

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับพิกัด 6 kV  
A 6 kV Impulse Voltage Generator impose on AC Voltage



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 104069  
วัน,เดือน,ปี 28 ต.ค. 2552

b.....  
i.....

ปริญญาโทนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2551

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับพิกัด 6 kV  
Impulse Voltage Generator impose on AC Voltage



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.นรเศรษฐ พัฒนเดช  
ดร.ภาพ จันทร์เจริญสุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2551

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับพิกัด 6 kV

ผู้จัดทำ



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ดร.ภพ จันทรเจริญสุข )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการรู้สึกซาบซึ้งต่อความกรุณาที่ ผศ.นรเศรษฐ พัฒนเดช และ ดร.ภพ จันท์เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาทุก ท่านที่ประสิทธิประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำในครั้งนี้ ถ้าปราศจากท่านโครงการนี้ก็คงไม่ สำเร็จลุล่วงไปได้

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกใช้เครื่องมือ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของโครงการ และผู้จัดทำ ต้องขอขอบคุณเพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการ(lab) ที่คอยเอาใจใส่คอยถามไถ่ตลอดเวลา และแหล่ง ค้นคว้าหาข้อมูลทางอินเทอร์เน็ต

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ชีวิต ให้การอบรมสั่ง สอน ให้คำปรึกษา และคอยส่งเสียเงินทอง ให้ผู้จัดทำเรียนหนังสือจนจบในครั้งนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับพิกัด 6 kV

นายกิตติชัย แก้วดำ

นายปริญญา สุวรรณมาโจ

นายเพชร แดงรักษ์

นายสรรัชต์ อานอาชา

ผศ.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ภพ จันทร์เจริญสุข

อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับพิกัด 6 kV รูปคลื่น 1.2/50  $\mu$ s ทั้งชั่ววอกและชั่วลบ และควบคุมมุมทับซ้อนได้ตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ ผลการทดสอบรูปคลื่นที่สร้างขึ้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน IEEE C62.41-1991 การทดสอบการทับซ้อนของรูปคลื่นอิมพัลส์บนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มุมต่างๆ มีค่าผิดพลาดไม่เกิน 3 องศา ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## A 6 kV Impulse Voltage Generator Impose on AC Voltage

Kittichai kaewdum

Parinya Suwanmajo

Pachara Dangluk

Sanchai Arnacha

Asst Prof.Norasage Pattanadech Supervisor

Dr.Phop Chancharoensook Supervisor

2008

### ABSTRACT

This project presents the design and construction of a 6 kV Impulse Voltage Generator Impose on AC Voltage, waveform 1.2/50  $\mu$ s with a superimposed angle between 0 and 360 degrees for positive and negative polarity. The superimposed wave generator is controlled by a microcontroller AVR for testing of low-voltage equipment.

Experimental results show a good agreement between the voltage waveforms obtained from the superimposed wave generator and the standard waveform defined by IEEE C62.41-1991. The results also indicate that mismatches on different superimposed angles are less than 3 degrees, which meet standard IEC 61000-4-5.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการรัฐศึกษาซึ่งต่อความกรุณาที่ ผศ.นรเศรษฐ พัฒนเดช และ ดร.ภพ จันทรเจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาทุกท่านที่ประสิทธิประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำในครั้งนี้ถ้าปราศจากท่านโครงการนี้ก็คงไม่สำเร็จลุล่วงไปได้

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เปิดใช้เครื่องมือ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของโครงการ และผู้จัดทำต้องขอขอบคุณเพื่อร่วมห้องปฏิบัติการ(lab) ที่คอยเอาใจใส่คอยถามไถ่ตลอดเวลา รวมถึงนายภูชิต บุญโทที่ได้ช่วยออกแบบชุดกรองความถี่ และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายณัฐพล คงพันธ์ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยดีมาตลอดท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ชีวิต ให้โอกาส และคอยส่งเสียเงินทอง ให้ผู้จัดทำเรียนหนังสือจนจบในครั้งนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VII
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีการสร้างแรงดันอิมพัลส์	4
2.1.1 วงจรพื้นฐานของการสร้างแรงดันอิมพัลส์	6
2.1.2 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น	8
2.1.3 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	9
2.1.4 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์	13
2.1.5 การวัดแรงดันอิมพัลส์	18
2.2 ทฤษฎีวงจรกรองความถี่	21
2.2.1 การกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)	21
2.2.2 การกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter)	24
บทที่ 3 การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ	27
3.1 ชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	29
3.1.1 ชุดกำเนิดแรงดันสูง	30
3.1.2 ชุดสร้างแรงดันอิมพัลส์	30
3.1.3 ชุดโวลต์เดจดีไวเดอร์	31
3.2 วงจรกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

3.3	ชุดกรองผ่านความถี่ต่ำและชุดกรองผ่านความถี่สูง	32
3.4	การออกแบบสร้างชุดทริกกาตรอน	34
3.4.1	การออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันสูง	35
3.4.2	ออกแบบวงจรชุดสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์	37
3.4.3	การออกแบบวงจรทวีแรงดัน	39
3.4.4	การออกแบบสร้างชุดตรวจจับผ่านศูนย์	41
3.4.5	การออกแบบสร้างชุดควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์	42

### บทที่ 4 การทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1	การทดสอบชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ขั้วขั้วบนแรงดันกระแสสลับ	46
4.2	การทดสอบชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน	48
4.3	การทดสอบชุดกรองความถี่สูงผ่าน	49
4.4	การทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ขั้วขั้วบนแรงดันกระแสสลับ	50
4.4.1	ใช้ชุดกรองความถี่สูง R-C เป็นชุดกรองความถี่สูงผ่าน	50
4.4.2	ใช้แกปทรงกลมเป็นชุดกรองความถี่สูงผ่าน	51
4.4.3	เปรียบเทียบผลระหว่างการใช้ชุดกรองทั้งสองชนิด	52

### บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

5.1	สรุป	56
5.2	อุปสรรคและวิธีการแก้ไขในโครงการ	57
5.3	ข้อเสนอแนะ	57

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก

ประวัติผู้เขียน

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้า	5
2.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง	6
2.3 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดสร้างแรงดันอิมพัลส์	6
2.4 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายชั้น	9
2.5 อิเล็กโทรดสปาร์กแกป	12
2.6 สปาร์กแกปมีไกสวิตช์	12
2.7 ช่วงการกระตุ้นสปาร์กได้ของไกสวิตช์ในเทอมของระยะแกป	13
2.8 ลาพลาสทรานฟอร์มของวงจรอิมพัลส์พื้นฐาน	13
2.9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม	16
2.10 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์	17
2.11 เส้นกราฟใช้หาแรงดันดิสชาร์จเบรกทาวน์ 50%	20
2.12 วงจรกรอง	21
2.13 ช่วงกรองความถี่ต่ำผ่าน	21
2.14 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	22
2.15 ช่วงกรองความถี่สูงผ่าน	24
2.16 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน	24
3.1 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์กับช้อนบนแรงดันกระแสสลับ	26
3.2 วงจรที่ใช้ในการจำลองแรงดันอิมพัลส์กับช้อนบนแรงดันกระแสสลับ	28
3.3 ผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม	29
3.4 ชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	29
3.5 การจำลองวงจรทีวีแรงดันด้วยโปรแกรม Orcad	30
3.6 ผลการจำลองวงจรทีวีแรงดันด้วยโปรแกรม Orcad	30
3.7 การจำลองวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโปรแกรม Orcad	31
3.8 ผลการจำลองวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโปรแกรม Orcad	31
3.9 ชุดกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ	32
3.10 ชุดกรองผ่านความถี่ต่ำและชุดกรองผ่านความถี่สูง	33
3.11 การจำลองวงจรกรองความถี่สูงผ่านด้วยโปรแกรม Orcad	33
3.12 ผลการจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน	33
3.13 การจำลองวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านด้วยโปรแกรม Orcad	34
3.14 ผลการจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	34
3.15 วงจรกำเนิดแรงดันสูง	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

3.16	วงจรภายใน IC เบอร์ TLP250	38
3.17	ชุดสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับควบคุมการกำเนิดแรงดันสูง	38
3.18	วงจรทีวีแรงดัน	39
3.19	วงจรที่ใช้ในการจำลองสร้างสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน	40
3.20	ผลของการจำลองรูปคลื่นสัญญาณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	40
3.21	วงจรกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	41
3.22	แสดงชุดตรวจจับผ่านศูนย์	42
3.23	แสดงรูปคลื่นที่ชุดตรวจจับผ่านศูนย์สร้างออกมา	42
3.24	แสดงไฟล์เวิร์ดของชุดควบคุม	43
3.25	ชุดควบคุมมุกริก	45
4.1	วงจรกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	47
4.2	รูปคลื่นเต็มที่ได้จากชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้น	47
4.3	วงจรการทดสอบชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน	48
4.4	ผลของการทดสอบชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน	48
4.5	วงจรการทดสอบชุดกรองความถี่สูงผ่าน	49
4.6	ผลของการทดสอบชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน	49
4.7	วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ	50
4.8	รูปคลื่นเต็มที่ได้จากแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 90 องศา	51
4.9	วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ(ใช้แกปป้องกัน)	51
4.10	รูปคลื่นเต็มที่ได้จากแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 90 องศา	52
4.11	รูปคลื่นเต็มที่ได้ที่มุม 0 องศา ขั้วบวก	53
4.12	รูปคลื่นเต็มที่ได้ที่มุม 90 องศา ขั้วบวก	53
4.13	รูปคลื่นเต็มที่ได้ที่มุม 180 องศา ขั้วบวก	53
4.14	รูปคลื่นเต็มที่ได้ที่มุม 270 องศา ขั้วบวก	54
4.15	รูปคลื่นเต็มที่ได้ที่มุม 0 องศา ขั้วลบ	54
4.16	รูปคลื่นเต็มที่ได้ที่มุม 90 องศา ขั้วลบ	54
4.17	รูปคลื่นเต็มที่ได้ที่มุม 180 องศา ขั้วลบ	55
4.18	รูปคลื่นเต็มที่ได้ที่มุม 270 องศา ขั้วลบ	55

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 วิธีการดำเนินงาน	2
2.1 $B_1, B_0$ และ $K$ สำหรับวงจร A และ B	15
2.2 เวลา $T_1, T_2$ และประสิทธิภาพของวงจร A และ B	18
3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ IC เบอร์ TLP250	38
3.2 ข้อมูลการจำลองรูปคลื่นเต็ม	41



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6 kV ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับจะใช้ในการทดสอบความคงทนของฉนวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ขณะรับแรงดันกระแสสลับปกติ จะสอดคล้องกับความเป็นจริงในการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงหากได้รับแรงดันเกินขณะใช้งานคือรับแรงดันกระแสสลับอยู่ก่อนได้รับแรงดันเกิน เพื่อให้สามารถทดสอบความสามารถในการทนต่อแรงดันเกินที่เลียนแบบแรงดันเกินจริงที่เกิดตามธรรมชาติของอุปกรณ์ด้านแรงดันต่ำ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับจึงมีความจำเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ เครื่องกำเนิดแรงดันผสมดังกล่าวยังสามารถนำไปใช้ในการทดสอบหรืองานวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงได้อีกด้วย

การพัฒนาเทคโนโลยีการออกแบบสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้น ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีประสบการณ์และศักยภาพเพียงพอที่สามารถสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับได้ อีกทั้งเครื่องกำเนิดแรงดันชนิดนี้มีการวิจัยออกแบบสร้างขึ้นเองภายในประเทศน้อยมากจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาวิจัยออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับขึ้นมาเพื่อใช้ในการงานวิจัยและงานทดสอบของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และเพื่อพัฒนาความรู้และศักยภาพทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงของประเทศอีกด้วย

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อทำการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6 kV ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับสำหรับเป็นต้นแบบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง
- 2) เพื่อส่งเสริมให้เกิดการวิจัยเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
- 3) เพื่อรองรับงานวิจัยเกี่ยวกับความคงทนของฉนวน
- 4) เพื่อรองรับการบริการการทดสอบฉนวนในอนาคต

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

ทำการออกแบบและเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6 kV ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ โดยแรงดันอิมพัลส์เป็นไปตามมาตรฐาน 1.2/50  $\mu$ s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 แผนการดำเนินงานโครงการ

- 1) ศึกษาคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6 kV ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ
- 2) ศึกษามาตรฐานการทดสอบฉนวนไฟฟ้า
- 3) ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6 kV ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ
- 4) ทำการทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6 kV ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่จัดสร้างขึ้น
- 5) ทำการวิเคราะห์ปรับปรุงคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6 kV ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ
- 6) ทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

##### ตารางที่ 1.1 วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2551								
	มี.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1) ศึกษาคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6 kV ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ	←-----→								
2) ศึกษามาตรฐานการทดสอบฉนวนไฟฟ้า	←-----→								
3) ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6 kV ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ			←-----→						
4) ทำการทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6 kV ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่จัดสร้างขึ้น					←-----→				
5) ทำการวิเคราะห์ปรับปรุงคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6 kV ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ							←-----→		
6) ทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์						←-----→			←-----→

←-----→ วางแผน

←-----→ ทำจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

- 1) สามารถออกแบบสร้างต้นแบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6 KV ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับได้ตามข้อกำหนดที่ตั้งไว้
- 2) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6 KV ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่ออกแบบสร้างขึ้นมาเป็นต้นแบบในการจัดสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6 KV ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ สำหรับห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงเพื่อรองรับงานเกี่ยวกับการวิจัยและการบริการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีการสร้างแรงดันอิมพัลส์ [1]

แรงดันอิมพัลส์ทั้งแบบภาพคลื่นฟ้าผ่าและแบบสวิทช์ซิ่ง เป็นแรงดันทรานเซียนต์ที่ไม่เป็นคาบ ค่าแรงดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากศูนย์ไปจนถึงค่ายอด แล้วจะค่อยๆลดลงไปเป็นศูนย์ ภาพคลื่นแรงดันอิมพัลส์จะกำหนดด้วย

- ขั้วของแรงดัน เป็นบวกหรือลบ
- ขนาดแรงดัน ซึ่งหมายถึงค่ายอดของภาพคลื่น
- เวลาช่วงหน้าคลื่น  $T_1$  คือ ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มต้นจากศูนย์จนถึงค่ายอด
- เวลาช่วงหางคลื่น  $T_2$  คือ ช่วงเวลาที่นับจากแรงดันเริ่มต้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด
- แรงดันอิมพัลส์ภาพคลื่นฟ้าผ่าจะเรียกว่า ภาพคลื่น 1.2/50  $\mu\text{s}$
- แรงดันอิมพัลส์ภาพคลื่นสวิทช์ซิ่งจะเรียกว่า ภาพคลื่น 250/2500  $\mu\text{s}$

ภาพคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ขนาดเพิ่มขึ้นจนถึงค่ายอดแล้วค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเป็นศูนย์ เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์ภาพคลื่นเต็ม (Full wave) ดังภาพที่ 2.1ก) แรงดันอิมพัลส์ภาพคลื่นเต็มนี้เมื่อป้อนเข้าไปที่วัสดุทดสอบแล้ว หากการฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นทนต่อแรงดันไม่ได้ ก็จะเกิดสปาร์กหรือเบรกดาว์นหรือวาบไฟตามผิวขึ้น ณ จุดหนึ่งบนภาพคลื่นนั้นแรงดันจะยุบตัวลงเป็นศูนย์ เกิดเป็นภาพคลื่นตัด (Chopped wave) ซึ่งอาจเกิดคลื่นตัดขึ้นที่ส่วนหางคลื่นหรือส่วนหน้าคลื่นก็ได้ ดังภาพที่ 2.1 ข) และ 2.1 ค) ตามลำดับ ลักษณะของภาพคลื่นตัดจะมีส่วนกำหนดที่สำคัญคือ เวลาช่วงคลื่นตัด (Chopped time)  $T_c$

แรงดันอิมพัลส์ภาพคลื่นฟ้าผ่าตามมาตรฐานกำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่น  $T_1$  เวลาหางคลื่น  $T_2$  และค่ายอด  $U_m$  ไว้คือ

$$\text{เวลาช่วงหน้าคลื่น } T_1 = 1.2 \mu\text{s} \pm 30 \%$$

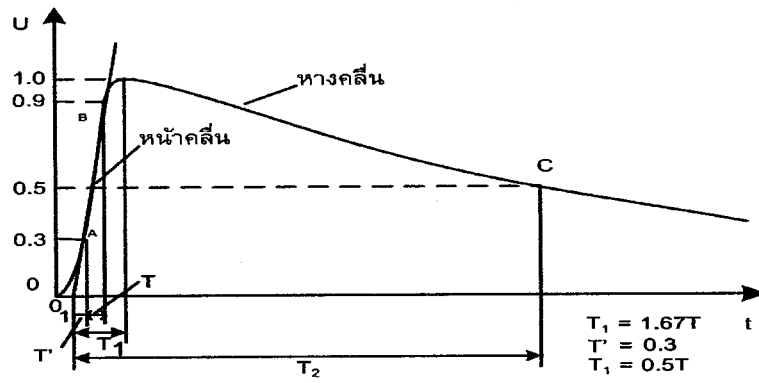
$$\text{เวลาช่วงหางคลื่น } T_2 = 50 \mu\text{s} \pm 20 \%$$

$$\text{ค่ายอดแรงดัน } U_m \pm 3 \%$$

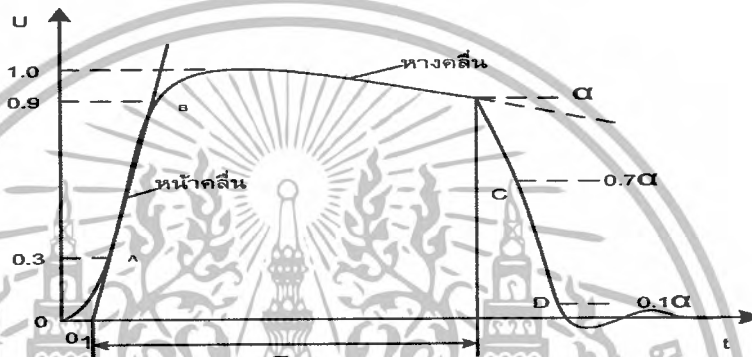
ส่วนแรงดันอิมพัลส์แบบสวิทช์ซิ่ง 250/2500  $\mu\text{s}$  ดังภาพที่ 2.2 จะกำหนดให้มีความคลาดเคลื่อนได้คือ

$$\text{เวลาช่วงหน้าคลื่น } T_{cr} = 250 \mu\text{s} \pm 20 \%$$

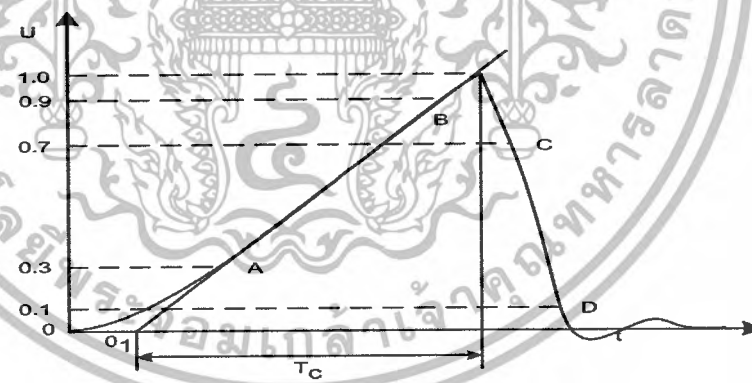
$$\text{เวลาช่วงหางคลื่น } T_2 = 2500 \mu\text{s} \pm 60 \%$$



ก) แรงดันอิมพัลส์ภาพคลื่นเต็ม



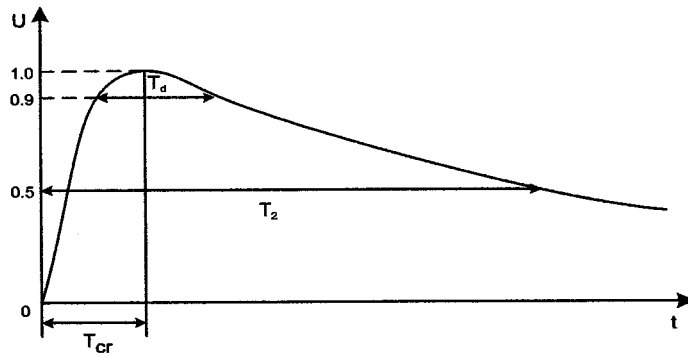
ข) แรงดันอิมพัลส์ภาพคลื่นตัดที่หางคลื่น



ค) แรงดันอิมพัลส์ภาพคลื่นตัดที่หน้าคลื่น

ภาพที่ 2.1 ภาพคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า

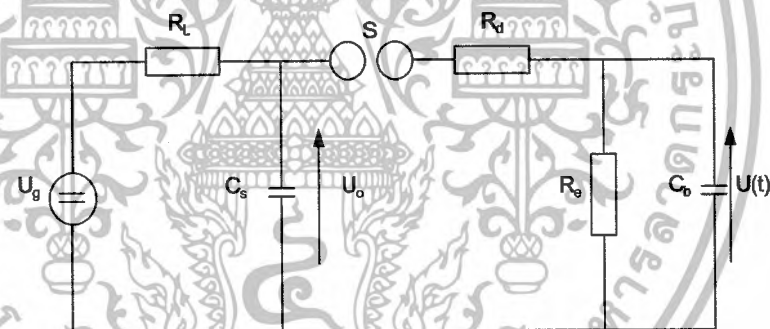
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



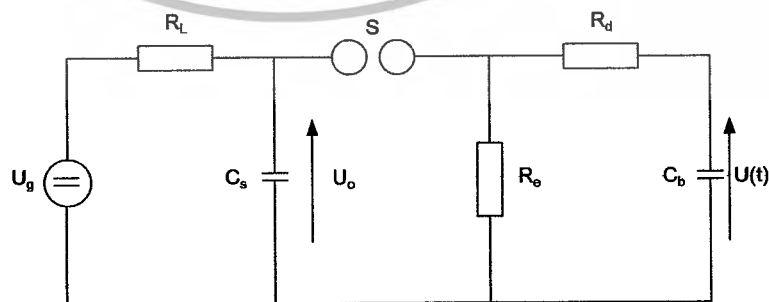
ภาพที่ 2.2 ภาพคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

### 2.1.1 วงจรพื้นฐานของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ [1]

การสร้างแรงดันอิมพัลส์จะอาศัยหลักการของวงจรทรานเซียนต์ RC โดยการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุจนถึงค่าแรงดันที่ต้องการ แล้วปล่อยให้การคายประจุผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าคงตัวเวลาให้มีภาพคลื่นตามต้องการได้ วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปมี 2 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ก) และ ข)



ก) วงจร A



ข) วงจร B

### ภาพที่ 2.3 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดสร้างแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหมายในภาพวงจร A และ B

$U_0$  = แรงดันกระแสตรงของตัวจ่าย เป็นตัวป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์

$U_0$  = แรงดันอัดประจุกระแสตรง

$C_s$  = ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน

$C_b$  = โหลดตัวเก็บประจุ (รวมทั้งความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดแรงดันและอื่นๆ)

$R_L$  = ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

$R_d$  = ความต้านทานหน่วง เป็นตัวปรับหน้าคลื่น  $T_1$

$R_e$  = ความต้านทานปล่อยประจุ เป็นตัวปรับหางคลื่น  $T_2$

$U(t)$  = แรงดันอิมพัลส์ที่ได้แปรไปตามเวลา

$S$  = สปรັกแกป เป็นตัวกำหนดค่าแรงดันอัดประจุ และทำหน้าที่เป็นไกสวิตช์ใกล้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์  $C_s$  ดิสชาร์จประจุให้กับโหลด

หน้าที่ของส่วนประกอบในวงจร คือ ตัวจ่ายแรงดันกระแสตรง  $U_0$  เป็นตัวป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ที่เป็นตัวเก็บพลังงาน ซึ่งมีค่าแรงดันที่กำหนด  $U_0$  การอัดประจุนี้จะผ่านความต้านทาน  $R_L$  ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมเวลาในการอัดประจุระยะห่างของสปรັกแกป  $S$  จะเป็นตัวกำหนดแรงดันที่เริ่มทำงานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อให้สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่มีค่าสอดคล้องตามต้องการ โดยที่สปรັกแกปจะทำงานร่วมกับไกสวิตช์ (Trigger) ที่มีลักษณะเป็นแกปช่วย (Auxiliary gap) เพื่อให้ตัวเก็บประจุ  $C_s$  ทำการปล่อยประจุให้กับโหลด การเกิดสปรັกแกปในช่องสปรັกแกปจะดำเนินไปด้วยความรวดเร็ว คือ ใช้เวลาน้อยกว่า 100 ns เมื่อเกิดสปรັกแกปที่  $S$  แรงดันอัดประจุ  $U_0$  จะคร่อม  $R_d$  และ  $C_b$  ซึ่งประจุจะถ่ายเทไปยังวัสดุทดสอบซึ่งแทนด้วย  $C_b$  เวลาในการคายประจุจาก  $C_s$  ไปยัง  $C_b$  จะขึ้นอยู่กับ  $R_d$  และ  $C_b$  ซึ่งเป็นเวลาช่วงหน้าคลื่น  $T_1$  เมื่อถ่ายเทประจุให้  $C_b$  จนกระทั่งแรงดันคร่อม  $C_s$  เท่ากับแรงดันคร่อม  $C_b$  จะไม่มีการถ่ายเทประจุระหว่าง  $C_s$  กับ  $C_b$  จากนั้น  $C_s$  และ  $C_b$  จะทำการคายประจุผ่าน  $R_e$  จึงกล่าวได้ว่า  $R_e$  ทำหน้าที่ควบคุมเวลาช่วงหางคลื่น  $T_2$

ค่ายอดแรงดันที่จ่ายออกที่ปลายแรงสูง  $U$  จะน้อยกว่าแรงดันอัดประจุ  $U_0$  เพราะมีการถ่ายเทประจุระหว่าง  $C_s$  และ  $C_b$  ฉะนั้นอัตราส่วนของ  $U$  ต่อ  $U_0$  จะน้อยกว่า 1 เสมอ และเรียกอัตราส่วนนี้เป็นประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์นั้น คือ

$$\text{ประสิทธิภาพของวงจร } \eta = U/U_0 \leq (C_s/(C_s + C_b)) \quad (2.1)$$

ฉะนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าสูง และให้ได้ภาพคลื่นตามมาตรฐานกำหนดควรเลือกให้  $C_s$  มีค่าสูงกว่าโหลด  $C_b$  มากๆ โดยทั่วไปจะให้  $C_s \geq 10 C_b$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปจะกำหนดด้วย

- แรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิด
- แรงดันอัดประจุรวมทั้งหมด  $U_0$
- ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมด  $C_s$
- พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด
- อัตราการดีสชาร์จจำนวนครั้งต่อนาที
- ภาพคลื่นแรงดันแบบฟ้าผ่า

พลังงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับความจุไฟฟ้า  $C_s$  และแรงดันอัดประจุ  $U_0$  ซึ่งค่าพลังงานคำนวณได้จากสมการ

$$W = \frac{1}{2} C_s U_0^2 \times 10^{-3} \quad \text{kJ} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $W$  คือ พลังงานอัดประจุเป็น kJ  
 $C_s$  คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเป็น  $\mu\text{F}$   
 $U_0$  คือ แรงดันอัดประจุเป็น kV

### 2.1.2 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่มีพิกัดเกิน 200 kV โดยปกติจะใช้วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น อันเนื่องมาจากข้อจำกัด ด้านฉนวน ด้านเศรษฐศาสตร์ โดยจะใช้วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์พื้นฐาน มาต่อซ้อนกันหลายชั้นตามหลักการ วงจรของมาร์กซ์ (Marx's circuit) ดังในภาพที่ 2.4

ในวงจรภาพที่ 2.4 ตัวเก็บประจุ  $C_s$  ทุกตัวจะได้รับการอัดประจุในลักษณะที่ต่อกันแบบขนานด้วยแรงดัน  $U_0$  เมื่อส่งสัญญาณพัลส์ผ่านไกสวิตช์จะทำให้สปาร์กที่แยกชั้นแรกทำงานก่อน และสปาร์กแยกชั้นต่อไปก็จะเกิดสปาร์กตามลำดับ เป็นผลให้ตัวเก็บประจุ  $C_s$  ทั้งหมดต่อกันแบบอนุกรม และได้แรงดันสูงเป็นทวีคูณตามจำนวนชั้นของวงจร ถ้าเครื่องกำเนิดมี  $n$  ชั้นก็จะได้แรงดันสูงจ่ายออกเป็น

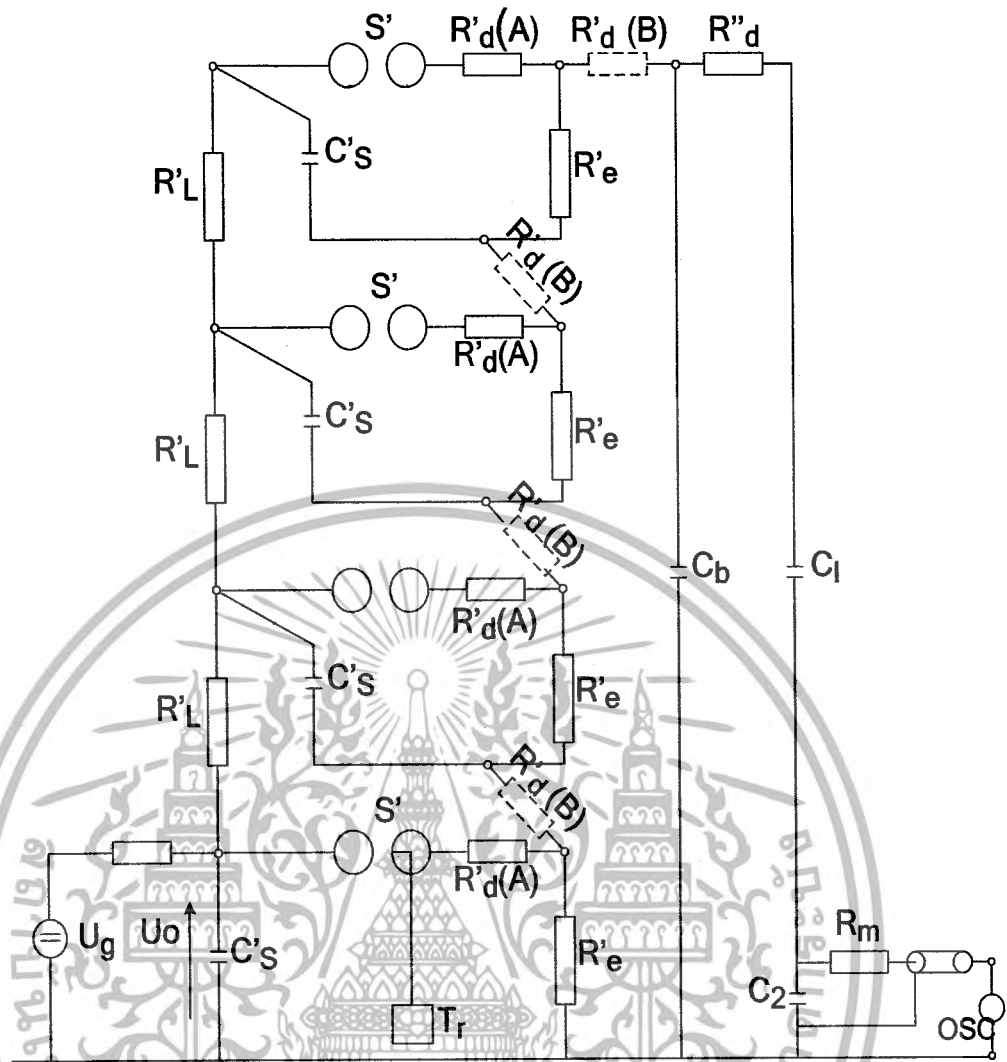
$$\text{ค่าแรงดันรวมที่ได้} \quad U_0 = n U'_0 \quad (2.3)$$

$$\text{ค่าความจุไฟฟ้ารวม} \quad C_s = C'_s/n \quad (2.4)$$

$$\text{ค่าความต้านทานหน้าคลื่นรวม} \quad R_d = n R'_d \quad (2.5)$$

$$\text{ค่าความต้านทานหลังคลื่นรวม} \quad R_e = n R'_e \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.4 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายชั้น

### 2.1.3 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะประกอบด้วย องค์ประกอบดังนี้

- 1) ตัวเก็บประจุอิมพัลส์  $C_s$
- 2) ตัวเก็บประจุโหลด  $C_b$
- 3) ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ  $R_L$
- 4) ความต้านทานปรับหน้าคลื่น  $R_d$  และความต้านทานปรับหลังคลื่น  $R_e$
- 5) สปาร์กแกปและไทม์สวิทช์

1) ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ทำหน้าที่เก็บพลังงานไว้ในภาพสนามไฟฟ้า โดยการอัดประจุด้วยแรงดันสูงกระแสตรง แล้วคายพลังงานออกไปอย่างรวดเร็วใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลานั้นสั้น ตัวเก็บประจุอิมพัลส์จึงต้องเป็นประเภทที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้ภาพคลื่นแรงดันที่สร้างขึ้นไม่เกิดการแกว่ง (Oscillation)

ค่าความจุไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ภาพคลื่นมาตรฐาน ( $1.2/50 \mu\text{s}$ ) ได้ โดยปกติค่าตัวเก็บประจุ  $C_s$  จะต้องมากกว่าค่าเก็บประจุโหลด  $C_b$  อย่างน้อย 10 เท่า นั่นคือ

$$C_s \geq 10 C_b \quad (2.7)$$

2) ตัวเก็บประจุโหลด ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุโหลด  $C_b$  หมายถึง ผลรวมของความจุไฟฟ้าของวัสดุ และอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า ปลอกฉนวนนำสายหม้อแปลงวัดแรงดันและกระแส โวลเตจดีไวเดอร์ รวมกับตัวเก็บประจุที่ต่อเพิ่มเติมเข้าไปเพื่อปรับภาพคลื่นให้ได้ตามมาตรฐาน ซึ่งตัวเก็บประจุโหลด  $C_b$  มีส่วนสำคัญในการปรับภาพคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับส่วนหน้าคลื่น แต่จะมีผลน้อยต่อหางคลื่น คุณสมบัติของตัวเก็บประจุโหลดจะต้องมีค่าพิกัดแรงดันมากกว่าค่าแรงดันทดสอบของวัสดุหรืออุปกรณ์ทดสอบและควรมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำด้วย เหตุผลเช่นเดียวกับตัวเก็บประจุอิมพัลส์  $C_s$

3) ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ  $R_L$  ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปจะมีการกำหนดความถี่ของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ไว้ เช่น 3 ครั้งต่อนาที เพราะการใช้เครื่องกำเนิดให้ทำการคายประจุ และอัดประจุด้วยอัตราเร็วมากเกินไปจะทำให้เกิดผลเสียต่อองค์ประกอบต่างๆ เช่น วงจรเรกติฟายเออร์ (ไดโอดแรงสูง และตัวเก็บประจุกรองกระแส) ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ และความต้านทานปรับภาพคลื่น เป็นต้น เพราะว่าการคายประจุจะเป็นแบบสภาวะทรานเซียนต์ ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันและกระแสอย่างรวดเร็ว นั่นก็คือเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของสนามไฟฟ้า ซึ่งมีผลกระทบต่อการณ์ขององค์ประกอบของเครื่องกำเนิดในด้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าหรือความเครียดสนามไฟฟ้า อันจะทำให้อายุการใช้งานขององค์ประกอบสั้นลงหากใช้งานอย่างต่อเนื่องถี่เกินไป ฉะนั้นจึงจะต้องไม่ใช่เครื่องกำเนิดให้เกิดการอัดประจุหรือคายประจุถี่จนเกินไป ซึ่งการจำกัดอัตราการอัดประจุอาจทำได้โดยใช้ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ  $R_L$  ซึ่งจะต่ออนุกรมกันอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรงกับตัวเก็บประจุอิมพัลส์  $C_s$  เพื่อให้กระแสอัดประจุมีค่าไม่เกินค่าพิกัดกระแสของแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง  $i$  ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มแรงดันอัดประจุ  $du/dt$  จะต้องไม่ควรเร็วเกินไป ดังนั้นค่ากระแสอัดประจุจึงเขียนได้ว่า

$$i = C_s \cdot du/dt \quad (2.8)$$

นอกจากนี้ ความต้านทาน  $R_L$  ต้องมีความคงทนต่อแรงแรงดันอัดประจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ได้ เพราะความต้านทาน  $R_L$  จะต้องรับแรงดันเท่ากับพิกัดของแรงดันอัดประจุเมื่อตัวเก็บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจักษ์ประจุเต็ม แล้วนอกจากต้องเลือกค่าความต้านทานและความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์แล้วยังต้องคำนึงถึงค่ากำลังไฟฟ้าของ  $R_L$  ที่มีค่าสูงพอ เมื่อต้องรับกระแสอัดประจุตลอดเวลาที่อัดประจุได้

3) ความต้านทานปรับสภาพคลื่น ความต้านทานปรับสภาพคลื่นในที่นี้หมายถึงความต้านทาน  $R_d$  และ  $R_e$  ที่แสดงไว้ในภาพที่ 2-3 ซึ่ง  $R_d$  จะมีผลต่อเวลาหน้าคลื่น  $T_1$  กล่าวคือ  $T_1$  จะแปรตามค่า  $R_d$  และเช่นเดียวกัน  $R_e$  มีผลต่อเวลาหางคลื่น  $T_2$  นั่นคือ  $T_2$  จะแปรตาม  $R_e$

คุณสมบัติของความต้านทาน  $R_d$  และ  $R_e$  จะต้องสามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับพลังงานจากการดิสชาร์จในสภาวะทรานเซียนต์ได้ โดยไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนเกินไปตลอดช่วงเวลาทำงาน โดยทั่วไปมักจะใช้ความต้านทานที่ทำด้วยเส้นลวดความต้านทานซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอาจคำนวณได้จากสมการของพลังงานที่ผ่านความต้านทาน คือ

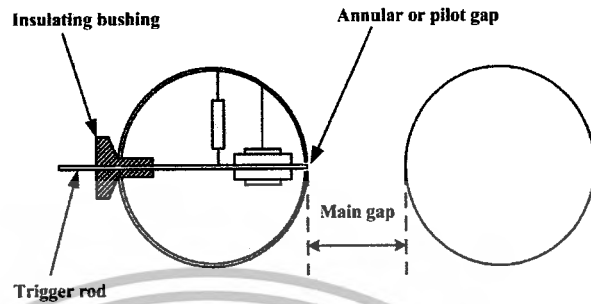
$$W = mc\Delta T \quad (2.9)$$

เมื่อ	$W$	คือ พลังงานที่ป้อนผ่านความต้านทาน (kJ)
	$m$	คือ มวลของเส้นลวดที่ประกอบเป็นความต้านทาน (kg)
	$c$	คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg.°K)
	$\Delta T$	คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น (°C)

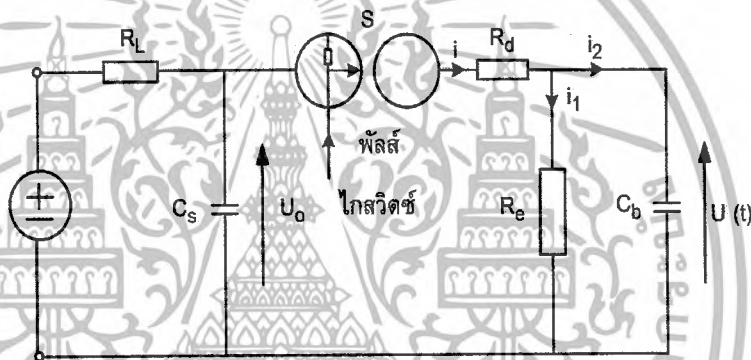
สิ่งสำคัญประการหนึ่งของการทำความต้านทาน  $R_d$  และ  $R_e$  ก็คือจะต้องเป็นความต้านทานปลอดภัยเหนียวหรือมีแต่น้อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อมิให้เกิดการแกว่งของภาพคลื่นแรงดันอิมพัลส์

5) สปาร์กแกปและไกสวิตช์ แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบหรือการศึกษาวิจัยจะต้องสามารถสร้างให้มีขนาดเท่าเดิมก็ครั้งก็ได้ ซึ่งตามมาตรฐาน IEC 71 [2] ได้กำหนดให้มีค่าคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน  $\pm 3\%$  การควบคุมให้ขนาดแรงดันเท่าเดิมดังกล่าวนี้ทำได้โดยการใช้พัลส์ไกสวิตช์บังคับให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เริ่มต้นคายประจุที่แรงดันอัดประจุที่กำหนด พัลส์ไกสวิตช์จะเป็นตัวทำให้เกิดการสปาร์กที่แกปช่วย (auxiliary gap) ซึ่งเป็นแกปแคบๆ ขนาดประมาณ 1-2 มิลลิเมตร อยู่ที่ด้านหนึ่งของสปาร์กแกปคู่แรกของเครื่องกำเนิดดังภาพที่ 2.5 และ 2.6 แกปช่วยนี้จะเป็นสัญญาณพัลส์ทำให้เกิดสปาร์กขึ้นในแกปช่วยก่อน ผลของการเกิดสปาร์กในแกปช่วยนี้ทำให้เกิด การไอออไนเซชันของอากาศและเกิดอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น ระหว่างสปาร์กแกปคู่แรกและเกิดการคายประจุที่สปาร์กแกปคู่ นั้น เป็นผลให้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ตัวแรกต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ตัวที่สอง และเกิดสปาร์กที่แกปถัดไปเป็นลำดับจนถึงแกปคู่สุดท้ายหรือคู่บนสุดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และเป็นการเริ่มต้นคายพลังงานให้กับตัวเก็บประจุโหลด ซึ่งจะได้แรงดันอิมพัลส์ตามที่ต้องการ ฉะนั้นการใช้ไกสวิตช์ช่วยเริ่มต้นจุดสปาร์กจึงทำให้สามารถกำหนดแรงดันคายประจุ ได้อย่างแม่นยำ

สัญญาณพัลส์ที่ใช้สำหรับทำให้เกิดสปาร์กในแก๊ปชว้นั้น โดยทั่วไปจะใช้สวิทช์อิเล็กทรอนิกส์ความเร็วสูงร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์สร้างพัลส์ โดยแรงดันของพัลส์นี้มีค่าประมาณ 5-10 kV และจะต้องทำให้เกิดสปาร์กแก๊ปภายในเวลา 10-100 ns



ภาพที่ 2.5 อิเล็กโทรดสปาร์กแก๊ป [3]

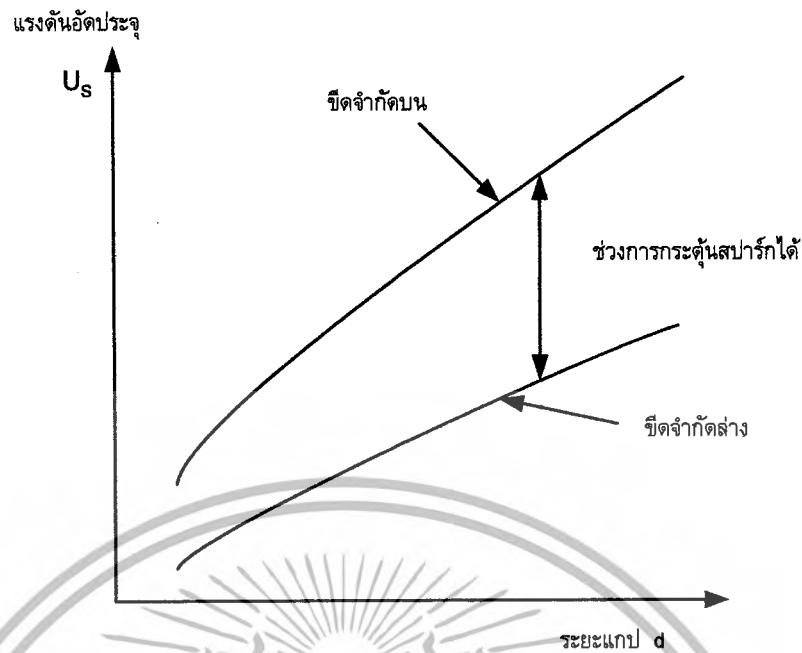


ภาพที่ 2.6 สปาร์กแก๊ปมีโกลสวิตช์

คุณลักษณะการทำงานหรือประสิทธิภาพของโกลสวิตช์จะพิจารณากันที่ช่วงการกระตุ้นสปาร์กได้ ซึ่งหมายถึงที่ระยะแก๊ปกำหนดให้ค่าหนึ่ง โดยให้เกิดสปาร์กเอง (Self firing) เรียกว่าขีดจำกัดบน และที่พัลส์โกลสวิตช์จะสามารถจุดสปาร์กได้ (Trigger) ที่แรงดันอัดประจุต่ำสุดเท่าใด เรียกว่า ขีดจำกัดล่าง ความแตกต่างของแรงดันกระตุ้นสปาร์กได้ระหว่างค่าต่ำสุดกับค่าสูงสุด เรียกว่า “ช่วงการกระตุ้นสปาร์กได้” (Trigger range) ของโกลสวิตช์ ซึ่งอาจแสดงเป็นค่าแรงดันกิโลโวลต์ หรือเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าแรงดันขีดจำกัดบนนั้น คือ

$$\text{ช่วงการกระตุ้นสปาร์กได้} = (\text{ขีดจำกัดบน} - \text{ขีดจำกัดล่าง}) / \text{ขีดจำกัดบน} \times 100\% \quad (2-10)$$

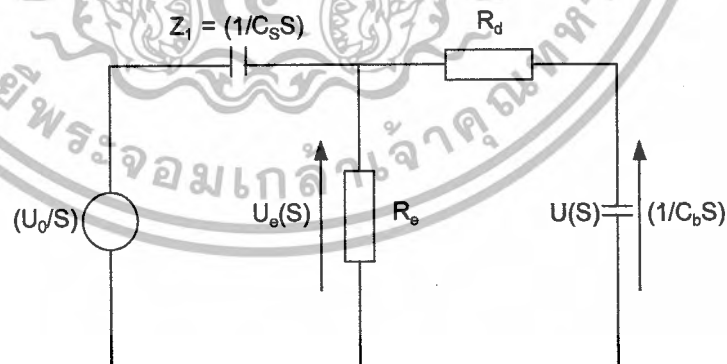
ความสัมพันธ์ของแรงดันที่กระตุ้นได้ต่ำสุดและสูงสุด และช่วงการกระตุ้นได้ในเทอมของระยะแก๊ปในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ช่วงการกระตุ้นสปาร์กได้ของโกสวิตซ์ในเทอมของระยะแกป

#### 2.1.4 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์[1]

1) การแปรของแรงดันในเทอมของเวลา อาศัยการวิเคราะห์จากวงจรพื้นฐานสร้างแรงดันอิมพัลส์ เช่น วงจรพื้นฐาน B ในภาพที่ 2.3 ข เมื่ออัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_s$  ด้วยแรงดันอัดประจุ  $U_0$  และเกิดสปาร์กที่สปาร์กแกป  $S$  จะทำให้  $C_s$  ต่อกับวงจรปรับสภาพคลื่น การวิเคราะห์ใช้ Laplace transform เขียนวงจรสร้างแรงดันได้ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ลาพลาซทรานฟอร์มของวงจรอิมพัลส์พื้นฐาน

จากวงจรในภาพ 2-8 ค่าแรงดันตกคร่อม  $R_o$  จะเขียนได้ว่า

$$U_e(s) = \frac{U_o}{S} \frac{Z_2}{(Z_1 + Z_2)} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $Z_1 = \frac{1}{C_s S}$  (2.12)

$$Z_2 = \frac{R_e(R_d + \frac{1}{C_b S})}{R_e + R_d + \frac{1}{C_b S}} \quad (2.13)$$

นำสมการ (2.12) และ (2.13) แทนลงใน (2.11)

ฉะนั้น  $U_e(s) = \frac{U_o(R_d R_e C_s C_b S + R_e C_s)}{R_d C_b S + R_e C_b S + R_e C_s S + R_d R_e C_s C_b S^2}$  (2.14)

แรงดันที่จ่ายออกจากโหนดคิดจาก  $U_e(s)$  ตามอัตราส่วนอิมพีแดนซ์จะได้

$$U(s) = \frac{U_e(s) \frac{1}{C_b S}}{R_d + \frac{1}{C_b S}} = \frac{U_e(s)}{R_d C_b S + 1}$$

แทน  $U_e(s)$  ด้วยสมการ (2-14)

$$U(s) = \frac{U_o R_e C_s}{R_d R_e C_s C_b S^2 + (R_d C_b + R_e C_s + R_e C_b) S + 1}$$

$$U(s) = \frac{U_o}{R_d C_b} \frac{1}{S^2 + \frac{(R_d C_b + R_e C_s + R_e C_b) S}{R_d R_e C_s C_b} + \frac{1}{R_d R_e C_s C_b}}$$

ซึ่งอาจเขียนได้ในภาพแบบง่าย ๆ คือ

$$U(s) = \frac{U_o}{K} \frac{1}{S^2 + B_1 S + B_0}$$

$$= \frac{U_o}{K} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \left[ \frac{1}{(S - \alpha_1)} - \frac{1}{(S - \alpha_2)} \right] \quad (2.15)$$

เมื่อกำหนดให้

$$B_1 = \frac{R_d C_b + R_e C_s + R_e C_b}{R_d R_e C_b C_s} \quad (2.16)$$

$$B_0 = \frac{1}{R_d R_e C_b C_s} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K = R_d C_b \quad (2.18)$$

$\alpha_1, \alpha_2$  เป็นค่ารากที่สองของสมการ  $S^2 + B_1 S + B_0 = 0$

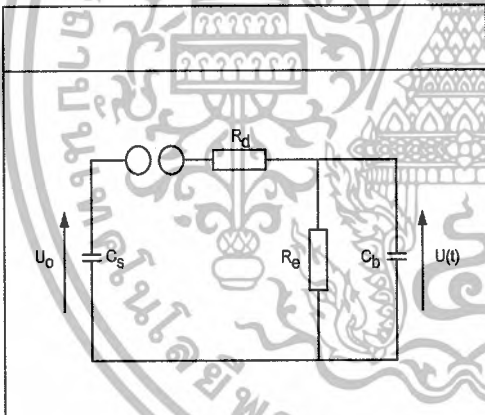
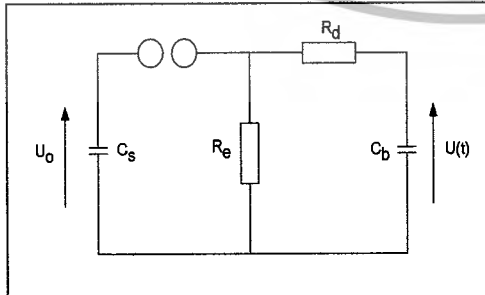
$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4B_0}}{2} \quad (2.19)$$

จึงเขียนค่าแรงดันอิมพัลส์ในเทอมของเวลาได้ดังนี้

$$u(t) = \frac{U_0}{K} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \{e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}\} \quad (2.20)$$

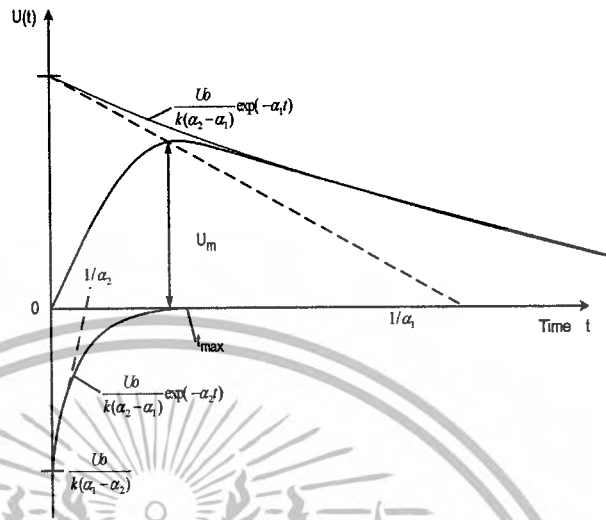
ค่าแฟกเตอร์  $B_1, B_0$  และ  $K$  สำหรับวงจร A และ B แสดงไว้ในตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1  $B_1, B_0$  และ  $K$  สำหรับวงจร A และ B

	$B_1$	$B_0$	$K$
	$\frac{R_d C_s + R_e C_s + R_e C_b}{R_d R_e C_b C_s}$	$\frac{1}{R_d R_e C_b C_s}$	$R_d C_b$
	$\frac{R_d C_b + R_e C_b + R_e C_s}{R_d R_e C_b C_s}$	$\frac{1}{R_d R_e C_b C_s}$	$R_d C_b$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการของแรงดันที่ได้จากวงจรอิมพัลส์จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันใน  
 เทอมของเวลา ประกอบด้วยเทอมเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม ซึ่งมีค่าคงตัวเวลา (Time  
 constant) เท่ากับ  $1/\alpha_1$  และ  $1/\alpha_2$  ดังภาพ 2.9



ภาพที่ 2.9 ภาพคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม

ตามนิยามของภาพคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานที่กำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่นและ  
 หลังคลื่น  $T_1$  และ  $T_2$  ตามลำดับ มีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลา  $1/\alpha_1$  และ  $1/\alpha_2$  ซึ่งขึ้นอยู่กับ  
 อัตราส่วนของ  $T_1 / T_2$  อันเป็นตัวแทนถึงภาพลักษณะของภาพคลื่น ค่า  $T_1$  และ  $T_2$  อาจหาได้  
 ดังนี้

$$T_1 = k_2 / \alpha_2 \quad (2.21)$$

$$T_2 = k_1 / \alpha_1 \quad (2.22)$$

กรณีของภาพคลื่น  $1.2/50 \mu\text{s}$  ค่าคงตัวจะมีค่า

$$k_1 = 0.73, \quad k_2 = 2.96$$

$$1/\alpha_1 (\mu\text{s}) = 68.5, \quad 1/\alpha_2 = 0.405$$

2) การคำนวณค่าองค์ประกอบวงจร การสร้างแรงดันอิมพัลส์ภาพคลื่นใด กำหนดด้วย  
 ค่า  $T_1$  และ  $T_2$  ปกติเราจะเริ่มต้นมาจากค่าความจุไฟฟ้าของโหลด  $C_b$  ก่อนและเลือกตัวเก็บประจุ  
 อิมพัลส์  $C_s$  ให้สอดคล้องกับ  $C_b$  กล่าวคือ  $C_s$  เป็นตัวเก็บพลังงานได้มากพอที่จะจ่ายถ่ายทอด  
 ให้กับโหลด ดังนั้นเมื่อทราบค่า  $C_b$  และ  $C_s$  แล้ว องค์ประกอบที่เหลือต้องคำนวณ คือ ความ  
 ต้านทาน  $R_d$  และ  $R_e$  ซึ่งอาจหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าคงตัวเวลา

$$\alpha_1, \alpha_2 = \sqrt{\frac{B_1}{2} \pm \left(\frac{B_1}{2}\right)^2 - B_0}$$

จะได้

$$\alpha_1 + \alpha_2 = B_1$$

$$\alpha_1 \cdot \alpha_2 = B_0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่า  $B_1$  และ  $B_0$  คำนวณหาค่า  $R_d$  และ  $R_e$  ได้คือ

**วงจร A**

$$R_e = \frac{1}{2(C_s + C_b)} \left\{ \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 C_b}} \right\} \quad (2.23)$$

$$R_d = \frac{1}{2C_s} \left\{ \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 C_b}} \right\} \quad (2.24)$$

**วงจร B**

$$R_e = \frac{1}{2(C_s + C_b)} \left\{ \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 C_s}} \right\} \quad (2.25)$$

$$R_d = \frac{1}{2C_b} \left\{ \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 C_s}} \right\} \quad (2.26)$$

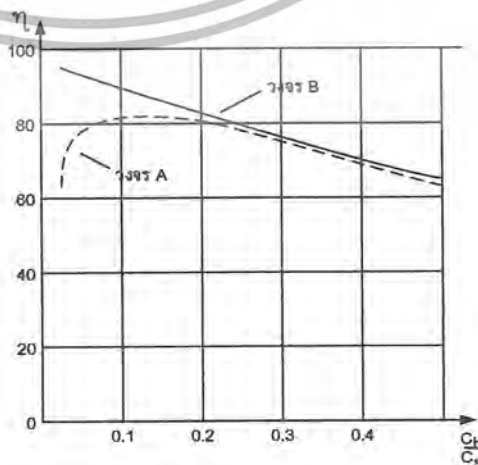
3) ประสิทธิภาพของวงจร  $\eta$  เมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพของวงจรหรือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ หมายถึง อัตราส่วนค่ายอดของแรงดันที่สร้างขึ้นออกมาได้ ต่อค่าแรงดันอัดประจุปกติจะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอทั้งวงจร A หรือวงจร B

$$\eta = U_m / U_0 < 1 \quad (2.27)$$

เมื่อ  $U_m$  คือ ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์  $u(t)$

$U_0$  คือ แรงดันอัดประจุให้กับ  $C_s$

ในกรณีแรงดันอิมพัลส์ภาพคลื่นฟ้าผ่า (1.2/50  $\mu s$ ) ประสิทธิภาพของวงจรอิมพัลส์ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า  $C_b$  และ  $C_s$  มีค่าดังภาพ 2.10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาพที่ 2.10** เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

4) การคำนวณหาค่าช่วงเวลาหน้าคลื่นและช่วงเวลาหางคลื่น  $T_1$  และ  $T_2$  ในกรณีที่ทราบค่าองค์ประกอบต่างๆ ของวงจรอิมพัลส์ ถ้าจำเป็นต้องการทราบค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและช่วงหางคลื่น อาจคำนวณค่าโดยประมาณได้จากค่าที่ตั้งแสดงในตารางที่ 2-2

**ตารางที่ 2.2** เวลา  $T_1$ ,  $T_2$  และประสิทธิภาพของวงจร A และ B

	วงจร A	วงจร B
$T_1$	$k_2 \frac{R_d R_e}{(R_d + R_e)} \cdot \frac{C_b C_s}{(C_b + C_s)}$	$k_2 R_d \frac{C_b C_s}{C_b + C_s}$
$T_2$	$k_1 (R_d + R_e) (C_b + C_s)$	$k_1 R_e (C_b + C_s)$
$\eta$	$\frac{R_e C_s}{(R_d + R_e) (C_b + C_s)}$	$\frac{C_s}{C_s + C_b}$

การคำนวณที่กล่าวแล้วข้างต้นนั้น ถือว่าวงจรที่ใช้คำนวณ ไม่มีค่าความเหนี่ยวนำในทางปฏิบัติภาพคลื่นที่ได้มักจะแตกต่างไปจากค่าทฤษฎี โดยเฉพาะค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและค่ายอดของแรงดัน ทั้งนี้ เนื่องจากในวงจรมีความเหนี่ยวนำซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ อาจทำให้เกิดการแกว่งบริเวณยอดคลื่นขึ้นได้ ดังนั้น ความต้านทานปรับหน้าคลื่น  $R_d$  ต้องมีค่ามากกว่าวิกฤตของวงจร ดังสมการ

$$R_d \geq k \sqrt{\frac{L(C_s + C_b)}{C_s C_b}} \quad \text{โดย } k = 2 \text{ ถึง } 4 \quad (2-28)$$

### 2.1.5 การวัดแรงดันอิมพัลส์[1]

การวัดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้กันอยู่ในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงทั่วไปมีอยู่ 2 วิธีคือ

- 1) วัดด้วยแกปทรงกลม
- 2) วัดด้วยระบบโวลเตจดีไวเดอร์

1) การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลม หลักการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลม ก็ปฏิบัติเช่นเดียวกับการวัดแรงดันกระแสสลับและแรงดันกระแสตรง กล่าวคือค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ของแกปทรงกลมนั้น ขึ้นอยู่กับระยะแกปของทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม และสภาวะอากาศรอบๆ ทรงกลมการเกิดเบรกดาวนซ์อย่างสมบูรณ์ในช่องแกปที่เป็น

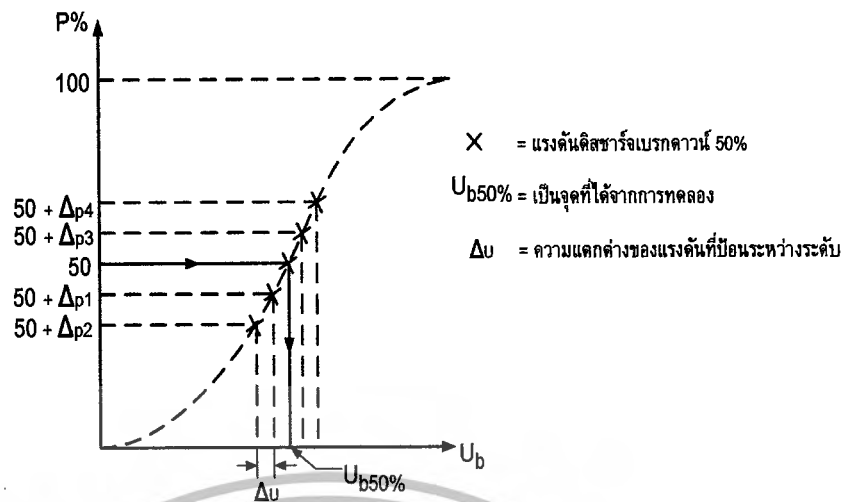
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศ ใช้เวลาเพียงไม่กี่ไมโครวินาที ฉะนั้นในกรณีของแรงดันกระแอสลับ ช่วงเวลาของแรงดันที่เพิ่มขึ้นจะไม่มีผลนัยสำคัญต่อค่าแรงดันเบรกดาวน  $U_b$  เบรกดาวนจะเกิดเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าหนึ่ง คือ  $E_b$  แต่ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์ ช่วงเวลาของแรงดันจะมีความสำคัญต่อการเกิดเบรกดาวน หรือค่าแรงดันเบรกดาวน ผลของเวลาดังกล่าวอาจอธิบายได้ด้วยเรื่องเวลาล่าช้า (time lag) ของการเกิดเบรกดาวนของก๊าซด้วยแรงดันอิมพัลส์

วิธีการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลม มีความแตกต่างที่สำคัญจากการวัดแรงดันกระแอสตรง และแรงดันกระแอสลับ ก็คือ การวัดแรงดันอิมพัลส์นั้นไม่สามารถใช้วิธีค่อยๆ เพิ่มแรงดันสูงขึ้นจนกระทั่งการเกิดเบรกดาวน หากแต่ต้องใช้การอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุแรงสูงของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ให้ได้แรงดันอัดประจุตามที่ต้องการก่อน แล้วจึงปล่อยดีสชาร์จออกไปที่แกปทรงกลม ซึ่งอาจเกิดเบรกดาวนหรือไม่เกิดก็ได้ ทั้งๆ ที่แรงดันสูงมากพอ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็น (Probability) และขนาดแรงดัน ถ้าแรงดันอัดประจุต่ำเกินไป ก็จะไม่เกิดเบรกดาวนที่แกปทรงกลมวัดแรงดัน แต่ถ้าแรงดันอัดประจุเพิ่มสูงขึ้นมากพอ ก็จะทำให้มีโอกาสเกิดเบรกดาวนมากขึ้น และถ้าแรงดันอัดประจุสูงมากเกินไป ก็จะเกิดเบรกดาวนทุกครั้งที่คายประจุออกไป ด้วยเหตุนี้เองการวัดแรงดันอิมพัลส์จึงกำหนดเป็นค่าแรงดันเบรกดาวน 50% คือ  $U_{b50\%}$  อันหมายถึงค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ค่าปานกลาง บางทีก็เรียกว่า ค่าอิมพัลส์วิกฤต (Critical impulse) ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่ทำให้จำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวนที่แกปของทรงกลม เป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ดีสชาร์จออกไป ฉะนั้นการหาค่า  $U_{b50\%}$  จึงหาได้โดยวิธีการคายประจุออกไปเป็นจำนวนหลายๆ ครั้ง จนกระทั่งจำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวนเป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ดีสชาร์จออกไป เช่น ดีสชาร์จ 10 ครั้ง แล้วเกิดเบรกดาวนที่แกปทรงกลม 5 ครั้ง ค่าแรงดันนั้นก็คือ  $U_{b50\%}$  แต่การที่จะอัดประจุให้ได้แรงดันอัดประจุพอดีที่จะทำให้เกิดค่าแรงดันเบรกดาวน 50% พอดีนั้นทำได้ยากและเสียเวลา

การวัดค่าแรงดัน  $U_{b50\%}$  โดยทั่วไปวัดได้ 2 วิธี คือวิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ (Multiple level voltage method) และวิธีปรับขึ้นลง (Up and down method)

- วิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ เป็นวิธีหาค่า  $U_{b50\%}$  ด้วยเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นที่จะเกิดเบรกดาวนกับค่าแรงดัน ป้อนแรงดันอย่างน้อย 10 ครั้งที่แรงดันแต่ละค่า หรือแต่ละระดับต่างกัน  $\Delta U$  น้อยกว่า 3% ของค่าแรงดันเบรกดาวน 50% ที่คาดหมาย ทดลองแรงดันหลายระดับที่สูงกว่า และที่ต่ำกว่าค่าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน 50% จากเส้นกราฟนี้จะหาค่าแรงดันดีสชาร์จ 50% ได้ดังภาพที่ 2.11



ภาพ 2.11 เส้นกราฟใช้หาแรงดันดีสชาร์จเบรกดาว์น 50%

- วิธีปรับขึ้นลง เป็นวิธีหาค่าแรงดันดีสชาร์จเบรกดาว์น 50% โดยการเริ่มต้นเลือกแรงดันค่าหนึ่ง  $U_k$  ที่คาดว่าจะจะเป็นค่าแรงดันเบรกดาว์น 50% ป้อนเข้าไปที่แกปทรงกลม ถ้าหากไม่เกิดเบรกดาว์นที่แกปทรงกลมให้เพิ่มแรงดันขึ้น  $\Delta U$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 3% ของแรงดันดีสชาร์จ 50% จึงป้อนแรงดันใหม่ด้วยค่า  $U_k + \Delta U$  แต่ถ้าเกิดเบรกดาว์นที่แกปทรงกลมที่แรงดัน  $U_k$  ก็ให้ลดแรงดันเหลือเพียง  $U_k - \Delta U$  ฉะนั้นค่าแรงดันที่ป้อนต่อไป จะขึ้นอยู่กับผลที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันครั้งที่ผ่านมา ปฏิบัติต่อเนื่องกันเช่นนี้จนกระทั่งมีจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันมากพอ จะหาค่าแรงดีสชาร์จเบรกดาว์น 50% ได้จากสมการ

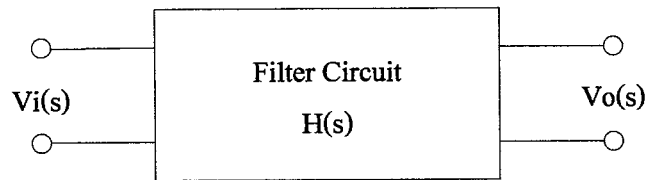
$$U_{50\%} = \frac{\sum n_v U_v}{\sum n} \quad (2-29)$$

โดยที่  $n_v$  คือ จำนวนครั้งที่ที่ป้อนแรงดันที่ระดับแรงดัน  $U_v$   
และ  $\sum n$  คือ ผลรวมจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดัน ควรจะ  $> 20$

2) การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเตอร์ การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลมนั้น ทราบแต่ค่ายอดเท่านั้น แต่ไม่ทราบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตามเวลา คือภาพคลื่นแรงดัน ซึ่งจำเป็นต้องทำการวัด และมีทางทำได้ โดยใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) หรือเครื่องบันทึกแรงดันอิมพัลส์ ประกอบเข้ากับโวลเตจดีไวเตอร์ ถ้าแรงดันที่วัดมีค่ายังสูงไม่มากนัก คือ ต่ำกว่า 100 kV เทคนิคการวัดก็ไม่ยุ่งยากอะไร เมื่อแรงดันเพิ่มสูงมากขึ้นเทคนิคและปัญหาการวัดก็มีมากขึ้นตามขนาดแรงดันที่วัด

## 2.2 ทฤษฎีวงจรกรองความถี่ [4]

วงจรกรองความถี่ หรือ วงจรเลือกความถี่ วงจรนี้เป็นวงจรแบบ Two port ซึ่งมีทั้งอินพุตและ เอาท์พุท ในการพิจารณาวงจรมักกระทำในภาพของ Frequency domain



ภาพที่ 2.12 วงจรกรอง

จากภาพที่ 2.12 จะได้สมการของการถ่ายโอน (Transfer function) โดยจะเป็นอัตราส่วนระหว่างเอาท์พุท และอินพุท ดังสมการ

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} \quad (2.30)$$

จากสมการของการถ่ายโอนเราจะใช้  $H(s)$  และมักจะพิจารณาในเชิงของความถี่ โดยที่  $s=j\omega$

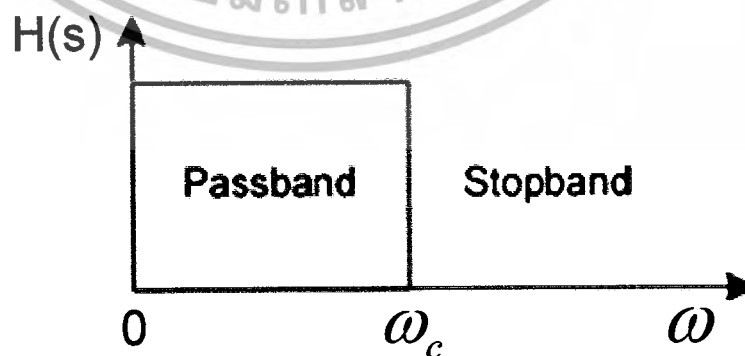
### ชนิดของวงจรกรองความถี่

สำหรับวงจรกรองความถี่เป็นวงจรที่เลือกความถี่ออกจากเอาท์พุท โดยสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. วงจรกรองความถี่ต่ำ Low pass filter (LP)
2. วงจรกรองความถี่สูง High pass filter (HP)

ลักษณะการตอบสนองทางความถี่ที่นำมาใช้ในหัวข้อนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ กรองความถี่ต่ำผ่าน และกรองความถี่สูงผ่านซึ่งจะกล่าวดังต่อไปนี้

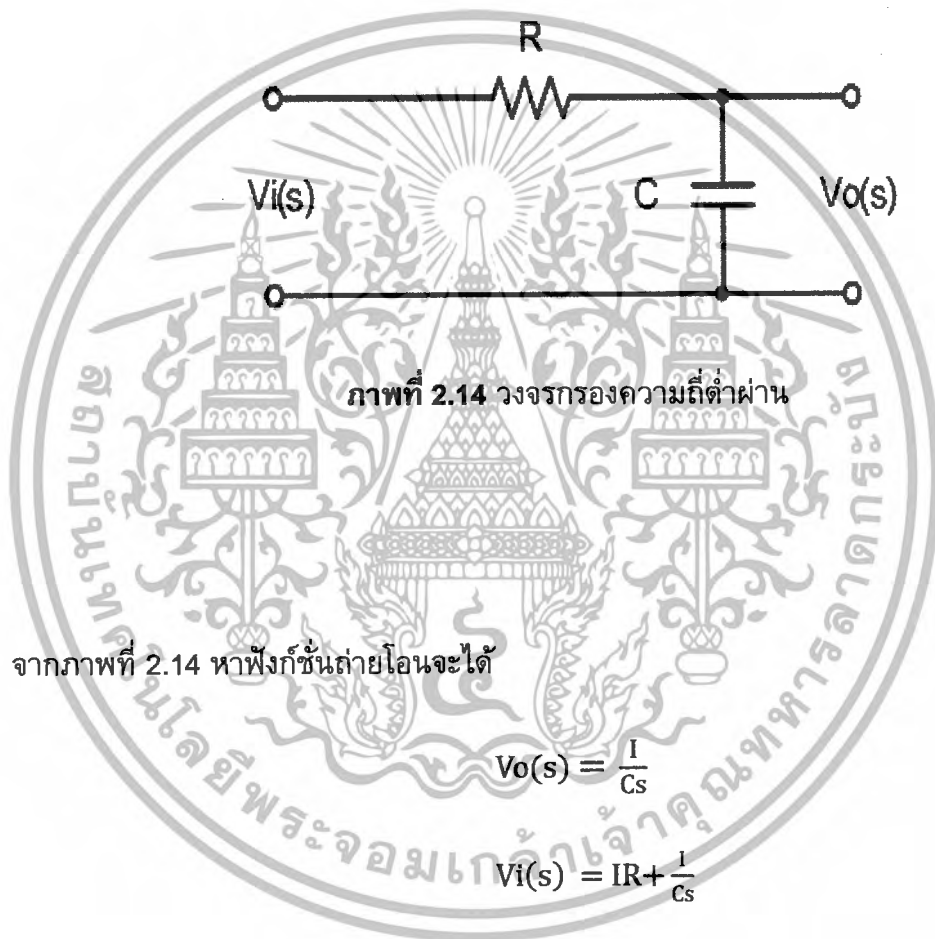
#### 2.2.1 การกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)



ภาพที่ 2.13 ช่วงกรองความถี่ต่ำผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะโดยทั่วไปของการกรองความถี่ต่ำผ่าน คือ ให้ความถี่ต่ำผ่านได้ และลดทอนสัญญาณความถี่สูง ภาพแบบของการกรองความถี่ต่ำผ่านแสดงดังภาพที่ 2.14 ซึ่งการกรองความถี่ต่ำผ่านจะยอมให้สัญญาณตั้งแต่ 0 ไปจนถึงความถี่  $\omega_c$  ซึ่งเรียก  $\omega_c$  ว่าความถี่ตัดออฟ (Cutoff frequency ช่วงของความถี่ตั้งแต่ 0 จนถึง  $\omega_c$  จะเรียกว่า แถบความถี่ผ่าน (Passband) และความถี่ที่มากกว่า  $\omega_c$  จะมีอัตราการลดทอนของสัญญาณ โดยเรียกช่วงความถี่ที่มากกว่า  $\omega_c$  ว่า แถบความถี่หยุด (Stopband) และเรียกความถี่ที่  $\omega_c$  ว่า ขอบของแถบความถี่หยุด (Stopband edge frequency) ช่วงความถี่ระหว่าง  $\omega_c$  และ  $\omega$  เรียกว่า ช่วงผ่านสัญญาณ (Transitionband)



จากภาพที่ 2.14 หาฟังก์ชันถ่ายโอนจะได้

$$V_o(s) = \frac{I}{Cs}$$

$$V_i(s) = IR + \frac{1}{Cs}$$

$$= I\left(R + \frac{1}{Cs}\right)$$

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)}$$

$$= \frac{\frac{1}{Cs}}{I\left(R + \frac{1}{Cs}\right)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\frac{1}{Cs}}{R + \frac{1}{Cs}} \\
 &= \frac{\frac{1}{Cs}}{\left(R + \frac{1}{Cs}\right)} \times \frac{Cs}{Cs} \\
 &= \frac{1}{1 + RCs}
 \end{aligned}$$

แต่  $s = j\omega$

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (2.31)$$

ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอน

จากสมการที่ 2.31 จะได้

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + (j\omega RC)^2}}$$

แต่  $j^2 = -1$  เมื่อพิจารณาถึงขนาดจะไม่คิดเครื่องหมาย

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + (\omega RC)^2}} \quad (2.32)$$

หาความถี่คัทออฟ  $\omega_c$

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.31 พิจารณาในส่วนจินตภาพ(ความถี่)

โดยที่ความถี่

คัทออฟ  $\omega_c RC = 1$  เกิดขึ้นเมื่อ  $\omega_c = \frac{1}{RC}$

จากสมการที่ 2-32 เมื่อให้  $\omega_c = 0$

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1+0}} = 1$$

จากสมการที่ 2-32 เมื่อให้  $\omega_c = \frac{1}{RC}$

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{RC}{RC}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1^2 + 1^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.32 เมื่อให้  $\omega_c = \infty$

$$|H(j\infty)| = \frac{1}{\sqrt{1+\infty}} = 0$$

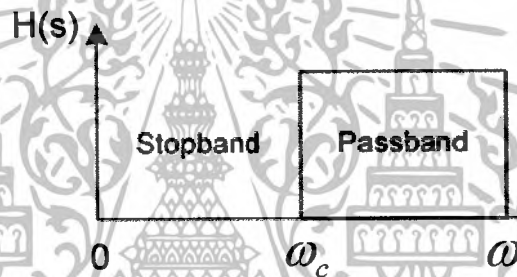
โดยที่  $V_o(s)$  คือ แรงดันทางด้านออกของวงจรฟิลเตอร์

$V_i(s)$  คือ แรงดันทางด้านเข้าของวงจรฟิลเตอร์

$\omega_c$  คือ ความถี่คัตออฟ

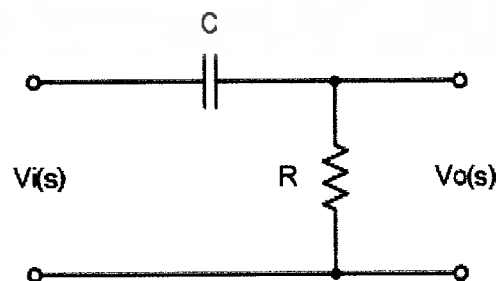
$\omega$  คือ ความถี่หยุด

### 2.2.2 การกรองความถี่สูงผ่าน ( High Pass Filter )



ภาพที่ 2.15 ช่วงกรองความถี่สูงผ่าน

การกรองความถี่ผ่านจะยอมให้ความถี่ที่กำหนดมาผ่านไปได้ เรียกว่าความถี่นี้ว่า ความถี่คัตออฟ ( Cutoff frequency ) ลักษณะโดยทั่วไปของการกรองความถี่สูงผ่านจะปรากฏดังภาพที่ 2.16 ช่วงแถบความถี่ผ่านจะเริ่มที่  $\omega_c$  ถึง  $\infty$  และช่วงแถบความถี่ตัด จะเริ่มตั้งแต่ความถี่ 0 จนถึง  $\omega_c$  เช่นเดียวกับการกรองความถี่ต่ำ



ภาพที่ 2.16 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 2-16 หาฟังก์ชันถ่ายโอน

$$V_o(s) = IR$$

$$V_i(s) = \frac{1}{Cs} + IR$$

$$= I\left(\frac{1}{Cs} + R\right)$$

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)}$$

$$= \frac{IR}{I\left(\frac{1}{Cs} + R\right)}$$

$$= \frac{R}{\frac{1}{Cs} + R}$$

$$= \frac{\frac{R}{R}}{\frac{1}{Cs} + R}$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{1}{RCs}}$$

แต่  $s = j\omega$

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega RC}}$$

(2-33)

หาขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอน

จากสมการที่ 2.33 จะได้

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{1}{j\omega RC}\right)^2}}$$

แต่  $j^2 = -1$  เมื่อพิจารณาถึงขนาดจะไม่คิดเครื่องหมาย

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{1}{\omega RC}\right)^2}}$$

(2-34)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาความถี่คัทออฟ  $\omega_c$

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.31 พิจารณาในส่วนจินตภาพ(ความถี่) โดยที่ความถี่คัทออฟ  $\omega_c RC = 1$  เกิดขึ้นเมื่อ  $\omega_c = \frac{1}{RC}$   
จากสมการที่ 2.34 เมื่อให้  $\omega_c = 0$

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{1}{0}}} = \frac{1}{\sqrt{1+\infty}} = 0$$

จากสมการที่ 2.34 เมื่อให้  $\omega_c = \frac{1}{RC}$

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{RC}{RC}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1^2 + 1^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$$

จากสมการที่ 2.34 เมื่อให้  $\omega_c = \infty$

$$|H(j\infty)| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{1}{\infty}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1^2 + 0}} = \frac{1}{1} = 1$$

สรุปสมการที่ใช้ในการคำนวณวงจรกรองทั้งสองแบบ

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

$$\omega_c = \frac{1}{RC}$$

$$f = \frac{\omega_c}{2\pi}$$

วงจรกรองความถี่สูงผ่าน

$$\omega_c = \frac{1}{RC}$$

$$f = \frac{\omega_c}{2\pi}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

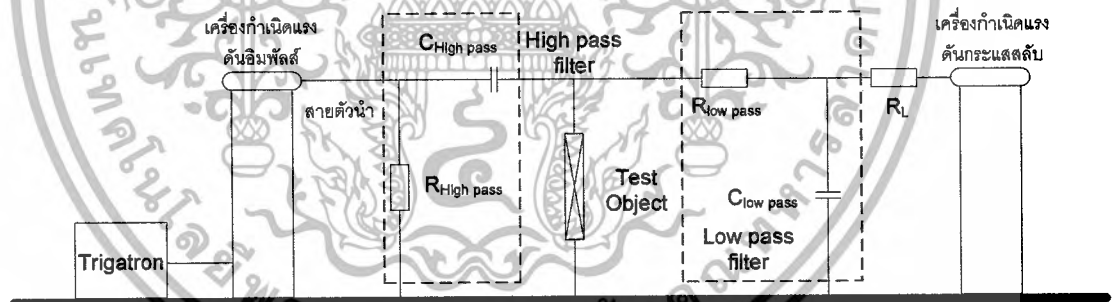
### บทที่ 3

## การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยแรงดันเพียงชนิดเดียว เช่น แรงดันกระแสสลับ หรือ แรงดันอิมพัลส์เป็นต้น จะไม่สอดคล้องกับสภาวะที่เกิดขึ้นจริงในระบบขณะที่ใช้งาน อุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์ทางด้านไฟฟ้าแรงสูงในสภาวะปกติจะได้รับแรงดันกระแสสลับที่พิกัด อยู่ตลอดเวลา เมื่อเกิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นจะทับซ้อนอยู่บนแรงดันกระแสสลับ พฤติกรรม ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนฉนวนจึงอาจจะมีความแตกต่างกันกับการได้รับแรงดัน เพียงชนิดเดียว เพื่อให้สามารถทดสอบการฉนวนได้ใกล้เคียงกับสภาวะจริง ๆ ของการใช้งาน อุปกรณ์ไฟฟ้า จึงได้มีการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ (Super impose) ขึ้นมาเพื่อจะสามารถทำการทดสอบได้เหมือนจริงมากที่สุด

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับจะประกอบไปด้วย

1. ชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
2. ชุดกำเนิดแรงดันกระแสสลับ
3. ชุดกรองความถี่

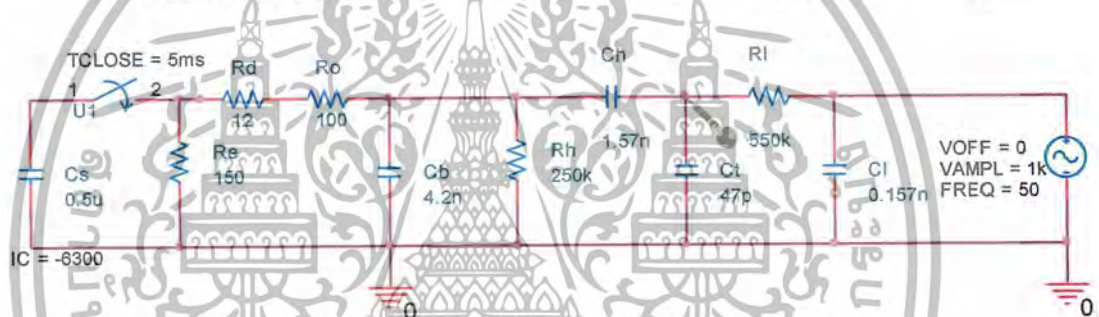


ภาพที่ 3.1 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

เพื่อให้สามารถเข้าใจหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดัน กระแสสลับ จึงได้ทำการจำลองวงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แสดงดังภาพที่ 3.2 โดย กำหนดให้สวิชชี่ปิดวงจรที่เวลา 5 mS สำหรับการเกิดขึ้นของแรงดันอิมพัลส์ที่มุม  $90^\circ$  ของ แรงดันกระแสสลับ และให้สวิชชี่ปิดวงจรที่เวลา 15 mS สำหรับการเกิดขึ้นของแรงดันอิมพัลส์ที่ มุม  $180^\circ$  ของแรงดันกระแสสลับ

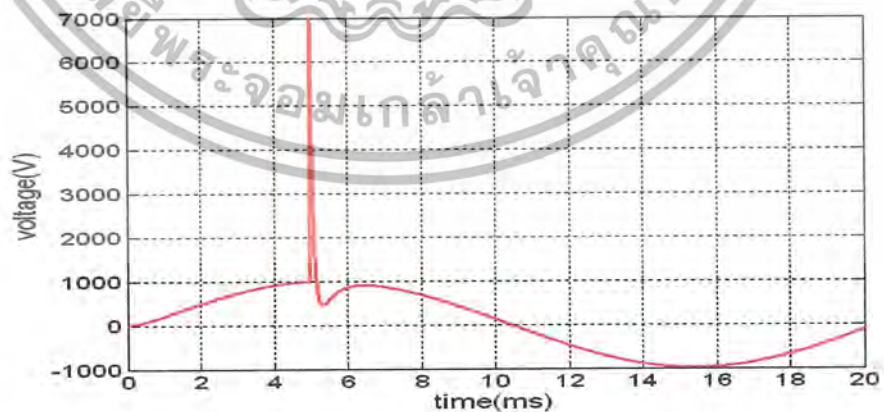
การจำลองวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ได้ใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

- ค่ายอดแรงดันอัดประจุ	6	kV
- ตัวเก็บประจุ $C_s$	0.5	$\mu\text{F}$
- ตัวเก็บประจุ $C_b$	4.2	nF
- ตัวเก็บประจุ $C_h$	1.57	nF
- ตัวเก็บประจุ $C_L$	0.157	nF
- ตัวเก็บประจุ $C_t$	47	pF
- ความต้านทาน $R_d$	12	$\Omega$
- ความต้านทาน $R_e$	150	$\Omega$
- ความต้านทาน $R_h$	250	k $\Omega$
- ความต้านทาน $R_L$	550	k $\Omega$
- ความต้านทาน $R_o$	100	$\Omega$



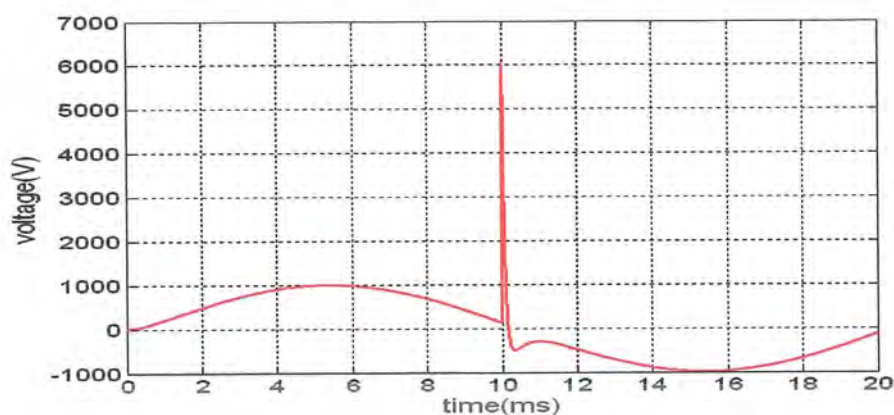
ภาพที่ 3.2 วงจรที่ใช้ในการจำลองกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

ผลการจำลองด้วยโปรแกรม Orcad แสดงได้ดังภาพที่ 3.3



(ก) การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ แรงดันอิมพัลส์เกิดที่มุม  $90^\circ$  ของแรงดันกระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ แรงดันอิมพัลส์เกิดที่มุม  $180^\circ$  ของแรงดันกระแสสลับ

### ภาพที่ 3.3 ผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม

ซึ่งรายละเอียดต่างๆของส่วนประกอบในวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับจริงที่ได้นำมาทำการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นประกอบด้วย

#### 3.1 ชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

วงจรชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ประกอบด้วย วงจรกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ และโวลต์เตจดีไวเซอร์ ซึ่งชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สามารถใช้ได้จากห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งมีรายละเอียดดังภาพที่3-4

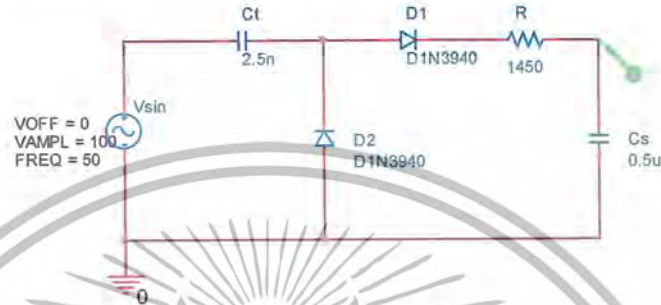


ภาพที่ 3.4 ชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1) ชุดกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง  
2) ชุดสร้างภาพคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 3) อิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 ชุดกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง

ชุดกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรงเป็นชุดที่ป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_s$  โดยชุดกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรงจะรับแรงดันจากหม้อแปลง แล้วทำการยกระดับแรงดันขึ้นเป็น 2 เท่าพร้อมกับทำการแปลงแรงดันจากแรงดันกระแสสลับไปเป็นแรงดันกระแสตรง หม้อแปลงที่ใช้เป็นหม้อแปลงแรงดันขึ้นพิกัดแรงดัน 220/48000 V, 600 VA สำหรับวงจร Doubler circuit มีส่วนประกอบดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 การจำลองวงจรทวีแรงดันด้วยโปรแกรม Orcad



ภาพที่ 3.6 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ  $C_s$  ผลการจำลองวงจรทวีแรงดันด้วยโปรแกรม Orcad เมื่อกำหนดให้แรงดันของหม้อแปลงมีค่า 100 V

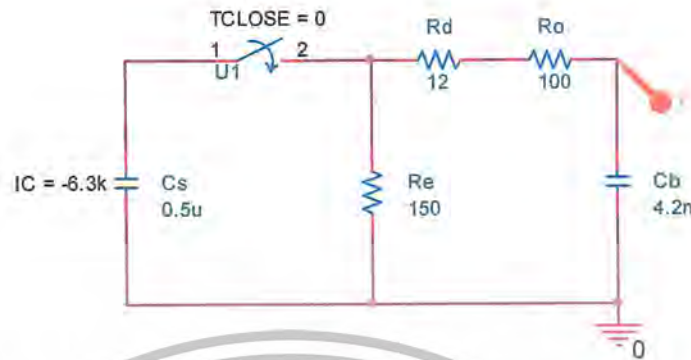
### 3.1.2 ชุดสร้างแรงดันอิมพัลส์

ชุดสร้างแรงดันอิมพัลส์ทำหน้าที่สร้างภาพคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ให้ได้ตรงตามมาตรฐานที่กำหนดประกอบด้วย

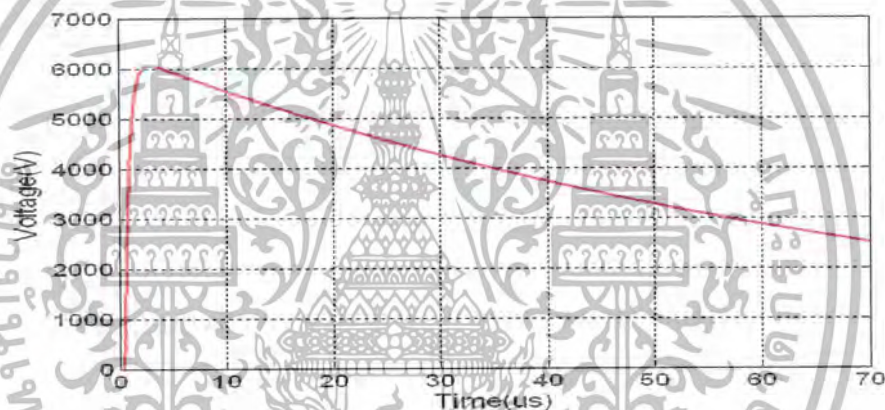
- ตัวเก็บประจุ  $C_s$  มีขนาดพิกัดแรงดัน 100 KVDC มีค่าความเก็บประจุ 0.5  $\mu$ F
- ความต้านทาน  $R_s$  มีขนาด 150  $\Omega$
- ความต้านทาน  $R_d$  มีขนาด 12  $\Omega$
- ความต้านทาน  $R_o$  มีขนาด 100  $\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองการทำงานของชุดสร้างแรงดันอิมพัลส์แสดงดังภาพที่ 3.7 และผลการจำลองแสดงดังภาพที่ 3.8 โดยกำหนดให้แรงดันของ Cs มีค่า -6kV



ภาพที่ 3.7 การจำลองวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโปรแกรม Orcad



ภาพที่ 3.8 ผลการจำลองวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโปรแกรม Orcad

### 3.1.3 ชุดโวลต์เตจดีไวเดอร์

ชุดโวลต์เตจดีไวเดอร์ใช้สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งโวลต์เตจดีไวเดอร์เป็นแบบคาปาซิเตอร์ใช้ความต้านทานหน้าวงภายนอกและให้ตัวสตทอนต่อรวมอยู่กับโวลต์เตจดีไวเดอร์ด้วย มีอัตราลดทอนของระบบวัดเท่ากับ 26530 : 1

### 3.2 วงจรกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ

ชุดกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับใช้สำหรับจ่ายแรงดันกระแสสลับให้กับอุปกรณ์ที่จะทำการทดสอบวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับเนื่องจากอุปกรณ์ที่ทดสอบนั้นในสภาวะปกติจะต้องรับแรงดันกระแสสลับอยู่ตลอดเวลา ชุดกำเนิดแรงดันสูงมีพิกัด 220 V / 100 kV, 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3-9 ชุดกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ

### 3.3 ชุดกรองความถี่ต่ำผ่านและชุดกรองความถี่สูงผ่าน[4]

วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำและกรองผ่านความถี่สูงที่ออกแบบวงจรแบบความต้านทานกับตัวเก็บประจุลำดับที่ 1 (First order) โดยกำหนดค่าความถี่ตัดข้ามค่าต่ำๆ มีค่าเป็นไปตามสมการ

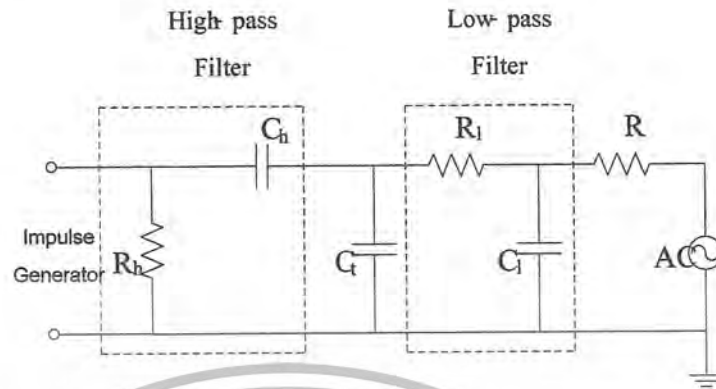
$$f_c = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \quad (3.1)$$

คุณสมบัติของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำคือจะยอมให้ความถี่ที่มีค่าไม่เกินความถี่ตัด (Cut-off frequency) ผ่านวงจรไปได้ก็ต่อเมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นถึงค่าความถี่ตัด ความถี่นั้นจะไม่สามารถผ่านวงจรไปได้ โดยจะถูกลดทอนลงเรื่อยๆ ตามอัตราความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่งได้ออกแบบโดยใช้ตัวต้านทานมาทำการต่ออนุกรมกันจำนวน 250 ตัว แต่ละตัวมีค่าความต้านทานเท่ากับ 2.2 k $\Omega$  ซึ่งจะได้ค่าความต้านทานรวมทั้งหมดเท่ากับ 550 k $\Omega$  และใช้ตัวเก็บประจุมาทำการต่ออนุกรมกันจำนวน 140 ตัว แต่ละตัวมีค่าเก็บประจุเท่ากับ 22 nF ซึ่งจะได้ค่าเก็บประจรรวมเท่ากับ 0.157 nF และเมื่อทำการคำนวณจากสมการที่ 3.1 จะได้ความถี่ตัดมีค่า 1843 Hz

คุณสมบัติของวงจรกรองผ่านความถี่สูงคือจะยอมให้ความถี่ที่มีค่าเกินความถี่ตัด (Cut-off frequency) ผ่านวงจรไปได้แต่เมื่อความถี่ค่าลดลงถึงความถี่ตัด ความถี่นั้นจะไม่สามารถผ่านวงจรไปได้โดยจะถูกลดทอนลงเรื่อยๆ ตามอัตราความถี่ที่ลดลง ซึ่งได้ออกแบบโดยใช้ตัวต้านทานมาทำการต่ออนุกรมกันจำนวน 250 ตัว แต่ละตัวมีค่าความต้านทานเท่ากับ 1 k $\Omega$  ซึ่งจะได้ค่าความต้านทานรวมทั้งหมดเท่ากับ 250 k $\Omega$  และใช้ตัวเก็บประจุมาทำการต่ออนุกรมกันจำนวน 140 ตัว แต่ละตัวมีค่าเก็บประจุเท่ากับ 220 nF ซึ่งจะได้ค่าเก็บประจรรวมเท่ากับ 1.57 nF และเมื่อทำการคำนวณจากสมการที่ 3.1 จะได้ความถี่ตัดมีค่า 405 Hz แสดงดังวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

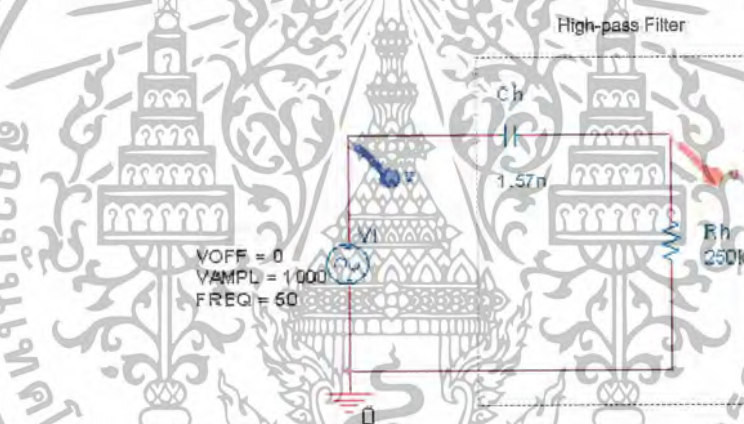
ตามภาพที่ 3.10 ซึ่งสามารถป้องกันแรงดันของแหล่งจ่ายทั้งสองด้านที่จะตกคร่อมซึ่งกันและกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 3.10 ชุดกรองผ่านความถี่ต่ำและชุดกรองผ่านความถี่สูง[4]

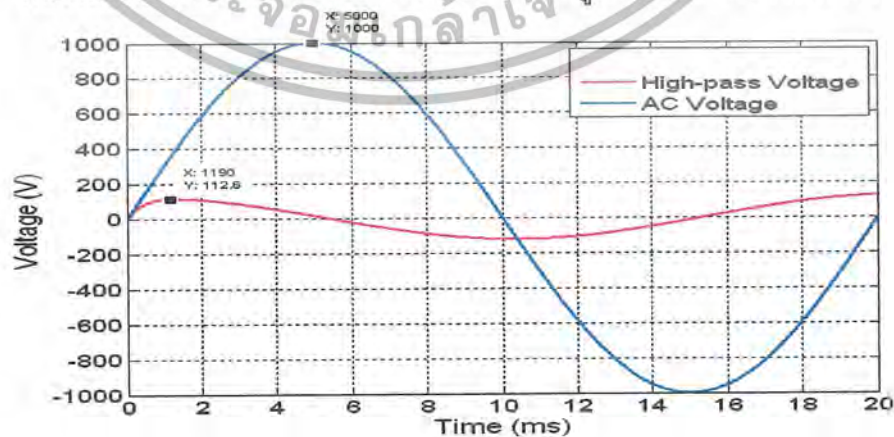
การจำลองวงจรกรองด้วยโปรแกรม Orcad

- วงจรกรองความถี่สูงผ่าน



ภาพที่ 3.11 การจำลองวงจรกรองความถี่สูงผ่านด้วยโปรแกรม Orcad

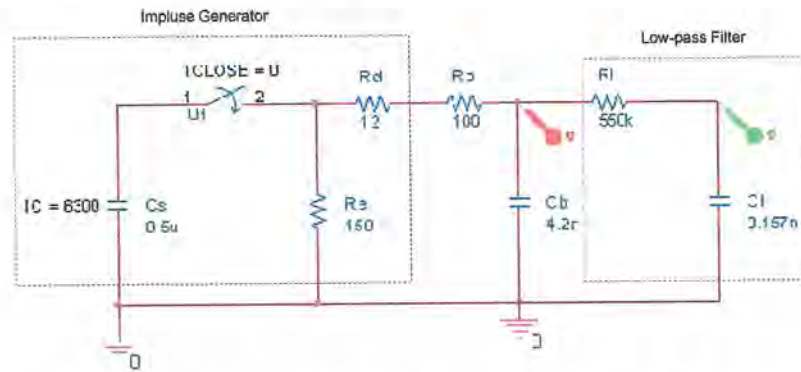
ผลจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่สูงผ่านแสดงดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 ผลจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

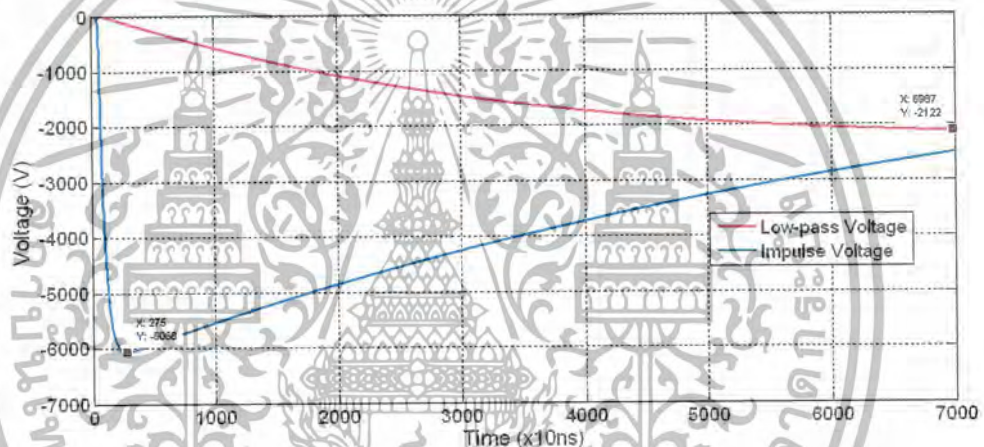
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### - วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



ภาพที่ 3.13 การจำลองวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านด้วยโปรแกรม Orcad

ผลจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแสดงดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 ผลจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

### 3.4 การออกแบบสร้างชุด Trigratron[5]

แรงดันอิมพัลส์ที่ถูกสร้างขึ้นโดยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์นั้น ควรจะต้องกำหนดหรือควบคุมได้ ทั้งนี้เพื่อให้แรงดันที่ป้อนเข้าไปที่วัสดุทดสอบหลายครั้งมีค่าคงที่ การควบคุมแรงดันนั้นสามารถทำได้โดยการใช้ชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เป็นตัวช่วยในการเริ่มเกิดคายประจุที่สปาร์กแก๊ปของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยบังคับจากระยะไกล ซึ่งการใช้ชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (Trigratron) เป็นตัวจุดชนวนนั้น จะทำให้เกิดการสปาร์กตามที่กำหนด และช่วยลดการกระจัดกระจายแรงดันจ่ายออก นั่นคือจะทำให้แรงดันทดสอบมีค่าที่ต้องการ

วงจรชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ที่ได้ทำการออกแบบ ประกอบด้วย 3 วงจรหลัก คือ วงจรกำเนิดแรงดันสูง วงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ และวงจรทวีแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1 การออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันสูง

วงจรกำเนิดแรงดันสูง ดังภาพที่ 3.15 จะประกอบด้วย แกนเหล็กเฟอไรต์ความถี่สูง ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำซึ่งเป็นขดลวด 2 ชุด คือขดลวดป้อนแรงดันเข้าเป็นด้านแรงดันต่ำกว่าอีกด้านหนึ่งที่เป็นขดลวดจ่ายแรงดันออกซึ่งเป็นขดลวดแรงสูง ขดลวดทั้งสองถ่ายทอดพลังงานทางสนามแม่เหล็กผ่านทางแกนเฟอไรต์ ขดลวดทางด้านป้อนแรงดันเข้า  $L_1$  จะต่อขนานกับตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทางด้านแรงสูงจะมีขดลวดแรงสูง  $L_2$  จากภาพที่ 3-15 เมื่อ  $C_1$  ได้รับการอัดประจุจากวงจรทวีแรงดันจนได้แรงดันตามต้องการแล้ว และเมื่อได้รับคำสั่งจากชุดวงจรสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นชุดสั่งให้เริ่มการทำงาน พลังงานที่เก็บไว้ในตัวเก็บประจุ  $C_1$  ในภาพสนามไฟฟ้า ก็จะถ่ายเทประจุให้กับขดลวด  $L_1$  และขดลวด  $L_1$  จะเก็บพลังงานในภาพสนามแม่เหล็กจนเต็มที่แล้ว  $L_1$  ก็จะถ่ายทอดพลังงานกลับมาให้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ใหม่ การถ่ายทอดพลังงานไปมาระหว่าง  $C_1$  กับ  $L_1$  จึงทำให้เกิดการแกว่ง(Oscillation)ขึ้น จะมีภาพคลื่นเป็นขบวนหน่วง(Damped train wave) ซึ่งกระแสจากการแกว่ง (Oscillation) ทางด้านแรงต่ำจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นทางด้านแรงสูง

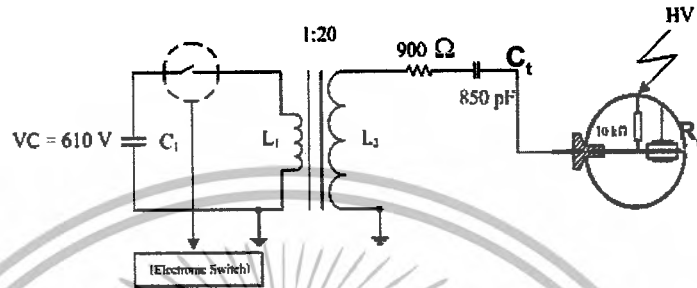
ชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์(trigatron) สามารถนำไปใช้ติดตั้งได้ทั้งสปาร์กแกปด้านแรงสูงและด้านกราวด์ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งข้อแตกต่างระหว่างการมีชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์อยู่ที่ศักย์ไฟฟ้าต่างกันคือ

- กรณีที่เมื่อต่อชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เข้าที่ด้านแรงสูง ต้องมีความต้านทาน  $R_f$  ดังภาพที่ 3.15 ก. ความต้านทาน  $R_f$  จะมีค่าเท่ากับ  $10 \text{ k}\Omega$  เพื่อใช้ในการชาร์จตัวเก็บประจุ  $C_f$  (trigatron capacitor) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $850 \text{ pF}$  ซึ่งจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าของทริกาตรอนอิเล็กทรอนิกส์โทรมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับช่องสปาร์กแกปทรงกลม ทำให้สามารถควบคุมการสปาร์กที่ช่องสปาร์กอากาศช่วยได้ แต่ถ้าไม่มีความต้านทาน  $R_f$  พอมีการชาร์จตัวเก็บประจุ  $C_f$  (ตัวเก็บประจุอิมพัลส์) จนสูงมากพอ จะทำให้เกิดการสปาร์กที่ช่องสปาร์กอากาศช่วยเอง โดยที่เรายังไม่ได้เริ่มสั่งการทำงานของชุดทริกาตรอน และแรงดันชาร์จยังไม่ถึงค่าที่ต้องการ ( $U_0$ )

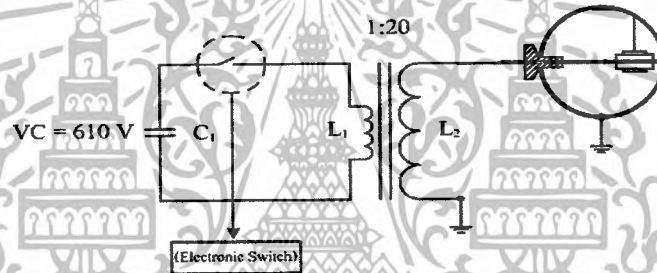
- กรณีเมื่อต่อชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เข้าที่ด้านกราวด์ ดังภาพที่ 3.15 ข. ไม่จำเป็นต้องมีความต้านทาน  $R_f$  และตัวเก็บประจุ  $C_f$  ทั้งนี้เนื่องจากก่อนการสั่งชุดทริกาตรอนให้ทำงาน สปาร์กแกปทรงกลมจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์โวลต์ แต่เมื่อเราสั่งให้ชุดทริกาตรอนทำงาน จะทำให้มีค่าแรงดันสัญญาณพัลส์ของชุดทริกาตรอนเท่ากับ  $12 \text{ kV}$  ทำให้มีความต่างศักย์เกิดขึ้นระหว่างทริกาตรอนอิเล็กทรอนิกส์โทรมและสปาร์กแกปทรงกลม จึงสามารถทำให้มีการสปาร์กที่ช่องอากาศช่วยได้ แต่จะต้องมีการกลับขั้วสัญญาณพัลส์ของชุดทริกาตรอนเพื่อทำให้เกิดการไอออไนเซชันระหว่างสปาร์กแกปทรงกลมทั้ง 2 ด้าน กล่าวคือ ถ้ายังแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก จะต้องกลับขั้วสัญญาณพัลส์ของชุดทริกาตรอนเป็นขั้วลบ

และถ้ายิงแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบ จะต้องกลับชั่วสัญญาณพัลส์ของชุดทริกาดรอนให้เป็นชั่วบวกเช่นกัน

การกลับชั่วสัญญาณพัลส์ของชุดทริกาดรอน ทำได้โดยการพันขดลวด  $L_1$  จำนวน 2 ขดให้สวนทางกัน จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งสวนทางกัน จากนั้นเส้นทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่ต่างกัน จะทำให้สามารถเลือกต่อเข้ากับขดลวด  $L_1$  ขดใดขดหนึ่งเพื่อเลือกกว่าจะให้สัญญาณพัลส์เป็นชั่วบวกหรือชั่วลบ



ก) เมื่อต่อชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เข้าที่ด้านแรงสูง



ข) เมื่อต่อชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เข้าที่ด้านกราวด์

ภาพที่ 3.15 วงจรกำเนิดแรงดันสูง

ในขั้นต้นจะกำหนดคุณสมบัติของชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันสูงของชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- ค่ายอดแรงดันของสัญญาณพัลส์ 12 KV
- ช่วง 1 คาบเวลาของสัญญาณพัลส์ 1  $\mu$ s
- ตัวเก็บประจุพลังงาน  $C_1$  2  $\mu$ F
- แรงดันอัดประจุ  $C_1$  610 V
- อัตราส่วนหม้อแปลงประมาณ 1:20

แรงดันที่เกิดขึ้นนั้นจะต้องมีหน้าคลื่นที่ไวพอ โดยเลือกที่ 250 ns ซึ่ง 1 คาบเวลาการแกว่งเป็น 1  $\mu$ s ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างตัวเก็บประจุ  $C_1$  และตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ซึ่งเลือกค่า

$C_1 = 2 \mu$ F สามารถคำนวณค่า  $L_1$  ได้ตามสมการที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_1 = \frac{1}{C_1} \left( \frac{\Gamma}{2\pi} \right)^2 \quad (3.2)$$

ได้ค่า  $L_1 = 12.66 \text{ nH}$  โดยเลือกอัตราส่วนหม้อแปลง ประมาณ 1:20 เนื่องจากวงจรทวีแรงดันที่แปลงไฟด้านขาเข้าประมาณ 610 V และต้องการแรงดันออกประมาณ 12 kV ฉะนั้นจึงกำหนดให้จำนวนรอบของขดลวดด้านแรงดันต่ำเท่ากับ 1 รอบ จำนวนรอบด้านแรงดันสูงอยู่ที่ 30 รอบ ผลการทดสอบจริงจะให้ค่ายอดภาพคลื่นเต็ม ดังแสดงผลในส่วนของกราฟทดลอง แต่ในความเป็นจริงแล้วแรงดันที่ใช้ในการเกิดสปาร์กที่แกปช่วยจะยังไม่ทันถึง 12 kV นั่นคือเวลาที่ใช้ในการสปาร์กแกปนั้นจะไม่ถึง 1 คาบด้วยเช่นกัน

จากสมการ 
$$L = \frac{N^2 \mu A_c}{l_c} \quad (3.3)$$

$L$	=	ค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า
$N$	=	จำนวนรอบขดลวด
$\mu$	=	ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแกนเหล็ก
$A_c$	=	พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก
$l_c$	=	ความยาวเฉลี่ยของแกนเหล็ก

กำหนด 
$$K = \frac{\mu A_c}{l_c} \quad (3.4)$$

ให้  $K$  เป็นค่าคงที่ เพราะฉะนั้น  $L \propto KN^2$  (3.5)

จากสมการที่ 3.5 จะเห็นว่าค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับกำลังสองของจำนวนรอบขดลวด ดังนั้น จากค่า  $L_1 = 12.66 \text{ nH}$  ที่จำนวนรอบด้านแรงต่ำ 1 รอบ และเมื่อเทียบกับจำนวนรอบด้านแรงสูงที่ 30 รอบ จะได้ค่า  $L_2 = 11.4 \text{ } \mu\text{H}$

#### 3.4.2 การออกแบบวงจรชุดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์

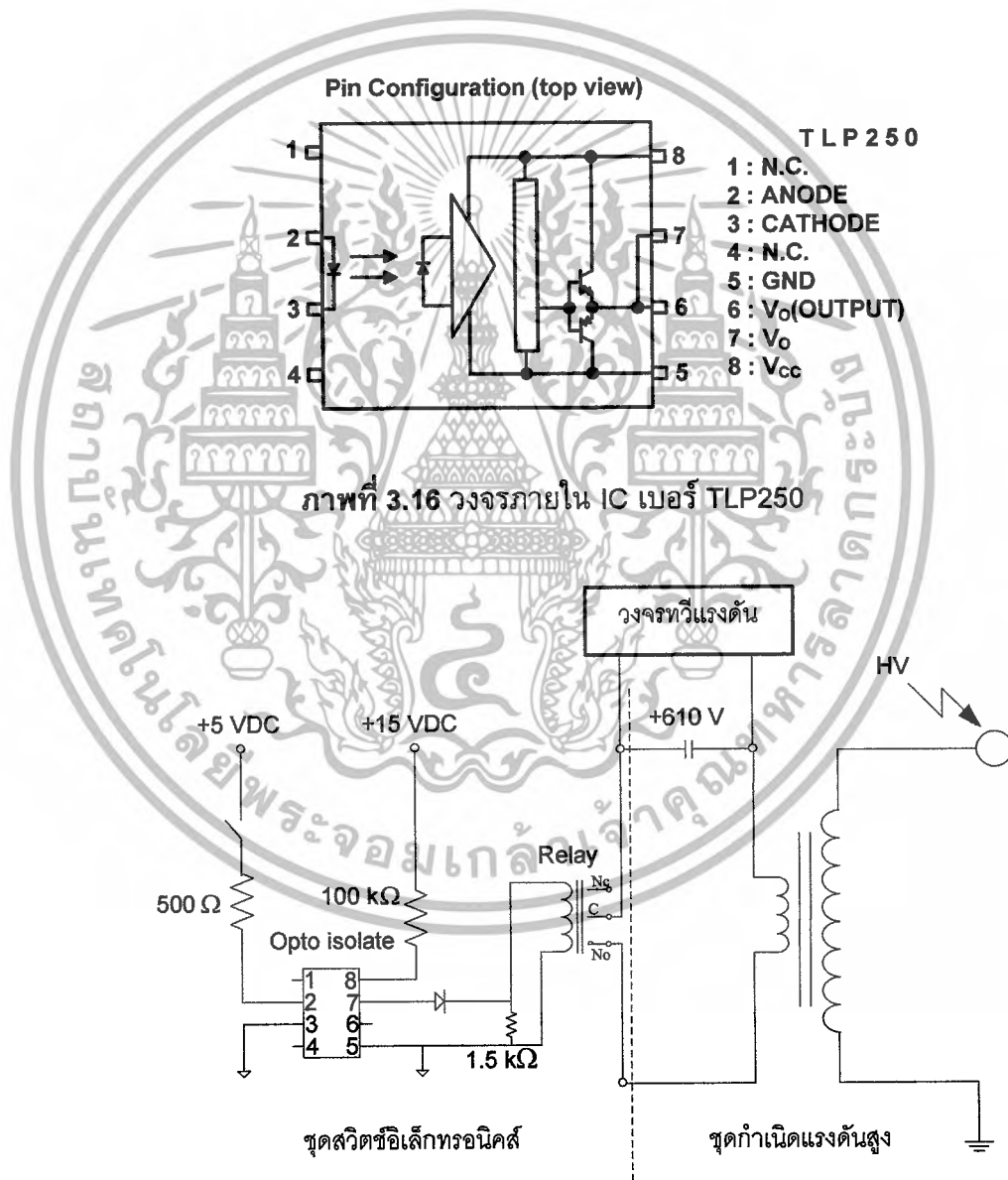
รีเลย์ในวงจรชุดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิด-ปิดวงจร โดยจะต้องได้รับคำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ก่อนจึงจะทำงาน และเมื่อรีเลย์ทำการปิดวงจรจะทำให้มีการถ่ายเทพลังงานจากตัวเก็บประจุที่อัดประจุไฟฟ้าไปยังตัวเหนี่ยวนำผ่านทางหม้อแปลงความถี่สูง

การควบคุมการเปิด-ปิดวงจรของรีเลย์ จะใช้หลักการควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำของรีเลย์ ทำให้เกิดแรงจากสนามแม่เหล็กไปกระทำกับหน้าสัมผัส

โดยจะใช้วงจรแยกทางแสง (Opto isolate) ในการควบคุมรีเลย์ซึ่งจะใช้ IC เบอร์ TLP250 เป็นตัวสร้างพัลส์ไปที่ขาขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งมีการทำงานดังนี้ เมื่อไม่มีกระแสไบอัสหลอด LED ในขาที่ 2 และขาที่ 3 จะทำให้แรงดันระหว่างขาที่ 7 กับขาที่ 5 มีค่าเป็น 0 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เมื่อมีกระแสไบอัสเข้ามาที่ขา 2 และ ขาที่ 3 จนทำให้หลอด LED เปล่งแสง จะทำให้ขาที่ 7 และขาที่ 8 เสมือนลัดวงจรถึงกัน ทำให้มีแรงดันตกคร่อมระหว่างขาที่ 7 กับขาที่ 5 ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมระหว่างขาที่ 8 กับขาที่ 5 การทำงานของ IC เบอร์ TLP250 จึงเสมือนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่ควบคุมได้ คุณสมบัติทางไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 3-1 ความต้านทาน  $500\ \Omega$  จะจำกัดกระแสไบอัสของหลอด LED ไม่ให้สูงเกินไป ค่าความต้านทาน  $100\ \Omega$  เป็นค่าความต้านทานขาออกเพื่อช่วยให้แรงดันตกคร่อมระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าสูงพอที่จะสร้างสนามแม่เหล็กให้มีแรงพอที่จะทำให้หน้าสัมผัสทำงานได้ วงจรชุดสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังภาพที่ 3.17



**ภาพที่ 3.17 ชุดสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับควบคุมการกำเนิดแรงดันสูง**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ IC เบอร์ TLP250

**TOSHIBA**

TLP250

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $T_a = -20\sim 70^\circ\text{C}$ , Unless otherwise specified)

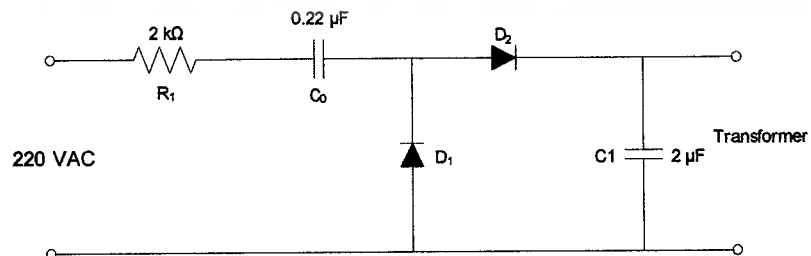
CHARACTERISTIC	SYMBOL	TEST CIRCUIT	TEST CONDITION	MIN	TYP.	MAX	UNIT		
Input Forward Voltage	$V_F$	—	$I_F = 10 \text{ mA}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$	—	1.6	1.8	V		
Temperature Coefficient of Forward Voltage	$\Delta V_F / \Delta T_a$	—	$I_F = 10 \text{ mA}$	—	-2.0	—	mV/°C		
Input Reverse Current	$I_R$	—	$V_R = 5 \text{ V}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$	—	—	10	$\mu\text{A}$		
Input Capacitance	$C_T$	—	$V = 0$ , $f = 1 \text{ MHz}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$	—	45	250	pF		
Output Current	"H" Level	$I_{OH}$	2	$V_{CC} = 30 \text{ V}$ (*1)	$I_F = 10 \text{ mA}$ $V_{\theta-} = 4 \text{ V}$	-1.0	-1.5	A	
	"L" Level	$I_{OL}$	1		$I_F = 0$ $V_{\theta-} = 2.5 \text{ V}$	1.0	2		—
Output Voltage	"H" Level	$V_{OH}$	3	$V_{CC1} = +15 \text{ V}$ $V_{EE1} = -15 \text{ V}$ $R_L = 200\Omega$ , $I_F = 5 \text{ mA}$	11	12.8	—	V	
	"L" Level	$V_{OL}$	4		$V_{CC1} = +15 \text{ V}$ $V_{EE1} = -15 \text{ V}$ $R_L = 200\Omega$ , $V_F = 0.8 \text{ V}$	—	-14.2		-12.5
Supply Current	"H" Level	$I_{CC+}$	—	$V_{CC} = 30 \text{ V}$	$I_F = 10 \text{ mA}$ $T_a = 25^\circ\text{C}$	—	7	mA	
	"H" Level	$I_{CC+}$	—		$I_F = 10 \text{ mA}$	—	—		11
	"L" Level	$I_{CC-}$	—		$I_F = 0 \text{ mA}$ $T_a = 25^\circ\text{C}$	—	7.5		—
Threshold Input Current	L→H	$I_{FH}$	—	$V_{CC1} = +15 \text{ V}$ $V_{EE1} = -15 \text{ V}$ $R_L = 200\Omega$ , $V_O > 0\text{V}$	—	1.2	5	mA	
	H→L	$I_{FL}$	—		$V_{CC1} = +15 \text{ V}$ $V_{EE1} = -15 \text{ V}$ $R_L = 200\Omega$ , $V_O < 0\text{V}$	0.8	—		—
Threshold Input Voltage	H→L	$V_{FHL}$	—	$V_{CC1} = +15 \text{ V}$ $V_{EE1} = -15 \text{ V}$ $R_L = 200\Omega$ , $V_O < 0\text{V}$	0.8	—	—	V	
Supply Voltage	$V_{CC}$	—	—	—	10	—	35	V	
Capacitance (Input-Output)	$C_0$	—	$V_S = 0$ , $f = 1 \text{ MHz}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$	—	1.0	2.0	pF		
Resistance (Input-Output)	$R_S$	—	$V_S = 500 \text{ V}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$ $R_{H.L.} \leq 60\%$	$1 \times 10^{12}$	$10^{14}$	—	$\Omega$		

(\*): All typical values are at  $T_a = 25^\circ\text{C}$

(\*1): Duration of IO time  $\leq 50\mu\text{s}$

### 3.4.3 การออกแบบวงจรตีแรงดัน

วงจรในภาพที่ 3.18 ซึ่งประกอบไปด้วยไดโอด  $D_1$  และตัวเก็บประจุ  $C_0$  จะช่วยให้สามารถสร้างแรงดันได้สูงขึ้นเป็น 2 เท่าของค่ายอดแรงดันด้านจ่ายออกของหม้อแปลง โดยไดโอดจะต้องทนแรงดันได้อย่างน้อย 2 เท่าของค่ายอดแรงดัน ฉะนั้นถ้าเอาแรงดันนี้ไปผ่านเรกติฟายเออร์ ที่มีไดโอด  $D_2$  และตัวเก็บประจุกรองกระแส  $C_1$  ก็จะทำให้ได้แรงดันกระแสตรงสูงเป็น 2 เท่าของแรงดันค่ายอดของหม้อแปลงด้านจ่ายกำลังออก โดยตัวเก็บประจุกรองกระแส  $C_1$  ในวงจรตีแรงดันจะใช้เป็นตัวเก็บประจุ  $C_1$  ในวงจรกำเนิดแรงดันสูง ดังแสดงในภาพที่ 3.17



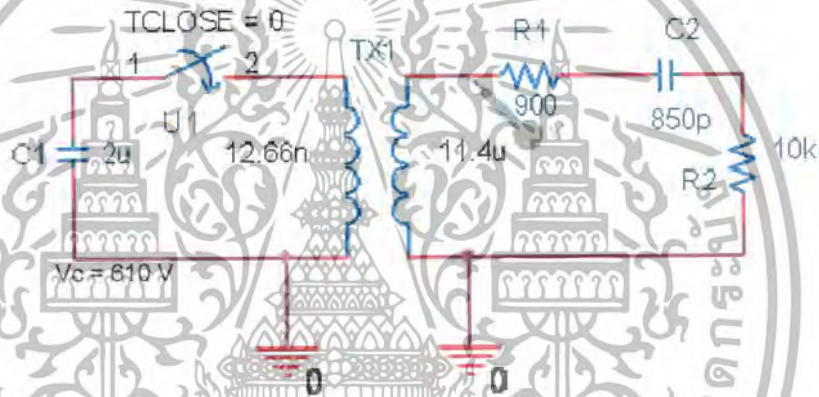
ภาพที่ 3.18 วงจรตีแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### - ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

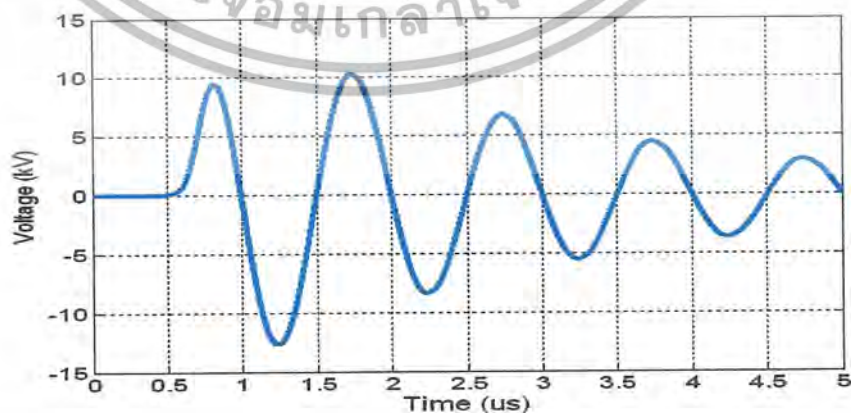
จากข้อมูลเบื้องต้นของการออกแบบชุดทรานซิสเตอร์นั้น เมื่อนำมาจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ดังภาพที่ 3.19 จะได้ผลของการจำลองแสดงดังภาพที่ 3.20 ข้อมูลของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์[5]

- ตัวเก็บประจุพลังงาน  $C_1 = 2 \mu\text{F}$
- แรงดันอัดประจุ  $C_1 = 610 \text{ VDC}$
- switch time close = 0 s
- ค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าด้านแรงต่ำ  $L_1 = 12.66 \text{ nH}$
- ค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าด้านแรงสูง  $L_2 = 11.4 \mu\text{H}$
- ค่าความต้านทานด้านแรงดันสูง  $R_1 = 900 \Omega$  และ  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$
- ค่าเก็บประจุ  $C_2 = 850 \text{ pF}$



ภาพที่ 3.19 วงจรที่ใช้ในการจำลองสร้างสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ขั้วบนแรงดันกระแสสลับ

ภาพคลื่นสัญญาณเริ่มต้นที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



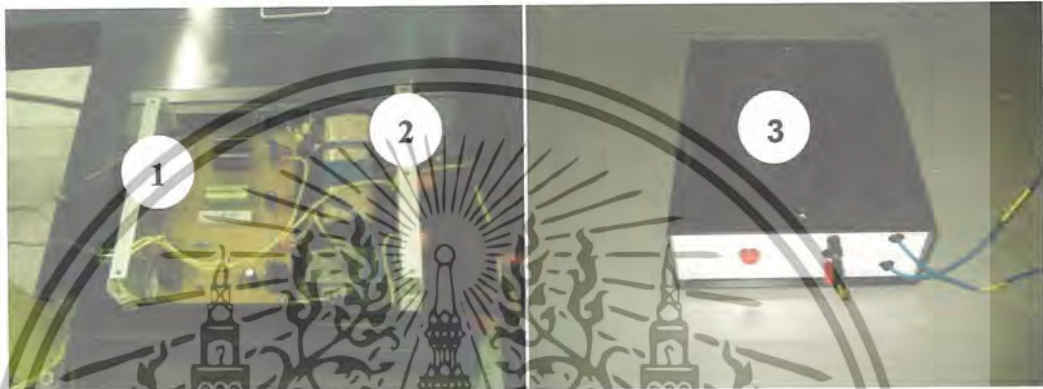
ภาพที่ 3.20 ผลของการจำลองภาพคลื่นสัญญาณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 3.2 ข้อมูลผลการจำลองภาพคลื่นเต็ม

แรงดันค่ายอด	12.4 kV
ช่วงเวลาหน้าคลื่น	319 ns
ช่วง 1 คาบเวลา	1 us

-วงจรกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นที่ได้ออกแบบสร้าง

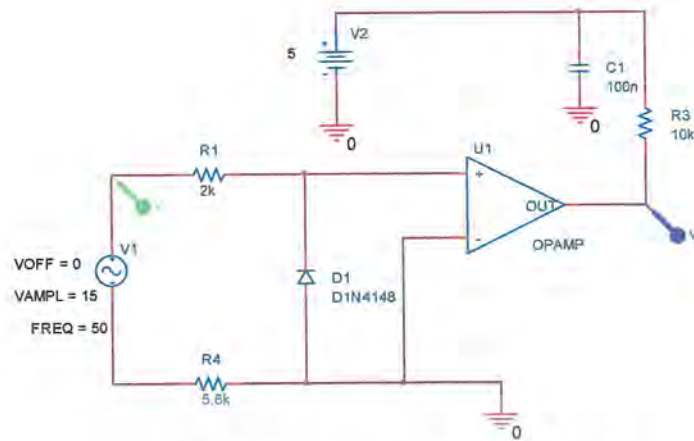


ภาพที่ 3.21 วงจรกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์  
1) ชุดวงจรควบคุม 2) ชุดกำเนิดแรงดันสูง 3) ชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นที่สมบูรณ์

#### 3.4.4 การออกแบบสร้างชุดตรวจจับผ่านศูนย์[6]

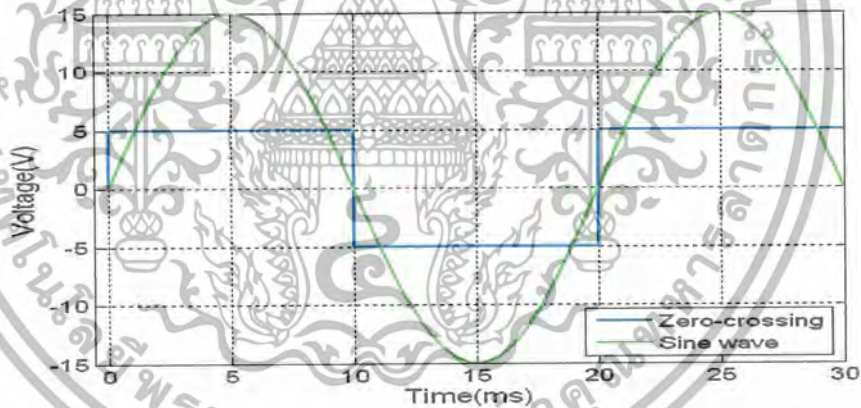
เนื่องจากการที่จะทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถที่จะสั่งให้มีการส่งสัญญาณกระตุ้นการทำงานให้กับชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยสามารถที่จะเลือกมุมได้นั้นจำเป็นจะต้องมีการอ้างอิงมุมของแรงดันกระแสสลับ 220 V ซึ่งมุมที่นำมาทำการอ้างอิงนั้นเป็นมุม 0 องศาและ 180 องศา จึงได้มีการนำวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero-crossing) มาทำการตรวจจับเพื่อเป็นตัวอ้างอิงให้กับชุดไมโครคอนโทรลเลอร์โดยเมื่อภาพคลื่นแรงดันกระแสสลับ 220 V อยู่ที่มุม 0 องศาจะทำให้ตัวตรวจจับสร้างสัญญาณพัลส์ขึ้นมา และเมื่ออยู่ที่มุม 180 องศาตัวตรวจจับก็จะสร้างสัญญาณพัลส์ขึ้นมาเช่นกันทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์รู้ว่าขณะนี้แรงดันอยู่ที่มุมที่เท่าใด โดยมีวงจรดังภาพที่ 3.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.22 แสดงชุดตรวจจับผ่านศูนย์[7]

ชุดตรวจจับผ่านศูนย์จะได้รับสัญญาณอินพุตจากหม้อแปลง 220/15 V ในลักษณะไซน์เวฟ โดยผ่านความต้านทาน 2 k $\Omega$  และ 5.6 k $\Omega$  และสัญญาณดังกล่าวจะถูกเรกติไฟร์ด้วยไดโอดในลักษณะฮาล์ฟบริดจ์ จากนั้นสัญญาณจะถูกปรับขนาดให้เหมาะสมด้วยออปแอมป์ LM393 เพื่อส่งให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลซึ่งภาพคลื่นที่ชุดตรวจจับผ่านศูนย์สร้างออกมามีลักษณะดังภาพที่ 3.23

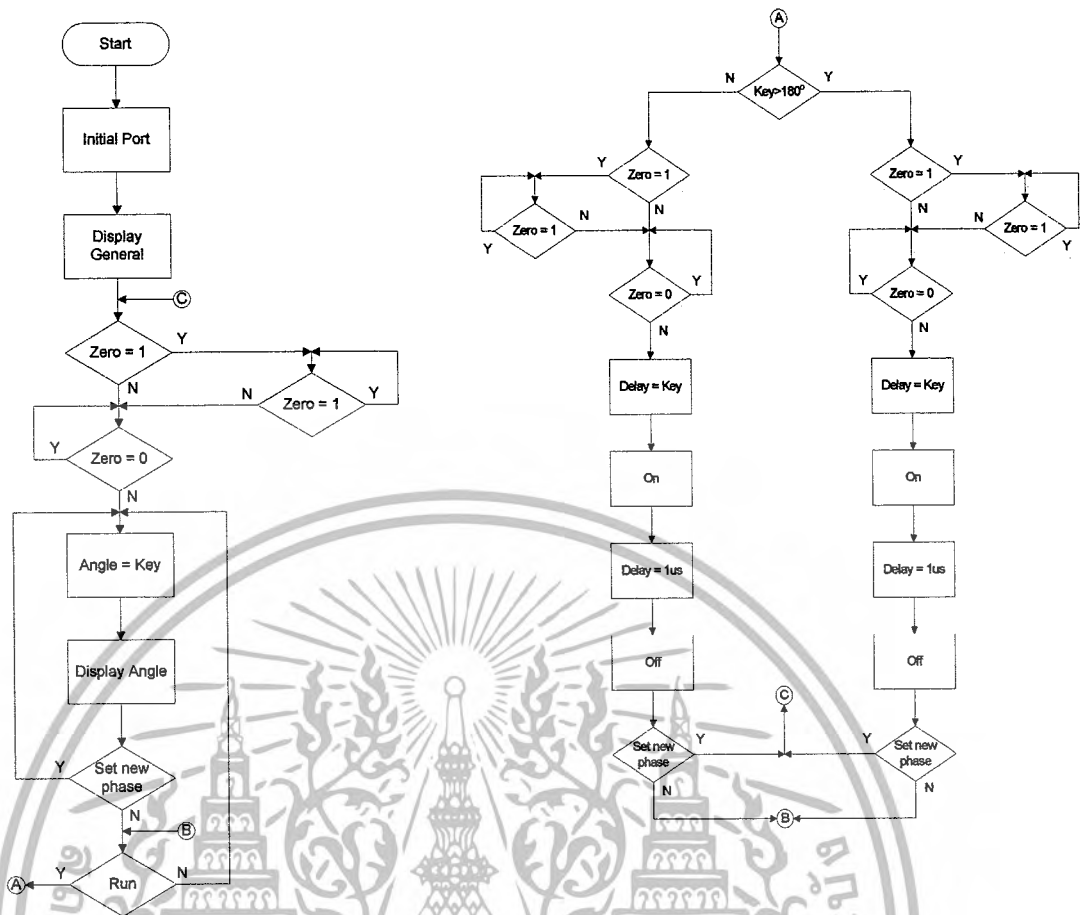


ภาพที่ 3.23 แสดงภาพคลื่นที่ชุดตรวจจับผ่านศูนย์สร้างออกมา

#### 3.4.5 การออกแบบสร้างชุดควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในส่วนของชุดควบคุม จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นวงจรควบคุมการทำงาน โดยจะรับค่าจากชุดตรวจจับ ซึ่งเป็นตัวอ้างอิงมุมของแรงดันให้เท่ากับระหว่างมุมของแรงดันกระแสสลับและมุมที่ไม่โครต้องการพร้อมกับรับค่าการกดสวิตช์ควบคุมจากคีย์แพด และส่งข้อมูลออกแสดงผลการทำงานที่แอลซีดีและแอลอีดี ในส่วนของซอฟต์แวร์นั้นสามารถอธิบายตามโพลีชาร์ตในภาพที่ 3.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.24 แสดงโฟลว์ชาร์ตของชุดควบคุม

หมายเหตุ คำที่ใช้สื่อความหมายในโฟลว์ชาร์ตอธิบายได้ดังนี้

- Initial Port หมายถึง การกำหนดสถานะของขาสัญญาณของไมโครคอนโทรลเลอร์
- Display General หมายถึง การแสดงผลการเริ่มทำงานของโปรแกรม
- Zero หมายถึง สัญญาณ Zero-crossing
- Angle = Key หมายถึง การปรับค่าของมุมเฟสที่ต้องการ (คือ 0,5,10...360) ด้วยการปรับที่คีย์แพด
- Display Angle หมายถึง การแสดงผลมุมที่ได้ทำการเลือกไว้
- Set new phase หมายถึง การเลือกมุมที่ต้องการใหม่
- OFF หมายถึง การหยุดจ่ายสัญญาณที่ขั้วรีเลย์
- ON หมายถึง การจ่ายสัญญาณที่ขั้วรีเลย์
- Delay หมายถึง การรอเวลาให้ไอซีบีทีทำงานค้าง
- RUN หมายถึง การเริ่มโปรแกรมจ่ายสัญญาณให้กับรีเลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### แนวคิดในการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์[6]

ในการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อนำมาควบคุมเฟสเพราะมีความรวดเร็วมากเมื่อเทียบกับความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V ซึ่งมีค่าเท่ากับ 50 Hz และโดยปกติคริสตอลที่ใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีค่าประมาณ 4 - 20 MHz ซึ่งมากพอในการประมวลผล

ในการที่จะอ้างอิงความถี่จะใช้ชุดตรวจจับผ่านศูนย์มาเป็นชุดตรวจจับเพื่อส่งสัญญาณไปให้ไมโครรู้ถึงสถานะของเฟสที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน และเมื่อทำการเปลี่ยนความถี่ให้อยู่ในภาพของคาบเวลาจะได้ 20 ms จาก

$$T = \frac{1}{f} \quad (3-6)$$

จากนั้นก็มาพิจารณาช่วงคาบเวลาของความถี่ 50 Hz ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็นสองช่วงคือ ช่วงบวกและช่วงลบช่วงละ 10 ms และในการสร้างชุดควบคุมนี้จะต้องทำการปรับมุมได้ตั้งแต่ 0 - 360 องศา เมื่อทำการคำนวณหามุมที่ 1 องศาจะต้องใช้เวลาเท่ากับ 55.555  $\mu$ s จากนั้นก็จะทำการเขียนโปรแกรมควบคุมให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ให้ทำงาน ณ ตำแหน่งมุมเฟสที่ต้องการ

ตัวอย่าง เราต้องการควบคุมมุมเฟสที่ตำแหน่ง 90 องศา

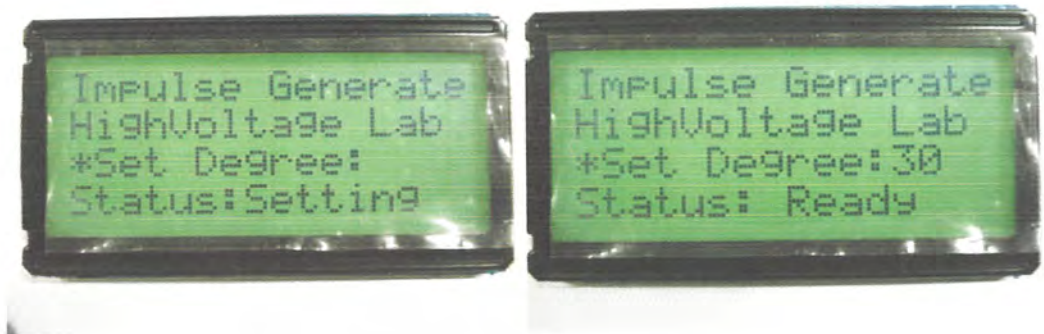
1. รับสัญญาณจากชุดตรวจจับผ่านศูนย์ว่าเป็นช่วงบวกหรือลบเพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์จึงสร้างวงจรให้สร้างสัญญาณสองลักษณะคือช่วงบวกจะเป็นลอจิก 1 และช่วงลบจะเป็นลอจิก 0
2. นำค่าหน่วยเวลาที่คำนวณได้คือ 4.99995 ms ไปตั้งในโปรแกรมหน่วยเวลา และเมื่อหน่วยเวลาดิ้นสุดไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะทำการสร้างสัญญาณไปสั่งให้รีเลย์ทำงาน



ก)

ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค)

ง)



จ)

ภาพที่ 3.25 ชุดควบคุมมมุทริก ก)วงจรภายในชุดควบคุมมมุทริก  
 ข)ชุดควบคุมมมุทริกที่สมบรูณ์ ค)สถานเริ่มต่นการทำงาน  
 ง)สถานะพร้อมทำงาน จ)สถานะทำงานสมบรูณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดสอบและประเมินผล

เพื่อเป็นการยืนยันในหลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ จึงมีความจำเป็นต้องทำการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้ โดยจะทำการแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 ส่วนหลักๆดังนี้

1. การทดสอบชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ
  - ผลการทดสอบจริงที่วัดได้ด้วยออสซิลโลสโคป
2. การทดสอบชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน
  - ผลการทดสอบจริงที่วัดได้ด้วยออสซิลโลสโคป
3. การทดสอบชุดกรองความถี่สูงผ่าน
  - ผลการทดสอบจริงที่วัดได้ด้วยออสซิลโลสโคป
4. การทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ
  - 1) ใช้ R-C Filter เป็นชุดกรองความถี่สูงผ่าน
    - ผลการทดสอบจริงที่วัดได้ด้วยออสซิลโลสโคป
  - 2) ใช้แกปทรงกลมเป็นชุดป้องกันแรงดันกระแสสลับ
    - ผลการทดสอบจริงที่วัดได้ด้วยออสซิลโลสโคป
  - 3) เปรียบเทียบผลระหว่างการใช้ R-C Filter กับ แกปทรงกลม

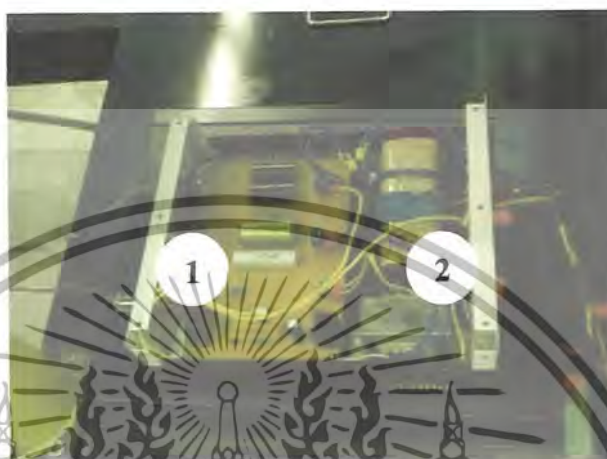
#### 4.1 การทดสอบชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับการทดสอบจริงจะมีตัวแปรที่ทำการพิจารณาอยู่ 3 ตัวแปรคือ

1. ค่ายอดแรงดันของสัญญาณพัลส์ จะต้องมียอด 12 kV
2. ช่วง 1 คาบเวลาของสัญญาณพัลส์ จะต้องมียอดประมาณ 1  $\mu$ s หรือ ช่วงเวลาน้ำคลื่นประมาณ 300 ns
3. มุมที่ทำการสั่งให้มีการกำเนิดสัญญาณเริ่มต้น

ซึ่งตัวแปรทั้ง 3 ตัวที่ทำการพิจารณานั้น จะต้องมียอดใกล้เคียงกับเงื่อนไขที่กำหนดในตอนต้นที่ได้ทำการออกแบบไว้

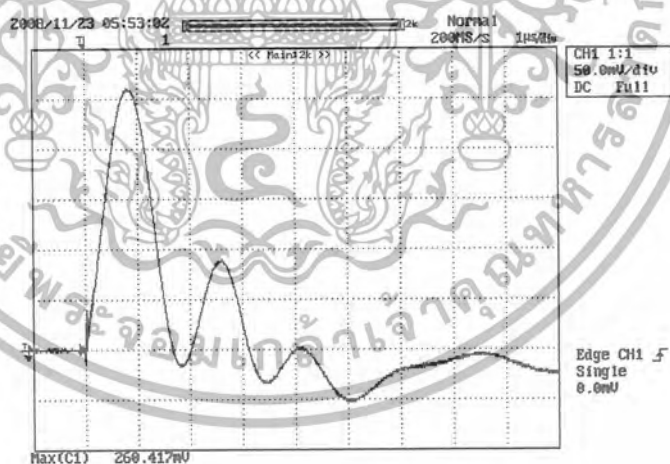
วงจรชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ได้  
ออกแบบ



ภาพที่ 4.1 วงจรกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

1) ชุดวงจรควบคุม 2) ชุดกำเนิดแรงดันสูง

- ผลการทดสอบจริงที่วัดได้ด้วยออสซิลโลสโคป

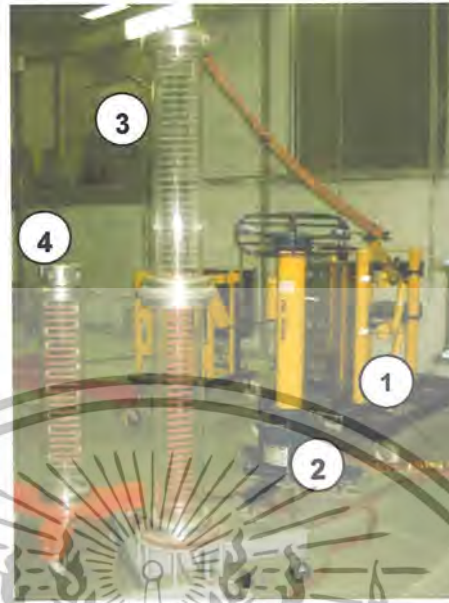


ภาพที่ 4.2 ภาพคลื่นเต็มที่วัดได้จากชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้น

จากผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่าลักษณะภาพร่างของภาพคลื่นที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ กับการทดสอบจริงนั้นจะแตกต่างกัน แต่ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการพิจารณา คือแรงดันค่ายอดและช่วงเวลาหน้าคลื่น จากผลการทดสอบมีค่าแรงดันค่ายอด 12.2 kV และช่วงเวลาหน้าคลื่น 850 ns ช่วง 1 คาบเวลา เท่ากับ 1.7  $\mu$ s การทดสอบนั้นจะเห็นได้ว่า ข้อมูลที่ได้มีความใกล้เคียงกันกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในบทที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การทดสอบชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน

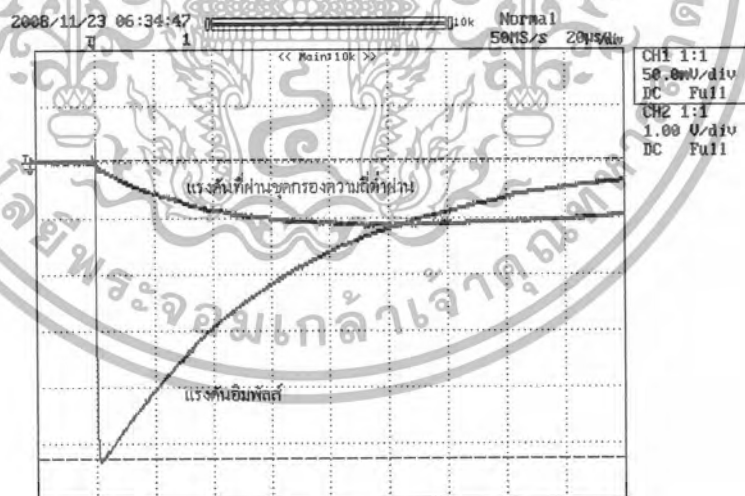


ภาพที่ 4.3 วงจรการทดสอบชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน

1) ชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 2) อิมพัลส์โวลต์เกจดีไวเดอร์

3) ชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน 4) โวลต์เกจดีไวเดอร์วัดแรงดันที่ผ่านชุดกรอง

- ผลการทดสอบชุดกรองความถี่ต่ำผ่านจริงที่วัดได้ด้วยออสซิลโลสโคป

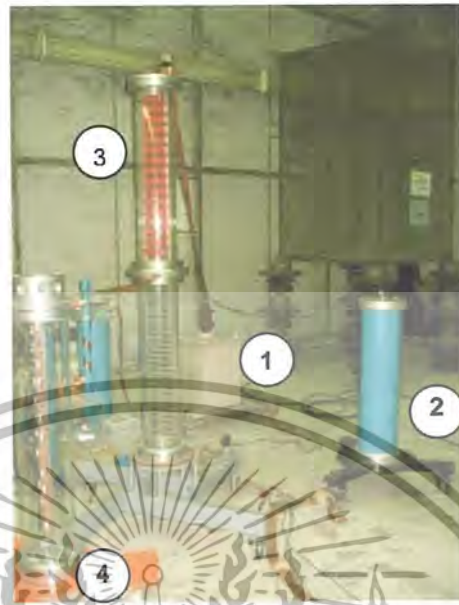


ภาพที่ 4.4 ผลการทดสอบชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน

จากผลการทดสอบจะพบว่าลักษณะภาพคลื่นที่ได้จากการทดสอบจริงนั้นมีลักษณะใกล้เคียงกับผลที่ได้ทำการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในบทที่ 3 โดยในการทดสอบจริงนั้นจะได้แรงดันค่ายอดเท่ากับ 6 kV และค่าแรงดันที่สามารถผ่านชุดกรองความถี่ต่ำมาได้มีค่าเท่ากับ 2.4 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

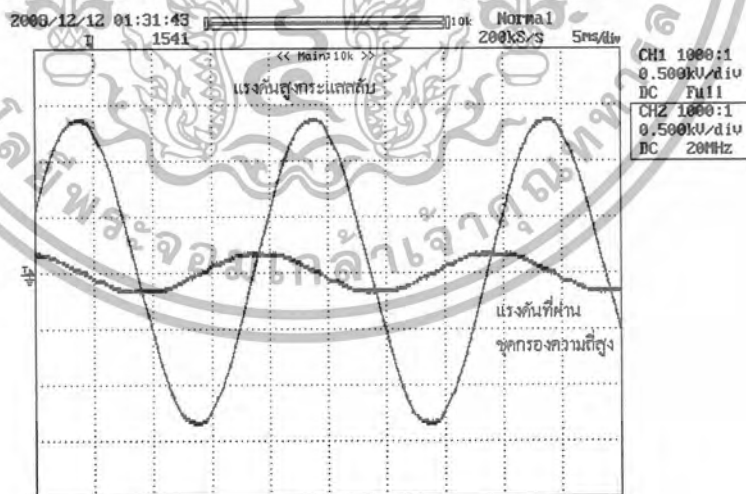
### 4.3 การทดสอบชุดกรองความถี่สูงผ่าน



ภาพที่ 4.5 วงจรการทดสอบชุดกรองความถี่สูงผ่าน

- 1) ชุดกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ 2) โวลท์เตจดีไวเดอร์วัตแรงต้นกระแสสลับ
- 3) ชุดกรองความถี่สูงผ่าน 4) โวลท์เตจดีไวเดอร์วัตแรงต้นที่ผ่านชุดกรอง

- ผลการทดสอบชุดกรองความถี่ต่ำผ่านจริงที่วัดได้ด้วยออสซิลโลสโคป



ภาพที่ 4.6 ผลการทดสอบชุดกรองความถี่สูงผ่าน

จากผลการทดสอบจะพบว่าลักษณะภาพคลื่นที่ได้จากการทดสอบจริงนั้นมีลักษณะ

ใกล้เคียงกับผลที่ได้ทำการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในบทที่ 3 โดยในการทดสอบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นจะได้แรงดันค่ายอดเท่ากับ 1 kV และค่าแรงดันที่สามารถผ่านชุดกรองความถี่สูงมาได้มีค่าเท่ากับ 120 V

#### 4.4 การทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทึบซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

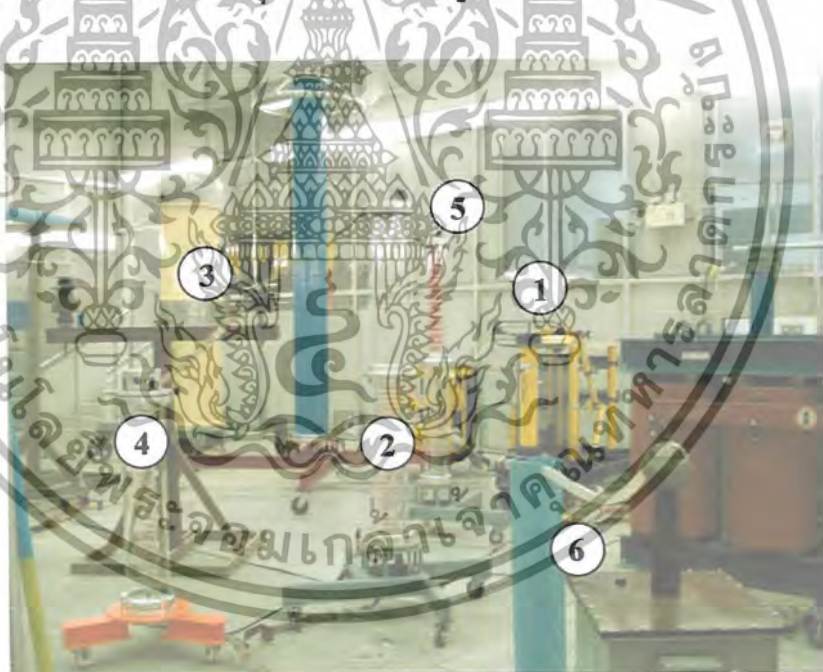
ในการทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทึบซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ได้มีการนำชุดสร้างสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทึบซ้อนบนแรงดันกระแสสลับซึ่งทำการควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 200 kV 5 kJ ของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งในการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับการทดสอบจริงจะมีตัวแปรที่ทำการพิจารณาอยู่ 2 ตัวคือ

1. ค่าแรงดันจะต้องมีค่ายอดประมาณ 6 kV

2. มุมทึบซ้อนต้องใกล้เคียงกัน

ซึ่งทั้ง 2 ตัวแปรจะต้องค่าใกล้เคียงกับเงื่อนไขที่ทำการกำหนดในตอนต้นที่ได้ทำการออกแบบไว้

##### 4.4.1 ใช้ R-C Filter เป็นชุดกรองความถี่สูงผ่าน

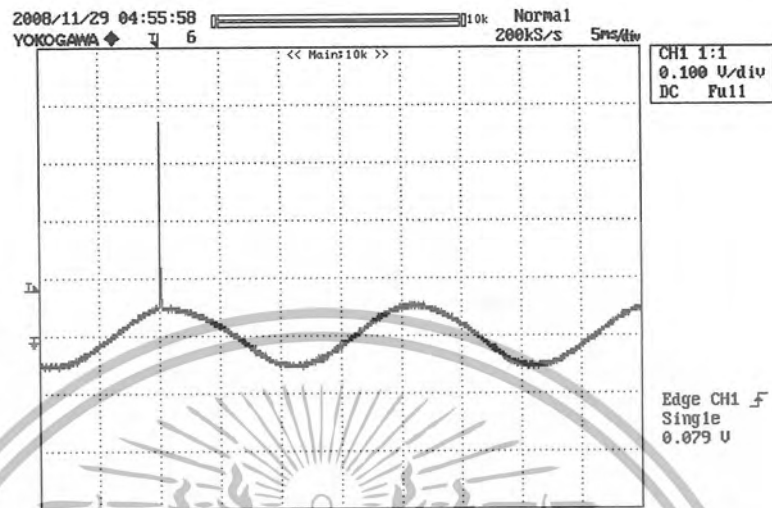


ภาพที่ 4.7 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทึบซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

- 1) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 2) ชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน 3) วัตถุทดสอบ  
4) โวลท์เตจดีไวเดอร์ 5) ชุดกรองความถี่สูงผ่าน(R-C Filter)  
6) ชุดกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ

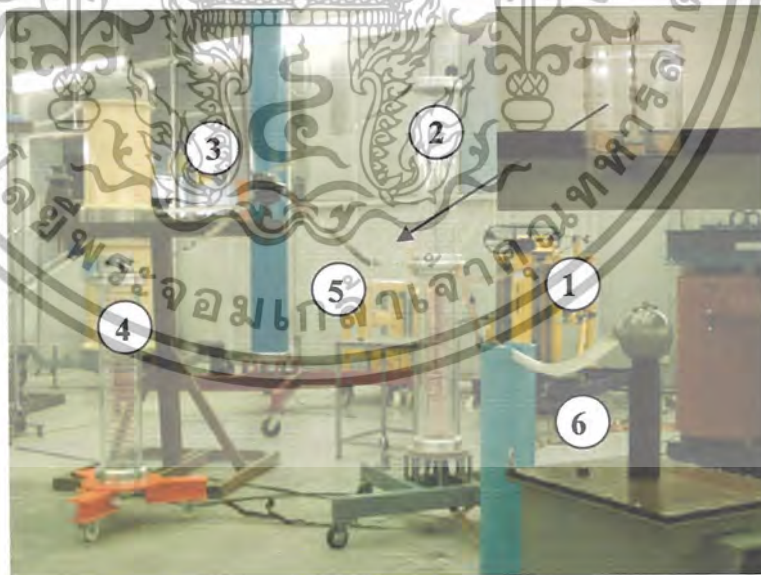
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลการทดสอบจริงที่วัดได้ด้วยออสซิลโลสโคป



ภาพที่ 4.8 ภาพคลื่นเต็มที่วัดได้กรณีแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 90 องศา

4.4.2 ใช้แถบทรงกลมเป็นตัวป้องกันแรงดันกระแสสลับ

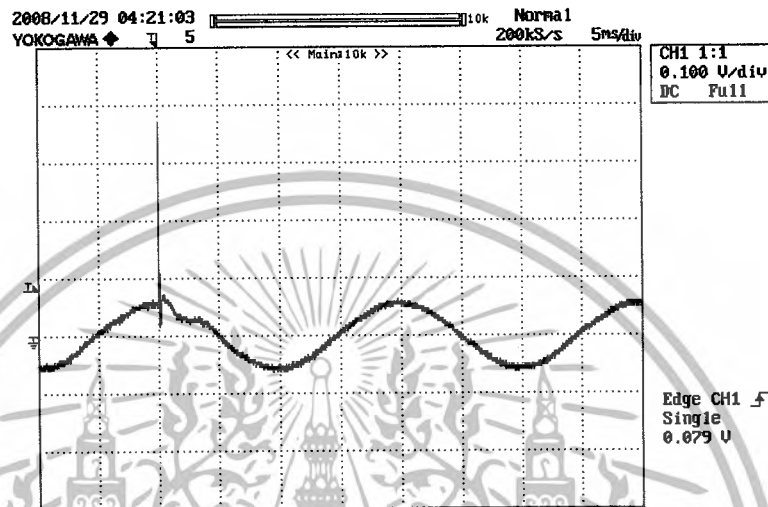


ภาพที่ 4.9 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ(ใช้แถบป้องกันแรงดัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 2) ชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน 3) วัตต์ทดสอบ 4) โวลต์เดจิติไวเดอ์
- 5) ชุดป้องกันแรงดันกระแสสลับ(ແກ່ປຸງກຸລຸມເສັ້ນຜ່ານສູນຍຸ້ງກາງ 20 ມມ. ມີຮະຍະແກ່ປ 0.35 ມມ.)
- 6) ชุดกำเนิดแรงดันกระแสสลับ

- ผลการทดสอบจริงที่วัดได้ด้วยออสซิลโลสโคป



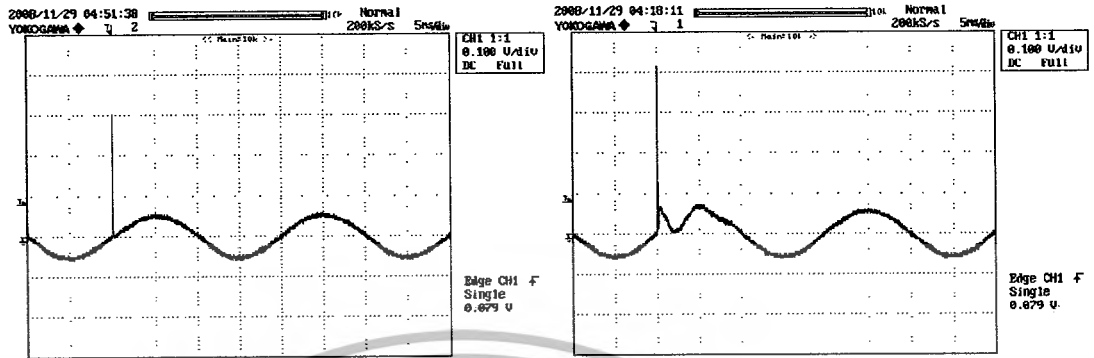
ภาพที่ 4.10 ภาพคลื่นเต็มที่วัดได้กรณีแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 90 องศา

จากผลการทดสอบทั้ง 2 กรณีพบว่าลักษณะรูปร่างของรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ กับการทดสอบจริงนั้นค่าใกล้เคียงกัน เพราะฉะนั้นจึงสามารถยืนยันหลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับได้เป็นอย่างดี

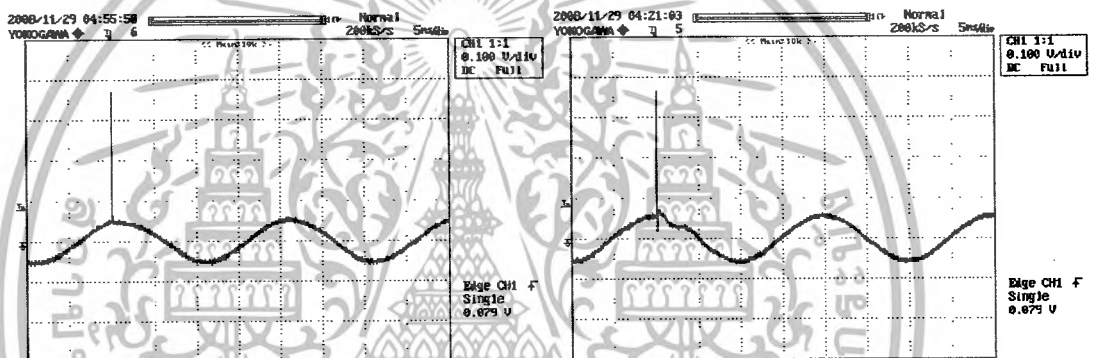
#### 4.4.3 เปรียบเทียบผลระหว่างการใช้ R-C Filter กับ แก่งทรงกลม

จากการทดสอบในหัวข้อที่ 4.4.1 และหัวข้อที่ 4.4.2 นั้นเมื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบจริงมาพิจารณาจะพบว่า ลักษณะของภาพคลื่นที่ได้นั้นมีความแตกต่างกัน ดังนั้นในหัวข้อที่ 4.4.3 นี้จะนำผลที่ได้จากการทดสอบมาทำการเปรียบเทียบให้เห็นถึงข้อแตกต่างที่ชัดเจน โดยที่ภาพคลื่นที่ได้จากการทดสอบด้วย R-C Filter จะแสดงทางด้านซ้ายมือ และภาพคลื่นที่ได้จากการใช้แ่งทรงกลมเป็นตัวป้องกันแรงดันกระแสสลับจะแสดงทางด้านขวามือ

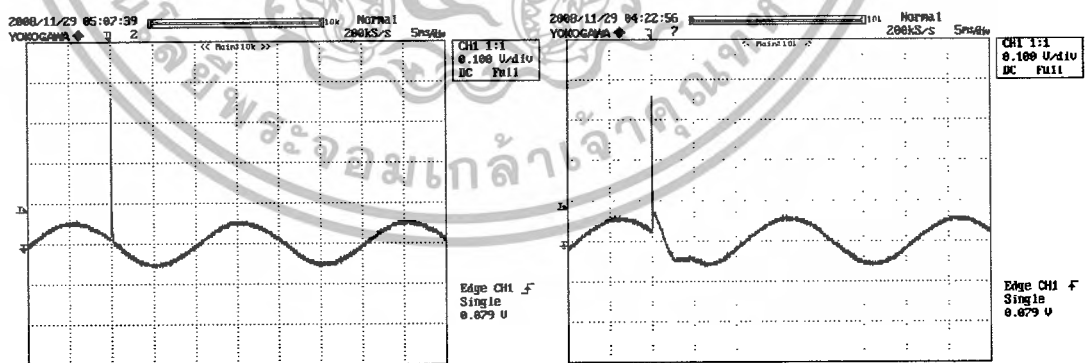
- ผลการทดสอบที่แรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวกับข้อบนแรงดันกระแสสลับ



ภาพที่ 4.11 ภาพคลื่นเต็มทิวต์ได้ที่มุม 0 องศา ขั้วบวก

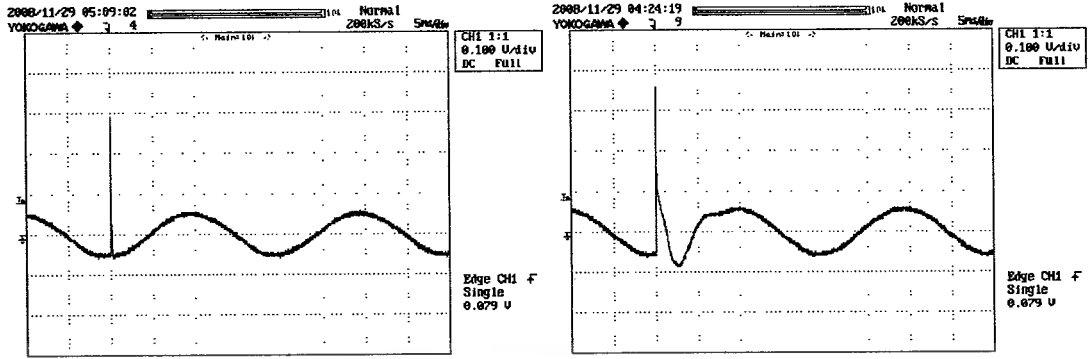


ภาพที่ 4.12 ภาพคลื่นเต็มทิวต์ได้ที่มุม 90 องศา ขั้วบวก



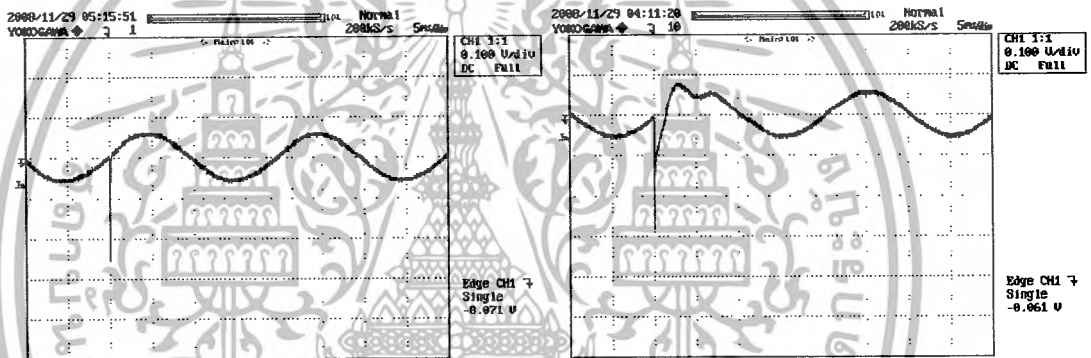
ภาพที่ 4.13 ภาพคลื่นเต็มทิวต์ได้ที่มุม 180 องศา ขั้วบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

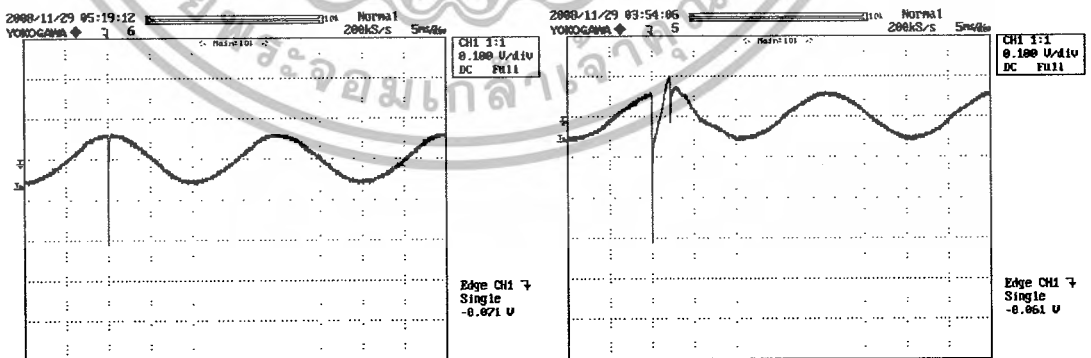


ภาพที่ 4.14 ภาพคลื่นเต็มทีวัดได้ที่มุม 270 องศา ขั้วบวก

- ผลการทดสอบที่แรงดันอิมพัลส์ขั้วลบที่ขั้วบนแรงดันกระแสสลับ

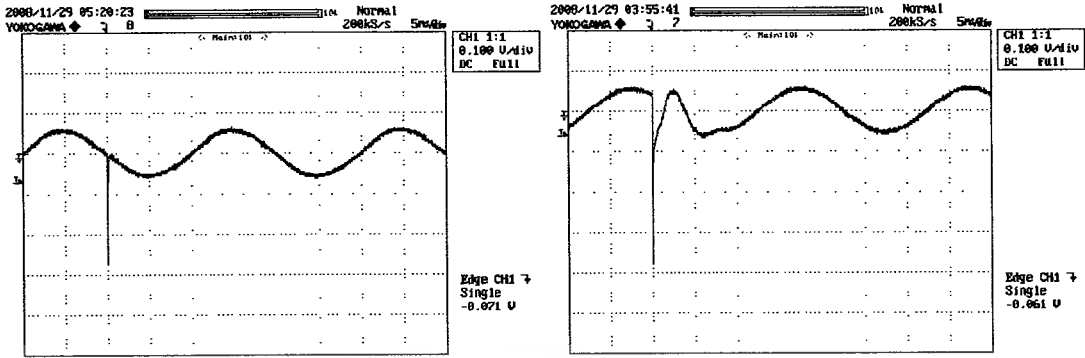


ภาพที่ 4.15 ภาพคลื่นเต็มทีวัดได้ที่มุม 0 องศา ขั้วลบ

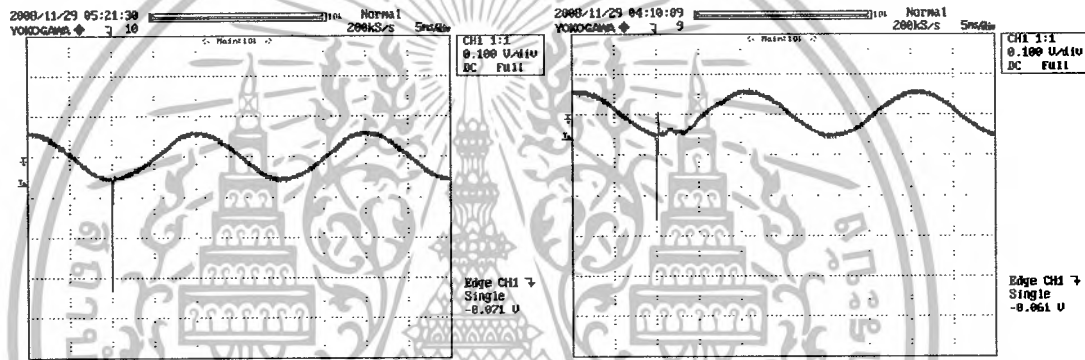


ภาพที่ 4.16 ภาพคลื่นเต็มทีวัดได้ที่มุม 90 องศา ขั้วลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.17 ภาพคลื่นเต็มทีวัดได้ที่มีม 180 องศา ขั้วลบ



ภาพที่ 4.18 ภาพคลื่นเต็มทีวัดได้ที่มีม 270 องศา ขั้วลบ

จากภาพเมื่อทำการวิเคราะห์การใช้ชุดกรองความถี่สูงเปรียบเทียบกับการใช้แกปทรงกลมเพื่อป้องกันแรงดันกระแอสลับไปตกร่อมชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

- การกรองความถี่โดยใช้ชุดกรองความถี่สูง R-C นั้นจะได้ภาพคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแอสลับที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่จะมีปัญหาในเรื่องของมุมที่มีการเลื่อนเฟสไปบ้าง

- การป้องกันแรงดันกระแอสลับโดยใช้แกปทรงกลมนั้นจะได้ภาพคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแอสลับ ที่มีลักษณะที่แตกต่างจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเกิดจากความสามารถในการคืนตัวของอากาศในฉนวนอีกครั้งหนึ่งหลังจากเกิดการเบรคดาวนด์ต้องอาศัยระยะเวลาช่วงหนึ่ง ภาพคลื่นแรงดันที่ได้จึงมีความผิดเพี้ยนไปจากผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่มุมที่ต้องการจะไม่มีเบี่ยงเบนไปมากเท่ากับชนิด R-C Filter โดยที่การป้องกันแรงดันกระแอสลับไม่ให้เกิดกร่อมแหล่งกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยใช้แกปทรงกลมจะมีต้นทุนน้อยกว่าการนำเอาชุดกรองความถี่สูง R-C เป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุป

ชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ปรับขึ้นบนแรงดันกระแสสลับพิกัด 6 kV ที่ได้จัดสร้างขึ้นนั้นสามารถที่จะทำการกำหนดมุมได้ตามต้องการ โดยใช้การควบคุมมุมทริกด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ผลการทดสอบพบว่ารูปคลื่นที่ได้เป็นไปตามการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การป้องกันแรงดันสูงกระแสสลับตกคร่อมเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้ทำการศึกษา 2 วิธีคือ การใช้ชุดกรองแรงดันความถี่สูง R-C ต่อกับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และการใช้แกปทรงกลม พบว่า ใช้แกปทรงกลมที่รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนซึ่งเกิดจากพฤติกรรมการเบรคดาวน์ของแกปทรงกลมที่อากาศที่เบรคดาวน์แล้วไม่สามารถคืนตัวเป็นฉนวนได้ทันที สำหรับการใส่ชุดกรองความถี่สูงผ่านนั้นมีประสิทธิภาพโดยรวมดีกว่าแกปทรงกลม แต่ก็จะมีปัญหาในเรื่องของมุมอาจจะมีการเบี่ยงเบนไปเล็กน้อยซึ่งก็เป็นคุณสมบัติของตัวเอง ซึ่งเป็นตัวกรองแบบ R-C

ในส่วนของชุดควบคุมมุมทริกนั้นได้นำไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ในการควบคุมการทำงานในการเริ่มการทำงานของชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ปรับขึ้นบนแรงดันกระแสสลับ ซึ่งเป็นการนำเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์มาประยุกต์ใช้ในทางด้านไฟฟ้าแรงสูง เมื่อนำระบบควบคุมที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ามาควบคุมนั้นทำให้การสั่งการให้การทำงานของชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ปรับขึ้นบนแรงดันกระแสสลับนั้นมีความแม่นยำสูงเนื่องจากได้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีการประมวลผลสูง

ส่วนการออกแบบชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ปรับขึ้นบนแรงดันกระแสสลับที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นนั้น ในตอนเริ่มทำการทดสอบได้มีการเลือกใช้สวิทช์อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวควบคุมการทำงาน ซึ่งมีความสามารถสูงมีความแม่นยำสูงเนื่องจากมีค่าเวลาการสวิทช์ที่ต่ำระดับนาโนวินาที แต่เมื่อได้มีการใช้งานไปในระยะเวลาหนึ่งได้เกิดปัญหาขึ้นเนื่องจากกระแสของหม้อแปลงแรงดันสูงที่ได้จัดทำขึ้นนั้นมีขนาดที่สูงมาก ทำให้อุปกรณ์สวิทช์ที่เป็นไอจีบีทีนั้นไม่สามารถทนได้เมื่อมีการใช้ไปในระยะเวลาหนึ่ง จึงได้มีการเปลี่ยนมาใช้อุปกรณ์สวิทช์ตัวใหม่ที่เป็นแบบบริเลย์ซึ่งจะสามารถทนกระแสได้มากกว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แต่ก็จะมีปัญหาในเรื่องเวลาในการสวิทช์ซึ่งที่สูงกว่ามากและจะเกิดปัญหาการอาร์คขึ้นที่หน้าสัมผัสตัวรีเลย์ โดยในส่วนของหม้อแปลงความถี่สูงนั้นจะใช้ไม่ล่าเป็นฉนวนกันช้อนระหว่างขดลวดแต่ละชั้น ด้วยน้ำหนักที่เบาของฉนวนไมล่านั้น จะทำให้สะดวกในการเคลื่อนย้าย และบำรุงรักษาได้ง่ายกว่าการใช้ฉนวนเป็นฉนวน

ผลโดยรวมก็ชี้ให้เห็นว่าการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับนั้นมีประสิทธิภาพโดยรวมเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งในอนาคตสามารถที่จะมีการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องให้สูงขึ้นได้ และมีเงื่อนไขการทำงานที่หลากหลายกว่าที่ได้ทำการออกแบบได้ในอนาคต

## 5.2 อุปสรรคและวิธีการแก้ไขในโครงการ

อุปสรรคที่พบได้ในการดำเนินโครงการและการแก้ปัญหาต่าง ๆ ดังนี้

1. เรื่องของค่าตัวเก็บประจุและความต้านทานที่นำมาประกอบเป็นชุดกรองความถี่สูงและชุดกรองความถี่ต่ำนั้น ค่าที่ทำการคำนวณออกแบบไว้นั้นไม่สามารถหาซื้อได้ในท้องตลาด จึงจำเป็นต้องเลือกค่าให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ทำให้ประสิทธิภาพของชุดกรองความถี่สูงและชุดกรองความถี่ต่ำนั้นมีประสิทธิภาพที่ลดลงมา
2. สัญญาณรบกวนที่เข้ามารบกวนชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นเกิดอาการผิดปกติ จึงต้องทำการจ่ายแรงดันให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์โดยผ่านทาง UPS เพื่อลดสัญญาณรบกวนต่างๆทางแหล่งจ่ายแรงดัน
3. ชุดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ไอจีบีทีเป็นตัวสวิตช์แรงดันให้กับหม้อแปลงแรงดันสูงนั้น เมื่อทำการใช้ไปในระยะเวลาหนึ่งทำให้ไอจีบีทีเสียหายเนื่องจากกระแสทางด้านอินพุตของหม้อแปลงแรงดันสูงมีค่าสูงมาก จึงเปลี่ยนมาใช้อุปกรณ์สวิตช์ที่เป็นรีเลย์แทนแต่ก็ทำให้ค่าความถูกต้องของสัญญาณเริ่มการทำงานของชุดสร้างแรงดันอิมพัลส์นั้นลดลง

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

เนื่องด้วยปัญหาในเรื่องของมุมที่มีการเบี่ยงเบนไปจากมุมที่กำหนด ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการทำงานที่ช้าของรีเลย์ หากต้องการความถูกต้องของมุมที่กำหนดนั้นควรที่จะออกแบบชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับใหม่ โดยต้องมีการออกแบบให้หม้อแปลงมีกระแสทางด้านอินพุตลดลง ซึ่งจะเป็นผลทำให้ลดการสูญเสียและยังสามารถใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาทำการสวิตช์ได้ ในชุดกรองความถี่สูงที่เลือกใช้ชุดป้องกันแรงดันสูงที่ใช้แกปทรงกลมจะสามารถใช้ได้ในการที่แรงดันกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์นั้นมีความแตกต่างกันพอสมควร เนื่องจากจะต้องมีการกำหนดระยะห่างของแกปทรงกลมหากทำการกำหนดไม่ถูกต้องก็จะมีผลทำให้แรงดันอิมพัลส์ไม่สามารถข้ามระยะแกปไปได้ หรืออาจจะทำให้แรงดันกระแสสลับข้ามแกปมาทางชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้ จึงต้องมีความระมัดระวังเป็นพิเศษในการเลือกใช้แกปทรงกลมมาเป็นตัวป้องกันแรงดันสูง แต่จะมีข้อดีในเรื่องของราคาที่ถูกกว่าชุดที่ใช้ R-C Filter อยู่พอสมควร

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ดร.สำราญ สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, มีนาคม 2549.
- [2] IEC 71-1, Insulation Co-ordination, Part 1, Definitions, principles and rules, seventh edition. 1999-12.
- [3] มนตรี ไทยมานะ, สันติ สุวิชาญวรสิน, การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 3 ชั้น 300 กิโลโวลต์ 3 กิโลจูล, ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [4] โกสินทร์ คล่องเชิงสาน, อาพันธ์วัฒน์ คุณากร, พีรภูมิ ยุทธโกวิท, นรเศรษฐ พัฒเดช, วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30
- [5] สุรัชย์ แสงสุริยันต์, อภิชาติ ศรีพานิชจิก, อาณัติ เล็กเกาะทวด, รัฐพงศ์ ธรรมเจริญ, การศึกษาและปรับปรุงเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 200 kV 5 kJ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550
- [6] ญัฐพนธ์ จงฤกษ์มงคล, วงจรควบคุมมุมเฟสด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์, เซมิคอนดักเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์ 301(เม.ย. 2550).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ภาคผนวก**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ก**  
**ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250**

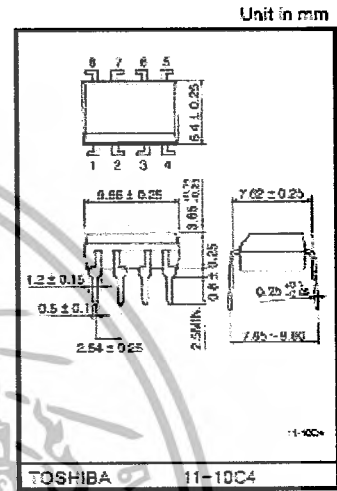
TOSHIBA PHOTOCOUPLER GaAlAs IRED & PHOTO-IC

# TLP250(INV)

**TRANSISTOR INVERTER  
INVERTERS FOR AIR CONDITIONER  
IGBT GATE DRIVE  
POWER MOS FET GATE DRIVE**

The TOSHIBA TLP250(INV) consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.  
This unit is 8-lead DIP.  
TLP250(INV) is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

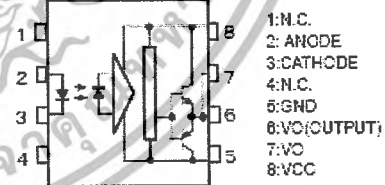
- Input Threshold Current :  $I_F=5\text{mA(MAX)}$
- Supply Current(I<sub>CC</sub>) : 11mA(MAX)
- Supply Voltage(V<sub>CC</sub>) : 10~35V
- Output Current(I<sub>O</sub>) :  $\pm 2.0\text{A(MAX)}$
- Switching Time(tpLH,tpHL) : 0.5 $\mu\text{s(MAX)}$
- Isolation Voltage : 2500Vrms
- UL Recognized : UL1677,File No.E67249
- Option(D4)  
VDE Approved : DIN VDE0894:06.92 Certificate No.79823  
Maximum Operating Insulation Voltage : 930V<sub>eff</sub>  
Highest Permissible Over Voltage : 4000V<sub>eff</sub>  
(Note):When a VDE0884 approved type is needed,  
Please designate the "Option(D4)"
- Creepage Distance : 6.4mm(MIN)
- Clearance : 6.4mm(MIN)



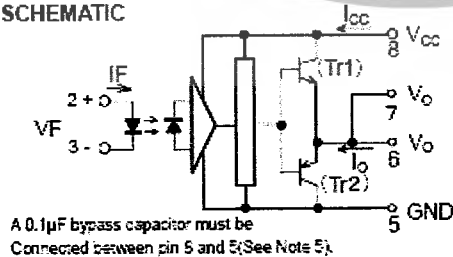
**TRUTH TABLE**

		Tr 1	Tr 2
INPUT LED	ON	ON	OFF
	OFF	OFF	ON

**PIN CONFIGURATION(TOP VIEW)**



**SCHEMATIC**



## ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

### MAXIMUM RATINGS (Ta=25°C)

CHARACTERISTIC		SYMBOL	RATING	UNIT
LED	Forward Current	$I_f$	25	mA
	Forward Current Derating (Ta≥70°C)	$\Delta I_f / \Delta T_a$	-0.36	mA/°C
	Peak Transient Forward Current (Note 1)	$I_{fT}$	1	A
	Reverse Voltage	$V_r$	5	V
	Junction Temperature	$T_j$	125	°C
DETECTOR	"H" Peak Output Current	$I_{OH}$	-1.5	A
	"L" Peak Output Current		-2.0	
	"L" Peak Output Current	$I_{OL}$	+1.5	A
			+2.0	
	Output Voltage	$V_o$	35	V
			24	
	Supply Voltage	$V_{cc}$	35	V
			24	
	Output Voltage Derating (Ta≥70°C)	$\Delta V_o / \Delta T_a$	-0.73	V/°C
	Supply Voltage Derating (Ta≥70°C)	$\Delta V_{cc} / \Delta T_a$	-0.73	V/°C
	Junction Temperature	$T_j$	125	°C
Operating Frequency (Note 3)	$f$	25	kHz	
Operating Temperature Range	$T_{op}$	-20~85	°C	
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-55~125	°C	
Lead Soldering Temperature(10s)	$T_{sl}$	260	°C	
Isolation Voltage (AC, 1min., R.H. ≤60%, Ta=25°C) (Note 4)	$BV_s$	2500	Vrms	

(Note 1) : Pulse width PW≤1μs, fs300pps

(Note 2) : Exponential Waveform

(Note 3) : Exponential Waveform  $I_{OH} = -1.0A$  (≤2.5μs) ;  $I_{OL} = +1.0A$  (≤2.5μs)

(Note 4) : Device considered a two terminal device ; pins 1, 2, 3 and 4 shorted together and pins 5, 6, 7 and 8 shorted together.

(Note 5) : A ceramic capacitor(0.1μF) should be connected from pin 8 to pin 5 to stabilize the operation of the high gain linear amplifier. Failure to provide the bypassing may impact the switching property. The total lead length between capacitor and coupler should not exceed 1cm.

### RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

CHARACTERISTIC	SYMBOL	MIN	TYP.	MAX	UNIT	
Input Current I <sub>ON</sub>	$I_{ON}$	7	8	10	mA	
Input Voltage, OFF	$V_{f(off)}$	0	—	0.5	V	
Supply Voltage	$V_{cc}$	15	—	30	20	V
Peak Output Current	$I_{OH} / I_{OL}$	—	—	±0.5	A	
Operating Temperature	$T_{op}$	-20	25	70	85	°C

ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Ta = -20~70°C, Unless otherwise specified)

CHARACTERISTIC	SYMBOL	TEST CIRCUIT	TEST CONDITION	MIN	TYP.	MAX	UNIT		
Input Forward Voltage	V <sub>f</sub>	—	I <sub>f</sub> = 10 mA, Ta = 25°C	—	1.8	1.8	V		
Temperature Coefficient of Forward Voltage	ΔV <sub>f</sub> /ΔTa	—	I <sub>f</sub> = 10 mA	—	-2.0	—	mV/°C		
Input Reverse Current	I <sub>r</sub>	—	V <sub>rk</sub> = 5 V, Ta = 25°C	—	—	10	μA		
Input Capacitance	C <sub>i</sub>	—	V = 0, f = 1 MHz, Ta = 25°C	—	45	250	pF		
Output Current	"H" Level	I <sub>OH</sub>	2	V <sub>CC</sub> = 30 V (*)	I <sub>f</sub> = 10 mA V <sub>OL</sub> = 4 V	-1.0	-1.5	A	
	"L" Level	I <sub>OL</sub>	1		I <sub>f</sub> = 0 V <sub>OL</sub> = 2.5 V	1.0	2		—
Output Voltage	"H" Level	V <sub>OH</sub>	3	V <sub>CC1</sub> = +15 V V <sub>EE1</sub> = -15 V R <sub>L</sub> = 200Ω, I <sub>f</sub> = 5 mA	11	12.8	—	V	
	"L" Level	V <sub>OL</sub>	4		V <sub>CC1</sub> = +15 V V <sub>EE1</sub> = -15 V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>f</sub> = 0.8 V	—	-14.2		-12.5
Supply Current	"H" Level	I <sub>CC1</sub>	—	V <sub>CC</sub> = 30 V	I <sub>f</sub> = 10 mA Ta = 25°C	—	7	—	mA
	"L" Level	I <sub>CC2</sub>	—		I <sub>f</sub> = 0 mA Ta = 25°C	—	7.5	—	
Threshold Input Current	H→L	I <sub>th</sub>	—	V <sub>CC1</sub> = +15 V V <sub>EE1</sub> = -15 V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>f</sub> > 0V	—	1.2	5	mA	
	L→H	I <sub>tl</sub>	—		V <sub>CC1</sub> = +15 V V <sub>EE1</sub> = -15 V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>f</sub> < 0V	0.8	—		—
Supply Voltage	V <sub>CC</sub>	—	—	10	—	35	V		
Capacitance (Input-Output)	C <sub>o</sub>	—	V <sub>o</sub> = 0, f = 1 MHz, Ta = 25°C	—	1.0	2.0	pF		
Resistance (Input-Output)	R <sub>o</sub>	—	V <sub>o</sub> = 500 V, Ta = 25°C R <sub>H</sub> ≤ 20%	1×10 <sup>12</sup>	10 <sup>14</sup>	—	Ω		

(\*) : All typical values are at Ta=25°C

(†) : Duration of IO time ≤ 50μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

### SWITCHING CHARACTERISTICS (Ta = -20~70°C, Unless otherwise specified)

CHARACTERISTIC		SYMBOL	TEST CIRCUIT	TEST CONDITION	MIN	TYP.	MAX	UNIT		
Propagation Delay Time	L→H	$t_{pHL}$	5	$I_T = 8 \text{ mA}$ $V_{CC} = 15 \text{ V}$ $R_L = 20 \Omega, C_L = 10 \text{ nF}$	0.05	0.15	0.5	$\mu\text{s}$		
	H→L	$t_{pLH}$			0.05	0.15	0.5			
Switching Time Dispersion between ON and OFF		$ t_{pHL} - t_{pLH} $			—	—	0.45		—	—
Output Rise Time		$t_r$			—	—	—		—	—
Output Fall Time		$t_f$			—	—	—		—	—
Common Mode Transient Immunity at High Level Output		$CM_H$	6	$V_{CM} = 1000 \text{ V}, I_T = 8 \text{ mA}$ $V_{CC} = 30 \text{ V}, T_a = 25^\circ\text{C}$	-15000	—	—	$\text{V}/\mu\text{s}$		
Common Mode Transient Immunity at Low Level Output		$CM_L$		$V_{CM} = 1000 \text{ V}, I_T = 0 \text{ mA}$ $V_{CC} = 30 \text{ V}, T_a = 25^\circ\text{C}$	15000	—	—	$\text{V}/\mu\text{s}$		

Fig.1  $I_{OPL}$  TEST CIRCUIT

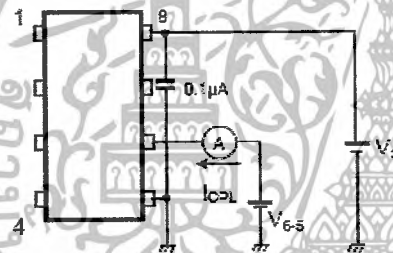


Fig.2  $I_{OPH}$  TEST CIRCUIT

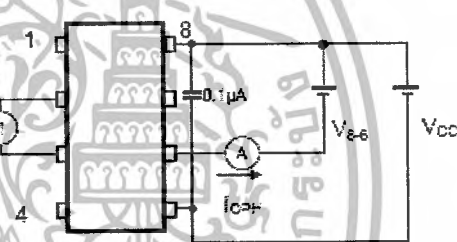


Fig.3  $V_{CH}$  TEST CIRCUIT

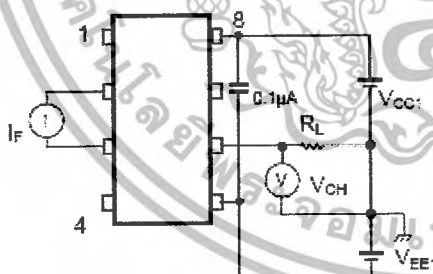
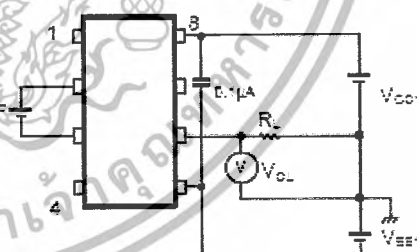


Fig.4  $V_{OL}$  TEST CIRCUIT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

Fig.5 tpLH, tpHL, tr, tf TEST CIRCUIT

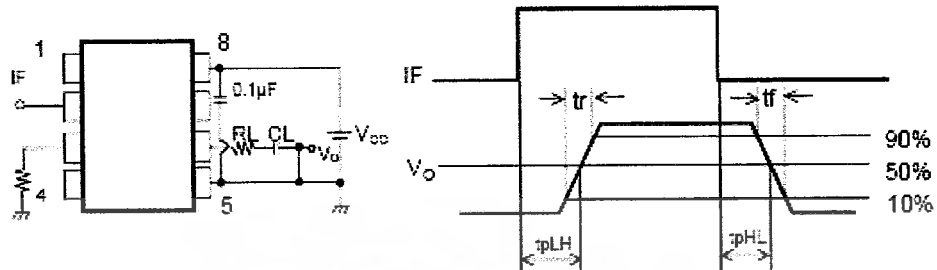
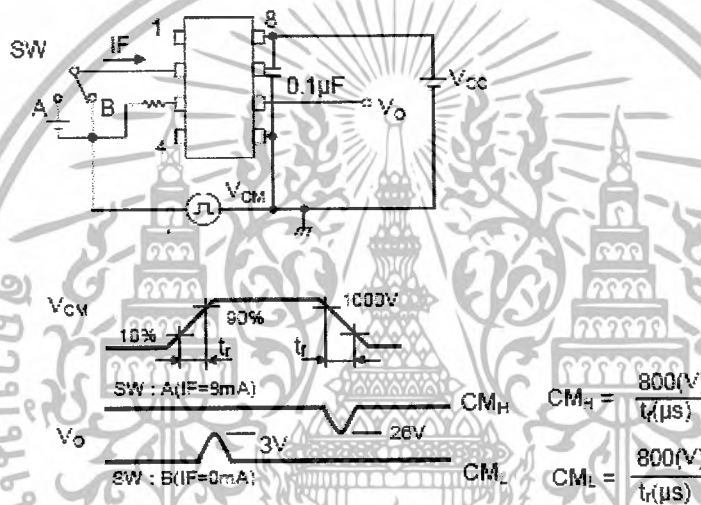


Fig.6 CMH, CML TEST CIRCUIT



CML(CMH) is the maximum rate of rise(fall) of the common mode voltage that can be sustained with the output voltage in the low(high)state.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางแสดงคุณสมบัติ IC เบอร์ TLP250 (ต่อ)

### RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

CCC07F8C

- TOSHIBA is continually working to improve the quality and reliability of its products. Nevertheless, semiconductor devices in general can malfunction or fail due to their inherent electrical sensitivity and vulnerability to physical stress. It is the responsibility of the buyer, when utilizing TOSHIBA products, to comply with the standards of safety in making a safe design for the entire system, and to avoid situations in which a malfunction or failure of such TOSHIBA products could cause loss of human life, bodily injury or damage to property. In developing your designs, please ensure that TOSHIBA products are used within specified operating ranges as set forth in the most recent TOSHIBA products specifications. Also, please keep in mind the precautions and conditions set forth in the "Handling Guide for Semiconductor Devices," or "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" etc..
- The TOSHIBA products listed in this document are intended for usage in general electronics applications (computer, personal equipment, office equipment, measuring equipment, industrial robotics, domestic appliances, etc.). These TOSHIBA products are neither intended nor warranted for usage in equipment that requires extraordinarily high quality and/or reliability or a malfunction or failure of which may cause loss of human life or bodily injury ("Unintended Usage"). Unintended Usage include atomic energy control instruments, airplanes or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, combustion control instruments, medical instruments, all types of safety devices, etc.. Unintended Usage of TOSHIBA products listed in this document shall be made at the customer's own risk.
- Gallium arsenide (GaAs) is a substance used in the products described in this document. GaAs dust and fumes are toxic. Do not break, cut or pulverize the product, or use chemicals to dissolve them. When disposing of the products, follow the appropriate regulations. Do not dispose of the products with other industrial waste or with domestic garbage.
- The products described in this document are subject to the foreign exchange and foreign trade laws.
- The information contained herein is presented only as a guide for the applications of our products. No responsibility is assumed by TOSHIBA CORPORATION for any infringements of intellectual property or other rights of the third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any intellectual property or other rights of TOSHIBA CORPORATION or others.
- The information contained herein is subject to change without notice.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข  
ตารางแสดงคุณสมบัติไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

**Features**

- High-performance, Low-power AVR<sup>®</sup> 8-bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
  - 130 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
  - 32 x 8 General Purpose Working Registers
  - Fully Static Operation
  - Up to 16 MIPS Throughput at 16 MHz
  - On-chip 2-cycle Multiplier
- Nonvolatile Program and Data Memories
  - 8K Bytes of In-System Self-Programmable Flash
    - Endurance: 10,000 Write/Erase Cycles
  - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
  - In-System Programming by On-chip Boot Program
  - True Read-While-Write Operation
  - 512 Bytes EEPROM
    - Endurance: 100,000 Write/Erase Cycles
  - 512 Bytes Internal SRAM
  - Programming Lock for Software Security
- Peripheral Features
  - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescalers and Compare Modes
  - One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare Mode, and Capture Mode
  - Real Time Counter with Separate Oscillator
  - Four PWM Channels
  - 8-channel, 10-bit ADC
    - 8 Single-ended Channels
    - 7 Differential Channels for TQFP Package Only
    - 2 Differential Channels with Programmable Gain at 1x, 10x, or 200x for TQFP Package Only
  - Byte-oriented Two-wire Serial Interface
  - Programmable Serial USART
  - Master/Slave SPI Serial Interface
  - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
  - On-chip Analog Comparator
- Special Microcontroller Features
  - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
  - Internal Calibrated RC Oscillator
  - External and Internal Interrupt Sources
  - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby and Extended Standby
- I/O and Packages
  - 32 Programmable I/O Lines
  - 40-pin PDIP, 44-lead TQFP, 44-lead PLCC, and 44-pad QFN/MLF
- Operating Voltages
  - 2.7 - 5.5V for ATmega8535L
  - 4.5 - 5.5V for ATmega8535
- Speed Grades
  - 0 - 8 MHz for ATmega8535L
  - 0 - 16 MHz for ATmega8535



**8-bit AVR<sup>®</sup>  
Microcontroller  
with 8K Bytes  
In-System  
Programmable  
Flash**

**ATmega8535  
ATmega8535L**

2502K-AVR-10/06



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ตารางแสดงคุณสมบัติไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR(ต่อ)



Pin Configurations Figure 1. Pinout ATmega8535



**Disclaimer**

Typical values contained in this data sheet are based on simulations and characterization of other AVR microcontrollers manufactured on the same process technology. Min and Max values will be available after the device is characterized.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ตารางแสดงคุณสมบัติไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR(ต่อ)

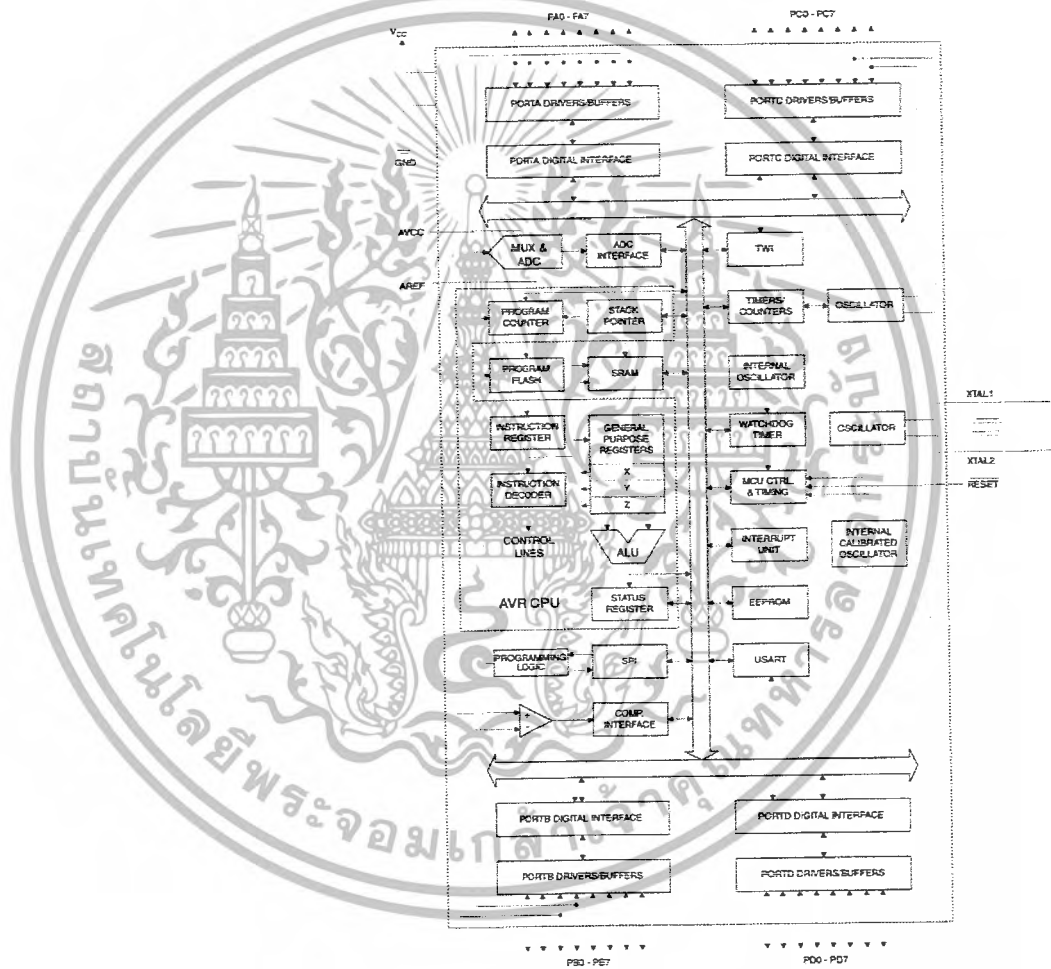
## ATmega8535(L)

### Overview

The ATmega8535 is a low-power CMOS 8-bit microcontroller based on the AVR enhanced RISC architecture. By executing instructions in a single clock cycle, the ATmega8535 achieves throughputs approaching 1 MIPS per MHz allowing the system designer to optimize power consumption versus processing speed.

### Block Diagram

Figure 2. Block Diagram



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางแสดงคุณสมบัติไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR(ต่อ)



The AVR core combines a rich instruction set with 32 general purpose working registers. All 32 registers are directly connected to the Arithmetic Logic Unit (ALU), allowing two independent registers to be accessed in one single instruction executed in one clock cycle. The resulting architecture is more code efficient while achieving throughputs up to ten times faster than conventional CISC microcontrollers.

The ATmega8535 provides the following features: 8K bytes of In-System Programmable Flash with Read-While-Write capabilities, 512 bytes EEPROM, 512 bytes SRAM, 32 general purpose I/O lines, 32 general purpose working registers, three flexible Timer/Counters with compare modes, internal and external interrupts, a serial programmable USART, a byte oriented Two-wire Serial Interface, an 8-channel, 10-bit ADC with optional differential input stage with programmable gain in TQFP package, a programmable Watchdog Timer with Internal Oscillator, an SPI serial port, and six software selectable power saving modes. The Idle mode stops the CPU while allowing the SRAM, Timer/Counters, SPI port, and interrupt system to continue functioning. The Power-down mode saves the register contents but freezes the Oscillator, disabling all other chip functions until the next interrupt or Hardware Reset. In Power-save mode, the asynchronous timer continues to run, allowing the user to maintain a timer base while the rest of the device is sleeping. The ADC Noise Reduction mode stops the CPU and all I/O modules except asynchronous timer and ADC, to minimize switching noise during ADC conversions. In Standby mode, the crystal/resonator Oscillator is running while the rest of the device is sleeping. This allows very fast start-up combined with low-power consumption. In Extended Standby mode, both the main Oscillator and the asynchronous timer continue to run.

The device is manufactured using Atmel's high density nonvolatile memory technology. The On-chip ISP Flash allows the program memory to be reprogrammed In-System through an SPI serial interface, by a conventional nonvolatile memory programmer, or by an On-chip Boot program running on the AVR core. The boot program can use any interface to download the application program in the Application Flash memory. Software in the Boot Flash section will continue to run while the Application Flash section is updated, providing true Read-While-Write operation. By combining an 8-bit RISC CPU with In-System Self-Programmable Flash on a monolithic chip, the Atmel ATmega8535 is a powerful microcontroller that provides a highly flexible and cost effective solution to many embedded control applications.

The ATmega8535 AVR is supported with a full suite of program and system development tools including: C compilers, macro assemblers, program debugger/simulators, In-Circuit Emulators, and evaluation kits.

### AT90S8535 Compatibility

The ATmega8535 provides all the features of the AT90S8535. In addition, several new features are added. The ATmega8535 is backward compatible with AT90S8535 in most cases. However, some incompatibilities between the two microcontrollers exist. To solve this problem, an AT90S8535 compatibility mode can be selected by programming the S8535C fuse. ATmega8535 is pin compatible with AT90S8535, and can replace the AT90S8535 on current Printed Circuit Boards. However, the location of fuse bits and the electrical characteristics differs between the two devices.

### AT90S8535 Compatibility Mode

Programming the S8535C fuse will change the following functionality:

- The timed sequence for changing the Watchdog Time-out period is disabled. See "Timed Sequences for Changing the Configuration of the Watchdog Timer" on page 45 for details.
- The double buffering of the USART Receive Register is disabled. See "AVR USART vs. AVR UART – Compatibility" on page 146 for details.

# ตารางแสดงคุณสมบัติไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR(ต่อ)

## ATmega8535(L)

### Pin Descriptions

<b>V<sub>CC</sub></b>	Digital supply voltage.
<b>GND</b>	Ground.
<b>Port A (PA7..PA0)</b>	Port A serves as the analog inputs to the A/D Converter.  Port A also serves as an 8-bit bi-directional I/O port, if the A/D Converter is not used. Port pins can provide internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port A output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. When pins PA0 to PA7 are used as inputs and are externally pulled low, they will source current if the internal pull-up resistors are activated. The Port A pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.
<b>Port B (PB7..PB0)</b>	Port B is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port B output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port B pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port B pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.  Port B also serves the functions of various special features of the ATmega8535 as listed on page 60.
<b>Port C (PC7..PC0)</b>	Port C is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port C output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port C pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port C pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.
<b>Port D (PD7..PD0)</b>	Port D is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port D output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port D pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port D pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.  Port D also serves the functions of various special features of the ATmega8535 as listed on page 64.
<b>RESET</b>	Reset input. A low level on this pin for longer than the minimum pulse length will generate a reset, even if the clock is not running. The minimum pulse length is given in Table 15 on page 37. Shorter pulses are not guaranteed to generate a reset.
<b>XTAL1</b>	Input to the inverting Oscillator amplifier and input to the internal clock operating circuit.
<b>XTAL2</b>	Output from the inverting Oscillator amplifier.
<b>AVCC</b>	AVCC is the supply voltage pin for Port A and the A/D Converter. It should be externally connected to V <sub>CC</sub> , even if the ADC is not used. If the ADC is used, it should be connected to V <sub>CC</sub> through a low-pass filter.
<b>AREF</b>	AREF is the analog reference pin for the A/D Converter.

## ตารางแสดงคุณสมบัติไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR(ต่อ)

### ATmega8535(L)

#### Electrical Characteristics

##### Absolute Maximum Ratings\*

Operating Temperature .....	-55°C to +125°C
Storage Temperature .....	-65°C to +150°C
Voltage on any Pin except $\overline{\text{RESET}}$ with respect to Ground .....	-0.5V to $V_{CC}+0.5V$
Voltage on $\overline{\text{RESET}}$ with respect to Ground .....	-0.5V to +13.0V
Maximum Operating Voltage .....	6.0V
DC Current per I/O Pin .....	40.0 mA
DC Current $V_{CC}$ and GND Pins .....	200.0 PDIP eq 400 mA TQFP/MLF/PLCCmA

\*NOTICE: Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at these or other conditions beyond those indicated in the operational sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

##### DC Characteristics

$T_A = -40^\circ\text{C}$  to  $85^\circ\text{C}$ ,  $V_{CC} = 2.7V$  to  $5.5V$  (unless otherwise noted)

Symbol	Parameter	Condition	Min	Typ	Max	Units
$V_{IL}$	Input Low Voltage except XTAL1 and RESET pins	$V_{CC}=2.7V - 5.5V$	-0.5		$0.2 V_{CC}^{(1)}$	V
$V_{IH}$	Input High Voltage except XTAL1 and RESET pins	$V_{CC}=2.7V - 5.5V$	$0.6 V_{CC}^{(2)}$		$V_{CC} + 0.5$	V
$V_{IL1}$	Input Low Voltage XTAL1 pin	$V_{CC}=2.7V - 5.5V$	-0.5		$0.1 V_{CC}^{(1)}$	V
$V_{IH1}$	Input High Voltage XTAL1 pin	$V_{CC}=2.7V - 5.5V$	$0.8 V_{CC}^{(2)}$		$V_{CC} + 0.5$	V
$V_{IL2}$	Input Low Voltage RESET pin	$V_{CC}=2.7V - 5.5V$	-0.5		$0.2 V_{CC}$	V
$V_{IH2}$	Input High Voltage RESET pin	$V_{CC}=2.7V - 5.5V$	$0.9 V_{CC}^{(2)}$		$V_{CC} + 0.5$	V
$V_{OL}$	Output Low Voltage <sup>(3)</sup> (Ports A,B,C,D)	$I_{OL} = 20 \text{ mA}, V_{CC} = 5V$ $I_{OL} = 10 \text{ mA}, V_{CC} = 3V$			0.7 0.5	V V
$V_{OH}$	Output High Voltage <sup>(4)</sup> (Ports A,B,C,D)	$I_{OH} = -20 \text{ mA}, V_{CC} = 5V$ $I_{OH} = -10 \text{ mA}, V_{CC} = 3V$	4.2 2.2			V V
$I_{IL}$	Input Leakage Current I/O Pin	$V_{CC} = 5.5V$ , pin low (absolute value)			1	$\mu\text{A}$
$I_{IH}$	Input Leakage Current I/O Pin	$V_{CC} = 5.5V$ , pin high (absolute value)			1	$\mu\text{A}$
$R_{RST}$	Reset Pull-up Resistor		30		60	$k\Omega$
$R_{PU}$	I/O Pin Pull-up Resistor		20		50	$k\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางแสดงคุณสมบัติไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR(ต่อ)



$T_A = -40^{\circ}\text{C}$  to  $85^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{CC} = 2.7\text{V}$  to  $5.5\text{V}$  (unless otherwise noted) (Continued)

Symbol	Parameter	Condition	Min	Typ	Max	Units	
$I_{CC}$	Power Supply Current	Active 4 MHz, $V_{CC} = 3\text{V}$ (ATmega8535L)		4		mA	
		Active 8 MHz, $V_{CC} = 5\text{V}$ (ATmega8535)		14		mA	
		Idle 4 MHz, $V_{CC} = 3\text{V}$ (ATmega8535L)		3		mA	
		Idle 8 MHz, $V_{CC} = 5\text{V}$ (ATmega8535)			10		mA
	Power-down mode <sup>(5)</sup>	WDT enabled, $V_{CC} = 3\text{V}$			< 10		$\mu\text{A}$
		WDT disabled, $V_{CC} = 3\text{V}$			< 3		$\mu\text{A}$
$V_{ACIO}$	Analog Comparator Input Offset Voltage	$V_{CC} = 5\text{V}$ $V_{in} = V_{CC}/2$			40	mV	
$I_{ACLK}$	Analog Comparator Input Leakage Current	$V_{CC} = 5\text{V}$ $V_{in} = V_{CC}/2$	-50		50	nA	
$t_{ACPD}$	Analog Comparator Propagation Delay	$V_{CC} = 2.7\text{V}$ $V_{CC} = 4.0\text{V}$		750 500		ns	

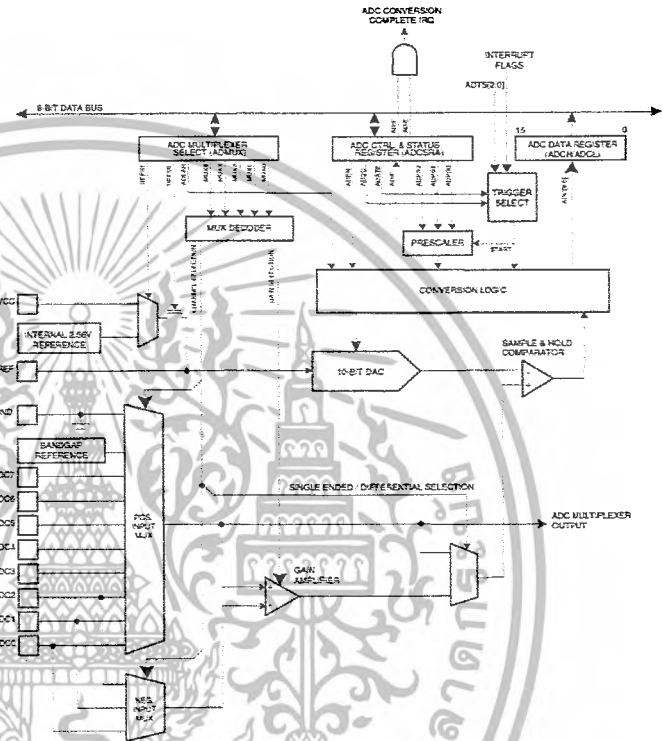
- Notes:
- "Max" means the highest value where the pin is guaranteed to be read as low.
  - "Min" means the lowest value where the pin is guaranteed to be read as high.
  - Although each I/O port can sink more than the test conditions (20mA at  $V_{CC} = 5\text{V}$ , 10mA at  $V_{CC} = 3\text{V}$ ) under steady state conditions (non-transient), the following must be observed:  
 PDIP Package:  
 1] The sum of all IOL, for all ports, should not exceed 200 mA.  
 2] The sum of all IOL, for port A0 - A7, should not exceed 100 mA.  
 3] The sum of all IOL, for ports B0 - B7, C0 - C7, D0 - D7 and XTAL2, should not exceed 100 mA.  
 PLCC/MLF/TQFP Package:  
 1] The sum of all IOL, for all ports, should not exceed 400 mA.  
 2] The sum of all IOL, for ports A0 - A7, should not exceed 100 mA.  
 3] The sum of all IOL, for ports B0 - B3, should not exceed 100 mA.  
 4] The sum of all IOL, for ports B4 - B7, should not exceed 100 mA.  
 5] The sum of all IOL, for ports C0 - C3, should not exceed 100 mA.  
 6] The sum of all IOL, for ports C4 - C7, should not exceed 100 mA.  
 7] The sum of all IOL, for ports D0 - D3 and XTAL2, should not exceed 100 mA.  
 8] The sum of all IOL, for ports D4 - D7, should not exceed 100 mA.  
 If IOL exceeds the test condition, VOL may exceed the related specification. Pins are not guaranteed to sink current greater than the listed test condition.
  - Although each I/O port can source more than the test conditions (20mA at  $V_{CC} = 5\text{V}$ , 10mA at  $V_{CC} = 3\text{V}$ ) under steady state conditions (non-transient), the following must be observed:  
 PDIP Package:  
 1] The sum of all IOH, for all ports, should not exceed 200 mA.  
 2] The sum of all IOH, for port A0 - A7, should not exceed 100 mA.  
 3] The sum of all IOH, for ports B0 - B7, C0 - C7, D0 - D7 and XTAL2, should not exceed 100 mA.  
 PLCC/MLF/TQFP Package:  
 1] The sum of all IOH, for all ports, should not exceed 400 mA.  
 2] The sum of all IOH, for ports A0 - A7, should not exceed 100 mA.  
 3] The sum of all IOH, for ports B0 - B3, should not exceed 100 mA.  
 4] The sum of all IOH, for ports B4 - B7, should not exceed 100 mA.  
 5] The sum of all IOH, for ports C0 - C3, should not exceed 100 mA.  
 6] The sum of all IOH, for ports C4 - C7, should not exceed 100 mA.  
 7] The sum of all IOH, for ports D0 - D3 and XTAL2, should not exceed 100 mA.  
 8] The sum of all IOH, for ports D4 - D7, should not exceed 100 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ตารางแสดงคุณสมบัติไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR(ต่อ)

## ATmega8535(L)

Figure 98. Analog-to-Digital Converter Block Schematic



### Operation

The ADC converts an analog input voltage to a 10-bit digital value through successive approximation. The minimum value represents GND and the maximum value represents the voltage on the AREF pin minus 1 LSB. Optionally, AVCC or an internal 2.56V reference voltage may be connected to the AREF pin by writing to the REFSn bits in the ADMUX Register. The internal voltage reference may thus be decoupled by an external capacitor at the AREF pin to improve noise immunity.

The analog input channel and differential gain are selected by writing to the MUX bits in ADMUX. Any of the ADC input pins, as well as GND and a fixed bandgap voltage reference, can be selected as single ended inputs to the ADC. A selection of ADC input pins can be selected as positive and negative inputs to the differential gain amplifier.

If differential channels are selected, the differential gain stage amplifies the voltage difference between the selected input channel pair by the selected gain factor. This amplified value then becomes the analog input to the ADC. If single ended channels are used, the gain amplifier is bypassed altogether.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางแสดงคุณสมบัติไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR(ต่อ)



The ADC is enabled by setting the ADC Enable bit, ADEN in ADCSRA. Voltage reference and input channel selections will not go into effect until ADEN is set. The ADC does not consume power when ADEN is cleared, so it is recommended to switch off the ADC before entering power saving sleep modes.

The ADC generates a 10-bit result which is presented in the ADC Data Registers, ADCH and ADCL. By default, the result is presented right adjusted, but can optionally be presented left adjusted by setting the ADLAR bit in ADMUX.

If the result is left adjusted and no more than 8-bit precision is required, it is sufficient to read ADCH. Otherwise, ADCL must be read first, then ADCH, to ensure that the content of the data registers belongs to the same conversion. Once ADCL is read, ADC access to data registers is blocked. This means that if ADCL has been read, and a conversion completes before ADCH is read, neither register is updated and the result from the conversion is lost. When ADCH is read, ADC access to the ADCH and ADCL Registers is re-enabled.

The ADC has its own interrupt which can be triggered when a conversion completes. When ADC access to the data registers is prohibited between reading of ADCH and ADCL, the interrupt will trigger even if the result is lost.

### Starting a Conversion

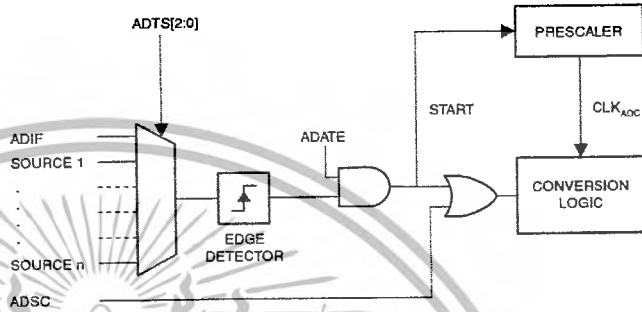
A single conversion is started by writing a logical one to the ADC Start Conversion bit, ADSC. This bit stays high as long as the conversion is in progress and will be cleared by hardware when the conversion is completed. If a different data channel is selected while a conversion is in progress, the ADC will finish the current conversion before performing the channel change.

Alternatively, a conversion can be triggered automatically by various sources. Auto Triggering is enabled by setting the ADC Auto Trigger Enable bit, ADATE in ADCSRA. The trigger source is selected by setting the ADC Trigger Select bits, ADTS in SFIOR (See description of the ADTS bits for a list of the trigger sources). When a positive edge occurs on the selected trigger signal, the ADC prescaler is reset and a conversion is started. This provides a method of starting conversions at fixed intervals. If the trigger signal still is set when the conversion completes, a new conversion will not be started. If another positive edge occurs on the trigger signal during conversion, the edge will be ignored. Note that an interrupt flag will be set even if the specific interrupt is disabled or the global interrupt enable bit in SREG is cleared. A conversion can thus be triggered without causing an interrupt. However, the interrupt flag must be cleared in order to trigger a new conversion at the next interrupt event.

ตารางแสดงคุณสมบัติไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR(ต่อ)

ATmega8535(L)

Figure 99. ADC Auto Trigger Logic

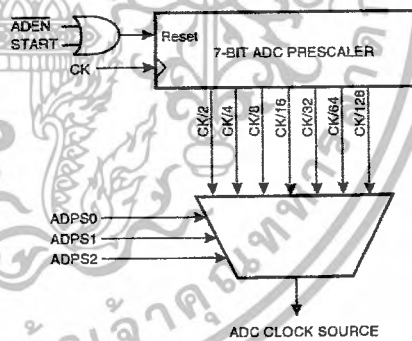


Using the ADC Interrupt Flag as a trigger source makes the ADC start a new conversion as soon as the ongoing conversion has finished. The ADC then operates in Free Running mode, constantly sampling and updating the ADC Data Register. The first conversion must be started by writing a logical one to the ADSC bit in ADCSRA. In this mode the ADC will perform successive conversions independently of whether the ADC Interrupt Flag, ADIF is cleared or not.

If Auto Triggering is enabled, single conversions can be started by writing ADSC in ADCSRA to one. ADSC can also be used to determine if a conversion is in progress. The ADSC bit will be read as one during a conversion, independently of how the conversion was started.

Prescaling and Conversion Timing

Figure 100. ADC Prescaler



By default, the successive approximation circuitry requires an input clock frequency between 50 kHz and 200 kHz to get maximum resolution. If a lower resolution than 10 bits is needed, the input clock frequency to the ADC can be higher than 200 kHz to get a higher sample rate.

## ตารางแสดงคุณสมบัติไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR(ต่อ)



The ADC module contains a prescaler, which generates an acceptable ADC clock frequency from any CPU frequency above 100 kHz. The prescaling is set by the ADPS bits in ADCSRA. The prescaler starts counting from the moment the ADC is switched on by setting the ADEN bit in ADCSRA. The prescaler keeps running for as long as the ADEN bit is set, and is continuously reset when ADEN is low.

When initiating a single ended conversion by setting the ADSC bit in ADCSRA, the conversion starts at the following rising edge of the ADC clock cycle. See "Differential Gain Channels" on page 212 for details on differential conversion timing.

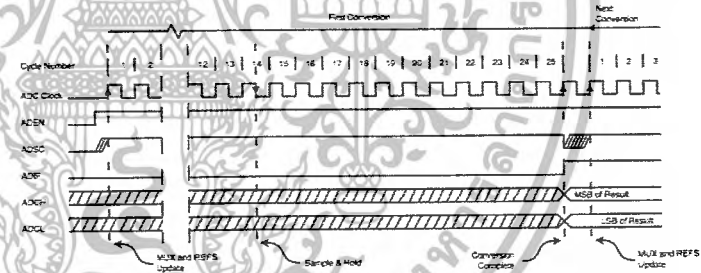
A normal conversion takes 13 ADC clock cycles. The first conversion after the ADC is switched on (ADEN in ADCSRA is set) takes 25 ADC clock cycles in order to initialize the analog circuitry.

The actual sample-and-hold takes place 1.5 ADC clock cycles after the start of a normal conversion and 13.5 ADC clock cycles after the start of an first conversion. When a conversion is complete, the result is written to the ADC Data Registers, and ADIF is set. In Single Conversion mode, ADSC is cleared simultaneously. The software may then set ADSC again, and a new conversion will be initiated on the first rising ADC clock edge.

When Auto Triggering is used, the prescaler is reset when the trigger event occurs. This assures a fixed delay from the trigger event to the start of conversion. In this mode, the sample-and-hold takes place two ADC clock cycles after the rising edge on the trigger source signal. Three additional CPU clock cycles are used for synchronization logic.

In Free Running mode, a new conversion will be started immediately after the conversion completes, while ADSC remains high. For a summary of conversion times, see Table 82.

Figure 101. ADC Timing Diagram, First Conversion (Single Conversion Mode)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางแสดงคุณสมบัติไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR(ต่อ)



### Analog-to-Digital Converter

#### Features

- 10-bit Resolution
- 0.5 LSB Integral Non-Linearity
- $\pm 2$  LSB Absolute Accuracy
- 85 - 260  $\mu$ s Conversion Time
- Up to 15 kSPS at Maximum Resolution
- 8 Multiplexed Single Ended Input Channels
- 7 Differential Input Channels
- 2 Differential Input Channels with Optional Gain of 10x and 200x<sup>(1)</sup>
- Optional Left Adjustment for ADC Result Readout
- 0 -  $V_{CC}$  ADC Input Voltage Range
- Selectable 2.56V ADC Reference Voltage
- Free Running or Single Conversion Mode
- ADC Start Conversion by Auto Triggering on Interrupt Sources
- Interrupt on ADC Conversion Complete
- Sleep Mode Noise Canceler

Note: 1. The differential input channel are not tested for devices in PDIP and PLCC Package. This feature is only guaranteed to work for devices in TQFP and QFN/MLF Packages.

The ATmega8535 features a 10-bit successive approximation ADC. The ADC is connected to an 8-channel Analog Multiplexer which allows eight single-ended voltage inputs constructed from the pins of Port A. The single-ended voltage inputs refer to 0V (GND).

The device also supports 16 differential voltage input combinations. Two of the differential inputs (ADC1, ADC0 and ADC3, ADC2) are equipped with a programmable gain stage, providing amplification steps of 0 dB (1x), 20 dB (10x), or 46 dB (200x) on the differential input voltage before the A/D conversion. Seven differential analog input channels share a common negative terminal (ADC1), while any other ADC input can be selected as the positive input terminal. If 1x or 10x gain is used, 8-bit resolution can be expected. If 200x gain is used, 7-bit resolution can be expected.

The ADC contains a Sample and Hold circuit which ensures that the input voltage to the ADC is held at a constant level during conversion. A block diagram of the ADC is shown in Figure 98.

The ADC has a separate analog supply voltage pin, AVCC. AVCC must not differ more than  $\pm 0.3V$  from  $V_{CC}$ . See the paragraph "ADC Noise Canceler" on page 214 on how to connect this pin.

Internal reference voltages of nominally 2.56V or AVCC are provided On-chip. The voltage reference may be externally decoupled at the AREF pin by a capacitor for better noise performance.

**ภาคผนวก ค**  
รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงการ

```
#include <mega8535.h>
#include <delay.h>
#include <stdio.h>
// Alphanumeric LCD Module functions
#asm
.equ __lcd_port=0x15 ;PORTC
#endasm
#include <lcd.h>

char dis[8];
unsigned char key_pad[4][4]={{'1','2','3','<'},
                             {'4','5','6','>'},
                             {'7','8','9','2n'},
                             {'c','0','h','e'}
                             };

unsigned char scan_col[]={0xef,0xdf,0xbf,0x7f};
unsigned int col,row,p1,p2,p3,enter,flag,num;
unsigned int
num1,num2,num3,total,nums,numw,shift,degree,k,time,time_max,lad,clear,m,help,zero,q
,w,d;
interrupt [EXT_INT0] void ext_int0_isr(void)
{
    TCCR1B=0x02;
    TIMSK=0x04;
    TCNT1=time_max-(degree*k);
}

interrupt [TIM1_OVF] void timer1_ovf_isr(void)
{
    m=m+1;
    TCCR1B=0x00;
    TIMSK=0x00;
    switch(m)
    {
        case 1:
            PORTD.7=1;
            PORTD.1=1;
            delay_ms(10);
            PORTD.7=0;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงการ(ต่อ)

```
m=2;
case 2:m=1;

}
TCCR1B=0x00;
TIMSK=0x00;
PORTD.1=0;

}
void buzzer(void)
{
PORTD.0=1;
delay_us(3000);
PORTD.0=0;
}
void clear_monitor(void)
{
switch(clear)
{
case 0://numw=numw;
break;
case 1:
numw=0;
flag=0;
lcd_gotoxy(12,2);
lcd_putsf(" ");
lcd_gotoxy(7,3);
lcd_putsf(" ");
//lcd_gotoxy(7,3);
//lcd_putsf("Setting ");
clear=0;
PORTD.1=0;
enter=0;
TCNT1=0;
break;
}
}

void check_ladd(void)
{
switch (lad)

{
case 1:lcd_gotoxy(0,1);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงการ(ต่อ)

```
        lcd_putsf("*");
        lcd_gotoxy(0,2);
        lcd_putsf(" ");
        break;
    case 2:lcd_gotoxy(0,1);
        lcd_putsf(" ");
        lcd_gotoxy(0,2);
        lcd_putsf("*");
        break;
    }
}
void check_key1(void)
{
    switch (col)
    {
        // PORTD.0=0;
        case 0:numw=1;
            break;
        case 1:numw=2;
            break;
        case 2:numw=3;
            break;
        case 3:q=1;
            break;
    }
}
void check_key2(void)
{
    switch (col)
    {
        //PORTD.0=0;
        case 0:numw=4;
            break;
        case 1:numw=5;
            break;
        case 2:numw=6;
            break;
        case 3:w=1;
            break;
    }
}
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงการ(ต่อ)

```
void check_key3(void)
```

```
{  
  switch (col)  
  {  
    // PORTD.0=0;  
    case 0:numw=7;  
    break;  
    case 1:numw=8;  
    break;  
    case 2:numw=9;  
    break;  
    case 3:d=1;  
    break;  
  }  
}
```

```
void check_key4(void)
```

```
{  
  switch (col)  
  {  
    ///PORTD.0=0;  
    case 0:clear=1;  
    break;  
    case 1:zero=1;  
    break;  
    case 2:help=1;  
    break;  
    case 3:enter=enter+1;  
    break;  
  }  
}
```

```
void check_flag(void)
```

```
{  
  switch (flag)  
  {  
    case 0:  
    if(flag>3)  
    {  
      flag=0;  
    }  
  
    else  
    {  
      flag=flag;  
    }  
  }  
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงการ(ต่อ)

```
    }
    break;
case 1:flag=flag;
    break;
}
}
void show_dis(void)
{
    switch (flag)
    {
        case 1:num1=numw;
            nums=num1*1;
            // clear_monitor();
            // check_ladd();
            sprintf(dis,"%d",nums);
            lcd_gotoxy(12,2);
            lcd_puts(dis);

            // PORTD.0=0;
            break;
        case 2:num2=numw;
            nums=(num1*10)+num2*1;
            // check_ladd();
            // clear_monitor();
            sprintf(dis,"%d",nums);
            lcd_gotoxy(12,2);
            lcd_puts(dis);

            // PORTD.0=0;
            break;
        case 3:num3=numw;
            nums=(num1*100)+(num2*10)+num3*1;
            //check_ladd();
            // clear_monitor();
            sprintf(dis,"%d",nums);
            lcd_gotoxy(12,2);
            lcd_puts(dis);

            // PORTD.0=0;
            break;
    }
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงการ(ต่อ)

```
void set_key(void)
{
    switch (col)
    {
        case 0:PORTA.4=0;
            PORTA.5=1;
            PORTA.6=1;
            PORTA.7=1;
            break;
        case 1:PORTA.4=1;
            PORTA.5=0;
            PORTA.6=1;
            PORTA.7=1;
            break;
        case 2:PORTA.4=1;
            PORTA.5=1;
            PORTA.6=0;
            PORTA.7=1;
            break;
        case 3:PORTA.4=1;
            PORTA.5=1;
            PORTA.6=1;
            PORTA.7=0;
            break;
    }
}

void check_row(void)
{
    switch(PINA.3)
    {
        case 0:row=3;
            buzzer();
            // PORTD.0=1;
            check_key4();
            flag+=1;
            delay_ms(500);
            clear_monitor();

            switch(enter)
            {
                case 0:
                    switch(help)
                    {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงการ(ต่อ)

```
case 0:
switch (zero)
{
case 0:
  lcd_clear();
  lcd_gotoxy(0,0);
  lcd_putsf("Impulse Generate");
  lcd_gotoxy(1,2);
  lcd_putsf("Set Degree:");
  lcd_gotoxy(0,1);
  lcd_putsf("HighVoltage Lab");
  lcd_gotoxy(0,3);
  lcd_putsf("Status:");
  lcd_gotoxy(0,2);
  lcd_putsf("*");
  lcd_gotoxy(7,3);
  lcd_putsf("Innitial");
  delay_ms(1000);
  lcd_gotoxy(7,3);
  lcd_putsf(" ");
  lcd_gotoxy(7,3);
  lcd_putsf("Setting");
  break;
case 1:numw=0;
  zero=0;
  break;
}
break;
case 1:
  flag=flag-1;
  help=0;
  break;
}
break;
case 1:PORTD.1=1;
  lcd_gotoxy(7,3);
  lcd_putsf(" Ready ");
  PORTD.0=1;
  delay_ms(1000);
  PORTD.0=0;
  delay_ms(1000);
  PORTD.0=1;
  delay_ms(1000);
  PORTD.0=0;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงการ(ต่อ)

```
flag=4;
break;
case 2:lcd_gotoxy(7,3);
lcd_putsf("Completed");
degree=nums;
time_max=65536;

flag=4;
m=0;

break;
}
// num=key_pad[row][col];
break;
case 1:col=col;
break;
}
switch(PINA.2)
{
case 0:row=2;
buzzer();
// PORTD.0=1;
check_key30;
flag+=1;
delay_ms(500);
switch(d)
{
case 0:

break;
case 1:flag=flag-1;
d=0;
break;
}

// num=key_pad[row][col];
break;
case 1:col=col;
break;
}
}
switch(PINA.1)
{
case 0:row=1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงการ(ต่อ)

```
buzzer();
// PORTD.0=1;
check_key2();
flag+=1;
delay_ms(500);
//num=key_pad[row][col];
switch(w)
{
  case 0:

    break;
  case 1:flag=flag-1;
  w=0;
  break;
}
break;
case 1: col=col;
break;
}
switch(PINA.0)
{
  case 0:row=0;
  // PORTD.0=1;
  buzzer();
  check_key1();
  flag+=1;
  delay_ms(500);
  // num=key_pad[row][col];
  switch(q)
  {
    case 0:

      break;
    case 1:flag=flag-1;
    q=0;
    break;
  }
  break;
  case 1:col=col;
  break;
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงการ(ต่อ)

```
    }  
  }  
  void main(void)  
  {  
  
    PORTA=0x0f;  
    DDRA=0xf0;  
  
    PORTB=0x00;  
    DDRB=0xff;  
  
    PORTC=0x00;  
    DDRC=0x00;  
  
    PORTD=0x70;  
    DDRD=0x83;  
  
    TCCR0=0x00;  
    TCNT0=0x00;  
    OCR0=0x00;  
  
    TCCR1A=0x00;  
    TCCR1B=0x00;  
    TCNT1H=0x00;  
    TCNT1L=0x00;  
    ICR1H=0x00;  
    ICR1L=0x00;  
    OCR1AH=0x00;  
    OCR1AL=0x00;  
    OCR1BH=0x00;  
    OCR1BL=0x00;  
  
    ASSR=0x00;  
    TCCR2=0x00;  
    TCNT2=0x00;  
    OCR2=0x00;  
  
    MCUCR=0x00;  
    MCUCSR=0x00;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงการ(ต่อ)

```
TIMSK=0x00;
```

```
ACSR=0x80;  
SFIOR=0x00;
```

```
TIMSK=0x00;
```

```
GICR|=0x40;  
MCUCR=0x03;  
MCUCSR=0x00;  
GIFR=0x40;
```

```
lcd_init(16);  
lcd_gotoxy(0,0);  
lcd_putsf("Impulse Generate");  
lcd_gotoxy(1,2);  
lcd_putsf("Set Degree:");  
lcd_gotoxy(0,1);  
lcd_putsf("HighVoltage Lab");  
lcd_gotoxy(0,3);  
lcd_putsf("Status:");  
lcd_gotoxy(0,2);  
lcd_putsf("*");  
lcd_gotoxy(7,3);  
lcd_putsf("Innitail");  
delay_ms(1000);  
lcd_gotoxy(7,3);  
lcd_putsf(" ");  
lcd_gotoxy(7,3);  
lcd_putsf("Setting");  
shift=10;  
#asm("sei")  
while (1)  
{
```

```
    //time=55.5;  
    k=111;  
    // lcd_clear();  
    for(col=0;col<4;col++)  
    {  
        set_key();  
        check_row();
```

## รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงการ(ต่อ)

```
//check_flag();  
show_dis();  
// check_ladd();  
}  
}  
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นายกิตติชัย แก้วดำ เกิดเมื่อวันที่ 17 มีนาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดแพร่ สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร วิทยาเขตพระนครเหนือ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายปริญญ์ สุวรรณมาโจ เกิดเมื่อวันที่ 28 กันยายน พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงจากวิทยาลัยเทคนิคมีนบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายพชร แดงรักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 2 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดสมุทรสาคร สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงจากวิทยาลัยเทคนิคสมุทรสาคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายสรราช อานอชา เกิดเมื่อวันที่ 12 มีนาคม พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร วิทยาเขตพระนครเหนือ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้