



การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ
วงจรทดสอบซินเทติก สำหรับทดสอบ
เซอร์กิตเบรคเกอร์แรงสูง
Computer Aided Design of
Synthetic Test Circuit For
High-Voltage Circuit-Breakers



โดย
นางสาวอารีสา ขำมาตย์มณี
นายแมนสรวง คล้ายมณี
นายวราพงษ์ ยัตธีรวงศ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2535

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งจะมิให้คัดลอกเนื้อหากลับและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

032661

ปีการศึกษา 2535

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ
วงจรทดสอบแบบซินเทติกสำหรับ
เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง

โดย

นางสาวมารีสา อ่ำมาตย์มณี

นายแมนสรวง คล้ายมณี

นายวราพงษ์ อัดธีรวงศ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ศุภี บรรจงจิตร

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2535

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
เรื่อง การใช้คอมพิวเตอร์ในการออกแบบวงจรทดสอบแบบซินเทติก
สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง

ผู้จัดทำ

- | | | | |
|------------------|------------|--------|----|
| 1. นางสาว มาริสา | อำมาตย์มณี | 321239 | 4B |
| 2. นาย แมนสรวง | คล้ายมณี | 321246 | 4B |
| 3. นาย วราพงษ์ | อัครีรวงศ์ | 321284 | 4B |

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ. ศุภี บรรจงจิตร)

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบวงจรทดสอบ
แบบซินเทติกสำหรับทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง

มาวิสา อ่ำมาตย์มณี
แมนสรวง คล้ายมณี
วราพงษ์ อัครีรวงศ์

รศ.ศุภี บรรจงจิตร อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2535

บทคัดย่อ

ในปฏิญานินพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงการใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรทดสอบแบบซินเทติกของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง ซึ่งจะยึดถือหลักการสร้างวงจรทดสอบตามมาตรฐาน IEC และ ANSI ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรชั้นในระบบไฟฟ้า (short circuit fault) โดยพิจารณาในทอมของทรานเซียนท์ รีโอดเวอรี โวลเตจ ที่เกิดขึ้นที่ตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์ขณะทำการอินเตอร์รับ และคำนึงถึงการทำงานในช่วงโมเมนตารีดิวิตีของเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นสำคัญเนื่องจากเป็นช่วงที่มีกระแสลัดวงจรสูงสุด และในการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรทดสอบนี้จะใช้วิธีการที่เรียกว่า "วิธีการทำซ้ำ" (iterative process) โดยอาศัยหลักการแปลงลาปลาซ (laplace transform) มาใช้ในการแก้สมการ ดังนั้น เมื่อมีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้ การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรทดสอบจึงเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้การทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์ง่ายและสะดวกขึ้น

Computer Aided Design of Synthetic Test Circuit
for High-Voltage Circuit Breaker

Marisa Ammatmanee

Mansaung Klaimanee

Warapong Atthirawong

Associate Professor Sulee Banjongjid Adviser
1992

Abstract

This thesis describes application of computer to use in synthetic testing method for high voltage circuit breaker, which calculate and select components of synthetic test circuits. The test circuits are specified by IEC and ANSI standards in case short circuit fault. We'll discuss characteristic of circuit breaker, in term transient recovery voltage during interruption, that means the momentary duty of circuit breaker is very important, because in this period has the maximum short circuit current. This process, calculation components of synthetic short circuit fault test circuit, is achieved by iterative method, which involves laplace transform. The creation of a software for calculating test circuit components, the facilities and principles of which are the accuracy and the high speed operation.

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 : บทนำทั่วไป	
1.1 บทนำ	1
1.2 กระแสลัดวงจร	2
1.3 ชนิดของการเกิดผิดปกติ	4
1.4 คุณสมบัติประจำตัวของเซอร์กิตเบรกเกอร์	5
บทที่ 2 : การทดสอบแบบซินเทติกของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง	
2.1 บทนำ	7
2.2 วิธีการเคอเรนทอินเจคชัน	7
2.3 ช่วงเวลาก่อนที่กระแสจะเป็นศูนย์	9
2.4 ช่วงเวลาหลังจากเกิดการอาร์ก	10
2.5 รีโคเวอรี โวลเตจ	10
2.6 ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการอินเจค กระแสจากวงจรโวลเตจ	10
บทที่ 3 : ทรานเซียนท์ รีโคเวอรี โวลเตจ	
3.1 ระบบรีโคเวอรี โวลเตจ	12
3.2 มาตรฐานทั่วไป	13
3.3 ข้อแตกต่างระหว่างมาตรฐานแอนซีและไออีซี	19
บทที่ 4 : การศึกษาเชิงวิเคราะห์ของวงจรทดสอบหลัก	
4.1 วงจรความถี่เดียวแบบเวล-คัปต์	23
4.2 วงจรความถี่เดียวตามมาตรฐานแอนซี	25
4.3 วงจรหลายความถี่	27
บทที่ 5 : ผลการทดลองออกแบบวงจรทดสอบ	
5.1 ข้อมูลที่จำเป็นในการออกแบบวงจรทดสอบ	33
5.2 หลักการออกแบบให้ได้ส่วนประกอบของวงจรที่ดีที่สุด	34
5.3 ตัวอย่างอุปกรณ์จริงที่ใช้ในห้องทดลองลีส-เลอนาเดอร์	45
5.4 การหาค่าตัวแปรต่างๆ ในโปรแกรม	46
5.5 ผลการทดลอง	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ ๕ : บทสรุป-วิจารณ์	๕8
ภาคผนวก ก	ก-1
ภาคผนวก ข	ข-1
ภาคผนวก ค	ค-1
กิตติกรรมประกาศ	
หนังสืออ้างอิง	



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะการสมมาตรที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจร ณ ค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่จุดสูงสุด	2
1.2 ลักษณะการไม่สมมาตรที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจร ณ ค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่จุดต่ำสุด	2
1.3 แสดงองค์ประกอบกระแสตรง	3
1.4 การเปรียบเทียบอันแลตชิงไทม์และเวลาที่ เซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดวงจร	6
2.1 วงจรทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์ด้วยวิธีเคอเรนทอนเจคชัน	7
2.2 แสดงช่วงเวลาในการป้อนกระแส	9
3.1 ทราเนเซียนท์ รีโคเวอรี โวลเตจ เมื่อเกิดการผิดปกติใน ระบบไฟฟ้าสามเฟสลงที่ต่อกราวนด์	12
3.2 รูปคลื่นทดสอบตามมาตรฐานแอนซี ที่พิกัดต่ำกว่า 72.5 KV	13
3.3 รูปคลื่นทดสอบตามมาตรฐานแอนซี ที่พิกัดสูงกว่า 72.5 KV	14
3.4 ลักษณะการทดสอบแบบ 2 พารามิเตอร์ ตามมาตรฐานไออีซี	16
3.5 ลักษณะการทดสอบแบบ 4 พารามิเตอร์ ตามมาตรฐานไออีซี	17
4.1 วงจรทดสอบหลักในการทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบซินเทติก	22
4.2 วงจรทดสอบแบบเวล-ดูปต์	23
4.3 วงจรทดสอบตามมาตรฐานแอนซี	25
4.4 วงจรทดสอบแบบหลายความถี่	27
4.5 วงจรทดสอบแบบหลายความถี่ เมื่อความถี่ต่ำ	28
4.6 วงจรทดสอบแบบหลายความถี่ เมื่อความถี่สูง	29
5.1 main flowchart ที่ใช้ในการออกแบบ	35
5.2 flowchart ของวงจรแบบเวล-ดูปต์	36
5.3 flowchart ของวงจรแบบแอนซี	39
5.4 flowchart ของวงจรแบบหลายความถี่	42
5.5 แสดงค่าคาปาซิเตอร์	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
ภาคผนวก ก		
1	วงจรถดสอบการลัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบไดเร็ค	ก-1
ภาคผนวก ข		
1	วงจรถดสอบแบบซินเทติกและการต่อกับเครื่องตรวจจับสัญญาณ	ข-2
2	ระบบการทำงานของเครื่องบันทึกชั่วขณะกับ เครื่องมินิคอมพิวเตอร์	ข-2
3	แผนภาพส่วนประกอบของเครื่องบันทึกชั่วขณะ	ข-3
ภาคผนวก ค		
1	แหล่งกำเนิดของวงจรถดสอบทดสอบแบบซินเทติก	ค-2

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตารางทรานเซียนท์ รีโคเวอรี โวลเตจสำหรับ เซอร์กิตเบรกเกอร์พิกัดสูงกว่า 72.5 KV ตามมาตรฐานแอนซี	15
3.2 ตารางทรานเซียนท์ รีโคเวอรี โวลเตจสำหรับ เซอร์กิตเบรกเกอร์พิกัดต่ำกว่าหรือเท่ากับ 72.5 KV ตามมาตรฐานไออีซี แบบ 2 พารามิเตอร์	17
3.3 ตารางทรานเซียนท์ รีโคเวอรี โวลเตจสำหรับ เซอร์กิตเบรกเกอร์พิกัดสูงกว่า 72.5 KV ตามมาตรฐานไออีซี แบบ 4 พารามิเตอร์	18
5.1 ตารางแสดงค่ารีแอกแตนซ์ที่ 1	45
5.2 ตารางแสดงค่ารีแอกแตนซ์ที่ 2	46
5.3 ตารางแสดงค่าความต้านทาน	46

นิยามและคำศัพท์

Actual current หมายถึง กระแสที่ไหลผ่านเซอร์กิตเบรคเกอร์ทดสอบจริงๆ

Applied voltage หมายถึง แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าที่ขั้วของเซอร์กิตเบรคเกอร์ โดยตรงก่อนเกิดการลัดวงจร

Arcing time หมายถึง ช่วงระยะเวลาตั้งแต่เกิดอาร์กจนถึงอาร์กถูกดับหมดสิ้น หรือระยะเวลาที่หน้าสัมผัสแยกออกจากกันเมื่อเกิดอาร์กจนถึงเวลาที่กระแสหลักของ วงจรถูกอินเตอรัป

Automatic opening (tripping) หมายถึง การเปิดวงจรของอุปกรณ์ตัดต่อ วงจรภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยปราศจากการกระตุ้นให้ทำงานโดยผู้ควบคุม

Auxiliary circuit breaker หมายถึง เซอร์กิตเบรคเกอร์ในวงจรทดสอบแบบ ชินเทติกใช้ในการต่อเซอร์กิตเบรคเกอร์ทดสอบเข้ากับวงจรและส่วนต่างๆของวงจร ตามต้องการ

Circuit breaker (เซอร์กิตเบรคเกอร์: ตัวตัดตอนอัตโนมัติ) หมายถึง อุปกรณ์ ที่ออกแบบให้เปิดปิดวงจรแบบไม่อัตโนมัติ และให้เปิดวงจรแบบอัตโนมัติในกรณีที่ กระแสเกินค่าที่กำหนด โดยไม่ทำให้เครื่องเสียหาย

Current circuit หมายถึง ส่วนหนึ่งของวงจรทดสอบแบบชินเทติกที่ทำหน้าที่จ่าย กระแสหลักให้กับเซอร์กิตเบรคเกอร์ทดสอบ

Current-injection method หมายถึง วิธีการทดสอบแบบชินเทติกที่โวลเตจ เซอร์กิตของวงจรทดสอบแบบอินเจคกระแส (current-injection method) จะถูกต่อเพื่อจ่ายกระแสให้กับเซอร์กิตเบรคเกอร์ทดสอบก่อนที่กระแสหลักจะมีค่าเป็น ศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Closing time หมายถึง ช่วงระยะเวลาตั้งแต่เซอร์กิตเบรกเกอร์ถูกทำให้เปลี่ยนจากสภาพเปิดหน้าสัมผัสเป็นสภาพปิดหน้าสัมผัส จนกระทั่งหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์สัมผัสกันสนิททุกโพล

Direct test หมายถึง การทดสอบที่ป้อนแรงดันไฟฟ้า กระแส และทรานเซียนท์รีโคเวอรี โวลเตจ เข้าโดยตรงให้กับเซอร์กิตเบรกเกอร์จากวงจรที่มีแหล่งจ่ายพลังงานเพียงแหล่งเดียวซึ่งอาจจะเป็นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (power system) หรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดพิเศษแบบเดียวกับที่ใช้ในสถานทดสอบการลัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง

Distortion current หมายถึง ค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณ โดยเป็นผลต่างระหว่างค่ากระแสคาดหวัง (prospective current) และกระแสจริงที่ไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์

First-pole-to-clear factor หมายถึง อัตราส่วนของเพาเวอร์ฟรีเคเวนซี 1 โวลเตจของเฟสใดเฟสหนึ่งในขณะที่สองเฟสที่เหลือเกิดลัดวงจร ณ ตำแหน่งของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ซึ่งจะลงกราวนด์หรือไม่ก็ได้) ต่อโวลเตจของเฟสใดเฟสหนึ่งเทียบกับนิวทรอล ณ ตำแหน่งเดียวกัน เมื่อไม่เกิดการลัดวงจร

Impulse withstand voltage หมายถึง ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของอิมพัลส์โวลเตจ ที่จะสามารถป้อนให้กับอุปกรณ์โดยไม่เกิดแฟลชโอเวอร์ (Flasfover) หรือทะลุทางไฟฟ้า (Puncture) ภายใต้งैอนไซท์ที่กำหนด

Injected-current หมายถึง กระแสที่ป้อนจากโวลเตจเซอร์กิตของวงจรทดสอบแบบอินเจคกระแส เมื่อทำการต่อเข้ากับเซอร์กิตเบรกเกอร์ภายใต้การทดสอบ

Interrupting (breaking) capacity หมายถึง ค่ากระแสหรือโวลต์แอมแปร์สูงสุดในขณะที่เกิดอาร์กที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยที่เซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถทำงานตัดวงจรได้โดยไม่เกิด การชำรุดเสียหาย

Interrupting (breaking) current หมายถึง กระแสในแต่ละขั้วของเซอร์กิตเบรคเกอร์ในขณะที่เริ่มเกิดอาร์กในขณะตัดวงจร

Interrupting (breaking) time หมายถึง ช่วงระยะเวลาตั้งแต่ที่อุปกรณ์ตัดต่อวงจรได้รับสัญญาณกระตุ้นให้เริ่มทำงานตัดวงจร จนกระทั่งอาร์กที่เกิดขึ้นครั้งแรก ถูกดับจนหมดสิ้น หรือเป็นผลรวมของ opening time และ arcing time

Main contact หมายถึง หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรคเกอร์ที่นำกระแสทั้งหมดของหรือส่วนใหญ่ของวงจร

Make time หมายถึง ช่วงระยะเวลาที่เซอร์กิตเบรคเกอร์ถูกทำให้เปลี่ยนสภาพเปิดหน้าสัมผัสเป็นสภาพปิดหน้าสัมผัส จนกระทั่งกระแสเริ่มไหลในวงจรหลัก

Making current หมายถึง ค่าสูงสุดในไซเคิลแรกของกระแสที่ไหลผ่านแต่ละโพลของเซอร์กิตเบรคเกอร์ทันทีที่เปลี่ยนสภาพจากเปิดหน้าสัมผัส เป็นปิดหน้าสัมผัส

Opening time หมายถึง ช่วงระยะเวลาตั้งแต่ส่วนควบคุมอุปกรณ์ชุดเปิดวงจร (trip elements) เริ่มทำงานจนกระทั่งหน้าสัมผัสที่เกิดอาร์กเปิดออกซึ่งเป็นขณะเดียวกันกับเวลาที่เริ่มเกิดอาร์กโวลเตจ

Pole หมายถึง ส่วนของอุปกรณ์ตัดต่อที่นับเฉพาะส่วนที่ตัดต่อวงจรของแต่ละชุดหน้าสัมผัส

Post-arc current หมายถึง กระแสที่ไหลผ่านอาร์กแกปของเซอร์กิตเบรคเกอร์ทดสอบทันทีทันใดหลังจากที่กระแสลัดวงจรและอาร์กโวลเตจมีค่าลดลงเป็นศูนย์ หรือทรานเซียนท์ รีโคเวอรี โวลเตจเริ่มเกิดขึ้นระหว่างโพลของเซอร์กิตเบรคเกอร์

power frequency recovery voltage หมายถึง แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างปลายทั้งสองของหน้าสัมผัสในแต่ละขั้วของเซอร์กิตเบรคเกอร์ เมื่อทำการเปิดหน้าสัมผัสไปแล้วเป็นระยะเวลาหนึ่งจนเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady state)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Prospective current หมายถึง กระแสที่ไหลในวงจรเมื่อแต่ละโพลของ เซอร์กิตเบรกเกอร์ทดสอบและเซอร์กิตเบรกเกอร์ช่วย ถูกแทนที่ด้วยตัวนำไฟฟ้าที่ไม่มีอิมพีแดนซ์

Recovery voltage หมายถึง แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างปลายทั้งสองของหน้า สัมผัสในแต่ละขั้วของเซอร์กิตเบรกเกอร์หลังจากทำการเปิดหน้าสัมผัสไปแล้ว

Reignition หมายถึง การเกิดขึ้นใหม่ของกระแสระหว่างหน้าสัมผัสของอุปกรณ์ ตัดต่อในขณะเปิดวงจร หลังจากที่ผ่านมาจุดกระแสศูนย์ (zero current) ในช่วง น้อยกว่า $1/4$ ไซเคิลที่ความถี่ปกติ

Short circuit หมายถึง การลัดวงจรทางไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการต่อของวงจรใน สภาวะผิดปกติ ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ในวงจรต่ำกว่าปกติ อันอาจจะเกิดจากอุบัติเหตุหรือ ความตั้งใจ ในระหว่างจุดสองจุดที่มีค่าความต่างศักย์อยู่

Synthetic test หมายถึง การทดสอบที่แยกแหล่งจ่ายเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะ ทำหน้าที่จ่ายกระแส เรียกว่า วงจรกระแส (current circuit) และอีกส่วน หนึ่งทำหน้าที่ป้อนรีโวลเตจ (voltage circuit)

Transient recovery voltage (abbreviation: TRV) หมายถึง แรงดัน ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างปลายทั้งสองของหน้าสัมผัสในแต่ละขั้วของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ในทันทีทันใดที่เปิดหน้าสัมผัส สำหรับ transient recovery voltage ของ วงจรสามเฟสจะใช้ค่าโวลเตจของโพลแรกที่ทำกรเปิดวงจร เพราะค่าโวลเตจนี้ ส่วนมากจะมีค่าสูงกว่าโวลเตจที่เกิดขึ้นในสองโพลที่เหลือ

บทที่ 1 บทนำทั่วไป

1.1 บทนำ

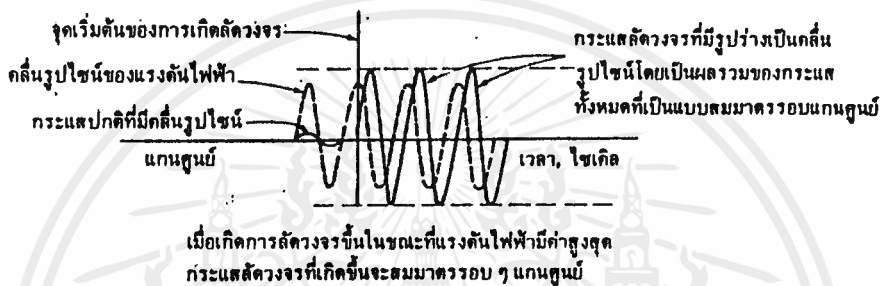
เซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่อยู่ในวงจรไฟฟ้าทำหน้าที่ตัดวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในวงจร โดยที่การทำงานต้องปราศจากความผิดพลาด ดังนั้น การทดสอบคุณลักษณะและความสามารถของเซอร์กิตเบรกเกอร์ จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากจะส่งผลไปถึงความถูกต้องในการทำงานและความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สินด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งได้มีการพัฒนาระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าวัดหน้าไปอย่างรวดเร็ว แนวโน้มในการใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ต้องการเบรกกึ่งคาปาซิตีสูงขึ้นเรื่อยๆ ปัจจุบันเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้มีพิกัดสูงถึง 420-800 KV และพิกัดกระแสลัดวงจร 63 KA การทดสอบแบบไดเร็คโดยใช้ระบบและวงจรที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายกระแสลัดวงจร จึงไม่สามารถนำมาใช้ได้อีกต่อไป เนื่องจากต้องใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่มาก และมีต้นทุนค่าใช้จ่ายในการทดสอบสูง จึงได้มีการนำการทดสอบแบบซินเทติกมาใช้ เป็นการจำลองสร้างวงจรทดสอบแบบต่างๆ เพื่อให้ได้สภาวะในการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบแบบไดเร็ค โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสและแหล่งจ่ายโวลเตจเป็น 2 ส่วนแยกจากกัน ทำให้การขยายพิกัดการทดสอบได้ง่ายขึ้น

ในการทดสอบไม่เพียงแต่ต้องการทราบลักษณะการตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ยังรวมถึงการทนต่อความเค้นที่เกิดขึ้นที่ตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์ขณะทำการอินเตอร์รับด้วย ในปริศยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการศึกษาและการนำคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรทดสอบแบบซินเทติก ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยใช้วิธีการที่เรียกว่า "วิธีการทำซ้ำ" (iterative process) และจะพิจารณาการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในเทอมของทรานเซียนท์ รีโคเวอรี โวลเตจ ซึ่งจะ เป็นไปตามมาตรฐานของ ANSI และ IEC หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในช่วงโอมเมทารีตีวี จะอยู่ในช่วง 1/2 ไซเคิลแรกนับจากเกิดการผิดปกติซึ่งจะเป็นช่วงที่มีกระแสลัดวงจรสูงสุด

1.2 กระแสลัดวงจร

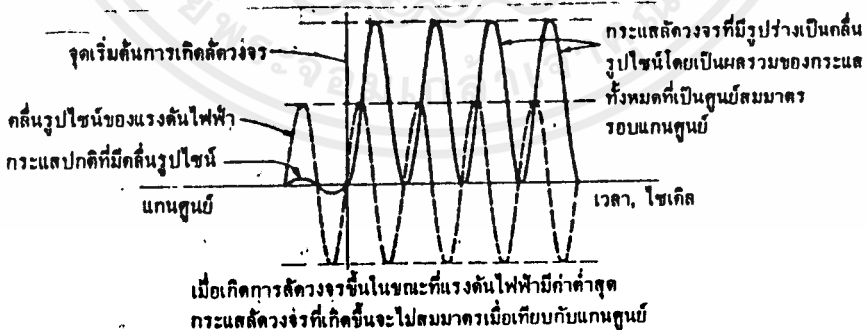
ในการพิจารณากระแสลัดวงจร จะหมายถึงกระแสในค่าของ RMS หรือค่าจริงของสัญญาณรูปไซน์ โดยสัญญาณคลื่นของกระแสจะแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ

ก) กระแสสมมาตร หมายถึง กระแสสลับที่สมดุลรอบแกนศูนย์ กระแสลัดวงจรชนิดสมมาตรเกิดจากการลัดวงจรในขณะที่แรงดันไฟฟ้าของวงจรมีค่าสูงสุด กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจะเริ่มที่ค่าเกือบเป็นศูนย์ และจะมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะของรูปไซน์ทำมุม 90 องศา(ต่างเฟส) กับแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แสดงลักษณะของการสมมาตร ที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจร ณ ค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่จุดสูงสุด

ข) กระแสไม่สมมาตร หมายถึง กระแสสลับที่ไม่สมดุลรอบแกนศูนย์ เกิดจากการลัดวงจรในขณะที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าศูนย์ กระแสลัดวงจรจะเริ่มที่ค่าศูนย์และล่าหลัง (lag) แรงดันไฟฟ้าเป็นมุม 90 องศา ดังรูปที่ 1.2



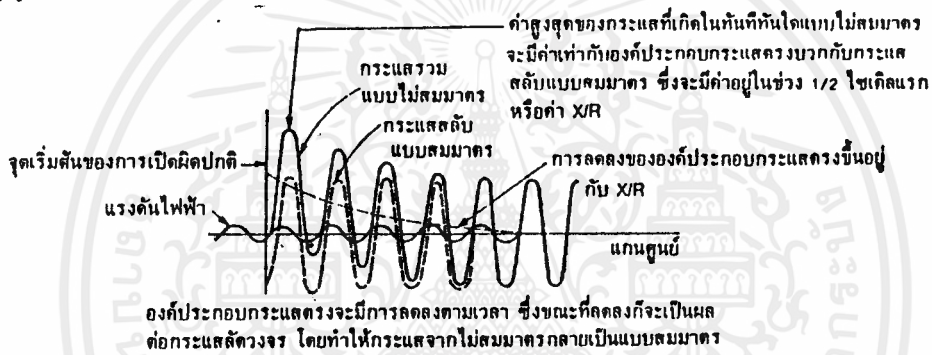
รูปที่ 1.2 แสดงลักษณะของการไม่สมมาตร ที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจร ณ ค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าต่ำสุด

ในวงจรใช้งานจริงๆแล้ว การเกิดลัดวงจรอาจจะเกิดขณะเวลาใดก็ตาม จุดที่เกิดลัดวงจรนี้อาจอยู่ในช่วงระหว่างแรงดันต่ำสุดและแรงดันสูงสุด กระแสลัดวงจรเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกิดขึ้นก็คือ กระแสที่ไม่สมมาตรที่มีกระแสตรงเข้ามาเป็นองค์ประกอบ กล่าวคือ เป็นกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นโดยเริ่มต้น จากไม่สมมาตรในไซเคิลแรกๆ หลังจากนั้น 2-3 ไซเคิลต่อมา ก็จะกลายเป็นแบบสมมาตร เนื่องจากค่าองค์ประกอบกระแสตรง ได้ลดลงไป ดังรูปที่ 1.3 ค่าองค์ประกอบกระแสตรงนี้จะถือว่าเป็นตัวที่ทำให้เกิดการสูญเสีย I^2R ภายในวงจรก็ได้ แฟกเตอร์ที่มีผลต่อการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรงอย่างมากคือ อัตราส่วน X/R ซึ่งเป็นอัตราส่วนของรีแอกแตนซ์ต่อความต้านทานของวงจรที่อยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดกับจุดที่เกิดการลัดวงจร

ถ้า $R = 0 \rightarrow X/R = \infty$ และองค์ประกอบกระแสตรงจะไม่ลดลง

ถ้า $X = 0 \rightarrow X/R = 0$ และองค์ประกอบกระแสตรงจะลดลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 1.3 แสดงองค์ประกอบกระแสตรง

สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์จะพิจารณาเฉพาะค่าองค์ประกอบกระแสตรงที่มีค่ามากที่สุดเท่านั้นที่นำไปใช้ในการพิจารณาถึงโมเมนตารีตีวดีของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เพราะจะได้แน่ใจว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์นั้นสามารถทนต่อกระแสลัดวงจรสูงสุดได้

ค่าพิกัดต่างๆของเพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ (>600 KV) เป็นสิ่งที่สลับซับซ้อนมาก ในช่วงเวลาไม่กี่ไซเคิลที่เซอร์กิตเบรกเกอร์จะเปิดวงจรออกหลังจากเกิดการลัดวงจรขึ้น ซึ่งช่วงเวลานี้เป็นผลของเวลาต่างๆดังนี้ คือ เวลาที่ใช้ไปของรีเลย์ป้องกัน (protective relay) ในการปิดหน้าสัมผัส เวลาสำหรับขดลวดเปิดวงจร (trip coil) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในการสั่งและควบคุมระบบกลไก เวลาในการเปิดหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ และเวลาที่ใช้ในการอาร์กในอาร์กชัมเบอร์ (arc chamber) ความเค้นทางกลสูงสุดจะเกิดขึ้นในช่วง 1/2 ไซเคิล แรกหลังจากเกิดการลัดวงจรขึ้น เนื่องมาจากองค์ประกอบกระแสตรง กระแสลัดวงจรที่จ่ายออกมาจากมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มเกิดการลัดวงจรจนถึงเวลาที่เซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดวงจร กระแสจะลดลงอันเนื่องมาจากการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรง ซึ่งในช่วงนี้ กระแสที่ไหลผ่านหน้าสัมผัสขณะที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานจะอยู่ในช่วง 4,5 หรือ 8 ไซเคิลหลังจากเกิดการผิดปกติ (โดยทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมจะนิยมใช้ เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบ 8 ไซเคิลเบรกเกอร์) และจะมีค่าน้อยกว่าค่าสูงสุดที่เกิด ในช่วง 1/2 ไซเคิลแรก เพราะขนาดของกระแสลัดวงจรจะลดลงตามเวลา ดังนั้น จึงมีลักษณะของกระแสลัดวงจรสองอย่าง ที่จะต้องพิจารณาสำหรับเพาเวอร์ เซอร์กิต เบรกเกอร์ ดังนี้คือ

ก) โมเมนทารีเรตติ้ง (momentary rating) จะเป็นค่าที่แสดงถึงพิกัด ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่สามารถทนทานต่อแรงดันทางกล และความเค้นที่เกิดขึ้น ตลอดจนสามารถเปิดวงจรได้เมื่อมีกระแสลัดวงจรเกิดขึ้นในช่วง 1/2 ไซเคิลแรก นับจากเกิดการผิดปกติโดยตัวเองไม่มีความเสียหาย ซึ่งแสดงว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์ มีการทำงานในช่วงขององค์ประกอบกระแสตรงด้วย ค่าโมเมนทารีวัตต์สูงสุดของ เพาเวอร์ เซอร์กิตเบรกเกอร์จะสามารถหาได้จากกระแสที่เกิดขึ้นในช่วง 1/2 ไซเคิลแรกนั่นเอง เนื่องจากกระแสในช่วงนี้จะเกิดจากทุกๆ แหล่งจ่ายกระแสลัด วงจร เช่น เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซินโครนสมอเตอร์ มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ และจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ต่อกับระบบ

ข) อินเตอร์รัปติงเรตติ้ง (interrupting rating) เป็นค่าที่แสดงถึงพิกัด ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ในการที่จะขัดจังหวะการไหลของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น หลังจากเกิดลัดวงจรขึ้นแล้ว 4,5 หรือ 8 ไซเคิลซึ่งก็จะสัมพันธ์กับชนิดของเซอร์กิต เบรกเกอร์ หรืออีกนัยหนึ่ง คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานช้า ค่าองค์ประกอบ กระแสตรงจะหมดลงหรือหายไป คงเหลือเพียงค่ากระแสแบบสมมาตรเท่านั้นในขณะที่ เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงาน ปกติการทำงาน ของเซอร์กิตเบรกเกอร์จะอยู่ในกรณีนี้ มากกว่า แต่ในระบบไฟฟ้าที่ใหญ่มากๆ เช่น ขนาด 500 MVA หรือสูงกว่านี้ขึ้นไป ค่า X/R มักจะมีค่าสูง การทำให้องค์ประกอบกระแสตรงลดหายไปจะต้องใช้เวลา นานมาก จึงเกิดกระแสที่ไม่สมมาตรขึ้นได้เช่นกัน

1.3 ชนิดของการเกิดผิดปกติ

การเกิดผิดปกติหรือการเกิดลัดวงจรเป็นเหตุการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระบบ ไฟฟ้า และจะจำแนกออกได้หลายชนิด อุปกรณ์ป้องกันจึงจำเป็นต้องมีความสามารถ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเปิดวงจรและทนต่อแรงดันและความร้อนที่เกิดขึ้นได้ในกรณีที่เกิดการลัดวงจร การเกิดผิดปกติมีอยู่ด้วยกันหลายลักษณะ แต่พื้นฐานการคำนวณทั่วไปจะคำนึงถึงการผิดปกติแบบทรีเฟสฟอลต์มากกว่าการผิดปกติแบบอื่นๆ

ก) ทรีเฟสฟอลต์ (three-phase fault) สภาวะเช่นนี้จะเกิดขึ้นไม่บ่อยนัก แต่ผลของการเกิดการผิดปกติแบบนี้จะให้ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด ดังนั้น จึงใช้การคำนวณการผิดปกตินี้ในระบบไฟฟ้ากำลังทั่วไปที่ใช้กับงานพาณิชย์ (commercial power system)

ข) ไลน์ทูล์ไลน์ฟอลต์ (line to line fault) โดยปกติในระบบไฟ 3 เฟส กระแสที่เกิดจากการผิดปกติแบบนี้จะประมาณ 87% ของกระแสที่เกิดจากในกรณี ก

ค) ไลน์ทูล์กราวนด์ฟอลต์ (line to ground fault) กระแสที่เกิดจากการผิดปกติแบบนี้เกือบมีค่าเท่ากับในกรณี ก ทั้งนี้ต้องเป็นแบบระบบโซลิดกราวนด์ (solidly grounded system) เช่น ในกรณีที่เกิดไลน์ทูล์กราวนด์ฟอลต์ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง Δ -Y แต่พอจะกล่าวได้ว่ากระแสที่เกิดขึ้นในกรณีไลน์ทูล์กราวนด์ฟอลต์จะมีค่าน้อยกว่ากระแสที่เกิดขึ้นในกรณีทรีเฟสฟอลต์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ป้อนกลับของวงจรของระบบกราวนด์ที่ปกติมีค่าสูง (เช่น ทางเดินสาย ท่อ สิ่งห่อหุ้มที่ใช้เป็นอุปกรณ์ในการร้อยสาย ตัวนำที่เป็นระบบกราวนด์ เป็นต้น)

ง) อาร์กชิงฟอลต์ (arcing fault) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยการอาร์กที่เกิดขึ้นนี้กระแสที่ทำให้เกิดการอาร์กอาจจะน้อยกว่ากระแสที่เกิดจากกรณี ก ถึง ค ก็ได้ระดับกระแสน้อยๆนี้จะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของช่วงการอาร์กนั้น

1.4 คุณสมบัติประจำตัวของเซอร์กิตเบรกเกอร์

1.3.1 ชัดคอยล์เปิดวงจร หมายถึง พิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ 150 A จะมีชุดเปิดวงจรเมื่อกระแสผ่าน 150 A (กรณีของโมลด์สเซอร์กิตเบรกเกอร์จะไม่สามารถปรับค่าของชุดคอยล์เปิดวงจรได้)

1.3.2 long time pick up คือ การหน่วงเวลาแบบเวลานาน นั้นหมายถึงค่ากระแสที่ทำให้ชุดคอยล์เปิดวงจรทำงาน เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีชุดคอยล์เปิดวงจร 200 A และสามารถปรับได้ถึง 120% ดังนั้นค่าการหน่วงเวลาแบบเวลานานก็จะมีค่า 240 A เป็นการแสดงคุณสมบัติในการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จะทำงานภายใต้กรณีโหลดเกิน

1.3.3 ขนาดเฟรมของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เป็นการบ่งบอกถึงขนาดสูงสุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

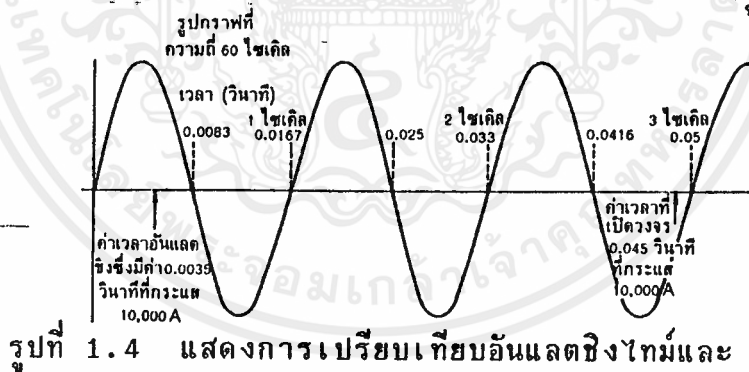
ของชุดเปิดวงจร เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีขนาดเฟรม , 100 A จะสามารถทำการเปิดวงจรได้ตั้งแต่พิกัดกระแส 15 A ถึง 100 A

1.3.4 instantaneous pick up current เป็นกระแสที่จะทำให้ เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงาน หมายถึง ค่าการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ซึ่งจะสัมพันธ์กับกระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านชุดคอยล์สนามแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในชุดคอยล์ก็จะทำให้เปิดวงจรรอกได้ และค่านี้ในเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ๆไปอาจจะมีการปรับค่าได้

1.3.5 instantaneous opening เป็นค่าเวลาในการที่เซอร์กิตเบรกเกอร์จะเปิดวงจรโดยไม่มีการหน่วงเวลาเลย

1.3.6 short time pick up หมายถึง ค่าของกระแสที่จุดเริ่มต้นของการหน่วงเวลาอันสั้น

1.3.7 unlatching time หมายถึง เมื่อมีกระแสผิดปกติเกิดขึ้น เซอร์กิตเบรกเกอร์ต้องพร้อมที่จะทำงานจนถึงเวลาสิ้นสุดของอันแลตชิ่งไทม์ไป เซอร์กิตเบรกเกอร์ก็จะเริ่มทำงาน และเวลาต่อมาจะไม่สามารถที่จะหยุดการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้ แต่ถ้าเวลาในช่วงอันแลตชิ่งไทม์กระแสที่ผิดปกติกลับคืนสู่สภาวะปกติแล้ว เซอร์กิตเบรกเกอร์ก็จะไม่มีการทำงาน ดังแสดงในรูป 1.4



รูปที่ 1.4 แสดงการเปรียบเทียบอันแลตชิ่งไทม์และเวลาที่เซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดวงจร

1.3.8 interrupting capacity เป็นพิกัดการทนต่อกระแสลัดวงจรของ เซอร์กิตเบรกเกอร์ หมายถึง ค่ากระแสสูงสุดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในการที่จะเปิดวงจรมันเอง ซึ่งในขณะที่กระแสไหลผ่านหน้าสัมผัสของการเปิดวงจรมันจะทำให้เกิดการอาร์กขึ้น การอาร์กที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องอาจมีอันตรายต่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ ดังนั้น เซอร์กิตเบรกเกอร์จึงจะต้องมีขนาดการทนต่อกระแสลัดวงจรตั้งแต่ 5 kA ถึง 200 kA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การทดสอบแบบซินเทติกของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง

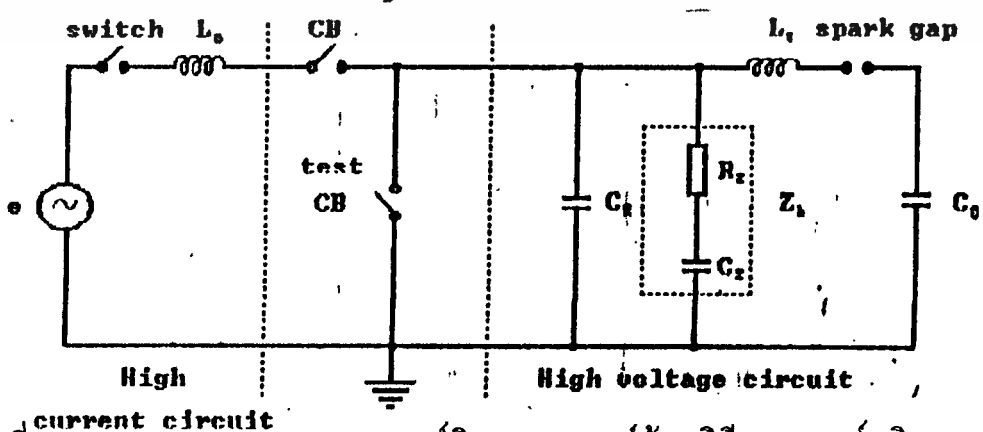
2.1 บทนำ

ปัจจุบันการทดสอบการลัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูงมักจะมีแนวโน้มพิถีพิถันการทดสอบมากกว่าพิถีพิถันของสถานที่ทดสอบ ดังนั้น วิธีการทดสอบแบบซินเทติกจึงถูกนำมาใช้แทนการทดสอบแบบไดเร็ค จากการที่เราพบว่าขณะที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำการอินเตอร์รับเมื่อเกิดการลัดวงจร ช่วงเวลาในการเกิดอาร์กจะเป็นช่วงที่มีกระแสสูงและโวลเตจต่ำ เมื่อผ่านจุดที่กระแสเป็นศูนย์ไปแล้วจะไม่มีกระแสแต่จะมีโวลเตจสูงมาก จึงเกิดแนวคิดที่ว่าเราสามารถใช้อะไหล่จ่ายพลังงาน 2 ส่วนแยกออกจากกัน ส่วนแรกทำหน้าที่จ่ายกระแส (current source) และส่วนที่สองทำหน้าที่จ่ายโวลเตจ (voltage source) ให้กับเซอร์กิตเบรกเกอร์ทดสอบ แต่จะเกิดปัญหาในการที่จะเปลี่ยนสภาวะจากแหล่งจ่ายหนึ่งไปยังอีกแหล่งหนึ่งขณะที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์

ต่อมาได้พบว่าวิธีหนึ่งที่จะรวมแหล่งจ่ายทั้งสองไว้ด้วยกันและเปลี่ยนสภาวะได้ง่ายตามที่ต้องการ คือ วิธีการ "เคอเรนทอินเจคชัน" โดยที่วงจรกระแสจะทำการป้อนกระแสหลักให้กับเซอร์กิตเบรกเกอร์ทดสอบก่อนการอินเตอร์รับ และวงจรโวลเตจจะจ่ายรีโคเวอรี่ โวลเตจให้กับเซอร์กิตเบรกเกอร์ทดสอบหลังจากการอินเตอร์รับ

2.2 วิธีการเคอเรนทอินเจคชัน

วิธีการเคอเรนทอินเจคชัน จะมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 2.1



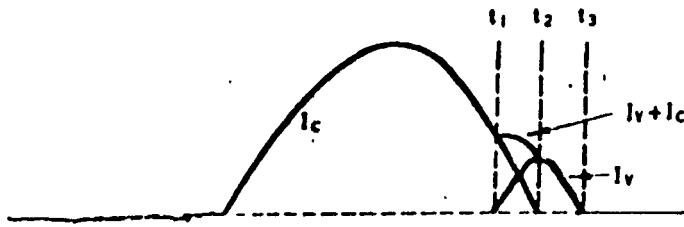
รูปที่ 2.1 แสดงวงจรทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์ด้วยวิธีเคอเรนทอินเจคชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจร Z_n : เสรีจิมพิแดนซ์ ควรมีค่าเป็น $(du/dt)(di/dt)$ เมื่อ (du/dt) เป็นอัตราการเพิ่มขึ้นของทรานเซียนท์ รีโคเวอรี โวลเตจ และ (di/dt) เป็นอัตราการลดลงของกระแสลัดวงจร และจากการที่ C_n ต่อขนานกับ Z_n ทำให้เกิดการหน่วงเวลา $t_d = Z_n C_n$

เป็นการนำเอาวงจรกระแสความถี่สูงและวงจรโวลเตจที่ใช้คาปาซิเตอร์มา ต่อเข้าด้วยกันเป็นวงจรทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์ และแยกออกจากกันโดยใช้ เซอร์กิตเบรกเกอร์ช่วยมาต่ออนุกรมกับเซอร์กิตเบรกเกอร์ทดสอบ การที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ 2 ตัว มาต่ออนุกรมกันนี้จะทำให้อาร์กโวลเตจและช่วงเวลาที่เกิดอาร์กสั้นลง ดังนั้น เพื่อให้ได้สภาวะการทดสอบเช่นเดียวกับที่ใช้ในการทดสอบแบบไคเร็ค จึงต้องทำให้ช่วงเวลาในการอาร์กของเซอร์กิตเบรกเกอร์ยืดออกไปอีก 1/2 หรือ 1 ไซเคิล

เริ่มแรกเซอร์กิตเบรกเกอร์ช่วย และเซอร์กิตเบรกเกอร์ทดสอบอยู่ในสภาวะต่อวงจร เมื่อสวิตช์ปิดลงจะทำให้กระแสหลัก I_c จากวงจรกระแสไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ทดสอบ (โดยการตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ทดสอบ และเซอร์กิตเบรกเกอร์ช่วยจะถูกปรับตั้งให้มีการจากกันของหน้าสัมผัสพร้อมกัน) ในช่วงเวลาก่อนที่กระแสหลักจะเป็นศูนย์เล็กน้อย (เวลา t_1 จากรูป 2.2) กระแสความถี่สูง I_v จากการทริกของสปาร์กแกป S ในวงจรโวลเตจจะถูกป้อนเข้าเซอร์กิตเบรกเกอร์ทดสอบ ทำให้กระแสรวมที่ไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ทดสอบเพิ่มขึ้น แต่กระแสที่ไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ช่วยยังคงเป็น I_c และจะทำการอินเตอร์รัป-ทันท์ที่กระแส I_c เป็นศูนย์ (ที่เวลา t_2) สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ทดสอบช่วงเวลาอาร์กจะถูกยืดออกไปจนถึง t_3 คือ เมื่อกระแส I_v เป็นศูนย์ จึงค่อยทำการอินเตอร์รัป และจะได้รับทรานเซียนท์ รีโคเวอรี โวลเตจ (TRV) จากคาปาซิเตอร์ ในวงจรโวลเตจ นอกจากนี้อาร์กโวลเตจที่เกิดขึ้นจะส่งผลร่วมกับค่าอิมพิแดนซ์ของวงจรทดสอบจะทำให้เกิด กระแสผิดเพี้ยน (distortion current) ขึ้นมารวมกับกระแสในการทดสอบ จะทำให้เกิดความร้อนมากและความเค้นสูงมากๆ ที่ตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์ ในบริเวณที่กระแสเป็นศูนย์จนทำให้ผลการทดสอบผิดพลาดไปได้



รูปที่ 2.2 แสดงช่วงเวลาในการป้อนกระแส

โดยทั่วไปค่า rms ของพิกัดกระแสลัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ในการทดสอบจะเป็น 6.3 KA, 8 KA, 10 KA, 12.5 KA, 16 KA, 20 KA, 25 KA, 31.5 KA, 40 KA, 50 KA, 63 KA, 80 KA และ 100 KA

สิ่งที่ควรคำนึงถึงในการทดสอบประการหนึ่ง ก็คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสขณะที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำการอินเตอร์รับ (di/dt) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับส่วนประกอบของวงจร คือ $di/dt = V_{charge}/L_v$

และเมื่อความถี่ในการป้อนกระแสเป็น $f_u = 1/(2\pi\sqrt{L_v * C_u})$

TRV ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ทดสอบจะถูกกำหนดโดยค่าพารามิเตอร์ C_u และ L_v ถ้าเซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่สามารถทำการอินเตอร์รับได้ที่จุดนี้ จึงมีเพียงกระแสจากวงจรโวลเตจเท่านั้นที่ไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ทดสอบเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายแก่เซอร์กิตเบรกเกอร์

ในการเพิ่มค่า TRV ให้เหมาะสมกับพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ อาจทำได้โดยการเพิ่มโวลเตจที่ใช้ชาร์จคาปาซิเตอร์ในวงจรโวลเตจ (charging voltage) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับแฟคเตอร์ที่ เรียกว่า "overcharging" ที่จะถูกกำหนดโดย L_v/L_u โดยทั่วไปมาตรฐาน ANSI จะใช้แฟคเตอร์นี้เป็น 1.5

2.3 ช่วงเวลาก่อนที่กระแสจะเป็นศูนย์ (Prezero current period)

ในการทดสอบโดยวิธีเคอเรนทอนเจคชั่น การเปลี่ยนสภาวะจากวงจรกระแสไปยังวงจรโวลเตจจะต้องเสร็จเรียบร้อยก่อนที่จะเกิดอาร์กโวลเตจที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกอร์ ซึ่งเราสามารถกำหนดได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดและความถี่ของกระแสที่ป้อนให้ เซอร์กิตเบรกเกอร์จากวงจรโวลเตจ โดยทั่วไปจะใช้ความถี่ในการป้อนอยู่ในช่วง 300-1000 Hz

2.4 ช่วงเวลาหลังจากเกิดการอาร์ก (Post-arc duration)

เพื่อความถูกต้องในการทดสอบ เมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์อินเตอร์รัปและทำการดับอาร์กไปแล้ว วงจรโวลเตจต้องป้อน TRV ที่เหมาะสมให้กับเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งจะเป็นไปได้เมื่อการสูญเสียที่เกิดขึ้นในวงจรโวลเตจมีค่าน้อยมาก คือ C_p มีค่าน้อยกว่า C_o มากๆ อาจเป็นอัตราส่วนประมาณ 1:10 การที่ C_p มีค่ามากเกินไปจะทำให้ความถี่ของ TRV มีค่าเปลี่ยนไป และ TRV มีค่าลดลง เนื่องจากจะเป็นตัวแบ่งโวลเตจที่ซาร์จที่ C_o ให้น้อยลง การแก้ไขอาจทำได้โดยเพิ่มค่า L_p หรือเพิ่มโวลเตจในการซาร์จของ C_o

2.5 รีโคโนเวอร์ โวลเตจ

คาปาซิเตอร์ที่ใช้ในวงจรโวลเตจจะเป็นตัวจ่าย รีโคโนเวอร์ โวลเตจ ให้กับเซอร์กิตเบรกเกอร์โดยตรง ซึ่งค่ารีโคโนเวอร์ โวลเตจ นี้จะลดลงตามเวลาแบบเอกซ์โปเนนเชียล โดยเราสามารถควบคุมได้จากความต้านทานค่าต่ำที่ต่อขนานอยู่กับเซอร์กิตเบรกเกอร์ ถ้าความต้านทานนี้มีค่ามากกว่า 1 K โอห์ม ค่าคงที่เวลา (time constant) จะมากกว่า 8 msec

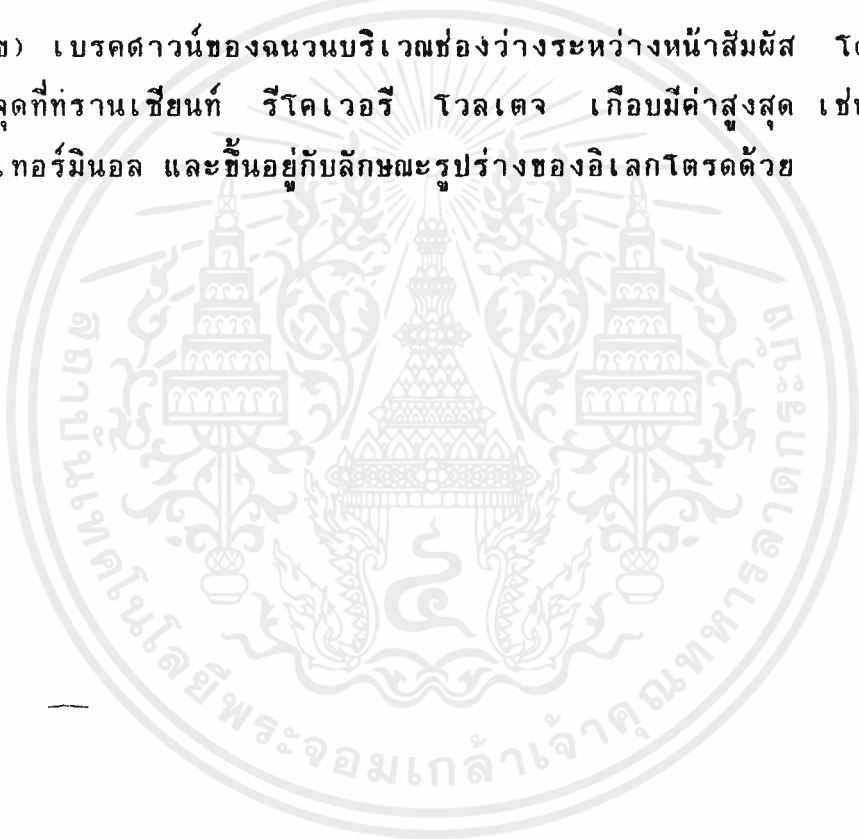
2.6 ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการอินเจคกระแสจากวงจรโวลเตจ

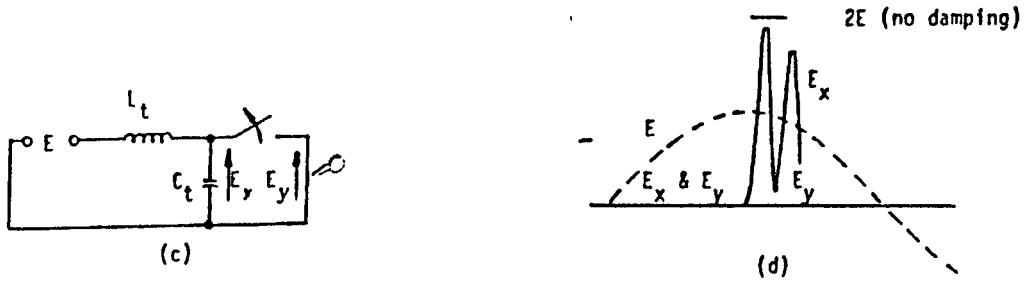
เพื่อให้การอินเจคกระแสจากวงจรโวลเตจเข้าสู่เซอร์กิตเบรกเกอร์ ขณะที่กระแสหลักมีค่าเป็นศูนย์เป็นไปอย่างรวดเร็ว ควรอินเจคโดยให้ค่าสูงสุดของกระแสพอดีกับที่กระแสหลักเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติสามารถยอมให้เกิดความผิดพลาดได้ประมาณ ± 20 องศาไฟฟ้า และก่อนที่กระแสที่ผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ทดสอบจะเป็นศูนย์ประมาณ 200-1000 μsec

ความล้มเหลวในการอินเตอร์รัปของเซอร์กิตเบรกเกอร์อาจมีสาเหตุมาจาก
หลายๆประการ และเป็นเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นได้บ่อย จึงมีการวิเคราะห์หาสาเหตุ
ของความล้มเหลวดังกล่าว จากการศึกษาลักษณะของทรานเซียนท์ รีโคเวอรี
โวลเตจ จนถึงจุดแรงดันที่เกิดการเบรคดาว์ของฉนวนในเซอร์กิตเบรกเกอร์ เรา
สามารถแบ่งประเภทของความล้มเหลวในการอินเตอร์รัปของเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้
ดังนี้

ก) การเบรคดาว์จากความร้อน เนื่องจากเกิดสภาวะไม่สมดุลของพลังงาน
คือ อัตราการระบายความร้อนน้อยกว่าอัตราการเกิดความร้อน

ข) เบรคดาว์ของฉนวนบริเวณช่องว่างระหว่างหน้าสัมผัส โดยมากมักเกิด
ขึ้น ณ จุดที่ทรานเซียนท์ รีโคเวอรี โวลเตจ เกือบมีค่าสูงสุด เช่น การเกิดลัด
วงจรที่เทอร์มินอล และขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของอิเล็กโทรดด้วย





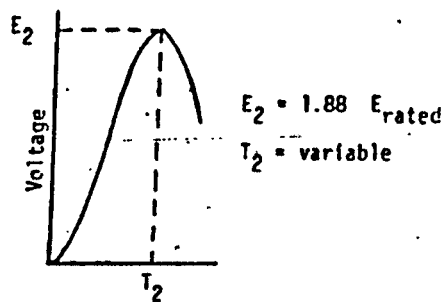
รูปที่ 3.1 ทรานเซียนท์รีโคเวอริโวลเตจเมื่อเกิดผิดปกติในระบบมีกราวด์สามเฟส
 c เน็ตเวอร์ค ทรานเซียนท์ d ระบบโวลเตจ

3.2 มาตรฐานทั่วไป

การศึกษาทรานเซียนท์รีโคเวอริโวลเตจของมาตรฐานแอนซีและมาตรฐานไออีซี ได้พัฒนามากว่า 20 ปี แม้ว่าจุดมุ่งหมายในการทดสอบจะเหมือนกัน แต่ก็มีวิธีการทดสอบที่แตกต่างกัน แต่ความแตกต่างของทั้งสองมาตรฐานไม่มีความสำคัญ เพราะมีการใช้งานในระบบที่แตกต่างกันคือ มาตรฐานแอนซีจะใช้ในระบบอเมริกา และมาตรฐานไออีซีจะใช้ในระบบยุโรป ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดสอบของทั้งสองมาตรฐาน

3.2.1 มาตรฐานแอนซี (ANSI) ได้อธิบายทรานเซียนท์รีโคเวอริโวลเตจ (TRV) ไว้ 2 แบบ คือ

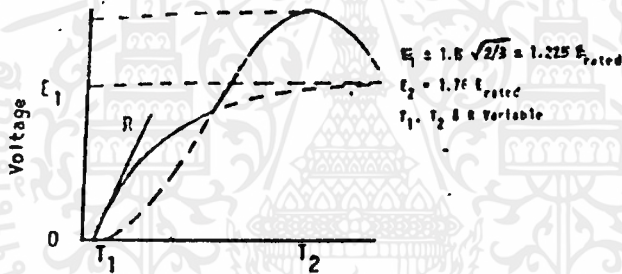
1. เซอร์กิตเบรคเกอร์พิกัด 72.5 kV และที่ต่ำกว่า จะใช้รูปคลื่น $(1-\cos)$ ตามรูปที่ 3.2 ซึ่งยอดโวลต์เตจ (E_2) เท่ากับ 1.88 เท่าของโวลต์เตจที่พิกัดสูงสุดของเซอร์กิตเบรคเกอร์ และเวลาจากเริ่มต้นจนถึงยอดคลื่น (T_2) จะแปรผันตามโวลเตจ



รูปที่ 3.2 รูปคลื่นทดสอบตามมาตรฐาน แอนซี ที่พิกัดต่ำกว่า 72.5 KV
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เซอร์กิตเบรคเกอร์พิกัดสูงกว่า 72.5 KV จะอธิบายทรานเซียนท์รีโคเวอริโวลเตจในรูปของรูปคลื่นเอ็กโปเนนเชียลโคซาย (exponential-cosine(ex-cos)) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ในรูปที่เอ็กโปเนนเชียล จะถูกกำหนดจากอัตราการเพิ่มเริ่มต้น (initial rate of rise(R)) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งจะแปรผันตามพิกัดกระแสและพิกัดโวลต์เตจของเซอร์กิตเบรคเกอร์ และค่ายอดสุดท้าย (final crest value)

E_1 ($1.5 \times \sqrt{2/3} \approx 1.225$) เท่ากับ 1.225 เท่าของโวลเตจที่พิกัดสูงสุดรูปคลื่น (1-cos) จะถูกกำหนดโดยค่ายอด E_2 เท่ากับ 1.76 เท่าของโวลเตจที่พิกัดสูงสุดและเวลาจากเริ่มต้นจนถึงยอดคลื่น (T_2) ซึ่งแปรผันตามพิกัดกระแสและพิกัดโวลเตจตามตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.3 รูปคลื่นทดสอบตามมาตรฐาน แอนซี ที่พิกัดสูงกว่า 72.5 KV

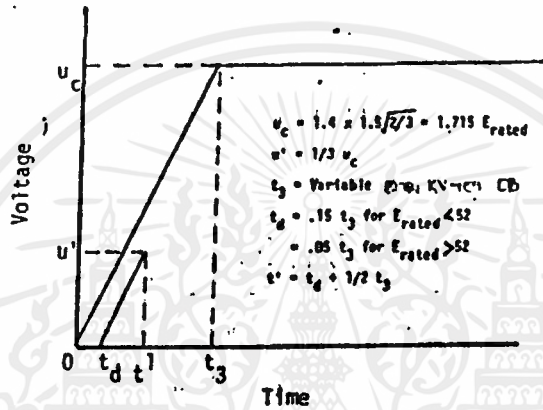
ตารางที่ 3.1 ค่าทรานเซียนท์รีโคเวอรีโวลเตจสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์
พิกัดสูงกว่า 72.5 KV ตามมาตรฐาน แอนซี

Rated Voltage U(KV)	Rated short circuit current (KA)	R (KV/ μ s)	E ₁ (KV) (1)	T ₂ (μ s)	E ₂ (KV) (2)	T ₁ (μ s)
121	20	1.7	148	276	213	2.9
	40	1.8	148	258	213	2.9
	63	1.8	148	252	213	2.9
145	20	1.7	178	331	255	3.2
	40	1.8	178	310	255	3.2
	63	1.8	178	302	255	3.2
	80	1.8	178	298	255	3.2
169	16	1.7	207	396	297	3.4
	31.5	1.8	207	369	297	3.4
	40	1.8	207	361	297	3.4
	63	1.8	207	357	297	3.4
242	31.5	1.8	296	529	426	4.1
	40	1.8	296	517	426	4.1
	63	1.8	296	503	426	4.1
362	40	1.8	443	773	637	4.9
550	40	1.6	674	1325	968	5.4
800	40	1.9	980	1531	1408	7.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 มาตรฐานไออีซี (IEC) ได้อธิบาย TRV ไว้ 2 แบบเช่นกัน คือ

1. เซอร์กิตเบรกเกอร์พิกัด 72.5 kV และที่ต่ำกว่าจะใช้วิธี 2 พารามิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ค่า u_c เท่ากับ 1.715 เท่าของโวลเตจที่พิกัดสูงสุดของเซอร์กิตเบรกเกอร์และค่า t_3 แปรผันตามโวลเตจที่พิกัด ค่า t_d , u' , t' จะเป็นผลมาจากผลของบัสและผลของคาปาซิแตนซ์เซอร์กิตเบรกเกอร์ เหมือนกับค่าหน่วยเวลา T_1 ในมาตรฐาน แอนซี

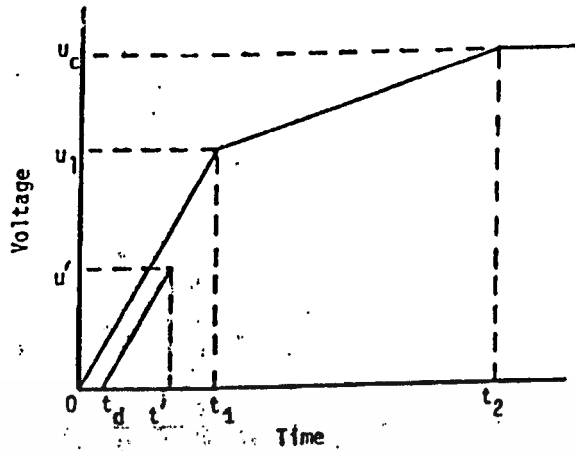


รูปที่ 3.4 ลักษณะการทดสอบแบบ 2 พารามิเตอร์ ตามมาตรฐาน ไออีซี

2. เซอร์กิตเบรกเกอร์พิกัดสูงกว่า 72.5 KV ทราเนเซียนท์ รีโวลเวอร์ โวลเตจจะใช้วิธี 4 พารามิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่พิกัด 100 ถึง 170 KV จะใช้ในระบบไม่มีกราวนด์ , ค่า u_1 จะเท่ากับ 1.225 เท่าของโวลเตจที่พิกัดสูงสุด สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์พิกัด 100 ถึง 170 KV ในระบบกราวนด์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ทั้งหมดที่พิกัดสูงกว่า 245 KV ค่า u_1 เท่ากับ 1.061 เท่า ของโวลเตจที่พิกัดสูงสุดและค่า u_c จะเท่ากับ 1.4 เท่าของ u_1 เสมอ และเท่ากับ 1.715 เท่าของโวลเตจที่พิกัดสูงสุดสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์พิกัด 100 ถึง 170 KV ในระบบไม่มีกราวนด์, 1.486 เท่าของโวลเตจที่พิกัดสูงสุด สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์พิกัด 100 ถึง 170 KV ในระบบกราวนด์ และเซอร์กิตเบรกเกอร์พิกัด 245 KV และที่สูงกว่า ตามตารางที่ 3.2 ค่า t_1 แปรผันตามค่าโวลเตจที่พิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์เหมือนค่า T_2 ของมาตรฐาน แอนซี ค่า t_2 จะมีค่าเป็นสามเท่าของค่า t_1 เสมอ และค่า t_d , u' , t' จะเป็นผลมาจากผลของบัสและผลของคาปาซิแตนซ์เซอร์กิตเบรกเกอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ลักษณะการทดสอบแบบ 4 พารามิเตอร์ ตามมาตรฐาน ไออีซี

ตารางที่ 3.2 ค่าทรานเซียนท์รีโคเวอรี่โวลเตจสำหรับเซอร์กิตเบรคเกอร์พิกัดเท่ากับหรือต่ำกว่า 72.5 KV ตาม มาตรฐาน ไออีซีแบบ 2 พารามิเตอร์.

Rated Voltage	TRV peak value	Time	Time delay	Voltage	Time	Rated of rise
U (KV)	u_c (KV)	t_s (μ S)	t_d (μ S)	u' (KV)	t' (μ S)	u_c/t_s (KV/ μ S)
3.6	6.2	40	6	2.1	19	0.15
7.2	12.3	52	8	4.1	25	0.24
12.0	20.6	60	9	6.9	29	0.34
17.5	30.0	72	11	10.0	35	0.42
24.0	41.0	88	13	14.0	42	0.47
36.0	62.0	108	16	21.0	52	0.57
52.0	89.0	132	7	30.0	51	0.68
72.5	124.0	166	8	41.0	64	0.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์รีโวลเตอร์โวลเตจสำหรับเซอร์กิตเบรคเกอร์
สูงกว่า 72.5 กิโลโวลต์ตาม มาตรฐาน ไออีซี
แบบ 4 พารามิเตอร์.

Rated Voltage U (KV)	First reference voltage u_1 (KV)	Time t_1 (μ S)	TRV peak value u_c (KV)	Time t_2 (μ S)	Time delay t_d (μ S)	Voltage u' (KV)	Time t' (μ S)	Rate of rise u_1/t_1 (KV/ μ S)
100	106	53	149	159	2	53	29	2.0
	122	61	171	183	2	61	33	2.0
123	131	65	183	195	2	65	35	2.0
	151	75	211	225	2	75	40	2.0
145	154	77	215	231	2	77	40	2.0
	178	89	249	267	2	89	46	2.0
170	180	90	253	270	2	90	47	2.0
	208	104	291	312	2	104	54	2.0
245	260	130	364	390	2	130	67	2.0
300	318	159	446	477	2	159	82	2.0
362	384	192	538	576	2	192	98	2.0
420	446	223	624	669	2	223	113	2.0
525	557	279	780	837	2	279	141	2.0
765	812	406	1137	1218	2	406	205	2.0

ข้อสังเกต

1. พิกัดโวลเตจ 100 ถึง 170 กิโลโวลต์ อย่างแรกในระบบกราวนด์จะใช้ค่า เฟสท์โพลทูลเคลียร์แฟกเตอร์เท่ากับ 1.3 และอย่างที่สองในระบบไม่มีกราวนด์ใช้ค่าเฟสท์โพลทูลเคลียร์แฟกเตอร์เท่ากับ 1.5 สำหรับ 245 กิโลโวลต์และที่สูงกว่าใช้ค่าแฟกเตอร์เท่ากับ 1.3

2. ค่า $u_1 = 1.3 \sqrt{2/3}$ เท่าของโวลต์เตจที่พิกัดคือ $1.061 E_{rated}$ หรือ

$u_1 = 1.5 \sqrt{2/3}$ เท่าของโวลต์เตจที่พิกัดคือ $1.225 E_{rated}$

3. ค่า $t_2 = 3t_1$

4. $u_c = 1.4u_1 = 1.485 E_{rated}$ ในระบบกราวนด์

$= 1.715 E_{rated}$ ในระบบไม่มีกราวนด์

5. $u' = 1/2 u_1$

3.3 ข้อแตกต่างระหว่างมาตรฐานแอนซีและไออีซี

จากรูปที่ 3.2 ถึง 3.5 และตารางที่ 3.1 และ 3.3 แสดงให้เห็นถึงข้อแตกต่าง 5 อย่างระหว่างมาตรฐาน แอนซีและมาตรฐาน ไออีซี คือ

1. ความแตกต่างระหว่างวิธีการทดสอบคือ พิกัด 72.5 กิโลโวลต์และต่ำกว่าแอนซีจะใช้ คุณลักษณะของ 1-cos แต่ ไออีซีจะใช้วิธี 2 พารามิเตอร์และที่พิกัดสูงกว่า 72.5 กิโลโวลต์แอนซีจะใช้ ex-cos แต่ ไออีซีจะใช้วิธี 4 พารามิเตอร์

2. แอนซีจะมีค่า R ที่ต่างกันออกไปตามพิกัดโวลเตจและพิกัดกระแส แต่ ไออีซีจะมีค่าคงที่คือ $R = u_1/t_1$ ที่ทุกๆพิกัด

3. คุณลักษณะของทรานส์เซียนรีโวลเตจของ ไออีซีไม่ขึ้นอยู่กับพิกัดกระแสอินเทอร์รับของเซอร์กิตเบรคเกอร์ในขณะที่ แอนซีมีค่า R และ T_2 สำหรับพิกัดกระแสอินเทอร์รับต่างๆ

4. ไออีซีให้ความแตกต่างระหว่างระบบมีกราวนด์ และระบบไม่มีกราวนด์ คือ มีค่าเฟสท์โพลทูลเคลียร์แฟกเตอร์เท่ากับ 1.3 และ 1.5 ในขณะที่ แอนซีใช้ค่าเดียวคือ 1.5 ที่ทุกๆพิกัดโวลเตจ

5. แม้ว่าทั้งสองมาตรฐานจะใช้ค่า เฟสท์โพลทูลเคลียร์แฟกเตอร์เท่ากัน คือ 1.5 แต่ค่าโวลเตจสูงสุด (u_c) ของมาตรฐาน ไออีซี จะมีค่าสูงกว่าค่า E_2 ของมาตรฐาน แอนซี

3.3.1 อัตราการเพิ่มขึ้นของทรานเซียนท์รีโคเวอริโวลเตจ (Rate of rise of TRV)

ตามมาตรฐาน ไออีซี บอกไว้ว่าเส้นที่ลากจากจุด 0 (โดยใช้วิธี 4-พารามิเตอร์) สัมผัสกราฟโดยผ่านจุดเริ่มต้นและไม่ตัดกราฟนั้น และมีค่าเท่ากับ u_1 ทหารด้วย t_1 คือ ค่าเริ่มต้นของอัตราการเพิ่มขึ้นของรีโคเวอริโวลเตจ (ซึ่งตามมาตรฐานแอนซี คือค่า R) ตารางที่ 3.3 แสดงถึงค่า u_1/t_1 เป็นค่าคงที่คือ 2.0 กิโลโวลต์ต่อไมโครวินาที ในขณะที่ตารางที่ 3.1 ค่า R จะมีค่าระหว่าง 1.6 ถึง 1.9 กิโลโวลต์ต่อไมโครวินาที ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าโวลเตจและกระแสลัดวงจร

เวลาจากเริ่มต้นถึงยอดคลื่น (T_2)

จากตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าค่า T_2 ตามมาตรฐาน แอนซีแตกต่างกันสำหรับแต่ละพิกัดกระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ในขณะที่มาตรฐาน ไออีซี มีค่า t_2 เพียงค่าเดียวสำหรับทุกๆพิกัดโวลเตจและไม่คำนึงถึงพิกัดกระแส เมื่อเปรียบเทียบกันของ แอนซี ที่ค่า 145 กิโลโวลต์ (298 ถึง 331 ไมโครวินาที) กับของ ไออีซี ค่าสำหรับพิกัดค่าเฟสที่โพลทูลเคลียร์แพกเตอร์ 1.5 (267 ไมโครวินาที) ค่าจะไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ค่า t_2 ของไออีซีจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่รูปคลื่นสูงสุดเสมอ

สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์พิกัด 72.5 กิโลโวลต์และต่ำกว่าจะเกิดความแตกต่างกันมากของค่า T_2 ของแอนซีและค่า t_2 ของไออีซี โดยที่ T_2 จะมีค่าประมาณ 0.6 เท่าของค่า t_2 เหตุผล ก็คือ วงจรทั้งหมดที่โวลเตจขนาดนี้ในยุโรปจะใช้เป็นสายเคเบิลในขณะที่อเมริกาใช้เป็นสายโอเวอร์เฮด ค่าคาปาซิแตนซ์ที่เพิ่มขึ้นของสายเคเบิลทำให้ความถี่ธรรมชาติต่ำกว่า และทำให้มีค่ามากกว่า T_2 สำหรับรีโคเวอริโวลเตจ

จากข้อแตกต่างของทั้งสองมาตรฐานที่ชี้ให้เห็นดังกล่าว IEEE , NEMA จะใช้

1. วิธี 2 และ 4 พารามิเตอร์ ในอุปกรณ์ทรานเซียนท์รีโคเวอริโวลเตจ
2. ใช้ค่า อัตราเพิ่มของค่าทรานเซียนท์รีโคเวอริโวลเตจเริ่ม (R) สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่พิกัดสูงกว่า 72.5 กิโลโวลต์ ค่าจาก IEC 2.0 กิโลโวลต์ต่อไมโครวินาที จะเป็นค่าที่เหมาะสมที่พิกัดกระแสลัดวงจร 100 เปอรเซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

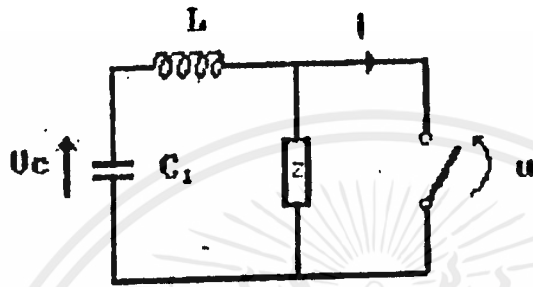
3. ใช้ค่าทรานเซียนท์รีโคเวอรัวอลเตจพารามิเตอร์ ในแต่ละพิกัดโวลเตจ โดยไม่ต้องค่าพิกัดกระแส
4. ทังแอนซีและไออีซีใช้ค่าเฟิสท์โพลทูเคลียร์แฟกเตอร์เท่ากับ 1.3 สำหรับ เซอร์กิตเบรคเกอร์ที่สูงกว่า 72.5 กิโลโวลต์
5. ใช้ค่าสูงสุดทั้งสองมาตรฐานโดยขึ้นกับว่าจะเลือกวิเคราะห์ และใช้งาน แบบใด



บทที่ 4

การศึกษาเชิงวิเคราะห์ของวงจรทดสอบหลัก

ปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากวงจรสร้างความต่างศักย์สูงๆ นั้นสามารถวิเคราะห์ได้จากวงจรถังรูปนี้



v_c = charging voltage

L = short-circuit impedance seen from the generator

Z = impedance of the recovery voltage control circuit

รูปที่ 4.1

กระแสที่ไหลผ่านเซอร์กิตเบรคเกอร์ในการทดสอบแสดงในรูปเฟสแควมซีโคมินได้ดังนี้

$$i(s) = \frac{C_1 v_c}{s^2 LC_1 + 1}$$

ดังนั้น $i(t) = v_c \sqrt{C_1/L} \sin(2\pi f_1 t)$

โดย $f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}}$

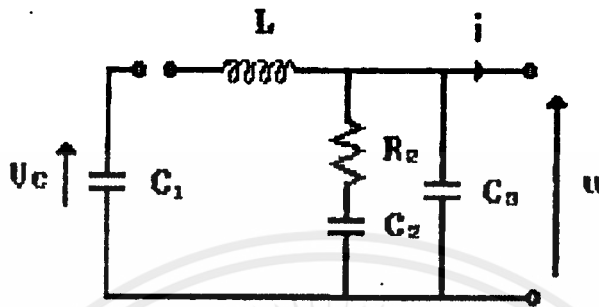
ในขณะที่กระแสเป็นศูนย์ (หลังจากครึ่งคาบ) เซอร์กิตเบรคเกอร์จะทำงานและวงจรจะเปิดออก โวลต์เตจที่ขั้วของ C_1 ที่ขณะนั้นจะกลายเป็น $-v_c$ และหลังจากนั้นโวลต์เตจที่ขั้วของเซอร์กิตเบรคเกอร์ จะเป็นไปตามสมการซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$U(s) = -\underline{v_c} \cdot \frac{Z(s)}{s Z(s) + sL + 1/sC_1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 วงจรความถี่เดียวแบบเวล-ดูปด์(Weil-Dubke Diagram)

วงจรมีจะสร้างทรานเซียนท์รีโควเวอรี่โวลเตจแบบ 2-พารามิเตอร์ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ไอโอซีที่สามารถแสดงวงจรถังรูป



รูปที่ 4.2

สมการรีโควเวอรี่โวลเตจแสดงได้ดังนี้

$$U(s) = \frac{-C_1 V_c \cdot (1 + sR_2 C_2)}{s^3 R_2 C_2 C_3 L C_1 + s^2 L C_1 (C_2 + C_3) + sR_2 C_2 (C_2 + C_3) + C_1 + C_2 + C_3}$$

$$= -\frac{V_c}{C_3 L} \cdot \frac{(s + 1/R_2 C_2)}{s(s^2 + \frac{C_2 + C_3}{R_2 C_2 C_3} s^2 + \frac{C_2 + C_3}{C_1 C_3 L} s + \frac{C_1 + C_2 + C_3}{R_2 C_1 C_2 C_3 L})}$$

จากสูตรการแปลงอินเวอร์สลาปลาซสูตรที่ 118 จากหนังสืออ้างอิงเล่มที่ [6]

ถ้า $F(s) = \frac{s+a_0}{s(s+v)[(s+\alpha)^2 + \beta^2]}$ จะได้

$$f(t) = \frac{a_0}{(\alpha^2 + \beta^2)v} + \frac{(v-a_0)e^{-vt}}{v[(\alpha-v)^2 + \beta^2]}$$

$$+ \frac{\sqrt{[\beta^2 + (a_0 - \alpha)^2] / [\beta^2 + (\alpha - v)^2]}}{\beta \sqrt{(\alpha^2 + \beta^2)}} \cdot e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \phi)$$

$$\phi = \tan^{-1}(\beta/\alpha) + \tan^{-1}(\beta/(\alpha-v)) + \tan^{-1}(\beta/(a_0 - \alpha))$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตร

$$\frac{s + a_0}{s(s+v)[(s+\alpha)^2 + \beta^2]} = \frac{s+a_0}{s^3 + (2\alpha+v)s^2 + (\alpha^2 + 2\alpha v + \beta^2)s + v(\alpha^2 + \beta^2)}$$

เทียบสัมประสิทธิ์

จะได้
$$2\alpha + v = \frac{(C_2 + C_3)}{R_2 C_2 C_3}$$

ให้
$$\alpha = R_2 / 2L$$

ดังนั้น
$$v = \frac{C_2 + C_3}{R_2 C_2 C_3} \cdot \frac{R_2}{L}$$

และ
$$v(\alpha^2 + \beta^2) = \frac{(C_1 + C_2 + C_3)}{R_2 L C_1 C_2 C_3}$$

เมื่อเราถือว่า C_3 มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} (\alpha^2 + \beta^2) &= \frac{C_1 + C_2}{L C_1 C_2} \\ \frac{R_2^2}{4L^2} + \beta^2 &= \frac{C_1 + C_2}{L C_1 C_2} \\ \beta^2 &= \frac{C_1 + C_2}{L C_1 C_2} - \frac{R_2^2}{4L^2} \\ \beta &= \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{L C_1 C_2} - \frac{R_2^2}{4L^2}} \end{aligned}$$

$$a_0 = 1/R_2 C_2$$

แทนค่าตัวแปรลงในสูตรที่ 118 จะได้

$$U(t) = \frac{-V_c}{C_3 L} \left\{ \frac{C_1 C_3 L}{C_1 + C_2} + \frac{C_1 C_3 L}{C_1 + C_2} \cdot \frac{e^{-\alpha t}}{\sin \phi} \cdot \sin(\beta t - \phi) \right\}$$

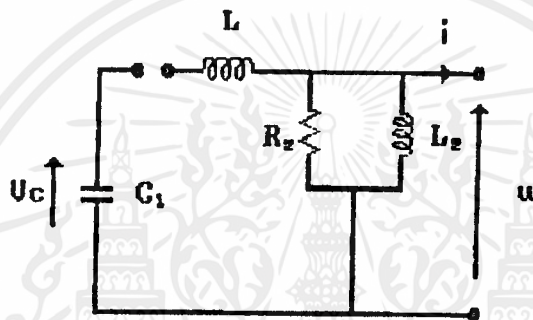
$$U(t) = \frac{-V_c C_1}{C_1 + C_2} \left\{ 1 + \frac{e^{-\alpha t}}{\sin \phi} \cdot \sin(\beta t - \phi) \right\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \alpha &= R_2/2L \\ \beta &= \sqrt{\frac{C_1+C_2}{LC_1C_2} - \frac{R_2^2}{4L^2}} \\ \phi &= \tan^{-1}[(C_1/(C_1+2C_2))*(\beta/\alpha)] \end{aligned}$$

4.2 วงจรความถี่เดียวตามมาตรฐาน ANSI

วงจรมีแสดงดังรูป ซึ่งสามารถสร้าง รัคเวอวีโวลเตจ ตามมาตรฐานของ ANSI ได้



รูปที่ 4.3

จากการใช้วิธีการแปลงลาปลาซ จะได้ค่ารัคเวอวีโวลเตจที่หัวของเซอร์กิต เบรกเกอร์ ดังนี้

$$\begin{aligned} U(s) &= -\frac{C_1}{C_1+C_2} V_c \cdot \frac{R_2 + L_2s + R_2L_2C_2s^2}{(C_1+C_2)R_2 + (C_1+C_2)L_2s + (L+L_2)R_2C_1C_2s^2 + LC_1L_2C_2s^3} \\ &= -V_c \cdot \frac{R_2}{L} \cdot \frac{s^2 + (1/R_2C_2)s + (1/L_2C_2)}{s(s^3 + \frac{(L+L_2)R_2}{LL_2}s^2 + \frac{(C_1+C_2)}{LC_1C_2}s + \frac{(C_1+C_2)R_2}{LC_1L_2C_2})} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตรการแปลงอินเวอร์สลาปลาซสูตรที่ 173 จากหนังสืออ้างอิงเล่มที่ [6]

ถ้า $F(s) = \frac{s^2 + a_1 s + a_0}{s(s+v)[(s+\alpha)^2 + \beta^2]}$ จะได้

$$f(t) = \frac{a_0}{(\alpha^2 + \beta^2)v} + \frac{(a_1 v - a_0 - v^2)e^{-vt}}{v[(\alpha - v)^2 + \beta^2]}$$

$$+ \frac{e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \phi)}{\beta (\alpha^2 + \beta^2) \{(\alpha - v)^2 + \beta^2\}} \sqrt{\beta^2 (2\alpha - a_1)^2 + (\alpha^2 - \beta^2 - a_1 \alpha + a_0)^2}$$

$$\phi = \tan^{-1}(\beta/\alpha) + \tan^{-1}(\beta/(\alpha - v)) - \tan^{-1} \left[\frac{\beta(2\alpha - a_1)}{\alpha^2 - \beta^2 + a_0 - a_1 \alpha} \right]$$

จากสูตร

$$\frac{s^2 + a_1 s + a_0}{s(s+v)[(s+\alpha)^2 + \beta^2]} = \frac{s^2 + a_1 s + a_0}{s^3 + (2\alpha + v)s^2 + (\alpha^2 + 2\alpha v + \beta^2)s + v(\alpha^2 + \beta^2)}$$

เทียบสัมประสิทธิ์

จะได้ $2\alpha + v = \frac{(L+L_2)R_2}{LL_2}$

ให้ $\alpha = R_2/2L$

ดังนั้น $v = \frac{(L+L_2)R_2}{LL_2} - \frac{R_2}{L}$

เมื่อเราถือว่า L_2 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ R_2 ดังนั้นจะได้ว่า

$$v = R_2/L_2$$

เทียบสัมประสิทธิ์

$$v(\alpha^2 + \beta^2) = \frac{(C_1 + C_2)R_2}{LC_1 L_2 C_2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้น

$$(\alpha^2 + \beta^2) = \frac{C_1 + C_2}{LC_1 C_2}$$

$$\frac{R_2^2}{4L^2} + \beta^2 = \frac{C_1 + C_2}{LC_1 C_2}$$

$$\beta^2 = \frac{C_1 + C_2}{LC_1 C_2} - \frac{R_2^2}{4L^2}$$

$$a_1 = 1/R_2 C_2 \quad , \quad a_0 = 1/L_2 C_2$$

แทนค่าตัวแปรลงในสูตรที่ 173 จะได้

$$U(t) = -\frac{V_c R_2}{L} \left(\frac{C_1 L}{(C_1 + C_2) R_2} + \frac{1}{R_2} \frac{e^{-\alpha t}}{\beta} \sin(\beta t + \phi) \right) \cdot \sqrt{(C_1 L / C_2 (C_1 + C_2))}$$

$$U(t) = -V_c \left[\frac{C_1}{C_1 + C_2} + \frac{e^{-\alpha t}}{\beta} \sin(\beta t + \phi) \right] \cdot \sqrt{(C_1 / LC_2 (C_1 + C_2))}$$

เมื่อ

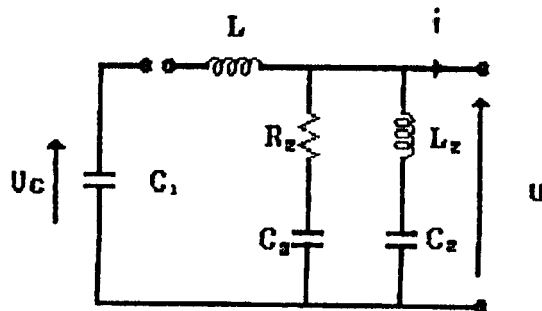
$$\alpha = R_2 / 2L$$

$$\beta = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{LC_1 C_2} - \frac{R_2^2}{4L^2}}$$

$$\phi = \tan^{-1}(\beta / \alpha)$$

4.3 วงจรหลายความถี่ (Multi-frequency circuit)

วงจรนี้เป็นวงจรที่พัฒนาขึ้นมาจากวงจรความถี่เดียว ซึ่งจะให้ทรานเซียนท์รีโอดเวอริโวลเตจแบบ 4-พารามิเตอร์ ตามมาตรฐานของไออีซี แสดงวงจรได้ดังรูป



รูปที่ 4.4

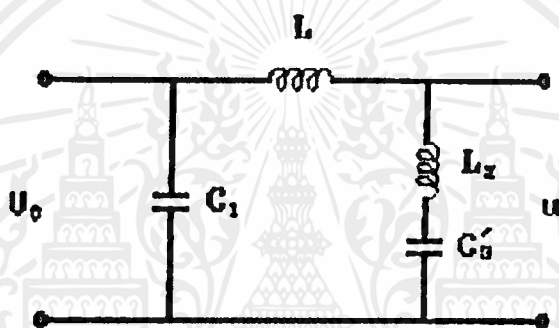
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรแบบนี้จะได้ค่ารีโควเอร์รีโวลเตจดังนี้

$$U(s) = -\frac{C_1 V_c}{s} \cdot \frac{(1+sR_3C_3)(1+s^2L_2C_2)}{s^4LC_1L_2C_2C_3 + s^3R_3C_1C_2C_3(L+L_2) + s^2(LC_1(C_2+C_3)+L_2C_2(C_1+C_3)) + sR_2C_2(C_1+C_2)+C_1+C_2+C_3}$$

การแสดงค่าของเวลาของรีโควเอร์รีโวลเตจของวงจรหลายความถี่ เป็นค่าเชิงซ้อนแต่เราสามารถวิเคราะห์ห้อย่างง่ายโดยการแยกออกเป็นสองความถี่ คือ

- ความถี่ต่ำ รูปคลื่นโวลเตจจะเกี่ยวข้องกับ การออสซิลเลตโดยธรรมชาติของวงจรดังรูป



รูปที่ 4.5

สามารถหา $U(s)$ ได้จากสมการของวงจรพื้นฐาน

$$U(s) = -\frac{V_c}{s} \cdot \frac{Z(s)}{Z(s) + sL + 1/sC_1}$$

เมื่อ $Z(s)$ คือ $1/C_2s + L_2s$

$$Z(s) = (L_2C_2s^2 + 1)/C_2s$$

ดังนั้น

$$U(s) = -\frac{V_c}{s} \cdot \frac{(L_2C_2s^2 + 1)/C_2s}{(L_2C_2s^2 + 1)/C_2s + sL + 1/sC_1}$$

$$= -V_c \cdot \frac{L_2}{L + L_2} \cdot \frac{(s^2 + 1/L_2C_2)}{s(s^2 + \frac{C_1 + C_2}{C_1C_2(L + L_2)})}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตรการแปลงอินเวอร์สลาปลาซสูตรที่ 161 จากหนังสืออ้างอิงเล่มที่ [6]

ถ้า
$$F(s) = \frac{s^2 + a_1 s + a_0}{s(s^2 + \alpha^2)} \quad \text{จะได้}$$

$$f(t) = \frac{a_0}{\alpha^2} + \left\{ \left(\frac{a_1}{\alpha} \right)^2 + \left(\frac{a_0}{\alpha^2} - 1 \right)^2 \right\} \cos(\alpha t + \phi)$$

$$\phi = - \tan^{-1} \left[\frac{\alpha a_1}{\alpha^2 - a_0} \right]$$

เทียบสัมประสิทธิ์จะได้

$$a_1 = 0, \quad a_0 = 1/LC$$

$$\alpha = \sqrt{(C_1 + C_2) / (C_1 C_2 (L + L_2))}$$

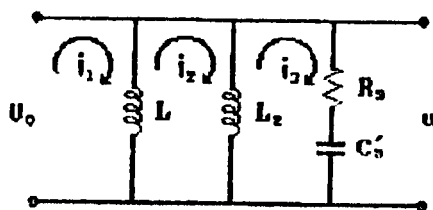
แทนค่าตัวแปรลงในสูตรที่ 161 จะได้

$$U(t) = -V_c \left[\frac{C_1}{C_1 + C_2} + \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} - \frac{L_2}{L + L_2} \right) \cos(\alpha t + \phi) \right]$$

เมื่อ
$$\alpha = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2 (L + L_2)}}$$

$$\phi = \tan^{-1}(0)$$

- ความถี่สูง รูปคลื่นโวลเตจเกิดขึ้นจากการออสซิลเลตโดยอิสระของวงจรที่แสดงดังรูป



รูปที่ 4.6

โดยที่ $C_3' = C_3 \cdot \frac{C_1+C_2}{C_1+C_2+C_3}$

จากกฎของเคอชอฟฟ์

$$V_c/s = sLI_1(s) \quad \text{----- (1)}$$

$$0 = sL(I_2(s)-I_1(s)) + sL_2I_2(s)$$

$$0 = -sLI_1(s) + (sL+sL_2)I_2(s) \quad \text{----- (2)}$$

$$0 = sL_2(I_3(s)-I_2(s)) + (R_3+1/sC_3')I_3(s)$$

$$0 = -sL_2I_2(s) + (sL_2+R_3+1/sC_3')I_3(s) \quad \text{----- (3)}$$

นำสมการที่ 1 แทนในสมการที่ 2

$$0 = -V_c/s + (sL+sL_2)I_2(s)$$

ได้ $I_2(s) = V_c / s(sL+sL_2) \quad \text{----- (4)}$

นำสมการที่ 4 แทนในสมการที่ 3

$$0 = -sL_2 \left(\frac{V_c}{s(sL+sL_2)} \right) + (sL_2+R_3+ \frac{1}{sC_3'}) I_3(s)$$

$$I_3(s) = \frac{V_c L_2}{s(L+L_2)(sL_2+R_3+1/sC_3')}$$

$$= \frac{V_c L_2 C_3'}{(L+L_2)(L_2 C_3' s^2 + R_3 C_3' s + 1)}$$

$$U(s) = I_3(s) * (R_3 + 1/sC_3')$$

$$U(s) = \frac{-V_c L_2 C_3' (R_3 C_3' s + 1)}{(L+L_2)(L_2 C_3' s^2 + R_3 C_3' s + 1)(sC_3')}$$

$$U(s) = -V_c \left(\frac{L}{L+L_2} \right) \left(\frac{R_3 C_3' s + 1}{s(L_2 C_3' s^2 + R_3 C_3' s + 1)} \right)$$

$$= -V_c \left(\frac{L}{L+L_2} \right) \left(\frac{R_3 C_3'}{L_2 C_3'} \right) \left(\frac{s + 1/R_3 C_3'}{s(s^2 + R_3 s + \frac{1}{L_2 C_3'})} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= -V_c \left(\frac{L}{L+L_2} \right) \left(\frac{R_3}{L_2} \right) \left(\frac{s+1/R_3 C_3'}{s(s^2 + \frac{R_3}{L_2} s + \frac{1}{L_2 C_3'})} \right)$$

จากสูตรการแปลงอินเวอร์สลาปลาซสูตรที่ 115 จากหนังสืออ้างอิงเล่มที่ [6]

ถ้า $F(s) = \frac{s+a_0}{s[(s+\alpha)^2 + \beta^2]}$ จะได้

$$f(t) = \frac{a_0}{\alpha^2 + \beta^2} - \frac{\sqrt{[\beta^2 + (a_0 - \alpha)^2]}}{[\beta^2 (\alpha^2 + \beta^2)]} \cdot e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \phi)$$

$$\phi = \tan^{-1}(\beta/\alpha) + \tan^{-1}(\beta/a_0 - \alpha)$$

จากสูตร

$$\frac{s+a_0}{s[(s+\alpha)^2 + \beta^2]} = \frac{s+a_0}{s(s^2 + 2\alpha s + \alpha^2 + \beta^2)}$$

เทียบสัมประสิทธิ์โดย

$$\begin{aligned} 2\alpha &= R_3/L_2 \\ \text{ดังนั้น} \quad \alpha &= R_3/2L_2 \\ a_0 &= 1/R_3 C_3' \\ \alpha^2 + \beta^2 &= 1/L_2 C_3' \\ \beta^2 &= \frac{1}{L_2 C_3'} - \frac{R_3^2}{4L_2^2} \\ \beta &= \sqrt{\frac{1}{L_2 C_3'} - \frac{R_3^2}{4L_2^2}} \end{aligned}$$

แทนค่าตัวแปรลงในสูตรที่ 116 จะได้

$$U(t) = -V_c \frac{L}{L+L_2} \frac{R_3}{L_2} \left\{ \frac{L_2}{R_3} + \frac{2L_2}{R_3} \sqrt{\frac{L_2}{4L_2^2 - R_3^2 C_3'}} \right\} e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \phi)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U(t) = -V_c \frac{L}{L+L_2} \left[1 + 2\sqrt{\frac{L_2}{4L_2 - R_3^2 C_3'}} e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \phi) \right]$$

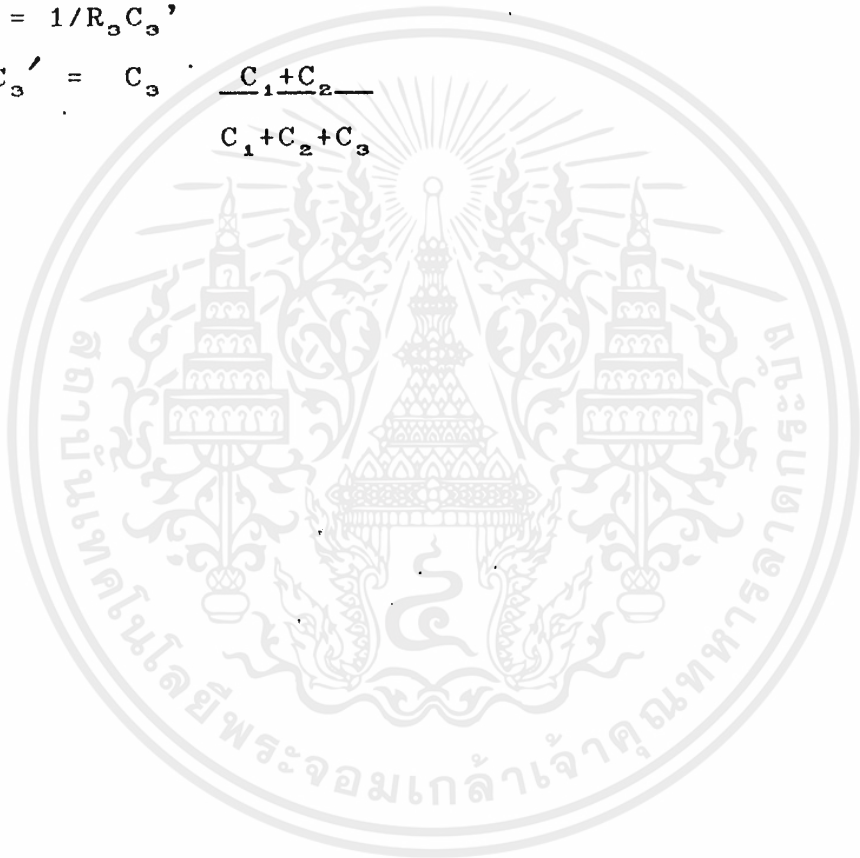
เมื่อ $\alpha = R_3/2L_2$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{L_2 C_3'} - \frac{R_3^2}{4L_2^2}}$$

$$\phi = \tan^{-1}(\beta/\alpha) + \tan^{-1}(\beta/a_0 - \alpha)$$

และ $a_0 = 1/R_3 C_3'$

โดยที่ $C_3' = C_3 \frac{C_1+C_2}{C_1+C_2+C_3}$



บทที่ 5

ผลการทดลองออกแบบวงจรทดสอบ

โดยทั่วไปแล้ววัตถุประสงค์ของแต่ละมาตรฐานล้วนแต่เพื่อพยายามหาค่าที่ถูกต้องของพารามิเตอร์ของทรานเซียนท์รีโคเวอรีโวลเตจ (TRV) ซึ่งแน่นอนว่าการที่จะหาค่าเหล่านี้ได้จะต้องเกี่ยวข้องกับค่าของส่วนประกอบของวงจรทดสอบในแต่ละแบบดังนั้นการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการช่วยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของทรานเซียนท์รีโคเวอรีโวลเตจซึ่งจะทำให้การแสดงถึงหลักการของแต่ละมาตรฐานเห็นชัดเจนเร็วขึ้น และยิ่งไปกว่านั้นในกระบวนการกระทำซ้ำยังทำให้ทราบค่าส่วนประกอบของวงจรทดสอบเพื่อนำค่าเหล่านั้นไปเตรียมจัดตั้งค่าอุปกรณ์ให้เหมาะสมตามส่วนประกอบต่างๆ ของวงจรที่หามาได้ ทำให้ได้วงจรทดสอบตามเป้าหมาย และในการนำค่าของส่วนประกอบของวงจรทดสอบมาใช้อีกครั้งหนึ่งถ้าเราใช้คนปรับจัดตั้งค่าอุปกรณ์เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับการทดสอบครั้งก่อนมากที่สุดจะเป็นการเสียเวลาอย่างมาก ดังนั้นในการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบจึงเป็นประโยชน์อย่างมาก ทำให้ช่วยลดเวลาในการปรับจัดตั้งค่าอุปกรณ์ลงไปได้มาก และรับรองผลลัพธ์ได้เลยว่าจะได้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุด และยังขจัดความผิดพลาดจากการจดหรือจำค่าส่วนประกอบของวงจรที่ใช้ทดสอบโดยผู้ที่ทำการทดสอบได้อีกด้วย เพราะมีการเชื่อมต่อโปรแกรมโดยอัตโนมัติกับหน่วยประกอบ ที่จะทำการประกอบส่วนประกอบของวงจรทดสอบขึ้นโดยตรง

5.1 ข้อมูลที่จำเป็นในการออกแบบวงจรทดสอบ

5.1.1 Wiel Doubke Diagram

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่ามีส่วนแปรอิสระ 6 ตัวคือ V_c , C_1 , L , R_2 , C_2 และ C_3 ซึ่งจะมีตัวแปรบังคับขอบเขต 6 ตัวคือ ความถี่ในการป้อนแรงดัน (injection frequency), ความชันของกระแส (current slope), u_c , t_3 , t_4 และ โวลเตจที่สภาวะคงที่ (steady state voltage) ส่วนค่าเริ่มต้นของส่วนประกอบวงจรถูกพิจารณาเชิงวิเคราะห์โดยสมมติว่าค่า C_3 ละทิ้งได้และการกระทำซ้ำจะสิ้นสุดลงเมื่อการแก้ไขปรับเปลี่ยนค่า V_c , C_2 , C_3 , R_2 ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งตัวแปรเหล่านั้นจะมีอิทธิพลต่อค่าพารามิเตอร์ของ ทรานเซียนท์รีโคเวอรีโวลเตจ ได้แก่ โวลเตจที่สภาวะคงที่, โวลเตจสูงสุด, อัตราการเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของรีโควารีโวลเตจ (rate of rise of recovery voltage:RRRV) และ เวลาหน่วง(delay time : t_d)

5.1.2 ANSI Type

จากรูปที่ 4.3 จะมีตัวแปรอิสระอยู่ 6 ตัวคือ V_c , C_1 , L_1 , L_2 , R_2 , C_2 และยังมีตัวแปรบังคับขอบเขตอีก 6 ตัวคือ ความถี่ในการป้อนแรงดัน, ความชันของกระแส , RRRV , E_1 , E_2 และ t_2 ส่วนค่าของความต้านทาน R_2 สามารถคำนวณได้จากค่า RRRV

$$RRRV = R_2 \cdot V_c / L_1 = R_2 (di/dt) \Big|_{t=0}$$

ซึ่งจากการสังเกตจากวงจรจะเห็นว่าหลังจากการตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์แล้ว เมื่อกระแสเป็นศูนย์กระแสจะไหลผ่าน R หรือ L_2 ในกรณีที่ความถี่ต่ำ ($R \gg \omega L_2$) วงจรจะให้ผลตอบสนองเป็น cosinusoidal ส่วนในกรณีที่ความถี่สูง R จะมีผลมากกว่าเมื่อเทียบกับ L_2 ดังนั้นในการเริ่มต้น iterative process เราจะไม่คำนึงถึงค่า L_2 และค่าของส่วนประกอบของวงจรจะถูกคำนวณขึ้นเพื่อให้ได้ค่า E_2 และ T_2 ตามที่มาตรฐานกำหนดไว้

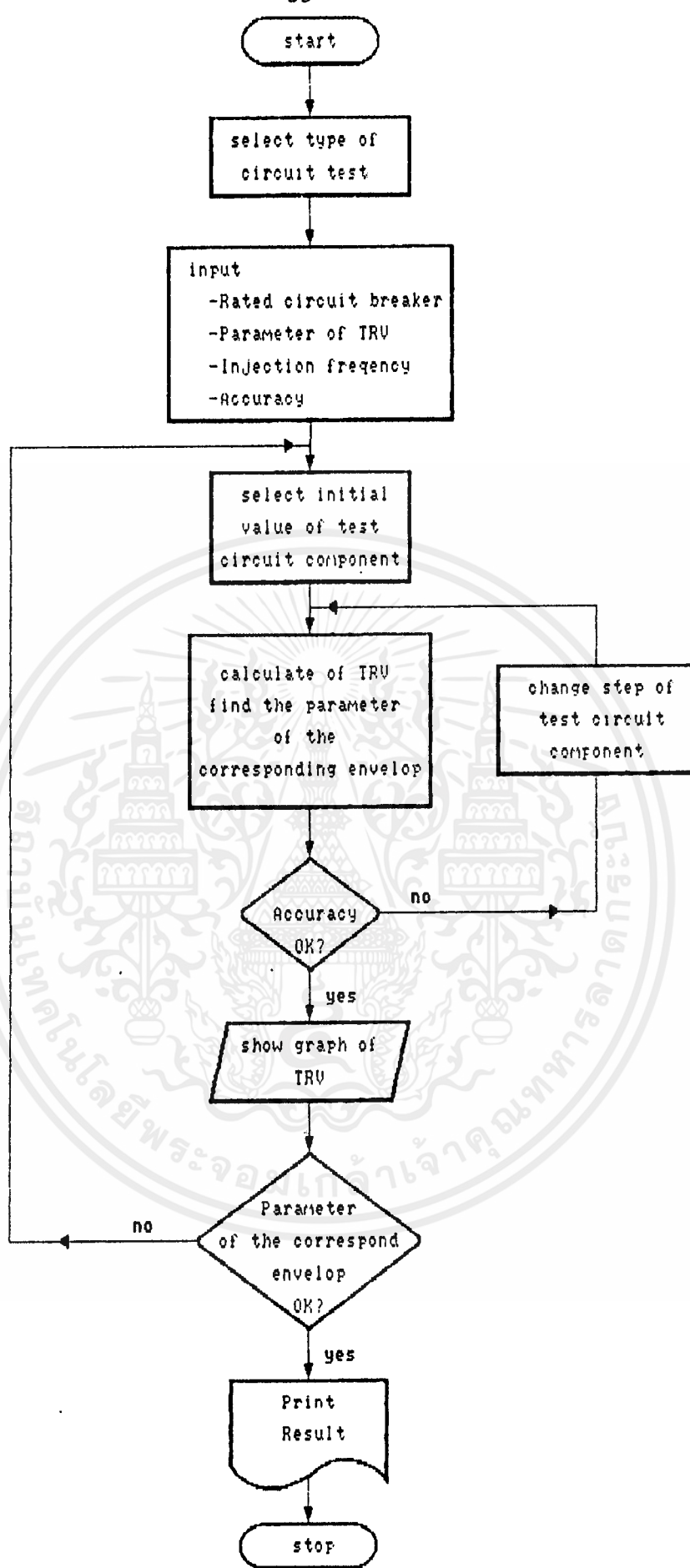
5.1.3 Multi-Frequency

จากโครงสร้างวงจรทดสอบแบบ หลายความถี่ (multi-frequency) ซึ่งจะใช้การวิเคราะห์แบบ 4-พารามิเตอร์ ดังรูปที่ 4.4 จะเห็นว่ามีตัวแปรอิสระ 7 ตัวคือ V_c , C_1 , L , R_3 , C_3 , L_2 และ C_2 และมีตัวแปรบังคับขอบเขตอีก 7 ตัวคือ ความถี่ในการป้อนแรงดัน, ความชันของกระแสขณะอินเตอร์รัป (slope of the interrupted current) , t_1 , u_1 , t_2 , u_c และ t_d ในวงจรนี้การเปลี่ยนแปลงตัวแปรอิสระทุกตัวจะมีผลต่อค่า TRV ดังนั้นใน iterative process เพื่อหาค่า TRV จึงใช้วิธีเปลี่ยนค่าตัวแปรอิสระทีละตัวขณะที่ตัวแปรอิสระอีก 6 ตัวคงที่ และต้องทดสอบเงื่อนไขทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนค่าตัวแปรไป

5.2 หลักการออกแบบให้ได้ส่วนประกอบของวงจรที่ดีที่สุด

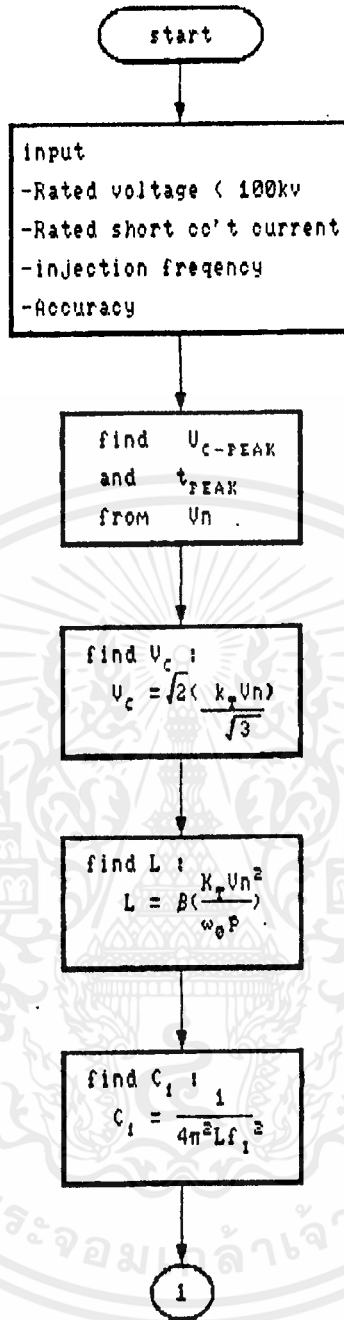
การที่จะได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์จริงที่มีอยู่ได้แก่ ตัวความต้านทาน , คาปาซิเตอร์ แบงก์, และ รีแอคเตอร์ ว่าจะมีค่าที่เหมาะสมกันแล้วได้ค่าผลลัพธ์ที่ต้องการหรือไม่ และสิ่งสำคัญอีกสิ่งหนึ่งคือ การตรวจสอบเงื่อนไขภายในโปรแกรม จะต้องรอบคอบและถูกต้องแม่นยำอีกด้วย ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเป็นโฟลว์ชาร์ต (flow chart) ได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารทศวันวิสาห์สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



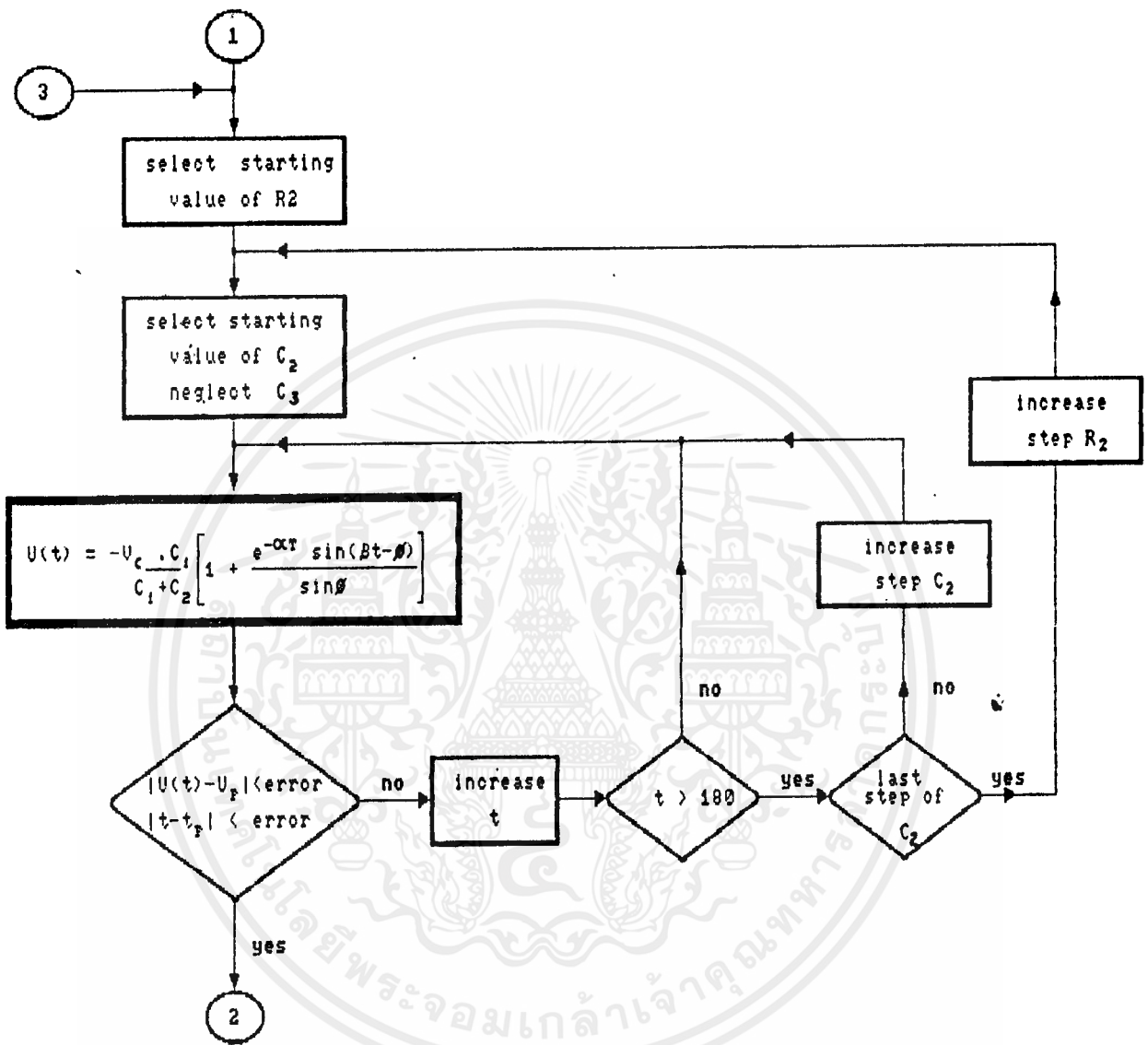
รูปที่ 5.1 main flowchart ที่ใช้ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



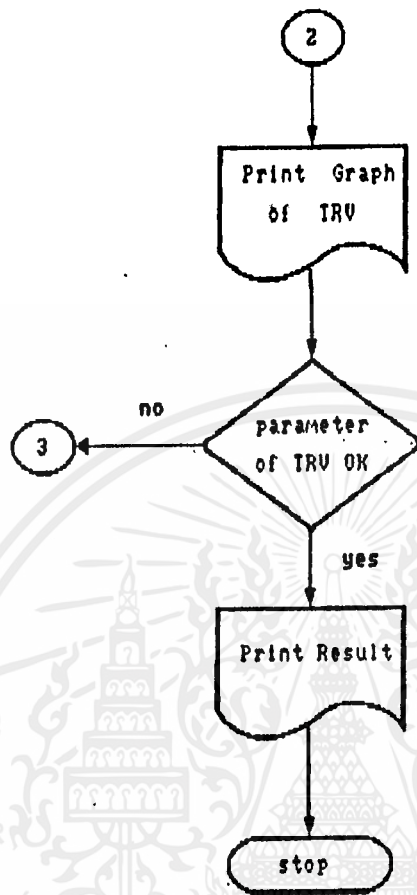
รูปที่ 5.2 flow chart ของวงจรแบบ เวลดรูปค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

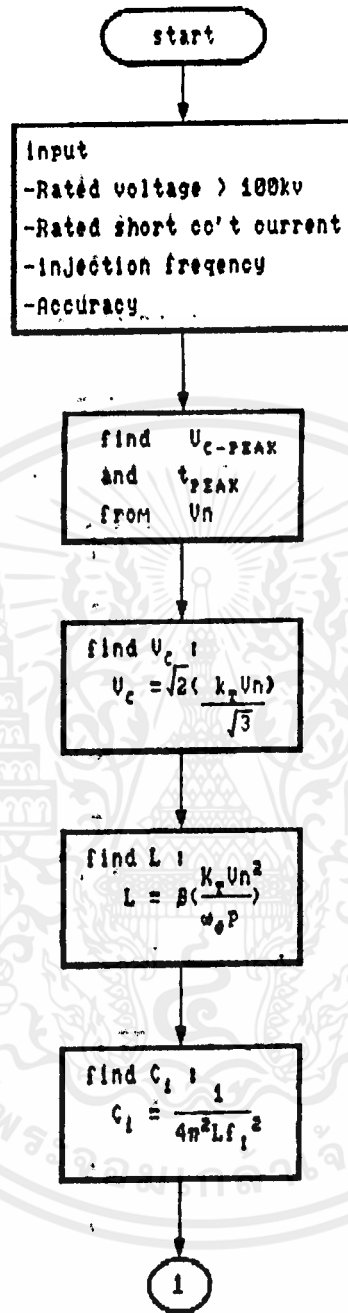


รูปที่ 5.2 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

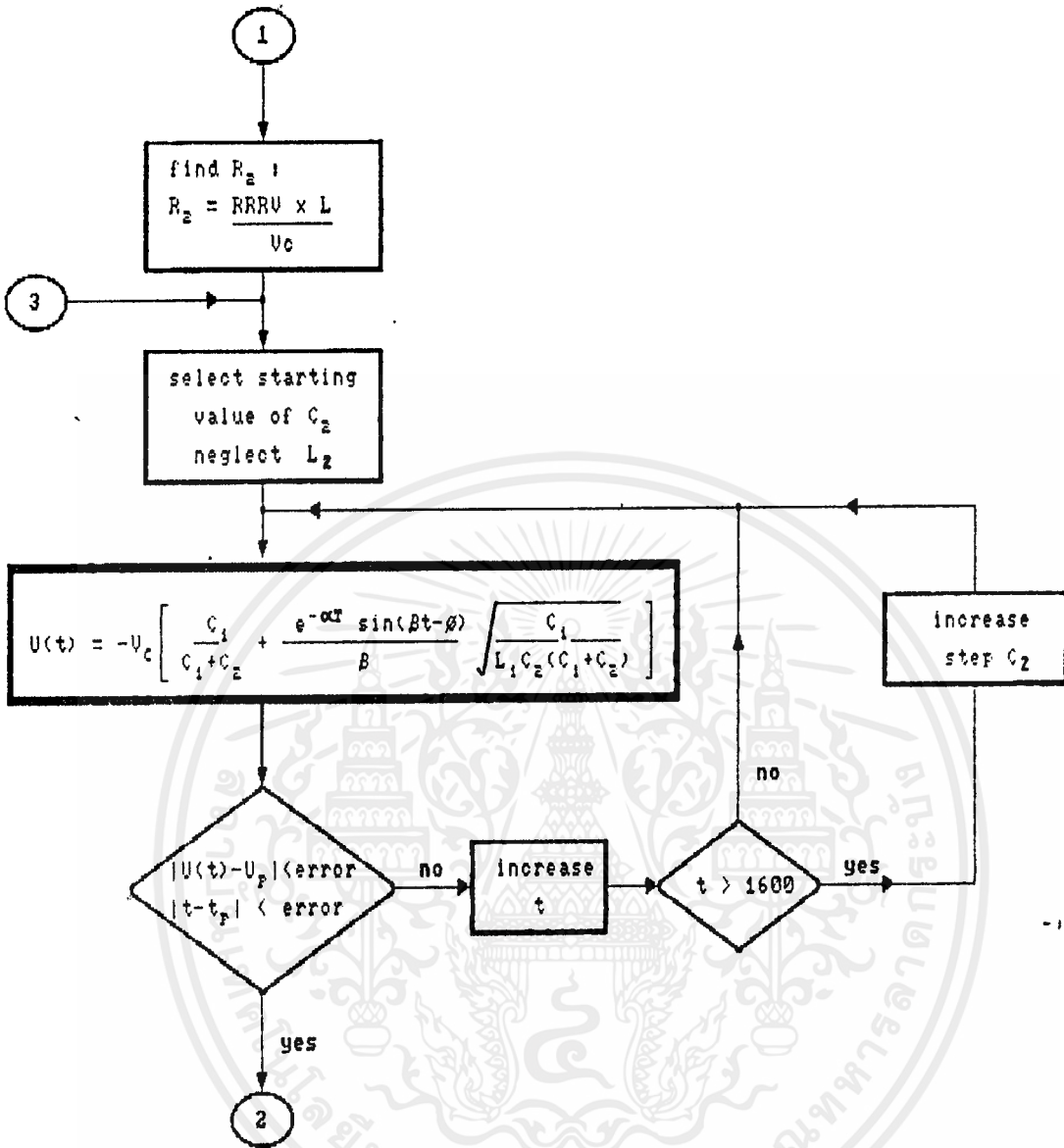


รูปที่ 5.2 (ต่อ)



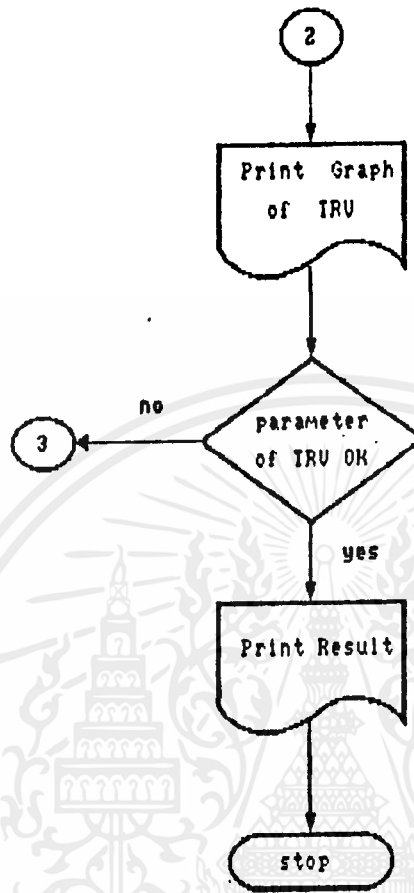
รูปที่ 5.3 flow chart ของวงจรแบบ แอนเช่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



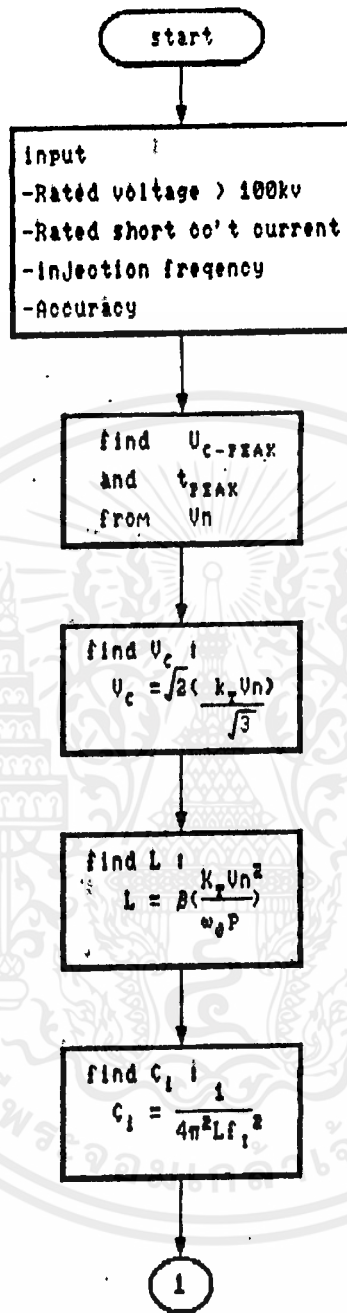
รูปที่ 5.3 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

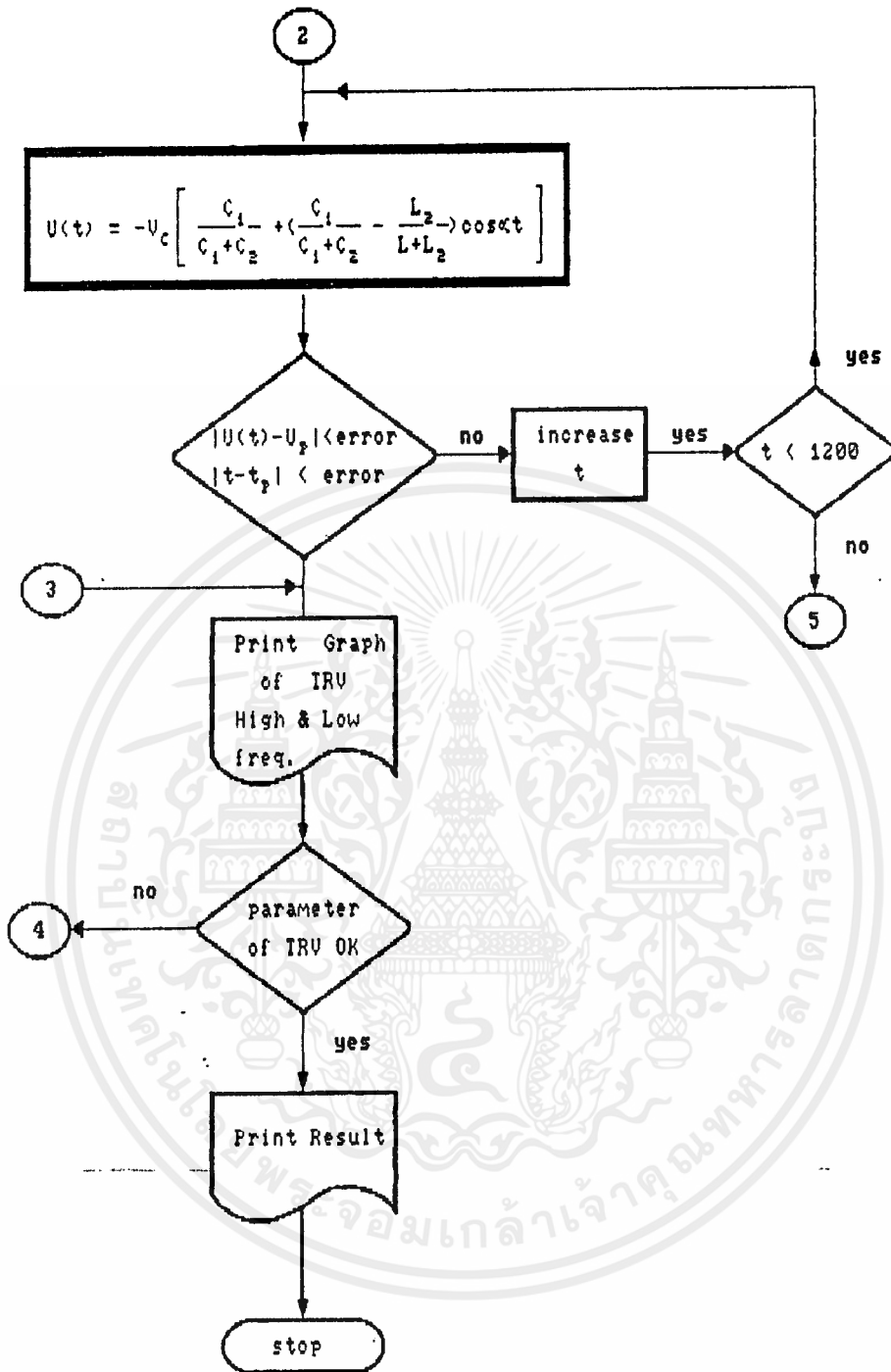


รูปที่ 5.3 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 flow chart ของวงจรแบบ หลายความถี่



รูปที่ 5.4 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ตัวอย่างอุปกรณ์จริงที่ใช้ในห้องทดลองลีส์-เลอนาเดอร์ (Les Renardieres)

5.3.1 Capacitors

อุปกรณ์สำคัญที่ติดตั้งในห้องทดลองนี้ก็คือ capacitor bank เรียกว่า C_1 , C_2 และ C_3 แต่ละ bank จะเป็นแบบ duplicate ค่าของคาปาซิแตนซ์ที่สามารถรับแรงดันกระแสตรงที่ป้อนให้ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.5 ซึ่งผลรวมค่าคาปาซิแตนซ์คือ $22.2 \mu\text{F}$ ที่ 800 kV สามารถสะสมพลังงานได้ 7.1 MJ



รูปที่ 5.5

5.3.2 Reactors

รีแอคเตอร์มีลักษณะเป็นแบงก์คู่ ซึ่งค่ารีแอคแตนซ์ L มีทั้งหมด 15 ค่า ดังแสดงตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1

L (mH)	0.06	0.06	0.17	0.34	0.66	0.66	1.6	
L (mH)	3.3	6.6	6.6	16.7	34.6	66.1	67	167

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนแบ่งกักของรีแอคเตอร์ L_2 มีทั้งหมด 8 ค่าดังแสดงตามตารางที่ 5.2
ตารางที่ 5.2

L_2 (mH)	0.5	1	2	4	8	16	32	64
---------------	-----	---	---	---	---	----	----	----

5.3.3 Damping Resistors

แบ่งกักของความต้านทานหน่วง (damping resistors) มีทั้งหมด 16 ค่า ซึ่งสามารถต่อได้แบบขนานกับวงจรเท่านั้น ค่าความต้านทานแสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3

R (ohm)	1.2	2.4	4.9	9.9	19.6	38	75	152
R (ohn)	312	625	1316	2500	5000	10000	20000	50000

5.4 การหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ในโปรแกรม

5.4.1 ค่าพารามิเตอร์ของทรานเซียนท์รีโคเวอรีโวลเตจ

เมื่อเราทราบพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เราสามารถนำค่าพิกัดไปเปิดตารางตามมาตรฐานต่าง ๆ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของทรานเซียนท์รีโคเวอรีโวลเตจได้ทุกค่าเช่น U_c , t_1 , t_2 , t_d , RRRV , E_2 เป็นต้น

5.4.2 ค่า V_c

เราสามารถหาค่าโวลเตจที่จะชาร์จให้กับขั้วของ C_1 ได้จาก

$$V_c = \sqrt{2} V_d$$

$$\text{เมื่อ } V_d = K_T * V_n / \sqrt{3}$$

เมื่อ V_d คือ ค่า rms ของแหล่งจ่ายโวลเตจที่ทดสอบแบบไดเร็ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

K_T คือ ค่าเฟสที่โพลทูลเคลียร์แฟคเตอร์

V_n คือ ค่าโวลเตจที่พิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์

5.4.3 ค่าส่วนประกอบของวงจรทดสอบ

- ค่า L สามารถหาได้จากสูตร

$$L = \beta L_d$$

$$\text{เมื่อ } L_d = K_T V_n^2 / \omega_0 P$$

เมื่อ $\omega_0 = 2\pi * 60$ สำหรับระบบไฟ 60 Hz

$$P = \sqrt{3} V_n I_{sc}$$

β คือ ค่าอัตราส่วนอินดักแตนซ์

- ค่า C_1 สามารถหาได้จากสูตร

$$f_1 = 1/2\pi / LC_1$$

เมื่อ f_1 คือ injection frequency

- ค่า C_2, C_3, L_2 จะปรับเปลี่ยนไปตาม step จริงของอุปกรณ์ที่มีอยู่ในห้องทดสอบลีส-เลอนาเดอร์ ที่ประเทศฝรั่งเศส

- ค่า R_2 จะแยกคิดเป็น 2 มาตรฐาน ถ้าเป็นมาตรฐาน IEC ก็ จะปรับค่าตาม step ของอุปกรณ์ที่มีอยู่ ส่วนมาตรฐาน ANSI จะสามารถหาค่า R_2 ได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$RRRV = R_2 * V_c / L_1$$

5.4.4 เงื่อนไขที่ใช้ทดสอบภายในโปรแกรม

- เนื่องจากผลลัพธ์ของ TRV จะใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุดขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ทดสอบการวนลูบในโปรแกรม ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบเงื่อนไขให้รอบคอบ ตัวอย่างเงื่อนไขเช่น ในการตรวจสอบค่า $u(t)$ ว่าใกล้เคียงกับค่า u_{peak} หรือยัง จะทดสอบแต่เงื่อนไข $|u(t) - u_{peak}| < error$ นั้นไม่เพียงพอ ต้องทดสอบเงื่อนไขอื่นประกอบด้วย กล่าวคือ ค่า t มีค่าใกล้เคียง t_{peak} หรือไม่และค่า $u(t)$ ที่ได้มานั้นเป็นค่าสูงสุดแล้วจริงหรือไม่ เป็นต้น

5.4.5 การตรวจสอบค่าพารามิเตอร์หลังจากได้ค่าส่วนประกอบวงจรแล้ว

สามารถทำได้โดยการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์จากสูตร ที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ว่าได้ผลตามต้องการหรือไม่ หรืออีกวิธีหนึ่งคือ เมื่อพิมพ์ผลกราฟของ TRV แล้วผู้ run โปรแกรมก็พิจารณาค่าพารามิเตอร์และรูปร่างของกราฟ TRV ได้ว่าจะ เป็นไปตามมาตรฐานหรือไม่

5.5 ผลการทดลอง

SELECT TYPE OF REPRESENTATION TRV

1. single frequency circuit representation by 2-parameters
(use for circuit breaker rated 72.5 KV and below)
2. single frequency circuit (ANSI)
3. double frequency circuit representation by 4-parameters
4. exit to Dos

select numer : 3

SELECT RATED OF CIRCUIT BREAKER

- | | |
|-----------|------------|
| 1) 3.6 KV | 2) 7.2 KV |
| 3) 12 KV | 4) 17.5 KV |
| 5) 24 KV | 6) 36 KV |
| 7) 52 KV | 8) 72.5 KV |

Select Number :8

How much rated short-circuit breaking current ?

- | | |
|------------|------------|
| 1) 8 kA | 2) 10 kA |
| 3) 12.5 kA | 4) 16 kA |
| 5) 20 kA | 6) 25 kA |
| 7) 31.5 kA | 8) 40 kA |
| 9) 50 kA | 10) 63 kA |
| 11) 80 kA | 12) 100 kA |

Select Number :12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

How much injection frequency do you want ?

- | | |
|-----------|-----------|
| 1) 250 Hz | 2) 300 Hz |
| 3) 350 Hz | 4) 400 Hz |
| 5) 500 Hz | 6) 600 Hz |

Select Number :1

Please select inductance ratio

- 1) 1.05
- 2) 1.20
- 3) 1.50

Select Number :1

How much percent accuracy do you want ?80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Type of device to be tested : Circuit breaker
Name of test : Short circuit test
Test specification : IEC Standard (2-parameters)
Rated Voltage : 72.50 kV
Rated short circuit current : 100.00 kA
Injection frequency : 250.00 Hz
Inductance ratio : 1.05
Percent accuracy : 80.00 %

CONFIRM BY PRESS [Y]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Put initial value of R in ohm

- | | |
|-------------|-------------|
| 1) 1.2 | 2) 2.4 |
| 3) 4.9 | 4) 9.9 |
| 5) 19.6 | 6) 38.0 |
| 7) 75.0 | 8) 152.0 |
| 9) 312.0 | 10) 625.0 |
| 11) 1316.0 | 12) 2500.0 |
| 13) 5000.0 | 14) 10000.0 |
| 15) 20000.0 | 16) 50000.0 |

Select Number :5

Put initial value of C2 in micri-F

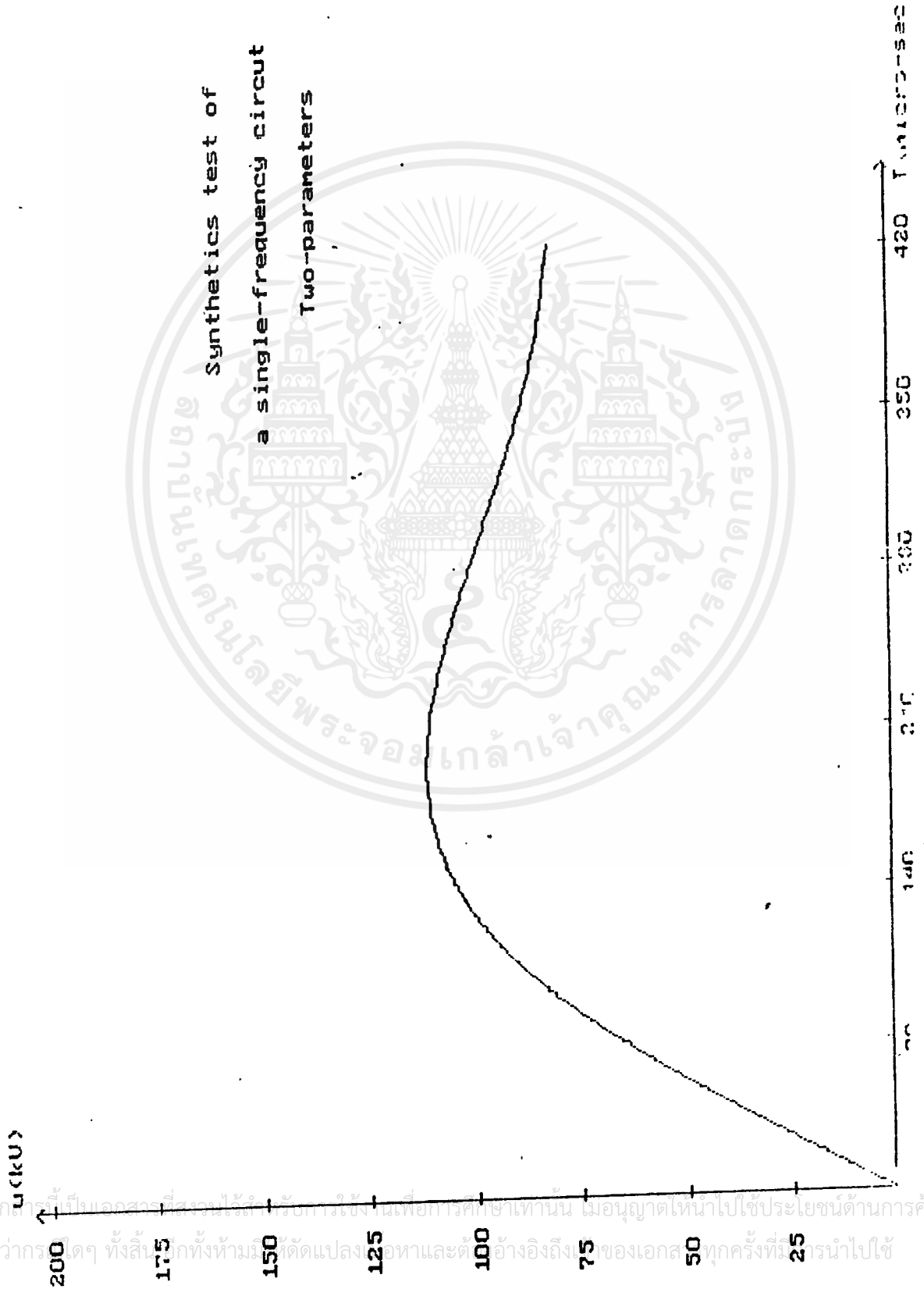
- | | |
|---------|----------|
| 1) 4.0 | 2) 5.0 |
| 3) 6.0 | 4) 8.0 |
| 5) 18.0 | 6) 24.0 |
| 7) 70.0 | 8) 280.0 |

Select Number :1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V rated = 72.50 kV
isc = 100.000 kA
Fij = 250.000 Hz
Accuracy = 80.00 %
inductance ratio = 1.05
tp = 166.000 micro-sec
Up = 124.000 kV
Vc = 93.23370 kV
R = 19.60 ohm
L = 1.60 milli-H
C1 = 180.00 micro-F
C2 = 4.00 micro-F
uc = 119.825 kV
tc = 191 micro-sec

DO YOU WANT TO SEE GRAPH ? (y/n)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ที่นำทั้งหมดนี้ไปดัดแปลงเนื้อหาและตัวอย่างอ้างอิงของเอกสารทุกครั้งที่มีให้นำไปใช้

SELECT RATED OF CIRCUIT BREAKER

- | | |
|-----------|-----------|
| 1) 121 KV | 2) 145 KV |
| 3) 169 KV | 4) 242 KV |
| 5) 362 KV | 6) 550 KV |
| 7) 800 KV | |

Select number : 3

Select short circuit current

- | | | | |
|----------|------------|----------|----------|
| 1) 16 KA | 2) 31.5 KA | 3) 40 KA | 4) 63 KA |
|----------|------------|----------|----------|

Select number : 4

How much injection frequency do you want ?

- | | | |
|-----------|-----------|-----------|
| 1) 250 Hz | 2) 300 Hz | 3) 350 Hz |
| 4) 400 Hz | 5) 500 Hz | 6) 600 Hz |

Select number : 1

How much percent accuracy do you want ? 80

How much inductance rationcy do you want ?

- 1) 1.05 2) 1.20 3) 1.50

Select number : 1

How much capacitor2 do you want ?

- 1) 4 uF 2) 5 uF 3) 6 uF
4) 8 uF 5) 18 uF 6) 24 uF
7) 70 uF 8) 280 uF

Select number : 1

How much Resistance do you want ?

- | | | | | | |
|-----|---------|-----|---------|-----|---------|
| 1) | 1.2 | 2) | 2.4 | 3) | 4.9 |
| 4) | 9.9 | 5) | 19.6 | 6) | 38.0 |
| 7) | 75.0 | 8) | 152.0 | 9) | 312.0 |
| 10) | 625.0 | 11) | 1316.0 | 12) | 2500.0 |
| 13) | 5000.0 | 14) | 10000.0 | 15) | 20000.0 |
| 16) | 50000.0 | | | | |

Select number : 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

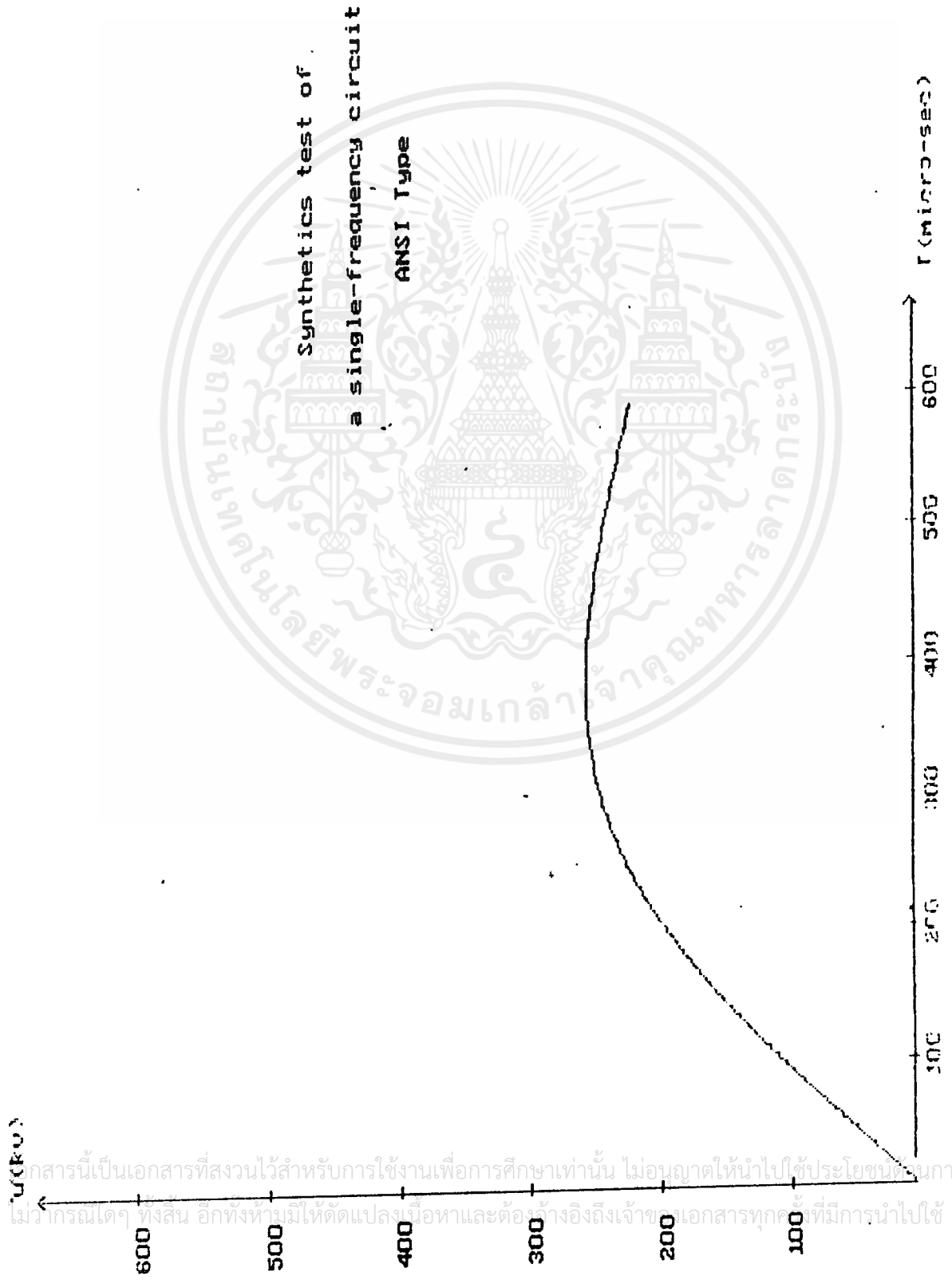
Rated = 169 kV
Isc = 63 kA
injection frequency = 250 Hz
inductance ratio = 1.05
accuracy = 80.00 %

tp = 357.000
Up = 297.00000
Vc = 206.98189

R = 38.00 ohm
L = 6.600 mH
C1 = 60.000 micro-F
C2 = 4.000 micro-F

T2 = 389 micro-S
Uc = 257.463 kV

Do you want to see the graph ? (y/n)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SELECT RATED OF CIRCUIT BREAKER

- | | |
|-----------|------------|
| 1) 100 KV | 2) 123 KV |
| 3) 145 KV | 4) 170 KV |
| 5) 245 KV | 6) 300 KV |
| 7) 362 KV | 8) 420 KV |
| 9) 525 KV | 10) 765 KV |

Select number :1

Input First Pole to clear factor please

1) 1.3

2) 1.5

Select number :1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INPUT RATED SHORT-CIRCUIT BREAKING CURRENT

- | | |
|--------------|-------------|
| 1) 6.3 kA | 2) 8.0 kA |
| 3) 10.0 kA | 4) 12.5 kA |
| 5) 16.0 kA | 6) 20.0 kA |
| 7) 25.0 kA | 8) 31.0 kA |
| 9) 40.0 kA | 10) 50.0 kA |
| 11) 63.0 kA | 12) 80.0 kA |
| 13) 100.0 kA | |

Select number : 4

INPUT INJECTION FREQUENCY

- | | |
|----------|----------|
| 1) 250.0 | 2) 300.0 |
| 3) 350.0 | 4) 400.0 |
| 5) 500.0 | 6) 600.0 |

Select number : 1

Please select inductance ratio

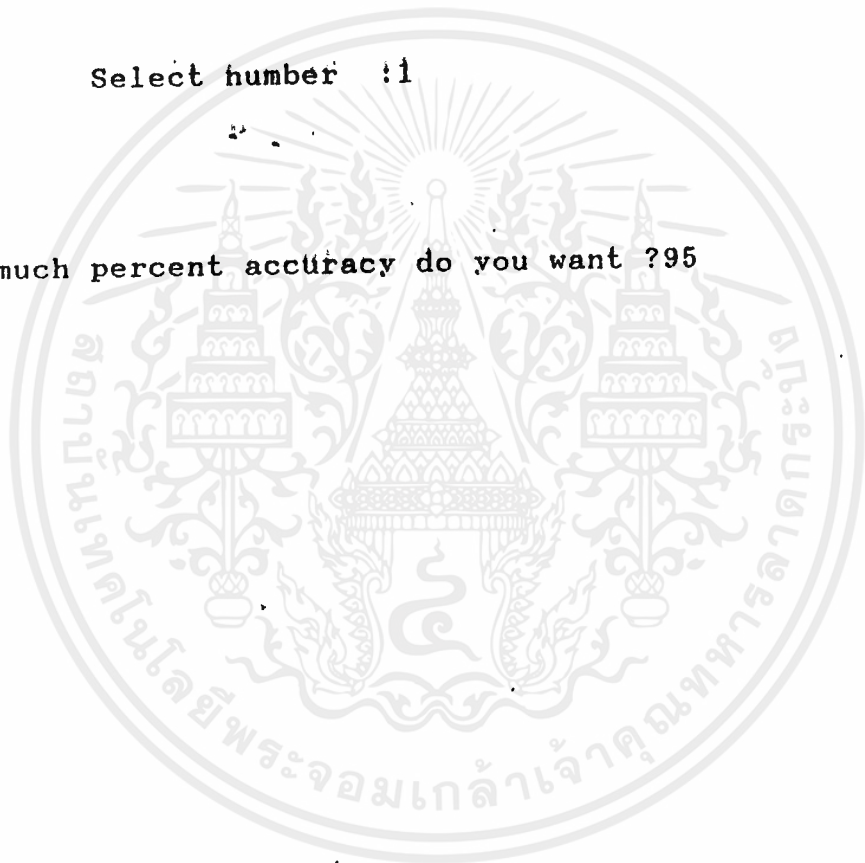
1. 1.05

2. 1.20

3. 1.50

Select number :1

How much percent accuracy do you want ?95



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Put initial value of R in ohm

- | | | | | | |
|-----|---------|-----|---------|-----|---------|
| 1) | 1.2 | 2) | 2.4 | 3) | 4.9 |
| 4) | 9.9 | 5) | 19.6 | 6) | 38.0 |
| 7) | 75.0 | 8) | 152.0 | 9) | 312.0 |
| 10) | 625.0 | 11) | 1316.0 | 12) | 2500.0 |
| 13) | 5000.0 | 14) | 10000.0 | 15) | 20000.0 |
| 16) | 50000.0 | | | | |

select number: 3

Put initial value of L2 in mH

- | | | | | | |
|----|------|----|------|----|------|
| 1) | 0.5 | 2) | 1.0 | 3) | 2.0 |
| 4) | 4.0 | 5) | 8.0 | 6) | 16.0 |
| 7) | 32.0 | 8) | 64.0 | | |

select number: 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Put initial value of C2 in micro-F

- | | | | | | |
|----|------|----|-------|----|------|
| 1) | 4.0 | 2) | 5.0 | 3) | 6.0 |
| 4) | 8.0 | 5) | 18.0 | 6) | 24.0 |
| 7) | 70.0 | 8) | 280.0 | | |

select number : 6

Put initial value of C3 in micro-F

- | | | | | | |
|----|-----|----|------|----|-----|
| 1) | 0.4 | 2) | 0.5 | 3) | 0.6 |
| 4) | 0.8 | 5) | 1.8 | 6) | 2.5 |
| 7) | 8.0 | 8) | 30.0 | | |

select number : 1

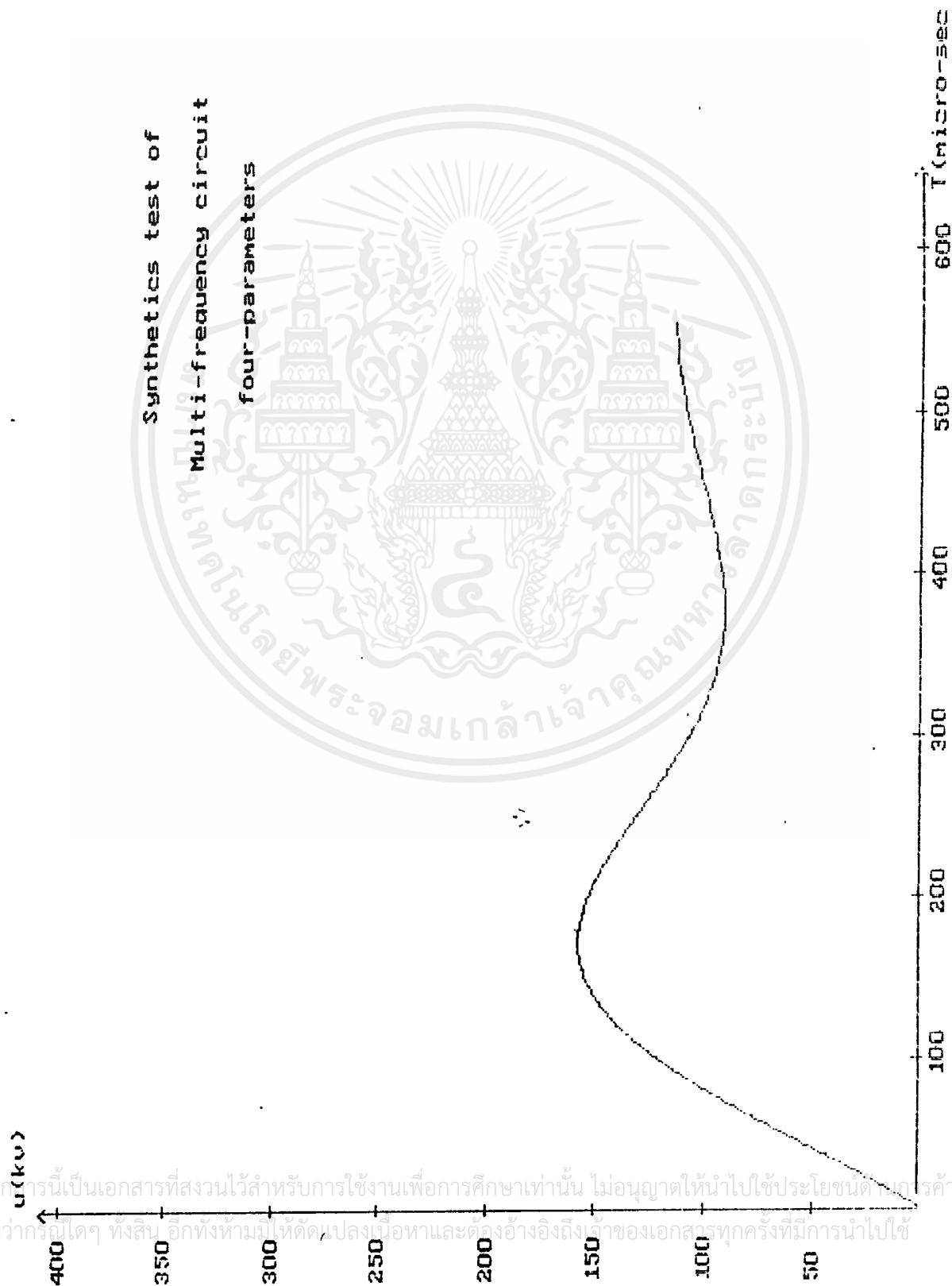
rated = 100.00 kV
isc = 12.500 kA
Fi = 250 Hz
Accuracy = 95.00 %
inductance ratio = 11050

tp = 159 micro-sec
Up = 149.000 kV
Vc = 111.45224 kV

R = 4.90 ohm
L = 16.70000076 mH
C1 = 20.00000000 micro-F
C2 = 280.00000000 micro-F
C3 = 8.00000 micro-F
L2 = 0.50000 mH

T2 = 165 micro-S
Uc = 156.374 kV

Do you want to see the graph ? (y/n)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางธุรกิจ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 บทสรุปและวิจารณ์

บทสรุป

ในระบบไฟฟ้าแรงสูงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกันแรงสูง เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง ซึ่งต้องมีการทดสอบก่อนนำไปใช้จริง แต่การทดสอบอุปกรณ์แรงสูงนั้นต้องป้องกันแรงดันไฟและกระแสที่สูงเพื่อดูว่าอุปกรณ์ป้องกันสามารถใช้งานได้ แต่การป้องกันแรงดันไฟ และกระแสที่สูงนั้นเป็นไปได้ยาก เพราะต้องมีการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมีหม้อแปลงขนาดใหญ่มากซึ่งในปัจจุบันยังไม่สามารถสร้างได้ จึงได้มีการพัฒนาวงจรทดสอบแบบซินเทติกเพื่อสร้างแรงดันไฟและกระแสสูงซึ่งการออกแบบวงจรทดสอบนั้นเป็นวิธีที่ซับซ้อนและยุ่งยาก ดังนั้นผู้จัดทำจึงได้ทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ โดยมีวัตถุประสงค์ให้ผู้อ่านได้เข้าใจถึงระบบการทดสอบมาตรฐานการทดสอบและการออกแบบวงจรทดสอบ และแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบวงจรทดสอบ

โปรแกรมที่สร้างขึ้นมานี้ ได้ผลเป็นที่น่าพอใจสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์พิกัดสูงกว่า 72.5 กิโลโวลต์ ส่วนเซอร์กิตเบรกเกอร์พิกัดต่ำกว่า 72.5 กิโลโวลต์จะมีความผิดพลาดของ อุปกรณ์ในการทดสอบจากการใช้ โปรแกรมมากกว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์พิกัดสูงๆ เนื่องจากความละเอียดของอุปกรณ์ยังไม่มากพอ เพราะอุปกรณ์ที่ใช้อยู่ใน ห้องทดสอบของลีสเลอนาเดอร์ในประเทศฝรั่งเศส จะใช้ทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่พิกัดสูงๆ ส่วนพิกัดต่างๆใช้วิธีทดสอบโดยตรงได้ดังนั้นเมื่อเรานำอุปกรณ์เหล่านั้นมาใช้กับพิกัดต่างๆจึงยากที่จะหาอุปกรณ์ที่เหมาะสมกันตามต้องการ แต่โดยรวมแล้วโปรแกรมนี้ก็สามารถใช้งานได้ดี และถ้าต้องการเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสูงยิ่งขึ้นจะใช้เวลาในการทำงานของโปรแกรมนานขึ้น ซึ่งถ้าเราเลือกค่าเริ่มต้นของอุปกรณ์ในวงจรได้ใกล้เคียงกับค่าที่ถูกต้องก็จะช่วยลดเวลาในการทำงานได้

บทวิจารณ์

โปรแกรมในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เขียนด้วยภาษาซีใช้กับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ที่เป็นคอมแพคทิเบิลกับไอบีเอ็ม 16 บิต โดยโปรแกรมจะแบ่งออกเป็นสามโปรแกรมย่อยตามแต่ละแบบของวงจรทดสอบ แล้วมีการเรียกใช้โปรแกรมย่อยนั้นจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมหลักและในโปรแกรมยังใส่โปรแกรมเขียนกราฟ Vcoord.c ไว้เพื่อสะดวกในการเขียนกราฟอีกด้วย

การสร้างและพัฒนาวงจรทดสอบในประเทศไทยยังเป็นไปได้ยาก เพราะไม่มีเป็นที่กว้างขวางเนื่องจากในประเทศไทยยังไม่สามารถผลิตเซมิคอนดักเตอร์แรงสูงได้และใช้เซมิคอนดักเตอร์แรงสูงน้อย ซึ่งใช้แต่ในไฟฟ้าฝ่ายผลิตเท่านั้นซึ่งมีพิกัดสูงสุดเพียง 230 กิโลโวลต์เท่านั้น เซมิคอนดักเตอร์แรงสูงที่ซื้อมาจากต่างประเทศนั้นก็จะทดสอบจากประเทศที่สั่งซื้อมาแล้วและอุปกรณ์ร่วมที่จำเป็นในวงจรทดสอบ เช่นคาร์ปาซิเตอร์ ตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทานซึ่งมีขนาดใหญ่มาก (ดังแสดงในรูปภาคผนวก ค) ก็ยังขาดแคลนนับเป็นอุปสรรคสำคัญดังนั้นจึงสามารถทำได้เพียงเขียนโปรแกรม เพื่อสร้างสัญญาณแรงดันทรานเซียนรีโวลเตอร์โวลเตจขึ้นเท่านั้นเพื่อช่วยเป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจนำไปใช้ประโยชน์ในอนาคต



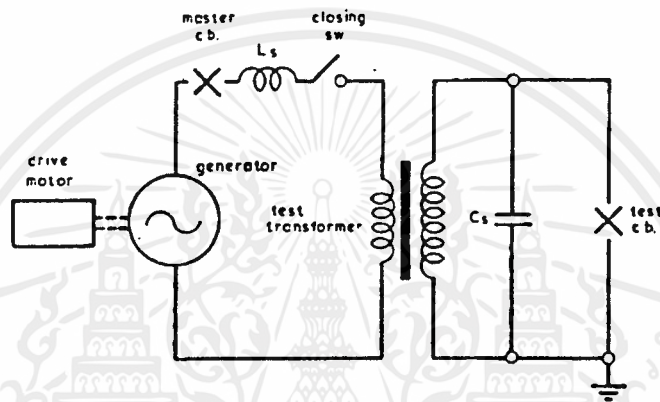


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบไดเร็ค

เป็นการทดสอบการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยในการทดสอบจะใช้แหล่งจ่ายพลังงานเพียงแหล่งเดียวทำหน้าที่ทั้งจ่ายกระแสและรีโควอร์รี่ โวลเตจให้กับเซอร์กิตเบรกเกอร์ มีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงวงจรทดสอบการลัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบไดเร็ค

พารามิเตอร์ของวงจรทดสอบแบบไดเร็คสามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

$$V_d = (K_T * V_n) / \sqrt{3}$$

$$V_1 = \sqrt{2} * V_d$$

$$L_d = (K_T * V_n^2) / (\omega_o * P)$$

V_d : ค่า rms ของแหล่งจ่ายโวลเตจ

V_n : ค่าพิกัดโวลเตจ (ค่าต่อเฟส) ของระบบไฟฟ้า

K_T : ค่าเฟิสท์โพลทูเคลียร์แฟกเตอร์

L_d : ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรทดสอบแบบไดเร็ค

P : กำลังไฟฟ้า 3 เฟส ของระบบ $P = \sqrt{3} * V_n * I_{sc}$

ω_o : ความถี่เชิงมุมของระบบไฟฟ้า $\omega_o = 2\pi * 60$

องค์ประกอบของวงจรทดสอบแบบไดเร็ค

1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกขับโดยตรงจากมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งได้รับพลังงานจากระบบไฟฟ้าภายนอก มีการส่งกำลังผ่านเพลลา และเก็บพลังงานไว้ในหม้อแปลงขนาดใหญ่ มอเตอร์เหนี่ยวนำจะถูกตัดออกจากระบบทันทีทันใด ก่อนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต่อเข้ากับวงจรทดสอบและจ่ายพลังงานให้กับวงจรทดสอบ โดยอาศัยผลของแรงเฉื่อยจากหม้อแปลงนั้น

1.2 สวิตช์ เป็นสวิตช์ตัดต่อที่ใช้ในการเชื่อมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับวงจรทดสอบ ณ จุดเวลาที่ต้องการอย่างแม่นยำ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้สวิตช์ที่มีความรวดเร็วในการทำงานสูงมาก ส่วนมากจะนิยมใช้สวิตช์แบบอัดอากาศ โดยจะอยู่ในแชมเบอร์ที่มีความดันอากาศประมาณ 60 atm

1.3 เซอร์กิตเบรกเกอร์มาสเตอร์จุดมุ่งหมายของการใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์นี้เพื่อป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆในสถานทดสอบ ถ้าเซอร์กิตเบรกเกอร์ทดสอบทำงานล้มเหลวในการอินเตอร์รัปกระแสลัดวงจร เซอร์กิตเบรกเกอร์มาสเตอร์นี้จะต่ออยู่ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นจุดที่เซอร์กิตเบรกเกอร์มาสเตอร์จะต้องสามารถทำการอินเตอร์รัปได้ที่พิกัดเอาท์พุทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และมีความทนทานทางกลสูง ปัจจุบันนิยมใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดพัดลมไปอากาศ มาทำหน้าที่เป็นมาสเตอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งจะมีเวลาในการตัดวงจรภายใน 7 msec และเวลาที่ทนการเกิดอาร์กได้นานที่สุด 10 msec

1.4 หม้อแปลงไฟฟ้า ต้องเป็นชนิดที่มีฉนวนทนต่อการเกิดโอเวอร์โวลเตจในวงจรได้ มีอิมพีแดนซ์น้อยมาก เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.5 รีเลย์ตัดวงจรจำกัดกระแส นิยมใช้รีเลย์ตัดวงจรแก้อากาศมาติดตั้งระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อทำการจำกัดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

1.6 คาปาซิแตนซ์รวมของแหล่งจ่าย เป็นตัวจำกัดอัตราการเพิ่มขึ้นของทรานเซียนท์ รีโคเวอรี โวลเตจ ในช่วง 2-3 μ sec แรก และยังเป็นตัวกำหนดค่าเวลาหน่วงของวงจรทดสอบ

ลำดับการทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบไดเร็ค

1) เดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเร่งเข้าสู่ความเร็วรอบที่พิกัด โดยต่อขับโดยตรงจากมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้รับพลังงานจากภายนอก เซอร์กิตเบรกเกอร์ทดสอบอยู่ในสภาวะต่อวงจร เซอร์กิตเบรกเกอร์มาสเตอร์และสวิตช์อยู่ในสภาวะเปิดวงจร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

- 2) เซอร์กิตเบรกเกอร์มาสเตอร์ทำการต่อวงจร
- 3) มอเตอร์เหนียวน่าถูกตัดออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 4) สับสวิตช์ต่อวงจร
- 5) เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำการอินเตอร์รับ เปิดวงจรออก
- 6) เซอร์กิตเบรกเกอร์มาสเตอร์เปิดออก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ระบบข้อมูลและการวิเคราะห์โดยคอมพิวเตอร์

ในการออกแบบและการควบคุมการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ จำเป็นต้องมีการทดสอบ เพื่อที่จะทราบความสามารถในการทนทานต่อความเค้นที่จะเกิดขึ้นในการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์นั้น นั้นแสดงว่าต้องมีการบันทึกและวิเคราะห์ปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆ เช่น แรงดันไฟฟ้าที่เทอร์มินัล กระแส ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ ปัจจุบันได้มีการค้นพบว่าการนำระบบข้อมูลในแบบดิจิทัลร่วมกับกราฟิกริเซสและการวิเคราะห์ข้อมูลแบบฮอตเมติก มาใช้แทนระบบที่วิเคราะห์แทนระบบที่วิเคราะห์ด้วยมือจากข้อมูลการบันทึกของออสซิลโลกราฟ (oscillograph) จะได้ประโยชน์ทางด้านความเร็วและความแม่นยำกว่า

ส่วนของการส่งสัญญาณจากเครื่องตรวจจับสัญญาณ (sensor) ไปยังเครื่องบันทึกชั่วขณะจะนำระบบเส้นใยนำแสงมาใช้ ส่วนตัวเครื่องบันทึกชั่วขณะจะทำงาน 2 หน้าที่ คือ แปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล และเก็บรักษาข้อมูลไว้ชั่วขณะหนึ่ง จากนั้นจะทำการส่งต่อข้อมูลไปยังเครื่องดิจิทัลคอมพิวเตอร์เพื่อทำการเลือกใช้ซอฟต์แวร์ (software) ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ตัวแปรทางไฟฟ้าต่างๆกัน

ระบบข้อมูล

ก) เครื่องตรวจจับสัญญาณและการนำส่งสัญญาณ

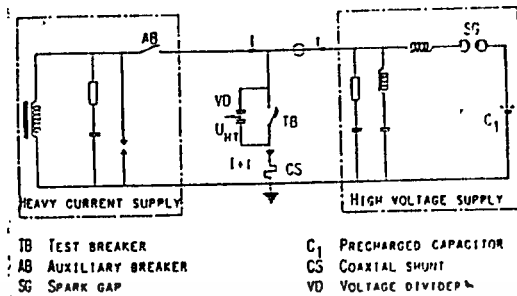
ในการติดตั้งระบบข้อมูลดิจิทัลในสถานทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ผู้ออกแบบจะต้องศึกษาระบบการนำส่งสัญญาณ เกี่ยวกับการป้องกันอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ของระบบข้อมูลดิจิทัลจากสัญญาณรบกวนของสนามแม่เหล็ก และปัญหาเหล่านี้จะยิ่งทวีความรุนแรงขึ้นในกรณีที่เป็นการวัดและบันทึกปริมาณกระแสในระดับหลายสิบลีบ kA และแรงดันไฟฟ้าในระดับหลายร้อย kV

ปัจจุบันเครื่องตรวจจับสัญญาณที่นิยมใช้จะประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรก คือ โคแอกเซียลชั๊นท์ และส่วนที่สองคือ โวลเตจดิไวเดอร์ ซึ่งจะ เป็นแบบแดมป์โวลเตจดิไวเดอร์ (damped voltage divider) หรือแบบผสมก็ได้ตั้งแสดงในรูปที่ 1 สัญญาณเทอร์มินัลโวลเตจจากโวลเตจดิไวเดอร์ และสัญญาณกระแสทั้งหมดจากชั๊นท์

โคแอกเซียลจะถูกส่งไปยังเครื่องบันทึกชั่วขณะ โดยผ่านระบบเส้นใยนำแสง ซึ่งทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

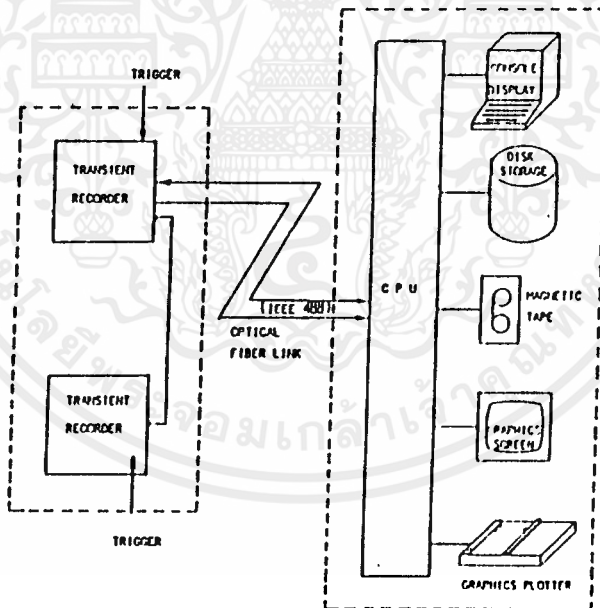
ระบบนำส่งสัญญาณและเครื่องรับจะต้องทำการป้องกันคลื่นรบกวนจากแหล่งต่างๆด้วย



รูปที่ 1 แสดงวงจรการทดสอบแบบซินเทติกและการต่อเครื่องตรวจจับสัญญาณ

ข) ระบบข้อมูลดิจิทัล

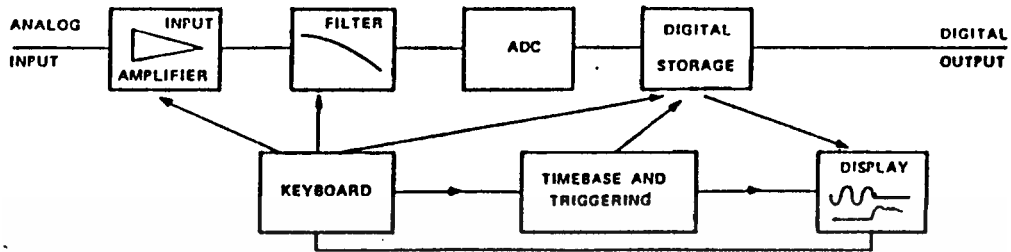
จากรูปที่ 2 จะแสดงให้เห็นถึงระบบที่ง่ายที่สุดและมีความยืดหยุ่นในการใช้งานมากที่สุด คือ เครื่องบันทึกชั่วขณะจะทำหน้าที่ในการบันทึกผลการวัดและเก็บรักษาข้อมูลจากการทดสอบ แล้วจึงส่งต่อข้อมูลไปยังเครื่องมินิคอมพิวเตอร์



รูปที่ 2 แสดงระบบการทำงานของเครื่องบันทึกชั่วขณะกับเครื่องมินิคอมพิวเตอร์

รูปที่ 3 จะแสดงถึงส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องบันทึกชั่วขณะที่ใช้งานอยู่ที่สถานีทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง LEP ประเทศฝรั่งเศส ซึ่งจะเป็นเครื่องแบบ 4 ชินโครนิสแซนแนล ในแต่ละแซนแนลจะมีหน่วยความจำภายในขนาด 16 บิต อยู่ 8 kwords และมีคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาด 10 บิต มีช่วงความกว้างของสัญญาณ (bandwidth) 50 kHz สำหรับการ
 สุ่มด้วยความถี่ 1 MHz และต้องการความผิดพลาดไม่เกิน 1%



รูปที่ 3 แสดงแผนภาพส่วนประกอบของเครื่องบันทึกชั่วขณะ

เมื่อข้อมูลถูกส่งต่อมายังเครื่องมินิคอมพิวเตอร์ขนาด 16 บิต โดยผ่านทาง
 เส้นใยนำแสง และเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็ก (ทั้งจากหน่วยความ
 จำภายในและจากการทำงานของตัวเครื่องมินิคอมพิวเตอร์เองด้วย) จึงต้องมีการ
 นำเอาลวดนำไฟฟ้ามาใช้ป้องกันสำหรับเครื่องมือแต่ละชิ้นเป็นอย่างดี แม้จะเกิดแฟลช
 โอเวอร์ (flashover) ในระดับแรงดันไฟฟ้าถึง 1 MV ก็ตาม

การวิเคราะห์โดยคอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์สัญญาณที่บันทึกได้ ในการทดสอบแบบซินเทติกของเซอร์กิต
 เบรกเกอร์ โดยใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยจะก่อให้เกิดประโยชน์ในด้านความรวดเร็ว
 และความแม่นยำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัจจุบันนี้ความสามารถของเครื่องดิจิทัล
 คอมพิวเตอร์มีมากขึ้น ทำให้เราได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องในเวลาอันสั้นมาก เป็น
 การลดบทบาทการทำงานของมนุษย์ลงทำให้ความเสี่ยงในด้านความผิดพลาดและการ
 คิดประมาณการเองเองของมนุษย์ลดลงด้วย แต่สัญญาณที่ถูกส่งมาจากเครื่องตรวจจับ
 สัญญาณจะอยู่ในฟังก์ชันของเวลา เมื่อนำมาใช้กับคอมพิวเตอร์จึงต้องเปลี่ยนเป็น
 สัญญาณดิจิทัลก่อนโดยเครื่องบันทึกชั่วขณะ ซึ่งมีคุณสมบัติในการรับสัญญาณอินพุตได้
 พร้อมกันครั้งละหลายๆ แชนแนล และมีการทำงานหลายโหมดเพื่อที่จะช่วยให้การ
 บันทึกข้อมูลเฉพาะส่วนที่ต้องการเป็นไปโดยง่ายขึ้น

ข้อจำกัดที่สำคัญของการวิเคราะห์โดยคอมพิวเตอร์ คือ การวิเคราะห์สัญญาณ
 ดิจิตอล ณ ตำแหน่งที่ปริมาณทางไฟฟ้าเป็นศูนย์ เช่น ตำแหน่งที่กระแสเป็นศูนย์
 (current zero) อาจมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นได้ เนื่องจากในการแปลงสัญญาณ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลใช้วิธีการสุ่มตามความถี่ที่กำหนด สัญญาณดิจิทัลที่ได้จึงไม่ใช่ส่วนของสัญญาณจริงทั้งหมด ในทางตรงข้าม ถ้าบันทึกผลการทดสอบโดยใช้ออสซิลโลกราฟจะสามารถทำการวิเคราะห์ที่จุดนี้ได้ง่ายกว่า และปัญหาเหล่านี้จะยิ่งเพิ่มความรุนแรงขึ้นเมื่อมีผลของสิ่งต่อไปนี้

- ก) สัญญาณรบกวนของสนามแม่เหล็กจากการปิด เปิดของระบบสวิตช์เกียร์
- ข) สัญญาณรบกวนจากการนำส่งสัญญาณในระบบเส้นใยนำแสง
- ค) สัญญาณรบกวนจากการใช้เครื่องบันทึกชั่วคราวและเคื่องมิโครคอมพิวเตอร์
- ง) ความผิดพลาดของคอนเวอร์เตอร์ในการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

จากการที่เราพบว่า สัญญาณส่วนที่ต้องการนำมาใช้งานจะอยู่ในย่านความถี่ที่จำกัดค่าหนึ่งขึ้นอยู่กับช่วงความกว้างของสัญญาณของเครื่องบันทึกชั่วคราว แต่สัญญาณรบกวนต่างจะมีย่านความถี่ที่กว้างมาก เราจึงสามารถลดสัญญาณรบกวนโดยปราศจากผลกระทบต่อสัญญาณส่วนที่นำมาใช้งานโดยใช้เครื่องกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (low-pass filter) ได้ เริ่มแรกสัญญาณจะถูกนำมาวิเคราะห์โดยรวมทั้งหมดเพื่อทำการหาค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ค่ากระแสสูงสุด รีโควีร์โวลเตจ จากนั้นจึงจะนำผลจากการบันทึก ณ ตำแหน่งที่ปริมาณไฟฟ้าเป็นศูนย์มาวิเคราะห์ จากการพิจารณาโวลเตจ และ กระแสที่บันทึกไว้ขณะทำการทดสอบจะพบว่า สัญญาณมีความถี่สูงมาก เพราะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงในระยะเวลานั้นๆ จึงมีการแยกสัญญาณออกเป็นส่วนๆที่มีย่านความถี่ต่างกัน การลดสัญญาณรบกวนจึงทำได้ง่ายขึ้นเนื่องจากช่วงความถี่ในการทำงานของวงจรกรองสัญญาณมีค่าต่ำกว่าการพิจารณาทั้งระบบรวมกัน

ภาคผนวก ค

แหล่งกำเนิดซินเทติกสำหรับเซอร์กิตเบรคเกอร์แรงสูง

ทฤษฎีทางไฟฟ้าสามารถอธิบายอุปกรณ์กำเนิดพลังงาน และอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงานได้เกือบทั้งหมดอย่างแม่นยำ โดยใช้วิธีการคำนวณ ยกเว้นอุปกรณ์ที่มีการอาร์กเข้ามาเกี่ยวข้องกับการทำงาน เช่น เซอร์กิตเบรคเกอร์ หน้าที่ของเซอร์กิตเบรคเกอร์ ก็คือ การตัดวงจรไฟฟ้าออกเมื่อเกิดการผิดปกติโดยการตัดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ในการออกแบบเซอร์กิตเบรคเกอร์นั้นเราไม่สามารถลองผิดลองถูกหรือทำการลดขนาดของอุปกรณ์นั้นในขณะทดสอบได้ คือ การทดสอบต้องมาจากอุปกรณ์จริงๆ ซึ่งอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดจะมีราคาสูง และใช้ร่วมกับอุปกรณ์อื่นที่ต้องมีประสิทธิภาพสูงด้วย แต่ก็สามารถที่จะนำอุปกรณ์กำลังต่ำต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดโวลเตจ ซึ่งเรียกได้ว่า "วงจรซินเทติก"

แหล่งกำเนิดซินเทติกเริ่มมีความสำคัญมากขึ้นในการทดสอบเซอร์กิตเบรคเกอร์กระแสสลับ แม้จะเป็นเพียงการคาดคะเนว่าอุปกรณ์ที่ทดสอบสามารถใช้งานได้จากผลการทดลองก็ตาม

โครงสร้างของเครื่องทดสอบ

แหล่งกำเนิดจะประกอบไปด้วยวงจรรูปร่าง E ที่เหมือนกันสองส่วน ซึ่งทำการติดตั้งให้สมมาตรกันในหอททดสอบขนาด 20 x 60 x 20 เมตร ตามรูปที่ 1 ในแต่ละวงจรจะมีส่วนหลัก หรือโมดูล (moduls) ให้ค่าชาร์จจิ้งโวลต์เตจ 180 KV ต่อส่วน ซึ่งโมดูลนี้สามารถต่อเข้าด้วยกันได้สามแบบ คือ

- ต่ออนุกรมกัน 4 โมดูล สำหรับโวลต์เตจสูงสุด 720 KV
- ต่อขนานกัน 4 โมดูล สำหรับโวลต์เตจสูงสุด 180 KV
- ต่ออนุกรมกัน 2 โมดูล 2 ชุด และนำมาต่อขนานกัน สำหรับโวลต์เตจสูงสุด 360 KV

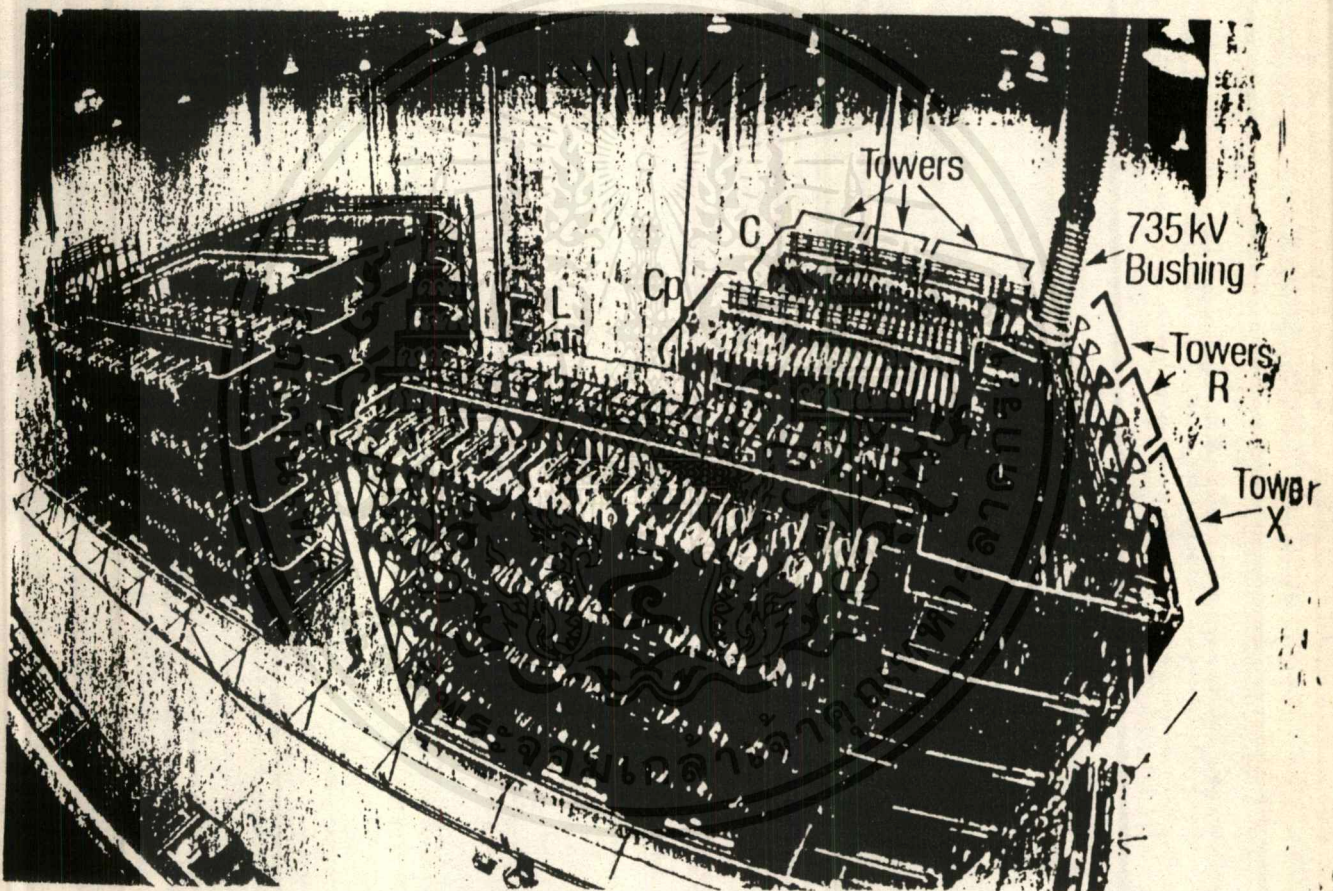
แต่ละด้านของวงจรรูป E ทั้งสี่ด้านจะมีอุปกรณ์ติดตั้ง ดังนี้

- กิ่งที่ใกล้ที่สุด (L) เป็นรีแอคเตอร์ 10 mH 30 KV
- กิ่งตรงกลาง (C₀) ประกอบไปด้วยคาปาซิเตอร์หลัก 20 μ F 30 KV
- กิ่งที่ไกลที่สุด (C₁) เป็นคาร์ปาซิเตอร์ควบคุม 10 μ F 30 KV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านไกล (R) และเป็นที่ต่ออนุกรมหรือขนาน ทางด้านใกล้ (X)

ซึ่งแต่ละวงจรจะต่อถึงกันโดยผ่านบushing ซึ่งต่อไปยังบัสบาร์บนหลังคาทดสอบ เพื่อนำกระแสไปยังเครื่องวัดแรงสูง 2 ตัว จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าแต่ละวงจรประกอบด้วย 12 หอสูง ที่สูงประมาณ 12 เมตร โดยที่ 3 หอสูงเป็นคาปาซิเตอร์ , 3 หอสูงเป็นรีแอคเตอร์ , 3 หอสูงเป็นคาปาซิเตอร์ควบคุม , 2 หอสูงเป็นตัวต้านทาน และอีกหอเป็นตัวเชื่อมวงจร ซึ่งหอสูงทั้งหมดจะติดตั้งบนเครื่องรองรับน้ำหนักแบบใช้อากาศซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 1 แสดงแหล่งกำเนิดของวงจรทดสอบแบบซินเทติก

ส่วนประกอบทางไฟฟ้า

หอสูงที่แสดงออกมาดังรูปนั้นจะเป็นสองวงจร แต่ละวงจรจะแบ่งเป็นหอสูง L 3 ส่วนแต่ละส่วนมี 4 แท่น ในแต่ละแท่นจะมีรีแอคเตอร์อยู่ 6 ตัว ในแต่ละด้านตามยาว ซึ่งทั้งหมดจะมีรีแอคเตอร์ 288 ตัว พิกัด 10 mH 30 KV (6 x 2 x 4 แท่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

x 3 ส่วน x 2 วงจร) และแต่ละวงจรจะมีคาปาซิเตอร์ 3 ส่วน แต่ละส่วนมี 4 แทน ในแต่ละแทนมีคาปาซิเตอร์ 7 ตัวหลัก ในแต่ละด้านตามแนวยาวมีคาปาซิเตอร์ 366 ตัว (7 x 2 x 4 แทน x 3 ส่วน x 2 วงจร) คาปาซิเตอร์มีพิกัดพลังงาน 9 KJ และได้พลังงานรวมเท่ากับ 3 MJ

ในส่วนคาปาซิเตอร์ควบคุมก็จะเหมือนกับคาปาซิเตอร์หลัก ยกเว้นที่ส่วนประกอบพิกัดเป็น 10 μ F 30 KV ให้พลังงานรวม 1.5 MJ

ตัวต้านทาน (R) มี 2 หอสูงต่อวงจร แต่ละแทนจะมีตัวต้านทานต่ออนุกรมกัน 12 ตัว (รวม 96 ตัว) แต่ละตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า เช่น 0.4, 0.8, ... พลังงานจากคาปาซิเตอร์ของแหล่งกำเนิดมีค่าเท่ากับ 4.5 MJ จ่ายให้กับแทนทั้งสิ้น ไปยังแต่ละตัวต้านทานซึ่งใช้พลังงานในแต่ละแทนใกล้เคียงกัน คือ 1 MJ

เนื่องจากโวลเตจชาร์จจึงเท่ากับ 180 KV ต่อแทน และสามารถที่จะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า เมื่อเกิดภาวะทรานเซียนท์ คือมีค่า 360 KV ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้ฉนวนที่ดีในการป้องกัน

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้ได้รับความกรุณาจาก อาจารย์ ศุภี บรรจงจิตร ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษาของโครงการ ที่ให้คำแนะนำตลอดจนเอกสารและบทความประกอบการดำเนินงานต่างๆ แก่ผู้จัดทำ จนทำให้ปริญญาโทสำเร็จลงได้ด้วยดี ผู้จัดทำจึงขอแสดงความขอบคุณมา ณ ที่นี้

นอกจากนี้ผู้จัดทำขอขอบคุณ ท่านอาจารย์ เจ้าหน้าที่ และเพื่อนๆทุกคนที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือแก่ผู้จัดทำในทุกๆด้าน

อย่างไรก็ตาม หากปริญญาโทฉบับนี้มีข้อบกพร่องประการใด ผู้จัดทำขอรับผิดชอบไว้แต่เพียงฝ่ายเดียว ส่วนความดีและคุณค่าของปริญญาโทฉบับนี้ ขอมอบให้คณาจารย์ที่ได้สั่งสอนอบรมมา ตลอดจนทุกท่านที่มีส่วนช่วยทำให้ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี

ขอขอบคุณ

มาริส่า	อำมาตย์มณี
แมนสรวง	คล้ายมณี
วราพงษ์	อัครีรวงศ์

หนังสืออ้างอิง

1. C.L. Wagner, H.M. Smith, "Analysis of transient recovery voltage TRV rating concept", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems", Vol. PAS-103, No. 11, 1984, pp. 3354-3363
2. D.E. Hedman and S.R. Lambert, "Power circuit breaker transient recovery voltage", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, No. 1, January/February 1976, pp. 197-205
3. E. Thuries, P. Van doan, J. Dayet and B. Joyeux-Bouillion, "Synthetic testing method for generator circuit breaker", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 1, January 1986, pp. 179-184
4. IEC 56 (International Standard), High-voltage alternative-current circuit breaker, Fourth edition, 1987
5. IEC (Sub-committee 17A), Revision of publication 427 : Synthetic testing of high-voltage circuit breaker, 1986
6. James G. Holbrook, "Laplace transform for electronic engineering", Second (revised) edition, 1966, pp. 333
7. J. A. Sullivan, "Circuit breaker specification and testing", High-voltage circuit breaker, pp. 424-489
8. J. M. Hanriot and C. uilloux, "Digital acquisition and numerical processing of measuring signal", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 3, July 1986, pp. 134-139
9. L. Van der Sluis and W.A. Van der Linden, "Short circuit testing methods for generator circuit breaker with a parallel resistor", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 10, October 1985, pp. 2713-2719
10. S. Yamashita, P. Van doan, J. Dayet and B. Joyeux-Bouillion, "

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง(ต่อ)

Construction of a computer-aides measuring system for short circuit testing", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.7, No.3, July 1992, pp.1299-1306

11. W.P.Legros and P.G.Scarpa, "Use of numerical methods in a current breaker testing laboratory", IEEE Trans. on Power Apparatus and system, Vol. PAS-102, No.5, May 1983, pp.1414-1419
12. W.P.Legros, R.Planche, C.Guilloux, M.M.Morant, P.G.Scarpa and A.M.Genon, "Computer aided design of synthetic test circuit for high-voltage circuit breaker", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.4, No.2, April 1989, pp.1049-1055
13. G.St-Jean, S. Member, "A 2-MV 4.5-MJ synthetic test source for HV circuit breakers", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.PWRD-1, No.1, January 1986, pp.191-195
14. ดวงแก้ว สวามิภักดิ์ ฝศ.ดร., "การโปรแกรมภาษา C". สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต, 2532
15. บุญเลิศ เอี่ยมทัศนาศ, ยืน ภู่อสุวรรณ และสมนึก ศิริโรต, "โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ภาษาซี", บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 2532
16. ศุภวี เสรีวัลย์สถิตย์, "เรียนรู้ภาษาซี", ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ, 2533
17. ศุภลี บรรจงจิตร ฝศ., "หลักการและเทคนิคการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง", ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2533