3.5 ผลการทดลองวัดคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์

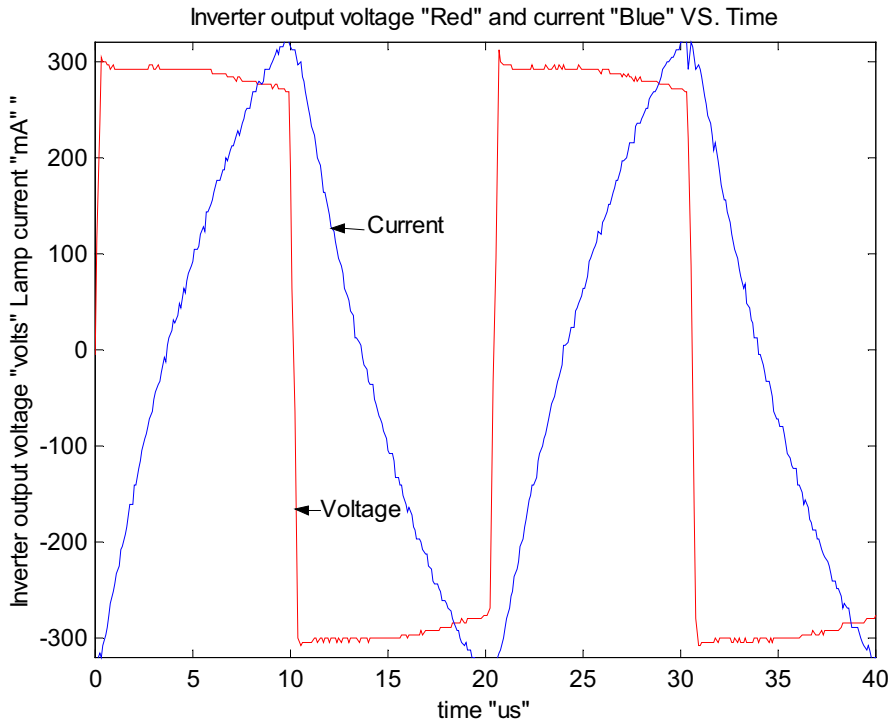
เพื่อทดสอบความถูกต้องของผลการคำนวณทางทฤษฎี ที่ประมาณหลอดฟลูออเรสเซนต์ ที่มีคุณสมบัติไม่เชิงเส้น ด้วยตัวต้านทานแบบเชิงเส้นและแทนอินเวอร์เตอร์ที่มีแรงดันออกเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมด้วยวงจรสมมูลสำหรับความถี่หลักมูล ได้ทดลองวัดค่ากระแสและแรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์และวงจรหลอดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จากผู้ผลิต 2 รายและผลิตภัณฑ์ของบริษัทไทยยูนิลักส์ จำกัด เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีที่คำนวณโดยใช้ค่าแรงดันไฟตรง V_{dc} ค่าความเหนี่ยวนำ Ls ค่าตัวเก็บประจุ Cig พิกัด ความต้านทานหลอด (R_L) ที่คำนวณจากกระแสหลอด (I_{lamp}) แรงดัน(V_{lamp}) ตลอดจนความถี่ที่ได้จากการวัด (f_s) ในการทดลองวัดคุณสมบัติของวงจรอินเวอร์เตอร์และวงจรหลอด เนื่องจากแรงดันออกของวงจรเรียงกระแสที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองและแรงดันไฟตรงด้านเข้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ไม่ได้มีเฉพาะองค์ประกอบแรงดันไฟตรงแต่จะมีแรงดันกระเพื่อมด้วยทำให้แรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์เปลี่ยนแปลงกับเวลาด้วยความถี่ 100 Hz แรงดันกระเพื่อมดังกล่าวมีผลให้กระแสออกและและแรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์เปลี่ยนแปลงกับเวลาด้วยความถี่ 100 Hz ด้วย การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีผลต่อขนาดของกระแสและแรงดันที่หลอดด้วย นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของกำลังและคุณสมบัติของหลอดซึ่งได้แก่ค่าความต้านทานสมมูลของหลอดที่มีลักษณะสมบัติไม่เชิงเส้นทำให้การนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีมีความคลาดเคลื่อน เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวการทดลองวัดคุณสมบัติของวงจรอินเวอร์เตอร์จึงใช้วิธีป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจรคงค่าแรงดันเพื่อลดแรงดันกระเพื่อมลงต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยใช้ค่าแรงดันไฟตรงเท่ากับแรงดันเฉลี่ยด้านออกของวงจเรียงกระแสเมื่อใช้ไฟฟ้ากระแสสลับจากสายกำลังเท่ากับค่าพิกัดสูงสุดที่ผู้ผลิตกำหนด จากการทดลองวัดพบว่ากำลังที่หลอดมีค่าประมาณร้อยละ 90 ของกำลังที่ผู้ผลิตกำหนดเมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้ามีค่าเท่ากับค่าพิกัดสูงสุดที่ผู้ผลิตกำหนด การที่กำลังที่หลอดมีค่าประมาณร้อยละ 90 ของกำลังที่ผู้ผลิตกำหนดนั้นน่าจะเป็นผลมาจากการที่ผู้ผลิตมักจะกำหนดกำลังพิกัดของหลอดเมื่อใช้หลอดกับไฟฟ้ากระแสสลับจากสายกำลัง แต่เมื่อใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงที่มี luminous efficacy สูงขึ้นประมาณร้อยละ 10 ทำให้สามารถลดกำลังที่ป้อนให้หลอดลงได้ประมาณร้อยละ 10 เพื่อให้แสงของหลอดมีค่าเท่ากับกรณีที่ใช้หลอดกับไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สายกำลัง

เนื่องจากการวิเคราะห์การทำงานของอินเวอร์เตอร์ ใช้วงจรสมมูลสำหรับความถี่หลักมูล ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี จึงได้คำนวณขนาดของกระแส แรงดันและกำลังของความถี่หลักมูลและองค์ประกอบฮาร์มอนิกต่าง ๆ(spectrum) รูปที่ 3.10 แสดงรูปคลื่นของแรงดันออกและกระแสออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ จะเห็นได้ว่าแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์มีรูปคลื่นสี่เหลี่ยมในขณะที่กระแสออกมีรูปคลื่นระหว่างสามเหลี่ยมกับไซน์ รูปที่ 3.11 แสดง

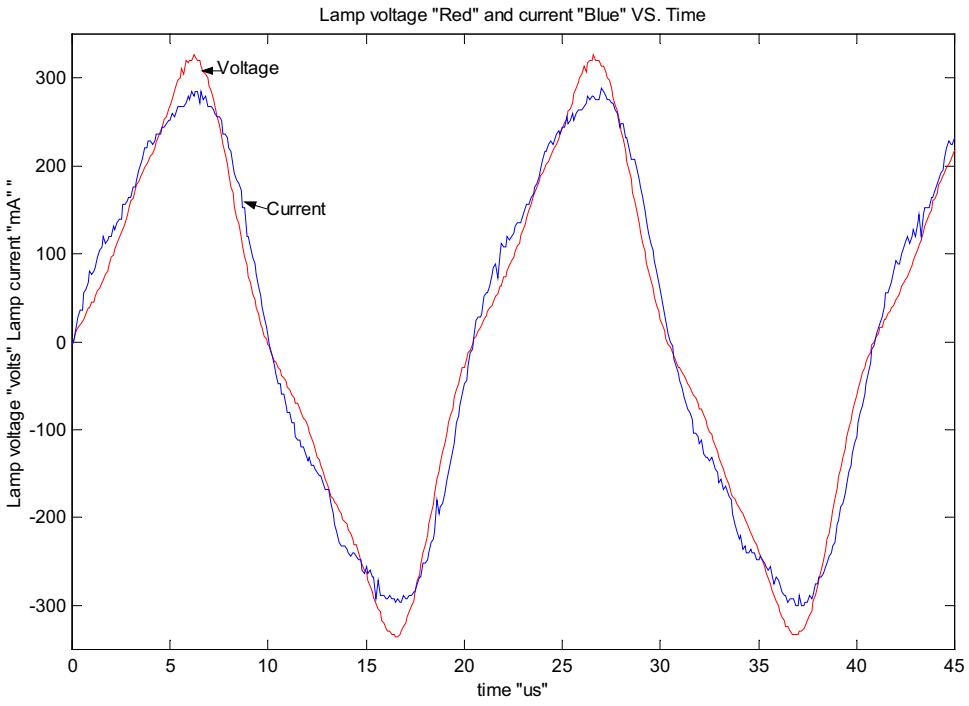
รูปคลื่นของแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอด จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นของแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอด มีลักษณะใกล้ไซน์ รูปที่ 3.12 และ 3.13 แสดงค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิกของแรงดันออก กระแสออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแรงดันออกจะมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกมากในขณะที่กระแสออกและกำลังออกมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกน้อยมาก จากผลการคำนวณพบว่า องค์ประกอบฮาร์มอนิกของแรงดัน $THDV_{inv}$ มีค่าร้อยละ 43.4 ใกล้เคียงกับ THD ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งมีค่าร้อยละ 48.3 ส่วนองค์ประกอบฮาร์มอนิก(THD)ของกระแส I_{inv} มีค่าเพียงร้อยละ 12.4 รูปที่ 3.14 3.15 และ 3.16 แสดงค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิกของแรงดันคร่อมหลอด กระแสผ่านหลอด และกำลังที่หลอดตามลำดับ จะเห็นได้ว่าทั้งแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกน้อยมาก จากผลการคำนวณพบว่า องค์ประกอบฮาร์มอนิกของแรงดันคร่อมหลอด $THDV_{lamp}$ มีค่าร้อยละ 18.7 ส่วน องค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสผ่านหลอด $THDI_{lamp}$ มีค่าเพียงร้อยละ 13 ซึ่งใกล้เคียงกับองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ $THDI_{inv}$ การคำนวณองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกำลังออกในรูปที่ 3.16 พบว่า กำลังออกของอินเวอร์เตอร์อยู่ในความถี่หลักมูลประมาณร้อยละ 98 ผลการคำนวณดังกล่าวแสดงว่าการวิเคราะห์การทำงานของบัลลาสต์โดยใช้ความถี่หลักมูลน่าจะให้ค่ากำลังที่ใกล้เคียงผลการทดลองซึ่งแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 3.4 ถึง 3.6 เปรียบเทียบผลการคำนวณทางทฤษฎีกับผลการวัดจากบัลลาสต์สำหรับคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์ของผู้ผลิตอื่น 2 ราย และบริษัท ไทยยูนิลักส์ จำกัด การเปรียบเทียบดังกล่าวทำให้ทราบถึงความถูกต้องและข้อจำกัดของแบบจำลองแบบเชิงเส้นสำหรับความถี่หลักมูลเมื่อใช้คำนวณและออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีแรงดันออกเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมและใช้ความต้านทานแบบเชิงเส้นแทนหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไม่เชิงเส้น

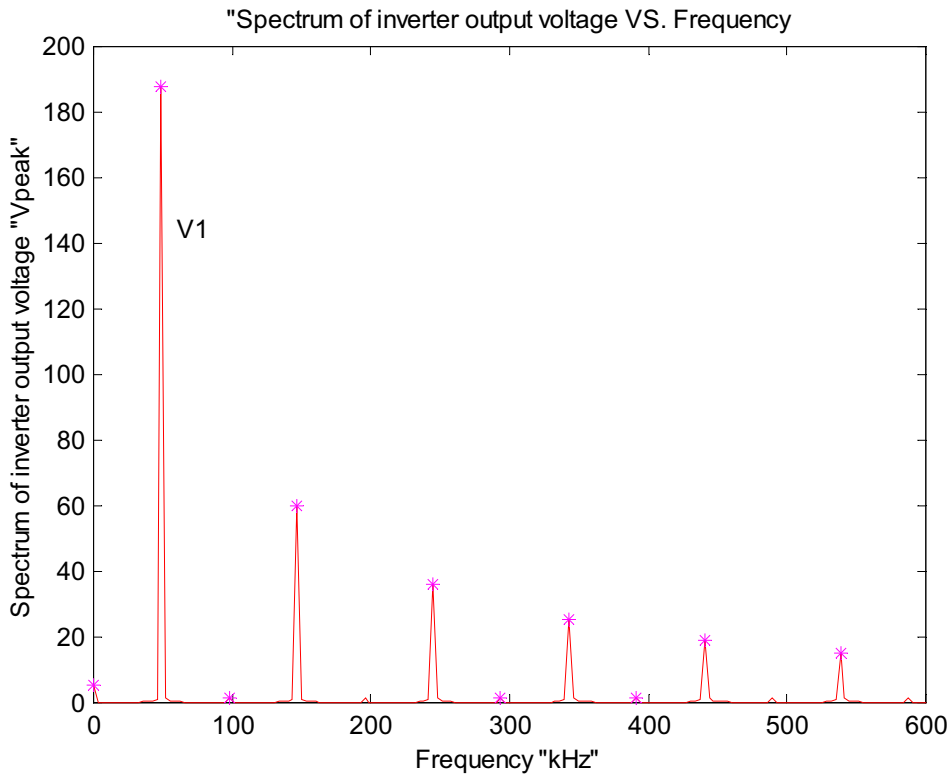
จากการเปรียบเทียบค่าในตารางที่ 3.4 ถึง 3.6 จะเห็นได้ว่าการคำนวณทางทฤษฎี ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยมีความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกับความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด คือมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 5 ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบดังกล่าว ประกอบกับผลการคำนวณโดยใช้ค่าที่ได้จากการวัดและผลการทดลองที่บ่งชี้ว่ากำลังส่วนใหญ่ที่หลอดเป็นผลของกระแสและแรงดันของความถี่หลักมูล ดังนั้นจึงอาจจะกล่าวได้ว่าการคำนวณและออกแบบวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้วงจรสมมูลแบบเชิงเส้นสำหรับความถี่หลักมูลจะให้ผลที่คลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 5 ซึ่งน่าจะเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบ CFL ยกเว้นการประเมินค่าประสิทธภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าที่ควรจะเป็นเนื่องจากความแตกต่างของกำลังเข้าและกำลังออกมีค่าใกล้เคียงกับความคลาดเคลื่อนของการวัด



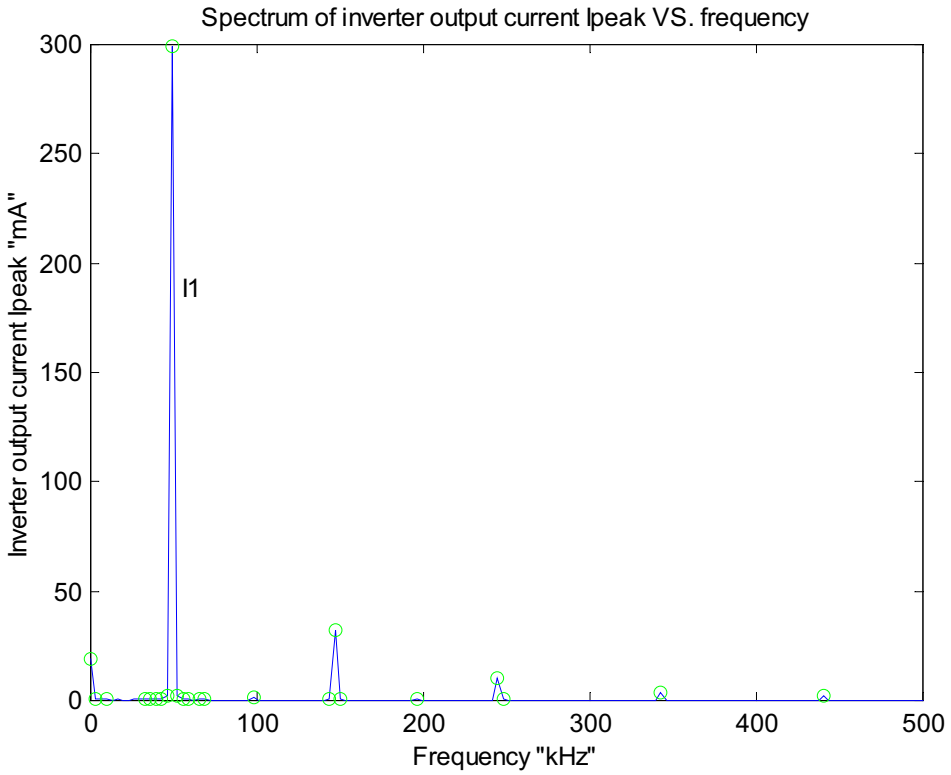
รูปที่ 3.10 รูปคลื่นของกระแสออก(mA)และแรงดันออก(V)ของวงจรอินเวอร์เตอร์ (ผู้ผลิต C)



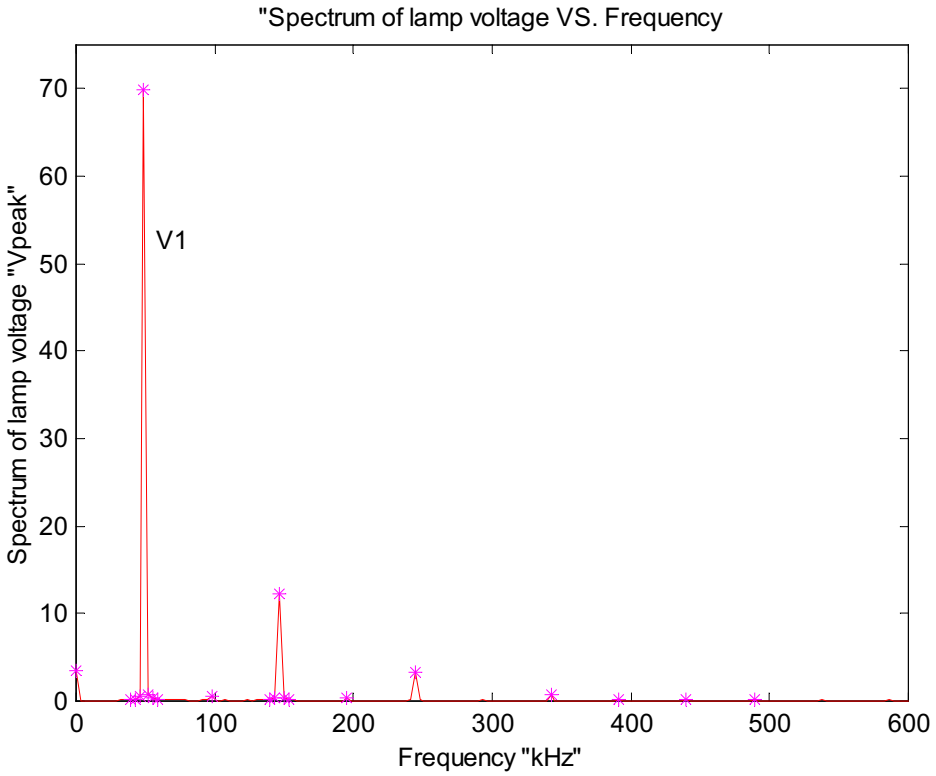
รูปที่ 3.11 รูปคลื่นของกระแสผ่านหลอด(mA)และแรงดันคร่อมหลอด(V) (ผู้ผลิตC)



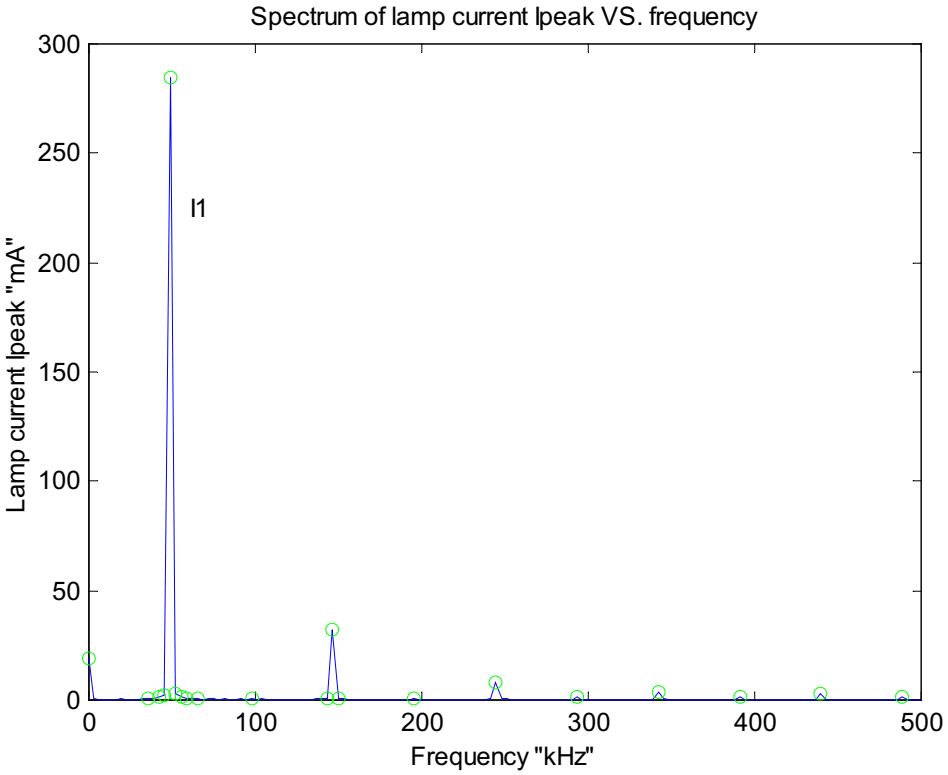
รูปที่ 3.12 องค์ประกอบฮาร์มอนิกของแรงดันออก(V_{peak}"V")ของอินเวอร์เตอร์(ผู้ผลิต C)



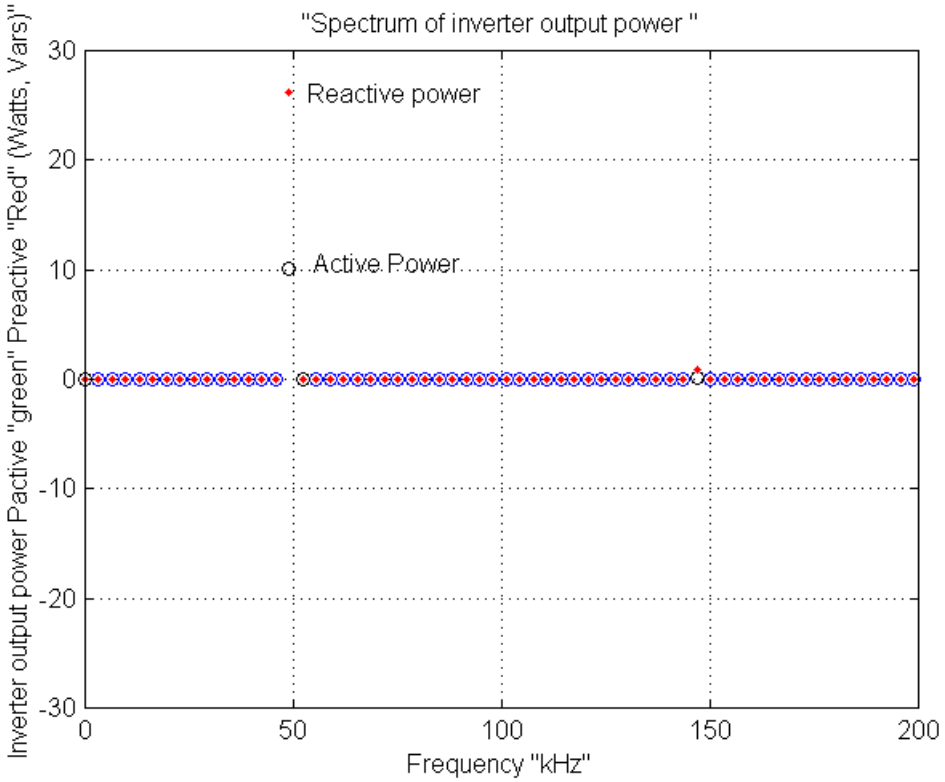
รูปที่ 3.13 องค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสออก(I_{peak} "mA")ของอินเวอร์เตอร์ (ผู้ผลิตC)



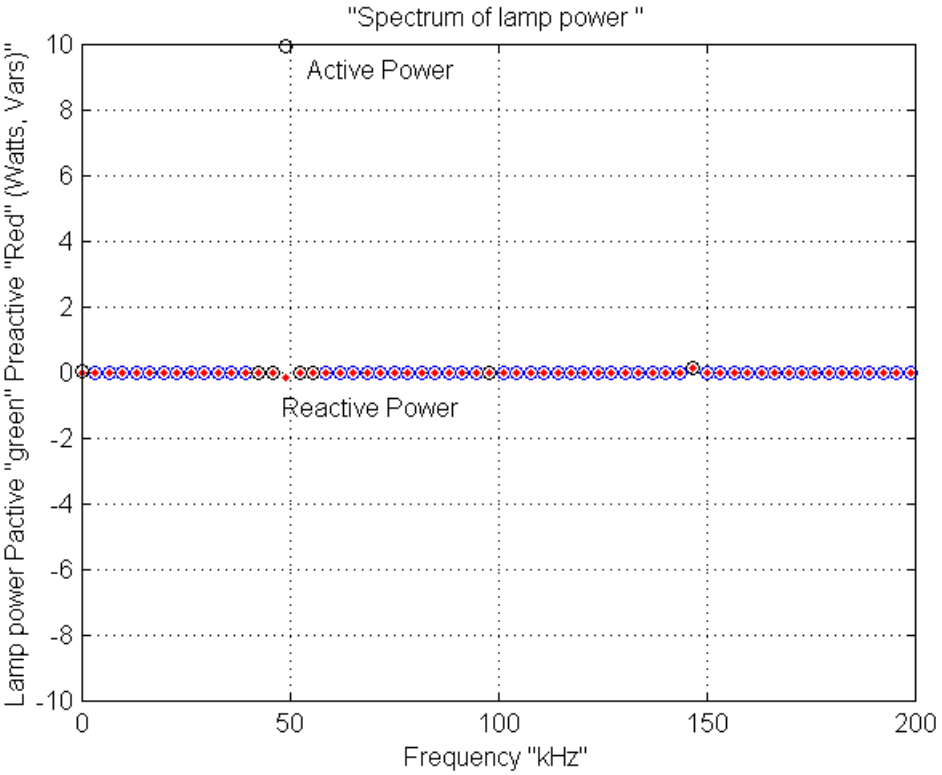
รูปที่ 3.14 องค์ประกอบฮาร์มอนิกของแรงดันคร่อมหลอด(V_{peak} “V”)ของหลอด(ผู้ผลิต C)



รูปที่ 3.15 องค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสผ่านหลอด(I_{peak} “mA”)ของหลอด (ผู้ผลิตC)



รูปที่ 3.16 Active Power และ Reactive Power ที่ความถี่ต่าง ๆ ที่อินเวอร์เตอร์(ผู้ผลิต C)



รูปที่ 3.17 Active Power และ ReactivePower ที่ความถี่ต่าง ๆ ที่หลอด (ผู้ผลิตC)

ตารางที่ 3.4 ผลการคำนวณทางทฤษฎีและผลการทดลองวงจรด้านออกของ CFL แบบต่าง ๆ

ผู้ผลิต	ผู้ผลิต C, พิกัด 7 วัตต์		Thai Unilux,พิกัด 9 วัตต์		หมายเหตุ
เวลาผลิต	Preheat Start รุ่นเก่า		Instant start รุ่นเก่า-ใหม่		
ตัวแปร	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง	
V_{line}(V)	230	229.3	230	229.8	
V_{dc}(V)	NA	309.3	NA	296	
V_{inv}(V)	NA	143.5	NA	140.8	
V_{inv1}(V)	135.8	135.8	132.4	132.4	
f_s(kHz)	34.8	34.8	24.4	24.4	
f_0(kHz)	51.8	51.8	35.2	35.2	
V_{lamp}(V)	NA	50.7	NA	54.8	
V_{lamp1}(V)	51.2	49.5	54.7	54.0	
I_{lamp}(mA)	NA	120.7	NA	141.2	
I_{lamp1}-mA	124.1	119.9	142.2	140.4	
R_{lamp1}	413.1	413.1	385	385	
Ls(mH)	4.86	4.86	5.9	5.9	
Cig(nF)	1.94	1.94	3.46	3.46	
I_{inv}(mA)	NA	136.7	NA	145.2	
I_{inv1}-mA	126.1	135.9	145.2	144.4	
PHI_{inv}(dg)	- 67.2	- 68.3	- 64.4	- 64.4	
P_{inv}(W)	NA	6.95	NA	8.4	
P_{inv1}(W)	6.65	6.8	8.0	8.3	
P_{lamp}(W)	NA	6.0	NA	7.7	
P_{lamp1}(W)	6.4	5.9	7.8	7.6	
I_{fil}(mA)	21.7	31.9	29.0	25	
InverterPF	NA	0.31	NA	0.38	
InverterVA	NA	19.6	NA	20.4	
Inv-η(%)	NA	86.3	NA	91.8	

ตารางที่ 3.5 ผลการคำนวณทางทฤษฎีและผลการทดลองวงจรด้านออกของ CFL แบบต่าง ๆ

ผู้ผลิต	ผู้ผลิต C, พิกัด 11 วัตต์		ผู้ผลิต E, พิกัด 11 วัตต์		ผู้ผลิต C, พิกัด 15 วัตต์	
เวลาผลิต	Preheat Start รุ่นเก่า-ใหม่		Preheat Start รุ่นเก่า-ใหม่		Preheat Start รุ่นเก่า-ใหม่	
ตัวแปร	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง
V_{line}(V)	240	238.4	230	230.1	230	231
V_{dc}(V)	NA	310	NA	285	NA	300.5
V_{inv}(V)	NA	151.5	NA	144.9	NA	142.6
V_{inv1}(V)	140.6	140.6	132.9	132.9	133.0	133.0
f_s(kHz)	32.1	32.1	48.9	48.9	38.6	38.6
f_0(kHz)	60.9	60.9	55.5	55.5	65.2	65.2
V_{lamp}(V)	NA	43.3	NA	50.3	NA	70.6
V_{lamp1}(V)	42.8	42.6	49.7	49.4	67.9	69.6
I_{lamp}(mA)	NA	218.4	NA	202.9	NA	195.7
I_{lamp1}-mA	217.7	218.1	202.4	201.2	189.3	193.9
R_{lamp1}	196.4	196.0	245.5	245.3	358.7	358.7
Ls(mH)	3.11	3.11	2.11	2.11	2.71	2.71
Cig(nF)	2.2	2.2	3.9	3.9	2.2	2.2
I_{inv}(mA)	NA	221.4	NA	213.0	NA	200.5
I_{inv1}-mA	218.6	220.3	211.6	211.4	193	199.0
PHI_{inv}(dg)	- 71.2	- 71.7	- 68.1	- 68.9	- 59.1	- 58.2
P_{inv}(W)	NA	9.9	NA	10.3	NA	14.2
P_{inv1}(W)	9.8	9.7	10.5	10.1	13.2	14.0
P_{lamp}(W)	NA	9.4	NA	10.2	NA	13.7
P_{lamp1}(W)	9.3	9.3	10.1	10	12.9	13.5
I_{fil}(mA)	19.2	27.8	59.6	65.4	36.6	39.3
InverterPF	NA	0.28	NA	0.33	NA	0.48
InverterVA	NA	33.5	NA	30.9	NA	28.6
Inv-η(%)	NA	94.9	NA	99	NA	96.5

ตารางที่ 3.6 ผลการคำนวณทางทฤษฎีและผลการทดลองของวงจรด้านออกของ CFL แบบต่าง ๆ

ผู้ผลิต	Thai Unilux,พิกัด 18 วัตต์		ผู้ผลิต E, พิกัด 18 วัตต์		ผู้ผลิต C, พิกัด 21 วัตต์	
เวลาผลิต	Instant start รุ่นใหม่		Instant start รุ่นใหม่		Instant start รุ่นเก่า-ใหม่	
ตัวแปร	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง
V_{line}(V)	220	219.5	230	227.8	230	228.0
V_{dc}(V)	NA	290.3	NA	282.0	NA	278.3
V_{inv}(V)	NA	136.4	NA	126.7	NA	132.5
V_{inv1}(V)	128.9	128.9	122.1	122.1	122.0	122.0
f_s(kHz)	41.3	41.3	38.3	38.3	45.4	45.4
f_0(kHz)	65.9	65.9	54.2	54.2	54.9	54.9
V_{lamp}(V)	NA	92.4	NA	101.5	NA	87.3
V_{lamp1}(V)	92.17	91.6	102.2	100.8	85.3	86.7
I_{lamp}(mA)	NA	166.8	NA	171.5	NA	203.6
I_{lamp1}-mA	166.3	165.3	172.1	169.8	198.7	202.1
R_{lamp1}	554.0	554.0	593.7	539.7	429.3	429.3
Ls(mH)	2.65	2.65	2.61	2.61	2.05	2.05
Cig(nF)	2.2	2.2	3.3	3.3	4.1	4.1
I_{inv}(mA)	NA	190.2	NA	198.7	NA	236.5
I_{inv1}-mA	174.9	189.0	191	197.9	223.7	235.4
PHI_{inv}(dg)	- 45.9	- 46.3	- 39.0	- 39.0	- 49.4	- 46.4
P_{inv}(W)	NA	17.1	NA	18.9	NA	18.9
P_{inv1}(W)	15.7	16.8	18.1	18.8	17.7	18.7
P_{lamp}(W)	NA	15.3	NA	17.2	NA	17.7
P_{lamp1}(W)	15.3	15.1	17.6	17.1	16.9	17.5
I_{fil}(mA)	52.7	68.0	81.2	85.7	99.7	100.8
InverterPF	NA	0.59	NA	0.68	NA	0.56
InverterVA	NA	25.9	NA	25.2	NA	31.3
Inv-η(%)	NA	89.5	NA	91.0	NA	93.6

จากการพิจารณาผลการวัดคุณสมบัติของวงจรอินเวอร์เตอร์จะสรุปได้ดังนี้

- วงจรมีความถี่การทำงานในภาวะปรกติระหว่าง 25 –50 kHz โดยในระยะหลังนิยมใช้ความถี่ระหว่าง 35 – 50 kHz
- ทุกวงจรทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง (f_0) ของวงจรโหลดและมีแนวโน้มที่ออกแบบให้ความถี่การทำงานเข้าใกล้ f_0 มากขึ้น
- วงจรที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดมักออกแบบให้มีกระแสเผาไส้ในภาวะการทำงานปรกติต่ำกว่าแบบจุดติดทันที หรือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามกำลังออกของหลอด
- กระแสอินเวอร์เตอร์มีค่าสูงกว่ากระแสหลอดไม่เกินร้อยละ 15 โดยวงจรที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดมีกระแสอินเวอร์เตอร์ใกล้เคียงกับกระแสหลอดมากกว่า
- ในภาวะการทำงานปรกติกระแสออกของอินเวอร์เตอร์จะล้าหลังแรงดันมากกว่า 50 องศา
- ค่าตัวประกอบกำลังของอินเวอร์เตอร์จะมีค่าต่ำ โดยมีค่าระหว่าง 0.3 –0.7 และแนวโน้มเพิ่มตามกำลังออก
- กำลังออกของหลอดต่ำกว่าค่าพิกัดที่กำหนดเสมอโดยมีค่าต่ำกว่าประมาณร้อยละ10
- ในช่วงจุดหลอดวงจร CFL ที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดจะมีกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ล้าหลังแรงดันเสมอ แต่ CFL แบบจุดติดทันทีที่ใช้การป้อนกลับกระแสออกในการขับนำสวิตช์ไวงานจะมีความถี่เพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่มีกระแสล้าหลังแรงดันแต่จะมีบางช่วงที่กระแสนำหน้าแรงดันทำให้เกิดความเค้นในสวิตช์ไวงานสูง
- แรงดันพิกัดของหลอดมีแนวโน้มเพิ่มตามกำลังออกแต่มีหลอดกำลังสูงกว่าแต่มีแรงดันพิกัดที่หลอดต่ำกว่าหลอดที่มีกำลังพิกัดต่ำกว่า

3.6 สรุป

การวิเคราะห์วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองส่วนคือการวิเคราะห์วงจรเรียงกระแสที่มีตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองใช้วิธีการทางกราฟที่ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับผลการทดลองสำหรับแรงดันไฟตรงด้านออก แต่การคำนวณแรงดันกระเพื่อมจะมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้นและการคำนวณองค์ประกอบฮาร์มอนิกมีความคลาดเคลื่อนสูงมากเนื่องจากองค์ประกอบฮาร์มอนิกมีความไวต่อความผิดพลาดจากการอ่านค่าอัตราส่วนกระแสรวมต่อกระแสที่ความถี่หลักมูลจากกราฟมาก การวิเคราะห์วงจรอินเวอร์เตอร์ใช้การจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วยแบบจำลองเชิงแบบเส้นสำหรับความถี่หลักมูล ส่วนการวัดคุณสมบัติของวงจรทั้งสองใช้หัววัดกระแสและ Oscilloscope ที่สามารถเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์โดยการคำนวณองค์ประกอบความถี่หลักมูลและองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ต่าง ๆ ด้วยวิธี DFT ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า กำลังส่วนใหญ่ที่หลอดเกิดจากกระแสและแรงดันที่ความถี่หลักมูลทำให้ผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองเชิงเส้นสำหรับความถี่หลักมูลให้ผลการคำนวณที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยโดยมีค่าใกล้เคียงกับความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด การพัฒนาแบบจำลองแบบเชิงเส้นของวงจรทำให้สามารถวิเคราะห์วงจรได้เป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบอย่างเป็นระบบในบทต่อไป

จากการศึกษาวงจร CFL พบว่า CFL ที่มีจำหน่ายในประเทศไทยไม่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง โดยมีค่าตัวประกอบกำลังระหว่าง 0.5 ถึง 0.65 มีองค์ประกอบฮาร์มอนิกระหว่างร้อยละ 100 ถึง 150 การออกแบบ CFL มีแนวโน้มที่จะลดค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรองลงเมื่อเทียบกับการออกแบบวงจรในระยะแรกเพื่อลดองค์ประกอบฮาร์มอนิกและเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ใช้ความถี่ต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติไม่หน่วงซึ่งจะทำให้กระแสเผาไส้ต่ำ แต่การออกแบบในลักษณะดังกล่าวมีผลทำให้กระแสออกของอินเวอร์เตอร์นำหน้าแรงดันในช่วงจุดหลอด สำหรับ CFL แบบจุดติดทันทีในบางขณะถึงแม้วงจรขับนำจะสามารถเพิ่มความถี่ขึ้นในช่วงจุดหลอดซึ่งเป็นลักษณะธรรมชาติของวงจรขับนำที่ใช้หลักการดังกล่าว ทำให้เกิดความเค้นในสวิตช์ แต่ในช่วงทำงานปรกติกระแสจะล้าหลังแรงดันเนื่องจากค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรในช่วงทำงานปรกติมีค่าต่ำ สำหรับ CFL ที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดสามารถออกแบบให้กระแสเผาไส้ในช่วงทำงานปรกติต่ำได้ แต่ CFL แบบจุดติดทันทีมักต้องออกแบบโดยยอมให้กระแสเผาไส้เพิ่มขึ้นเพื่อลดผลความเค้นช่วงจุดหลอดโดยเฉพาะวงจรที่มีกำลังสูงซึ่งแรงดันหลอดสูงมักจะมีค่าสูงกว่าหลอดกำลังต่ำ อย่างไรก็ดีข้อจำกัดด้านราคามีผลให้มี CFL แบบจุดติดทันทีครองตลาดได้มากขึ้นและการหาซื้อ CFL คุณภาพดีที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดและมีอายุการใช้งานมากกว่าทำได้ยากขึ้นเรื่อย ๆ

บทที่ 4
การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

4.1 บทนำ

ในบทที่ 3 ได้นำเสนอการวิเคราะห์วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ โดยแบ่งการวิเคราะห์วงจรออกเป็น 2 ส่วนคือ การวิเคราะห์วงจรเรียงกระแสที่มีตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับจากสายกำลังเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและการวิเคราะห์วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง การวิเคราะห์วงจรแต่ละส่วนมีแนวทางที่แตกต่างกัน กล่าวคือ การวิเคราะห์วงจรเรียงกระแสที่มีตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองซึ่งเป็นวงจรไม่เชิงเส้นมีรูปลักษณ์วงจรเปลี่ยนแปลงกับเวลาจะวิเคราะห์โดยใช้กราฟ ส่วนการวิเคราะห์วงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีรูปคลื่นของแรงดันเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมและมีโหลดแบบไม่เชิงเส้นจะวิเคราะห์แบบประมาณโดยใช้วงจรสมมูลแบบเชิงเส้นสำหรับความถี่หลักมูล เนื่องจากอินเวอร์เตอร์มีวงจรโหลดที่มีคุณสมบัติเป็นวงจรกรองแบบผ่านต่ำทำให้กำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่อยู่ในองค์ประกอบความถี่หลักมูล นอกจากนี้ผลของการใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงทำให้ลักษณะสมบัติกระแสแรงดันของหลอดมีความไม่เป็นเชิงเส้นน้อยกว่าการใช้ไฟฟ้ากระแสสลับจากสายกำลัง ดังนั้นจึงอาจประมาณคุณสมบัติกระแสแรงดันของหลอดด้วยตัวต้านทานแบบเชิงเส้นที่มีค่าแปรตามค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสผ่านหลอด การประมาณโดยวิธีดังกล่าวทำให้สามารถเขียนวงจรสมมูลและสมการของวงจรอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ได้ การมีสมการของวงจรทำให้สามารถคำนวณคุณสมบัติต่าง ๆ ของวงจรสำหรับเป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์อย่างเป็นระบบ

เนื่องจากแนวทางการวิเคราะห์วงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์มีแนวทางที่ต่างกัน โดยการวิเคราะห์วงจรเรียงกระแสจะใช้วิธีการทางกราฟ ส่วนการวิเคราะห์วงจรอินเวอร์เตอร์ใช้วงจรสมมูลสำหรับความถี่หลักมูลดังนั้นการออกแบบจะออกแบบวงจรแต่ละส่วนแยกกันโดยวงจรทั้งสองส่วนจะเชื่อมโยงกันผ่านแรงดันไฟตรงด้านออกของวงจรเรียงกระแสหรือแรงดันเข้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์จะมีการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบจุดติดทันทีและการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอด การออกแบบวงจรแต่ละส่วนจะเริ่มจากข้อกำหนดของการออกแบบ จากนั้นจึงคำนวณหาคุณสมบัติการทำงานของวงจรสำหรับการใช้ค่าอุปกรณ์ของวงจรโหลดที่แตกต่างกันเพื่อประกอบการตัดสินใจเลือกค่าอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับการใช้งานโดยจะต้องพิจารณาข้อมูลการทำงานหลายด้านประกอบกันตามลำดับความสำคัญ การออกแบบเป็นการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับ CFL ที่มีกำลังพิกัด 11 W แรงดันพิกัดของสายกำลังเท่ากับ 220 V

4.2 ข้อกำหนดของการออกแบบ

ข้อกำหนดในการออกแบบจะถูกกำหนดโดยคุณสมบัติของโหลดและแหล่งจ่ายพลังงานด้านเข้าของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์รวมทั้งมาตรฐานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งปัจจุบันมีมาตรฐานด้านความปลอดภัย [3-4] และมาตรฐานด้านคุณภาพของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดแบบ Tubular [5-6] แต่ยังไม่มีมาตรฐานสำหรับ CFL โดยตรง

4.2.1 ข้อกำหนดของหลอด

- กำลังพิกัดที่กำหนด W_{rated} 11 W
- แรงดันคร่อมหลอดรวม V_{lamp} 47.7 V
- แรงดันคร่อมหลอดที่ความถี่หลักมูล V_{1amp1} 47 V
- กระแสผ่านหลอดรวม I_{lamp} 220 mA
- กระแสผ่านหลอดที่ความถี่หลักมูล I_{lamp1} 219 mA
- กำลังที่หลอดรวม W_{lamp} 10.5 W
- กำลังที่ความถี่หลักมูล W_{lamp1} 10.2 W
- ความต้านทานหลอด
  - ความต้านทานสำหรับกระแสและแรงดันรวม (R_{lamp}) 217 Ω
  - ความต้านทานสำหรับความถี่หลักมูล (R_{lamp1}) 215 Ω
- ความต้านทานไส้หลอดทดสอบโดยใช้ความถี่สูงของบัลลาสต์เอง
  - ขณะเย็น (R_{fa}) 6.25 Ω
  - ก่อนเกิด plasma R_{fh} 35.5 Ω
  - หลังเกิด plasma R_{fion} 35.0 Ω
- กระแสเผาไส้เพื่อให้เกิด plasma 300 mA
- แรงดันขณะจุดหลอด (V_{igrms}) 400 V
- ค่ายอดแรงดันขณะจุดหลอด (V_{igpeak}) 550 V

<u>หมายเหตุ</u> - ปรกติแล้วกำลังพิกัดที่กำหนดของหลอดจะเป็นพิกัดเมื่อใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สายกำลัง 50/60 Hz แต่เมื่อใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงประสิทธิภาพของหลอดจะสูงขึ้นประมาณร้อยละ 10 กำลังที่ป้อนให้หลอดลงประมาณร้อยละ 10 เพื่อให้ได้ปริมาณแสงเท่ากับพิกัด ซึ่งกำลังที่หลอดควรจะมีค่าประมาณ 10 W อย่างไรก็ดี กำลังที่หลอดที่วัดได้จะต่ำกว่า 10 W ซึ่งอาจจะมีสาเหตุจากความผิดพลาดของเครื่องมือวัด หรืออาจเกิดจากขบวนการผลิตที่อาจจะคลาดเคลื่อนจากค่าที่กำหนดได้ การคำนวณและการออกแบบจะเป็นการคำนวณและออกแบบโดยใช้ค่าที่วัดได้ ซึ่งผลที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการวัดโดยใช้เครื่องมือวัดชุดเดิม

4.2.2 ข้อกำหนดของสายกำลัง (AC Line Characteristic)

- แรงดันพิกัด V_{rms} 220 V
- ค่าตัวประกอบกำลัง (power factor) มากกว่า 0.55
- Total Harmonic Distortion(THD) น้อยกว่า 120 %
- กระแสกระชาก(I_{surge}) น้อยกว่า 5 A

<u>หมายเหตุ</u> - คอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์ในปัจจุบันเป็นแบบที่ไม่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง และใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรอง เนื่องจากข้อจำกัดด้านราคา และขนาด ดังนั้นค่าตัวประกอบกำลังจะมีค่าระหว่าง 0.5 – 0.6

- หากใช้วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง แบบ Ripple or Valley Fill Power factor correction circuit ที่ใช้อุปกรณ์แบบเฉื่อยงานเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จะทำให้ ค่าตัวประกอบกำลังสูงกว่า 0.9 และ THD น้อยกว่าร้อยละ 30 แต่จะทำให้แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ มีการกระเพื่อมมากซึ่งจะส่งผลให้ค่าตัวประกอบค่ายอดของกระแสผ่านหลอด สูงกว่า 2.1

4.2.3 ข้อกำหนดด้านคุณภาพของกระแสผ่านหลอด (lamp current crest factor)

- ค่าตัวประกอบค่ายอดของกระแสผ่านหลอดไม่เกิน 1.7

4.2.4 ข้อกำหนดด้านการจุดหลอด (lamp ignition technique)

- Instant start และ Preheat starting

4.2.5 ข้อกำหนดด้านการป้องกันและความปลอดภัย

- แรงดันเปิดวงจรหลอด 800 V
- อินเวอร์เตอร์ต้องหยุดทำงานเมื่อหลอดเสื่อม
- อินเวอร์เตอร์ต้องหยุดทำงานเมื่อถอดหลอดเพื่อเปลี่ยนหลอด
- อินเวอร์เตอร์ต้องทำงานเองเมื่อเปลี่ยนหลอดใหม่แล้ว

4.2.6 การเลือกโครงสร้างของวงจร (Circuit Topology)

- **โครงสร้างของวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ**
  - วงจรเรียงกระแส แบบบริดจ์ 1 เฟส
  - วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง ไม่มี
- **โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์** แบบกึ่งบริดจ์

4.2.7 การเลือกการควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit Control)

- **แบบมีการเผาไส้ก่อนจุดหลอด**
  - ใช้วงจรกำเนิดสัญญาณด้วยวงจรประมวล
  - ใช้สวิตช์ไวงานเป็น FET

- **แบบจุดติดทันทีโดยไม่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอด**
  - ปรกติแล้วจะใช้วงจรกำเนิดสัญญาณขับนำโดยการป้อนกลับกระแสโหลดผ่านหม้อแปลงแบบอิ่มตัวได้ แต่การทดลองเพื่อให้สามารถควบคุมการทำงานได้จะใช้วงจรประมวลโดยตัดการทำงานช่วงเผาไส้ออก

หมายเหตุ - เนื่องจากต้องการให้เป็นบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการอุ่นไส้ก่อนจุดหลอด และเลือกการควบคุมการอุ่นไส้ควบคุมด้วยความถี่ ดังนั้นจึงเลือกใช้วงจรประมวลในการกำเนิดสัญญาณขับนำและใช้ FET เป็นสวิตช์ไวงาน

4.3 ขีดจำกัดในการออกแบบ

ขีดจำกัดของการออกแบบเป็นเงื่อนไขเพิ่มเติมในการออกแบบที่ผู้ออกแบบจะต้องทราบเพื่อให้บัลลาสต์ทำงานได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ขีดแบ่งระหว่างข้อกำหนดและขีดจำกัดในบางกรณีอาจจะไม่เด่นชัดนัก ขึ้นกับความรู้ความเข้าใจของผู้เขียนข้อกำหนด เช่นคุณสมบัติของหลอดที่ผู้ใช้โดยทั่วไปไม่ทราบอาจถือเป็นขีดจำกัดของการออกแบบได้ หรืออาจถือเป็นข้อกำหนดที่เป็นคุณสมบัติของหลอดก็ได้

4.3.1 ขีดจำกัดของวงจรเรียงกระแส

ขีดจำกัดโดยทั่วไปของวงจรเรียงกระแสมักจะปรากฏในข้อกำหนดเป็นส่วนใหญ่ เช่น องค์ประกอบฮาร์มอนิก(THD) ข้อจำกัดด้านกระแสกระชากที่จะส่งผลเสียต่อสวิตช์เปิด-ปิดไฟแสงสว่าง และการรบกวนอุปกรณ์ข้างเคียงเป็นต้น

4.3.2 ขีดจำกัดของวงจรอินเวอร์เตอร์

- กระแสออกของอินเวอร์เตอร์ต้องล้าหลังแรงดันอย่างเพียงพอเพื่อให้สวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ทำงานแบบเรโซแนนซ์ในภารแรงดันศูนย์ทั้งในช่วงจุดหลอดและในช่วงทำงานปรกติ
- สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แบบจุดติดทันทีซึ่งไม่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอด ต้องออกแบบให้มีช่วงการปล่อยประจุรุ่งแสงสะสม(cumulative glow discharge period) ระหว่างการจุดหลอดไม่เกิน 100 ms โดยไม่มีส่วนที่เป็นโลหะต่อลงดินอยู่ใกล้กับหลอดเพื่อช่วยการจุด ช่วงการปล่อยประจุรุ่งแสงสะสมจะถือได้ว่าจบลงเมื่อกระแสผ่านหลอดมีค่าอย่างน้อยร้อยละ 80 ของกระแสที่ระบุของหลอด
- ช่วงเวลาเผาไส้ก่อนจุดหลอดต้องไม่น้อยกว่า 400 ms
- ระหว่างการเผาไส้หลอดแรงดันวงจรเปิดต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่ระบุ
- ระหว่างการเผาไส้กระแสผ่านหลอดต้องมีค่าที่น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่ระบุ
- แรงดันจุดหลอดหลังจากการเผาไส้ต้องไม่น้อยกว่าค่าที่ระบุ
- เวลาในการเพิ่มขึ้นของแรงดันจนถึงค่าที่กำหนดในกรณีที่ตัดกระแสเผาไส้ก่อนจุดหลอดต้องไม่เกิน 100 ms

4.4 การออกแบบวงจรเรียงกระแส

ในการออกแบบวงจรเรียงกระแสที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจำเป็นต้องทราบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโหลด เช่นค่าความต้านทานของโหลด หรือในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสไม่ใช่ตัวต้านทานล้วนจะต้องทราบวงจรสมมูลของโหลด ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปแบบวงจรสมมูลแบบเทวินินหรือวงจรสมมูลแบบนอร์ตันก็ได้ ซึ่งในกรณีของวงจรอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีโหลดไม่เชิงเส้นเช่นหลอดฟลูออเรสเซนต์ วงจรสมมูลจะมีลักษณะไม่เชิงเส้นซึ่งทำให้การคำนวณทำได้ยากและมักต้องใช้การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ แต่สำหรับการออกแบบค่าตัวเก็บประจุของวงจรเรียงกระแสการคำนวณโดยการแทนวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วยตัวต้านทานจะให้ผลที่ไม่ผิดพลาดมากนัก อย่างไรก็ดี ค่าความต้านทานสมมูลของอินเวอร์เตอร์ที่ให้กำลังออกเท่ากับค่าที่กำหนดขึ้นกับแรงดันด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งขึ้นกับขนาดของตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองที่ต้องการคำนวณด้วย ดังนั้นการออกแบบจำเป็นต้องกำหนดค่าเริ่มต้นของแรงดันก่อนจากนั้นจึงใช้การคำนวณแบบทำซ้ำจนได้ค่าที่ถูกต้อง โดยทั่วไปแล้วถ้าให้ขนาดของแรงดันไฟตรงเข้าใกล้ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้ามากขึ้นมีผลทำให้การกระเพื่อมของแรงดันไฟตรงและการคงค่าแรงดันไฟตรงเนื่องจากโหลด(load voltage regulation) ดีขึ้นส่งผลดีต่อค่าตัวประกอบค่ายอดของกระแสผ่านหลอด(lamp current crest factor) แต่การให้ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟตรงมีค่าเข้าใกล้ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจำเป็นต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่ามากขึ้นและมีผลทำให้องค์ประกอบฮาร์มอนิก(THD) ของกระแสด้านเข้าสูงขึ้น กระแสกระชากเมื่อเปิดใช้ไฟแสงสว่างและค่ายอดของกระแสขณะทำงานมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นจึงต้องประนีประนอมระหว่างผลดีและผลเสียดังกล่าวข้างต้น ค่าที่เหมาะสมของอัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟตรงต่อค่ายอดของไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า(V_{dc}/V_m)จะมีค่าประมาณ 0.85 ถึง 0.92 สำหรับการออกแบบในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าต่ำกว่า 0.9 ซึ่งจะทำให้ค่า THD มีค่าไม่เกิน ร้อยละ 120 ตามที่กำหนด การออกแบบวงจรเรียงกระแสเป็นการใช้กราฟ โดยต้องมีการประเมินค่ากระแสและแรงดันออกของวงจรเรียงกระแสจากกำลังและประสิทธิภาพของวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ การประเมินค่าตัวประกอบการกระจัด(displacement power factor) ขององค์ประกอบความถี่หลักมูล(I_{rms}/I_1)ที่ได้จากผลการทดลองในบทที่ 2 I_{rms}/I_1 จะมีความสัมพันธ์กับ V_{dc}/V_m ในการออกแบบจะแบ่งค่าออกเป็น 3 ช่วง ถ้า V_{dc}/V_m มีค่าประมาณ 0.85 จะใช้ค่า I_{rms}/I_1 ประมาณ 0.91 ถ้า V_{dc}/V_m มีค่าประมาณ 0.9 จะใช้ค่า I_{rms}/I_1 ประมาณ 0.95 และ ถ้า V_{dc}/V_m มีค่าประมาณ 0.95 จะใช้ค่า I_{rms}/I_1 ประมาณ 0.99 การคำนวณโดยใช้ค่าดังกล่าวร่วมกับวิธีการคำนวณแบบทำซ้ำจนทำให้ค่าที่คำนวณ 2 ครั้งติดต่อกันมีความแตกต่างกันน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ คือประมาณร้อยละ 1-2 การออกแบบวงจรเรียงกระแสประกอบด้วยการเลือกค่าตัวเก็บประจุของ

วงจรกรอง เพื่อให้ได้แรงดันไฟตรงด้านออกตามต้องการ จากนั้นจึงคำนวณค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิก(THD) และค่าแรงดันกระเพื่อม ซึ่งมีขั้นตอนในการออกแบบเป็นขั้นตอนดังนี้

1 เขียนข้อกำหนดของการออกแบบวงจรเรียงกระแสซึ่งมีดังนี้

แรงดันเข้าจากสายกำลัง(V_{line})	220	V
ค่าประมาณของแรงดันไฟตรงด้านเข้า V_{dc}	280	V
กำลังที่หลอด (W_{lamp})	10	W
กำลังในวงจรประมวลที่ใช้ขับนำรับจากไฟตรง	1	W
กำลังในวงจรประมวลที่ใช้ขับนำรับจาก inverter	1	W
ประสิทธิภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์ (η_{INV})	96	%
กำลังด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ (P_{INV})	11.5	W
โหลดของวงจรเรียงกระแส (P_{OUT})	11.5	W
ประสิทธิภาพของวงจรเรียงกระแส (η_{REC})	98	%
กำลังด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส (P_{INPUT})	11.7	W

ค่าตัวประกอบการกระจัด(displacement power factor) $Cos(\lambda)$ = 0.91-0.99

2 กำหนด V_{dc}/V_m ที่เป็นค่าประเมินเบื้องต้นที่มีค่า ประมาณ 0.85 –0.9

3 คำนวณแรงดันไฟตรง V_{dc} จากค่าที่เลือกในข้อ 2

4 คำนวณกระแสไฟตรงด้านออกของวงจรเรียงกระแสจากกำลังออก $I_{dc} = P_{OUT}/V_{dc}$

5 คำนวณ R_{Leq} จากกระแสและแรงดันออกของวงจรเรียงกระแส $R_{Leq}= V_{dc}/I_{dc}$

6 ใช้ค่า V_{dc}/V_m ที่ประเมินจากข้อ 2 อ่านค่า $\omega C_F R_{Leq}$ จากกราฟในรูปที่ 3.2

7 คำนวณ C_F จาก $\omega C_F R_{Leq}$ ที่อ่านได้จากข้อ 6 โดยใช้ค่า ω และ R_{Leq}จากข้อ 5

8 เลือกค่า C_F จากที่เป็นค่ามาตรฐานที่ใกล้เคียงกับ C_F ที่คำนวณได้จากข้อ 7

9 คำนวณ $\omega C_F R_{Leq}$ โดยใช้ค่า C_F ที่เลือกในข้อ 8 และ R_{Leq}จากข้อ 5

10 จากค่า $\omega C_F R_{Leq}$ ที่คำนวณได้จากข้อ 9 อ่านค่า V_{dc}/V_m จากกราฟในรูปที่ 3.2

11 ทำซ้ำตามขั้นตอนในข้อ 3 ถึงข้อ 10 จนกว่า ค่า V_{dc} ที่คำนวณได้ในการทำซ้ำ 2 ครั้งติดต่อกันจะมีความแตกต่างกันน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

12 จากค่า $\omega C_F R_{Leq}$ ที่คำนวณได้จากข้อ 11 ครั้งล่าสุด อ่านค่า I_{rmsD}/I_{avD} ของไดโอดจากกราฟรูปที่ 3.3

13 คำนวณอัตราส่วนของกระแส I_{rms}/I_{dc} ของกระแสด้านเข้าจากค่า I_{rmsD}/I_{avD} ของไดโอดจากข้อ 12 จากสมการ $\frac{I_{rms}}{I_{dc}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{I_{rmsD}}{I_{avD}} \right)$

14 คำนวณหาค่ากระแส I_{dc} โดยใช้ V_{dc} ที่คำนวณได้จากข้อ 11 และสมการตามข้อ 4

15 คำนวณหาค่ากระแส Irms โดยใช้อัตราส่วนของกระแสจากข้อ 13 และ I_{dc} จากข้อ 14

16 คำนวณกระแสความถี่หลักมูลด้านเข้า I_1 โดยใช้ค่าโดยประมาณของค่าตัวประกอบการกระจัด(displacement power factor) $Cos(\lambda)$ = 0.91-0.99

17 คำนวณ THD โดยใช้ค่า I_{rms} และ จากข้อ 15 และข้อ 16 แทนลงในสมการ

$$THD = 100 * \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1} \right)^2 - 1}$$

18 หากค่า THD ที่คำนวณได้จากข้อ 17 มีค่าสูงไป ให้เลือกค่า C_F ที่เป็นค่ามาตรฐาน ที่เล็กกว่าที่เลือกไว้ในข้อ 8 และคำนวณตามกระบวนการในข้อ 8 ถึง 17 ตัดสินใจเลือก C_F ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงาน

19 ใช้ค่า C_F V_{dc} I_{dc} ค่าล่าสุดที่คำนวณได้

20 คำนวณองค์ประกอบฮาร์มอนิก และแรงดันกระเพื่อม

21 ใช้ค่า V_{dc} สำหรับการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์

จากข้อกำหนดในข้อ 4.2 สามารถคำนวณหาขนาดของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง และคุณสมบัติต่าง ๆ ของวงจรเรียงกระแสโดยใช้ขั้นตอน 1-20 ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งผลการคำนวณแสดงเปรียบเทียบกับผลการทดลองไว้ในตารางที่ 4.1 ถึง 4.3

4.4.1 การเลือกตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

จากข้อกำหนดคำนวณหาขนาดของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ได้ดังนี้

- ขนาดตัวเก็บประจุ 3.3 μF
- แรงดันออกของวงจรเรียงกระแสที่ออกแบบไว้ 270 V
- แรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุที่ใช้ 350-400 V
- พิกัดอุณหภูมิของตัวเก็บประจุที่อยู่ในอุณหภูมิสูงใช้ 105 องศาเซลเซียส

4.4.2 การเลือกตัวต้านทานจำกัดกระแสกระชาก

เพื่อจำกัดกระแสกระแสกระชากให้ต่ำกว่า 5 A ตามข้อกำหนดในข้อ 4.2.2 จึงใช้ตัวต้านทานขนาด 47 Ω ต่ออนุกรมกับวงจรด้านเข้าในตำแหน่ง Rlm ในรูปที่ 2.8 และตัวเหนี่ยวนำ Lx ขนาด 82 μH และ C2 ขนาด20 nF เพื่อป้องกันกระแสความถี่สูงออกไปรบกวนวงจรภายนอก เช่นเดียวกับในวงจรรูปที่ 2.8

4.4.3 การเลือกไดโอดของวงจรเรียงกระแส

เนื่องจากวงจรเรียงกระแสที่เลือกใช้เป็นวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ซึ่งไดโอดแต่ละตัวจะนำกระแสเพียงครึ่งคาบดังนั้นจะต้องรับกระแส $I_{ac}/\sqrt{2}$ และรับแรงดันสูงสุดเท่ากับค่ายอดของแรงดันสายกำลัง ดังนั้นกระแสและแรงดันของไดโอดจะมีค่าอย่างต่ำดังนี้

- กระแสผ่านไดโอด 65 mA
- แรงดันย้อนกลับ 311 V

ไดโอดจะต้องสามารถรับกระแสกระชากขณะเริ่มเปิดใช้งานบัลลาสต์ตามข้อกำหนดประมาณ 5 A อย่างไรก็ดีไดโอดที่มีจำหน่ายสำหรับชนิดที่ใช้สำหรับวงจรเรียงกระแสจากสายกำลัง (Rectifier Type) จะมีพิกัดกระแสต่ำสุดประมาณ 1 A ซึ่งสามารถรับกระแสกระชากครึ่งคาบได้ประมาณ 16 A และทนแรงดันได้มากกว่า 400 V เช่นไดโอด เบอร์ 1N1004 ดังนั้นจึงเลือกใช้ไดโอดชนิดที่ใช้สำหรับวงจรเรียงกระแสจากสายกำลังที่มีพิกัดดังนี้

- กระแสพิกัดของไดโอด 1 A
- แรงดันพิกัดมากกว่า 400 V

4.4.4 พิกัดของฟิวส์

โดยทั่วไปแล้วฟิวส์จะไม่สามารถป้องกันทรานซิสเตอร์ได้ ดังนั้นจึงไม่มีวัตถุประสงค์ในการป้องกันโหลดเกินพิกัดแต่การใช้ฟิวส์สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะใช้สำหรับจำกัดความรุนแรงของการลัดวงจร นอกจากนี้ขณะเริ่มเปิดใช้งานบัลลาสต์จะมีกระแสกระชากสูงกว่ากระแสพิกัดมาก ดังนั้นจะต้องเลือกใช้ฟิวส์ที่ทนกระแสกระชากได้ และไม่มีความจำเป็นต้องใช้ slow blow fuse เนื่องจากจะทำให้เกิดความเสียหายรุนแรง ควรใช้ normal blow fuse ประมาณ 500 –750 mA ที่จะสามารถรับกระแสได้ 5 A เป็นเวลา ประมาณ 10 ms

4.5 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจรเรียงกระแสเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงป้อนให้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้นอกจากทำหน้าที่รักษากระแสหลอดให้มีเสถียรภาพแล้ว ยังต้องทำหน้าจุดหลอดให้ติดสว่างอย่างเหมาะสมซึ่งพฤติกรรมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์จะขึ้นกับคุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่เป็นโหลดด้านออก ขนาดของแรงดันไฟตรงด้านเข้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ ค่าความถี่ในการทำงานทั้งในภาวะการทำงานปรกติและในช่วงเผาไส้และจุดหลอด รวมทั้งค่าอุปกรณ์ของวงจรโหลดคือตัวเหนี่ยวนำ Ls และตัวเก็บประจุ Cig เนื่องจากขนาดของแรงดันไฟตรงด้านเข้าของวงจรที่ใช้จะถูกกำหนดด้วยวงจรเรียงกระแสซึ่งในกรณีที่ไม่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง แรงดันไฟตรงดังกล่าวจะถูกกำหนดโดยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากสายกำลังและสามารถปรับเปลี่ยนโดยการออกแบบได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้นซึ่งอาจกล่าวได้ว่ามีค่าประมาณคงที่ขึ้นกับแรงดันด้านเข้าจากสายกำลัง ส่วนโหลดของวงจรเมื่อเลือกชนิดและขนาดของหลอดแล้ว ขนาดของกระแสเผาไส้หลอด แรงดันคร่อมหลอดและความต้านทานของหลอดและไส้หลอดจะถูกกำหนด ดังนั้นการออกแบบวงจรจำเป็นการเลือกค่าความถี่การทำงานในภาวะต่าง ๆ ค่าตัวเหนี่ยวนำ Ls และตัวเก็บประจุ Cig การควบคุมคุณสมบัติของวงจรจึงทำได้ผ่านตัวแปรทั้งสามเท่านั้น สำหรับความถี่การทำงานของบัลลาสต์นั้นความถี่ต่ำสุดจะถูกจำกัดโดยความถี่สูงสุดที่มนุษย์ได้ยิน คือประมาณ 20 kHz ส่วนความถี่สูงสุดจะถูกจำกัดไว้ที่ประมาณ 100 kHz เพื่อจำกัดระดับการรบกวนของคลื่นความถี่สูงและกำลังสูญเสียในการสวิตช์ ความถี่ระหว่าง 30 - 40 kHz มักจะสงวนไว้สำหรับเครื่องควบคุมระยะไกล(Remote control) ของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในบ้าน ดังนั้น ความถี่ที่ใช้ได้จะมีช่วงประมาณ 24 – 30 kHz และความถี่ที่สูงกว่า 40 kHz บัลลาสต์ที่ออกแบบในปัจจุบันนิยมใช้ความถี่ประมาณ 50 kHz ซึ่งจะมีช่องว่างของความถี่ที่สูงกว่า 50 kHz เพื่อใช้สำหรับการทำงานช่วงเผาไส้หลอดสำหรับบัลลาสต์ที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดหรือเพื่อการหรี่แสงโดยการเพิ่มความถี่สำหรับบัลลาสต์หรี่แสง [27-30]ในงานวิจัยนี้จึงเลือกความถี่การทำงานสำหรับบัลลาสต์ในภาวะการทำงานปรกติเท่ากับ 50 kHz

เมื่อได้กำหนดความถี่การทำงานในภาวะปรกติแล้วการออกแบบบัลลาสต์สำหรับหลอด CFL จะเป็นการตัดสินใจเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำ Ls และตัวเก็บประจุ Cig ของวงจรโหลด โดยอาศัยพฤติกรรมการทำงานของวงจรเป็นเกณฑ์ เนื่องจากการใช้ข้อกำหนดด้านกำลังออกของหลอดเพียงอย่างเดียวจะสามารถเลือกคู่ของตัวเหนี่ยวนำ Ls และตัวเก็บประจุ Cig ของวงจรโหลดได้อย่างไม่มีข้อจำกัดดังนั้นจึงต้องมีการคำนวณคุณสมบัติอื่นของวงจรโดยใช้แบบจำลองเชิงเส้นสำหรับความถี่หลักมูล การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์จะต้องพิจารณาพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์ทั้งในช่วงการเผาไส้ การจุดหลอดและช่วงทำงานปรกติหลังจากหลอดติดสว่างแล้ว โดยจะเริ่มพิจารณาการทำงานในช่วงทำงานปรกติหลังจากการจุดหลอดติดสว่างแล้ว จากนั้นจึงพิจารณาการทำงานในช่วงเผาไส้และจุดหลอด

4.5.1 การคำนวณหาคุณสมบัติของบัลลาสต์ที่ออกแบบแตกต่างกัน

การออกแบบวงจรในช่วงทำงานปรกติ เป็นการเลือกค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำให้กำลังที่หลอดมีค่าเท่ากับพิกัดของหลอด ซึ่งในกรณีที่ใช้ความถี่สูงจะออกแบบให้หลอดมีกำลังประมาณ ร้อยละ 90 ของกำลังพิกัดของหลอดที่กำหนดสำหรับความถี่ต่ำ โดยหลอด 11 W จะออกแบบให้กำลังที่หลอดมีค่าประมาณ 10 W ที่ความถี่การทำงาน 50 kHz โดยจะต้องหาความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเพื่อให้ได้กำลังที่หลอด 10 W และคำนวณคุณสมบัติต่าง ๆ ที่จะใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจเลือกค่า ตัวเหนี่ยวนำ Ls และตัวเก็บประจุ Cig ของ วงจรโหลด โดยใช้ข้อจำกัดอื่นนอกเหนือจากกำลังที่หลอด

การกำหนดช่วงของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานร่วมกับตัวเหนี่ยวนำจะมีผลต่อพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์มาก ทั้งในช่วงเผาไส้ ช่วงจุดหลอดและช่วงทำงานปรกติ การกำหนดช่วงของตัวเก็บประจุที่สามารถใช้ได้ กำหนดจากกระแสเผาไส้ขณะทำงานปรกติ เนื่องจากหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์มีความหนาแน่นของกระแสผ่านหลอดสูงดังนั้นจึงทำให้หลอดมีอุณหภูมิสูงและความร้อนที่ไส้หลอดที่เกิดจากการชนไส้หลอดของพาหะนำกระแสมีค่าสูงจึงไม่จำเป็นต้องใช้กระแสเผาไส้ขณะทำงานปรกติสูงนัก จากการทดลองพบว่า ผู้ผลิตจะใช้กระแสเผาไส้ประมาณร้อยละ 15 ถึง 50 ของกระแสผ่านหลอด ในการออกแบบ จะกำหนดให้ค่าต่ำสุดของตัวเก็บประจุมีค่าเพียงพอที่จะทำให้กระแสเผาไส้มีค่าประมาณร้อยละ 7 ของกระแสผ่านหลอด ส่วนค่าสูงสุดของตัวเก็บประจุจะเป็นค่าที่ทำให้กระแสเผาไส้หลอดไม่เกินร้อยละ 65 ของกระแสผ่านหลอด การใช้เกณฑ์ดังกล่าวจะประมาณได้ว่าช่วงของขนาดตัวเก็บประจุที่ใช้ศึกษาควรมีค่า Reactance ที่ความถี่ทำงานปรกติระหว่าง 1.5 ถึง 15 เท่าของค่าความต้านทานหลอดที่พิกัด สำหรับหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์ขนาด 11 W ที่มีค่าความต้านทานหลอดระหว่าง ประมาณ 200 – 250 Ω ถ้าใช้ความถี่การทำงาน 50 kHz ควรใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าระหว่าง 1 – 10 nF

การหาความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

การหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะใช้ข้อกำหนดดังนี้

- แรงดันไฟตรงด้านเข้า 270 V
- ความถี่การทำงาน 50 kHz
- กำลังที่หลอดประมาณ 10.2 W
- แรงดันที่หลอด 47 V
- กระแสผ่านหลอด 219 mA

- ความต้านทานไส้หลอดขณะเย็น 6.25 Ω
- ความต้านทานไส้หลอดขณะหลอดติด 35 Ω
- ตัวเก็บประจุ 1-10 nF

เมื่อใช้ข้อกำหนดข้างต้นแทนลงในสมการของแรงดันหลอด V_{lamp} จากสมการ 3.5 หรือสมการกระแสหลอด I_{lamp} จากสมการ 3.6 ซึ่งนำมาเขียนซ้ำดังในสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

$$\frac{V_{lamp}}{V_S} = \frac{\left(\frac{R_L + j\omega_S R_L R_f Cig}{R_L + R_f}\right)}{\left[1 - \omega_S{}^2 LsCig + j\omega_S\left(\frac{Ls + (2R_L + R_f)R_f Cig}{(R_L + R_f)}\right)\right]} \tag{4.1}$$

$$\frac{I_{lamp}}{V_S} = \frac{\left(\frac{1 + jR_f\omega_S Cig}{R_L + R_f}\right)}{\left[1 - \omega_S{}^2 LsCig + j\omega_S\left(\frac{Ls + (2R_L + R_f)R_f Cig}{(R_L + R_f)}\right)\right]} \tag{4.2}$$

จากสมการ 4.1 หรือ 4.2 สามารถที่จะเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าของตัวเหนี่ยวนำ Ls กับตัวเก็บประจุ C_{ig} ที่ทำให้กระแส หรือแรงดัน หรือกำลังที่หลอดมีค่าเท่ากับพิกัด สำหรับเงื่อนไขการทำงาน และค่าความต้านทานหลอด R_{lamp} ที่กำหนด ในที่นี้จะใช้สมการของแรงดัน V_{lamp} ซึ่งจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเหนี่ยวนำ L_S กับตัวเก็บประจุ C_{ig} ดังในสมการ4.3

$$Ls = \frac{-b(Cig) \pm \sqrt{b^2(Cig) - 4a(Cig)k(Cig)}}{2a(Cig)} \tag{4.3}$$

เมื่อ

$$a(Cig) = \omega_S{}^2 + \omega_S{}^2\left[\omega_S Cig(R_L + R_f)\right]^2 \tag{4.4}$$

$$b(Cig) = -2\omega_S{}^2 R_L^2 Cig \tag{4.5}$$

$$k(Cig) = (R_L + R_f)^2 + \left[\left(2R_L + R_f\right)R_f\omega_S Cig\right]^2 - \left[R_L^2 + \left(R_L R_f \omega_S Cig\right)^2\right] * \left[\frac{V_S}{V_{lamp}}\right]^2 \tag{4.6}$$

รูปที่ 4.1 เป็นผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่าง Lsและ Cig โดยใช้ข้อกำหนดการ

ทำงานการออกแบบแทนลงในสมการ 4.3-4.6 ซึ่งจะเป็นค่า Ls และ Cig ที่ทำให้หลอดมีกำลังพิกัดตามข้อกำหนด นอกจากการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างตัวเหนี่ยวนำ Ls กับตัวเก็บประจุ Cig ของวงจรโหลดที่ทำให้หลอดมีกำลังพิกัดแล้วยังได้คำนวณค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เป็นคุณสมบัติของวงจรสำหรับตัวเหนี่ยวนำ Ls และ ตัวเก็บประจุ C_{ig} แต่ละคู่ที่ให้กำลังออกเท่ากับพิกัด ที่จะใช้พิจารณาประกอบการออกแบบวงจรซึ่งประกอบด้วย ความสัมพันธ์ระหว่าง inductive reactance (X_{Ls}) ของตัวเหนี่ยวนำ Ls กับ capacitive reactance (X_{Cig}) ของตัวเก็บประจุ Cig ที่ทำให้หลอดมีกำลังพิกัด ความถี่การทำงานเทียบกับความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง (f_n) Characteristic impedance (Zo) ค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) ต่าง ๆ กระแสเผาไส้หลอด (I_{fn}) แรงดันหลอด (V_{lampn}) กระแสออก (I_{invn}) เฟส (θ_{inv}) ของกระแสออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณสำหรับภาวะทำงานปรกติ นำเสนอไว้ในรูปที่ 4.2 ถึง 4.8 นอกจากนี้ยังได้คำนวณค่าต่าง ๆในช่วงเผาไส้ก่อนจุดหลอดควบคุมด้วยความถี่ ซึ่งประกอบด้วยความถี่การทำงานในช่วงเวลาเผาไส้ที่สูงกว่าความถี่ธรรมชาติไม่หน่วงที่ทำให้กระแสเผาไส้มีค่าเท่าที่กำหนด กระแสเผาไส้ แรงดันคร่อมหลอด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.9 ถึง 4.12 คำนวณความถี่ในการจุดหลอด แรงดันวงจรเปิดคร่อมหลอด ขนาดและมุมของกระแสออก (I_{invn}) ในช่วงการจุดหลอดควบคุมด้วยความถี่ แสดงไว้ในรูปที่ 4.12 ถึง 4.17 และสำหรับการออกแบบวงจร CFL ที่ไม่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดจะต้องใช้ค่ากระแส(I_{lampn}) และแรงดันหลอด (V_{lampn}) ในช่วงที่หลอดเป็นวงจรเปิดด้วยจึงแสดงไว้ในรูปที่4.18 โดยกระแสทุกค่าจะ normalized ด้วยกระแสพิกัดที่ผ่านหลอด แรงดันจะ normalized ด้วยแรงดันพิกัดของหลอด impedance จะ normalized ด้วยความต้านทานหลอดที่พิกัด และปริมาณที่ถูก normalized จะมีดัชนีที่ตามด้วย “ n ” โดยปริมาณต่าง ๆมีนิยามดังในข้อ 3.4 และมีนิยามเพิ่มเติมดังนี้คือ

$$Z_{On} = \frac{Z_O}{R_L} \tag{4.7}$$

f_{ph} ความถี่การทำงานในช่วงเผาไส้หลอด (4.8)

$$f_{phn} = \frac{f_{ph}}{f_O} \tag{4.9}$$

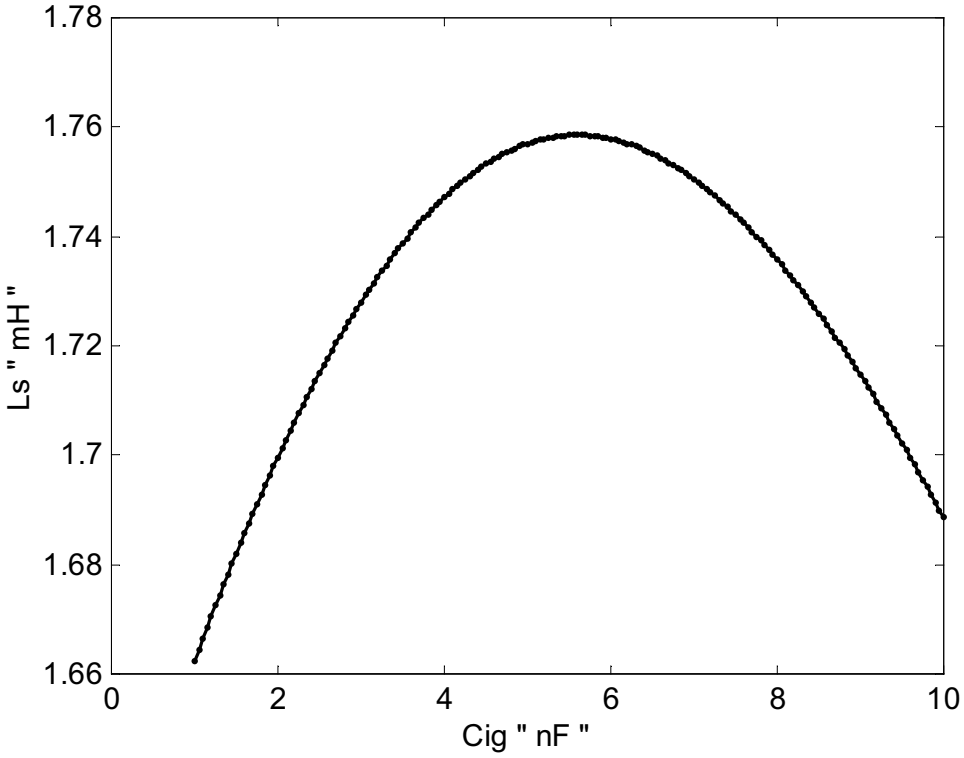
f_{ig} ความถี่การทำงานในช่วงจุดหลอด (4.10)

$$f_{ign} = \frac{f_{ig}}{f_O} \tag{4.11}$$

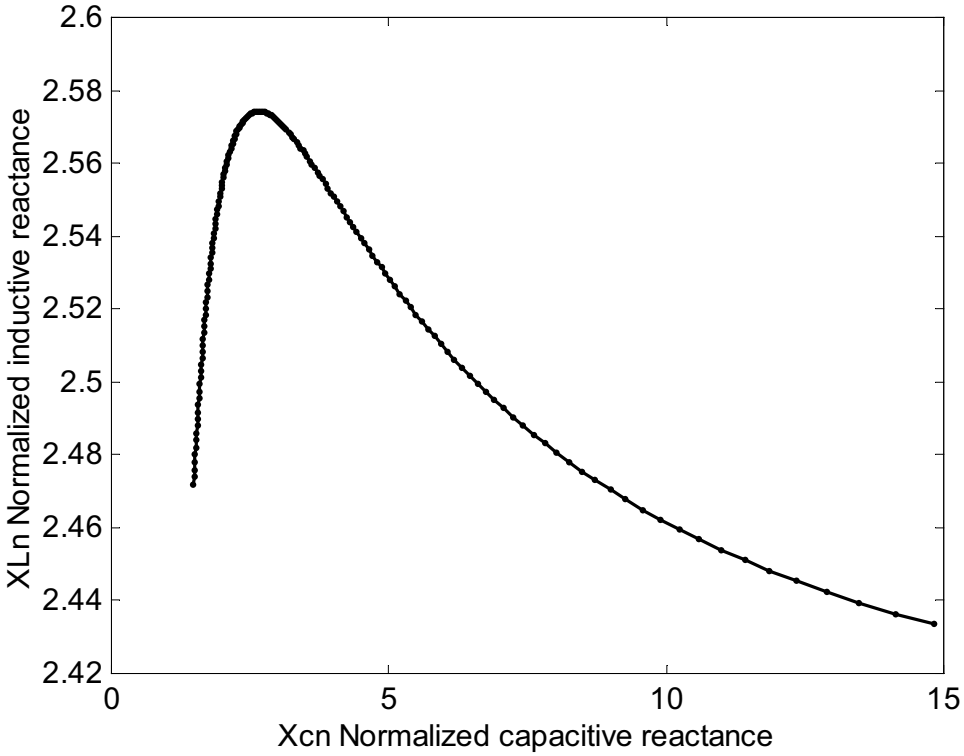
$$I_{invn} = \frac{I_{inv}}{I_{lmr}} \tag{4.12}$$

$$V_{On} = \frac{V_{lamp}}{V_{lmr}} \tag{4.13}$$

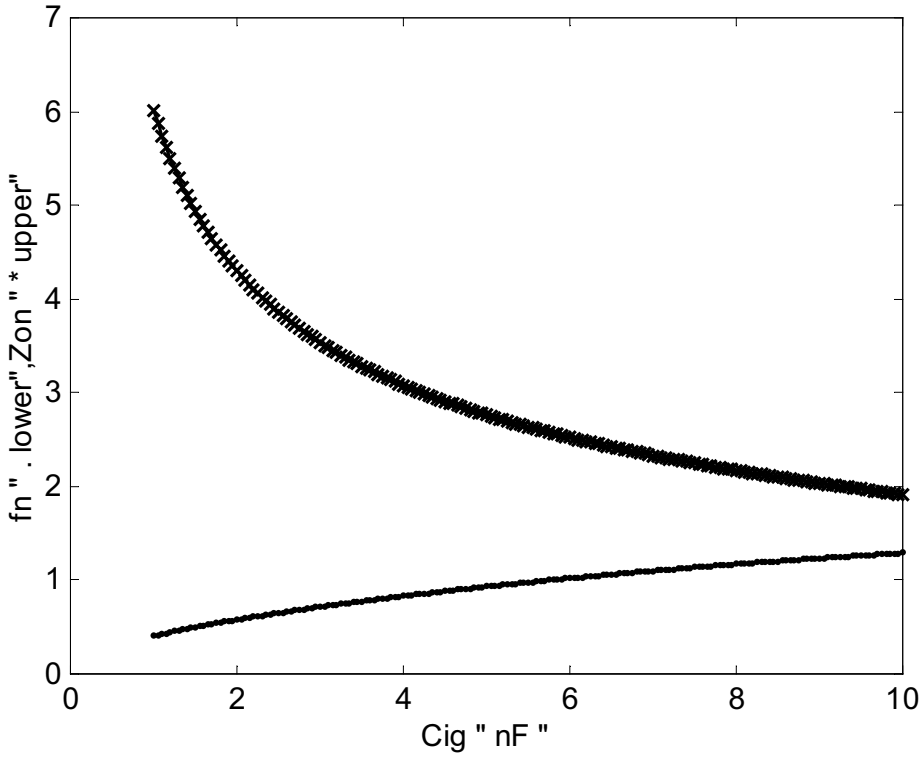
$$I_{On} = \frac{I_{lamp}}{I_{lmr}} \tag{4.14}$$



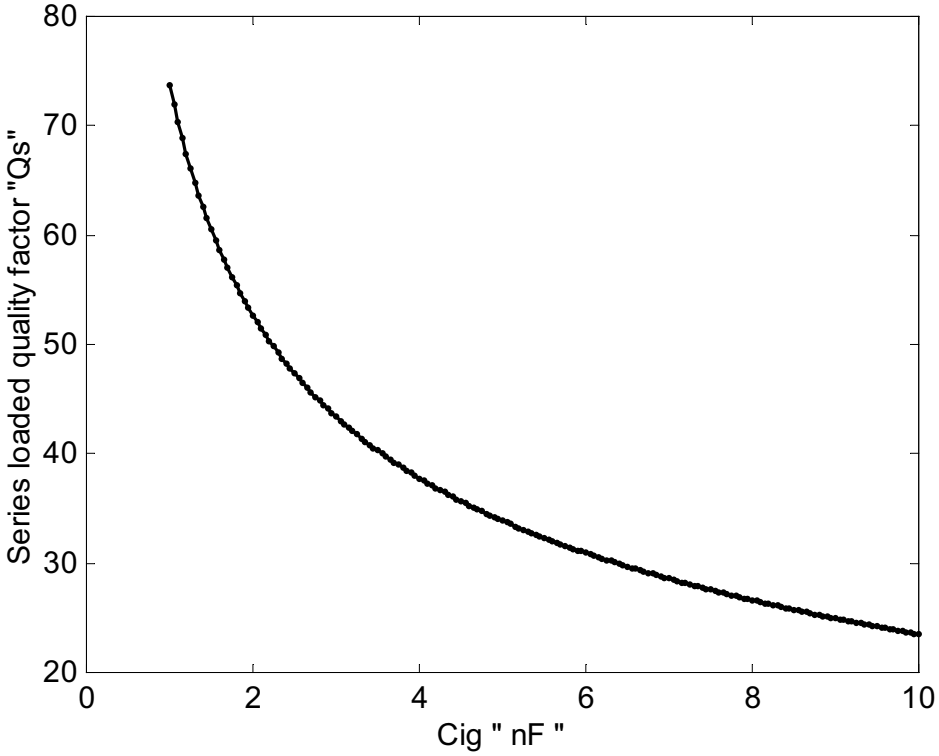
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวเหนี่ยวนำ Ls และ ตัวเก็บประจุ Cig (nF)



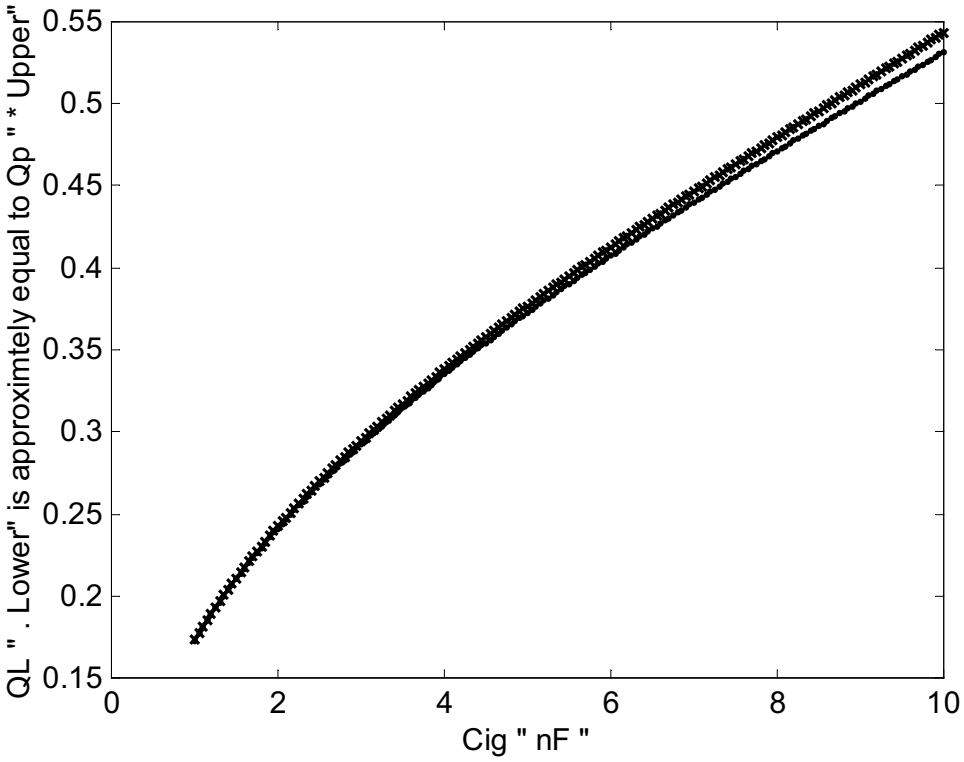
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า reactance X_{Ln} (X_{Ls}/R_{lamp}) กับ X_{Cn} (X_{Cig}/R_{lamp})



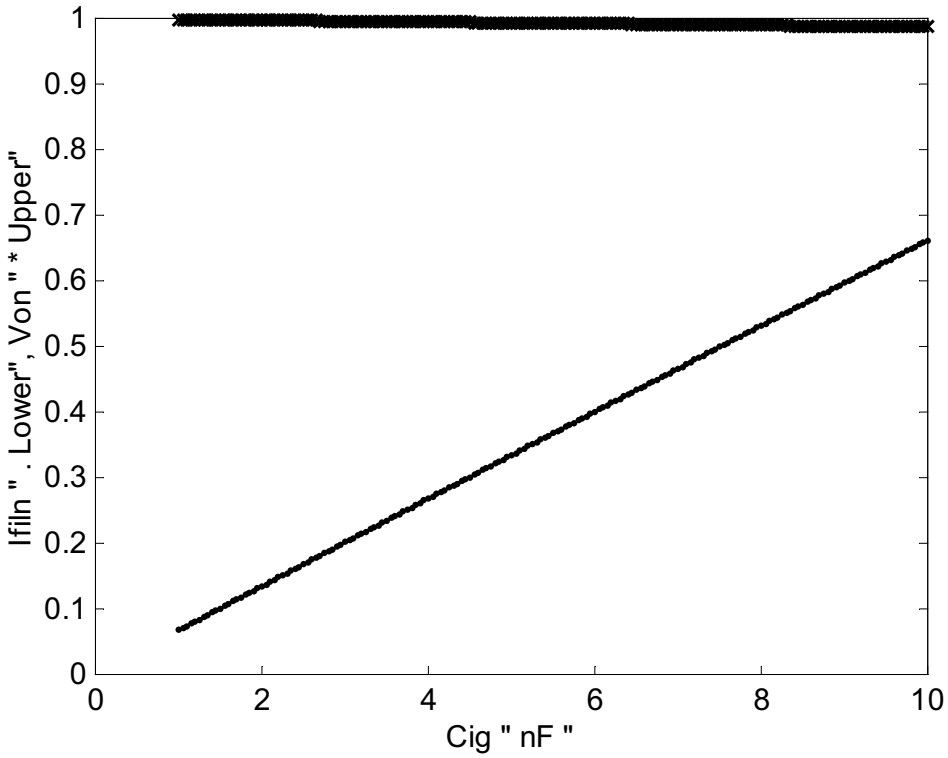
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่การทำงาน f_n (f_{run}/f_0) และ Z_{on} กับ Cig (nF)



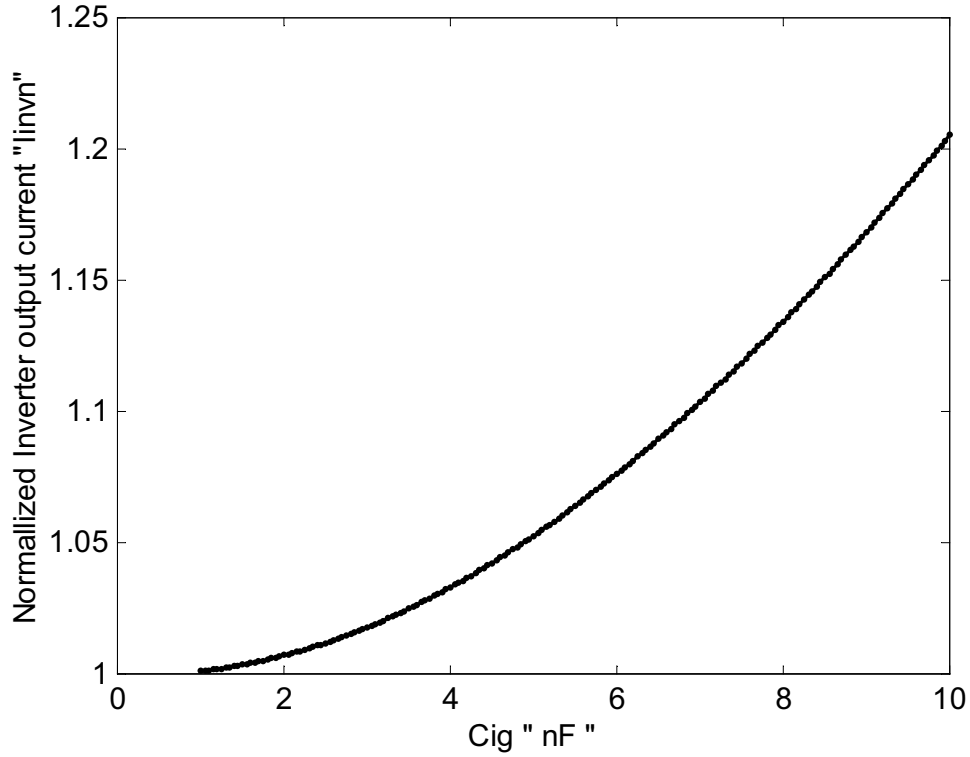
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบคุณภาพ Q_S กับ Cig (nF)



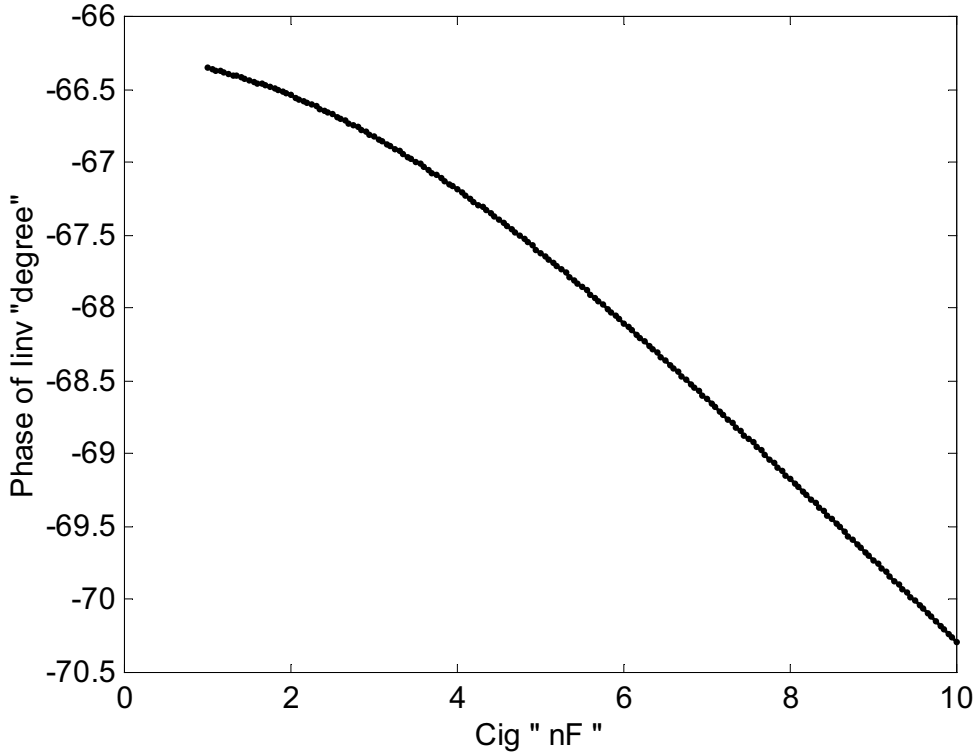
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบคุณภาพ Q_P (บน) และ Q_L (ล่าง) กับ Cig (nF)



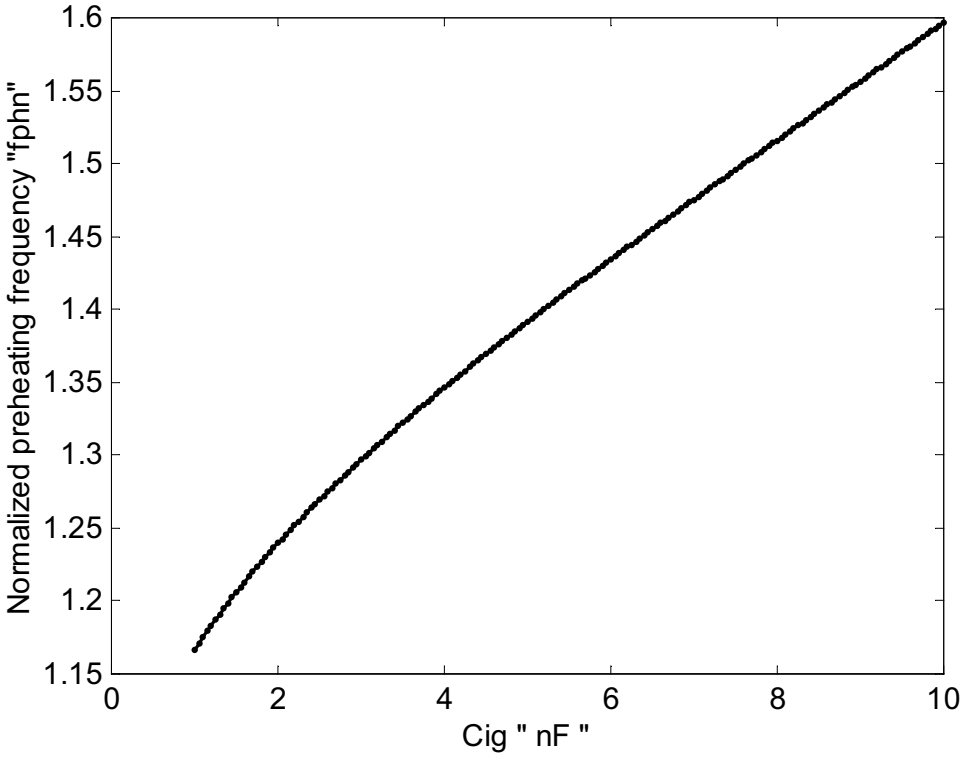
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันออก V_{on} (บน) I_{filn} (ล่าง) กับ Cig (nF)



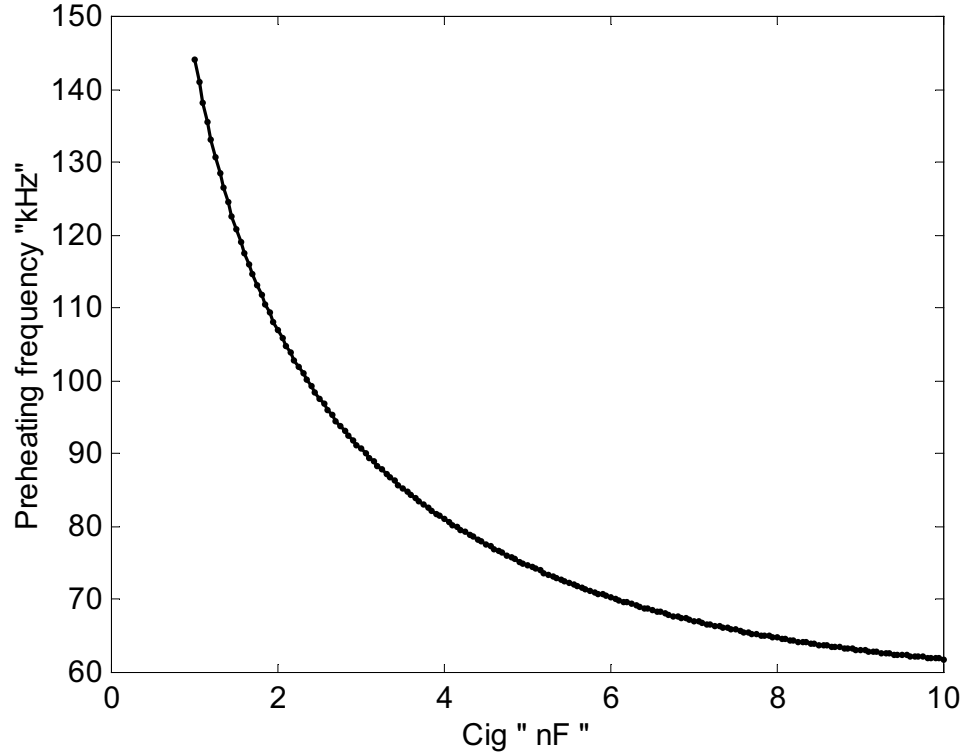
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสออกของอินเวอร์เตอร์ I_{invn} กับ Cig (nF)



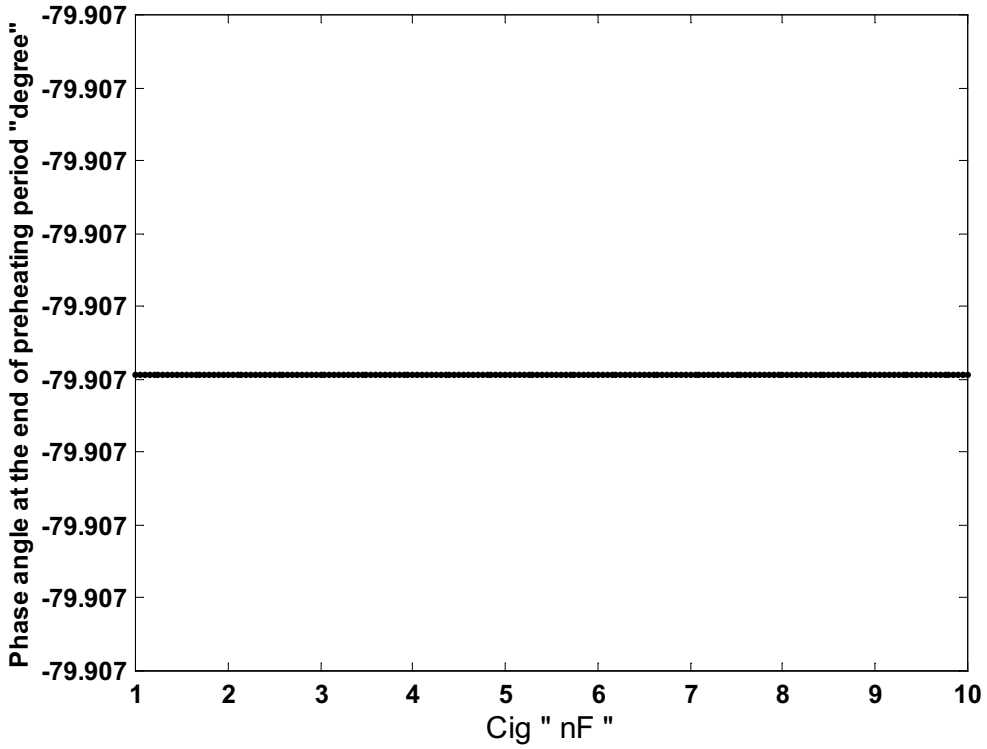
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง เฟสของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ θ_{inv} กับ Cig (nF)



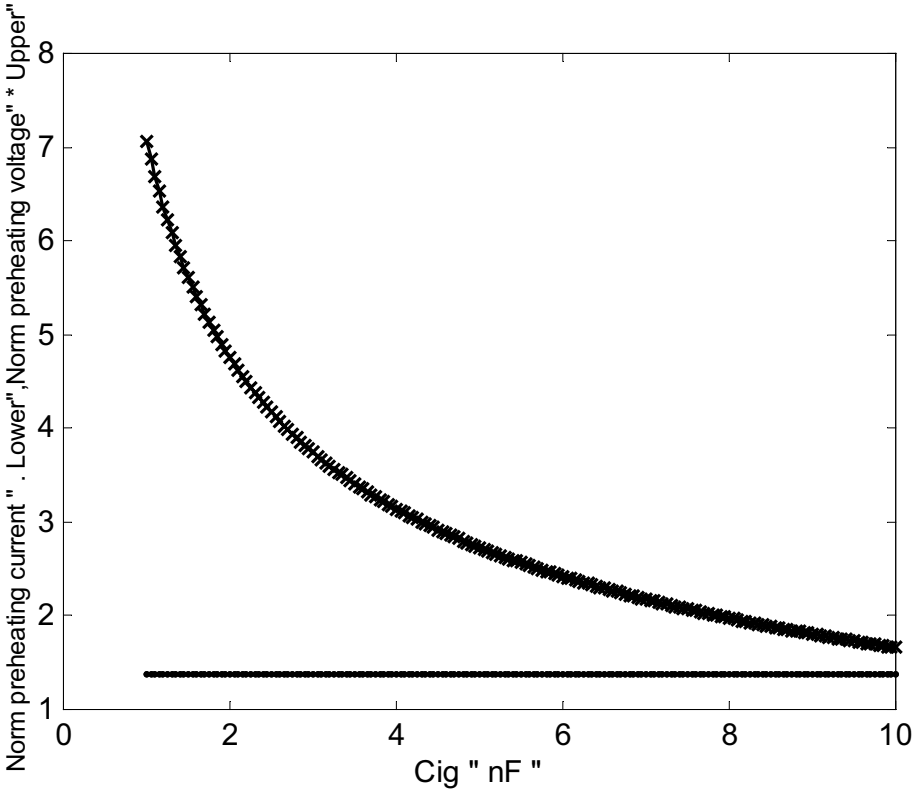
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ช่วงเผาไส้ f_{phn} (f_{ph}/f_0) กับ Cig (nF)



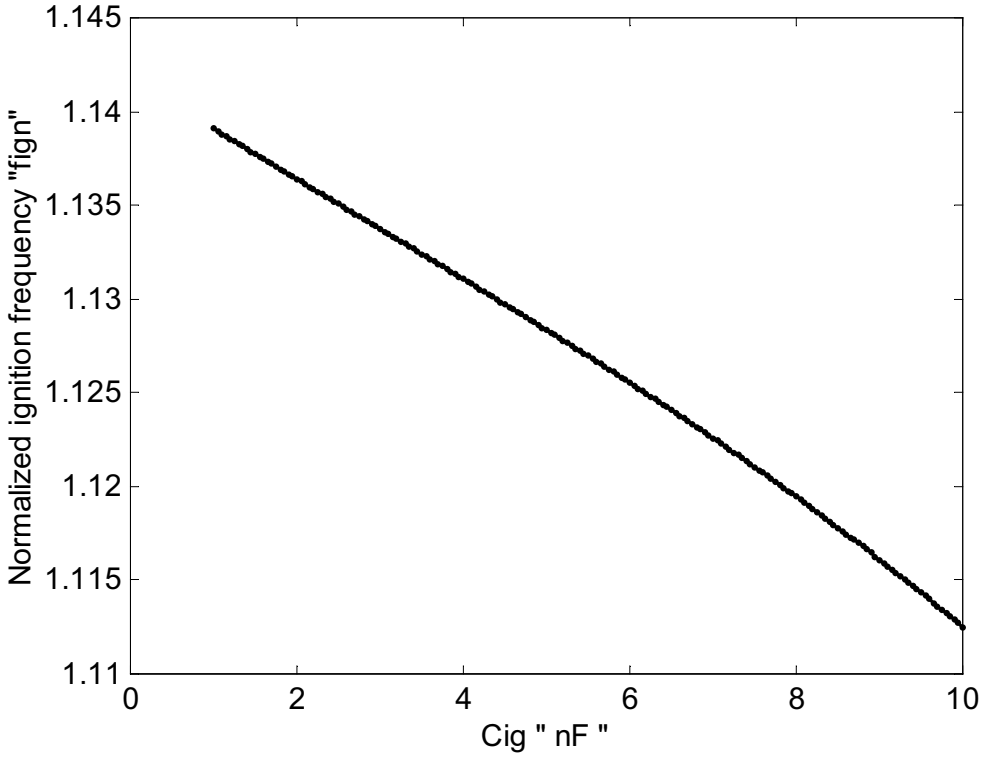
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ช่วงเผาไส้ f_{ph} (kHz) กับ Cig (nF)



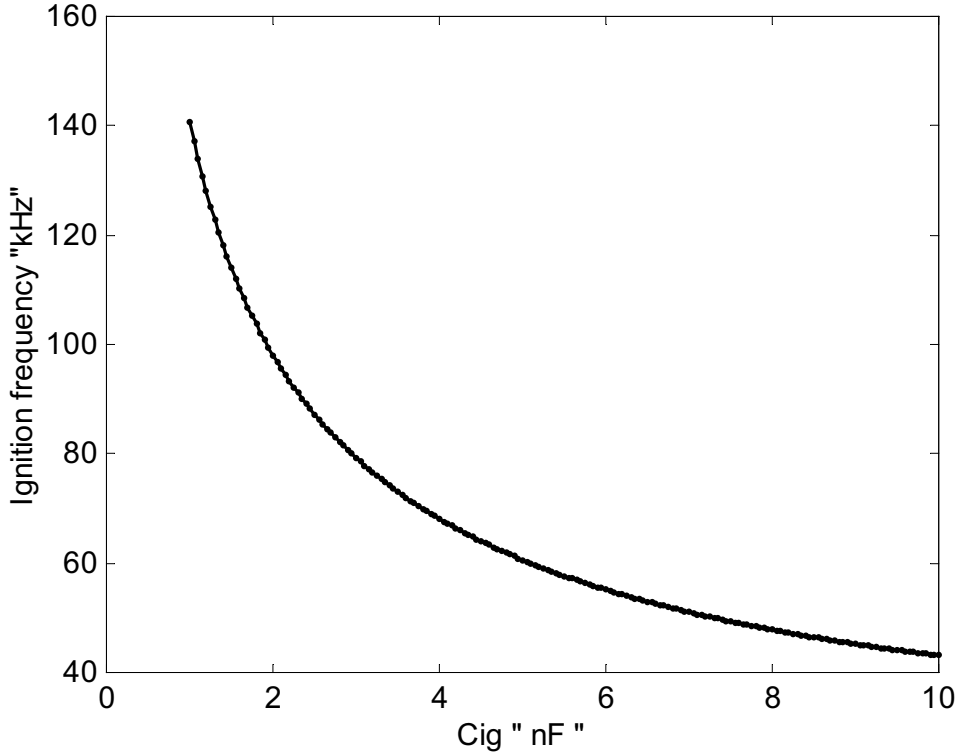
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง เฟสของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ช่วงเผาไส้ กับ Cig (nF)



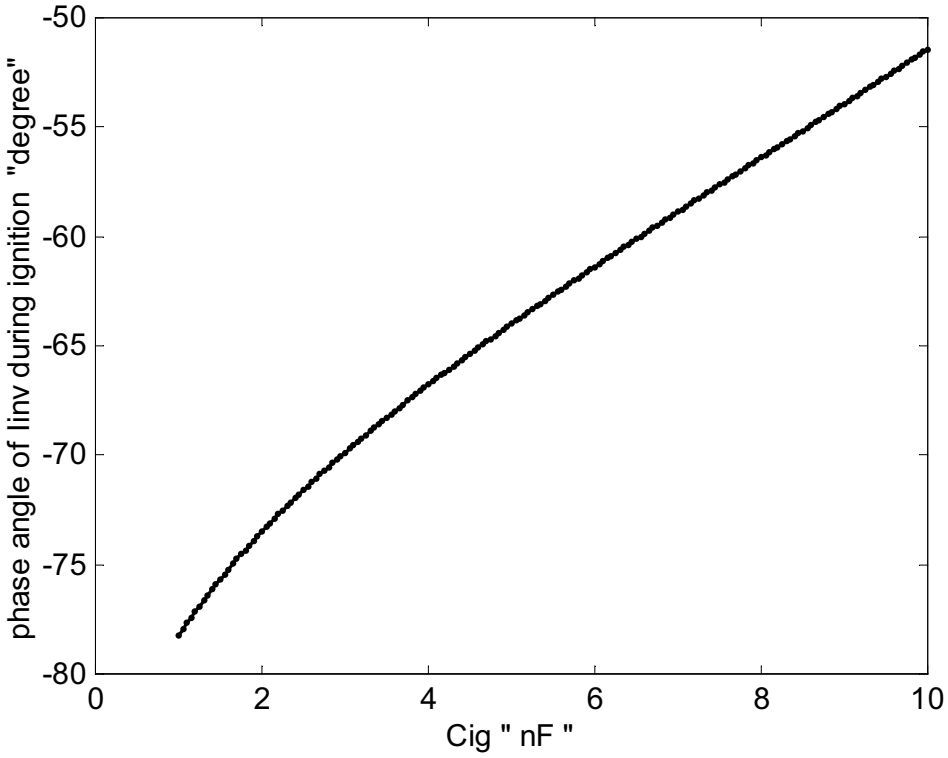
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันคร่อมหลอด (บน) กระแสเผาไส้ (ล่าง) กับ Cig (nF)



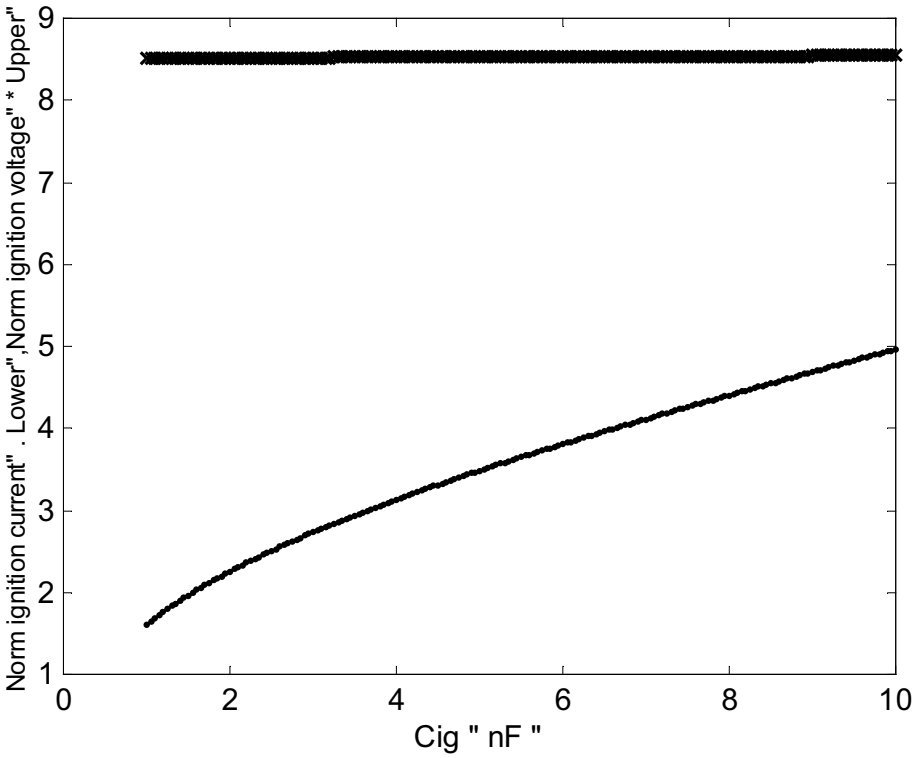
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่จุดหลอด f_{ign} (f_{ig}/f_0) กับ Cig (nF)



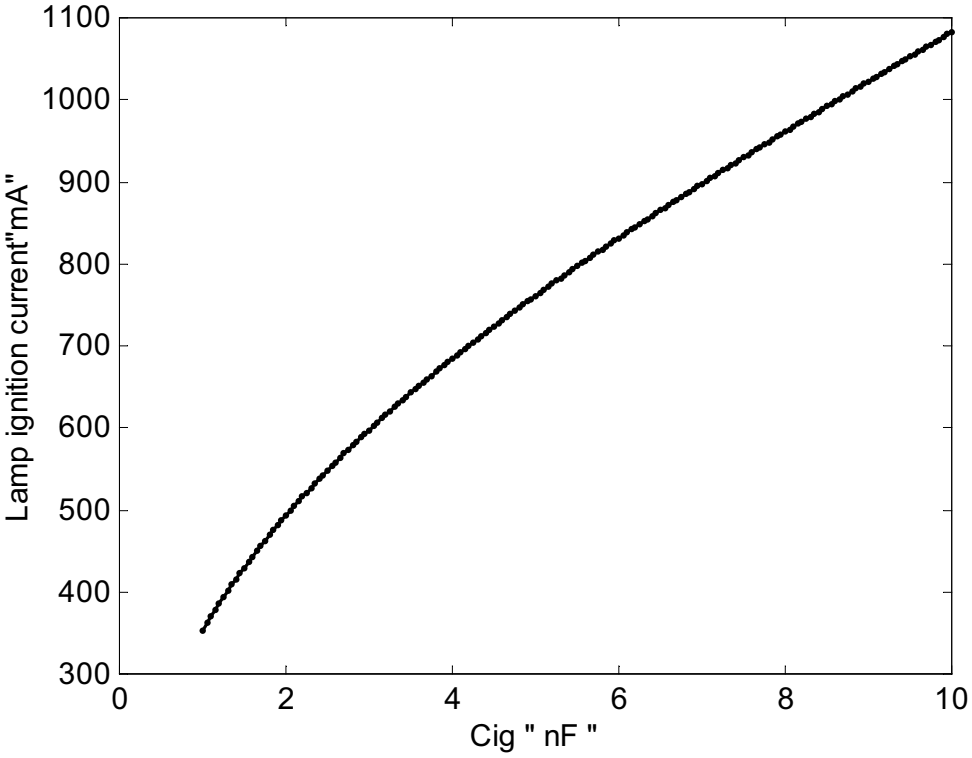
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่จุดหลอด f_{ig} (kHz) กับ Cig (nF)



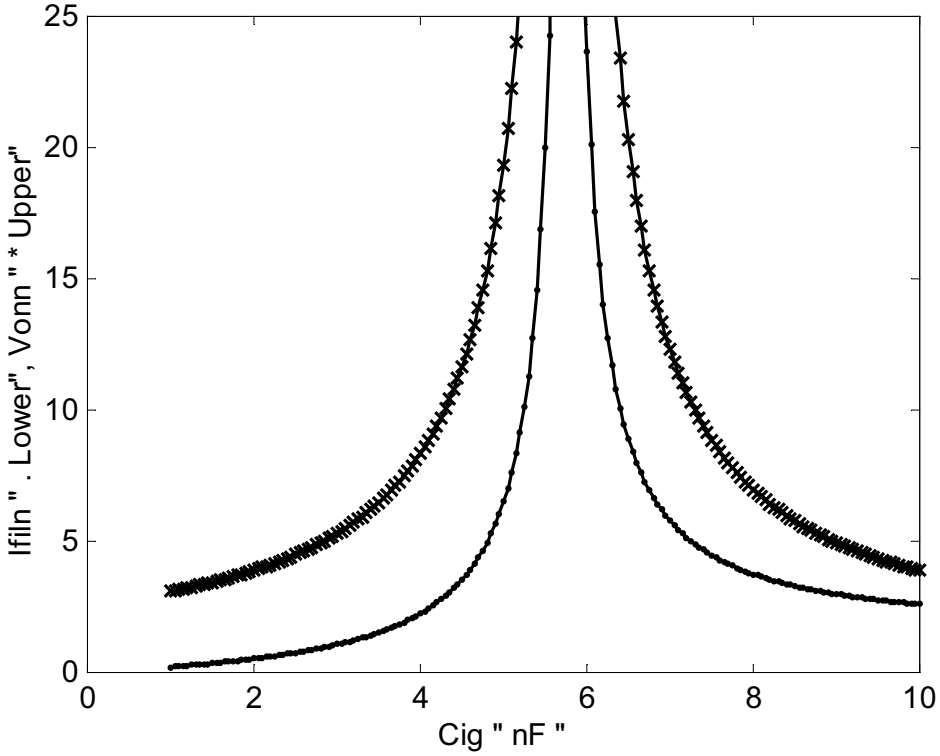
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเฟส θ_{inv} ช่วงจุดหลอด กับ Cig (nF)



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันจุดหลอด (บน) กระแสผ่านไส้ (ล่าง) กับ Cig (nF)



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสผ่านไส้หลอด I_{filn} (mA) กับ Cig (nF) ช่วงจุดหลอด



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเปิดวงจรVon(V บน) I_{filn} (mA ล่าง) กับ Cig (nF) ช่วงจุดหลอดโดยใช้ความถี่คงที่

4.5.2 การพิจารณาผลของ Ls และ Cig ที่แตกต่างกัน

การออกแบบวงจรโหลดของบัลลาสต์จะต้องพิจารณาคุณสมบัติที่เป็นเกณฑ์การออกแบบสำหรับตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่มีค่าเหมาะสมแต่ละคู่ที่ทำให้กระแสและแรงดันรวมทั้งกำลังไฟฟ้าที่หลอดรวมมีค่าเท่ากับพิกัดที่กำหนด จากกราฟในรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเพื่อให้กระแสเผาไส้ในภาวะการทำงานปกติมีค่าระหว่างร้อยละ 5 ถึง 65 ของกระแสผ่านหลอด ต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าระหว่าง 1 nF ถึง 10 nF ซึ่งทำให้ค่า Reactance ของตัวเก็บประจุมีค่าระหว่าง 2 ถึง 15 เท่า ของ R_L ส่วน Reactance ของตัวเหนี่ยวนำมีค่าระหว่าง 2.43 ถึง 2.58 เท่าของ R_L ดังแสดงในรูป 4.2 จากการพิจารณาคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอด 11 W ที่มีข้อกำหนดในข้อ 4.2 จากกราฟในรูปที่4.1 – 4.18 จะสรุปได้ดังนี้

1 เมื่อ Cig มีค่าน้อยกว่า 5.8 nF วงจรจะทำงานในย่านความถี่ต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง

2 กรณีที่หลอดยังไม่ทำงาน Q_S ของวงจรมีค่าสูงมาก หากเลือกตัวเก็บประจุต่ำกว่า 5.8 nF กระแสจะนำหน้าแรงดัน จะเกิดความเค้นในสวิตช์สูงมาก ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดเกี่ยวกับเฟสของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ ในช่วงที่หลอดเป็นวงจรเปิดหากไม่มีการเพิ่มความถี่ของการทำงานของอินเวอร์เตอร์

3 ในภาวะการทำงานปรกติที่หลอดติด Q_L Q_P ของวงจรมีค่าประมาณเท่ากันและมีค่าต่ำ แต่มีค่าเพิ่มตามค่าของ Cig ถึงแม้เลือกตัวเก็บประจุต่ำกว่า 5.8 nF กระแสจะยังคงล้าหลังแรงดันมากกว่า 65 องศา เสมอ ดังนั้นจึงไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับเฟสของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์

4 การใช้ตัวเก็บประจุค่าสูงขึ้นจะทำให้กระแสเผาไส้ขณะทำงานปรกติเพิ่มขึ้นโดยกระแสเผาไส้จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของกระแสผ่านหลอดเมื่อ Cig มีค่า 7.7 nF เป็นผลเสียต่อประสิทธิภาพของระบบ และอุณหภูมิหลอด

5 กระแสออกของอินเวอร์เตอร์มีค่าใกล้เคียงกับกระแสผ่านหลอด มีค่าเพิ่มขึ้นกับ Cig และมีค่าสูงกว่ากระแสหลอดประมาณร้อยละ 20 เมื่อ Cig มีค่า 10 nF

6 ในกรณีที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดควบคุมด้วยความถี่ เมื่อกำหนดให้กระแสเผาไส้ประมาณ 1.5 เท่าของกระแสผ่านหลอดความถี่การทำงานจะต้องมีค่าระหว่าง 1.15 ถึง 1.6 เท่าของความถี่ธรรมชาติไม่หน่วงของวงจร และแรงดันคร่อมหลอดจะมีค่ามากกว่า 4 เท่าของแรงดันพิกัดหลอดเมื่อ Cig มีค่าน้อยกว่า 2.2 nF ซึ่งอาจทำให้หลอดติดก่อนกำหนด

7 ในกรณีที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดควบคุมด้วยความถี่ เมื่อกำหนดให้กระแสเผาไส้ประมาณ 1.5 เท่าของกระแสผ่านหลอดความถี่การทำงานจะต้องมีค่าระหว่าง 1.1 ถึง 1.4 เท่าของความถี่ธรรมชาติไม่หน่วงของวงจรกระแสออกของอินเวอร์เตอร์จะล้าหลังแรงดันมากกว่า 75 องศา จึงไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับเฟสของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะเผาไส้

8 ในกรณีที่ให้แรงดันจุดหลอดขณะที่หลอดเป็นวงจรเปิดมีค่าสูงกว่าแรงดันพิกัดหลอดประมาณ 8 เท่า ซึ่งเพียงพอสำหรับการจุดหลอดให้ติดสว่างเสมอ ความถี่การทำงานของวงจรจะมีค่าประมาณ 1.11 – 1.14 เท่าของความถี่ธรรมชาติไม่หน่วงของวงจรกระแสออกของอินเวอร์เตอร์จะล้าหลังแรงดันมากกว่า 50 องศา จึงไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับเฟสของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ ขณะจุดหลอด

4.5.3 การออกแบบบัลลาสต์แบบมีการเผาไส้ก่อนจุดหลอด

จากการพิจารณาคุณสมบัติต่าง ๆ ของการใช้ Ls และ Cig ที่ทำให้บัลลาสต์มีคุณสมบัติตามข้อกำหนดในหัวข้อ 4.2 หากวงจรดังกล่าวมีการควบคุมความถี่เพื่อเผาไส้ก่อนจุดหลอดเพื่อให้มีคุณสมบัติในช่วงเผาไส้และจุดหลอดตามที่กำหนดในข้อ 4.2 การเลือก Ls และ Cig มีข้อจำกัดดังนี้

- ต้องใช้ Cig ที่สูงกว่า 2.2 nF เพื่อไม่ให้แรงดันคร่อมหลอดสูงกว่า 210 V ไม่เช่นนั้นหลอดติดก่อนสิ้นสุดการเผาไส้
- หากใช้ตัวเก็บประจุ Cig สูงกว่า 2.2 nF จะทำให้กระแสเผาไส้หลอดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่ม ของ Cig และหากใช้ Cig ใหญ่กว่า 8 nF จะต้องใช้ความถี่ในการจุดหลอดต่ำกว่าความถี่ในภาวะการทำงานปรกติ

เพื่อให้มีการเผื่อแรงดันไม่ให้หลอดติดและไม่ให้กำลังสูญเสียจากกระแสเผาไส้หลอดมากเกินไปจึงเลือกตัวเก็บประจุค่ามาตรฐาน 3.3 nF ซึ่งจะทำให้แรงดันขณะเผาไส้มีค่าไม่เกิน 165 V กระแสเผาไส้ในภาวะอยู่ตัวที่หลอดติดสว่างประมาณร้อยละ 23 ของกระแสผ่านหลอดที่พิกัด การเลือกค่าดังกล่าวจะได้ค่าต่าง ๆ สรุปได้ดังนี้

ช่วงทำงานปรกติ

ตัวเหนี่ยวนำ Ls	1.74	mH
ตัวเก็บประจุ Cig	3.3	nF
ความถี่การทำงาน	50	kHz
ความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง	66.4	kHz
Characteristc impedance	726	Ω
ค่าตัวประกอบคุณภาพ $Q_L = Q_P$	0.32	
กระแสออกของอินเวอร์เตอร์	224	mA
เฟสของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์	-67	องศา
แรงดันคร่อมหลอด	47	V
กระแสผ่านหลอด	219	mA
กระแสเผาไส้	50	mA

ช่วงเผาไส้

ความถี่การทำงาน		87	kHz
ความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง		66.5	kHz
ค่าตัวประกอบคุณภาพ Q_S		10-58	
กระแสออกของอินเวอร์เตอร์		300	mA
เฟสของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์		-67	องศา
แรงดันคร่อมหลอด		165	V
กระแสผ่านหลอด		0	mA
กระแสเผาไส้		300	mA

ช่วงจุดหลอด

ความถี่การทำงาน		75	kHz
ความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง		66.5	kHz
ค่าตัวประกอบคุณภาพ Q_S		10	
กระแสออกของอินเวอร์เตอร์	น้อยกว่า	626	mA
เฟสของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์		-69	องศา
แรงดันคร่อมหลอด	น้อยกว่า	400	V
กระแสผ่านหลอด		0	mA
กระแสเผาไส้	น้อยกว่า	626	mA
เวลาที่ใช้ในการเผาไส้	ประมาณ	0.8-1	s

การเลือกพิกัดของอุปกรณ์สำหรับ CFLที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอด

การเลือกตัวเหนี่ยวนำ

จากการพิจารณากระแสออกของอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ ตัวเหนี่ยวนำจะต้องมีค่าประมาณ 1.74 mH สามารถรับกระแสค่ายอดในช่วงจุดหลอด ประมาณ 1 A ได้โดยไม่อิ่มตัว มีกำลังสูญเสียไม่เกินประมาณ ¼ W ที่กระแสพิกัด 225 mA และรับแรงดันสูงกว่าแรงดันจุดหลอดโดยมีค่าประมาณ 700 V

<u>หมายเหตุ</u> พิกัดของกระแสและแรงดันสูงสุดมักจะกำหนดโดยการทำงานในช่วงจุดหลอดซึ่งการทำงานตามปรกติแล้วแรงดันจุดหลอดมักจะไม่เกินร้อยละ 70 ของแรงดันจุดหลอดซึ่งจะทำให้ทั้งกระแสและแรงดันสูงสุดต่ำกว่าพิกัดสูงสุด อย่างไรก็ดีในภาวะที่เกิดความผิดปรกติหรือการทดสอบตามมาตรฐานความปลอดภัยจะมีการทดสอบในภาวะที่ไม่มีหลอดในวงจรซึ่งแรงดันจุดหลอดจะมีค่าเท่ากับพิกัดสูงสุดที่ออกแบบ

การเลือกตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุควรเป็นตัวเก็บประจุแบบไม่มีขั้วใช้กับความถี่สูง ที่สามารถรับแรงดันค่ายอดได้ประมาณ 700 V

การเลือกสวิตช์ไวงาน FET

สวิตช์ไวงานควรมีพิกัดกระแสเท่ากับกระแสสูงสุดในช่วงจุดหลอดคือประมาณ 0.75 ถึง 1 A ซึ่งสามารถรับกระแสในช่วงเวลาประมาณ ไม่เกิน 10 us ได้ประมาณ 2-3 เท่าของกระแสพิกัด และเลือกพิกัดแรงดันมากกว่าพิกัดแรงดันไฟตรงในภาวะที่แรงดันเกินพิกัดร้อยละ 10 ถึง 15 ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้พิกัดแรงดันประมาณ 400 V

วงจรขับนำ

ในการขับนำ FET ใช้วงจรประมวลที่สามารถขับนำ FET ได้โดยตรง เนื่องจากไม่สามารถจัดซื้อวงจรประมวลที่ใช้ขับนำสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับหลอด CFL ที่ใช้กำลังต่ำได้จึงใช้วงจรประมวลที่ใช้ขับนำสวิตช์ไวงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับ Tubular Fluorescent lamp ที่สามารถกำหนดความถี่ทั้งในช่วงอุ่นไส้ จุดหลอดและในช่วงทำงานปรกติได้ ได้อย่างอิสระ โดยมีวงจรป้องกันแรงดันสูงกว่าพิกัดสูงกว่าพิกัดสูงสุด แรงดันต่ำกว่าพิกัดต่ำสุด กระแสเกินพิกัดตลอดจนภาวะกระแสออกของวงจรอินเวอร์เตอร์นำหน้าแรงดันซึ่งเป็นภาวะที่จะทำให้เกิดความเค้นและกำลังสูญเสียในสวิตช์มาก

4.5.4 การออกแบบบัลลาสต์แบบจุดติดทันที

จากการพิจารณาคุณสมบัติต่าง ๆ ของการใช้ Ls และ Cig ที่ทำให้บัลลาสต์มีคุณสมบัติตามข้อกำหนดในหัวข้อ 4.2 หากวงจรดังกล่าวใช้ความถี่การทำงานคงที่สำหรับการจุดหลอด การเลือก Ls และ Cig มีข้อจำกัดดังนี้

- ต้องให้ความถี่สูงกว่าความถี่ธรรมชาติไม่หน่วงเพื่อให้กระแสล้าหลังแรงดันทั้งในช่วงจุดหลอดและในภาวะการทำงานปรกติ ดังนั้นจึงต้องใช้ Cig ที่มีค่าสูงกว่า 5.8 nF

- เพื่อให้แรงดันจุดหลอดสูงกว่า 400 V ที่ความถี่การทำงาน 50 kHz ต้องใช้ Cig ที่มีค่าสูงกว่า 4.3 nF

เพื่อไม่ให้แรงดันที่หลอดขณะเปิดวงจรมีค่ายอดสูงกว่า 1500 V หรือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยไม่เกิน 1060 V [4 – 5] จากรูปที่4.17 ต้องไม่ใช้ Cig ที่มีค่าระหว่าง 5.1 nF ถึง 6.4 nF

จากการพิจารณาข้อจำกัดทั้งสอง จะเห็นได้ว่าจะต้องใช้ข้อจำกัดที่ต้องให้กระแสออกของอินเวอร์เตอร์และ ข้อจำกัดด้านแรงดันเปิดวงจรของหลอดเป็นข้อจำกัดด้านการออกแบบและต้องใช้ตัวเก็บประจุขนาดมาตรฐานที่มีจำหน่ายคือ 6.8 nF สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แบบจุดทันทีใช้วงจรขับนำที่ใช้การป้อนกลับกระแสในการกำเนิดสัญญาณขับนำ ความถี่ในช่วงจุดหลอดมักจะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้การออกแบบมีการเผื่อด้านเฟสมากกว่าที่คำนวณโดยใช้ความถี่คงที่ และจากการทดลองวัดบัลลาสต์บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แบบจุดทันทีที่ใช้วงจรขับนำที่ใช้การป้อนกลับกระแสในการกำเนิดสัญญาณขับนำพบว่าในช่วงจุดหลอด กระแสออกจะล้าหลังแรงดันเล็กน้อย และในบางขณะกระแสอาจนำหน้าแรงดันซึ่งจะมีผลทำให้เกิดความเค้นในสวิตช์ไวงานและน่าจะเป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แบบจุดทันทีมีความทนทานน้อยลงเพื่อให้การออกแบบเป็นไปตามข้อกำหนดจึงเลือกค่าต่าง ๆ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

ช่วงทำงานปรกติ

ตัวเหนี่ยวนำ Ls	1.75	mH
ตัวเก็บประจุ Cig	6.8	nF
ความถี่การทำงาน	50	kHz
ความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง	46	kHz
Characteristc impedance	507	Ω
ค่าตัวประกอบคุณภาพ $Q_L = Q_P$	0.43	
กระแสออกของอินเวอร์เตอร์	240	mA
เฟสของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์	-69	องศา
แรงดันคร่อมหลอด	47	V
กระแสผ่านหลอด	219	mA
กระแสเผาไส้	99	mA

ช่วงจุดหลอด

ความถี่การทำงาน	50	kHz
ความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง	46	kHz
ค่าตัวประกอบคุณภาพ Q_S	40	

กระแสออกของอินเวอร์เตอร์	น้อยกว่า	1.45	A
เฟสของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์		-81	องศา
แรงดันคร่อมหลอด	น้อยกว่า	680	V
กระแสผ่านหลอด		0	mA
กระแสเผาไส้	น้อยกว่า	1.45	A

การเลือกพิกัดของอุปกรณ์สำหรับ CFL แบบจุดติดทันที

การเลือกตัวเหนี่ยวนำ

จากการพิจารณากระแสออกของอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ ตัวเหนี่ยวนำจะต้องมีค่าประมาณ 1.75 mH สามารถรับกระแสค่ายอดในช่วงจุดหลอด ประมาณ 2 A ได้โดยไม่อิ่มตัว มีกำลังสูญเสียไม่เกินประมาณ ¼ W ที่กระแสพิกัด 240 mA และรับแรงดันสูงกว่าแรงดันจุดหลอดโดยมีค่าประมาณ 1,000 V

การเลือกตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุควรเป็นตัวเก็บประจุแบบไม่มีขั้วใช้กับความถี่สูง ที่สามารถรับแรงดันค่ายอดได้ประมาณ 1000 V

การเลือกสวิตช์ไวงาน FET

สวิตช์ไวงานควรมีพิกัดกระแสเท่ากับกระแสสูงสุดในช่วงจุดหลอดโดยมีค่าไม่น้อยกว่า 1 A ซึ่งสามารถรับกระแสในช่วงเวลาประมาณ ไม่เกิน 10 us ได้ประมาณ 3 เท่าของกระแสพิกัด และเลือกพิกัดแรงดันมากกว่าพิกัดแรงดันไฟตรงในภาวะที่แรงดันเกินพิกัดร้อยละ 10 – 15 ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้พิกัดแรงดันประมาณ 400 V

วงจรขับนำ

ในการขับนำ FET ใช้วงจรประมวลเช่นเดียวกับกรณีการออกแบบ CFL ที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดเพื่อให้สามารถควบคุมความถี่การทำงานได้ตามต้องการ และสามารถเปรียบเทียบผลการคำนวณทางทฤษฎีกับผลการทดลองได้แต่ในการผลิตเพื่อจำหน่ายสามารถใช้วงจรขับนำที่ใช้การป้อนกลับจากด้านวงจรออกได้

4.6 ผลการทดลองวัดคุณสมบัติของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับ CFL ขนาด 11 W

ได้มีการทดลองวัดคุณสมบัติต่าง ๆ ของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอด CFL ขนาด 11 W ทั้งแบบจุดติดทันทีและแบบที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดที่ได้ออกแบบและต่อวงจรเพื่อทดสอบการออกแบบได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 จากการพิจารณาผลสามารถสรุปผลได้ดังนี้

4.6.1 วงจรเรียงกระแส

เนื่องจากการออกแบบวงจรเรียงกระแสของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เป็นการออกแบบเป็นการออกแบบสำหรับหลอด CFL ขนาด 11 W หลอดเดียวกันทั้งแบบจุดติดทันทีและแบบที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอด เพื่อใช้กับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากสายกำลังที่มีแรงดัน 220 V 50 Hz เหมือนกันทำให้มีข้อกำหนดของการออกแบบทั้งด้านเข้าและด้านออกของวงจรเรียงกระแสสำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งแบบจุดติดทันทีและแบบที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดเหมือนกัน ดังนั้นจึงสามารถออกแบบร่วมกันได้ อย่างไรก็ดีบัลลาสต์ทั้งสองชนิดจะมีการทำงานที่แตกต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากอินเวอร์เตอร์สำหรับบัลลาสต์ทั้งสองแบบไม่เหมือนกันทุกประการ เมื่อเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการคำนวณจะเห็นได้ว่าการออกแบบแรงดันไฟตรงของวงจรเรียงกระแสมีความคลาดเคลื่อนในระดับใกล้เคียงกับความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด แต่การคำนวณแรงดันกระเพื่อมและค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิก (THD) มีความคลาดเคลื่อนมากเนื่องจากเหตุผลดังได้กล่าวไว้แล้วในข้อ 3.3 ส่วนด้านคุณสมบัติและการทำงานของวงจรเรียงกระแสของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งแบบจุดติดทันทีและแบบที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดสรุปได้ดังนี้

- CFLที่ออกแบบทั้งแบบจุดติดทันทีและแบบที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอด วงจรด้านเข้าเป็นวงจรเรียงกระแสที่มีตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองไม่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง โดยมีค่าตัวประกอบกำลังจากการวัดประมาณ 0.66
- CFL ที่ออกแบบทั้งสองแบบมีค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิกใกล้เคียงกันโดยมีค่าระหว่างร้อยละ 103 ถึง 106
- การกระเพื่อมของแรงดันออกมีค่าประมาณร้อยละ 10 ซึ่งทำให้การกระเพื่อมของกระแสผ่านหลอดมีค่าไม่เกินข้อกำหนดของขนาดตัวประกอบค่ายอดที่กำหนด

4.6.2 วงจรอินเวอร์เตอร์

จากการเปรียบเทียบค่าในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าการทดลองใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้ โดยเฉพาะกรณีบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับ CFL แบบที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดเนื่องจากแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่หลักมูลที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบ แต่ใน

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณทางทฤษฎีและผลการทดลองของวงจรด้านเข้าของ CFL ที่ออกแบบ

ชนิด CFL	Frequency Control Preheat Starting			Instant Start		
ชนิดหลอด	Lamp Rating 11W Daylight			Lamp Rating 11W Daylight		
ตัวแปร	ออกแบบ	ทดลอง	% Error	ออกแบบ	ทดลอง	% Error
V_{srms}(V)	220	217.4	1.18	220	218.9	0.50
f(Hz)	50	50.06	- 0.12	50	50.03	- 0.06
R_{Leq}(kΩ)	5.9	5.9	- 0.50	5.9	5.1	13.5
C_F(uF)	3.3	3.3	-	3.3	3.3	-
$\omega C_F R_{Leq}$	6.1	6.1	- 0.46	6.1	5.3	13.50
V_m(V)	311.1	307.5	1.16	311.1	309.5	0.51
V_{dc}(V)	270.7	269.5	0.42	270.7	269.0	0.62
V_{dc}/V_m	0.87	0.88	- 1.15	0.87	0.87	0.11
V_{ripple}(V)	27.1	23.7	12.6	33.84	25.3	25.2
% Ripple	10	8.8	12.0	12.5	9.4	24.8
V_{1rms}(V)	220	217.4	1.18	220	218.8	0.55
%THD-V	NA	1.6	5.82	NA	2.3	4.62
I_{rms}(mA)	81.5	86.0	- 5.52	81.5	9.2	- 21.73
I_{1rms}(mA)	52.6	58.9	- 11.98	52.6	68.8	- 30.83
I_{dc}(mA)	46.1	41.8	9.33	46.1	48.2	- 4.52
I_{rms}/I_{dc}	1.8	2.1	- 15.96	1.8	2.1	- 16.43
%THD-I	123.2	106.3	10.30	118.5	103.9	12.32
VA	18.3	18.7	- 4.47	17.9	21.7	- 21.23
Input(W)	10.5	12.3	- 17.14	10.5	14.2	- 35.62
PF	0.57	0.66	- 12.51	0.59	0.66	- 11.83
COS(θ1)	0.91	0.96	- 5.82	0.91	0.95	- 4.62
P_{dc}(W)	NA	11.3	NA	NA	13.0	NA
η(%)	NA	91.3	NA	NA	90.5	NA

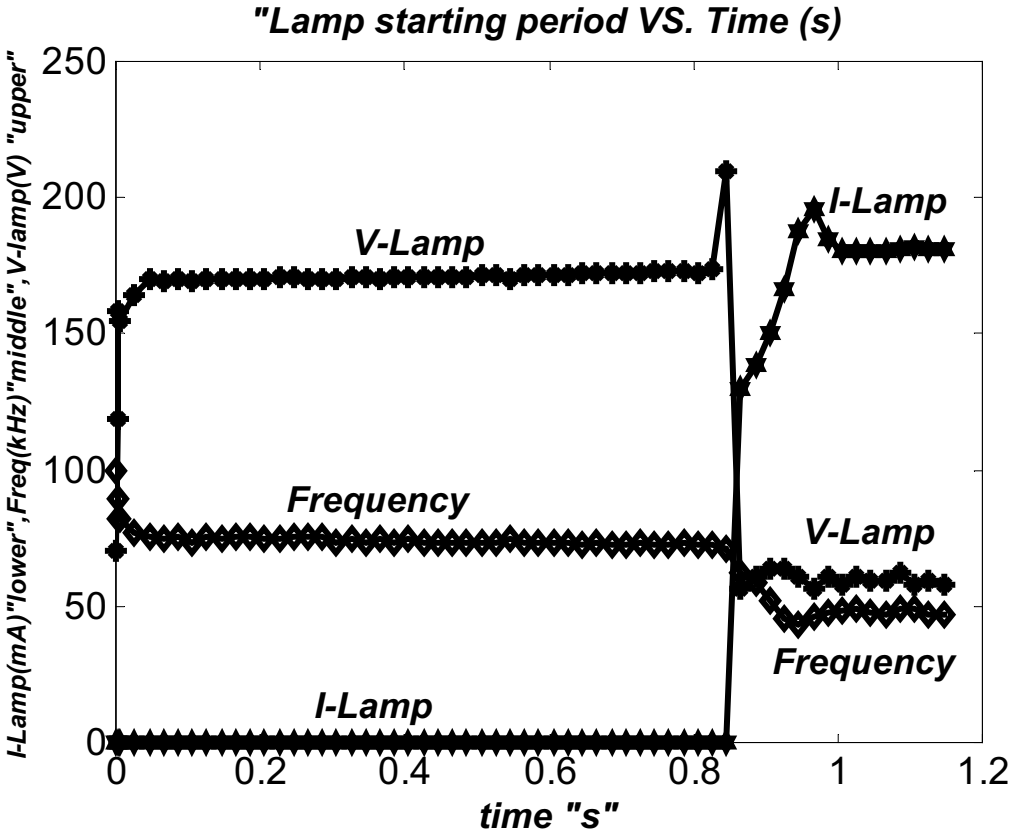
ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณทางทฤษฎีและผลการทดลองของวงจรด้านออกของ CFL ที่ออกแบบ

ชนิด CFL	Frequency Control Preheat Starting			Instant Start		
ชนิดหลอด	Lamp Rating 11W Daylight			Lamp Rating 11W Daylight		
ตัวแปร	ออกแบบ	ทดลอง	%Error	ออกแบบ	ทดลอง	%Error
V_{line}(V)	220	217.4	1.18	220	218.9	0.50
V_{dc}(V)	270	269.5	0.19	270	269.0	0.37
V_{inv}(V)	135	129.0	4.44	135	139.9	- 3.63
V_{inv1}(V)	121.5	119.1	1.98	121.5	130.7	- 7.57
f(Hz)	50.0	50.3	- 0.60	50	50.1	- 0.20
f_0(kHz)	66.2	66.2	-	46.1	46.1	-
V_{lamp}(V)	NA	47.7	NA	NA	47.9	NA
V_{lamp1}(V)	47	46.8	0.43	47	47.5	- 1.06
I_{lamp}(mA)	NA	220.5	NA	NA	239.8	NA
I_{lamp1}-mA	219	218.8	0.09	219	238.2	- 8.77
R_{lamp1}	215	214.1	0.42	215	199.1	7.40
Ls(mH)	1.75	1.75	-	1.75	1.75	-
Cig(nF)	3.3	3.3	-	6.8	6.8	-
I_{inv}(mA)	NA	226.5	NA	NA	263	NA
I_{inv1}-mA	224	225.1	- 0.49	240	261.6	- 9.00
PHI_{inv}(dg)	- 67.0	- 67.2	- 0.30	- 69	- 70.1	- 1.59
P_{inv}(W)	NA	10.5	NA	NA	11.8	NA
P_{inv1}(W)	10.6	10.4	1.89	10.5	11.7	- 11.43
P_{lamp}(W)	NA	10.4	NA	NA	11.4	NA
P_{lamp1}(W)	10.2	10.2	-	10.2	11.3	- 10.78
I_{fil}(mA)	50.0	47.3	5.40	99.0	90.2	8.89
InverterPF	NA	0.36	NA	NA	0.31	NA
InverterVA	NA	29.2	NA	NA	36.8	NA
Inv-η(%)	NA	99	NA	NA	96.6	NA

กรณีของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับ CFL แบบจุดติดทันทีผลที่ได้จากการทดลองจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ออกแบบทั้งที่แรงดันไฟตรงด้านเข้ามีขนาดใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้ จากการพิจารณาข้อมูลพบว่าความแตกต่างเกิดจากแรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์มีค่าสูงกว่าที่ออกแบบไว้ประมาณร้อยละ 8 การเพิ่มขึ้นของแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เกิดจากผลของตัวเหนี่ยวนำ Lx และตัวเก็บประจุ C2 ที่ทำหน้าที่ป้องกันกระแส reactive ของวงจรอินเวอร์เตอร์ออกไปรบกวนวงจรโหลดอื่นที่ต่อกับสายกำลังร่วมกันกับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับ CFL หากตัดวงจรดังกล่าวออกจะทำให้แรงดันออกของอินเวอร์เตอร์สำหรับความถี่หลักมูลมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้ การเพิ่มขึ้นของแรงดันออกมีผลให้กำลังที่หลอดสูงกว่าที่ออกแบบไว้ประมาณร้อยละ 10 อย่างไรก็ดีสำหรับการออกแบบทั้งสองกรณีผลการทดลองที่บ่งชี้ว่ากำลังส่วนใหญ่ที่หลอดเป็นผลของกระแสและแรงดันของความถี่หลักมูล ดังนั้นจึงอาจจะกล่าวได้ว่าการออกแบบวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้วงจรสมมูลแบบเชิงเส้นสำหรับความถี่หลักมูลจะให้ผลที่คลาดเคลื่อนน้อยซึ่งน่าจะเพียงพอสำหรับการออกแบบ CFL ยกเว้นการประเมินค่าประสิทธภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าที่ควรจะเป็นเนื่องจากความแตกต่างของกำลังเข้าและกำลังออกมีค่าใกล้เคียงกับความคลาดเคลื่อนของการวัด รูปที่ 4.19 แสดงค่าความถี่ แรงดันผ่านหลอดและกระแสผ่านหลอดระหว่างการจุดหลอด จะเห็นได้ว่าความถี่การทำงานมีค่าใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้ และแรงดันจุดหลอดมีค่าประมาณ 220 V ซึ่งอยู่ในพิกัดของแรงดันเปิดวงจร

จากการพิจารณาผลการวัดคุณสมบัติของวงจรอินเวอร์เตอร์จะสรุปได้ดังนี้

- วงจรอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แบบที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดมีความถี่การทำงานต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง f_0 และมีกระแสออกล้าหลังแรงดันทั้งในภาวะทำงานปรกติและจากการกวาดดูรูปคลื่นในช่วงเผาไส้และจุดหลอดพบว่ากระแสออกยังคงล้าหลังแรงดันเสมอ
- วงจรอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แบบจุดติดทันทีมีความถี่การทำงานสูงกว่าความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง f_0 และมีกระแสออกล้าหลังแรงดันทั้งในภาวะทำงานปรกติและจากการกวาดดูรูปคลื่นในช่วงจุดหลอดพบว่ากระแสออกยังคงล้าหลังแรงดันเสมอ
- กระแสเผาไส้ในภาวะการทำงานปรกติของ CFL แบบจุดติดทันทีจะมีกระแสเผาไส้สูงกว่า CFL แบบที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดประมาณ 2 เท่า
- กระแสออกของอินเวอร์เตอร์ของ CFL แบบที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดมีค่าสูงกว่ากระแสผ่านหลอดร้อยละ 3 ในขณะที่กระแสออกของอินเวอร์เตอร์ของ CFL แบบจุดติดทันทีมีค่าสูงกว่ากระแสผ่านหลอดร้อยละ 10
- ในภาวะการทำงานปรกติกระแสออกของอินเวอร์เตอร์จะล้าหลังแรงดันมากกว่า 65 องศา



รูปที่ 4.19 ความถี่การทำงาน แรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดระหว่างการจุดหลอด

- ค่าตัวประกอบกำลังของอินเวอร์เตอร์ของ CFL แบบที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดมีค่า 0.36 ซึ่งสูงกว่ากรณีของอินเวอร์เตอร์ของ CFL แบบจุดติดทันทีซึ่งมีค่า 0.3
- กำลังออกของหลอดต่ำกว่าค่าพิกัดที่กำหนดเสมอโดยมีค่าต่ำกว่าประมาณร้อยละ10
- แรงดันจุดหลอดในการจุดหลอดแต่ละครั้งของของอินเวอร์เตอร์ของ CFL แบบที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดมีค่าไม่แน่นอนแต่แตกต่างกันน้อยโดยมีค่าระหว่าง 230 ถึง 270 V ซึ่งต่ำกว่าแรงดันเปิดวงจรที่ออกแบบไว้ประมาณร้อยละ 30
- แรงดันจุดหลอดในการจุดหลอดแต่ละครั้งของของอินเวอร์เตอร์ของ CFL แบบจุดติดทันทีมีค่าไม่แน่นอนและแตกต่างกันมาก รวมทั้งระยะเวลาจุดหลอด

4.7 สรุป

การใช้แบบจำลองแบบเชิงเส้นสำหรับความถี่หลักมูลทำให้สามารถคำนวณคุณสมบัติต่าง ๆ ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอด CFL ที่กำหนดโดยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรโหลดที่มีค่าเหมาะสมเพื่อให้การทำงานของ CFL เป็นไปตามข้อกำหนดต่าง ๆ ของการออกแบบ การคำนวณคุณสมบัติต่าง ๆ มีการคำนวณในภาวะการทำงานที่แตกต่างกันตามเงื่อนไขการออกแบบ โดยมีการคำนวณคุณสมบัติในภาวะการทำงานปรกติและในช่วงจุดหลอด และมีการคำนวณคุณสมบัติการทำงานในช่วงอุ่นไส้เพิ่มสำหรับ CFL ที่มีการอุ่นไส้ก่อนจุดหลอด ข้อกำหนดการออกแบบที่แตกต่างกัน ทำให้มีขีดจำกัดสำหรับการออกแบบจะแตกต่างกัน การใช้แบบจำลองแบบง่ายที่ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงจะทำให้สามารถออกแบบอย่างเป็นระบบโดยสามารถพิจารณาข้อกำหนด ขีดจำกัดและคุณสมบัติการทำงานในแง่มุมต่าง ๆ ที่ได้การคำนวณ เพื่อประกอบการตัดสินในเลือกอุปกรณ์ให้เหมาะสมตามเงื่อนไขที่เป็นไปได้

ได้มีการทดลองออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์ขนาด 11 W ทั้งแบบจุดติดทันทีและแบบที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอด จากการพิจารณาคุณสมบัติต่าง ๆ ประกอบการออกแบบพบว่า สำหรับเงื่อนไขการจุดหลอดที่แตกต่างกันเมื่อใช้ข้อกำหนดของแรงดันด้านเข้าและข้อกำหนดด้านคุณสมบัติของหลอดเหมือนกันมีความแตกต่างกัน การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับ CFL แบบมีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดสามารถออกแบบให้กระแสเผาไส้หลอดในช่วงการทำงานปรกติต่ำกว่าแบบจุดติดทันทีแต่มีขีดจำกัดด้านแรงดันคร่อมหลอดขณะเผาไส้ที่เป็นผลจากข้อกำหนดของกระแสเผาไส้ ส่วนการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับ CFL แบบจุดติดทันทีมีขีดจำกัดด้านเฟสของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ที่ต้องล้าหลังแรงดันในช่วงจุดหลอดและต้องมีแรงดันเพียงพอสำหรับการจุดหลอดแต่ไม่เกินค่าที่กำหนดโดยมาตรฐานด้านความปลอดภัย บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับ CFL แบบจุดติดทันทีสามารถใช้วงจรขับนำสวิตช์แบบง่ายและใช้อุปกรณ์น้อยแต่ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีพิกัดด้านกระแส แรงดันและความเค้นสูงกว่าแบบที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอด ส่วนบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับ CFL แบบที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดต้องใช้วงจรขับนำที่ควบคุมความถี่ได้หรือต้องเพิ่มอุปกรณ์ในวงจรโหลดแต่สามารถควบคุมคุณสมบัติการทำงานในช่วงจุดหลอดได้ดีและมีความเค้นต่ำทำให้ทั้งบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และหลอดมีความทนทานกว่าหากมีการออกแบบและเลือกอุปกรณ์อย่างเหมาะสม

บทที่ 5
สรุป

จากการวางเป้าหมายการศึกษาแนวทางในการออกแบบบัลลาสต์อย่างเป็นระบบโดยการใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีจำหน่ายในประเทศเป็นตัวอย่างศึกษาวิจัย นำไปสู่ผลการศึกษาวิจัยใน 2 แนวทางประกอบด้วยวิธีการออกแบบและตรวจสอบคุณสมบัติของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์อย่างเป็นระบบและผลการศึกษาคุณสมบัติของบัลลาสตอิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์โดยสามารถสรุปผลในแต่ละแนวทางได้ดังนี้

- **ผลด้านการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์**

⌘ ได้แนวทางในการวิเคราะห์และคำนวณคุณสมบัติของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นวงจรไม่เชิงเส้นมีแหล่งจ่ายเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม ที่สามารถใช้แบบจำลองแบบเชิงเส้นสำหรับความถี่หลักมูล โดยมีความคลาดเคลื่อนในระดับเดียวกับเครื่องมือวัด

⌘ สามารถคำนวณคุณสมบัติของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบแตกต่างกันโดยใช้ข้อกำหนดในการออกแบบเหมือนกัน ผลการคำนวณใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบอย่างเป็นระบบและทำให้เข้าใจผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ภายในวงจรหรือเข้าใจถึงสาเหตุของพฤติกรรมของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

⌘ กำหนดแนวทางในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์อย่างเป็นระบบ การออกแบบจะใช้ข้อกำหนดและขีดจำกัดในการออกแบบร่วมกับเกณฑ์การออกแบบที่ได้จากการคำนวณคุณสมบัติของบัลลาสต์ที่ออกแบบแตกต่างกันโดยใช้ข้อกำหนดและขีดจำกัดที่ได้รับเพื่อให้การออกแบบมีความเหมาะสมที่สุด มีการพิจารณาผลดีผลเสียของการออกแบบที่แตกต่างกันประกอบการตัดสินใจเลือกอุปกรณ์

⌘ ในด้านการตรวจสอบการออกแบบ หรือการวัดคุณสมบัติของบัลลาสต์ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์ผลการวัดด้วย DFT ทำให้สามารถเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีได้ หรือใช้เพื่อตรวจสอบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบหรือผลิตเพื่อจำหน่าย

⌘ ได้ทดลองใช้วิธีการคำนวณและวิธีการออกแบบอย่างเป็นระบบที่ได้ออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอด CFL ขนาด 11 W ทั้งแบบที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดและแบบจุดติดทันที เปรียบเทียบผลการออกแบบกับผลการทดลองวัดวงจรที่สร้างตามที่ออกแบบไว้และใช้วิธีการวัดและวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวข้างต้นเพื่อตรวจสอบการออกแบบซึ่งให้ผลเป็นไปตามที่ออกแบบ

➢ **คุณสมบัติทั่วไปของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์**

- ❖ CFL มีขนาดตั้งแต่ ขนาด 7 W ถึง 21 W
- ❖ CFL ไม่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง เป็นวงจรเรียงกระแสที่ใช้ตัวเก็บประจุทำหน้าที่วงจรกรองมีค่าตัวประกอบกำลังระหว่าง 0.55 ถึง 0.65
- ❖ CFL มีค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิก (THD) ระหว่างร้อยละ 110 ถึง 150
- ❖ CFL ที่ออกแบบระยะหลังลดขนาดตัวเก็บประจุของวงจรกรองลงทำให้มีค่าตัวประกอบกำลังประมาณ 0.65 และมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกประมาณร้อยละ 110 แต่จะมีแรงดันกระเพื่อมเพิ่มขึ้นจากประมาณร้อยละ 5-6 เป็นร้อยละ 10 ค่าตัวประกอบค่ายอดของกระแสผ่านหลอดเพิ่มขึ้นแต่ยังต่ำกว่าค่าสูงสุด 1.7 ที่กำหนดโดยมาตรฐาน
- ❖ CFL มีทั้งชนิดที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดที่มีราคาสูงและแบบจุดติดทันทีที่มีราคาระดับกลางและแบบประหยัด
- ❖ CFL ชนิดที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดมีอายุการใช้งานที่ระบุระหว่าง 10,000 ถึง 12,000 ชั่วโมง ในขณะที่ ชนิดที่มีราคาระดับกลางจะมีอายุใช้งานที่ระบุระหว่าง 6,000 ถึง 8,000 ชั่วโมง ส่วนชนิดราคาประหยัดจะมีอายุใช้งานที่ระบุระหว่าง 3,000 ถึง 6,000 ชั่วโมง
- ❖ วงจรอินเวอร์เตอร์ของ CFL ทุกตัวทำงานในย่านความถี่ต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติไม่หน่วงของวงจรโหลด แต่ในภาวะการทำงานปรกติกระแสออกจะล้าหลังแรงดันเนื่องจากวงจรโหลดมีค่าตัวประกอบคุณภาพต่ำมาก
- ❖ อินเวอร์เตอร์ของ CFL เป็นวงจรกึ่งบริดจ์สวิตช์ทำงานแบบเรโซแนนซ์ภาคแรงดันศูนย์
- ❖ ในช่วงจุดหลอดกระแสออกของวงจรอินเวอร์เตอร์จะนำหน้าแรงดันทำให้เกิดความเค้นในสวิตช์หากวงจรทำงานที่ความถี่คงที่ หรือวงจรขับนำที่ใช้การป้อนกลับไม่สามารถเพิ่มความถี่การทำงานให้สูงกว่าความถี่ธรรมชาติไม่หน่วงของวงจรโหลด
- ❖ CFL ที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่ธรรมชาติไม่หน่วงของวงจรโหลดในช่วงจุดหลอดทำให้ไม่มีปัญหาที่เกิดจากกระแสนำหน้าแรงดัน
- ❖ CFL ที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดจะมีกระแสเผาไส้ในภาวะการทำงานปรกติต่ำกว่า CFL แบบจุดติดทันที
- ❖ CFL ที่มีกำลังออกสูงขึ้นมักจะมีกระแสเผาไส้หลอดในภาวะการทำงานปรกติเทียบกับกระแสผ่านหลอดเพิ่มขึ้น
- ❖ CFL แบบจุดติดทันทีมีความเค้นที่เกิดกับอุปกรณ์สูงกว่าแบบที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอด

เอกสารอ้างอิง

1 Philips Lighting, Lamp Specifications and Application Guide.

2 Osram Indoor Outdoor Ligthing Catalogue.

3 IEC 928 A.C. Supplied Electronic Ballasts for Tubular Fluorescent Lamps. General and Safety Requirements. 1990.

4 มอก.885-2532. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม "บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับหลอดฟลูออเรสเซนซ์ เฉพาะด้านความปลอดภัย"

5 IEC 929 A.C.- Supplied Electronic Ballasts for Tubular Fluorescent Lamps – Performance Requirements. 1990-12.

6 มอก.1506-254. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม "บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับหลอดฟลูออเรสเซนซ์ "

7 โคทม อารียา " อิเล็กทรอนิกส์กำลัง " เล่ม 1 กรุงเทพฯ บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด บทที่ 16-17 หน้า 477-559. พ.ศ. 2544.

8 Robert W. Erickson, "Fundamental of Power Electronics" Chapman & Hall International Thomson Publishing. 1997 Chapter 20. pp. 711-740.

9 ยุทธนา กุลวิทิต และ ไพศาล บุญเจียม "วิธีเลือกค่าอุปกรณ์ในวงจรโหลดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์" หนังสือรวมบทความทางวิชาการ ซึ่งได้นำเสนอต่อที่ประชุมสัมมนา (Proceedings) ใน การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23 จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ วันที่ 23-24 พฤศจิกายน 2543. ณ. โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่ หน้า 253-256.

10 ยุทธนา กุลวิทิต และ จิโรจน์ พรวัฒนา "ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันเข้าต่อความเชื่อถือได้ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์" หนังสือรวมบทความทางวิชาการ ซึ่งได้นำเสนอต่อที่ประชุมสัมมนา (Proceedings) ใน การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23 จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ วันที่ 23-24 พฤศจิกายน 2543. ณ. โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่ หน้า 249-252.

11 ไพศาล บุญเจียม และ ยุทธนา กุลวิทิต "บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการอุ่นไส้หลอดก่อนการจุดหลอดควบคุมด้วยวงจรโหลด" หนังสือรวมบทความทางวิชาการ ซึ่งได้นำเสนอต่อที่ประชุมสัมมนา (Proceedings) ใน การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23 จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ วันที่ 23-24 พฤศจิกายน 2543. ณ. โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่ หน้า 257-260.

12 ไพศาล บุญเจียม และ ยุทธนา กุลวิทิต "การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการอุ่นไส้ก่อนการจุดหลอดควบคุมด้วยความถี่" หนังสือรวมบทความทางวิชาการ ซึ่งได้นำเสนอต่อที่ประชุมสัมมนา (Proceedings) ใน การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24 จัดโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วันที่ 22-23 พฤศจิกายน 2544 หน้า 452-457.

13 E. Gluskin, "On the Theory of Fluorescent Lamp Circuits" Science, Measurement and Technology, IEE Proceeding, Vol. 137 Part. A No. 4. July 1990. pp 201-208.

14 E. Deng and S. Cuk, "Negative Incremental Impedance and Stability of Fluorescent Lamps" Applied Power Electronics Conference and Exposition, Conference proceeding. 23-27 February 1997. Vol. 2 pp. 1050-1056.

15 O.H Schade, Proc. IRE, Vol. 31 p.343-346, 1943.

16 J.R. Coaton and A.M Marsden "Lamp and Lighting" Fourth Edition Arnold and Contributors 1997. Chapter 10. pp.194-215.

17 ยุทธนา กุลวิทิต "บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์" เสนอต่อกองเศรษฐกิจการพลังงาน สำนักงานคณะกรรมการพลังงานแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการพลังงาน มิถุนายน 2545

18 Philips Technical Manual "High Frequency Electronic Lighting System" 1984.

19 P.N. Wood, "Fluorescent Ballast Design Using Passive PFC and Crest Factor Control," Conference Proceeding of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Oct 1998, Vol. 3 pp 2076-2081.

20 Gyu Chae, Tae-Ha Ryoo, Gyu-Hyeong Cho, "Electronic Ballast with Valley Fill and Charge Pump Capacitor for Prolonged Filaments Preheating and Power Factor Correction," Proceeding of IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1999. Vol. 2 pp. 1097-1102.

21 R. Prado, A. Seidel, F. Bisogno, T. Marchesan, "Boost Push-Pull Electronic Ballast Converter with High Power Factor for Fluorescent Lamp," Power Electronic Congress. Acapulco, Mexico. 15-19 October 2000. pp. 182-187.

22 N. Takahashi, Y. Kato, M. Ohkita, K. Okutu, M. Matsuyama, M.Nakaoka, " An Electronic Ballast For Suppresion of the Input Harmonic Current," Conference Record of Industry Applications Conference. Rome Italy. 8-12 October, 2000. Vol. 4, pp. 2317-2322.

23 R.N. Prado, A.R. Seidel, F.E. Costa, “A Design of the Self-Oscillating Electronic Ballast,” Conference Proceeding of Power Electronic and Motion Control. Beijing, China. 15-18 August, 2000. Vol. 3, pp. 1127-1131.

24 F. Tao, F.C. Lee, and N. Onishi, “A Self-Oscillating Drive for Single Stage Charge-Pump Power Factor Correction Electronic Ballast with Frequency Modulation” Conference Record of Industry Applications Conference. Rome Italy. 8-12 October, 2000. Vol. 5, pp. 3367-3375.

25 Yueh-Ru-Yuang and Chern-Lin Chen; “Steady State Analysis and Simulation of a BJT Self-Oscillating ZVS-CV Ballast Driven by a Saturable Transformer,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 46, No. 2, 1999, pp.249-260

26 จิโรจน์ พรวัฒนา และ ยุทธนา กุลวิทิต “การวิเคราะห์การทำงานของวงจรขับนำสวิตช์แรงดันศูนย์ที่ใช้หม้อแปลงอิ่มตัว” หนังสือรวมบทความทางวิชาการ ซึ่งได้นำเสนอต่อที่ประชุมสัมมนา (Proceedings) ใน การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 22 จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วันที่ 2-3 ธันวาคม 2542. ณ. อาคารสถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ หน้า 264 - 267.

27 J. Adams, T.J. Ribarich, J.J. Ribarich; “ A New Control IC for Dimmable High-Frequency Electronic Ballast” Conference Proceeding of IEEE Applied Poweer Electronics Conference and Exposition, March 1999, Vol. 2 pp.713-719

28 J. Ribas, J. M. Alonso, E. L. Corominas, A. j. Calleja and M. Rico-Secades; “Design Considerations for Optimum Ignition and Dimming of Fluorescent Lamps Using a Resonant Inverter Operating Open Loop,” Conference Proceeding of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, October 1998, Vol. 3, pp. 2068-2075.

29 N. Onishi, T. Shiomi, A. Okude and T. Yamauchi; “A Fluorescent Lamp Model for High Frequency Wide Range Dimming Electronic Ballast Simulation,” Conference Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 1999, Vol. 2 , pp. 1001-1005.

30 J. Adams, T.J. Ribarich, J.J. Ribarich; “ A New Control IC for Dimmable High-Frequency Electronic Ballast” Conference Proceeding of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 1999, Vol. 2 pp.713-719.

31 IEEE/ANSI62.41-1991. IEEE RECOMMEMDED PRACTICE ON SURGE VOLTAGE IN LOW VOLTAGE AC POWER CIRCUITS. pp. 45.

การวิเคราะห์การทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์

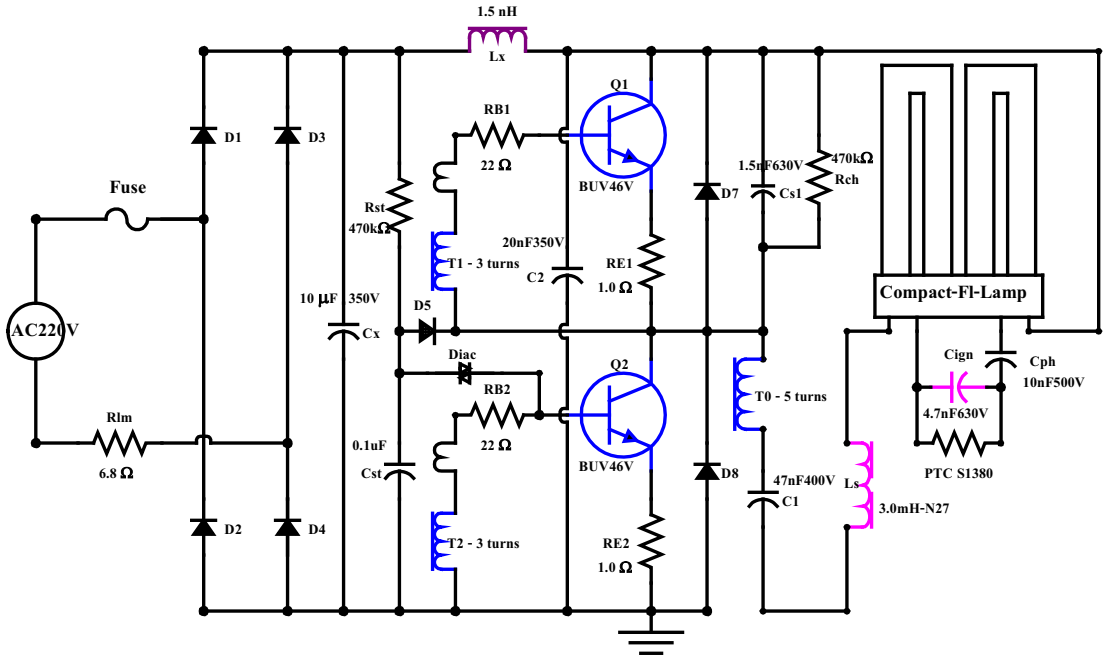
1. บทนำ

คอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์(Compact Fluorescent Lamp ที่เรียกย่อว่า CFL) เป็นอุปกรณ์ให้แสงสว่างที่ได้รับความนิยมใช้กันแพร่หลายมากขึ้นในปัจจุบันเนื่องจากช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 4 – 5 เท่า เมื่อเทียบกับหลอดแบบเผาไส้ ให้แสงสว่างนวล และที่สำคัญคือมีราคาที่ไม่สูงมากเหมือนในอดีต ปัจจุบันมีหลายขนาดตั้งแต่ 5 W ถึง 21 W มีหลายรูปแบบ จากผู้ผลิตที่หลากหลายและในแง่เทคนิค มีการออกแบบที่แตกต่างกันหลายแบบ คอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์ประกอบด้วยหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์และบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์ประกอบอยู่ภายใน การวิจัยเพื่อพัฒนาการออกแบบและคุณภาพผลิตภัณฑ์ จำเป็นต้องมีความเข้าใจการทำงานของหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์และบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานร่วมกับหลอด เข้าใจผลของคุณสมบัติของหลอดและอุปกรณ์ในวงจรต่อพฤติกรรมของคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์โดยรวม บทความนี้นำเสนอแนวทางการวิเคราะห์และผลการทดลองวัดคุณสมบัติของ CFL เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ ทดลองวัดและศึกษาการออกแบบวงจร CFL ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัย “การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับ CFL อย่างเป็นระบบ” การออกแบบอย่างเป็นระบบเป็นการออกแบบวงจรและอุปกรณ์โดยอาศัยข้อกำหนดในการออกแบบโดยจะต้องคำนึงถึงขีดจำกัด พฤติกรรมการทำงานและข้อดี ข้อเสีย ของการออกแบบที่แตกต่างกันประกอบการออกแบบ การที่จะทราบคุณสมบัติต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นจำเป็นต้องมีแบบจำลองที่ใช้คำนวณพฤติกรรมการทำงาน CFL สำหรับการออกแบบที่แตกต่างกันตามข้อกำหนดที่ได้รับ แบบจำลองควรมีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้และไม่ควรซับซ้อนเกินความจำเป็น วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำจากสายกำลังเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เป็นวงจรที่มีอุปกรณ์น้อย รูปแบบวงจรไม่ซับซ้อน ดังนั้นการออกแบบน่าจะสามารถพิจารณาคุณสมบัติต่าง ๆ ได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์ อย่างไรก็ดีการวิเคราะห์วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีอุปสรรคสำคัญที่ความไม่เป็นเชิงเส้นของลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามขนาดของกระแสที่ผ่านหลอด [1-2] ความถี่การทำงาน สภาพการทำงาน สภาพหลอดและอุณหภูมิหลอด รูปคลื่นของแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ที่ป้อนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงให้หลอดมีรูปคลื่นสี่เหลี่ยมไม่ใช่รูปคลื่นไซน์ วงจรเรียงกระแสเป็นวงจรที่มีรูปลักษณ์ของวงจรเปลี่ยนแปลงกับเวลา ลักษณะสมบัติกระแสแรงดันด้านออกขึ้นกับอิมพีแดนซ์ของทั้งแหล่งและโหลด [3] ปัญหาดังกล่าวทำให้การ

วิเคราะห์และออกแบบวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ซับซ้อนมากขึ้น เพื่อให้การออกแบบสามารถพิจารณาพฤติกรรมการทำงานสำหรับการออกแบบที่แตกต่างกันได้อย่างครบถ้วนมากที่สุดจึงได้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์วงจรที่ไม่ซับซ้อนนัก มีความคลาดเคลื่อนในระดับเดียวกับเครื่องมือวัดและใช้วิธีการตรวจสอบผลการคำนวณที่เหมาะสม

2. การวิเคราะห์วงจร

เนื่องจากบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สายกำลังเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงที่เชื่อมโยงด้วยไฟตรงมีลักษณะวงจรทั่วไปดังในรูปที่ 1 มีโครงสร้างของวงจรที่สำคัญ 2 ส่วนคือ วงจรเรียงกระแสที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับจากสายกำลังเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงป้อนให้หลอดฟลูออเรสเซนต์พร้อมทำหน้าที่ควบคุมกระแสในช่วงเผาไส้หลอด กำเนิดแรงดันที่มีค่าสูงเพียงพอสำหรับการจุดหลอด ตลอดจนควบคุมกระแสผ่านหลอดในภาวะทำงานปรกติ ดังนั้นการวิเคราะห์วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์อาจจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ดังนี้

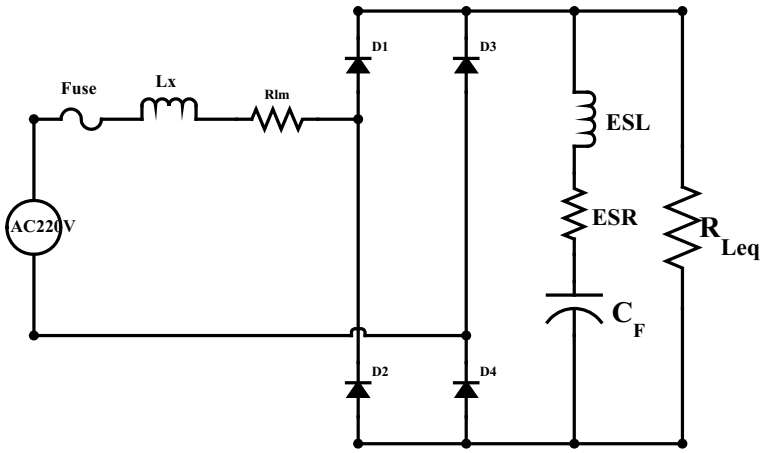


รูปที่ 1 วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์

2.1 การวิเคราะห์วงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 1 เฟส ที่มีตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองมีลักษณะของวงจรดังในรูปที่ 2 วงจรเรียงกระแสรับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz ตัวเหนี่ยวนำ Lx เป็นผลรวมของตัวเหนี่ยวนำของสายกำลังและความเหนี่ยวนำของวงจรกรองด้านเข้าของวงจร CFL

ส่วน Rlm เป็นผลรวมของความต้านทานของสายกำลังและตัวต้านทานด้านเข้าของวงจร CFL ที่ต่อไว้เพื่อจำกัดกระแสกระชากขณะเริ่มป้อนพลังงานไฟฟ้าให้ CFL ตัวเก็บประจุ C_F ทำหน้าในการ

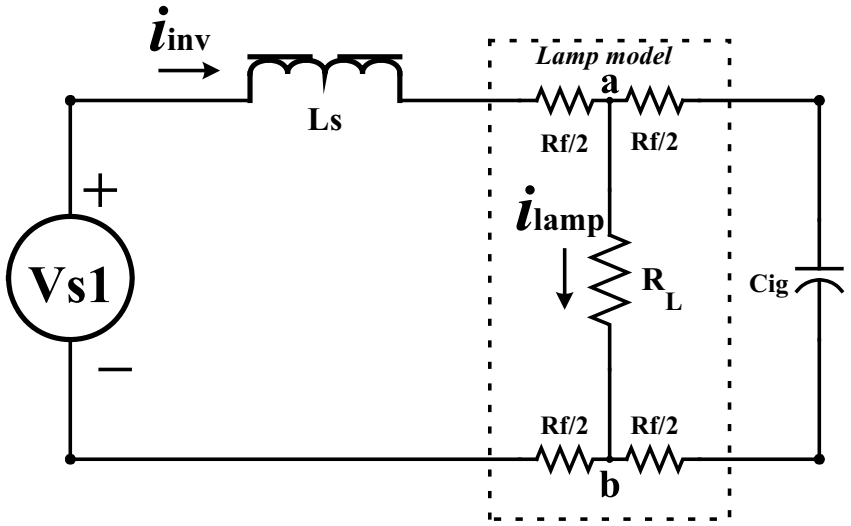


รูปที่ 2 วงจรเรียงกระแสที่มีตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรอง

กรองแรงดันออก ตัวเหนี่ยวนำ ESL ตัวต้านทาน ESR เป็นตัวเหนี่ยวนำอนุกรมสมมูล และตัวต้านทานอนุกรมสมมูลของตัวเก็บประจุ C_F ตัวต้านทาน R_{Leq} เป็นตัวต้านทานสมมูลของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่เป็นโหลดของวงจรเรียงกระแส วงจรเรียงกระแสที่มีตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองดังในรูปที่ 2 เป็นวงจรที่มีรูปวงจรเปลี่ยนกับเวลา (time varying circuit) เนื่องจากการตัดต่อวงจรของไดโอดที่กำหนดโดยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้าจากสายกำลัง และวงจรด้านออกที่โหลด ดังนั้นเวลาที่ไดโอดตัดต่อวงจรในแต่ละคาบของการทำงานจะขึ้นกับโหลดของวงจรเรียงกระแส [3, 4] การวิเคราะห์วงจรเรียงกระแสโดยทั่วไปเป็นการคำนวณแรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสเมื่อกำหนดค่าความต้านทานโหลด ขนาดตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ขนาดแรงดันด้านเข้า ความถี่และอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจากสายกำลัง การวิเคราะห์วงจรจำเป็นต้องแก้สมการอดิศัย (Transcendental equation) การแก้สมการใช้วิธีการทำซ้ำ (iteration) [4] ซึ่งอาจคำนวณด้วยมือหรือใช้คอมพิวเตอร์ มีผลการคำนวณที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนของแรงดันออกเฉลี่ยต่อค่ายอดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า(V_{dc}/V_m) กับผลคูณระหว่าง ความถี่เชิงมุม (ω) ค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรอง(C_F) และความต้านทานสมมูลของวงจรโหลด (R_{Leq})โดยมีอัตราส่วนของความต้านทานของแหล่ง(R_S) ต่อความต้านทานโหลด(R_{Leq}) เป็นตัวแปรควบคุม (parameters) [3] เมื่อทราบค่าอุปกรณ์ของวงจรจะสามารถคำนวณค่า $\omega.C.R_{Leq}$ และ R_S/R_{Leq} จากค่าดังกล่าวสามารถอ่านค่า V_{dc}/V_m จากกราฟซึ่งทำให้สามารถคำนวณแรงดันไฟตรงด้านออกของวงจรเรียงกระแสได้

2.2 การวิเคราะห์วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับป้อนให้กับหลอด เนื่องจากแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (square wave)อีกทั้งหลอดฟลูออเรสเซนต์ก็มีลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันแบบไม่เชิงเส้น[1]อีกทั้งมีความต้านทานพลวัติเป็นลบ[2]ดังนั้นการวิเคราะห์และออกแบบวงจรที่มีอุปกรณ์ดังกล่าวทำได้ยาก อย่างไรก็ดีถึงแม้หลอดฟลูออเรสเซนต์จะมีลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไม่เป็นเชิงเส้นและเปลี่ยนแปลงตามกำลังออกของหลอดแต่ในกรณีที่ใช้ความถี่สูงอาจจะประมาณคุณสมบัติของหลอดด้วยตัวต้านทานแบบเชิงเส้นที่มีค่าความต้านทานลดลงเมื่อกำลังของหลอดเพิ่มขึ้นเนื่องจากความต้านทานพลวัติของหลอดที่เป็นลบ เหตุผลอีกประการหนึ่งที่ช่วยให้การประมาณใกล้เคียงความจริงเกิดจากสาเหตุที่หลอดมีความต้านทานพลวัติเป็นลบทำให้มีความจำเป็นต้องใช้แหล่งที่มีลักษณะสมบัติใกล้แหล่งกระแสเพื่อให้การทำงานของวงจรมีเสถียรภาพ ซึ่งวงจรที่มีความเหมาะสมจะเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมที่ต่อโหลดขนานกับตัวเก็บประจุของวงจรเรโซแนนซ์ ดังในรูปที่ 3 วงจรดังกล่าวจะสามารถอาศัยปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ในภาวะที่หลอดยังเป็นวงจรเปิดซึ่งค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor) มีค่าสูงทำให้เกิดแรงดันสูงเพื่อการจุดหลอดและในภาวะการทำงานปรกติตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรเรโซแนนซ์ยังมีลักษณะการต่อเป็นวงจรผ่านต่ำทำให้กระแสฮาร์มอนิกที่ผ่านหลอดมีค่าต่ำ กำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่ผ่านหลอดจึงเป็นกำลังไฟฟ้าจากความถี่หลักมูล จากการทดลองพบว่าที่กำลังพิกัด กำลังไฟฟ้าที่หลอดจะเป็นกำลังไฟฟ้าความถี่หลักมูลมากกว่าร้อยละ 98 ดังนั้นการคำนวณคุณสมบัติต่าง ๆ ของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เฉพาะความถี่หลักมูลจะให้ผลที่ใกล้เคียงความจริงมาก การศึกษานี้จะวิเคราะห์และออกแบบวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้วงจรสมมูลและสมการสำหรับกระแสและแรงดันรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่หลักมูล ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์และออกแบบทำได้สะดวกคล่องตัวและทำให้เข้าใจพฤติกรรมโดยรวมของวงจรได้ดีขึ้น การวิเคราะห์และออกแบบวงจรจะใช้ตัวต้านทานแบบเชิงเส้นแทนหลอด ค่าความต้านทานที่ใช้แทนหลอดจะเป็นค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งมีขนาดขึ้นกับกำลังออกของหลอด โดยหลอดฟลูออเรสเซนต์จะมีความต้านทานสมมูลของหลอดเท่ากับ R_L ต่อเข้าที่กึ่งกลางของความต้านทานไส้หลอด R_f แต่ละข้างดังในรูปที่ 3 โดยมีตัวเหนี่ยวนำ Ls ของวงจรโหลดของอินเวอร์เตอร์ ต่ออนุกรมระหว่างแหล่ง V_S และขั้วหลอดแต่ละด้านของหลอด ส่วนตัวเก็บประจุ Cig จะต่อขนานกับขั้วหลอดอีก 2 ขั้วที่เหลือ การวิเคราะห์วงจรดังกล่าวสำหรับความถี่หลักมูลของแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ สามารถใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์วงจรเชิงเส้นสำหรับกระแสและแรงดันที่มีรูปคลื่นไซน์ทั่วไปเพื่อคำนวณหาค่าของกระแสและแรงดันต่าง ๆ ในรูปของขนาดแรงดันด้านออกสำหรับความถี่หลักมูล V_{s1} แต่เพื่อความสดวกจะเขียนแทนด้วย V_S และการคำนวณจะคำนวณปริมาณต่าง ๆ ในรูปของค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (RMS)



รูปที่ 3 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์สำหรับความถี่หลักมูล

การคำนวณตัวแปรต่าง ๆ สำหรับการทำงานในช่วงทำงานปรกติและหลอดติดสว่างที่หลอดแทนด้วยค่าความต้านทานเชิงเส้น R_Lช่วงเวลาดังกล่าวสามารถคำนวณค่ากระแสและแรงดันต่าง ๆ ได้ดังนี้

◆ แรงดันออกของอินเวอร์เตอร์สำหรับความถี่หลักมูล Vs ในรูปของแรงดันไฟตรง V_{dc}

$$V_S = \frac{\sqrt{2}}{\pi}.V_{dc} \tag{1}$$

◆ สมการอิมพีแดนซ์ของวงจรโหลดสำหรับความถี่หลักมูล Z_T

$$Z_T = \frac{1-\omega_S{}^2 LsCig + j\omega_S\left\lfloor \frac{Ls+(2R_L+R_f)R_fCig}{(R_L+R_f)} \right\rfloor}{\frac{1}{(R_L+R_f)}+j\omega_S Cig} \tag{2}$$

◆ สมการของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์สำหรับความถี่หลักมูล I_{inv}

$$I_{inv} = \frac{\left\lfloor \frac{1}{(R_L+R_f)}+j\omega_S Cig \right\rfloor * V_S}{\left\lfloor 1-\omega_S{}^2 LsCig + j\omega_S\left(\frac{Ls+(2R_L+R_f)R_fCig}{(R_L+R_f)} \right) \right\rfloor} \tag{3}$$

◆ สมการเฟสของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันสำหรับความถี่หลักมูล θ_{inv}

$$\theta_{inv} = \arctan\left[\frac{R_L^2\omega_S Cig - \omega_S Ls\left\lfloor (R_L+R_f)^2\omega_S{}^2Cig^2+1 \right\rfloor}{(R_L+R_f)\left\lfloor 1+\omega_S{}^2Cig^2R_f(2R_L+R_f) \right\rfloor} \right] \tag{4}$$

◆ สมการของแรงดันหลอดสำหรับความถี่หลักมูล V_{lamp}

$$V_{lamp} = \frac{\left(\frac{R_L + j\omega_S R_L R_f Cig}{R_L + R_f}\right) * V_S}{\left[1 - \omega_S{}^2 LsCig + j\omega_S\left(\frac{Ls + (2R_L + R_f)R_f Cig}{(R_L + R_f)}\right)\right]} \quad (5)$$

◆ สมการของกระแสผ่านหลอดสำหรับความถี่หลักมูล I_{lamp}

$$I_{lamp} = \frac{\left(\frac{1 + jR_f\omega_S Cig}{R_L + R_f}\right) * V_S}{\left[1 - \omega_S{}^2 LsCig + j\omega_S\left(\frac{Ls + (2R_L + R_f)R_f Cig}{(R_L + R_f)}\right)\right]} \quad (6)$$

◆ กระแสเผาไส้หลอดสำหรับความถี่หลักมูล I_{fil}

$$I_{fil} = \frac{\left(\frac{j\omega_S R_L Cig}{R_L + R_f}\right) * V_S}{\left[1 - \omega_S{}^2 LsCig + j\omega_S\left(\frac{Ls + (2R_L + R_f)R_f Cig}{(R_L + R_f)}\right)\right]} \quad (7)$$

การคำนวณคุณสมบัติของวงจรในช่วงเผาไส้และจุดหลอดสามารถใช้สมการดังกล่าวข้างต้นโดยแทนค่า R_L ให้เป็นอนันต์

3. วิธีทดลองเพื่อตรวจสอบผลการวิเคราะห์

เนื่องจากการวิเคราะห์การทำงานของอินเวอร์เตอร์ ใช้วงจรสมมูลสำหรับความถี่หลักมูล ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี จึงได้คำนวณขนาดของกระแส แรงดันและกำลังของความถี่หลักมูลและองค์ประกอบฮาร์มอนิกต่าง ๆ(spectrum) ผลการคำนวณกำลังขององค์ประกอบฮาร์มอนิกพบว่า กำลังที่หลอดอยู่ในความถี่หลักมูลมีประมาณร้อยละ 98 ผลการคำนวณดังกล่าวแสดงว่าการวิเคราะห์การทำงานของบัลลาสต์โดยใช้ความถี่หลักมูลน่าจะให้ค่ากำลังที่ใกล้เคียงผลการทดลองซึ่งแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

4. ผลการทดลอง

เพื่อทดสอบความถูกต้องของการคำนวณทางทฤษฎีจึงได้ทดลองวัดค่ากระแส แรงดันต่าง ๆ ของทั้งวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์

4.1 วงจรเรียงกระแส

ได้ทดลองวัดค่ากระแสและแรงดันต่าง ๆ ของวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นโหลดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จากผู้ผลิต 3 รายได้ผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 1 และ 3 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันออกที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีการใช้กราฟให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองในระดับที่น่าจะเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้ออกแบบบัลลาสส์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอด CFL แต่ผลการคำนวณแรงดันกระเพื่อมมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้นและการคำนวณองค์ประกอบกระแสฮาร์มอนิกมีความคลาดเคลื่อนสูงมากเนื่องจากค่าขององค์ประกอบกระแสฮาร์มอนิกมีค่าที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนระหว่างค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสด้านเข้ารวมต่อค่ารากกำลังสองเฉลี่ยขององค์ประกอบความถี่หลักมูลของกระแสด้านเข้า ดังนั้นจึงควรใช้การจำลองประกอบการพิจารณาหากต้องการทราบค่าที่มีความถูกต้องมากขึ้นโดยจะต้องมีการประเมินค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งให้ถูกต้องด้วย อย่างไรก็ตามการออกแบบ CFL รุ่นใหม่มักจะมีการเพิ่มตัวต้านทานจำกัดกระแสกระชากที่อาจมีค่าสูงถึง 47 Ω ทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งมีผลต่อคุณสมบัติของวงจรด้านเข้าน้อยลง

จากการพิจารณาผลการวัดคุณสมบัติของวงจรด้านเข้าจะสรุปได้ดังนี้

- CFL ทุกรุ่นไม่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังและมีค่าตัวประกอบกำลังระหว่าง 0.5 ถึง 0.65 โดย CFL รุ่นใหม่มีแนวโน้มจะมีค่าตัวประกอบกำลังเพิ่มขึ้น
- CFL มีค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิก ระหว่างร้อยละ 100 ถึง 150 โดย CFL รุ่นใหม่มีแนวโน้มจะมีค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิกน้อยลง
- การเพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบกำลังและการลดลงขององค์ประกอบฮาร์มอนิก เกิดจากการลดขนาดของตัวเก็บประจุของวงจรกรองที่มีผลเสียที่ทำให้การกระเพื่อมของแรงดันออกและการกระเพื่อมของกระแสผ่านหลอดเพิ่มขึ้น

4.2 วงจรอินเวอร์เตอร์

ได้ทดลองวัดค่ากระแสและแรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์หลอดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จากผู้ผลิต 3 ราย เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีที่คำนวณโดยใช้ค่าแรงดันไฟตรง V_{dc} ค่าความเหนี่ยวนำ Ls ค่าตัวเก็บประจุ Cig พิกัดกระแสหลอด (I_{lamp}) แรงดัน (V_{lamp}) ตลอดจนความถี่ที่ได้จากการวัด (f_s) ในการทดลองวัดคุณสมบัติของวงจรอินเวอร์เตอร์และวงจรโหลด เนื่องจากการวิเคราะห์การทำงานของอินเวอร์เตอร์ ใช้วงจรสมมูลสำหรับความถี่หลักมูล ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี จึงได้คำนวณขนาดของกระแส แรงดันและกำลังของความถี่หลักมูลและองค์ประกอบฮาร์มอนิกต่าง ๆ(spectrum) จากการ

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณทางทฤษฎีและผลการทดลองของวงจรด้านเข้าของ CFL แบบต่าง ๆ

ผู้ผลิต	ผู้ผลิต C, พิกัด 7 W		ผู้ผลิต F ,พิกัด 9 W		หมายเหตุ
เวลาผลิต	Preheat Start รุ่นเก่า		Instant start รุ่นเก่า-ใหม่		
ตัวแปร	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง	
V_{srms}(V)	230	229.3	230	229.8	
f(Hz)	50	49.92	50	50.04	
R_{Leq}(kΩ)	14.6	13.1	8.8	9.1	
C_F(uF)	10	10	4.7	4.7	
$\omega C_F R_{Leq}$	45.7	41.3	13.0	13.5	
V_m(V)	325.3	324.2	325.3	325.0	
V_{dc}(V)	309.0	309.3	296.0	284.5	
V_{dc}/V_m	0.95	0.95	0.91	0.88	
V_{ripple}(V)	6.2	6.1	17	14	
% Ripple	2.0	2.0	5.7	4.9	
V_{1rms}(V)	230	229.2	230	229.7	
%THD-V	NA	NA	NA	1.8	
I_{rms}(mA)	60.1	57.9	87.5	71.4	
I_{1rms}(mA)	30.7	32.9	46.4	41.5	
I_{dc}(mA)	21.2	24.6	33.6	31.2	
I_{rms}/I_{dc}	2.8	2.4	2.6	2.3	
%THD-I	167.8	145.1	154.7	127.5	
VA	13.8	13.3	20.1	16.4	
Input(W)	7.0	7.3	10.2	9.1	
PF	0.51	0.55	0.50	0.55	
COS(θ1)	0.99	0.99	0.95	0.95	
P_{dc}(W)	6.6	7.0	9.9	8.9	
η(%)	NA	95.8	NA	97.7	

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณทางทฤษฎีและผลการทดลองของวงจรด้านเข้าของ CFL แบบต่าง ๆ

ผู้ผลิต	ผู้ผลิต C, พิกัด 11 W		ผู้ผลิต E, พิกัด 11 W		ผู้ผลิต C, พิกัด 15 W	
เวลาผลิต	Preheat Start รุ่นเก่า-ใหม่		Preheat Start รุ่นเก่า-ใหม่		Preheat Start รุ่นเก่า-ใหม่	
ตัวแปร	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง
V_{srms}(V)	240	238.4	230	230.1	230	231
f(Hz)	50	49.95	50	49.94	50	49.99
R_{Leq}(kΩ)	9.1	9.2	8.1	7.8	6.1	6.1
C_F(uF)	4.7	4.7	3.0	3.0	10.0	10.0
$\omega C_F R_{Leq}$	13.5	13.6	7.7	7.4	19.2	19.1
V_m(V)	339.4	337.1	325.3	325.4	325.3	326.3
V_{dc}(V)	310.5	313.0	283.5	285.0	292.7	300.5
V_{dc}/V_m	0.92	0.93	0.87	0.88	0.90	0.92
V_{ripple}(V)	17.5	15.1	25.8	23.5	12.8	9.2
% Ripple	5.6	4.8	9.1	8.2	4.4	3.1
V_{1rms}(V)	240	238.3	230	229.4	230	230.9
%THD-V	NA	2.1	NA	2.5	NA	2.6
I_{rms}(mA)	89.5	76.4	79.5	73.0	112.1	109
I_{1rms}(mA)	47.3	46.4	48.2	48.9	68.7	66.7
I_{dc}(mA)	34.0	33.9	34.9	36.3	48.0	48.6
I_{rms}/I_{dc}	2.6	2.3	2.3	2.0	2.3	2.2
%THD-I	157	124	126	111	129	129
VA	21.5	18.2	18.3	16.8	25.8	25.2
Input(W)	10.7	10.7	10.1	10.7	15.0	14.8
PF	0.50	0.59	0.56	0.64	0.58	0.59
COS(θ1)	0.95	0.98	0.91	0.94	0.95	0.98
P_{dc}(W)	10.6	10.6	9.9	10.4	14.1	14.6
η(%)	NA	98.8	NA	97.0	NA	98.5

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณทางทฤษฎีและผลการทดลองของวงจรด้านเข้าของ CFL แบบต่าง ๆ

ผู้ผลิต	ผู้ผลิต F ,พิกัด 18 W		ผู้ผลิต E, พิกัด 18 W		ผู้ผลิต C, พิกัด 21 W	
เวลาผลิต	Instant start รุ่นใหม่		Instant start รุ่นใหม่		Instant start รุ่นเก่า-ใหม่	
ตัวแปร	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง
V_{srms}(V)	220	219.5	230	227.8	230	228.0
f(Hz)	50	49.93	50	49.99	50	49.99
R_{Leq}(kΩ)	4.0	5.0	4.7	4.1	4.0	4.0
C_F(uF)	10	10	4.7	4.7	4.7	4.7
$\omega C_F R_{Leq}$	15.6	15.6	7.0	6.0	5.9	5.9
V_m(V)	311.1	310	325.3	322.2	325.3	322.4
V_{dc}(V)	289.4	290.4	283.0	282.0	279.7	278.3
V_{dc}/V_m	0.93	0.94	0.87	0.88	0.86	0.86
V_{ripple}(V)	15.8	11.0	22.6	25.9	36.4	28.2
% Ripple	5.5	3.8	8.0	9.2	13.0	10.0
V_{1rms}(V)	220	219.4	230	227.8	230	228.0
%THD-V	NA	2.3	NA	2.2	NA	2.3
I_{rms}(mA)	127.8	136.1	119.3	135.9	126.4	131.6
I_{1rms}(mA)	79.1	79.2	86.0	92.1	100.3	92.6
I_{dc}(mA)	58.3	58.0	59.6	66.5	70.4	67.9
I_{rms}/I_{dc}	2.2	2.3	2.4	2.0	1.8	1.9
%THD-I	127	138	97	109	77	101
VA	28.1	29.9	27.5	31.0	29.1	30.0
Input(W)	17.2	17.0	18.0	19.2	21.0	19.3
PF	0.61	0.57	0.66	0.62	0.68	0.64
COS(θ1)	0.99	0.99	0.91	0.92	0.91	0.92
P_{dc}(W)	16.9	16.8	16.9	18.8	19.7	18.9
η(%)	NA	99.1	NA	97.9	NA	98.0

เปรียบเทียบค่าในตารางที่ 4-6 จะเห็นได้ว่าการคำนวณทางทฤษฎี ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยมีความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกับความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดคือมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 5 ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบดังกล่าว ประกอบกับผลการคำนวณโดยใช้ค่าที่ได้จากการวัดและผลการทดลองที่บ่งชี้ว่ากำลังส่วนใหญ่ที่หลอดเป็นผลของกระแสและแรงดันของความถี่หลักมูล ดังนั้นจึงอาจจะกล่าวได้ว่าการคำนวณและออกแบบวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้วงจรสมมูลแบบเชิงเส้นสำหรับความถี่หลักมูลจะให้ผลที่คลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 5

จากการพิจารณาผลการวัดคุณสมบัติของวงจรอินเวอร์เตอร์จะสรุปได้ดังนี้

- วงจรมีความถี่การทำงานในภาวะปรกติระหว่าง 25 –50 kHz โดยในระยะหลังนิยมใช้ความถี่ระหว่าง 35 – 50 kHz
- ทุกวงจรทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง (f_0) ของวงจรโหลดและมีแนวโน้มที่ออกแบบให้ความถี่การทำงานเข้าใกล้ f_0 มากขึ้น
- วงจรที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดมักออกแบบให้มีกระแสเผาไส้ในภาวะการทำงานปรกติต่ำกว่าแบบจุดติดทันที หรือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามกำลังออกของหลอด
- กระแสอินเวอร์เตอร์มีค่าสูงกว่ากระแสหลอดไม่เกินร้อยละ 15 โดยวงจรที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดมีกระแสอินเวอร์เตอร์ใกล้เคียงกับกระแสหลอดมากกว่า
- ในภาวะการทำงานปรกติกระแสออกของอินเวอร์เตอร์จะล้าหลังแรงดันมากกว่า 50 องศา
- ค่าตัวประกอบกำลังของอินเวอร์เตอร์จะมีค่าต่ำ โดยมีค่าระหว่าง 0.3 –0.7 และแนวโน้มเพิ่มตามกำลังออก
- กำลังออกของหลอดต่ำกว่าค่าพิกัดที่กำหนดเสมอโดยมีค่าต่ำกว่าประมาณร้อยละ10
- ในช่วงจุดหลอดวงจร CFL ที่มีการเผาไส้ก่อนจุดหลอดจะมีกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ล้าหลังแรงดันเสมอ แต่ CFL แบบจุดติดทันทีที่ใช้การป้อนกลับกระแสออกในการขับนำสวิตช์ไวงานจะมีความถี่เพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่มีกระแสล้าหลังแรงดันแต่จะมีบางช่วงที่กระแสนำหน้าแรงดันทำให้เกิดความเค้นในสวิตช์ไวงานสูง
- แรงดันพิกัดของหลอดมีแนวโน้มเพิ่มตามกำลังออกแต่มีหลอดกำลังสูงที่มีแรงดันพิกัดที่หลอดต่ำกว่าหลอดที่มีกำลังพิกัดต่ำกว่า

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณทางทฤษฎีและผลการทดลองวงจรด้านออกของ CFL แบบต่าง ๆ

ผู้ผลิต	ผู้ผลิต C, พิกัด 7 W		ผู้ผลิต F ,พิกัด 9 W		หมายเหตุ
เวลาผลิต	Preheat Start รุ่นเก่า		Instant start รุ่นเก่า-ใหม่		
ตัวแปร	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง	
V_{line}(V)	230	229.3	230	229.8	
V_{dc}(V)	NA	309.3	NA	296	
V_{inv}(V)	NA	143.5	NA	140.8	
V_{inv1}(V)	135.8	135.8	132.4	132.4	
f_s(kHz)	34.8	34.8	24.4	24.4	
f_0(kHz)	51.8	51.8	35.2	35.2	
V_{lamp}(V)	NA	50.7	NA	54.8	
V_{lamp1}(V)	51.2	49.5	54.7	54.0	
I_{lamp}(mA)	NA	120.7	NA	141.2	
I_{lamp1}-mA	124.1	119.9	142.2	140.4	
R_{lamp1}	413.1	413.1	385	385	
Ls(mH)	4.86	4.86	5.9	5.9	
Cig(nF)	1.94	1.94	3.46	3.46	
I_{inv}(mA)	NA	136.7	NA	145.2	
I_{inv1}-mA	126.1	135.9	145.2	144.4	
PHI_{inv}(dg)	- 67.2	- 68.3	- 64.4	- 64.4	
P_{inv}(W)	NA	6.95	NA	8.4	
P_{inv1}(W)	6.65	6.8	8.0	8.3	
P_{lamp}(W)	NA	6.0	NA	7.7	
P_{lamp1}(W)	6.4	5.9	7.8	7.6	
I_{fil}(mA)	21.7	31.9	29.0	25	
InverterPF	NA	0.31	NA	0.38	
InverterVA	NA	19.6	NA	20.4	
Inv-η(%)	NA	86.3	NA	91.8	

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณทางทฤษฎีและผลการทดลองวงจรด้านออกของ CFL แบบต่าง ๆ

ผู้ผลิต	ผู้ผลิต C, พิกัด 11 W		ผู้ผลิต E, พิกัด 11 W		ผู้ผลิต C, พิกัด 15 W	
เวลาผลิต	Preheat Start รุ่นเก่า-ใหม่		Preheat Start รุ่นเก่า-ใหม่		Preheat Start รุ่นเก่า-ใหม่	
ตัวแปร	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง
V_{line}(V)	240	238.4	230	230.1	230	231
V_{dc}(V)	NA	310	NA	285	NA	300.5
V_{inv}(V)	NA	151.5	NA	144.9	NA	142.6
V_{inv1}(V)	140.6	140.6	132.9	132.9	133.0	133.0
f_s(kHz)	32.1	32.1	48.9	48.9	38.6	38.6
f_0(kHz)	60.9	60.9	55.5	55.5	65.2	65.2
V_{lamp}(V)	NA	43.3	NA	50.3	NA	70.6
V_{lamp1}(V)	42.8	42.6	49.7	49.4	67.9	69.6
I_{lamp}(mA)	NA	218.4	NA	202.9	NA	195.7
I_{lamp1}-mA	217.7	218.1	202.4	201.2	189.3	193.9
R_{lamp1}	196.4	196.0	245.5	245.3	358.7	358.7
Ls(mH)	3.11	3.11	2.11	2.11	2.71	2.71
Cig(nF)	2.2	2.2	3.9	3.9	2.2	2.2
I_{inv}(mA)	NA	221.4	NA	213.0	NA	200.5
I_{inv1}-mA	218.6	220.3	211.6	211.4	193	199.0
PHI_{inv}(dg)	- 71.2	- 71.7	- 68.1	- 68.9	- 59.1	- 58.2
P_{inv}(W)	NA	9.9	NA	10.3	NA	14.2
P_{inv1}(W)	9.8	9.7	10.5	10.1	13.2	14.0
P_{lamp}(W)	NA	9.4	NA	10.2	NA	13.7
P_{lamp1}(W)	9.3	9.3	10.1	10	12.9	13.5
I_{fil}(mA)	19.2	27.8	59.6	65.4	36.6	39.3
InverterPF	NA	0.28	NA	0.33	NA	0.48
InverterVA	NA	33.5	NA	30.9	NA	28.6
Inv-η(%)	NA	94.9	NA	99	NA	96.5

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณทางทฤษฎีและผลการทดลองของวงจรด้านออกของ CFL แบบต่าง ๆ

ผู้ผลิต	ผู้ผลิต F ,พิกัด 18 W		ผู้ผลิต E, พิกัด 18 W		ผู้ผลิต C, พิกัด 21 W	
เวลาผลิต	Instant start รุ่นใหม่		Instant start รุ่นใหม่		Instant start รุ่นเก่า-ใหม่	
ตัวแปร	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง
V_{line}(V)	220	219.5	230	227.8	230	228.0
V_{dc}(V)	NA	290.3	NA	282.0	NA	278.3
V_{inv}(V)	NA	136.4	NA	126.7	NA	132.5
V_{inv1}(V)	128.9	128.9	122.1	122.1	122.0	122.0
f_s(kHz)	41.3	41.3	38.3	38.3	45.4	45.4
f_0(kHz)	65.9	65.9	54.2	54.2	54.9	54.9
V_{lamp}(V)	NA	92.4	NA	101.5	NA	87.3
V_{lamp1}(V)	92.17	91.6	102.2	100.8	85.3	86.7
I_{lamp}(mA)	NA	166.8	NA	171.5	NA	203.6
I_{lamp1}-mA	166.3	165.3	172.1	169.8	198.7	202.1
R_{lamp1}	554.0	554.0	593.7	539.7	429.3	429.3
Ls(mH)	2.65	2.65	2.61	2.61	2.05	2.05
Cig(nF)	2.2	2.2	3.3	3.3	4.1	4.1
I_{inv}(mA)	NA	190.2	NA	198.7	NA	236.5
I_{inv1}-mA	174.9	189.0	191	197.9	223.7	235.4
PHI_{inv}(dg)	- 45.9	- 46.3	- 39.0	- 39.0	- 49.4	- 46.4
P_{inv}(W)	NA	17.1	NA	18.9	NA	18.9
P_{inv1}(W)	15.7	16.8	18.1	18.8	17.7	18.7
P_{lamp}(W)	NA	15.3	NA	17.2	NA	17.7
P_{lamp1}(W)	15.3	15.1	17.6	17.1	16.9	17.5
I_{fil}(mA)	52.7	68.0	81.2	85.7	99.7	100.8
InverterPF	NA	0.59	NA	0.68	NA	0.56
InverterVA	NA	25.9	NA	25.2	NA	31.3
Inv-η(%)	NA	89.5	NA	91.0	NA	93.6

5. สรุป

จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณทางทฤษฎีของแรงดันออก แรงดันกระเพื่อมของวงจรเรียงกระแสโดยวิธีการทางกราฟ และการคำนวณกระแส-แรงดันของอินเวอร์เตอร์โดยใช้แบบจำลองแบบเชิงเส้นสำหรับความถี่หลักมูลให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองวัดค่าต่าง ๆ สำหรับความถี่หลักมูลและใกล้เคียงกับค่าจริงที่รวมผลของความไม่เป็นเชิงเส้นและผลขององค์ประกอบฮาร์มอนิกด้วย เนื่องจากกำลังส่วนใหญ่ของ CFL อยู่ในองค์ประกอบหลักมูลประมาณร้อยละ 98 สำหรับคุณสมบัติของ CFL ที่ใช้ศึกษาพบว่า CFL ไม่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง มีค่าตัวประกอบกำลังระหว่าง 0.5 ถึง 0.65 องค์ประกอบฮาร์มอนิกมีค่าระหว่างร้อยละ 100 ถึง 150 โดย CFL รุ่นใหม่มีแนวโน้มจะออกแบบให้ค่าตัวประกอบกำลังประมาณ 0.65 องค์ประกอบกระแสฮาร์มอนิกน้อยกว่าร้อยละ 110 การกระเพื่อมของแรงดันไฟตรงประมาณร้อยละ 10 ทำให้ กระแสผ่านหลอดจะมีค่าตัวประกอบค่ายอดเพิ่มขึ้น กำลังออกที่หลอดมีค่าประมาณร้อยละ 90 ของกำลังพิกัดหลอด ประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 90

เอกสารอ้างอิง

1 E. Gluskin, “On the Theory of Fluorescent Lamp Circuits” Science, Measurement and Technology, IEE Proceeding, Vol. 137 Part. A No. 4. July 1990. pp 201-208.

2 E. Deng and S. Cuk, “Negative Incremental Impedance and Stability of Fluorescent Lamps” Applied Power Electronics Conference and Exposition, Conference proceeding. 23-27 February 1997. Vol. 2 pp. 1050-1056.

3 O.H Schade, Proc. IRE, Vol. 31 p.343-346, 1943.

4 โคทม อารียา “ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ” เล่ม 1 กรุงเทพฯ บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด บทที่ 16-17 หน้า 477-559. พ.ศ. 2544.

oooooooooooooooooooooooooOOOOOOOOOOOOOOOOOOooooooooooooooooooooooooo

B1. ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ และผลการดำเนินงาน

วัตถุประสงค์ของโครงการ	ผลการดำเนินงาน	หมายเหตุ
1. พัฒนาหลักการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์อย่างเป็นระบบ	1. ได้มีการพัฒนาวิธีการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์อย่างเป็นระบบ 1.1 ศึกษาวิธีการวิเคราะห์และคำนวณคุณสมบัติของวงจรโดยใช้แบบจำลองที่เหมาะสมกับการออกแบบ 1.2 พัฒนาวิธีวัดคุณสมบัติของบัลลาสต์เพื่อให้สามารถตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณ 1.3 กำหนดขั้นตอนและวิธีการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ข้อกำหนดของการออกแบบคำนวณคุณสมบัติต่าง ๆ ที่สำคัญ สำหรับการออกแบบที่แตกต่างกันเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจเลือกอุปกรณ์ 1.4 ทดลองออกแบบบัลลาสต์สำหรับหลอด CFL ของผู้ผลิตรายหนึ่งโดยใช้ข้อกำหนดที่แตกต่างกัน และเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง	
2. ศึกษาผลของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจรต่อพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง	2. ได้ศึกษาผลของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจรต่อพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ 2.1 ศึกษาการออกแบบทั้งวงจรและอุปกรณ์ตลอดจนวัดคุณสมบัติของ CFL ที่มีขนาดต่าง ๆ กันจากผู้ผลิตที่มีชื่อเสียง โดยใช้วิธีการในข้อ 1. 2.2 วิเคราะห์การทำงานของ CFL โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ในข้อ 1 2.3 เปรียบเทียบผลการคำนวณทางทฤษฎีกับผลการทดลองและข้อมูลของผลิตภัณฑ์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์และการวัด 2.4 คำนวณคุณสมบัติของวงจรที่ออกแบบแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ศึกษาโดยใช้ข้อกำหนดด้านเข้าและหลอดที่มีคุณสมบัติตามที่วัดได้ ผลการคำนวณดังกล่าวทำให้ทราบถึงผลของค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ต่อพฤติกรรมการทำงานของ CFL และเหตุผลการออกแบบ ข้อจำกัดของการออกแบบของผู้ผลิต	

B2. ตารางเปรียบเทียบแผน งานกิจกรรมและผลการดำเนินงาน

แผนงานและกิจกรรม	ผลการดำเนินงาน	หมายเหตุ
1. เรียนรู้รูปแบบและการทำงานของ วงจร CFL ที่มีจำหน่าย	1. เรียนรู้รูปแบบและการทำงานของ วงจร CFL ที่มีจำหน่าย โดยการศึกษาวงจร การวัดคุณสมบัติ และการคำนวณเปรียบเทียบ กับผลการวัด	
2. เรียนรู้ปัญหาที่เกิดกับสินค้า	2. เรียนรู้ปัญหาที่เกิดกับสินค้า โดยการทดลองใช้งาน การศึกษารูปแบบ วงจร วัดคุณสมบัติ การวิเคราะห์วงจร การออกแบบที่แตกต่างเพื่อเปรียบเทียบ คุณสมบัติ และศึกษาขีดจำกัด	
3. หาแบบจำลองของวงจรต่าง ๆ การทดสอบแบบจำลอง	3. ได้หาแบบจำลองของวงจรต่าง ๆ ที่เหมาะสำหรับการออกแบบ และได้ทดสอบความถูกต้องของวงจร โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับผลการทดลอง	
4. เรียนรู้และทำความเข้าใจผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆต่อพฤติกรรมของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์	4. เรียนรู้และทำความเข้าใจผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ต่อพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ โดยการคำนวณพฤติกรรมของวงจรสำหรับการออกแบบที่แตกต่างกัน	
5. กำหนดเกณฑ์การออกแบบ	5. กำหนดขั้นตอนการออกแบบและคำนวณเกณฑ์การออกแบบโดยใช้ข้อกำหนดสำหรับการออกแบบ ได้ทดสอบความถูกต้องของวิธีการออกแบบและผลการคำนวณเกณฑ์ โดยทดลองออกแบบและเปรียบเทียบกับผลการทดลอง	
6. ใช้ความรู้ในการพัฒนาสินค้าให้มีคุณภาพดีขึ้น	6. ยังไม่ได้ใช้ความรู้ในการพัฒนาสินค้าให้มีคุณภาพดีขึ้น เนื่องจากพึ่งเสร็จสิ้นการวิจัย และผลจากผู้ปฏิบัติการวิจัยลาออกเพื่อไปศึกษาต่อต่างประเทศ หัวหน้าโครงการต้องทำการวิจัยโดยจ้างนิสิตช่วยงานแต่ละงานที่พอทำได้โดยแต่ละคนจะทำได้เฉพาะบางอย่างเท่านั้นทำให้ไม่มีการไปปฏิบัติงานที่บริษัท	6. ผู้ปฏิบัติการวิจัยมีปัญหาเกี่ยวกับเวลาวิจัยและลาออกไปศึกษาต่อต่างประเทศในที่สุด

7. การเรียนรู้ปัญหาของสินค้า	7. การเรียนรู้ปัญหาของสินค้าเป็นการเรียนรู้ปัญหาของสินค้าในเชิงการออกแบบ และวัดคุณสมบัติการทำงานของสินค้าที่ผลิตสำเร็จแล้ว เนื่องจากไม่ได้ไปดูขบวนการผลิต ในต่างประเทศจึงไม่ได้ประสานงานกับผู้ผลิตเพื่อศึกษาปัญหาการออกแบบการคัดเลือกอุปกรณ์และการควบคุมคุณภาพ รวมทั้งไม่ได้ติดตามผลการใช้งานจากผู้ใช้ที่มีจำนวนเพียงพอ อย่างไรก็ดีจากการศึกษาสินค้าที่ได้รับพบว่ามีสิ่งที่น่าจะเป็นสาเหตุของปัญหาของสินค้าในแง่การออกแบบ การเลือกอุปกรณ์ ที่ไม่ได้พิจารณาเงื่อนไขการทำงานในทุกด้าน รวมทั้งการควบคุมคุณภาพในการผลิต	
8. การไปปฏิบัติการวิจัย ณ.สถานที่ประกอบการ	8. ผู้ปฏิบัติการวิจัยได้ไปปฏิบัติการวิจัย ณ. สถานที่ประกอบการเฉพาะในระยะแรก ในระยะหลังมีปัญหาด้านเวลา และการลาออกตามที่ได้รายงานรายละเอียดไว้ในรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2แล้ว	8. หัวหน้าโครงการไม่มีเวลาเพียงพอ และไม่เหมาะสมที่จะไปปฏิบัติการวิจัยที่บริษัท