

การศึกษาการกระจายของแรงดันเสิร์จในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า
A STUDY OF SURGE VOLTAGE DISTRIBUTION IN A
TRANSFORMER WINDING



โดย

นาย สนิท สີโยธะ
นาย ศักดิ์ชัย แสงบำรุงทรัพย์
นาย เมธี ไหนาค
นาย ยุทธนา ปิติวารภรณ์

เลขหนังสือ.....
เลขทะเบียน..... 42607
วัน, เดือน, ปี..... 4 ส.ย. 2545

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

ปีการศึกษา 2543

การศึกษาการกระจายของแรงดันเสิร์จในระบบไฟฟ้ากำลัง

A STUDY OF SURGE VOLTAGE DISTRIBUTION IN A TRANSFORMER WINDING



อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. อานันท์วัฒน์คุณากร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2543

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการกระจายของแรงดันแลร์จในระบบไฟฟ้ากำลัง

A STUDY OF SURGE VOLTAGE DISTRIBUTION IN A TRANSFORMER
WINDING

ผู้จัดทำ

- | | | | |
|------------------|----------------|------|----------|
| 1. นาย สนิท | สีโยธะ | รหัส | 41013108 |
| 2. นาย สักดิ์ชัย | แสงบำรุงทรัพย์ | รหัส | 41013106 |
| 3. นาย เมธี | ไพนาค | รหัส | 41013104 |
| 4. นาย ยุทธนา | ปิติวราภรณ์ | รหัส | 41013151 |



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการกระจายของแรงดันเล็รจในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

นาย สนิท สีโยธะ
 นาย ศักดิ์ชัย แสงบำรุงทรัพย์
 นาย เมธี ไหนาค
 นาย ยุทธนา ปิติวรารณ

อาจารย์ที่ปรึกษา
 ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันหม้อแปลงไฟฟ้ามักจะได้รับผลกระทบรุนแรงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากแรงดันเกินที่เกิดจากสาเหตุภายในระบบ คือ เกิดจากการทำงานตัดต่อของอุปกรณ์เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Switching surge) และแรงดันเกินจากสาเหตุภายนอกระบบ คือ เกี่ยวข้องกับฟ้าผ่า (Lightning) อยู่ตลอดเวลา ฉ่าหน้าคลื่นของเล็รจดังกล่าวมีความชันสูง (Steep-fronted surge) จะทำให้การกระจายของเล็รจ ในขดลวดของหม้อแปลงเป็นไปในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อฉนวนของขดลวด และอาจก่อให้เกิดการเสื่อมของฉนวนของหม้อแปลง ที่บริเวณ line end เนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงเกินกว่าในสภาวะปกติ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงการกระจายของแรงดันเล็รจขึ้น

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการศึกษาถึงการกระจาย ของแรงดันเล็รจในขดลวดของหม้อแปลงแบบ layer winding ในการศึกษาดังกล่าวจำเป็นต้องสร้างเครื่องกำเนิดเล็รจแรงดันต่ำ ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้สร้างแรงดันเล็รจหรือเครื่องกำเนิดอิมพัลส์แรงดันต่ำที่สามารถปรับความชันหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ได้ แล้วจ่ายแรงดันเล็รจเข้าไปในขดลวด เพื่อศึกษาการกระจายของแรงดันเล็รจภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าว่าลักษณะการกระจายเป็นอย่างไร

A STUDY OF SURGE VOLTAGE DISTRIBUTION IN A TRANSFORMER WINDING

Mr.Sanit Sriyotha
Mr.Sakchai Sangbumrungsup
Mr.Matee Hainak
Mr.Yuthana Pitiwaraporn

Adviser

Dr.Anantawat Kunakorn

Abstract

Nowadays, Transformers are subjected to the internal overvoltage resulted from the operation of circuit breakers known as switching surge and the external overvoltage i.e. lightning. In case of that the surge is steep-fronted, the distribution of such a surge along a transformer winding is non-linear. This can cause a failure of the transformer insulation at the line end due to an excessive electrical stress. Thus, it is necessary to study the surge voltage distribution so that a proper design of the transformer insulation can be achieved.

The thesis presents a study of surge distributions a layer transformer winding. A low voltage surge generator is designed and constructed. The surge, then, is injected to the transformer winding in order to study the distribution of surge.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
abstract	II
๒ สารบัญรูปภาพ	III
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับ Steep-fronted surge	5
2.1 จุดกำเนิดของ Steep-fronted surge	5
2.2 แบบจำลองภายในของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า	5
2.3 Transformer model for switching on open circuit	14
2.4 แบบจำลองของขดลวดเมื่อ Steep-fronted voltage ผ่านหม้อแปลง	14
2.5 ค่าทรานเซียนพารามีเตอร์ของหม้อแปลง	16
2.6 Transformer capacitance	17
2.7 Travelling wave	19
บทที่ 3 วงจร Surge generator และ การทำงาน	22
3.1 หลักการทำงานของวงจร Surge generator	22
3.2 การออกแบบวงจร Transmitter	23
3.3 การออกแบบวงจร Receiver	29
3.4 วงจร Discharge pulse generator	30
3.5 Power supply	31
บทที่ 4 รูปคลื่นการกระจายของ Steep-fronted surge ในขดลวด	33
4.1 ที่ความชันหน้าคลื่น 40 ns	38
4.2 ที่ความชันหน้าคลื่น 100 ns	40
4.3 ที่ความชันหน้าคลื่น 300 ns	43
4.4 ที่ความชันหน้าคลื่น 500 ns	45
4.5 ที่ความชันหน้าคลื่น 800 ns	48
4.6 ที่ความชันหน้าคลื่น 1.2 μ s	50
4.7 ที่ความชันหน้าคลื่น 1.5 μ s	53
4.8 กราฟแสดงการกระจายแรงดัน	55
บทที่ 5 สรุปผล	70
ภาคผนวก	72
กิตติกรรมประกาศ	

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงภาพตัดขวางของคลื่นในหม้อแปลง	6
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลย์ของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า	8
รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงที่คิดขณะเกิด Steep-fronted surge	9
รูปที่ 2.4 ผลของ capacitance ต่อ กราวด์	10
รูปที่ 2.5 แสดงการเกิด Capacitive ระหว่าง ขดลวดปฐมภูมิ และ ขดลวดทุติยภูมิ	16
รูปที่ 2.6 แสดงภาพตัดอย่างง่าย และแสดงการเกิด Capacitance ระหว่างขดลวด	19
รูปที่ 2.7 แสดงระบบสายส่งสองสาย และการเกิด L และ C ของสายส่ง	19
รูปที่ 3.1 รูปแบบการออกแบบ Steep-fronted surge generator	23
รูปที่ 3.2 วงจรการต่อ Astable ของ NE555N	24
รูปที่ 3.3 การต่อวงจรใช้งาน Astable ของ NE555N	25
รูปที่ 3.4 วงจรภายใน TTL 74123 in-out	26
รูปที่ 3.5 Truth table ของวงจร Monostable	26
รูปที่ 3.6 วงจร Monostable ที่สร้าง Trigger pulse	27
รูปที่ 3.7 วงจร Optical transmitter	28
รูปที่ 3.8 Receiver circuit diagram	29
รูปที่ 3.9 วงจร Discharge pulse generator	30
รูปที่ 3.10 Discharge pulse generator and receiver circuit diagram	30
รูปที่ 3.11 Complete circuit diagram	32
รูปที่ 4.1 Steep-fronted surge 40 ns	34
รูปที่ 4.2 Steep-fronted surge 100 ns	34
รูปที่ 4.3 Steep-fronted surge 300 ns	35
รูปที่ 4.4 Steep-fronted surge 500 ns	35
รูปที่ 4.5 Steep-fronted surge 800 ns	36
รูปที่ 4.6 Steep-fronted surge 1.2 μ s	36
รูปที่ 4.7 Steep-fronted surge 1.5 μ s	37
รูปที่ 4.8 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge 40 ns ขณะ open ground	40
รูปที่ 4.9 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge 100 ns ขณะ open ground	42
รูปที่ 4.10 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge 300 ns ขณะ open ground	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.11 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge 500 ns ขณะ open ground	47
รูปที่ 4.12 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge 800 ns ขณะ open ground	50
รูปที่ 4.13 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge 1.2 μ s ขณะ open ground	52
รูปที่ 4.14 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge 1.5 μ s ขณะ open ground	55
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการกระจายแรงดันที่ความชันหน้าคลื่น 40 ns	55
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการกระจายแรงดันที่ความชันหน้าคลื่น 100 ns	56
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการกระจายแรงดันที่ความชันหน้าคลื่น 300 ns	56
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงการกระจายแรงดันที่ความชันหน้าคลื่น 800 ns	57
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการกระจายแรงดันที่ความชันหน้าคลื่น 1.2 μ s	57
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงการกระจายแรงดันที่ความชันหน้าคลื่น 1.5 μ s	57
รูปที่ 4.21 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge 40 ns ขณะ connected ground	61
รูปที่ 4.22 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge 100 ns ขณะ connected ground	63
รูปที่ 4.23 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge 300 ns ขณะ connected ground	66
รูปที่ 4.24 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge 500 ns ขณะ connected ground	67
รูปที่ 4.25 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge 800 ns ขณะ connected ground	68
รูปที่ 4.20 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge 1.5 μ s ขณะ connected ground	69

บทที่ 1

บทนำ

ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ประเภทขดลวดใน Power System ยกตัวอย่าง เช่น ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เป็นเรื่องที่ต้องให้ความสำคัญอย่างยิ่ง ความเสียหายส่วนหนึ่งมาจากการเกิด Faults ของฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวด ส่วนใหญ่การเกิด Faults นี้จะเกิดที่ส่วยปลายของขดลวด ส่วนการเกิด Faults ของฉนวนระหว่างขดลวดจะเกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงดัน Steep-fronted Transient ซึ่งเกิดจากการตัดต่อของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งแรงดันนี้จะทำให้เกิดความเครียดระหว่างขดลวดมากขึ้นไปจึงทำให้ฉนวนทนไม่ได้ ปัจจุบันแม้จะมีการทดสอบเกี่ยวกับเรื่อง Steep-fronted Surge อยู่ก็ตาม แต่แรงดันที่ใช้ในการทดสอบมีค่าน้อยกว่าแรงดันที่เกิดขึ้นในระบบจริง แต่ข้อมูลที่ได้จากการทดลองก็พอที่จะนำไปประเมินเพื่อหาแนวโน้มของผลกระทบจาก Steep-fronted Surge ที่มีต่ออุปกรณ์ใน Power System ได้ ซึ่งค่าความทนของฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจาก Steep-fronted Surge ปัจจุบันยังไม่มีกำหนดเป็นมาตรฐานแน่นอน โดยส่วนมากการประเมินจะใช้ประสบการณ์ ซึ่งเป็นการยากสำหรับการใช้งานทั่วไป โดยส่วนมากแล้วเมื่อต้องการศึกษาเรื่อง Steep-fronted Surge สิ่งแรกที่ต้องทำความเข้าใจคือ คุณสมบัติของ Steep-fronted Surge ว่าเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะมีผลอย่างไรต่อระบบ ซึ่งเป็นการยากที่จะไปทดลองกับระบบจริง ดังนั้นการใช้ชุดจำลอง R,L,C ต่อกันเพื่อที่จะทำเป็นรูปแบบจำลองระบบ เช่น ระบบสายส่งแบบจำลองของขดลวดมอเตอร์ แบบจำลองของ Generator แบบจำลองของขดลวดหม้อแปลง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วขดลวดของอุปกรณ์ใน Power System เมื่อจำลองรูปแบบออกมาแล้วจะเหลือเพียงแค่ R กับ C ต่อกัน ซึ่งค่าความต้านทาน(R) มีค่าน้อยมาก สามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นโครงการประกอบปริญญาโทฉบับนี้จึงใช้ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อที่จะจำลองจาก ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจากระบบ โดยเมื่อนำไปทดสอบ คุณสมบัติต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับขดลวดทดสอบสามารถนำไปประเมิน เพื่อหาแนวโน้มความรุนแรงของ Steep-fronted Surge ที่มีต่อระบบได้

ในโครงการนี้ได้ทำการศึกษา และสร้างชุดจำลองดังกล่าวพร้อมทั้งได้ทดลอง เพื่อที่จะศึกษาแนวโน้มของความรุนแรงที่มีต่อระบบ โดยเฉพาะกับขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดที่จะกล่าวถึงในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งบทได้ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ เนื้อหาโดยย่อของแต่ละบท วัตถุประสงค์ ขอบเขต การใช้งานใน อนาคต และประโยชน์ที่ได้จากโครงการนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน เกี่ยวกับการกระจายของแรงดัน Surge รูปแบบจำลองของ ขดลวดหม้อแปลง

บทที่ 3 การสร้างวงจร Surge Generator พร้อมทั้งอธิบาย ขั้นตอนการสร้างแต่ละ ส่วนของวงจร

บทที่ 4 ผลการทดลองของ Surge Generator ที่ความชันหน้าคลื่นต่างๆ พร้อมทั้ง เปรียบเทียบ ในแต่ละสถานะ คือ ขณะ No-load , On-load , Open-Ground

บทที่ 5 สรุปผล และวิจารณ์ผลการทดลอง พร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางการแก้ไข ปัญหาระหว่างการทำโครงการ

1.1 ขอบเขตของการทำโครงการ

สร้างชุดจำลอง Steep-Fronted Surge ที่สามารถปรับความชันหน้าคลื่นได้ โดยมี ขนาดแรงดัน 12 Vdc เพื่อจ่ายเข้าขดลวดของหม้อแปลงแบบ Layer แล้วศึกษาการกระจาย ของรูปคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆของขดลวดหม้อแปลง แล้วเปรียบเทียบกับที่ความชันหน้าคลื่น ต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์

- ศึกษาผลกระทบของ Steep-fronted Surge ที่มีต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า ซึ่งในโครงการนี้จะศึกษาเฉพาะผลกระทบที่เกิดขึ้น กับขดลวดของหม้อแปลง ไฟฟ้า

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัยโครงการ

- เห็นแนวโน้มของผลกระทบจาก Steep-fronted Surge ต่ออุปกรณ์ใน ระบบไฟฟ้า เพื่อหาแนวทางป้องกันในอนาคต

- ทำให้ผู้สนใจเรื่อง Steep-fronted Surge เมื่ออ่านปริยญาณิพนธ์ฉบับนี้แล้ว มีความเข้าใจมากขึ้น และสามารถนำบางส่วนจากปริยญาณิพนธ์ไปใช้ประกอบการทำวิจัยได้

1.4 การพัฒนาโครงการในอนาคต

- จากโครงการนี้สามารถนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ประกอบในการทำวิจัย เกี่ยวกับเรื่อง Steep-fronted Surge ได้

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- สร้างชุดกำเนิด Steep-fronted Surge
- ปรับแต่งวงจรเพื่อพร้อมที่จะใช้งาน
- ทำการทดลองโดยจ่าย Steep-fronted Surge ให้กับขดลวดของหม้อแปลง
- ทำการวัดรูปคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆของขดลวดหม้อแปลง แล้วบันทึกผลลงในแผ่นดิस्कเพื่อนำไปวิเคราะห์การกระจายของรูปคลื่น
- นำรูปคลื่นที่ได้มาวิเคราะห์ โดยใช้การเขียนกราฟเปรียบเทียบในแต่ละความชันของรูปคลื่น

1.6 เปรียบเทียบคุณสมบัติของโครงการ

ข้อดี

- ประหยัดพลังงานในการทดลองเมื่อเทียบกับเครื่องกำเนิด Surge โดยทั่วไป
- มีความปลอดภัยในการทดลอง เนื่องจากใช้แรงดันต่ำคือ 12 Vdc
- เคลื่อนย้ายสะดวก เนื่องจากมีขนาดเล็ก
- ประหยัดค่าใช้จ่ายในการสร้าง เครื่องกำเนิด Surge

ข้อเสีย

- โครงการเมื่อทำการจ่ายโหลคแล้ว ยังไม่มีเสถียรภาพ คือจะเกิดความเพี้ยนของรูปคลื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

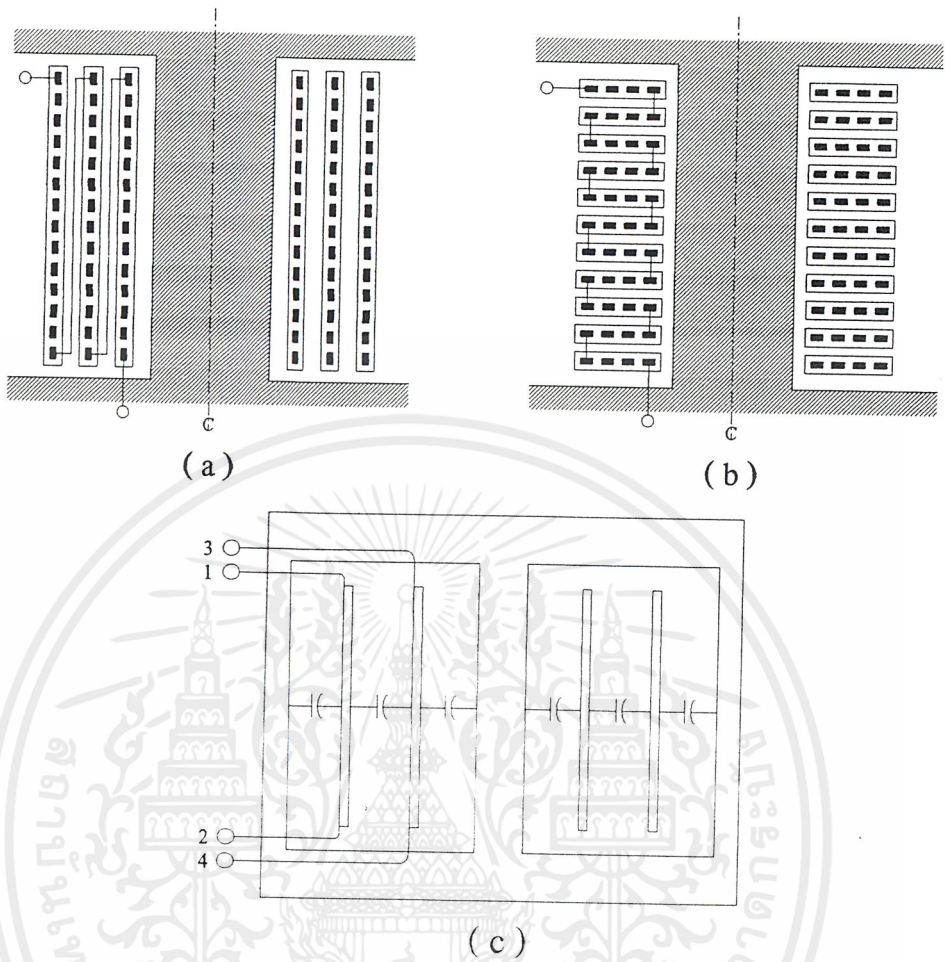
2.1 จุดกำเนิดของ Steep-fronted Surge

steep – fronted ของแรงดันทรานเซียนท์จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ไลต์นิงหรือ สวิตชิง ที่มีการกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอสูงในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งการกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอนี้จะทำให้ความเครียดของสนามไฟฟ้าในส่วนของขดลวดมีค่าสูงขึ้นมากว่าเดิมในช่วงเวลาของการทำงานปกติ การศึกษาถึงเรื่องนี้ก็เพื่อที่จะประเมินผลความทนทานของฉนวนต่อความเครียดของสนามไฟฟ้า สิ่งที่จะต้องรู้ก็คือขนาดและการผันแปรตามเวลาของความเครียดสนามไฟฟ้า

การกระจายของแรงดันในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม โดยใช้ไลต์นิงทรานเซียนท์ที่เป็นรูปคลื่นอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC คือ $1.2/50 \mu\text{S}$ จำเข้าไปในขดลวดโดยทั่วไปแล้ว เป็นที่ยอมรับว่าภายใต้เงื่อนไขที่รูปหน้าคลื่นของแรงดันทรานเซียนท์มีความชันมากจะเป็นการพิจารณาของสวิตชิงทรานเซียนท์มากถึง 80 – 90% ของการเกิดแรงดันทรานเซียนท์ขึ้น ซึ่งอาจปรากฏอยู่ในเส้นลวดของคอยล์ นอกจากนี้โดยปกติแล้วถ้าความชันหน้าคลื่นของแรงดันทรานเซียนท์มีค่าคงที่แล้วการกระจายของแรงดันเสร็จภายในขดลวดก็จะกระจายอย่างสม่ำเสมอด้วย

2.2 แบบจำลองภายในของหม้อแปลงไฟฟ้า

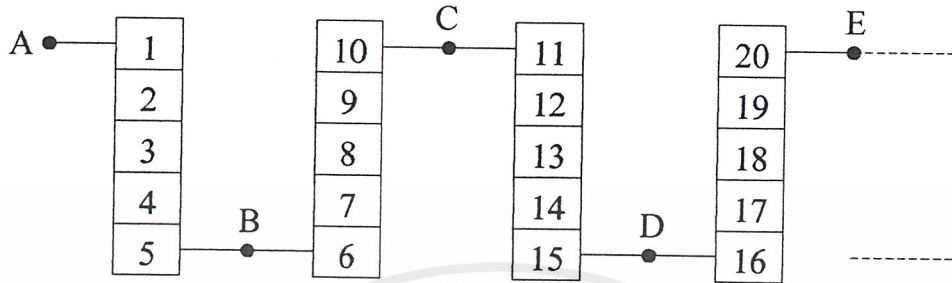
วงจรในที่นี่ใช้แทนหม้อแปลง สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิด คือหม้อแปลงแบบ Layer winding โดยแบบ Layer นี้จะวางขดลวดขนานกับแกนเหล็กซ้อนกัน ไปเรื่อยๆ โดยแต่ละชั้นจะมีฉนวนคั่นดังแสดงในรูปที่ 2.1(a) ส่วนแบบ Disc นั้นจะวางในแนวตั้งฉากกับแกนเหล็กดังรูปที่ 2.1 (b) เมื่อต้องการหาค่า Capacitance ระหว่างขดลวด ถ้ามองที่ภาพตัดจะสามารถพิจารณาได้ง่ายขึ้น จะสามารถมองเห็น Capacitance ระหว่างชั้นดังรูปที่ 2.1(c)



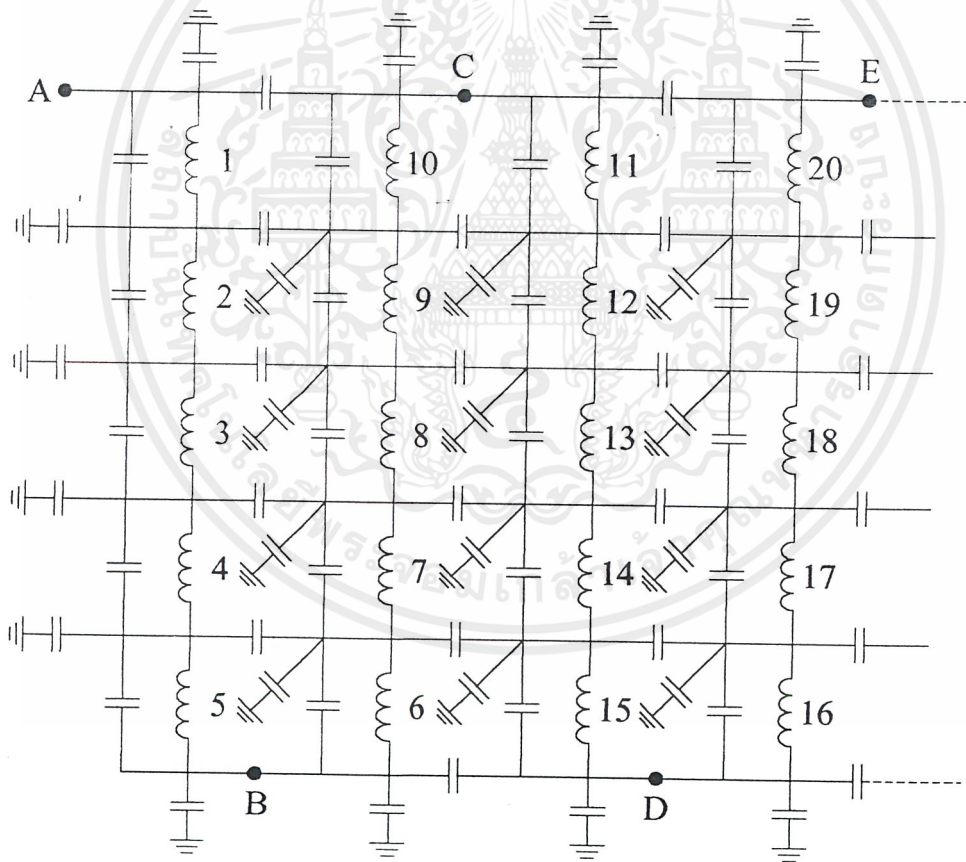
รูปที่ 2.1 (a) layer winding ; (b) disc winding

(c) Capacitance ของหม้อแปลง 1 เฟส , 2 ขดลวด

ดังนั้นเมื่อนำหม้อแปลงแบบ Layer winding มาวิเคราะห์สามารถพิจารณาได้โดยให้ Layer ทั้งหมดมาผ่าออกจะเห็นขดลวดวางซ้อนกันในแต่ละ Layer ดังรูปที่ 2.1(a) ซึ่งจะเห็นว่ามี 4 Layer และมีจำนวนขดลวดทั้งหมด 20 ขดลวด

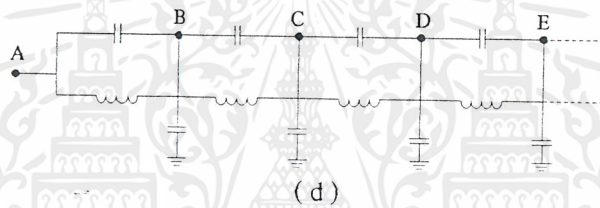
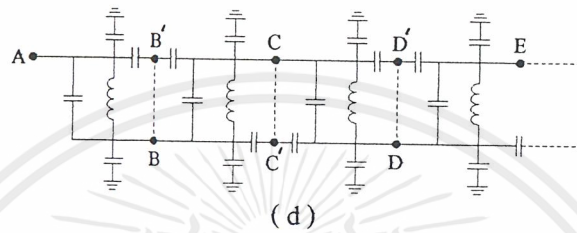
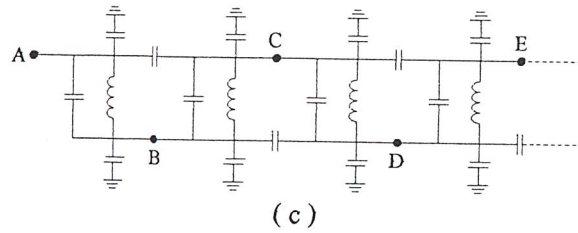


(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



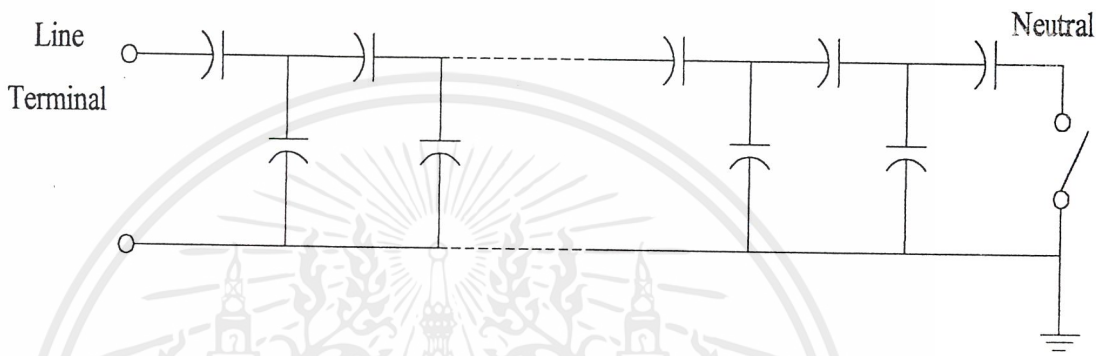
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า (a) แสดงการผ่า layer ;(b) รายละเอียดของวงจรทั้งหมด ;(c),(d) วงจรอย่างง่ายเมื่อลดรูป ; (e) วงจรสำเร็จรูปขั้นสุดท้าย

วงจรที่แสดงในรูปที่ 2.2 นี้ไม่ได้รวมผลของความต้านทานขดลวดจากรูปที่ 2.2(b) สามารถลดรูปวงจรให้อยู่ในรูปที่ 2.2(c) ได้โดยการมองวงจรให้อยู่ในรูปต่อขนานและอนุกรมกัน

ถ้าคิดขณะวงจร steady state ถ้าเราจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว แรงดันที่ขั้วจะเป็นเชิงเส้นและสม่ำเสมอ ถ้าเราแบ่ง Capacitance ออกเป็น 2 ตัว แล้วกำหนดโหนดสมมุติขึ้นมาคือ B' และให้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ B แล้วทำการรวม Capacitance ระหว่าง A และ B' แล้วนำไปรวมกับ Capacitance ระหว่าง A และ B ทำอย่างนี้เหมือนกันทุกส่วนของวงจรแล้วจะได้วงจรสำเร็จรูปขั้นสุดท้ายคือรูปที่ 2.2(e)

การออกแบบหม้อแปลง สิ่งที่ต้องพิจารณาคือ หม้อแปลงจะแสดงพฤติกรรมเช่นไร เมื่อมี Steep-Fronted Surge เข้ามาในระบบ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีวงจรสมมูลมาศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลง ซึ่งเราจะพิจารณาช่วงเวลาดังนี้ เป็นไมโครวินาที นั่นคือกระแสะไหลเฉพาะส่วนที่เป็น Capacitance เท่านั้น เพราะกระแสใน Inductanceเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นรูปที่ 2.2(e) ถ้าเราไม่คิดผลของ Inductance เราสามารถเขียนวงจรได้ใหม่ดังรูปที่ 2.3

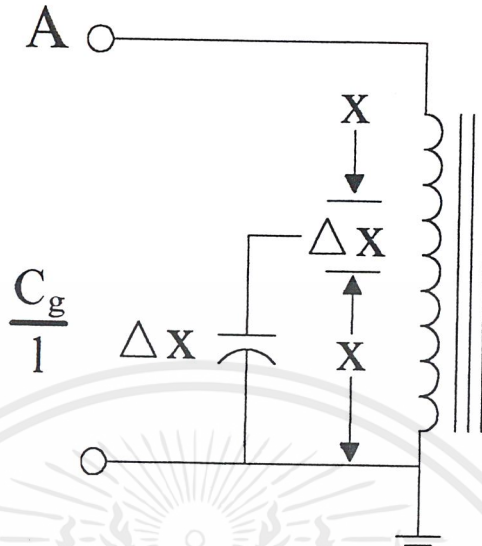


รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงที่ลักษณะที่มี Steep-Fronted Surge เข้ามา

จากรูปที่ 2.3 เป็นวงจรที่ประกอบด้วย Loop ที่มากขึ้นไปแต่ในความเป็นจริงนั้น จะมี Capacitance กระจายสม่ำเสมอตลอดขดลวด ถ้าเราพิจารณาช่วงสั้นๆ บนขดลวด จะพิจารณาผลของ Capacitance ได้ดังรูปที่ 4 ถ้ากำหนดให้

C_g คือผลของ Capacitance ระหว่างขดลวดและกราวด์

C_s คือผลของ Capacitance ระหว่างขดลวดที่พิจารณากับขดลวดข้างๆ



รูปที่ ผลของ Capacitance ต่อการวัดบนความยาว ΔX ของขดลวดหม้อแปลง

กราวด์คาปาซิแตนซ์
หน่วยความยาว = $C_s l$

เมื่อกำหนดให้

l = ความยาวของขดลวด

E = แรงดันที่วัดเทียบกับกราวด์บนจุดใดๆของขดลวด

I_g = กระแสทั้งหมดในกราวด์ Capacitance

I_s = กระแสใน Capacitance

พิจารณาที่ความยาว ΔX ในรูปที่ 2.4 จะได้กราวด์ Capacitance คือ $\frac{C_g \Delta X}{l}$

และมีกระแสไหลผ่าน
$$\Delta I_g = \left(\frac{C_g \Delta X \omega E}{l} \right) \dots \dots \dots (1)$$

เมื่อคือความถี่ของแรงดัน E

แต่
$$\Delta I_g = \left(\frac{dI_s}{dx} \Delta X \right) \dots \dots \dots (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ระหว่าง (1) และ (2) จะได้

$$\frac{dI_s}{dx} = \frac{C_g \omega E}{l} \dots\dots\dots(3)$$

Capacitance อนุกรมของส่วนนี้ ΔX คือ $\frac{C_s l}{\Delta X} \dots\dots\dots(4)$

และแรงดันคร่อมส่วน ΔX คือ $\left(\frac{dE}{dx} \Delta X \right) \dots\dots\dots(5)$

ใน Capacitance อนุกรมจะมีกระแสไหล = $C \frac{dE}{dx}$ และจากความสัมพันธ์

ระหว่าง (4) และ (5) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น $I_s = I C_s \omega \frac{dE}{dX} \dots\dots\dots(6)$

ทำการดิฟสมการ (6) จะได้ $\frac{dI_s}{dX} = I C_s \omega \frac{d^2 E}{d^2 X} \dots\dots\dots(7)$

จากสมการ (3) และ (7) $\frac{C_g \omega E}{l} = I C_s \omega \frac{d^2 E}{d^2 X} \dots\dots\dots(8)$

$$\frac{d^2 E}{d^2 X} - \frac{C_g E}{l^2 C_s} = 0 \dots\dots\dots(9)$$

ซึ่ง (9) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่มีผลเฉลยของคำตอบอยู่ในรูป

$$E = A_1 e^{px} + A_2 e^{-px} \dots\dots\dots(10)$$

เมื่อ $p = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{C_g}{C_s}}$

ค่าคงที่ A_1 และ A_2 สามารถหาได้จากเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)

สมมติให้จุดนิวตรอนเป็นกราวด์ดังนั้นที่ $X = 0, E = 0$

ที่ $X = l, E = V$

เมื่อ V คือ แอมพลิจูดของ step function surge และนำเงื่อนไขในนี้แทนค่าลงในสมการที่(10)

$$A_1 + A_2 = 0$$

$$A_1 e^{px} + A_2 e^{-px} = V$$

$$A_1 = -A_2 = \frac{V}{e^{px} + e^{-px}}$$

เหตุนี้เราใช้ Step function เพราะว่ามีค่าใกล้เคียงกับ Steep-Fronted Surge และคลื่นที่มีความชันหน้าคลื่นมากๆ

$$\text{กำหนดให้ } p l = \sqrt{\frac{C_g}{C_s}} = \alpha$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ดังนั้น } A_1 = -A_2 = \frac{V}{2\sinh\alpha} \dots\dots\dots(12)$$

แทนค่า (12) และ (10) จะได้

$$E = \frac{V(2\sinh\alpha)}{(2\sinh\alpha)}$$

$$= V \left[\frac{\sinh(\alpha \frac{x}{l})}{\sinh\alpha} \right] \dots\dots\dots(13)$$

ถ้ามีการแยกสายนิวตรอน ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตจะได้ดังนี้

$$\text{ที่ } x=l, \quad E=V$$

$$\text{ที่ } x=0 \quad I_s=0 \text{ หรือ } \frac{dE}{dx}=0$$

ดังนั้นเราจะได้

$$p(A_1 - A_2) = 0$$

$$A_1 e^{pl} + A_2 e^{-pl} = V$$

เมื่อเรากำหนดให้

$$A_1 = A_2 = \frac{V}{2\cosh pl} = \frac{V}{2\cosh\alpha} \dots\dots\dots(14)$$

แทนสมการ 11.1.31 ลงใน 11.1.27 โดยใช้กรณีที่แยกสายนิวตรอน

$$E = \frac{V}{2\cosh} (e^{\alpha x/l} + e^{-\alpha x/l})$$

$$= V \frac{\cosh(\alpha x/l)}{\cosh\alpha} \dots\dots\dots(15)$$

สมการที่ 13 และ 14 อธิบายการกระจายเริ่มต้นของแรงดัน เมื่อหม้อแปลงถูกป้อนโดย step function surge สามารถบอกได้ว่า สมการทั้งสองขึ้นอยู่กับค่า α หรืออัตราส่วนของ $(C_2/C_1)^{1/2}$ สำหรับผู้ที่สนใจมากกว่านี้สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ที่ [1]

ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า การกระจายไม่สม่ำเสมอสูง จะขึ้นจะเกิดขึ้นเมื่อค่า α เพิ่มขึ้น เมื่อ $\alpha = 10$, 60% ของแรงดันที่ตกคร่อม 10% แรกของขดลวด โดยที่การกระจายแรงดันที่แน่นอน ของปลายขดลวดนั้น ได้โดยการดิฟ สมการ 13 หรือ 15 จะได้ดังนี้

1 เมื่อมีการต่อสายนิวตรอน

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\alpha}{l} V \frac{\cosh(\alpha x/l)}{\sinh \alpha}$$

$$\text{ถ้า } x=l; \frac{dE}{dx} = \frac{\alpha V}{l} \coth \alpha \dots\dots\dots(16)$$

2 เมื่อการแยกสายนิวตรอนออก

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\alpha V}{l} \frac{\sinh(\alpha x/l)}{\cosh \alpha}$$

$$\text{ถ้า } x=l, \frac{dE}{dx} = \frac{\alpha V}{l} \tanh \alpha \dots\dots\dots(17)$$

ที่ค่า α มีค่ามากๆ, $\coth \alpha \approx \tanh \alpha \approx 1$ ดังนั้นทั้งสองสถานะ $dE/dx = \alpha V/l$, ซึ่งก็คือ α เป็นจำนวนเท่าของความชันนั่นเอง

ภายใต้การเกิดแรงดัน surge ฉนวนระหว่างขดลวดที่บริเวณปลายขดลวดจะได้รับความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงมาก การค้นพบเหตุการณ์นี้ครั้งแรก ทำให้สามารถอธิบายได้ว่าทำไม ฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าส่วนมาก จึงเกิดการเบรคดาว์ ของฉนวนขึ้นที่บริเวณนี้

จากอัตราส่วนของ α นี้เองทำให้ค่า capacitance ของขดลวด มีส่วนสำคัญมากในการทำรูปร่างของขดลวด โดยที่รูปร่างของขดลวดและจำนวนรอบของขดลวด จะต้องมีส่วนสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน นอกจากนั้นยังมีส่วนที่ต่อถึงกราวด์ ของโครงสร้างของหม้อแปลงด้วย ดังนั้นจึงไม่ต้องแปลกใจเลยว่า ถ้าขดลวดที่มีรูปร่างแตกต่างกัน ทำไมจึงให้ผลการทดลองที่แตกต่างกัน เมื่อมีการจ่าย Steep-fronted เข้าไป ซึ่งโดยทั่วไปแล้วขดลวดจะมีอยู่สองแบบคือ แบบชั้น(Layer) และแบบแผ่นอัดซ้อนกัน(Disc)

2.3 Transformer model for switching on open circuit

กระแสกระตุ้นเป็นส่วนสำคัญ ที่ทำให้เกิดกระแสไหลในหม้อแปลง ขณะไม่มีโหลดต่ออยู่ และยังเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิด harmonics ด้วย เนื่องจากเกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็ก และ กระแสนี้จะรวมอยู่ในเฟสของแรงดัน ซึ่งเมื่อจ่ายเข้าไปในหม้อแปลงก็จะทำให้เกิด hysteresis และ eddy current ในแกนเหล็ก ทำให้ส่วนประกอบของกำลังทั้งหมดมีค่าต่ำ จึงทำให้สามารถแทน หม้อแปลงขณะ steady state ได้โดยการมีเพียงค่า R และ L ต่อขนานกัน โดยที่ L คือ magnetizing inductance และ ค่า R สามารถหาได้จากการสูญเสียขณะ No-load, W_0 ;

$$R_0 = \frac{V^2}{W_0}$$

ซึ่งค่า capacitance to ground ของขดลวดหม้อแปลงจะกระจายอยู่ ถ้าเรากำหนดให้ capacitance ทั้งหมดคือ C_g และมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอบนความยาว l ของขดลวด ซึ่งค่า capacitance ต่อหน่วยความยาว ของขดลวด คือ C_g/l ถ้าแบ่งขดลวดออกเป็นส่วนเล็กๆ Δx ซึ่งจะมี capacitance (C_g/l) ดังแสดงในรูปที่ 4 มีค่า impedance $1/(j\omega C_g \Delta x)$ เมื่อมองจากทางด้าน A ซึ่งทำให้ มองเห็นเหมือน autotransformer ต่อโหลดอยู่ และมีค่า impedance $(l/x)^2 (1/j\omega C_g \Delta x)$ ทำนองเดียวกันมีค่า capacitance $C_g x^2 \Delta x/l^3$ ค่า effective capacitance รวมทั้งหมดของขดลวดเมื่ออ้างอิงทาง ด้าน A จะได้

$$C_{eff} = \frac{C_g}{l^3} \int_0^l x^2 dx = \frac{C_g}{l^3} \left[\frac{x^3}{3} \right]_0^l = \frac{C_g}{3} \dots \dots \dots (18)$$

ซึ่งจากการวิเคราะห์เราจะ ได้วงจรง่ายดังรูปที่ 2.4 โดยที่แบบจำลองนี้ ไม่คิดผลของการ อิ่มตัวของแกนเหล็ก และกำหนดให้การกระจายของ C_g สม่ำเสมอ ทำให้เราสามารถบอกได้ว่าการ สูญเสียที่เกิดจาก transient จะปรากฏขึ้นที่ความถี่กำลัง

2.4 รูปแบบจำลองของขดลวดเมื่อแรงดันเสิร์จผ่านหม้อแปลง

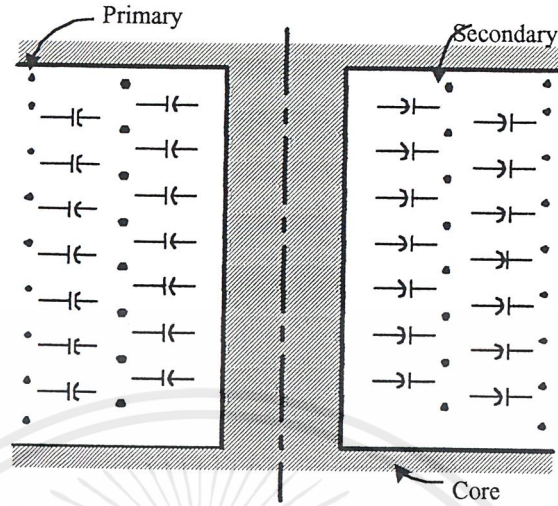
ในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดหนึ่ง แรงดันจะไปปรากฏที่ปลายของ ขดลวดหนึ่ง และขนาดของแรงดันจะขึ้นอยู่กั้อัตราส่วนของขดลวด แต่การแปรผันตามอัตราส่วน ของขดลวดจะไม่เป็นจริงทุกๆ ความถี่ หม้อแปลงจะทำหน้าที่เหมือน filter โดยจะกรองบางความถี่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออก ค่า Inductive ของหม้อแปลงมีผลมากที่ความถี่ต่ำ โดยจะกรองความถี่ต่ำออก ส่วน Capacitance ของหม้อแปลงจะกรองความถี่สูงออก

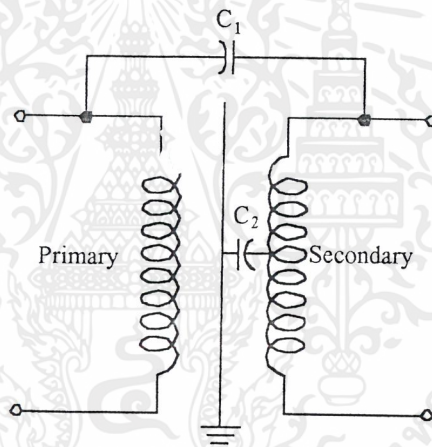
ในการพิจารณา steep-fronted surge เมื่อผ่านเข้าไปในหม้อแปลงจะพิจารณาตามหลักเหตุผล ในเชิงปฏิบัติเป็นสำคัญ ตัวอย่างเช่นเมื่อเกิด surge ขึ้นที่บัสของ generator ใน Power system ซึ่ง steep-fronted surge จะมีผลกระทบต่อขดลวดแรงดันสูงของหม้อแปลงลดแรงดันดังรูป 2.5 a แสดงรูปแบบจำลองของหม้อแปลงสองขดลวดซึ่งประกอบด้วย Capacitance ระหว่างขดลวดและ ระหว่างขดลวดทุติยภูมิกับแกนเหล็ก เมื่อพิจารณาอย่างง่ายจะได้ดังรูปที่ 2.5 b เมื่อมีแรงดัน Surge เกิดขึ้นจะมีแรงดันตกคร่อมขดลวดทุติยภูมิ

$$\frac{C_1}{C_1 + C_2} V \dots\dots\dots(14)$$

เมื่อ V คือแรงดัน Surge การพิจารณาปรากฏการณ์การเกิด C_1 และ C_2 จะพิจารณาโดยรูปทรง ของขดลวดและ โครงของแกนเหล็ก ดังนั้นแรงดันที่ปรากฏในสมการ 14 แทนแรงดันส่วนหนึ่งของ surge ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันที่เกิดขึ้นนี้ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับอัตราส่วนของหม้อแปลง ดังนั้น เมื่อ ขดลวดปฐมภูมิได้รับการกระตุ้นโดยเฉพาะจากแรงดันที่ใกล้เคียงกับค่า peak voltage ใช้งาน ก็จะ ทำให้เกิดแรงดัน เพียงแค่ส่วนน้อยเท่านั้นที่ขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งสนามแม่เหล็กจากเหตุการณ์นี้ทำให้เกิดแรงดัน surge เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ จากหลักการนี้ทำให้ปัจจุบันนี้ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในการแปลงแรงดันจาก 100 KV ให้ลดลงเหลือไม่กี่ร้อยโวลต์ภายใน stage เดียว แต่ถ้าหากต้องการ ป้องกันแรงดัน surge ที่เกิดขึ้น ทำได้โดยการเพิ่ม C_2 ซึ่งก็คือจะต้องต่อ C เข้าที่ระหว่างขั้วของขด ลวดทุติยภูมิและกราวด์



(a)



(b)

รูปที่ 1 แสดงการเกิด Capacitive ระหว่างขดลวดปฐมภูมิ และ ขดลวดทุติยภูมิ

Transient parameter value for transformer Inductance

ค่า Inductance ของหม้อแปลงจะต้องคำนึงถึงเป็นพิเศษ เมื่อหม้อแปลงค่อใน power system เนื่องจากมีส่วนที่ทำให้เกิดการ oscillate ของระบบโดยการคำนวณหาค่า Inductance นี้สามารถคำนวณหาได้ง่าย จากระบบ per-unit reactance, X_{pu} หรือจากเปอร์เซ็นต์ Reactance, %X ซึ่งส่วนมากจะบอกมากับ nameplate โดยหาได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_{pu} = \frac{IX}{V}, \%X = \frac{IX}{V} * 100 \dots\dots\dots(15)$$

เมื่อ X คือ leakage reactance และ V, I คือ แรงดันและกระแสที่พิกัด ถ้า $X = \omega L$

ดังนั้น leakage reactance คือ
$$L = \frac{X_{pu} V}{\omega I} = \frac{\%XV}{100\omega I}$$

โดยการทำให้อยู่ในรูปใช้งานทั่วไปโดยการคูณ V เข้าทั้งเศษและส่วน

$$L = \frac{X_{pu} V^2}{\omega VI} = \frac{X_{pu} (KV)^2}{\omega (MVA)} \dots\dots\dots(16)$$

โดยการใส่แรงดันที่พิกัด KV และพิกัดหม้อแปลง MVA ถ้าใช้แรงดัน line to line ดังนั้น MVA รวมทั้งหม้อแปลงสามเฟส ถ้าใช้ line to neutral ดังนั้น MVA ที่ใช้จะเป็น MVA/เฟส

ดังนั้นตัวอย่าง หม้อแปลง 34.5 KV , 15 MVA , 60 Hz , 7% reactance จากสมการข้างบน

$$L = \frac{0.07 * (34.5)^2}{377 * 15} = 14.7 \text{ mH}$$

นี่คือค่า leakage inductance ย้ายไปทางด้านขดลวด 34.5 KV ถ้าขดลวดอีกด้านมีค่า 13.8 KV เมื่อย้าย inductance มาทางด้านนี้ค่าจะลดลงเป็นสัดส่วนกำลังสองของอัตราส่วนหม้อแปลง

$$L = 14.7 * \left[\frac{13.8}{34.5} \right]^2 = 2.36 \text{ mH}$$

ค่า leakage reactance ของหม้อแปลงขึ้นอยู่กับกรอกแบบหรือยิ่งกว่านั้นขึ้นอยู่กับกรอวางตำแหน่งขดลวดด้วย

2.6 Transformer Capacitance

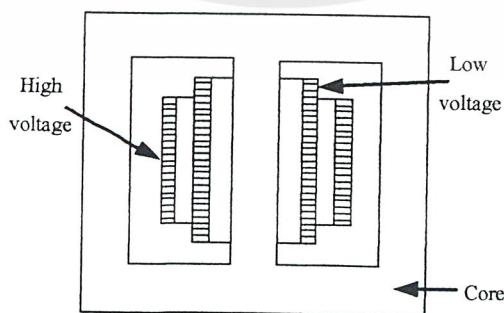
เริ่มพิจารณาโดยสมมติให้ขดลวดแกนเหล็กและตัวถังของหม้อแปลงเปรียบเหมือนทรงกระบอก ดังแสดงในรูป.2.6 ขดลวดภายในที่ใกล้กับแกนเหล็กคือขดลวดแรงดันต่ำ และขดลวดที่พันรอบๆ ที่ออกมาอีกคือขดลวดแรงดันสูง ซึ่งการวางขดลวดแบบนี้จะเหมือนกับการเกิด Capacitance ในสาย Coaxial โดย Capacitance จะเกิดระหว่างขดลวดแรงดันต่ำกับแกนเหล็ก โดยทั่วไปแล้วค่า Capacitance ขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ของเพลท ระยะห่างระหว่างเพลทและ วัสดุที่นำมาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหามาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ทำตัวกลาง ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มี KVA มากๆ จะมี Capacitance สูงกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่มี KVA น้อยๆ เพราะลักษณะทางโครงสร้างที่ใหญ่กว่านั่นเอง และยังบอกได้อีกว่าหม้อแปลงที่มีแรงดันสูงจะต้องแยกขดลวดให้ห่างกันมากขึ้นเพื่อป้องกันการเบรคความถี่ระหว่างขดลวดและระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้หม้อแปลงชนิดแห้งมีค่า Capacitance น้อยกว่าหม้อแปลงชนิดน้ำมัน ดังที่เคยกล่าวไว้แล้ว การออกแบบขดลวดของหม้อแปลงจะมีอยู่สองแบบคือ แบบที่พันเป็นชั้นและแบบที่เป็นแผ่นวางซ้อนกัน จากการพิจารณาทางโครงสร้างของการวางขดลวดจะมีค่า Capacitance ระหว่างขดลวดเอง และระหว่างขดลวดกับกราวด์ และพบว่าค่า effective Capacitance ระหว่างขดลวดกับกราวด์ของขดลวดแบบ แผ่นซ้อนกันมีค่าไม่เกิน 30 – 40 % ของขดลวดที่พันเป็นชั้น เมื่อเปรียบเทียบกับ KVA เดียวกัน

เหมือนกับ inductance ค่า Capacitance จะขึ้นอยู่กับรูปทรงของขดลวดซึ่งก็คือระยะห่างระหว่างขดลวดและระยะห่างระหว่างขดลวดกับกราวด์และอื่นๆ เช่นขนาดของขดลวด ดังรูป 13.7 แสดงภาพตัดขวางของหม้อแปลงโดยขดลวดแรงดันต่ำ (Low Voltage) เป็นแบบชนิดพันเป็นชั้นและขดลวดแรงดันสูง (high voltage) เป็นแบบแผ่นซ้อนกัน ค่า Capacitance ระหว่างแผ่นที่ซ้อนกันของขดลวด แรงดันสูง พื้นที่ P และ Q สามารถนำคำนวณได้จากสมการ

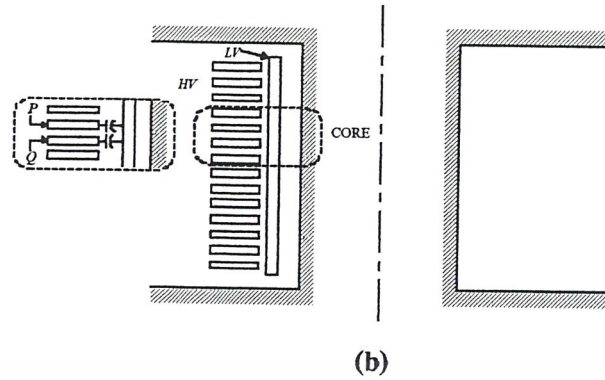
$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \dots \dots \dots (17)$$

เมื่อ A คือพื้นที่ของ P และ Q , d คือระยะห่างระหว่าง P และ Q , ϵ_r คือค่า relative permittivity ของตัวกลางระหว่าง P และ Q ซึ่งอาจจะเป็นน้ำมันหรืออากาศซึ่งค่า Capacitance ระหว่าง P และ Q จะมีค่ามากกว่าค่า C_1 ซึ่งเป็นค่า Capacitance ระหว่างขดลวดกับกราวด์



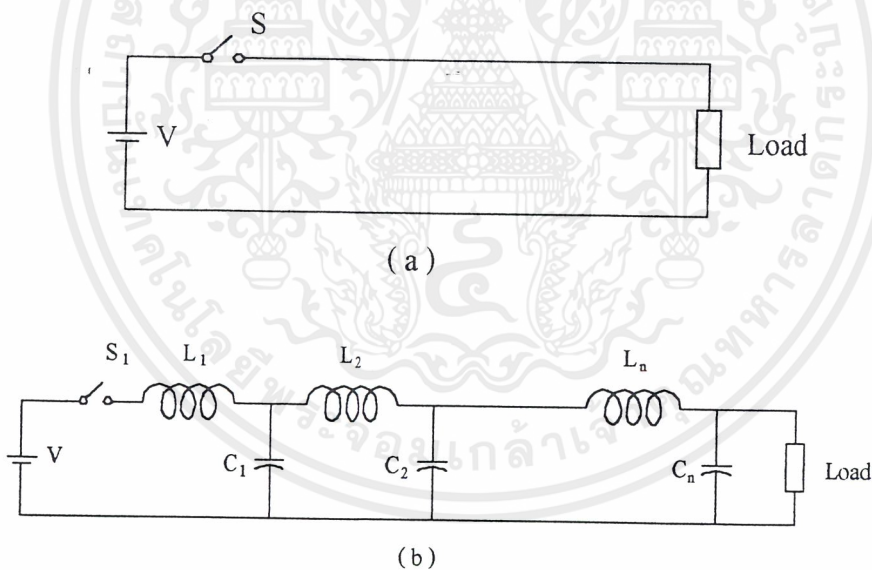
(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 (a) แสดงภาพตัดอย่างง่าย และ (b) แสดงการเกิด Capacitance ระหว่างขดลวด

2.7 Traveling Wave (การเดินทางของคลื่น)



รูปที่ 2.7 (a) รูปแสดงระบบสายส่งสองสาย (b) รูปแสดงการเกิดค่า L และ C ของสายส่ง

การจำลองคั้งรูปข้างบนสามารถนำไปใช้ได้กับรูปแบบจำลองของขดลวดได้ เมื่อ S_1 ปิดวงจรกระแสจะไหลผ่านอินดักเตอร์ตัวแรก เพื่อที่จะไปชาร์จคาปาซิเตอร์ตัวแรกอย่างรวดเร็วจะทำให้แรงดันคร่อมช่วงต่อไป และกระแสจะไหลผ่าน L_2 เพื่อที่จะชาร์จ C_2 และจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนถึง L_n และ C_n เมื่อเราพิจารณาจากจุดที่หยุดนิ่งแล้วมีกระแสไหลในวงจรหลังจากเวลาผ่านไป Δt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ระยะทางความยาว Δx ของวงจรที่มีการชาร์จวงจร ถ้า C คือคาปาซิเตอร์ของสาย (F/m) จะมีประจุ

$$Q = CV\Delta x \dots \dots \dots (18)$$

เมื่อมีประจุไหลผ่านตัวนำจะทำให้เกิดเหตุการณ์สองอย่างคือ เกิดสนามแม่เหล็ก ระหว่างตัวนำตลอดความยาว Δx ของสายตัวนำ และจะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นรอบๆตัวนำ นั่นคือจะมีกระแสไหลในขดลวดตัวนำ $I = dQ/dt$ ดังนั้นจากสมการที่ (18)

$$I = VC \frac{\Delta x}{\Delta t} = CV \frac{dx}{dt} \quad \text{ที่ความยาวกำหนด}$$

ซึ่ง dx/dt คือพิกัดการกระจายของคลื่นไปตามสายโดยจะใช้สัญลักษณ์ v ดังนั้น

$$I = CVv \dots \dots \dots (19)$$

จากการที่เกิดสนามแม่เหล็กนี้จึงทำให้เกิด L ขึ้นบนตัวนำ (H/m) และขณะที่กระแสไหลผ่านตัวนำยาว Δx เมตรทำให้เกิด flux linkage, Φ โดย

$$\Phi = L\Delta x I = L\Delta x CVv$$

และเกิดแรงดันเหนี่ยวนำ

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi}{dt} &= LCVv \frac{\Delta x}{\Delta t} \\ &= LCVv^2 \quad \text{ที่ความยาวกำหนด} \dots \dots \dots (20) \end{aligned}$$

ดังนั้น $v = LCVv^2$

$$\text{หรือ} \quad v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \dots \dots \dots (21)$$

ความเร็วในการกระจายคลื่นของกระแสและแรงดันบนตัวนำซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่าง และคุณสมบัติทางสนามไฟฟ้าของตัวกลาง นั่นก็คือคุณสมบัติของ L และ C ของตัวนำ โดยการสมมุติให้สายตัวนำวางห่างกัน d และมีความยาวของคลื่นผ่านศูนย์กลาง r , โดยไม่คำนึงถึง flux ภายในตัวนำ ดังนั้นจะสามารถประมาณค่า L และ C ของตัวนำได้ดังนี้

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{d}{r} \quad \text{H/m} \dots \dots \dots (22)$$

$$C = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln d/r} \quad \text{F/m} \dots \dots \dots (23)$$

นำไปแทนค่าในสมการที่ (6) โดย

$$LC = \mu_0 \epsilon_0$$

นั่นคือ
$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \dots \dots \dots (24)$$

ซึ่งก็คือความเร็วของคลื่นสนามไฟฟ้าในสุญญากาศหรือความเร็วของแสงนั่นเอง และความเร็วนี้จะไม่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของสาย



บทที่ 3

วงจร Surge Generator และ การทำงาน

3.1 หลักการทำงานของ Low voltage surge generator

หลักการของเครื่อง simulator นี้ เพื่อกำเนิกรูปคลื่นของ steep-fronted surge โดยการตรวจจับสัญญาณที่จุดต่างๆ ของหม้อแปลงจะใช้ Oscilloscope เครื่อง Steep-Fronted Surge Generator นี้ ควรจะมีความสามารถในการกำเนิกรูปคลื่นที่แตกต่างกัน ทั้งหม้อแปลงที่ฉนวนด้วยอากาศและน้ำมัน รูปคลื่น Pulse จะเกิดขึ้นเร็วมาก เพราะการแพร่ผ่านในขดลวดนั้นจะชัดเจน

เครื่อง simulator จะต้องมีการแยกกันทางไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย ซึ่งจะลดการรบกวนจากความถี่ ซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดความผิดพลาดใดๆ ในการวัด

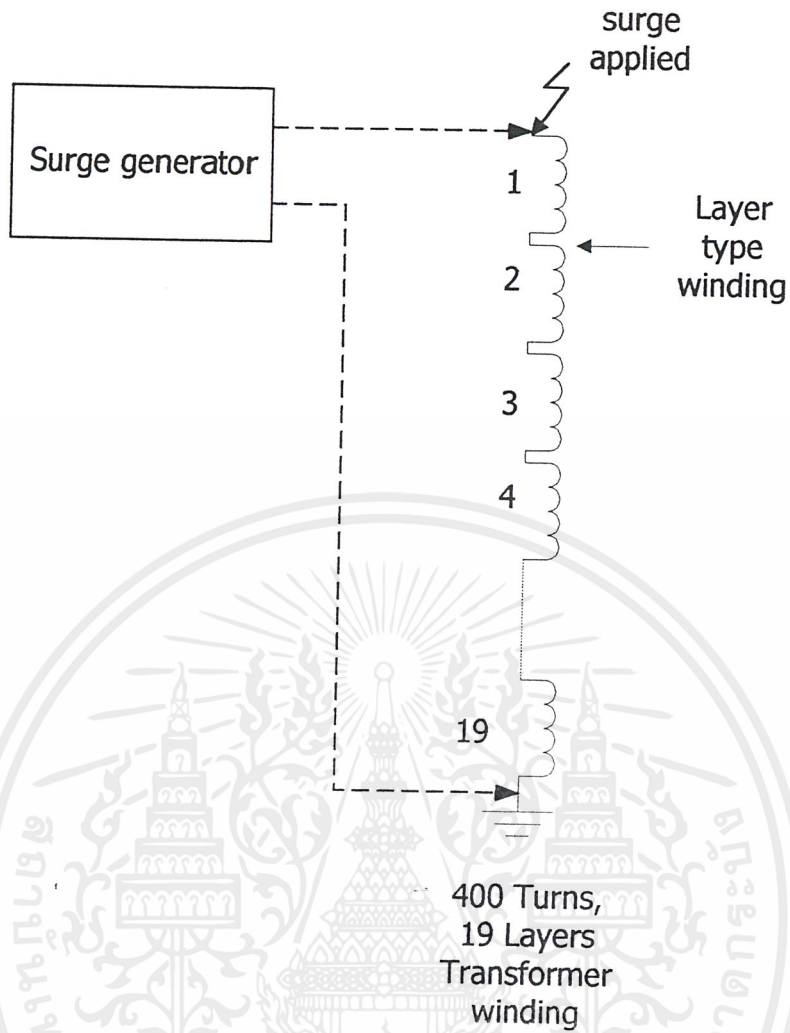
เนื่องด้วยเครื่อง Discharge pulse generator จะถูกติดตั้งระหว่างปลายของขดลวดหม้อแปลง ดังนั้นมันจึงต้องเล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อที่จะง่ายต่อการทดลอง และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จึงถูกเลือกใช้ในการสร้าง

สำหรับการเชื่อมโยงของวงจรนี้ เริ่มที่หน่วยสร้างสัญญาณทำงาน (trigger) ส่งไปตัวส่ง (transmitter) จากนั้นส่งไปที่ Discharge pulse generator และก็จะส่งไปที่ตัวรับ (Receiver)

เพราะฉะนั้นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงในการออกแบบการสร้างวงจร

1. ต้องกำเนิด Pulse ได้ทั้งฉนวนด้วยอากาศ และน้ำมัน
2. simulator กับ supply ต้องแยกจากกันทางไฟฟ้าเพื่อลดสัญญาณรบกวน
3. ต้องมีขนาดเล็ก

การส่งและรับสัญญาณแสดงไว้ดังรูปที่ 3.1

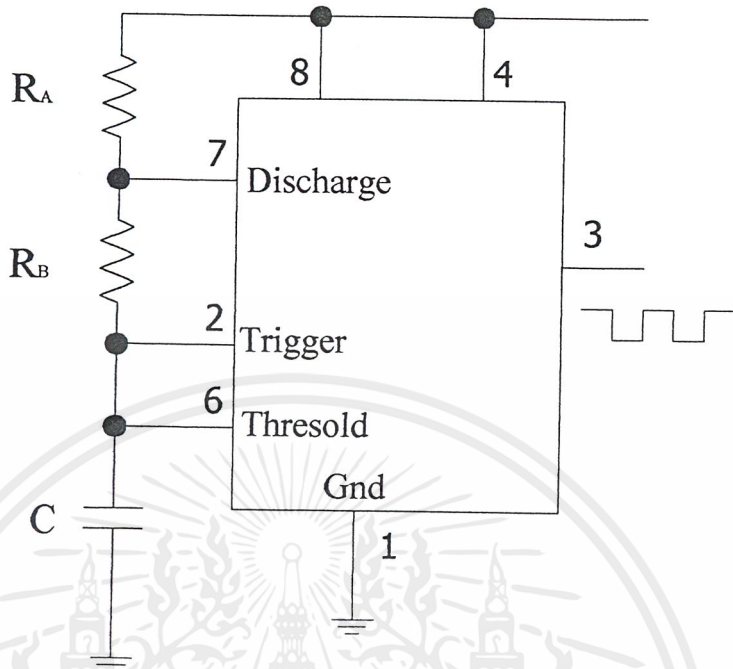


รูปที่ 3.1 รูปแบบการออกแบบ Steep-Fronted Surge Generator

3.2 การออกแบบวงจร Transmitter

Astable Circuit

วงจรนี้จะถูกใช้งานเพื่อกำเนิดสัญญาณ Pulse ที่ต่อเนื่องที่มีความถี่หลายความถี่ และ NE555N เป็นชิปที่ทำได้ง่ายและมีวงจร Astable ซึ่งจะกำเนิด Pulse ที่ดี



รูปที่ 3.2 วงจรการต่อ Astable ของ NE555N

และเมื่อใช้วงจรนี้สร้าง Pulse ต่อเนื่องที่มีความถี่ 50 Hz rise time และ fall time ก็จะสามารถหาได้จากสูตร

$$t_r(\text{rise time}) = 0.693(R_A + R_B)C$$

$$t_f(\text{fall time}) = 0.693R_B C$$

โดย Discharge pulse ที่ความถี่ 50 Hz t_r และ t_f เท่ากับ 20 ms และเลือกค่า C เท่ากับ $1 \mu\text{F}$

$$\text{ที่ } t_r = t_f = 10 \text{ ms} = 0.693R_B * 1 \mu\text{F}$$

$$R_B = 14.43 \text{ K}\Omega$$

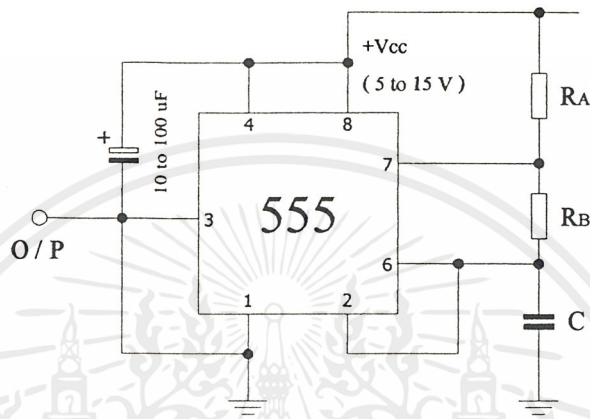
$$t_r = 0.693(R_A + R_B)C$$

$$10 \text{ ms} = 0.693(R_A + R_B)C$$

$$R_A = 1.43 \text{ K}\Omega$$

$$\text{เลือก } R_A = 2.2 \text{ K}\Omega$$

ในการใช้งานที่ความถี่ของ pulse 50 Hz จะต้องใช้ที่มากกว่า $R_A = 1.43 \text{ K}\Omega$ ซึ่งในที่นี้จะเลือกใช้ $2.2 \text{ K}\Omega$ และ NE555N จะให้ Output voltage 5V การต่อวงจร Astable ของ IC NE555N หาได้ใน Data sheet และค่า C ที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง $10 - 100 \mu\text{F}$ ซึ่งในที่นี้จะใช้ $10 \mu\text{F}$ ดังรูปที่ 3.3



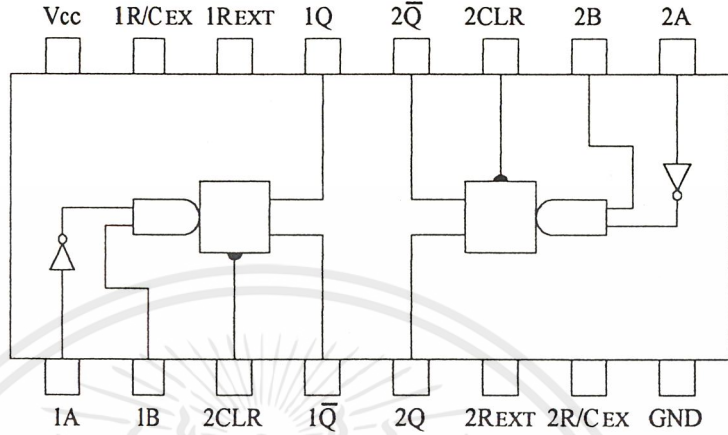
รูปที่ 3.3 การต่อวงจร ใช้งาน Astable ของ NE555N

Output ที่ได้จาก IC นี้จะถูกต่อเป็นวงจร Astable ที่สามารถปรับความกว้างของ pulse ขาออกได้ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

Monostable Circuit

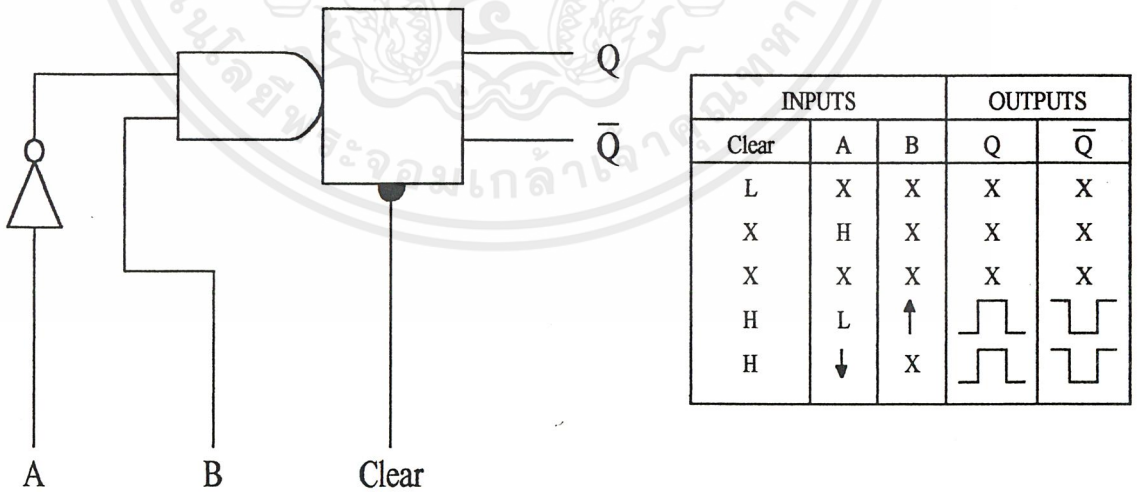
วงจร Monostable ถูกใช้เพื่อสร้างสัญญาณ pulse เพื่อสั่งให้ transmitter ทำงาน การเลือกวงจรนี้เพราะว่ามันมีความสามารถในการปรับความกว้างของ pulse ได้ มีความแน่นอนและราคาถูก รวมทั้งยังมี IC ที่มีวงจรนี้บรรจุอยู่จึงง่ายต่อการใช้งาน IC LS221 จะประกอบด้วยวงจร Monostable 2 วงจร แต่ในที่นี้จะใช้เพียง 1 วงจร เท่านั้นดังรูปที่ 10

TOP VIEW



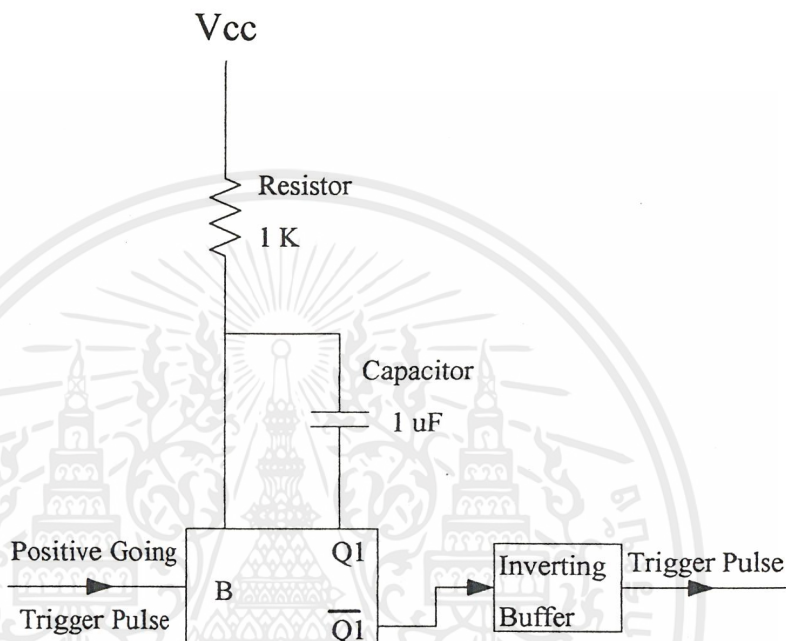
รูปที่ 3.4 TTL 74123 in – out

ที่ขา R/C_{EXT} และ R_{EXT} จะเป็นขาที่ R และ C จะต่อไว้เพื่อปรับความกว้างของ Pulse โดยจะแสดง Truth Table ของวงจรมอนอสเตเบิล ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Truth Table ของวงจรมอนอสเตเบิล

สังเกตว่าที่ขา clear เป็น High และ A เป็น Low จะทำให้ B กลายเป็น Input ของวงจร Monostable ซึ่งสามารถปรับตามต้องการแต่ IC นี้จะให้กำลังน้อยเกินไปที่จะสั่งให้ Transmitter ทำงานได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วงจร Buffer มาต่อที่ output



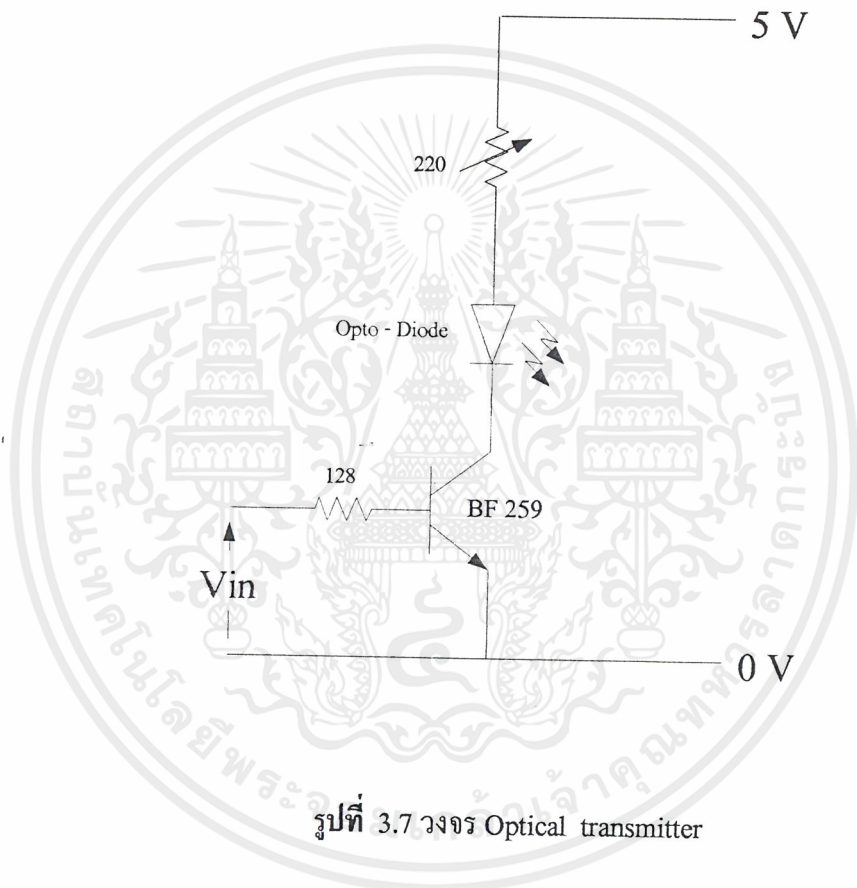
รูปที่ 3.6 วงจร Monostable ที่สร้าง Trigger pulse

IC LS7404 ถูกเลือกใช้เป็นวงจร Buffer ซึ่งวงจรการต่อขึ้นได้แสดงในรูปที่ 3.6 จากรูปใช้แหล่งจ่ายไฟ 5V เมื่อ input 5V มาเข้าที่วงจร Monostable จะกลับเฟสเพื่อให้แรงดันตกคร่อมที่ output เป็น 0 จากนั้น RC ที่ต่ออยู่ก็จะกลับเฟสเป็น +5V อีกครั้งและ RC นี้ก็เป็นตัวปรับความกว้างของ pulse ขาออกด้วย, t_w ดังรูปที่ 12

ความกว้างของ Pulse , t_w เพื่อที่จะให้แน่ใจว่ามีเวลามากพอที่จะสั่งให้ Transmitter ทำงานได้ จึงเลือกใช้ $R = 1\text{ K}\Omega$, $C = 1\text{ }\mu\text{F}$ ซึ่งจะมีค่าความกว้าง 0.9 ms แต่ถ้าใช้ $R = 1.8\text{ K}\Omega$ ก็จะมีค่าความกว้างได้มากขึ้นถึง 1.18 ms ซึ่งมากกว่า 1ms ทำให้แน่ใจได้ว่าจะสามารถสั่งงานให้ Transmitter ทำงานได้ Output ของ LS7404 จะถูกต่อเข้ากับขาเบสของทรานซิสเตอร์ในขณะที่ input ของทรานซิสเตอร์จะถูกเปลี่ยนจาก pulse ทางไฟฟ้า เป็นการให้ pulse ทางแสง สั่งงานไปที่ตัว Receiver ให้ทำงาน โดยจะใช้ Opto - Emitter Diode

การออกแบบนั้น จะต้องคำนึงถึงกระแสที่ไหลผ่านขา Emitter ที่ 50 mA ซึ่งถ้าใช้ Supply 5V ค่า R ก็จะใช้เป็นตัวกำหนดกระแสที่ไหล โดยกำหนดจาก $R = V / I$; $R = 5V / 5mA = 100 \Omega$

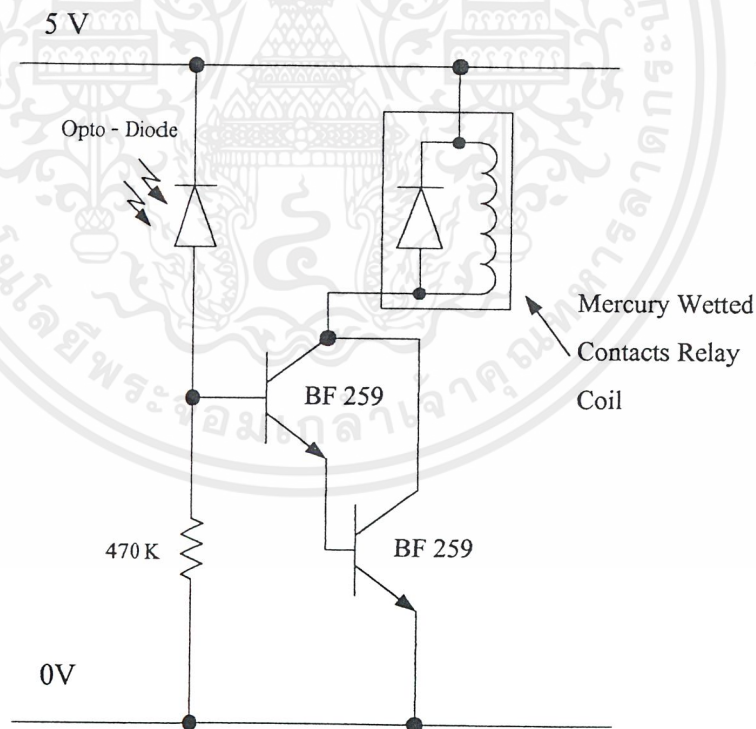
เนื่องจากค่า R ที่ใช้กับทรานซิสเตอร์นี้ ไม่รู้ค่าที่แน่นอนจึงใช้ R ปรับค่าได้มาจนหาค่าที่เหมาะสม โดยเลือกใช้ $R = 220 \Omega$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การออกแบบวงจร Receiver

เมื่อวงจร receiver ได้รับแสงจาก Transmitter ก็จะเปลี่ยน pulse ทางแสงเป็น pulse ทางไฟฟ้า ซึ่งตัวรับแสงใช้ PIN Photo-diode และการทำงานจะขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่ส่งมา และเมื่อไดโอดทำงานจะมีกระแสไหลผ่าน $10\mu\text{A}$ จะส่งผลให้ทรานซิสเตอร์ BF259 ทำงานขยายสัญญาณ แต่จะทำให้มีแรงดันตกคร่อมรีเลย์เพียง 3 V ซึ่งไม่เพียงพอที่จะทำงาน และถ้าเป็นกระแสหน่อยๆ ก็จะทำให้ทรานซิสเตอร์ไม่ทำงานในช่วง saturate ดังนั้นจึงใช้วงจร Darlington คู่ (BF259) มาขยายกระแสที่มีขนาดเล็ก เมื่อกระแส $10\mu\text{A}$ ไหลผ่าน Detector มีแรงดัน 5V ดังนั้นค่า $R = 500\text{ K}\Omega$; เลือกลงใช้ $470\text{ K}\Omega$ photo diode จะถูกต่อเข้ากับขาเบสของวงจร Darlington ด้วยแรงดัน 5V จึงทำให้แรงดันตกคร่อมรีเลย์เท่ากับ 5 V ซึ่งจะทำให้รีเลย์ทำงานได้เมื่อ photo diode ได้รับแสง

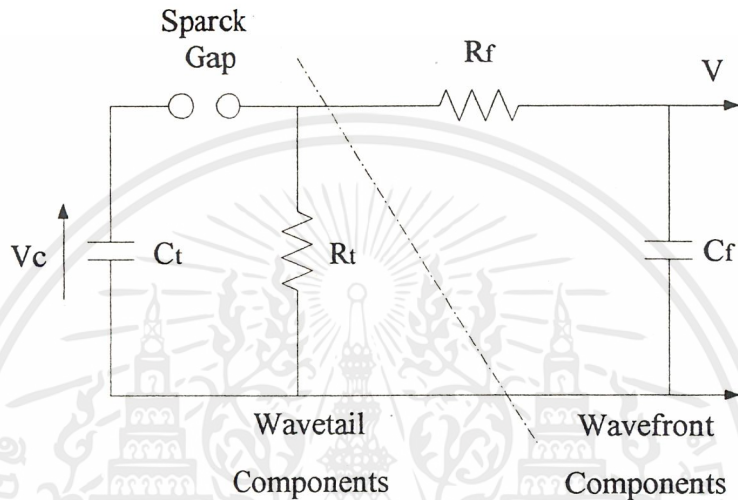


รูปที่ 3.8 Receiver Circuit Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

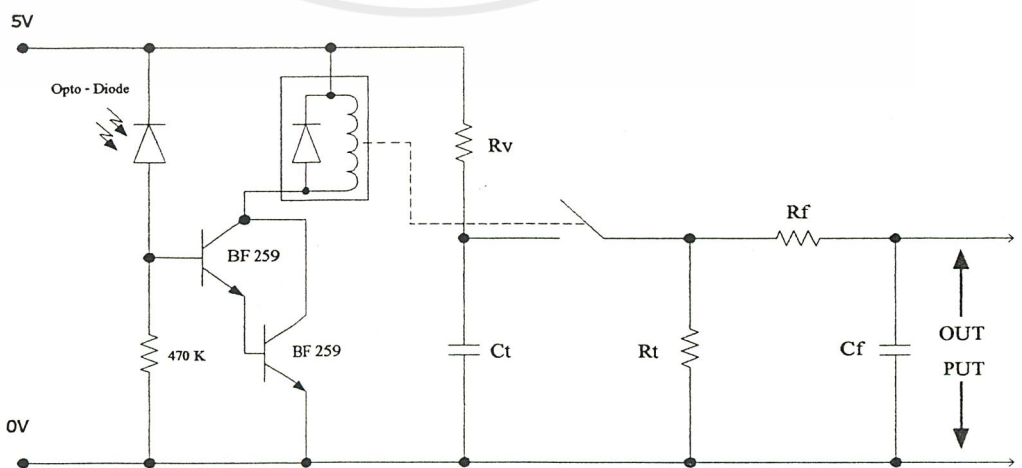
2.5 วงจร Discharge pulse generator

หางคลื่นของ Impulse จะเกิดจาก C_t ถูกชาร์จประจุเมื่อได้รับแรงที่มากพอที่จะ spark ที่ gap การเพิ่ม C, R นั้นจะใช้ R_f, C_f เพื่อที่จะทำให้น้ำคลื่นช้าลง ก็จะได้ waveform ตามที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 3.9 วงจร Discharge pulse generator

ในการสร้างแรงดัน surge ที่มีความชันหน้าคลื่นสูง ความเร็วในการ switching เป็นสิ่งจำเป็น จึงเลือกใช้ a mercury-welded relay ซึ่งสามารถทำงานที่เวลา 1.5 ms ขณะที่มิถุนญาณ trigger เข้ามาที่ขาเบส ทำให้coil รีเลย์สะสมพลังงานไว้จนทำให้น้ำคอนแทคปิดทำให้ C_t คายประจุผ่าน RC Network และเมื่อน้ำคอนแทคเปิด ก็จะทำให้ C_t ชาร์จประจุได้นั้น ได้แรงดันที่ต้องการอีกครั้ง ดังรูปที่ 14



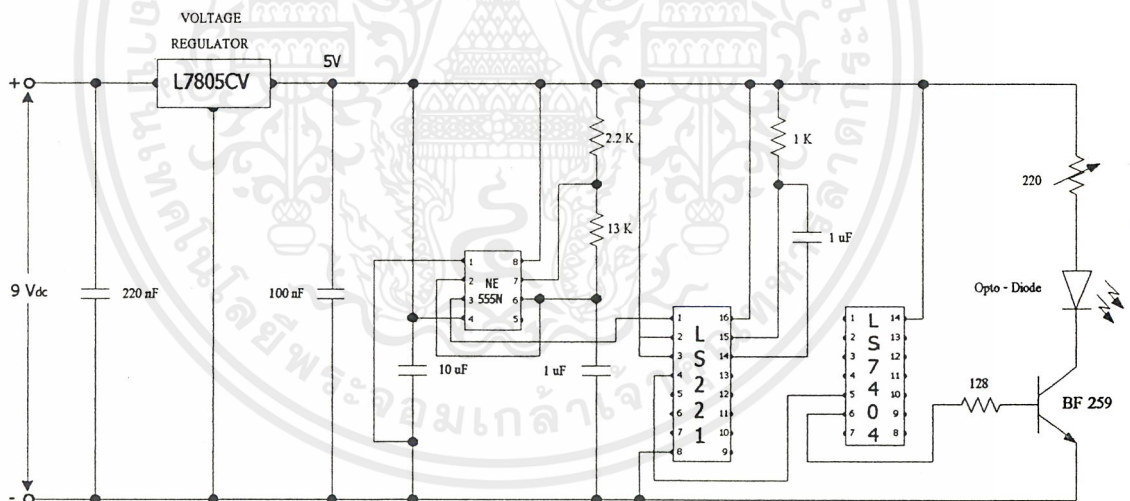
รูปที่ 3.10 แสดง Discharge pulse generator and receiver circuit diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 Power Supply

ทั้ง Transmitter และ Receiver จะใช้แรงดัน 5V ที่ได้จาก IC Regulator L7805CV จะมีขา 3 ขา รับ Input ได้ 7V – 30V และจะให้ output 5V คงที่ ที่กระแส 1.5 A และมีแรงดันตกคร่อม 2V ซึ่งก็ยังไม่ได้นั้นจึงเลือกใช้ Battery BR2330 V2A 9V input ซึ่งจะใช้งานร่วมกับ Capacitor ที่ค่า 220nF และ 100 nF การติดตั้งของ Transmitter และ Receiver จะต้องแยกलगด่อง และแยกกันทางไฟฟ้าด้วย ดังแสดงในรูปวงจรทั้งหมดในรูปที่ 3.11

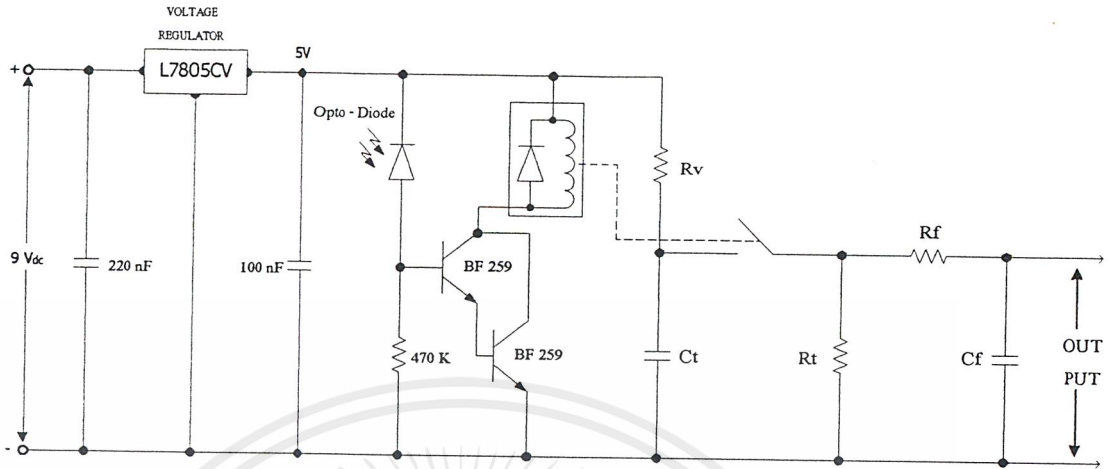
พบว่ารูปคลื่นที่ขา Collector และ ขา Base ในวงจรของ Receiver มี spike เกิดขึ้นบน pulse หลังจากเวลา 1mS ซึ่งเชื่อว่าเกิดจาก จากคอยล์ของ Relay ซึ่งทรานซิสเตอร์ BF259 สามารถทนแรงดัน spike ที่เกิดขึ้นได้



Transmitter circuit diagram

(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) Receiver circuit diagram

รูปที่ (a) Complete transmitter circuit diagram

(b) Complete receiver circuit diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การกระจายของ Steep-Fronted Surge ในขดลวด

ในการทดลองจะทำการจ่าย Steep-Fronted Surge เข้าไปในขดลวดของหม้อแปลง โดยการปรับความชันหน้าคลื่น โดยความชันหน้าคลื่นที่ใช้คือ 40 ,100, 300, 500, 800ns, 1.2 μ s และ 1.5 μ s แล้วทำการจ่ายเข้าขดลวด เพื่อดูการกระจายของรูปคลื่นที่ความชันหน้าคลื่นต่างกัน ซึ่งในการวัดจะวัดที่ Disc ต่างๆดังนี้ 50, 100, 150, 200, 250, 300 และ 350 นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบ ระหว่างขณะ No-Load และ ขณะ Take-Load และยังวัดขณะ Open-Circuit อีกด้วย เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่าง ซึ่งค่าที่วัดได้เมื่อบันทึกจาก Storage Oscilloscope ลงบนแผ่นคิสก์ เมื่อนำมาพิมพ์ จะได้ดังรูปที่จะแสดงในหน้าถัดไป

รายละเอียดของขดลวดหม้อแปลงที่ใช้ในการทดลอง

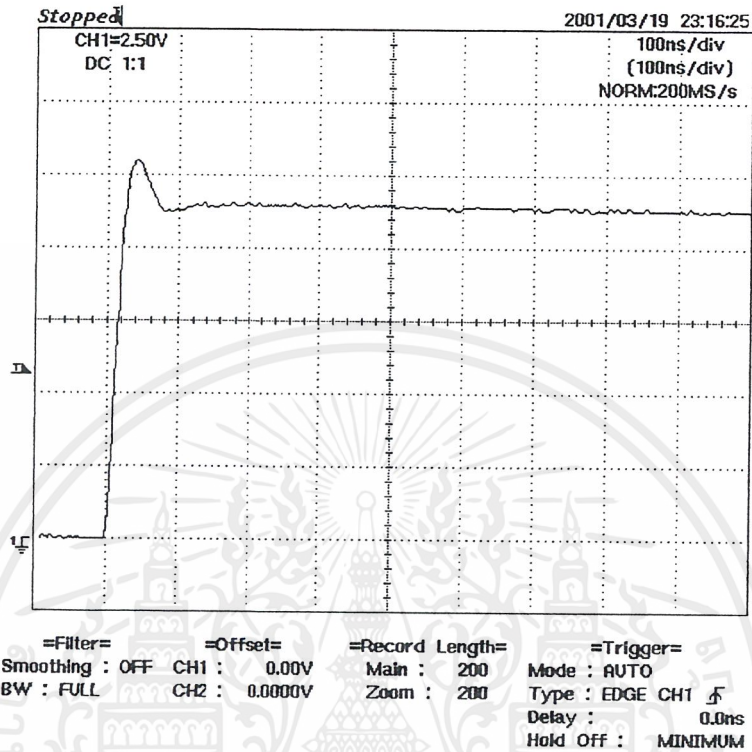
ชนิด : Layer winding ; 19 layer, 400 turn

วัสดุที่ใช้พัน : ลวดทองแดง

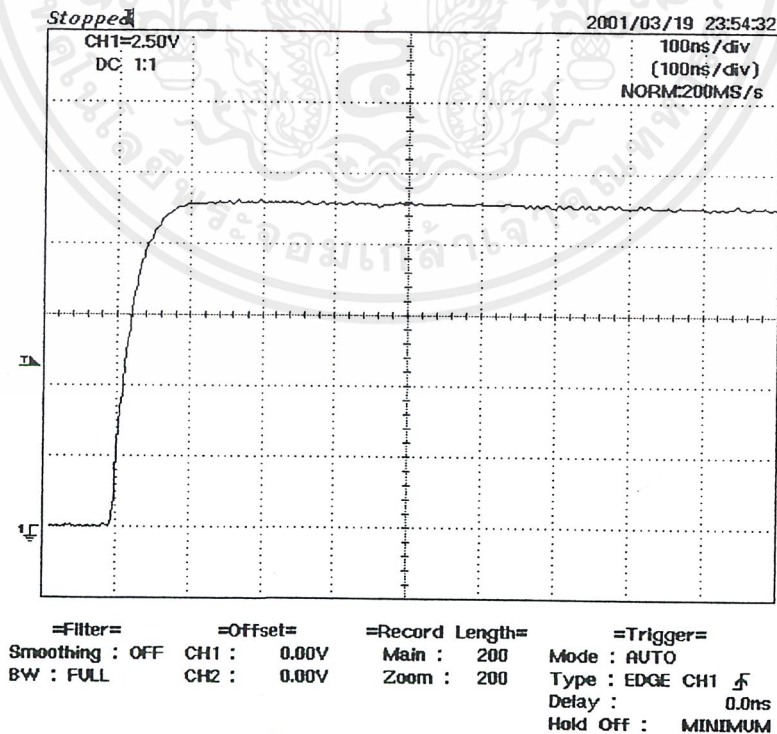
น้ำหนัก : 1.5 กก.

ขนาดลวด : #15 SWG

รูปคลื่นขนาดความชันหน้าคลื่นต่างๆ

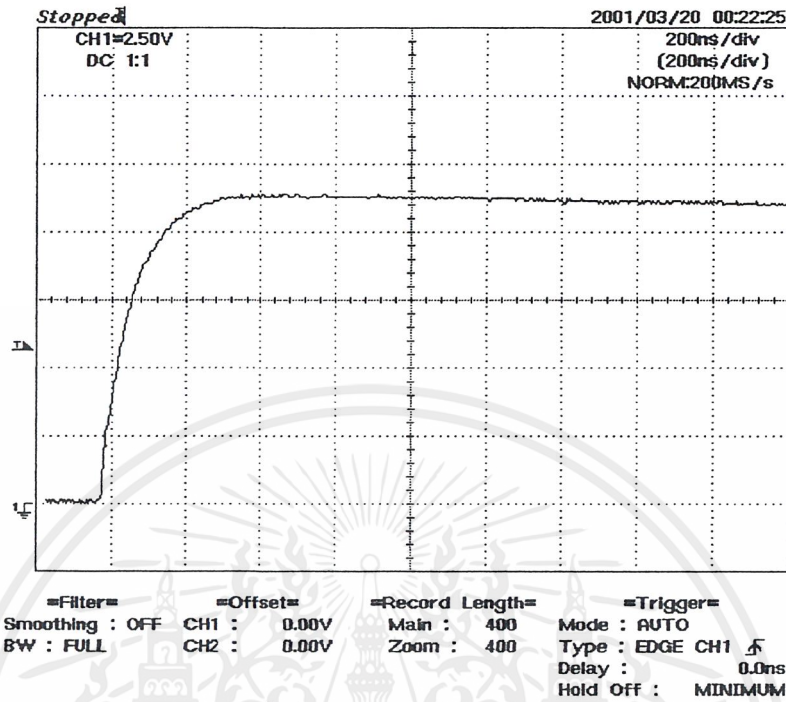


รูปที่ 4.1 ความชันหน้าคลื่น 40 ns

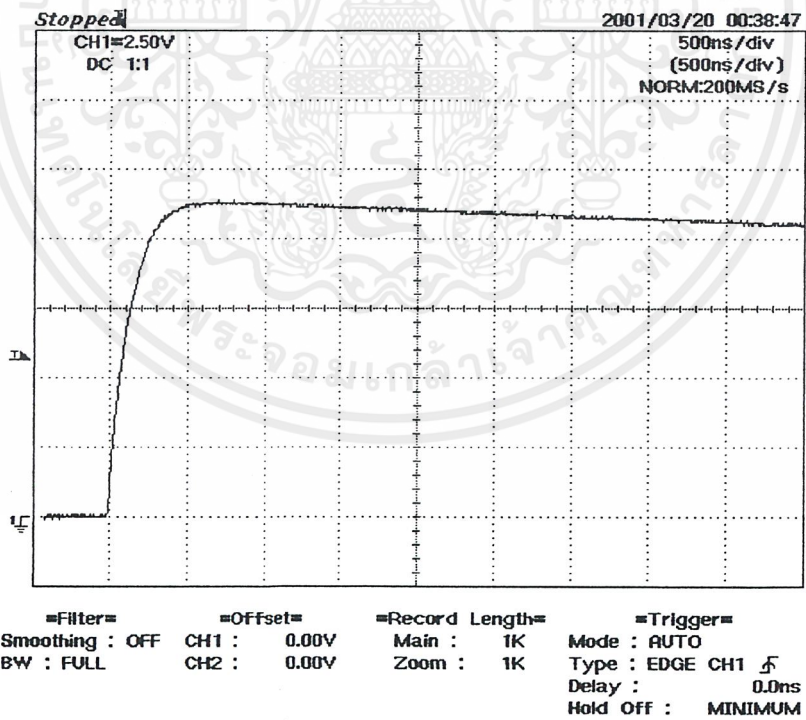


รูปที่ 4.2 ความชันหน้าคลื่น 100 ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

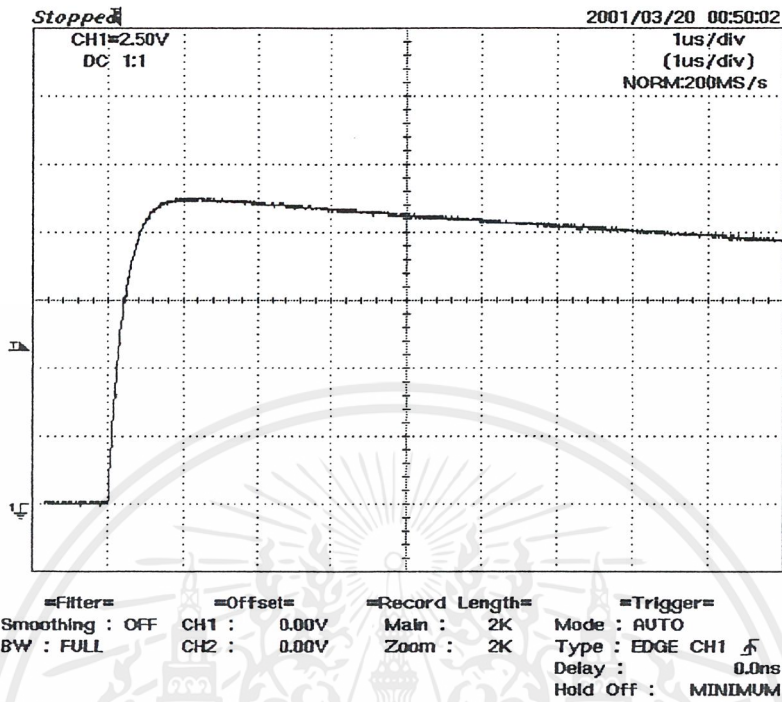


รูปที่ 4.3 ความชันหน้าคลื่น 300 ns

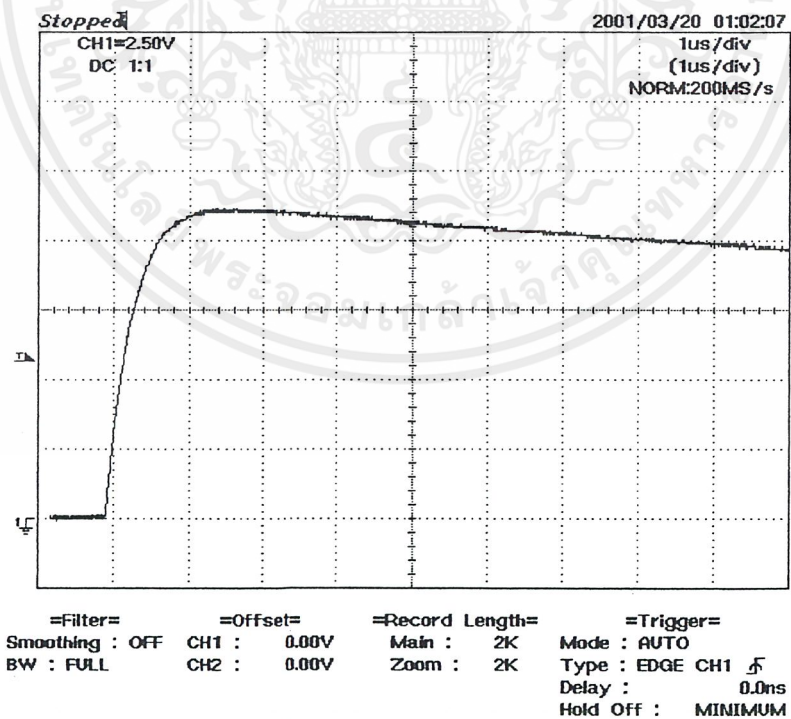


รูปที่ 4.4 ความชันหน้าคลื่น 500 ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

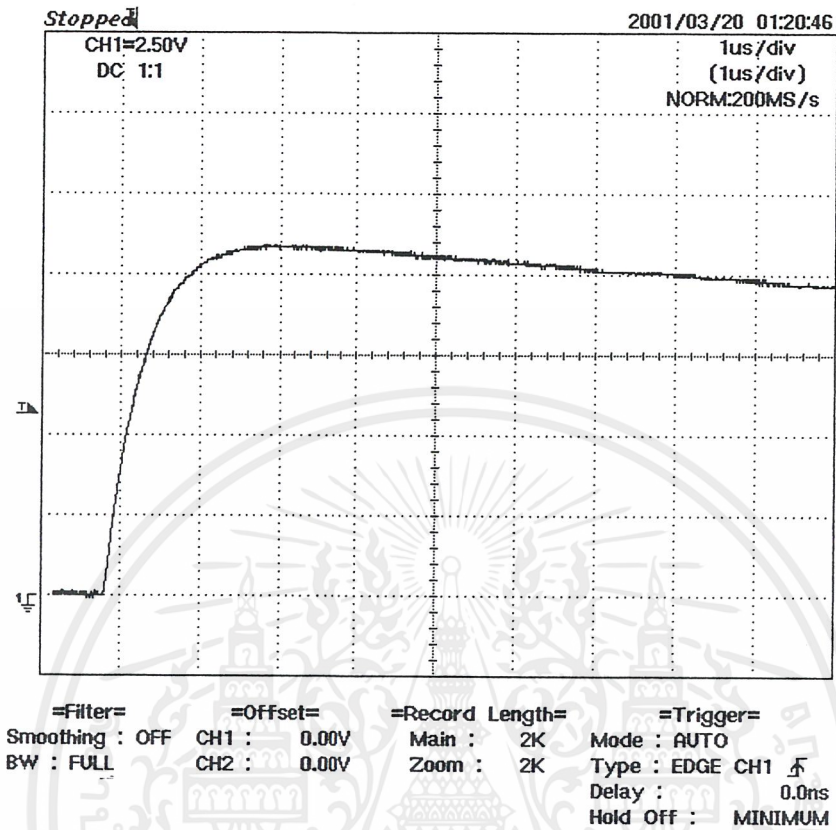


รูปที่ 4.5 ความชันหน้าคลื่น 800 ns



รูปที่ 4.6 ความชันหน้าคลื่น 1.2μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

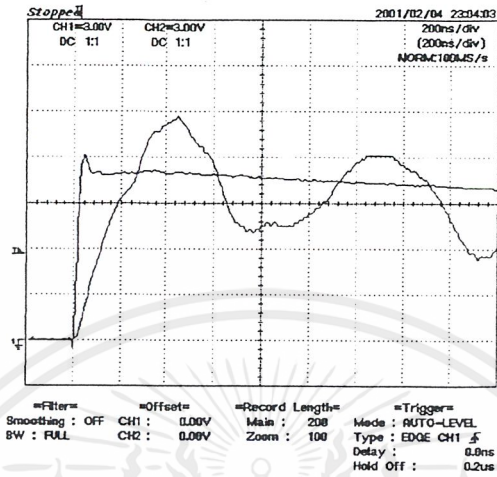


รูปที่ 4.7 ความชันหน้าคลื่น 1.2 μ s

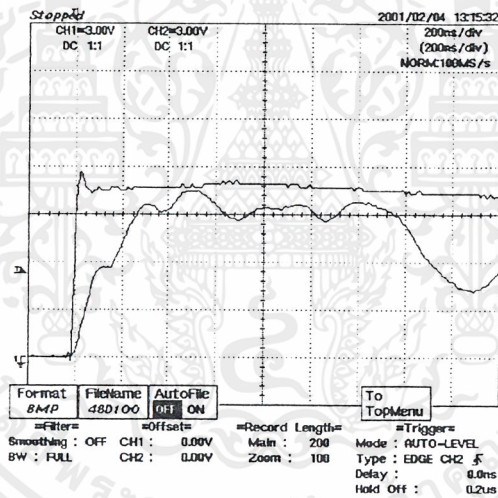
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปคลื่นแรงดันที่ได้เมื่อนำจ่ายเข้าขลวดขณะ open ground

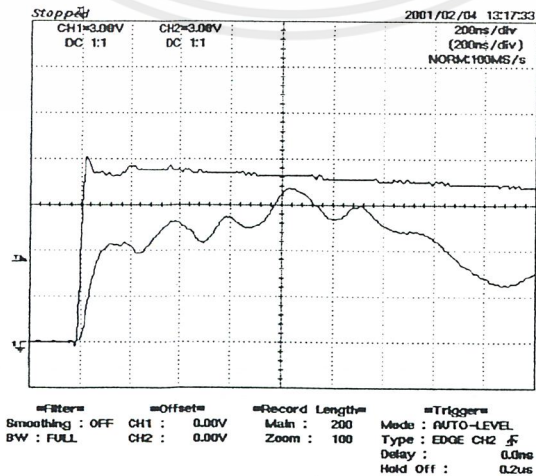
4.1 ที่ความชันหน้าคลื่น 40 ns



(a) วัดที่ turn 50

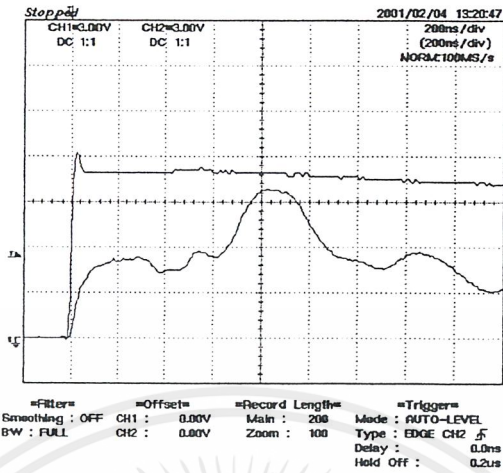


(b) วัดที่ turn 100

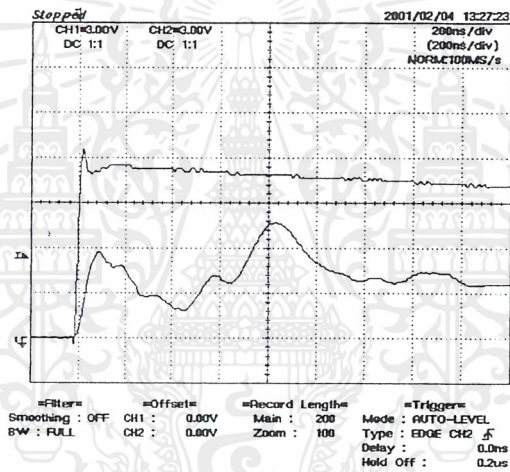


(c) วัดที่ turn 150

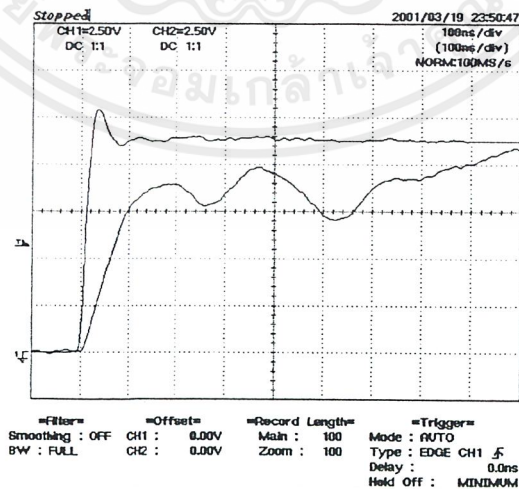
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d) วัคที่ turn 200

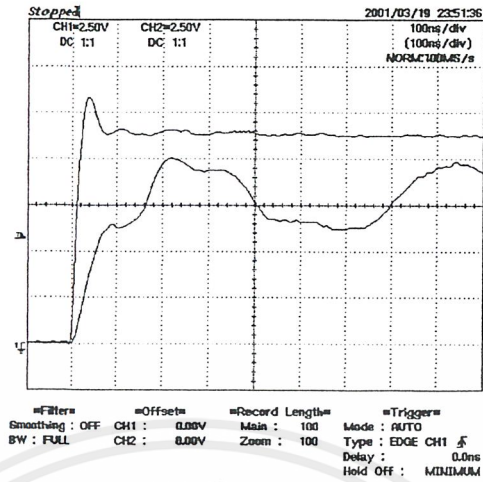


(e) วัคที่ turn 250



(e) วัคที่ turn 300

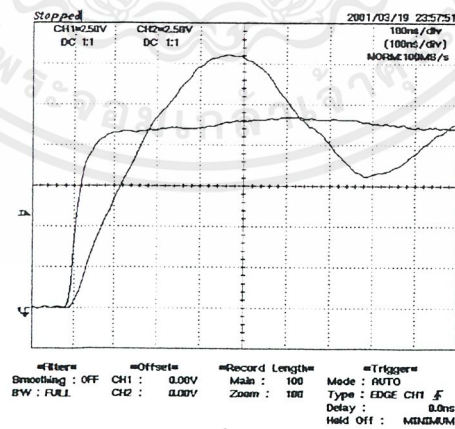
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(f) วัดที่ turn 350

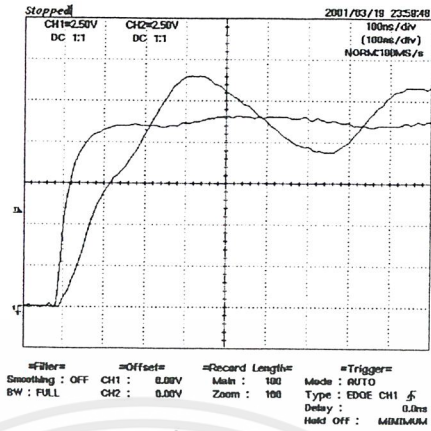
รูปที่ 4.8 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge 40 ns ขณะ open ground

4.2 ที่ความชันหน้าคลื่น 100 ns

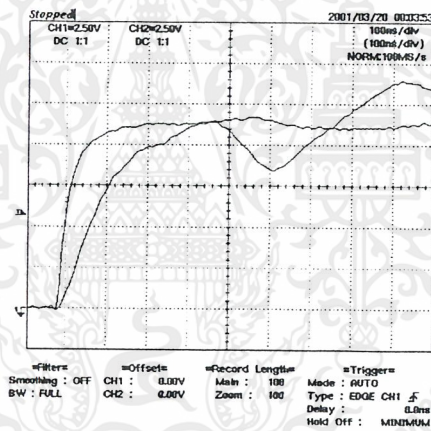


(a) วัดที่ turn 50

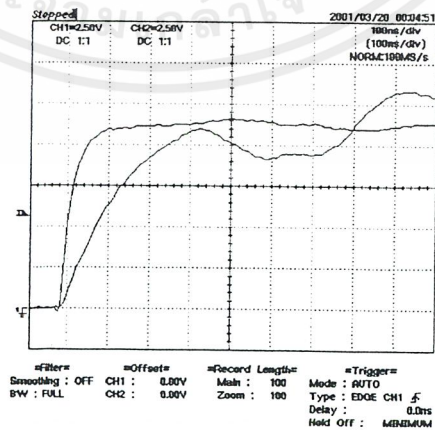
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) วัดที่ turn 100

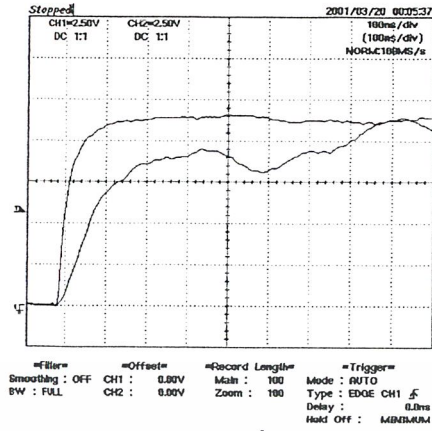


(c) วัดที่ turn 150

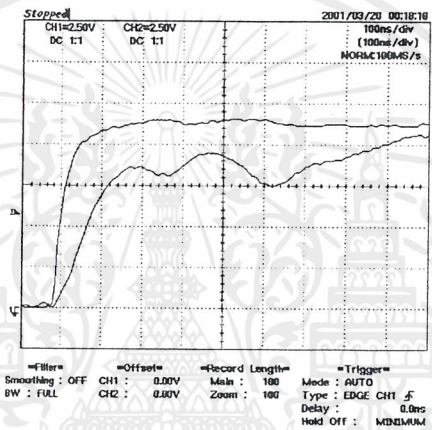


(d) วัดที่ turn 200

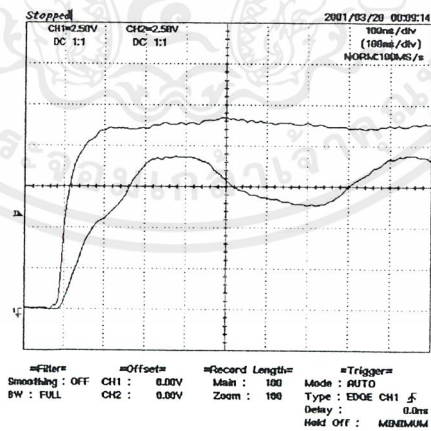
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e) วัดที่ turn 250



(g) วัดที่ turn 300

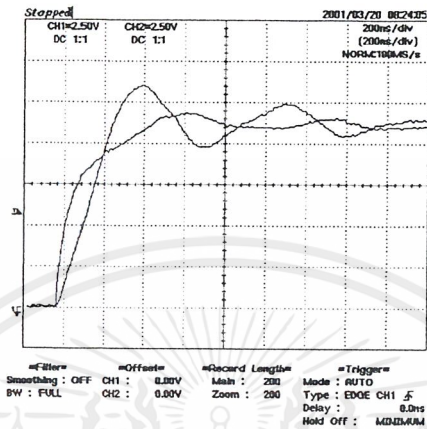


(f) วัดที่ turn 350

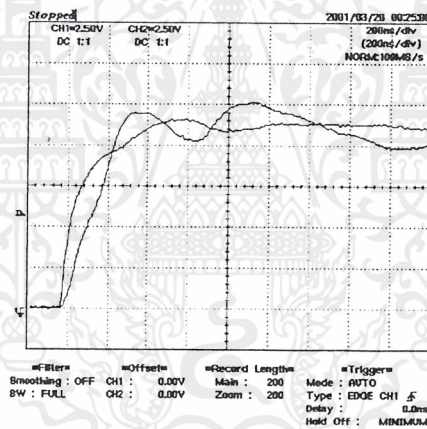
รูปที่ 4.9 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge 100 ns ขณะ open ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

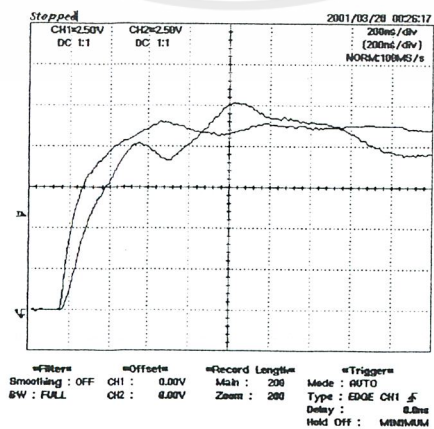
4.3 ที่ความชันหน้าคลื่น 300 ns



(a) วัดที่ turn 50

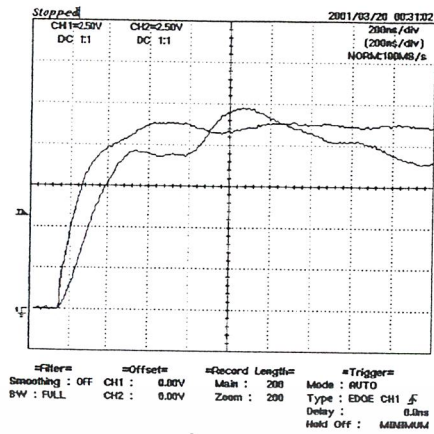


(b) วัดที่ turn 100

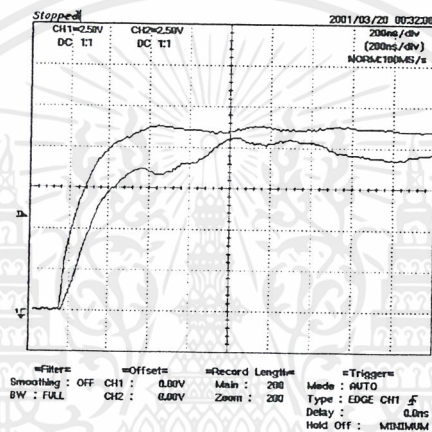


(c) วัดที่ turn 150

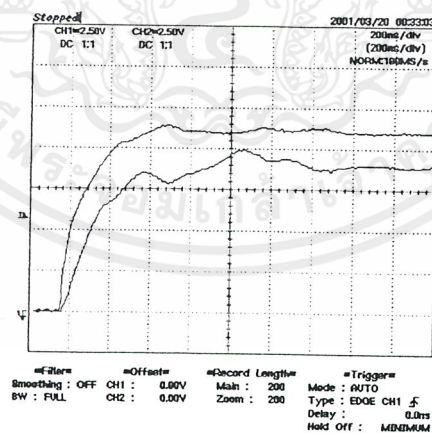
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d) วัดที่ turn 200

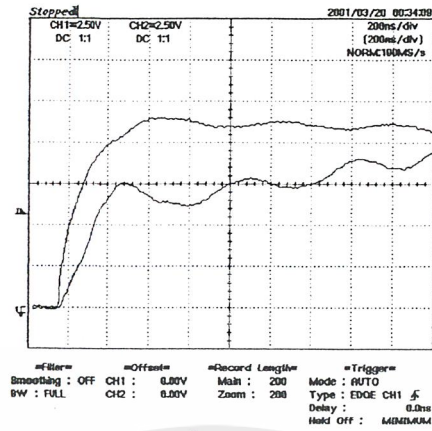


(e) วัดที่ turn 250



(f) วัดที่ turn 300

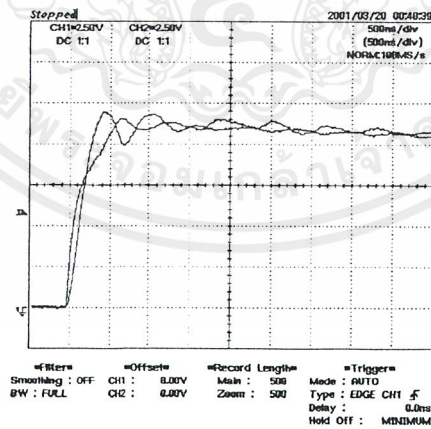
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(g) วัดที่ turn 350

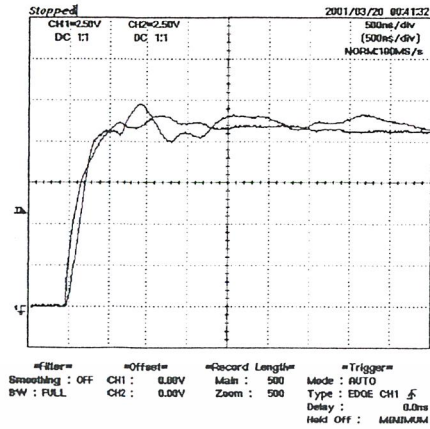
รูปที่ 4.10 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge 300 ns ขณะ open ground

4.4 วัดที่ความชันหน้าคลื่น 500 ns

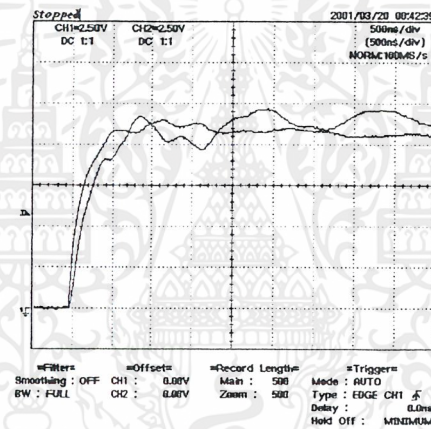


(a) วัดที่ turn 50

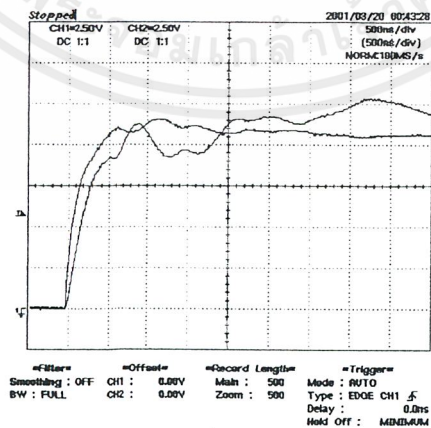
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) วัดที่ turn 100

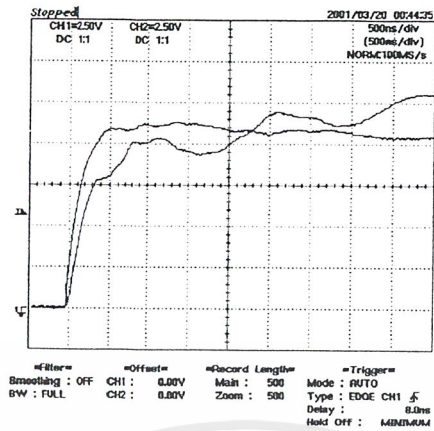


(c) วัดที่ turn 150

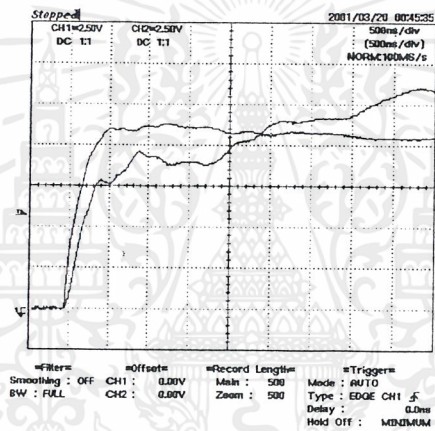


(d) วัดที่ turn 200

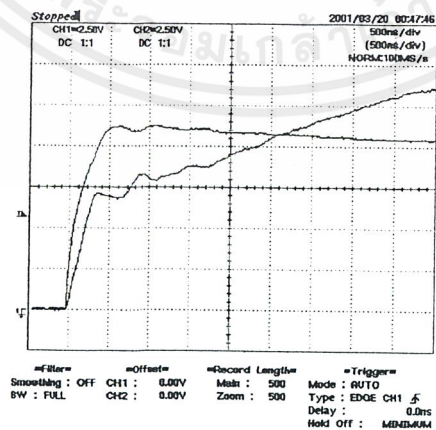
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e) วัดที่ turn 250



(f) วัดที่ turn 300

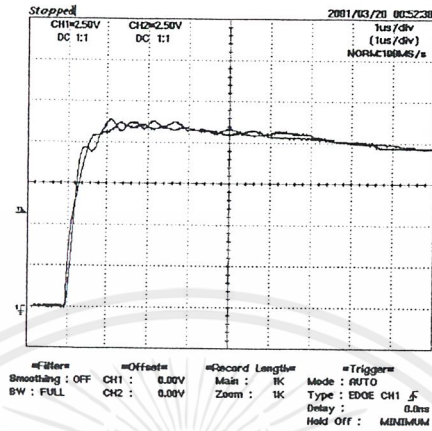


(g) วัดที่ turn 350

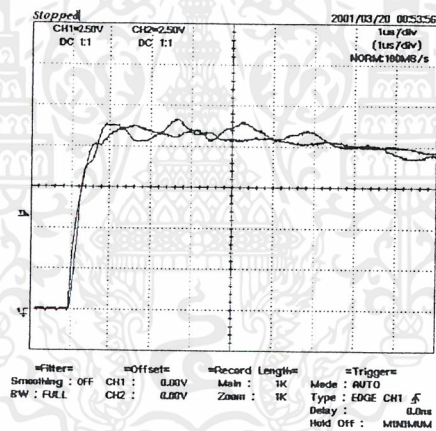
รูปที่ 4.11 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge 500 ns ขณะ open ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

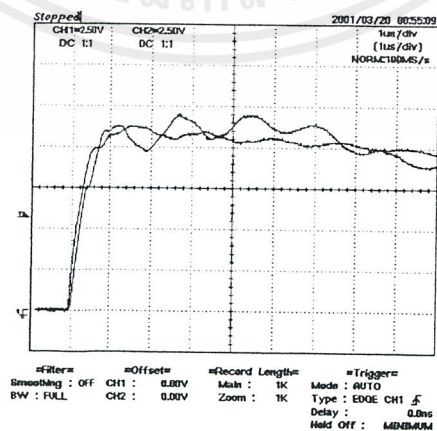
4.5 ที่ความชันหน้าคลื่น 800 ns



(a) วัดที่ turn 50

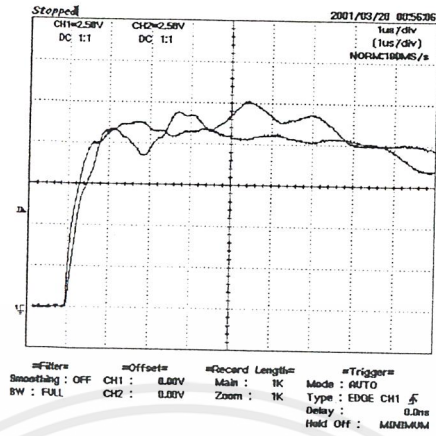


(b) วัดที่ turn 100



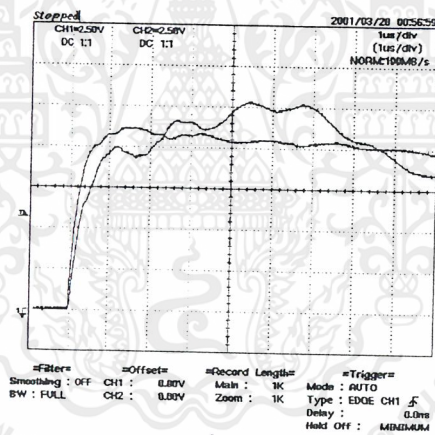
(c) วัดที่ turn 150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

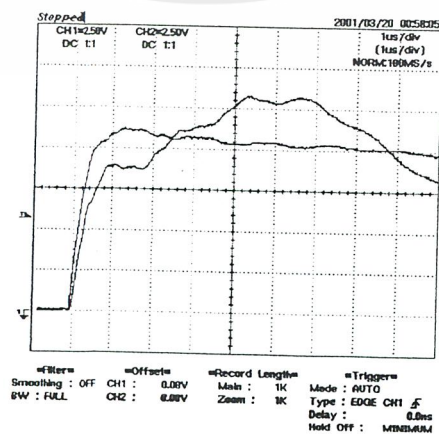


(d)

(e) วัดที่ turn 200

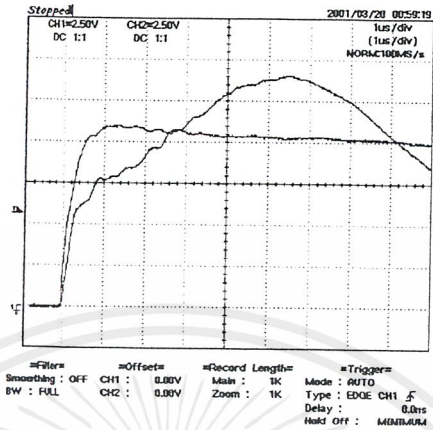


(e) วัดที่ turn 250



(f) วัดที่ turn 300

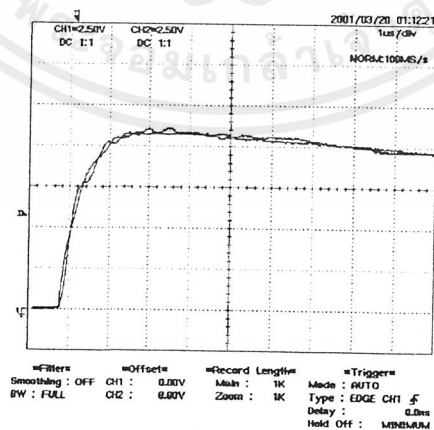
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(g) วัดที่ turn 350

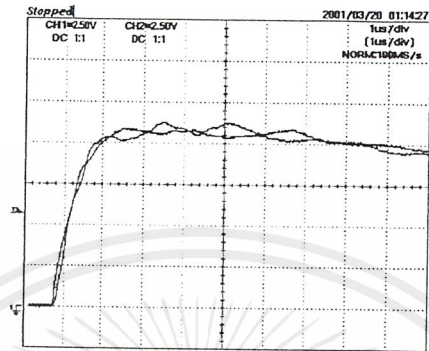
รูปที่ 4.12 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge 800 ns ขณะ open ground

4.6 ที่ความชันหน้าคลื่น 1.2 μ s



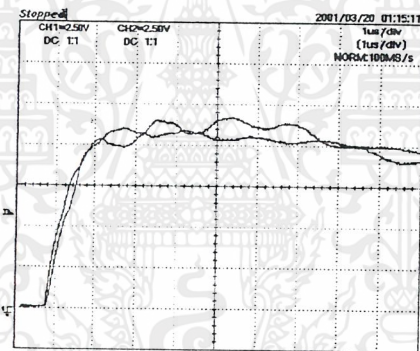
(a) วัดที่ turn 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



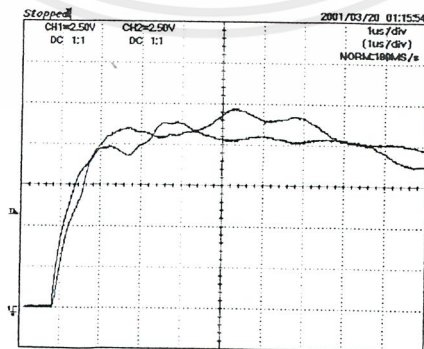
#Filter# #Offset# #Record Length# #Trigger#
 Smoothing : OFF CH1 : 0.00V Main : 1K Mode : AUTO
 BW : FULL CH2 : 0.00V Zoom : 1K Type : EDGE CH1 $\frac{1}{2}$
 Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

(b) วัดที่ turn 100



#Filter# #Offset# #Record Length# #Trigger#
 Smoothing : OFF CH1 : 0.00V Main : 1K Mode : AUTO
 BW : FULL CH2 : 0.00V Zoom : 1K Type : EDGE CH1 $\frac{1}{2}$
 Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

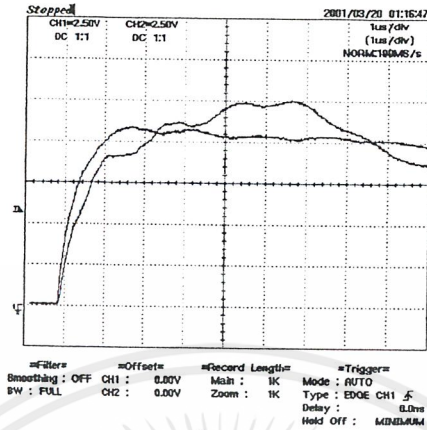
(c) วัดที่ turn 150



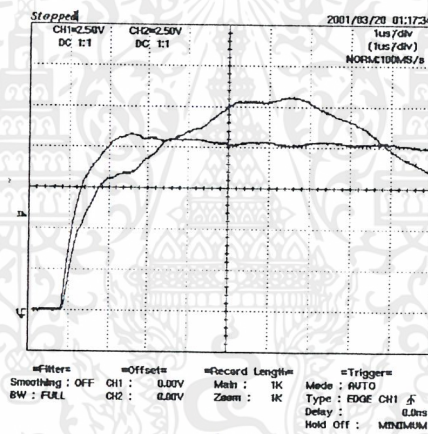
#Filter# #Offset# #Record Length# #Trigger#
 Smoothing : OFF CH1 : 0.00V Main : 1K Mode : AUTO
 BW : FULL CH2 : 0.00V Zoom : 1K Type : EDGE CH1 $\frac{1}{2}$
 Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

(d) วัดที่ turn 200

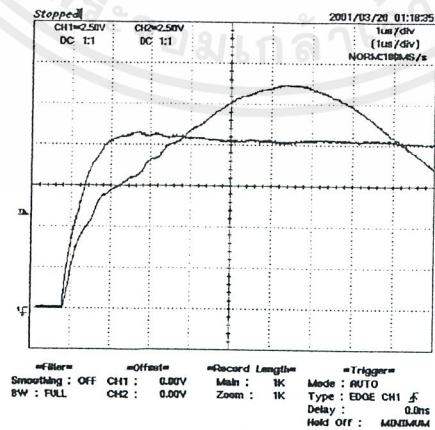
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e) วัดที่ turn 250



(d) วัดที่ turn 300

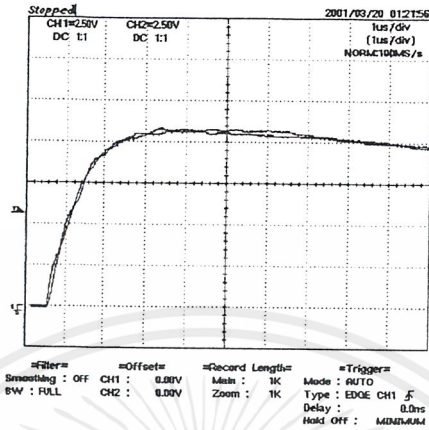


(e) วัดที่ turn 350

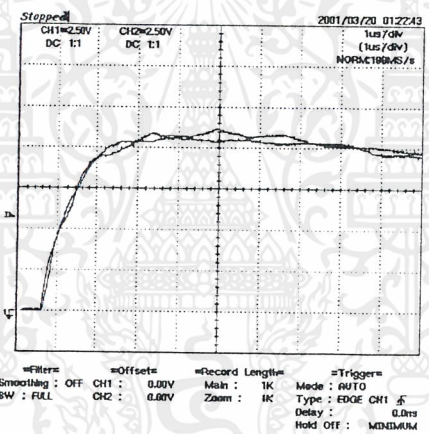
รูปที่ 4.13 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge $1.2 \mu\text{s}$ ขณะ open ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

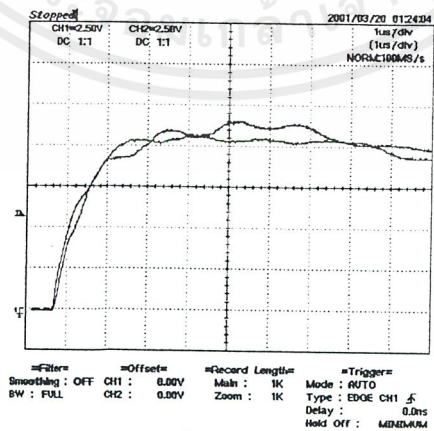
4.7 ที่ความชันหน้าคลื่น 1.5 μ s



(a) วัดที่ turn 50

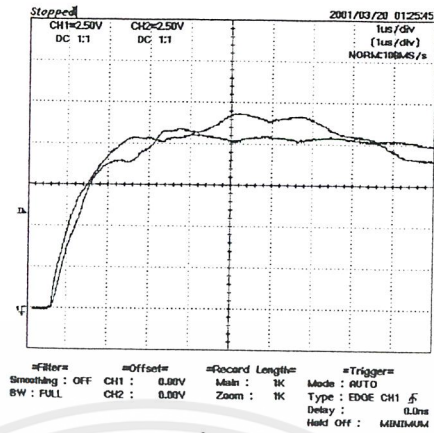


(b) วัดที่ turn 100

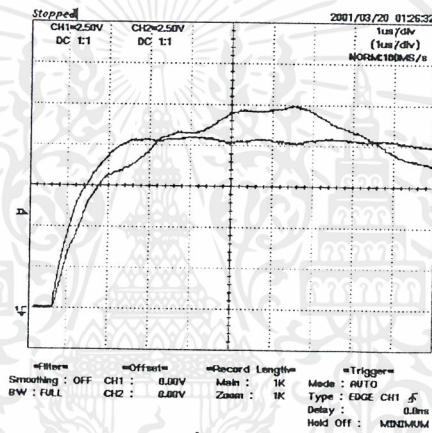


(c) วัดที่ turn 150

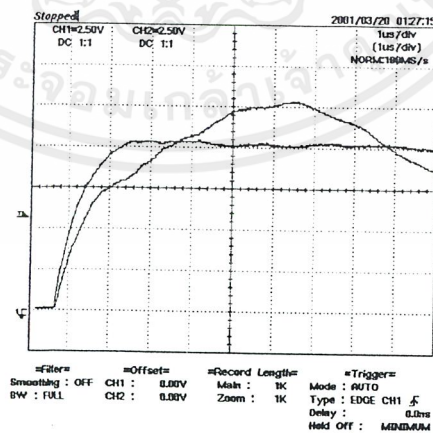
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d) วัดที่ turn 200

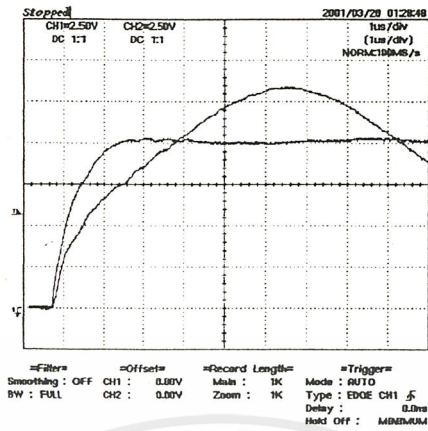


(e) วัดที่ turn 250



(d) วัดที่ turn 300

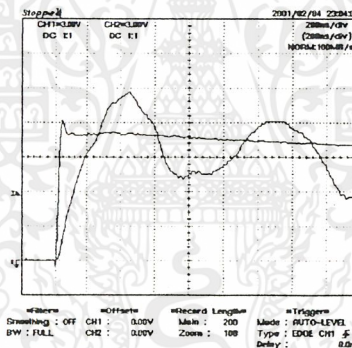
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



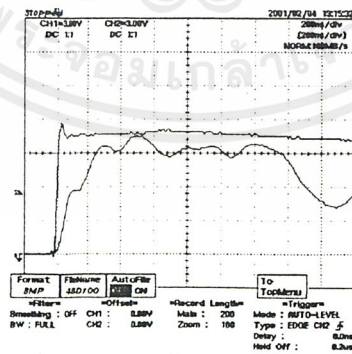
(e) วัดที่ turn 350

รูปที่ 4.14 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge $1.5 \mu\text{s}$ ขณะ open ground

4.8 ที่ความชันหน้าคลื่น 40 nanosecond

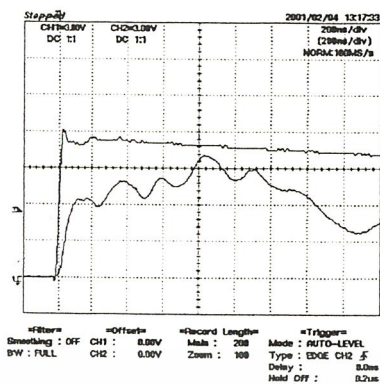


(a) วัดที่ turn 50

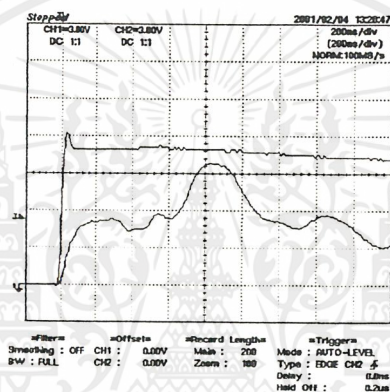


(b) วัดที่ turn 100

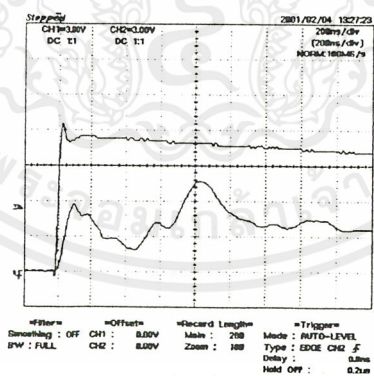
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) วัดที่ turn 150

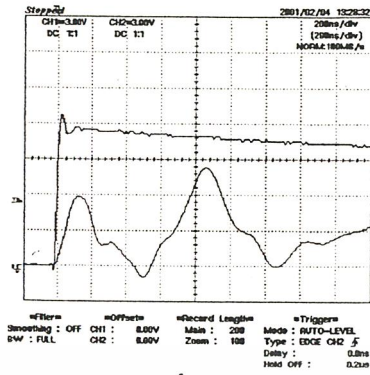


(d) วัดที่ turn 200

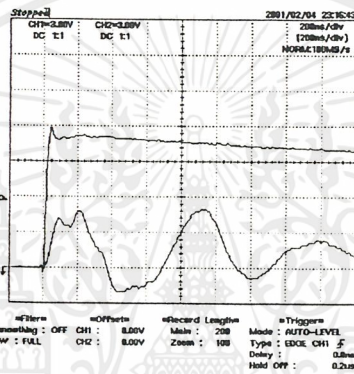


(e) วัดที่ turn 250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



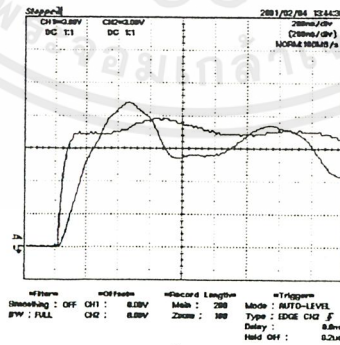
(f) วัดที่ turn 300



(g) วัดที่ turn 350

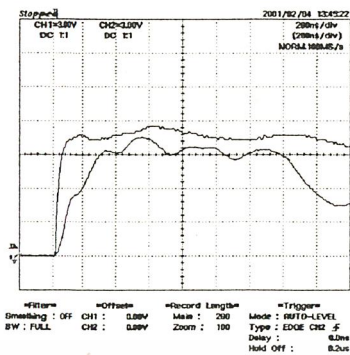
รูปที่ 4.15 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge 40 ns ขณะ connected ground

4.9 ที่ความชันหน้าคลื่น 100 nanosecond

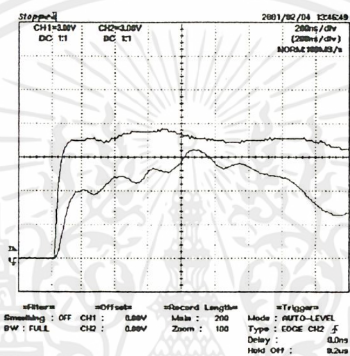


(a) วัดที่ turn 50

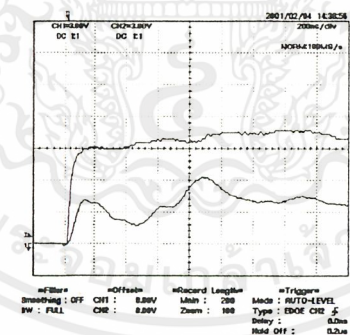
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) วัดที่ turn 100

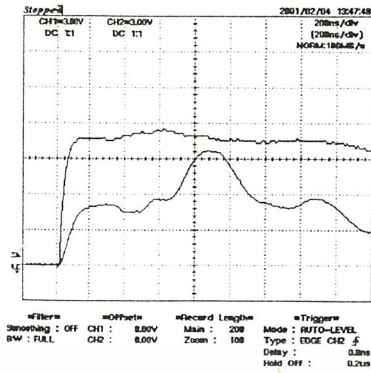


(c) วัดที่ turn 150

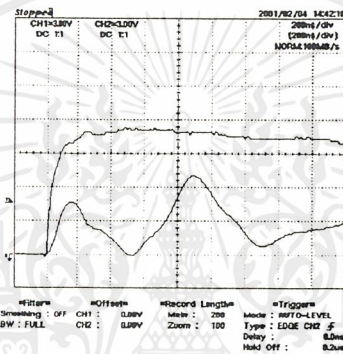


(d) วัดที่ turn 200

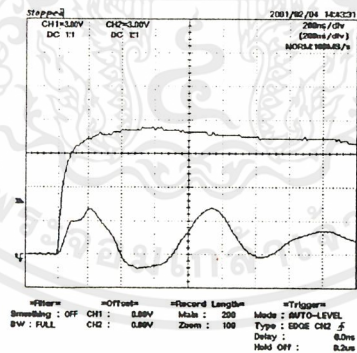
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e) วัดที่ turn 250



(f) วัดที่ turn 300

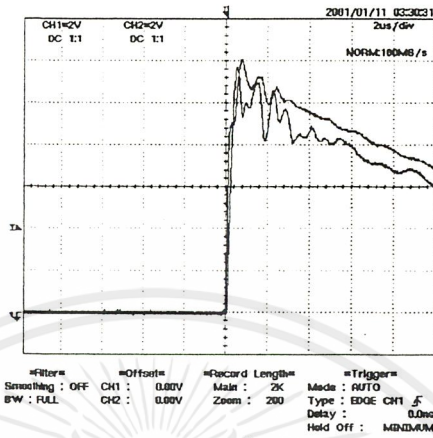


(g) วัดที่ turn 350

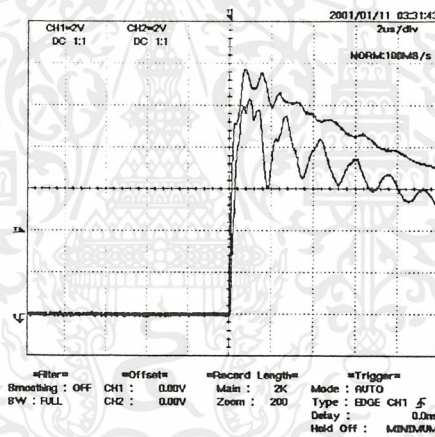
รูปที่ 4.16 การกระจายแรงดันของ Step-fronted surge 100 ns ขณะ connected ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

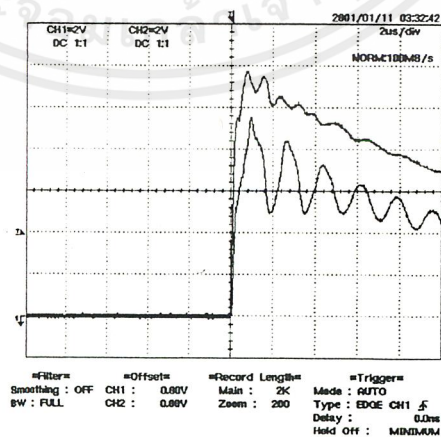
4.11 ที่ความชันหน้าคลื่น 300 ns



(a) วัดที่ turn 50

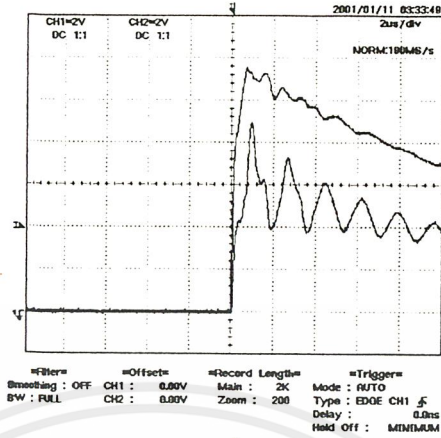


(b) วัดที่ turn 100

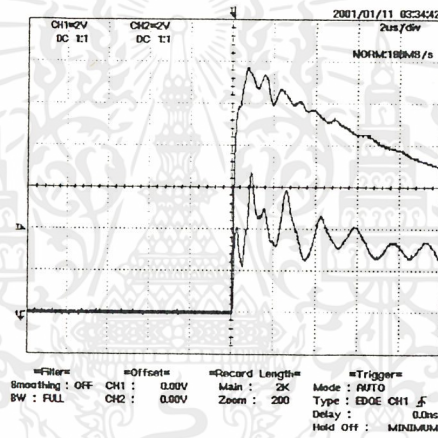


(c) วัดที่ turn 150

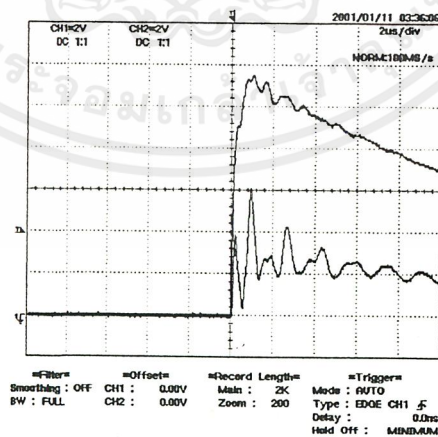
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d) วัดที่ turn 200

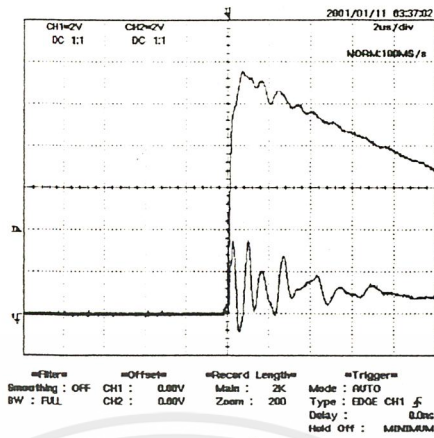


(e) วัดที่ turn 250



(f) วัดที่ turn 300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

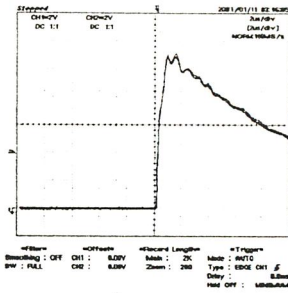


(g) วัดที่ turn 350

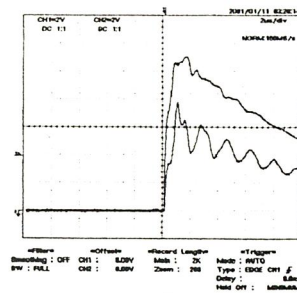
รูปที่ 4.23 การกระจายแรงดันของ Steep-fronted surge 300 ns ขณะ connected ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

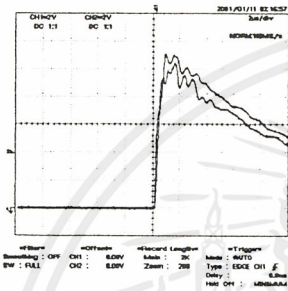
4.12 ที่ความชันหน้าคลื่น 500 ns



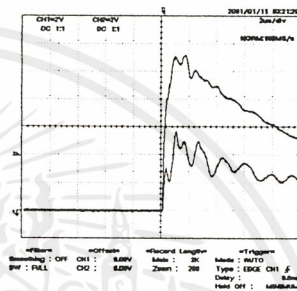
วัดที่ turn 10



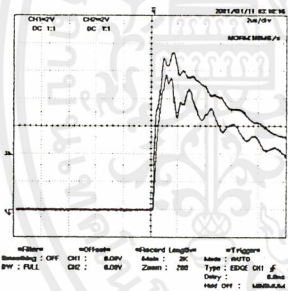
วัดที่ turn 200



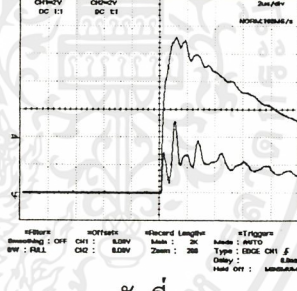
วัดที่ turn 50



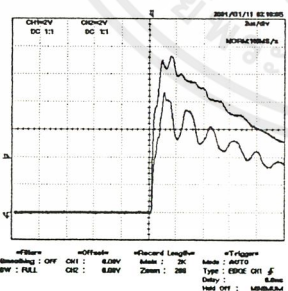
วัดที่ turn 250



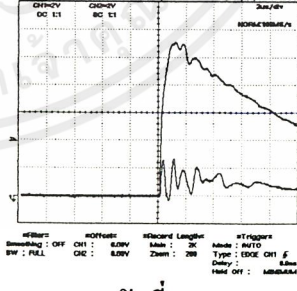
วัดที่ turn 100



วัดที่ turn 300



วัดที่ turn 150

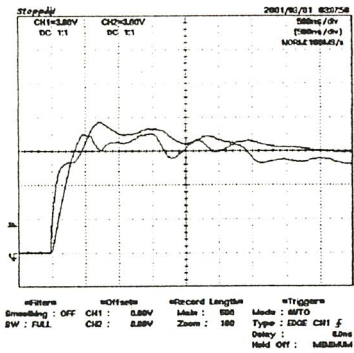


วัดที่ turn 350

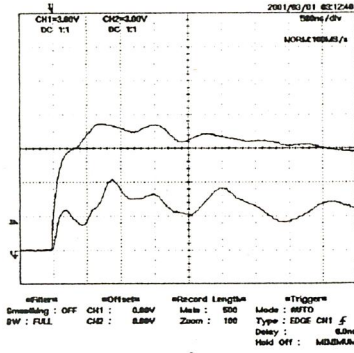
รูปที่ 4.24 ที่ความชัน 500ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

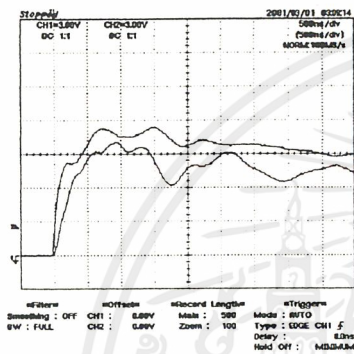
4.13 ที่ความชันหน้าคลื่น 800 nanosecond



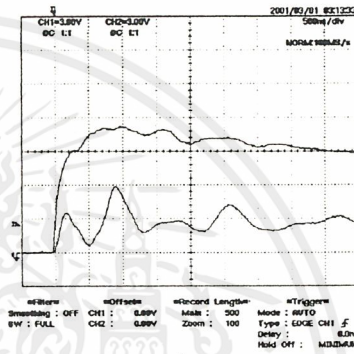
วัดที่ turn 50



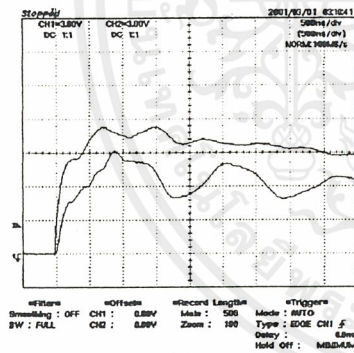
วัดที่ turn 250



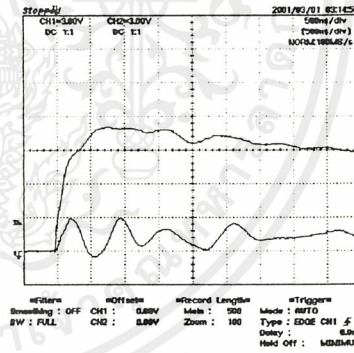
วัดที่ turn 100



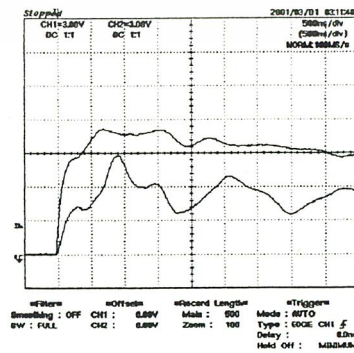
วัดที่ turn 300



วัดที่ turn 150



วัดที่ turn 350

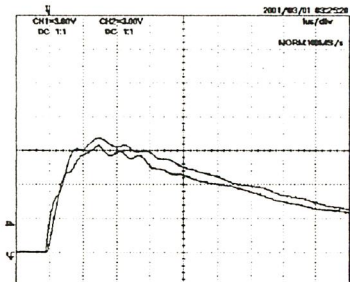


วัดที่ turn 200

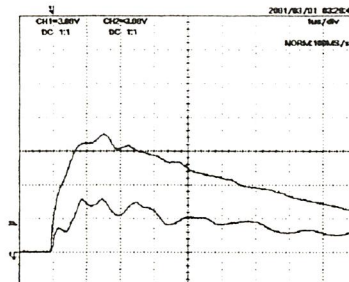
รูปที่ 4.25 ที่ความชันหน้าคลื่น 800 ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

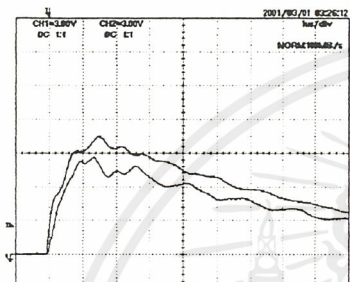
4.14 ที่ความชันหน้าคลื่น 1.5 microsecond



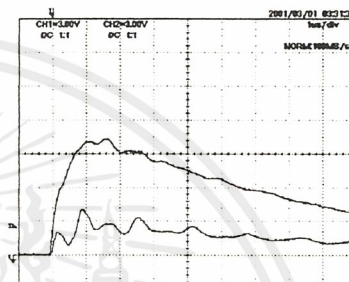
วัดที่ turn 50



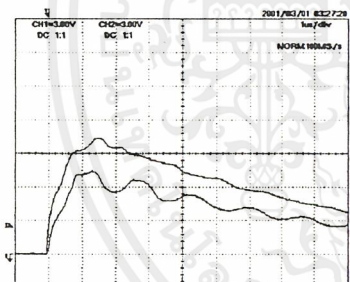
วัดที่ turn 250



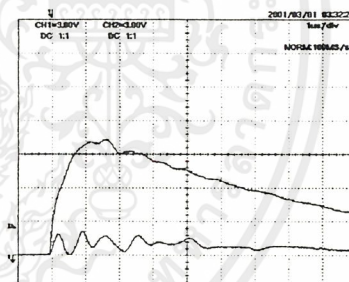
วัดที่ turn 100



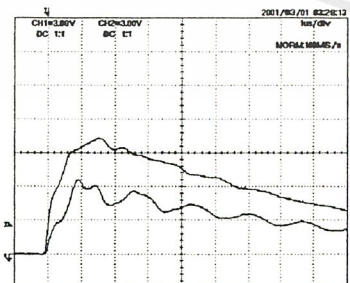
วัดที่ turn 300



วัดที่ turn 150



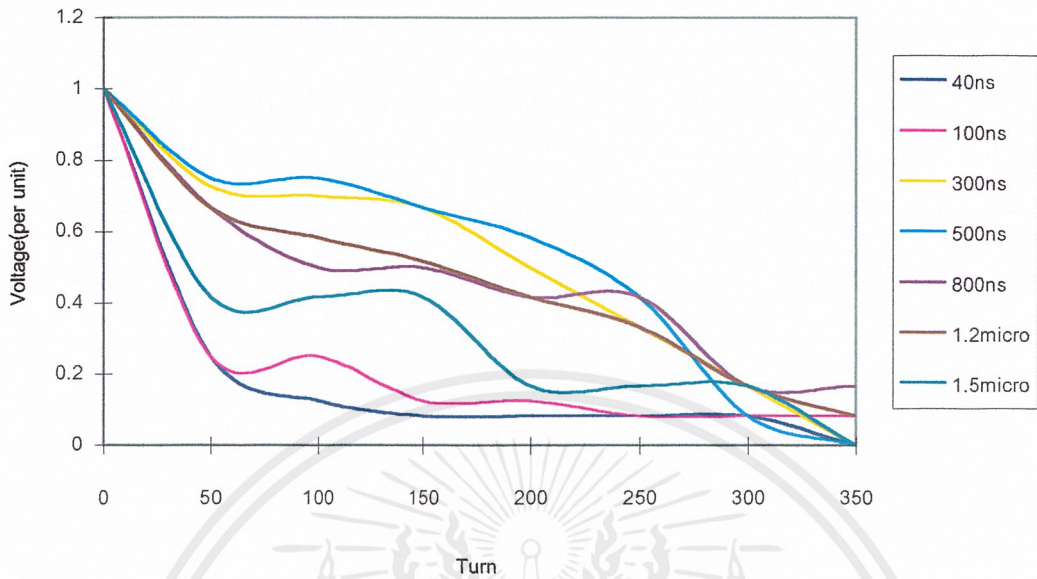
วัดที่ turn 350



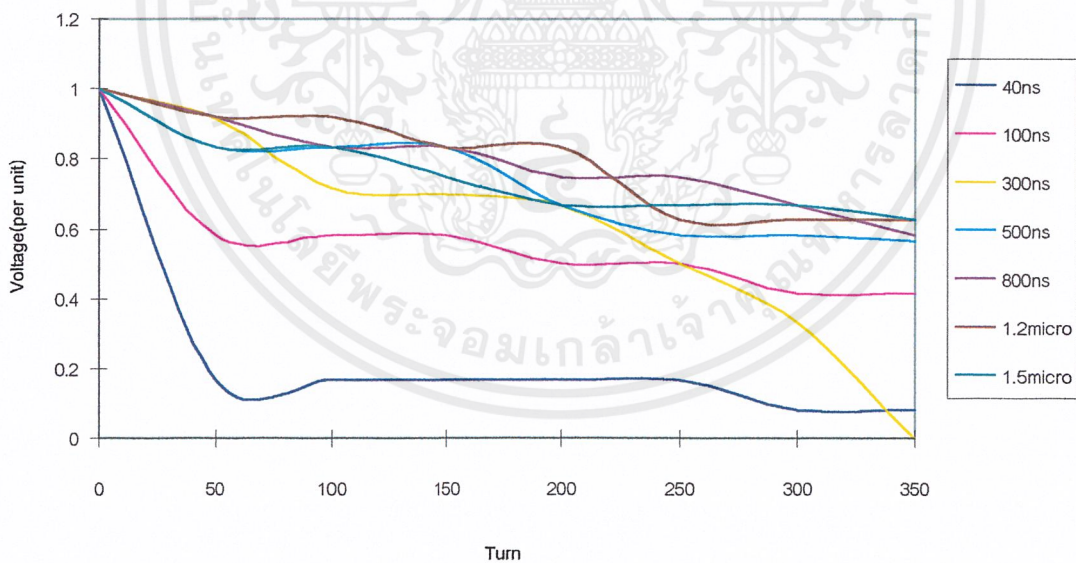
วัดที่ turn 200

รูปที่ 4.26 ที่ความชันหน้าคลื่น 1.5 μ s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แสดงการกระจายแรงดันที่ turn ต่างๆขณะ ต่อปลายขดลวดหม้อแปลงกับ ground



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงการกระจายของแรงดันที่ turn ต่างๆขณะที่เปิดวงจรระหว่างปลายขดลวด หม้อแปลง กับ ground

วิเคราะห์การกระจายของแรงดันที่ turn ต่างๆของขดลวด

เมื่อสังเกตการกระจายของแรงดันที่ turn ต่างๆของขดลวด จะเห็นว่าถ้า steep-fronted surge มีความชันหน้าคลื่นมากๆ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ขดลวดจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยสามารถเปรียบเทียบได้จาก ที่ความชันหน้าคลื่น 40ns และ 500 ns ซึ่งที่ความชันของหน้าคลื่นที่มากกว่า การเปลี่ยนแปลงของแรงดันจะเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ซึ่งทำให้เราสามารถประเมินความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับขดลวดได้ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่แตกต่างกันในแต่ละ turn อีกสาเหตุหนึ่งก็เนื่องมาจากค่า parameter ในแต่ละ turn โดยที่ turn มากๆค่า inductance และ ค่า capacitance จะมีค่ามากนั่นเอง ดังนั้นความเสียหายจะเกิดขึ้นกับขดลวดที่ turn ต้นๆมากที่สุดเมื่อมี steep-fronted surge เกิดขึ้น



บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผล

สรุป

จากชุดจำลอง Steep-Fronted Surge ที่สร้างขึ้นเมื่อนำไปจ่ายเข้ากับขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า แล้ววัดรูปคลื่นที่ Disc ต่างๆ จะเห็นว่าที่ Disc ต้นๆจะได้รับผลกระทบจาก Steep-Fronted Surge มากที่สุด ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้ระหว่าง Disc 50 กับ Disc 200 ดังนั้นสามารถประเมินได้ว่าเมื่อเกิด Steep-Fronted Surge ขึ้นใน Power System จริงๆ ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ประเภทขดลวด ช่วงต้นๆของขดลวด หรือ Disc แรกๆสำหรับหม้อแปลงแบบ Disc จะได้รับผลกระทบมากที่สุด จึงเป็นสาเหตุให้ฉนวน ที่ขดลวดช่วงต้นๆ และ Disc ต้นๆ ของขดลวด เกิด Breakdown หรือ ขดลวดอาจจะไหม้ได้ เนื่องจากมีความเครียดสนามไฟฟ้ามากเกินไป และยังสามารถสรุปได้ว่าค่า พารามิเตอร์ต่างใน Power System มีผลทำให้ความรุนแรงของ Steep-Fronted Surge ลดลงได้ ดังผลการทดลอง ที่ส่วนปลายของขดลวดซึ่งมีค่า Inductance มาก ความรุนแรงของ Surge จะมีน้อยกว่าช่วงต้นๆ ซึ่งมีค่า Inductance น้อยกว่า แต่ก็เป็นการศึกษาที่จะเปลี่ยนพารามิเตอร์ของระบบ ดังนั้นการศึกษาการกระจายของ Steep-Fronted Surge เพื่อที่จะหาความรุนแรง และผลกระทบในระบบ จาก การทดลองด้วยการจำลองอุปกรณ์จึงเป็นวิธีที่ดีที่สุดอีกวิธีหนึ่ง เพื่อที่จะหาทางป้องกันได้

วิจารณ์โครงการ

โปรเจกต์นี้ค่อนข้างที่จะคัดแปลงจากเดิมมาก เพราะโปรเจกต์เดิมทำขึ้นที่ UMIST ประเทศ อังกฤษจึงทำให้อุปกรณ์บางตัวมีความสามารถไม่เหมือนเดิม ดังนั้น Output ที่ได้จึงเปลี่ยนไป เช่น Lead Relay ที่มาทำหน้าที่ในการสวิตช์ ทางคณะผู้จัดทำได้ลองมาหมดแล้ว ทุกยี่ห้อในบ้านหม้อ โดยผู้ขายทุกร้านในบ้านหม้อมันมีความรู้่น้อยมาก เกี่ยวกับ Lead Relay ถ้าถามผู้ขายเขาจะไม่รู้รายละเอียด โดยบางครั้งเราต้องเดินเข้าไปซื้อเอง โดยร้านในบ้านหม้อมีร้านประกิดร้านเดียวเท่านั้นที่พอจะมีขาย แต่พอซื้อมาก็ใช้ไม่ได้ การสวิตช์ไม่ดีเท่าที่ควร แต่ก็ยังโชคดีที่ได้ Lead Relay บอร์ดเก่าของคอมพิวเตอรี่ยี่ห้อ Matsushita ซึ่งการสวิตช์ก็น่าพอใจระดับหนึ่ง โดยความชันหน้าคลื่นที่ชันที่สุดทำได้ 40 ns ส่วนเรื่องราคาของ Lead Relay ที่ซื้อจากร้านประกิดจะตกตัวละ 55 บาท สำหรับขนาดพิกัดขดลวด 5 V

ปัญหาอีกอย่างหนึ่งที่พบคือ อุปกรณ์ Opto-Emitter จะต้องส่งผ่านในท่อที่มีความมืด ถึงจะได้แอมพลิจูดพอที่จะไปขับขาเบสของ ทรานซิสเตอร์ แต่ก็ยังมีการแกว่งของสัญญาณในช่วงขาตง แต่ก็ยังใช้งานให้ทรานซิสเตอร์ ทำงานได้

ปัญหาระหว่างการสร้างวงจรของตัวอุปกรณ์นั้นไม่มี เพราะใช้แรงดันต่ำ คือ 5 Vdc ในวงจรส่ง และ 12 Vdc ในวงจรรับ จึงทำให้ระหว่างการสร้างวงจรไม่มีอุปกรณ์เสียหาย ปัญหาส่วนมาก จะเป็นที่อุปกรณ์ไม่มีพอใช้เช่น Storage Oscilloscope ซึ่งในภาควิชา มีไม่กี่ตัวจึงมีปัญหามาก เวลาที่จะใช้ต้องบริหารเวลากันอย่างจำกัด

ข้อเสนอแนะ

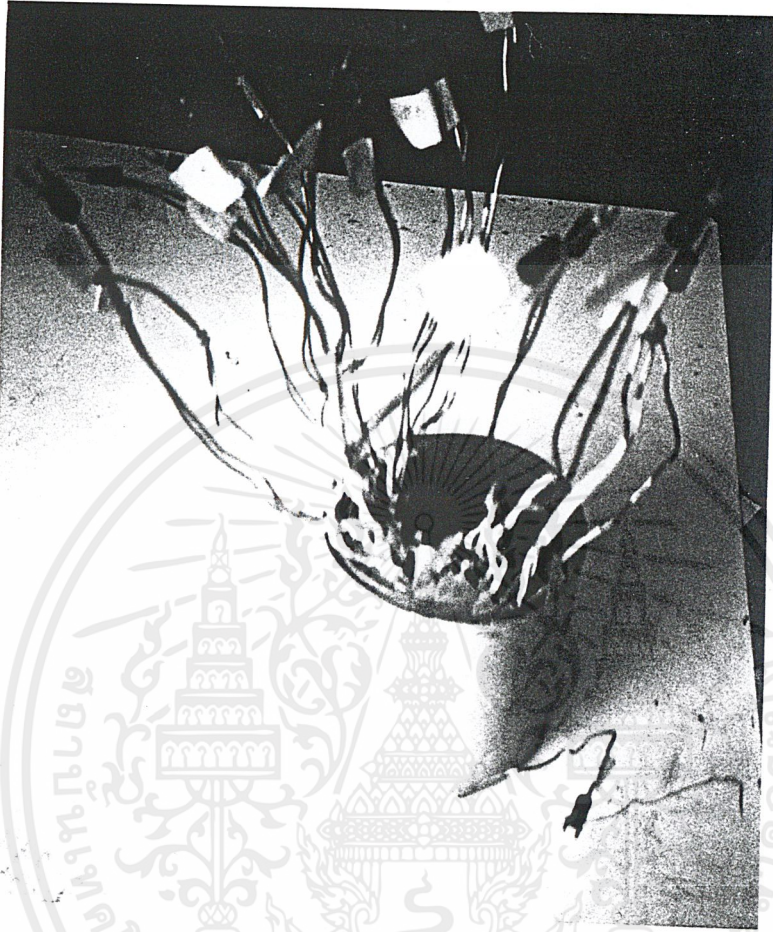
อุปกรณ์ที่ใช้ในการสวิตซ์ ถ้าเป็นไปได้ควรใช้พวกอุปกรณ์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ เช่น FET จะควมมีประสิทธิภาพน่าเชื่อถือมากกว่าการใช้ Relay





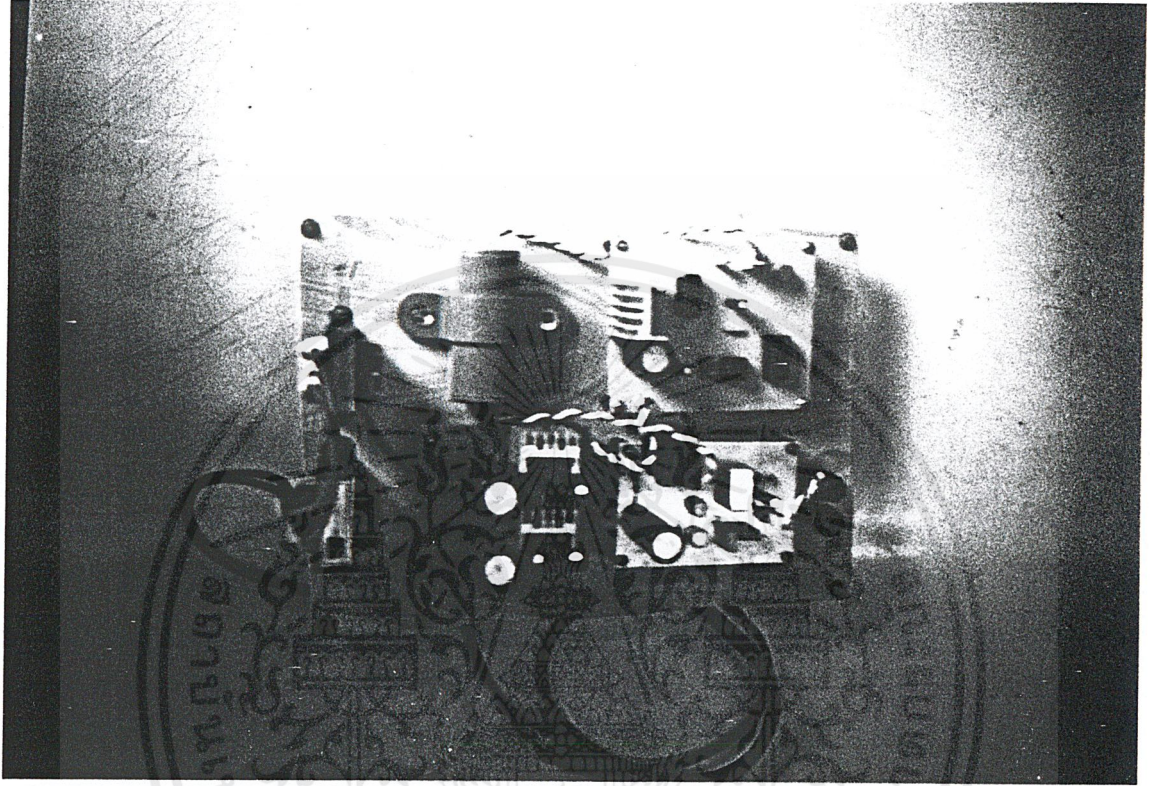
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



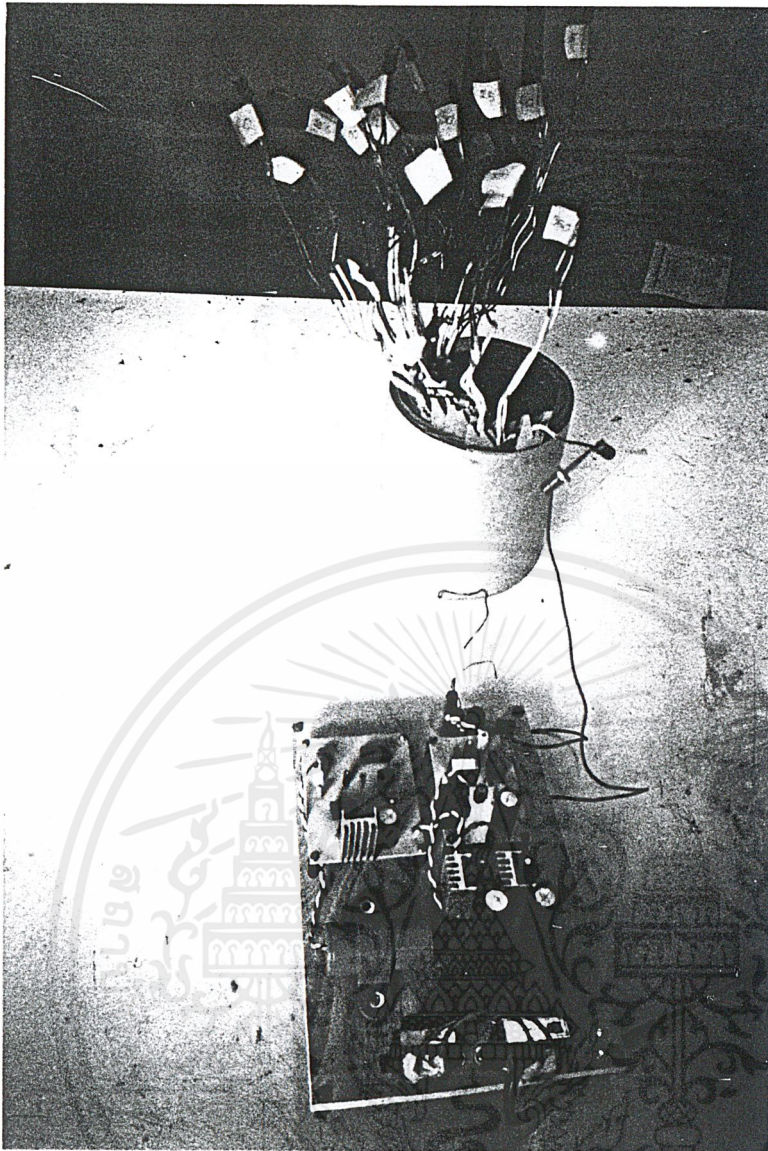
รูปขลุ่ยหวดหม้อแปลงที่ใช้ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



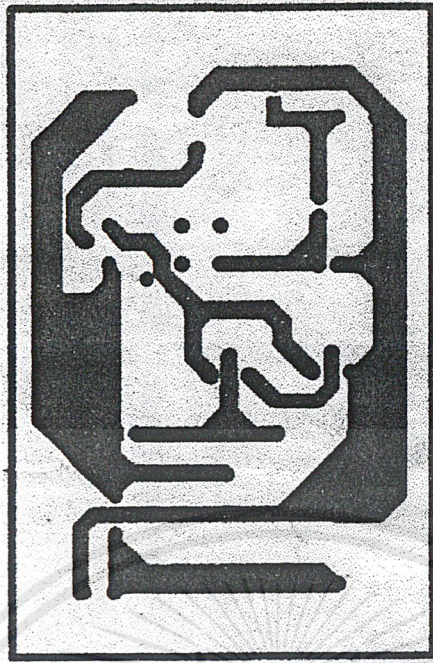
รูปแสดงการทดลองกับวงจรจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

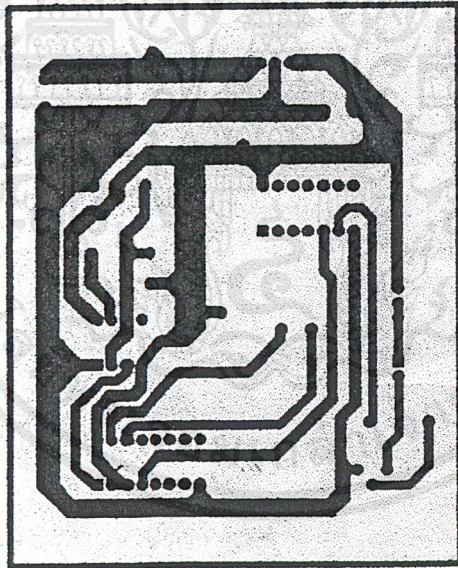


รูปแสดงการต่อวงจรเข้ากับชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ลายแผ่นปริ๊นของวงจรทางด้านภาครับ



ลายแผ่นปริ๊นของวงจรทางด้านภาคส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.อนันต์วัฒน์ คุณากร ที่ได้ให้โอกาส และคำปรึกษา จึงทำให้โครงการนี้สำเร็จขึ้นมาได้ บริษัทพรพิมานหม้อแปลงไฟฟ้า จำกัด ที่เอื้อเพื่อขดลวดหม้อแปลง ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ และความใกล้ชิดแก่ลูกศิษย์ทุกคน และขอขอบคุณเพื่อนๆ สำหรับมิตรภาพที่ไม่มีวันลืม

ขอขอบคุณ พ่อ ผู้ซึ่งหล่อหลอมลูกให้แข็งแกร่ง แม่ ผู้ซึ่งคอยห่วงใย แม่แม่จะจากไปแล้ว แต่ความอบอุ่นอันเป็นนิรันดร์ของแม่ยังอยู่กับลูกเสมอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Allan Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems", John Wiley & Son New York(1991)
2. Tan Yam Ngee, "Propagation of Partial Discharge Pulses in Transformer Windings" Final Year Project Report, UMIST, UK(1995)
3. K.J. Cornick and T.R. Thompson, "Steep-Fronted Switching Voltage Transients and Their Distribution in Motor Winding. Part 1 : System Measurements of Steep-Fronted Switching Voltage Transients", IEE PROC., Vol. 129, Pt. B, No.2, MARCH 1982, pp. 45
4. K.J. Cornick and T.R. Thompson, "Steep-Fronted Switching Voltage Transients and Their Distribution in Motor Winding. Part 2 : Distribution of Steep-Fronted Switching Voltage Transients in Motor Windings", IEE PROC., Vol. 129, Pt. B, No.2, MARCH 1982, pp. 56
5. Alexander Mazur, Isidoro Kerszenbaum and Jerome Frank, "Maximum Insulation Stresses Under Transient Voltages in The HV Barrel-Type Winding of Distribution and Power Transformer", IEEE Transactions on Industry Applications. , Vol. 24., No.3., MAY/JUNE 1988, pp.427