 2.27 วงจรภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแยกกระตุ้น

วงจรภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแยกกระตุ้นจะแสดงในรูปที่ 2.27 ซึ่งประกอบด้วยวงจรฟิลด์และวงจรอาร์เมเจอร์แยกจากกัน และเขียนวงจรเทียบเคียงได้ดังรูปที่ 2.27 สำหรับ F ในรูปหมายถึง ฟิลด์รีโอสตัท (Field Rheostat) ซึ่งเป็นความต้านทานที่ปรับค่าได้ เพื่อจำกัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดฟิลด์ ส่วนแบตเตอรี่หรือแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าเพื่อกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดฟิลด์

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

การออกแบบวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับสำหรับกังหันลมในงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนต่างดังนี้

1) วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับ (เครื่องทดสอบ)

2) เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE เพื่อเป็นต้นกำลังแทนกังหันลมจริง

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับสำหรับกังหันลม นั้นจะประกอบไปด้วยขั้นตอนการวางแผนการดำเนินงานดังนี้

3.1.1 วางแผนการดำเนินงาน

การวางแผนการดำเนินการ เริ่มต้นจากการศึกษารวบรวมข้อมูลวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า จากงานวิจัยต่างๆ ดังที่กล่าวแล้วในบทที่ 2 เพื่อเป็นแนวทางการออกแบบวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า เมื่อได้รูปแบบหรือโครงสร้างที่ต้องการแล้วจึงทำการจำลองการทำงานต่อไป

3.1.2 การจำลองการทำงานวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าและจำลองกังหันลม

วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าจะถูกจำลองการทำงาน ด้วยโปรแกรม Orcad/Pspice เพื่อหาคุณลักษณะต่างๆ เช่น ค่าตัวเหนี่ยวนำ ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า ไดโอด เมื่อได้คุณลักษณะตามที่ต้องการแล้ว จึงสร้างวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับตามที่จำลอง แล้วจึงนำวงจรที่สร้างเสร็จแล้ว ไปทำการวัดการทำงานจริง เพื่อเปรียบเทียบที่ได้จากการจำลอง และในส่วนเครื่องจำลองกังหันลมจะถูกจำลองการทำงาน ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อหาคุณลักษณะต่างๆ เช่น ขนาดใบ ความเร็วลม ความแปรปรวนของลม เมื่อได้คุณลักษณะตามที่ต้องการแล้ว จึงสร้างเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE เสร็จแล้วส่งกำลังไปขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อเป็นอินพุตให้วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าต่อไป

3.1.3 การวัดคุณลักษณะของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบ

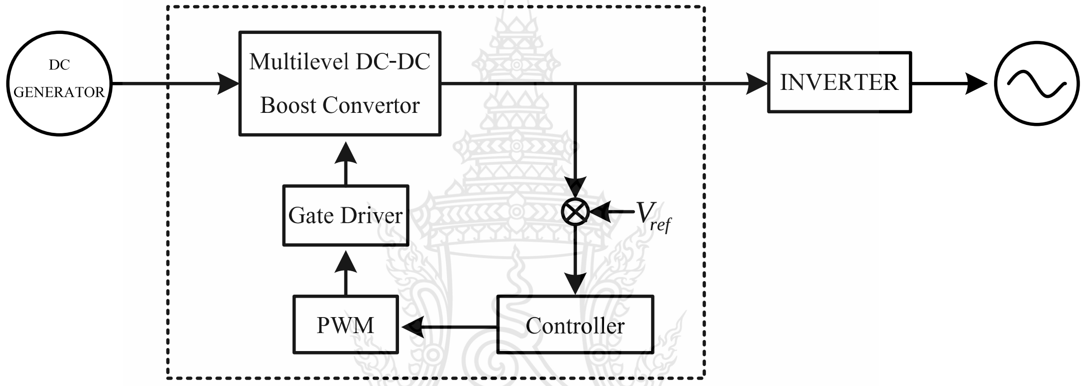
จากการจำลองการทำงานของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบจนได้คุณลักษณะตามต้องการแล้ววงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าจะถูกสร้างขึ้นโดยมีขนาดเดียวกันกับวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง วงจรที่ถูกสร้างขึ้นนี้จะถูกไปวัดหาคุณลักษณะต่างๆ เช่น ระดับแรงดันที่เปลี่ยนแปลงแต่ละระดับ

3.1.4 การวิเคราะห์ผล

ทำการเปรียบเทียบผลการวัดจริงของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบ กับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Orcad/Pspice แล้วนำวงจรที่สร้างขึ้นไปต่อร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ส่งกำลังจากเครื่องจำลองกังหันลม แล้ววิเคราะห์ผล ดังจะได้กล่าวในบทที่ 4 จากนั้นจะสรุปผล ดังจะกล่าวในบทที่ 5

3.2 โครงสร้างของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับ

โครงสร้างโดยรวมของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับสำหรับกังหันลมจะประกอบไปด้วยสองส่วนหลัก คือ ชุดวงจรกำลังและชุดวงจรควบคุม



รูปที่ 3.1 โครงสร้างวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับ

จากรูปที่ 3.1 จะแสดงให้ เห็นลักษณะโครงสร้างการทำงานของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับโดยจะมีขบวนการทำงานดังนี้

3.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง จะเป็นต้นกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอินพุตให้วงทบระดับแรงดันไฟฟ้า โดยประมาณ 50 โวลต์ โดยอาศัยการส่งกำลังจากมอเตอร์เหนี่ยวนำในการขับ

3.2.2 วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับรับอินพุตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าให้เพิ่มสูงขึ้นในแต่ละระดับ

3.2.3 วงจรขับนำเกตและควบคุม เป็นชุดควบคุมการสวิตช์ของมอสเฟท ซึ่งจะใช้ไอซีเบอร์ UC3824 ในการกำเนิดสัญญาณพัลส์และควบคุมการทำงาน

3.2.4 วงจรป้อนกลับแรงดันเอาต์พุต จะใช้ในการรักษาระดับแรงดันให้คงที่ ซึ่งจะทำงานควบคู่ไปกับชุดควบคุม โดยอาศัยแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง เพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีลักษณะคงที่

3.2.5 อินเวอร์เตอร์ 220 โวลต์ 50 Hz ที่จะต่อใช้งาน

3.3 วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับแบบคาสเคด [12]

3.3.1 การออกแบบวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับแบบคาสเคด

ในงานวิจัยนี้ใช้วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าเบื้องต้นมายกระดับแรงดันไฟฟ้าเป็นขั้นๆ ให้สูงขึ้นตามที่ได้จำลองจากโปรแกรม Orcad/Pspice เมื่อแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุต มีแรงดันกระเพื่อมเล็กน้อยที่ความถี่สวิตช์สามารถลดได้ด้วยการเลือกค่าของตัวเก็บประจุที่ถูกต้อง ซึ่งขั้นตอนการออกแบบสามารถใช้วงจรในรูปที่ 3.2 วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับ ก) และ ข) ซึ่งแสดงสถานการณ์สวิตช์ได้ดังรูปที่ 3.2 ค) แสดงแรงดันกระเพื่อมที่ตัวเก็บประจุ V_1 ที่ตกคร่อม C_1 ค่าดิวตี้ไซเคิลที่ 0.5 เริ่มต้นด้วยสวิตช์เปิดวงจร C_2 จะถ่ายโอนพลังงานไปที่ตัวเก็บประจุ C_3 และ C_1 ในสภาวะประจุที่ครึ่งไซเคิลหลัง ตัวเก็บประจุ C_1 จะมีแรงดันสูงกว่า C_2 เมื่อตัวเก็บประจุ C_1 ประจุตัวเก็บประจุ C_2 ผ่าน d_2 จะได้แรงดันไฟฟ้าเดียวกันคือ

$$V_{1ac} = V_{2ac} = \frac{V_{1bc}C_1 + V_{2bc}C_2}{C_1 + C_2} \tag{3.1}$$

เมื่อ แรงดัน V_{1ac} คือแรงดัน V_1 หลังจากสวิตช์ปิดวงจร

แรงดัน V_{1bc} คือแรงดัน V_1 ก่อนการสวิตช์

เมื่อ C_2 ไม่สามารถส่งผ่านพลังงานไปที่โหลดได้ แรงดันไฟฟ้าจะคงที่ตลอดช่วงครึ่งไซเคิลถัดมา ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_3 จะมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมจากด้านโหลด ซึ่งแรงดันตกคร่อม Δ_{V1} ในรูปที่ 3.2 ค) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\Delta_{V1} = \Delta_{V12} = \frac{1}{C_1} I_{OUT} \Delta_{t1} = \frac{1}{C_2} I_{OUT} \Delta_{t1} \tag{3.2}$$

ในช่วงเวลา Δ_{t1} ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_3 จะต่ออนุกรมกับโหลดและตัวเก็บประจุ C_2 จะเก็บพลังงานเพื่อจะคายพลังงานไปที่ C_3 ในช่วงเวลา Δ_{t3} เมื่อสวิตช์เปิดวงจร ในช่วงเวลา Δ_{t2} จะสามารถแบ่งเป็นสองช่วงคือ Δ_{t3} และ Δ_{t4} เมื่อสวิตช์เปิดวงจรตัวเก็บประจุ C_2 จะมีแรงดันสูงกว่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_3 และ C_2 เมื่อคายประจุ เมื่อตัวเก็บประจุ C_3 ทำการประจุจนได้สมการแรงดัน

$$\Delta_{V4} = \frac{1}{C_2} I_L \Delta_{t3} \tag{3.3}$$

และแรงดันกระเพื่อม Δ_{V2} ที่ตัวเก็บประจุ C_3 สามารถเขียนได้คือ

$$\Delta_{V4} = \frac{1}{C_2}(I_L - I_{OUT})\Delta_{t3} \qquad (3.4)$$

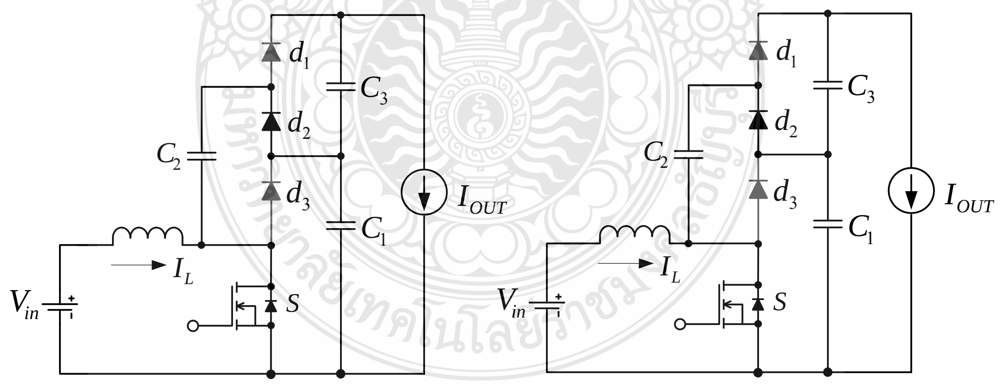
หลังจากนั้นตัวเก็บประจุทั้งสองจะขนานและอนุกรมอยู่กับ C_1 โดยแรงดันตกคร่อมกระเพื่อม Δ_{V3} สามารถเขียนได้ดังสมการคือ

$$\Delta_{V3} = \frac{1}{C_2}(\frac{I_{OUT}}{2})\Delta_{t4} = \frac{1}{C_3}(\frac{I_{OUT}}{2})\Delta_{t4} \qquad (3.5)$$

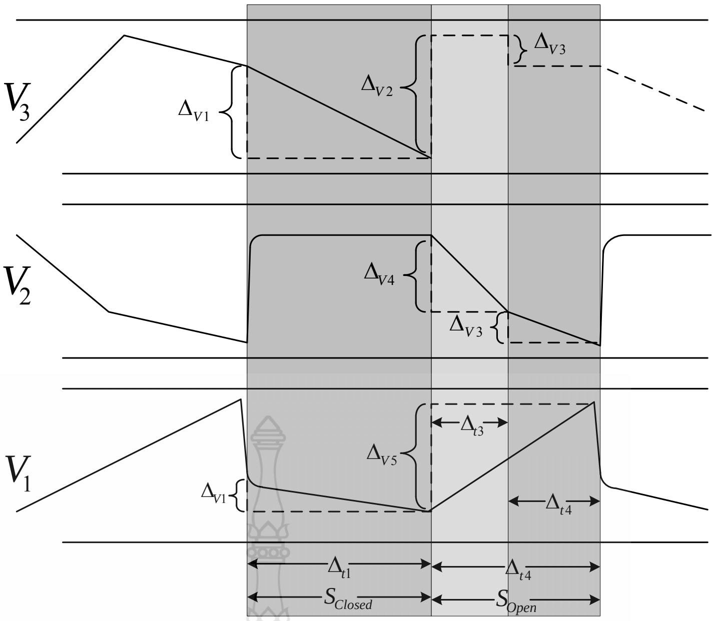
และแรงดันกระเพื่อม Δ_{V5}

$$\Delta_{V5} = \frac{1}{C1}(I_L - I_{OUT})\Delta_{t2} = \frac{1}{C_1}(I_L - I_{OUT})(\Delta_{t3} + \Delta_{t4}) \qquad (3.6)$$

แรงดันเอาต์พุต V_1 รวมกับแรงดัน V_3 จะได้แรงดันกระเพื่อมรวมที่ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_3 ตามสมการที่ 3.1 – 3.6 ซึ่งความถี่สวิตชิ่งสามารถคำนวณจากกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำเหมือนกับวงจรแปลงผันแบบทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบเบื้องต้น



(ก) วงจรสมมูลในสถาวะสวิตช์ปิด (ON) (ข) วงจรสมมูลในสถาวะสวิตช์เปิด (OFF)



(ค) แรงดันกระเพื่อมที่ตัวเก็บประจุในแต่ละช่วง

รูปที่ 3.2 วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับ(2 สถานะ)

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบวงจรแปลงผันแต่ละแบบ

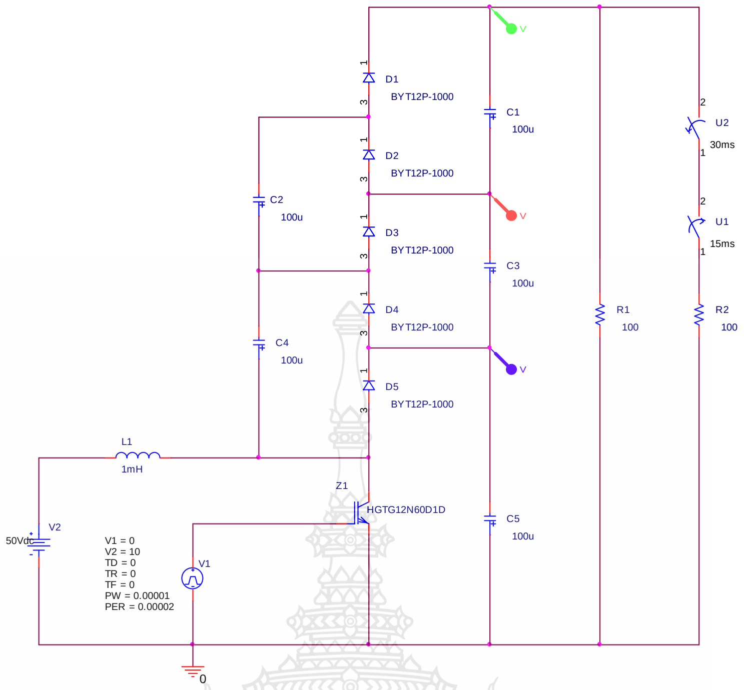
วงจร แปลงผัน	ตัวเหนี่ยวนำ	ตัวเก็บ ประจุ	อุปกรณ์ สวิตช์	ไดโอด	อัตราขยายแรงดัน	แรงดันตก คร่อมสวิตช์
SCBS	1	3	3	5	$(3-2xD)/(1-D)$	V_{OUT}
QBC	2	2	3	3	$1/(1-D)^2$	V_{OUT}
2x MBC	1	3	3	3	$2/(1-D)$	$V_{OUT}/2$

SCBS = Switched Capacitor With Boost State (วงจรบูสแบบสวิตช์คาปาซิเตอร์)

QBC = Quadratic Boost Converter (วงจรบูสแบบครอดาติก)

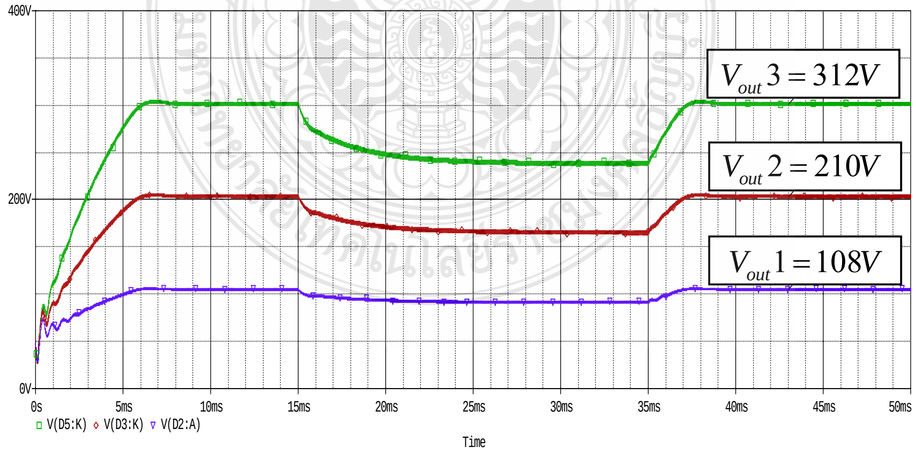
2x MBC = Multilevel Boost Converter (วงจรบูสแบบหลายระดับ(2สถานะ))

การจำลองโปรแกรม Orcad/Pspice



รูปที่ 3.3 การจำลองวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับ

ผลจำลองวงจรทบระดับแบบสามระดับแสดงระดับแรงดันสภาวะอยู่ตัวที่ได้ในแต่ละระดับจำนวน 3 ระดับ ใช้ $C = 100\,\mu F$



รูปที่ 3.4 ผลจำลองวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับแบบวงเปิด

3.3.1.1 การคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง

ในวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมาก เนื่องจากมีหน้าที่ในการเก็บและคายพลังงาน เป็นผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตมีค่าสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต การคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากสมการที่ 3.7

$$L = \frac{V_s D}{f \Delta i_L} \tag{3.7}$$

เมื่อ L คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำ
V_s คือ แรงดันอินพุต
D คือ ดิวตี้ไซเคิล
f คือ ความถี่ที่ใช้ในวงจร
Δi_L คือ กระแสกระเพื่อมทางอินพุต

แทนค่าในสมการที่ 3.7 เพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำ เมื่อ V_S คือแรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 50โวลต์

$$L = \frac{50 \times 0.5}{50 \times 10^3 \times 0.5} = 1mH$$

เมื่อได้ค่าของตัวเหนี่ยวนำแล้วจะหาขนาดของแกนที่ใช้โดยเลือกชนิดแกนเป็นแกนเฟอร์ไรต์ เพราะมีค่าสูญเสียต่ำเมื่อทำงานที่ความถี่สูง การคำนวณขนาดใช้วิธีคำนวณแบบ A_P (Area Appoach) วิธีนี้เป็นการออกแบบเพื่อใช้ค่า T_{rise} ซึ่งอยู่ในรูปของความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำ โดยคำนวณหาขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 จากขีดจำกัดและข้อกำหนดในการคำนวณหาค่า A_P ในการกำหนดค่าต่างๆดังนี้ $J = 4A/mm^2 = 4 \times 10^6 A/m^2$, $k = 0.45$ กระแสอินพุต $(I_{rms}) = 7.071$ กระแสอินพุตสูงสุด $(I_{peak}) = 10A$ และ $B = 0.25$ แทนค่าลงในสมการที่ 3.8

$$A_P = \frac{L I_{peak} I_{rms}}{BJK} \tag{3.8}$$

$$= \frac{1 \times 10^{-3} \times 10 \times 7.071}{0.25 \times 4 \times 10^6 \times 0.45}$$

$$=1571.33\times10^{-9}$$

$$=1571333.33mm^3$$

ขั้นตอนที่ 2 เลือกขนาดของแกนเฟอไรต์ที่มีค่า A_P มากกว่าที่ได้คำนวณจากขั้นตอนที่ 1 เนื่องจากถ้าเลือก A_P น้อยกว่าที่คำนวณได้อาจจะทำให้ไม่ได้ค่าต่างๆ ตามต้องการ โดยจะเลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์เบอร์ UF160 ซึ่งมีค่าต่างๆดังนี้

$A_P=1103300mm^3, A_W=1526mm^2, S=723mm^2$

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดให้ $L=1mH$, $I_{peak}=10A$, $B=0.25$ และ $S=723mm^2$ แทนค่าเพื่อหาจำนวนรอบของขดลวดตัวเหนี่ยวนำจะได้ ดังนี้

$$N=\frac{LI_{peak}}{BS} \tag{3.9}$$

$$=\frac{1\times10^{-3}\times10}{0.25\times723\times10^{-6}}$$

$$=55 \text{ รอบ}$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาขนาดของขดลวดตัวนำ A_w

$$A_w=\frac{I_{rms}}{J} \tag{3.10}$$

$$=\frac{7.071}{4\times10^6 A/m^2}$$

$$=1.767mm^2$$

ขั้นตอนที่ 5 เลือกเบอร์ลวดทองแดงให้มี A_w ใหญ่กว่า A_w ที่ได้จากการคำนวณขั้นตอนที่ 4 โดยคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดได้จากสมการที่ 3.11

$$d = \sqrt{\frac{4A_w}{\pi}} \tag{3.11}$$

$$= \sqrt{\frac{4 \times 1.767mm^2}{\pi}}$$

$$= 1.5mm$$

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ขดลวดทองแดง

หมายเลข AWG	**เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)**	**ความต้านทาน (Ω/km)**	**น้ำหนัก Kg/km**	**จำนวนรอบ cm**
13	1.83	7.99	23.3	27
14	1.63	10.1	18.5	34
15	1.45	12.7	14.7	40

จากตารางที่ 3.2 เลือกขดลวดเบอร์ 14 มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าที่คำนวณได้ เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลาง มีผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ถ้าค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้กระแสจะไหลได้ไม่ถึงที่ต้องการ ทำให้กระแสไหลไม่ต่อเนื่อง

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของขดลวดที่ใช้งานจริงว่าสามารถนำไปใช้กับแกนเฟอร์ไรต์ได้หรือไม่

$$A_w = \frac{\pi d^2}{4} \tag{3.12}$$

$$= \frac{\pi (1.5)^2}{4}$$

$$= 1.767mm^2$$

$$W = \frac{N \times A_w}{k} \tag{3.13}$$

$$= \frac{55 \times 1.767}{0.45}$$

$$= 215.96mm^2$$

ดังนั้นจะได้ W ที่ใช้ได้จะมีค่า $\leq 1526mm^2$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาค่าความกว้างของ Air Gab (l_g)

$$l_g = \frac{\mu_o N^2 S}{2L} \tag{3.14}$$

$$= \frac{4\pi \times 10^{-7} \times (55)^2 \times 723 \times 10^{-6}}{2 \times 1 \times 10^{-3}}$$

$$= 1.37mm$$

3.3.1.2 การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุต

วงจรกำลังของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า ตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุตของวงจรมีหน้าที่ในการเก็บพลังงานในรูปของประจุไฟฟ้าและทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าออกให้กับเอาต์พุตหรือภาระ(Load) คายประจุไฟฟ้าเมื่ออุปกรณ์สวิตช์ T_{on} และทำการเก็บประจุเมื่ออุปกรณ์สวิตช์ T_{off} ดังนั้นจำเป็นต้องเลือกตัวเก็บประจุที่สามารถทนแรงดันได้เท่าแรงดันเอาต์พุต หากเลือกตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะมีส่วนช่วยในการลดแรงดันกระเพื่อมทางเอาต์พุต การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุตหาได้จากสมการที่ 3.15

$$C = \frac{I_O D}{f \Delta V_O} \tag{3.15}$$

เมื่อ C คือ ค่าตัวเก็บประจุ

I_O คือ กระแสด้านเอาต์พุต

D คือ ดิวตี้ไซเคิล

f คือ ความถี่ที่ใช้ในวงจร

ΔV_O คือ แรงดันกระเพื่อมทางด้านเอาต์พุต

แทนค่าลงในสมการที่ 3.15 เพื่อหาค่าตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุต

$$C \geq \frac{2\times 0.5}{50\times 10^{3}\times 0.2} = 100\mu F$$

3.4 การออกแบบวงจรควบคุม

ในส่วนของวงจรที่ควบคุมการทำงานของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า จะทำหน้าที่ควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตคงที่ 311 โวลต์ โดยใช้วิธีการป้อนกลับของแรงดันทางด้านเอาต์พุตนอกจากนี้วงจรควบคุมยังทำหน้าที่ผลิตความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ในการออกแบบวงจรควบคุมจะประกอบไปด้วยวงจรต่างๆ ดังนี้

1) วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ด้วยไอซี UC3824 [ภาคผนวก ง]

2) วงจรขับนำเกตด้วยไอซี TPL250 [ภาคผนวก ง]

3.4.1 วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่

ไอซี UC3824 สามารถควบคุมการทำงานแบบ PWM โดยที่มีความถี่คงที่ และคาบเวลาในการทำงานของเอาต์พุต กำหนดได้โดยค่าของ C_T และ R_T ที่ต่ออยู่ภายในที่ขา 5 และ 6 ของไอซีวงจรนี้จะทำหน้าที่กำเนิดความถี่และควบคุมความถี่ให้คงที่ ค่าความถี่สามารถหาได้จากสมการที่ 3.16

$$f = \frac{1}{R_T C_T} \tag{3.16}$$

เมื่อ f คือ ความถี่ในการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์

C_T คือ กำหนดให้มีค่า $0.01\mu F$

ดังนั้น R_T มีค่า

$$R_T = \frac{1}{fC_T}$$

$$= \frac{1}{50\times 10^{3}\times 0.01\times 10^{-6}}$$

$$= 2k\Omega$$

3.4.2 วงจรขับนำเกตด้วยไอซี TLP250

สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตความกว้างของพัลส์ มีลักษณะเป็นสัญญาณพัลล์สี่เหลี่ยมสัญญาณนี้ถูกส่งไปยังวงจรสร้างสัญญาณขับนำเกต ด้วยไอซีสร้างสัญญาณนำขับเกต TPL250 เพื่อควบคุมการทำงานของมอสเฟท จากวงจรสัญญาณด้านเข้าเป็นสัญญาณที่ถูกส่งมาจากวงจรมอดูเลต

ตามความกว้างของพัลส์และสัญญาณนี้ถูกส่งเข้าไปไบอัสให้แอลอีดี ใน TLP250 นำกระแสโดยมีความต้านทาน 470 Ω

ทำหน้าที่จำกัดกระแสในการไบอัส เมื่อแอลอีดีนำกระแส ทำให้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ทางด้านเอาต์พุตของ TLP250 นำกระแส แรงดันที่ขา 6 ของ TLP250 จะเทียบกับกราวด์ และแรงดัน V_{GS} มีค่าเป็นบวกสามารถทำให้มอสเฟทนำกระแสได้ ส่วนในกรณีที่แรงดันอินพุตน้อยกว่า 0.7 V แอลอีดีภายใน TLP250 หยุดนำกระแสส่งผลให้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ทางด้านเอาต์พุตของ TLP250 หยุดนำกระแสเช่นเดียวกัน แต่ทรานซิสเตอร์นิด PNP จะนำกระแสแทน ส่งผลให้ที่สภาวะนี้แรงดันที่ขา 6 ของ TLP250 เทียบกับกราวด์มีค่าประมาณ 0 V เมื่อแรงดันที่ V_{GS} มีค่าเป็น 0 V ก็จะทำให้มอสเฟทหยุดนำกระแส

3.5 วงจรที่ใช้ควบคุมแบบวงเปิด

วงจรการทดสอบและใช้งานของไอซีเบอร์ UC3824 ใช้วงจรพื้นฐาน

3.5.1 วงจรกำเนิดความถี่ทำงาน(Oscillator , OSC)

ซึ่งกำหนดความถี่ทำงานและความถี่ของสัญญาณ PWM ที่จ่ายออกมา กำหนดได้โดยค่าความต้านทาน R_T และค่าตัวเก็บประจุ C_T ที่ตำแหน่งขา 5 และ 6 การเลือกใช้ค่า R_T , C_T สามารถดูความสัมพันธ์ได้จากกราฟ การปรับตั้งความถี่โดยการเลือกค่าตัวเก็บประจุและค่าความต้านทานชนิดปรับค่าได้ ให้อยู่ในช่วงความถี่ที่ต้องการ จากนั้นใช้ออสซิลโลสโคป วัดสัญญาณความถี่ที่ขา 4 ของตัวไอซี และทำการปรับค่าความต้านทาน จนได้ค่าความถี่ที่ต้องการ ซึ่งความถี่ที่ใช้ในการทดสอบนี้อยู่ที่ 50kHz

3.6 วงจรที่ใช้ควบคุมแบบวงปิด(ตัวควบคุมแบบเฟสนำหน้า-ล้าหลัง (Phase Lead - Phase Lag)) [16]

วงจรที่ใช้ควบคุมแบบวงปิดในโหมดแรงดันและวงจรชดเชยแรงดัน ตรวจจับวัดแรงดันเอาต์พุตจะใช้แบบแรงดันเอาต์พุต ซึ่งเป็นสัญญาณบวก จะใช้ค่าความต้านทาน 2 ตัว โดยอาศัยหลักการแบ่งแรงดันมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง V_{ref} เมื่อแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงจะทำให้ V_{error} มีค่ามากขึ้นและนำสัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่าง V_{error} และ V_{ref} ไปเข้ากับชุดชดเชยระบบเพื่อใช้ในการปรับค่าดิวตี้ไซเคิล โดยจะนำสัญญาณ V_{error} ที่ได้ไปเปรียบเทียบสัญญาณ Ramp Oscillator ทำให้ได้สัญญาณ DTC Comp ไปควบคุมการเปิดและปิดของเพาเวอร์มอสเฟท วงจรนี้จะถูกควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่และชดเชยให้ระบบมีเสถียรภาพ

การหาค่าความต้านทาน R_4 และ R_5 จะใช้หลักการของวงจรแบ่งแรงดันคำนวณค่าได้จากสมการที่ 3.17

$$V_{out} = \left[\frac{R_4}{R_5} + 1 \right] \times V_{ref} \tag{3.17}$$

เมื่อ V_{out} คือ แรงดันเอาต์พุตของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบหลายระดับ

V_{ref} คือ แรงดันอ้างอิงที่ขา 1 มีค่าเท่ากับขา 2 กำหนดให้มีค่า 5.1 โวลต์

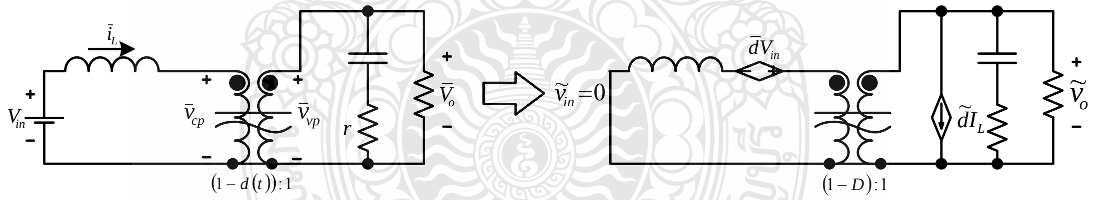
R_4 คือ กำหนดให้มีค่า 75 $k\Omega$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.17 เพื่อหาค่า R_5 จะได้

$$311 = 5.1\left[\frac{75\times10^3}{R_5} + 1 \right]$$

$$\therefore R_5 = 1.25k\Omega$$

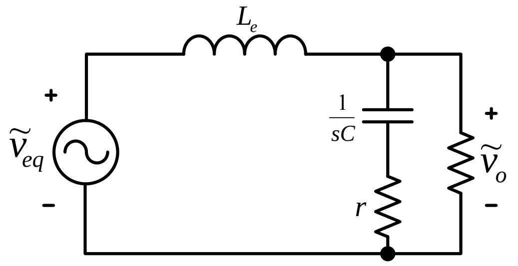
การออกแบบวงจรป้อนกลับของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า จะต้องเปลี่ยนวงจรภาคกำลังให้ทำงานในแบบเชิงเส้น โดยการไม่พิจารณาสัญญาณรบกวนขนาดเล็กของระบบ จะได้วงจรเทียบเคียงวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า ในแบบหม้อแปลงอุดมคติ เพื่อให้สามารถทดสอบการตอบสนองความถี่ของวงจรดังนี้



รูปที่ 3.5 วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า เมื่อเทียบเคียงหม้อแปลงอุดมคติ

จากรูปที่ 3.5 สามารถเขียนวงจรไฟฟ้าสมมูล โดยพิจารณาให้ตัวเหนี่ยวนำ (L_e) มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับตัวเหนี่ยวนำที่ใช้งานจริง โดยมีค่าเท่ากับ

$$L_e = \frac{L}{(1-D)^2} \tag{3.18}$$



รูปที่ 3.6 วงจรไฟฟ้าสมมูลของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า

จะได้สมการสำหรับทดสอบผลการตอบสนองความถี่ และ ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน ดังนี้

$$\frac{\tilde{v}_o}{\tilde{d}} = \frac{V_{in}}{(1-D)^2}\left(1 - s\frac{L_e}{R}\right)\frac{1+srC}{L_eC\left(s^2 + s\left(\frac{1}{RC}+\frac{r}{L_e}\right)+\frac{1}{L_eC}\right)} \tag{3.19}$$

การคำนวณหาค่าอุปกรณ์ในวงจรชดเชยระบบ (Compensation Network) สมการ ทรานเฟอร์ฟังก์ชันวงเปิดดังนี้

$$\left|G_L(s)\right|_{fc} = \left|G_C(s)\right|_{fc}.\left|G_{PWM}(s)\right|_{fc}.\left|G_{PS}(s)\right|_{fc}.K_{FB} = 1$$

อัตราการขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง $\left|G_{PWM}(s)\right|$ หาได้จาก

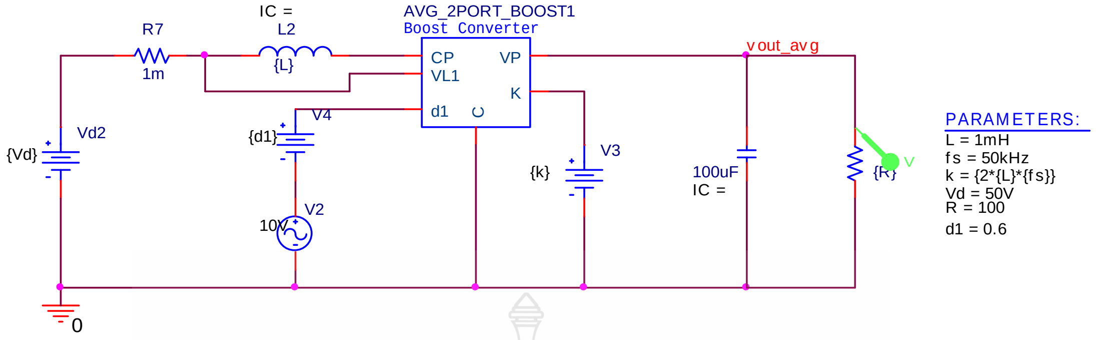
$$\left|G_{PWM}(s)\right|_{fc} = \frac{1}{V_r} = \frac{1}{1.8} = 0.556$$

เมื่อ

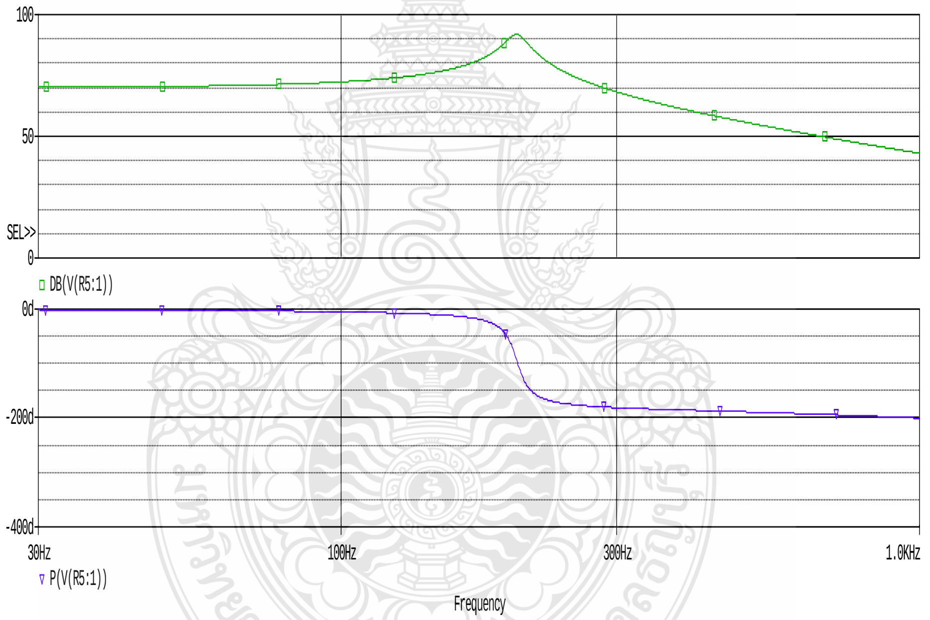
$$K_{FB} = 0.047$$

Power State of Boost Convertor $\left|G_{PS}(s)\right|_{fc}$

จำลองวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม Orcad/Pspice เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่



รูปที่ 3.7 จำลองวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Ocad/Pspice เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่



รูปที่ 3.8 ผลของการจำลองวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Ocad/Pspice เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่

จากผลของการจำลองดังรูปที่ 3.8 สามารถนำไปหาค่าต่างๆได้ดังนี้

เลือกใช้ความถี่ $f_c = 300Hz$

$$\left|G_{PS}(s)\right|_{f_C} = 40dB = 100$$

$$\angle\left|G_{PS}(s)\right|_{f_C} = -181.1^\circ$$

$$\therefore \left|G_C(s)\right|_{f_C} = \frac{1}{\left|G_{PWM}(s)\right|_{f_C} . \left|G_{PS}(s)\right|_{f_C} . K_{FB}}$$

$$= \frac{1}{(0.556)(100)(0.047)} = 0.382$$

หาค่า ϕ_{boost} หาได้จาก

$$\phi_{boost} = -90^\circ + \phi_{PM} - \angle\left|G_{PS}(s)\right|_{f_C}$$

ซึ่ง $\phi_{PM} = 60^\circ$ ซึ่งเป็นค่านิยมในการออกแบบ

$$\therefore \phi_{boost} = -90^\circ + 60^\circ + 181.1^\circ = 151.1^\circ$$

หาค่า K_{boost} ได้จาก

$$K_{boost} = \tan\left[45^\circ + \frac{\phi_{boost}}{4}\right]$$

$$= \tan\left[45^\circ + \frac{151.1^\circ}{4}\right]$$

$$= 7.88$$

หาค่า f_Z

$$f_Z = \frac{f_C}{K_{boost}} = \frac{300}{7.88} = 38.07\,Hz \;\; ; \; \omega_Z = 2\pi f_Z = 2\pi(38.07) = 239.2\,rad$$

หาค่า f_P

$$f_P = (K_{boost})(f_C) = (7.88)(300) = 2364\,Hz \;\; ; \; \omega_p = 2\pi f_p = 2\pi(2364) = 14853\,rad$$

หาค่า K_C

$$K_C = \left|G_C(s)\right|_{f_C} \cdot \frac{\omega_Z}{K_{boost}} = \frac{(0.382)(239.2)}{7.88} = 11.6$$

กำหนดให้ $R_1 = 100k\Omega$

หาค่า C_2 ได้จาก

$$C_2 = \frac{\omega_Z}{K_C \omega_P R_1} = \frac{239.2}{(11.6)(14853)(100\times 10^3)} = 13.86\,nF$$

หาค่า C_1 ได้จาก

$$C_1 = C_2\left(\frac{\omega_P}{\omega_Z - 1}\right) = \left(13.86\times 10^{-9}\right)\left(\frac{14853}{239.2-1}\right) = 0.864\,\mu F$$

หาค่า R_2 ได้จาก

$$R_2 = \frac{1}{\omega_Z C_1} = \frac{1}{(239.2)\left(0.864\times 10^{-6}\right)} = 4.835k\Omega$$

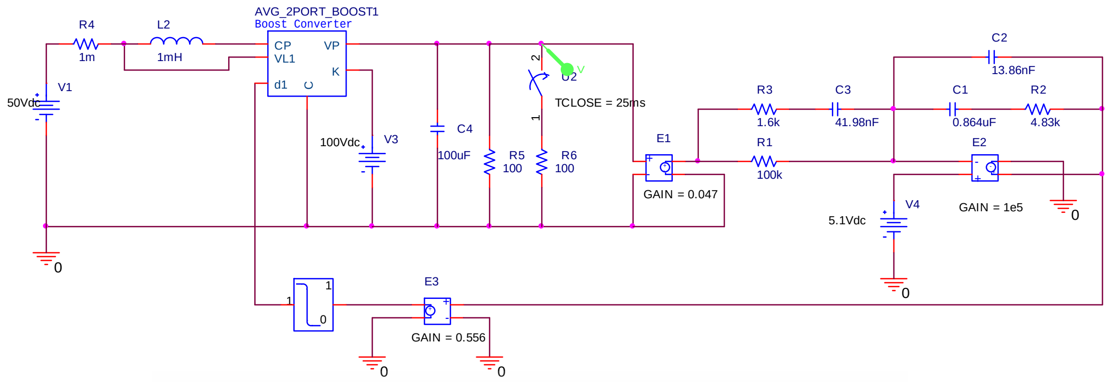
หาค่า R_3 ได้จาก

$$R_3 = \frac{R_1}{(\omega_P)/(\omega_Z - 1)} = \frac{100\times 10^3}{(14853)/(239.2-1)} = 1.603\,k\Omega$$

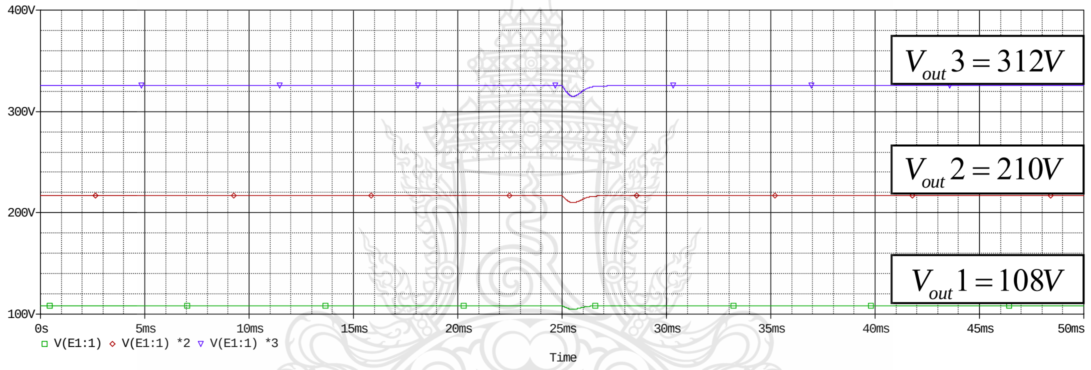
หาค่า C_3 ได้จาก

$$C_3 = \frac{1}{\omega_P R_3} = \frac{1}{(14835)\left(1.603\times 10^3\right)} = 41.98\,nF$$

จำลองวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม Orcad/Pspice เพื่อหาผลตอบสนองทางแรงดันไฟฟ้าโดยใช้วิธีป้อนกลับแรงดัน



รูปที่ 3.9 จำลองผลการตอบสนองวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Orcad /Pspice เพื่อหาผลตอบสนองทางแรงดันไฟฟ้าโดยใช้วิธีป้อนกลับแรงดัน



รูปที่ 3.10 ผลการตอบสนองวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Orcad/Pspice เพื่อหาผลตอบสนองทางแรงดันไฟฟ้าโดยใช้วิธีป้อนกลับแรงดัน

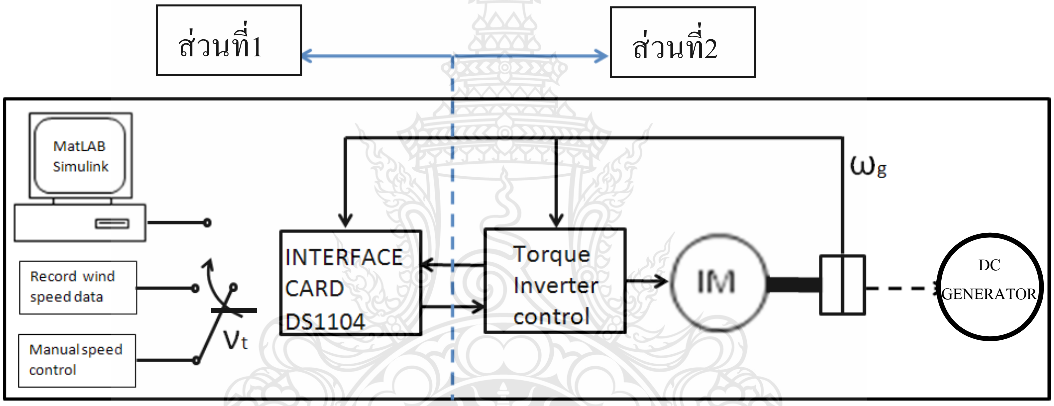
จากรูปที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองเมื่อเราทำการใช้วิธีป้อนกลับแรงดันและออกแบบตัวควบคุมแล้ว สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้เมื่อมีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด จากผลการตอบสนองแรงดันในระดับที่ 2 และ 3 ได้จากการคูณผลของแรงดันในระดับที่ 1 เนื่องจากวงจรการทดสอบในส่วนบล็อกไดอะแกรมของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า ไม่สามารถจำลองการทำงานแบบหลายระดับได้ จึงใช้การคูณผลที่ได้ เพื่อแสดงให้เห็นถึงการลดลงของแรงดันไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนโหลดแบบทันทีทันใดในแต่ระดับของแรงดันไฟฟ้า

3.7 โครงสร้างของเครื่องจำลองกังหันลม

โครงสร้างโดยรวมของเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักดังรูปที่ 3.11

ส่วนที่ 1 ประกอบไปด้วยแบบจำลองความเร็วลมใช้สร้างความเร็วลมที่ต้องการ รูปแบบของพลังงานความเร็วของลมสามารถสร้างได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากหลักการสุ่มของ Kaimal Spectrum โดยโปรแกรม Matlab/Simulink หรือสร้างจากการปรับค่าขึ้นลงด้วยตัวเองหรือจากข้อมูลบันทึกความเร็วลมที่เก็บค่าได้และต่อมาจะเป็นแบบจำลองกังหันลมที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหลักการและทฤษฎีกังหันลมที่คำนวณสัญญาณอ้างอิงในรูปของแรงบิดอ้างอิง (Torque Reference) ผ่านอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE เพื่อแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบทันเวลา (Real-time) ส่งไปที่อินเวอร์เตอร์เลือกใช้ในโหมดควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งอยู่ในส่วนที่สอง

ส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่รับสัญญาณในรูปแบบทันเวลามาควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำให้แสดงคุณลักษณะของกังหันลมที่แกนโรเตอร์ออกมาในลักษณะสัญญาณแรงบิด (Torque Output) เสมือนของกังหันลม



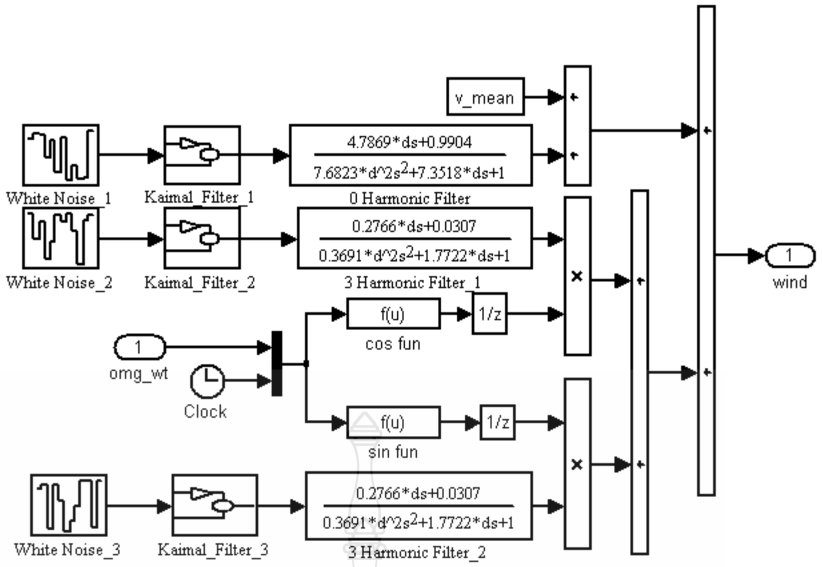
รูปที่ 3.11 โครงสร้างและส่วนประกอบเครื่องจำลองกังหันลม

3.7.1 แบบจำลองความเร็วลม (Wind Speed Model)

แบบจำลองความเร็วลมมีความสำคัญในการบอกค่าสมรรถนะของแหล่งกำเนิดลมและพฤติกรรมของลมที่เกิดขึ้นจริง เพื่อนำผลจากแบบจำลองความเร็วลมไปวิเคราะห์และนำพลังงานลมนี้ไปสังเคราะห์ใช้ประโยชน์ต่อไป ในธรรมชาติของความเร็วลมจะมีปัจจัย 2 ส่วนคือ

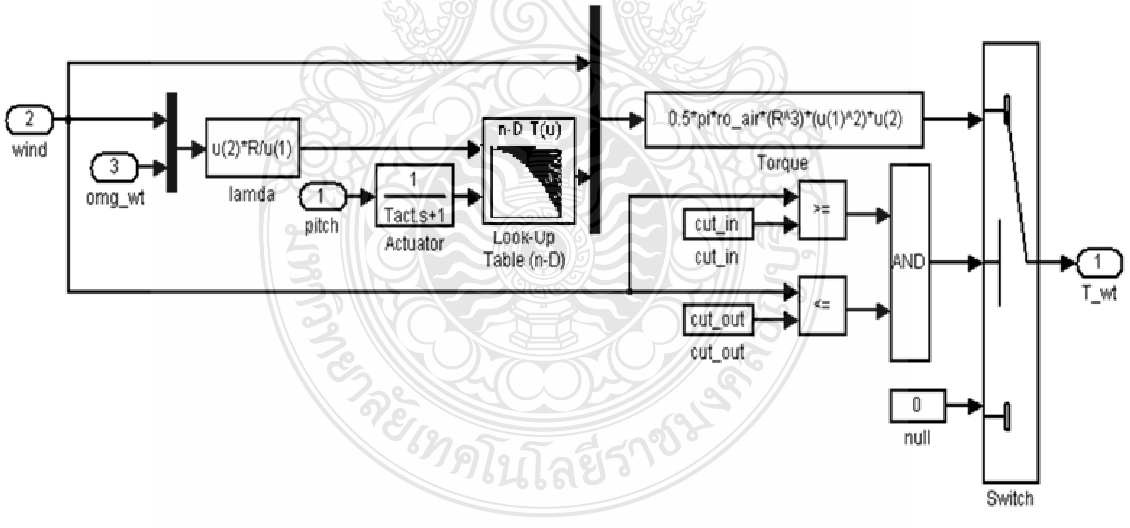
ส่วนที่ 1 คือส่วนที่เป็นค่ากลางคงที่เฉลี่ย(Steady State) ซึ่งจะเฉลี่ยจากค่าที่เพิ่มขึ้นสูงสุด และลดลงต่ำสุด

ส่วนที่ 2 คือส่วนของค่าความแปรปรวน(Turbulence) เป็นคุณลักษณะของการสุ่มค่าไปแบบไม่เป็นปกติกับส่วนแรกคือส่วนที่เป็นค่ากลางคงที่เฉลี่ย (Steady State) กับเวลาและระยะทางและนำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมแบบจำลองความเร็วลมได้ดังนี้



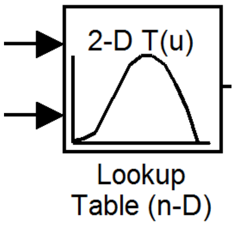
รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองความเร็วลมและการกำหนดค่าตัวแปร

จากรูปที่ 3.12 กังหันลมเป็นระบบที่มีอินพุตคือแรงบิดของกังหันลม มีเอาต์พุตคือ ความเร็ว รอบ และถือว่าลมที่กระทำต่อกังหันลมคือสัญญาณรบกวน (Disturbance)

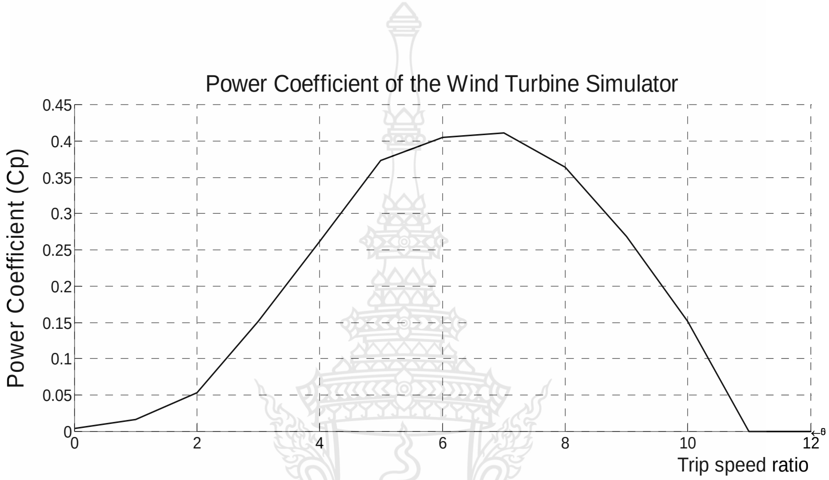


รูปที่ 3.13 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของกังหันลม

จากรูปที่ 3.13 จากสมการพื้นฐานในบทที่ 2 ของกังหันลมสามารถนำมาประยุกต์ใช้ใน โปรแกรม Matlab/Simulink ได้โดยในส่วนของการคำนวณค่า C_p จะใช้บล็อกของ Look-Up Table



รูปที่ 3.14 บล็อกของ Look-Up Table ในโปรแกรม Matlab/Simulink ในการคำนวณค่า C_p โดยใช้หลักการ Interpolation



รูปที่ 3.15 กราฟค่าของ C_p เปรียบเทียบกับค่า λ ที่ได้

จากกราฟของ C_p จึงสามารถหากราฟคุณลักษณะของกังหันได้โดยการเปรียบเทียบกับค่า λ ที่ใช้ในการทดลองได้ดังกราฟที่ 3.15 ถ้าทราบความเร็วลมที่กระทำต่อกังหันก็จะสามารถเลือกทำงานที่ความเร็วรอบอันจะทำให้เกิดการสกัดกำลังตามที่ต้องการได้ แต่ในทางปฏิบัติ พบว่าการวัดค่าความเร็วลมมีปัญหาหลายประการและอาจได้ค่าที่ไม่แม่นยำงานวิจัยนี้จะใช้วิธีซึ่งไม่ต้องวัดความเร็วลมแต่จะใช้แบบจำลองความเร็วลม (Wind Speed Model)

ตารางที่ 3.3 ค่าของ C_p เปรียบเทียบกับ λ

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
C_p	0.003	0.015	0.052	0.151	0.261	0.373	0.405	0.411	0.364	0.268	0.151	0

3.7.2 การ์ดอินเตอร์เฟส DS1104

งานวิจัยนี้ได้นำเทคโนโลยีของอินเตอร์เฟสการ์ดควบคุมแบบทันเวลาร่วมกับโปรแกรม Matlab/Simulink มาใช้ในการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้แสดงคุณลักษณะของกังหันลมออกมาให้มีพฤติกรรมเสมือนกังหันลมจริงและมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิด ของกังหันลมจริง ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยบริษัท dSPACE เป็นการ์ดอินเตอร์เฟสที่ออกแบบสำหรับใช้กับงานพัฒนาต้นแบบ (Prototype) และงานวิจัยในอุตสาหกรรมรถยนต์

3.7.3 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส FUJIรุ่น FRENIC MEGA (พิกัด 3 kW)

งานวิจัยนี้จะใช้อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ควบคุมแรงบิดเพื่อควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสร้างแรงบิดตามความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิดของกังหันลมทำให้ สามารถสร้างเครื่องจำลองการทำงานของกังหันลมได้ใกล้เคียงเสมือนกังหันลมจริงได้โดยรับสัญญาณแรงบิดอ้างอิงผ่านอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE ออกมาในรูปแบบทันเวลา

3.7.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แบบเหนี่ยวนำ (พิกัด 3 kW)

งานวิจัยนี้จะใช้คุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ดีคือมีความเร็วรอบคงที่อันเนื่องมาจากความเร็วรอบเหนี่ยวนำมอเตอร์ขึ้นอยู่กับความถี่(Frequency) ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับมีราคาถูกโครงสร้างไม่ซับซ้อนสะดวกในการบำรุงรักษาเพราะไม่มีคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่านเหมือนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อใช้ร่วมกับเครื่องควบคุมความเร็วแบบอินเวอร์เตอร์ (Inverter) สามารถควบคุมความเร็ว (Speed Control) ได้ตั้งแต่ศูนย์จนถึงความเร็วตามพิกัดของมอเตอร์นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม ขับเคลื่อนลิฟต์ ขับเคลื่อนสายพานลำเลียง ขับเคลื่อนเครื่องจักรไฟฟ้า เช่น เครื่องไส เครื่องกลึง แต่ในงานวิจัยนี้ใช้เสมือนเป็นเครื่องจำลองกังหันลม

3.7.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น (พิกัด 0.37 kW)

งานวิจัยนี้จะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของกังหันลมที่กระทำต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะที่มีโหลด ซึ่งทราบอยู่แล้วว่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันที่ได้ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีระดับแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สูงพอที่จะนำไปใช้งาน กล่าวคือมีลักษณะที่ไม่คงที่ฉะนั้นจำเป็นต้องมีเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงพอด้วยวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับสำหรับกังหันลมต่อไป

บทที่ 4

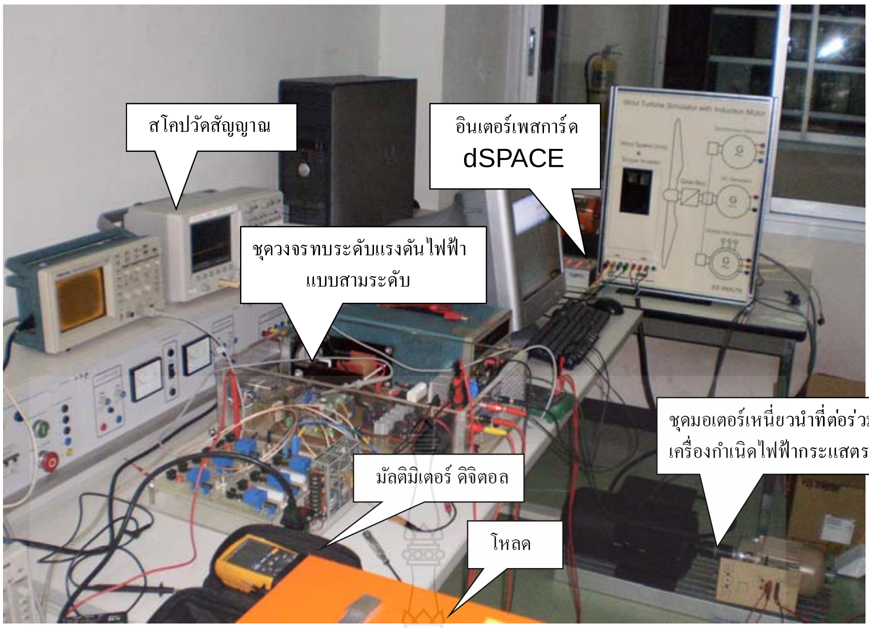
ผลการสร้างและการทดสอบ

การทดสอบคุณลักษณะของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับที่ได้ทำการสร้างขึ้น แบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ การทดสอบวัดค่าที่การควบคุมแบบวงเปิดแบบเปลี่ยนแปลงโหลดทันที และการทดสอบวัดค่าค่าที่การควบคุมแบบวงปิดแบบเปลี่ยนแปลงโหลดทันทีทันใด

4.1 วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับ

การทดสอบจากวงจรต้นแบบที่สร้างขึ้นดังที่แสดงในรูปที่ 4.1 โดยมีอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบดังต่อไปนี้

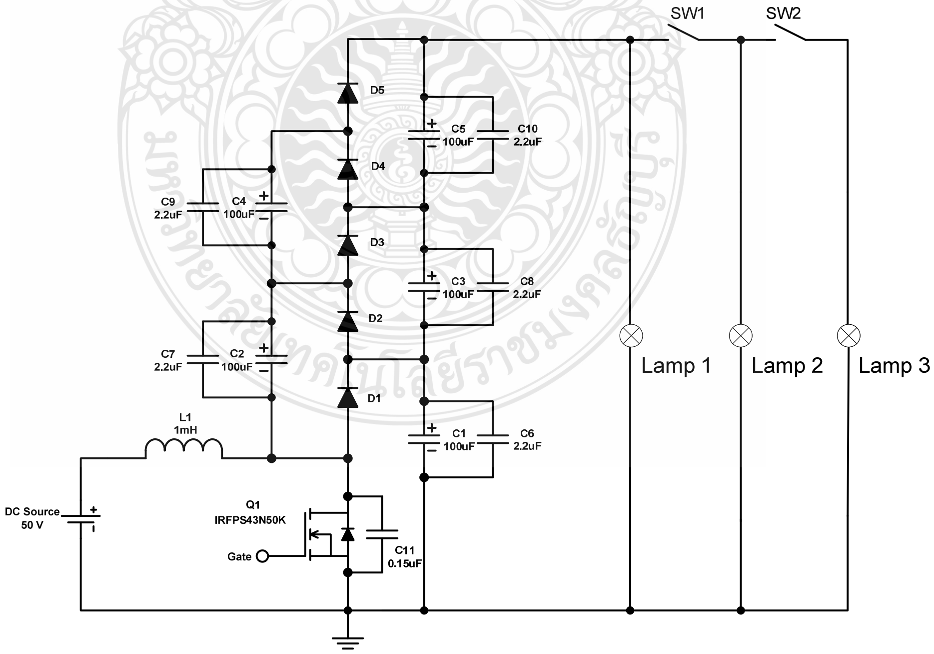
Digital Multimeter	: Fluke 179
Digital Oscilloscope	: Agilent Technologies DSO5014A
Induction Motor 3 Phase	: ELWE 3 kW
Inverter 3 Phase	: Fuji Model Frenic mega
Separately excited D.C Generator	: ELWE 0.37 kW
Load	: Incandescent Lamp 200 W
Load	: Resistance $1.5\,k\Omega$ $50\,W$
D.C source	: 0 – 100 V, 20 A
Computer & Control	: dSPACE DS1104
Software	: Matlab/Simulink
	: Orcad/Pspice



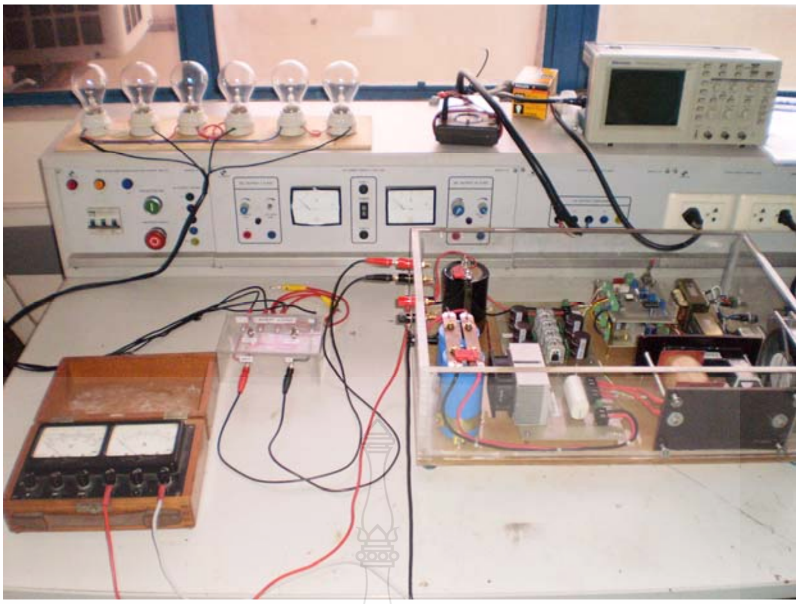
รูปที่ 4.1 การทดสอบวงจรต้นแบบวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับ

4.1.1 การทดสอบวงจรกำลังและวงจรควบคุม

เมื่อทำการออกแบบในส่วนของวงจรกำลังและวงจรควบคุมของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับแล้ว ก็จะทำการทดสอบว่าวงจรกำลังและวงจรควบคุมสามารถทำงานไปตามที่ได้ออกแบบไว้



(ก) วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับที่ใช้ในการทดสอบ

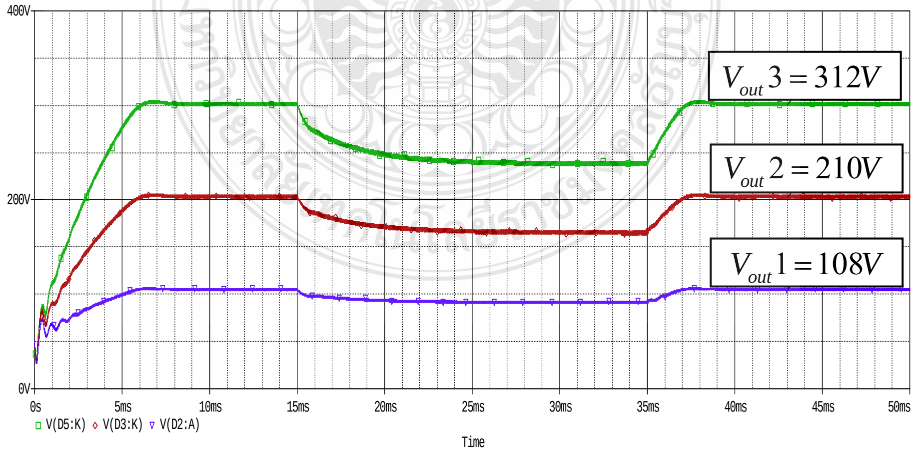


(ข) วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับที่ใช้ในการทดสอบที่สร้างขึ้น

รูปที่ 4.2 วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับที่ใช้ในการทดสอบ

4.1.2 ผลการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตควบคุมแบบวงเปิด

ทำการทดสอบที่ระดับแรงดันอินพุต 50 โวลต์ ความถี่สวิตซิ่ง 50 kHz ปรับค่าดิวตี้ไซเคิลคงที่ 50% เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันเอาต์พุตว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร โดยเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดเมื่อมีการควบคุมแบบวงเปิด



(ก) วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับที่จำลองด้วยโปรแกรม Orcad/Pspice

(ข) วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับที่ใช้ออสซิลโลสโคปวัด ควบคุมแบบวงเปิด

รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าจำลองด้วยโปรแกรม Orcad/Pspice กับที่ใช้ออสซิลโลสโคปวัด วงจรที่สร้างขึ้น

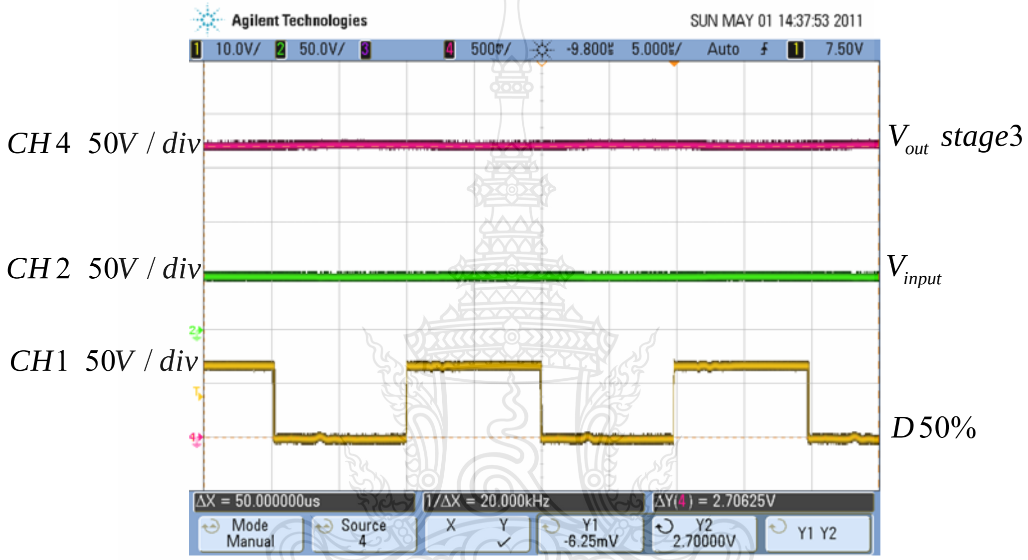
จากรูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าจากการจำลองด้วยโปรแกรมและจากวงจรที่สร้างขึ้นผลที่ได้วัดจริง พบว่า การตอบสนองในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตไม่คงที่คือแรงดันเปลี่ยนแปลงตามโหลด(หลอดไส้100W 2หลอดต่ออนุกรม ค่าความต้านทาน 66 Ω : ลำดับโหลด)ที่ต่อร่วมในวงจรดังที่จะแสดงตามตารางที่ 4.1 และทดสอบเปลี่ยนโหลดลำดับ3คงที่ดูการตอบสนองเมื่อเปลี่ยนแปลงดิวตี้ไซเคิลตามตารางที่ 4.2 ไว้ดังนี้

ตารางที่ 4.1 การทดสอบดูค่าแรงดันและกระแสเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลดแบบทันทีทันใดที่แรงดันอินพุตคงที่ 50 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิลคงที่ 0.5 แบบวงเปิด

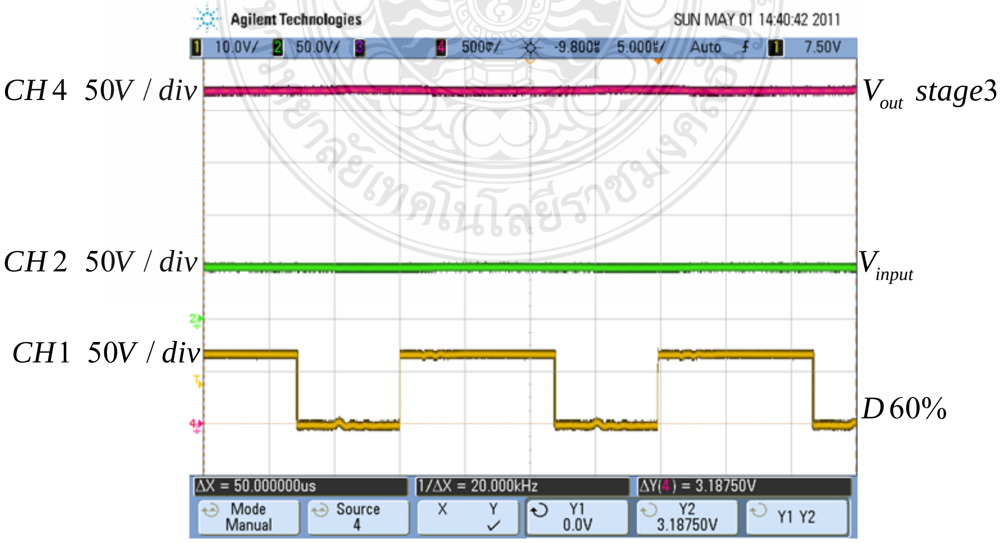
ลำดับการเปลี่ยนโหลด	แรงดันอินพุต (V)	กระแสอินพุต (A)	แรงดันเอาต์พุต (V)	กระแสเอาต์พุต(A)
1	50	3.62	311	0.37
2	50	5.29	277	0.70
3	50	7.04	255	1.02

ตารางที่ 4.2 การทดสอบดูค่าแรงดันเอาต์พุต ที่แรงดันอินพุตคงที่ 50 โวลต์ ทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงโหลดลำดับ3 เมื่อเปลี่ยนค่าดิวตี้ไซเคิล แบบวงเปิด

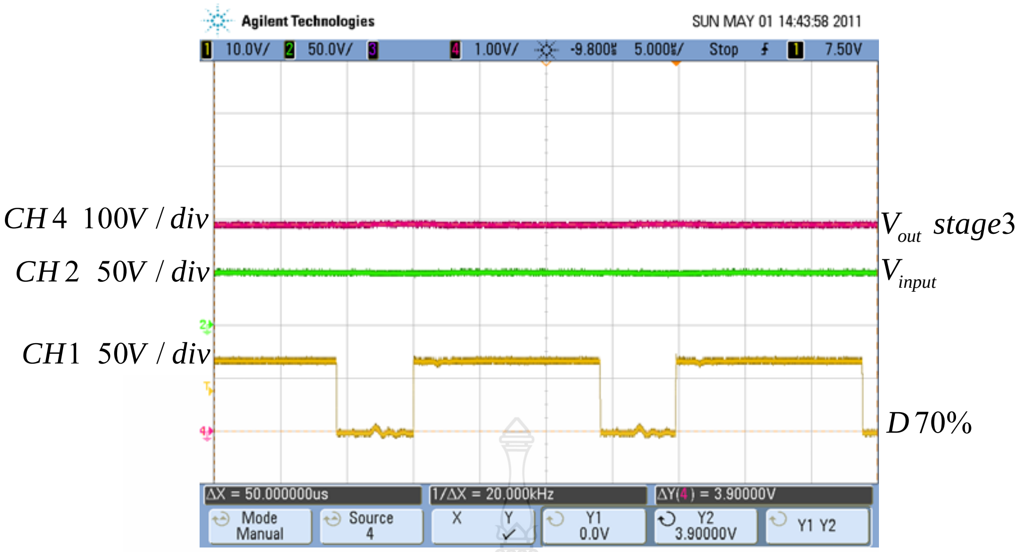
แรงดันอินพุต	ระดับแรงดันที่ค่าดิวตี้ไซเคิล (%)		
(V)	50	60	70
50	270.0	318.7	390.0



รูปที่ 4.4 สัญญาณแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่ดิวตี้ไซเคิล 50%



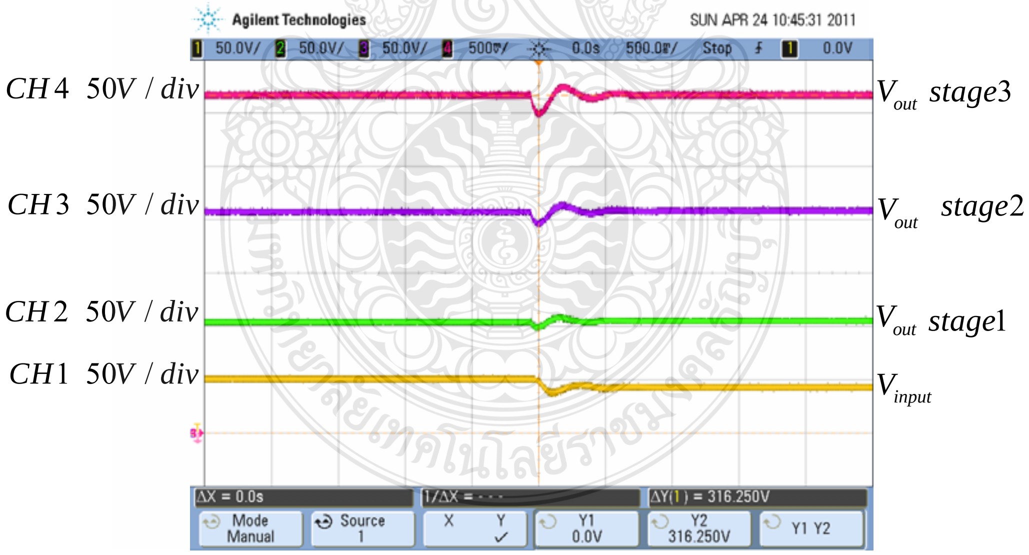
รูปที่ 4.5 สัญญาณแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่ดิวตี้ไซเคิล 60%



รูปที่ 4.6 สัญญาณแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่ดิวตี้ไซเคิล 70%

4.1.3 ผลการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตควบคุมวงปิดด้วยตัวควบคุมแบบเฟสนำหน้า-ล้าหลัง

ทำการทดสอบที่ระดับแรงดันอินพุต 50 โวลต์คงที่ ความถี่สวิตชิ่ง 50 kHz เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันเอาต์พุตโดยเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใด

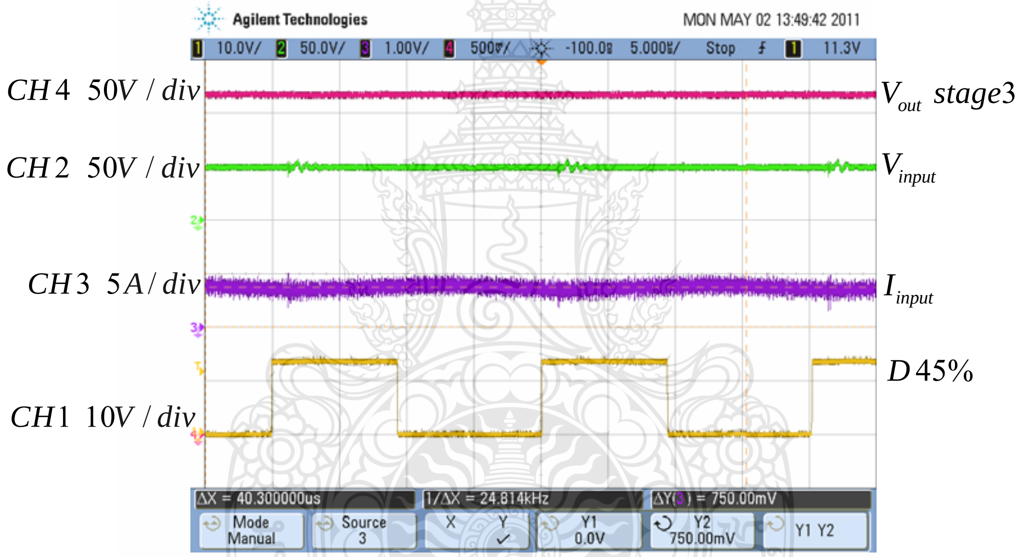


รูปที่ 4.7 สัญญาณแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุต ควบคุมแบบวงปิด

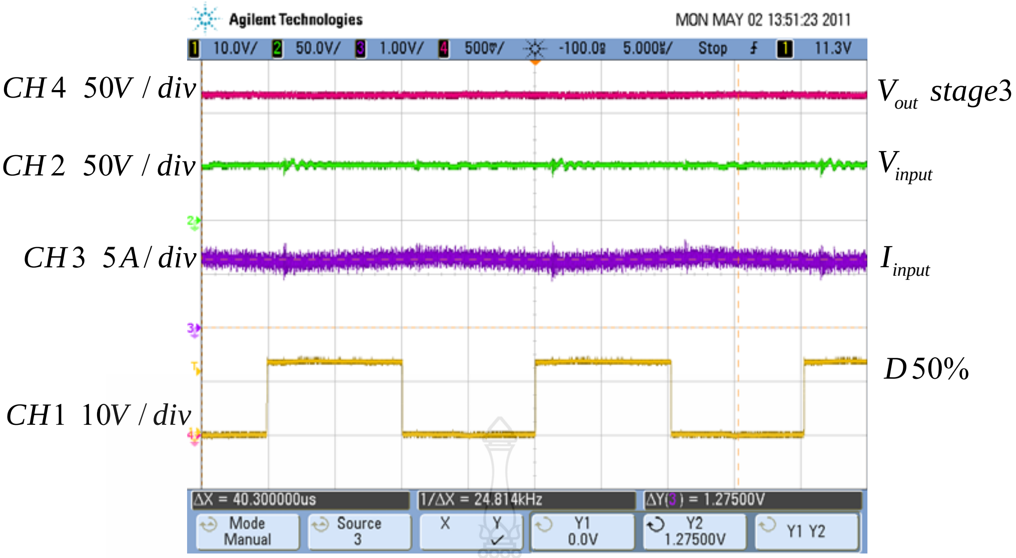
จากรูปที่ 4.7 จากวงจรที่สร้างขึ้นผลที่ได้วัดจริง พบว่า การตอบสนองในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตไว้ได้ คือแรงดันไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามโหลด(หลอดไส้100W 2หลอดต่ออนุกรม ค่าความต้านทาน 66 Ω : ลำดับโหลด)ดังที่จะแสดงตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การทดสอบดูค่าแรงดันค่ากระแสเอาต์พุตกระแสอินพุตและค่าดิวตี้ไซเคิลเมื่อปรับเปลี่ยนโหลดตามลำดับแบบทันทีทันใด โดยแรงดันอินพุตคงที่ 50 โวลต์ แบบวงปิด

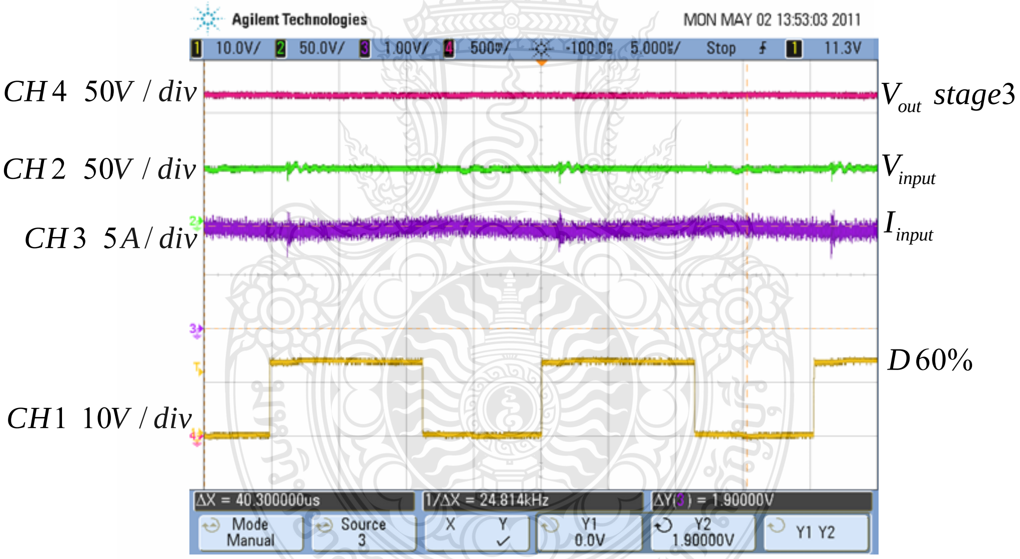
ลำดับการเปลี่ยนโหลด	แรงดันอินพุต (V)	ดิวตี้ไซเคิล (%)	กระแสอินพุต (A)	แรงดันเอาต์พุต (V)	กระแสเอาต์พุต (A)
1	50	45	3.75	311	0.37
2	50	50	6.37	311	0.75
3	50	60	9.50	311	1.12



รูปที่ 4.8 สัญญาณแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่ดิวตี้ไซเคิล 45% ที่การเปลี่ยนแปลงโหลดลำดับ 1 ควบคุมแบบวงปิด



รูปที่ 4.9 สัญญาณแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่ดิวตี้ไซเคิล 50%
ที่การเปลี่ยนแปลงโหลดลำดับ 2 ควบคุมแบบวงปิด



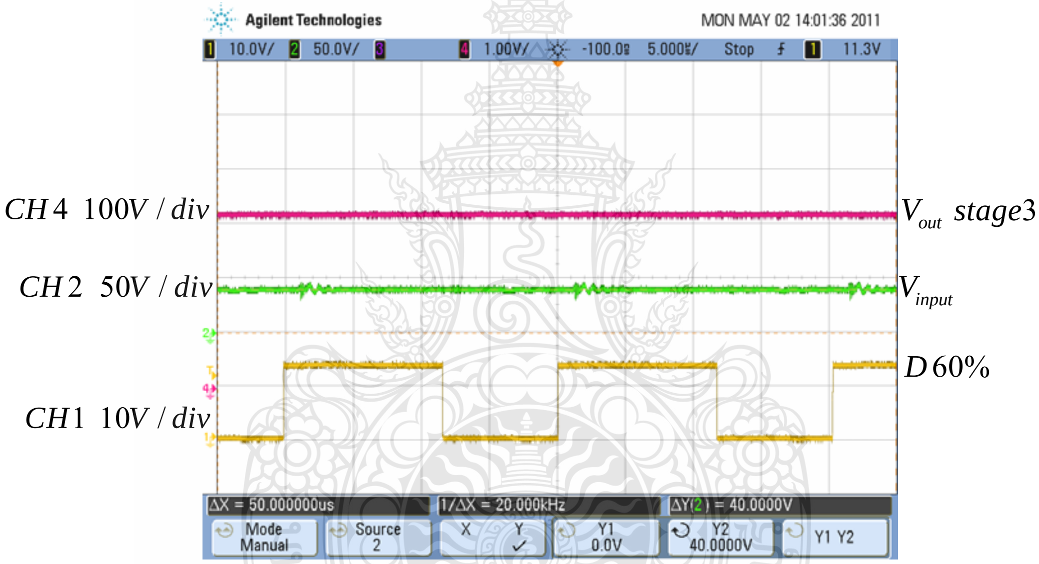
รูปที่ 4.10 สัญญาณแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่ดิวตี้ไซเคิล 60%
ที่การเปลี่ยนแปลงโหลดลำดับ 3 ควบคุมแบบวงปิด

จากรูปที่ 4.8 – 4.10 จากวงจรที่สร้างขึ้นผลที่ได้วัดจริง พบว่า การตอบสนองในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตไว้ได้ คือแรงดันไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามโหลดที่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใด โดยที่ค่าดิวตี้ไซเคิลจะปรับเปลี่ยนไปตามโหลดที่เพิ่มแต่ละระดับ เพื่อชดเชยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าไว้ได้

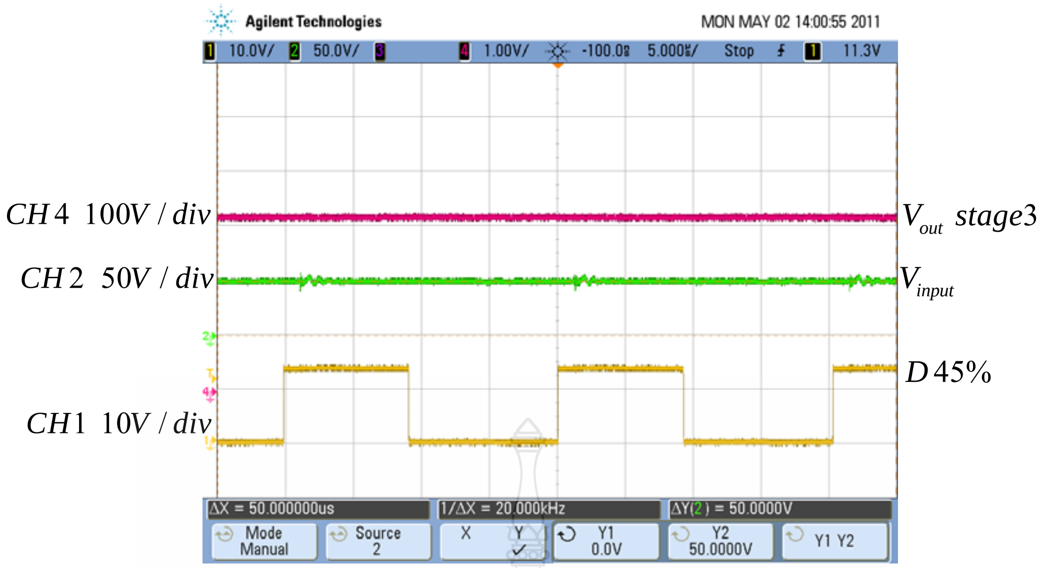
ทำการทดสอบที่เปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอินพุต ความถี่สวิตชิ่ง 50 kHz เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตโดยต่อโหลด(หลอดไส้100W 2หลอดต่ออนุกรม ค่าความต้านทาน 66 Ω : ลำดับโหลด)ดังที่จะแสดงตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การทดสอบดูค่าแรงดันเอาต์พุตและดิวตี้ไซเคิลเมื่อแรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลง แบบวงปิด

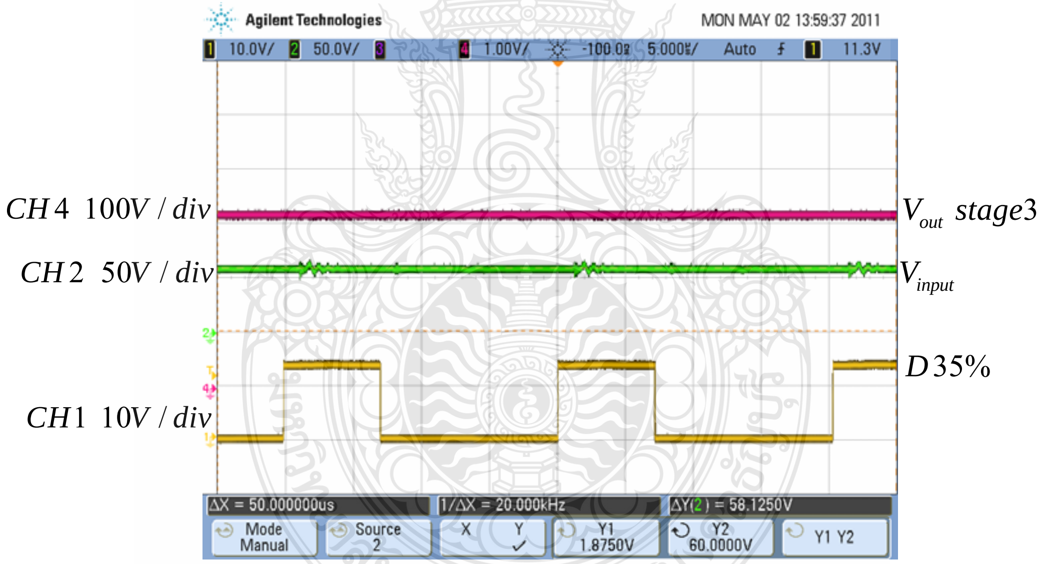
แรงดันอินพุต (V)	40	50	60	70
ดิวตี้ไซเคิล (%)	60	45	35	25
แรงดันเอาต์พุต (V)	311	311	311	311



รูปที่ 4.11 สัญญาณแรงดันอินพุต 40 โวลต์และที่ดิวตี้ไซเคิล 60% ควบคุมแบบวงปิด

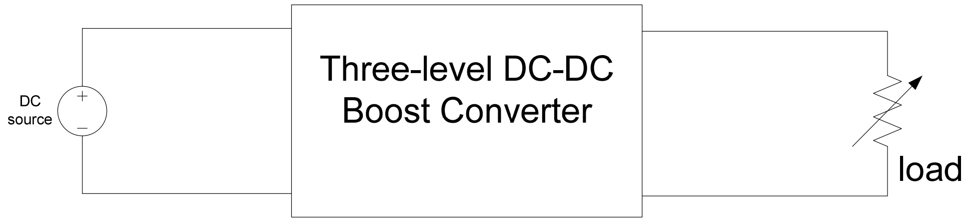


รูปที่ 4.12 สัญญาณแรงดันอินพุต 50 โวลต์และที่ดิวตี้ไซเคิล 45% ควบคุมแบบวงปิด



รูปที่ 4.13 สัญญาณแรงดันอินพุต 60 โวลต์และที่ดิวตี้ไซเคิล 35% ควบคุมแบบวงปิด

4.1.4 การทดสอบหาประสิทธิภาพโดยรักษาระดับแรงดันอินพุต 50 โวลต์คงที่ แบบวงปิด



รูปที่ 4.14 วงจรวัดค่าประสิทธิภาพ แบบวงปิด

ทดสอบหาประสิทธิภาพวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า โดยรักษาระดับแรงดันอินพุต 50 โวลต์ ใช้มัลติมิเตอร์วัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าทั้งอินพุตและเอาต์พุต ที่ความถี่ 50 kHz ทำการเปลี่ยนแปลงโหลดตามระดับ และสามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพได้จากสมการ

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} \times 100\%$$

กำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุตหาได้จาก $P_{output} = V_{output} \times I_{output}$

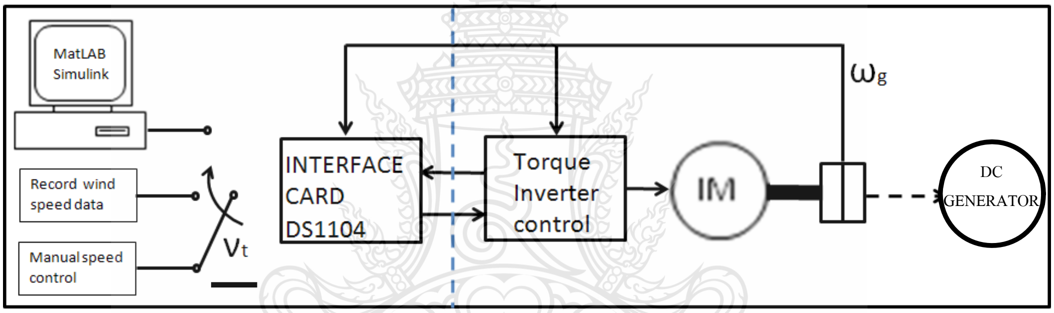
กำลังไฟฟ้าด้านอินพุตหาได้จาก $P_{input} = V_{input} \times I_{input}$

ตารางที่ 4.5 ทดสอบหาค่าประสิทธิภาพโดยรักษาระดับแรงดันอินพุตคงที่ แบบวงปิด

ลำดับการเปลี่ยนโหลด	แรงดันอินพุต (V)	กระแสอินพุต (A)	แรงดันเอาต์พุต (V)	กระแสเอาต์พุต (A)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (W)	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (W)	ประสิทธิภาพ (%)
1	50	3.75	311	0.37	187	115	61
2	50	6.37	311	0.75	318	233	73
3	50	9.50	311	1.12	475	348	73

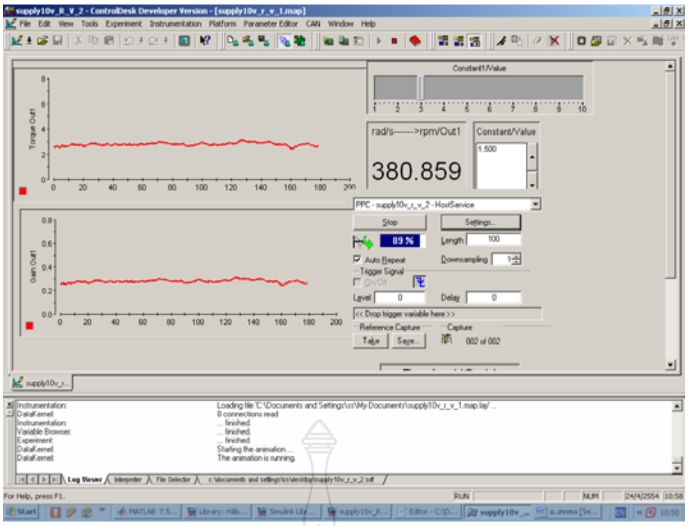
4.2 เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE

เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE สามารถกำหนดค่าความเร็วลมต่างๆได้โดยผ่านโปรแกรม Matlab/Simulink แต่จะมีความล่าช้าในกระบวนการประมวลผลอันเนื่องมาจากต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ขนาดใบ ความแปรปรวน ก่อนแล้วจึงทำการส่งผ่านสัญญาณให้กับอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE ทำการประมวลผลแปลงค่าเป็นแบบทันเวลา ทุกครั้งซึ่งเสียเวลามาก ในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้โปรแกรม Control Desk เป็นโปรแกรมที่ใช้ควบคุมค่าพารามิเตอร์ผ่านหน้าต่างของ Graphic User Interface เมื่อได้ทำการส่งผ่านสัญญาณให้กับอินเตอร์เฟสการ์ด ทำการประมวลผลแปลงเป็นแบบทันเวลาในครั้งแรกแล้วการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆจะถูกควบคุมที่หน้าต่างของโปรแกรม Control Desk



(ก) โครงสร้างและส่วนประกอบเครื่องจำลองกังหันลม

(ข) เครื่องจำลองกังหันลมต้นแบบที่สร้างขึ้น

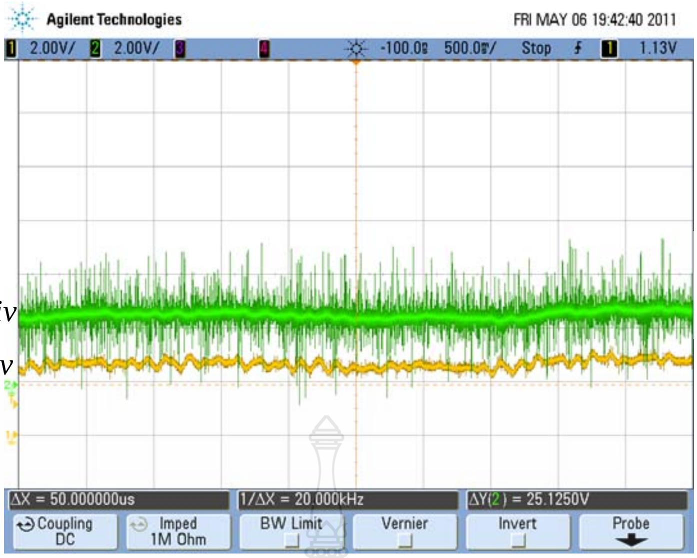


(ค) โปรแกรม Control Desk ใช้ปรับเปลี่ยนความเร็วลม

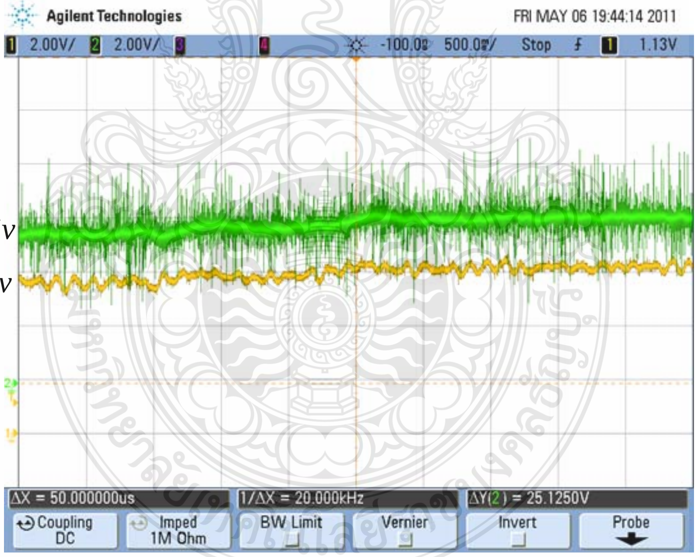
รูปที่ 4.15 เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วย อินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE ที่สร้างขึ้น

4.1.5 การทดสอบเครื่องจำลองกังหันลม

จากการเก็บข้อมูลการวัดความเร็วลม ณ ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ความสูง 30 เมตร จำนวน 5 วัน ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ทราบว่าความเร็วลมแต่ละวันมีค่าไม่สม่ำเสมอเมื่อคิดเป็นค่าเฉลี่ยประมาณ 3 เมตรต่อวินาที (3m/s) มาเป็นข้อมูลเริ่มต้นเสมือนเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆไว้ที่โปรแกรม Matlab/Simulink ทำการประมวลผลส่งผ่านสัญญาณให้กับอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE แล้วส่งผ่านเข้าอินเวอร์เตอร์สั่งการให้มอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนเสมือนกังหันลม เราสามารถวัดรูปสัญญาณดังกล่าวจากวงจรที่สร้างขึ้นมาได้ดังนี้



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบสัญญาณแรงบิดของมอเตอร์และสัญญาณแรงบิดอินเตอร์เฟสการ์ด ที่ความเร็วลม 3 m/s

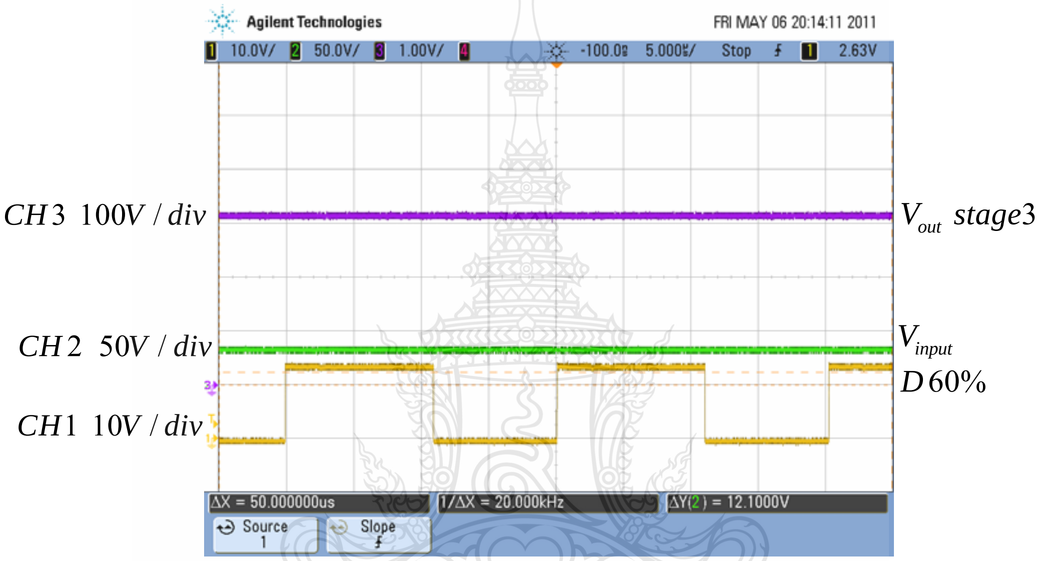


รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบสัญญาณแรงบิดของมอเตอร์และสัญญาณแรงบิดอินเตอร์เฟสการ์ด ที่ความเร็วลม 4 m/s

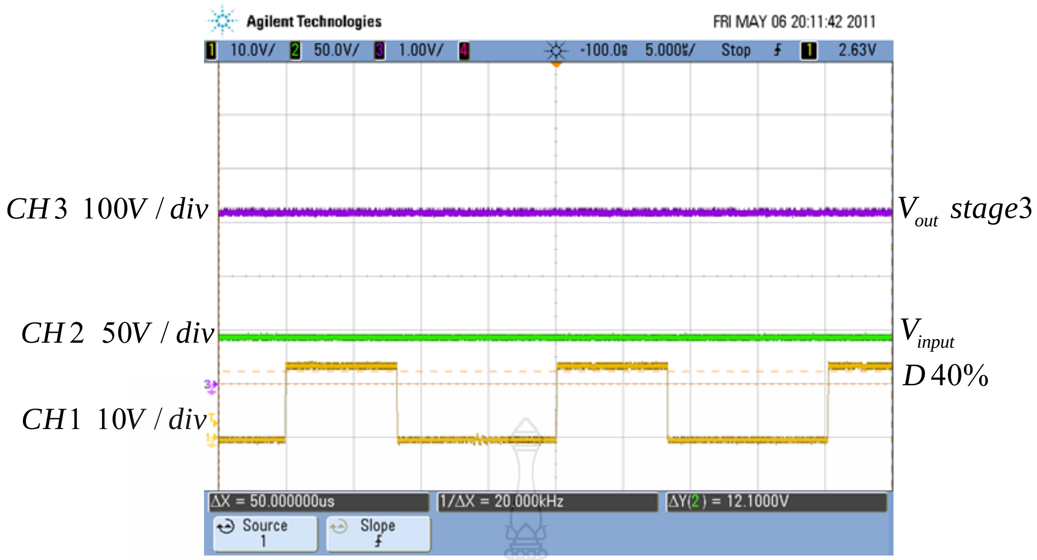
จากรูปที่ 4.16 – 4.17 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณแรงบิดของมอเตอร์จากการประมาณของอินเวอร์เตอร์และสัญญาณแรงบิดอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE จากวงจรที่สร้างขึ้นผลที่ได้วัดจริง พบว่า การตอบสนองสัญญาณทั้งสองมีความใกล้เคียงกันเสมือนเป็นสัญญาณเดียวกัน

4.3 การทดสอบวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับด้วยเครื่องจำลองกังหันลม

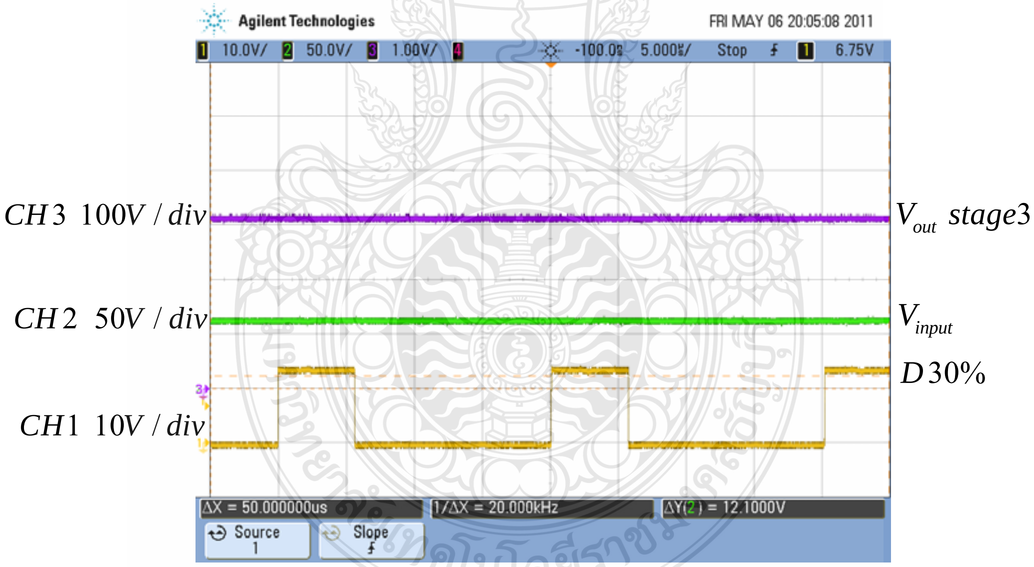
เมื่อทำการออกแบบในส่วนของวงจรกำลังและวงจรควบคุมของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับแล้ว นำวงจรมาสร้างเป็นเครื่องต้นแบบแล้วมาต่อร่วมกับเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE โดยทดสอบวัดค่าที่การควบคุมแบบวงปิดแบบเปลี่ยนแปลงโหลดทันที และกำหนดค่าการแปรปรวนลมเป็น สองระดับ ดังจะได้แสดงดังต่อไปนี้



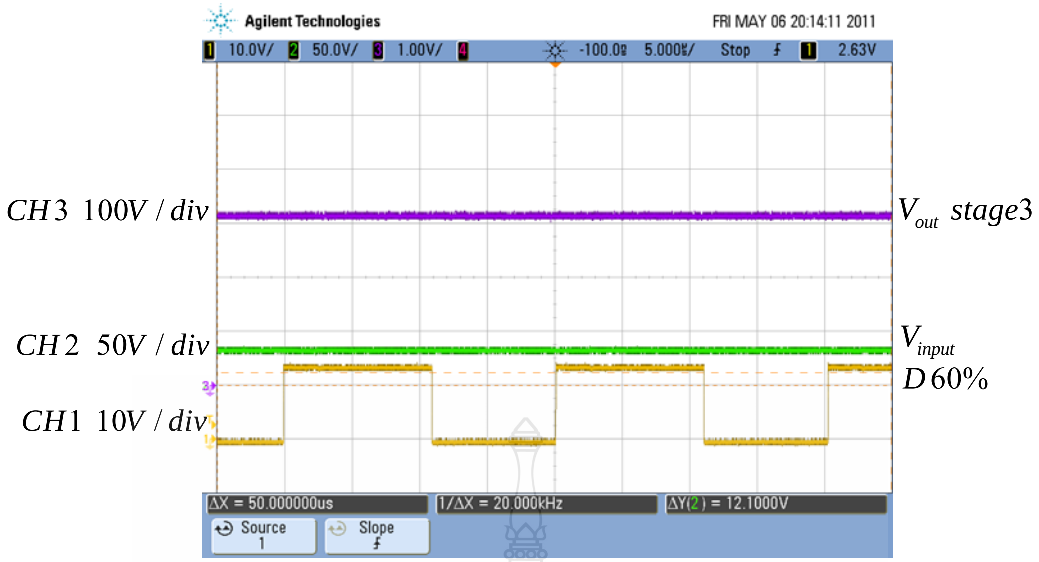
รูปที่ 4.18 สัญญาณแรงดันอินพุต 35 โวลต์ แรงดันเอาต์พุต 311 โวลต์ ที่ดิวตี้ไซเคิล 60% ควบคุมแบบวงปิด ที่ความเร็วลม 3 m/s และความแปรปรวนลม 2 %



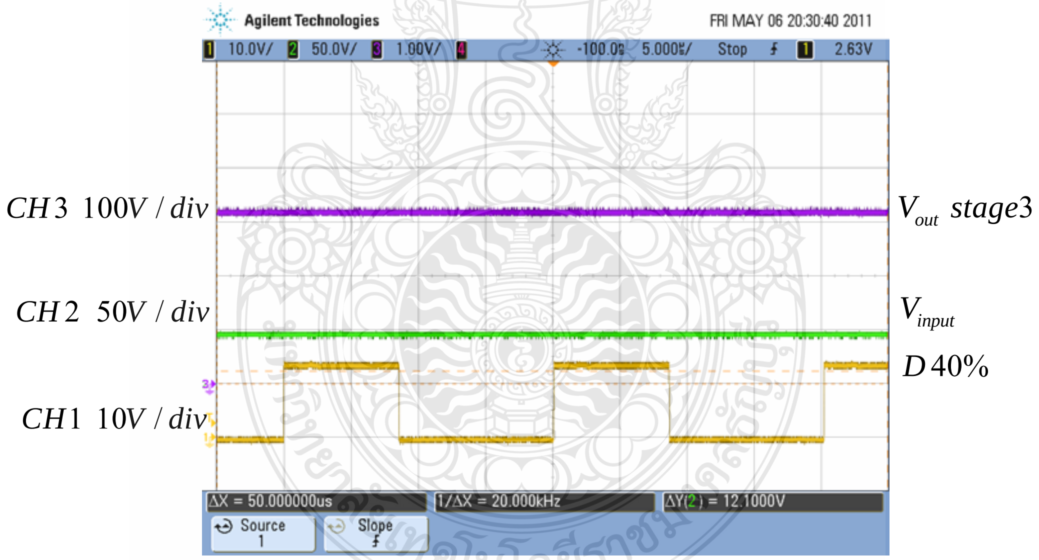
รูปที่ 4.19 สัญญาณแรงดันอินพุต 40 โวลต์ แรงดันเอาต์พุต 311 โวลต์ ที่ดิวตี้ไซเคิล 40% ควบคุมแบบวงปิด ที่ความเร็วลม 4 m/s และความแปรปรวนลม 2 %



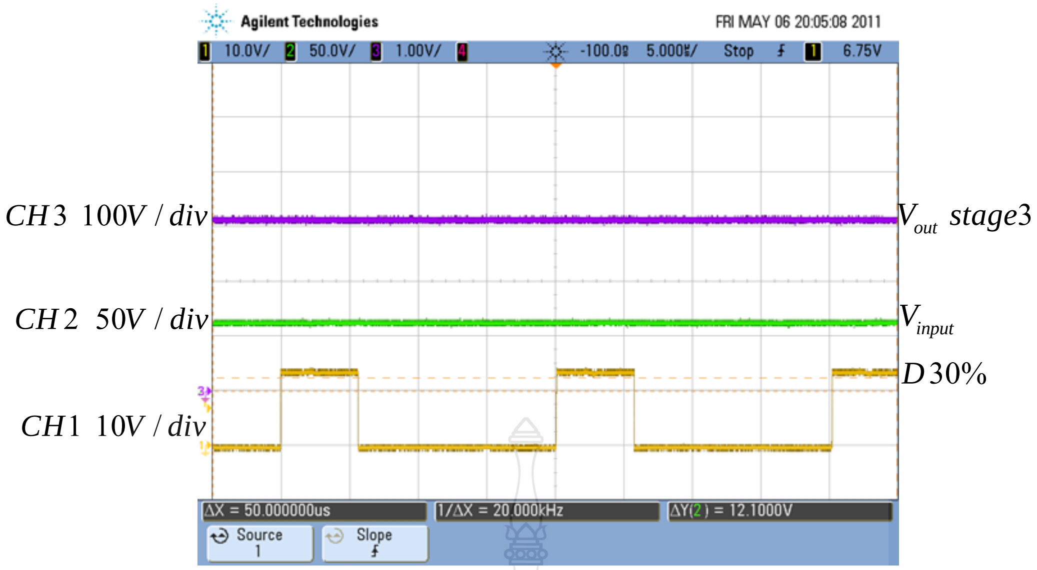
รูปที่ 4.20 สัญญาณแรงดันอินพุต 60 โวลต์ แรงดันเอาต์พุต 311 โวลต์ ที่ดิวตี้ไซเคิล 30% ควบคุมแบบวงปิด ที่ความเร็วลม 5 m/s และความแปรปรวนลม 2 %



รูปที่ 4.21 สัญญาณแรงดันอินพุต 35 โวลต์ แรงดันเอาต์พุต 311 โวลต์ ที่ดิวตี้ไซเคิล 60% ควบคุมแบบวงปิด ที่ความเร็วลม 3 m/s และความแปรปรวนลม 5 %



รูปที่ 4.22 สัญญาณแรงดันอินพุต 48 โวลต์ แรงดันเอาต์พุต 311 โวลต์ ที่ดิวตี้ไซเคิล 40% ควบคุมแบบวงปิด ที่ความเร็วลม 4 m/s และความแปรปรวนลม 5 %



รูปที่ 4.23 สัญญาณแรงดันอินพุต 65 โวลต์ แรงดันเอาต์พุต 311 โวลต์ ที่ดิวตี้ไซเคิล 30% ควบคุมแบบวงปิด ที่ความเร็วลม 5 m/s และความแปรปรวนลม 5 %

จากรูปที่ 4.18 – 4.23 จากวงจรที่สร้างขึ้นมีการควบคุมแบบวงปิดแบบเปลี่ยนแปลงโหลดทันที ผลการทดสอบกับเครื่องจำลองกังหันลม ณ ความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงไป รวมคือความแปรปรวนของลมที่เปลี่ยนแปลงนั้นได้พบว่า การตอบสนองในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรทบระดับแรงดันแบบสามระดับสำหรับกังหันลมที่สร้างขึ้นมานั้นสามารถคงแรงดันเอาต์พุตไว้ได้จริง

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ศึกษาการทำงานและออกแบบวงจรทบระดับแรงดันแบบคาสเคดแบบสามระดับเพื่อใช้งานร่วมเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงโดยมีเครื่องจำลองกังหันลมเป็นต้นกำลังที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE โดยจากการศึกษาลักษณะการทำงานวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบเดิม พบว่าสามารถต่อแบบคาสเคดเพื่อเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงเป็นระดับๆได้มากขึ้นโดยใช้สวิตช์และตัวเหนี่ยวนำอย่างละหนึ่งตัว และเมื่อนำวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นต่อร่วมกับเครื่องจำลองกังหันลมที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันอินพุตให้กับวงจรแปลงผัน พบว่าไม่สามารถรักษาแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดทันทีทันใด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เสนอตัวควบคุมแบบวงปิดแบบเฟสนำหน้า-ล้าหลัง

ผู้วิจัยได้สร้างวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับสำหรับกังหันลม ซึ่งประกอบด้วยวงจรทบระดับไฟฟ้าแบบคาสเคด เครื่องจำลองกังหันลมใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE ที่ต่อร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อทำการทดสอบวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดทันทีทันใด และรักษาแรงดันเอาต์พุตให้มีระดับแรงดันไฟฟ้า 311 โวลต์ให้คงที่ ผลการทดสอบร่วมกับผลการศึกษาสามารถนำมาสรุปเป็นผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ได้ดังนี้

5.1 สรุปผลงานวิจัย

วงจรทบระดับแรงดันแบบสามระดับ(ตัวทดสอบ)ที่ต่อกับเครื่องจำลองกังหันลม(ต้นกำลัง)ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอินพุตให้วงจรนั้น พบว่าวงจรทบระดับแรงดันแบบสามระดับไม่สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า 311 โวลต์ให้คงที่ได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดทันทีทันใด ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอตัวควบคุมแบบวงปิดแบบเฟสนำหน้า-ล้าหลัง

จากผลการทดสอบพบว่าเครื่องจำลองกังหันลมใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE ต่อร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอินพุตให้วงจรที่ความเร็วลม 3 - 5 m/s มีความแปรปรวนลม 2 – 5 % มีระดับแรงดันไฟฟ้า 35 – 65 โวลต์ ดังรูปที่ 4.18 – 4.23 นั้นวงจรทบระดับแรงดันแบบสามระดับควบคุมแบบวงปิดแบบเฟสนำหน้า-ล้าหลังที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดทันทีทันใด สามารถรักษาแรงดันไฟฟ้า 311 โวลต์ให้คงที่

จากที่กล่าวมาทั้งหมดวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบคาสเคดสามระดับควบคุมแบบวงปิดที่สร้างขึ้นมานั้นสามารถเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอินพุตที่ต่ำให้มีระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้น

ที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดทันทีทันใด สามารถรักษาแรงดันไฟฟ้า 311 โวลต์ให้คงที่ โดยการทดสอบสามารถต่อร่วมกับเครื่องจำลองกังหันลมที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอินพุตให้วงจรที่กำหนดค่าความเร็วลมได้จากโปรแกรม Matlab/Simulink หรือโปรแกรม Control Desk แต่มีข้อเสียคือต้องเลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เหมาะสมกับมอเตอร์เหนี่ยวนำหรือเลือกใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกออกแบบมาสำหรับกังหันลม เพราะแรงดันเอาต์พุตจะมีระดับที่สูงกว่าที่ได้นำเสนอได้

5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการนำเสนอ วงจรทบระดับแรงดันแบบสามระดับสำหรับกังหันลม ดังนั้นจึงควรแก้ไขเพิ่มเติมในส่วนต่อไปนี้

5.2.1 ควรนำข้อดีของการควบคุมแบบเฟสนำหน้า-ล้าหลังมาใช้เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ได้แบบวงปิด

5.2.2 ควรนำตัวควบคุมที่สร้างขึ้นมาทดสอบกับกังหันลมจริง

5.2.3 ควรมีการทดสอบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายประเภท

5.2.4 ควรพัฒนาให้สามารถทำงานร่วมกับระบบส่งจ่ายไฟฟ้าได้

5.2.5 หากต้องการลดกำลังสูญเสียให้น้อยที่สุด จึงควรใช้คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิคสวิตช์แบบนิ่มนวล (Soft Switching)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

[1] การพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้า,คณะอนุกรรมการพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้า มกราคม 2545. http://www.eppo.go.th/load/load-forecast/index.html (18 เมษายน 2554).

[2] Middlebrook R.D., “Transformerless DC-to-DC converters with large conversion ratios,” **IEEE Trans. Power Electron**., pp. 484–488,1988.

[3] Maksimovic D., and CUK S., “Switching converters with wide DC conversion range,” **IEEE Trans. Power Electron**., pp. 151–157,1991.

[4] Dongyan Z, Pietkiewic, Pietkiewicz A, and CUK S., “A three-switch high-voltage converter,” **IEEE Trans. Power Electron**., pp. 177–183,1999.

[5] Abutbul O, Gherlitz A, Berkovich Y, and Ioinovici A., “Step-up switching-mode converter with high voltage gain using a switched-capacitor circuit,” **IEEE Trans. Circuits Syst. I: Fundam. Theory**., pp. 1098–1102,2003.

[6] Yonetani S, KondoY, Akagi H, and Fujita H ., “A6.6-kV Transformerless STATCOM based on a five-level diode-clamped PWM converter system design and experimentation of a 200-V 10-kVA laboratory model,” **IEEE Trans. Ind**., pp. 672–680.

[7] Rodriguez J, Lai J.-S, and Peng F.Z., “Multilevel inverters a survey of topologies, controls, and applications,” **IEEE Trans. Ind. Electron**., pp. 724–738,2002.

[8] Lai J.-S, and Peng F.Z., “Multilevel converters – a new breed of power converters,” **IEEE Trans. Ind**., pp. 509–517, 1996.

[9] Fan Z, Peng F.Z, and Zhaoming Q., “Study of the multilevel converters in DC–DC applications,” **IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conf**., PESC 04, vol. 2, pp. 1702–1706,2004.

[10] Julio C.R.-C, Ramirez J.M, and Dedro M.G.-V., “NovelDC–DC multilevel boost converter,” **Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conf**., 2008.

[11] วีรเชษฐ์ ขันเงิน, วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์, **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง,** กรุงเทพฯ: หจก.วี.เจ.พริ้นติ้ง, 2547, หน้า 353 – 375.

[12] Julio C.R.-C, Ramirez J.M, Peng F.Z, and Valderrabano A., “A DC-DC multilevel boost Converter,” **IET Power Electron**., Vol. 3, pp129-137,2010.

[13] Heier, and Siegfried, “**Grid integration of Wind energy conversion systems**,” chichester,England: Wiley,2006.

[14] กรวิทย์ กระจ่างพันธ์, **การสร้างและการเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมกังหันลมแบบป้อนล่วงหน้า แบบติดตามกำลังสูงสุด และ แบบฟัซซี สำหรับกังหันลมขนาดเล็กแบบมุมใบพัดคงที่** วิทยานิพนธ์นิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ,2549.

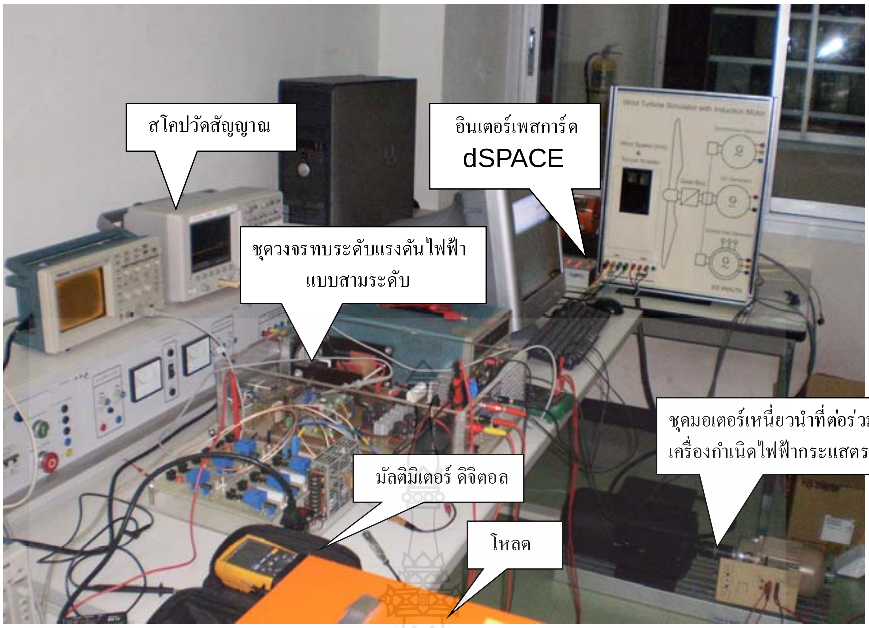
[15] แผนที่ศักยภาพ พลังงานลมในประเทศไทย,กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน มกราคม 2546 . http://www.dede.go.th/dede/index.php (เมษายน 2552)

[16] Nod Mohan, "**First Course on Power Electronics**," England: Wiley,2009.

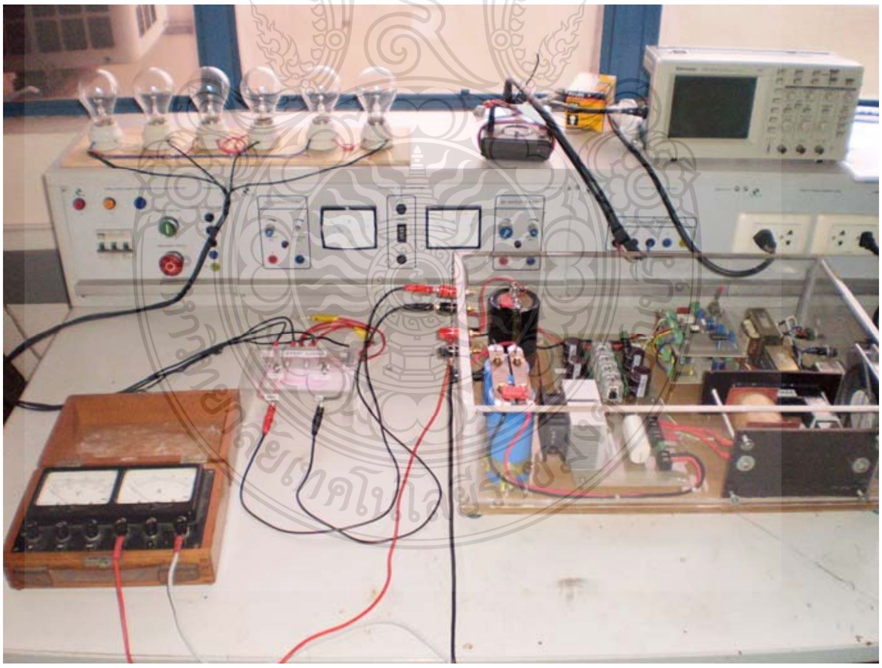
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ภาคผนวก ก

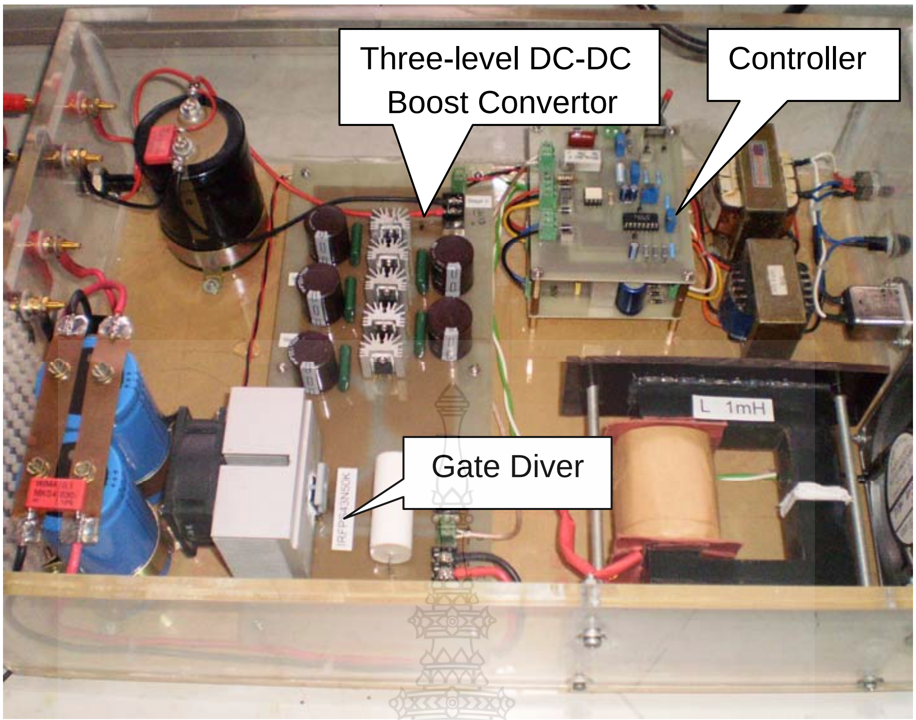
รูปเครื่องต้นแบบ



รูปที่ ก.1 เครื่องต้นแบบวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับทดสอบด้วยเครื่องจำลองกังหันลม



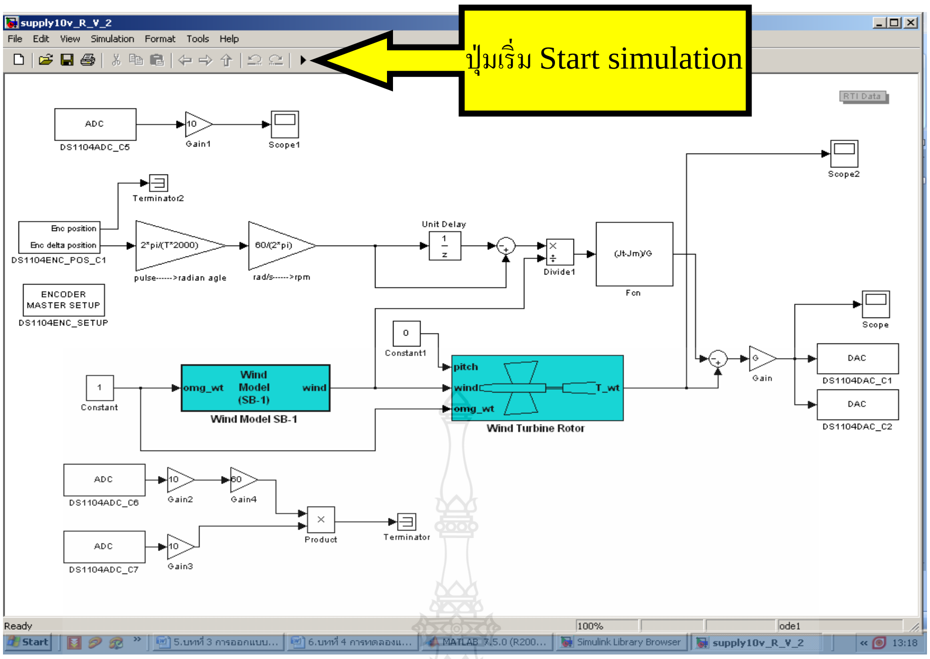
รูปที่ ก.2 เครื่องต้นแบบวงจรทบระดับแรงดันแบบสามระดับที่ใช้ทดสอบ



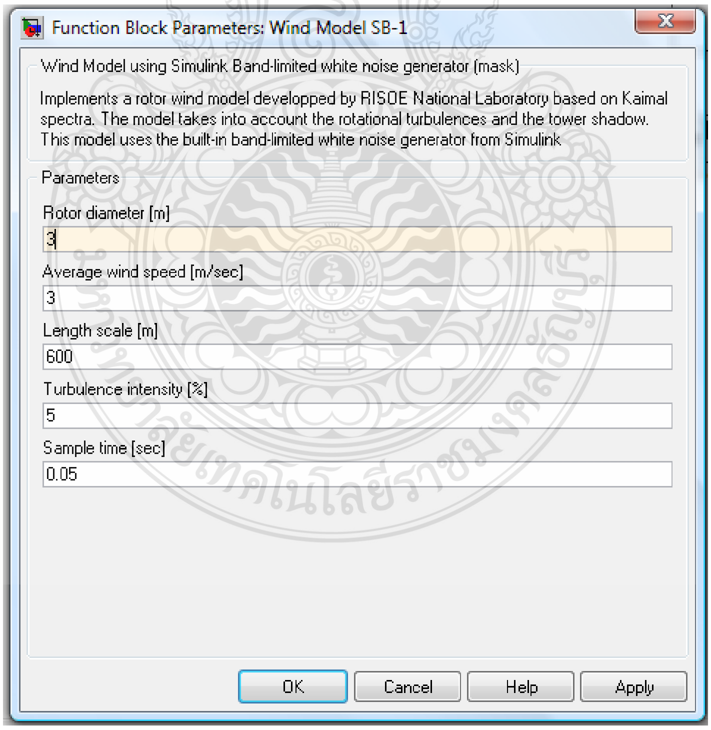
รูปที่ ก.3 อุปกรณ์เครื่องต้นแบบวงจรทบระดับแรงดันแบบสามระดับ

ภาคผนวก ข

โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองของเครื่องจำลองกังหันลม

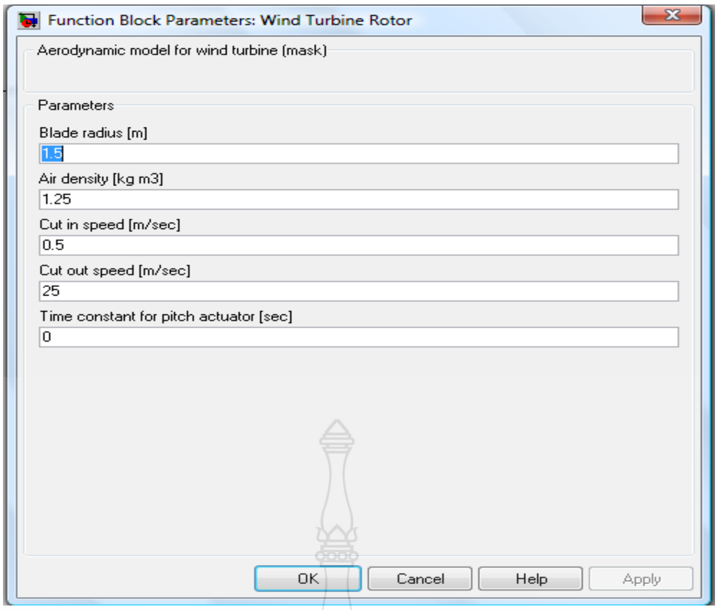


รูปที่ ข.1 โปรแกรม Matlab/Simulink ที่ใช้แบบจำลองระบบเครื่องจำลองกังหันลม

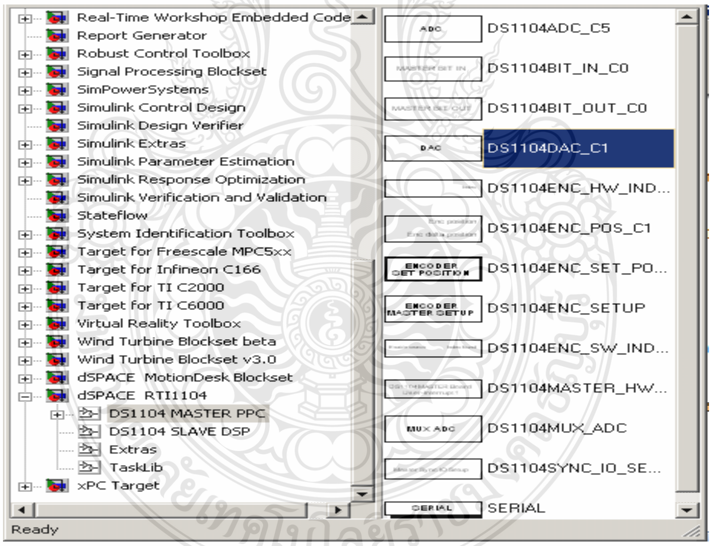


รูปที่ ข.2 การกำหนดค่าใน Block Parameters Wind Model SB-1

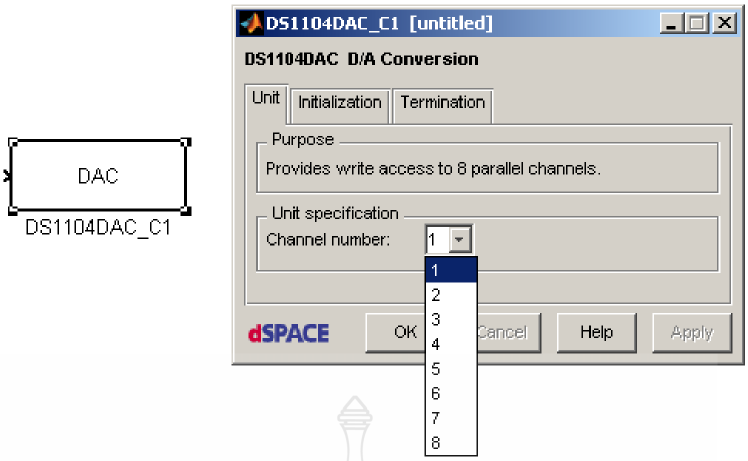
ในโปรแกรม Matlab/Simulink



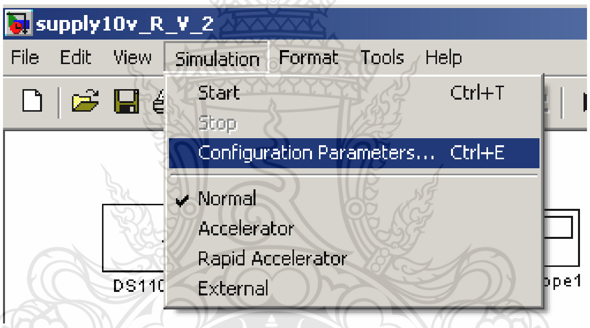
รูปที่ ข.3 การกำหนดค่าใน Block Parameters Wind Turbine Rotor
ในโปรแกรม Matlab/Simulink



รูปที่ ข.4 การเลือกช่องเอาต์พุตของ Block set D/A โดยไปที่หน้าต่างของ
Simulink Library Browser

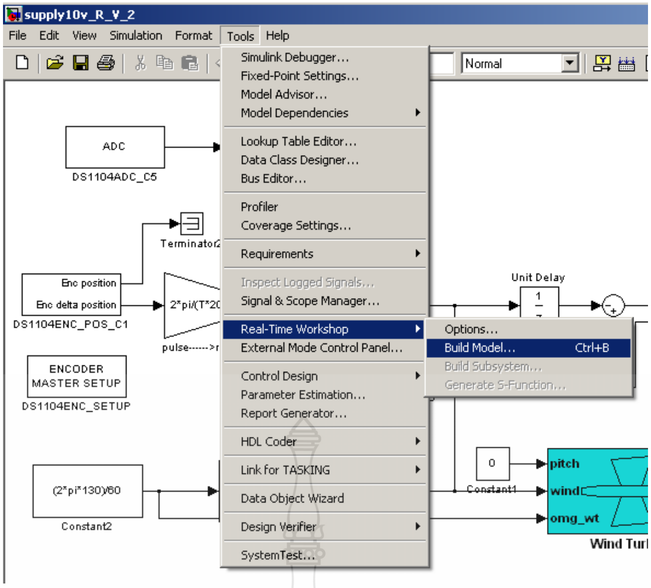


รูปที่ ข.5 การเลือกช่องเอาท์พุทของ Block set D/A

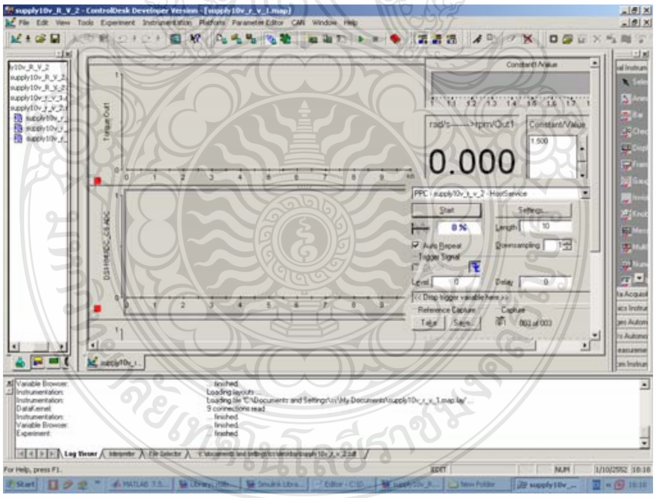


รูปที่ ข.6 การกำหนดค่าคุณลักษณะการแสดงผล โดยไปที่หน้าต่างของ

Simulation >Configuration Parameter



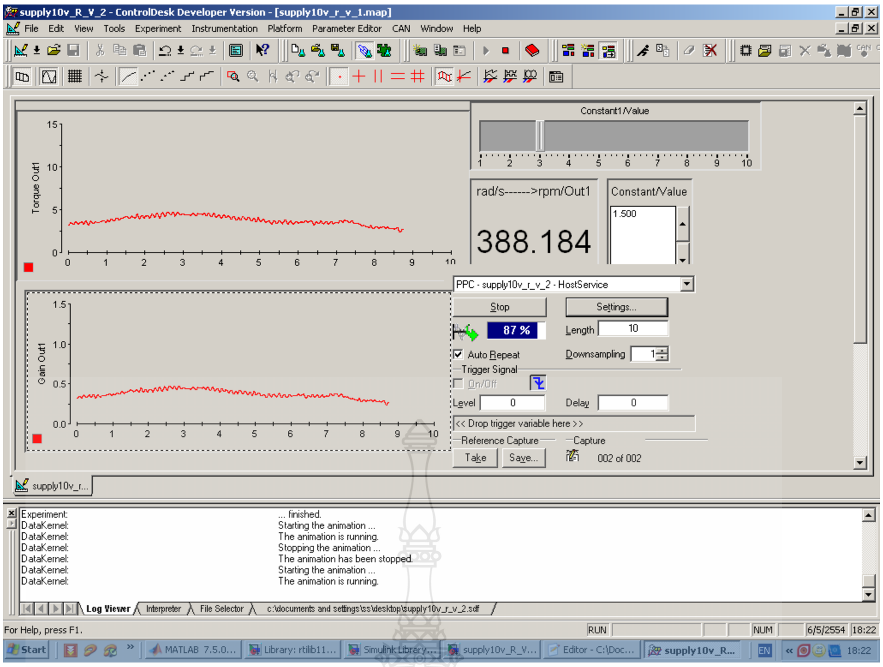
รูปที่ ข.7 การส่งสัญญาณให้กับอินเตอร์เฟสการ์ด dSPACE ทำการประมวลผลแปลงเป็นแบบทันเวลาโดยไปที่หน้าต่างของ Tool >Real Times Works >Build Model >Enter



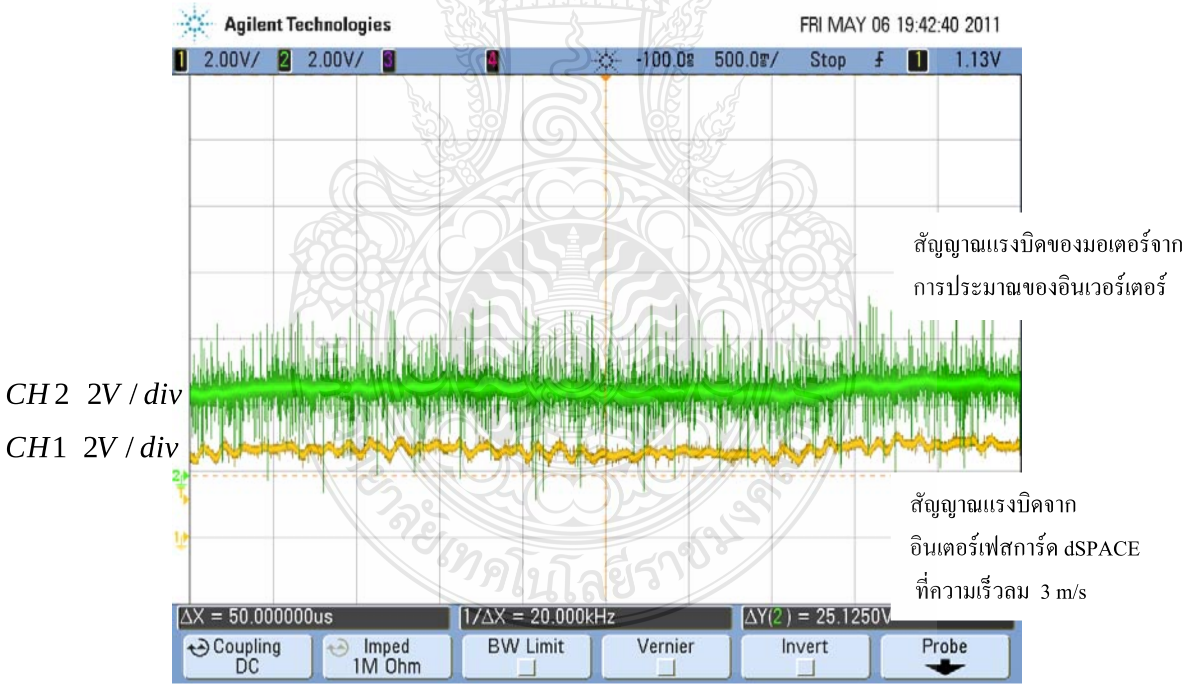
รูปที่ ข.8 โปรแกรม Control Desk เป็นโปรแกรมที่ Control Parameters ผ่านหน้าต่างของ Graphic User Interface แบบทันเวลา

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบเครื่องจำลองกังหันลมจากโปรแกรม Control Desk กับวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับ



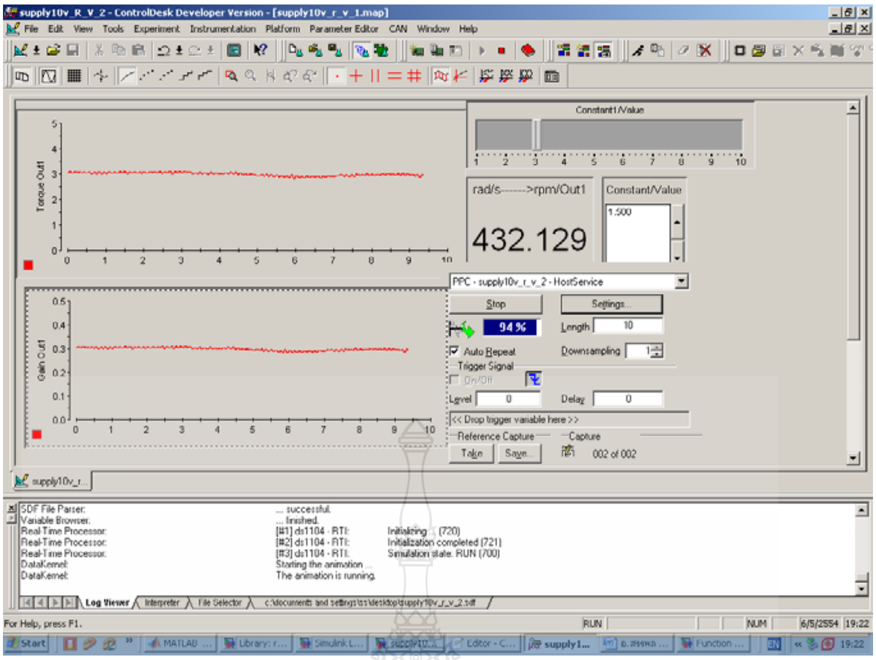
ก)



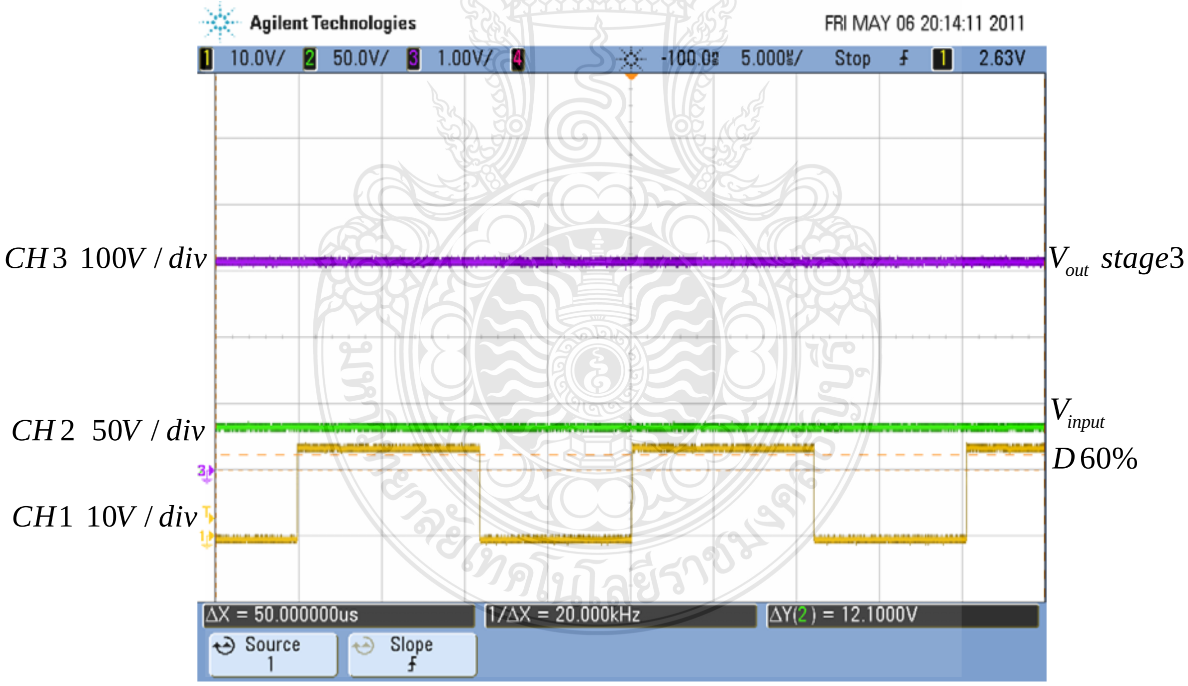
ข)

รูปที่ ค.1 ก) โปรแกรม Control Desk ปรับเปลี่ยนความเร็วลมที่ 3m/s ผ่านหน้าต่างของ GUI

ข) สัญญาณแรงบิดของมอเตอร์และสัญญาณแรงบิดอินเตอร์เฟสการ์ดที่ความเร็วลม 3m/s



ก)

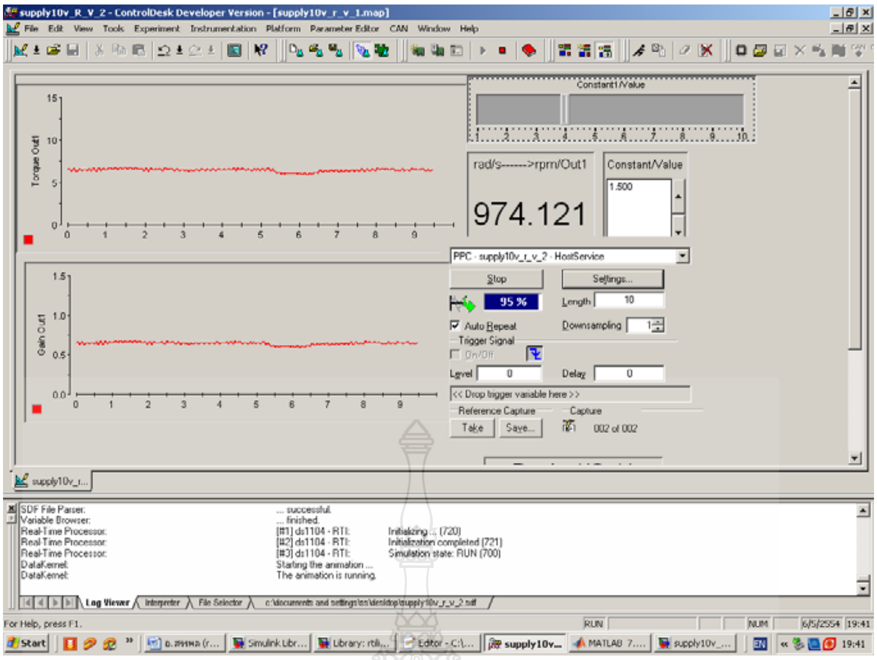


ข)

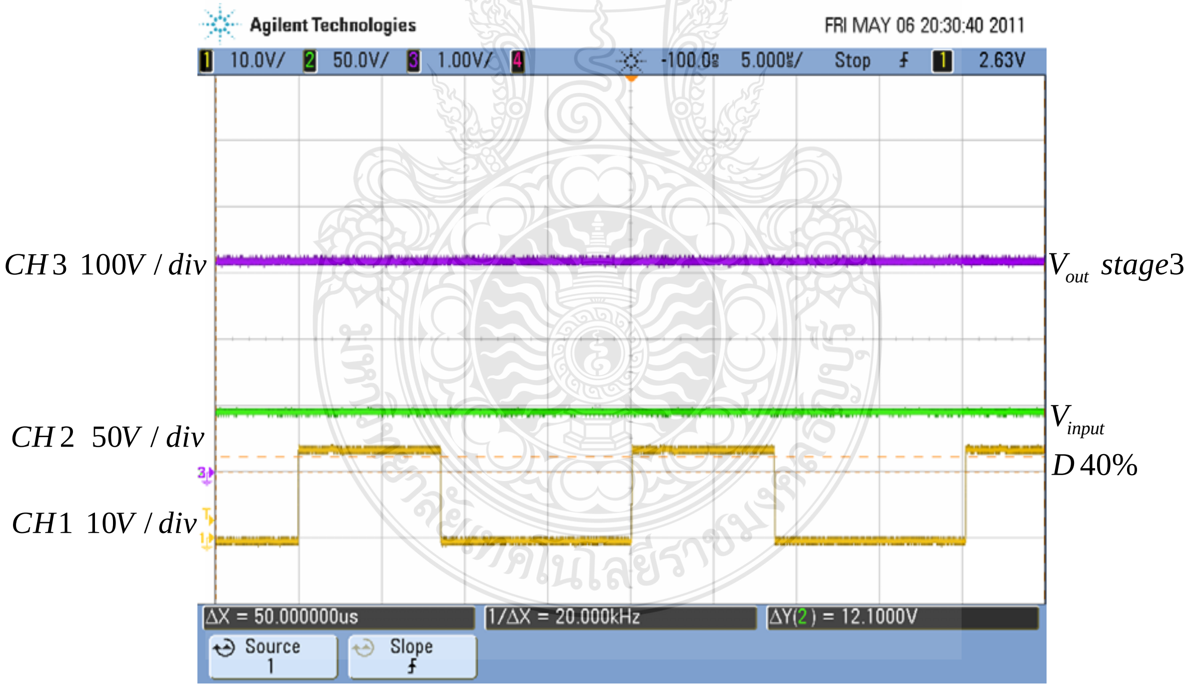
รูปที่ ค.2 ก) โปรแกรม Control Desk ปรับเปลี่ยนความเร็วลมที่ 3m/s ที่ความแปรปรวนลม 2%

ข) สัญญาณแรงดันอินพุต 35 โวลต์ แรงดันเอาต์พุต 311 โวลต์ ที่ดิวตี้ไซเคิล 60%

ควบคุมแบบวงปิด ที่ความเร็วลม 5 m/s และความแปรปรวนลม 2 %



ก)



ข)

รูปที่ ค.3 ก) โปรแกรม Control Desk ปรับเปลี่ยนความเร็วลมที่ 4m/s ที่ความแปรปรวนลม 5%

ข) สัญญาณแรงดันอินพุต 48 โวลต์ แรงดันเอาต์พุต 311 โวลต์ ที่ดิวตี้ไซเคิล 40% ควบคุมแบบวงปิด ที่ความเร็วลม 4 m/s และความแปรปรวนลม 5 %

ภาคผนวก ง

ข้อมูลอุปกรณ์

TEXAS INSTRUMENTS
www.ti.com

HIGH SPEED PWM CONTROLLER

FEATURES

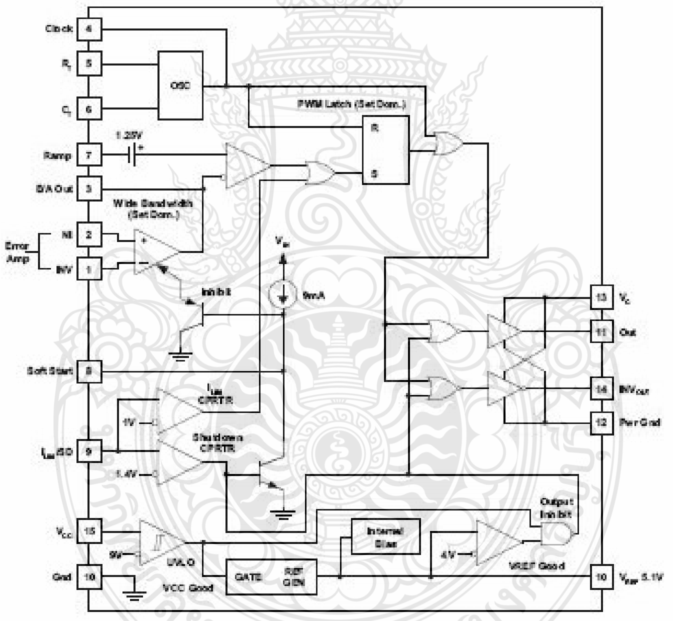
- Complementary Outputs
- Practical Operation Switching Frequencies to 1 MHz
- 50-ns Propagation Delay to Output
- High Current Dual Totem Pole Outputs (1.5 A Peak)
- Wide Bandwidth Error Amplifier
- Fully Latched Logic With Double Pulse Suppression
- Pulse-by-Pulse Current Limiting
- Soft Start/Maximum Duty Cycle Control
- Under-Voltage Lockout with Hysteresis
- Low Start Up Current (1.1 mA)
- Trimmed Bandgap Reference (5.1 V ± 1%)

DESCRIPTION

The UC1824 family of PWM control devices is optimized for high frequency switched mode power supply applications. Particular care was given to minimizing propagation delays through the comparators and logic circuitry while maximizing bandwidth and slew rate of the error amplifier. This controller is designed for use in either current mode or voltage mode systems with the capability for input voltage feed-forward.

Protection circuitry includes a current limit comparator with a 1-V threshold, a TTL compatible shutdown port, and a soft-start pin which doubles as a maximum duty cycle clamp. The logic is fully latched to provide jitter free operation and prohibit multiple pulses at an output. An under-voltage lockout section with 800 mV of hysteresis assures low start up current. During under-voltage lockout, the outputs are high impedance.

BLOCK DIAGRAM



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 1997–2007, Texas Instruments Incorporated

DESCRIPTION (CONTINUED)

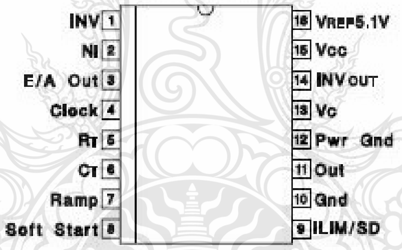
These devices feature totem pole outputs designed to source and sink high peak currents from capacitive loads, such as the gate of a power MOSFET. The on state is designed as a high level.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS(1)(2)

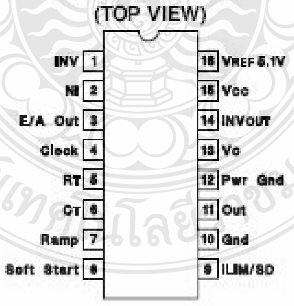
	VALUE	UNIT
Supply voltage (pins 13, 15)	30	V
Output current, source or sink (pins 11, 14)		
DC	0.5	A
Pulse (0.5 ms)	2	A
Analog inputs		
(Pins 1, 2, 7)	–0.3 TO 7	V
(Pin 8, 9)	–0.3 TO 6	V
Clock output current (pin 4)	–5	mA
Error amplifier output current (pin 3)	5	mA
Soft start sink current (pin 8)	20	mA
Oscillator charging current (pin 5)	–5	mA
Power dissipation	1	W
Storage temperature range	–65 to 150	°C
Lead temperature (soldering, 10 seconds)	300	°C

(1) All voltages are with respect to GND (Pin 10); all currents are positive into, negative out of part; pin numbers refer to DIL-16 package.
(2) Consult Unitrode Integrated Circuit Databook for thermal limitations and considerations of package.

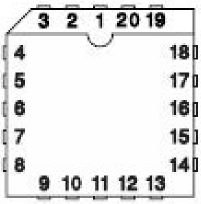
SOIC-16
DW PACKAGE
(TOP VIEW)



DIL-16
J OR N PACKAGE
(TOP VIEW)



PLCC-20 AND LCC-20
Q AND L PACKAGES
(TOP VIEW)



PACKAGE PIN FUNCTION	
FUNCTION	PIN
N/C	1
INV	2
NI	3
E/A Out	4
Clock	5
N/C	6
R_T	7
C_T	8
Ramp	9
Soft Start	10
N/C	11
ILIM/SD	12
Gnd	13
Out	14
Pwr Gnd	15
N/C	16
V_C	17
INV_{OUT}	18
V_{CC}	19
V_{REF} 5.1V	20

TEXAS INSTRUMENTS
www.ti.com

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Unless otherwise stated, these specifications apply for, R_T = 3.65k, C_T = 1 nF, V_{CC} = 15 V, –55°C < T_A < 125°C for the UC1824, –40°C < T_A < 85°C for the UC2824, and 0°C < T_A < 70°C for the UC3824, T_A = T_J.

PARAMETER	TEST CONDITIONS	UC1824 UC2824			UC3824			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Reference Section								
Output voltage	T_J = 25°C, I_O = 1 mA	5.05	5.10	5.15	5	5.10	5.20	V
Line regulation	10 V < V_{CC} < 30 V		2	20		2	20	mV mV
Load regulation	1 mA < I_O < 10 mA		5	20		5	20	
Temperature stability(1)	T_{MIN} < T_A < T_{MAX}		0.2	0.4		0.2	0.4	mV/°C
Total output variation(1)	Line, Load, Temperature	5		5.20	4.95		5.25	V
Output noise voltage(1)	10 Hz < f < 10 kHz		50			50		µV
long term stability(1)	T_J = 125°C, 1000 hrs.		5	25		5	25	mV
Short circuit current	V_{REF} = 0 V	–15	–50	–100	–15	–50	–100	mA
Oscillator Section								
Initial accuracy(1)	T_J = 25°C	360	400	440	360	400	440	kHz
Voltage stability(1)	10 V < V_{CC} < 30 V		0.2%	2%		0.2%	2%	
Temperature stability(1)	T_{MIN} < T_A < T_{MAX}		5%			5%		
Total variation(1)	Line, Temperature	340		460	340		460	kHz
Clock out high		3.9	4.5		3.9	4.5		V
Clock out low			2.3	2.9		2.3	2.9	
Ramp peak(1)		2.6	2.8	3	2.6	2.8	3	
Ramp valley(1)		0.7	1	1.25	0.7	1	1.25	
Ramp valley to peak(1)		1.6	1.8	2	1.6	1.8	2	
Error Amplifier Section								
Input offset voltage				10			15	mV
Input bias current			0.6	3		0.6	3	µA
Input offset current			0.1	1		0.1	1	µA
Open loop gain	1 V < V_O < 4 V	60	95		60	95		dB
CMRR	1.5 V < V_{CM} < 5.5 V	75	95		75	95		
PSRR	10 V < V_{CC} < 30 V	85	110		85	110		
Output sink current	$V_{PIN\ 3}$ = 1 V	1	2.5		1	2.5		mA
Output source current	$V_{PIN\ 3}$ = 4 V	–0.5	–1.3		–0.5	–1.3		
Output high voltage	$I_{PIN\ 3}$ = –0.5 mA	4	4.7	5	4	4.7	5	V
Output low voltage	$I_{PIN\ 3}$ = 1 mA	0	0.5	1	0	0.5	1	
Unity gain bandwidth(1)		3	5.5		3	5.5		MHz
Slew rate(1)		6	12		6	12		V/µs
PWM Comparator Section								
Pin 7 bias current	$V_{PIN\ 7}$ = 0 V		–1	–5		–1	–5	µA
Duty cycle range		0		80	0		85	%
Pin 3 zero dc threshold	$V_{PIN\ 7}$ = 0 V	1.1	1.25		1.1	1.25		V
Delay to output(1)			50	80		50	80	ns
Soft-Start Section								
Charge current	$V_{PIN\ 8}$ = 0.5 V	3	9	20	3	9	20	µA
Discharge current	$V_{PIN\ 8}$ = 1 V	1			1			mA
Current Limit/Shutdown Section								
Pin 9 bias current	0 < $V_{PIN\ 9}$ < 4 V			15			10	µA

(1) This parameter not 100% tested in production but guaranteed by design.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

Unless otherwise stated, these specifications apply for, R_T = 3.65k, C_T = 1 nF, V_{CC} = 15 V, –55°C < T_A < 125°C for the UC1824, –40°C < T_A < 85°C for the UC2824, and 0°C < T_A < 70°C for the UC3824, T_A = T_J.

PARAMETER	TEST CONDITIONS	UC1824 UC2824			UC3824			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Current limit threshold		0.9	1	1.1	0.9	1	1.1	V
Shutdown threshold		1.25	1.40	1.55	1.25	1.40	1.55	V
Delay to output			50	80		50	80	ns
Output Section								
Output low level	I_{OUT} = 20 mA		0.25	0.40		0.25	0.40	V
	I_{OUT} = 200 mA		1.2	2.2		1.2	2.2	
Output high level	I_{OUT} = –20 mA	13	13.5		13	13.5		
	I_{OUT} = –200 mA	12	13		12	13		
Collector leakage	V_C = 30 V		100	500		10	500	µA
Rise/fall time(2)	CL = 1 nF		30	60		30	60	ns
Under-Voltage Lockout Section								
Start threshold		8.8	9.2	9.6	8.8	9.2	9.6	V
UVLO hysteresis		0.4	0.8	1.2	0.4	0.8	1.2	
Supply Current Section								
Start up current	V_{CC} = 8 V		1.1	2.5		1.1	2.5	mA
ICC	$V_{PIN 1}$, $V_{PIN 7}$, $V_{PIN 9}$ = 0 V; $V_{PIN 2}$ = 1 V		22	33		22	33	

(2) This parameter not 100% tested in production but guaranteed by design.

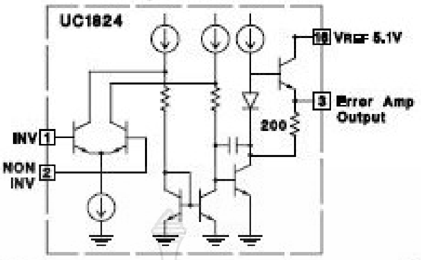
UC1824 Printed Circuit Board Layout Considerations

High speed circuits demand careful attention to layout and component placement. To assure proper performance of the UC1824 follow these rules:

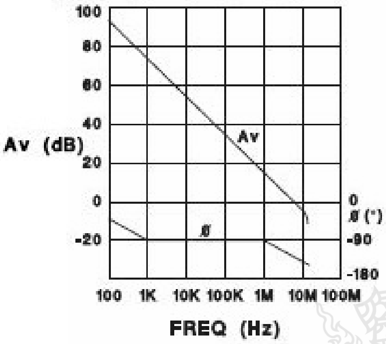
1. Use a ground plane.
2. Damp or clamp parasitic inductive kick energy from the gate of driven MOSFETs. Do not allow the output pins to ring below ground. A series gate resistor or a shunt 1-A Schottky diode at the output pin serves this purpose.
3. Bypass V_{CC}, V_C, and V_{REF}. Use 0.1-µF monolithic ceramic capacitors with low equivalent series inductance. Allow less than 1 cm of total lead length for each capacitor between the bypassed pin and the ground plane.
4. Treat the timing capacitor, C_T, like a bypass capacitor.

Error Amplifier Circuit

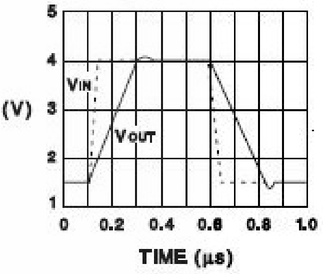
Simplified Schematic



Open Loop Frequency Response

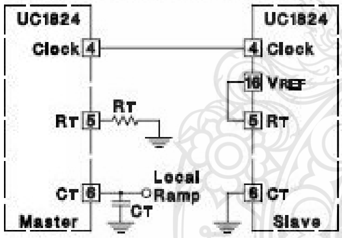


Unity Gain Slew Rate

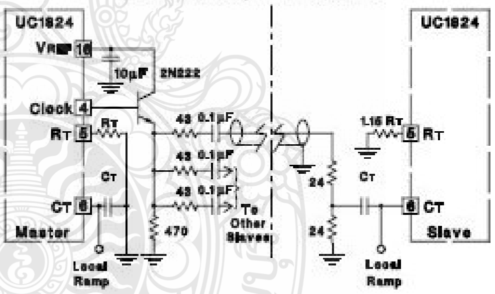


Synchronized Operation

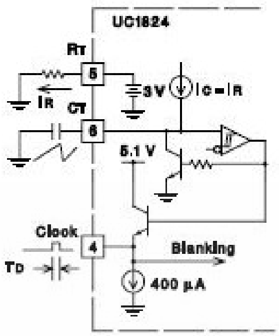
Two Units in Close Proximity



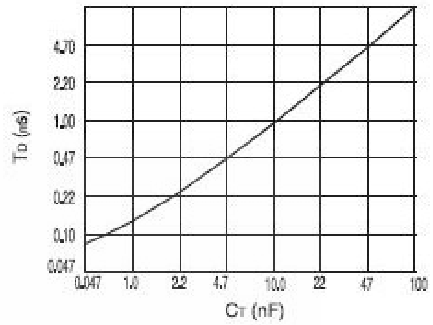
Generalized Synchronization



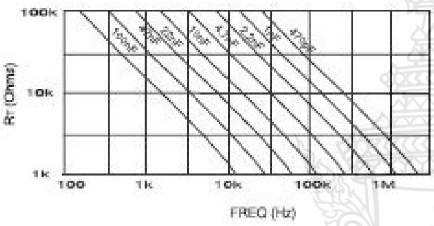
Oscillator Circuit



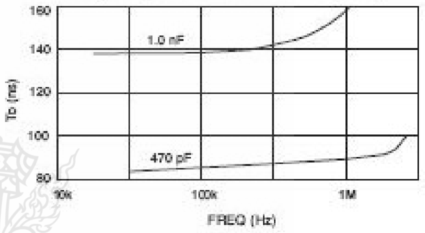
Primary Output Deadtime vs C_T ($3k \le R_T \le 100k$)



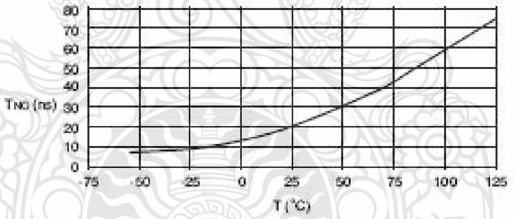
Timing Resistance vs Frequency



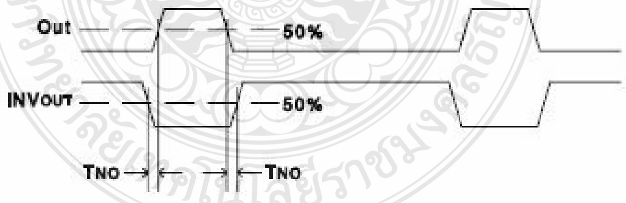
Primary Output Deadtime vs Frequency



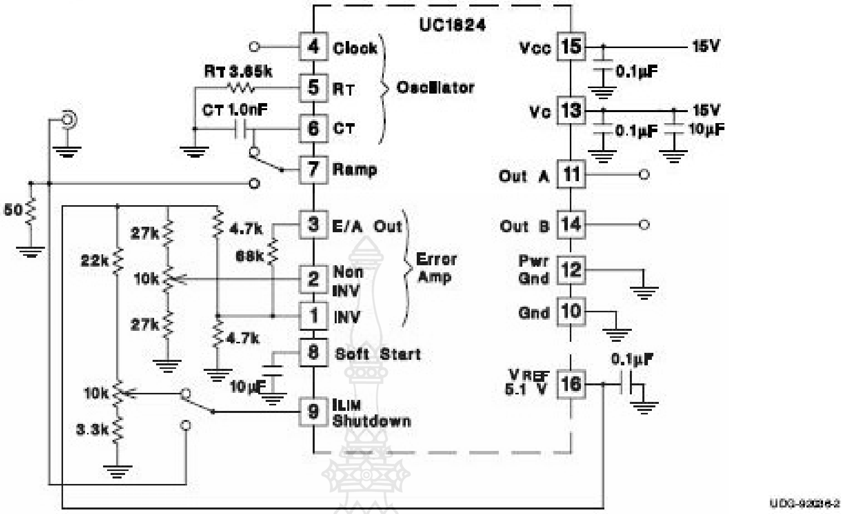
Typical Non-Overlap Time (TNO) Over Temperature



Non-Overlap Time (TNO)

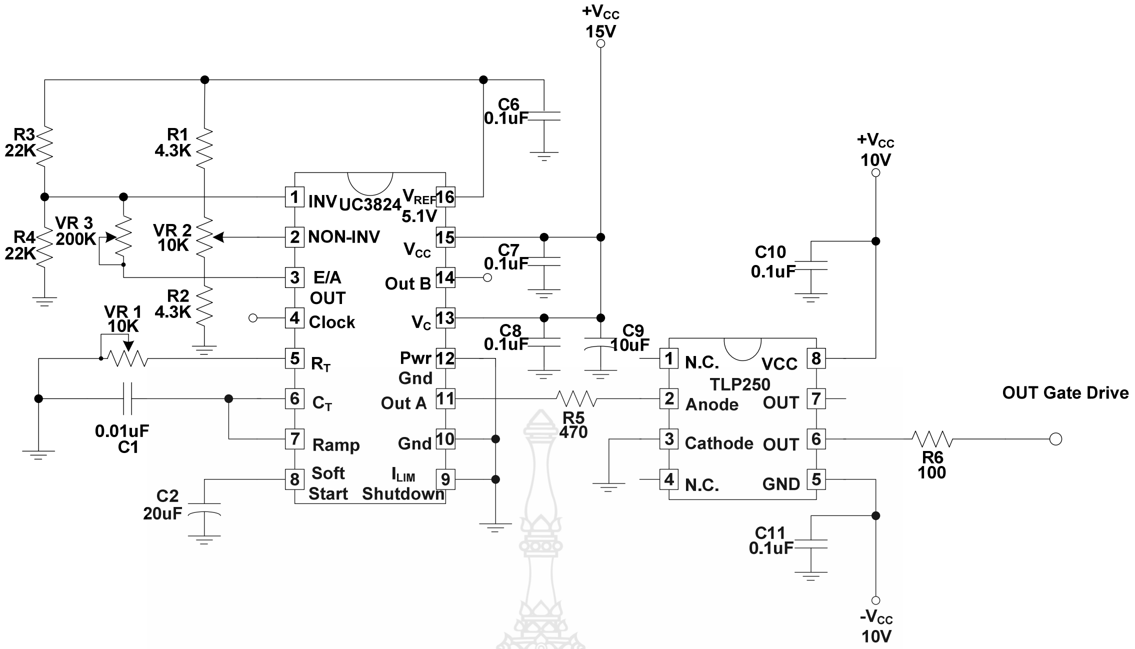


Open-Loop Laboratory Test Fixture

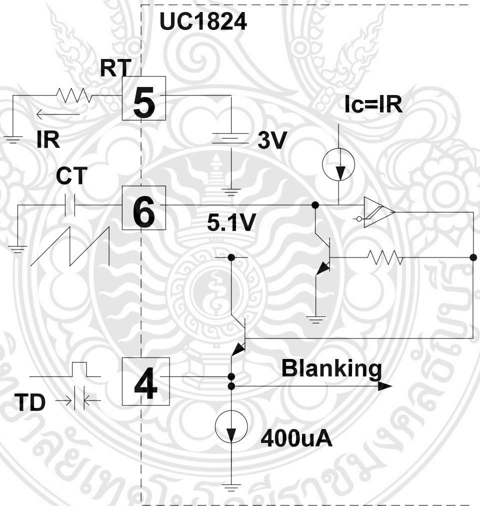


This test fixture is useful for exercising many of the UC1824's functions and measuring their specifications.

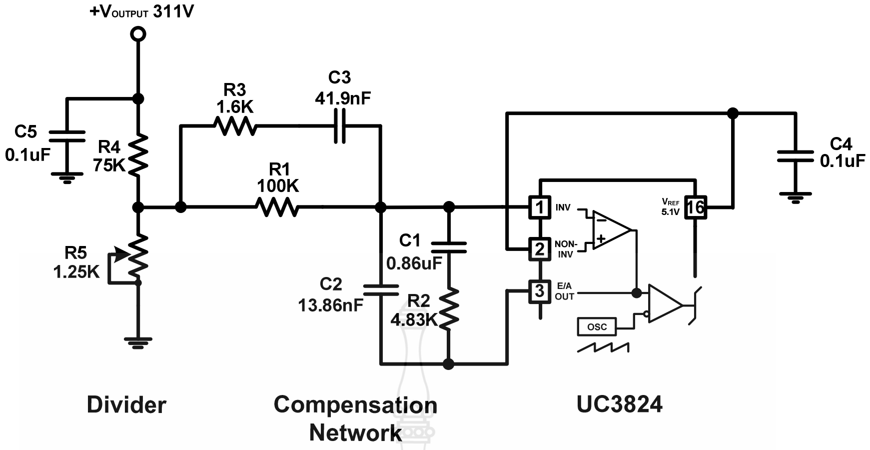
As with any wideband circuit, careful grounding and bypass procedures should be followed. The use of a ground plane is highly recommended.



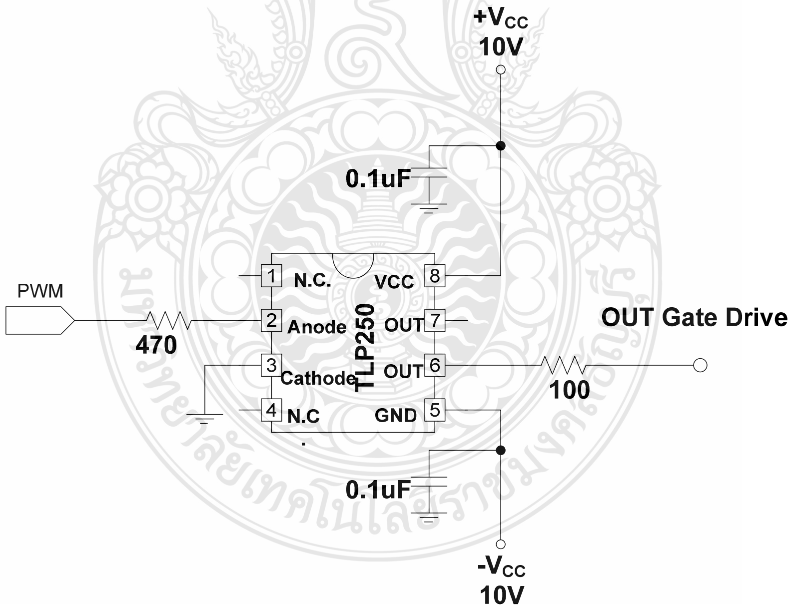
รูปที่ ง.1 วงจรที่ใช้งานจริงแบบวงเปิด



รูปที่ ง.2 วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ของไอซี UC3824



รูปที่ ง.3 วงจรโหมดควบคุมแรงดันและวงจรชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบเฟสนำหน้า-ล้าหลัง



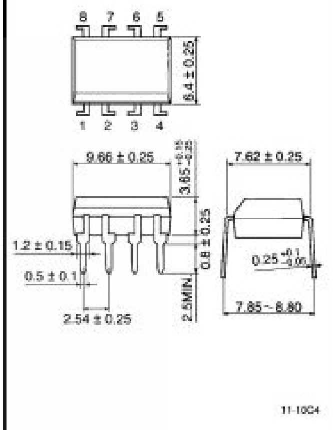
รูปที่ ง.4 วงจรขับนำเกทโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250

TOSHIBA Photocoupler GaAlAs Ired & Photo−IC

TLP250

Transistor Inverter
Inverter For Air Conditionor
IGBT Gate Drive
Power MOS FET Gate Drive

Unit in mm



TOSHIBA 11−10C4

Weight: 0.54 g

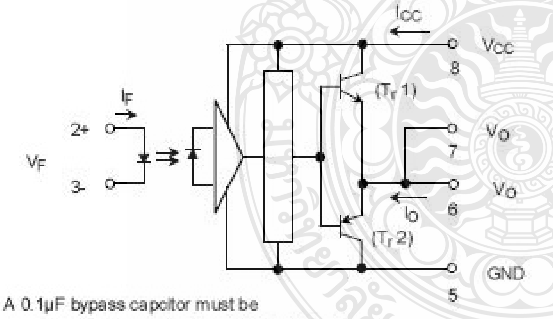
The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.
This unit is 8−lead DIP package.
TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input threshold current: I_F=5mA(max.)
- Supply current (I_{CC}): 11mA(max.)
- Supply voltage (V_{CC}): 10−35V
- Output current (I_O): ±1.5A (max.)
- Switching time (t_{pLH}/t_{pHL}): 1.5μs(max.)
- Isolation voltage: 2500V_{rms}(min.)
- UL recognized: UL1577, file No.E67349
- Option (D4) type
  - VDE approved: DIN VDE0884/06.92,certificate No.76823
  - Maximum operating insulation voltage: 630V_{PK}
  - Highest permissible over voltage: 4000V_{PK}

(Note) When a VDE0884 approved type is needed, please designate the "option (D4)"

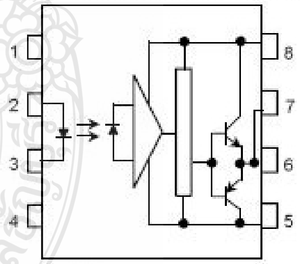
- Creepage distance: 6.4mm(min.)
  Clearance: 6.4mm(min.)

Schmatic



A 0.1μF bypass capcitor must be connected between pin 8 and 5 (See Note 5).

Pin Configuration (top view)



1 : N.C.
2 : Anode
3 : Cathode
4 : N.C.
5 : GND
6 : V_O (Output)
7 : V_O
8 : V_{CC}

Truth Table

		Tr1	Tr2
Input LED	On	On	Off
	Off	Off	On

Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)

	Characteristic		Symbol	Rating	Unit
LED	Forward current		I_F	20	mA
	Forward current derating (Ta ≥ 70°C)		$\Delta I_F / \Delta Ta$	−0.36	mA / °C
	Peak transient forward curent (Note 1)		I_{FPT}	1	A
	Reverse voltage		V_R	5	V
	Junction temperature		Tj	125	°C
Detector	"H"peak output current (P_W ≤ 2.5μs, f ≤ 15kHz) (Note 2)		I_{OPH}	−1.5	A
	"L"peak output current (P_W ≤ 2.5μs, f ≤ 15kHz) (Note 2)		I_{OPL}	+1.5	A
	Output voltage	(Ta ≤ 70°C)	V_O	35	V
		(Ta = 85°C)		24	
	Supply voltage	(Ta ≤ 70°C)	V_{CC}	35	V
		(Ta = 85°C)		24	
	Output voltage derating (Ta ≥ 70°C)		$\Delta V_O / \Delta Ta$	−0.73	V / °C
	Supply voltage derating (Ta ≥ 70°C)		$\Delta V_{CC} / \Delta Ta$	−0.73	V / °C
	Junction temperature		Tj	125	°C
Operating frequency (Note 3)			f	25	kHz
Operating temperature range			T_{opr}	−20~85	°C
Storage temperature range			T_{stg}	−55~125	°C
Lead soldering temperature (10 s)			T_{sol}	260	°C
Isolation voltage (AC, 1 min., R.H. ≤ 60%) (Note 4)			BV_S	2500	Vrms

(Note 1) Pulse width P_W ≤ 1μs, 300pps

(Note 2) Exporenential wavefom

(Note 3) Exporenential wavefom, I_{OPH} ≤ −1.0A(≤ 2.5μs), I_{OPL} ≤ +1.0A(≤ 2.5μs)

(Note 4) Device considerd a two terminal device: Pins 1, 2, 3 and 4 shorted together, and pins 5, 6, 7 and 8 shorted together.

(Note 5) A ceramic capacitor(0.1μF) should be connected from pin 8 to pin 5 to stabilize the operation of the high gain linear amplifier. Failure to provide the bypassing may impair the switching proparty. The total lead length between capacitor and coupler should not exceed 1cm.

Recommended Operating Conditions

Characteristic	Symbol	Min.	Typ.	Max.		Unit
Input current, on	$I_{F(ON)}$	7	8	10		mA
Input voltage, off	$V_{F(OFF)}$	0	—	0.8		V
Supply voltage	V_{CC}	15	—	30	20	V
Peak output current	I_{OPH}/I_{OPL}	—	—	±0.5		A
Operating temperature	T_{opr}	−20	25	70	85	°C

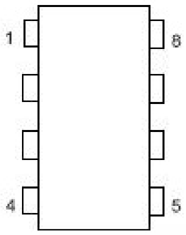
Electrical Characteristics (Ta = −20~70°C, unless otherwise specified)

Characteristic		Symbol	Test Circuit	Test Condition		Min.	Typ.*	Max.	Unit
Input forward voltage		V_F	—	I_F = 10 mA , Ta = 25°C			1.6	1.8	V
Temperature coefficient of forward voltage		$\Delta V_F / \Delta Ta$	—	I_F = 10 mA		—	−2.0	—	mV / °C
Input reverse current		I_R	—	V_R = 5V, Ta = 25°C			—	10	μA
Input capacitance		C_T	—	V = 0 , f = 1MHz , Ta = 25°C		—	45	250	pF
Output current	"H" level	I_{OPH}	3	V_{CC} = 30V (*1)	I_F = 10 mA V_{8-6} = 4V	−0.5	−1.5	—	A
	"L" level	I_{OPL}	2		I_F = 0 V_{6-5} = 2.5V	0.5	2	—	
Output voltage	"H" level	V_{OH}	4	V_{CC1} = +15V, V_{EE1} = −15V R_L = 200Ω, I_F = 5mA		11	12.8	—	V
	"L" level	V_{OL}	5	V_{CC1} = +15V, V_{EE1} = −15V R_L = 200Ω, V_F = 0.8V		—	−14.2	−12.5	
Supply current	"H" level	I_{CCH}	—	V_{CC} = 30V, I_F = 10mA Ta = 25°C		—	7	—	mA
				V_{CC} = 30V, I_F = 10mA		—	—	11	
	"L" level	I_{CCL}	—	V_{CC} = 30V, I_F = 0mA Ta = 25°C		—	7.5	—	
				V_{CC} = 30V, I_F = 0mA		—	—	11	
Threshold input current	"Output L→H"	I_{FLH}	—	V_{CC1} = +15V, V_{EE1} = −15V R_L = 200Ω, V_O > 0V		—	1.2	5	mA
Threshold input voltage	"Output H→L"	I_{FHL}	—	V_{CC1} = +15V, V_{EE1} = −15V R_L = 200Ω, V_O < 0V		0.8	—	—	V
Supply voltage		V_{CC}	—			10	—	35	V
Capacitance (input−output)		C_S	—	V_S = 0 , f = 1MHz Ta = 25°C		—	1.0	2.0	pF
Resistance(input−output)		R_S	—	V_S = 500V , Ta = 25°C R.H.≤ 60%		1×10^{12}	10^{14}	—	Ω

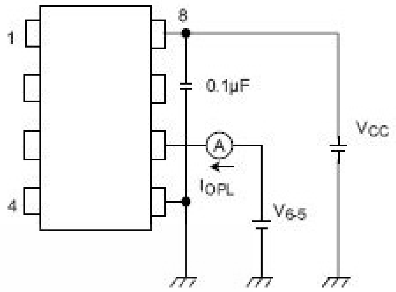
* All typical values are at Ta = 25°C (*1): Duration of I_O time ≤ 50μs

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

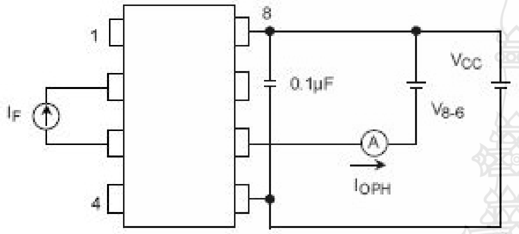
Test Circuit 1 :



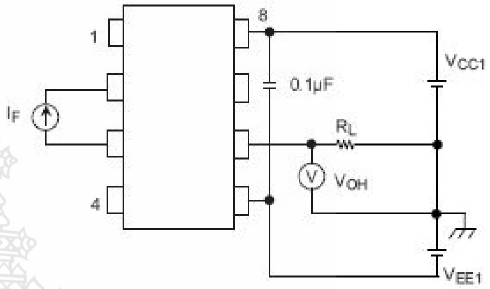
Test Circuit 2 : IOPL



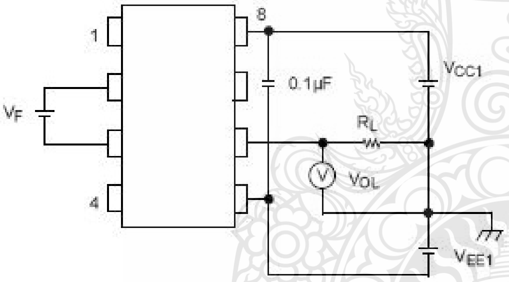
Test Circuit 3 : IOPH



Test Circuit 4 : VOH

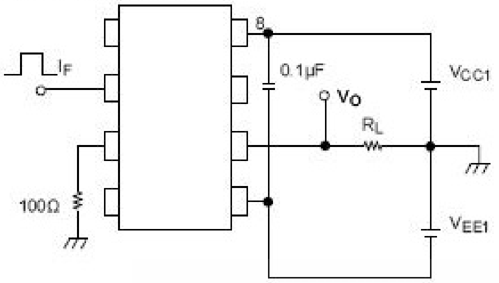


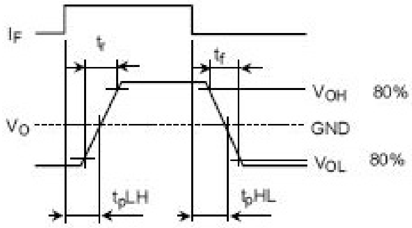
Test Circuit 5 : V_{OL}



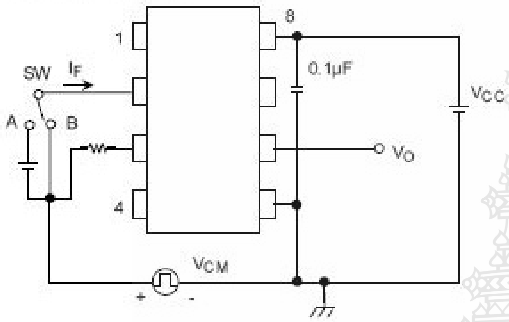
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

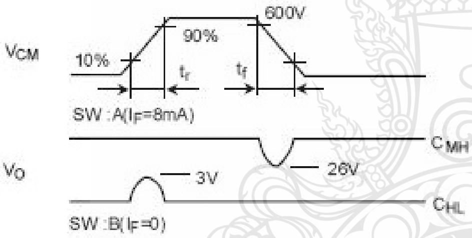
Test Circuit 6: t_{pLH}, t_{pHL}, t_r t_f





Test Circuit 7: C_{MH}, C_{ML}





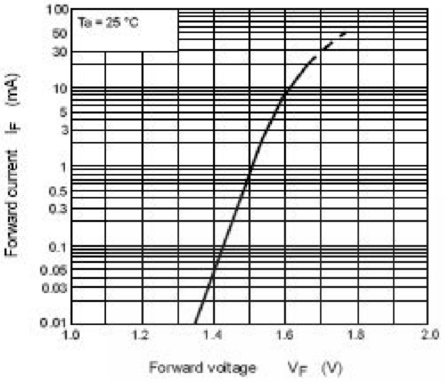
$$C_{ML} = \frac{480\ (V)}{t_r\ (\mu s)}$$

$$C_{MH} = \frac{480\ (V)}{t_f\ (\mu s)}$$

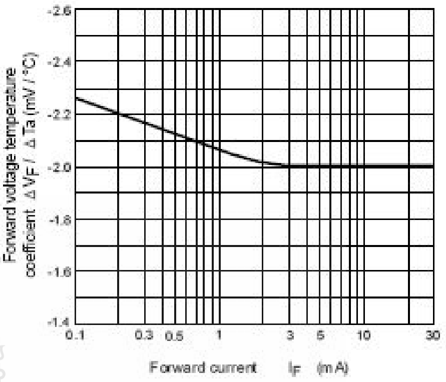
C_{ML}(C_{MH}) is the maximum rate of rise (fall) of the common mode voltage that can be sustained with the output voltage in the low (high) state.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

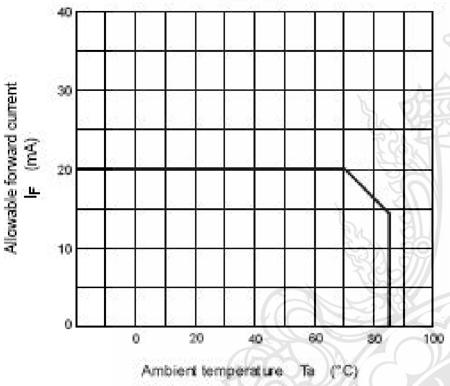
$I_F - V_F$



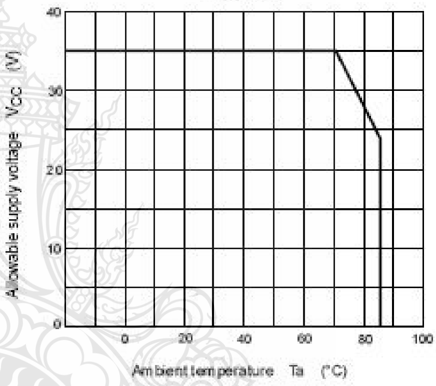
$\Delta V_F / \Delta Ta - I_F$



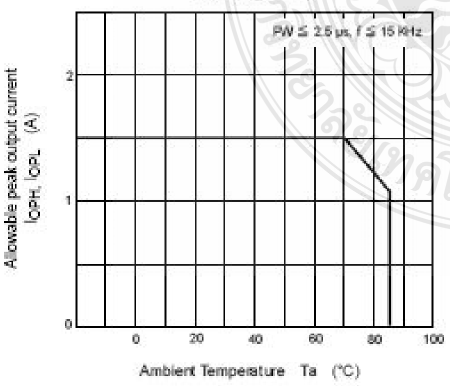
$I_F - Ta$



$V_{CC} - Ta$



$I_{OPH}, I_{OPL} - Ta$



Data Sheet **January 2002**

15A, 1200V Hyperfast Diode

The RHRP15120 is a hyperfast diode with soft recovery characteristics (t_{rr} < 65ns). It has half the recovery time of ultrafast diodes and is of silicon nitride passivated ion-implanted epitaxial planar construction.

This device is intended for use as a freewheeling/clamping diode and rectifier in a variety of switching power supplies and other power switching applications. Its low stored charge and hyperfast soft recovery minimize ringing and electrical noise in many power switching circuits, thus reducing power loss in the switching transistors.

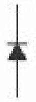
Formerly developmental type TA49098.

Ordering Information

PART NUMBER	PACKAGE	BRAND
RHRP15120	TO-220AC	RHR15120

NOTE: When ordering, use the entire part number.

Symbol



Features

- Hyperfast with Soft Recovery . . . . <65ns
- Operating Temperature . . . . 175°C
- Reverse Voltage 1200V
- Avalanche Energy Rated
- Planar Construction

Applications

- Switching Power Supplies
- Power Switching Circuits
- General Purpose

Packaging

JEDEC TO-220AC

Absolute Maximum Ratings T_C = 25°C, Unless Otherwise Specified

		RHRP15120	UNITS
Peak Repetitive Reverse Voltage	V_{RRM}	1200	V
Working Peak Reverse Voltage	V_{RWM}	1200	V
DC Blocking Voltage	V_R	1200	V
Average Rectified Forward Current (T_C = 140°C)	$I_{F(AV)}$	15	A
Repetitive Peak Surge Current (Square Wave, 20kHz)	I_{FRM}	30	A
Nonrepetitive Peak Surge Current (Halfwave, 1 Phase, 60Hz)	I_{FSM}	200	A
Maximum Power Dissipation	P_D	100	W
Avalanche Energy (See Figures 10 and 11)	E_{AVL}	20	mJ
Operating and Storage Temperature	T_{STG}, T_J	-65 to 175	°C

©2002 Fairchild Semiconductor Corporation

Electrical Specifications $T_C = 25^oC$, Unless Otherwise Specified

SYMBOL	TEST CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNITS
V_F	$I_F = 15A$	-	-	3.2	V
	$I_F = 15A$, $T_C = 150^oC$	-	-	2.6	V
I_R	$V_R = 1200V$	-	-	100	μA
	$V_R = 1200V$, $T_C = 150^oC$	-	-	500	μA
t_{rr}	$I_F = 1A$, $dI_F/dt = 100A/\mu s$	-	-	65	ns
	$I_F = 15A$, $dI_F/dt = 100A/\mu s$	-	-	75	ns
t_a	$I_F = 15A$, $dI_F/dt = 100A/\mu s$	-	36	-	ns
t_b	$I_F = 15A$, $dI_F/dt = 100A/\mu s$	-	28	-	ns
Q_{RR}	$I_F = 15A$, $dI_F/dt = 100A/\mu s$	-	150	-	nC
C_J	$V_R = 10V$, $I_F = 0A$	-	55	-	pF
$R_{\theta JC}$		-	-	1.5	$^oC/W$

DEFINITIONS

V_F = Instantaneous forward voltage (pw = 300μs, D = 2%).
I_R = Instantaneous reverse current.
t_{rr} = Reverse recovery time (See Figure 9), summation of $t_a + t_b$.
t_a = Time to reach peak reverse current (See Figure 9).
t_b = Time from peak I_{RM} to projected zero crossing of I_{RM} based on a straight line from peak I_{RM} through 25% of I_{RM} (See Figure 9).
Q_{RR} = Reverse recovery charge.
C_J = Junction capacitance.
$R_{\theta JC}$ = Thermal resistance junction to case.
pw = pulse width.
D = duty cycle.

Typical Performance Curves

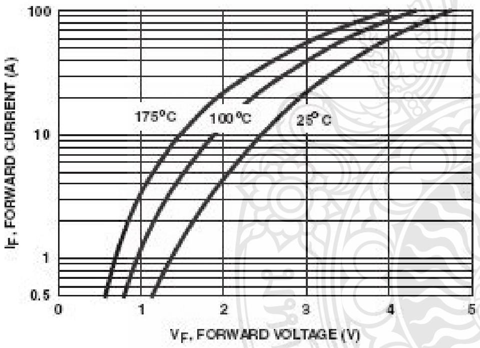


FIGURE 1. FORWARD CURRENT vs FORWARD VOLTAGE

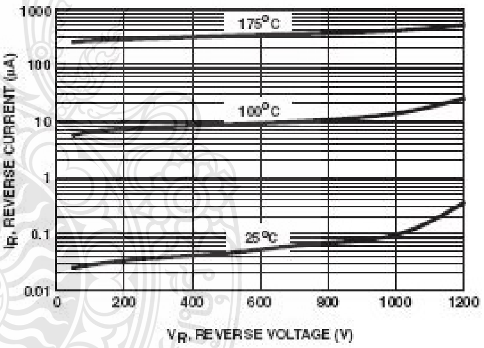


FIGURE 2. REVERSE CURRENT vs REVERSE VOLTAGE

Typical Performance Curves (Continued)

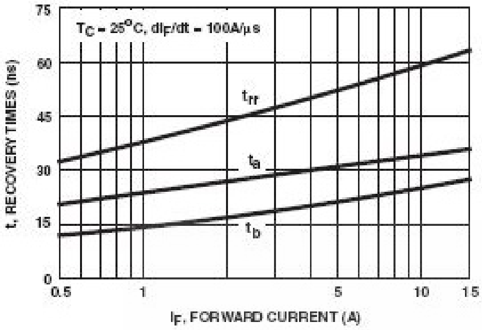


FIGURE 3. t_{rr}, t_a AND t_b CURVES vs FORWARD CURRENT

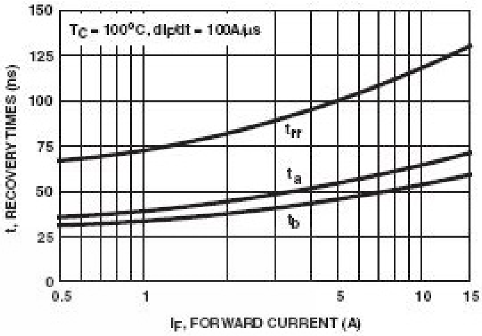


FIGURE 4. t_{rr}, t_a AND t_b CURVES vs FORWARD CURRENT

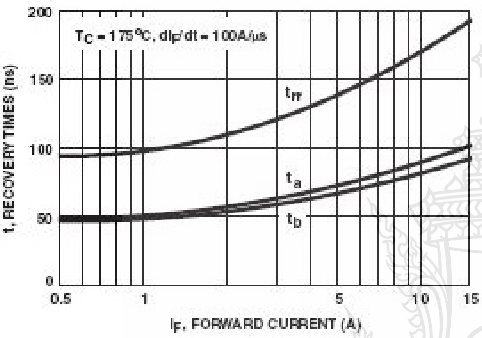


FIGURE 5. t_{rr}, t_a AND t_b CURVES vs FORWARD CURRENT

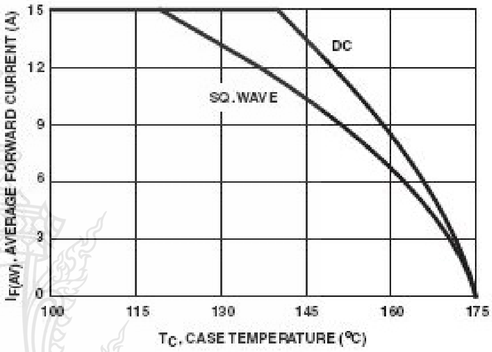


FIGURE 6. CURRENT DERATING CURVE

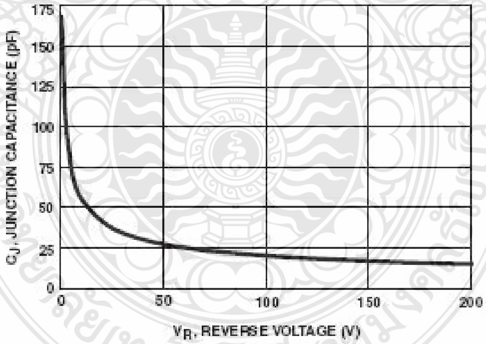


FIGURE 7. JUNCTION CAPACITANCE vs REVERSE VOLTAGE

©2002 Fairchild Semiconductor Corporation

Test Circuits and Waveforms

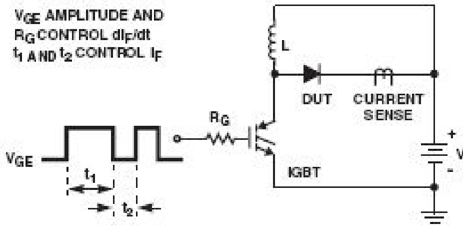


FIGURE 8. t_{rr} TEST CIRCUIT

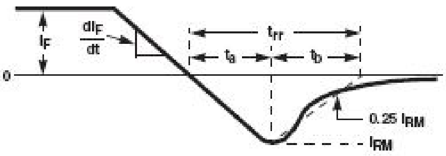


FIGURE 9. t_{rr} WAVEFORMS AND DEFINITIONS

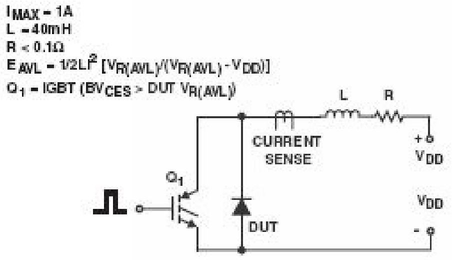


FIGURE 10. AVALANCHE ENERGY TEST CIRCUIT

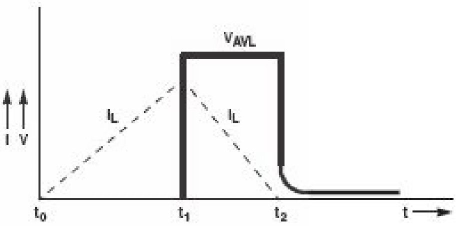


FIGURE 11. AVALANCHE CURRENT AND VOLTAGE WAVEFORMS

©2002 Fairchild Semiconductor Corporation

PD- 93922B

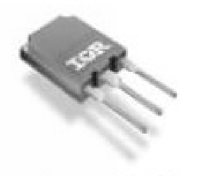
International
IOR Rectifier

SMPS MOSFET IRFPS43N50K

HEXFET® Power MOSFET

V_{DSS}	$R_{DS(on)}$ typ.	I_D
500V	0.078Ω	47A

Applications
- Switch Mode Power Supply (SMPS)
- Uninterruptible Power Supply
- High Speed Power Switching
- Hard Switched and High Frequency Circuits



Super-247 ™

Benefits
- Low Gate Charge Qg results in Simple Drive Requirement
- Improved Gate, Avalanche and Dynamic dv/dt Ruggedness
- Fully Characterized Capacitance and Avalanche Voltage and Current
- Low $R_{DS(on)}$

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
I_D @ T_C = 25°C	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10V	47	A
I_D @ T_C = 100°C	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10V	29	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	190	
P_D @T_C = 25°C	Power Dissipation	540	W
	Linear Derating Factor	4.3	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 30	V
	dv/dtPeak Diode Recovery dv/dt ③	9.0	V/ns
T_J T_{STG}	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to + 150	°C
	Soldering Temperature, for 10 seconds (1.6mm from case)	300	

Avalanche Characteristics

Symbol	Parameter	Typ.	Max.	Units
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy②	——	910	mJ
I_{AR}	Avalanche Current①	——	47	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy①	——	54	mJ

Thermal Resistance

Symbol	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{θJC}$	Junction-to-Case	——	0.23	°C/W
$R_{θCS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.24	——	
$R_{θJA}$	Junction-to-Ambient	——	40	

04/03/01

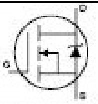
Static @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	500	—	—	V	V_{GS} = 0V, I_D = 250μA
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.60	—	V/°C	Reference to 25°C, I_D = 1mA ⑥
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	0.078	0.090	Ω	V_{GS} = 10V, I_D = 28A ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	3.0	—	5.0	V	V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250μA
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	50	μA	V_{DS} = 500V, V_{GS} = 0V
		—	—	250	μA	V_{DS} = 400V, V_{GS} = 0V, T_J = 125°C
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	V_{GS} = 30V
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		V_{GS} = -30V

Dynamic @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
g_{fs}	Forward Transconductance	23	—	—	S	V_{DS} = 50V, I_D = 28A
Q_g	Total Gate Charge	—	—	350	nC	I_D = 47A
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	85		V_{DS} = 400V
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	180		V_{GS} = 10V, See Fig. 6 and 13 ④
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	25	—	ns	V_{DD} = 250V
t_r	Rise Time	—	140	—		I_D = 47A
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	55	—		R_G = 1.0Ω
t_f	Fall Time	—	74	—		V_{GS} = 10V,See Fig. 10 ④
C_{iss}	Input Capacitance	—	8310	—	pF	V_{GS} = 0V
C_{oss}	Output Capacitance	—	960	—		V_{DS} = 25V
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	120	—		f = 1.0MHz, See Fig. 5
C_{oss}	Output Capacitance	—	10170	—		V_{GS} = 0V, V_{DS} = 1.0V, f = 1.0MHz
C_{oss}	Output Capacitance	—	240	—		V_{GS} = 0V, V_{DS} = 400V, f = 1.0MHz
C_{oss} eff.	Effective Output Capacitance	—	440	—		V_{GS} = 0V, V_{DS} = 0V to 400V ⑤

Diode Characteristics

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	47	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. 
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	190		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.5	V	T_J = 25°C, I_S = 47A, V_{GS} = 0V ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	620	940	ns	T_J = 25°C, I_F = 47A
Q_{rr}	Reverse RecoveryCharge	—	14	21	μC	di/dt = 100A/μs ④
I_{RRM}	Reverse RecoveryCurrent	—	38	—	A	
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S+L_D)				

Notes:

① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See Fig. 11)

② Starting T_J= 25°C, L = 0.82mH, R_G = 25Ω, I_{AS} = 47A (See Figure 12a).

③ I_{SD} ≤ 47A, di/dt ≤ 230A/μs, V_{DD} ≤ $V_{(BR)DSS}$, T_J ≤ 150°C.

④ Pulse width ≤ 400μs; duty cycle ≤ 2%.

⑤ C_{oss} eff. is a fixed capacitance that gives the same charging time as C_{oss} while V_{DS} is rising from 0 to 80% V_{DSS}.

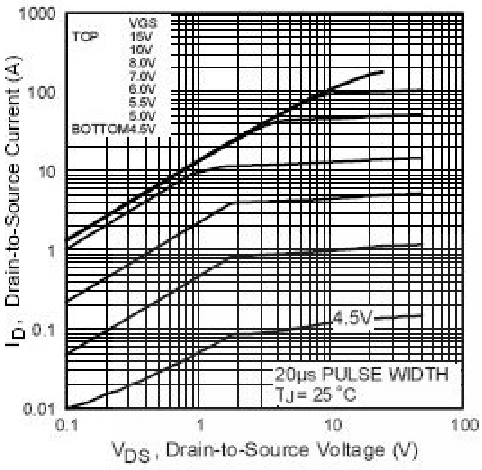


Fig 1. Typical Output Characteristics

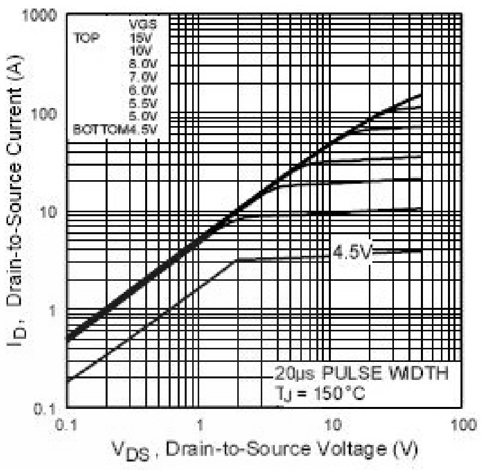


Fig 2. Typical Output Characteristics

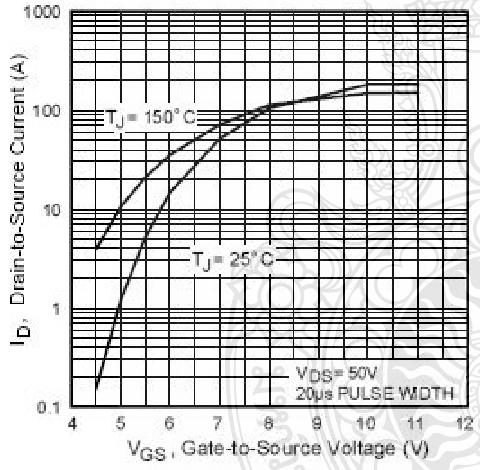


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

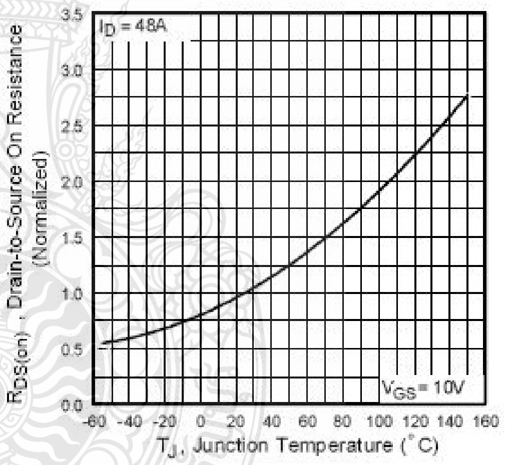


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

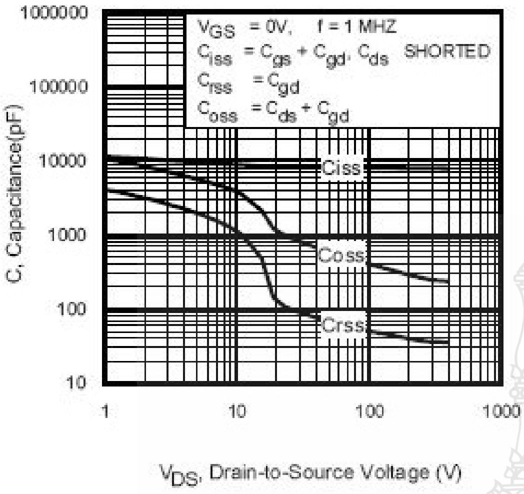


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

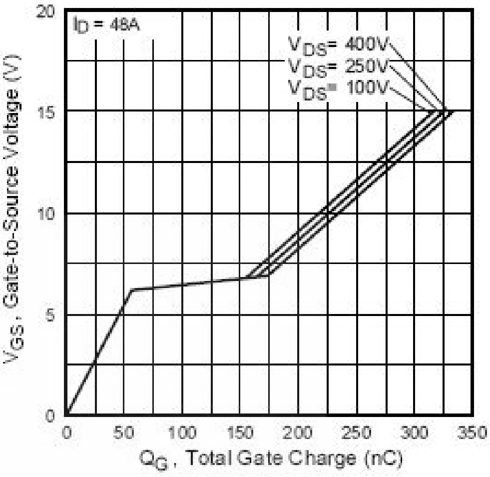


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

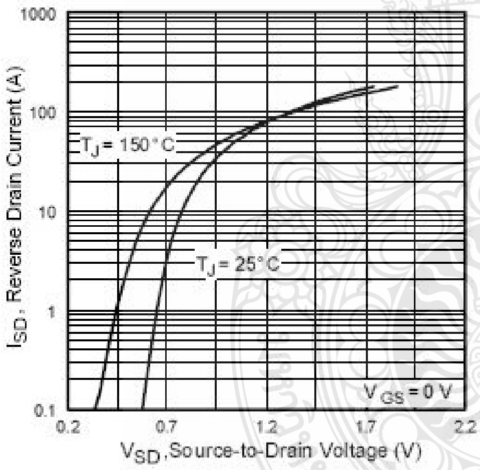


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

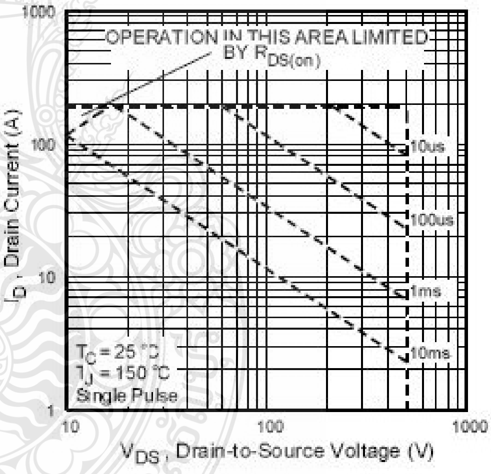
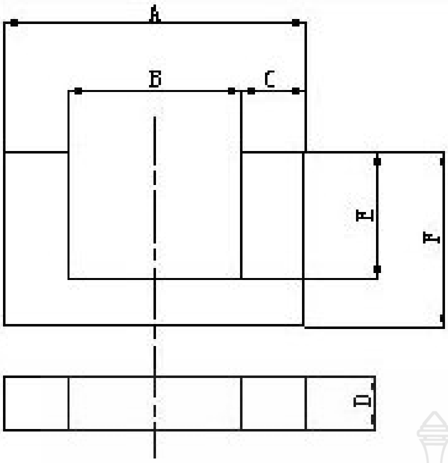


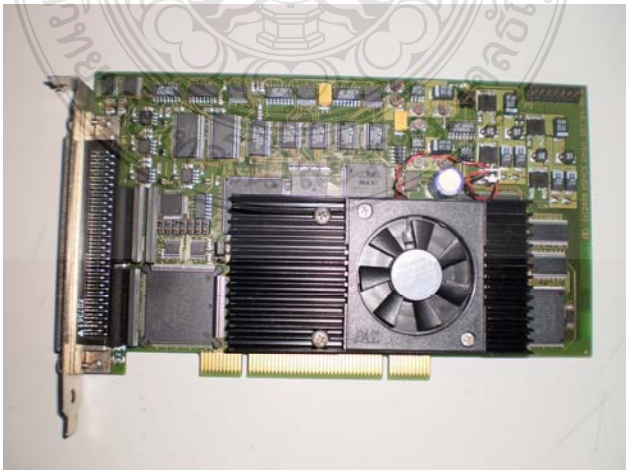
Fig 8. Maximum Safe Operating Area



รูปที่ ง.5 ลักษณะของแกนเฟอร์ไรต์เบอร์ UF 160

Parameter			
Core factor	C1	mm^{-1}	0.474
Effective core volume	Ve	mm^{3}	1103300
Effective cross – sectional area	Ae	mm^{2}	723
Minimun cross – sectional center pole area	ACW	mm^{2}	1526

รูปที่ ง.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแกนเฟอร์ไรต์เบอร์ UF160



รูปที่ ง.7 การ์ดอินเตอร์เฟส DS1104 โดยบริษัท dSPACE

รูปที่ ง.8 การ์ดอินเตอร์เฟส DS1104 โดยบริษัท dSPACE และอุปกรณ์ต่อพ่วง

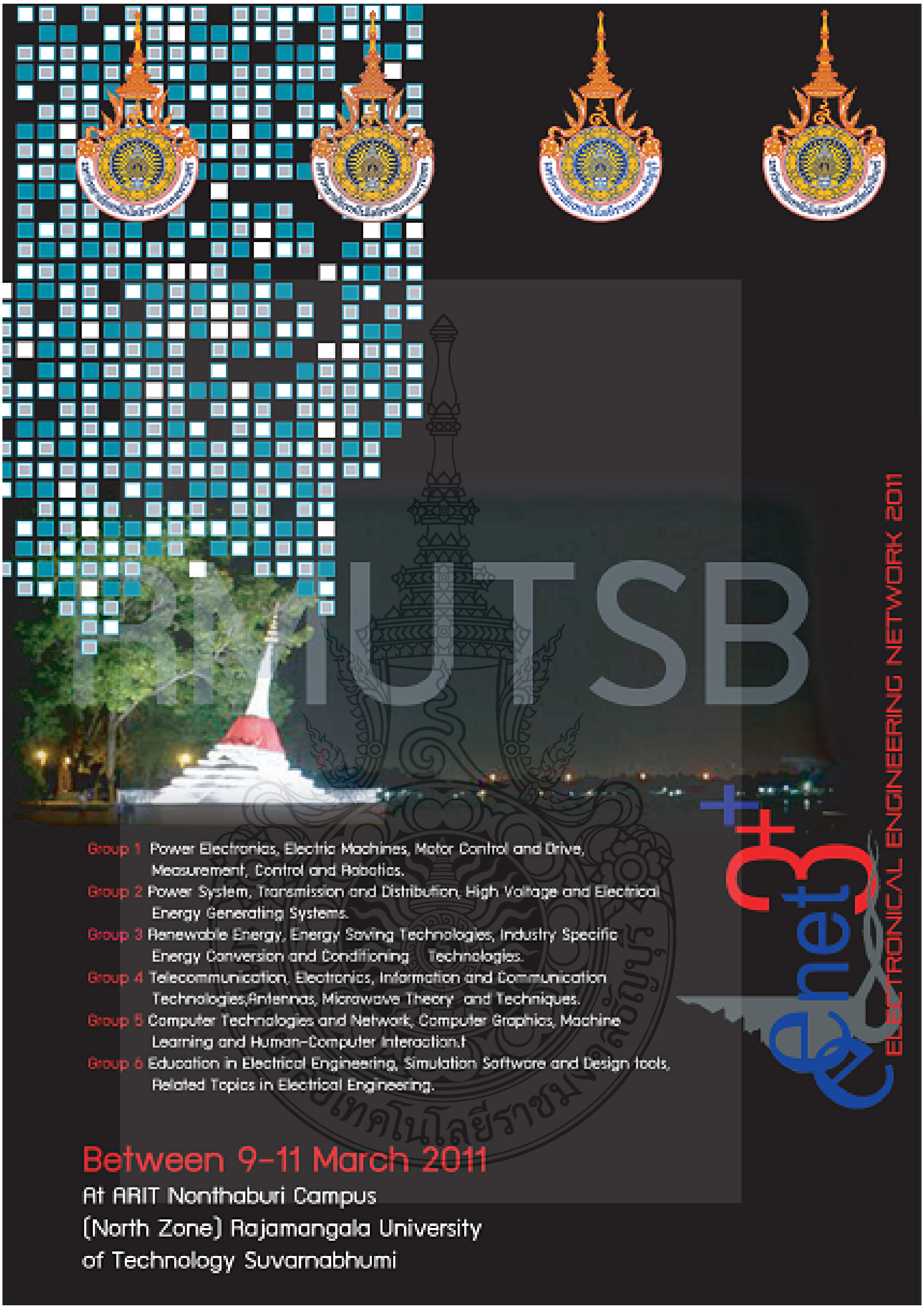
รูปที่ ง.9 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส FUJIรุ่น FRENIC MEGA พิกัด 3 kW

รูปที่ ง.10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้นขนาด พิกัด 0.37 kW

รูปที่ ง.11 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด พิกัด 3 kW

ภาคผนวก จ

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่


RMUTSB
ELECTRONICAL ENGINEERING NETWORK 2011
eenet3+
Group 1 Power Electronics, Electric Machines, Motor Control and Drive, Measurement, Control and Robotics.
Group 2 Power System, Transmission and Distribution, High Voltage and Electrical Energy Generating Systems.
Group 3 Renewable Energy, Energy Saving Technologies, Industry Specific Energy Conversion and Conditioning Technologies.
Group 4 Telecommunication, Electronics, Information and Communication Technologies,Antennas, Microwave Theory and Techniques.
Group 5 Computer Technologies and Network, Computer Graphics, Machine Learning and Human-Computer Interaction.t
Group 6 Education in Electrical Engineering, Simulation Software and Design tools, Related Topics in Electrical Engineering.
Between 9-11 March 2011
At ARIT Nonthaburi Campus
(North Zone) Rajamangala University
of Technology Suvarnabhumi

เกรียงไกร เหลืองอำพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
กิจจา ลักษณ์อำนวยพร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
กิตติวงศ์ สุธรรมโน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
กิตติวุฒิ จินะบุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
เกษม เนื่องแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
โกศล นิธิโสภา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
โกศล โอฬารไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ขจรเจริญ คุ้มบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
จตุรงค์ จตุรพิธชัยกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
จรินทร์ จุฑานิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
ฉัตรฤทธิ์ ทองปรอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ชนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตศาลายา
ชนฎา พรหมเกษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เฉลิมชาติ มานพ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
เฉลียว เกตุแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ชลากร สุวรรณสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ชัยณรงค์ วิเศษศักดิ์วิชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ชาญชัย เดชธรรมรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ชาญวิทย์ ตั้งศิริวรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ชูศักดิ์ กมลขันติธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ไชยยันต์ บุญมี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ณฐภัทร พันธ์คง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ณรงค์ นันทกุศล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ณรงค์ฤทธิ์ พิมพ์คำวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
ณัฐพงศ์ สนองคุณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ณัฐพงษ์ พันธุเละ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
ณัฐพล หาญปละ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดนุพล คำปัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดุลย์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
ดุสิต ธุกิจสุนทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ตะวัน ขุนธาศา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
เติมศักดิ์ แสนเพียง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
เตียนไช ธาชีวพานิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ทง สานธารทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
ทัศนะ ธนทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
ธงชัย คล้ายคลึง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
ธนวัฒน์ ฉลาดสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
ธวัช เกิดชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
ธานี สมวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ธีรพล เหมือนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นคร ทองเล็ก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นครินทร์ ศรีปัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นพพร พัชรประกิติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
นภัทร วัจนเทพินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
นราวิทย์ กิจเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นรินทร์ หลักทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นาตยา คล้ายเรือง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ศรีราชา
นิติพงศ์ ปานกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นิติพงษ์ สมไชยวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นิพนธ์ วงศ์ทา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นิพนธ์ ศุภกรพุด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
นิพนธ์ เกตุจ้อย	มหาวิทยาลัยนเรศวร
นิมิต นิยาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ

นิวัต จารุวระกูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
บุญช่วย เจริญผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
บุญยัง ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปฏิวัติ บุญมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ประกาศิต ศรีทะแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
ประดิษฐ์ เลื่อนหมื่นไวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
ประดิษฐ์ แสงยศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ประทีป แสงสว่าง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ประยุทธ ชุมเลขะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ประวิช เปรียมเหมือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ปราโมทย์ อนันต์วราพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ปรีชา สาคะรังค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ณัฐวุฒิ โสมะเกษตรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พันธ์ พิริยะวรรธน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
พิชัย เพ่งพันธุ์พัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
พิชัย อยู่เปล่า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
พินิจ ศรีธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
พินิจ จิตจริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พิศิษฐ์ วิสุทธิเมธีกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
พิศิษฐ์ ถีรนกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
พีรพล จิราพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
พูนศรี วรรณการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
ภัทรวัฒน์ จันทร์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ภานุมาศ แสนพวง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
มงคล ด่านบำรุงตระกูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
มังกร ศิริจันทร์ชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
มานพ ชนะคำดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
มาลียา ตั้งจิตตนญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

มีชัย แช่มใส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ยุทธนา กันทะพะเยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ยุทธนา จำสุวรรณ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รัก สกุลพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
เรวัต ธรรมสนธิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
วนพันธ์ วิชวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
วรรณศรี วงศ์ไตรรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
วัชรชัย สีมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
วันชัย ทรัพย์สิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วารุณี กรุดพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
วารุณี ศรีสงคราม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
วิรัช กิมเรศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิชัย ผดุงศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วิชา จันที	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
วิชิต สุทธิพร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
วิเชียร หทัยรัตน์ศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
วิฑูรย์ พรมมี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
วินัย เมธาวีกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
วิบูลย์ ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
วิรัตน์ นักกรองดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
วิโรจน์ เพชรพันธุ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
วิวัฒน์ ทิพจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
วิวัฒน์ เจริญสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วีระ ธันยาภิรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
วีระชัย จรบุรมย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
วีระยุทธ รัตนคุณศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
วุฒิชัย สว่างงาน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศรีศักดิ์ น้อยไร่ภูมิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ

ศักดิ์ชัย ระวิกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ศิริชัย แดงเอม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศิริชัย ดาบกาศระน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
ศุภลักษณ์ ศรีดา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
สมเกียรติ อุดมหรรษากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
สมเกียรติ ทองแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
สมชัย หิรัญวโรดม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
สมชาย เปี่ยมสุขเกิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
สมนึก เครือสอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
สมพร ศรีวัฒนพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
สยาม ประจุศตศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
สรรเพชร ตุ้มทรัพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
สราวุธ ทองกุลภัทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
สันติ อัศวศรีพงศ์ธร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
สันติภาพ โตลทะเล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
สาคร ปันตา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สาธิต รุ่งสว่าง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สายชล ชุดเจือจีน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
สำเริง ฮินท่าไม้	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
สุขุม สุพรรณสุรศิริรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
สุชาติ จันทร์จรมานิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สุทธินันท์ สันไพศี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
สุพรรณ์ จันทร์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
สุเมธ เตชะชุ่ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
สุรพันธ์ ไฝ่เพชร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สุรศักดิ์ อยู่สวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สุรสิทธิ์ แสนทอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

สุรินทร์ แหงมงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
สุริยา แก้วอาษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
สุวิทยา ศิริศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
องอาจ แสงใหม่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อนันท์ นำอิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
อนันต์ ไตภิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อโนชา รุ่งโรจน์วัฒนศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อัศวิน แก้วสิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ชอบคุณ ไชยวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
อนุภาพ มหาวิร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
อิษฎา บุญญาอรุณเนตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อุดม เครือเทพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
อุทาน คำม่วน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตภาคพายัพ
อุรา สันนิมแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
เอกชัย ชัยดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
เอกวิทย์ หาญกรวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

PE1_1	ระบบควบคุมรถเข็นอัตโนมัติสำหรับฟื้นฟูสมรรถภาพกล้ามเนื้อขา	1
PE1_2	การสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิล แบบ K	5
PE1_3	การจำแนกภูมิพลศาสตร์ในผู้ป่วยที่มีความผิดปกติในการหลับปีสภาวะด้วยศาสตร์ทางศาสตร์คุณหรือ	9
PE1_4	ไม้เท้าอิเล็กทรอนิกส์ช่วยผู้พิการทางการมองเห็น	13
PE1_5	การวัดความสามารถเชิงของวัสดุโดยอาศัยแรงไม้ปร่าไลท์	17
PE1_6	เครื่องดูดความชื้นในสายเคเบิล XLPE	22
PE1_7	เครื่องเชื่อมไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงขนาด 1,500 วัตต์	26
PE1_8	การสอบเทียบดิจิตอลมัลติมิเตอร์	30
PE1_9	บูสต์ซิงเกิลอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์	35
PE1_10	การศึกษาเปรียบเทียบตัวควบคุมพีไอดีปรับค่าด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมและพีไอดี ควบคุมระบบลูกบอลบนคาน	41
PE1_11	การลดแรงกระเพื่อมกระแสไหลย้อนที่ส่งผลต่อตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยวิธีแบ่งช่วงย่อยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรกล	45
PE1_12	การหาแบบจำลองมอเตอร์กระแสตรง ด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาคและควบคุมโดยพีไอดีแบบแบ่งช่วงย่อย	49
PE1_13	บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ต้นทุนต่ำสำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบ T5 ขนาด 28 วัตต์ บนพื้นฐานวงจรเรียงกระแสทวีแรงดัน	53
PE1_14	บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ด้วยวงจรแก้ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสูง	57
PE1_15	การพัฒนาเครื่องชาร์จแบตเตอรี่มือถือด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบพกพา	61
PE1_16	Evaluation of Switching Behavior of SiC JFET Based on Static I-V and C-V Characteristics	65
PE1_17	การประเมินศักยภาพของแหล่งไฟฟ้าพลังน้ำเพื่อการใช้งานสำหรับการประยุกต์เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ	69
PE1_18	แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1000 วัตต์ ทำงานในรูปแบบควบคุมแบบไม่ต่อเนื่อง	73

PE1_9

บูสดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับสำหรับกังหันลม

Three-level boost Dc to dc Converter for Wind Turbine

สรวงพร อุ่นทรัพย์ และ วันชัย ทรัพย์สิงห์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
โทรศัพท์: 0-8140-03637 โทรสาร 0-2287-9629 E-mail: [illegible]@hotmail.com

บทคัดย่อ

[illegible]

คำสำคัญ: [illegible]

Abstract

This paper presens the three-level boost Dc to dc converter for wind arbine that is be tested with a wind arbine simulator. The simulator can simulate velocity of wind, blade's size of wind turbine and heigh of pole. The function of the boost converter is step-up dc voltage to 311 volts which is enough for a single phase inverter 220 V 50 Hz. The Orcad/Pspice simulation and experimental results shows that the boost dc to dc converter voltage to be constant.

Keywords: Three-level boost dc to dc converter, Wind turbine

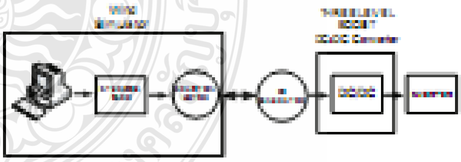
1. คำนำ

[illegible]

2. ทฤษฎี

2.1 บล็อกไดอะแกรมระบบ

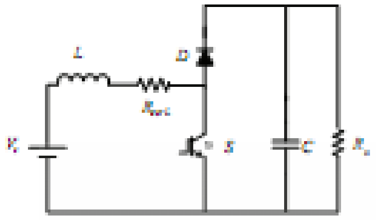
[illegible]



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของระบบทดสอบที่นำเสนอ

PE1_9

2.2 [illegible]



[illegible]

[illegible]

$$I_L = \frac{V_o}{(1-D)R_o} \qquad (1)$$

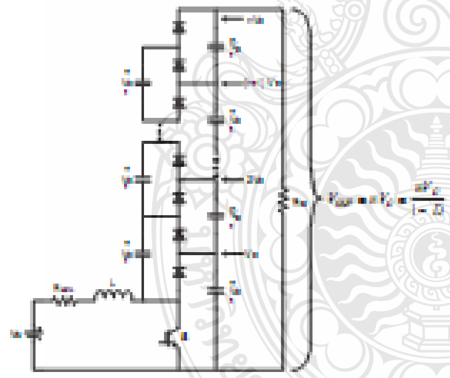
$$V_L = D(V_s - I_L R_{esr}) + (1-D)(V_s - V_o - I_L R_{esr}) = 0 \qquad (2)$$

$$V_s = (1-D)V_o + I_L R_{esr} \qquad (3)$$

[illegible]

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{(1-D) + \frac{R_L}{(1-D)R_o}} \qquad (4)$$

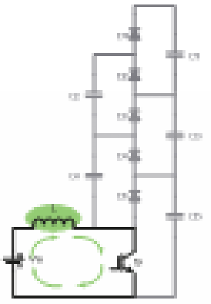
2.3 [illegible]



[illegible]

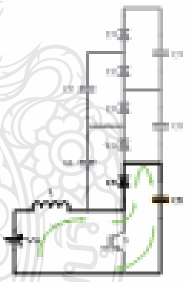
[illegible]

[illegible]



[illegible]

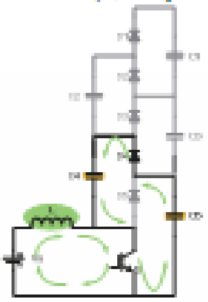
[illegible]

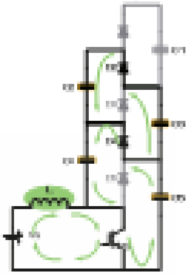


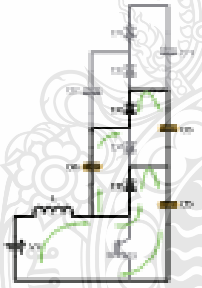
[illegible]

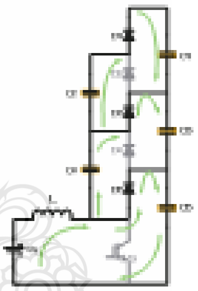
[illegible]

PE1_9









PE1_9

[illegible] C_1, C_2 [illegible] C_3 [illegible]

[illegible] (5) [illegible] (6)

$$\frac{V_c}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (5)$$

และ

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{N}{1-D} \quad (6)$$

[illegible]

$$V_s I_L = V_o I_o = V_o \frac{V_o}{R_o} = N V_s \frac{N V_s}{R_o} = \frac{N^2 V_s^2}{R_o} \quad (7)$$

$$I_L = \frac{V_o}{V_s} \frac{N^2 V_s}{R_o} = \frac{N^2 V_s}{(1-D) R_o} \quad (8)$$

[illegible] (7) [illegible] (8) [illegible] ESR

$$V_L = D(V_s - I_L R_{esr}) + (1-D)(V_s - V_c - I_L R_{esr}) = 0 \quad (9)$$

$$DV_s - DI_L R_{esr} + (1-D)V_s - (1-D)V_c - (1-D)I_L R_{esr} = 0 \quad (10)$$

$$V_s(D + 1 - D) + I_L R_{esr}(-D - 1 + D) = (1-D)V_c \quad (11)$$

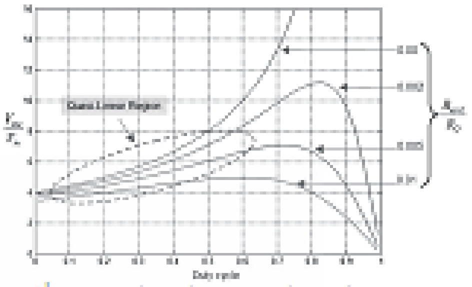
$$V_s = (1-D)V_c + I_L R_L \quad (12)$$

$$V_s = (1-D)\frac{V_o}{N} + \frac{N V_o}{(1-D)R_o} R_{esr} \quad (13)$$

[illegible] (13) [illegible]

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{((1-D)/N) + (NR_{esr}/(1-D)R_o)} \quad (14)$$

รูปที่ 10 [illegible] $N = 3$ [illegible] R_{esr}/R_o [illegible] 0.5 [illegible]



รูปที่ 10 [illegible] ESR [illegible]

3. ผลการทดลอง

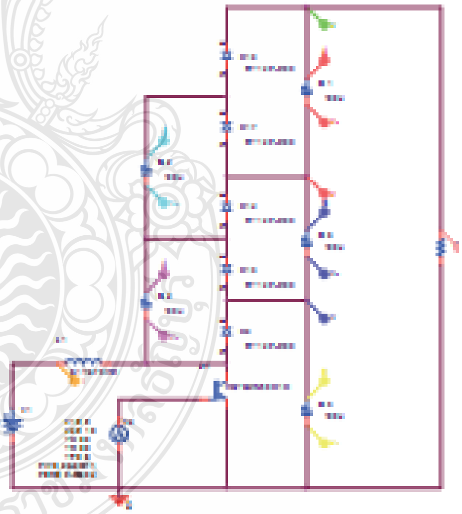
3.1 ผลจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม OrCad/Pspice

[illegible] 3 [illegible] 100 μF [illegible] 50% [illegible]

Level 1 = 108789 V

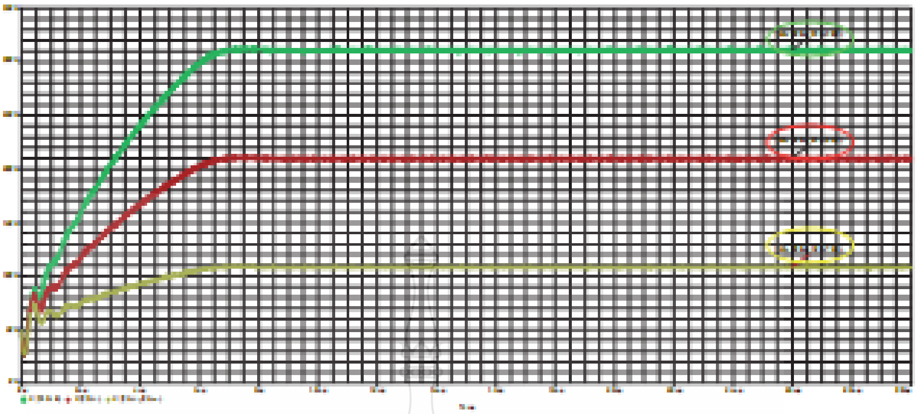
Level 2 = 210859 V

Level 3 = 312100 V



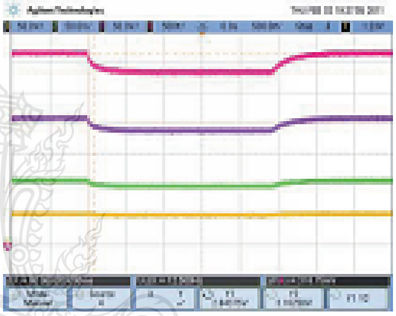
รูปที่ 11 [illegible]

PE1_9



[illegible] 12 [illegible]

3.2 [illegible]



[illegible] 0.76 → 1.07 7A (CH I: V_s, CH II: V_{out1}, CH III: V_{out2}, CH IV: V_{out3})

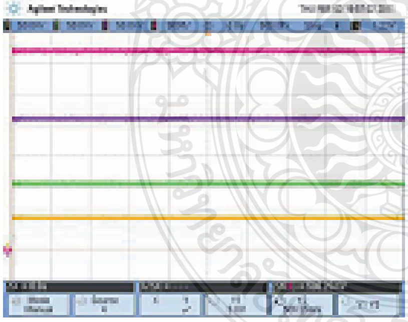
[illegible] 076 [illegible] 50 [illegible] 50 kHz [illegible] (L) 0.111 mH [illegible] 100 μF [illegible] Orcad/Pspice [illegible]

Level1 = 110 V

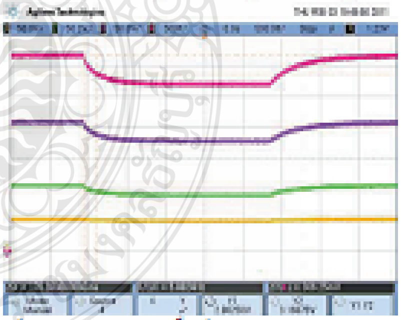
Level2 = 210 V

Level3 = 315 V

[illegible] 14-15 [illegible]

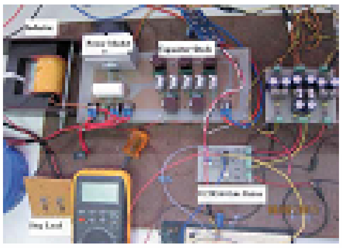


[illegible] 13 [illegible] (CH I: V_s, CH II: V_{out1}, CH III: V_{out2}, CH IV: V_{out3})



[illegible] 15 [illegible] 0.76 → 1.13 A (CH I: V_s, CH II: V_{out1}, CH III: V_{out2}, CH IV: V_{out3})

PE1_9



รูปที่ [illegible]

4. สรุปผล

[illegible]

เอกสารอ้างอิง

[1] Erich Hau, Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics ,Springer Berlin ,Heidelberg ,New York, 2006.

[2] Florin Iov, Anca Daniela Hansen, Poul Sørensen, Frede Blaabjerg, Wind Turbine Blockset in Matlab/Simulink, General Overview and Description of the Models, Institute of Energy Technology Aalborg University2004

[3] J.C. Rosas-Caro, J.M. Ramirez, F.Z. Peng, A. Valderrabano, A DC–DC multilevel boost converter, The Institution of Engineering and Technology2009, IET Power Electron., 2010, Vol.3, Issue 1, pp.129–137

ประวัติผู้เขียนบทความ

[illegible]

[illegible] Northumbria University, UK [illegible] FACTS

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายสรรธพล คุ้มทรัพย์
วัน เดือน ปีเกิด	8 กุมภาพันธ์ 2514
ที่อยู่	42/115 ซอยนิมิตใหม่6/1 หมู่บ้านพนาสนธิ์4 ถนนนิมิตใหม่ แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ 10510
ประวัติการศึกษา	ปีการศึกษา 2532 ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาช่างไฟฟ้า วิทยาลัยช่างกลปทุมวัน ปีการศึกษา 2544 ระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2532 - 2540	ช่างเทคนิคไฟฟ้า เครื่องกลไฟฟ้าและเครื่องปรับอากาศและระบายอากาศ ประจำบริษัทวรจักรอินเตอร์เนชั่นเนลจำกัด(รับเหมา)
พ.ศ. 2540 - 2545	ช่างเทคนิคไฟฟ้า เครื่องกลไฟฟ้าและเครื่องปรับอากาศและระบายอากาศ ประจำบริษัทเคซีเอสแอนแอสซิโอซิเอดจำกัด(ควบคุมงาน)
พ.ศ. 2545 - ปัจจุบัน	อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

สรรธพล คุ้มทรัพย์, วันชัย ทรัพย์สิงห์, และชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข "สเปซเวกเตอร์พัลส์วิทมอดดูเลชั่นสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบทันเวลา" **มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลวิชาการ ครั้งที่ 1**, โรงแรมธรรมรินทร์ ธนา จังหวัดตรัง, สิงหาคม 2551

วันชัย ทรัพย์สิงห์, สรรธพล คุ้มทรัพย์, และเวคิน ปิยรัตน์ "สเปซเวกเตอร์พัลส์วิทมอดดูเลชั่นสำหรับการควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบทันเวลา" **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31**, ณ รอแยลฮิลส์ กอล์ฟรีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดนครนายก, ตุลาคม 2551

สรรธพล คุ้มทรัพย์ , วันชัย ทรัพย์สิงห์ "บูสดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับสำหรับกังหันลม" **การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3**, ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิจังหวัดกรุงเทพ, มีนาคม 2554