รายงานผลการประดิษฐ์
ทุนอุดหนุนโครงการสิ่งประดิษฐ์

เรื่อง

เครื่องจ่ายไฟตรง 0 – 500 V, 10 A

โดย

ยุทธนา กุลวิทิต

621.31912
ย3557

2529

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงการสิ่งประดิษฐ์

รายงาน

เครื่องจ่ายไฟตรง 0 - 500 V, 10 A

โดย

ผศ. ดร. ยุทธนา กุลวิทิต

มกราคม 2529

ฝ่ายวิจัย จุฬา
มอบให้หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
15 / ก.พ. / 33

621.319
I2
ย355ร
29 มิ.ย. 2533
053816

กิตติกรรมประกาศ

โครงการประดิษฐ์เครื่องจ่ายไฟตรง ขนาด 5 kw นี้ ได้รับการสนับสนุนจากโครงการสิ่งประดิษฐ์ ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประจำปี 2528 ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณคณะกรรมการสิ่งประดิษฐ์ที่ได้อนุมัติโครงการประดิษฐ์ เครื่องจ่ายไฟตรงขนาด 5 kw นี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อนุญาตให้ใช้เครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ และสถานที่ในการทำการประดิษฐ์ ตลอดจนคณาจารย์และบุคคลากรของห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลังและฝ่ายธุรการภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่มีส่วนทำให้การประดิษฐ์ เครื่องจ่ายไฟตรง ขนาด 5 kw นี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เครื่องจ่ายไฟตรง 0-500 V 10 A

ผศ.ดร. ยุทธนา กุลวิทิต

มกราคม 2529

บทคัดย่อ

เครื่องจ่ายไฟตรงขนาด 5 kw ที่สร้างขึ้นนี้จะเป็นแบบที่ไม่มีวงจรคงค่าแรงดัน แรงดันออกของเครื่องจ่ายไฟตรงนี้สามารถปรับได้ระหว่าง 0 ถึง 500 โวลท์ โดยการแปรค่าแรงดันของไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาเข้า เครื่องจ่ายไฟตรงจะให้กระแสออกสูงสุดได้ 10 แอมแปร์ วงจรตัดไฟที่ใช้เป็นวงจรตัดไฟ 3 เฟส แบบบริดจ์ วงจรตัดไฟแบบนี้จะทำให้ตัวประกอบของประสิทธิภาพในการใช้หม้อแปลงมีค่าสูงถึง 0.955 สำหรับวงจรกรองด้านขาออกเป็นวงจรกรองผ่านต่ำแบบ LC ซึ่งมีความถี่หักมุมเท่ากับ 40 Hz การกระเพื่อมของแรงดันออกมีค่าต่ำกว่า 1 เปอร์เซนต์ และอัตราการคงค่าแรงดันเท่ากับ 6 เปอร์เซนต์ ณ แรงดันที่กำหนด การวัดค่ากระแสออกของระบบป้องกันกระแสเกินพิกัด จะเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีการตอบสนองที่เร็วกว่า Thermal overload relay ซึ่งมีสำรองไว้ กรณีที่วงจรอิเล็กทรอนิกส์เกิดขัดข้อง นอกจากวงจรป้องกันกระแสเกินพิกัดแล้ว เครื่องจ่ายไฟตรงที่สร้างขึ้น ยังมีวงจรป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นเมื่อเฟสใดเฟสหนึ่งของไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาเข้าเกิดขัดข้อง

DC Power Supply 0-500 V. 10 A.

Assistant Professor Youthana Kulvitit

January 1986

Abstract

An Unregulated DC power supply with an output power of 5 kw has been built. Its output voltage can be varied between 0 and 500 Volts by varying the input AC voltage. The maximum output current rating is 10 amperes. The three phases bridge configuration is used for the rectifier circuit while a low-pass LC filter with a cut-off frequency of 40 Hz is used as an output filter. The three phases bridge configuration gives high transformer utilization factor of 0.955 and the low-pass filter reduces the output voltage ripple to less than 1 percent. The output voltage regulation is 6 percent at the rated output voltage. An electronic circuit is used as a current sensor for the over current protection while a thermal overload relay with a lower response time is used as a back up. The unit is also protected against single phase failure.

สารบัญ

หน้า

หัวข้อเรื่อง ____ i

กิตติกรรมประกาศ ____ ii

บทคัดย่อภาษาไทย ____ iii

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ____ IV

สารบัญ ____ V

รายการภาพประกอบ ____ VI

รายการสัญญลักษณ์ ____ VII

1. บทนำ ____ 1

2. แนวความคิดของการประดิษฐ์ ____ 1

3. การประดิษฐ์ ____ 4

3.1 หม้อแปลงแยกโดด ____ 5

3.2 หม้อแปลงปรับแรงดัน ____ 5

3.3 วงจรตัดไฟ ____ 6

3.4 วงจรกรอง ____ 11

3.5 วงจรควบคุมและป้องกัน ____ 14

4. การทดสอบและการใช้งาน ____ 20

4.1 การทดสอบในภาวะอยู่ตัว ____ 20

4.2 การทดสอบในภาวะชั่วครู่ ____ 29

4.3 การทดสอบวงจรป้องกัน ____ 34

5. การอภิปรายผลและสรุป ____ 36

เอกสารอ้างอิง ____ 38

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1	วงจร 3 เฟส แบบบริดจ์ ชนิด 6 ลูกคลื่น	6
2	รูปคลื่นของแรงดันออกของวงจรดัดไฟ 3 เฟส แบบบริดจ์	7
3	ไดอะแกรมของลำดับการนำกระแสของไดโอด	8
4 ก	วงจรกรอง LC แบบผ่านต่ำ	11
4 ข	อัตราการส่งผ่านสัญญาณของวงจรกรอง	11
5	วงจรควบคุมการ เปิดปิด เครื่อง	15
6	วงจรอิ เล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการป้องกันกระแส เกินพิกัด	16
7	ลักษณะการทำงานของ Thermal overload relay	18
8 ก	รูปคลื่นของแรงดันออกของวงจรดัดไฟ	21
8 ข	รูปคลื่นของแรงดันออกของ เครื่องจ่ายไฟตรง	21
9	รูปคลื่นของการกระ เพื่อมของแรงดันออก	22
10 ก	รูปคลื่นของกระแสออกของ เครื่องจ่ายไฟตรง	24
10 ข	รูปคลื่นของกระแสในตัว เหนี่ยวนำ	24
11	องค์ประกอบของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับในตัว เหนี่ยวนำ	25
12	การคงค่าแรงดัน	27
13 ก	แรงดันระหว่างสายด้านขา เข้า	28
13 ข	กระแสในสายด้านขา เข้า	28
14	กระแสและแรงดันของไดโอด	29
15 ก	แรงดันออกของวงจรกรองและแรงดันออกของวงจรดัดไฟ	30
15 ข	แรงดันตกคล่อมตัว เหนี่ยวนำของวงจรกรอง	30
16 ก	แรงดันออกของ เครื่องจ่ายไฟตรงตอน เปิด เครื่อง	31
16 ข	กระแสออกของวงจรดัดไฟตอน เปิด เครื่อง	31
17	กระแสในสายและแรงดันระหว่างสายตอน เปิด เครื่อง	33
18	กระแสและแรงดันของไดโอดตอน เปิด เครื่อง	33
19 ก	กระแสออกของ เครื่องจ่ายไฟตรง เมื่อ เกิดกระแส เกินพิกัด	35
19 ข	สัญญาณควบคุมการตัดวงจร	35

รายการสัญญลักษณ์

A	=	หน่วยของกระแส เป็นแอมแปร์
C	=	ตัว เก็บประจุหรือค่าของตัว เก็บประจุ
D	=	สัญญลักษณ์ของไดโอด
db	=	หน่วย เดซิ เบล
Hz	=	หน่วยของความถี่ เป็น Hertz
I	=	กระแส
IC	=	วงจรรวม
k_D	=	Current form factor ของไดโอด
k_h	=	distortion factor
k_u	=	utilization factor ของหม้อแปลง
kw	=	หน่วยของกำลัง เป็นกิโลวัตต์
kVA	=	หน่วยของกำลัง เป็นกิโลโวลท์-แอมแปร์
L	=	ตัว เหนี่ยวนำหรือค่าความ เหนี่ยวนำ
P_D	=	กำลังสูญ เสีย
Q	=	Quality factor
R_θ	=	ความต้านทานการนำความร้อน
T	=	อุณหภูมิ
V	=	แรงดันหรือหน่วยของแรงดัน โวลท์
ω	=	ความถี่ เชิงมุม
ϕ	=	มุมระหว่างกระแสและแรงดันที่ความถี่หลักมูล

1. บทนำ

แหล่งจ่ายไฟตรงนับ เป็นส่วนประกอบพื้นฐานที่สำคัญต่องานด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังอย่างหนึ่ง วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าแทบทุกชนิด เช่น inverter ซึ่งจะให้พลังงานออกเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถแปรค่าของความถี่ แรงดัน และ กระแสตามความต้องการของโหลด และ วงจร converter ซึ่งให้พลังงานออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่สามารถแปรค่าของกระแสและแรงดันออกได้ ล้วนต้องการแหล่งจ่ายไฟตรงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานทั้งสิ้น ดังนั้น การพัฒนาแหล่งจ่ายไฟตรงไว้ใช้ในงานทดลองของห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลังนับเป็นความจำเป็นอย่างหนึ่ง นอกจากนี้แล้ว เรายังสามารถนำประสบการณ์ดังกล่าวไปใช้ในการสร้างแหล่งจ่ายไฟตรง ซึ่งเป็นส่วนประกอบของวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้า ชนิดอื่นๆ ที่กำลังพัฒนา ในห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

แหล่งจ่ายไฟตรงที่ใช้กันในปัจจุบันนั้นจะได้มาจากการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ เช่น Diode หรือ SCR แทนการใช้ DC generator แทนทั้งสิ้น ทั้งนี้เนื่องจากทำได้ง่าย ราคาถูก และมีประสิทธิภาพสูงกว่า การใช้ DC generator นอกจากนี้แล้วสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำยังต้องการการบำรุงรักษาน้อยกว่าการใช้ DC generator เนื่องจากไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหวเลย

2. แนวความคิดของการประดิษฐ์

การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงนั้น จะอาศัยวงจรตัดไฟ (rectifier circuit) ร่วมกับวงจรกรอง (filter) โดยที่วงจรตัดไฟจะทำหน้าที่ เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง แต่แรงดันออกของวงจรตัดไฟมักจะไม่เรียบ เนื่องจากมีองค์ประกอบของไฟฟ้ากระแสสลับร่วมอยู่ด้วย ดังนั้น เราจึงจำเป็นต้องใช้วงจรกรองเพื่อ กรององค์ประกอบของไฟฟ้ากระแสสลับออกทำให้ได้แรงดันไฟตรงที่เรียบ

วงจรตัดไฟที่ใช้ในปัจจุบันนั้นมีหลายแบบ ทั้งที่เป็นแบบเฟสเดียว (single phase) และแบบสามเฟส (three phases) และทั้งที่เป็นแบบครึ่งคลื่น (half wave) และแบบเต็มคลื่น (full wave)[1,2] วงจรแต่ละแบบต่างก็มีความเหมาะสมในงานที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ดีในการเลือกแบบของวงจรตัดไฟนั้น เราจะต้องพยายามทำให้การใช้งานของไดโอดและหม้อแปลง (ในกรณีที่ต้องการให้มี isolation จาก AC line) มีประสิทธิภาพสูงสุด ประสิทธิภาพการใช้งานของไดโอดนั้น จะวัดด้วยค่าของ form factor (k_D) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของ

ค่ายังผลของกระแสที่ไหลผ่านไดโอด (I_{rms}) ต่อค่าเฉลี่ยของกระแสที่ไหลผ่านไดโอด (I_{dc}) เนื่องจากกำลังสูญเสียในไดโอดซึ่งเป็นตัวกำหนดขนาดของไดโอด จะขึ้นอยู่กับ I_{rms} มากกว่า I_{dc} สำหรับไดโอดกำลังสูง ในขณะที่กำลังออกของวงจรดัดไฟ จะขึ้นอยู่กับ I_{dc} ดังนั้น เพื่อให้ได้กำลังออกของวงจรดัดไฟสูงสุด โดยให้กำลังสูญเสียในไดโอดต่ำสุด วงจรดัดไฟควรจะมีค่าของ form factor ต่ำที่สุด สำหรับประสิทธิภาพของการใช้หม้อแปลงนั้น จะวัดค้วยค่าของ utilization factor ของหม้อแปลง (k_u) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของกำลังออกของวงจรดัดไฟต่อผลคูณของ volt-ampere ของขดลวดหม้อแปลง เพื่อให้ประสิทธิภาพของการใช้หม้อแปลงมีค่าสูงอันจะเป็นการลดขนาดของหม้อแปลงสำหรับกำลังออกเท่าเดิม เราควรเลือกใช้วงจรดัดไฟที่ให้ค่าของ k_u สูงสุด ค่าของ k_u นี้จะมีลักษณะคล้ายกับเป็นค่า power factor รวมของวงจรดัดไฟ utilization factor ของหม้อแปลง (k_u) จะเท่ากับผลคูณของ distortion factor (k_h) กับ displacement factor ($\cos\phi$) โดยที่ k_h คือ อัตราส่วนของ ค่ายังผลของกระแสที่ความถี่หลักมูล (fundamental component) ต่อค่ายังผลของกระแสรวม (I_{rms}) และ ϕ เป็นมุมระหว่างกระแสและแรงดันของหม้อแปลงที่ความถี่หลักมูล นอกจากนี้แล้วองค์ประกอบไฟสลับของแรงดันออกของวงจรดัดไฟควรจะมีความถี่สูง เพื่อความสะดวกในการกรองซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะขึ้นอยู่กับความถี่และจำนวนเฟสของไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ โดยจะมีค่าสูงสุดเท่ากับสองเท่าของผลคูณของความถี่กับจำนวนเฟส

สำหรับการแปรค่าของแรงดันออกนั้น อาจทำโดยการใช้วงจรดัดไฟที่ใช้ไดโอดร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับที่แปรค่าแรงดันออกได้ (Variac) หรืออาจจะทำโดยการใช้ controlled rectifier หรือ SCR ในการควบคุมแรงดันออก โดยอาศัยหลักการของ phase control นอกจากนี้แล้วเราอาจจะทำโดยการใช้วงจรดัดไฟร่วมกับวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง การควบคุมแรงดันออกโดยใช้วิธีที่ 1 จะเป็นแบบที่ง่ายที่สุด และมีช่วงการควบคุมแรงดันออกได้มากที่สุด แต่จะมีน้ำหนักมากกว่าแบบที่ 2 และ 3 เนื่องจากน้ำหนักของ Variac สำหรับแบบที่ 2 นั้น การควบคุมจะทำได้ง่ายทั้งนี้เพราะการหยุดนำกระแสของ SCR นั้น จะเกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ เนื่องจากการกลับขั้วของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Natural line commutation) แต่การแปรค่าแรงดันออก โดยวิธีนี้จะทำให้องค์ประกอบไฟสลับด้านขาออกมีค่ามากกว่าวิธีที่ 1 โดยเฉพาะ เมื่อแรงดันออกมีค่าต่ำกว่าแรงดันสูงสุดมาก ๆ [2] ทำให้ต้องใช้วงจรกรองที่มีขนาดใหญ่ขึ้น วิธีที่ 2 นี้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการแปรค่าแรงดันออก

ไม่มากนักถ้าต้องการให้มีองค์ประกอบไฟสลับน้อย สำหรับวิธีที่ 3 นั้น การควบคุมแรงดันออกจะทำได้โดยการควบคุมวัฏจักรการทำงาน (Duty cycle) ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง การควบคุมแรงดันออกโดยวิธีการใช้วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงนั้น จะมีความยุ่งยากในการทำให้สวิตช์หยุดนำกระแสถ้าหากใช้ SCR เป็นสวิตช์เนื่องจากการทำให้ SCR หยุดนำกระแสนั้นจะเป็นแบบ forced commutation หรือไม่เช่นนั้นก็ต้องใช้ Transistor ซึ่ง การควบคุมให้ Transistor นำกระแสจะต้องใช้พลังงานมากกว่าการใช้ SCR มาก แต่จะไม่มีปัญหาในการทำให้สวิตช์หยุดนำกระแส นอกจากนี้แล้วถ้าหากเราสวิตช์ที่ความถี่สูงแล้วจะทำให้ วงจรกรองที่ใช้กรององค์ประกอบไฟสลับมีขนาดเล็กได้

แหล่งจ่ายไฟตรงขนาด 5 kw ที่สร้างขึ้นนี้ใช้วงจรดัดไฟ 3 เฟสแบบบริดจ์ ชนิด 6 ลูกคลื่น (three phases six pulses bridge rectifier circuit)และการแปรค่าแรงดันออกทำโดยการใช้ Variac 3 เฟส ที่ให้แรงดันออกระหว่างสาย แปรอยู่ระหว่าง 0 - 400 Volts ส่วนแหล่งจ่ายไฟตรงที่แปรแรงดันออกโดยใช้หลักการ phase control และชนิดที่ใช้วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง โดยการสวิตช์ที่ความถี่สูงก็อยู่ในระหว่างการพัฒนาในห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่นเดียวกัน วงจรดัดไฟ 3 เฟส แบบบริดจ์นั้น เกิดจากการนำเอาวงจรดัดไฟ 3 เฟส ครึ่งคลื่น 2 ชุดมาต่ออนุกรมกัน ทำให้กระแสในขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงเป็นกระแสสลับที่สมมาตรกัน อันเป็นการตัดปัญหาการมีองค์ประกอบไฟตรงในหม้อแปลงโดยไม่จำเป็นต้องต่อหม้อแปลงแบบ ซิก-แซก (zig-zag transformer connection) ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการใช้หม้อแปลงต่ำลงกว่าการต่อหม้อแปลงแบบธรรมดา การนำเอาวงจร 3 เฟส 2 ชุดมาต่อ อนุกรม กันเป็นวงจร 3 เฟส แบบบริดจ์ จะทำให้ utilization factor ของหม้อแปลงเพิ่มขึ้นจาก 0.79 เป็น 0.955 [2] ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ คือ 1.0 นอกจากนี้แล้วยังทำให้ความถี่ต่ำสุดของ องค์ประกอบไฟสลับเพิ่มขึ้นเท่าตัว อันจะทำให้การกรองเอาองค์ประกอบไฟสลับดังกล่าวออกทำได้ง่ายขึ้น

สำหรับวงจรกรองที่ทำหน้าที่ลดการกระเพื่อมของแรงดันด้านขาออก โดยการกรองเอาองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับออกจากแรงดันออกของวงจรดัดไฟ นั้น จะเป็นวงจรกรองที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำ L และตัวเก็บประจุ (C) ต่อกันเป็นวงจรกรองผ่านต่ำ การที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ทางด้านขาออกจะทำให้แหล่งจ่ายไฟตรงมีลักษณะเป็นแหล่งกำเนิดแรงดัน (Voltage source) และการต่อตัวเหนี่ยวนำระหว่างวงจรดัดไฟกับตัวเก็บประจุจะเป็นการจำกัดกระแสออกของวงจรดัดไฟที่ใช้ในการประจุตัวเก็บประจุในตอนเปิดเครื่องไม่ให้มากเกินไปอันอาจจะเป็น

อันตรายต่อไดโอดที่ใช้ในวงจรดัดไฟ ทั้งนี้เพราะในตอนเริ่มเปิดเครื่องตัวเก็บประจุมีลักษณะเสมือนเป็นวงจรลัด ดังนั้น ถ้าหากแรงดันเข้ามีค่าสูงจะทำให้กระแสออกของวงจรดัดไฟ มีค่าสูง ถ้าหาก impedance ระหว่างวงจรดัดไฟกับตัวเก็บประจุมีค่าน้อย อัตราการส่งผ่านองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับของวงจรกรองผ่านต่ำแบบ LC ที่ความถี่สูงกว่าความถี่หักมุม (ω_o) จะลดลง 40 db เมื่อความถี่ขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับเพิ่มขึ้น 10 เท่า โดยที่ความถี่หักมุม (ω_o) ของวงจรกรองมีค่าเท่ากับ $1/\sqrt{LC}$

3. <u>การประดิษฐ์</u>

แหล่งจ่ายไฟตรงขนาด 5 kw ที่สร้างขึ้นนี้จะมีข้อกำหนดดังนี้คือ

แรงดันออก (V_o)	0-500	Volts
กระแสออกสูงสุด (I_{omax})	10	Amps
การกระเพื่อมของแรงดันออก (ripple)	1 %	
การคงค่าแรงดัน (Voltage regulation)	10 %	

แหล่งจ่ายไฟตรงขนาด 5 kw ที่สร้างขึ้นจะมีระบบป้องกันกระแสเกินทั้งที่เป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีการตอบสนองเร็วและระบบที่ใช้ Thermal overload relay ซึ่งมีการตอบสนองช้ากว่าระบบอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับสำรองในกรณีที่ระบบอิเล็กทรอนิกส์เกิดขัดข้อง นอกจากนี้แล้วยังมีการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นเมื่อแรงดันเข้าไม่ครบ 3 เฟส คือจะป้องกันไม่ให้เกิดการ overload ของอุปกรณ์ของแหล่งจ่ายไฟตรง เมื่อเฟสใดเฟสหนึ่งเกิดขัดข้อง และเพื่อความสะดวกต่อผู้ใช้ แหล่งจ่ายไฟตรงดังกล่าวจะมีอุปกรณ์วัดรวมอยู่ด้วย โดยทางด้านเข้าจะมีเครื่องวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้กับเครื่องจ่ายไฟตรง ส่วนทางด้านขาออกจะมีเครื่องวัดทั้งกระแสและแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้กับโหลด

ภายในแหล่งจ่ายไฟตรงขนาด 5 kw จะมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้คือ

- หม้อแปลงแยกโดด (isolation transformer)
- หม้อแปลงปรับแรงดัน (Variac)
- วงจรดัดไฟ (rectifier circuit)
- วงจรกรอง (filter circuit)
- วงจรควบคุมและป้องกัน (control and protection circuit) โดยที่แต่ละส่วนจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้คือ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 หม้อแปลงแยกโดด (isolation transformer)

การใส่หม้อแปลงแยกโดดให้กับแหล่งจ่ายไฟตรงนั้นถึงแม้จะทำให้ ราคา ขนาด และน้ำหนักของแหล่งจ่ายไฟตรง เพิ่มขึ้นไม่น้อย แต่ก็นับว่ามีความเหมาะสม เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องทดลอง ทั้งนี้เพราะการใส่หม้อแปลงแยกโดด กั้นหว่างสายส่งกับ Variac นั้น จะทำให้แรงดันด้านขาออกถูกแยกออกจากสายส่งซึ่งจะทำให้ผู้ใช้งานปลอดภัยจากการถูกไฟดูด โดยผ่านทางสายดิน นอกจากนี้แล้ว ยังทำให้การวัดต่าง ๆ ในระหว่างการทดลองสะดวกและไม่เกิดอันตรายกับเครื่องวัด ทั้งนี้เพราะเครื่องวัดบางอย่าง เช่น Oscilloscope มักจะมีขั้วลบต่ออยู่กับตัวถังของเครื่อง (ground) ซึ่งปรกติจะต่อเข้ากับสายดินของสายส่ง ดังนั้นถ้าหากไม่มีหม้อแปลงแยกโดดอาจจะทำให้เกิดการลัดวงจรจากแหล่งจ่ายไฟตรงผ่านเครื่องมือวัดไปยังสายดินของสายส่งได้

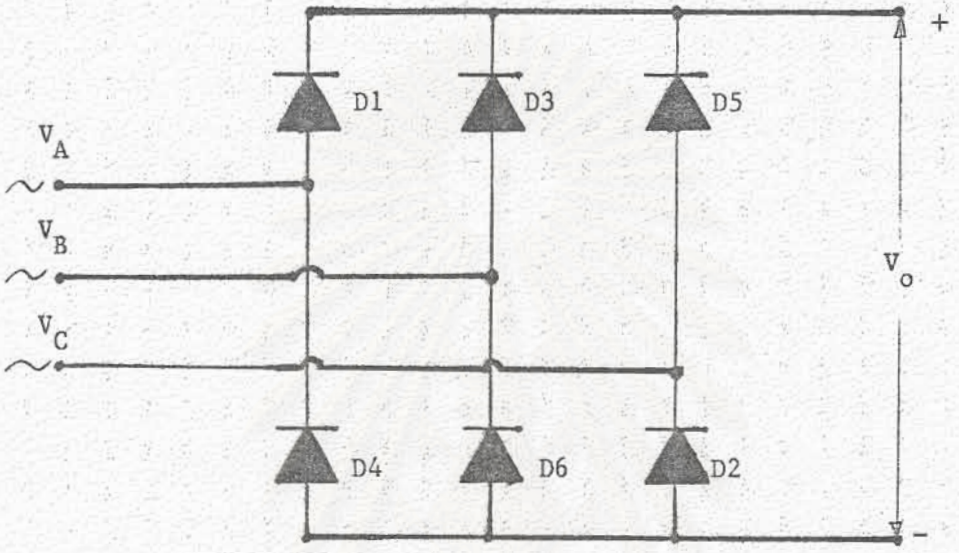
หม้อแปลงแยกโดดที่ใช้เป็นแบบ 3 เฟส ที่ให้กำลังออกเท่ากับขนาดของ Variac คือ 7 kVA โดยจะให้แรงดันระหว่างสายที่กระแสที่กำหนด 10 Amps เท่ากับ 380 Volts เมื่อแรงดันระหว่างสายด้านขาเข้าเป็น 380 Volts หม้อแปลงแยกโดดนี้ทางด้านขาเข้าจะต่อแบบ delta เพื่อป้องกันไม่ให้มีองค์ประกอบไฟตรง เกิดขึ้นกับสายส่ง อันเนื่องมาจากความไม่สมดุลย์ ของกระแสออกของหม้อแปลงที่อาจจะเกิดขึ้นได้ ส่วนทางด้านขาออกของหม้อแปลงแยกโดดจะต่อเป็นแบบ star (Y) เพื่อที่จะให้มีสาย Neutral ให้กับ Variac ที่ใช้ในการปรับแรงดันออกของเครื่องจ่ายไฟตรง

3.2 หม้อแปลงปรับแรงดัน (Variac)

หม้อแปลงปรับแรงดันหรือ Variac นี้ทำหน้าที่ปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ใส่ให้กับวงจรคัดไฟ ซึ่งจะทำให้ระดับแรงดันของไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาออกแปรตาม การปรับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาออกจะทำด้วยมือเท่านั้น และจะไม่มีระบบป้อนกลับ เพื่อรักษาแรงดันออกให้คงที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดทางไฟฟ้า หม้อแปลงปรับแรงดันนี้เป็นแบบ 3 เฟส ต่อกันแบบ star (Y) โดยมีแรงดันระหว่างสายทางด้านขาเข้าเท่ากับ 380 Volts ส่วนแรงดันระหว่างสายด้านขาออกจะแปรค่าได้ระหว่าง 0 ถึง 400 Volts โดยให้กระแสออกสูงสุดได้ 10 ซึ่งเพียงพอสำหรับจ่ายกำลังให้กับวงจรคัดไฟซึ่งมีกระแสเข้า 8.3 Amps เมื่อกระแสออกของวงจรคัดไฟเท่ากับ 10 Amps

3.3 วงจรดัดไฟ

วงจรดัดไฟที่ใช้เป็นวงจรดัดไฟ 3 เฟส แบบบริดจ์ ชนิด 6 ลูกคลื่น (three phases six pulses bridge rectifier circuit) ซึ่งใช้ไดโอด 6 ตัวต่อกันดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจร 3 เฟส แบบบริดจ์ชนิด 6 ลูกคลื่น

วงจรดัดไฟ 3 เฟสแบบบริดจ์ ดังแสดงในรูปที่ 1 นี้มีแรงดันเข้าเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 3 เฟส ซึ่งแต่ละเฟสมีแรงดันเข้าเท่ากัน แต่มีเฟสต่างกัน 120 องศาส่วนทางด้านขาออกจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมีองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับอยู่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาออก (V_o) จะแปรตามค่ายังผลของแรงดันระหว่างสายด้านขาเข้า (V) ตามสมการ (1) ดังนี้ [2]

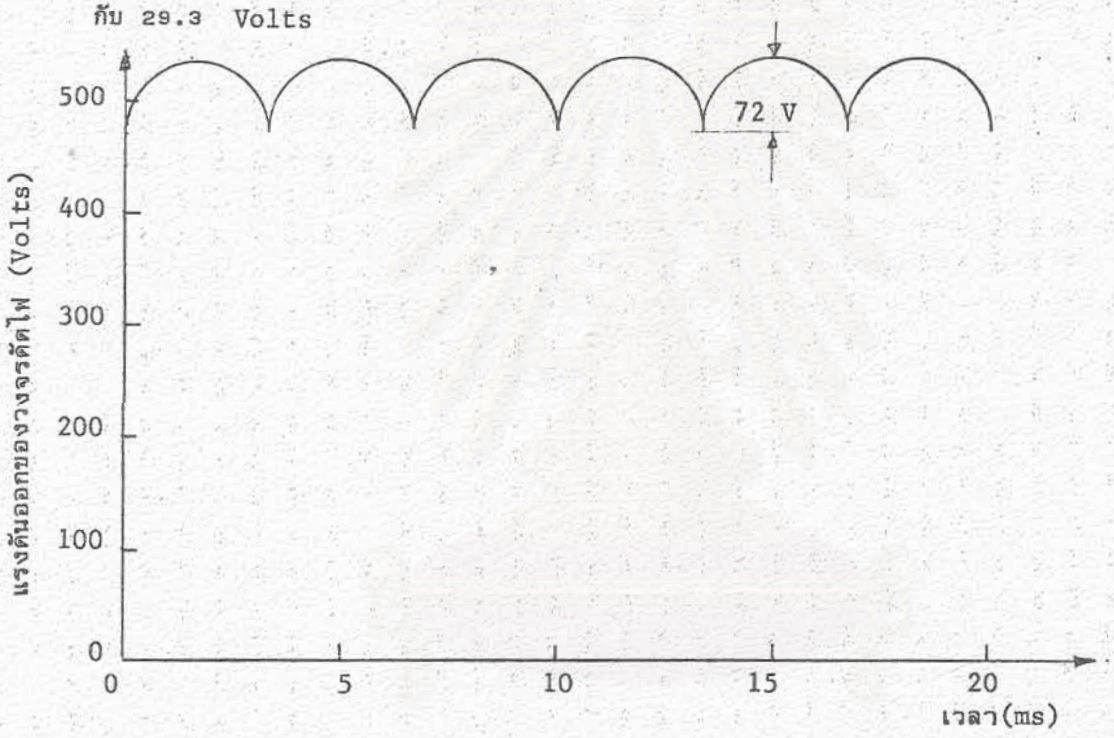
$$V_o = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot V \qquad (1)$$

ส่วนการกระเพื่อมของแรงดันออกจะมีความถี่ 6 เท่าของความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับของสายส่ง การกระเพื่อมของแรงดันออกจะประกอบด้วยองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมีความถี่ต่ำสุดเท่ากับความถี่ของการกระเพื่อม ส่วนความถี่ที่สูงขึ้นไปจะเพิ่มเป็นจำนวนทวีคูณ (6n) ของความถี่ของการกระเพื่อม ค่ายอดถึงยอดของการกระเพื่อม (V_r) และค่ายอดขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่ต่าง ๆ (V_{6n}) จะคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ [2,3]

$$V_r = \left(1 - \cos\frac{\pi}{6}\right)\sqrt{2}\ V \qquad (2n)$$

$$V_{6n} = -\frac{6\sqrt{2}\ V}{\left[(6n)^2 - 1\right]\pi} \qquad (2ข)$$

ในกรณีที่แรงดันระหว่างสาย เท่ากับ 380 Volts ค่ายอดของการกระเพื่อมจะเท่ากับ 72 Volts และค่ายอดขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำสุดคือ 300 Hz จะมีค่า เท่ากับ 29.3 Volts



รูปที่ 2 รูปคลื่นของแรงดันออกของวงจรตัดไฟ 3 เฟสแบบบริดจ์

สำหรับวงจรตัดไฟ 3 เฟสแบบบริดจ์นั้น ในแต่ละคาบ (360 องศา) ไดโอดแต่ละตัวจะมีช่วงนำกระแส เท่ากับ 1/3 คาบ (120 องศา) โดยจะมีไดโอดนำกระแสครั้งละ 2 ตัว และมีลำดับการนำกระแสดังในไดอะแกรมรูปที่ 3

ไดโอดที่นำกระแส		D1		D3		D5		D1		
เฟสที่มีกระแสไหลด	CB	AB	AC	BC	BA	CA	CB	AB	AC	
	D6		D2		D4		D6		ไดโอดที่นำกระแส	

รูปที่ 3 ไดอะแกรมของลำดับการนำกระแสของไดโอด

เมื่อไดโอดนำกระแส กระแสของไดโอดจะเท่ากับกระแสออกของวงจรดัดไฟ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยระหว่างการนำกระแสเท่ากับกระแสโหลดและในกรณีที่วงจรกรองแบบ LC มีขนาดของค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำสูง กระแสออกของวงจรดัดไฟและกระแสของไดโอดในตอนนำกระแสจะมีขนาดเท่ากับกระแสโหลด (I_L) ดังนั้น กระแสเฉลี่ย (I_{av}) และค่ายังผลของกระแส (I_{rms}) ในไดโอดจะมีค่าตามสมการ (3) และ (4) ตามลำดับ คือ

$$I_{av} = \frac{1}{3} I_L \qquad (3)$$

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_L \qquad (4)$$

จากสมการ (3) และ (4) เราสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพการใช้งานของไดโอด (form factor) ได้ดังนี้ คือ

$$k_D = \frac{I_{rms}}{I_{av}} = \sqrt{3} \qquad (5)$$

เนื่องจากกระแสโหลดตามข้อกำหนดที่ตั้งไว้คือ 10A ดังนั้นไดโอดที่ใช้จะต้องทนกระแสเฉลี่ย (I_{av}) ได้ 3.3 A และทนกระแสที่มีค่ายังผล (I_{rms}) ได้ 6 A ซึ่งเราอาจจะเลือกใช้ไดโอดที่ทนกระแสที่มีค่ายังผล 10 A โดยมีค่า safety factor เท่ากับ 1.7

อย่างไรก็ดี เนื่องจากวงจรตัดไฟจะมีกระแส surge สูงถึง 180 A โดยมีความกว้างของ pulse 5 ms หรือเทียบเท่ากับ 127 A ที่ความกว้างของ pulse เท่ากับ 10 ms เมื่อเราเริ่มเปิดเครื่องโดยมีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้าเท่ากับ 380 V ดังนั้น เราจึงเลือกใช้ไดโอดที่ทนกระแสที่มีค่ายังผล 15 A ซึ่งจะทนกระแส surge (I_{FSM}) ที่มีความกว้างของ pulse 10 ms ได้ 180 A เราสามารถลดกระแส surge ลงได้ โดยใช้วงจรที่ป้องกันไม่ให้เครื่องทำงาน ถ้าแรงดันออกของ variac มีค่าสูงเกินไป ในตอนเริ่มเปิดเครื่องหรืออาจทำโดยการเพิ่มขนาดของตัวเหนี่ยวนำ (L) และลดขนาดของตัวเก็บประจุ (C) ทำให้สามารถใช้ไดโอดขนาดเล็กลงได้ แต่การกระทำดังกล่าว จะเป็นการจำกัดการทำงานของเครื่องจ่ายไฟตรงหรืออาจจะเป็นการเพิ่มน้ำหนักของเครื่องจ่ายไฟตรง เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำจะมีน้ำหนักมากกว่าตัวเก็บประจุมาก นอกจากนี้แล้วการใช้ไดโอดขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ แรงดันตกคล่อมไดโอดลดลงอันเป็นการลดปัญหา เรื่องความร้อนของไดโอดและทำให้สามารถลดขนาดของตัวระบายความร้อน (heat sink) ลงได้ อีกทั้งราคาของไดโอดขนาด 10 A และขนาด 15A จะไม่แตกต่างกันมากนัก สำหรับแรงดันย้อนกลับของไดโอดในวงจรตัดไฟแบบบริดจ์ จะมีค่าเท่ากับค่ายอดของแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับ ซึ่งในกรณีที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมีค่า 380 V แล้วไดโอดจะต้องรับแรงดันย้อนกลับเท่ากับ 538 V และเราเลือกใช้ไดโอดที่ทนแรงดันย้อนกลับได้ 1000 V

ในการเลือกขนาดของตัวระบายความร้อนนั้นเราจะต้องทราบกำลังสูญเสียของไดโอด (P_D) ความต้านทานการนำความร้อนระหว่างตัวถังของไดโอดกับตัวระบายความร้อน (case to sink thermal resistance Recs) ความแตกต่างสูงสุดระหว่างอุณหภูมิของไดโอดกับอุณหภูมิห้อง ($T_C - T_A$) เพื่อที่จะใช้ในการคำนวณหา ความต้านทานการนำความร้อนระหว่าง ตัวระบายความร้อนกับอากาศ (sink to ambient thermal resistance Resa)

เพื่อความสะดวกในการติดตั้งและต่อวงจร เราได้เลือกใช้ไดโอดซึ่งมีอาโนดต่อกับตัวถัง (common anode) 3 ตัว ยึดติดกับตัวระบายความร้อนร่วมกัน โดยไม่มีฉนวนกั้น ทำให้อาโนดของไดโอดทั้งสามต่อถึงกันโดยผ่านตัวระบายความร้อนและเป็นขั้วลบของวงจรตัดไฟ ส่วนไดโอดอีก 3 ตัว ซึ่งเป็นแบบที่มีคาโทดต่อกับตัวถัง (common cathode) จะยึดติดกับตัวระบายความร้อนอีก 1 อัน ทำให้คาโทดของไดโอดทั้ง 3 ต่อถึงกันโดยผ่านตัวระบายความร้อนและเป็นขั้วบวกของวงจรตัดไฟ เนื่องจากแรงดันตกคล่อมไดโอดแต่ละตัวเมื่อมีกระแสไฟตรง 10 A

ไหลผ่านมีค่าเท่ากับ 0.95 Volt ดังนั้นตัวระบายความร้อนแต่ละตัวจะต้องระบายความร้อน 9.5 Watts ถ้าเรากำหนดให้อุณหภูมิสูงสุดของตัวถังของไดโอดเท่ากับ 85° C เมื่ออุณหภูมิสูงสุด ของอากาศภายในเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 50° C ดังนั้น ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวถังของไดโอดและอากาศ $(T_C - T_A)$ จะเท่ากับ 35° C จากค่าของผลต่างของอุณหภูมิที่กำหนดและพลังงานสูญเสีย เราสามารถคำนวณหาความต้านทานการนำความร้อนระหว่างตัวระบายความร้อนกับอากาศ ของตัวระบายความร้อนที่จะใช้โดยอาศัยสมการ

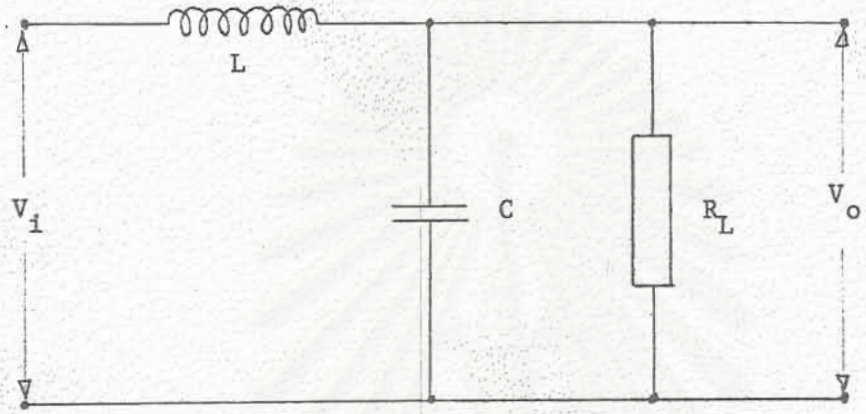
$$R_{es.a} = \frac{T_C - T_A}{P_D} - R_{ecs} \qquad (6)$$

จากค่าของ P_D , $T_C - T_A$ และ R_{ecs} ซึ่งเท่ากับ 0.5° C/Watt เราพบว่าเราจะต้องใช้ตัวระบายความร้อนที่มีค่าความต้านทานการนำความร้อนเท่ากับ 3.2° C/Watt เนื่องจากตัวระบายความร้อนที่มีขายในท้อยตลาดเมืองไทยไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับความต้านทานการนำความร้อนให้ ดังนั้น เราจึงจำเป็นต้องทดสอบเองและเราได้เลือกใช้ตัวระบายความร้อนตามขนาดที่มีขายในท้องตลาดที่มีความต้านทานการนำความร้อนประมาณ 3° C/Watt ซึ่งจะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิ ระหว่างตัวถังของไดโอดกับอากาศเท่ากับ 33° C เมื่อกระแสโหลดเท่ากับ 10 Amps

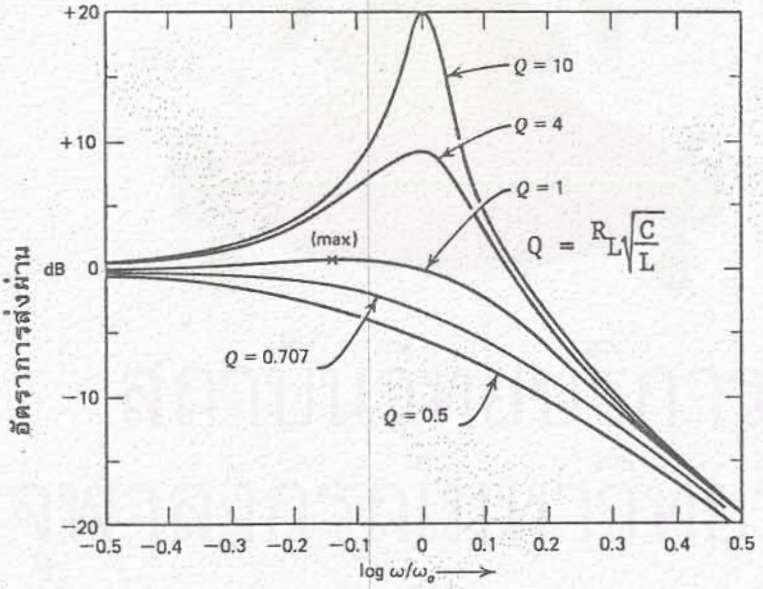
การคำนวณหาค่ายังผลของกระแสด้านขาเข้าของวงจรดัดไฟซึ่งจะมีขนาดเท่ากับค่ายังผลของกระแสด้านขาออกของ variac นั้น เราจะคำนวณโดยประมาณว่า ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้มีขนาดใหญ่ทำให้ กระแสออกของวงจรดัดไฟมีค่าประมาณคงที่ เท่ากับกระแสของโหลด ซึ่งขนาดของตัวเหนี่ยวนำที่ถือว่าใหญ่จนทำให้การกระเพื่อมมีค่าต่ำเทียบกับกระแสโหลดนั้น จะขึ้นอยู่กับขนาดของการกระเพื่อมของแรงดันออกของวงจรดัดไฟและความถี่ของการกระเพื่อมจากลักษณะการทำงานของวงจรดัดไฟ ซึ่งให้กระแสออกมีค่าคงที่จะทำให้กระแสในสายด้านขาเข้าเป็น square wave ที่สมมาตรโดยมีค่าสูงสุดเท่ากับกระแสโหลด (I_L) และมีช่วงเวลาในการนำกระแสในแต่ละครึ่งคาบ (180 องศา) เท่ากับ 120 องศา ซึ่งค่ายังผลของกระแสดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับ $\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_L$ ดังนั้นค่ายังผลของกระแสในสายด้านขาเข้าของวงจรดัดไฟ เมื่อกระแสโหลดมีค่า 10 Amps จะเท่ากับ 8.16 Amps

3.4 <u>วงจรกรอง</u> (filter)

วงจรกรองที่ใช้ในการลดขนาดขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันด้านขาออกของเครื่องจ่ายไฟตรงนั้น จะเป็นวงจรกรองที่ใช้ ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) ต่อกันเป็นวงจรกรองผ่านต่ำ (Low-pass filter) ดังแสดงในรูปที่ 4 ก.



ก) วงจรกรอง LC แบบผ่านต่ำ



ข) อัตราการส่งผ่านสัญญาณของวงจรกรองในรูป ก ที่ความถี่ต่าง ๆ กัน

รูปที่ 4 วงจรกรอง LC แบบผ่านต่ำ (ก) และอัตราการส่งผ่านสัญญาณของวงจรกรอง ($\frac{V_o}{V_i}$) ที่ความถี่ (ω) ต่าง ๆ กัน (ข)

วงจรกรองผ่านต่ำนี้จะส่งผ่านไฟฟ้ากระแสตรง โดยไม่มีการลดขนาด แต่จะลดทอนขนาดขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่สูงกว่า ความถี่หักมุม (ω_o) ของวงจรกรอง โดยที่ความถี่หักมุมของวงจรกรองผ่านต่ำแบบ LC จะมีค่าเท่ากับ $1/\sqrt{LC}$ อัตราการส่งผ่านไฟฟ้ากระแสสลับ ($\frac{V_o}{V_i}$) ของวงจรกรองจะลดลงเมื่อความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4ข ซึ่งเราสามารถเขียน สมการของการเปลี่ยนแปลงของอัตราการส่งผ่านกับความถี่ได้ดังนี้คือ

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{1}{R_L}\sqrt{\frac{L}{C}}\ \frac{\omega}{\omega_o}\right)^2}} \qquad (7)$$

จากสมการ 7 จะเห็นได้ว่า ที่ความถี่เท่ากับความถี่หักมุม ($\omega = 1/\sqrt{LC}$) อัตราการส่งผ่านไฟฟ้ากระแสสลับจะมีค่าเท่ากับ $R_L\sqrt{\frac{C}{L}}$ ซึ่งอาจจะมีค่ามากหรือน้อยกว่า 1 ก็ได้ ดังนั้น ถ้าเป็นไปได้ เราควรหลีกเลี่ยงไม่ให้อัตราการส่งผ่านองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับมากกว่า 1 เพราะแทนที่วงจรกรองจะลดทอนองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับวงจรกรองกลับจะเพิ่มขนาดขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับที่ออกจากวงจรตัดไฟ เพื่อที่จะให้ค่าของ $R_C\sqrt{\frac{C}{L}}$ มีค่าต่ำ C จะต้องมีค่าน้อยและ L จะต้องมีค่ามากโดยให้ผลคูณของ L และ C คงที่ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความถี่หักมุม อย่างไรก็ดี R_L จะมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ ในช่วงที่ค่อนข้างกว้างและจะมีค่าสูงในกรณีที่โหลดมีค่าต่ำ นอกจากนี้แล้ว C มักจะมีราคาถูกและน้ำหนักเบากว่า L มาก ดังนั้น การแก้ปัญหาโดยการพยายามลดค่า $R_L\sqrt{\frac{C}{L}}$ จึงดูไม่เหมาะสมนัก การแก้ปัญหาอีกวิธีหนึ่งก็คือ การเลือกความถี่หักมุม(ω_o)ของวงจรกรองให้อยู่ในย่านความถี่ซึ่งแรงดันออกของวงจรตัดไฟไม่มีองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับความถี่นั้นอยู่

ความถี่ต่ำสุดขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านขาออกของวงจรตัดไฟ 3 เฟส แบบบริดจ์ที่มีแรงดันสมดุลย์กันทั้ง 3 เฟส คือ 300 Hz โดยมีค่ายอดถึงยอดเท่ากับ 59 Volts ดังนั้น เพื่อให้การกระเพื่อมของแรงดันออกเท่ากับ 1 % เราอาจจะเลือกใช้วงจรกรองที่มีความถี่หักมุมประมาณ 84 Hz ก็เพียงพอ แต่จากการทดลองพบว่า แรงดันออกของวงจรตัดไฟ 3 เฟส แบบบริดจ์จะมีองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 100 Hz อยู่ด้วย องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 100 Hz นี้ เกิดจากความไม่สมดุลย์ของแรงดันระหว่างสายของสายส่ง ความไม่

สมดุลย์ ของหม้อแปลงแยกไดดและ variac โดยอาจจะมีค่าสูงถึง 14 Volts ซึ่งทำให้การกระเพื่อมของแรงดันออกของวงจรดัดไฟที่ความถี่ 100 Hz มีค่าสูงถึง 20 Volts เนื่องจากอัตราการส่งผ่านองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่สูงกว่าความถี่หักมุม จะลดลง เมื่อความถี่ เพิ่มขึ้น เป็นฟังก์ชันของความถี่กำลังสอง ดังนั้นอัตราการส่งผ่านองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 300 Hz จะต่ำกว่าอัตราการส่งผ่านองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 100 Hz 9 เท่า ในขณะที่ขนาดขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่300Hz ใหญ่กว่าองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 100 Hz เพียง 3 เท่า ดังนั้น การกระเพื่อมของแรงดันออกส่วนใหญ่จะเกิดจากองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 100 Hz โดยมีองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 300Hz ร่วมอยู่ด้วย ดังนั้น เพื่อให้การกระเพื่อมของแรงดันออกของเครื่องจ่ายไฟตรงมีค่าต่ำกว่า 1% ความถี่หักมุมของวงจรกรองควรจะมีค่า เท่ากับ 40 Hz สำหรับองค์ประกอบของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับในตัว เหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับกับความถี่ ดังนั้น องค์ประกอบกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่ไหลผ่านตัว เหนี่ยวนำที่ความถี่ 300 Hz จะมีค่าใกล้เคียงกับที่ความถี่ 100 Hz

ในการเลือกขนาดของ L และ C นั้น เราจะต้องไม่ให้องค์ประกอบของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับในอุปกรณ์ดังกล่าวสูงเกินไป โดยทั่วไปแล้วองค์ประกอบกระแสของไฟฟ้ากระแสสลับของตัว เหนี่ยวนำมักจะเลือกให้มีค่าประมาณ 20-40 % ขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงในตัว เหนี่ยวนำ

ส่วนค่าสูงสุดของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่ไหลผ่านตัว เก็บประจุจะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของตัว เก็บประจุ นอกจากนี้ก็ยังขึ้นอยู่กับ ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับและอุณหภูมิของตัว เก็บประจุด้วย โดยค่าสูงสุดของกระแสจะ เพิ่มขึ้น เมื่อความถี่ เพิ่มขึ้น แต่จะลดลง เมื่ออุณหภูมิของตัว เก็บประจุเพิ่มขึ้น [4]

. เครื่องจ่ายไฟตรงที่สร้างขึ้นนั้น จะใช้ตัว เก็บประจุ 1000 μF และตัว เหนี่ยวนำ 15 mH ซึ่งจะทำให้ความถี่หักมุม เท่ากับ 41 Hz และองค์ประกอบของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 100Hz และ 300Hz มีค่ายอดถึงยอดประมาณ 2 amps ซึ่งผลรวมของกระแสทั้งสองความถี่จะมีค่ายอดถึงยอดประมาณ 3-4 amps ซึ่ง เท่ากับ 30-40 % ขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรง และมีค่าต่ำกว่าค่าสูงสุดของกระแสที่ยอมให้ผ่านตัว เก็บประจุ คือมีค่าสูงสุด เท่ากับ 10 Amps(rms) ที่อุณหภูมิ 60° C และความถี่ 100 Hz

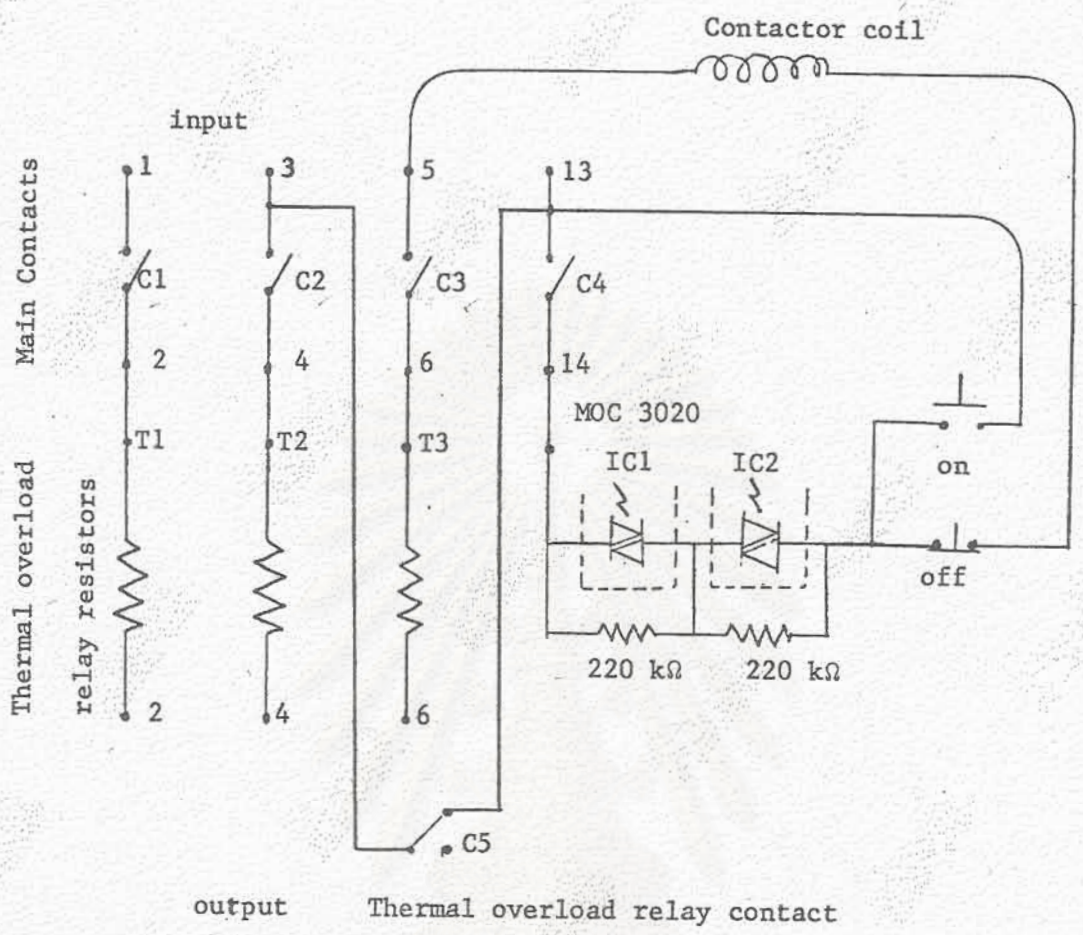
3.5 <u>วงจรควบคุมและป้องกัน</u> (control and protection circuit)

วงจรควบคุมและป้องกันจะมีส่วนประกอบที่ทำหน้าที่ต่าง ๆ กันดังต่อไปนี้ คือ

- วงจรควบคุมการ เปิด-ปิด เครื่อง
- วงจรป้องกันกระแส เกิน
- วงจรป้องกันอันตรายจาก เฟสหาย
- เครื่องวัดกระแสและแรงดัน

3.5.1 <u>วงจรควบคุมการ เปิด-ปิด เครื่อง</u>

การป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เข้า เครื่องจ่ายไฟตรงจะต่อผ่าน magnetic contactor ซึ่งมี main contacts 3 ชุด คือ C1,C2 และ C3 และ auxiliary contacts 2 ชุด คือ C4 , C5.contact C4 จะถูกควบคุมโดยขดลวดควบคุม (magnetic contactor coil) เช่น เดียวกับ mains contacts C1,C2 และ C3 ส่วน C5 เป็น contact ของ Thermal over load relay การต่อ magnetic contactor จะเป็นดังแสดงในรูปที่ 5 magnetic contactor coil ที่ใช้ควบคุม contacts C1-C4 จะทำให้ C1-C4 ต่อวงจร เมื่อ Coil ได้รับไฟ เลี้ยง 380 Volts, magnetic contactor coil จะต่ออนุกรมกับสวิตช์ปิด เครื่อง (off), Triacของ IC1,IC2 และ auxiliary contacts C4,C5 ซึ่งลักษณะการต่อดังกล่าวจะทำให้ main contacts ตัดไฟฟ้ากระแสสลับ ออกจาก เครื่องจ่ายไฟตรงถ้า สวิตช์ปิด เครื่องหรือ Triac หรือ Thermal over load relay contact ถูกกระตุ้นให้ตัดวงจร สวิตช์ปิด เครื่องจะ เป็น contact ซึ่งปรกติจะต่อวงจรอยู่และจะตัดวงจร เมื่อ เรากดสวิตช์ ที่ใช้ในการปิด เครื่องจ่ายไฟตรงด้วยมือ ส่วน Triac และ contact ของ thermal over load relay จะถูกควบคุมโดยวงจรอิ เล็กทรอนิกส์ ที่ใช้ ตรวจจับกระแสโหลด และ Thermal over load relay ตามลำดับ เพื่อใช้ในการป้องกันกระแสของโหลด เกินพิกัด เมื่อ เรากดสวิตช์ปิด เครื่องหรือ วงจรอิ เล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการตรวจจับกระแส เกินทำงานหรือ Thermal over load relay ทำงานจะทำให้กระแสที่ไป เลี้ยง magnetic contactor coil ถูกตัดขาด C4 จะ เปิดวงจรทำให้ contacts C1 - C4 อยู่ในสภาพ เปิดวงจรตลอดไปจนกว่าจะมีการ เปิด เครื่องโดยการกดสวิตช์ เปิด เครื่อง (on) อีกครั้งหนึ่ง



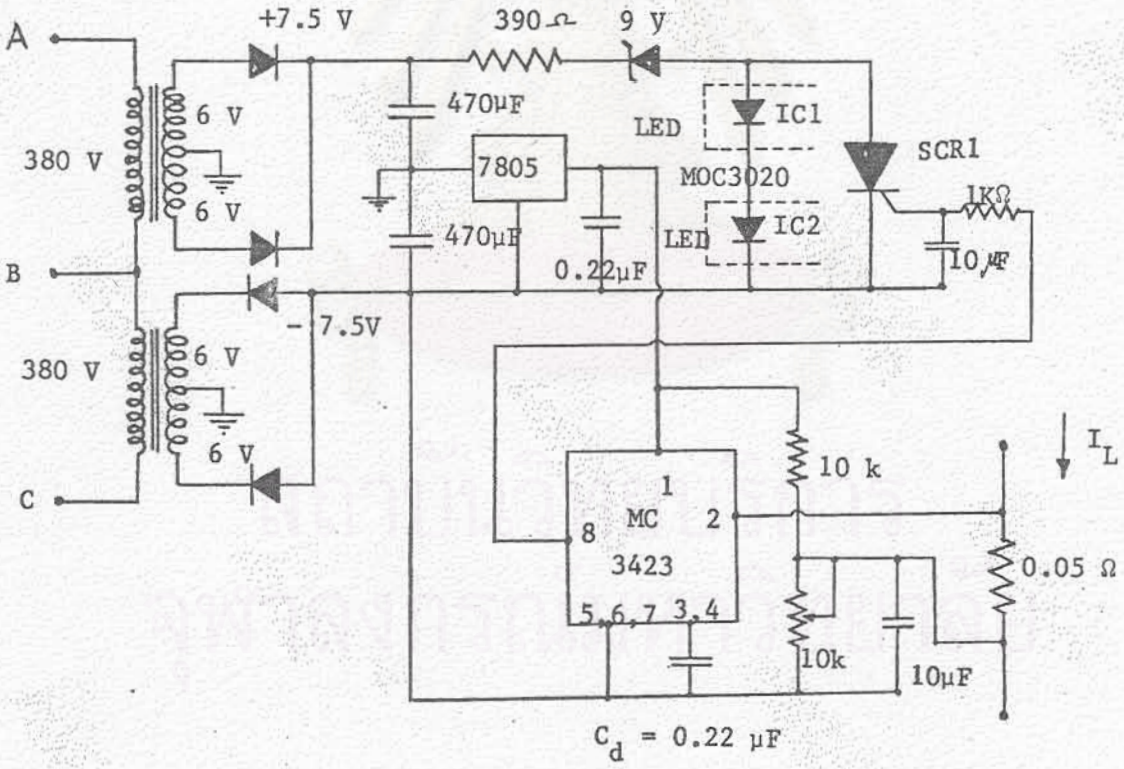
รูปที่ 5 วงจรควบคุมการเปิด-ปิดเครื่อง

การต่อไฟฟ้ากระแสสลับเข้ากับเครื่องจ่ายไฟตรงจะทำโดยการกดสวิตช์เปิดเครื่อง (on) เพื่อต่อ contact ซึ่งปรกติจะเปิดอยู่ และต่อขนานกับ C4 และ Triac ของ IC1 และ IC2 ทำให้มีกระแสไฟฟ้ากระแสสลับไฟเลี้ยง magnetic contactor coil ถ้า Thermal over load relay contact และสวิตช์ปิดเครื่องไม่ถูกกระตุ้น เมื่อมีไฟมาเลี้ยง magnetic contactor coil จะทำให้ contacts C1-C4 ต่อวงจรทำให้มีไฟฟ้ากระแสสลับไปเลี้ยงเครื่องจ่ายไฟตรงและวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ควบคุม Triac ของ IC1 และ IC2 ทำให้ Triac ทั้งสองนำกระแส เมื่อ Triac และ contact C4 ต่อวงจรจะทำให้มีไฟไปเลี้ยง magnetic contactor coil ตลอดเวลาถึงแม้เราจะปล่อยมือจากสวิตช์เปิดเครื่องซึ่งจะทำให้ contact ของ สวิตช์เปิดเครื่องตัดวงจรแล้วก็ตาม

053816

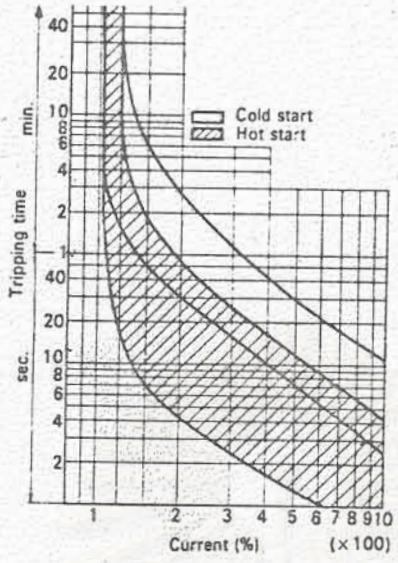
3.5.2 <u>วงจรป้องกันกระแสเกินพิกัด</u>

สำหรับการป้องกันกระแสของโหลดเกินพิกัดนั้นจะมีการตรวจจับกระแสเกินพิกัด 2 วิธี โดยวิธีแรกใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะวัดกระแสไฟตรงที่เครื่องจ่ายไฟตรงจ่ายให้กับโหลด เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง ที่เป็นขีดจำกัดสูงสุดของโหลด ค่าอ้างอิงนี้สามารถปรับค่าได้ระหว่าง 10-125 % ของกระแสที่กำหนด (Norminal output current = 10 Amps) เมื่อกระแสโหลดเกินค่าอ้างอิงที่ตั้งไว้เป็นเวลาเกิน 3 ms วงจรเปรียบเทียบจะสั่งให้ Magnetic contactor ตัดวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้กับเครื่องจ่ายไฟตรง การที่ต้องมีการหน่วงเวลาไว้ 3 ms ก่อนที่จะสั่งตัดไฟเลี้ยงนั้นก็เพื่อจะป้องกันการตัดวงจรโดยไม่จำเป็น (nuisance tripping) ซึ่งมีสาเหตุเนื่องมาจาก spike ของแรงดันที่มาจากโหลด หรือสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับ spike ของแรงดันดังกล่าวนี้จะมีลักษณะเป็น pulse ที่มีช่วงกว้างต่ำกว่า 1 ms เมื่อ spike หายไปในเวลาที่น้อยกว่า 3 ms วงจรเปรียบเทียบ



รูปที่ 6 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการป้องกันกระแสเกินพิกัด

จะ reset ตัวเอง โดยใช้เวลาประมาณ 2 - 3 μs วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ป้องกันกระแสเกินพิกัดนั้น จะมีรายละเอียดของวงจร แสดงในรูปที่ 6 ส่วนลักษณะการทำงานของวงจรจะเป็นดังนี้คือ ในภาวะปรกติ SCR1 จะไม่ทำงาน ทำให้มีกระแสมาเลี้ยง LED ของ IC1 และ IC2 ทำให้ Triac ของ IC1 และ IC2 นำกระแสจึงมีไฟไปเลี้ยง magnetic contactor coil ถ้ากระแส I_L ซึ่งไหลผ่านความต้านทาน 0.05 Ω มีค่าสูงเกินค่าที่กำหนดจะทำให้แรงดันที่ขา 2 ของ MC3423 ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรเปรียบเทียบกระแส มีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดเป็นเวลาเกิน 3 ms MC3423 จะส่งสัญญาณออกจากขา 8 เพื่อไปจุดชนวน SCR1 ให้นำกระแสซึ่งเมื่อ SCR1 นำกระแสจะทำให้ไม่มีกระแสไปเลี้ยง LED ของ IC1 และ IC2 อันจะเป็นผลทำให้ SCR ของ IC1 และ IC2 หยุดนำกระแส ซึ่งเมื่อไม่มีกระแสไปเลี้ยง magnetic contactor coil, contacts C1-C4 จะตัดวงจรทำให้เครื่องจ่ายไฟตรงหยุดทำงาน เนื่องจากแรงดันที่ขา 2 ของ MC3423 ขึ้นอยู่กับแรงดันคล่อมความต้านทาน 0.05 Ω และแรงดันคล่อม R_C ดังนั้นเราจึงสามารถตั้งค่าของกระแสพิกัดโดยการปรับค่า R_C ซึ่งทำได้ง่ายกว่าการปรับค่าความต้านทานที่กระแส I_L ไหลผ่าน สำหรับการตั้งช่วงการหน่วงเวลาจะทำโดยการปรับค่า C_d ซึ่งต่อระหว่างขา 3 และ 4 ของ MC 3423 กับไฟลบ วิธีที่ 2 ที่ใช้ในการตรวจจับกระแสเกินพิกัดก็คือการใช้ Thermal overload relay วิธีนี้ใช้หลักการขยายตัวที่แตกต่างกันของ bimetals เมื่อได้รับความร้อน เพื่อไปตัด contact C5 ซึ่งก็คือการตัดไฟเลี้ยง magnetic contactor coil และทำให้ contacts C1-C4ตัดไฟฟ้ากระแสสลับออกจากเครื่องจ่ายไฟตรง การขยายตัวที่แตกต่างกันของ bimetals จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของ bimetals ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านลวดความร้อนของ Thermal overload relay เราจะให้กระแสไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาเข้าของเครื่องจ่ายไฟตรงไหลผ่านลวดความร้อนของ Thermal overload relay ซึ่งเมื่อกระแสเข้าของเครื่องจ่ายไฟตรงสูงถึงค่าหนึ่ง Thermal overload relay ก็จะตัดไฟเลี้ยงของ magnetic contactor coil การทำงานของ Thermal overload relay จะขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านลวดความร้อนของ Thermal overload relay เวลาและสภาพทางความร้อนของ bimetals ก่อนเกิดกระแสเกินพิกัด hot start หรือ cold-start



รูปที่ 7 ลักษณะการทำงานของ Thermal overload relay

ดังแสดงในรูปที่ 7 Thermal overload relay ที่ใช้จะสามารถตั้งพิกัดกระแสได้ระหว่าง 85-135 % ของกระแสที่กำหนด เนื่องจาก Thermal overload relay จะมีการตอบสนองที่ช้ากว่าการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้แล้วยังยอมให้กระแสเกินพิกัดได้ถึง 5-6 เท่า เป็นเวลานานกว่า 1 วินาที ดังนั้น เมื่อเราตั้งพิกัดกระแสของ Thermal overload relay ไว้ที่ค่ากระแสที่กำหนด คือ 8.2 A แล้ว ปรากฏว่า เมื่อเกิดกระแสเกินพิกัดระบบตรวจจับกระแสเกินพิกัดที่ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีการตอบสนองที่เร็วกว่าจะทำงานก่อนทุกครั้ง แต่การมี Thermal overload relay ไว้ก็เพื่อเป็นการสำรองในกรณีที่วงจรอิเล็กทรอนิกส์เกิดขัดข้อง

นอกจากระบบป้องกันกระแสเกินพิกัดดังได้กล่าวมาแล้ว เรายังมีระบบป้องกันที่ใช้ฟิวส์ต่อไว้ทั้งทางด้านขาเข้าและขาออก โดยเราใช้ฟิวส์ขนาด 10 A 500V ทั้งทางด้านขาเข้าและขาออกของเครื่องจ่ายไฟตรง

3.5.3 <u>วงจรป้องกันอันตรายจากเฟสหาย</u>

เมื่อเฟสใดเฟสหนึ่งใน 3 เฟสของไฟฟ้ากระแสสลับหายไป วงจรดัดไฟ 3 เฟสแบบบริดจ์ จะมีลักษณะเป็นวงจรบริดจ์เฟสเดียวแบบเต็มคลื่น (single phase full bridge rectifier) ซึ่งถ้าต้องจ่ายกระแสโหลดเต็มพิกัดแล้วจะทำให้หม้อแปลงต้องจ่ายกระแสเกินพิกัด ซึ่งอาจจะทำให้หม้อแปลงเสียหายได้ นอกจากนี้แล้ว แรงดันด้านขาออกจะมีการกระเพื่อม

(ripple) เพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้น เมื่อเฟสใดเฟสหนึ่งใน 3 เฟส ของไฟฟ้ากระแสสลับหายไป เราจะตัดไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้กับวงจรจ่ายไฟตรงทันที วงจรที่ทำหน้าที่ดังกล่าวจะอยู่ในส่วนของไฟเลี้ยงของวงจรป้องกัน กระแสเกินพิกัด ดังแสดงในรูปที่ 6 กล่าวคือ ทางด้าน primary ของหม้อแปลง 2 ตัว ที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงให้กับ LED ของ IC1 และIC2 นั้น จะต่อกันแบบ open delta ส่วนทางด้านขาออกของหม้อแปลงทั้งสองจะต่ออนุกรมกัน ซึ่งในภาวะปรกติจะให้แรงดันออกเท่ากับ 15 V เพื่อจ่ายกระแสให้กับ LED ของ IC1 และIC2 โดยผ่าน ความต้านทาน 390Ω และ Zener diode 9V ถ้าไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านขาเข้าของหม้อแปลงเฟสใดเฟสหนึ่งหายไปจะทำให้แรงดันของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงที่จ่ายกระแสให้กับ LED ของ IC1 และ IC2 ลดลง $\sqrt{3}$ เท่า และแรงดันที่เหลือจะไม่เพียงพอที่จะทำให้ Triac ของ IC1 และ IC2 นำกระแสได้ ดังนั้น จะทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไปเลี้ยง magnetic contactor coil และ contact C1-C4 จะตัดวงจรไฟฟ้ากระแสสลับทั้ง 3 เฟส ที่จ่ายพลังงานให้กับเครื่องจ่ายไฟตรง

3.5.4 <u>เครื่องวัดกระแสและแรงดัน</u>

เพื่อความสะดวกในการใช้งานของเครื่องจ่ายไฟตรงที่สร้างขึ้น เราได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดกระแสและแรงดันทั้งทางด้านขาเข้าและขาออกของเครื่องจ่ายไฟตรง กล่าวคือ เราจะมี Voltmeter และ Ammeter ไฟฟ้ากระแสสลับไว้ทางด้านขาออกของ Variac เพื่อวัดแรงดันระหว่างสายและกระแสในสายทางด้านขาเข้าของวงจรตัดไฟ อย่างละ หนึ่งตัว สำหรับทางด้านขาออกเราจะต่อ Voltmeter และ Ammeter ไฟฟ้ากระแสตรงไว้หลังวงจรกรองเพื่อใช้วัดแรงดันด้านขาออกและกระแสไฟตรงที่เครื่องจ่ายไฟตรงจ่ายให้กับโหลด นอกจากเครื่องวัดดังกล่าวแล้ว เรายังมี pilot lamp ต่อระหว่างสายของไฟฟ้ากระแสสลับโดยต่อไว้ก่อนหน้า magnetic contactor เพื่อให้ทราบว่ามีไฟเข้าเครื่องหรือไม่ และมีเฟสใดเฟสหนึ่งหายไปหรือไม่

4. การทดสอบการใช้งาน

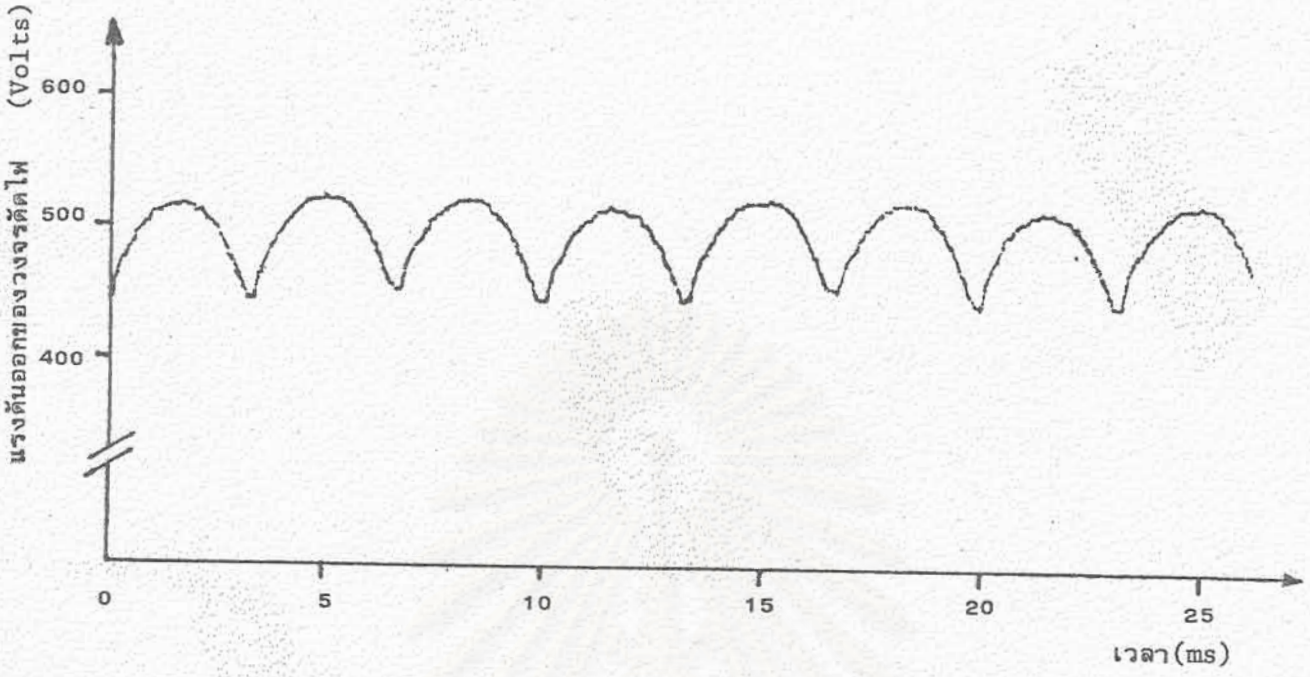
หลังจากที่ได้ประกอบวงจรตามหลักการที่ได้กล่าวมาแล้ว ได้มีการทดสอบการใช้งานวงจรจ่ายไฟตรงขนาด 5 kw ที่สร้างขึ้นทั้งในภาวะอยู่ตัว (steady state)และภาวะชั่วครู่ (transient state) ตลอดจนได้มีการทดสอบระบบป้องกันต่าง ๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้คือ

4.1 การทดสอบในภาวะอยู่ตัว

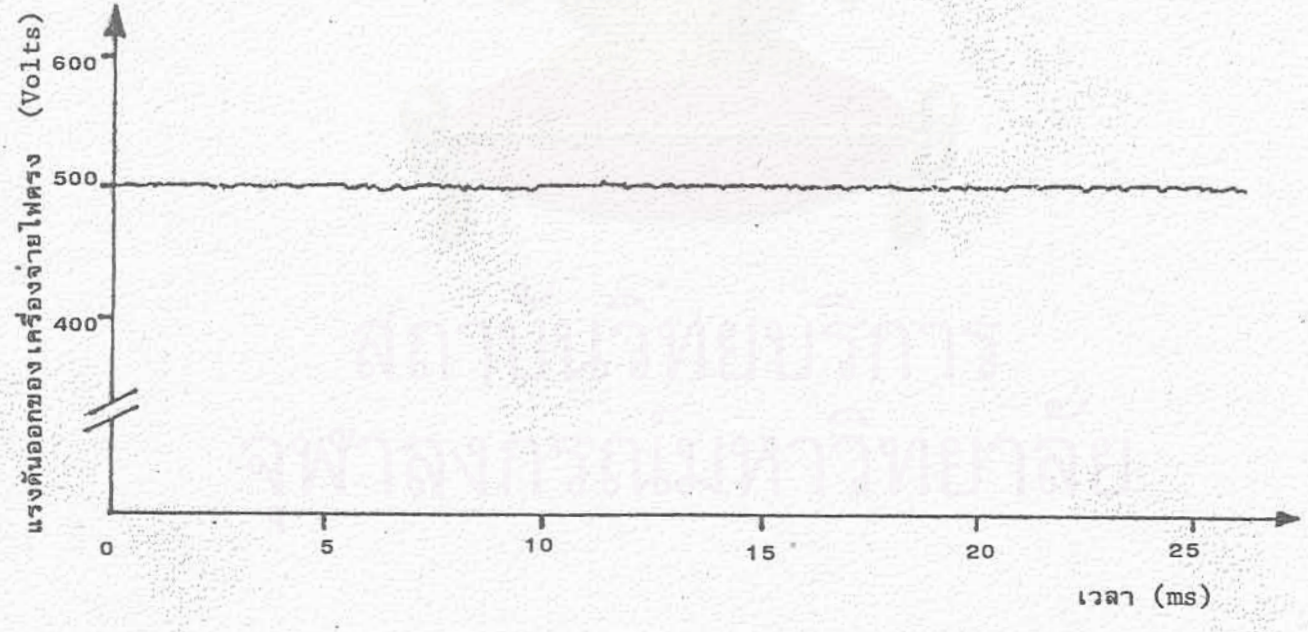
4.1.1 การทดสอบวงจรด้านขาออก

ได้มีการทดสอบแปรค่าแรงดันออกของเครื่องจ่ายไฟตรง ในภาวะที่ไม่มีโหลดเราจะสามารถแปรค่าแรงดันออกได้ระหว่าง 0 ถึง 565 Volts และที่โหลด 10 Amps เราจะสามารถแปรค่าแรงดันออกได้ระหว่าง 0 ถึง 507 Volts การที่แรงดันออกในภาวะที่ไม่มีโหลดมีค่าสูงถึง 565 Volts แทนที่จะเป็น 540 Voltsนั้นก็เนื่องจากว่าด้านขาออกของเครื่องจ่ายไฟตรงเป็นตัวเก็บประจุซึ่งในภาวะที่ไม่มีโหลดตัวเก็บประจุจะถูกประจุไปสู่แรงดันค่ายอดของแรงดันเข้าคือมีค่าเท่ากับ $\sqrt{2} \times 400$ ซึ่งเท่ากับ 565 Volts รูปที่ 8 ก และ 8 ข แสดงรูปคลื่นของแรงดันออกของวงจรตัดไฟ (ก่อนผ่านวงจรกรอง) และแรงดันออกของเครื่องจ่ายไฟตรง (หลังผ่านวงจรกรอง) เมื่อแรงดันออกมีค่า 500 Volts และกระแสออกมีค่า 10 Amps จากรูป 8 ก จะเห็นได้ว่า การกระเพื่อมของแรงดันออกจากวงจรตัดไฟ จะมีค่าจากยอดถึงยอดประมาณเท่ากับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีคือ 72 Volts นอกจากนี้แล้วรูปคลื่นที่ได้จากการทดลองจะมีค่ายอดของแรงดันออกจากวงจรตัดไฟที่แตกต่างกัน อันมีสาเหตุเนื่องมาจากการที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาเข้าของทั้งสามเฟสไม่สมดุลย์กัน สำหรับแรงดันออกของเครื่องจ่ายไฟตรงจะมีการกระเพื่อมน้อยมาก เมื่อเทียบกับการกระเพื่อมของแรงดันออกของวงจรตัดไฟและจากการขยายรูปคลื่นของแรงดันออก เพื่อดูขนาดของการกระเพื่อมดังแสดงในรูปที่ 9 ก จะเห็นว่าการกระเพื่อมของแรงดันออกของเครื่องจ่ายไฟตรงจะมีทั้งองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 100 Hz และ 300 Hz โดยมีค่ายอดถึงยอดเท่ากับ 4 Volts เมื่อแรงดันออกเท่ากับ 500Voltsและกระแสโหลดเท่ากับ 10 Ampsซึ่งคิดเป็นเปอร์เซนต์การกระเพื่อมได้เท่ากับ 0.8 % จากรูปคลื่นในรูปที่ 9 ก จะเห็นได้ว่าการกระเพื่อมของแรงดันออกส่วนใหญ่จะเกิดจากองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 100 Hz ตามที่คำนวณไว้อย่างไรก็ดี ถ้าเราจัดการสลับเฟสเพื่อให้ความไม่สมดุลย์ของแรงดันระหว่างสายลดลง จะทำให้การกระเพื่อมของแรงดันออกลดลงได้บ้าง ดังแสดงในรูปที่ 9 ข ซึ่งเราจะเห็นได้ว่าการกระเพื่อมของแรงดันออกจะลดลงเหลือ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

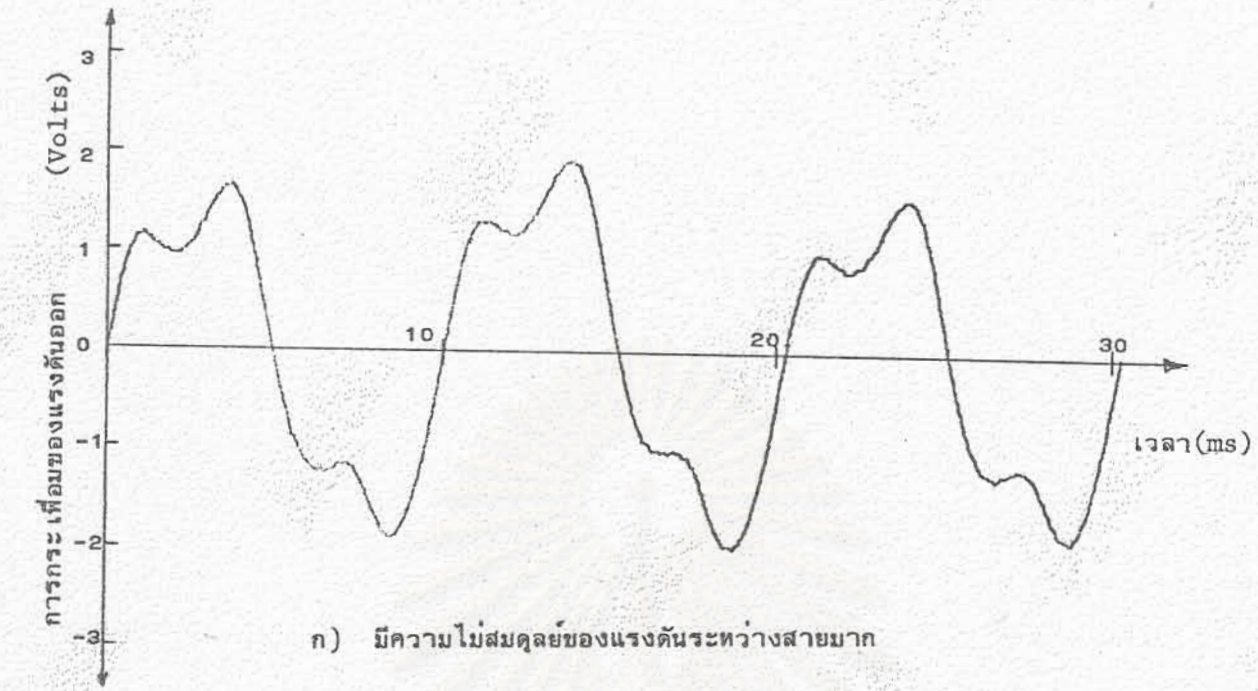


ก) รูปคลื่นของแรงดันออกของวงจรดัดไฟ

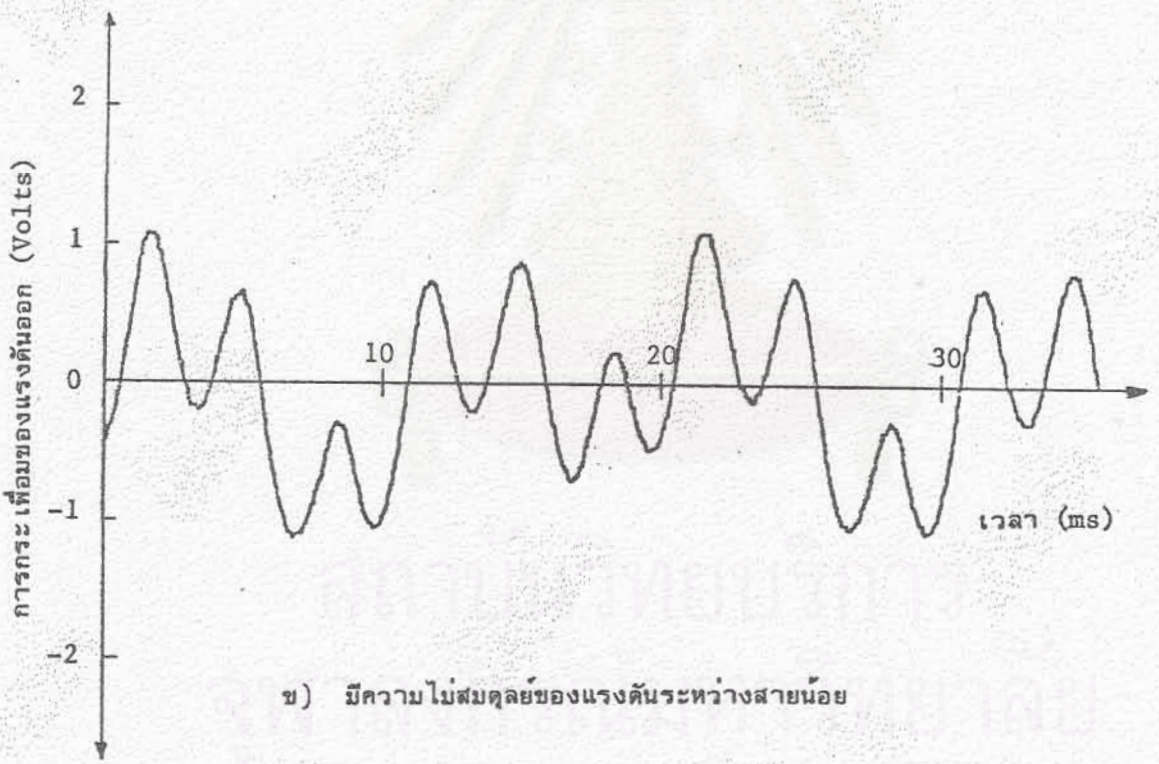


ข) แรงดันออกของเครื่องจ่ายไฟตรง

รูปที่ 8 รูปคลื่นของแรงดันออกของวงจรดัดไฟ (ก) และแรงดันออกของเครื่องจ่ายไฟตรง (ข) เมื่อกระแสโหลด เท่ากับ 10 แอมป์ แรงดันออกเท่ากับ 500 โวลท์



ก) มีความไม่สมดุลย์ของแรงดันระหว่างสายมาก

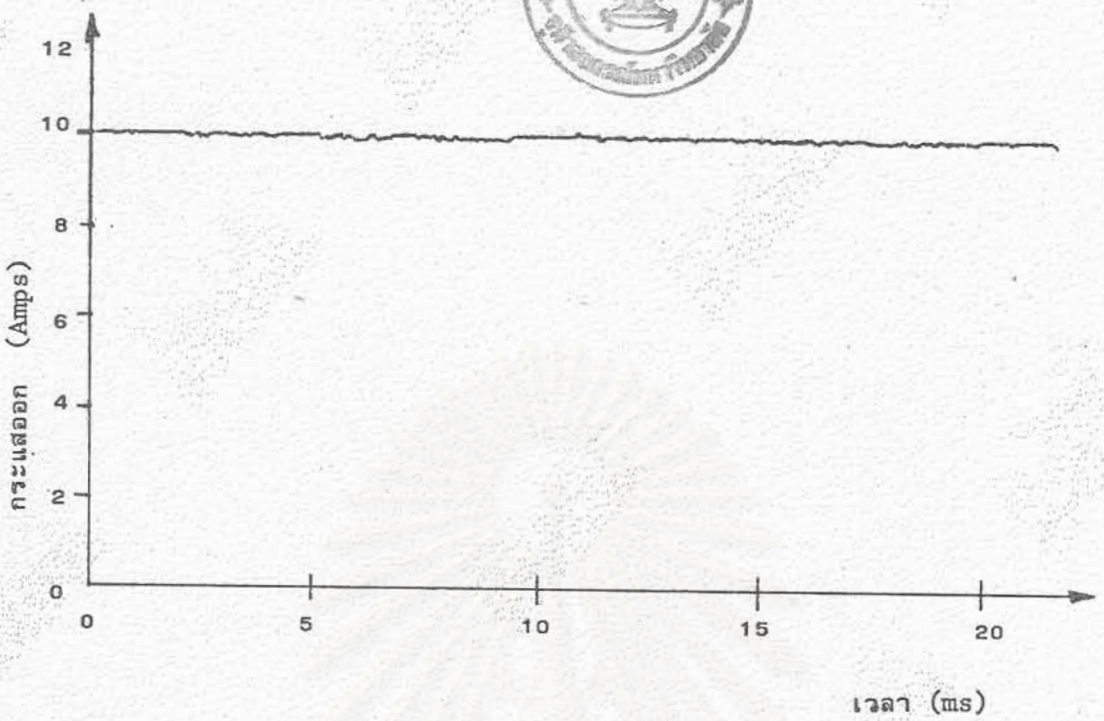


ข) มีความไม่สมดุลย์ของแรงดันระหว่างสายน้อย

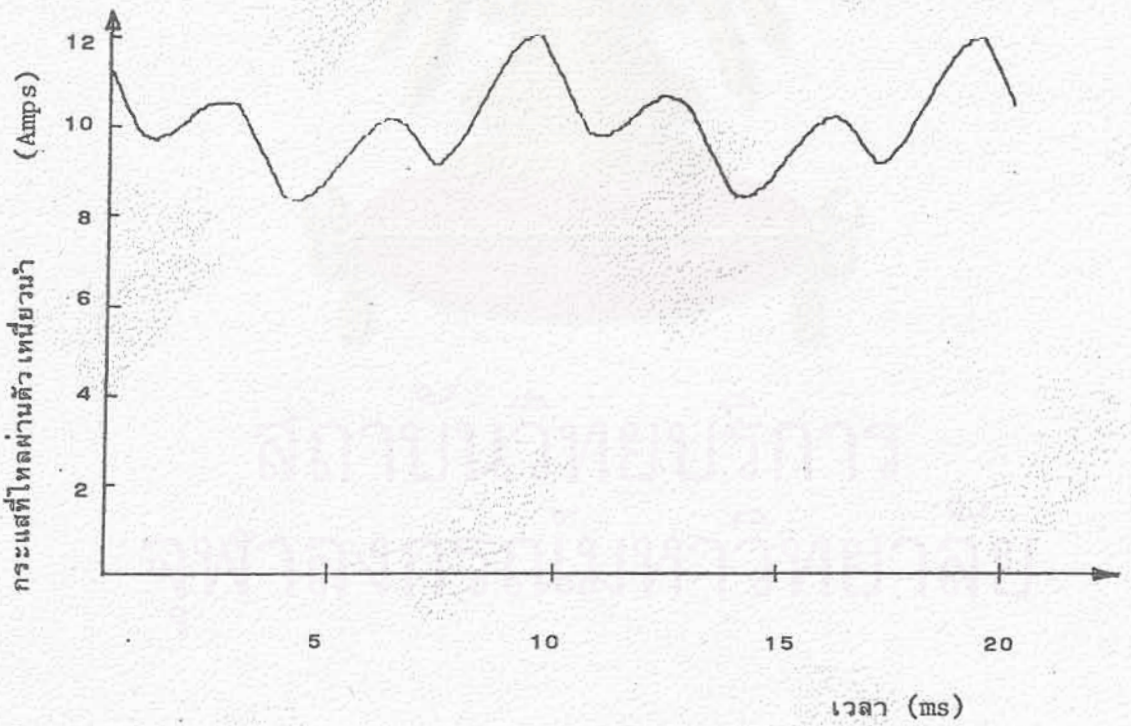
รูปที่ 9 รูปคลื่นของการกระเพื่อมของแรงดันออกของเครื่องจ่ายไฟตรง เมื่อแรงดันออกเท่ากับ 500 โวลท์ และกระแสโหลด 10 แอมป์ ในรูป ก มีความไม่สมดุลย์ของแรงดันระหว่างสายมาก ส่วนในรูป ข มีความไม่สมดุลย์ของแรงดันระหว่างสายน้อยลง

ประมาณ 0.5 % ค่าเปอร์เซนต์การกระเพื่อมของแรงดันออกนี้จะเปลี่ยนแปลงกับค่าแรงดันออกและกระแสโหลดน้อย

สำหรับรูปคลื่นของกระแสโหลดของเครื่องจ่ายไฟตรงจะมีลักษณะคล้ายกับรูปคลื่นของแรงดันออกของเครื่องจ่ายไฟตรง คือจะมีการกระเพื่อมของกระแสน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 10 ก ทั้งนี้เพราะ แรงดันออกของเครื่องจ่ายไฟตรงมีการกระเพื่อมน้อยมาก ส่วนกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองนั้นจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับกระแสโหลด แต่จะมีองค์ประกอบของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับร่วมอยู่ด้วยดังแสดงในรูปที่ 10 ข องค์ประกอบกระแสไฟฟ้ากระแสสลับนี้เกิดจากองค์ประกอบของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากวงจรดัดไฟ โดยจะมีขนาดขึ้นอยู่กับความถี่ ขนาดของแรงดันขององค์ประกอบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและขนาดของตัวเหนี่ยวนำดังได้กล่าวมาแล้ว องค์ประกอบของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่สำคัญ ซึ่งไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง จะได้แก่องค์ประกอบกระแสไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 100 Hz และ 300 Hz ดังแสดงในรูปที่ 11 ก ค่ายอดถึงยอดขององค์ประกอบกระแสไฟฟ้ากระแสสลับในกรณีที่มีความไม่สมดุลย์ของแรงดันระหว่างสายมากจะมีค่าเท่ากับ 4 A ขนาดของกระแสนี้จะลดลงได้ด้วยการลดความไม่สมดุลย์ของแรงดันระหว่างสายโดยการสลับเฟสอย่างเหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 11 ข ซึ่งเราจะเห็นได้ว่า ค่ายอดถึงยอดขององค์ประกอบกระแสไฟฟ้ากระแสสลับลดลงจาก 4 Amps เหลือเพียงประมาณ 2 Amps การลดลงของกระแสในตัวเหนี่ยวนำนี้เกิดจากการลดลงขององค์ประกอบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 100 Hz ในขณะที่กระแสที่เกิดจากองค์ประกอบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 300 Hz ยังมีค่าประมาณคงที่ดังในรูปที่ 11 ข



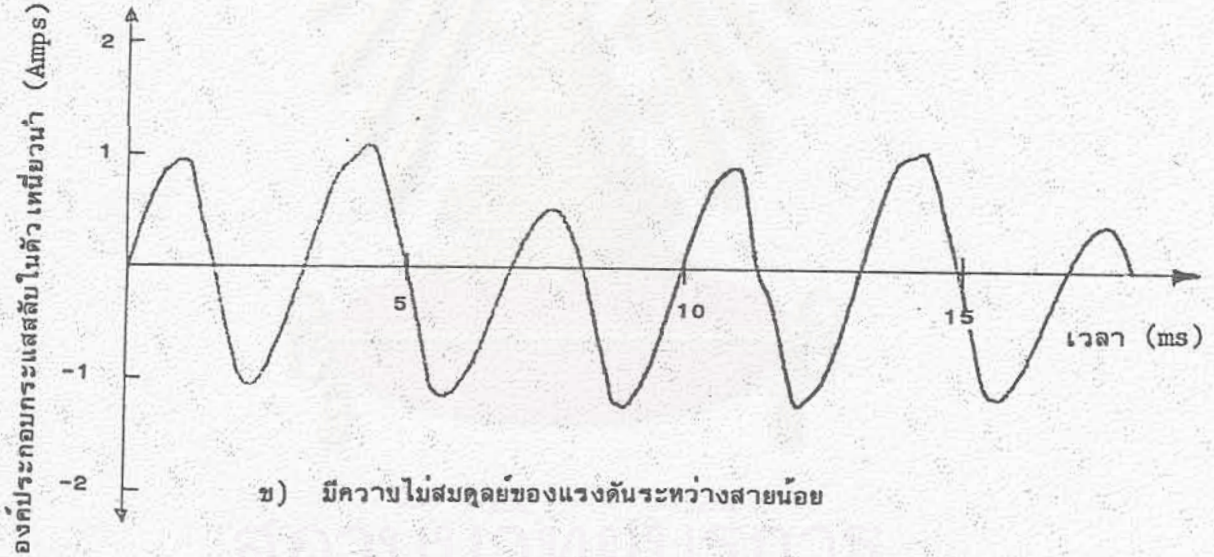
ก) รูปคลื่นของกระแสออกของเครื่องจ่ายไฟตรง



ข) รูปคลื่นของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ

รูปที่ 10 รูปคลื่นของกระแสด้านขาออกของเครื่องจ่ายไฟตรง (ก) และรูปคลื่นของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (ข) เมื่อแรงดันออกเท่ากับ 500 โวลท์ และกระแสออกเท่ากับ 10 แอมป์

ก) มีความไม่สมดุลย์ของแรงดันระหว่างสายมาก



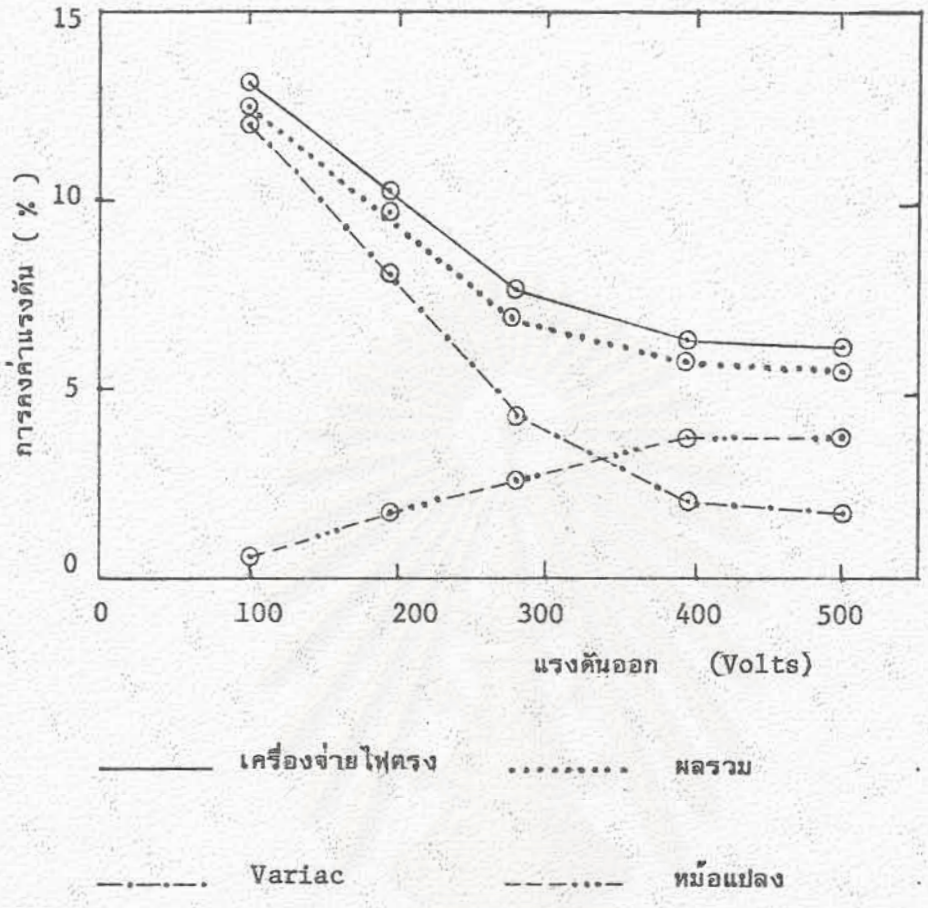
ข) มีความไม่สมดุลย์ของแรงดันระหว่างสายน้อย

รูปที่ 11 องค์ประกอบของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำ เมื่อแรงดันออกของเครื่องจ่ายไฟตรงเท่ากับ 500 โวลท์ และกระแสไหลดเท่ากับ 10 แอมป์ ในรูป ก เป็นกรณีที่มีความไม่สมดุลย์ของแรงดันระหว่างสายมาก ส่วนในรูป ข เป็นกรณีที่มีความไม่สมดุลย์ของแรงดันระหว่างสายน้อย

เนื่องจากขนาดขององค์ประกอบกระแสไฟฟ้ากระแสสลับในตัว เหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ตกคล่อมตัว เหนี่ยวนำ ซึ่งองค์ประกอบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ตกคล่อมตัว เหนี่ยวนำจะ เพิ่มขึ้นกับแรงดันออก ดังนั้นขนาดขององค์ประกอบกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่ไหลผ่านตัว เหนี่ยวนำจะมีค่าสูงสุด เมื่อแรงดันออก เท่ากับ 500 Volts คือมีค่าจากยอดถึงยอด เท่ากับ 4 A หรือ เท่ากับ 40 % ของกระแส เต็มพิกัดของ เครื่องจ่ายไฟตรง เนื่องจากขนาดขององค์ประกอบของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เปลี่ยนแปลงกับกระแสโหลดน้อย ดังนั้น องค์ประกอบกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่ไหลผ่านตัว เหนี่ยวนำจึง เปลี่ยนแปลงกับกระแสโหลดน้อยด้วย

ดังได้กล่าวมาแล้วว่าการกระ เพื่อมของกระแสโหลดมีค่าน้อยมาก ดังนั้นองค์ประกอบของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่ไหลผ่านตัว เหนี่ยวนำของวงจรกรองจะไหลผ่านตัว เก็บประจุของวงจรกรอง เกือบทั้งหมดทำให้ องค์ประกอบกระแสไฟฟ้ากระแสสลับในตัว เก็บประจุมีค่ามาก แต่อย่างไรก็ดี ค่ายังผลของกระแสดังกล่าวยังคงมีค่าต่ำ เมื่อ เทียบกับค่าสูงสุดขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับที่ตัว เก็บประจุที่ใช้จะรับได้ การที่ขนาดของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่ไหลผ่านตัว เก็บประจุมีค่าน้อยกว่าค่าสูงสุดของกระแสที่ตัว เก็บประจุจะรับได้ จะทำให้อายุการใช้งานของตัว เก็บประจุยาวขึ้น

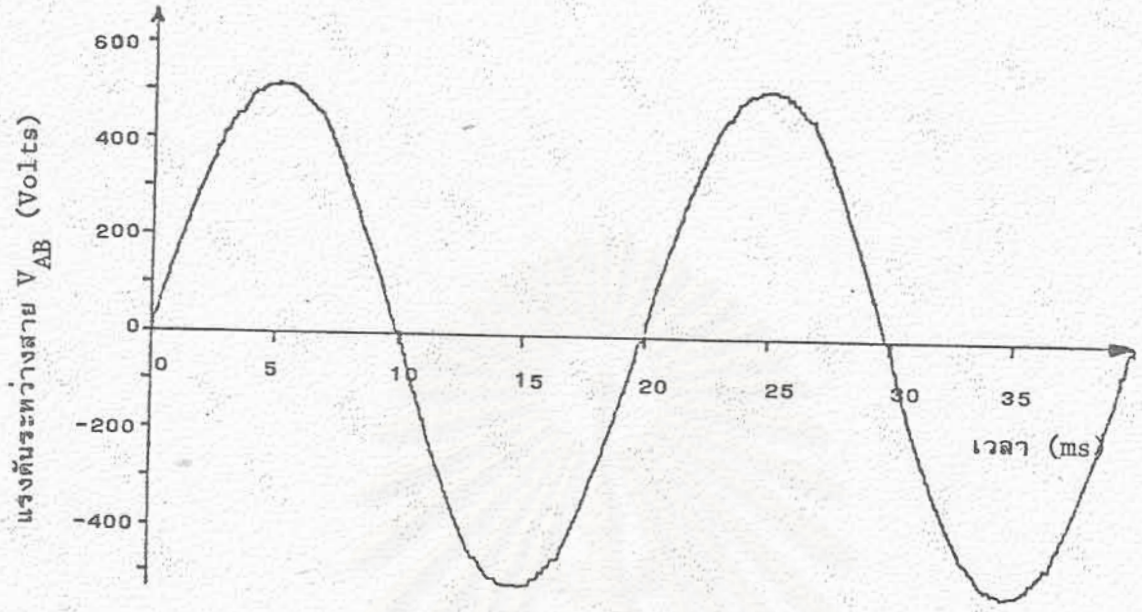
การวัดค่าการคงค่าแรงดัน (Voltage Regulation) ของ เครื่องจ่ายไฟตรง จะทำโดยการวัดการ เปลี่ยนแปลงของแรงดันออก เมื่อกระแสโหลด เพิ่มจาก 1 ถึง 10 Amps จากนั้น เราจะคำนวณหา ค่าการ เปลี่ยนแปลงของแรงดันออก เมื่อโหลด เพิ่ม จาก 0 ถึง 10 Amps เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาการคงค่าแรงดัน ของ เครื่องจ่ายไฟตรง ในรูปที่ 12 แสดงค่าการคงค่าแรงดันของ เครื่องจ่ายไฟตรง เมื่อแรงดันออกแปรอยู่ระหว่าง 100-500 Volts ซึ่งเราจะ เห็นได้ว่าการคงค่าแรงดันจะมีค่าต่ำสุด เมื่อแรงดันออกมีค่า 500 Volts คือ มีค่าประมาณ 6 % การคงคงค่าแรงดันจะ เพิ่มขึ้น เมื่อแรงดันออกของ เครื่องจ่ายไฟตรงลดลงโดยมีค่า เท่ากับ 13 % เมื่อแรงดันออกมีค่า 100 Volts ภาร เพิ่มขึ้นของค่าการคงค่าแรงดัน เมื่อแรงดันออกมีค่าลดลงนี้ เกิดจากการ เพิ่มขึ้น อย่างมากของค่า การคงค่าแรงดันของ Variac ในขณะที่การคงค่าแรงดันของหม้อแปลงแยกโดดลดลง ดังแสดงในกราฟรูป เดียวกัน การคงค่าแรงดันของ เครื่องจ่ายไฟตรงจะมีค่าสูงกว่าผลรวมของการคงค่าแรงดันของ Variac และหม้อแปลงแยกโดด เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งความแตกต่าง ของการคงค่าแรงดันทั้งสองนี้ เป็นผล เนื่องมาจากแรงดันตกคล่อมไดโอดของวงจรคัดไฟและแรงดันตกคล่อมความต้านทานของตัว เหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรกรอง ตลอดจนความต้านทานที่ใช้ในการวัดกระแสออก



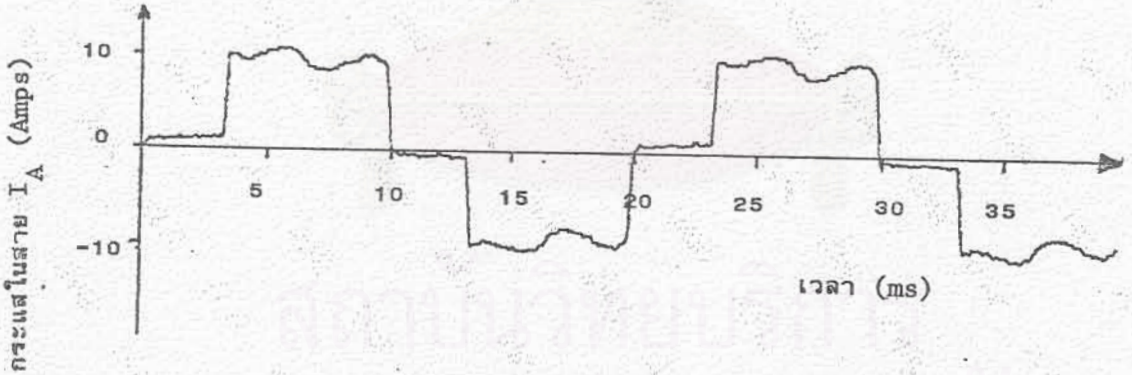
รูปที่ 12 การคงค่าแรงดัน (Voltage Regulation) ที่แรงดันออกของเครื่องจ่ายไฟตรงค่าต่าง ๆ กัน

4.1.2 <u>การทดสอบวงจรด้านขาเข้า</u>

แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับระหว่างสายด้านขาเข้าจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นแบบ sine ซึ่งมีค่ายอดเท่ากับ 537 V ความถี่ 50 Hz ดังในรูปที่ 13 ก ส่วนกระแสในสายจะมีลักษณะเป็น square wave ที่มีการกระเพื่อมร่วมอยู่ด้วย แต่จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับกระแสโหลดและมีช่วงการนำกระแสในแต่ละครึ่งคาบเท่ากับ 120 องศา ดังแสดงในรูปที่ 13 ข โดยเฟสของกระแสในสายจะตาม (lag) เฟสของแรงดันระหว่างสายอยู่ 30 องศา ซึ่งจะทำให้กระแสเฟสและแรงดันเฟสมีมุมเท่ากัน (inphase) ในรูปที่ 14 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของไดโอด 1 ตัว เมื่อแรงดันออกและกระแสออกของเครื่องจ่ายไฟตรงเท่ากับ 500 Volts และ 10 Amps ตามลำดับจะเห็นได้ว่า ไดโอดแต่ละตัวจะมีช่วงเวลานำกระแสในแต่ละคาบ 120 องศาและมีแรงดันย้อนกลับสูงสุดเท่ากับ 537 Volts

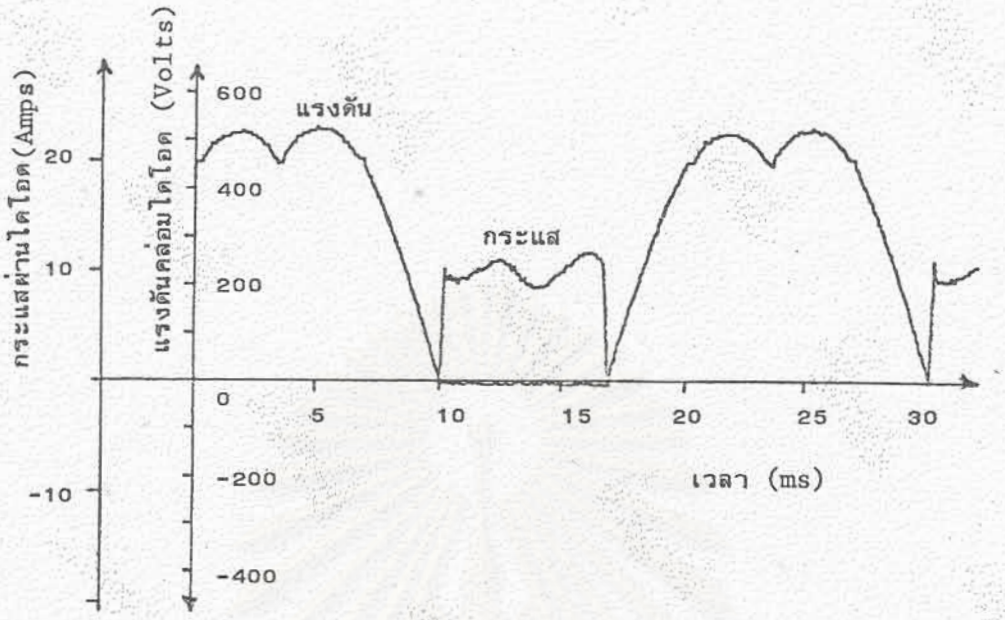


ก) แรงดันระหว่างสาย



ข) กระแสในสาย

รูปที่ 13 แรงดันระหว่างสาย (ก) และกระแสในสาย (ข) ด้านขาเข้าของเครื่องจ่ายไฟตรง



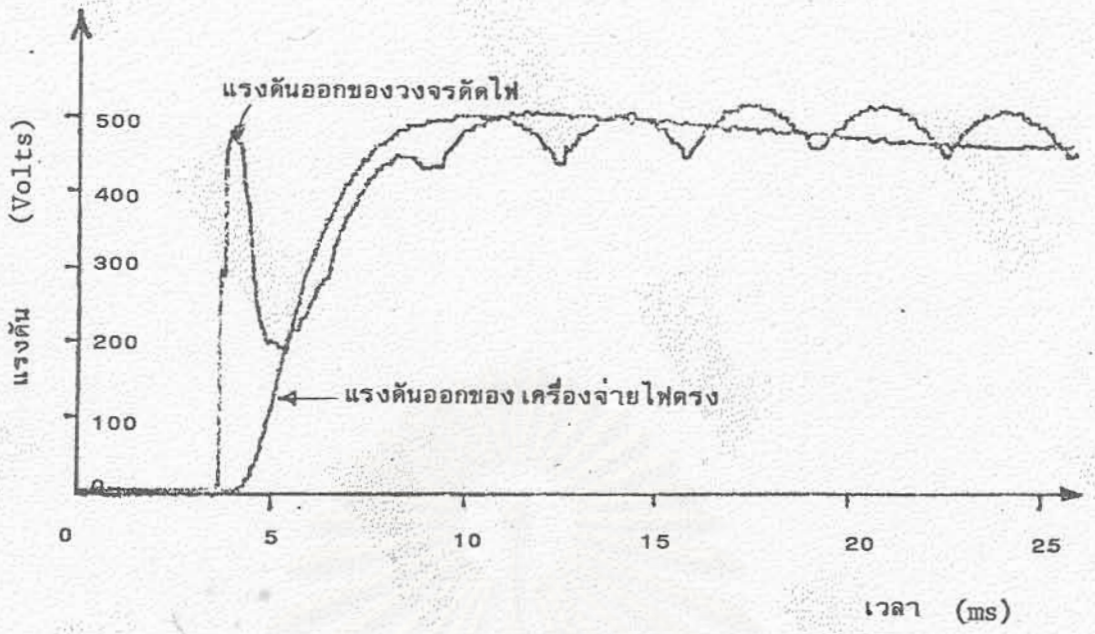
รูปที่ 14 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของไดโอดแต่ละตัว

สำหรับค่ายังผลของกระแส เข้าที่วัดด้วย moving iron ammeter จะมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากความแตกต่างกันของแรงดันในแต่ละ เฟส คือมีค่าเท่ากับ 8.1, 8.2 และ 8.7 Amps เมื่อกระแสออกเท่ากับ 10 Amps ซึ่งจากค่าดังกล่าวเราจะสามารถคำนวณหาค่าของ utilization factor ของหม้อแปลงได้เท่ากับ 0.912 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี 0.955 ความแตกต่างกันนี้สืบเนื่องมาจากกำลังสูญเสียของหม้อแปลงเป็นส่วนใหญ่

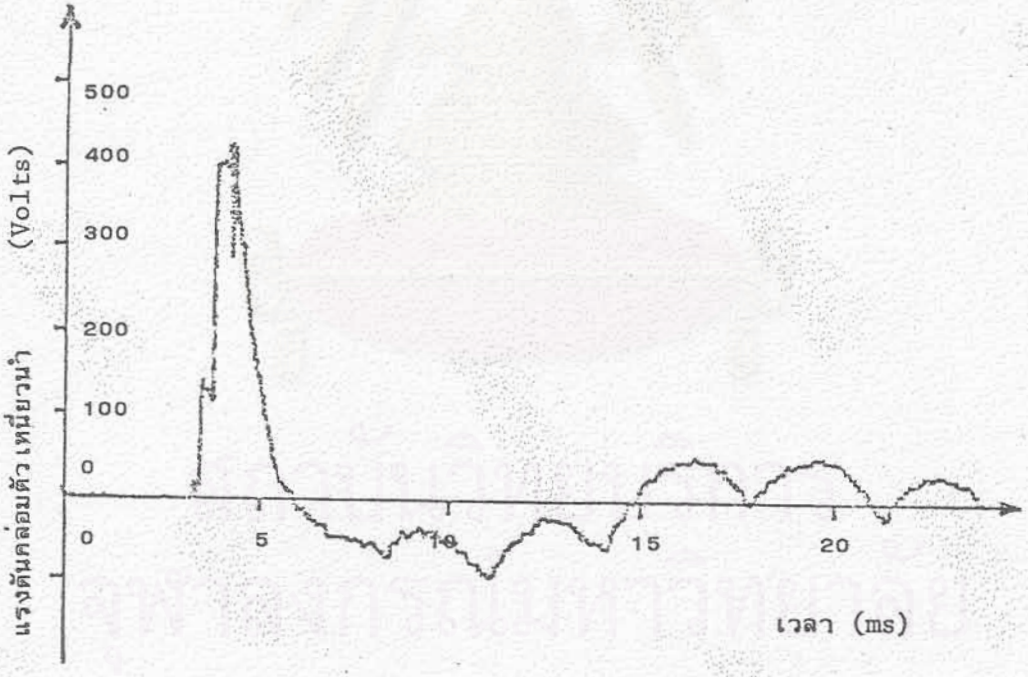
4.2 <u>การทดสอบในภาวะชั่วครู่</u>

4.2.1 <u>การทดสอบด้านขาออก</u>

เนื่องจากด้านขาออกมีวงจรกรองผ่านต่ำแบบ LC ซึ่งมีตัวเก็บประจุต่ออยู่กับด้านขาออกของเครื่องจ่ายไฟตรง ตัวเก็บประจุดังกล่าวจะทำให้ impedance ด้านขาออกของเครื่องจ่ายไฟตรงมีค่าต่ำสำหรับกรณีมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของโหลด แต่ขณะเดียวกันตัวเก็บประจุดังกล่าว ก็จะจำกัดการเพิ่มขึ้นของแรงดันออกในตอนเปิดเครื่องจ่ายไฟตรง ทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันอย่างมากระหว่างด้านขาออกของวงจรคัดไฟ และด้านขาออกของเครื่องจ่ายไฟตรง ดังแสดงในรูปที่15 ก ความแตกต่างของแรงดันทั้งสองส่วนใหญ่จะตกคล่อมตัวเหนี่ยวนำ ของวงจรกรองดังแสดงในรูปที่ 15 ข ตัวเหนี่ยวนำ

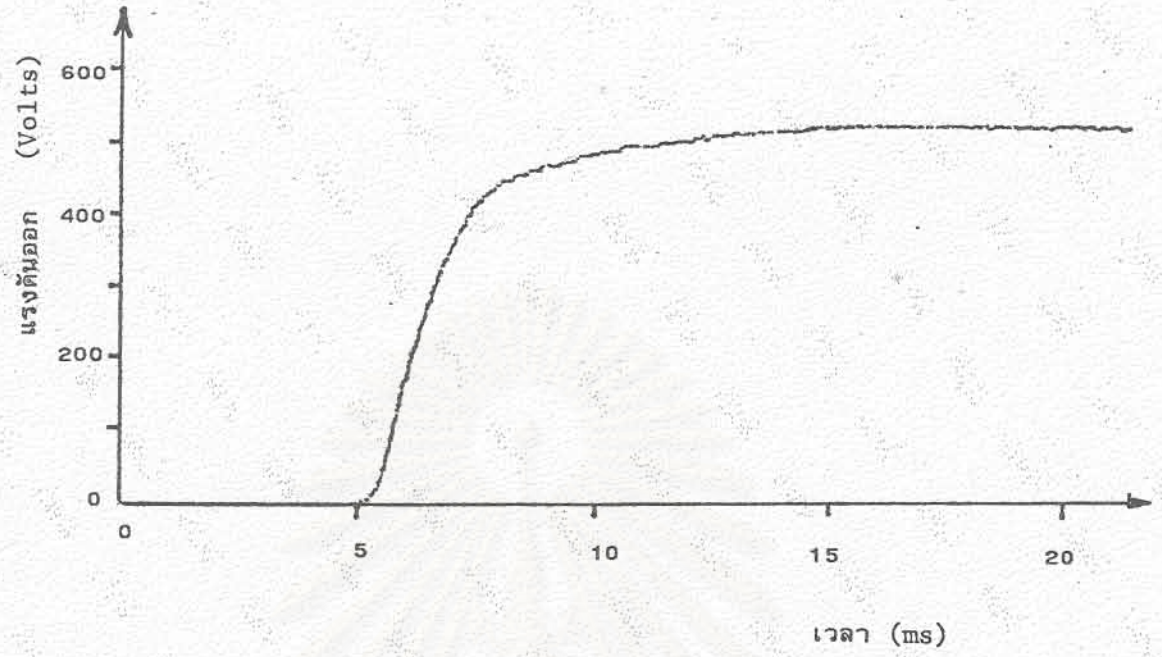


ก) แรงดันออกของวงจรกรองและแรงดันออกของวงจรดัดไฟ

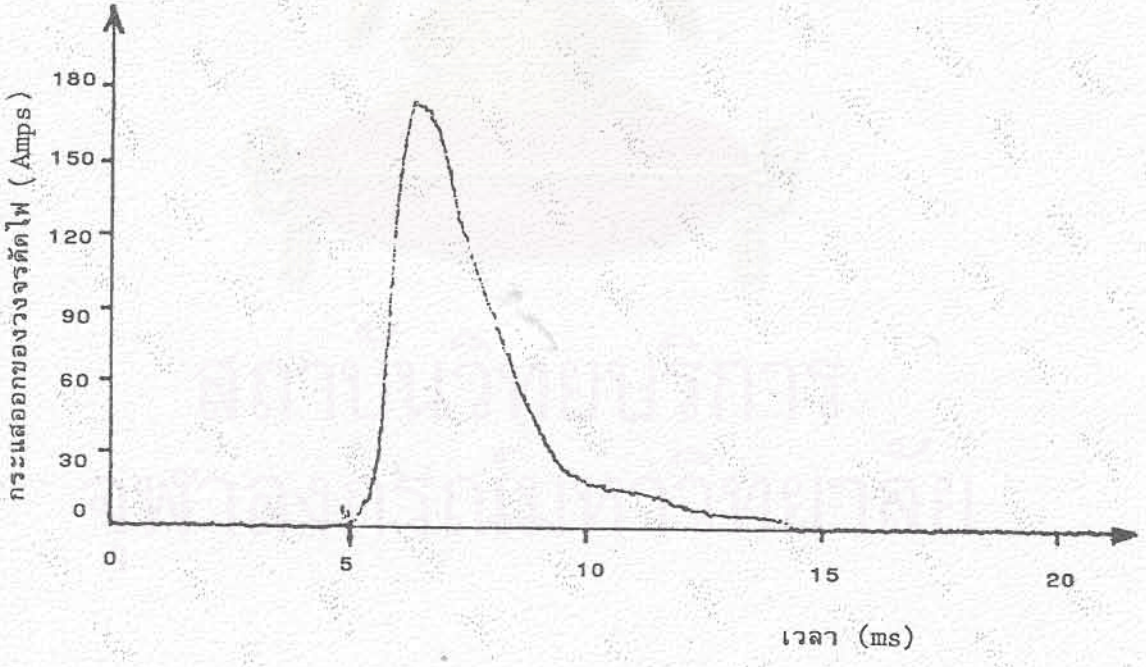


ข) แรงดันตกคล่อมตัว เหนี่ยวนำของวงจรกรอง

รูปที่ 15 แรงดันออกของวงจรดัดไฟและแรงดันออกของ เครื่องจ่ายไฟตรง (ก) และแรงดันตกคล่อมตัว เหนี่ยวนำของวงจรกรอง (ข) เมื่อแรงดันออก เท่ากับ 500 โวลท์ กระแสออก เท่ากับ 10 แอมป์



ก) แรงดันออกของ เครื่องจ่ายไฟตรง เมื่อไม่มีโหลด



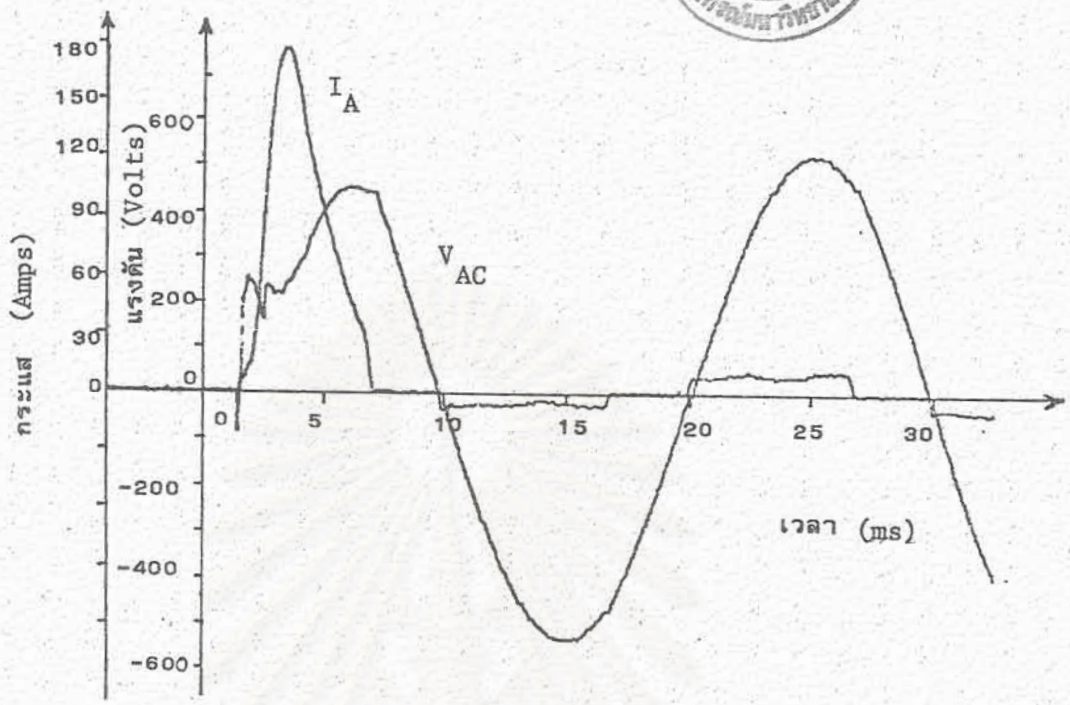
ข) กระแสออกของวงจรตัดไฟ เมื่อไม่มีโหลด

รูปที่ 16 แรงดันออกของ เครื่องจ่ายไฟตรง (ก) และกระแสออกของวงจรตัดไฟ (ข) ในตอน เปิด เครื่องโดยแรงดัน เข้ามีค่า เท่ากับ 380 Volts

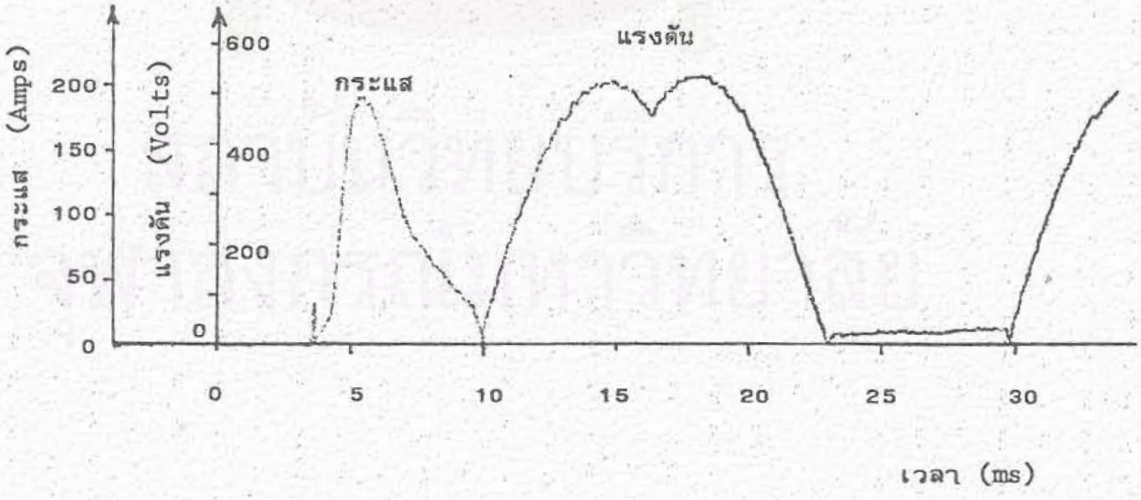
ของวงจรกรองจะทำหน้าที่จำกัดอัตราการ เพิ่มขึ้นของกระแสที่ใช้ในการประจุตัว เก็บประจุให้มีแรงดัน เท่ากับค่า เฉลี่ยของแรงดันออกของวงจรดัดไฟ แต่อย่างไรก็ดี เมื่อกระแสของตัว เหนี่ยวนำ เพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่งจะทำให้ตัว เหนี่ยวนำของวงจรกรองอิ่มตัว และค่าความ เหนี่ยวนำของตัว เหนี่ยวนำจะลดลง และทำให้อัตราการ เพิ่มขึ้นของกระแสออกของวงจรดัดไฟ เพิ่มขึ้น เนื่องจากการ เพิ่มขึ้นของกระแสออกของวงจรดัดไฟจะถูกจำกัดด้วย ความ เหนี่ยวนำของตัว เหนี่ยวนำของวงจรกรองที่อิ่มตัว ความ เหนี่ยวนำของหม้อแปลง variac และสายซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่า เล็กกว่าความ เหนี่ยวนำของตัว เหนี่ยวนำของวงจรกรองที่ยังไม่อิ่มตัว กระแสออกของวงจรดัดไฟที่ใช้ในการประจุ ตัว เก็บประจุจะทำให้แรงดันของตัว เก็บประจุซึ่งก็คือแรงดันออกของ เครื่องจ่ายไฟตรงสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 16 ก การ เพิ่มขึ้นของแรงดันออกจะทำให้แรงดันตกคล่อมตัว เก็บประจุลดลง และกลับทิศในที่สุด ซึ่งจะทำให้กระแสของตัว เหนี่ยวนำลดลง ดังแสดงในรูปที่ 16 ข ซึ่งเราจะ เห็นได้ว่ากระแสออกของวงจรดัดไฟจะมีค่ายอดประมาณ 180 Amps ซึ่งสูงกว่า กระแสพิกัดของ เครื่องจ่ายไฟตรงมาก ค่ายอดของกระแสออกของวงจรดัดไฟจะ เพิ่มตามกระแสโหลดเล็กน้อย แต่จะ เพิ่มขึ้นมาก เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและขนาดของตัว เก็บประจุของวงจรกรอง เพิ่มขึ้น และลดลง เมื่อค่าของความ เหนี่ยวนำของหม้อแปลง variac สายและตัว เหนี่ยวนำของวงจรกรอง เพิ่มขึ้น จากผลดังกล่าวจะ เห็นได้ว่าในตอน เปิด เครื่องถ้าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านขา เข้ามีค่าสูง ไดโอดของวงจรดัดไฟจะได้รับกระแส surge สูงมาก ดังนั้นในการ เลือกขนาดไดโอดของวงจรดัดไฟ เราจะต้องคำนึงถึงขนาดของกระแส surge ในตอน เปิด เครื่องด้วย ถ้า เราต้องการให้สามารถ เปิด เครื่องโดยมีแรงดัน เข้าสูงได้ นอกจากนี้ในการออกแบบตัว เหนี่ยวนำ ของวงจรกรองนั้น ฉนวนของตัว เหนี่ยวนำจะต้องทนแรงดันสูงได้ เนื่องจากจะมีแรงดันขนาดพอ ๆ กับแรงดัน เข้าของ เครื่องจ่ายไฟตรงตกคล่อมตัว เหนี่ยวนำในตอน เปิด เครื่องดังแสดงในรูปที่ 15 ข

4.2.2 <u>การทดสอบด้านขา เข้า</u>

รูปที่ 17 แสดงรูปคลื่นของกระแสในสายและแรงดันระหว่างสายทางด้านขา เข้าของ เครื่องจ่ายไฟตรง ในตอน เปิด เครื่องซึ่ง เราจะ เห็นได้ว่า ในครึ่งคาบแรกของการนำกระแสจะมีกระแส surge ที่สูง เช่น เดียวกันกับกระแสออกของวงจรดัดไฟ โดยมีช่วงกว้างของ pulse



รูปที่ 17 กระแสในสายและแรงดันระหว่างสายทางด้านขาเข้าของเครื่องจ่ายไฟตรงในตอนเปิดเครื่อง



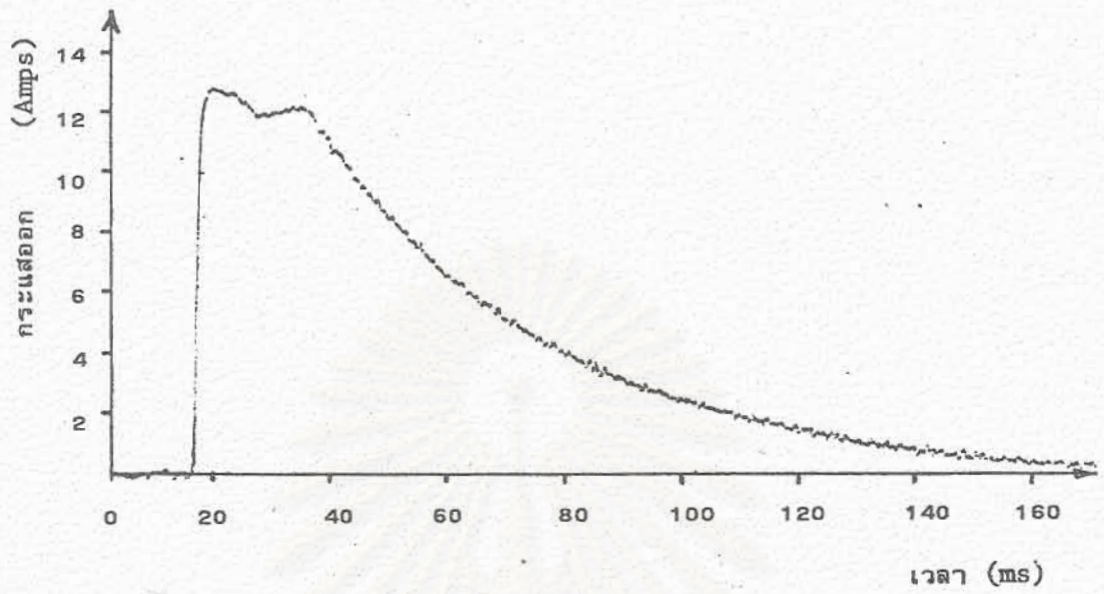
รูปที่ 18 กระแสและแรงดันของไดโอดในตอนเปิดเครื่องจ่ายไฟตรง

ประมาณ 5 ms สำหรับแรงดันระหว่างสายก็จะมีการเพี้ยนและลดขนาดลงในครึ่งคาบแรกของการนำกระแสเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากแรงดันตกคล่อม impedance ของสาย ส่วนรูปที่ 18 แสดงกระแสและแรงดันของไดโอด 1 ตัว ในตอนเปิดเครื่อง เราจะเห็นได้ว่าในครึ่งคาบแรกของการนำกระแสไดโอดจะต้องรับกระแส surge ที่มีค่าสูงมาก ซึ่งเป็นสิ่งที่เราจะต้องคำนึงถึงในการเลือกขนาดของไดโอด ดังได้กล่าวมาแล้ว

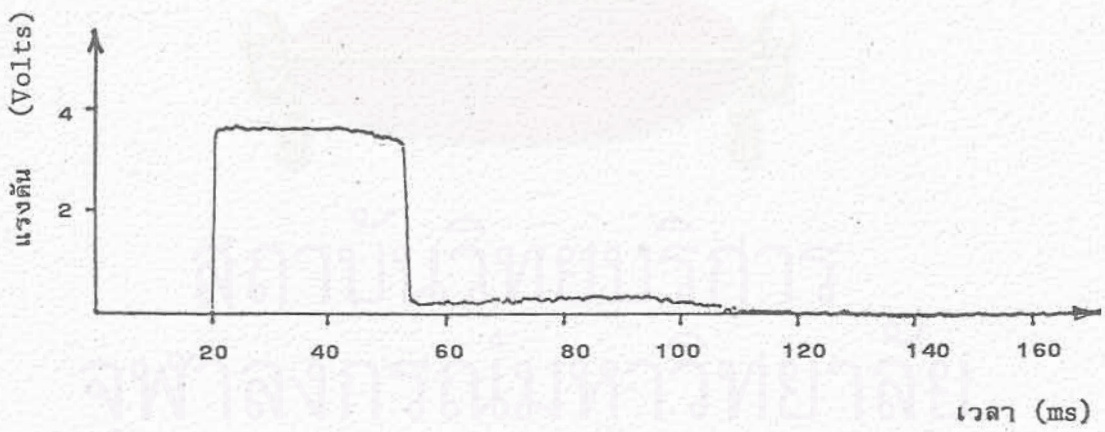
4.3 <u>การทดสอบวงจรป้องกัน</u>

การทดสอบวงจรป้องกันจะประกอบด้วยการทดสอบระบบป้องกันกระแสเกินและระบบป้องกันอันตรายจากเฟสหาย การทดสอบระบบป้องกันกระแสเกินแบบอิเล็กทรอนิกส์ จะทำโดยการตั้งกระแสโหลดไว้ที่ 125 % เพื่อให้สูงกว่าค่ากระแสอ้างอิง คือกระแสพิกัดของเครื่องจ่ายไฟตรง (10 Amps) แรงดันออกของเครื่องจ่ายไฟตรงจะถูกตั้งไว้ให้มีค่า 500 Volts ที่กระแสโหลด 10 A ก่อนต่อโหลด 125 % เข้ากับ เครื่องจ่ายไฟตรง เครื่องจ่ายไฟตรงจะไม่มีโหลดซึ่งทำให้แรงดันออกมีค่า 556 Volts เมื่อเราต่อโหลดที่ตั้งไว้เข้ากับเครื่องจ่ายไฟตรงทันทีทำให้กระแสโหลดของเครื่องจ่ายไฟตรงเพิ่มขึ้นสู่ค่าที่ตั้งไว้ ดังแสดงในรูปที่ 19 ก. เมื่อกระแสออกของเครื่องจ่ายไฟตรงมีค่าสูงกว่ากระแสพิกัดที่ตั้งไว้เกิน 3 ms วงจรตรวจจับกระแสเกินจะส่งสัญญาณออกไปควบคุมการตัดวงจรของ magnetic contactor ดังแสดงในรูปที่ 19 ข magnetic contactor จะใช้เวลาประมาณ 20 ms ในการตัดวงจรซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวกระแสออกจะมีค่าประมาณคงที่ เนื่องจากเราตัดวงจรเฉพาะด้านขาเข้าโดยไม่ได้ตัดโหลดออกจากเครื่องจ่ายไฟตรง ดังนั้น เมื่อ magnetic contactor ตัดวงจรประจุในตัวเก็บประจุของวงจรกรองจะถูก discharge ผ่านโหลดทำให้แรงดันออกและกระแสออกของเครื่องจ่ายไฟตรงลดลงแบบ exponential ดังแสดงในรูปที่ 19 ก ความเร็วในการลดลงของกระแสและแรงดันออกจะขึ้นอยู่กับค่าคงตัวเวลา (time constant) ซึ่งเป็นผลคูณของค่าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง และค่าความต้านทานของโหลดของเครื่องจ่ายไฟตรง

เนื่องจากการตอบสนองของวงจรป้องกันกระแสเกินแบบอิเล็กทรอนิกส์เร็วกว่า Thermal overload relay มาก ดังนั้นทุกครั้งที่กระแสโหลดเกินพิกัด วงจรป้องกันกระแสเกินแบบอิเล็กทรอนิกส์จะทำงานก่อนทุกครั้ง Thermal overload relay จะทำงานก็ต่อเมื่อเกิดกระแสเกินพิกัด และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไม่ทำงานเท่านั้น โดยจะมีเวลาในการตอบสนองขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสที่เกินพิกัด ดังแสดงในรูปที่ 7 สำหรับการทดสอบวงจรป้องกันอันตราย เนื่องจากเฟสหายนั้น จะทำโดยการดัดเฟสใดเฟสหนึ่งของวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ



ก กระแสออกของเครื่องจ่ายไฟตรง เมื่อ เกิดกระแส เกินพิกัด



ข) สัญญาณควบคุมการตัดวงจร

รูปที่ 19 กระแสออกของเครื่องจ่ายไฟตรง (ก) และสัญญาณควบคุมการตัดวงจรของ magnetic contactor (ข)

ด้านขาเข้า ซึ่งเราพบว่าทุกครั้งที่มีเฟสใดเฟสหนึ่งถูกตัด จะทำให้ magnetic contactor ตัดวงจรไฟเลี้ยงของเครื่องจ่ายไฟตรงเสมอ

5. <u>การอภิปรายผลและสรุป</u> (Discussion and Conclusion)

จากการทดสอบการใช้งานจะเห็นได้ว่า เครื่องจ่ายไฟตรงที่สร้างขึ้นสามารถจ่ายกระแสและแรงดันได้ตามที่กำหนด โดยสามารถปรับระดับแรงดันออกได้อย่างต่อเนื่องระหว่าง 0 ถึง 500 Volts และจ่ายกระแสออกได้สูงสุด 10 Amps คือมีกำลังออกเท่ากับ 5 kw โดยมีเปอร์เซนต์การกระเพื่อมของแรงดันออกประมาณคงที่ตลอดช่วงของกระแสและแรงดันออกของเครื่อง การกระเพื่อมของแรงดันออกส่วนใหญ่จะเกิดจากผลขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 100 Hz อันเป็นผลมาจากความไม่สมดุลย์ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แทนที่จะเป็นการกระเพื่อมของแรงดันความถี่ 300 Hz ซึ่งเป็นการกระเพื่อมของแรงดันออกของวงจร 3 เฟสแบบบริดจ์ทั่ว ๆ ไป ที่มีแรงดันเข้าสมดุลย์กันทั้งสามเฟส การที่การกระเพื่อมของแรงดันออกส่วนใหญ่เกิดจากความถี่ 100 Hz ทั้งที่การกระเพื่อมของแรงดันออกของวงจรตัดไฟที่ความถี่ 300 Hz มีค่ามากกว่าการกระเพื่อมของแรงดันออกของวงจรตัดไฟความถี่ 100 Hz ถึงประมาณ 3 เท่านั้นก็เนื่องจากการลดลงขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 300 Hz เมื่อผ่านวงจรกรองแบบ LC จะมากกว่า การลดลงขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 100 Hz ถึงประมาณ 9 เท่า เนื่องจากการกระเพื่อมของแรงดันออกมีค่าต่ำ องค์ประกอบกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่ไหลผ่าน ตัวเก็บประจุจึงมีค่าต่ำกว่าค่าสูงสุดขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับที่ตัวเก็บประจุจะรับได้มาก แต่อย่างไรก็ดี ตัวเก็บประจุของวงจรกรองจะทำให้เกิดกระแส surge ขึ้นในวงจรตัดไฟ ในตอนเปิดเครื่อง ถ้าแรงดันเข้าของวงจรตัดไฟมีค่าสูง ดังนั้น เราจะต้องเลือกไดโอดให้สามารถทนกระแส surge ดังกล่าวได้ด้วย เราสามารถลดขนาดของกระแส surge ได้โดยการลดขนาดของตัวเก็บประจุและเพิ่มขนาดของตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองแต่จะทำให้ราคาและน้ำหนักของวงจรกรองเพิ่มขึ้น นอกจากนี้แล้ว เราสามารถป้องกันไม่ให้เกิดกระแส surge ได้โดยค่อย ๆ เพิ่มแรงดันเข้าของวงจรตัดไฟจากค่าต่ำ ๆ

สำหรับอัตราการคงค่าแรงดันของเครื่องจ่ายไฟตรงจะมีค่าค่อนข้างสูง เนื่องจากไม่มีวงจรคงค่าแรงดัน คือมีค่า 6 % ที่แรงดันออก 500 Volts และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันออกของเครื่องจ่ายไฟตรงลดลง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอัตราการคงค่าแรงดันนั้น เกิดจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการคงค่าแรงดันของ variac

จากการวัดกระแสและแรงดันของ เครื่องจ่ายไฟตรงทั้งทางด้านขา เข้าและขาออก เราพบว่า วงจรตัดไฟแบบบริดจ์จะทำให้utilization factor ของหม้อแปลงมีค่าสูง คือมีค่า 0.915 แต่จะต่ำกว่า ค่าทางทฤษฎี คือ 0.955 ความแตกต่างนี้ เกิดจากกำลังสูญ เสียของหม้อแปลงซึ่งค่าทางทฤษฎีไม่ได้คำนึงถึง

เครื่องจ่ายไฟตรงที่สร้างขึ้นจะมีการแยก (isolated) วงจรด้านขาออกจากสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้หม้อแปลงทำให้ เครื่องจ่ายไฟตรงมีขนาด น้ำหนักและราคา เพิ่มขึ้น แต่การแยกวงจรด้านขาออก จากสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับ จะ เป็นการ เพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ใช้และเครื่องมือวัด ดังนั้น จึง เหมาะสำหรับงานทดลองในห้องปฏิบัติการวิจัย

เพื่อความปลอดภัยของ เครื่องจ่ายไฟตรงและความปลอดภัยของโหลด เครื่องจ่ายไฟตรงจะมีระบบป้องกันอันตราย เนื่องจาก เฟสหาย และระบบป้องกันกระแส เกินพิกัดแบบอิ เล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีการตอบสนองที่รวด เร็ว โดยมีระบบป้องกันกระแส เกินพิกัดที่ใช้ Thermal overload relay ไว้สำรองในกรณีที่ระบบป้องกันอิ เล็กทรอนิกส์ไม่ทำงาน ระบบป้องกันกระแส เกินพิกัดแบบอิ เล็กทรอนิกส์มีการตอบสนองที่ เร็วมาก ดังนั้น เพื่อป้องกันการตัดวงจร เนื่องจากสัญญาณรบกวน (nuisance tripping) เราจะมีวงจรหน่วง เวลา โดยจะสั่งตัดวงจร เฉพาะในกรณีที่กระแส เกินพิกัดนานกว่า 3 ms.ซึ่งการกระทำดังกล่าวทำให้ไม่มีปัญหาการตัดวงจร เนื่องจากสัญญาณรบกวน เลย อย่างไรก็ดี ถึงแม้ระบบป้องกันกระแส เกินพิกัดแบบอิ เล็กทรอนิกส์จะทำงานได้ เร็วแต่ความ เร็วในการตัดวงจรจะถูกจำกัดด้วย เวลาตอบสนองของ magnetic contactor ซึ่งมีค่าประมาณ 20 ms นอกจากนี้แล้ว เมื่อ magnetic contactor ตัดวงจร โหลดจะยังคงได้รับพลังงานที่ เก็บสะสมอยู่ในตัว เก็บประจุของวงจรกรอง ซึ่งปัญหานี้จะแก้ไขได้ด้วยการ เพิ่ม magnetic contactor ทางวงจรด้านขาออกของ เครื่องจ่ายไฟตรงถ้ามีความจำ เป็น

———— ooo○○○ooo ————

เอกสารอ้างอิง

1. Dewan, S. and Stawghan, A. (1975). Power Semiconductor Circuits, John Wiley & Sons, New York.

2. Bird, B.M. and King, K.G. (1983) An Introduction to Power Electronics, John Wiley & SonS, New York.

3. Lander, C.W. (1981) Power Electronics, Mc Graw-Hill Book Company (UK) Limited.

4. RIFA Capacitor 1983/1984.

รายการค่าใช้จ่าย

1. รายการครุภัณฑ์

ลำดับที่	วัน เดือน ปี	รายการ	จำนวนเงิน	
			บาท	ส.ต.
1	30 มค. 2529	หจก ประกายนคร เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า Voltac	9600.-	

2. รายการค่าใช้สอย

ลำดับที่	วัน เดือน ปี	รายการ	จำนวนเงิน	
			บาท	ส.ต.
1	8 สค.29	ไทยซีรีนเทรดดิ้ง ค่าถ่ายเอกสาร	33	25

รวมยอด 9,633.25 บาท

(เก้าพันหกร้อยสามสิบสามบาทยี่สิบห้าสตางค์)