



ปีการศึกษา 2530
ระบบไฟฟ้ากำลังจำลอง 1

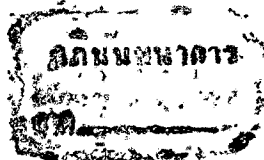
โดย

นาย ก่อแก้ว พิกุลทอง 27.1027

นาย พงศ์ศักดิ์ วิญญูตระกูล 27.1139

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล



POWER SYSTEM SIMULATOR I

MR. KOKAEW PIKULTHONG

MR. PONGSAK WINYUTRAKUL

MR. SIRIWAT POTIVEJKUL M.ENG ADVISOR

1987

Abstract

It is necessary to study either normal conditions or abnormal conditions of electrical power systems and how to prevent all damage to transmission lines and equipments and interruptions in generation following the occurrence of a fault. Measuring directly is the simplest method but that is uncomfortable and dangerous in practice and measurements are also always expensive. The better way is making simulating systems from real systems. This will be achieved by using "Per Unit" method, all variables are built into lower level which equipments and measurements easily find in laboratory can be used. To study from these simulating systems will save both lives and expense. However all values that have been measured in simulating systems will transform to real system correctly and then we will know all in real system. The detail of all topics above are contented in this thesis.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบไฟฟ้ากำลังจำลอง 1

ก่อแก้ว นิกุลทอง

พงศ์ศักดิ์ วิญญูตระกูล

อ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

2530

บทคัดย่อ

เป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องศึกษาระบบไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสภาวะปกติและสภาวะผิดปกติ รวมทั้งการศึกษาถึงวิธีการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับสายส่ง อุปกรณ์ต่างๆ และการทำให้การส่งกำลังไฟฟ้าต้องหยุดชะงักลง อันเนื่องมาจากการเกิดขึ้นของฟอลต์ วิธีศึกษาที่ง่ายที่สุดก็คือการวัดค่าจากระบบโดยตรง แต่เครื่องมือที่ใช้วัดมักมีราคาแพง กระบวนการวัดก็ไม่ค่อยสะดวก และเสี่ยงต่ออันตรายอันอาจจะเกิดขึ้นได้กับผู้ทำการวัด วิธีที่ดีกว่าการวัดค่าจากระบบโดยตรงก็คือ การสร้างระบบจำลองจากระบบจริง โดยจะให้หลักการของเปอร์ยูนิตมาแปลงค่าของระบบจริงให้ต่ำลง จนสามารถใช้ อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่หาได้ง่ายในห้องปฏิบัติการ มาทำเป็นระบบจำลองและศึกษาวัดค่า การศึกษาโดยวิธีนี้ นอกจากจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย, ค่าเครื่องมือแล้ว ยังปลอดภัยกว่าด้วย นอกจากนี้ ค่าที่วัดได้จากระบบจำลอง ยังสามารถแปลงกลับไปเป็นค่าของระบบจริงได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจะทำให้เราสามารถ รู้ทุกค่าของระบบจริงที่เราต้องการรู้ได้โดยง่าย รายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการและขั้นตอนของการปฏิบัติ ได้มีการบันทึกไว้ในปฏิญานินพนธ์ฉบับนี้เรียบร้อยแล้ว

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
1	ระบบไฟฟ้ากำลัง	1
2	ทฤษฎี	5
	2.1 การหาพารามิเตอร์ของสายส่ง	5
	2.1.1 ความต้านทาน	6
	2.1.2 ความเหนี่ยวนำ	7
	2.1.3 ความจุไฟฟ้า	14
	2.1.4 ความนำไฟฟ้า	17
	2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของสายส่ง	18
	2.2.1 สายส่งระยะสั้น	19
	2.2.2 สายส่งระยะยาวปานกลาง	20
	2.2.3 สายส่งระยะยาว	22
	2.3 ระบบเปอร์ยูนิต	23
3	การคำนวณและการออกแบบ	26
	3.1 การคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งที่จะจำลอง	26
	3.2 การใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ	27
	3.3 การออกแบบและสร้างตัวเหนี่ยวนำ	37
	3.4 การออกแบบและสร้างหม้อแปลง	39
4	ผลการทดสอบ	44
	4.1 การทดสอบหม้อแปลง	44
	4.2 การทดสอบตัวเหนี่ยวนำ	49
5	บทวิจารณ์และสรุป	51

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบไฟฟ้ากำลัง	3
2.1	แสดงการหาฟลักซ์ภายนอกของสายส่ง	8
2.2	สายส่งหนึ่งเฟส	9
2.3	รูปแสดงการหา GMD	10
2.4	สายส่ง 3 เฟส วงจรเดี่ยวที่จัดระยะห่างระหว่างเฟสเท่ากัน	11
2.5	สายส่ง 3 เฟส วงจรเดี่ยวแบบท้าว ไไป	11
2.6	การสลับสายส่ง	12
2.7	สายส่ง 3 เฟส วงจรคู่	13
2.8	สายส่ง 3 เฟส แบบบันได	14
2.9	ความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนสายส่ง	14
2.10	ความจุไฟฟ้าระหว่างสายกับจุดสะเทิน	16
2.11	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสายกับแรงดันเฟส	16
2.12	พารามิเตอร์ที่กระจายอยู่บนสายส่ง	18
2.13	สายส่งระยะสั้น	19
2.14	เฟเซอร์ ไดอะแกรม	20
2.15	สายส่งระยะยาวปานกลาง วงจรสมมูลย์แบบ π	20
2.16	สายส่งระยะยาวปานกลาง วงจรสมมูลย์แบบ T	21
2.17	สายส่งระยะยาว วงจรสมมูลย์แบบ π	22
2.18	สายส่งระยะยาว วงจรสมมูลย์แบบ T	23
3.1	แสดงการจัดวางของสายส่ง 3 เฟส วงจรเดี่ยว	26
3.2 ก	แสดงค่าพารามิเตอร์บนสายส่งหนึ่งเฟส ระยะยาวปานกลางแบบ π ของระบบจริง	35
3.2 ข	แสดงค่าพารามิเตอร์บนสายส่งหนึ่งเฟส ระยะยาวปานกลางแบบ π	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารของระบบจำลอง ทรัพยากรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.3	แสดงค่าพารามิเตอร์ในลักษณะ 3 เฟส	35
3.4	ลักษณะแกนเหล็กรูป E และ I	37
3.5	ลักษณะของ บอบบี้	40
3.6	แสดงการจัดเรียงแกนเหล็กแบบอุดมคติ	41
3.7	แสดงการจัดเรียงแกนเหล็กที่สร้างขึ้น	42
4.1	แสดงการทดสอบวงจรเปิด	44
4.2	แสดงวงจรสมมุติของการทดสอบวงจรเปิด	44
4.3	แสดงการทดสอบลัดวงจร	45
4.4	แสดงวงจรสมมุติของการทดสอบลัดวงจร	45
4.5	วงจรสมมุติของหม้อแปลงทั้ง 2 ตัว	47
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของ ตัวเหนี่ยวนำในสายส่งระยะสั้น	49
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของ ตัวเหนี่ยวนำในสายส่งระยะกลาง	50


สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตาราง สกิน เอฟเฟค	ภาคผนวก ก
2	ตารางสายไฟฟ้าชนิด ACSR	ภาคผนวก ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์



A	: Area
B	: Flux density
C	: Capacitance
Deq	: Equivalent Equilateral Spacing
G	: Conductance
GMD	: Geometric mean distance
GMR	: Geometric mean radian
H	: Magnetic field intensity
I	: Current
K	: Permittivity
L	: Inductance
mmf	: Magnetomotive force
N	: Turn
P	: Power
R	: Resistance
r	: radius
V	: Voltage
Y	: Admittance
Z	: Impedance
μ	: Permuability

บทที่ 1

บทนำ

ระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบไฟฟ้ากำลังนั้นจำแนกได้เป็น 3 ส่วนคือ

1. ระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้า (Generating System) ได้แก่ โรงจักรไฟฟ้าหรือแหล่งกำเนิดไฟฟ้า

โรงจักรไฟฟ้า (Power Plant)

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

ระบบแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของโรงจักรไฟฟ้า ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ มีทั้งที่จ่ายออกในระบบ 13.9 KV, 11 KV และ 3.5 KV แล้วเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น โดยมีลานไกวไฟฟ้า เป็นส่วนที่รับพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตขึ้น เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า จ่ายไฟเข้าสู่ระบบสายส่งซึ่งมีแรงดันไฟฟ้า 500 KV, 230 KV , 115 KV หรือ 69 KV โดยเชื่อมสายส่งแรงสูงนี้ต่อกันเกือบทุกแหล่งผลิตทั่วประเทศ ทำให้ระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้าเป็นไปอย่างประหยัดและมีประสิทธิภาพ

2. ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission System) ได้แก่ สายส่งกำลังไฟฟ้า และสถานีเปลี่ยนแรงดัน

สายส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission Line)

สายส่งกำลังไฟฟ้าเป็นชุดของสายตัวนำ สำหรับส่งพลังงานไฟฟ้าจากโรงจักรไฟฟ้าไปยังสถานีเปลี่ยนแรงดัน ซึ่งเป็นการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไปยังผู้ใช้หรือแหล่งจ่ายไฟฟ้า. และเป็นการส่งพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งผลิตต่างๆ กัน ไปยังศูนย์กลางของโหลด (Load Center) ในกรณีที่มีแหล่งผลิตหลายแห่งอยู่ห่างๆ กัน นอกจากนี้ยังเป็นการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้า (Tie Line) จากระบบหนึ่งไปยังอีกระบบหนึ่ง ในกรณีที่ระบบหนึ่งมีกำลังผลิตไม่เพียงพอ

ประโยชน์ของการเชื่อมโยงสายส่งกำลังไฟฟ้า

- 1) สามารถถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าจากระบบหนึ่งไปยังอีกระบบหนึ่ง ทำให้ช่วยลดกำลังผลิตไฟฟ้า ในขณะที่มีการใช้ไฟฟ้าไม่มากลงได้ ซึ่งเป็นการประหยัดเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า
- 2) สามารถเชื่อมโยงแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าหลายๆ ชนิดถึงกันได้ ซึ่งช่วยให้สามารถวางแผนการเดินเครื่องอย่างมีประสิทธิภาพสูง
- 3) การเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าถึงกันช่วยให้ระบบมีความมั่นคง เนื่องจากมีแหล่งผลิตหลายทาง จึงสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง

สถานีเปลี่ยนแรงดัน (Substation)

สถานีเปลี่ยนแรงดัน เป็นสถานกลางซึ่งรับ พลังงานไฟฟ้าจาก สายส่ง หรือจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เพื่อถ่ายผ่านสู่ระบบจำหน่าย ประกอบด้วย การเปลี่ยนแรงดัน, การตัดตอน, การควบคุม และการป้องกันระบบ เป็นต้น

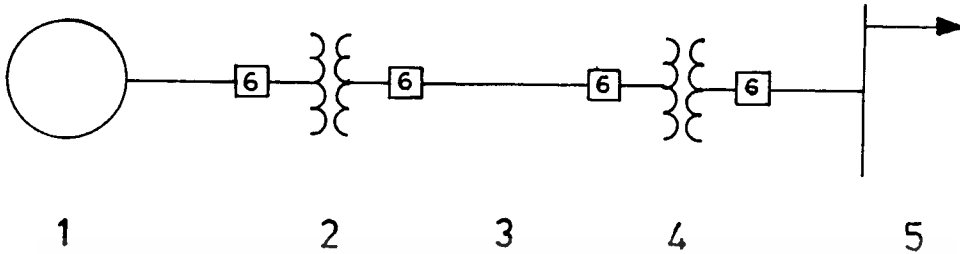
หน้าที่และจุดประสงค์ของสถานีเปลี่ยนแรงดัน

- 1) เป็นจุดเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้า
- 2) เป็นจุดปรับระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบให้คงที่
- 3) เป็นจุดเชื่อมระบบสายส่ง และระบบจำหน่ายไฟฟ้า ทำหน้าที่ในการตัดตอน ออกจากระบบและนำเข้าสู่ระบบ
- 4) เป็นจุดวัดปริมาณทางไฟฟ้า เช่น แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า เป็นต้น
- 5) เป็นจุดเชื่อมโยงระบบสื่อสาร โทรมาตร (Telemetry) และการป้องกันในระบบสายส่ง
- 6) เป็นตำแหน่งที่ติดตั้ง อุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้า, อุปกรณ์ตัดตอน, อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินผิดปกติ และ อุปกรณ์ประกอบอื่นๆ ที่จำเป็น

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

เอกสารนี้เป็นระบบไฟฟ้ากำลังสามารถที่จะแสดงให้เห็นง่าย ๆ นั้น ไม่ในรูปของที่ได้อะแกรม์เส้นเดียวว่ากรณิใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Single Line Diagram) ได้ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1

ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญๆ 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)

เราจะจำลองส่วนต่างๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยอุปกรณ์ที่หาได้ในห้องทดลองดังนี้

ส่วนผลิตพลังงานไฟฟ้า

ในระบบจริงจะเป็นโรงจักรไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดพิกัดใหญ่มากๆ แต่ในระบบจำลองเราจะแทนด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดพิกัด 3 KW, 220 Volt, 8.6 Amp, 1500 rpm, 50 Hz, Power Factor = 1 โดยใช้มอเตอร์เป็นตัวต้นกำลัง

ส่วนเพิ่มแรงดันไฟฟ้า

เนื่องจากเราเลือกค่าแรงดันไฟฟ้าที่จะป้อนให้สายส่งไฟฟ้ามีขนาด 415 Volt (เลือกตามความเหมาะสมของอุปกรณ์ที่ใช้ทำสายส่ง) ดังนั้น หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้จึงออกแบบให้ขนาดแรงดันเหมาะสมกับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และแรงดันที่จะป้อนให้สายส่ง ขนาดพิกัดของกระแสตามขนาดกระแสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายได้ ดังนั้นจึงมี ขนาดพิกัดเป็น 7.5 KVA , 220/415 Volt ต่อแบบ สตาร์-สตาร์ (Star-Star : Y-Y) ในระบบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
จะเป็นหม้อแปลงที่มีขนาดพิกัดเป็น MVA และขนาดแรงดันในระดับ KV
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนสายส่งกำลังไฟฟ้า

ในส่วนนี้ เราไม่สามารถหาสายส่งจริงๆ มาทำการทดลองได้ จึงต้องสร้างเป็นวงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน (Resistor : R), ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor : L) และตัวประจุไฟฟ้า (Capacitor : C) แทนสายส่งที่มีความยาวต่างๆ กัน การหาค่า RLC นี้ค่อนข้างจะยุ่งยาก เพราะเมื่อหาค่า RLC ที่ระดับจริงได้แล้ว ต้องใช้วิธีเปอร์ยูนิต (Per-unit) แปลงมาที่ระบบจำลอง แต่ค่า C ที่แปลงมาที่ระบบจำลอง อาจจะมีขนาดไม่ตรงกับ ค่า C ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ดังนั้นต้องมีการเลือกค่ากระแสของระบบจำลองใหม่ เพื่อให้ค่า C มีขนาดตรงกับค่า C ที่เราสามารถหาได้ ในส่วนนี้เราจะใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ ซึ่งได้ทำโปรแกรมช่วยในการคำนวณขึ้นมาด้วย

ส่วนลดแรงดันไฟฟ้า

เป็นหม้อแปลงที่ทำหน้าที่ ลดแรงดันจากสายส่งให้มีค่าต่ำลง มาจ่ายให้กับโหลด ซึ่งเราเลือกระดับแรงดันที่จ่ายให้กับโหลดมีขนาดเท่ากับ 220 Volt ดังนั้นหม้อแปลงของส่วนนี้ จึงออกแบบให้มีขนาดพิกัด 7.5 KVA, 415/220 Volt ต่อแบบ Y-Y

ส่วนของโหลด

ในระบบจริงก็คือ ผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งเราจะแทนด้วยโหลดที่หาได้ในห้องทดลอง

ส่วนของระบบป้องกัน

ส่วนของระบบป้องกัน จะกล่าวในปริศยานิพนธ์เรื่อง ระบบไฟฟ้ากำลังจำลอง ส่วนที่ 2

บทที่ 2 บททฤษฎี

ก่อนที่จะทำการจำลองสายส่งไฟฟ้า เราจะต้องทำความเข้าใจในเรื่อง พารามิเตอร์ (Parameter) ของสายส่ง และ ระบบเปอร์ยูนิต เสียก่อน จากนั้นจึงสามารถ คำนวณค่าแรงดันและกระแส ของสายส่ง และจำลองสายส่งได้

2.1 การหาพารามิเตอร์ของสายส่ง

สายส่งที่ใช้ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้า ไปยังผู้ใช้ไฟ เป็นระยะทางไกลๆ ประกอบด้วย พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องนำมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งประกอบไปด้วย ความต้านทาน (Resistance), ความเหนี่ยวนำ (Inductance), ความจุไฟฟ้า (Capacitance) และความนำไฟฟ้า (Conductance)

ข้อมูลที่จำเป็นต้องทราบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง มีดังต่อไปนี้

1. ชนิดของสายส่งไฟฟ้า

สายไฟฟ้า (Conductor) มีหน้าที่รับส่งให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน สายไฟฟ้าเป็นสารตัวนำ อันได้แก่ เงิน, ทองแดง, อลูมิเนียม, เหล็ก หรือ ส่วนประกอบของทองแดงกับเหล็ก หรือ อลูมิเนียมผสมเหล็ก ซึ่งเป็นโลหะผสม (Alloy) การพิจารณาเลือกชนิดของวัสดุที่จะใช้ทำสายไฟฟ้า จะต้องคำนึงถึง ความสามารถในการนำไฟฟ้า (Conductivity), ความสามารถในการรับแรงดึง (Mechanical Strength), น้ำหนักสาย และราคา

- เงิน เป็นโลหะตัวนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด แต่มีราคาแพงมาก จึงไม่ใช้ทำสายไฟฟ้า
- ทองแดง เป็นโลหะตัวนำไฟฟ้าที่ดี ความสามารถในการรับแรงดึงไฟฟ้าได้พอสมควร แต่มีราคาแพง
- อลูมิเนียม เป็นโลหะตัวนำไฟฟ้าที่ดีพอสมควร มีน้ำหนักเบา แต่มีความสามารถในการรับแรงดึงได้จำกัด เนื่องจากมีราคาถูกลงกว่าทองแดง จึงนิยมนำมาใช้ทำสายไฟฟ้า โดยมีแกนเหล็กเสริมเพื่อให้สามารถรับแรงดึงได้ดีขึ้น

สายไฟฟ้าอาจจะเป็นชนิดตัน เป็นแท่ง หรือตีเกลียว (Strand) สายไฟฟ้าขนาดใหญ่

จะเป็นชนิดตีเกลียว เพราะถ้าเป็นสายตันจะมีน้ำหนักมากและหักงอได้โดยทั่วไปสายไฟฟ้าแยกการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้เป็น 3 ชนิดคือ

- 1) สายไฟฟ้าชนิด อลูมิเนียมล้วน (All Aluminium Conductor : AAC) เป็นสายไฟฟ้าทำด้วย อลูมิเนียมตีเกลียว
- 2) สายไฟฟ้าชนิด อลูมิเนียมแกนเหล็ก (Aluminium Conductor Steel Reinforced : ACSR) สายไฟฟ้าทำด้วยอลูมิเนียมตีเกลียว ภายในเป็นแกนเหล็กตีเกลียว
- 3) สายไฟฟ้าชนิด อลูมิเนียมแกนเหล็ก โดยที่แกนเหล็ก เคลือบอลูมิเนียม (Aluminium Conductor , Aluminium Clad Steel Reinforced : ACSR/AW)

2. การจัดวางสายส่งไฟฟ้า

การจัดวางสายไฟฟ้าอาจจะจัดเป็นแบบ

- 1) เฟสเดียว
- 2) สามเฟส วงจรเดี่ยว สายเดี่ยว หรือ แบบบันเดิล (Bundle) หรือ สามเฟส วงจรคู่ สายเดี่ยว หรือ แบบบันเดิล

3. ความยาวของสายส่ง

จะต้องทราบว่า สายส่งไฟฟ้ามีความยาวเท่าไร

2.1.1 ความต้านทาน

ความต้านทานของสายส่ง เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากตัวหนึ่ง เพราะกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนมากก็เกิดเนื่องจากความต้านทานของสายส่ง ความต้านทานของสายส่งที่จะกล่าวถึง หมายถึง ความต้านทานกระแสสลับ คือ คัดผลของสกินเอฟเฟค (Skin Effect) อันเนื่องมาจากกระแสไหลในสายไม่เท่ากันด้วย

วิธีการเปลี่ยนค่าความต้านทานกระแสตรงเป็นค่าความต้านทานกระแสสลับ

- 1) เปลี่ยนความต้านทานกระแสตรง ไปยังอนุกรมที่ต่อมีการ

$$R_2/R_1 = (T+t_2)/(T+t_1) \tag{2.1}$$

โดยที่ :

R_1, R_2 เป็นความต้านทานกระแสตรงที่อนุกรม t_1, t_2

T = 241.5 สำหรับทองแดงแบบ hard-drawn ที่มีความนำไฟฟ้า 97.3%

T = 228.1 สำหรับอลูมิเนียมแบบ hard-drawn ที่มีความนำไฟฟ้า 61%

2) การเปลี่ยนค่าความต้านทานกระแสตรง เป็นค่าความต้านทานกระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ

$$r_f = K \cdot r_{dc} \tag{2.2}$$

โดยที่ :

r_f = ค่าความต้านทานกระแสสลับที่ความถี่ที่ต้องการ

r_{dc} = ค่าความต้านทานกระแสตรง

K = ค่าที่หาได้ในตารางสกินเอฟเฟค (ตารางที่ 1 ในภาคผนวก ก.)

เมื่อ K เป็นฟังก์ชันของ X

โดยที่ :

$$X = 0.063598 \sqrt{\mu f / r_{m11}} \tag{2.3}$$

โดยที่ :

f = ความถี่ที่ต้องการ (Hz)

μ = เพอร์มิอิตีวี่ (Permeability) ; เท่ากับ 1 สำหรับสารที่ไม่นำแม่เหล็ก

r_{m11} = ค่าความต้านทานกระแสตรง ($\Omega/mile$)

2.1.2 ความเหนี่ยวนำ

เมื่อมีกระแสสลับไหลในตัวนำ ทำให้เกิดฟลักซ์คัลลิ่งทั้งภายในและภายนอกตัวนำ การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ ทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำ นั่นคือทำให้เกิดความเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำ การหาค่าความเหนี่ยวนำของตัวนำ จำเป็นต้องพิจารณาจาก ทั้งฟลักซ์ที่เกิดขึ้นภายในตัวนำและภายนอกตัวนำ

ฟลักซ์คัลลิ่งที่เกิดขึ้นภายในตัวนำมีค่าเท่ากับ

$$\psi = (1/2) \times 10^{-7} (Wb-T/m) \tag{2.4}$$

โดยที่ :



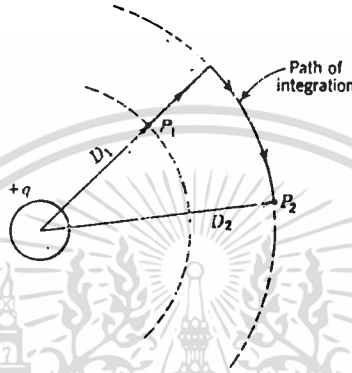
ฟลักซ์ค้ำงที่เกดขึ้นภายนอกตัวนำมีค่าเท่ากับ

$$\psi = 2 \times 10^{-7} I \ln (D_2 / D_1) \quad (\text{Wb-T/m}) \quad (2.5)$$

โดยที่ :

D_1 = ระยะห่างระหว่างจุด P_1 กับ จุดศูนย์กลางของตัวนำ ดังรูปที่ 2.1

D_2 = ระยะห่างระหว่างจุด P_2 กับ จุดศูนย์กลางของตัวนำ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1

ฟลักซ์รวมที่ค้ำงตัวนำเส้นเดี่ยว มีค่าเท่ากับ ฟลักซ์ภายในรวมกับฟลักซ์ภายนอก

$$\psi = 2 \times 10^{-7} I \ln (D_2 / e^{-1/4} D_1) \quad (\text{Wb-T/m}) \quad (2.6)$$

กรณีนี้ D_1 = รัศมีของตัวนำ (r)

$$\psi = 2 \times 10^{-7} I \ln (D_2 / e^{-1/4} r) \quad (\text{Wb-T/m}) \quad (2.7)$$

ให้ $r' = e^{-1/4} r$

$$\psi = 2 \times 10^{-7} I \ln (D_2 / r') \quad (\text{Wb-T/m}) \quad (2.8)$$

ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ

$$L = \psi / I \quad (2.9)$$

ความเหนี่ยวนำของตัวนำเส้นเดี่ยว มีค่าเท่ากับ

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln (D_2 / r') \quad (\text{H/m}) \quad (2.10)$$

การหาค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งเฟสเดี่ยว

พิจารณาสายส่งเฟสเดี่ยว ในรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบด้วย สายส่ง 2 เส้น รัศมี r_a และ รัศมี r_b ซึ่งมีกระแสไหลไปทางสายส่งเส้นหนึ่ง และไหลกลับทางสายส่งอีกเส้นหนึ่ง

จะได้ว่า เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของ 024631 ที่มีการนำไปใช้

ความเหนี่ยวนำของสายส่ง a

$$L_a = 2 \times 10^{-7} \ln(D/r_a') \quad (\text{H/m}) \quad (2.11)$$

ความเหนี่ยวนำของสายส่ง b

$$L_b = 2 \times 10^{-7} \ln(D/r_b') \quad (\text{H/m}) \quad (2.12)$$

โดยที่ :

D = ระยะห่างระหว่างสายส่งทั้งสองเส้น

ความเหนี่ยวนำทั้งหมดของสายส่งเฟสเดียว

$$L = L_a + L_b = 4 \times 10^{-7} \ln(D/\sqrt{r_a' \cdot r_b'}) \quad (\text{H/m}) \quad (2.13)$$

กรณีที่สายส่งทั้งสองเส้นมีขนาดเท่ากัน ความเหนี่ยวนำของสายส่งเฟสเดียวทั้งหมด

$$L = 4 \times 10^{-7} \ln(D/r') \quad (\text{H/m}) \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.2

การหาค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งสามเฟส

วิธีที่จะศึกษาให้เข้าใจในการคำนวณในเรื่องนี้ และนำไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง จะต้องเริ่มจากคำนวณค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต ของระยะต่างๆ ซึ่งแบ่งเป็น ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิตของระยะทาง (Geometric Mean Distance : GMD) และค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิตของสายส่ง (Geometric Mean Radius : GMR)

ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิตของระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า GMD หรือ D บางครั้งเรียกว่า Mutual GMD ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อแหล่งอื่นหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำจำกัดความ :

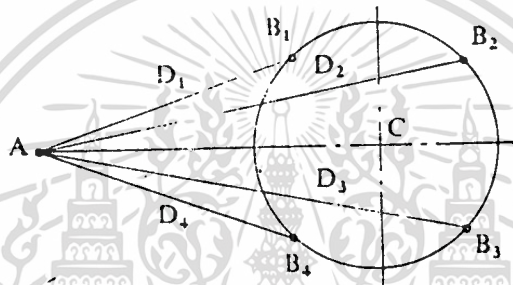
GMD จากจุด A ไปยังกลุ่มของจุด B (เช่น B_1, B_2, B_3, B_4 ตามรูปที่ 2.3)

คือ ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิตจากจุด A ไปยังกลุ่มของจุด B นั้น

$$GMD = \sqrt[4]{AB_1 \cdot AB_2 \cdot AB_3 \cdot AB_4}$$

จากรูปที่ 2.3 ถ้ากลุ่มของจุด B มีมากแล้ว ค่า GMD จากจุด A ไปยังกลุ่มของจุด

B จะเท่ากับ ระยะจากจุด A ไปยังจุดศูนย์กลางของวงกลม คือ เท่ากับระยะ AC



รูปที่ 2.3

ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิตของรัศมีของสายส่ง

GMR หรือ D_g ซึ่งก็คือ r' นั้นเอง บางครั้งเรียกว่า Self GMD ค่า GMR ของสายส่งชนิดที่ประกอบด้วยสายหลายเส้นตีเกลียวนั้น ส่วนมากอ่านจาก ตารางขนาดของสายไฟ
ผ้าได้เลย

สายส่งสามเฟสวางจรเตี๊ยะ ที่จัดระยะห่างระหว่างเฟสเท่ากัน

จากรูปที่ 2.4 การจัดรูปแบบของสายไฟฟ้าแต่ละเฟส แบบนี้เรียกว่า Equilateral Spacing คือระยะ $ab = bc = ac = D$

ถ้าสมมติว่า กระแสที่ไหลในเฟสทั้งสามนั้นสมดุลย์ (Balanced)

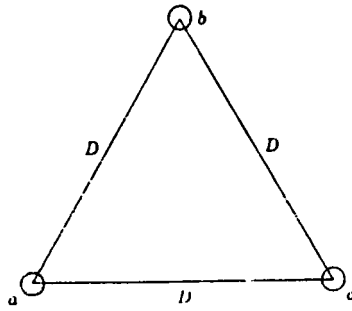
$$I_a + I_b + I_c = 0$$

ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำในแต่ละเฟสจะเท่ากันหมด

$$L_{aa} = 2 \times 10^{-7} \ln (D_m / D_g) \quad (H/m) \quad (2.15)$$

โดยที่ :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับ $\sqrt[3]{D \cdot D \cdot D}$ เท่ากับ D ศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4

สายส่งสามเฟสวงจรเดียว แยกตัว ไป

โดยทั่วไป เฟส a, b และ c ของสายส่ง จะแขวนอยู่กับลูกถ้วย ตามโครงสร้างของเสา ดังในรูปที่ 2.5 เนื่องจาก abc ไม่ใช่สามเหลี่ยมด้านเท่า ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำแต่ละเฟสจึงไม่เท่ากัน (แตกต่างกันเล็กน้อย) ในการคำนวณจึงถือค่าความเหนี่ยวนำเฉลี่ยเมื่อสลับหรือไขว้ (Transposed) สายส่งแล้ว เป็นค่าที่นำไปใช้คำนวณได้

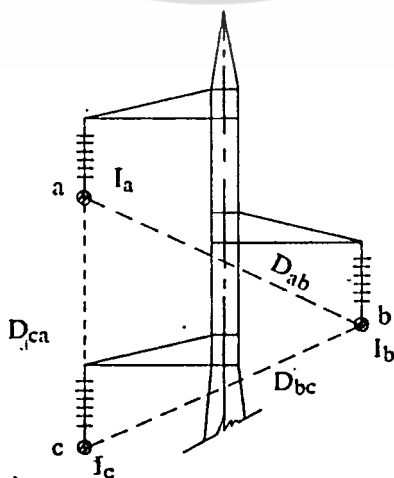
$$L_{\alpha} = 2 \times 10^{-7} \ln (D_{\alpha\alpha} / D_{\alpha}) \quad (\text{H/m}) \quad (2.16)$$

โดยที่ :

L_{α} = ค่าความเหนี่ยวนำเฉลี่ย

$D_{\alpha\alpha}$ = ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิตระหว่างเฟสของสายส่งทั้งสามเส้น

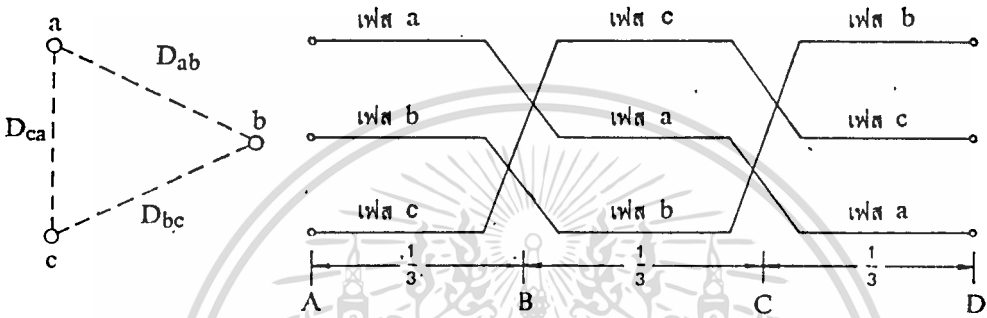
$$= \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ca}}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานรูปที่ 2.5 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสลับ หรือไขว้ สายส่ง เป็นการสลับสายส่งแต่ละเฟสให้อยู่ในตำแหน่งต่างๆ กันดังรูปที่ 2.6 ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาเรื่องการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสายส่งแต่ละเฟสไม่เท่ากันได้ ซึ่งปัญหาการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่เท่ากันนี้ เกิดจาก

- 1) การจัดวางรูปสายไฟฟ้าทั้งสามเฟส ไม่ได้เป็นสามเหลี่ยมด้านเท่า
- 2) กระแสไฟฟ้าที่ไหลในแต่ละเฟสอาจไม่เท่ากัน



รูปที่ 2.6

สายส่งสามเฟสวงจรถูก

การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งสามเฟสวงจรถูก บนเสาไฟฟ้าโครงสร้างเดียวกันนั้น จะทำได้โดยใช้หลักการของ Mutual GMD และ Self GMD ซึ่งจะได้ค่าความเหนี่ยวนำเฉลี่ยของแต่ละเฟสมีค่าเท่ากัน เพราะถือว่าได้ทำการไขว้ หรือ สลับเฟสของสายส่งแล้ว

พิจารณาจากรูปที่ 2.7 แบ่งขั้นตอน การคำนวณได้เป็นขั้นๆ คือ

ขั้นที่ 1 คำนวณค่า D_{aa}

$$D_{aa} = \text{Mutual GMD ระหว่างเฟส a ใดๆ กับ เฟส b ใดๆ}$$

$$= \sqrt[4]{(ab.ab')(a'b.a'b')} = \sqrt{gy}$$

$$D_{bb} = \text{Mutual GMD ระหว่างเฟส b ใดๆ กับ เฟส c ใดๆ}$$

$$= \sqrt[4]{(bc.bc')(b'c.b'c')} = \sqrt{gy}$$

$$D_{cc} = \text{Mutual GMD ระหว่างเฟส c ใดๆ กับ เฟส a ใดๆ}$$

$$= \sqrt[4]{(ca.ca')(c'a.c'a')} = \sqrt{2dh}$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{aa} \cdot D_{bb} \cdot D_{cc}} = (gy \sqrt{2dh})^{1/3} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 2 คำนวณค่า D_g

D_{g1} พิจารณาจากรูปที่ 2.7 (ก) ตำแหน่งของเฟส a อยู่ทแยงมุมกัน

D_{g2} พิจารณาจากรูปที่ 2.7 (ข) ตำแหน่งของเฟส a อยู่ตรงกลาง

D_{g3} พิจารณาจากรูปที่ 2.7 (ค) ตำแหน่งของเฟส a อยู่ทแยงมุมกันอีกด้านหนึ่ง

ถ้า $r' = \text{GMR}$ ของสายส่งแต่ละเฟส ซึ่งในที่นี้ถือว่าเท่ากันหมด

$$D_{g1} = \sqrt[4]{r' \cdot f \cdot r' \cdot f} = \sqrt{r' f}$$

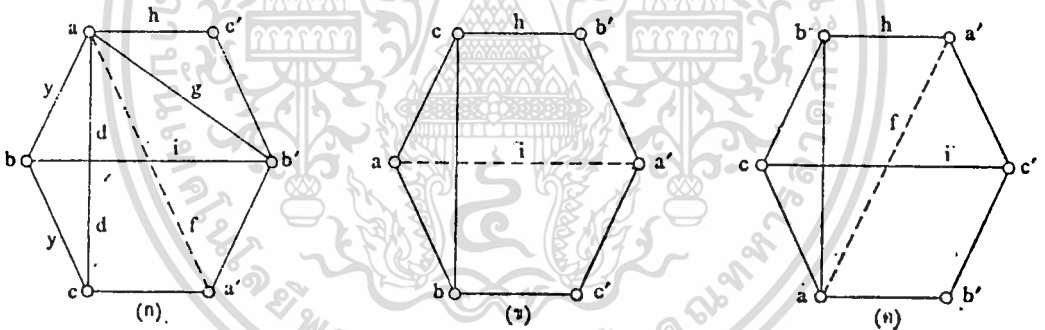
$$D_{g2} = \sqrt[4]{r' \cdot i \cdot r' \cdot i} = \sqrt{r' i}$$

$$D_{g3} = \sqrt[4]{r' \cdot f \cdot r' \cdot f} = \sqrt{r' f}$$

$$D_g = \sqrt[3]{D_{g1} \cdot D_{g2} \cdot D_{g3}} = (r' f \sqrt{r' i})^{1/3} \quad (2.18)$$

ขั้นที่ 3 คำนวณค่าความเหนี่ยวนำ

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln (D_m / D_g) \quad (\text{H/m}) \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.7

จากวิธีการเดียวกัน จะสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งวงจรคู่ ที่จัดรูปร่างอย่างไรก็ได้

สายส่งสามเฟส แบบกันเคิล

ดังรูปที่ 2.8 ในสายส่งแต่ละเฟสจะมี สายไฟฟ้า 2 เส้น (Two-stand Bundle) รูปที่ 2.8 ก., 3 เส้น (Three-stand Bundle) รูปที่ 2.8 ข., 4 เส้น (Four-stand Bundle) รูปที่ 2.8 ค. ซึ่งการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำก็เหมือนกับการหาค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งสามเฟสทั่วไป ขึ้นอยู่กับว่าเป็น แบบวงจรเดี่ยวหรือวงจรคู่ ซึ่งจะต่างกันก็ตรงที่ การ

สำหรับ สาย 2 เส้น

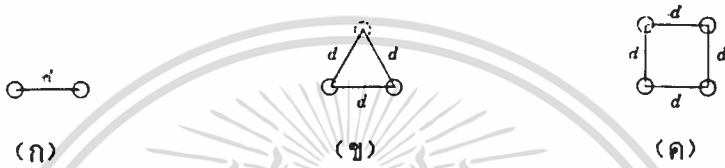
$$D_{sb} = \sqrt{(D_s \cdot d)} \tag{2.20}$$

สำหรับ สาย 3 เส้น

$$D_{sb} = \sqrt[3]{(D_s \cdot d^2)} \tag{2.21}$$

สำหรับ สาย 4 เส้น

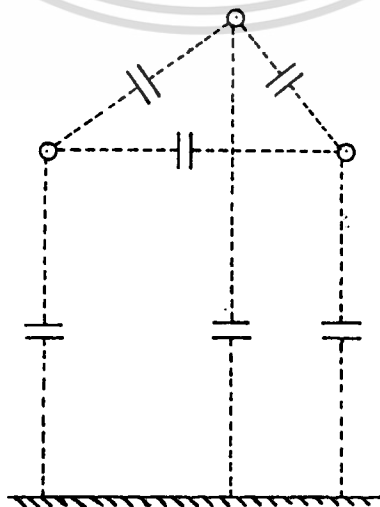
$$D_{sb} = 1.09 \sqrt[4]{(D_s \cdot d^3)} \tag{2.22}$$



รูปที่ 2.8

2.1.3 ความจุไฟฟ้า

คุณสมบัติความจุไฟฟ้าเกิดขึ้นกับสายส่ง ก็เนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างสายส่งด้วยกัน หรือระหว่างสายส่งกับดิน ความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนสายส่ง แสดงไว้ดังรูปที่ 2.9 ความจุไฟฟ้าระหว่างสายกับสาย มีค่าสูงกว่าความจุไฟฟ้าระหว่างสายกับดินมาก เนื่องจากสายส่งโดยทั่วไปอยู่สูงเหนือพื้นดินมาก การคำนวณความจุไฟฟ้าของสายส่ง บางครั้งก็ไม่คำนึงถึงความจุไฟฟ้าระหว่างสายกับดิน เนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความจุไฟฟ้าระหว่างสายกับสาย



รูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความจุไฟฟ้าของสายส่งจะมีผลต่อการส่งจ่ายไฟฟ้าของระบบมาก โดยเฉพาะสายส่งยาว สำหรับสายส่งขนาดยาวต่ำกว่า 80 กิโลเมตร ความจุไฟฟ้าไม่ค่อยมีผลต่อระบบมากและอาจไม่คิดก็ได้ ความจุไฟฟ้าที่เกิดในสายส่ง มีผลต่อระบบมากกับสายส่งระยะทางไกล ซึ่งผลทำให้ขนาดคัทเอาท์ไฟฟ้าปลายทางสูงกว่าต้นทางได้ เมื่อเปิดวงจรที่ปลายสายส่งออก ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า ผลของ เฟอร์รันตี (Ferranti Effect)

การหาค่าความจุไฟฟ้าของสายส่งเฟสเดียว

พิจารณาลายส่งเฟสเดียวในรูปที่ 2.2 เพื่อหาความจุไฟฟ้าระหว่าง สายส่ง 2 เส้น ความต่างศักย์ระหว่างสายส่ง 2 เส้น เกิดเนื่องมาจากประจุ q_a ที่สายส่ง a และประจุ q_b ที่สายส่ง b

ความต่างศักย์ระหว่างสายส่ง เนื่องจากประจุ q_a

$$V_{ab} = (q_a / 2\pi K) \cdot \ln (D/r_a) \quad (V) \quad (2.23)$$

ความต่างศักย์ระหว่างสายส่ง เนื่องจากประจุ q_b

$$V_{ab} = (q_b / 2\pi K) \cdot \ln (r_b/D) \quad (V) \quad (2.24)$$

โดยที่ :

K = เฟอร์มิตตีวิตี้ (Permittivity) ของตัวกลาง

เนื่องจาก $q_a = -q_b$

$$V_{ab} = (q_a / 2\pi K) \cdot \ln (D^2/r_a \cdot r_b) \quad (V) \quad (2.25)$$

ความจุไฟฟ้าระหว่างสายส่ง

$$C_{ab} = q_a / V_{ab} = (2\pi K) / \ln (D^2/r_a \cdot r_b) \quad (F/m) \quad (2.26)$$

กรณีที่ $r_a = r_b = r$ (รัศมีของสายส่ง)

$$C_{ab} = \pi K / \ln (D/r) \quad (F/m) \quad (2.27)$$

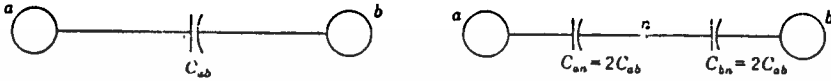
กรณีที่ต้องการหาความจุไฟฟ้าระหว่างสายกับจุดสะเทิน (Neutral) ที่อยู่กึ่งกลางระหว่างสาย เช่น กรณีที่สายรับไฟจากหม้อแปลงที่มีกราวด์ที่แทป (Tap) ตรงกลาง ความต่างศักย์ระหว่างสายหนึ่งกับจุดสะเทิน มีค่าเท่ากับ ครึ่งหนึ่งของความต่างศักย์ระหว่างสายส่ง 2 เส้น พิจารณาจากรูปที่ 2.10

เอกสารนี้ ความจุไฟฟ้าระหว่างสายกับจุดสะเทินมีค่าเท่ากับ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 C_n &= 2C_{ab} = (2\pi K)/\ln(D/r) \\
 &= 55.6 \times 10^{-12} / \ln(D/r) \quad (\text{F/m}) \quad (2.28)
 \end{aligned}$$

โดยที่ :

$$K = 8.85 \times 10^{-12} \quad (\text{F/m}) \quad \text{สำหรับอากาศ}$$



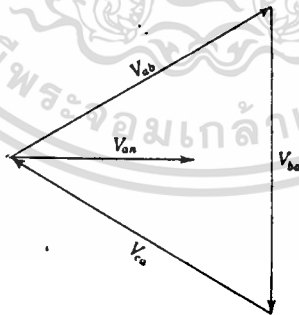
รูปที่ 2.10

การหาค่าความจุไฟฟ้าของสายส่งสามเฟส

สายส่งสามเฟสวงจรเดี่ยว ที่จัดระยะห่างระหว่างเฟสเท่ากัน

พิจารณาจากรูปที่ 2.4 คัดดาไฟฟ้าระหว่างสาย V_{ab} และ V_{ac} สามารถหาได้โดยพิจารณาจาก คัดดาไฟฟ้าเนื่องจากประจุ q_a, q_b และ q_c ซึ่ง $q_a + q_b + q_c = 0$ จะได้ว่า

$$V_{ab} + V_{ac} = (3q_a / 2\pi) \cdot \ln(D/r) \quad (2.29)$$



รูปที่ 2.11

พิจารณาจากรูปที่ 2.11 จะเห็นว่า

$$V_{ab} = \sqrt{3} V_{aa} (\cos 30^\circ + j \sin 30^\circ) \quad (2.30)$$

$$V_{ac} = -V_{ca} = \sqrt{3} V_{aa} (\cos 30^\circ - j \sin 30^\circ) \quad (2.31)$$

$$V_{ab} + V_{ac} = 3 V_{aa} \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด (2.33) การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_n = 2\pi K / \ln(D/r) = 55.6 \times 10^{-12} / \ln(D/r) \quad (F/m) \quad (2.34)$$

สายส่งสามเฟสวงจรเดี่ยวแบบทัว ไป

ในการคำนวณจะใช้ค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ยจากเฟสไปยังจุดสะเทิน โดยถือว่าได้ทำการไขว้สลับตำแหน่งของสายส่งจนครบรอบแล้ว ดังนั้น

$$C_n = 55.6 \times 10^{-12} / \ln(D_{eq}/r) \quad (F/m) \quad (2.35)$$

โดยที่ :

D_{eq} = ระยะทางเฉลี่ยทางเรขาคณิต ระหว่างเฟสของสายส่งทั้ง 3 เส้น

สายส่งสามเฟสวงจรคู่

การหาค่าความจุไฟฟ้าเหมือนกับแบบวงจรเดี่ยว แต่ค่า GMD จะต้องหาเหมือนกับการหาค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งสามเฟส วงจรคู่

สายส่งสามเฟส แบบกันเคิล

ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งการคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้า ก็เหมือนกับการหาค่าความจุไฟฟ้าของสายส่งสามเฟสทัวไป ขึ้นอยู่กับว่าเป็น แบบวงจรเดี่ยวหรือวงจรคู่ ซึ่งจะต่างกันก็ตรงที่ ค่ารัศมีของสาย r ซึ่งจะต้องเปลี่ยนเป็น D_{sc}

$$C_n = 55.6 \times 10^{-12} / \ln(D_{eq}/D_{sc}) \quad (F/m) \quad (2.36)$$

ค่า D_{sc} มีวิธีการหาดังนี้

สำหรับสาย 2 เส้น

$$D_{sc} = \sqrt{(r \cdot d)} \quad (2.37)$$

สำหรับ สาย 3 เส้น

$$D_{sc} = \sqrt[3]{(r \cdot d^2)} \quad (2.38)$$

สำหรับ สาย 4 เส้น

$$D_{sc} = 1.09 \sqrt[4]{(r \cdot d^3)} \quad (2.39)$$

2.1.4 ความนำไฟฟ้า

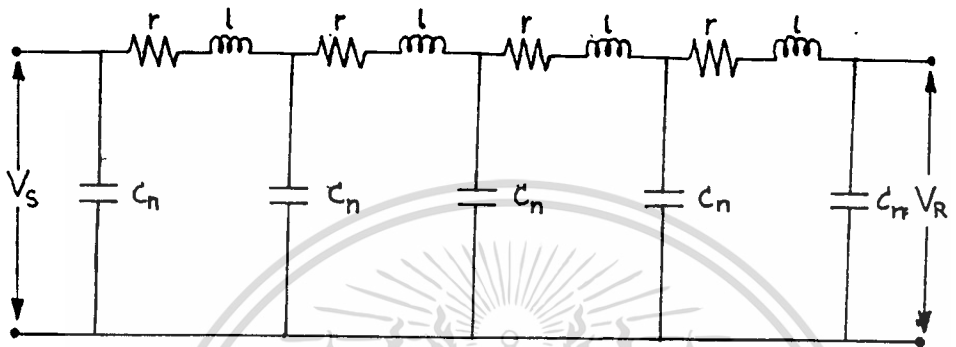
ความนำไฟฟ้าของสายส่ง เป็นพารามิเตอร์ที่เกิดเนื่องจากมีกระแสรั่ว (Leakage

Current) ที่ฉนวนลูกถ้วย กระแสรั่วที่ฉนวนลูกถ้วยโดยทั่วไปมีค่าน้อยมาก ดังนั้นความนำไฟฟ้าในการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงไม่ค่อยนำมาคิดในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของสายส่ง

สายส่งประกอบไปด้วย พารามิเตอร์ต่างๆ กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12

กำหนดให้

- R = ความต้านทานของสายส่งต่อระยะทางหนึ่งหน่วยต่อเฟส
- L = ความเหนี่ยวนำของสายส่งต่อระยะทางหนึ่งหน่วยต่อเฟส
- C = ความจุไฟฟ้าของสายส่งต่อระยะทางหนึ่งหน่วยต่อเฟสกับจุดสะเทิน
- z = อิมพีแดนซ์ของสายส่งต่อระยะทางหนึ่งหน่วยต่อเฟส
- y = แอดมิแตนซ์ของสายส่งต่อระยะทางหนึ่งหน่วยต่อเฟสกับจุดสะเทิน
- l = ความยาวของสายส่ง
- $Z = zl = (R + j \omega L) \cdot l$
- $Y = yl = (j \omega C) \cdot l \quad ; \quad \omega = 2\pi f$
- V_s = แรงดันไฟฟ้าต้นทาง (Sending-end Voltage)
- V_R = แรงดันไฟฟ้าปลายทาง (Receiving-end Voltage)
- I_s = กระแสไฟฟ้าจากต้นทาง (Sending-end Current)
- I_R = กระแสไฟฟ้าที่ปลายทาง (Receiving-end Current)

ในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า เราจำแนกสายส่งตามความยาวได้เป็น 3 ประเภท คือ

- 1) สายส่งระยะสั้น (Short Transmission Line) ความยาวต่ำกว่า 80 km

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) สายส่งระยะปานกลาง (Medium Length Line) ความยาวอยู่ระหว่าง

80 km ถึง 240 km

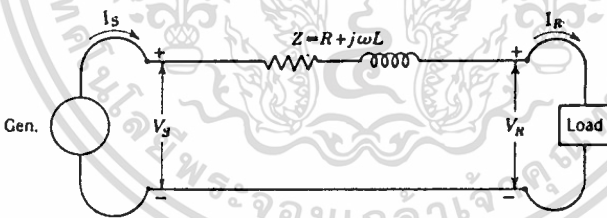
3) สายส่งระยะยาว (Long Transmission Line) ความยาวมากกว่า

240 km

ในกรณีของสายส่งระยะสั้น และสายส่งระยะยาวปานกลาง เราสามารถพิจารณาพารามิเตอร์ที่กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในสายส่ง (Uniformly Distributed) เป็นพารามิเตอร์แบบกลุ่ม (Lumped Parameter) ส่วนสายส่งระยะยาวนั้น เราจะพิจารณาพารามิเตอร์ในสายส่งเป็นแบบกระจายตามความยาวของสายส่ง (Uniformly Distributed Parameter) เท่านั้น

2.2.1 สายส่งระยะสั้น

สำหรับสายส่งระยะสั้น ผลเนื่องจากค่าความจุไฟฟ้ามีน้อยมาก ดังนั้นเมื่อไม่คิดค่าความจุไฟฟ้า จะมีแต่ค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำ เท่านั้น ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า จะหาได้ดังนี้

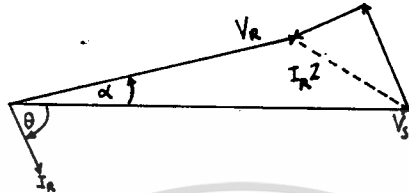
$$I_g = I_r \tag{2.40}$$

$$V_g = V_r + Z \cdot I_r \tag{2.41}$$

เนื่องเรากำหนดให้ค่า V_g เป็นตัวอ้างอิง โดยที่เราคิดว่า เมื่อเรารู้ค่าโหลดของระบบ และแรงดันไฟฟ้าต้นทาง (แรงดันที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วแปลงแรงดันขึ้นที่หม้อแปลง) แล้ว เราจะสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าจากต้นทาง และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม (Drop) ไปในสายส่งแล้ว เหลือแรงดันไฟฟ้าที่ปลายทางเท่าไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับ VU ใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถเขียนในรูปของเฟเซอร์ ไดอะแกรม (Phasor Diagram) โดยที่ โหลดที่วาง
ไปนั้นจะเป็น Lagging Power Factor ได้ดังรูปที่ 2.14

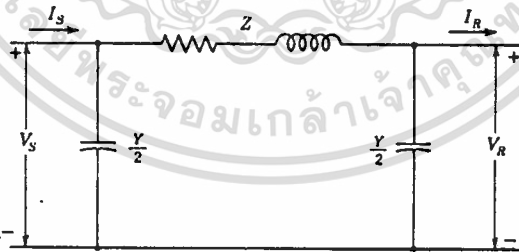


รูปที่ 2.14

2.2.2 สายส่งระยะยาวปานกลาง

วงจรสมมูลของสายส่งระยะยาวปานกลาง นี้จะประกอบด้วย ความต้านทาน, ความ
เหนี่ยวนำ และ ความจุไฟฟ้า ที่นิยมใช้กันมาก สามารถเขียนได้ 2 แบบ คือ วงจรสมมูล
แบบ π (Nominal- π) และวงจรสมมูลแบบ T (Nominal-T)

วงจรสมมูลแบบ π เขียนได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ วงจรสมมูลแบบ π จะหาได้ดังนี้

$$V_s = [1 + (ZY/2)] \cdot V_R + Z \cdot I_R \quad (2.43)$$

$$I_s = [Y + (ZY^2/4)] \cdot V_R + [1 + (ZY/2)] \cdot I_R \quad (2.44)$$

$$I_{c1} = (Y/2) \cdot V_s \quad (2.45)$$

$$I_{c2} = (Y/2) \cdot V_R \quad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

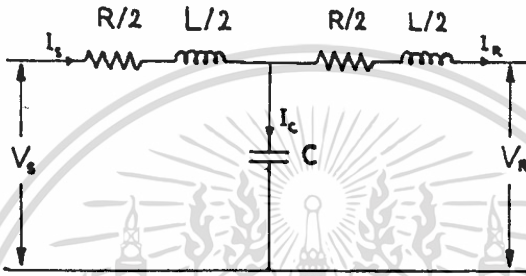
ให้:

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

$$B = Z$$

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

วงจรสมมูลแบบ T เขียนได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ วงจรสมมูลแบบ T จะหาได้ดังนี้

$$V_s = [1 + (ZY/2)] \cdot V_R + [Z + (Z^2Y/4)] \cdot I_R \quad (2.47)$$

$$I_s = Y \cdot V_R + [1 + (ZY/2)] \cdot I_R \quad (2.48)$$

$$I_C = I_s - I_R \quad (2.49)$$

ให้:

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

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

$$C = Y$$

วงจรสมมูลทั้งสองแบบสามารถเขียนในรูปของ ตัวแปร A, B, C และ D ได้ดังนี้

$$V_s = A \cdot V_R + B \cdot I_R \quad (2.50)$$

$$I_s = C \cdot V_R + D \cdot I_R \quad (2.51)$$

เขียนความสัมพันธ์ของ V_R และ I_R ในรูปของ V_s และ I_s ได้เป็น

$$V_R = D \cdot V_s - B \cdot I_s \quad (2.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ A.I.I. และ C.V. ศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ปร (2.53) งานการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก เรารู้ค่า I_R และ V_S ซึ่งเราต้องการหาค่า I_S และ V_R จากสมการที่ 2.50 และ 2.51 จะได้

$$I_S = (C.V_S + I_R)/A \tag{2.54}$$

เมื่อเราหา I_S ได้ ก็นำไปแทนในสมการที่ 2.51 ก็จะได้ค่า V_R

2.2.3 · สายส่งระยะยาว

ในการคำนวณ ค่ากระแส และแรงดันไฟฟ้า ของสายส่งที่มีความยาวมาก เราจะคำนวณ ในลักษณะพารามิเตอร์แบบกระจายตามความยาว โดยใช้สมการดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Equation) มาช่วยในการจัดรูปแบบ เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันไฟฟ้าในรูปของ ไฮเปอร์โบลิก (Hyperbolic) ได้ดังนี้

$$V_S = V_R \cosh \gamma l + I_R Z_C \sinh \gamma l \tag{2.55}$$

$$I_S = I_R \cosh \gamma l + (V_R/Z_C) \sinh \gamma l \tag{2.56}$$

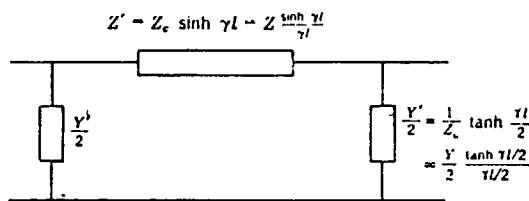
โดยที่ :

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

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

ซึ่งสามารถเขียนวงจรมุมูลย์ของสายส่งระยะยาว ได้ดังนี้

วงจรมุมูลย์แบบ π (รูปที่ 2.17)



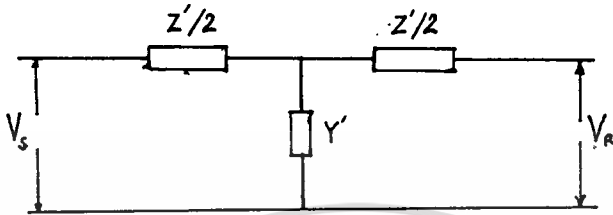
รูปที่ 2.17

โดยที่ :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ (Copyright) เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y' = Y [\tanh (\tau l / 2) / (\tau l / 2)] \tag{2.58}$$

วงจรสมมูลแบบ T (รูปที่ 2.18)



รูปที่ 2.18

โดยที่ :

$$Z' = Z [\tanh (\tau l / 2) / (\tau l / 2)] \tag{2.59}$$

$$Y' = Y (\sinh \tau l / \tau l) \tag{2.60}$$

2.3 ระบบเปอร์ยูนิต (Per Unit System : p.u)

ระบบเปอร์ยูนิตถูกนำมาใช้ ในการคำนวณ และวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังทั้งนี้เนื่องจากความง่ายในการคำนวณ และไม่ต้องกังวลเกี่ยวกับเรื่องหน่วยต่างๆ ค่า p.u เป็นอัตราส่วนของปริมาณต่อค่าอ้างอิง ซึ่งจะมีค่าน้อยๆ ส่วนมากจะเป็นเลขทศนิยม ส่วนผลคูณของจำนวนที่เป็น p.u สองจำนวนก็จะได้จำนวนใหม่ที่เป็น p.u ทั้งนี้ และข้อได้เปรียบของระบบเปอร์ยูนิตที่นำมาใช้ในการระบบไฟฟ้ากำลังก็คือ ลดปัญหาเกี่ยวกับการย้ายข้างของ กระแส, ศักดิ์ไฟฟ้า และ อิมพีแดนซ์ ระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง เมื่อต้องการคำนวณหรือวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบเปอร์ยูนิต เมื่อนำมาใช้แล้วทำให้ค่าต่างๆ อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ หรือ p.u ของค่าอ้างอิง (Reference Value) เช่น ศักดิ์ไฟฟ้าฐาน (Base Voltage) ของระบบมีค่า 200 KV ศักดิ์ไฟฟ้าขนาด 69, 33, 22, 11 KV จะมีค่าเท่ากับ 0.345, 0.165, 0.11, 0.055 p.u ตามลำดับ หรือคิดเป็น 34.5, 16.5, 11, 5.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เอกสารเปอร์ยูนิตของค่าใดๆ หมายถึงอัตราส่วนของค่านั้นๆ ต่อ ฐานที่ตั้งไว้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบไฟฟ้า จะมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้า และค่าอิมพีแดนซ์ ดังนี้

สำหรับระบบไฟฟ้าเฟสเดียว ค่ากระแสเป็น Phase Current (I_{PH}), ค่าแรงดันไฟฟ้าเป็น Line To Neutral Voltage (V_{LN}), ค่ากำลังไฟฟ้าเป็น Volt-Ampere Per Phase (VA_{1PH})

$$\begin{aligned} \text{เบสกระแสไฟฟ้า (A)} &= \frac{\text{เบสกำลังไฟฟ้า (KVA)}}{\text{เบสแรงดันไฟฟ้า (KV)}} \\ \text{เบสอิมพีแดนซ์ (\Omega)} &= \frac{(\text{เบสแรงดันไฟฟ้า KV})^2 \times 1000}{\text{เบสกำลังไฟฟ้า (KVA)}} \\ &= \frac{(\text{เบสแรงดันไฟฟ้า KV})^2}{\text{เบสกำลังไฟฟ้า (MVA)}} \end{aligned}$$

สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟส ค่ากระแสไฟฟ้าเป็น Line Current (I_L), ค่าแรงดันไฟฟ้าเป็น Line To Line Voltage (V_L)

$$\begin{aligned} \text{เบสกระแสไฟฟ้า (A)} &= \frac{\text{เบสกำลังไฟฟ้า (KVA)}}{\sqrt{3} \times \text{เบสแรงดันไฟฟ้า (KV)}} \\ \text{เบสอิมพีแดนซ์ (\Omega)} &= \frac{(\text{เบสแรงดันไฟฟ้า KV})^2 \times 1000}{\text{เบสกำลังไฟฟ้า (KVA)}} \\ &= \frac{(\text{เบสแรงดันไฟฟ้า KV})^2}{\text{เบสกำลังไฟฟ้า (MVA)}} \end{aligned}$$

จำนวนที่เป็น เปรอ์ยูนิต จะคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{p.u กระแสไฟฟ้า} &= \frac{\text{กระแสไฟฟ้าจริง (A)}}{\text{เบสกระแสไฟฟ้า (A)}} \\ \text{p.u อิมพีแดนซ์} &= \frac{\text{อิมพีแดนซ์จริง (\Omega)}}{\text{เบสอิมพีแดนซ์ (\Omega)}} \\ \text{p.u แรงดันไฟฟ้า} &= \frac{\text{แรงดันไฟฟ้าใดๆ (KV)}}{\text{เบสแรงดันไฟฟ้า (KV)}} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน **เบสแรงดันไฟฟ้า (KV)** ม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

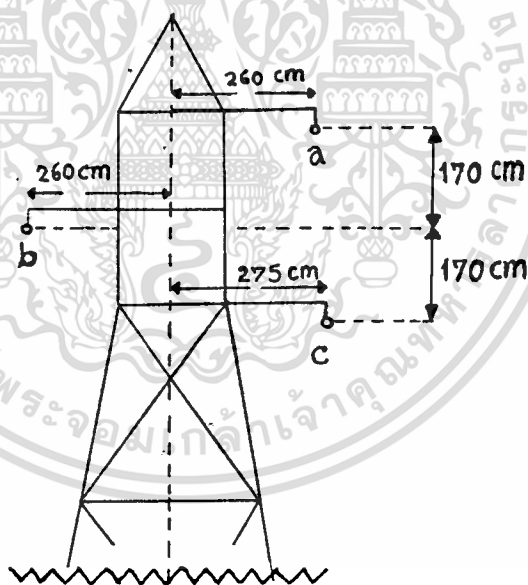
การคำนวณและการออกแบบ

3.1 การคำนวณหาพารามิเตอร์ของสายส่งที่จะจำลอง

ในปริศยานี้ เราจะจำลองสายส่งมา 2 แบบ คือ สายส่งระยะสั้น และสายส่งระยะยาวปานกลาง ซึ่งจะมีรูปแบบการจัดวางสายเหมือนกันทั้งสองแบบ ซึ่งเป็นมาตรฐานที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ ใช้อยู่

สายส่งระยะสั้น

สายส่งสามเฟส วงจรเดี่ยว สายเดี่ยว ใช้สายไฟฟ้าแบบ 477 ACSR Hawk ความยาว 61.757 km มีการจัดวางสายส่งในลักษณะ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1

จากตารางสายไฟฟ้าแบบ ACSR (ตารางที่ 2 ในภาคผนวก ก.) ดูที่ ชนิด 477 Hawk จะได้ค่าต่างๆ ดังนี้

$$GMR = 0.0289 \text{ ft} = 0.8809 \text{ cm}$$

$$\text{เส้นผ่าศูนย์กลาง} = 0.858 \text{ in} = 2.18 \text{ cm}$$

$$\text{จะได้รัศมีของสาย} = 1.09 \text{ cm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานกระแสตรงที่ $20^{\circ}\text{C} = 0.0357 \text{ } \Omega/1000 \text{ ft} = 0.1171 \text{ } \Omega/\text{km}$

เปลี่ยนค่าความต้านกระแสตรงมาที่อุณหภูมิ 50°

จากสมการที่ 2.1 จะได้

$$R_{DC} \text{ ที่ } 50^{\circ} = 0.1312 \text{ } \Omega/\text{km} = 0.2112 \text{ } \Omega/\text{mile}$$

เปลี่ยนมาเป็นความต้านกระแสลัพท์ที่ 50 Hz

จากสมการที่ 2.2 และ 2.3 จะได้

$$R_{AC} \text{ ที่ } 50 \text{ Hz} = 0.1318 \text{ } \Omega/\text{km} = 2.122 \text{ } \Omega/\text{mile}$$

จากรูปที่ 3.1 $D_{ab} = 547.08 \text{ cm}$

$$D_{bc} = 561.36 \text{ cm}$$

$$D_{ca} = 340.33 \text{ cm}$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{547.08 \times 561.36 \times 340.33} = 471.05 \text{ cm}$$

จากสมการที่ 2.16

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln(471.05 / 0.8809)$$

$$= 1.25635 \times 10^{-6} \text{ H/cm} = 1.25635 \text{ mH/km}$$

สายส่งระยะสั้น เราไม่คำนึงถึงผลของความจุไฟฟ้า

สายส่งระยะยาวปานกลาง

สายส่งสามเฟส วงจรเดี่ยว สายเดี่ยว ใช้สายไฟฟ้า แบบ 477 ACSR Hawk ความยาว 107.973 km มีลักษณะการวางสายเหมือนสายส่งระยะสั้น ดังรูปที่ 3.1

ความต้านทานต่อกิโลเมตร และความเหนี่ยวนำต่อกิโลเมตร มีค่าเท่ากับแบบสายส่งระยะสั้น ส่วนค่าความจุไฟฟ้า สามารถหาได้ดังนี้

จากสมการที่ 2.35

$$C = 55.6 \times 10^{-12} / \ln(471.05 / 1.09)$$

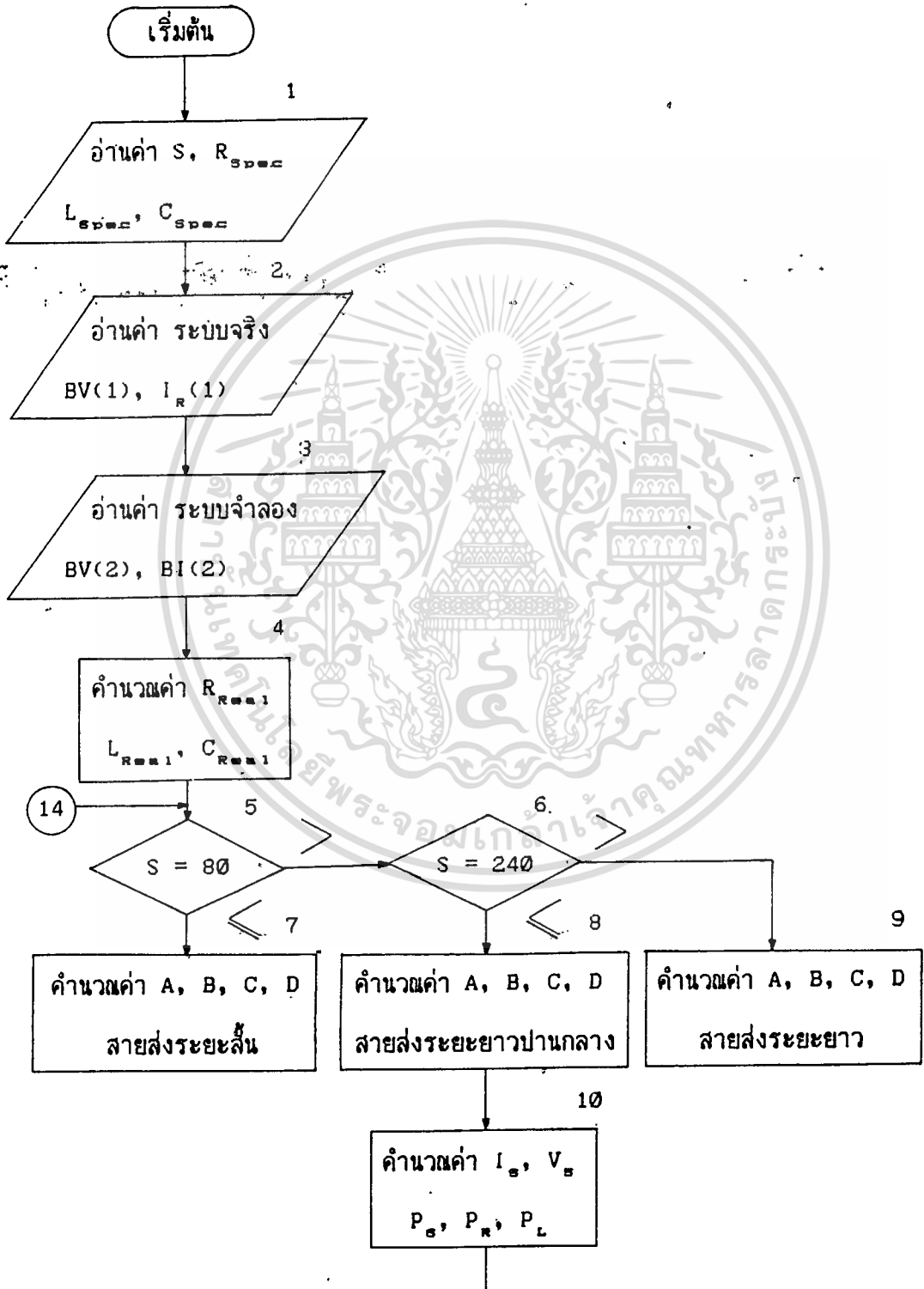
$$= 9.1616 \times 10^{-12} \text{ F/m} = 9.1616 \times 10^{-9} \text{ F/km, to neutral}$$

3.2 การใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ

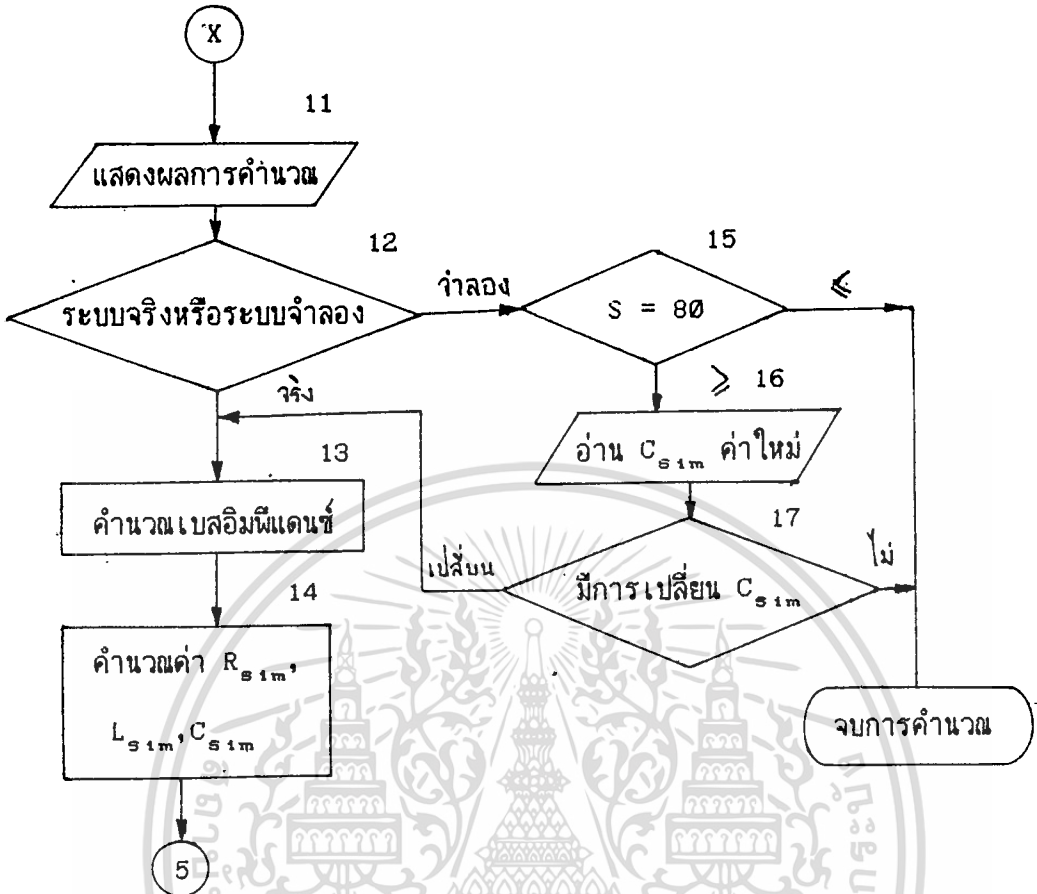
เอกสารนี้เป็นเมื่อเราได้คำนวณารามิตอร์ของสายส่งแล้ว เราจะใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณหา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าของสายส่งของระบบจริง และระบบจำลอง รวมทั้งการหาค่าความต้านทาน, ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า ของระบบจำลอง

เราสามารถเขียน Flow Chart แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จาก Flow Chart สามารถ อธิบายการทำงานของโปรแกรมเป็นส่วนใหญ่ ได้ดังนี้
ส่วนที่ 1 อ่านค่า

- ความยาวสาย (S)

ถ้าเป็นสายส่งระยะสั้น ไม่ต้องอ่านค่าความจุไฟฟ้า

- ความต้านทานของสายส่งต่อความยาวต่อเฟส (Rspec)
- ความเหนี่ยวนำของสายส่งต่อความยาวต่อเฟส (Lspec)
- ความจุไฟฟ้าของสายส่งต่อความยาวต่อเฟสกับจุดสะเทิน (Cspec)

ส่วนที่ 2 อ่านค่าของระบบจริง โดยอ้างอิงทางด้านส่ง (1 แทน ระบบจริง)

- ระดับแรงดันไฟฟ้าที่สายส่งของด้านส่งต่อเฟส (V_g) ในที่นี้ให้เป็น เบสแรงดันไฟฟ้าของระบบจริง [BV(1)] และเป็นจุดเปรียบเทียบของมุม
- กระแสของโหลดในระบบ [$I_L(1)$] และ Power Factor (p.f) ในรูปของ

มุมเครื่องหมาย (-) หมายถึง เป็นมุมล่าหลัง (Lagging) นั้นเมื่อเทียบกับจุดเปรียบเทียบของมุมการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเป็นมุมนำหน้า (Leading) เมื่อเทียบกับจุดเปรียบของมุม ไม่ต้องใส่เครื่องหมาย

ส่วนที่ 3 อ่านค่าของระบบจำลอง (2 แกน ระบบจำลอง)

- แรงดันไฟฟ้าที่ด้านส่งที่ออกมาจากหม้อแปลงเพิ่มแรงดัน ให้เป็นเบสแรงดันไฟฟ้าของระบบจำลอง [BV(2)] และเป็นจุดเปรียบเทียบของมุม

- กระแสสูงสุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบจำลองสามารถผลิตได้ ที่แปลงมายังระดับแรงดันที่จะป้อนให้สายส่ง ให้เป็นเบสกระแสของระบบจำลอง [BI(2)]

ส่วนที่ 4 คำนวณค่าความต้านทาน ($R_{R=1}$), ความเหนี่ยวนำ ($L_{R=1}$) และความจุไฟฟ้า ($C_{R=1}$) ทั้งหมดของความยาวของสายส่ง แล้วเปลี่ยนเป็นค่าอิมพีแดนซ์ ($Z_{R=1}$) และแอดมิตแตนซ์ ($Y_{R=1}$)

$$R_{R=1} = R_{Spec} \cdot S$$

$$L_{R=1} = L_{Spec} \cdot S$$

$$C_{R=1} = C_{Spec} \cdot S$$

$$Z_{R=1} = R_{R=1} + j \omega L_{R=1}$$

$$Y_{R=1} = j \omega C_{R=1}$$

ส่วนที่ 5 และส่วนที่ 6 เลือกการคำนวณว่าเป็นสายส่งชนิดใด (ระยะสั้น, ระยะยาวปานกลาง, ระยะยาว)

ส่วนที่ 7 การคำนวณค่า A, B, C, D ของสายส่งระยะสั้น เนื่องจากไม่คิดค่าความจุไฟฟ้า คือ Y เท่ากับ 0

$$A = D = 1$$

$$B = Z$$

$$C = 0$$

ส่วนที่ 8 การคำนวณค่า A, B, C, D ของสายส่งระยะยาวปานกลาง

วงจรสมมูลแบบ π

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

$$B = Z$$

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

วงจรสมมูลย์แบบ T

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

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

$$C = Y$$

ส่วนที่ 9 การคำนวณค่า A, B, C, D ของสายส่งระยะยาว

ค่า A, B, C, D เหมือนกับของสายส่งระยะยาวปานกลาง แต่เปลี่ยน Z เป็น

Z' และ Y เป็น Y' โดยที่

วงจรสมมูลย์แบบ π

$$Z' = Z (\sinh \tau l / \tau l)$$

$$Y' = Y [\tanh (\tau l / 2) / (\tau l / 2)]$$

วงจรสมมูลย์แบบ T

$$Z' = Z [\tanh (\tau l / 2) / (\tau / 2)]$$

$$Y' = Y (\sinh \tau l / \tau l)$$

ส่วนที่ 10 การคำนวณค่า กระแสที่ด้านส่ง (I_s), แรงดันที่ปลายของสายส่ง (V_R),

กำลังของด้านส่ง (P_s), กำลังทางด้านรับ (P_R) และ กำลังที่สูญเสียเนื่องจากสายส่ง (P_L)

กระแสที่ด้านส่งที่คำนวณได้ของระบบจริง ให้เป็นเบสกระแสของระบบจริง [BI(1)]

$$I_s = (C.V_s + I_R)/A$$

$$V_R = D.V_s - B.I_s$$

$$P_s = V_s \cdot I_s \cos \theta_s$$

$$P_R = V_R \cdot I_R \cos \theta_R$$

$$P_L = P_s - P_R$$

โดยที่ :

$$\theta_s = \text{มุมระหว่าง } V_s \text{ กับ } I_s$$

$$\theta_R = \text{มุมระหว่าง } V_R \text{ กับ } I_R$$

ส่วนที่ 11 แสดงผลค่าต่างๆ ที่คำนวณไว้ของแต่ละระบบออกมา ขึ้นอยู่กับว่า กำลังคำนวณ

อยู่ในระบบใด ก็จะแสดงผลของระบบนั้นออกมา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 12 เปรียบเทียบว่าระบบที่ทำการคำนวณอยู่นั้นเป็นระบบใด ถ้าเป็นระบบจริง ก็ให้ไปที่ส่วนที่ 13 ถ้าเป็นระบบจำลองให้ไปที่ ส่วนที่ 15

ส่วนที่ 13 คำนวณค่าเบสอิมพีแดนซ์ ของระบบจริง BZ(1) และระบบจำลอง BZ(2)

$$BZ(1) = BV(1)/BI(1)$$

$$BZ(2) = BV(2)/BI(2)$$

ส่วนที่ 14 การคำนวณของระบบจำลอง เริ่มจาก คำนวณค่าความต้านทาน (R_{S1m}), ความเหนี่ยวนำ (L_{S1m}) และความจุไฟฟ้า (C_{S1m}) ของระบบจำลอง แล้วเปลี่ยนเป็น ค่าอิมพีแดนซ์ (Z_{S1m}) และแอดมิตแตนซ์ (Y_{S1m})

$$R_{S1m} = R_{R=1} \cdot BZ(1) / BZ(2)$$

$$L_{S1m} = L_{S1m} \cdot BZ(1) / BZ(2)$$

$$C_{S1m} = C_{R=1} \cdot BZ(2) / BZ(1)$$

$$Z_{S1m} = R_{S1m} + j \omega L_{S1m}$$

$$Y_{S1m} = j \omega C_{S1m}$$

ส่วนที่ 15 เปรียบเทียบว่า ถ้าเป็นสายส่งระยะสั้นก็ จบการคำนวณ ถ้าเป็นสายส่งระยะยาวปานกลาง หรือระยะยาว ก็ทำต่อไปที่ ส่วนที่ 16

ส่วนที่ 16 ให้ถามว่า จะเปลี่ยนค่า C_{S1m} หรือไม่ ถ้าค่าของ C_{S1m} ไม่ตรงกับค่าที่เราสามารถจะหาได้ เราจะเปลี่ยนเบสกระแสของระบบจำลองใหม่ โดยมีค่าที่ ทำให้ค่าของ C_{S1m} ตรงกับที่เราสามารถหาได้ เนื่องจาก C_{S1m} ขึ้นกับ BZ(2) ซึ่ง BZ(2) นั้นขึ้นกับ BI(2) ในที่นี้เราจะเปลี่ยนค่า C_{S1m} ให้เป็นค่าที่เราหาได้ แต่ต้องทำให้ค่า BI(2) เหมาะสมกับการผลิตกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ (R_{S1m} , L_{S1m} นั้นเราสามารถหาได้ โดยที่ R_{S1m} นั้นมีค่าความต้านทานแบบปรับค่าได้ หรือไม่ก็ใช้ลวดต้านทานมาสร้างค่าที่เราต้องการ ส่วน L_{S1m} นั้นเราสร้างขึ้นมาได้ ตามค่าที่เราต้องการ)

ส่วนที่ 17 เปรียบเทียบว่ามีการสั่งให้เปลี่ยน C_{S1m} หรือไม่ ถ้าไม่ ก็ให้จบการคำนวณ ถ้าเปลี่ยน ให้ไปที่ ส่วนที่ 13

ผลของการคำนวณเมื่อใช้คอมพิวเตอร์

๓ ๕

สายส่งระยะยาวปานกลาง มีระดับแรงดันที่ต้นทาง เท่ากับ 117.8 KV และมี
กระแสไหลลด เท่ากับ 76.๐86 A Lagging Power Factor เท่ากับ ๐.814 ส่วนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้หาไว้แล้วในหัวข้อ 3.1

ดังนั้น จากข้อมูลของระบบจริง จะได้

$$BV(1) = 117.8/\sqrt{3} = 68.๐12 \text{ KV}$$

$$I_{R1} = 76.๐86 \text{ A}$$

ระบบจำลองที่สร้างขึ้นได้กำหนดให้ แรงดันที่ออกมาจากหม้อแปลง เพิ่มแรงดันที่บ่อนให้
สายส่งมีค่าเท่า 415 V และกระแสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายได้เท่ากับ 8.6 A

$$BV(2) = 415/\sqrt{3} = 239.6 \text{ V}$$

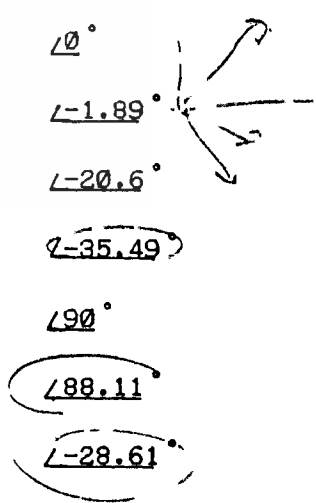
เนื่องจาก กระแสที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 220 V มีค่าเท่ากับ 8.6 A
ดังนั้นกระแสที่แปลงมาที่ระดับแรงดันของสายส่ง 415 V จะมีค่าเท่ากับ $(220/415) \times 8.6 = 4.56 \text{ A}$ ดังนั้น

$$BI(2) = 4.56 \text{ A}$$

จากข้อมูลเหล่านี้ จะคำนวณค่าต่างๆ ออกมาได้ดังนี้ (คิดต่อเฟส)

วงจรมุมศูนย์แบบ π

	ระบบจริง		ระบบจำลอง	
V_s	68.๐12	KV	239.6๐๐	V
V_R	65.713	KV	231.5๐2	V
I_s	66.5๐5	A	4.56๐	A
I_R	76.๐86	A	5.217	A
I_{cs}	1๐.572	A	๐.725	A
I_{cR}	1๐.215	A	๐.7๐๐	A
I_L	7๐,938	A	4.864	A
P_s	12.7๐1	MW	3.๐68	KW
P_R	12.492	MW	3.๐17	KW



เอกสารนี้ เป็นเอกสารที่ส่ง ๐.2๐9 MW ใช้งานเพื่อการสี ๐.๐51 นี้ KW อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 R_{R_{eq1}} &= 14.231 \ \Omega & , & & R_{S1m} &= 0.731 \ (\Omega) \\
 L_{R_{eq1}} &= 135.652 \ \text{mH} & , & & L_{S1m} &= 6.970 \ (\text{mH}) \\
 C_{R_{eq1}} &= 0.989 \ \mu\text{F} & , & & C/2_{S1m} &= 9.626 \ (\mu\text{F})
 \end{aligned}$$

เนื่องจากเราไม่สามารถหาค่าความจุไฟฟ้าที่มีขนาดเท่ากับที่คำนวณได้ ประกอบกับในส่วน
 ของระบบป้องกัน ต้องการให้กระแสที่ไหลในสายส่งมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 2 A เนื่องจากจะ
 ตั้ง ให้ค่ากระแสที่เป็นค่า โอเวอร์ เคอร์เรนท์ และกระแสเนื่องจากฟลัด มีค่าสูงมากไม่ได้
 เพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ ผลิตรกระแสได้เพียง 8.6 A เท่านั้น เมื่อแปลงมาที่ระดับแรง
 ดันของสายส่งก็จะเหลือเพียง 4.56 A เท่านั้น เราจึงเปลี่ยน C_{S1m} เป็น 4 μF ซึ่งเป็นค่าที่
 เหมาะสมกับความต้องการที่จะให้ค่ากระแสที่สายส่งมีค่าประมาณ 2 A

เมื่อเปลี่ยน ค่า $C_{S1m} = 4 \ \mu\text{F}$ ค่าต่างๆ ของระบบจำลอง จะมีผลออกมาดังนี้

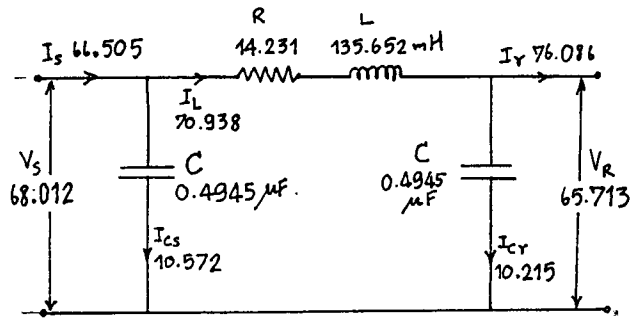
ระบบจำลอง

$$\begin{aligned}
 V_S &= 239.600 \ \text{V} & /0^\circ \\
 V_R &= 231.502 \ \text{V} & /-1.89^\circ \\
 I_S &= 1.895 \ \text{A} & /-20.6^\circ \\
 I_R &= 2.168 \ \text{A} & /-35.49^\circ \\
 I_{CS} &= 0.301 \ \text{A} & /90^\circ \\
 I_{CR} &= 0.291 \ \text{A} & /88.11^\circ \\
 I_L &= 2.021 \ \text{A} & /-28.61^\circ \\
 P_S &= 1.275 \ \text{KW} & , & P_R &= 1.254 \ \text{KW} \\
 \therefore P_L &= 21 \ \text{W}
 \end{aligned}$$

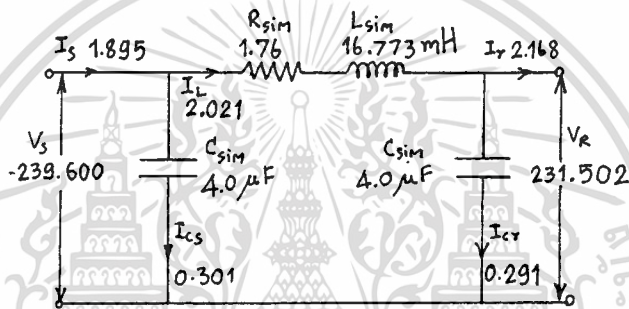
$$\begin{aligned}
 R_{R_{eq1}} &= 14.231 \ (\Omega) & , & & R_{S1m} &= 1.760 \ (\Omega) \\
 L_{R_{eq1}} &= 135.652 \ (\text{mH}) & , & & L_{S1m} &= 16.773 \ (\text{mH}) \\
 C_{R_{eq1}} &= 0.989 \ (\mu\text{F}) & , & & C/2_{S1m} &= 4.000 \ (\mu\text{F})
 \end{aligned}$$

ซึ่งในรูปที่ 3.2 จะเป็นวงจรสมมูลย์ แบบ π แสดงไว้ต่อเฟส ของระบบจริง (รูปที่
 3.2 ก) และระบบจำลอง (รูปที่ 3.2 ข) ซึ่งสามารถ เขียนแสดงในรูปของ สามเฟสได้ดัง

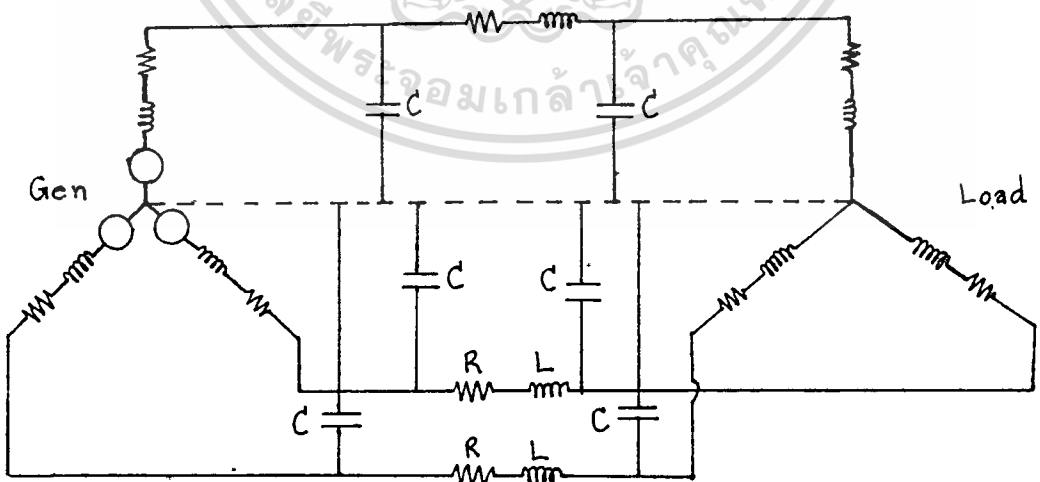
เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ก (ระบบจริง)



รูปที่ 3.2 ข (ระบบจำลอง)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่รูปที่ 3.3 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายส่งระยะสั้น มีระดับแรงดันต้นทางเท่ากับ 113 KV และ กระแสไหลเท่ากับ 61.743 A Lagging Power Factor เท่ากับ 0.926 ส่วนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้หาไว้แล้วในหัวข้อ 3.1

จากข้อมูลของระบบจริง จะได้

$$BV(1) = 113/\sqrt{3} = 65.241 \text{ KV}$$

$$I_R(1) = 61.743 \text{ A}$$

ข้อมูลของระบบจำลอง ใช้เบสกระแส ค่าเดียวกับของสายส่งแบบระยะยาวปานกลาง (ที่ $C_{s1m} = 4 \text{ MF}$)

$$BV(2) = 415/\sqrt{3} = 239.6 \text{ V}$$

$$BI(2) = 1.895 \text{ A}$$

เมื่อเราใส่ข้อมูลเหล่านี้ ให้คอมพิวเตอร์ จะได้ ผลลัพธ์ออกมาดังนี้

	<u>ระบบจริง</u>	<u>ระบบจำลอง</u>	
V_S	65.241 KV	239.600 V	0°
V_R	64.21 KV	235.853 V	-1.07°
I_S	61.743 A	1.895 A	-22.09°
I_R	61.743 A	1.895 A	-22.09°
P_S	11.197 MW	1.262 KW	
P_R	11.102 MW	1.252 KW	
P_L	0.095 MW	10.493 W	

$$R_{R_{real}} = 8.140 \text{ } (\Omega) \quad , \quad R_{s1m} = 0.974 \text{ } (\Omega)$$

$$L_{R_{real}} = 77.588 \text{ } (mH) \quad , \quad L_{s1m} = 9.284 \text{ } (mH)$$

สรุป ค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง ที่ระบบจำลอง

สายส่งระยะยาวปานกลาง แบบ π

$$R_{s1m} = 1.760 \text{ } \Omega$$

$$L_{s1m} = 16.773 \text{ } mH$$

$$C/2_{s1m} = 4.000 \text{ } MF$$

สายส่งระยะสั้น

$$R_{s1m} = 0.974 \Omega$$

$$L_{s1m} = 9.284 \text{ mH}$$

3.3 การออกแบบและสร้างตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นจะใช้แกนเหล็ก EI การออกแบบพิจารณาจาก รูปการวางแกนเหล็ก EI ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยเริ่มจากสมการของค่าความเหนี่ยวนำคือ

$$L = N^2 A \cdot (dB/dNI)$$

เมื่อ NI คือ ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) ของวงจรแม่เหล็ก ซึ่งมีค่าเป็น

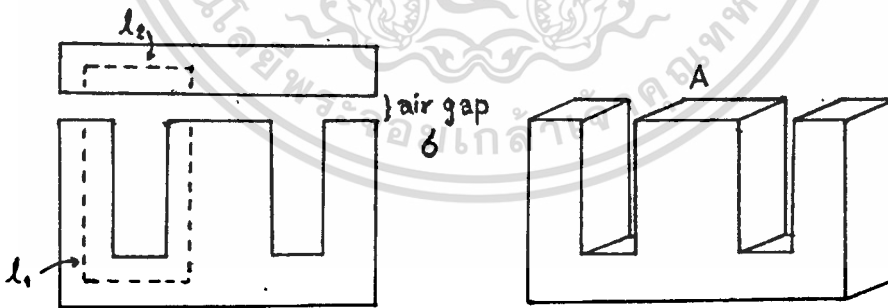
$$\text{mmf} = NI = (B_1 l_1 / \mu_0 \mu_{r1}) + (B_2 l_2 / \mu_0 \mu_{r2}) + (2\sigma B_g / \mu_0)$$

โดยที่ :

σ = ระยะแอร์แก๊ป

μ_0 = เฟอร์มิเอบิลิตี (Permeability) ของอากาศ

μ_{r1}, μ_{r2} = เฟอร์มิเอบิลิตีของแกนเหล็กส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2



รูปที่ 3:4

สมมติให้ $B_1 = B_2 = B_g = B$

เมื่อ $\mu_{r1} \gg \mu_0$ และ $\mu_{r2} \gg \mu_0$ ดังนั้น สมการข้างบน สามารถจัดใหม่ได้

เป็น

$$\text{mmf} = NI = 2\sigma B / \mu_0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหนี่ยวนำคือ

$$L = N^2 \mu_0 / 2\sigma$$

สมการนี้เป็นเพียงค่าประมาณโดย ไม่คิดค่าของ μ_{r1} และ μ_{r2} ซึ่งมีค่ามาก เมื่อเทียบกับ μ_0 ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จริงๆ ในการปฏิบัติจะไม่แปรผันตรงกับจำนวนรอบกำลังสอง

สมการนี้จะถูกนำไปใช้ ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ แต่ในการออกแบบจริงแล้วจะต้องพิจารณาระยะห่างของแกน EI (แอร์แก๊ป) ต่ำสุด ซึ่งจะทำให้ตัวเหนี่ยวนำอ้อมตัว สมมติให้ mmf ที่เกิดขึ้นบนวงจรมแม่เหล็กจะปรากฏบนระยะห่างของแกน EI และปริมาณสนามแม่เหล็กสูงสุด (B_{max}) จะเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลสูงสุด (I_{max}) ซึ่งจะได้สมการของ mmf คือ

$$Ni_{max} = H_{max} \cdot 2\sigma_{min}$$

และ

$$B_{max} = \mu_0 H_{max}$$

เมื่อ H คือ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

สมการ 2 สมการข้างบนนี้สามารถจัดใหม่ได้เป็น

$$\sigma_{min} \geq (Ni_{max} \cdot \mu_0 / 2B_{max})$$

ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องให้ระยะแอร์แก๊ปไม่น้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ในสมการข้างบน

ค่าความเหนี่ยวนำของ Short Line ในระบบจำลองคือ 9.284 mH

จากสมการ $L = (N^2 \mu_0 / 2\sigma)$

เมื่อใช้แกนเหล็ก EI ขนาด 2"x2" และปรับระยะแอร์แก๊ปเป็น 2 มม.

ดังนั้นจำนวนรอบที่ต้องพัน คือ 108 รอบ

และจากสมการ $\sigma_{min} \geq (Ni_{max} \cdot \mu_0 / 2B_{max})$

เมื่อ จำนวนรอบ เป็น 108 รอบ

i_{max} ที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำในระบบ Short Line คือ 1.895 แอมป์

ค่า B_{max} ที่ใช้มีค่าเป็น 0.5 เทสลา

จะได้ $\sigma_{min} > 0.257$ มม.

เอกสารนี้ ดึงขึ้น เอกสารนี้ใช้สำหรับอ้างอิงเท่านั้น ไม่ทำให้แกนเหล็กอ้อมตัวไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งระยะยาวปานกลาง ในระบบจำลองคือ 16.773 mH

จากสมการ $L = (N^2 \mu_0 / 2\sigma)$

เมื่อใช้แกนเหล็ก EI ขนาด 2"x2" และปรับระยะแอร์เก็บเป็น 2 มม.

ดังนั้นจำนวนรอบที่ต้องพันคือ 144 รอบ

และจากสมการ $\sigma_{min} \geq (N i_{max} \cdot \mu_0 / 2B_{max})$

เมื่อจำนวนรอบเป็น 144 รอบ

i_{max} ที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำในระบบสายส่งระยะยาวปานกลาง คือ 2.02 แอมป์

ค่า B_{max} ที่ใช้ มีค่าเป็น 0.5 เทสลา

จะได้ $\sigma_{min} \geq 0.366$ มม.

ดังนั้นเมื่อใช้ระยะแอร์เก็บเป็น 2 มม. จะไม่ทำให้แกนเหล็กอึดตัวเช่นกัน

3.4 การออกแบบและสร้างหม้อแปลง

หม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด (Two Winding) ชุดที่ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เรียกว่า ขดปฐมภูมิ (Primary Winding) โดยมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ V_1 และชุดที่ต่อไปยังโหลดเรียกว่า ขดทุติยภูมิ (Secondary Winding) โดยมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ V_2 จำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ เท่ากับ N_1 และ N_2 ตามลำดับ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์

$$\text{Transformation Ratio} = V_1 / V_2 = N_1 / N_2 = a$$

ขั้นตอนในการออกแบบหม้อแปลง สามเฟส แบบ Core Type

1) กำหนดขนาดชนิดต่างๆ ของหม้อแปลงที่ต้องการว่ามีขนาด VA เท่าไร แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ (V_1) และทางด้านทุติยภูมิ (V_2) เป็นเท่าไร (โดยคิดต่อเฟส)

2) หาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (A) โดยใช้สูตร

$$A = \sqrt{VA/5.58} \quad \text{ตารางนิ้ว (VA คิดต่อเฟส)}$$

หรือ ใช้วิธีการคำนวณแบบ โวลต์ต่อรอบ (Volt Per Turn) เพื่อหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่ง V/N สำรับ 4.44 rBA เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ :

V = แรงดันไฟฟ้าต่อเฟส

B = ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Tesla)

f = ความถี่ (Hz) ; ในประเทศไทยใช้ 50 Hz

โดยกำหนดให้ V/N เป็นเท่าไรก็ได้ แล้วแต่ความเหมาะสม จะได้พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก หน่วยเป็น ตารางเมตร

3) หาจำนวนรอบของขดลวด (N) ทั้งทางปฐมภูมิ (N_1) และทางทุติยภูมิ (N_2)

โดยใช้สูตร

$$V = 4.44 f N B A$$

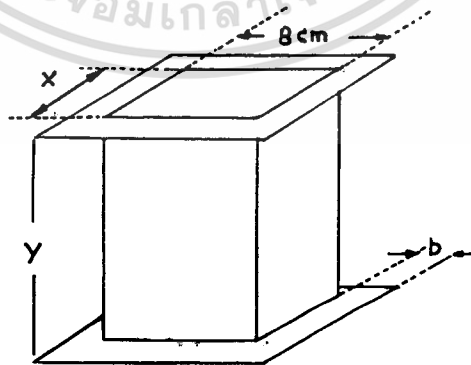
4) หากระแสในขดลวด (I) ทั้งทาง ปฐมภูมิ (I_1) และทางทุติยภูมิ (I_2) โดย

ใช้สูตร

$$I = VA / \sqrt{3} V_L$$

5) หาขนาดของขดลวด โดยเปิดตารางหาเบอร์ของขดลวดที่สามารถทนกระแสได้ตามค่าของ I_1 และ I_2 จดขนาดพื้นที่หน้าตัด (Ac) ไว้ จากนั้น ก็หาค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวดทั้งทางปฐมภูมิ (d_1) และทุติยภูมิ (d_2) โดยใช้สูตร

$$d = 2\sqrt{(Ac/\pi)}$$



รูปที่ 3.5

6) หาขนาดของ Bobbin ซึ่งจะมีขนาดเท่าไร ขึ้นอยู่กับว่าเราเลือกใช้แกน

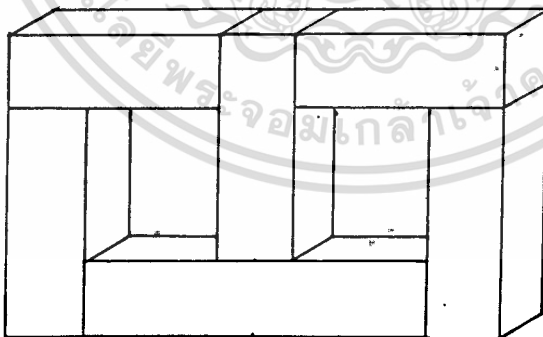
เหล็กที่มีขนาดเท่าไร เช่น เหล็กขนาด 8 cm (ความกว้างของเหล็ก) จะหาระยะ X ของการคำนวณไว้ก่อนแล้วหรือไม่ ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bobbin (ดูจากรูปที่ 3.5) ได้ โดยที่ $X = A/8$ (cm) ระยะ Y ของ Bobbin ขึ้นอยู่กับว่าเราต้องการพันขดลวดของขดปฐมภูมิกี่ชั้น และขดทุติยภูมิกี่ชั้น เช่น ถ้าเอาขดปฐมภูมิเป็นหลัก โดยจะพันให้ได้ 3 ชั้นเต็มพอดี จะได้ว่า จำนวนรอบของขดลวดในแต่ละชั้นเท่ากับ $(N_1/3)$ ดังนั้นระยะ Y ของ Bobbin จะมีค่าเท่ากับ $(N_1/3) \cdot d_1$ เมื่อเรารู้จำนวนชั้นของการพันแล้วก็สามารถหาปีก ของ Bobbin (b) ได้เท่ากับ $[(\text{จำนวนชั้นของขดปฐมภูมิ} \times d_1) + (\text{จำนวนชั้นของขดทุติยภูมิ} \times d_2)]$ ซึ่งค่า b นี้จะมากกว่าที่คำนวณก็ได้

7) หาน้ำหนักของขดลวดทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ

- โดยการหาความยาว (L) ของ N_1, N_2 ที่ใช้พันทั้งหมดจริงๆ
- เอาพื้นที่หน้าตัดของขดลวด (A_c) ของ N_1, N_2 มาคูณเพื่อหาปริมาตรของขดลวด N_1, N_2 ทั้งหมด
- นำค่าความถ่วงจำเพาะของขดลวดมาคูณปริมาตรที่ได้ ก็จะได้ค่าน้ำหนักของขดลวดทั้ง N_1, N_2 ใน 1 เฟส ดังนั้น จะหา 3 เฟส ก็คูณด้วย 3

8) หาน้ำหนักของเหล็ก ก็ด้วยการหาปริมาตรมาคูณกับความถ่วงจำเพาะในทำนองเดียวกัน แต่หาโดยคิดเป็นเหล็ก 6 ส่วน ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6

การหาน้ำหนักของแกนเหล็กและขดลวด ก็เฝ้าหาจุดที่หม้อแปลงมีราคาถูกและมีน้ำหนักพอสมควร คือ หม้อแปลงที่มีราคาถูก จะต้อง มีราคาของเหล็กเท่ากับราคาของขดลวด

การออกแบบของหม้อแปลงที่ใช้ในปฏิกรณ์นิวเคลียร์นี้ การสร้างหม้อแปลงขึ้นมา เราคำนึง

ถึง ความสะดวกในการจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้สร้างหม้อแปลง ที่ ดังนั้นการออกแบบจึงไม่ค่อยจะเป็นไปอย่างกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามขั้นตอนของทฤษฎี แต่เป็นไปตามความเหมาะสมมากกว่า

หม้อแปลง ตัวที่ 1 ทำหน้าที่เพิ่มแรงดันไฟฟ้า จาก 220 v. ไปเป็น 415 v.

หม้อแปลง ตัวที่ 2 ทำหน้าที่ลดแรงดันไฟฟ้า จาก 415 v. มาเป็น 220 v.

ซึ่งหม้อแปลงทั้ง 2 ตัว ต้องรับกระแสไฟฟ้าด้านแรงดันต่ำ (220 v) ได้ประมาณ 10 Amp (เลือกขึ้นมา โดยให้สอดคล้องกับพิกัดของกระแสของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า) แต่ลวดทองแดง ที่เราหาได้เป็นลวดเบอร์ 14 ซึ่งทนกระแสได้ถึง 20 Amp ดังนั้น เราจึงเลือกลวดทองแดงเบอร์นี้ ซึ่งมีจำนวนมากพอที่จะ พันได้ทั้ง ขดปฐมภูมิ และขดทุติยภูมิ โดยใช้ลวดเบอร์เดียวกัน ดังนั้นหม้อแปลงที่สร้างขึ้น จะมีพิกัดกำลังถึง 7.5 KVA

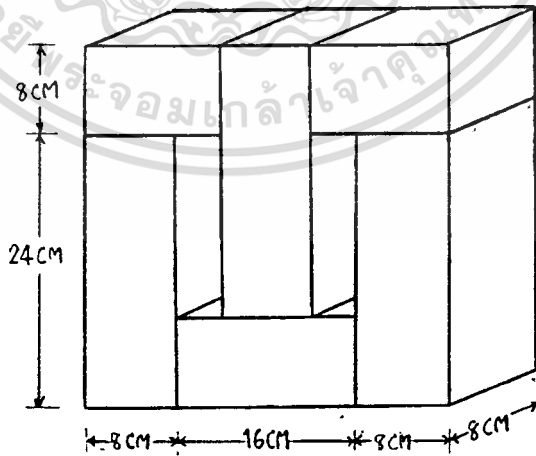
เนื่องจากมีเหล็กขนาด 8 cm ดังนั้น เราจึงเลือกพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กเท่ากับ 64 cm² ดังนั้นเราจะหา N₁ และ N₂ ได้ โดยกำหนดให้ B มีค่าต่ำๆ เพื่อป้องกันการอิ่มตัวของแกนเหล็ก ในที่นี้เราเลือก B เท่ากับ 1.05 Tesla

$$N = V / (4.44 fBA)$$

$$N_1 = 85 \text{ รอบ}$$

$$N_2 = 161 \text{ รอบ}$$

เนื่องจากมีเหล็ก 8x12 cm, 8x16 cm, 8x24 cm อยู่ เรานำมาจัดรูปแกนเหล็ก จะได้ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7

จากรูปที่ 3.7 ระยะ Y ของ Bobbin เท่ากับ 16 cm แต่ความหนาของ Bobbin เท่ากับ 0.5 cm ดังนั้น จะเหลือเนื้อที่ให้พันขดลวดได้ 16 - 2(0.5) = 15 cm พิกของ

เอก Bobbin มีขนาดได้ไม่เกิน (4/2) = 2 cm การศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลวดเบอร์ 14 มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.2048 cm ดังนั้น ในแต่ละชั้นจะพันลวด
ได้เท่ากับ $15/0.2048 = 73$ รอบ เนื่องจากเราใช้ลวดเบอร์เดียวกันทั้งสองชุด ดังนั้นรอบ
รวมของชุดลวดทั้งหมดเท่ากับ $85+161 = 246$ รอบ เพราะฉะนั้นจะต้องพันลวด
($246/73$) ประมาณ 3 ชั้น จะมีความหนาของชุดลวดที่พัน (3×0.2048) = 0.6144 cm ซึ่ง
ไม่เกินระยะปีกของ Bobbin ที่สามารถทำได้ ดังนั้นจะออกแบบขนาดของ Bobbin ได้ ดัง
แสดงไว้ในภาคผนวก ข.



บทที่ 4

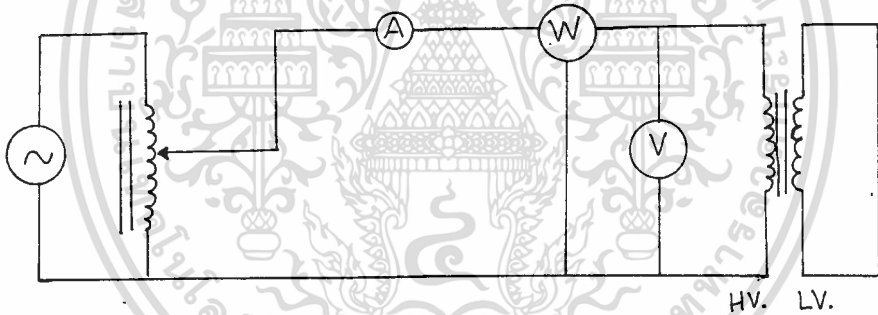
ผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบหม้อแปลง

การทดสอบหม้อแปลงเป็นส่วนสำคัญในการหา พารามิเตอร์ต่างๆ ของหม้อแปลงซึ่งทำให้หาจรรยาสมมุขณ์ของหม้อแปลงทั้งตัวได้ โดยหาค่าต่างๆ ทางด้านใดก็ได้ ซึ่งจากจรรยาสมมุขณ์นี้ทำให้เราหาวประสิทธิภาพ, เรกกูเลชันของหม้อแปลง และค่าอื่นๆ อีกตามต้องการ โดยแบ่งเป็น 2 ตอน

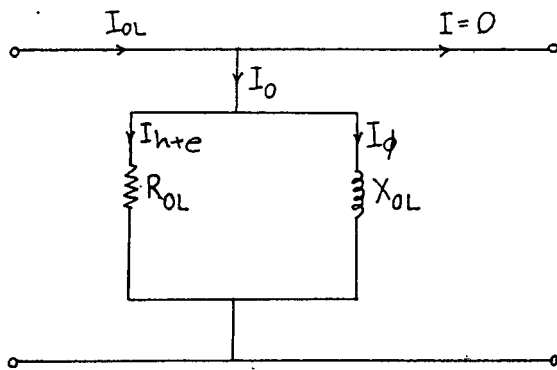
1) Open Circuit Or No Load Test

เพื่อหาส่วนสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) ค่า R_o , X_o ได้โดยมักจะทำการเปิดวงจรทางด้านแรงดันสูงและวัดทางด้านแรงต่ำ



รูปที่ 4.1

แล้วปรับแรงดันให้สูงเท่ากับพิกัดทางด้านแรงดันต่ำ วัดค่า จะได้ V_{o1} , W_{o1} และ I_{o1}



รูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่า R_{o1} และ X_{o1}

จาก $W_{o1} = \sqrt{3} V_{o1} \times I_{o1} \times \cos \theta_{o1}$

$\cos \theta_{o1} = W_{o1} / (\sqrt{3} \times V_{o1} \times I_{o1})$

$I_{n+e} = I_{o1} \times \cos \theta_{o1}$

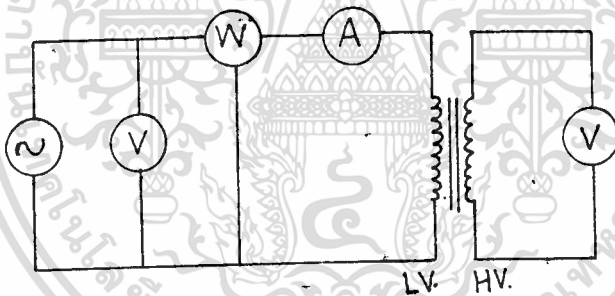
$I\theta = I_{o1} \times \sin \theta_{o1}$

$R_{o1} = V_{o1} / I_{n+e}$

$X_{o1} = V_{o1} / I\theta$

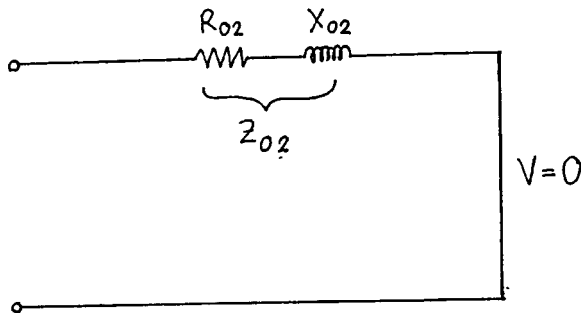
2) Short Circuit Or Impedance Test

เพื่อหาส่วนสูญเสียในขดลวดทองแดง (Cu Loss) ค่า Leakage Reactance (X_{o1} หรือ X_{o2}) ความต้านทานสมมูลย์ (R_{o1} หรือ R_{o2}) และค่า เรกกูเลชั่น โดยมักจะทำการ ลัดวงจรทางด้าน LV และวัดทางด้าน HV ดังรูป



รูปที่ 4.3

แล้วปรับกระแสทางด้าน HV ให้สูงเท่ากับพิกัด วัดค่า I_{sc} , W_{sc} และ V_{sc}



รูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{O2} = W_{sc} / (I_{sc})^2$$

$$Z_{O2} = V_{sc} / I_{sc}$$

$$X_{O2} = \sqrt{(Z_{O2})^2 - (R_{O2})^2}$$

ผลการทดสอบหม้อแปลง

TR	การทดสอบวงจรเปิด				TR	การทดสอบลัดวงจร			
	N	W_{OL}	V_{OL}	I_{OL}		N	W_{O2}	V_{O2}	I_{O2}
1	161	38	220	0.533	1	161	78	11	4.46
2	161	38	220	0.573	2	161	78	10	4.52

การทดลองลัดวงจร มาหาค่า X_{O2} และ R_{O2}

หม้อแปลงตัวที่ 1 : $W_{OL} = 38$ วัตต์, $V_{OL} = 220$ โวลต์, $I_{OL} = 0.533$ แอมป์

$$\begin{aligned} \cos \theta_{OL} &= W_{OL} / \sqrt{3} V_{OL} I_{OL} \\ &= 0.1871 \end{aligned}$$

ดังนั้น $\sin \theta_{OL} = 0.98234$

$$\begin{aligned} I_{H+M} &= I_{OL} \cdot \cos \theta_{OL} \\ &= 0.0997 \quad \text{แอมป์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{\phi} &= I_{OL} \cdot \sin \theta_{OL} \\ &= 0.5236 \quad \text{แอมป์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{OL} &= V_{OL} / I_{H+M} \\ &= 2206.62 \quad \text{โอห์ม} \end{aligned}$$

$$X_{OL} = V_{OL} / I_{\phi}$$

$$= 420.168 \quad \text{โอห์ม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในหอการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกัน

หม้อแปลงตัวที่ 2 : $W_{oL} = 38$ วัตต์, $V_{oL} = 220$ โวลต์, $I_{oL} = 0.5733$ แอมป์

$$R_{oL} = 2205.51 \text{ โอห์ม}$$

$$X_{oL} = 389.725 \text{ โอห์ม}$$

หาค่า R_{o2} , X_{o2}

หม้อแปลงตัวที่ 1 : $W_{sc} = 78$ วัตต์, $V_{sc} = 11$ โวลต์, $I_{sc} = 4.46$ แอมป์

$$R_{o2} = \frac{W_{sc}}{3 I_{sc}^2} = 1.307 \text{ โอห์ม}$$

$$Z_{o2} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = 1.424 \text{ โอห์ม}$$

$$X_{o2} = \sqrt{Z_{o2}^2 - R_{o2}^2} = 0.565 \text{ โอห์ม}$$

แต่

$$R'_{o2} = a^2 \cdot R_{o2} \quad (a = 220/415)$$

$$= 0.3673 \text{ โอห์ม}$$

$$X'_{o2} = a^2 \cdot X_{o2} = 0.15878 \text{ โอห์ม}$$

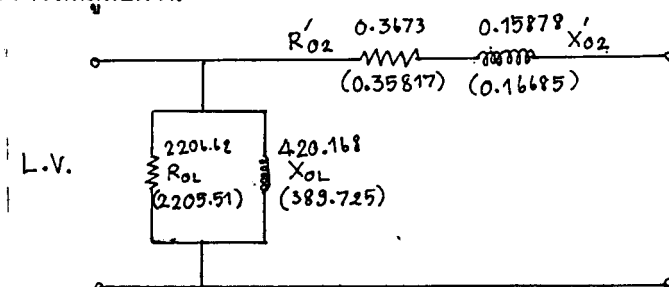
ในทำนองเดียวกัน

หม้อแปลงตัวที่ 2 : $W_{sc} = 78$ วัตต์, $V_{sc} = 10$ โวลต์, $I_{sc} = 4.516$ แอมป์

$$R'_{o2} = 0.35817 \text{ โอห์ม}$$

$$X'_{o2} = 0.16685 \text{ โอห์ม}$$

ซึ่งจะได้วงจรสมมูลดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานรูปที่ 4.5 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ ตัวเลขนอกวงเล็บคือ ค่าของหม้อแปลงตัวที่ 1

ตัวเลขในวงเล็บคือ ค่าของหม้อแปลงตัวที่ 2

ประสิทธิภาพของหม้อแปลง

ประสิทธิภาพ = 1-Loss/Input

หม้อแปลงตัวที่ 1 : Loss = Cu Loss + Core Loss
= 116 วัตต์

ที่ p.f. เป็น 1 : ประสิทธิภาพ = 1- Loss/Input
= 96.46 %

ที่ p.f. เป็น 0.8 : ประสิทธิภาพ = 1- Loss/Inputx0.8
= 95.57 %

หม้อแปลงตัวที่ 2 : Loss = 116 วัตต์

ที่ p.f. เป็น 1 : ประสิทธิภาพ = 96.46 %

ที่ p.f. เป็น 0.8 : ประสิทธิภาพ = 95.57 %

เร็กกูเลชันของหม้อแปลง

% เร็กกูเลชัน = $(E_2 - V_2) \times 100 / E_2$
 $V_2 = E_2 - I_2(R_{o2} + jX_{o2})$

เมื่อ E_2 คือแรงเคลื่อนขณะไม่มีโหลด

V_2 คือแรงเคลื่อนขณะจ่ายไฟเต็มที่

หม้อแปลงตัวที่ 1 : ที่ p.f. เป็น 1 :

$V_2 = 415 - 4.46(1.307 + j0.565)$
= 409.1785 โวลต์

% เร็กกูเลชัน = 1.403 %

ที่ p.f. เป็น 0.8 :

% เร็กกูเลชัน = 1.488 %

หม้อแปลงตัวที่ 2 : ที่ p.f. เป็น 1 : % เร็กกูเลชัน = 1.385 %

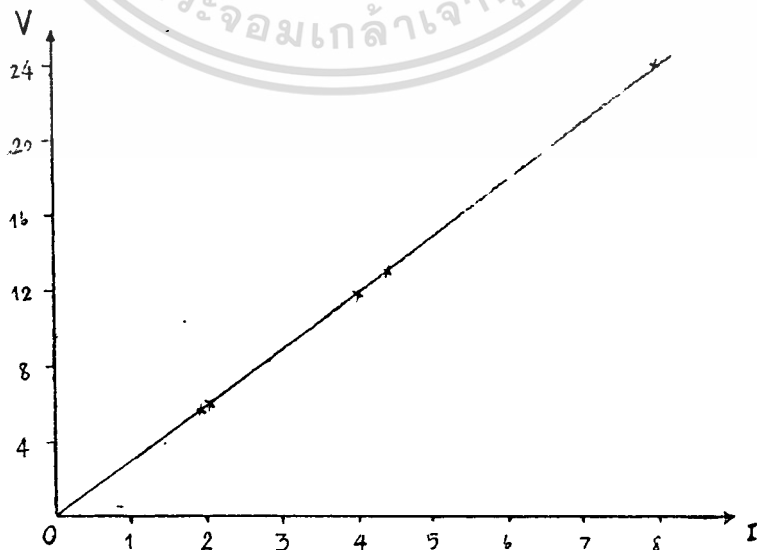
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น กรุณาอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบตัวเหนี่ยวนำ

ผลการทดสอบตัวเหนี่ยวนำของสายระยะสั้น

V	I	Z
5.5	1.9	2.895
5.8	2.0	2.9
11.7	4.0	2.925
12.9	4.4	2.923
23.6	8.0	2.95

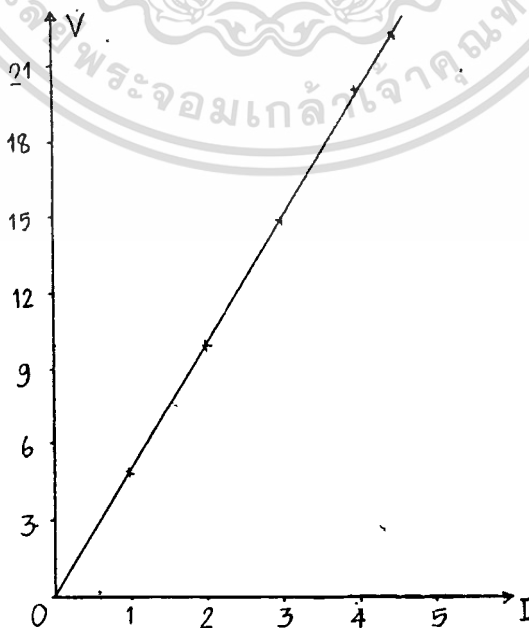
รูปข้างล่างนี้เป็นกราฟระหว่าง V กับ I (รูปที่ 4.6)



ผลการทดสอบตัวเหนี่ยวนำของสายส่งระยะปานกลาง

V	I	Z
4.9	1.0	4.9
10.0	2.0	5.0
14.9	3.0	4.967
20.0	4.0	5.0
22.4	4.5	4.977

รูปข้างล่างนี้เป็นกราฟระหว่าง V กับ I (รูปที่ 4.7)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานรูปที่ 4.7 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป

โดยหลักการ ที่เราใช้ในการจำลองพารามิเตอร์ของสายส่งจากระบบจริงมาเป็นพารามิเตอร์ของระบบจำลองนั้น ส่วนสำคัญก็คือ ค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งค่าที่คำนวณได้ของระบบจำลอง อาจมีค่าไม่ตรงกับค่าที่เราจะหาได้ เราสามารถเปลี่ยนค่าเบสกระแสของระบบจำลองซึ่งขึ้นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เรานำมาใช้ ซึ่งเราถือเอาค่ากระแสไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตที่แปลงมายังระดับแรงดันของสายส่งเป็นเบสกระแสไฟฟ้า ดังนั้นเราสามารถกำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาให้เหมาะสม(ต้องไม่เกินกำลังที่สามารถผลิตได้) เพื่อให้ได้ค่าของความจุไฟฟ้าตรงกับค่าที่เราสามารถหาได้

ดังนั้น เมื่อเราหาค่าพารามิเตอร์ของระบบจำลองได้ แล้วนำไปประกอบเป็นวงจร เพื่อทำการทดลอง ซึ่งสามารถใช้ระบบเปอร์ยูนิตเปลี่ยนค่าที่วัดได้จากระบบจำลอง ไปเป็นค่าที่ระบบจริง ของสายส่งชุดที่เราจำลองมา ที่ค่ากระแสต่างๆ ว่าจะมีค่าต่างๆ เป็นอย่างไร

สำหรับชุดจำลองที่ เราสร้างขึ้นมา จำลองมาจากสายส่งแบบระยะสั้น และระยะยาว ปานกลาง ซึ่งประกอบไปด้วยความต้านทาน, ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า ซึ่งตัวเหนี่ยวนำนั้น เราสร้างขึ้นมาจากผลการทดสอบตัวเหนี่ยวนำ ด้วยการจ่ายกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำหลายค่า แต่ตัวเหนี่ยวนำก็ยังให้ค่าความเหนี่ยวนำเท่าเดิม ซึ่งเราจะนำไปใช้ได้โดยไม่ต้อง วัดกว่าค่าความเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนไป เมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวมันเปลี่ยนไป

ภาคผนวก ก.

ตารางที่ 1 SKIN Effect Table

X	K	X	K	X	K	X	K
0.0	1.00000	1.0	1.00519	2.0	1.07816	3.0	1.31809
0.1	1.00000	1.1	1.00758	2.1	1.09375	3.1	1.35102
0.2	1.00001	1.2	1.01071	2.2	1.11126	3.2	1.38504
0.3	1.00004	1.3	1.01470	2.3	1.13069	3.3	1.41999
0.4	1.00013	1.4	1.01969	2.4	1.15207	3.4	1.45570
0.5	1.00032	1.5	1.02582	2.5	1.17538	3.5	1.49202
0.6	1.00067	1.6	1.03323	2.6	1.20056	3.6	1.52879
0.7	1.00124	1.7	1.04205	2.7	1.22753	3.7	1.56587
0.8	1.00212	1.8	1.05240	2.8	1.25620	3.8	1.60314
0.9	1.00340	1.9	1.06440	2.9	1.28644	3.9	1.64051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

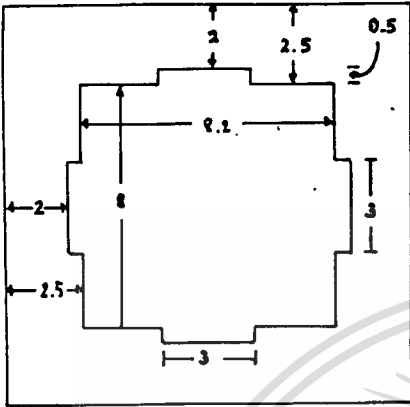
ตารางที่ 2 Electrical characteristics of bare aluminum conductors steel-reinforced (ACSR)†

Code word	Aluminum area, cmil	Stranding Al/St	Layers of aluminum	Outside diameter, in	Resistance				GMR D_g , ft	Reactance per conductor 1-ft spacing, 60 Hz	
					Dc, 30°C, $\Omega/1,000$ ft	Ac, 60 Hz		Inductive $X_{L, D}$ /mi		Capacitive $X_{C, \epsilon}$ M Ω /mi	
						20°C, Ω /mi	50°C, Ω /mi				
Warwing	266,800	18/1	2	0.609	0.0646	0.3488	0.3831	0.0198	0.476	0.1090	
Partridge	266,900	20/7	2	0.642	0.0640	0.3452	0.3792	0.0217	0.485	0.1074	
Ostrich	300,000	26/7	2	0.680	0.0569	0.3070	0.3372	0.0229	0.458	0.1057	
Martin	336,400	18/1	2	0.684	0.0512	0.2767	0.3037	0.0222	0.462	0.1055	
Linnet	336,400	26/7	2	0.721	0.0507	0.2737	0.3006	0.0243	0.451	0.1040	
Oriole	336,400	30/7	2	0.711	0.0504	0.2719	0.2987	0.0255	0.445	0.1032	
Chickadee	397,500	18/1	2	0.713	0.0433	0.2442	0.2572	0.0241	0.452	0.1031	
Ibis	397,500	20/7	2	0.783	0.0430	0.2323	0.2551	0.0264	0.441	0.1015	
Felican	477,000	18/1	2	0.814	0.0361	0.1957	0.2148	0.0284	0.441	0.1004	
Flicker	477,000	24/7	2	0.846	0.0359	0.1943	0.2134	0.0284	0.432	0.0992	
Hawk	477,000	26/7	2	0.858	0.0357	0.1931	0.2120	0.0289	0.430	0.0988	
Hea	556,500	30/7	2	0.883	0.0355	0.1919	0.2107	0.0304	0.424	0.0980	
Osprey	556,500	18/1	2	0.879	0.0309	0.1679	0.1843	0.0284	0.432	0.0981	
Parakeet	556,500	24/7	2	0.914	0.0308	0.1669	0.1832	0.0306	0.423	0.0969	
Dove	556,500	26/7	2	0.937	0.0307	0.1663	0.1826	0.0314	0.420	0.0965	
Rook	636,000	24/7	2	0.977	0.0269	0.1461	0.1603	0.0327	0.415	0.0950	
Groebank	636,000	20/7	2	0.990	0.0268	0.1454	0.1598	0.0335	0.412	0.0946	
Drake	795,000	20/7	2	1.108	0.0215	0.1172	0.1284	0.0373	0.399	0.0912	
Tern	795,000	45/7	3	1.063	0.0217	0.1188	0.1302	0.0352	0.406	0.0925	
Rail	954,000	45/7	3	1.165	0.0181	0.0997	0.1092	0.0386	0.395	0.0897	
Cardinal	954,000	34/7	3	1.196	0.0190	0.0988	0.1082	0.0402	0.390	0.0880	
Ortolan	1,033,500	45/7	3	1.213	0.0187	0.0924	0.1011	0.0402	0.390	0.0885	
Bluejay	1,113,000	45/7	3	1.259	0.0155	0.0861	0.0941	0.0415	0.386	0.0874	
Fuech	1,113,000	54/19	3	1.293	0.0155	0.0856	0.0937	0.0436	0.380	0.0866	
Bittern	1,272,000	45/7	3	1.315	0.0136	0.0762	0.0832	0.0444	0.378	0.0855	
Pressant	1,272,000	54/19	3	1.427	0.0135	0.0731	0.0821	0.0460	0.372	0.0847	
Bobolink	1,431,000	45/7	3	1.427	0.0121	0.0684	0.0748	0.0470	0.371	0.0837	
Plover	1,431,000	54/19	3	1.465	0.0120	0.0673	0.0735	0.0494	0.365	0.0829	
Lapwing	1,590,000	45/7	3	1.502	0.0109	0.0623	0.0678	0.0498	0.364	0.0822	
Falcon	1,590,000	54/19	3	1.545	0.0108	0.0612	0.0667	0.0523	0.358	0.0814	
Bluebird	2,156,000	84/19	4	1.762	0.0080	0.0476	0.0515	0.0586	0.344	0.0776	

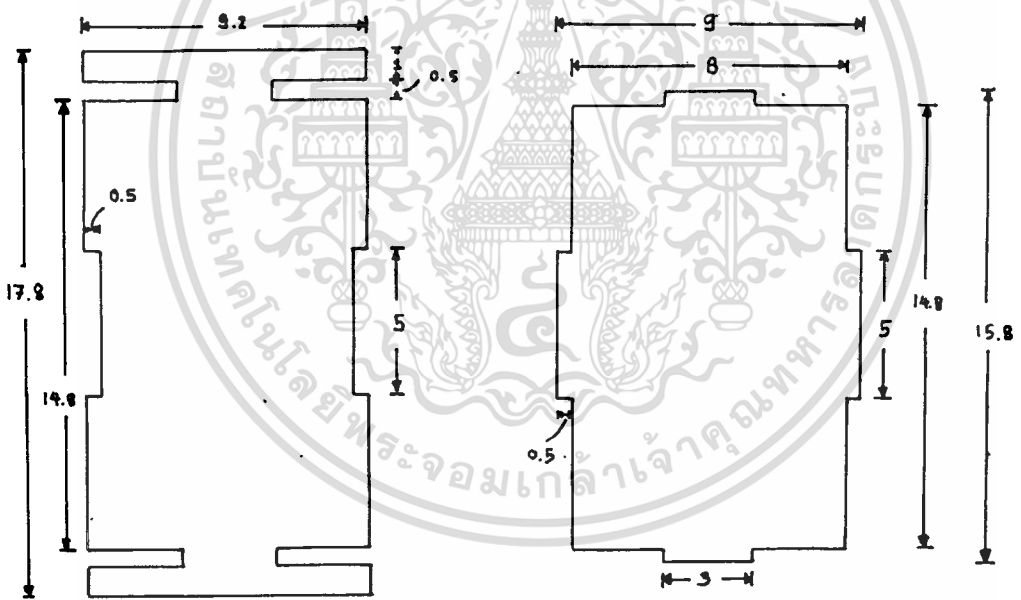
† Most used multilayer sizes.

‡ Data, by permission, from Aluminum Association, "Aluminum Electrical Conductor Handbook," New York, September 1971.

ภาคผนวก ข.



แสดงขนาดและรูปร่างของส่วนประกอบ
ที่ออกแบบสำหรับ Bobbin ที่ใช้ใน
ปริกฏยานิพนธ์นี้ (หน่วยเป็นเซนติเมตร)



ภาคผนวก ค.

โปรแกรม การคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน และกระแสของสายส่ง รวมทั้ง
การคำนวณหา พารามิเตอร์ของระบบจำลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DEF fnsinh(x)= (exp(x)-exp(-x))/2
DEF fncosh(x)= (exp(x)+exp(-x))/2
DEF fntanh(x)= fnsinh(x)/fncosh(x)
DIM BV(10),BI(10),BVA(10),BZ(10),Ir(10)
Begin:
CLS
?"=====
?
?"
?"          POWER SYSTEM SIMULATOR 1
?"          1. SHORT LINE           :   S < 80           Km
?"          2. MEDIUM LINE          :  80 < S < 240        Km
?"          * NOMINAL  $\pi$  *
?"          * NOMINAL T *
?"          3. LONG LINE             :   S > 240           Km
?"          * EQUIVALENT  $\pi$  *
?"          * EQUIVALENT T *
?"
?"=====
input " Length (m) = ";S
input " R per unit length per phase = ";Rspec
input " L per unit length per phase = ";Lspec
if S > 80 then
input " C per unit length per phase = ";Cspec
end if
input " Base Voltage (phase) of Real system = ";BV(1)
input " Angle of base voltage = ";OVs
input " Load current of real system = ";Ir(1)
input " Power factor [Angle] = ";p.f
input " Base Voltage (phase) of Simulate system = ";BV(2)
input " Base Current of Simulate system = ";BI(2)
CLS
if S > 80 then
? "-----"
? "       $\pi$  - Network...key 1   -or-   T - Network...any key "
? "-----"
input dc
end if

REM  || || || Real System  || || ||

kind$ = " Real "
Rreal = Rspec * S
Lreal = Lspec * S
Creal = Cspec * S
XLreal = 2*22/7*50*Lreal
Yreal = 2*22/7*50*Creal
OYreal = 90*22/7/180
Zreal = sqr(Rreal^2 + XLreal^2)
OZreal = atn(XLreal/Rreal)
if S > 240 then goto Longreal
if S <= 240 then
if 80 < S then goto Mediumreal
end if
if S <= 80 then goto Shortreal

```

เอกสาร Shortreal: ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CLS

```

? "          Z          "
? " Is ----- Ir "
? " o->---/\//\--(((---o->--- "
? " |          R          L          |          | "
? " |          |          |          |          |L| "
? " Vs          Vr          |D| "
? " |          |          |          |          |A| "
? " |          |          |          |          |D| "
? " |          |          |          |          |T| "
? " o-----o----- "
? " "
? " - Real System - (per phase) "
? " "

```

p.f = p.f * 22/7/180

OVs = OVs * 22/7/180

call PI (Rreal,XLreal,Yreal,OYreal,BV(1),OVs,Ir(1),p.f,Is(1),OIs,Kind\$,S)

goto sim

Mediumreal:

REM - Network of Real System -

if dc = 1 then

Type\$ = " π "

CLS

```

? "          Z          "
? " Is ----- Ir "
? " o->---/\//\-->---(((---o->--- "
? " | | R IL L | | | "
? " | Ics Icr | |L| "
? " Vs --- C/2 --- C/2 --- Vr |D| "
? " | --- Y/2 --- Y/2 --- | |A| "
? " | | ( π - Network ) | | |D| "
? " | | | | | | |T| "
? " o-----o----- "
? " "
? " - Real System - (per phase) "
? " "

```

p.f = p.f * 22/7/180

OVs = OVs * 22/7/180

call PI (Rreal,XLreal,Yreal,OYreal,BV(1),OVs,Ir(1),p.f,Is(1),OIs,Kind\$,S)

goto sim

end if

REM - T - Network of Real System -

CLS

```

? "          Z/2          Z/2          "
? " Is ----- Ir "
? " o->---/\//\--(((---T---)))---/\//\--o->--- "
? " | R/2 L/2 | L/2 R/2 | | "
? " |          Ic          | |L| "
? " Vs          C --- Y          Vr          |D| "
? " |          |          |          |          |A| "
? " |          |          |          |          |D| "
? " | ( T - Network ) |          |          |T| "
? " o-----o----- "
? " "
? " - Real System - (per phase) "
? " "

```

เอกสาร types\$ = "T" นี้ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 p.f = p.f * 22/7/180
 ไม่ว่าจะผิดๆ ดีๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

OVs = OVs * 22/7/180
call TEE (Rreal,XLreal,Yreal,OYreal,BV(1),OVs,Ir(1),p.f,Is(1),OIs,Kind$)
goto sim
Longreal:

```

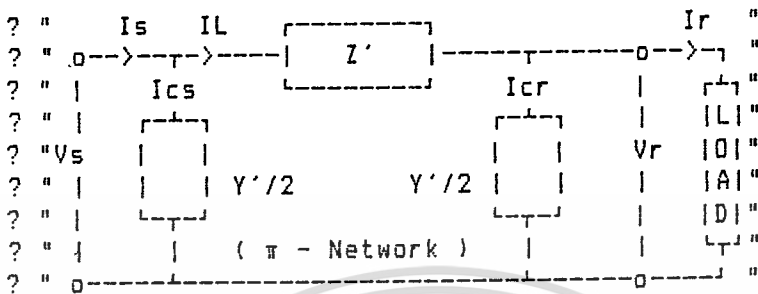
REM - π - Network of Real System -

```

if dc = 1 then
  Type$ = " π "

```

CLS



```

y = sqr (Zreal*Yreal)/S
Oy = (OZreal+OYreal)/2
Zc = sqr (Zreal/Yreal)
OZc = (OZreal-OYreal)/2
yl = y * S
yli = yl*cos(Oy)
ylj = yl*sin(Oy)

```

```

CoshYli = fncosh(yli)*cos(ylj)
CoshYlj = fnsinh(yli)*sin(ylj)
call Angle (CoshYli,CoshYlj,Cosh(yl),OCosh(yl))
SinhYli = fnsinh(yli)*cos(ylj)
SinhYlj = fncosh(yli)*sin(ylj)
call Angle (SinhYli,SinhYlj,Sinh(yl),OSinh(yl))
k1 = CoshYli - 1      REM : find tanh (x/2)
k2 = CoshYlj

```

```

call Angle (k1,k2,k,Ok)
Tanh(yl/2) = k / Sinh(yl)
OTanh(yl/2) = Ok-OSinh(yl)
Z1 = Zreal*Sinh(yl)/yl
OZ1 = OZreal+OSinh(yl)-Oy
Y1 = Yreal*tanh(yl/2)/(yl/2)
OY1 = OYreal+OTanh(yl/2)-Oy

```

```

Rreal = Z1*Cos(OZ1)
XLreal = Z1*Sin(OZ1)
Lreal = XLreal/2/22/50*7
Yreal = Y1
Creal = Yreal/2/22/50*7
OZreal = OZ1
OYreal = OY1

```

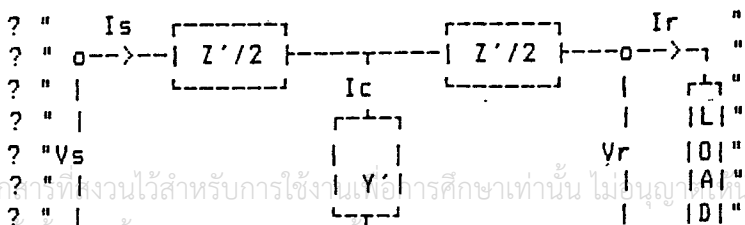
```

call PI (Rreal,XLreal,Yreal,OYreal,BV(1),OVs,Ir(1),p.f,Is(1),OIs,Kind$,S)
goto sim
end if

```

REM - T - Network of Real System -

CLS



```
? " | ( T - Network ) | | L_T "
? " o-----o----- "

```

```
Z1 = Zreal*tanh(y1/2)/(y1/2)
OZ1 = OZreal+OTanh(y1/2)-Oy
Y1 = Yreal*Sinh(y1)/y1
OY1 = OYreal+OSinh(y1)-Oy
Rreal = Z1*Cos(OZ1)
XLreal = Z1*Sin(OZ1)
Lreal = XLreal/2/22/50*7
Yreal = Y1
Creal = Yreal/2/22/50*7
OZreal = OZ1
OYreal = OY1

```

```
call TEE (Rreal, XLreal, Yreal, OYreal, BV(1), OV, Ir(1), p.f, Is(1), OIs, Kind$)
sim:
```

```
REM || || Simulate System. || ||
```

```
BI(1) = Is(1)
BZ(1) = BV(1)/BI(1)
BZ(2) = BV(2)/BI(2)
Ir(2) = Ir(1)*BI(2)/BI(1)

```

```
Csim = Creal*BZ(1)/BZ(2)
```

A1:

```
kind$ = " Sim "
Rsim = Rreal*BZ(2)/BZ(1)
Lsim = Lreal*BZ(2)/BZ(1)
XLsim = 2*22/7*50*Lsim
Ysim = 2*22/7*50*Csim
OYsim = 90*22/7/180
Zsim = sqr(Rsim^2 + XLsim^2)
OZsim = atn(XLsim/Rsim)

```

```
if S > 240 then goto Longsim
if S <= 240 then
  if 80 < S then goto Mediumsim
end if
if s <= 80 then goto Shortsim

```

```
Shortsim:
```

```
? " "
? "- Simulate System - (per phase)"
? " "
```

```
p.f = p.f*22/7/180
OVs = OVs * 22/7/180

```

```
call PI (Rsim, XLsim, Ysim, OYsim, BV(2), OV, Ir(2), p.f, Is(2), OIs, kind$, S)
Ls = Lsim*1000 : REM milli henry
Lr = Lreal*1000

```

```
print using "Rreal = ####.### (Ω) Rsim = ###.### (Ω)"; Rreal, Rsim
print using "Lreal = ####.### (mH) Lsim = ###.### (mH)"; Lr, Ls
? "-----"
```

```
goto sys
```

```
Mediumsim:
```

```
Longsim:
```

```
? " "
? "- Simulate System - (per phase)"
? " "
```

```
Ls = Lsim*1000 : REM milli henry
Lr = Lreal*1000 : REM milli henry
Cs = Csim*1e6 : REM micro farad

```

```

    Cr = Creal*1e6
    Rs = Rsim
    Rr = Rreal
    REM - π - Network of Sim. System -
if type$ = " π " then
    p.f = p.f*22/7/180
    OV$ = OV$ * 22/7/180
call PI (Rsim,XLsim,Ysim,OYsim,BV(2),OV$,Ir(2),p.f,Is(2),OIs,kind$,S)
print using "Rreal = ####.### (Ω)    Rsim = ###.### (Ω)";Rr,Rs
print using "Lreal = ####.### (mH)    Lsim = ###.### (mH)";Lr,Ls
print using "Creal = ####.### (μF)    C/2 sim = ###.### (μF)";Cr,Cs/2
? "-----"
input "Do you want to change C/2 sim only : [ Yes, key...1 ] "; dc
if dc = 1 then
    input " C/2 sim (μF) = ";C
    Csim = 2*C*1e-6
    BZ(2) = Cspec*S*BZ(1)/Csim
    BI(2) = BV(2)/BZ(2)
    Ir(2) = Ir(1)*BI(2)/BI(1)
    goto A1
end if
goto sys
end if
    REM - T - Network of Sim. System -
    p.f = p.f*22/7/180
    OV$ = OV$ * 22/7/180
call TEE (Rsim,XLsim,Ysim,OYsim,BV(2),OV$,Ir(2),p.f,Is(2),OIs,kind$)
print using "Rreal = ####.### (Ω)    R/2 sim = ###.### (Ω)";Rr,Rs/2
print using "Lreal = ####.### (mH)    L/2 sim = ###.### (mH)";Lr,Ls/2
print using "Creal = ####.### (μF)    Csim = ###.### (μF)";Cr,Cs
? "-----"
input "Do you want to change Csim only : [ Yes, key...1 ] "; dc
if dc = 1 then
    input " Csim (μF) = ";Csim
    Csim = Csim*1e-6
    BZ(2) = Cspec*S*BZ(1)/Csim
    BI(2) = BV(2)/BZ(2)
    Ir(2) = Ir(1)*BI(2)/BI(1)
    goto A1
end if
sys:
    REM END PROGRAM
input " Press any key ";S$
CLS : REM Change Value of Simulate System to Real System
input "Change Value of Sim.System to Real System :[ Yes, key...1 ]";dc
if dc = 1 then
    A2:
input " Load Current of Sim. System = ";Ir(2)
input " Power factor [Angle] = ";p.f
input " Sending-Voltage of Sim.System = ";BV(2)
p.f = p.f*22/7/180
Kind$ = " Sim "
? "
? " - π Simulate System - (per phase)"
? "
if Type$ = " π " then
call PI (Rsim,XLsim,Ysim,OYsim,BV(2),OV$,Ir(2),p.f,Is(2),OIs,kind$,S)
goto A3
end if

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

call TEE (Rsim,XLsim,Ysim,OYsim,BV(2),OVs,Ir(2),p.f,Is(2),OIs,Kind$)
A3:
  Ir(1) = Ir(2)*BI(1)/BI(2)
  p.f = p.f*22/7/180
  Kind$ = " Real "
  ? " "
  ? "- Real System - (per phase)"
  ? " "
  if Type$ = " π " then
call PI (Rreal,XLreal,Yreal,OYreal,BV(1),OVs,Ir(1),p.f,Is(1),OIs,Kind$,S)
? "-----"
  goto A4
  end if
call TEE (Rreal,XLreal,Yreal,OYreal,BV(1),OVs,Ir(1),p.f,Is(1),OIs,Kind$)

```

```

A4:
  input " You will change again : [ Yes, key...1 ] ";dc
CLS
  if dc = 1 then goto A2
end if
  input " If you want to use this program : key...1 ";dc
CLS
  if dc = 1 then goto begin
end

```

end of MAIN Prog

```

REM - SUB Angle -
SUB Angle (i,j,Amp,DAmp)
  Amp = sqr (i^2 + j^2)
  if i = 0 then goto SS
  DAmp = atn (j/i)
  if i < 0 then goto Add
  goto Still
SS:
  if j > 0 then goto DD
  DAmp = 33/7 : REM 270 'c
  goto Still
DD:
  DAmp = 11/7 : REM 90 'c
  goto Still
  Add:
  DAmp = DAmp + 22/7 : REM add 180 'c
  Still:
end SUB

```

end of SUB ANGLE

```

REM - SUB Power -
SUB Power (Vs,OVs,Vr,OVR,Is,OIs,Ir,OIR,P.S,P.R,Q.S,Q.R,P.L,kind$)
  OVs = OV*s*22/7/180
  OVR = OVR*s*22/7/180
  OIs = OIs*s*22/7/180
  OIR = OIR*s*22/7/180
  Ss = Vs * Is
  OSs = OV*s - OIs
  Sr = Vr * Ir
  OSr = OVR - OIR
  P.S = Ss*cos(OSs)
  Q.S = Ss*sin(OSs)
  P.R = Sr*cos(OSr)
  Q.R = Sr*sin(OSr)
  P.L = P.S - P.R
  if kind$ = " Real " then

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่งานบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

print using "Ps =####.### MW      Qs =####.### MVAR";P.S/1e6,Q.S/1e6
print using "Pr =####.### MW      Qr =####.### MVAR";P.R/1e6,Q.R/1e6
print using "Total Power Loss =###.### MW ";P.L/1e6
  goto A5
end if
print using "Ps =####.### KW      Qs =####.### KVAR";P.S/1e3,Q.S/1e3
print using "Pr =####.### KW      Qr =####.### KVAR";P.R/1e3,Q.R/1e3
print using "Total Power Loss =####,.### watt";P.L
A5:
  OVs = OVs*180/22*7
  OVr = OVr*180/22*7
  OIs = OIs*180/22*7
  OIr = OIr*180/22*7

```

end SUB

end of sub power

```

REM - SUB Volt -
SUB Volt (A,OA,B,OB,C,OC,D,OD,Vs,OVs,Is,OIs,Vr,OVr,Ir,OIr)
LOCAL Vri,Vrj,Iri,Irj
  p1 = C*Vs/A
  p2 = OC+OVs-OA
  p3 = Ir/A
  p4 = OIr-OA
  Isi = p1*cos(p2)+p3*cos(p4)
  Isj = p1*sin(p2)+p3*sin(p4)
  Call Angle (Isi,Isj,Is,OIs)
  s1 = D*Vs
  s2 = OD+OVs
  s3 = B*Is
  s4 = OB+OIs
  Vri = s1*cos(s2) - s3*cos(s4)
  Vrj = s1*sin(s2) - s3*sin(s4)
  call Angle (Vri,Vrj,Vr,OVr)
end SUB

```

$$I_s = (C \cdot V_s + I_r) / A$$

$$V_r = D \cdot V_s - B I_s$$

end of sub volt

```

REM - SUB PI -
SUB PI (R,XL,Y,OY,Vs,OVs,Ir,OIr,Is,OIs,kind$,S)
REM ** π - Network **
  Aip = 1 - XL*Y/2
  Ajp = R*Y/2
  call Angle (Aip,Ajp,Ap,OAp)
  Bip = R
  Bjp = XL
  call Angle (Bip,Bjp,Bp,OBp)
  Cip = -(R*Y^2)/4
  Cjp = Y-(XL*Y^2)/4
  call Angle (Cip,Cjp,Cp,OCp)
  Dip = Aip
  Djp = Ajp
  call Angle (Dip,Djp,Dp,ODp)
  call Volt (Ap,OAp,Bp,OBp,Cp,OCp,Dp,ODp,Vs,OVs,Is,OIs,Vr,OVr,Ir,OIr)
  Ics = Vs*Y/2
  OIcs = OVs + OY
  Icr = Vr*Y/2
  OIcr = OVr + OY
  ILi = Ir*cos(OIr) + Icr*cos(OIcr)
  ILj = Ir*sin(OIr) + Icr*sin(OIcr)
  call Angle (ILi,ILj,IL,OIL)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DIr = DIr*180/22*7
OIcs = OIcs*180/22*7
OIcr = OIcr*180/22*7
OIL = OIL*180/22*7
if kind$ = " Real " then
print using "Vs =####.### (KV)           0Vs =####.##° ";Vs/1e3,0Vs
print using "Vr =####.### (KV)           0Vr =####.##° ";Vr/1e3,0Vr
  goto A6
end if
print using "Vs =####.### (V)             0Vs =####.##° ";Vs,0Vs
print using "Vr =####.### (V)             0Vr =####.##° ";Vr,0Vr
  A6:
print using "Is =####.### (A)             0Is =####.##° ";Is,0Is
print using "Ir =####.### (A)             0Ir =####.##° ";Ir,0Ir
  if S > 80 then
print using "Ics =####.### (A)           0Ics =####.##° ";Ics,0Ics
print using "Icr =####.### (A)           0Icr =####.##° ";Icr,0Icr
print using "IL =####.### (A)            0IL =####.##° ";IL,OIL
  end if
call Power (Vs,0Vs,Vr,0Vr,Is,0Is,Ir,0Ir,P.S,P.R,Q.S,Q.R,P.L,kind$)
end SUB

```

end of SUB PI

```

REM -SUB TEE -
SUB TEE (R,XL,Y,OY,Vs,0Vs,Ir,0Ir,Is,0Is,kind$)
REM ** T - Network **
  Ait = 1-XL*Y/2
  Ajt = R*Y/2
call Angle (Ait,Ajt,Atee,0At)
  Bit = R*(1-XL*Y/2)
  Bjt = XL + Y*(R^2 - XL^2)/4
call Angle (Bit,Bjt,Bt,0Bt)
  Cit = 0
  Cjt = Y
call Angle (Cit,Cjt,Ct,0Ct)
  Dit = Ait
  Djt = Ajt
call Angle (Dit,Djt,Dt,0Dt)
call Volt (Atee,0At,Bt,0Bt,Ct,0Ct,Dt,0Dt,Vs,0Vs,Is,0Is,Vr,0Vr,Ir,0Ir)
  Ici = Is*cos(0Is) - Ir*cos(0Ir)
  Icj = Is*sin(0Is) - Ir*sin(0Ir)
call angle (Ici,Icj,Ic,0Ic)
  0Vs = 0Vs*180/22*7
  0Vr = 0Vr*180/22*7
  0Is = 0Is*180/22*7
  0Ir = 0Ir*180/22*7
  0Ic = 0Ic*180/22*7
  if kind$ = " Real " then
print using "Vs =####.### (KV)           0Vs =####.##° ";Vs/1e3,0Vs9
print using "Vr =####.### (KV)           0Vr =####.##° ";Vr/1e3,0Vr
  goto A7
end if
print using "Vs =####.### (V)             0Vs =####.##° ";Vs,0Vs
print using "Vr =####.### (V)             0Vr =####.##° ";Vr,0Vr
  A7:
print using "Is =####.### (A)             0Is =####.##° ";Is,0Is
print using "Ir =####.### (A)             0Ir =####.##° ";Ir,0Ir
print using "Ic =####.### (A)             0Ic =####.##° ";Ic,0Ic
call Power (Vs,0Vs,Vr,0Vr,Is,0Is,Ir,0Ir,P.S,P.R,Q.S,Q.R,P.L,kind$)
END SUB

```

กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและรู้สึกขอบคุณในพระคุณของอาจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล เป็นอย่างยิ่งที่ได้ให้คำแนะนำให้แนวทางปฏิบัติ มาโดยตลอด จนทำให้ปริญาานิพนธ์นี้สำเร็จจุล่ง
ไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ภาควิชาไฟฟ้ากำลังทุกคนที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมของคณะวิศวกรรมศาสตร์ พระจอมเกล้าลาดกระ
บัง ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ภาควิชาไฟฟ้ากำลังทุกคน ที่ได้ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ พระจอมเกล้า ลาดกระบัง ที่ได้สั่งสอน อบรม
จนทำให้ผู้จัดทำมีความรู้เพียงพอที่จะจัดทำปริญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จจุล่ง



เอกสารอ้างอิง

1. William D. Stevenson, Jr. "Element of Power System Analysis " 4th Edition, 2nd printing 1983.
2. Reference Book "Electrical transmission and Distribution"
3. Electrical Power Transfer System.
4. B.L. Thereja, "A Text Book of Electrical Technology" 9th Edition, Niraj Prahshan.
5. ศูนย์ฝึกอบรมการไฟฟ้าภูมิภาค, "คู่มืออบรมหลักสูตร Switchgear" 675 หน้า 2523

