

การวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โปรแกรมพีเอสไปซ์



นายวินิจ ชัยไชย

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

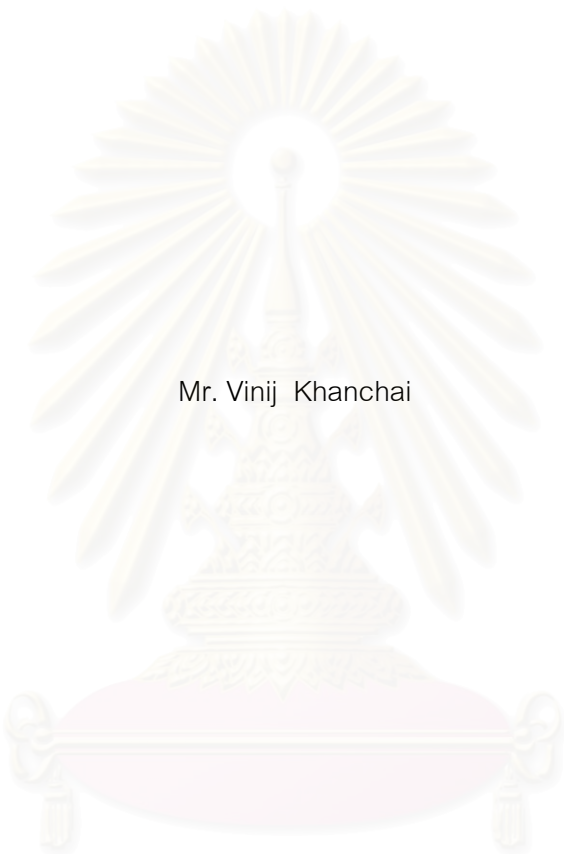
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1303-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ELECTROMAGNETIC TRANSIENT ANALYSIS IN AN ELECTRIC POWER SYSTEM USING PSPICE



Mr. Vinij Khanchai

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1303-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้
โปรแกรมพีเอสไปซ์
โดย นายวินิจ ชั่นไชย
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. ทรงศักดิ์ ชูษณพิพัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลาวัศม์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร. ทรงศักดิ์ ชูษณพิพัฒน์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรวัชร)

..... กรรมการ
(ดร. สุเทพ ฉิมคล้าย)

วินิจฉัย ชันไชย : การวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โปรแกรมพีสไปซ์.
(ELECTROMAGNETIC TRANSIENT ANALYSIS IN AN ELECTRIC POWER SYSTEM USING
PSPICE) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ดร. ทรงศักดิ์
ชูชนพิพัฒน์ , 162 หน้า. ISBN 974-03-1303-5.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงถึงการใช้โปรแกรมพีสไปซ์เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็ก
ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยทำการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยแบบจำลองของโปรแกรมพีสไปซ์ โปรแกรมพีสไปซ์
สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการศึกษาเชิงจริงเนื่องจากฟ้าผ่าและการศึกษาเบื้องต้นเนื่องจากสวิตชิงเชิงจริง เพื่อ
ประโยชน์ในการวิเคราะห์ปัญหาแรงดันเกิน เมื่อตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมพีสไปซ์เปรียบเทียบกับ
โปรแกรมอีเอ็มทีพี ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ...วิศวกรรมไฟฟ้า.....
สาขาวิชา ...วิศวกรรมไฟฟ้า.....
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4170522021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: PSPICE / ELECTROMAGNETIC TRANSIENT / SURGE / MODEL / SWITCHING

VINIJ KHANCHAI : ELECTROMAGNETIC TRANSIENT ANALYSIS IN AN ELECTRIC POWER SYSTEM USING PSPICE. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.DR.SUKUMVIT

PHOOMVUTHISARN, PH.D., THESIS COADVISOR : DR.SONGSAK CHUSANAPIPUTT, 162 pp.

ISBN 974-03-1303-5.

This thesis presents the use of a computer software called PSPICE as a tool to analyze Electromagnetic Transient in An Electric Power System. An electrical model of the given system is developed by using electrical elements called the PSPICE model. PSPICE can apply to study lightning surge and simple switching surge events for overvoltage analysis. The same system was also analyzed by using EMTP. The results obtained from PSPICE and EMTP programs were compared and found to be almost identical.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department ...Electrical.Engineering..... Student's signature

Field of Study ...Electrical.Engineering..... Advisor's signature

Academic year 2001 Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร. สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. ทรงศักดิ์ ชุขณพิพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและควบคุมวิทยานิพนธ์ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อันประกอบด้วย ดร.สุเทพ ฉิมคล้ายและคุณวุฒิชัย พิงประเสริฐ ที่ได้สละเวลาอันมีค่า ในการช่วยเหลือค้นหาข้อมูล และให้คำแนะนำที่มีประโยชน์

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อันประกอบด้วยประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลาวัศมี และกรรมการ อาจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรักษ์ ที่ได้กรุณาช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำที่มีประโยชน์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ผู้เป็นอาจารย์คนแรกในชีวิต ที่ได้ให้กำลังใจและสนับสนุนในการศึกษาตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	1
1.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีในการวิเคราะห์.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับภาวะทรานเซียนต์.....	5
2.3 แบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	10
2.4 ทฤษฎีในการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า.....	14
2.5 องค์ประกอบในการคำนวณพารามิเตอร์ของระบบสายส่ง 500 kV.....	36
2.6 ตัวอย่างวงจรการเกิดทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ.....	45
บทที่ 3 การใช้งานโปรแกรมพีเอสไปซ์.....	49
3.1 บทนำ.....	49
3.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโปรแกรมพีเอสไปซ์.....	49
3.3 การจำลองอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าโดยโปรแกรมพีเอสไปซ์.....	64
3.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์วงจรโดยใช้โปรแกรมพีเอสไปซ์.....	76
บทที่ 4 กรณีศึกษาของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โปรแกรมพีเอสไปซ์.....	82
4.1 บทนำ.....	82
4.2 วงจรกรณีศึกษาของการกระตุ้นสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์.....	82

	หน้า
4.3 วงจรกรณีศึกษาของทรานเซียนต์จากฟ้าผ่า.....	89
4.4 วงจรกรณีศึกษาของสวิตชิงตัวเก็บประจุ.....	99
4.5 วงจรกรณีศึกษาของแบบจำลองสายส่งหลายเส้น.....	105
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	110
5.1 สรุป.....	110
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	111
รายการอ้างอิง.....	112
ภาคผนวก ก.....	116
ภาคผนวก ข.....	137
ภาคผนวก ค.....	142
ภาคผนวก ง.....	148
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	162

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ ตา ร าน

ตารางที่	หน้า
2.1 การประมาณแถบความถี่ที่คาดไว้สำหรับทรานเซียนต์ชนิดต่าง ๆ.....	6
2.2 ชนิดของแรงดันเกินที่สัมพันธ์กับแถบความถี่.....	7
2.3 ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ ช่วงสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ 3 ถึงสถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก.....	42
2.4 ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ เมื่อจัดให้อยู่ในรูปของ Z และ Y.....	43
2.5 ข้อมูลของพารามิเตอร์ระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองแบบพารามิเตอร์คงที่ (Constant-parameter Line).....	43
2.6 ข้อมูลของพารามิเตอร์ระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ แบบพารามิเตอร์ลำดับ.....	44
2.7 ข้อมูลของพารามิเตอร์ระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ แบบพารามิเตอร์เฟส.....	44
3.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของสวิตช์ควบคุมโดยแรงดัน.....	55
3.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแหล่งกำเนิดแบบเอ็กซีโพเนนเชียล.....	56
3.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแหล่งกำเนิดแบบพัลส์.....	57
3.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแหล่งกำเนิดแบบชายนาร์.....	58
3.5 ตัวอย่างของชนิดของพาร์ท.....	61
3.6 รูปแบบทั่วไปของการกำหนดค่าตัวแปรของเอาต์พุท.....	62
3.7 การกำหนดชื่อของอุปกรณ์ที่มี 2 ขั้ว.....	62
3.8 เวลาที่ใช้ในการคำนวณของซีพียูของแบบจำลองสายส่งแบบต่าง ๆ.....	69
3.9 ค่าความต้านทานที่ใช้ในการศึกษาวงจรขนาน RLC.....	79
ก.1 แอตทริบิวต์ของตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ.....	125
ก.2 แอตทริบิวต์ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	126
ก.3 แอตทริบิวต์ของสายส่งไฟฟ้ากำลัง.....	127
ค.1 ข้อมูลกายภาพของเสาส่ง.....	142
ค.2 ข้อมูลกายภาพของสายส่งแรงสูง.....	142
ค.3 ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์.....	143
ค.4 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อกับระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์.....	144
ค.5 ข้อมูลของหม้อแปลงที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์..	144
ค.6 ข้อมูลของหม้อแปลงที่ต่ออยู่ที่สถานีไฟฟ้าย่อยในระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์.....	144
ค.7 ข้อมูลทั่วไปของลูกถ้วยติดเสาในระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์.....	145

ตารางที่	หน้า
ค.8 ข้อมูลทั่วไปของลูกถ้วยแขวนในระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์.....	145
ค.9 ข้อมูลทั่วไปของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์.....	146
ค.10 ข้อมูลทั่วไปของรีแอกเตอร์ขนานในระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์.....	146
ค.11 ข้อมูลทั่วไปของกัปดักเสิร์จในระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์.....	147



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ ภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะเปรียบเทียบของรูปคลื่นแรงดันเกินทั้ง 3 ประเภท.....	7
รูปที่ 2.2 รูปคลื่นมาตรฐานของแรงดันอิมพัลส์สวิตซิง 250/2500 ms.....	8
รูปที่ 2.3 การปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์โดยมีการต่อความต้านทานในจังหวะแรก.....	9
รูปที่ 2.4 รูปคลื่นของฟังก์ชันลาด.....	12
รูปที่ 2.5 รูปคลื่นของฟังก์ชันขั้น.....	12
รูปที่ 2.6 รูปคลื่นของฟังก์ชันคลื่นมาตรฐาน.....	12
รูปที่ 2.7 แสดงวงจรสมมุติแบบฟอสเตอร์.....	14
รูปที่ 2.8 วงจรสมมุติสายส่งไฟฟ้า.....	15
รูปที่ 2.9 (ก) สายส่งที่ไม่มีกำลังสูญเสียแบบจำลอง (ข) วงจรสมมุติของสายส่ง ที่ไม่มีกำลังสูญเสียแบบคลื่นเดินทางที่ค่าพารามิเตอร์ไม่เป็นฟังก์ชันของความถี่.....	17
รูปที่ 2.10 ตำแหน่งในการต่อความต้านทานของสายส่งที่ไม่มีกำลังสูญเสีย.....	18
รูปที่ 2.11 (ก) ไดอะแกรมเส้นเดียว (ข) วงจรสมมุติแบบพายน์.....	19
รูปที่ 2.12 วงจรสมมุติพายน์ จำนวน n หน่วย.....	21
รูปที่ 2.13 วงจรสมมุติของสายส่งแบบคลื่นเดินทางที่พารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่.....	22
รูปที่ 2.14 วงจรสมมุติเทวินินของสายส่งไฟฟ้าหลายเส้น.....	24
รูปที่ 2.15 วงจรสมมุติของความต้านทานเมื่อใช้พารามิเตอร์แบบก้อน.....	25
รูปที่ 2.16 การอินทิเกรตแบบสี่เหลี่ยมคางหมู.....	26
รูปที่ 2.17 (ก) ตัวเหนี่ยวนำ.....	26
รูปที่ 2.17 (ข) วงจรสมมุติของตัวเหนี่ยวนำเมื่อใช้พารามิเตอร์แบบก้อน.....	27
รูปที่ 2.18 (ก) ตัวเก็บประจุ (ข) วงจรสมมุติของตัวเก็บประจุเมื่อใช้พารามิเตอร์แบบก้อน.....	28
รูปที่ 2.19 วงจรสมมุติของความต้านทานไม่เชิงเส้น.....	28
รูปที่ 2.20 วงจรสมมุติของกับดักเล็รจ์แบบออกไซด์ของโลหะ.....	29
รูปที่ 2.21 วงจรสมมุติของตัวเหนี่ยวนำไม่เชิงเส้น.....	30
รูปที่ 2.22 วงจรสมมุติของเซอร์กิตเบรกเกอร์.....	30
รูปที่ 2.23 วงจรของระบบไฟฟ้าที่มี 4 โหนด.....	31
รูปที่ 2.24 วงจรส่วนหนึ่งของระบบวงจรไฟฟ้าเฟสเดียว.....	32
รูปที่ 2.25 แหล่งจ่ายพลังงานของระบบวงจรไฟฟ้า.....	34
รูปที่ 2.26 ระบบไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ในการศึกษาแรงดันเกินสวิตซิง.....	34

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.27 วงจรป้อนที่ใช้ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรที่ 50 Hz ของวงจรส่วนห่างไกล.....	35
ต่อขนานกับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่ต่อกับบัสต้นทาง.....	35
รูปที่ 2.28 วงจรสังเคราะห์ระบบแรงสูง.....	36
รูปที่ 2.29 องค์ประกอบของเสาไฟฟ้า 500 kV.....	37
รูปที่ 2.30 ระยะทางระหว่างตัวนำ i และ k.....	38
รูปที่ 2.31 ไดอะแกรมเส้นเดียวของวงจรสายส่งที่ไม่ต่อโหลด.....	45
รูปที่ 2.32 วงจรทรานเซียนต์ขณะปิดวงจรเซอร์กิตเบรคเกอร์.....	45
รูปที่ 2.33 วงจรทรานเซียนต์ขณะเปิดเซอร์กิตเบรคเกอร์.....	46
รูปที่ 2.34 วงจรทรานเซียนต์ขณะปิดวงจรคาแปซิเตอร์.....	47
รูปที่ 3.1 แบบจำลองของสายส่งไฟฟ้าแบบอุดมคติ.....	53
รูปที่ 3.2 รูปคลื่นของแหล่งกำเนิดกระแสแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล.....	56
รูปที่ 3.3 รูปคลื่นของแหล่งกำเนิดกระแสแบบพัลส์.....	57
รูปที่ 3.4 รูปคลื่นของแหล่งกำเนิดกระแสแบบซายน์.....	58
รูปที่ 3.5 ซีมเมตริกไดอะแกรมและกล่องแสดงการแก้ไขแอดทริบิวต์ ของแบบจำลองแบบพายน์.....	65
รูปที่ 3.6 ซีมเมตริกไดอะแกรมของสายส่งโดยใช้แบบจำลองแบบอุดมคติ.....	66
รูปที่ 3.7 ซีมเมตริกไดอะแกรมของสายส่งโดยใช้แบบจำลองแบบก้อน.....	67
รูปที่ 3.8 ซีมเมตริกไดอะแกรมของสายส่งโดยใช้แบบจำลองแบบพารามิเตอร์กระจาย.....	67
รูปที่ 3.9 แรงดันที่เอาต์พุทของแบบจำลองสายส่งแบบอุดมคติ, แบบก้อน และแบบพารามิเตอร์กระจาย.....	68
รูปที่ 3.10 วงจรของเซอร์กิตเบรคเกอร์.....	69
รูปที่ 3.11 ซีมเมตริกไดอะแกรมและกล่องแสดงการแก้ไขแอดทริบิวต์ของเซอร์กิตเบรคเกอร์.....	70
รูปที่ 3.12 ซีมเมตริกไดอะแกรมและกล่องแสดงการแก้ไขแอดทริบิวต์ของรีแอคเตอร์ขนาน.....	71
รูปที่ 3.13 การนำกระแสของกัปดักเสิร์จแบบออกไซด์ของโลหะ (ZnO).....	71
รูปที่ 3.14 ซีมเมตริกไดอะแกรมและกล่องแสดงการแก้ไขแอดทริบิวต์ของกัปดักเสิร์จ.....	72
รูปที่ 3.15 วงจรสมมูลย์ของสายส่งไฟฟ้าที่ไม่มีกำลังสูญเสีย 3 เส้น.....	75
รูปที่ 3.16 แบบจำลองสำหรับโปรแกรมพีเอสไปซ์ของสายส่งไฟฟ้า ที่มีกำลังสูญเสียและขึ้นกับความถี่ 3 เส้น (N=3).....	76

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.17 วงจรขนานของตัวต้านทาน, ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ.....	77
รูปที่ 3.18 ซคิมเมติกไดอะแกรมของวงจรขนาน RLC.....	79
รูปที่ 3.19 กระแสในตัวเหนี่ยวนำที่คำนวณโดยโปรแกรมพีเอสไปซ์.....	80
รูปที่ 3.20 กระแสในตัวเหนี่ยวนำจากเอกสารอ้างอิง [10].....	80
รูปที่ 4.1 วงจรกรณีศึกษาของระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์.....	83
รูปที่ 4.2 ซคิมเมติกไดอะแกรมของวงจรกรณีการกระตุ้นสายส่ง.....	83
รูปที่ 4.3 แรงดันเกินสวิตชิง 500 กิโลโวลต์ ประเภท 1 เฟส จากโปรแกรมพีเอสไปซ์.....	84
รูปที่ 4.4 แรงดันเกินสวิตชิง 500 กิโลโวลต์ ประเภท 1 เฟส จากโปรแกรมอีเอ็มทีพี.....	84
รูปที่ 4.5 ผลของแรงดันเกินสวิตชิงที่ความยาวของสายส่งค่าต่าง ๆ.....	85
รูปที่ 4.6 การแก้ไขค่าพารามิเตอร์ (Rins) ของเซอร์กิตเบรคเกอร์.....	86
รูปที่ 4.7 ผลของแรงดันเกินสวิตชิงที่ความต้านทานของเซอร์กิตเบรคเกอร์ค่าต่าง ๆ.....	87
รูปที่ 4.8 ผลของแรงดันเกินสวิตชิงที่ระยะเวลาของการใส่ความต้านทานค่าต่าง ๆ.....	87
รูปที่ 4.9 ซคิมเมติกไดอะแกรมของวงจรกรณีการกระตุ้นสายส่งที่ต่อรีแอคเตอร์ขนาน.....	88
รูปที่ 4.10 ผลของแรงดันเกินสวิตชิงที่ขนาดของรีแอคเตอร์ขนานค่าต่าง ๆ.....	88
รูปที่ 4.11 วงจรกรณีศึกษาของทรานเซียนต์จากฟ้าผ่า.....	90
รูปที่ 4.12 รูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่า.....	90
รูปที่ 4.13 รูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่าจากโปรแกรมพีเอสไปซ์.....	91
รูปที่ 4.14 ไดอะแกรมของวงจรกรณีศึกษาของทรานเซียนต์จากฟ้าผ่า.....	91
รูปที่ 4.15 ซคิมเมติกไดอะแกรมของวงจรกรณีศึกษาของทรานเซียนต์ฟ้าผ่า.....	92
รูปที่ 4.16 แรงดันที่ยอดเสาส่งและบัส 4 ของวงจรกรณีศึกษาจากโปรแกรมพีเอสไปซ์.....	92
รูปที่ 4.17 แรงดันที่ยอดเสาส่งและบัส 4 ของวงจรกรณีศึกษาจากโปรแกรมอีเอ็มทีพี.....	93
รูปที่ 4.18 ผลของแรงดันเกินสูงสุดที่ยอดเสาส่งที่ค่าความต้านทานดินค่าต่าง ๆ.....	95
รูปที่ 4.19 คลื่นแรกเริ่ม, คลื่นสะท้อนกลับและคลื่นส่งผ่าน.....	95
รูปที่ 4.20 แรงดันที่ยอดเสาส่งและบัส 4 เมื่อความต้านทานดินเท่ากับ 100 โอห์ม.....	96
รูปที่ 4.21 คุณสมบัติของแรงดันและกระแสของกับดักฟ้าผ่า.....	97
รูปที่ 4.22 ผลของแรงดันยอดเสาส่งและบัส 4 ที่มีเสาส่งอยู่ข้างเคียง.....	98
รูปที่ 4.23 คลื่นเคลื่อนที่และสะท้อนกลับจากเสาข้างเคียง.....	99
รูปที่ 4.24 วงจรกรณีศึกษาของทรานเซียนต์ตัวเก็บประจุ.....	100

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.25 ไดอะแกรมของวงจรรณีสึกษาของทรานเซียนต์ตัวเก็บประจุ.....	100
รูปที่ 4.26 ซีคิเมติกไดอะแกรมของวงจรรณีสึกษาทรานเซียนต์ตัวเก็บประจุ.....	101
รูปที่ 4.27 กระแสอินรัชของตัวเก็บประจุตัวที่สอง.....	101
รูปที่ 4.28 แรงดันบั๊สของวงจรรณีสึกษาจากโปรแกรมพีสไปซ์ (ก) ในช่วงเวลา 25 ms (ข) ในช่วงเวลา 4 ms.....	102
รูปที่ 4.29 แรงดันบั๊สของวงจรรณีสึกษาจากโปรแกรมอีเอ็มทีพี (ก) ในช่วงเวลา 25 ms (ข) ในช่วงเวลา 4 ms.....	103
รูปที่ 4.30 ผลของแรงดันเกินสูงสุดที่บั๊สที่ขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่สองค่าต่าง ๆ.....	105
รูปที่ 4.31 วงจรรณีสึกษาของแบบจำลองสายส่งหลายเส้น.....	106
รูปที่ 4.32 หน้าตัดขวางของสายส่งขนาดเล็ก (หน่วยเป็นมิลลิเมตร).....	106
รูปที่ 4.33 ซีคิเมติกไดอะแกรมของวงจรรณีสึกษาของแบบจำลองสายส่งหลายเส้น.....	107
รูปที่ 4.34 แรงดันที่แต่ละขั้วของสายส่ง.....	108
รูปที่ 4.35 ผลของแรงดันที่ขั้ว 3 ที่ค่าความต้านทานที่ขั้วขาออกทั้งสองค่าต่าง ๆ.....	109
รูปที่ ก.1 กล่องข้อความเบร่าเซอร์พาร์ท.....	117
รูปที่ ก.2 กล่องแสดงการแก้ไขแอดทริบิวต์.....	120
รูปที่ ก.3 กล่องแสดงการเปลี่ยนแอดทริบิวต์.....	121
รูปที่ ก.4 กล่องตั้งค่าแอดทริบิวต์.....	122
รูปที่ ก.5 กล่องแสดงการพิมพ์.....	124
รูปที่ ก.6 วงจรไดโอดคลิปเปอร์.....	128
รูปที่ ก.7 หน้าต่างสถานะการจำลองของ SPICE A/D.....	131
รูปที่ ก.8 ไฟล์เอาต์พุทของการจำลอง.....	132
รูปที่ ก.9 วงจรไดโอดคลิปเปอร์และตัวกระตุ้นแรงดันที่ขึ้นอยู่กัเวลา.....	133
รูปที่ ก.10 หน้าต่างซีทีเอ็มวีลัสเอดิเตอร์.....	134
รูปที่ ก.11 กล่องข้อความการวิเคราะห์ทรานเซียนต์.....	135
รูปที่ ก.12 รูปคลื่นอินพุทและเอาต์พุทของวงจรไดโอดคลิปเปอร์.....	136
รูปที่ ข.1 วงจรไดโอดบริดจ์เรคทีไฟเออร์.....	138

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงหรือกระตุ้นในทันทีทันใดของสภาวะของวงจร เช่นเมื่อสวิตช์เปิดหรือปิด การเกิดแรงดันเกินจากภายนอก และการเกิดฟอลต์ เป็นต้น แม้ว่าช่วงเวลาในภาวะทรานเซียนต์จะสั้นมาก แต่มีความสำคัญอย่างมาก เพราะเป็นเวลาที่อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าจะได้รับผลกระทบจากกระแสหรือแรงดันที่สูงเกินพิกัด ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายได้ ในกรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้า อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูง ระบบสายส่งไฟฟ้า ก่อให้เกิดไฟฟ้าดับในบริเวณกว้าง ดังนั้นความเข้าใจที่ถูกต้องของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในช่วงทรานเซียนต์ จึงเป็นส่วนสำคัญในความเข้าใจของพฤติกรรมของวงจรไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์หามาตรการป้องกัน หรือควบคุมไม่ให้เกิดอันตรายร้ายแรงต่อวงจรหรือระบบไฟฟ้ากำลัง

1.2 ที่มาของปัญหา

ปัญหาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนใหญ่มักยุ่งยากมากเกินกว่าจะคำนวณโดยตรง ปัจจุบันนิยมใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการแก้ปัญหา เนื่องจากสามารถคำนวณได้อย่างถูกต้อง แม่นยำและรวดเร็ว จึงมีบทบาทสำคัญอย่างมากในการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

ปัจจุบันการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้านิยมใช้โปรแกรม EMTP (Electromagnetic Transients Program) แต่เนื่องจากโปรแกรม EMTP ใช้งานยากและอาจมีค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อมาใช้งาน จึงไม่เหมาะสมกับการปฏิบัติงานในบางสถานะที่มีงบประมาณจำกัด และไม่ต้องการความยุ่งยากในการใช้โปรแกรม จึงได้พิจารณาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ทรานเซียนต์ซึ่งมีอยู่หลายโปรแกรมให้เลือกใช้งาน ในที่นี้พิจารณาเลือกใช้โปรแกรมพีเอสไสบีซี (PSPICE) (Evaluation Version 8) ซึ่งเป็นโปรแกรมประเภทพีเอสไสบีซี (SPICE) สำหรับใช้งานบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ผลิตโดยบริษัทไมโครซิม จำกัด (MICROSIM Co,Ltd) ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างมากในการใช้วิเคราะห์พฤติกรรมทางไฟฟ้าของวงจรไฟฟ้าต่าง ๆ เนื่องจากทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ (WINDOWS) โดยที่ผู้ใช้สามารถเลือกลักษณะการใช้งานเป็น

แบบซิมเมตริก (Schematic) ได้ กล่าวคือ ไม่จำเป็นต้องเขียนคอมมานด์ไลน์ (Command Line) ที่ละบรรทัดเหมือนโปรแกรมที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการดอส (DOS) เช่น โปรแกรม EMTP นอกจากนี้ยังใช้งานง่ายและไฟล์ไปซ์ยังมีราคาถูกกว่าอีเอ็มทีพีอีกด้วย

1.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3.1 วิทยานิพนธ์เรื่อง “การวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง”, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [1]

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ [1] แสดงถึงวิธีการหาผลลัพธ์ของทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง และแสดงรายละเอียดของโปรแกรมการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เพื่อใช้กับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ขนาด 16 บิต หน่วยความจำ 512 กิโลไบต์ โปรแกรมนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการศึกษาเชิงจริงเนื่องจากฟ้าผ่า และการศึกษาเบื้องต้นเนื่องจากสวิตชิงเชิงจริง เพื่อประโยชน์ในการเลือกกระดัดบฉนวนให้เหมาะสม ตลอดจนวิเคราะห์ปัญหาแรงดันเกิน โดยได้นำเอาการเลือกองค์ประกอบจำลองตามชนิดของทรานเซียนต์และช่วงเวลาที่ต้องการศึกษา เป็นแนวทางในการศึกษาทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า เพราะอุปกรณ์แต่ละชนิดมีผลตอบสนองในช่วงทรานเซียนต์แต่ละช่วงเวลาแตกต่างกัน

1.3.2 วิทยานิพนธ์เรื่อง “การรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์แรงดันเกินสวิตชิงในระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ กรณีศึกษา แม่เกาะ 3 - ท่าตะโก”, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ [2]

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ [2] นำเสนอเกี่ยวกับข้อมูลระบบและการวิเคราะห์หาค่าสูงสุดของแรงดันเกินสวิตชิงในระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ เพื่อเลือกกระดัดบฉนวนของอุปกรณ์ โดยได้ทำการรวบรวมข้อมูลของอุปกรณ์ในระบบ และจัดทำเป็นระบบในการศึกษาผลของพารามิเตอร์ของสายส่งและอุปกรณ์ควบคุมแรงดันเกิน ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าสูงสุดของแรงดันเกินสวิตชิง โดยโปรแกรมอีเอ็มทีพีและวิธีทีเอ็นเอ (TNA, Transient Network Analyzer)

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.4.1 เพื่อศึกษาวิธีการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังโดยการใช้โปรแกรมพีเอสไปซ์ เป็นเครื่องมือและนำไปใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติงานจริง

1.4.2 เพื่อศึกษาวิธีการจำลองอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบไฟฟ้าแรงสูงในภาวะทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับใช้ในโปรแกรมพีเอสไปซ์

1.4.3 เพื่อประเมินผลการศึกษา โดยทำการเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาของอีเอ็มทีพี

1.4.4 เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการศึกษาต่อไป

1.5 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์

1.5.1 ใช้แบบจำลองที่มีอยู่ในโปรแกรมพีเอสไปซ์ ในการจำลองอุปกรณ์ที่สำคัญต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยอาจต้องสร้างแบบจำลองขึ้นมาใหม่หรือดัดแปลงแบบจำลองที่มีอยู่ให้เหมาะสมกับการใช้โปรแกรมและข้อมูลที่สามารถหาได้

1.5.2 การศึกษาระบบขนาดใหญ่สามารถทำได้โดยแทนวงจรที่ห่างไกลจากบริเวณที่ต้องการด้วยไดรวิงพอยท์อิมพีแดนซ์ (Driving Point Impedance)

1.5.3 การจำลองแบบหลายเฟสจะพิจารณาแยกเฟสกันโดยแต่ละเฟสจะมีการเชื่อมโยงกันก็ได้

1.6 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน

1.6.1 ศึกษาการใช้โปรแกรมพีเอสไปซ์ในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า

1.6.2 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

1.6.3 ศึกษาวิธีการจำลองอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบไฟฟ้ากำลังโดยการใช้โปรแกรมพีเอสไปซ์

1.6.4 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับเอกสารอ้างอิงหรือโปรแกรมพีเอสไปซ์

1.6.5 สรุปและเรียบเรียง

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1.7.1 ทำให้สามารถวิเคราะห์ทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้ากำลังได้โดยการใช้โปรแกรมพีเอสไปซ์

1.7.2 ทำให้ได้แบบจำลองของอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้กับโปรแกรมพีเอสไปซ์

1.7.3 สามารถนำผลของแรงดันเกินที่วิเคราะห์ได้ไปใช้ในการออกแบบและป้องกันระบบไฟฟ้าแรงสูงได้

1.7.4 สามารถนำมาใช้ประกอบในการเรียนการสอนเกี่ยวกับทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้าแรงสูงได้

1.7.5 นำไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการศึกษาระดับสูงต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีในการวิเคราะห์

2.1 บทนำ

การเปลี่ยนแปลงในทันทีทันใดของสถานะของระบบไฟฟ้า พลังงานจะมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างวงจรของความเหนี่ยวนำและความจุไฟฟ้า แต่การเปลี่ยนแปลงพลังงานนี้เกิดขึ้นในทันทีทันใดไม่ได้ ต้องใช้ช่วงเวลาหนึ่งๆที่เรียกว่า ช่วงเวลาทรานเซียนต์ เช่นเมื่อมีสวิตช์ในวงจรไฟฟ้าเปิดหรือปิด ทำให้เกิดสวิตชิ่งทรานเซียนต์ขึ้นในวงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยความเหนี่ยวนำและความจุไฟฟ้า เกิดการออสซิลเลชัน (Oscillation) ในช่วงเวลาทรานเซียนต์เป็นแรงดันเกิน (Overvoltage) ขึ้นในระบบ

2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับภาวะทรานเซียนต์

2.2.1 สาเหตุสำคัญของการเกิดทรานเซียนต์ [1]

1) เสิร์จฟ้าผ่า (Lightning Surge) ฟ้าผ่าประกอบด้วยอิมพัลส์ (Impulse) ของกระแสไฟฟ้าซึ่งมีขนาดสูงในหน่วยของหลายร้อยกิโลแอมแปร์ (kA) เกิดในช่วงเวลาเป็นไมโครวินาที แล้วลดลง เสิร์จจากฟ้าผ่าลงบนสายส่งเกิดจากฟ้าผ่าโดยตรง (Direct Stroke) บนเฟสของสายส่งหรือจาก Backflashover การศึกษานี้เพื่อนำไปหาอัตราการขาดพลังงาน (Line Outage Rate) และหาระดับของฉนวนไฟฟ้าของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า รวมทั้งเลือกขนาดและตำแหน่งติดตั้งของกับดักฟ้าผ่า (Lightning Arrester)

2) สวิตชิ่งเสิร์จ (Switching Surge) ในระบบที่มีแรงดันสูงกว่า 300 กิโลโวลต์ (kV) การออกแบบเลือกฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าต้องคำนึงถึงเสิร์จประเภทนี้ สวิตชิ่งเสิร์จที่สำคัญได้แก่

1. การกระตุ้นสายส่ง (Line Energization) รูปร่างและขนาดของแรงดันเกินในกรณีของการกระตุ้นสายส่งขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของสายส่ง, ชนิดของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและตำแหน่งของการทำงานของอุปกรณ์ตัดตอน เช่นเซอร์กิตเบรกเกอร์ องค์ประกอบความถี่ของสวิตชิ่งเสิร์จอยู่ในช่วงหลายร้อยกิโลเฮิรตซ์ถึงไม่กี่เฮิรตซ์และช่วงเวลาของทรานเซียนต์อยู่ระหว่าง 10-40 มิลลิวินาที [3]

2. แรงดันฟื้นตัวทรานเซียนต์ (Transient Recovery Voltage) เกิดเมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดกระแสไฟฟ้าขณะเกิดการลัดวงจร จะเกิดแรงดันทรานเซียนต์ขึ้นที่ขั้วทั้งสองของเบรกเกอร์ ช่วงเวลาของการเกิดอยู่ในช่วงสิบถึงหลายร้อยไมโครวินาที

3. การสวิตชิงขดลวดเหนี่ยวนำและหม้อแปลง (Reactor and Transformer Switching) การกระตุ้น (Energize) อุปกรณ์ที่มีแกนเหล็ก (Magnetic Core) สามารถทำให้เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็กและกระแสอินรัช (Inrush Current) ซึ่งมีองค์ประกอบของความถี่จาก 50 เฮิร์ตถึงหลายร้อยกิโลเฮิร์ต การปลด (Disconnect) อุปกรณ์เหล่านี้สามารถทำให้เกิดทรานเซียนต์ที่มีความถี่สูงขึ้น

4. การสวิตชิงตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank Switching) การกระตุ้นตัวเก็บประจุหรือการปิดซ้ำของเซอร์กิตเบรกเกอร์ระหว่างช่วงเวลากระตุ้นและปลด มีผลให้เกิดกระแสอินรัชที่มีขนาดและความถี่สูงในหน่วยของกิโลเฮิร์ต

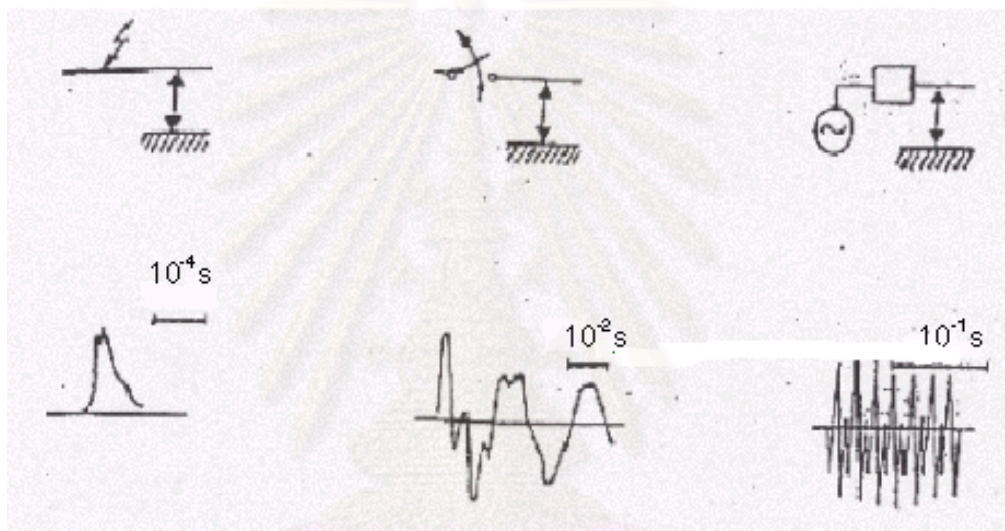
2.2.2 ชนิดของทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

การวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้ในการศึกษาแรงดันเกิน (Overvoltage) นั้น แบบจำลองของอุปกรณ์จำเป็นต้องให้เหมาะสมกับความถี่ของทรานเซียนต์ที่กำลังศึกษาอยู่ การประมาณแถบความถี่ที่คาดไว้สำหรับทรานเซียนต์ชนิดต่าง ๆ ได้แสดงดังตารางที่ 2.1 [3]

ตารางที่ 2.1 การประมาณแถบความถี่ที่คาดไว้สำหรับทรานเซียนต์ชนิดต่าง ๆ

ชนิดของทรานเซียนต์	ช่วงความถี่ (Frequency Band)
การกระตุ้นหม้อแปลง (Transformer Energization)	0.1 Hz - 3 kHz
การละโหลด (Load Rejection)	0.1 Hz - 3 kHz
การกำจัดฟอลต์ (Fault Clearing)	10 Hz - 3 kHz
การกระตุ้นสายส่ง (Line Energization)	3 Hz - 15 kHz
แรงดันฟื้นตัวทรานเซียนต์ (Transient Recovery Voltage)	10 Hz - 30 kHz
การเกิดฟอลต์ (Fault Inception)	10 Hz - 30 kHz
การปิดซ้ำของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Restrike of Circuit Breaker)	10 Hz - 30 kHz
การปิดซ้ำหลายครั้งของเบรกเกอร์ (Multiple Restrike of Circuit Breaker)	10 Hz - 3 MHz
เสิร์จฟ้าผ่าหรือฟอลต์ในสถานีไฟฟ้า (Lightning Surges or Faults in Station)	5 kHz - 3 MHz

เมื่อเกิดทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง จะทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าได้ แรงดันเกินที่เกิดขึ้นทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท [4] คือ แรงดันเกินภายนอกระบบ ได้แก่แรงดันเกินฟ้าผ่า (Lightning Overvoltage) มีสาเหตุจากฟ้าผ่าตามปรากฏการณ์ธรรมชาติ จึงไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันของระบบไฟฟ้า และแรงดันเกินภายในระบบ ได้แก่แรงดันเกินสวิตชิง (Switching Overvoltage) และแรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage) ขนาดของแรงดันเกินจะขึ้นอยู่กับแรงดันพิกัดของระบบ ลักษณะของรูปคลื่นของแรงดันเกินฟ้าผ่า, แรงดันเกินสวิตชิงและแรงดันเกินชั่วคราวแสดงดังรูปที่ 2.1



แรงดันเกินฟ้าผ่า

แรงดันเกินสวิตชิง

แรงดันเกินชั่วคราว

รูปที่ 2.1 ลักษณะเปรียบเทียบของรูปคลื่นแรงดันเกินทั้ง 3 ประเภท

จากแถบความถี่ของทรานเซียนต์ชนิดต่าง ๆ ในตารางที่ 2.1 อาจจัดกลุ่มตามลักษณะของแรงดันเกินได้ตามตารางที่ 2.2

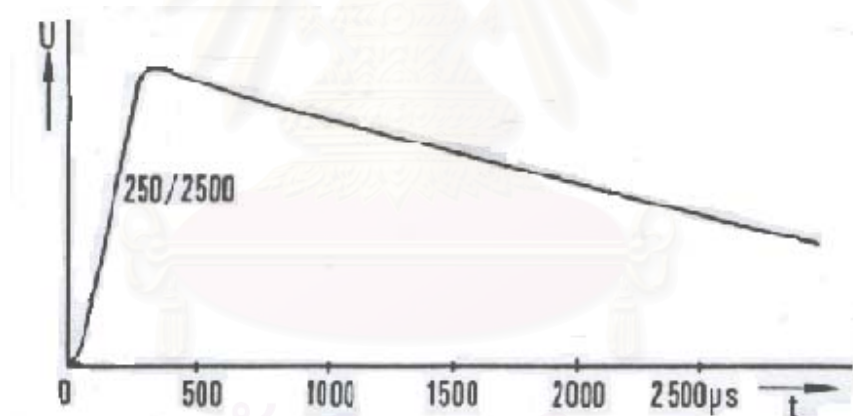
ตารางที่ 2.2 ชนิดของแรงดันเกินที่สัมพันธ์กับแถบความถี่

ชนิดของแรงดันเกิน	ช่วงความถี่
แรงดันเกินฟ้าผ่า (Lightning Overvoltage)	5 kHz - 3 MHz
แรงดันเกินสวิตชิง (Switching Overvoltage)	3 Hz - 30 kHz
แรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage)	0.01 Hz - 5 kHz

ในการพิจารณาระดับของฉนวนและความทนทานของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงสูงจะพิจารณาถึงแรงดันเกินฟ้าผ่าและแรงดันเกินสวิตชิง แต่เนื่องจากการเพิ่มขึ้นอย่างมากของแรงดันในระบบสายส่งไฟฟ้า ทำให้ในระดับแรงดันปรกติตั้งแต่ 300 กิโลโวลต์ขึ้นไป แรงดันเกินสวิตชิงเป็นปัจจัยที่ต้องพิจารณาเป็นอันดับแรก ซึ่งมีสาเหตุสำคัญ 2 ประการ คือ

1. ขนาดแรงดันเกินสวิตชิงขึ้นอยู่กับแรงดันของระบบ แต่ขนาดของแรงดันเกินฟ้าผ่าไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันของระบบ ดังนั้นขนาดของแรงดันเกินฟ้าผ่าจะลดความรุนแรงลง เมื่อเทียบกับแรงดันของระบบที่เพิ่มขึ้น ขณะที่แรงดันของระบบเพิ่มมากขึ้น ขนาดของแรงดันเกินสวิตชิงจะยิ่งมากขึ้นตามไปด้วย ตามคำแนะนำของ IEC (International Electrotechnical Commission) อุปกรณ์ทั้งหมดที่มีแรงดันพิกัดมากกว่า 300 กิโลโวลต์ ควรจะถูกทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (Switching Impulse)

2. ฉนวนภายนอกมีความทนทานต่ำที่สุดภายใต้เสิร์จที่มีหน้าคลื่นในช่วง 50 - 500 μs ในขณะที่สวิตชิงเสิร์จส่วนมากมีหน้าคลื่นระหว่าง 100 - 500 μs รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงมาตรฐานของ IEC คือ 250/2500 μs โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 รูปคลื่นมาตรฐานของแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง 250/2500 μs

เมื่อ k_0 คืออัตราของขนาดของแรงดันเกินสวิตชิงต่อขนาดของแรงดันเฟสต่อกราวด์ (Phase-to-ground Voltage) ของระบบไฟฟ้า ซึ่งใช้ในการพิจารณาความรุนแรง (Severity) ต่อระบบไฟฟ้าแล้ว ในกรณีของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 กิโลโวลต์ k_0 เท่ากับ 3.5

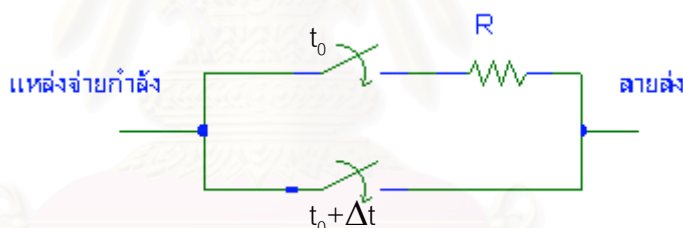
$$\text{ดังนั้น } U_{S,\max} = k_0 U_{I-n,\max} = 3.5 \times 500 \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 1,428.9 \text{ kV}$$

2.2.3 การควบคุมเพื่อลดขนาดของแรงดันเกินสวิตชิง

การควบคุมเพื่อลดขนาดของแรงดันเกินสวิตชิงในระบบสายส่ง 500 กิโลโวลต์ทำได้ดังนี้

(1) การใส่ความต้านทานในกลไกการปิด-เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์

การควบคุมการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถช่วยลดขนาดของแรงดันเกินสวิตชิง ในขณะที่ปิดหรือเปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ เช่นการใช้ความต้านทานในกลไกของเบรกเกอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยที่ t_0 คือเวลาของจังหวะแรกในการปิดเบรกเกอร์จะมีความต้านทานต่ออนุกรมกับสายส่งเป็นระยะเวลาหนึ่ง (Δt) เช่น 6 มิลลิวินาที แล้วจึงลัดวงจรเพื่อตัดความต้านทานออกโดยปิดหน้าสัมผัสอีกชุดหนึ่ง โดยทั่วไปค่าความต้านทานที่เหมาะสม มีค่าประมาณค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ (Surge Impedance) ของสายส่งนั้น เวลาที่ใส่ความต้านทานยิ่งนาน ยิ่งมีผลต่อการลดขนาดสูงสุดของแรงดันเกินสวิตชิงที่ปลายสายส่ง แต่ในทางปฏิบัติต้องพิจารณาถึงการระบายความร้อนในตัวความต้านทาน การใช้ความต้านทานต่ออนุกรมมากกว่า 1 ค่า จะยิ่งช่วยให้การควบคุมแรงดันเกินมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งนี้ระบบกลไกของเบรกเกอร์จะยิ่งซับซ้อนและมีราคาสูงขึ้น



รูปที่ 2.3 การปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์โดยมีการต่อความต้านทานในจังหวะแรก

(2) การใช้รีแอคเตอร์ขนาน (Shunt Reactor)

การใช้รีแอคเตอร์ขนานควบคุมแรงดันเกินทำได้โดยต่อระหว่างเฟสไปยังดิน การต่อตัวเหนี่ยวนำเป็นการชดเชยแบบขนาน (Shunt Compensation) เพื่อทดแทนกระแสของความจุไฟฟ้าของสายส่งและช่วยลดแรงดันเกินสวิตชิงที่เกิดจากการปิดเบรกเกอร์ ในขณะที่กระตุ้นสายส่ง ลักษณะสมบัติของตัวเหนี่ยวนำจะช่วยหน่วงให้แรงดันเกินลดลง

(3) การใช้กั๊บดักเสิร์จ (Surge Arrester)

กั๊บดักเสิร์จที่ใช้ในการควบคุมแรงดันเกินในระบบสายส่ง 500 กิโลโวลต์ เป็นแบบออกไซด์ของโลหะ (Metal Oxide) เนื่องจากไม่มีช่องประกาย จึงทำให้ไม่มีแรงดันประกายข้ามใน

ขณะที่มีการนำกระแสเสิร์จ กับดักเสิร์จแบบนี้สามารถนำมาใช้ป้องกันแรงดันเกินที่อุปกรณ์ต่าง ๆ เช่นหม้อแปลงไฟฟ้า

2.3 แบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

การเลือกแบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังต้องพิจารณาถึงชนิดของทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า ความถี่และช่วงเวลาของทรานเซียนต์

2.3.1 สายส่งไฟฟ้า (Overhead Transmission Line) ประกอบด้วยแบบจำลอง 2 แบบคือ

2.3.1.1 แบบจำลองของการต่อแบบอนุกรม (Cascade) พารามิเตอร์ก้อน (Lumped Parameter) หลาย ๆ ตอนต่อกัน ได้แก่วงจรสมมูลแบบพายนี่ ใช้แทนสายส่งชนิดไม่สลับสาย (Untransposed Line) สั้น ๆ เช่นในช่วงความยาวสายส่ง 5 ถึง 20 กิโลเมตรสำหรับแต่ละตอนของวงจรสมมูลแบบพายนี่ [5]

2.3.1.2 แบบจำลองของพารามิเตอร์แบบกระจาย (Distributed Parameter) แทนสายส่งด้วยเสิร์จอิมพีแดนซ์ (Surge Impedance) และความเร็วการเคลื่อนที่ของคลื่น (Propagation Velocity) สำหรับสายส่งหลายเฟสใช้ Modal Transform [6] ซึ่งเป็นวิธีการถอดการเชื่อมโยง (Decouple) แรงดันและกระแสเฟสในสายส่งด้วยเทคนิคของ Modal Transform เปลี่ยนสายส่งเป็น Mode ต่าง ๆ ดังนี้

Earth Mode เหมือนกับลำดับศูนย์ (Zero Sequence) ขององค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) ของระบบสมมูล 3 เฟส เมื่อความถี่สูงขึ้น ความลึกประสิทธิผล (Effective Depth) ของพื้นดินจะลดลง เป็นการเพิ่มความต้านทานและลดความเหนี่ยวนำ ดังนั้นเสิร์จอิมพีแดนซ์ (Surge Impedance) จะลดลงและความเร็วการเคลื่อนที่ของคลื่นเพิ่มขึ้น นิยามของ Mode นี้คือวง (Loop) ซึ่งเกิดจากทุกเฟสขนานกัน โดยมีกราวด์ (Ground) เป็นทางย้อนกลับ (Return Path) ในที่นี้จะเรียก Mode นี้ว่า Mode ที่ 1

Aerial Mode เหมือนกับลำดับบวก (Positive Sequence) ขององค์ประกอบสมมาตรของระบบสมมูล 3 เฟส นิยามของ Mode ที่ 2 ถึง Mode ที่ M คือวงซึ่งเกิดจากเฟสหนึ่งโดยมีทางย้อนกลับผ่านเฟสที่ 2 ถึงเฟสที่ M ตามลำดับ

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาเพียงแบบจำลองแบบสมมาตร (Symmetrical Model) (สมมุติเฟสอิมพีแดนซ์เหมือนกันและการเชื่อมโยง (Coupling) ระหว่างเฟสเท่ากับค่าเฉลี่ยหรือทำการสลับทุกสายเพื่อให้สมมูลกัน) พารามิเตอร์ของสายส่งหาที่ความถี่เดียว ซึ่งแบบ

จำลองนี้เหมาะสมสำหรับการศึกษาสวิตชิงเสิร์จจำนวนมากสำหรับสายส่งชนิดสลับสาย (Transposed)

2.3.1.3 แบบจำลองของสายส่งแทนด้วยความเหนี่ยวนำ (Lumped Inductance) ใช้ศึกษา การสวิตชิงตัวเก็บประจุ (Capacitor Switching)

2.3.2 หม้อแปลง (Transformer) แบบจำลองของหม้อแปลงขึ้นอยู่กับความถี่ของชนิดของทรานเซียนต์ที่ต้องการศึกษา ที่ความถี่สูง Electrostatic ได้แก่คาแปซิแตนซ์ (Capacitance) จะมีอิทธิพลสำคัญ การแทนหม้อแปลงสำหรับการศึกษาลีร์จฟ้าผ่าสามารถแทนด้วยคาแปซิแตนซ์ต่อกับกราวด์ ปกติค่านี้อยู่ระหว่าง 2 ถึง 9 นาโนฟารัด (Nanofarad)

เนื่องจากช่วงเวลาแกนนเหล็กแสดงลักษณะของแม่เหล็กคือประมาณ 20 ไมโครวินาทีขึ้นไปเป็นทรานเซียนต์แบบสวิตชิงเสิร์จและทรานเซียนต์แรงดันพื้นตัว จึงใช้แบบจำลองของอิมพีแดนซ์ขนาน (Shunt Impedance) และตัวเหนี่ยวนำค่าต่ำต่ออนุกรมแทนหม้อแปลง

2.3.3 รีแอกเตอร์ขนาน (Shunt Reactor) สร้างแบบจำลองด้วยตัวเหนี่ยวนำ การพิจารณาถึงลักษณะสมบัติการอิมิตัวของแกนเหล็กเป็นเช่นเดียวกับหม้อแปลงเมื่อเกิดการแรงดันเกินชั่วคราวและคาแปซิแตนซ์มีอิทธิพลสูงเมื่อเกิดลีร์จฟ้าผ่า

2.3.4 แหล่งกำเนิดแรงดัน (Voltage Source) แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

2.3.4.1 แหล่งกำเนิดแรงดันกระแสสลับได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสซึ่งแทนด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันคงที่กับซับทรานเซียนต์อิมพีแดนซ์ (Sub-transient Impedance) หรือทรานเซียนต์อิมพีแดนซ์ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาของการศึกษา

ข้อเสียของการแทนแบบนี้คือไม่เพียงพอ ถ้าทำการศึกษาถึงการสวิตชิงใกล้กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหรือศึกษาแรงดันเกินไดนามิก (Dynamic Overvoltage) [6]

2.3.4.2 แหล่งกำเนิดแรงดันฟ้าผ่า สามารถแทนรูปร่างและลักษณะของคลื่นฟ้าผ่าด้วยฟังก์ชันดังนี้

(1) ฟังก์ชันลาด (Ramp Function) ช่วงเวลา $t = 0$ ถึง t_1 เป็นช่วงฟังก์ชันลาด และจากเวลา t_1 ถึง t_2 เป็นช่วงที่มีขนาดคงที่ดังรูปที่ 2.4

(2) ฟังก์ชันขั้น (Step Function) มีช่วงเวลา $t = 0$ ถึง t_1 มีขนาดคงที่แสดงดังรูปที่

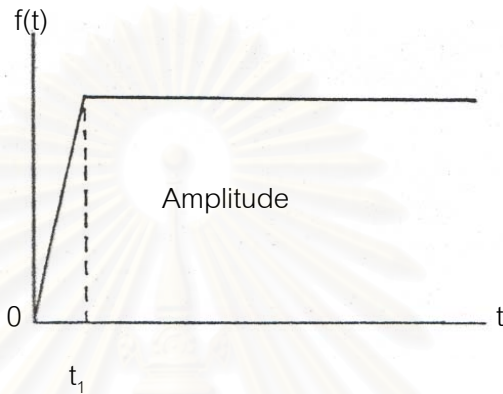
2.5

(3) ฟังก์ชันคลื่นมาตรฐาน (Standard Wave Function) เป็นคลื่นฟ้าผ่าที่ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงสูง แสดงลักษณะคลื่นดังรูปที่ 2.6 โดยมีฟังก์ชันทั่วไปคือ

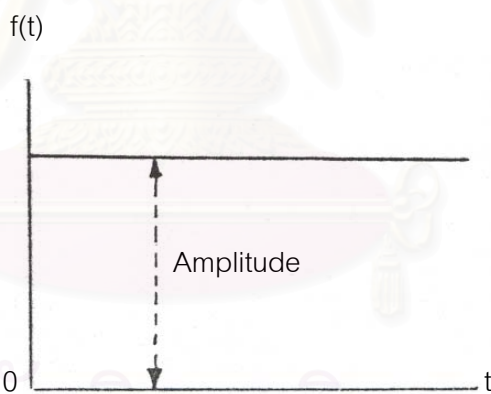
$$f(t) = A(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2.1)$$

โดยที่ A คือขนาด (Amplitude)

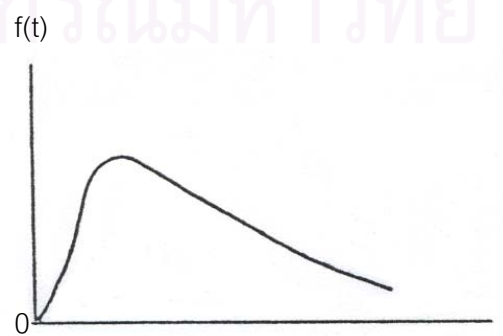
α, β เป็นค่าบวกและ $\alpha < \beta$



รูปที่ 2.4 รูปคลื่นของฟังก์ชันลาด



รูปที่ 2.5 รูปคลื่นของฟังก์ชันขั้น



รูปที่ 2.6 รูปคลื่นของฟังก์ชันคลื่นมาตรฐาน

2.3.5 เซอร์คิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) แทนด้วยสวิตช์ที่ทำหน้าที่ปิดหรือเปิดที่เวลาที่ต้องการโดยแรงดันคร่อมสวิตช์เป็น 0 ขณะปิด และกระแสผ่านสวิตช์เป็น 0 ขณะเปิด

สำหรับเซอร์คิตเบรกเกอร์ในระบบไฟฟ้าแรงสูงพิเศษ โดยทั่วไปจะมีความต้านทานต่ออนุกรมในขณะปิดวงจรเซอร์คิตเบรกเกอร์ในช่วงเวลาหนึ่ง สามารถแทนเซอร์คิตเบรกเกอร์นี้ด้วยสวิตช์ต่ออนุกรมกับความต้านทานขณะปิดและทำการขนานความต้านทานนี้ด้วยความต้านทานขนาดเล็กเข้าใกล้ 0 เพื่อบายพาส (Bypass) ความต้านทานนี้ออกไปเมื่อเวลาผ่านไปช่วงหนึ่ง (Preinsertion Time)

2.3.6 กั๊บดักฟ้าผ่า (Lightning Arrester) แบบจำลองนี้มีเพื่อจุดประสงค์ในการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดพิกัดที่ต้องการ ในการป้องกันอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าย่อย แบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

2.3.6.1 กั๊บดักฟ้าผ่าแบบซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide) ใช้แบบจำลองของความต้านทานไม่เชิงเส้น (Nonlinear Resistance) พิจารณาจากลักษณะสมบัติของแรงดันและกระแส (V-I Characteristic) ต่ออนุกรมกับสวิตช์ซึ่งจะปิดต่อเมื่อแรงดันตกคร่อมตัวเองสูงกว่าแรงดันสปาร์คโอเวอร์ (Sparkover Voltage)

2.3.6.2 กั๊บดักฟ้าผ่าแบบออกไซด์ของโลหะ (Metal Oxide Arrester) ซึ่งเป็นกั๊บดักฟ้าผ่าแบบใหม่และใช้ออกไซด์ของสังกะสี (Zinc Oxide) ซึ่งมีคุณสมบัติความต้านทานไม่เชิงเส้นเป็นส่วนประกอบหลัก ดังนั้นการแทนกั๊บดักฟ้าผ่าแบบนี้จึงเพียงแทนด้วยความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของตัวเองเท่านั้น

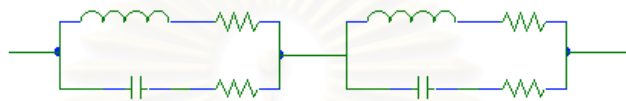
2.3.7 วงจรสมมูลย์ของระบบขนาดใหญ่ (Network Equivalent) ในการศึกษาระบบขนาดใหญ่ เพื่อเป็นการลดเวลาของคอมพิวเตอร์ตลอดจนลดขนาดของระบบให้เหมาะสมกับโปรแกรม โดยให้ผลลัพธ์ที่ไม่ผิดพลาด จึงต้องอาศัยวงจรสมมูลย์ของระบบที่ห่างไกลกับเหตุการณ์ของทรานเซียนต์ วงจรสมมูลย์นี้ขึ้นอยู่กับชนิดของทรานเซียนต์ดังนี้

2.3.7.1 กรณีทรานเซียนต์ของฟ้าผ่าหรือแรงดันเกินจากการปิดซ้ำ (Restriking Overvoltage) วิธีการจำลองสถานีไฟฟ้าย่อยโดยละเอียดทั้งบัสและอุปกรณ์อื่น ๆ สายส่งและเคเบิลแทนด้วยเสิร์จอิมพีแดนซ์ ช่วงเวลาที่ต้องการศึกษาต้องไม่มีคลื่นสะท้อนกลับมาจากปลายสายอีกด้านหนึ่ง ถ้าคลื่นสามารถสะท้อนมาถึงได้ในช่วงเวลานั้นจะไม่สามารถใช้วงจรสมมูลย์นี้ได้

2.3.7.2 กรณีทรานเซียนต์เกิดจากสวิตชิงเสิร์จ วิธีการในหัวข้อ 2.3.7.1 ไม่สามารถแทนได้ เนื่องจากเวลาในการศึกษาสวิตชิงเสิร์จนานกว่าเสิร์จฟ้าผ่ามาก การพิจารณาช่วงเวลา

100 มิลลิวินาที จะสามารถแทนด้วยวงจรมมูลย์ในหัวข้อ 2.3.7.1 ได้ เมื่อจุดที่ทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับมาจากจุดที่พิจารณาอย่างน้อย 3,000 กิโลเมตร ซึ่งเป็นไปไม่ได้สำหรับระบบไฟฟ้าทั่วไป

วิธีการสร้างวงจรมมูลย์สำหรับทรานเซียนต์แบบนี้ได้มีการพัฒนาขึ้น [7,8] เช่น แทนด้วยวงจรมมูลย์แบบฟอสเตอร์ (Foster) ซึ่งประกอบด้วยความต้านทาน, ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำต่อกันดังรูปที่ 2.7 นอกจากนั้นยังมีวงจรมมูลย์ที่แทนด้วยวิธีการอื่น ๆ [7] ซึ่งความถูกต้องของแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ต้องการ



รูปที่ 2.7 แสดงวงจรมมูลย์แบบฟอสเตอร์

2.4 ทฤษฎีในการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า

การวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นสามารถทำได้ 2 วิธี คือการวิเคราะห์ทางโดเมนเวลา (Time Domain) เช่นวิธีการของแลททิซ (Lattice's Method) ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาคลื่นเดินทาง (Traveling Wave) ของเสิร์จฟ้าผ่าบนสายส่งไฟฟ้า โดยจะต้องทราบค่าของเสิร์จจิมพีแดนซ์ของสายส่งและเวลาที่เสิร์จเคลื่อนที่ไปบนสายส่ง และวิธีลักษณะสมบัติของเบอร์เจอร์อน (Bergeron's Method of Characteristic) ส่วนอีกวิธีหนึ่งคือการวิเคราะห์ทางโดเมนความถี่ (Frequency Domain) เช่นวิธีการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำหลักการวิเคราะห์ทางโดเมนเวลามาใช้สำหรับการศึกษาคลื่นเดินทาง (Traveling Wave) ของเสิร์จ เพื่อศึกษาแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า

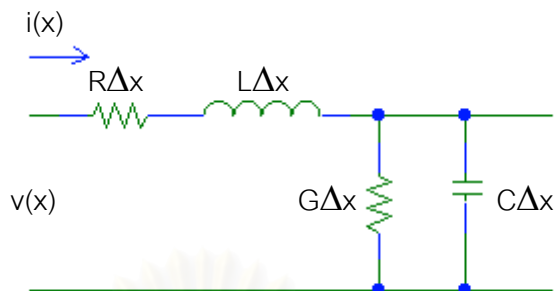
2.4.1 การแทนสายส่ง

2.4.1.1 วิธีลักษณะสมบัติของเบอร์เจอร์อน [9]

การวิเคราะห์คลื่นเดินทางบนสายส่งที่มีความยาวมาก จะแทนสายส่งด้วยวิธีลักษณะสมบัติของเบอร์เจอร์อน ซึ่งเป็นการรวมความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสตามแนวความคิดของการเคลื่อนที่ของคลื่น (Wave Propagation)

การสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าของสายส่งที่ไม่มีกำลังสูญเสีย (Lossless Line) ด้วยวิธีลักษณะสมบัติของเบอร์เจอร์อน ดังนี้

เมื่อพิจารณาสายส่งไฟฟ้าจากทฤษฎีวงจรไฟฟ้าสำหรับวงจร 1 เฟสสามารถแทนด้วยวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลสายส่งไฟฟ้า

โดยที่ R : ความต้านทานต่อหน่วยความยาว

L : อินдукแตนซ์ (Inductance) ต่อหน่วยความยาว

G : คอนดักแตนซ์ (Conductance) ต่อหน่วยความยาว

C : คาปาซิแตนซ์ต่อหน่วยความยาว

Δx : ความยาวของสายส่ง

จากรูปที่ 2.8 สามารถสร้างสมการสายส่งพื้นฐานได้ดังนี้

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = Ri + L\frac{\partial i}{\partial t} \tag{2.2}$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = Gv + C\frac{\partial v}{\partial t} \tag{2.3}$$

โดยการทำอนุพันธ์ย่อย (Partial Derivative) สมการ (2.2) เทียบกับ x และสมการ (2.3) เทียบกับ t เพื่อแยกแรงดันและกระแสออกจากกัน จะได้สมการดังนี้

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = RGv + (RC + GL)\frac{\partial v}{\partial t} + LC\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \tag{2.4}$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = RGi + (RC + GL)\frac{\partial i}{\partial t} + LC\frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \tag{2.5}$$

สมการ (2.4) และ (2.5) เรียกว่าสมการคลื่นของสายส่ง (Transmission Line Wave Equation)

กรณีสายส่งที่ไม่มีกำลังสูญเสียหมายความว่าค่าความต้านทานและคอนดักแตนซ์ของสายส่งมีค่าเป็นศูนย์ แทนค่าในสมการ (2.4) และ (2.5) จะได้

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

การแก้สมการทั่วไปของสมการ (2.6) และ (2.7) เมื่อ x เป็นทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่ และมี v_0 เป็นความเร็วของคลื่น จะได้สมการ (2.8) และ (2.9)

$$I(x,t) = f_1(x-vt) + f_2(x+vt) \quad (2.8)$$

$$V(x,t) = Z_0 f_1(x-vt) - Z_0 f_2(x+vt) \quad (2.9)$$

$$\text{โดยที่ } Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

นำ Z_0 คูณทั้งสองข้างของสมการ (2.8) แล้วนำไปบวกหรือลบกับสมการ (2.9) จะได้

$$V(x,t) + Z_0 I(x,t) = 2Z_0 f_1(x-vt) \quad (2.10)$$

$$V(x,t) - Z_0 I(x,t) = -2Z_0 f_2(x+vt) \quad (2.11)$$

โดยที่ $(V+Z_0 I)$ เป็นค่าคงที่ ถ้า $(x-vt)$ เป็นค่าคงที่

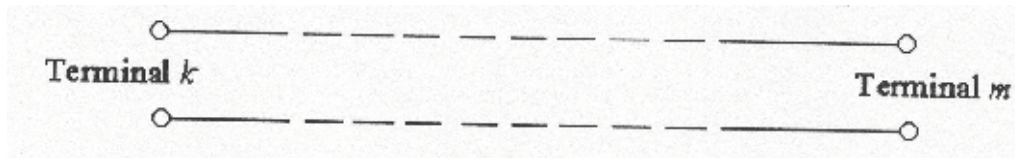
และ $(V-Z_0 I)$ เป็นค่าคงที่ ถ้า $(x+vt)$ เป็นค่าคงที่

การรวมตัวแบบเชิงเส้นของแรงดันและกระแส $V-Z_0 I$ และ $V+Z_0 I$ จะแสดงถึงลักษณะสมบัติฟอร์เวิร์ด (Forward Characteristic) และลักษณะสมบัติแบคเวิร์ด (Backward characteristic) ตามลำดับ เรียกว่าวิธีดังกล่าวว่าวิธีลักษณะสมบัติ (Method of Characteristic)

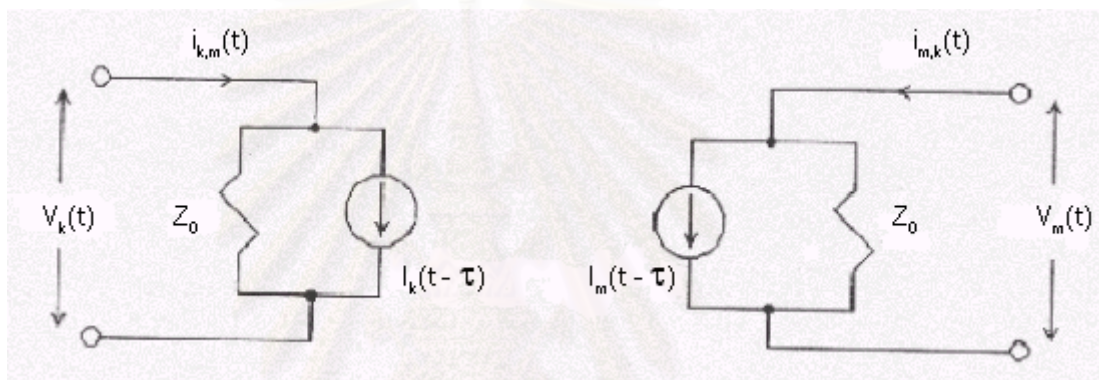
2.4.1.2 วงจรสมมูลของสายส่งที่ไม่มีกำลังสูญเสีย (Lossless Line)

สายส่งที่ไม่มีกำลังสูญเสียแบบคลื่นเดินทางที่ค่าพารามิเตอร์ไม่เป็นฟังก์ชันของความถี่

[10] โดยใช้พารามิเตอร์แบบกระจาย (Distributed Parameter) แสดงดังรูปที่ 2.9



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.9 (ก) สายส่งที่ไม่มีกำลังสูญเสียแบบจำลอง (ข) วงจรสมมูลของสายส่งที่ไม่มีกำลังสูญเสียแบบคลื่นเดินทางที่ค่าพารามิเตอร์ไม่เป็นฟังก์ชันของความถี่

พิจารณาเวลาของคลื่นเดินทางของสายส่งในรูปที่ 2.9 จะได้สมการ (2.12)

$$\tau = d/v = d(\sqrt{LC}) \tag{2.12}$$

โดยที่ d : ระยะทางจากโหนด k ถึง m

v : ความเร็วของการเคลื่อนที่ของคลื่น (Wave Propagation Velocity)

τ : เวลาของการเคลื่อนที่ของคลื่น (Travel Time) จากโหนด k ถึง m

จากนิพจน์ $V+Z_0I$ ในสมการ (2.10) สามารถหาความสัมพันธ์ได้ว่า เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ออกจากโหนด m ที่เวลา $(t-\tau)$ ยังคงมีค่าเท่าเดิมเมื่อเดินทางมาถึงโหนด k ที่เวลา t นั่นคือ

$$V_m(t-\tau) + Z_0 i_{m,k}(t-\tau) = V_k(t) + Z_0 (-i_{k,m}(t)) \tag{2.13}$$

จะได้สมการ (2.14)

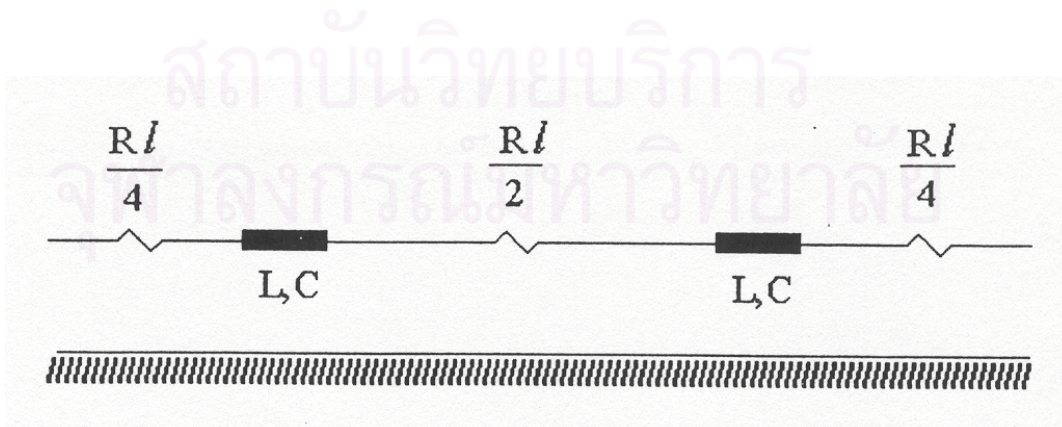
$$\begin{aligned} i_{k,m}(t) &= (1/Z_0)V_k(t) + I_k(t-\tau) \\ i_{m,k}(t) &= (1/Z_0)V_m(t) + I_m(t-\tau) \end{aligned} \tag{2.14}$$

และสมการ (2.15)

$$\begin{aligned} I_k(t-\tau) &= -(1/Z_0)V_m(t-\tau) - i_{m,k}(t-\tau) \\ I_m(t-\tau) &= (1/Z_0)V_k(t-\tau) - i_{k,m}(t-\tau) \end{aligned} \tag{2.15}$$

โดยที่ $I_k(t-\tau)$ เป็นแหล่งจ่ายกระแสสมมุติ หาได้จากค่าของแรงดันและกระแสของช่วงเวลาที่ผ่านไป $(t-\tau)$ และทำนองเดียวกัน เมื่อคลื่นเดินทางจากโหนด k ที่เวลา $(t-\tau)$ มาถึงโหนด m ที่เวลา t จะได้ $I_m(t-\tau)$ สามารถแสดงวงจรสมมุติได้ดังรูปที่ 2.9 (ข)

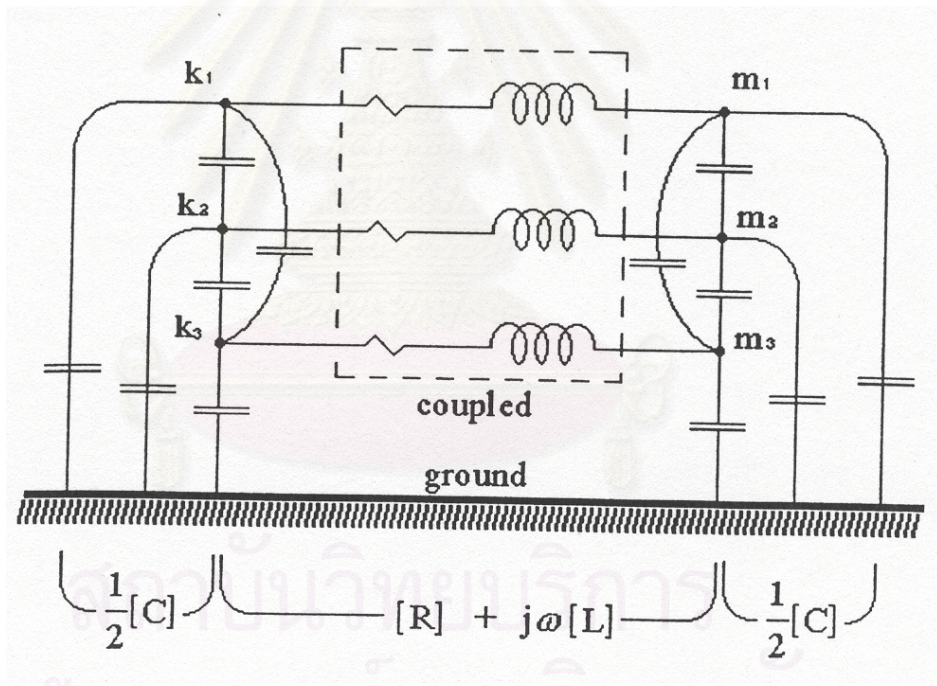
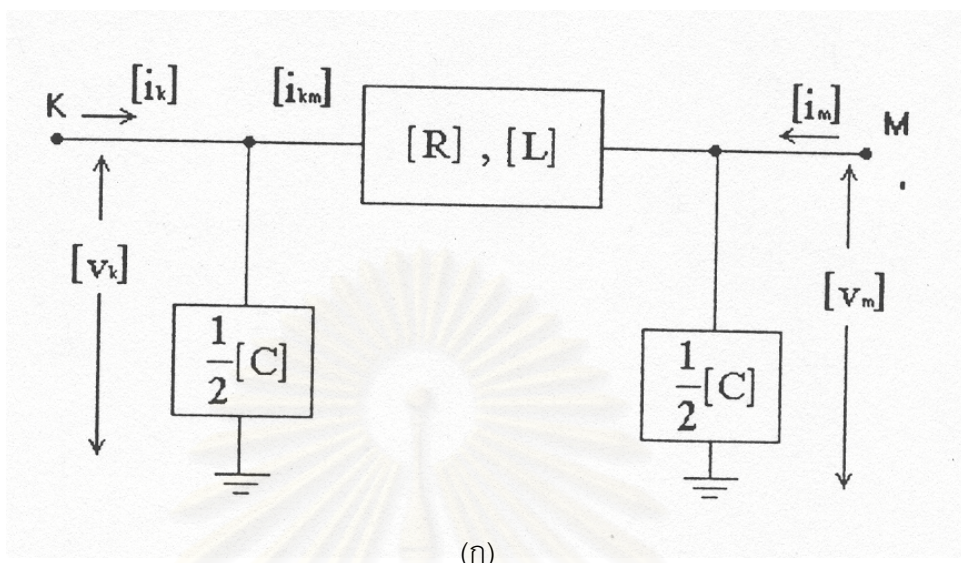
เมื่อคลื่นเดินทางไปตามสายส่งไฟฟ้าจะเกิดการลดทอน (Attenuation) ขึ้น การแทนสายส่งแบบนี้จะเลยพลังงานสูญเสียในสายส่ง ถ้าต้องการพิจารณาผลของพลังงานสูญเสียด้วยทำได้โดยการต่ออนุกรมกับความต้านทานขนาดเท่ากับ $1/2$ ของความต้านทานสายส่งที่ตรงกลางสายส่ง และต่ออนุกรมกับความต้านทานขนาดเท่ากับ $1/4$ ของความต้านทานสายส่งที่ปลายทั้งสองข้าง [9] โดยแบ่งสายส่งออกเป็น 2 ช่วง แต่ละช่วงมีค่าเสรีจิมพีแดนซ์ของสายส่ง (Z_0) เท่ากับ $(\sqrt{L/C})$ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตำแหน่งในการต่อความต้านทานของสายส่งที่ไม่มีกำลังสูญเสีย

2.4.1.3 วงจรสมมูลแบบพายน์ (Equivalent-Pi Circuit)

พิจารณาวงจรสมมูลแบบพายน์แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 (ก) ไดอะแกรมเส้นเดียว (ข) วงจรสมมูลแบบพายน์

กำหนดให้ $[R]+j\omega[L]$ เป็นเมตริกซ์ของความต้านทานและรีแอกแตนซ์ (Reactance) ต่ออนุกรมกัน

$\begin{bmatrix} C \\ 2 \end{bmatrix}$ เป็นเมตริกซ์ของคาปาซิแตนซ์ต่อที่ปลายทั้งสองข้างของสายส่ง

จากรูปที่ 2.11 สามารถสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสได้ดังนี้

$$[v_k] - [v_m] = [L] \left[\frac{di_{km}}{dt} \right] + [R][i_{km}] \quad (2.16)$$

$$[i_k] = \frac{1}{2} [C] \left[\frac{dv_k}{dt} \right] + [i_{km}] \quad (2.17)$$

$$[i_m] = \frac{1}{2} [C] \left[\frac{dv_m}{dt} \right] - [i_{km}] \quad (2.18)$$

วงจรสมมูลย์พายน์ประกอบด้วยพารามิเตอร์คือความต้านทานต่ออนุกรมกับรีแอกแตนซ์ และต่อขนานกับคาปาซิแตนซ์ ดังสมการ (2.19) และ (2.20) ตามลำดับ

$$[R] + j\omega[L] = \begin{bmatrix} R_{11} + j\omega L_{11} & R_{12} + j\omega L_{12} & R_{13} + j\omega L_{13} \\ R_{21} + j\omega L_{21} & R_{22} + j\omega L_{22} & R_{23} + j\omega L_{23} \\ R_{31} + j\omega L_{31} & R_{32} + j\omega L_{32} & R_{33} + j\omega L_{33} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

เมื่อพิจารณาเมตริกซ์ $[R] + j\omega[L]$ จะได้

$R_{ii} + j\omega L_{ii}$ (Diagonal Element) เท่ากับอิมพีแดนซ์ตัวเอง (Self Impedance) ของสาขา (Branch) i

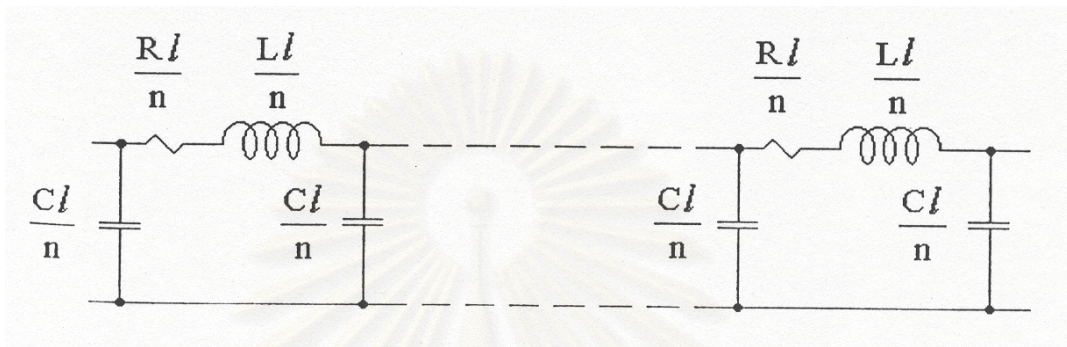
$R_{ik} + j\omega L_{ik}$ (Off-diagonal Element) เท่ากับอิมพีแดนซ์ร่วม (Mutual Impedance) ระหว่างสาขา i และ k

และพิจารณาเมตริกซ์ $[C]$ จะได้

C_{ii} เท่ากับผลรวมของคาปาซิแตนซ์ทั้งหมดที่ต่อกับโหนด i

C_{ik} เท่ากับค่าลบของคาปาซิแตนซ์ที่ต่อระหว่างโหนด i และ k

วงจรสมมุติพายนนี้ใช้แทนสายส่งช่วงสั้น ๆ และสายส่งชนิดไม่สลับตำแหน่งสาย (Untranspose) มีพารามิเตอร์ที่ความถี่ 50 Hz ของวงจรสมมุติพายนนี้หนึ่งวงจรต่อระยะทาง 30 กิโลเมตร นำมาต่ออนุกรมกันจนได้ความยาวเท่ากับสายส่งในวงจรนั้น ในแบบจำลองนี้ ค่าความต้านทาน (RI), ความเหนี่ยวนำ (LI), ความจุไฟฟ้า (CI) จะเป็นค่าที่ความยาวสายส่ง l กิโลเมตร และมี n เป็นจำนวนวงจรสมมุติพายนนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วงจรสมมุติพายนนี้ จำนวน n หน่วย

2.4.1.4 วงจรสมมุติของสายส่งแบบคลื่นเดินทางที่มีพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่ (Frequency Dependent Line Model)

ใช้หลักการของคลื่นเคลื่อนที่เช่นเดียวกับหัวข้อ 2.4.1.2 แต่พิจารณาถึงความเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ไปตามความถี่ของสายส่งด้วย ดังนั้นวงจรสมมุติจึงคล้ายกับหัวข้อ 2.4.1.2 แต่ค่าเสรีจิมพีแดนซ์ (Z_0) และแหล่งจ่ายกระแสในรูปที่ 2.9 (ข) จะแตกต่างกัน ดังสมการของอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติ (Characteristic Impedance) (2.21) และ (2.22)

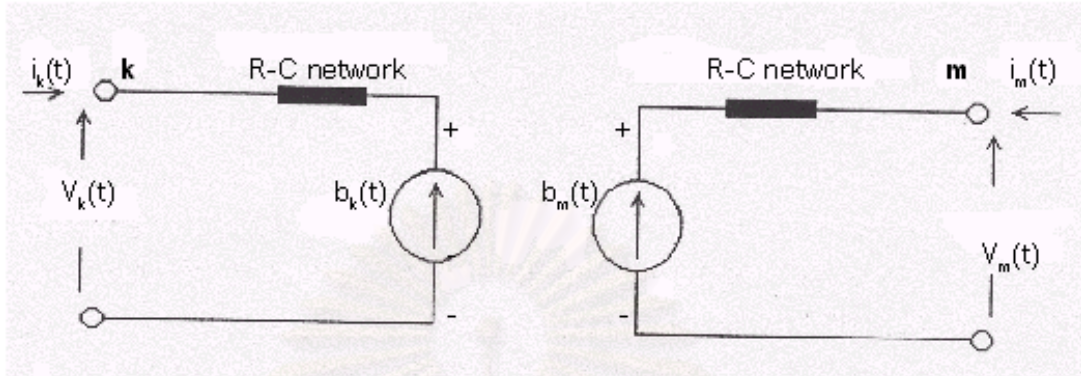
$$Z_c(\omega) = \sqrt{\frac{R(\omega) + j\omega L(\omega)}{G(\omega) + j\omega C(\omega)}} \quad (2.21)$$

โดยมีการกระจายแบบฟอร์เวด (Forward Propagation) เป็นฟังก์ชันของ $e^{-\gamma(\omega)z}$

$$\text{และ} \quad \gamma(\omega) = \sqrt{(R(\omega) + j\omega L(\omega))(G(\omega) + j\omega C(\omega))} \quad (2.22)$$

วงจรแบบนี้เรียกว่าสายส่งแบบคลื่นเดินทางที่มีพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ละเอียด จึงใช้เวลาคำนวณเพื่อสร้างแบบจำลองมากกว่าหัวข้อ 2.4.1.2 และมีวงจรสมมุติดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยแหล่งจ่ายกระแส $b_r(t)$ และ $b_m(t)$ จะมีค่าขึ้นอยู่กับกระแสและ

แรงดันของปลายสายส่งด้านตรงข้ามที่ทราบค่าแล้วก่อนเวลา t ทำให้ค่าเสรีจิมพีแดนซ์ของสายส่งเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของสาย



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลย์ของสายส่งแบบคลื่นเดินทางที่พารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่

แบบจำลองนี้ถ้านำมาใช้ในระบบมากกว่า 1 เฟส จำเป็นต้องแปลงปริมาณทางเฟส (Phase Quantity) ให้เป็นปริมาณทาง Mode ก่อน แล้วจึงสร้างวงจรสมมูลย์ในแต่ละ Mode ในลักษณะเดียวกับรูปที่ 2.9 เมื่อหาค่าที่ต้องการใน Mode ต่าง ๆ ได้แล้ว จึงแปลงค่ากลับมาเป็นปริมาณทางเฟส การแปลงค่าระหว่างปริมาณทาง Mode และปริมาณทางเฟสจะต้องใช้เมตริกซ์การแปลง [10]

2.4.1.5 สายส่งหลายเส้น (MTL, Multiconductor Transmission Lines) [11]

การพิจารณาสายส่งไฟฟ้าหลายเส้น (MTL, Multiconductor Transmission Line) ควรทำการเปลี่ยนสมการการเชื่อมโยงในโดเมนเฟส (Phase Domain) เป็นสมการถอดการเชื่อมโยงในโดเมน Mode เมื่อให้แกน X มีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวของสายส่ง โดย $x = 0$ เป็นด้านขาเข้าของสายส่ง และ $x = D$ ($D > 0$) เป็นด้านขาออกของสายส่ง จะได้สมการของแรงดันและกระแสจากการแปลงลาปลาซสมการ (2.2) และ (2.3) ดังนี้

$$\frac{d[V(x)]}{dx} = -[R][I(x)] - s[L][I(x)], \quad 0 < x < D \quad (2.23)$$

$$\frac{d[I(x)]}{dx} = -[G][V(x)] - s[C][V(x)], \quad 0 < x < D \quad (2.24)$$

สมการ (2.23) และ (2.24) มีผลตอบอยู่ในรูปของแฟคเตอร์ตัวคูณด้วย $\text{EXP}(\mp \gamma_i x)$

โดยที่ $\gamma_i = \alpha_i + j\beta_i$ เป็นสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ Modal (Modal Propagation Coefficient) ($i = 1, 2, \dots, N$, N คือจำนวนสาย)

สมการของแรงดันและกระแสสามารถเขียนให้อยู่ในโดเมน Modal ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} [V(x)] &= [V_{\text{inc}}(x)] + [V_{\text{ref}}(x)] \\ &= [S_V] \{ [G_{\text{inc}}(x)] + [G_{\text{ref}}(x)] \} \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} [I(x)] &= [I_{\text{inc}}(x)] + [I_{\text{ref}}(x)] \\ &= [S_I] \{ [G_{\text{inc}}(x)] - [G_{\text{ref}}(x)] \} \end{aligned} \quad (2.26)$$

โดยที่ inc, ref : คลื่นเดินทางในทิศทางตามแนวแกน X และทิศทางตรงข้ามตามลำดับ

$[G_{\text{inc}}(x)], [G_{\text{ref}}(x)]$: เวกเตอร์ของปริมาณ Modal

$[S_V], [S_I]$: เมตริกซ์การแปลงของแรงดันและกระแส Modal

เมตริกซ์ Modal และเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติมีความสัมพันธ์ดังสมการ (2.27)

$$[Z_C] = [S_V][S_I]^{-1} = [S_V][\Gamma]^{-1}[S_V]^{-1}([R] + s[L]) \quad (2.27)$$

โดยที่ $[\Gamma]$: เมตริกซ์แนวทแยง (Diagonal Matrix) ของ $\gamma_1, \dots, \gamma_N$

จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทาง Mode ที่ปลายสายส่งดังนี้

$$[G_{\text{inc}}(D)] = [E][G_{\text{inc}}(0)] \quad (2.28)$$

$$[G_{\text{ref}}(0)] = [E][G_{\text{ref}}(D)] \quad (2.29)$$

โดยที่ $[E]$: เมตริกซ์แนวทแยงของ $\text{EXP}(-\gamma_1 D), \dots, \text{EXP}(-\gamma_N D)$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่ปลายสายส่งดังนี้

$$[V(0)] = [S_V] \{ [G_{\text{inc}}(0)] + [E][G_{\text{ref}}(D)] \} \quad (2.30)$$

$$[I(0)] = [S_I]\{[G_{inc}(0)]-[E][G_{ref}(D)]\} \quad (2.31)$$

$$[V(D)] = [S_V]\{[E][G_{inc}(0)]+[G_{ref}(0)]\} \quad (2.32)$$

$$[I(D)] = [S_I]\{[E][G_{inc}(0)]-[G_{ref}(D)]\} \quad (2.33)$$

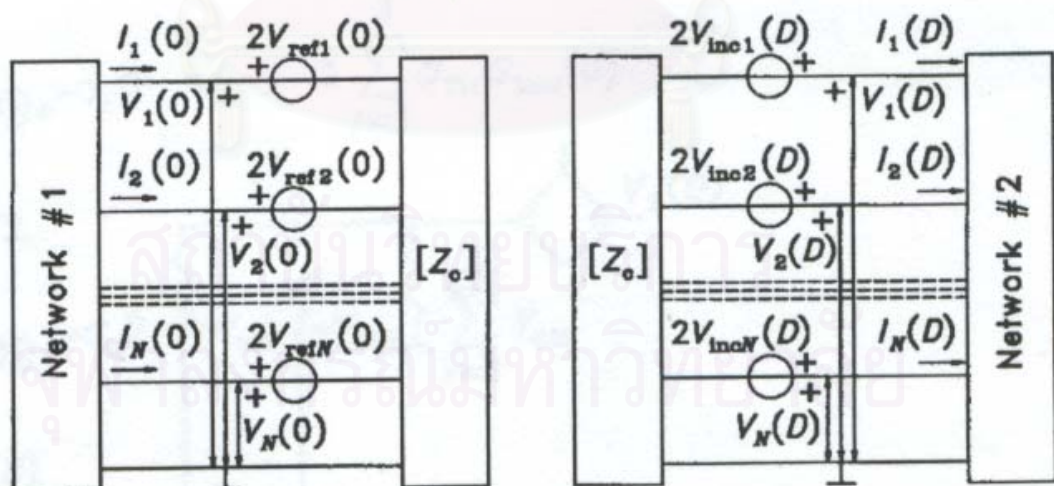
สมการ (2.31) คูณด้วย $[Z_C]$ แล้วลบออกจากสมการ (2.30) จะได้

$$\begin{aligned} [V(0)] - [Z_C][I(0)] &= 2[S_V][E][G_{ref}(D)] \\ &= 2[S_V][G_{ref}(0)] = 2[V_{ref}(0)] \end{aligned} \quad (2.34)$$

สมการ (2.33) คูณด้วย $[Z_C]$ แล้วบวกเข้ากับสมการ (2.32) จะได้

$$\begin{aligned} [V(D)] + [Z_C][I(D)] &= 2[S_V][E][G_{inc}(0)] \\ &= 2[S_V][G_{inc}(D)] = 2[V_{inc}(D)] \end{aligned} \quad (2.35)$$

จากสมการ (2.34) และ (2.35) สามารถสร้างวงจรสมมูลย์เทวินินได้ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลย์เทวินินของสายส่งไฟฟ้าหลายเส้น

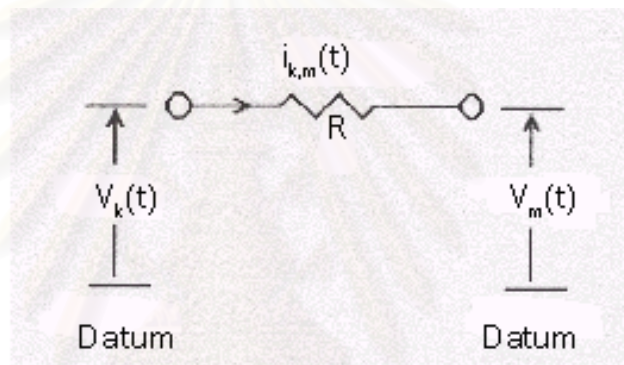
2.4.2 ตัวประกอบแบบก้อน (Lumped Linear Element) ได้แก่ ตัวต้านทาน (R), ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C)

2.4.2.1 วงจรสมมูลย์ของตัวต้านทาน

สมการแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของตัวต้านทานที่ต่อระหว่างโหนด k และ m คือ

$$i_{k,m}(t) = \frac{1}{R} [v_k(t) - v_m(t)] \quad (2.36)$$

ดังนั้นสามารถแทนความต้านทานด้วยวงจรสมมูลย์ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลย์ของความต้านทานเมื่อใช้พารามิเตอร์แบบก้อน

2.4.2.2 วงจรสมมูลย์ของตัวเหนี่ยวนำ

สมการแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของตัวเหนี่ยวนำระหว่างโหนด k และ m คือ

$$v_k - v_m = L \left(\frac{di_{k,m}}{dt} \right) \quad (2.37)$$

ทำการอินทิเกรตสมการดิฟเฟอเรนเชียล (2.37) จะได้

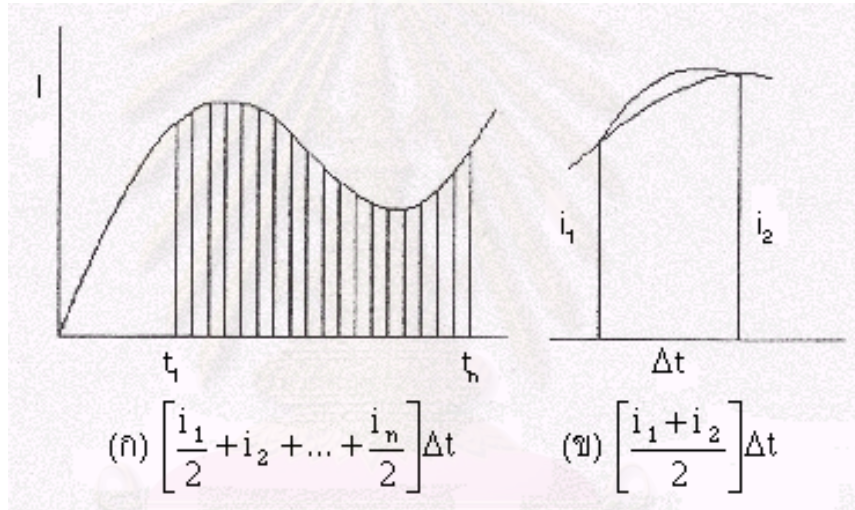
$$i_{k,m}(t) = i_{k,m}(t-\Delta t) + \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^t (v_k - v_m) dt \quad (2.38)$$

นำการอินทิเกรตแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal) มาใช้ในสมการ (2.38) ดังแสดงดังรูปที่ 2.16 จะได้สมการ (2.39)

$$i_{k,m}(t) = \frac{\Delta t}{2L} [v_k(t)-v_m(t)] + i_{k,m}(t-\Delta t) \tag{2.39}$$

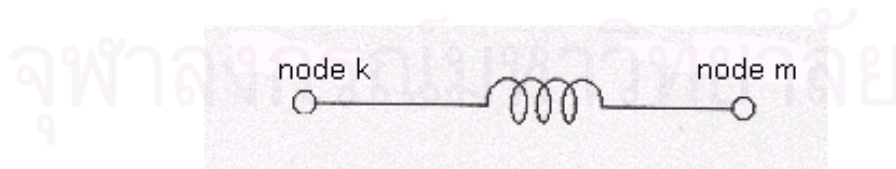
โดยที่ $i_{k,m}(t-\Delta t)$ เป็นแหล่งจ่ายกระแสสมมุติของช่วงเวลาที่ผ่านไป (Past History) มีค่าดังนี้

$$i_{k,m}(t-\Delta t) = i_{k,m}(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} [v_k(t-\Delta t)-v_m(t-\Delta t)] \tag{2.40}$$

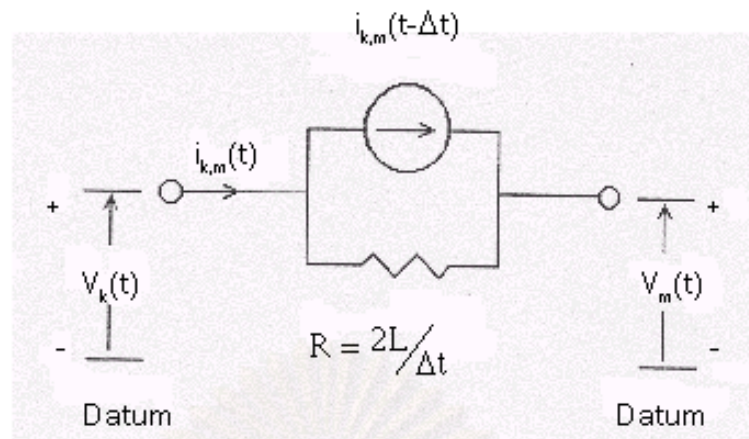


รูปที่ 2.16 การอินทิเกรตแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

ดังนั้นสามารถแทนตัวเหนี่ยวนำด้วยวงจรสมมุติดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 (ก) ตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.17 (ข) วงจรสมมูลย์ของตัวเหนี่ยวนำเมื่อใช้พารามิเตอร์แบบก่อน

2.4.2.3 วงจรสมมูลย์ของตัวเก็บประจุ

สมการแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุระหว่างโหนด k และ m คือ

$$v_k(t) - v_m(t) = \frac{1}{C} \int_{t-\Delta t}^t i_{k,m}(t) dt + [v_k(t-\Delta t) - v_m(t-\Delta t)] \quad (2.41)$$

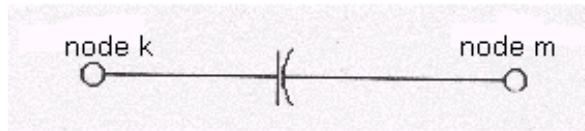
นำการอินทิเกรตแบบสี่เหลี่ยมคางหมูมาใช้ในสมการ (2.41) จะได้

$$i_{k,m}(t) = \frac{2C}{\Delta t} [v_k(t) - v_m(t)] + i_{k,m}(t-\Delta t) \quad (2.42)$$

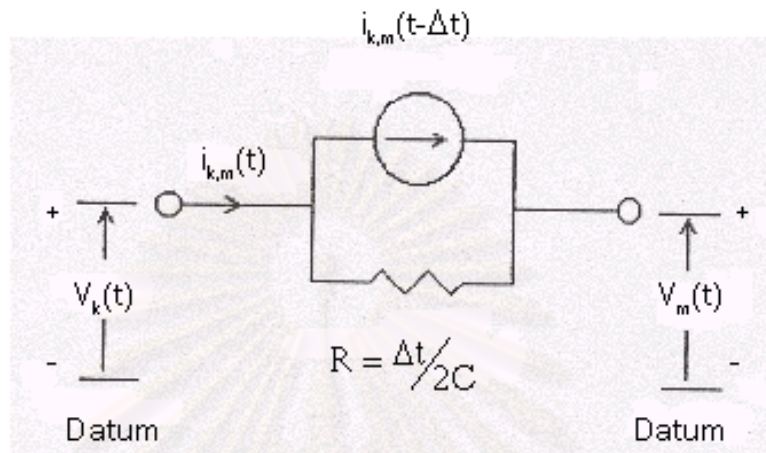
โดยที่ $i_{k,m}(t-\Delta t)$ เป็นแหล่งจ่ายกระแสสมมูลย์ของช่วงเวลาที่ผ่านมาแล้ว มีค่าดังนี้

$$i_{k,m}(t-\Delta t) = i_{k,m}(t-\Delta t) - \frac{2C}{\Delta t} [v_k(t-\Delta t) - v_m(t-\Delta t)] \quad (2.43)$$

ดังนั้นสามารถแทนตัวเก็บประจุด้วยวงจรสมมูลย์ดังรูปที่ 2.18



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.18 (ก) ตัวเก็บประจุ (ข) วงจรสมมูลย์ของตัวเก็บประจุเมื่อใช้พารามิเตอร์แบบก่อน

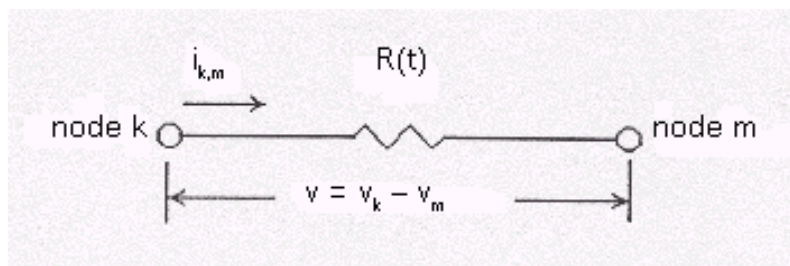
2.4.3 ตัวประกอบแบบไม่เชิงเส้นหรือแบบที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Nonlinear or Time Varying Elements) อุปกรณ์เหล่านี้ได้แก่ตัวต้านทานไม่เชิงเส้น, หม้อแปลงหรือตัวเหนี่ยวนำในสภาวะแม่เหล็กอิ่มตัว, เซอร์กิตเบรคเกอร์และกับดักเคอร์รี่

2.4.3.1 ความต้านทานไม่เชิงเส้น

สมการแสดงความสัมพันธ์ที่เขียนอยู่ในรูปของแรงดันซึ่งเป็นฟังก์ชันของกระแสคือ

$$V = f(i) \tag{2.44}$$

ดังนั้นสามารถแทนความต้านทานไม่เชิงเส้นด้วยวงจรมูลย์ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 วงจรมูลย์ของความต้านทานไม่เชิงเส้น

ความต้านทานไม่เชิงเส้นจะพบได้ในอุปกรณ์กับดักเสิร์จแบบออกไซด์ของโลหะ (Metal Oxide) เช่นออกไซด์ของสังกะสีที่มีคุณสมบัติของความต้านทานไม่เชิงเส้น การแทนความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสสามารถแทนได้ดังสมการ (2.45), (2.46) และ (2.47) ตามลำดับ

$$i = \left[\frac{|v|}{c} \right]^\alpha (\text{sign of } v) \quad (2.45)$$

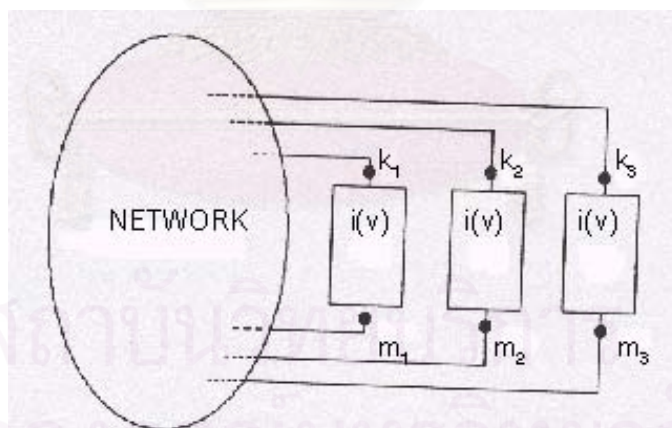
$$i_k = \left[\frac{|v_k|}{c} \right]^\alpha (\text{sign of } v_k), k = 1, 2, \dots, M \quad (2.46)$$

$$[v] = [v_{\text{OPEN}}] - [R_{\text{THEV}}][i] \quad (2.47)$$

โดยที่ α : ค่าคงที่

c : แรงดันอ้างอิง

ดังนั้นสามารถแทนวงจรสมมูลย์ของกับดักเสิร์จแบบออกไซด์ของโลหะได้ดังรูปที่ 2.20



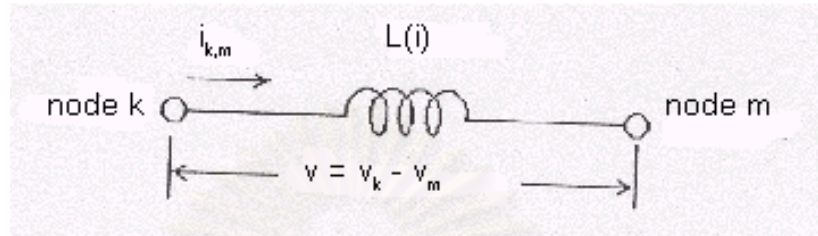
รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลย์ของกับดักเสิร์จแบบออกไซด์ของโลหะ

2.4.3.2 ตัวเหนี่ยวนำไม่เชิงเส้น

ลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นเกิดจากฟลักซ์รั่วไหล (Flux Leakage, ψ) ได้แก่ การอิ่มตัวของแกนเหล็กของหม้อแปลง ความสัมพันธ์แสดงได้ดังสมการ (2.48)

$$\psi(t) = \int_0^t (v_k(t) - v_m(t)) dt + \psi(0) \quad (2.48)$$

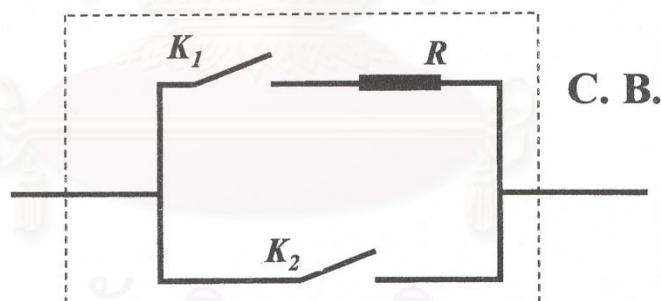
ดังนั้นสามารถแทนตัวเหนี่ยวนำไม่เชิงเส้นด้วยวงจรมูลยุดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 วงจรมูลยุดของตัวเหนี่ยวนำไม่เชิงเส้น

2.4.4 เซอร์กิตเบรกเกอร์

เซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นสวิตช์ที่ทำหน้าที่ปิดหรือเปิดที่เวลาที่ต้องการ โดยมีความต้านทานต่ออนุกรมในขณะที่ปิดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์ในช่วงเวลาหนึ่งเพื่อลดขนาดของแรงดันเกิน ดังนั้นสามารถแทนเซอร์กิตเบรกเกอร์ด้วยวงจรมูลยุดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 วงจรมูลยุดของเซอร์กิตเบรกเกอร์

2.4.5 การวิเคราะห์ทรานเซียนต์ของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยบัสดัดแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์

ทำได้โดยใช้สมการของระบบไฟฟ้า (Network Equations) พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบด้วย n โหนด (n เป็นจำนวนเต็มบวก) จะสามารถแทนระบบนั้น ๆ ด้วยสมการโหนด (Node Equation) จำนวน $n-1$ สมการ ซึ่งเป็นอิสระจากกันและเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเมตริกซ์ได้คือ

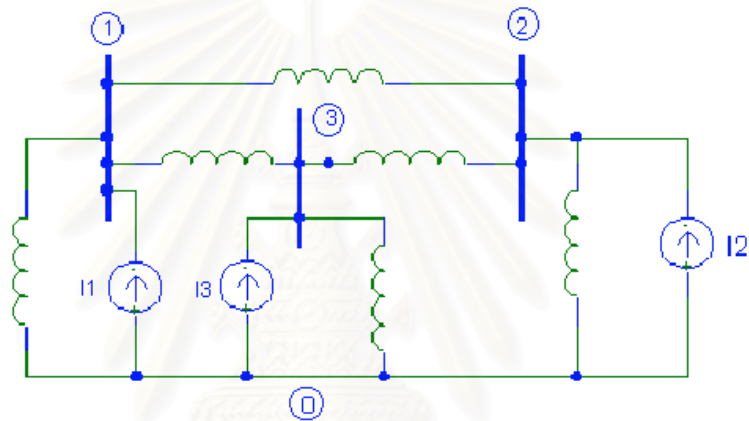
$$I_{BUS} = Y_{BUS} E_{BUS} \quad (2.49)$$

โดยที่ I_{BUS} : เวกเตอร์ของกระแสที่ไหลเข้าบัส

Y_{BUS} : บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ ซึ่งประกอบด้วยอิลิเมนต์ต่าง ๆ โดยที่อิลิเมนต์ในแนวทแยง (Diagonal Element) เรียกว่าแอดมิตแตนซ์ตัวเอง (Self Admittance) และอิลิเมนต์นอกแนวทแยง (Off-diagonal Element) เรียกว่าแอดมิตแตนซ์ร่วม (Mutual Admittance)

E_{BUS} : เวกเตอร์ของแรงดันที่โหนดวัดเทียบกับโหนดอ้างอิง

พิจารณาระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วย 4 โหนดที่มีโหนด 0 เป็นโหนดอ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 วงจรของระบบไฟฟ้าที่มี 4 โหนด

จากรูปที่ 2.23 จะได้สมการของระบบไฟฟ้างานี้

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

โดยที่ Y_{11} , Y_{22} และ Y_{33} เป็นแอดมิตแตนซ์ตัวเองของโหนด 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

Y_{12} และ Y_{13} เป็นแอดมิตแตนซ์ร่วมของโหนด 1 กับโหนด 2 และโหนด 3 ตามลำดับ

Y_{21} และ Y_{23} เป็นแอดมิตแตนซ์ร่วมของโหนด 2 กับโหนด 1 และโหนด 3 ตามลำดับ

Y_{31} และ Y_{32} เป็นแอดมิตแตนซ์ร่วมของโหนด 3 กับโหนด 1 และโหนด 2 ตามลำดับ

เมื่อทราบค่าของ I_{BUS} จะสามารถหาค่าแรงดันที่โหนดต่าง ๆ ได้จากการอินเวอร์สเมตริกซ์ Y_{BUS} เพื่อพิจารณาผลตอบสนองของระบบไฟฟ้าในช่วงเวลา t ใด ๆ จะได้สมการโหนดดังนี้

$$[Y][e(t)] = [i(t)] - [I] \quad (2.51)$$

โดยที่ $[Y]$: โหนดแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์

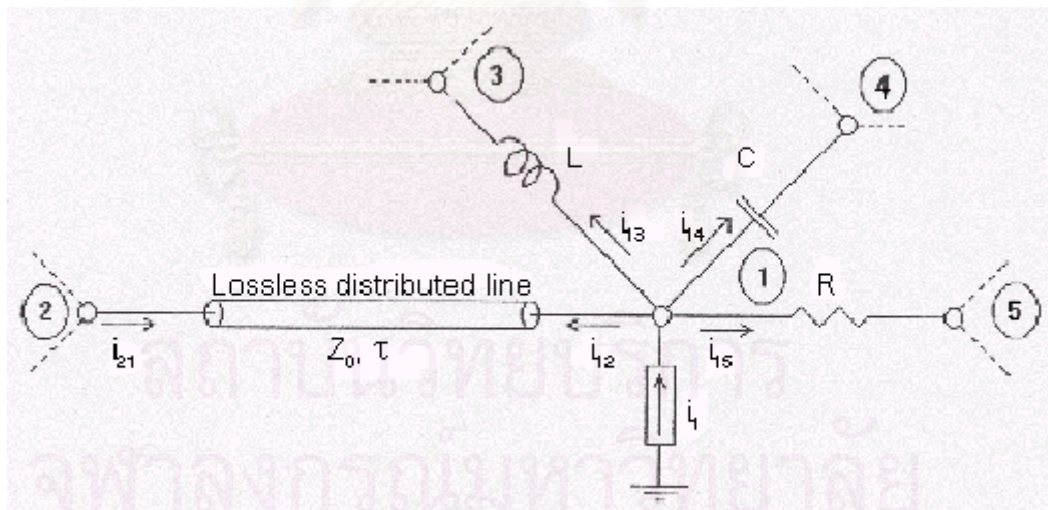
$[e(t)]$: เวกเตอร์ของแรงดันโหนดที่เวลา t

โดยที่ $[i(t)]$: เวกเตอร์ของกระแสที่ป้อนเข้าที่โหนดที่เวลา t

$[I]$: เวกเตอร์ที่ทราบค่าคือแหล่งจ่ายกระแสสมมูลย์ (Equivalent Current Source)

จากการแทนค่าอิมพีแดนซ์ต่าง ๆ และแก้สมการ จะสามารถหาแรงดันโหนดหรือกระแสที่เวลาใด ๆ ได้ และนำค่าที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าต่อไป

เมื่อต้องการพิจารณาองค์ประกอบวงจรต่าง ๆ จำเป็นต้องแยกวงจรออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นวงจรเชิงเส้นซึ่งสามารถยุบรวมตัวลงเป็นแหล่งจ่ายสมมูลย์เทวินิน และส่วนที่เป็นตัวประกอบไม่เชิงเส้น ซึ่งถูกพิจารณาเป็นโหลดเพื่อแก้สมการในลักษณะของสมการแรงดันโหนด (Node Voltage Equation) โดยวิธีทำซ้ำ (Iteration) ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 วงจรส่วนหนึ่งของระบบวงจรไฟฟ้าเฟสเดียว

พิจารณาที่โหนด 1 จะได้

$$i_{12}(t) + i_{13}(t) + i_{14}(t) + i_{15}(t) = i_1(t) \quad (2.52)$$

นำสมการ (2.14), (2.39), (2.42) และ (2.36) แทนค่าด้านซ้ายมือตามลำดับจะได้

$$\left(\frac{1}{Z_0} + \frac{\Delta t}{2L} + \frac{2C}{\Delta t} + \frac{1}{R} \right) v_1(t) - \frac{\Delta t}{2L} v_3(t) - \frac{2C}{\Delta t} v_4(t) - \frac{1}{R} v_5(t) = i_1(t) - I_{12}(t-\tau) - I_{13}(t-\Delta t) - I_{14}(t-\Delta t) - I_{15}(t-\Delta t) \quad (2.53)$$

จากสมการ (2.53) จะสามารถสร้างสมการโหนดของระบบที่เวลา t ได้ดังนี้

$$[G][v(t)] = [i(t)] - [I] \quad (2.54)$$

โดยที่ $[G]$: โหนดคอนดักแตนซ์เมตริกซ์

$[v(t)]$: เวกเตอร์ของแรงดันโหนดที่เวลา t

$[i(t)]$: เวกเตอร์ของกระแสที่ป้อนเข้าที่โหนดที่เวลา t

$[I]$: เวกเตอร์ที่ทราบค่าคือแหล่งจ่ายกระแสสมมูลย์ I

พิจารณาเมตริกซ์ $[G]$ จะสามารถจัดกลุ่มของโหนด ซึ่งไม่ทราบค่าแรงดันด้วยเซตย่อย A และกลุ่มที่ทราบค่าแรงดันด้วยเซตย่อย B จัดเป็นรูปเมตริกซ์ได้ดังสมการ (2.55)

$$\begin{bmatrix} [G_{AA}] & [G_{AB}] \\ [G_{BA}] & [G_{BB}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [v_A(t)] \\ [v_B(t)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [i_A(t)] \\ [i_B(t)] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

จากสมการ (2.55) สามารถหาค่าเวกเตอร์ของแรงดันที่ไม่ทราบค่า $V_A(t)$ โดยการแก้สมการ (2.56) ด้วยวิธี Triangular Factorization [10]

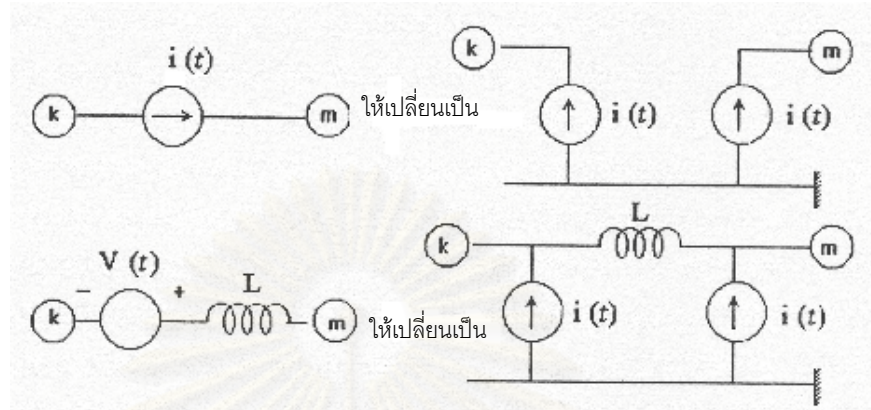
$$[G_{AA}][v_A(t)] = [I_{total}] - [G_{AB}][v_{AB}(t)] \quad (2.56)$$

$$[I_{total}] = [i_A(t)] - [I_A] \quad (2.57)$$

2.4.6 แหล่งจ่ายพลังงาน

แหล่งจ่ายพลังงานมีทั้งประเภทแหล่งจ่ายแรงดันและแหล่งจ่ายกระแสที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในแบบต่าง ๆ เช่นรูปคลื่นไซน์, รูปคลื่นขั้นและรูปคลื่นลาดเป็นต้น และต้องเป็นแหล่งจ่าย

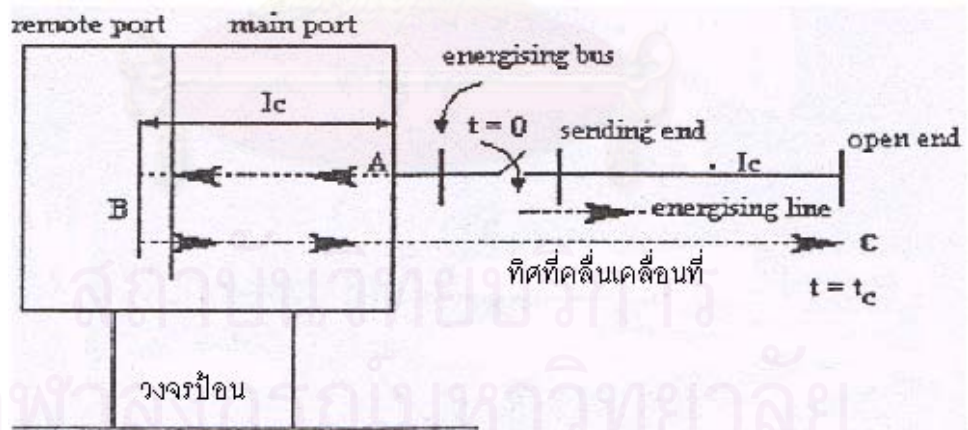
พลังงานที่มีปลายด้านหนึ่งเป็นโหนดต่อลงดิน (Ground Node) หรือโหนดอ้างอิง (Reference Node) ในรูปที่ 2.25 แสดงวิธีการแปลงแหล่งกำเนิดพลังงานให้มีปลายด้านหนึ่งต่อกับโหนดต่อลงดิน



รูปที่ 2.25 แหล่งจ่ายพลังงานของระบบวงจรไฟฟ้า

2.4.7 หลักการสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าแรงสูง

การวิเคราะห์แรงดันเกินสวิตชิงที่เกิดจากการส่งกำลังให้แก่สายส่งที่ยังไม่ได้ต่อกับโหลด จากวงจรป้อน (Feeding Network) โดยการปิดเบรกเกอร์หรือการกระตุ้นสายส่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.26

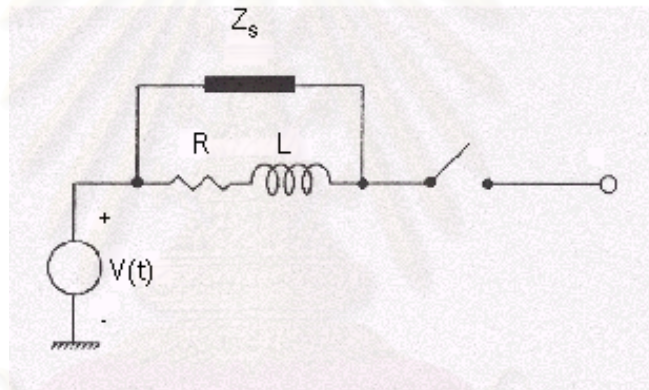


รูปที่ 2.26 ระบบไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ในการศึกษาแรงดันเกินสวิตชิง

จากรูปที่ 2.26 เป็นแบบที่มีความสำคัญต่อการออกแบบฉนวนไฟฟ้า เพราะแรงดันเกินสวิตชิงที่ปลายสายนั้นมักจะมีขนาดสูงที่สุดในระบบ การสร้างแบบจำลองวงจรป้อนแบ่งออกเป็น 2 แนวทาง [12] คือ

แนวทางที่ 1 ส่วนประกอบของวงจรป้อนแบบที่ใช้ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรที่ 50 Hz ของวงจรส่วนห่างไกลต่อขนานกับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่ต่อกับบัสต้นทาง

ในขั้นแรกจะต้องพิจารณาตัดส่วนประกอบที่ไม่ค่อยสำคัญออกไปก่อน ส่วนประกอบนี้ได้แก่วงจรส่วนห่างไกลจากเบรคเกอร์ (Remote Part) ซึ่งอาจเป็นแหล่งผลิตหรือเป็นระบบสายจ่ายและโหลด ที่อยู่ไกลจากเบรคเกอร์จนกระทั่งคลื่นแรงดันที่เกิดจากการปิดเบรคเกอร์ แล้วเคลื่อนที่ไปถึงวงจรส่วนห่างไกลแล้วย้อนกลับมาถึงปลายสายส่งที่ไม่ได้ต่อโหลดนานเกินกว่าเวลาที่ขนาดสูงสุดของแรงดันเกินได้เกิดขึ้นแล้ว โดยทั่วไปมักจะเกิดในช่วงเวลาหลังจากปิดเบรคเกอร์ไม่นาน ดังนั้นผลสืบเนื่องจากวงจรส่วนนี้จะอยู่นอกช่วงที่พิจารณา จึงสามารถแทนด้วยวงจรสมมูลย์โดยประมาณอย่างง่าย ซึ่งจะใช้อิมพีแดนซ์ลัดวงจรที่ 50 Hz (Short Circuit Power Frequency Impedance) ของวงจรส่วนห่างไกลต่อขนานกับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่ต่อกับบัสต้นทาง วงจรส่วนห่างไกลที่พิจารณาจากเบรคเกอร์แสดงดังรูปที่ 2.27

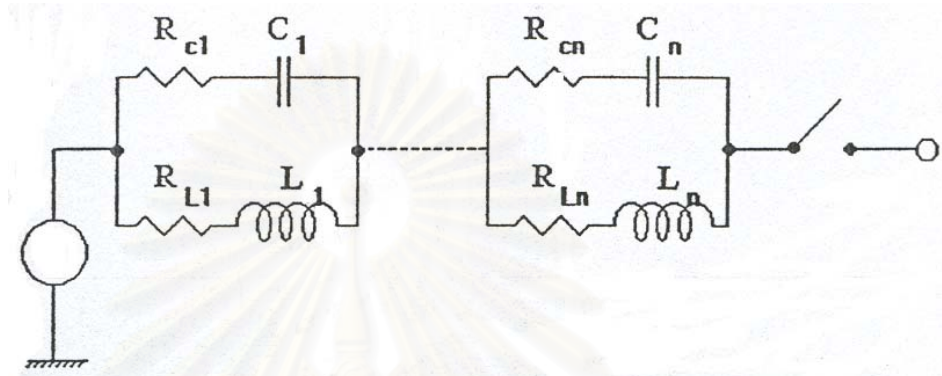


รูปที่ 2.27 วงจรป้อนที่ใช้ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรที่ 50 Hz ของวงจรส่วนห่างไกลต่อขนานกับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่ต่อกับบัสต้นทาง

ในขั้นต่อมาจึงนำส่วนประกอบที่สำคัญแต่ละส่วนมาสร้างแบบจำลอง สำหรับส่วนที่สามารถพิจารณาเป็นส่วนที่มีพารามิเตอร์แบบก้อนได้ เนื่องจากเวลาเดินทางของคลื่นแรงดันผ่านตัวเองน้อยมากเมื่อเทียบกับเวลาที่คลื่นใช้เดินทางผ่านสายส่ง จะแทนด้วยตัวต้านทาน, ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ส่วนสายส่งจะเลือกแบบจำลองจากสายส่งแบบคลื่นเดินทางที่มีพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่

แนวทางที่ 2 วงจรป้อนที่สร้างแบบจำลองด้วยวงจรสังเคราะห์อิมพีแดนซ์

หลักการของแนวทางนี้คือการสร้างวงจรสังเคราะห์ขึ้นให้มีอิมพีแดนซ์ (Z_{eq}) เท่ากับอิมพีแดนซ์ของวงจรป้อนที่พิจารณาจากเบรคเกอร์ (Z_T) วงจรสังเคราะห์นี้สร้างขึ้นโดยอาศัยลักษณะของวงจรฟอสเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.28 จำนวน n หน่วยจะขึ้นอยู่กับจำนวนความถี่เรโซแนนซ์



รูปที่ 2.28 วงจรสังเคราะห์ระบบแรงสูง

2.5 องค์ประกอบในการคำนวณพารามิเตอร์ของระบบสายส่ง 500 kV [2]

จากรูปที่ 2.29 เป็นองค์ประกอบของเสาไฟฟ้า 500 kV ประกอบด้วยสายดิน 2 เส้น สายเฟสชนิดสายควบ (Bundle Conductors) 4 เส้น 3 ชุด

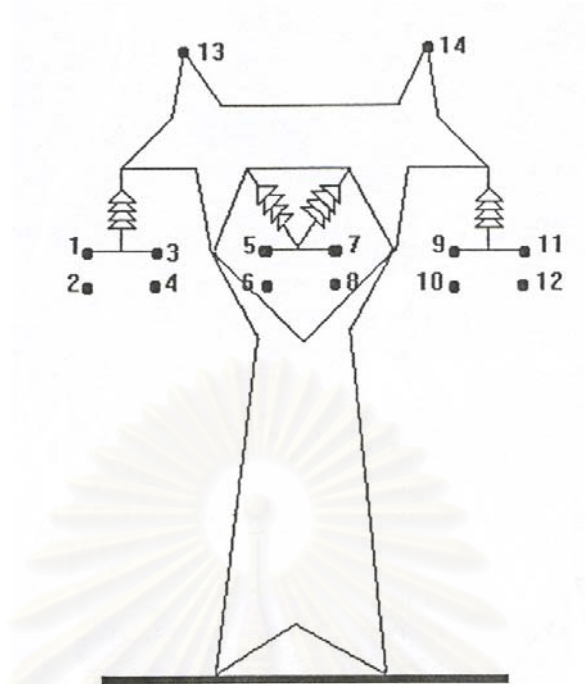
กำหนดให้ สายเฟส 1, 2, 3, 4 เป็นสายเฟส A

สายเฟส 5, 6, 7, 8 เป็นสายเฟส B

สายเฟส 9, 10, 11, 12 เป็นสายเฟส C

สายดิน 13, 14 เป็นสายดิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.29 องค์ประกอบของเสาไฟฟ้า 500 kV

การคำนวณพารามิเตอร์ของสายจะประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ต่ออนุกรม (Series Impedance) และคาปาซิแตนซ์ต่อขนาน (Shunt Capacitance) ดังนี้

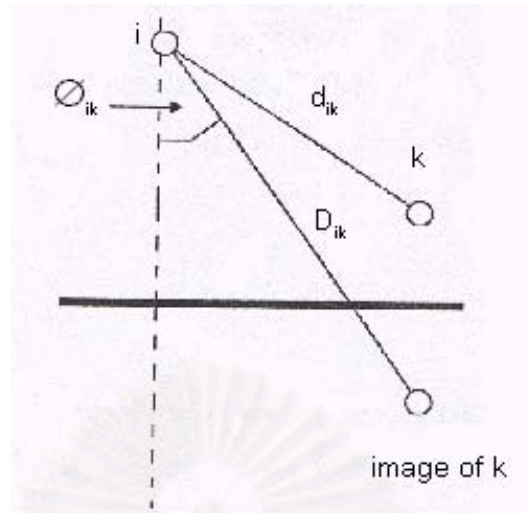
2.5.1 อิมพีแดนซ์ต่ออนุกรม (Series Impedance)

อิมพีแดนซ์ต่ออนุกรมของสายตัวนำ 14 เส้น จะอธิบายอยู่ในเทอมของอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ $[Z]$ 14×14 และคำนวณโดยใช้สูตรของคาร์สัน (Carson's Formula) ซึ่งพิจารณาผลของทางย้อนกลับผ่านดิน (Earth Return Path) ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.30 และสมการ (2.58) และสมการ (2.59)

สมการในการคำนวณอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ประกอบด้วย

$$Z_{ii} = (R_{ii} + \Delta R_{ii}) + j(2\omega 10^{-4} \ln \frac{2h_i}{GMR_i} + \Delta x_{ii}) \quad (\text{โอห์ม/กิโลเมตร}) \quad (2.58)$$

$$Z_{ik} = Z_{kj} = \Delta R_{ik} + j(2\omega 10^{-4} \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}} + \Delta x_{ik}) \quad (\text{โอห์ม/กิโลเมตร}) \quad (2.59)$$



รูปที่ 2.30 ระยะทางระหว่างตัวนำ i และ k

กำหนดให้ Z_{ii} : อิมพีแดนซ์ตัวเองอนุกรม (Series Self Impedance)

Z_{ik} : อิมพีแดนซ์ร่วมอนุกรม (Series Mutual Impedance)

โดย R_{ii} : ความต้านทานของสายเฟส (โอห์ม/กิโลเมตร)

h_i : ความสูงเฉลี่ยของสายเฟส i จากพื้นดิน (เมตร)

D_{ik} : ระยะระหว่างสายเฟส i และภาพเสมือน (Image) ของสายเฟส k (เมตร)

d_{ik} : ระยะระหว่างสายเฟส i และสายเฟส k (เมตร)

GMR_i : ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต (Geometric Mean Radius) ของสายนำไฟฟ้า i

ω : ความถี่เชิงมุม (Angular Frequency)

$\Delta R, \Delta x$: การแก้ไขของคาร์สัน (Carson's correction) ซึ่งพิจารณาผลของทางย้อนกลับผ่านดินด้วย

สมการของแรงดันคร่อมตามความยาวของสายส่ง ในสภาวะคงตัวของสายตัวนำ 14 เส้น สามารถเขียนได้เป็น

$$-\begin{bmatrix} dv_1 / dx \\ dv_2 / dx \\ \vdots \\ dv_{14} / dx \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \vdots & Z_{114} \\ Z_{21} & Z_{22} & \vdots & Z_{214} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{141} & Z_{142} & \vdots & Z_{1414} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{14} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

2.5.2 คาแปซิแตนซ์ต่อขนาน (Shunt Capacitance)

คาแปซิแตนซ์ต่อขนานระหว่างสายตัวนำ 14 เส้นกับดิน จะอธิบายอยู่ในเทอมของคาแปซิแตนซ์เมตริกซ์ $[C]$ 14×14 สามารถหาได้โดยการใช้อินเวอร์สโพเทนเชียลเมตริกซ์ (Potential Matrix, $[P]$) คือ

$$[C] = [P]^{-1} \quad (2.61)$$

โดยแต่ละอิลิเมนต์ของโพเทนเชียลเมตริกซ์จะหาได้จากสมการ (2.62) และสมการ (2.63) เมื่อ r คือรัศมีของสายตัวนำ และ $r \ll h$

$$P_{ii} = 18 \times 10^6 \ln \frac{2h_i}{v_i} \quad (\text{km/F}) \quad (2.62)$$

$$P_{ik} = P_{ki} = 18 \times 10^6 \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}} \quad (\text{km/F}) \quad (2.63)$$

สมการ (2.62) และ (2.63) จะให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องเมื่อรัศมีของสายนำไฟฟ้ามีขนาดเล็กมาก เมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างสายไฟฟ้า โดยค่าคงที่ของสมการคือ $2c^2 \times 10^{-4}$ เท่ากับ 18×10^6 (c เป็นความเร็วแสงมีหน่วยเป็นกิโลเมตรต่อวินาที)

สมการของแรงดันระหว่างสายเฟสกับดินของสายตัวนำ 14 เส้น มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ศักย์ไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Potential Coefficients) และประจุไฟฟ้า (Q) บนสายตัวนำสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \vdots & P_{114} \\ P_{21} & P_{22} & \vdots & P_{214} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{141} & P_{142} & \vdots & P_{1414} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_{14} \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

2.5.3 การลดรูปของเมตริกซ์ของสายดินและสายควบ (Elimination of Ground Wires and Bundling)

สมการ (2.60) และสมการ (2.64) สำหรับสายตัวนำ 14 เส้น สามารถลดจำนวนสมการในระบบ 3 เฟส ให้เหลือ 3 สมการ เช่นในกรณีสมการ (2.64) สามารถใช้การอินเวอร์ส [P] ได้ดังสมการ (2.65)

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \vdots & C_{114} \\ C_{21} & C_{22} & \vdots & C_{214} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{141} & C_{142} & \vdots & C_{1414} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_{14} \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

กำหนดให้ค่าแรงดันที่สายดินเท่ากับศูนย์ ดังนั้น V_{13} และ V_{14} จะเท่ากับศูนย์ในสมการ (2.65) จากการลดรูปเมตริกซ์ครั้งที่ 1 จะเหลือ 12 สมการ

ต่อมาทำการลดรูปเมตริกซ์ครั้งที่ 2 โดยต่อสายตัวนำเป็นแบบสายควบและจัดกลุ่มเป็นสายเฟส เช่นเฟส A จะต่อสายตัวนำ 1, 2, 3 และ 4 ซึ่งจะได้ $V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = V_a$ รวมทั้ง $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = Q_a$ ดังสมการ (2.66)

$$\begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ab} & C_{ac} \\ C_{ba} & C_{bb} & C_{bc} \\ C_{ca} & C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

โดยที่

$$C_{aa} = C_{11} + C_{12} + C_{13} + C_{14} + C_{21} + C_{22} + C_{23} + C_{24} + C_{31} + C_{32} + C_{33} + C_{34} + C_{41} + C_{42} + C_{43} + C_{44}$$

ทำนองเดียวกัน สมการ (2.60) สามารถลดรูปเมตริกซ์ได้ดังสมการ (2.67)

$$-\begin{bmatrix} dV_a/dx \\ dV_b/dx \\ dV_c/dx \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

2.5.4 องค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Components)

จากสมการ (2.66) และ (2.67) จะทำการแปลงสายส่งจากปริมาณทางเฟส (Phase Quantities) ไปเป็นปริมาณทางลำดับ (Sequence Quantities) เช่นในกรณีสมการ (2.67) สามารถแปลงสายส่งชนิดไม่สลับตำแหน่งสาย (Untransposed) ได้ ดังสมการ (2.68)

$$-\begin{bmatrix} dV_{\text{zero}}/dx \\ dV_{\text{pos}}/dx \\ dV_{\text{neg}}/dx \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{\text{zero,zero}} & Z_{\text{zero,pos}} & Z_{\text{zero,neg}} \\ Z_{\text{pos,zero}} & Z_{\text{pos,pos}} & Z_{\text{pos,neg}} \\ Z_{\text{neg,zero}} & Z_{\text{neg,pos}} & Z_{\text{neg,neg}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\text{zero}} \\ I_{\text{pos}} \\ I_{\text{neg}} \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ในส่วนแนวทแยง (Diagonal Element) และแนวสามเหลี่ยมบนและล่าง (Off-diagonal) ในสมการ (2.66) หรือสมการ (2.67) มีค่าเท่ากันจะได้

$$Z_s = \frac{1}{3}(Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc}) \quad (2.69)$$

$$Z_m = \frac{1}{3}(Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{bc}) \quad (2.70)$$

ถ้าเมตริกซ์ $\begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix}$ สมดุล เมื่อทำการแปลงให้อยู่ในเทอมปริมาณทางลำดับ

(Sequence Quantities) แล้ว ในสมการ (2.68) จะเหลือเพียงเทอมในแนวทแยงเท่านั้น แต่ในกรณีของสายส่งชนิดไม่สลับตำแหน่งสายนั้น เทอมในแนวสามเหลี่ยมบนและล่างในสมการ (2.68) จะต้องใช้ในการพิจารณาผลของการเชื่อมโยง (Coupling Effects) ระหว่างปริมาณทางลำดับ

2.5.5 Modal Parameters [11]

จากหัวข้อ 2.5.4 การหาสมการลำดับศูนย์, ลำดับบวกและลำดับลบ เป็นการเปลี่ยนสมการการเชื่อมโยงในเฟสโดเมน (Phase Domain) เป็นสมการถอดการเชื่อมโยงในโดเมน Mode สำหรับสายส่งชนิดไม่สลับตำแหน่งของสายจะสามารถเขียนได้ดังสมการ (2.71) และสมการ (2.72)

$$[V_{\text{mode}}] = [S_v]^{-1}[V_{\text{phase}}] \quad (2.71)$$

$$[I_{\text{mode}}] = [S_i]^{-1}[I_{\text{phase}}] \quad (2.72)$$

โดยที่ $[S_v]$, $[S_i]$: เมตริกซ์การแปลงของแรงดันและกระแส และ $[S_v] = [S_i]^{-1}$

2.5.6 การคำนวณพารามิเตอร์ของระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ สำหรับคำนวณแรงดันเกินสวิตชิง [2]

จากข้อมูลของเสาและสายส่งไฟฟ้ากำลังดังแสดงในตารางที่ ค.1 และ ค.2 ของภาคผนวก ค สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้าได้ดังตารางที่ ค.3 ของภาคผนวก ค ซึ่งเป็นข้อมูลอิมพีแดนซ์ของสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ฯ ในที่นี้จะเลือกแสดงสายส่งแรงสูงช่วงสถานีไฟฟ้าย่อยแม่เมาะ 3 ถึงสถานีไฟฟ้าย่อยท่าตะโก เป็นตัวอย่างในการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ ช่วงสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ 3 ถึงสถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก

หมายเลข	วงจรสายส่ง (Line Section)	ลำดับบวก (P.U.)			ลำดับศูนย์ (P.U.)			ระยะทาง (km)
		R_1	X_1	Y_1	R_0	X_0	Y_0	
1	MM3-TTK-L5K1	0.00264	0.03482	3.34795	0.02752	0.12423	2.09251	325.6
2	MM3-TTK-L5K2	0.0027	0.03363	3.62629	0.04963	0.20799	1.52394	333.3
3	MM3-TTK-L5K3	0.0027	0.03363	3.62629	0.04963	0.20799	1.52394	333.3

โดยที่ MM3-TTK-L5K1 : สายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ระหว่างสถานีไฟฟ้าย่อยแม่เมาะ 3 ถึงสถานีไฟฟ้าย่อยท่าตะโก วงจร 1

MM3-TTK-L5K2 : สายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ระหว่างสถานีไฟฟ้าย่อยแม่เมาะ 3 ถึงสถานีไฟฟ้าย่อยท่าตะโก วงจร 2

MM3-TTK-L5K3 : สายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ระหว่างสถานีไฟฟ้าย่อยแม่เมาะ 3 ถึงสถานีไฟฟ้าย่อยท่าตะโก วงจร 3

จากตารางที่ 2.3 นำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตารางหารด้วยระยะทาง และจัดให้อยู่ในรูปแบบค่าอิมพีแดนซ์ (Z) และแอดมิตแตนซ์ (Admittance, Y) ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ เมื่อจัดให้อยู่ในรูปของ Z และ Y

หมายเลข	วงจรสายส่ง	ลำดับบวก (P.U.)		ลำดับศูนย์ (P.U.)	
		Z (P.U./km)	Y (P.U./km)	Z (P.U./km)	Y (P.U./km)
1	MM3-TTK-L5K1	0.0000081+j0.00011	j0.0103	0.000085+j0.00038	j0.00643
2	MM3-TTK-L5K2	0.0000081+j0.00010	j0.0109	0.00015+j0.00062	j0.00468
3	MM3-TTK-L5K3	0.0000081+j0.00010	j0.0109	0.00015+j0.00062	j0.00468

จากตารางที่ 2.4 นำค่า Z (P.U./km) มาคูณกับอิมพีแดนซ์ฐาน (Base Impedance) และนำค่า Y (P.U./km) มาหารกับอิมพีแดนซ์ฐาน แล้วนำค่าที่ได้ไปใส่ไว้ในตารางที่ 2.5 เป็นข้อมูลพารามิเตอร์สายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ โดยใช้แบบจำลองแบบพารามิเตอร์คงที่ (Constant-parameter Line)

$$\text{โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ฐานเท่ากับ } \frac{(\text{base voltage, kv})^2}{\text{base MVA } 3\phi} = \frac{(500)^2}{100} = 2,500 \Omega$$

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลของพารามิเตอร์ระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองแบบพารามิเตอร์คงที่ (Constant-parameter Line)

หมายเลข	วงจรสายส่ง	ลำดับบวก			ลำดับศูนย์			ระยะทาง (km)
		R ₁ (Ω/km)	X _{L1} (Ω/km)	B _{C1} (μmoh/km)	R ₀ (Ω/km)	X _{L0} (Ω/km)	B _{C0} (μmoh/km)	
1	MM3-TTK-L5K1	0.0203	0.2674	4.1130	0.2113	0.9539	2.5707	325.6
2	MM3-TTK-L5K2	0.0203	0.2525	4.3559	0.3726	1.5615	1.8306	333
3	MM3-TTK-L5K3	0.0203	0.2525	4.3559	0.3726	1.5615	1.8306	333

จากตารางที่ 2.5 เป็นข้อมูลพารามิเตอร์ของสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ ที่ได้จากการคำนวณ จะสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ลำดับ (Sequence Parameter) และพารามิเตอร์เฟส (Phase Parameter) ได้

$$\text{โดยที่ ค่าความเหนี่ยวนำ (L) เท่ากับ } \frac{X_L}{2\pi f} \text{ H/km และค่าความจุไฟฟ้า (C) เท่ากับ } \frac{B_C}{2\pi f} \text{ F/km}$$

แล้วนำค่าความเหนี่ยวนำ (L) และค่าความจุไฟฟ้า (C) ไปใส่ไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ข้อมูลของพารามิเตอร์ระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ แบบพารามิเตอร์ลำดับ

หมายเลข	วงจรสายส่ง	ลำดับบวก			ลำดับศูนย์			ระยะทาง (km)
		R_1 (Ω /km)	L_1 (mH/km)	C_1 (nF/km)	R_0 (Ω /km)	L_0 (mH/km)	C_0 (nF/km)	
1	MM3-TTK-L5K1	0.0203	0.8510	13.0920	0.2113	3.0362	8.1826	325.6
2	MM3-TTK-L5K2	0.0203	0.8037	13.8653	0.3726	4.9704	5.8268	333
3	MM3-TTK-L5K3	0.0203	0.8037	13.8653	0.3726	4.9704	5.8268	333

$$\text{โดยที่ ค่าความต้านทานของตัวเอง (R}_s) = \frac{1}{3}(R_0 + 2R_1) \quad \Omega/\text{km}$$

$$\text{ค่าความต้านทานร่วม (R}_m) = \frac{1}{3}(R_0 - R_1) \quad \Omega/\text{km}$$

$$\text{ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเอง (L}_s) = \frac{1}{3}(L_0 + 2L_1) \quad \text{H/km}$$

$$\text{ค่าความเหนี่ยวนำร่วม (L}_m) = \frac{1}{3}(L_0 - L_1) \quad \text{H/km}$$

$$\text{ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเอง (C}_s) = \frac{1}{3}(C_0 + 2C_1) \quad \text{F/km}$$

$$\text{ค่าความจุไฟฟ้าร่วม (C}_m) = \frac{1}{3}(C_0 - C_1) \quad \text{F/km}$$

ตารางที่ 2.7 ข้อมูลตัวอย่างของพารามิเตอร์ระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์แบบพารามิเตอร์เฟส (Phase Parameter)

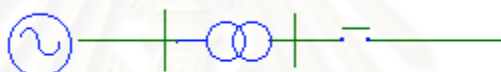
หมายเลข	วงจรสายส่ง	ตัวเอง (Self)			ร่วม (Mutual)			ระยะทาง (km)
		R_s (Ω /km)	L_s (mH/km)	C_s (nF/km)	R_m (Ω /km)	L_m (mH/km)	C_m (nF/km)	
1	MM3-TTK-L5K1	0.0839	1.5794	11.4555	0.0637	0.7284	-1.6364	325.6
2	MM3-TTK-L5K2	0.1377	2.1926	11.1858	0.1174	1.3889	-2.6795	333
3	MM3-TTK-L5K3	0.1377	2.1926	11.1858	0.1174	1.3889	-2.6795	333

2.6 ตัวอย่างวงจรการเกิดทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ

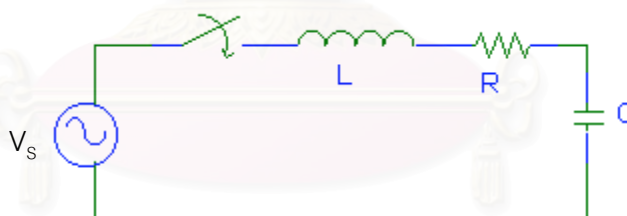
ทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้ากำลังเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดในวงจร เช่น การปิดวงจรหรือปลดของเซอร์กิตเบรกเกอร์, การเกิดการลัดวงจรและการเกิดฟ้าผ่า เป็นต้น สำหรับการแทนวงจรทรานเซียนต์มีดังนี้

2.6.1 ทรานเซียนต์ขณะปิดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์ของสายส่งที่ไม่ต่อโหลด

จากรูปที่ 2.31 พิจารณาแทนหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยความเหนี่ยวนำรั่วไหลและแทนสายส่งไฟฟ้าด้วยอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์ต่อลงกราวด์ การทำงานของสวิตช์เกิดที่เวลา T วินาที ความต้านทาน R เป็นผลรวมของความต้านทานอนุกรมทั้งหมดของหม้อแปลงและสายส่ง กำหนดให้ $V_s(t) = V_s \sin(\omega(t + T))$ โดยที่ ω : ความถี่ของแหล่งกำเนิดแรงดัน



รูปที่ 2.31 ไดอะแกรมเส้นเดียวของวงจรสายส่งที่ไม่ต่อโหลด



รูปที่ 2.32 วงจรทรานเซียนต์ขณะปิดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์

จากรูปที่ 2.32 เมื่อเขียนเป็นสมการไฟฟ้าจะได้

$$V_s(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad (2.73)$$

การแก้สมการ (2.73) เพื่อหาแรงดันคร่อมคาปาซิเตอร์จะได้ [10]

$$V_c(t) = V_c \sin(\omega t + \omega T - \theta) + A e^{-\alpha t} \sin(\omega_1 t + \beta) \quad (2.74)$$

โดยที่ $\theta = \tan^{-1} \frac{-R}{\omega L - 1/\omega C}$

$$V_c = \frac{V_s}{\omega C \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}$$

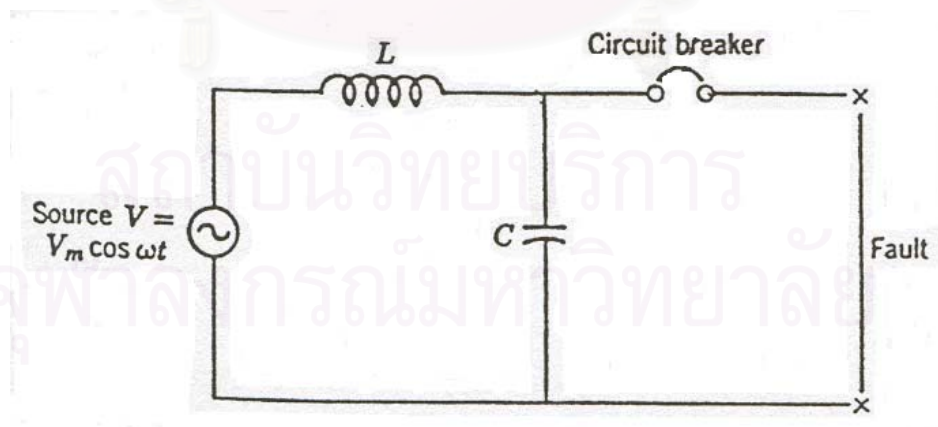
$$A = -V_c \frac{\sin(\omega T - \theta)}{\sin \beta}$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{\omega_1 \sin(\omega T - \theta)}{\omega \cos(\omega T - \theta) + \alpha \sin(\omega T - \theta)}$$

$$\alpha = \frac{R}{2L}$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \alpha^2} = 2\pi f_1$$

2.6.2 ทราวนเขียนต์ขณะทำการตัดกระแสลัดวงจร



รูปที่ 2.33 วงจรทราวนเขียนต์ขณะเปิดเซอร์กิตเบรคเกอร์

จากรูปที่ 2.33 แสดงถึงการเปิดเซอร์กิตเบรคเกอร์เพื่อตัดกระแสลัดวงจร ซึ่งแรงดันฟื้นตัว (Recovery Voltage) สามารถเกิดขึ้นได้ เมื่อเขียนเป็นสมการวงจรไฟฟ้าจะได้

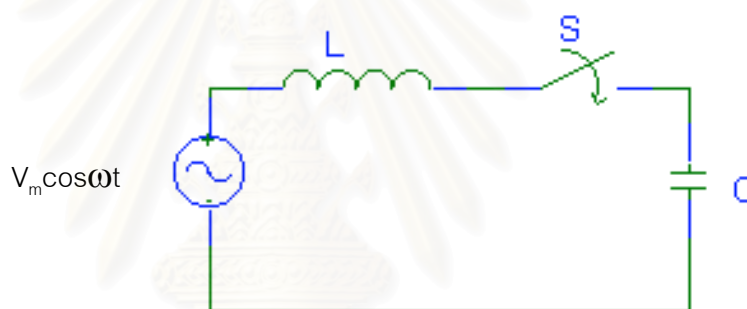
$$\frac{d^2V_c}{dt^2} + \frac{V_c}{LC} = \frac{V_m}{LC} \cos \omega t \quad (2.75)$$

เมื่อแก้สมการ (2.75) เพื่อหาแรงดันพืนตัวคร่อมคาแปซิเตอร์จะได้ [10]

$$V_c(t) = \frac{\omega_0^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)} V_m [\cos \omega t - \cos \omega_0 t] \quad (2.76)$$

$$\text{โดยที่ } \omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

2.6.3 ทรานเซียนต์ขณะปิดวงจรวจรตัวคาแปซิเตอร์ (Capacitor Switching)



รูปที่ 2.34 วงจรถานเซียนต์ขณะปิดวงจรวจรคาแปซิเตอร์

จากรูปที่ 2.34 เมื่อเขียนเป็นสมการวงจรไฟฟ้าจะได้

$$V_m \cos \omega t - V_c = L \frac{di}{dt} \quad (2.77)$$

เมื่อแก้สมการ (2.77) จะได้กระแสอินรัชขณะปิดวงจรวจรคาแปซิเตอร์ดังนี้

$$i(t) = \frac{V_m - V_c(0)}{L\omega_0} \sin \omega_0 t \quad (2.78)$$

สำหรับค่าแรงดันคร่อมคาปาซิเตอร์จะเป็นดังสมการ (2.79) [10]

$$V_c = V_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t [V_m - V_c(0)] \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \omega_0 t dt \quad (2.79)$$

โดยที่ $V_c(0)$ คือแรงดันคร่อมคาปาซิเตอร์ขณะปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การใช้งานโปรแกรมพีเอสไปซ์

3.1 บทนำ

โปรแกรมพีเอสไปซ์เป็นโปรแกรมตัวหนึ่งของโปรแกรมจำลองการทำงานของวงจรไฟฟ้าที่เรียกว่าโปรแกรมประเภทสไปซ์ (SPICE, Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) ซึ่งสามารถวาดวงจรที่เอ็ดดิเตอร์ (Editor) แล้วทำการจำลอง (Simulation) ได้ทันที โดยที่ไม่ต้องทำการแปลงรูปวงจรให้เป็นเท็กซ์ไฟล์ (Text File) ก่อน ทำให้สะดวกต่อการใช้งานมาก แต่ในบทนี้จะขอกล่าวถึงการสร้างไฟล์อินพุทที่สามารถนำไปทำการจำลอง (Simulation) ได้เหมือนกัน [13-16]

3.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโปรแกรมพีเอสไปซ์

3.2.1 ขั้นตอนและวิธีการทำงานของโปรแกรมพีเอสไปซ์

โปรแกรมพีเอสไปซ์จะใช้องค์ประกอบวงจรแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete) สำหรับการจำลองวงจรไฟฟ้า การสร้างประโยคคำสั่ง (Syntax) ของโปรแกรมต้องการความเข้าใจพื้นฐานของทฤษฎีวงจรไฟฟ้า ในการจำลองระบบไฟฟ้าหนึ่งโดยโปรแกรมพีเอสไปซ์ จะทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. สร้างไดอะแกรมเส้นเดี่ยว (Single-line-diagram) ของระบบไฟฟ้านั้น และใช้แบบจำลองพีเอสไปซ์ (PSPICE Model) ที่เป็นอิลิเมนต์ (Element) ทางไฟฟ้าทั้งแบบเชิงเส้น, ไม่ต่อเนื่อง (Discrete), เชื่อยงาน (Passive) และไวงาน (Active) ที่เหมาะสม ใช้แทนที่อุปกรณ์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ เช่นสายส่งไฟฟ้า, เซอร์คิตเบรคเกอร์และแหล่งกำเนิดพลังงาน เป็นต้น โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จำเป็นของแบบจำลองพีเอสไปซ์ ด้วยค่าที่สอดคล้องกับอุปกรณ์ทางไฟฟ้าของระบบนั้น แล้วสร้างเป็นซคีแมติกไดอะแกรม (Schematic Diagram) หรือไฟล์อินพุท (Input File) ของระบบไฟฟ้านั้น

2. เลือกการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้านั้น ว่าจะเป็นแบบกระแสไฟตรง, กระแสไฟสลับ หรือทรานเซียนต์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาเฉพาะการวิเคราะห์ทรานเซียนต์ ซึ่งวงจรที่ศึกษาต้องประกอบด้วย แหล่งกำเนิดอิสระที่กำหนดช่วงเวลาทรานเซียนต์, เงื่อนไขเริ่มแรก (Initial Condition) ของตัวสะสมพลังงานหรืออิลิเมนต์แบบรีแอคทีฟ (Reactive Element) หรือแหล่ง

กำเนิดควบคุมที่เป็นฟังก์ชันของเวลา อย่างน้อยหนึ่งอย่าง แล้วกำหนดช่วงเวลาที่ต้องการศึกษา และสั่งให้โปรแกรมทำการจำลองระบบไฟฟ้านั้น

3. โปรแกรมจะแสดงผลลัพธ์ของกระแสและแรงดันที่โหนด (Node) ต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า ในรูปแบบของตารางหรือรูปภาพในช่วงเวลาที่กำหนด

3.2.2 โครงสร้างของไฟล์อินพุท

ไฟล์อินพุทคือไฟล์ที่มีนามสกุล *.CIR ใช้เก็บคำสั่งที่จำเป็นสำหรับโปรแกรมพีเอสไปซ์ ในการวิเคราะห์ระบบ โดยโครงสร้างของไฟล์อินพุทในโปรแกรมพีเอสไปซ์จะต้องเรียงเป็นบรรทัด ๆ ดังนี้

1. ไตเติลไลน์ (Title Line) ต้องเป็นบรรทัดแรกของไฟล์อินพุทเสมอ บรรทัดไตเติลไลน์นี้จะไม่ถูกนำไปแปลเป็นคำสั่ง

2. คอมเมนต์ไลน์ (Comment Line) เป็นบรรทัดที่ขึ้นต้นด้วยเครื่องหมายดอกจัน "*" ใช้ในการระบุว่าบรรทัดที่ใช้เป็นคำอธิบายโปรแกรม และโปรแกรมพีเอสไปซ์จะไม่แปลความหมายของบรรทัดนี้

3. อิลิเมนต์ไลน์ (Element Line) เป็นบรรทัดที่ใช้ระบุชื่อ, ชนิด, ลักษณะการต่อวงจรและค่าของอุปกรณ์ในวงจร โดยจะเขียนบรรทัดไหนก็ได้ ระหว่างไตเติลไลน์กับเอ็นดีไลน์ (End Line)

4. คอนโทรลไลน์ (Control Line) เป็นบรรทัดที่ใช้ควบคุมการทำงานของโปรแกรมพีเอสไปซ์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือใช้ควบคุมการวิเคราะห์ และใช้ควบคุมการแสดงผล โดยคอนโทรลไลน์คือบรรทัดที่ขึ้นต้นด้วย "." และสามารถอยู่บรรทัดไหนก็ได้ ระหว่างไตเติลไลน์กับเอ็นดีไลน์

5. วงจรย่อย (Subcircuit) เป็นบรรทัดกลุ่มของคำสั่งที่ใช้ระบุวงจรย่อย เพื่อเรียกใช้งานจากโปรแกรมหลักอีกที เป็นการนำอุปกรณ์มาตรฐานที่มีอยู่มาสร้างอุปกรณ์ชนิดอื่นขึ้นมา เช่น วงจรย่อยของออปแอมป์ (OP-AMP) เป็นต้น และบรรทัดสุดท้ายของวงจรย่อยต้องเป็น .ENDS

6. เอ็นดีไลน์ (End Line) เป็นบรรทัดสุดท้าย บอกการสิ้นสุดของไฟล์อินพุท เขียนด้วย .END

นอกจากนี้หากต้องการขึ้นบรรทัดใหม่ แต่ต้องการให้อยู่ในคำสั่งเดียวกัน ทำได้โดยใช้เครื่องหมายบวก "+" นำหน้าในแต่ละบรรทัด

3.2.3 ตัวอย่างอิลิเมนต์ไลน์ที่สำคัญของอุปกรณ์ในโปรแกรมพีสไปซ์

- ตัวต้านทาน (Resistor)

รูปแบบคือ R<name> <Node(+)> <Node(-)> <Value>

โดยที่

R<name> คือชื่อของตัวต้านทานที่ต้องขึ้นต้นด้วย R ตามด้วยตัวอักษรต่าง ๆ

<Node(+)> คือโหนดอ้างอิงที่มีแรงดันสูงกว่า

<Node(-)> คือโหนดอ้างอิงที่มีแรงดันต่ำกว่า

<Value> คือค่าของความต้านทาน มีหน่วยเป็นโอห์ม

เช่น R1 1 0 10

หมายความว่าตัวต้านทานชื่อ R1 ต่ออยู่ระหว่างโหนด 1 กับโหนด 0 มีขนาด 10 โอห์ม

(พารามิเตอร์ในเครื่องหมาย < > เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนด แต่พารามิเตอร์ใน [] จะกำหนดหรือไม่กำหนดก็ได้)

- ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

รูปแบบคือ L<name> <Node(+)> <Node(-)> <Value> [IC = <INITIAL VALUE>]

โดยที่

L<name> คือชื่อของตัวเหนี่ยวนำที่ต้องขึ้นต้นด้วย L ตามด้วยตัวอักษรต่าง ๆ

<Node(+)> คือโหนดอ้างอิงที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า

<Node(-)> คือโหนดอ้างอิงที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า

<Value> คือค่าของความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็นเฮนรี (H)

[IC] (Initial Condition) โดยถ้าไม่ระบุจะมีค่าเท่ากับ 0 A

<INITIAL VALUE> คือค่ากระแสเริ่มต้น (I_L) ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ที่เวลา $t = 0$ ของการวิเคราะห์ทรานเซียนต์ มีหน่วยเป็นแอมแปร์

เช่น L1 1 2 3

หมายความว่าตัวเหนี่ยวนำชื่อ L1 ต่ออยู่ระหว่างโหนด 1 กับโหนด 2 มีขนาด 3 เฮนรี

- ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

รูปแบบคือ C<name> <Node(+)> <Node(-)> <Value> [IC = <INITIAL VALUE>]

โดยที่

C<name> คือชื่อของตัวเก็บประจุที่ต้องขึ้นต้นด้วย C ตามด้วยตัวอักษรต่าง ๆ

<Node(+)> คือโหนดอ้างอิงที่มีแรงดันสูงกว่า

<Node(-)> คือโหนดอ้างอิงที่มีแรงดันต่ำกว่า

<Value> คือค่าของความจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็นฟารัด (F)

[IC] (Initial Condition) โดยถ้าไม่ระบุจะมีค่าเท่ากับ 0 V

<INITIAL VALUE> คือค่าแรงดันเริ่มต้น (V_0) ของตัวเก็บประจุ ที่เวลา $t = 0$ ของการวิเคราะห์
ทรานเซียนต์ มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

เช่น C1 3 0 5

หมายความว่าตัวเก็บประจุชื่อ C1 ต่ออยู่ระหว่างโหนด 3 กับโหนด 0 มีขนาด 5 ฟารัด

- สายส่งไฟฟ้าแบบอุดมคติหรือแบบที่ไม่มีกำลังสูญเสีย

รูปแบบคือ T<name> <Aport(+ node)> <Aport(- node)> <Bport(+ node)>

+ <Bport(- node)> Z0=<value> [TD=<value>] [F=<value>] [NL=<value>]

โดยที่

T<name> คือชื่อของสายส่งไฟฟ้าอุดมคติที่ต้องขึ้นต้นด้วย T ตามด้วยตัวอักษรต่าง ๆ

<Aport(+ node)> คือโหนดอ้างอิงขาเข้าที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า

<Aport(- node)> คือโหนดอ้างอิงขาเข้าที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า

<Bport(+ node)> คือโหนดอ้างอิงขาออกที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า

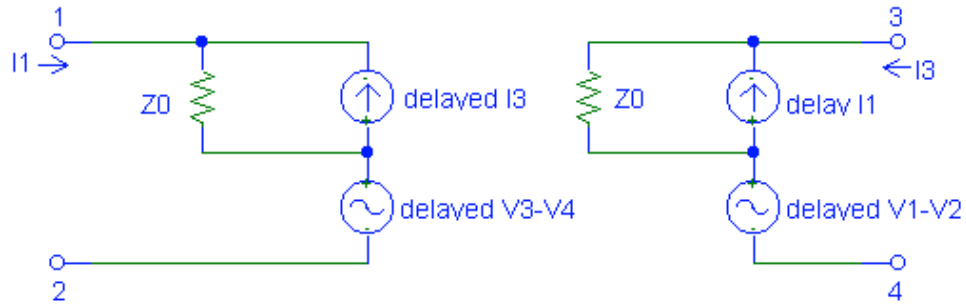
<Bport(- node)> คือโหนดอ้างอิงขาออกที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า

Z0 คืออิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติ (Characteristic Impedance) มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ohm)

TD คือเวลาหน่วงของสายส่ง มีหน่วยเป็นวินาที (Second)

F คือความถี่ไฟฟ้าของ NL มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

NL คือความยาวคลื่นสัมพันธ์ ไม่มีหน่วย



รูปที่ 3.1 แบบจำลองของสายส่งไฟฟ้าแบบอุดมคติ

เช่น T1 1 2 3 4 Z0=220 TD=115ns

T2 1 2 3 4 Z0=220 F=2.25MEG

T3 1 2 3 4 Z0=220 F=4.5MEG NL=0.5

โดยที่สายส่งทั้งสามเส้นนี้เป็นสายส่งที่มีค่าพารามิเตอร์เหมือนกัน

- สายส่งไฟฟ้าแบบที่มีกำลังสูญเสีย

รูปแบบคือ T<name> <Aport(+)> node <Aport(-)> node <Bport(+)> node

+ <Bport(-)> node LEN=<value> R=<value> L=<value> G=<value> C=<value>

โดยที่

T<name> คือชื่อของสายส่งไฟฟ้าที่ต้องขึ้นต้นด้วย T ตามด้วยตัวอักษรต่าง ๆ

<Aport(+)> node คือโหนดอ้างอิงขาเข้าที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า

<Aport(-)> node คือโหนดอ้างอิงขาเข้าที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า

<Bport(+)> node คือโหนดอ้างอิงขาออกที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า

<Bport(-)> node คือโหนดอ้างอิงขาออกที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า

LEN คือความยาวของสายส่งไฟฟ้า

R คือความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาว

L คือความเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาว

G คือความนำไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความยาว

C คือความจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความยาว

โดยที่หน่วยความยาวของ LEN, R, L, G และ C ต้องสอดคล้องกัน

เช่น T4 1 0 2 0 LEN=1 R=.311 L=.387u G=6.27u C=67.3p

- แหล่งกำเนิดแรงดันควบคุมโดยแรงดัน (Voltage-Controlled Voltage Source)

รูปแบบคือ

E<name> <(+) node> <(-) node> <(+) controlling node> <(-) controlling node> <gain>

หรือ

E<name> <(+) <node> <(-) node> VALUE = { <expression> }

หรือ

E<name> <(+) <node> <(-) node> TABLE { <expression> } =

+ < <input value>,<output value> >

หรือ

E<name> <(+) node> <(-) node> LAPLACE { <expression> } = { <transform> }

เช่น EBUFF 1 2 10 11 1.0

ESQROOT 5 0 VALUE = {5V*SQRT(V(3,2))}

ET2 2 0 TABLE {V(ANODE,CATHODE)} = (0,0) (30,1)

ERC 5 0 LAPLACE {V(10)} = {1/(1+.001*s)}

ในการกำหนดแหล่งกำเนิดแรงดันควบคุมโดยกระแสสามารถทำได้หลายรูปแบบโดยที่ โหนด (+) และ (-) เป็นโหนดเอาต์พุต (Output Node) กระแสจะไหลจากโหนด (+) ไปยังโหนด (-), โหนด <(+) controlling node> และ <(-) controlling node> เป็นโหนดควบคุม, การใช้ "VALUE = { <expression> }" เป็นการกำหนดค่าโดยตรง และการใช้ "TABLE { <expression> } = + < <input value>,<output value> >" เป็นการหาค่าของ y เมื่อกำหนด x มาให้จากคู่ของ (x_1, y_1) (x_2, y_2) ที่นำไปสร้างกราฟและทำการประมาณค่าของ y ออกมาโดยวิธีการเชิงเส้น ขนาดสูงสุดของตารางคือ 2048 คู่ และการใช้ "LAPLACE { <expression> } = { <transform> }" เป็นการ ใช้ผลการแปลงลาปลาซในการกำหนดค่าของแหล่งกำเนิดแรงดัน นอกจากนี้แหล่งกำเนิดกระแส ควบคุมโดยแรงดัน (Voltage-Controlled Current Source,G) มีรูปแบบการใช้งานเหมือนกันกับ แหล่งกำเนิดแรงดันควบคุมโดยแรงดัน

- สวิตช์ควบคุมโดยแรงดัน

รูปแบบคือ S<name> <(+) switch node> <(-) switch node> <(+) controlling node>

+ <(-) controlling node> <model name>

รูปแบบแบบจำลองคือ .MODEL < model name> VSWITCH [model parameters]

โดยที่ [model parameters] แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของสวิตช์ควบคุมโดยแรงดัน

พารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย	ค่าที่กำหนดให้ (Default)
ROFF	ความต้านทาน "Off"	Ohm	1MEG
RON	ความต้านทาน "On"	Ohm	1
VOFF	แรงดันที่สถานะ "off"	Volt	0.0
VON	แรงดันที่สถานะ "On"	Volt	1.0

เช่น S12 13 17 2 0 SMOD

.MODEL SMOD Vswitch(Ron=0.01 Roff=1MEG)

สวิตช์ควบคุมโดยแรงดันอาจพิจารณาได้ว่าเป็นความต้านทานที่ควบคุมโดยแรงดันชนิดพิเศษชนิดหนึ่ง ซึ่งความต้านทานระหว่างโหนด <(+)> switch node และ <(-)> switch node ขึ้นอยู่กับแรงดันระหว่างโหนด <(+)> controlling node และ <(-)> controlling node ความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง RON และ ROFF ของค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

- แหล่งกำเนิดแรงดันและกระแสอิสระแบบต่าง ๆ

1. แหล่งกำเนิดแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential)

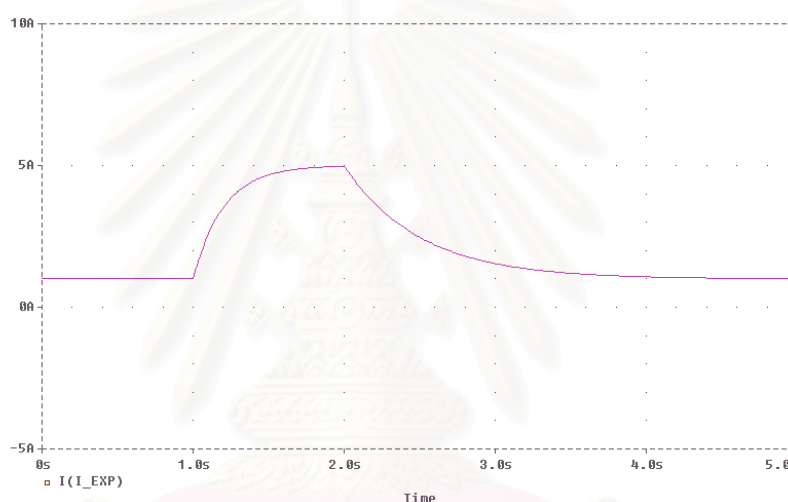
รูปแบบคือ EXP (<i1> <i2> <td1> <tc1> <td2> <tc2>)

เช่น IRAMP 10 5 EXP(1 5 1 .2 2 .5)

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแหล่งกำเนิดแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลแสดงดังตารางที่ 3.2 และรูปคลื่นของแหล่งกำเนิดกระแสแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลแสดงดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแหล่งกำเนิดแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

พารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย	ค่าที่กำหนดให้ (Default)
<i1>	กระแสแรกเริ่ม	Amp	None
<i2>	กระแสสูงสุด	Amp	None
<td1>	เวลาก่อนขาขึ้น (ลง)	Sec	0
<tc1>	ค่าคงที่เวลาขาขึ้น (ลง)	Sec	TSTEP
<td2>	เวลาขาลง (ขึ้น)	Sec	<td1>+TSTEP
<tc2>	ค่าคงที่เวลาขาลง (ขึ้น)	Sec	TSTEP



รูปที่ 3.2 รูปคลื่นของแหล่งกำเนิดกระแสแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

รูปคลื่นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลจะเริ่มต้นด้วยกระแสที่มีค่า <i1> เป็นเวลา <td1> จึงเปลี่ยนค่าจาก <i1> เป็น <i2> ด้วยค่าคงที่เวลา <tc1> และที่เวลา <td2> กระแสจะเปลี่ยนค่ากลับจาก <i2> เป็น <i1> ด้วยค่าคงที่เวลา <tc2>

2. แหล่งกำเนิดแบบพัลส์ (PULSE)

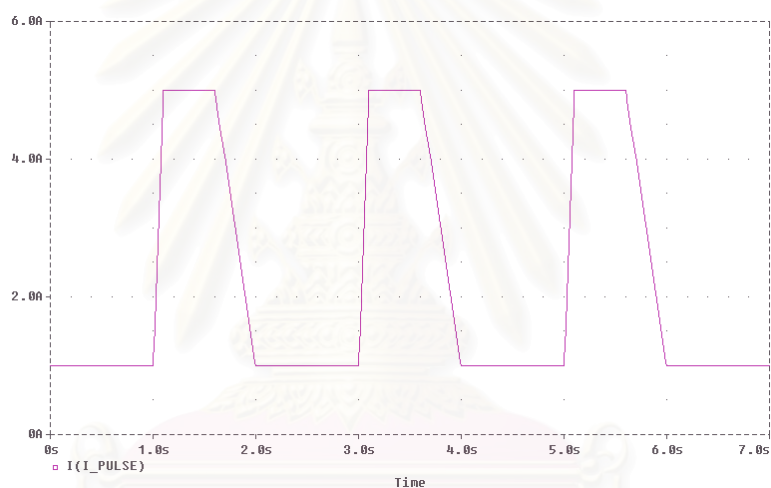
รูปแบบคือ PULSE (<i1> <i2> <td> <tr> <tf> <pw> <per>)

เช่น ISW 1 0 PULSE(1A 5A 1sec .1sec .4sec .5sec 2sec)

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแหล่งกำเนิดแบบพัลส์แสดงดังตารางที่ 3.3 และรูปคลื่นของแหล่งกำเนิดกระแสแบบพัลส์แสดงดังรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแหล่งกำเนิดแบบพัลส์

พารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย	ค่าที่กำหนดให้ (Default)
<i1>	กระแสแรกเริ่ม	Amp	None
<i2>	กระแสพัลส์	Amp	None
<td>	เวลาหน่วง	Sec	0
<tr>	เวลาขาขึ้น	Sec	TSTEP
<tf>	เวลาขาลง	Sec	TSTEP
<pw>	ความกว้างพัลส์	Sec	TSTOP
<per>	คาบ	Sec	TSTOP



รูปที่ 3.3 รูปคลื่นของแหล่งกำเนิดกระแสแบบพัลส์

รูปคลื่นแบบพัลส์จะเริ่มต้นด้วยกระแสที่มีค่า <i1> เป็นเวลา <td> จึงเปลี่ยนค่าจาก <i1> เป็น <i2> แบบเชิงเส้นในช่วงเวลา <tr> และมีค่าคงที่เท่ากับ <i2> เป็นเวลา <pw> จึงเปลี่ยนกลับจาก <i2> เป็น <i1> แบบเชิงเส้นในช่วงเวลา <tf> และมีค่าคงที่เท่ากับ <i1> เป็นเวลา per-(tr+pw+tf) แล้วจึงเริ่มรอบใหม่แต่จะไม่มีเวลาหน่วง <td> เหมือนในตอนเริ่มต้น

3. แหล่งกำเนิดแบบซายน์ (Sine)

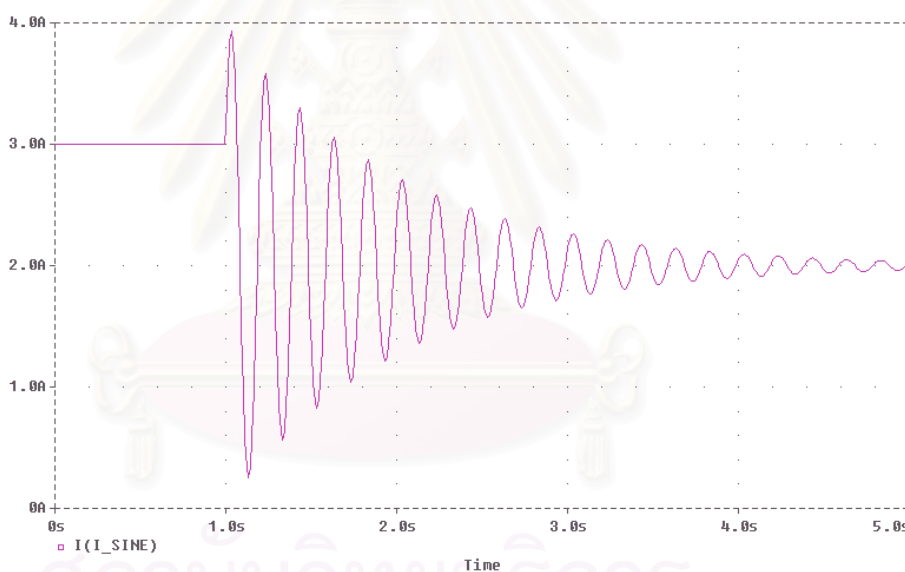
รูปแบบคือ SIN (<ioff> <iAMPL> <freq> <td> <df> <phase>)

เช่น ISIG 10 5 SIN(2 2 5Hz 1sec 1 30)

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแหล่งกำเนิดแบบซายน์แสดงดังตารางที่ 3.4 และรูปคลื่นของแหล่งกำเนิดกระแสแบบซายน์แสดงดังรูปที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแหล่งกำเนิดแบบซายน์

พารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย	ค่าที่กำหนดให้ (Default)
<i>i</i>off>	กระแสออฟเซต	Amp	None
<i>i</i>ampl>	กระแสสูงสุด	Amp	None
<i>f</i>req>	ความถี่	Hertz	1/TSTOP
<i>t</i>d>	เวลาหน่วง	Sec	0
<i>d</i>f>	แดมปีงแฟคเตอร์	Sec ⁻¹	0
<i>p</i>hase>	มุมเฟส	Degree	0



รูปที่ 3.4 รูปคลื่นของแหล่งกำเนิดกระแสแบบซายน์

รูปคลื่นแบบซายน์จะเริ่มด้วยกระแสที่มีค่า <i>i</i>off ที่มุมเฟส <i>p</i>hase เป็นเวลา <i>t</i>d จึงเปลี่ยนค่าลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลด้วยแดมปีงแฟคเตอร์ <i>d</i>f โดยยังคงรูปคลื่นซายน์ที่มีความถี่เท่ากับ <i>f</i>req

3.2.4 ตัวอย่างคอนโทรลไลน์ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์วงจร

- การวิเคราะห์ทรานเซียนต์ (Transient Analysis)

รูปแบบคือ .TRAN <TSTEP> <TSTOP> [TSTART [CSTEP]] [SKIPBP]

โดยที่

.TRAN คือคำสั่งระบุว่าเป็นการวิเคราะห์แบบทรานเซียนต์

<TSTEP> คือช่วงเวลาที่ใช้แสดงค่าในคำสั่งพิมพ์ (PRINT) หรือใช้ในการวาดกราฟในคำสั่งวาดกราฟ (PLOT)

<TSTOP> คือเวลาสิ้นสุดของการวิเคราะห์แบบทรานเซียนต์

[TSTART] คือเวลาเริ่มต้นของการแสดงผล (จะใส่ค่าหรือไม่ใส่ก็ได้)

[CSTEP] คือช่วงเวลาที่ใช้โปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณแบบเชิงเลข (Numerical)

[SKIPBP] (Skip Bias-point) คือการยกเลิกการใช้ค่าเริ่มต้นของตัวสะสมพลังงาน

เช่น .TRAN 2 8

หมายความว่า การวิเคราะห์แบบทรานเซียนต์จะบันทึกผลที่เกิดขึ้นทุก ๆ 2 วินาที ตั้งแต่ช่วงเวลา
ระหว่าง 0 ถึง 8 วินาที

- การเรียกใช้ไฟล์ข้อมูล

รูปแบบคือ .INC "ชื่อไฟล์"

โดยที่

.INC คือคำสั่งในการเรียกใช้ไฟล์

เช่น .INC "SETUP.CIR"

.INC "C:\LIBVCO.CIR"

- การเรียกใช้ไฟล์ห้องสมุดสัญลักษณ์

รูปแบบคือ .LIB ["ชื่อไฟล์ห้องสมุดสัญลักษณ์"]

โดยที่

.LIB คือคำสั่งในการเรียกใช้ไฟล์ห้องสมุด

เช่น .LIB

.LIB linear.lib

.LIB "C:\lib\bipolar.lib"

ในโปรแกรมพีสไปซึ้นั้น การใช้อักษรตัวพิมพ์ใหญ่หรือเล็ก จะให้ผลลัพธ์ไม่แตกต่างกัน และในกรณีที่ ไม่กำหนดชื่อไฟล์ห้องสมุดสัญลักษณ์ โปรแกรมจะเรียกใช้ไฟล์หลักคือ "nom.lib." โดยอัตโนมัติ ในกรณีที่มีการแก้ไขไฟล์ห้องสมุดใด ๆ โปรแกรมจะสร้างไฟล์ดัชนี (Index File) เมื่อเรียกใช้ไฟล์ห้องสมุดนั้นเป็นครั้งแรก การสร้างไฟล์ดัชนีนี้จะช่วยโปรแกรมในการหาวงจรร้อยยหรือพารามิเตอร์ของพาร์ท (Part) ที่สร้างโดยคำสั่ง .SUBCKT และ .MODEL ได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจาก NOM.LIB ประกอบด้วยพาร์ททั้งหมดในโปรแกรมพีสไปซึ้น ดังนั้นจึงสามารถแก้ไขเพื่อให้รวมสัญลักษณ์ที่สร้างขึ้นใหม่ได้

- การคำนวณจุดไบแอส

รูปแบบคือ .OP

เช่น .OP

การคำนวณจุดไบแอสจะเกิดขึ้นทุกครั้งที่มีการจำลอง (Simulate) โปรแกรม เมื่อไม่มีคำสั่งนี้ข้อมูลที่แสดงในไฟล์เอาต์พุตจะมีเพียงบัญชีรายชื่อของแรงดันโหนด, แหล่งกำเนิดกระแสหรือแรงดันและกำลังสูญเสียของวงจร แต่เมื่อมีคำสั่งนี้โปรแกรมจะแสดงค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณเล็ก ๆ ที่ประมาณได้เป็นแบบเชิงเส้น (Linearized) ของแหล่งกำเนิดควบคุมที่ไม่เชิงเส้นทั้งหมดและอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ด้วย

- การกำหนดพารามิเตอร์ของพาร์ทในวงจร

รูปแบบคือ .MODEL <model name> <model type> ([<parameter name> = <value>])

เช่น .MODEL DNOM D (IS=1E-9)

หมายความว่าไดโอดชื่อ "DNOM" มีค่าพารามิเตอร์ IS=1E-9

ตารางที่ 3.5 ตัวอย่างของชนิดของพาร์ท

ชนิดของพาร์ท	ชื่อของสัญลักษณ์	ชนิดของอุปกรณ์
CAP	Cxxx	ตัวเก็บประจุ
IND	Lxxx	ตัวเหนี่ยวนำ
RES	Rxxx	ตัวต้านทาน
TRN	Txxx	สายส่งไฟฟ้า
ISWITCH	Wxxx	สวิตช์ควบคุมโดยกระแส
VSWITCH	Sxxx	สวิตช์ควบคุมโดยแรงดัน

- การพิมพ์ผลลัพธ์ในไฟล์เอาต์พุท (Print)

รูปแบบคือ .PRINT <analysis type> [output variable]

เช่น .PRINT TRAN V(3) V(2,3) ID(M2) I(VCC)

.PRINT TRAN D(QA) D(QB) V(3) V(2,3)

.PRINT TRAN V(3) V(R1) V([RESET])

ชนิดของการวิเคราะห์คือ DC (กระแสไฟตรง), AC(กระแสไฟสลับ), NOISE (เสียงรบกวน) และ TRAN (ทรานเซียนต์) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เน้นเฉพาะการวิเคราะห์ทรานเซียนต์ของวงจรไฟฟ้าเท่านั้น

- การแสดงกราฟผลลัพธ์ (Probe)

รูปแบบคือ .PROBE[/CSDF][output variable]

เช่น .PROBE

.PROBE V(3) V(2,3) V(R1) I(VIN) I(R2) IB(Q13) VBE(Q13)

.PROBE/CSDF

.PROBE V(3) V(R1) V([RESET])

.PROBE D(QBAR)

ในกรณีที่ไม่งำหนดตัวแปรของเอาต์พุท โปรแกรมจะเก็บค่าของแรงดันและกระแสทั้งหมดของวงจรในไฟล์ที่มีนามสกุล *.DAT เพื่อแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบกราฟที่กำหนด

คำสั่งซีเอสดีเอฟ (CSDF, Common Simulation Data File) เป็นการสั่งให้โปรแกรมเก็บค่าในรูปแบบที่โปรแกรมอื่น ๆ สามารถเรียกใช้งานได้

ตารางที่ 3.6 รูปแบบทั่วไปของการกำหนดค่าตัวแปรของเอาต์พุต

รูปแบบทั่วไป	ความหมายของค่าตัวแปรของเอาต์พุต
I(<name>)	กระแสที่ผ่านอุปกรณ์ที่มี 2 ขั้ว
Iz(<name>)	กระแสที่ผ่านสายส่งไฟฟ้า (z คือ "A" หรือ "B")
V(<node>)	แรงดันที่โหนด
V(<+ node>, <- node>)	แรงดันระหว่าง 2 โหนด
V(<name>)	แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์ที่มี 2 ขั้ว
Vz(<name>)	แรงดันที่ด้านปลายของสายส่งไฟฟ้า (z คือ "A" หรือ "B")
Vxy(<name>)	แรงดันระหว่าง 2 ขั้วของอุปกรณ์ที่มี 3 หรือ 4 ขั้ว

ในการกำหนดชื่อของอุปกรณ์ที่มี 2 ขั้วที่ต้องการให้แสดงผลลัพธ์นั้น มีรูปแบบดังแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การกำหนดชื่อของอุปกรณ์ที่มี 2 ขั้ว

ชื่อของตัวแปร	ชนิดของอุปกรณ์
Dxxx	ไดโอด
Rxxx	ตัวต้านทาน
Cxxx	ตัวเก็บประจุ
Lxxx	ตัวเหนี่ยวนำ
Sxxx	สวิตช์ควบคุมโดยแรงดัน
Wxxx	สวิตช์ควบคุมโดยกระแส
Exxx	แหล่งกำเนิดแรงดันควบคุมโดยแรงดัน
Fxxx	แหล่งกำเนิดแรงดันควบคุมโดยกระแส
Gxxx	แหล่งกำเนิดกระแสควบคุมโดยแรงดัน
Hxxx	แหล่งกำเนิดกระแสควบคุมโดยกระแส
Vxxx	แหล่งกำเนิดแรงดัน
Ixxx	แหล่งกำเนิดกระแส

- การกำหนดชื่ออื่น ๆ ของโหนดและพิน (Pin) ที่แตกต่างกัน

รูปแบบคือ

```
.ALIASES <device name> <device alias> (<<pin>=<node>>) __ (<<net>=<node>>)
.ENDALIASES
```

เช่น .ALIASES R_RBIAS RBIAS (1=\$N_0001 2=VDD) __ (OUT=\$N_0007) .ENDALIASES
หมายความว่า ชื่อ “RBIAS” ถูกใช้เป็นอีกชื่อหนึ่งของ “R_RBIAS”, พิน “1” ของอุปกรณ์ “R_RBIAS” คือโหนด “\$N_0001” และพิน “2” ของอุปกรณ์ “R_RBIAS” คือโหนด “VDD” และชื่อของโครงข่าย “OUT” คือโหนด “\$N_0007”

- การสร้างวงจรรย่อย (Subcircuit)

รูปแบบคือ .SUBCKT <name> [node] [PARAMS: <<name> = <value> >]ENDS

เช่น .subckt Lump_Pi in out params: len=1 r=0 l=1 c=1 g=0

```
RPi1 in 71 {len*r}
```

```
CPi1 in 0 {len*c/2}
```

```
LPi1 71 out {len*l}
```

```
CPi2 out 0 {len*c/2}
```

```
.ends
```

และ

```
.subckt Lump_T in out params: len=1 r=0 l=1 c=1 g=0
```

```
RT1 in 71 {len*r/2}
```

```
LT1 71 72 {len*l/2}
```

```
CT1 72 0 {len*c}
```

```
RT2 72 73 {len*r/2}
```

```
LT2 73 out {len*l/2}
```

```
.ends
```

ในการสร้างวงจรรย่อยทำโดยการกำหนดชื่อของวงจรรย่อย, จำนวนและลำดับของขั้ว และชื่อของพารามิเตอร์ที่ควบคุมคุณสมบัติรวมทั้งค่าของพารามิเตอร์นั้น และเมื่อสิ้นสุดวงจรรย่อยนั้น

บรรทัดสุดท้ายต้องลงท้ายด้วย “.ENDS” ในการเรียกใช้วงจรย่อยมีวิธีการใช้งานเหมือนกับอิเลเมนต์ไลน์ทั่วไป แต่ต้องใช้อักขรนำหน้าเป็น “X” ตามด้วยโหนดที่สอดคล้องกับขั้วของวงจรย่อย ชื่อของวงจรย่อยและชื่อของพารามิเตอร์รวมทั้งค่าของพารามิเตอร์นั้น

เช่น X_T1 1 2 LumpPi PARAMS: LEN=24 R=2 L=1n C=5p G=0

X_B1 7 8 breaker PARAMS: Tins=6e-3 Rins=520

- การใช้ข้อสังเกตภายในบรรทัดของคำสั่ง (In-line Comment)

รูปแบบคือ circuit file text ;[any text]

เช่น R13 6 8 10 ; R13 is a

; feedback resistor

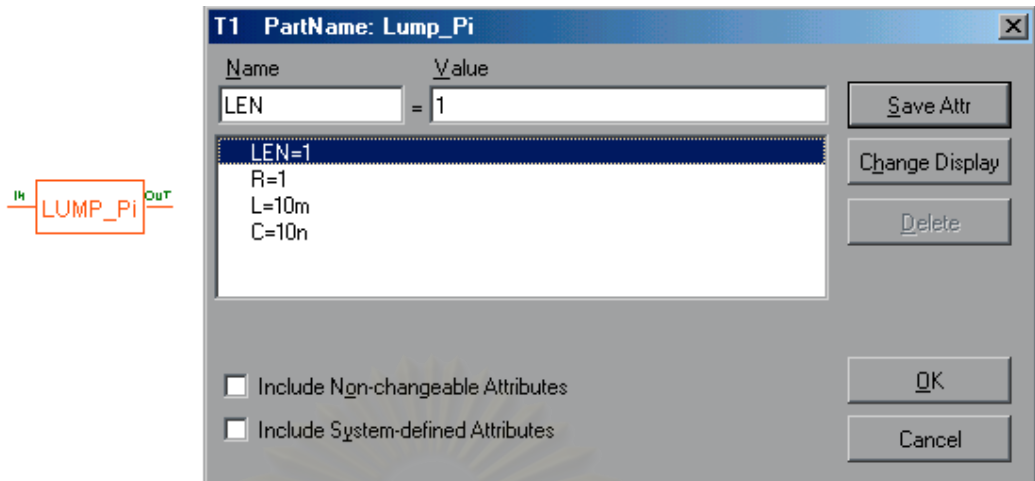
C3 15 0 .1U ; decouple supply

โปรแกรมพีเอสไปซ์จะไม่แปลความหมายของข้อความหลังเครื่องหมาย “;” ซึ่งใช้เป็นข้อสังเกตเพื่อความเข้าใจของผู้ใช้งาน

3.3 การจำลองอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าโดยโปรแกรมพีเอสไปซ์

3.3.1 สายส่งไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาสายส่งเป็นวงจรสมมูลแบบพายนน์ สามารถสร้างวงจรย่อยที่มีพารามิเตอร์เป็นความยาวสายส่ง (LEN), ความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาว (R), ความเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาว (L) และความจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความยาว (C) ได้ดังแสดงใน ง.1 ของภาคผนวก ง ซึ่มีเมตริกไดอะแกรมและกล่องแสดงการแก้ไขแอตทริบิวต์ (Attribute) ของแบบจำลองแบบพายนน์แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ซิมเมติกไดอะแกรมและกล่องแสดงการแก้ไขแอตทริบิวต์ของแบบจำลองแบบพายน์

ในโปรแกรมพีสไปซีมีแบบจำลองของสายส่งไฟฟ้าที่มีกำลังสูญเสีย เป็นแบบพารามิเตอร์คงที่ (Constant Parameter) โดยการกำหนดความยาวของสายส่ง, ความต้านทาน, ความนำไฟฟ้า, ความเหนี่ยวนำและความจุไฟฟ้าที่กระจายไปตามความยาวของสายส่ง ซึ่งผลตอบสนองจะถูกคำนวณโดยการใช้ผลตอบสนองอิมพัลส์ (Impulse Response) แทนที่การใช้แบบจำลองแบบก้อน (Lumped Model) มาต่ออนุกรมกันเป็นโครงสร้างรูปบันได

ในกรณีของแบบจำลองแบบก้อนจะพิจารณาว่าสายส่งสามารถถูกแสดงในรูปของอนุกรมของส่วนของสายส่งความยาวสั้น ๆ ในแบบจำลองแบบพายน์ (Pi Model) หรือแบบจำลองแบบที (T Model) ได้ ถ้าต้องการให้ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับแบบจำลองของสายส่งแบบพารามิเตอร์กระจาย (Distributed Parameter) จะต้องใช้ส่วนของสายส่งเป็นจำนวนมากมาต่ออนุกรมกัน ปัญหาหนึ่งของการใช้วิธีนี้คือการใช้ส่วนของสายส่งจำนวนมากจะเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลองนี้เพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากส่วนของสายส่งที่สั้นนี้จะมีค่าคงที่เวลา (Time Constant) สั้น จึงต้องใช้ช่วงเวลาคำนวณ (Time Step) ที่สั้นด้วย ทำให้เวลาของการคำนวณทั้งหมดนานขึ้น

อย่างไรก็ตามปัญหาใหญ่ที่สุดของการใช้แบบจำลองแบบก้อนคือความราบเรียบ (Smooth) ของสายส่งที่ลดลง ที่เกิดจากแบบจำลองแบบก้อนจำนวนมาก ทำให้เกิดผลตอบความถี่เสมือนรอบ ๆ ความถี่ธรรมชาติของสายส่งแต่ละส่วน พิจารณาได้จากการแกว่งที่จุดที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของคลื่นสัญญาณที่วิ่งไปตามสายส่ง

ไฟล์อินพุตต่อไปนี้จะแสดงการใช้แบบจำลองทั้งแบบพารามิเตอร์กระจายและแบบก้อน และเปรียบเทียบผลที่ได้กับแบบจำลองแบบอุดมคติ ซึ่งจะให้ผลตอบสนองแตกต่างกัน

ตัวอย่างไฟล์อินพุทเมื่อใช้แบบจำลองแบบอุดมคติ

* Transmission line model

.Tran 1n 20n 0 .1n

.Probe

.Lib

* Circuit description

Vin 1 0 PULSE (0 5 0 .1n .1n 5n 10n)

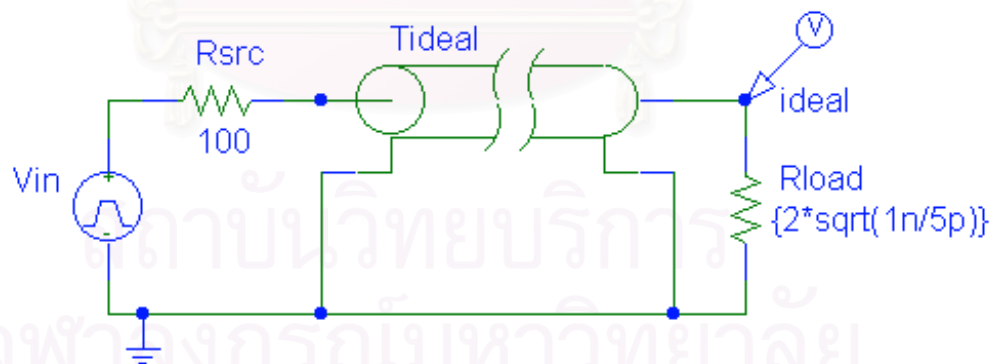
Rsrc 101 1 100

Rload 100 0 {2*sqrt(1n/5p)}

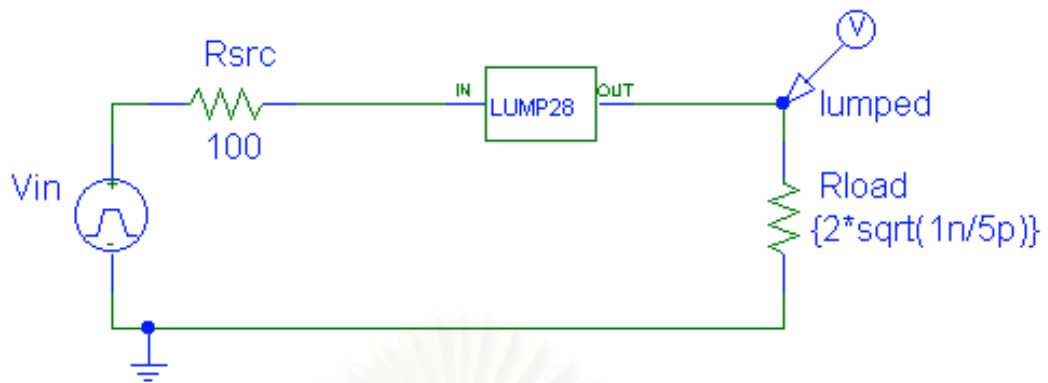
Tideal 101 0 100 0 z0={sqrt(1n/5p)} td={24*sqrt(1n*5p)}

.End

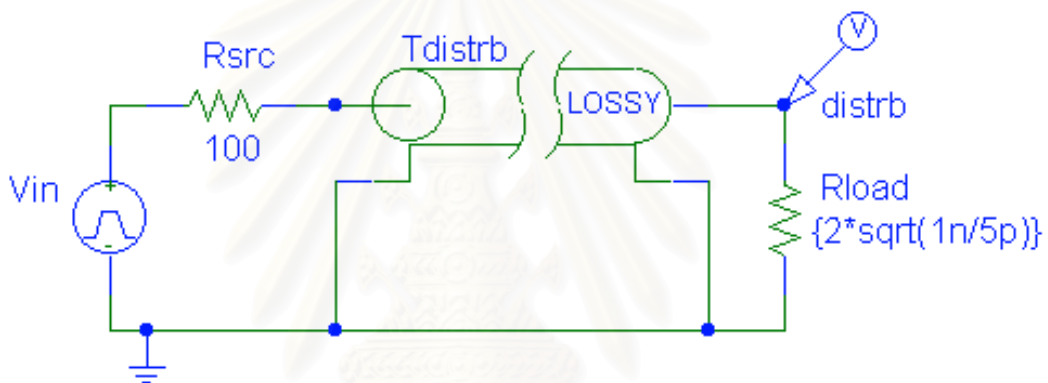
เมื่อต้องการไฟล์อินพุทของวงจรสายส่งที่มีกำลังสูญเสียที่ใช้แบบจำลองแบบก้อนและแบบพารามิเตอร์กระจาย ทำได้โดยการเปลี่ยนบรรทัดที่กำหนด Tideal ... เป็น Xlumped 101 100 LUMP28 params: len=24 r=2 l=1n g=0 c=5p และ Tdistrb 101 0 100 0 len=24 r=2 l=1n g=0 c=5p ตามลำดับ (วงจรรย่อยของแบบจำลอง LUMP28 แสดงใน ง.2 ของภาคผนวก ง ซีเค็มเมติกไดอะแกรมของสำหรับวงจรสายส่งที่ใช้แบบจำลองแบบอุดมคติ,แบบก้อนและแบบพารามิเตอร์กระจายแสดงดังรูปที่ 3.6, รูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8 ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 ซีเค็มเมติกไดอะแกรมของสายส่งโดยใช้แบบจำลองแบบอุดมคติ



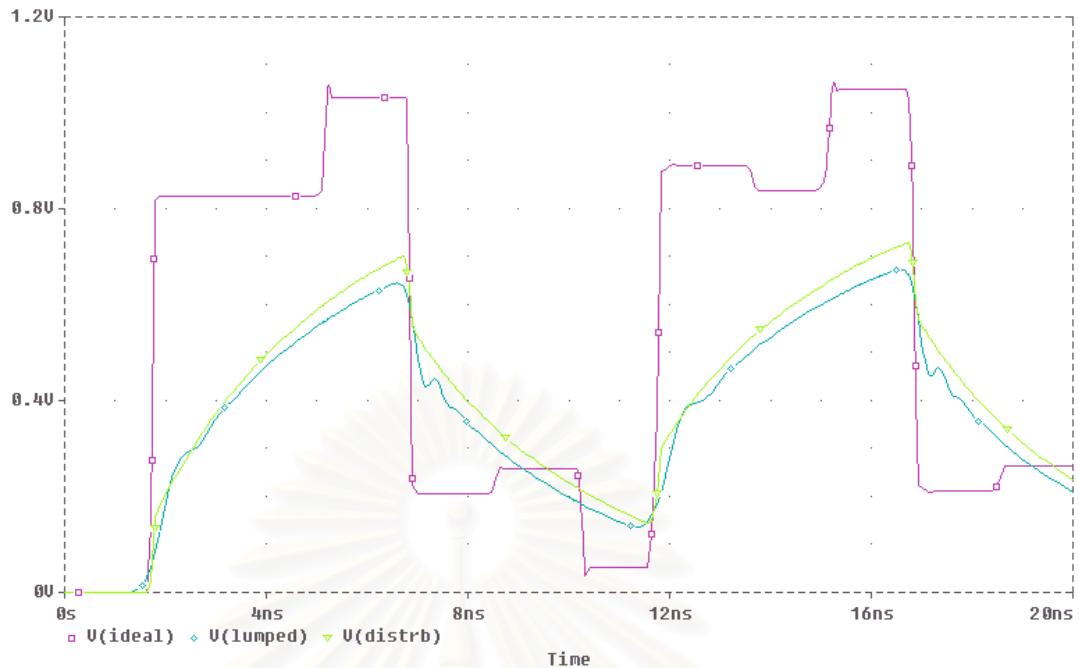
รูปที่ 3.7 ซิมูเลชันไดอะแกรมของสายส่งโดยใช้แบบจำลองแบบก้อน



รูปที่ 3.8 ซิมูเลชันไดอะแกรมของสายส่งโดยใช้แบบจำลองแบบพารามิเตอร์กระจาย

วงจรทั้งสามแบบนี้ประกอบด้วยตัวต้านทานของแหล่งกำเนิดขนาด 100 โอห์ม, ตัวต้านทานของโหลดขนาดเท่ากับ 2 เท่าของ Z_0 และแหล่งกำเนิดแรงดันแบบพัลส์ (V_{in}) ความถี่ 200 MHz เมื่อตรวจสอบแรงดันที่โหนดเอาต์พุตของสายส่งจะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 3.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.9 แรงดันที่เอาต์พุตของแบบจำลองสายส่งแบบอุดมคติ, แบบก้อนและแบบพารามิเตอร์กระจาย

จากรูปที่ 3.9 พิจารณาเปรียบเทียบแบบจำลองแบบพารามิเตอร์กระจายกับแบบจำลองแบบอุดมคติและแบบก้อน จะพบว่าแบบจำลองแบบอุดมคติไม่เพียงพอที่จะแสดงผลตอบสนองสำหรับคุณสมบัติของสายส่งที่กำหนด เนื่องจากสายส่งที่มีกำลังสูญเสียจะมีการลดทอนแรงดันอย่างมาก และการใช้แบบจำลองของสายส่งแบบก้อนต่ออนุกรมกันเพียง 28 ส่วน จะได้ผลตอบสนองที่ต่างกันเล็กน้อย ถ้าเพิ่มจำนวนของสายส่งแบบก้อนให้มากขึ้นเช่น 64 ส่วน ก็จะได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น อย่างไรก็ตามแบบจำลองแบบก้อนจะให้ผลตอบสนองที่มีการแกว่งเกิดขึ้นที่จุดเริ่มและจุดสิ้นสุดของคลื่นพัลส์เนื่องจากความถี่เสมือนดังกล่าวข้างต้น

พิจารณาแบบจำลองสำหรับสายส่งที่มีกำลังสูญเสียทั้ง 2 แบบ จะใช้เวลาในการคำนวณของซีพียู (CPU, Central Processing Unit) มากกว่าแบบจำลองแบบอุดมคติ โดยที่ทั้ง 2 แบบนี้ จะใช้เวลาในการอ่านค่าของโปรแกรม (Read-in) สั้นแต่จะใช้เวลาในการวิเคราะห์ทรานเซียนต์ นานกว่า การคำนวณสำหรับแบบจำลองแบบพารามิเตอร์กระจายเกิดจากผลตอบสนองอิมพัลส์จึงหลีกเลี่ยงการคำนวณซ้ำ (Redundant Calculation) ระหว่างการวิเคราะห์ทรานเซียนต์ นอกจากนี้แบบจำลองแบบก้อนจะใช้เวลาในการอ่านค่ามากขึ้น หากเพิ่มจำนวนของแบบจำลองแบบก้อนให้มากขึ้น การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณของซีพียูของแบบจำลองสายส่งแบบต่าง ๆ โดยคอมพิวเตอร์ที่ใช้คือ AMD ATHLON™ Processor 1000 MHz หน่วยความจำ 128 MBytes แสดงดังตารางที่ 3.8

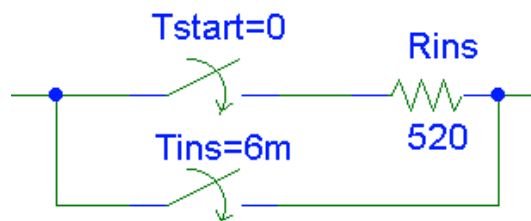
ตารางที่ 3.8 เวลาที่ใช้ในการคำนวณของซีพียูของแบบจำลองสายส่งแบบต่าง ๆ

ชนิดของแบบจำลอง	Read-in Time (s)	Transient Analysis (s)	Total Time (s)
แบบจำลองแบบอุดมคติ	0.02	0.05	0.07
แบบจำลองแบบก้อน (28 ก้อน)	0.04	0.20	0.25
แบบจำลองแบบพารามิเตอร์กระจาย	0.02	0.07	0.09

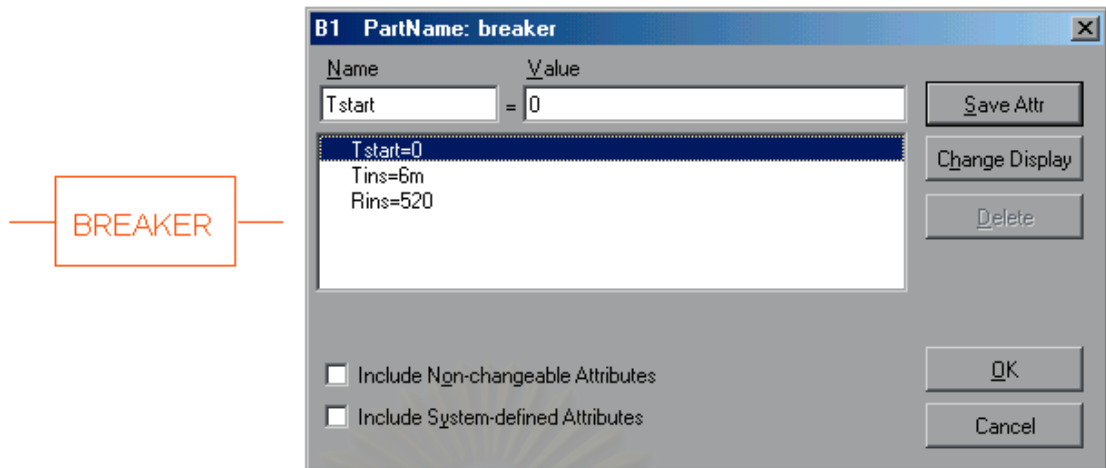
3.3.2 การจำลองเซอร์กิตเบรกเกอร์

เนื่องจากการพิจารณาเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่นำมาใช้เป็นแบบเบรกเกอร์ที่ใช้ก๊าซ (Gas Circuit Breaker) SF₆ เป็นฉนวนและเป็นตัวช่วยดับประกายไฟที่เกิดขึ้นขณะมีการปลดหรือปิดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์ และภายในของเซอร์กิตเบรกเกอร์จะมีความต้านทานต่ออนุกรม (Pre-insertion Resistors) ขนาด 520 โอห์ม [2] ขณะปิดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์ก่อนที่จะลัดวงจรออกไปในช่วงเวลา (Pre-insert Time) 6 มิลลิวินาที เพื่อลดค่าแรงดันเกินที่สูงขึ้น การนำสายส่งที่มีความยาวมาก ๆ มาใช้งาน ตำแหน่งการติดตั้งเซอร์กิตเบรกเกอร์จะติดตั้งที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง ข้อมูลของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ต่อกับระบบสายส่ง 500 kV และนำมาใช้ในการคำนวณ ถูกแสดงดังตารางที่ ค.9 ในภาคผนวก ค

แบบจำลองของเซอร์กิตเบรกเกอร์ประกอบด้วยสวิตช์ควบคุมโดยแรงดันที่ทำหน้าที่ปิดหรือเปิดที่เวลาที่ต้องการ (Tstart) โดยแรงดันคร่อมสวิตช์เป็น 0 V ขณะปิด และกระแสผ่านสวิตช์เป็น 0 A และมีความต้านทานต่ออนุกรม (Rins) ในช่วงเวลาหนึ่ง (Tins) ก่อนที่จะทำการลัดวงจร ความต้านทานนี้ออกไป พิจารณาแบบจำลองของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีพารามิเตอร์คือ Tstart=0 Tins=6m Rins=520 สามารถสร้างวงจรย่อยของเซอร์กิตเบรกเกอร์ดังแสดงใน ง.3 ของภาคผนวก ง และวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์แสดงดังรูปที่ 3.10 ซีดีเมติกไดอะแกรมและกล่องแสดงการแก้ไขแอดทริบิวต์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 วงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์

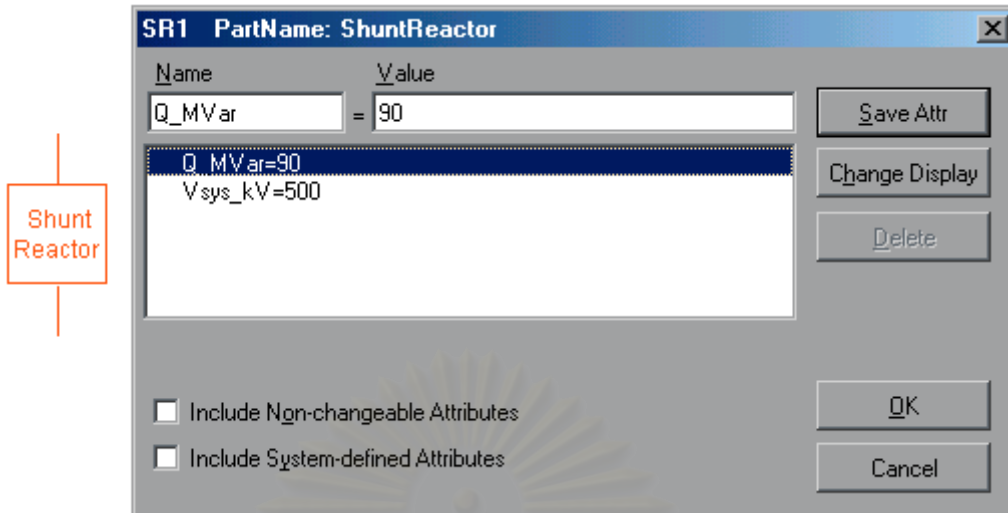


รูปที่ 3.11 ซีมเมติกไดอะแกรมและกล่องแสดงการแก้ไขแอตทริบิวต์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์

3.3.3 การจำลองรีแอกเตอร์ขนาน

เนื่องจากการพิจารณา รีแอกเตอร์ขนานที่นำมาใช้เป็นแบบน้ำมันใช้กลางแจ้ง (Oil Filled Outdoor) โดยติดตั้งที่ปลายสายส่งแต่ละด้าน เพื่อลดค่าแรงดันเกินที่เกิดขึ้น เนื่องจากกระแสอัดประจุซึ่งมีค่าสูงมากในกรณีของสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ที่มีความยาวมาก และรีแอกเตอร์ขนานยังสามารถควบคุมแรงดันและกำลังจินตภาพ (Q) ในระบบได้ รีแอกเตอร์ขนานจะต่อกับกราวด์เพื่อลดค่ากระแสอาร์คทุติยภูมิ (Secondary Arc Current) ข้อมูลของรีแอกเตอร์ขนานที่ต่อกับระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ และนำมาใช้ในการคำนวณถูกแสดงดังตารางที่ ค.10 ในภาคผนวก ค

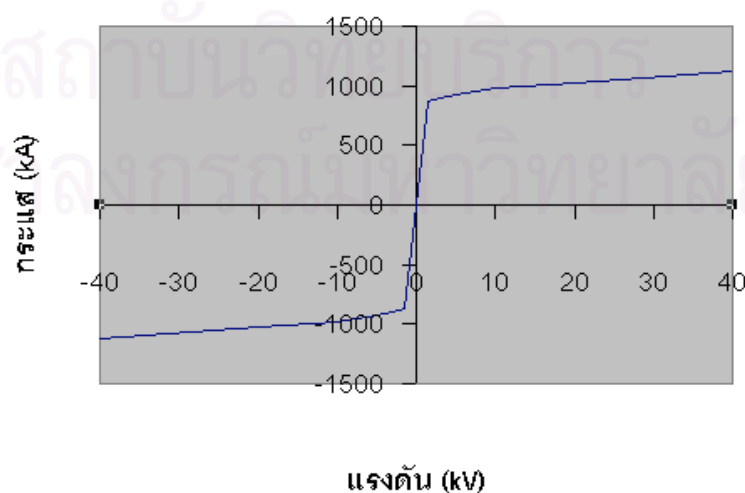
แบบจำลองของรีแอกเตอร์ขนานสามารถจำลองด้วยตัวเหนี่ยวนำที่มีพารามิเตอร์คือขนาด (Q_Mvar) เป็นเมกกะวาร์ (MVar) และแรงดัน (Vsys_kV) เป็นกิโลโวลต์ สามารถสร้างวงจรย่อยของรีแอกเตอร์ขนานดังแสดงใน ง.4 ของภาคผนวก ง ซีมเมติกไดอะแกรมและกล่องแสดงการแก้ไขแอตทริบิวต์ของรีแอกเตอร์ขนานแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ซัดิมเมติกไดอะแกรมและกล่องแสดงการแก้ไขแอตทริบิวต์ของรีแอคเตอร์ขนาน

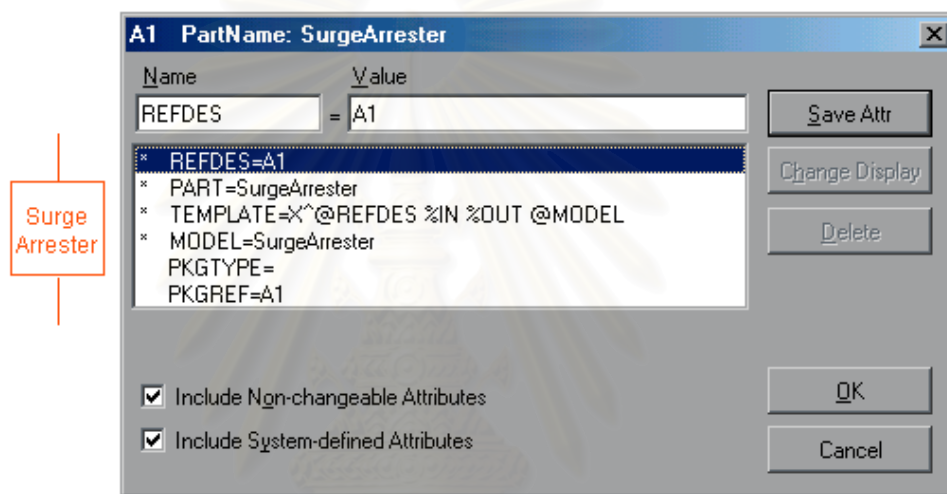
3.3.4 การจำลองกับดักเสิร์จ (Surge Arrester)

เนื่องจากการพิจารณากับดักเสิร์จที่นำมาใช้เป็นแบบออกไซด์ของโลหะเช่นออกไซด์ของสังกะสี (ZnO) เพื่อป้องกันอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยที่เกิดจากแรงดันเกินภายนอก หรือแรงดันเกินภายในระบบ โดยจะติดตั้งอยู่ใกล้กับรีแอคเตอร์ขนาน ซึ่งติดตั้งอยู่ตรงปลายสายส่งก่อนเข้าสู่สถานีไฟฟ้าย่อย กับดักเสิร์จแบบออกไซด์ของโลหะสามารถที่จะรักษาระดับแรงดันได้ค่อนข้างคงที่ ในขณะที่กระแสที่เกิดจากแรงดันเกินฟ้าผ่าและแรงดันเกินสวิตชิงดังแสดงในรูปที่ 3.13 ข้อมูลของกับดักเสิร์จที่ต่อกับระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ และนำมาใช้ในการคำนวณถูกแสดงดังตารางที่ ค.11 ในภาคผนวก ค



รูปที่ 3.13 การนำกระแสของกับดักเสิร์จแบบออกไซด์ของโลหะ (ZnO)

เนื่องจากกับดักเสิร์จชนิดนี้มีคุณสมบัติของความต้านทานไม่เชิงเส้น ซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นแหล่งแรงดันควบคุมโดยกระแสแบบหนึ่ง ดังนั้นแบบจำลองของกับดักเสิร์จสามารถจำลองด้วยความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่ผ่านกับดักเสิร์จได้ โดยการใช้แหล่งกำเนิดแรงดันควบคุมโดยกระแส และเนื่องจากข้อกำหนดของโปรแกรมพีเอสไปซ์ ดังนั้นการวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านกับดักเสิร์จทำได้โดยใช้ค่ากระแสที่ไหลผ่านแหล่งกำเนิดแรงดันอิสระอีกตัวหนึ่งที่มีค่า 0 V ที่ต่ออนุกรมอยู่ สามารถสร้างวงจรร้อยของกับดักเสิร์จดังแสดงใน ง.5 ของภาคผนวก ง เมื่อต้องการเปลี่ยนกราฟระหว่างแรงดันและกระแสใหม่ ทำได้โดยการแก้ไขวงจรร้อยโดยตรง ซิมเมติกไดอะแกรมและกล่องแสดงการแก้ไขแอมพลิจูดของกับดักเสิร์จแสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ซิมเมติกไดอะแกรมและกล่องแสดงการแก้ไขแอมพลิจูดของกับดักเสิร์จ

3.3.5 การจำลองสายส่งไฟฟ้าหลายเส้น [11]

จากหัวข้อ 2.4.1.5 พิจารณาส่วนจริง (Real Part) ของค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของสายส่งสามารถประมาณได้ดังนี้

$$\alpha_i = \alpha_{ci} + \alpha_{di}, \quad i = 1, \dots, N \quad (3.1)$$

โดยที่ α_{ci} : การสูญเสียจากตัวนำ (Conductor Loss)

α_{di} : การสูญเสียจากไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss)

ในการใช้งานทั่วไป [G] มีอิทธิพลน้อยมากต่อค่าของ α_{ci} และ [R] มีอิทธิพลน้อยมากต่อค่าของ α_{di}

พิจารณาสายส่งไฟฟ้าทั่วไป สัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ในโดเมนการแปลงลาปลาซสามารถจัดรูปใหม่เป็นดังสมการ (3.2)

$$\begin{aligned}
 \gamma(s) &= \sqrt{(R(s) + sL(s))(G(s) + sC(s))} \\
 &= \sqrt{\left(\frac{R(s)}{\sqrt{L(s)/C(s)}} + s\sqrt{L(s)C(s)}\right)\left(\frac{G(s)}{\sqrt{C(s)/L(s)}} + s\sqrt{L(s)C(s)}\right)} \\
 &= \sqrt{\left(2a(s) + \frac{s}{c(s)}\right)\left(2b(s) + \frac{s}{c(s)}\right)} \\
 &= \sqrt{A(s)B(s)} \tag{3.2}
 \end{aligned}$$

โดยที่ $s = j\omega$

$$a(s) \approx \alpha_c$$

$$b(s) \approx \alpha_d$$

$$c(s) \approx c_\phi \text{ (ความเร็วเฟส Mode)}$$

ในกรณีของสายส่งแบบพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่ เมื่อพิจารณาผลของสกินเอฟเฟค (Skin Effect) จะได้ $R(s) = R(s_{ref})\sqrt{s/s_{ref}}$ และ $sL(s) = sL_e + sL_i(s)$ โดยที่ s_{ref} แสดงว่าเป็นค่าอ้างอิง, L_e เป็นความเหนี่ยวนำภายนอกซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับความถี่และ $L_i(s)$ เป็นความเหนี่ยวนำภายในซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่

ในกรณีของสายส่งที่ไม่มีกำลังสูญเสียที่พารามิเตอร์ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่จะได้

$$A(s) = B(s) = \frac{s}{c_\phi(s_{ref})} \tag{3.3}$$

ในกรณีของสายส่งที่มีกำลังสูญเสียที่พารามิเตอร์ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่จะได้

$$A(s) = 2\alpha_c(s_{ref}) + \frac{s}{c_\phi(s_{ref})} \tag{3.4}$$

$$B(s) = 2\alpha_d(s_{ref}) + \frac{s}{c_\phi(s_{ref})} \quad (3.5)$$

ในกรณีของสายส่งที่มีกำลังสูญเสียที่พารามิเตอร์ขึ้นอยู่กับความถี่จะได้

$$A(s) = 2\alpha_c(s_{ref}) \sqrt{\frac{2js}{s_{ref}}} + \frac{s}{c_\phi(s_{ref})} \quad (3.6)$$

และด้วยการกำหนดให้ค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss Tangent) สามารถประมาณเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของความถี่ได้

$$B(s) = \frac{1}{2\alpha_d(s_{ref}) \left(\frac{jc_\phi(s_{ref})}{s_{ref}} \right)^2 + \frac{c_\phi(s_{ref})}{s}} \quad (3.7)$$

การวิเคราะห์แบบ Mode นี้จะให้ค่าผลลัพธ์เพียงที่ความถี่อ้างอิงที่กำหนดในการศึกษาเท่านั้น จากสมการ (2.25) และ (2.26) แรงแดันและกระแสที่แท้จริงที่หัวของสายส่งไฟฟ้าหลายเส้นมีความสัมพันธ์กับแรงแดันและกระแสของแบบจำลองสายส่งที่ถอดการเชื่อมต่อเรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$[V(0)] = [S_v] \{ [G_{inc}(0)] + [G_{ref}(0)] \} \quad (3.8)$$

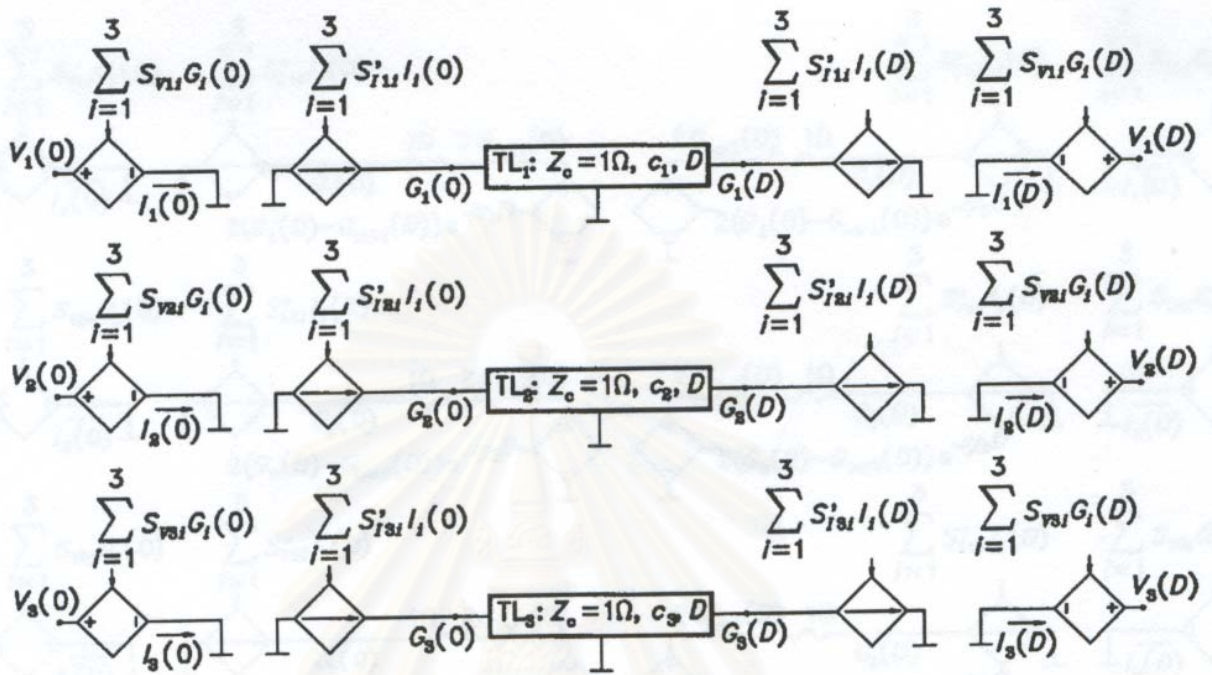
$$\{ [G_{inc}(x)] - [G_{ref}(x)] \} = [S]^{-1} [I(0)] \quad (3.9)$$

$$[V(D)] = [S_v] \{ [G_{inc}(D)] + [G_{ref}(D)] \} \quad (3.10)$$

$$\{ [G_{inc}(D)] - [G_{ref}(D)] \} = [S]^{-1} [I(D)] \quad (3.11)$$

สมการ (3.8) และ (3.10) สามารถแทนในโปรแกรมพีเอสไปซีได้โดยการใช้แหล่งกำเนิดแรงแดันควบคุม ส่วนสมการ (3.9) และ (3.11) สามารถแทนได้โดยการใช้แหล่งกำเนิดกระแสควบคุม

ดังนั้นสามารถสร้างวงจรสมมูลย์ของสายส่งไฟฟ้าหลายเส้นที่ไม่มีกำลังสูญเสียได้ วงจรสมมูลย์ของสายส่งไฟฟ้าที่ไม่มีกำลังสูญเสีย 3 เส้น (N=3) แสดงดังรูปที่ 3.15

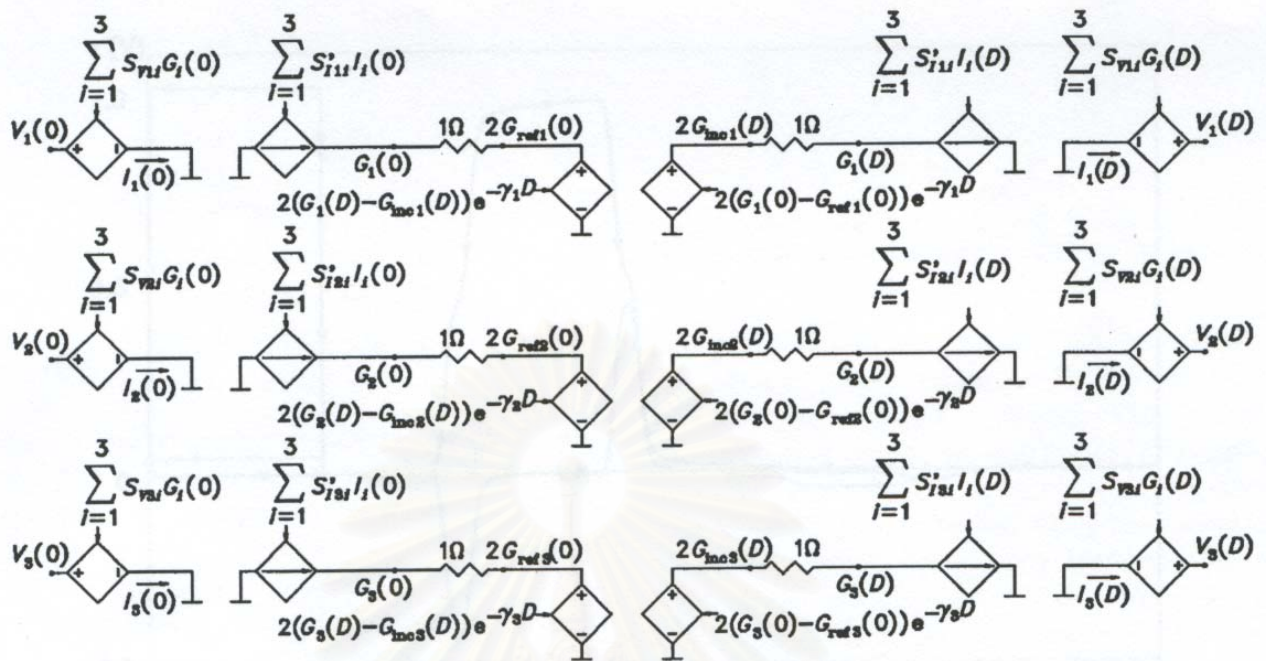


รูปที่ 3.15 วงจรสมมูลย์ของสายส่งไฟฟ้าที่ไม่มีกำลังสูญเสีย 3 เส้น

สายส่งแต่ละเส้นในแบบจำลองนี้เป็นแบบไม่มีกำลังสูญเสีย, มีอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติ 1 โอห์ม, ความยาว D และความเร็วของคลื่นเคลื่อนที่เป็น c_i เท่ากับความเร็วในโดเมน Mode และค่าเหล่านี้ไม่ขึ้นกับความถี่

สำหรับสายส่งหลายเส้นที่มีกำลังสูญเสียและขึ้นอยู่กับความถี่ทำได้โดยการดัดแปลงวงจรสมมูลย์ในรูปที่ 3.15 โดยใช้การแปลงลาปลาซเพื่อแสดงค่าที่แปรผันตามความถี่ของสัมประสิทธิ์การลดทอนและความเร็วคลื่น วงจรสมมูลย์สายส่งไฟฟ้าที่มีกำลังสูญเสียและขึ้นกับความถี่ 3 เส้น (N=3) แสดงดังรูปที่ 3.16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

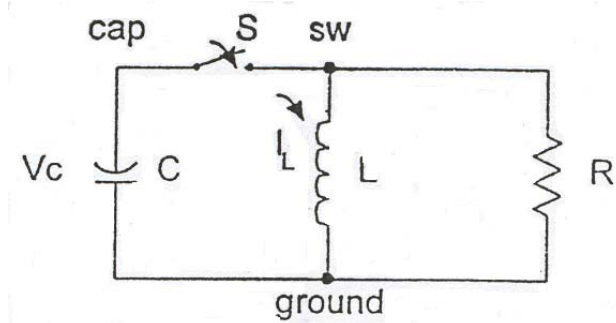


รูปที่ 3.16 แบบจำลองสำหรับโปรแกรมพีเอสไปซ์ของสายส่งไฟฟ้า
ที่มีกำลังสูญเสียและขึ้นกับความถี่ 3 เส้น (N=3)

การใช้วงจรสมมูลย์ในรูปที่ 3.15 และ 3.16 ต้องมีการเพิ่มเติมวงจรบางอย่างเพื่อให้เข้ากับข้อกำหนดของโปรแกรมพีเอสไปซ์ โดยเมื่อหัวของสายส่งเป็นวงจรเปิด กรณีนี้หัวของแหล่งกำเนิดแรงดันจะลอยอยู่ จึงต้องใช้ความต้านทานค่าสูงมากต่อระหว่างแต่ละหัวของวงจรรอยกับกราวด์ และเมื่อหัวของสายส่งลัดวงจรหรือต่อกับตัวเหนี่ยวนำเป็นวงที่มีความต้านทานศูนย์ จึงต้องใช้ความต้านทานค่าน้อยมากต่ออนุกรมกับแต่ละหัวของสายส่ง

3.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์วงจรโดยใช้โปรแกรมพีเอสไปซ์

การใช้โปรแกรมพีเอสไปซ์สำหรับการศึกษาวิธีการออกแบบหรือวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นนั้น ในขั้นต้นจะเริ่มจากการใช้กรณีศึกษา (Case Study) ทั่วไป เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป ซึ่งในที่นี้จะใช้กรณีศึกษาของวงจรรขนานของตัวต้านทาน, ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (Parallel RLC Circuit) [10]



รูปที่ 3.17 วงจรขนานของตัวต้านทาน, ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

วงจรที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.17 เป็นวงจรรขนานของตัวต้านทาน, ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ในวงจรจะไม่มีแหล่งจ่ายไฟ แต่จะมีแรงดันเริ่มแรก (Initial Voltage) ที่ตัวเก็บประจุเท่ากับ 20 kV แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะแทนด้วยโหนด CAP กับโหนด GROUND, แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทานจะแทนด้วยโหนด SW กับโหนด GROUND ส่วนกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะแทนด้วยสาขา (Branch) SW ไป GROUND จากรูปที่ 3.17 สร้างสมการของกระแสได้ดังนี้

$$C \frac{dV_C}{dt} + I_L + \frac{V_C}{R} = 0 \quad (3.12)$$

$$V_C = L \frac{dI_L}{dt} \quad (3.13)$$

แทน V_C ในสมการ (3.13) ลงในสมการ (3.12) จะได้

$$\frac{d^2 I_L}{dt^2} + \left(\frac{1}{RC} \right) \frac{dI_L}{dt} + \frac{I_L}{LC} = 0 \quad (3.14)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.15)$$

รูปแบบของการออสซิลเลชัน (Oscillation) ขึ้นอยู่กับตัวแปร $\eta = \frac{R}{Z_0}$, $T_p = RC$ ดังนั้น

สามารถหาผลตอบของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (I_L) จากสมการ (3.14) โดยแบ่งออกได้เป็น 3 กรณีคือ

1. $\eta > \frac{1}{2}$ (Underdamped)

$$I_L(t) = \left(\frac{V_C(0)}{L} \right) \frac{2T_p e^{-t/2T_p}}{(4\eta^2 - 1)^{1/2}} \sin(4\eta^2 - 1)^{1/2} \frac{t}{2T_p} \quad (3.16)$$

2. $\eta = \frac{1}{2}$ (Critically damped)

$$I_L(t) = \left(\frac{V_C(0)}{L} \right) t e^{-t/2T_p} \quad (3.17)$$

3. $\eta < \frac{1}{2}$ (Overdamped)

$$I_L(t) = \left(\frac{V_C(0)}{L} \right) \frac{2T_p e^{-t/2T_p}}{(1 - 4\eta^2)^{1/2}} \sin(1 - 4\eta^2)^{1/2} \frac{t}{2T_p} \quad (3.18)$$

$$V_C(0) = 20 \text{ kV} , C = 0.1 \text{ } \mu\text{F} , L = 8 \text{ mH} , R = 430 \text{ } \Omega$$

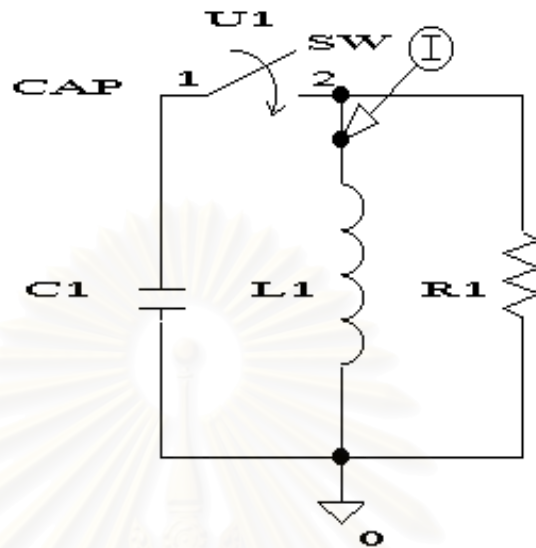
$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{8 \times 10^{-3}}{10^{-7}}} = 283 \text{ } \Omega$$

$$\eta = \frac{R}{Z_0} = \frac{430}{283} = 1.52$$

ขั้นตอนการศึกษา

ใช้โปรแกรมพีเอสไปซ์สร้างซิมูเลชันเมติกโดอะแกรมของวงจรขนาน RLC ดังแสดงในรูปที่ 3.18 โดยการปิดสวิตช์ (S) ที่อยู่ระหว่างโหนด CAP กับโหนด SW แล้ววัดกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจากโหนด SW ไปโหนด GROUND โดยฟลักอินพุทของวงจรขนานของตัวต้านทาน, ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ แสดงใน ง.6 ของภาคผนวก ง จากนั้นทำการศึกษาซ้ำโดยการเปลี่ยนค่าความ

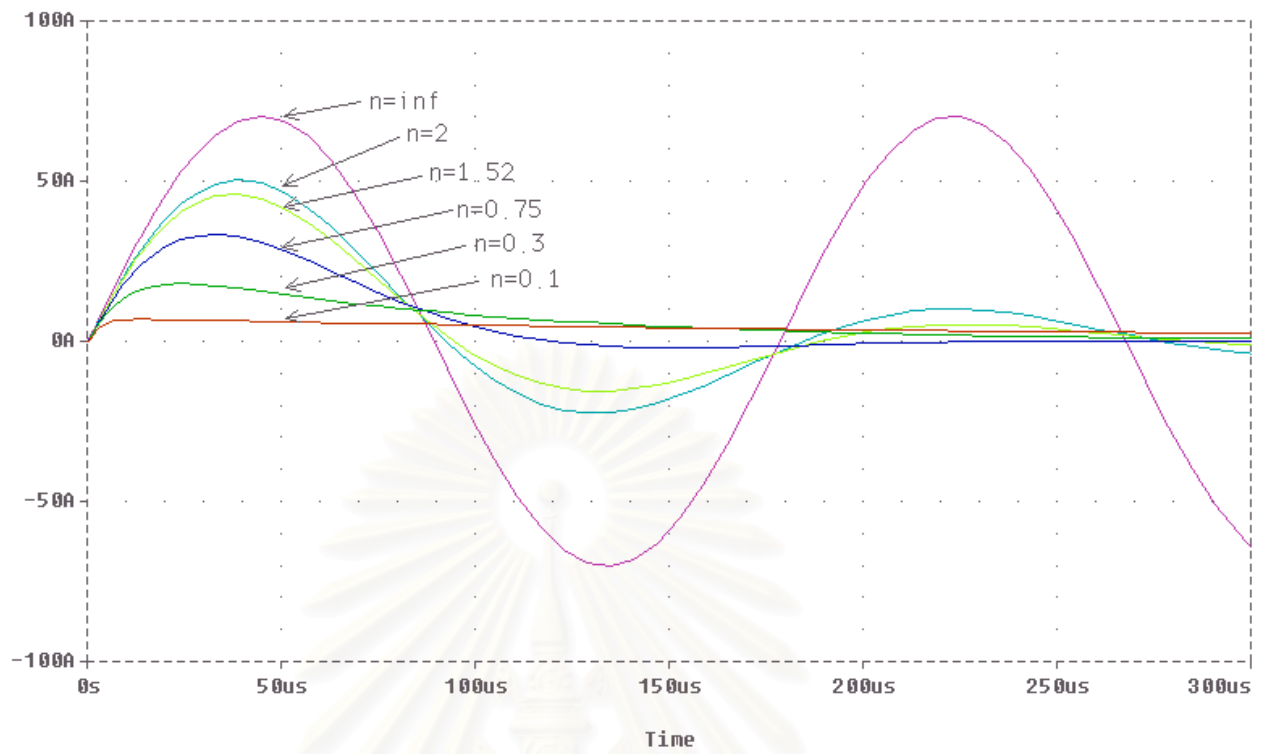
ต้านทานจาก $R = 430 \Omega$ เป็นค่าต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.9 ผลลัพธ์จากการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.19



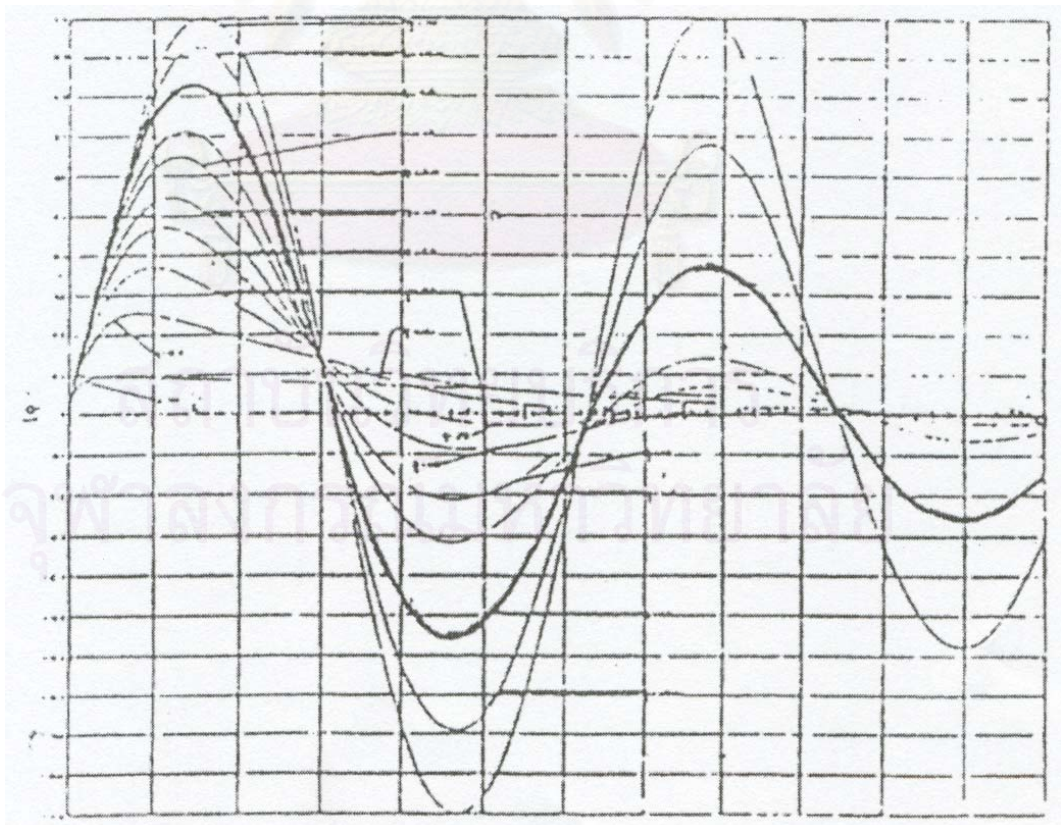
รูปที่ 3.18 ซิมูเลตริกไดอะแกรมของวงจรรangkaian RLC

ตารางที่ 3.9 ค่าความต้านทานที่ใช้ในการศึกษาวงจรรangkaian RLC

ค่าความต้านทาน (Ω)	η
90E6	∞
565.7	2
430	1.52
212.1	0.75
84.8	0.3
28.3	0.1



รูปที่ 3.19 กระแสในตัวเหนี่ยวนำที่คำนวณโดยโปรแกรมพีซี



รูปที่ 3.20 กระแสในตัวเหนี่ยวนำจากเอกสารอ้างอิง [10]

สรุปผลการศึกษา

จากการเปรียบเทียบระหว่างผลของโปรแกรมพีสไปซ์ในรูปแบบที่ 3.19 กับผลของกรณีศึกษาจากเอกสารอ้างอิง [10] ในรูปที่ 3.20 ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน เช่นที่ค่า $\eta = 1.52$ ค่ากระแสที่ยอดคลื่นแรกของโปรแกรมพีสไปซ์ เท่ากับ 46.1 A ส่วนกรณีศึกษาใน [10] ที่ $\eta = 1.5$ มีค่าประมาณ 46 A และรูปคลื่นในการออกสวิตช์ก็ใกล้เคียงกันด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

กรณีศึกษาของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โปรแกรมพีเอสไปซ์

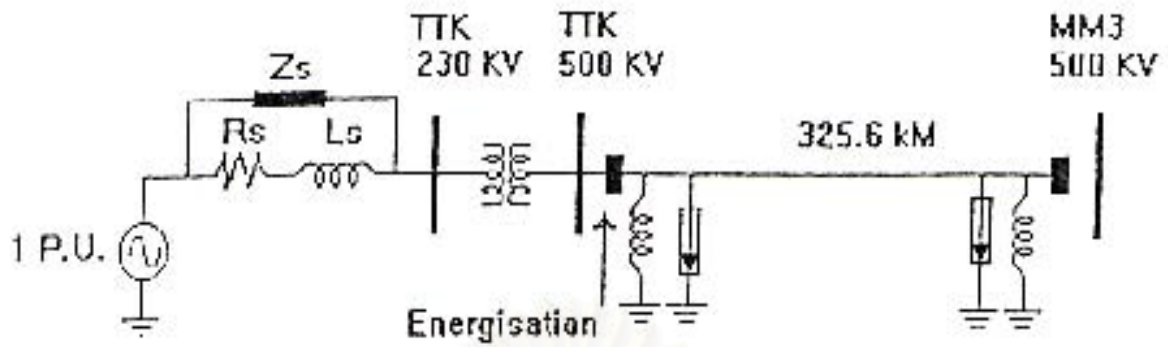
4.1 บทนำ

ในบทนี้จะทำการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โปรแกรมพีเอสไปซ์ สำหรับกรณีศึกษาต่าง ๆ เพื่อศึกษาทราบขั้นตอนของระบบไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

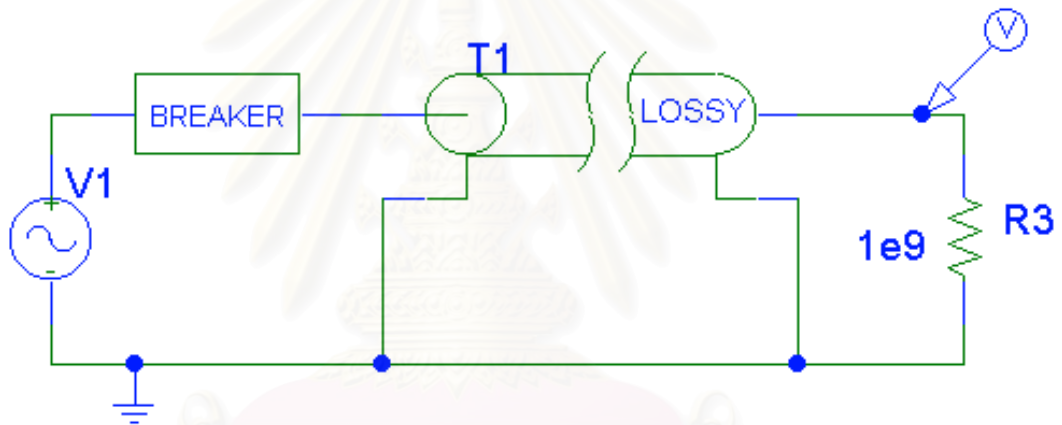
4.2 วงจรกรณีศึกษาของการกระตุ้นสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์ [2]

สวิตชิงทรานเซียนต์ที่เกิดจากการปิดวงจรเพื่อกระตุ้นสายส่ง (Line Energization) เป็นกรณีศึกษาที่รุนแรง (Severe Case) เมื่อเทียบกับการเกิดจากสาเหตุอื่น ๆ [17] เมื่อพิจารณาวงจรกรณีศึกษาในรูปที่ 4.1 ในกรณีนี้พิจารณาศึกษาค่าแรงดันเกินสวิตชิง 500 กิโลโวลต์ ประเภท 1 เฟส ของการกระตุ้นสายส่งจากสถานีไฟฟ้าย่อยท่าตะโกไปยังสถานีไฟฟ้าย่อยแม่เมาะ 3 โดยที่ปลายสายไม่ได้ต่อโหลดไว้ เป็นวงจรเปิด (Open Circuit) ความยาวของสายส่งไฟฟ้า 325.6 กิโลเมตร พิจารณาสายส่งเป็นแบบคลื่นเดินทางที่พารามิเตอร์คงที่ไม่ขึ้นกับความถี่ ประกอบด้วยพารามิเตอร์ดังนี้ $R = 0.0839 \Omega/\text{km}$, $C = 11.4555 \text{ nF}/\text{km}$, $L = 1.5794 \text{ mH}/\text{km}$ และแบบจำลองของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีความต้านทานภายในกลไกเซอร์กิตเบรกเกอร์ 520Ω และระยะเวลาของการต่อความต้านทานภายในกลไกเซอร์กิตเบรกเกอร์ 6 ms และละเลยผลของวงจรป้อนได้ แรงดันพื้นฐาน (Base Voltage) เป็น 500 kV และพลังงานพื้นฐาน (Base MVA) เป็น 100 MVA

จากการสร้างซิมเมติกไดอะแกรมของการศึกษาผลการกระตุ้นสายส่งที่ปลายสายเป็นวงจรเปิดประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันรูปซายน์, เซอร์กิตเบรกเกอร์, สายส่งไฟฟ้าแบบพารามิเตอร์กระจายและใช้ตัวต้านทานขนาดใหญ่แทนการเปิดวงจร และใช้การวิเคราะห์แบบทรานเซียนต์มีค่า $\langle T_{\text{step}} \rangle$ เท่ากับ $10 \mu\text{s}$ และ $\langle T_{\text{stop}} \rangle$ เท่ากับ 80 ms ใช้โพรบแสดงผลแรงดันที่ปลายสายส่ง (แรงดันคร่อมตัวต้านทาน R3) จะได้ไฟล์อินพุทของโปรแกรมพีเอสไปซ์แสดงใน ง.7 ของภาคผนวก ง และซิมเมติกไดอะแกรมแสดงดังรูปที่ 4.2 และแสดงแรงดันเกินสวิตชิงที่ปลายสายส่งจากโปรแกรมพีเอสไปซ์ดังรูปที่ 4.3 และแสดงแรงดันเกินสวิตชิงที่ปลายสายส่งจากโปรแกรมอีเอ็มทีพีดังรูปที่ 4.4 [2]

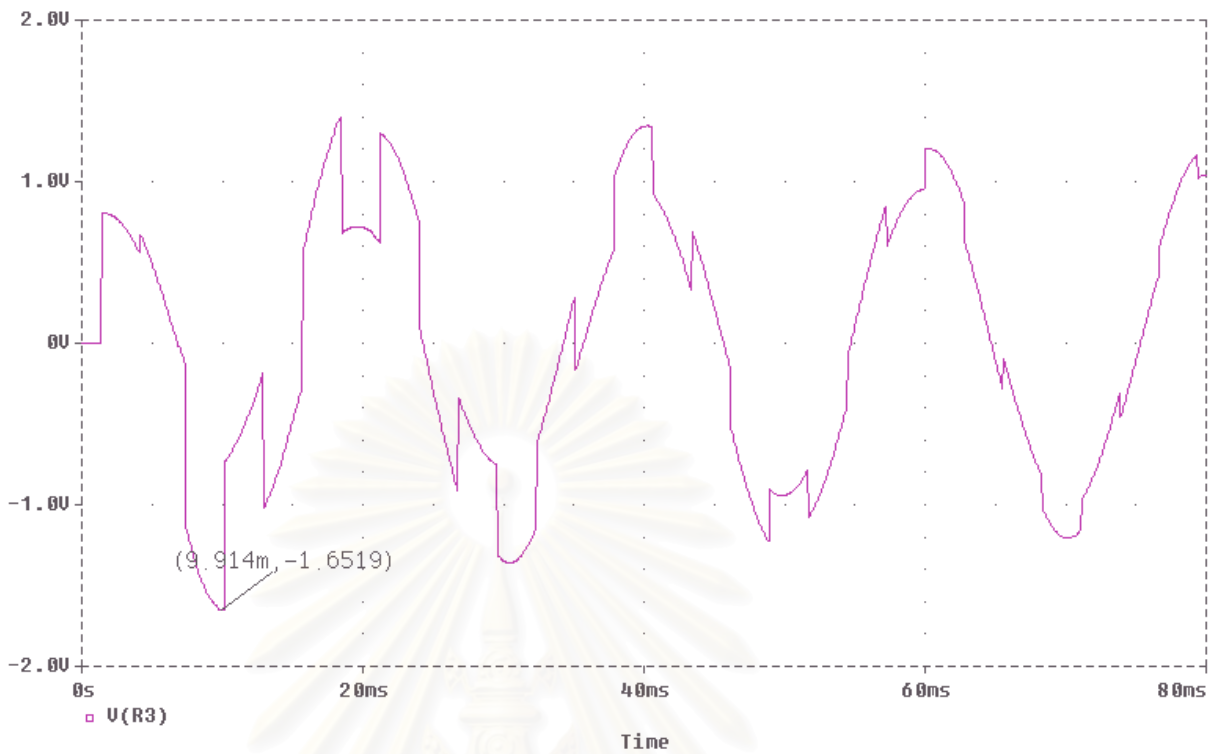


รูปที่ 4.1 วงจรกรณีศึกษาของระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์

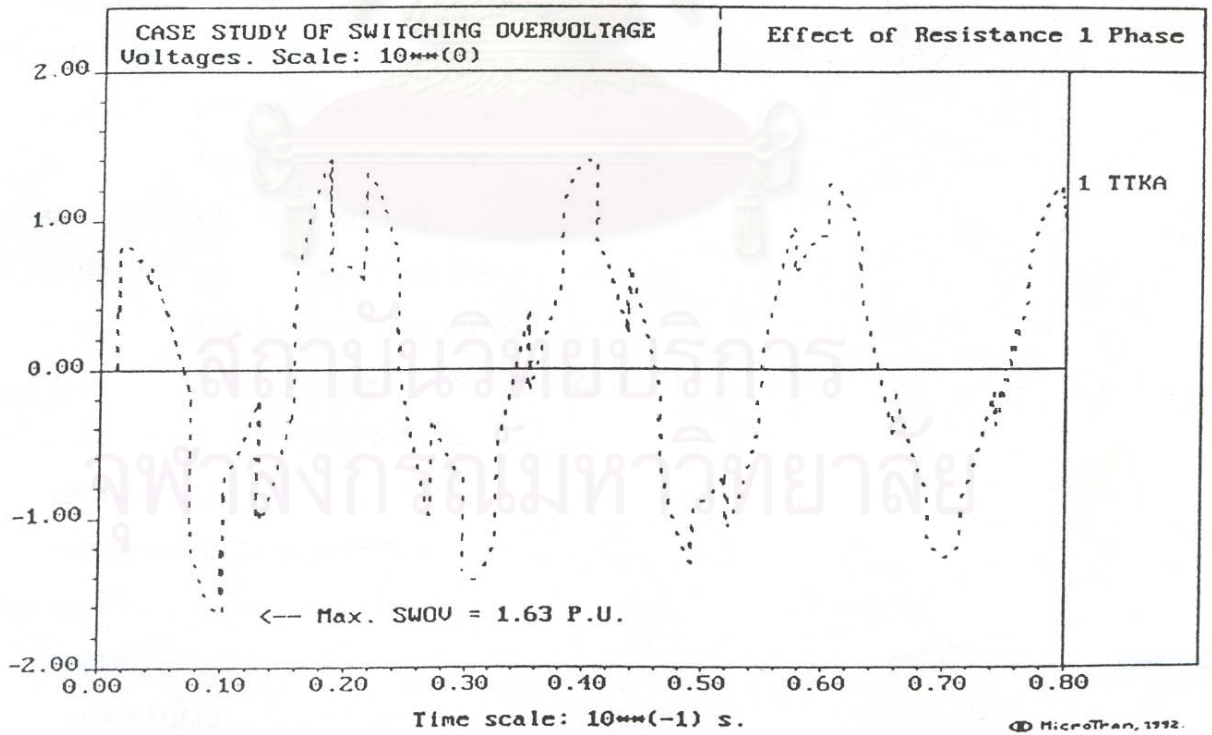


รูปที่ 4.2 ซิมูเลชันไดอะแกรมของวงจรกรณีการกระตุ้นสายส่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 แรงดันเกินสวิตชิง 500 กิโลโวลต์ ประเภท 1 เฟส จากโปรแกรมพีสไปซ์



รูปที่ 4.4 แรงดันเกินสวิตชิง 500 กิโลโวลต์ ประเภท 1 เฟส จากโปรแกรมอีเอ็มทีพี

พิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมพีสไปซ์และจากเอกสารอ้างอิง ได้รูปคลื่นของแรงดันใกล้เคียงกัน และขนาดแรงดันเกินสูงสุดที่ได้จากโปรแกรมพีสไปซ์ได้เท่ากับ 1.6519 P.U. เทียบกับขนาดแรงดันเกินสูงสุดจากเอกสารอ้างอิงคิดเป็น 1.3 %

4.2.1 ผลของความยาวของสายส่ง

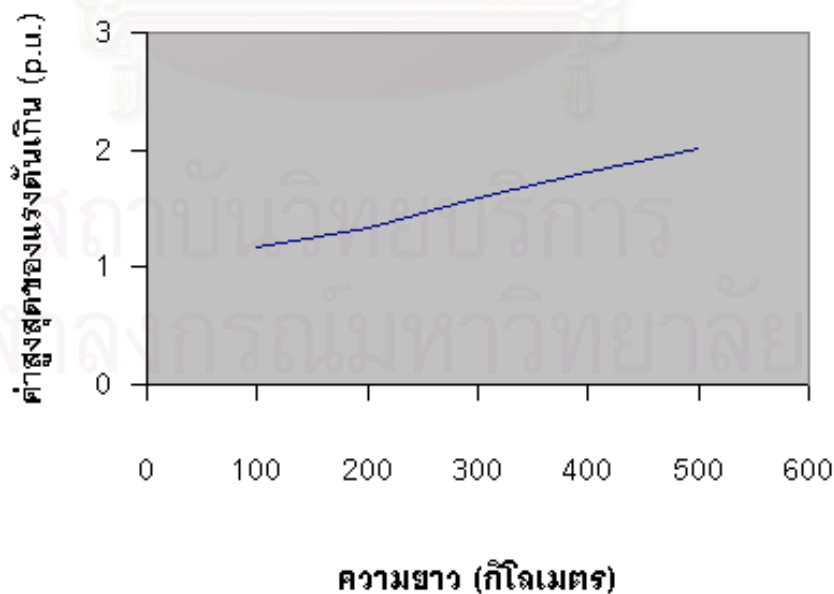
จากวงจรกรณีศึกษาในรูปที่ 4.1 เปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของสายส่งในส่วนของความยาวของสายส่งตั้งแต่ 100 ถึง 500 กิโลเมตร จะได้ผลของแรงดันเกินสวิตชิงที่ความยาวของสายส่งค่าต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อความยาวของสายส่งมากขึ้น ค่าสูงสุดของแรงดันเกินจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากเฟอร์รันตีเอฟเฟค (Ferranti Effect) ที่แรงดันเกินสูงสุดจะอยู่ที่ปลายสายส่งที่ไม่ได้ต่อโหลดไว้ดังสมการ (4.1)

$$U_s = U_R \cos(\beta l) \quad (4.1)$$

โดยที่ β : ค่าคงที่ของเฟสชิฟต์ (Phase Shift constant) = $\omega\sqrt{LC}$

U_s : แรงดันที่ปลายด้านส่ง

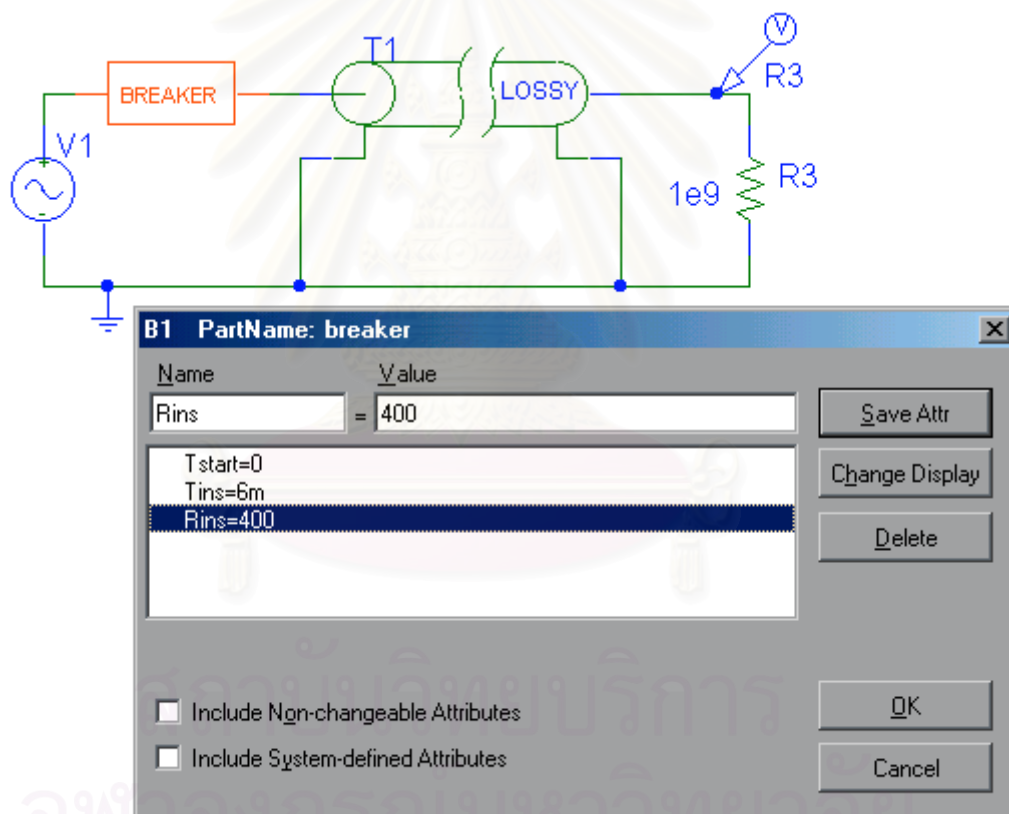
U_R : แรงดันที่ปลายด้านโหลด



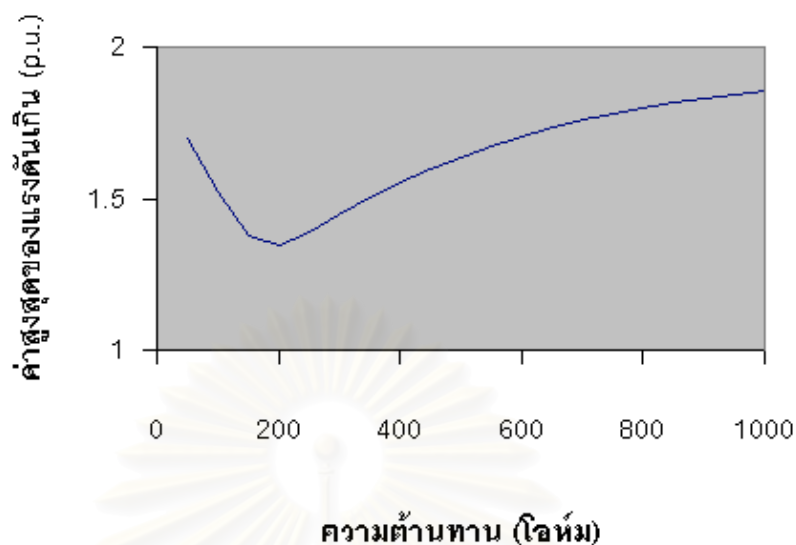
รูปที่ 4.5 ผลของแรงดันเกินสวิตชิงที่ความยาวของสายส่งค่าต่าง ๆ

4.2.2 ขนาดของความต้านทานภายในในกลไกของเซอร์กิตเบรกเกอร์

จากวงจรกรณีศึกษาในรูปที่ 4.1 เปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในส่วนของความต้านทาน (Rins) ตั้งแต่ 50 ถึง 1,000 โอห์ม ภายในกล่องแสดงการแก้ไขแอสทรีวิคซ์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยที่ระยะเวลาของการใส่ความต้านทานภายในในกลไกของเซอร์กิตเบรกเกอร์ยังคงเท่ากับ 6 มิลลิวินาที จะได้ผลของแรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่ความต้านทานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ค่าต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าในช่วง 50 ถึง 200 โอห์ม ค่าแรงดันเกินสูงสุดมีค่าลดลง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความต้านทานมีค่ามากกว่า 200 โอห์มขึ้นไป เนื่องจากถ้าความต้านทานภายในในกลไกของเซอร์กิตเบรกเกอร์มีค่าใกล้เคียงกับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายส่ง แรงดันที่ปลายด้านขาออกจะน้อย เพราะไม่มีคลื่นสะท้อนกลับมา



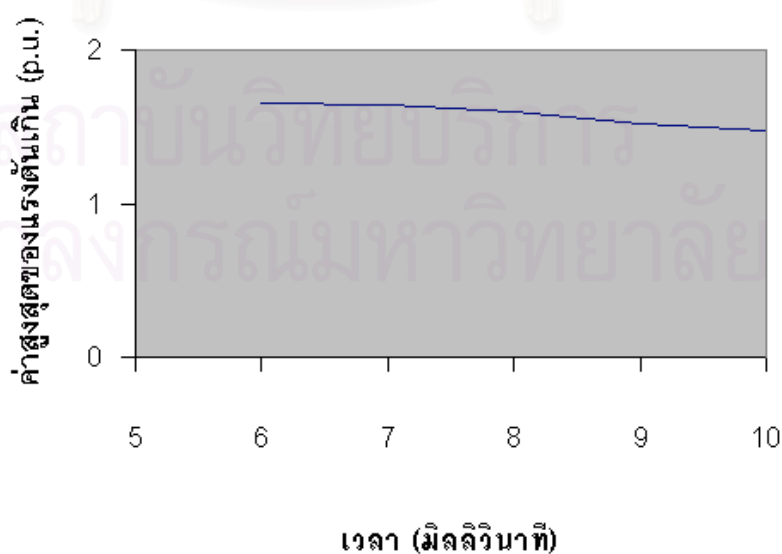
รูปที่ 4.6 การแก้ไขค่าพารามิเตอร์ (Rins) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์



รูปที่ 4.7 ผลของแรงดันเกินสวิตชิงที่ความต้านทานของเซอร์กิตเบรคเกอร์ค่าต่าง ๆ

4.2.3 ระยะเวลาของการใส่ความต้านทานในกลไกของเซอร์กิตเบรคเกอร์

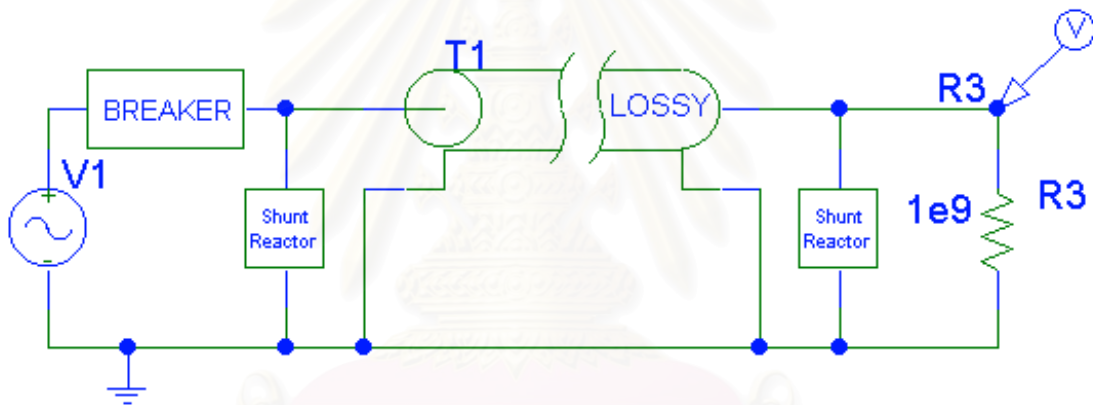
จากวงจรกรณีศึกษาในรูปที่ 4.1 เปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของเซอร์กิตเบรคเกอร์ในส่วนของระยะเวลาที่ใส่ความต้านทาน (Tins) ตั้งแต่ 6 ถึง 10 มิลลิวินาที โดยที่ค่าความต้านทานภายในกลไกของเซอร์กิตเบรคเกอร์เท่ากับ 520 โหม้ม จะได้ผลของแรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่ระยะเวลาที่ใส่ความต้านทานค่าต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการใส่ความต้านทาน ค่าแรงดันเกินสูงสุดจะมีค่าลดลง เนื่องจากระยะเวลาที่ต่อความต้านทานนานขึ้น ทำให้มีการสูญเสียพลังงานในตัวต้านทานมากขึ้น แรงดันเกินจึงมีค่าลดลง เข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วขึ้น



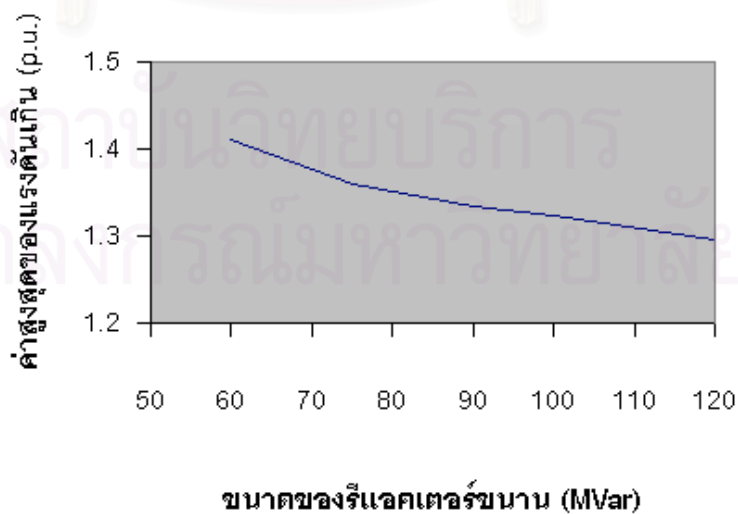
รูปที่ 4.8 ผลของแรงดันเกินสวิตชิงที่ระยะเวลาของการใส่ความต้านทานค่าต่าง ๆ

4.2.4 ผลของรีแอคเตอร์ขนาน

จากวงจรกรณีศึกษาในรูปที่ 4.1 เลือกใช้รีแอคเตอร์ขนานต่อที่ต้นทางและปลายทางของสายส่งมีขนาดระหว่าง 60 ถึง 120 MVAR จะได้โพลอินพุทของโปรแกรมพีเอสแสดงใน ง.8 ของภาคผนวก ง และซิมเมติกไดอะแกรมแสดงในรูปที่ 4.9 และผลของแรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่ขนาดของรีแอคเตอร์ขนานค่าต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดของรีแอคเตอร์ขนานมากขึ้น ค่าแรงดันเกินสูงสุดจะมีค่าลดลง เนื่องจากค่ารีแอคแตนซ์ที่มากขึ้น เป็นการชดเชยแบบขนาน (Shunt Compensation) มากขึ้น แรงดันเกินในสายส่งจึงมีค่าลดลง ดังนั้นการเพิ่มหรือลดขนาดของรีแอคเตอร์ขนานจะช่วยควบคุมแรงดันที่ปลายสายส่งได้ โดยเมื่อมีโหลดต่ออยู่น้อยที่ปลายสายส่ง แรงดันที่ปลายสายส่งจะมีค่าสูงขึ้น ให้ทำการเพิ่มขนาดของรีแอคเตอร์ขนานเพื่อลดแรงดันที่ปลายสายส่งลง ในทำนองเดียวกันเมื่อมีโหลดต่ออยู่มากที่ปลายสายส่ง แรงดันที่ปลายสายส่งจะต่ำลง ให้ลดขนาดของรีแอคเตอร์ขนานลงเพื่อเพิ่มแรงดันที่ปลายสายส่ง



รูปที่ 4.9 ซิมเมติกไดอะแกรมของวงจรกรณีการกระตุ้นสายส่งที่ต่อรีแอคเตอร์ขนาน



รูปที่ 4.10 ผลของแรงดันเกินสวิตชิงที่ขนาดของรีแอคเตอร์ขนานค่าต่าง ๆ

4.3 วงจรกรณีศึกษาของทรานเซียนต์จากฟ้าผ่า

เมื่อพิจารณาวงจรกรณีศึกษาของทรานเซียนต์จากฟ้าผ่าในรูปที่ 4.11 และกระแสเสิร์จฟ้าผ่าแสดงดังรูปที่ 4.12 ในกรณีของการเกิดฟ้าผ่าลงที่เสาส่ง โดยมีพารามิเตอร์ของส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้

- เสา (Tower) : ความสูง 30 เมตร, $L = 1 \mu\text{H/m}$, $C = 15 \text{ pF/m}$, $Z_c = 260 \Omega$

- สายส่งไฟฟ้า : $R = 0.295 \Omega/\text{km}$, $L = 6.116 \text{ mH/m}$, $C = 5.1242 \times 10 \text{ nF/m}$, $Z_c = 345 \Omega$

- กัปดักเสิร์จ คุณสมบัติระหว่างแรงดันและกระแสคือ

กระแส (kA) แรงดัน (kV)

1.5 249

3.0 259

5.0 269

10.0 284

15.0 301

20.0 315

40.0 355

- หม้อแปลงสำหรับการศึกษาเสิร์จฟ้าผ่าสามารถแทนด้วยตัวเก็บประจุต่อกับกราวด์ขนาด 10 nF และไม่มีโหลดต่ออยู่ ซึ่งแทนด้วยตัวต้านทานขนาด 100 M Ω

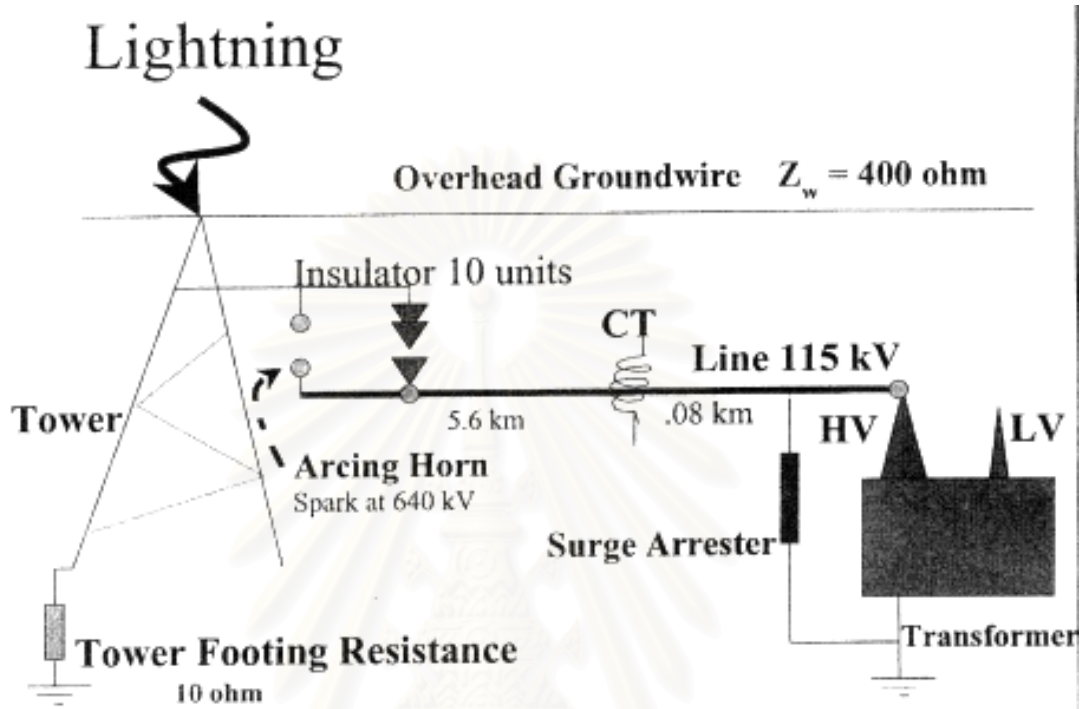
- อุปกรณ์วัดกระแสแทนด้วยตัวเหนี่ยวนำขนาด 1.5 μH

การเกิดฟ้าผ่าบนสายส่งทำให้เกิดคลื่นเดินทางเคลื่อนที่ไปตามสายส่ง เมื่อเคลื่อนที่ไปถึงตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงของเสิร์จอิมพีแดนซ์จะเกิดการสะท้อนกลับ (Reflection) และคลื่นส่งผ่าน ซึ่งสามารถทำให้เกิดผลของแรงดันเกินที่ตำแหน่งดังกล่าวได้ วงจรในการศึกษาทรานเซียนต์เนื่องจากฟ้าผ่าจึงแทนด้วยเสิร์จอิมพีแดนซ์และเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ไปบนสายส่ง (ความเร็วของคลื่นบนสายในอากาศประมาณ 3×10^8 เมตรต่อวินาที)

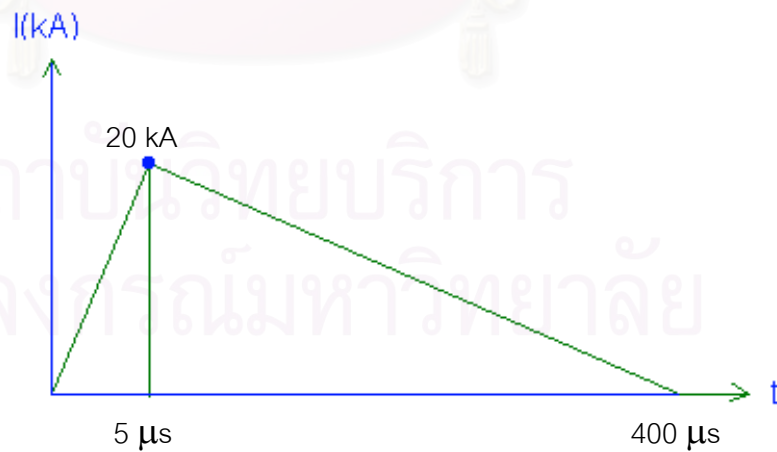
ดังนั้นสามารถสร้างรูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่าจากแหล่งกำเนิดกระแสแบบพัลส์ (ILightning 0 1 PULSE 0 +20k 0 5u 395u 1p 1) แสดงดังรูปที่ 4.13 จากไดอะแกรมของวงจรกรณีศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.14 สามารถสร้างซิมเมติกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.15 และใช้การวิเคราะห์แบบ

ทรานเซียนต์มีค่า <Tstep> เท่ากับ 0.05 μs และ <Tstop> เท่ากับ 0.5 ms

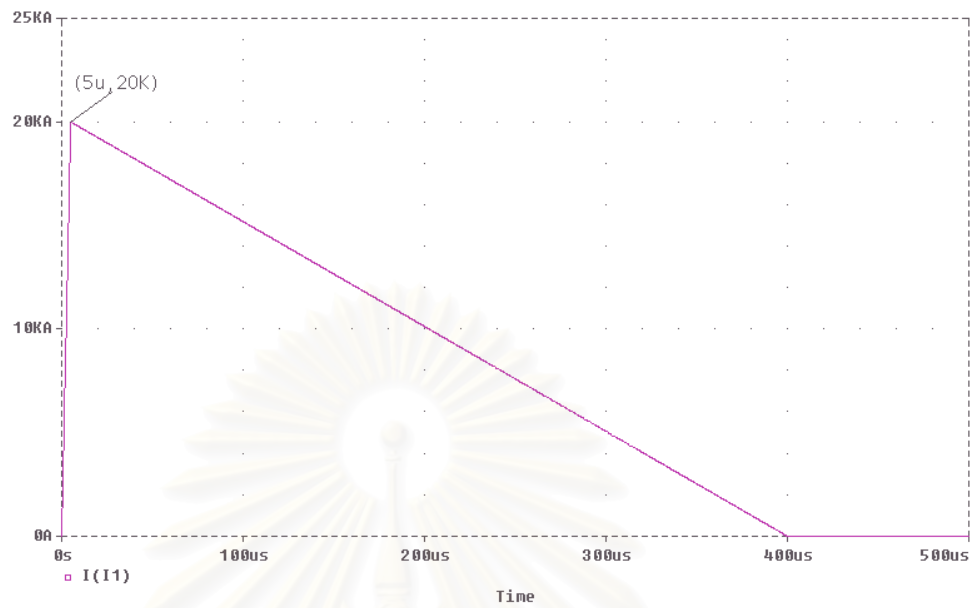
โดยไฟล์อินพุทของวงจรดังแสดงในง.8 ของภาคผนวก ง และแรงดันที่ยอดและบัส 4 ของวงจรกรณีศึกษาจากโปรแกรมพีเอสไปซ์แสดงดังรูปที่ 4.16 และแรงดันที่ยอดและบัส 4 ของวงจรกรณีศึกษาจากโปรแกรมอีเอ็มทีพีแสดงดังรูปที่ 4.17



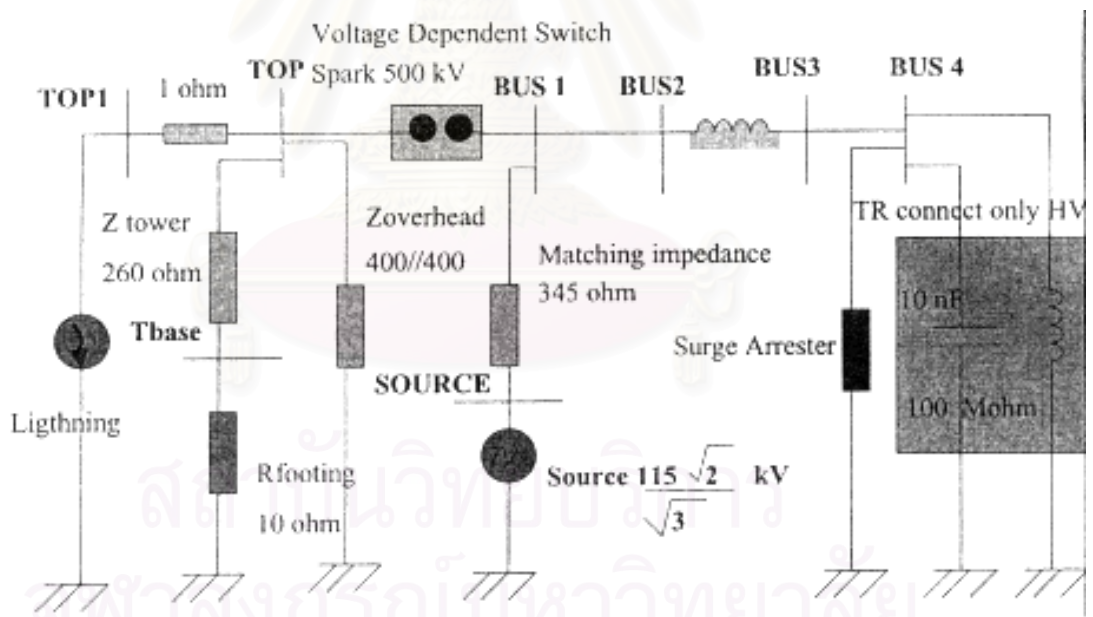
รูปที่ 4.11 วงจรกรณีศึกษาของทราวเนียนต์จากฟ้าผ่า



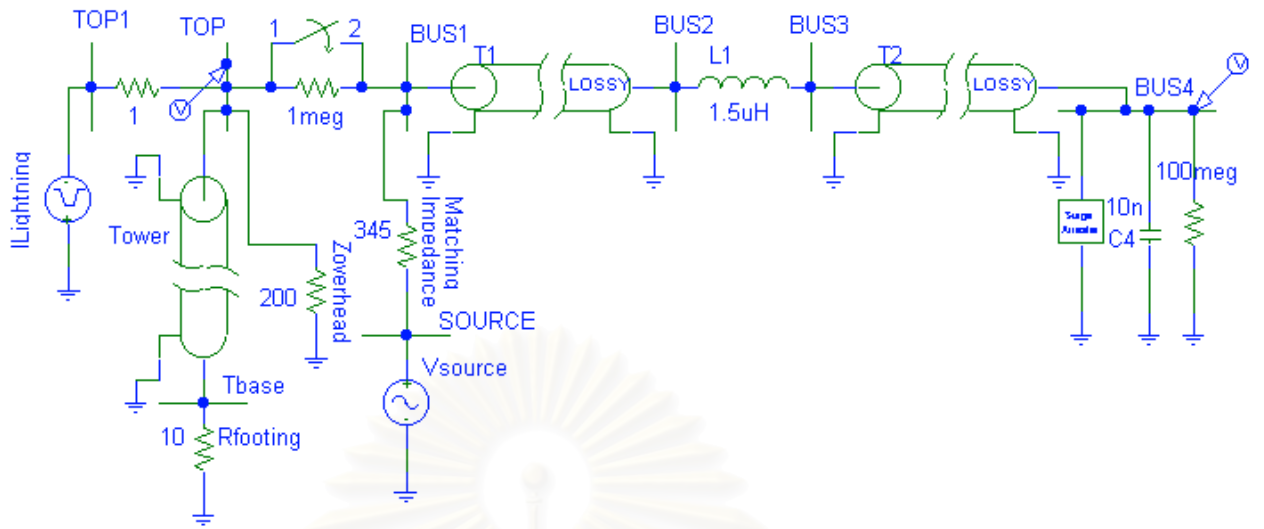
รูปที่ 4.12 รูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่า



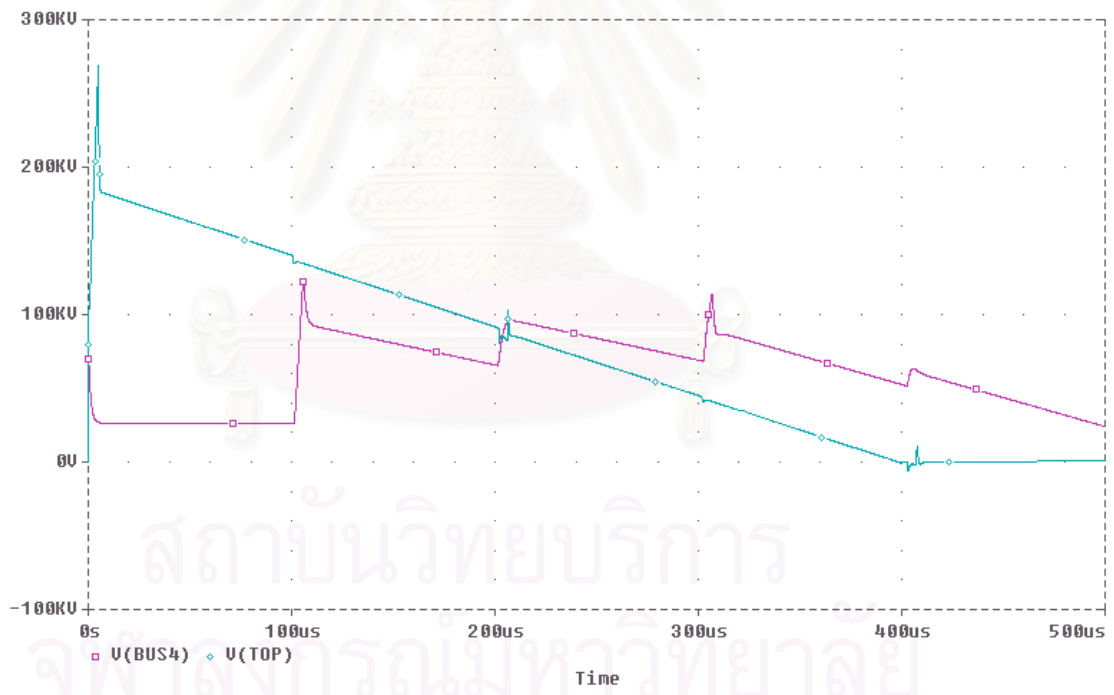
รูปที่ 4.13 รูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่าจากโปรแกรมพีเอสไปท์



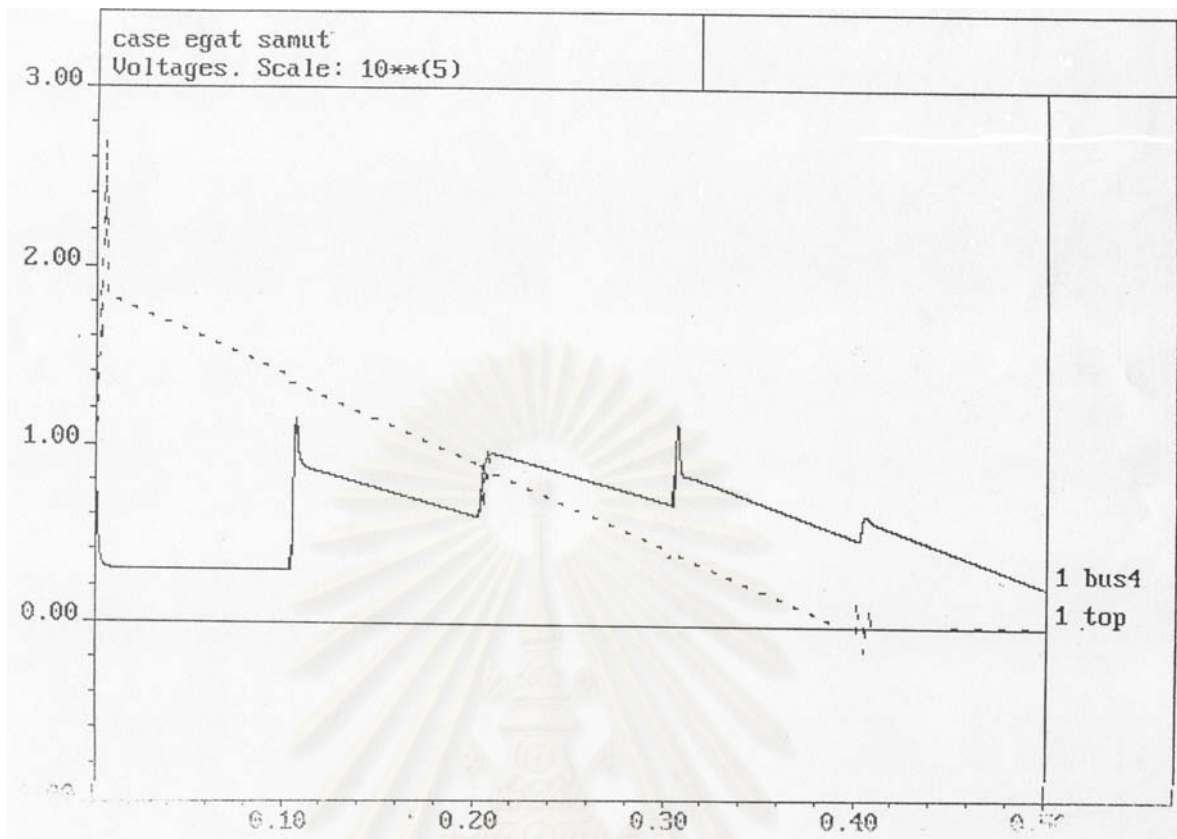
รูปที่ 4.14 ไดอะแกรมของวงจรกรณีศึกษาของทวานเซียนด์จากฟ้าผ่า



รูปที่ 4.15 ซักิมเมติกไดอะแกรมของวงจรกรณีศึกษาของทราวานเซี่ยนต์ฟ้าผ่า



รูปที่ 4.16 แรงดันที่ยอดเสาส่งและบัส 4 ของวงจรกรณีศึกษาจากโปรแกรมพีสไปซ์



รูปที่ 4.17 แรงดันที่ยอดเสาส่งและบัส 4 ของวงจรกรณีศึกษาจากโปรแกรมอีเอ็มทีพี

พิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมพีสไปซ์และจากโปรแกรมอีเอ็มทีพี ได้รูปคลื่นของแรงดันใกล้เคียงกัน

เมื่อฟ้าผ่าลงที่เสาส่งจะเกิดแรงดันขึ้นที่สายดินและในขณะเดียวกันก็เกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่สายเฟส ทำให้เกิดแรงดันระหว่างสายเฟสและสายดิน ถ้าแรงดันที่เกิดขึ้นนี้มีค่ามากจะทำให้เกิดวาทไฟที่ฉนวนที่เสาด้วย

พิจารณาแรงดันบนยอดเสาได้ดังสมการ

$$V_T = \frac{IZ}{\left(1 + \frac{Z}{Z_s}\right)} \quad (4.2)$$

$$Z = \frac{Z_T}{\left(1 + \frac{2Z_T}{Z_g}\right)} \quad (4.3)$$

โดยที่ I : กระแสฟ้าผ่า

Z_T : เสรีจิมพีแดนซ์ของเสาส่ง

Z_g : เสรีจิมพีแดนซ์ของสายดิน

Z_S : เสรีจิมพีแดนซ์ของลัมฟ้าผ่า

แรงดันคร่อมฉนวนลูกถ้วยหาได้ดังนี้

แรงดันบนยอดเสาเท่ากับ V_T

แรงดันที่สายเฟสเท่ากับ KV_T

แรงดันคร่อมฉนวนเท่ากับ $V_T(1-K)$

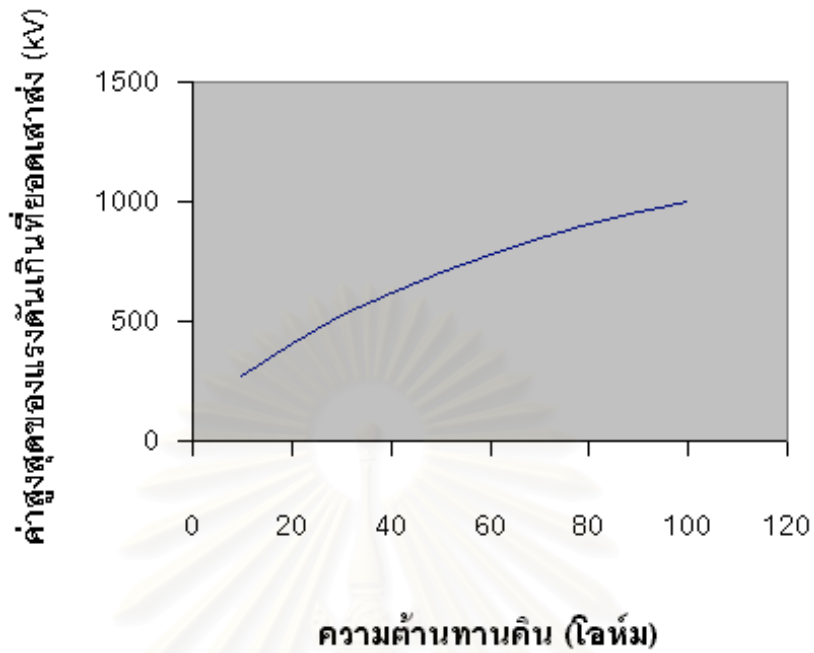
โดยทั่วไป K มีค่าประมาณ 0.15-0.30

เมื่อพิจารณาความแตกต่างของฟ้าผ่าที่เสาและกลางสายที่กระแสฟ้าผ่าขนาดเท่ากัน จะทำให้เกิดแรงดันที่ระบบไฟฟ้าไม่เท่ากัน เนื่องจากในกรณีของฟ้าผ่าที่เสาส่ง เสรีจิมพีแดนซ์รวมเกิดจาก $Z_T // Z_T // Z_g$ ส่วนกรณีของฟ้าผ่าที่กลางสายดิน เสรีจิมพีแดนซ์รวมเกิดจาก $Z_g // Z_g$ จะเห็นได้ว่าเสรีจิมพีแดนซ์ของฟ้าผ่าที่เสาส่งมีค่าน้อยกว่าที่กลางสาย ดังนั้นกระแสฟ้าผ่าขนาดเท่ากัน การเกิดฟ้าผ่าที่กลางสายทำให้เกิดแรงดันในระบบสูงกว่าการเกิดฟ้าผ่าที่เสาส่ง แต่ในทางปฏิบัติการเกิดฟ้าผ่าที่กลางสายเป็นไปได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากฟ้าผ่าส่วนใหญ่จะลงที่ปลายแหลมกว่า จึงลงที่เสาส่งมากกว่าที่กลางสาย

4.3.1 ผลของความต้านทานดินที่เสาส่ง

จากวงจรกรณีศึกษาในรูปที่ 4.11 เปลี่ยนค่าความต้านทานดินที่เสาส่งตั้งแต่ 10 ถึง 100 โอห์ม จะได้ผลของแรงดันยอดสูงสุดที่ความต้านทานดินค่าต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.18

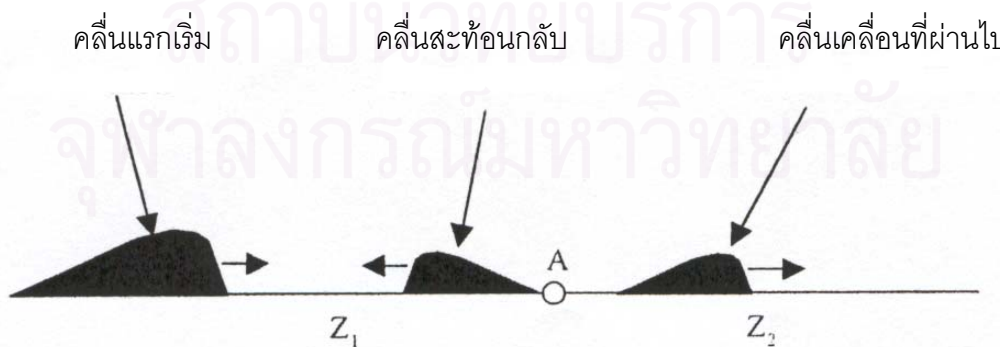
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.18 ผลของแรงดันเกินสูงสุดที่ยอดเสาสูงที่ค่าความต้านทานดินค่าต่าง ๆ

จะเห็นได้ว่าเมื่อความต้านทานดินมีค่ามากขึ้น แรงดันเกินสูงสุดที่ยอดเสาสูงจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

ความต้านทานดินที่เสาสูงมีผลอย่างมากต่อแรงดันที่เกิดขึ้นที่เสาสูง เพราะถ้าความต้านทานดินที่เสาสูงน้อย จะทำให้ค่าแรงดันที่เสาสูงน้อยลงด้วยดังแสดงในสมการ (4.2) โดยใช้ทฤษฎีของคลื่นเคลื่อนที่ในสายส่ง ที่จุดต่อระหว่างสายที่มีเสิร์จอิมพีแดนซ์ Z_1 และ Z_2 เมื่อมีคลื่นวิ่งเข้าไปที่จุดต่อนี้ คลื่นส่วนหนึ่งจะผ่านไป และคลื่นอีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 คลื่นแรกเริ่ม, คลื่นสะท้อนกลับและคลื่นส่งผ่าน

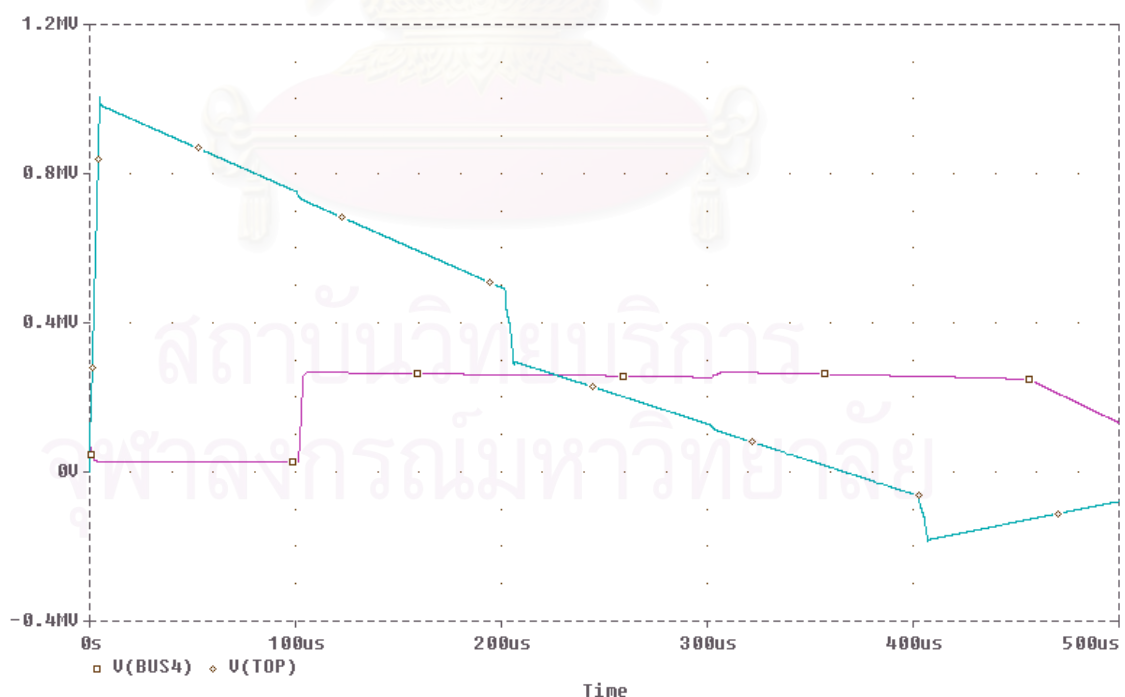
คลื่นสะท้อนกลับมีอัตราส่วนเทียบกับคลื่นแรกเริ่มที่เข้ามาเป็นไปตามสมการ (4.4)

$$\Gamma = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_1 + Z_2)} \quad (4.4)$$

จะเห็นได้ว่าถ้า Z_2 มีค่ามากกว่า Z_1 จะทำให้เกิดแรงดันสะท้อนกลับมีค่าเป็นบวก และถ้า Z_2 มีค่าน้อยมากจนเข้าใกล้ศูนย์ จะทำให้แรงดันสะท้อนกลับมีค่าเป็นลบและเท่ากับคลื่นที่เกิดขึ้นเริ่มแรก

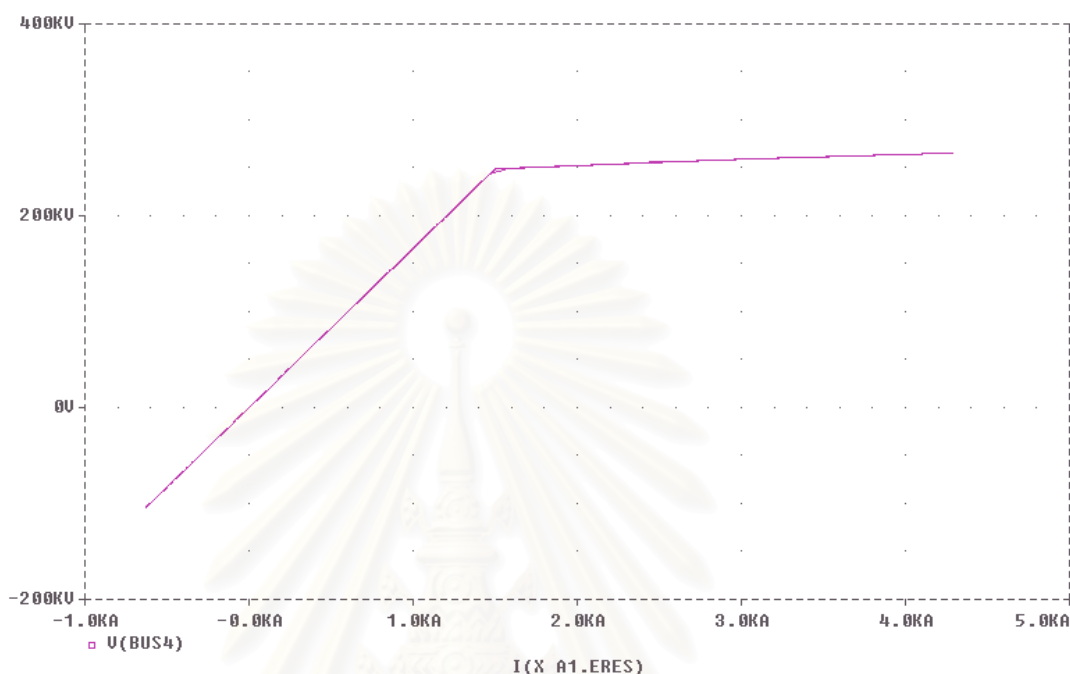
ดังนั้นถ้าความต้านทานดินที่เสาสูงมีค่าสูงกว่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาสูง จะทำให้คลื่นสะท้อนกลับขึ้นมาเป็นบวก แรงดันที่เสาสูงจะมีค่าสูงขึ้น แต่ถ้าความต้านทานดินที่เสาสูงมีค่าต่ำกว่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาสูง จะทำให้คลื่นสะท้อนกลับขึ้นมาเป็นค่าลบ แรงดันที่เสาสูงจะมีค่าต่ำลง

ในขณะที่แรงดันเกินที่ยอดเสาสูงมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความต้านทานดินมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่แรงดันที่บัส 4 จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นถึงช่วงหนึ่งที่แรงดันเริ่มคงที่ เนื่องจากผลของกับดักฟ้าผ่า พิจารณาแรงดันที่ยอดเสาสูงและที่บัส 4 เมื่อความต้านทานดินเท่ากับ 100 โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แรงดันที่ยอดเสาสูงและบัส 4 เมื่อความต้านทานดินเท่ากับ 100 โอห์ม

จะเห็นว่า แรงดันที่บัส 4 ค่อนข้างคงที่ แม้ว่าแรงดันที่ยอดเสาสูงจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความต้านทานดินมากขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของแรงดันและกระแสของกับดักฟ้าผ่าดังแสดงในรูปที่ 4.21 ดังนั้นการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าจะช่วยป้องกันแรงดันเกินที่หม้อแปลงไฟฟ้าได้

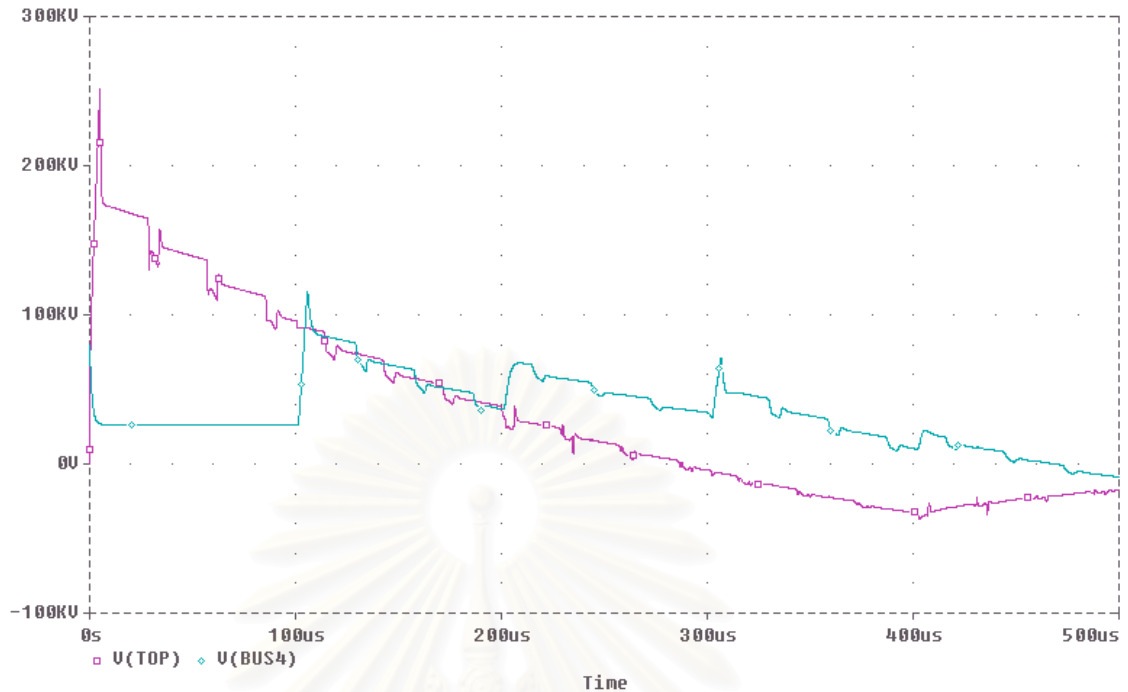


รูปที่ 4.21 คุณสมบัติของแรงดันและกระแสของกับดักฟ้าผ่า

4.3.2 ผลของเสาสูงที่อยู่ข้างเคียง

จากวงจรกรณีศึกษาในรูปที่ 4.11 เมื่อมีเสาสูงอยู่ข้างเคียง พิจารณาเฉพาะเสาสูงที่อยู่ถัดไปมีระยะห่างระหว่างกัน 800 เมตร จะได้ผลของแรงดันยอดและบัส 4 ที่มีเสาสูงอยู่ข้างเคียงดังแสดงในรูปที่ 4.22

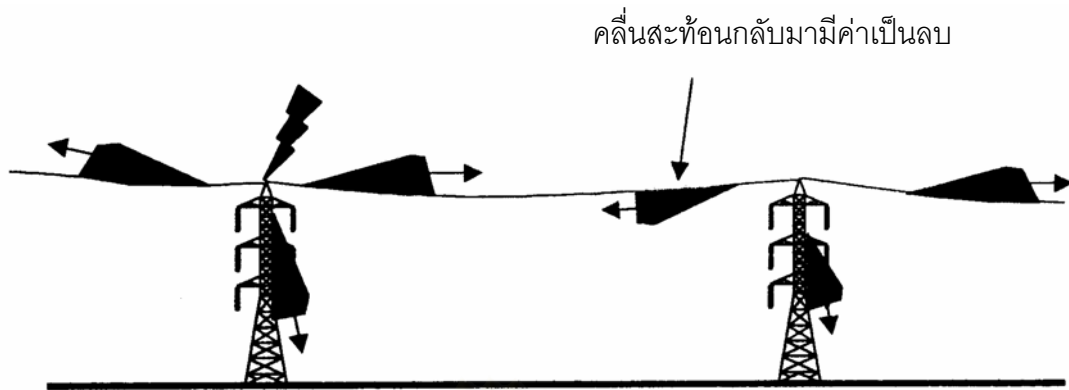
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.22 ผลของแรงดันยอดเสาส่งและบัส 4 ที่มีเสาส่งอยู่ข้างเคียง

จะเห็นได้ว่าแรงดันที่ยอดเสาส่งและบัส 4 มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาผลของเสาส่งที่อยู่ข้างเคียงด้วย

ผลของเสาส่งที่อยู่ข้างเคียงทำให้คลื่นสะท้อนกลับมาจากเสาข้างเคียงเป็นลบ จึงทำให้คลื่นรวมมีค่าลดลง ดังแสดงดังรูปที่ 4.23 เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงที่เสาส่งทางด้านซ้ายมือ เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปยังเสาส่งข้างเคียงทางขวามือ จะเกิดคลื่นสะท้อนกลับมาเป็นลบ เนื่องจากคลื่นเคลื่อนที่ในสายดินที่มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์ Z_g เมื่อไปถึงเสาส่งที่มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์ $Z_g // Z_T$ จึงมีค่าอิมพีแดนซ์น้อยกว่า Z_g ทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับมาเป็นลบ เวลาที่คลื่นสะท้อนกลับมาใช้เวลาในการเคลื่อนที่รวมจากเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ไปยังเสาข้างเคียงและเคลื่อนที่กลับมา ดังนั้นถ้าเสาส่งมีระยะห่างระหว่างกัน 300 เมตร เวลาที่ใช้สำหรับคลื่นสะท้อนกลับมาเท่ากับ $(300+300)/300 = 2$ ไมโครวินาที และบางครั้งเวลานี้นานเกินไปที่คลื่นสะท้อนกลับมาอาจลบยอดคลื่นไม่ทัน ทำให้แรงดันที่เสาส่งไม่ลดลงเนื่องจากคลื่นสะท้อนกลับมา

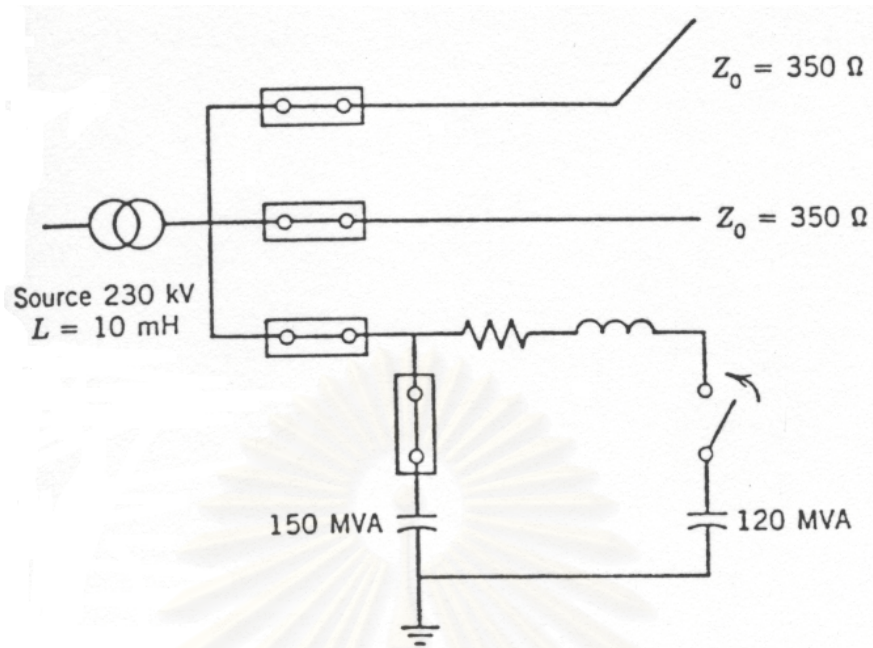


รูปที่ 4.23 คลื่นเคลื่อนที่และสะท้อนกลับจากเสาข้างเคียง

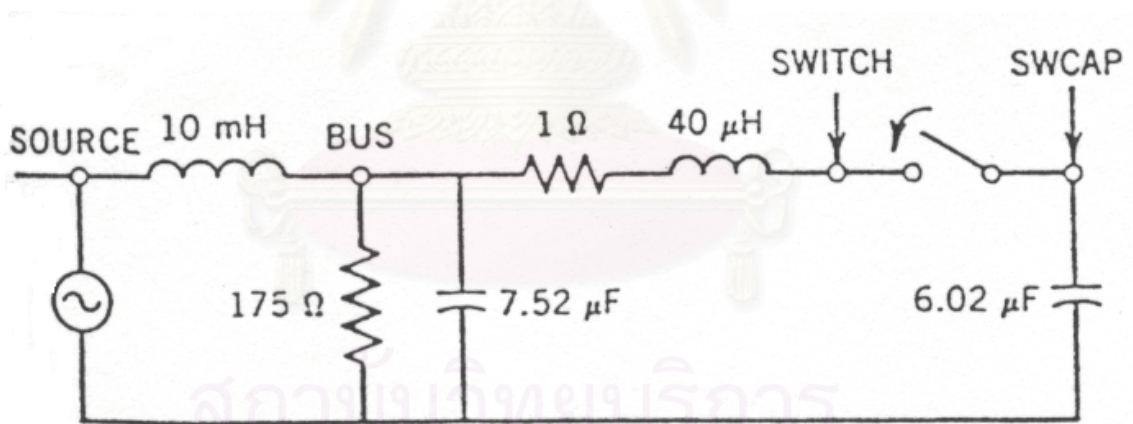
4.4 วงจรกรณีศึกษาของสวิตชิงตัวเก็บประจุ

พิจารณาวงจรกรณีศึกษาในรูปที่ 4.24 ตัวเก็บประจุตัวที่หนึ่งขนาด 150 MVA ถูกกระตุ้นแล้วบนบัสของสถานีไฟฟ้าย่อย 230 kV ขณะที่ตัวเก็บประจุตัวที่สองจะถูกกระตุ้นโดยการปิดสวิตช์ที่เวลา 0.1 ms อิมพีแดนซ์ระหว่างตัวเก็บประจุประกอบด้วย $R = 1 \Omega$ และ $L = 40 \mu\text{H}$ โดยมีสายส่งไฟฟ้า 2 เส้นต่ออยู่ที่บัส ไดอะแกรมของวงจรกรณีศึกษาสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 4.25 โดยความต้านทานประสิทธิผลของสายส่งไฟฟ้าในกรณีคือ 175Ω , ขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่หนึ่งเท่ากับ $\frac{150}{120\pi \times (230)^2} = 7.52 \mu\text{F}$, ขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่สองเท่ากับ $\frac{120}{120\pi \times (230)^2} = 6.02 \mu\text{F}$

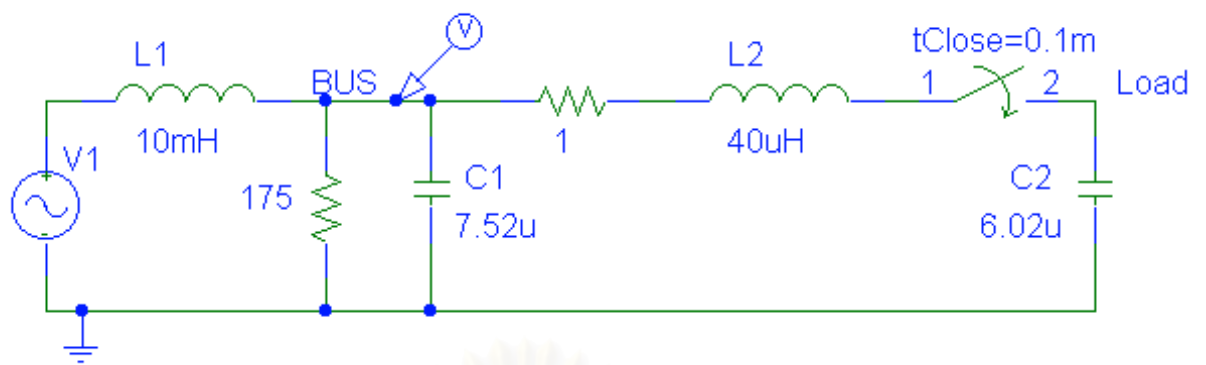
สามารถสร้างซิมูเลชันไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.26 และใช้การวิเคราะห์แบบทรานเซียนต์มีค่า $\langle T_{\text{step}} \rangle$ เท่ากับ 50 ns และ $\langle T_{\text{stop}} \rangle$ เท่ากับ 25 ms โดยไฟล์อินพุทของวงจรถูกแสดงใน Fig. 9 ของภาคผนวก ง และผลลัพธ์ของกระแสอินรัชของตัวเก็บประจุตัวที่สองแสดงดังรูปที่ 4.27 และแรงดันบัสของวงจรกรณีศึกษาจากโปรแกรมพีเอสไปซ์แสดงดังรูปที่ 4.28 และของแรงดันบัสของวงจรกรณีศึกษาจากโปรแกรมอีเอ็มทีพีแสดงดังรูปที่ 4.29



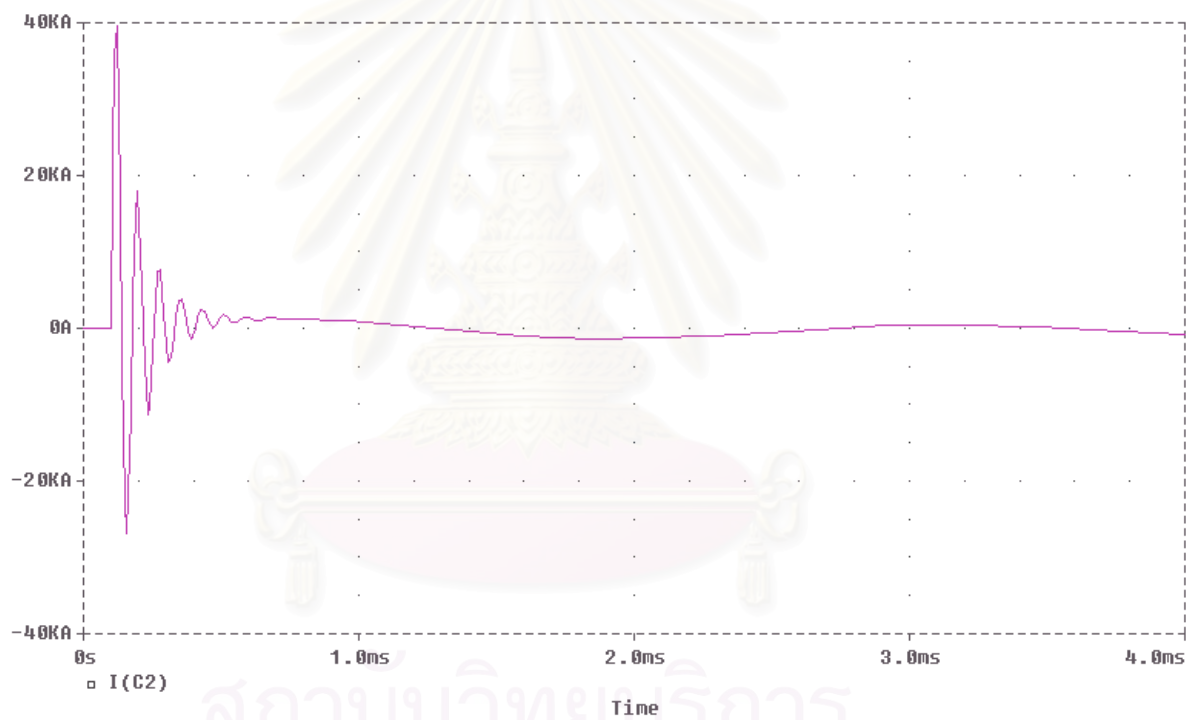
รูปที่ 4.24 วงจรกรณีศึกษาของทรานเซียนต์ตัวเก็บประจุ



รูปที่ 4.25 ไดอะแกรมของวงจรกรณีศึกษาของทรานเซียนต์ตัวเก็บประจุ

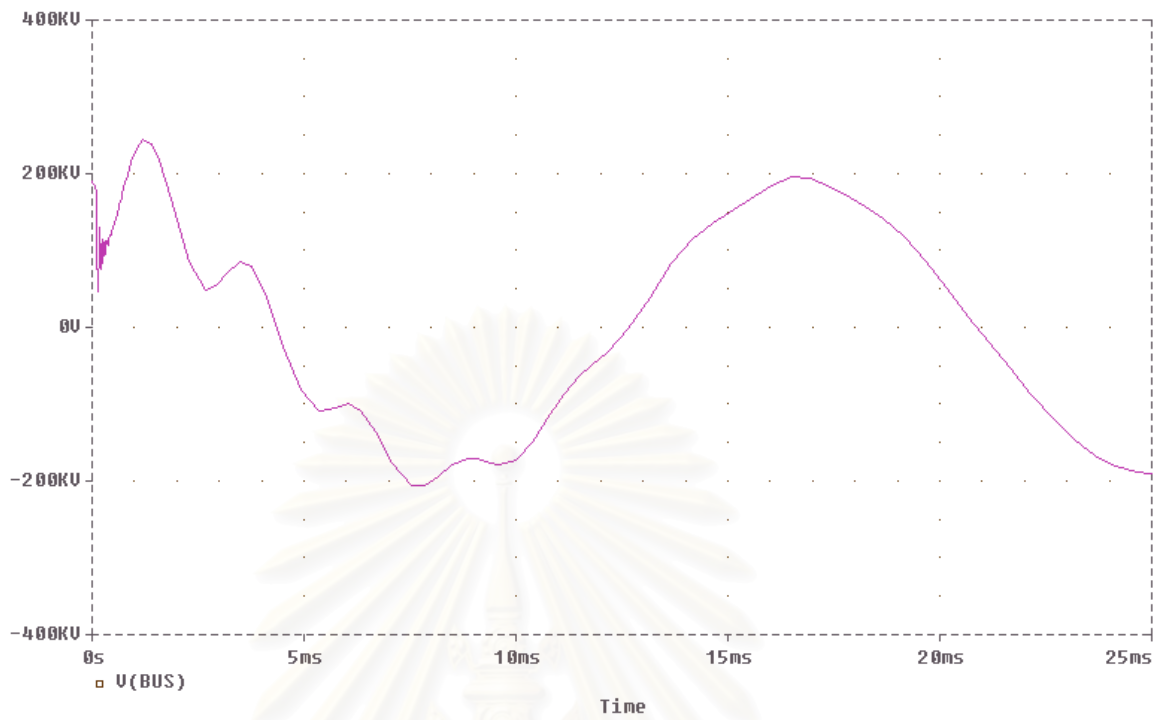


รูปที่ 4.26 ซิมูเลชันไดอะแกรมของวงจรกรณีศึกษาทรานเซียนต์ตัวเก็บประจุ

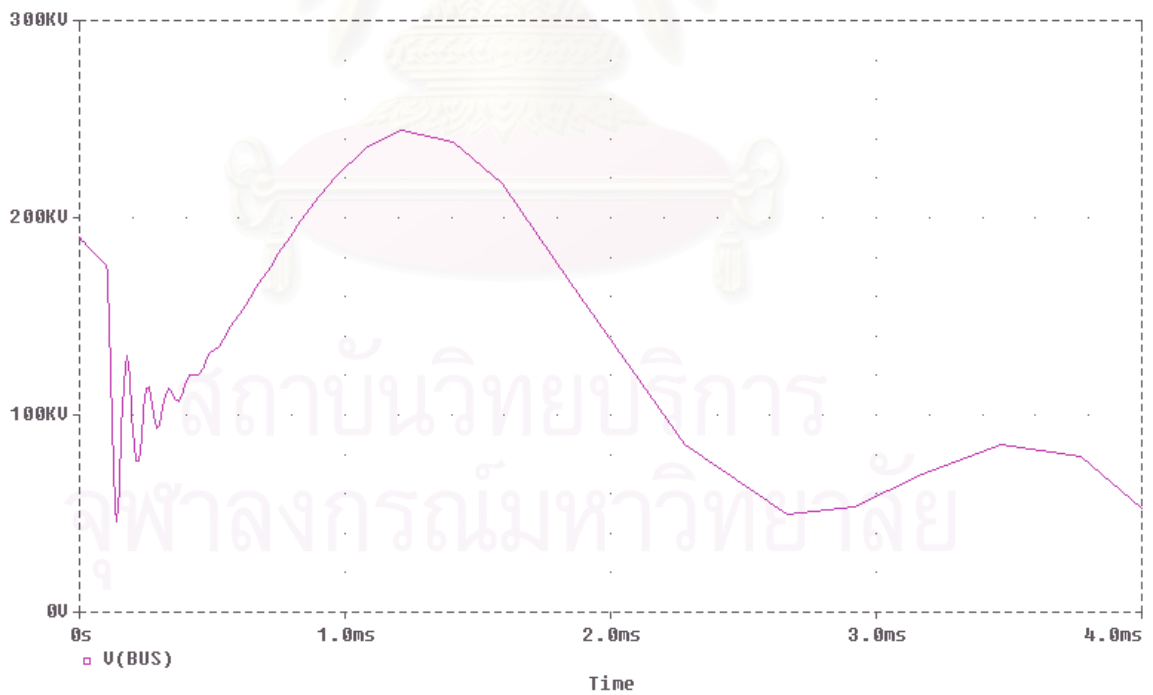


รูปที่ 4.27 กระแสในรัชของตัวเก็บประจุตัวที่สอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



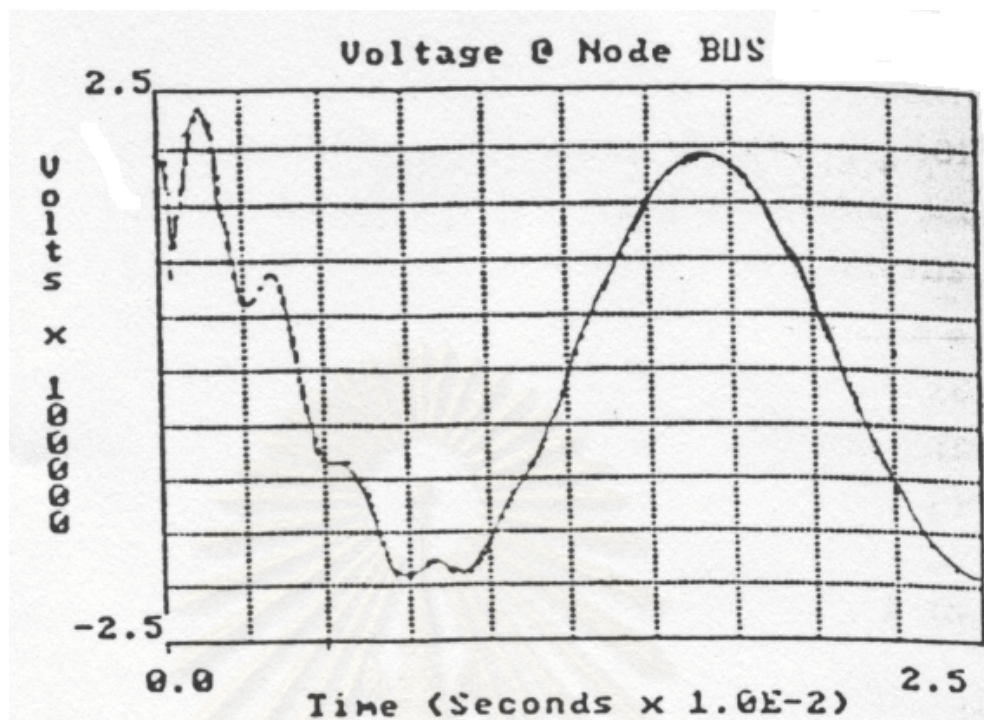
(ก)



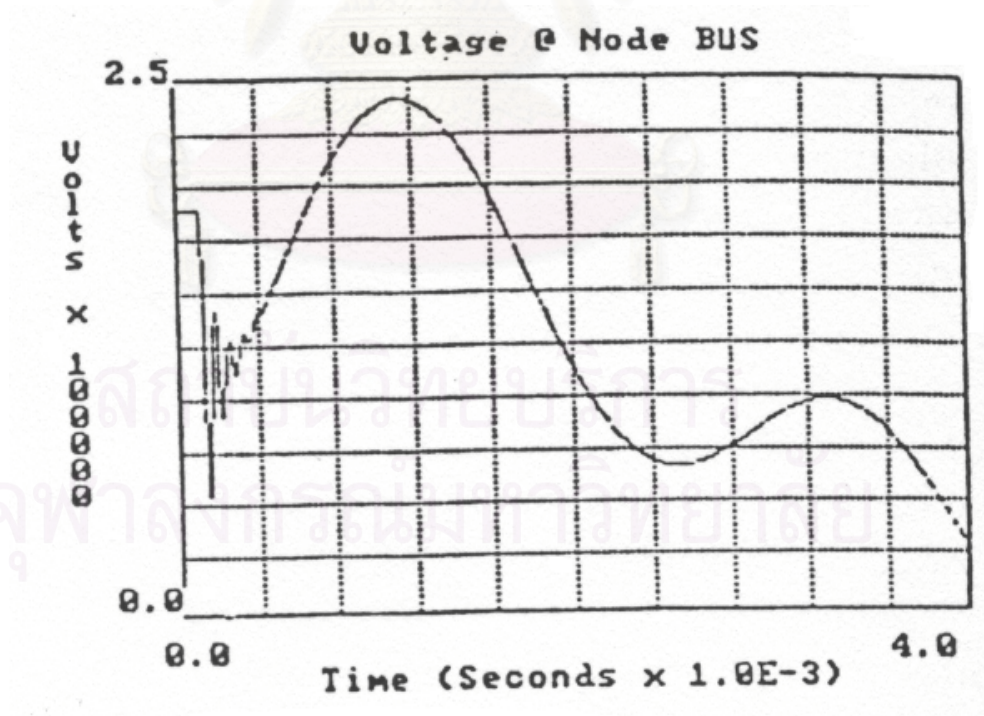
(ข)

รูปที่ 4.28 แรงดันบัสดของวงจรกรณีศึกษาจากโปรแกรมพีเอสไปซ์

(ก) ในช่วงเวลา 25 ms (ข) ในช่วงเวลา 4 ms



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.29 แรงดันบั๊สของวงจรกรณีศึกษาจากโปรแกรมอีเอ็มทีพี

(ก) ในช่วงเวลา 25 ms (ข) ในช่วงเวลา 4 ms

พิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมพีเอสไปซ์และจากโปรแกรมอีเอ็มทีพี จากรูปคลื่นของแรงดันใกล้เคียงกัน

จากรูปที่ 4.27 จะเห็นได้ว่าเมื่อปิดวงจรสวิตช์ที่เวลา 0.1 ms จะมีการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าระหว่างตัวเก็บประจุทั้งสอง โดยความถี่พิจารณาได้จากค่าความจุไฟฟ้าทั้งสองและค่าความ

$$\text{เหนี่ยวนำ } 40 \mu\text{H} \text{ จะได้ } f_{01} = \frac{10^6}{2\pi \left[40 \times \left(\frac{7.52 \times 6.02}{7.52 + 6.02} \right) \right]} = 13.76 \text{ kHz}$$

เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมพีเอสไปซ์จะให้ความถี่ในตอนเริ่มแรก

$$f_{01} = \frac{10^6}{(213.43 - 140.39)} = 13.69 \text{ kHz} \text{ มีค่าใกล้เคียงกัน}$$

การแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าระหว่างตัวเก็บประจุทั้งสองผ่านตัวเหนี่ยวนำของแหล่งกำเนิด

$$\text{ขนาด } 10 \text{ mH} \text{ เพื่อเข้าสู่สมดุล จะให้ความถี่ในขณะต่อมา } f_{02} = \frac{10^6}{2\pi \sqrt{(10^4 \times (7.52 + 6.02))}} = 433 \text{ Hz}$$

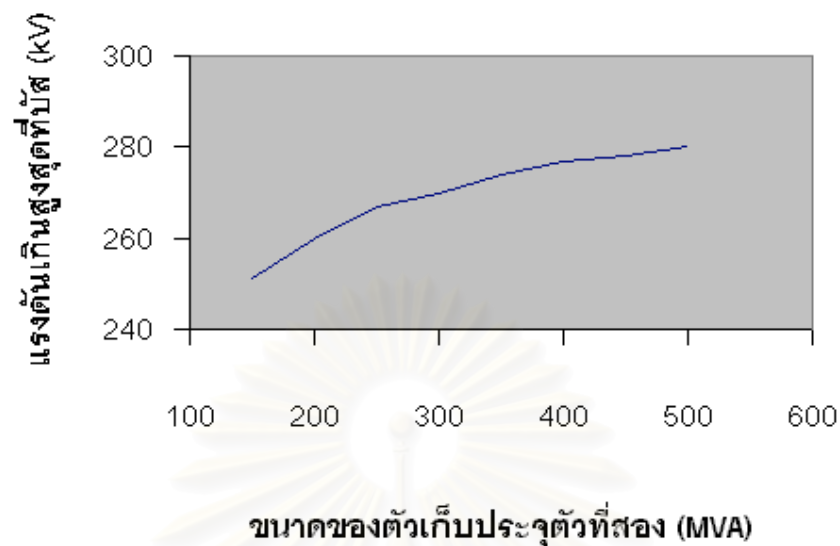
เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรมพีเอสไปซ์จะให้ความถี่ในขณะต่อมา

$$f_{02} = \frac{10^3}{(3.63 - 1.33)} = 435 \text{ Hz} \text{ มีค่าใกล้เคียงกัน}$$

4.4.1 ผลของขนาดของตัวเก็บประจุ

จากวงจรกรณีศึกษาในรูปที่ 4.24 เปลี่ยนขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่สองตั้งแต่ 150 ถึง 1,000 MVA จะได้ผลของแรงดันเกินสูงสุดที่บัสที่ขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่สองค่าต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.30

จะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่สองเพิ่มขึ้น แรงดันเกินที่บัสสูงสุดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ที่สภาวะคงตัวถ้าขนาดของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันสูงสุดจะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นจึงสามารถควบคุมขนาดของแรงดันได้ โดยการใช้น้ำขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสม

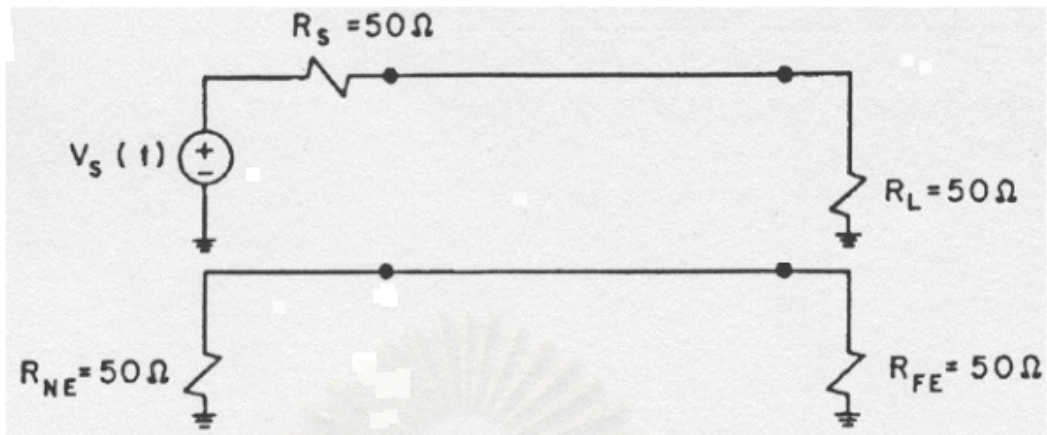


รูปที่ 4.30 ผลของแรงดันเกินสูงสุดที่บัสที่ขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่สองค่าต่าง ๆ

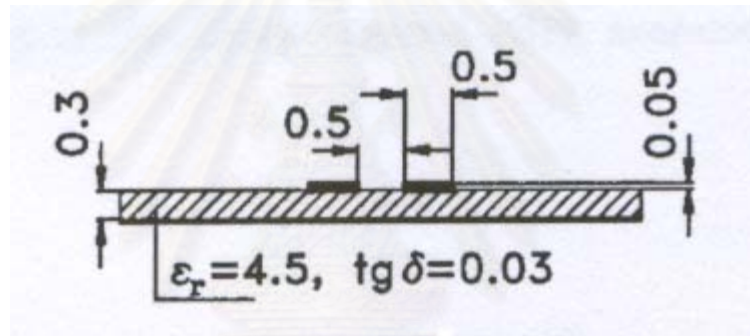
4.5 วงจรกรณีศึกษาของแบบจำลองสายส่งหลายเส้น [11]

พิจารณาวงจรกรณีศึกษาในรูปที่ 4.31 ประกอบด้วยสายส่งขนาดเล็กสมมาตรมีการเชื่อมโยงระหว่างกัน 2 เส้น ฐานหนา 0.3 mm, สภาพความต้านทานสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) เท่ากับ 4.5, แทนเจนต์ของการสูญเสียเป็น 0.03 (ที่ความถี่ 10 GHz) และเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับความถี่, ความนำไฟฟ้า (σ) ของตัวนำสมมติว่ามีค่าเป็น 14 mS/m (ค่านี้ต่ำกว่าความนำไฟฟ้าของทองแดงประมาณ 4 เท่าเพื่เน้นผลของกำลังสูญเสีย), ความหนาของตัวนำเป็น 50 μm , ความกว้างของตัวนำเป็น 0.5 mm, ระยะห่างระหว่างตัวนำเป็น 0.5 mm, ความยาวสาย 300 mm

รูปที่ 4.32 แสดงภาพตัดขวางของสายส่ง ขั้วหนึ่งของสายถูกกระตุ้นด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันพัลส์ที่มีขนาด 2 V ความกว้างพัลส์ 1 ns มีความต้านทานภายใน 50 Ω , และอีก 3 ขั้วที่เหลือต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน 50 Ω ลงกราวด์



รูปที่ 4.31 วงจรกรณีศึกษาของแบบจำลองสายส่งหลายเส้น



รูปที่ 4.32 หน้าตัดขวางของสายส่งขนาดเล็ก (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

ที่ความถี่อ้างอิง 10 GHz [11] ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็นดังนี้

$$[L] = \begin{bmatrix} 307.4 & 41.3 \\ 41.3 & 307.4 \end{bmatrix} \text{ nH/m}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 117.5 & -5.8 \\ -5.8 & 117.5 \end{bmatrix} \text{ pF/m}$$

$$[R] = \begin{bmatrix} 93.50 & 9.69 \\ 9.69 & 93.50 \end{bmatrix} \text{ } \Omega/\text{m}$$

$$[G] = \begin{bmatrix} 192.6 & -3.0 \\ -3.0 & 192.6 \end{bmatrix} \text{ mS/m}$$

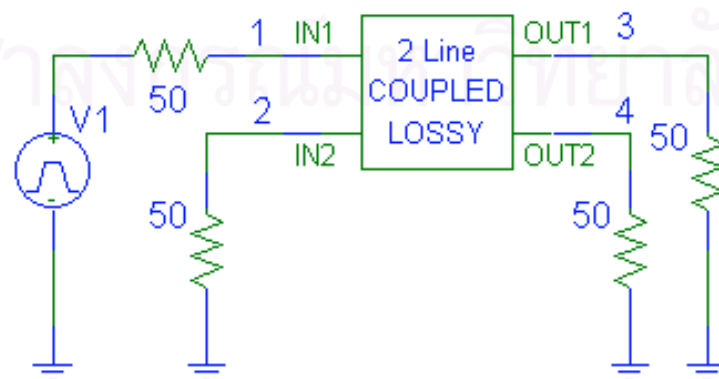
$$[S_v] = \begin{bmatrix} 0.7071 & -0.7071 \\ 0.7071 & 0.7071 \end{bmatrix} \text{ V}$$

$$[S_i] = \begin{bmatrix} 12.63 & -15.18 \\ 12.63 & 15.18 \end{bmatrix} \text{ mA}$$

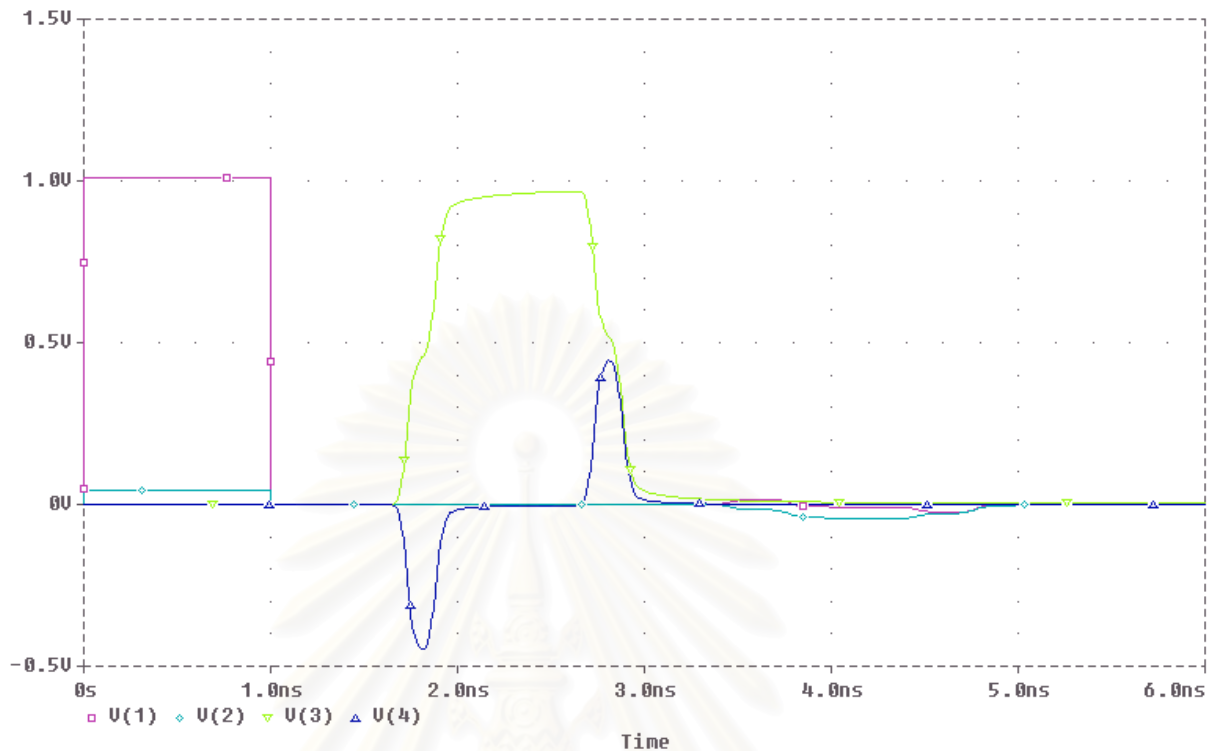
$$[Z_c] = \begin{bmatrix} 51.29 & 4.71 \\ 4.71 & 51.29 \end{bmatrix} \Omega$$

โดยที่ส่วนจินตภาพของเมตริกซ์เหล่านี้มีขนาดเล็กมากและสามารถละเลยได้ ความเร็ว Mode ของ Mode 1 และ 2 เป็น $c_{\phi_1} = 160.2 \text{ mm/s}$ และ $c_{\phi_2} = 174.6 \text{ mm/s}$ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนจากความสูญเสียของตัวนำเป็น $\alpha_{c_1} = 0.9214 \text{ Np/m}$ และ $\alpha_{c_2} = 0.8997 \text{ Np/m}$ และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนจากความสูญเสียไดอิเล็กตริกเป็น $\alpha_{d_1} = 5.296 \text{ Np/m}$ และ $\alpha_{d_2} = 4.543 \text{ Np/m}$

วงจรร้อยของแบบจำลองของสายส่ง 2 เส้นนี้ [11] แสดงใน ง.10 ของภาคผนวก ง สามารถสร้างซิมเมติกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.33 และใช้การวิเคราะห์แบบทรานเซียนต์มีค่า $\langle T_{\text{step}} \rangle$ เท่ากับ 10 ps และ $\langle T_{\text{stop}} \rangle$ เท่ากับ 6 ns โดยไฟล์อินพุทของวงจรถัดแสดงใน ง.11 ของภาคผนวก ง และแรงดันที่แต่ละขั้วของสายส่งแสดงดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.33 ซิมเมติกไดอะแกรมของวงจรรณีศึกษาของแบบจำลองสายส่งหลายเส้น

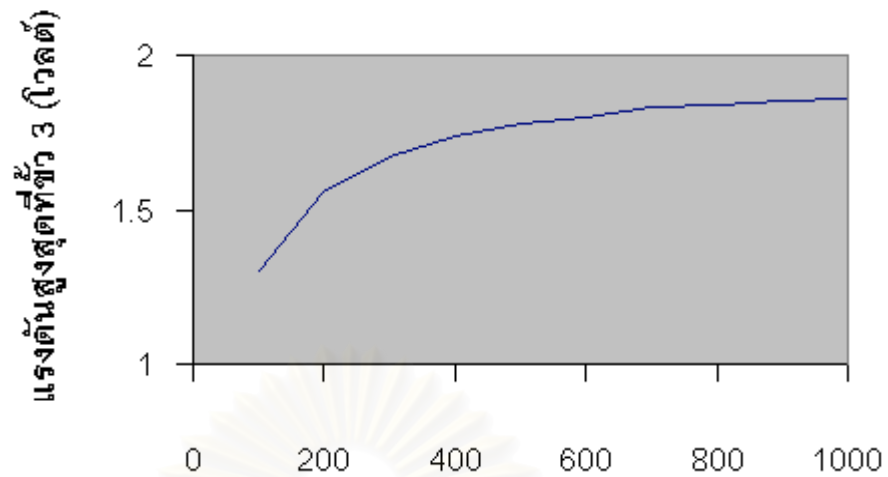


รูปที่ 4.34 แรงดันที่แต่ละขั้วของสายส่ง

ดังนั้นสามารถสร้างแบบจำลองสายส่ง 2 เส้นที่มีการเชื่อมโยงและพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่ได้โดยการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จำเป็นก่อนแล้วจึงสร้างแบบจำลองพีสไปซึ้นสำหรับวงจรที่มีสายส่งหลายเส้น แบบจำลองจะยิ่งซับซ้อนขึ้นและการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองจำเป็นต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ [18] ช่วยในการคำนวณ

4.5.1 ผลของความต้านทานที่ขั้วขาออก

พิจารณาวงจรกรณีศึกษาในรูปที่ และเปลี่ยนค่าความต้านทานที่ขั้วขาออกทั้งสองตั้งแต่ 100 ถึง 1,000 โอห์ม จะได้ผลของแรงดันที่ขั้ว 3 ที่ค่าความต้านทานที่ขั้วขาออกทั้งสองค่าต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.35



ความต้านทานที่ข้าวออกทั้งสอง (โหล่ม)

รูปที่ 4.35 ผลของแรงดันที่ข้าว 3 ที่ค่าความต้านทานที่ข้าวออกทั้งสองค่าต่าง ๆ

จะเห็นได้ว่าเมื่อความต้านทานที่ข้าวออกทั้งสองมีค่ามากขึ้น แรงดันสูงสุดที่ข้าว 3 จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากคลื่นสะท้อนกลับมามีค่ามากขึ้น ทำให้แรงดันที่ข้าว 3 มีค่ามากขึ้นด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

การใช้โปรแกรมพีเอสไปซ์สามารถเลือกการป้อนข้อมูล ทั้งการอ่านข้อมูลจากไฟล์อินพุท และการวาดวงจรโดยการใช้ซิมเมติกไดอะแกรมซึ่งสามารถวาดวงจรที่เอดิเตอร์แล้วทำการจำลองได้ทันที และสามารถตรวจสอบผลลัพธ์ทั้งขนาดและรูปคลื่นของแรงดันและกระแส จึงสามารถใช้งานได้อย่างสะดวก รวดเร็ว สามารถแก้ไข เพิ่มเติมวงจรไฟฟ้าได้ง่าย จึงสามารถนำโปรแกรมนี้มาใช้ในการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าได้ ในการศึกษาเสิร์จเนื่องจากฟ้าผ่า และการศึกษาเบื้องต้นเนื่องจากสวิตชิงเสิร์จ เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ปัญหาแรงดันเกิน โดยการเลือกใช้แบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังตามชนิดของทรานเซียนต์และช่วงเวลาที่ต้องการศึกษา เพราะอุปกรณ์แต่ละชนิดมีผลตอบสนองในช่วงทรานเซียนต์แต่ละช่วงเวลาแตกต่างกัน การเลือกช่วงเวลา (Time Step) ให้มีขนาดละเอียดเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดของทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าที่ต้องการศึกษา และใช้แบบจำลองของวงจรที่สร้างขึ้นในการวิเคราะห์ผลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ในวงจรว่าจะมีผลตอบสนองอย่างไรต่อวงจรไฟฟ้านั้น

จากการใช้โปรแกรมพีเอสไปซ์ซึ่งเป็นโปรแกรมตัวหนึ่งของโปรแกรมจำลองการทำงานของวงจรไฟฟ้า โดยที่โปรแกรมพีเอสไปซ์ที่ใช้เป็นรุ่นแจกจ่ายเวอร์ชัน 8 (Evaluation Version 8) ซึ่งมีข้อจำกัดที่สำคัญคือวงจรที่ทำการจำลองจะต้องมีโหนดทั้งหมดไม่เกิน 64 โหนด, สามารถใช้ซิมเมติกได้เพียงหน้าเดียวต่อหนึ่งวงจรและสามารถใช้พาร์ทบางอย่างได้จำกัดในหนึ่งวงจร ดังนั้นจึงไม่สามารถสร้างแบบจำลองที่มีโครงข่ายขนาดใหญ่ได้ จึงต้องทำการวิเคราะห์เฉพาะส่วนที่สนใจเท่านั้น โดยสมมติฐานว่าส่วนอื่น ๆ ที่อยู่ห่างไกล มีอิทธิพลน้อยมากต่อขอบเขตที่พิจารณา

ในการพิจารณาระบบหลายเฟส ถ้ามีการเชื่อมโยงระหว่างเฟส จะต้องทำการถอดสมการการเชื่อมโยงก่อน แล้วจึงพิจารณาสร้างแบบจำลองจากสมการถอดการเชื่อมโยงที่ได้ จะพบว่าเมื่อจำนวนเฟสเพิ่มมากขึ้น แบบจำลองที่ได้จะซับซ้อนมากขึ้นด้วย และการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลอง จำเป็นต้องใช้โปรแกรมอื่น ๆ ช่วยในการคำนวณ

แรงดันเกินที่เกิดจากภายนอกระบบ เช่นแรงดันเกินจากฟ้าผ่า จะไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันของระบบ แต่แรงดันเกินที่เกิดจากภายในระบบ เช่นแรงดันเกินสวิตชิง จะขึ้นอยู่กับระบบไฟฟ้า ทั้งแหล่งกำเนิด, รูปคลื่นและแรงดันพิกัด แรงดันเกินที่เกิดขึ้นอาจสร้างความเสียหายร้ายแรงให้แก่

อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าได้ ถ้าไม่มีการป้องกันที่ดีพอ ดังนั้นการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าโดยโปรแกรมพีสไปซ์ สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการหาขนาดของแรงดันเกินสูงสุดที่อาจเกิดขึ้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นของการออกแบบและวางแผนป้องกันอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้เกิดความเสียหายน้อยที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

แม้ว่าโปรแกรมพีสไปซ์สามารถวิเคราะห์ทรานเซียนต์ของระบบไฟฟ้ากำลังได้ผลเบื้องต้นในระดับที่น่าพอใจ แต่หากต้องการสร้างแบบจำลองที่มีโครงข่ายขนาดใหญ่ จำเป็นต้องใช้โปรแกรมพีสไปซ์เวอร์ชันสมบูรณ์

เมื่อต้องการศึกษาผลตอบสนองที่ภาวะทรานเซียนต์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยคำนึงถึงผลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น ควรสร้างแบบจำลองโดยพิจารณาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ เช่นแบบจำลองแบบละเอียดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, หม้อแปลงไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น

ในการวิเคราะห์สายส่งไฟฟ้าที่พารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่และมีการเชื่อมโยงหลายเส้น ควรพัฒนาโปรแกรมอื่น ๆ ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จำเป็นในการสร้างแบบจำลองต่อไป

รายการอ้างอิง

- [1] วิชัย จิวรานันตกุล. การวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
- [2] ประดิษฐ์พงษ์ สุขศิริถาวรกุล. การรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์แรงดันเกินสวิตชิงในระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2538.
- [3] Ardito, A. G. Santagostino. A Review of Digital and Analog Methods of Calculation of Overvoltages in Electric Systems. CIGRE Study Committee 33, 1985.
- [4] สำรวัย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพฯ ฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2523.
- [5] Dommel, H. W.. Nonlinear and Time-varying Elements in Digital Simulation of Electromagnetic Transients. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. 90, 1971 : 2561-2567
- [6] Dommel, H. W. and W. S. Meyer. Computation of Electromagnetic Transient. Proceeding of IEEE Vol.62, 1974 : 983-993
- [7] Alessandro Clerici and Leonardo Mazzio. Coordinated Use of TNA and Digital Computer for Switching-Surge Studies : Transient Equivalent of A Complex Network. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol.89, 1970 : 1717-1726
- [8] Morched, A. S. and V. Brandwajn. Transmission Network Equivalent for Electromagnetic Transient Studies. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol.102, 1983 : 2984-2994

- [9] Dommel, H. W.. Digital Computer Solution of Electromagnetic Transient in Single and Multiphase Networks. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol.88, 1969 : 388-399
- [10] Greenwood Allan. Electrical Transients in Power System. Second Edition. New York : Wiley-Interscience, 1991.
- [11] Antonije R. Djordjevic'. SPICE-Compatible Models for Multiconductor Transmission Line in Laplace-Transform Domain. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques Vol.45, 1997.
- [12] Surapol Dumronggittigule. Feeding Network Representation in Switching Overvoltage Calculation. Dr.-Thesis The Norwegian Institute of Technology. Norway, 1983.
- [13] A Guide to Circuit Simulation and Analysis Using PSPICE. Prentice-Hall, 1998.
- [14] William M. Portnoy. PSPICE as A Simulation Tool in Teaching Electrodynamics. Department of Electrical Engineering Texas Tech University Texas.
- [15] คู่มือปฏิบัติการ PSPICE for Windows วิชาวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า 1. ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- [16] คู่มือปฏิบัติการ PSPICE for Windows วิชาวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า 2. ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- [17] Electricity Generating Authority of Thailand 500 kV System. USA : General Electric, 1982.

- [18] Scattering Parameter of Microwave Networks With MTL. Software and User's Manual. cited in Antonije R. Djordjevic'. SPICE-Compatible Models for Multiconductor Transmission Line in Laplace-Transform Domain. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques Vol.45, 1997.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การใช้งานชคีมเมติกไดอะแกรม

ก.1 การสร้างและการแก้ไขการออกแบบ

การเปิดชคีมเมติกเอดิเตอร์ (Schematic Editor)

การเปิดชคีมเมติกเอดิเตอร์ทำได้โดยดับเบิลคลิก (Double-click) บนไอคอนชคีมเมติก (Schematics Icon) ในกลุ่มโปรแกรมไมโครซิม (Microsim Program Group) จะปรากฏชคีมเมติก หน้าใหม่ขึ้นมา



ขณะที่กำลังทำงานบนชคีมเมติกหน้าหนึ่งอยู่ ถ้าต้องการเปิดหน้าใหม่ ทำได้โดยคลิกบน ไอคอนไฟล์ใหม่ (New File Icon)



ในการเปิดไฟล์ที่มีอยู่แล้ว เพื่อทำการแก้ไขชคีมเมติก ทำได้โดยคลิกบนไอคอนเปิดไฟล์ (Open File Icon)



การหาพาร์ท (Parts)

พาร์ทจะเป็นตัวแทนของอุปกรณ์ทางไฟฟ้า เช่นตัวต้านทาน, ไดโอด, แหล่งกำเนิดแรงดัน เป็นต้น เพื่อใช้ในการสร้างแผนภาพวงจร

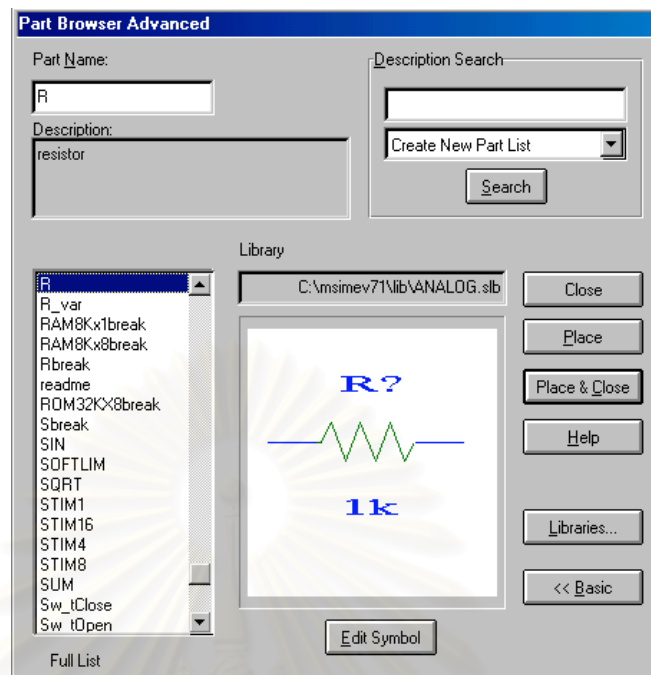
รูปภาพของพาร์ทคือสัญลักษณ์ (Symbol) ที่ถูกเก็บอยู่ในห้องสมุดสัญลักษณ์ (Symbol Library) โดยสามารถใช้สัญลักษณ์ที่มีอยู่ในโปรแกรมพีสไปซ์หรือสร้างสัญลักษณ์ขึ้นมาใหม่และเก็บไว้ในห้องสมุดสัญลักษณ์ที่ต้องการก็ได้

การค้นหาพาร์ทในห้องสมุด

ห้องสมุดสัญลักษณ์ประกอบด้วยสัญลักษณ์ของพาร์ทมากมาย การเลือกพาร์ททำได้ดังนี้

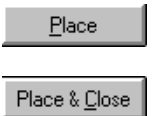
1. คลิกบนไอคอนเลือกพาร์ท (Select Part Icon) เพื่อแสดงกล่องข้อความเบราว์เซอร์พาร์ท (Part Browser Dialog Box)





รูปที่ ก.1 กล่องข้อความเบรเซอร์พาร์ท

2. พิมพ์ชื่อของพาร์ทในกล่องแสดงชื่อพาร์ทหรือเลือกชื่อพาร์ทจากบัญชีรายชื่อ (List) ของพาร์ทที่ด้านซ้ายของกล่องข้อความ
3. คลิกที่ Place เพื่อวางพาร์ท (เบรเซอร์ยังเปิดอยู่) หรือคลิกที่ Place & Close เพื่อวางพาร์ทและปิดเบรเซอร์ด้วย



การเลือกพาร์ทโดยชื่อ

กล่องบัญชีรายชื่อพาร์ทบนแถบเครื่องมือ (Toolbar) ประกอบด้วยบัญชีรายชื่อแบบเลื่อนลง (Scroll-down List) ของพาร์ทที่ถูกใช้ไปก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ยังสามารถพิมพ์ชื่อของพาร์ทโดยตรงในกล่องบัญชีรายชื่อพาร์ทด้วย

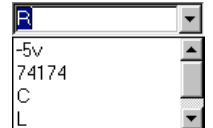
1. พิมพ์ชื่อของพาร์ทที่ต้องการในกล่องบัญชีรายชื่อพาร์ท
2. กดแป้น Enter
3. เคลื่อนรูปของพาร์ทที่เลือกไปยังตำแหน่งที่ต้องการบนชคีมเมติกและคลิกเพื่อวางพาร์ท
4. คลิกขวาเพื่อหยุดการวางพาร์ท



การวางพาร์ทที่เลือกไปแล้วครั้งหนึ่ง

เมื่อพาร์ทใดถูกวางไปแล้ว ชื่อของพาร์ทนั้นจะถูกแสดงในกล่องบัญชีรายชื่อพาร์ทบนแถบเครื่องมือ ทำให้สะดวกในการเรียกดูใหม่อีกครั้ง

1. คลิกที่ลูกศรของกล่องบัญชีรายชื่อพาร์ท จะปรากฏชื่อของพาร์ทอย่างน้อย 10 ตัวที่ถูกใช้ไปก่อนหน้านี้
2. คลิกที่ชื่อของพาร์ทที่ต้องการ
3. เคลื่อนรูปของพาร์ทที่เลือกไปยังตำแหน่งที่ต้องการบนซิมเมติกและคลิกเพื่อวางพาร์ท
4. คลิกขวาเพื่อหยุดการวางพาร์ท



การวางและการแก้ไขพาร์ท

เมื่อเลือกพาร์ทที่ต้องการแล้ว รูปของพาร์ทนั้นจะปรากฏอยู่ติดกับตัวชี้ (Pointer) โดยที่จะสามารถวางพาร์ทนั้นบนซิมเมติกได้หลายครั้งเท่าที่ต้องการ

การวางพาร์ทบนซิมเมติก

1. ใช้ไอคอนเลือกพาร์ทเพื่อที่จะเลือกพาร์ทจากห้องสมุดสัญลักษณ์
2. เคลื่อนรูปของพาร์ทที่เลือกไปยังตำแหน่งที่ต้องการบนซิมเมติกและคลิกเพื่อวางพาร์ท โดยสามารถวางพาร์ทนั้นได้หลายครั้งเท่าที่ต้องการ โดยการเคลื่อนไปยังตำแหน่งใหม่ที่ต้องการและคลิกอีกครั้งหนึ่ง

การหยุดวางพาร์ท

เพื่อที่จะหยุดการวางพาร์ท ทำได้โดยวิธีใดวิธีหนึ่งต่อไปนี้

- ก. ดับเบิลคลิกเพื่อวางเป็นรูปสุดท้ายและหยุดการวางพาร์ทนั้นด้วย
- ข. คลิกขวาเพื่อหยุดการวางพาร์ทโดยไม่มีกรวางพาร์ทบนซิมเมติก

เมื่อหยุดการวางพาร์ทแล้ว รูปจะเปลี่ยนกลับไปเป็นตัวชี้ตามเดิม

การหมุนและการพลิกพาร์ท

ผู้ใช้งานสามารถหมุนและพลิกพาร์ทได้ ทั้งพาร์ทที่เลือกเพื่อจะวางบนซิมเมติก, พาร์ทที่ถูกวางบนซิมเมติกแล้ว และพื้นที่ที่กำหนดบนซิมเมติก

การหมุนพาร์ทก่อนที่จะวางบนซคิมเมติก

1. เลือกพาร์ทที่จะวางบนซคิมเมติก
2. กดแป้น Ctrl กับแป้น R เพื่อหมุนพาร์ท โดยเป็นการหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา 90 องศาในทุกครั้งที่กดแป้น

การหมุนพาร์ทที่ถูกวางบนซคิมเมติกแล้ว

1. เลือกพาร์ทที่ถูกวางบนซคิมเมติกโดยใช้ตัวชี้และคลิก
2. กดแป้น Ctrl กับแป้น R เพื่อหมุนพาร์ท

การหมุนพื้นที่ของซคิมเมติก

1. คลิกและลากเมาส์เพื่อสร้างกรอบครอบพื้นที่ที่ต้องการจะหมุน
2. กดแป้น Ctrl กับแป้น R เพื่อหมุนพื้นที่ โดยเป็นการหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา 90 องศารอบจุดศูนย์กลางของพื้นที่นั้น

การพลิกพาร์ทก่อนที่จะวางบนซคิมเมติก

1. เลือกพาร์ทที่จะวางบนซคิมเมติก
2. กดแป้น Ctrl กับแป้น F เพื่อพลิกพาร์ท โดยเป็นการพลิกกลับด้านกับกระจกในทุกครั้งที่กดแป้น

การพลิกพาร์ทที่ถูกวางบนซคิมเมติกแล้ว

1. เลือกพาร์ทที่ถูกวางบนซคิมเมติกโดยใช้ตัวชี้และคลิก
2. กดแป้น Ctrl กับแป้น F เพื่อพลิกพาร์ท

การพลิกพื้นที่ของซคิมเมติก

1. คลิกและลากเมาส์เพื่อสร้างกรอบครอบพื้นที่ที่ต้องการจะพลิก
2. กดแป้น Ctrl กับแป้น F เพื่อพลิกพื้นที่นั้นรอบแกนแนวตั้ง

การแก้ไขแอตทริบิวต์ของพาร์ท (Part Attributes)

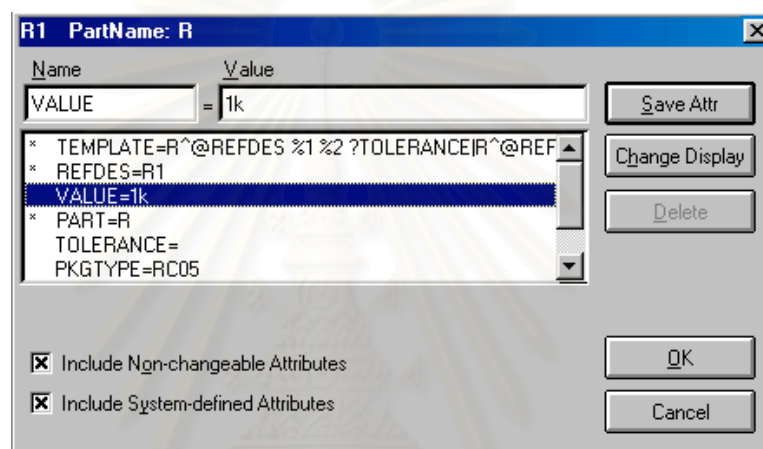
พาร์ท, พอร์ท, สาย, บัสและสัญลักษณ์ส่วนมากมีแอตทริบิวต์ของตัวเอง แอตทริบิวต์ประกอบด้วยชื่อและค่าที่เกี่ยวข้อง

ผู้ใช้งานสามารถสร้างแอตทริบิวต์ใหม่หรือแก้ไขค่าที่มีอยู่เดิมของพาร์ทบนซคีมเมติกได้ ฟังก์ชันเหล่านี้มีอยู่ในกล่องแสดงการแก้ไขแอตทริบิวต์ (Attribute Editing Dialog Box)

1. ดับเบิลคลิกที่พาร์ทเพื่อแสดงกล่องแสดงการแก้ไขแอตทริบิวต์
2. ในบัญชีรายชื่อของแอตทริบิวต์และค่า เลือกแอตทริบิวต์ที่ต้องการแก้ไข (ชื่อแอตทริบิวต์แสดงอยู่ในกล่องข้อความแสดงชื่อและค่าปัจจุบันแสดงอยู่ในกล่องข้อความแสดงค่า)
3. แก้ไขค่าที่ต้องการในกล่องข้อความแสดงค่า
4. คลิกที่ Save Attr เพื่อบันทึกแอตทริบิวต์ที่แก้ไขแล้ว
5. คลิกที่ OK เพื่อปิดกล่องแสดงการแก้ไขแอตทริบิวต์

Save Attr

OK



รูปที่ ก.2 กล่องแสดงการแก้ไขแอตทริบิวต์

การลบแอตทริบิวต์

1. ดับเบิลคลิกที่พาร์ทเพื่อแสดงกล่องแสดงการแก้ไขแอตทริบิวต์
2. เลือกแอตทริบิวต์ที่ต้องการลบ
3. คลิกที่ Delete
4. คลิกที่ OK เพื่อปิดกล่องแสดงการแก้ไขแอตทริบิวต์

Delete

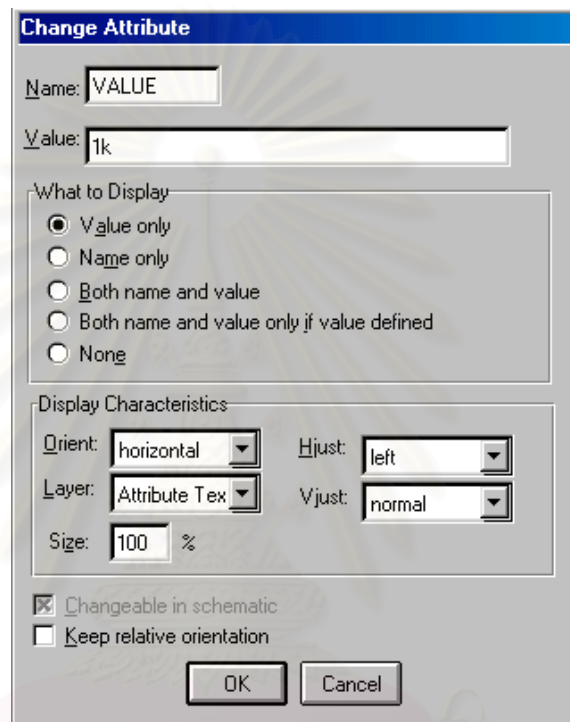
การเปลี่ยนวิธีแสดงแอตทริบิวต์

ผู้ใช้งานสามารถเปลี่ยนวิธีแสดงแอตทริบิวต์บนซคีมเมติกได้ดังนี้

1. ดับเบิลคลิกที่พาร์ทเพื่อแสดงกล่องแสดงการแก้ไขแอตทริบิวต์
2. เลือกแอตทริบิวต์ที่ผู้ใช้งานต้องการจะเปลี่ยนวิธีแสดง
3. คลิกที่ Change Display เพื่อแสดงกล่องแสดงการเปลี่ยนแอตทริบิวต์ (Change Attribute Dialog Box)

Change Display

4. คลิกที่ช่องหนึ่งในเช็คบ็อกซ์ (Check Box) ต่อไปนี้เพื่อแสดงรูปแบบที่ต้องการคือแสดงแอตทริบิวต์นั้นเพียงค่า, แสดงเพียงชื่อ, แสดงทั้งค่าและชื่อ, แสดงทั้งค่าและชื่อเมื่อกำหนดค่ามาให้และไม่แสดงอะไรเลย
5. คลิกที่ OK เพื่อปิดกล่องแสดงการเปลี่ยนแอตทริบิวต์
6. คลิกที่ OK เพื่อปิดกล่องแสดงการแก้ไขแอตทริบิวต์



รูปที่ ก.3 กล่องแสดงการเปลี่ยนแอตทริบิวต์

การใช้สายไฟและบัล

พาร์ทและพอร์ทประกอบด้วยพิน (Pin) หนึ่งพินหรือมากกว่าเพื่อทำการต่อเป็นวงจร การเชื่อมต่อทางไฟฟ้าเกิดจากการต่อระหว่างพินของพาร์ทหรือพอร์ทด้วยสายไฟและบัล

การวาดสายไฟ

1. คลิกที่ไอคอนวาดสายไฟ (Draw Wire Icon) เพื่อเปลี่ยนตัวชี้เป็นรูปดินสอ
2. คลิกเพื่อเริ่มจุดตั้งต้นของสายไฟ
3. คลิกที่แต่ละมุมของสายไฟ ถ้าต้องการเปลี่ยนมุมของสายไฟ
4. คลิกที่พินเป็นการสิ้นสุดความยาวของสายไฟเส้นนั้น
5. เพื่อหยุดการวาดสายไฟ ทำได้โดยวิธีใดวิธีหนึ่งต่อไปนี้

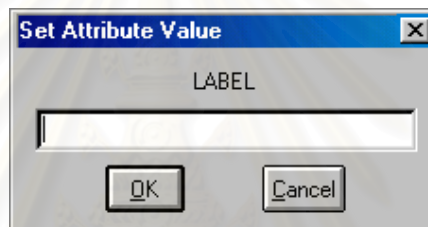


- ก. ดับเบิลคลิกเพื่อวางส่วนสุดท้ายของสายไฟ
- ข. คลิกขวาเพื่อหยุดการวาดสายไฟโดยไม่มีกรวาดส่วนใด ๆ เพิ่มเข้าไป
เมื่อหยุดการวาดสายไฟแล้ว รูปดินสอจะเปลี่ยนกลับไปเป็นตัวชี้ตามเดิม

การตั้งชื่อสายไฟ

ผู้ใช้งานสามารถตั้งชื่อสายไฟได้ตามต้องการเพื่อป้องกันความสับสน โดยทั่วไปไม่จำเป็นต้องตั้งชื่อสายไฟก็ได้ ยกเว้นเมื่อสายไฟนั้นต่อกับบัล

1. ดับเบิลคลิกที่ส่วนของสายไฟที่ต้องการตั้งชื่อ เพื่อแสดงกล่องตั้งค่าแอตทริบิวต์ (Set Attribute Value Dialog Box)
2. พิมพ์ชื่อที่ต้องการ
3. คลิกที่ OK



รูปที่ ก.4 กล่องตั้งค่าแอตทริบิวต์

การแก้ไขชื่อของสายไฟ

1. ดับเบิลคลิกที่สายไฟหรือชื่อของสายไฟเพื่อแสดงกล่องตั้งค่าแอตทริบิวต์ ซึ่งจะแสดงชื่อเดิมที่ตั้งไว้
2. แก้ไขชื่อเดิมหรือลบทิ้งและพิมพ์ชื่อใหม่ที่ต้องการ
3. คลิกที่ OK

การวาดบัล

1. คลิกที่ไอคอนวาดบัล (Draw Bus Icon) เพื่อเปลี่ยนตัวชี้เป็นรูปดินสอ
2. คลิกเพื่อเริ่มจุดตั้งต้นของบัล
3. คลิกที่แต่ละมุมของบัล ถ้าต้องการเปลี่ยนมุมของบัล
4. คลิกขวาเพื่อหยุดการวาดบัล รูปดินสอจะเปลี่ยนกลับไปเป็นตัวชี้ตามเดิม



การตั้งชื่อของบัส

การเชื่อมต่อของบัสและส่วนของบัสจะถูกควบคุมโดยชื่อของบัส กฎของการเชื่อมต่อที่สำคัญคือ

- ชื่อของบัสต้องแสดงถึงสัญญาณที่อยู่ในบัสและลำดับของสัญญาณนั้น
- การเชื่อมต่อบัสหนึ่งเข้ากับอีกบัสหนึ่งทำได้เพียงเมื่อบัสนั้นเป็นเซตย่อยของอีกบัสหนึ่ง เช่น A[0-30] และ A[16-30] เป็นต้น
- เมื่อบัสเชื่อมต่อกับพินของพาร์ทหรือพอร์ทโดยมีจำนวนของสัญญาณเท่ากัน การเชื่อมต่อจะเป็นไปตามลำดับ เช่นบัสชื่อ A[31-0] ต่อกับพอร์ทชื่อ Addr[32-63] หมายความว่า A[31] ต่อกับ Addr[32], A[30] ต่อกับ Addr[33] เป็นต้น
- เมื่อสายไฟเชื่อมต่อกับบัส ชื่อของสายไฟนั้นต้องเป็นหนึ่งในสัญญาณทั้งหมดของบัสนั้น
- การตั้งชื่อของบัสทำได้หลายแบบดังนี้

CLK[0-15]

CLK[0:15]

CLK[0..15]

CLK1, CLK2, data1, data2, input,...

ในรูปแบบสุดท้ายนั้นทุก ๆ สัญญาณในบัสต้องถูกแสดงตามลำดับ

1. ดับเบิลคลิกที่ส่วนของบัส เพื่อแสดงกล่องตั้งค่าแอดทริบิวต์
2. พิมพ์ชื่อที่ต้องการ
3. คลิกที่ OK

การแก้ไขชื่อของบัส

1. ดับเบิลคลิกที่บัสหรือชื่อของบัสเพื่อแสดงกล่องตั้งค่าแอดทริบิวต์ ซึ่งจะแสดงชื่อเดิมที่ตั้งไว้
2. แก้ไขชื่อเดิมหรือลบทิ้งและพิมพ์ชื่อใหม่ที่ต้องการ
3. คลิกที่ OK

การเชื่อมต่อสายไฟเข้ากับบัส

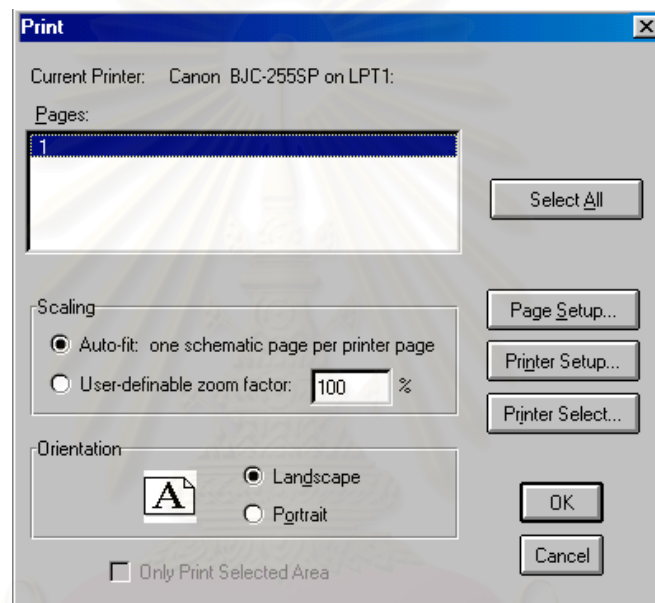
1. วาดสายไฟให้ปลายของสายสิ้นสุดที่บัส
2. ตั้งชื่อของสายไฟด้วยชื่อหนึ่งในสัญญาณของบัสนั้น เช่นการตั้งชื่อสายไฟเป็น DB[12] หรือ DB12 เมื่อชื่อของบัสเป็น DB[0:16]

การแยกบัส

1. วาดส่วนของบัสให้ปลายสิ้นสุดที่บัสหลัก
2. ตั้งชื่อของส่วนของบัสเป็นเซตย่อยของสัญญาณบนบัสหลัก เช่นการตั้งชื่อของบัสย่อยเป็น DB [0:8] เมื่อชื่อของบัสหลักเป็น DB[0:16]

การพิมพ์ชดิมเมติก

1. เลือกคำสั่งพิมพ์ (Print) จากไฟล์เมนู (File Menu) เพื่อแสดงกล่องแสดงการพิมพ์ (Print Dialog Box)



รูปที่ ก.5 กล่องแสดงการพิมพ์

2. กำหนดเลขหน้าที่ต้องการพิมพ์จากบัญชีรายชื่อแสดงหน้าหรือคลิกที่ Select All เพื่อพิมพ์หน้าทั้งหมดของชดิมเมติก
3. เลือกสเกลของหน้าที่ต้องการพิมพ์
4. เลือกการจัดวางหน้ากระดาษ
5. คลิกที่ OK

การปิดชดิมเมติกที่ใช้งานอยู่

เพื่อปิดชดิมเมติกที่ใช้งานอยู่โดยไม่ต้องปิดชดิมเมติกเอดิเตอร์ ให้เลือกคำสั่งปิด (Close) จากไฟล์เมนู หากผู้ใช้งานยังไม่ได้บันทึกชดิมเมติกนั้น โปรแกรมจะแสดงข้อความเตือนให้บันทึกก่อนปิดชดิมเมติก

การปิดซิมเมติกเอดิเตอร์

ผู้ใช้งานสามารถปิดซิมเมติกเอดิเตอร์ได้โดยวิธีใดวิธีหนึ่งต่อไปนี้คือ

ก. เลือกคำสั่งออก (Exit) จากไฟล์เมนู

ข. ดับเบิลคลิกที่กล่องควบคุมเมนูที่มุมบนซ้ายมือของหน้าต่างซิมเมติกเอดิเตอร์

หากผู้ใช้งานยังไม่ได้บันทึกซิมเมติก โปรแกรมจะแสดงข้อความเตือนให้บันทึกก่อนออกจากโปรแกรม

ก.2 การเตรียมซิมเมติกสำหรับการจำลอง

หัวข้อนี้จะจัดหาข้อมูลที่จะใช้ในการสร้างแบบจำลองของวงจรได้อย่างถูกต้อง

พาร์ทประเภทเฉื่อยงาน (Passive Parts)

แสดงข้อมูลเบื้องต้นสำหรับพาร์ทประเภทเฉื่อยงาน ได้แก่ ตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำดังนี้

ตารางที่ ก.1 แอตทริบิวต์ของตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ

ชนิด	ชื่อ	ไฟล์ห้องสมุด	แอตทริบิวต์	คำอธิบาย
พาร์ท	สัญลักษณ์	สัญลักษณ์		
ตัวเก็บประจุ	C	analog.slb	VALUE	ค่าความจุไฟฟ้า
			IC	แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นระหว่างตัวเก็บประจุระหว่างการคำนวณจุดไบแอส (Bias Point)
			C_VAR	VALUE
			SET	ตัวคูณ (Multiplier)
ตัวเหนี่ยวนำ	L	analog.slb	VALUE	ค่าความเหนี่ยวนำ
			IC	กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำระหว่างการคำนวณจุดไบแอส
ตัวต้านทาน	R	analog.slb	VALUE	ค่าความต้านทาน
			TC	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเชิงเส้นและควอดราติก (Quadratic)
			R_VAR	VALUE
			SET	ตัวคูณ (Multiplier)

สำหรับพารามิเตอร์ R, C และ L มาตรฐานแล้ว ค่าประสิทธิผล (Effective) ของพารามิเตอร์ถูกกำหนดโดยตรงจากค่าแอดทริบิวต์พื้นฐาน (VALUE) สำหรับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่แปรค่าได้, R_VAR และ C_VAR ค่าประสิทธิผลคือผลคูณของค่าพื้นฐาน (VALUE) และตัวคูณ (Multiplier)

โดยทั่วไป R, C และ L ควรจะมีค่าเป็นองค์ประกอบบวก (Positive Component) ในทุกกรณีองค์ประกอบต้องมีค่าไม่เป็นศูนย์ อย่างไรก็ตามในกรณีที่ต้องการค่าองค์ประกอบลบที่มักเกิดขึ้นบ่อย ๆ ในการออกแบบฟิลเตอร์ (Filter) เพื่อวิเคราะห์วงจร RLC ที่สมมูล (Equivalent) กับวงจรจริง ๆ เมื่อแปลงจากวงจรจริงมาเป็นวงจร RLC ที่สมมูลกันอาจทำให้เกิดค่าองค์ประกอบลบขึ้นได้

โปรแกรมพีเอสไปซ็อนอนุญาตให้มีค่าองค์ประกอบลบได้สำหรับจุดไบแอส, การกวาดแบบกระแสดตรง (DC Sweep), กระแสสลับ (AC) และการวิเคราะห์เสียงรบกวน การวิเคราะห์ทรานเซียนต์อาจไม่สามารถทำได้สำหรับวงจรที่มีองค์ประกอบลบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าเป็นลบอาจทำให้เกิดความไม่มีเสถียรภาพ ที่โปรแกรมไม่สามารถจัดการได้

หม้อแปลงไฟฟ้า

ตารางที่ ก.2 หม้อแปลงไฟฟ้า

ชนิด	ชื่อ	ไฟล์ห้องสมุด	แอดทริบิวต์	คำอธิบาย
พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	สัญลักษณ์		
หม้อแปลงไฟฟ้า	XFRM_LINEAR	analog.slb	L1_VALUE	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด
			L2_VALUE	หน่วยเป็นเฮนรี่ (Henries)
			COUPLING	สัมประสิทธิ์ของ mutual coupling (ค่าระหว่าง 0 และ 1)
	K_LINEAR	analog.slb	Ln	inductor reference designator

สายส่งไฟฟ้ากำลัง

ตารางที่ ก.3 สายส่งไฟฟ้ากำลัง

ชนิด พาริต	ชื่อ สัญลักษณ์	ไฟล์ห้องสมุด สัญลักษณ์	แอดทริบิวต์	คำอธิบาย
สายส่งไฟฟ้ากำลัง	T	analog.slb	Z0	Characteristic impedance
			TD	Transmission delay
			F	ความถี่ของ NL
			NL	number of wavelengths หรือ wave number
	TLOSSY	analog.slb	LEN	electrical length
			R	per unit length resistance
			L	per unit length inductance
			G	per unit length conductance
			C	per unit length capacitance

โปรแกรมพีสไปซ์ใช้โมเดลแบบกระจายในการแสดงคุณลักษณะของสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีกำลังสูญเสีย ดังนั้นค่าความต้านทาน, ความเหนี่ยวนำ, ความนำไฟฟ้าและความจุไฟฟ้า ทั้งหมดพิจารณาเป็นแบบพารามิเตอร์คงที่ กระจายสม่ำเสมอไปตามความยาวสาย

วิธีหนึ่งของการจำลองสายส่งที่มีกำลังสูญเสียนี้คือการใช้องค์ประกอบเฉื่อยงานแบบไม่ต่อเนื่อง ในการแทนส่วนเล็ก ๆ ของสายส่ง นั่นคือการใช้แบบจำลองแบบก้อน (Lumped Model) ซึ่งประกอบด้วยการเชื่อมต่อวงจรย่อยหลาย ๆ วงจรแบบอนุกรม ซึ่งวิธีนี้ต้องการจำนวนของแบบจำลองแบบก้อนให้มากเพียงพอที่จะใช้แสดงคุณสมบัติแบบกระจายของสายได้ ผลลัพธ์ก็คือต้องใช้โครงสร้างของแบบจำลองขนาดใหญ่และเวลาที่ใช้ในการจำลองที่นานขึ้น และยังก่อให้เกิดการแกว่งเสมือน (Spurious Oscillation) ขึ้นรอบ ๆ ความถี่ธรรมชาติขององค์ประกอบแบบก้อนด้วย

แบบจำลองแบบกระจายที่ให้มาในโปรแกรมพีสไปซ์จะทำให้ไม่จำเป็นต้องพิจารณาว่าต้องใช้อะไรบ้างของแบบก้อนมากเท่าไรจึงจะเพียงพอและกำจัดการแกว่งเสมือนได้ด้วย นอกจากนี้ยังสามารถจำลองสายส่งที่มีกำลังสูญเสีย โดยมีความถูกต้องในระดับเดียวกัน ใช้เวลาเพียงเศษส่วนของเวลาที่ใช้โดยองค์ประกอบแบบก้อน อีกทั้งยังสามารถทำการแปลงลาปลาซของ R และ G

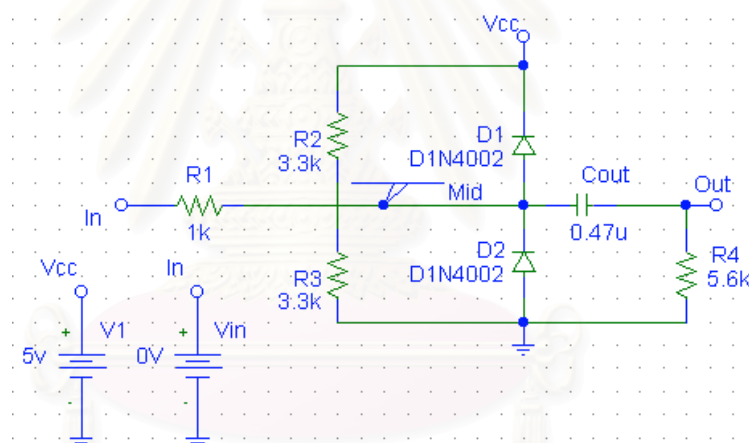
ในการพิจารณาถึงผลกระทบจากองค์ประกอบที่ขึ้นกับความถี่ เช่น สกินเอฟเฟค (Skin Effect) และความสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss) เป็นต้น

ก.3 ตัวอย่างของการจำลอง

ตัวอย่างในหัวข้อนี้จะช่วยในการแสดงวิธีและเครื่องมือสำหรับการออกแบบวงจร, การจำลองด้วย PSPICE A/D และการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการจำลองโดยใช้โพรบ (Probe) การวิเคราะห์ทั้งหมดถูกแสดงในวงจรตัวอย่างเดียวกัน ซึ่งจะช่วยให้เห็นขั้นตอนของการเตรียมการวิเคราะห์, การจำลองและการวิเคราะห์ผลลัพธ์สำหรับการวิเคราะห์ทรานเซียนต์

ตัวอย่างของการเตรียมวงจร

หัวข้อนี้จะอธิบายถึงวิธีการใช้ชคิมเมติกในการสร้างวงจรไดโอดคลิปเปอร์ (Diode Clipper) ดังแสดงในรูปที่ ก.6



รูปที่ ก.6 วงจรไดโอดคลิปเปอร์

การเปิดหน้าต่างของชคิมเมติกใหม่

1. เปิดหน้าต่างชคิมเมติกใหม่ ถ้าชคิมเมติกกำลังทำงานอยู่แล้ว ต้องแน่ใจว่าขณะนี้กำลังทำงานบนชคิมเมติกเอดิเตอร์
2. ถ้านหน้าต่างชคิมเมติกกำลังเปิดอยู่ ผู้ใช้งานสามารถเริ่มการสร้างวงจรได้เลย แต่หากว่าต้องการเปิดหน้าต่างชคิมเมติกใหม่ ให้คลิกที่ไอคอนไฟล์ใหม่ (New) หรือเลือก New จากไฟล์เมนู

การวางแหล่งกำเนิดแรงดัน

1. คลิกที่เลือกไอคอนเลือกชิ้นส่วน (Get New Part) จากเมนูวาด (Draw Menu) เพื่อแสดงกล่องข้อความเบราเซอร์พาร์ท (Part Browser Dialog Box)
2. พิมพ์ VDC ในกล่องข้อความแสดงชื่อ
3. คลิกที่ Place & Close
4. เคลื่อนรูปของแหล่งกำเนิดไปยังตำแหน่งที่ต้องการบนซิมเมติก
5. คลิกเพื่อวางแหล่งกำเนิดตัวที่หนึ่ง
6. เคลื่อนรูปและคลิกอีกครั้งเพื่อวางแหล่งกำเนิดตัวที่สอง
7. คลิกขวาเพื่อหยุดการวางพาร์ท

การวางไดโอด

1. เปิดกล่องข้อความเบราเซอร์พาร์ท
2. พิมพ์ D1N4* ในกล่องข้อความแสดงชื่อ
3. กดแป้น Enter เพื่อแสดงบัญชีรายชื่อของไดโอด
4. คลิกที่ D1N4002
5. คลิกที่ Place เพื่อวางพาร์ท (เบราเซอร์ยังเปิดอยู่) หรือคลิกที่ Place & Close เพื่อวางพาร์ทและปิดเบราเซอร์ด้วย
6. กดแป้น Ctrl กับแป้น R เพื่อหมุนไดโอดให้อยู่ในทิศทางที่ต้องการ
7. คลิกเพื่อวางไดโอดตัวที่หนึ่ง (D1) และคลิกอีกครั้งเพื่อวางไดโอดตัวที่สอง (D2)
8. คลิกขวาเพื่อหยุดการวางพาร์ท

การย้ายข้อความเกี่ยวกับไดโอด (หรือพาร์ทอื่น ๆ)

1. คลิกที่ข้อความที่ต้องการเคลื่อนย้าย
2. ลากข้อความไปยังตำแหน่งที่ต้องการ

การวางพาร์ทอื่น ๆ

จากวิธีที่ได้กล่าวมาแล้วในการวางไดโอด ผู้ใช้งานสามารถวางพาร์ทอื่น ๆ ได้ในลักษณะเดียวกัน โดยที่ชื่อของสัญลักษณ์ที่ต้องพิมพ์ในกล่องข้อความแสดงชื่อของกล่องข้อความเบราเซอร์พาร์ทแสดงอยู่ในวงเล็บดังนี้

1. ตัวต้านทาน (R)
2. ตัวเก็บประจุ (C)

3. สัญลักษณ์กราวด์ (EGND)
4. สัญลักษณ์บับเบิล (BUBBLE)

การเชื่อมต่อพาร์ท

1. เลือกลายไฟ (Wire) จากเมนูวาดเพื่อเปลี่ยนตัวที่เป็นรูปดินสอ
2. คลิกที่จุดเชื่อมต่อของพินบนบับเบิลที่อินพุทของวงจร
3. คลิกที่จุดเชื่อมต่อที่ใกล้ที่สุดของอินพุทตัวต้านทาน R1
4. เชื่อมต่อพินอีกด้านหนึ่งของ R1 เข้ากับเอาต์พุทของตัวเก็บประจุ
5. การเชื่อมต่อไดโอดเข้าด้วยกันด้วยสายไฟทำได้ดังนี้
 - ก. คลิกที่จุดเชื่อมต่อของแอโนด (Anode) ของไดโอดตัวล่าง
 - ข. เคลื่อนตัวชี้ขึ้นไปและคลิกบนสายไฟระหว่างไดโอด ทำให้สายไฟสิ้นสุดและเกิดจุดต่อ (Junction) ของสายไฟขึ้น
 - ค. คลิกอีกครั้งที่จุดต่อเพื่อวาดสายไฟต่อ
 - ง. คลิกที่พินแคโทด (Cathode) ของไดโอดตัวบน
6. ทำการเชื่อมต่อพาร์ทที่เหลือทั้งหมดจนกระทั่งได้วงจรดังแสดงในรูปที่ ก.6

การตั้งชื่อของเครือข่ายและบับเบิล

1. ดับเบิลคลิกที่สายไฟที่เชื่อมต่อ R1, R2, R3, ไดโอดและตัวเก็บประจุ
2. พิมพ์ Mid ในกล่องข้อความแสดงชื่อ
3. คลิกที่ OK
4. ดับเบิลคลิกที่แต่ละบับเบิลเพื่อตั้งชื่อดังแสดงในรูปที่ ก.6

การวางสัญลักษณ์วิวพอยนต์ (Viewpoint)

1. พิมพ์ VIEWPOINT ในกล่องข้อความแสดงชื่อของกล่องข้อความเบราเซอร์พาร์ท
2. วางวิวพอยนต์โดยให้จุดเชื่อมโยงสัมผัสกับสายไฟที่ตั้งชื่อว่า Mid

การตั้งชื่อขององค์ประกอบ

ผู้ใช้งานสามารถตั้งชื่อขององค์ประกอบในซิมเมติก เช่น Vin สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดัน หรือ Cout สำหรับตัวเก็บประจุเป็นต้น ได้ดังนี้

1. ดับเบิลคลิกที่ชื่ออ้างอิงเดิมขององค์ประกอบวงจรมัน
2. พิมพ์ชื่อใหม่ที่ต้องการในกล่องข้อความแสดงชื่อ

3. คลิกที่ OK

การเปลี่ยนค่าขององค์ประกอบ

1. ดับเบิลคลิกที่ค่าเดิมขององค์ประกอบ
2. พิมพ์ค่าใหม่ที่ต้องการในกล่องข้อความแสดงค่า
3. คลิกที่ OK

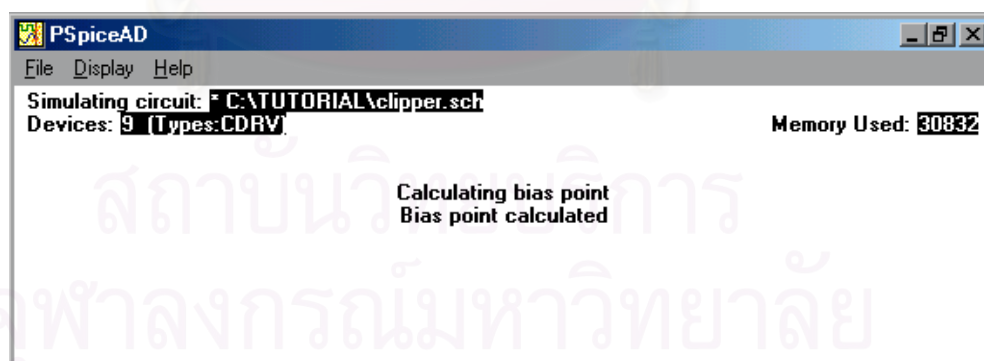
การบันทึกซิมเมติก

1. เลือกคำสั่งบันทึก (Save) จากไฟล์เมนู
2. พิมพ์ CLIPPER เป็นชื่อของไฟล์ซิมเมติกนี้
3. คลิกที่ OK เพื่อบันทึกไฟล์เป็น clipper.sch

การทำงานของพีเอสไปซ์ (PSPICE A/D)

หลังจากสร้างซิมเมติกชื่อว่า clipper.sch แล้ว ผู้ใช้งานสามารถเริ่มการทำงานของ PSPICE A/D โดยการเลือก Simulate จากเมนูวิเคราะห์ (Analysis Menu) PSPICE A/D จะแสดงการจำลองและให้ไฟล์เอาต์พุตออกมาชื่อว่า clipper.out

ขณะที่ PSPICE A/D กำลังทำงานอยู่นั้น ความคืบหน้าของการจำลองจะถูกแสดงในหน้าต่างสถานะการจำลองของ PSPICE A/D ดังในรูปที่ ก.7



รูปที่ ก.7 หน้าต่างสถานะการจำลองของ SPICE A/D

ไฟล์เอาต์พุตของการจำลอง

ไฟล์เอาต์พุตของการจำลองเป็นผลลัพธ์ที่ผู้ใช้งานใช้ตรวจสอบผลการจำลอง โดยจะแสดงองค์ประกอบของวงจรและผลของการคำนวณจุดไบแอส ถ้ามีเออเรอร์ (Error) เกิดขึ้นทั้งที่เกิด

จากการสร้างวงจร การจำลองและการคำนวณ เอลิเมนต์หรือข้อความเตือนจะถูกเขียนลงในไฟล์เอาต์พุตด้วย

การแสดงผลไฟล์เอาต์พุตของการจำลอง

1. เปิดหน้าต่าง PSPICE A/D
2. ในหน้าต่างซิมเมติก เลือก Examine Output จากเมนูวิเคราะห์เพื่อแสดงผลไฟล์เอาต์พุตในหน้าต่างไมโครซิมเท็กซ์เอดิเตอร์ ผลของการคำนวณจุดไบแอสที่ได้แสดงดังรูปที่ ก.8

```

clipper.out* - MicroSim Text Editor
File Edit Search View Insert Help
[Icons]

* C:\TUTORIAL\clipper.sch

****      SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION      TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****

NODE   VOLTAGE      NODE   VOLTAGE      NODE   VOLTAGE      NODE   VOLTAGE
( In)   0.0000      ( Mid) 14.31E-06   ( Out)  0.0000      ( Vcc)  5.0000
($N_0001) 2.5000

VOLTAGE SOURCE CURRENTS
NAME      CURRENT
V_V1      -7.576E-04
V_Vin     1.431E-08

TOTAL POWER DISSIPATION 3.79E-03 WATTS

For Help, press F1
Ln 102, Col 1
CAP NUM

```

รูปที่ ก.8 ไฟล์เอาต์พุตของการจำลอง

3. เมื่อตรวจสอบเรียบร้อยแล้ว ให้ปิดหน้าต่างไมโครซิมเท็กซ์เอดิเตอร์

เนื่องจากไดโอดทั้งสองอยู่ในสถานะรีเวอร์สไบแอสหรืออยู่ในสถานะปิด (Off) และแหล่งกำเนิดแรงดัน V_{in} เป็น 0 V ดังนั้นจุดไบแอสจึงขึ้นอยู่กับเพียงค่าของ V_{cc} , R_1 , R_2 และ R_3 โดยผู้

ใช้งานสามารถคำนวณแรงดันที่โหนด Mid ได้จาก $V(Mid) = \frac{R_{eq}}{R_2 + R_{eq}} \times V_{cc}$ โดยที่ $R_{eq} =$

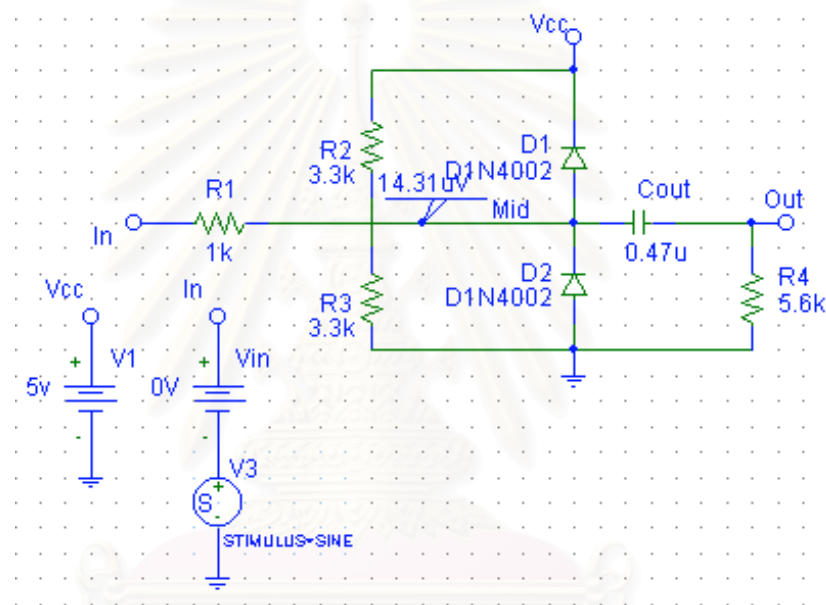
$$\frac{R_1 \times R_3}{R_1 + R_3}$$

วิวพอยนต์ของแรงดัน

สัญลักษณ์วิวพอยนต์ซึ่งเป็นเพียงเส้นว่างเปล่าในตอนแรก เมื่อการจำลองและการคำนวณแรงดันจุดไบแอสเสร็จเรียบร้อยแล้ว วิวพอยนต์จะแสดงแรงดันที่จุดเชื่อมต่อซึ่งในกรณีนี้เท่ากับ 0.9434 V

การวิเคราะห์ทรานเซียนต์ (Transient Analysis)

ในการวิเคราะห์ทรานเซียนต์นั้น ผู้ใช้งานต้องใส่ตัวกระตุ้นแรงดันที่ขึ้นอยู่กัเวลา (Time-domain Voltage Stimulus) ดังแสดงในรูปที่ ก.9

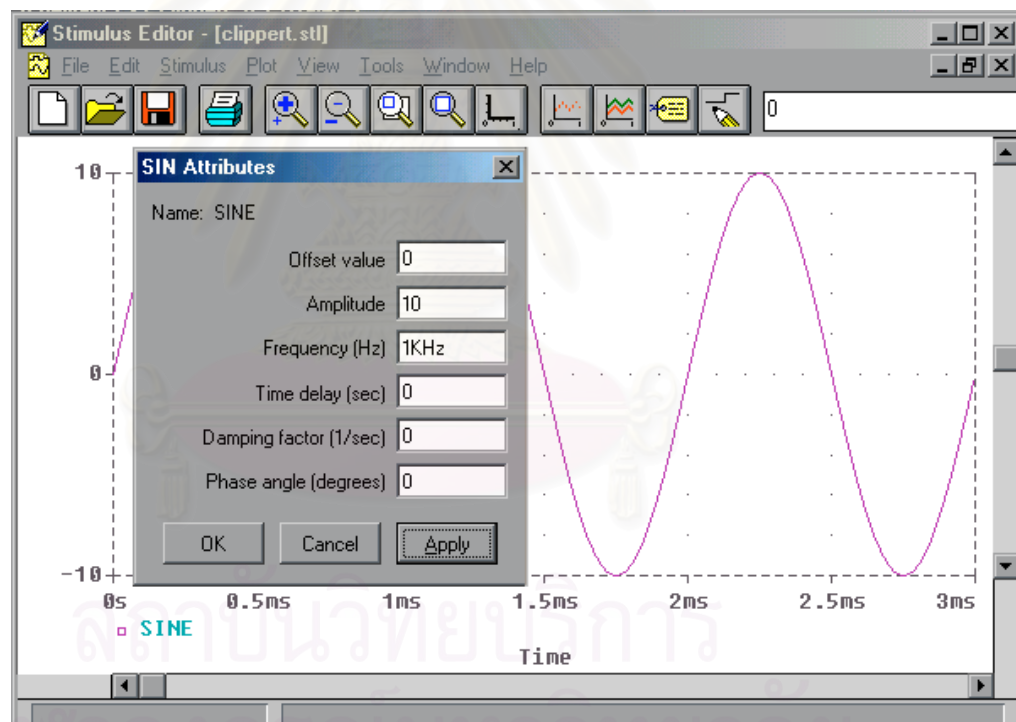


รูปที่ ก.9 วงจรไดโอดคลิปปเปอร์และตัวกระตุ้นแรงดันที่ขึ้นอยู่กัเวลา

การวางแหล่งกำเนิดแรงดันที่ขึ้นอยู่กัเวลา

1. ในหน้าต่างซิมเมตริกให้เลือก Clear All จากเมนูเครื่องหมาย (Markers Menu)
2. เลือกสัญลักษณ์กราวด์ที่อยู่ใต้แหล่งกำเนิดแรงดัน Vin
3. เลือก Cut จากเมนูแก้ไข (Edit Menu)
4. เลื่อนแถบลงมาหรือเลือก Out จากเมนูมุมมอง (View Menu)
5. วางสัญลักษณ์ VSTIM ดังแสดงในรูปที่ ก.9
6. เลือก Paste จากเมนูแก้ไข
7. วางสัญลักษณ์กราวด์ดังแสดงในรูปที่ ก.9
8. เลือก Fit จากเมนูมุมมอง

9. เลือก Save as จากไฟล์เมนู และบันทึกไฟล์เป็น clippert.sch
10. ดับเบิลคลิกที่สัญลักษณ์ VSTIM เพื่อเริ่มการทำงานของชทิมมิวลัสเอดิเตอร์ (Stimulus Editor)
11. ตั้งชื่อตัวกระตุ้น พิมพ์ว่า SINE และคลิกที่ OK
12. ในกล่องข้อความชทิมมิวลัสใหม่ (New Stimulus Dialog Box) คลิกที่ SINE และคลิกที่ OK
13. ในกล่องข้อความชทิมมิวลัส (Stimulus Dialog Box) กำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้
 - แรงดันออฟเซต (Offset Voltage) = 0
 - แอมพลิจูด = 10
 - ความถี่ = 1 kHz
14. คลิกที่ Apply เพื่อดูรูปคลื่น หน้าต่างชทิมมิวลัสเอดิเตอร์จะแสดงดังรูปที่ ก.10

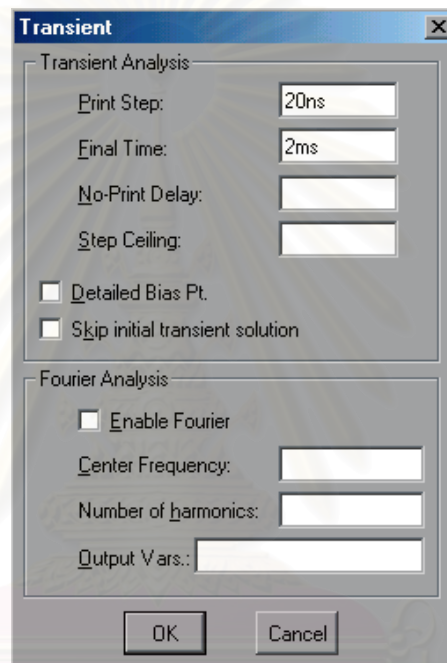


รูปที่ ก.10 หน้าต่างชทิมมิวลัสเอดิเตอร์

15. คลิกที่ OK
16. คลิกที่ไอคอนบันทึก
17. เลือก Exit จากไฟล์เมนู

การกำหนดค่าเริ่มต้นและการทำงานในการวิเคราะห์ทรานเซียนต์

1. ในหน้าต่างซิมเมติก คลิกที่ไอคอนการกำหนดการวิเคราะห์ (Analysis Setup) หรือเลือก Setup จากเมนูวิเคราะห์เพื่อแสดงกล่องข้อความการกำหนดการวิเคราะห์ (Analysis Setup Dialog Box)
2. คลิกที่ Transient เพื่อแสดงกล่องข้อความการวิเคราะห์ทรานเซียนต์ (Transient Analysis Dialog Box)
3. กำหนดค่าเริ่มต้นในกล่องข้อความการวิเคราะห์ทรานเซียนต์ดังแสดงในรูปที่ ก.11



รูปที่ ก.11กล่องข้อความการวิเคราะห์ทรานเซียนต์

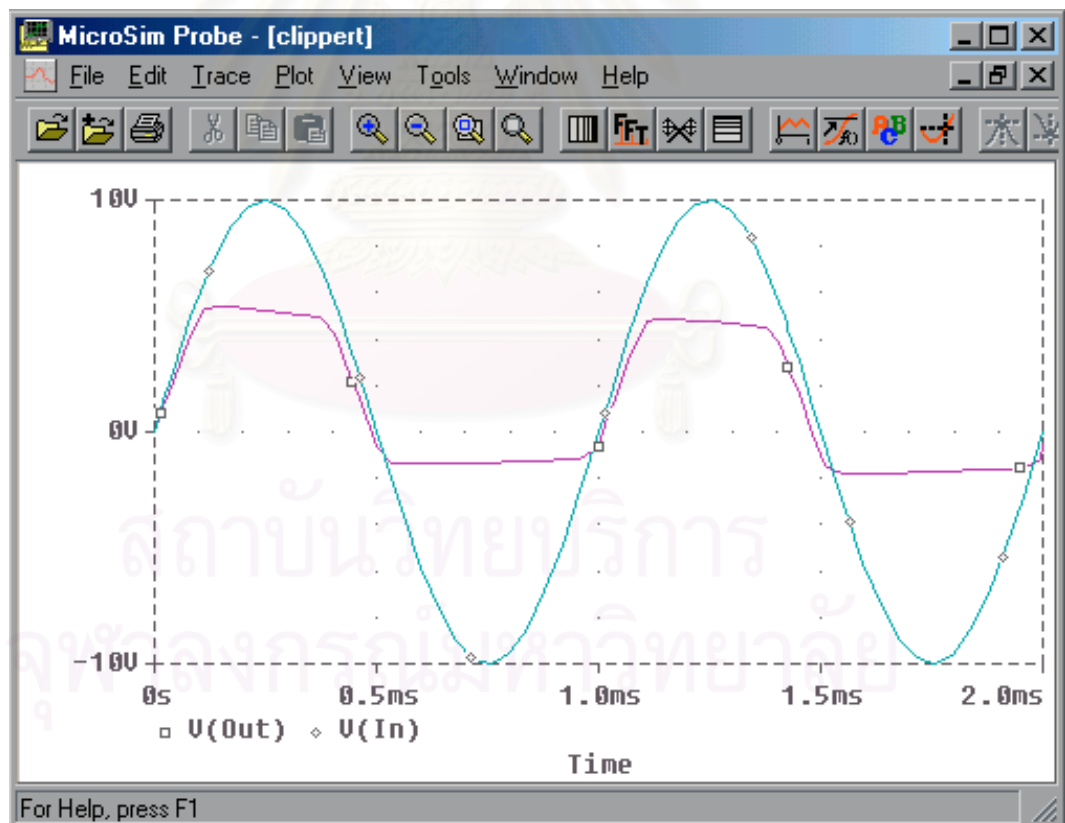
4. คลิกที่ OK
5. ถ้าจำเป็น ให้คลิกที่เช็คบ็อกซ์ของทรานเซียนต์ในกล่องข้อความการกำหนดการวิเคราะห์เพื่อให้เริ่มทำงาน (Enabled)
6. คลิกที่ Close เพื่อออกจากกล่องข้อความการกำหนดการวิเคราะห์
7. คลิกที่ไอคอนบันทึก
8. คลิกที่ไอคอนการจำลอง (Simulate) หรือกดแป้น F11 เพื่อเริ่มการจำลอง

PSPICE A/D จะใช้ขั้นเวลาภายในของตัวเอง (Internal Time Step) สำหรับการคำนวณที่ละเอียดขึ้น ๆ จนถึงเวลาสิ้นสุด ข้อมูลที่ได้จะถูกบันทึกลงในไฟล์ข้อมูลโพรบ (Probe Data File) สำหรับ

แต่ละขั้นของขั้นเวลาภายใน (ขั้นเวลาภายในนี้แตกต่างจากขั้นการพิมพ์ (Print Step) โดยค่าของขั้นการพิมพ์จะเป็นตัวกำหนดข้อมูลที่จะถูกเขียนลงในไฟล์เอาต์พุต (.OUT)

การแสดงตัวแปรเอาต์พุตและกราฟที่ต้องการในโปรบ

1. เลือก Add จากเมนูติดตาม (Trace Menu)
2. เลือก V(Out) และ V(In) โดยการคลิกที่บัญญัติรายชื่อ
3. คลิกที่ OK เพื่อแสดงกราฟ
4. เลือกสัญลักษณ์ที่แสดงในกราฟที่แสดงค่าที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ ก.12
 - ก. เลือก Option จากเมนูเครื่องมือ (Tools Menu)
 - ข. คลิกที่ Always ในส่วนของการใช้สัญลักษณ์ของกราฟ
 - ค. คลิกที่ OK
5. คลิกที่ไอคอนเซฟ



รูปที่ ก.12 รูปคลื่นอินพุตและเอาต์พุตของวงจรไดโอดคลิปปเปอร์

ภาคผนวก ข

การสร้างและการแก้ไขสัญลักษณ์ใหม่

การสร้างสัญลักษณ์ใหม่

การสร้างสัญลักษณ์ใหม่ทำได้โดยการใช้ซิมโบลครีเอชันวิซาร์ด (Symbol Creation Wizard) และการคัดลอก (Copy) สัญลักษณ์ที่มีอยู่เดิมและแก้ไขสัญลักษณ์นั้นในชื่อใหม่

ข้อดีของการใช้ซิมโบลครีเอชันวิซาร์ดในการสร้างสัญลักษณ์ใหม่คือ

- ให้คำแนะนำการสร้างสัญลักษณ์ใหม่ตามขั้นตอนทีละขั้น
- สร้างได้โดยง่ายจากการชี้และคลิกของตัวชี้ที่กล่องข้อความ
- แสดงข้อมูลป้อนกลับ (Feedback) เพื่อช่วยในการตัดสินใจ
- สามารถย้อนกลับและเดินหน้าไปตามแต่ละขั้นตอนได้ตลอดเวลา

การเปิดซิมโบลครีเอชันวิซาร์ด

ขณะที่กำลังทำงานอยู่บนซิมเมติก คลิกที่ไอคอนแก้ไขสัญลักษณ์ (Edit Symbol Icon) เพื่อเปิดซิมโบลเอดิเตอร์ (Symbol Editor)



ในซิมโบลเอดิเตอร์ เลือก New จากเมนูพาร์ท (Part Menu) เพื่อวาดสัญลักษณ์ใหม่หรือเลือก Copy จากเมนูพาร์ทเพื่อคัดลอกรูปแบบที่ต้องการจากห้องสมุด (Library) ที่มีอยู่เดิม

การสร้างสัญลักษณ์โดยการวาดใหม่

ผู้ใช้งานสามารถสร้างสัญลักษณ์โดยการวาดใหม่ได้โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- วาดรูปภาพ
- การใส่พิน (Pin)
- การเปลี่ยนขนาดของกริด (Grid)
- การนิยามค่าแอดทริบิวต์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
- การกำหนดห้องสมุดสัญลักษณ์ใหม่

ตัวอย่าง : วงจรไดโอดบริดจ์เรคทีไฟเออร์

สำหรับตัวอย่างนี้ สมมติว่าผู้ใช้งานมีวงจรรย่อย (Subcircuit) ชื่อ Bridge อยู่ในไฟล์ห้องสมุดที่ตั้งชื่อว่า Mylib.lib อยู่ในไดรฟ์ที่กำลังทำงานอยู่แล้ว วงจรรย่อยกำหนดดังแสดงต่อไปนี้

.SUBCKT BRIDGE 1 2 3 4

D1 4 1 D1N914

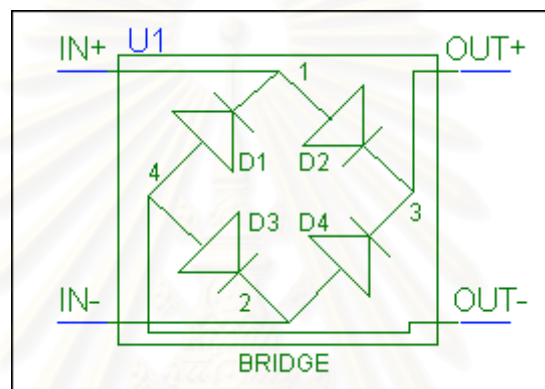
D2 1 3 D1N914

D3 4 2 D1N914

D4 2 3 D1N914

.ENDS

โดย D1 คือไดโอดตัวที่ 1 ในวงจรย่อยและ D1N914 เป็นไดโอดที่มีอยู่แล้วในห้องสมุด
สัญลักษณ์ที่จะสร้างมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 วงจรไดโอดบริดจ์เรกติไฟเออร์

การเปิดหรือการสร้างห้องสมุดสัญลักษณ์

1. เลือก Edit Library จากไฟล์เมนูเพื่อเปิดซิมโบลเอดิเตอร์
2. เพื่อเพิ่มสัญลักษณ์ใหม่เข้าไปในห้องสมุดสัญลักษณ์เดิม ให้เลือก Open จากไฟล์เมนูและเลือกห้องสมุดสัญลักษณ์ที่มีอยู่เดิม
3. ถ้าต้องการสร้างห้องสมุดใหม่ ให้เลือก Save As จากไฟล์เมนู พิมพ์ชื่อที่ต้องการแล้วคลิกที่ Yes เพื่อสร้างห้องสมุดขึ้นมา
4. เลือก New จากเมนูพาร์ทเพื่อเปิดกล่องข้อความคำจำกัดความ (Definition Dialog Box)
5. การใส่ค่าเป็นดังนี้
 - คำอธิบายของอุปกรณ์ (ตัวเลือก) - จะแสดงออกมาในช่องคำอธิบายเมื่อผู้ใช้งานเลือกสัญลักษณ์นั้นในซิมเมติกเอดิเตอร์
 - ชื่อ - ชื่อของสัญลักษณ์ที่จะถูกแสดงในซิมเมติก (ในกรณีนี้คือ "Bridge")
 - ชนิดของพาร์ท - ชนิดของพาร์ทคือส่วนที่เป็นองค์ประกอบ (Component) ดังแสดงในตัวอย่างนี้

- เอเคโอ (AKO, A Kind Of) หรือเอเลียส (Alias) - ใช้เอเคโอเมื่อผู้ใช้งานต้องการใช้รูปภาพและ
แอตทริบิวต์ของสัญลักษณ์นั้นเป็นสัญลักษณ์อีกตัวหนึ่ง และใช้เอเลียสในการเรียก
สัญลักษณ์นี้โดยใช้ชื่อหนึ่ง

การวาดรูปภาพ

เมื่อผู้ใช้งานให้คำจำกัดความแก่สัญลักษณ์แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการวาดรูปภาพ สำหรับตัวอย่างนี้ผู้ใช้งานอาจจะใช้การคัดลอกรูปภาพจากสัญลักษณ์ไดโอดที่มีอยู่ แต่เนื่องจากมีรูปภาพเฉพาะในแนวตั้งและแนวนอน ในขณะที่ตัวอย่างนี้ต้องการไดโอดที่เอียง 45 องศา ดังนั้นจึงควรใช้การวาดรูปภาพจากการเขียน (Scratch)

1. เลือกตัวเลือกการแสดงผล (Display Option) จากเมนูตัวเลือก (Options Menu) และกำหนดระยะห่างระหว่างกริดเป็น 0.2 และเลือกให้สัญลักษณ์อยู่บนกริด (Stay on Grid) และชิดกับกริด (Snap to Grid) เพื่อช่วยในการลากเส้นของส่วนต่าง ๆ ของสัญลักษณ์ แล้วจึงคลิกที่ OK
2. เลือก Polyline จากเมนูกราฟิก (Graphics Menu) เพื่อเปลี่ยนรูปตัวชี้เป็นดินสอ
3. วาดไดโอดที่อยู่ในตำแหน่งบนขวาของสัญลักษณ์ (D2) :
 - คลิกเพื่อเริ่มการวาด
 - ลากเส้นในแนวนอนยาว 6 เท่าของความยาวระหว่างกริด
 - คลิกเพื่อสร้างมุมฉากและเคลื่อนตัวชี้ขึ้นไปอีกยาว 6 เท่าของความยาวระหว่างกริด และคลิกเพื่อสร้างมุมขึ้น
 - ลากเส้นเชื่อมและทำวงปิดรูปสามเหลี่ยมโดยดับเบิลคลิกที่จุดเริ่มต้น
 - ลากเส้นตรงเอียง 45 องศาชิดกับมุมฉากของสัญลักษณ์เพื่อแสดงถึงด้านแคโรต
4. สร้างไดโอด 3 ตัวที่เหลือจากการคัดลอก
 - คลิกและลากเมาส์เพื่อสร้างกรอบครอบรูปไดโอด ปล่อยเมาส์แล้วเส้นที่ล้อมรอบจะเปลี่ยนเป็นสีแดง
 - เลือก Copy จากเมนูแก้ไข
 - เลือก Paste จากเมนูแก้ไข
 - วางไดโอดที่คัดลอกในตำแหน่ง D3
 - ก่อนที่วางไดโอดอีก 2 ตัวที่เหลือ ต้องหมุนรูปโดยการกดแป้น Ctrl และ R จึงวางไดโอดที่ตำแหน่ง D1 และ D4
5. เลือกตัวเลือกการแสดงผลจากเมนูตัวเลือกและกำหนดให้ระยะห่างระหว่างกริดเป็น 0.10
6. เลือก Box จากเมนูกราฟิกเพื่อเริ่มโหมดการวาดกล่อง (Box Drawing Mode)
 - คลิกและลากเมาส์ไปที่ตำแหน่งมุมขวาล่างของกล่องที่ต้องการ



- คลิกเพื่อสิ้นสุดการวาดกล่อง
- 7. เลือกลักษณะโหนดและย้ายไปอยู่ภายในกล่อง

การวาง핀

1. เลือก Pin จากเมนูกราฟฟิก
2. วางพินดังต่อไปนี้
 - วางพิน IN+ และพิน IN- ดังแสดงในรูปที่ ข.1
 - กดแป้น Ctrl และ R เพื่อหมุนพิน
 - วางพิน OUT+ และพิน OUT- ดังแสดงในรูปที่ ข.1
3. ดับเบิลคลิกที่ชื่อที่ตั้งมาแต่เดิม (Default Name) ของแต่ละพิน (pin1, pin2, pin3 และ pin4) เพื่อเปลี่ยนชื่อแต่ละพินเป็นดังนี้ตามลำดับคือ IN+, IN-, OUT+ และ OUT-
4. คลิกที่ชื่อหรือเลขของแต่ละพินและลากเมาส์ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ



การวาดรายละเอียดที่เหลือ

1. เลือกตัวเลือกการแสดงผลจากเมนูตัวเลือกและกำหนดให้ระยะห่างระหว่างกริดเป็น 0.10
2. เลือก Polyline จากเมนูกราฟฟิกเพื่อวาดเส้นเชื่อมต่อระหว่างโหนดในบริดจ์และจุดปลายของพินต่าง ๆ
3. เลือก Text จากเมนูกราฟฟิกเพื่อวางข้อความ D1 จนถึง D4 บนสัญลักษณ์โหนด
4. เพื่อเปลี่ยนขนาดของข้อความ ให้ดับเบิลคลิกที่ข้อความและแก้ไขขนาดตามต้องการ ตัวเลขที่แสดงคือค่าเปอร์เซ็นต์เทียบกับขนาดเดิม
5. เลือก BBox จากเมนูกราฟฟิกและคลิกเพื่อเริ่มการวาดกล่องขอบเขต (Bounding Box) ซึ่งเป็นตัวกำหนดพื้นที่ของสัญลักษณ์ในซิมเมติก
 - เลื่อนตัวชี้ไปยังตำแหน่งมุมขวาล่างของกล่องขอบเขตที่ต้องการ โดยให้ล้อมรอบสัญลักษณ์ทั้งหมด
 - คลิกเพื่อสิ้นสุดการวาดกล่องขอบเขต โดยจุดเชื่อมต่อทั้งหมดของพินต้องอยู่บนขอบหรือภายในกล่องขอบเขต
6. เลือก Origin จากเมนูกราฟฟิกและคลิกเพื่อสร้างจุดกำเนิดของสัญลักษณ์ซึ่งเป็นจุดที่สัญลักษณ์จะหมุนรอบในซิมเมติก
 - เลื่อนตัวชี้ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ
 - คลิกเพื่อวางจุดกำเนิด



การกำหนดค่าแอดทริบิวต์

ขั้นตอนสุดท้ายในการสร้างสัญลักษณ์คือการกำหนดค่าแอดทริบิวต์ เพื่อให้สามารถใช้สัญลักษณ์นี้ในการจำลองได้

1. เลือก Attributes จากเมนูพาร์ทเพื่อกำหนดค่าแอดทริบิวต์ต่าง ๆ ในกล่องแสดงการแก้ไขแอดทริบิวต์ดังนี้คือ

REFDES

PART

MODEL

TEMPLATE

2. ในช่องที่กำหนดชื่อ (Name) ให้ใส่ “REFDES” และกำหนดค่า (Value) เป็น “U?” ซึ่งเป็นตัวอ้างอิงที่แสดงบนชคีมเมติก และคลิกที่ Save Attr

3. ในช่องที่กำหนดชื่อให้ใส่ “PART” และกำหนดค่าเป็นชื่อที่ผู้ใช้งานใช้ในกล่องข้อความค่าจำกัดความในตอนแรก ในกรณีนี้คือ “Bridge” และคลิกที่ Save Attr

3. ในช่องที่กำหนดชื่อให้ใส่ “MODEL” และกำหนดค่าเป็นตัวเดียวกับที่ผู้ใช้งานใช้ในแบบจำลองหรือวงจรรย่อย ในกรณีนี้คือ “Bridge” และคลิกที่ Save Attr

4. ในช่องที่กำหนดชื่อให้ใส่ “TEMPLATE” และกำหนดค่าให้สอดคล้องกับการสร้างโครงข่าย (Netlist) สำหรับการจำลอง ในกรณีนี้คือ “X^@REFDES %IN+ %IN- %OUT+ %OUT-@MODEL” (โดยที่ X^@REFDES คือตัวที่แสดงว่าเป็นวงจรรย่อยในโครงข่ายสำหรับการจำลอง, % คือตัวที่กำหนดค่าของแต่ละพินในวงจเรียงตามลำดับ และ @MODEL คือตัวที่แสดงถึงการแทนค่าในแอดทริบิวต์ของแบบจำลอง) และคลิกที่ Save Attr

5. คลิกที่ OK

6. เลือก Save จากไฟล์เมนู

7. พิมพ์ชื่อของห้องสมุดสัญลักษณ์ในช่องที่กำหนดชื่อของไฟล์เป็น “Bridge”

8. คลิกที่ OK

9. คลิกที่ Yes เมื่อมีกล่องข้อความถามว่าให้เพิ่มลิสต์ของห้องสมุดสัญลักษณ์ของชคีมเมติกด้วยหรือไม่ (“Add to list of Schematics configured libraries?”) ซึ่งในตอนนีผู้ใช้งานสามารถเรียกใช้พาร์ทที่ชื่อว่า “Bridge” ในชคีมเมติกสำหรับการจำลองได้แล้ว



ภาคผนวก ค

ตารางข้อมูลของระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลกายภาพของเสา 901

รหัสเสา	คุณลักษณะของเสา	สายเฟส	สายดิน
901	ชนิดวงจรเดี่ยว		
	เสา (Tower)	31.2	41.0
	ความยาวของเสาตามแนวขวาง (Horizontal Length)	13	13.85
	ระยะหย่อนสูงสุด (Maximum Sag)	18.32	18.32
	ระยะห่างจากพื้นดินกับระยะหย่อนสูงสุด (Ground Clearance)	12.88	22.68

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลกายภาพของสายส่งแรงสูง

รหัสเสา	คุณลักษณะของสาย	สายเฟส	สายดิน
901, 902	ชนิด (Type)	795 MCM ACSR	Class A 3/8" EHS
	จำนวนสายตีเกลียว (Number of Strands)	Al 54/st 7	st 7
	ระยะห่างของแต่ละเส้นในเฟสเดียวกัน (Spacing)	18 นิ้ว	-
	รัศมีภายนอก (Outside Diameter)	1,093 นิ้ว	0.36 นิ้ว
	รัศมีเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (GMR)	0.0368 ฟุต	0.00016 ฟุต
	ความต้านทานกระแสสลับ (AC Resistance)	0.08487 โอห์ม/กม.	4.26 โอห์ม/กม.
	ความต้านทานกระแสตรง (DC Resistance)	0.07180 โอห์ม/กม.	3.06 โอห์ม/กม.
	จำนวนสายควบต่อเฟส (Number of Bundles/phase)	4	-
	จำนวนสายดิน (Number of Overhead Ground Wire)	-	2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์

NO.	TOWER CODE	LINE CODE	LINE SECTION	CCT NO	POSITIVE SEQUENCE (P.U.)			ZERO SEQUENCE (P.U.)			DISTANCE (KM)
					R_1	X_1	Y_1	R_0	X_0	Y_0	
			MAE MOH UNITS 8-11 PROJECT								
1	901	112	MAEMOH 3 - THA TAKO	41	0.00264	0.03482	3.34795	0.02752	0.12423	2.09251	325.6
2	902	112	MAEMOH 3 - THA TAKO	42	0.0027	0.03363	3.62629	0.04963	0.20799	1.52394	333
3	902	112	MAEMOH 3 - THA TAKO	43	0.0027	0.03363	3.62629	0.04963	0.20799	1.52394	333
4	901	112	THA TAKO - NONG CHOK	41	0.00173	0.0225	2.12624	0.01856	0.08138	1.31903	208
			AO PHAI THERMAL PLANT PROJECT								
5	902	122	AO PHAI 2 - NONG CHOK	41	0.00131	0.01611	1.69598	0.02554	0.10206	0.70323	157
6	902	122	AO PHAI 2 - SAI NOI	41	0.00201	0.02178	2.6334	0.03819	0.15548	1.09773	243
			MAE MOH UNITS 12-13 PROJECT								
7	902	122	THA TAKO - NONG CHOK	42	0.00178	0.02198	2.32718	0.03423	0.03838	0.96816	215
8	902	122	NONG CHOK - SAI NOI	41	0.00101	0.01234	1.29506	0.01972	0.07837	0.53615	120
9	902	122	NONG CHOK - SAI NOI	42	0.00101	0.01234	1.29506	0.01972	0.07837	0.53615	120
			LAMPANG UNITS 1-4 PROJECT								
10	902	122	LAMPANG - MAE MOH 3	41	0.00015	0.00186	0.19401	0.003	0.01183	0.08014	18
11	902	122	LAMPANG - THA TAKO	43	0.00283	0.03537	3.82673	0.05165	0.21798	1.61133	351
12	902	122	LAMPANG - THA TAKO	44	0.00283	0.03537	3.82673	0.05165	0.21798	1.61133	351

ตารางที่ ค.4 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อกับระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์

Power Plant	Generator Code	Trade Mark	Voltage Rating (kV)	Rated Capacity			Speed r.p.m.	Flywheel Effect ωr^2 (Ton-m ²)	Inertia Constant (p.u.-sec)	P.U.Reactance on 100 MVA Base		
				MW	PF	MVA				X'd	X''d	X ₀
Region 4 Mae Moh 3	S8,S9,S10,S11, S12,S13	Fuji	18	300	0.9	333	3,000	26.3	12.978	0.087	0.069	0.0324

ตารางที่ ค.5 ข้อมูลของหม้อแปลงที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์

Power Plant	Generator Transformer Code	Trade Mark	Voltage Rating (kV)	Rated Capacity (MVA) (Main Winding)	Tap (HV)	P.U.Impedance on 100 MVA Base
Region 4 Mae Moh 3	KG8A,KG9A,KG10A, KG11A,KG12A, KG13A,	Fuji	500/18	370	(+)2×2.5	0.0361

ตารางที่ ค.6 ข้อมูลของหม้อแปลงที่ต่ออยู่ที่สถานีไฟฟ้าย่อยในระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์

Power Plant	Transformer Code	Trade Mark	Type	No. of Unit	3-1p MVA	System Voltage (kV)	Connection	XHM	XH	XM	XT
Region 4 Mae Moh 3	KT5A	Toshiba	Auto	3	120/160/200-40/53.33/66.67	525 GRD.Y/307.1-242Y/139.7-22/242-22	YYd	j0.0208611	j0.0223053	j0.0014444	j0.133777
The Tako	KT1A, KT2A	Fuji	Auto	3	120/160/200-40/53.33/66.67	525 GRD.Y/307.1-242Y/139.7-22/242-22	YYd	j0.0224444	j0.0251388	j0.0026944	j0.1421111

ตารางที่ ค.7 ข้อมูลทั่วไปของลูกถ้วยติดเสาในระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์

รายการ	ค่าตัวเลข	หน่วย
Type (Core Structure : Chocolate brown)		
BIL (1.2/50 μ s)	1,800	กิโลโวลต์
Switching Surge (250/2500 μ s)	1,100	กิโลโวลต์
Low Frequency Wet Withstand Voltage	710	กิโลโวลต์
Max. Continuous Voltage (line to line)	550	กิโลโวลต์
Creepage Distance	11,800	นิ้ว
Height	152	นิ้ว
จำนวนลูกถ้วยต่อ 1 ชุด		
Tension (ANSI class 52-11)	27	ลูกถ้วย
Double & Triple Tension String (ANSI class 52-8)	32	ลูกถ้วย

ตารางที่ ค.8 ข้อมูลทั่วไปของลูกถ้วยแขวนในระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์

รายการ	ค่าตัวเลข	หน่วย
Type ANSI class 52-8 (Fog Type : Chocolate brown & grey)		
Min. Leakage Distance	305-432	กิโลเมตร
Low Frequency Dry Flashover	80	กิโลโวลต์
Low Frequency Wet Flashover	50	กิโลโวลต์
Critical Impulse Flashover, Pos	125	กิโลโวลต์
Critical Impulse Flashover, Neg	130	กิโลโวลต์
จำนวนลูกถ้วยต่อ 1 ชุด		
V-string	26	ลูกถ้วย
I-string	27	ลูกถ้วย

ตารางที่ ค.9 ข้อมูลทั่วไปของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์

รายการ	ค่าตัวเลข	หน่วย
Type Outdoor, 3 pole, Single Phase		
Insulation Type SF ₆		
BIL	1,800	kV Crest
Switching Surge Withstand (250/2500 μ s)		
Terminal-to-ground-breaker Closed	1,175	kV Crest
Terminal-to-terminal-breaker Open	1,300	kV Crest
Maximum Electrical Pole Closing Spantime	5.5	ms
Closing Resistor		
Rating	350-520	ohms
Electrical Insertion Time	6-15	ms
System Voltage		
Nominal	525	kV
Max. Continuous	550	kV

ตารางที่ ค.10 ข้อมูลทั่วไปของรีแอคเตอร์ขนานในระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์

รายการ	ค่าตัวเลข	หน่วย
Type Neutral Reactor, Oil Filled Outdoor		
Rated Capacity	90	MVAR
BIL (High voltage)	1,300	kV
Neutral Ckt Zero Seq. React	4,200	ohms

ตารางที่ ค.11 ข้อมูลทั่วไปของกัับดักเสิร์จในระบบสายส่งแรงสูง 500 กิโลโวลต์

รายการ	ค่าตัวเลข	หน่วย
Porcelain Colour (Brown)		
Voltage Rating	396	kV
Arrester BIL (Insulation withstand voltage)	1,600	kV Crest
Maximum Switching Surge Protective Level (45×90 μ s wave)	845	kV Crest
Test Voltage Wet (50 Hz 1 min)	710	kV
Critical Operating Voltage (1 mA current flow)	397	kV Crest
Leakage Current		
Arrester Voltage Rating	10	mA rms
Creepage Distance	14,200	mm
Height without Insulaing Base	5,053	mm
Discharge Voltage (8×20 μ s wave)		
1.5 kA	867 kV Crest	
3.0 kA	898 kV Crest	
5.0 kA	922 kV Crest	
10 kA	975 kV Crest	
20 kA	1,020 kV Crest	
40 kA	1,120 kV Crest	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ข้อมูลของวงจรร้อยและไฟล์อินพุทของโปรแกรมพีสไปซ์

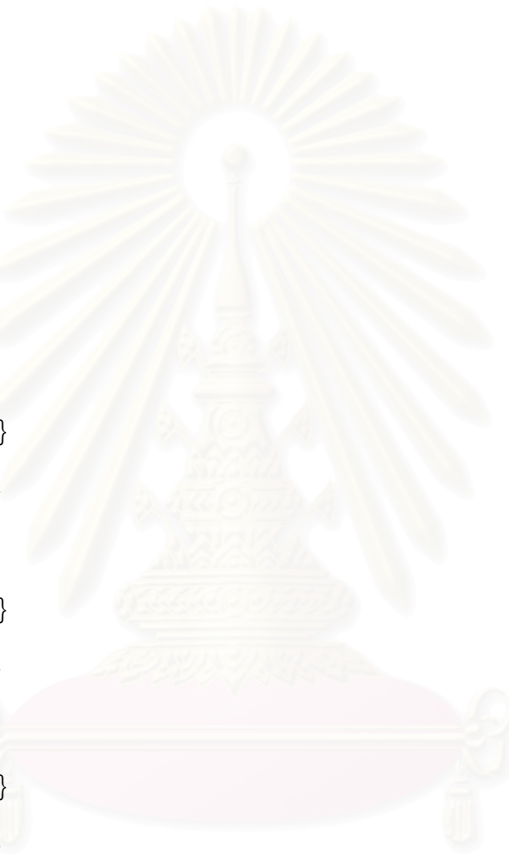
ง.1 วงจรร้อยของแบบจำลองแบบพายนน์

```
* Subckt Lump_Pi
.subckt Lump_Pi in out params: len=1 r=0 l=1 c=1
RPi1 in 71 {len*r}
CPi1 in 0 {len*c/2}
LPi1 71 out {len*l}
CPi2 out 0 {len*c/2}
.ends
```

ง.2 วงจรร้อยของแบบจำลองแบบก้อน 28 ส่วน

```
* Subckt Lump28
.subckt Lump28 in out params: len=1 r=0 l=1 c=1 g=0
RP1 in 31 {len*r/28}
CP1 in 0 {len*c/56}
LP1 31 32 {len*l/28}
CP2 32 0 {len*c/28}
RP2 32 33 {len*r/28}
LP2 33 34 {len*l/28}
CP3 34 0 {len*c/28}
RP3 34 35 {len*r/28}
LP3 35 36 {len*l/28}
CP4 36 0 {len*c/28}
RP4 36 37 {len*r/28}
LP4 37 38 {len*l/28}
CP5 38 0 {len*c/28}
RP5 38 39 {len*r/28}
LP5 39 40 {len*l/28}
```

CP6 40 0 {len*c/28}
RP6 40 41 {len*r/28}
LP6 41 42 {len*l/28}
CP7 42 0 {len*c/28}
RP7 42 43 {len*r/28}
LP7 43 44 {len*l/28}
CP8 44 0 {len*c/28}
RP8 44 45 {len*r/28}
LP8 45 46 {len*l/28}
CP9 46 0 {len*c/28}
RP9 46 47 {len*r/28}
LP9 47 48 {len*l/28}
CP10 48 0 {len*c/28}
RP10 48 49 {len*r/28}
LP10 49 50 {len*l/28}
CP11 50 0 {len*c/28}
RP11 50 51 {len*r/28}
LP11 51 52 {len*l/28}
CP12 52 0 {len*c/28}
RP12 52 53 {len*r/28}
LP12 53 54 {len*l/28}
CP13 54 0 {len*c/28}
RP13 54 55 {len*r/28}
LP13 55 56 {len*l/28}
CP14 56 0 {len*c/28}
RP14 56 57 {len*r/28}
LP14 57 58 {len*l/28}
CP15 58 0 {len*c/28}
RP15 58 59 {len*r/28}
LP15 59 60 {len*l/28}
CP16 60 0 {len*c/28}



สถาบันวิทยบริการ
คลังวรรณกรรมมหาวิทยาลัย

RP16 60 61 {len*r/28}

LP16 61 62 {len*l/28}

CP17 62 0 {len*c/28}

RP17 62 63 {len*r/28}

LP17 63 64 {len*l/28}

CP18 64 0 {len*c/28}

RP18 64 65 {len*r/28}

LP18 65 66 {len*l/28}

CP19 66 0 {len*c/28}

RP19 66 67 {len*r/28}

LP19 67 68 {len*l/28}

CP20 68 0 {len*c/28}

RP20 68 69 {len*r/28}

LP20 69 70 {len*l/28}

CP21 70 0 {len*c/28}

RP21 70 71 {len*r/28}

LP21 71 72 {len*l/28}

CP22 72 0 {len*c/28}

RP22 72 73 {len*r/28}

LP22 73 74 {len*l/28}

CP23 74 0 {len*c/28}

RP23 74 75 {len*r/28}

LP23 75 76 {len*l/28}

CP24 76 0 {len*c/28}

RP24 76 77 {len*r/28}

LP24 77 78 {len*l/28}

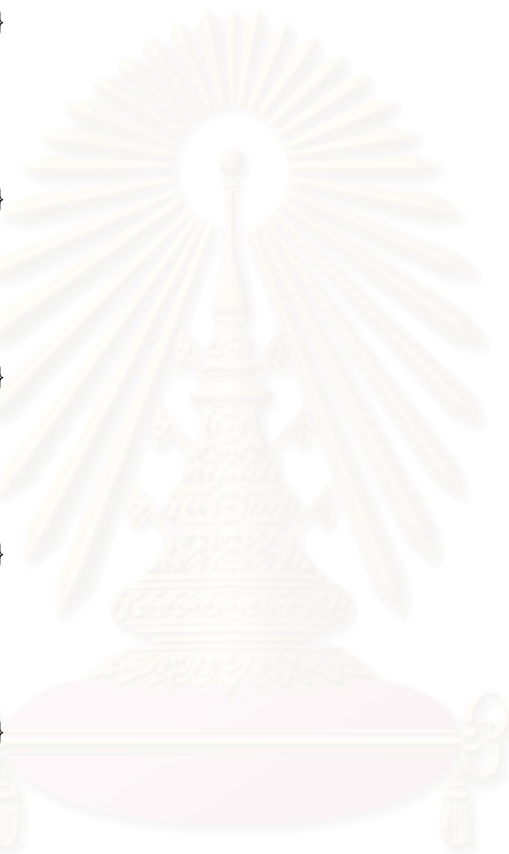
CP25 78 0 {len*c/28}

RP25 78 79 {len*r/28}

LP25 79 80 {len*l/28}

CP26 80 0 {len*c/28}

RP26 80 81 {len*r/28}



สถาบันวิทยบริการ
กองบรรณานุกรมมหาวิทยาลัย

```

LP26 81 82 {len*I/28}
CP27 82 0 {len*c/28}
RP27 82 83 {len*r/28}
LP27 83 84 {len*I/28}
CP28 84 0 {len*c/28}
RP28 84 85 {len*r/28}
LP28 85 out {len*I/28}
CPout out 0 {len*c/56}
.ends

```

ง.3 วงจรย่อยของเซอร์กิตเบรกเกอร์

```

* Subckt Breaker
.subckt breaker 1 2 params: Tstart=0 Tins=6m Rins=520
X_U1 1 3 Sw_tClose PARAMS:tClose={Tstart} ttran=0.01u Rclosed=0.01 Ropen=10Meg
R1 3 2 {Rins}
X_U2 1 2 Sw_tClose PARAMS:tClose={Tins} ttran=0.01u Rclosed=0.01 Ropen=10Meg
.ends

```

ง.4 วงจรย่อยของรีแอกเตอร์ชานาน

```

* Subckt ShuntReactor
.subckt ShuntReactor in out params: Q_MVar=1 Vsys_kV=1
LShuntReactor in out {Vsys_kV*Vsys_kV*7/(Q_MVar*2*22*50)}
.ends

```

ง.5 วงจรย่อยของกักเก็บพลังงาน

```

* Subckt SurgeArrester
.subckt SurgeArrester in out
ERES in 7 VALUE = {TABLE(I(Vsense),
+ -40k, -1120k,
+ -20k, -1020k,
+ -10k, -975k,

```

```

+ -5.0k, -922k,
+ -3.0k, -898k,
+ -1.5k, -867k,
+ 0, 0,
+ 1.5k, 867k,
+ 3.0k, 898k,
+ 5.0k, 922k,
+ 10k, 975k,
+ 20k, 1020k,
+ 40k, 1120k}}
Vsense 7 out
.ends

```

ง.6 ไฟล์อินพุตของโปรแกรมพีเอสไปซ์ของวงจร RLC ขน่าน ในกรณีที่ใช้ $R = 430 \Omega$

```

* C:\MSimEv_8\EXAMPLES\SCHEMAT\EXAMPLE\RLC.sch
****   CIRCUIT DESCRIPTION
* Schematics Version 8.0 - July 1997
** Analysis setup **
.tran 10ns 0.3ms
.OP
* From [SCHEMATICS NETLIST] section of msim.ini:
.lib nom.lib
.INC "RLC.net"
**** INCLUDING RLC.net ****
* Schematics Netlist *
R_R1      SW 0 430
C_C1      CAP 0 0.1uF IC=20kV
X_U1      CAP SW Sw_tClose PARAMS: tClose=0 ttran=1u Rclosed=0.01 Ropen=1Meg
L_L1      SW 0 8mH
**** RESUMING RLC.cir ****

```



```
.INC "RLC.als"
**** INCLUDING RLC.als ****
* Schematics Aliases *
.ALIASES
R_R1      R1(1=SW 2=0 )
C_C1      C1(1=CAP 2=0 )
X_U1      U1(1=CAP 2=SW )
L_L1      L1(1=SW 2=0 )
_  _ (SW=SW)
_  _ (CAP=CAP)
.ENDALIASES
**** RESUMING RLC.cir ****
.probe
.END
```

ง.7 ไฟล์อินพุตของโปรแกรมพีเอสไปซ์ของวงจรถอดศึกษาการกระตุ้นสายส่ง

```
* C:\MSimEv_8\EXAMPLES\SCHEMAT\EXAMPLE\transmission1phase.sch
****   CIRCUIT DESCRIPTION
*****
* Schematics Version 8.0 - July 1997
** Analysis setup **
.tran 10us 80ms SKIPBP
.OP
.STMLIB "C:\MSimEv_8\EXAMPLES\SCHEMAT\EXAMPLE\transm.stl"
* From [SCHEMATICS NETLIST] section of msim.ini:
.lib nom.lib
.INC "transmission1phase.net"
**** INCLUDING transmission1phase.net ****
* Schematics Netlist *
R_R3      0 R3 1e9
V_V1      $N_0001 0
```

```

+SIN 0 1 50 0 0 90
X_B1      $N_0001 $N_0002 breaker PARAMS: Tstart=0 Tins=6m Rins=520
T_T1      $N_0002 0 R3 0 LEN=325.6 R=0.0839 L=1.5794m G=0 C=11.4555n
**** RESUMING transmission1phase.cir ****
.INC "transmission1phase.als"
**** INCLUDING transmission1phase.als ****
* Schematics Aliases *
.ALIASES
R_R3      R3(1=0 2=R3 )
V_V1      V1(+=$N_0001 -=0 )
X_B1      B1(IN=$N_0001 OUT=$N_0002 )
T_T1      T1(A+=$N_0002 A-=0 B+=R3 B-=0 )
_ _ (R3=R3)
.ENDALIASES
**** RESUMING transmission1phase.cir ****
.probe
.END

```

ง.8 ไฟล์อินพุตของโปรแกรมพีเอสไปซ์ของวงจรรณีศึกษาทรานเซียนด์ฟ้าผ่า

```

* C:\MSimEv_8\EXAMPLES\SCHEMAT\EXAMPLE\lightning.sch
**** CIRCUIT DESCRIPTION
*****
* Schematics Version 8.0 - July 1997
** Analysis setup **
.tran 0.05us 0.5ms
.OP
* From [SCHEMATICS NETLIST] section of msim.ini:
.lib nom.lib
.INC "lightning.net"
**** INCLUDING lightning.net ****
* Schematics Netlist *

```

```

I_Lightning    0 TOP1
+PULSE 0 20k 0 5u 395u 1p 1k
T_T2    BUS3 0 BUS4 0 LEN=0.08 R=0.295 L=6.116m G=0 C=51.242e-9
R_RMatching    BUS1 SOURCE 345
T_T1    BUS1 0 BUS2 0 LEN=5.6 R=0.295 L=6.116m G=0 C=51.242e-9
L_L1    BUS2 BUS3 1.5uH
R_RLoad    BUS4 0 100meg
X_A1    BUS4 0 SurgeArrester
R_Rfooting    Tbase 0 10
V_Vsource    SOURCE 0
+SIN 0 93.8k 50 0 0 60
R_Rtop    TOP1 TOP 1
T_Tower    TOP 0 Tbase 0 Z0=260 TD=.1u
R_Roverhead    TOP 0 200
X_U3    TOP BUS1 Sw_tClose PARAMS: tClose=0.3u ttran=1u Rclosed=0.01
+ Ropen=1Meg
R_R9    TOP BUS1 1meg
C_C4    BUS4 0 10n IC=80k
**** RESUMING lightning.cir ****
.INC "lightning.als"
**** INCLUDING lightning.als ****

* Schematics Aliases *
.ALIASES
I_Lightning    ILightning(+=0 -=TOP1 )
T_T2    T2(A+=BUS3 A-=0 B+=BUS4 B-=0 )
R_RMatching    RMatching(1=BUS1 2=SOURCE )
T_T1    T1(A+=BUS1 A-=0 B+=BUS2 B-=0 )
L_L1    L1(1=BUS2 2=BUS3 )
R_RLoad    RLoad(1=BUS4 2=0 )
X_A1    A1(IN=BUS4 OUT=0 )
R_Rfooting    Rfooting(1=Tbase 2=0 )

```

```

V_Vsource      Vsource(+=SOURCE -=0 )
R_Rtop        Rtop(1=TOP1 2=TOP )
T_Tower       Tower(A+=TOP A-=0 B+=Tbase B-=0 )
R_Roverhead   Roverhead(1=TOP 2=0 )
X_U3         U3(1=TOP 2=BUS1 )
R_R9         R9(1=TOP 2=BUS1 )
C_C4         C4(1=BUS4 2=0 )
_ _ (TOP1=TOP1)
_ _ (BUS3=BUS3)
_ _ (BUS4=BUS4)
_ _ (SOURCE=SOURCE)
_ _ (BUS1=BUS1)
_ _ (BUS2=BUS2)
_ _ (Tbase=Tbase)
_ _ (TOP=TOP)
.ENDALIASES
**** RESUMING lightning.cir ****
.probe
.END

```

ง.9 ไฟล์อินพุตของโปรแกรมพีเอสไปซ์ของวงจรรณีสึกษาสวิตซิงตัวเก็บประจุ

```

* C:\MSimEv_8\EXAMPLES\SCHEMAT\EXAMPLE\capswitching.sch
****   CIRCUIT DESCRIPTION
*****
* Schematics Version 8.0 - July 1997
** Analysis setup **
.tran 50ns 25ms SKIPBP
.OP
* From [SCHEMATICS NETLIST] section of msim.ini:
.lib nom.lib
.INC "capswitching.net"

```

**** INCLUDING capswitching.net ****

* Schematics Netlist *

L_L1 \$N_0001 BUS 10mH

R_R1 BUS 0 175

R_R2 BUS \$N_0002 1

L_L2 \$N_0002 \$N_0003 40uH

X_U1 \$N_0003 Load Sw_tClose PARAMS: tClose=0.1m ttran=1u Rclosed=0.01

+ Ropen=10Meg

V_V1 \$N_0001 0

+SIN 0 187.79k 60 0 0 90

C_C2 Load 0 6.02u

C_C1 BUS 0 7.52u IC=190k

**** RESUMING capswitching.cir ****

.INC "capswitching.als"

**** INCLUDING capswitching.als ****

* Schematics Aliases *

.ALIASES

L_L1 L1(1=\$N_0001 2=BUS)

R_R1 R1(1=BUS 2=0)

R_R2 R2(1=BUS 2=\$N_0002)

L_L2 L2(1=\$N_0002 2=\$N_0003)

X_U1 U1(1=\$N_0003 2=Load)

V_V1 V1(+= \$N_0001 -=0)

C_C2 C2(1=Load 2=0)

C_C1 C1(1=BUS 2=0)

_ _ (BUS=BUS)

_ _ (Load=Load)

.ENDALIASES

**** RESUMING capswitching.cir ****

.probe

.END

ง.10 วงจรย่อยของสายส่ง 2 เส้นในหัวข้อ 4.5

* Subckt Linecoupled2

.subckt Linecoupled2 IN1 IN2 OUT1 OUT2

+ params: length=3.000e-1 w0=6.284e10

E_sg1 ug1 ugx1 poly(2) udlg1 0 udlg2 0

+ 0.0 7.071e-1 7.071e-1

E_sl1 ul1 ulx1 poly(2) udll1 0 udll2 0

+ 0.0 7.071e-1 7.071e-1

E_sg2 ug2 ugx2 poly(2) udlg1 0 udlg2 0

+ 0.0 -7.071e-1 7.071e-1

E_sl2 ul2 ulx2 poly(2) udll1 0 udll2 0

+ 0.0 -7.071e-1 7.071e-1

*

F_sg1 0 udlg1 poly(2) Vf_g1 Vf_g2

+ 0.0 3.284e1 -3.284e1

F_sl1 0 udll1 poly(2) Vf_l1 Vf_l2

+ 0.0 3.284e1 -3.284e1

F_sg2 0 udlg2 poly(2) Vf_g1 Vf_g2

+ 0.0 3.949e1 3.949e1

F_sl2 0 udll2 poly(2) Vf_l1 Vf_l2

+ 0.0 3.949e1 3.949e1

*

Vf_g1 ugx1 0 0V

Vf_l1 ulx1 0 0V

Vf_g2 ugx2 0 0V

Vf_l2 ulx2 0 0V

*

R_rl1 udlg1 ll1 1

R_rl2 udlg2 ll2 1

R_rr1 udll1 lr1 1

R_rr2 udll2 lr2 1


```

*
E_lapl1 I11 0 LAPLACE {2*V(udI11)-V(Ir1)}
+ {EXP(-length*sqrt((2*8.997e-1*sqrt(2*s/w0)+s/1.746e8)/(2*4.543e0
+/(w0*w0/1.746e8/1.746e8)+1.746e8/s))))}
E_lapr1 Ir1 0 LAPLACE {2*V(udlg1)-V(I11)}
+ {EXP(-length*sqrt((2*8.997e-1*sqrt(2*s/w0)+s/1.746e8)/(2*4.543e0
+/(w0*w0/1.746e8/1.746e8)+1.746e8/s))))}
E_lapl2 I12 0 LAPLACE {2*V(udI12)-V(Ir2)}
+ {EXP(-length*sqrt((2*9.214e-1*sqrt(2*s/w0)+s/1.602e8)/(2*5.296e0
+/(w0*w0/1.602e8/1.602e8)+1.602e8/s))))}
E_lapr2 Ir2 0 LAPLACE {2*V(udlg2)-V(I12)}
+ {EXP(-length*sqrt((2*9.214e-1*sqrt(2*s/w0)+s/1.602e8)/(2*5.296e0
+/(w0*w0/1.602e8/1.602e8)+1.602e8/s))))}
*
R_rsg1 IN1 ug1 1e-9
R_rpg1 IN1 0 1e9
R_rsl1 OUT1 ul1 1e-9
R_rpl1 OUT1 0 1e9
R_rsg2 IN2 ug2 1e-9
R_rpg2 IN2 0 1e9
R_rsl2 OUT2 ul2 1e-9
R_rpl2 OUT2 0 1e9
.ends

```

ง.11 ไฟล์อินพุทของโปรแกรมพีเอสไปซ์ของวงจรรณีศึกษาแบบจำลองของสายส่งหลายเส้น

* C:\MSimEv_8\EXAMPLES\SCHEMAT\EXAMPLE\LinecoupledLossy2.sch

**** CIRCUIT DESCRIPTION

* Schematics Version 8.0 - July 1997

** Analysis setup **

```

.tran 10ps 6ns
.OP
* From [SCHEMATICS NETLIST] section of msim.ini:
.lib nom.lib
.INC "LinecoupledLossy2.net"
**** INCLUDING LinecoupledLossy2.net ****
* Schematics Netlist *
R_R1    $N_0001 1 50
R_R2    2 0 50
R_R3    4 0 50
V_V1    $N_0001 0
+PULSE 0 2 0 1e-15 1e-15 1n 1
R_R4    3 0 50
X_T1    1 2 3 4 Linecoupled2 PARAMS: LENGTH=300m
**** RESUMING LinecoupledLossy2.cir ****
.INC "LinecoupledLossy2.als"
**** INCLUDING LinecoupledLossy2.als ****
* Schematics Aliases *
.ALIASES
R_R1    R1(1=$N_0001 2=1 )
R_R2    R2(1=2 2=0 )
R_R3    R3(1=4 2=0 )
V_V1    V1(+=$N_0001 -=0 )
R_R4    R4(1=3 2=0 )
X_T1    T1(IN1=1 IN2=2 OUT1=3 OUT2=4 )
-  _(1=1)
-  _(2=2)
-  _(4=4)
-  _(3=3)
.ENDALIASES
**** RESUMING LinecoupledLossy2.cir ****

```

.probe

.END



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวินิจ ชันไชย เกิดเมื่อวันที่ 28 กรกฎาคม พ.ศ. 2519 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ ๗ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2540 แล้วเข้ารับการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2541 ปัจจุบันเป็นลูกจ้างโครงการมียาชาวา ตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า ฝ่ายสัญญาณไฟ กองสัญญาณไฟและเครื่องหมาย สำนักการจราจรและขนส่ง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย