การออกแบบและสร้างพัลสวิดธ์มอดูเลท(พี.ดับเบิลยู.เอ็ม)
อินเวอร์เตอร์ ขนาด 1.0 เควีเอ 220 โวลท์ 50 เฮิทซ์

นายมงคล ลีกำเนิดไทย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2529

ISBN 974-566-803-6

013357

I16294414X

Design and Construction of a 1.0 kVA, 220 V, 50 Hz Pulse - Width Modulated (PWM) Inverter.

Mr. Mongkol Leekamnerdthai

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A thesis Submitted in Partial Fulfillment of the requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Electrical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
1986

ISBN 974-566-803-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและสร้างพัลสวิดธ์มอดูเลท(พี.ดับเบิลยู.เอ็ม) อินเวอร์เตอร์ ขนาด 1.0 เควีเอ 220 โวลท์ 50 เฮิทซ์
โดย	นายมงคล ลีกำเนิดไทย
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพบูลย์ ไชยนิล

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.สรชัย พิศาลบุตร)

รักษาการในตำแหน่งรองคณบดีฝ่ายวิชาการ

ปฏิบัติราชการแทนรักษาการในตำแหน่งคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประโมทย์ อุณห์ไวทยะ)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เทียนชัย ประดิสถายน)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จุมพล พรหมพิทักษ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพบูลย์ ไชยนิล)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและสร้างพัลสวิดธ์มอดูเลท(พี.ดับเบิลยู.เอ็ม) อินเวอร์เตอร์ ขนาด 1.0 เควีเอ 220 โวลท์ 50 เฮิทซ์

โดย นายมงคล ลีกำเนิดไทย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพบูลย์ ไชยนิล

ปีการศึกษา 2528

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้แสดงการออกแบบและสร้าง พัลสวิดธ์มอดูเลทอินเวอร์เตอร์ ขนาด 1.0 เควีเอ 220 โวลท์ 50 เฮิทซ์ โดยใช้ไทรีสเตอร์เป็นอุปกรณ์หลัก แรงดันกระแสตรงเข้า(DC Input Votage)ใช้ 60 Vdc วงจรกำลัง(Power Circuit) อันเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งใช้วงจรที่พัฒนามาจากวงจรแมคเมอร์เรย์ซึ่งเป็นวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์การคอมมิวเตตไทรีสเตอร์ด้วยวิธีการจุดชนวนไทรีสเตอร์ช่วย ก่อให้เกิดการสวิงของกระแสในวงจร LC ทำให้ไทรีสเตอร์หยุดนำกระแส ในช่วงเริ่มทำงานของ อินเวอร์เตอร์ไม่จำเป็นต้องประจุกระแสไฟให้แก่ตัวเก็บประจุก่อนสามารถที่จะคอมมิวเตตไทรีสเตอร์ได้ทันที อินเวอร์เตอร์นี้ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ย่อย 3 ชุด ที่ทำงานอิสระต่อกันโดยการควบคุมการเลื่อนเฟสให้ต่างกันแรงดันกระแสไฟออก(AC Output Voltage) เกิดจากผลรวมของแรงดันกระแสไฟออกของอินเวอร์เตอร์ย่อยทั้ง 3 ชุด โดยการใช้หม้อแปลง 3 ตัวต่อขดลวดทุติยภูมิอนุกรมกัน ทำให้แรงดันออกมีลักษณะรูปคลื่นขั้นบันได 12 ขั้นคล้ายรูปคลื่นไซน์เพื่อลดฮาร์โมนิคที่ประกอบอยู่ ในการทดสอบอินเวอร์เตอร์ เพื่อหาลักษณะสมบัติได้กระทำทั้งในภาวะไร้โหลดและมีโหลด

Thesis Title Design and Construction of a 1.0 kVA, 220 V, 50 Hz Pulse Width Modulated (PWM) Inverter

Name Mr. Mongkol Leekamnerdthai

Department Electrical Engineering

Thesis Adviser Assistant Professor Paibul Chaiyanil

Academic Year 1985

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ABSTRACT

This thesis is dealt with the design and construction of a 1.0 kVA,220 V,50 Hz Pulse Width Modulated (PWM) Inverter using thyristors as main components. The power circuit is modified from a McMurray bridge inverter which is supplied by a 60 Vdc from batteries. Turning the main thyristors off is achieved by firing an auxiliary thyristor which results in an oscillating current in the LC circuit. The commutation circuit does not require precharging of a commutation capacitor,therefore, the circuit is ready for commutation at any time. The inverter consists of 3 sub-inverters which operate independently. The output voltage of each sub-inverters has the same waveform but shifted in phase from one to another. Transformers are used to combine the voltage waveform from the sub-inverters. Thus the resultant

output waveform has harmonic contents reduction. In order to study the PWM inverter and characteristics ; noload and on-load conditions are being tested and discussed.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพบูลย์ ไชยนิล อาจารย์ที่ปรึกษาที่แนะนำแนวทางการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นมาโดยตลอด และขอบเขตของการวิจัยที่เป็นประโยชน์หลายอย่าง และกระตุ้นให้ผู้ทำวิทยานิพนธ์เห็นถึงความสำคัญของวิทยานิพนธ์นี้ ทั้งยังช่วยกรุณาอ่านทบทวน แก้ไขวิทยานิพนธ์หลายอย่างจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงลงได้

ขอขอบพระคุณบริษัทกระเบื้อง กระดาษไทย(โรงงานสระบุรี)เป็นอย่างยิ่งที่กรุณาให้ผู้ทำวิทยานิพนธ์ได้ใช้สถานที่และเครื่องคอมพิวเตอร์ PC ในการพิมพ์งานวิทยานิพนธ์, ขอขอบคุณนายเมธี บรรจงศิลป์ ผู้บังคับบัญชา และเพื่อนพนักงานทุกคนที่ได้สนับสนุนให้กำลังใจและช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงลงได้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดาของผู้ทำวิทยานิพนธ์ที่ให้กำลังใจ สอบถามความก้าวหน้าในการทำวิทยานิพนธ์เสมอมาและกระตุ้นให้ผู้ทำวิทยานิพนธ์เห็นความสำคัญในการเรียนปริญญาโท

ท้ายนี้ขอขอบพระคุณท่านรองศาสตราจารย์ ดร.เทียนชัย ประดิสถายน ที่กรุณาแนะนำหลายประการที่เป็นประโยชน์แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ฆ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง
กิตติกรรมประกาศ.....จ
รายการรูปและกราฟ.....ฉ
รายการตาราง.....ฑ
สัญญลักษณ์.....ฒ

บทที่

1. บทนำ

1.1 คำนำ.....1
1.2 อินเวอร์เตอร์แบบใช้ไทรีสเตอร์.....1
1.3 จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์และประโยชน์ที่จะได้รับ....2
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย.....3
1.4.1 บทที่ 2 3
1.4.2 บทที่ 3 3
1.4.3 บทที่ 4 3
1.4.4 บทที่ 5 3
1.4.5 บทที่ 6 3
1.4.6 บทที่ 7 3
1.4.7 ผลการทดสอบ 3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2. ไทรีสเตอร์

2.1 คำนำ.....4

2.2 ไทรีสเตอร์.....4

2.3 หลักการทำงานและลักษณะสมบัติของไทรีสเตอร์.....6

2.3.1 หลักการทำงาน.....6

2.3.2 ลักษณะคุณสมบัติของไทรีสเตอร์.....7

2.4 การจุดชนวนไทรีสเตอร์.....9

2.5 การนำกระแสและการหยุดนำกระแสของไทรีสเตอร์..10

2.6 การคอมมิวเตดไทรีสเตอร์ด้วยวิธีบีบบังคับ.....11

3. การวิเคราะห์ฮาร์โมนิค

3.1 คำนำ.....14

3.2 การวิเคราะห์ฮาร์โมนิค.....14

3.3 วิธีการปรับปรุงคลื่นแรงดันไฟฟ้าออก
ของวงจรอินเวอร์เตอร์.....17

3.3.1 วงจรเรโซแนนซ์ของโหลด.....17

3.3.2 การลดฮาร์โมนิคด้วยวงจรกรองคลื่น.....17

3.3.3 การลดฮาร์โมนิคด้วยพัลสวิดธ์มอดูเลท.....18

3.3.4 Multiple pulse modutation.....19

3.3.5 การเลือกที่จะลดฮาร์โมนิคที่ความถี่ต่าง ๆ .23

3.3.5 การลดฮาร์โมนิคด้วยการต่อหม้อแปลง.....25

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4. การวิเคราะห์เพื่อออกแบบสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์

4.1 คำนำ.....28

4.2 การทำงานของวงจร.....28

4.3 การวิเคราะห์วงจรคอมมิวเตต.....33

5. การออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์

5.1 คำนำ.....37

5.2 การออกแบบวงจรกำลัง.....38

5.2.1 กำลังไฟฟ้าเข้า.....38

5.2.2 กระแสเฉลี่ยของไทรีสเตอร์.....39

5.2.3 แรงดันสูงสุดของไทรีสเตอร์.....39

5.2.4 อุปกรณ์ในวงจรคอมมิวเตต L และ C ...40

5.2.5 กำหนดคุณสมบัติของไทรีสเตอร์ที่จะใช้.....40

5.2.6 วงจรสนับเบอร์.....41

5.2.6 หม้อแปลงไฟฟ้า.....42

5.3 การออกแบบวงจรควบคุม.....43

5.3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณ.....43

5.3.2 วงจรหน่วงเวลา.....46

5.3.3 วงจรจุดชนวน.....47

5.4 การออกแบบวงจรป้องกัน.....50

5.4.1 วงจรป้องกันแรงดันแหล่งจ่ายไฟ
ต่ำกว่ากำหนด.....50

5.4.2 วงจรป้องกันกระแสเกิน.....52

5.4.3 วงจรกำหนดค่าเริ่มต้น.....52

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6. การปรับเทียบและทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์

6.1 คำนำ.....51

6.2 การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์.....51

6.2.1 การทดสอบวงจรควบคุม.....53

6.2.2 การทดสอบวงจรกำลัง.....56

7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....

7.1 คำนำ 67

7.2 วงจรควบคุม 67

7.3 วงจรอินเวอร์เตอร์ 68

7.3.1 วงจรอินเวอร์เตอร์แต่ละชุด 68

7.3.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ 68

7.4 ปัญหาในการดำเนินการวิจัย 69

7.5 ข้อเสนอแนะ 72

เอกสารอ้างอิง.....74

ภาคผนวก.....

ก. การออกแบบหม้อแปลงและขดลวดเหนี่ยวนำ.....76

ข. คุณสมบัติและรายละเอียดของอุปกรณ์.....82

ประวัติผู้เขียน.....97

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการรูปประกอบ

หน้า

รูปที่

2.1 ก) โครงสร้างของไทรีสเตอร์ 5
ข) สัญญลักษณ์ของไทรีสเตอร์.....5
2.2 โมเดลของไทรีสเตอร์แบบวงจรทรานซีสเตอร์ต่อกันแบบป้อนกลับค่าบวก.....6
2.3 ลักษณะคุณสมบัติของแรงดันและกระแสของไทรีสเตอร์.....8
2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแอโนดกับกระแสสลักกลอน.....9
2.5 แสดงคุณสมบัติของแรงดันและกระแสเกต.....10
2.6 วงจรการคอมมิวเตตไทรีสเตอร์ด้วยวิธีบังคับของวงจรซอปเปอร์..13
3.1 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีการลดช่วงกว้างของคลื่นเท่ากับ θ.....14
3.2 วงจร Ott Filter 18
3.3 แสดงฮาร์โมนิคที่ประกอบอยู่ในรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความกว้างของพัลสขนาดต่าง ๆ จากสมการ 3.1 19
3.4 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าออกที่ประกอบด้วยพัลสหลายพัลสในครึ่งไซเคิล 20
3.5 ฮาร์โมนิคที่ประกอบอยู่ในรูปคลื่นแรงดันรูปที่ 3.4 21
3.6 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากับรูปคลื่น Sinusoidal pulse 22
3.7 แสดงฮาร์โมนิคที่ประกอบอยู่ในรูปคลื่นของแรงดันจากรูปที่ 3.6 กรณี N = 10 22
3.8 แสดงการนำและหยุดนำกระแสไทรีสเตอร์ เพื่อลดฮาร์โมนิคที่ 3 และที่ 5 23
3.9 ก) การลดฮาร์โมนิคที่ 3 โดยการต่อหม้อแปลง 26
ข) รูปลักษณะการต่อหม้อแปลง 26
3.10 ก) การลดฮาร์โมนิคที่ 3 และที่ 5 โดยการปรับความกว้างของพัลสและเลื่อนเฟสให้ต่างกันแล้วต่อกับหม้อแปลง 27
ข) ลักษณะการต่อหม้อแปลง 27

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

หน้า

รูปที่

3.11 แสดงรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าออก 10 ชั้นบันได โดยการต่อหม้อแปลงหลาย ๆ แท็ป 27
4.1 ก) วงจรแมคเมอร์เรย์อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส 29
ข) วงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ที่ประกอบด้วยวงจรคอมมิวเตตแบบใหม่ (แสดงเพียงครึ่งวงจร) 29
4.2 ก) วงจรอินเวอร์เตอร์ที่พิจารณาในช่วงคอมมิวเตต T1 31
ข) รูปคลื่นแรงดันและกระแสในช่วงการคอมมิวเตต 31
4.3 แสดงขั้นตอนการคอมมิวเตตจากรูป 4.2 32
4.4 วงจร RLC ต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 33
5.1 ก) ลักษณะระบบอินเวอร์เตอร์ 37
ข) รูปคลื่นแรงดันออก 37
5.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรอินเวอร์เตอร์ 38
5.3 วงจรอินเวอร์เตอร์ ที่ออกแบบและสร้างแต่ละชุด 42
5.4 ก) บล็อกไดอะแกรมของวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 50 เฮิทซ์ ..44
ข) ลักษณะการต่อวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ 50 เฮิทซ์ 44
5.5 ก) รูปสัญญาณวงจรหน่วงเวลา 46
ข) การต่อวงจรหน่วงเวลาด้วย IC 74123 46
5.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรจุดชนวน 47
5.7 สัญญาณที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของวงจรจุดชนวน 48
5.8 วงจรขยายสัญญาณทริก 49
5.9 วงจรป้องกัน 51
6.1 วงจรควบคุมและวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์.....52
6.2 รูปแสดงชุดอินเวอร์เตอร์ 53
6.3 รูปคลื่นสัญญาณความถี่ 59

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

หน้า

รูปที่

6.4 รูปคลื่นสัญญานออกของวงจรหน่วงเวลาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสัญญานอ้างอิง 60
6.5 รูปคลื่นสัญญานครึ่งไซเคิลบวกและลบ 61
6.6 รูปคลื่นสัญญานทริกเมนไทรีสเตอร์ 61
6.7 วงจรการทดลองการคอมมิวเตตไทรีสเตอร์ 56
6.8 รูปคลื่นกระแสคอมมิวเตต i_c และแรงดันของตัวเก็บประจุ V_c เมื่อต่อวงจรชอปเปอร์ 62
6.9 รูปคลื่นกระแสคอมมิวเตต i_c และกระแสเมนไทรีสเตอร์ 62
6.10 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าออก V_o วงจรอินเวอร์เตอร์แต่ละชุด 63
6.11 รูปคลื่นกระแสคอมมิวเตต i_c และแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ V_c 63
6.12 รูปคลื่นกระแสโหลด i_o และแรงดันไฟฟ้าออก V_o ของวงจรอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดในภาวะโหลด R.....64
6.13 รูปคลื่นกระแสโหลด i_o และแรงดันไฟฟ้าออก V_o ของวงจรอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดในภาวะโหลด RL.....64
6.14 รูปคลื่นกระแสโหลด i_o และแรงดันไฟฟ้าออก V_o ของวงจรอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดในภาวะมีโหลด RLC.....65
6.15 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ เมื่อต่อแรงดันไฟฟ้าออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ทั้งสามชุดอนุกรมกันในภาวะไร้โหลด.....65
6.16 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ เมื่อต่อแรงดันไฟฟ้าออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ทั้งสามชุดอนุกรมกันในภาวะมีโหลด R.....66

รายการตาราง

ตารางที่ หน้า

6.1 แสดงผลการทดลองวงจรคอมมิวเตต รูปที่ 6.7
โดยการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุ C 57
ก-1 จำนวนรอบขดลวดต่อแรงดันของหม้อแปลง ขนาดไม่เกิน
1000 วีเอ 80

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญญลักษณ์

A	แอมแปร์
A	ขั้วแอโนดของไทรีสเตอร์
B_m	ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำสูงสุด
C	ตัวเก็บประจุไฟฟ้า
D	ไดโอด
E	แรงดันแหล่งจ่ายไฟ
E_m	ค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้า
f	ความถี่
I_H	กระแสยึดของไทรีสเตอร์(Holding Current)
I_l	กระแสสลักกลอนของไทรีสเตอร์(Latching Current)
I_T	กระแสไทรีสเตอร์
I_L	กระแสโหลด
I_g	กระแสเกต
i	กระแสไฟฟ้า
I_{po}	กระแสคอมมิวเตตสูงสุด($I_{po} = E/X$)
L	ขดลวดเหนี่ยวนำ
Θ	ความกว้างของพลัสของรูปคลื่น
α	ช่วงการหน่วงเวลา
μ	ความซาบซึมแม่เหล็กของแกนเหล็ก
R	ความต้านทาน
SWG	Standard wire gauge
T	คาบเวลา
t_{on}	ช่วงเวลานำกระแสไทรีสเตอร์
t_g	ช่วงเวลาหยุดนำกระแสไทรีสเตอร์
T	เมนไทรีสเตอร์
TA	ไทรีสเตอร์ช่วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

v	แรงดันไฟฟ้า
v_C	แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C
v_{BO}	แรงดันพังข้ามของไทรีสเตอร์
v_O	แรงดันไฟฟ้าออก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย