



แบบจำลองการควบคุมแรงดันเกินในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า
Model of over voltage in control transmission system

นายภูซงค์ รุ่งเรือง
นายรัฐพล มั่งคั่ง
นายอธิรुจน์ เจริญจิตร

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

แบบจำลองการควบคุมแรงดันเกินในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า



นายภูซังค์ รุ่งเรือง
นายรัฐพล มั่งคั่ง
นายอธิรุจน์ เจริญจิตร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พ.ศ. 2556

Model of over voltage in control transmission system

Mr.Puchong Rungruauang
Mr.Rattapon Mangkang
Mr.Athirut Chareonjit



THIS PROJECT REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE BACHELOR OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA NAKHON
2013

หัวข้อโครงการ ออกแบบชุดราตรีสำหรับสุภาพสตรี
กรณีศึกษาจากภาพยนตร์เรื่องคลีโอพัตราปี1963
ชื่อผู้เขียน นายภูชงค์ คุณฉนวน
ปริญญา เทคโนโลยีบัณฑิต
สาขาวิชา ออกแบบแฟชั่นและสิ่งทอ
คณะ อุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์รัชชัชย แสงน้ำเพชร
อาจารย์จรัสพิมพ์ วังเย็น

คณะกรรมการสอบโครงการได้ให้ความเห็นชอบโครงการฉบับนี้แล้ว

.....กรรมการ .....กรรมการ

(อาจารย์รัชชัชย แสงน้ำเพชร)

(อาจารย์จรัสพิมพ์ วังเย็น)

.....กรรมการ .....กรรมการ

(อาจารย์ก้องเกียรติ มหาอินทร์)

(อาจารย์สัมพันธ์ สุวรรณศิริ)

.....กรรมการ .....กรรมการ

(อาจารย์นิตยา วันโสิกา)

(อาจารย์จิตติมา พุทธบูชา)

.....กรรมการ .....กรรมการ

(อาจารย์กฤษดา รัตนางกูร)

(อาจารย์ณฤพณ ไพศาลดิวงค์)

วันที่ 14 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2557

หัวข้อปริญญานิพนธ์	แบบจำลองการควบคุมแรงดันเกินในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า	
โดย	นายภูษงค์	รุ่งเรือง
	นายรัฐพล	มั่งคั่ง
	นายอธิรุจน์	เจริญจิตร
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ดร.นัฐโชติ	รักไทยเจริญชีพ
	อาจารย์อานนท์	สิงห์เสถียร
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	
ปีการศึกษา	2556	

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้เสนอการออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ขนาด $1.2 / 50 \mu s$ เพื่อการศึกษาและใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน เพื่อทดสอบความคงทนของสายส่งกำลังไฟฟ้าทดสอบและศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากค่าองค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยมีการจำลองผ่านโปรแกรมสำเร็จรูป Orcad ก่อนดำเนินการสร้างจริง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะหาได้ตามท้องตลาดและใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้ โดยจะนำมาทดสอบกับตู้จำลองสายส่งระยะไกล ผลที่ได้จากการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่นำมาทดสอบจะต้องมีประสิทธิภาพที่ดี สามารถทนต่อแรงดันสูงชั่วขณะที่นำมาทดสอบได้ เพื่อความปลอดภัยของระบบไฟฟ้า

(ปริญญานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 56 หน้า)

คำสำคัญ : อิมพัลส์, สายส่งไฟฟ้า, ค่ามาตรฐานในการทดสอบที่ใช้อ้างอิง, ออสซิลโลสโคป

Project Report Title : Model of over voltage control in transmission system
By : Mr.Puchong Rungruauang
Mr.Rattapon Mangkang
Mr.Athirut Chareonjit
ProjectAdvisor : Dr.Nattachote Rugthaicharoencheep
Mr.Arnon Singhasathein
Departmentof : Electrical Engineering
Faculty : Engineering
Academic Year : 2013

Abstract

This thesis offers the design of the impulse generator $1.2 / 50 \mu\text{s}$, which applies for studying and generating the lightning impulse, to test the endurance of the electricity transmission line. Moreover, this study analyses the factors, which affects the impulse waveform by using Orcad program. The parts of prototype device can find in the general market. After the efficiency test of the electricity transmission line, the result shown that the device should have the high capability to endure the temporarily high impulse. This minimizes the dangerous from the electricity system.

(Total 56 pages)

Keywords : Impulse, Transmission line, Basic Impulse Level, Oscilloscope

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าคณะผู้จัดทำโครงการนี้ขอขอบพระคุณ อาจารย์ดร. ณัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ กับ อาจารย์อานนท์ สิงห์เสถียร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างยิ่งที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการดำเนินการออกแบบและวิจัย การศึกและวิเคราะห์แบบจำลองการควบคุมแรงดันเกินในระบบสายส่งไฟฟ้ากำลัง และหนังสือวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงทุกเล่ม และข้อมูลจาก IEEE รวมถึงอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยและทดสอบรวมถึง คำแนะนำเพิ่มเติม จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

โครงการนี้ได้รับทุนอุดหนุนงบประมาณจากโครงการสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมเพื่อคนรุ่นใหม่ ประจำปี 2556 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ขอขอบพระคุณบิดามารดาของข้าพเจ้าขอขอบคุณเพื่อนๆ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ทุกท่าน ที่เป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้ามีความพยายาม มุ่งมั่นในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ให้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ข้าพเจ้าคณะผู้จัดทำรู้สึกถึงความกรุณาของทุกๆท่านเหล่านี้เป็นอย่างยิ่งที่มีความกรุณาด้วยดีเสมอมาจึงขอประกาศขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 ข้อกำหนดของการศึกษา	3
1.7 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การสร้างแรงดันเกินอิมพัลส์	4
2.2 ขนาดแรงดันอิมพัลส์ทดสอบ	13
2.3 เปรกคาว์นของแรงดันอิมพัลส์	17
2.4 สายส่งระยะยาว	23
2.5 ผลกระทบของแรงดันเกินในระบบส่งจ่าย	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 การออกแบบวงจรอิมพัลส์	26
3.2 ทำการทดสอบกับโปรแกรม Orcad	28
3.3 ออกแบบจำลองสายส่งระยะยาว	29
3.4 ออกแบบสวิตช์แม่เหล็กไฟฟ้าทางกล	30
3.5 ทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์กับแบบจำลองสายส่งระยะยาวผ่านโปรแกรม Orcad	31
บทที่ 4 ผลการทดสอบ	
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้าง	32
4.2 ผลจากการทดสอบจริง	34
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดสอบ	36
5.2 การป้องกันฟ้าผ่าแก่ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	36
5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาและพัฒนาต่อ	36

สารบัญ (ต่อ)

5.4 ปัญหาและอุปสรรค	36
บรรณานุกรม	37
ภาคผนวก ก	
การใช้งานโปรแกรม Orcad	38
ภาคผนวก ข	
บทความวิชาการ การวิเคราะห์ผลกระทบแรงดันเกินในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า ด้วยการทดสอบแรงดันอิมพัลส์	49
ประวัติผู้เขียน	54



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าแฟกเตอร์ k_1 และ k_2 สำหรับรูปคลื่นมาตรฐาน	11
2.2 ค่าองค์ประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์	13
2.3 มาตรฐานการฉนวนระดับ $1\text{kV} < U_m < 52\text{kV}$	14
2.4 มาตรฐานการฉนวนระดับ $52 \leq U_m \leq 300\text{kV}$	14
2.5 มาตรฐานการฉนวนระดับ $U_m \geq 300\text{kV}$	15



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า	5
2.2	วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	6
2.3	Laplace transform ของวงจรอิมพัลส์พื้นฐาน	9
2.4	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานประกอบด้วยเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม	10
2.5	เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์	12
2.6	เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาว์นของแรงดันอิมพัลส์	17
2.7	ลักษณะเส้นแรงดัน - เวลา	19
2.8	ลักษณะเส้นแรงดัน - เวลา ของแกปทรงกลม และแกปแท่งกลมปลายแหลม	19
2.9	ฟังก์ชันกระจายของแรงดันอิมพัลส์เบรกดาว์น	21
2.10	แรงดันเบรกดาว์น U_b ของอิเล็กทรอนิกส์ที่ระบายในอากาศในเทอมของระยะแกป d	22
2.11	$U_{b50\%}$ ของแท่ง - ระบายในเทอมของเวลาหน้าคลื่น	23
2.12	ส่วนประกอบวงจรของระบบสายส่งระยะยาว	24
2.13	วงจรสมมูลสำหรับสายส่งระยะยาว	24
3.1	วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	26
3.2	วงจรการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ผ่านโปรแกรม Orcad	28
3.3	วงจรการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ผ่านโปรแกรม Orcad ที่ตัดทางคลื่น	28
3.4	ผลจากการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ผ่านโปรแกรม Orcad ที่ตัดหน้าคลื่น	28
3.5	เปรียบเทียบแบบจำลองการทดสอบกับมาตรฐาน IEC IEC 60060-1	29
3.6	วงจรสมมูลสายส่งระยะยาวเมื่อใส่ค่าพารามิเตอร์	29
3.7	ชุดสวิตช์แม่เหล็กไฟฟ้า	30
3.8	วงจรการทดสอบแรงดันเกินอิมพัลส์กับแบบจำลองสายส่งระยะยาวผ่านโปรแกรม Orcad	31
3.9	ผลจากการทดสอบแรงดันอิมพัลส์กับแบบจำลองสายส่งระยะยาวผ่านโปรแกรม Orcad	31
4.1	ความต้านทานหน่วง (R_d)	32
4.2	ความต้านทานปล่อยประจุ (R_c)	32
4.3	ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_b)	33
4.4	ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s)	33
4.5	หม้อแปลงแรงดันต้นไฟฟ้าขนาด 1kV	34
4.6	เปรียบเทียบผลของแรงดันอิมพัลส์ที่ทดสอบจาก Oscilloscope แรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน	34
4.7	เปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ที่ทำการทดสอบกับแบบจำลองสายส่งระยะยาวจาก Oscilloscope กับโปรแกรม Orcad	35

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมากในการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรม เพื่อการพัฒนาประเทศในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้านั้นจำเป็นที่จะต้องส่งจ่ายกันในลักษณะของไฟฟ้าแรงสูงเพื่อที่จะให้เพียงพอต่อความต้องการและเกิดการสูญเสียที่น้อยที่สุดโดยที่อุปกรณ์ต่างๆที่นำมาใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นจำเป็นที่จะต้องได้รับการทดสอบก่อนที่จะนำมาใช้งานจริงเพื่อควมมีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของระบบและเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงส่วนใหญ่จะติดตั้งอยู่กลางแจ้งจึงมีโอกาที่จะได้รับแรงดันเกินที่อาจจะเกิดขึ้นได้จากสาเหตุที่สำคัญ 2 ประการคือจากปรากฏการณ์ธรรมชาติเช่นฟ้าผ่าเรียกว่าแรงดันเกินฟ้าผ่าและอีกสาเหตุหนึ่งเกิดขึ้นจากการทำงานของสวิตช์ตัดตอนวงจรในระบบเนื่องจากมีผู้ปฏิบัติงานเป็นผู้กระทำหรือกระทำเองโดยอัตโนมัติเนื่องจากเกิดความผิดปกติในระบบเรียกว่าแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งดังนั้นจึงมีข้อกำหนดให้มีการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในหัวข้อการทดสอบเนื่องจากแรงดันเกินอิมพัลส์

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เป็นผลเนื่องมาจากการเกิดดิสชาร์จของประจุในก้อนเมฆซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงมาก นอกจากนั้นแล้วการเปลี่ยนแปลงของกระแสฟ้าผ่ายังมีอัตราสูงอีกด้วย จากผลที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิดความเสียหายต่างๆขึ้นในระบบได้ เช่น เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปรบกวนการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวต่อสัญญาณรบกวนสูง เกิดแรงดันเกินวิ่งไปตามสายไฟเข้าสู่อุปกรณ์ไฟฟ้าได้รับความเสียหาย หรือ เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในรูปแบบของเสิร์จเข้ามาทำความเสียหายกับอุปกรณ์ในระบบแรงต่ำ เป็นต้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาลักษณะสมบัติของคลื่นฟ้าผ่า ทั้งในรูปแบบของแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะในระบบแรงต่ำ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบรูปคลื่นเพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันระบบ ให้อุปกรณ์เหล่านี้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่เกิดความเสียหายเมื่อถูกรบกวน โดยเราเลือกใช้โปรแกรม Orcad เพราะเป็นโปรแกรมที่รู้จักกันทั่วไป ง่ายต่อการใช้งาน เราจึงนำมาจำลองวงจรอิมพัลส์เพื่อทำการคำนวณหาอุปกรณ์ในการสร้างแบบจำลองแรงดันอิมพัลส์เพื่อทำการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยแรงดันเกินอิมพัลส์ ซึ่งจะแสดงภาพออกทางออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

1.2วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อสร้างชุดจำลองแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบสายส่งระยะยาว
2. เพื่อออกแบบวงจรแรงดันเกินชั่วขณะในระบบสายส่งระยะยาว
3. เพื่อศึกษาการใช้ ออสซิลโลสโคป(Oscilloscope) ในการบันทึกภาพผลตอบสนอง

1.3ขอบเขตของโครงการ

1. สร้างชุดจำลองแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบสายส่งจำนวน 1 ชุด
2. ใช้แรงดันอิมพัลส์(1.2/50) μ s
3. ใช้ทดลองกับแบบจำลองสายส่งระยะยาว
4. สามารถบันทึกภาพด้วยออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)
5. สามารถนำไปต่อใช้กับชุดทดลองแบบอื่นเพื่อทดสอบได้

1.4ขั้นตอนการศึกษา

1. กำหนดหัวข้อโครงการ
2. ศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงการ
3. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับโครงการ
4. ออกแบบชุดจำลองแรงดันเกินในระบบสายส่ง
5. ตรวจสอบงบประมาณที่ใช้ในโครงการ
6. ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษา
7. ยื่นเสนอหัวข้อโครงการต่อคณะกรรมการ
8. ดำเนินการสร้างชุดจำลองแรงดันเกินในระบบสายส่ง
9. ทดสอบความถูกต้องของโครงการตามที่ได้ออกแบบไว้
10. บันทึกผลที่ได้จากการทดสอบ
11. วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ
12. เรียบเรียงเอกสารโครงการ
13. จัดทำปฏิญานิพนธ์

1.5ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ชุดจำลองแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบสายส่งระยะยาว
2. ได้ออกแบบวงจรแรงดันเกินชั่วขณะในระบบสายส่งระยะยาว
3. ได้ศึกษาการใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ในการบันทึกภาพผลตอบสนอง

1.6 ข้อกำหนดของการศึกษา

ใช้งบประมาณในการดำเนินงานประมาณ 15000 บาท

ใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานประมาณ 4 เดือน

1.7 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา

Impulse, Transmission line, Basic Impulse Level, Oscilloscope

อิมพัลส์, สายส่งไฟฟ้า, ค่ามาตรฐานในการทดสอบที่ใช้อ้างอิง, ออสซิลโลสโคป



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 การสร้างแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์ เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันเกินเสิร์จทรานเซียนต์ ที่เกิดจากเหตุภายนอกที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า และที่เกิดขึ้นจากสาเหตุภายในระบบส่งจ่ายเอง คือเกิดจากการทำงานของสวิตช์ หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ เมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นในระบบ เรียกว่า แรงดันอิมพัลส์แบบสวิตช์ซึ่ง ความมุ่งหมายของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขึ้นในห้องทดลอง ก็เพื่อที่จะนำไปศึกษาวิจัย หรือทดสอบอุปกรณ์ต่างๆ ก่อนที่จะนำไปใช้งาน เพื่อจะดูว่าทนต่อแรงดันเกินเหล่านี้ได้หรือไม่ ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันหรือความเครียดสนามไฟฟ้าอิมพัลส์ มีใช้ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันสูงสุดเท่านั้น หากแต่ยังขึ้นอยู่กับการแปรของแรงดันไปตามเวลาอีกด้วย ฉะนั้น เพื่อความสะดวกต่อการเปรียบเทียบผลการทดสอบ จึงมีการกำหนดรูปคลื่นอิมพัลส์ให้เป็นมาตรฐานขึ้น โดยยึดถือเอารูปที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติเป็นเกณฑ์

2.1.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน

แรงดันอิมพัลส์อาจกำหนดด้วยข้อกำหนดต่อไปนี้

2.1.1.1 ขนาดของแรงดัน โดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน ในกรณีที่มีคลื่นระลอกซ้อน

ที่เกิดจากออสซิลเลชันใกล้ๆ ยอดรูปคลื่น ให้ถือเอาค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอก

2.1.1.2 ขั้วของแรงดันอาจจะเป็นบวกหรือลบก็ได้ เมื่อเทียบกับดิน

2.1.1.3 เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอด

2.1.1.4 เวลาช่วงหลังคลื่น T_2 หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่ง

ขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อาจแบ่งเป็น ดังนี้

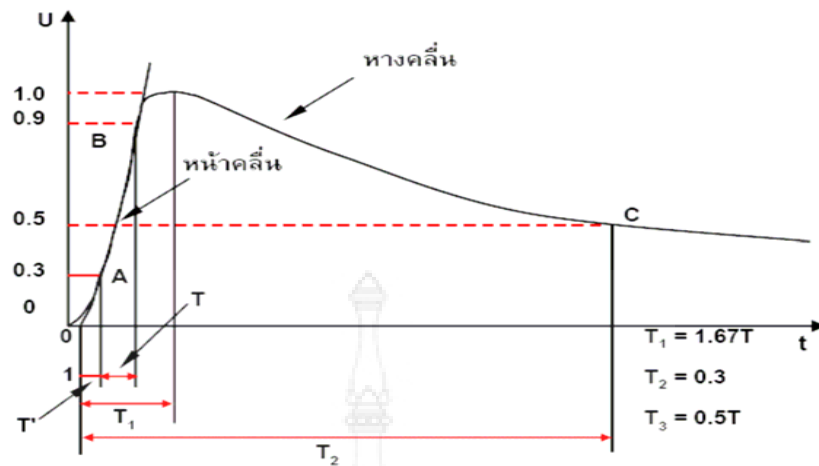
- รูปคลื่นเต็ม (Full wave) หมายถึง รูปคลื่นที่ขนาดเพิ่มขึ้นถึงค่ายอดแล้วค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเป็นศูนย์
- รูปคลื่นตัด (Chopped wave) หมายถึง เกิดจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มเข้าไปที่วัสดุทดสอบ และการฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นทนต่อแรงดันที่ป้อนเข้าไปไม่ได้ ซึ่งเกิดการสปาร์กผ่าน เกิดวาบไปตามผิวหรือเกิดเบรกดาวนเงาะทะเล ทำให้เกิดลัดวงจร ณ จุดนั้น การเกิดคลื่นตัดนี้อาจเกิดขึ้นที่ส่วนหางคลื่นหรือส่วนหน้าคลื่นก็ได้

ถ้าต้องการทราบว่า แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นมานั้น เป็นไปตามมาตรฐานกำหนดหรือไม่ ให้หาค่า T_1 , T_2 และ T_c โดยวิธีที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 คือ

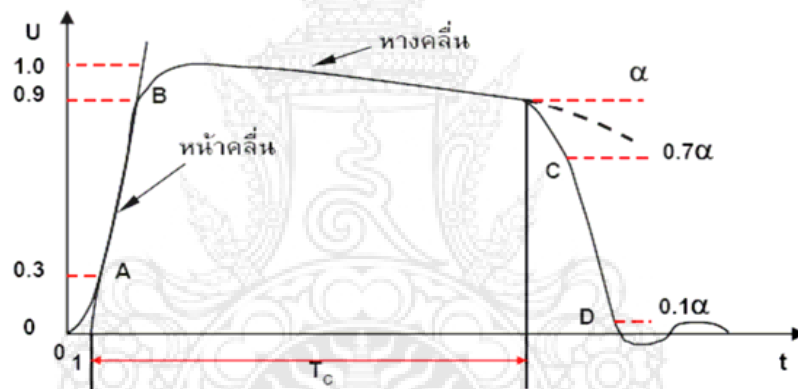
- เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$ คือจะต้องอยู่ในช่วง $0.84 - 1.56 \mu\text{s}$

- เวลาช่วงหางคลื่น $T_2 = 50 \mu\text{s} \pm 20\%$ คือจะต้องอยู่ในช่วง $40 - 60 \mu\text{s}$

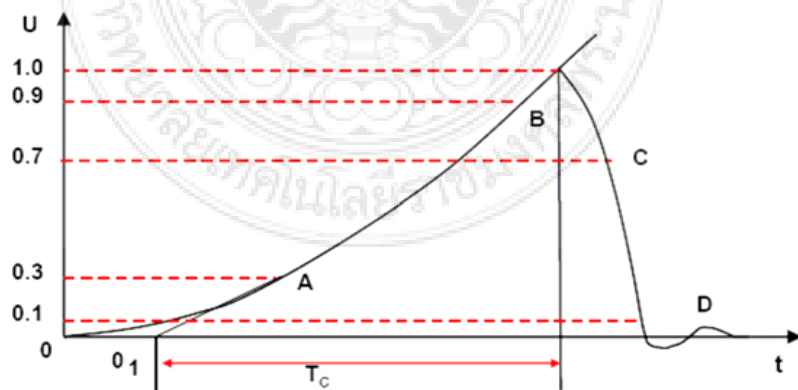
รูปคลื่นแรงดัน U_m ยอมให้ผิดพลาดได้ $\pm 3\%$ ของค่าที่ระบุรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์



a) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม

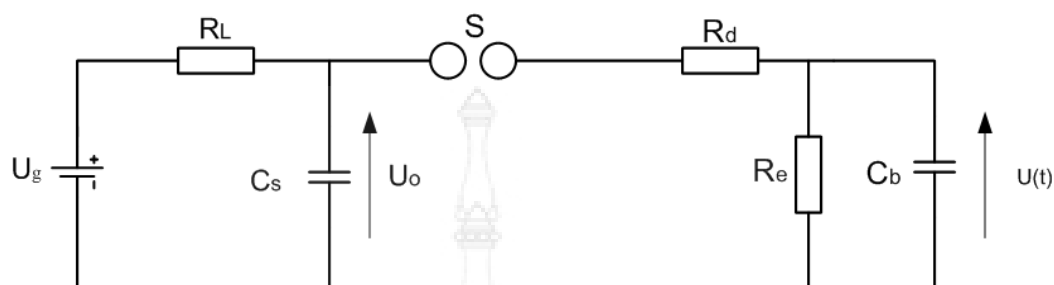


b) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หางคลื่น

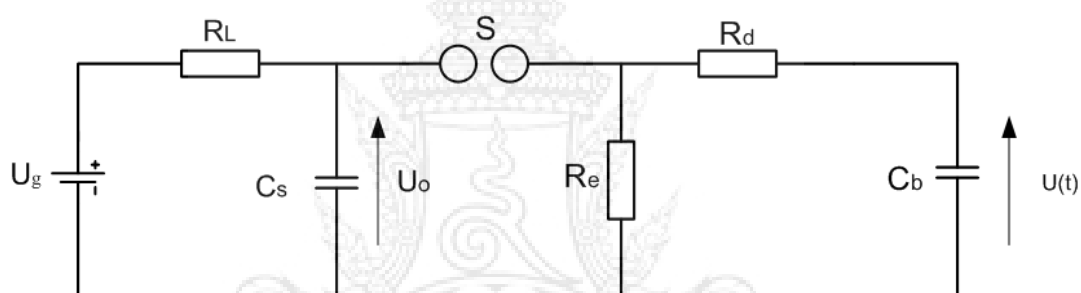
c) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น
รูปที่ 2.1 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า

2.1.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ามี 2 แบบ ดังในรูป



a) วงจร A



b) วงจร B

รูปที่ 2.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ความหมายในรูปวงจร a) และ b)

- U_g = แรงดันกระแสตรงของตัวจ่าย
- U_o = แรงดันอัดประจุกระแสตรง
- C_s = ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน
- C_b = ตัวเก็บประจุไหลด (รวมทั้งความจุไฟฟ้าของ อุปกรณ์เครื่องวัดและอื่นๆ)
- R_L = ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ
- R_d = ความต้านทานหน่วง
- R_e = ความต้านทานปล่อยประจุ
- $U(t)$ = แรงดันอิมพัลส์ที่ได้แปรไปตามเวลา
- S = สปรັกแกป

หน้าที่ของส่วนประกอบในวงจร คือ แรงดันกระแสตรง U_g เป็นตัวป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ จนกระทั่งได้แรงดันที่ต้องการ U_0 การอัดประจุนี้จะผ่านความต้านทาน R_L ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการอัดประจุเร็วหรือช้า ขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้าที่ต้องการอัดประจุ และขนาดแรงดันอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาดใหญ่ อาจต้องใช้เวลาอัดประจุหลายสิบลวินาที ขนาดแรงดันอัดประจุ U_0 จำกัดด้วยระยะห่างของสปาร์กแกป S ที่ปรับได้ เป็นตัวกำหนดค่าแรงดันอัดประจุ ให้สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้มากน้อยตามต้องการ สปาร์กแกปนอกจากจะเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันอัดประจุแล้ว ยังทำหน้าที่เหมือนกับสวิทช์ หรือไก (trigger) เพื่อให้ตัวเก็บประจุ C_s ทำการปล่อยประจุให้กับโหลด การเกิดสปาร์กแกป เมื่อกำหนดระยะห่างช่องสปาร์กแกป จะดำเนินไปด้วยความเร็ว คือ ใช้เวลาประมาณ 10 – 100 ns ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์กแกป เมื่อกำหนดระยะห่างช่องสปาร์กแกป อาจจะแตกต่างกันไปบ้างแต่ไม่มากนัก ประมาณน้อยกว่า 1% ถ้าหากอากาศสะอาดปราศจากฝุ่นละออง ช่วงระยะเวลาระหว่างการเกิดสปาร์กต่อเนื่องจะถี่หรือห่าง ขึ้นอยู่กับแรงดันกระแสตรงที่ป้อนให้กับ C_s ถ้าปรับ U_g ให้สูงมากๆ ก็จะเกิดสปาร์กง่ายหรือสปาร์กถี่ขึ้น เมื่อเกิดสปาร์กที่ S แรงดันอัดประจุ U_0 จะคร่อม R_d และ C_b ประจุจะถ่ายทอดไปยังวัสดุทดสอบซึ่งแทนด้วย C_b การถ่ายทอดหรือปล่อยประจุนี้ จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับ R_d และ C_b นับเป็นเวลาช่วงหน้าคลื่น ฉะนั้น จึงกล่าวได้ว่า R_d และ C_b นี้ จะเป็นตัวกำหนดเวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 เมื่อถ่ายประจุให้ C_b จนเต็มที่แล้ว ประจุนี้ก็จะดีสชาร์จหรือปล่อยประจุออกไปสู่ R_e จึงกล่าวได้ว่า R_e ทำหน้าที่ควบคุมเวลาช่วงหางคลื่น T_2 คือ ถ้า R_e มีค่าสูง T_2 ก็จะมีค่ามากตามไปด้วย (ค่าคงตัวเวลาคายประจุ วงจร A เท่ากับ $C_s (R_d + R_e)$ และวงจร B เท่ากับ $(C_s R_e)$ ค่ายอดแรงดันที่จ่ายออกที่ปลายแรงสูง U จะน้อยกว่าแรงดันอัดประจุ U_0 เพราะประจุจะกระจายให้กับ C_s และ C_b ฉะนั้น อัตราส่วนของ U ต่อ U_0 จะน้อยกว่า 1 เสมอ และเรียกอัตราส่วนนี้เป็นประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ นั่นคือ

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

ฉะนั้น เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าสูงๆ ควรเลือกให้ C_s มีค่าสูงกว่าโหลด C_b มากๆ และเพื่อให้เครื่องกำเนิด มีพลังงานมากพอสามารถสร้างรูปคลื่นได้ตามเกณฑ์ที่มาตราฐานกำหนด คือ T_1 และ T_2 อยู่ในเกณฑ์ และมีให้เกิดออสซิลเลชันเกินกำหนด (< 5%) ในทางปฏิบัติจะใช้เงื่อนไขให้

$$C_s \geq 10C_b \quad (2.2)$$

ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยทั่วไปจะกำหนดด้วย

- แรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิด U_n (kV)
- แรงดันอัดประจุรวมทั้งหมด U_o (kV)
- ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมด C_s (F)
- พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด W_e (kJ)
- อัตราการดีสชาร์จจำนวนครั้งต่อนาที
- รูปคลื่นแรงดันแบบฟ้าผ่า หรือแบบสวิตซ์ซิ่ง

ค่าแรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบ BIL หรือ BSL ตามมาตรฐานกำหนด ตามระดับแรงดันของระบบที่จะนำเอาอุปกรณ์ไปใช้ ซึ่งมีหลักการเลือกและการกำหนดทำนองเดียวกับการกำหนดขนาดแรงดันของหม้อแปลงทดสอบ

พลังงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ W_e เป็นลักษณะสำคัญประการหนึ่งที่จะต้องกำหนด ซึ่งขึ้นอยู่กับความจุไฟฟ้า C_s และแรงดันอัดประจุ U_o จะคำนวณได้จาก

$$W_e = \frac{1}{2} C_s U_o^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ

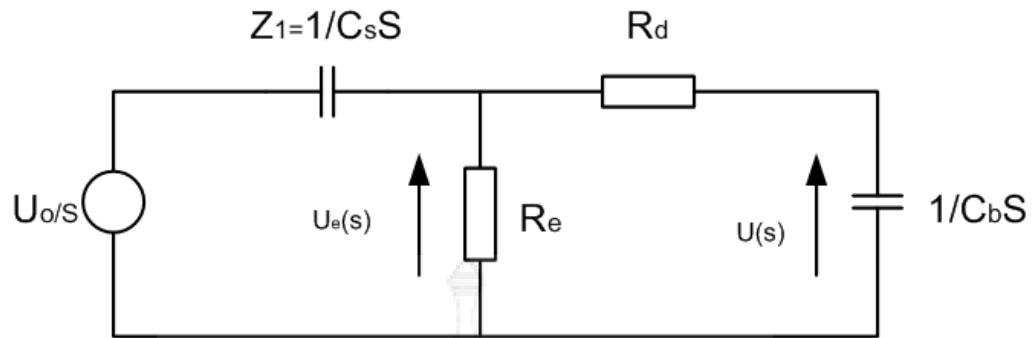
$$\begin{aligned} W_e &= \text{พลังงานอัดประจุ kJ} \\ C_s &= \text{ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเป็น pF} \end{aligned}$$

2.1.3 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์

ลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งแปรอยู่ในเทอมของเวลา แสดงได้ด้วยค่าสูงสุดและเวลาหน้าคลื่น T_1 (T_{cr}) เวลาหางคลื่น T_2 ขึ้นอยู่กับค่าองค์ประกอบวงจรที่สามารถวิเคราะห์และคำนวณได้

2.1.3.1 การแปรของแรงดันอิมพัลส์ในเทอมของเวลา

จากวงจรพื้นฐานสร้างแรงดันอิมพัลส์วงจร B ในรูป 2.3 เมื่ออัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_s ด้วยแรงดันอัดประจุ U_o และเกิดสปาร์กแกป S จะทำให้ C_s ต่อกับวงจรปรับรูปคลื่น การวิเคราะห์อาจใช้ Laplace transform เขียนวงจรสร้างแรงดันได้ดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 Laplace transform ของวงจรอิมพัลส์พื้นฐาน

จากวงจรในรูปที่ 2.3 ค่าแรงดันคร่อม R_e จะเขียนได้ว่า

$$U_s(S) = \frac{U_o}{S} \frac{Z_2}{(Z_1 + Z_2)} \quad (2.4)$$

เมื่อ $Z_1 = \frac{1}{C_s S}$ (2.5)

$$Z_2 = \frac{R_e \left(R_d + \frac{1}{C_b S} \right)}{R_e + R_d + \frac{1}{C_b S}} \quad (2.6)$$

ฉะนั้น $U_e(S) = \frac{U_o (R_d R_e C_s C_b S + R_e C_s)}{R_d C_b S + R_e C_b S + R_e C_s S + R_d R_e C_s C_b S^2}$ (2.7)

แรงดันที่จ่ายออกที่โหลดคิดจาก $U_e(S)$ ตามอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ได้

$$U(S) = \frac{U_e(S) \frac{1}{C_b S}}{R_d + \frac{1}{C_b S}} = \frac{U_e(S)}{R_d C_b S + 1} \quad (2.8)$$

$$U(S) = \frac{U_o R_e C_s}{R_d R_e C_s C_b S^2 + (R_d C_b + R_e C_s + R_e C) S + 1} \quad (2.9)$$

$$U(S) = \frac{U_o}{R_d C_b} \frac{1}{S^2 + \frac{(R_d C_b + R_e C_s + R_e C_b) S}{R_d R_e C_s C_b} + \frac{1}{R_d R_e C_s C_b}} \quad (2.10)$$

ซึ่งอาจเขียนในแบบง่ายๆ ได้คือ

$$U(S) = \frac{U_o}{K} \frac{1}{S^2 + aS + b} = \frac{U_o}{K} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \left[\frac{1}{(S - \alpha_1)} - \frac{1}{(S - \alpha_2)} \right] \quad (2.11)$$

$$\text{เมื่อ } a = \frac{R_d C_b + R_e C_s + R_e C_b}{R_d R_e C_s C_b} \quad (2.12)$$

$$b = \frac{1}{R_d R_e C_s C_b} \quad (2.13)$$

$$K = R_d C_b \quad (2.14)$$

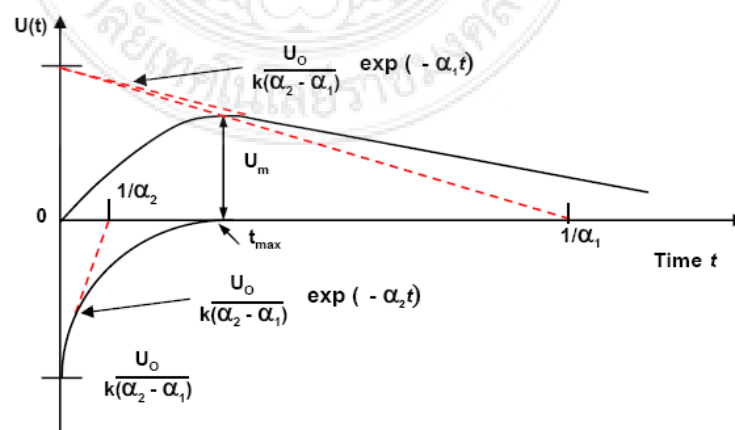
α_1, α_2 เป็นค่ารากที่สองของสมการ $S^2 + aS + b = 0$

$$\text{นั่นคือ } \alpha_1, \alpha_2 = \frac{a \pm \sqrt{a^2 - 4b}}{2} \quad (2.15)$$

จึงเขียนค่าแรงดันอิมพัลส์ในเทอมเวลาได้ว่า

$$U(t) = \frac{U_o}{K} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)] \quad (2.16)$$

จากสมการของแรงดันที่ได้จากวงจรอิมพัลส์ จะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของแรงดันในเทอมของเวลา ประกอบด้วยเทอมเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม ซึ่งมีค่าคงตัว (Time constant) เท่ากับ $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานประกอบด้วยเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม

ตามนิยามของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน ที่กำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่น และหลังคลื่น T_1 และ T_2 ตามลำดับ มีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลา $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ T_1/T_2 อันเป็นตัวแสดงถึงรูปลักษณะของรูปคลื่น ค่า k_1 และ k_2 เป็นค่าคงตัว ขึ้นอยู่กับรูปคลื่น ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ค่า T_1 และ T_2 อาจหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$T_1 = \frac{k_2}{\alpha_2}, \quad T_2 = \frac{k_1}{\alpha_1} \quad (2.17)$$

ตารางที่ 2.1 ค่าแฟกเตอร์ k_1 และ k_2 สำหรับรูปคลื่นมาตรฐาน

T_1 / T_2	k_1	k_2	$1/\alpha_1$ (μs)	$1/\alpha_2$ (μs)
1.2/5	1.44	1.49	3.47	0.805
1.2/50	0.73	2.96	68.5	0.405
1.2/200	0.70	3.15	286	0.381
250/2500	0.87	2.41	2875	104.0

2.1.3.2 การคำนวณค่าองค์ประกอบวงจร

เมื่อทราบว่าต้องสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นใด กำหนดด้วยค่า T_1 และ T_2 ปกติเราจะเริ่มต้นมาจากค่าความจุไฟฟ้าของโหลด C_b ก่อน เลือกตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_s ให้สอดคล้องกับ C_b กล่าวคือ C_s เป็นตัวเก็บพลังงานได้มากพอที่จะจ่ายถ่ายเทให้กับโหลด ดังนั้น เมื่อทราบค่า C_b และ C_s แล้ว องค์ประกอบที่เหลือต้องคำนวณ คือ ความต้านทาน R_d และ R_e ซึ่งอาจหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าคงตัวเวลา $1/\alpha_1$, $1/\alpha_2$ คือ สมการวงจร B

$$R_d = \frac{1}{2C_b} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 C_s}} \right] \quad (2.18)$$

$$R_e = \frac{1}{2(C_s + C_b)} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 C_s}} \right] \quad (2.19)$$

2.1.3.3 ประสิทธิภาพของวงจร

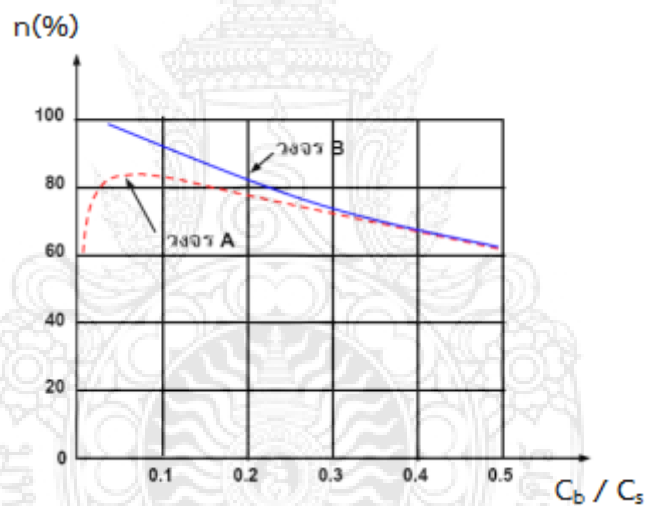
เมื่อก้าวถึงประสิทธิภาพของวงจรหรือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ หมายถึงอัตราส่วนค่ายอดแรงดันที่สร้างขึ้นออกมาได้ต่อค่าแรงดันอัดประจุ ปกติจะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอทั้งวงจร A แลวงจร B

$$\eta = U_m / U_o < 1 \quad (2.20)$$

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

$U_o =$ แรงดันอัดประจุให้กับ C_s

ในกรณีแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ($1.2/50 \mu s$) ประสิทธิภาพของวงจรอิมพัลส์ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า C_b ต่อ C_s มีค่าดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์คำนวณได้จากสมการแรงดันอิมพัลส์ คือ

$$\frac{du(t)}{dt} = 0 \quad (2.21)$$

$$-\alpha_1 e^{-\alpha_1 t_m} + \alpha_2 e^{-\alpha_2 t_m} = 0 \quad (2.22)$$

โดยที่ $t_m =$ เวลาขณะที่ค่าแรงดันขึ้นถึงค่ายอด U_m
 ฉะนั้น จะได้

$$t_m = \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \quad (2.23)$$

$$U_m = \frac{U_o}{K} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} e^{-\alpha_1 t_m - \alpha_2 t_m} \quad (2.24)$$

2.1.3.4 การคำนวณหาค่าเวลาของรูปคลื่น T_1 และ T_2

ในกรณีที่ทราบค่าองค์ประกอบต่างๆ ของวงจรอิมพัลส์ ถ้าจำเป็นต้องทราบเวลาช่วงหน้าคลื่น อาจคำนวณค่าโดยประมาณได้จากค่า k_1 และ k_2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ค่าองค์ประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

องค์ประกอบ วงจรอิมพัลส์	วงจร A	วงจร B
T_1	$k_2 \frac{R_d R_e}{(R_d + R_e)} \frac{C_b C_s}{(C_b + C_s)}$	$k_2 R_d \frac{C_b C_s}{C_b + C_s}$
T_2	$k_1 (R_d + R_e) (C_b + C_s)$	$k_1 R_e (C_b + C_s)$
η	$\frac{R_e C_s}{(R_d + R_e) (C_b + C_s)}$	$\frac{C_s}{C_s + C_b}$

การคำนวณที่กล่าวแล้วข้างต้น ถือว่าวงจรที่ใช้คำนวณไม่มีค่าความเหนี่ยวนำ ในทางปฏิบัติรูปคลื่นที่ได้มักจะไม่แตกต่างไปจากค่าทฤษฎี โดยเฉพาะค่าเวลาช่วงหน้าคลื่น และค่ายอดของแรงดัน ทั้งนี้เนื่องจากในวงจรมีความเหนี่ยวนำซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ อาจทำให้เกิดออสซิลเลชันได้ เพื่อขจัดคลื่นระลอกซ้อน จึงจำเป็นต้องใส่ความต้านทานหน่วง R_d การพิจารณาให้ความเหนี่ยวนำต่ออันดับกับความต้านทาน R_d และสมมติว่าผลของ R_e มีน้อย ($R_e = \alpha$) ความต้านทาน R_d ที่ใส่เข้าไปจะต้องมีค่ามากกว่าค่าวิกฤติ คือ

$$R_d \geq 2 \times \sqrt{L \frac{(C_b + C_s)}{C_b C_s}} \quad (2.25)$$

2.2 ขนาดแรงดันอิมพัลส์ทดสอบ

ขนาดแรงดันอิมพัลส์ทดสอบขึ้นอยู่กับระดับฉนวน (Insulation Level) นั่นคือขึ้นอยู่กับระบบแรงดันที่จะนำเอาอุปกรณ์หรือวัสดุต่างๆ ไปใช้งานแต่ละประเทศอาจจะกำหนดมาตรฐานการทดสอบของตนเอง อย่างไรก็ตามอาจใช้มาตรฐานสากล IEC (International standard) ซึ่งเป็นที่ยอมรับของนานาชาติประเทศเป็นค่าอ้างอิงหรือตกลงกันระหว่างประเทศ IEC Pub1.71-1993: Insulation Co-ordination Part 1 ได้กำหนดระดับแรงดันทดสอบตามช่วงระบบแรงดันสูงสุด (highest voltage) U_m ออกเป็น 3 ช่วง ดังตารางที่ 4 (a), (b), และ (c) ตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานการฉนวนระดับ $1\text{kV} < U_m < 52\text{kV}$

Highest voltage for equipment U_m kV_{rms}	Rated lightning impulse withstand Voltage kV_{peak}		Rated power-frequency short Duration withstand voltage kV_{rms} (2N)(3N)
	List 1 (3N)	List 2 (2N)	
3.6	20	40	10
7.2	40	60	20
12.0	60	75	28
17.5	75	95	38
24.0	95	125	50
36.0	145	170	70

ตารางที่ 2.4 มาตรฐานการฉนวนระดับ $52 \leq U_m \leq 300\text{kV}$

1	2	3	4
Highest voltage for equipment U_m kV_{rms}	Base for p.u. values $U_m \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \text{kV}_{\text{peak}}$	Rated lightning impulse withstand voltage kV_{peak}	Rated power-frequency short duration withstand voltage kV_{rms}
52	42.5	250	95
72.5	59	325	140
123	100	450 ^(3N) 4N) 2NE)	185 ^(4NE) 2NE) 3NE)
145	118	550 ^(2N) 1NE)	230 ^(2N) 3N)
170	139	650 ^(4N)	275 ^(4N)
245	200	750 ^(3NE) 2NE) 3NE)	325 ^(2NE) 3SE)
		850 ^(2NE)	360 ^(2NE) 3NE)
		950 ^(3NE) 1SE)	395
		1050 ^(2N) 1NE)	460 ^(2N) 3N)

ตารางที่ 2.5 มาตรฐานการฉนวนระดับ $U_m \geq 300\text{kV}$

1	2	3	4	5	6
Highest voltage for equipment U_m (r.m.s.)	Base for p.u.values $\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_m$ peak	Rated switch impulse with voltage (peak)		Ratio between rated lightning and switching impulse withstand voltage	Rated Lightning impulse withstand voltage (peak)
kV	kV	p.u.	kV		kV
300	245	3.06	750	1.13	850
		3.47	850	1.27	950
362	296	2.86	850	1.12	950
		3.21	950 ^{2SE)} 3SE)	1.24	1050
300	343	2.76	950	1.11	1050
		3.06	1050 ^{2SE)} 3SE)	1.24	1175 ^{2SE)} 3SE)
525	429	2.45	1050	1.12	1175
		2.74	1175	1.24	1300 ^{2SE)} 3SE)
		2.45	1175	1.11	1300
		2.74	1175	1.36	1425 ^{2SE)} 3SE)
765	625	2.08	1300	1.21	1425
		2.28	1425	1.10	1425
		2.48	1550	1.32	1550 ^{2SE)} 3SE)
		2.08	1300	1.19	1550
		2.28	1425	1.09	1550
		2.48	1550	1.38	1800 ^{2SE)} 3SE)
1550	1550	2.28	1425	1.26	1800
		2.48	1550	1.16	1800
		2.28	1425	1.26	1950 ^{2SE)} 3SE)
		2.48	1550	1.47	2100 ^{2SE)} 3SE)
2400	2400	1.55	2400	1.55	2400 ^{2SE)} 3SE)
		1.55	2400	1.55	2400

1) ถ้าระบบแรงดันใช้งานไม่ตรงกับ U_m ที่ระบุในตาราง ให้เลือกที่ U_m ค่าสูงกว่าเช่น ระบบ 115kV ก็ต้องดูที่ระดับ $U_m = 123kV$

2) ค่าแรงดันทดสอบของแต่ละระดับ U_m มีหลายค่า จะเลือกค่าทดสอบใด ขึ้นอยู่กับระบบต่อลงดิน ว่าเป็น solidly grounded ค่าแรงดันทดสอบจะต่ำสุดเป็น reduced insulation ถ้าไม่ต่อลงดิน (ungrounded) จะทดสอบด้วยแรงดันสูงสุดเรียกว่า full insulation ส่วนค่าอื่นระหว่างค่าต่ำสุดกับค่าสูงสุด จะพิจารณาจากค่าโอห์มของอิมพีแดนซ์ ที่ต่อนิวตรอนลงดิน และอัตราเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น ในการใช้งานระบบแรงดันกระแสสลับซึ่งบางครั้งก็มีบ้างที่เป็นแรงดันกระแสตรงและแรงดันเกินประเภทต่างๆ เช่น แรงดันเกินเนื่องจากการเสิร์จสวิตซ์ซิ่งและแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่า ดังนั้นจึงจะต้องมีการจัดประสานสัมพันธ์การฉนวนขึ้น เพื่อจุดประสงค์

1. จัดให้เหมาะสมกับคุณสมบัติการฉนวนของฉนวน เพื่อที่จะสามารถทนแรงดันที่คาดว่าจะต้องเกิดขึ้นในระบบ
2. เพื่อที่จะลดค่าแรงดันเกินที่อาจเกิดขึ้น
3. เพื่อให้เกิดความมั่นใจในการประสานสัมพันธ์ของฉนวนแบบต่างๆ

การแบ่งชนิดของฉนวน (Type of insulation) ออกเป็นกลุ่มจะแบ่งตามลักษณะความสำคัญของการฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลัง ยกตัวอย่าง เช่น การฉนวนระหว่างแรงดันเฟสกับดินหรือการฉนวนแรงดันระหว่างเฟสต่อเฟส หรือการฉนวนของช่องว่างอากาศ ในกรณีนี้จะแบ่งได้เป็น 5 กลุ่มคือ

กลุ่มที่ 1 ได้แก่ Isolating clearances, fuse holders, between networks

กลุ่มที่ 2 ได้แก่ insulators, bushings, switching devices (apart from isolating gaps), power transformers, instrument transformers, cables และอื่นๆ

กลุ่มที่ 3 ได้แก่ prefabricated switchgear with individual items of gear assigned to insulation group 2 (i.e. consideration of enlargement effects)

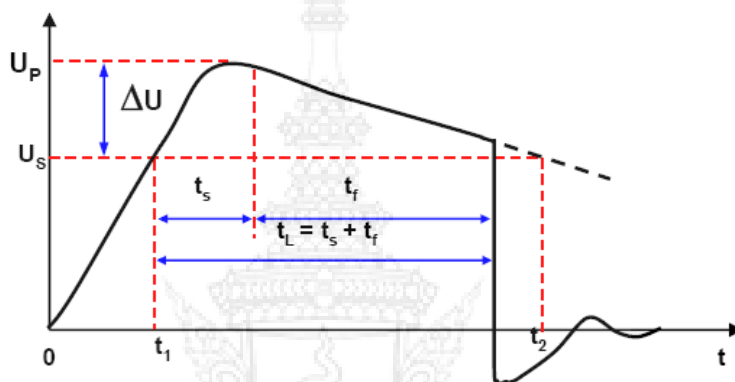
กลุ่มที่ 4 ได้แก่ neutral-point insulation

กลุ่มที่ 5 ได้แก่ insulation of rotating machines

สำหรับการแบ่งประเภทของการฉนวน (insulation class) จะขึ้นอยู่กับลักษณะพฤติกรรมของจุดนิวตรอนกับความเสี่ยงของการเกิดแรงดันเกินโดยกำหนดให้ NE คือ effectively earthed, N คือ not effectively earthed และ SE คือ effectively earthed and not prone to over voltage ซึ่งการแบ่งชนิดและประเภทของฉนวนนั้นจะสอดคล้องกับระดับการทดสอบดังแสดงในตาราง 2.3 – 2.5

2.3 เบรกดาวนซ์ของแรงดันอิมพัลส์ (Breakdown of impulse voltage)

สลับความถี่พลังงาน ถือว่าค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปมีค่าคงตัว ฉะนั้น แรงดันเบรกดาวนซ์จะเป็นฟังก์ชันของ α , y , η และช่องแคบ d แต่ในกรณีที่ป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาดแรงดันจะคงอยู่ในช่วงระยะเวลาอันสั้น นั่นก็หมายถึงสนามไฟฟ้าจะคงมีอยู่ในช่วงเวลาอันสั้นด้วย เมื่อขนาดแรงดันอิมพัลส์เท่ากับแรงดันสถานะอยู่ตัวควรจะเกิดเบรกดาวนซ์ได้ แต่ปรากฏว่ายังไม่เกิดเบรกดาวนซ์จะต้องรอเวลาอีกช่วงระยะหนึ่ง เบรกดาวนซ์จึงจะเกิดขึ้นได้ ช่วงระยะเวลานับตั้งแต่ขนาดแรงดันอิมพัลส์เท่ากับแรงดันสถานะอยู่ตัวแล้ว ไปจนถึงเวลาเบรกดาวนซ์เกิดขึ้นจริงของแรงดันอิมพัลส์ เวลาที่ช้กว่านี้เรียกว่า เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวนซ์ของแรงดันอิมพัลส์

2.3.1 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวนซ์ (Time lag of breakdown)

ดังที่กล่าวแล้วว่าเบรกดาวนซ์จะเกิดขึ้นได้นั้น ทุกกรณีจะต้องมีอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน ซึ่งต้องมีอิเล็กตรอนเริ่มต้นอย่างน้อยหนึ่งอิเล็กตรอน และต้องเป็นอิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะที่พอเหมาะคือมีพลังงานพอที่จะทำให้เกิดไอออไนเซชันสร้างอะวาลานซ์ต่อไปได้ นั่นคือ จะเริ่มต้นด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่ในบริเวณสนามไฟฟ้าที่สูงพอ และมีระยะห่างอาโนดอย่างน้อยเท่ากับระยะอะวาลานซ์วิกฤติ X_c ในกรณีของแรงดันที่สถานะคงตัว สนามไฟฟ้าจะคงตัวอยู่เป็นเวลาเหลือเพื่อพอที่จะหาหรือพบอิเล็กตรอนอิสระเริ่มต้นได้ง่าย และมีมากพอจากธรรมชาติ เช่น อิเล็กตรอนอิสระจากรังสีคอสมิก เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์ สนามไฟฟ้าจะคงตัวอยู่ในช่วงเวลาเพียงเป็นไมโครวินาที ฉะนั้นอิเล็กตรอนอิสระที่พอเหมาะจากธรรมชาติ อาจจะไม่เพียงพอที่จะเริ่มต้นได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของแก๊บที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงพอ เบรกดาวนซ์อาจจะไม่เกิดขึ้นก็ได้ถ้าหากไม่มีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เช่นการฉายแสงรังสี เป็นต้น อิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่ในปริมาณแก๊บซึ่งกระจายเป็นสถิติ ฉะนั้น เวลานั้นนับตั้งแต่แรงดันอิมพัลส์เพิ่มสูงเท่าแรงดันสถานะคงตัว คือ U_s จนกระทั่งพบอิเล็กตรอนเริ่มต้นจึงเป็นสถิติด้วยเรียกว่า เวลาล่าช้าสถิติ t_s (statistic time lag) เมื่อพบอิเล็กตรอนเริ่มต้นแล้ว จะต้องใช้เวลาในการไอออไนเซชันสร้างอะวาลานซ์ตามกระบวนการกลไกเบรกดาวนซ์ เพื่อให้ได้จำนวนอิเล็กตรอนตามเงื่อนไขเรียกช่วงเวลานี้ว่า เวลาล่าช้าก่อตัว t_f (formative time lag) จึงสรุปได้ว่า เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวนซ์ประกอบด้วย

$$t_l = t_s + t_f \quad (2.26)$$

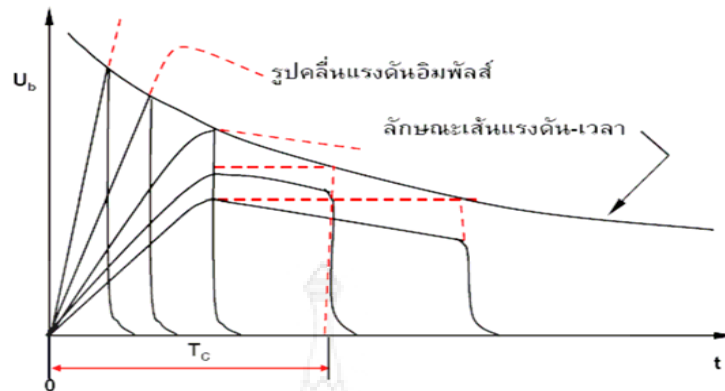
แรงดันเบรกดาวนอิมพัลส์ U_p จะต้องมีค่าสูงกว่าแรงดันเบรกดาวนสถานะอยู่ตัว U_s อัตราส่วนของแรงดัน U_p ต่อแรงดัน U_s คือ U_p / U_s เรียกว่า อัตราส่วนอิมพัลส์ (impulse ratio) โดยปกติ ค่าอัตราส่วนอิมพัลส์นี้มีค่าสูงกว่าหนึ่ง ยกเว้นในกรณีของโคโรนาเบรกดาวนที่เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง และมีผลโคโรนาเสถียร (stabilized corona) ทำให้แรงดันเบรกดาวนสูงกว่าเมื่อไม่มีโคโรนา ค่าอัตราส่วนอิมพัลส์จะต่ำกว่าหนึ่ง แต่ในทางปฏิบัติการออกแบบลักษณะของอิเล็กโตรด หรือส่วนของอุปกรณ์จะต้องหลีกเลี่ยงมิให้เกิดโคโรนา ฉะนั้น การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ (BIL) จึงมีค่าสูงกว่าแรงดันสถานะอยู่ตัว

ค่าอัตราส่วนอิมพัลส์ ขึ้นอยู่กับเวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน t_r และอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันที่ป้อน ตัวอย่างเช่น ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ถ้าหากเกิดความชัน คือ du/dt ยังมีค่าสูง เวลาช่วงหน้าคลื่นหรือเวลาที่แรงดันเพิ่มขึ้นถึงค่ายอดแล้วลดลงก็ยังสั้น ย่อมหมายถึงช่วงเวลาสนามไฟฟ้าคงอยู่นั้นยังสั้นตามไปด้วย โอกาสที่จะเกิดเบรกดาวนก็น้อยลง เพื่อให้มีโอกาสเบรกดาวนสูงขึ้นจำเป็นต้องความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น นั่นคือ ต้องป้อนแรงดันให้สูงขึ้น

จากคำอธิบายเกี่ยวกับเวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวนดังกล่าว จะช่วยให้เข้าใจได้อย่างชัดเจนเกี่ยวกับแรงดันเบรกดาวนอิมพัลส์ห้าสิบเปอร์เซ็นต์ $U_{b50\%}$ ดีขึ้น คือ ทั้งๆที่ป้อนแรงดันเท่ากันที่แกปเดียวกันเงื่อนไขเหมือนกัน แต่บางครั้งก็เบรกดาวนบางครั้งก็ไม่เบรกดาวน ทำให้เกิดเบรกดาวนออกมาที่เปอร์เซ็นต์ต่างกัน ที่แกปของอิเล็กโตรดกำหนดให้โอกาสที่จะเกิดเบรกดาวน มากน้อยขึ้นอยู่กับความชันของแรงดันที่ป้อน ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติอันหนึ่งของแกปนั้น คือ ลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา

2.3.2 ลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา (Voltage time characteristics)

ในข้อที่ผ่านมา ได้ชี้ให้เห็นชัดเจนถึงผลของช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดัน มีผลอย่างมากต่อแรงดันเบรกดาวนของแกป โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอการสร้างอิเล็กตรอนอิสระเพื่อก่ออะวาลานซ์ให้ได้ค่าวิกฤติจะต้องใช้เวลา (เวลาก่อตัวอะวาลานซ์ t_r) ถ้าช่วงเวลาแรงดันคงตัวอยู่น้อยจำเป็นต้องใช้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น เพื่อให้สตริมเมอร์เกิดขึ้นได้ตามเงื่อนไขในเวลาอันรวดเร็ว นั่นคือค่าแรงดันเบรกดาวนจะสูงขึ้น ถ้าหากช่วงเวลาคงตัวของแรงดันสั้นลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนจะสูงขึ้น ถ้าใช้กับแรงดันมีช่วงเวลาสั้นลง ในกรณีแรงดันอิมพัลส์ความคงทนของไดอิเล็กตริกอาจแสดงได้ด้วย ลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน กับเวลาเบรกดาวนหรือเวลาคลื่นตัด ได้จากการป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มี ความชันต่างๆ กัน แล้ววัดค่าแรงดันเบรกดาวน U_b ถ้าคลื่นตัดที่ช่วงห่างคลื่นค่ายอดคือ ค่าแรงดัน เบรกดาวนแต่ถ้าคลื่นตัดช่วงหน้าคลื่น ค่าแรงดันเบรกดาวนก็คือ แรงดัน ณ จุดที่เกิดเบรกดาวนทุกค่าแรงดัน เบรกดาวนจะได้ค่าเวลาคลื่นตัด T_c เมื่อนำค่า U_b และ T_c มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ก็จะได้ลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.7

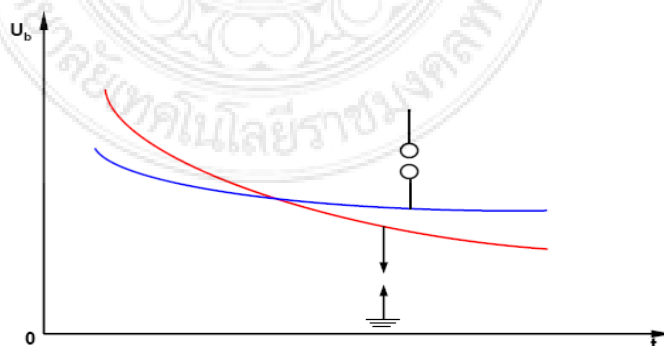


รูปที่ 2.7 ลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา

ในสนามไฟฟ้าสมำเสมอ ลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา ($U_{b,t}$) จะลดลงในช่วงที่เวลา t น้อยๆ (น้อยกว่า $1 \mu s$) เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ลักษณะเส้นเกือบคงตัวเป็นเส้นระดับ แต่ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สมำเสมอสูงลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา จะลดลงตลอดเมื่อช่วงเวลาแรงดันเพิ่มขึ้น อัตราการลดลงจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับลักษณะของอิเล็กโตรดตั้งในรูป 2.8 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา ของแกปทรงกลมกับแกปของแท่งกลมปลายแหลม

ความแตกต่างของลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา ระหว่างแกปของทรงกลมกับแกปของแท่งกลมปลายแหลม อาจอธิบายได้ด้วยผลของเวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์ t_1 ในช่วงเวลาน้อยๆ ความชันของรูปคลื่นแรงดันชันมาก หรือช่วงเวลาแรงดันคงอยู่น้อย เวลาน้อยจนใกล้เคียงกับเวลาที่ใช้ในการสร้างอะวาลานซ์ ฉะนั้น $t_1 = t_s + t_r$ จึงมีผลอย่างมากต่อค่า U_b ที่เวลามากเหลือเกิน $t \gg t_1$ เวลาของ t_1 ไม่มีผลต่อ U_b ความแตกต่างของลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา จึงขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ 2 ประการ คือ

- ปริมาณของแกปยังผล
- สนามไฟฟ้ากระจาย (Field distribution) ของแกป



รูปที่ 2.8 ลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา ของแกปทรงกลมและแกปแท่งกลมปลายแหลม

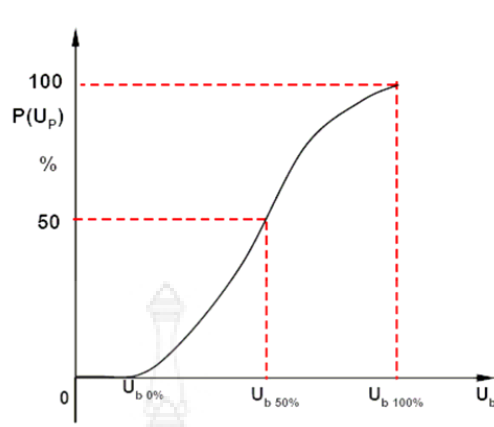
ในกรณีแกปของทรงกลมกับแกปของแท่งกลมปลายแหลม อย่างแรกย่อมมีปริมาตรของแกปซึ่งมีผล (ปริมาตรที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงพอที่จะทำให้เกิดการชนไอออนไอออนได้) มากกว่าอย่างหลังจำนวนอิเล็กตรอนที่มีโอกาสเริ่มต้นสร้างอะวาลานซ์มีมากกว่า และสนามไฟฟ้ากระจายของแกปทรงกลม $E(x)$ ยังลดลงไม่มากที่ระยะห่างออกไปจากผิวทรงกลม โอกาสสร้างอะวาลานซ์วิกฤติมีมากและง่ายกว่าในช่วงของเวลาน้อยๆ แกปทรงกลมจึงใช้ความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำกว่าของแกปปลายแหลม เพราะแกปของปลายแหลมยังผลน้อยกว่า และสนามไฟฟ้ากระจายจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโทรด กล่าวคือ สนามไฟฟ้าจะมีความเครียดสูงแต่เฉพาะใกล้ๆ อิเล็กโทรดเท่านั้น เพื่อให้สามารถสร้างอะวาลานซ์วิกฤติได้ จากปริมาตรยังผลน้อยกว่าและเวลาสั้น จึงต้องป้อนแรงดันเข้าไปสูงกว่าเพื่อให้ได้สนามไฟฟ้าสูงพอ แต่ที่เวลามากๆ คือ $t \gg t_1$ เรื่องเวลาจึงไม่มีนัยสำคัญ หรือมีผลต่อการสร้างอะวาลานซ์วิกฤติ แต่จะมีผลของความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด แบบปลายแหลมจะมี E_m สูงกว่า คือแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า η ต่ำกว่า ค่า U_0 จึงต่ำกว่าดังสมการ

$$(U_i = E_i \times d \times \eta) \quad (15)$$

ความรู้เกี่ยวกับลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา จะมีประโยชน์มากต่อการออกแบบเกี่ยวกับการฉนวนระบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง และการเลือกแกปป้องกันแรงดันเสิร์จให้แก่อุปกรณ์ส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง เช่น หม้อแปลงกำลัง เป็นต้น โดยตั้งระยะแกปให้เกิดเบรกดาวน์ที่แกปง่ายกว่าที่ปลอกฉนวนตัวนำหรือป้องกันมิให้เกิดอาร์กที่ลูกถ้วยยึดตัวนำสายไฟฟ้าในระบบสายส่งแรงสูง โดยใช้เขาหรือแหวนอาร์ก (Arcing horn, grading ring)

2.3.3 ความน่าจะเป็นเกิดเบรกดาวน์ของแรงดันอิมพัลส์

รูปที่ 2.9 กราฟแสดงฟังก์ชันกระจายของแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ แสดงให้เห็นว่าแรงดันอิมพัลส์จะเกิดเบรกดาวน์ขึ้นได้ เมื่อมีแรงดันเกิน $\Delta U = [U_p(t) - U_a]$ มีค่าสูงพอที่เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์ t_1 ยังอยู่ในช่วงของเวลาเกินนี้ นั่นคือ $(t_2 - t_1) > t_1$ เวลา t_1 มากน้อยเปลี่ยนไปตามสถิติ แต่ก็อยู่ในช่วงแน่นอน แต่ละค่าของแรงดันอิมพัลส์ U_p เมื่อป้อนซ้ำอีกจะมีการเกิดเบรกดาวน์เป็นเปอร์เซ็นต์ค่าหนึ่งของจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันเข้าไปทั้งหมด ซึ่งจัดเป็นความน่าจะเป็นเกิดเบรกดาวน์ p (probability of breakdown) ของแรงดันอิมพัลส์ค่านั้นๆ ความน่าจะเป็นเกิดเบรกดาวน์ $p(U_p)$ อาจหาได้จากการป้อนแรงดันค่าหนึ่งให้กับแกปเป็นจำนวนครั้งมากพอ เช่น 20 ครั้ง 100 ครั้ง หรืออาจถึง 1000 ครั้ง จำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวน์ในแกปหารด้วยจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ฟังก์ชันกระจายของแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์

$U_{b50\%}$ = ค่าแรงดันเบรกดาวน์ห้าสิบเปอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายถึง ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ เป็นจำนวนครั้งครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ดีสชาร์จออกไป

$U_{b100\%}$ = ค่าแรงดันพอดีที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ทุกครั้ง ซึ่งมีความหมายที่สำคัญในการกำหนดมิติของอุปกรณ์ป้องกัน เช่น กับดีกฟ้าผ่า (Lightning arrester)

$U_{b0\%}$ = ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์สูงสุด ที่ไม่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ ซึ่งเรียกค่าแรงดันนี้ว่าค่าความคงทน อยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ (Impulse withstand voltage) มีความหมายอันสำคัญในการกำหนดมิติการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง และใช้เป็นค่ากำหนดการทดสอบการฉนวนที่ต้องทนต่อแรงดันอิมพัลส์ได้ ซึ่งโดยทั่วไปเรียกค่าแรงดันนี้ว่า BIL

โดยทั่วไป ฟังก์ชันกระจายของแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ มีลักษณะเป็นฟังก์ชันปกติ (Normal distribution) หรือเรียกว่า กระจายแบบเกาส์ฟังก์ชัน (Gaussian distribution function) ในทางปฏิบัติเป็นการยากที่จะหาค่า $U_{b0\%}$ และ $U_{b100\%}$ ได้โดยตรง ดังนั้น จึงอาศัยหาค่า $U_{b50\%}$ แล้วใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ หาค่า $U_{b0\%}$ และ $U_{b100\%}$ คือ

$$U_{b0\%} = U_{b50\%} - 3\sigma$$

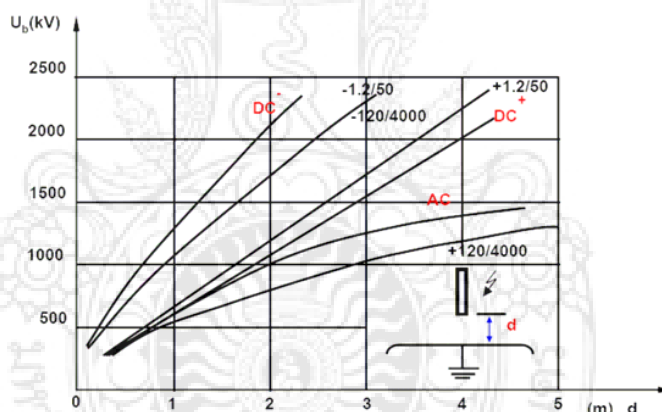
$$U_{b100\%} = U_{b50\%} + 3\sigma$$

ค่าที่ได้คือ ค่าที่มีความน่าจะเป็นเบรกดาวน์ 1.5% และ 98.5% ตามลำดับ

2.3.4 ผลของรูปคลื่นแรงดัน

แรงดันเบรกดาวน์ในก๊าซหรืออากาศ นอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะของอิเล็กโตรดคือ ค่าของแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า η และความหนาแน่นของก๊าซ δ ยังขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ที่สำคัญอีกประการหนึ่งนั่นคือ เวลา t ซึ่งหมายถึง เวลาคงอยู่นานเพียงใดของแรงดัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ เกี่ยวข้องกับเวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์นั่นเอง

แรงดันเบรกดาวน์ ขึ้นอยู่กับรูปคลื่นของแรงดัน ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเบรกดาวน์ในอากาศ ในฟังก์ชันของระยะแกปในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ และไม่สมมาตร คือ ระหว่างแท่งกับแผ่นระนาบของแรงดัน $\pm DC$, AC 50 Hz, สวิตซ์ซิ่ง $\pm 120/4000 \mu s$ ผลที่ได้คือ แรงดันแบบอิมพัลส์สวิตซ์ซิ่งซั้วบวกรมีค่าเบรกดาวน์ต่ำสุด แรงดันซั้วลบกระแสตรงซั้วลบ (DC^-) มีค่าเบรกดาวน์สูงสุด แต่สูงกว่าแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ (แบบฟ้าผ่าและสวิตซ์ซิ่ง) ซั้วลบเล็กน้อย จึงอาจกล่าวได้ว่า ความคงทนของอากาศต่อแรงดันซั้วลบทุกรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แรงดันซั้วบวกอิมพัลส์ฟ้าผ่าและกระแสตรง (DC^+) จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนเชิงเส้นโดยตรงกับระยะแกปแบบอิมพัลส์ฟ้าผ่าซั้วบวกรสูงกว่าแบบแรงดันกระแสตรงซั้วบวกรเล็กน้อยแต่ซั้วบวกรทั้ง $1.2/50 \mu s$ และ DC^+ มีค่าเบรกดาวน์ต่ำกว่าซั้วลบ และสูงกว่าแบบอิมพัลส์สวิตซ์ซิ่งซั้วบวกร ส่วนแรงดันกระแสสลับความถี่พลังงาน (50 - 60 Hz) จะมีค่าเบรกดาวน์เท่าๆ กับแรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงซั้วบวกรในแกปที่ระยะห่างไม่เกิน 150 cm. ซึ่งระยะแกปห่างกว่านี้ แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับจะต่ำกว่าแรงดันกระแสตรงมากขึ้น เมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้นแต่กลับไปใกล้เคียงกับสวิตซ์ซิ่งซั้วบวกร แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ ขึ้นอยู่กับความชันของรูปคลื่น ซึ่งอธิบายได้ในลักษณะของแรงดัน-เวลา นั้นเอง



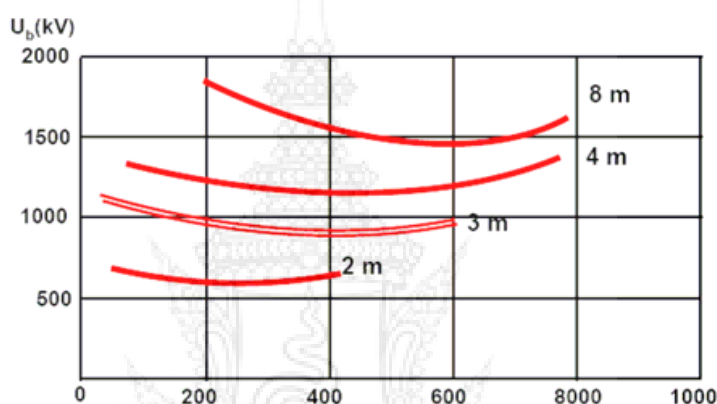
รูปที่ 2.10 แรงดันเบรกดาวน์ U_b ของอิเล็กโตรดแท่งกับระนาบในอากาศในเทอมของระยะแกป d

เมื่อแรงดันป้อนมีรูปแบบต่างๆ ที่สภาวะมาตรฐาน (760 Torr , $20^\circ C$, $11 \text{ gmH}_2\text{O} / \text{m}^3$)

- 1) DC บวก (+), $U_b = 4.9 d$ (kV) d เป็น cm
DC ลบ (-), U_b อ่านจากกราฟ
- 2) AC (50 Hz) ค่ายอด U_b อ่านจากกราฟ
- 3) อิมพัลส์ฟ้าผ่าบวก $1.2/50 \mu s$ $U_{b50\%} = 5.4 d$
อิมพัลส์ฟ้าผ่าลบ $1.2/50 \mu s$ ดูกราฟ
- 4) อิมพัลส์สวิตซ์ซิ่ง $120/4000 \mu s$ ซั้วบวกรและลบดูจากกราฟ

ผลในรูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นชัดเจนกว่าแกปแแห่ง-ระนาบแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซึ่งเบรกดาวนซ์ชั่วคราวมีค่าต่ำสุด ต่ำกว่าแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ นอกจากผลของเวลาล่าช้าในการก่อตัวของอะวาลานซ์ด้วย กรณีของแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซึ่ง ค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ในเทอมของเวลาหน้าคลื่นจะพบวาระยะแกปในช่วง 2 เมตร ถึง 8 เมตร ของแกปแแห่ง-ระนาบ ค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ $U_{b50\%}$ จะมีค่าอยู่ในช่วง 150-400 μs

รูปที่ 2.11 ปรากฏการณ์ลักษณะนี้ อาจอธิบายได้ด้วยเวลาก่อตัวของอะวาลานซ์พอที่จะสร้างอะวาลานซ์ให้ในข้ามแกปได้พอดี ฉะนั้น ในการออกแบบระยะฉนวนในอากาศ ระยะช่องว่างของสายส่งระบบตั้งแต่ EHV ขึ้นไป(สูงกว่า 300 kV) จึงกำหนดด้วยค่าเบรกดาวนซ์ของแรงดันสวิตซ์ซึ่งเสิร์จ



รูปที่ 2.11 $U_{b50\%}$ ของแกปแแห่ง-ระนาบในเทอมของเวลาหน้าคลื่น

2.4 สายส่งระยะยาว

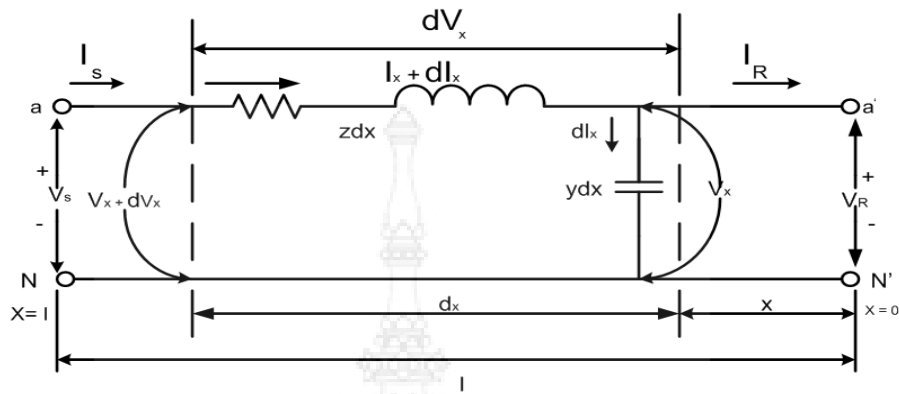
ในการวิเคราะห์สมรรถนะของสายส่งเราสามารถที่จะแบ่งสายส่งในอากาศออกเป็น 3 ประเภท โดยการจัดประเภทขึ้นอยู่กับความยาวของสายส่ง

1. สายส่งระยะสั้น (Short transmission lines) มีความยาวของสายส่งน้อยกว่า 80 km หรือ 50 ไมล์
2. สายส่งระยะปานกลาง (medium transmission line) มีความยาวอยู่ระหว่าง 80 ถึง 240 km หรือ 50 ถึง 150 ไมล์
3. สายส่งระยะยาว (long transmission lines) มีความยาวตั้งแต่ 240 km หรือ 150 ไมล์ ขึ้นไป

โดยทั่วไปเราจะถือว่าสายส่งจะใช้งานกับโพลิตสามเฟสที่สมดุลกัน ถึงแม้ว่าการจัดวางตัวนำในสายส่งจะมีระยะระหว่างตัวนำไม่สมมาตรและไม่มีการสลับตำแหน่งของสายส่ง ซึ่งมีผลทำให้เกิดการไม่สมมาตรขึ้นแต่ก็ถือว่าเป็นสิ่งเล็กน้อย ดังนั้นสายส่งแต่ละเสสามารถพิจารณาได้ว่ามีความสมดุลกัน

สายส่งระยะยาวที่มีความยาวมากกว่า 240 km หรือ 150 ไมล์ถือว่าเป็นสายส่งระยะยาว ซึ่งสายส่งระยะยาวมีขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าสายส่งระยะปานกลาง ทำให้ค่า C และ G ของสายส่งมีค่ามาก วิธีที่เหมาะสมสำหรับการหาค่า Y และ I ของสายส่งระยะยาว เพื่อพิจารณา V และ I จาก

ส่วนย่อยตลอดความยาวของสายส่ง ลักษณะเช่นนี้ ฟลักแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณสายส่งจึงถูกพิจารณาให้ เป็นรูปคลื่นสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีผลต่อสมการหาค่า V และ I ของสายส่งระยะยาวอีกด้วย



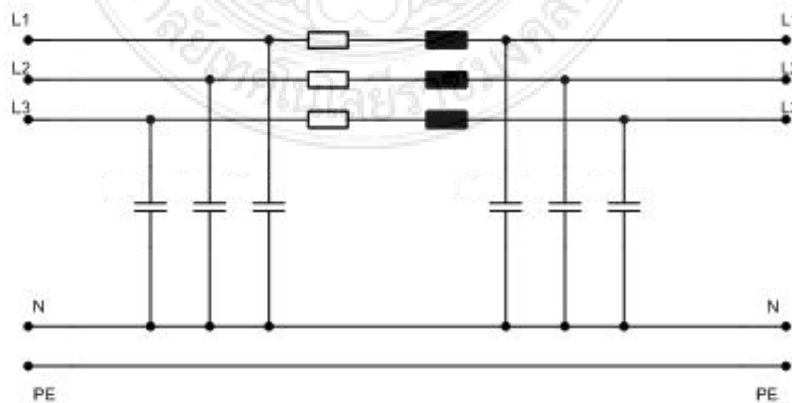
รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบวงจรของระบบสายส่งระยะยาว

เมื่อ

- dx = ส่วนย่อยของสายส่งใช้พิจารณา
- V_x และ I_x = แรงดันและกระแสไฟฟ้าทางด้านปลาย ของ dx
- x และ y = อิมพีแดนซ์และแอดมิตแตนซ์ต่อหน่วยความยาว
- zdx และ ydx = อิมพีแดนซ์และแอดมิตแตนซ์ที่ประกอบอยู่ในส่วนของ dx
- $V_x + dV_x$ และ $I_x + dI_x$ = แรงดันและกระแสไฟฟ้าทางด้านต้นของ dx

2.4.1 วงจรสมมูลของสายส่งระยะยาว

การหาวงจรสมมูลในสายส่งระยะยาวสามารถทำได้โดยการใช้พารามิเตอร์ของสายส่งมาพัฒนาเข้ากับวงจรสมมูล π ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลสำหรับสายส่งระยะยาว

2.5 ผลกระทบของแรงดันเกินในระบบส่งจ่าย

การเกิดแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่าขึ้นในระบบส่งจ่าย ซึ่งอาจมีค่าถึง 6 pu ดังที่กล่าวแล้ว แรงดันเกินแม้จะเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาอันสั้น แต่ก็มีความสำคัญยิ่งต่อเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่าย เพราะในช่วงระยะเวลาสั้นๆ นั้น การฉนวนของอุปกรณ์จะได้รับความเครียดสนามไฟฟ้า (electric field stress) ที่เกิดขึ้นสูงกว่าค่าความคงทนของฉนวน (dielectric strength) อาจจะทำให้เกิดเบรกดาวน์แบบชั่วคราว เช่น ฟ้าชหรืออากาศ หรือแบบถาวร เช่น ฉนวนแข็ง หรือฉนวนเหลวจะเกิดเสื่อมสภาพ เช่น น้ำมันหม้อแปลง

การเสื่อมสภาพการฉนวนจะทำให้เกิดผิดพลาด (fault) ในระบบ เกิดการลัดวงจร กระแสลัดวงจรก็จะทำให้เกิดแรงระเบิด เกิดความเสียหายได้



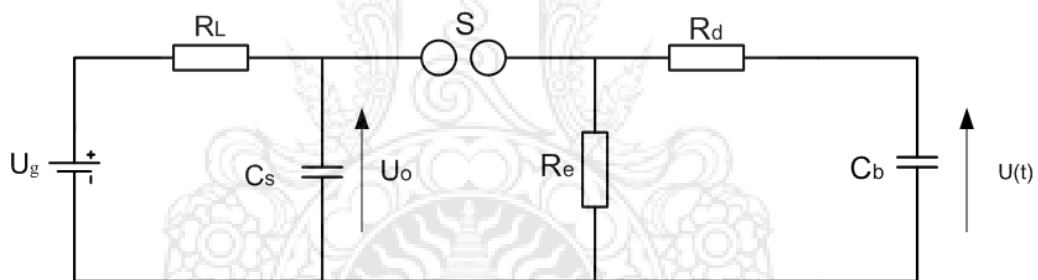
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 การออกแบบวงจรอิมพัลส์

การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในโครงการนี้จะใช้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์และตัวเก็บประจุโพลิตที่ผลิตภายในประเทศโดยมีการออกแบบและสร้างขึ้นใหม่ทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยชุดการทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แผ่นวงจรที่ใช้ส่วนของสปาร์กแกปตัวเก็บประจุต่างๆ ค่าความต้านทานและการฉนวนยัดรองรับโดยใช้วัสดุและผลิตภัณฑ์ภายในประเทศทั้งสิ้น การออกแบบลักษณะโครงสร้างอาศัยรูปแบบผลิตภัณฑ์ของต่างประเทศมาดัดแปลงให้ง่ายต่อการประกอบสร้างและการทำงานในด้านสมรรถนะและคุณภาพใช้เกณฑ์มาตรฐานเป็นเงื่อนไขในการออกแบบและประเมินผลใช้เทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงเป็นพื้นฐานในการออกแบบสร้างโดยใช้

3.1.1 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ความหมายในรูปวงจรรูปที่ 2

- U_g = แรงดันกระแสตรงของตัวจ่าย
- U_o = แรงดันอัดประจุกระแสตรง
- C_s = ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน
- C_b = ตัวเก็บประจุโพลิต (รวมทั้งความจุไฟฟ้าของ อุปกรณ์เครื่องวัดและอื่นๆ)
- R_L = ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ
- R_d = ความต้านทานหน่วง
- R_e = ความต้านทานปล่อยประจุ
- $U(t)$ = แรงดันอิมพัลส์ที่ได้แปรไปตามเวลา
- S = สปาร์กแกป

ส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งที่จะทำให้ได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่เป็นไปตามมาตรฐาน นั่นก็คือ ความต้านทานปรับหน้าคลื่น และหลังคลื่น การออกแบบจำเป็นจะต้องคำนึงถึงค่าความต้านทาน โดยค่าความต้านทานที่ได้จะต้องเป็นความต้านทานที่ไร้ซึ่งความเหนี่ยวนำ นั่นทำให้จะได้ความต้านทานที่ใช้ในการปรับรูปคลื่นตามที่ต้องการ

3.1.1.2 การสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2 / 50 μ s

วงจร : $C_s = 0.1\mu\text{F}$, $C_b = 4.7\text{nF}$; ผลของ : $R_d = 90.3096\Omega$, $R_e = 654.183\Omega$

ค่าความต้านทานของตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) ดูจากสมการความสัมพันธ์วงจร B

$$T_1 = k_2 R_e \frac{C_b C_s}{C_b + C_s} \quad (3.1)$$

$$1.2 \times 10^{-6} = (2.96) R_d \frac{(4.7 \times 10^{-9})(0.1 \times 10^{-6})}{(4.7 \times 10^{-9}) + (0.1 \times 10^{-6})} \quad (3.2)$$

$$R_d = \frac{(1.2 \times 10^{-6})}{(2.96)(4.489 \times 10^{-9})} \quad (3.3)$$

$$R_d = 90.3096458\Omega \quad (3.4)$$

ค่าความต้านทานของตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_e) ดูจากสมการความสัมพันธ์วงจร B

$$T_2 = k_1 R_e (C_b + C_s) \quad (3.5)$$

$$50 \times 10^{-6} = (0.73) R_e [(4.7 \times 10^{-9}) + (0.1 \times 10^{-6})] \quad (3.6)$$

$$R_e = \frac{50 \times 10^{-6}}{(0.73)(4.7 \times 10^{-9}) + (0.1 \times 10^{-6})} \quad (3.7)$$

$$R_e = 654.0183\Omega \quad (3.8)$$

ทำการตรวจคำตอบเพื่อหาประสิทธิภาพของวงจร

$$T_1 = k_2 R_d \frac{C_b C_s}{C_b + C_s} \quad (3.9)$$

$$T_1 = (2.96)(90.309) \frac{(4.7 \times 10^{-9})(0.1 \times 10^{-6})}{(4.7 \times 10^{-9}) + (0.1 \times 10^{-6})} \quad (3.10)$$

$$T_1 = 1.199975419\mu\text{sec} \quad (3.11)$$

$$T_2 = k_1 R_e (C_b + C_s) \quad (3.12)$$

$$T_2 = (0.73)(654.183)[(4.7 \times 10^{-9}) + (0.1 \times 10^{-6})] \quad (3.13)$$

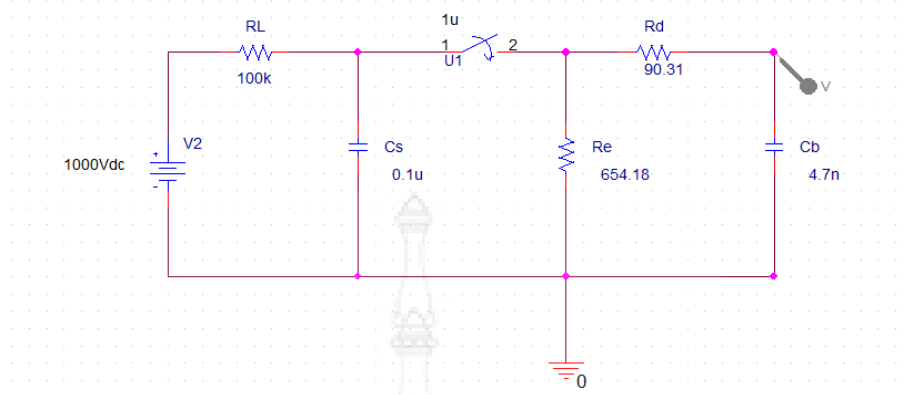
$$T_2 = 49.999986087\mu\text{sec} \quad (3.14)$$

$$\eta = \frac{C_s}{C_s + C_b} \quad (3.15)$$

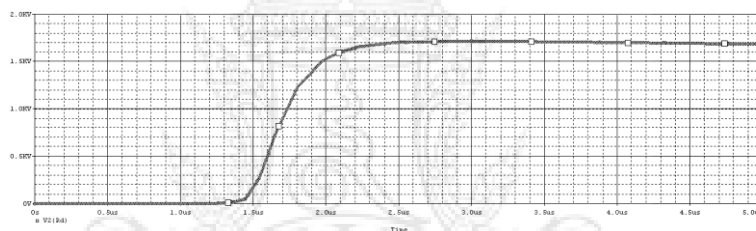
$$\eta = \frac{0.1 \times 10^{-6}}{(0.1 \times 10^{-6}) + (4.7 \times 10^{-9})} \quad (3.16)$$

$$\eta = 0.9551098376 \quad (3.17)$$

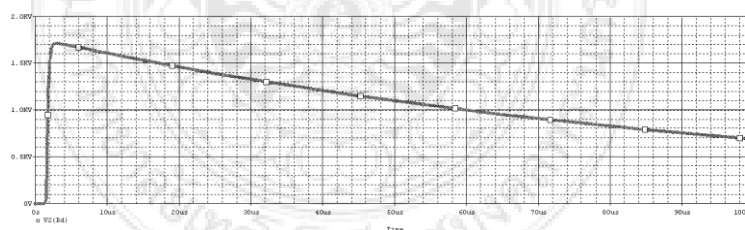
3.2 ทำการทดสอบกับโปรแกรม Orcad



รูปที่ 3.2 วงจรการทดสอบผ่านโปรแกรม Orcad

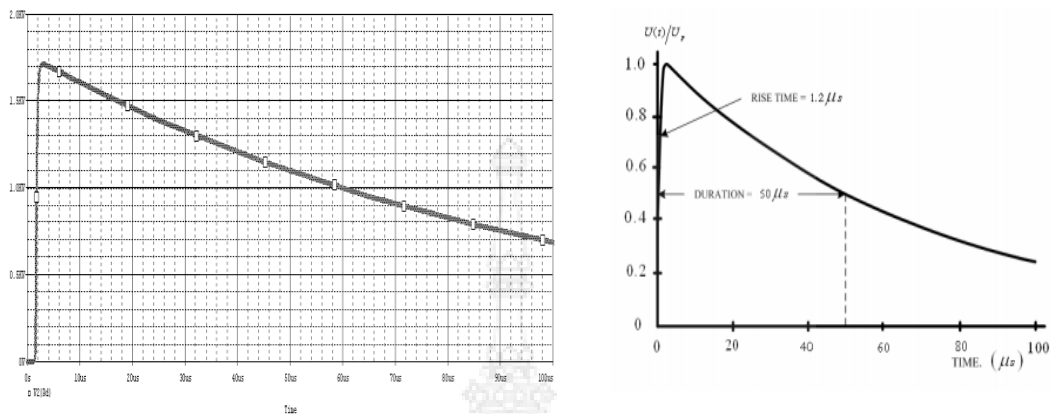


รูปที่ 3.3 ผลจากการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ผ่านโปรแกรม Orcad ที่ตัดทางคลื่น



รูปที่ 3.4 ผลจากการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ผ่านโปรแกรม Orcad ที่ตัดหน้าคลื่น

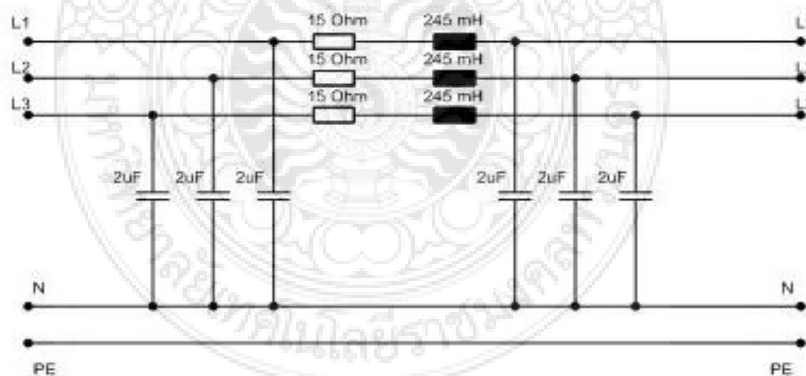
ทำการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่ทำการทดสอบกับค่าแรงดันอิมพัลส์ $1.2/50\mu\text{s}$ ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 โดยผลที่ออกมาจะเห็นว่าค่าที่ทำการทดสอบมีความใกล้เคียงกับค่าแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน แสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ในระบบที่ออกแบบมานั้นสามารถนำไปอ้างอิงในการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบแบบจำลองการทดสอบกับมาตรฐาน IEC IEC 60060-1

3.3 ออกแบบจำลองสายส่งระยะยาว

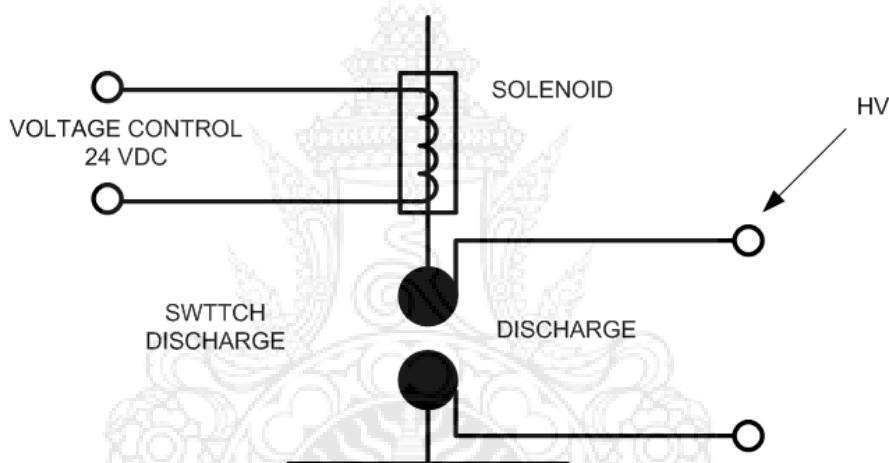
เมื่อทำการออกแบบจำลองสายส่งระยะยาวแล้ว ก็นำค่าพารามิเตอร์มาประกอบกับวงจรสมมูล ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลสายส่งระยะยาว

3.4 ออกแบบสวิตช์แม่เหล็กไฟฟ้าทางกล

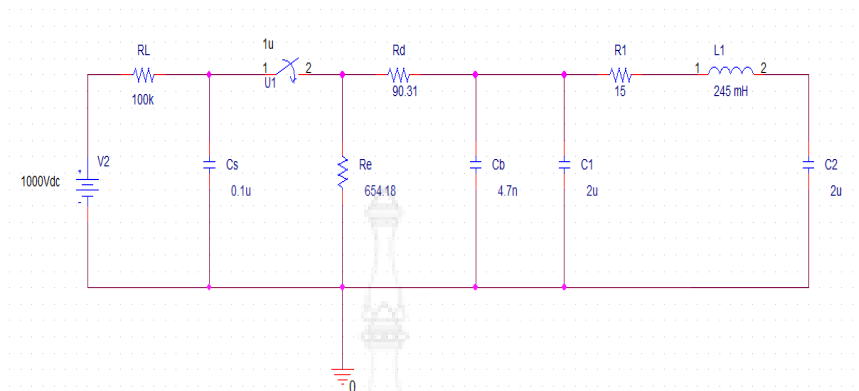
โซลินอยด์ คืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่อาศัยแรงดึงดูดของแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้แท่งเหล็กเคลื่อนที่ (Movable Core) เคลื่อนที่ไปในทิศทางหนึ่งได้ โครงสร้างเบื้องต้นของโซลินอยด์ประกอบด้วย ขดลวดพันรอบแกนเหล็กรูปทรงกระบอกภายในเป็นช่อง และมีแท่งเหล็กเคลื่อนที่ติดภายในปลายข้างหนึ่งของแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ยึดติดกับฐาน (Case) สปริง (Spring) เมื่อไม่จ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวด (Coil) จะไม่เกิดขั้วแม่เหล็กที่ขดลวด ไม่มีการดูดและผลักกันระหว่างแท่งเหล็กเคลื่อนที่กับขดลวด และอีกประการหนึ่งเพราะแรงดึงของสปริงยึดเอาไว้ ดังนั้นจึงไม่มีการเคลื่อนที่ของโซลินอยด์ แต่เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดจะเกิดเส้นแรงแม่เหล็ก และขั้วแม่เหล็กขึ้นที่ขดลวดเกิดแรงดึงดูดและผลักรันของแม่เหล็กกับแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ที่จะเกิดขึ้นแรงดังกล่าวจะเอาชนะแรงดึงของสปริงได้ ทำให้แท่งเหล็กเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งเดิมไปได้



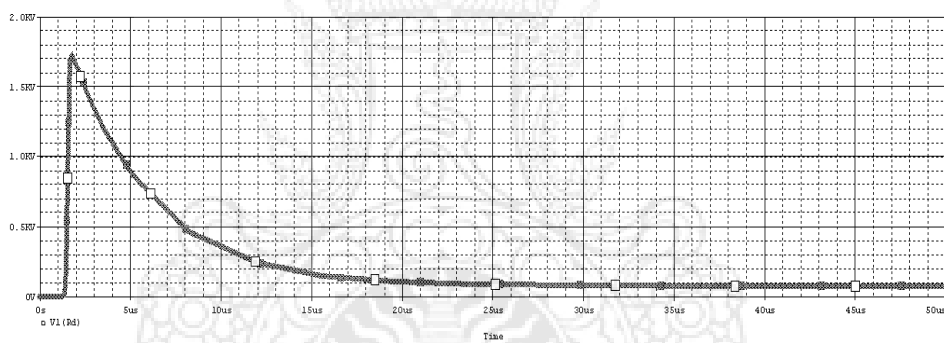
รูปที่ 3.7 ชุดสวิตช์แม่เหล็กไฟฟ้า

โซลินอยด์ที่ใช้นั้นเป็นทางเลือกที่ง่าย คงทน และมีประสิทธิภาพ ในการทำสวิตช์ปล่อยประจุแรงสูง (Switch Discharge) เมื่อป้อนแรงดันกระแสตรง 12 V โซลินอยด์จะเป็นแม่เหล็กชั่วคราวทำหน้าที่ดึงแกปทรงกลมแรงสูงให้เข้าหาแกปทรงกลมอีกด้านหนึ่ง ทำให้พลังงานที่สะสมใน C_s สามารถถ่ายเทประจุไปสู่องค์ประกอบอื่นของวงจร

3.5 ทำการทดสอบแรงดันเกินอิมพัลส์กับแบบจำลองสายส่งระยะยาวผ่านโปรแกรม Orcad



รูปที่ 3.8 วงจรการทดสอบแรงดันเกินอิมพัลส์กับแบบจำลองสายส่งระยะยาวผ่านโปรแกรม Orcad



รูปที่ 3.9 ผลจากการทดสอบแรงดันเกินอิมพัลส์กับแบบจำลองสายส่งระยะยาวผ่านโปรแกรม Orcad

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

การสร้างแบบจำลองแรงดันเกินในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้านี้ ควรคำนึงถึงวัสดุอุปกรณ์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด หาซื้อได้ง่ายและมีราคาไม่สูง และมีประสิทธิภาพที่ดีสามารถทนต่อกระแสได้ตามที่ได้ออกแบบไว้ ทางคณะผู้จัดทำจึงเลือกใช้อุปกรณ์ที่นำมาสร้างแบบจำลองแรงดันเกินในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.5

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้าง



รูปที่ 4.1 ความต้านทานเหนี่ยวนำ (R_d)



รูปที่ 4.2 ความต้านทานปล่อยประจุ (R_c)



รูปที่ 4.3 ตัวเก็บประจุไหลด (C_b)

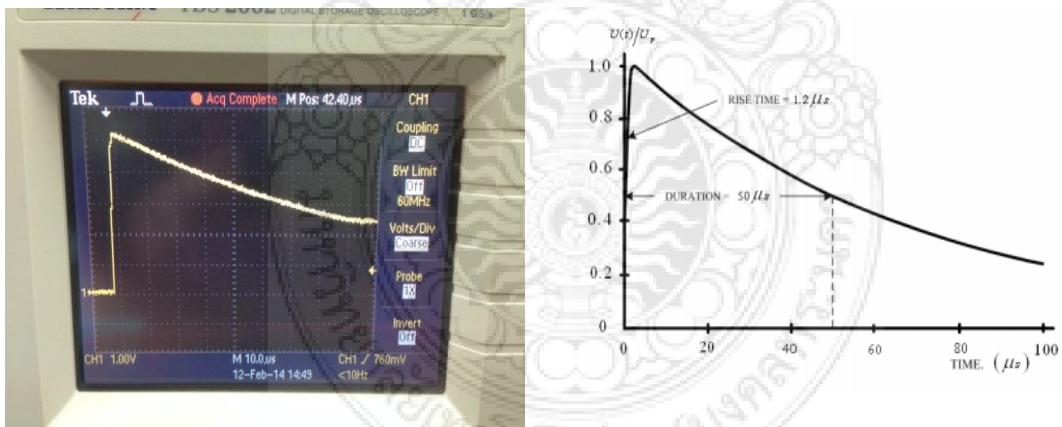


รูปที่ 4.4 ตัวเก็บประจุฟิล์ม (C_s)



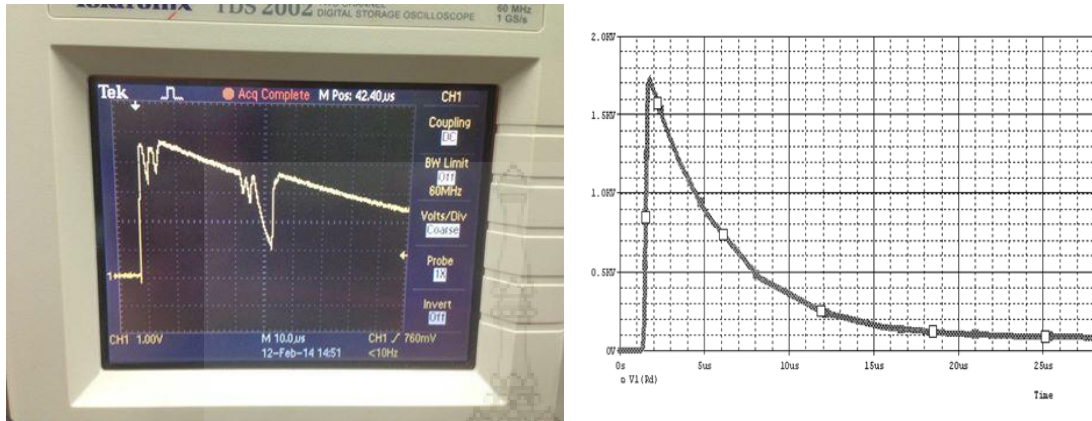
รูปที่ 4.5 หม้อแปลงขนาด 1 kV

4.2 ผลจากการทดสอบจริง



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบผลของแรงดันอิมพัลส์ที่ทดสอบจาก Oscilloscope แรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน

จากการเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ที่ทำการทดสอบกับแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน IEC 60060-1 จะเห็นได้ว่า แรงดันอิมพัลส์ที่ทำการทดสอบนั้นมีความใกล้เคียงกับแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน IEC 60060-1 จึงสรุปได้ว่า แรงดันอิมพัลส์ที่ทำการทดสอบนั้นสามารถนำมาทดสอบได้จริง โดยนำมาทดสอบกับแบบจำลองสายส่งระยะยาว ซึ่งผลที่ออกมาเป็นดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ที่ทำการทดสอบกับแบบจำลองสายส่งระยะยาวจาก Oscilloscope กับโปรแกรม Orcad

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าผลที่ได้จากการทดสอบจริงผ่าน Oscilloscope นั้นเกิดการออสซิลเลชันมากกว่าผลที่ได้จากการจำลองผ่านโปรแกรม Orcad เนื่องจากในการทดสอบจริงนั้นไม่เหมือนกับการทดสอบผ่านโปรแกรม Orcad เพราะพารามิเตอร์ในระบบนั้นจะมีค่าความเหนี่ยวนำแฝงอยู่ จึงทำให้รูปที่ทำการทดสอบจริงนั้นผิดเพี้ยนไปเล็กน้อย



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าการออสซิลเลชันในวงจรเพราะในวงจรสายส่งมีพารามิเตอร์ในระบบมีผลทำให้แรงดันเกินที่เกิดขึ้นในระบบ แม้จะเป็นช่วงเวลาอันสั้น แต่ก็มีความสำคัญยิ่งต่อเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่าย เพราะในช่วงระยะเวลาสั้นๆ นั้น การฉนวนของอุปกรณ์จะได้รับความเครียดสนามไฟฟ้า (electric field stress) ที่เกิดขึ้นสูงกว่าค่าความคงทนของฉนวน (dielectric strength) อาจจะทำให้เกิดเบรกดาวน์แบบชั่วคราว หรือแบบถาวร โดยการเสียหายสภาพการฉนวนจะทำให้เกิดผิดพลาด (fault) ในระบบเกิดการลัดวงจร และกระแสลัดวงจรอาจทำให้เกิดการระเบิดซึ่งจะเกิดความเสียหายได้

5.2 การป้องกันฟ้าผ่าแก่ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ระบบสายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบกลางแจ้งจะมีโอกาสได้รับผลกระทบจากฟ้าผ่าโดยตรง โดยการป้องกันนั้นอาจทำได้โดยใช้สายดินซึ่งอากาศ OGW (Overhead Ground Wire) ซึ่งไว้สูงกว่าสายเฟสหรือสายส่งกำลัง (phase conductor) ทำหน้าที่เป็นชิลด์ป้องกัน (shielding) ไม่ให้ฟ้าผ่าโดยตรงบนสายเฟส ผลของการป้องกันจะมีผลดียิ่งขึ้นถ้าหากสายดินนั้นซึ่งอยู่เหนือสายเฟส

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาและพัฒนาต่อ

1. สามารถนำไปทดสอบกับอุปกรณ์อื่นได้
2. สามารถเพิ่มขนาดของแรงดันในการทดสอบได้
3. ใช้โปรแกรมที่มีประสิทธิภาพมากกว่านี้ เพื่อสามารถทำการทดลองได้มากขึ้น

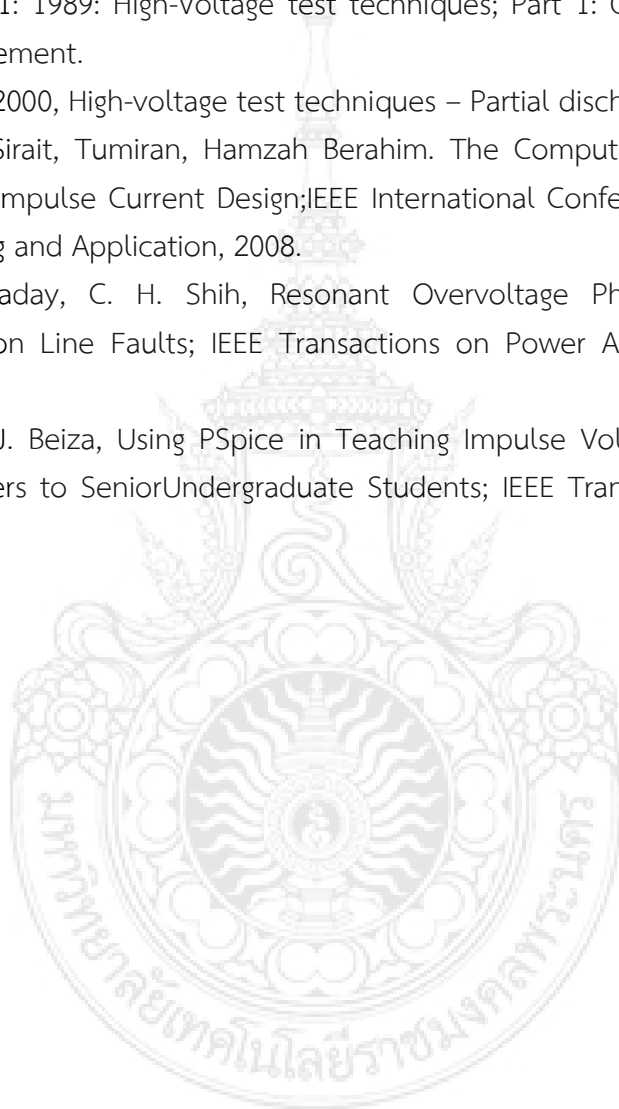
5.4 ปัญหาและอุปสรรค

การสร้างแบบจำลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งมองจากภายนอกจะพบว่าโครงสร้างทำได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก แต่โครงสร้างที่ง่ายนั้น ต้องผ่านการลองผิดลองถูก ประยุกต์และใช้เวลาในการออกแบบเพื่อให้ชิ้นงานมีความง่ายในการสร้าง แต่มีประสิทธิภาพสูงสุด เพราะกว่าจะสำเร็จต้องอาศัยความทุ่มเท ความเอาใจใส่ของผู้สร้าง ซึ่งจะต้องคำนึงถึงทุกรายละเอียดตั้งแต่การสร้างต้องตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยหลีกเลี่ยงผลของค่าความเหนียวนำแฝง และคำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้งาน

สุดท้ายผู้จัดทำมั่นใจว่าแบบจำลองแรงดันเกินในระบบสายส่งระยะยาวที่สร้างนั้นมีประสิทธิภาพ ทั้งรูปคลื่นตามมาตรฐาน ความคงทน และการซ่อมบำรุงที่ง่าย เนื่องจากโครงสร้างไม่ยุ่งยากซับซ้อน ซึ่งผู้สร้างได้มองถึงจุดนี้ด้วย หวังว่าผลงานของผู้สร้างจะได้ใช้งานจริงและเป็นวิทยาทานแก่ผู้ที่สนใจในการสร้างเสิร์จแรงดันสูงต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] สุชาติ ปรีชาธร, 2555, วิศวกรรมการป้องกันระบบไฟฟ้าแรงสูง กรุงเทพฯ
- [2] สำรวย สัจจ์สะอาด ,2539, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, กรุงเทพฯ
- [3] มงคล ทองสงคราม, 2535, การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า, กรุงเทพฯ
- [4] IEEE std 4-1995: IEEE Standard Techniques for High Voltage testing.
- [5] IEC 60060-1: 1989: High-Voltage test techniques; Part 1: General definitions and test requirement.
- [6] IEC 60270:2000, High-voltage test techniques – Partial discharge measurements
- [7] Haryono, Sirait, Tumiran, Hamzah Berahim. The Computer Simulation for High Amplitude Impulse Current Design; IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2008.
- [8] J. A. Halladay, C. H. Shih, Resonant Overvoltage Phenomena Caused By Transmission Line Faults; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems , 1985.
- [9] B. Vahidi, J. Beiza, Using PSpice in Teaching Impulse Voltage Testing of Power Transformers to Senior Undergraduate Students; IEEE Transactions on Education , 2005.



ภาคผนวก ก

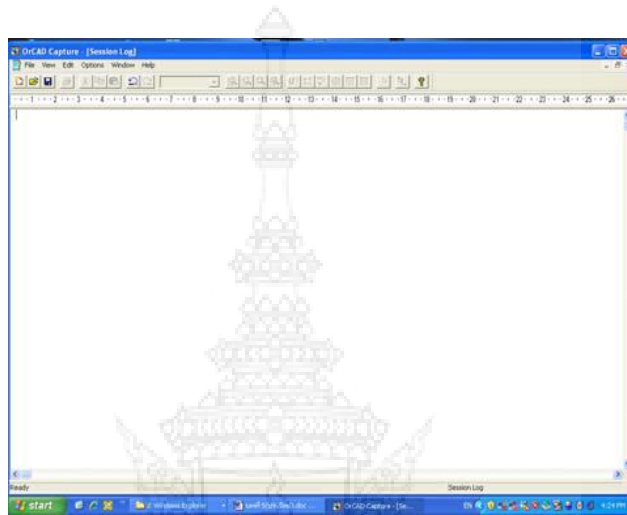
การใช้งานโปรแกรม Orcad



ภาคผนวก ก

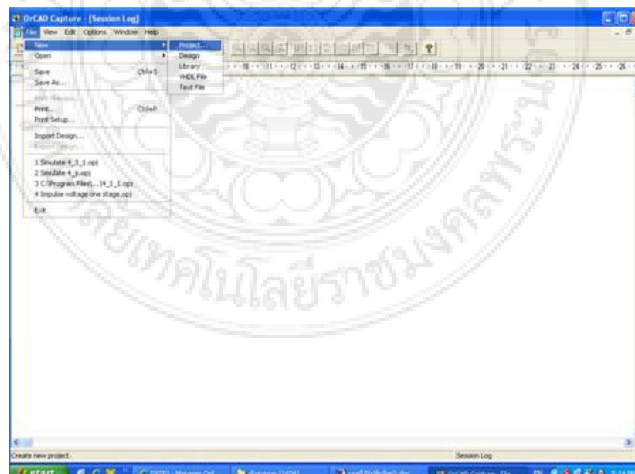
การใช้งานโปรแกรม Orcad

1. ทำการติดตั้งโปรแกรม Orcad
2. เลือกเปิดโปรแกรม Orcad จะปรากฏหน้าจอ ดังรูปที่ 1



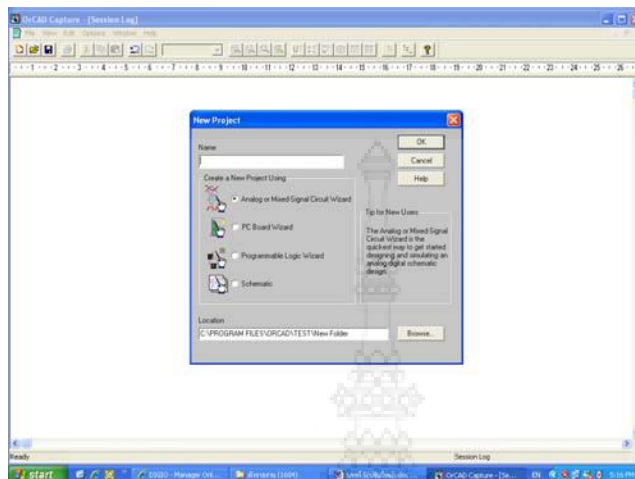
รูปที่ 1 หน้าจอโปรแกรม Orcad

3. เลือก File เพื่อจะสร้าง New Project หรือเปิด Project เดิมที่ทำไว้จะได้ ดังรูปที่ 2 เป็นการสร้าง New Project



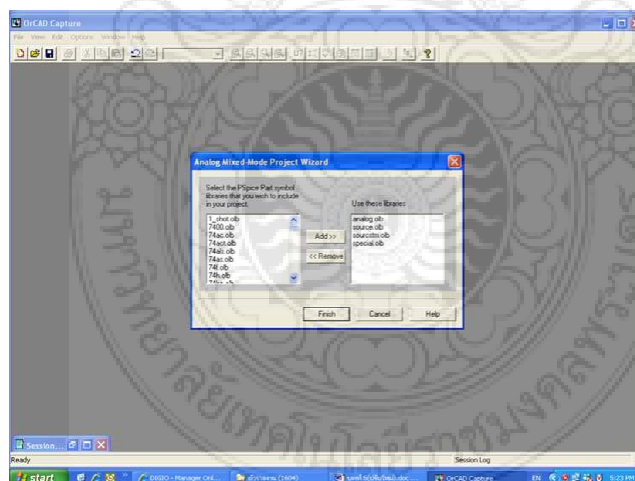
รูปที่ 2 เลือก File เพื่อสร้าง New Project

4. เลือก File > New > Project จะปรากฏหน้าต่างดังรูป ให้ตั้งชื่อ File ที่จะทำงานและเลือกวิธีการจำลองโดยเลือก Analog Mixed A/D ดังรูปที่ 3



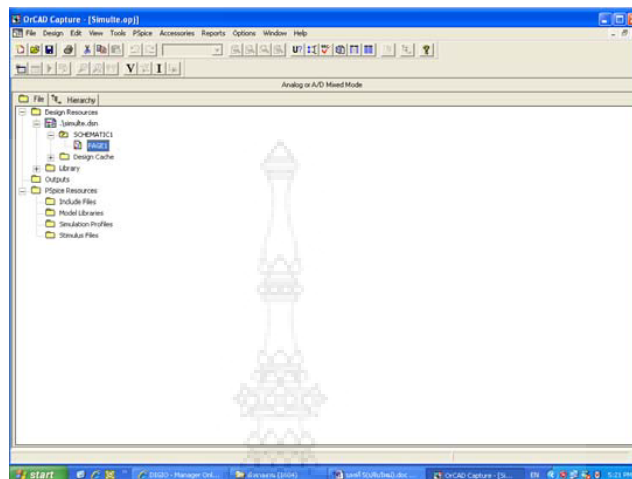
รูปที่ 3 ทำการตั้งชื่อ File

5. เมื่อทำตามขั้นตอนที่ 4 เสร็จเรียบร้อยจะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 4 ให้เลือก Create based upon on Existing project > empty.opi > OK



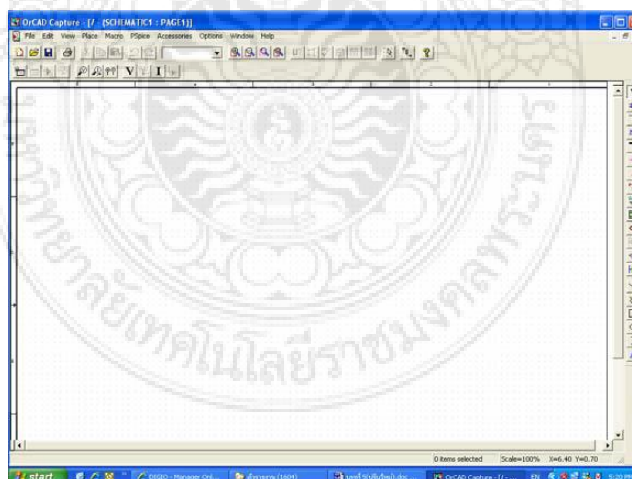
รูปที่ 4 การสร้างแผ่นงาน

6. เมื่อทำตามขั้นตอนที่ 5 เสร็จจะปรากฏหน้าจอดังรูปที่ 5 ให้เลือกดังนี้คือ + (ชื่อโปรเจคที่ตั้ง ในที่นี้คือ Project 1.dsn) > SHEMATIC 1 > Page 1 ดังรูป



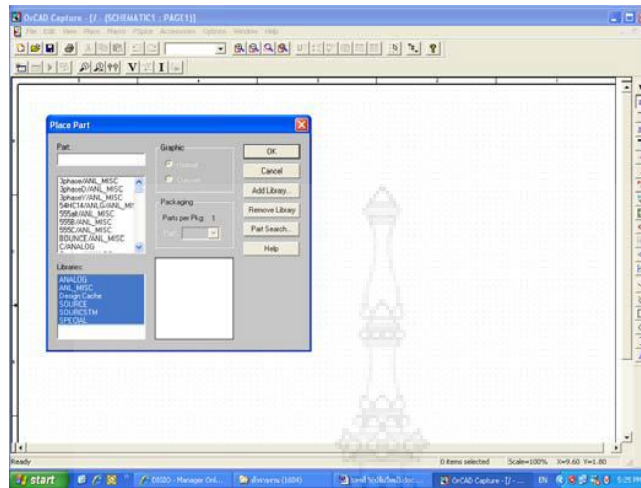
รูปที่ 5 การเลือกหน้าใหม่

7. เมื่อทำตามขั้นตอนที่ 6 เสร็จจะปรากฏหน้าจอดังรูปที่ 6 เป็นพื้นที่ให้เขียนวงจรลงไป โดยการหาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องการนำมาเขียนวงจร (ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างเป็นวงจรแรงดันอิมพัลส์) ในขั้นตอนนี้ให้เขียนวงจรตามที่ต้องการจำลอง โดยมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 6 พื้นที่สำหรับการเขียนวงจร

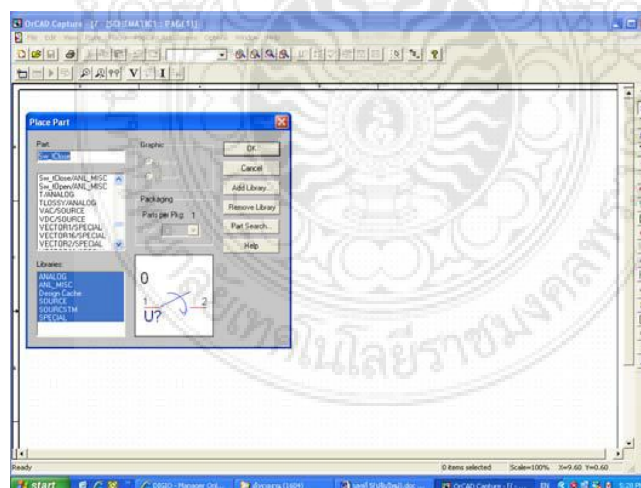
7.1 การหาอุปกรณ์ต่างๆ ทำได้โดยเลือก Place part ที่ด้านข้าง จะปรากฏหน้าต่างรูปที่ 7



รูปที่ 7 การเลือกเครื่องมืออุปกรณ์

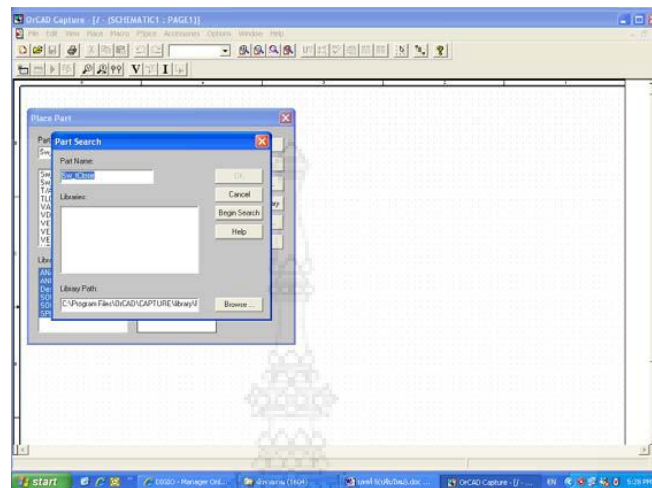
7.2 ในที่นี้จะแนะนำสำหรับวงจรที่เป็นของ แรงดันอิมพัลส์ หรือ กระแสอิมพัลส์ หรือวงจรแรงสูง ต่างๆที่ต้องใช้สปาร์กแกป ให้เลือกใช้อุปกรณ์ Sw_tclose แทนสปาร์กแกปดังกล่าว โดยต้องทำตามขั้นตอนต่อไปนี้

7.2.1 ลองพิมพ์ชื่อ Sw_tclose ที่ช่องชื่ออุปกรณ์ดูก่อน หากมีก็นำมาใช้ได้เลย ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การค้นหาสัญลักษณ์สำหรับการเขียนวงจร

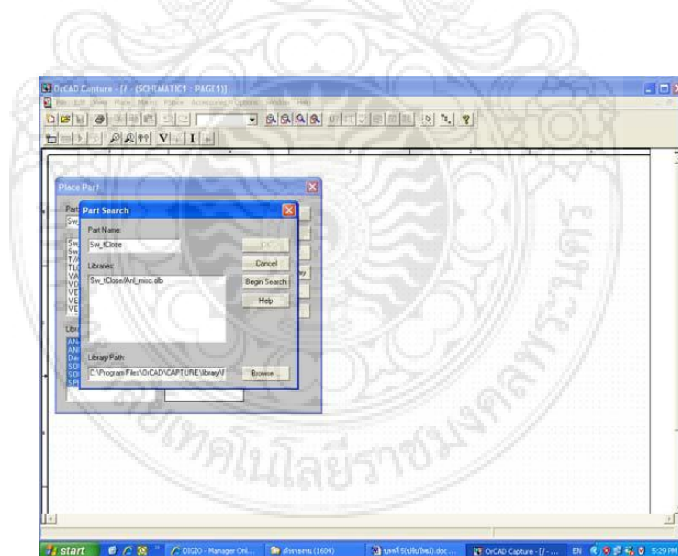
7.2.2 หากลองพิมพ์ชื่อดูแล้ว ไม่มีอุปกรณ์ดังกล่าวขอแนะนำว่าให้ทำดังนี้คือ เลือก Part Search จะปรากฏหน้าจอ ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 การ Search หาอุปกรณ์

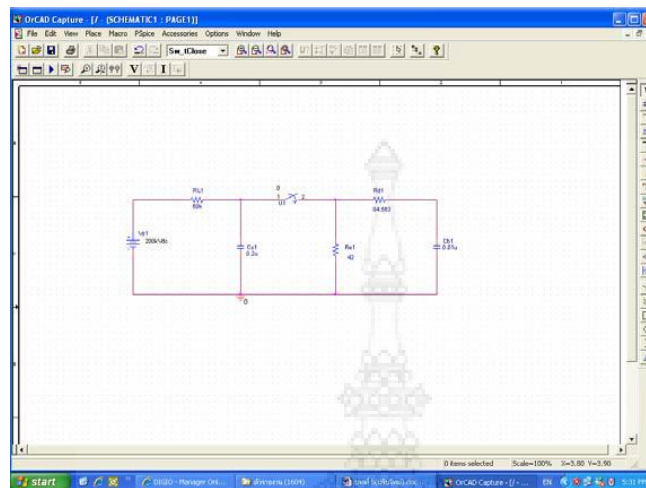
7.2.3 พิมพ์ Sw_tclose ลงในช่อง Part Name กด Begin Search จะปรากฏหน้าจอ ดังรูปที่ 10

7.2.4 เมื่อเลือกอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 10 ทำการกด OK จะได้นำอุปกรณ์ Sw_tclose มาใช้ได้



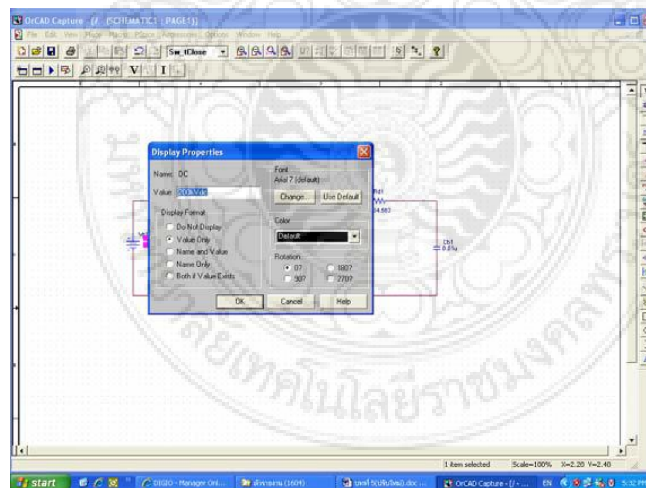
รูปที่ 10 การค้นหาอุปกรณ์โดยวิธี Begin Search

7.3 เมื่อหาอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในวงจรเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการสร้างวงจรโดยในหน้าจอตั้งกล่าวรายละเอียด ดังรูปที่ 11



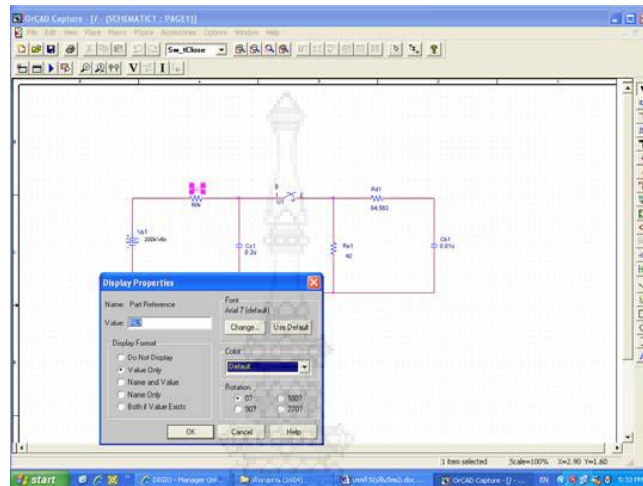
รูปที่ 11 การสร้างวงจร

7.4 เมื่อได้วงจรที่ต้องการและใส่ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งวิธีการตั้งค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ นั้นทำได้โดยการดับเบิลคลิกที่ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของอุปกรณ์ตัวนั้นก็ได้ แล้วจะปรากฏหน้าจอให้ใส่ค่าดังรูปที่ 12



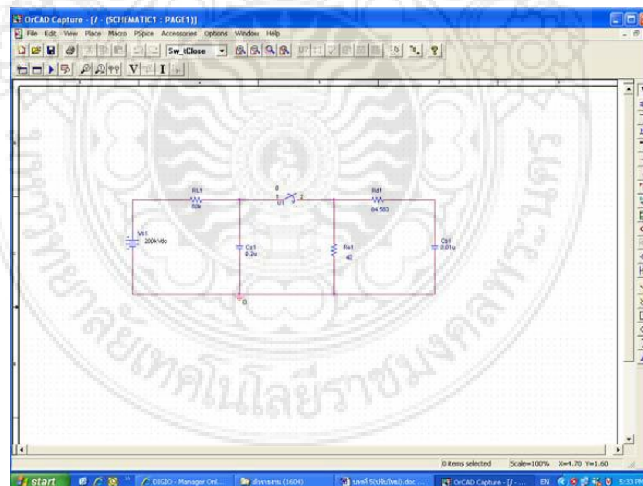
รูปที่ 12 การใส่ชื่ออุปกรณ์

7.5 เมื่อทำตามขั้นตอนที่ 7.4 เสร็จเรียบร้อย ก็ตั้งชื่ออุปกรณ์แต่ละตัว เช่น ให้ R1 เป็น RL ให้ C1 เป็น Cs เป็นต้น ซึ่งสามารถทำได้โดยให้เลือกที่ชื่อของอุปกรณ์ตัวเดิมแล้วดับเบิลคลิกเข้าไปตั้งชื่ออุปกรณ์ใหม่ตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 13



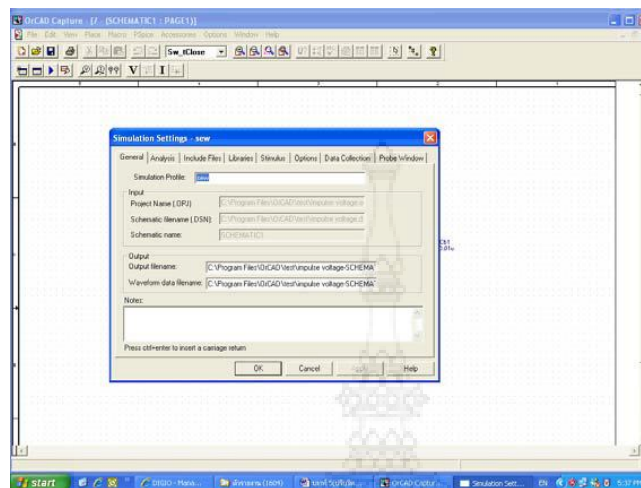
รูปที่ 13 การเปลี่ยนชื่ออุปกรณ์แต่ละตัว

7.6 เพียงเท่านี้ก็จะได้อุปกรณ์ต่างๆ ที่ต่อเป็นวงจรตามที่ต้องการ และจะได้วงจรที่พร้อมจะทำการจำลองดังรูปที่ 14



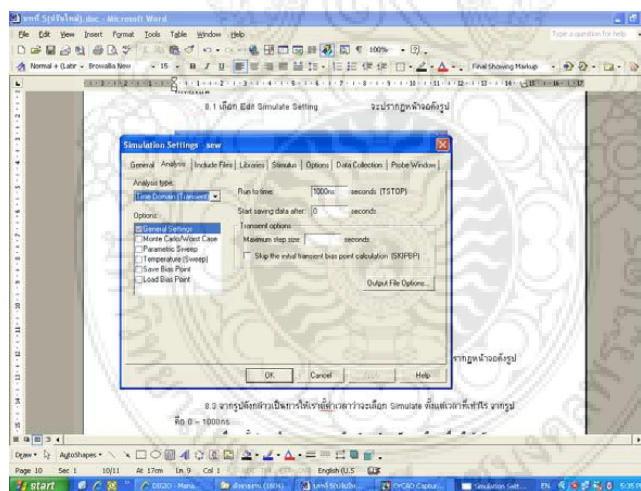
รูปที่ 14 วงจรที่พร้อมทำการจำลองเพื่อการทดลอง

8. เมื่อสร้างวงจรเสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการจำลอง โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้
- 8.1 เลือก Edit Simulate Setting จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 15



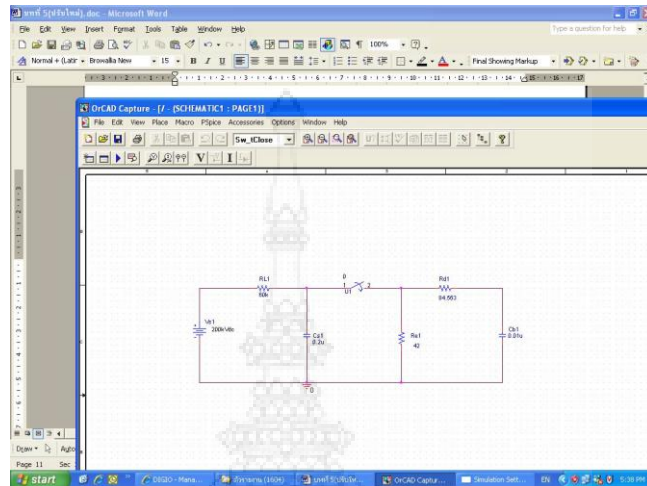
รูปที่ 15 ขั้นตอนการจำลองการทดลอง

- 8.2 เลือก Analysis type แบบ Time Domain (Transient) จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 16



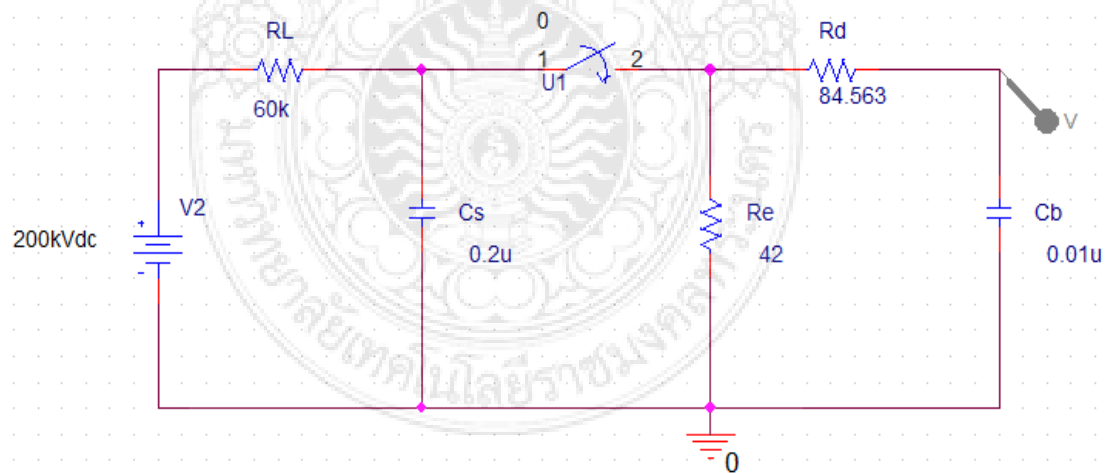
รูปที่ 16 ขั้นตอนการจำลองการทดลอง

- 8.3 จากรูปที่ 16 เป็นการให้ตั้งค่าเวลาว่าจะเลือกจำลองตั้งแต่เวลาที่เท่าไร จากรูป คือ 0 – 1000 ns
 8.4 เมื่อตั้งค่าเวลาในการจำลองเรียบร้อยแล้วจะมาเลือกเครื่องมือวัดว่าจะวัดค่าอะไร จากแถบเครื่องมือด้านบน ดังรูปที่ 17



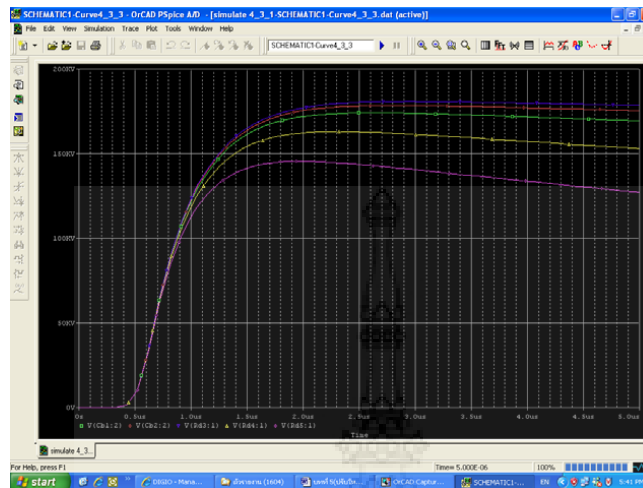
รูปที่ 17 การเลือกเครื่องมือในการวัดค่า

- 8.5 เมื่อเลือกเครื่องมือวัดได้เรียบร้อยแล้วให้นำไปวางตรงจุดที่ต้องการวัด ดังรูปที่ 18



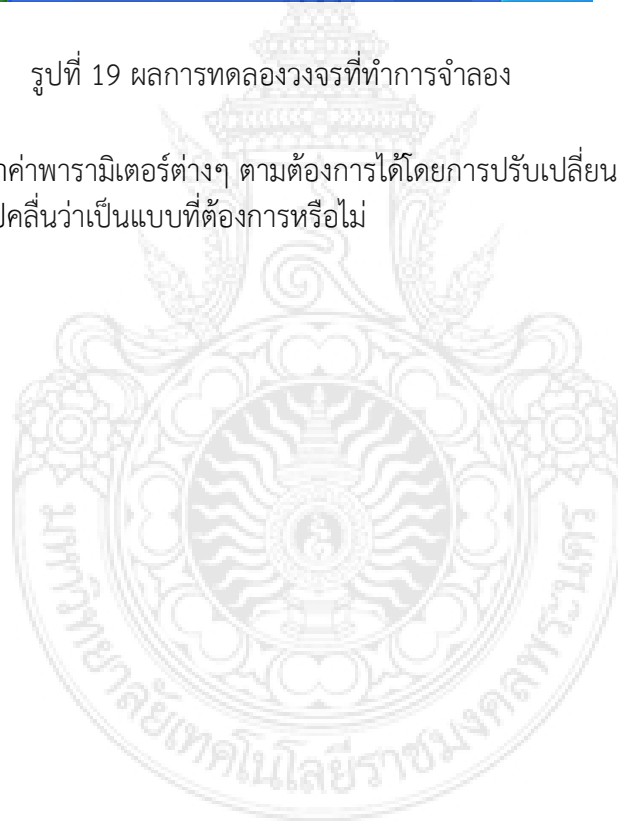
รูปที่ 18 การนำเครื่องมือที่ต้องการวัดไปวางในวงจร


8.6 เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้วให้ทำการกด Run PSpice ก็จะได้รูปคลื่น ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 ผลการทดลองวงจรที่ทำการจำลอง

เพียงเท่านี้ก็สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามต้องการได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ แล้วทำการจำลองเพื่อดูรูปคลื่นว่าเป็นแบบที่ต้องการหรือไม่





ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ผลกระทบแรงดันเกินในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าด้วยการทดสอบ
แรงดันอิมพัลส์

การวิเคราะห์ผลกระทบแรงดันเกินในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าด้วยการทดสอบแรงดันอิมพัลส์

Impact Analysis Over Voltage in Power Transmission Lines with Impulse Test Voltage

ภูงศ์ รุ่งเรือง รัฐพล มั่งคั่ง อธิรุจน์ เจริญจิตร อานนท์ สิงห์เสถียร และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถ.ประชาราษฎร์ สาย 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 โทรศัพท์: 029132424 ต่อ 150 E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้เสนอการออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ขนาด $1.2 / 50 \mu\text{s}$ เพื่อศึกษาและใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน(ฟ้าผ่า) เพื่อทดสอบความคงทนของสายส่งกำลังไฟฟ้าและศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากค่าองค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยมีการจำลองผ่านโปรแกรมสำเร็จรูป Pspice student ก่อนดำเนินการสร้างจริง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะหาได้ตามท้องตลาดและใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้ โดยจะนำมาทดสอบกับแบบจำลองสายส่งระยะยาว ผลที่ได้จากการทดสอบ แสดงให้เห็นว่า วัสดุที่นำมาทดสอบจะต้องมีประสิทธิภาพที่ดี และสามารถทนต่อแรงดันเกินชั่วขณะที่นำมาทดสอบได้ เพื่อความปลอดภัยของระบบไฟฟ้า

คำสำคัญ: อิมพัลส์, สายส่งไฟฟ้า, ค่ามาตรฐานในการทดสอบที่ใช้อ้างอิง, ออสซิลโลสโคป

Abstract

This article proposes a model voltage impulse, at $1.2 / 50 \mu\text{s}$. To education and to create pressure impulse's lightning. Standard waveforms to test the durability of power transmission lines tested and factors affecting the voltage waveform impulse from the elements of the generator's voltage impulse. The simulation via Pspice program before performing the actual creation. Device which is used to create a generator voltage impulse will find in the market and close to the design. They will be tested on a simulated transmission distance. The results of testing show that material tested must have good performance. Can withstand high pressure while the test was taken. For the safety of the electrical system

Keywords: Impulse, Transmission line, Basic Impulse Level, Oscilloscope

1. บทนำ

ในปัจจุบันวิศวกรรมทางไฟฟ้าได้มีการขยายตัวทางเศรษฐกิจในภาคอุตสาหกรรมและการบริการซึ่งทำให้มีการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าอย่างเพียงพอแล้วความมั่นคงของระบบส่งจ่ายนั้นต้องให้ความสำคัญ ถ้าระบบไม่มีความมั่นคงจะทำให้การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าไม่ต่อเนื่องส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้ามักขึ้นระดับแรงดันสูงขึ้นพลังงานไฟฟ้ามากขึ้นตามความต้องการของผู้บริโภค เพราะฉะนั้นจำเป็นต้องหาอุปกรณ์ที่มีระดับความทนทานที่สามารถรองรับได้ การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในประเทศไทย โดยส่วนใหญ่จะเป็นการส่งจ่ายแบบชิงในอากาศ ซึ่งอาจจะเกิดการถูกฟ้าผ่าและทำให้แรงดันเกินวิ่งไปตามสายไฟเข้าสู่อุปกรณ์ไฟฟ้าได้รับความเสียหาย หรือ เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในรูปแบบของเสิร์จเข้ามาทำความเสียหายกับอุปกรณ์ในระบบแรงต่ำ ทำให้ระบบส่งจ่ายต้องหยุดชะงักลงโดยส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้า ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบรูปคลื่นเพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์ป้องกันระบบ ให้อุปกรณ์เหล่านี้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่เกิดความเสียหายเมื่อถูกรบกวน [1,2]

จากการวิจัยที่ผ่านมาได้เห็นถึงผลกระทบของการเกิดฟ้าผ่าในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าว่ามีผลต่ออุปกรณ์ป้องกันเป็นอย่างมาก จึงมีการทดสอบในระบบเพื่อวิเคราะห์ความเสียหายในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าและความเสียหายของอุปกรณ์ เพื่อประสิทธิภาพของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า

ดังนั้นบทความนี้ได้นำเสนอแบบจำลองแรงดันเกินอิมพัลส์ที่ขนาด $1.2/50 \mu\text{s}$ เพื่อทำการทดสอบกับแบบจำลองสายส่งกำลังไฟฟ้าระยะยาวและนำผลที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์ เพื่อจัดหาอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพสูงสุดของอุปกรณ์ของในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าระยะยาวเพื่อให้แน่ใจว่าระบบทำงานได้ปกติ เมื่ออุปกรณ์ได้รับแรงเกินจริงๆในระบบ โดยใช้รูปคลื่นที่มีคุณสมบัติในด้านต่างๆคล้ายกับแรงดันเกินอิมพัลส์เพื่อจำลองสภาพแวดล้อมในการทดสอบอุปกรณ์ ให้เหมือนกับที่เกิดขึ้นกับระบบจริงๆ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การสร้างแรงดันอิมพัลส์

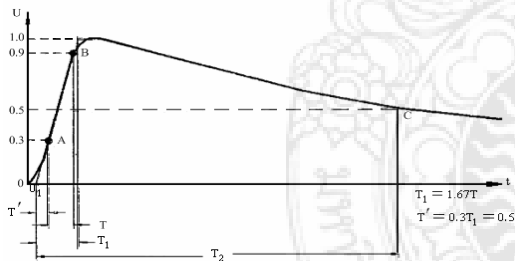
แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันเกินที่เกิดจากเหตุภายนอก คือ เกี่ยวข้องกับฟ้าผ่า เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าและแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจากสาเหตุภายในระบบส่งจ่ายเอง คือ เกิดจากการทำงานของสวิตช์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์เมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นในระบบ เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ ซึ่ง โดยการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขึ้นในห้องทดลองก็เพื่อที่จะนำไปทดสอบอุปกรณ์ต่างๆ ก่อนที่จะนำไปใช้งาน เพื่อที่จะดูว่าทนต่อแรงดันเกินเหล่านี้ได้ไหม ฉะนั้น เพื่อความสะดวกต่อการเปรียบเทียบผลการทดสอบ จึงมีการกำหนดรูปคลื่นอิมพัลส์ให้เป็นมาตรฐานขึ้น โดยยึดเอารูปคลื่นที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติเป็นเกณฑ์ [2]

2.2 ข้อกำหนดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

ลักษณะของแรงดันอิมพัลส์ทั้งสองที่เกิดขึ้นจะมีรูปคลื่นและคาบเวลาที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีการกำหนดมาตรฐานรูปคลื่นขอแรงดันอิมพัลส์ทดสอบขึ้นมา คือ มาตรฐาน IEC 2.2.1 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นเต็ม (Lighting Impulse Full Wave) ดังแสดงในรูปที่ 1

$$T_1 / T_2 = 1.2 / 50 \mu s$$

เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \mu s \pm 30 \%$ จะต้องอยู่ในช่วง $0.84-1.56 \mu s$
 เวลาช่วงหางคลื่น $T_2 = 50 \mu s \pm 20 \%$ จะต้องอยู่ในช่วง $40-60 \mu s$
 ค่ายอดแรงดันทดสอบ $U_m \pm 3 \%$ [2]



รูปที่ 1 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะเต็มคลื่น

ความหมายในรูปวงจรรูปที่ 1 [5]

- จุด A คือ จุดที่ 30 % ของค่ายอด
- จุด B คือ จุดที่ 90% ของค่ายอดขาขึ้น
- จุด C คือ จุดที่ 50% ของค่ายอดขาลง
- จุด O_1 คือ จุดที่เส้นตรง AB ตัดกับแกน t (จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นอิมพัลส์)
- T_1 คือ เวลาช่วงหน้าคลื่น
- T_2 คือ เวลาช่วงหลังคลื่น

2.3 ทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

โดยทั่วไปจะกำหนดด้วย

- แรงดันอัดประจุรวมทั้งหมด U_m (kV)
- ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมด C_s (uF)
- พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด W_e (kJ)
- อัตราการดีสชาร์จจำนวนครั้งต่อนาที
- รูปคลื่นแรงดันแบบฟ้าผ่า หรือแบบสวิตช์ซึ่ง

2.4 ขนาดแรงดันทดสอบ

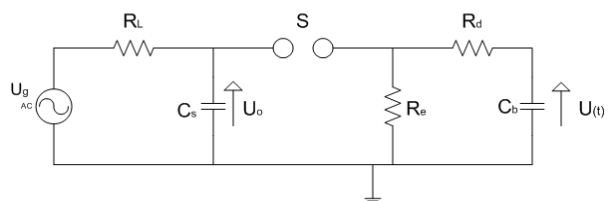
ขนาดแรงดันทดสอบขึ้นอยู่กับระดับฉนวน (Insulation level) นั่นคือขึ้นอยู่กับระบบแรงดันที่จะนำเอาอุปกรณ์หรือวัตต์นั้นๆ ไปใช้งาน แต่ละประเทศอาจจะกำหนดมาตรฐานการทดสอบของตนเอง อย่างไรก็ตามอาจใช้มาตรฐานสากล IEC (International standard) ซึ่งเป็นที่ยอมรับของนานาชาติประเทศเป็นค่าอ้างอิงหรือตกลงกันระหว่างประเทศ IEC Pub.1.71-1993: Insulation Co-ordination Part ได้กำหนดระดับแรงดันทดสอบตามช่วงระบบแรงดันสูงสุด (highest voltage) U_m [2]

3. การออกแบบวงจรอิมพัลส์

การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในโครงการนี้ จะใช้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์และตัวเก็บประจุโหลดที่ผลิตภายในประเทศ โดยมีการออกแบบและสร้างขึ้นมาใหม่ทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วยชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ แผ่นวงจร ส่วนของสปาร์กแก๊ป ตัวเก็บประจุต่างๆ ค่าความต้านทานและการฉนวนยึดรองรับ โดยใช้วัสดุและผลิตภัณฑ์ภายในประเทศทั้งสิ้น การออกแบบลักษณะโครงสร้างอาศัยรูปแบบผลิตภัณฑ์ของต่างประเทศมาดัดแปลงให้ง่ายต่อการประกอบสร้างและการทำงาน ในด้านสมรรถนะและคุณภาพ ใช้เกณฑ์มาตรฐานเป็นเงื่อนไขในการออกแบบและประเมินผลใช้เทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงเป็นพื้นฐานในการออกแบบสร้าง [1]

3.1 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สำหรับการประมวลผลการทดสอบกับแบบจำลองสายส่งระยะยาว ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ [2]

เมื่อ

U_g	คือ	แรงดันกระแสตรงของตัวจ่าย
U_o	คือ	แรงดันอัดประจุกระแสตรง
C_s	คือ	ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน
C_b	คือ	ตัวเก็บประจุโหลด (รวมทั้งความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์เครื่องวัดและอื่นๆ)
R_L	คือ	ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ
R_d	คือ	ความต้านทานหน่วง
R_e	คือ	ความต้านทานปล่อยประจุ
$U(t)$	คือ	แรงดันอิมพัลส์ที่ได้แปรไปตามเวลา
S	คือ	สปาร์กแกป

3.2 คำนวณหาค่าองค์ประกอบวงจร

เมื่อทราบว่า จะต้องสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นใด กำหนดด้วยค่า T_1 และ T_2 ปกติเริ่มต้นจากค่าความจุไฟฟ้าของโหลด C_b ก่อนเลือกตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_s ให้สอดคล้องกับ C_b กล่าวคือ C_s เป็นตัวเก็บพลังงานได้มากที่สุดที่จะจ่ายทอดให้กับ โหลด ดังนั้นเมื่อทราบค่า C_b และ C_s แล้ว องค์ประกอบที่เหลือต้องคำนวณ คือ ความต้านทาน R_d และ R_e ซึ่งอาจหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าเวลา $1/\alpha_1, 1/\alpha_2$ คือ

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

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

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน ที่กำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่น และหลังคลื่น T_1 และ T_2 ตามลำดับ มีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลา $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ T_1 / T_2 อันเป็นตัวแสดงถึงรูปลักษณะของรูปคลื่น ค่า k_1 และ k_2 เป็นค่าคงตัว ขึ้นอยู่กับรูปคลื่น ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าแฟกเตอร์ k_1 และ k_2 สำหรับรูปคลื่นมาตรฐาน [5]

T_1 / T_2	k_1	k_2	$1/\alpha (\mu s)$	$1/\alpha (\mu s)$
1.2/5	1.44	1.49	3.47	0.805
1.2/50	0.73	2.96	68.5	0.405
1.2/200	0.70	3.15	286	0.381
250/2500	0.87	2.41	2875	104.0

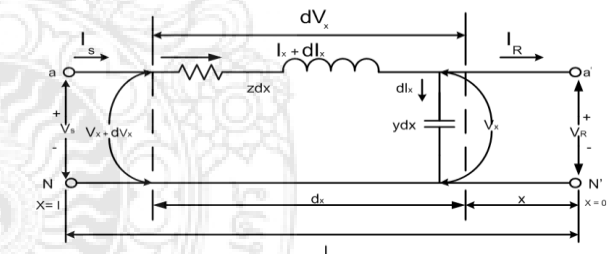
ในกรณีที่ทราบค่าองค์ประกอบต่างๆของวงจรอิมพัลส์ ถ้าจำเป็นต้องทราบค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและช่วงหางคลื่น อาจคำนวณค่าโดยประมาณได้จากค่า k_1 และ k_2 ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สูตรการคำนวณหาค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและเวลาช่วงหางคลื่นโดยประมาณ [5]

T_1	T_2	η
$k_2 \frac{R_d R_e}{R_d + R_e} \cdot \frac{C_s C_b}{C_b + C_s}$	$k_1 (R_d + R_e)(C_b + C_s)$	$\frac{R_e C_s}{(R_d + R_e)(C_b + C_s)}$

4. แบบจำลองสายส่งระยะยาว

การวิเคราะห์สมรรถนะของสายส่งระยะยาว (long transmission lines) มีความยาวตั้งแต่ 240 km หรือ 150 mile ขึ้นไป [3] ในกรณีนี้สายส่งระยะยาวนั้นเป็นระยะที่ทำการตรวจสอบลำช้ากว่าสายส่งระยะต่างๆ จึงได้ทำการออกแบบเพื่อสร้างแบบจำลองสายส่งระยะยาว โดยแบบจำลองสายส่งระยะยาวมีขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าสายส่งระยะปานกลาง ทำให้ค่า C และ G ของสายส่งมีค่ามาก วิธีที่เหมาะสมสำหรับการหาค่า Y และ I ของสายส่งระยะยาว เพื่อพิจารณา V และ I จากส่วนย่อยตลอดความยาวของสายส่ง ลักษณะเช่นนี้ พลั๊กแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณสายส่งจึงถูกพิจารณาให้เป็นรูปคลื่นสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีผลต่อสมการหาค่า V และ I ของสายส่งระยะยาวอีกด้วย [4] แบบจำลองวงจรเทียบเคียงของสายส่งระยะยาว ดังแสดงในรูปที่ 3 และ รูปที่ 4

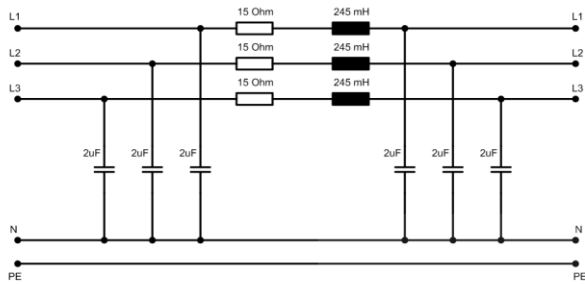


รูปที่ 3 ส่วนประกอบวงจรของระบบสายส่งระยะยาว

เมื่อ

dx	คือ	ส่วนย่อยของสายส่งใช้พิจารณา
V_x และ I_x	คือ	แรงดันและกระแสไฟฟ้าทางด้านปลายของ dx
x และ y	คือ	อิมพีแดนซ์และแอดมิตแตนซ์ต่อหน่วยความยาว
zdx และ ydx	คือ	อิมพีแดนซ์และแอดมิตแตนซ์ที่ประกอบอยู่ในส่วนของ dx
$V_x + V_{dx}$ และ $I_x + dI_x$	คือ	แรงดันและกระแสไฟฟ้าทางด้านต้นของ dx

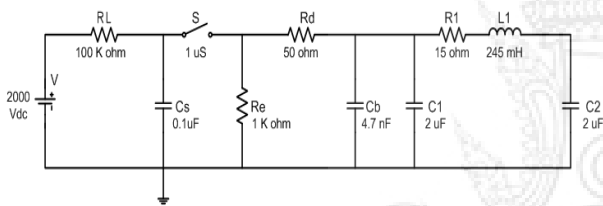
ทำการออกแบบแบบจำลองสายส่งระยะยาว โดยใช้ค่าพารามิเตอร์เข้าไปในระบบสายส่ง



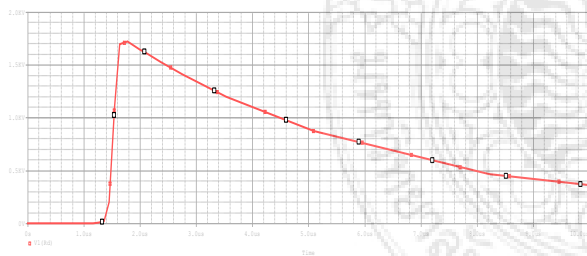
รูปที่ 4 วงจรสมมูลสายส่งระยะยาว

5. ทำการทดสอบ

โดยประมวลผลทำการทดสอบแรงดันเกินชั่วขณะกับแบบจำลองสายส่งระยะไกลผ่านโปรแกรมจำลอง PSpice: student version ดังแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6



รูปที่ 5 วงจรการทดสอบผ่านโปรแกรม PSpice



รูปที่ 6 ผลจากการทดสอบเสมือนจริงผ่านโปรแกรม PSpice student

จากรูปที่ 6 จะเห็นว่ารูปคลื่นที่ทำการทดสอบเสมือนจริงผ่านโปรแกรม PSpice student มีความแตกต่างจากแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานเพียงเล็กน้อย เพราะได้มีการเพิ่มแบบจำลองสายส่งระยะยาวเข้าไปในวงจร ซึ่งในระบบสายส่งระยะยาวมีค่าพารามิเตอร์อยู่ จึงทำให้รูปคลื่นเกิดการแกว่งเพียงเล็กน้อย ซึ่งอุปกรณ์ในวงจรจะที่มีผลต่อรูปคลื่นดังนี้

1. หน้าคลื่นกำหนดโดย R_L และ C_b หากต้องการหน้าคลื่นชันมาก R_L จะมีค่าน้อย
2. หางคลื่นกำหนดโดย L และ C_b การแกว่งกระพือมของหางคลื่นจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าของ L
3. ความถี่กำหนดโดย C_s กับ L ต้องมีความเหมาะสมกัน มีค่าประมาณความเรโซแนนท์

6. ผลการทดสอบ

การวิเคราะห์ผลกระทบแรงดันเกินในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าด้วยการทดสอบแรงดันอิมพัลส์จะแสดงให้เห็นว่า เกิดการอสซิลเลชันในวงจรเพราะในแบบจำลองสายส่งระยะยาวมีค่าพารามิเตอร์ในระบบ มีผลทำให้แรงดันเกินที่เกิดขึ้นในระบบ แม้จะเป็นช่วงเวลาอันสั้น แต่ก็มีความสำคัญยิ่งต่อเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่าย เพราะในช่วงระยะเวลาสั้นๆ นั้น การฉนวนของอุปกรณ์จะได้รับความเครียดสนามไฟฟ้า (electric field stress) ที่เกิดขึ้นสูงกว่าค่าความทนของฉนวน (dielectric strength) อาจจะทำให้เกิดเบรคดาวน์แบบชั่วคราว หรือแบบถาวร โดยการเสียหายการฉนวนจะทำให้เกิดผิดพลาด (fault) ในระบบเกิดการลัดวงจร และกระแสลัดวงจรอาจทำให้เกิดการระเบิดซึ่งจะเกิดความเสียหายได้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] สุชาติ ปรีชาธร, 2555, วิศวกรรมการป้องกันระบบไฟฟ้าแรงสูง กรุงเทพฯ
- [2] สำรวย สังข์สะอาด ,2539, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, กรุงเทพฯ
- [3] มงคล ทองสงคราม, 2535, การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า, กรุงเทพฯ
- [4] IEEE std 4-1995: IEEE Standard Techniques for High Voltage testing.
- [5] IEC 60-1: 1989: High-Voltage test techniques; Part 1: General definitions and test requirement.
- [6] Haryono, Sirait, Tumiran, Hamzah Berahim. The Computer Simulation for High Amplitude Impulse Current Design; IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2008.
- [7] J. A. Halladay, C. H. Shih, Resonant Overvoltage Phenomena Caused By Transmission Line Faults; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985.
- [8] B. Vahidi, J. Beiza, Using PSpice in Teaching Impulse Voltage Testing of Power Transformers to Senior Undergraduate Students; IEEE Transactions on Education, 2005.

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-ชื่อสกุล	นายภูซังค์ รุ่งเรือง
วัน-เดือน-ปีเกิด	21 กรกฎาคม 2534
สถานที่เกิด	จังหวัด ราชบุรี
สถานที่อยู่อาศัยปัจจุบัน	เลขที่ 187/7 ถนนมนตรีสุริยวงศ์ ซอย9 ตำบลหน้าเมือง อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี 70000
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ.2554	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง วิทยาลัยเทคนิคราชบุรี
พ.ศ.2557	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-ชื่อสกุล	นายรัฐพล มั่งคั่ง
วัน-เดือน-ปีเกิด	6 มีนาคม 2533
สถานที่เกิด	จังหวัด สมุทรปราการ
สถานที่อยู่อาศัยปัจจุบัน	เลขที่ 3/2 หมู่ 10 ถนนเทพารักษ์ ตำบลบางปลา อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ 10540
ประวัติการศึกษา	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง วิทยาลัยเทคนิคสมุทรปราการ
พ.ศ.2554	ปริญญาตรี
พ.ศ.2557	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-ชื่อสกุล	นายอิทธิจันท์ เจริญจิตร
วัน-เดือน-ปีเกิด	8 มกราคม 2534
สถานที่เกิด	จังหวัด ชุมพร
สถานที่อยู่อาศัยปัจจุบัน	เลขที่ 125 ถนนทวีสินคำ ตำบลท่าตะเภา อำเภอเมือง จังหวัดชุมพร 86000
ประวัติการศึกษา	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง วิทยาลัยเทคนิคชุมพร
พ.ศ.2554	ปริญญาตรี
พ.ศ.2557	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร