

การประเมินค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์และปรับปรุงประสิทธิภาพของ
อินเวอร์เตอร์

PW-6310

Estimation of electrical power losses in the inverter and improve its efficiency



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ปีการศึกษา 2563

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Estimation of electrical power losses in the inverter and improve its efficiency



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปีการศึกษา 2563

การประเมินค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์และปรับปรุงประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์



อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประเมินค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์และปรับปรุงประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์

ผู้จัดทำ

- 
1. นายนครินทร์ เกษรสุวรรณ
 2. นายนครินทร์ ประเสริฐสุด
 3. นายนนทกร ชัยทอง

Wiwat

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ เกียรติวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การประเมินค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์และปรับปรุงประสิทธิภาพของ อินเวอร์เตอร์

นายนครินทร์ เกษรสุวรรณ

นายนครินทร์ ประเสริฐสุต

นายพนนทกร ชัยทอง

ผศ.ดร. วิวัฒน์ เกียรติวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ ศึกษาเกี่ยวกับการสูญเสียทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ และแยกองค์ประกอบของค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้า ประเมินค่ากำลังสูญเสียแบบเจาะจงของตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ปรับค่าตัวแปรพารามิเตอร์ของค่ากำลังสูญเสียและปรับปรุงประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ให้ดีขึ้น

ประโยชน์ที่จะได้รับจากปริญญานิพนธ์นี้ ทำให้ทราบค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ว่ามีองค์ประกอบจากเหนี่ยวนำและการเปิดปิดสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มากน้อยเพียงใด เพื่อที่จะเป็นแนวทางในการปรับปรุงค่าแปรพารามิเตอร์ของค่ากำลังสูญเสียให้น้อยลง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ เพื่อเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงพัฒนา การออกแบบระบบอินเวอร์เตอร์ การออกแบบระบบป้องกันการสูญเสียทางไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Estimation of electrical power losses in the inverter and improve its efficiency

Nakarin kadsuwan

Nakarin Prasetsut

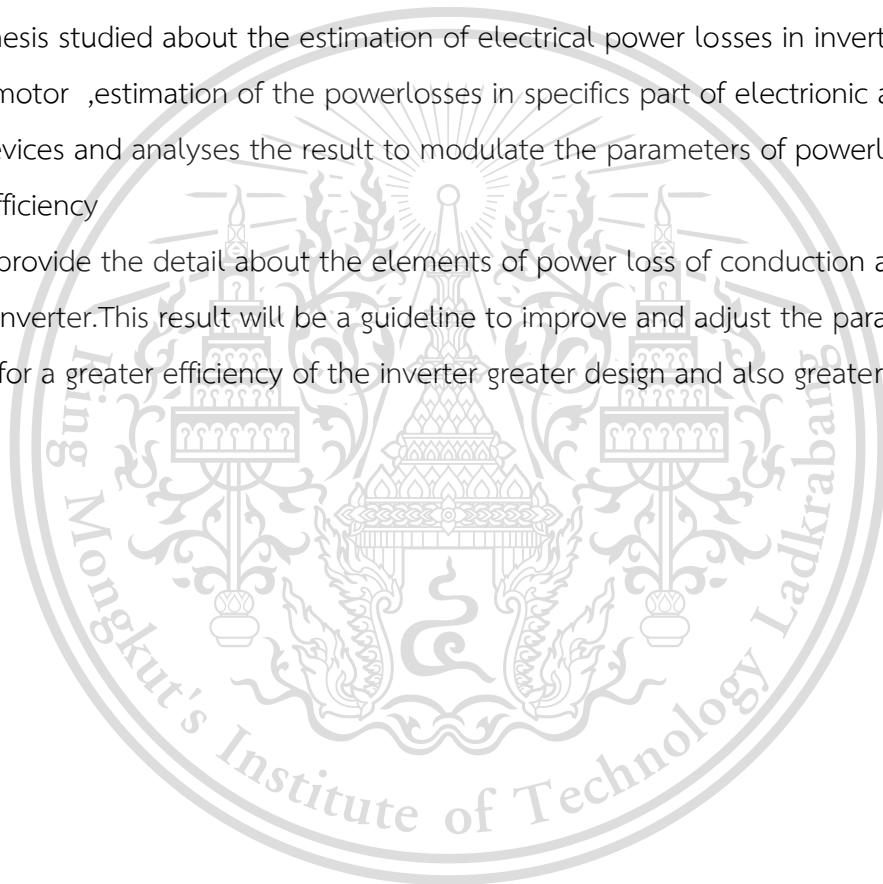
Nonthakorn chaitong

Assoc. Prof. Wiwat Keyoonwong Advisor

ABSTRACT

This thesis studied about the estimation of electrical power losses in inverter driving brushless dc motor ,estimation of the powerlosses in specifics part of electronic and power electronics devices and analyses the result to modulate the parameters of powerlosses and enhance its efficiency

Our thesis provide the detail about the elements of power loss of conduction and switching losses of the inverter.This result will be a guideline to improve and adjust the parameters of the power losses for a greater efficiency of the inverter greater design and also greater power losses protection .



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การประเมินค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์และปรับปรุงประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ สามารถประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดีเนื่องจากการทำงานของผู้จัดทำได้รับคำแนะนำและการสนับสนุนจากหลายภาคส่วน จากบุคลากรหลายท่านในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทางผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณในความอนุเคราะห์โดยมีรายนามดังต่อไปนี้

ผู้จัดทำได้ขอขอบพระคุณในความกรุณาของผศ.ดร. วิวัฒน์ เกียรติวงศ์ ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้ความกรุณานำแนวทางและสนับสนุนในด้านต่างๆจนกระทั่งปริญญานิพนธ์นี้ประสบความสำเร็จตามเป้าหมาย และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในสาขาภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆ รวมถึงประสิทธิประสาทวิชาความรู้ให้กับผู้จัดทำในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการสาขาภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่กรุณาให้หยิบยืมใช้อุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงให้คำแนะนำที่ดีในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณรุ่นพี่อินโนเจนที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบุคลากรที่สำคัญที่สุดที่ให้ผู้จัดทำในวันนี้คือบิดามารดาผู้ซึ่งอุปการะเลี้ยงดูผู้จัดทำมาเป็นอย่างดีพร้อมให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่และคอยให้กำลังใจผู้จัดทำมาโดยตลอด

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 อินเวอร์เตอร์(Inverter)	3
2.2 บัสเลตส์ซีมคอนเวอร์เตอร์ในอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	3
2.3 ความสูญเสียทางไฟฟ้าในอินเวอร์เตอร์	4
2.4 สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความสูญเสียในอินเวอร์เตอร์	5
2.4.1 ค่าความสูญเสียจากการเหนี่ยวนำ	5
2.4.2 ค่าความสูญเสียจากการ Switching on	5
2.4.3 ค่าความสูญเสียจากการ Switching on	5
2.4.4 ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์	6
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	7
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรขับ BLDC Motorและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่า	7
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรขับ BLDC Motor	7
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่า	8
3.2 วงจรควบคุม BLDC Motor	10
3.2.1 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์	14
3.2.3 วงจรขับนำสวิตช์	15
3.2.4 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์	15
3.2.5 วงจรขับ BLDC Motor	16
3.3 วิธีการทดลอง	16
3.3.1 การทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพ	17
3.3.2 การทดลองเพื่อหาค่ากำลังสูญเสีย	19
บทที่ 4 ผลการทดลอง	21
4.1 ผลการทดลองจากการวัดก่อนปรับปรุงประสิทธิภาพ	21
4.1.1 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพและค่าความสูญเสียก่อนปรับปรุงประสิทธิภาพ 0 kg	21
4.1.2 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพและค่าความสูญเสียก่อนปรับปรุงประสิทธิภาพ 1 kg	25
4.1.3 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพและค่าความสูญเสียก่อนปรับปรุงประสิทธิภาพ 2 kg	30
4.1.4 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพและค่าความสูญเสียก่อนปรับปรุงประสิทธิภาพ 3 kg	35
4.1.5 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพและค่าความสูญเสียก่อนปรับปรุงประสิทธิภาพ 4 kg	40
4.1.6 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพและค่าความสูญเสียก่อนปรับปรุงประสิทธิภาพ 5 kg	44
4.1.7 ตารางผลการทดลองรวมก่อนปรับปรุงประสิทธิภาพ	49
4.2 ผลการทดลองจากการวัดหลังปรับปรุงประสิทธิภาพ	50
4.2.1 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพหลังปรับปรุงประสิทธิภาพ 0 kg	50
4.2.2 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพหลังปรับปรุงประสิทธิภาพ 1 kg	51
4.2.3 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพหลังปรับปรุงประสิทธิภาพ 2 kg	53
4.2.4 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพหลังปรับปรุงประสิทธิภาพ 3 kg	57
4.2.5 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพหลังปรับปรุงประสิทธิภาพ 4 kg	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.6 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพหลังปรับปรุงประสิทธิภาพ 5 kg	60
4.2.7 ตารางผลการทดลองรวมหลังปรับปรุงประสิทธิภาพ	61
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	62
5.1 บทนำ	62
5.2 ก่อนปรับปรุงประสิทธิภาพ	62
5.3 หลังปรับปรุงประสิทธิภาพ	64
5.4 ข้อเสนอแนะ	65
เอกสารอ้างอิง	67
ภาคผนวก ก ภาพจากการวัดด้วยเครื่อง Oscilloscope ของ MOSFET	68
ภาคผนวก ข อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในการทดลอง	103
ภาคผนวก ค บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่	123
ประวัติผู้เขียน	129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลอินเวอร์เตอร์เมื่อเทียบกับ BLDC Motor	4
รูปที่ 2.2 กราฟการสูญเสียในอุดมคติใน MOSFET	4
รูปที่ 3.1 Oscilloscope ยี่ห้อ KEYSIGHT รุ่น DSO-X 2002A	8
รูปที่ 3.2 HIOKI รุ่น PQ3198	9
รูปที่ 3.3 Current probe ยี่ห้อ HAMEG รุ่น HZO50 Max current 20A RMS	9
รูปที่ 3.4 มัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ KETSIGHT รุ่น U1232A	10
รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมวงจรอินเวอร์เตอร์	11
รูปที่ 3.6 ลายกัต์บอร์ดอินเวอร์เตอร์	12
รูปที่ 3.7 อินเวอร์เตอร์เมื่อประกอบเสร็จแล้ว	12
รูปที่ 3.8 DC Power supply ยี่ห้อ SIGLENT รุ่น SPD3303C	13
รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลของ LM2575HVT-12/NOPB:12V และ LM2575T-5.0:5V	13
รูปที่ 3.10 วงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงบนอินเวอร์เตอร์	14
รูปที่ 3.11 หน้าที่ของแต่ PIN ของ dsPIC30F4011	14
รูปที่ 3.12 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011	15
รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลของ IR2101	15
รูปที่ 3.14 วงจรนำขับสวิตช์ IR2101	15
รูปที่ 3.15 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์	16
รูปที่ 3.16 วงจรขับ BLDC Motor	16
รูปที่ 3.17 การถ่วงน้ำหนักโดยวิธี Pulley	17
รูปที่ 3.18 วงจรสมมูลของการวัดกำลังขาออกโดยใช้เครื่อง HIOKI	18
รูปที่ 3.19 วงจรในการวัดกำลังขาเข้าและขาออกของอินเวอร์เตอร์	18
รูปที่ 3.20 วงจรที่ทำการดัดแปลงโดยการเพิ่มสายไฟเพื่อใช้ในการวัดกระแส Drain to Source	19
รูปที่ 3.21 วงจรสมมูลของการวัดเพื่อหาค่ากำลังสูญเสียโดยใช้ Oscilloscope	20
รูปที่ 4.1 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 0 kg	21
รูปที่ 4.2 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI	21
รูปที่ 4.3 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์	22

เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.4 ค่าเวลา T_{off} และ ขนาด I_{DS} จากเครื่อง Oscilloscope ของ MOSFET A High ประโยชน์ 22 การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.5 ขนาด V_{DS} ขณะที่ I_{DS} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High	23
รูปที่ 4.6 ช่วงเวลา T_{ON} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High	23
รูปที่ 4.7 รูปคลื่น V_{DS} และ I_{DS} ของ MOSFET A High	23
รูปที่ 4.8 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 1 kg	25
รูปที่ 4.9 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI	26
รูปที่ 4.10 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์	26
รูปที่ 4.11 ค่าเวลา T_{off} และ ขนาด I_{DS} จากเครื่อง Oscilloscope ของ MOSFET A High	27
รูปที่ 4.12 ขนาด V_{DS} ขณะที่ I_{DS} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High	27
รูปที่ 4.13 ช่วงเวลา T_{ON} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High	27
รูปที่ 4.14 รูปคลื่น V_{DS} และ I_{DS} ของ MOSFET A High	28
รูปที่ 4.15 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 2 kg	30
รูปที่ 4.16 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI	30
รูปที่ 4.17 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์	31
รูปที่ 4.18 ค่าเวลา T_{off} และ ขนาด I_{DS} จากเครื่อง Oscilloscope ของ MOSFET A High	31
รูปที่ 4.19 ขนาด V_{DS} ขณะที่ I_{DS} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET B High	32
รูปที่ 4.20 ช่วงเวลา T_{ON} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET B High	32
รูปที่ 4.21 รูปคลื่น V_{DS} และ I_{DS} ของ MOSFET B High	33
รูปที่ 4.22 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 3 kg	35
รูปที่ 4.23 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI	35
รูปที่ 4.24 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์	36
รูปที่ 4.25 ค่าเวลา T_{off} และ ขนาด I_{DS} จากเครื่อง Oscilloscope ของ MOSFET A High	36
รูปที่ 4.26 ขนาด V_{DS} ขณะที่ I_{DS} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High	37
รูปที่ 4.27 ช่วงเวลา T_{ON} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High	37
รูปที่ 4.28 รูปคลื่น V_{DS} และ I_{DS} ของ MOSFET A High	38
รูปที่ 4.29 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 4 kg	40
รูปที่ 4.30 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI	40
รูปที่ 4.31 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์	40
รูปที่ 4.32 ค่าเวลา T_{off} และ ขนาด I_{DS} จากเครื่อง Oscilloscope ของ MOSFET A High	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.33 ขนาด V_{DS} ขณะที่ I_{DS} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High	41
รูปที่ 4.34 ช่วงเวลา T_{ON} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High	42
รูปที่ 4.35 รูปคลื่น V_{DS} และ I_{DS} ของ MOSFET A High	42
รูปที่ 4.36 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 5 kg	44
รูปที่ 4.37 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI	45
รูปที่ 4.38 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์	45
รูปที่ 4.39 ค่าเวลา T_{off} และ ขนาด I_{DS} จากเครื่อง Oscilloscope ของ MOSFET A High	46
รูปที่ 4.40 ขนาด V_{DS} ขณะที่ I_{DS} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High	46
รูปที่ 4.41 ช่วงเวลา T_{ON} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High	47
รูปที่ 4.42 รูปคลื่น V_{DS} และ I_{DS} ของ MOSFET A High	47
รูปที่ 4.43 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 0 kg หลังปรับปรุง	50
รูปที่ 4.44 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI หลังปรับปรุง	50
รูปที่ 4.45 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์	51
รูปที่ 4.46 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 1 kg หลังปรับปรุง	51
รูปที่ 4.47 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI หลังปรับปรุง	52
รูปที่ 4.48 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์	52
รูปที่ 4.49 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 2 kg หลังปรับปรุง	53
รูปที่ 4.50 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI หลังปรับปรุง	53
รูปที่ 4.51 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์	53
รูปที่ 4.52 ค่าเวลา T_{off} และ ขนาด V_{DS} จากเครื่อง Oscilloscope ของ MOSFET A High	54
รูปที่ 4.53 ขนาด I_{DS} ขณะที่ V_{DS} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High	54
รูปที่ 4.54 ช่วงเวลา T_{ON} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High	55
รูปที่ 4.55 รูปคลื่น V_{DS} และ I_{DS} ของ MOSFET A High	55

รูปที่ 4.56 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 3 kg หลังปรับปรุง	57
--	----

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
หลังปรับปรุง	58
รูปที่ 4.58 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์	58
รูปที่ 4.59 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 4 kg หลังปรับปรุง	59
รูปที่ 4.60 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI	
หลังปรับปรุง	59
รูปที่ 4.61 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์	59
รูปที่ 4.62 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 5 kg หลังปรับปรุง	60
รูปที่ 4.63 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI	
หลังปรับปรุง	60
รูปที่ 4.64 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์	61
รูปที่ 5.1 กราฟประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่โหลดน้ำหนักต่างๆ	62
รูปที่ 5.2 กราฟ Switching loss ของอินเวอร์เตอร์ที่โหลดน้ำหนักต่างๆ	63
รูปที่ 5.3 กราฟ Conduction loss ของอินเวอร์เตอร์ที่โหลดน้ำหนักต่างๆ	63
รูปที่ 5.4 กราฟประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์หลังปรับปรุงที่โหลดน้ำหนักต่างๆ	64
รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงที่โหลดน้ำหนักต่างๆ	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าแรงดัน กระแสและเวลาในการสวิตช์ MOSFET 6 ตัว 0 kg	24
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าความสูญเสียของ MOSFET 6 ตัว 0 kg	25
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าแรงดัน กระแสและเวลาในการสวิตช์ MOSFET 6 ตัว 1 kg	29
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าความสูญเสียของ MOSFET 6 ตัว 1 kg	29
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าแรงดัน กระแสและเวลาในการสวิตช์ MOSFET 6 ตัว 2 kg	34
ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าความสูญเสียของ MOSFET 6 ตัว 2 kg	34
ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าแรงดัน กระแสและเวลาในการสวิตช์ MOSFET 6 ตัว 3 kg	39
ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงค่าความสูญเสียของ MOSFET 6 ตัว 3 kg	39
ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงค่าแรงดัน กระแสและเวลาในการสวิตช์ MOSFET 6 ตัว 4 kg	43
ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงค่าความสูญเสียของ MOSFET 6 ตัว 4 kg	44
ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงค่าแรงดัน กระแสและเวลาในการสวิตช์ MOSFET 6 ตัว 5 kg	48
ตารางที่ 4.12 ตารางแสดงค่าความสูญเสียของ MOSFET 6 ตัว 5 kg	49
ตารางที่ 4.13 ตารางสรุปค่าประสิทธิภาพและการสูญเสียก่อนปรับปรุงตั้งแต่ 0-5 kg	49
ตารางที่ 4.14 ตารางแสดงค่าแรงดัน กระแสและเวลาในการสวิตช์ MOSFET 6 ตัว 2 kg หลังการปรับปรุง	56
ตารางที่ 4.15 ตารางแสดงค่าความสูญเสียของ MOSFET 6 ตัว 2 kg หลังการปรับปรุง	57
ตารางที่ 4.16 ตารางสรุปค่าประสิทธิภาพและการสูญเสียหลังปรับปรุงตั้งแต่ 0-5 kg	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำการแปลงไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟที่เป็นกระแสตรงเช่น แบตเตอรี่เป็นกระแสสลับไปยังมอเตอร์และควบคุมแรงดันและความถี่ให้มีความเสถียรและให้ค่าที่เหมาะสมตามการใช้งานซึ่งในปัจจุบันนี้มีความต้องการที่จะใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากที่เนื่องมาจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมเช่นการขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าบางรุ่นที่ต้องใช้อินเวอร์เตอร์หรือโพลดักอินในสถานที่สำคัญอย่างโรงพยาบาลที่จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา

ในปัจจุบันนี้ Brushless DC Motor (BLDC) เป็นที่นิยมมากในการใช้ขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าเนื่องจากมีความเร็วรอบที่สูง ให้แรงบิดที่ความเร็วสูงและประสิทธิภาพสูง ปราศจากแปรงถ่านซึ่งเป็นส่วนที่เกิดการสึกหรอ มีขนาดเล็กกว่ามอเตอร์ตัวอื่นๆที่กำลังเท่ากัน ซึ่งในการขับ BLDC มอเตอร์จำเป็นต้องใช้อินเวอร์เตอร์แปลงไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ในรูปแบบไซน์ ซึ่งประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนระบบนั้นมีปัจจัยมาจากหลายๆส่วน เช่น การติดตั้งตำแหน่งของ Hall sensor , ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ หรือจะเป็นในส่วนของการพันขดลวดของมอเตอร์ ซึ่งประสิทธิภาพส่วนใหญ่ของระบบก็ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ด้วย เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำนวนมาก ทำหน้าที่ในการสั่งการ ควบคุม รับค่า รับค่า ทำการ on off ที่ความถี่สวิตชิง ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการสูญเสียทางไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ เช่น conduction loss , switching loss และอื่นๆ ถึงแม้ว่าในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะมีการใส่ EMI filter เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพแต่ก็ยังมีการสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังอยู่ดี

ทางกลุ่มของข้าพเจ้าจึงจัดทำวิจัยนี้เพื่อศึกษาและหาค่าเกี่ยวกับการสูญเสียทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับ BLDC มอเตอร์ว่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากส่วนไหน มากน้อยเพียงใด เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพในจุดที่มีน้ำหนักมากที่สุดได้อย่างตรงจุดและเป็นประโยชน์สืบต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการสูญเสียทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์และศึกษาการทำงานของอินเวอร์เตอร์และ BLDC มอเตอร์เบื้องต้น
2. เพื่อประเมินค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าและหาค่าประสิทธิภาพในอินเวอร์เตอร์
3. เพื่อแยกองค์ประกอบของค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้า
4. เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use. 1

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1. ศึกษาค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์จากการวัดค่าและการคำนวณ
2. ใช้ตัวคอนโทรลเลอร์โดยPIC dsPIC30F และมีวงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์จะมีอยู่ในรูปของไอซีขับมอเตอร์ 6 ตัว มอเตอร์ต่อแบบสตาร์
3. ประกอบอินเวอร์เตอร์ขนาด 48V DC/AC 220V และนำไปขับมอเตอร์
4. ในการวัดประสิทธิภาพใช้ DC power sup 48 โวลต์ โดยมีการใส่โหลดที่น้ำหนัก 0-5 กิโลกรัม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์และอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
2. สามารถทราบการสูญเสียทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ว่าเกิดจากส่วนไหน มากน้อยเพียงใด
3. สามารถประยุกต์การปรับตัวแปรพารามิเตอร์ของค่ากำลังสูญเสียให้น้อยลงได้
4. เพิ่มประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.2

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนของบทที่ 2 นี้จะประกอบไปด้วย 4 ส่วนคือ 1.ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอินเวอร์เตอร์ 2.ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ BLDC Motor 3.ความสูญเสียทางไฟฟ้าและ 4.สูตรในการคำนวณค่าความสูญเสียทางไฟฟ้า

2.1 อินเวอร์เตอร์(Inverter)

อินเวอร์เตอร์คือวงจรที่ใช้ในการแปลงพลังงานทางไฟฟ้าจากกระแสตรงให้เป็นพลังงานทางไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับค่าได้หรือคงที่หรือเพื่อให้ได้ความถี่ขาออกของไฟฟ้ากระแสสลับตามที่เรากำลังต้องการโดยหลักการก็จะมี 2 แบบคือ 1.ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้าหรือ 2.ใช้เทคนิคการควบคุมการเปิดปิดสวิตช์ของตัวอินเวอร์เตอร์เช่น การใช้เทคนิคแบบ PWM เป็นต้น สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ 3 เฟสจะใช้หลักการของการควบคุมอัตราส่วนของแรงดันขาออกและความถี่ขาออกให้คงที่ เพื่อให้สามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ได้คงที่ แต่สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่จะนำไปใช้ในเครื่องของงานอื่นๆที่ต้องการแรงดันขาออกและความถี่ที่คงที่ก็สามารถใช้อินเวอร์เตอร์ที่สามารถควบคุมการเปิด-ปิดของ MOSFET หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยวิธีที่ไม่ยากเช่น วิธี PWM แบบ 180 หรือ 120 องศา ในส่วนของรูปคลื่นแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ในอุดมคติจะเป็นรูปคลื่นไซน์ แต่ว่าในทางปฏิบัติจริงนั้นจะไม่ใช่อุปกรณ์ที่บริสุทธิ์ แต่จะเป็นรูปกึ่งสี่เหลี่ยมเนื่องมาจากฮาร์มอนิกส์ที่รวมอยู่ด้วย เทคนิคการสวิตช์แบบ PWM จะทำให้ฮาร์มอนิกส์ลดลงได้หรือจะทำการลดในส่วนของการสูญเสียทางไฟฟ้าเพื่อให้ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์นั้นมีค่าสูงขึ้น

2.2 บัสเลตตีซิมูเลเตอร์ในอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

Mistretta et.al (2018) [1]บัสเลตตีซิมูเลเตอร์มีโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวรและมีสเตเตอร์ที่มีการพัดของขดลวด โดยบัสเลตตีซิมูเลเตอร์จะไม่มีแปรงถ่านและซีคอมมิวเตเตอร์และขดลวดที่พันอยู่กับสเตเตอร์จะต่อเข้ากับวงจรควบคุมเช่นอินเวอร์เตอร์ที่ซึ่งจะมาแทนที่ฟังก์ชันของซีคอมมิวเตเตอร์และจ่ายไฟเข้ามอเตอร์ได้อย่างเหมาะสม โดยขดลวดจะโดนกระตุ้นเป็นรูปแบบโดยเมื่อขดลวดที่สเตเตอร์โดนกระตุ้นแล้วจะเปรียบเสมือนเป็นแม่เหล็กและจะกระตุ้นเป็นเฟสๆไปและจะทำให้เกิดเป็นสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ และจะมีตัวจับตำแหน่งการหมุนชื่อฮอลล์เซ็นเซอร์

เมื่อไหร่ก็ตามที่สนามแม่เหล็กหมุนผ่านฮอลล์เซ็นเซอร์มันจะทำให้เกิดสัญญาณสูงหรือต่ำที่จะแสดงว่าขั้วเหนือหรือขั้วใต้ผ่านฮอลล์เซ็นเซอร์ไป แรงบิดจะเกิดขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากขดลวดในสเตเตอร์ไปเหนี่ยวนำแม่เหล็กถาวรที่เป็นโรเตอร์ให้หมุน โดยแรงบิดสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กจากสเตเตอร์ตรงกับขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์

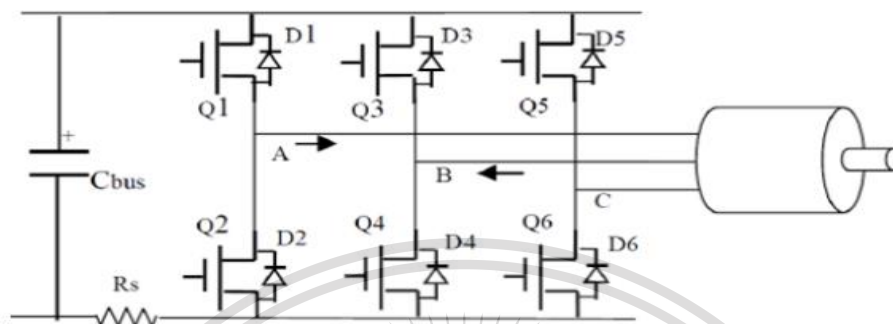
บัสเลตตีซิมูเลเตอร์ที่ใช้คอมมิวเตเตอร์เพื่อควบคุมการสับเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสสำหรับกำหนดทิศ

ทางการหมุนของมอเตอร์ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์จะใช้โครงสร้างบริดจ์แบบสามเฟสแสดงดังรูปเป็นวงจรสมมูลที่มี

MOSFET สองตัวต่อ 1 เฟส สำหรับการควบคุมความเร็วมอเตอร์จะควบคุมด้วยสวิตช์ตัวบนของอินเวอร์เตอร์โดย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

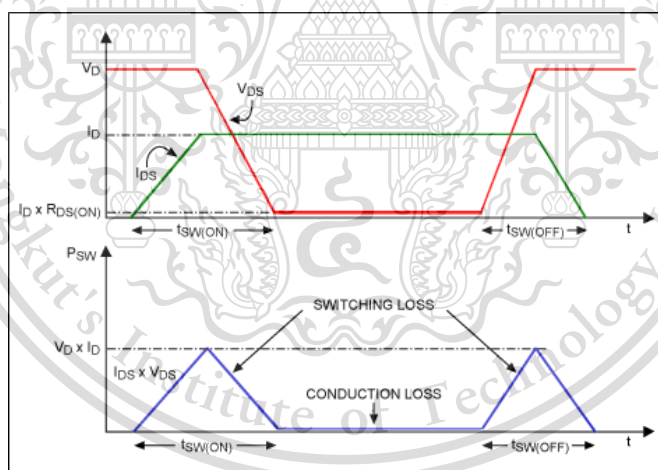
ใช้การควบคุมด้วยสัญญาณพัลส์บิวดีเอ็ม (PWM) ซึ่งเกิดจากการมอดูเลตสัญญาณแรงดันโดยปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้ความเร็วของมอเตอร์เปลี่ยนแปลง วิธีการนี้ทำได้ง่ายและสามารถจำกัดค่ากระแสเริ่มหมุนเพื่อควบคุมความเร็วและแรงบิด



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลอินเวอร์เตอร์เมื่อต่อกับ BLDC Motor

2.3 ความสูญเสียทางไฟฟ้าในอินเวอร์เตอร์

Patrik Varecha et.al. (2019) [2] ความสูญเสียทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์นั้นจะแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆที่ใช้ในการศึกษาในการวิจัยนี้คือ 1. ค่าความสูญเสียจากการสวิตซ์ซิงและ 2.ค่าความสูญเสียจากการเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.2 กราฟการสูญเสียในอุณหภูมิตัว MOSFET

จากรูปที่ 2.2 จะเป็น กราฟการสูญเสียในอุณหภูมิตัว MOSFET จะสามารถอธิบายช่วงเวลาในการเกิด Switching on loss และ Conduction loss ได้เริ่มจากการสูญเสียจากการสวิตซ์ซิงแบ่งเป็นการสูญเสียสวิตซ์ซิง on และ การสูญเสียสวิตซ์ซิงลอส off โดยเมื่อแรงดัน gate มากกว่าค่า เทรดโธว(V_{th})แล้วจะเกิดการนำกระแสจาก drain to source ในขณะที่กระแส DS ถึงค่าอิ่มตัวแรงดัน drain to source จะเริ่มตกลงจนเข้าสู่ใกล้ศูนย์เนื่องจากค่าความต้านทานภายในตัว MOSFET มีค่าน้อยมากโดยเมื่อนำกระแสและแรงดันมาคูณกันจะได้เป็นพื้นที่

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามเหลี่ยมตามรูปด้านล่างในส่วนนี้เรียกว่า the switching on losses เมื่อแรงดัน gate เริ่มตกลงจะทำให้แรงดัน drain to source มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อถึงจุดอิ่มตัวจะทำให้กระแส drain to source มีค่าลดลงจนไม่มีการนำกระแส และในช่วงเวลานี้จะเรียกว่า the switching off losses พื้นที่ใต้กราฟของการสูญเสียจะเป็นสามเหลี่ยม เช่นเดียวกับ the switching on losses ในส่วนของ Conduction loss จะเกิดในขณะที่กระแสไหลผ่านจาก drain to source โดยมีตัวต้านทานภายใน MOSFET อยู่

2.4 สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความสูญเสียในอินเวอร์เตอร์

Yi Zhang et.al. (2017) [3] โดยค่าความสูญเสียบนอินเวอร์เตอร์จะแบ่งเป็นสองส่วนหลักๆคือ ค่าความสูญเสียจากการเหนี่ยวนำและค่าความสูญเสียจากการสวิตชิง โดยค่าความสูญเสียส่วนใหญ่จะเกิดที่ตัว MOSFET ที่เป็นเป็นค่าความสูญเสียจากการสวิตชิงโดยทั้งค่าความสูญเสียจากการเหนี่ยวนำและค่าความสูญเสียจากการสวิตชิงมีสมการดังนี้

2.4.1 ค่าความสูญเสียจากการเหนี่ยวนำ

ค่าความสูญเสียจากการเหนี่ยวนำนั้นเกิดขึ้นที่ตัวบวมตัวของ MOSFET ที่มีค่าความต้านทานภายในอยู่ โดยจะมีสมการเป็นดังนี้

$$P_{cond} = I_{D(rms)}^2 \cdot R_{DS(on)}^2$$

$R_{DS(on)}$ คือตัวต้านทานภายในของ MOSFET

$I_{D(RMS)}$ คือกระแสไหลผ่าน MOSFET เป็นค่า RMS

2.4.2 ค่าความสูญเสียจากการ Switching on

$$P_{sw(on)} = \frac{1}{2} V_D \cdot I_D \cdot t_{on} \cdot f_{sw}$$

V_D คือแรงดัน Drain to Source

I_D คือกระแสไหลผ่าน MOSFET

t_{on} คือเวลาที่ Switching on

f_{sw} คือความถี่สวิตชิง

2.4.3 ค่าความสูญเสียจากการ Switching on

$$P_{sw(off)} = \frac{1}{2} V_D \cdot I_D \cdot t_{off} \cdot f_{sw}$$

V_D คือแรงดัน Drain to Source

I_D คือกระแสไหลผ่าน MOSFET

t_{off} คือเวลาที่ Switching off

f_{sw} คือความถี่สวิตชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รวบรวมไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์

$$Eff = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \%$$

P_{out} คือกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์

P_{in} คือกำลังขาเข้าของอินเวอร์เตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use. 6

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในส่วนของบทที่ 3 นี้จะแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ 1.อุปกรณ์ที่ใช้ในการขับ BLDC Motor และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าต่าง 2.อธิบายส่วนประกอบและการทำงานของวงจรในส่วนที่สำคัญและ 3.วิธีการในการวัดค่าประสิทธิภาพและค่าความสูญเสียของตัวอินเวอร์เตอร์

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรขับ BLDC Motorและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่า

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรขับ BLDC Motor

- ตัวเก็บประจุ EKM108M1LK25RRSAP 1000uF/63V	2 ตัว
- ตัวเก็บประจุ 1000uF/100V : Elite 85'C,E-cap	1 ตัว
- ตัวเก็บประจุ UCA2E100MPD 10uF/250V	3 ตัว
- ตัวเก็บประจุ 330uF/16v Electrolytic Capacitor	1 ตัว
- ตัวเก็บประจุ 330uF/25v : Elite 85'C,E-cap	1 ตัว
- ตัวเก็บประจุ 330uF/35v : Elite 85'C,E-cap	2 ตัว
- ตัวเก็บประจุ Polyester Film Cap 10nF/100v	7 ตัว
- ตัวเก็บประจุ Ceramic Disc Capacitor 33pF/50v	2 ตัว
- ตัวเก็บประจุ poly Film Cap 1uF/63v	1 ตัว
- ขดลวดเหนี่ยวนำ 330uH	2 ตัว
- ควอตซ์ oscillator	1 ตัว
- terminal block 3 pin	2 ตัว
- terminal block 2 pin	1 ตัว
- ตัวต้านทานปรับค่าได้ 5kOhm	1 ตัว
- ตัวต้านทานปรับค่าได้ 10kOhm	1 ตัว
- Connector 5 pin	1 ตัว
- Connector 16 pin	1 ตัว
- Interface MOSFET driver: IR2101PBF	3 ตัว
- กระบอกรัด 20mm.	1 ตัว

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use. 7

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- หลอกLED สีแดง 3mm.	1 ตัว
- หลอกLED สีเขียว 3mm.	1 ตัว
- MOSFET IRF2807PBF:75V/82A	6 ตัว
- Switching Voltage Regulator LM2575T-5.0:5V	1 ตัว
- Switching Voltage Regulator LM2575HVT-12/NOPB:12V	1 ตัว
- Heatsink	8 ตัว
- Diode Switching Signalnal 1N4148 100V/200mA	3 ตัว
- Diode Shottky Barrier 1N4148 40V/1A	2 ตัว
- ตัวต้านทาน 4.7kOhm 1%	7 ตัว
- ตัวต้านทาน 10kOhm 1%	3 ตัว
- ตัวต้านทาน 300Ohm 1%	6 ตัว
- ตัวต้านทาน 2K 1%	1 ตัว
- ตัวต้านทาน 50kOhm 1%	1 ตัว
- ตัวต้านทาน 3KOhm 1%	1 ตัว
- ตัวต้านทาน 33Ohm 1%	7 ตัว
- แผ่นวงจรพิมพ์	1 แผ่น
- สายไฟ	
-microchip dsPIC30F4011	1ตัว

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่า



รูปที่ 3.1 Oscilloscope ยี่ห้อ KEYSIGHT รุ่น DSO-X 2002A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use. 8

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.2 HIOKI รุ่น PQ3198



รูปที่ 3.3 Current probe ยี่ห้อ HAMEG รุ่น HZO50 Max current 20A RMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.⁹

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.4 มัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ KETSIGHT รุ่น U1232A

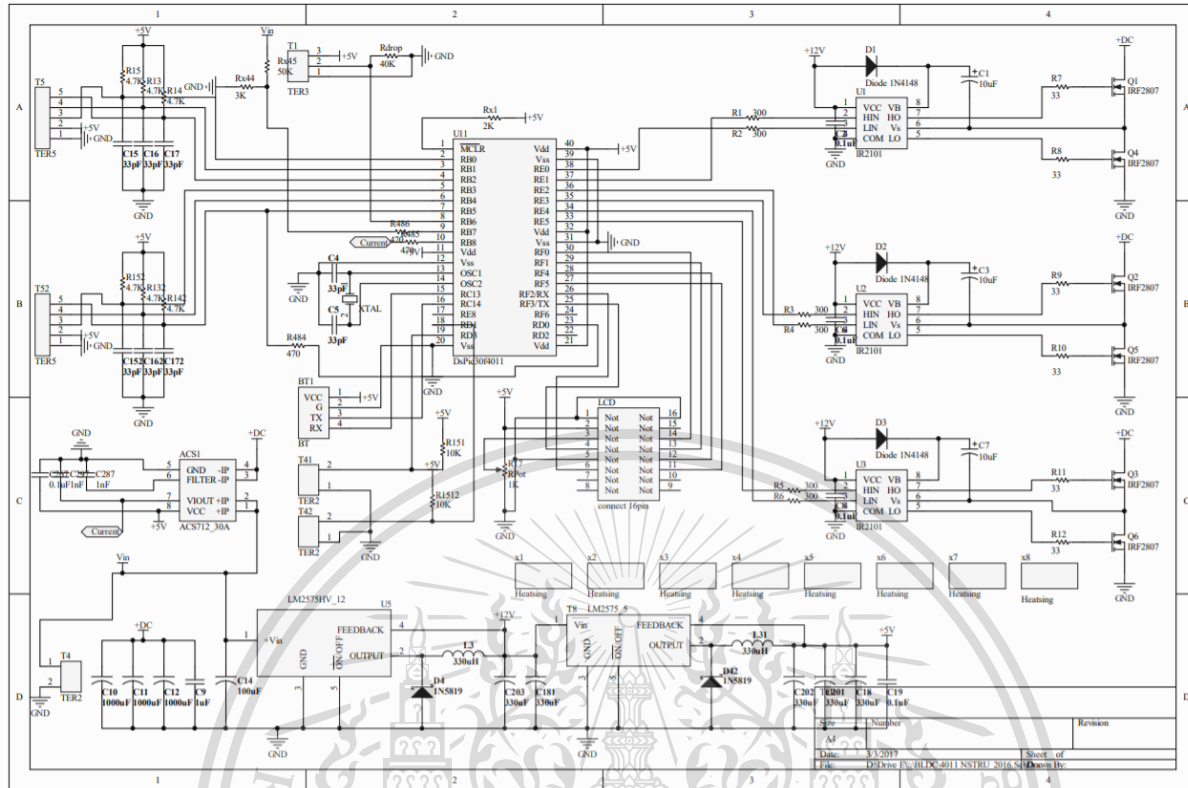
3.2 วงจรควบคุม BLDC Motor

โดยการประกอบอินเวอร์เตอร์จะนำไดโอดแกรมวงจรอินเวอร์เตอร์จากชุดมอดูลอินโนเจนมาศึกษาและนำไปประกอบตามเบื้องต้นโดยมีไดโอดแกรมดังภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use¹⁰

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



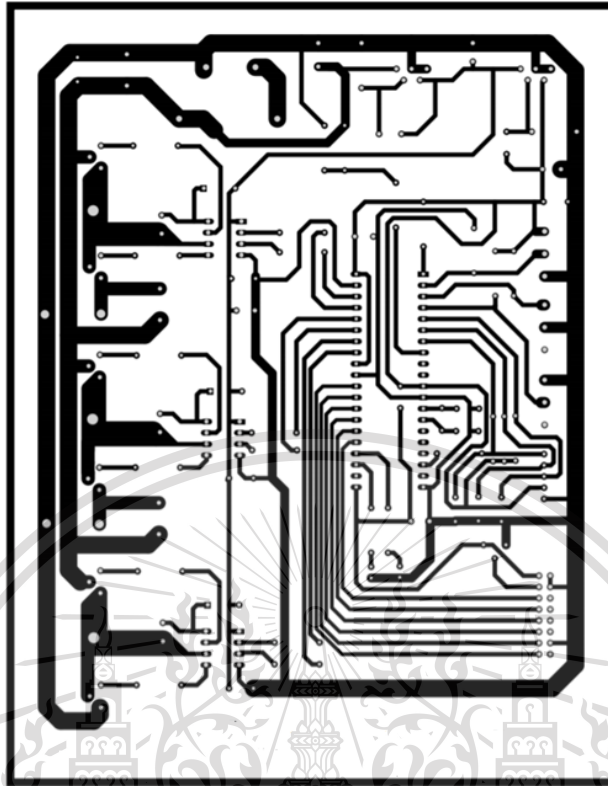
รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมวงจรอินเวอร์เตอร์

และนำบอร์ดในชุมชนอินโนเจนมาประกอบเป็นอินเวอร์เตอร์โดยจะมีลายบอร์ดเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

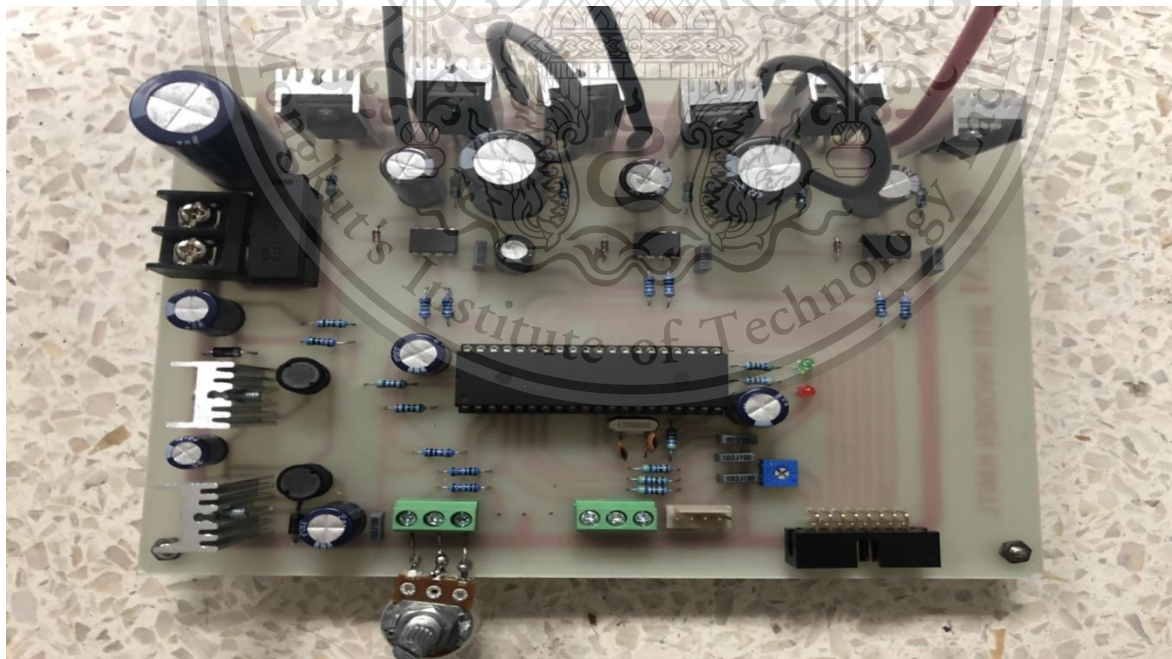
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use11

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.6 ลายกັดบอร์ดอินเวอร์เตอร์

โดยวิธีการทำอินเวอร์เตอร์ไปซื้ออุปกรณ์ดังด้านบนและประกอบตามไดอะแกรมโดยจะมีอินเวอร์เตอร์เป็นดังภาพ



รูปที่ 3.7 อินเวอร์เตอร์เมื่อประกอบเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use¹²

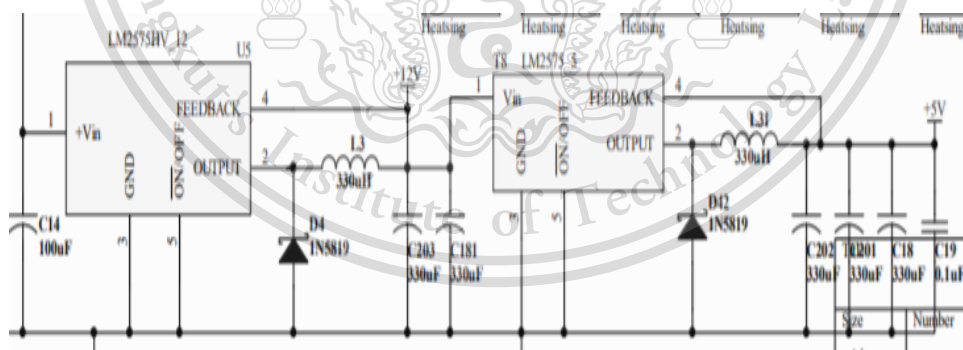
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2.1 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

เป็นส่วนที่ได้รับพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจาก DC Power supply 48VDC ดังรูปที่ 3.8 โดยในส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2 ชนิดคือ Switching Voltage Regulator LM2575HVT-12/NOPB:12V มีหน้าที่ลดทอนแรงดันจาก DC Power supply 48VDC เหลือ 12VDC เพื่อใช้ในวงจรนำขับสวิตช์และอีกชนิดคือ Switching Voltage Regulator LM2575T-5.0:5V มีหน้าที่ลดทอนแรงดันของ LM2575HVT-12/NOPB:12V เหลือ 5VDC สำหรับใช้เป็นไฟเลี้ยงไมโครคอนโทรลเลอร์ในชุดควบคุม



รูปที่ 3.8 DC Power supply ยี่ห้อ SIGLENT รุ่น SPD3303C



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลของ LM2575HVT-12/NOPB:12V และ LM2575T-5.0:5V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use¹³

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

LM2575HVT-12/NOPB:12V

LM2575T-5.0:5V



รูปที่ 3.10 วงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงบนอินเวอเตอร์

3.2.2 วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

ในส่วนนี้จะเน้นในเรื่องของการประมวลผลของสัญญาณแรงดันที่ได้รับมาจาก Hall Sensors ทั้ง 3 ตัวของ BLDC Motor เพื่อใช้ควบคุมตำแหน่งและทิศทางการหมุนโดยอุปกรณ์ใช้ในการควบคุมประมวลผลสัญญาณคือ dsPIC30F4011 ซึ่งต้องใช้แรงดันไฟเลี้ยง 5VDC ที่ส่งมาจากแหล่งจ่ายไฟ

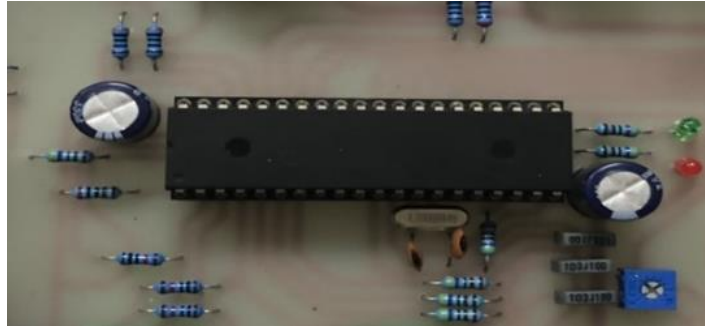
MCLR	1	40	AVDD
EMUD3/AN0/VREF+/CN2/RB0	2	39	AVSS
EMUC3/AN1/VREF-/CN3/RB1	3	38	PWM1L/RE0
AN2/SS1/CN4/RB2	4	37	PWM1H/RE1
AN3/INDX/CN5/RB3	5	36	PWM2L/RE2
AN4/QEA/IC7/CN6/RB4	6	35	PWM2H/RE3
AN5/QEB/IC8/CN7/RB5	7	34	PWM3L/RE4
AN6/OCFA/RB6	8	33	PWM3H/RE5
AN7/RB7	9	32	VDD
AN8/RB8	10	31	VSS
VDD	11	30	C1RX/RFO
VSS	12	29	C1TX/RF1
OSC1/CLKIN	13	28	U2RX/CN17/RF4
OSC2/CLKO/RC15	14	27	U2TX/CN18/RF5
EMUD1/SOSC/T2CK/U1ATX/CN1/RC13	15	26	PGC/EMUC/U1RX/SDI1/SDA/Rf2
EMUC1/SOSCO/T1CK/U1ARX/CN0/RC14	16	25	PGD/EMUD/U1TX/SDO1/SCL/Rf3
FLTA/INT0/RE8	17	24	SCK1/Rf6
EMUD2/OC2/IC2/INT2/RD1	18	23	EMUC2/OC1/IC1/INT1/RD0
OC4/RD3	19	22	OC3/RD2
VSS	20	21	VDD

รูปที่ 3.11 หน้าที่ของแต่ PIN ของ dsPIC30F4011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use14

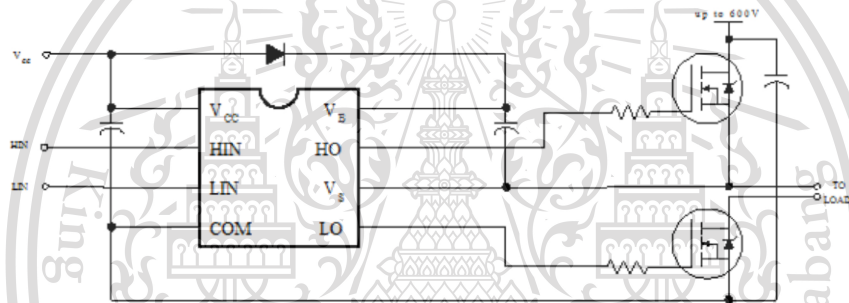
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



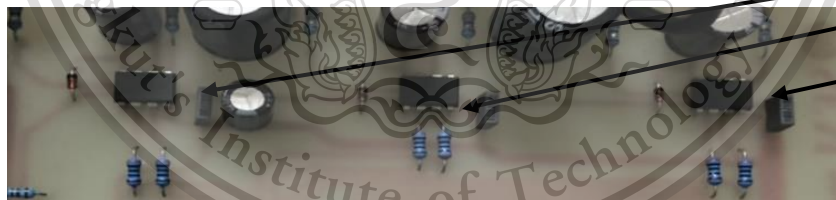
รูปที่ 3.12 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011

3.2.3 วงจรขับนำสวิตช์

เป็นส่วนที่รับสัญญาณ PWM ที่ถูกสร้างจากประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 เพื่อใช้ในการขับสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ทั้งด้าน High และ Low สำหรับสร้างแรงดันและกระแสไฟฟ้าสลับเข้าสู่ BLDC Motor โดยอุปกรณ์ที่ใช้นำขับสวิตช์คือ IR2101



รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลของ IR2101



IR2101

รูปที่ 3.14 วงจรนำขับสวิตช์ IR2101

3.2.4 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์

ประกอบด้วยสวิตช์ที่ใช้ในการแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจาก DC Power supply ให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่ BLDC Motor ใช้เป็นพลังงานในการขับเคลื่อน โดยสวิตช์ที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปแบบของพลังงานคือ MOSFET IRF2807PBF:75V/82A

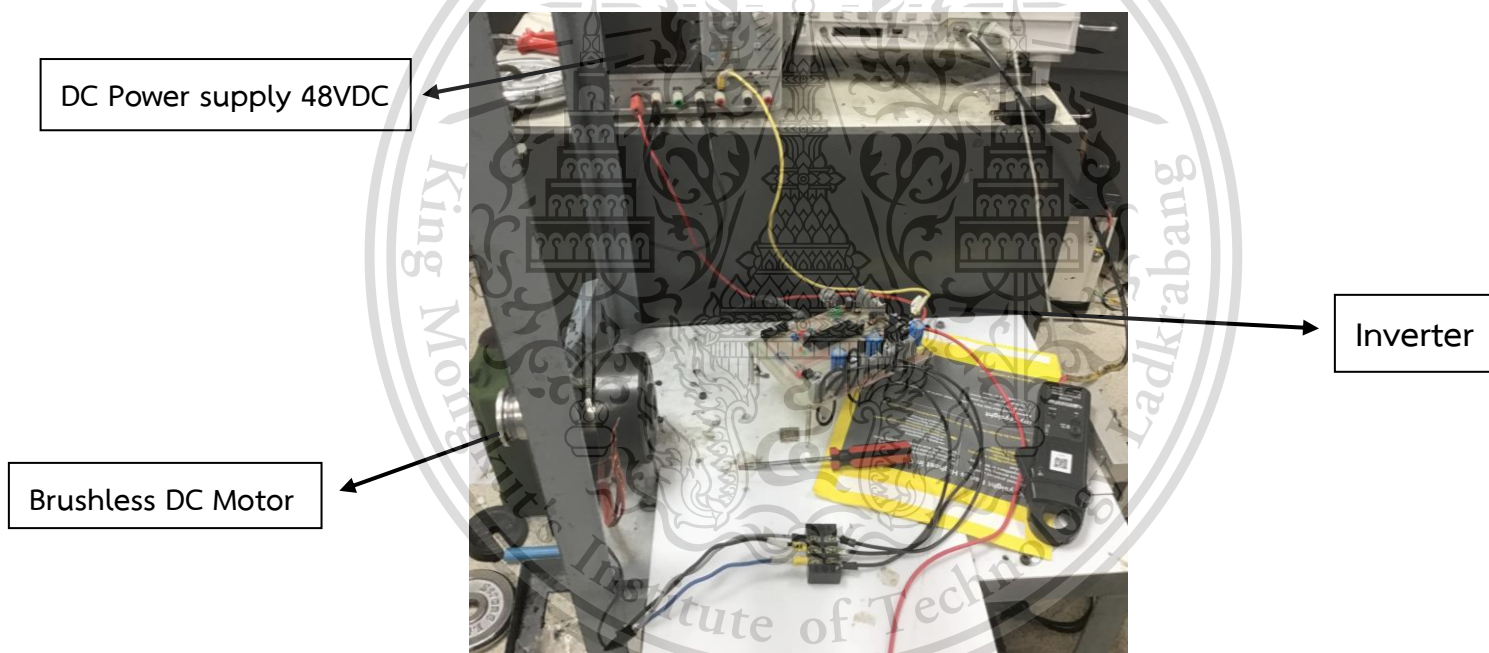
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์

3.2.5 วงจรขับ BLDC Motor

วงจรที่ใช้ในการขับ BLDC Motor จะมีองค์ประกอบ 3 ส่วนหลักคือ 1. DC Power supply 48VDC 2. อินเวอร์เตอร์เพื่อใช้แปลงพลังงานและ 3. BLDC Motor ที่มี Hall Sensors ดังภาพต่อไปนี้



รูปที่ 3.16 วงจรขับ BLDC Motor

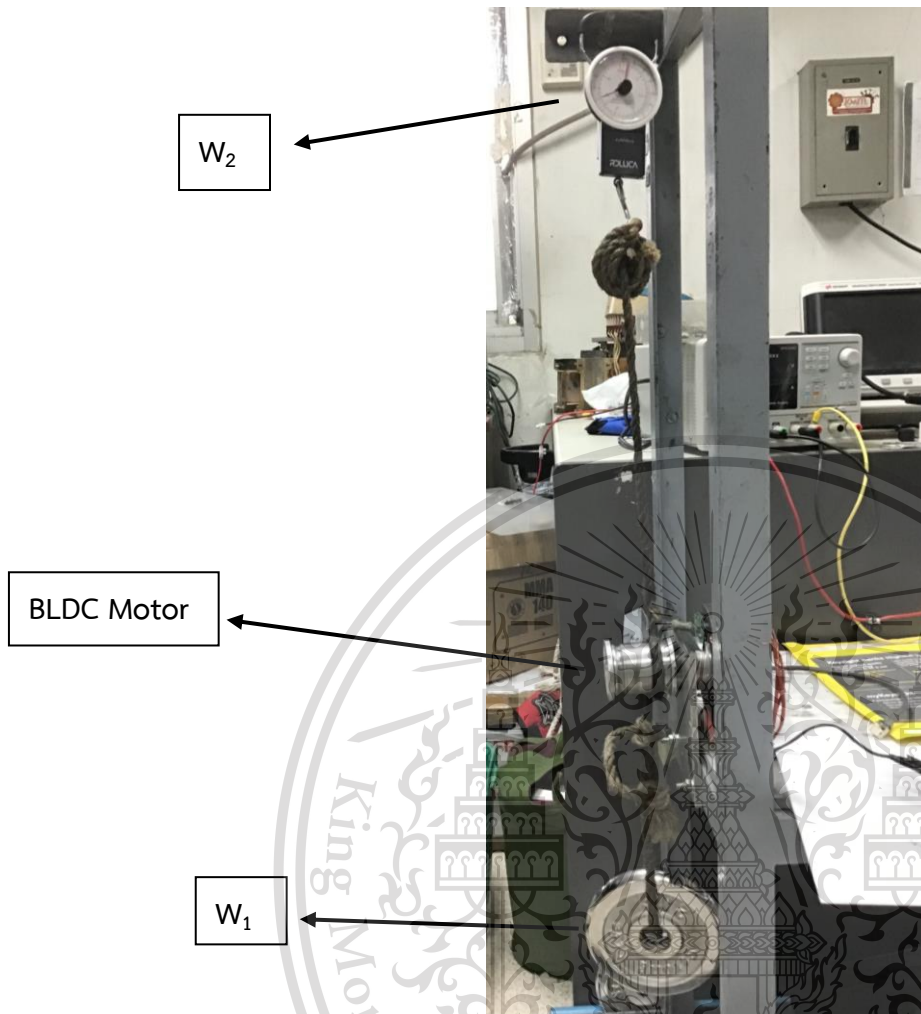
3.3 วิธีการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนคือ 1. การทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพและ 2. การทดลองเพื่อหาความสูญเสียโดยการทดลองทั้งสองจะทดลองที่น้ำหนักตั้งแต่ 0-5 kg โดยใช้วิธี Pulley ดังภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use¹⁶

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.17 การถ่วงน้ำหนักโดยวิธี Pulley

3.3.1 การทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพ

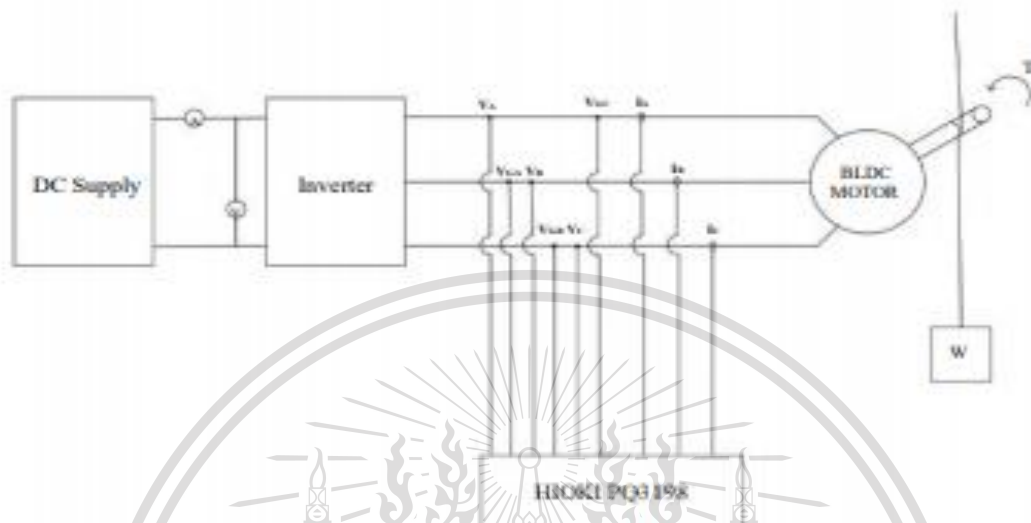
1. หาค่ากำลังเข้าของอินเวอร์เตอร์โดยใช้มัลติมิเตอร์ต่ออนุกรมก่อนเข้าอินเวอร์เตอร์จะได้ค่ากระแสและนำไปคูณกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ตั้งไว้ที่ DC Power Supply จะได้ค่ากำลังขาเข้าของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

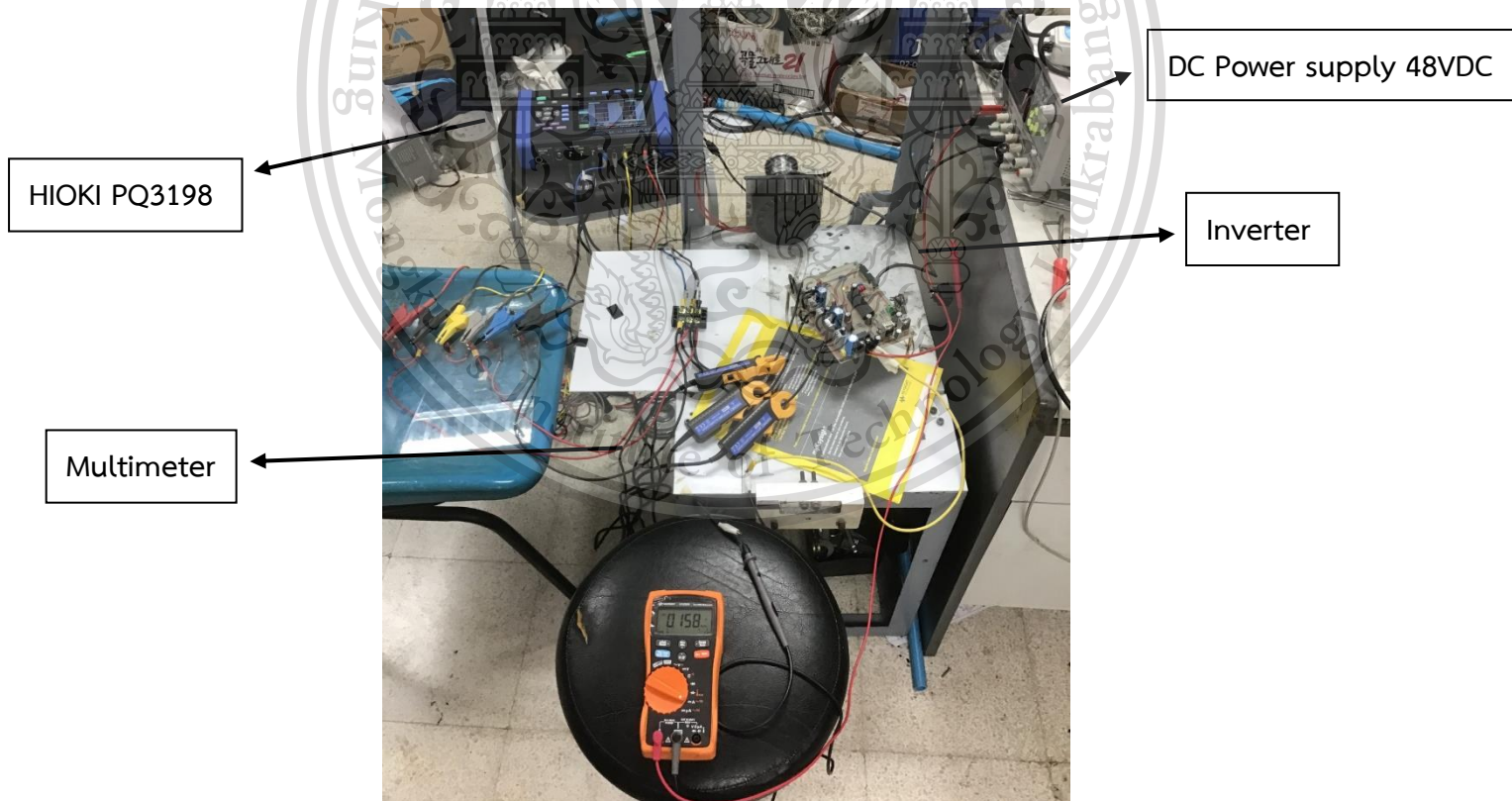
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use¹⁷

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.หากำลังขาออกโดยใช้เครื่อง HIOKI วัดแรงดัน Line-Line และกระแสทั้ง 3 เฟสจากนั้นเครื่องจะทำการคำนวณกำลังขาออก



รูปที่ 3.18 วงจรสมมูลของการวัดกำลังขาออกโดยใช้เครื่อง HIOKI



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรในมหาวิทยาลัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use18

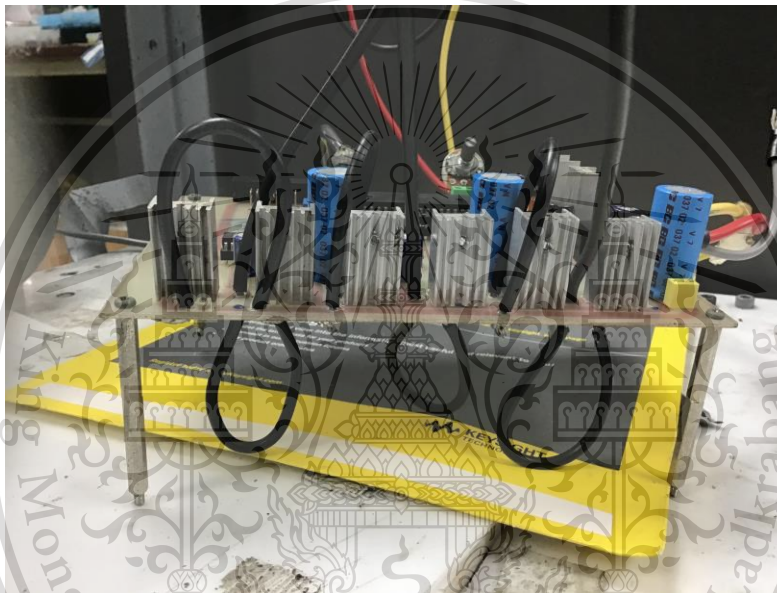
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3.2 การทดลองเพื่อหาค่ากำลังสูญเสีย

1. ใช้เครื่อง Oscilloscope ช่องแรกที่ต่อเข้ากับ Current Probe เพื่อวัดกระแส Drain to Source ก่อนเชื่อมต่อโดยนักศึกษาได้ทำการดัดแปลงวงจรเพื่อให้มีสายไฟสำหรับวัดกระแสได้ดังรูปที่ 3.20

2. ใช้เครื่อง Oscilloscope ช่องที่สองที่ต่อเข้ากับ Voltage Probe เพื่อวัดแรงดัน Drain to Source เพื่อได้กราฟขนาดแรงดันขณะนั้น

โดยทำการทดลองทั้งข้อ 1 และข้อ 2 พร้อมกันเพื่อจะได้กราฟของกระแสและแรงดันในขณะที่มีการเปิดปิดสวิทช์ของ MOSFET และจะสามารถรู้เวลาในการปิดและเปิดในช่วงที่เกิดการสูญเสีย และนำไปคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียต่อไป

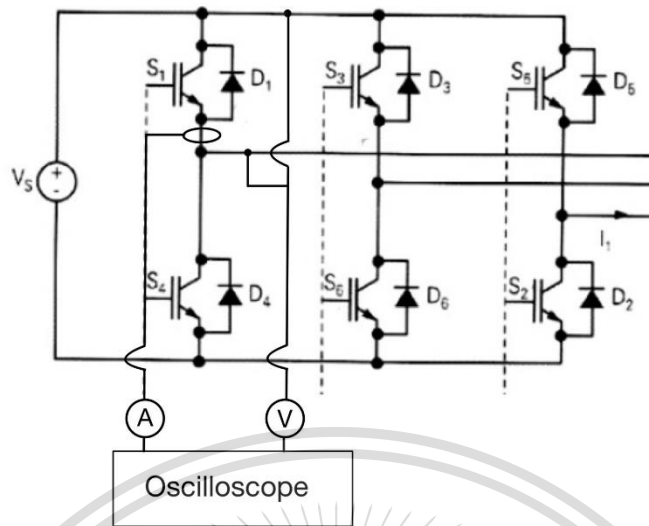


รูปที่ 3.20 วงจรที่ทำการดัดแปลงโดยการเพิ่มสายไฟเพื่อใช้ในการวัดกระแส Drain to Source

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use¹⁹

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.21 วงจรสมมูลของการวัดเพื่อหาค่ากำลังสูญเสียโดยใช้ Oscilloscope



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use²⁰

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

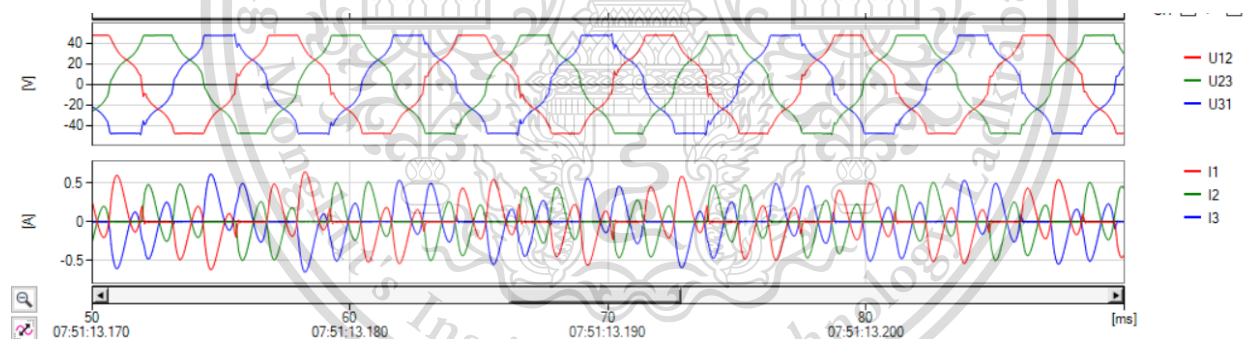
ผลการทดลอง

ในส่วนของบทที่ 4 นี้จะแบ่งผลการวิจัยออกเป็น 2 ส่วนคือการวัดประสิทธิภาพและการวัดค่าความสูญเสียก่อนการปรับปรุงประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์และหลังการปรับปรุงประสิทธิภาพซึ่งการวัดค่าประสิทธิภาพนั้นผลที่ได้มาจากค่าในเครื่อง HIOKI และมัลติมิเตอร์และในส่วนของการวัดค่าความสูญเสียนั้นค่าที่ได้มาจากเครื่อง Oscilloscope และโพรบวัดกระแสโดยจะทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดัน Drain to Source และรูปคลื่นกระแส Drain to Source ในขณะที่มีมอเตอร์ทำงานที่ Duty Cycle 100% และถ่วงน้ำหนักที่ 0-5 kg

4.1 ผลการทดลองจากการวัดก่อนปรับปรุงประสิทธิภาพ

ผลจากการวัดนี้จะมีรูปกราฟจาก 2 เครื่องมือวัดซึ่งรูปกราฟจากเครื่อง HIOKI และมัลติมิเตอร์จะบอกค่าในส่วนของประสิทธิภาพและรูปกราฟที่ได้มาจากเครื่อง Oscilloscope และโพรบวัดกระแสจะบอกค่า Conduction loss และ Switching loss โดยค่าความต้านทานภายใน MOSFET ($R_{DS(on)} = 13 \text{ m}\Omega$) ทุกตัว และมีความถี่สวิตช์ซึ่งเป็น 20 kHz

4.1.1 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพและค่าความสูญเสียก่อนปรับปรุงประสิทธิภาพ 0 kg



Power			Voltage			Current		
U12	rms	34.82V	Psum		6.8W	I1	rms	0.2412A
U23	rms	34.83V	P1		2.6W	I2	rms	0.2247A
U31	rms	34.82V	P2		1.7W	I3	rms	0.2500A
Ums	avg	34.83V	P3		2.5W	Ims	avg	0.2387A
U4	rms	0.00V	P4		0.000kW	I4	rms	0.00A
			Ssum		14.4VA			
			S1		4.8VA			
			S2		4.5VA			
			S3		5.0VA			
			S4		0.000kVA			

รูปที่ 4.2 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



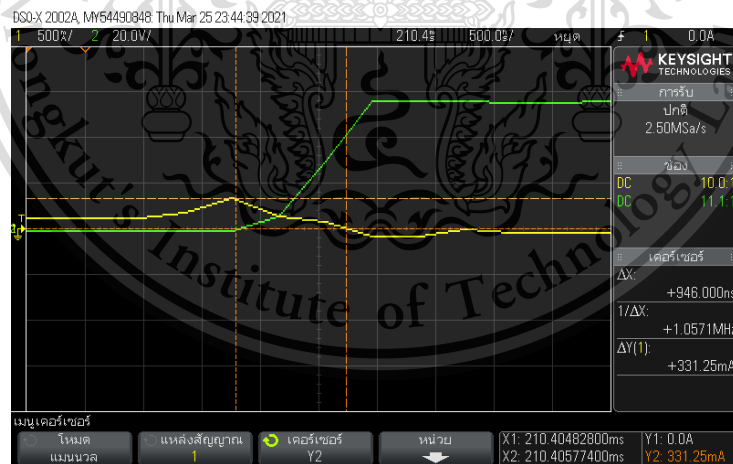
รูปที่ 4.3 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์

จากผลการทดลองจะได้ค่า

$$\text{กำลังขาออก} = 6.8 \text{ W}$$

$$\text{กำลังขาเข้า} = 48 \text{ V} \times 0.157 \text{ A} = 7.536 \text{ W}$$

$$\text{ประสิทธิภาพ} = 90.2335 \%$$

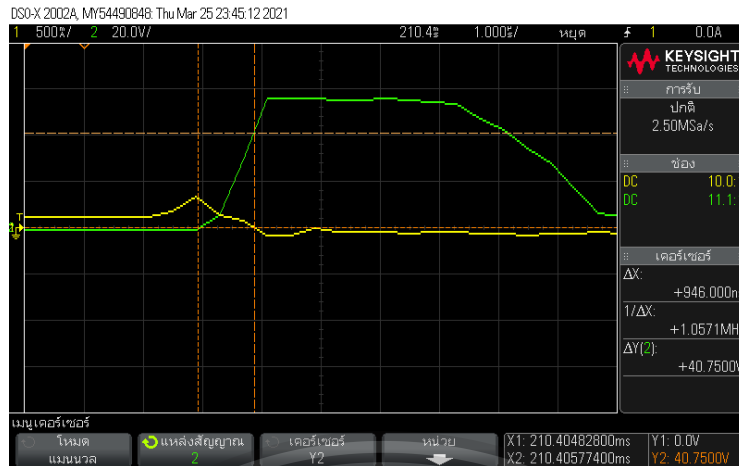


รูปที่ 4.4 ค่าเวลา T_{off} และ ขนาด I_{DS} จากเครื่อง Oscilloscope ของ MOSFET A High

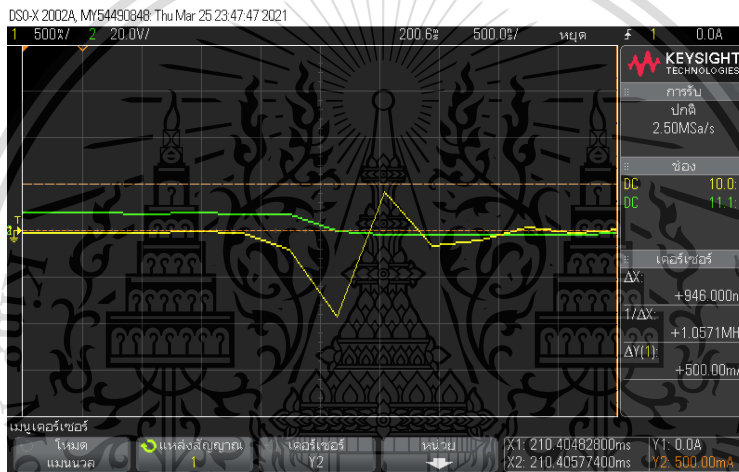
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use²²

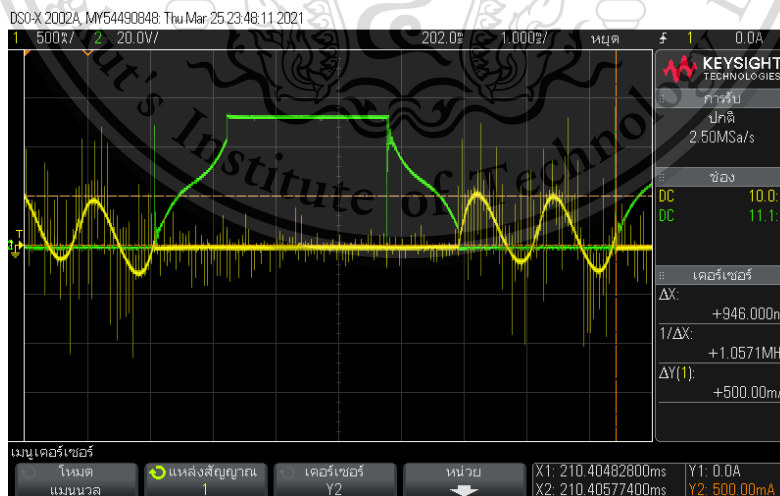
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.5 ขนาด V_{DS} ขณะที่ I_{DS} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High



รูปที่ 4.6 ช่วงเวลา T_{ON} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High



รูปที่ 4.7 รูปคลื่น V_{DS} และ I_{DS} ของ MOSFET A High

จากผลการทดลองจะได้ค่า $T_{off}=946 \text{ ns}$, $I_m = I_{DS} 500 \text{ mA}$, $V_{DS}= 40.75 \text{ V}$, $T_{on} = 0 \text{ s}$, $I_{rms} = 0.3535 \text{ A}$
 เอกสารนี้เป็นเอกสารทงงานไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{SW} = \frac{1}{2} \times V_{DS} \times I_{DS} \times (t_{on} + t_{off}) \times f_{sw}$$

$$P_{SW} = 0.1276 \text{ W}$$

$$P_{CON} = I_{rms}^2 \times R_{DS(on)}$$

$$P_{CON} = 1.625 \text{ mW}$$

รูปกราฟจาก Oscilloscope ในส่วนของตัว MOSFET B High, MOSFET C High, MOSFET A Low, MOSFET B Low, MOSFET C Low ดูได้จากภาคผนวก

ซึ่งตารางต่อไปนี้จะแสดงค่า Conduction Loss และ Switching Loss และนำมาเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ เพื่อวิเคราะห์ค่าความสูญเสีย และตารางค่ากระแส แรงดันและเวลาที่ใช้ในการสวิตชิง

0 kg	$I_{DS,M}$ (mA)	$I_{DS,RMS}$ (A)	V_{DS} (V)	T_{on} (ns)	T_{off} (ns)
A _{High}	500	0.3535	40.75	0	946
A _{Low}	493.75	0.3491	53	660	600
B _{High}	493.75	0.3491	52	0	860
B _{Low}	487.5	0.3447	55	418	960
C _{High}	575	0.4065	55	0	916
C _{Low}	550	0.3889	55.5	304	900

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าแรงดัน กระแสและเวลาในการสวิตชิง MOSFET 6 ตัว 0 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

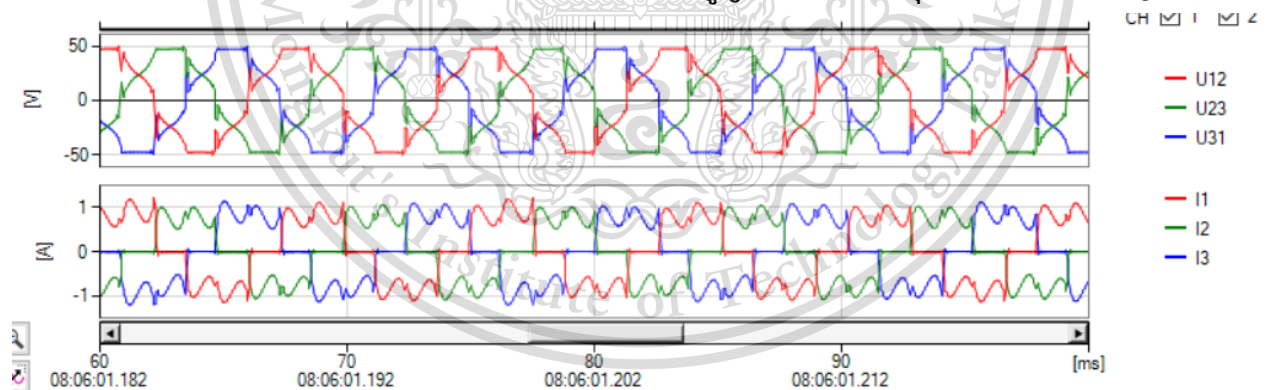
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use²⁴

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

0 kg	$P_{\text{switching}}$		$P_{\text{conduction}}$ (mw)
	$P_{\text{Sw,on}}$ (w)	$P_{\text{Sw,off}}$ (w)	
A_{High}	0	0.1276	1.625
A_{Low}	0.0334	0.0636	1.5846
B_{High}	0	0.1565	1.5846
B_{Low}	0.0101	0.099	0.02535
C_{High}	0	0.1259	2.149
C_{Low}	0.0083	0.0655	0.03074

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าความสูญเสียของ MOSFET 6 ตัว 0 kg

4.1.2 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพและค่าความสูญเสียก่อนปรับปรุงประสิทธิภาพ 1 kg



รูปที่ 4.8 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 1 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use²⁵

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Power		Voltage		Current	
U12	rms	34.38	▲	Psum	38.31 ▲
U23	rms	34.38	▲	P1	13.01
U31	rms	34.45	▲	P2	12.11
Ums	avg	34.40	▼	P3	13.21 ▼
<		>		<	
I1	rms	0.696	▲	Ssum	40.81 ▲
I2	rms	0.648	▲	S1	13.91
I3	rms	0.707	▲	S2	12.91
Ims	avg	0.684	▼	S3	14.11 ▼
<		>		<	

รูปที่ 4.9 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI



รูปที่ 4.10 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์

จากผลการทดลองจะได้ค่า

กำลังขาออก = 38.3 W

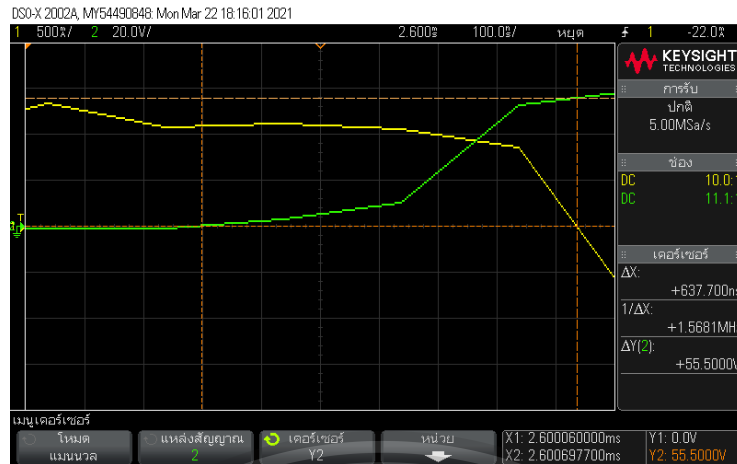
กำลังขาเข้า = $48 \text{ V} \times 0.851 \text{ A} = 40.896 \text{ W}$

ประสิทธิภาพ = 93.6521 %

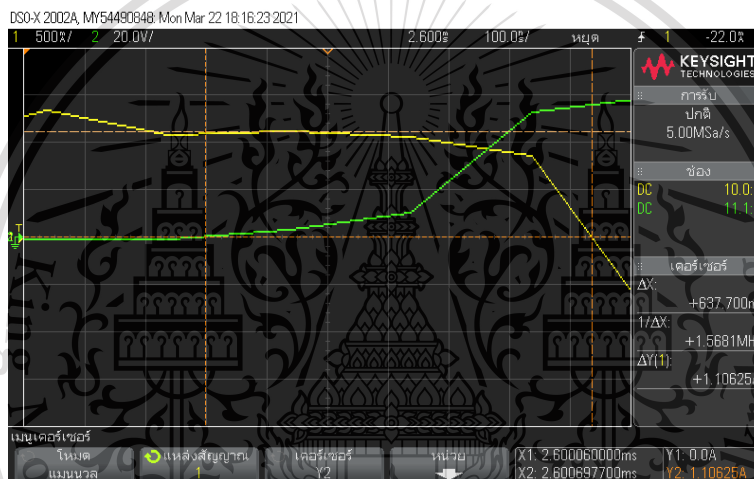
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use26

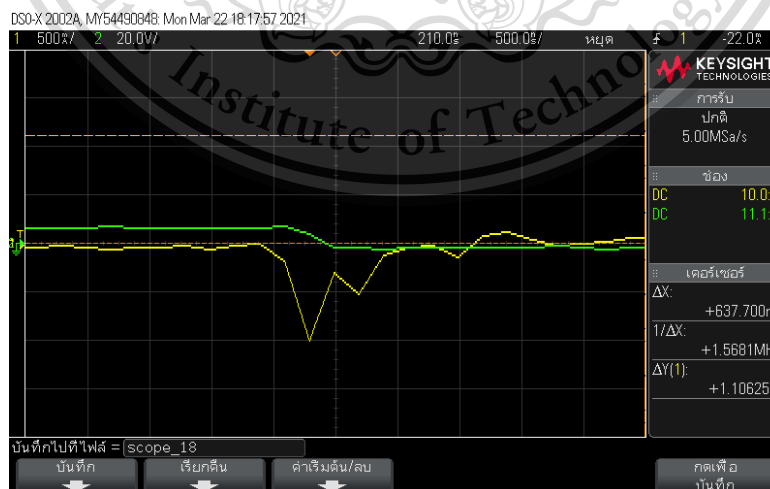
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.11 ค่าเวลา T_{off} และ ขนาด V_{DS} จากเครื่อง Oscilloscope ของ MOSFET A High

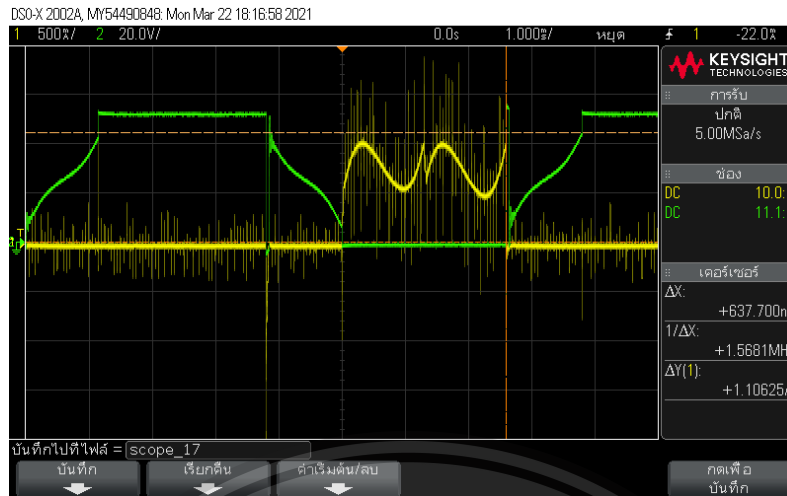


รูปที่ 4.12 ขนาด I_{DS} ขณะที่ V_{DS} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High



รูปที่ 4.13 ช่วงเวลา T_{ON} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 รูปคลื่น V_{DS} และ I_{DS} ของ MOSFET A High

จากผลการทดลองจะได้ค่า $T_{off} = 637.7 \text{ ns}$ $I_m = I_{DS} = 1.1062 \text{ A}$ $V_{DS} = 55.5 \text{ V}$ $T_{on} = 0 \text{ s}$ $I_{rms} = 0.7822 \text{ A}$

$$P_{SW} = \frac{1}{2} \times V_{DS} \times I_{DS} \times (t_{on} + t_{off}) \times f_{sw}$$

$$P_{SW} = 0.3915 \text{ W}$$

$$P_{CON} = I_{rms}^2 \times R_{DS(on)}$$

$$P_{CON} = 7.9539 \text{ mW}$$

รูปกราฟจาก Oscilloscope ในส่วนของตัว MOSFET B High, MOSFET C High, MOSFET A Low, MOSFET B Low, MOSFET C Low ดูได้จากภาคผนวก

ซึ่งตารางต่อไปนี้จะแสดงค่า Conduction Loss และ Switching Loss และนำมาเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์เพื่อวิเคราะห์ค่าความสูญเสีย และตารางค่ากระแส แรงดันและเวลาที่ใช้ในการสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 28

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1 kg	$I_{DS,M}$ (A)	$I_{DS,RMS}$ (A)	V_{DS} (V)	T_{on} (ns)	T_{off} (ns)
A_{High}	1.1062	0.7822	55.5	0	637.7
A_{Low}	1.2937	0.9147	56.5	0	633
B_{High}	1.575	1.1136	56	0	430.5
B_{Low}	1.125	0.7954	55.75	0	788.5
C_{High}	1.55	1.096	54	0	812
C_{Low}	1.0375	0.7336	53.5	260	334.9

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าแรงดัน กระแสและเวลาในการสวิตช์ MOSFET 6 ตัว 1kg

1 kg	$P_{switching}$		$P_{conduction}$ (w)
	$P_{Sw,on}$ (mw)	$P_{Sw,off}$ (w)	
A_{High}	0	0.3915	0.0079
A_{Low}	0	0.4626	0.0108
B_{High}	0	0.3797	0.016
B_{Low}	0	0.4423	0.0082
C_{High}	0	0.67964	0.0156
C_{Low}	3.188	0.1489	0.0069

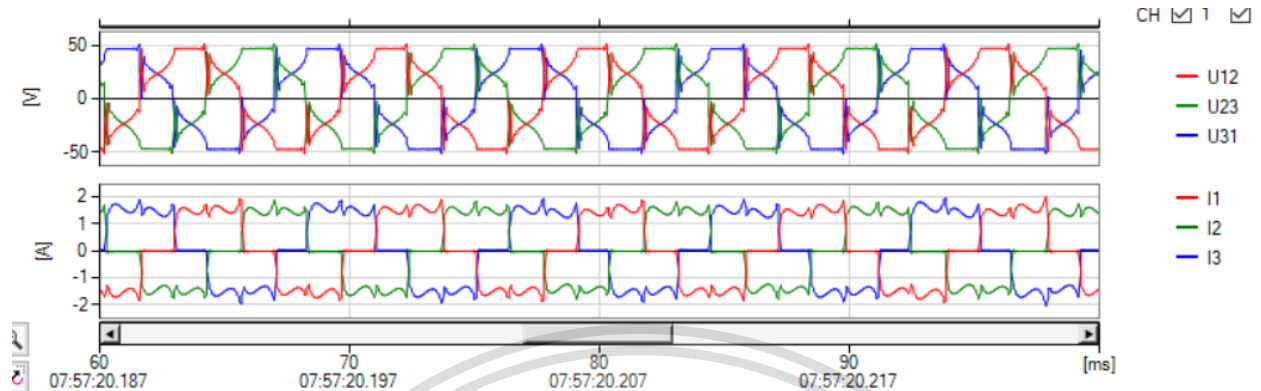
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าความสูญเสียของ MOSFET 6 ตัว 1 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 29

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.3 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพและค่าความสูญเสียก่อนปรับปรุงประสิทธิภาพ 2 kg



รูปที่ 4.15 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาคอกจากอินเวอร์เตอร์ 2 kg

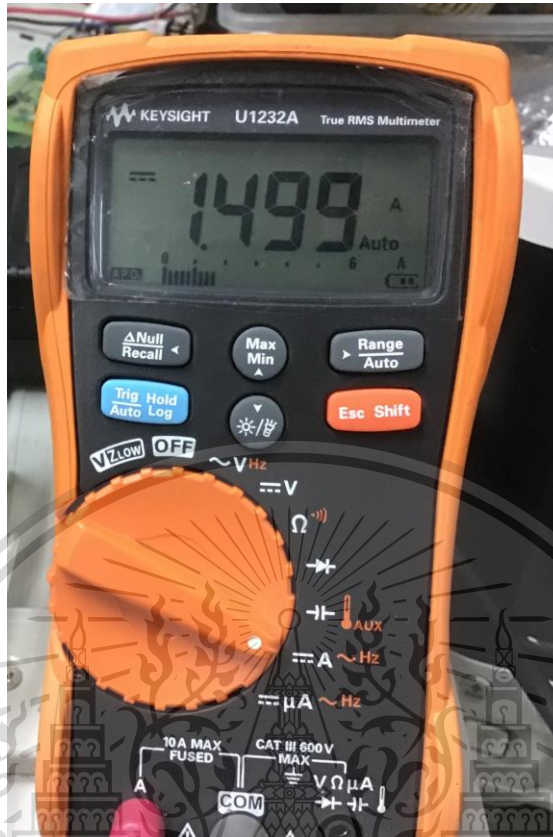
Power			Voltage			Current		
U12	rms	34.0	Psum		68.0	I1	rms	1.242
U23	rms	33.9	P1		22.9	I2	rms	1.176
U31	rms	34.1	P2		21.7	I3	rms	1.254
Ums	avg	34.0	P3		23.3	Ims	avg	1.224
			Ssum		72.2			
			S1		24.5			
			S2		23.1			
			S3		24.7			

รูปที่ 4.16 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาคอกจากอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use³⁰

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



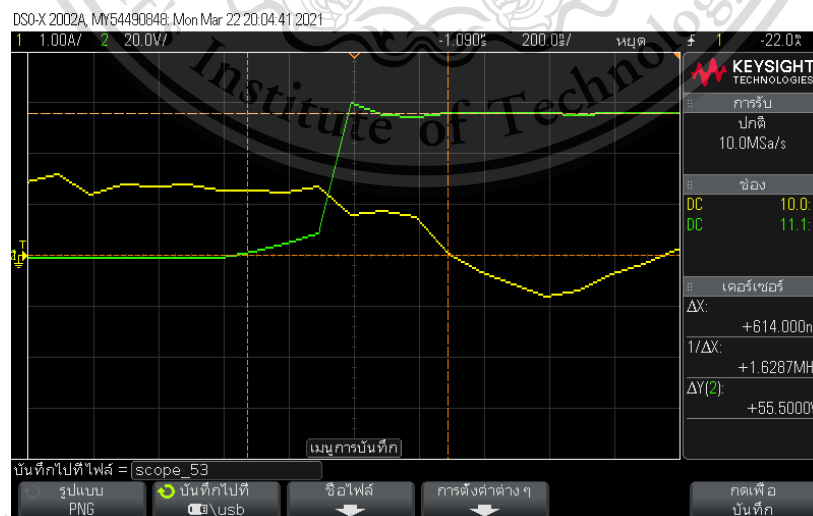
รูปที่ 4.17 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์

จากผลการทดลองจะได้ค่า

กำลังขาออก = 38.3 W

กำลังขาเข้า = $48 \text{ V} \times 1.49 \text{ A} = 71.52 \text{ W}$

ประสิทธิภาพ = 95.0782 %

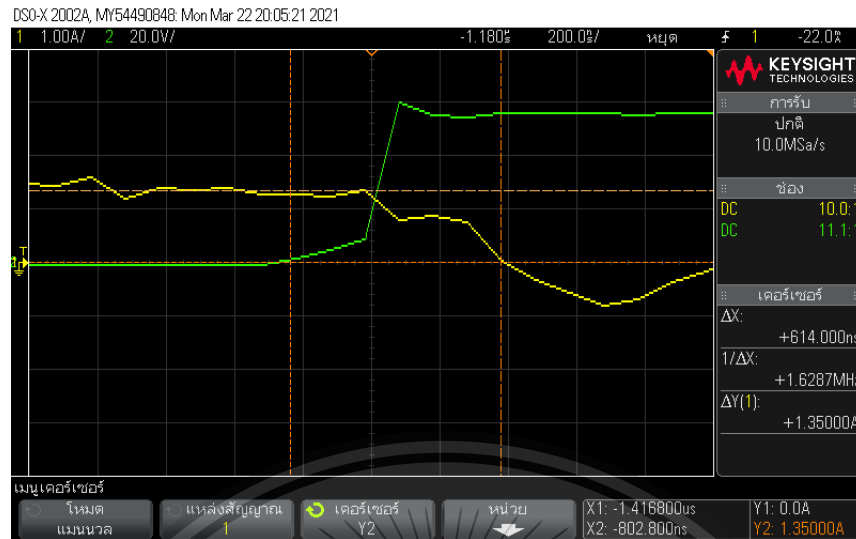


รูปที่ 4.18 ค่าเวลา T_{off} และ ขนาด V_{DS} จากเครื่อง Oscilloscope ของ MOSFET B High

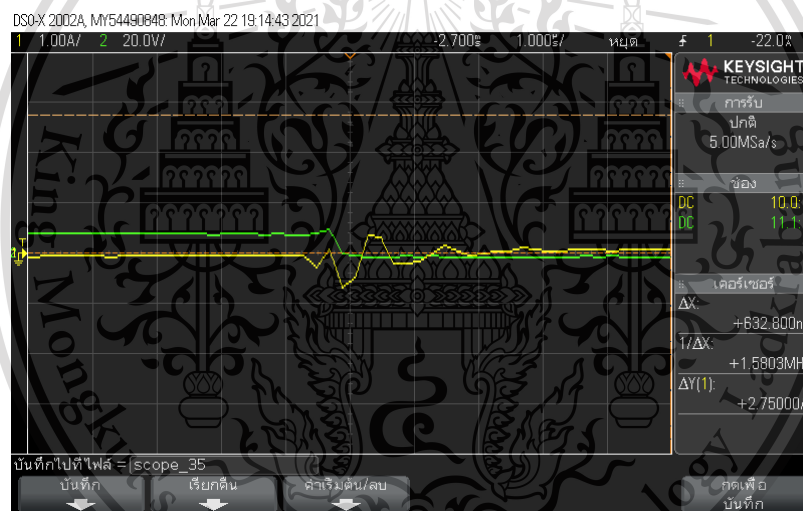
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use31

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.19 ขนาด I_{DS} ขณะที่ V_{DS} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET B High

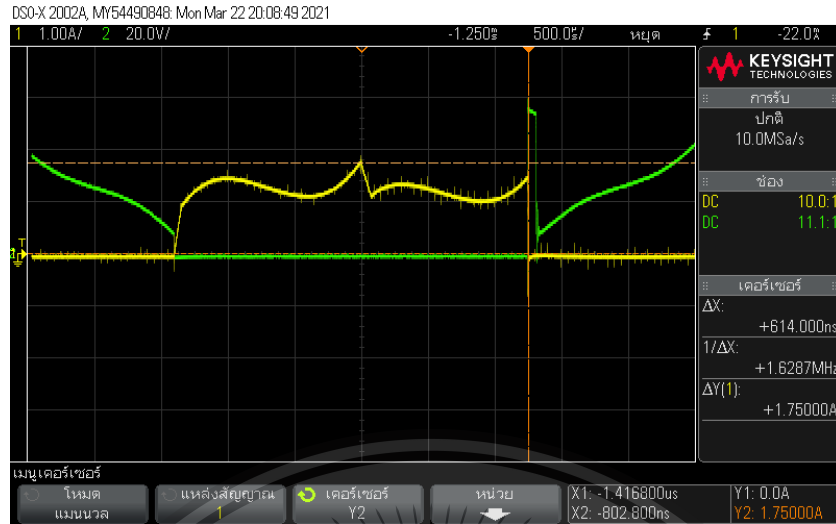


รูปที่ 4.20 ช่วงเวลา T_{ON} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET B High

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use³²

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.21 รูปคลื่น V_{DS} และ I_{DS} ของ MOSFET B High

จากผลการทดลองจะได้ค่า $T_{off} = 614 \text{ ns}$ $I_m = 1.75 \text{ A}$ $I_{DS} = 1.35 \text{ A}$ $V_{DS} = 55.5 \text{ V}$ $T_{on} = 0 \text{ s}$ $I_{rms} = 1.2374 \text{ A}$

$$P_{SW} = \frac{1}{2} \times V_{DS} \times I_{DS} \times (t_{on} + t_{off}) \times f_{sw}$$

$$P_{SW} = 0.46 \text{ W}$$

$$P_{CON} = I_{rms}^2 \times R_{DS(on)}$$

$$P_{CON} = 0.0199 \text{ W}$$

รูปกราฟจาก Oscilloscope ในส่วนของตัว MOSFET A High, MOSFET C High, MOSFET A Low, MOSFET B Low, MOSFET C Low ดูได้จากภาคผนวก

ซึ่งตารางต่อไปนี้จะแสดงค่า Conduction Loss และ Switching Loss และนำมาเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์เพื่อวิเคราะห์ค่าความสูญเสีย และตารางค่ากระแส แรงดันและเวลาที่ใช้ในการสวิชชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use³³

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

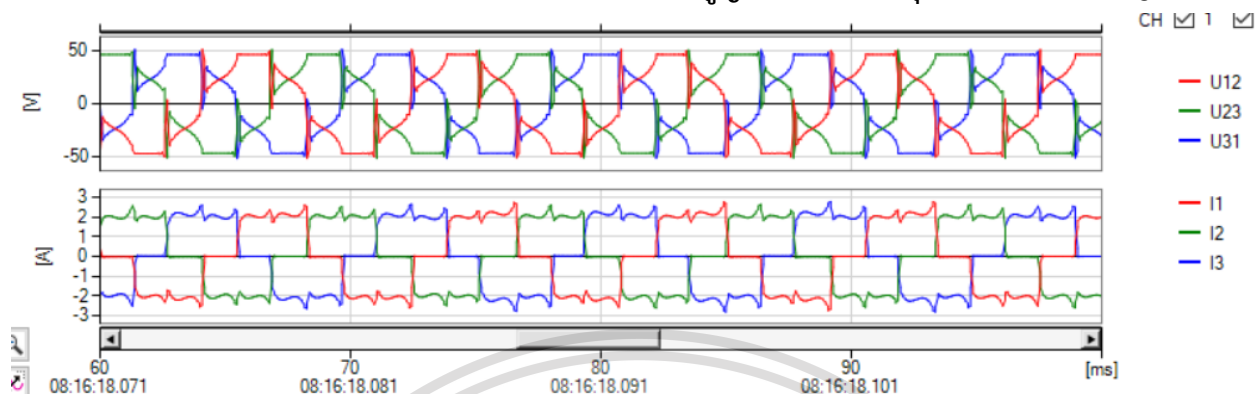
2 kg	$I_{DS,M}$ (A)	$I_{DS,RMS}$ (A)	V_{DS} (V)	T_{on} (ns)	T_{off} (ns)
A_{High}	1.885	1.3258	55.25	243.8	612.2
A_{Low}	2.025	1.4318	59	0	465
B_{High}	1.75	1.2374	55.5	0	614
B_{Low}	1.7875	1.2639	58	194.8	400.6
C_{High}	1.875	1.3258	57	0	460.4
C_{Low}	1.75	1.2374	48.2	0	548.4

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าแรงดัน กระแสและเวลาในการสวิตช์ MOSFET 6 ตัว 2 kg

2 kg	$P_{switching}$		$P_{conduction}$ (w)
	$P_{Sw,on}$ (mw)	$P_{Sw,off}$ (w)	
A_{High}	9.904	0.6373	0.02285
A_{Low}	0	0.555	0.02665
B_{High}	0	0.46	0.0199
B_{Low}	9.727	0.415	0.0207
C_{High}	0	0.446	0.0228
C_{Low}	0	0.463	0.019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าความสูญเสียของ MOSFET 6 ตัว 2 kg
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพและค่าความสูญเสียก่อนปรับปรุงประสิทธิภาพ 3 kg



รูปที่ 4.22 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากรีเลย์ 3 kg

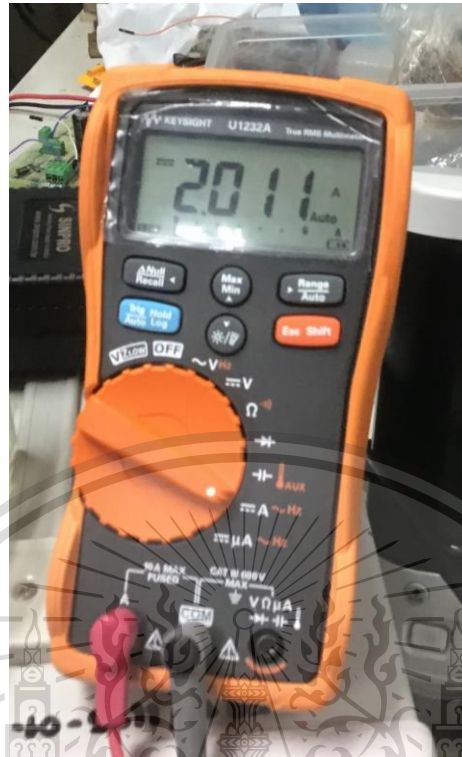
Power		Voltage		Current	
U12	rms	33.6	^	Psum	92.7
U23	rms	33.6	^	P1	31.0
U31	rms	33.8	^	P2	29.8
Ums	avg	33.7	^	P3	32.0
I1	rms	1.716	^	Ssum	99.7
I2	rms	1.646	^	S1	33.5
I3	rms	1.754	^	S2	32.0
Ims	avg	1.705	^	S3	34.2

รูปที่ 4.23 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของรีเลย์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use³⁵

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



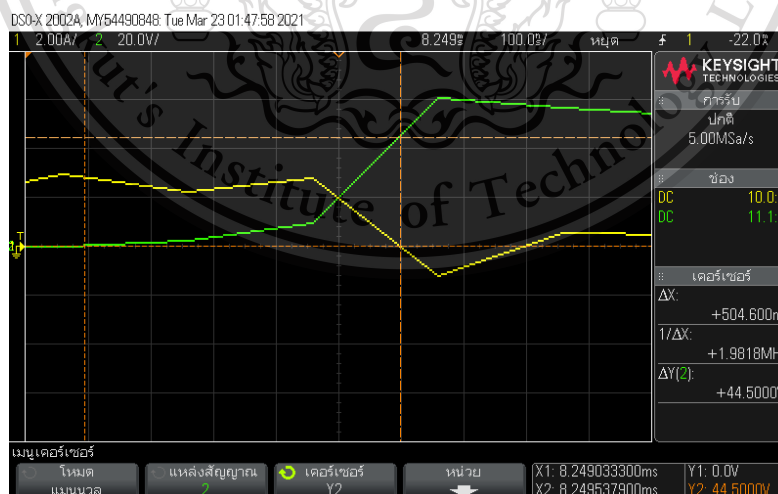
รูปที่ 4.24 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์

จากผลการทดลองจะได้ค่า

กำลังขาออก = 92.7 W

กำลังขาเข้า = $48 \text{ V} \times 2.01 \text{ A} = 96.48 \text{ W}$

ประสิทธิภาพ = 96.0820 %

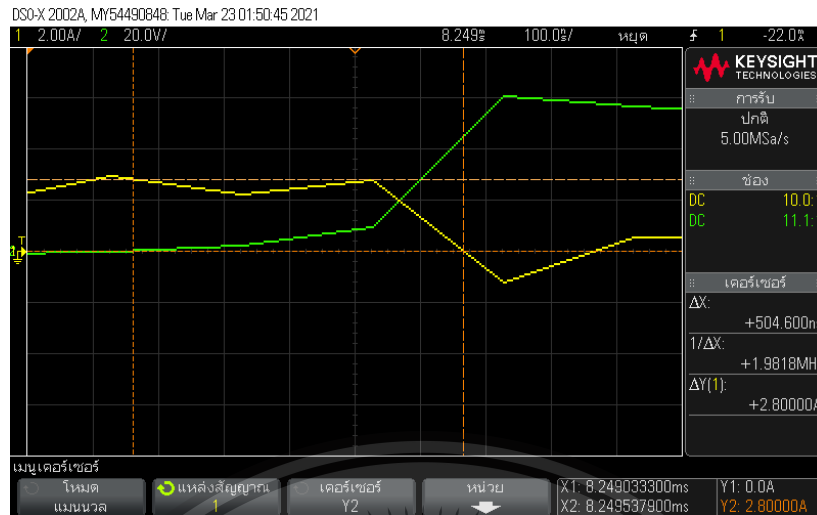


รูปที่ 4.25 ค่าเวลา T_{off} และ ขนาด V_{DS} จากเครื่อง Oscilloscope ของ MOSFET A High

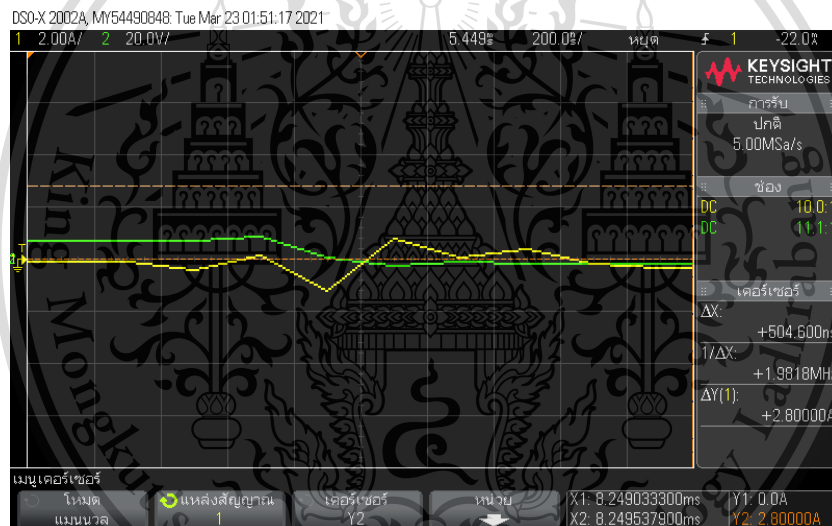
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use³⁶

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.26 ขนาด I_{DS} ขณะที่ V_{DS} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High



รูปที่ 4.27 ช่วงเวลา T_{ON} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use³⁷

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3 kg	$I_{DS,M}$ (A)	$I_{DS,RMS}$ (A)	V_{DS} (V)	T_{on} (ns)	T_{off} (ns)
A_{High}	2.8	1.9798	44	0	504.6
A_{Low}	2.4	1.697	51	0	323.4
B_{High}	2.673	1.8915	50	0	352
B_{Low}	2.45	1.7324	58	0	444
C_{High}	3.125	2.209	51.75	0	342
C_{Low}	2.5	1.7677	60	0	361.8

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าแรงดัน กระแสและเวลาในการสวิตชิง MOSFET 6 ตัว 3 kg

3 kg	$P_{switching}$		$P_{conduction}$ (w)
	$P_{Sw,on}$ (mw)	$P_{Sw,off}$ (w)	
A_{High}	0	0.6216	0.05
A_{Low}	0	0.6597	0.0374
B_{High}	0	0.4708	0.0465
B_{Low}	0	0.5665	0.039
C_{High}	0	0.5530	0.0634
C_{Low}	0	0.4775	0.0406

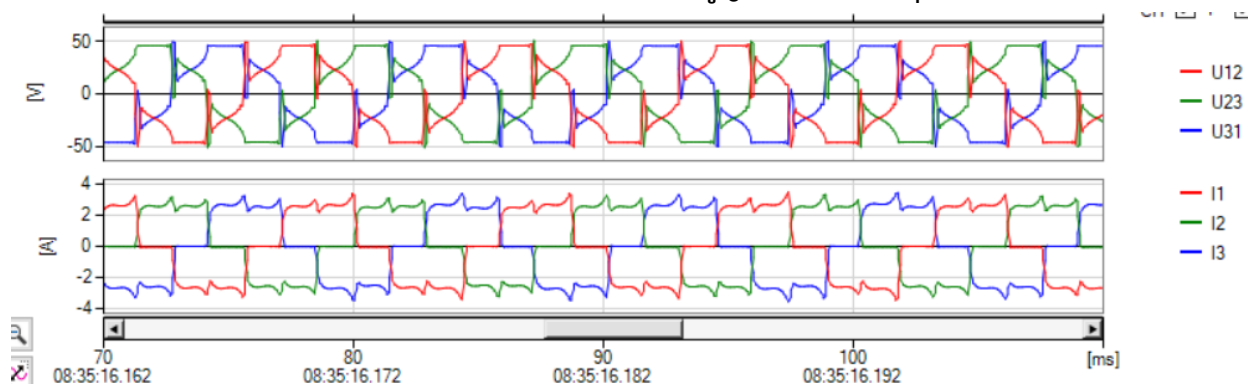
ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงค่าความสูญเสียของ MOSFET 6 ตัว 3 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use³⁹

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.5 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพและค่าความสูญเสียก่อนปรับปรุงประสิทธิภาพ 4 kg



รูปที่ 4.29 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากรถมอเตอร์ 4 kg

Power		Voltage		Current	
U12	rms	33.4	^	Psum	115.8
U23	rms	33.4	^	P1	38.6
U31	rms	33.6	^	P2	37.3
Ums	avg	33.5	^	P3	39.9
I1	rms	2.181	^	Ssum	126.1
I2	rms	2.102	^	S1	42.3
I3	rms	2.231	^	S2	40.5
Ims	avg	2.171	^	S3	43.3

รูปที่ 4.30 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI



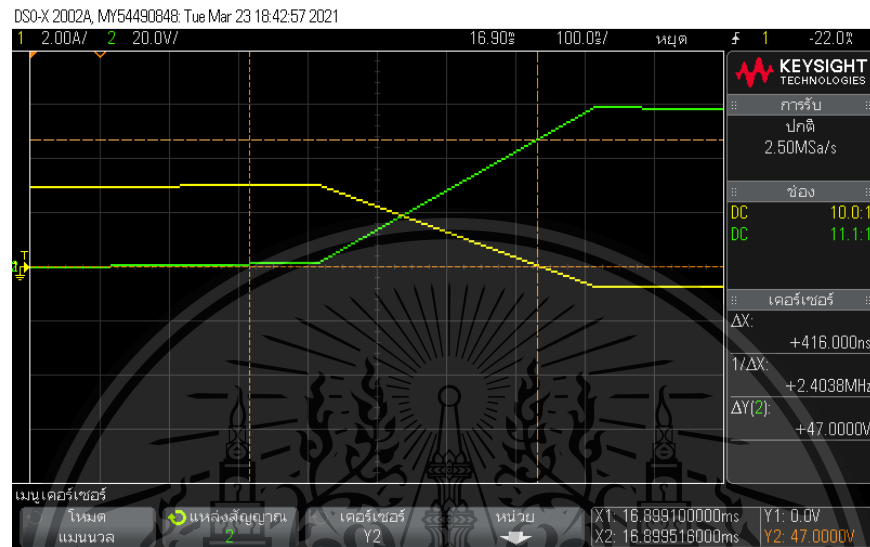
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 4.31 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองจะได้ค่า

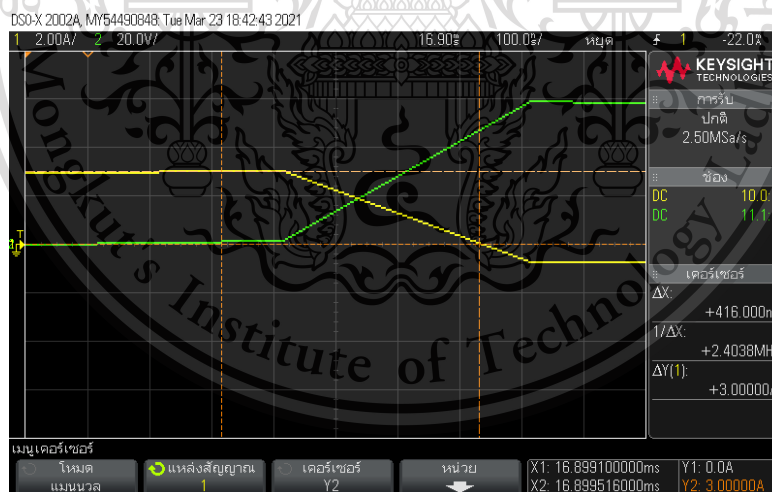
กำลังขาออก = 115.8 W

กำลังขาเข้า = $48 \text{ V} \times 2.01 \text{ A} = 120 \text{ W}$

ประสิทธิภาพ = 96.5 %



รูปที่ 4.32 ค่าเวลา T_{off} และ ขนาด V_{DS} จากเครื่อง Oscilloscope ของ MOSFET A High

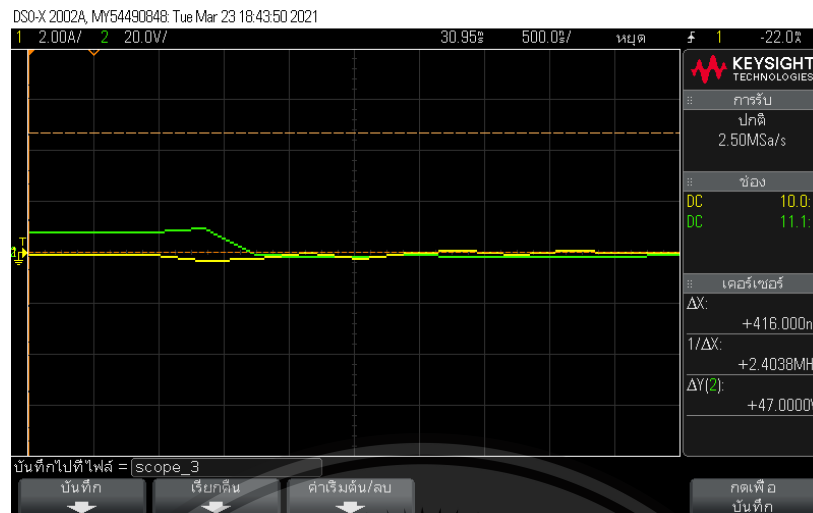


รูปที่ 4.33 ขนาด I_{DS} ขณะที่ V_{DS} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High

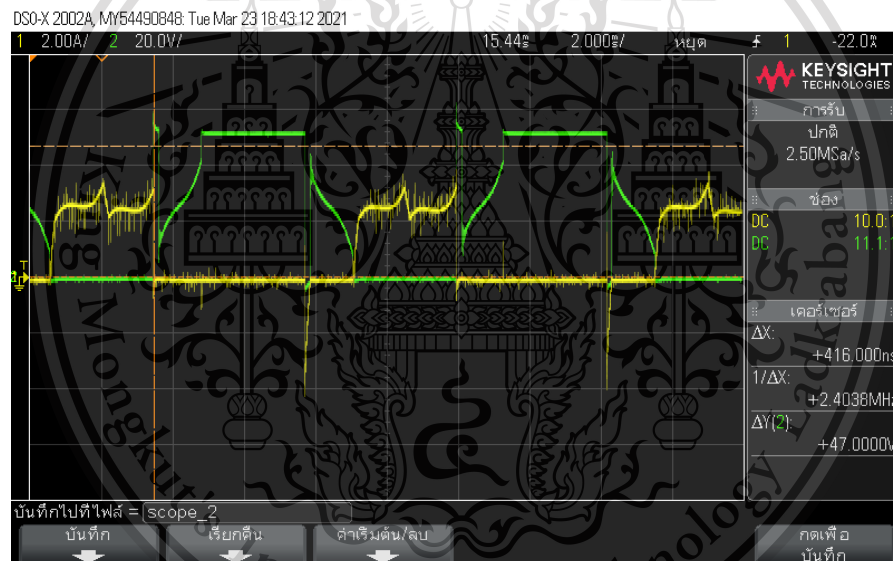
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁴¹

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.34 ช่วงเวลา T_{ON} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High



รูปที่ 4.35 รูปคลื่น V_{DS} และ I_{DS} ของ MOSFET A High

จากผลการทดลองจะได้ค่า $T_{off}=416 \text{ ns}$ $I_m = I_{DS} 3 \text{ A}$ $V_{DS}= 47 \text{ V}$ $T_{on} = 0 \text{ s}$ $I_{rms} = 2.1213 \text{ A}$

$$P_{SW} = \frac{1}{2} \times V_{DS} \times I_{DS} \times (t_{on} + t_{off}) \times f_{sw}$$

$$P_{SW} = 0.5865 \text{ W}$$

$$P_{CON} = I_{rms}^2 \times R_{DS(on)}$$

$$P_{CON} = 0.0585 \text{ W}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁴²

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปกราฟจาก Oscilloscope ในส่วนของตัว MOSFET B High, MOSFET C High, MOSFET A Low, MOSFET B Low, MOSFET C Low ได้จากภาคผนวก
ซึ่งตารางต่อไปนี้จะแสดงค่า Conduction Loss และ Switching Loss และนำมาเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์เพื่อวิเคราะห์ค่าความสูญเสีย และตารางค่ากระแส แรงดันและเวลาที่ใช้ในการสวิตชิง

4 kg	$I_{DS,M}$ (A)	$I_{DS,RMS}$ (A)	V_{DS} (V)	T_{on} (ns)	T_{off} (ns)
A_{High}	3	2.1213	49	0	416
A_{Low}	3.35	2.3688	60	266	392
B_{High}	2.95	2.0859	58	0	385.6
B_{Low}	3.1	2.192	38	0	520
C_{High}	2.575	1.8207	36.9	0	653.3
C_{Low}	3.05	2.1566	40.5	0	526

ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงค่าแรงดัน กระแสและเวลาในการสวิตชิง MOSFET 6 ตัว 4 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

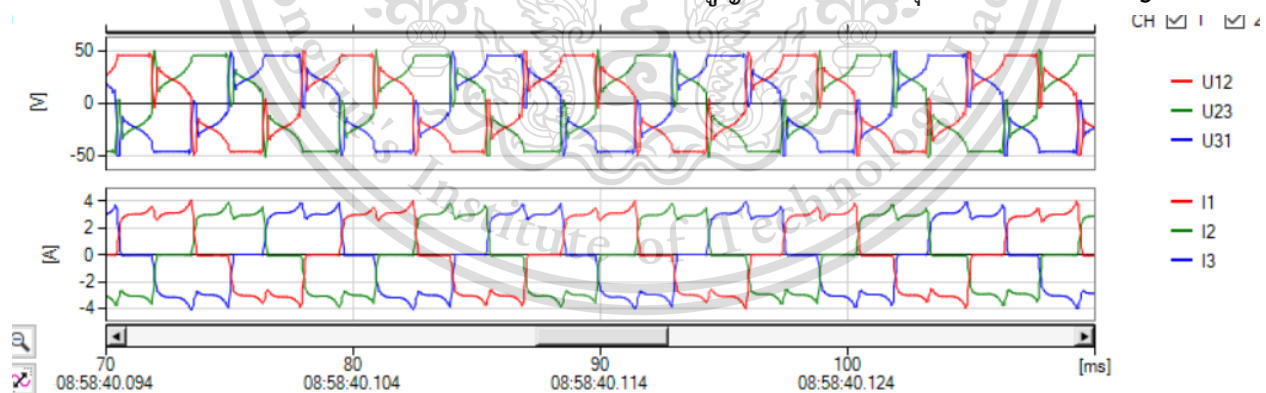
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁴³

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4 kg	$P_{\text{switching}}$		$P_{\text{conduction}} \text{ (w)}$
	$P_{\text{Sw,on}} \text{ (w)}$	$P_{\text{Sw,off}} \text{ (w)}$	
A_{High}	0	0.5865	0.0585
A_{Low}	0.0116	0.75264	0.0729
B_{High}	0	0.5647	0.0565
B_{Low}	0	0.6125	0.0624
C_{High}	0	0.6207	0.04309
C_{Low}	0	0.6497	0.0604

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงค่าความสูญเสียของ MOSFET 6 ตัว 4 kg

4.1.6 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพและค่าความสูญเสียก่อนปรับปรุงประสิทธิภาพ 5 kg



รูปที่ 4.36 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 5 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁴⁴

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Power		Voltage		Current			
U12	rms	33.2	▲	Psum	131.8V ▲		
U23	rms	33.2	■	P1	43.8V ■		
U31	rms	33.5	■	P2	42.6V ■		
Ums	avg	33.3	▼	P3	45.3V ▼		
<			>	<			>

I1	rms	2.517	▲	Ssum	145.0' ▲		
I2	rms	2.437	■	S1	48.6' ■		
I3	rms	2.575	■	S2	46.7' ■		
Ims	avg	2.510	▼	S3	49.7' ▼		
<			>	<			>

รูปที่ 4.37 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI



รูปที่ 4.38 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์

จากผลการทดลองจะได้ค่า

กำลังขาออก = 131.8 W

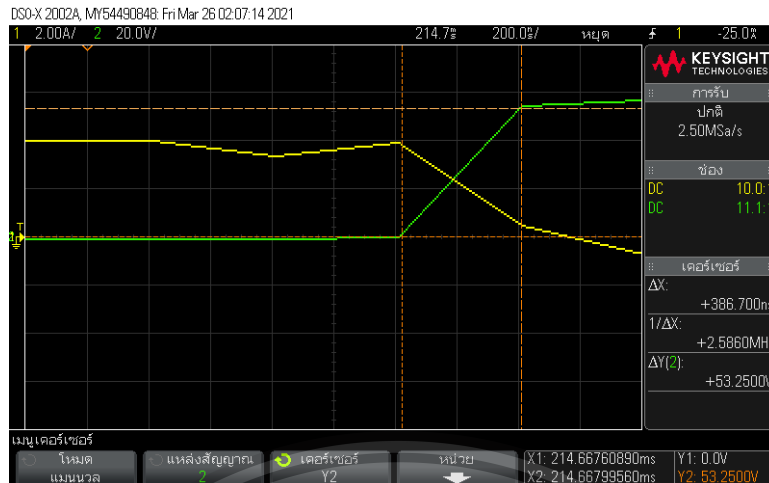
กำลังขาเข้า = 48 V x 2.94 A = 136.32 W

ประสิทธิภาพ = 96.6842 %

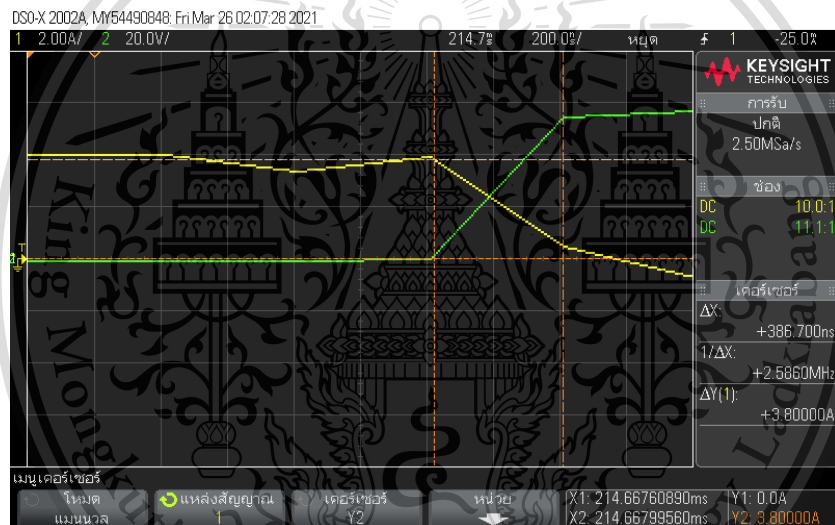
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁴⁵

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.39 ค่าเวลา T_{off} และ ขนาด V_{DS} จากเครื่อง Oscilloscope ของ MOSFET A High

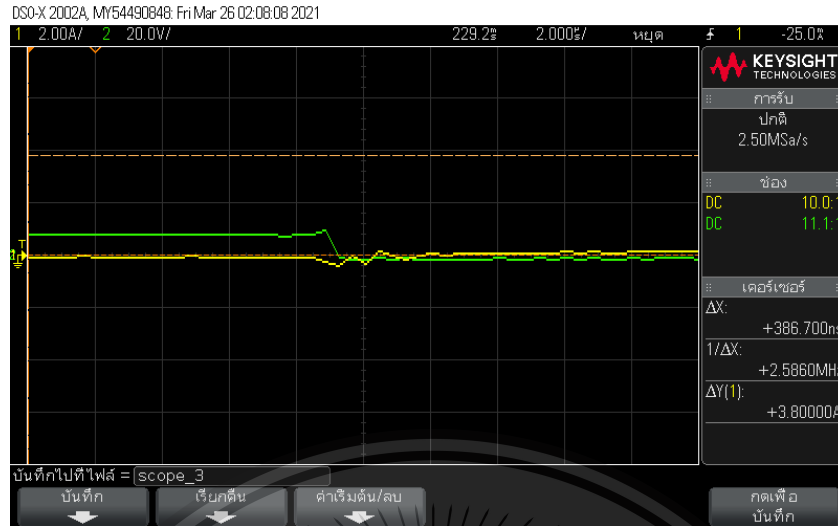


รูปที่ 4.40 ขนาด I_{DS} ขณะที่ V_{DS} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High

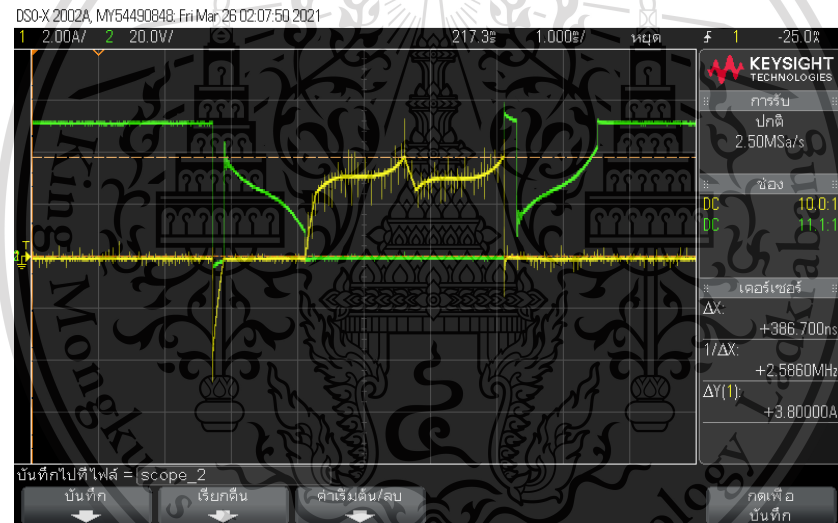
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use46

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.41 ช่วงเวลา T_{ON} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High



รูปที่ 4.42 รูปคลื่น V_{DS} และ I_{DS} ของ MOSFET A High

จากผลการทดลองจะได้ค่า $T_{off} = 416 \text{ ns}$ $I_m = I_{DS} = 3 \text{ A}$ $V_{DS} = 47 \text{ V}$ $T_{on} = 0 \text{ s}$ $I_{rms} = 2.1213 \text{ A}$

$$P_{SW} = \frac{1}{2} \times V_{DS} \times I_{DS} \times (t_{on} + t_{off}) \times f_{sw}$$

$$P_{SW} = 0.5865 \text{ W}$$

$$P_{CON} = I_{rms}^2 \times R_{DS(on)}$$

$$P_{CON} = 0.0585 \text{ W}$$

รูปกราฟจาก Oscilloscope ในส่วนของตัว MOSFET B High, MOSFET C High, MOSFET A Low, MOSFET B Low, MOSFET C Low ดูได้จากภาคผนวก
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งตารางต่อไปนี้จะแสดงค่า Conduction Loss และ Switching Loss และนำมาเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์เพื่อวิเคราะห์ค่าความสูญเสีย และตารางค่ากระแส แรงดันและเวลาที่ใช้ในการสวิตชิง

5 kg	$I_{DS,M}$ (A)	$I_{DS,RMS}$ (A)	V_{DS} (V)	T_{on} (ns)	T_{off} (ns)
A_{High}	3.8	2.687	53.25	0	386.7
A_{Low}	3.85	2.722	53	0	412
B_{High}	3.95	2.793	46.75	0	340
B_{Low}	3.7	2.6162	45.25	0	302.9
C_{High}	3.65	2.5809	43	0	325.9
C_{Low}	3.8	2.687	46	0	351.7

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงค่าแรงดัน กระแสและเวลาในการสวิตชิง MOSFET 6 ตัว 5 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use48

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5 kg	$P_{\text{switching}}$		$P_{\text{conduction}} \text{ (w)}$
	$P_{\text{Sw,on}} \text{ (mw)}$	$P_{\text{Sw,off}} \text{ (w)}$	
A_{High}	0	0.7824	0.0938
A_{Low}	0	0.8406	0.0963
B_{High}	0	0.5881	0.1014
B_{Low}	0	0.4488	0.088
C_{High}	0	0.4764	0.0865
C_{Low}	0	0.5662	0.09387

ตารางที่ 4.12 ตารางแสดงค่าความสูญเสียของ MOSFET 6 ตัว 5 kg

4.1.7 ตารางผลการทดลองรวมก่อนปรับปรุงประสิทธิภาพ

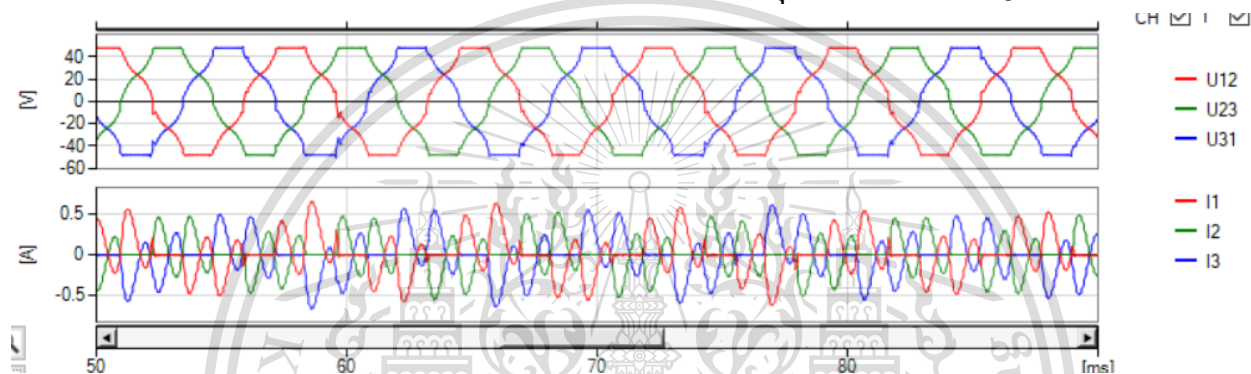
	efficiency	$P_{\text{switching}}$	$P_{\text{conduction}}$	P_{etc}
0 kg	90.2335%	9.2635%	0.13866%	0.3434%
1 kg	93.6521%	6.1319%	0.1648%	0.0512%
2 kg	95.0782%	4.1753%	0.1844%	0.5621%
3 kg	96.0820%	3.4712%	0.287%	0.1597%
4 kg	96.5%	3.1555%	0.2947%	0.0498%
5 kg	96.6842%	2.716%	0.4106%	0.1892%

เอกสารนี้เป็นเอกสารตารางที่ 4.13 ตารางสรุปค่าประสิทธิภาพและการสูญเสียก่อนปรับปรุงตั้งแต่ 0-5 kg ะโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลองจากการวัดหลังปรับปรุงประสิทธิภาพ

จากตารางรวมจะพบว่า Switching loss มีค่ามากที่สุด การปรับปรุงประสิทธิภาพนั้นมีหลายวิธีมาก เนื่องจากมีเวลาและงบประมาณที่จำกัดดังนั้นจึงทำการเปลี่ยนค่าความต้านทานก่อนเข้าขาเกตของ MOSFET ทั้ง 6 ตัวและวัดค่าความสูญเสียที่ 2 kg ผลจากการวัดนี้จะมีรูปกราฟจาก 2 เครื่องมือวัดซึ่งรูปกราฟจากเครื่อง HIOKI และมัลติมิเตอร์จะบอกค่าในส่วนของประสิทธิภาพและรูปกราฟที่ได้มาจากเครื่อง Oscilloscope และโพรบวัดกระแสจะบอกค่า Conduction loss และ Switching loss โดยค่าความต้านทานภายใน MOSFET ($R_{DS(on)}$) = 13 m Ω ทุกตัว และมีความถี่สวิตช์ซึ่งเป็น 20 KHz

4.2.1 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพหลังปรับปรุงประสิทธิภาพ 0 kg



รูปที่ 4.43 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 0 kg หลังปรับปรุง

Power		Voltage		Current	
U12	rms	34.8	^	Psum	6.7V ^
U23	rms	34.8		P1	2.6V
U31	rms	34.8		P2	1.6V
Ums	avg	34.8	v	P3	2.5V v
<		>		<	
I1	rms	0.243	^	Ssum	14.5 ^
I2	rms	0.225		S1	4.9
I3	rms	0.252		S2	4.5
Ims	avg	0.240	v	S3	5.1 v
<		>		<	

รูปที่ 4.44 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI หลังปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์

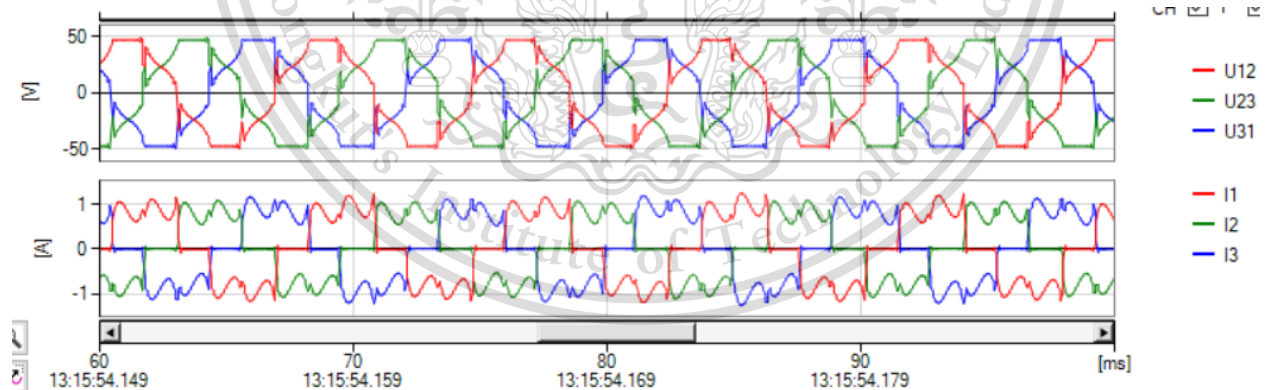
จากผลการทดลองจะได้ค่า

กำลังขาออก = 6.7 W

กำลังขาเข้า = $48 \text{ V} \times 0.157 \text{ A} = 7.536 \text{ W}$

ประสิทธิภาพ = 88.9065 %

4.2.2 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพหลังปรับปรุงประสิทธิภาพ 1 kg



รูปที่ 4.46 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 1 kg หลังปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use51

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Power		Voltage		Current	
U12	ms	34.2	▲	Psum	39.6V ▲
U23	ms	34.2	■	P1	13.4V ■
U31	ms	34.2	■	P2	12.4V ■
Ums	avg	34.2	▼	P3	13.8V ▼
< >		< >		< >	
I1	ms	0.724	▲	Ssum	42.2 ▲
I2	ms	0.670	■	S1	14.3 ■
I3	ms	0.736	■	S2	13.2 ■
Ims	avg	0.710	▼	S3	14.6 ▼
< >		< >		< >	

รูปที่ 4.47 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI หลังปรับปรุง



รูปที่ 4.48 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์

จากผลการทดลองจะได้ค่า

กำลังขาออก = 39.6 W

กำลังขาเข้า = $48 \text{ V} \times 0.157 \text{ A} = 41.328 \text{ W}$

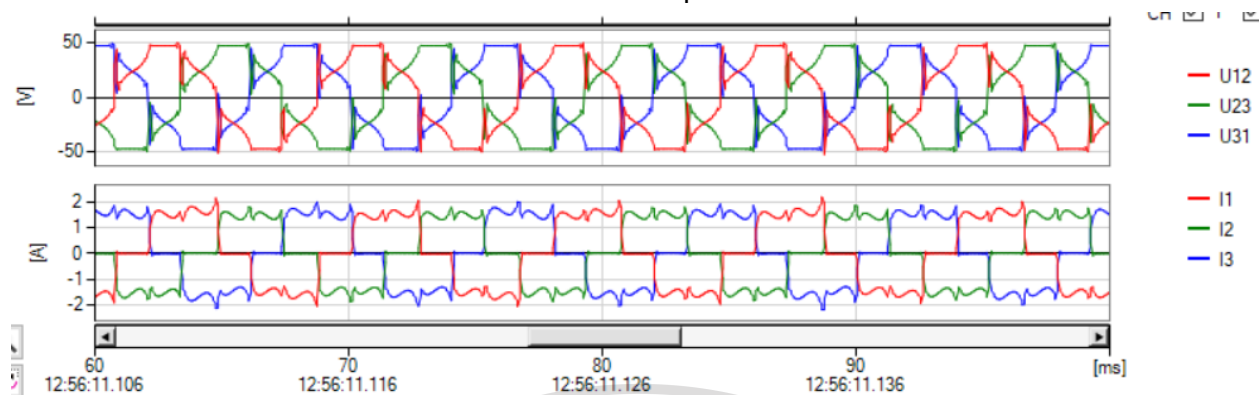
ประสิทธิภาพ = 95.8188 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁵²

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2.3 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพหลังปรับปรุงประสิทธิภาพ 2 kg



รูปที่ 4.49 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 2 kg หลังปรับปรุง

Power		Voltage		Current	
U12	rms	34.5	^	Psum	70.6
U23	rms	34.5	^	P1	23.5
U31	rms	34.6	^	P2	22.6
Ums	avg	34.5	^	P3	24.5
I1	rms	1.262	^	Ssum	75.1
I2	rms	1.202	^	S1	25.2
I3	rms	1.299	^	S2	23.9
Ims	avg	1.254	^	S3	25.9

รูปที่ 4.50 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOLK หลังปรับปรุง



รูปที่ 4.51 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองจะได้ค่า

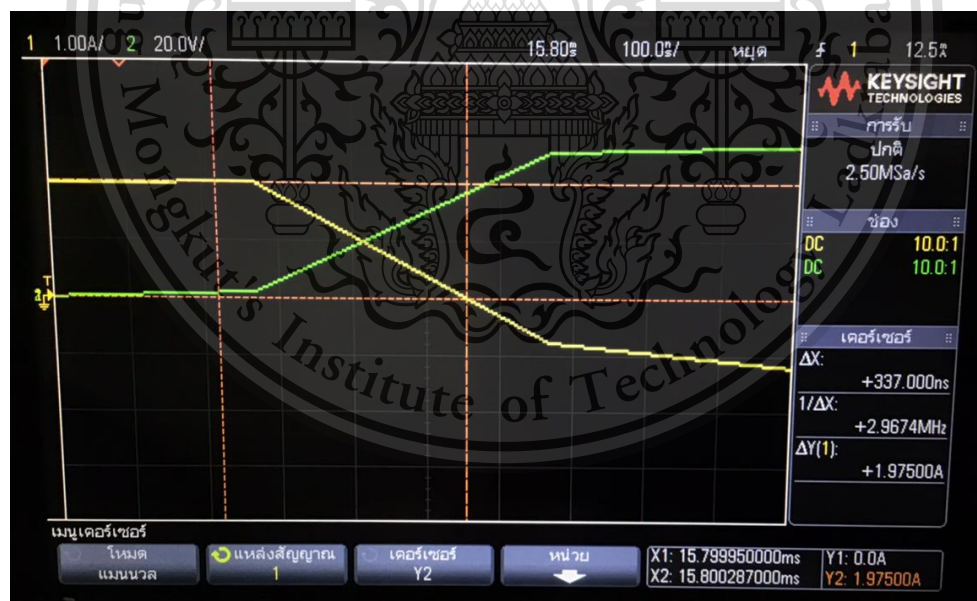
กำลังขาออก = 70.6 W

กำลังขาเข้า = $48 \text{ V} \times 1.520 \text{ A} = 72.96 \text{ W}$

ประสิทธิภาพ = 96.765 %



รูปที่ 4.52 ค่าเวลา T_{off} และ ขนาด V_{DS} จากเครื่อง Oscilloscope ของ MOSFET A High



รูปที่ 4.53 ขนาด I_{DS} ขณะที่ V_{DS} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High

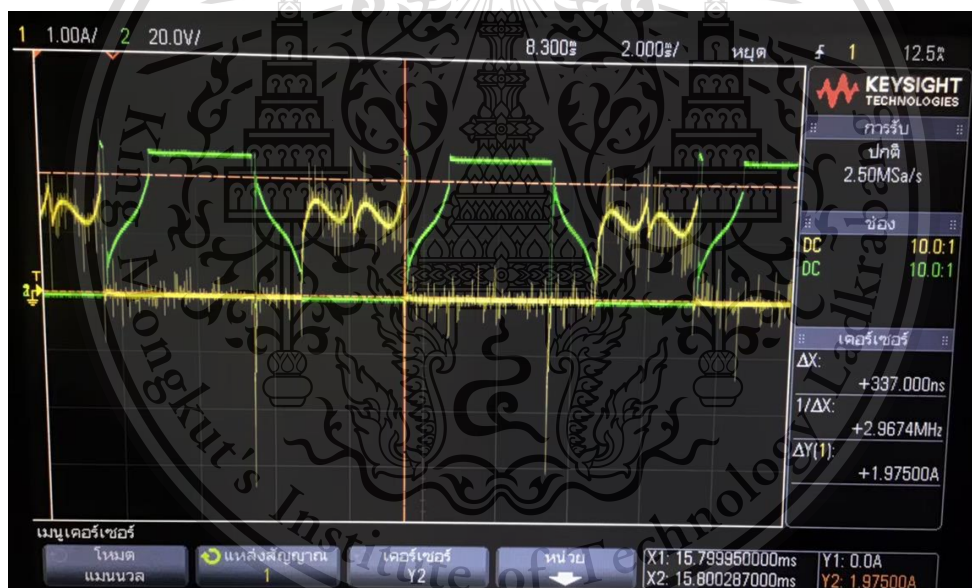
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁵⁴

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.54 ช่วงเวลา T_{ON} มีค่าเป็น 0 ของ MOSFET A High



รูปที่ 4.55 รูปคลื่น V_{DS} และ I_{DS} ของ MOSFET A High

จากผลการทดลองจะได้ค่า $T_{off}=337$ ns $I_m = I_{DS}$ 1.975 A $V_{DS}= 36.7$ V $T_{on} = 0$ s $I_{rms} = 1.3965$ A

$$P_{SW} = \frac{1}{2} \times V_{DS} \times I_{DS} \times (t_{on} + t_{off}) \times f_{sw}$$

$$P_{SW} = 0.24426 \text{ W}$$

$$P_{CON} = I_{rms}^2 \times R_{DS(on)}$$

$$P_{CON} = 0.02535 \text{ W}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use55

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปกราฟจาก Oscilloscope ในส่วนของตัว MOSFET B High, MOSFET C High, MOSFET A Low, MOSFET B Low, MOSFET C Low ได้จากภาคผนวก
ซึ่งตารางต่อไปนี้จะแสดงค่า Conduction Loss และ Switching Loss และนำมาเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์เพื่อวิเคราะห์ค่าความสูญเสีย และตารางค่ากระแส แรงดันและเวลาที่ใช้ในการสวิตชิง

2 kg	$I_{DS,M}$ (A)	$I_{DS,RMS}$ (A)	V_{DS} (V)	T_{on} (ns)	T_{off} (ns)
A_{High}	1.975	1.3965	36.7	0	337
A_{Low}	2.025	1.4318	54	0	471.6
B_{High}	1.825	1.3435	35	0	589
B_{Low}	1.8125	1.46724	33.5	0	268.2
C_{High}	1.625	1.4142	47.5	0	378.8
C_{Low}	1.475	1.2551	31	0	219.1

ตารางที่ 4.14 ตารางแสดงค่าแรงดัน กระแสและเวลาในการสวิตชิง MOSFET 6 ตัว 2 kg หลังการปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

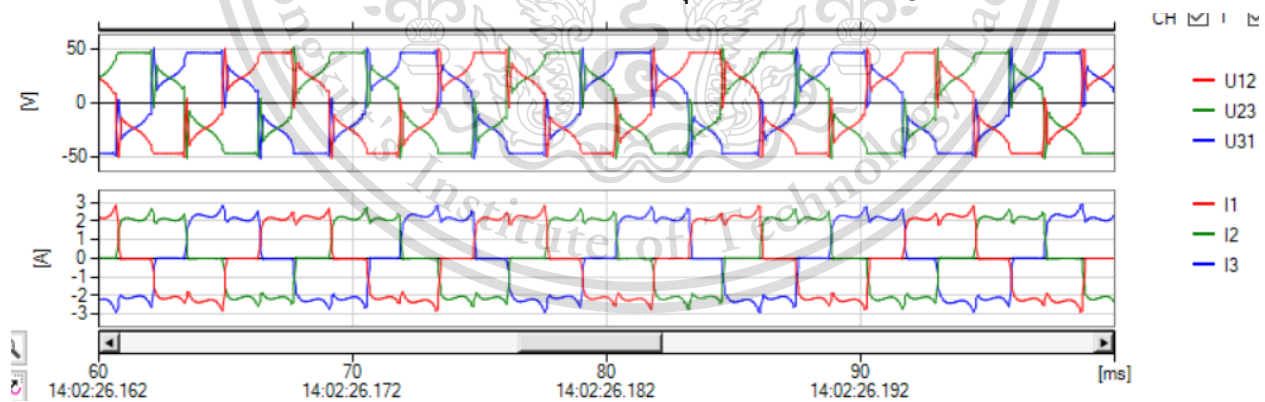
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁵⁶

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2 kg	$P_{\text{switching}}$		$P_{\text{conduction}} \text{ (w)}$
	$P_{\text{Sw,on}} \text{ (w)}$	$P_{\text{Sw,off}} \text{ (w)}$	
A_{High}	0	0.24426	0.02535
A_{Low}	0	0.5156	0.02665
B_{High}	0	0.37622	0.02346
B_{Low}	0	0.16284	0.02798
C_{High}	0	0.2923	0.02599
C_{Low}	0	0.10018	0.0204

ตารางที่ 4.15 ตารางแสดงค่าความสูญเสียของ MOSFET 6 ตัว 2 kg หลังการปรับปรุง

4.2.4 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพหลังปรับปรุงประสิทธิภาพ 3 kg



รูปที่ 4.56 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 3 kg หลังปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁵⁷

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Power		Voltage	Current	
U12	ms	33.6	Psum	97.5
U23	ms	33.6	P1	32.5
U31	ms	33.8	P2	31.2
Ums	avq	33.7	P3	33.8
<		>	<	>
I1	ms	1.812	Ssum	105.1
I2	ms	1.728	S1	35.4
I3	ms	1.855	S2	33.5
Ims	avq	1.798	S3	36.2
<		>	<	>

รูปที่ 4.57 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI หลังปรับปรุง



รูปที่ 4.58 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์

จากผลการทดลองจะได้ค่า

กำลังขาออก = 97.5 W

กำลังขาเข้า = 48 V x 2.087 A = 100.176 W

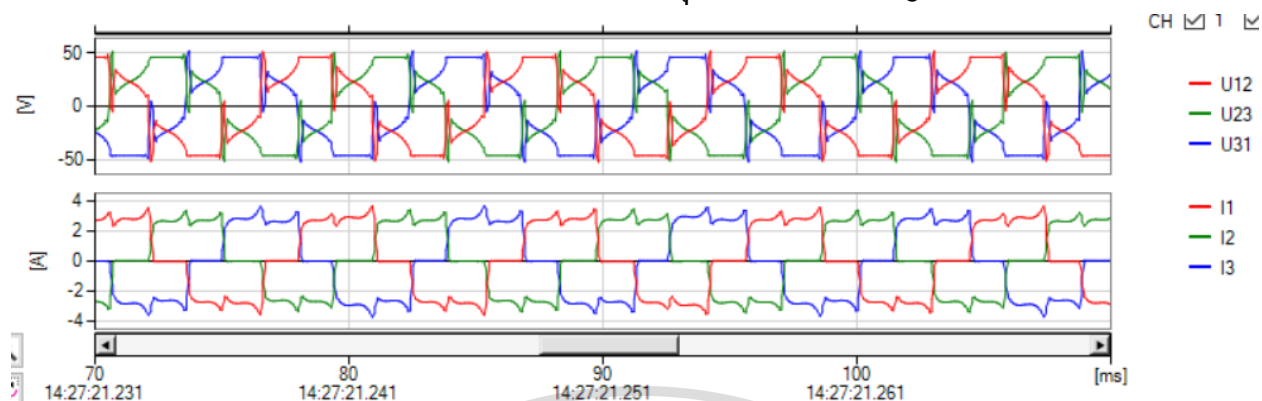
ประสิทธิภาพ = 97.3287 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 58

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

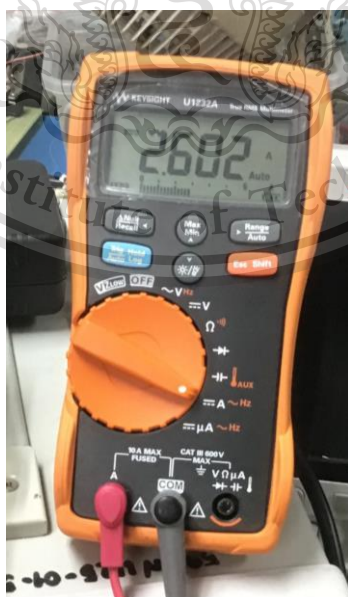
4.2.5 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพหลังปรับปรุงประสิทธิภาพ 4 kg



รูปที่ 4.59 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ 4 kg หลังปรับปรุง

Power			Voltage		Current	
U12	ms	33.5	↕	Psum	121.9V	
U23	ms	33.6		P1	40.8V	
U31	ms	33.8		P2	39.1V	
Ums	avg	33.6		P3	42.0V	
↩				↪		
I1	ms	2.308	↕	Ssum	133.1	
I2	ms	2.199		S1	44.9	
I3	ms	2.338		S2	42.6	
Ims	avg	2.282		S3	45.6	
↩				↪		

รูปที่ 4.60 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI หลังปรับปรุง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 4.61 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

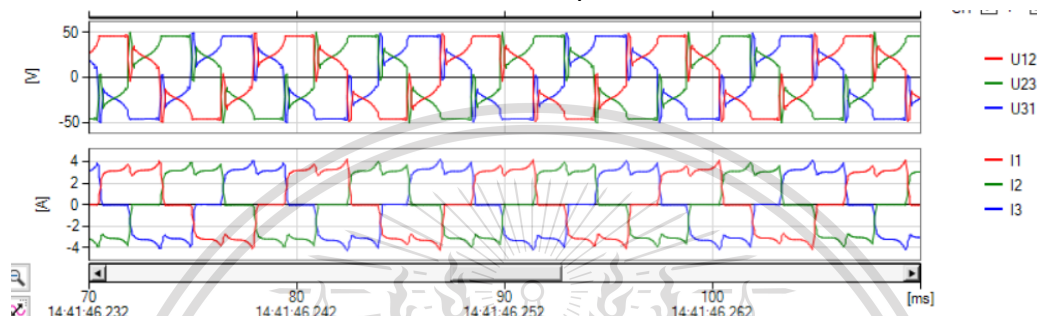
จากผลการทดลองจะได้ค่า

กำลังขาออก = 121.9 W

กำลังขาเข้า = $48 \text{ V} \times 2.602 \text{ A} = 124.896 \text{ W}$

ประสิทธิภาพ = 97.6012 %

4.2.6 ผลการทดลองจากการวัดค่าประสิทธิภาพหลังปรับปรุงประสิทธิภาพ 5 kg



รูปที่ 4.62 รูปแรงดัน Line-Line และ กระแส 3 เฟสขาออกจากรีเลย์เตอร์ 5 kg หลังปรับปรุง

Power		Voltage		Current	
U12	rms	33.4	Psum	138.3V	
U23	rms	33.4	P1	46.0V	
U31	rms	33.7	P2	44.6V	
Ums	avg	33.5	P3	47.8V	
I1	rms	2.633	Ssum	152.4	
I2	rms	2.538	S1	51.1	
I3	rms	2.699	S2	48.9	
Ims	avg	2.623	S3	52.4	

รูปที่ 4.63 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังขาออกของรีเลย์เตอร์จากการวัดจากเครื่อง HIOKI หลังปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use60

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.64 ค่ากระแสขาเข้าอินเวอร์เตอร์จากมัลติมิเตอร์

จากผลการทดลองจะได้ค่า

กำลังขาออก = 138.3 W

กำลังขาเข้า = $48 \text{ V} \times 2.944 \text{ A} = 141.321 \text{ W}$

ประสิทธิภาพ = 97.8685 %

4.2.7 ตารางผลการทดลองรวมหลังปรับปรุงประสิทธิภาพ

	efficiency	P _{switching}	P _{conduction}	P _{etc}
0 kg	88.9065 %	-	-	-
1 kg	95.8188 %	-	-	-
2 kg	96.765 %	2.31825%	0.20531%	0.71144%
3 kg	97.3287 %	-	-	-
4 kg	97.6012 %	-	-	-
5 kg	97.8685 %	-	-	-

ตารางที่ 4.16 ตารางสรุปค่าประสิทธิภาพและการสูญเสียหลังปรับปรุงตั้งแต่ 0-5 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use61

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนแนะ

5.1 บทนำ

หลังจากที่เราได้ศึกษาการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ขับ BLDC มอเตอร์ และได้ทำการการวัดประสิทธิภาพโดยใช้เครื่อง HIOK วัด Switching loss และ Conduction loss โดยการใช้ Oscilloscope เรา
จะแบ่งสรุปผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ก่อนปรับปรุงประสิทธิภาพ เพื่อที่เราจะได้ทราบว่าการสูญเสียส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากส่วนไหน เพื่อที่จะได้ปรับปรุงประสิทธิภาพได้อย่างตรงจุด และหลังการปรับปรุงประสิทธิภาพ ว่า
หลังจากที่เราปรับปรุงการสูญเสียให้มีค่าน้อยลงแล้วประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์จะดีขึ้นหรือไม่

5.2 ก่อนปรับปรุงประสิทธิภาพ

เราได้ทำการวัดประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่น้ำหนักโหลดต่างๆโดยใช้เครื่อง HIOK พบว่า เมื่อเพิ่ม
น้ำหนักโหลดมากขึ้น ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์จะมากขึ้นตามไปด้วย โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่
96.9842% แสดงในรูปที่ 5.1



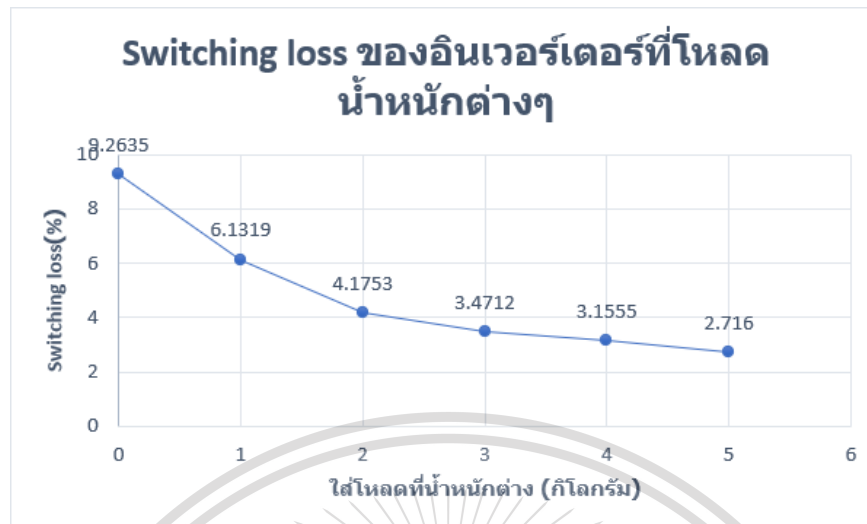
รูปที่ 5.1 กราฟประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่โหลดน้ำหนักต่างๆ

เมื่อเราทำการวัด Switching loss ของอินเวอร์เตอร์ที่น้ำหนักโหลดต่างๆโดยใช้ Oscilloscope พบว่า
เมื่อเพิ่มน้ำหนักโหลดมากขึ้น Switching loss ของอินเวอร์เตอร์จะมีค่าลดลง แต่ก็ยังเป็นค่าส่วนมากของการ
สูญเสียอยู่ดี แสดงในรูปที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

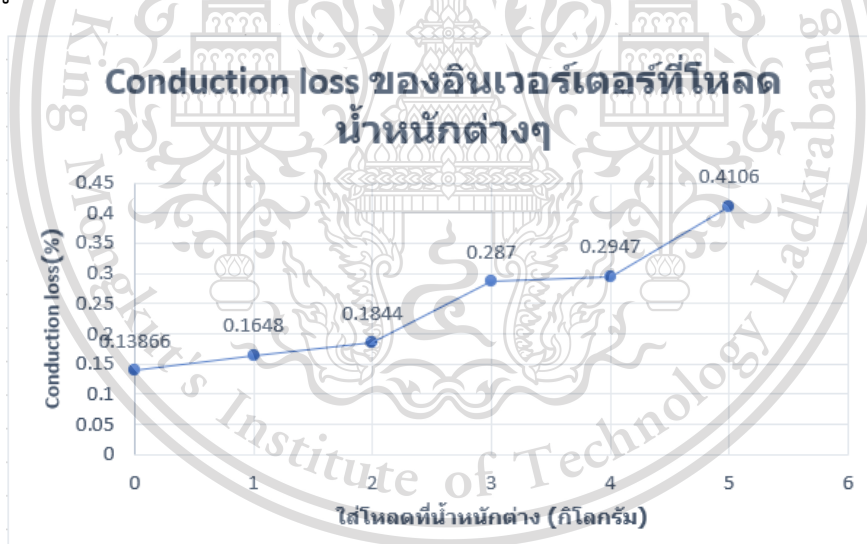
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use62

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.2 กราฟ Switching loss ของอินเวอร์เตอร์ที่โหลดน้ำหนักต่างๆ

เมื่อเราทำการวัด Conduction loss ของอินเวอร์เตอร์ของที่โหลดน้ำหนักต่างๆโดยใช้ Oscilloscope พบว่า เมื่อน้ำหนักโหลดมากขึ้น ค่า Conduction loss ของอินเวอร์เตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากกระแส I_{ds} ที่เพิ่มขึ้น แสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 กราฟ Conduction loss ของอินเวอร์เตอร์ที่โหลดน้ำหนักต่างๆ

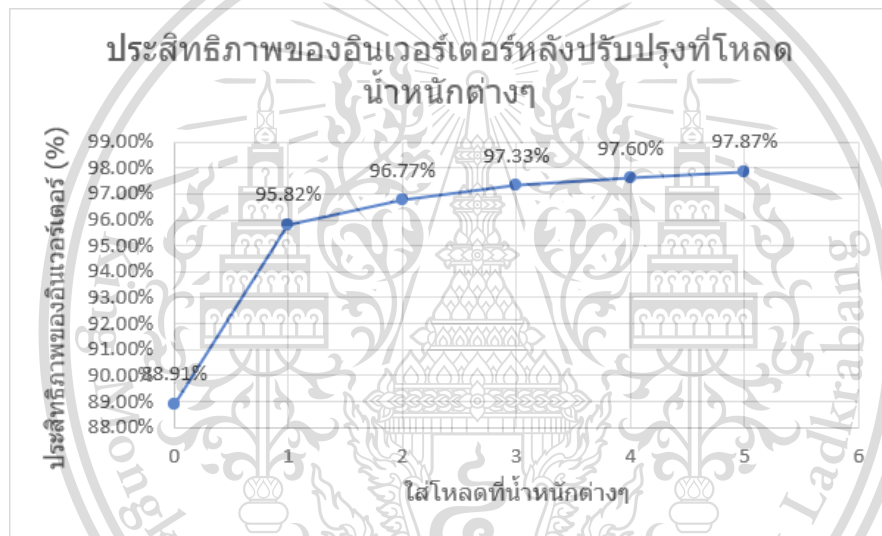
เมื่อเราได้ทำการวัดค่าต่างๆ พบว่า การสูญเสียที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจาก Switching loss ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า Switching loss มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ขับ BLDC มอเตอร์มากที่สุด ดังนั้น หากต้องการจะปรับปรุงประสิทธิภาพ ควรเลือกปรับปรุงที่ค่า Switching loss

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 หลังปรับปรุงประสิทธิภาพ

การลดค่า Switching loss นั้นทำได้หลายวิธี เช่น การลดความถี่สวิชชิง, เปลี่ยนตัว MOSFET ที่มีค่า rise time และ fall time หรือ Q gate-charge ที่น้อยลง หรือ เปลี่ยนตัวต้านทานที่ก่อนเข้าขาเกตให้มีค่าน้อยลง ซึ่งเราได้เลือกวิธีเปลี่ยนตัวต้านทานที่ก่อนเข้าขาเกตในการลดค่า Switching loss

หลังจากที่เราได้ทำการเปลี่ยนตัวต้านทานก่อนเข้าเกตจาก 33 โอห์ม เป็น 27 โอห์ม ทำให้มีกระแสไหลเข้าขาเกตเยอะขึ้นจึงทำให้เวลาในการชาร์จประจุของขาเกตมีค่าลดลง ส่งผลให้ fall time มีค่าลดลงตามไปด้วย จึงทำให้ Switching loss มีค่าลดลง และเมื่อวัดประสิทธิภาพรวมของระบบ พบว่า เมื่อเพิ่มน้ำหนักรไหลมากขึ้น ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์จะมากขึ้นตามไปด้วยเช่นเดียวกับก่อนปรับปรุง โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 97.8685% แสดงในรูปที่ 5.4



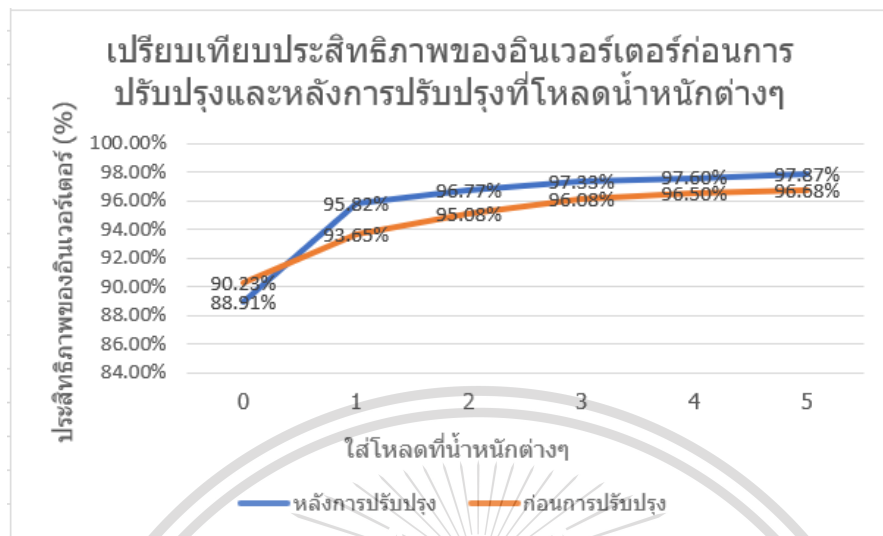
รูปที่ 5.4 กราฟประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์หลังปรับปรุงที่โหลดน้ำหนักต่างๆ

และเมื่อนำประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงมาเปรียบเทียบกับ พบว่า หลังการปรับปรุงมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น แสดงในรูปที่ 5.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 64

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงที่โหลดน้ำหนักต่างๆ

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อทำการปรับปรุงค่า Switching loss ที่เป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ของระบบ ทำให้อินเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ซึ่งในส่วนข้อเสียที่พบนั้น จะเป็นในส่วนของกระแสที่อาจจะกระชากได้ เยอะขึ้น อาจจะทำให้อุปกรณ์เสียหายได้ง่ายขึ้น

5.4 ข้อเสนอแนะ

ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์นั้น ควรจะศึกษาระบบและรูปแบบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ตัวนั้นๆ หากเป็นอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานในรูปแบบอื่นๆ ที่ไม่ได้ใช้ขับ BLDC มอเตอร์ การสูญเสียส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นอาจจะไม่ใช่ Switching loss ก็ได้ ดังนั้นจึงควรศึกษาก่อนว่าสิ่งที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ตัวนั้นๆมาจากอะไร ซึ่งในส่วนของอินเวอร์เตอร์ที่ขับ BLDC มอเตอร์ แนวทางในการลด Switching loss ทำได้หลายวิธี ซึ่งวิธีการเปลี่ยนตัวต้านทานก่อนเข้าขาเกตให้มีค่าน้อยลงบางครั้งเมื่อเปลี่ยนเป็นตัวที่มีค่าน้อยเกินไปก็ไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น ยิ่งใช้ตัวต้านทานที่มีค่าน้อยๆซึ่งทำให้มีกระแสไหลเข้าขาเกตเยอะขึ้นจึงทำให้เวลาในการชาร์จประจุของขาเกตมีค่าลดลงน้อยลงก็จริง แต่ทำให้มีกระแสไหลเข้าขาเกตเยอะขึ้น อาจจะทำให้ค่า Conduction loss เยอะขึ้นแล้วประสิทธิภาพรวมน้อยลงก็ได้ หรืออาจจะทำให้กระแสกระชากในบางจังหวะ ทำให้อุปกรณ์เสียหายได้ จึงควรเลือกใช้ขนาดของตัวต้านทานที่เหมาะสม ในส่วนของการลดความถี่สวิตชิง สามารถทำได้โดยการแก้ไขโค้ดให้มีการสั่งการที่ความถี่เยอะขึ้นหรือน้อยลง ซึ่งบางครั้งการลดความถี่ให้มีความถี่ที่น้อยเกินไปอาจจะทำให้ Switching loss น้อยลง แต่ไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้น จึงควรเลือกการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งนั้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ที่เหมาะสมเช่นกัน และในการเปลี่ยนตัว MOSFET ที่มีค่า rise time และ fall time หรือ Q gate-charge ที่น้อยลงก็ถือเป็นทางเลือกที่น่าสนใจหากจะลองทำการปรับปรุงทั้ง 3 วิธีนี้พร้อมกันเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดี ยิ่งขึ้นกว่าเดิม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁶⁶

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารอ้างอิง

- [1] Tefvik Yigit, Hakan Celik, Speed controlling of the PEM fuel cell powered BLDC motor with FOPI optimized by MSA, International Journal of Hydrogen Energy, 2020, ISSN 0360-3199
- [2] Patrik Varecha, Pavol Makyš, Martin Sumega, Pavel Sovička, Power losses analysis in MOSFET 3-phase high current power inverter for automotive application area, Transportation Research Procedia, Volume 40, 2019, Pages 571-578, ISSN 2352-1465
- [3] Yi Zhang, Huai Wang, Zhongxun Wang, Yongheng Yang, Frede Blaabjerg, Impact of lifetime Model Selections on the reliability Prediction of IGBT Modules in Modular Multilevel Converters, 2017
- [4] Mika Ikonen, Power Cycling lifetime estimation of IGBT power modules based on chip temperature modeling, 2012, pages 41-43
- [5] Adam Niesłony, Determination of fragments of multiaxial service loading strongly influencing the fatigue of machine components, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 23, Issue 8, 2009, Pages 2712-2721, ISSN 0888-3270
- [6] U.M. Choi, S. Jørgensen, F. Iannuzzo, F. Blaabjerg, Power cycling test of transfer molded IGBT modules by advanced power cycler under different junction temperature swings, Microelectronics Reliability, Volumes 88–90, 2018, Pages 788-794, ISSN 0026-2714

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁶⁷

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ก

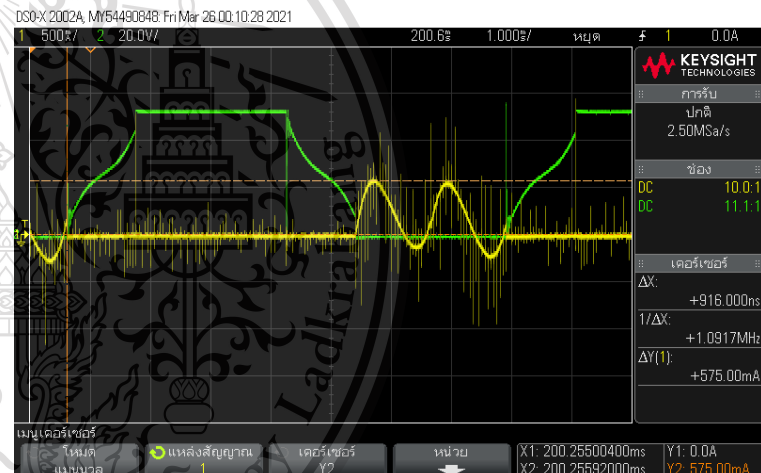
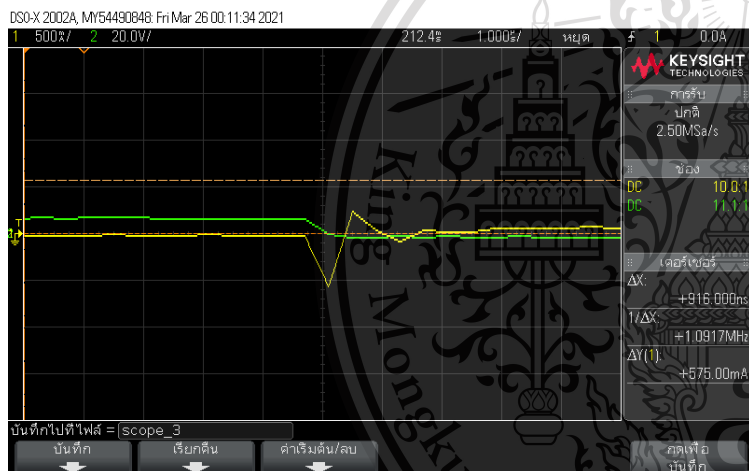
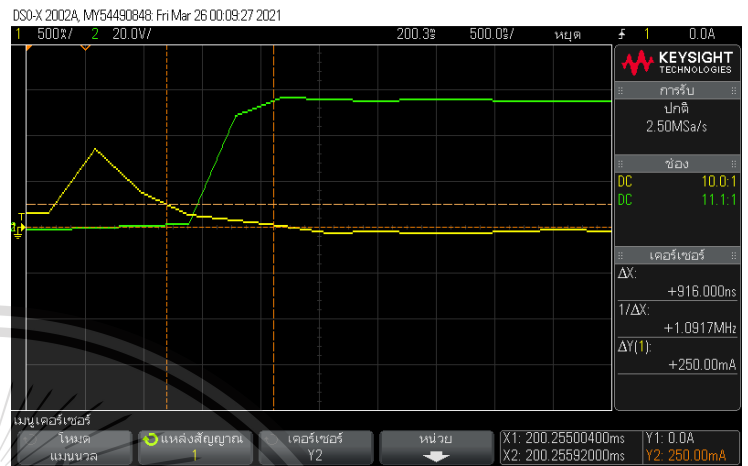
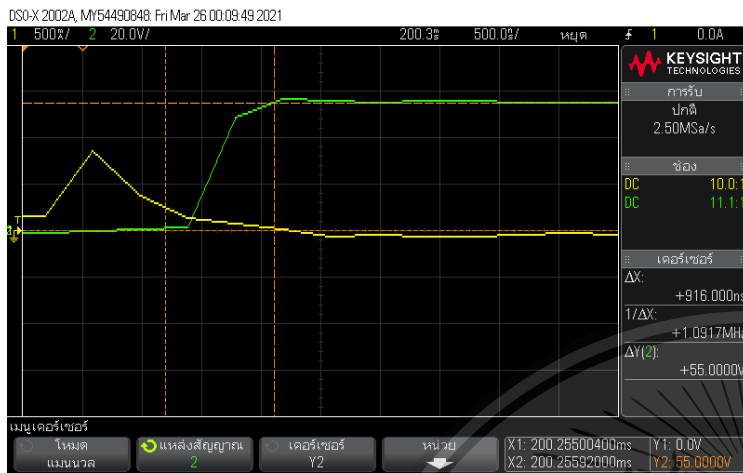
ภาพจากการวัดด้วยเครื่อง Oscilloscope ของ MOSFET

จากกราฟต่อไปนี้นี้เป็นกราฟของ MOSFET B High, C High, A Low, B Low, C Low จากกราฟทุกกราฟจะมีความคล้ายกันในด้านของทฤษฎีตามบทที่ 2 แต่จะมีส่วนที่ไม่เหมือนกันตรงค่า Fall time, Rise time จะมีความแตกต่างกันซึ่งการที่ไม่เหมือนกันของสองค่านี้ทำให้ค่าแรงดันและกระแสที่นำมาคำนวณค่าความสูญเสียย่อมมีค่าไม่เหมือนกันตามไปด้วย

0 kg MOSFET B high



0 kg MOSFET C High

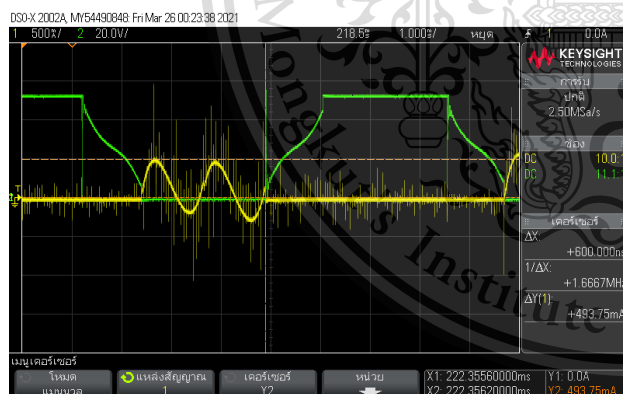
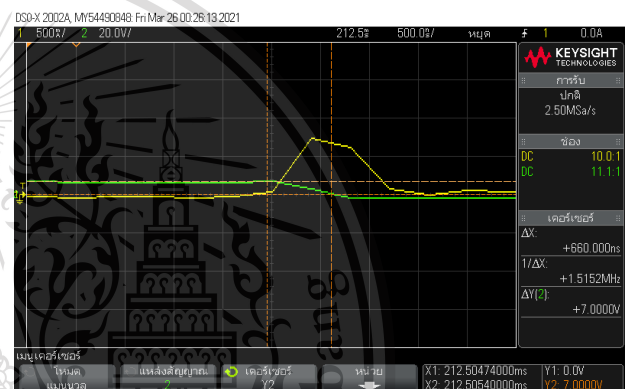
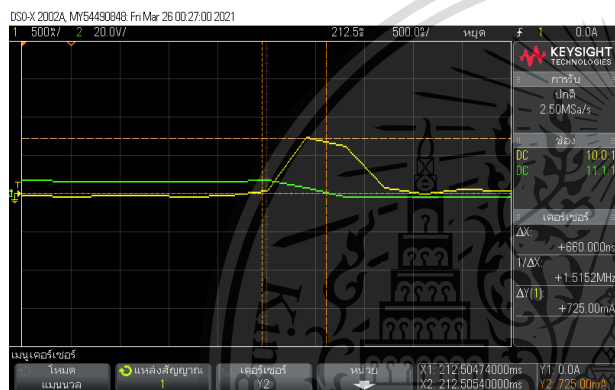
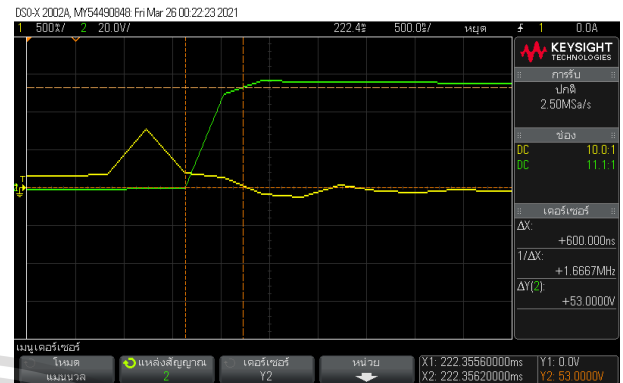
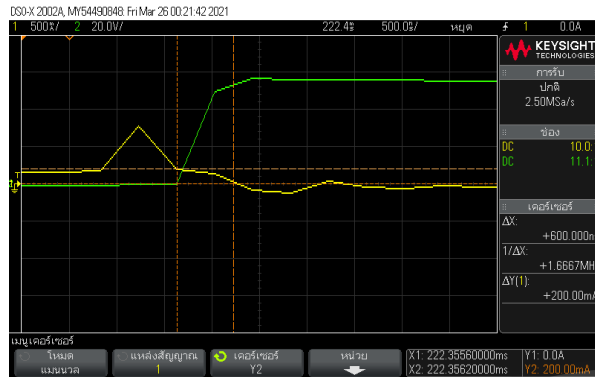


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁶⁹

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

0 kg MOSFET A Low

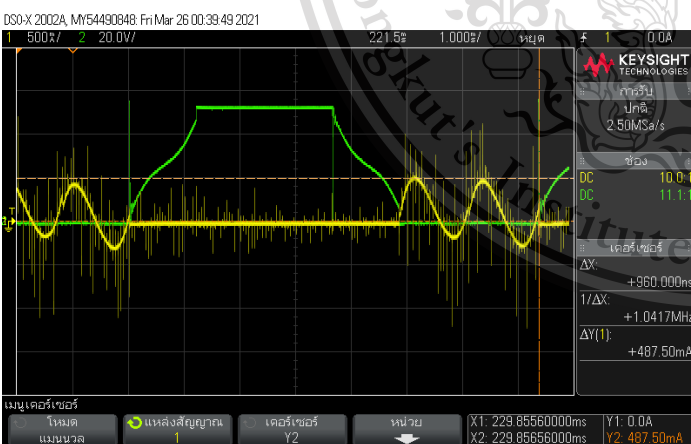
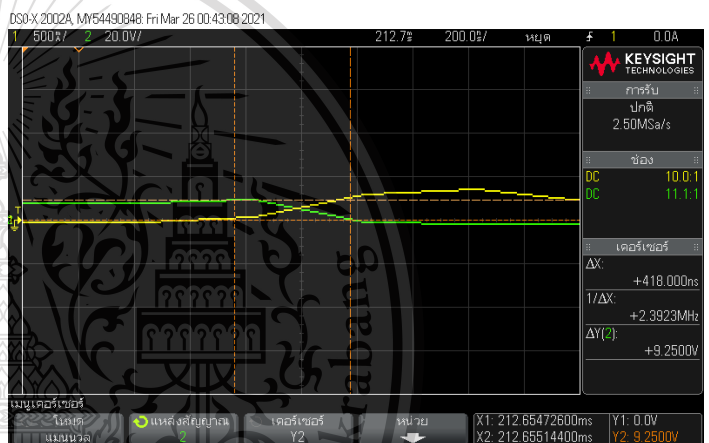
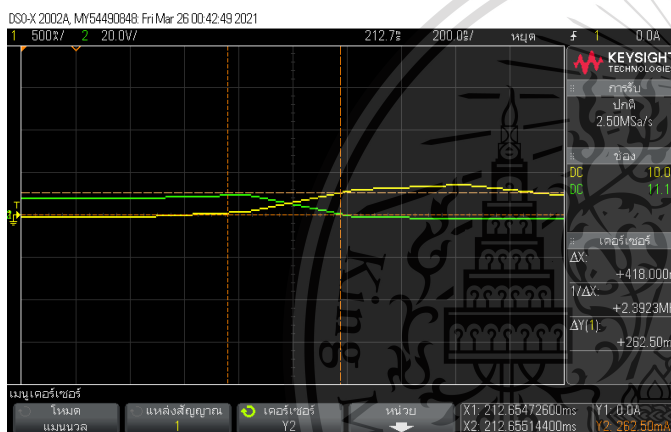
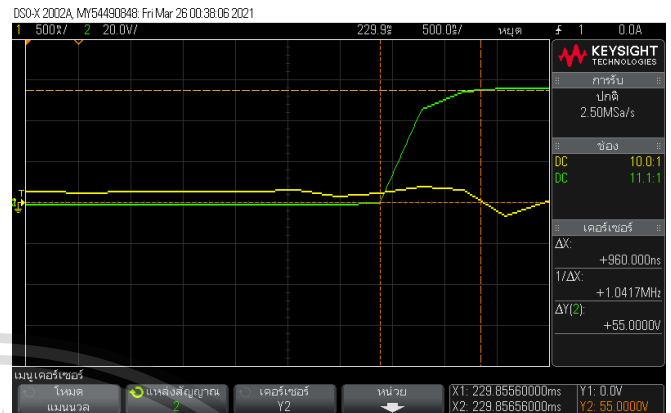
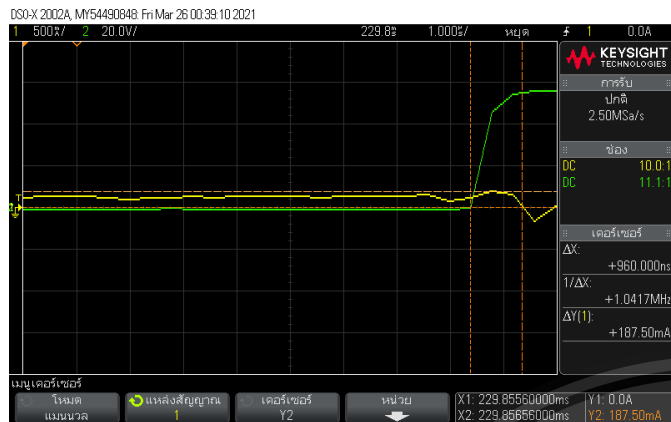


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use70

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

0 kg MOSFET B Low

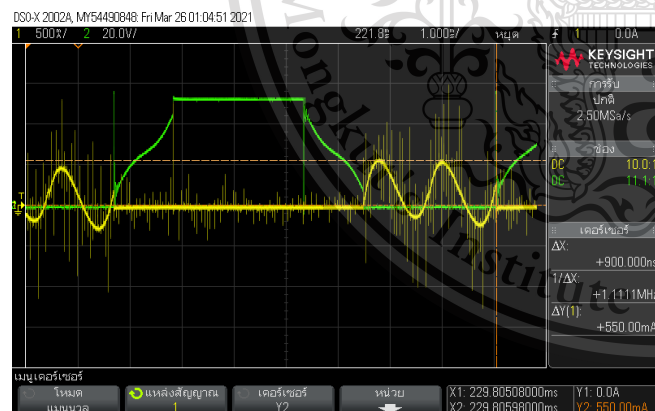
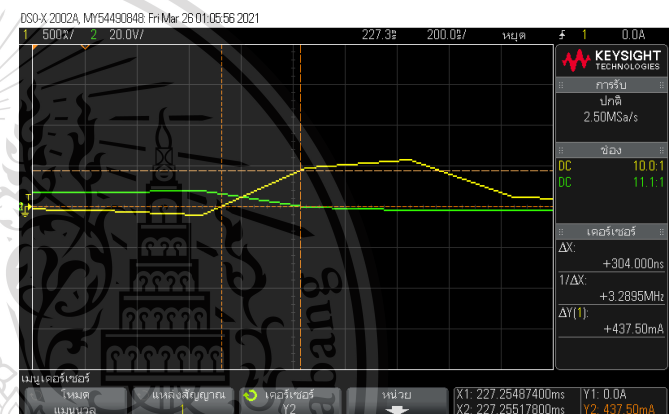
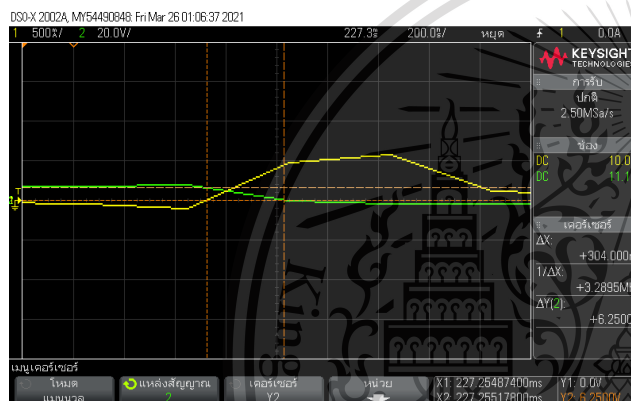
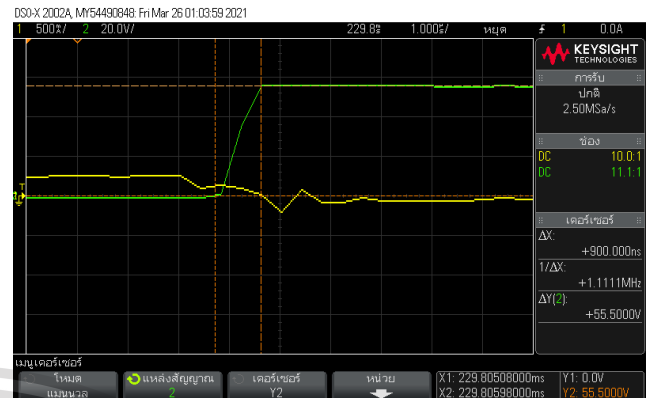
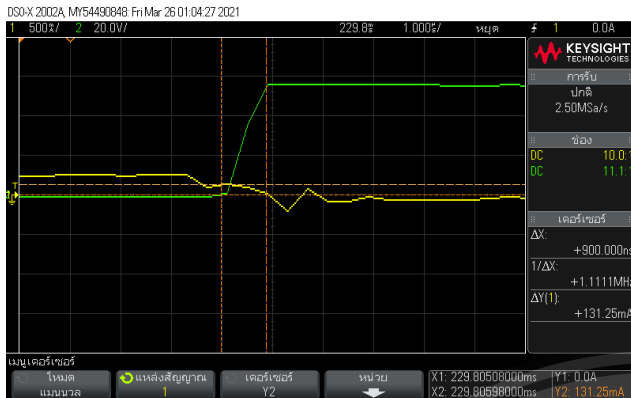


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 71

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

0 kg MOSFET C Low

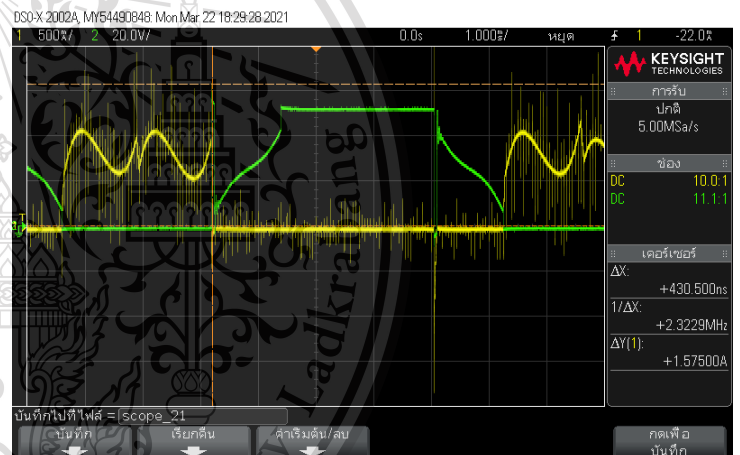
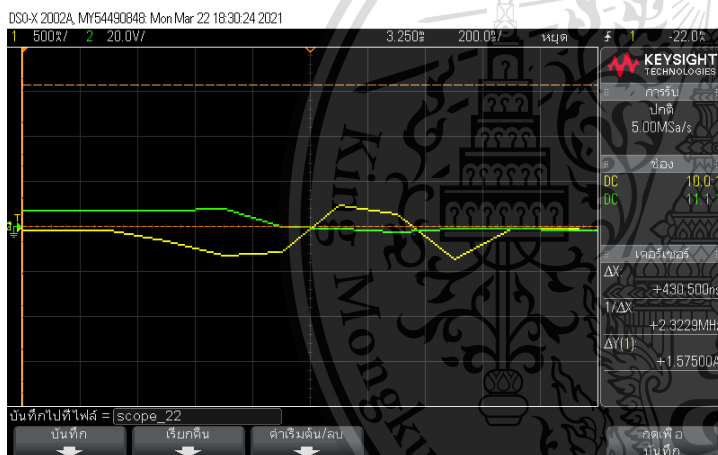
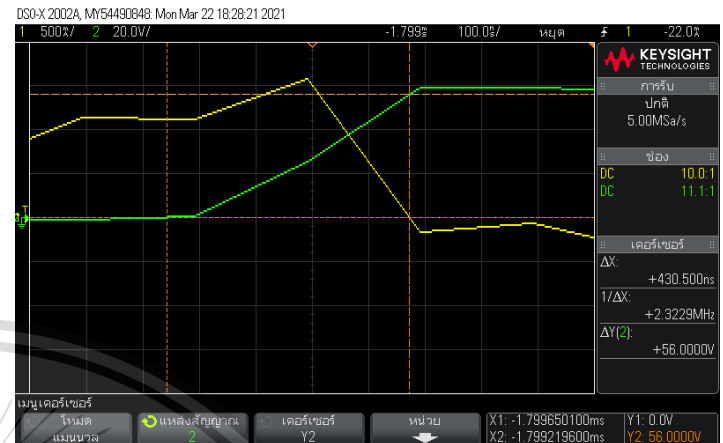
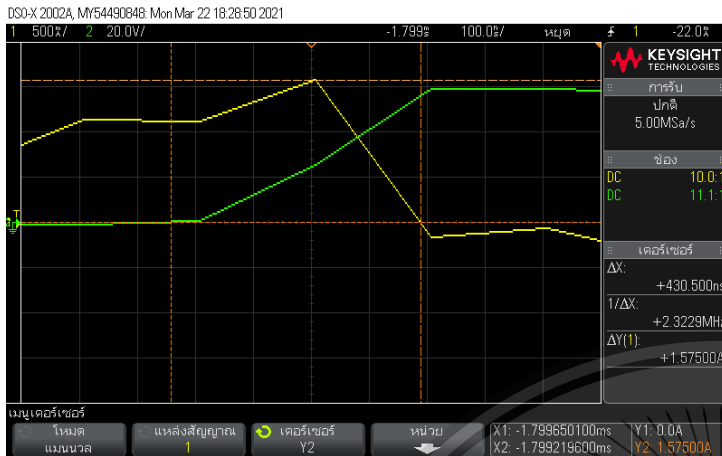


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁷²

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1 kg MOSFET B High

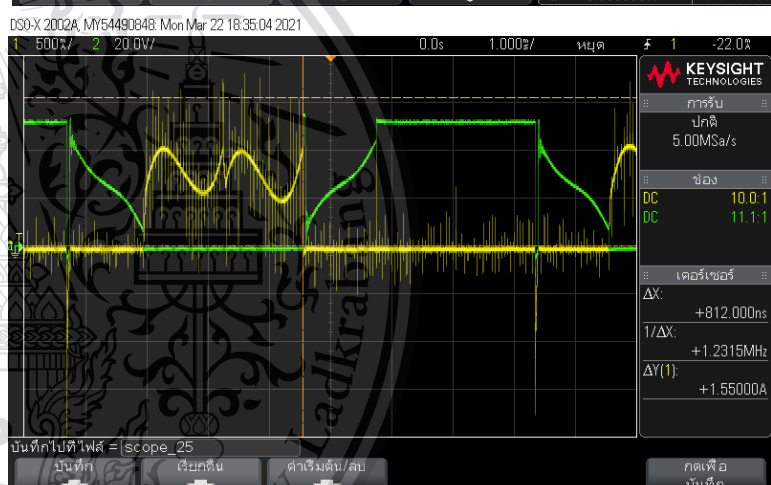
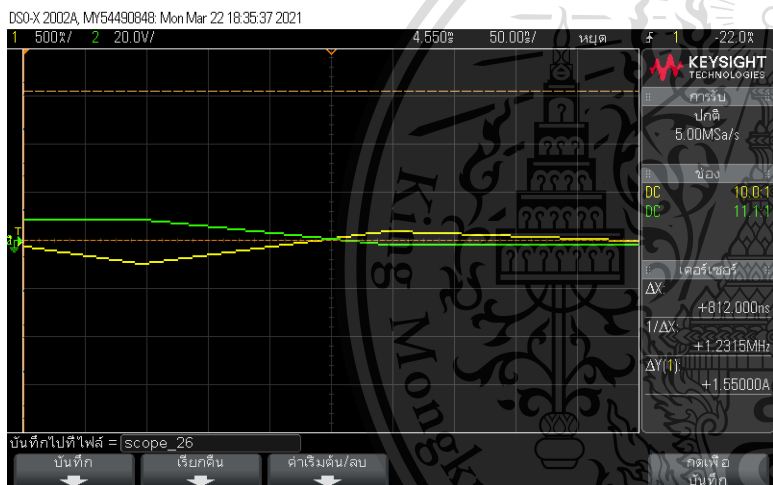
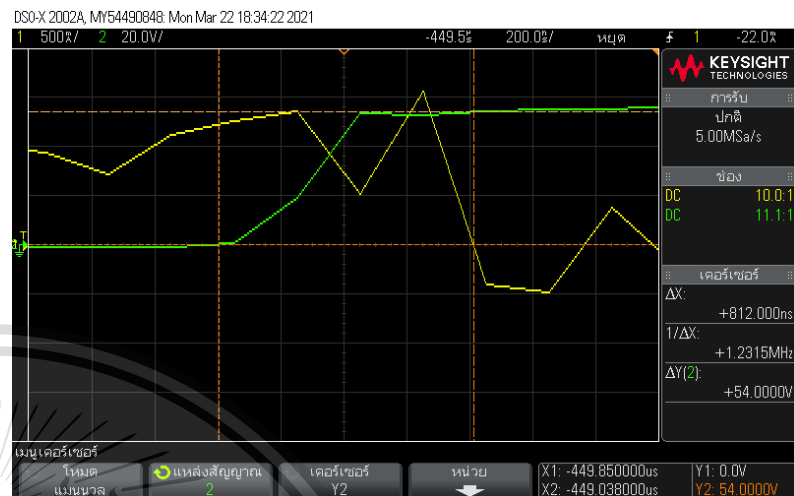
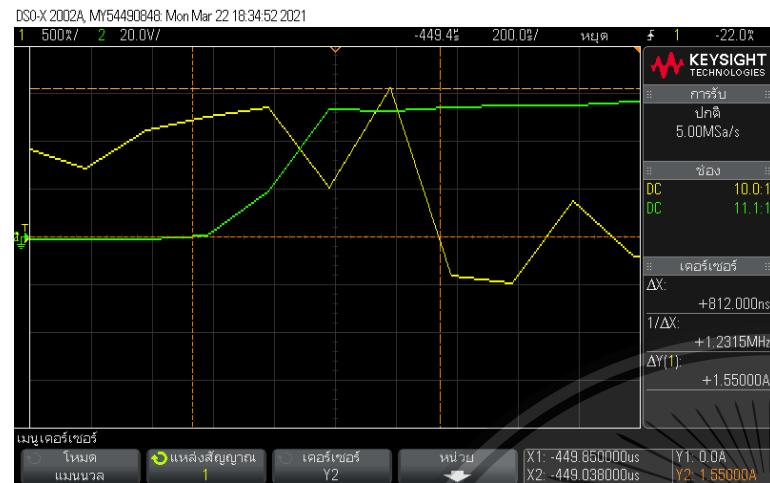


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁷³

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1 kg MOSFET C High

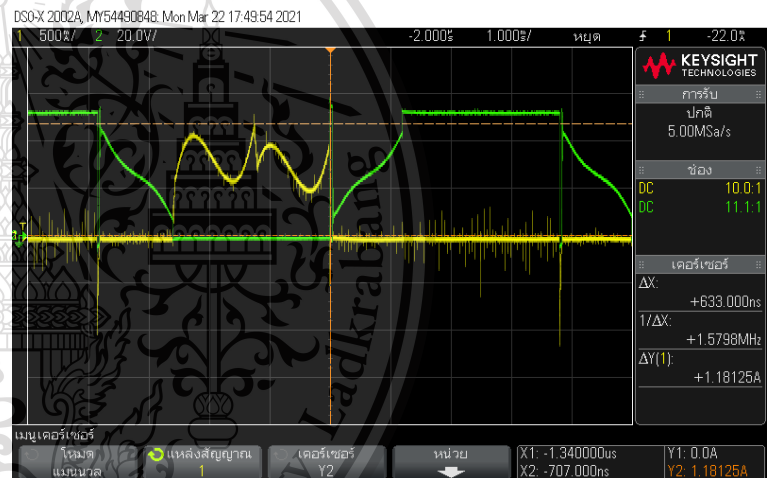
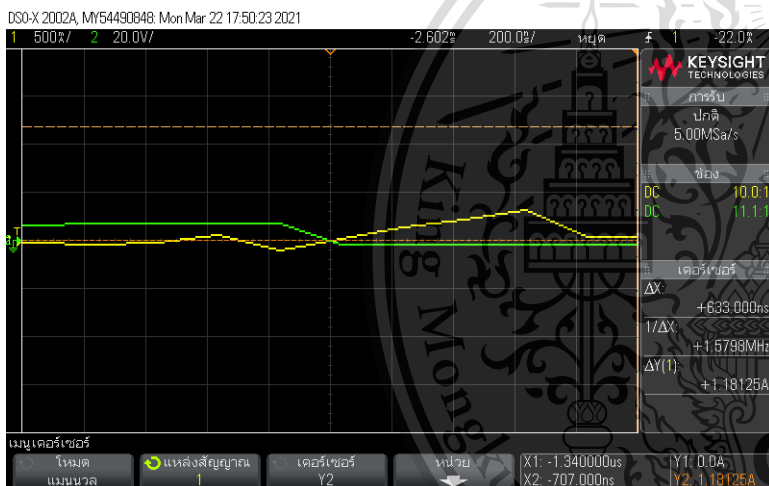
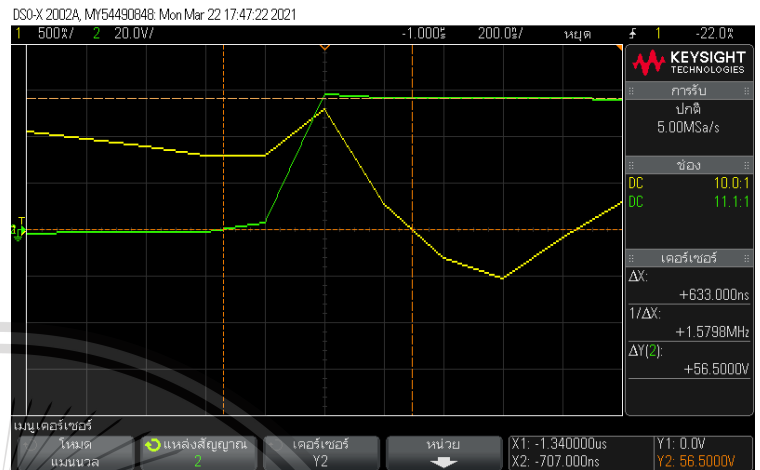
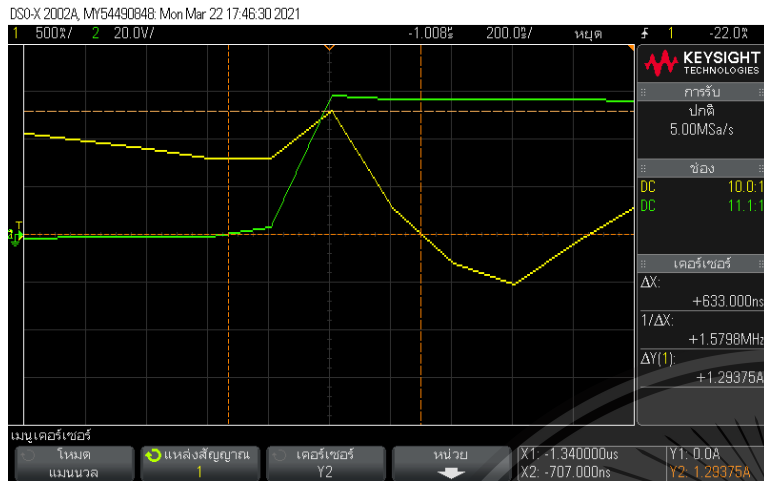


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁷⁴

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1 kg MOSFET A Low

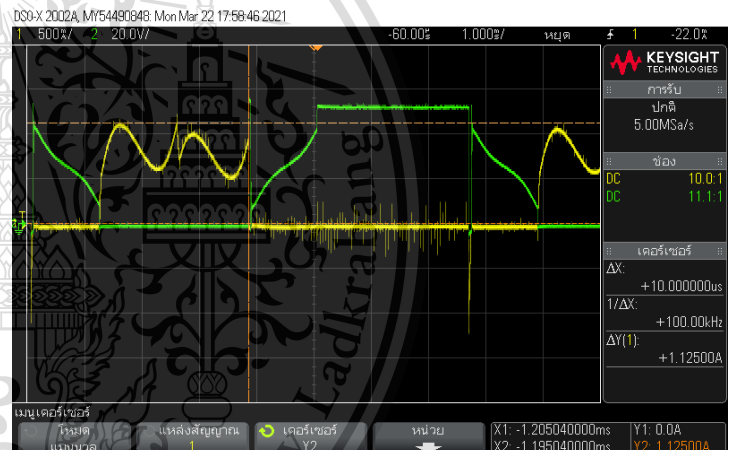
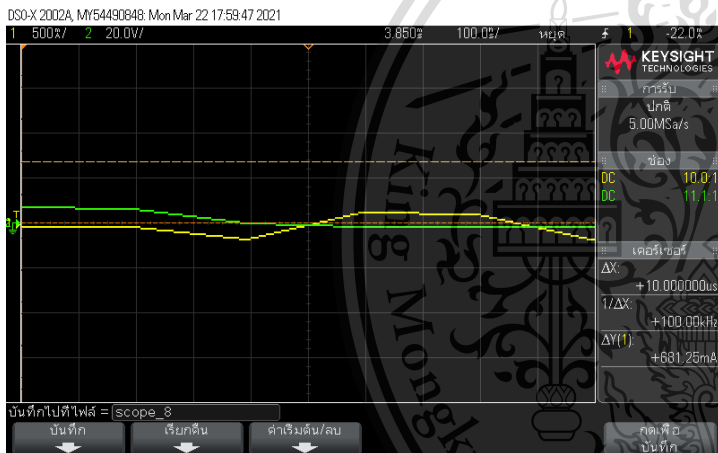
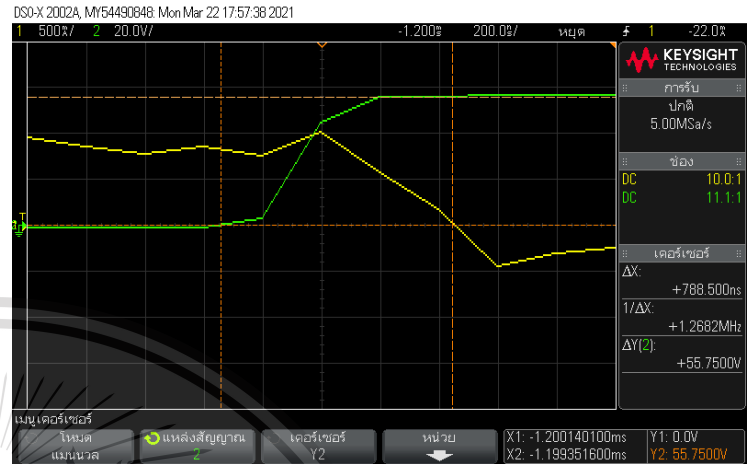
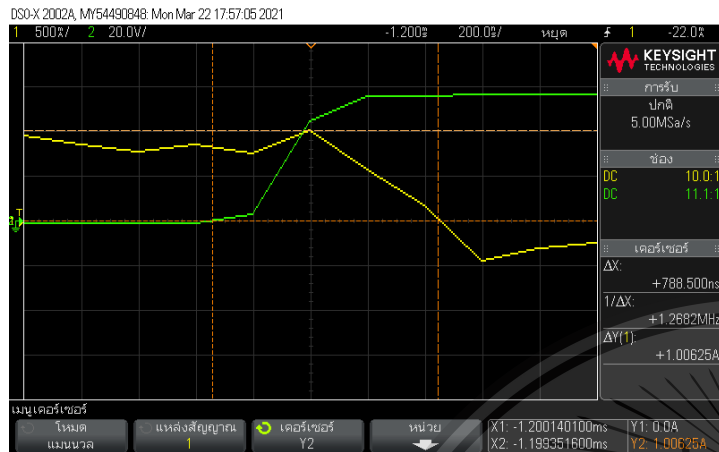


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁷⁵

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1 kg MOSFET B Low

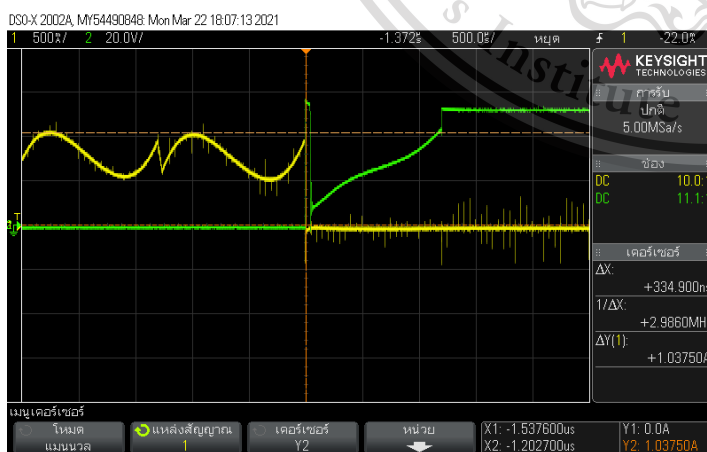
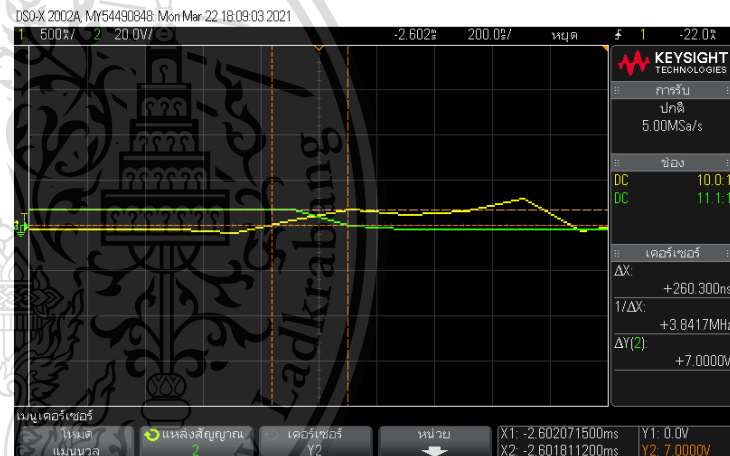
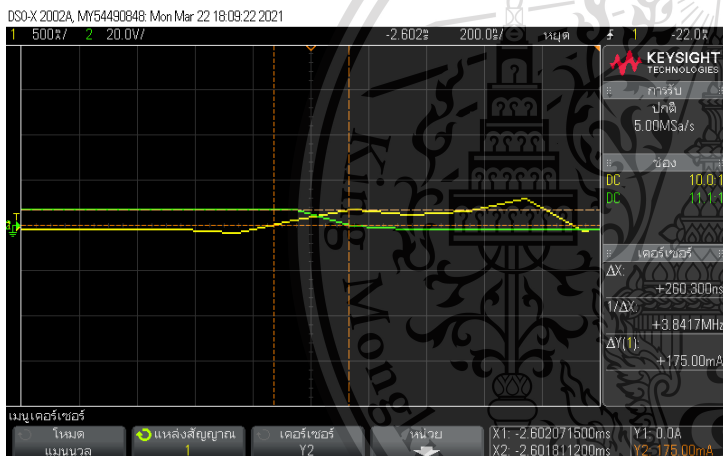
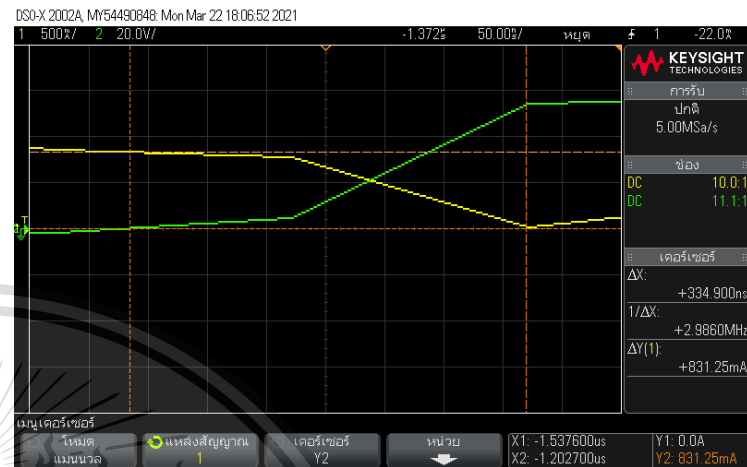
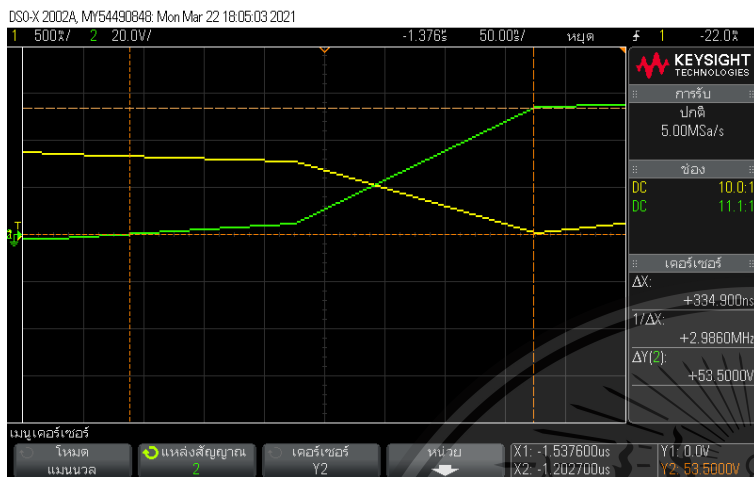


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁷⁶

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1 kg MOSFET C Low

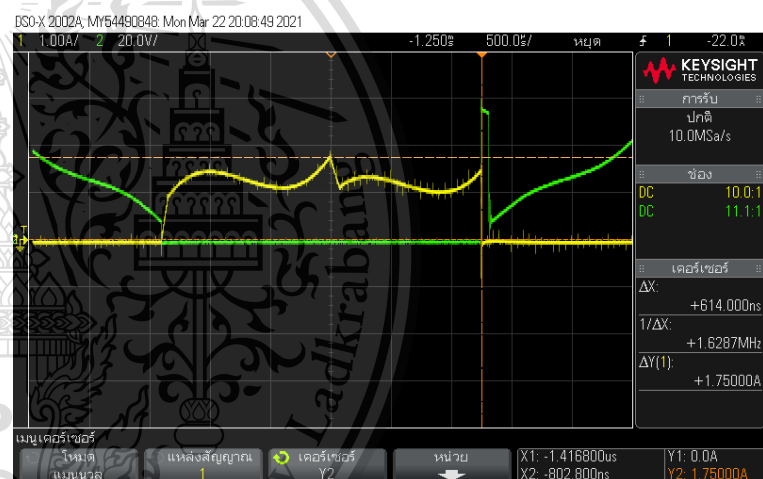
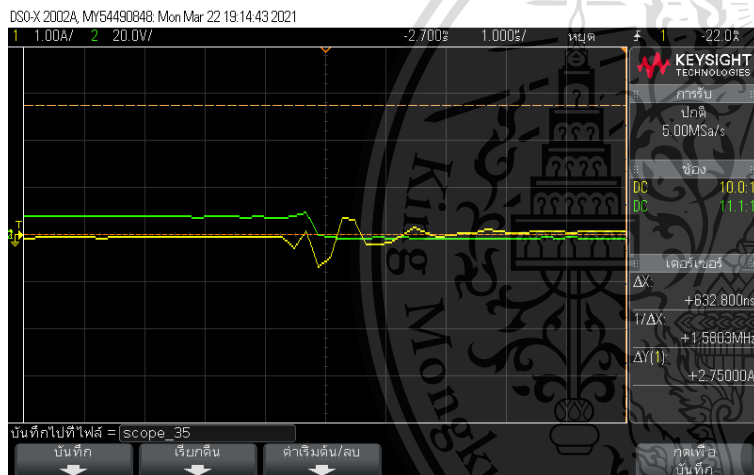
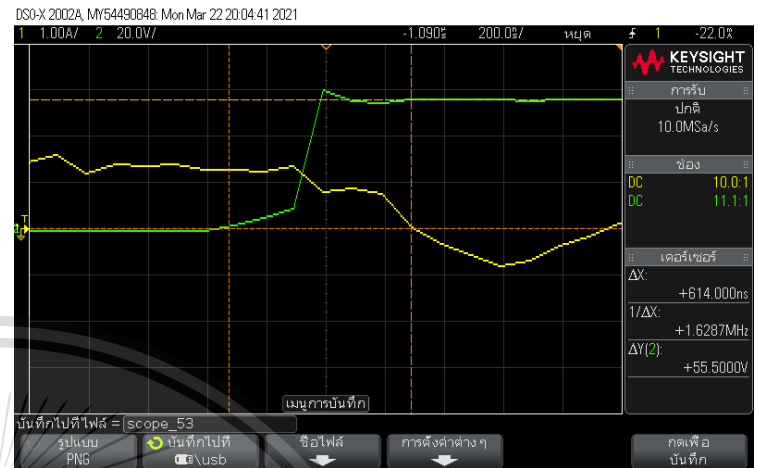
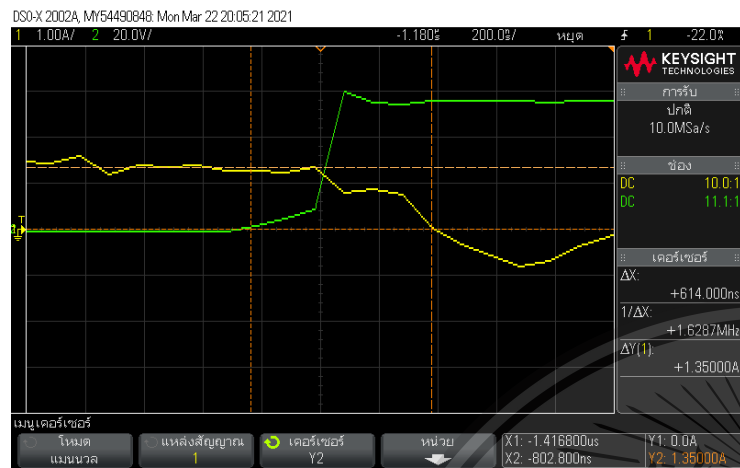


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁷⁷

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2 kg MOSFET B high



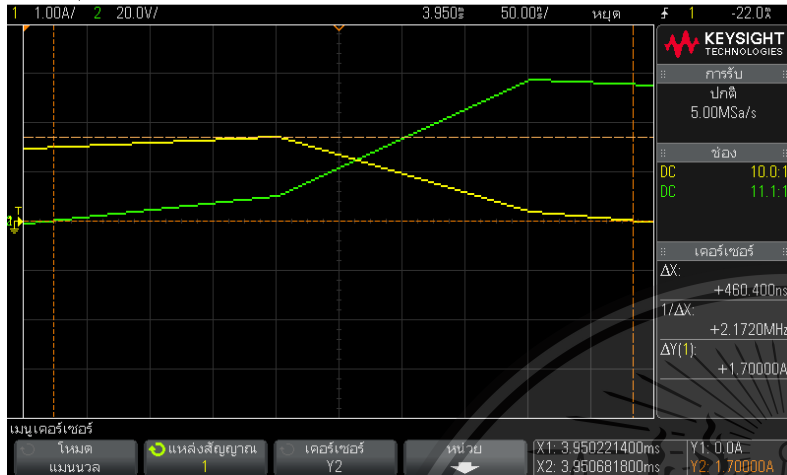
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁷⁸

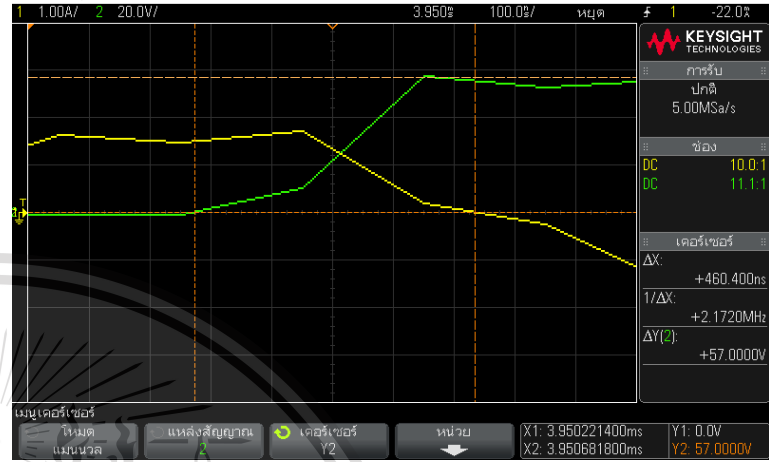
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2 kg MOSFET C high

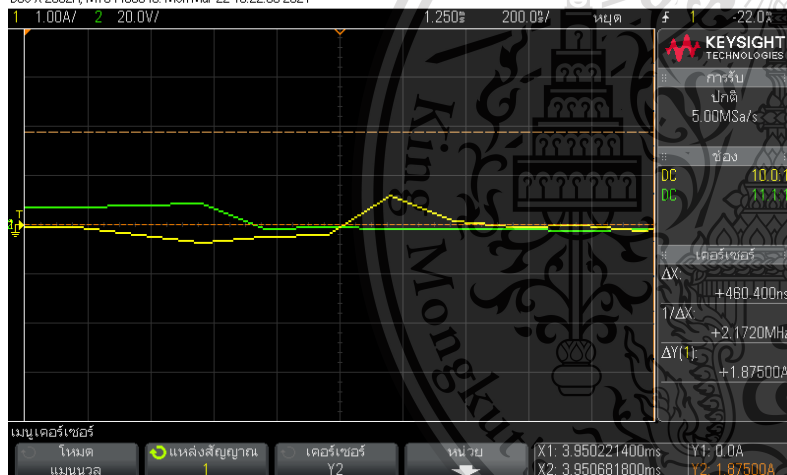
DSO-X 2002A, MY54490848, Mon Mar 22 19:20:59 2021



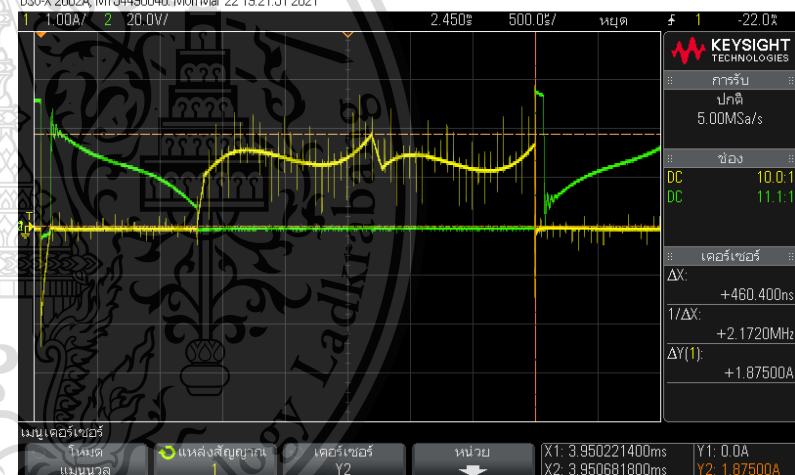
DSO-X 2002A, MY54490848, Mon Mar 22 19:20:28 2021



DSO-X 2002A, MY54490848, Mon Mar 22 19:22:08 2021



DSO-X 2002A, MY54490848, Mon Mar 22 19:21:51 2021



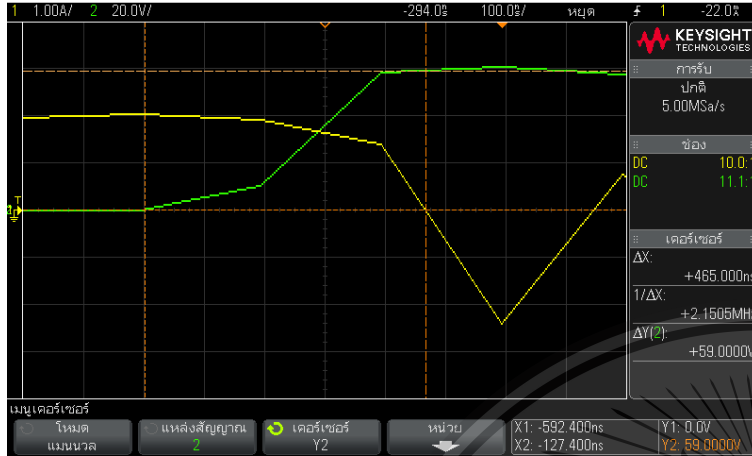
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁷⁹

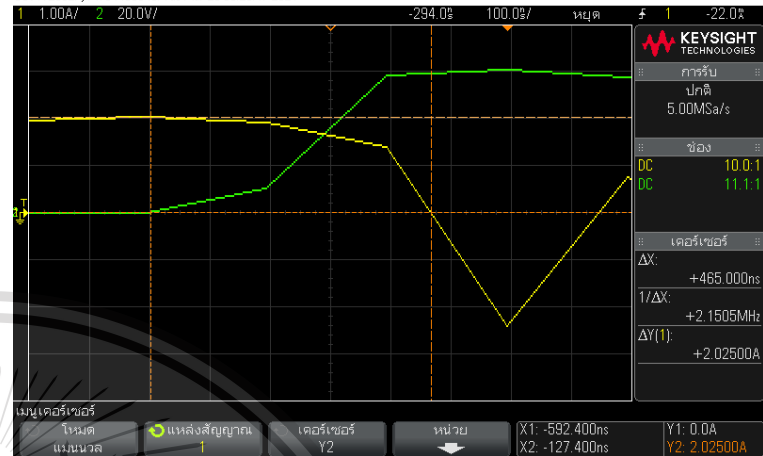
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2 kg MOSFET A Low

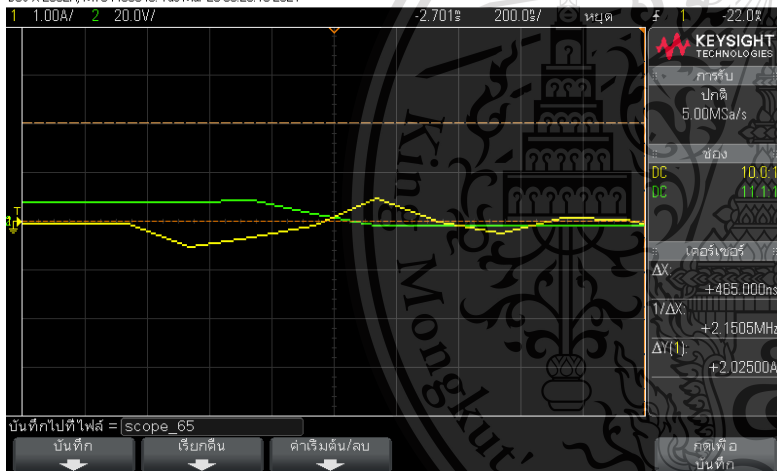
DSO-X 2002A, MY54490848, Tue Mar 23 00:23:26 2021



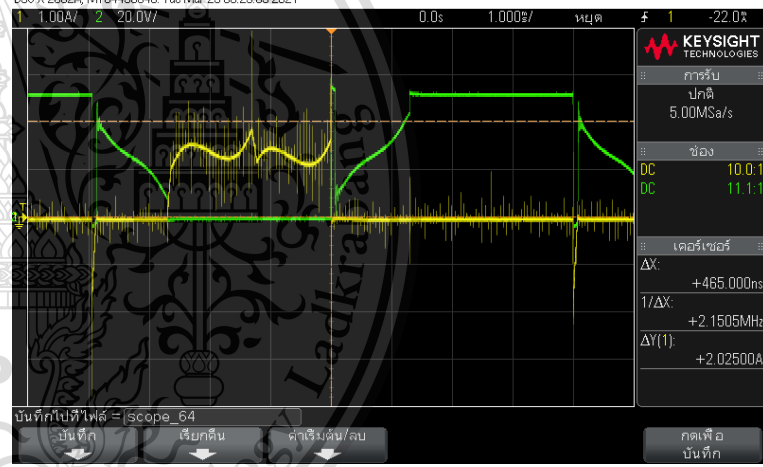
DSO-X 2002A, MY54490848, Tue Mar 23 00:23:47 2021



DSO-X 2002A, MY54490848, Tue Mar 23 00:25:10 2021



DSO-X 2002A, MY54490848, Tue Mar 23 00:23:59 2021



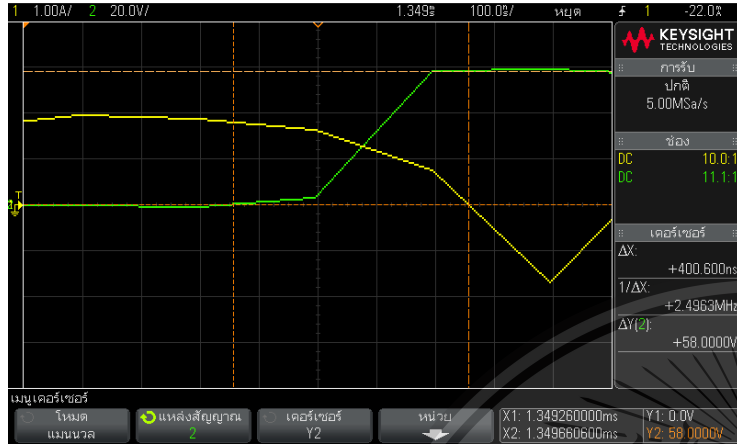
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 80

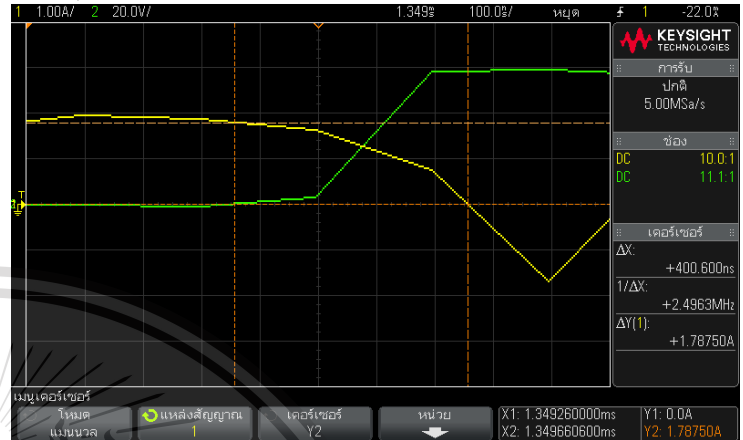
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2 kg MOSFET B Low

DSO-X 2002A, MY54490848 Tue Mar 23 00:34:26 2021



DSO-X 2002A, MY54490848 Tue Mar 23 00:34:53 2021



DSO-X 2002A, MY54490848 Tue Mar 23 00:36:30 2021



DSO-X 2002A, MY54490848 Tue Mar 23 00:35:05 2021

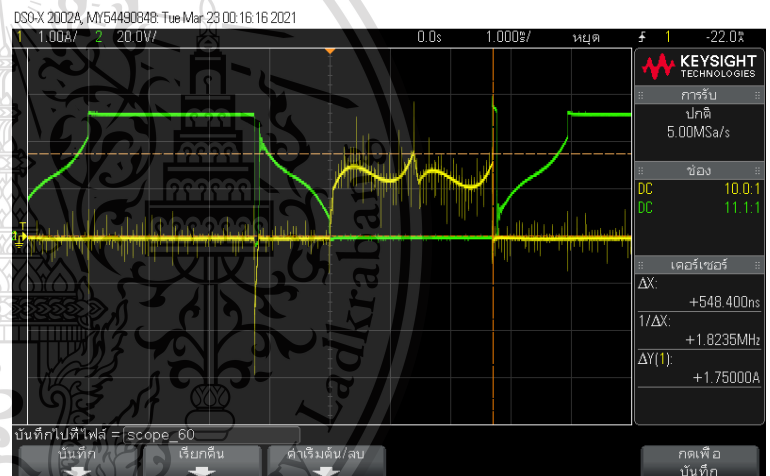
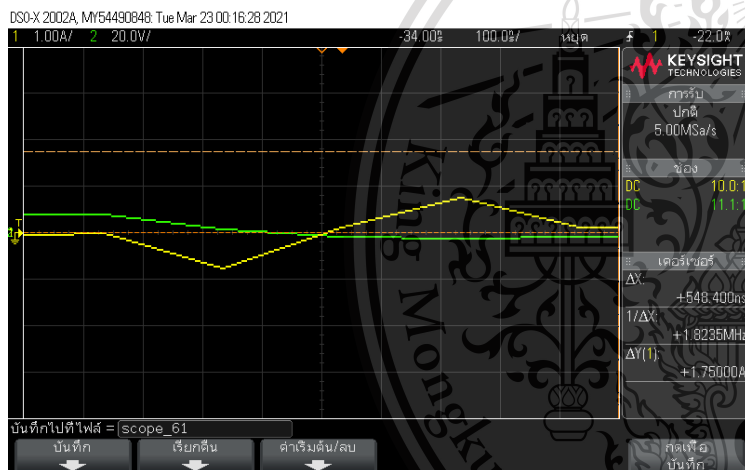
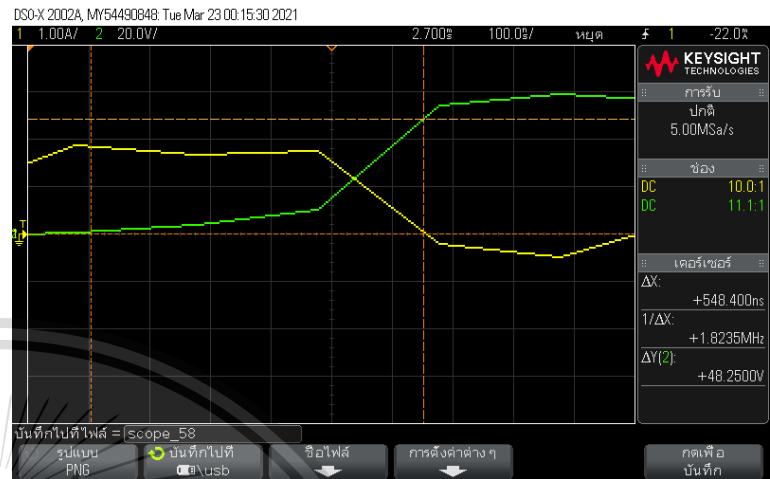
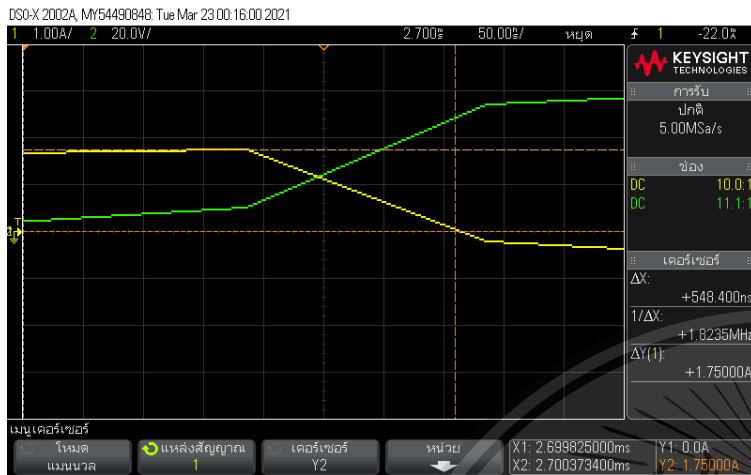


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 81

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2 kg MOSFET C Low

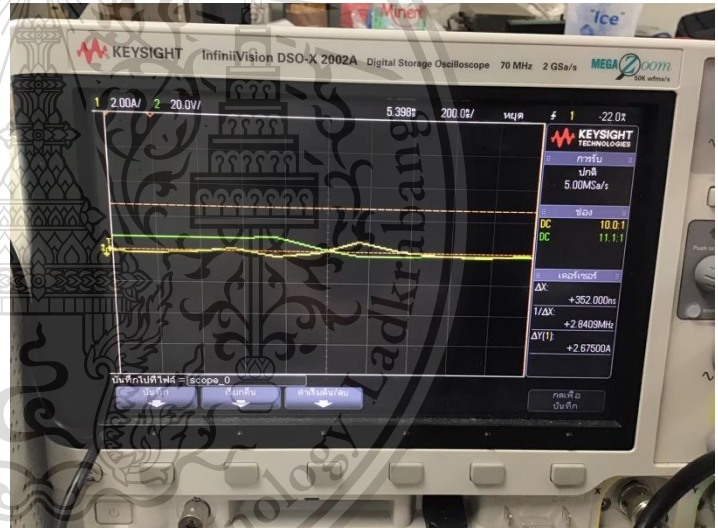
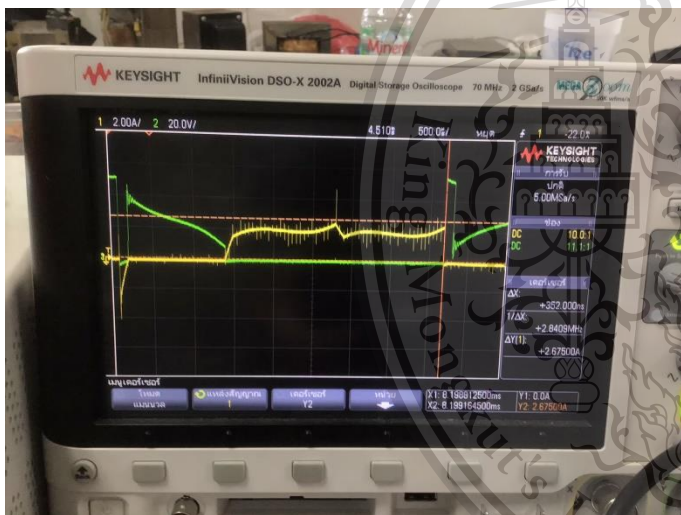
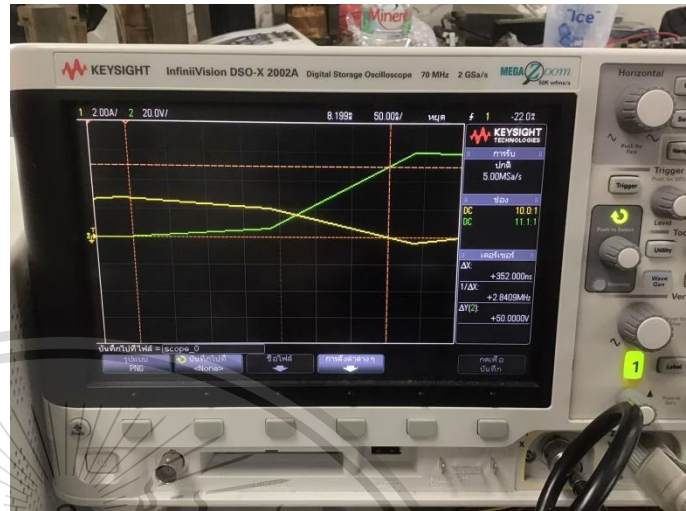
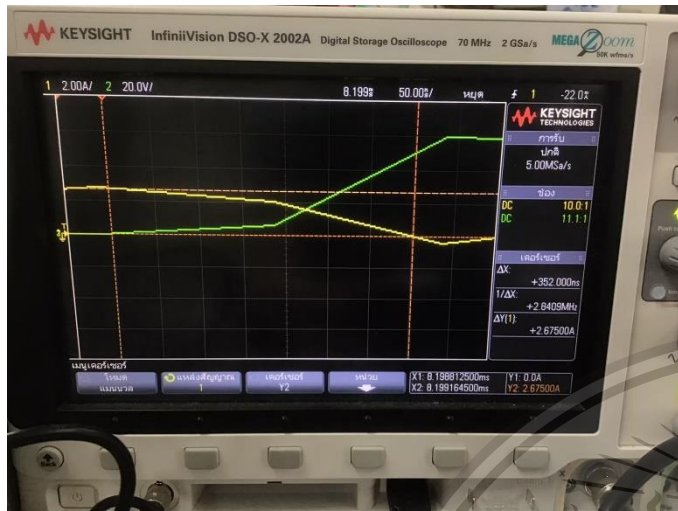


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 82

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3 kg MOSFET B high

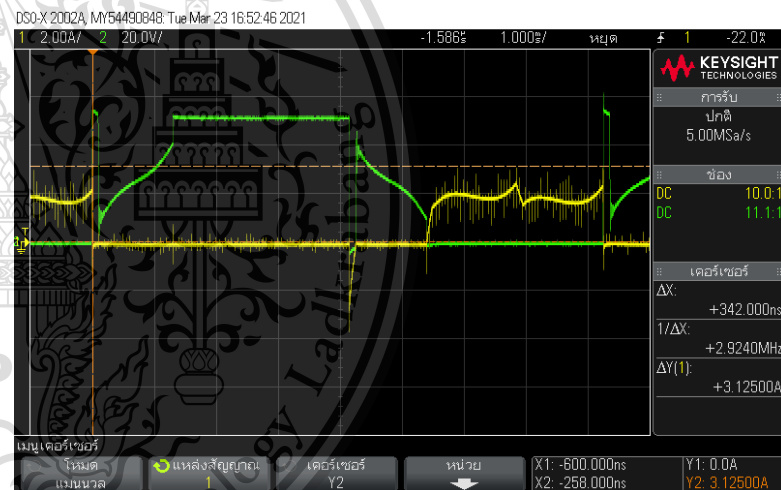
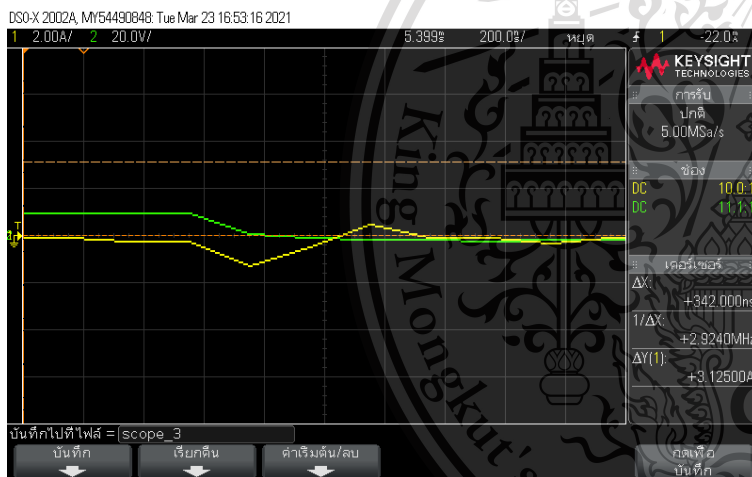
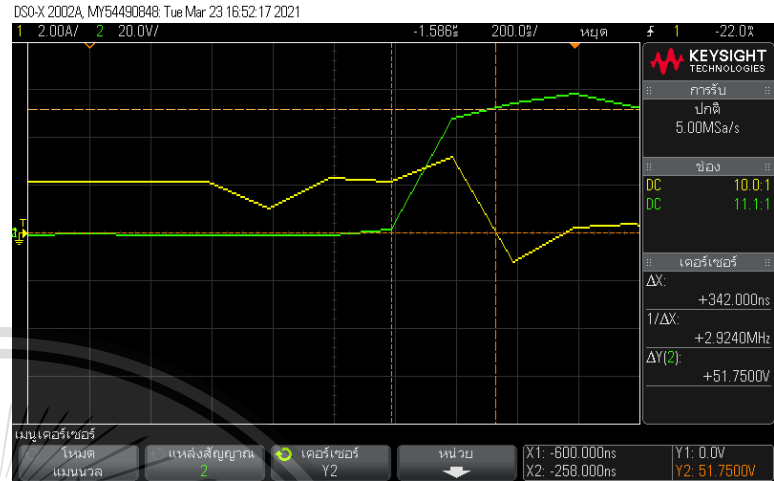
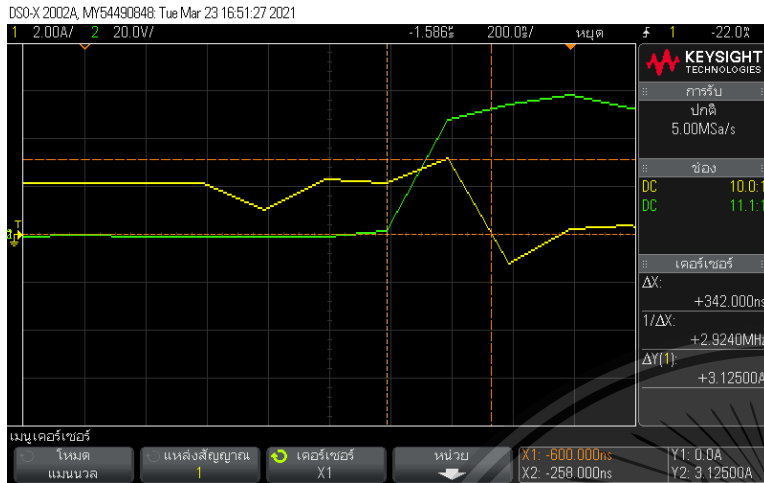


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁸³

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3 kg MOSFET C high

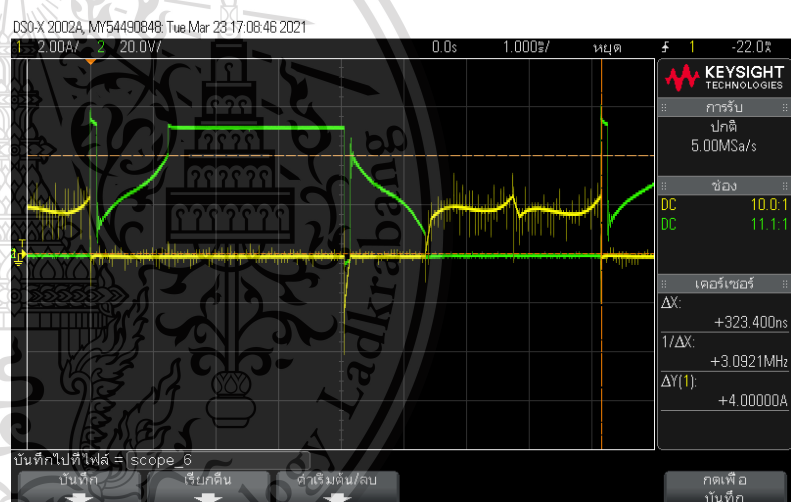
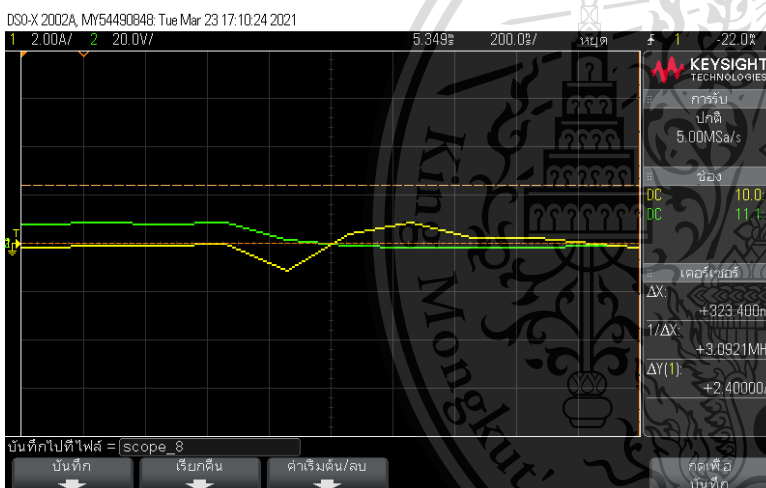
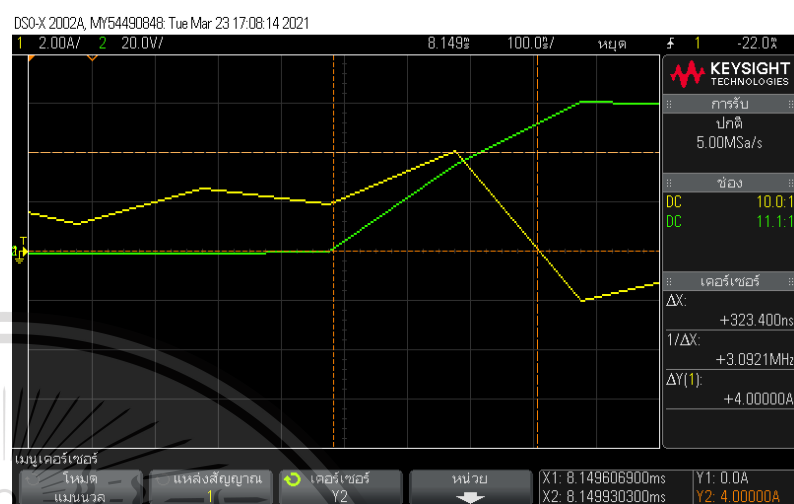
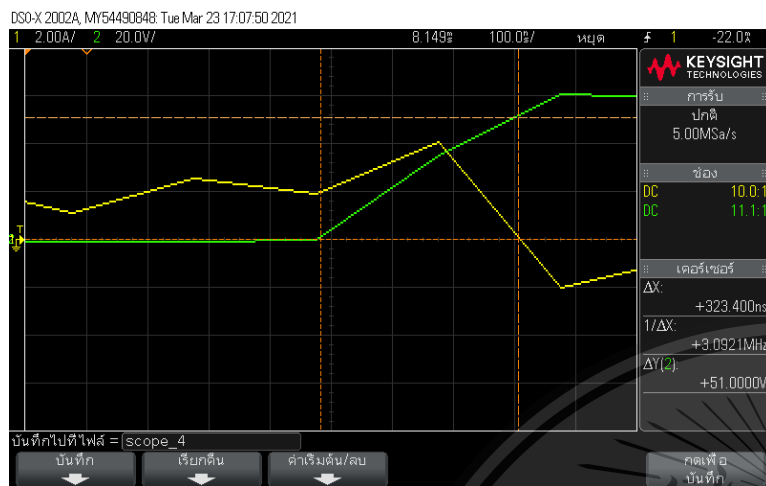


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 84

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3 kg MOSFET A Low

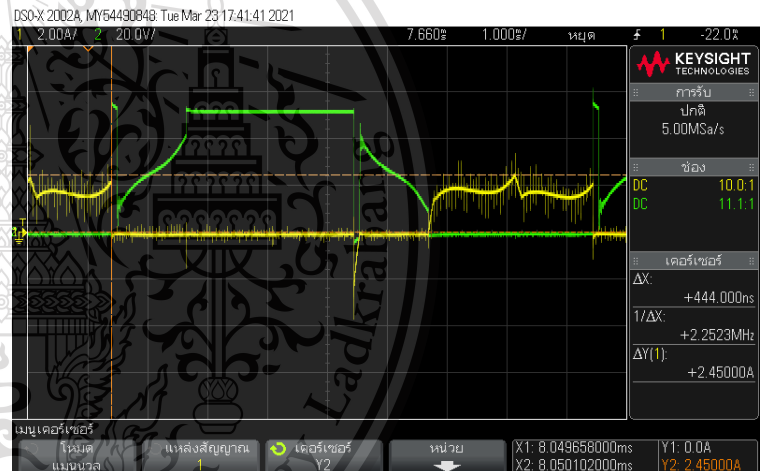
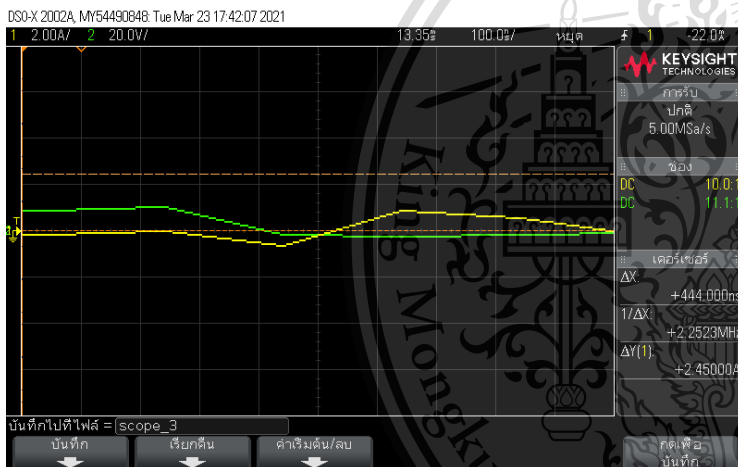
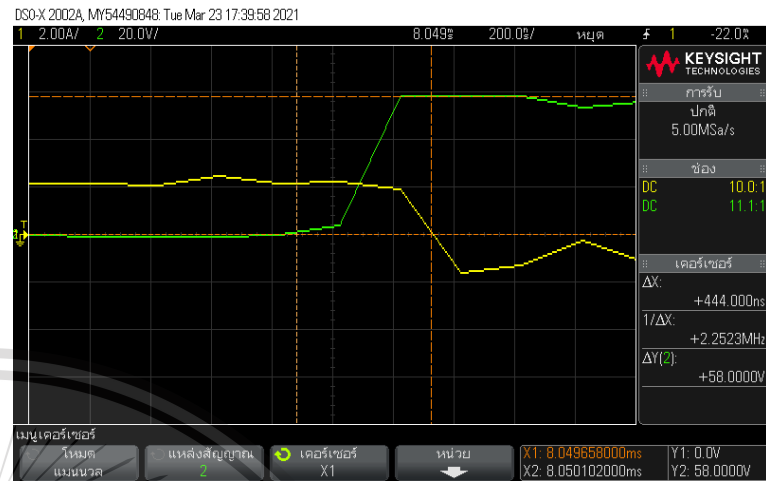
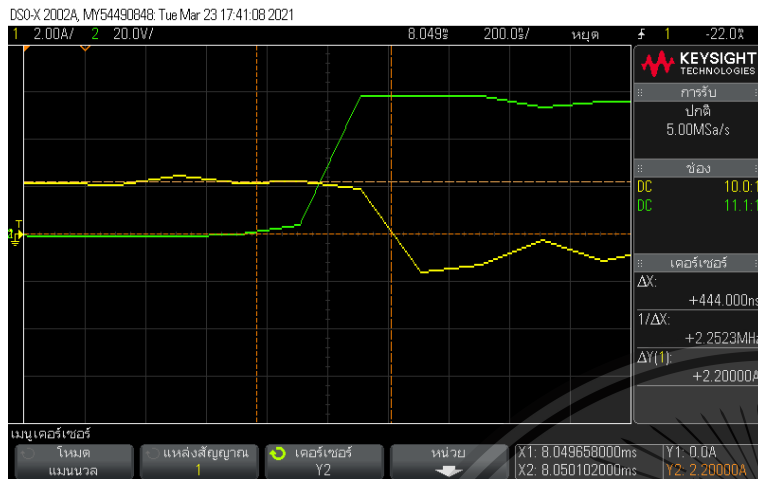


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 85

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3 kg MOSFET B Low

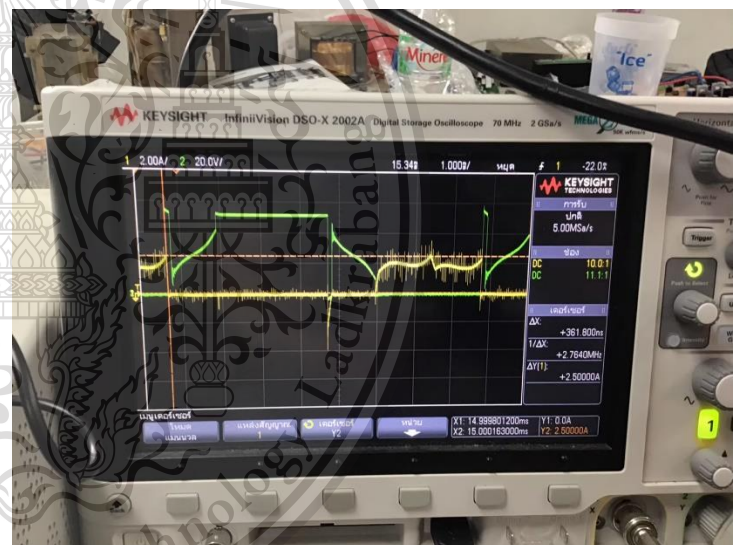
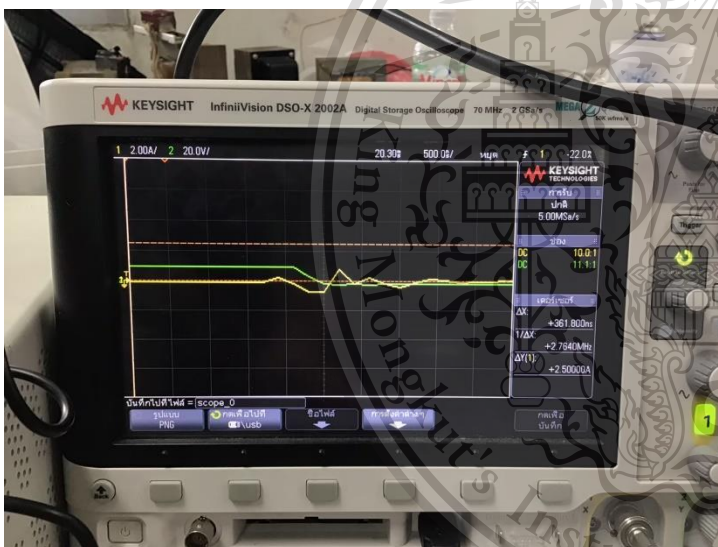


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 86

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3 kg MOSFET C Low



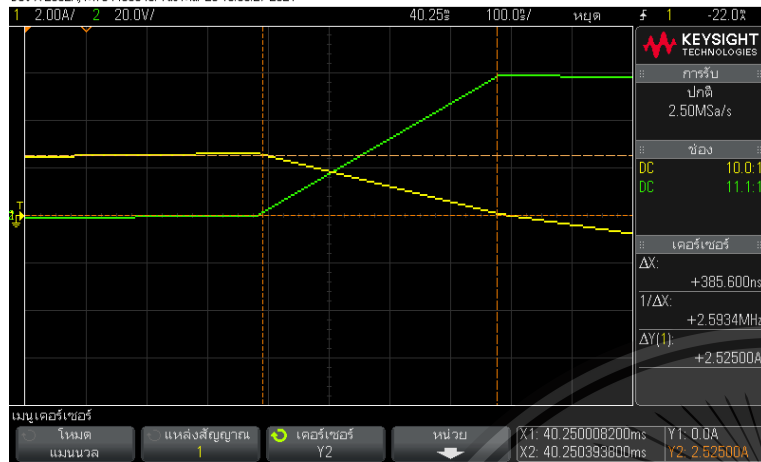
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁸⁷

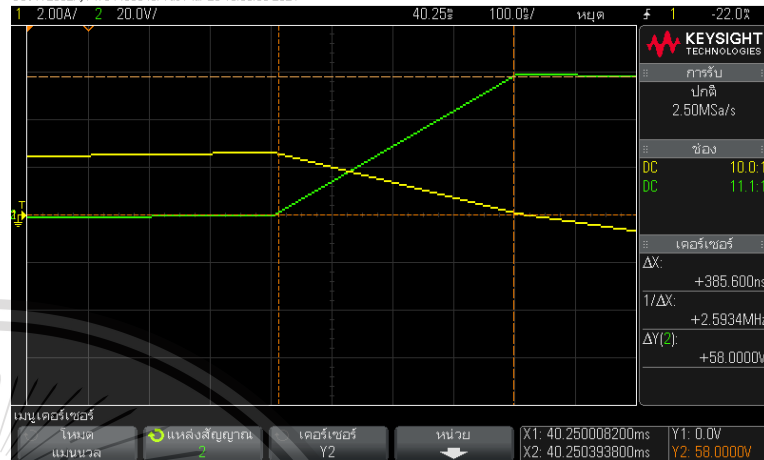
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4 kg MOSFET B High

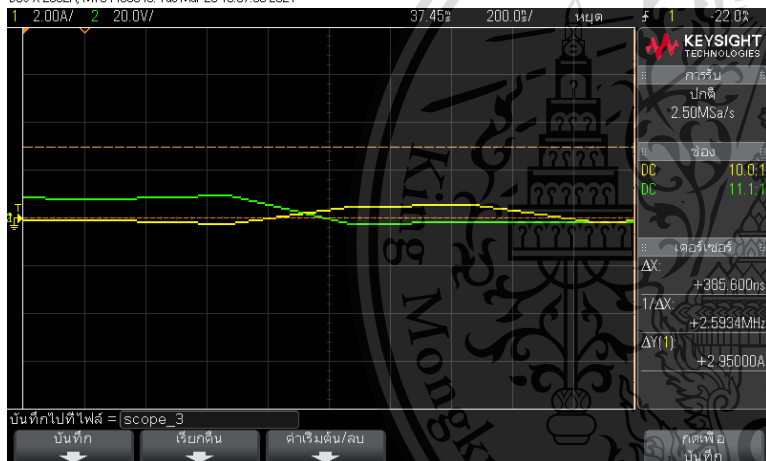
DSO-X 2002A, MY54490848, Tue Mar 23 18:55:27 2021



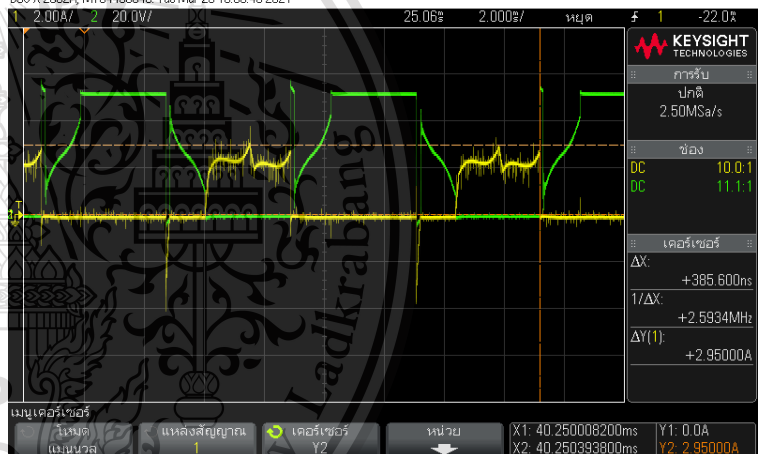
DSO-X 2002A, MY54490848, Tue Mar 23 18:56:05 2021



DSO-X 2002A, MY54490848, Tue Mar 23 18:57:36 2021



DSO-X 2002A, MY54490848, Tue Mar 23 18:58:40 2021

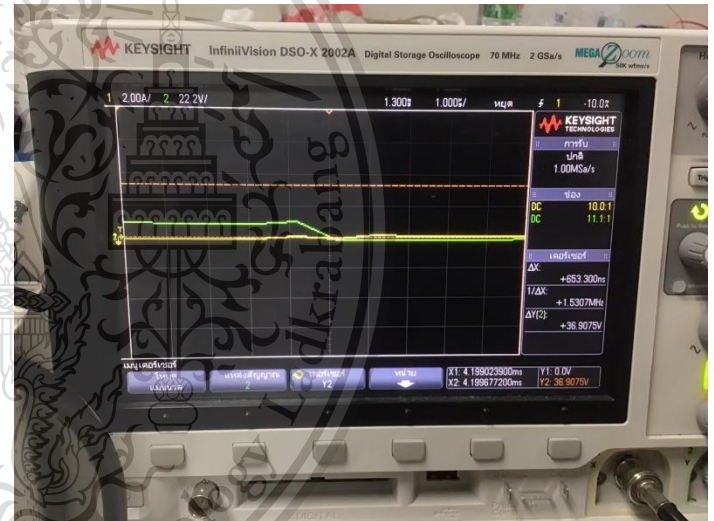
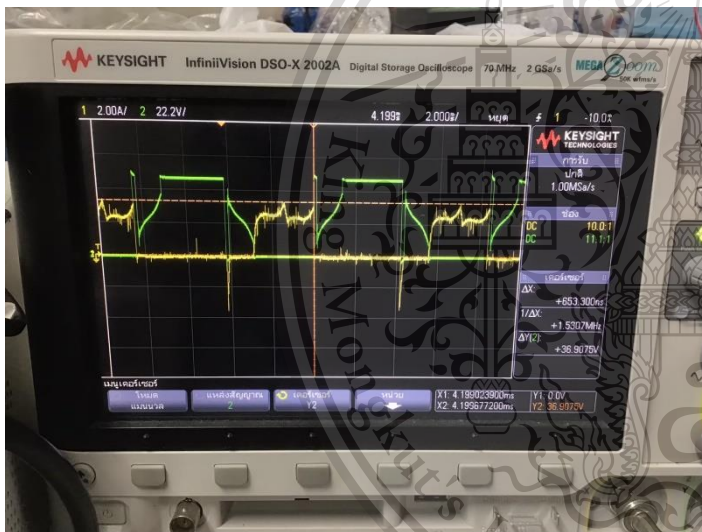


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 88

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4 kg MOSFET C High

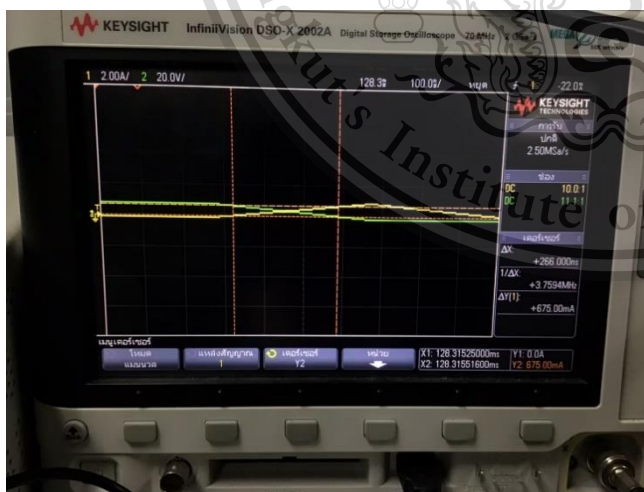
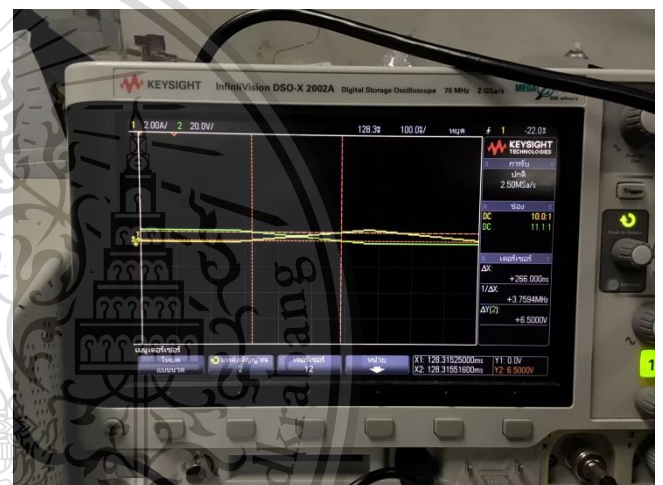
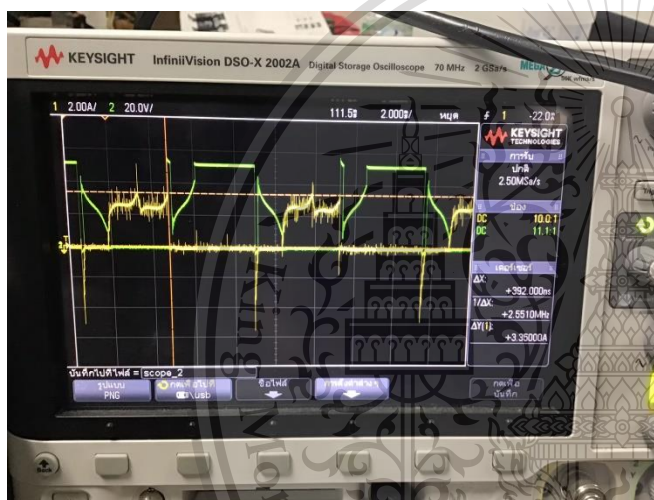
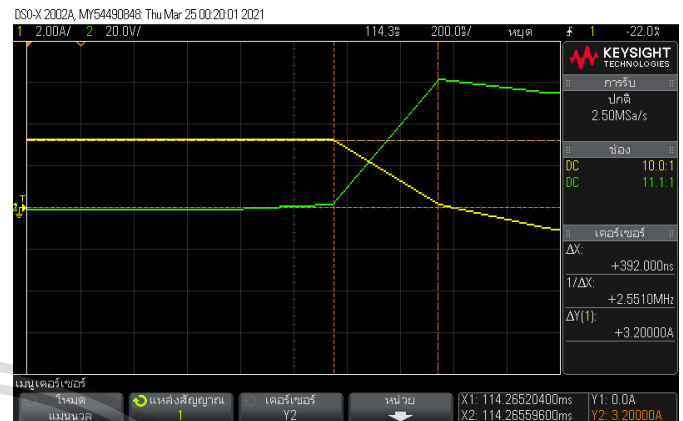
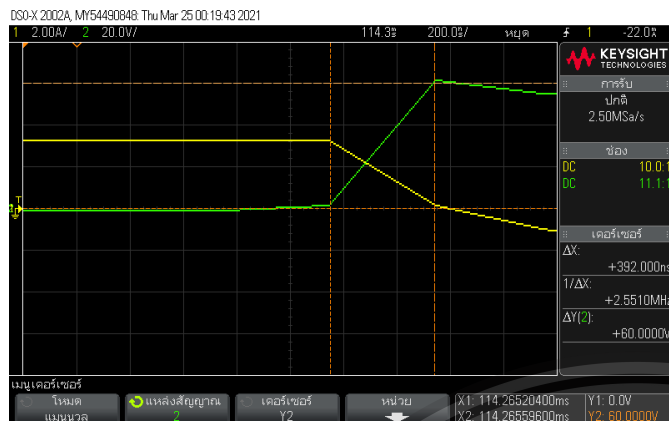


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁸⁹

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4 kg MOSFET A Low

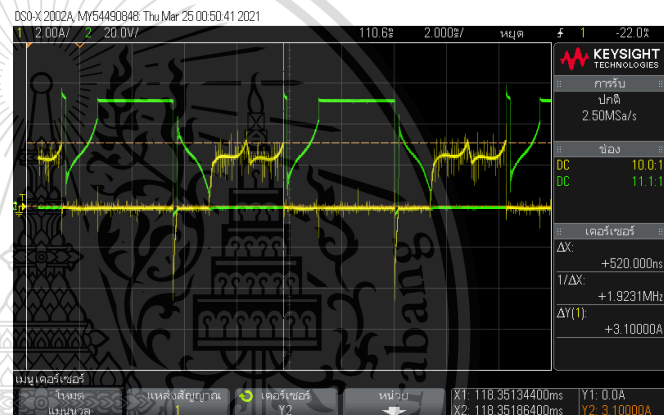
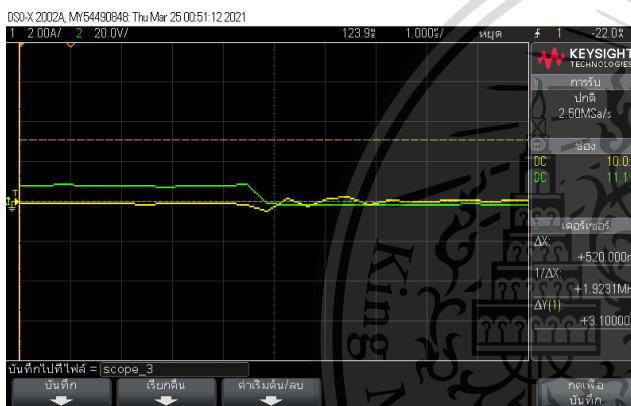
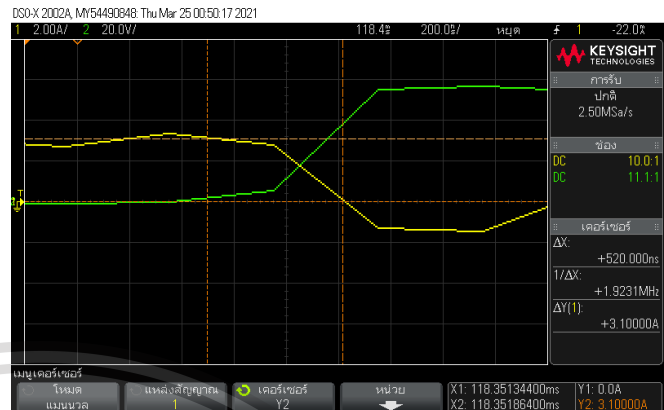
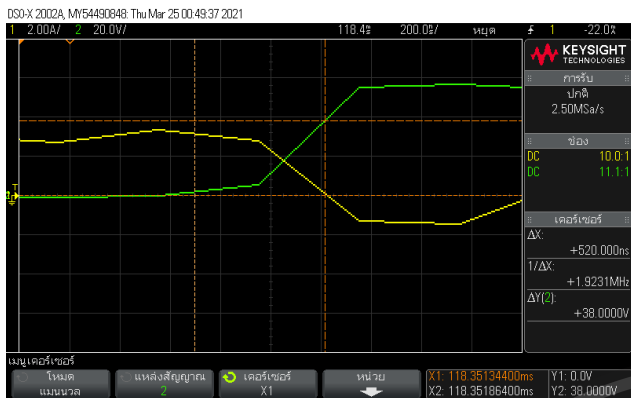


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁹⁰

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4 kg MOSFET B Low

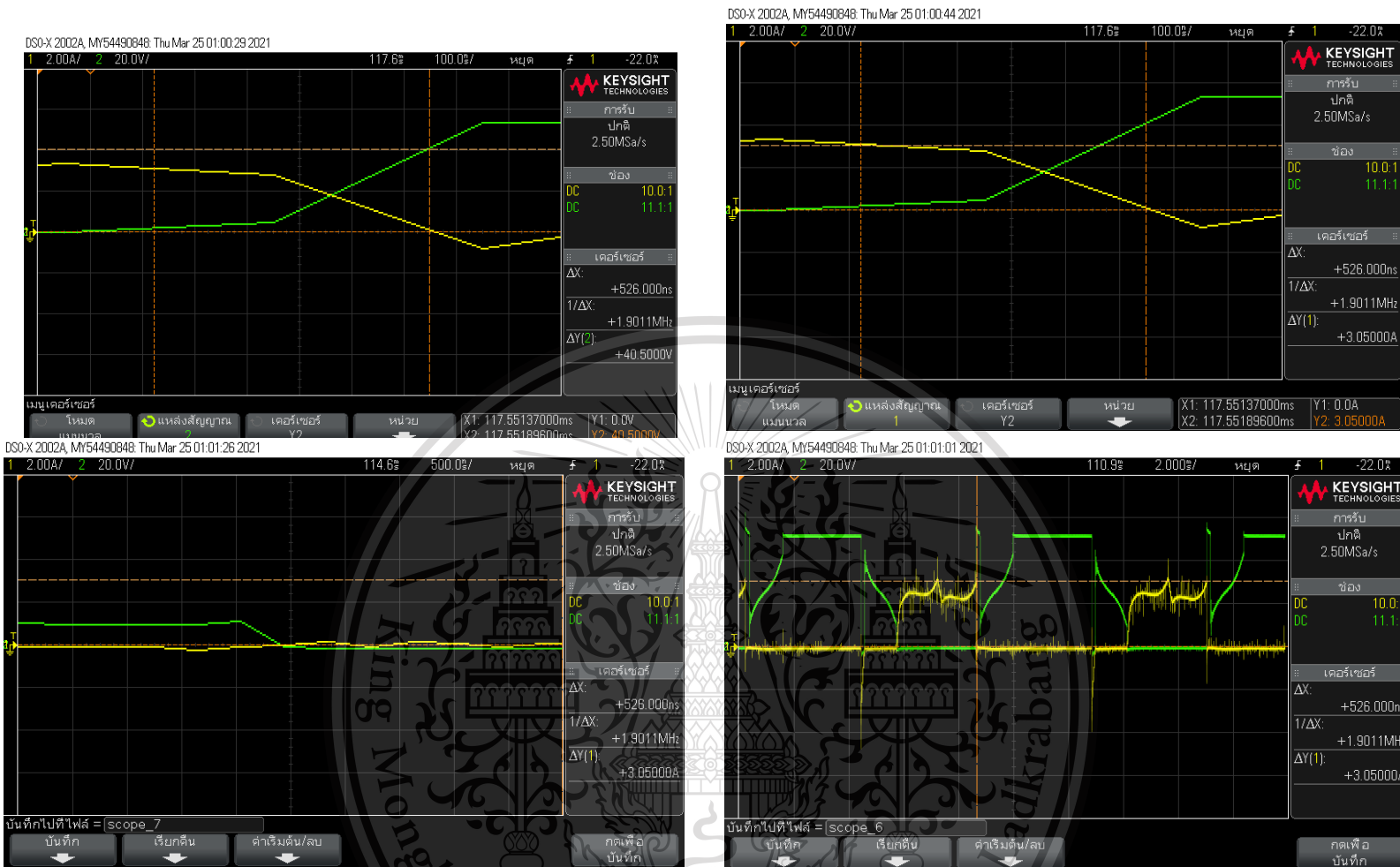


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁹¹

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4 kg MOSFET C Low

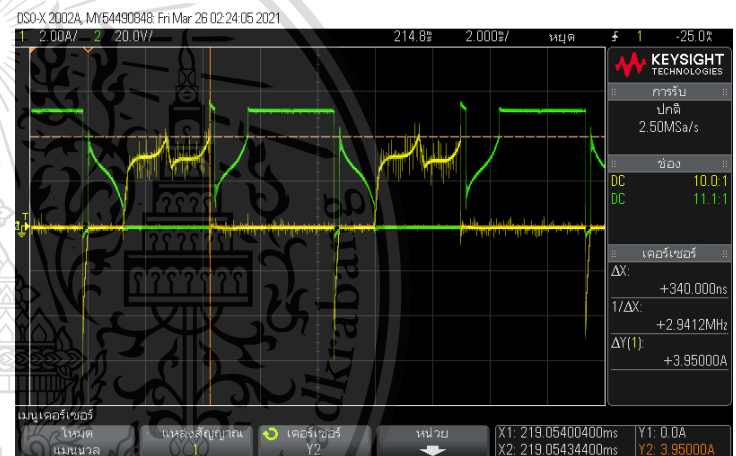
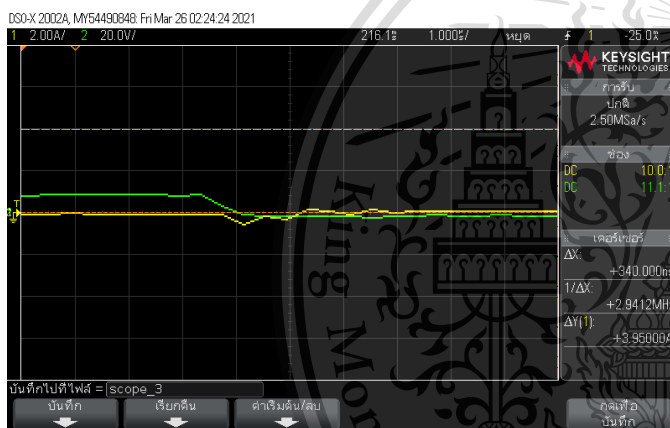
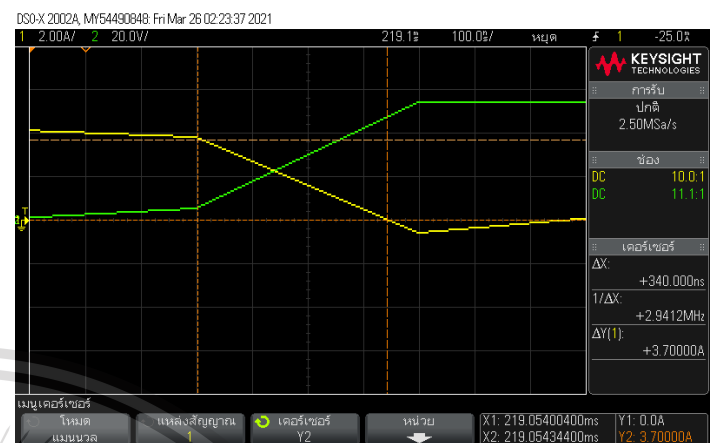
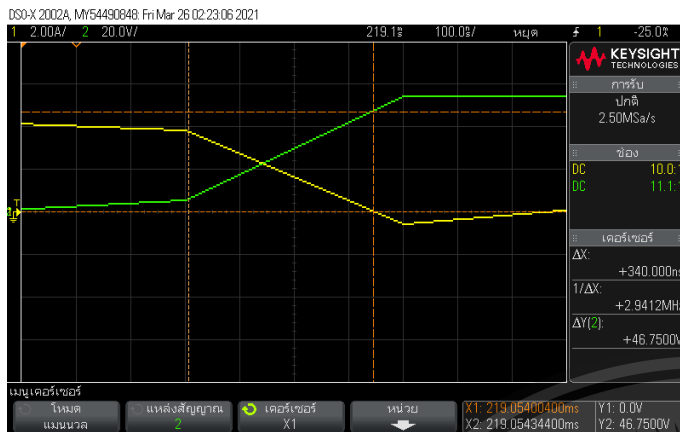


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁹²

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5 kg MOSFET B High

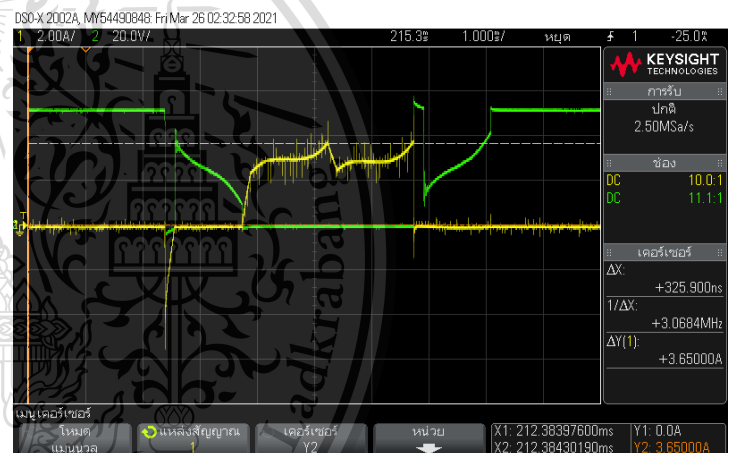
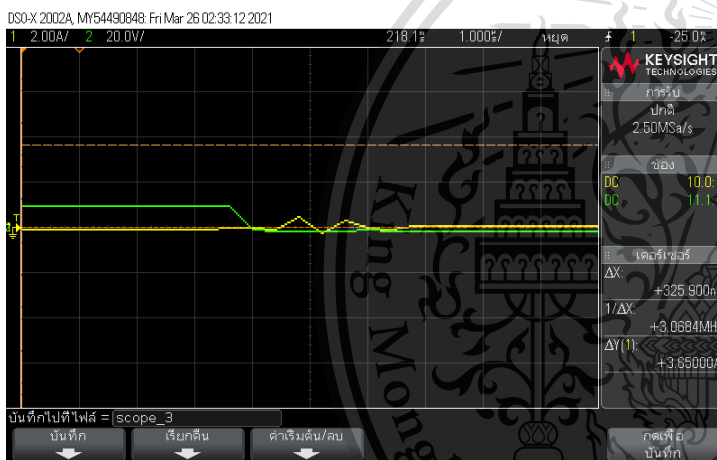
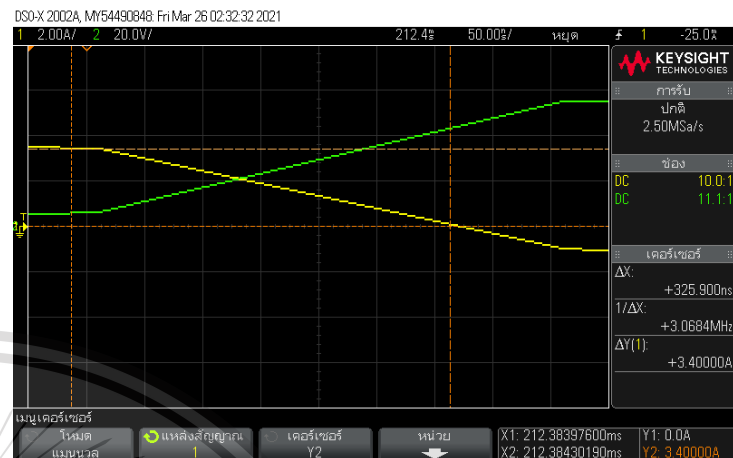
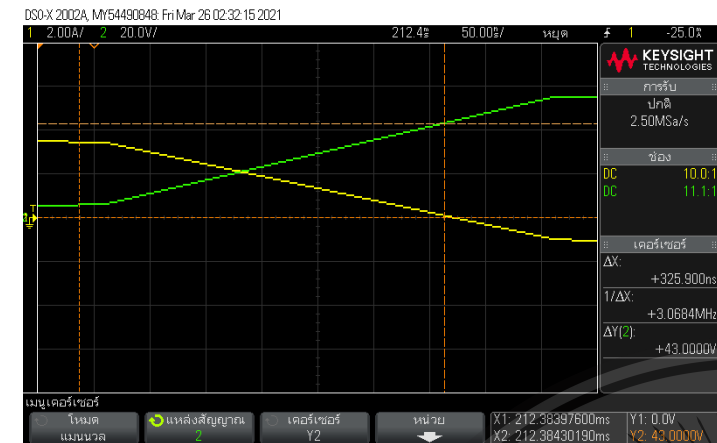


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁹³

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5 kg MOSFET C High

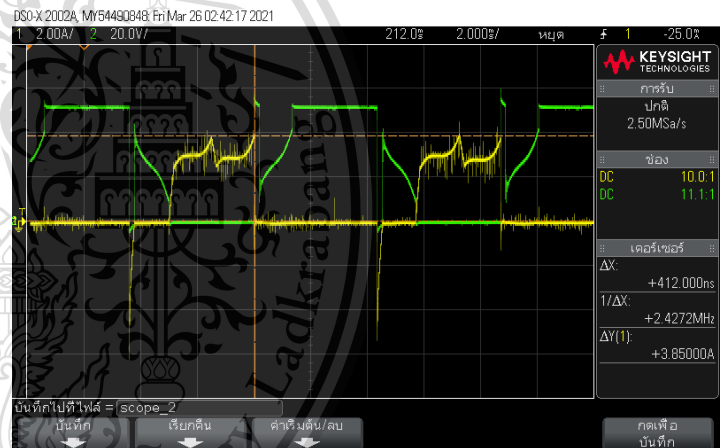
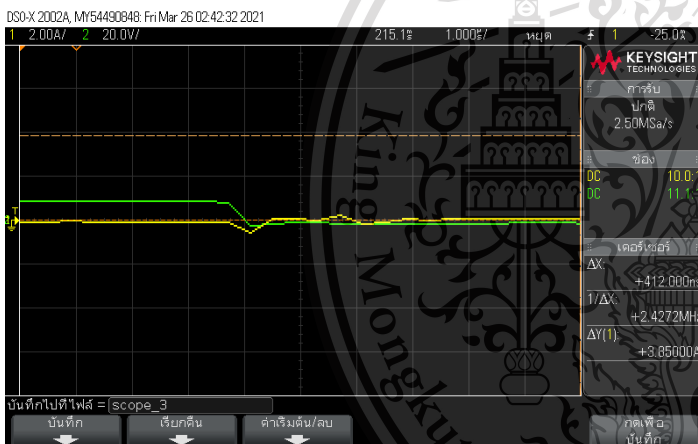
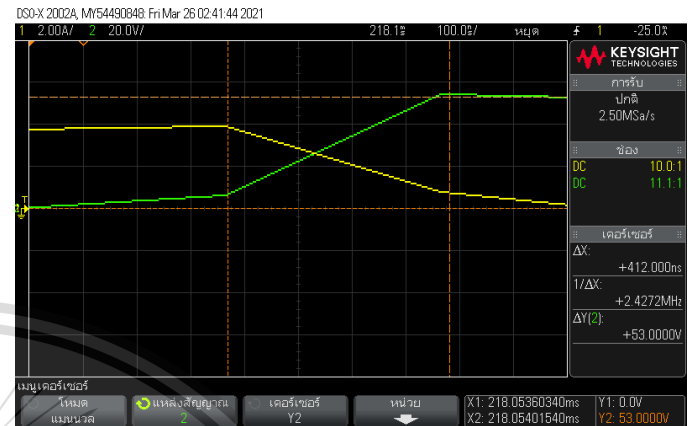
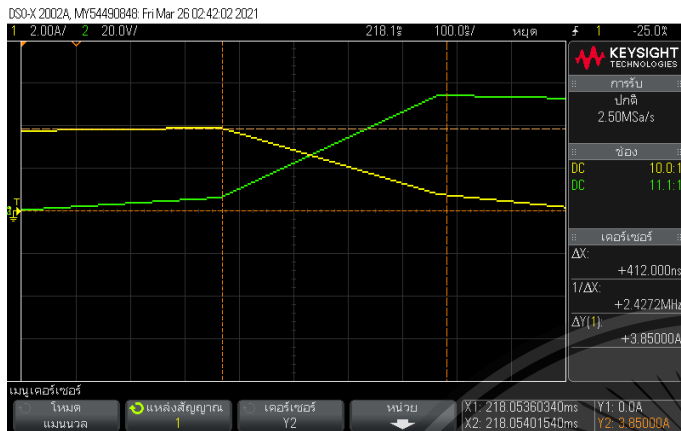


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁹⁴

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5 kg MOSFET A Low

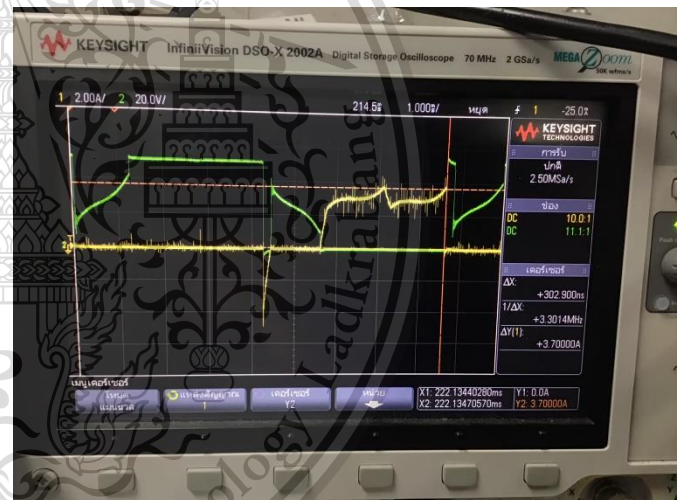
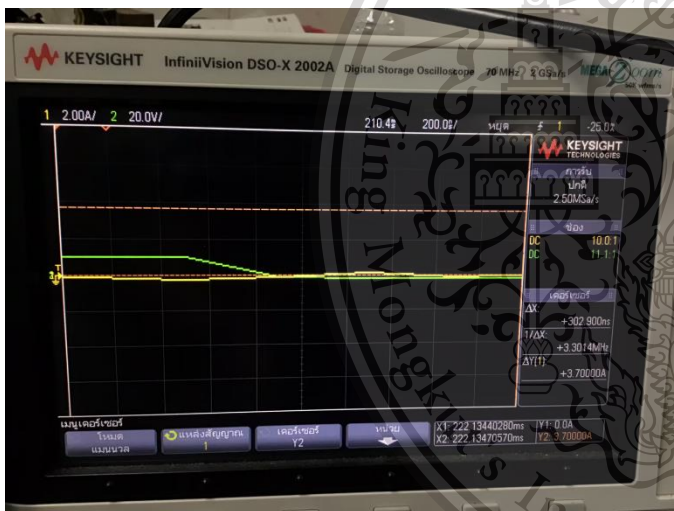


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁹⁵

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5 kg MOSFET B Low

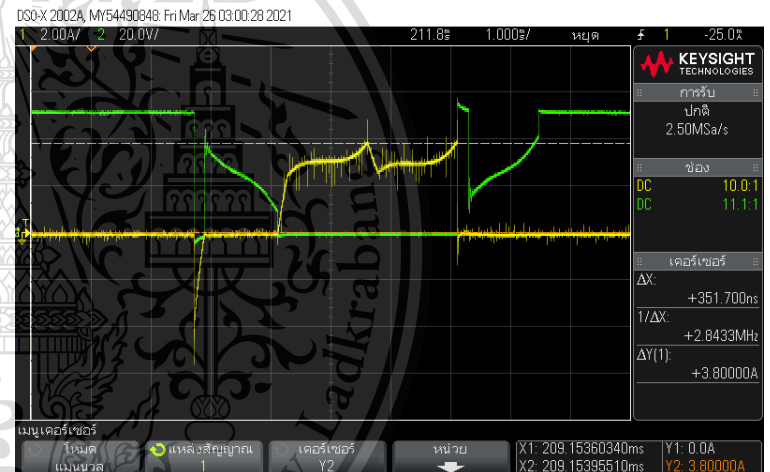
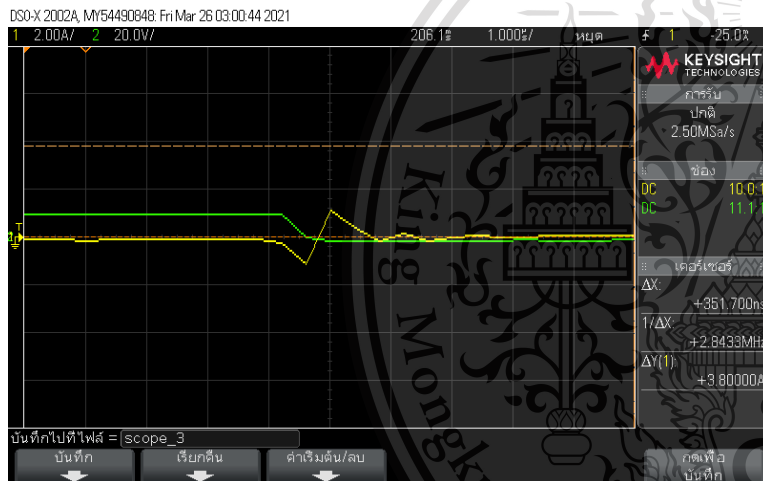
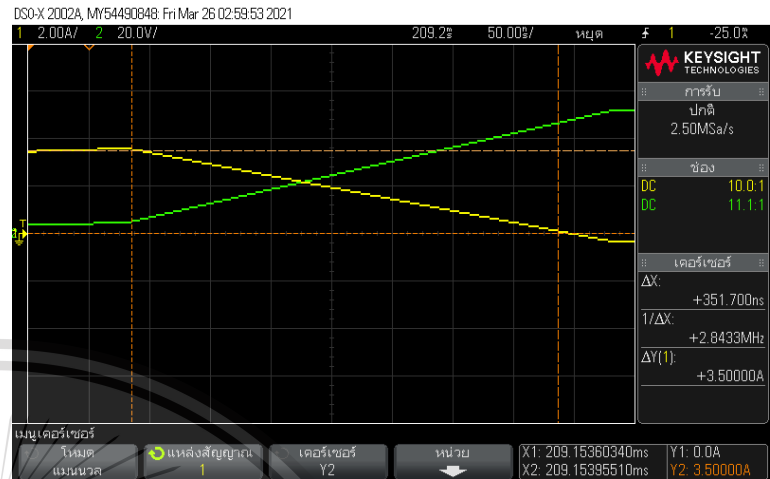
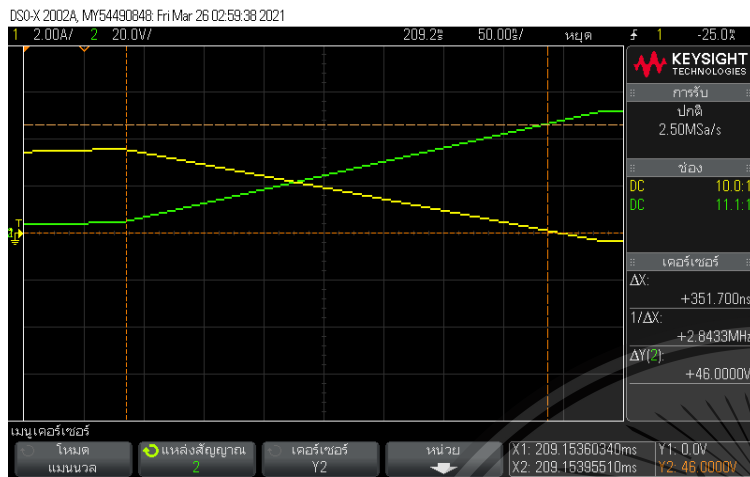


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁹⁶

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5 kg MOSFET C Low

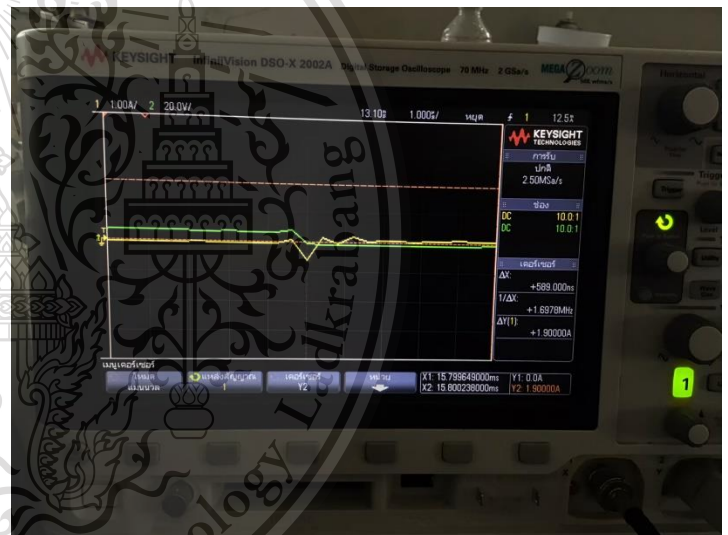
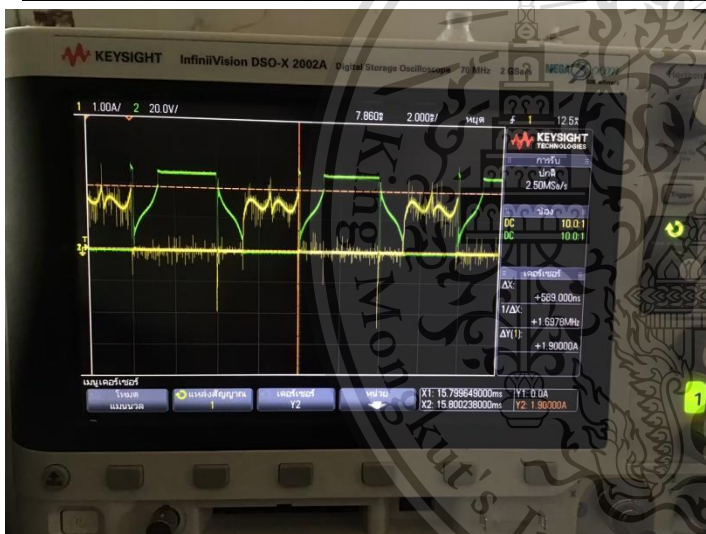
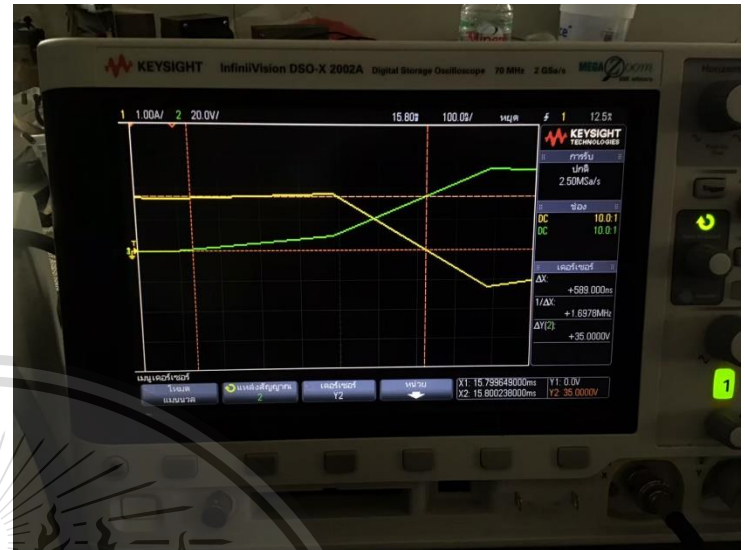
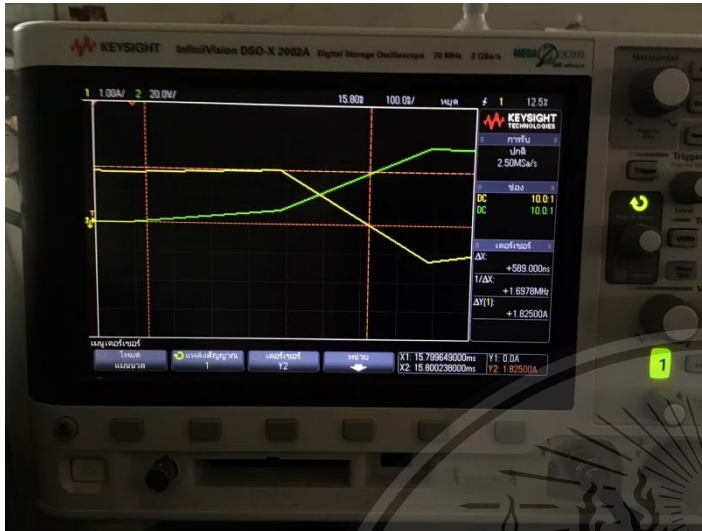


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁹⁷

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2 kg MOSFET B High หลังการปรับปรุง

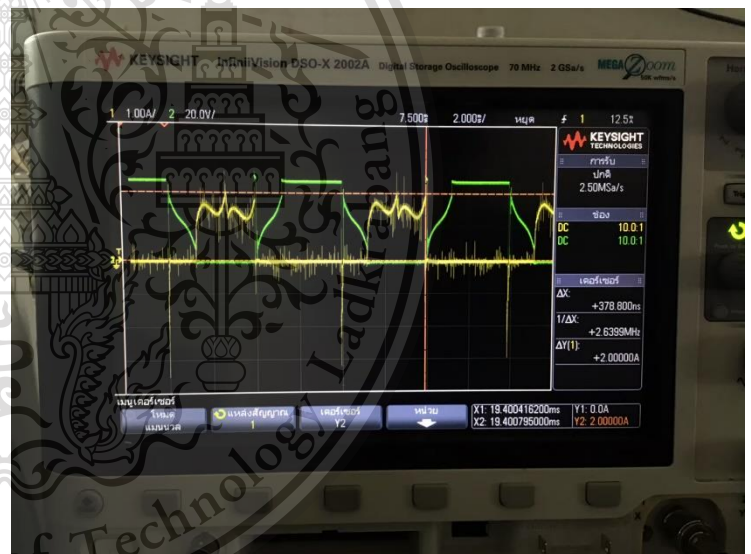
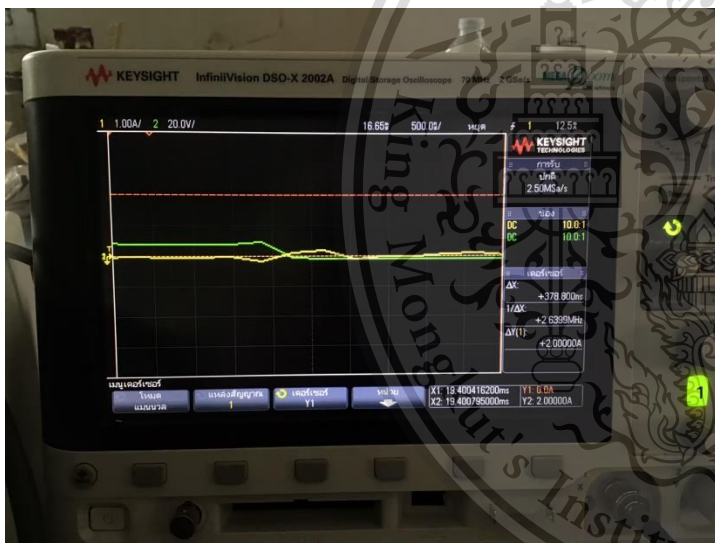


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁹⁸

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2 kg MOSFET C High หลังการปรับปรุง

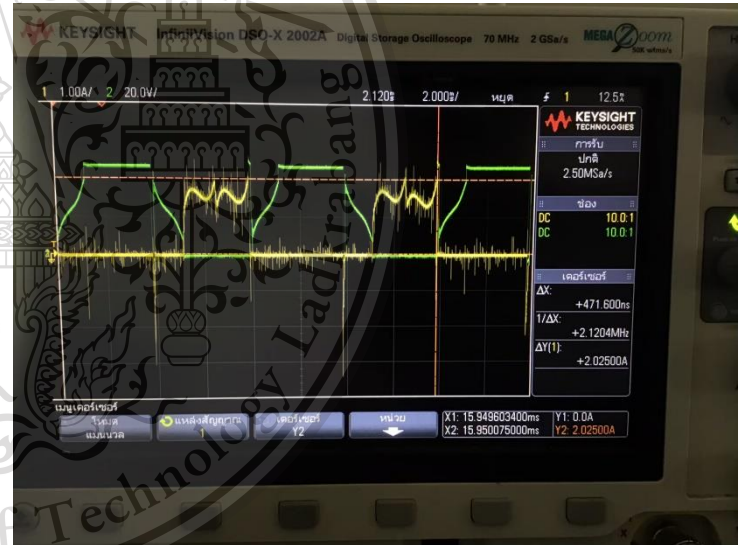
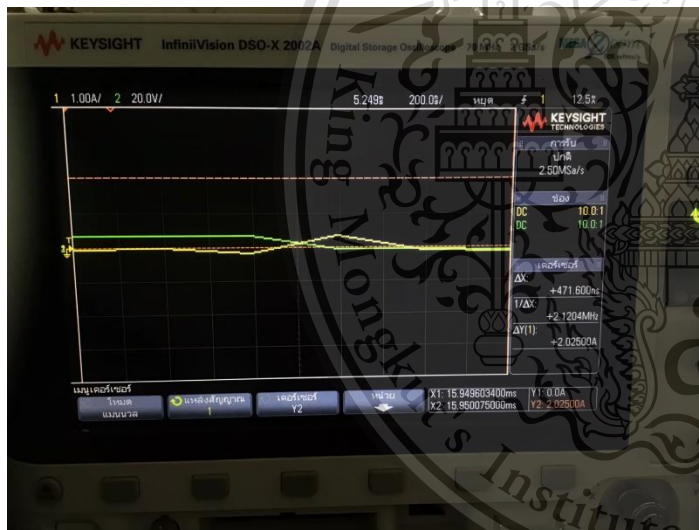


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use⁹⁹

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2 kg MOSFET A Low หลังการปรับปรุง

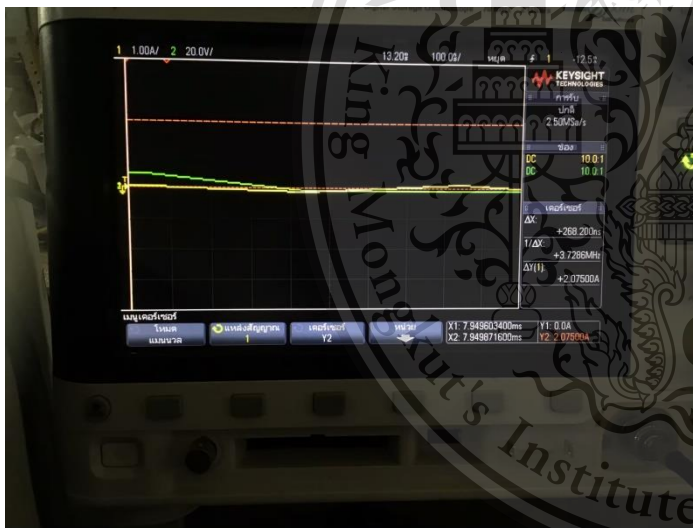
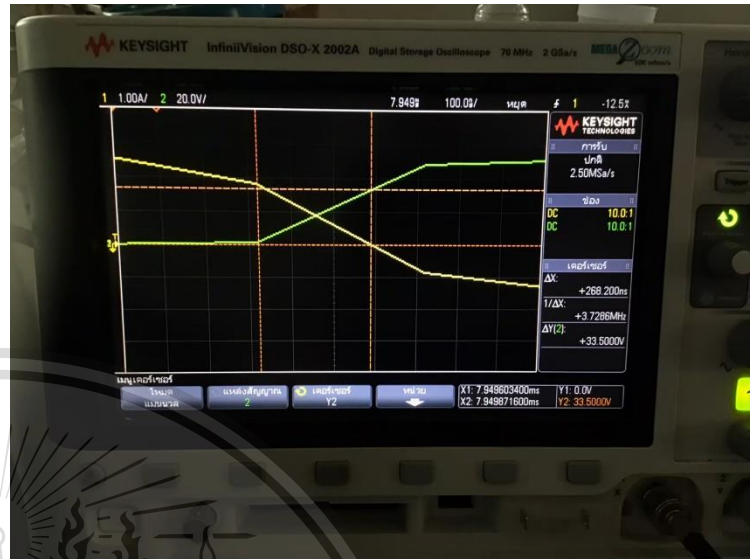
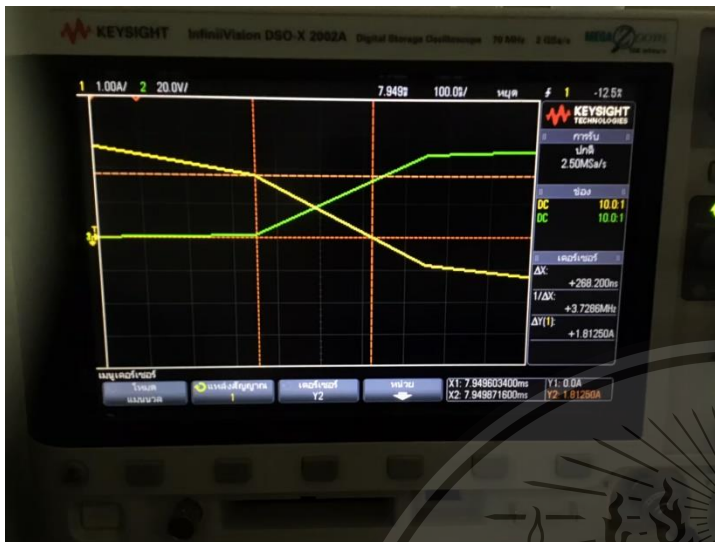


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 100

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2 kg MOSFET B Low หลังการปรับปรุง

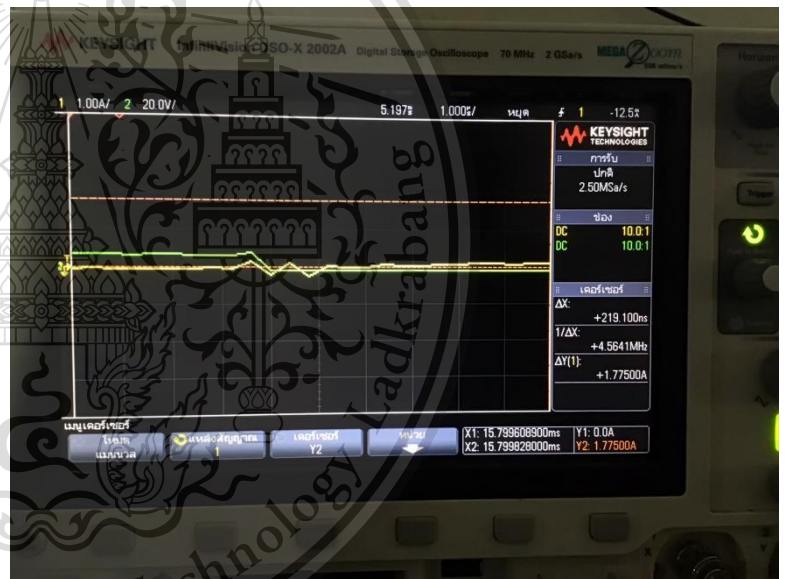
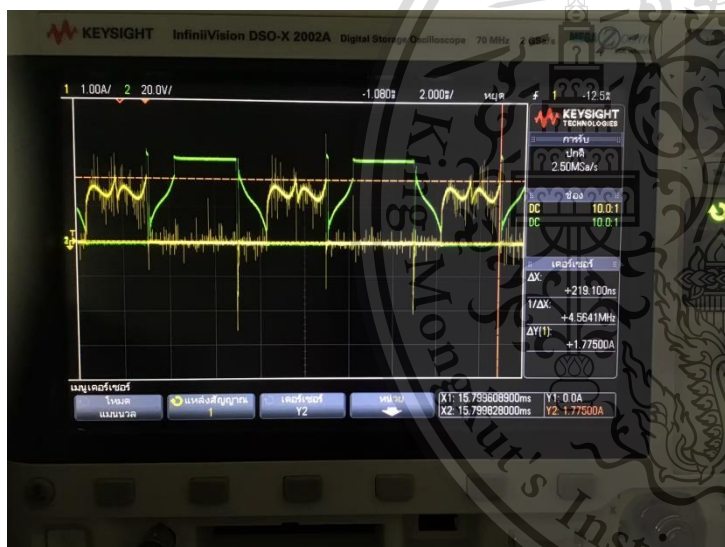
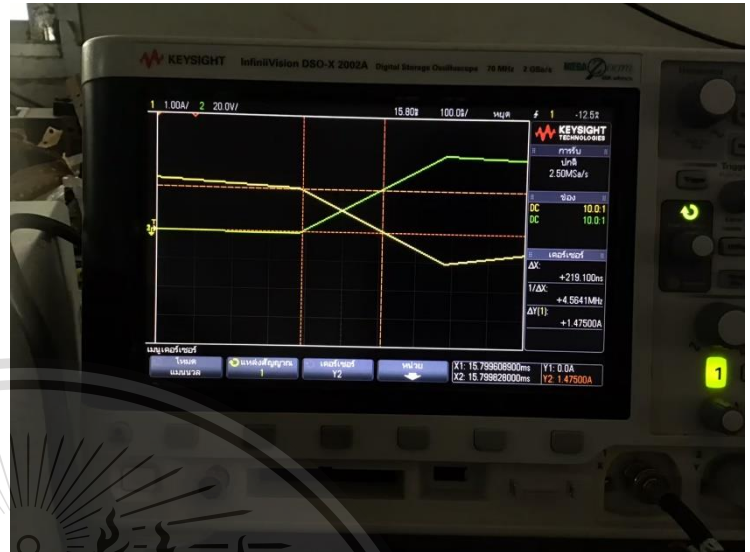
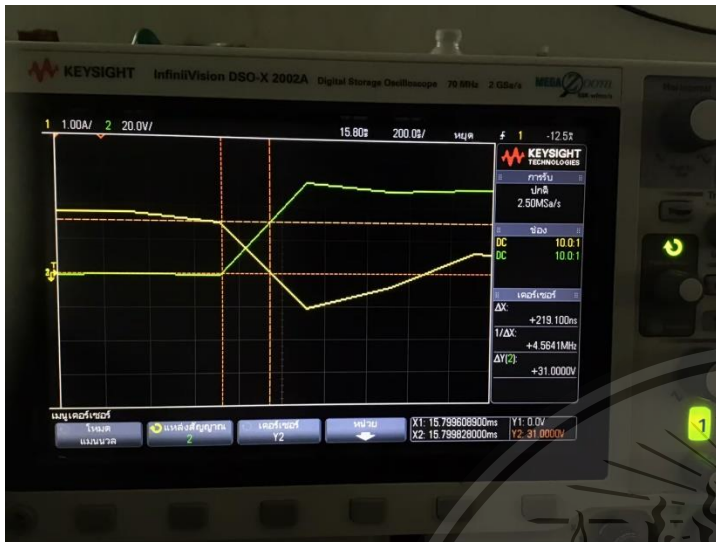


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 101

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2 kg MOSFET C Low หลังการปรับปรุง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 102

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ข

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในการทดลอง

1. LM2575HVT-12/NOPB:12V

LM2575, NCV2575

1.0 A, Adjustable Output Voltage, Step-Down Switching Regulator

The LM2575 series of regulators are monolithic integrated circuits ideally suited for easy and convenient design of a step-down switching regulator (buck converter). All circuits of this series are capable of driving a 1.0 A load with excellent line and load regulation. These devices are available in fixed output voltages of 3.3 V, 5.0 V, 12 V, 15 V, and an adjustable output version.

These regulators were designed to minimize the number of external components to simplify the power supply design. Standard series of inductors optimized for use with the LM2575 are offered by several different inductor manufacturers.

Since the LM2575 converter is a switch-mode power supply, its efficiency is significantly higher in comparison with popular three-terminal linear regulators, especially with higher input voltages. In many cases, the power dissipated by the LM2575 regulator is so low, that no heatsink is required or its size could be reduced dramatically.

The LM2575 features include a guaranteed $\pm 4\%$ tolerance on output voltage within specified input voltages and output load conditions, and $\pm 10\%$ on the oscillator frequency ($\pm 2\%$ over 0°C to 125°C). External shutdown is included, featuring 80 μA typical standby current. The output switch includes cycle-by-cycle current limiting, as well as thermal shutdown for full protection under fault conditions.

Features

- 3.3 V, 5.0 V, 12 V, 15 V, and Adjustable Output Versions
- Adjustable Version Output Voltage Range of 1.23 V to 37 V $\pm 4\%$ Maximum Over Line and Load Conditions
- Guaranteed 1.0 A Output Current
- Wide Input Voltage Range: 4.75 V to 40 V
- Requires Only 4 External Components
- 52 kHz Fixed Frequency Internal Oscillator
- TTL Shutdown Capability, Low Power Standby Mode
- High Efficiency
- Uses Readily Available Standard Inductors
- Thermal Shutdown and Current Limit Protection
- Moisture Sensitivity Level (MSL) Equals 1
- Pb-Free Packages are Available*

Applications

- Simple and High-Efficiency Step-Down (Buck) Regulators
- Efficient Pre-Regulator for Linear Regulators
- On-Card Switching Regulators
- Positive to Negative Converters (Buck-Boost)
- Negative Step-Up Converters
- Power Supply for Battery Chargers

*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

TO-220
TV SUFFIX
CASE 314B

Heatsink surface connected to Pin 3

TO-220
T SUFFIX
CASE 314D

Pin 1: V_{in}
2: Output
3: Ground
4: Feedback
5: ON/OFF

DPAK
D2T SUFFIX
CASE 936A

Heatsink surface (shown as terminal 6 in case outline drawing) is connected to Pin 3

ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 25 of this data sheet.

DEVICE MARKING INFORMATION

See general marking information in the device marking section on page 26 of this data sheet.

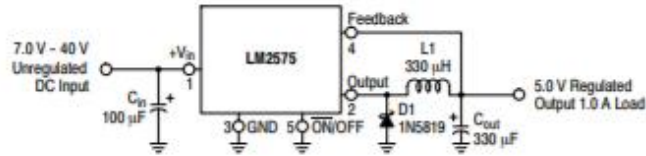
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 103

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

LM2575, NCV2575

Typical Application (Fixed Output Voltage Versions)



Representative Block Diagram and Typical Application

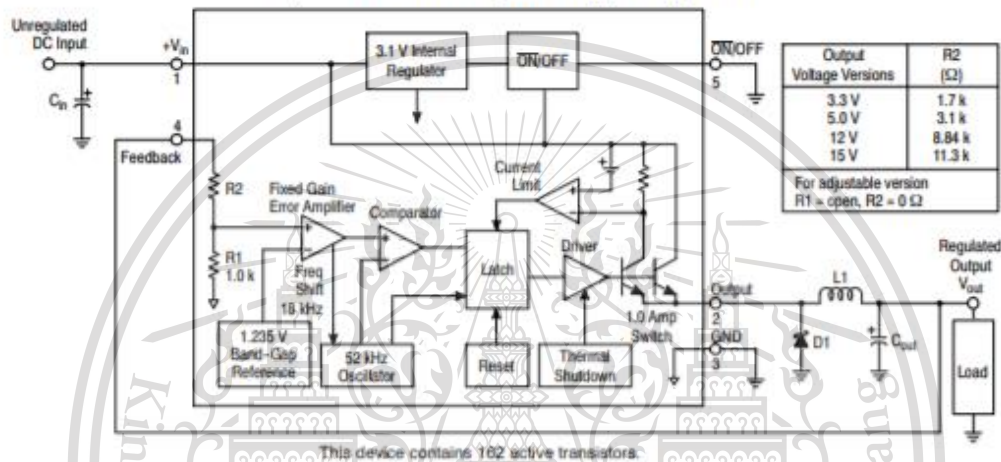


Figure 1. Block Diagram and Typical Application

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Maximum Supply Voltage	V_{in}	45	V
ON/OFF Pin Input Voltage	-	$-0.3 \text{ V} \leq V \leq +V_{in}$	V
Output Voltage to Ground (Steady-State)	-	-1.0	V
Power Dissipation			
Case 314B and 314D (TQ-220, 5-Lead)	P_D	Internally Limited	W
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	65	$^{\circ}\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$	5.0	$^{\circ}\text{C/W}$
Case 936A (D ² PAK)	P_D	Internally Limited	W
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient (Figure 34)	$R_{\theta JA}$	70	$^{\circ}\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$	5.0	$^{\circ}\text{C/W}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-65 to +150	$^{\circ}\text{C}$
Minimum ESD Rating (Human Body Model: $C = 100 \text{ pF}$, $R = 1.5 \text{ k}\Omega$)	-	2.0	kV
Lead Temperature (Soldering, 10 s)	-	260	$^{\circ}\text{C}$
Maximum Junction Temperature	T_J	150	$^{\circ}\text{C}$

Stresses exceeding Maximum Ratings may damage the device. Maximum Ratings are stress ratings only. Functional operation above the Recommended Operating Conditions is not implied. Extended exposure to stresses above the Recommended Operating Conditions may affect device reliability.

<http://onsemi.com>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 104

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

LM2575, NCV2575

OPERATING RATINGS (Operating Ratings indicate conditions for which the device is intended to be functional, but do not guarantee specific performance limits. For guaranteed specifications and test conditions, see the Electrical Characteristics.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Operating Junction Temperature Range	T_J	-40 to +125	$^{\circ}\text{C}$
Supply Voltage	V_{in}	40	V

SYSTEM PARAMETERS ([Note 1] Test Circuit Figure 14)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Unless otherwise specified, $V_{in} = 12\text{ V}$ for the 3.3 V, 5.0 V, and Adjustable version, $V_{in} = 25\text{ V}$ for the 12 V version, and $V_{in} = 30\text{ V}$ for the 15 V version. $I_{Load} = 200\text{ mA}$. For typical values $T_J = 25^{\circ}\text{C}$, for min/max values T_J is the operating junction temperature range that applies [Note 2], unless otherwise noted.)

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
LM2575-3.3 (Note 1 Test Circuit Figure 14)					
Output Voltage ($V_{in} = 12\text{ V}$, $I_{Load} = 0.2\text{ A}$, $T_J = 25^{\circ}\text{C}$)	V_{out}	3.234	3.3	3.366	V
Output Voltage ($4.75\text{ V} \leq V_{in} \leq 40\text{ V}$, $0.2\text{ A} \leq I_{Load} \leq 1.0\text{ A}$) $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ $T_J = -40\text{ to }+125^{\circ}\text{C}$	V_{out}	3.168 3.135	3.3 —	3.432 3.465	V
Efficiency ($V_{in} = 12\text{ V}$, $I_{Load} = 1.0\text{ A}$)	η	—	75	—	%
LM2575-5 ([Note 1] Test Circuit Figure 14)					
Output Voltage ($V_{in} = 12\text{ V}$, $I_{Load} = 0.2\text{ A}$, $T_J = 25^{\circ}\text{C}$)	V_{out}	4.9	5.0	5.1	V
Output Voltage ($8.0\text{ V} \leq V_{in} \leq 40\text{ V}$, $0.2\text{ A} \leq I_{Load} \leq 1.0\text{ A}$) $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ $T_J = -40\text{ to }+125^{\circ}\text{C}$	V_{out}	4.8 4.75	5.0 —	5.2 5.25	V
Efficiency ($V_{in} = 12\text{ V}$, $I_{Load} = 1.0\text{ A}$)	η	—	77	—	%
LM2575-12 (Note 1 Test Circuit Figure 14)					
Output Voltage ($V_{in} = 25\text{ V}$, $I_{Load} = 0.2\text{ A}$, $T_J = 25^{\circ}\text{C}$)	V_{out}	11.76	12	12.24	V
Output Voltage ($15\text{ V} \leq V_{in} \leq 40\text{ V}$, $0.2\text{ A} \leq I_{Load} \leq 1.0\text{ A}$) $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ $T_J = -40\text{ to }+125^{\circ}\text{C}$	V_{out}	11.52 11.4	12 —	12.48 12.6	V
Efficiency ($V_{in} = 15\text{ V}$, $I_{Load} = 1.0\text{ A}$)	η	—	88	—	%
LM2575-15 (Note 1 Test Circuit Figure 14)					
Output Voltage ($V_{in} = 30\text{ V}$, $I_{Load} = 0.2\text{ A}$, $T_J = 25^{\circ}\text{C}$)	V_{out}	14.7	15	15.3	V
Output Voltage ($18\text{ V} \leq V_{in} \leq 40\text{ V}$, $0.2\text{ A} \leq I_{Load} \leq 1.0\text{ A}$) $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ $T_J = -40\text{ to }+125^{\circ}\text{C}$	V_{out}	14.4 14.25	15 —	15.6 15.75	V
Efficiency ($V_{in} = 18\text{ V}$, $I_{Load} = 1.0\text{ A}$)	η	—	88	—	%
LM2575 ADJUSTABLE VERSION (Note 1 Test Circuit Figure 14)					
Feedback Voltage ($V_{in} = 12\text{ V}$, $I_{Load} = 0.2\text{ A}$, $V_{out} = 5.0\text{ V}$, $T_J = 25^{\circ}\text{C}$)	V_{FB}	1.217	1.23	1.243	V
Feedback Voltage ($8.0\text{ V} \leq V_{in} \leq 40\text{ V}$, $0.2\text{ A} \leq I_{Load} \leq 1.0\text{ A}$, $V_{out} = 5.0\text{ V}$) $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ $T_J = -40\text{ to }+125^{\circ}\text{C}$	V_{FB}	1.193 1.18	1.23 —	1.267 1.28	V
Efficiency ($V_{in} = 12\text{ V}$, $I_{Load} = 1.0\text{ A}$, $V_{out} = 5.0\text{ V}$)	η	—	77	—	%

- External components such as the catch diode, inductor, input and output capacitors can affect switching regulator system performance. When the LM2575 is used as shown in the Figure 14 test circuit, system performance will be as shown in system parameters section.
- Tested junction temperature range for the LM2575 and the NCV2575: $T_{low} = -40^{\circ}\text{C}$ $T_{high} = +125^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
<http://onsemi.com>
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 105

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

LM2575, NCV2575

DEVICE PARAMETERS

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Unless otherwise specified, $V_{in} = 12\text{ V}$ for the 3.3 V, 5.0 V, and Adjustable version, $V_{in} = 25\text{ V}$ for the 12 V version, and $V_{in} = 30\text{ V}$ for the 15 V version. $I_{load} = 200\text{ mA}$. For typical values $T_J = 25^\circ\text{C}$, for min/max values T_J is the operating junction temperature range that applies [Note 2], unless otherwise noted.)

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
ALL OUTPUT VOLTAGE VERSIONS					
Feedback Bias Current ($V_{out} = 5.0\text{ V}$ Adjustable Version Only) $T_J = 25^\circ\text{C}$ $T_J = -40\text{ to }+125^\circ\text{C}$	I_b	– –	25 –	100 200	nA
Oscillator Frequency Note 3 $T_J = 25^\circ\text{C}$ $T_J = 0\text{ to }+125^\circ\text{C}$ $T_J = -40\text{ to }+125^\circ\text{C}$	f_{osc}	– 47 42	52 – –	– 58 63	kHz
Saturation Voltage ($I_{out} = 1.0\text{ A}$ Note 4) $T_J = 25^\circ\text{C}$ $T_J = -40\text{ to }+125^\circ\text{C}$	V_{sat}	– –	1.0 –	1.2 1.3	V
Max Duty Cycle ("on") Note 5	DC	94	98	–	%
Current Limit (Peak Current Notes 4 and 3) $T_J = 25^\circ\text{C}$ $T_J = -40\text{ to }+125^\circ\text{C}$	I_{CL}	– –	1.7 2.3 –	3.0 3.2	A
Output Leakage Current Notes 6 and 7, $T_J = 25^\circ\text{C}$ Output = 0 V Output = –1.0 V	I_L	–	0.8 6.0	2.0 20	mA
Quiescent Current Note 6 $T_J = 25^\circ\text{C}$ $T_J = -40\text{ to }+125^\circ\text{C}$	I_Q	–	5.0 –	9.0 11	mA
Standby Quiescent Current (ON/OFF Pin = 5.0 V ("off")) $T_J = 25^\circ\text{C}$ $T_J = -40\text{ to }+125^\circ\text{C}$	I_{sby}	–	15 80	200 400	μA
ON/OFF Pin Logic Input Level (Test Circuit Figure 14) $V_{out} = 0\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$ $T_J = -40\text{ to }+125^\circ\text{C}$ $V_{out} = \text{Nominal Output Voltage}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$ $T_J = -40\text{ to }+125^\circ\text{C}$	V_{IH} V_{IL}	– –	2.2 2.4 1.2	1.4 – 1.0 0.8	V
ON/OFF Pin Input Current (Test Circuit Figure 14) ON/OFF Pin = 5.0 V ("off"), $T_J = 25^\circ\text{C}$ ON/OFF Pin = 0 V ("on"), $T_J = 25^\circ\text{C}$	I_{in} I_{in}	– –	15 0	30 5.0	μA

- The oscillator frequency reduces to approximately 18 kHz in the event of an output short or an overload which causes the regulated output voltage to drop approximately 40% from the nominal output voltage. This self protection feature lowers the average dissipation of the IC by lowering the minimum duty cycle from 5% down to approximately 2%.
- Output (Pin 2) sourcing current. No diode, inductor or capacitor connected to output pin.
- Feedback (Pin 4) removed from output and connected to 0 V.
- Feedback (Pin 4) removed from output and connected to +12 V for the Adjustable, 3.3 V, and 5.0 V versions, and +25 V for the 12 V and 15 V versions, to force the output transistor "off".
- $V_{in} = 40\text{ V}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
<http://onsemi.com>

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 106

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. LM2575T-5.0:5V



LM1575, LM2575-N, LM2575HV

www.ti.com

SNVS106E –MAY 1999–REVISED APRIL 2013

LM1575/LM2575/LM2575HV SIMPLE SWITCHER® 1A Step-Down Voltage Regulator

Check for Samples: LM1575, LM2575-N, LM2575HV

FEATURES

- 3.3V, 5V, 12V, 15V, and Adjustable Output Versions
- Adjustable Version Output Voltage Range,
 - 1.23V to 37V (57V for HV Version) $\pm 4\%$ Max Over
 - Line and Load Conditions
- Specified 1A Output Current
- Wide Input Voltage Range, 40V up to 60V for HV Version
- Requires Only 4 External Components
- 52 kHz Fixed Frequency Internal Oscillator
- TTL Shutdown Capability, Low Power Standby Mode
- High Efficiency
- Uses Readily Available Standard Inductors
- Thermal Shutdown and Current Limit Protection
- P* Product Enhancement Tested

APPLICATIONS

- Simple High-Efficiency Step-Down (Buck) Regulator
- Efficient Pre-Regulator for Linear Regulators
- On-Card Switching Regulators
- Positive to Negative Converter (Buck-Boost)

DESCRIPTION

The LM2575 series of regulators are monolithic integrated circuits that provide all the active functions for a step-down (buck) switching regulator, capable of driving a 1A load with excellent line and load regulation. These devices are available in fixed output voltages of 3.3V, 5V, 12V, 15V, and an adjustable output version.

Requiring a minimum number of external components, these regulators are simple to use and include internal frequency compensation and a fixed-frequency oscillator.

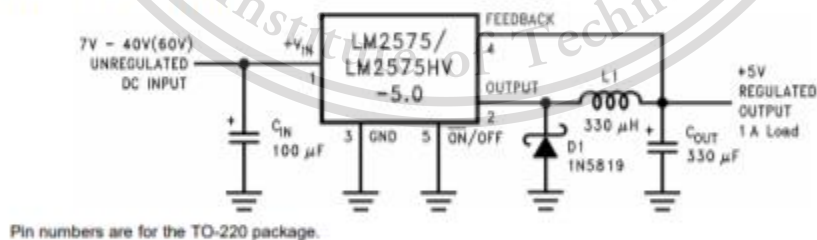
The LM2575 series offers a high-efficiency replacement for popular three-terminal linear regulators. It substantially reduces the size of the heat sink, and in many cases no heat sink is required.

A standard series of inductors optimized for use with the LM2575 are available from several different manufacturers. This feature greatly simplifies the design of switch-mode power supplies.

Other features include a specified $\pm 4\%$ tolerance on output voltage within specified input voltages and output load conditions, and $\pm 10\%$ on the oscillator frequency. External shutdown is included, featuring 50 μA (typical) standby current. The output switch includes cycle-by-cycle current limiting, as well as thermal shutdown for full protection under fault conditions.

Typical Application

(Fixed Output Voltage Versions)



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. SIMPLE SWITCHER is a registered trademark of Texas Instruments. All other trademarks are the property of their respective owners.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing times and quantities may vary. Production processing times and quantities may vary. Production processing times and quantities may vary.

Copyright © 1999–2013, Texas Instruments Incorporated

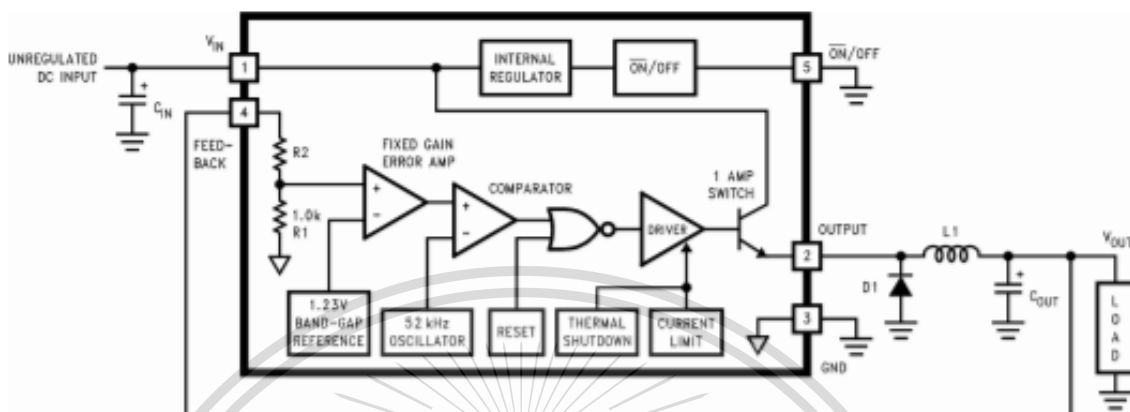
เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัท Texas Instruments เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 107

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Block Diagram and Typical Application



3.3V, R2 = 1.7k
 5V, R2 = 3.1k
 12V, R2 = 8.84k
 15V, R2 = 11.3k
 For ADJ. Version
 R1 = Open, R2 = 00
 Pin numbers are for the TO-220 package.

Figure 1.

Connection Diagrams

(XX indicates output voltage option.)

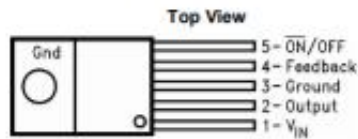


**Figure 2. Straight Leads
5-Lead TO-220 Package**
LM2575T-XX or LM2575HVT-XX
See Package Number KC0005A

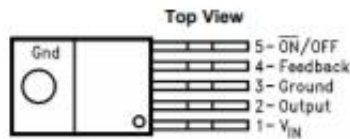


**Figure 3. Bent, Staggered Leads
5-Lead TO-220 Package**
See Package Number NDH0005D

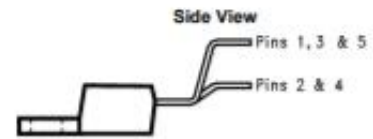


**Figure 4. LM2575T-XX Flow LB03
or
LM2575HVT-XX Flow LB03**
See Package Number NDH0005D

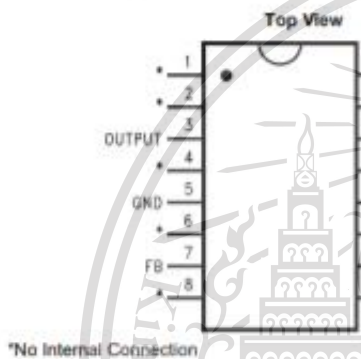


Figure 5. 16-Lead CDIP and PDIP Packages
LM2575N-XX or LM2575HVN-XX
LM1575J-XX-QML
See Package Numbers NFE0016A and NBG

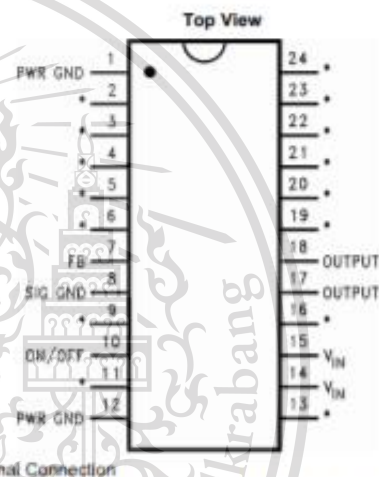


Figure 6. 24-Lead Surface Mount SOIC Package
LM2575M-XX or LM2575HVM-XX
See Package Number DW0024B

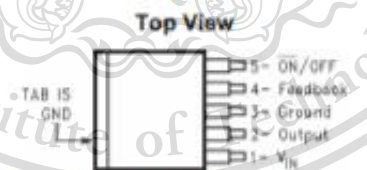


Figure 7. DPAK/TO-263 Package
5-Lead Surface-Mount Package
See Package Number KTT0005B

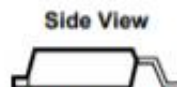


Figure 8. LM2575S-XX or LM2575HVS-XX
See Package Number KTT0005B

LM1575, LM2575-N, LM2575HV



SNVS106E –MAY 1999–REVISED APRIL 2013

www.ti.com



These devices have limited built-in ESD protection. The leads should be shorted together or the device placed in conductive foam during storage or handling to prevent electrostatic damage to the MOS gates.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (1)(2)(3)

Maximum Supply Voltage	LM1575/LM2575	45V
	LM2575HV	63V
ON /OFF Pin Input Voltage		$-0.3V \leq V \leq +V_{IN}$
Output Voltage to Ground	(Steady State)	-1V
Power Dissipation		Internally Limited
Storage Temperature Range		-65°C to +150°C
Maximum Junction Temperature		150°C
Minimum ESD Rating	(C = 100 pF, R = 1.5 kΩ)	2 kV
Lead Temperature	(Soldering, 10-sec.)	260°C

- (1) Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is intended to be functional, but do not ensure specific performance limits. For specified specifications and test conditions, see [Electrical Characteristics](#).
- (2) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the TI Sales Office/Distributors for availability and specifications.
- (3) Refer to RETS LM1575J for current revision of military RETS/SMD.

OPERATING RATINGS

Temperature Range	LM1575	$-55^{\circ}\text{C} \leq T_J \leq +150^{\circ}\text{C}$
	LM2575/LM2575HV	$-40^{\circ}\text{C} \leq T_J \leq +125^{\circ}\text{C}$
Supply Voltage	LM1575/LM2575	40V
	LM2575HV	60V

ELECTRICAL CHARACTERISTICS LM1575-3.3, LM2575-3.3, LM2575HV-3.3

Specifications with standard type face are for $T_J \leq 25^{\circ}\text{C}$ and those with **bold type face** apply over full Operating Temperature Range.

Symbol	Parameter	Conditions	Typ	LM1575-3.3 Limit (1)	LM2575-3.3 LM2575HV-3.3 Limit (2)	Units (Limits)
SYSTEM PARAMETERS Test Circuit Figure 25 and Figure 26 (3)						
V_{OUT}	Output Voltage	$V_{IN} = 12V, I_{LOAD} = 0.2A$ Circuit Figure 25 and Figure 26	3.3	3.287 3.333	3.234 3.366	V V(Min) V(Max)
V_{OUT}	Output Voltage LM1575/LM2575	$4.75V \leq V_{IN} \leq 40V, 0.2A \leq I_{LOAD} \leq 1A$ Circuit Figure 25 and Figure 26	3.3	3.200/ 3.168 3.400/ 3.432	3.168/ 3.135 3.432/ 3.465	V V(Min) V(Max)
V_{OUT}	Output Voltage LM2575HV	$4.75V \leq V_{IN} \leq 60V, 0.2A \leq I_{LOAD} \leq 1A$ Circuit Figure 25 and Figure 26	3.3	3.200/ 3.168 3.416/ 3.450	3.168/ 3.135 3.450/ 3.482	V V(Min) V(Max)
η	Efficiency	$V_{IN} = 12V, I_{LOAD} = 1A$	75			%

- (1) All limits specified at room temperature (standard type face) and at **temperature extremes (bold type face)**. All limits are used to calculate Average Outgoing Quality Level, and all are 100% production tested.
- (2) All limits specified at room temperature (standard type face) and at **temperature extremes (bold type face)**. All room temperature limits are 100% production tested. All limits at **temperature extremes** are specified via correlation using standard Statistical Quality Control (SQC) methods.
- (3) External components such as the catch diode, inductor, input and output capacitors can affect switching regulator system performance. When the LM1575/LM2575 is used as shown in the test circuit [Figure 25](#) and [Figure 26](#), system performance will be as shown in system parameters of [Electrical Characteristics](#).

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่าง ไม่สามารถใช้ในการศึกษาเชิงพาณิชย์ ไม่สามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใด
Submit Documentation Feedback Copyright © 1999–2013, Texas Instruments Incorporated

Product Folder Links: [LM1575](#), [LM2575-N](#), [LM2575HV](#)
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 110

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS LM1575-5.0, LM2575-5.0, LM2575HV-5.0

Specifications with standard type face are for $T_J = 25^\circ\text{C}$, and those with **boldface type** apply over full Operating Temperature Range.

Symbol	Parameter	Conditions	Typ	LM1575-5.0	LM2575-5.0 LM2575HV-5.0	Units (Limits)
				Limit ⁽¹⁾	Limit ⁽²⁾	
SYSTEM PARAMETERS Test Circuit Figure 25 and Figure 26 ⁽³⁾						
V _{OUT}	Output Voltage	V _{IN} = 12V, I _{LOAD} = 0.2A Circuit Figure 25 and Figure 26	5.0	4.950 5.050	4.900 5.100	V V(Min) V(Max)
V _{OUT}	Output Voltage LM1575/LM2575	0.2A ≤ I _{LOAD} ≤ 1A, 8V ≤ V _{IN} ≤ 40V Circuit Figure 25 and Figure 26	5.0	4.850/4.800 5.150/5.200	4.800/4.750 5.200/5.250	V V(Min) V(Max)
V _{OUT}	Output Voltage LM2575HV	0.2A ≤ I _{LOAD} ≤ 1A, 8V ≤ V _{IN} ≤ 60V Circuit Figure 25 and Figure 26	5.0	4.850/4.800 5.175/5.225	4.800/4.750 5.225/5.275	V V(Min) V(Max)
η	Efficiency	V _{IN} = 12V, I _{LOAD} = 1A	77			%

(1) All limits specified at room temperature (standard type face) and at **temperature extremes (bold type face)**. All limits are used to calculate Average Outgoing Quality Level, and all are 100% production tested.

(2) All limits specified at room temperature (standard type face) and at **temperature extremes (bold type face)**. All room temperature limits are 100% production tested. All limits at **temperature extremes** are specified via correlation using standard Statistical Quality Control (SQC) methods.

(3) External components such as the catch diode, inductor, input and output capacitors can affect switching regulator system performance. When the LM1575/LM2575 is used as shown in the test circuit Figure 25 and Figure 26, system performance will be as shown in system parameters of [Electrical Characteristics](#).

ELECTRICAL CHARACTERISTICS LM1575-12, LM2575-12, LM2575HV-12

Specifications with standard type face are for $T_J = 25^\circ\text{C}$, and those with **bold type** apply over full Operating Temperature Range.

Symbol	Parameter	Conditions	Typ	LM1575-12	LM2575-12 LM2575HV-12	Units (Limits)
				Limit ⁽¹⁾	Limit ⁽²⁾	
SYSTEM PARAMETERS Test Circuit Figure 25 and Figure 26 ⁽³⁾						
V _{OUT}	Output Voltage	V _{IN} = 25V, I _{LOAD} = 0.2A Circuit Figure 25 and Figure 26	12	11.88 12.12	11.76 12.24	V V(Min) V(Max)
V _{OUT}	Output Voltage LM1575/LM2575	0.2A ≤ I _{LOAD} ≤ 1A, 15V ≤ V _{IN} ≤ 40V Circuit Figure 25 and Figure 26	12	11.64/11.52 12.36/12.48	11.52/11.40 12.48/12.60	V V(Min) V(Max)
V _{OUT}	Output Voltage LM2575HV	0.2A ≤ I _{LOAD} ≤ 1A, 15V ≤ V _{IN} ≤ 60V Circuit Figure 25 and Figure 26	12	11.64/11.52 12.42/12.54	11.52/11.40 12.54/12.66	V V(Min) V(Max)
η	Efficiency	V _{IN} = 15V, I _{LOAD} = 1A	88			%

(1) All limits specified at room temperature (standard type face) and at **temperature extremes (bold type face)**. All limits are used to calculate Average Outgoing Quality Level, and all are 100% production tested.

(2) All limits specified at room temperature (standard type face) and at **temperature extremes (bold type face)**. All room temperature limits are 100% production tested. All limits at **temperature extremes** are specified via correlation using standard Statistical Quality Control (SQC) methods.

(3) External components such as the catch diode, inductor, input and output capacitors can affect switching regulator system performance. When the LM1575/LM2575 is used as shown in the test circuit Figure 25 and Figure 26, system performance will be as shown in system parameters of [Electrical Characteristics](#).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. dsPIC30F4011



dsPIC30F4011/4012

High-Performance, 16-Bit Digital Signal Controllers

Note: This data sheet summarizes features of this group of dsPIC30F devices and is not intended to be a complete reference source. For more information on the CPU, peripherals, register descriptions and general device functionality, refer to the "dsPIC30F Family Reference Manual" (DS70046). For more information on the device instruction set and programming, refer to the "16-bit MCU and DSC Reference Manual" (DS70157).

High-Performance, Modified RISC CPU:

- Modified Harvard architecture
- C compiler optimized instruction-set architecture with flexible addressing modes
- 83 base instructions
- 24-bit wide instructions, 16-bit wide data path
- 48 Kbytes on-chip Flash program space (16K instruction words)
- 2 Kbytes of on-chip data RAM
- 1 Kbyte of nonvolatile data EEPROM
- Up to 30 MIPS operation:
 - DC to 40 MHz external clock input
 - 4 MHz-10 MHz oscillator input with PLL active (4x, 8x, 16x)
- 30 interrupt sources:
 - Three external interrupt sources
 - Eight user-selectable priority levels for each interrupt source
 - Four processor trap sources
- 16 x 16-bit working register array

DSP Engine Features:

- Dual data fetch
- Accumulator write-back for DSP operations
- Modulo and Bit-Reversed Addressing modes
- Two, 40-bit wide accumulators with optional saturation logic
- 17-bit x 17-bit single-cycle hardware fractional/integer multiplier
- All DSP instructions are single cycle
- ± 16 -bit, single-cycle shift

Peripheral Features:

- High-current sink/source I/O pins: 25 mA/25 mA
- Timer module with programmable prescaler:
 - Five 16-bit timers/counters; optionally pair 16-bit timers into 32-bit timer modules
- 16-bit Capture input functions
- 16-bit Compare/PWM output functions
- 3-wire SPI modules (supports 4 Frame modes)
- I²C™ module supports Multi-Master/Slave mode and 7-bit/10-bit addressing
- Two UART modules with FIFO Buffers
- CAN module, 2.0B compliant

Motor Control PWM Module Features:

- Six PWM output channels:
 - Complementary or Independent Output modes
 - Edge and Center-Aligned modes
- Three duty cycle generators
- Dedicated time base
- Programmable output polarity
- Dead-time control for Complementary mode
- Manual output control
- Trigger for A/D conversions

Quadrature Encoder Interface Module Features:

- Phase A, Phase B and Index Pulse input
- 16-bit up/down position counter
- Count direction status
- Position Measurement (x2 and x4) mode
- Programmable digital noise filters on inputs
- Alternate 16-bit Timer/Counter mode
- Interrupt on position counter rollover/underflow

Analog Features:

- 10-bit Analog-to-Digital Converter (ADC) with four Sample and Hold (S&H) inputs:
 - 1 Msps conversion rate
 - Nine input channels
 - Conversion available during Sleep and Idle
- Programmable Brown-out Reset

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use. 112

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

dsPIC30F4011/4012

Special Digital Signal Controller Features:

- Enhanced Flash program memory:
 - 10,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 100K (typical)
- Data EEPROM memory:
 - 100,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 1M (typical)
- Self-reprogrammable under software control
- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Flexible Watchdog Timer (WDT) with on-chip, low-power RC oscillator for reliable operation
- Fail-Safe Clock Monitor operation detects clock failure and switches to on-chip, low-power RC oscillator
- Programmable code protection
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™)
- Selectable Power Management modes:
 - Sleep, Idle and Alternate Clock modes

CMOS Technology:

- Low-power, high-speed Flash technology
- Wide operating voltage range (2.5V to 5.5V)
- Industrial and Extended temperature ranges
- Low-power consumption

dsPIC30F Motor Control and Power Conversion Family

Device	Pins	Program Mem. Bytes/Instructions	SRAM Bytes	EEPROM Bytes	Timer 16-bit	Input Cap	Output Comp/Std PWM	Motor Control PWM	10-bit A/D 1 Msp	Quad Enc	UART	SPI	PC™	CAN
dsPIC30F4012	28	48K/16K	2048	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	1
dsPIC30F4011	40/44	48K/16K	2048	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use. 113

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

dsPIC30F4011/4012

Table 1-1 provides a brief description of the device I/O pinout and the functions that are multiplexed to a port pin. Multiple functions may exist on one port pin. When multiplexing occurs, the peripheral module's functional requirements may force an override of the data direction of the port pin.

TABLE 1-1: dsPIC30F4011 I/O PIN DESCRIPTIONS

Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
AN0-AN8	I	Analog	Analog input channels. AN0 and AN1 are also used for device programming data and clock inputs, respectively.
AVDD	P	P	Positive supply for analog module. This pin must be connected at all times.
AVSS	P	P	Ground reference for analog module. This pin must be connected at all times.
CLKI CLKO	I O	ST/CMOS —	External clock source input. Always associated with OSC1 pin function. Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. Optionally functions as CLK0 in RC and EC modes. Always associated with OSC2 pin function.
CN0-CN7 CN17-CN18	I	ST	Input change notification inputs. Can be software programmed for internal weak pull-ups on all inputs.
C1RX C1TX	I O	ST —	CAN1 bus receive pin. CAN1 bus transmit pin.
EMUD EMUC EMUD1 EMUC1 EMUD2 EMUC2 EMUD3 EMUC3	I/O I/O I/O I/O I/O I/O I/O I/O	ST ST ST ST ST ST ST ST	ICD Primary Communication Channel data input/output pin. ICD Primary Communication Channel clock input/output pin. ICD Secondary Communication Channel data input/output pin. ICD Secondary Communication Channel clock input/output pin. ICD Tertiary Communication Channel data input/output pin. ICD Tertiary Communication Channel clock input/output pin. ICD Quaternary Communication Channel data input/output pin. ICD Quaternary Communication Channel clock input/output pin.
IC1, IC2, IC7, IC8	I	ST	Capture inputs 1, 2, 7 and 8.
INDX QEA QEB	I I I	ST ST ST	Quadrature Encoder Index Pulse input. Quadrature Encoder Phase A input in QEI mode. Auxiliary Timer External Clock/Gate input in Timer mode. Quadrature Encoder Phase B input in QEI mode. Auxiliary Timer External Clock/Gate input in Timer mode.
INT0 INT1 INT2	I I I	ST ST ST	External interrupt 0. External interrupt 1. External interrupt 2.
FLTA PWM1L PWM1H PWM2L PWM2H PWM3L PWM3H	I O O O O O O	ST — — — — — —	PWM Fault A input. PWM1 low output. PWM1 high output. PWM2 low output. PWM2 high output. PWM3 low output. PWM3 high output.
MCLR	I/P	ST	Master Clear (Reset) input or programming voltage input. This pin is an active-low Reset to the device.
OCFA OC1-OC4	I O	ST —	Compare Fault A input (for Compare channels 1, 2, 3 and 4). Compare outputs 1 through 4.

Legend: CMOS = CMOS compatible input or output Analog = Analog input
ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels O = Output
I = Input P = Power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use. 114

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

dsPIC30F4011/4012

TABLE 1-1: dsPIC30F4011 I/O PIN DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
OSC1	I	ST/CMOS	Oscillator crystal input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise.
OSC2	I/O	—	Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. Optionally functions as CLK0 in RC and EC modes.
PGD	I/O	ST	In-Circuit Serial Programming™ data input/output pin.
PGC	I	ST	In-Circuit Serial Programming clock input pin.
RB0-RB8	I/O	ST	PORTB is a bidirectional I/O port.
RC13-RC15	I/O	ST	PORTC is a bidirectional I/O port.
RD0-RD3	I/O	ST	PORTD is a bidirectional I/O port.
RE0-RE5, RE8	I/O	ST	PORTE is a bidirectional I/O port.
RF0-RF6	I/O	ST	PORTF is a bidirectional I/O port.
SCK1	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for SPI1.
SDI1	I	ST	SPI1 data in.
SDO1	O	—	SPI1 data out.
SS1	I	ST	SPI1 slave synchronization.
SCL	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for I ² C™.
SDA	I/O	ST	Synchronous serial data input/output for I ² C.
SOSCO	O	—	32 kHz low-power oscillator crystal output.
SOSCI	I	ST/CMOS	32 kHz low-power oscillator crystal input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise.
T1CK	I	ST	Timer1 external clock input.
T2CK	I	ST	Timer2 external clock input.
U1RX	I	ST	UART1 receive.
U1TX	O	—	UART1 transmit.
U1ARX	I	ST	UART1 alternate receive.
U1ATX	O	—	UART1 alternate transmit.
U2RX	I	ST	UART2 receive.
U2TX	O	—	UART2 transmit.
VDD	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.
VSS	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VREF+	I	Analog	Analog voltage reference (high) input.
VREF-	I	Analog	Analog voltage reference (low) input.

Legend: CMOS = CMOS compatible input or output Analog = Analog input
ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels O = Output
I = Input P = Power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

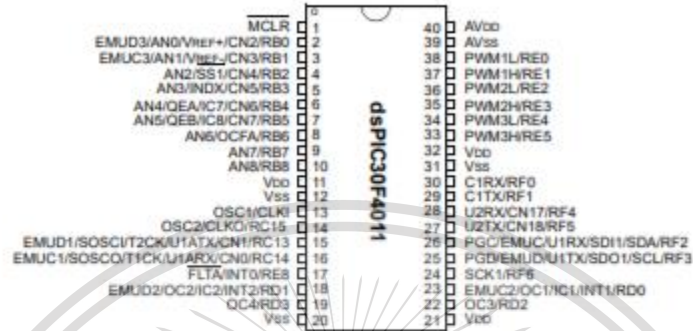
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use. 115

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

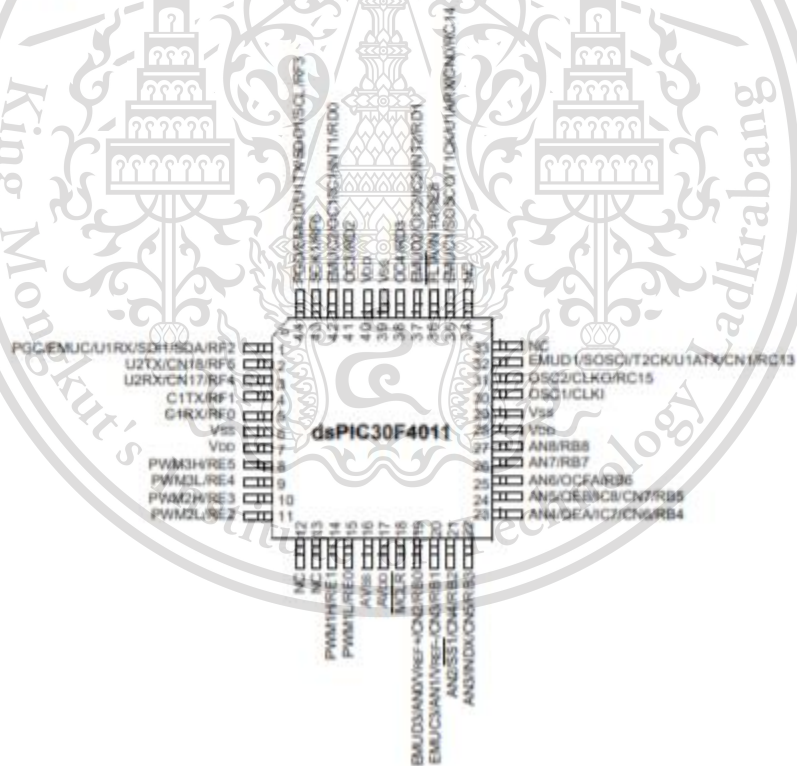
dsPIC30F4011/4012

Pin Diagrams

40-Pin PDIP



44-Pin TQFP



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 116

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3. IR2101PBF

International
IR Rectifier

Data Sheet No. PD60043 Rev.O

IR2101(S)/IR2102(S) & (PbF)

HIGH AND LOW SIDE DRIVER

Features

- Floating channel designed for bootstrap operation
Fully operational to +600V
Tolerant to negative transient voltage
dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout
- 3.3V, 5V, and 15V logic input compatible
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase with inputs (IR2101) or out of phase with inputs (IR2102)
- Also available LEAD-FREE

Product Summary

V_{OFFSET}	600V max.
$I_{\text{O}+/-}$	130 mA / 270 mA
V_{OUT}	10 - 20V
$t_{\text{on/off (typ.)}}$	160 & 150 ns
Delay Matching	50 ns

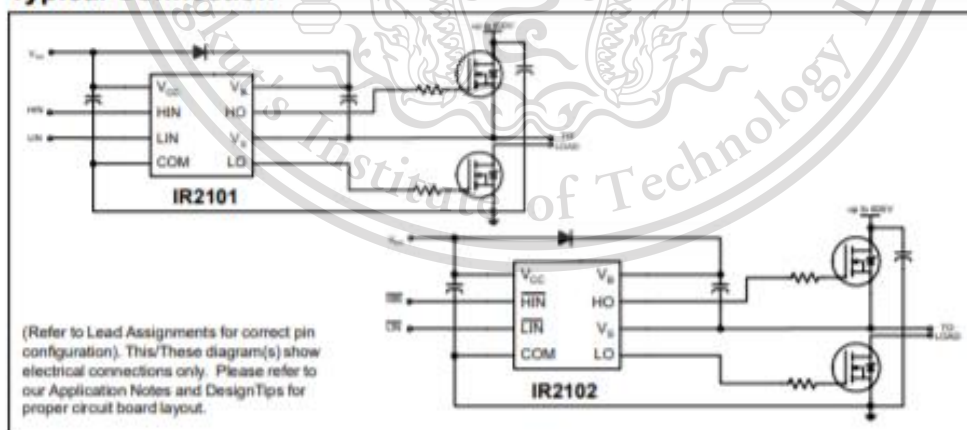
Description

The IR2101(S)/IR2102(S) are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with independent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. The logic input is compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 600 volts.

Packages



Typical Connection



www.irf.com

1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 117

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

IR2101(S)/IR2102(S) & (PbF)

International
IR Rectifier

Absolute Maximum Ratings

Absolute maximum ratings indicate sustained limits beyond which damage to the device may occur. All voltage parameters are absolute voltages referenced to COM. The thermal resistance and power dissipation ratings are measured under board mounted and still air conditions.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V_B	High side floating supply voltage	-0.3	625	V
V_S	High side floating supply offset voltage	$V_B - 25$	$V_B + 0.3$	
V_{HO}	High side floating output voltage	$V_S - 0.3$	$V_B + 0.3$	
V_{CC}	Low side and logic fixed supply voltage	-0.3	25	
V_{LO}	Low side output voltage	-0.3	$V_{CC} + 0.3$	
V_{IN}	Logic input voltage (HIN & LIN)	-0.3	$V_{CC} + 0.3$	
dV_S/dt	Allowable offset supply voltage transient		50	V/ns
P_D	Package power dissipation @ $T_A \leq +25^\circ\text{C}$		1.0	W
	(8 lead PDIP)		0.625	
	(8 lead SOIC)			$^\circ\text{C/W}$
R_{thJA}	Thermal resistance, junction to ambient		125	
	(8 lead PDIP)		200	$^\circ\text{C}$
	(8 lead SOIC)			
T_J	Junction temperature		150	
T_S	Storage temperature	-55	150	
T_L	Lead temperature (soldering, 10 seconds)		300	

Recommended Operating Conditions

The input/output logic timing diagram is shown in Figure 1. For proper operation the device should be used within the recommended conditions. The V_S offset rating is tested with all supplies biased at 15V differential.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V_B	High side floating supply absolute voltage	$V_S + 10$	$V_S + 20$	V
V_S	High side floating supply offset voltage	Note 1	600	
V_{HO}	High side floating output voltage	V_S	V_B	
V_{CC}	Low side and logic fixed supply voltage	10	20	
V_{LO}	Low side output voltage	0	V_{CC}	
V_{IN}	Logic input voltage (HIN & LIN) (IR2101) & (HIN & LIN) (IR2102)	0	V_{CC}	
T_A	Ambient temperature	-40	125	$^\circ\text{C}$

Note 1: Logic operational for V_S of -5 to +600V. Logic state held for V_S of -5V to $-V_{BS}$. (Please refer to the Design Tip DT97-3 for more details).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use. 118

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Dynamic Electrical Characteristics

V_{BIAS} (V_{CC}, V_{SS}) = 15V, C_L = 1000 pF and T_A = 25°C unless otherwise specified.

Symbol	Definition	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
t _{on}	Turn-on propagation delay	—	160	220	ns	V _S = 0V
t _{off}	Turn-off propagation delay	—	150	220		V _S = 600V
t _r	Turn-on rise time	—	100	170		
t _f	Turn-off fall time	—	50	90		
MT	Delay matching, HS & LS turn-on/off	—	—	50		

Static Electrical Characteristics

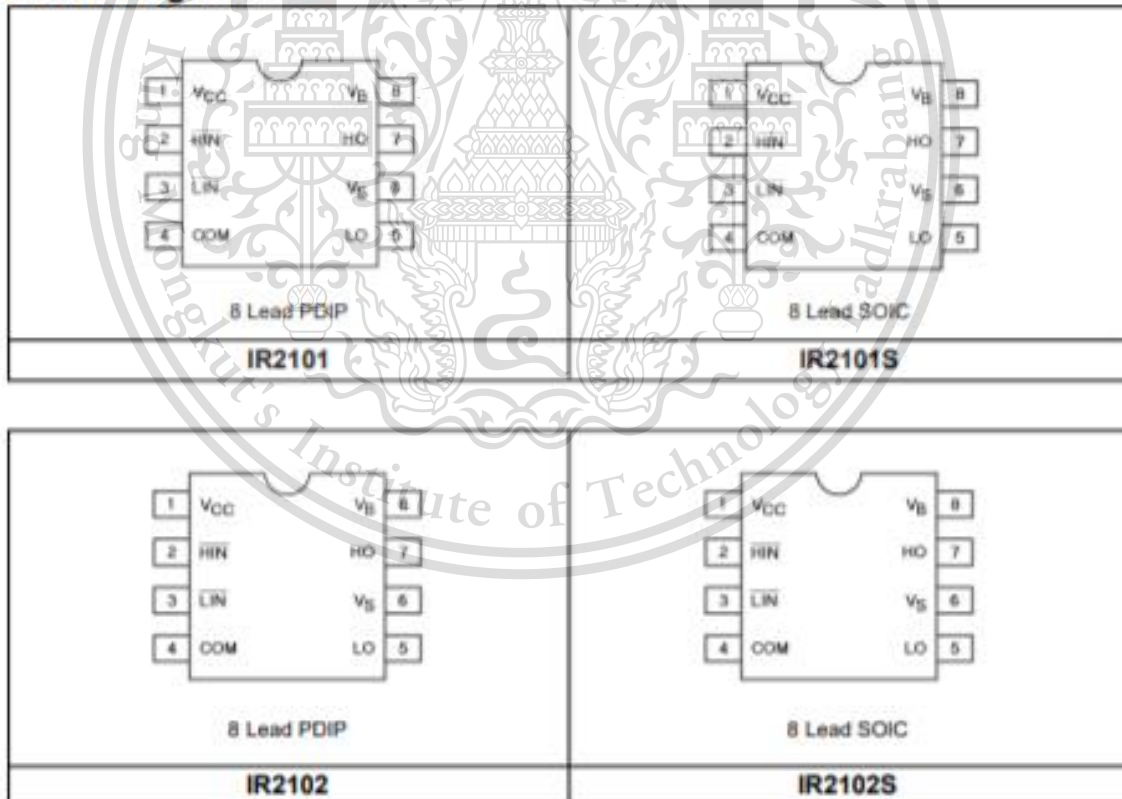
V_{BIAS} (V_{CC}, V_{SS}) = 15V and T_A = 25°C unless otherwise specified. The V_{IN}, V_{TH} and I_{IN} parameters are referenced to COM. The V_O and I_O parameters are referenced to COM and are applicable to the respective output leads: HO or LO.

Symbol	Definition	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
V _{IH}	Logic "1" input voltage (IR2101) Logic "0" input voltage (IR2102)	3	—	—	V	V _{CC} = 10V to 20V
V _{IL}	Logic "0" input voltage (IR2101) Logic "1" input voltage (IR2102)	—	—	0.8		V _{CC} = 10V to 20V
V _{OH}	High level output voltage, V _{BIAS} = V _O	—	—	100	mV	I _O = 0A
V _{OL}	Low level output voltage, V _O	—	—	100		I _O = 0A
I _{LK}	Offset supply leakage current	—	—	50	μA	V _B = V _S = 600V
I _{QSS}	Quiescent V _{SS} supply current	—	30	50		V _{IN} = 0V or 5V
I _{QCC}	Quiescent V _{CC} supply current	—	150	270		V _{IN} = 0V or 5V
I _{IN+}	Logic "1" input bias current	—	3	10		V _{IN} = 5V (IR2101) V _{IN} = 0V (IR2102)
I _{IN-}	Logic "0" input bias current	—	—	1		V _{IN} = 0V (IR2101) V _{IN} = 5V (IR2102)
V _{CCUV+}	V _{CC} supply undervoltage positive going threshold	8	8.9	9.8	V	
V _{CCUV-}	V _{CC} supply undervoltage negative going threshold	7.4	8.2	9		
I _{O+}	Output high short circuit pulsed current	130	210	—	mA	V _O = 0V V _{IN} = Logic "1" PW ≤ 10 μs
I _{O-}	Output low short circuit pulsed current	270	360	—		V _O = 15V V _{IN} = Logic "0" PW ≤ 10 μs

Lead Definitions

Symbol	Description
HIN	Logic input for high side gate driver output (HO), in phase (IR2101)
$\overline{\text{HIN}}$	Logic input for high side gate driver output (HO), out of phase (IR2102)
LIN	Logic input for low side gate driver output (LO), in phase (IR2101)
$\overline{\text{LIN}}$	Logic input for low side gate driver output (LO), out of phase (IR2102)
V _B	High side floating supply
HO	High side gate drive output
V _S	High side floating supply return
V _{CC}	Low side and logic fixed supply
LO	Low side gate drive output
COM	Low side return

Lead Assignments



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use. 120

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4. IRF2807PbF

International
IR Rectifier

PD - 94970A

IRF2807PbF

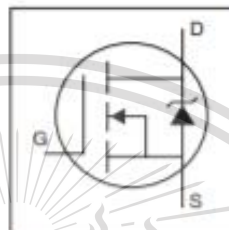
HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated
- Lead-Free

Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

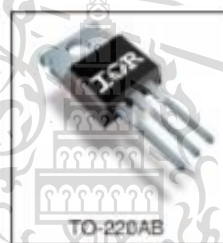
The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



$$V_{DS} = 75V$$

$$R_{DS(on)} = 13m\Omega$$

$$I_D = 82A @$$



Absolute Maximum Ratings

Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$ Continuous Drain Current, $V_{GS} \geq 10V$	82A	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$ Continuous Drain Current, $V_{GS} \geq 10V$	58A	A
I_{DM} Pulsed Drain Current (1)	280A	A
$P_D @ T_C = 25^\circ C$ Power Dissipation	230W	W
Linear Derating Factor	1.5	W/°C
V_{GS} Gate-to-Source Voltage	± 20	V
I_{AS} Avalanche Current (1)	43A	A
E_{AS} Repetitive Avalanche Energy (1)	23	mJ
dv/dt Peak Diode Recovery dv/dt (2)	5.9	V/ns
T_J Operating Junction and	-55 to +175	°C
T_{STG} Storage Temperature Range		°C
Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1N•m)	

Thermal Resistance

Parameter	Typ.	Max.	Units
R_{JC} Junction-to-Case	—	0.65	°C/W
R_{CS} Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	°C/W
R_{JA} Junction-to-Ambient	—	62	°C/W

www.irf.com

1

07/22/10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 121

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

IRF2807PbF

International
IOR Rectifier

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	75	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.074	—	V/°C	Reference to 25°C , $I_D = 1mA$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	13	m Ω	$V_{GS} = 10V, I_D = 43A$ ③
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	38	—	—	S	$V_{DS} = 50V, I_D = 43A$ ③
I_{OSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS} = 75V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250	μA	$V_{DS} = 60V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS} = -20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	160	nC	$I_D = 43A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	29	nC	$V_{DS} = 60V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	55	nC	$V_{DS} = 10V$, See Fig. 6 and 13
$t_{(on)}$	Turn-On Delay Time	—	13	—	ns	$V_{DD} = 38V$
t_r	Rise Time	—	64	—	ns	$I_D = 43A$
$t_{(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	49	—	ns	$R_G = 2.5\Omega$
t_f	Fall Time	—	48	—	ns	$V_{GS} = 10V$, See Fig. 10 ③
L_D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package
L_S	Internal Source Inductance	—	7.5	—	nH	and center of die contact
C_{iss}	Input Capacitance	—	3820	—	pF	$V_{DS} = 0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	810	—	pF	$V_{GS} = 25V$
C_{riss}	Reverse Transfer Capacitance	—	130	—	pF	$f = 1.0MHz$, See Fig. 5
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy	—	280/340	—	mJ	$I_{AS} = 50A, L = 370\mu H$

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	82	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	280	A	
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.2	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 43A, V_{GS} = 0V$ ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	100	150	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 43A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	410	610	nC	$dI/dt = 100A/\mu s$ ④
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 $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 370\mu H$, $R_G = 25\Omega$, $I_{AS} = 43A$, $V_{DS} = 10V$ (See Figure 12)
- ③ $I_{SD} \leq 43A$, $dI/dt \leq 300A/\mu s$, $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$, $T_J \leq 175^\circ\text{C}$

- ④ Pulse width $\leq 400\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$.
- ⑤ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.
- ⑥ This is a calculated value limited to $T_J = 175^\circ\text{C}$.
- ⑦ Calculated continuous current based on maximum allowable junction temperature. Package limitation current is 75A.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

The 7th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology
1-3 April 2021, Pattaya, THAILAND

ic
east
2021

Estimation of Electrical Power Losses in Inverter Driving Brushless DC Motor and Enhances Its Efficiency

Wiwat Keyoonwong^{1,*}, Nakarin Ketsuwan², Nakarin Prasetsut³ and Nontakorn Chaithong⁴

*Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
1 Soi Chalokkrung 1, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand, +66 2329 8000 ext 3515, 3939*

** E-mail: wiwat.ke@kmitl.ac.th*

Abstract

This paper studied the Power Losses and Efficiency of Inverter Driving Brushless DC (BLDC) Motors by Differentiate the Elements of Power Losses and Estimate the Specific Power Electronic devices losses (MOSFET) then Analyze the Experimental Result to adjust the parameter of the power losses equation. Efficiency testing on BLDC motor driving system including inverter and BLDC motor at various load conditions. Using the High bandwidth measuring device to gain the value of the precise value of rising and falling time. The maximum efficiency of BLDC motor at 48 volts is 98.135% with 5 kg load. The inverter including a variable resistor to adjust the duty cycle for control speed of the BLDC motor. According to the maximum Efficiency of the Inverter (98%) the Total Loss of the MOSFET is 2%. The power losses consist of Switching loss and Conduction loss. The method to improve the switching loss is to use the MOSFET that had less rising time, falling time, and using less Resistant of drain to source ON to reduce the Conduction loss. The experiment results give a pleasing performance.

Keywords: Inverter, Brushless DC Motor, Switching loss, Conduction loss, MOSFET.

1. INTRODUCTION

Nowadays Brushless DC Motor plays a huge role in Electrical vehicles because its high speed, great torque, and high efficiency. Driving BLDC motor requires an inverter to change direct current into alternative current. The inverter is one of the most important factors for the efficiency of the EV [1,5].

The purpose of this study mainly focuses on the Estimation of Electrical Power Losses in Inverter Driving Brushless DC Motor and Enhance its Efficiency. In the inverter, PIC dsPIC30F is the controller of the system, IC that drives the gate of 6 MOSFETs and Star-connected motor. Using the 48 Volt DC power supply, then increase the load to the system and change load from 0-5 kg. Measuring the power in and power out then compare the efficiency, Next is measuring the losses. There are mainly two losses that have the highest impact on the inverter which are Conduction losses and Switching losses.

In power electronic circuit even using the EMI filter to improve the efficiency, It still has losses occurring within the power electronic devices. This paper studies the losses that

occurred, where are they from, how many losses occurred, and uses this information to improve the efficiency of the Inverter [4].

2. Electrical Power losses in Inverter

The major power losses that occurred on the 3 phase inverter are switching and conduction losses [6]. The switching losses occurred while MOSFET On and Off which can be split into Switching on losses and Switching off losses. Switching on loss occurred when the value of V_g more than $V_{g(th)}$ making the current flow from drain gate to source gate together with V_d when the drain to source current is at peak, V_d will gradually decrease to almost zero. The time when drain to source current occur to the time when the value of V_d nearly zero was called t_{on} , Switching on losses will occur in this range. Switching losses occurred in the same way as the Switching off losses. Conduction losses occurred when the drain to source current flow pass the MOSFET which has Internal resistance ($R_{DS(on)}$) [2,3].

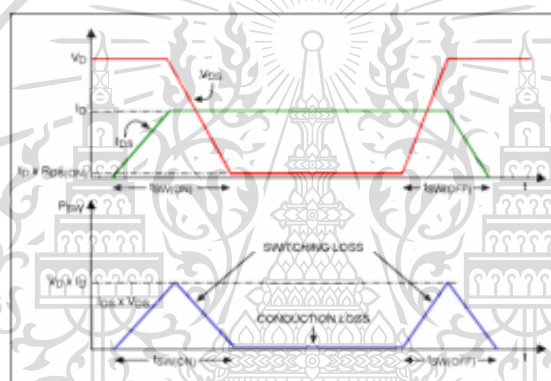


Fig 1. Graph of ideal power losses in MOSFET

The Conduction loss of the MOSFET

$$P_{cond} = I_{D(rms)}^2 \cdot R_{DS(on)}^2 \quad (1)$$

The switching on losses of the MOSFET

$$P_{sw(on)} = \frac{1}{2} V_D \cdot I_D \cdot t_{on} \cdot f_{sw} \quad (2)$$

The Switching off loss of the MOSFET

$$P_{sw(off)} = \frac{1}{2} V_D \cdot I_D \cdot t_{off} \cdot f_{sw} \quad (3)$$

Efficiency

$$Eff = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
2
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 124

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3. FIGURES AND TABLES

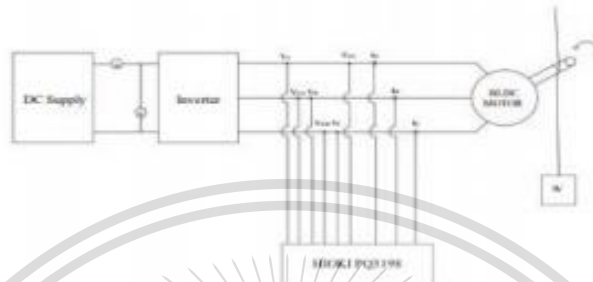


Fig 2. The measurement diagram of the power output

Supply the voltage with dc power supply at 48 volts and apply load various from 0-5 kg. Measuring the current and voltage at power input, we measure the 3 phases alternative current with Hioki then using the result to evaluate the efficiency

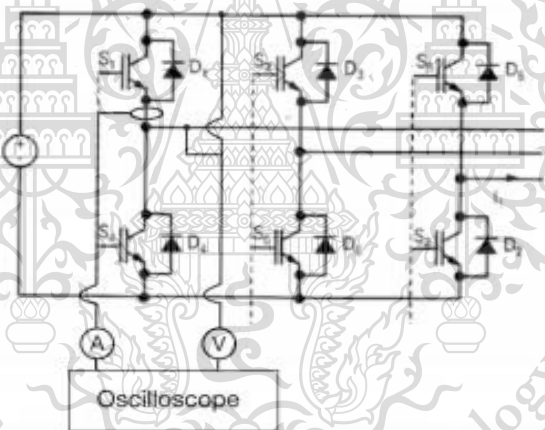


Fig. 3. The circuit diagram

In Conduction and Switching losses measurement will be measured between each MOSFETs for example to measure high-sided MOSFET phase A will be using oscilloscope by clamping the current at the output of the MOSFET before the motor compares with input voltage at the phase A of the motor in Fig3. At low-sided MOSFET phase will be using oscilloscope by clamping the current at the output of the MOSFET before the ground compares

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use 125

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

with Voltage phase A at motor and ground. The result will give the graph of current and voltage of the MOSFET

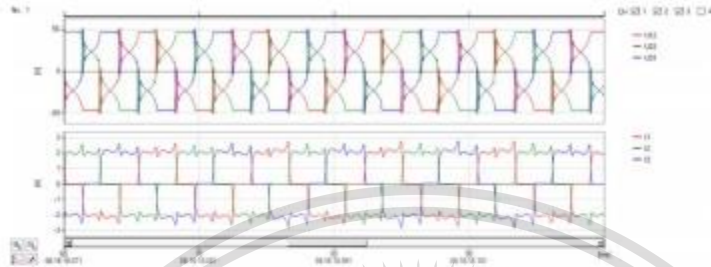


Fig 4. Output Voltage and Current of 3 phase inverter

From Fig 4. The voltage of each phase shifts 120 degrees. The ideal waveform is a pure sine wave, but in practice the waveform isn't pure sine due to the harmonics distortion.

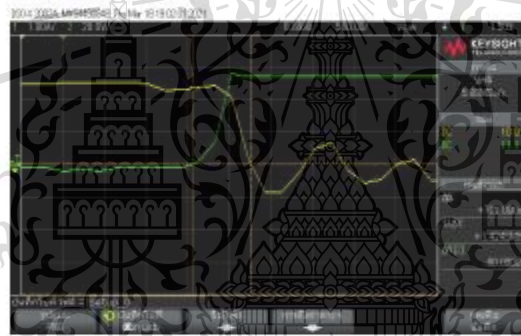


Fig 5. Switching off of the high-sided phase A

The yellow line is drain to source current and the green line is drain to source voltage. Switching loss off occurred when the voltage is rising but the current not yet zero. As shown by x-axis cursor in fig 5.

4. Power Losses

Table 1. The efficiency and losses in various loads

	efficiency	$P_{\text{switching}}$	$P_{\text{conduction}}$	P_{in}
0 kg	90.2335%	9.4393%	0.0216%	0.3059%
1 kg	93.6521%	6.1226%	0.1101%	0.1152%
2 kg	95.7207%	3.4670%	0.1378%	0.6744%
3 kg	96.0820%	3.3975%	0.1989%	0.3214%
4 kg	98.4694%	1.1231%	0.2845%	0.123%
5 kg	98.135%	0.9978%	0.4052%	0.4619%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

When increased loads the efficiency also increased. Most of the losses occurred from switching losses even if increasing the load made the switching losses less than before but it's still a major loss. On the other hand, the more load put on the system causes more conduction losses in the system too due to the rise of the current.

Table 2. The proportion of losses at 3 kg

3 kg	P _{switching}		P _{conduction} (w)
	P _{Sw,on} (w)	P _{Sw,off} (w)	
A _{High}	0.0010384	0.3949	0.03716
A _{Low}	0	0.6355	0.03438
B _{High}	0	0.5796	0.03217
B _{Low}	0	0.47803	0.02335
C _{High}	0	0.6401	0.0327
C _{Low}	0	0.54883	0.03074

From table 2 the value of switching losses and conduction losses of 6 MOSFETs is close. The switching loss will mostly occur at switching off mode on the other hand the losses at the switching on mode are nearly zero and can be considered as zero.

5. Conclusion

This paper has described the 3 phases inverter driving brushless dc motor. Most of the power electronics losses are from the switching of the MOSFETs. To improve the efficiency of the inverter should aiming to reduce the switching losses which can be achieved by choosing the MOSFET that has less rise time and fall time or designs the circuit that has faster switching.

For conduction losses can be reduced by choosing MOSFET that has less internal resistance ($R_{DS(on)}$) or paralleled the MOSFET for less internal resistance and the other losses which can be occurred from the other electronics devices for example the power losses of the diode within the MOSFET can be reduced by added the Schottky diode parallel with the MOSFET.

Finally to improve the efficiency of the inverter should concern about the operation of the inverter if the inverter has a different operation, should concern about the impact of the operation then Focusing the point to improve the efficiency.

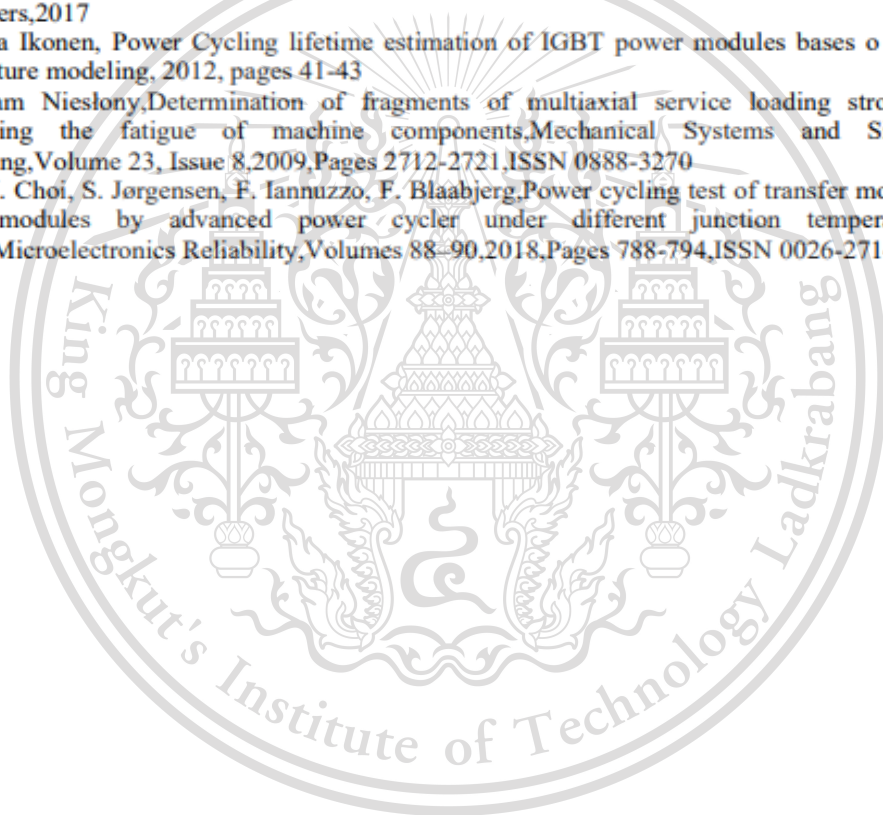
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา⁵และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use¹²⁷

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

REFERENCES

- [1] Tevfik Yigit, Hakan Celik, Speed controlling of the PEM fuel cell powered BLDC motor with FOPI optimized by MSA, International Journal of Hydrogen Energy, 2020, ISSN 0360-3199
- [2] Patrik Varecha, Pavol Makyš, Martin Sumega, Pavel Sovička, Power losses analysis in MOSFET 3-phase high current power inverter for automotive application area, Transportation Research Procedia, Volume 40, 2019, Pages 571-578, ISSN 2352-1465
- [3] Yi Zhang, Huai Wang, Zhongxun Wang, Yongheng Yang, Frede Blaabjerg, Impact of lifetime Model Selections on the reliability Prediction of IGBT Modules in Modular Multilevel Converters, 2017
- [4] Mika Ikonen, Power Cycling lifetime estimation of IGBT power modules bases o chip temperature modeling, 2012, pages 41-43
- [5] Adam Niesłony, Determination of fragments of multiaxial service loading strongly influencing the fatigue of machine components, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 23, Issue 8, 2009, Pages 2712-2721, ISSN 0888-3270
- [6] U.M. Choi, S. Jørgensen, F. Iannuzzo, F. Blaabjerg, Power cycling test of transfer molded IGBT modules by advanced power cycler under different junction temperature swings, Microelectronics Reliability, Volumes 88–90, 2018, Pages 788-794, ISSN 0026-2714



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นาย นครินทร์ เกษรสุวรรณ 60010483

เกิด 18/06/2541

ที่อยู่ 19 หมู่ 9 ต.พระประโทน อ.เมือง จ.นครปฐม



นาย นครินทร์ ประเสริฐสุต 60010484

เกิด 11/07/2541

ที่อยู่ 62/26 ต.โคกสว่าง อ.เมือง จ.สระบุรี



นาย นนทกร ชัยทอง 60010489

เกิด 28/12/2541

ที่อยู่ 38/2 หมู่ 1 ต.เขาไม้แก้ว อ.สีแกว จ.ตรัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use. 129

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.