

วงจรรีเลย์กระแส 3 เฟสที่มีตัวประกอบกำลังด้านเข้าสูงโดยใช้เทคนิคอินเทอร์ลีฟ

นายจักรพงษ์ วงศาสุลักษณ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-102-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A THREE- PHASE INTERLEAVED HIGH POWER FACTOR RECTIFIER



MR . JAKRAPONG WONGSASULUG

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Department of Electrical Engineering

Graduate School

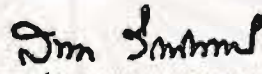
Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-333-102-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์ : วงจรเรียงกระแส ๑ เฟสที่มีตัวประกอบกำลังด้านเข้าสูงโดยใช้เทคนิคอิน
เตอร์ลิต์ฟ
โดย : นายจักรพงษ์ วงศาสุลักษณ์
ภาควิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : รองศาสตราจารย์ ดร.โคทม อาริยา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดี บัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาคา กิระนันท์)

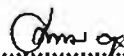
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



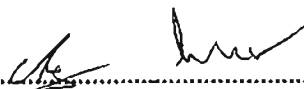
..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยuthana กุลวิทิต)



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.โคทม อาริยา)



..... กรรมการ
(อาจารย์เจ็ดกุล โสภวานิชย์)

จักรพงษ์ วงศาสุลักษณ์ : วงจรเรียงกระแส 3 เฟสที่มีตัวประกอบกำลังด้านเข้าสูงโดยใช้เทคนิคอินเทอร์ลีฟ (A THREE – PHASE INTERLEAVED HIGH POWER FACTOR RECTIFIER)
อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร . สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ , อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : รองศาสตราจารย์ ดร . โคทม อารียา , 68 หน้า. ISBN 974-333-102-6

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอแนวทางในการวิเคราะห์วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีตัวประกอบกำลังด้านเข้าสูง ซึ่งเป็นวงจรทระดับที่ทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องและมีโครงสร้างแบบสวิทช์สองตัว จุดเด่นของวงจรนี้คือ 1) มีการควบคุมที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน 2) สามารถลดระดับของแรงดันไฟตรงขาออก โดยที่กระแสด้านเข้ายังมีรูปร่างใกล้เคียงไซน์ 3) สามารถใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบแพคเกจ และผู้วิจัยยังได้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคนิคอินเทอร์ลีฟซึ่งมีข้อดีคือ 1) ทำให้ค่าระลอกของกระแสด้านเข้าลดลง 2) ความถี่ของระลอกเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า เพื่อลดขนาดของวงจรกรองด้านเข้า และ 3) สามารถทำการแยกโคดเพื่อปรับค่าของแรงดันไฟตรงขาออกตามต้องการได้ ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองยืนยันถึงความถูกต้องของแนวคิดที่นำเสนอ และวงจรที่นำเสนอมีค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ที่อันดับต่างๆ ไม่เกินค่าที่กำหนดตามมาตรฐาน IEC 61000-3-2 Class A

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
ปีการศึกษา.....2549.....

ลายมือชื่อนิสิต.....จักรพงษ์ วงศาสุลักษณ์.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4070529321

: MAJOR POWER ELECTRONICS

KEYWORD : HIGH POWER FACTOR , SMR , INTERLEAVED TECHNIQUE ,
HARMONICS , THREE-PHASE RECTIFIER

THESIS ADVISOR : Dr .SOMBOON SANGWONGVANICH

THESIS CO – ADVISOR : ASSO.PROF.GOTHOM ARYA , 68 pp. ISBN 974-333-102-6

This thesis presents an analysis of a three-phase high power factor rectifier whose topology is of a boost-type working in discontinuous current mode and using only two switches. This rectifier circuit has many advantages : 1) the control strategy is simple, 2) the DC bus voltage can be reduced while an input line current is still approximately sinusoidal, and 3) module power devices can be used. The interleaved technique is also introduced whose main features are: 1) the ripple component in the line current is smaller, 2) the current ripple frequency is twice thus reducing the size of input filter, and 3) an isolated transformer can be added to adjust the dc output voltage to a desired level. Simulation and experimental results are given, they confirm the validity of the proposed concept and prove that the line current harmonics are conformed to IEC 61000-3-2 Class A standard.

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
ปีการศึกษา.....๒๕๔๒.....

ลายมือชื่อนิติศ.....จิตรพงษ์ วงศ์สุวณิก.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*Som*.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....*Gothom*.....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือ และเอาใจใส่อย่างดียิ่งของอาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ และรองศาสตราจารย์ ดร. โททม อารีธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำตลอดจนความช่วยเหลือต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย รวมทั้งบริษัท APY ที่กรุณาเอื้อเฟื้ออุปการะในการทำวิจัย ขอขอบคุณ โครงการศึกษากันกุฎิที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษาให้การสนับสนุนในทุกๆด้าน และให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา

จักรพงษ์ วงสาสุลักษณ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญเรื่อง	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
2 วงจรที่ใช้โครงสร้างสวิตช์สองตัว	5
3 วงจรที่ใช้เทคนิคอินเทอร์ลีฟ	14
4 การออกแบบวงจรควบคุม	20
5 ผลการทดสอบการทำงาน	28
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	62
ภาคผนวก	63
รายการอ้างอิง	67
ประวัติผู้เขียน	68

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

1.1 มาตรฐาน IEC 1000-3-2 Class A.....3



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 รูปวงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์แบบใช้สวิตช์สองตัว	2
1.2 รูปโครงสร้างรวมของวงจรที่ใช้เทคนิคอินเตอร์ลีฟ	2
2.1 รูปวงจรในช่วงการทำงาน $0 < \omega t < \frac{\pi}{3}$	5
2.2 รูปการทำงานของวงจรในโหมดที่ 1	6
2.3 รูปการทำงานของวงจรในโหมดที่ 2	6
2.4 รูปการทำงานของวงจรในโหมดที่ 3	7
2.5 รูปการทำงานของวงจรในโหมดที่ 4	7
2.6 รูปการทำงานของวงจรในโหมดที่ 5	8
2.7 รูปคลื่นกระแสในแต่ละคาบการสวิตช์	9
2.8 รูปวงจรสมมูล 1 เฟสของวงจรในรูปที่ 2.1	10
2.9 รูปกระแสของแหล่งจ่ายที่จำลองโดยโปรแกรม Matlab	11
2.10 รูปกระแสของแหล่งจ่ายที่จำลองโดยโปรแกรม PSPICE	11
2.11 สเปกตรัมของกระแสในรูปที่ 2.10	12
2.12 สเปกตรัมที่บริเวณความถี่การสวิตช์ของกระแสในรูปที่ 2.10	13
3.1 รูปวงจรที่ใช้เทคนิคอินเตอร์ลีฟ	14
3.2 รูปคลื่นกระแสในขณะที่ใช้เทคนิคอินเตอร์ลีฟ	15
3.3 รูปกระแสของแหล่งจ่ายที่จำลองโดยโปรแกรม PSPICE	16
3.4 รูปแสดงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทั้งสองชุดที่มีลักษณะเหมือนกัน	16
3.5 รูปสเปกตรัมของกระแสในรูปที่ 3.3	17
3.6 รูปสเปกตรัมที่บริเวณความถี่การสวิตช์ของกระแสในรูปที่ 3.4	17
3.7 รูปกระแสของแหล่งจ่ายที่จำลองโดยโปรแกรม PSPICE	18
3.8 รูปสเปกตรัมของกระแสในรูปที่ 3.7	18
3.9 รูปสเปกตรัมที่บริเวณความถี่การสวิตช์ของกระแสในรูปที่ 3.7	18
4.1 รูปวงจรที่ใช้สวิตช์สองตัว	20
4.2 รูปผลตอบแบบขั้นของวงจรสมมูลสัญญาณขนาดเล็ก(simulink)	22
4.3 รูปผลตอบแบบขั้นของวงจรสมมูลสัญญาณขนาดเล็ก(PSPICE)	22

4.4 แผนภาพบล็อกของระบบ.....23

4.5 รูปผลตอบแบบของวงจรที่ทำงานในวงรอบปิด25

4.6 วงจรที่ใช้เทคนิคอินเตอร์ลิต์.....23

4.7 รูปแสดงผลตอบของวงจรที่ทำงานในวงรอบปิด.....25

5.1 กราฟแสดงปริมาณแรงดันฮาร์โมนิกของแหล่งจ่ายแรงดันเฟส a28

5.2 กราฟแสดงปริมาณแรงดันฮาร์โมนิกของแหล่งจ่ายแรงดันเฟส a28

5.3 กราฟแสดงปริมาณแรงดันฮาร์โมนิกของแหล่งจ่ายแรงดันเฟส a29

5.4 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้านเข้าเมื่อ $RL = 540 \Omega$ 30

5.5 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับเมื่อ $RL = 540 \Omega$ 30

5.6 สเปกตรัมของกระแสที่บริเวณความถี่การสวิตช์30

5.7 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $RL = 540 \Omega$ 31

5.8 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ia.....31

5.9 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ib.....31

5.10 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ic.....32

5.11 กราฟเปรียบเทียบปริมาณกระแสฮาร์โมนิกระหว่างกระแสที่ได้จากการทดลองกับที่มาตรฐาน IEC 1000-3-2 Class A กำหนดไว้32

5.12 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้านเข้าเมื่อ $RL = 1200 \Omega$ 33

5.13 รูปกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับเมื่อ $RL = 1200 \Omega$ 33

5.14 สเปกตรัมของกระแสที่บริเวณความถี่การสวิตช์33

5.15 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $RL = 1200 \Omega$ 34

5.16 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ia.....34

5.17 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ib.....34

5.18 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ic.....35

5.19 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้านเข้าเมื่อ $RL = 1780 \Omega$ 35

5.20 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับเมื่อ $RL = 1780 \Omega$ 36

5.21 สเปกตรัมของกระแสที่บริเวณความถี่การสวิตช์36

5.22 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $RL = 1780 \Omega$ 36

5.23 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ia.....37

5.24 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ib.....37

5.25 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ic.....37

5.26 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้านเข้าเมื่อ $RL = 2120 \Omega$ 38

5.27 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับเมื่อ $RL = 2120 \Omega$ 38

5.28 สเปกตรัมของกระแสที่บริเวณความถี่การสวิตช์39

5.29 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $RL = 2120 \Omega$ 39

5.30 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ia.....39

5.31 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ib.....40

5.32 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ic.....40

5.33 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้านเข้าเมื่อ $RL = 2540 \Omega$ 41

5.34 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับเมื่อ $RL = 2540 \Omega$ 41

5.35 สเปกตรัมของกระแสที่บริเวณความถี่การสวิตช์41

5.36 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $RL = 2540 \Omega$ 42

5.37 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ia.....42

5.38 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ib.....42

5.39 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ic.....43

5.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสที่ความถี่มูลฐานกับความถี่การสวิตช์43

5.41 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟตรงด้านออกที่ค่าโหลดต่างๆ44

5.42 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้านเข้าเมื่อ $RL = 300 \Omega$ 45

5.43 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับเมื่อ $RL = 300 \Omega$ 45

5.44 รูปคลื่นกระแส $iL1$, $iL4$, $iL1+iL4$, และแรงดัน $V_{co1}-V_{co2}$46

5.45 สเปกตรัมของกระแสที่บริเวณความถี่การสวิตช์46

5.46 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $RL = 300 \Omega$ 46

5.47 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ia.....47

5.48 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ib.....47

5.49 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ic.....47

5.50 กราฟเปรียบเทียบปริมาณกระแสฮาร์มอนิกระหว่างกระแสที่ได้จากการทดลองกับที่มาตรฐาน IEC 1000-3-2 Class A กำหนดไว้48

5.51 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้านเข้าเมื่อ $RL = 540 \Omega$ 49

5.52 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับเมื่อ $RL = 540 \Omega$ 49

5.53 รูปคลื่นกระแส $iL1$, $iL4$, $iL1+iL4$, และแรงดัน $V_{co1}-V_{co2}$49

5.54 สเปกตรัมของกระแสที่บริเวณความถี่การสวิตช์50

5.55 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $RL = 540 \Omega$ 50

5.56 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ia.....50

5.57 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ib.....51

5.58 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ic.....51

5.59 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุค่านเข้าเมื่อ $RL = 1020 \Omega$	52
5.60 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับเมื่อ $RL = 1020 \Omega$	52
5.61 รูปคลื่นกระแส $iL1$, $iL4$, $iL1+iL4$, และแรงดัน $Vco1-Vco2$	52
5.62 สเปกตรัมของกระแสที่บริเวณความถี่การสวิตช์	53
5.63 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $RL = 1020 \Omega$	53
5.64 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ia	53
5.65 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ib	54
5.66 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ic	54
5.67 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุค่านเข้าเมื่อ $RL = 1200 \Omega$	55
5.68 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับเมื่อ $RL = 1200 \Omega$	55
5.69 รูปคลื่นกระแส $iL1$, $iL4$, $iL1+iL4$, และแรงดัน $Vco1-Vco2$	56
5.70 สเปกตรัมของกระแสที่บริเวณความถี่การสวิตช์	56
5.71 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $RL = 1200 \Omega$	56
5.72 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ia	57
5.73 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ib	57
5.74 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ic	57
5.75 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุค่านเข้าเมื่อ $RL = 1480 \Omega$	58
5.76 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับเมื่อ $RL = 1480 \Omega$	58
5.77 รูปคลื่นกระแส $iL1$, $iL4$, $iL1+iL4$, และแรงดัน $Vco1-Vco2$	59
5.78 สเปกตรัมของกระแสที่บริเวณความถี่การสวิตช์	59
5.79 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $RL = 1480 \Omega$	59
5.80 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ia	60
5.81 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ib	60
5.82 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ic	60
5.83 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสที่ความถี่มูลฐานกับความถี่การสวิตช์	61
5.84 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟตรงค่านออกที่ค่าโหลดต่างๆ	61

บทที่ 1

บทนำ

ความเบื้องต้น

เนื่องจากในปัจจุบัน วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังส่วนใหญ่ได้รับกำลังจากระบบสายกำลังผ่าน วงจรเรียงกระแส จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกส์ในสายกำลังซึ่งรบกวนการทำงานของอุปกรณ์อื่นในระบบ เช่น ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกินในคาปาซิเตอร์ที่ต่ออยู่กับระบบ เกิดการเพี้ยนของแรงดันที่ในระบบสายกำลังเดียวกัน เป็นต้น

แนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าวหนึ่งคือการใช้วงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตซ์ (Switched Mode Rectifier ; SMR) เพื่อลดกระแสฮาร์มอนิกส์ด้านเข้าของวงจร ที่ผ่านมาก็ได้มีการพัฒนาวงจร SMR สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสขึ้นมาหลายโครงสร้าง เช่น วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบปรับความกว้างพัลส์ซึ่งใช้สวิตซ์หกตัวโดยที่กระแสด้านเข้ามีลักษณะต่อเนื่อง วงจรที่ใช้สวิตซ์สี่ตัวหรือสามตัว ซึ่งต้องอาศัยวงจรควบคุมที่ยุ่งยาก [E. H. Ismail, R. Erickson, 1996] หรือวงจรที่ใช้สวิตซ์ตัวเดียวซึ่งช่วยประหยัดจำนวนอุปกรณ์ได้และมีการขับนำสวิตซ์ที่ไม่ซับซ้อน แต่แรงดันไฟตรงขาออกต้องมีค่าสูงจึงทำให้กระแสด้านเข้ามีรูปร่างใกล้เคียงไซน์ [M. Sedighy, F. P. Dawson, 1995]

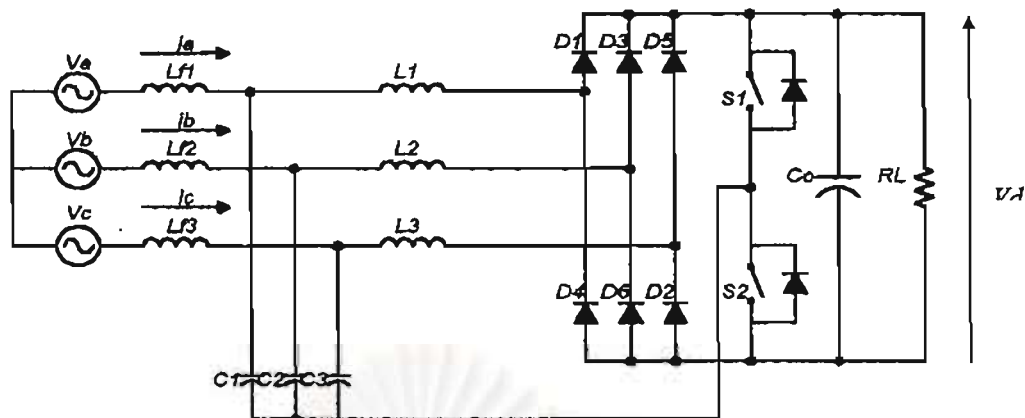
จากการวิเคราะห์วงจรในรูปแบบต่างๆ ผู้วิจัยพบว่าวงจรที่ใช้สวิตซ์สองตัว [A. Nabae, H. Nakano, S. Arai, 1994] ดังแสดงในรูปที่ 1.1 เป็นวงจรที่น่าสนใจ เนื่องจากมีข้อดีดังนี้ คือ

- 1) วงจรควบคุมไม่ยุ่งยากซับซ้อน
- 2) สามารถลดระดับของแรงดันไฟตรงขาออกได้ โดยที่กระแสด้านเข้ายังมีรูปร่างใกล้เคียงไซน์

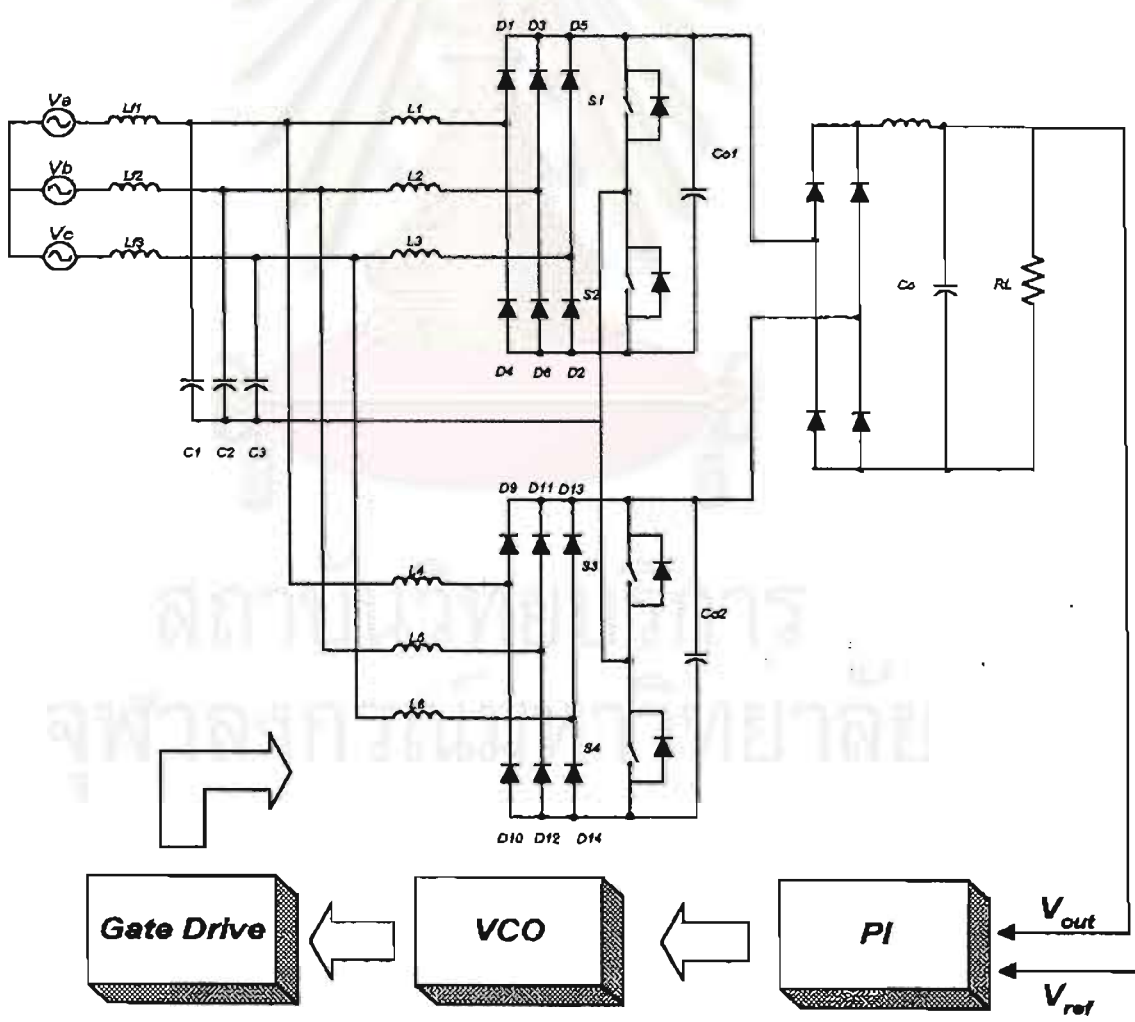
- 3) สามารถใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบแพคเกจ

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์การทำงานของวงจรในรูป 1.1 และนำเทคนิคอินเตอร์ตีฟมาใช้เพื่อให้

- 1) สามารถลดขนาดของวงจรกรองด้านเข้าลงได้ และ
- 2) สามารถทำการแยก โดคเพื่อปรับระดับของแรงดันไฟตรงขาออกได้ตามต้องการ



รูปที่ 1.1 วงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตซ์ที่ใช้สวิตซ์สองตัว



รูปที่ 1.2 โครงสร้างรวมของวงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตซ์ที่ใช้เทคนิคอินเตอร์ล๊อค

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษา ออกแบบและสร้าง วงจรเรียงกระแส 3 เฟสที่มีตัวประกอบกำลังด้านเข้าสูง โดยใช้เทคนิคการสวิตช์อย่างง่ายและเทคนิคอินเวอร์ต

ขอบเขตการวิจัย

พัฒนาสร้างวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบวิธีสวิตช์ ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้คือ

1. สามารถป้อนกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดไฟตรงขนาด 1 kW
2. สามารถปรับปรุงรูปคลื่นของกระแสทางด้านเข้า ให้มีค่ากระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆ ไม่เกินค่ามาตรฐาน IEC 1000-3-2 Class A ดังตารางข้างล่างนี้

Table - Limits for Class A Equipment กระแสหลักมูลของสายกำลัง = 16 A

Harmonic order n	Maximum permissible harmonic current (A)
Odd harmonics	
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
$15 < n < 39$	$0.15 \frac{15}{n}$
Even harmonics	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
$8 < n < 40$	$0.23 \frac{8}{n}$

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการ

1. ศึกษาคุณสมบัติของวงจรเรียงกระแสแบบที่มีการปรับปรุงรูปคลื่นกระแสด้านเข้า
2. จำลองการทำงานของวงจร โดยคอมพิวเตอร์ เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การทำงาน
3. ศึกษาและพัฒนาวงจรสมมูลสัญญาณขนาดเล็กลงและออกแบบวงจรควบคุม
4. ออกแบบและทดลองสร้างวงจรที่ยังไม่ได้ใช้เทคนิคอินเทอร์ลิฟ
5. ออกแบบและทดลองสร้างวงจรที่ใช้เทคนิคอินเทอร์ลิฟแล้ว
6. ประเมินผล และเขียนวิทยานิพนธ์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

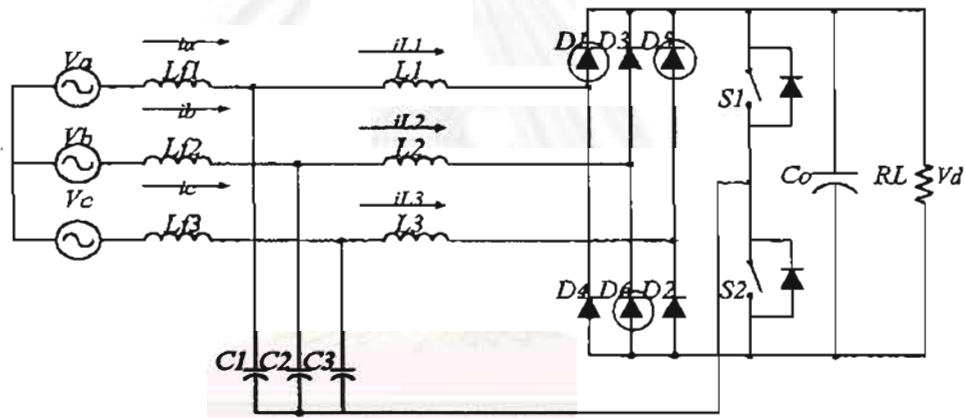
1. สามารถพัฒนาและสร้างวงจรเรียงกระแสแบบใหม่ ที่ผลิตกระแสฮาร์มอนิกในปริมาณที่น้อยซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังมากนัก และมีราคาถูก
2. สามารถลดขนาดของวงจรทางด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสแบบวิธีตีคัทได้

บทที่ 2

วงจรเรียงกระแสที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว

ลักษณะโครงสร้างและทฤษฎีการทำงาน

รูปที่ 2.1 เป็นรูปวงจรที่ยังไม่ได้ใช้เทคนิคอินเตอร์ลีฟ [A. Nabae, H. Nakano, S. Arai, 1994] วงจรจะประกอบด้วยไดโอดบริดจ์ ตัวเก็บประจุด้านเข้า (C1,C2,C3) ตัวเหนี่ยวนำ (L1,L2,L3) และคู่สวิตช์กำลังซึ่งจะทำงานในลักษณะคู่ประกอบ โดยมีวัฏจักรงานเท่ากับ 0.5 วงจรมีโครงสร้างเป็นวงจรทบระดับโดยตัวเก็บประจุ (C1,C2,C3) จะทำหน้าที่คล้ายเป็นแหล่งแรงดันเทียบ



รูปที่ 2.1 รูปวงจรในช่วงการทำงาน $0 < \omega t < \frac{\pi}{3}$

จากรูปที่ 2.1 เราสามารถวิเคราะห์การทำงานได้ดังต่อไปนี้ กำหนดให้

$$v_a = V_m \sin(\omega t) \tag{2.1}$$

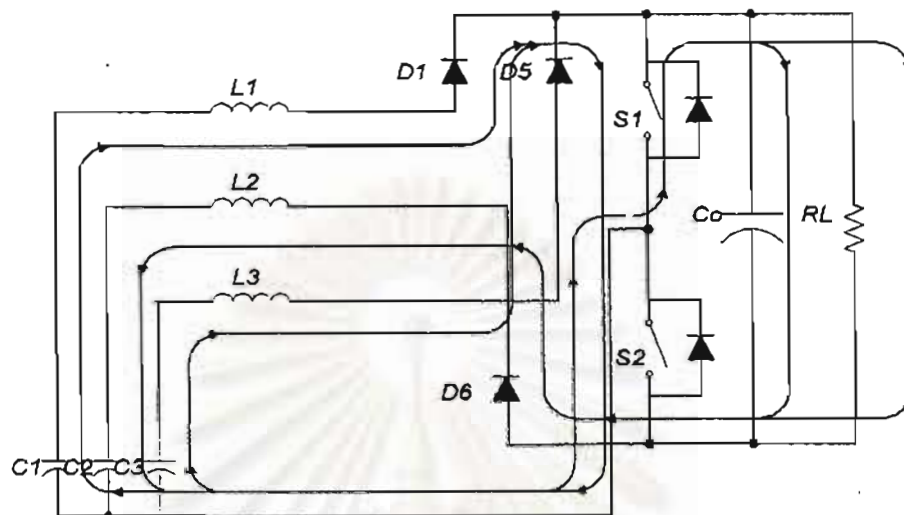
$$v_b = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \tag{2.2}$$

$$v_c = V_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \tag{2.3}$$

ในเบื้องต้น เมื่อเราพิจารณาการทำงานในช่วงเวลา $0 < \omega t < \frac{\pi}{3}$ จะพบว่า D1 D5 D6 จะนำกระแส เราสามารถแบ่งการทำงานออกเป็นโหมดต่างๆดังนี้คือ

โหมดที่ 1

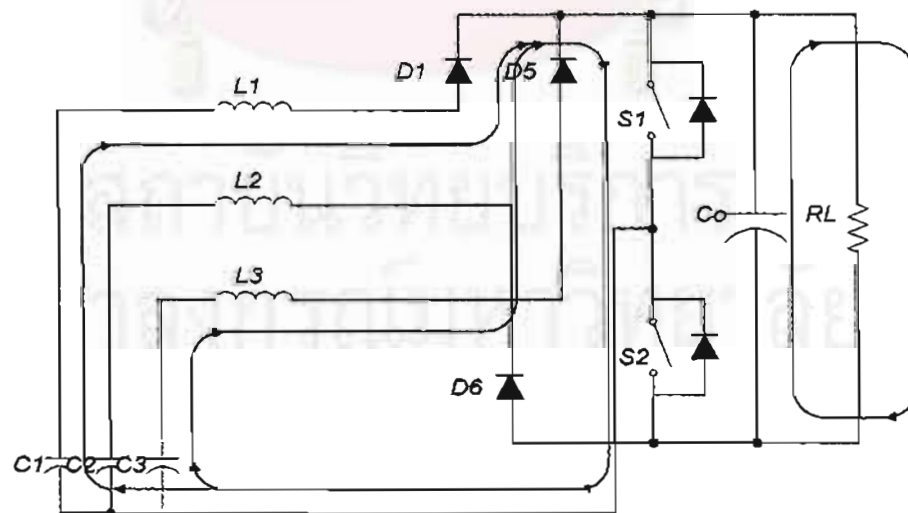
สวิตช์ S1 จะอยู่ในสถานะ ON และ S2 จะอยู่ในสถานะ OFF กระแส i_{L1} และ i_{L3} จะไหลผ่าน $L1$, $L3$, $D1$, $D5$ และ S1 พลังงานจะสะสมใน $L1$ และ $L3$ ในขณะที่พลังงานใน $L2$ จะถูกคายผ่าน $D6$, S1 ให้ C_o และไหล RL โดยกระแส i_{L2}



รูปที่ 2.2 แสดงการทำงานของวงจรในโหมดที่ 1

โหมดที่ 2

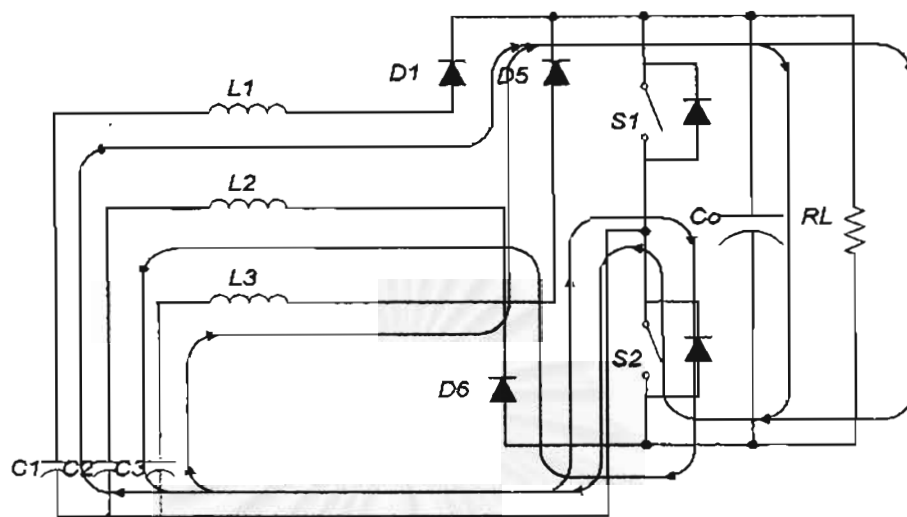
สวิตช์ S1 จะอยู่ในสถานะ ON และ S2 จะอยู่ในสถานะ OFF กระแส i_{L1} และ i_{L3} ยังคงไหลในวงรอบเดิมเหมือนโหมดที่ 1 แต่กระแส i_{L2} ลดลงเป็น 0 ในโหมดนี้ พลังงานจาก C_o จะถูกคายให้โหลด RL



รูปที่ 2.3 แสดงการทำงานของวงจรในโหมดที่ 2

โหมดที่ 3

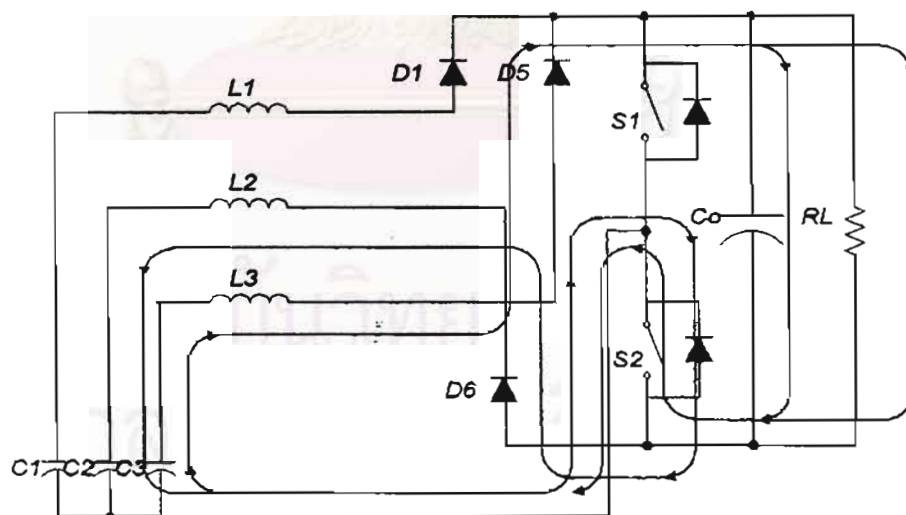
สวิตช์ S2 จะอยู่ในสภาวะ ON และ S1 จะอยู่ในสภาวะ OFF กระแส i_{L2} จะไหลผ่าน L2, D6 และ S2 พลังงานจะถูกสะสมใน L2 ในขณะที่พลังงานใน L1 และ L3 จะถูกปล่อยผ่าน D1, D5 และ S2 ให้ C_o และ RL โดยกระแส i_{L1} และ i_{L3}



รูปที่ 2.4 แสดงการทำงานของวงจรในโหมดที่ 3

โหมดที่ 4

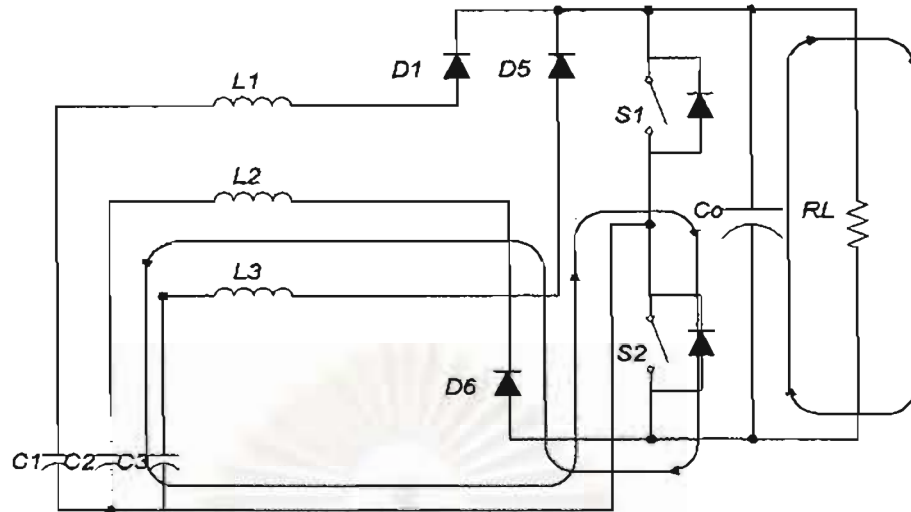
สวิตช์ S2 ยังคงอยู่ในสภาวะ ON และ S1 อยู่สภาวะ OFF แต่กระแส i_{L1} ลดลงเป็น 0 ในขณะที่กระแสอีกสองเฟสยังทำงานเหมือนโหมดที่ 3



รูปที่ 2.5 แสดงการทำงานของวงจรในโหมดที่ 4

โหมดที่ 5

สวิตช์ S2 ยังคงอยู่ในสภาวะ ON และ S1 อยู่สภาวะ OFF แต่กระแส i_{L3} จะลดลงเป็น 0 ในโหมดนี้พลังงานจาก C_o จะถูกคายให้โหลด RL ส่วนกระแส i_{L2} ยังทำงานเหมือนโหมดที่ 3



รูปที่ 2.6 แสดงการทำงานของวงจรอินโหมคที่ 5

สมมติแรงดันไฟสลับตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรองมีค่าน้อย แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 และ C_3 จึงมีค่าประมาณเท่ากับ v_a , v_b และ v_c ตามลำดับ เมื่อ S1 อยู่ในสภาวะ ON และ S2 อยู่ในสภาวะ OFF จะได้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ v_{l1} , v_{l2} , v_{l3} ดังนี้

$$v_{l1} = v_a \quad (2.4)$$

$$v_{l2} = v_b - V_d \quad (2.5)$$

$$v_{l3} = v_c \quad (2.6)$$

ต่อมาเมื่อ S2 อยู่ในสภาวะ ON และ S1 อยู่ในสภาวะ OFF จะได้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังนี้

$$v_{l1} = v_a - V_d \quad (2.7)$$

$$v_{l2} = v_b \quad (2.8)$$

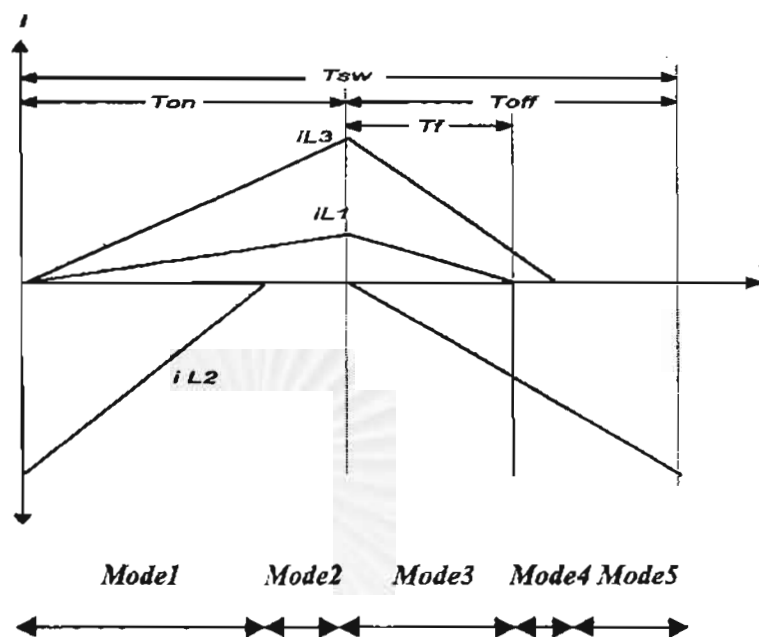
$$v_{l3} = v_c - V_d \quad (2.9)$$

จากค่าแรงดันในสมการที่ (2.4)-(2.9) เราสามารถคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของกระแสในแต่ละช่วงเวลาในหนึ่งคาบการสวิตช์ได้ดังรูปที่ 2.7 และค่ากระแสเฉลี่ยในหนึ่งคาบการสวิตช์สามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟหารด้วยคาบการสวิตช์

เราสามารถคำนวณสมการของกระแสเฉลี่ยในแต่ละคาบการสวิตช์ได้ดังนี้ คือ

$$i_{L1} = \frac{\sin(\omega t)}{\sqrt{3M - \sin(\omega t)}} \left(\frac{V_d T_{ON}^2}{2LT_{sw}} \right) \quad ; 0 < \omega t < \frac{\pi}{3} \quad (2.10)$$

$$i_{L2} = \frac{\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})}{\sqrt{3M + \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})}} \left(\frac{V_d T_{ON}^2}{2LT_{sw}} \right) \quad ; 0 < \omega t < \frac{\pi}{3} \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.7 รูปคลื่นกระแสในแต่ละคาบการสวิตช์

$$i_{i3} = \frac{\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})}{\sqrt{3M} - \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})} \left(\frac{V_d T_{ON}^2}{2LT_{SW}} \right) ; 0 < \omega t < \frac{\pi}{3} \quad (2.12)$$

โดยที่

L = ค่าความเหนี่ยวนำของ $L1, L2, L3$

T_{ON} = เวลาที่สวิตช์ตัวที่ 1 = เวลาที่สวิตช์ตัวที่ 2 OFF = DT_{SW}

T_{SW} = คาบเวลาในการสวิตช์

V_d = ระดับแรงดันไฟตรงขาออก

V_m = แอมพลิจูดของแรงดันเฟสของแหล่งจ่ายไฟสลับ

$M = \frac{V_d}{\sqrt{3}V_m} =$ อัตราการแปลงผันแรงดัน

นอกจากนี้เราสามารถคำนวณเงื่อนไขจำเป็นเพื่อให้วงจรยังทำงานอยู่ในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องได้ ณ ค่าวัฏจักรงาน D ดังนี้

$$T_{ON} + T_f \leq T_{SW} \quad (2.13)$$

โดยที่

$T_f = \frac{v_a T_{ON}}{V_d - v_a} =$ เวลาที่กระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ $L1$ ลดลงเป็นศูนย์

จากสมการที่ (2.13) คำนวณได้ว่า

$$M \geq \frac{1}{\sqrt{3(1-D)}} \quad (2.14)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขในกรณีที่เรารู้วงจรที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว [M. Sedighy, F. P. Dawson, 1995] คือ

$$M \geq \frac{1}{1-D} \quad (2.15)$$

ที่วัฏจักรงาน D เท่ากับ 0.5 วงจรที่ใช้สวิตช์สองตัวจะสามารถลดระดับแรงดันไฟฟ้าตรงขาออกได้ต่ำกว่าวงจรที่ใช้สวิตช์ตัวเดียวโดยที่วงจรยังทำงานอยู่ในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องได้

การออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจร

1) การเลือกค่า L

เราสามารถเขียนสมการที่ (2.10) ให้อยู่อีกรูปหนึ่งคือ

$$I_m = \left(\frac{V_m}{V_d - V_m} \right) \frac{V_d D^2}{2L f_{sw}} \quad (2.16)$$

โดยที่

$$i_{L1} = I_m \sin(\omega t)$$

กำหนดให้กำลังขาออกของวงจร $P_{out} = 750 \text{ W}$ $V_d = 650 \text{ V}$ ประสิทธิภาพ $\eta \approx 90 \%$

$$\begin{aligned} \therefore \text{กำลังขาเข้า} \quad P_{in} &= \frac{750}{0.9} = 833 \text{ W} \\ &= \frac{3}{2} V_m I_m \end{aligned}$$

จะได้ $I_m = 1.79 \text{ A}$

จากสมการที่ (2.16) เลือก $L = 3.2 \text{ mH}$ จะได้ความถี่การสวิตช์ต่ำสุดของวงจร

$$f_{sw} = 12 \text{ kHz}$$

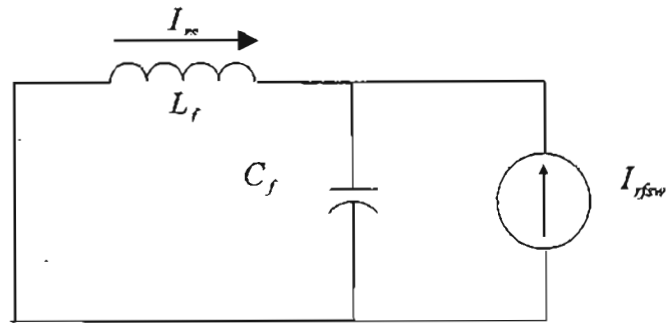
2) การเลือกค่าของวงจรกรองด้านเข้า

การออกแบบวงจรกรองด้านเข้า เราสามารถเขียนวงจรสมมูล 1 เฟสของวงจรในรูปที่ 2.1 ได้ดังรูปที่ 2.8 โดย I_r เป็นค่าระลอกของกระแสจากแหล่งจ่ายแรงดันและ I_{rsw} เป็นค่าระลอกของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ของวงจรทระดับ

ในที่นี้ เนื่องจากความถี่การสวิตช์ต่ำสุดของวงจรคือ 12 kHz เราจึงเลือกความถี่หักมุม f_r ของวงจรกรองเป็น 3.6 kHz จากรูปที่ 2.8 เราจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$L_f C_f = \frac{1}{(2\pi f_{sw})^2} \left[\frac{I_{rsw}}{I_r} - 1 \right] = \frac{1}{(2\pi f_r)^2} \quad (2.17)$$

เลือก $L_f = 2.5 \text{ mH}$ $C_f = 0.75 \mu\text{F}$



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูล 1 เฟสของวงจรในรูปที่ 1

ผลการจำลองการทำงาน

เมื่อจำลองสมการ (2.10), (2.11), (2.12) ด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Matlab ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของวงจรที่ใช้เป็นดังที่ได้ออกแบบคือ

$$V_m = 310 V$$

$$f = 50 Hz$$

$$f_{sw} = \frac{1}{T_{sw}} = 12 kHz$$

$$V_d = 650 V$$

$$L_1 = L_2 = L_3 = 3.2 mH$$

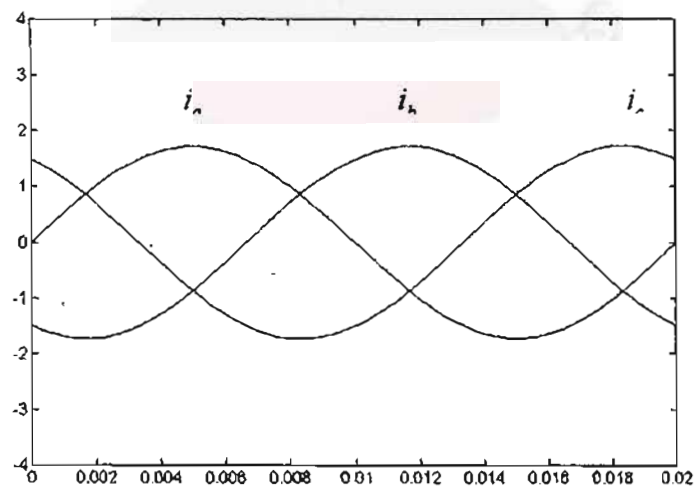
$$C_o = 1333 \mu F$$

$$L_{f1} = L_{f2} = L_{f3} = 2.5 mH$$

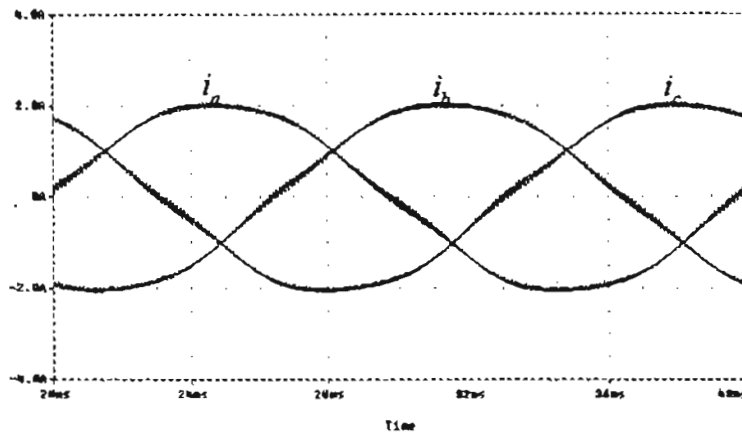
$$C_{f1} = C_{f2} = C_{f3} = 0.75 \mu F$$

$$RL = 540 \Omega$$

$$D = 50 \%$$

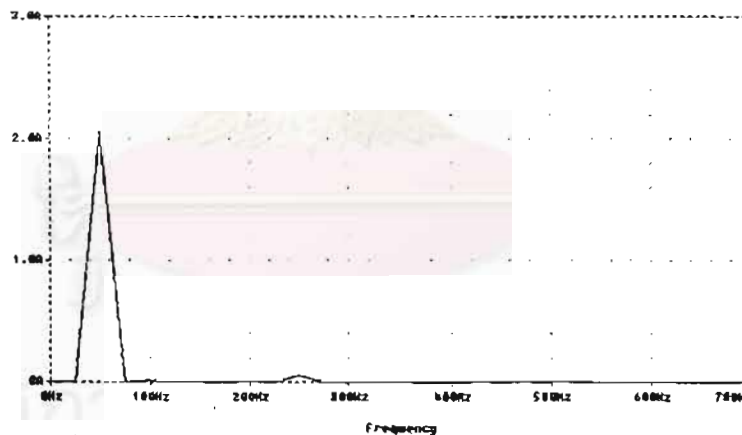


รูปที่ 2.9 รูปกระแสของแหล่งจ่ายที่จำลองโดยโปรแกรม Matlab



รูปที่ 2.10 รูปกระแสของแหล่งจ่ายที่จำลองโดยโปรแกรม PSPICE

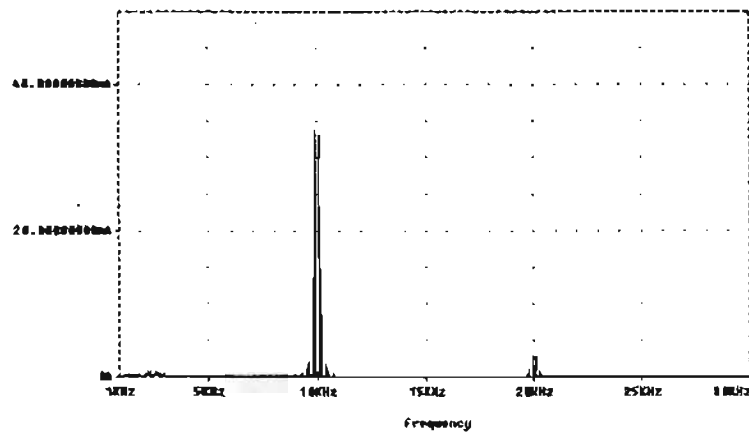
จะได้รูปร่างของกระแสทั้ง 3 เฟสดังรูปที่ 2.9 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงานจากโปรแกรม PSPICE จะได้รูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแสดังรูปที่ 2.10, 2.11 และ 2.12 ตามลำดับจะพบว่าได้รูปกระแสในลักษณะเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าสมการของกระแสที่วิเคราะห์สามารถนำมาใช้งานได้จริง



รูปที่ 2.11 สเปกตรัมของกระแสในรูปที่ 2.10

สรุปข้อดีของวงจร

1. วงจรควบคุมไม่ยุ่งยากซับซ้อน(จะกล่าวรายละเอียดในบทที่ 4)
2. สามารถลดระดับของแรงดันไฟตรงขาออกลง โดยที่ทำให้กระแสด้านเข้ายังมีรูปร่างใกล้เคียงไซน์
3. สามารถใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบแพคเกจได้



รูปที่ 2.12 สเปกตรัมที่บริเวณความถี่การสวิตช์ของกระแสในรูปที่ 2.10

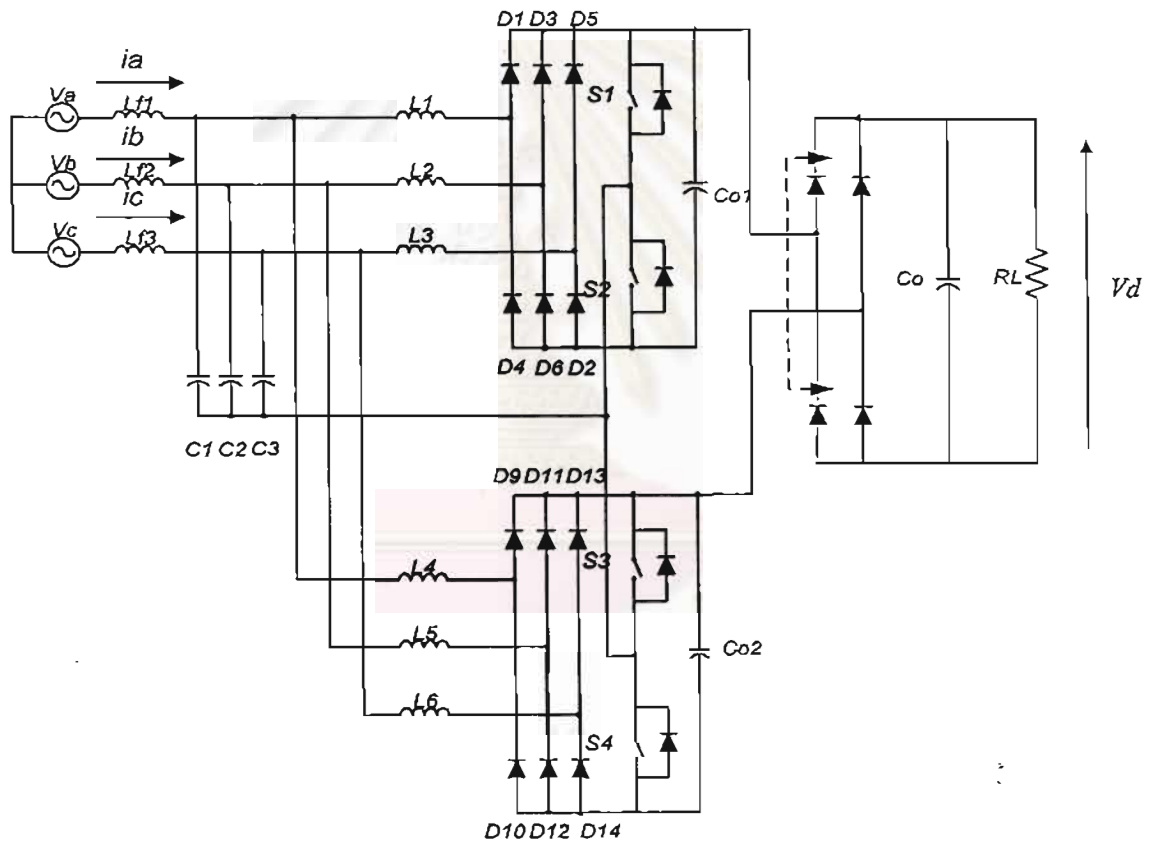


บทที่ 3

วงจรที่ใช้เทคนิคอินเตอร์ลีฟ

ลักษณะโครงสร้างและทฤษฎีการทำงาน

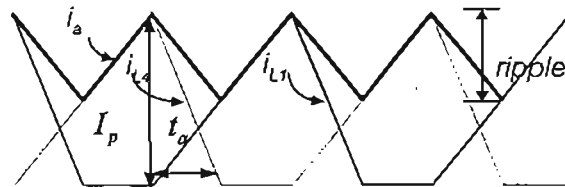
วงจรที่มีการปรับปรุงเพื่อใช้เทคนิคอินเตอร์ลีฟมีโครงสร้างวงจรดังรูปที่ 3.1 หลักการทำงานโดยคร่าวๆคือ เมื่อนำวงจรมาขนานกัน เราจะกำหนดการสวิตช์ของสวิตช์ S1 , S2 ของวงจรส่วนบน และสวิตช์ของวงจรส่วนล่าง S3 , S4 ในลักษณะตรงกันข้ามกัน ดังนี้ คือ



รูปที่ 3.1 รูปวงจรที่ใช้เทคนิคอินเตอร์ลีฟ

- จังหวะที่ 1 สวิตช์ S1 “ON” สวิตช์ S2 “OFF” ในขณะที่สวิตช์ S3 “OFF” สวิตช์ S4 “ON”
 - จังหวะที่ 2 สวิตช์ S1 “OFF” สวิตช์ S2 “ON” ในขณะที่สวิตช์ S3 “ON” สวิตช์ S4 “OFF”
- เราจะพบว่าในจังหวะที่ 1 นั้นกระแสที่ L1 จะเพิ่ม ส่วนกระแสที่ L4 จะลด สำหรับในจังหวะที่ 2 กระแสที่ L1 จะลด ส่วนกระแสที่ L4 จะเพิ่มไปสลับกันไป ดังนั้นกระแสที่จ่ายออกจาก

แหล่งจ่ายจะเป็นกระแสจากสองวงจรรวมกัน จึงมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีความถี่ระลอกเป็น 2 เท่า และมีลักษณะคล้ายกับในกรณีวงจรที่เป็นแบบกระแสต่อเนื่องดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รูปคลื่นกระแสในขณะที่ใช้เทคนิคอินเทอร์ลิฟ

การคำนวณค่าระลอกของกระแส

เมื่อพิจารณากระแสในเฟส a เราสามารถคำนวณค่ายอดของกระแส I_p และเวลาที่กระแสลดลงเป็นศูนย์ t_a ได้ดังสมการ

$$I_p = \frac{v_a}{L} DT_{sw} \quad (3.1)$$

$$t_a = \frac{v_a DT_{sw}}{V_d - v_a} \quad (3.2)$$

ค่าระลอกของกระแสจึงมีขนาดลดลงดังสมการ(3.3) ส่วนเฟสอื่นก็คิดได้ในทำนองเดียวกัน

$$\begin{aligned} ripple &= I_p - i_L(t_a) \\ &= \frac{v_a}{L} DT_{sw} - \frac{v_a}{L} \left(\frac{v_a DT_{sw}}{V_d - v_a} \right) \\ &= \frac{v_a DT_{sw}}{L} \left(\frac{V_d - 2v_a}{V_d - v_a} \right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

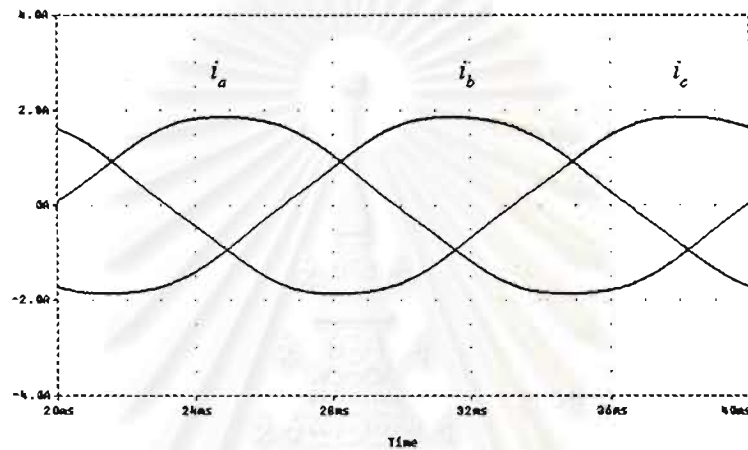
นอกจากนั้นความถี่ของระลอกยังเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าด้วย ดังนั้นเราสามารถลดขนาดของวงจรทางด้านเข้าลงได้ดังจะเห็นได้จากผลจำลองการทำงาน

แรงดันระหว่างตัวเก็บประจุ(Co1,Co2) จะเป็นแรงดันไฟสลับรูปสี่เหลี่ยมที่มีแอมพลิจูดเป็น $\pm v_a$ ดังนั้นถ้าต่อวงจรเรียงกระแสทางด้านขาออกอีกชุดดังรูป 3.1 แรงดันขาออกก็จะเป็นแรงดันไฟตรง และเรายังสามารถทำการต่อหม้อแปลงเพื่อทำการแยกโคดที่ขั้วระหว่างตัวเก็บประจุ(Co1,Co2) (บริเวณเส้นประ)และปรับระดับแรงดันได้ถ้าต้องการ

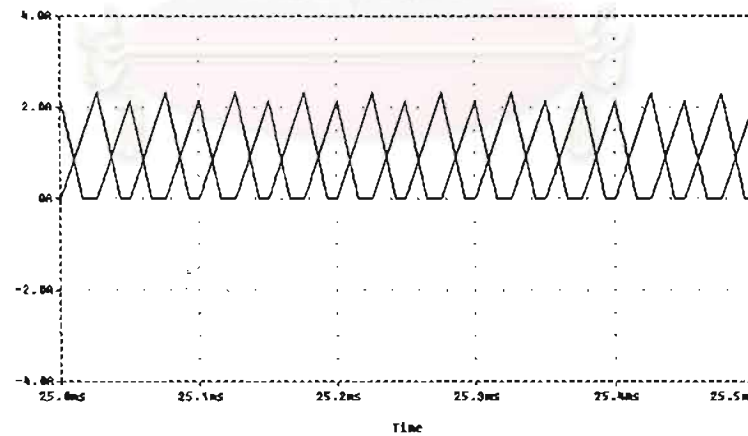
ผลการจำลองการทำงาน

ผลจำลองการทำงานของวงจรเมื่อใช้เทคนิคอินเทอร์ลิฟ ในรูปที่ 3.1 ภายได้เงื่อนไขโหลดเท่าเดิม (v_d, R_L) เท่ากับรูป 2.10 จะได้รูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแสดังรูปที่ 3.3 , 3.4 , 3.5 และ 3.6 โดยรูปที่ 3.4 แสดงรูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทั้งสองชุดที่มีลักษณะ

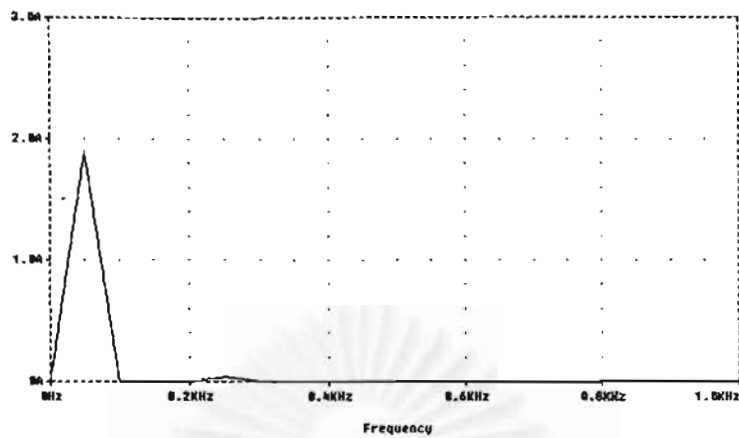
เหลือมกัน ณ มุมเฟสประมาณ $\omega t = \frac{\pi}{2}$ พารามิเตอร์ที่ใช้ยังคงเหมือนกับในบทที่ 2 ยกเว้นขนาด L_f ของวงจรกรองซึ่งเราสามารถลดขนาด L_f เหลือเพียง 0.9 mH และเพิ่มความถี่การสวิตช์เป็น 20 kHz ทั้งนี้ก็เพราะว่าในกรณีที่โหลดเท่าเดิม วงจรทบระดับในส่วนบนและล่างในรูปที่ 3.1 จะต้องจ่ายกำลังงานเพียงครึ่งหนึ่งของค่าเดิม ความถี่การสวิตช์ของวงจรจึงเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าระลอกของกระแสลดลงด้วย โดยจะเห็นได้จากการเปรียบเทียบสเปกตรัมระหว่างกระแสในรูปที่ 3.6 และรูปที่ 2.12



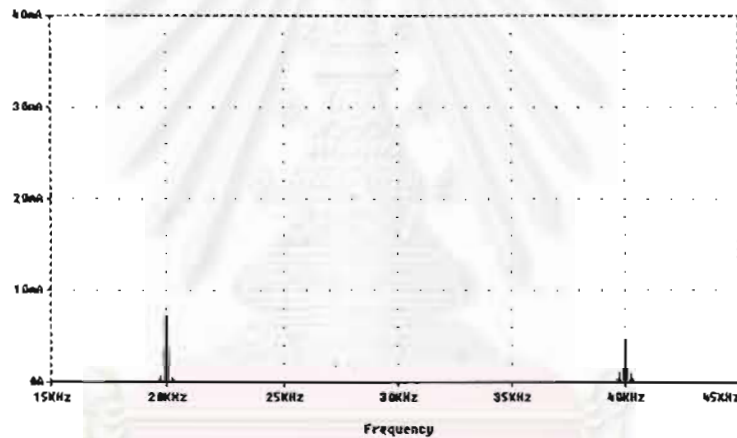
รูปที่ 3.3 รูปกระแสของแหล่งจ่ายที่จำลองโดยโปรแกรม PSPICE



รูปที่ 3.4 รูปแสดงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทั้งสองจุดที่มีลักษณะเหลือมกัน

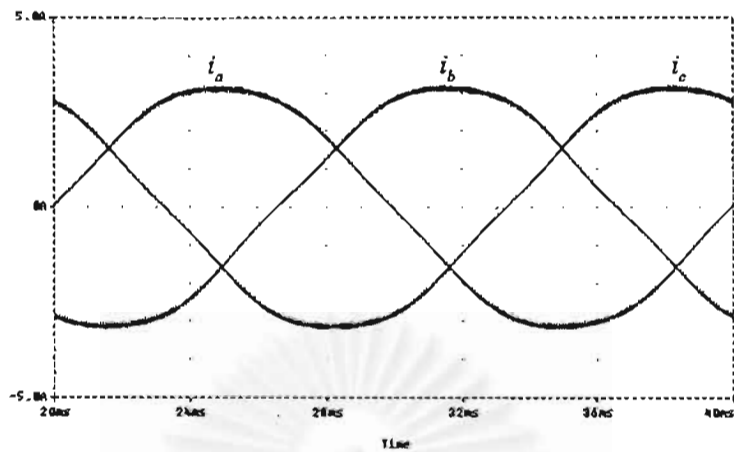


รูปที่ 3.5 สเปกตรัมของกระแสในรูปที่ 3.3

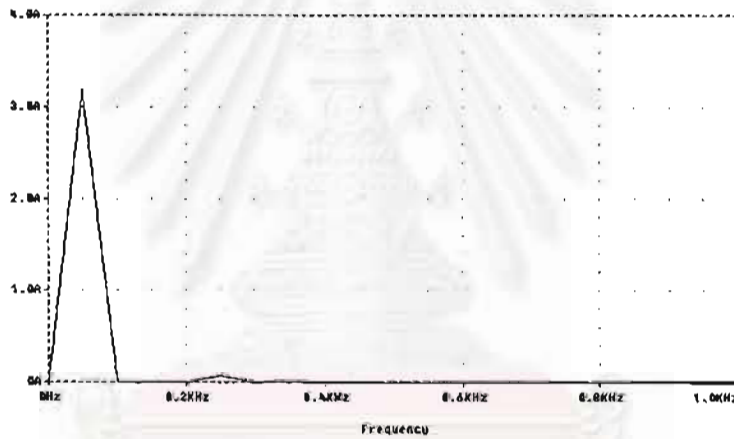


รูปที่ 3.6 สเปกตรัมที่บริเวณความถี่การสวิตช์ของกระแสในรูปที่ 3.4

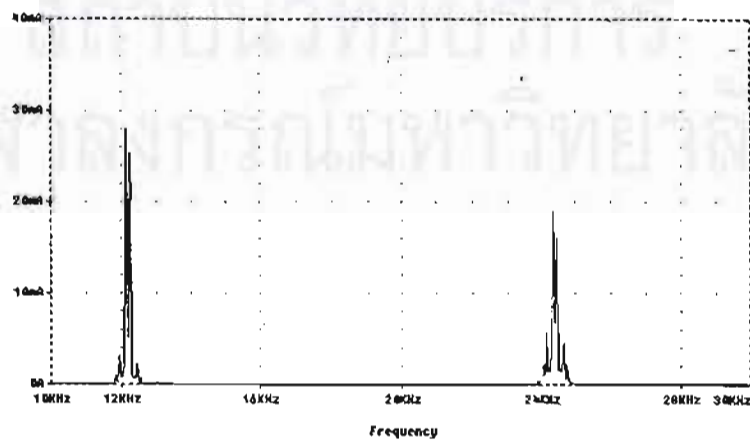
ในกรณีที่กำหนดให้ความถี่การสวิตช์เท่าเดิมคือ 12 kHz $RL = 300 \Omega$ ก็จะได้กำลังงานประมาณสองเท่าของค่าเดิมดังจะเห็นได้จากรูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแสในรูปที่ 3.7, 3.8, 3.9



รูปที่ 3.7 รูปกระแสของแหล่งจ่ายที่จำลอง โดยโปรแกรม PSPICE



รูปที่ 3.8 สเปกตรัมของกระแสในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.9 สเปกตรัมที่บริเวณความถี่การสวิตช์ของกระแสในรูปที่ 3.7

เราสามารถสรุปข้อดีของการใช้เทคนิคอินเทอร์ลีฟได้ดังนี้คือ

- 1) ทำให้ค่าระลอกของกระแสต้านเข้าลดลง
- 2) ความถี่ของระลอกเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า
- 3) สามารถนำการแยกโคคเพื่อปรับระดับของแรงดันขาออกตามต้องการได้

บทที่ 4

การออกแบบวงจรควบคุม

เราจะควบคุมการทำงานของวงจรเรียงกระแสที่นำเสนอ โดยการควบคุมความถี่การสวิตช์ของวงจรและคงค่าวัฏจักรงานไว้ที่ 0.5 แรงดันไฟตรงขาออกจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง ผลต่างที่ได้จะถูกนำมาผ่านตัวควบคุมแบบ PI แล้วแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ VCO (Voltage Controlled Oscillator) เพื่อปรับเปลี่ยนความถี่การสวิตช์

ดังนั้นในขั้นแรก เราจะทำการหาจอร์สมมูลสัญญาณขนาดเล็กของวงจร จากนั้นจึงนำฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรที่หาได้ มาทำการออกแบบตัวควบคุมต่อไป

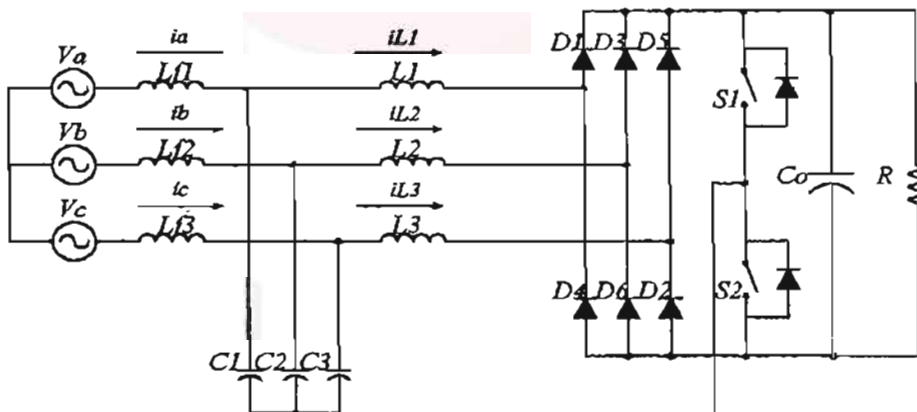
การหาจอร์สมมูลสัญญาณขนาดเล็ก

1. วงจรที่ใช้โครงสร้างสวิตช์สองตัว

เราจะทำการหาจอร์สมมูลสัญญาณขนาดเล็กของวงจรเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรด้านออกและตัวแปรควบคุมซึ่งในที่นี้คือความถี่การสวิตช์โดยใช้ทฤษฎีบทของเทเลเกนดังนี้

$$\sum_k \bar{v}_k \bar{i}_k = 0 \quad (4.1)$$

" $\bar{\quad}$ " หมายถึง การหาค่าเฉลี่ยของตัวแปรนั้นต่อคาบสายกำลัง



รูปที่ 4.1 รูปวงจรที่ใช้สวิตช์สองตัว

จากรูปที่ 4.1 จะได้ว่า

$$3\bar{v}_s \bar{i}_s = 3L_f \frac{d\bar{i}_s}{dt} + 3C \frac{d\bar{v}_s}{dt} + 3L \frac{d\bar{i}_s}{dt} + C_o \frac{d\bar{V}_d}{dt} + \frac{\bar{V}_d^2}{R} \quad (4.2)$$

เมื่อนิยาม i_s เป็นกระแสจากแหล่งจ่ายของวงจร
และได้สมการของกระแสโดยประมาณคือ

$$\bar{i}_s = \frac{\bar{v}_s D^2}{2L\hat{f}_{sw}} \quad (4.3)$$

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจุดทำงานค่าเล็กน้อยจากจุดทำงานที่ระบุ เช่น $\bar{i}_s = I_s + \hat{i}_s$ เราสามารถ
เขียนสมการ (4.2) และ (4.3) ใหม่ โดยสังเกตว่าเทอมอนุพันธ์จะมีแต่สัญญาณขนาดเล็ก เช่น
 $\frac{d\bar{i}_s}{dt} = \frac{d\hat{i}_s}{dt}$ เพราะ $\frac{dI_s}{dt} = 0$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$3V_s \hat{i}_s + 3\hat{v}_s I_s = 3L_f \frac{d\hat{i}_s}{dt} I_s + 3C \frac{d\hat{v}_s}{dt} V_s + 3L \frac{d\hat{i}_s}{dt} I_s + C_o \frac{d\hat{v}_d}{dt} V_d + 2\hat{v}_d \frac{V_d}{R} \quad (4.4)$$

$$\hat{i}_s = \frac{\hat{v}_s D^2}{2L\hat{f}_{sw}} - \frac{v_s D^2}{2L\hat{f}_{sw}^2} \hat{f}_{sw} \quad (4.5)$$

ในที่นี้เราประมาณว่าแหล่งจ่ายมีความแปรปรวนน้อยมาก ทำให้ \hat{v}_s , $\frac{d\hat{v}_s}{dt} = 0$ และเมื่อทำการ
แปลงลาปลาซสมการ (4.4), (4.5) จะได้ว่า

$$3V_s \hat{i}_s = 3L_f s \hat{i}_s I_s + 3L s \hat{i}_s + 3C_o s \hat{v}_d V_d + 2\hat{v}_d \frac{V_d}{R} \quad (4.6)$$

$$\hat{i}_s = -\frac{v_s D^2}{2L\hat{f}_{sw}^2} \hat{f}_{sw} \quad (4.7)$$

นำสมการ (4.6) และ (4.7) มารวมกัน จะได้ความสัมพันธ์สัญญาณขนาดเล็กระหว่าง แรงดันไฟตรง
ขาออกและความถี่การสวิตช์

$$\frac{\hat{v}_d}{\hat{f}_{sw}} = \left(\frac{3V_s^2 D^2}{4L\hat{f}_{sw}^2} \frac{V_d}{R} \right) \left[\frac{\frac{s}{z} - 1}{\frac{s}{p} + 1} \right] \quad (4.8)$$

โดย $z = \frac{V_s}{(L+L_f)I_s}$ และ $p = \frac{2}{RC_o}$

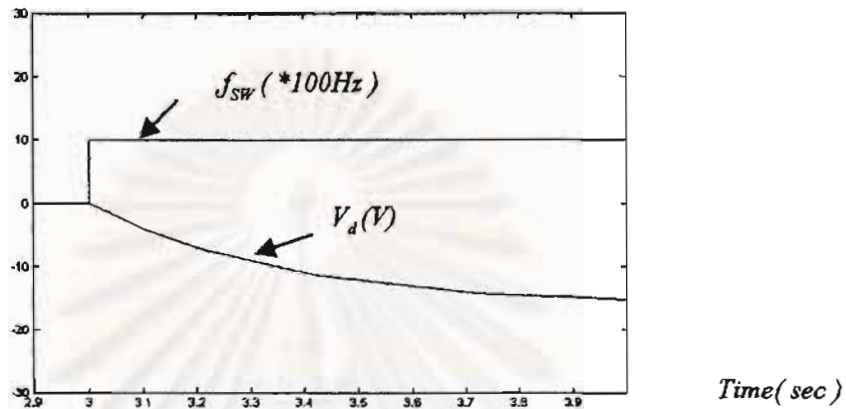
ผลการจำลองการทำงาน

เมื่อนำพารามิเตอร์ที่ออกแบบไว้ในบทที่ 2 แทนลงในสมการ (4.8) จะได้ฟังก์ชันโอนย้าย
เป็นว่า

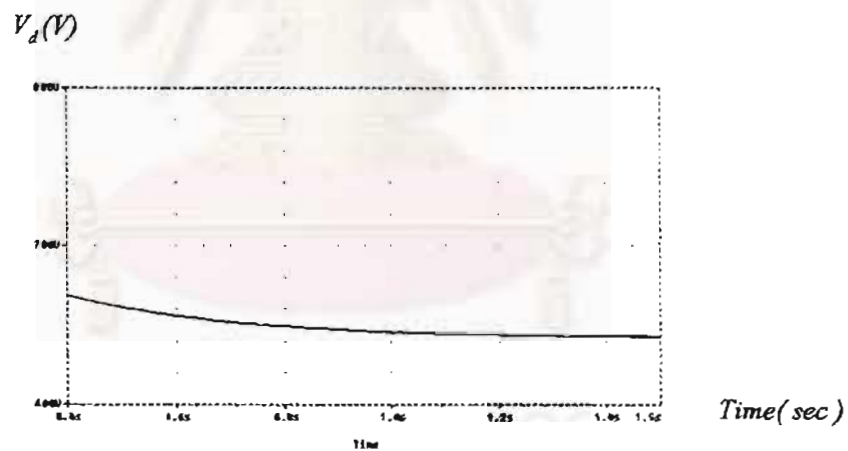
$$\frac{\hat{v}_d}{\hat{f}_{sw}} = 0.0164 \left[\frac{\frac{s}{30324} - 1}{\frac{s}{2.7785} + 1} \right] \quad (4.9)$$

จากสมการ(4.9) เราสามารถหาผลตอบแบบขั้นโดยโปรแกรม simulink เมื่อเปลี่ยนความถี่การสวิตช์จาก 12 kHz เป็น 13 kHz ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.2

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบโดยโปรแกรม PSPICE ในรูปที่ 4.3 จะพบว่าได้รูปคลื่นคล้ายกันแสดงว่า วงจรสมมูลสัญญาณขนาดเล็กที่หาได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมได้

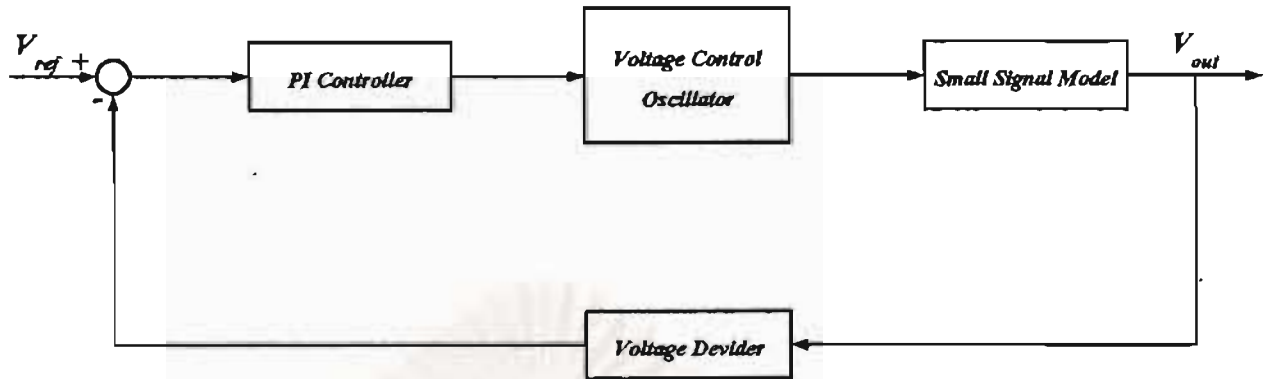


รูปที่ 4.2 ผลตอบแบบขั้นของวงจรสมมูลสัญญาณขนาดเล็กจำลองด้วยโปรแกรม simulink



รูปที่ 4.3 ผลตอบแบบขั้นของวงจรสมมูลสัญญาณขนาดเล็กจำลองด้วยโปรแกรม PSPICE

การออกแบบตัวควบคุม PI



รูปที่ 4.4 แผนภาพบล็อกของระบบ

พารามิเตอร์ต่างๆของระบบ

ฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรถือ

$$0.0164 \left[\frac{\frac{s}{2.7785} - 1}{\frac{s}{2.7785} + 1} \right]$$

อัตราขยายของ VCO ที่ใช้คือ 1867

อัตราขยายของวงจรทอนแรงดันคือ 0.01

กำหนดให้ตัวควบคุม PI คือ $-(K_p + \frac{K_I}{s})$

เราสามารถหาสมการลักษณะเฉพาะของระบบวงรอบการควบคุมในรูปที่ 4.4 ได้เป็น

$$(1 - 1867 * 0.0164 * 0.01 * \frac{2.7785}{30324} * K_p) s^2 + (2.7785 - 1867 * 0.0164 * 0.01 * \frac{2.7785}{30324} * (K_I - 30324 K_p)) s + 1867 * 0.0164 * 0.01 * 2.7785 * K_I$$

$$= (1 - 2.8 * 10^{-5} K_p) s^2 + (2.7785 - 2.8 * 10^{-5} (K_I - 30324 K_p)) s + 0.8507 K_I$$

เงื่อนไขที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพคือสัมประสิทธิ์ของสมการลักษณะเฉพาะมีค่ามากกว่าศูนย์ ซึ่งจะเห็นว่าค่า K_p และ K_I ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมีช่วงกว้าง

ในกรณีนี้ เราเลือกเวลาเข้าที่ (settling time) ประมาณ 500 ms ดังนั้นเลือก $K_p = 2.833$, $K_I = 8.329$ จะได้รากของสมการลักษณะเฉพาะเป็น $-2.5919 \pm j0.6065$ ซึ่งทำให้ค่าพุงเกินของผลตอบไม่สูงจนเกินไป

แต่ในการทำงานจริงของวงจรจะมีการแปรค่าความถี่การสวิตซ์ตามการแปรค่าของโหลด จากสมการ (4.8) จะพบว่าค่าอัตราขยาย ศูนย์และโพลของแบบจำลองสมมูลสัญญาณขนาดเล็กลงของวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงด้วย เราจะใช้ทฤษฎีบทของ Kharitonov พิสูจน์ว่าตัวควบคุมที่เราออกแบบสามารถทำให้ระบบมีความเสถียรทุกจุดทำงานดังต่อไปนี้

ทฤษฎีบทของ Kharitonov

เราสามารถเขียนสมการลักษณะเฉพาะของระบบให้อยู่ในรูปของ

$$p(s, q) = \sum_{i=1}^n [q_i^-, q_i^+] s^i \quad (4.14)$$

โดย q_i^- เป็นสัมประสิทธิ์ค่าต่ำสุดของ s^i

q_i^+ เป็นสัมประสิทธิ์ค่ามากที่สุดของ s^i

เมื่อพิจารณา Kharitonov Polynomials ดังต่อไปนี้

$$K_1(s) = q_0^- + q_1^- s + q_2^+ s^2 + q_3^+ s^3 + q_4^- s^4 + q_5^- s^5 + q_6^+ s^6 + \dots \quad (4.15)$$

$$K_2(s) = q_0^+ + q_1^+ s + q_2^- s^2 + q_3^- s^3 + q_4^+ s^4 + q_5^+ s^5 + q_6^- s^6 + \dots \quad (4.16)$$

$$K_3(s) = q_0^+ + q_1^- s + q_2^- s^2 + q_3^+ s^3 + q_4^+ s^4 + q_5^- s^5 + q_6^- s^6 + \dots \quad (4.17)$$

$$K_4(s) = q_0^- + q_1^+ s + q_2^+ s^2 + q_3^- s^3 + q_4^- s^4 + q_5^+ s^5 + q_6^+ s^6 + \dots \quad (4.18)$$

ถ้า $K_1(s), K_2(s), K_3(s), K_4(s)$ เสถียรทุกตัว ก็จะได้ว่าจุดทำงานของระบบจะเสถียรทุก

จุด

นำแบบจำลองสมมุตัญญาขนาดเล็กของวงจรมาพิจารณา โดยค่า f_{sw} จะแปรค่าจาก $12 \text{ kHz} - 40 \text{ kHz}$, R แปรค่าจาก $540\Omega - 2540\Omega$ จะได้

$$\frac{v_d}{f} = [0.0069, 0.0164] \left[\frac{\frac{s}{[30324, 151000]} - 1}{[0.5907, 2.7785] + 1} \right] \quad (4.19)$$

คำนวณหา Kharitonov Polynomials ได้ดังนี้

$$K_1(s) = 0.6338 + 0.8063s + s^2 \quad (4.20)$$

$$K_2(s) = 7.0858 + 5.1886s + s^2 \quad (4.21)$$

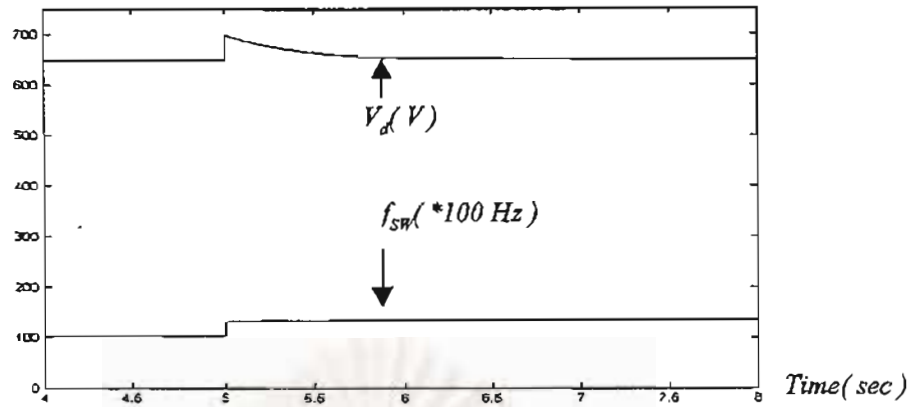
$$K_3(s) = 7.0858 + 0.8063s + s^2 \quad (4.22)$$

$$K_4(s) = 0.6338 + 5.1886s + s^2 \quad (4.23)$$

ซึ่งพบว่า $K_1(s), K_2(s), K_3(s), K_4(s)$ เสถียรทุกตัว ดังนั้นระบบจึงเสถียรทุกจุดทำงาน

ผลการจำลองการทำงาน

เมื่อจำลองการทำงานของระบบในวงรอบปิดด้วยโปรแกรม simulink เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟตรงด้านออกจาก $650 \text{ V} \rightarrow 700 \text{ V}$ จะได้ผลดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.5 รูปแสดงผลตอบของวงจรที่ทำงานในวงรอบปิด

2 วงจรที่ใช้เทคนิคอินเตอร์ลีฟ

เราสามารถหาพารามิเตอร์สมมูลลักษณะของวงจรที่ใช้เทคนิคอินเตอร์ลีฟโดยใช้สมการของเทเลเจนดังนี้

$$3\bar{v}_s \bar{i}_s = 2(3L \frac{d(\frac{\bar{i}_s}{2})}{dt} \frac{\bar{i}_s}{2}) + 3L_f \frac{d\bar{i}_s}{dt} \bar{i}_s + 2C \frac{d\bar{V}_d}{dt} \bar{V}_d + C_o \frac{d\bar{V}_d}{dt} \bar{V}_d + \frac{\bar{V}_d^2}{R} \quad (4.10)$$

และสมการของกระแสโดยประมาณคือ

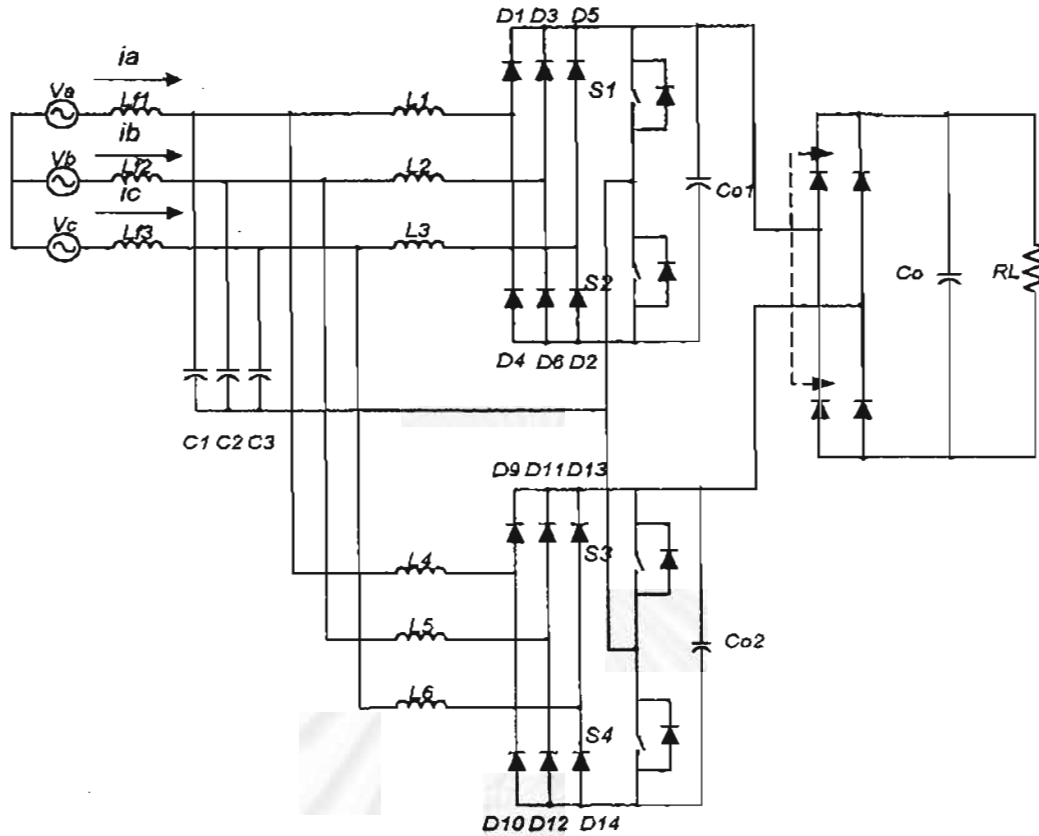
$$\frac{\bar{i}_s}{2} = \frac{\bar{v}_s D^2}{2Lf_{sw}} \quad (4.11)$$

โดยอาศัยการคำนวณต่อในทำนองเดียวกับกรณีแรกจะได้ว่า

$$\frac{\hat{v}_d}{\hat{f}_{sw}} = \frac{3V_s^2 D^2}{2Lf_{sw}^2} \frac{\frac{s}{R} - 1}{\frac{s}{R} + 1} \quad (4.12)$$

โดย $z = \frac{2V_s}{(2L_f + L)I_s}$ และ $p = \frac{2}{-R(2C + C_o)}$

$$\frac{\hat{v}_d}{\hat{f}_{sw}} = 0.0182 \left[\frac{\frac{s}{4.9273} - 1}{\frac{s}{4.9273} + 1} \right] \quad (4.13)$$



รูปที่ 4.6 วงจรที่ใช้เทคนิคอินเวอร์ตลิฟ

เมื่อใช้ตัวควบคุม PI ตัวเต็ม จะได้รากสมการลักษณะเฉพาะของระบบวงรอบการควบคุมของวงจรในรูปที่ 4.4 เป็น $-7.9008, -1.7650$

นำแบบจำลองสมมุติฐานขนาดเล็กลงของวงจรที่ใช้เทคนิคอินเวอร์ตลิฟมาพิจารณา โดยค่า f_{sw} จะแปรค่าจาก $12 \text{ kHz} - 40 \text{ kHz}$, R แปรค่าจาก $300\Omega - 1480\Omega$ จะได้

$$\frac{\hat{v}_d}{\hat{f}} = [0.0081, 0.0182] \left[\frac{\frac{s}{[34570, 173000]} - 1}{\frac{s}{[0.9988, 4.9273]} + 1} \right] \quad (4.19)$$

คำนวณหา Kharitonov Polynomials ดังนี้

$$K_1(s) = 1.2581 + 1.4267s + s^2 \quad (4.20)$$

$$K_2(s) = 13.9450 + 9.6704s + s^2 \quad (4.21)$$

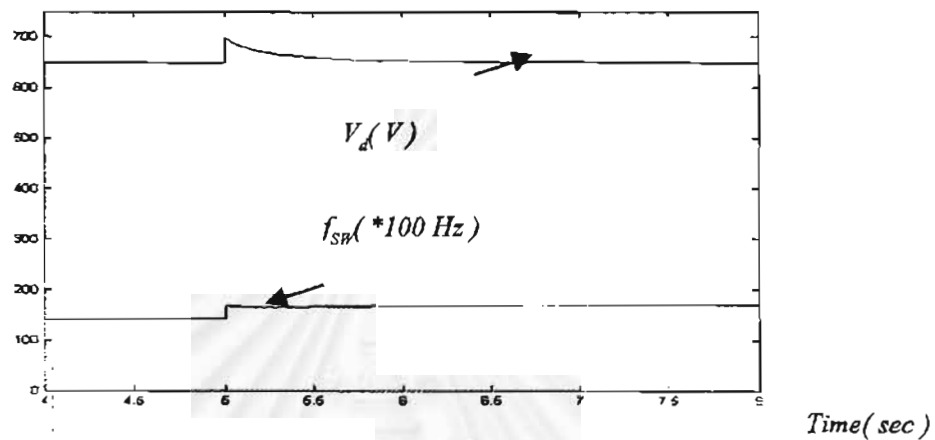
$$K_3(s) = 13.9450 + 1.4267s + s^2 \quad (4.22)$$

$$K_4(s) = 1.2581 + 9.6704s + s^2 \quad (4.23)$$

ซึ่งพบว่า $K_1(s), K_2(s), K_3(s), K_4(s)$ เสถียรทุกตัว ดังนั้นระบบจึงเสถียรทุกจุดทำงาน

ผลการจำลองการทำงาน

เมื่อจำลองการทำงานของระบบในวงรอบปิดด้วยโปรแกรม simulink เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟตรงด้านออกจาก $650\text{ V} \rightarrow 700\text{ V}$ ได้ผลดังรูปที่ 4.9

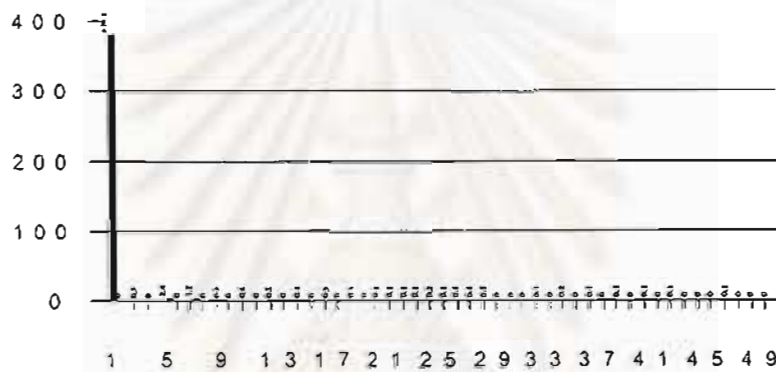


รูปที่ 4.7 รูปแสดงผลตอบของวงจรที่ทำงานในวงรอบปิด

บทที่ 5

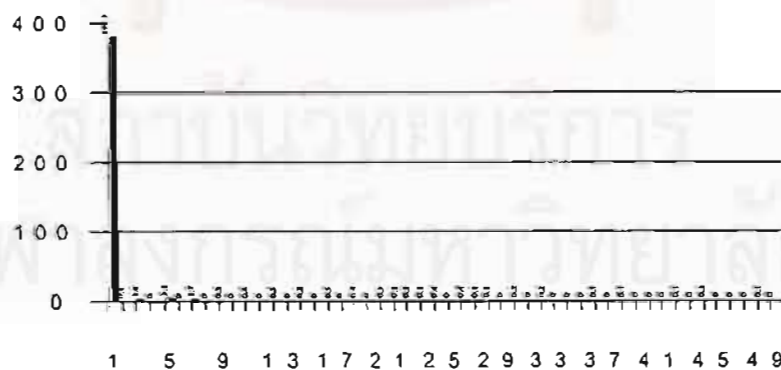
ผลการทดสอบการทำงาน

เราได้ทำการทดสอบการทำงานของวงจรที่ใช้สวิตช์สองตัวและการทำงานของวงจรที่ใช้เทคนิคอินเทอร์ลิฟ โดยใช้พารามิเตอร์ต่างๆดังที่ออกแบบมาแล้วในบทที่ 2 , 3 และ 4 ทั้งนี้แหล่งจ่ายที่ใช้ในการทดลองมีค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ดังรูปที่ 5.1 , 5.2 , 5.3



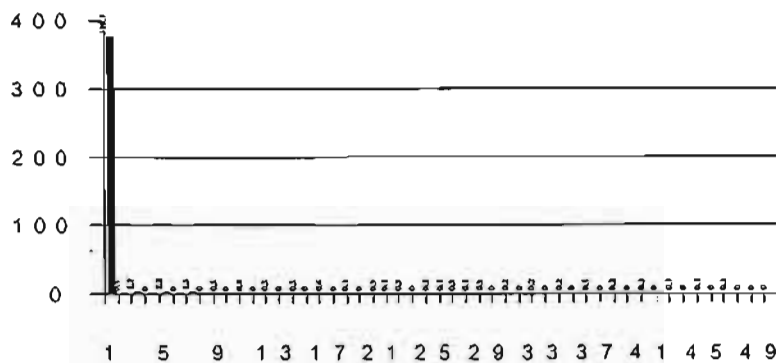
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกของแหล่งจ่ายแรงดันเฟส a

THD. = 0.75 %



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกของแหล่งจ่ายแรงดันเฟส b

THD. = 1.07 %



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกของแหล่งจ่ายแรงดันเฟส c

THD. = 0.90 %

1 ผลการทดลองวงจรเรียงกระแสที่ใช้สวิตช์สองตัว

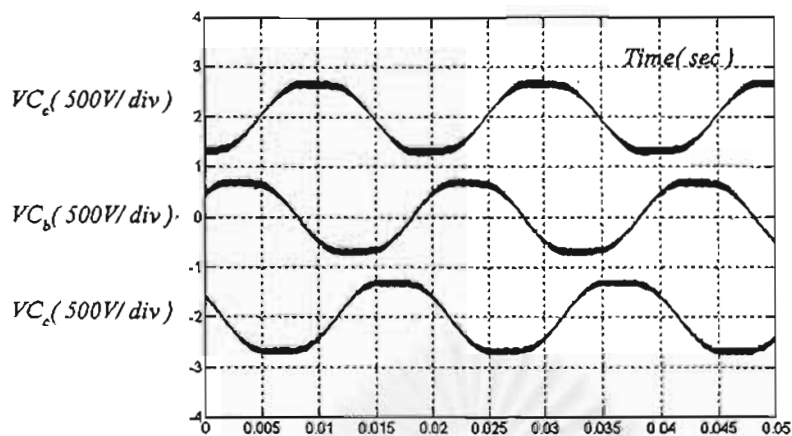
ในการทดสอบ เราได้ทำการแปร โหลดค่าต่างๆ 5 ค่า คือ 540Ω , 1200Ω , 1780Ω , 2120Ω , 2540Ω

กรณีโหลด $RL = 540 \Omega$

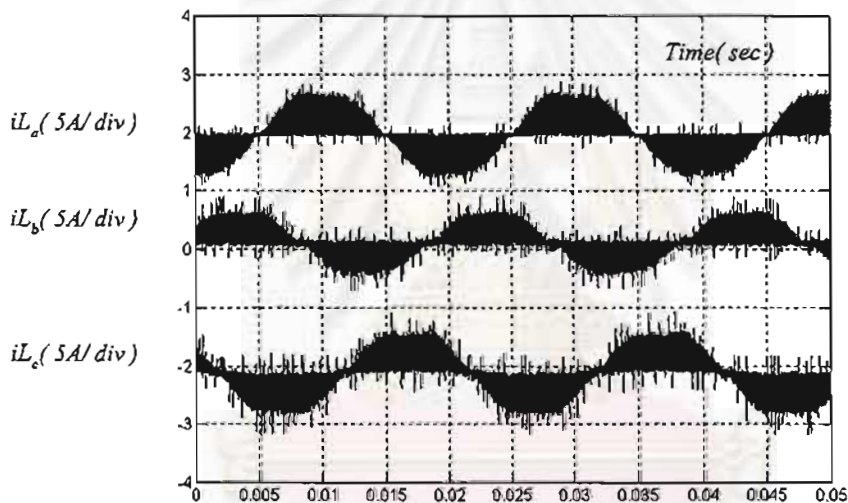
แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุขาเข้าซึ่งเป็นตัวกำหนดรูปร่างของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทบระดับจะมีลักษณะดังรูปที่ 5.4 และได้รูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำดังรูปที่ 5.5 เมื่อพิจารณาสเปกตรัมที่บริเวณความถี่การสวิตช์ในรูปที่ 5.6 จะพบว่าวงจรทำงานที่ความถี่การสวิตช์ประมาณ 11.5 kHz

ลักษณะของรูปกระแสจากแหล่งจ่ายทั้ง 3 เฟสเป็นดังรูปที่ 5.7 และมีค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆดังรูปที่ 5.8 , 5.9 , 5.10 จากสมการ 2.10 เราสามารถประมาณได้ว่าความสัมพันธ์ของค่ากระแสที่ความถี่มูลฐานกับกระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆจะแปรตามกันในลักษณะเป็นเชิงเส้น ดังนั้นเมื่อนำค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ได้จากการทดลองมาคิดเป็นปริมาณร้อยละเทียบกับค่าความถี่มูลฐานจะพบว่า มีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆไม่เกินค่ามาตรฐาน IEC 1000-3-2 Class A ที่แสดงเป็นร้อยละ ดังแสดงในรูปที่ 5.11

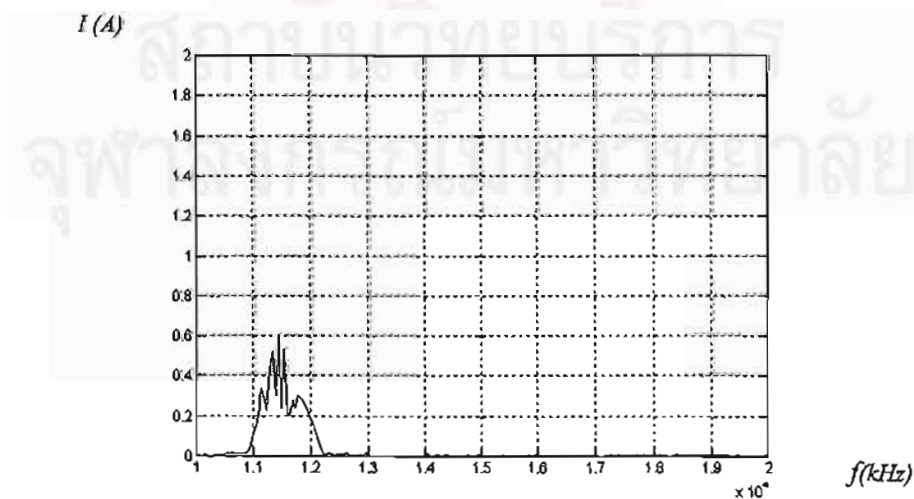
เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายมีค่า $380 V_{\text{RMS}}$ แรงดันไฟตรงขาออกมีค่าประมาณ 641 V ดังรูปที่ 5.7 และเมื่อลดแรงดันจากแหล่งจ่ายลงเหลือ $342 V_{\text{RMS}}$ แรงดันไฟตรงขาออกยังคงมีค่าประมาณ 641 V เท่าเดิม



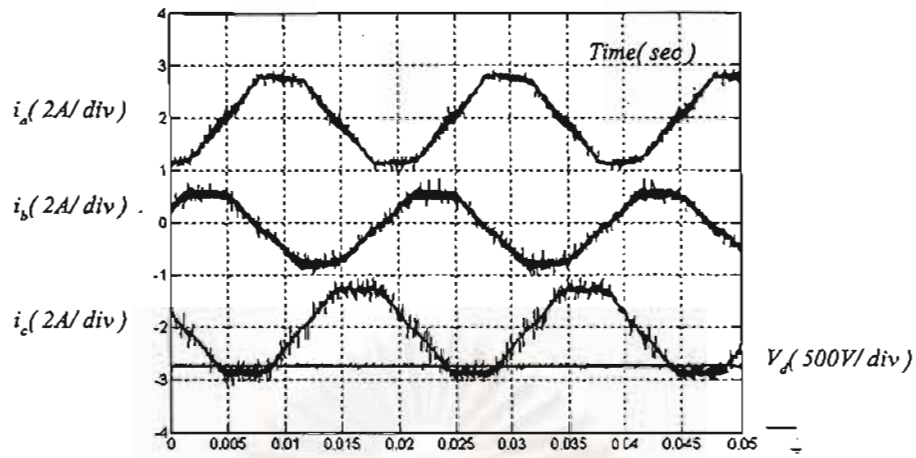
รูปที่ 5.4 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้านเข้าเมื่อ $RL = 540 \Omega$



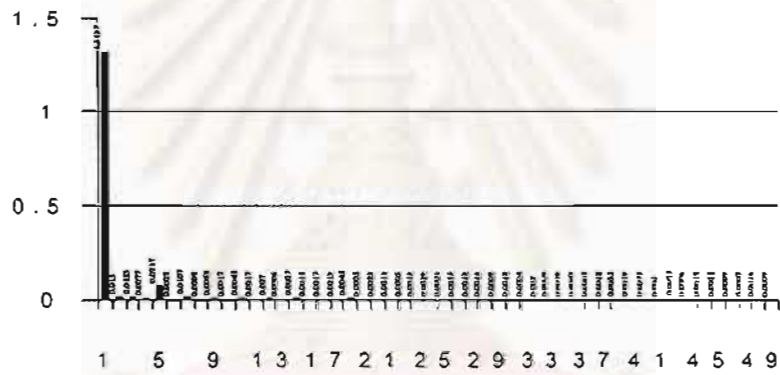
รูปที่ 5.5 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรหระดับเมื่อ $RL = 540 \Omega$



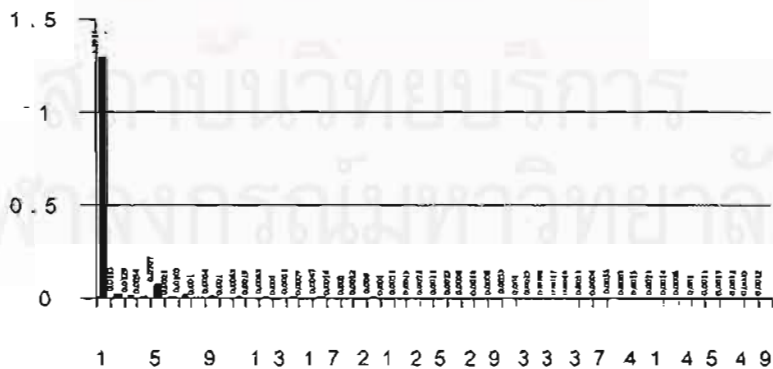
รูปที่ 5.6 สเปกตรัมของกระแสที่บริเวณความถี่การสวิตช์



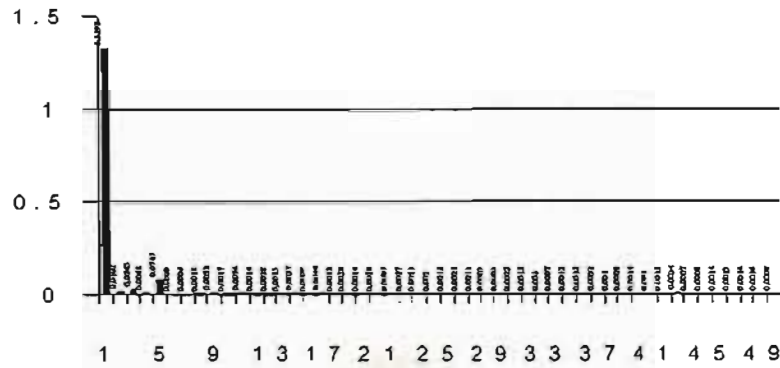
รูปที่ 5.7 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $RL = 540 \Omega$



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ia
THD. = 5.88 % , PF = 0.992

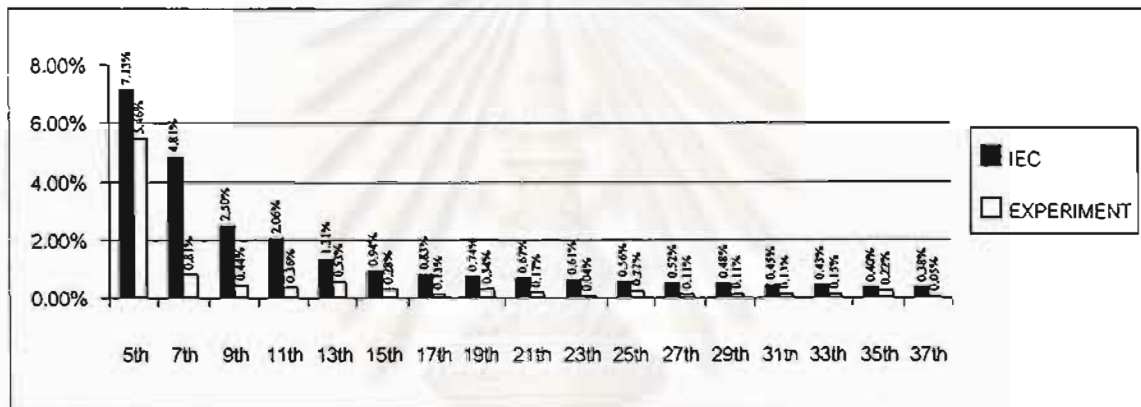


รูปที่ 5.9 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ib
THD. = 5.97 % , PF = 0.992



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ic

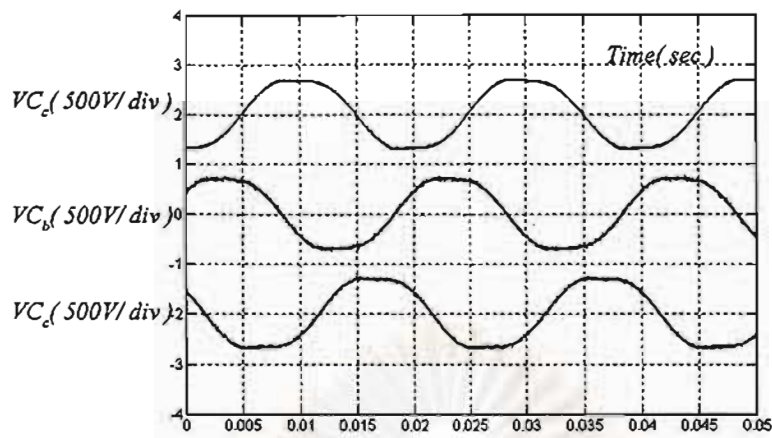
$$\text{THD} = 6.08 \% , \text{PF} = 0.992$$



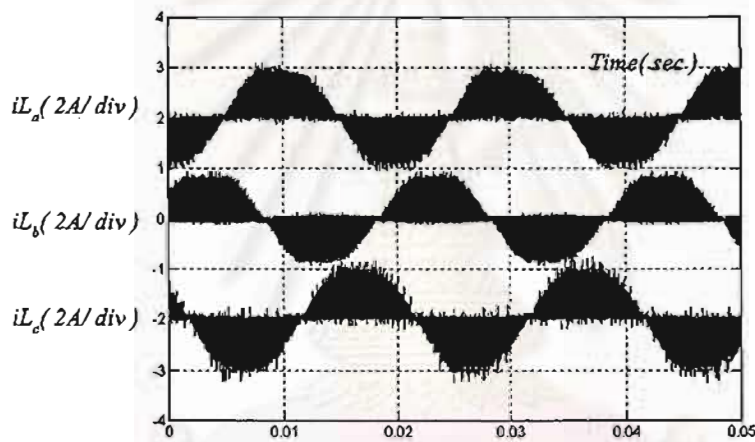
รูปที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบปริมาณกระแสฮาร์มอนิกระหว่างกระแสที่ได้จากการทดลองกับที่มาตรฐาน IEC 61000-3-2 Class A กำหนดไว้

กรณีโหลด $RL = 1200 \Omega$

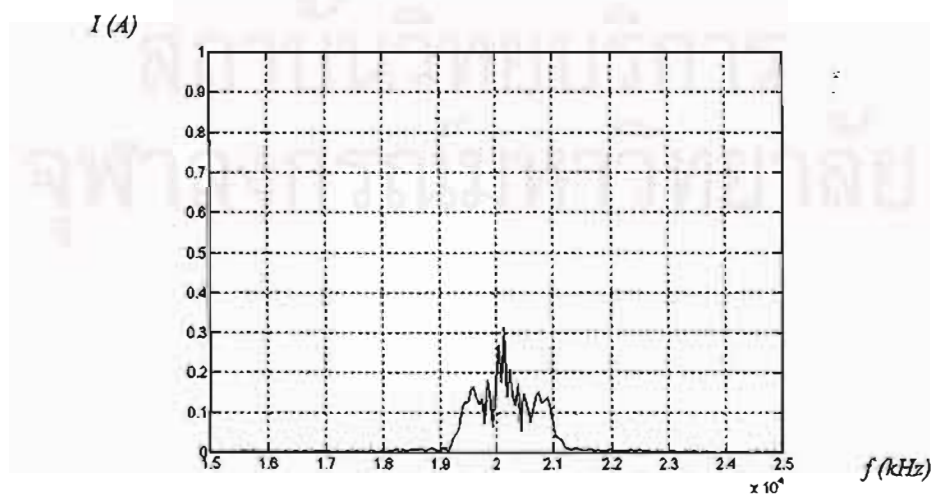
แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุขาเข้าซึ่งเป็นตัวกำหนดรูปร่างของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับจะมีลักษณะดังรูปที่ 5.12 และได้รูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำดังรูปที่ 5.13 เมื่อพิจารณาสเปกตรัมที่บริเวณความถี่การสวิตช์ในรูปที่ 5.14 จะพบว่าวงจรทำงานที่ความถี่การสวิตช์ประมาณ 20 kHz ลักษณะของรูปกระแสจากแหล่งจ่ายทั้ง 3 เฟสเป็นดังรูปที่ 5.15 และมีค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆดังรูปที่ 5.16 , 5.17 , 5.18 เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายมีค่า 380 V_{rms} แรงดันไฟตรงขาออกมีค่าประมาณ 641.5 V ดังรูป 5.15 และเมื่อลดแรงดันจากแหล่งจ่ายเหลือ 342 V_{rms} แรงดันไฟตรงขาออกจะมีค่าประมาณ 641.5 V เท่าเดิม



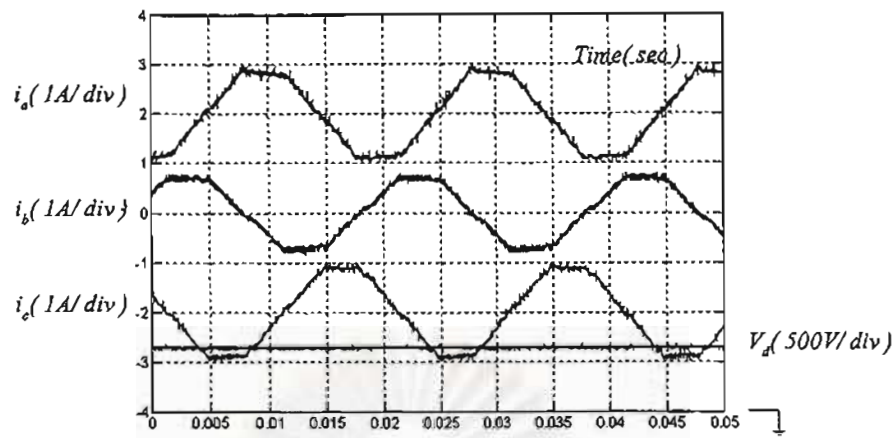
รูปที่ 5.12 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้านเข้าเมื่อ $RL = 1200 \Omega$



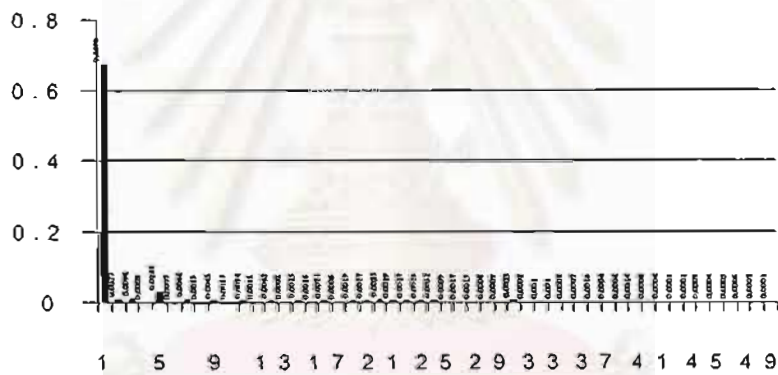
รูปที่ 5.13 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับเมื่อ $RL = 1200 \Omega$



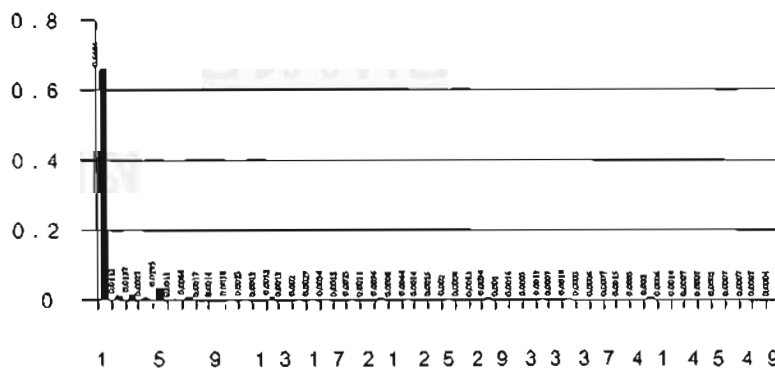
รูปที่ 5.14 สเปกตรัมของกระแสที่บริเวณความถี่การสวิตช์



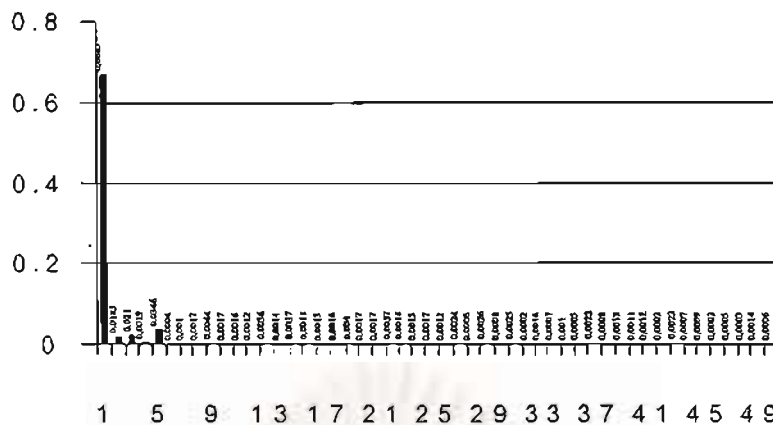
รูปที่ 5.15 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $RL = 1200 \Omega$



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส i_a
 $THD. = 5.14\%$, $PF = 0.992$



รูปที่ 5.17 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส i_b
 $THD. = 5.62\%$, $PF = 0.992$

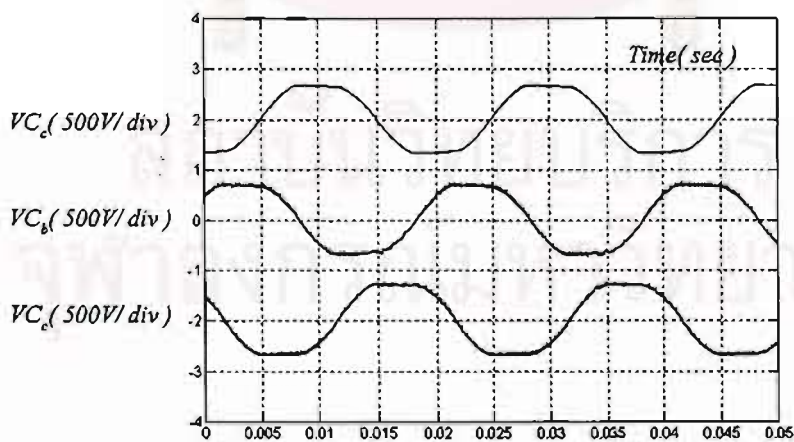


รูปที่ 5.18 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ic

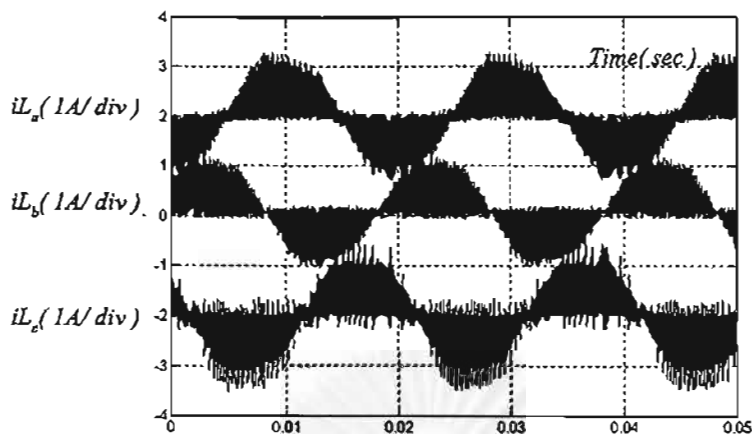
$$\text{THD} = 6.89\% , \text{PF} = 0.992$$

กรณีโหลด $RL = 1780 \Omega$

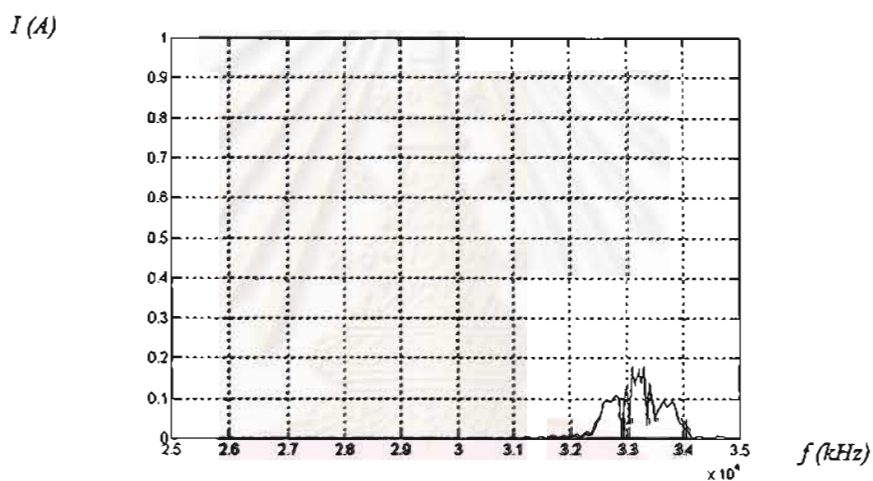
แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุขาเข้าซึ่งเป็นตัวกำหนดรูปร่างของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทบทระดับจะมีลักษณะดังรูปที่ 5.19 และได้รูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำดังรูปที่ 5.20 เมื่อพิจารณาเฟสที่บริเวณความถี่การสวิตช์ในรูปที่ 5.21 จะพบว่าวงจรทำงานที่ความถี่การสวิตช์ประมาณ 33 kHz ลักษณะของรูปกระแสจากแหล่งจ่ายทั้ง 3 เฟสเป็นดังรูปที่ 5.22 และมีค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆดังรูปที่ 5.23, 5.24, 5.25 เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายมีค่า $380 V_{rms}$ แรงดันไฟตรงขาออกมีค่าประมาณ 644 V ดังรูปที่ 5.22 และเมื่อลดแรงดันจากแหล่งจ่ายลงเหลือ 342 V_{rms} แรงดันไฟตรงขาออกจะมีค่าประมาณ 641 V



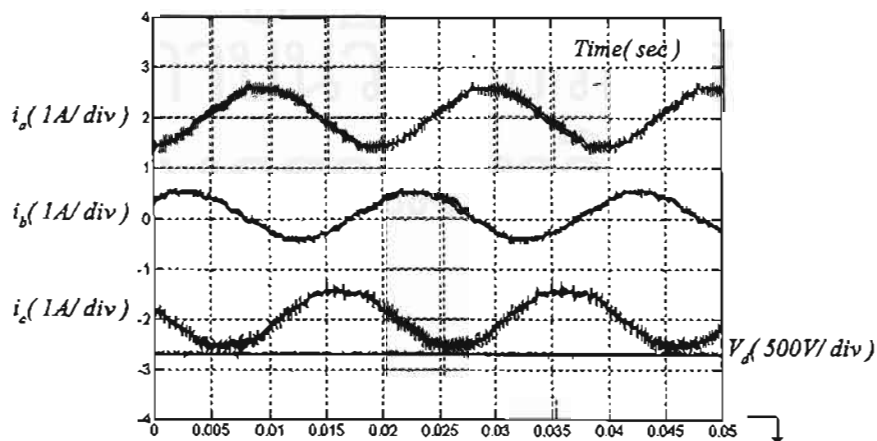
รูปที่ 5.19 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุขาเข้าเมื่อ $RL = 1780 \Omega$



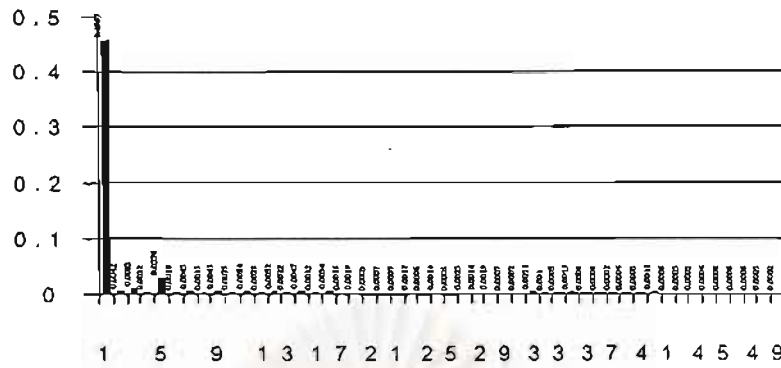
รูปที่ 5.20 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับเมื่อ $RL = 1780 \Omega$



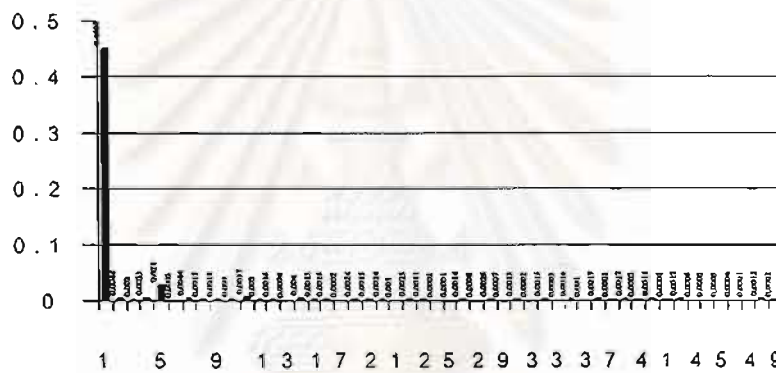
รูปที่ 5.21 สเปกตรัมของกระแสที่บริเวณความถี่การสวิตซ์



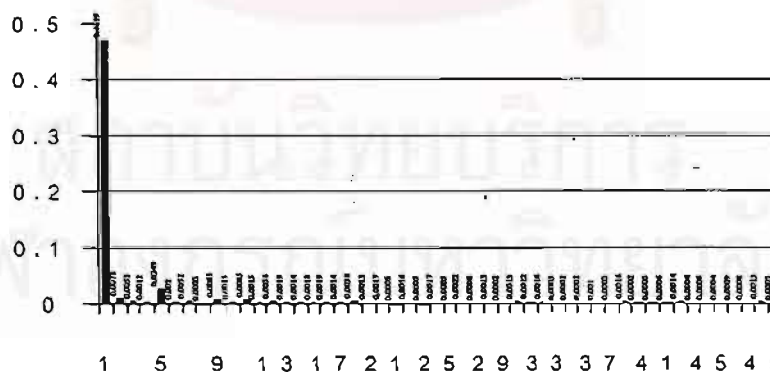
รูปที่ 5.22 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $RL = 1780 \Omega$



รูปที่ 5.23 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ia
THD. = 7.09 % , PF = 0.984



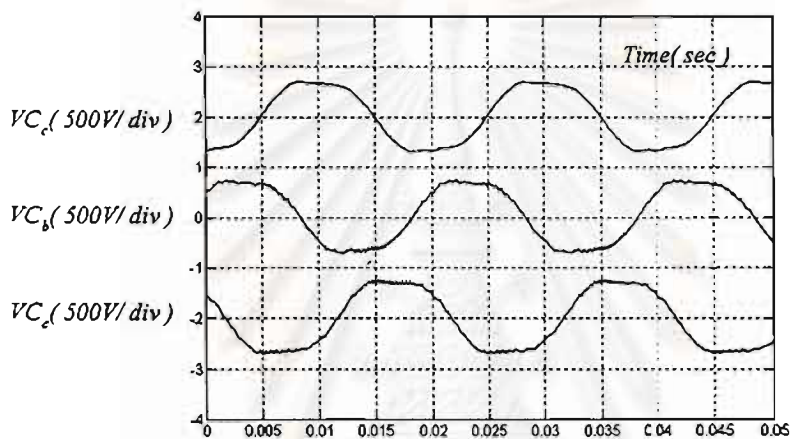
รูปที่ 5.24 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ib
THD. = 6.92 % , PF = 0.984



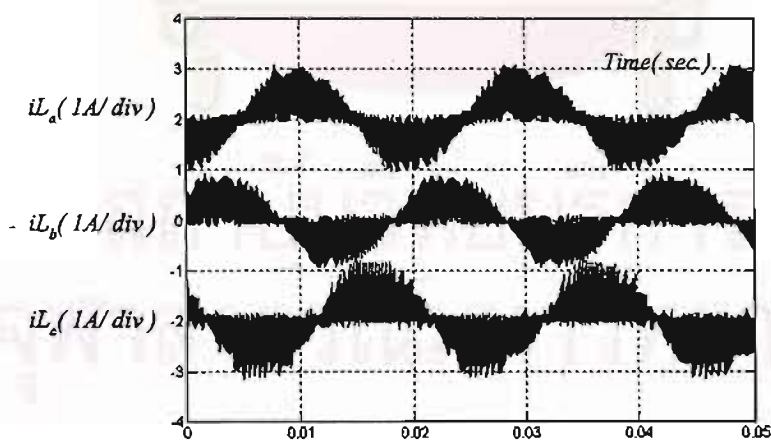
รูปที่ 5.25 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ic
THD. = 6.41 % , PF = 0.984

กรณีโหลด $RL = 2120 \Omega$

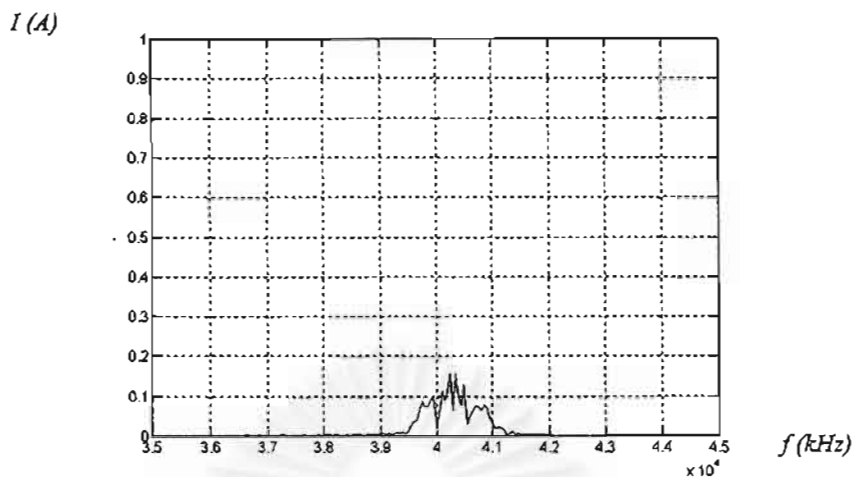
แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุขาเข้าซึ่งเป็นตัวกำหนดรูปร่างของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทบทระดับจะมีลักษณะดังรูปที่ 5.26 และได้รูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำดังรูปที่ 5.27 เมื่อพิจารณาสเปกตรัมที่บริเวณความถี่การสวิตช์ในรูปที่ 5.28 จะพบว่าวงจรทำงานที่ความถี่การสวิตช์ประมาณ 40 kHz ลักษณะของรูปกระแสจากแหล่งจ่ายทั้ง 3 เฟสเป็นดังรูปที่ 5.29 และมีค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆดังรูปที่ 5.30 , 5.31 , 5.32 เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายมีค่า 380 V_{rms} แรงดันไฟตรงขาออกมีค่าประมาณ 642.5 V ดังรูปที่ 5.29 และเมื่อลดแรงดันจากแหล่งจ่ายลงเหลือ 342 V_{rms} แรงดันไฟตรงขาออกจะมีค่าประมาณ 641.5 V



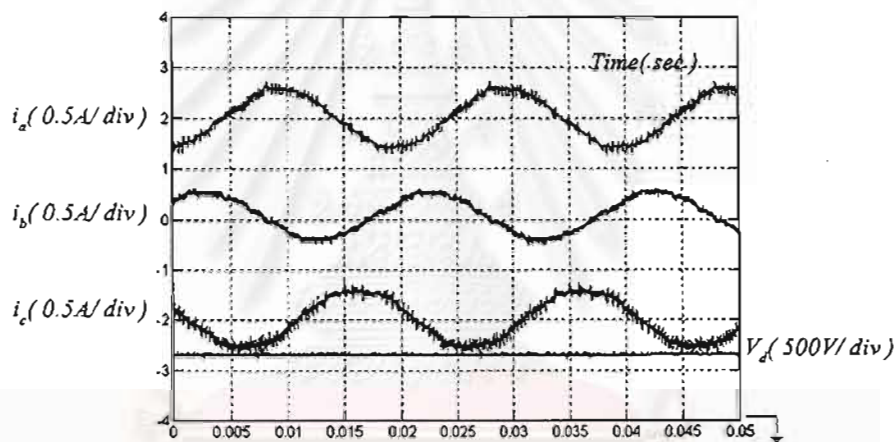
รูปที่ 5.26 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุขาเข้าเมื่อ $RL = 2120 \Omega$



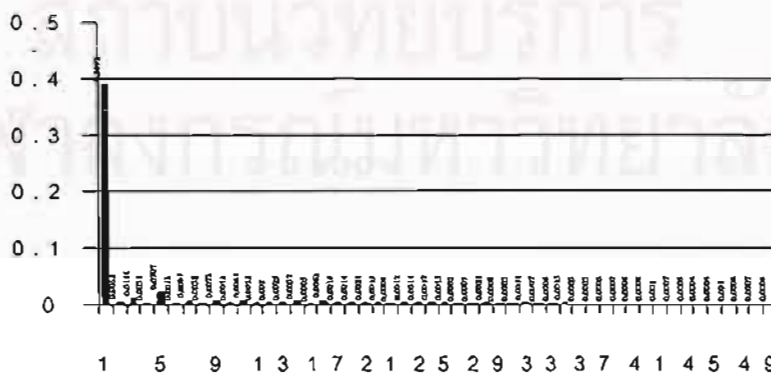
รูปที่ 5.27 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทบทระดับเมื่อ $RL = 2120 \Omega$



รูปที่ 5.28 สเปกตรัมของกระแสที่บริเวณความถี่การสวิตช์

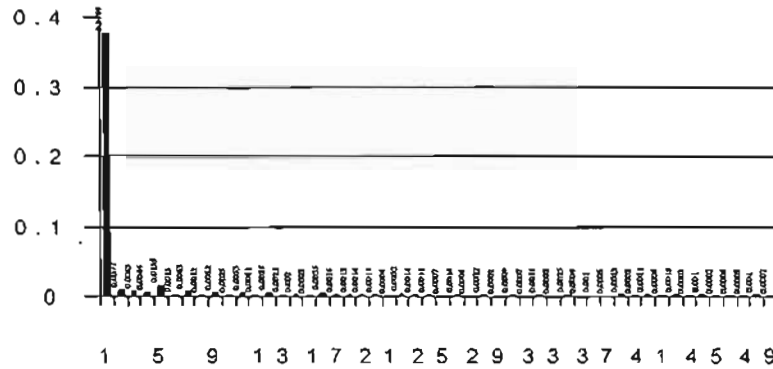


รูปที่ 5.29 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $RL = 2120 \Omega$

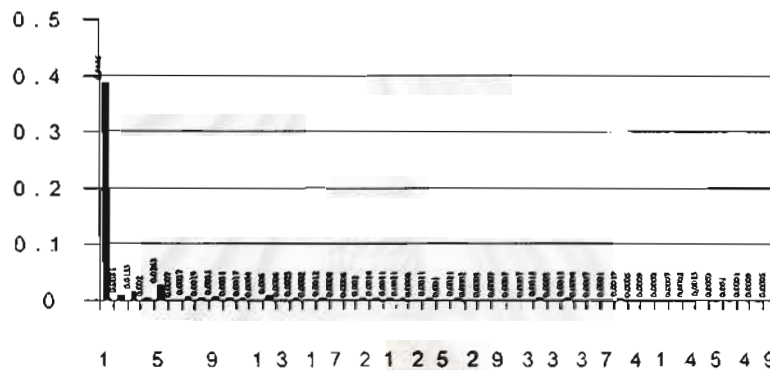


รูปที่ 5.30 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส i_a

THD. = 7.53 % , PF = 0.981



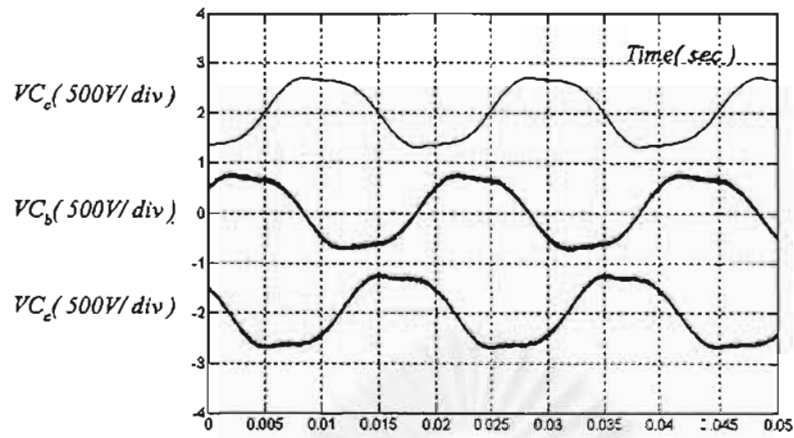
รูปที่ 5.31 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส i_b
 $THD. = 6.43 \%$, $PF = 0.981$



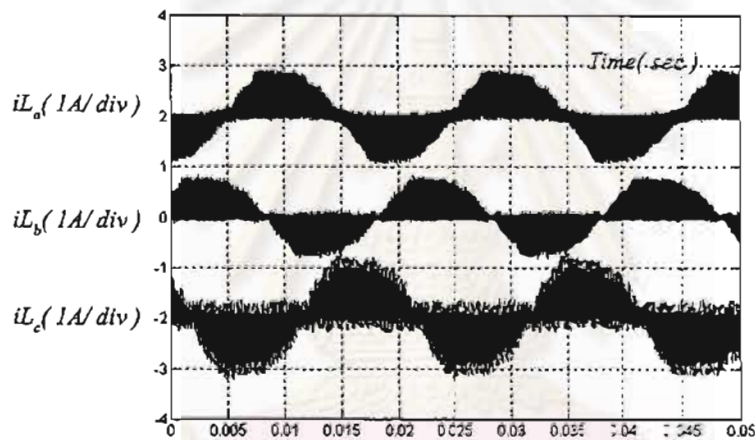
รูปที่ 5.32 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส i_c
 $THD. = 8.65 \%$, $PF = 0.981$

กรณีโหลด $RL = 2540 \Omega$

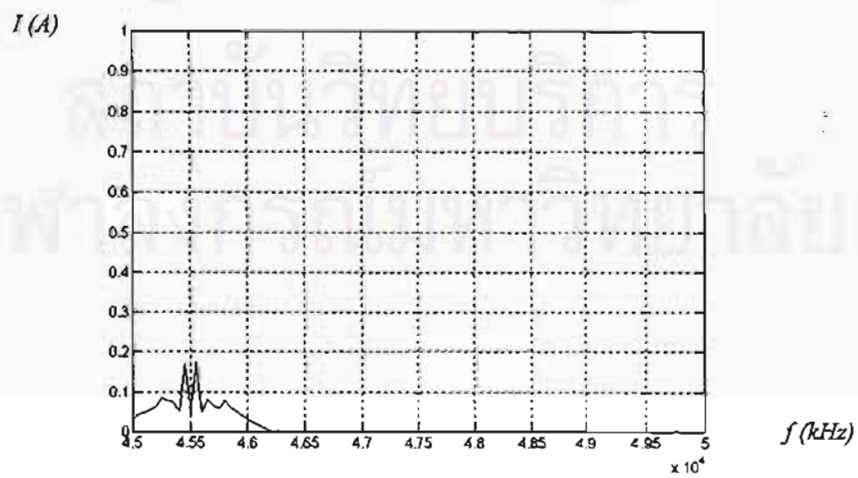
แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุขาเข้าซึ่งเป็นตัวกำหนดรูปร่างของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทบทระดับจะมีลักษณะดังรูปที่ 5.33 และได้รูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำดังรูปที่ 5.34 เมื่อพิจารณาสเปกตรัมที่บริเวณความถี่การสวิตช์ในรูปที่ 5.35 จะพบว่าวงจรทำงานที่ความถี่การสวิตช์ประมาณ 45.5 kHz ลักษณะของรูปกระแสจากแหล่งจ่ายทั้ง 3 เฟสเป็นดังรูปที่ 5.36 และมีค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆดังรูปที่ 5.37 , 5.38 , 5.39 เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายมีค่า 380 V_r แรงดันไฟตรงขาออกมีค่าประมาณ 649 V ดังรูปที่ 5.36 และเมื่อลดแรงดันจากแหล่งจ่ายลงเหลือ 342 V_r แรงดันไฟตรงขาออกจะมีค่าประมาณ 641 V



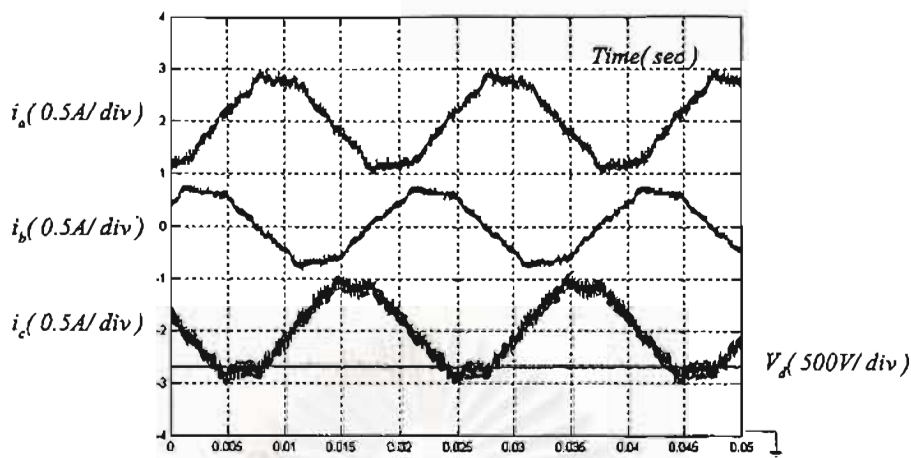
รูปที่ 5.33 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้านเข้าเมื่อ $RL = 2540 \Omega$



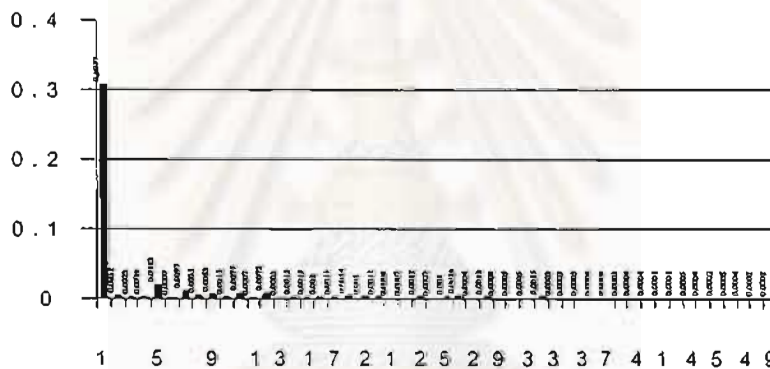
รูปที่ 5.34 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรหระดับเมื่อ $RL = 2540 \Omega$



รูปที่ 5.35 สเปกตรัมของกระแสที่บริเวณความถี่การสวิตช์

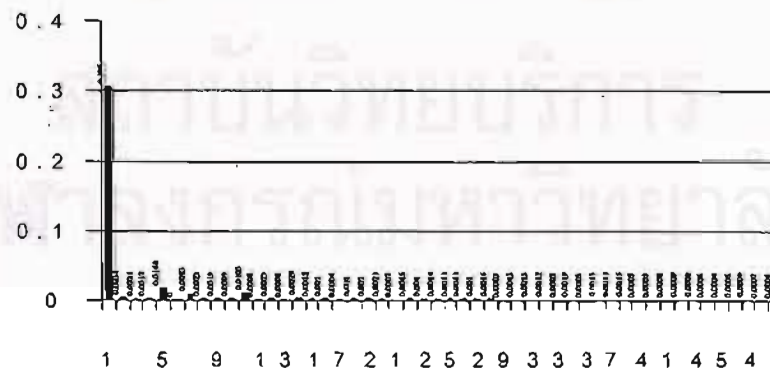


รูปที่ 5.36 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $RL = 2540 \Omega$



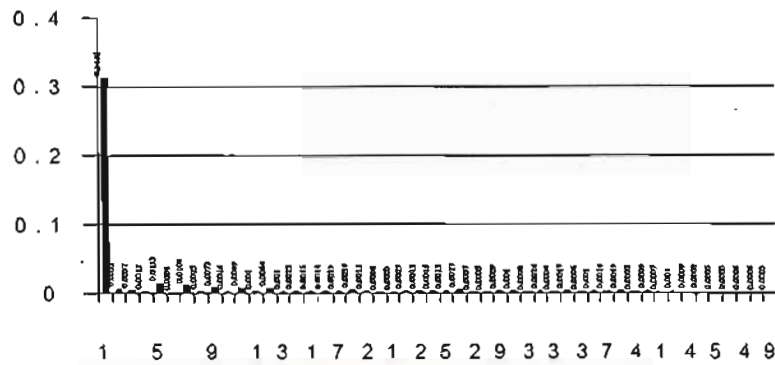
รูปที่ 5.37 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ia

THD. = 8.23 % , PF = 0.978



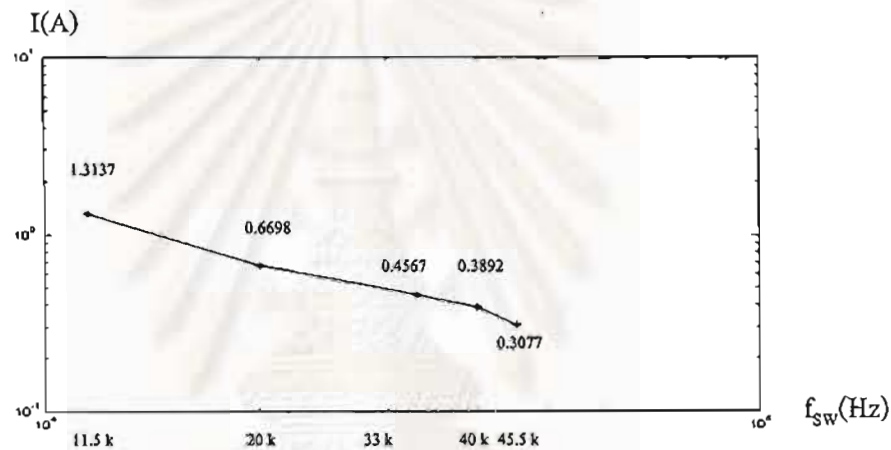
รูปที่ 5.38 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ib

THD. = 7.61 % , PF = 0.978



รูปที่ 5.39 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ic

$$\text{THD} = 7.58\% , \text{PF} = 0.978$$

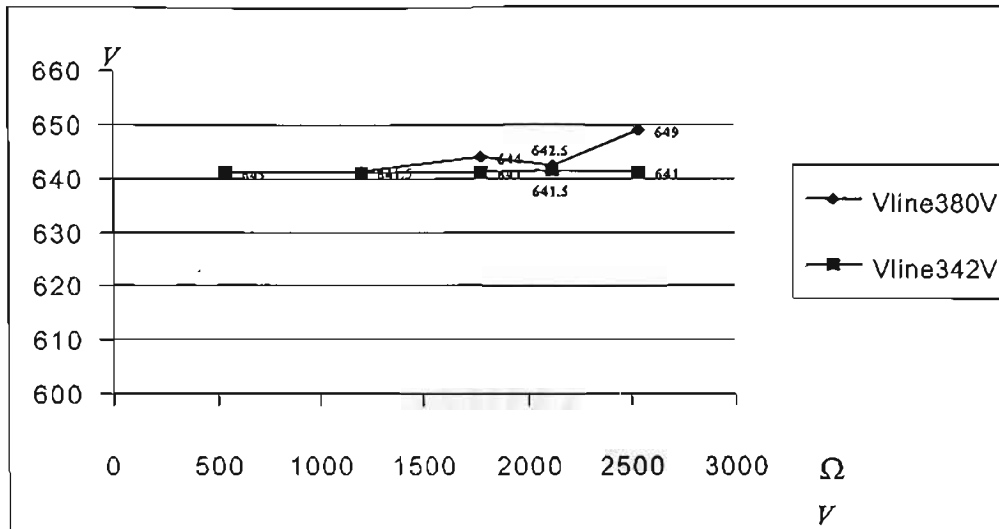


รูปที่ 5.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสที่ความถี่มูลฐานกับความถี่การสวิตช์

เมื่อเรานำค่าของกระแสที่ความถี่มูลฐานและค่าของความถี่การสวิตช์ที่โหลดค่าต่างๆ มาเขียนลงบนกราฟแบบล็อกสเกลจะให้ความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับเชิงเส้นดังรูปที่ 5.40 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ของกระแสและความถี่การสวิตช์นั้นแปรผกผันกันดังสมการ (2.10) จริง และเมื่อนำค่าแรงดันไฟตรงขาออกที่โหลดค่าต่างๆมาแสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 5.41 จะคำนวณหาค่า load regulation และ line regulation ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{load regulation} &= \frac{V_{\text{lightload}} - V_{\text{fullload}}}{V_{\text{fullload}}} \\ &= \frac{649 - 641}{641} = 1.25\% \end{aligned}$$

ได้แรงดันไฟตรงขาออก 641 V เท่ากัน ดังนั้น $\text{line regulation} \approx 0$



รูปที่ 5.41 กราฟแสดงค่าของแรงดันไฟตรงต้านออกที่โหลดต่างๆ

2 ผลการทดลองวงจรที่ใช้เทคนิคอินเตอร์ลัฟ

ในการทดสอบ เราได้ทำการแปรโหลดค่าต่างๆ 5 ค่า คือ 300 Ω , 540 Ω , 1020 Ω , 1200 Ω , 1480 Ω

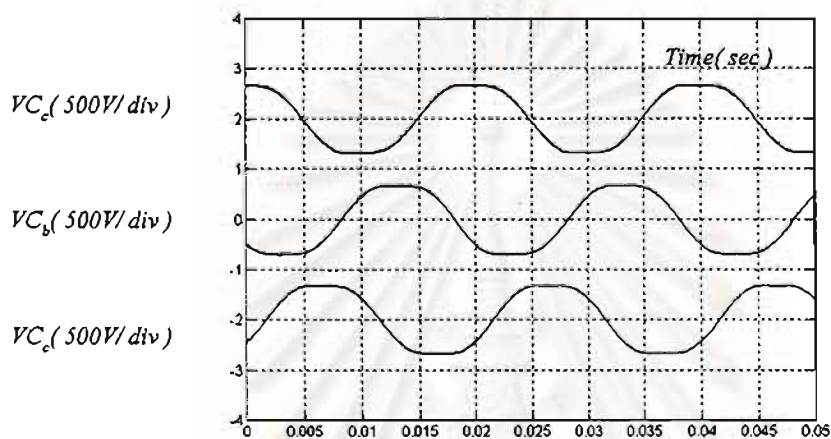
กรณีโหลด $RL = 300 \Omega$

ได้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุขาเข้าซึ่งเป็นตัวกำหนดรูปร่างของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทบระดับจะมีลักษณะดังรูปที่ 5.42 จะสังเกตเห็นว่า รูปร่างของกระแสที่จะทำการกรองคือกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองชุดรวมกัน จึงมีลักษณะเปลี่ยนเป็นคล้ายกระแสต่อเนื่องดังรูปที่ 5.43 ทำให้สามารถลดขนาดของวงจรกรองด้านเข้าลงเหลือเพียง 0.9 mH รูปที่ 5.44 เป็นรูปขยายของกระแสจากรูปที่ 5.43 ที่บริเวณ $\omega t = \frac{\pi}{2}$ เมื่อพิจารณาสเปคตรัมที่บริเวณความถี่การสวิตช์ในรูปที่ 5.45 จะพบว่าวงจรทำงานที่ความถี่การสวิตช์ประมาณ 11.5 kHz และเมื่อตรวจจับค่าแรงดันระหว่าง Co1 และ Co2 จะได้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งมีความถี่เท่ากับความถี่การสวิตช์ของวงจรดังรูปที่ 5.44 ซึ่งเราสามารถเติมหม้อแปลงที่บริเวณนี้เพื่อทำการแยกโคด เลือกระดับของแรงดันไฟตรงขาออกตามต้องการได้

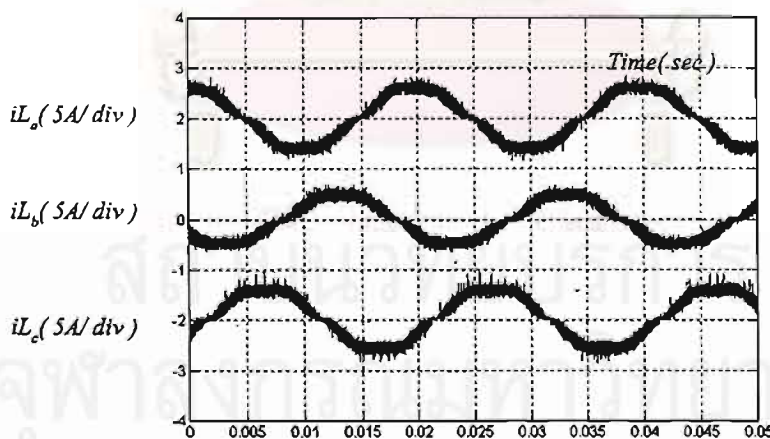
ลักษณะของรูปกระแสจากแหล่งจ่ายทั้ง 3 เฟสเป็นดังรูปที่ 5.46 และมีค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆดังรูปที่ 5.47 , 5.48 , 5.49 จากสมการที่ (2.10) เราสามารถประมาณได้ว่าค่ากระแสที่ความถี่มูลฐานกับกระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆแปรเปลี่ยนตามกันมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ดังนั้นเมื่อนำค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ได้จากการทดลองมาคิดเป็นปริมาณร้อยละเทียบกับค่าที่ความถี่มูลฐาน

จะพบว่า มีปริมาณกระแสฮาร์โมนิกที่อันดับต่างๆ ไม่เกินค่ามาตรฐาน IEC 1000-3-2 Class A ที่แสดงเป็นร้อยละดังแสดงในรูปที่ 5.50

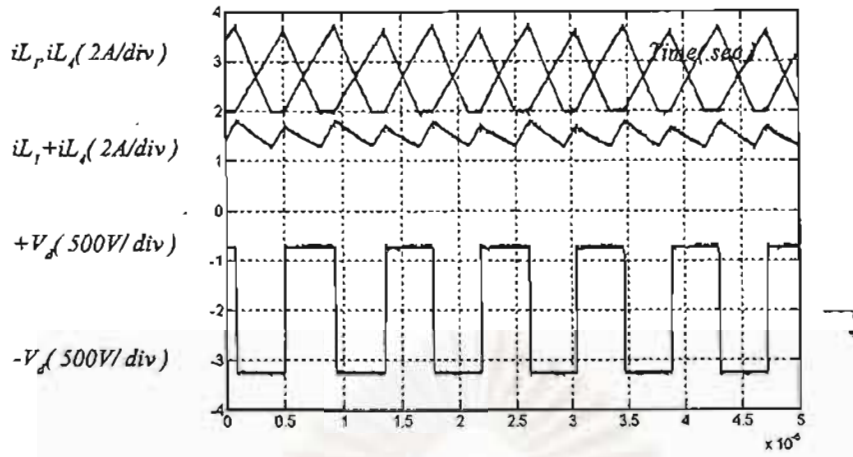
เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายมีค่า 380 V_{H} แรงดันไฟตรงขาออกมีค่าประมาณ 643 V ดังรูปที่ 5.46 และเมื่อลดแรงดันจากแหล่งจ่ายลงเหลือ 342 V_{H} แรงดันไฟตรงขาออกจะมีค่าประมาณ 641 V



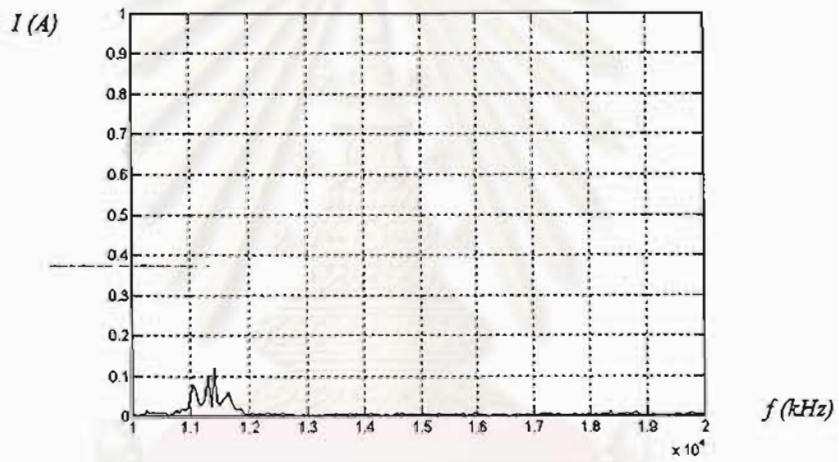
รูปที่ 5.42 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้านเข้าเมื่อ $RL = 300\ \Omega$



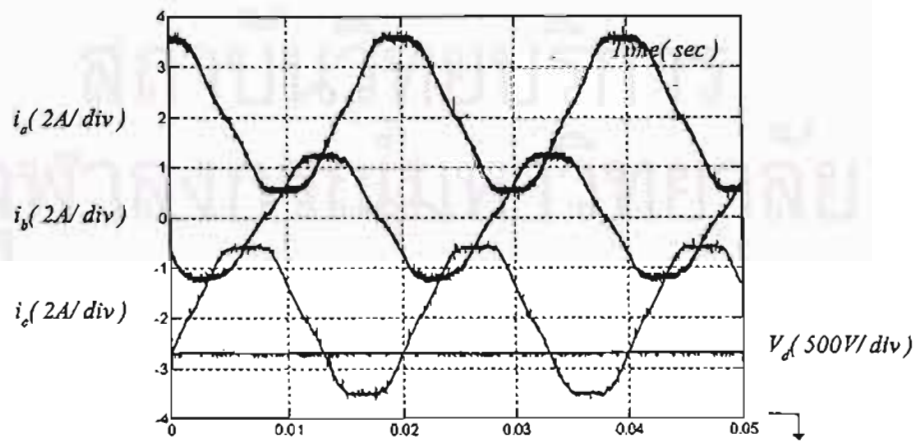
รูปที่ 5.43 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับเมื่อ $RL = 300\ \Omega$



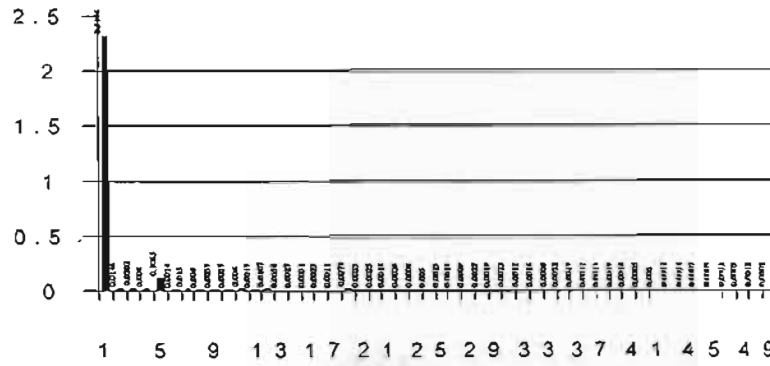
รูปที่ 5.44 รูปคลื่นกระแส i_{L1} , i_{L4} , $i_{L1}+i_{L4}$, และแรงดัน $V_{co1}-V_{co2}$



รูปที่ 5.45 สเปกตรัมของกระแสที่ความถี่การสวิตช์

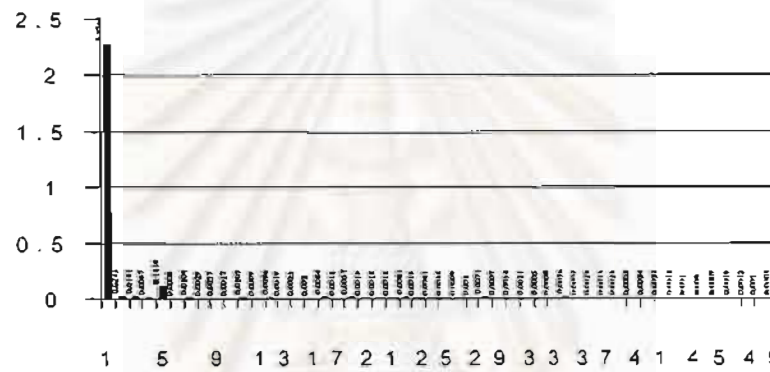


รูปที่ 5.46 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $RL = 300 \Omega$



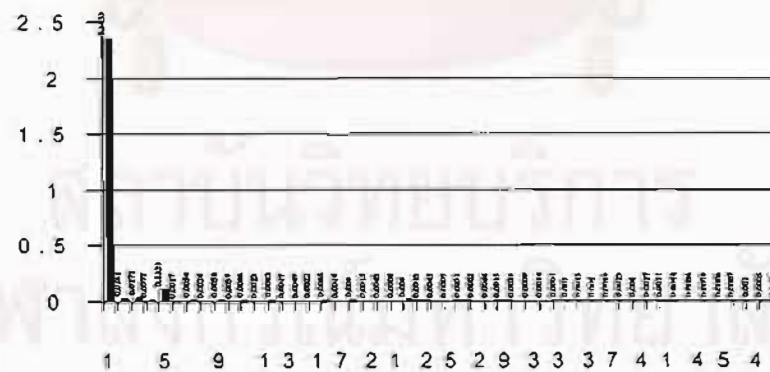
รูปที่ 5.47 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ia

$$\text{THD} = 4.85 \% , \text{PF} = 0.992$$



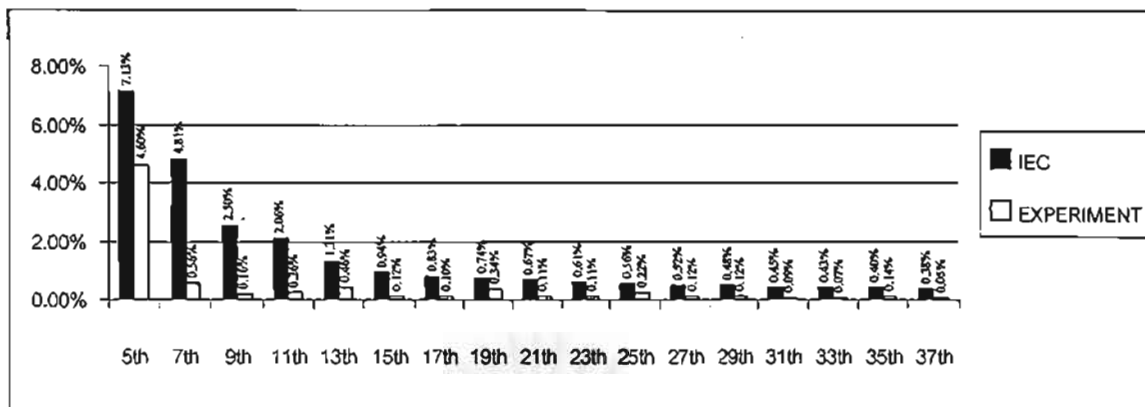
รูปที่ 5.48 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ib

$$\text{THD} = 5.22 \% , 0.992$$



รูปที่ 5.49 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ic

$$\text{THD} = 5.15 \% , \text{PF} = 0.992$$



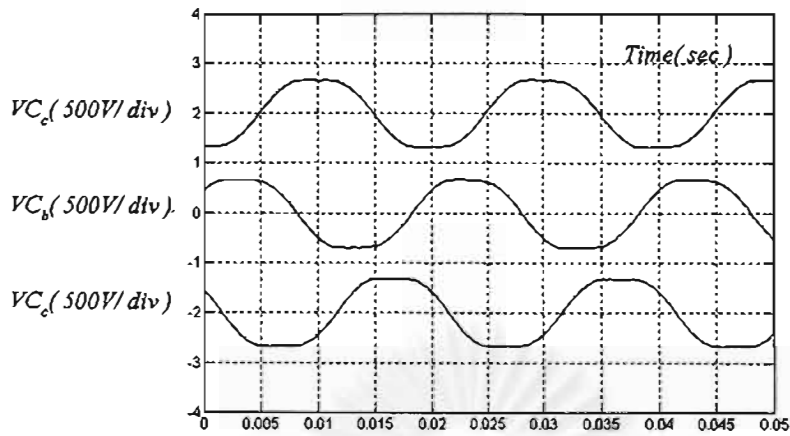
รูปที่ 5.50 กราฟเปรียบเทียบปริมาณกระแสฮาร์มอนิกระหว่างกระแสที่ได้จากการทดลองกับที่มาตรฐาน IEC 61000-3-2 Class A กำหนดไว้

กรณีโหลด $RL = 540 \Omega$

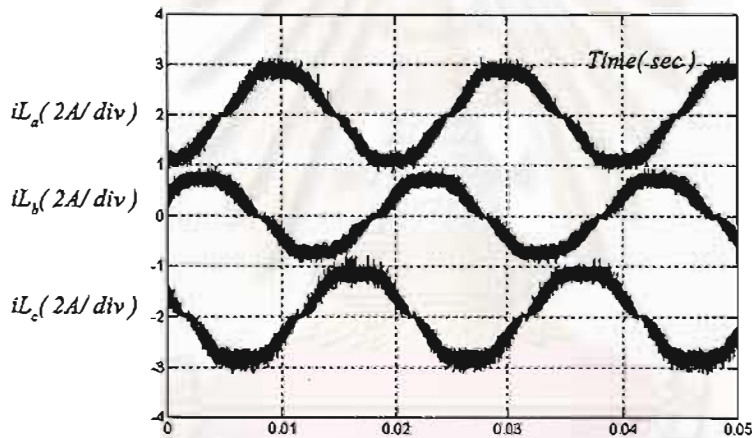
แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุขาเข้าซึ่งเป็นตัวกำหนดรูปร่างของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรบัพจะมีความถี่รูปที่ 5.51 จะสังเกตพบว่า รูปร่างของกระแสแหล่งจ่ายที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองชุดรวมกัน จึงมีความถี่เปลี่ยนเป็นคล้ายกระแสต่อเนื่องและมีขนาดเพิ่มขึ้นตามโหลด รูปที่ 5.53 เป็นรูปขยายของกระแสจากรูปที่ 5.52 ที่บริเวณ $\omega t = \frac{\pi}{2}$ เมื่อพิจารณาสเปกตรัมที่บริเวณความถี่การสวิตช์ในรูปที่ 5.54 จะพบว่าวงจรทำงานที่ความถี่การสวิตช์ประมาณ 19 kHz และเมื่อตรวจจับค่าแรงดันระหว่าง $Co1$ และ $Co2$ จะได้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งมีความถี่เท่ากับความถี่การสวิตช์ของวงจรดังรูปที่ 5.53

ลักษณะของรูปกระแสจากแหล่งจ่ายทั้ง 3 เฟสเป็นดังรูปที่ 5.55 และมีค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆดังรูปที่ 5.56, 5.57, 5.58

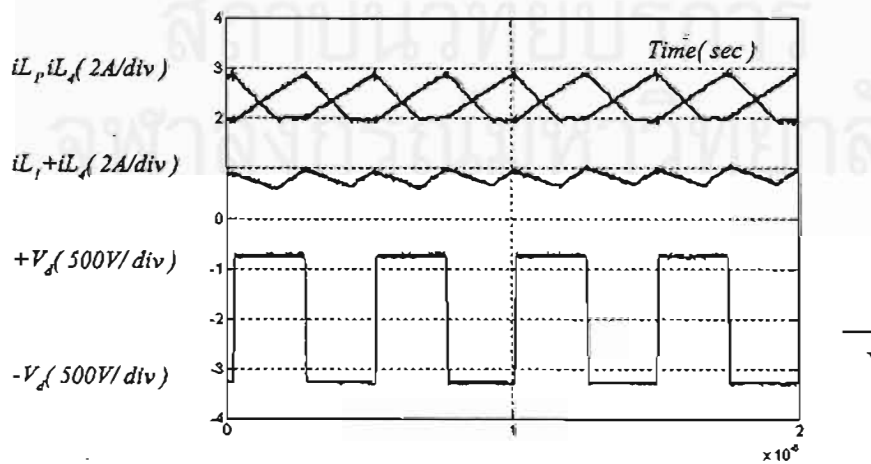
เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายมีค่า $380 V_{rms}$ แรงดันไฟตรงขาออกมีค่าประมาณ 649 V ดังรูปที่ 5.55 และเมื่อลดแรงดันจากแหล่งจ่ายลงเหลือ $342 V_{rms}$ แรงดันไฟตรงขาออกจะมีค่าประมาณ 644 V



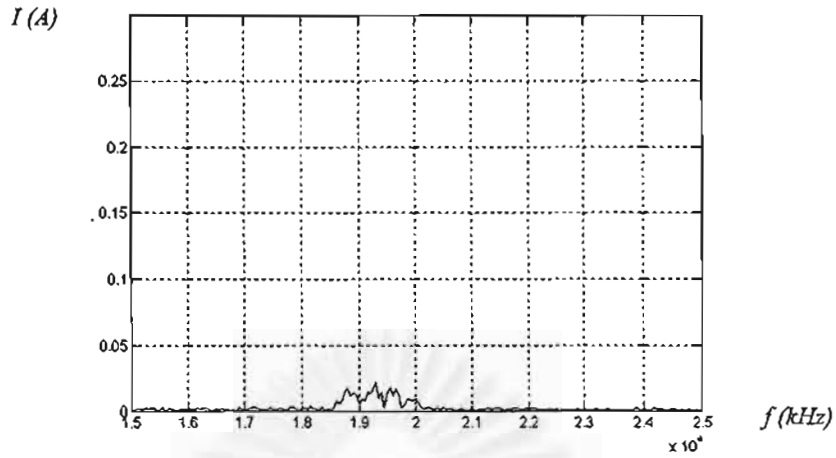
รูปที่ 5.51 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้านเข้าเมื่อ $RL = 540 \Omega$



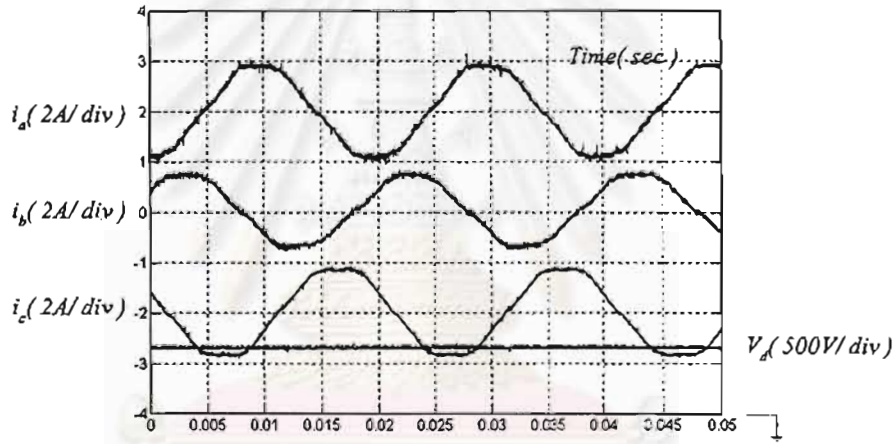
รูปที่ 5.52 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับเมื่อ $RL = 540 \Omega$



รูปที่ 5.53 รูปคลื่นกระแส iL_1 , iL_4 , $iL_1 + iL_4$, และแรงดัน $V_{co1} - V_{co2}$



รูปที่ 5.54 สเปกตรัมของกระแสที่บริเวณความถี่การสวิตช์

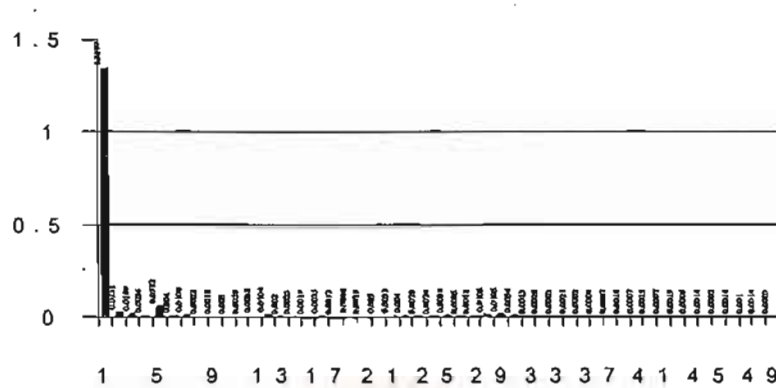


รูปที่ 5.55 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $RL = 540 \Omega$



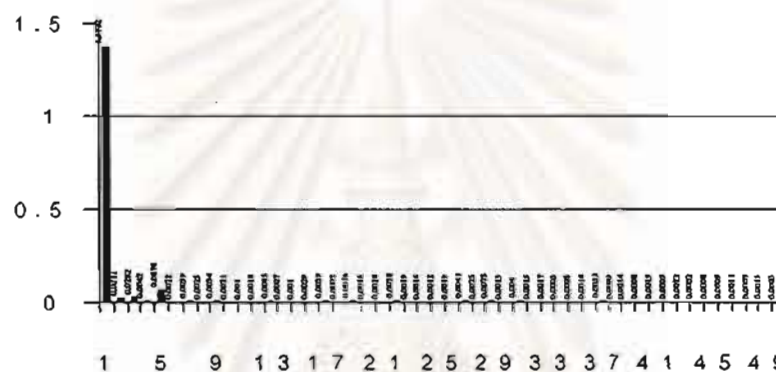
รูปที่ 5.56 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส i_a

THD. = 5.12 % , PF = 0.992



รูปที่ 5.57 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ib

$$\text{THD} = 5.23 \% , \text{PF} = 0.992$$



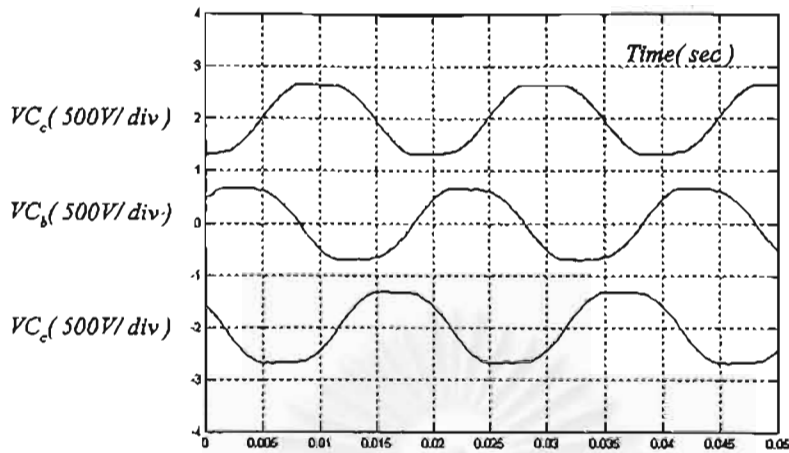
รูปที่ 5.58 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ic

$$\text{THD} = 5.74 \% , \text{PF} = 0.992$$

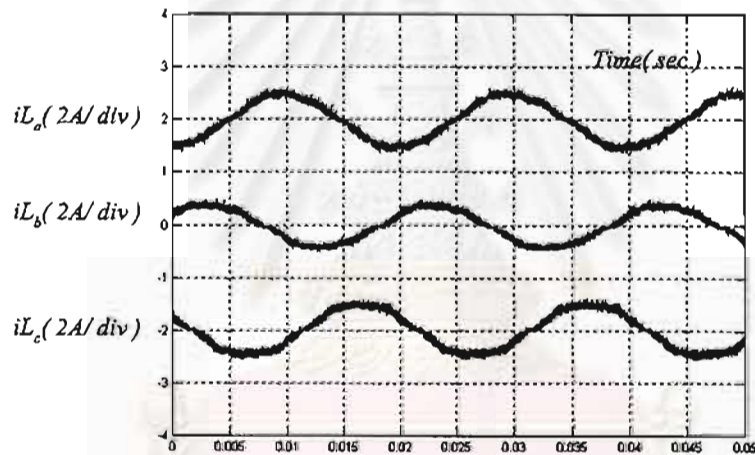
กรณีโหลด $RL = 1020 \Omega$

แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุขาเข้าซึ่งเป็นตัวกำหนดรูปร่างของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทบทระดับจะมีลักษณะดังรูปที่ 5.59 จะสังเกตพบว่า รูปร่างของกระแสแหล่งจ่ายไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองชุดรวมกัน จึงมีลักษณะเปลี่ยนเป็นคล้ายกระแสต่อเนื่องและมีขนาดเพิ่มขึ้นตามโหลด รูปที่ 5.61 เป็นรูปขยายของกระแสจากรูปที่ 5.60 ที่บริเวณ $\omega t = \frac{\pi}{2}$ เมื่อพิจารณาสเปกตรัมที่บริเวณความถี่การสวิตช์ในรูปที่ 5.62 จะพบว่าวงจรทำงานที่ความถี่การสวิตช์ประมาณ 40 kHz และเมื่อตรวจจับค่าแรงดันระหว่าง C_{o1} และ C_{o2} จะได้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งมีความถี่เท่ากับความถี่การสวิตช์ของวงจรดังรูปที่ 5.61

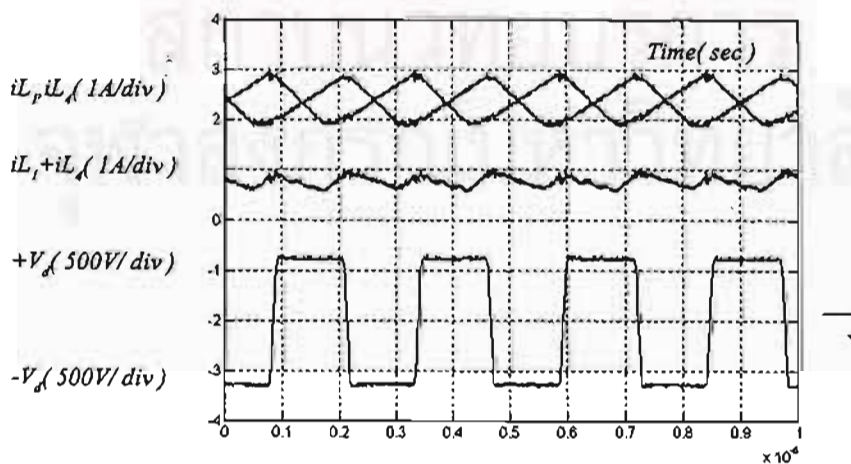
ลักษณะของรูปกระแสจากแหล่งจ่ายทั้ง 3 เฟสเป็นดังรูปที่ 5.63 และมีค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆดังรูปที่ 5.64 , 5.65 , 6.66



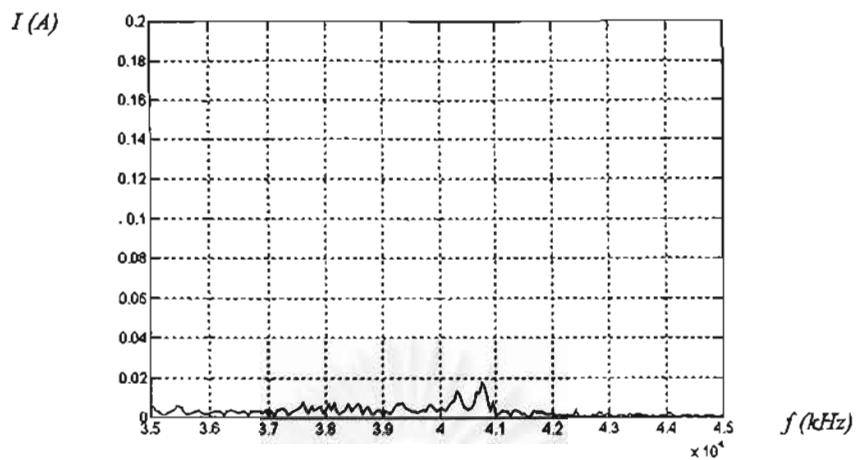
รูปที่ 5.59 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้านเข้าเมื่อ $RL = 1020 \Omega$



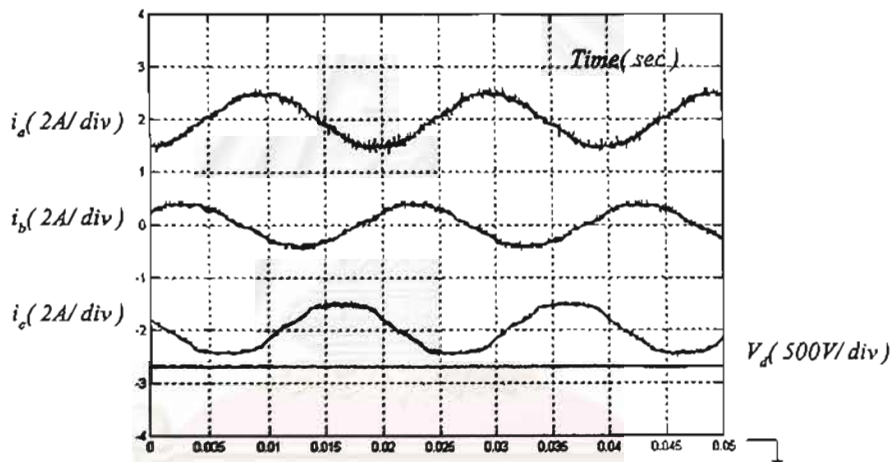
รูปที่ 5.60 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับเมื่อ $RL = 1020 \Omega$



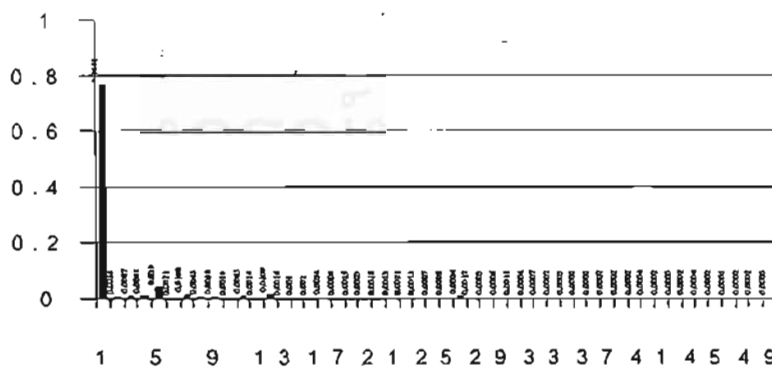
รูปที่ 5.61 รูปคลื่นกระแส iL_1 , iL_4 , iL_1+iL_4 , และแรงดัน V_{co1} - V_{co2}



รูปที่ 5.62 สเปกตรัมของกระแสที่บริเวณความถี่การสวิตช์

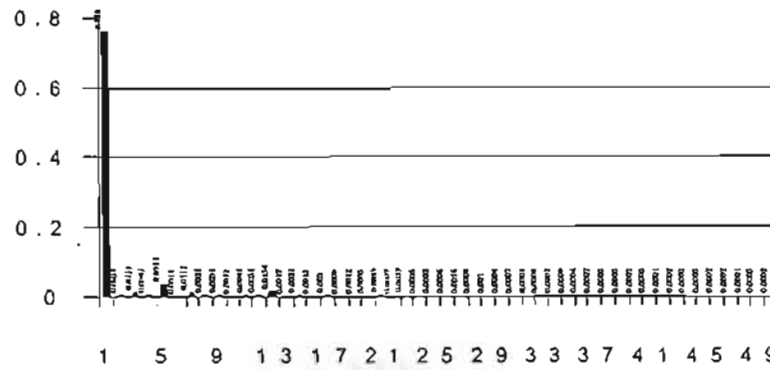


รูปที่ 5.63 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $RL = 1020 \Omega$

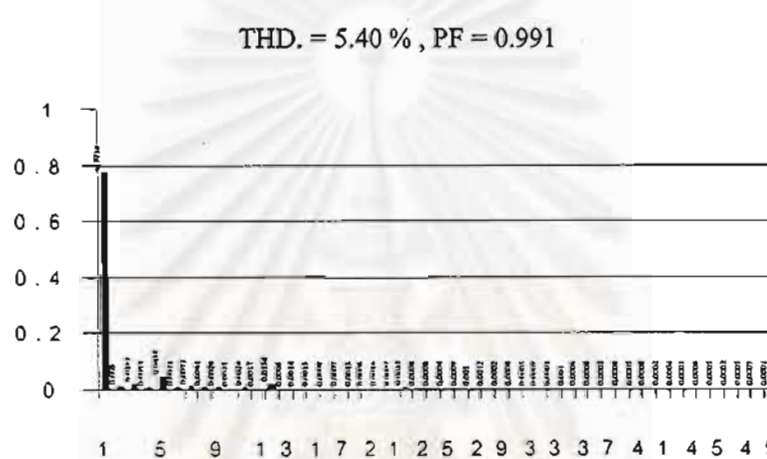


รูปที่ 5.64 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส i_a

THD. = 5.94 % , PF = 0.991



รูปที่ 5.65 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ib



รูปที่ 5.66 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ic

$$\text{THD.} = 6.65 \% , \text{PF} = 0.991$$

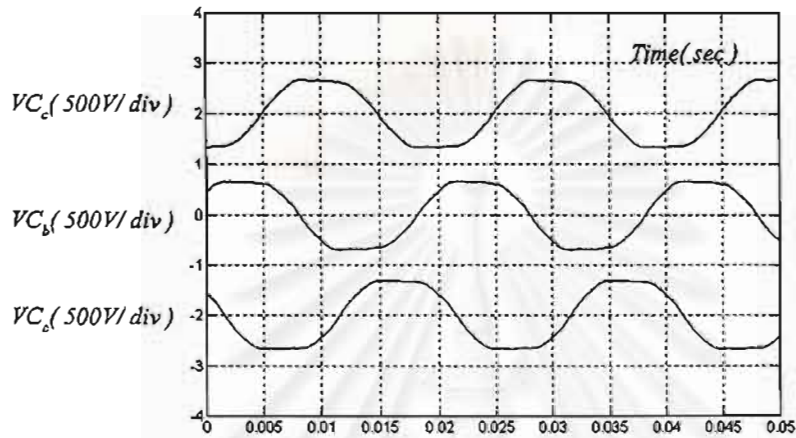
เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายมีค่า $380 \text{ V}_{\text{RMS}}$ แรงดันไฟตรงขาออกมีค่าประมาณ 648 V ดังรูปที่ 5.63 และเมื่อลดแรงดันจากแหล่งจ่ายลงเหลือ $342 \text{ V}_{\text{RMS}}$ แรงดันไฟตรงขาออกจะมีค่าประมาณ 645 V

กรณีโหลด $RL = 1200 \Omega$

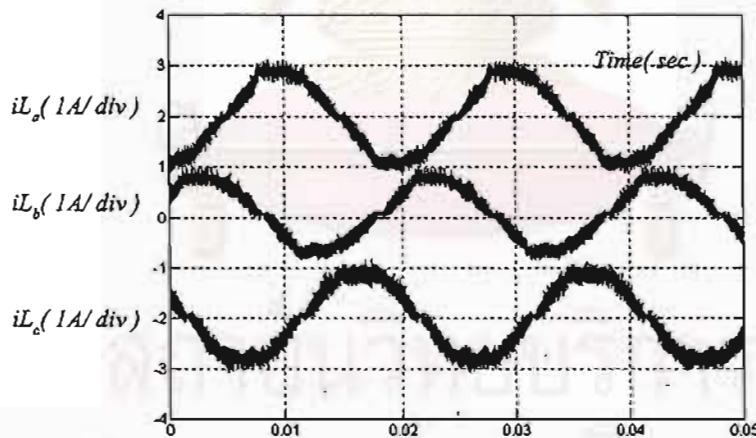
แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุขาเข้าซึ่งเป็นตัวกำหนดรูปร่างของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรหระดับจะมีลักษณะดังรูปที่ 5.67 จะสังเกตพบว่า รูปร่างของกระแสแหล่งจ่ายไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองซุกรวมกัน จึงมีลักษณะเปลี่ยนเป็นคล้ายกระแสต่อเนื่องและมีขนาดเพิ่มขึ้นตามโหลด รูปที่ 5.69 เป็นรูปขยายของกระแสจากรูปที่ 5.68 ที่บริเวณ $\omega t = \frac{\pi}{2}$ เมื่อพิจารณาสเปกตรัมที่บริเวณความถี่การสวิตช์ในรูปที่ 5.70 จะพบว่าวงจรทำงานที่ความถี่การสวิตช์ประมาณ 41 kHz และเมื่อตรวจจับค่าแรงดันระหว่าง C_{o1} และ C_{o2} จะได้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งมีความถี่เท่ากับความถี่การสวิตช์ของวงจรดังรูปที่ 5.69

ลักษณะของรูปกระแสจากแหล่งจ่ายทั้ง 3 เฟสเป็นดังรูปที่ 5.71 และมีค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆดังรูปที่ 5.72 , 5.73 , 5.74

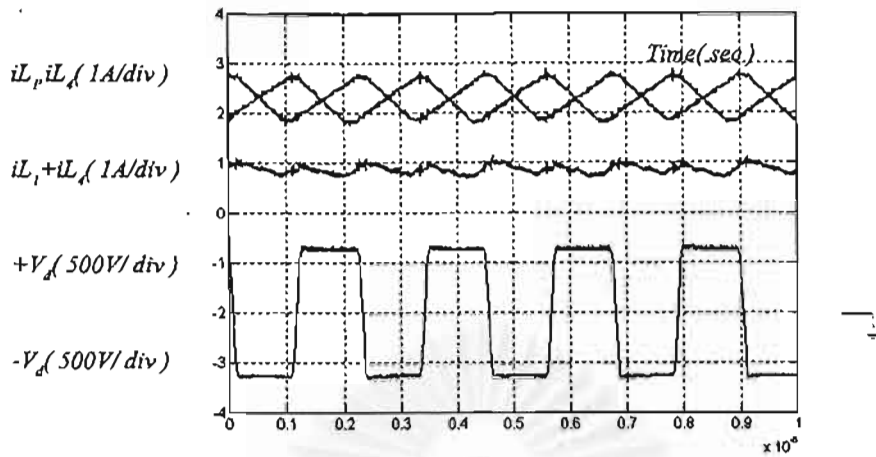
เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายมีค่า $380 \text{ V}_{\text{rms}}$ แรงดันไฟตรงขาออกมีค่าประมาณ 648 V ดังรูปที่ 5.71 และเมื่อลดแรงดันจากแหล่งจ่ายลงเหลือ $342 \text{ V}_{\text{rms}}$ แรงดันไฟตรงขาออกจะมีค่าประมาณ 644 V



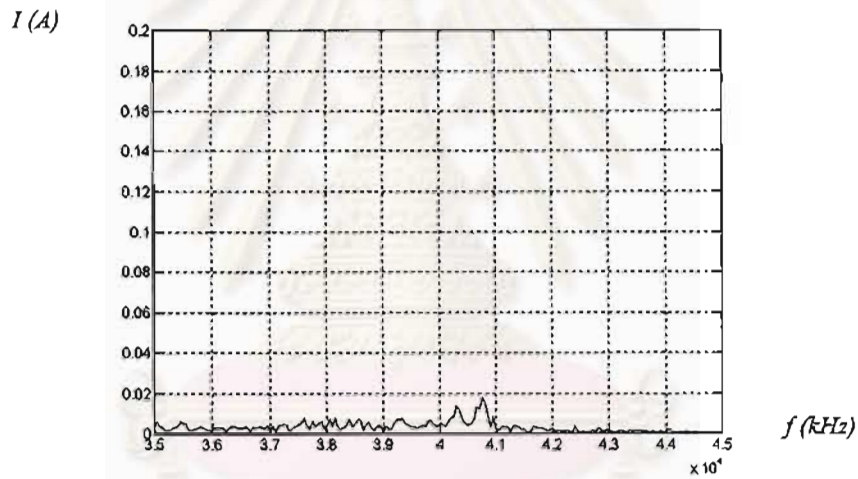
รูปที่ 5.67 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้านเข้าเมื่อ $RL = 1200 \Omega$



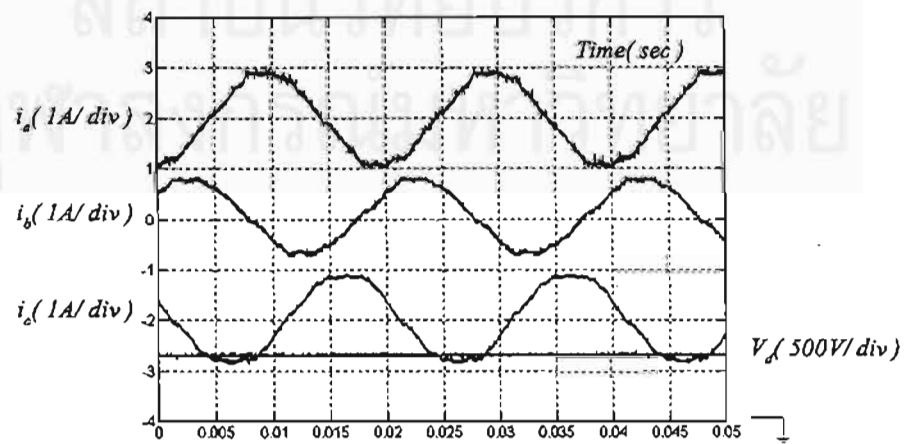
รูปที่ 5.68 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรระดับเมื่อ $RL = 1200 \Omega$



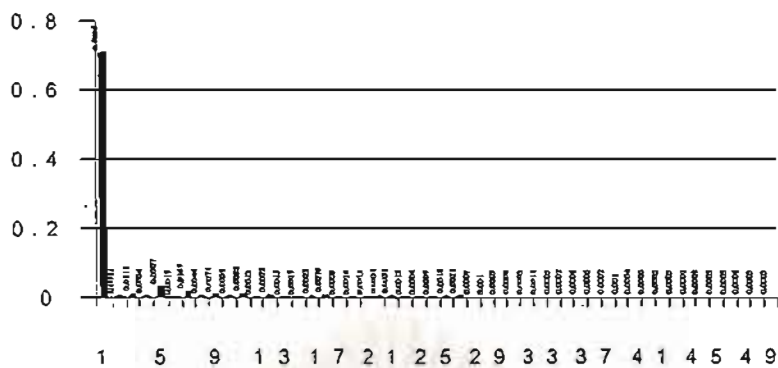
รูปที่ 5.69 รูปคลื่นกระแส i_{L1} , i_{L4} , $i_{L1}+i_{L4}$, และแรงดัน $V_{co1}-V_{co2}$



รูปที่ 5.70 สเปกตรัมของกระแสที่บริเวณความถี่การสวิตช์

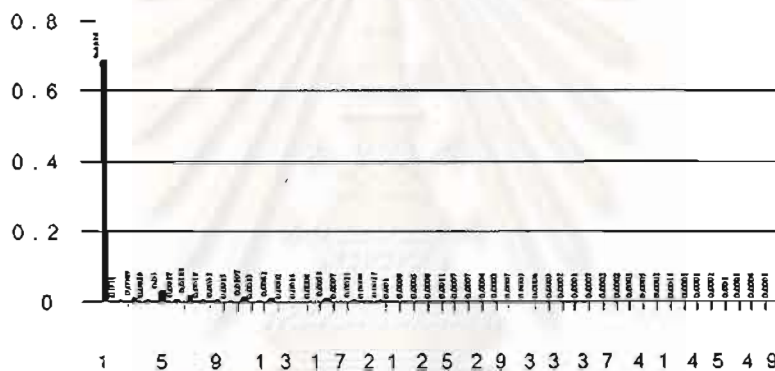


รูปที่ 5.71 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $RL = 1200 \Omega$



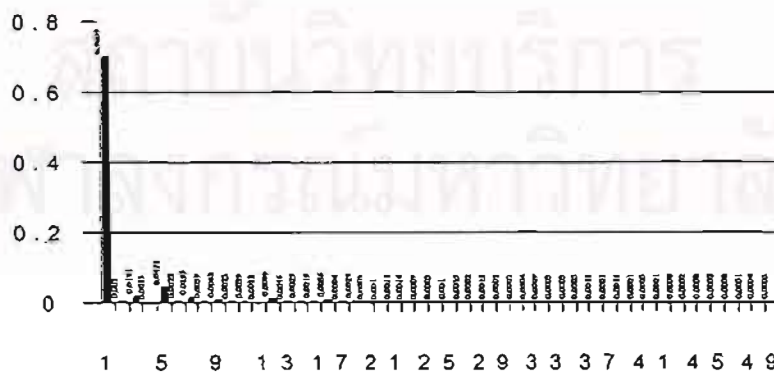
รูปที่ 5.72 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ia

$$\text{THD} = 5.86\%, \text{PF} = 0.989$$



รูปที่ 5.73 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ib

$$\text{THD} = 5.81\%, \text{PF} = 0.989$$



รูปที่ 5.74 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกสั่งจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ic

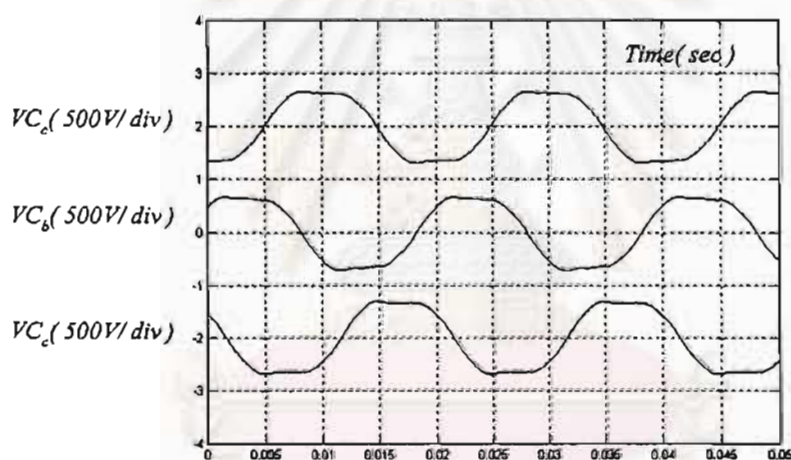
$$\text{THD} = 7.30\%, \text{PF} = 0.989$$

กรณีโหลด $RL = 1480 \Omega$

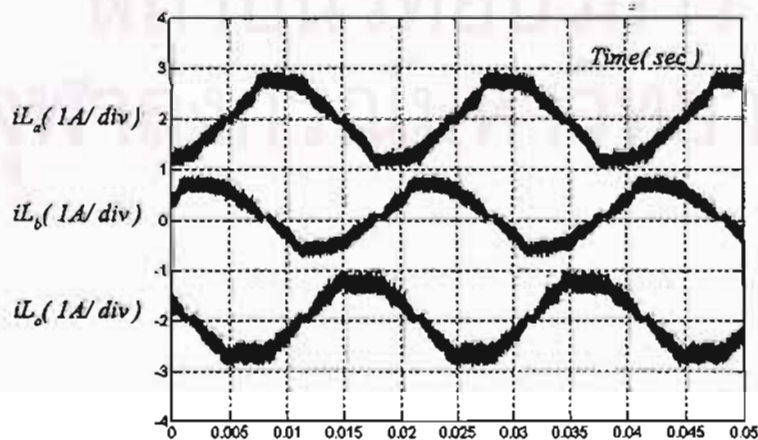
แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุขาเข้าซึ่งเป็นตัวกำหนดรูปร่างของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับจะมีลักษณะดังรูปที่ 5.75 จะสังเกตพบว่า รูปร่างของกระแสแหล่งจ่ายไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองชุดรวมกัน จึงมีลักษณะเปลี่ยนเป็นคล้ายกระแสต่อเนื่องและมีขนาดเพิ่มขึ้นตามโพล รูปที่ 5.77 เป็นรูปขยายของกระแสจากรูปที่ 5.76 ที่บริเวณ $\omega t = \frac{\pi}{2}$ เมื่อพิจารณาสเปกตรัมที่บริเวณความถี่การสวิตช์ในรูปที่ 5.78 จะพบว่าวงจรทำงานที่ความถี่การสวิตช์ประมาณ 47 kHz และเมื่อตรวจจับค่าแรงดันระหว่าง C_{o1} และ C_{o2} จะได้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งมีความถี่เท่ากับความถี่การสวิตช์ของวงจรดังรูปที่ 5.77

ลักษณะของรูปกระแสจากแหล่งจ่ายทั้ง 3 เฟสเป็นดังรูปที่ 5.79 และมีค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆดังรูปที่ 5.80 , 5.81 , 5.82

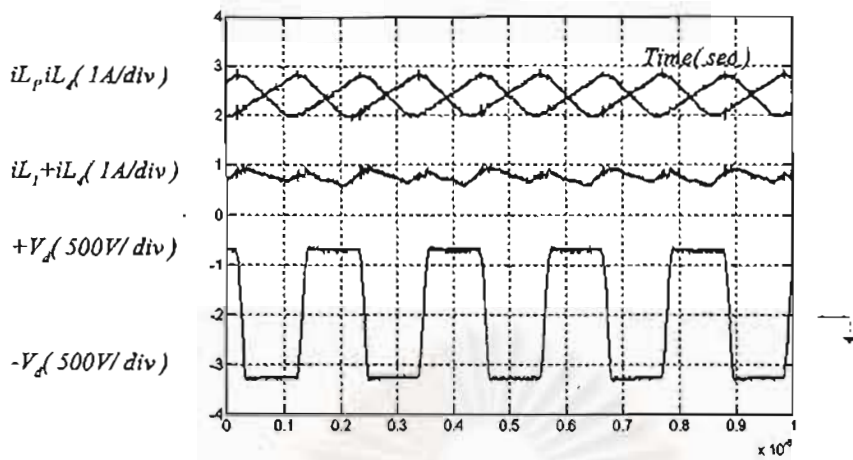
เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายมีค่า $380 V_{rms}$ แรงดันไฟตรงขาออกมีค่าประมาณ $661 V$ ดังรูปที่ 5.79 และเมื่อลดแรงดันจากแหล่งจ่ายลงเหลือ $342 V_{rms}$ แรงดันไฟตรงขาออกจะมีค่าประมาณ $644 V$



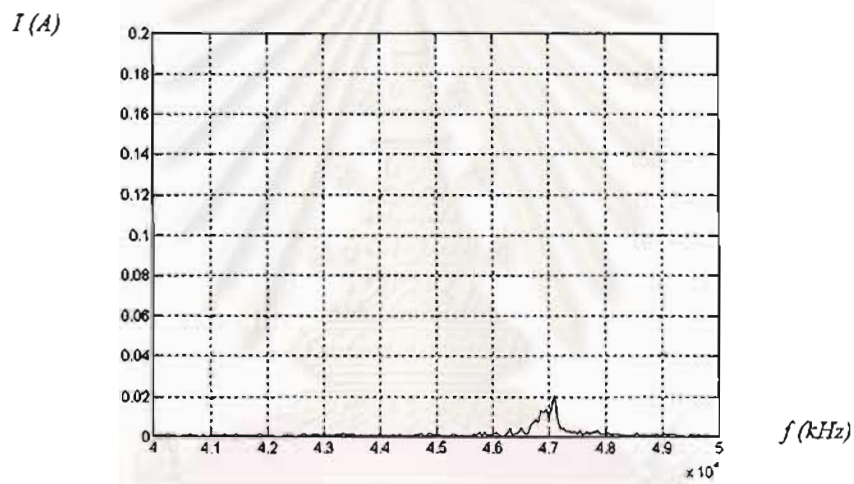
รูปที่ 5.75 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้านเข้าเมื่อ $RL = 1480 \Omega$



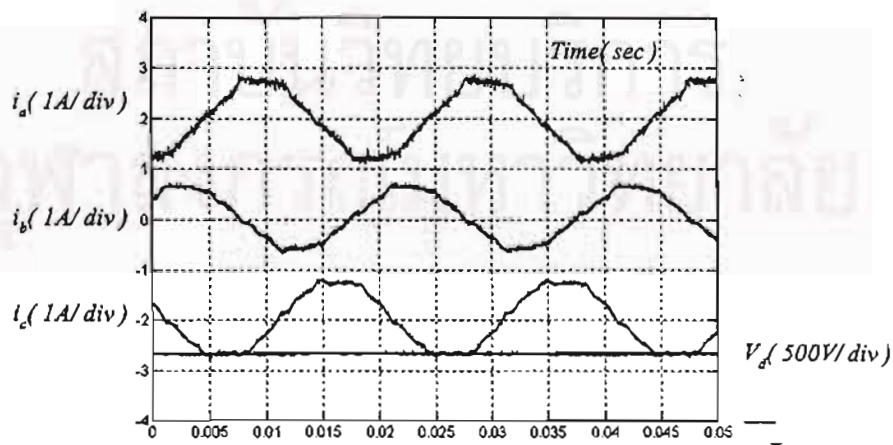
รูปที่ 5.76 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับเมื่อ $RL = 1480 \Omega$



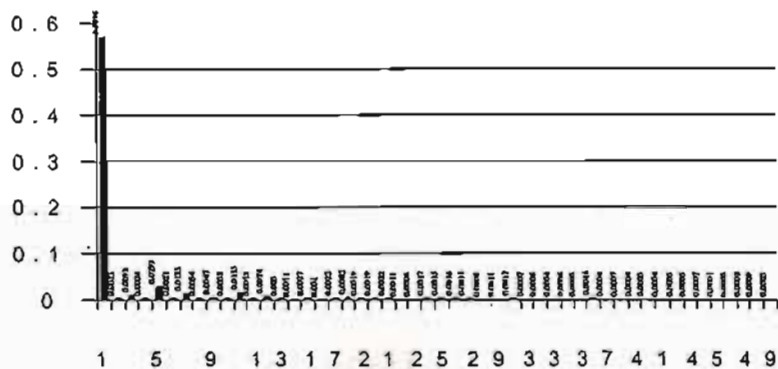
รูปที่ 5.77 รูปคลื่นกระแส i_{L1} , i_{L4} , $i_{L1}+i_{L4}$, และแรงดัน $V_{co1}-V_{co2}$



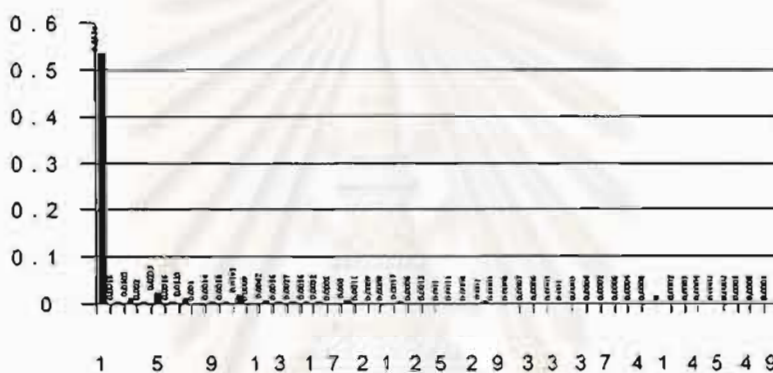
รูปที่ 5.78 สเปกตรัมของกระแสที่บริเวณความถี่การสวิตช์



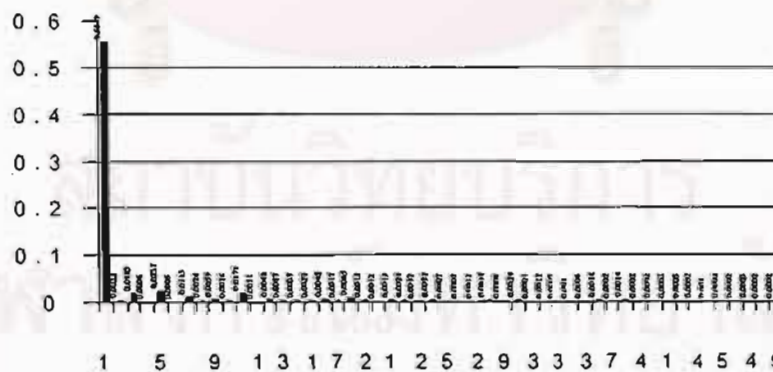
รูปที่ 5.79 รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเมื่อ $RL = 1480 \Omega$



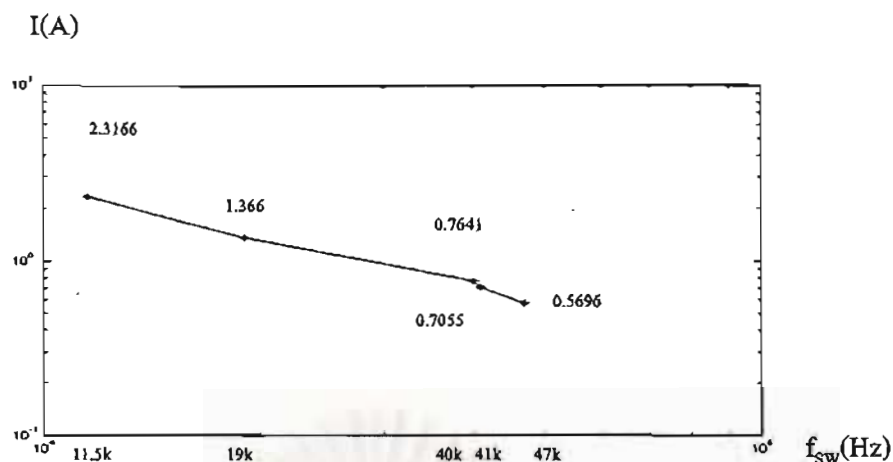
รูปที่ 5.80 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ia
THD. = 6.95 % , PF = 0.991



รูปที่ 5.81 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ib
THD. = 6.43 % , PF = 0.991



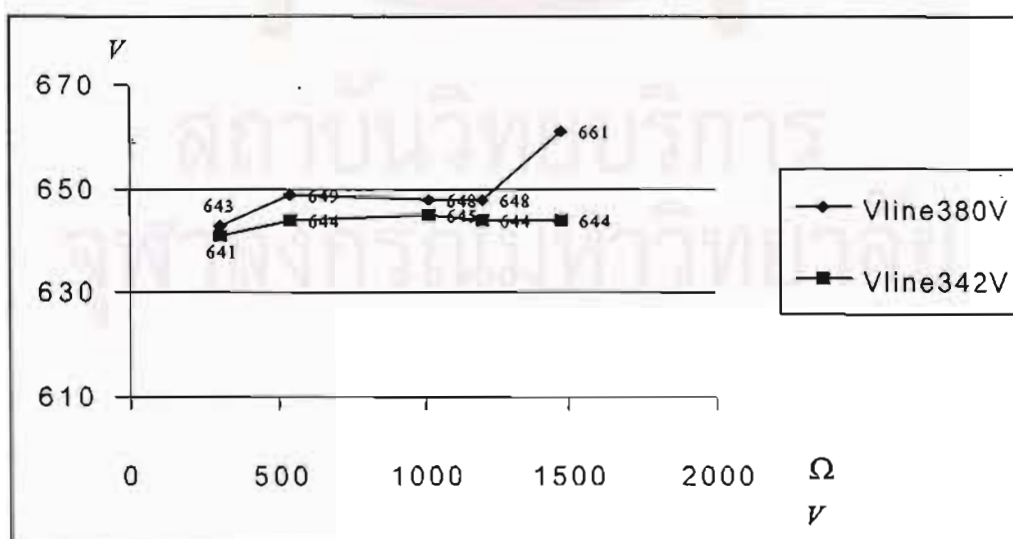
รูปที่ 5.82 กราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจนถึงอันดับที่ 50 ของกระแส ic
THD. = 7.07 % , PF = 0.991



รูปที่ 5.83 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสที่ความถี่มูลฐานกับความถี่การสวิตช์

เมื่อเรานำค่าของกระแสที่ความถี่มูลฐานและค่าของความถี่การสวิตช์ที่โหลดค่าต่างๆ มาเขียนลงบนกราฟแบบล็อกสเกลจะให้ความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับเชิงเส้นดังรูปที่ 5.83 แสดงให้พบว่าความสัมพันธ์ของกระแสและความถี่การสวิตช์นั้นแปรผกผันกัน ดังสมการที่ 2.10 และเมื่อนำค่าแรงดันไฟตรงขาออกที่โหลดค่าต่างๆมาแสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 5.84 จะคำนวณหาค่า load regulation และ line regulation ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{load regulation} &= \frac{V_{\text{lightload}} - V_{\text{fullload}}}{V_{\text{fullload}}} \\ &= \frac{661 - 643}{643} = 2.80\% \\ \text{line regulation} &= \frac{643 - 641}{643} = 0.31\% \end{aligned}$$



รูปที่ 5.84 กราฟแสดงค่าของแรงดันไฟตรงด้านออกที่โหลดต่างๆ

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

1. วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโครงสร้างแบบสวิตช์สองตัว

ได้มีการเสนอแนวทางในการวิเคราะห์สมการกระแสของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโครงสร้างแบบสวิตช์สองตัว และตรวจสอบผลโดยจำลองสมการที่หาได้ลงในโปรแกรม Matlab เปรียบเทียบกับผลจำลองการทำงานโดยโปรแกรม PSPICE จากนั้นได้ทำการหาวงจรมูลสัญญาณขนาดเล็กลงของวงจรเพื่อทำการออกแบบตัวควบคุมในวงรอบปิด และนำพารามิเตอร์ที่ออกแบบไว้มาทำการทดลองจริง โดยทำการคงค่าแรงดันไฟตรงขาออกไว้ที่ 650 V เมื่อทำการตรวจจับกระแสด้านเข้าของวงจร พบว่าสถานะ fullload มีค่ากระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆ ไม่เกินค่ามาตรฐาน IEC 61000-3-2 Class A

2. ปรับปรุงการทำงานของวงจรโดยใช้เทคนิคอินเตอร์ลีฟ

หลังจากปรับปรุงการทำงานของวงจรโดยใช้เทคนิคอินเตอร์ลีฟแล้ว พบว่าวงจรกรองจะทำการกรองกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทั้งสองชุดรวมกัน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกระแสต่อเนื่อง ทำให้เราสามารถลดขนาดของวงจรกรองลง โดยที่กระแสด้านเข้าของวงจรยังมีค่ากระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆ ไม่เกินค่ามาตรฐาน IEC 61000-3-2 Class A

ข้อเสนอแนะ

ในกรณีที่ load ต่ำ ความถี่การสวิตช์ของวงจรจะมีค่าสูง วงจร VCO (voltage controlled oscillator) ที่ใช้ในการทดลองยังไม่สามารถปรับความถี่ให้นิ่งได้ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อค่ากระแสฮาร์มอนิกด้านเข้าของวงจร อาจแก้ไขโดยการหาวิธีอื่นในการเปลี่ยนค่าแรงดันเป็นความถี่การสวิตช์

ภาคผนวก

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

1. การออกแบบตัวเหนี่ยวนำของวงจรทอร์ค

ข้อกำหนดในการออกแบบ

ค่าความเหนี่ยวนำ	(L) = 3.2 mH
ค่ายอดของกระแส	(I _p) = 1.9 A
ค่า RMS ของกระแส	(I _{RMS}) = 1.3 A
ค่าสูงสุดของความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก	(B _m) = 0.2 T
ตัวประกอบการใช้หน้าตัด	k = 0.4
กำลังสูญเสียในลวดทองแดง	(P _{cu}) = 5 W

คำนวณพารามิเตอร์ K_g

(ρ = 1.72 × 10⁻⁸ Ω.m คือความต้านทานจำเพาะของทองแดง)

$$K_g = 4 \cdot \rho \cdot \frac{\left(\frac{1}{2} \cdot L \cdot I_p^2 \right) \left(\frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{RMS}^2 \right)}{(k \cdot B_m^2 \cdot P_{cu})}$$

ได้ค่า K_g = 1.42 × 10⁻¹¹

เลือกขนาดแกนที่ใช้จากเรขาคณิตของแกน โดย

$$K_g = \frac{W \cdot S^2}{l}$$

W คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน

S คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน

l คือ ความยาวเฉลี่ยของลวดหนึ่งรอบ

เลือกแกนที่มีในท้องตลาด ที่มี K_g ใหญ่กว่าที่คำนวณ ได้แกน ETD49 (K_{g-ETD49} = 3.13 × 10⁻¹⁰)

เลือก N = 200 จำนวนค่า AL จาก

$$L = N^2 \cdot AL$$

ได้ค่า AL = 80 mH ได้ค่าของช่องว่างอากาศ (airgap) = 5 mm

จาก DataBook ของ Tokin หน้า 6-13 พบว่าที่ $NI = 800 \text{ AT}$, $\text{airgap} = 5 \text{ mm}$, $AL = 80 \text{ nH}$ ทำให้แกนยังไม่อิ่มตัว

เลือกลวดทองแดงที่จะใช้

$$A_w = \frac{k \cdot W}{N}$$

พื้นที่ลวดทั้งหมด (A_w) = 0.515 mm^2 เลือก #SWG21 (มีพื้นที่หน้าตัด 0.518 mm^2)

2. การออกแบบตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองด้านเข้าของวงจรสวิตซ์สองตัว

ข้อกำหนดในการออกแบบ

ค่าความเหนี่ยวนำ	(L) = 2.5 mH
ค่ายอดของกระแส	(I_p) = 1.3 A
ค่า RMS ของกระแส	(I_{RMS}) = 0.9 A
ค่าสูงสุดของความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก	(B_m) = 0.2 T
ตัวประกอบการใช้หน้าตัด	k = 0.4
กำลังสูญเสียในลวดทองแดง	(P_{cu}) = 1 W

คำนวณพารามิเตอร์ K_g

($\rho = 1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ คือความต้านทานจำเพาะของทองแดง)

$$K_g = 4 \cdot \rho \cdot \left[\frac{\left(\frac{1}{2} \cdot L \cdot I_p^2 \right) \left(\frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{RMS}^2 \right)}{\left(k \cdot B_m^2 \cdot P_{cu} \right)} \right]$$

ได้ค่า $K_g = 9.7 \times 10^{-12}$

เลือกขนาดแกนที่ใช้จากรายการชนิดของแกน โดย

$$K_g = \frac{W \cdot S^2}{t}$$

W คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน

S คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน

t คือ ความยาวเฉลี่ยของลวดหนึ่งรอบ

เลือกแกนที่มีในท้องตลาด ที่มี K_g ใหญ่กว่าที่คำนวณ ได้แกน ETD39 ($K_{g-ETD39} = 1 \times 10^{-10}$)

เลือก $N = 158$ คำนวณค่า AL จาก

$$L = N^2 \cdot AL$$

ได้ค่า $AL = 100 \text{ nH}$ ได้ค่าของช่องว่างอากาศ (airgap) = 3 mm

จาก DataBook ของ Tokin หน้า 6-13 พบว่าที่ $NI = 347.6 \text{ AT}$, $\text{airgap} = 3 \text{ mm}$, $AL = 100 \text{ nH}$ ทำให้แกนยังไม่อิ่มตัว
เลือกลวดทองแดงที่จะใช้

$$A_w = \frac{k \cdot W}{N}$$

พื้นที่ลวดทั้งหมด (A_w) = 0.31 mm^2 เลือก #SWG22 (มีพื้นที่หน้าตัด 0.39730 mm^2)

อนทน-พจนานุกรมของ MATLAB: # Fig.4

3. การออกแบบตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองด้านเข้าของวงจรที่ใช้เทคนิคอินเตอร์ลิฟ

ข้อกำหนดในการออกแบบ

ค่าความเหนี่ยวนำ	(L) = 0.9 mH
ค่ายอดของกระแส	(I_p) = 3.8 A
ค่า RMS ของกระแส	(I_{RMS}) = 2.68 A
ค่าสูงสุดของความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก	(B_m) = 0.2 T
ตัวประกอบการใช้หน้าตัด	k = 0.4
กำลังสูญเสียในลวดทองแดง	(P_{cu}) = 1 W

คำนวณพารามิเตอร์ K_g

($\rho = 1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ คือความต้านทานจำเพาะของทองแดง)

$$K_g = 4 \cdot \rho \cdot \left[\frac{\left(\frac{1}{2} \cdot L \cdot I_p^2 \right) \left(\frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{RMS}^2 \right)}{(k \cdot B_m^2 \cdot P_{cu})} \right]$$

ได้ค่า $K_g = 9.0309 \times 10^{-11}$

เลือกขนาดแกนที่ใช้จากเรขาคณิตของแกน โดย

$$K_g = \frac{W \cdot S^2}{l}$$

W คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน

S คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน

l คือ ความยาวเฉลี่ยของลวดหนึ่งรอบ

เลือกแกนที่มีในท้องตลาด ที่มี K_g ใหญ่กว่าที่คำนวณ ได้แกน ETD39 ($K_{g-ETD39} = 1 \times 10^{-10}$)

เลือก $N = 95$ คำนวณค่า AL จาก

$$L = N^2 \cdot AL$$

ได้ค่า $AL = 100 \text{ nH}$ ได้ค่าของช่องว่างอากาศ (airgap) = 3 mm

จาก DataBook ของ Tokin หน้า 6-13 พบว่าที่ $NI = 342 \text{ AT}$, $\text{airgap} = 3 \text{ mm}$, $AL = 100 \text{ nH}$ ทำให้แกนยังไม่อิ่มตัว

เลือกขนาดทองแดงที่จะใช้

$$A_w = \frac{k \cdot W}{N}$$

พื้นที่ลวดทั้งหมด (A_w) = 0.5156 mm^2 เลือก #SWG21 (มีพื้นที่หน้าตัด 0.51890 mm^2)



รายการอ้างอิง

- E. H. Ismail, R. Erickson, "Single-Switch 3 ϕ PWM Low Harmonic Rectifiers", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 11, no. 2, pp. 338-346, 1996
- M. Sedighy, F. P. Dawson, "Single-Switch Three-Phase Power Factor Correction", Proc. Of IPEC-Yokohama, pp. 293-297, 1995.
- A. Nabae, H. Nakano, S. Arai, "Novel Sinusoidal Converters With High Power Factor", IEEE/IAS 1994 Conf. Rec., pp. 775-780, 1994.
- L. Balogh, R. Redl, "Power-Factor Correction with Interleaved Boost Converters in Continuous-Inductor-Current Mode", IEEE/APEC 1993 Conf. Rec., pp. 168-174.

ประวัติผู้เขียน

นายจักรพงษ์ วงศาสุลักษณ์ เกิดเมื่อวันที่ 6 เมษายน พ.ศ. 2519 ที่เขตนบุรี กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจาก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2539 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540

