ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
190762

รายงานวิจัย

เรื่อง

การออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงความถี่สูง

Design and Construction of High Frequency High Voltage AC Switching Power Supply

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิศีโรตม์ เกตุแก้ว
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

งานวิจัยนี้ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยรามคำแหง
ประจำปี 2554

b00255921

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
190762

รายงานวิจัย

เรื่อง

การออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงความถี่สูง

Design and Construction of High Frequency High Voltage AC Switching Power Supply

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิศีโรตม์ เกตุแก้ว
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

งานวิจัยนี้ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยรามคำแหง
ประจำปี 2554

บทคัดย่อ

190762

โครงการวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงแบบสวิตชิ่ง ซึ่งอาศัยหลักการของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ โดยใช้ไอซีเบอร์ TL494 เป็นตัวกำเนิดสัญญาณพัลส์และทำการปรับดิวตี้ไซเคิลที่ 1 เปอร์เซ็นต์ 2 เปอร์เซ็นต์ 3 เปอร์เซ็นต์ และ 4 เปอร์เซ็นต์ โดยปรับความถี่สวิตชิ่งไว้ที่ 2.5 กิโลเฮิร์ต 3 กิโลเฮิร์ต และ 4 กิโลเฮิร์ต ซึ่งใช้ไอซีเบอร์ TLP250 เป็นตัวแยกกราวด์และทำการขยายสัญญาณ เพื่อนำไปขับเพาเวอร์มอสเฟตเบอร์ IRFP460 ให้ทำงาน เพื่อควบคุมการทำงานของหม้อแปลงฟลายแบค ให้ได้ขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงมากกว่าหรือเท่ากับ 1 กิโลโวลท์พีคทูพีค โดยใช้โหลดเป็นเส้นลวดตัวนำที่วางบนแผ่นกระจกสำหรับสร้างสนามไฟฟ้า เพื่อสังเกตปฏิกิริยาของผึ้ง ผลการทดลองที่ได้ คือ เมื่อทำการขยายความกว้างสัญญาณพัลส์ให้เพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงเพิ่มขึ้นที่ขนาด 2.041 กิโลโวลท์พีคทูพีค ที่ดิวตี้ไซเคิล 1 เปอร์เซ็นต์ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงขนาด 3.241 กิโลโวลท์พีคทูพีค ที่ดิวตี้ไซเคิล 2 เปอร์เซ็นต์ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงขนาด 4.001 กิโลโวลท์พีคทูพีค ที่ดิวตี้ไซเคิล 3 เปอร์เซ็นต์ และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงขนาด 5.281 กิโลโวลท์พีคทูพีค ที่ดิวตี้ไซเคิล 4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อทำการทดสอบเพื่อสังเกตปฏิกิริยาของผึ้งจะเห็นว่าที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงเอาต์พุต 2.041 กิโลโวลท์พีคทูพีค ทำให้ผึ้งบินมารวมตัวกันบนแผ่นกระจกจำนวนน้อย ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงเอาต์พุต 3.241 กิโลโวลท์พีคทูพีค ทำให้ผึ้งบินมารวมตัวกันบนแผ่นกระจกจำนวนมากขึ้นกว่า โดยมีผึ้งบางตัวที่หมุนตัว เพื่อต่อยลงบนแผ่นกระจก และที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงเอาต์พุตเท่ากับหรือมากกว่า 4.001 กิโลโวลท์พีคทูพีค ทำให้ผึ้งบินมารวมตัวกันบนแผ่นกระจกจำนวนมากขึ้น โดยมีบางตัวเกิดรอยไหม้ที่ปีก ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้สามารถพัฒนาให้เป็นงานวิจัยเชิงประยุกต์ และต่อยอดให้เป็นนวัตกรรมในเชิงพานิชย์ได้ในอนาคต

Abstract

190762

This research was presented the design and construction of high voltage AC switching power supply. The power supply based on flyback converter comprises of a pulse generator using IC#TL494 on the frequency adjustment at 2.5 kHz, 3 kHz, 4 kHz by using IC#TLP250. The power MOSFET switching using Power MOSFET driver IRFP460 to control flyback transformer to generate 1 kV_{P-P} or more by using wire on glass plate to observe bee behavior. The experimental results are duty cycle increasing of high voltage AC at 2.041 kV_{P-P} at duty cycle 1 % , 3.241 kV_{P-P} at duty cycle 2 % , 4.001 kV_{P-P} at duty cycle 3 % and 5.281 kV_{P-P} at duty cycle 4 % which the testing of bee observtion at V_{OUT} equal 2.041 kV_{P-P}. The bee behavior indicated only few bee flying in circle around the glass plate. After adjustment of voltage to V_{OUT} equal 3.241 kV_{P-P} more number of bee fly around the glass plate. Some bee stick on glass plate and V_{OUT} equal or more than 4.001 kV_{P-P} more number of bee fly around the glass plate. Some bee got burn on wings. Then this research can be developed further for commercial in electrical appliances industry in the future.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการวิจัย จากมหาวิทยาลัยรามคำแหง พ.ศ. 2554 ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำโครงการวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณท่านผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือโครงการวิจัยนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณท่านคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่ให้ข้อเสนอแนะและสนับสนุนโครงการวิจัยนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่ให้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณคุณยาย คุณพ่อ และคุณแม่ ของผู้วิจัย ที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือทุกด้านในการทำวิจัย จนทำให้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ดร.มัลลิกา เกตุแก้ว ที่คอยให้กำลังใจ และช่วยเหลือทุกด้านในการทำวิจัยนี้ จนทำให้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณประธานกรรมการบริษัท บีโปรดักส์อินดัสตรี้ จำกัด และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ ช่วยอนุเคราะห์รังผึ้งในการทดสอบ

และขอขอบคุณท่านอาจารย์ ดร.สุรพล ดำรงกิตติกุล ที่เป็นอาจารย์ที่ติดต่อบริษัทบีโปรดักส์อินดัสตรี้ จำกัด โดยให้ความช่วยเหลือทุกๆด้าน ออกแบบการทดสอบ และร่วมทำการทดสอบด้วย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ I
กิตติกรรมประกาศ II
สารบัญ III
สารบัญตาราง V
สารบัญรูป VI
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมา 1
1.2 วัตถุประสงค์วิจัย 1
1.3 ขอบเขตการวิจัย 1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย 2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 3
2.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3
2.2 ตัวประกอบกำลัง 5
2.3 เพาเวอร์มอสเฟต 7
2.4 ออปโต้คัปเปอร์ 15
2.5 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ 16
2.6 ภาควงจรควบคุม 17
2.7 หม้อแปลงความถี่สูง 22
บทที่ 3 การออกแบบ 30
3.1 การออกแบบวงจรเร็กติไฟร์และฟิลเตอร์ด้านอินพุต 30
3.2 การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ 31
3.3 การออกแบบวงจรควบคุมและวงจรขับเกท 33
3.4 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงความถี่สูงที่ออกแบบ 34
บทที่ 4 ผลการทดสอบ 32
4.1 การทดสอบวงจรส่วนต่างๆ ในแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงความถี่สูง 36
4.1.1 การทดสอบวัดสัญญาณภาควงจรควบคุม 36
4.1.2 การทดสอบวัดสัญญาณ (V_{GS}) ของภาควงจรกำลัง
และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงฟลายแบค (I_{OUT}) 39
4.1.3 การทดสอบวัดสัญญาณ V_{GS} และ V_{DS} ของภาควงจรกำลัง 42

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.4 การทดสอบวัดสัญญาณภาคอินพุต คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุต กระแสไฟฟ้าอินพุต และสัญญาณ FFT ด้านอินพุตของวงจรคอนเวอร์เตอร์ พร้อมทั้งคงค่าความถี่ให้คงที่ (ปรับดิวตี้ไซเคิ้ลตั้งแต่ 1%, 2%, 3% และ 4%) 45

4.1.5 การทดสอบวัดสัญญาณภาคเอาต์พุต คือ สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงด้านเอาต์พุต (V_{OUT}) ของหม้อแปลงฟลายแบคในขณะต่อโหลด (โหลดที่ใช้เป็นเส้นลวดตัวนำที่วางบนแผ่นกระจกสำหรับสร้างสนามไฟฟ้า เพื่อสังเกตปฏิกิริยาของผึ้ง) 47

4.1.6 ผลการทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงความถี่สูง 48

4.2 ผลการทดสอบ โดยใช้เส้นลวดตัวนำที่วางบนแผ่นกระจกสำหรับสร้างสนามไฟฟ้า เพื่อสังเกตปฏิกิริยาของผึ้ง โดยคงค่าความถี่ไว้ที่ 2.5 kHz ในกรณีศึกษา 4 ครั้ง (ปรับดิวตี้ไซเคิ้ล 1% ที่ 2.041 kV_{P-P}, ดิวตี้ไซเคิ้ล 2% ที่ 3.241 kV_{P-P}, ดิวตี้ไซเคิ้ล 3% ที่ 4.001 kV_{P-P} และ ดิวตี้ไซเคิ้ล 4% ที่ 5.281 kV_{P-P}) 49

บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ และแนวทางการพัฒนา 54

5.1 สรุปผลการทดสอบ 54

5.2 สรุปโดยรวม 55

5.3 แนวทางการพัฒนา 56

บรรณานุกรม 57

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ดาต้าชีตไอซีเบอร์ TLP250 ก-1

ภาคผนวก ข ดาต้าชีตเพาเวอร์มอสเฟต เบอร์ IRFP460 ข-1

ภาคผนวก ค ดาต้าชีตไอซีเบอร์ TL494 ค-1

ภาคผนวก ง เส้นลวดตัวนำที่วางบนแผ่นกระจกสำหรับสร้างสนามไฟฟ้า เพื่อสังเกตปฏิกิริยาของผึ้ง (โหลดของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงความถี่สูง) ง-1

ภาคผนวก จ ขนาดแผ่นระบายความร้อนของเพาเวอร์มอสเฟต จ-1

ภาคผนวก ฉ ดาต้าชีตไดโอด เบอร์ MUR840 ฉ-1

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูง ในขณะจ่ายโหลด (โหลดที่ใช้เป็นเส้นลวดตัวนำที่วางบนแผ่นกระจกสำหรับสร้างสนามไฟฟ้า เพื่อสังเกตปฏิกิริยาของผึ้ง) โดยคงค่าความถี่ไว้ที่ 2.5 kHz 48

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบ เพื่อสังเกตปฏิกิริยาของผึ้ง ในกรณีศึกษา 4 ครั้ง ที่ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงที่แตกต่างกัน โดยคงค่าความถี่ไว้ที่ 2.5 kHz (ปรับดิวตี้ไซเคิ้ล 1% ที่ 2.041 kV_{P-P} , ดิวตี้ไซเคิ้ล 2% ที่ 3.241 kV_{P-P}, ดิวตี้ไซเคิ้ล 3% ที่ 4.001 kV_{P-P} และ ดิวตี้ไซเคิ้ล 4% ที่ 5.281 kV_{P-P}) 49

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิ่ง 4
รูปที่ 2.2 กระแสไฟฟ้าในสาย 5
รูปที่ 2.3 สัญลักษณ์ของมอสเฟตชนิด N-CHANNEL ENHANCEMENT MODE 8
รูปที่ 2.4 ตัวเก็บประจุที่แฝงที่ขาต่างๆ ภายในตัวเพาเวอร์มอสเฟต 8
รูปที่ 2.5 สัญญาณในการสวิตชิ่งของมอสเฟต 9
รูปที่ 2.6 ลักษณะกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟต ขณะเริ่มนำกระแสและหยุดนำกระแส 10
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของการถ่ายเทความร้อนออกจากเพาเวอร์มอสเฟตด้วย แผ่นระบายความร้อนไปยังอากาศรอบข้าง 11
รูปที่ 2.8 SOA Curve ของเพาเวอร์มอสเฟต 13
รูปที่ 2.9 วงจร Common Source 13
รูปที่ 2.10 การขับเพาเวอร์มอสเฟตให้นำกระแสด้วยไอซี CMOS โดยตรง 14
รูปที่ 2.11 โครงสร้างภายในของออปโต้คัปเปลอร์ 15
รูปที่ 2.12 ตัวเชื่อมโยงทางแสงโดยทั่วไป 16
รูปที่ 2.13 ลักษณะวงจรพื้นฐานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ 17
รูปที่ 2.14 วงจรพื้นฐานสำหรับการควบคุมในโหมดควบคุมจากแรงดันไฟฟ้า 18
รูปที่ 2.15 ลักษณะความกว้างของพัลส์จาก PWM 19
รูปที่ 2.16 บล็อกไดอะแกรมของไอซีเบอร์ TL494 20
รูปที่ 2.17 Timing Diagram ของไอซีเบอร์ TL494 20
รูปที่ 2.18 กราฟความสัมพันธ์ของค่า R_T และC_T ในการกำหนดความถี่ 21
รูปที่ 2.19 ลักษณะการเลือกใช้เอาท์พุตของไอซีเบอร์ TL494 22
รูปที่ 2.20 การเกิดฟลักซ์แม่เหล็กใน Coil แกนอากาศ 22
รูปที่ 2.21 การเกิดฟลักซ์แม่เหล็กใน Coil ที่ใช้แกนวัสดุแม่เหล็ก 23
รูปที่ 2.22 การเกิดฟลักซ์แม่เหล็กในแกนปิด 23
รูปที่ 2.23 ฮีสเตอร์รีซีสลูปของแกนที่ไม่มีช่องอากาศ 25
รูปที่ 2.24 ฮีสเตอร์รีซีสลูปของแกนที่มีช่องอากาศ 26
รูปที่ 2.25 Magnetization Curve แสดงย่านเชิงเส้นและย่านอิ่มตัว 26
รูปที่ 2.26 หม้อแปลงไฟฟ้า 27
รูปที่ 2.27 ลักษณะการพันหม้อแปลง 29
รูปที่ 2.28 ลักษณะของหม้อแปลงฟลายแบค 29

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.1 บล็อคไดอะแกรมของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงความถี่สูง 30

รูปที่ 3.2 การต่อไอซีเบอร์ TL494 33

รูปที่ 3.3 วงจรขับเกท โดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250 ในการแยกกราวด์และขยายสัญญาณภายในตัว 33

รูปที่ 3.4 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงความถี่สูงที่ออกแบบ 34

รูปที่ 3.5 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงความถี่สูงที่สร้างขึ้น 35

รูปที่ 3.6 ลักษณะการต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงความถี่สูงที่สร้างขึ้นกับเส้นลวดที่วางบนแผ่นกระจกสำหรับสร้างสนามไฟฟ้า เพื่อสังเกตปฏิกิริยาของผึ้ง 35

รูปที่ 4.1 (ก) สัญญาณเอาต์พุตของไอซีเบอร์ TL494 (ดิวตี้ไซเคิล 1%) และ (ข) สัญญาณเอาต์พุตของไอซีเบอร์ TL494 (ดิวตี้ไซเคิล 2%) ขณะต่อโหลด 36

รูปที่ 4.2 (ก) สัญญาณเอาต์พุตของไอซีเบอร์ TL494 (ดิวตี้ไซเคิล 3%) และ (ข) สัญญาณเอาต์พุตของไอซีเบอร์ TL494 (ดิวตี้ไซเคิล 4%) ขณะต่อโหลด 36

รูปที่ 4.3 (ก) สัญญาณเอาต์พุตของไอซีเบอร์ TL494 (ดิวตี้ไซเคิล 1%) และ (ข) สัญญาณเอาต์พุตของไอซีเบอร์ TL494 (ดิวตี้ไซเคิล 2%) ขณะต่อโหลด 37

รูปที่ 4.4 (ก) สัญญาณเอาต์พุตของไอซีเบอร์ TL494 (ดิวตี้ไซเคิล 3%) และ (ข) สัญญาณเอาต์พุตของไอซีเบอร์ TL494 (ดิวตี้ไซเคิล 4%) ขณะต่อโหลด 37

รูปที่ 4.5 (ก) สัญญาณเอาต์พุตของไอซีเบอร์ TL494 (ดิวตี้ไซเคิล 1%) และ (ข) สัญญาณเอาต์พุตของไอซีเบอร์ TL494 (ดิวตี้ไซเคิล 2%) ขณะต่อโหลด 38

รูปที่ 4.6 (ก) สัญญาณเอาต์พุตของไอซีเบอร์ TL494 (ดิวตี้ไซเคิล 3%) และ (ข) สัญญาณเอาต์พุตของไอซีเบอร์ TL494 (ดิวตี้ไซเคิล 4%) ขณะต่อโหลด 38

รูปที่ 4.7 (ก) สัญญาณ V_{GS} ของเพาเวอร์มอสเฟต และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (ดิวตี้ไซเคิล 1%) และ (ข) สัญญาณ V_{GS} ของเพาเวอร์มอสเฟต และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (ดิวตี้ไซเคิล 2%) ขณะ ต่อโหลด 39

รูปที่ 4.8 (ก) สัญญาณ V_{GS} ของเพาเวอร์มอสเฟต และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (ดิวตี้ไซเคิล 3%) และ (ข) สัญญาณ V_{GS} ของเพาเวอร์มอสเฟต และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (ดิวตี้ไซเคิล 4%) ขณะต่อโหลด 39

รูปที่ 4.9 (ก) สัญญาณ V_{GS} ของเพาเวอร์มอสเฟต และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (ดิวตี้ไซเคิล 1%) และ (ข) สัญญาณ V_{GS} ของเพาเวอร์มอสเฟต และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (ดิวตี้ไซเคิล 2%) ขณะต่อโหลด 40

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.10 (ก) สัญญาณ V_{GS} ของเพาเวอร์มอสเฟต และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (ดิวตี้ไซเคิล 3%) และ (ข) สัญญาณ V_{GS} ของเพาเวอร์มอสเฟต และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (ดิวตี้ไซเคิล 4%) ขณะต่อโหลด 40

รูปที่ 4.11 (ก) สัญญาณ V_{GS} ของเพาเวอร์มอสเฟต และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (ดิวตี้ไซเคิล 1%) และ (ข) สัญญาณ V_{GS} ของเพาเวอร์มอสเฟต และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (ดิวตี้ไซเคิล 2%) ขณะต่อโหลด 41

รูปที่ 4.12 (ก) สัญญาณ V_{GS} ของเพาเวอร์มอสเฟต และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (ดิวตี้ไซเคิล 3%) และ (ข) สัญญาณ V_{GS} ของเพาเวอร์มอสเฟต และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (ดิวตี้ไซเคิล 4%) ขณะต่อโหลด 41

รูปที่ 4.13 (ก) สัญญาณ V_{GS} และ V_{DS} ของเพาเวอร์มอสเฟต (ดิวตี้ไซเคิล 1%) และ (ข) สัญญาณ V_{GS} และ V_{DS} ของเพาเวอร์มอสเฟต (ดิวตี้ไซเคิล 2%) ขณะต่อโหลด 42

รูปที่ 4.14 (ก) สัญญาณ V_{GS} และ V_{DS} ของเพาเวอร์มอสเฟต (ดิวตี้ไซเคิล 1%) และ (ข) สัญญาณ V_{GS} และ V_{DS} ของเพาเวอร์มอสเฟต (ดิวตี้ไซเคิล 2%) ขณะต่อโหลด 42

รูปที่ 4.15 (ก) สัญญาณ V_{GS} และ V_{DS} ของเพาเวอร์มอสเฟต (ดิวตี้ไซเคิล 1%) และ (ข) สัญญาณ V_{GS} และ V_{DS} ของเพาเวอร์มอสเฟต (ดิวตี้ไซเคิล 2%) ขณะต่อโหลด 43

รูปที่ 4.16 (ก) สัญญาณ V_{GS} และ V_{DS} ของเพาเวอร์มอสเฟต (ดิวตี้ไซเคิล 1%) และ (ข) สัญญาณ V_{GS} และ V_{DS} ของเพาเวอร์มอสเฟต (ดิวตี้ไซเคิล 2%) ขณะต่อโหลด 43

รูปที่ 4.17 (ก) สัญญาณ V_{GS} และ V_{DS} ของเพาเวอร์มอสเฟต (ดิวตี้ไซเคิล 1%) และ (ข) สัญญาณ V_{GS} และ V_{DS} ของเพาเวอร์มอสเฟต (ดิวตี้ไซเคิล 2%) ขณะต่อโหลด 44

รูปที่ 4.18 (ก) สัญญาณ V_{GS} และ V_{DS} ของเพาเวอร์มอสเฟต (ดิวตี้ไซเคิล 1%) และ (ข) สัญญาณ V_{GS} และ V_{DS} (ดิวตี้ไซเคิล 2%) ขณะต่อโหลด 44

รูปที่ 4.19 (ก) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าอินพุต (V_{in}) และสัญญาณ FFT ของแรงดันไฟฟ้าอินพุต (V_{in}) ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ และ (ข) สัญญาณกระแสไฟฟ้าอินพุต (I_{in}) และสัญญาณ FFT ของกระแสไฟฟ้าอินพุต (I_{in}) ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (ดิวตี้ไซเคิล 1%) ขณะต่อโหลด 45

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.20 (ก) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าอินพุต (V_{in}) และสัญญาณ FFT ของแรงดันไฟฟ้าอินพุต (V_{in}) ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ และ (ข) สัญญาณกระแสไฟฟ้าอินพุต (I_{in}) และสัญญาณ FFT ของกระแสไฟฟ้าอินพุต (I_{in}) ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (ดิวตี้ไซเคิล 2%) ขณะต่อโหลด 45

รูปที่ 4.21 (ก) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าอินพุต (V_{in}) และสัญญาณ FFT ของแรงดันไฟฟ้าอินพุต (V_{in}) ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ และ (ข) สัญญาณกระแสไฟฟ้าอินพุต (I_{in}) และสัญญาณ FFT ของกระแสไฟฟ้าอินพุต (I_{in}) ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (ดิวตี้ไซเคิล 3%) ขณะต่อโหลด 46

รูปที่ 4.22 (ก) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าอินพุต (V_{in}) และสัญญาณ FFT ของแรงดันไฟฟ้าอินพุต (V_{in}) ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ และ (ข) สัญญาณกระแสไฟฟ้าอินพุต (I_{in}) และสัญญาณ FFT ของกระแสไฟฟ้าอินพุต (I_{in}) ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (ดิวตี้ไซเคิล 4%) ขณะต่อโหลด 46

รูปที่ 4.23 (ก) สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงด้านเอาต์พุต (V_{OUT}) ของหม้อแปลงฟลายแบค มีค่าเท่ากับ 2.041 กิโลโวลท์พีคทูพีค ที่ดิวตี้ไซเคิล 1% และ (ข) สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงด้านเอาต์พุต (V_{OUT}) ของหม้อแปลงฟลายแบคมีค่าเท่ากับ 3.241 กิโลโวลท์พีคทูพีค ที่ดิวตี้ไซเคิล 2% ขณะต่อโหลด 47

รูปที่ 4.24 (ก) สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงด้านเอาต์พุต (V_{OUT}) ของหม้อแปลงฟลายแบค มีค่าเท่ากับ 4.001 กิโลโวลท์พีคทูพีค ที่ดิวตี้ไซเคิล 3% และ (ข) สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงด้านเอาต์พุต (V_{OUT}) ของหม้อแปลงฟลายแบคมีค่าเท่ากับ 5.281 กิโลโวลท์พีคทูพีค ที่ดิวตี้ไซเคิล 4% ขณะต่อโหลด 47

รูปที่ 4.25 กรณีศึกษาที่ 1 ผึ้งจะบินมารวมตัวกันบนแผ่นกระจกจำนวนน้อย 50

รูปที่ 4.26 กรณีศึกษาที่ 2 ผึ้งจะบินมารวมตัวกันบนแผ่นกระจกจำนวนมากขึ้นกว่าในกรณีศึกษาที่ 1 และมีผึ้งบางตัวที่หมุนตัว เพื่อต่อยลงบนแผ่นกระจก 51

รูปที่ 4.27 กรณีศึกษาที่ 3 ผึ้งจะบินมารวมตัวกันบนแผ่นกระจกจำนวนมากขึ้นกว่าในกรณีศึกษาที่ 2 และมีบางตัวเกิดรอยไหม้ที่ปีก 52

รูปที่ 4.28 ผึ้งจะบินมารวมตัวกันบนแผ่นกระจกจำนวนเท่ากับในกรณีศึกษาที่ 3 และมีบางตัวเกิดรอยไหม้ที่ปีก 53