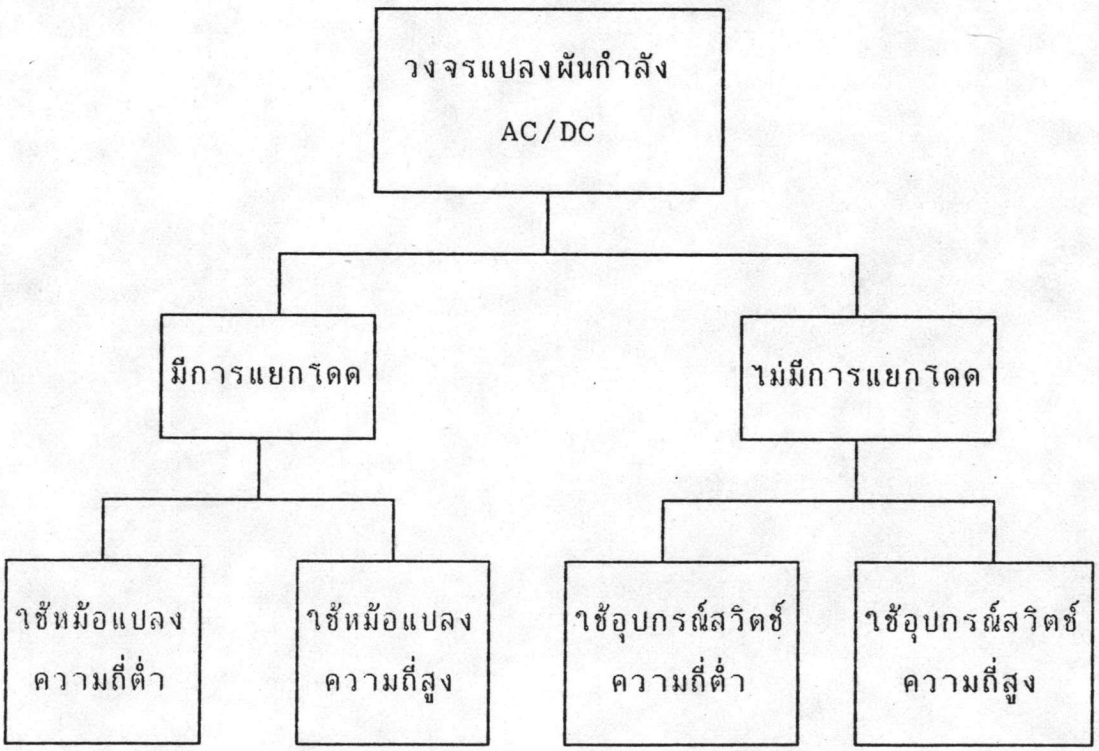
บทที่ 2

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

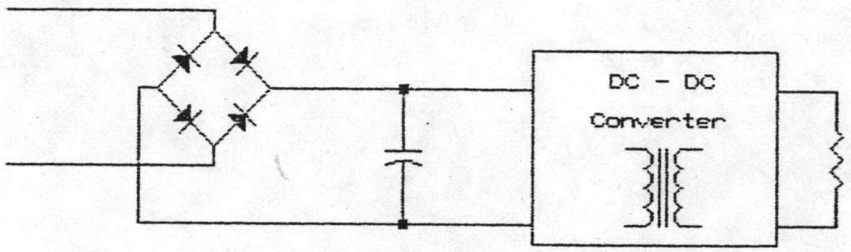
ชนิดของวงจรแปลงผันกำลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่นำมาใช้กับ UPS ในที่นี้จะทำหน้าที่แปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสามารถคงค่าตามที่ต้องการได้ เราสามารถแบ่งหลักการใหญ่ ๆ ของวงจรแปลงผันกำลังได้ดังรูปที่ 6



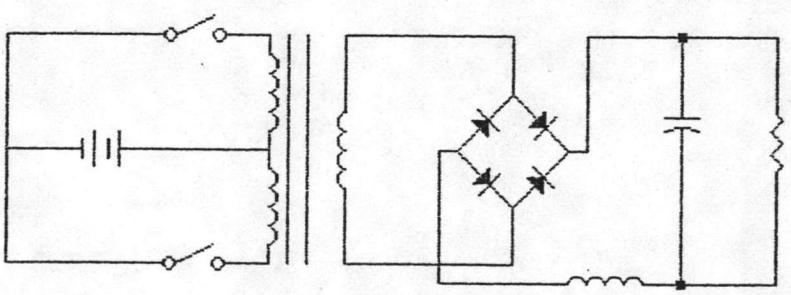
รูปที่ 6 ชนิดของวงจรแปลงผันกำลัง ฯ

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง แบบที่มีการแยกโดด(isolation)และใช้หม้อแปลงความถี่สูง ส่วนใหญ่จะใช้ไดโอดต่อเป็นบริดจ์ เพื่อแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง-กระแสตรงที่มีการแยกโดด เพื่อให้ได้ระดับแรงดันตามต้องการ และมีความปลอดภัยในการใช้งาน เช่น วงจรจ่ายไฟในเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 7

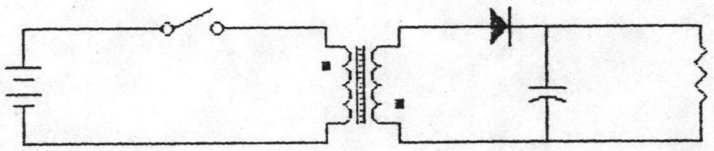


รูปที่ 7 วงจรแปลงผันที่มีการแยกโดดโดยใช้หม้อแปลงความถี่สูง

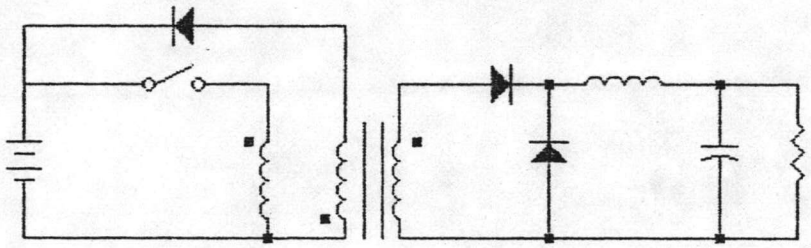
วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง-กระแสตรงที่มีการแยกโดดมีอยู่ด้วยกันหลายวงจร (6) เช่นวงจรพุชพูล(push-pull) (รูปที่ 8) วงจรฟลายแบ็ก(flyback) (รูปที่ 9) วงจรไปหน้า(forward) (รูปที่ 10) วงจรบริดจ์เต็ม(full-bridge) (รูปที่ 11) วงจรกึ่งบริดจ์(half-bridge) (รูปที่ 12) วงจรบริดจ์อสมมาตร(asymmetrical-bridge) (รูปที่ 13) ฯลฯ



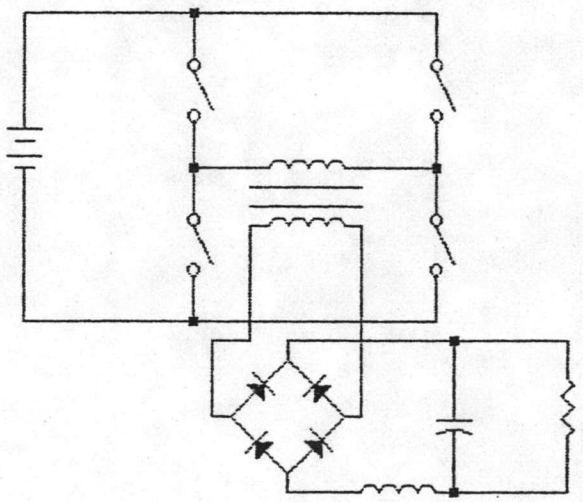
รูปที่ 8 วงจรพุชพูล



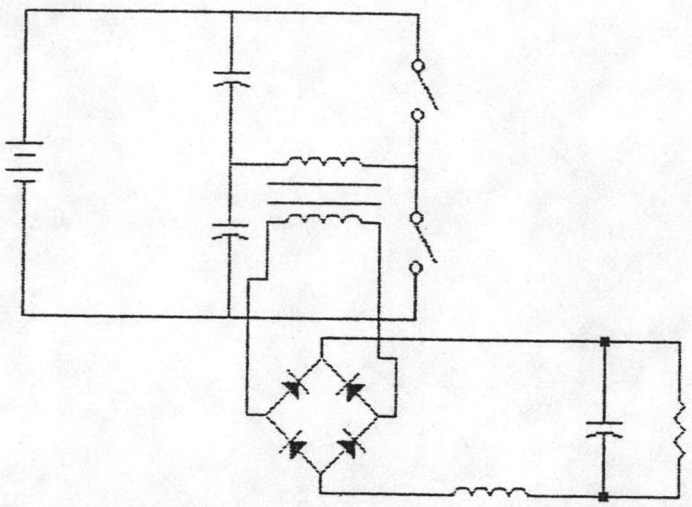
รูปที่ 9 วงจรฟลายแบ็ก



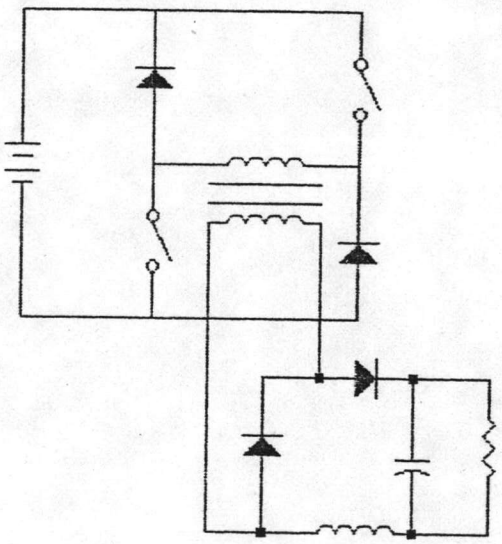
รูปที่ 10 วงจรไปหน้า



รูปที่ 11 วงจรบริดจ์เต็ม



รูปที่ 12 วงจรกึ่งบริดจ์

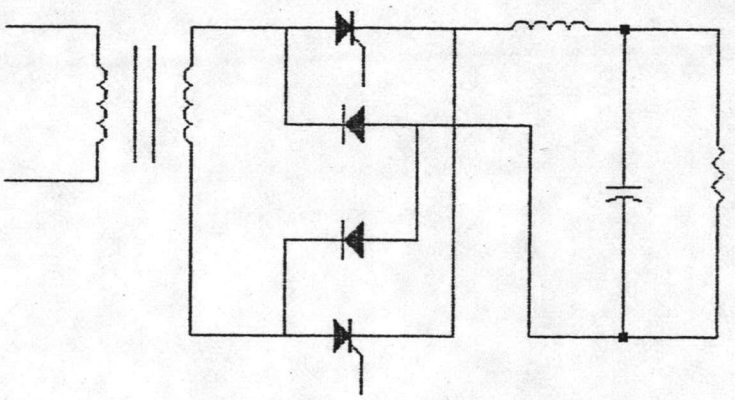


รูปที่ 13 วงจรบริดจ์อสมมาตร

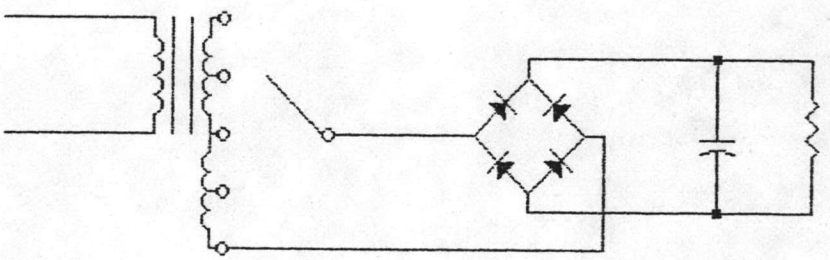
วงจรเหล่านี้ต่างก็มีข้อดีข้อเสียต่าง ๆ กัน (7) ทั้งในแง่ของขนาดของสวิตช์ และขนาดของหม้อแปลง เช่น วงจรไปหน้าต้องใช้หม้อแปลงที่มีขดลวดเพิ่มอีกหนึ่งขดเพื่อใช้ในการรีเซต(reset)กระแสแมกนิไตซิง วงจรบริดจ์เต็มสามารถใช้สวิตช์ที่ทนกระแสได้ต่ำกว่าวงจรกึ่งบริดจ์ที่กำลังเท่ากัน เพราะกำลังที่จ่ายออกมีค่าเท่ากับผลคูณของแรงดันคร่อมหม้อแปลงกับกระแส ในวงจรบริดจ์เต็ม แรงดันคร่อมหม้อแปลงมีค่าเท่ากับแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้ ส่วนในวงจร

กึ่งบริดจ์ แรงดันคร่อมหม้อแปลงมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้ ดังนั้นกระแสของวงจรกึ่งบริดจ์จึงมีค่าเป็น 2 เท่าของวงจรบริดจ์เต็ม ฯลฯ ด้วยเหตุนี้ ในการที่จะเลือกใช้โครงสร้างของวงจรใด เราจะต้องคำนึงถึงขนาดของอุปกรณ์ที่หาได้ว่าเหมาะกับขนาดของ UPS ที่ต้องการหรือไม่

สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกโดด โดยใช้หม้อแปลงความถี่ต่ำ วงจรที่ใช้ในการควบคุมแรงดันออกก็มีอยู่ด้วยกันหลายวงจร (4) เช่น วงจรควบคุมเฟส(phase control) ดังรูปที่ 14 วงจรเปลี่ยนจุดต่อแยก(tap)หม้อแปลง ดังรูปที่ 15 วงจรเฟอร์โรเรโซแนนซ์ (ferroresonance) รูปที่ 16 ฯลฯ

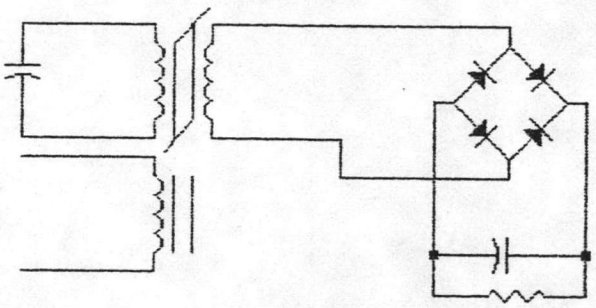


รูปที่ 14 วงจรควบคุมเฟสที่มีหม้อแปลงแยกโดด



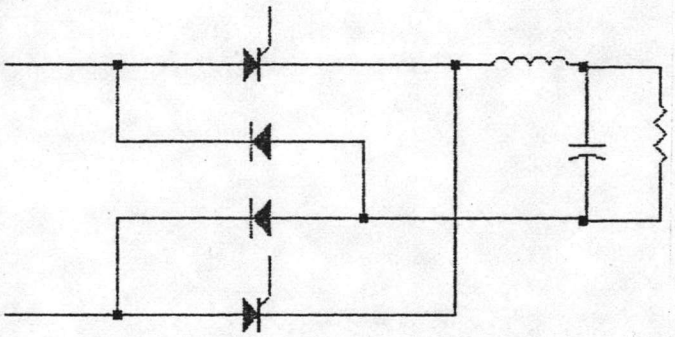
รูปที่ 15 วงจรเปลี่ยนจุดต่อแยกหม้อแปลง

016006

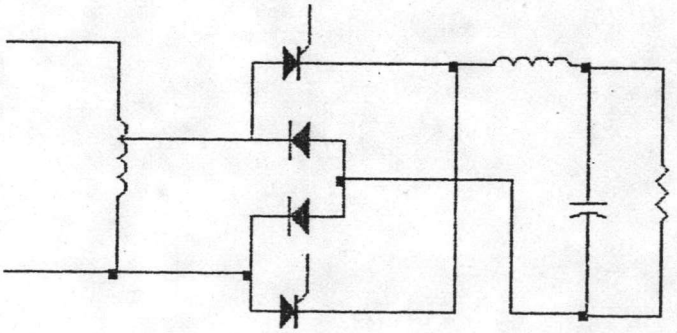


รูปที่ 16 วงจรเฟอร์โรเรโซแนนซ์

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีการแยกโดด และใช้อุปกรณ์สวิตช์ทำการสวิตช์ที่ความถี่ต่ำ มักใช้หลักการการควบคุมเฟส (4) ดังวงจรในรูปที่ 17 วงจรชนิดนี้อาจจะเพิ่มหม้อแปลงเพื่อการลดแรงดันดังในรูปที่ 18

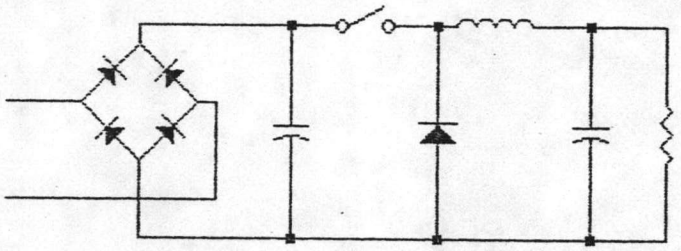


รูปที่ 17 วงจรควบคุมเฟส



รูปที่ 18 วงจรควบคุมเฟสแบบมีหม้อแปลงลดแรงดัน

สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีการแยกโดดและใช้อุปกรณ์สวิตช์ที่ความถี่สูงนั้น วงจรส่วนใหญ่จะใช้ไดโอดต่อเป็นบริดจ์ แปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง แล้วใช้วงจรหอนระดับ (buck) ลดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้ต่ำลงตามที่ต้องการ (6) ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 วงจรแปลงผันที่ไม่มีการแยกโดดและใช้สวิตช์ความถี่สูง

วงจรที่ใช้ในการสร้าง UPS ในที่นี้ก็คือวงจรในรูปที่ 19 เนื่องจาก UPS จำเป็นที่จะต้องมีการแยกโดดระหว่างวงจรขาเข้าและวงจรขาออก เพื่อให้สวิตช์โอนย้ายสามารถทำงานได้สะดวกขึ้น และเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งาน ถ้าหากใช้วงจรแยกโดดซึ่งสวิตช์ทำงานที่ความถี่สูงก็จะต้องใช้หม้อแปลงแกนเฟอร์ไรต์ที่มีราคาแพง แต่ถ้าใช้การแยกโดดที่ความถี่ต่ำก็สามารถใช้หม้อแปลงแกนเหล็กได้ ตำแหน่งในการต่อหม้อแปลงสามารถต่อได้ทั้งทางด้านเข้า (ต่อที่ด้านเข้าของวงจรแปลงผัน AC/DC) และด้านออก (ต่อระหว่างอินเวอร์เตอร์กับโหลด)ของ UPS ถ้าต่อทางด้านเข้าจะต้องใช้หม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่กว่าหม้อแปลงทางด้านออก ดังนั้นจึงเลือกต่อหม้อแปลงทางด้านออกของ UPS

ข้อกำหนดในการออกแบบ

การออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์และแบตเตอรี่ จำเป็นที่จะต้องทราบเงื่อนไขหลายๆอย่างดังต่อไปนี้

- ขนาดแรงดันขาเข้า
- ขนาดแรงดันขาออก
- ขนาดกำลัง

1. ขนาดแรงดันขาเข้า

ตามข้อกำหนด UPS จะต้องสามารถรับแรงดันขาเข้าระหว่าง 220 + 10% โวลต์ กับ 220- 10% โวลต์ได้ ซึ่งก็หมายถึงว่าวงจรนี้จะต้องรับแรงดันระหว่าง 198 ถึง 242 โวลต์ได้

2. ขนาดแรงดันขาออก

แรงดันขาออกจำเป็นจะต้องขึ้นอยู่กับ วงจรอินเวอร์เตอร์ แบตเตอรี่ และวงจรประจุแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ที่ใช้ให้แรงดัน 135 โวลต์ และวงจรประจุแบตเตอรี่ต้องการแรงดันตกคร่อมประมาณ 5 โวลต์ (จะกล่าวรายละเอียดในบทที่ 3) จึงเลือกใช้ระดับแรงดันประมาณ 140 โวลต์

3. ขนาดกำลัง

ขนาดกำลังของวงจรทอนระดับ ก็คือขนาดกำลังไฟฟ้าที่วงจรอินเวอร์เตอร์ใช้ไปรวมกับกำลังที่วงจรประจุแบตเตอรี่ใช้ไป ขนาดของกำลังไฟฟ้าที่วงจรอินเวอร์เตอร์ใช้คิดจาก

กำลังขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ = กำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์/ประสิทธิภาพ

กำลังขาออก = กำลังปรากฏ x ตัวประกอบกำลัง [1]

ตามข้อกำหนดกำลังปรากฏมีค่า 3 kVA ประสิทธิภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์สมมุติให้เท่ากับ 80 % และตัวประกอบกำลัง มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1

จากสมการ [1] เราได้

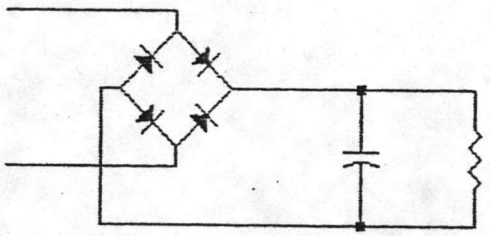
กำลังขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ = 3000 x 1/0.8

= 3750 วัตต์

ส่วนกำลังของวงจรประจุแบตเตอรี่มีค่าประมาณ 224 วัตต์ (กระแส 1.6 A x แรงดัน 140 โวลต์, ดูในบทที่ 3) ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกำลังที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ไม่ได้จ่ายโหลดสูงสุด คงที่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงตัดกำลังส่วนนี้ทิ้งไป

การออกแบบวงจรเรียงกระแส

ขนาดของอุปกรณ์ที่ต้องการทราบ คือ ตัวเก็บประจุ และขนาดของไดโอด ถ้ากำหนดให้การกระเพื่อมของแรงดันไฟตรงมีค่ายอดถึงยอดประมาณ 20 % ของค่าแรงดันไฟตรงสูงสุด



รูปที่ 20 วงจรเรียงกระแส

แรงดันขาเข้ามีค่า 220 Vac

แรงดันไฟตรงสูงสุด(ถ้าไม่มีการกระเพื่อม) = 220 x 1.414 = 310 Vdc

เราออกแบบโดยเลือกแรงดันกระเพื่อมเท่ากับ 20 % ดังนั้น

แรงดันกระเพื่อม V_r = 0.2 x 310 Vp-p

= 62 Vp-p

แรงดันไฟตรงเฉลี่ย = แรงดันไฟตรงสูงสุด - $V_r/2$

= 279 ≃ 280 Vdc

ประมาณค่าประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับเท่ากับ85 % ดังนั้น

กำลังไฟขาเข้า = กำลังไฟขาออก/ประสิทธิภาพ

= 3750/0.85

= 4412 วัตต์

ค่าตัวเก็บประจุ $C \simeq It/V_r$ [2]

โดยที่ I = กำลังไฟฟ้าขาเข้า/แรงดันขาเข้า

= 4412/280

= 15.8 A

t = 1/2 ของคาบของไฟฟ้ากระแสสลับ

= 10 ms

จากสมการ [2]

C = 15.8 x 0.01/62

= 2,548 μF

แต่ตัวเก็บประจุที่ใช้มีขนาดตัวละ 400 μF จึงเลือกใช้ค่า C = 2800 μF ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุ 400 μF เจ็ดตัวขนานกัน

ในการคำนวณหาขนาดของไดโอดเราจะต้องรู้อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายนั้นไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับสถานที่ติดตั้งของ UPS ในที่นี้สมมุติให้ UPS ต่อเข้ากับสายขนาด 2.5 mm^2 ยาว 10 เมตร ซึ่งต่อจากหม้อแปลงขนาด 250 kVA การติดตั้งบริเวณนี้ถือว่าเป็นตำแหน่งที่ใกล้แหล่งจ่ายมากที่สุดที่จะติดตั้งได้ ตำแหน่งนี้จะทำให้อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายต่ำที่สุด และเกิดกระแสผ่านไดโอดสูงสุด

ตารางที่ 1 หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันต่ำ 3 เฟส 4 สาย (8)

ขนาดหม้อแปลง (kVA)	กระแสพิกัด (A)	กำลังสูญเสีย (kW)	Zk (%)	ความต้านทาน (mΩ)	รีแอกแตนซ์ (mΩ)
250	360	3.250	4	8.32	24.19
315	455	3.900	4	6.30	19.30
400	580	4.600	4	4.60	15.32
500	720	5.500	4	3.52	12.32
630	910	6.500	6	2.62	15.01
800	1150	11.000	6	2.75	11.68
1000	1440	13.500	6	2.16	9.36
1250	1800	16.400	6	1.68	7.49
1600	2300	19.800	6	1.24	5.87
2000	2880	20.900	6	0.81	4.70

ตารางที่ 2 ความยาวของสายสูงสุด (m) ที่แรงดันตกในสายสูงสุดไม่เกิน 3 %(8)

220 V 1 ø 2 สาย 50 Hz PF. 90%							
กระแส (A)	ขนาดสาย (mm^2) เดินเกาะไปกับผนังตึกหรือไม้						
	2 x 35	2 x 25	2 x 16	2 x 10	2 x 6	2 x 4	2 x 2.5
15	370	250	189	121	62	41	30
20	277	187	142	90	47	31	
25	222	150	113	72	37		
30	185	125	94	60	31		
35	158	107	81	51	26		
40	138	93	71	45			
45	123	83	63	40			
50	111	75	56	36			
55	101	68	51				
60	92	62	47				
65	85	57	43				
70	79	53	40				
75	74	50					
80	69	46					
85	65	44					
90	61	41					
95	58	39					
100	55						

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 1 เราสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานและค่ารีแอก-แตนซ์ของหม้อแปลงได้เท่ากับ 8.32 mΩ และ 24.19 mΩ ตามลำดับ

จากตารางที่ 2 แรงดันในสายจะตกลง 3 % เมื่อสายยาว 30 เมตร กระแส 15 แอมแปร์ ตัวประกอบกำลัง 0.9 และอิมพีแดนซ์ของสายมีค่ารีแอก-แตนซ์:ความต้านทาน ประมาณ 1:6 (8) เพราะฉะนั้น

สายยาว 10 เมตร จะมีอิมพีแดนซ์ = แรงดัน x อัตราส่วนระยะทาง/กระแส

โดยที่

แรงดัน = 220 x 3 %

= 6.6 โวลต์

กระแส = 15 A

อัตราส่วนระยะทาง = 10/30

= 1/3

อิมพีแดนซ์สาย = 6.6 x (1/3)/15 Ω

= 146.67 mΩ

มุมของอิมพีแดนซ์ = $\tan^{-1}$ (รีแอกแตนซ์/ความต้านทาน)

= 9.46 องศา

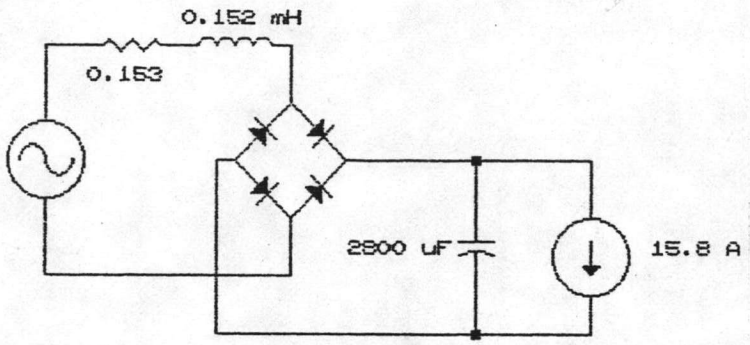
อิมพีแดนซ์สาย = 145 + j24 mΩ

อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย = อิมพีแดนซ์สาย + อิมพีแดนซ์หม้อแปลง

= 145 + j24 + 8.32 + j24.19

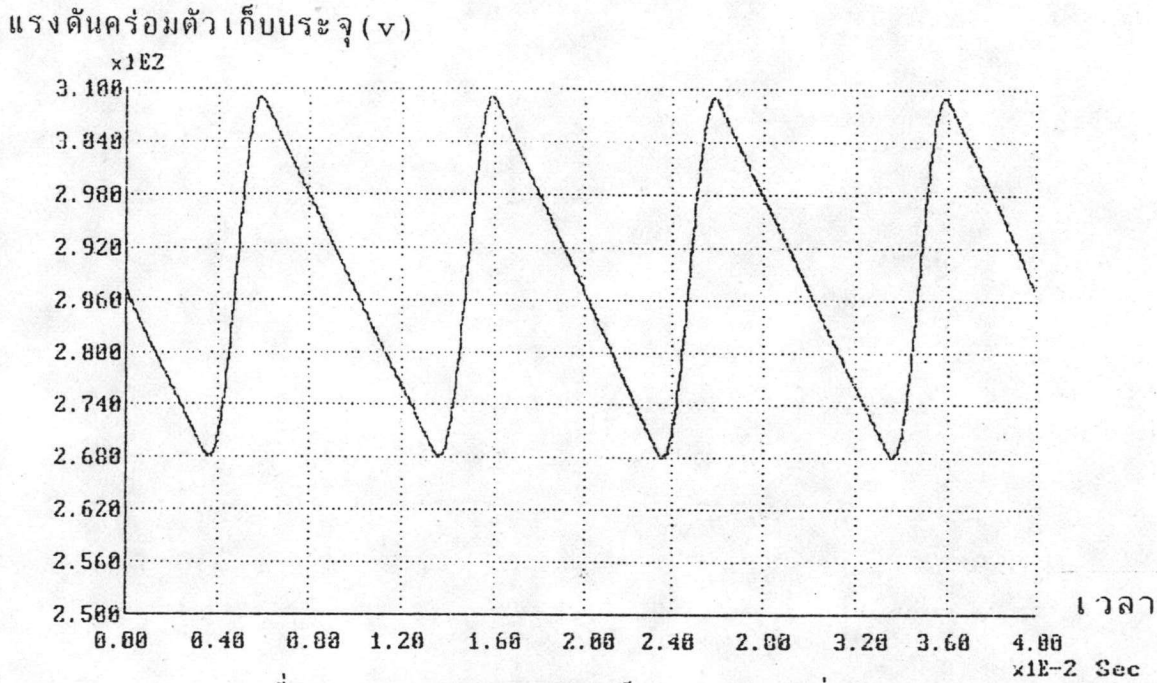
= 153 + j48 mΩ

เราใช้ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายค่านี้ เพื่อนำไปซีมูเลตวงจรเรียงกระแสดังรูปที่ 21 โดยใช้โปรแกรม LEC ของ รศ.ดร.เอกชัย ลีลารัศมี (9)



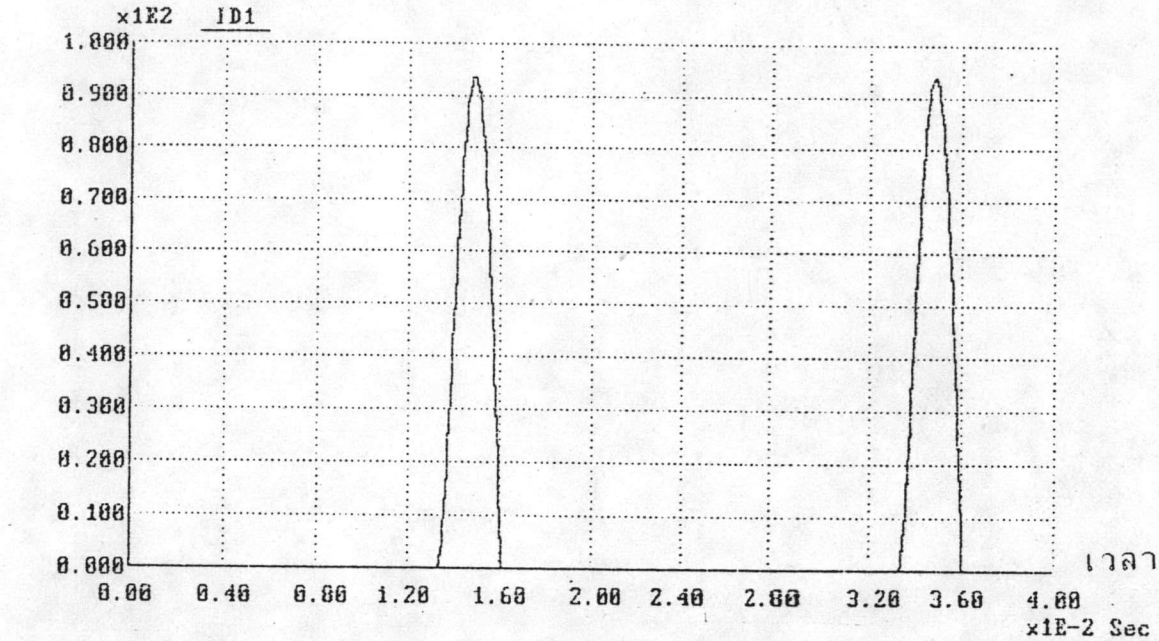
รูปที่ 21 วงจรที่ใช้ในการซีมูเลตวงจรเรียงกระแส

แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ ซึ่งเป็นผลการซีมูเลต แสดงอยู่ในรูปที่ 22



รูปที่ 22 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุในรูปที่ 21

จากรูปที่ 22 เราจะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุอยู่ระหว่าง 309 กับ 268 โวลต์ ซึ่งใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้ในตอนแรก



รูปที่ 23 กระแสผ่านไดโอดในรูปที่ 21 ซึ่งเป็นผลจากการซีมูเลต

รูปที่ 23 แสดงกระแสที่ผ่านไดโอด ซึ่งมีลักษณะที่ยากแก่การคำนวณหาค่าอาร์เอ็มเอส ดังนั้นเราจึงใช้ค่าโดยประมาณของกระแสโดยสมมุติเป็นคลื่นรูปไซน์ครึ่งคาบดังรูปที่ 24 เพื่อการคำนวณหากระแสอาร์เอ็มเอส

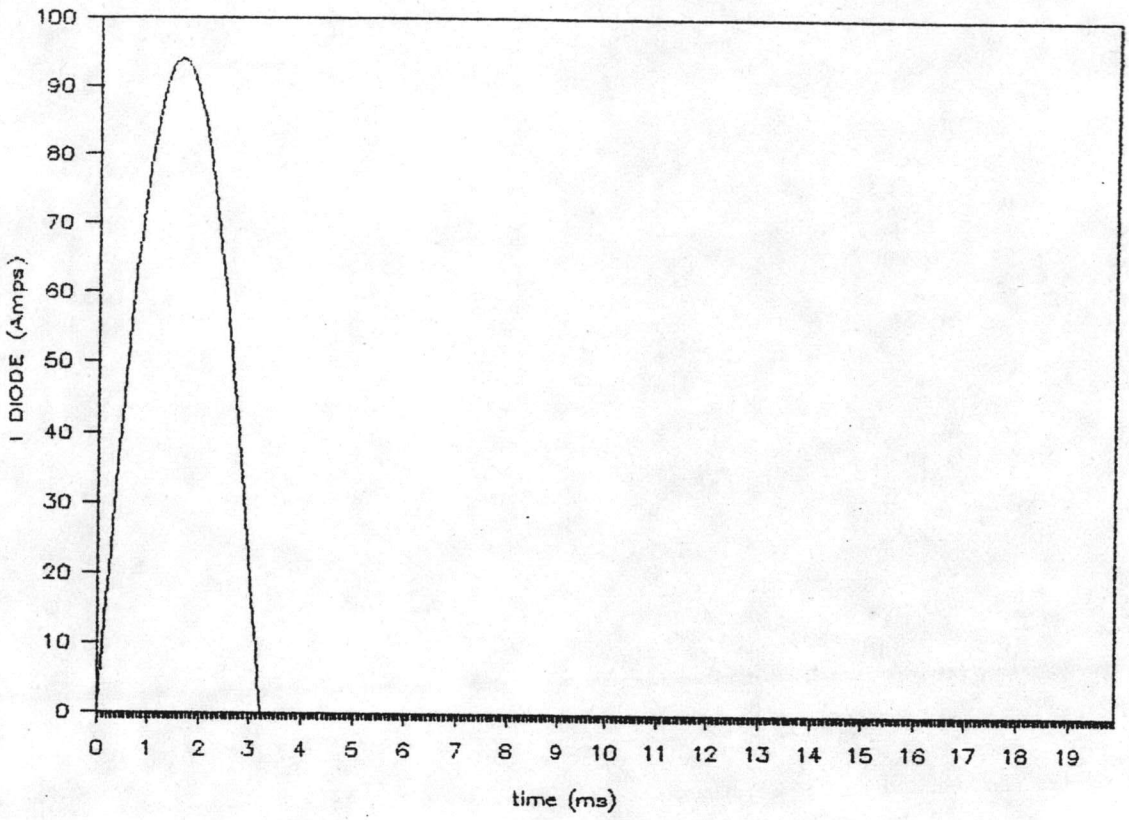
$$Irms = \sqrt{\int_{0}^{3.125ms} [94\sin(2\pi 156.25t)dt)]^2/20}$$

$$= 94\sqrt{2/25}$$

$$= 26.6 \quad A$$

ค่าความต้านทานที่ใช้ในการคายประจุของตัวเก็บประจุ ตามมาตรฐาน วสท. 408 กำหนดให้ตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันไม่เกิน 600 โวลต์ จะต้องมีตัวต้านทานต่ออยู่เพื่อช่วยให้แรงดันของตัวเก็บประจุลดลงเหลือ 50 โวลต์ ภายในเวลา 1 นาที และตามมาตรฐาน IEC No. 70 กำหนดให้ตัวเก็บประจุรับแรงดันได้ 1.1 เท่าของแรงดันปกติ ดังนั้นค่าความต้านทานในการคายประจุสามารถหาได้จากสมการ

$$50 = 1.1 \times 2 \times E\, e^{-60/RC} \qquad [3]$$



รูปที่ 24 กระแสโดยประมาณผ่านไดโอดโดยสมมุติเป็นรูปไซน์ครึ่งคาบ

โดยที่

แรงดันสูงสุดคร่อมตัวเก็บประจุ(E) = 310 V

ค่าความเก็บประจุ(C) = 2,800 μF

จากสมการ [3] คำนวณค่าความต้านทานได้ดังนี้

ค่าความต้านทาน(R) = 2.8 kΩ

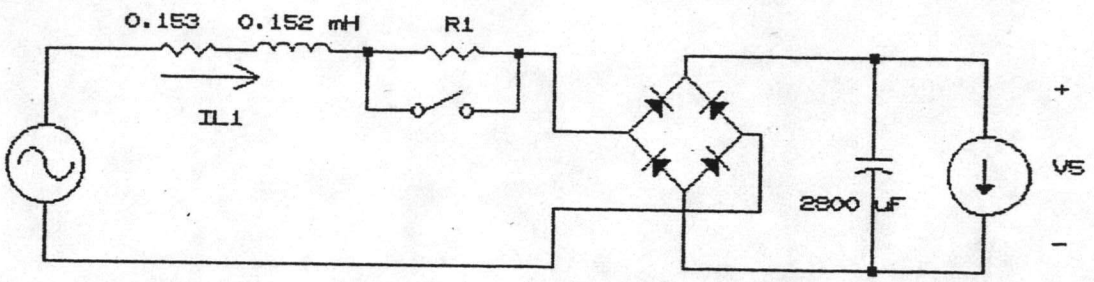
กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในความต้านทาน = V^2/R

= $310^2/2800$

= 11.7 W

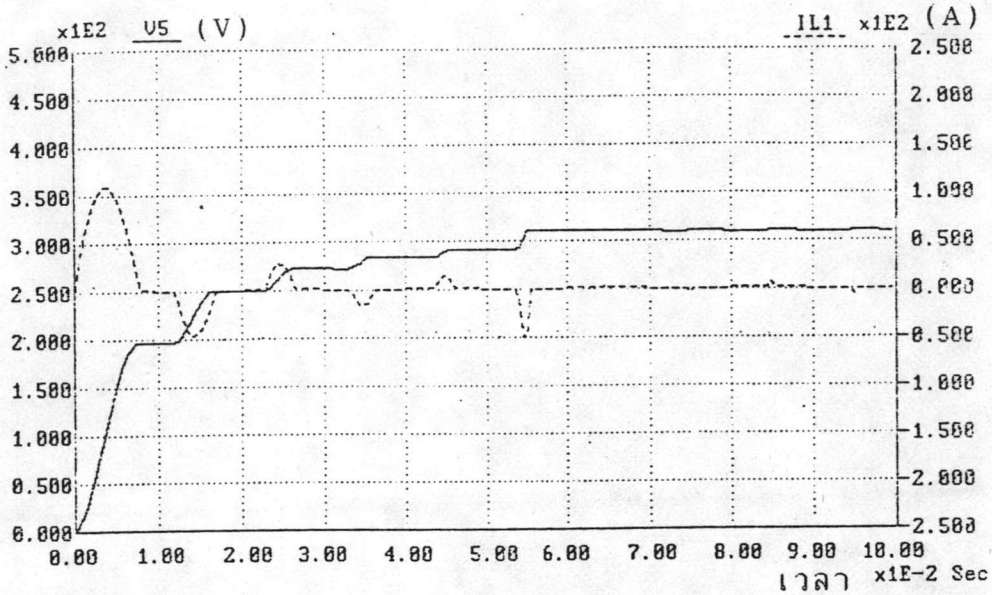
= 0.4 % ของกำลังขาออกของ UPS เครื่องนี้

ในช่วงแรกที่เริ่มทำงานจะมีกระแสจำนวนมากไหลผ่านไดโอด เพราะแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเป็นศูนย์ ซึ่งอาจทำให้เสียหายได้ ดังนั้นจึงทำการซีมูเลตกระแสของวงจรที่มีการต่อความต้านทานอนุกรม R_1 ดังรูปที่ 25

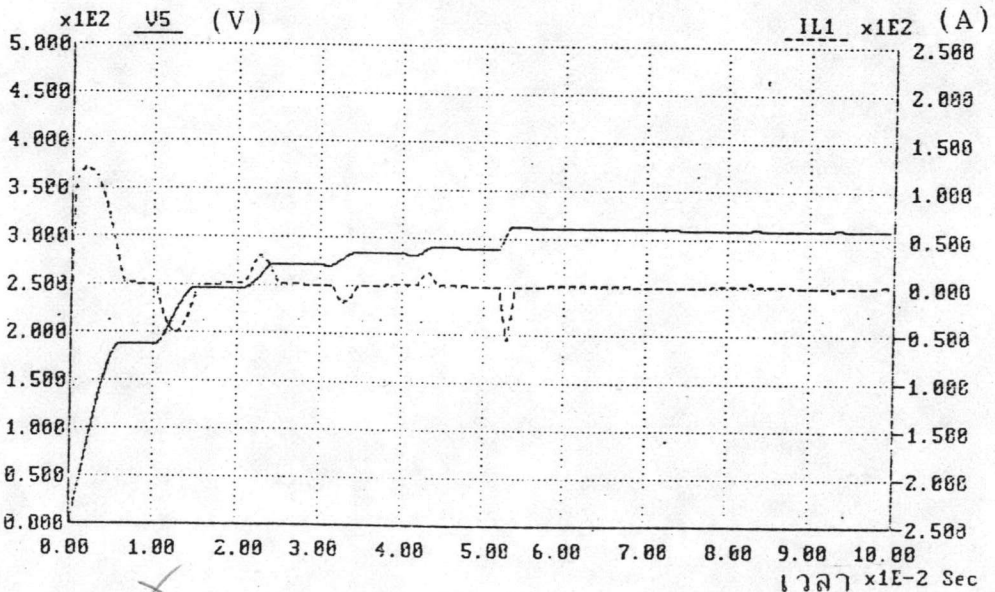


รูปที่ 25 วงจรที่ใช้ในการซีมูเลตกระแสตอนเริ่มทำงาน

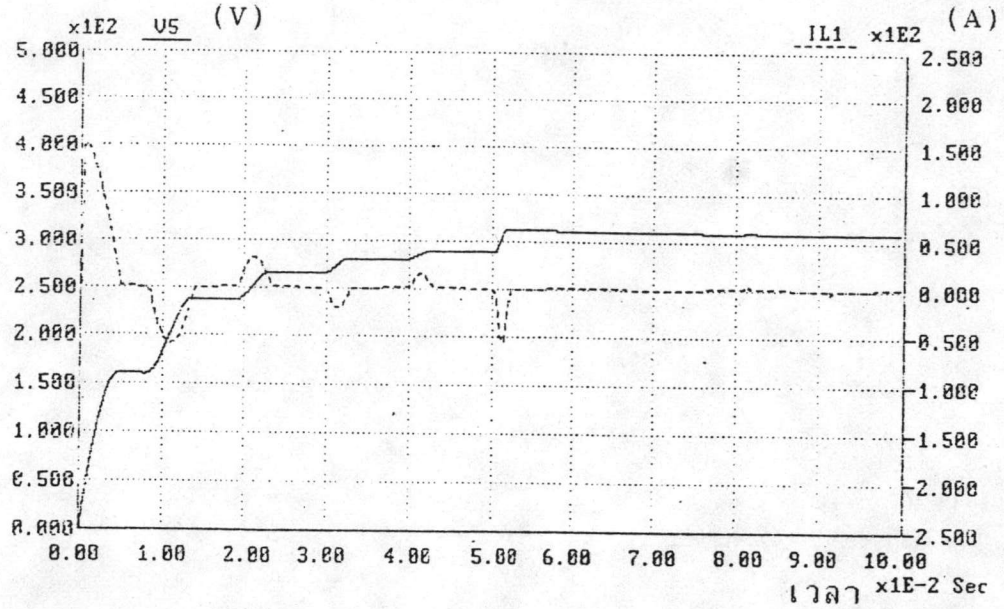
จากการคำนวณกระแสอาร์เอ็มเอสผ่านไดโอดเท่ากับ 26.6 แอมแปร์ เราจึงเลือกไดโอดที่มีพิกัดกระแสเท่ากับ 30 แอมแปร์ ซึ่งก็สามารถทนค่ายอดของกระแส (I_{FSM}) ในช่วงเวลา 16.67 msได้ 350 แอมแปร์ (10) เพื่อที่จะหาค่าของความต้านทาน R_1 ที่จะจำกัดค่ายอดของกระแสในช่วงแรกที่เริ่มทำงาน จึงทำการซีมูเลตที่ค่าความต้านทาน R_1 ต่าง ๆ กัน และมุมเฟสที่เริ่มต้นต่าง ๆ กัน พบว่าควรเลือกค่าความต้านทาน R_1 เท่ากับ 1.67 โอห์ม ผลของการซีมูเลตเป็นดังรูปที่ 26 ถึง 30 สังเกตได้ว่าสำหรับ R_1 เท่ากับ 1.67 โอห์ม ค่ายอดของกระแสจะไม่เกิน 160 แอมแปร์ ซึ่งต่ำกว่าพิกัดสูงสุดของค่ายอดของกระแสของไดโอดที่เลือกไว้



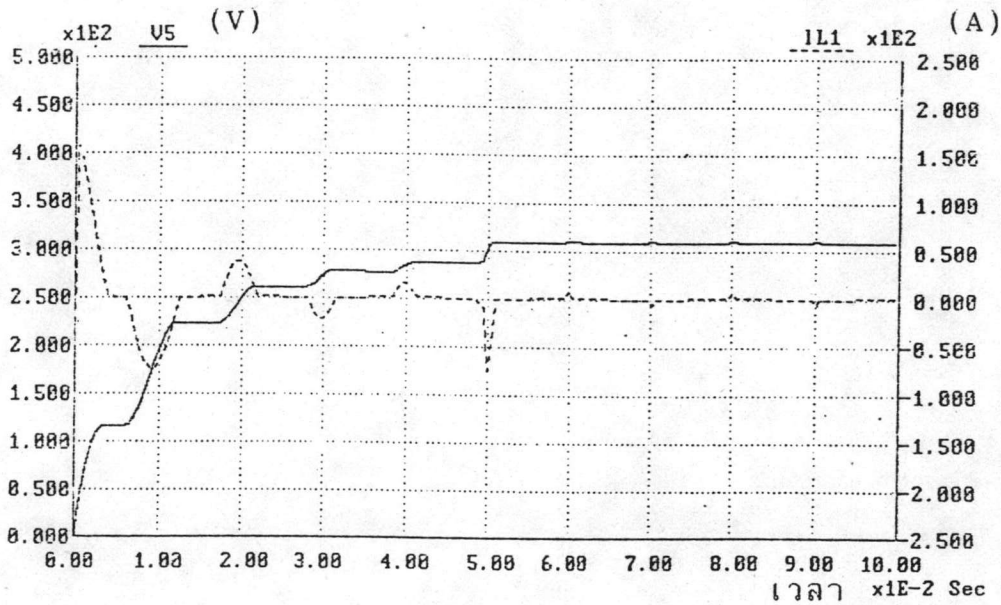
รูปที่ 26 ลักษณะแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ เมื่อต่อวงจรในขณะที่มุมเฟสของแรงดันด้านเข้าเป็น 0°



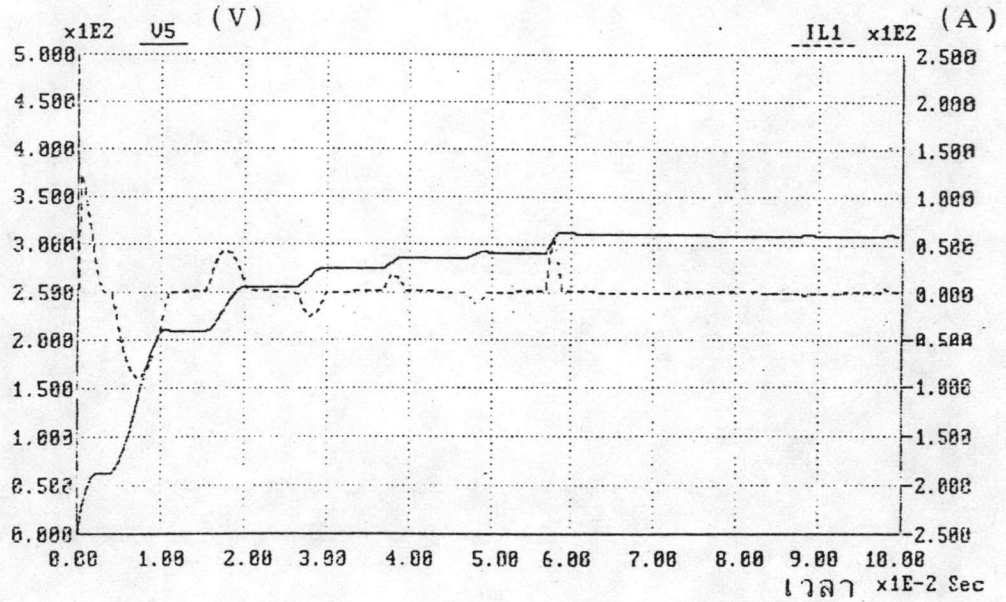
รูปที่ 27 แสดงลักษณะแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ เมื่อต่อวงจรในขณะที่มุมเฟสของแรงดันด้านเข้าเป็น 30°



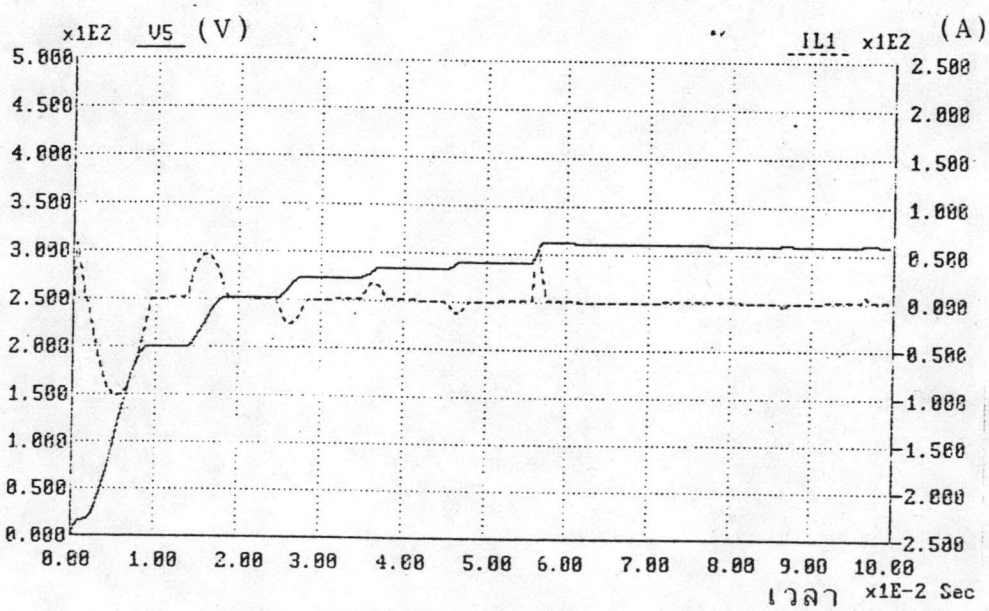
รูปที่ 28 ลักษณะแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ เมื่อต่อวงจรในขณะที่มุมเฟสของแรงดันด้านเข้าเป็น 60°



รูปที่ 29 ลักษณะแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ เมื่อต่อวงจรในขณะที่มุมเฟสของแรงดันด้านเข้าเป็น 90°



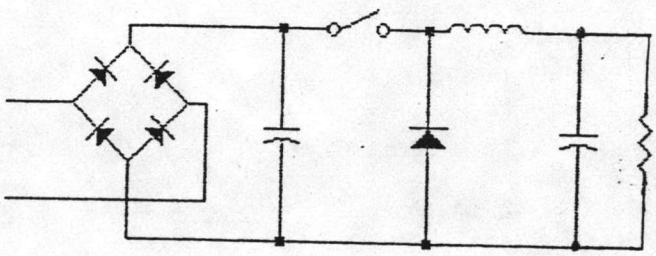
รูปที่ 30 ลักษณะแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ เมื่อต่อวงจรในขณะที่มุมเฟสของแรงดันด้านเข้าเป็น 120°



รูปที่ 31 ลักษณะแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ เมื่อต่อวงจรในขณะที่มุมเฟสของแรงดันด้านเข้าเป็น 150°

ในส่วนของความต้านทาน R_1 ที่ใช้ในการจำกัดกระแสในไดโอดตอนที่เริ่มเดินเครื่อง จะมีรีเลย์ทำการลัดวงจรหลังจากที่กระแสได้ลดลงแล้ว เพื่อเป็นการลดกำลังสูญเสีย

การออกแบบวงจรทอนระดับ



รูปที่ 32 วงจรทอนระดับ

เราคำนวณค่าวัฏจักรงานได้จากอัตราการแปลงผันแรงดันดังนี้

วัฏจักรงาน = Vo/Vs

= 140 / 280

= 0.50

1. การหาขนาดของตัวเหนี่ยวนำ

กระแสเฉลี่ยผ่านตัวเหนี่ยวนำในรูปที่ 32 = (กำลังขาออกของ UPS)/ (ประสิทธิภาพ x แรงดัน)

= 3000/(0.8 x 140)

= 26.8 A

ถ้าใช้ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20 kHz (ที่ความถี่ต่ำกว่านี้หูเราจะได้ยินเสียงที่เกิดจาก UPS ส่วนที่ความถี่สูงกว่านี้จะมีกำลังสูญเสียในขณะสวิตช์มากขึ้น) เนื่องจากใช้ L ที่เป็นแกนเหล็กจึงสมมุติการกระเพื่อมของกระแส(I_r) มีค่าเท่ากับ 3 % ของกระแสเฉลี่ย เราออกแบบให้การกระเพื่อมมีค่าน้อยเพียง

3 % เช่นนี้เนื่องจากเราใช้ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้แกนเหล็กมิใช่แกนเฟอร์ไรต์ จึงต้องพยายามลดการสูญเสียเป็นความร้อนในแกนอันเนื่องมาแต่องค์ประกอบไฟสลับ

$$I_r = 0.03 \times 26.8$$

$$= 0.8 \quad \text{A peak-to-peak}$$

ค่าของความเหนี่ยวนำ $L = (Vs - Vo) \times \text{Duty Cycle} \times T/I_r$

โดยที่ T คือ คาบของการสวิตช์

$$L = (280-140) \times 0.5 \times 50\times10^{-6}/0.8$$

$$= 4.3 \quad \text{mH}$$

เนื่องจากวงจรทอนระดับจะต้องสามารถจ่ายกำลังให้กับอินเวอร์เตอร์ซึ่งดึงกำลังเป็นช่วง ๆ ขึ้นอยู่กับผลคูณของกระแสและแรงดันที่จ่ายให้โหลด ซึ่งเป็นคลื่นรูปไซน์ ดังนั้นกระแสสูงสุดของตัวเหนี่ยวนำหาจาก

กระแสสูงสุดผ่านตัวเหนี่ยวนำ = กำลังขาออกของ UPS สูงสุด/(ประสิทธิภาพ x แรงดัน)

$$= V_p \times I_p/(0.8 \times 140)$$

$$= 2 \times Vrms \times Irms/(0.8 \times 140)$$

$$= 6000/(0.8 \times 140)$$

$$= 53.57 \quad \text{A}$$

สรุป ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้มีค่าความเหนี่ยวนำ 4 mH และทนกระแสสูงสุดได้ 53.57 A

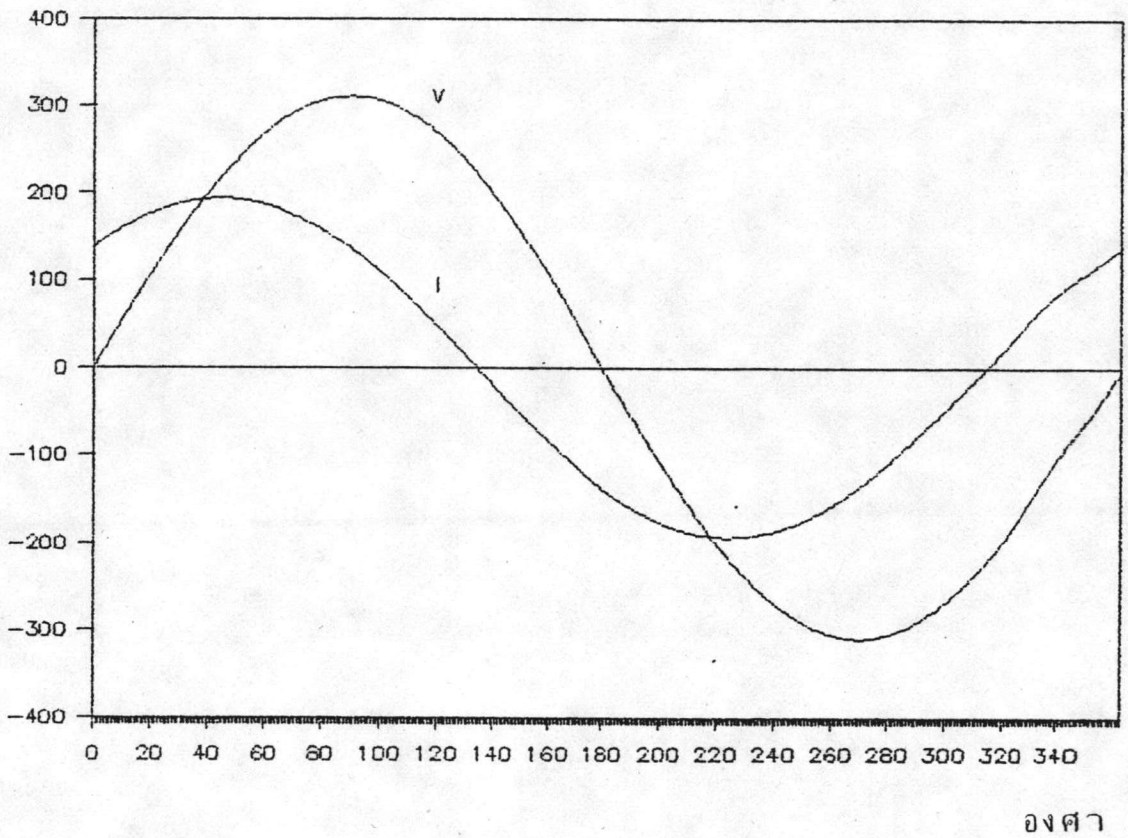
2. <u>การหาขนาดของตัวเก็บประจุ</u>

ในวงจรทั่วไปนั้น ขนาดของตัวเก็บประจุจะคำนวณจากแรงดันที่กระเพื่อมขึ้นลงเนื่องมาจากความไม่เรียบของกระแสใน L แต่ในวงจรนี้โหลดของวงจร คือวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งสามารถจ่ายกระแสกลับมาได้ในบางช่วง-เวลาเมื่อต่อโหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังต่ำ ดังนั้นการหาขนาดของตัวเก็บประจุจึงต้องขึ้นอยู่กับกระแสของอินเวอร์เตอร์ด้วย

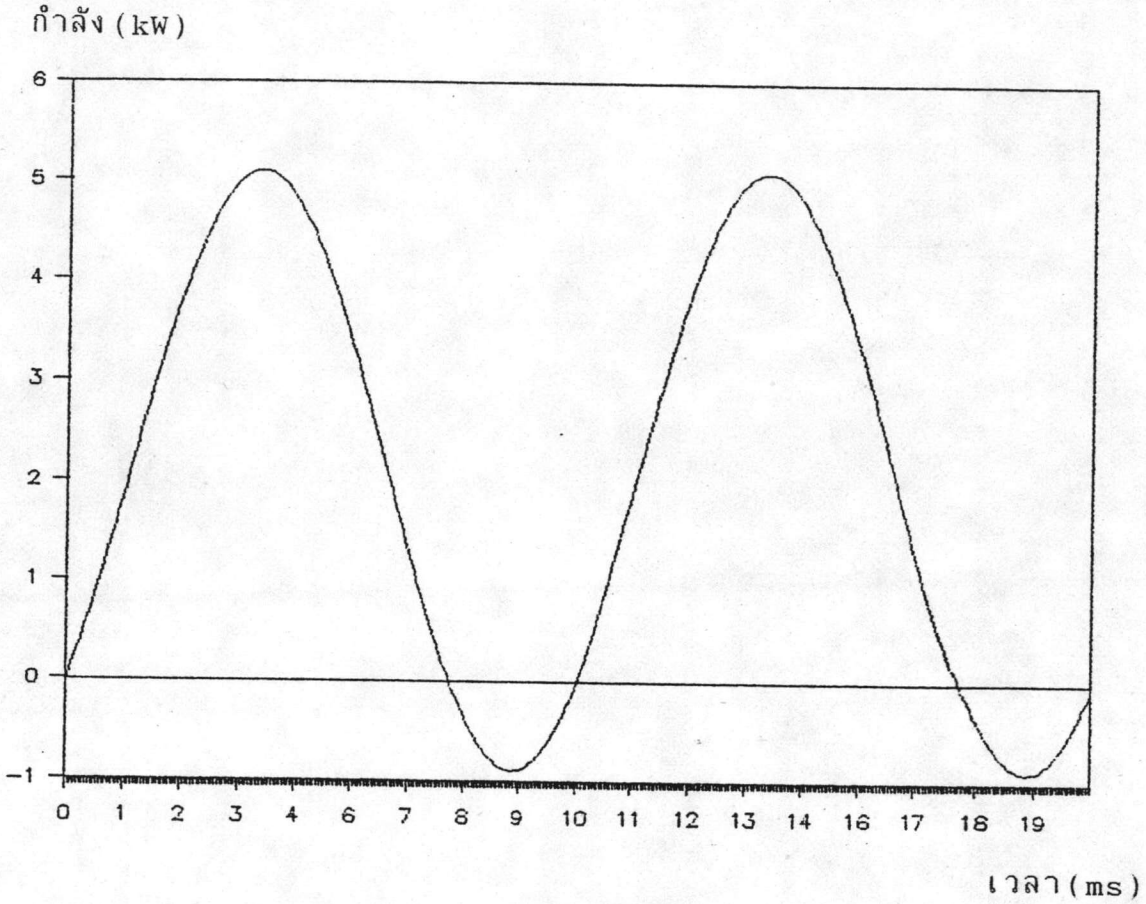
ในกรณีโหลดของอินเวอร์เตอร์มีขนาด 3 kVA P.F.= 0.7

(x 10^{-1} A)

(Volts)



รูปที่ 33 แรงดันและกระแสของโหลดขนาด 3 kVA P.F. = 0.7



รูปที่ 34 กำลังที่จ่ายให้โหลด 3 kVA P.F. = 0.7

รูปที่ 33 แสดงลักษณะแรงดัน และกระแส ที่จ่ายให้กับโหลด 3 kVA P.F. = 0.7 (นำหน้า) เมื่อนำค่าแรงดันและกระแสในเวลาใด ๆ มาคูณกัน จะได้กำลังที่ถ่ายเทระหว่างโหลดกับอินเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 34 ในช่วงเวลา 7.47 ms ถึง 10 ms กำลังจะไหลจากโหลดจ่ายคืนให้อินเวอร์เตอร์ กำลังส่วนนี้จะส่งย้อนกลับไปที่วงจรทอนระดับ

พลังงานส่งกลับคืน $= -\int v \times i \, dt$

$= -\int V_p \sin(\omega t) \times I_p \sin(\omega t+\theta) dt$

$$= -V_p I_p [\int \cos\theta \, dt - \int \cos(2\omega t+\theta) dt]/2$$

$$= -3000[\int \cos 0.795 \, dt -$$

$$\int \cos\{2 \times (2 \times \pi \times 50)t + .795\} \, dt]$$

$$= -3000 [\ 1.77 \times 10^{-3} - 2.27 \times 10^{-3}\ ]$$

$$= 1.51 \quad \text{จูล}$$

= พลังงานที่เพิ่มขึ้นในตัวเก็บประจุ

พลังงานที่ส่งกลับคืนมายังตัวเก็บประจุนี้ จะทำให้แรงดันของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นจาก Vmin เป็น Vmax นั่นคือ

พลังงานที่ส่งกลับคืน = $C(V^2 max - V^2 min)/2$ [4]

สมมุติให้แรงดันกระเพื่อม (V_r) = 5 โวลต์

ดังนั้น Vmax = $Vmin + V_r$

= 140 + 5

= 145 โวลต์

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ [4] จะได้

$1.51 = C(145^2 - 140^2)/2$

$C = 1.51 \times 2/1425$ μF

= 2,119 μF

เนื่องจากตัวเก็บประจุที่ใช้มีขนาด 400 μF 350 โวลต์ จึงเลือกใช้ค่าความจุเท่ากับ 2000 μF

3. <u>การหาขนาดของสวิตช์</u>

สวิตช์ที่เลือกใช้ในวงจรนี้คือ FET และ ไดโอด การหาขนาดของสวิตช์จะสามารถทำได้ดังนี้

กระแสสูงสุดใน FET = กระแสสูงสุดในตัวเหนี่ยวนำ

= 53.57 A

ขนาดกระแสของ FET ที่ใช้ = กระแสสูงสุดใน FET x safety factor

= 53.57 x 1.5

= 80 A

ขนาดแรงดันของ FET ที่ใช้ = แรงดันสูงสุด x safety factor

= (310 x 1.1) x 1.3

= 443 โวลต์

เนื่องจากวัฏจักรงานมีค่า 0.5 ดังนั้นกระแสผ่านไดโอดมีค่าเท่ากับกระแสผ่าน FET ด้วย โดยทั่วไปพิกัดสูงสุดสำหรับ FET ได้แก่กระแสสูงสุด แต่สำหรับไดโอดได้แก่กระแสเฉลี่ย FET และ ไดโอดที่หาได้มีขนาด 45 A, 450 V และ 40 A, 200 V ตามลำดับ จึงใช้ FET 2 ตัวขนานกัน และใช้ไดโอด 2 ตัวขนานกันแล้วนำมาอนุกรมกันอีกทีหนึ่ง

4. <u>การออกแบบวงจรคุมค่า</u> (Regulator)

เราใช้วงจรคุมค่าในวงรอบของการป้อนกลับ เพื่อให้เกิดการคงค่าแรงดันที่ดีโดยที่วงจรยังคงมีเสถียรภาพ ในการคำนวณจะนำวงจรกรองของวงจรทอนระดับในรูปที่ 19 มาดัดแปลงเป็นวงจรในรูปที่ 35 โดยที่ค่า R1 คือความต้านทานในวงจรประจุแบตเตอรี่ และ RL คือความต้านทานที่ใช้แทนวงจรอินเวอร์เตอร์

R1 = แรงดันออก^2/กำลังในการประจุแบตเตอรี่

= $140^2/224$

= 87.5 โอห์ม

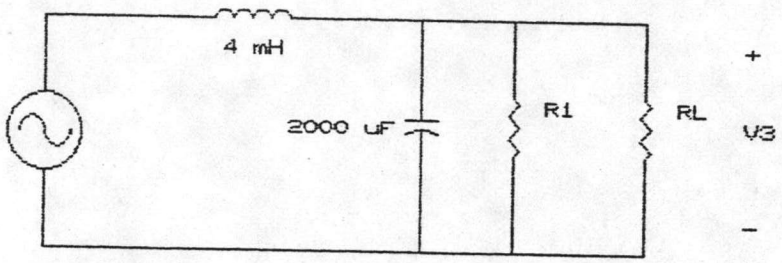
RL = แรงดันออก^2/กำลังขาเข้าของอินเวอร์เตอร์

= $140^2/3750$

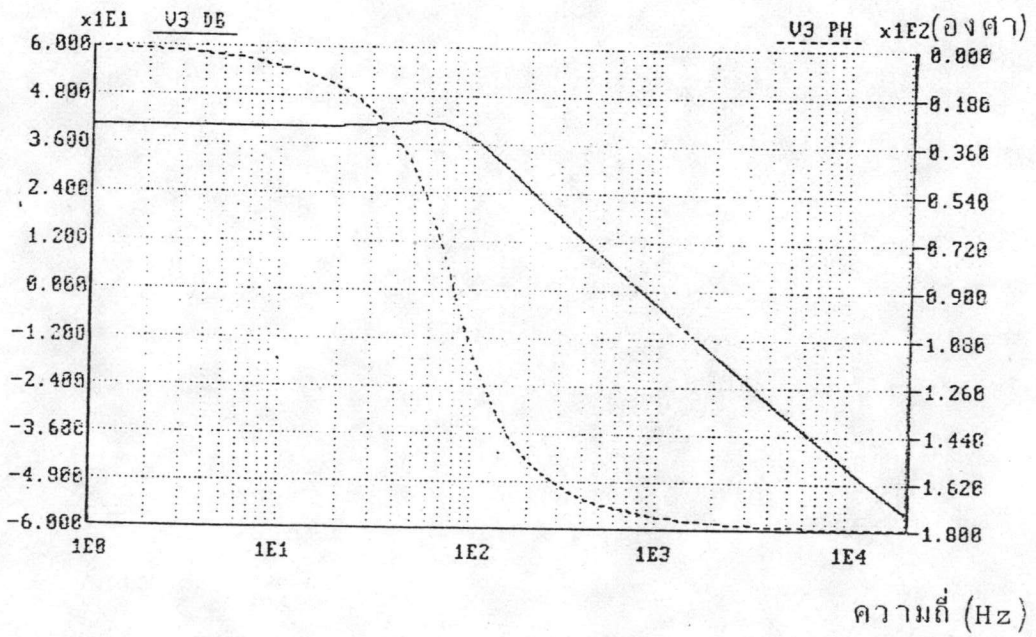
= 5.227 โอห์ม

เมื่อทำการซีมูเลตหาผลตอบเชิงความถี่ จะได้ผลตอบเชิงความถี่ในรูปที่ 36 และรูปที่ 37

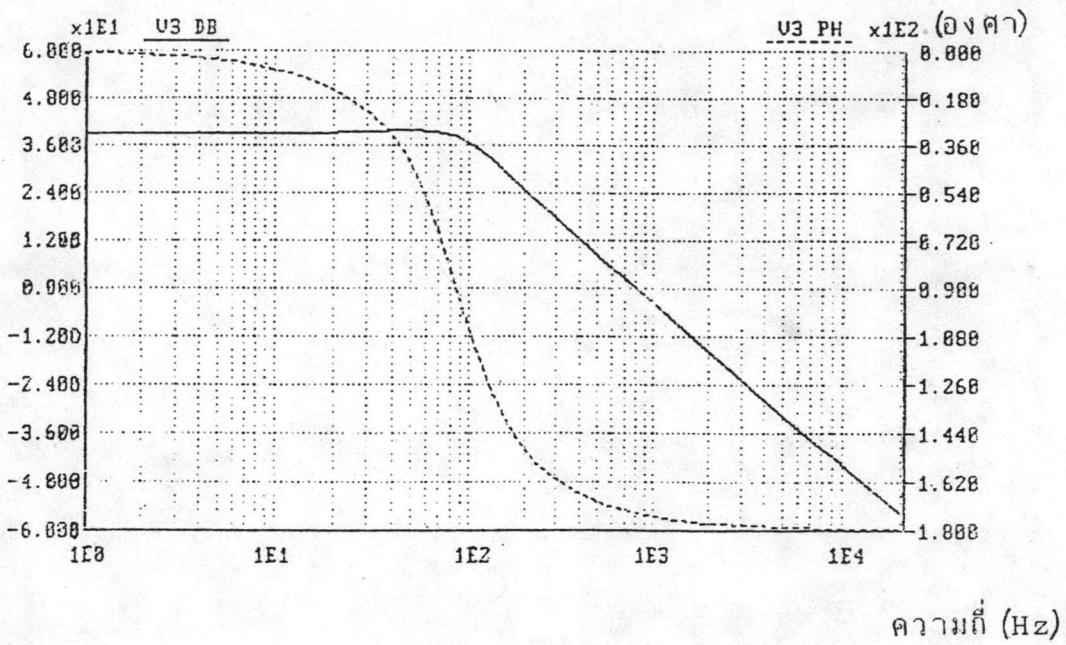
IA 5A9 69 X



รูปที่ 35 วงจรที่ใช้ในการซีมูเลตเพื่อหาผลตอบเชิงความถี่ของวงจรทอนระดับ

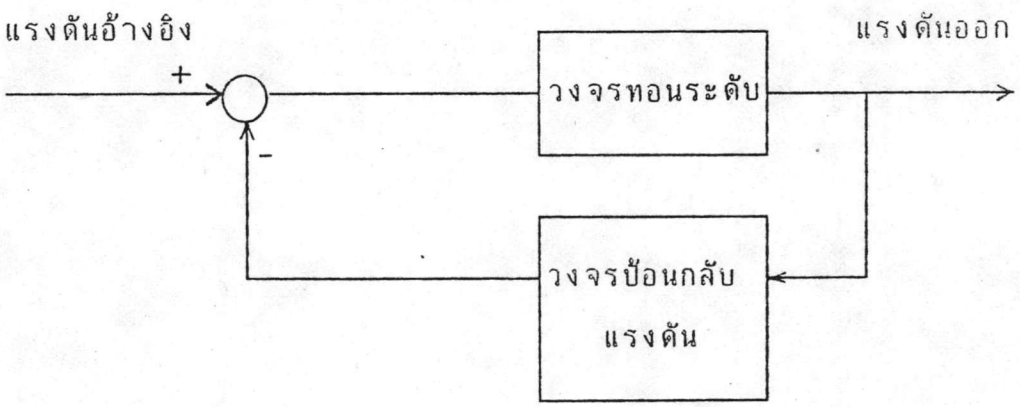


รูปที่ 36 ผลตอบเชิงความถี่ของวงจรทอนระดับขณะไม่มี RL



รูปที่ 37 ผลตอบเชิงความถี่ของวงจรทอนระดับขณะต่อ RL

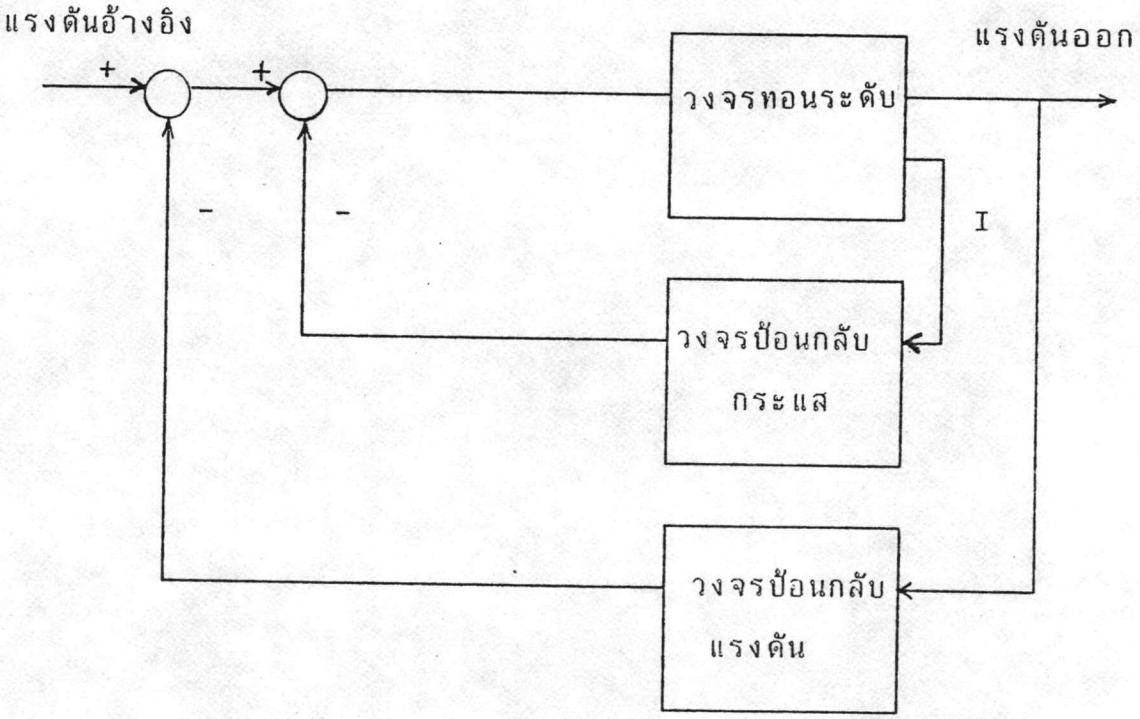
รูปที่ 36 และ รูปที่ 37 แสดงให้เห็นว่า มุมเฟสของแรงดันจะลดลงอย่างรวดเร็วเข้าสู่ 180 องศา โดยมีความถี่เรโซแนนซ์ประมาณ 80 Hz ถ้าจะต่อวงจรป้อนกลับแรงดัน ดังรูปที่ 38 วงจรป้อนกลับนั้นจะต้องมีแถบความถี่



รูปที่ 38 บล็อกไดอะแกรมของวงจรทอนระดับ(buck)ที่ป้อนกลับแรงดัน

(bandwidth)ที่แคบกว่า 80 Hz ค่อนข้างมาก เพราะถ้าให้วงจรป้อนกลับมีแถบความถี่กว้างกว่านี้ จะทำให้อัตราขยายวงรอบเปิดมีค่าสูงกว่า 1 ที่มุมเฟส 180

องศา ซึ่งจะทำให้เกิดการแกว่ง เมื่อทำการทดลองจริงพบว่าแรงดันด้านออกไม่เรียบเนื่องจากแรงดันด้านเข้ามีความถี่ 100 Hz ปนอยู่มากและวงจรป้อนกลับไม่สามารถคงค่าแรงดันที่ความถี่ 100 Hz ได้ การแก้ไขสามารถทำได้ 2 วิธี คือวิธีแรกทำโดยเพิ่มความถี่เรโซแนนซ์ให้สูงขึ้นโดยการปรับค่าตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ แล้วจึงขยายแถบความถี่ของวงจรป้อนกลับ ส่วนวิธีที่ 2 คือออกแบบโครงสร้างวงจรป้อนกลับใหม่ ในกรณีนี้ค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดในด้านการกระเพื่อมของกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำและการป้อนกลับพลังงานของอินเวอร์เตอร์ เว้นไว้แต่จะใช้ตัว-เหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์ ซึ่งจะยอมให้มีการกระเพื่อมของกระแสได้มากขึ้นแต่มีราคาแพง ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีที่ 2 โดยออกแบบวงจรป้อนกลับกระแสเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 39

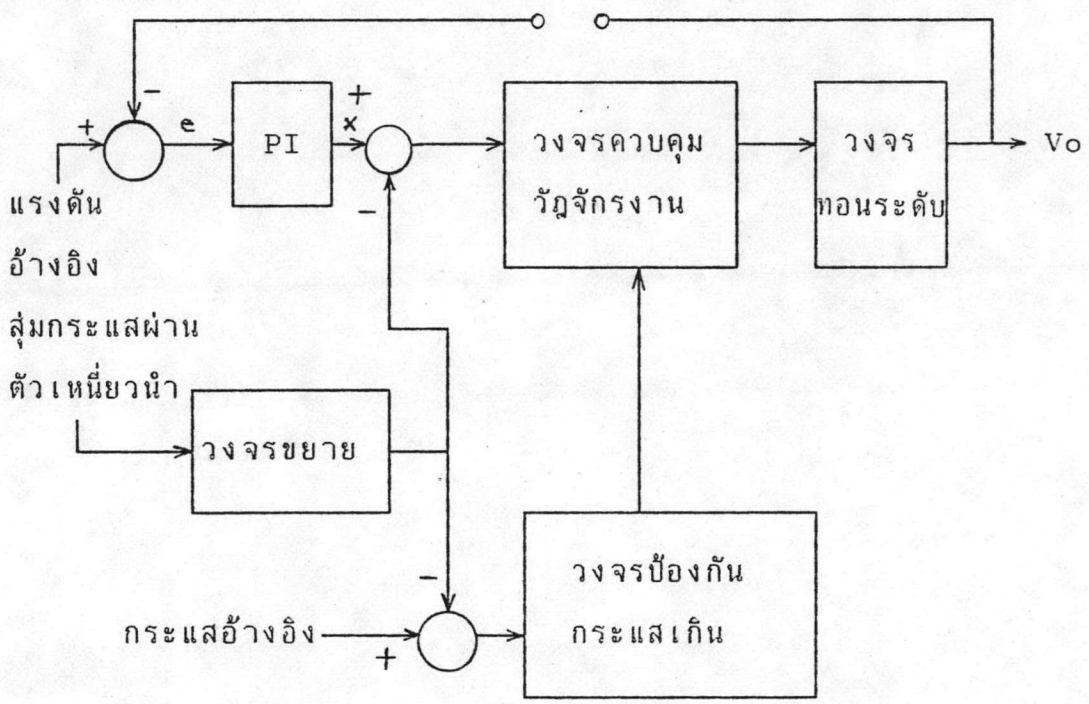


รูปที่ 39 บล็อกไดอะแกรมของวงจรทอนระดับที่ป้อนกลับทั้งกระแสและแรงดัน

วงจรป้อนกลับกระแสที่เพิ่มขึ้นมา ทำให้สามารถขยายแถบความถี่ให้กว้างกว่าเดิม โดยที่วงจรยังมีเสถียรภาพ เพราะกระแสในวงจรทอนระดับจะมีมุมเฟสล้าหลังไม่เกิน 90 องศา ดังนั้น เมื่อออกแบบให้วงจรป้อนกลับกระแสมี

มุมเฟสล้าหลังไม่เกิน 90 องศาในช่วงที่อัตราขยายวงรอบเปิดมีค่าเกิน 1 วงจรทอนระดับจะยังคงมีเสถียรภาพ เมื่อขยายแถบความถี่ของวงจรป้อนกลับแรงดันให้กว้างกว่า 100 Hz โดยให้อัตราขยายวงรอบเปิดของกระแส มากกว่าของแรงดัน ทำให้วงจรยังคงมีเสถียรภาพและแรงดันขาออกมีค่าค่อนข้างคงที่ และเรียบขึ้น วงจรที่ใช้คือวงจรดังรูปที่ 40 และมีผลตอบเชิงความถี่ดังรูปที่ 41

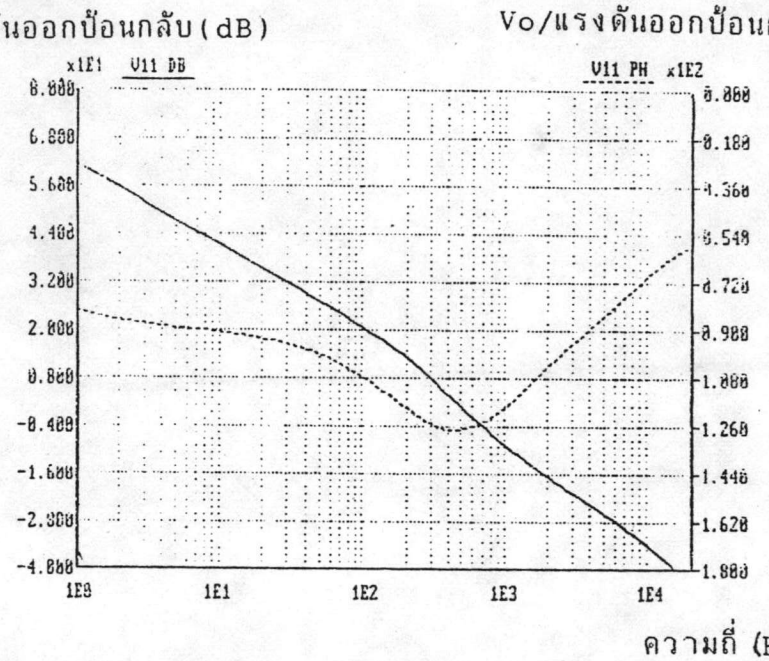
แรงดันออกป้อนกลับ เปิดวงรอบเพื่อวัดอัตราขยายวงรอบเปิด สุ่มแรงดัน



รูปที่ 40 บล็อกไดอะแกรมของวงจรทอนระดับ

วงจรป้อนกลับแรงดันซึ่งเป็นแบบ PI จะทำหน้าที่วัดแรงดันออกของวงจรทอนระดับมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงและส่งสัญญาณ e ไปยังวงจรขยาย PI วงจรป้อนกลับกระแสแบบ P จะวัดกระแสของตัวเหนี่ยวนำของวงจรทอนระดับ และส่งสัญญาณไปยังวงจรเปรียบเทียบเพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณ x และส่งสัญญาณไปควบคุมการสวิตช์ของวงจรทอนระดับ ผลตอบเชิงความถี่ของวงจรเมื่อป้อนกลับเฉพาะกระแส (Vo/แรงดันออกป้อนกลับ) มีแสดงในรูปที่ 41

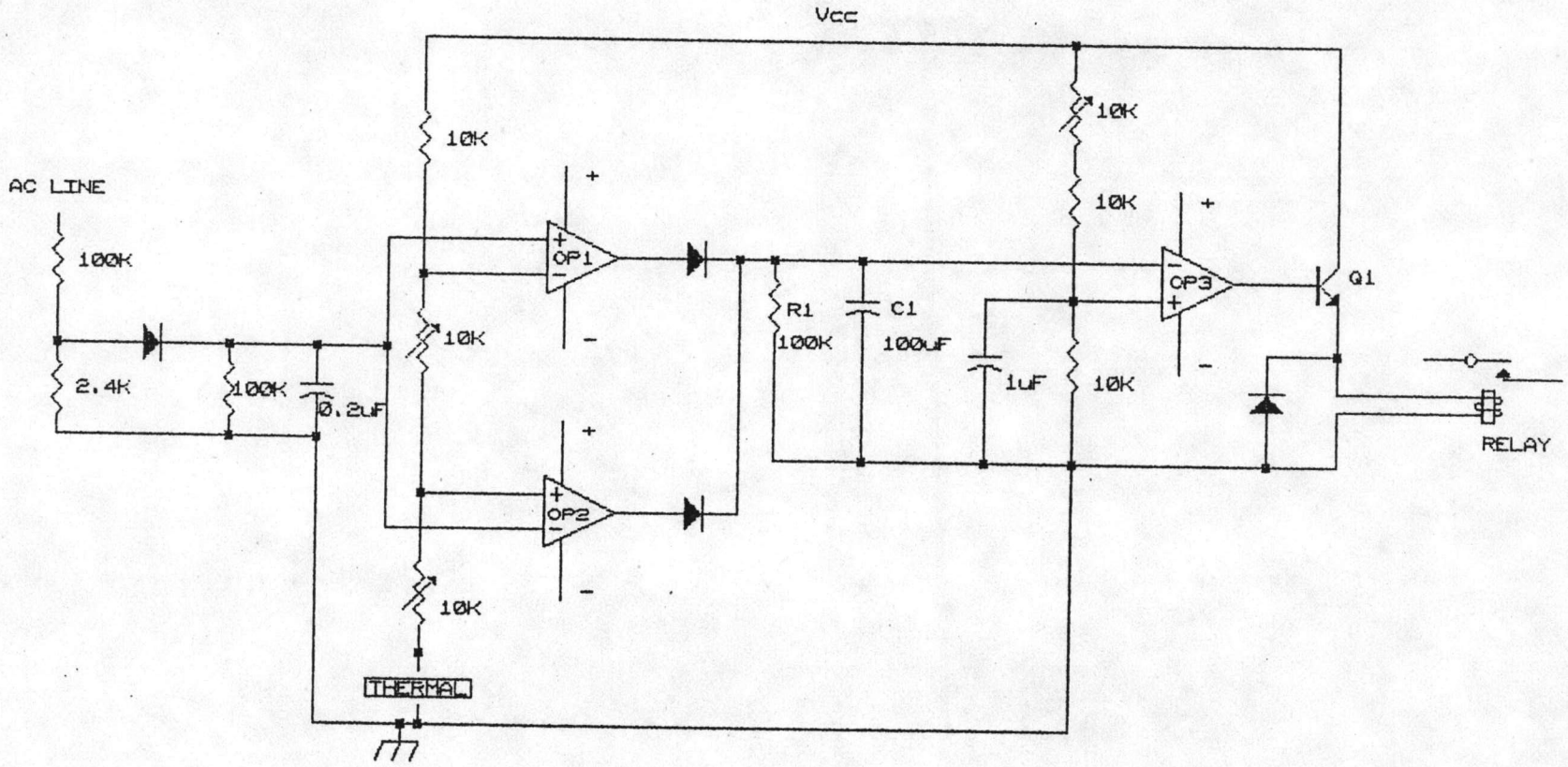
สังเกตจากรูปที่ 41 ได้ว่าความถี่ตัดข้าม(crossover frequency)เท่ากับ 500 Hz และที่ความถี่นี้ เฟสของอัตราขยายวงรอบเปิดมีค่าประมาณ -126 องศา หมายความว่าช่วงปลอดภัยเชิงเฟส(phase margin) เท่ากับ 180-126 = 54 องศา ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสม วงจรที่มีการป้อนกลับในลักษณะนี้จะมีเสถียรภาพ



รูปที่ 41 อัตราขยายวงรอบเปิด (Vo/แรงดันออกป้อนกลับ)

การออกแบบวงจรป้องกันวงจรตัดต่อสวิตช์

วงจรจะต้องมีลักษณะของการป้องกันตัวเองได้ คือ สามารถป้องกันแรงดันต่ำและแรงดันสูงได้ โดยการตัดวงจรออกจากสายไฟของการไฟฟ้า และถ้าอุณหภูมิของสวิตช์สูงเกินไป ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ ก็จะหยุดการสวิตช์และตัดวงจรออกเช่นกัน นอกจากนี้ยังสามารถต่อวงจรเข้ากับสายไฟฟ้าของการไฟฟ้าได้เองหลังจากสภาพทุกอย่างกลับคืนสู่ปกติ ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง (ขึ้นอยู่กับการตั้งเวลาของผู้ใช้) วงจรที่ได้ออกแบบไว้แสดงอยู่ในรูปที่ 42



รูปที่ 42 วงจรป้องกันวงจรตัดต่อสวิตช์

เมื่อแรงดันของการไฟฟ้ามีค่าเกิน + 10 % หรือ 242 โวลต์ ออป-แอมป์ OP1 จะให้แรงดันระดับสูงออกไป ทำให้ออปแอมป์ OP3 มีแรงดันต่ำและทรานซิสเตอร์ Q1 หยุดนำกระแส รีเลย์จะเปิดวงจรตัดสายของการไฟฟ้าออก

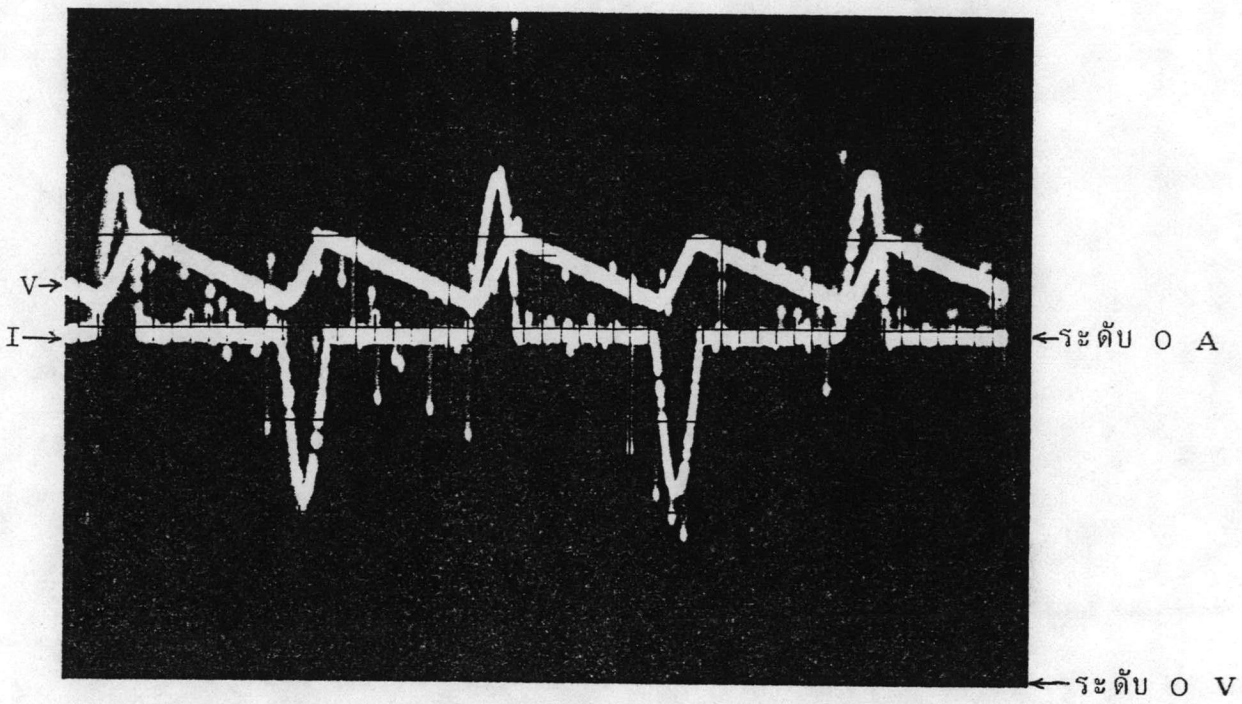
เมื่อแรงดันของการไฟฟ้ามีค่าลดลงมาต่ำกว่า 242 โวลต์ และสูงกว่า - 10 % หรือ 198 โวลต์ ออปแอมป์ OP1 และ OP2 จะให้แรงดันระดับต่ำออกไป ตัวเก็บประจุ C1 จะค่อย ๆ คายประจุออกเมื่อเวลาผ่านไป(อยู่ในช่วง 1 - 10 วินาที ขึ้นอยู่กับการปรับค่าความต้านทาน R1) ออปแอมป์ OP3 จะให้แรงดันระดับสูงและทรานซิสเตอร์ Q1 นำกระแส รีเลย์จะปิดวงจรต่อสายของการไฟฟ้า

เมื่อแรงดันของการไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า - 10 % หรือ 198 โวลต์ ออปแอมป์ OP2 จะให้แรงดันระดับสูงออกไป ทำให้ออปแอมป์ OP3 มีแรงดันต่ำและทรานซิสเตอร์ Q1 หยุดนำกระแส รีเลย์จะเปิดวงจรตัดสายของการไฟฟ้าออกไป

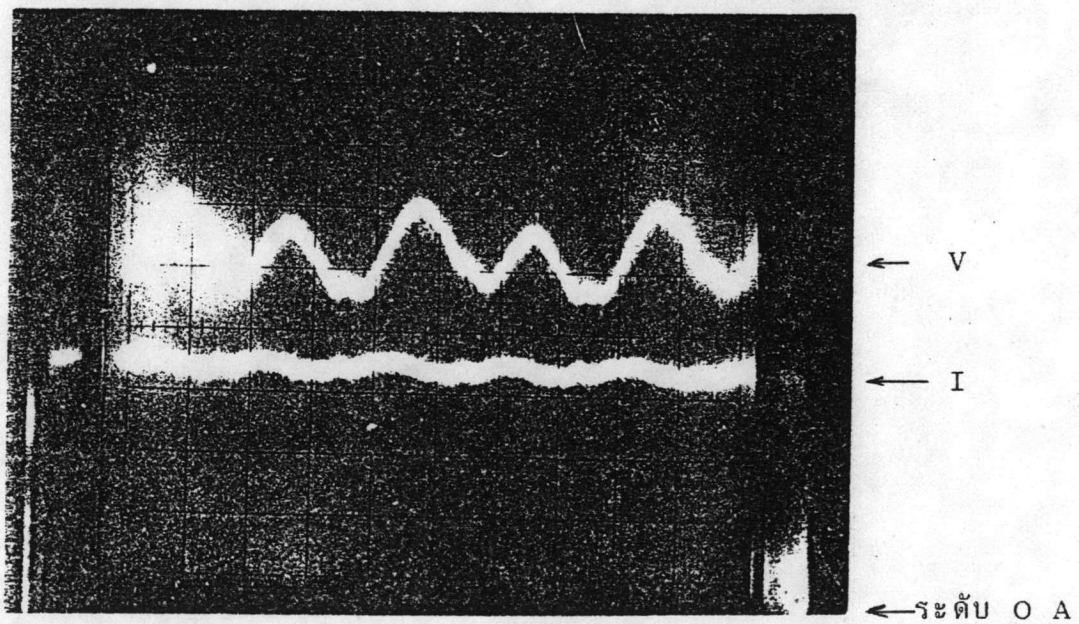
เมื่อระบบระบายความร้อนของเครื่องเกิดผิดปกติ ทำให้อุณหภูมิตัวระบายความร้อนของสวิตช์(FET และไดโอด) มีค่าสูงประมาณ 75 °C สวิตช์ความร้อนจะเปิดวงจร ออปแอมป์ OP2 จะให้แรงดันระดับสูงออกไป ทำให้ออปแอมป์ OP3 มีแรงดันต่ำและทรานซิสเตอร์ Q1 หยุดนำกระแส รีเลย์จะเปิดวงจรตัดสายของการไฟฟ้าออกไป

ผลการทดสอบวงจร

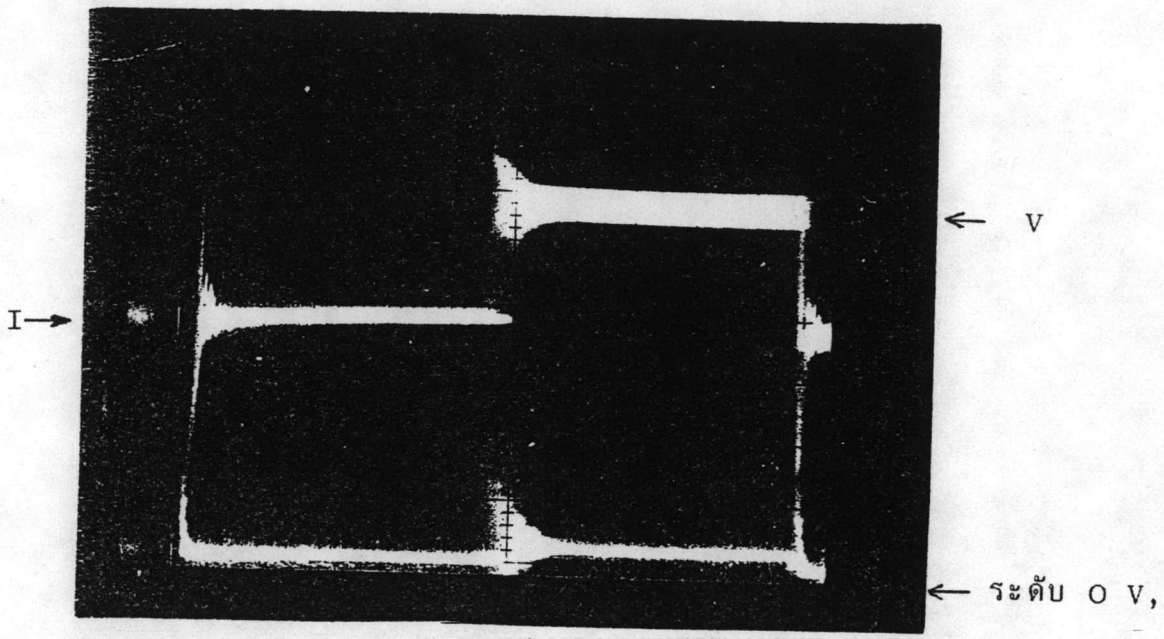
รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่วัดจากวงจรเรียงกระแสและวงจรทอนระดับมีแสดงไว้ในรูปที่ 43 ถึง 46



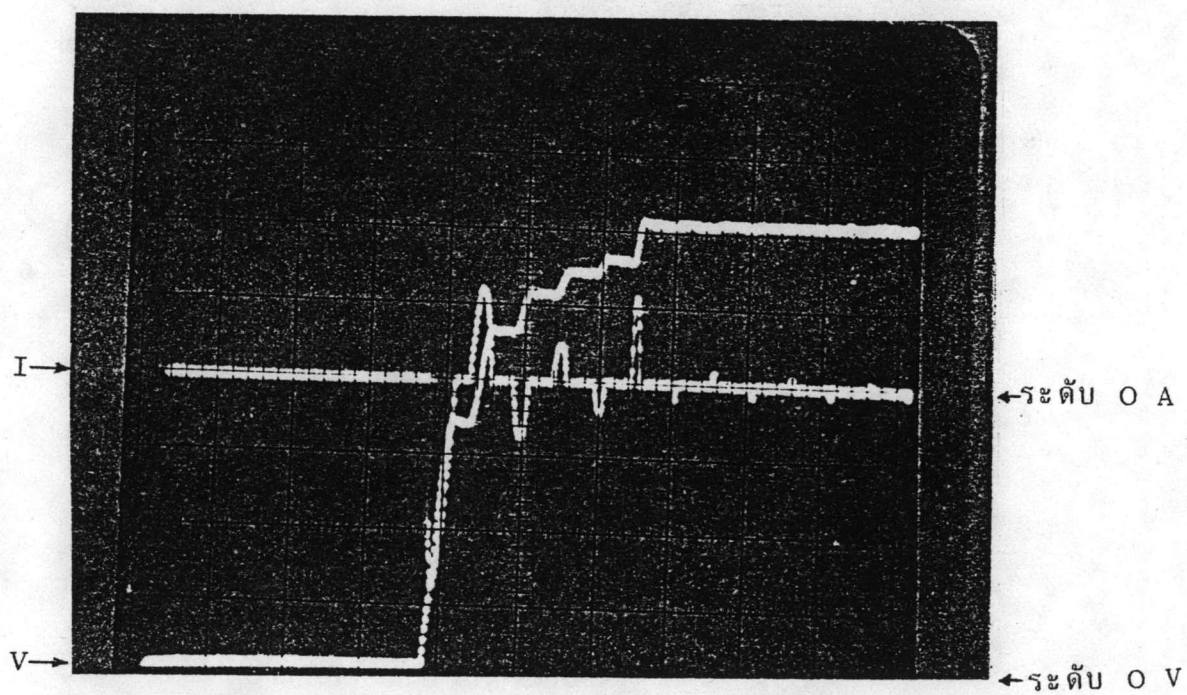
รูปที่ 43 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสในไดโอดของวงจรเรียงกระแสขณะต่อโหลดความต้านทานขนาด 3.5 kW
(แรงดัน 100 V/cm กระแส 50 A/cm เวลา 5 ms/cm)



รูปที่ 44 แรงดันขาออกและกระแสในตัวเหนี่ยวนำของวงจรทอนระดับขณะต่อโหลดความต้านทาน 3.5 kW
(แรงดัน 0.5 V/cm กระแส 5 A/cm เวลา 5 ms/cm)



รูปที่ 45 กระแสและแรงดันคร่อมสวิตช์ของวงจรทอนระดับขณะมีโหลด 3.5 kW
(แรงดัน 50 V/cm กระแส 5 A/cm เวลา 5 us/cm)



รูปที่ 46 กระแสและแรงดันของวงจรเรียงกระแสขณะเริ่มเดินเครื่องที่มุม
เฟสของแรงดันด้านเข้าเป็น 60 องศา
(แรงดัน 50 V/cm กระแส 50 A/cm เวลา 20 ms/cm)

จากรูปที่ 22, 23 และ 43 จะเห็นว่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุที่ได้จากการซีมูเลตและการทดลองใกล้เคียงกัน แต่กระแสที่ผ่านไดโอดในการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการซีมูเลตเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองจริงกับที่สมมุติขึ้นอาจไม่เท่ากัน ในรูปที่ 44 แรงดันขาออกของวงจรทอนระดับจะมีค่ากระเพื่อมเล็กน้อย คือแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงประมาณ 0.7 โวลต์ ซึ่งน้อยกว่าที่ได้ออกแบบไว้มาก ทั้งนี้เพราะในตอนคำนวณได้อาศัยโหลดที่เป็นอินเวอร์เตอร์ดึงกระแสเป็นช่วง ๆ และมีการป้อนกำลังกลับ แต่ในการทดลองใช้โหลดความต้านทาน ส่วนกระแสของตัวเหนี่ยวนำมีการกระเพื่อมที่ความถี่ประมาณ 100 Hz โดยที่ขนาดของการกระเพื่อมมีค่ามากกว่าที่ได้ออกแบบไว้ ทั้งนี้เพราะมีแรงดันด้านเข้าที่ความถี่ 100 Hz ปนเข้ามามาก รูปที่ 45 แสดงกระแสและแรงดันคร่อมสวิตช์ของวงจรทอนระดับ จะเห็นได้ว่าวัฏจักรงานไม่คงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่วงจรป้อนกลับพยายามควบคุมวัฏจักรงาน เพื่อกำจัดความถี่ 100 Hz ที่ปนเข้ามาทางด้านขาเข้า ไม่ให้ไปปรากฏทางด้านขาออก ในรูปที่ 46 แรงดันของตัวเก็บประจุมีค่าใกล้เคียงกับที่ได้จากการซีมูเลต แต่กระแสผ่านไดโอดที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการซีมูเลต ซึ่งเป็นผลเนื่องจากอิมพีแดนซ์ของสายซึ่งไม่เท่ากับที่สมมุติไว้

ตารางที่ 3 คุณลักษณะของวงจรทอนระดับ

Vin (V)	Iin (A)	Vout (V)	Iout (I)	Pin (W)	ประสิทธิภาพ (%)
198	0.5	137.6	0	60	0
198	4.0	137.3	2.6	433	82.4
198	7.5	137.1	5.1	802	87.2
198	10.0	136.9	7.7	1170	90.0
198	12.9	136.8	10.2	1540	90.6

ตารางที่ 3 (ต่อ) คุณลักษณะของวงจรทอนระดับ

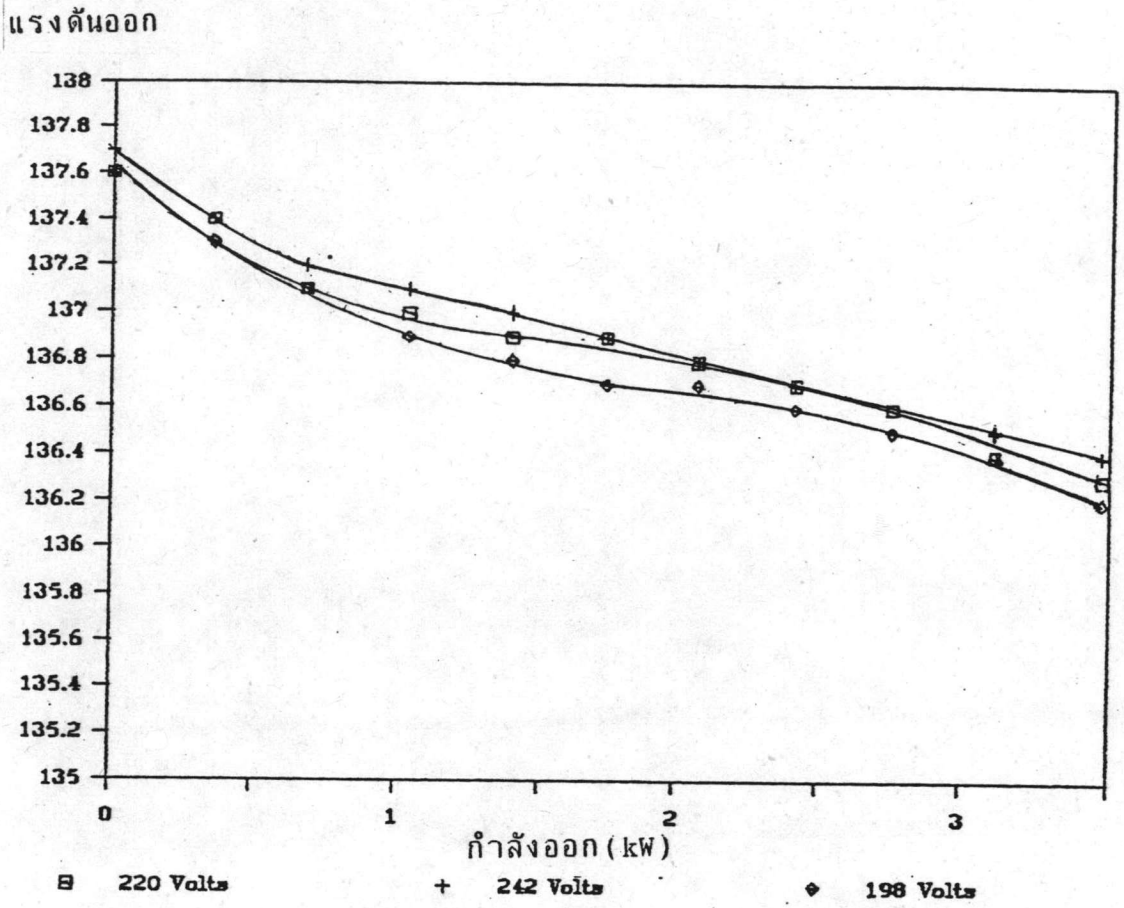
Vin (V)	Iin (I)	Vout (V)	Iout (I)	Pin (W)	ประสิทธิภาพ (%)
198	15.6	136.7	12.7	1906	91.0
198	18.4	136.7	15.2	2280	91.1
198	21.1	136.6	17.8	2660	91.4
198	23.8	136.5	20.2	3028	91.0
198	26.3	136.4	22.7	3400	91.0
198	29.0	136.2	25.2	3770	91.0
220	0.4	137.6	0	60	0
220	3.8	137.4	2.6	440	81.2
220	6.7	137.1	5.0	806	85.0
220	9.4	137.0	7.6	1180	88.2
220	12.0	136.9	10.2	1546	90.3
220	14.6	136.9	12.7	1916	90.7
220	17.2	136.8	15.2	2284	91.0
220	19.5	136.7	17.7	2654	91.2
220	22.1	136.6	20.2	2759	91.0
220	24.6	136.4	22.8	3414	91.5
220	27.2	136.3	25.5	3800	91.5
242	0.4	137.7	0	60	0
242	3.4	137.4	2.6	450	79.2
242	5.9	137.2	5.1	840	83.3

ตารางที่ 3 (ต่อ) คุณลักษณะของวงจรทอนระดับ

Vin (V)	Iin (I)	Vout (V)	Iout (I)	Pin (W)	ประสิทธิภาพ (%)
242	8.3	137.1	7.7	1190	88.7
242	10.7	137.0	10.2	1567	89.2
242	12.9	136.9	12.7	1940	89.6
242	15.0	136.8	15.3	2308	90.4
242	17.2	136.7	17.8	2680	90.8
242	19.3	136.7	20.2	3054	90.4
242	21.3	136.5	22.7	3424	90.5
242	23.4	136.4	25.2	3792	90.6

ตารางที่ 3 แสดงประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับ ในกรณีที่แรงดันไฟสลับมีค่าต่ำสุด (198 V) ค่าที่ระบุ (220 V) และค่าสูงสุด (242 V)

จากตารางที่ 3 นำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 47 และ 48



รูปที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันออกและกำลังออกของวงจรทอนระดับเมื่อแรงดันไฟสลับด้านเข้ามีค่าต่างกัน

จากรูปที่ 47 สามารถนำมาคำนวณหาค่าความคุมค่าแรงดันเชิงโหลด (load regulation)กับความคุมค่าแรงดันเชิงสายป้อน(line regulation) ได้ดังนี้

ความคุมค่าเชิงโหลด = (แรงดันไร้โหลด - แรงดันโหลดเต็มที่) x 100/แรงดันโหลดเต็มที่

= (137.6 - 136.3) x 100/136.3

= 0.95 %

ความคุมค่าเชิงสายป้อน = แรงดันเปลี่ยนแปลง x 100/แรงดันปกติ

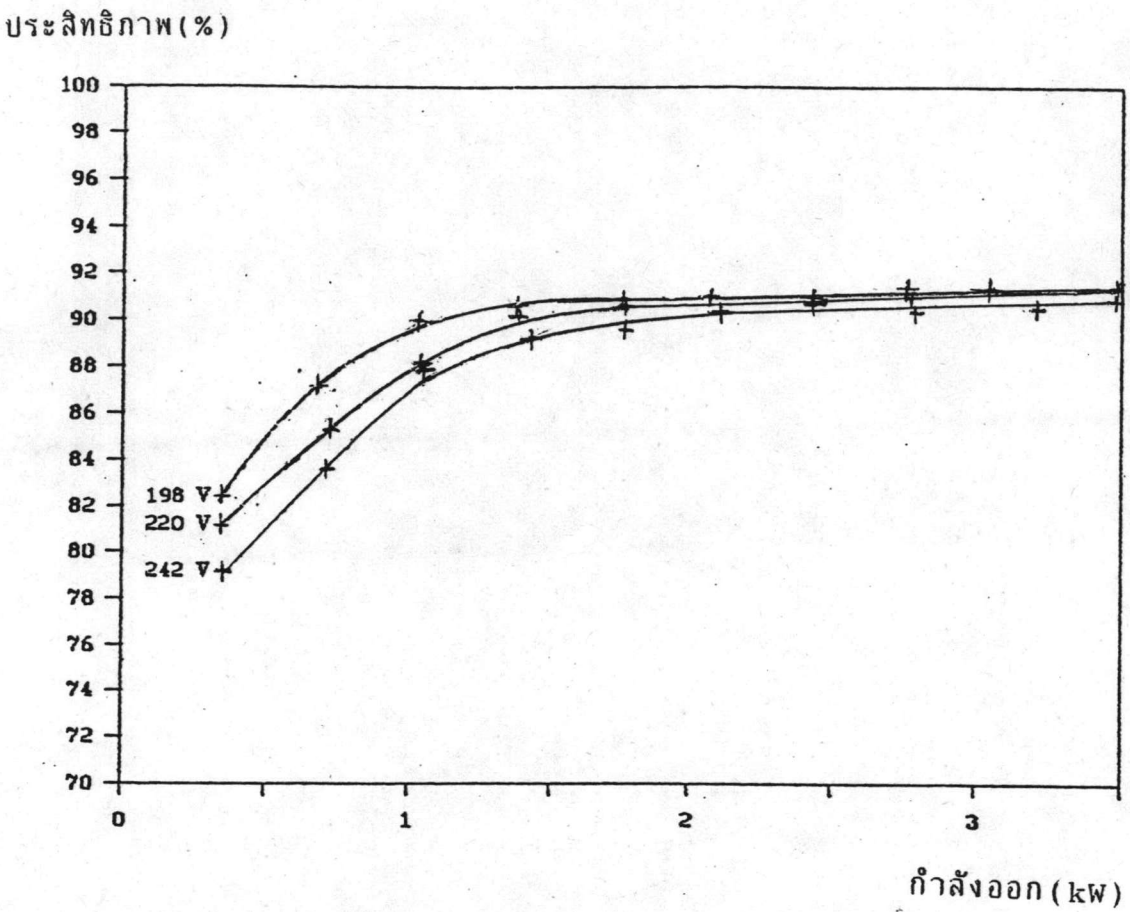
= (136.4 - 136.3) x 100/136.3

= 0.07 %

หรือ ความคุมค่าเชิงสายป้อน = (136.2 - 136.3) x 100/136.3

= - 0.07 %

กล่าวโดยสรุปคือ ความคุมค่าเชิงสายป้อนมีค่าประมาณ 0.07 %



รูปที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกำลังออกของวงจรทอนระดับเมื่อแรงดันไฟสลับด้านเข้ามีค่าต่างๆกัน

จากรูปที่ 48 จะเห็นได้ว่าเมื่อกำลังออกมีค่าสูงกว่า 1 kW ประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับจะสูงกว่า 88 % ซึ่งเป็นที่น่าพอใจ