การจำลองสายส่งระบบไฟฟ้ากำลัง

TRANSMISSION LINE SIMULATOR

โดย

นายเทียนชัย ฐานิกเกษตร

นายสมบูรณ์ เกียรติจักรวาล

นายสุรชัย วาริพันธ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2534

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

008423

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2534

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การจำลองสายส่งระบบไฟฟ้ากำลัง

ผู้จัดทำ

1. นาย เทียนชัย ฐานิกเกษตร 31.1092
2. นาย สมบูรณ์ เกียรติจักรวาล 31.1303
3. นาย สุรชัย วาริพันธ์ 31.1362

อาจารย์ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

(.....)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองสายส่งระบบไฟฟ้ากำลัง

นาย เทียนชัย ฐานิกเกษตร
นาย สมบูรณ์ เกียรติจักรวาล
นาย สุรชัย วาริพันธน์
อ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2534

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยในเรื่องของระบบสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้านั้น สายส่งกำลังไฟฟ้านับเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการศึกษาทำความเข้าใจถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของระดับแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, ตัวประกอบกำลังและกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในระบบสายส่ง ในบทความวิจัยนี้เสนอวิธีการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้าเพื่อทำการค้นคว้าในห้องปฏิบัติการ โดยจัดสร้างในรูปของตัวความต้านทาน, ตัวเหนี่ยวนำ, และตัวเก็บประจุ ที่เป็นสมมูลย์ทางไฟฟ้าของสาย กับระบบแรงดันไฟฟ้าต่ำ เพื่อทำการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบจำลองในภาวะต่างๆ จากข้อมูลที่ได้จะสามารถแปลงกลับไปเพื่อทำนายผลในระบบสายส่งจริงในระดับแรงดันไฟฟ้าสูงๆได้ ทั้งนี้โดยอาศัยหลักการของการแปลงค่า "เปอร์ยูนิต" เป็นฐานสำคัญร่วมกับไมโครคอมพิวเตอร์ ทำการจำลองระบบสายส่งเพื่อวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ และทำนายผลในระบบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TRANSMISSION LINE SIMULATOR

Mr. Tianchai Thanikkaset

Mr. Somboon Kiatchakrawan

Mr. Surachai Wariphan

Mr. Siriwat Potivejkul M.eng Advisor

1991

ABSTRACT

An improtant criterion in the study of power system in electrical engineering is the transmission line, envolving the determination of voltage level, current, power factor and losses on the line. This research utilizes transmission line simulation for laboratory study. The equivalent values of resistance , inductance and capacitance in a typical high-voltage power line is deduced to low-voltage for simulation in different circumstances. The acquired data could be translated to the actual behaviour of the high voltage power line. The translation is by principle of "per-unit quantity" incooperating a microcomputer, enabeling the power line simulation to be analyzed and evaluated in laboratory for the aquivalent values of the actual power transmission line.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
1	บทนำ	1
2	พารามิเตอร์ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า	5
	2.1 พารามิเตอร์ของสายส่ง	5
	2.2 ค่าความเหนี่ยวนำของสาย	7
	2.3 ค่าความต้านทานของสายและสกินเอฟเฟกต์	28
	2.4 ค่าความจุไฟฟ้าของสาย	32
	2.5 ค่าความนำไฟฟ้าของสาย	45
3	ปริมาณทางไฟฟ้าและระบบเปอร์ยูนิต	46
	3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง	46
	3.2 สายส่งระยะสั้น	47
	3.3 สายส่งระยะปานกลาง	48
	3.4 สายส่งระยะไกล	50
	3.5 ระบบเปอร์ยูนิต	51
4	การคำนวณและการออกแบบ	53
	4.1 การคำนวณหาพารามิเตอร์ของสายส่งที่จะจำลอง	53
	4.2 แสดงบล็อกโฟลว์ชาร์ต	56
	4.3 อธิบายโฟลว์ชาร์ต	60
	4.4 การออกแบบและการสร้างตัวเหนี่ยวนำ	64
5	ผลการทดสอบและผลการคำนวณ	67
	5.1 วิธีทดสอบ	67
	5.2 ผลการทดสอบ	69
	5.3 ผลการคำนวณ	74
	5.4 เปรียบเทียบผลการคำนวณของระบบจริงและระบบจำลอง	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่	เรื่อง	หน้า
6	บทวิจารณ์และสรุป	82
ภาคผนวก		84
กิตติกรรมประกาศ		116
หนังสืออ้างอิง		117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	เรื่อง	หน้า
1.1	ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบไฟฟ้ากำลัง	3
2.1	แสดงฟลักซ์คล้องภายนอกสาย	8
2.2	แสดงฟลักซ์คล้องภายในสาย	9
2.3	แสดงการวางสายในระบบ 1 เฟส 2 สาย	11
2.4	แสดงการวางสายทั้งกลุ่มขนานกัน	13
2.5	แสดงการวางสายรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	14
2.6	แสดงการวางสายรูปสามเหลี่ยมที่มีระยะห่างไม่เท่ากัน	14
2.7	แสดงสายตีเกลียว 2 เส้นที่มีจำนวนสายย่อยไม่เท่ากัน	15
2.8	การหาระยะห่างเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต	17
2.9	แสดงการวางสายควบชนิด 2,3,4 และ 10 เส้น	19
2.10	แสดงการวางสายควบชนิด 4 เส้นระบบ 3 เฟส	20
2.11	แสดงสายส่งวงจรคู่ระบบ 1 เฟส วางสายสมดุล	22
2.12	แสดงสายส่งวงจรคู่ระบบ 1 เฟส	22
2.13	แสดงสายส่งวงจรคู่ระบบ 1 เฟสที่มีการสลับสาย	23
2.14	แสดงการวางสาย 3 เฟสสมดุล 2 ชุดขนานกัน	24
2.15	แสดงการวางสาย 3 เฟส 2 ชุดขนานกัน	25
2.16	แสดงการวางสาย 3 เฟส 2 ชุดขนานกัน	27
2.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิ	29
2.18	แสดงสนามไฟฟ้าที่ออกจากประจุบวกรอบสาย	33
2.19	แสดงศักย์ไฟฟ้าและเส้นสมศักย์	34
2.20	แสดงการวางสายตัวนำในระบบเฟสเดียว	35
2.21	แสดงค่าความจุไฟฟ้าระหว่างสาย	36
2.22	แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกของสายตีเกลียว	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	เรื่อง	หน้า
2.23	แสดงการวางสายทั้งกลุ่ม	39
2.24	แสดงการวางสายรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	39
2.25	แสดงระยะห่างสายจริงและระยะห่างสายสมมูล	41
2.26	แสดงการวางสายควบ 3 เฟส	42
2.27	แสดงการวางสาย 3 เฟสสมดุล 2 ชุดขนานกัน	43
2.28	แสดงการวางสาย 3 เฟส 2 ชุดไม่สมดุลขนานกัน	44
3.1	พารามิเตอร์ที่กระจายอยู่บนสายส่ง	46
3.2	สายส่งระยะสั้น	47
3.3	เฟเซอร์ไดอะแกรม	48
3.4	สายส่งระยะปานกลาง วงจรสมมูลย์แบบ π	48
3.5	สายส่งระยะปานกลาง วงจรสมมูลย์แบบ T	49
3.6	สายส่งระยะไกล วงจรสมมูลย์แบบ π	50
3.7	สายส่งระยะไกล วงจรสมมูลย์แบบ T	51
5.1	วงจร Short Line	67
5.2	วงจร Medium Line และ Long Line แบบ π-network	67
5.3	วงจร Medium Line และ Long Line แบบ T-network	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบไฟฟ้ากำลังนั้นจำแนกได้เป็น 3 ส่วนคือ

1. **ระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้า** (Generating System) ได้แก่ โรงจักรไฟฟ้าหรือแหล่งกำเนิดไฟฟ้า

โรงจักรไฟฟ้า (Power Plant)

โรงจักรไฟฟ้าประกอบด้วย ส่วนที่ผลิตไฟฟ้า, ลานไกไฟฟ้า (Switchyard) รวมทั้งระบบป้องกันการเดินเครื่อง และการควบคุมเครื่อง สำหรับตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น จะต้องอาศัยตัวต้นกำลัง (Prime-mover) หรือกังหันเป็นตัวหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกตัวหนึ่ง

ระบบแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของโรงจักรไฟฟ้า ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ มีทั้งที่จ่ายออกในระบบ 13.9 KV, 11 KV, 3.5 KV แล้วเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น โดยมีลานไกไฟฟ้า เป็นส่วนที่รับพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตขึ้น เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจ่ายไฟเข้าสู่ระบบสายส่งซึ่งมีแรงดันไฟฟ้า 500 KV, 230 KV หรือ 69 KV โดยเชื่อมสายส่งแรงสูงนี้ต่อถึงกันเกือบทุกแหล่งผลิตทั่วประเทศ ทำให้ระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้าเป็นไปอย่างประหยัดและมีประสิทธิภาพ

2. **ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า** (Transmission System) ได้แก่ สายส่งกำลังไฟฟ้าและสถานีเปลี่ยนแรงดัน

สายส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission Line)

สายส่งกำลังไฟฟ้าเป็นชุดของสายตัวนำ สำหรับส่งพลังงานไฟฟ้าจากโรงจักรไฟฟ้าไปยังสถานีเปลี่ยนแรงดัน ซึ่งเป็นการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไปยังผู้ใช้หรือแหล่งจ่ายไฟฟ้า และเป็นการส่งพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งผลิตต่าง ๆ กัน ไปยังศูนย์กลางของโหลด (Load Center) ในกรณีที่มีแหล่งผลิตหลายแห่งอยู่ห่าง ๆ กัน นอกจากนี้ยังเป็นการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้า (Tie Line) จากระบบหนึ่งไปยังอีกระบบหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ระบบหนึ่งมีกำลังผลิตไม่เพียงพอ ก็สามารถรับจากอีกระบบหนึ่งได้

ประโยชน์ของการเชื่อมโยงสายส่งกำลังไฟฟ้า

1.สามารถถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าจากระบบหนึ่งไปยังอีกระบบหนึ่ง ทำให้ช่วยลดกำลังผลิตไฟฟ้า ในขณะที่มีการใช้ไฟฟ้าไม่มากลงได้ ซึ่งเป็นการประหยัดเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า

2.สามารถเชื่อมโยงแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าหลาย ๆ ชนิดถึงกันได้ ซึ่งช่วยให้สามารถวางโปรแกรมการเดินเครื่องอย่างมีประสิทธิภาพสูง

3.การเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าถึงกันช่วยให้ระบบมีความมั่นคง เนื่องจากมีแหล่งผลิตหลายทาง จึงสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง

สถานีเปลี่ยนแรงดัน (Substation)

สถานีเปลี่ยนแรงดัน เป็นสถานีกลางซึ่งรับพลังงานไฟฟ้าจากสายส่ง หรือจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เพื่อถ่ายผ่านสู่ระบบจำหน่าย ประกอบด้วย การเปลี่ยนแรงดัน, การตัดตอน, การควบคุม และการป้องกันระบบ เป็นต้น

หน้าที่และจุดประสงค์ของสถานีเปลี่ยนแรงดัน

1.เป็นจุดเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้า

2.เป็นจุดปรับระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบให้คงที่

3.เป็นจุดเชื่อมระบบสายส่ง และระบบจำหน่ายไฟฟ้า ทำหน้าที่ในการตัดตอนออกจากระบบและนำเข้าสู่ระบบ

4.เป็นจุดวัดปริมาณทางไฟฟ้า เช่น แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า เป็นต้น

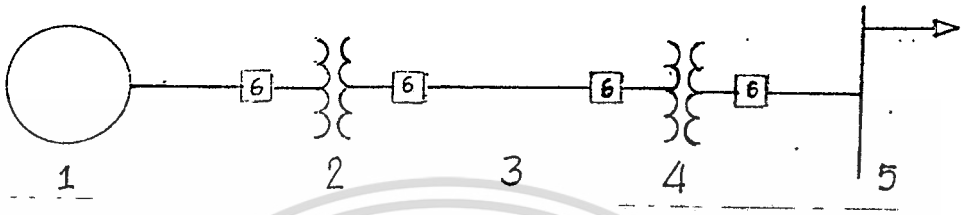
5.เป็นจุดเชื่อมโยงระบบสื่อสาร โทรมาตร (Telemetering) และ การป้องกันในระบบสายส่ง

6.เป็นตำแหน่งที่ติดตั้ง อุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า, อุปกรณ์ตัดตอน, อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินพิกัด และ อุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ ที่จำเป็น

3.ระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้า (Distribution System) ได้แก่ สายจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงที่จ่ายจากสถานีเปลี่ยนแรงดัน, หม้อแปลงลดแรงดันไฟฟ้า และสายจำหน่ายแรงต่ำที่จ่ายให้แก่โหลดหรือผู้ใช้ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถที่จะแสดงให้เห็นง่าย ๆ ในรูปของ ไดอะแกรมเส้นเดี่ยว (Single Line Diagram) ได้ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบไฟฟ้ากำลัง

ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ ๆ ดังนี้

1.ส่วนผลิตพลังงานไฟฟ้า (Generator Station)

2.ส่วนเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (Step-up Transformer)

3.ส่วนสายส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission Line)

4.ส่วนลดแรงดันไฟฟ้า (Step-down Transformer)

5.ส่วนของโหลด (Load)

6.ส่วนของระบบป้องกัน (Protection)

เราจะจำลองส่วนต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยอุปกรณ์ที่หาได้ในห้องทดลองดังนี้

<u>ส่วนผลิตพลังงานไฟฟ้าและส่วนเพิ่มแรงดันไฟฟ้า</u>

เนื่องจากจุดประสงค์ที่สำคัญในปริญญานิพนธ์นี้คือ การชี้ให้เห็นถึงผลการส่งผ่านพลังงานในสายส่งเป็นหลัก ดังนั้นในส่วนที่ 1 และ ส่วนที่ 2 ดังกล่าว เราจึงแทนด้วยการใช้ VARIAC 3ϕ ขนาด 7.2 kVA 10 Amp 380 Volts จำนวน 1 ตัว

<u>ส่วนสายส่งกำลังไฟฟ้า</u>

ในส่วนนี้ เราไม่สามารถหาสายส่งจริง ๆ มาทำการทดลองได้ จึงต้องสร้างเป็นวงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน (Resistor : R), ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor : L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และตัวประจุไฟฟ้า (Capacitor : C) แทนสายส่งที่มีความยาวต่าง ๆ กัน การหาค่า RLC นี้ค่อนข้างจะยุ่งยาก เพราะเมื่อหาค่า RLC ที่ระดับจริงได้แล้ว ต้องใช้วิธีเปอร์ยูนิต (Per-unit) แปลงมาที่ระบบจำลอง แต่ค่า C ที่แปลงมาที่ระบบจำลองใหม่ เนื่อให้ค่า C มีขนาดตรงกับค่า C ที่เราสามารถหาได้ ในส่วนนี้เราจะใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ ซึ่งได้ทำโปรแกรมช่วยในการคำนวณขึ้นมาด้วย

ส่วนลดแรงดันไฟฟ้า

ในการทดลองครั้งนี้ เราใช้แรงดันใช้งานส่งผ่านสายส่งโดยมิได้มีการเพิ่มแรงดัน (Step up) แต่อย่างใด ดังนั้น จึงไม่ต้องมีส่วน Step down ในวงจร

ส่วนของโหลด

ในระบบจริงคือ ผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งเราจะแทนด้วยโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3ϕ ขนาด 1 แรงม้า พร้อมตุ้มน้ำหนักเพื่อปรับโหลด

ส่วนของระบบป้องกัน

เนื่องจากเราไม่ได้มุ่งเน้นการศึกษาถึงการป้องกัน แต่มุ่งเน้นในเรื่องการเปรียบเทียบแรงดันและกระแสในระบบจำลองเทียบกับระบบจริง ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีส่วนป้องกันดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
พารามิเตอร์ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

ก่อนที่จะทำการจำลองสายส่งไฟฟ้า เราจะต้องทำความเข้าใจในเรื่องพารามิเตอร์เตอร์ (Parameter) ของสายส่งและระบบเปอร์ยูนิตเสียก่อน จากนั้นจึงสามารถคำนวณค่าแรงดันและกระแสของสายส่ง และจำลองสายส่งได้

2.1 พารามิเตอร์ของสายส่ง

สายส่งที่ใช้ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟเป็นระยะทางไกลๆ ประกอบด้วย พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ต้องนำมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งประกอบไปด้วย ความต้านทาน (Resistance), ความเหนี่ยวนำ(Inductance), ความจุไฟฟ้า (Capacitance), ความนำไฟฟ้า (Conductance)

ข้อมูลที่จำเป็นต้องทราบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของสายส่งมีดังต่อไปนี้

1.ชนิดของสายส่งไฟฟ้า

สายไฟฟ้า (Conductor) มีหน้าที่รับส่งให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน สายไฟฟ้าเป็นสารตัวนำ อันได้แก่ เงิน,ทองแดง,อลูมิเนียม,เหล็ก หรือส่วนประกอบของทองแดงกับเหล็ก หรืออลูมิเนียมผสมเหล็ก ซึ่งเป็นโลหะผสม (Alloy) การพิจารณาเลือกชนิดของวัสดุที่จะใช้ทำสายไฟฟ้าจะต้องคำนึงถึงความสามารถในการนำไฟฟ้า, ความสามารถในการรับแรงดึง (Mechanical strength), น้ำหนักสาย และราคา

-เงิน เป็นโลหะตัวนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด แต่มีราคาแพงมาก จึงไม่ใช้ทำสายไฟฟ้า

-ทองแดง เป็นโลหะตัวนำไฟฟ้าที่ดี ความสามารถในการรับแรงดึงไฟฟ้าได้พอสมควร แต่มีราคาแพง

-อลูมิเนียม เป็นโลหะตัวนำไฟฟ้าที่ดีพอสมควร มีน้ำหนักเบา แต่มีความสามารถในการรับแรงดึงได้จำกัด เนื่องจากมีราคาถูกกว่าทองแดง จึงนิยมนำมาใช้ทำสายไฟฟ้า โดยมีแกนเหล็กเสริมเพื่อให้สามารถรับแรงดึงได้ดีขึ้น

โดยทั่วไปเรานิยมใช้เป็นสายอลูมิเนียม เนื่องจากราคาถูกและมีน้ำหนักเบา แต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอลูมิเนียมล้วนรับแรงดึงได้ต่ำ จึงมีการพัฒนาสายอลูมิเนียมให้สามารถรับแรงดึงได้สูงขึ้น โดยการเสริมแกนเหล็ก หรือใช้โลหะอื่นผสม สายอลูมิเนียมเปลือยที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีอยู่ 4 ชนิดคือ

1.สายอลูมิเนียมล้วน AAC (All Aluminium Conductor) สายชนิดนี้จะทำจากเส้นลวดอลูมิเนียมล้วนขนาดเท่าๆ กัน ทุกเส้นพันตีเกลียวเป็นชั้นๆ จำนวนเส้นลวดจะมีตั้งแต่ 7 เส้นขึ้นไป แต่สายชนิดนี้รับแรงดึงได้ต่ำมาก ไม่เหมาะกับระยะห่างระหว่างเสาที่กว้างมากๆ

2.สายอลูมิเนียมผสม AAAC (All Aluminium Alloy Conductor) เป็นสายที่มีส่วนผสมของอลูมิเนียม 99 เปอร์เซ็นต์ แมกนีเซียม 0.5 เปอร์เซ็นต์ และซิลิกอน 0.5 เปอร์เซ็นต์ สายชนิดนี้มีราคาแพงและความต้านทานสูงกว่าชนิดแรก จึงไม่นิยมใช้นักยกเว้นในกรณีจำเป็นเช่น ในการเดินบริเวณชายทะเลเป็นต้น

3.สายอลูมิเนียมเหล็ก ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced) เป็นสายอลูมิเนียมตีเกลียว มีสายเหล็กอยู่ตรงกลาง สายเหล็กที่สอดไว้เพื่อให้รับแรงดึงได้สูงขึ้น ความโตของเส้นลวดอลูมเนียมและเส้นลวดเหล็กแต่ละเส้น อาจมีขนาดเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ สายชนิดที่รับแรงดึงได้สูงกว่าสายอลูมิเนียมล้วน (AAC) มากกว่า 2 เท่า จึงเป็นสายที่นิยมใช้ที่สุด แต่ไม่ควรใช้สายชนิดนี้ใกล้บริเวณชายทะเล เพราะไอของเกลือจะเกิดการกัดกร่อน ทำให้อายุการใช้งานสั้นลง

4.สายอลูมิเนียมแกนโลหะผสม ACAR (Aluminium Conductor Alloy Reinforced) เป็นสายคล้ายชนิด ACSR แต่รับแรงดึงได้ต่ำกว่า

2.การจัดวางสายส่งไฟฟ้า

การจัดวางสายไฟฟ้าอาจจะจัดเป็นแบบ

1.เฟสเดียว

2.สามเฟส วงจรเดี่ยว สายเดี่ยวหรือ แบบบันเดิล (Bundle) หรือสามเฟสวงจรคู่ สายเดี่ยว หรือแบบบันเดิล

3.ความยาวของสายส่ง จะต้องทราบว่า สายส่งไฟฟ้าที่ขนาดความยาวเท่าไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ค่าความเหนี่ยวนำของสาย

ความเหนี่ยวนำ (L) เป็นค่าคงที่ของสาย มีหน่วยเป็น Henry หาได้จากอัตราส่วนของฟลักซ์คล้องสาย (λ) ต่อกระแส (i) ที่ไหลผ่านสายสามารถเขียนเป็นสูตรได้ คือ

$$L = \lambda / i$$

เมื่อ λ = จำนวนฟลักซ์คล้องสายมีหน่วยเป็น Wb-T

และ i = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายมีหน่วยเป็น A

ถ้าหากกระแส (i) มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและไหลผ่านสายที่มีความเหนี่ยวนำ (L) จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายในสายขึ้นโดยมีทิศทางด้านกลับ ดังนั้นจึงอาจมองในรูปของแรงดันตกได้ดังสมการ

$$e = L \, di/dt$$

การหาค่าความเหนี่ยวนำในระบบส่งจ่าย ซึ่งสายขนาดใหญ่จะมีฟลักซ์คล้องภายในค่อนข้างสูง และส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำของสายเปลี่ยนไปด้วย ดังนั้นในการหาค่าความเหนี่ยวนำของสาย จึงจำเป็นต้องหาค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากฟลักซ์คล้องทั้งภายนอกและภายในรวมกัน

2.2.1 ค่าความเหนี่ยวนำของสายที่เกิดจากฟลักซ์ภายนอก

ถ้าให้ r เป็นรัศมีของสายตันรูปทรงกระบอก (cylindrical) และ I เป็นกระแสที่ไหลภายในสายฟลักซ์คล้องภายนอกจะเกิดจากกระแสนี้ มีลักษณะเป็นวงกลมล้อมรอบสายเป็นชั้น ๆ ตั้งแต่รัศมี r ออกไปจนถึงค่าอนันต์ (infinity)

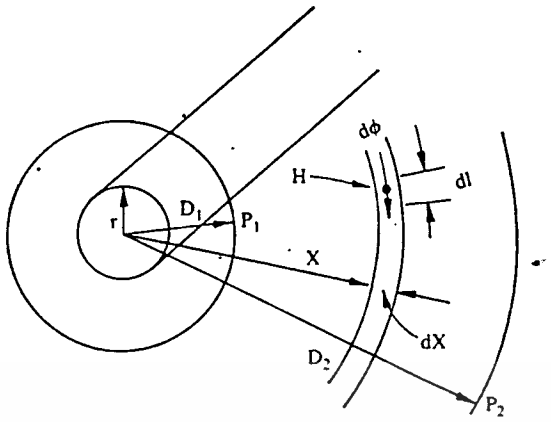
เนื่องจากสายส่งเป็นสายที่ขึงในแนวตรง จึงถือว่า N = 1 รอบ (T) เมื่อมีกระแส I แอมแปร์ (A)ไหลผ่าน จะมี mmf = I แอมแปร์-รอบ (A-T) และเขียนเป็นสมการคือ

$$mmf = I \quad . \quad A\text{-}T \qquad (2.1)$$

ถ้าให้ H เป็นความเข้มสนามแม่เหล็ก ณ จุดที่พิจารณา มีหน่วยเป็นแอมแปร์รอบต่อเมตร dl เป็นส่วนเล็กๆ ส่วนหนึ่งของเส้นรอบวงที่มีรัศมี X อาจหาความสัมพันธ์ของ mmf กับความเข้มสนามแม่เหล็ก H ได้โดยการอินทิกรัลรอบทางเดินปิด ดังสมการ

$$mmf = \oint H.dl = H(2\pi X) \quad A\text{-}T \qquad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แสดงฟลักซ์คล้องภายนอกสาย

จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง H,I ได้ดังนี้

$$H = I/(2\pi X) \quad A\text{-}T/m \tag{2.3}$$

แต่ความหนาแน่นฟลักซ์มีความสัมพันธ์กับเพอร์มีบิลิตี้ (μ) และความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ดังสมการ

$$B = \mu H = \mu I/(2\pi X) \quad Wb/m^2 \tag{2.4}$$

เมื่อพิจารณาระยะทางตามแนวสายที่มีความยาว 1 เมตร และความกว้าง dX จะมีพื้นที่ dA = 1dX ตารางเมตร ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ฟลักซ์ $d\phi$ ไหลผ่าน อาจเขียนได้เป็น

$$d\phi = BdA$$

$$= (\mu I/2\pi X)\, dX \quad Wb/m \tag{2.5}$$

แต่ปริมาณฟลักซ์คล้องสาย $d\lambda = Nd\phi$ และ N = 1 รอบ ดังนั้นปริมาณฟลักซ์คล้องสายจึงเท่ากับฟลักซ์ที่หาได้จากสมการที่ (2.5) และสามารถหาฟลักซ์คล้องภายนอก (external flux linkage) จากรัศมี D_1 ถึง D_2 ได้ดังนี้

$$d\lambda = (\mu I/2\pi X)\, dX$$

$$\lambda_{ext} = \int_{D_1}^{D_2} (\mu I/2\pi X)\, dX$$

$$= (\mu I/2\pi)\, \ln (D_2/D_1) \quad Wb\text{-}T/m \tag{2.6}$$

แต่ $\mu = \mu_r \mu_o$ เมื่อ μ_r คือเพอร์มีบิลิตี้สัมพัทธ์ มีค่าเท่ากับ 1 เนื่องจากฟลักซ์คล้องในอากาศ และ μ_o คือเพอร์มีบิลิตี้ของอากาศ มีค่า $4\pi \times 10^{-7}$ เมื่อแทนค่า μ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการที่ (2.6) จะมีค่าดังนี้

$$\lambda_{ext} = 2x10^{-7} I \ln (D_2/D_1) \quad Wb\text{-}T/m$$

และความเหนี่ยวนำของสายที่เกิดจากฟลักซ์คล้องภายนอกจะมีค่าดังนี้

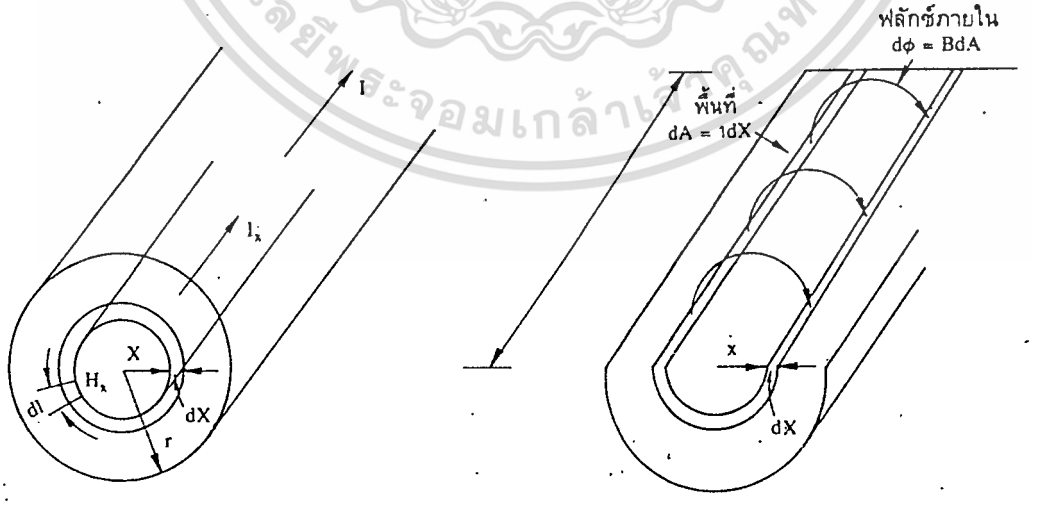
$$L_{ext} = \lambda_{ext}/I = 2x10^{-7} \ln (D_2/D_1) \quad H/m \qquad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.7) จะเห็นว่าการหาค่าความเหนี่ยวนำของสายเพียงเส้นเดียว โดยคิดเฉพาะผลที่เกิดจากฟลักซ์ภายนอกคล้องสายนั้นจะหาค่าได้เมื่อกำหนดระยะห่าง D_1 และ D_2 ให้แน่นอน แต่ในทางปฏิบัติ D_1 จะเริ่มที่ r และ D_2 ต้องเป็นระยะห่างที่ไม่ไกลเกินไป ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำของสายที่เกิดจากฟลักซ์คล้องภายนอกจะหาได้จากสมการที่ (2.8)

$$L_{ext} = 2x10^{-7} \ln (D_2/r) \quad H/m \qquad (2.8)$$

2.2.2 ค่าความเหนี่ยวนำของสายที่เกิดจากฟลักซ์ภายใน

มีวิธีการหาอย่างเดียวกับฟลักซ์ภายนอก จะแตกต่างกันตรงที่ฟลักซ์คล้องสายภายในเกิดจากกระแสบางส่วนของสาย แต่ฟลักซ์คล้องสายภายนอกเกิดจากกระแสทั้งหมดภายในสาย รูปที่ 2.2 เป็นรายละเอียดที่แสดงให้เห็นกระแสส่วนย่อย I_x ไหลภายในสาย และการเกิดฟลักซ์ล้อมรอบสายในส่วนที่พิจารณา



(ก) แสดงกระแส I และ I_x (ข) แสดงการไหลของฟลักซ์ dϕ

รูปที่ 2.2 แสดงฟลักซ์คล้องภายในสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

008423

ถ้าให้ I_x เป็นกระแสที่ไหลภายในรัศมี X และ H_x เป็นความเข้มของสนามแม่เหล็กที่รัศมี r ก็อาจแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง I_x และ H_x ได้ดังนี้

$$I_x = \oint H_x \, dl = mmf_x$$

$$= H_x(2\pi X) \quad A\text{-}T \tag{2.9}$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้าให้ I เป็นกระแสที่ไหลภายในรัศมี r และ H เป็นความเข้มสนามแม่เหล็กที่รัศมี r ก็อาจหาความสัมพันธ์ระหว่าง I,H ได้เช่นเดียวกันคือ

$$I = H(2\pi r) \quad A\text{-}T \tag{2.10}$$

สมมติว่า ความหนาแน่นกระแสภายในสายเท่ากัน ดังนั้น

$$I_x / \pi X^2 = I / \pi r^2$$

หรือ

$$I_x = X^2 I / r^2 \tag{2.11}$$

แทนค่าสมการที่ (2.11) ลงในสมการที่ (2.9)และหาค่า H_x จะได้ดังนี้

$$H_x = X I / (2\pi r^2) \quad A\text{-}T/m \tag{2.12}$$

แต่ความหนาแน่นฟลักซ์ที่ระยะ X จะมีค่าดังนี้ คือ

$$B_x = \mu H_x = \mu X I / (2\pi r^2) \quad Wb\text{-}T/m^2 \tag{2.13}$$

ถ้า dX เป็นระยะทางเล็กๆ ในแนวรัศมี X เมื่อคูณกับความยาวสาย 1 เมตร จะได้พื้นที่เล็กๆ $dA = 1\, dX$ ดังรูปที่ 2.2 (ข) และฟลักซ์ $D\phi$ ที่ไหลผ่านจะหาได้ดังนี้

$$d\phi = B_x dA$$

$$= (\mu X I / 2\pi r^2)\, dX \quad Wb/m \tag{2.14}$$

เนื่องจากฟลักซ์คล้องสายภายใน (internal flux linkage) จะคล้องได้ไม่เต็มพื้นที่หน้าตัดของสายหรือ N น้อยกว่า 1 รอบ ดังนั้นการหาจำนวนรอบจากปริมาณฟลักซ์คล้องในกรณีนี้จะต้องเทียบจากพื้นที่หน้าตัดที่ฟลักซ์คล้องได้ต่อพื้นที่หน้าตัดเต็มสาย

$$N = \pi X^2 / \pi r^2 \quad (\text{มีค่าน้อยกว่า } 1)$$

และ

$$d\lambda = N d\phi = (\mu I X^3 / 2\pi r^4)\, dX \tag{2.15}$$

ถ้าจะหาผลรวมของฟลักซ์คล้องภายในทั้งหมด ที่เกิดจากกระแสไหลในส่วนย่อย ตั้งแต่รัศมี X = 0 ไปจนถึง X = r จะได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_{int} = \int_0^r (\mu I X^2/2\pi r^4)\, dX = \mu I/8\pi \quad Wb/m^2 \qquad (2.16)$$

แต่ $\mu = \mu_r \mu_o$ เมื่อ μ_r คือเพอร์มิบิลิตี้สัมพัทธ์ ถ้าสายส่งไม่ได้ทำจากสารเหล็ก เช่นสายอลูมิเนียมล้วนหรือสายอลูมิเนียมอัลลอยด์ (AAAC) จะแทนค่า μ_r ด้วย 1 แต่ถ้าสายมีส่วนประกอบของสารเหล็ก เช่น สายอลูมิเนียมแกนเหล็ก (ACSR) ค่า μ_r จะมากกว่า 1 และ μ_o คือเพอร์มิบิลิตี้ของอากาศมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ เมื่อแทนค่า μ ลงในสมการที่ (2.16) สมการจะเป็นดังนี้

$$\lambda_{int} = 10^{-7} \mu_r I/2 \qquad \text{(สำหรับสาย ACSR)} \qquad (2.17)$$

หรือ $$\lambda_{int} = 10^{-7} I/2 \qquad \text{(สำหรับสาย AAC, AAAC)} \qquad (2.18)$$

และความเหนี่ยวนำของสายที่เกิดจากฟลักซ์คล้องภายในจะมีค่าดังนี้

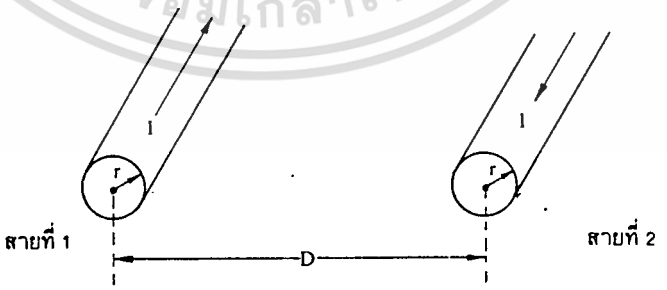
$$L_{int} = \lambda_{int}/I = 10^{-7} \mu_r/2 \qquad \text{(สำหรับสาย ACSR)} \qquad (2.19)$$

หรือ $$L_{int} = 10^{-7}/2 \qquad \text{(สำหรับสาย AAC, AAAC)} \qquad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.19) และ (2.20) จะเห็นว่าค่าความเหนี่ยวนำของสายที่เกิดจากฟลักซ์คล้องภายในมีค่าคงที่ และไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของสายส่ง

2.2.3 ค่าความเหนี่ยวนำของสายในระบบ 1 เฟส 2 สาย

ในการหาค่าความเหนี่ยวนำของสายชนิดเฟสเดียวที่เดินคู่ขนานกันจะมีความสัมพันธ์อยู่กับรัศมีของสาย r และระยะห่างระหว่างสาย D ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการวางสายในระบบ 1 เฟส 2 สาย

จากการคำนวณพบว่าค่าความเหนี่ยวนำของสายเส้นที่ 1 และเส้นที่ 2 มีค่าเท่ากัน การหาค่าฟลักซ์คล้องสายเส้นที่ 1 จะเกิดขึ้นจากผลรวมของฟลักซี 3 ส่วนด้วยกันคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.ฟลักซ์คล้องภายในของสายเส้นที่ 1 ที่เกิดจากกระแสในสายเส้นที่ 1

2.ฟลักซ์คล้องภายนอกของสายเส้นที่ 1 ที่เกิดจากกระแสในสายเส้นที่ 1

3.ฟลักซ์คล้องภายนอกของสายเส้นที่ 1 ที่เกิดจากกระแสในสายเส้นที่ 2 และจะคล้องได้เมื่อมีระยะห่างตั้งแต่ D ขึ้นไป

จากสมการจะเห็นว่าผลรวมของฟลักซ์คล้องสายที่ 1 จะเหลือเพียง 2 ส่วน คือ ฟลักซ์คล้องสายภายใน และฟลักซ์คล้องสายภายนอก ที่คิดตั้งแต่ระยะทาง r ถึง D เท่านั้น ซึ่งฟลักซ์คล้องอีกส่วนหนึ่งจะหักล้างกันหมดไป เมื่อแทนค่า $\mu_0 = 4\pi x10^{-7}$ ลงในสมการที่ (2.21) จะได้ดังนี้

$$\lambda_1 = (10^{-7}/2)I + 2x10^{-7} I \ln (D/r)$$

$$= 2x10^{-7} I \ln(D/r') \quad Wb\text{-}T/m \qquad (2.21)$$

เมื่อ $r' = re^{-1/4} = 0.7788r$

และเมื่อหาค่าความเหนี่ยวนำจะได้ดังนี้

$$L_1 = \lambda_1/I = 2x10^{-7} \ln(D/r') \quad H/m \qquad (2.22)$$

ในทำนองเดียวกันก็อาจพิสูจน์ได้ว่า L_2 ,มีค่า $2x10^{-7} \ln(D/r')$ ด้วย

ข้อควรสังเกต ถ้าเปรียบเทียบสมการที่ได้จากฟลักซ์ภายนอกอย่างเดียวกับสมการที่รวมเอาฟลักซ์ภายในเข้าไปด้วย จะเห็นว่าสมการมีลักษณะอย่างเดียวกัน เพียงแต่ว่ารัศมีของสมการใหม่ถูกลดขนาดลงไปเป็นจำนวน 0.7788 เท่าของรัศมีจริง จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของสายสูงขึ้น

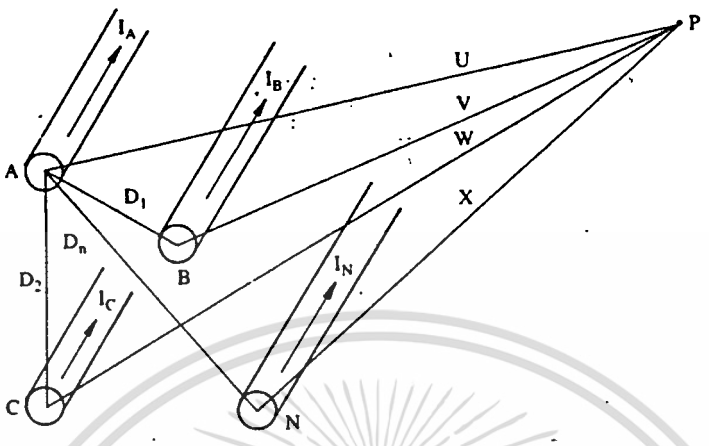
2.2.4 ฟลักซ์คล้องสายใดๆ ที่เกิดจากสายทั้งกลุ่ม

การหาค่าความเหนี่ยวนำของสายเส้นใด จะต้องเริ่มต้นจากการหาฟลักซีคล้องสายก่อนเสมอ ในกรณีที่สายภายในกลุ่มมีหลายเส้นและสายทุกเส้นมีกระแสไหลผ่าน จะต้องตรวจสอบว่าผลรวมทางเวกเตอร์ของกระแสมีค่าเป็นศูนย์ จึงจะสอดคล้องกับวิธีการหาค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งชนิดหลายเฟส

สมมติว่าสายภายในกลุ่มมีทั้งหมด N เส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 สายแต่ละเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีรัศมีเท่ากับ r และผลรวมของกระแสมีค่าเท่ากับศูนย์



รูปที่ 2.4 แสดงการวางสายทั้งกลุ่มขนานกัน

เนื่องจากจุด P อยู่ไกลเป็นค่าอนันต์ ดังนั้นระยะทาง X จึงเกือบเท่ากับระยะทางของ U, V, W และค่าของ U/X, V/X, W/X จึงเกือบเท่ากับ 1 แต่ ln 1 = 0 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าฟลักซ์คล้องสายในเทอมที่ 2 จะไม่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำของสายและสูตรของฟลักซ์คล้องสาย และสูตรของฟลักซ์คล้องสายที่ใช้ในการคำนวณจะมีค่าดังสมการที่ (2.23)

$$\lambda_A = 2\times10^{-7}\,[I_A \ln(1/r') + I_B \ln(1/D_1) + I_C \ln(1/D_2) + \ldots + I_N \ln(1/D_N)] \qquad (2.23)$$

2.2.5 ค่าความเหนี่ยวนำของสายในระบบ 3 เฟส ที่วางเป็นระยะห่างเท่าๆ กัน

ถ้าสายส่ง 3 เฟส วางเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า (equilateral spacing) มีระยะห่าง = D และรัศมี เท่ากับ r ดังรูปที่ 2.5 การหาฟลักซ์คล้องสายสามารถใช้สมการที่ (2.23) มาคำนวณได้ดังนี้

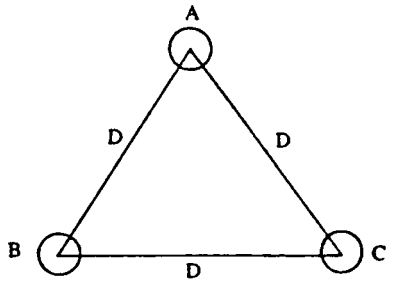
$$\lambda_A = 2\times10^{-7}\,[I_A \ln(D/r')]$$

และ
$$L_A = \lambda_A / I_A$$

$$= 2\times10^{-7} \ln(D/r') \qquad H/m$$

$$= 0.4605 \log(D/r') \qquad mH/km \qquad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงการวางสายรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า

ในทำนองเดียวกันก็อาจพิสูจน์ได้ว่า L_b และ L_c มีค่า 0.4605 log (D/r')ด้วย

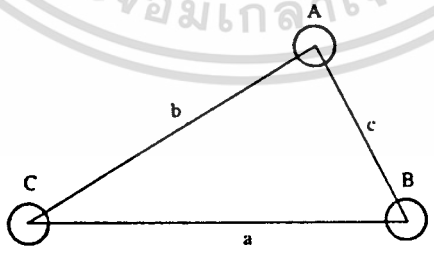
2.2.6 **ค่าความเหนี่ยวนำของสายในระบบ 3 เฟส ที่วางเป็นระยะห่างไม่เท่ากัน**

ในกรณีที่วางสายส่งทั้ง 3 เฟสไม่ใช่รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำในแต่ละเฟสไม่เท่ากัน จึงจำเป็นต้องมีการสลับสายทุกระยะทาง 1 ใน 3 ของระยะทางทั้งหมด จึงจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำสุดท้ายในแต่ละเฟสเท่ากันได้ โดยค่า D ในสมการดังกล่าวเราจะได้มาจากสมการ (2.25)

$$D_{eq} = \sqrt[3]{abc} \qquad (2.25)$$

เมื่อ D_{eq} = Equivalent Equilateral Spacing

a,b,c = ระยะห่างของสายในแต่ละเฟส



รูปที่ 2.6 แสดงการวางสายรูปสามเหลี่ยมที่มีระยะห่างไม่เท่ากัน

จากวิธีหาค่า D_{eq} เราจะเห็นว่าเป็นวิธีการหาระยะทางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometric mean distance) นั่นเอง โดยเรียกย่อ ๆ ว่า G.M.D.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.7 ค่าความเหนี่ยวนำของสายตีเกลียว

ในการหาค่าความเหนี่ยวนำของสายตีเกลียว 2 เส้น ที่มีกระแสไหลในสายเท่ากัน จะต้องเริ่มต้นจากการหาฟลักซ์คล้องสายเช่นเดียวกัน แต่ในกรณีนี้จะถือว่ากระแสที่ไหลย่อยของสายตีเกลียวมีค่าเฉลี่ยสายละเท่าๆกัน สมมติว่าสาย X มีสายย่อย n เส้นและสาย Y มีสายย่อย m เส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ถ้ากระแสที่ไหลในสายเท่ากับ I แอมแปร์ กระแสที่ไหลในสายย่อย X จะมีค่า I/n และกระแสที่ไหลกลับในสายย่อย Y มีค่า -I/m

การหาฟลักซ์คล้องสายย่อย a จะหาได้จากสูตร โดยใช้สมการที่ (2.23)

$$\lambda_a = 2\times10^{-7} I \ln \frac{\sqrt[m]{D_{aa'}\cdot D_{ab'}\cdot D_{ac'}\cdots D_{am'}}}{\sqrt[n]{r'D_{ab}D_{ac}\cdots D_{an}}}$$

รูปที่ 2.7 แสดงสายตีเกลียว 2 เส้นที่มีจำนวนสายย่อยไม่เท่ากัน

และความเหนี่ยวนำของสายย่อย a จะหาได้ดังนี้

$$L_a = \lambda_a/(I/n) = n\lambda_a/I$$

$$= 2nx10^{-7} \ln \frac{\sqrt[m]{D_{aa'}\cdot D_{ab'}\cdot D_{ac'}\cdots D_{am'}}}{\sqrt[n]{r'D_{ab}D_{ac}\cdots D_{an}}} \qquad (2.26)$$

ในทำนองเดียวกันก็อาจพิสูจน์ได้ว่า

$$L_b = 2nx10^{-7} \ln \frac{\sqrt[m]{D_{ba'}\cdot D_{bb'}\cdot D_{bc'}\cdots D_{bm'}}}{\sqrt[n]{D_{ba}r'D_{bc}\cdots D_{bn}}}$$

เมื่อหาค่าเฉลี่ยของความเหนี่ยวนำในสาย X จะได้ดังนี้

$$L_{av} = (L_a+L_b+L_c+\ldots+L_n)/n$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสาย X ประกอบด้วยสายย่อยที่ขนานกัน n เส้น จึงทำให้ค่าความเหนี่ยวนำราม L_x ลดลงจากค่าความเหนี่ยวนำเฉลี่ย L_{av} อยู่ n เท่า นั่นคือ

$$L_x = L_{av}/n = (L_a+L_b+L_c+...+L_n)/n^2 \qquad (2.27)$$

แทนค่าความเหนี่ยวนำของสายย่อย $L_a, L_b, ...$ และ L_n ลงในสมการที่(2.27) จะได้

$$L_x = 2\times10^{-7} \ln \frac{\sqrt[nn]{(D_{aa}\cdot D_{ab}\cdot...D_{am})(D_{ba}\cdot D_{bb}\cdot...D_{bm})...(D_{na}\cdot D_{nb}\cdot...D_{nm})}}{\sqrt[n^2]{(D_{aa}\,D_{ab}...D_{am})(D_{ba}\,D_{bb}...D_{bn})...(D_{na}\,D_{nb}...D_{nn})}}$$

$$= 2\times10^{-7} \ln D_m/D_a \qquad (2.28)$$

เมื่อ D_m = ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างสายเชิงเรขาคณิต(mutual GMD)

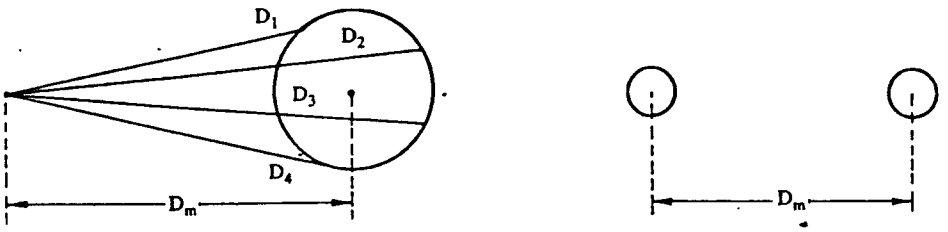
และ D_a = ระยะห่างเฉลี่ยภายในสายเชิงเรขาคณิต(self GMD)

2.2.8 วิธีหาระยะห่างเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต

ถ้ามีจุดหรือกลุ่มของจุดวางห่างกัน อาจหาค่าเฉลี่ยจากจุดนั้นไปยังกลุ่มของจุดได้โดยการนำระยะห่างที่วัดได้ทุกครั้งคูณกัน และถอดรากเท่ากับจำนวนครั้งของผลคูณ การหาค่าเฉลี่ยด้วยวิธีนี้เรียกว่า *วิธีหาระยะห่างเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต* (geometric mean distance) เขียนย่อๆว่า GMD ในกรณีที่จุดหรือกลุ่มของจุดนั้นอยู่ภายนอกกลุ่มที่ต้องการหาค่า ดังแสดงในรูปที่ 2.8(ก) ค่าเฉลี่ยของระยะห่างที่หาได้จะเรียกว่าระยะห่างเฉลี่ยระหว่างสายเชิงเรขาคณิต(mutual GMD) แต่ถ้าจุดนั้นเผอิญอยู่ภายในกลุ่มของจุดที่กำลังพิจารณาอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.8(ข) ค่าเฉลี่ยของระยะห่างที่หาได้จะเรียกว่าระยะห่างเฉลี่ยภายในสายเชิงเรขาคณิต(self GMD) และถ้าระยะห่างเฉลี่ยที่หาได้เป็นระยะห่างของจุดที่อยู่บนส่วนโค้งของวงกลม จะเรียกระยะนั้นว่า *รัศมีเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต* (geometric mean radius) เขียนย่อๆว่า GMR หรืออาจกล่าวได้ว่า GMR ก็คือ self GMD ของรูปวงกลมนั่นเอง

จากรูปที่ 2.8(ก) อาจหาค่า GMD ตามวิธีการได้ดังนี้คือ GMD = $\sqrt[4]{D_1D_2D_3D_4}$ และถ้าหาค่าเฉลี่ยของระยะห่างต่างๆที่อยู่บนส่วนโค้งของวงกลมกับจุดดังกล่าวข้างจะกลายเป็น D_m (mutual GMD) ซึ่งหาได้จากสูตร $\sqrt[4]{D_1D_2...D_n}$ จะเห็นว่าระยะห่างเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างสายเชิงเรขาคณิต

(ข). ระยะห่างเฉลี่ยภายในสายเชิงเรขาคณิต

รูปที่ 2.8 การหาระยะห่างเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต

ที่ได้ก็คือ ระยะห่างระหว่างจุดนั้นกับจุดศูนย์กลางของวงกลม และในทำนองเดียวกันการหาระยะห่างเฉลี่ยระหว่างวงกลมกับวงกลม จะมีค่าเท่ากับระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของวงกลมทั้งสองนั้นเอง

จากรูปที่ 2.8(ข) อาจหาค่า GMD ตามวิธีการได้ดังนี้คือ GMD $= \sqrt[5]{D_1 D_2 D_3 D_4 D_5}$ ถ้ากำหนดจุดที่อยู่บนส่วนโค้งของวงกลมให้ถี่มากเข้า ค่าเฉลี่ยจะกลายเป็นรัศมี r ของวงกลม แต่ได้เคยกล่าวไว้แล้วว่า ค่ารัศมีเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต(GMR)ของสายนั้น ถ้าคำนึงถึงฟลักซ์คล้องสายภายในด้วย จะทำให้รัศมีครั้งใหม่ (r') มีค่าลดลงไปจากรัศมีจริง (r) เป็นจำนวน 0.7788 เท่า

สำหรับการหาระยะห่างระหว่างกลุ่มสายในระบบเฟสเดียวที่เดินขนานกัน จะต้องใช้วิธีของ mutual GMD หาค่าเฉลี่ยเพื่อลดจำนวนกลุ่มสายให้เหลือเหมือนสายเพียง 2 เส้น แต่ถ้าเป็นกลุ่มสายในระบบ 3 เฟส ที่มีการสลับสายก็ใช้วิธี mutual GMD หาค่าเฉลี่ยเพื่อลดจำนวนกลุ่มสายให้เหลือเหมือนสาย 3 เส้นที่วางเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.9 วิธีใช้ตารางแทนการคำนวณ

จุดประสงค์ในการคำนวณหาพารามิเตอร์ของสายก็เพื่อจะนำไปใช้ในการคำนวณหาขนาดของแรงดันตกและกำลังสูญเสียภายในสายนั่นเอง แต่พารามิเตอร์ L ที่กำลังกล่าวถึงนี้เกี่ยวข้องกับค่า mutual GMD และ self GMD ของสายซึ่งสามารถคำนวณหาได้ แต่ในทางปฏิบัตินิยมทำเป็นตารางสำเร็จรูป เพื่อสะดวกในการใช้งาน รายละเอียดเกี่ยวกับสายตีเกลียวที่กำหนดไว้ในตารางจะบอกเกี่ยวกับขนาดพื้นที่หน้าตัดสาย จำนวนเส้นของสายตีเกลียว ถ้าเป็นสายอะลูมิเนียมแกนเหล็ก(ACSR)จะแยกบอกจำนวนเส้นของสายอะลูมิเนียม และจำนวนเส้นของเหล็กด้วย นอกจากนี้ก็จะบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรอบนอก (outside diameter) ค่ารัศมีเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (GMD) ค่าความต้านทานต่อความยาว ค่ารีแอกแตนซ์ต่อความยาว และค่าอื่นๆที่จำเป็น

การหาค่า self GMD ของสายอะลูมิเนียมแกนเหล็กนั้นในทางปฏิบัติจะคำนวณยุ่งยากกว่าสายอะลูมิเนียมล้วน ทั้งนี้เพราะว่าโลหะทั้งสองมีความนำไฟฟ้าและเพอร์มีบิลิตี้แตกต่างกัน ซึ่งตารางสำเร็จรูปจะสามารถช่วยลดข้อยุ่งยากลงได้มาก โดยให้แยกค่าออกเป็น 2 เทอม ดังนี้

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2\pi fx2x10^{-7}\ \ln(D_m/D_s) \\ &= 2.8935x10^{-3}\ flog(1/D_s) + 2.8935x10^{-3}\ flog\ D_m \\ &= X_a + X_d \quad \Omega/km \end{aligned} \tag{2.29}$$

เมื่อ $X_a = 2.8935x10^{-3}\ flog(1/D_s)$

และ $X_d = 2.8935x10^{-3}\ flog\ D_m$

ถ้า D_s และ D_m มีหน่วยเป็นฟุตทั้งคู่ ค่า X_a ของสมการที่(2.29) จะหมายถึงค่ารีแอกแตนซ์ชนิดความเหนี่ยวนำของสายเพียงเส้นเดียว ที่วางห่างกัน 1 เมตร และเรียกว่ารีแอกแตนซ์ชนิดความเหนี่ยวนำที่ระยะ 1 เมตร (inductive reactance at 1 m spacing) ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับ self GMD ของสายและความถี่จะอ่านค่านี้ได้จากตารางที่ 1 (ภาคผนวก) สำหรับค่า X_d เรียกว่าตัวประกอบระยะห่างของรีแอกแตนซ์ชนิดความเหนี่ยวนำ(inductive reactance spacing factor) ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับ mutual

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

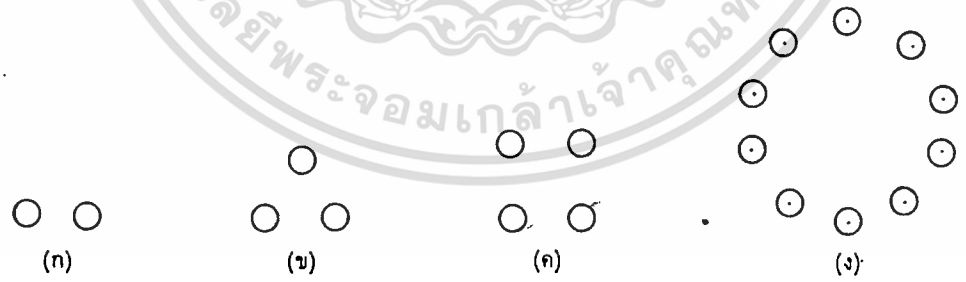
GMD ของสายและความถี่ ถ้า D_m = 1 เมตร ค่าของ X_d จะเป็นศูนย์ แต่ถ้า D_m มีค่าน้อยกว่า 1 เมตร ค่าของ X_d จะเป็นลบ สามารถอ่านค่านี้ได้จากตารางที่ 3 (ภาคผนวก)

2.2.10 ค่าความเหนี่ยวนำของสายควบและสายวงจรคู่

การหาค่าความเหนี่ยวนำของสายควบและสายวงจรคู่ อาจแยกการพิจารณาเป็น 2 กรณีได้ดังนี้คือ

1.สายควบ (bundle conductors) หมายถึงสายที่อยู่รวมกันเป็นกลุ่มตั้งแต่ 2 เส้น ขึ้นไปภายในเฟสเดียวกัน โดยวางให้มีระยะห่างเท่าๆกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 จากรูปจะเห็นว่าการเพิ่มจำนวนสายจะทำให้พื้นที่ผิวของสายเฟสเดียวกันมากขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ค่า self GMD สูงขึ้นอีกด้วย

เนื่องจากสายควบเป็นสายที่มีขนาดเท่ากันหมดทุกเส้น ภายในกลุ่มของสายจะมีอุปกรณ์คั่นสายควบ (bundle spacer) ซึ่งมีคุณสมบัติที่เป็นตัวนำไฟฟ้าคั่นไว้เป็นช่วงๆจึงทำให้กระแสที่ไหลในสายมีค่าเท่ากันหมดทุกเส้น ดังนั้นการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำรวมของสายจึงสามารถใช้วิธีการของ GMD ช่วยในการหาได้

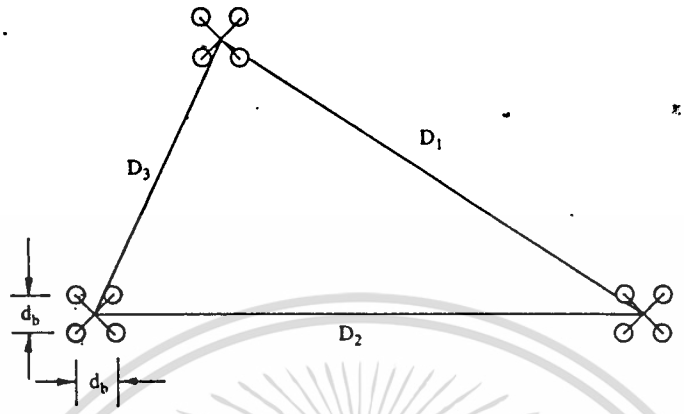


รูปที่ 2.9 แสดงการวางสายควบชนิด 2,3,4 และ 10 เส้น

การหาค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟสของสายควบมีวิธีการเช่นเดียวกับการหาความเหนี่ยวนำจากสายวงจรเดี่ยว เพียงแต่ว่าสายควบมีการกระจายสายภายในเฟสออกเป็นกลุ่มสาย จึงต้องหาระยะห่างเฉลี่ยภายในเฟสเชิงเรขาคณิต (self GMD)ด้วย สมมติว่าสายควบเป็นชนิด 4 เส้น สายแต่ละเส้นมีรัศมีเท่ากับ r และวางห่างกันภายในเฟสเป็นระยะ d

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงการวางสายควบชนิด 4 เส้นระบบ 3 เฟส

สำหรับการคำนวณหาค่าระยะห่างเฉลี่ยระหว่างเฟสเชิงเรขาคณิต (mutual GMD) นั้น จะเริ่มจากการหาระยะห่างเฉลี่ยระหว่างเฟสเดียวกันเสียก่อน แต่เนื่องจากระยะห่าง d_b ของสายควบเท่ากันทุกเฟส จึงทำให้การหาระยะห่างเฉลี่ยง่ายขึ้นและไม่ต้องคำนวณ ในที่นี้จะถือว่าระยะห่างจากจุดกึ่งกลางของสายควบแต่ละเฟสเป็นระยะห่างเฉลี่ยระหว่างเฟส ซึ่งมีค่าเป็น D_1, D_2 และ D_3 ตามลำดับ เนื่องจากระยะ D_1, D_2, D_3 ไม่เท่ากัน ถ้ามีการสลับสาย 3 ช่วงจะทำให้ฟลักซ์คล้องสายสมดุล และทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของสายเท่ากันทุกเส้น

การหาระยะห่างเฉลี่ยภายในเฟสเชิงเรขาคณิต (self GMD) จะได้ดังนี้

$$D_s = \sqrt[4]{r' d_b \sqrt{2}\, d_b\, d_b}$$

และการหาระยะห่างเฉลี่ยระหว่างเฟสเชิงเรขาคณิต (mutual GMD) จะได้ดังนี้

$$D_m = \sqrt[3]{D_1 D_2 D_3}$$

ค่าความเหนี่ยวนำของสายต่อเฟส

$$L = 0.4605 \log(D_m / D_s)$$

2. *สายส่งวงจรคู่ (double circuits)* หมายถึงการนำสายส่ง 2 วงจรมาต่อขนานกัน อาจแยกพิจารณาได้เป็น 2 ลักษณะด้วยกันคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 วงจรคู่ที่แยกเสาส่ง

2.2 วงจรคู่ที่อยู่บนเสาวงเดียวกัน

ในกรณีของวงจรคู่ที่แยกเสาส่ง จะเป็นสายส่งที่วางห่างกันมากจนฟลักซ์คล้องส่งไปไม่ถึงกัน การหาค่าความเหนี่ยวนำของสายกรณีนี้จะแยกหาทีละวงจร แต่ถ้าสายส่งอยู่บนเสาต้นเดียวกันทั้ง 2 วงจร จะแยกหาค่าความเหนี่ยวนำของสายแต่ละวงจรไม่ได้ ทั้งนี้เพราะฟลักซ์คล้องสายทั้ง 2 วงจรเกี่ยวข้องซึ่งกันและกัน แต่การกล่าวถึงสายส่งวงจรคู่ในกรณีนี้จะกล่าวถึงเฉพาะสายที่อยู่บนเสาเดียวกันเท่านั้น

การหาค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งวงจรคู่ มีวิธีหาเช่นเดียวกับการหาค่าความเหนี่ยวนำของสายควบ จะแตกต่างกันตรงที่สายควบจัดระยะห่างของสายภายในเฟสเดียวกันไว้เท่าๆกัน แต่สายส่งวงจรคู่มีระยะห่างภายในเฟสไม่แน่นอน ถ้าระยะห่างภายในเฟสเดียวกันมากจะเพิ่มค่าของ self GMD และทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของสายลดลงดังสมการ

$$L = 0.4605 \log(D_m/D_s)$$

จากสมการ จะเห็นว่า ถ้า D_s มีค่ามากขึ้น L จะมีค่าลดลง ค่าของ D_m และ D_s ของสายส่งวงจรคู่นั้น ขึ้นอยู่กับการวางตำแหน่งของสาย ถ้าวางสายมีระยะห่างสมดุลฟลักซ์คล้องสายจะสมดุล และความเหนี่ยวนำรวมของสายจะมีค่าเท่ากันทุกเฟส แต่ถ้าวางสายไม่สมดุล ฟลักซ์คล้องสายจะไม่สมดุล และยังมีผลต่อกระแสที่ไหลในสายด้วย ในกรณีนี้การสลับสายเป็นช่วงจะช่วยแก้ไขให้สายได้สมดุลตามวิธีของ GMD

การหาค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งวงจรคู่ อาจแยกพิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ

1.สายส่งวงจรคู่ระบบ 1 เฟส

2.สายส่งวงจรคู่ระบบ 3 เฟส

สายส่งวงจรคู่ระบบ 1 เฟส ถ้าวางสายมีระยะห่างสมดุล คือ $D_{aa'} = D_{bb'}$ และ $D_{ab'} = D_{ba'}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 จะทำให้ฟลักซ์คล้องสายสมดุล และความเหนี่ยวนำรวมของสายมีค่าเท่ากันทั้งคู่ ซึ่งกรณีนี้ไม่จำเป็นต้องสลับสาย

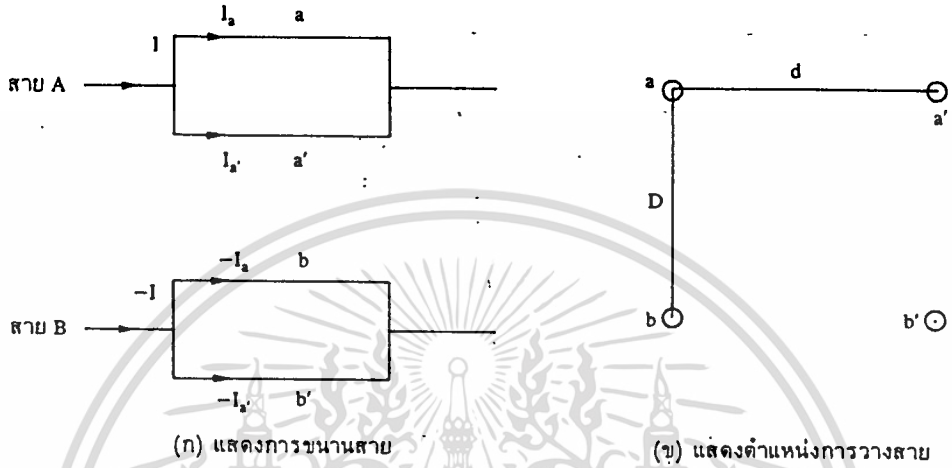
การหาค่า self GMD และ mutual GMD ของสาย A และ B จะมีค่าเท่ากัน ซึ่งค่า self GMD จะหาได้จากระยะห่างเฉลี่ยของสายเฟสเดียวกันดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_{sA} = \sqrt[4]{D_{aa}D_{aa'}D_{a'a}D_{a'a'}} = \sqrt{2}D$$

$$D_{sB} = \sqrt[4]{D_{bb}D_{bb'}D_{b'b}D_{b'b'}} = \sqrt{2}D$$

ซึ่ง $$D_s = \sqrt{D_{sA}D_{sB}} = \sqrt{2}D$$



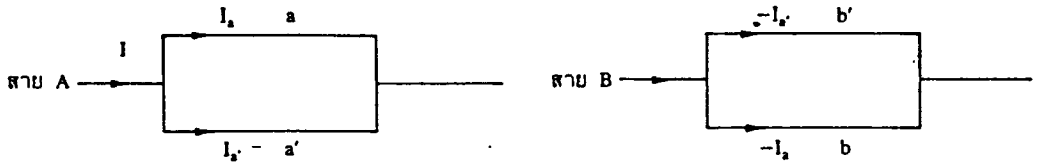
(ก) แสดงการขนานสาย (ข) แสดงตำแหน่งการวางสาย

รูปที่ 2.11 แสดงสายส่งวงจรคู่ระยบบ 1 เฟส วางสายสมดุล

และค่า mutual GMD จะหาได้จากระยะห่างเฉลี่ยระหว่างสายดังนี้

$$D_m = D_{AB} = \sqrt[4]{D_{ab}D_{ab'}D_{a'b}D_{a'b'}} = \sqrt{D(D^2+d^2)^{1/2}}$$

(ก) แสดงตำแหน่งการวางสายระยะไม่สมดุล

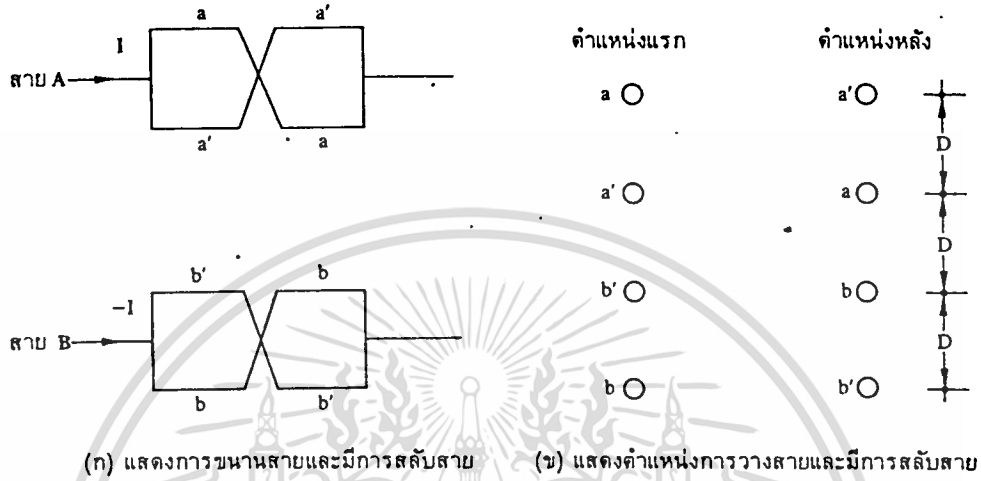


(ข) แสดงการขนานสาย

รูปที่ 2.12 แสดงสายส่งวงจรคู่ระยบบ 1 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหากวางสายไม่สมดุล ดังแสดงในรูปที่ 2.12 จะทำให้ฟลักซ์คล้องสายไม่สมดุล แต่แก้ไขได้โดยการสลับสาย ดังแสดงในรูปที่ 2.13



(ก) แสดงการขนานสายและมีการสลับสาย (ข) แสดงตำแหน่งการวางสายและมีการสลับสาย

รูปที่ 2.13 แสดงสายส่งวงจรคู่ระบบ 1 เฟสที่มีการสลับสาย

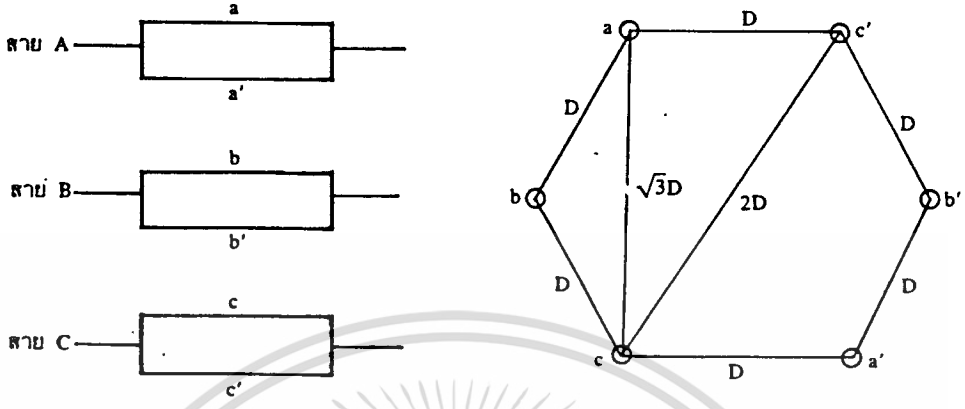
ในกรณีที่วางสายไม่สมดุลและไม่ได้สลับสาย จะได้ว่ากระแสที่ไหลในสายจะมีค่าไม่เท่ากัน

สายส่งวงจรคู่ระบบ 3 เฟส ถ้ามีการจัดวางระยะห่างของสายภายในเฟสและต่างเฟสสมดุลดังในรูปที่ 2.14 จะทำให้ค่าของ self GMD และ mutual GMD เท่ากันทุกเฟส ซึ่งในกรณีนี้ไม่จำเป็นต้องสลับสาย แต่ถ้ามีการจัดวางระยะห่างของสายภายในเฟสสมดุล แต่ระยะห่างของสายต่างเฟสไม่สมดุลดังแสดงในรูปที่ 2.15 จะทำให้ค่า self GMD เท่ากันทุกเฟส แต่ mutual GMD ไม่เท่ากัน ในกรณีนี้จำเป็นต้องสลับสายระหว่างเฟสเพื่อให้เกิดสมดุล แต่ถ้าการจัดวางระยะห่างของสายภายในเฟสเดียวกันและระยะห่างของสายต่างเฟสไม่สมดุลทั้งคู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 จะทำให้ค่าของ self GMD และ mutual GMD แตกต่างกันทุกเฟส ซึ่งในกรณีนี้จะต้องสลับสายทั้งภายในเฟสเดียวกัน และสลับสายระหว่างเฟสด้วยกันทั้งสองอย่าง ดังจะพิจารณาเป็นกรณีๆ ไปดังนี้

กรณีที่ 1 การวางสาย 3 เฟส 2 วงจรที่มีระยะห่างสมดุลได้แก่การวางสายเป็นรูป 6 เหลี่ยมด้านเท่า และมีการวางเรียงลำดับเฟสตามกันจะทำให้ฟลักซ์คล้องสายทุก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟสเท่ากันหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.14



(ก) แสดงการต่อสาย 3 เฟส ขนานกันโดยไม่ต้องสลับสาย

(ข) แสดงการวางสายรูปหกเหลี่ยมด้านเท่าชนิดระยะห่างสมดุล

รูปที่ 2.14 แสดงการวางสาย 3 เฟสสมดุล 2 ชุดขนานกัน

ถ้าระยะห่างระหว่างสายทุกเส้น = D จะหาค่าของ mutual GMD ได้ดังนี้

$$D_{AB} = \sqrt[4]{D_{ab}\,D_{ab'}\,D_{a'b}\,D_{a'b'}} = \sqrt[4]{(D)(\sqrt{3}D)(\sqrt{3}D)(D)}$$

$$= \sqrt[4]{3}D$$

$$D_{BC} = \sqrt[4]{D_{bc}\,D_{bc'}\,D_{b'c}\,D_{b'c'}} = \sqrt[4]{(D)(\sqrt{3}D)(\sqrt{3}D)(D)}$$

$$= \sqrt[4]{3}D$$

$$D_{CA} = \sqrt[4]{D_{ca}\,D_{ca'}\,D_{c'a}\,D_{c'a'}} = \sqrt[4]{(\sqrt{3}D)(D)(D)(\sqrt{3}D)}$$

$$= \sqrt[4]{3}D$$

และ $$D_m = \sqrt[3]{D_{AB}\,D_{BC}\,D_{CA}} = \sqrt[4]{3}D$$

ถ้าให้ r เป็นรัศมีของสายแต่ละเส้น จะหาค่าของ self GMD ได้ดังนี้

$$D_{SA} = \sqrt[4]{D_{aa}\,D_{aa'}\,D_{a'a}\,D_{a'a'}} = \sqrt[4]{(r')(2D)(2D)(r')}$$

$$= \sqrt{r'2D}$$

$$D_{SB} = \sqrt[4]{D_{bb}\,D_{bb'}\,D_{b'b}\,D_{b'b'}} = \sqrt[4]{(r')(2D)(2D)(r')}$$

$$= \sqrt{r'2D}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_{sc} = \sqrt[4]{D_{cc}\, D_{cc'}\, D_{c'c}\, D_{c'c'}} = \sqrt[4]{(r')(2D)(2D)(r')}$$

$$= \sqrt{r'2D}$$

และ $$D_s = \sqrt[3]{D_{sA}\, D_{sB}\, D_{sC}} = \sqrt{r'2D}$$

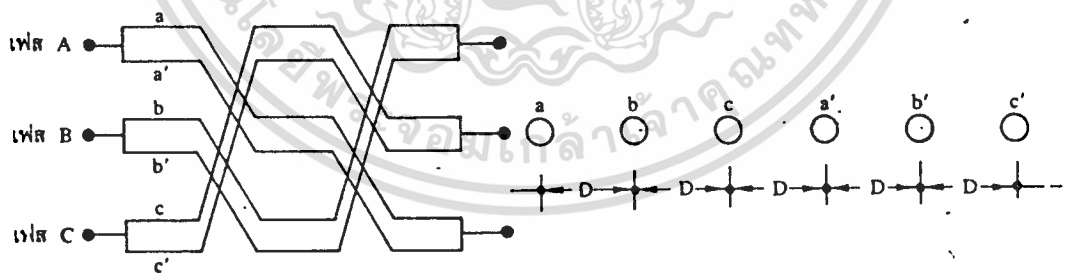
การหาค่าความเหนี่ยวนำของสายจะมีค่าดังนี้

$$L_A = L_B = L_C = 0.4605 \log \frac{D_m}{D_s}$$

$$= 0.4605 \log \frac{\sqrt[4]{3D}}{\sqrt{r'2D}}$$

$$= 0.23025 \log \frac{\sqrt{3D}}{2r'} \quad \text{mH/km} \qquad (2.30)$$

กรณีที่ 2 การวางสาย 3 เฟส 2 วงจร มีระยะห่างภายในเฟสเท่ากันหมด แต่ระยะห่างต่างเฟสไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ซึ่งกรณีนี้ต้องสลับสายระหว่างเฟสจึงจะเกิดสมดุล



(ก) แสดงการต่อสาย 3 เฟสขนานกัน โดยมีการสลับสายระหว่างเฟส

(ข) แสดงการวางสายแนวระนาบ ระยะห่างเท่า ๆ กัน

รูปที่ 2.15 แสดงการวางสาย 3 เฟส 2 ชุดขนานกัน

การหาค่า mutual GMD จะได้ดังนี้

$$D_{AB} = \sqrt[4]{D_{ab}\, D_{ab'}\, D_{a'b}\, D_{a'b'}} = \sqrt[4]{(D)(4D)(2D)(D)}$$

$$= \sqrt[4]{2^3 D^4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_{SC} = \sqrt[4]{D_{bc}\, D_{bc'}\, D_{b'c}\, D_{b'c'}} = \sqrt[4]{(D)(4D)(2D)(D)}$$

$$= \sqrt[4]{2^3 D^4}$$

$$D_{CA} = \sqrt[4]{D_{ca}\, D_{ca'}\, D_{c'a}\, D_{c'a'}} = \sqrt[4]{(2D)(D)(5D)(2D)}$$

$$= \sqrt[4]{5x2^2 D^4}$$

และ $$D_m = \sqrt[3]{D_{AB}\, D_{BC}\, D_{CA}} = \sqrt[12]{5x2^8 D^{12}} = 1.815\ D$$

ถ้าให้ r เป็นรัศมีของสายแต่ละเส้น จะหาค่าของ self GMD ได้ดังนี้

$$D_{SA} = \sqrt[4]{D_{aa}\, D_{aa'}\, D_{a'a}\, D_{a'a'}} = \sqrt[4]{(r')(3D)(3D)(r')}$$

$$= \sqrt{r'3D}$$

$$D_{SB} = \sqrt[4]{D_{bb}\, D_{bb'}\, D_{b'b}\, D_{b'b'}} = \sqrt[4]{(r')(3D)(3D)(r')}$$

$$= \sqrt{r'3D}$$

$$D_{SC} = \sqrt[4]{D_{cc}\, D_{cc'}\, D_{c'c}\, D_{c'c'}} = \sqrt[4]{(r')(3D)(3D)(r')}$$

$$= \sqrt{r'3D}$$

และ $$D_S = \sqrt[3]{D_{SA}\, D_{SB}\, D_{SC}} = \sqrt{r'3D}$$

การหาค่าความเหนี่ยวนำของสายจะมีค่าดังนี้

$$L_A = L_B = L_C = 0.4605 \log \frac{D_m}{D_S}$$

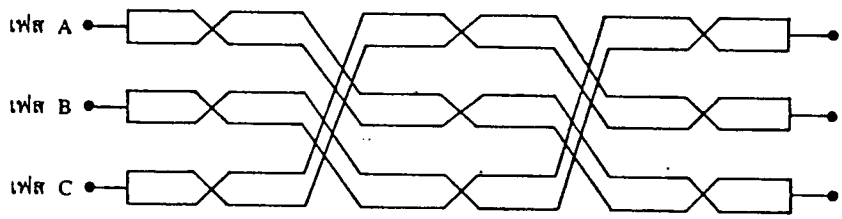
$$= 0.4605 \log \frac{1.815\ D}{\sqrt{r'3D}}$$

$$= 0.4605 \log \frac{1.815 \sqrt{D}}{\sqrt{r'3}} \quad \text{mH/km} \quad (2.31)$$

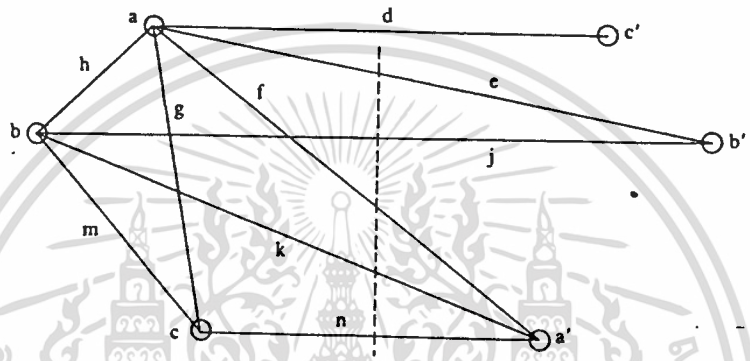
กรณีที่ 3 การวางสาย 3 เฟส 2 วงจร มีระยะห่างไม่สมดุลทั้งระยะภายในเฟสและระยะต่างเฟส โดยวางเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่า จะทำให้ฟลักซ์คล้องสายแต่ละเฟสไม่สมดุล จำเป็นต้องสลับสายทั้งภายในเฟสเดียวกันและสายต่างเฟสทุกๆ ช่วง เพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ได้ระยะห่างสมดุลตามวิธีการของ GMD



(ก) แสดงการต่อสาย 3 เฟสขนานกัน โดยมีการสลับสายภายในเฟสและสายระหว่างเฟส



(ข) แสดงการวางสายรูปหกเหลี่ยมด้านไม่เท่า

รูปที่ 2.16 แสดงการวางสาย 3 เฟส 2 ชุดขนานกัน

การหาค่า mutual GMD จะได้ดังนี้

$$D_{AB} = \sqrt[4]{D_{ab}\,D_{ab'}\,D_{a'b}\,D_{a'b'}} = \sqrt[4]{h\,e\,k\,m}$$

$$D_{BC} = \sqrt[4]{D_{bc}\,D_{bc'}\,D_{b'c}\,D_{b'c'}} = \sqrt[4]{m\,e\,k\,h}$$

$$D_{CA} = \sqrt[4]{D_{ca}\,D_{ca'}\,D_{c'a}\,D_{c'a'}} = \sqrt[4]{g\,n\,d\,g}$$

และ $$D_m = \sqrt[3]{D_{AB}\,D_{BC}\,D_{CA}} = \sqrt[12]{de^2g^2h^2k^2m^2n}$$

ถ้าให้ r เป็นรัศมีของสายแต่ละเส้น จะหาค่าของ self GMD ได้ดังนี้

$$D_{SA} = \sqrt[4]{D_{aa}\,D_{aa'}\,D_{a'a}\,D_{a'a'}} = \sqrt[4]{(r')(f)(f)(r')}$$

$$D_{SB} = \sqrt[4]{D_{bb}\,D_{bb'}\,D_{b'b}\,D_{b'b'}} = \sqrt[4]{(r')(j)(j)(r')}$$

$$D_{SC} = \sqrt[4]{D_{cc}\,D_{cc'}\,D_{c'c}\,D_{c'c'}} = \sqrt[4]{(r')(f)(f)(r')}$$

และ $$D_s = \sqrt[3]{D_{SA}\,D_{SB}\,D_{SC}} = \sqrt[6]{(r')^3(f)^2(j)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าความเหนี่ยวนำของสายจะมีค่าดังนี้

$$L_A = L_B = L_C = 0.4605 \log \frac{D_m}{D_s}$$

$$= 0.4605 \log \frac{\sqrt[12]{de^2g^2h^2k^2m^2n}}{\sqrt[6]{(r')^3(f)^2(j)}} \qquad (2.32)$$

จะเห็นได้ว่า การวางตำแหน่งของสายมีผลต่อความเหนี่ยวนำของสายด้วย กล่าวคือ ถ้าจัดระยะห่างของสายต่างเฟสให้น้อยลงจะทำให้ค่า mutual GMD ต่ำ ถ้าจัดระยะห่างของสายภายในเฟสเดียวกันให้มากขึ้นจะทำให้ค่า self GMD สูงขึ้นด้วย ซึ่งทั้งสองประการนี้จะมีผลให้ความเหนี่ยวนำลดลงทั้งคู่

2.3 ค่าความต้านทานของสายและสกินเอฟเฟกต์

ความต้านทาน (R) เป็นค่าคงที่ของสาย มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ohm) ส่วนคำว่าสกินเอฟเฟกต์ (skin effect) นั่นคือผลที่เกิดจากความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ส่ง ทำให้กระแสที่ไหลภายในสายมีค่าไม่สม่ำเสมอกันตลอดพื้นที่หน้าตัด ความหนาแน่นกระแสจะมากที่สุดบริเวณรอบๆ ผิวของสาย และจะค่อยๆ ลดลงเมื่อลึกเข้าไปในสาย

2.3.1 ค่าความต้านทานของสาย

อาจกล่าวได้ว่าความต้านทานเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดของสายส่ง เพราะว่านอกจากจะทำให้เกิดแรงดันตกแล้ว ยังทำให้เกิดกำลังสูญเสียภายในสายส่งอีกด้วย แต่ในการส่งพลังงานไฟฟ้าส่วนมากเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นความต้านทานของสายจึงเป็นความต้านทานกระแสสลับ ซึ่งเรียกว่า *ความต้านทานประสิทธิผล (effective resistance)* ความต้านทานชนิดนี้ถ้าเปรียบเทียบกับความต้านทานกระแสตรง จะมีค่าสูงกว่าความต้านทานกระแสตรงเล็กน้อย ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 (ภาคผนวก) ค่าของความต้านทานประสิทธิผล (R_e) อาจหาได้จากกำลังสูญเสียภายในสาย (P) ต่อกระแส (I) ที่ไหลผ่านสายยกกำลังสองและสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังสมการที่ (2.33)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{\bullet} = P/I^{2} \qquad (2.33)$$

สำหรับความต้านทานกระแสตรง (R_{dc}) อาจแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.34)

$$R_{dc} = \rho l/A \qquad (2.34)$$

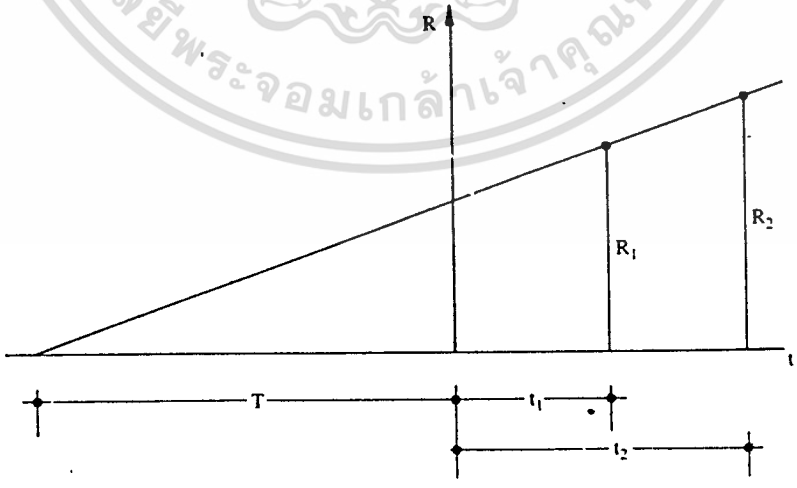
เมื่อ ρ = ความต้านทานจำเพาะของสาย

l = ความยาวของสาย

A = พื้นที่หน้าตัดของสาย

สมการที่(2.34)เป็นสูตรคำนวณหาค่าความต้านทานของสายเส้นเดียว ถ้าเป็นสายตีเกลียว ค่าความต้านทานของสายจะสูงขึ้นกว่าเดิมเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากสายที่ขวั้นเป็นเกลียวจะมีความยาวมากกว่าสายในแนวตรง จากการทดสอบพบว่าสายตีเกลียว 3 เส้น ควบจะมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 1% ถ้าเป็นสายตีเกลียวหลายชั้น ค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้นถึง 2%

ความต้านทานของสาย นอกจากจะขึ้นกับความต้านทานจำเพาะ ความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสายแล้ว ยังเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเป็นสมการเชิงเส้นอีกด้วย ถ้าให้ค่าความต้านทานอยู่บนแกนตั้งและอุณหภูมิอยู่บนแกนนอน อาจแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปสามารถเขียนความสัมพันธ์ของ R_1 และ R_2 ได้ดังสมการที่ (2.35)

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T+t_2}{T+t_1}$$

$$R_2 = R_1 [1+\alpha(t_2-t_1)] \qquad (2.35)$$

เมื่อ $\alpha = \frac{1}{T+t_1}$ = สัมประสิทธิ์ของการเพิ่มความต้านทานของวัสดุตัวนำเนื่องจากอุณหภูมิ

R_1 และ R_2 เป็นค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ t_1 และ t_2 ตามลำดับ และค่า T เป็นอุณหภูมิที่ทำให้วัสดุแต่ละชนิดมีความต้านทานเป็นศูนย์ ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวจะมีค่าแตกต่างกันดังนี้คือ

สายทองแดงอบอ่อน (anneal) ที่มีความนำไฟฟ้า 100% มีค่า T เท่ากับ 234.5

สายทองแดงรีดแข็ง (hard-drawn) ที่มีความนำไฟฟ้า 97.3% มีค่า T เท่ากับ 241.7

สายอลูมิเนียมรีดแข็ง (hard-drawn) ที่มีความนำไฟฟ้า 61% มีค่า T เท่ากับ 228

2.3.2 ผลของสกินเอฟเฟกต์

สกินเอฟเฟกต์เป็นชื่อที่ใช้เรียกปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าอย่างหนึ่งที่ทำให้ความหนาแน่นของกระแสบริเวณรอบผิวตัวนำสูงกว่าภายใน ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นเฉพาะกรณีที่ส่งพลังงานด้วยระบบไฟฟ้ากระแสสลับเท่านั้น จากการศึกษาพบว่า ความหนาแน่นกระแสที่ผิวนี้จะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ที่ใช้ส่ง กล่าวคือ ถ้าความถี่สูงขึ้นกระแสจะไหลที่ผิวมากขึ้น จากสาเหตุดังกล่าวจึงส่งผลให้ความต้านทานของสายมีค่าสูงขึ้น สาเหตุที่กระมีความหนาแน่นที่ผิวมากกว่าภายในเกิดจากผลของฟลักซ์คล้องสายภายในมีค่าสูงกว่าฟลักซ์คล้องที่ผิวนั่นเอง ซึ่งผลของฟลักซ์คล้องในวงจรกระแสสลับจะถูกเปลี่ยนให้เป็นแรงดันต้านกลับในภายหลัง ดังนั้นส่วนของตัวนำที่มีฟลักซ์คล้องสูงจะมีค่าความเหนี่ยวนำสูงและมีแรงดันต้านกลับสูง กระแสจึงไหลในส่วนนั้นได้น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานกระแสสลับกับค่าความต้านทานกระแสตรง ซึ่งเป็นผลมาจากสกินเอฟเฟกต์จะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของ mr

สำหรับ Solid Round Conductor:

$$mr = \frac{r \quad 2\pi f * 4\pi * 10^{-7} * \mu_r}{\rho}$$

$$= \frac{2f * 4\pi * 10^{-7} * \mu_r}{\rho / \pi r^2} \qquad (2.36)$$

เมื่อ f = ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ มีหน่วยเป็น Hz

μ_r = relative permeability ของวัสดุตัวนำ

ρ = ค่าความต้านทานจำเพาะของตัวนำ มีหน่วยเป็น Ω-m

r = รัศมีของตัวนำ มีหน่วยเป็นเมตร

โดยที่

$$R_{dc} = \frac{\rho}{\pi r^2} \quad \Omega/m$$

$$= \rho/\pi r^2 \times 10^3 \quad \Omega/km \qquad (2.37)$$

แทนค่า $\rho/\pi r^2 = R_{dc}/10^3$ ลงในสมการ (2.36) จะได้ว่า

$$mr = 0.0502 \sqrt{\mu_r f / R_{dc}} \qquad (2.38)$$

เมื่อ R_{dc} มีหน่วยเป็น Ω/km

<u>วิธีโดยประมาณ</u>

สำหรับตัวนำทองแดง เมื่อ A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ ค่าโดยประมาณของ mr จะเป็นดังนี้

$$mr = 0.3 \sqrt{fA} \qquad (2.39)$$

เมื่อ A มีหน่วยเป็นตารางนิ้ว

$$mr = 11.8 \sqrt{fA} \qquad (2.40)$$

เมื่อ A มีหน่วยเป็นตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าของ mr จาก 0 ถึง 3

$$R_{ac} = R_{dc} \frac{[\,1 + (mr^4/48)\,]^{1/2} + 1}{2} \qquad (2.41)$$

และสำหรับค่าของ mr ที่มากกว่า 3

$$R_{ac} = R_{dc} \frac{mr}{2\sqrt{2}} + 0.26 \qquad (2.42)$$

ค่าคลาดเคลื่อนสูงสุด (maximum error) ของสูตรข้างต้นประมาณ 1%

2.4 ค่าความจุไฟฟ้าของสาย

ความจุไฟฟ้า (C) เป็นค่าคงที่ของสายมีหน่วยเป็นฟารัด (Farad) หาได้จากอัตราส่วนของประจุ (q) ต่อแรงดัน (V) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$C = q/V$$

เมื่อ q = จำนวนประจุบนสาย มีหน่วยเป็น Culomb

V = แรงดันระหว่างคู่สาย มีหน่วยเป็น Volt

ถ้าแรงดัน (V) มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา จะมีการประจุและคายประจุผ่านความจุไฟฟ้า (C) ของสาย และจะมีกระแสอัดประจุ I_c ไหลผ่านสายตลอดเวลาทั้งในขณะมีโหลดและไม่มีโหลด กระแสนี้จะหาได้จากสมการที่ (2.43)

$$I_c = C\, dV/dt \qquad (2.43)$$

กระแสอัดประจุนี้จะนำหน้าแรงดันเป็นมุม 90 องศา ดังนั้นขณะที่โหลดปลายสาย (receiving end) ต่ำๆ หรือไม่มีโหลดจะทำให้แรงดันปลายสายสูงกว่าแรงดันที่ส่ง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า *ปรากฏการณ์เฟอร์รันติ (Ferranti effect)* แต่เนื่องจากความจุไฟฟ้าในสายมีค่าน้อยมาก ดังนั้นถ้าสายส่งมีความยาวน้อยกว่า 50 ไมล์ (80 กิโลเมตร) จะไม่นำผลของความจุไฟฟ้ามาคิดด้วย

2.4.1 สนามไฟฟ้าและความต่างศักย์

ถ้ามีประจุไฟฟ้า (q) อยู่บนสาย ประจุจะส่งสนามไฟฟ้า (ψ) ออกทุกทิศทางรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

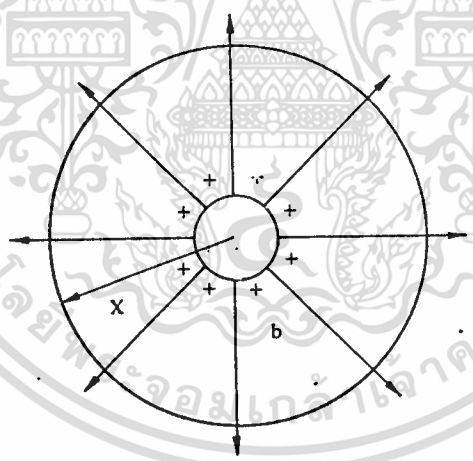
สายไฟฟ้านั้น ซึ่งผลรวมของสนามไฟฟ้าที่ส่งออกทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับประจุที่อยู่บนสายพอดี สนามไฟฟ้าดังกล่าวจะส่งเส้นแรงไปกระทำต่อประจุอื่นในแนวรัศมี ถ้าให้ D เป็นความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า อาจเขียนเป็นสมการดังนี้

$$D = \frac{\Psi}{A} = \frac{q}{A} \qquad C/m$$

เมื่อ A = พื้นที่ที่ล้อมรอบฟลักซ์ไฟฟ้าตามแนวเส้นรอบวง

จากรูปที่ 2.18 ถ้าให้ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางสายในแนวรัศมียาว X เมตร และพิจารณาที่ความยาวสาย 1 เมตร ดังนั้นพื้นที่ A ที่ล้อมรอบฟลักซ์ไฟฟ้าจะเป็น $2\pi X$ ตารางเมตร นั่นคือ

$$D = \frac{q}{2\pi X} \qquad C/m \qquad (2.44)$$



รูปที่ 2.18 แสดงสนามไฟฟ้าที่ออกจากประจุบวกรอบสาย

เมื่อพิจารณาที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางค่าใดๆ ความเข้มสนามไฟฟ้า E จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า D ดังสมการ

$$E = D/\epsilon \qquad V/m$$

เมื่อ ϵ = permittivity ของตัวกลาง (F/m)

$$= \epsilon_o \epsilon_r$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

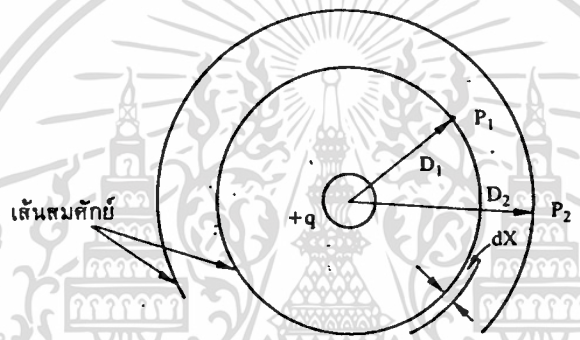
ϵ_o = permittivity ของตัวอากาศ = 8.854×10^{-12} หรือ $10^{-9}/36\pi$

ϵ_r = relative permittivity

ดังนั้น

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon X} \quad V/m \qquad (2.45)$$

จากสมการจะเห็นว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้า E จะแปรผกผันกับระยะห่าง X แต่ความเข้มสนามไฟฟ้า E ที่อยู่บนเส้นรอบวงเดียวกันจะมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน อาจเรียกเส้นรอบวงที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันแต่ละเส้นว่า *เส้นสมศักย์ (equipotential line)*



รูปที่ 2.19 แสดงศักย์ไฟฟ้าและเส้นสมศักย์

การหาแรงดันตก (voltage drop) ภายในสนามไฟฟ้าระหว่างจุด 2 จุด จะเริ่มต้นหาจากการอินทิเกรตผลคูณของความเข้มสนามไฟฟ้า E และระยะห่าง dX การหาแรงดันตกระหว่างรัศมี D_1 ถึง D_2 คือแรงดัน V_{12} ซึ่งจะหาได้ดังสมการ

$$V_{12} = V_1 - V_2 = \int_{D_1}^{D_2} E\,dX$$

$$= \int_{D_1}^{D_2} \frac{q}{2\pi\epsilon X}\,dX$$

$$= \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D_2}{D_1} \quad V \qquad (2.46)$$

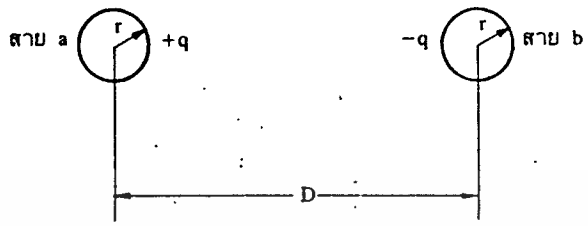
2.4.2 ค่าความจุไฟฟ้าในระบบ 1 เฟส

ความจุไฟฟ้าระหว่างสาย 2 เส้นหาได้จากประจุบนตัวนำต่อความต่างศักย์ระหว่างสายคู่นั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$C = q/V \qquad F/m \qquad (2.47)$$



รูปที่ 2.20 แสดงการวางสายตัวนำในระบบเฟสเดียว

การหาค่าความจุไฟฟ้าต่อความยาว จะใช้สมการที่ (2.47) โดยหาค่า V ในเทอมของ q ดังสมการที่ (2.46) จากรูปที่ 2.20 ถ้าให้รัศมีของสายทั้งสองเส้นเท่ากับ r และวางห่างกันเท่ากับ D การหาแรงดันระหว่างสาย a และ b จะแยกได้เป็น 2 เทอม คือเทอมแรกเป็นการหาแรงดันตก V_{ab} ที่เกิดจากประจุ q_a บนสาย a ก่อน โดยจะต้องสมมติว่าสาย b ไม่มีประจุ และเทอมที่ 2 จะหาแรงดันตก V_{ab} ที่เกิดจากประจุ q_b บนสาย b บ้าง โดยสมมติว่าสาย a ไม่มีประจุเช่นเดียวกัน

แรงดันตกระหว่างสาย a และ b ที่เกิดจากประจุ q_a คือ

$$V_{ab1} = \frac{q_a}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D}{r} \qquad V$$

แรงดันตกระหว่างสาย a และ b ที่เกิดจากประจุ q_b คือ

$$V_{ab2} = \frac{q_b}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r}{D} \qquad V$$

ดังนั้นแรงดันตกระหว่างสาย a และ b ที่เกิดจากประจุ q_a และ q_b จะหาได้จากผลบวกของแรงดันทั้งสองส่วนดังนี้คือ

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{ab1} + V_{ab2} \\ &= \frac{q_a}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D}{r} + \frac{q_b}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r}{D} \end{aligned} \qquad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า $q_a = +q$ และ $q_b = -q$ ดังนั้นค่าแรงดันตกจะกลายเป็น

$$V_{ab} = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D}{r} - \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r}{D}$$

$$= \frac{q}{\pi\epsilon} \ln \frac{D}{r} \qquad (2.49)$$

ซึ่งความจุไฟฟ้าระหว่างคู่สาย จะหาได้จากสมการที่ (2.47) และ (2.49)

$$C_{ab} = q/V_{ab}$$

$$= \frac{\pi\epsilon}{\ln(D/r)} \quad F/m$$

$$= \frac{0.01208}{\log(D/r)} \quad \mu F/km \qquad (2.50)$$

(ก) ความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างคู่สาย

(ข) ความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างสายกับสายสะเทิน

รูปที่ 2.21 แสดงค่าความจุไฟฟ้าระหว่างสาย

ค่าความจุไฟฟ้าที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.50) เป็นค่าระหว่างคู่สาย แต่ในบางครั้งอาจจะต้องการหาค่าความจุไฟฟ้าของสายกับดินหรือจุดสะเทิน (neutral point) เช่น ในระบบเฟสเดียว 3 สาย ขดลวดของหม้อแปลงจะมีสายแยกกลาง (center tap) ต่อลงดิน ในกรณีนี้แรงดันระหว่างสายกับดินจะเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันระหว่างคู่สาย จึงทำให้ความจุไฟฟ้าระหว่างสายกับดินมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของความจุไฟฟ้าระหว่างคู่สาย ซึ่งอาจพิสูจน์ให้เห็นได้โดยการแยกความจุไฟฟ้า C_{ab} ออกเป็น C_{an} และ C_{bn} และหาค่าความจุไฟฟ้าแต่ละตัวได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{C_{ab}} = \frac{1}{C_{an}} + \frac{1}{C_{bn}}$$

ถ้าให้ $C_{an} = C_{bn} = C_n$

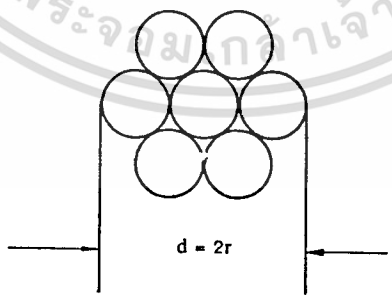
ดังนั้น $$\frac{1}{C_{ab}} = \frac{2}{C_n}$$

หรือ $$C_n = 2C_{ab}$$

$$= \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D/r)} \quad F/m$$

$$= \frac{0.02416}{\log(D/r)} \quad \mu F/km \qquad (2.51)$$

สมการที่ (2.51) เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่คำนวณได้ระหว่างสายกับสายสะเทิน หรืออาจเรียกว่าเป็นความจุไฟฟ้าของสายต่อเฟสก็ได้ ถ้าเปรียบเทียบกับการหาค่าความเหนี่ยวนำของสายต่อเฟส จะเห็นข้อแตกต่างกันคือ รัศมี r ที่ใช้คำนวณหาความจุไฟฟ้านั้นเป็นรัศมีจริงที่วัดจากจุดศูนย์กลางถึงผิวสายรอบนอก แต่ถ้าเป็นสายเกลียวจะใช้รัศมีรอบนอก (outside radius) แทน ดังแสดงในรูปที่ 2.22 แต่ในกรณีที่ใช้คำนวณหาความเหนี่ยวนำจะใช้รัศมี $r' = 0.7788r$ และถ้าเป็นสายตีเกลียวจะใช้ D_s ซึ่งเป็นค่า self GMD



รูปที่ 2.22 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกของสายตีเกลียว

การหาค่ารีแอกแตนซ์ชนิดความจุนั้น จะสามารถแยกออกเป็น 2 เทอมได้เช่นเดียวกับการหาค่ารีแอกแตนซ์ชนิดเหนี่ยวนำ ดังแสดงในสมการที่ (2.52)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$= \frac{\log (D/r)}{(2\pi f)(0.02416)x10^{-6}}$$

$$= \frac{6.5875 \times 10^6 \log 1}{f} + \frac{6.5875 \times 10^6 \log D}{r \qquad f}$$

$$= X_a' + X_d' \qquad \Omega\text{-km} \qquad (2.52)$$

เมื่อ $X_a' = \frac{6.5875 \times 10^6 \log 1}{f \qquad r}$

และ $X_d' = \frac{6.5875 \times 10^6 \log D}{f}$

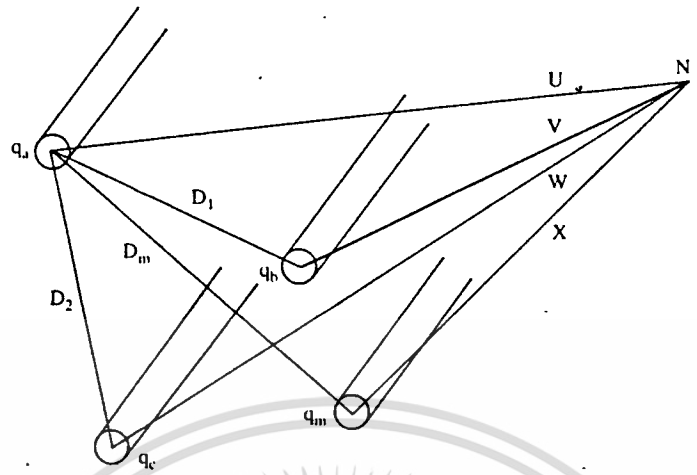
ถ้าค่า D และ r มีหน่วยเป็นเมตรทั้งคู่ จะเรียกค่า X_a' ว่ารีแอกแตนซ์ชนิดความจุที่ระยะ 1 เมตร (capacitive reactance at 1 m spacing) และเรียก X_d' ว่าตัวประกอบระยะห่างของรีแอกแตนซ์ชนิดความจุต่อขนาน (shunt capacitive reactance spacing factor) ในการหาค่ารีแอกแตนซ์ชนิดความจุ อาจคำนวณโดยตรงด้วยการแทนค่าลงในสมการที่ (2.52) หรืออาจหาค่าโดยการเปิดตารางเหมือนการหาค่ารีแอกแตนซ์ชนิดความเหนี่ยวนำก็ได้ ซึ่งค่าของ X_a' จะหาได้จากตารางที่ 1 และค่าของ X_d' จะหาได้จากตารางที่ 4 ในภาคผนวก

2.4.3 ความต่างศักย์ระหว่างสายกับจุดสะเทินที่เกิดจากประจุบนสายทั้งกลุ่ม

การหาค่าความจุไฟฟ้าของสายกับจุดสะเทิน จะต้องเริ่มจากการหาความต่างศักย์ก่อนเสมอ ในกรณีที่สายภายในกลุ่มมีหลายเส้นและสายทุกเส้นมีประจุจะต้องตรวจสอบว่าผลรวมทางเวคเตอร์ของประจุมีค่าเป็นศูนย์จึงจะสอดคล้องกับวิธีการหาค่าความจุไฟฟ้าของสายส่งชนิดหลายเฟส

สมมติว่าสายภายในกลุ่มมีทั้งหมด m เส้น สายแต่ละเส้นมีรัศมี r และผลรวมของประจุมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



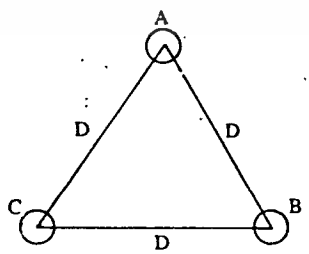
รูปที่ 2.23 แสดงการวางสายทั้งกลุ่ม

จากรูปถ้าต้องการหาความต่างศักย์ระหว่างสาย A กับจุดสะเทิน N เนื่องจากจุด N อยู่ไกลมาก ดังนั้นระยะทาง X จึงเกือบเท่ากับระยะทาง U,V,W,... ดังนั้นในการคำนวณหาความต่างศักย์ต่อเฟส จะแสดงได้ดังสมการที่ (2.57)

$$V_{an} = \frac{1}{2\pi\epsilon}\left[q_a \ln\frac{1}{r} + q_b \ln\frac{1}{D_1} + q_c \ln\frac{1}{D_2} + \ldots + q_m \ln\frac{1}{D_m}\right] \quad (2.53)$$

2.4.4 ค่าความจุไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส ที่วางเป็นระยะห่างเท่าๆกัน

ถ้าสายส่ง 3 เฟสวางเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยมีระยะห่าง D และรัศมี r ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แสดงการวางสายรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาความต่างศักย์ V_{an} สามารถใช้สมการที่ (2.53) คำนวณดังนี้

$$V_{an} = \frac{q_a}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D}{r} \qquad (2.54)$$

ความจุไฟฟ้าต่อเฟส จะหาได้จากสมการที่ (2.47) และ (2.54)

$$C_{an} = \frac{q_a}{V_{an}}$$

$$= \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D/r)} \quad F/m$$

$$= \frac{0.02416}{\log(D/r)} \quad \mu F/km \qquad (2.55)$$

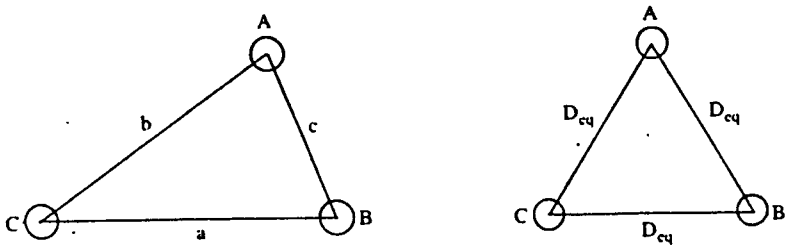
ในทำนองเดียวกันก็พิสูจน์ได้ว่า C_{bn} และ C_{cn} มีค่าเท่ากับ C_{an} เช่นเดียวกัน

2.4.5 ค่าความจุไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส ที่วางเป็นระยะห่างไม่เท่ากันแต่มีการสลับสาย 3 ช่วง

ในกรณีที่วางสายส่ง 3 เฟส มีระยะห่างไม่เท่ากันจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าคร่อมสายแตกต่างกัน และมีผลให้กระแสอัดประจุไหลในสายไม่เท่ากัน ซึ่งจะทำให้แรงดันระหว่างเฟสขาดสมดุลไปด้วย การแก้ไขจะทำได้โดยการสลับสาย 3 ช่วงเหมือนกับในเรื่องการหาค่าความเหนี่ยวนำ การสลับสาย 3 ช่วงจะมีผลต่อระยะห่างเฉลี่ยของสาย ทำให้ค่าเท่ากันหมดเหมือนกับการวางเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า จึงเรียกระยะห่างนี้ว่า *ระยะห่างสมมูล (equivalent spacing; D_{eq})* จะเรียกว่า *ระยะห่างระหว่างสายเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (mutual GMD; D_m)* ก็ได้

สมมติว่าสายทุกเส้นที่รัศมีเท่ากับ r วางห่างกันเป็นระยะ a,b และ c ดังแสดงในรูปที่ 2.25 การสลับสายแต่ละช่วงจะเลื่อนสายในเฟส A แทนสายเฟส B เลื่อนสายเฟส B แทนสายเฟส C และเลื่อนสายในเฟส C แทนสายเฟส A เมื่อสลับสายครบ 3 ช่วง จะทำให้ระยะห่างสมมูล $D_{eq} = \sqrt[3]{a\,b\,c}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 แสดงระยะห่างสายจริงและระยะห่างสายสมมูล

การคำนวณหาความต่างศักย์ระหว่างเฟส V_{an} จะมีค่าเหมือนสมการ (2.54) เพียงแต่เปลี่ยนค่า D เป็น D_{eq}

นั่นคือ
$$V_{an} = \frac{q_a}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D_{eq}}{r} \qquad (2.56)$$

และ
$$C_{an} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D_{eq}/r)} \quad F/m$$

$$= \frac{0.02416}{\log(D_{eq}/r)} \quad \mu F/km \qquad (2.57)$$

ในทำนองเดียวกันก็พิสูจน์ได้ว่า C_{bn} และ C_{cn} มีค่าเท่ากับ C_{an} เช่นเดียวกัน และเขียนแทนด้วย C_n ได้

2.4.6 ค่าความจุไฟฟ้าของสายควบและสายวงจรคู่

การหาความจุไฟฟ้าต่อเฟสของสายควบ มีวิธีการเช่นเดียวกับการหาความจุไฟฟ้าจากวงจรสายเดี่ยว โดยจะต้องหาระยะห่างเฉลี่ยภายในเฟสเชิงเรขาคณิต (self GMD) เสียก่อน วิธีหาค่าเฉลี่ยภายในเฟสเชิงเรขาคณิตจะเหมือนกับการหา D_s ในเรื่องความเหนี่ยวนำที่เคยกล่าวมาแล้ว แต่ในที่นี้จะเรียกว่า D_{ss} เพื่อให้แตกต่างจาก D_s ถ้าเป็นสายควบชุดเดียวกันจะพบว่าค่า D_{ss} สูงกว่าค่า D_s ทั้งนี้เป็นเพราะค่า D_{ss} คำนวณจากรัศมีจริง แต่ D_s คำนวณจากรัศมีที่ต่ำกว่าค่าจริง 0.7788 เท่า สำหรับการคำนวณหาระยะห่างเฉลี่ยระหว่างเฟสเชิงเรขาคณิต (mutual GMD) นั้น ค่าของ D_m เป็นค่าเดียว

และ $D_{ss} = \sqrt[3]{D_{ssA} D_{ssB} D_{ssC}} = \sqrt{2r}D$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาระยะห่างเฉลี่ยระหว่างเฟสเชิงเรขาคณิตจะได้ดังนี้

$$D_{AB} = \sqrt[4]{D_{ab} D_{ab'} D_{a'b} D_{a'b'}} = \sqrt[4]{(D)(\sqrt{3}D)(\sqrt{3}D)(D)}$$

$$= \sqrt[4]{3}D$$

$$D_{BC} = \sqrt[4]{D_{bc} D_{bc'} D_{b'c} D_{b'c'}} = \sqrt[4]{(D)(\sqrt{3}D)(\sqrt{3}D)(D)}$$

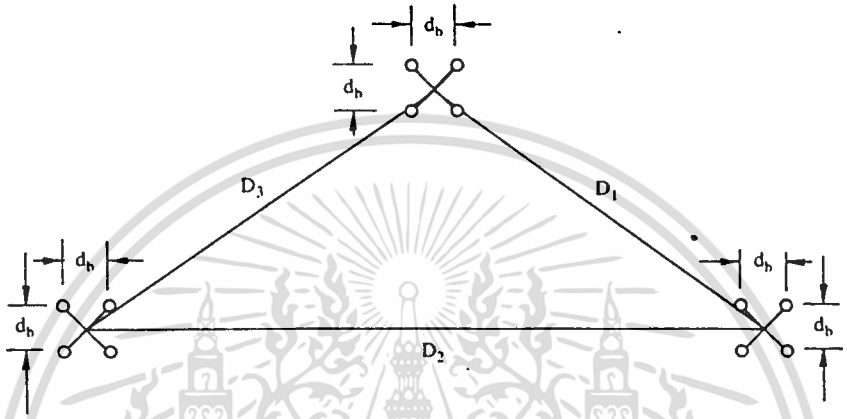
$$= \sqrt[4]{3}D$$

$$D_{CA} = \sqrt[4]{D_{ca} D_{ca'} D_{c'a} D_{c'a'}} = \sqrt[4]{(\sqrt{3}D)(D)(D)(\sqrt{3}D)}$$

$$= \sqrt[4]{3}D$$

กันกับที่หาได้ในเรื่องความเหนี่ยวนำ

สมมติว่าสายควบเป็นชนิด 4 เส้น สายแต่ละเส้นมีรัศมีเท่ากับ r และวางห่างกันภายในเฟสเป็นระยะ d_b ดังรูปที่ 2.26 ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างเฟสมีค่า D_1, D_2 และ D_3 ตามลำดับ ในกรณีนี้จะต้องสลับสาย 3 ช่วงเพื่อให้ค่าความจุไฟฟ้าเท่ากันทุกเฟส



รูปที่ 2.26 แสดงการวางสายควบ 3 เฟส

จากรูปจะหาค่าความจุไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.58)

$$C_n = \frac{0.02416}{\log(D_m/D_{ss})} \quad \mu F/km \qquad (2.58)$$

เมื่อ $D_m = \sqrt[3]{D_1 D_2 D_3}$

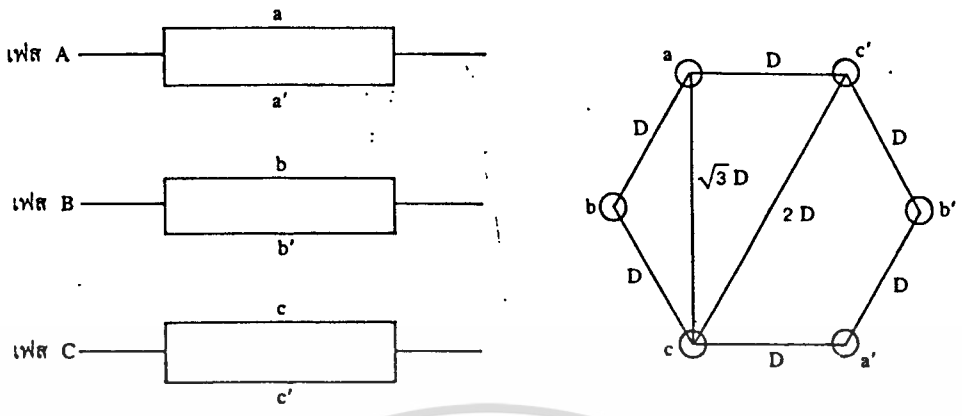
= ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างเฟสเชิงเรขาคณิต

$D_{ss} = \sqrt[4]{r\, d_b\, d_b \sqrt{2} d_b}$

= ระยะห่างเฉลี่ยภายในเฟสเชิงเรขาคณิต

สำหรับสายส่งวงจรคู่ที่อยู่บนเสาส่งเดียวกันจะใช้สูตรการหา C_n ดังสมการ (2.58) เหมือนกับสายควบ แต่ค่า D_m และ D_{ss} จะต้องหาตามวิธีการของการหาค่าเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต ซึ่งซับซ้อนกว่าการหาค่าในสายควบมาก ดังที่เคยกล่าวมาแล้วในเรื่องความเหนี่ยวนำว่า ถ้าวางสายไม่สมดุลจะต้องมีการสลับสาย 3 ช่วง และถ้าระยะห่างภายในเฟสไม่สมดุลจะต้องสลับสายภายในเฟสด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) แสดงการต่อสาย 3 เฟส ขนานกันโดยไม่ต้องสลับสาย

(ข) แสดงการวางสายรูป 6 เหลี่ยม ด้านเท่าชนิดระยะห่างสมดุล

รูปที่ 2.27 แสดงการวางสาย 3 เฟสสมดุล 2 ชุดขนานกัน

เนื่องจากการวางสายตามรูปที่ 2.27 นั้นเป็นการวางสายชนิดสมดุล จะทำให้ระยะห่าง $D_{AB} = D_{BC} = D_{CA} = D_m$ และ $D_{SSA} = D_{AAB} = D_{SSC} = D_{SS}$ ซึ่งในกรณีนี้ไม่ต้องสลับสายก็ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าทุกเฟสเท่ากัน

สมมติว่าสายทุกเส้นมีรัศมี r จะหาระยะห่างเฉลี่ยภายในเฟสเชิงเรขาคณิตได้ดังนี้

$$D_{SSA} = \sqrt[4]{D_{aa}\, D_{aa'}\, D_{a'a}\, D_{a'a'}} = \sqrt[4]{(r)(2D)(2D)(r)} = \sqrt{2rD}$$

$$D_{SSB} = \sqrt[4]{D_{bb}\, D_{bb'}\, D_{b'b}\, D_{b'b'}} = \sqrt{2rD}$$

$$D_{SSC} = \sqrt[4]{D_{cc}\, D_{cc'}\, D_{c'c}\, D_{c'c'}} = \sqrt{2rD}$$

และ $$D_{SS} = \sqrt[3]{D_{SSA}\, D_{SSB}\, D_{SSC}} = \sqrt{2rD}$$

การหาระยะห่างเฉลี่ยระหว่างเฟสเชิงเรขาคณิตจะได้ดังนี้

$$D_{AB} = \sqrt[4]{D_{ab}\, D_{ba'}\, D_{a'b}\, D_{a'b'}} = \sqrt[4]{(D)(\sqrt{3}D)(\sqrt{3}D)(D)}$$

$$= \sqrt[4]{3}D$$

$$D_{BC} = \sqrt[4]{D_{bc}\, D_{bc'}\, D_{b'c}\, D_{b'c'}} = \sqrt[4]{(D)(\sqrt{3}D)(\sqrt{3}D)(D)}$$

$$= \sqrt[4]{3}D$$

$$D_{CA} = \sqrt[4]{D_{ca}\, D_{ca'}\, D_{c'a}\, D_{c'a'}} = \sqrt[4]{(\sqrt{3}D)(D)(D)(\sqrt{3}D)}$$

$$= \sqrt[4]{3}D$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

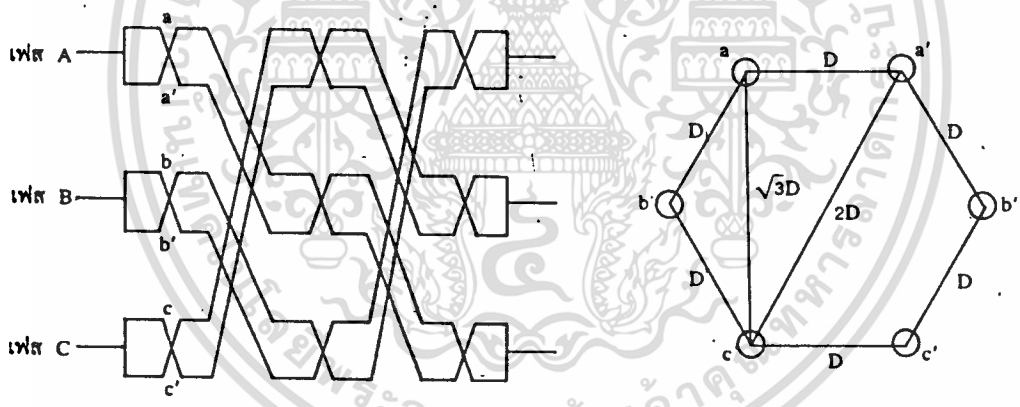
และ $D_m = \sqrt[3]{D_{AB} D_{BC} D_{CA}} = \sqrt[4]{3D}$

การหาค่าความจุไฟฟ้า

$$C_n = \frac{0.02416}{\log(D_m/D_{ss})}$$

$$= \frac{0.02416}{\log \frac{\sqrt[4]{3D}}{\sqrt{2rD}}}$$

$$= \frac{0.04832}{\log \frac{\sqrt{3D}}{2r}} \quad \mu F/km \qquad (2.59)$$



(ก) แสดงการต่อสายสามเฟสขนานกันโดยมีการสลับสายภายในเฟสและระหว่างเฟส

(ข) แสดงการวางสายรูป 6 เหลี่ยมด้านเท่าแต่ระยะห่างไม่สมดุล

รูปที่ 2.28 แสดงการวางสาย 3 เฟส 2 ชุดไม่สมดุลขนานกัน

การวางสายตามรูปที่ 2.28 ถึงแม้ว่าช่วงระยะห่างจะเท่ากันก็ตาม แต่ระยะห่างของสายไม่เท่ากัน จึงต้องมีการสลับสายทั้งภายในเฟสและระหว่างเฟส

สมมติว่าสายทุกเส้นมีรัศมี r จะหาระยะห่างเฉลี่ยภายในเฟสเชิงเรขาคณิตได้ดังนี้

$$D_{SSA} = \sqrt[4]{D_{aa} D_{aa'} D_{a'a} D_{a'a'}} = \sqrt[4]{(r)(D)(D)(r)} = \sqrt{rD}$$

$$D_{SSB} = \sqrt[4]{D_{bb} D_{bb'} D_{b'b} D_{b'b'}} = \sqrt[4]{(r)(2D)(2D)(r)} = \sqrt{2rD}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_{ssc} = \sqrt[4]{D_{cc}\, D_{cc'}\, D_{c'c}\, D_{c'c'}} = \sqrt[4]{(r)(D)(D)(r)} = \sqrt{rD}$$

และ $$D_{ss} = \sqrt[3]{D_{ssA}\, D_{ssB}\, D_{ssC}} = \sqrt[6]{2(rD)^3} = \sqrt[6]{2}\,\sqrt{rD}$$

การหารัศมีเฉลี่ยระหว่างเฟสเชิงเรขาคณิตจะได้ดังนี้

$$D_{AB} = \sqrt[4]{D_{ab}\, D_{ba'}\, D_{a'b}\, D_{a'b'}} = \sqrt[4]{(D)(\sqrt{3}D)(\sqrt{3}D)(D)}$$

$$= \sqrt[4]{3D}$$

$$D_{BC} = \sqrt[4]{D_{bc}\, D_{bc'}\, D_{b'c}\, D_{b'c'}} = \sqrt[4]{(D)(\sqrt{3}D)(\sqrt{3}D)(D)}$$

$$= \sqrt[4]{3D}$$

$$D_{CA} = \sqrt[4]{D_{ca}\, D_{ca'}\, D_{c'a}\, D_{c'a'}} = \sqrt[4]{(\sqrt{3}D)(2D)(2D)(\sqrt{3}D)}$$

$$= \sqrt[4]{12D}$$

และ $$D_m = \sqrt[3]{D_{AB}\, D_{BC}\, D_{CA}} = \sqrt[3]{(\sqrt[4]{3D})^2(\sqrt[4]{12D})} = \sqrt[6]{2}\,\sqrt[3]{3D}$$

การหาค่าความจุไฟฟ้า

$$C_n = \frac{0.02416}{\log(D_m/D_{ss})}$$

$$= \frac{0.02416}{\log \dfrac{\sqrt[6]{2}\,\sqrt[3]{3D}}{\sqrt[6]{2}\,\sqrt{rD}}}$$

$$= \frac{0.04832}{\log \dfrac{\sqrt[3]{9D}}{r}} \quad \mu F/km \qquad (2.60)$$

2.5 ค่าความนำไฟฟ้าของสาย

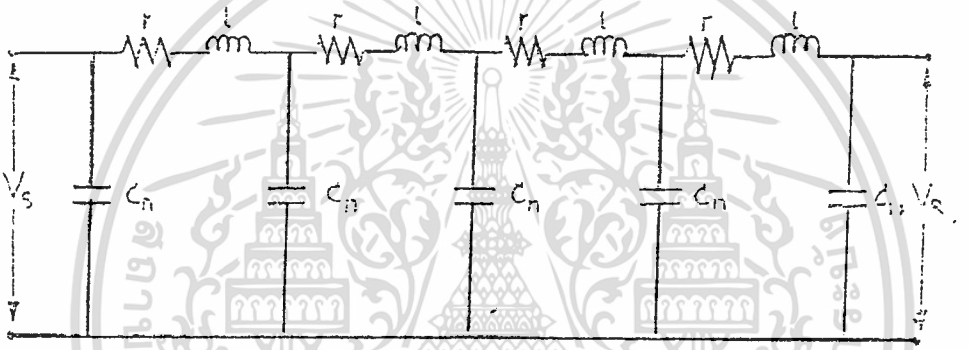
ความนำไฟฟ้าของสายส่งเป็นพารามิเตอร์ที่เกิดเนื่องจากมีกระแสรั่ว (Leakage Current) ที่ฉนวนลูกถ้วย กระแสรั่วที่ฉนวนลูกถ้วยโดยทั่วไปมีค่าน้อยมาก ดังนั้นความนำไฟฟ้าจึงไม่ค่อยนำมาคิดในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ปริมาณทางไฟฟ้าและระบบเปอร์ยูนิต

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง

สายส่งประกอบไปด้วย พารามิเตอร์ต่าง ๆ กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่กระจายอยู่บนสายส่ง

กำหนดให้

R = ความต้านทานของสายส่งต่อระยะทางหนึ่งหน่วยต่อเฟส

L = ความเหนี่ยวนำของสายส่งต่อระยะทางหนึ่งหน่วยต่อเฟส

C = ความจุไฟฟ้าของสายส่งต่อระยะทางหนึ่งหน่วยต่อเฟสกับจุดสะเทิน

z = อิมพิแดนซ์ของสายส่งต่อระยะทางหนึ่งหน่วยต่อเฟส

y = แอดมิดแตนซ์ของสายส่งต่อระยะทางหนึ่งหน่วยต่อเฟสกับจุดสะเทิน

l = ความยาวของสายส่ง

Z = zl = (R + j wL)*l

Y = yl = (j wC)*l ; w = 2 Pi f

V_S = แรงดันไฟฟ้าต้นทาง (Sending-end Voltage)

V_R = แรงดันไฟฟ้าปลายทาง (Receiving-end Voltage)

I_S = กระแสไฟฟ้าจากต้นทาง (Sending-end Current)

I_R = กระแสไฟฟ้าที่ปลายทาง (Receiving-end Current)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า เราจำแนกสายส่งตามความยาวได้เป็น 3 ประเภท คือ

1.สายส่งระยะสั้น (Short Transmission Line) ความยาวต่ำกว่า 80 km

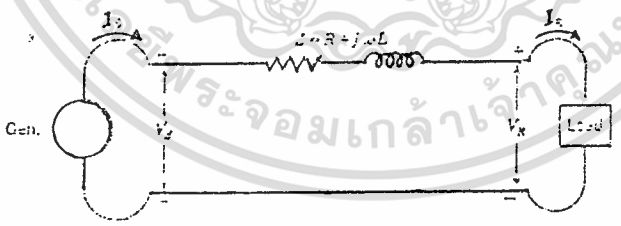
2.สายส่งระยะปานกลาง (Medium Transmission Line) ความยาวอยู่ระหว่าง 80 km ถึง 240 km

3.สายส่งระยะไกล (Long Transmission Line) ความยาวมากกว่า 240 km

ในกรณีของสายส่งระยะสั้น และสายส่งระยะปานกลาง เราสามารถพิจารณาพารามิเตอร์ที่กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในสายส่ง (Uniformly Distributed) เป็นพารามิเตอร์แบบกลุ่ม (Lumped Parameter) ส่วนสายส่งระยะไกลนั้น เราจะพิจารณาพารามิเตอร์ในสายส่งเป็นแบบกระจายตามความยาวของสายส่ง (Uniformly Distributed Parameter) เท่านั้น

3.2 สายส่งระยะสั้น

สำหรับสายส่งระยะสั้น ผลเนื่องจากค่าความจุไฟฟ้ามีน้อยมาก ดังนั้นเมื่อไม่คิดค่าความจุไฟฟ้า จะมีแต่ค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำ เท่านั้น ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 สายส่งระยะสั้น

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะหาได้ดังนี้

$$I_S = I_R \qquad (3.1)$$

$$V_S = V_R + Z*I_R \qquad (3.2)$$

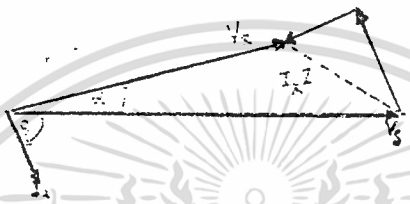
เนื่องจากเรากำหนดให้ค่า V_S เป็นตัวอ้างอิง โดยที่เราคิดว่า เมื่อเรารู้ค่าโหลดของระบบและแรงดันไฟฟ้าต้นทาง (แรงดันที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลงแรงดันขึ้นที่หม้อแปลง) แล้ว เราจะสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าจากต้นทาง และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม (Drop) ไปในสายส่งแล้ว เหลือแรงดันไฟฟ้าที่ปลายทางเท่าไร

$$V_R = V_S - Z*I_R \qquad (3.3)$$

เราสามารถเขียนในรูปของเฟเซอร์ไดอะแกรม (Phasor Diagram) โดยที่โหลดทั่วๆ ไปนั้นจะเป็น Lagging Power Factor ได้ดังรูปที่ 3.3

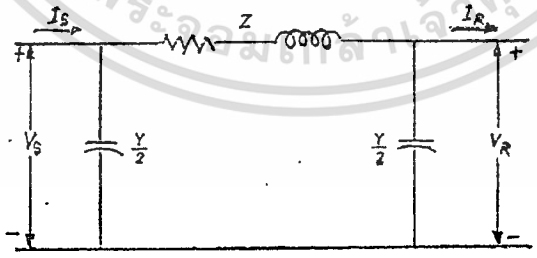


รูปที่ 3.3 เฟเซอร์ไดอะแกรม

3.3 สายส่งระยะปานกลาง

วงจรสมมูลย์ของสายส่งระยะปานกลางนี้จะประกอบด้วย ความต้านทาน,ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า ที่นิยมใช้กันมากสามารถเขียนได้ 2 แบบ คือ วงจรสมมูลย์แบบ π (Nominal-π) และวงจรสมมูลย์แบบ T (Nominal-T)

วงจรสมมูลย์แบบ π สามารถเขียนได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 สายส่งระยะปานกลาง วงจรสมมูลย์แบบ π

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของวงจรสมมูลย์แบบ π จะหาได้ดังนี้

$$V_S = [1 + (ZY/2)]*V_R + Z*I_R \qquad (3.4)$$

$$I_S = [Y + (ZY^2/4)]*V_R + [1 + (ZY/2)]*I_R \qquad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{c1} = (Y/2)*V_S \quad (3.6)$$

$$I_{c2} = (Y/2)*V_R \quad (3.7)$$

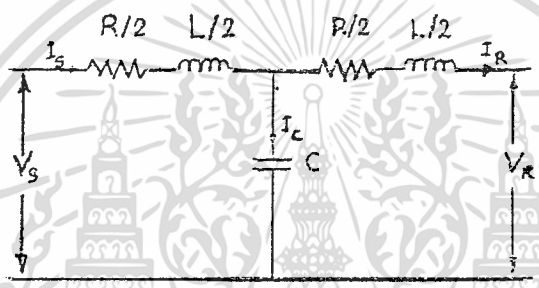
ให้

$$A = D = [1+ (ZY/2)]$$

$$B = Z$$

$$C = [Y + (ZY^2/4)]$$

วงจรสมมูลย์แบบ T เขียนได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 สายส่งระยะปานกลาง วงจรสมมูลย์แบบ T

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ วงจรสมมูลย์แบบ T จะหาได้ดังนี้

$$V_S = [1 + (ZY/2)]*V_R + [Z + (Z^2Y/4)]*I_R \quad (3.8)$$

$$I_S = Y*V_R + [1 + (ZY/2)]*I_R \quad (3.9)$$

$$I_C = I_S - I_R \quad (3.10)$$

ให้

$$A = D = [1+ (ZY/2)]$$

$$B = [Z + Z^2Y/4)]$$

$$C = Y$$

วงจรสมมูลย์ทั้งสองแบบสามารถเขียนในรูปของ ตัวแปร A, B, C, D ได้ดังนี้

$$V_S = A*V_R + B*I_R \quad (3.11)$$

$$I_S = C*V_R + D*I_R \quad (3.12)$$

เขียนความสัมพันธ์ของ V_R และ I_R ในรูปของ V_S และ I_S ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_R = D*V_S - B*I_S \quad (3.13)$$

$$I_R = A*I_S - C*V_S \quad (3.14)$$

เนื่องจาก เรารู้ค่า I_R และ V_S ซึ่งเราต้องการหาค่า I_S และ V_R จากสมการที่ 3.11 และ 3.12 จะได้

$$I_S = (C*V_S + I_R)/A \quad (3.15)$$

เมื่อเราหา I_S ได้ก็นำไปแทนในสมการที่ 3.12 ก็จะได้ค่า V_R

3.4 สายส่งระยะไกล

ในการคำนวณ ค่ากระแส และแรงดันไฟฟ้า ของสายส่งที่มีความยาวมาก ๆ เราจะคำนวณ ในลักษณะพารามิเตอร์แบบกระจายตามความยาว โดยใช้สมการดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Equation) มาช่วยในการจัดรูปแบบ เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในรูปของ Hyperbolic ได้ดังนี้

$$V_S = V_R \cosh \gamma l + I_R Z_C \sinh \gamma l \quad (3.16)$$

$$I_S = I_R \cosh \gamma l + (V_R/Z_C) \sinh \gamma l \quad (3.17)$$

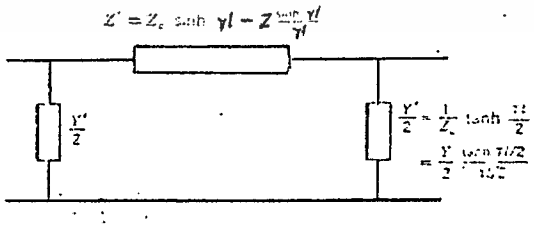
โดยที่

$$Z_C = \sqrt{z/y}$$

$$\gamma = \sqrt{yz}$$

ซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลย์ของสายส่งระยะไกล ได้ดังนี้

วงจรสมมูลย์แบบ π



รูปที่ 3.6 สายส่งระยะไกล วงจรสมมูลย์แบบ π

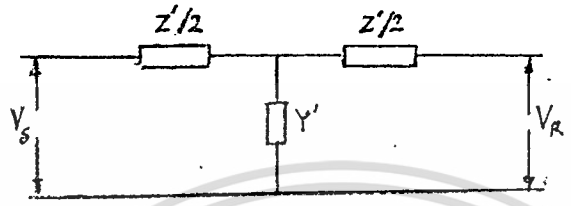
โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z' = Z(\sinh \gamma l/\gamma l) \quad (3.18)$$

$$Y' = Y[\tanh (\gamma l/2)/(\gamma l/2)] \quad (3.19)$$

วงจรสมมูลย์แบบ T



รูปที่ 3.7 สายส่งระยะไกล วงจรสมมูลย์แบบ T

โดยที่

$$Z' = Z[\tanh (\gamma l/2)/(\gamma l/2)] \quad (3.20)$$

$$Y' = Y(\sinh \gamma l/\gamma l) \quad (3.21)$$

3.5 ระบบเปอร์ยูนิต

<u>สำหรับระบบไฟฟ้าเฟสเดียว</u> ค่ากระแสเป็น Phase Current (I_{ph}), ค่าแรงดันไฟฟ้าเป็น Line to Neutral Voltage (V_{LN}), ค่ากำลังไฟฟ้าเป็น Volt-Ampere per Phase (VA_{1ph})

$$\text{เบสกระแสไฟฟ้า(A)} = \frac{\text{เบสกำลังไฟฟ้า (KVA)}}{\text{เบสแรงดันไฟฟ้า (KV)}}$$

$$\text{เบสอิมพิแดนซ์(}\Omega\text{)} = \frac{(\text{เบสแรงดันไฟฟ้า KV})^2 \times 1000}{\text{เบสกำลังไฟฟ้า (KVA)}}$$

$$= \frac{(\text{เบสแรงดันไฟฟ้า KV})^2}{\text{เบสกำลังไฟฟ้า (MVA)}}$$

<u>สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟส</u> ค่ากระแสไฟฟ้าเป็น Line Current (I_L), ค่าแรงดันไฟฟ้าเป็น Line To Line Voltage (V_{L-L})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เบสกระแสไฟฟ้า (A)} = \frac{\text{เบสกำลังไฟฟ้า (KVA)}}{\sqrt{3} \times \text{เบสแรงดันไฟฟ้า (KV)}}$$

$$\text{เบสอิมพิแดนซ์ (}\Omega\text{)} = \frac{(\text{เบสแรงดันไฟฟ้า KV})^2 \times 1000}{\text{เบสกำลังไฟฟ้า (KVA)}}$$

$$= \frac{(\text{เบสแรงดันไฟฟ้า KV})^2}{\text{เบสกำลังไฟฟ้า (MVA)}}$$

จำนวนที่เป็น เปอร์ยูนิต จะคำนวณได้ดังนี้

$$\text{p.u กระแสไฟฟ้า} = \frac{\text{กระแสไฟฟ้าจริง (A)}}{\text{เบสกระแสไฟฟ้า (A)}}$$

$$\text{p.u อิมพิแดนซ์} = \frac{\text{อิมพิแดนซ์จริง (}\Omega\text{)}}{\text{เบสอิมพิแดนซ์ (}\Omega\text{)}}$$

$$\text{p.u แรงดันไฟฟ้า} = \frac{\text{แรงดันไฟฟ้าใด ๆ (KV)}}{\text{เบสแรงดันไฟฟ้า (KV)}}$$

$$\text{p.u กำลังไฟฟ้า} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้า (MW)}}{\text{เบสกำลังไฟฟ้า (MVA)}}$$

$$\text{p.u รีแอคทีฟเพาเวอร์} = \frac{\text{รีแอคทีฟ เพาเวอร์ (MVAR)}}{\text{เบสกำลังไฟฟ้า (MVA)}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การคำนวณและการออกแบบ

4.1 การคำนวณหาพารามิเตอร์ของสายส่งที่จะจำลอง

สำหรับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะได้ทำการจำลองระบบสายส่ง 3 แบบด้วยกัน คือ สายส่งระยะสั้น สายส่งระยะปานกลาง และสายส่งระยะไกล

สายส่งระยะสั้น (Short Line)

เดินสายส่งจาก หนองจอก-บางกะปิ (NONG CHOK - BANG KAPI)

ระบบจริง

ขนาดพิกัด 100 MVA 230 KV

สายส่งมีขนาดความยาว 26.766 km

มีค่า GMD 924.114 cm

cable Pheasant

ระบบจำลอง

ขนาดพิกัด 1500 VA 415 V

	Real System	Simulation System
R	1.295474 Ω	0.281176 Ω
L	34.689174 mH	7.529103 mH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายส่งระยะปานกลาง (Medium Line)

เดินสายจาก ท่าตะโก-หนองจอก (THA TAKO - NONG CHOK)

ระบบจริง

ขนาดพิกัด 100 MVA 500 KV

สายส่งมีขนาดความยาว 207.192 km

มีค่า GMD 1768.93 cm

cable condor

ระบบจำลอง

ขนาดพิกัด 1500 VA 415 V

ต่อวงจรแบบ π-network

	Real System	Simulation System	เปลี่ยน C_{sim}
R	16.098818 Ω	0.739365 Ω	0.720878 Ω
L	305.122738 mH	14.013270 mH	13.662879 mH
C/2	0.806009 μF	17.549924 μF	18.000000 μF

ต่อวงจรแบบ T-network

	Real System	Simulation System	เปลี่ยน C_{sim}
R/2	8.049409 Ω	0.369683 Ω	0.360439 Ω
L/2	152.561369 mH	7.006635 mH	6.831440 mH
C	1.612019 μF	35.099847 μF	36.000000 μF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายส่งระยะไกล (Long Line)

เดินสายจาก แม่เมาะ-ท่าตะโก (MAE MOH 3 - THA TAKO)

ระบบจริง

ขนาดพิกัด 100 MVA 500 KV

สายส่งมีขนาดความยาว 325.635 km

มีค่า GMD 1511.905 cm

cable condor

ระบบจำลอง

ขนาดพิกัด 1500 VA 415 V

ต่อวงจรแบบ π-network

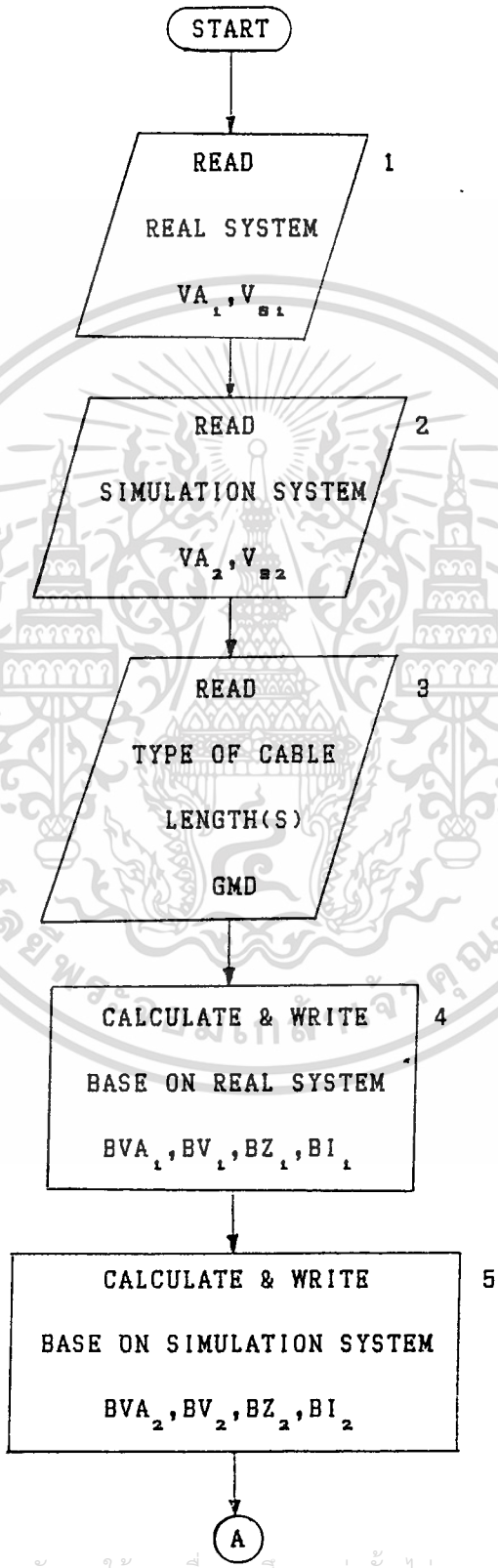
	Real System	Simulation System	เปลี่ยน C_{sim}
R	24.298840 Ω	1.115965 Ω	1.135378 Ω
L	460.265378 mH	21.138455 mH	21.506179 mH
C/2	1.308317 μF	28.487087 μF	28.000000 μF

ต่อวงจรแบบ T-network

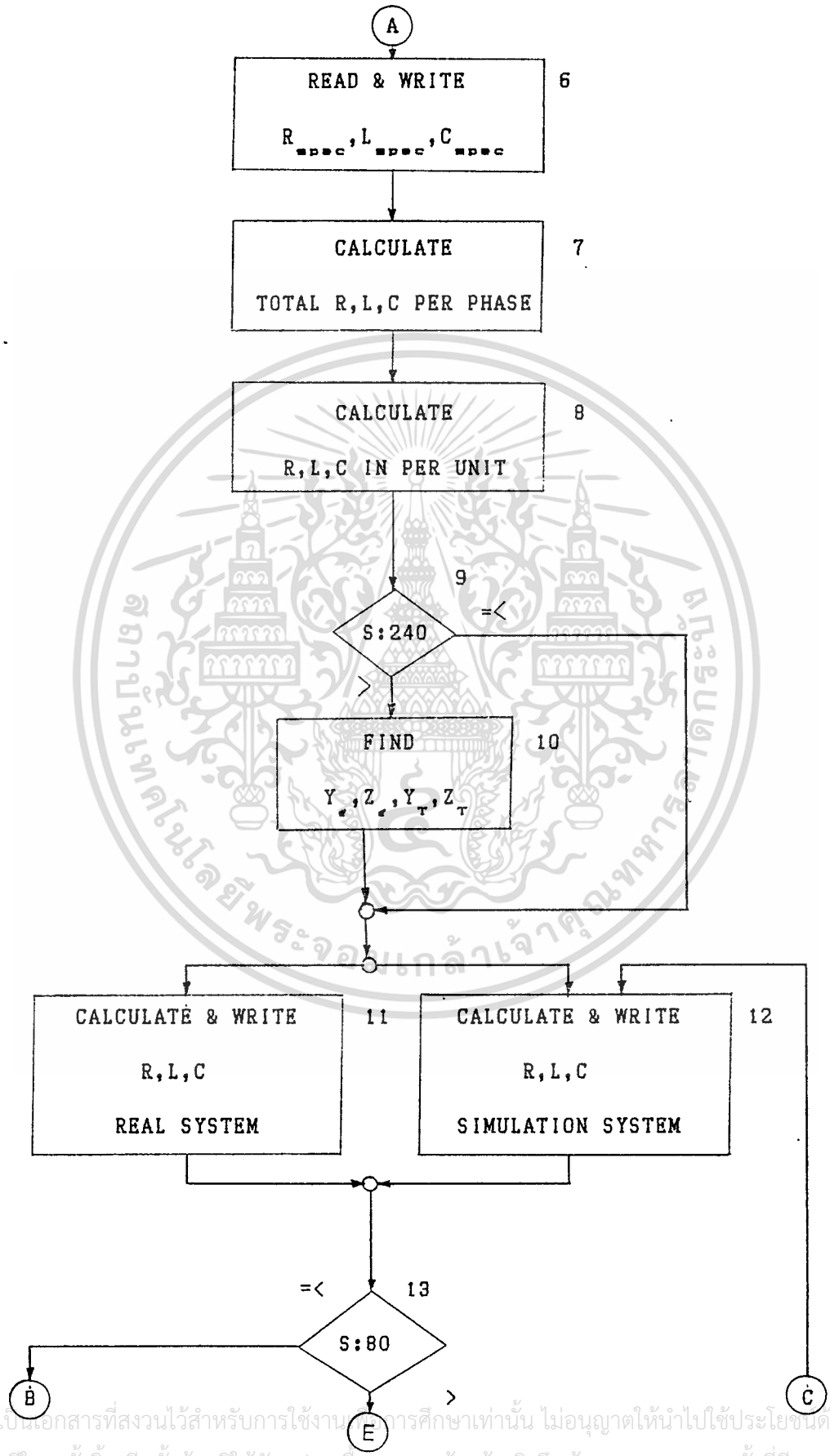
	Real System	Simulation System	เปลี่ยน C_{sim}
R/2	12.908497 Ω	0.592844 Ω	0.585247 Ω
L/2	2360964972 mH	10.883011 mH	10.743548 mH
C	2.538935 μF	55.282372 μF	56.000000 μF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

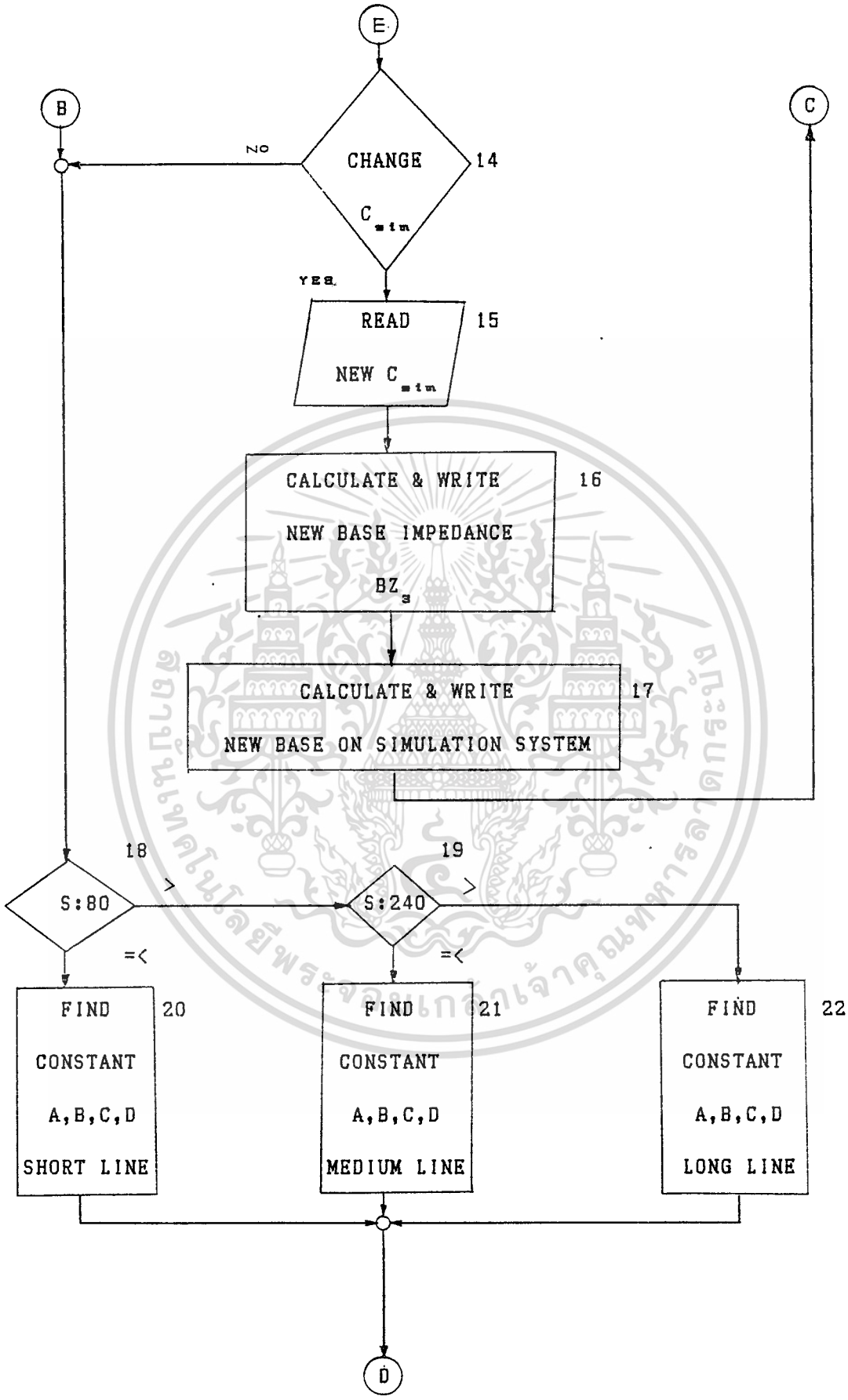
4.2 แสดงบล็อกโฟลชาร์ต์



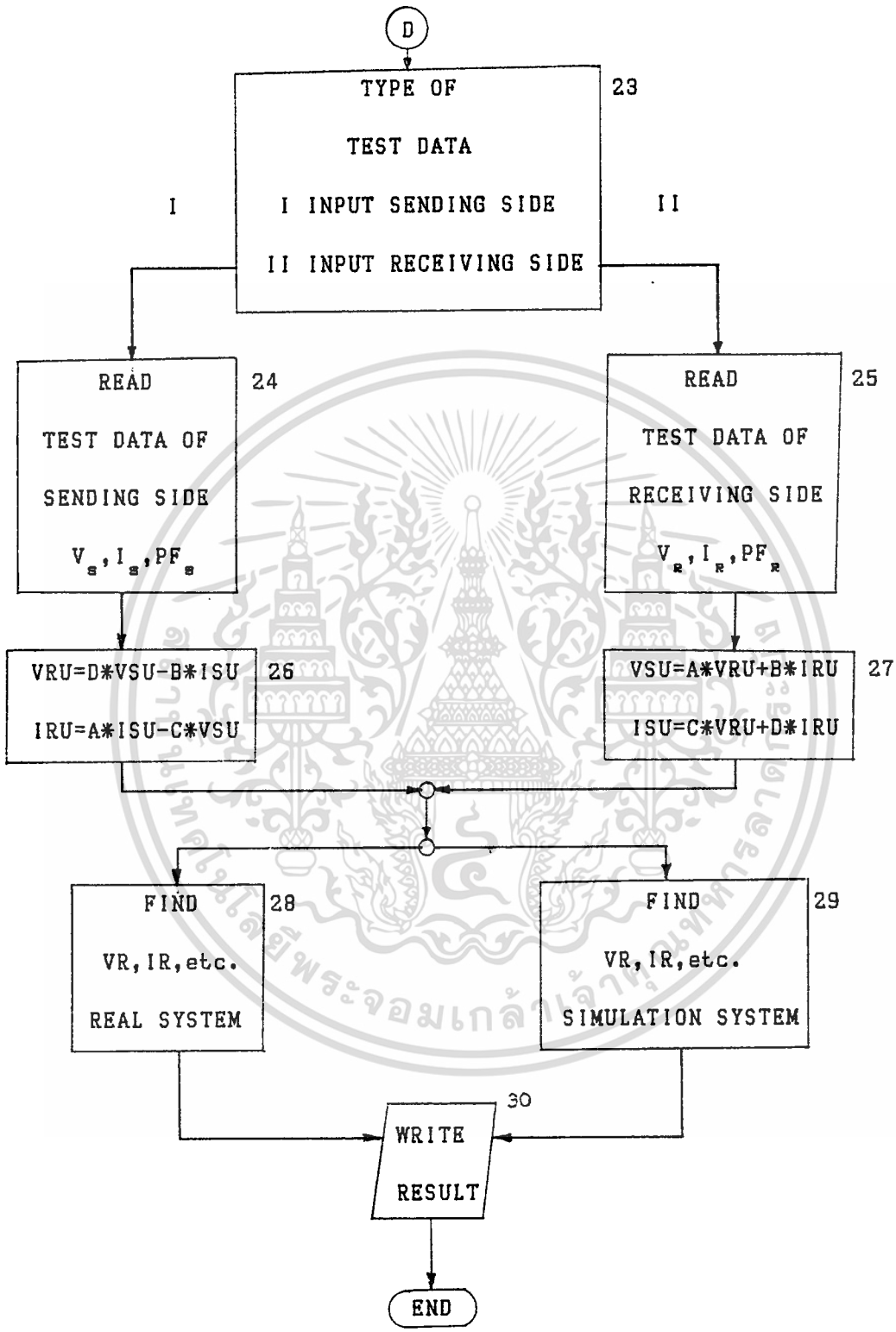
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 อธิบาย FLOWCHART

BLOCK 1 อ่านค่าพิกัดของระบบจริง โดยอ้างอิงทางด้านส่ง (sending end)

VA_1: พิกัดกำลังของระบบจริง (KVA 3ϕ)

V_{s1}: พิกัดแรงดันทางด้านส่งของระบบจริง (KV_{L-L})

BLOCK 2 อ่านค่าพิกัดของระบบจำลอง

VA_2: พิกัดกำลังของระบบจำลอง (VA 3ϕ)

V_{s2}: พิกัดแรงดันทางด้านส่งของระบบจำลอง (V_{L-L})

BLOCK 3 อ่านค่าต่างๆของสายส่งในระบบจริงที่จะนำมาจำลอง ซึ่งได้แก่

ชนิดของสายส่ง(code word) ความยาวสาย(ใช้ตัวแปร S)

ค่า GMD ของสายส่ง

BLOCK 4 คำนวณและแสดงค่าอ้างอิง(base)ต่างๆ ของระบบจริง(คิดต่อเฟส)

$BVA_1 = VA_1/3$

$BV_1 = V_{s1}/\sqrt{3}$

$BZ_1 = (BV_1)^2 * 1000/BVA_1$

$BI_1 = BVA_1/BV_1$

BLOCK 5 คำนวณและแสดงค่าอ้างอิง(base)ต่างๆ ของระบบจำลอง(คิดต่อเฟส)

$BVA_2 = VA_2/3$

$BV_2 = V_{s2}/\sqrt{3}$

$BZ_2 = (BV_2)^2/BVA_2$

$BI_2 = BVA_2/BV_2$

BLOCK 6 อ่านและแสดงค่าคุณสมบัติของสายส่งในระบบจริงจากตาราง ตามชนิดของสายส่งที่ป้อนเข้าไป

R_{spec} = ความต้านทานของสายส่งต่อหน่วยความยาว

L_{spec} = ความเหนี่ยวนำของสายส่งต่อหน่วยความยาว

C_{spec} = ความจุไฟฟ้าของสายส่งต่อหน่วยความยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BLOCK 7 หาค่า RLC ของสายส่งในระบบจริงต่อเฟส

$R_{real} = R_{spec} * S$

$L_{real} = L_{spec} * S$

$C_{real} = C_{spec} * S$

$XL_{real} = 2\pi f L_{real}$

$YC_{real} = 2\pi f C_{real}$

BLOCK 8 คำนวณค่า RLC ของระบบจริงเป็นค่าเปอร์ยูนิต

$R_{pu} = R_{real} / BZ_i$

$XL_{pu} = XL_{real} / BZ_i$

$YC_{pu} = YC_{real} * BZ_i$

BLOCK 9 ตรวจสอบความยาวสาย

ถ้า S<=240 km ทำการคำนวณต่อไปใน BLOCK 11

ถ้า S>240 km ทำการคำนวณต่อไปใน BLOCK 10

BLOCK 10 คำนวณค่า Y,Z เปอร์ยูนิตของสายส่งระยะไกลซึ่งแยกพิจารณาได้ 2 กรณี คือ π-network และ T-network แต่ต้องเปลี่ยนค่า Y_{pu} และ Z_{pu} ให้เป็นค่า Y_π, Z_π และ Y_T, Z_T ตามลำดับโดย

กรณีที่ 1 : π-network

$Y_\pi = Y_{pu} * \tanh(rs/2)/(rs/2)$

$Z_\pi = Z_{pu} * \sinh(rs)/rs$

กรณีที่ 2 : T-network

$Y_T = Y_{pu} * \sinh(rs)/rs$

$Z_T = Z_{pu} * \tanh(rs/2)/(rs/2)$

$r = \sqrt{yz}$

BLOCK 11 คำนวณและแสดงค่า RLC ของระบบจริง

$R_i = R_{pu} * BZ_i$

$L_i = X_{pu} * BZ_i / 2\pi f$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$C_1 = (Y_{pu}/BZ_1)/2\pi f$

BLOCK 12 คำนวณและแสดงค่า RLC ของระบบจำลอง

$R_2 = R_{pu}*BZ_2$

$L_2 = X_{pu}*BZ_2/2\pi f$

$C_2 = (Y_{pu}/BZ_2)/2\pi f$

BLOCK 13 ตรวจสอบความยาวสาย

ถ้า S<=80 km ให้ทำที่ BLOCK 18 ต่อไป

ถ้า S>80 km ให้ทำที่ BLOCK 14 ต่อไป

BLOCK 14 ตรวจสอบว่าจะเปลี่ยนค่าคาปาซิเตอร์ของระบบจำลอง(C_{sim})ใหม่หรือไม่

NO : ไม่เปลี่ยนค่า ให้ทำที่ BLOCK 18 ต่อไป

YES: เปลี่ยนค่า ให้ไปทำที่ BLOCK 15 ต่อไป

BLOCK 15 ป้อนค่า C_{sim} ใหม่

BLOCK 16 คำนวณและแสดงค่าอิมพีแดนซ์อ้างอิงของระบบจำลองใหม่(BZ_3)

$Y_{pu} = Y_1*BZ_1 = Y_2*BZ_2 = Y_3*BZ_3$

ดังนั้น $C_{real}*BZ_1 = C_{sim}*BZ_3$

$BZ_3 = C_{real}*BZ_1/C_{sim}$

BLOCK 17 คำนวณและแสดงค่าอ้างอิงของปริมาณทางไฟฟ้าของระบบจำลองใหม่ทั้งหมด

-จาก BLOCK 16 สามารถหา BZ_3 ได้ และ $BZ_3 = (BV_3)^2/BVA_3$

-ในระบบจำลองเพื่อให้ได้ BZ_3 ใหม่จึงต้องกำหนด BV_3 และ BVA_3ขึ้นมาใหม่

-ถ้าต้องการคงค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของระบบจำลองเดิมไว้จะต้องเปลี่ยน ค่ากำลังไฟฟ้าอ้างอิงใหม่ ดังนี้

$BV_3 = BV_2$

$BI_3 = BV_3/BZ_3$

$BVA_3 = BV_3*BI_3$

เมื่อทำ BLOCK 17 นี้เสร็จแล้วจะวนกลับไปเริ่มทำที่ BLOCK 12 ใหม่อีกครั้ง

BLOCK 18 ตรวจสอบความยาวสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า S<=80 km ให้ทำที่ BLOCK 20 ต่อไป

ถ้า S>80 km ให้ทำที่ BLOCK 19 ต่อไป

BLOCK 19 ตรวจสอบความยาวสาย

ถ้า S<=240 km ให้ทำที่ BLOCK 21 ต่อไป

ถ้า S>240 km ให้ทำที่ BLOCK 22 ต่อไป

BLOCK 20 คำนวณค่า A,B,C,D เปอร์ยูนิตของสายส่งระยะใกล้

$A = 1$

$B = Z_{pu} = R_{pu} + jXL_{pu}$

$C = 0$

$D = 1$

BLOCK 21 คำนวณค่า A,B,C,D เปอร์ยูนิตของสายส่งระยะปานกลาง

กรณีที่ 1 : π-network

$A = 1 + (Y_{pu} * Z_{pu}/2)$

$B = Z_{pu} = R_{pu} + jXL_{pu}$

$C = (Y_{pu}/2)(1+A)$

$D = A$

กรณีที่ 2 : T-network

$A = 1 + (Y_{pu} * Z_{pu}/2)$

$B = (Z_{pu}/2)(1+A)$

$C = Y_{pu}$

$D = A$

BLOCK 22 คำนวณค่า A,B,C,D เปอร์ยูนิตของสายส่งระยะไกล โดยมีสูตรการคำนวณเช่นเดียวกับสายส่งระยะปานกลาง แต่ต้องเปลี่ยนค่า Y_{pu} และ Z_{pu} ให้เป็นค่า Y_{π}, Z_{π} และ Y_{T}, Z_{T} ในกรณี π-network และ T-network ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BLOCK 23 ตรวจสอบชนิดของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

แบบ1: ป้อนข้อมูลทางด้านส่ง

แบบ2: ป้อนข้อมูลทางด้านรับ

BLOCK 24 ป้อนข้อมูลทางด้านส่งที่ได้จากการทดลอง

V_s : แรงดันไฟฟ้าทางด้านส่ง

I_s : กระแสไฟฟ้าทางด้านส่ง

PF_s: power factor ทางด้านส่ง

BLOCK 25 ป้อนข้อมูลทางด้านรับที่ได้จากการทดลอง

V_R : แรงดันไฟฟ้าทางด้านรับ

I_R : กระแสไฟฟ้าทางด้านรับ

PF_R: power factor ทางด้านรับ

BLOCK 26 คำนวณค่าแรงดันและกระแสทางด้านรับเป็นค่าเปอร์ยูนิต

$V_{ru} = (D*V_{su})-(B*I_{su})$

$I_{ru} = (A*I_{su})-(C*V_{su})$

BLOCK 27 คำนวณค่าแรงดันและกระแสทางด้านส่งเป็นค่าเปอร์ยูนิต

$V_{su} = (A*V_{ru})+(B*I_{ru})$

$I_{su} = (C*V_{ru})+(D*I_{ru})$

BLOCK 28 คำนวณค่าแรงดัน, กระแสและปริมาณทางไฟฟ้าอื่นๆทั้งหมดของระบบจริง

BLOCK 29 คำนวณค่าแรงดัน, กระแสและปริมาณทางไฟฟ้าอื่นๆทั้งหมดของระบบจำลอง

BLOCK 30 แสดงค่าปริมาณทางไฟฟ้าทั้งหมดที่คำนวณได้ของทั้งระบบจริงและระบบจำลอง

4.4 การออกแบบและการสร้างตัวเหนี่ยวนำ

หลังจากคำนวณและเลือกค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ครบแล้ว ในการสร้างและการออกแบบสร้างค่าพารามิเตอร์ต่างๆเราสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

1.คาปาซิเตอร์ เราเลือกจากค่า C ที่มีขายอยู่ตามท้องตลาด โดยจะต้องทนแรงดันที่พิกัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.ตัวต้านทาน สร้างได้จากการนำตัวความต้านทานกระเบื้องมาต่ออนุกรม และ/หรือ ขนานกันเพื่อให้ได้ค่าตามความต้องการ ที่สำคัญจะต้องออกแบบไม่ให้ค่า watt เกินกว่าที่ตัวความต้านทานจะทนได้

3.ตัวเหนี่ยวนำ จะต้องอาศัยการคำนวณและออกแบบดังต่อไปนี้

จะต้องเลือกขนาดพิกัดกระแสสูงสุดที่จะใช้ โดยที่ในการจำลองเราจะได้ค่า I_{max} และขนาดของขดลวดทองแดงที่จะต้องใช้พันตัวเหนี่ยวนำ

ตัวอย่าง จากการคำนวณสายส่งระยะสั้นที่ส่งจาก บางพลี ไป บางกะปิ มีขนาดของตัวเหนี่ยวนำ L = 7.53 mH เราจะทำการเลือกขนาดของกระแสสูงสุดที่ 5 Amp โดยที่ใช้เส้นลวดทองแดงเบอร์ 20 SWG

ในการคำนวณจากค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ โดยเสมือนว่าขดลวดที่พันนี้ปราศจากค่าของความต้านทาน (ค่าของ R น้อยมากเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ X_L) และมีกระแสสูงสุดไหลผ่านขดลวด 5 Amp เราจะได้ว่า

$$V = IX_L$$
$$= I*2\pi fL$$
$$= 5*2\pi*50*7.53*10^{-3}$$
$$= 11.83 \quad V.$$

เมื่อเราได้ค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L แล้ว จึงนำค่าที่ได้มาคำนวณออกแบบโดยใช้แผ่นเหล็กที่มีขนาด 1"*1" ซึ่งเราจะได้ค่าพื้นที่หน้าตัดที่ใช้เป็น $(2.54*10^{-2})$ $A = 6.4516*10^{-4}$ ตารางเมตร และมีค่าของ B = 1 เทสลา จากข้อมูลต่างๆที่ได้นำมาหาจำนวนรอบของขดลวดได้จากสมการ

$$V = 4.44fNBA$$
$$11.83 = 4.44*50*N*1*6.4516*10^{-4}$$
$$N = 82.59 \quad \text{รอบ}$$

ในการออกแบบเพื่อปรับระยะ air gap ให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำที่ค่อนข้างจะคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจึงทำการเผื่อค่าของจำนวนรอบโดยประมาณเข้าไปอีก 30% ดังนั้นเราจะได้ว่าจำนวนรอบที่ใช้ในการพันขดลวดตัวเหนี่ยวนำเป็น

$$N*1.3 = 82.59*1.3$$

$$= 107.367 \text{ รอบ}$$

โดยประมาณจำนวนรอบที่ใช้เราจะได้ = 110 รอบ

หลังจากได้จำนวนรอบในการพันขดลวดแล้วจึงนำมาคำนวณเพื่อหาค่า air gap ที่ต้องการเพื่อปรับให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำ L = 7.53 mH

จากสูตร

$$L = N^2 \mu_o A/2g$$

$$7.53*10^{-3} = (110)^2*4\pi*10^{-7}(2.54*10^{-2})^2/2g$$

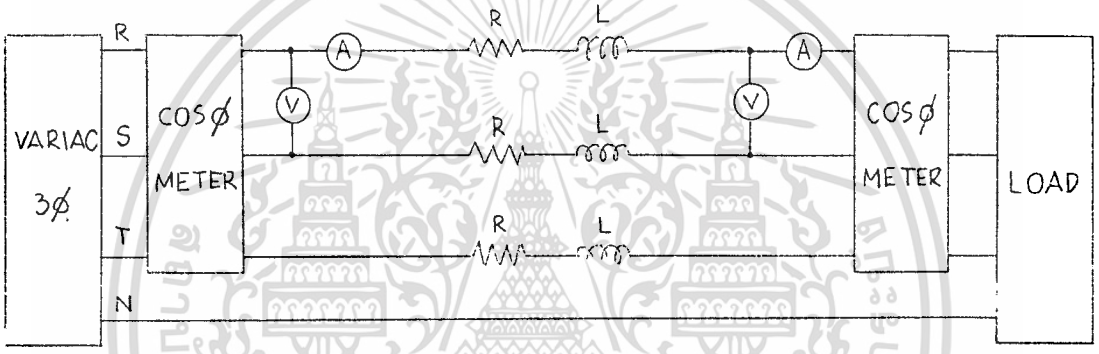
$$g = 0.65 \text{ mm.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ผลการทดสอบและผลการคำนวณ

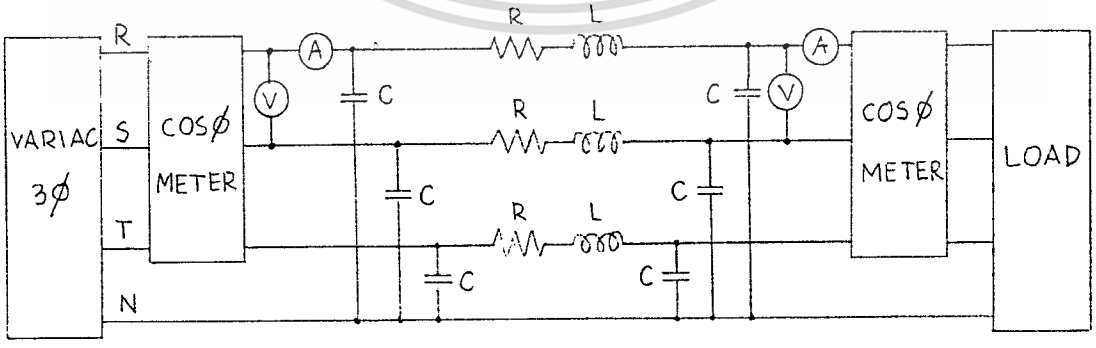
5.1 วิธีทดสอบ

1.ทำการต่อวงจร Short line ตามรูปที่ 5.1 โดยป้อนแรงดันที่ทางด้านเข้าด้วยขนาด 50 V_{L-L} ,100V_{L-L} ,150 V_{L-L} ,200 V_{L-L} และ 250 V_{L-L}



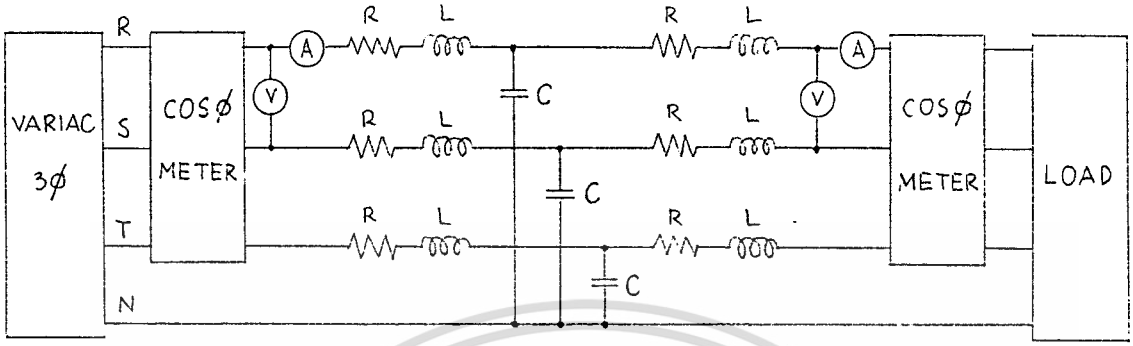
รูปที่ 5.1 วงจร Short Line

2.บันทึกผลการทดลองลงในตาราง



รูปที่ 5.2 วงจร Medium Line และ Long Line แบบ π-network

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 วงจร Medium Line และ Long Line แบบ T-network

3.ทำการต่อวงจร Medium line โดยป้อนแรงดันที่ทางด้านเข้าด้วยขนาด 50 V_{L-L} ,100V_{L-L} ,150 V_{L-L} ,200 V_{L-L} และ 250 V_{L-L}

3.1 ต่อวงจรแบบ π network ตามรูปที่ 5.2

3.2 ต่อวงจรแบบ T network ตามรูปที่ 5.3

4.บันทึกผลการทดลองลงในตาราง

5.ทำการต่อวงจร Long line โดยป้อนแรงดันที่ทางด้านเข้าด้วยขนาด 50 V_{L-L} , 100V_{L-L} ,150 V_{L-L} ,200 V_{L-L} และ 250 V_{L-L}

5.1 ต่อวงจรแบบ π network ตามรูปที่ 5.2

5.2 ต่อวงจรแบบ T network ตามรูปที่ 5.3

6.บันทึกผลการทดลองลงในตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ผลการทดสอบ

วงจร Short Line

ความยาวสาย 26.766 km ชนิดสาย Pheasant

พิกัดระบบจริง 100 MVA 230 KV

พิกัดระบบจำลอง 1500 VA 415 V

ค่าพารามิเตอร์ระบบจริง R : 1.2954 Ω L : 34.6891 mH

ค่าพารามิเตอร์ระบบจำลอง R : 0.2811 Ω L : 7.5291 mH

Sending			Receiving		
$V_S(V_{L-L})$	$I_S(A)$	$\cos\phi_S$	$V_R(V_{L-L})$	$I_R(A)$	$\cos\phi_R$
100	2.8	-0.79	89.5	2.8	-0.86
150	2.9	-0.81	139	2.9	-0.86
200	2.8	-0.74	183	2.8	-0.79
250	3.0	-0.58	234	3.0	-0.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร Medium Line ต่อวงจรแบบ π-network

ความยาวสาย 207.192 km ชนิดสาย condor

พิกัดระบบจริง 100 MVA 500 KV

พิกัดระบบจำลอง 1500 VA 415 V

พารามิเตอร์ระบบจริง R:16.0988 Ω L:305.1227 mH C/2: 0.8060 μF

พารามิเตอร์ระบบจำลอง R: 0.7393 Ω L: 14.0132 mH C/2:17.5499 μF

เปลี่ยน C_{min} R: 0.7208 Ω L: 13.6628 mH C/2:18.0000 μF

Sending			Receiving		
$V_S(V_{L-L})$	I_S(A)	$\cos\phi_S$	$V_R(V_{L-L})$	I_R(A)	$\cos\phi_R$
100	1.85	-0.895	87	2.2	-0.862
150	2.18	-0.925	135	2.75	-0.85
200	2.0	-0.942	184	2.7	-0.78
250	1.9	-0.905	230	3.0	-0.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร Medium Line ต่อวงจรแบบ T-network

ความยาวสาย 207.192 km ชนิดสาย condor

พิกัดระบบจริง 100 MVA 500 KV

พิกัดระบบจำลอง 1500 VA 415 V

พารามิเตอร์ระบบจริง R/2:8.0494 Ω L/2:152.5613 mH C: 1.6120 μF

พารามิเตอร์ระบบจำลอง R/2:0.3696 Ω L/2: 7.0066 mH C:35.0998 μF

เปลี่ยน C_{sim} R/2:0.3604 Ω L/2: 6.8314 mH C:36.0000 μF

Sending			Receiving		
$V_S (V_{L-L})$	I_S (A)	$\cos\phi_S$	$V_R (V_{L-L})$	I_R (A)	$\cos\phi_R$
100	1.9	-0.905	89	1.8	-0.87
150	2.2	-0.94	135	2.7	-0.86
200	2.0	-0.95	184	2.5	-0.75
250	1.9	-0.91	230	3.0	-0.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร Long Line ต่อวงจรแบบ π-network

ความยาวสาย 325.635 km ชนิดสาย condor

พิกัดระบบจริง 100 MVA 500 KV

พิกัดระบบจำลอง 1500 VA 415 V

พารามิเตอร์ระบบจริง R:24.2988 Ω L:460.2653 mH C/2: 1.3083 μF

พารามิเตอร์ระบบจำลอง R: 1.1159 Ω L: 21.1384 mH C/2:28.4870 μF

เปลี่ยน C_{sim} R: 1.1353 Ω L: 21.5061 mH C/2:28.0000 μF

Sending			Receiving		
$V_S(V_{L-L})$	I_S(A)	$\cos\phi_S$	$V_R(V_{L-L})$	I_R(A)	$\cos\phi_R$
100	1.5	-0.945	84	2.0	-0.842
150	2.1	-0.975	130	2.7	-0.87
200	2.1	-0.995	180	2.85	-0.81
250	1.82	-0.998	228	3.0	-0.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร Long Line ต่อวงจรแบบ T-network

ความยาวสาย 325.635 km ชนิดสาย condor

พิกัดระบบจริง 100 MVA 500 KV

พิกัดระบบจำลอง 1500 VA 415 V

พารามิเตอร์ระบบจริง R/2:12.9084 Ω L/2:236.9649 mH C: 2.5389 μF

พารามิเตอร์ระบบจำลองR/2: 0.5928 Ω L/2: 10.8830 mH C:55.2823 μF

เปลี่ยน C_{min} R/2: 0.5852 Ω L/2: 10.7435 mH C:56.0000 μF

Sending			Receiving		
$V_S(V_{L-L})$	I_S (A)	$\cos\phi_S$	$V_R(V_{L-L})$	I_R (A)	$\cos\phi_R$
100	1.45	-0.975	85	1.9	-0.84
150	2.2	-0.985	129	2.75	-0.86
200	2.12	1.0	181	2.82	-0.82
250	1.85	1.0	230	3.0	-0.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลการคำนวณ

ผลการคำนวณของระบบจำลองจากโปรแกรมโดยใช้เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ เป็นดังนี้

วงจร Short Line

กำหนดค่าด้านส่ง คำนวณหาด้านรับ

Sending			Receiving		
$V_S(V_{L-L})$	I_S(A)	$\cos\phi_S$	$V_R(V_{L-L})$	I_R(A)	$\cos\phi_R$
100	2.8	-0.79	92.26	2.8	-0.842
150	2.9	-0.81	142.16	2.9	-0.845
200	2.8	-0.74	191.43	2.8	-0.766
250	3.0	-0.58	239.21	3.0	-0.600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร Medium Line ต่อวงจรแบบ π-network

กำหนดค่าด้านส่ง คำนวณหาด้านรับ

Sending			Receiving		
$V_S(V_{L-L})$	$I_S(A)$	$\cos\phi_S$	$V_R(V_{L-L})$	$I_R(A)$	$\cos\phi_R$
100	1.85	-0.895	90.03	2.17	-0.822
150	2.18	-0.925	138.33	2.65	-0.806
200	2.0	-0.942	188.21	2.67	-0.735
250	1.9	-0.905	236.02	2.93	-0.612

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร Medium Line ต่อวงจรแบบ T-network

กำหนดค่าด้านส่ง คำนวณหาด้านรับ

Sending			Receiving		
$V_S(V_{L-L})$	I_S(A)	$\cos\phi_S$	$V_R(V_{L-L})$	I_R(A)	$\cos\phi_R$
100	1.9	-0.905	90.24	2.21	-0.836
150	2.2	-0.94	139.00	2.64	-0.824
200	2.0	-0.95	188.65	2.66	-0.743
250	1.9	-0.91	236.28	2.93	-0.613

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร Long Line ต่อวงจรแบบ π-network

กำหนดค่าด้านส่ง คำนวณหาด้านรับ

Sending			Receiving		
$V_S(V_{L-L})$	$I_S(A)$	$\cos\phi_S$	$V_R(V_{L-L})$	$I_R(A)$	$\cos\phi_R$
100	1.5	-0.945	86.77	1.96	-0.797
150	2.1	-0.975	133.35	2.71	-0.818
200	2.1	-0.995	182.88	2.92	-0.761
250	1.82	-0.998	230.97	3.08	-0.623

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร Long Line ต่อวงจรแบบ T-network

กำหนดค่าด้านส่ง คำนวณหาด้านรับ

Sending			Receiving		
$V_S(V_{L-L})$	$I_S(A)$	$\cos\phi_S$	$V_R(V_{L-L})$	$I_R(A)$	$\cos\phi_R$
100	1.45	-0.975	88.88	1.87	-0.820
150	2.2	-0.985	134.52	2.77	-0.842
200	2.12	1.0	185.39	2.84	-0.785
250	1.85	1.0	232.35	3.07	-0.634

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 เปรียบเทียบผลการคำนวณของระบบจริงและระบบจำลอง

จากผลการทดสอบที่ได้ จะเลือกที่ค่า V_s = 250 V_{L-L} ของแต่ละความยาวสาย ไปคำนวณหาค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆ ของทั้งระบบจริงและระบบจำลอง เพื่อเปรียบเทียบกัน ซึ่งจะได้ดังนี้

5.4.1 สายส่งระยะสั้น (ค่าต่อเฟส)

	ระบบจริง		ระบบจำลอง		
V_s	79.9943	kV	144.3376	V	$\angle\ 0.00^{\circ}$
I_s	360.8696	A	3.0000	A	$\angle -54.55^{\circ}$
I_L	360.8696	A	3.0000	A	$\angle -54.55^{\circ}$
I_R	360.8696	A	3.0000	A	$\angle -54.55^{\circ}$
V_R	76.5431	kV	138.1104	A	$\angle\ -1.42^{\circ}$
LOSS	168.7055	kW	2.5306	W	
EFF	98.9924	%	98.9924	%	

PF ของต้นส่ง = 0.580 $\angle -54.55^{\circ}$

PF ของต้นรับ = 0.600 $\angle -53.13^{\circ}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2 สายส่งระยะปานกลาง

1. แบบ π-network (ค่าต่อเฟส)

	ระบบจริง		ระบบจำลอง		
V_S	173.9007	kV	144.3376	V	$/\ 0.00^{\circ}$
I_S	102.5046	A	1.9000	A	$/-25.18^{\circ}$
I_{CS}	44.0343	A	0.8162	A	$/\ 90.00^{\circ}$
I_L	127.6189	A	2.3655	A	$/-43.37^{\circ}$
I_{CR}	41.5721	A	0.7706	A	$/\ 87.39^{\circ}$
I_R	157.9323	A	2.9274	A	$/-54.87^{\circ}$
V_R	164.1768	kV	136.2667	A	$/\ -2.61^{\circ}$
LOSS	262.1947	kW	4.0338	W	
EFF	98.3747	%	98.3747	%	

PF ของด้านส่ง = 0.905 $/-25.18^{\circ}$

PF ของด้านรับ = 0.612 $/-52.26^{\circ}$

2. แบบ T-network (ค่าต่อเฟส)

	ระบบจริง		ระบบจำลอง		
V_S	173.9007	kV	144.3376	V	$/\ 0.00^{\circ}$
I_S	102.5046	A	1.9000	A	$/-24.49^{\circ}$
I_C	86.6821	A	1.6067	A	$/\ 88.62^{\circ}$
I_R	158.1031	A	2.9306	A	$/-54.78^{\circ}$
V_R	164.3580	kV	136.4171	A	$/\ -2.60^{\circ}$
LOSS	285.7844	kW	4.3967	W	
EFF	98.2382	%	98.2382	%	

PF ของด้านส่ง = 0.910 $/-24.49^{\circ}$

PF ของด้านรับ = 0.613 $/-52.18^{\circ}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.3 สายส่งระยะไกล

1. แบบ π-network (ค่าต่อเฟส)

	ระบบจริง		ระบบจำลอง		
V_S	173.9007	kV	144.3376	V	$\angle\ 0.00^{\circ}$
I_S	102.4586	A	1.8200	A	$\angle\ -3.62^{\circ}$
I_{CS}	71.4766	A	1.2697	A	$\angle\ 89.90^{\circ}$
I_L	128.4800	A	2.2822	A	$\angle -37.35^{\circ}$
I_{CR}	66.0360	A	1.1730	A	$\angle\ 85.30^{\circ}$
I_R	173.2761	A	3.0780	A	$\angle -56.07^{\circ}$
V_R	160.6638	kV	133.3510	A	$\angle\ -4.60^{\circ}$
LOSS	401.1036	kW	5.9137	W	
EFF	97.5189	%	97.5189	%	

PF ของด้านส่ง = 0.998 $\angle\ -3.62^{\circ}$

PF ของด้านรับ = 0.623 $\angle -51.47^{\circ}$

2. แบบ T-network (ค่าต่อเฟส)

	ระบบจริง		ระบบจำลอง		
V_S	173.9007	kV	144.3376	V	$\angle\ 0.00^{\circ}$
I_S	101.0549	A	1.8500	A	$\angle\ 0.00^{\circ}$
I_C	137.7986	A	2.5227	A	$\angle\ 87.70^{\circ}$
I_R	167.5829	A	3.0679	A	$\angle -55.25^{\circ}$
V_R	161.6251	kV	134.1489	A	$\angle\ -4.56^{\circ}$
LOSS	494.3454	kW	7.5114	W	
EFF	97.6556	%	97.6556	%	

PF ของด้านส่ง = 1.000 $\angle\ 0.00^{\circ}$

PF ของด้านรับ = 0.634 $\angle -50.68^{\circ}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ ๖
บทวิจารณ์และสรุป

ความปลอดภัยและการประหยัดค่าใช้จ่ายเป็นสิ่งที่ผู้ค้นคว้าวิจัยต้องคำนึงถึง การจำลองระบบใดๆ เพื่อศึกษาถึงขั้นตอนรายละเอียดและผลลัพธ์ในการทำงานของระบบ เป็นสิ่งที่ผู้ค้นคว้าวิจัยสามารถจัดสร้างขึ้นได้ ดังเช่นการจำลองสายส่งระบบไฟฟ้ากำลังในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นต้น

การจำลองสายส่งระบบไฟฟ้ากำลังหรือ Transmission Line Simulator นี้ เป็นการจำลองการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากสถานีผลิตกระแสไฟฟ้า ผ่านสายส่งและอุปกรณ์ต่างๆ เช่น หม้อแปลงแรงดัน, อุปกรณ์ป้องกัน จนกระทั่งถึงผู้บริโภคหรือผู้ใช้ไฟฟ้านั่นเอง โดยทำการจำลองค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบ ซึ่งได้แก่ ค่าความต้านทาน (R), ค่าความเหนี่ยวนำ (L), ค่าความจุไฟฟ้า (C) ให้เป็นค่าต่ำๆ ที่สามารถหาได้ในห้องปฏิบัติการหรือตามท้องตลาดทั่วไป

การวิจัยในขั้นนี้จะมุ่งเน้นในการศึกษาค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆ เช่น แรงดันปลายด้านส่งและรับ, กระแสไฟฟ้า, ค่าประกอบกำลัง, ประสิทธิภาพ, กำลังไฟฟ้าสูญเสีย เป็นต้น โดยจำลองค่าพารามิเตอร์ของสายส่งด้วยการนำกรรมวิธีเปอร์ยูนิต (Per Unit System) มาใช้ โดยวิธีการทำให้ค่าพารามิเตอร์และปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆ ของทั้งระบบจริงและระบบจำลองมาเป็นค่าเปอร์ยูนิตที่เท่ากัน และสามารถเทียบกลับไปหาค่าจริงได้โดยเทียบผ่านค่าอ้างอิง (Base) ของแต่ละระบบ

การใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ จะทำให้ผู้วิจัยสามารถหาค่าต่างๆ ของทั้งระบบจริงและระบบจำลองได้รวดเร็วและถูกต้องยิ่งขึ้น รวมทั้งทำให้สามารถศึกษาระบบที่มีความยุ่งยากซับซ้อนได้ง่ายขึ้น โปรแกรมสำหรับใช้คอมพิวเตอร์คำนวณ ซึ่งอยู่ในภาคผนวกนั้นจะช่วยให้ผู้ทำการศึกษาสามารถเลือกรูปแบบต่างๆ ที่ใกล้เคียงความเป็นจริงได้มากขึ้น เช่น รูปแบบการวางสาย, ชนิดของสาย, ระยะทางของสายส่ง ซึ่งจะเป็นสายส่งระยะไกล (มากกว่า 240 กิโลเมตร), สายส่งระยะปานกลาง (80 ถึง 240 กิโลเมตร) หรือสายส่งระยะใกล้ (ต่ำกว่า 80 กิโลเมตร) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่วัดได้จากการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้โดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ จะมีค่าใกล้เคียงกัน

ข้อจำกัดในการวิจัยทดสอบครั้งนี้คือ การทนกระแสได้จำกัดของโหลด ซึ่งในที่นี้ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้า ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ จึงเป็นผลให้ไม่สามารถทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าค่าสูงๆ ได้ เนื่องจากที่ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงๆ จะทำให้กระแสเข้ามอเตอร์สูงตามไปด้วย ข้อจำกัดอีกประการหนึ่งคือ เครื่องวัดค่าประกอบกำลัง (COSϕ Meter) ไม่สามารถวัดที่ค่าประกอบกำลังต่ำๆ ได้ จึงต้องทำการเพิ่มโหลดน้ำหนักให้มอเตอร์เพื่อทำให้ค่าประกอบกำลังสูงขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้มอเตอร์ต้องดึงกระแสเพิ่มขึ้นด้วย จึงเป็นข้อจำกัดทางกระแสของโหลดดังเช่นเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ตารางแสดงคุณสมบัติทางด้านพารามิเตอร์ของสาย Aluminum Conductor Steel-Reinforced (ACSR) ในหน่วย SI UNIT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 1 Electrical characteristics of aluminum conductors, steel-reinforced (ACSR)

Code word	Aluminum area, cmil	Outside diameter, cm	Resistance, Ω/km					GMR D_s, cm	Reactance per conductor 1-m spacing, 50Hz	
			DC		AC					
			25°C	50°C	25°C	35°C	50°C		X_a, Ω/km	X_a', MΩ-km
Falcon	1,590,000	3.924	0.0365	0.0401	0.0367	0.0388	0.0419	1.5850	0.2604	0.2250
Parrot	1,510,500	3.825	0.0384	0.0423	0.0386	0.0408	0.0441	1.5453	0.2620	0.2265
Plover	1,431,000	3.721	0.0405	0.0446	0.0407	0.0430	0.0465	1.5027	0.2638	0.2281
Martin	1,351,000	3.617	0.0429	0.0473	0.0431	0.0455	0.0492	1.4600	0.2656	0.2297
Pheasant	1,272,000	3.510	0.0456	0.0502	0.0458	0.0484	0.0522	1.4173	0.2674	0.2314
Grackle	1,192,500	3.399	0.0487	0.0536	0.0488	0.0515	0.0556	1.3716	0.2695	0.2333
Finch	1,113,000	3.284	0.0521	0.0574	0.0523	0.0552	0.0595	1.3259	0.2716	0.2352
Curlew	1,033,500	3.165	0.0561	0.0618	0.0564	0.0593	0.0637	1.2802	0.2738	0.2373
Cardinal	954,000	3.038	0.0608	0.0670	0.0610	0.0644	0.0695	1.2283	0.2764	0.2397
Canary	900,000	2.951	0.0646	0.0711	0.0646	0.0680	0.0730	1.1918	0.2783	0.2413
Crane	874,500	2.911	0.0665	0.0732	0.0665	0.0702	0.0757	1.1765	0.2791	0.2421
Condor	795,000	2.776	0.0727	0.0800	0.0733	0.0777	0.0844	1.1217	0.2821	0.2448
Drake	795,000	2.814	0.0727	0.0800	0.0727	0.0756	0.0800	1.1430	0.2810	0.2441
Mallard	795,000	2.896	0.0727	0.0800	0.0727	0.0756	0.0800	1.1979	0.2780	0.2424
Crow	715,500	2.631	0.0814	0.0896	0.0814	0.0854	0.0915	1.0638	0.2855	0.2479
Starling	715,500	2.670	0.0814	0.0896	0.0814	0.0847	0.0896	1.0820	0.2844	0.2471
Redwing	715,500	2.746	0.0814	0.0896	0.0814	0.0847	0.0896	1.1339	0.2815	0.2455
Flamingo	666,600	2.540	0.0870	0.0958	0.0876	0.0921	0.0989	1.0272	0.2877	0.2499
Rook	636,000	2.482	0.0913	0.1005	0.0920	0.0969	0.1043	1.0028	0.2892	0.2513
Grosbeak	636,000	2.515	0.0913	0.1005	0.0913	0.0950	0.1005	1.0211	0.2880	0.2505
Egret	636,000	2.588	0.0913	0.1005	0.0913	0.0950	0.1005	1.0698	0.2851	0.2489
Peacock	605,000	2.421	0.0957	0.1053	0.0963	0.1014	0.1091	0.9784	0.2907	0.2527
Squab	605,000	2.454	0.0957	0.1056	0.0957	0.1002	0.1069	0.9967	0.2896	0.2519
Dove	556,500	2.355	0.1044	0.1149	0.1044	0.1088	0.1155	0.9540	0.2923	0.2543
Eagle	556,500	2.421	0.1044	0.1149	0.1044	0.1088	0.1155	0.9997	0.2894	0.2527

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 1 (Continued)

Code word	Aluminum area, cmil	Outside diameter, cm	Resistance, Ω/km					GMR D_s, cm	Reactance per conductor 1-m spacing, 50Hz	
			DC		AC					
			25°C	50°C	25°C	35°C	50°C		X_a, Ω/km	X_a', MΩ-km
Hawk	477,000	2.179	0.1218	0.1342	0.1218	0.1268	0.1342	0.8839	0.2971	0.2587
Hen	477,000	2.243	0.1218	0.1342	0.1218	0.1268	0.1342	0.9266	0.2941	0.2571
Ibis	397,500	1.989	0.1460	0.1609	0.1460	0.1520	0.1609	0.8077	0.3028	0.2639
Lark	397,500	2.047	0.1460	0.1609	0.1460	0.1520	0.1609	0.8473	0.2998	0.2623
Linnet	336,400	1.831	0.1727	0.1901	0.1727	0.1797	0.1901	0.7437	0.3080	0.2687
Oriole	336,400	1.882	0.1727	0.1901	0.1727	0.1797	0.1901	0.7772	0.3052	0.2671
Ostrich	300,000	1.727	0.1932	0.2125	0.1932	0.2009	0.2125	0.7010	0.3117	0.2720
Piper	300,000	1.778	0.1932	0.2125	0.1932	0.2009	0.2125	0.7346	0.3087	0.2704
Partridge	266,800	1.631	0.2175	0.2392	0.2175	0.2262	0.2392	0.6614	0.3153	0.2753

หนังสืออ้างอิงที่ใช้ในการแปลงหน่วยจากระบบอังกฤษเป็นระบบ SI UNIT

1. The Westinghouse Electric Corporation, "Electrical Transmission and Distribution Reference Book", WEC, East Pittsburgh, Pennsylvania, 1964.

2. J. Duncan Glover, Mulukutla Sarma, "Power System Analysis and Design", PWS Pulishers, Boston, 1987.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 2 Resistance of ACSR conductors (Ω/km)

Code word	Aluminum area, cmil	Stranding Al/St	DC		AC				
			25°C	50°C	25°C	30°C	35°C	40°C	50°C
Falcon	1,590,000	54/19	0.0365	0.0401	0.0367	0.0377	0.0388	0.0398	0.0419
Parrot	1,510,500	54/19	0.0384	0.0423	0.0386	0.0397	0.0408	0.0419	0.0441
Plover	1,431,000	54/19	0.0405	0.0446	0.0407	0.0419	0.0430	0.0442	0.0465
Martin	1,351,000	54/19	0.0429	0.0473	0.0431	0.0443	0.0455	0.0468	0.0492
Pheasant	1,272,000	54/19	0.0456	0.0502	0.0458	0.0471	0.0484	0.0496	0.0522
Grackle	1,192,500	54/19	0.0487	0.0536	0.0488	0.0502	0.0515	0.0529	0.0556
Finch	1,113,000	54/19	0.0521	0.0574	0.0523	0.0537	0.0552	0.0566	0.0595
Curlew	1,033,500	54/7	0.0561	0.0618	0.0564	0.0579	0.0593	0.0608	0.0637
Cardinal	954,000	54/7	0.0608	0.0670	0.0610	0.0627	0.0644	0.0661	0.0695
Canary	900,000	54/7	0.0646	0.0711	0.0646	0.0663	0.0680	0.0696	0.0730
Crane	874,500	54/7	0.0665	0.0732	0.0665	0.0683	0.0702	0.0720	0.0757
Condor	795,000	54/7	0.0727	0.0800	0.0733	0.0755	0.0777	0.0800	0.0844
Drake	795,000	26/7	0.0727	0.0800	0.0727	0.0742	0.0756	0.0771	0.0800
Mallard	795,000	30/19	0.0727	0.0800	0.0727	0.0742	0.0756	0.0771	0.0800
Crow	715,500	54/7	0.0814	0.0896	0.0814	0.0834	0.0854	0.0875	0.0915
Starling	715,500	26/7	0.0814	0.0896	0.0814	0.0830	0.0847	0.0863	0.0896
Redwing	715,500	30/19	0.0814	0.0896	0.0814	0.0830	0.0847	0.0863	0.0896
Flamingo	666,600	54/7	0.0870	0.0958	0.0876	0.0899	0.0921	0.0944	0.0989
Rook	636,000	54/7	0.0913	0.1005	0.0920	0.0945	0.0969	0.0994	0.1043
Grosbeak	636,000	26/7	0.0913	0.1005	0.0913	0.0931	0.0950	0.0968	0.1005
Egret	636,000	30/19	0.0913	0.1005	0.0913	0.0931	0.0950	0.0968	0.1005
Peacock	605,000	54/7	0.0957	0.1053	0.0963	0.0989	0.1014	0.1040	0.1091
Squab	605,000	26/7	0.0957	0.1056	0.0957	0.0979	0.1002	0.1024	0.1069
Dove	556,500	26/7	0.1044	0.1149	0.1044	0.1066	0.1088	0.1111	0.1155
Eagle	556,500	30/7	0.1044	0.1149	0.1044	0.1066	0.1088	0.1111	0.1155
Hawk	477,000	26/7	0.1218	0.1342	0.1218	0.1243	0.1268	0.1292	0.1342
Hen	477,000	30/7	0.1218	0.1342	0.1218	0.1243	0.1268	0.1292	0.1342

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 2 (Continued)

Code word	Aluminum area, cmil	Stranding Al/St	DC		AC				
			25°C	50°C	25°C	30°C	35°C	40°C	50°C
Ibis	397,500	26/7	0.1460	0.1609	0.1460	0.1490	0.1520	0.1549	0.1609
Lark	397,500	30/7	0.1460	0.1609	0.1460	0.1490	0.1520	0.1549	0.1609
Linnet	336,400	26/7	0.1727	0.1901	0.1727	0.1762	0.1797	0.1831	0.1901
Oriole	336,400	30/7	0.1727	0.1901	0.1727	0.1762	0.1797	0.1831	0.1901
Ostrich	300,000	26/7	0.1932	0.2125	0.1932	0.1971	0.2009	0.2048	0.2125
Piper	300,000	30/7	0.1932	0.2125	0.1932	0.1971	0.2009	0.2048	0.2125
Partridge	266,800	26/7	0.2175	0.2392	0.2175	0.2218	0.2262	0.2305	0.2392

หนังสืออ้างอิงที่ใช้ในการแปลงหน่วยจากระบบอังกฤษเป็นระบบ SI UNIT

1. The Westinghouse Electric Corporation, "Electrical Transmission and Distribution Reference Book", WEC, East Pittsburgh, Pennsylvania, 1964.

2. J. Duncan Glover, Mulukutla Sarma, "Power System Analysis and Design", PWS Pulishers, Boston, 1987.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 3 Inductive reactance spacing factor X_d at 50 Hz (Ω/km per conductor)

Metres	Decimetres									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	.....	-0.1447	-0.1011	-0.0756	-0.0576	-0.0436	-0.0321	-0.0224	-0.0140	-0.0066
1	0	0.0060	0.0115	0.0165	0.0211	0.0255	0.0295	0.0333	0.0369	0.0403
2	0.0436	0.0466	0.0495	0.0523	0.0550	0.0576	0.0600	0.0624	0.0647	0.0669
3	0.0690	0.0711	0.0731	0.0750	0.0769	0.0787	0.0805	0.0822	0.0839	0.0855
4	0.0871	0.0887	0.0902	0.0916	0.0931	0.0945	0.0959	0.0972	0.0986	0.0999
5	0.1011	0.1024	0.1036	0.1048	0.1060	0.1071	0.1082	0.1094	0.1104	0.1115
6	0.1126	0.1136	0.1146	0.1456	0.1166	0.1176	0.1186	0.1195	0.1204	0.1214
7	0.1223	0.1232	0.1240	0.1249	0.1258	0.1266	0.1274	0.1283	0.1291	0.1299
8	0.1307									
9	0.1381									
10	0.1447									
11	0.1507									
12	0.1561									
13	0.1612									
14	0.1658									
15	0.1702									
16	0.1742									
17	0.1780									
18	0.1816									
19	0.1850									
20	0.1882									
21	0.1913									
22	0.1942									
23	0.1970									
24	0.1997									
25	0.2022									

ln Ω/km per conductor

$X_d = 4\pi f \times 10^{-7} \times 1000 \ln d$

d = separation, m

At 50 Hz

$X_d = 0.06283 \ln d$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 4 Shunt capacitive reactance spacing factor X_d' at 50 Hz (MΩ-km per conductor)

Metres	Decimetres									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	.....	-0.1318	-0.0921	-0.0689	-0.0525	-0.0397	-0.0292	-0.0204	-0.0128	-0.0060
1	0	0.0055	0.0104	0.0150	0.0193	0.0232	0.0269	0.0304	0.0336	0.0367
2	0.0397	0.0425	0.0451	0.0477	0.0501	0.0525	0.0547	0.0569	0.0589	0.0609
3	0.0629	0.0648	0.0666	0.0683	0.0701	0.0717	0.0733	0.0749	0.0764	0.0779
4	0.0794	0.0808	0.0821	0.0835	0.0848	0.0861	0.0874	0.0886	0.0898	0.0910
5	0.0921	0.0933	0.0944	0.0955	0.0965	0.0976	0.0986	0.0996	0.1006	0.1016
6	0.1026	0.1035	0.1044	0.1054	0.1063	0.1071	0.1080	0.1089	0.1097	0.1106
7	0.1114	0.1122	0.1130	0.1138	0.1146	0.1153	0.1161	0.1168	0.1176	0.1183
8	0.1190									
9	0.1258									
10	0.1318									
11	0.1373									
12	0.1422									
13	0.1468									
14	0.1511									
15	0.1550									
16	0.1587									
17	0.1622									
18	0.1655									
19	0.1686									
20	0.1715									
21	0.1743									
22	0.1769									
23	0.1795									
24	0.1819									
25	0.1843									

ln MΩ-km per conductor

$$X_d' = \frac{1}{4\pi^2 fk \times 10^6 \times 1000} \ln d$$

d = separation, m

$k = 8.85 \times 10^{-12}$

At 50 Hz

$X_d' = 0.05724 \ln d$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

โปรแกรมการคำนวณหาความสัมพันธ์ของปริมาณทางไฟฟ้า และคำนวณหาพารามิเตอร์ของสายส่งในระบบจริงและระบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
program  TransmissionLineSimulator;
uses     crt;
const    f=50; k=8.854E-12;
type     realar7 = array[1..7] of real;
         realar2 = array[1..2] of real;
var      n,num,leadlag,cablecode,networktype,connect,inputdata : integer;
         s,r,diameter,Dm,Ds,Rac35,
         KVAreal,KVreal,Vsim,Isim,PF,phi,PFsend,phisend,PFrec,phirec,newC,
         Rspec,Lspec,Cspec,XLspec,XCspec,YCspec,
         Rreal,Lreal,Creal,XLreal,YCreal,Rpu,XLpu,YCpu,Csim,
         Zre,Zim,Yre,Yim,ZPre,ZPim,YPre,YPim,ZTre,ZTim,YTre,YTim,
         Are,Aim,Bre,Bim,Cre,Cim,Dre,Dim,
         VSUre,VSUim,ISUre,ISUim,VRUre,VRUim,IRUre,IRUim,ICSUre,ICSUim,
         ICRUre,ICRUim,ICUre,ICUim,ILUre,ILUim,LOSSpu : real;
         codeword : string[11];
         PUre,PUim,angle : realar7;
         VR,IR,ICS,ICR,IC,IL,IS,VS,LOSS,EFF,BaseV,BaseI,BaseVA,BaseZ : reala
         change,again,quit,ch : char;
         datafile : text;


{ real part of (a+bi)*(c+di) }
function  CmplxMulRe(a,b,c,d : real) : real;
begin
    CmplxMulRe:=(a*c)-(b*d);
end;


{ imaginary part of (a+bi)*(c+di) }
function  CmplxMulIm(a,b,c,d : real) : real;
begin
    CmplxMulIm:=(a*d)+(b*c);
end;


{ real part of (a+bi)/(c+di) }
function  CmplxDivRe(a,b,c,d : real) : real;
begin
    CmplxDivRe:=((a*c)+(b*d))/(sqr(c)+sqr(d));
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
{ imaginary part of (a+bi)/(c+di) }
function  CmplxDivIm(a,b,c,d : real) : real;
begin
    CmplxDivIm:=((b*c)-(a*d))/(sqr(c)+sqr(d));
end;


{ square root of x+yi }
procedure  CmplxSqrt(var xsqrt,ysqrt : real; x,y : real);
var  magsqrt,argsqrt,arg : real;
begin
    magsqrt:=sqrt(sqrt(sqr(x)+sqr(y)));
    if x=0 then
      begin
        if y<0 then arg:=-pi/2;
        if y=0 then arg:=0;
        if y>0 then arg:=pi/2;
      end;
    if x<>0 then
      begin
        arg:=arctan(y/x);
        if x<0 then arg:=arg+pi;
        if arg>180 then arg:=arg-2*pi;
      end;
    argsqrt:=arg/2;
    xsqrt:=magsqrt*cos(argsqrt);
    ysqrt:=magsqrt*sin(argsqrt);
end;


function  arccos(a : real) : real;
var  b : real;
begin
    if a=0 then
      arccos:=pi/2
    else
      begin
        b:=sqrt(1-sqr(a));
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        if a>0 then arccos:=arctan(b/a)
        else arccos:=arctan(b/a)+pi;
      end;
end;


function  sinh(x : real) : real;
begin
    sinh:=(exp(x)-exp(-x))/2;
end;


function  cosh(x : real) : real;
begin
    cosh:=(exp(x)+exp(-x))/2;
end;


procedure  RLC(Yre,Yim,Zre,Zim : real; BaseZ : realar2);
var  ZRre,ZRim,YRre,YRim,R,L,C : realar2;
begin
    clrscr;
    for n:=1 to 2 do
      begin
        ZRre[n]:=Zre*BaseZ[n]; ZRim[n]:=Zim*BaseZ[n];
        YRre[n]:=Yre/BaseZ[n]; YRim[n]:=Yim/BaseZ[n];
        R[n]:=ZRre[n];
        L[n]:=ZRim[n]/(2*pi*f);
        C[n]:=sqrt(sqr(YRre[n])+sqr(YRim[n]))/(2*pi*f);
      end;
    writeln;
    if s<=80 then
      begin
        for n:=1 to 2 do
          begin
            if n=1 then writeln('   Real System');
            if n=2 then writeln('   Simulation System');
            writeln('       R   = ',R[n]:15:6,'  Ω');
            writeln('       L   = ',L[n]*1E3:15:6,'  mH'); writeln;
          end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      end;
    if s>80 then
      begin
        if networktype=1 then write('PI-NETWORK'); writeln;
        if networktype=2 then write('TEE-NETWORK'); writeln;
        for n:=1 to 2 do
          begin
            if n=1 then writeln('   Real System');
            if n=2 then writeln('   Simulation System');
            if networktype=1 then
              begin
                writeln('       R   = ',R[n]:15:6,'  Ω');
                writeln('       L   = ',L[n]*1E3:15:6,'  mH');
                writeln('       C/2 = ',C[n]*1E6/2:15:6,'  μF'); writeln;
              end;
            if networktype=2 then
              begin
                writeln('       R/2 = ',R[n]/2:15:6,'  Ω');
                writeln('       L/2 = ',L[n]*1E3/2:15:6,'  mH');
                writeln('       C   = ',C[n]*1E6:15:6,'  μF'); writeln;
              end;
          end;
      end;
    ch:=readkey;
end;


procedure  NetworkConnect(var Are,Aim,Bre,Bim,Cre,Cim,Dre,Dim : real);
var  Aeqre,Aeqim,Beqre,Beqim,Ceqre,Ceqim,Deqre,Deqim : real;
begin
    if connect=2 then
      begin
        Aeqre:=CmplxMulRe(Are,Aim,Are,Aim)+CmplxMulRe(Bre,Bim,Cre,Cim);
        Aeqim:=CmplxMulIm(Are,Aim,Are,Aim)+CmplxMulIm(Bre,Bim,Cre,Cim);
        Beqre:=CmplxMulRe(Are,Aim,Bre,Bim)+CmplxMulRe(Bre,Bim,Dre,Dim);
        Beqim:=CmplxMulIm(Are,Aim,Bre,Bim)+CmplxMulIm(Bre,Bim,Dre,Dim);
        Ceqre:=CmplxMulRe(Cre,Cim,Are,Aim)+CmplxMulRe(Dre,Dim,Cre,Cim);
        Ceqim:=CmplxMulIm(Cre,Cim,Are,Aim)+CmplxMulIm(Dre,Dim,Cre,Cim);
        Deqre:=CmplxMulRe(Cre,Cim,Bre,Bim)+CmplxMulRe(Dre,Dim,Dre,Dim);
        Deqim:=CmplxMulIm(Cre,Cim,Bre,Bim)+CmplxMulIm(Dre,Dim,Dre,Dim);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสาร... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      end;
    if connect=3 then
      begin
        Aeqre:=Are; Aeqim:=Aim; Beqre:=Bre/2; Beqim:=Bim/2;
        Ceqre:=Cre*2; Ceqim:=Cim*2; Deqre:=Dre; Deqim:=Dim;
      end;
    Are:=Aeqre; Aim:=Aeqim; Bre:=Beqre; Bim:=Beqim;
    Cre:=Ceqre; Cim:=Ceqim; Dre:=Deqre; Dim:=Deqim;
end;


procedure  PINET(Yre,Yim,Zre,Zim,phi : real; BaseV,BaseI,BaseVA : realar2);
begin
    Are:=1+CmplxMulRe(Yre,Yim,Zre,Zim)/2; Aim:=CmplxMulIm(Yre,Yim,Zre,Zim)/2
    Bre:=Zre; Bim:=Zim;
    Cre:=CmplxMulRe(Yre,Yim,1+Are,Aim)/2; Cim:=CmplxMulIm(Yre,Yim,1+Are,Aim)
    Dre:=Are; Dim:=Aim;
    if connect in [2,3] then NetworkConnect(Are,Aim,Bre,Bim,Cre,Cim,Dre,Dim)
    if inputdata=1 then
      begin
        VSUre:=(Vsim/sqrt(3))/BaseV[2]; VSUim:=0;
        ISUre:=(Isim/BaseI[2])*cos(phi); ISUim:=(Isim/BaseI[2])*sin(phi);
        VRUre:=CmplxMulRe(Dre,Dim,VSUre,VSUim)-CmplxMulRe(Bre,Bim,ISUre,ISUi
        VRUim:=CmplxMulIm(Dre,Dim,VSUre,VSUim)-CmplxMulIm(Bre,Bim,ISUre,ISUi
        IRUre:=CmplxMulRe(Are,Aim,ISUre,ISUim)-CmplxMulRe(Cre,Cim,VSUre,VSUi
        IRUim:=CmplxMulIm(Are,Aim,ISUre,ISUim)-CmplxMulIm(Cre,Cim,VSUre,VSUi
      end;
    if inputdata=2 then
      begin
        VRUre:=(Vsim/sqrt(3))/BaseV[2]; VRUim:=0;
        IRUre:=(Isim/BaseI[2])*cos(phi); IRUim:=(Isim/BaseI[2])*sin(phi);
        VSUre:=CmplxMulRe(Are,Aim,VRUre,VRUim)+CmplxMulRe(Bre,Bim,IRUre,IRUi
        VSUim:=CmplxMulIm(Are,Aim,VRUre,VRUim)+CmplxMulIm(Bre,Bim,IRUre,IRUi
        ISUre:=CmplxMulRe(Cre,Cim,VRUre,VRUim)+CmplxMulRe(Dre,Dim,IRUre,IRUi
        ISUim:=CmplxMulIm(Cre,Cim,VRUre,VRUim)+CmplxMulIm(Dre,Dim,IRUre,IRUi
      end;
    ICSUre:=CmplxMulRe(VSUre,VSUim,Yre,Yim)/2;
    ICSUim:=CmplxMulIm(VSUre,VSUim,Yre,Yim)/2;
    ICRUre:=CmplxMulRe(VRUre,VRUim,Yre,Yim)/2;
    ICRUim:=CmplxMulIm(VRUre,VRUim,Yre,Yim)/2;
```

เอกสารนี้เป็น... ...นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
ILUre:=IRUre+ICRUre; ILUim:=IRUim+ICRUim;
LOSSpu:=(sqr(ILUre)+sqr(ILUim))*Zre;
PUre[1]:=VSUre;  PUim[1]:=VSUim;
PUre[2]:=ISUre;  PUim[2]:=ISUim;
PUre[3]:=ICSUre; PUim[3]:=ICSUim;
PUre[4]:=ILUre;  PUim[4]:=ILUim;
PUre[5]:=ICRUre; PUim[5]:=ICRUim;
PUre[6]:=IRUre;  PUim[6]:=IRUim;
PUre[7]:=VRUre;  PUim[7]:=VRUim;
for n:=1 to 7 do
  begin
    if PUre[n]=0 then
      begin
        if PUim[n]<0 then angle[n]:=-90;
        if PUim[n]=0 then angle[n]:=0;
        if PUim[n]>0 then angle[n]:=90;
      end;
    if PUre[n]<>0 then
      begin
        angle[n]:=arctan(PUim[n]/PUre[n])*180/pi;
        if PUre[n]<0 then angle[n]:=angle[n]+180;
        if angle[n]>180 then angle[n]:=angle[n]-360;
      end;
  end;
if inputdata=1 then
  begin
    phirec:=-(angle[7]-angle[6])*pi/180;
    PFrec:=cos(phirec);
    phirec:=phirec*180/pi;
    PFsend:=cos(phi);
    phisend:=phi*180/pi;
  end;
if inputdata=2 then
  begin
    phisend:=-(angle[1]-angle[2])*pi/180;
    PFsend:=cos(phisend);
    phisend:=phisend*180/pi;
    PFrec:=cos(phi);
    phirec:=phi*180/pi;
  end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  for n:=1 to 2 do
    begin
      VS[n]:=sqrt(sqr(VSUre)+sqr(VSUim))*BaseV[n];
      IS[n]:=sqrt(sqr(ISUre)+sqr(ISUim))*BaseI[n];
      ICS[n]:=sqrt(sqr(ICSUre)+sqr(ICSUim))*BaseI[n];
      IL[n]:=sqrt(sqr(ILUre)+sqr(ILUim))*BaseI[n];
      ICR[n]:=sqrt(sqr(ICRUre)+sqr(ICRUim))*BaseI[n];
      IR[n]:=sqrt(sqr(IRUre)+sqr(IRUim))*BaseI[n];
      VR[n]:=sqrt(sqr(VRUre)+sqr(VRUim))*BaseV[n];
      LOSS[n]:=LOSSpu*BaseVA[n];
      EFF[n]:=(VR[n]*IR[n]*PFrec)/(VS[n]*IS[n]*PFsend)*100;
    end;
  clrscr; writeln;
  writeln('PI-NETWORK      ( All value per phase )'); writeln;
  writeln('                REAL SYSTEM          SIMULATION SYSTEM');
  writeln('    VS    ',VS[1]:15:4,'  kV',VS[2]:20:4,'   V',
          '          < ',angle[1]:6:2,'° >');
  writeln('    IS    ',IS[1]:15:4,'   A',IS[2]:20:4,'   A',
          '          < ',angle[2]:6:2,'° >');
  writeln('    ICS   ',ICS[1]:15:4,'   A',ICS[2]:20:4,'   A',
          '          < ',angle[3]:6:2,'° >');
  writeln('    IL    ',IL[1]:15:4,'   A',IL[2]:20:4,'   A',
          '          < ',angle[4]:6:2,'° >');
  writeln('    ICR   ',ICR[1]:15:4,'   A',ICR[2]:20:4,'   A',
          '          < ',angle[5]:6:2,'° >');
  writeln('    IR    ',IR[1]:15:4,'   A',IR[2]:20:4,'   A',
          '          < ',angle[6]:6:2,'° >');
  writeln('    VR    ',VR[1]:15:4,'  kV',VR[2]:20:4,'   V',
          '          < ',angle[7]:6:2,'° >');
  writeln('    LOSS  ',LOSS[1]:15:4,'  kW',LOSS[2]:20:4,'   W');
  writeln('    EFF   ',EFF[1]:15:4,'   %',EFF[2]:20:4,'   %'); writeln;
  writeln('    PF of sending side    =  ',PFsend:5:3,'   < ',phisend:6:2,'° >');
  writeln('    PF of receiving side  =  ',PFrec:5:3,'   < ',phirec:6:2,'° >');
  ch:=readkey;
end;


procedure  TEENET(Yre,Yim,Zre,Zim,phi : real; BaseV,BaseI,BaseVA : realar2);
begin
  Are:=1+CmplxMulRe(Yre,Yim,Zre,Zim)/2; Aim:=CmplxMulIm(Yre,Yim,Zre,Zim)/2;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Bre:=CmplxMulRe(Zre,Zim,1+Are,Aim)/2; Bim:=CmplxMulIm(Zre,Zim,1+Are,Aim)/2
Cre:=Yre; Cim:=Yim;
Dre:=Are; Dim:=Aim;
if connect in [2,3] then NetworkConnect(Are,Aim,Bre,Bim,Cre,Cim,Dre,Dim);
if inputdata=1 then
  begin
    VSUre:=(Vsim/sqrt(3))/BaseV[2]; VSUim:=0;
    ISUre:=(Isim/BaseI[2])*cos(phi); ISUim:=(Isim/BaseI[2])*sin(phi);
    VRUre:=CmplxMulRe(Dre,Dim,VSUre,VSUim)-CmplxMulRe(Bre,Bim,ISUre,ISUim)
    VRUim:=CmplxMulIm(Dre,Dim,VSUre,VSUim)-CmplxMulIm(Bre,Bim,ISUre,ISUim)
    IRUre:=CmplxMulRe(Are,Aim,ISUre,ISUim)-CmplxMulRe(Cre,Cim,VSUre,VSUim)
    IRUim:=CmplxMulIm(Are,Aim,ISUre,ISUim)-CmplxMulIm(Cre,Cim,VSUre,VSUim)
  end;
if inputdata=2 then
  begin
    VRUre:=(Vsim/sqrt(3))/BaseV[2]; VRUim:=0;
    IRUre:=(Isim/BaseI[2])*cos(phi); IRUim:=(Isim/BaseI[2])*sin(phi);
    VSUre:=CmplxMulRe(Are,Aim,VRUre,VRUim)+CmplxMulRe(Bre,Bim,IRUre,IRUim)
    VSUim:=CmplxMulIm(Are,Aim,VRUre,VRUim)+CmplxMulIm(Bre,Bim,IRUre,IRUim)
    ISUre:=CmplxMulRe(Cre,Cim,VRUre,VRUim)+CmplxMulRe(Dre,Dim,IRUre,IRUim)
    ISUim:=CmplxMulIm(Cre,Cim,VRUre,VRUim)+CmplxMulIm(Dre,Dim,IRUre,IRUim)
  end;
ICUre:=ISUre-IRUre; ICUim:=ISUim-IRUim;
LOSSpu:=(sqr(ISUre)+sqr(ISUim)+sqr(IRUre)+sqr(IRUim))*Zre/2;
PUre[1]:=VSUre; PUim[1]:=VSUim;
PUre[2]:=ISUre; PUim[2]:=ISUim;
PUre[3]:=ICUre; PUim[3]:=ICUim;
PUre[4]:=IRUre; PUim[4]:=IRUim;
PUre[5]:=VRUre; PUim[5]:=VRUim;
for n:=1 to 5 do
  begin
    if PUre[n]=0 then
      begin
        if PUim[n]<0 then angle[n]:=-90;
        if PUim[n]=0 then angle[n]:=0;
        if PUim[n]>0 then angle[n]:=90;
      end;
    if PUre[n]<>0 then
      begin
        angle[n]:=arctan(PUim[n]/PUre[n])*180/pi;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        if PUre[n]<0 then angle[n]:=angle[n]+180;
        if angle[n]>180 then angle[n]:=angle[n]-360;
      end;
  end;
if inputdata=1 then
  begin
    phirec:=-(angle[5]-angle[4])*pi/180;
    PFrec:=cos(phirec);
    phirec:=phirec*180/pi;
    PFsend:=cos(phi);
    phisend:=phi*180/pi;
  end;
if inputdata=2 then
  begin
    phisend:=-(angle[1]-angle[2])*pi/180;
    PFsend:=cos(phisend);
    phisend:=phisend*180/pi;
    PFrec:=cos(phi);
    phirec:=phi*180/pi;
  end;
for n:=1 to 2 do
  begin
    VS[n]:=sqrt(sqr(VSUre)+sqr(VSUim))*BaseV[n];
    IS[n]:=sqrt(sqr(ISUre)+sqr(ISUim))*BaseI[n];
    IC[n]:=sqrt(sqr(ICUre)+sqr(ICUim))*BaseI[n];
    IR[n]:=sqrt(sqr(IRUre)+sqr(IRUim))*BaseI[n];
    VR[n]:=sqrt(sqr(VRUre)+sqr(VRUim))*BaseV[n];
    LOSS[n]:=LOSSpu*BaseVA[n];
    EFF[n]:=(VR[n]*IR[n]*PFrec)/(VS[n]*IS[n]*PFsend)*100;
  end;
clrscr; writeln;
writeln('TEE-NETWORK      ( All value per phase )'); writeln;
writeln('                REAL SYSTEM          SIMULATION SYSTEM');
writeln('    VS   ',VS[1]:15:4,'  kV',VS[2]:20:4,'   V',
        '         < ',angle[1]:6:2,'° >');
writeln('    IS   ',IS[1]:15:4,'   A',IS[2]:20:4,'   A',
        '         < ',angle[2]:6:2,'° >');
writeln('    IC   ',IC[1]:15:4,'   A',IC[2]:20:4,'   A',
        '         < ',angle[3]:6:2,'° >');
writeln('    IR   ',IR[1]:15:4,'   A',IR[2]:20:4,'   A',
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
          '          < ',angle[4]:6:2,'° >');
   writeln('    VR    ',VR[1]:15:4,'  kV',VR[2]:20:4,'   V',
          '          < ',angle[5]:6:2,'° >');
   writeln('    LOSS ',LOSS[1]:15:4,'  kW',LOSS[2]:20:4,'   W');
   writeln('    EFF  ',EFF[1]:15:4,'   %',EFF[2]:20:4,'   %'); writeln;
   writeln('    PF of sending side    =  ',PFsend:5:3,'   < ',phisend:6:2,'° >
   writeln('    PF of receiving side  =  ',PFrec:5:3,'   < ',phirec:6:2,'° >')
   ch:=readkey;
end;


{ LONG TRANSMISSION LINE }
procedure  LongLine(var Yre,Yim,Zre,Zim : real);
var  GLre,GLim,GMre,GMim,
     sinhGLre,sinhGLim,coshGLre,coshGLim,GLsinhGLre,GLsinhGLim,
     Hyperbolic1re,Hyperbolic1im,Hyperbolic2re,Hyperbolic2im : real;
begin
    CmplxSqrt(GMre,GMim,CmplxMulRe(0,YCspec,Rspec,XLspec),CmplxMulIm(0,YCspec,
    GLre:=GMre*s; GLim:=GMim*s;

  { Hyperbolic1 = tanh(GL/2)/(GL/2) = (cosh(GL)-1)/((GL/2)*sinh(GL)) }
  { Hyperbolic2 = sinh(GL)/GL }
    sinhGLre:=sinh(GLre)*cos(GLim); sinhGLim:=cosh(GLre)*sin(GLim);
    coshGLre:=cosh(GLre)*cos(GLim); coshGLim:=sinh(GLre)*sin(GLim);
    GLsinhGLre:=CmplxMulRe(GLre,GLim,sinhGLre,sinhGLim);
    GLsinhGLim:=CmplxMulIm(GLre,GLim,sinhGLre,sinhGLim);
    Hyperbolic1re:=CmplxDivRe(coshGLre-1,coshGLim,GLsinhGLre/2,GLsinhGLim/2);
    Hyperbolic1im:=CmplxDivIm(coshGLre-1,coshGLim,GLsinhGLre/2,GLsinhGLim/2);
    Hyperbolic2re:=CmplxDivRe(sinhGLre,sinhGLim,GLre,GLim);
    Hyperbolic2im:=CmplxDivIm(sinhGLre,sinhGLim,GLre,GLim);

  { EQUIVALENT PI NETWORK }
    if networktype=1 then
      begin
        { YP = Y*tanh(GL/2)/(GL/2) = Y*Hyperbolic1 }
        YPre:=CmplxMulRe(0,YCpu,Hyperbolic1re,Hyperbolic1im);
        YPim:=CmplxMulIm(0,YCpu,Hyperbolic1re,Hyperbolic1im);

        { ZP = Z*sinh(GL)/GL = Z*Hyperbolic2 }
        ZPre:=CmplxMulRe(Rpu,XLpu,Hyperbolic2re,Hyperbolic2im);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        ZPim:=CmplxMulIm(Rpu,XLpu,Hyperbolic2re,Hyperbolic2im);

        Yre:=YPre; Yim:=YPim;
        Zre:=ZPre; Zim:=ZPim;
      end;

  { EQUIVALENT TEE NETWORK }
    if networktype=2 then
      begin
        { YT = Y*sinh(GL)/GL = Y*Hyperbolic2 }
        YTre:=CmplxMulRe(0,YCpu,Hyperbolic2re,Hyperbolic2im);
        YTim:=CmplxMulIm(0,YCpu,Hyperbolic2re,Hyperbolic2im);

        { ZT = Z*tanh(GL/2)/(GL/2) = Z*Hyperbolic1 }
        ZTre:=CmplxMulRe(Rpu,XLpu,Hyperbolic1re,Hyperbolic1im);
        ZTim:=CmplxMulIm(Rpu,XLpu,Hyperbolic1re,Hyperbolic1im);

        Yre:=YTre; Yim:=YTim;
        Zre:=ZTre; Zim:=ZTim;
      end;
end;


begin    { MAIN }
  repeat
    clrscr;
    writeln('REAL SYSTEM');
    write('     Power (kVA 3ϕ) = '); readln(KVAreal);
    write('     Sending voltage (kV line-to-line) = '); readln(KVreal);
    writeln; writeln('SIMULATION SYSTEM');
    write('     Base Power (VA 3ϕ) = '); readln(BaseVA[2]);
    write('     Base Voltage (V line-to-line) = '); readln(BaseV[2]);
    writeln; writeln('Code word of ACSR cable :');
    writeln('        1. Falcon          2. Parrot          3. Plover');
    writeln('        4. Martin          5. Pheasant        6. Grackle');
    writeln('        7. Finch           8. Curlew          9. Cardinal');
    writeln('       10. Canary         11. Crane          12. Condor');
    writeln('       13. Drake          14. Mallard        15. Crow');
    writeln('       16. Starling       17. Redwing        18. Flamingo');
    writeln('       19. Rook           20. Grosbeak       21. Egret');
```

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
writeln('       22. Peacock          23. Squab          24. Dove');
writeln('       25. Eagle            26. Hawk           27. Hen');
writeln('       28. Ibis             29. Lark           30. Linnet');
writeln('       31. Oriole           32. Ostrich        33. Piper');
writeln('       34. Partridge');
write('                Select (1-34) : '); readln(cablecode); writeln;
write('Length of transmission line (km) = '); readln(s); writeln;
write('GMD (cm) = '); readln(Dm); writeln;
if s>80 then
  begin
    writeln('Represent transmission line by :');
    writeln('    1. PI network              2. TEE network');
    write('              Select (1 or 2) : '); readln(networktype); writel
  end;
writeln('The network connected in :');
writeln('    1. Single          2. Series          3. Parallel');
write('            Select (1,2,3) : '); readln(connect);

clrscr;
BaseVA[1]:=KVAreal/3;
BaseV[1]:=KVreal/sqrt(3);
BaseZ[1]:=sqr(BaseV[1])*1000/BaseVA[1];
BaseI[1]:=BaseVA[1]/BaseV[1];
BaseVA[2]:=BaseVA[2]/3;
BaseV[2]:=BaseV[2]/sqrt(3);
BaseZ[2]:=sqr(BaseV[2])/BaseVA[2];
BaseI[2]:=BaseVA[2]/BaseV[2];
writeln('BASE ON REAL SYSTEM');
writeln('      Base Power     (kVA) = ',BaseVA[1]:0:4);
writeln('      Base Voltage   (kV)  = ',BaseV[1]:0:4);
writeln('      Base Impedance (Ω)   = ',BaseZ[1]:0:4);
writeln('      Base Current   (A)   = ',BaseI[1]:0:4); writeln;
writeln('BASE ON SIMULATION SYSTEM');
writeln('      Base Power     (VA)  = ',BaseVA[2]:0:4);
writeln('      Base Voltage   (V)   = ',BaseV[2]:0:4);
writeln('      Base Impedance (Ω)   = ',BaseZ[2]:0:4);
writeln('      Base Current   (A)   = ',BaseI[2]:0:4);
ch:=readkey;

assign(datafile,'A:SITABLE.DAT');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
{$I-} reset(datafile); {$I+}
if ioresult<>0 then
  begin
    assign(datafile,'B:SITABLE.DAT'); reset(datafile);
  end;
readln(datafile);
n:=1;
while n<=cablecode do
  begin
    readln(datafile,num,codeword,diameter,Rac35,Ds);
    n:=n+1;
  end;
close(datafile);

r:=diameter/2;  { cm }
Rspec:=Rac35;  { Ω/km }
Lspec:=2E-4*ln(Dm/Ds);  { H/km }
Cspec:=2*pi*k*1000/ln(Dm/r);  { F/km }
XLspec:=2*pi*f*Lspec;  { Ω/km }
YCspec:=2*pi*f*Cspec;  { mho/km }

clrscr;
writeln('No. = ',num);
writeln('Code word of cable :',codeword);
writeln('Outside diameter (cm) = ',diameter:0:3);
writeln('r (cm)  = ',r:0:4);
writeln('Ds (cm) = ',Ds:0:4);
writeln('Ambient temperature = 35 C'); writeln;
writeln('Rspec (Ω/km)   = ',Rspec:0:6);
writeln('Lspec (mH/km)  = ',Lspec*1E3:0:6);
writeln('Cspec (μF/km)  = ',Cspec*1E6:0:6);
ch:=readkey;

Rreal:=Rspec*s;
XLreal:=XLspec*s;
YCreal:=YCspec*s;

Rpu:=Rreal/BaseZ[1];
XLpu:=XLreal/BaseZ[1];
YCpu:=YCreal*BaseZ[1];
```

เอกสารนี้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
if s<=80 then
  begin
    Yre:=0; Yim:=0; Zre:=Rpu; Zim:=XLpu;
  end;
if (s>80) and (s<=240) then
  begin
    Yre:=0; Yim:=YCpu; Zre:=Rpu; Zim:=XLpu;
  end;
if s>240 then
  LongLine(Yre,Yim,Zre,Zim);

repeat
  RLC(Yre,Yim,Zre,Zim,BaseZ);
  if s>80 then
    begin
      writeln;
      if networktype=1 then
        begin
          write('Do you want to change C/2 simulation ? (Y/N) : '); readln
          if change in ['Y','y'] then
            begin
              write('New C/2 simulation (μF) = '); readln(newC);
              Csim:=2*newC*1E-6;
              BaseZ[2]:=Cspec*s*BaseZ[1]/Csim;
              BaseI[2]:=BaseV[2]/BaseZ[2];
              BaseVA[2]:=BaseV[2]*BaseI[2];
            end;
        end;
      if networktype=2 then
        begin
          write('Do you want to change C simulation ? (Y/N) : '); readln(c
          if change in ['Y','y'] then
            begin
              write('New C simulation (μF) = '); readln(newC);
              Csim:=newC*1E-6;
              BaseZ[2]:=Cspec*s*BaseZ[1]/Csim;
              BaseI[2]:=BaseV[2]/BaseZ[2];
              BaseVA[2]:=BaseV[2]*BaseI[2];
            end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        end;
      if change in ['Y','y'] then
        begin
          writeln;
          writeln('NEW BASE ON SIMULATION SYSTEM');
          writeln('      Base Power     (VA)  = ',BaseVA[2]:0:4);
          writeln('      Base Voltage   (V)   = ',BaseV[2]:0:4);
          writeln('      Base Impedance (Ω)   = ',BaseZ[2]:0:4);
          writeln('      Base Current   (A)   = ',BaseI[2]:0:4);
          ch:=readkey;
        end;
    end;
  if s<=80 then change:='n';
until change in ['N','n'];

repeat
  clrscr;
  writeln('   Type of input data');
  writeln('      1. Input data of sending side');
  writeln('      2. Input data of receiving side');
  write('       Select (1 or 2) : '); readln(inputdata); writeln;
  if inputdata=1 then
    begin
      write('   Sending voltage (V line-to-line) = '); readln(Vsim);
      write('   Sending current (A) = '); readln(Isim);
      write('   Power factor of sending side = '); readln(PF);
    end;
  if inputdata=2 then
    begin
      write('   Receiving voltage (V line-to-line) = '); readln(Vsim);
      write('   Receiving current (A) = '); readln(Isim);
      write('   Power factor of receiving side = '); readln(PF);
    end;
  if PF<>1 then
    begin
      write('       1.Lagging  or  2.Leading ,  select (1 or 2) : ');
      readln(leadlag);
    end;
  phi:=arccos(PF);
  if leadlag=1 then phi:=-phi;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      if (networktype=1) or (s<=80) then
        PINET(Yre,Yim,Zre,Zim,phi,BaseV,BaseI,BaseVA);
      if networktype=2 then
        TEENET(Yre,Yim,Zre,Zim,phi,BaseV,BaseI,BaseVA);
      writeln;
      write('Do you want to input data again ? (Y/N) : '); readln(again);
    until again in ['N','n'];

    writeln; write('Quit program (Y/N) : '); readln(quit);
  until quit in ['Y','y'];
end.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

แผนผังแสดงไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของสายส่ง

อักษรย่อของสถานีย่อยที่ใช้ในโครงงานนี้

MM-3 = แม่เมาะ 3

TTK = ท่าตะโก

NCO = หนองจอก

BK = บางกะปิ

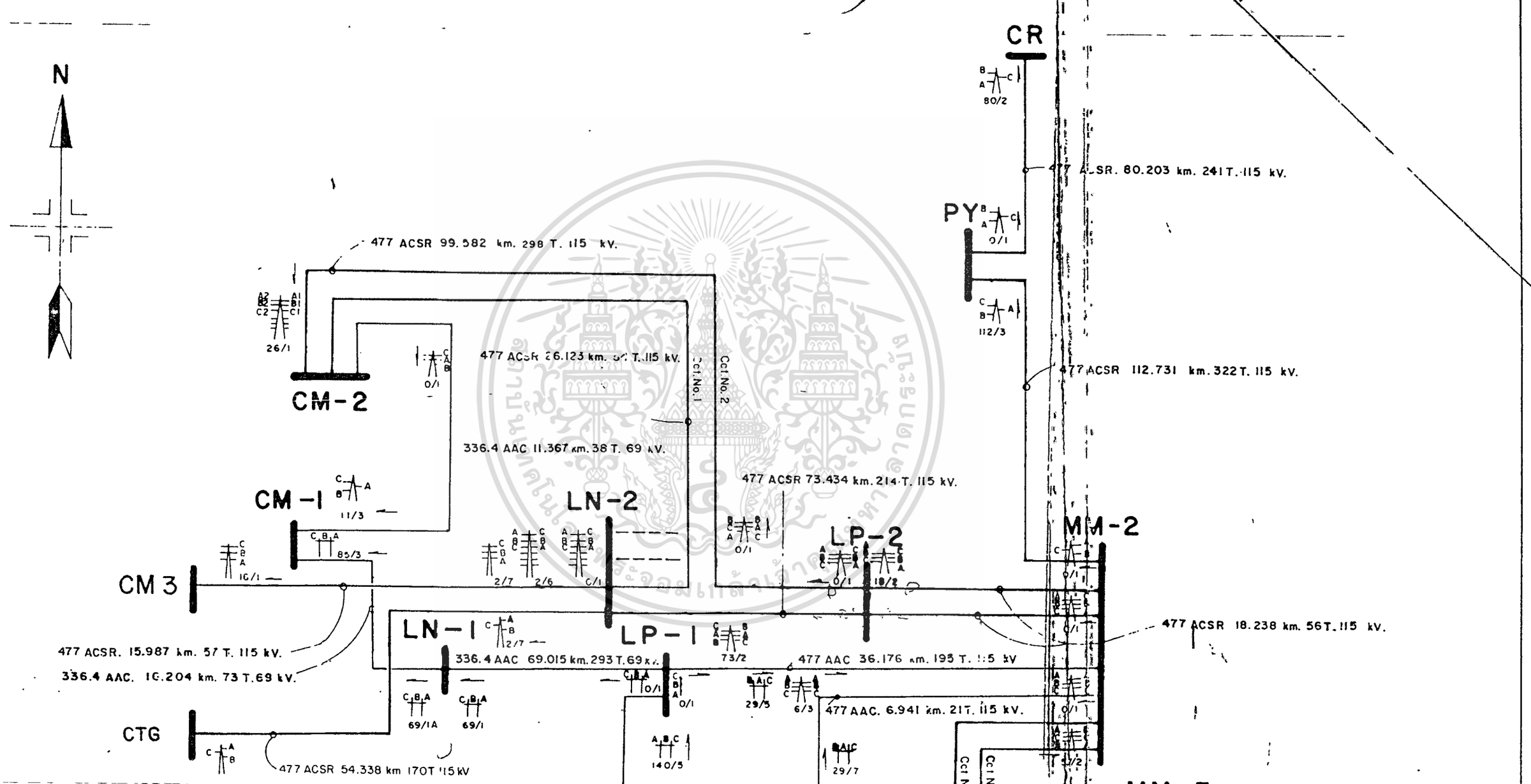
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

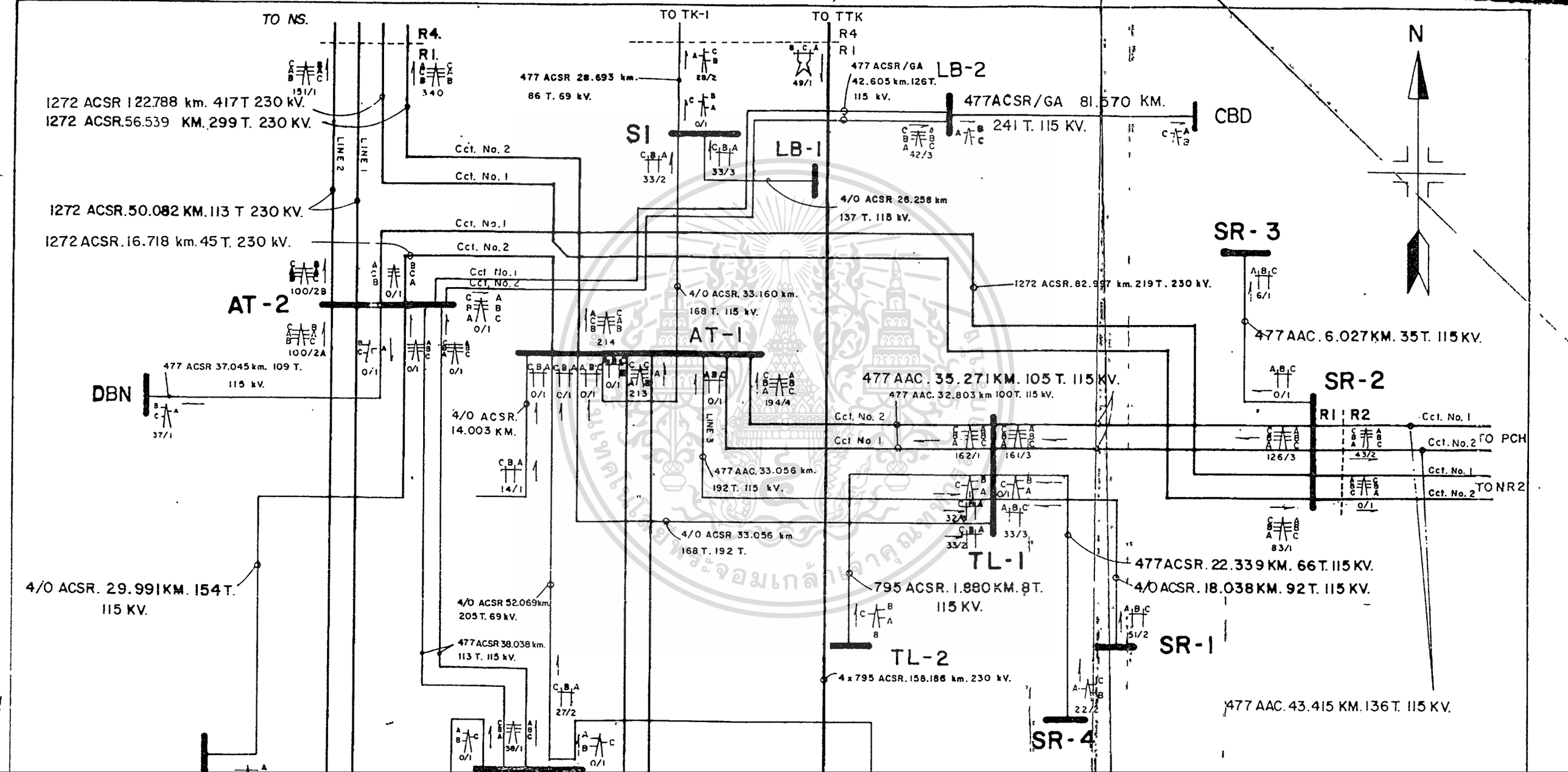
FULL NAME AND ABBREVIATION OF SUBSTATION

NO.	SUBSTATIONS	ABBR.	NO.	SUBSTATIONS	ABBR.	NO.	SUBSTATIONS	ABBR.
1.	AMNAT CHAROEN	AN	87.	LAM PA TAO	LT	173.	PHRAE	PR
2.	ANG THONG 1&2	AT1&2	88.	LAM POO RA	LR	174.	PHUKET 1&2	PK1&2
3.	AO PHAI	AP	89.	LAM TAKONG	LTK	175.	PHUNPHIN	PP
4.	AO UDOM	AU	90.	LAMPANG 1&2	LP1&2	176.	PHUTTHAMONTHON	PMT
5.	ARANYAPRATHET	AR	91.	LAMPHUN 1&2	LN1&2	177.	PONG	PNG
6.	AYUTTHAYA 1&2	AT1&2	92.	LAN KRABU	LKB	178.	PONG BON	PBO
7.	BAMNET NARONG	BNN	93.	LAT PHRAO	LPR	179.	PRACHIN BURI	PA
8.	BAN BUNG	BBG	94.	LANG SUAN	LSN	180.	PRACHUAP KHIRI KHAN	PKK
9.	BAN COK CHANG	BCC	95.	LI	LI	181.	PRAKHON CHAI	PKC
10.	BAN DON	BDN	96.	LOEI	LE	182.	PRAN BURI	PRB
11.	BAN DUNG	BDG	97.	LOM SAK	LS	183.	PRAN BURI POWER STATION	PRP
12.	BAN KHUN KLANG	BKG	98.	LOP BURI 1&2	LB1&2	184.	RAJJAPRABHA (CHIEW LARN)	RPB
13.	BAN NA SAN	BNS	99.	LOWER MAE PING	LMP	185.	RANGSIT	RS
14.	BAN PHAI	BPI	100.	MAE CHAEM	MC	186.	RANONG	RN
15.	BAN PONG 1&2	BP1&2	101.	MAE HONG SON	MH	187.	RANOT	RA
16.	BAN SANTI	BST	102.	MAE KOK	MKK	188.	RATCHABURI 1&2	RB1&2
17.	BAN TANG	BTG	103.	MAE KUM LUANG	MKL	189.	RAYONG 1,2&3	RY1,2&3
18.	BANG KAPI	BK	104.	MAE KUANG	MKG	190.	ROI ET	RE
19.	BANG LAMUNG	BL	105.	MAE MOH 1,2&3	MM1,2&3	191.	RUB ROH	RR
20.	BANG LANG	BLG	106.	MAE NGAT	MNG	192.	SABA YOI	SBY
21.	BANG LEN	BLE	107.	MAE SAI	MSA	193.	SADAO	SDO
22.	BANG MUN NAK	BMN	108.	MAE SA-NGA	MSN	194.	SAI NOI	SNO
23.	BANG PA-IN	BI	109.	MAE SARIANG	MSR	195.	SAI BURI	SBR
24.	BANG PAKONG	BPK	110.	MAE SOT	MS	196.	SAKON NAKHON	SO
25.	BANG PHLI	BPL	111.	MAE TAENG	MTG	197.	SALOKBAT	SLB
26.	BANG SAPHAN	BSP	112.	MAHA SARAKHAM	MK	198.	SAM PHRAN 1&2	SA1&2
27.	BANGKOK NOI	BN	113.	MANOROM	MR	199.	SAMUT PRAKAN	SPK
28.	BANG WUA	BW	114.	MAP TA PHUT	MTP	200.	SAMUT SAKHON 1&2	SN1&2
29.	BETONG	BT	115.	MUKDAHAN	MD	201.	SAMUT SONGKHRAM	SM
30.	BHUMIBOL	BB	116.	NA KAE	NE	202.	SAN KAMPHAENG	SKP
31.	BUNG KAN	BKN	117.	NAKHON CHAISI	NCS	203.	SARABURI 1&2	SR1&2
32.	BURI RAM	BR	118.	NAKHON NAYOK	NY	204.	SARABURI 3&4	SR3&4
33.	CHA-AM	CA	119.	NAKHON PATHOM	NPT	205.	SATTAHIP 1&2	SH1&2
34.	CHACHOENGSAO	CC	120.	NAKHON PHANOM	NN	206.	SATUN	STU
35.	CHAI BADAN	CBD	121.	NAKHON RATCHASIMA 1&2	NR1&2	207.	SAVANKHALOK	SL
36.	CHAI NAT	CN	122.	NAKHON SAWAN	NS	208.	SI RACHA	SC
37.	CHAIYAPHUM	CYP	123.	NAKHON SI THAMMARAT	NT	209.	SI SA KET	SS
38.	CHANA	CNA	124.	NAM CHOEN	NCE	210.	SIKHIU	SKI
39.	CHANTHABURI	CT	125.	NAM CHON	NCN	211.	SING BURI	ST
40.	CHAO PHRAYA	CPY	126.	NAM HAENG	NHA	212.	SIN PUN	SPU
41.	CHIANG KAN	CKN	127.	NAM KHAM	NKA	213.	SIRIKIT	SK
42.	CHIANG MAI 1,2&3	CM1,2&3	128.	NAM KHEK	NAK	214.	SIRINDHORN	SRD
43.	CHIANG RAI	CR	129.	NAM LOEI	NLE	215.	SOMDET	SD
44.	CHOK CHAI	CCI	130.	NAM MAN	NM	216.	SONGKHLA	SKL
45.	CHOM THONG	CTG	131.	NAM NGAO	NNA	217.	SOUTH BANGKOK	SB
46.	CHON BURI	CB	132.	NAM NGUM	NNG	218.	SOUTH THON BURI	STB
47.	CHONG KLAM	CHK	133.	NAM PAI	NPI	219.	SRINAGARIND	SNR
48.	CHONG MEK	CMK	134.	NAM PHONG	NPO	220.	SUKHOTHAI	ST
49.	CHULABHORN	CLB	135.	NAM PUNG	NP	221.	SUNG NOEN	SNN
50.	CHUM PHAE	CPA	136.	NAM SAN	NSN	222.	SUNGAI KOLOK	SUK
51.	CHUMPHON	CP	137.	NAM SU	NAS	223.	SUPHAN BURI	SP
52.	DET UDOM	DD	138.	NAM THUEN	NTN	224.	SURAT THANI	SRT
53.	DOEMBANG NANGBUAT	DBN	139.	NAM YUAM	NYU	225.	SURIN	SU
54.	FANG	FA	140.	NAN	NA	226.	TA MOON	TMO
55.	GREATER BANGKOK	BMK	141.	NANG RONG	NRG	227.	TAK 1&2	TA1&2
56.	HAT YAI 1&2	HY1&2	142.	NARATHIWAT	NW	228.	TAKHLI 1&2	TK1&2
57.	HUA HIN	HH	143.	NARESUAN	NRS	229.	TAKUA PA	TP
58.	HUAI KUI MANG	HKM	144.	NON SUNG	NSG	230.	THA MUANG	TM
59.	HUAI KUM	HK	145.	NONG BUA LAM PHU	NBL	231.	THALAN 1&2	TL1&2
60.	HUAI NGAED	HNG	146.	NONG CHOK	NCO	232.	THAP SAKAE	TSK
61.	HUAI PHUKHIO	HPK	147.	NONG HAN	NH	233.	THAP THAN	TTH
62.	HUAI RIN (UDY)	HR	148.	NONG KHAI	NK	234.	THA TAKO	TTK
63.	HUAI SAK	HSK	149.	NONTHABURI	ND	235.	THA THUNG NA	TN
64.	KABIN BURI	KBB	150.	NORTH BANGKOK	NB	236.	THAT PHANOM	TH
65.	KAENG KRUNG	KKU	151.	NUCLEAR	NC	237.	THI KHONG	TKH
66.	KAENG SUA TEN	KST	152.	ON NUCH	ON	238.	THOEN	TE
67.	KALASIN	KL	153.	PA MONG	PM	239.	THOENG	THG
68.	KAMPHAENGPHET	KP	154.	PAK CHONG	PCH	240.	THUNG SONG	TS
69.	KAMPHAENG SAEN	KS	155.	PAK MUN	PMN	241.	TRANG	TG
70.	KANCHANABURI	KB	156.	PAK SE	PSE	242.	TRAT	TR
71.	KAENG KRACHAN	KKC	157.	PATHUM THANI	PT	243.	U THONG	UTG
72.	KANTANG	KT	158.	PATTANI	PTN	244.	UBOLRATANA	UR
73.	KANTHARALAK	KRL	159.	PHACHI	PH	245.	UBON RATCHATHANI 1&2	UB1&2
74.	KHANOM	KN	160.	PHANAT NIKHOM	PNN	246.	UDON THANI 1&2	UD1&2
75.	KHAO LAEM	KHL	161.	PHANG KHON	PHK	247.	UPPER MAE PING	UMP
76.	KHLONG KLAI	KGK	162.	PHANGNGA	PN	248.	UPPER PA SAK	UPS
77.	KHLONG YAN	KY	163.	PHANOM SARAKHAM	PSK	249.	UPPER PATTANI	UP
78.	KHON KAEN 1&2	KK1&2	164.	PHATTHALUNG	PU	250.	UPPER QUAE YAI	UQY
79.	KHONG	KNG	165.	PHAYAKKHAPHUM PHISAI	PYK	251.	UTHAI THANI	UN
80.	KIRIDHARN (HUAI SAPHAN HIN)	KRD	166.	PHAYAO	PY	252.	UTTARADIT	UT
81.	KLAENG	KLA	167.	PHETCHABUN	PE	253.	VAJIRALONGKORN	VR
82.	KRABI	KA	168.	PHETCHABURI	PB	254.	WANG NOI	WN
83.	KUD	KUD	169.	PHICHIT	PC	255.	WATTHANA NAKHON	WNK
84.	KWAE NOI	KVN	170.	PHITSANULOK 1&2	PL1&2	256.	XESET	XSE
85.	LA NGU	LG	171.	PHON	PO	257.	YALA	YL
86.	LAEM CHABANG	LC	172.	PHRA PHUTTHABAT	PTB	258.	YASOTHON	YT

REVISION 9

POWER SYSTEM PLANNING DIVISION
JULY 1988


N
CR
80/2
477 ACSR. 80.203 km. 241 T. 115 kV.
PY
0/1
112/3
477 ACSR 112.731 km. 322 T. 115 kV.
477 ACSR 99.582 km. 298 T. 115 kV.
26/1
CM-2
0/1
477 ACSR 26.123 km. 81 T. 115 kV.
Cct No. 1
Cct No. 2
336.4 AAC 11.367 km. 38 T. 69 kV.
477 ACSR 73.434 km. 214 T. 115 kV.
CM-1
11/3
LN-2
LP-2
MM-2
CM 3
16/1
85/3
2/7
2/6
0/1
18/2
477 ACSR 18.238 km. 56 T. 115 kV.
LN-1
2/7
LP-1
73/2
477 ACSR. 15.987 km. 57 T. 115 kV.
336.4 AAC. 16.204 km. 73 T. 69 kV.
336.4 AAC 69.015 km. 293 T. 69 kV.
477 AAC 36.176 km. 195 T. 115 kV
CTG
69/1A
69/1
0/1
29/3
6/3
477 AAC. 6.941 km. 21 T. 115 kV.
140/5
29/7
477 ACSR 54.338 km 170 T 115 kV

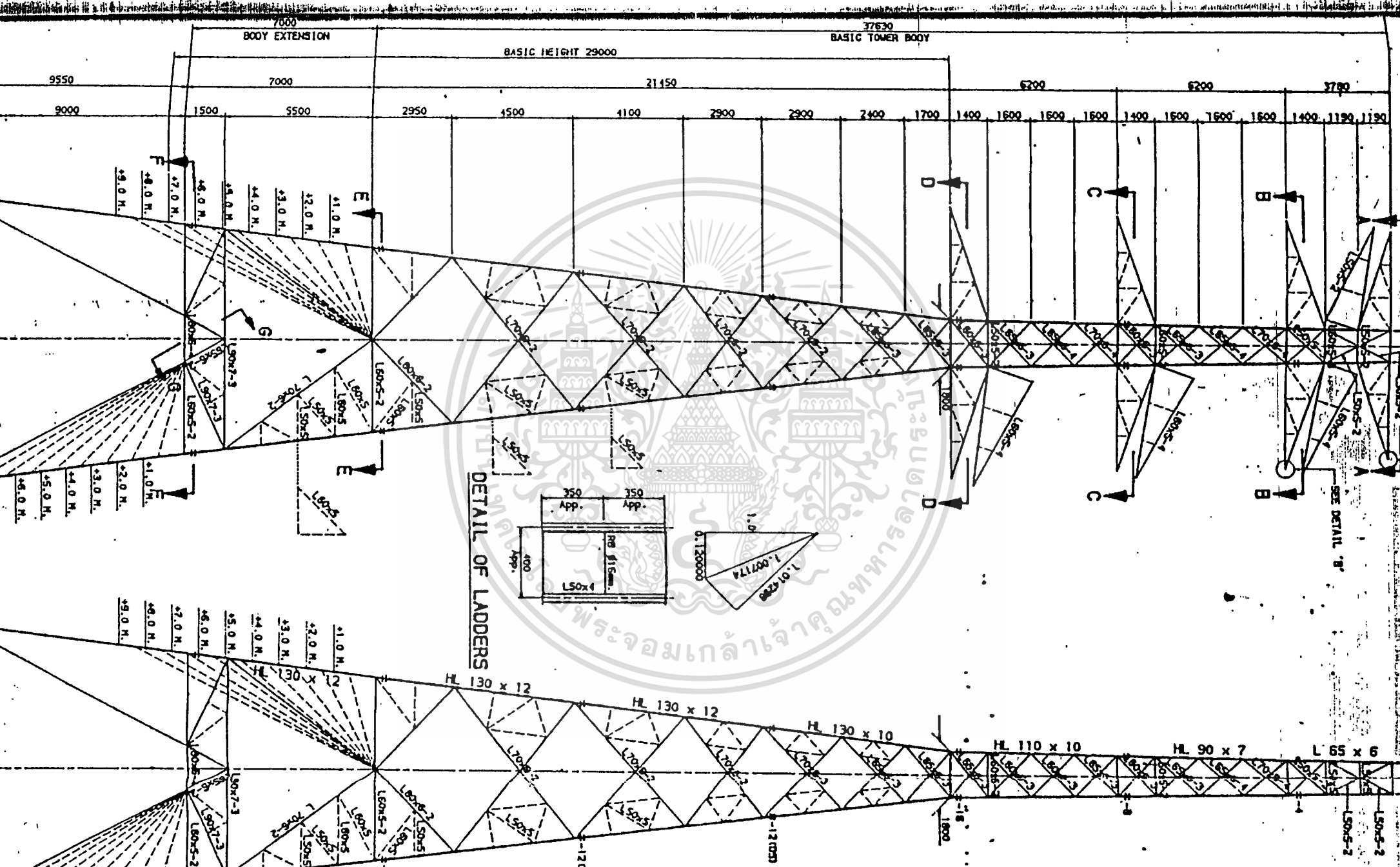

TO NS.
R4.
R1.
1272 ACSR 122.788 km. 417T 230 kV.
1272 ACSR.56.539 KM. 299 T. 230 KV.
LINE 2
LINE 1
1272 ACSR.50.082 KM. 113 T 230 KV.
1272 ACSR.16.718 km. 45 T. 230 kV.
AT-2
DBN
477 ACSR 37.045 km. 109 T.
115 kV.
4/0 ACSR. 29.991 KM. 154 T.
115 KV.
TO TK-1
TO TTK
R4
R1
477 ACSR 28.693 km.
86 T. 69 kV.
S1
Cct. No. 2
Cct. No. 1
Cct. No. 1
Cct. No. 2
Cct No. 1
Cct. No. 2
4/0 ACSR. 33.160 km.
168 T. 115 kV.
AT-1
4/0 ACSR.
14.003 KM.
LINE 3
477 AAC. 33.056 km.
192 T. 115 kV.
4/0 ACSR 33.056 km
168 T. 192 T.
4/0 ACSR 52.069km.
205 T. 69 kV.
477 ACSR 38.038 km.
113 T. 115 kV.
477 ACSR/GA
42.605 km. 126 T.
115 kV.
LB-2
477ACSR/GA 81.570 KM.
241 T. 115 KV.
CBD
LB-1
4/0 ACSR 26.258 km
137 T. 118 kV.
1272 ACSR. 82.997 km. 219 T. 230 kV.
SR-3
477 AAC. 6.027 KM. 35 T. 115 KV.
477 AAC. 35.271 KM. 105 T. 115 KV.
477 AAC. 32.803 km 100T. 115 kV.
SR-2
R1
R2
Cct. No. 1
Cct. No. 2 TO PCH
Cct. No. 1
Cct. No. 2 TO NR2
TL-1
795 ACSR. 1.880 KM. 8T.
115 KV.
TL-2
4 x 795 ACSR. 158.186 km. 230 kV.
477ACSR. 22.339 KM. 66 T. 115 KV.
4/0 ACSR. 18.038 KM. 92 T. 115 KV.
SR-1
SR-4
477 AAC. 43.415 KM. 136 T. 115 KV.
N

ภาคผนวก ง.

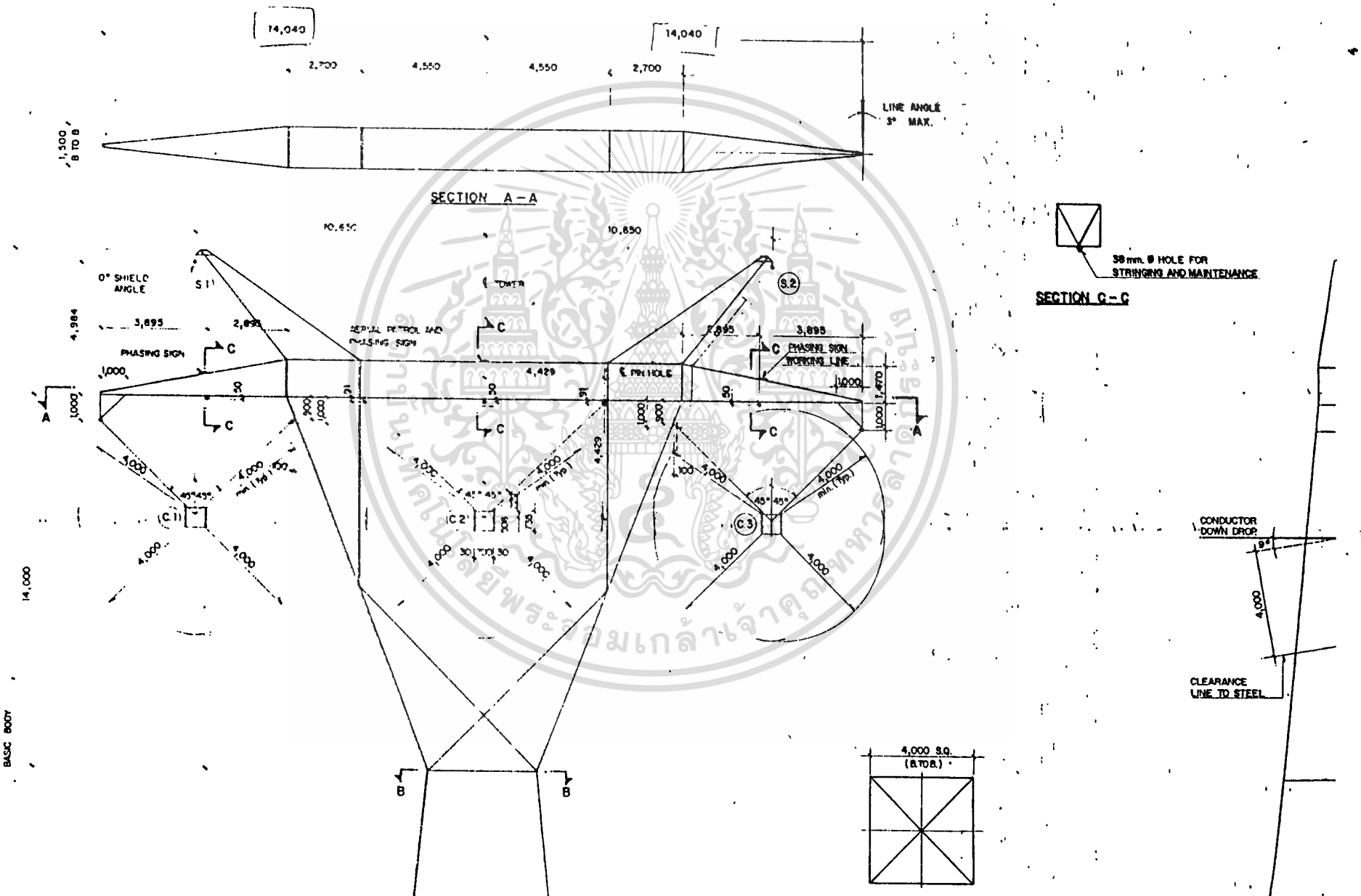
รูปแสดงโครงสร้างเสาส่งไฟฟ้าที่ใช้ในโครงงานนี้

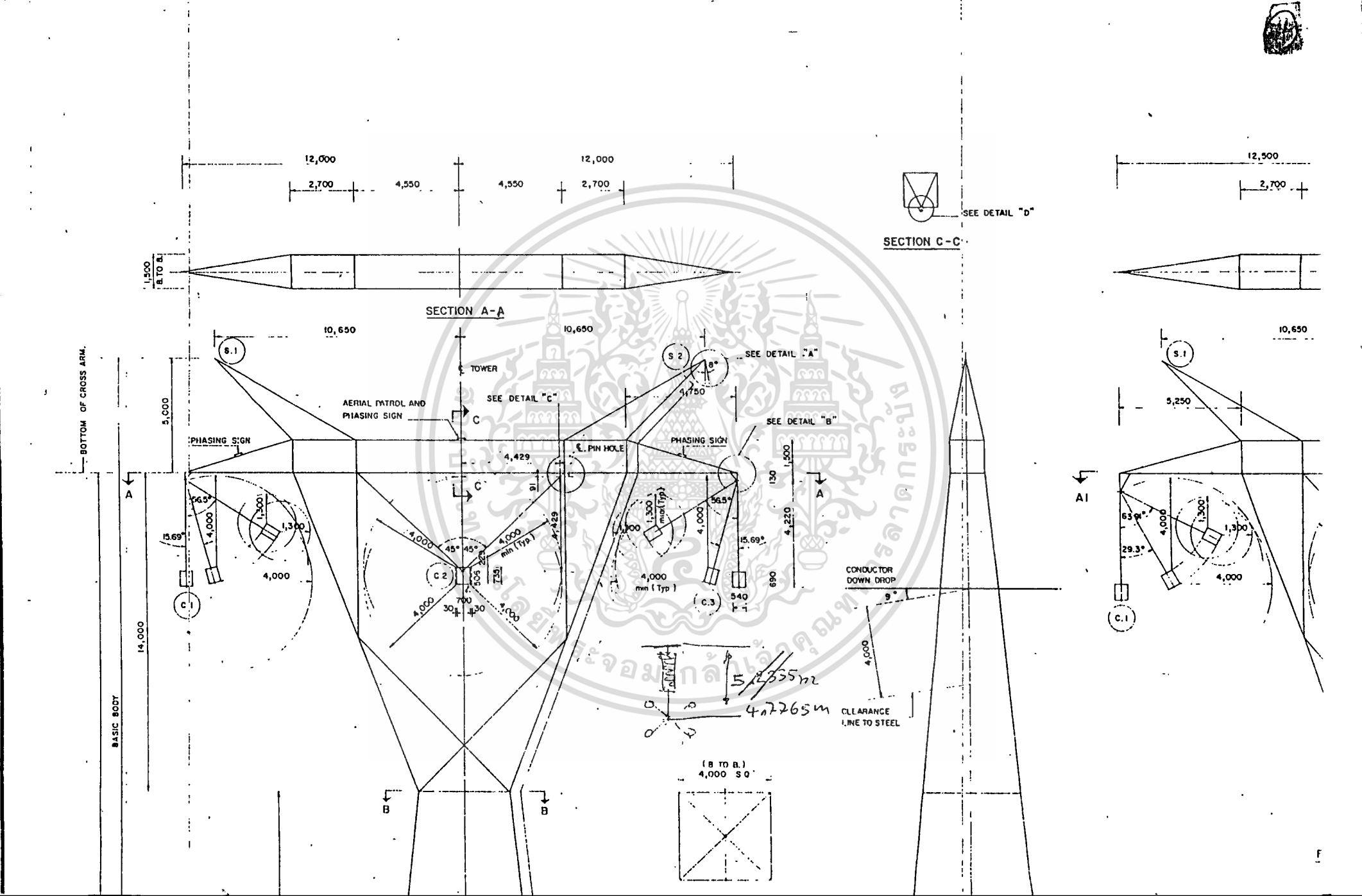
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



BODY EXTENSION
BASIC TOWER BODY
BASIC HEIGHT 29000
7000
37630
9550
7000
21450
6200
6200
3780
9000
1500
5500
2950
4500
4100
2900
2900
2400
1700
1400
1600
1600
1600
1400
1600
1600
1600
1400
1190
1190
DETAIL OF LADDERS
350 App.
350 App.
400 App.
L50x4
SEE DETAIL 'B'
HL 130 x 12
HL 130 x 12
HL 130 x 12
HL 130 x 10
HL 110 x 10
HL 90 x 7
L 65 x 6


14,040
14,040
2,700
4,550
4,550
2,700
LINE ANGLE 3° MAX.
1,500 B TO B
SECTION A – A
10,650
10,650
0° SHIELD ANGLE
S1
S2
℄ TOWER
AERIAL PATROL AND PHASING SIGN
PHASING SIGN
3,895
2,895
2,895
3,895
PHASING SIGN WORKING LINE
℄ PIN HOLE
4,984
4,429
4,429
1,000
1,470
4,000
4,000 min. (Typ.)
45° 45°
C1
C2
C3
BOTTOM OF CROSSARM
BASIC BODY
14,000
A
B
C
38 mm. Ø HOLE FOR STRINGING AND MAINTENANCE
SECTION C – C
CONDUCTOR DOWN DROP
9°
CLEARANCE LINE TO STEEL
4,000 S.Q. (B.TO B.)



SECTION A-A
SECTION C-C
SEE DETAIL "D"
SEE DETAIL "A"
SEE DETAIL "B"
SEE DETAIL "C"
℄ TOWER
AERIAL PATROL AND PHASING SIGN
PHASING SIGN
℄ PIN HOLE
BOTTOM OF CROSS ARM.
BASIC BODY
CONDUCTOR DOWN DROP
CLEARANCE LINE TO STEEL
(B TO B.) 4,000 SQ
12,000
2,700
4,550
10,650
5,000
14,000
1,500
4,220
5,250
4,429
4,750
4,000 min (Typ)
1,300
15.69°
56.5°
63.91°
29.3°
5.2335m
4.7765m

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อท่านอาจารย์ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ จนทำให้ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาโทรคมนาคมที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ที่ได้ทำโครงงานเกี่ยวกับเรื่องนี้มาก่อน ซึ่งเป็นแนวทางสำหรับทำโครงงานนี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรม ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการทำโครงงานนี้

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจ จนปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. ก่อแก้ว พิกุลทอง, พงศ์ศักดิ์ วิญญูตระกูล, "ระบบไฟฟ้ากำลังจำลอง 1", ปริญญานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 51 หน้า, ปีการศึกษา 2530.
2. ชวลิต ดำรงรัตน์, "ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เล่ม 1", ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 356 หน้า, 2521.
3. T.S. Madhava Rao, "Principles and Practice of Elctric Power Transfer Systems", Khanna Publishers, 254 p., 1984.
4. William D. Stevenson, "Elements of Power System Analysis", 4th Edition, McGraw-Hill, 436 p., 1985.
5. The Westinghouse Electric Corporation, "Electrical Transmission and Distribution Reference Book", WEC, 1964.
6. J. Duncan Glover, Mulukutla Sarma, "Power System Analysis and Design", PWS Pulishers, 738 p., 1987.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้