



ปีการศึกษา 2540

โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการศึกษาาระบบไฟฟ้าใต้ดิน
COMPUTER PROGRAM FOR A STUDY OF UNDERGROUND SYSTEM

โดย

นาย คำน หยดหยาด

นาย วสรัตน์ สุธรรม

นาย วิชัย แซ่ตั้ง

นาย การินต์ แซ่มสกุล

วัน เดือน ปี.....-5.ค.ค.2541.....
เลขทะเบียน.....0.38577.....
เลขเรียกหนังสือ.....T.400440678ป.

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. ชัยวุฒิ นัตอรุทัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

038577

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2540

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการศึกษาระบบไฟฟ้าใต้ดิน

ผู้จัดทำ

1. นาย คำรน หยดหยาด
2. นาย วสรศักดิ์ สุธรรม
3. นาย วิชัย แซ่ตั้ง
4. นาย การินต์ แซ่มสกุล



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. ชัยวุฒิ นัตตรอุทัย)

โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการศึกษาระบบไฟฟ้าใต้ดิน

นายคาร์น หยดหยาด

นายวสุรงค์ สุธรรม

นายวิชัย แซ่ตั้ง

นายการ์นต์ แซ่มสกุล

ผศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2540

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าใต้ดิน โดยอ้างอิงตามกฎการไฟฟ้า นครหลวง รายละเอียดของเนื้อหากล่าวถึง ระบบการจ่ายไฟฟ้าใต้ดินเปรียบเทียบกับระบบสาย อากาศ อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ การออกแบบและการติดตั้ง ตลอดจนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กระแส และพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้าใต้ดิน จากนั้นได้ทำการนำเสนอรายละเอียดทั้งหมดโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และยังได้นำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการประมวลผลหาค่า พารามิเตอร์ต่างๆ ด้วย พร้อมทั้งมีระบบการวัดผลภายหลังจากที่ได้ทำการศึกษาเนื้อหาใน โปรแกรมแล้ว ซึ่งออกแบบมาสำหรับผู้สนใจจะศึกษาดูด้วยตนเอง โดยโปรแกรมห่วงกล่าวถูก สร้างมาจากโปรแกรมวิซวลเบสิก

COMPUTER PROGRAM FOR A STUDY OF UNDERGROUND SYSTEM

Kamron hyodhyad

Wasan Suthum

Wichai Sae-tang

Karan Chamsakul

Asst. Prof. Dr. Chaiwut Chututhai Advisor

1998

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to present the Underground System. The contents describe the comparison of Power distributed by Underground System and Overhead System, equipments, design and installation. Furthermore, the relationship between voltage, current and parameters in Underground Lines which are calculated by computer program are shown. Subject matter is arranged and presented the examples in every unit. The CAI (Computer Aided Instruction) is used and implemented using Visual Basic Program.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	V
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ระบบไฟฟ้ากำลัง	3
2.1 โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง	3
2.2 การส่งและจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบสายส่ง	5
2.3 การจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบจำหน่าย	10
2.4 ระบบจำหน่ายแรงต่ำ	11
2.5 การจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบสายป้อนใต้ดิน	12
บทที่ 3 อุปกรณ์และการติดตั้งในระบบไฟฟ้าใต้ดิน	15
3.1 สายไฟฟ้าใต้ดิน	15
3.2 ท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน	22
3.3 บ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน	23
3.4 ตัวต่อสายไฟฟ้าหรือจุดต่อสาย	24
3.5 หัวต่อสายไฟฟ้าใต้ดิน	24
3.6 หัวสายไฟฟ้าใต้ดิน	25
3.7 เสาไรเซอร์	26
3.8 เเทป	26
3.9 การออกแบบการก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน	28
3.10 การออกแบบบ่อพักสาย	28
3.11 การวางสายไฟฟ้าใต้ดิน	31
3.12 การหล่อลื่น	32
3.13 การตรวจสอบและล้างท่อร้อยสายใต้ดิน	32
บทที่ 4 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าใต้ดิน	35
4.1 คาปาซิแตนซ์	36

4.2	กระแสดัดประจุ	37
4.3	อินดักแตนซ์	37
4.4	การหาความต้านทานของฉนวนของสายไฟฟ้าตัวนำแกนเดียว	39
4.5	รีแอคแตนซ์ของสายไฟฟ้าตัวนำแกนเดียว	40
4.6	ความเครียดสนามไฟฟ้าในสายไฟฟ้าตัวนำแกนเดียว	41
4.7	ความต้านทานของตัวนำสายไฟฟ้า	43
4.8	เพาเวอร์แฟคเตอร์และกำลังสูญเสียของไดอิเล็กทริก	45
บทที่ 5	การทำงานโดยรวมของโปรแกรม	48
บทที่ 6	การคำนวณและการออกแบบงานจริง	55
6.1	ขั้นตอนการคำนวณค่าต่าง ๆ ในงานจริง	56
6.2	การคำนวณแรงดึงและแรงกดด้านข้างของสายไฟฟ้าใต้ดิน	61
บทที่ 7	สรุปผลและวิจารณ์	65
	ภาคผนวก	
	กิตติกรรมประกาศ	
	เอกสารอ้างอิง	

สารบัญญรูป

	หน้า	
รูป 2.1	ผังแสดงโครงสร้างของระบบไฟฟ้า	4
รูป 2.2	รูปแบบการส่งและจ่ายพลังงานไฟฟ้าระบบเรเดียลแบบง่าย ๆ	6
รูป 2.3	รูปแบบการส่งและจ่ายพลังงานไฟฟ้าระบบวงจรตาข่ายแบบง่าย ๆ	6
รูป 2.4	รูปแบบวงจรสายส่งระบบเรเดียล	6
รูป 2.5	รูปแบบวงจรสายส่งระบบเรเดียลที่มีการต่อเชื่อมแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง	7
รูป 2.6	รูปแบบวงจรสายส่งระบบรูป	8
รูป 2.7	รูปแบบวงจรสายส่งระบบรูปที่มีแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า 2 แหล่ง	9
รูป 2.8	รูปแบบวงจรสายส่งระบบวงจรตาข่าย	10
รูป 2.9	ไดอะแกรมการต่อหม้อแปลงจำหน่าย 3 เฟส เพื่อเปลี่ยนแรงดันจากสายป้อนเป็นแรงดันระบบจำหน่าย 3 เฟส	11
รูป 2.10	การจ่ายไฟของสายป้อนใต้ดินในระบบรูปเปิด	12
รูป 2.11	การจ่ายไฟของสายป้อนใต้ดินด้วยระบบเลือกสายป้อนใต้ดิน	13
รูป 2.12	การจ่ายไฟของสายป้อนใต้ดินด้วยระบบสำรองพิเศษ	14
รูป 3.1	โครงสร้างของสายไฟฟ้าใต้ดิน	17
รูป 4.1	พื้นที่หน้าตัดของสายไฟฟ้าตัวนำแกนเดียว	35
รูป 4.2	กระแสร่วมในฉนวนของสายไฟฟ้าตัวนำแกนเดียว	39
รูป 4.3	วงจรสมมูลย์และเฟสเซอร์ไดอะแกรมสำหรับไดอิเล็กทริกของสายไฟฟ้าใต้ดิน	46
รูป 5.1	โฟลวชาร์ตการทำงานโดยรวมของโปรแกรม	48
รูป 5.2	เมนเมนู	49
รูป 5.3	หน้าจอ ฐานข้อมูล	50
รูป 5.4	หน้าจอ แบบทดสอบ	50
รูป 5.5	หน้าจอ รวมคะแนน	51
รูป 5.6	หน้าจอ บทนำ	51
รูป 5.7	หน้าจอ บทที่ 2	52
รูป 5.8	แบบทดสอบบทที่ 4	53
รูป 5.9	หน้าจอ แบบงานจริง	53
รูป 5.10	หน้าจอแบบงานจริง	54

รูป 6.1 ระบบการจ่ายไฟแบบรูป

55

รูป 6.2 สถานีข่อยวังเพชรบูรณ์

61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 3.1 ตารางเปรียบเทียบสายทองแดงและอลูมิเนียมในงานวิศวกรรม	17
ตาราง 4.1 ค่าคงที่ของ ไดอิเล็กทริกที่ใช้เป็นวัสดุฉนวนไฟฟ้า	37
ตาราง 4.2 ความต้านทานกระแสตรงและแฟลคเตอร์ตัวคูณสำหรับความต้านทานกระแสสลับ	45



บทนำ

ในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า นอกจากจะมีการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบสายอากาศ (Overhead System) แล้วยังมีการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบไฟฟ้าใต้ดิน (Underground System) ได้อีกวิธีหนึ่ง ซึ่งในปัจจุบันหน่วยงานที่รับผิดชอบโดยตรงเกี่ยวกับเรื่องระบบไฟฟ้าใต้ดินคือ การไฟฟ้านครหลวง หรือ กฟน. (Metropolitan Electricity Authority ; MEA) โดยได้ทำการออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้าใต้ดินในเขตนครหลวงได้แก่ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ ซึ่งการไฟฟ้านครหลวงจะรับพลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย หรือ กฟผ. (Electricity Generating Authority of Thailand ; EGAT) ด้วยระบบสายส่งไฟฟ้า (Transmission Line System) ที่ระดับแรงดัน 69, 115 และ 230 kV. เพื่อเชื่อมโยงให้กับสถานีไฟฟ้าย่อย (Substation) ซึ่งที่สถานีไฟฟ้าย่อยนี้จะทำการลดระดับแรงดันไฟฟ้าให้เป็นระบบจำหน่าย (Distribution System) ที่ระดับแรงดัน 12 และ 24 kV. ซึ่งทั้งสองระบบดังกล่าวคือระบบสายส่งไฟฟ้า และระบบจำหน่ายที่ทางการไฟฟ้านครหลวงได้ดำเนินการติดตั้งเป็นระบบไฟฟ้าใต้ดินในบางพื้นที่แล้ว และในส่วนที่เป็นระบบสายอากาศที่ติดตั้งมานานแล้วทางการไฟฟ้านครหลวงก็กำลังดำเนินการปรับปรุงและเปลี่ยนเป็นระบบไฟฟ้าใต้ดินในอีกหลาย ๆ พื้นที่เช่นกัน

สาเหตุและความจำเป็นที่มีการนำระบบไฟฟ้าใต้ดินมาใช้ก็เนื่องมาจากการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบสายใต้ดินจะมีความเชื่อถือ (Reliability) ได้สูง เพราะระบบไฟฟ้าใต้ดินจะไม่มีอุปสรรค หรือปัญหาเกี่ยวกับฟ้าผ่า พายุ หรือแม้กระทั่งลมแรงจึงทำให้สามารถส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง เพราะถ้าหากในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเกิดการขัดข้องบ่อย ๆ แล้วจะมีผลกระทบต่อระบบธุรกิจซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายได้ นอกจากนี้ในบางพื้นที่ เช่น ย่านชุมชนหรือแหล่งธุรกิจการท่องเที่ยว ถ้ามีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบสายอากาศจะทำให้เกิดทัศนียภาพที่ไม่สวยงามได้ และนอกจากนี้การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบไฟฟ้าใต้ดินยังทำให้ค่าใช้จ่ายในส่วนของการบำรุงรักษาลดลง และมีอายุการใช้งานของอุปกรณ์ที่ใช้ยาวนานกว่าระบบสายอากาศอีกด้วย

อย่างไรก็ตามในการนำระบบไฟฟ้าใต้ดินเข้ามาใช้งานในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าก็มีข้อเสียเช่นกัน เช่น ความสามารถในการนำกระแสของสายไฟฟ้าใต้ดินจะน้อยกว่าสายไฟฟ้าอากาศเมื่อตัวนำไฟฟ้ามีขนาดเท่ากัน ค่าใช้จ่ายในการลงทุนก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดินจะสูงกว่าระบบสายอากาศประมาณ 8 - 12 เท่า และเวลาในการก่อสร้างก็ยาวนานกว่า รวมไปถึงเมื่อเกิดความเสียหาย

หายในระบบไฟฟ้าใต้ดิน เช่น เมื่อเกิดฟอลต์ (Fault) ขึ้นจะต้องใช้เวลาในการแก้ไขนาน และยากกว่าระบบสายอากาศ

เนื่องจากในระบบไฟฟ้าใต้ดินจะมีความแตกต่างจากระบบสายอากาศในด้านของอุปกรณ์ที่ใช้ ดังนั้นในบทที่ 3 จึงได้มีการกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าใต้ดินอย่างละเอียด และมีการแยกประเภทของการใช้งานไว้อย่างชัดเจน เช่น สายไฟฟ้าใต้ดิน (Underground Cable) ซึ่งจะมีการกล่าวถึง ส่วนประกอบและประเภทของสายไฟฟ้าใต้ดินแบบต่าง ๆ ท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน (Duct or Duct Bank) บ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน (Manhole or Handhole) หัวสายไฟฟ้าใต้ดิน (Terminator) ตัวต่อสายไฟฟ้าใต้ดิน (Splice) และเสาไรเซอร์ (Riser Pole) นอกจากนี้ในบทนี้ยังได้กล่าวถึงการออกแบบและการติดตั้งระบบไฟฟ้าใต้ดิน (Design and Installation of Underground System) ในประเภทต่าง ๆ รวมทั้งมีการเปรียบเทียบข้อดี - ข้อเสีย ในแต่ละประเภทอีกด้วย

ในบทที่ 4 จะเป็นการกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าใต้ดิน (Parameter of Underground Cable) อันได้แก่ ความต้านทาน (Resistance) ความเหนี่ยวนำ (Inductance) และค่าคาปาซิแตนซ์ (Capacitance)

เนื่องจากโครงการนี้เป็นการนำเสนอความรู้เรื่องระบบไฟฟ้าใต้ดิน ผ่านทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งอยู่ในรูปของสื่อการสอนที่ผู้ใช้ (User) จะต้องศึกษาและได้ตอบกับโปรแกรมเป็นตอนต่าง ๆ ดังนั้นในบทที่ 5 จึงได้มีการกล่าวถึงการแนะนำ และขั้นตอนในการใช้โปรแกรม ซึ่งจะมีรูปประกอบในการอธิบายเพื่อให้สามารถเข้าใจได้ดียิ่งขึ้น

ในบทที่ 6 จะเป็นการกล่าวถึงการออกแบบระบบการจ่ายไฟฟ้าใต้ดินแบบต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ ซึ่งผู้ใช้สามารถโต้ตอบ (Interactive) กับคอมพิวเตอร์ได้ โดยเมื่อผู้ใช้ป้อนขนาดของโหลด (Load) และความยาวของสายป้อน (จากสถานีไฟฟ้าย่อยถึงโหลด) หลังจากนั้นคอมพิวเตอร์จะทำการคำนวณและแสดงค่าของกระแสในสายป้อน ขนาดของสายป้อน เปอร์เซ็นต์แรงกวลชัน (% Regulation) และเปอร์เซ็นต์แรงดันตกในสาย (% Voltage Drop) และแสดงผลออกมาให้ทราบ ซึ่งค่าที่คำนวณได้ของแต่ละระบบจะแตกต่างกัน กันออกไป ซึ่งจะนำไปสู่การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดัน กระแส และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละระบบ

บทที่ 2

ระบบไฟฟ้ากำลัง

(Power System)

2.1. โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง (Structure of Power system) [9]

เมื่อพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังจะมีส่วนประกอบ 3 ส่วนดังนี้คือ

1. ระบบผลิต (Generation System)
2. ระบบส่ง (Transmission System) และระบบส่งย่อย (Subtransmission System)
3. ระบบจำหน่าย (Distribution System)

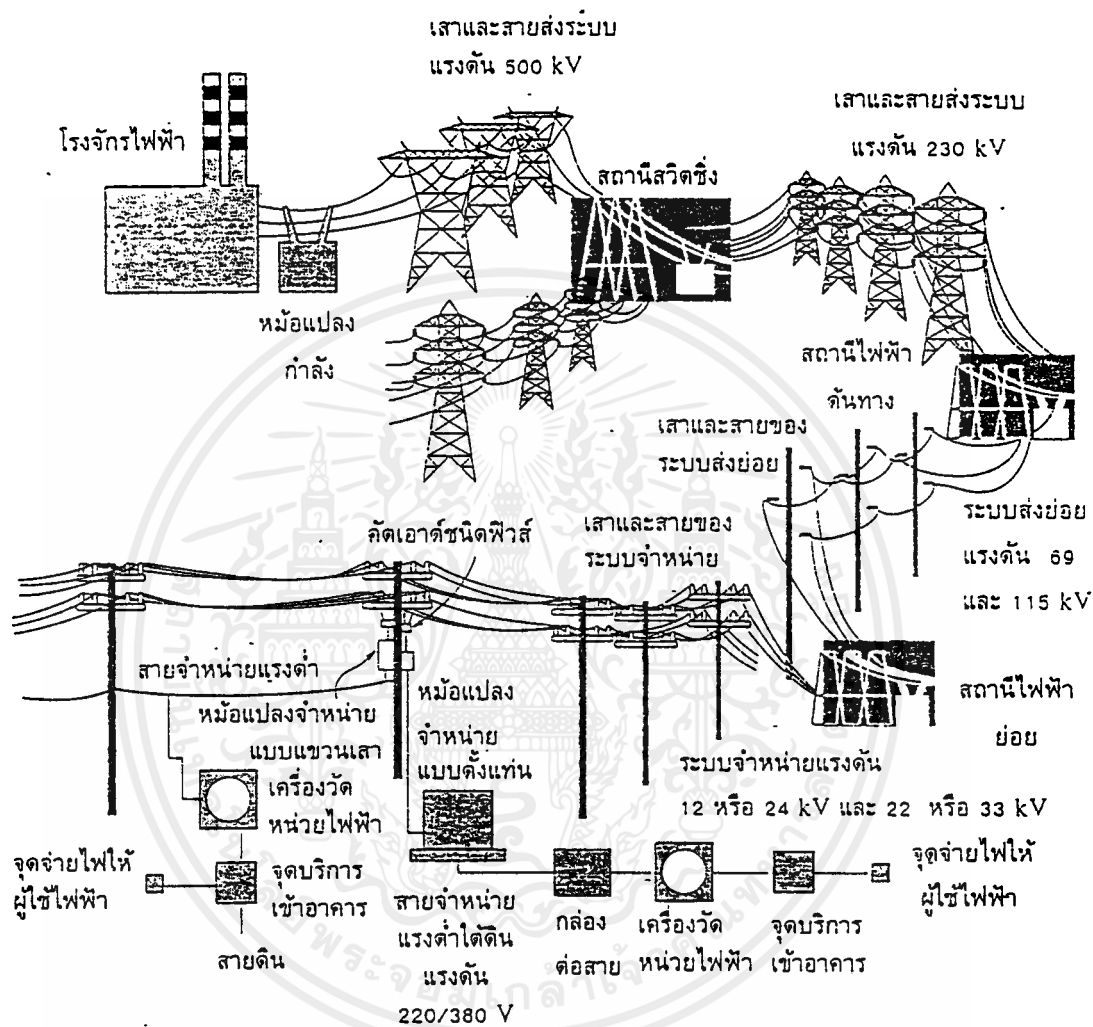
โดยทั่วไประบบผลิตและระบบส่งจะหมายถึง แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าขนาดใหญ่ (Bulk Power Supply) สำหรับระบบส่งย่อยและระบบจำหน่าย จะเป็นระบบที่นำพลังงานไฟฟ้าส่งไปยังโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้าหรือลูกค้า ซึ่งในประเทศไทยระบบผลิตและระบบส่งจะอยู่ในความดูแลและรับผิดชอบโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ส่วนระบบส่งย่อยและระบบจำหน่าย จะมีหน่วยงานที่รับผิดชอบอยู่ 2 หน่วยงานคือ ที่พื้นที่ในเขตกรุงเทพมหานครกับจังหวัดนนทบุรี และที่จังหวัดสมุทรปราการ การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) มีหน้าที่ให้บริการ สำหรับพื้นที่นอกเหนือจากจังหวัดดังกล่าว การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) เป็นหน่วยงานที่ให้บริการผู้ใช้ไฟฟ้า

การส่งพลังงานไฟฟ้าขนาดใหญ่จะส่งด้วยวงจรไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Network) โดยทั่วไปมีระดับแรงดันอยู่ระหว่าง 138 ถึง 765 kV ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรไฟฟ้าแรงสูงนี้จะเริ่มต้นส่งจากโรงจักรไฟฟ้า (Power Plants) และจะส่งพลังงานไฟฟ้าจากโรงจักรไฟฟ้าไปยังศูนย์กลางของโหลด สำหรับระบบส่งย่อย ปกติจะมีแรงดันเท่ากับ 34.5 ถึง 115 kV โดยจะต่อกับสถานีไฟฟ้าต้นทาง เพื่อที่จะจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบจำหน่ายต่อไป สำหรับการส่งและจ่ายพลังงานไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังได้แสดงไว้ดังในรูปที่ 2.1

จากรูป 2.1 ได้แสดงผังที่ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยสามารถแบ่งแยกหน้าที่ของส่วนประกอบต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. โรงจักรไฟฟ้า (Power Plants) เป็นส่วนของระบบการผลิต โดยมีชุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยระบบแรงดันหนึ่ง แล้วส่งผ่านไปยังหม้อแปลงกำลัง (Power Transformer) เพื่อยกกระดับแรงดันให้สูงขึ้นแล้วส่งผ่านไปยังลานไกไฟฟ้า (Switchyard) เพื่อส่งเข้าสู่ระบบส่งต่อไป

2. สายส่ง (Transmission Lines) มีหน้าที่ส่งพลังงานไฟฟ้าจากโรงจักรไฟฟ้าไปยังสถานีไฟฟ้าต้นทาง สำหรับระดับแรงดันที่สายส่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในปัจจุบัน มีอยู่ 3 ระดับคือ 115 , 230 และ 500 kV



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง

3. สถานีไฟฟ้าต้นทาง (Terminal Station) จะรับพลังงานไฟฟ้าจากระบบส่งเข้ามายังหม้อแปลงกำลัง เพื่อลดระดับแรงดันลงให้มีแรงดันอยู่ในระดับของระบบส่งย่อย

4. สายส่งย่อย (Subtransmission Lines) เป็นวงจรของสายส่งที่ออกจากสถานีไฟฟ้าต้นทาง เพื่อนำพลังงานไฟฟ้าไปจ่ายให้สถานีไฟฟ้าย่อย ระดับแรงดันของระบบส่งย่อยในประเทศไทยมีอยู่ 2 ระดับคือ 69 และ 115 kV

5. สถานีไฟฟ้าย่อย (Distribution Substation) จะรับพลังงานไฟฟ้าจากสายส่งย่อยเข้ามายังหม้อแปลงกำลัง เพื่อลดระดับแรงดันอยู่ในระดับของระบบจำหน่าย

6. สายป้อนหลัก (Primary Feeder) เป็นวงจรของสายป้อนที่ออกจากสถานีไฟฟ้าย่อย เพื่อนำพลังงานไฟฟ้าไปจ่ายให้กับหม้อแปลงจำหน่าย สำหรับระดับแรงดันที่สายป้อนของระบบจำหน่าย ในประเทศไทยปัจจุบันมีใช้งานอยู่ 4 ระดับคือ 22 และ 33 kV สำหรับพื้นที่บริการของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และ 12 และ 24 kV สำหรับพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวง แต่อย่างไรก็ตามในแผนปรับปรุงและขยายระบบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ได้บรรจุให้มีการเปลี่ยนแรงดันของพื้นที่ในระบบจำหน่ายทั้งหมดจาก 12 kV เป็น 24 kV ยกเว้น “เขตวงจรถาย” (เขตวงจรถายเป็นพื้นที่ล้อมรอบด้วยแม่น้ำเจ้าพระยา และคลองผดุงกรุงเกษม)

7. สายป้อนย่อย (Laterals) เป็นวงจรของสายป้อนที่แยกจากสายป้อนหลัก เพื่อนำพลังงานไฟฟ้าไปจ่ายให้กับหม้อแปลงจำหน่ายที่ตั้งอยู่ตามตรอกหรือซอย

8. หม้อแปลงจำหน่าย (Distribution Transformers) มีหน้าที่ลดระดับแรงดันของสายป้อนลงให้เท่ากับระดับแรงดันใช้งานของโหลด ซึ่งถือว่าเป็นระดับของไฟฟ้าแรงต่ำ

9. สายจำหน่ายแรงดันต่ำ (Low Voltage Circuits) เป็นวงจรของขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงจำหน่ายที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้า โดยต้องมีระดับแรงดันสอดคล้องกับระดับแรงดันใช้งานของโหลด ในประเทศไทยวงจรแรงดันต่ำจะเป็นระบบ 3 เฟส 4 สาย มีระดับแรงดัน 220/380 V

2.2. การส่งและจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบส่ง (Power Transmitted in Transmission System) [9]

การส่งพลังงานไฟฟ้าจะเริ่มจากโรงจักรไฟฟ้าที่ผลิตไฟฟ้าด้วยระดับแรงดัน 11.5 kV หรือ 13.8 kV ด้วยเหตุผลทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ กล่าวคือ เพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบส่ง จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนแรงดันให้สูงขึ้นโดยหม้อแปลงกำลัง เป็นระดับแรงดันสูง หรือแรงดันสูงพิเศษ สำหรับแรงดันสูงที่ใช้ในระบบส่งของประเทศไทยคือ แรงดัน 230 kV หรือ 500 kV ซึ่งถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นของระบบส่ง หลังจากนั้นพลังงานไฟฟ้าก็จะส่งผ่านสายส่งไปยังสถานีไฟฟ้าต้นทาง เพื่อลดระดับแรงดันลงเป็นแรงดัน 69 kV หรือ 115 kV แล้วพลังงานไฟฟ้านี้ส่งต่อโดยสายส่งย่อยไปยังสถานีไฟฟ้าย่อย แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากสถานีไฟฟ้าย่อย จะลดระดับลงให้เป็นแรงดันในระบบจำหน่ายต่อไป

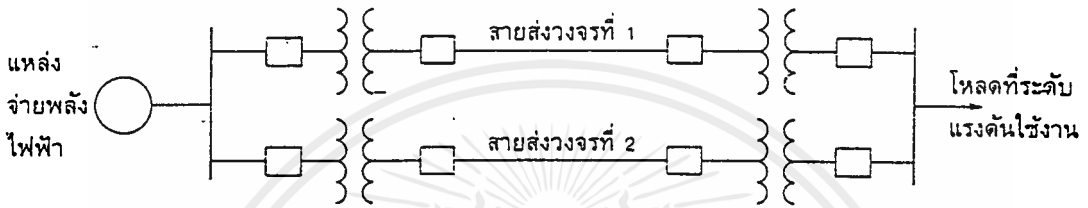
ระบบส่งและจ่ายพลังงานไฟฟ้า มีรูปแบบพื้นฐานอยู่ 2 ชนิด คือ

1. ระบบเรเดียล (Radial System) เป็นระบบที่มีพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปสู่โหลดเพียงวงจรเดียว



รูปที่ 2.2 รูปแบบการส่งและจ่ายพลังงานไฟฟ้าระบบเรเดียลแบบง่าย ๆ

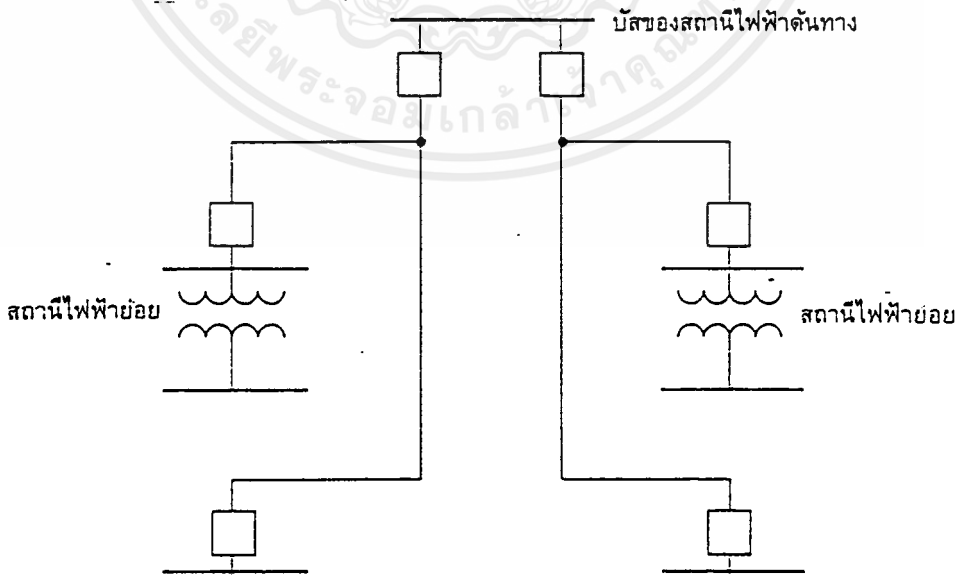
2. ระบบวงจรตาข่าย (Network System) เป็นระบบที่มีพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปสู่โหลดมากกว่าหนึ่งวงจร



รูปที่ 2.3 รูปแบบการส่งและจ่ายพลังงานไฟฟ้าระบบวงจรตาข่ายแบบง่าย ๆ

จากรูปที่ 2.2 และ 2.3 แสดงรูปแบบการส่งและจ่ายพลังงานไฟฟ้าอย่างง่าย ๆ ของระบบเรเดียลและระบบวงจรตาข่ายจากแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า และนำพลังงานไฟฟ้าไปจ่ายด้วยวงจรสายส่งไปยังหม้อแปลง เพื่อลดแรงดันลงให้มีระดับเดียวกับแรงดันใช้งานของโหลด อย่างไรก็ตาม การส่งและจ่ายพลังงานไฟฟ้าทั้งระบบเรเดียลและระบบวงจรตาข่าย ได้มีการเปลี่ยนแปลงและปรับปรุงเพื่อให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น โดยทั่วไปจะมีรูปแบบของการส่งและจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ได้ประยุกต์และนำไปใช้งานตามระบบต่อไปนี้

2.2.1. ระบบเรเดียล (Radial System)

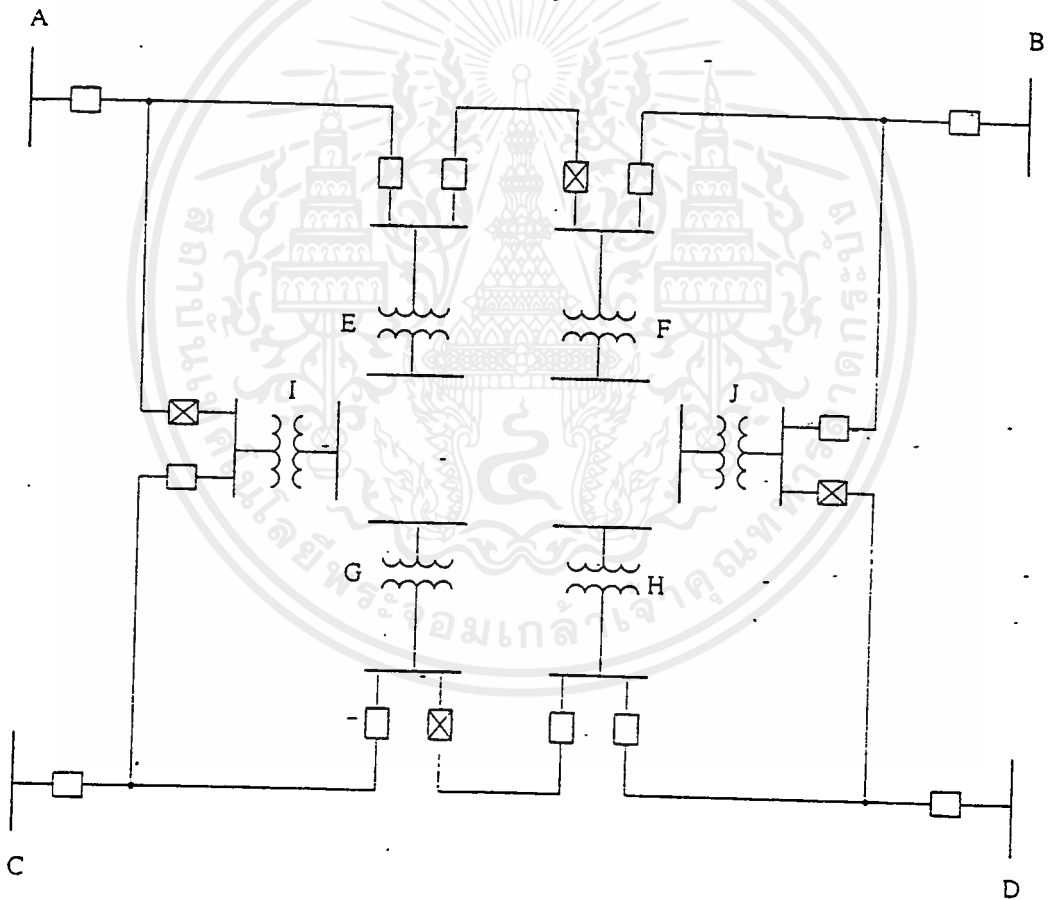


รูปที่ 2.4 รูปแบบวงจรสายส่งระบบเรเดียล

วงจรของสายส่งในระบบเรเดียลเริ่มจากบัส (Bus) ของแหล่งจ่ายพลังไฟฟ้า และไปสิ้นสุดที่สถานที่ไฟฟ้าย่อยโดยตรง ระบบเรเดียลเป็นระบบที่ง่ายและมีราคาของการลงทุนก่อสร้างสายส่งเริ่มต้นต่ำ แต่อย่างไรก็ตามระบบนี้โดยทั่วไปแล้วจะไม่นิยมใช้ด้วยเหตุผลที่ว่า ถ้าหากเกิดการลัดวงจร หรือฟอลต์ขึ้นที่บัสของแหล่งจ่ายพลังไฟฟ้า จะทำให้ไม่มีไฟฟ้าไปจ่ายให้กับสถานีไฟฟ้าย่อยเลย (ไฟฟ้าที่ต้องจ่ายด้วยสถานีไฟฟ้าต้นทางนี้จะดับหมด) แต่ถ้าเกิดฟอลต์ที่สายส่งวงจรใด สถานีไฟฟ้าย่อยที่ต่อกับสายส่งวงลานั้นก็จะเกิดไฟฟ้าดับ

2.2.2. ระบบเรเดียลที่มีการต่อเชื่อมแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรอง (Tapped - Tie Normally Open System)

จากข้อเสียในการส่งพลังไฟฟ้าของระบบเรเดียล จึงได้มีการปรับปรุงให้เป็นระบบเรเดียลที่มีการต่อเชื่อมแหล่งจ่ายพลังไฟฟ้าสำรอง ดังแสดงในรูป 2.5



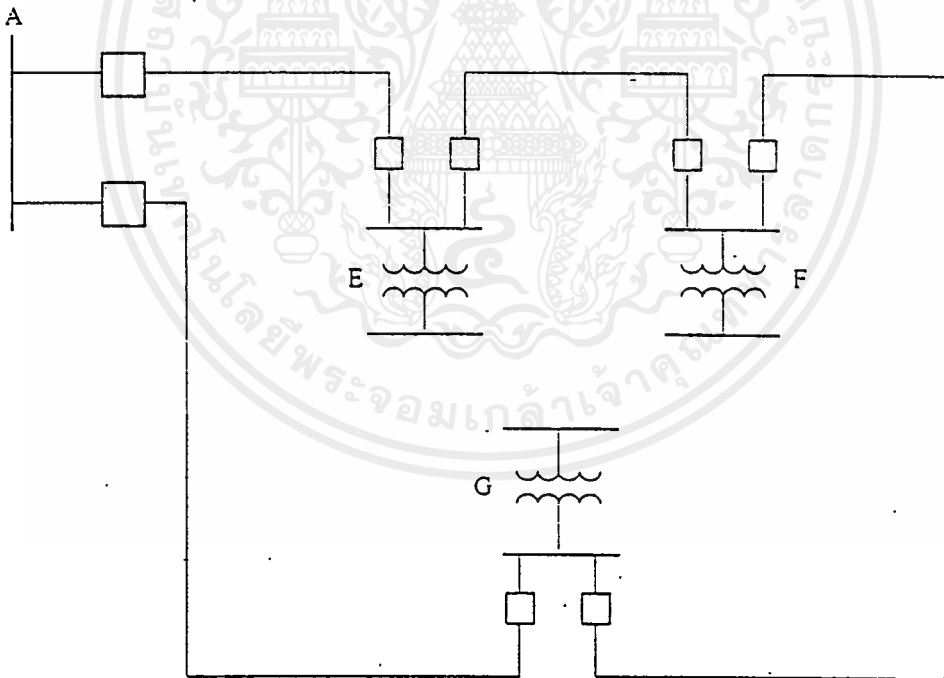
- A, B, C และ D คือ บัสของสถานีไฟฟ้าต้นทาง
 E, F, G, H, I และ J คือ สถานีไฟฟ้าย่อย
 □ คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ปกติปิด
 ⊗ คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ปกติเปิด

รูปที่ 2.5 รูปแบบวงจรสายส่งระบบเรเดียลที่มีการต่อเชื่อมแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง

จากรูปสถานีไฟฟ้าย่อยแต่ละแห่งจะมีสายส่งเข้ามาจ่ายพลังงานไฟฟ้า 2 วงจร โดยวงจรหนึ่งทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้า และอีกวงจรหนึ่งจะต่อเชื่อมเข้ามาเพื่อเป็นวงจรพลังงานไฟฟ้าสำรอง หากเกิดฟอลต์ขึ้นกับบัสหรือสายส่งวงจรที่จ่ายพลังงานไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าการจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบนี้จะมีความเชื่อถือได้มากกว่าระบบเรเดียล เพราะว่าถ้าหากเกิดฟอลต์ขึ้นกับบัสหรือสายส่งวงจรที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าอยู่ก็จะเกิดไฟฟ้าดับประมาณ 2 วินาที (เวลาที่ใช้ในการตรวจสอบเพื่อทำการปลด - สับเซอร์กิตเบรกเกอร์) ก็จะมีพลังงานไฟฟ้าจากสายส่งวงจรที่ต่อเชื่อมแหล่งจ่ายสำรองมาจ่ายแทน สำหรับราคาค่าลงทุนในการก่อสร้างสายส่งเริ่มต้นจะสูงกว่าระบบเรเดียล

2.2.3. ระบบลูป (Loop System)

เพื่อเป็นการเพิ่มความเชื่อถือได้ของการส่งและจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้สูงขึ้น จึงได้มีการจัดรูปแบบของวงจรสายส่งให้มีการจ่ายไฟฟ้ามามากกว่า 1 วงจร โดยวงจรของสายส่งเริ่มต้นออกจากบัสของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านไปจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับสถานีไฟฟ้าย่อยต่าง ๆ และกลับสู่บัสของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเดียวกัน เราจะเรียกรูปแบบการส่งและจ่ายพลังงานไฟฟ้านี้ว่าระบบลูป ดังแสดงในรูป 2.6



- A คือ บัสของสถานีไฟฟ้าต้นทาง
E, F และ G คือ สถานีไฟฟ้าย่อย
□ คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ปกติปิด

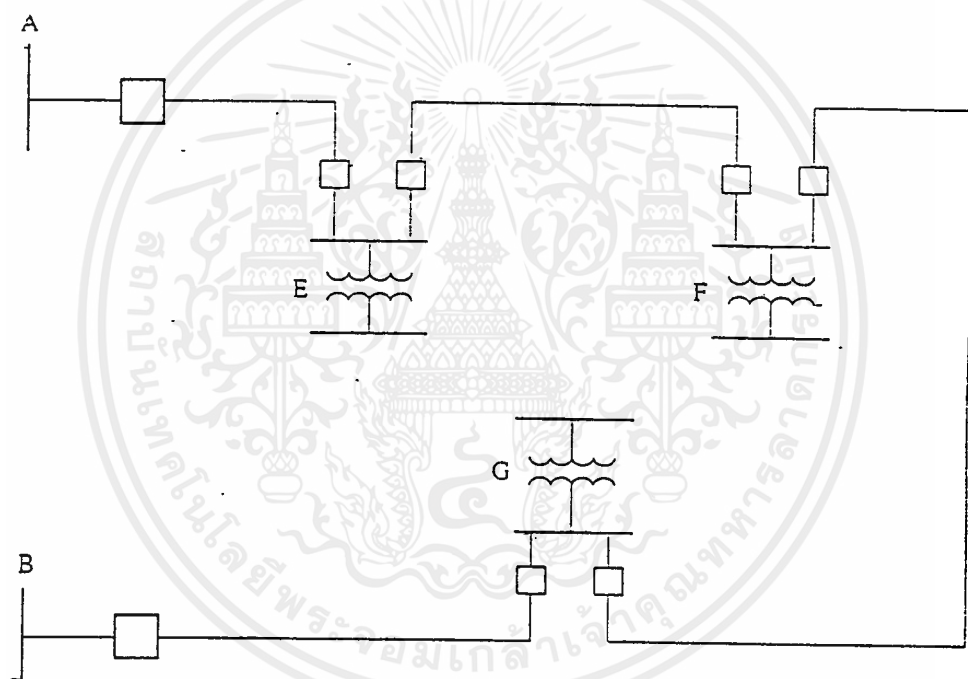
รูปที่ 2.6 รูปแบบวงจรสายส่งระบบลูป

ข้อดีของระบบรูปคือ ถ้าหากเกิดฟอลต์ขึ้นที่สายส่งของวงจรใดวงจรหนึ่งก็ตาม จะไม่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับที่สถานีไฟฟ้าย่อย E, F, หรือ G เพราะว่าจะยังมีสายส่งพลังไฟฟ้าอีกวงจรหนึ่งจ่ายพลังไฟฟ้าให้แทน และปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์หัวและท้ายของสายส่งวงจรที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบ เพื่อทำการตรวจสอบและแก้ไขได้ต่อไป

สำหรับข้อเสียของระบบรูปคือ ถ้าหากเกิดฟอลต์ขึ้นที่บัสของแหล่งจ่ายพลังไฟฟ้า จะทำให้สายส่งพลังไฟฟ้าทั้ง 2 วงจร ไม่สามารถจ่ายพลังไฟฟ้าได้ทำให้ไฟฟ้าดับหมดทุกสถานีไฟฟ้าย่อย

2.2.4. ระบบรูปที่มีแหล่งจ่ายพลังไฟฟ้า 2 แหล่ง (Tapped - Tie System)

จากข้อเสียของการจ่ายพลังไฟฟ้าในระบบรูป จึงได้มีการปรับปรุงเป็นระบบรูปที่มีแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า 2 แหล่ง ดังแสดงในรูป 2.7



A, B คือ บัสของสถานีไฟฟ้าต้นทาง

E, F และ G คือ สถานีไฟฟ้าย่อย

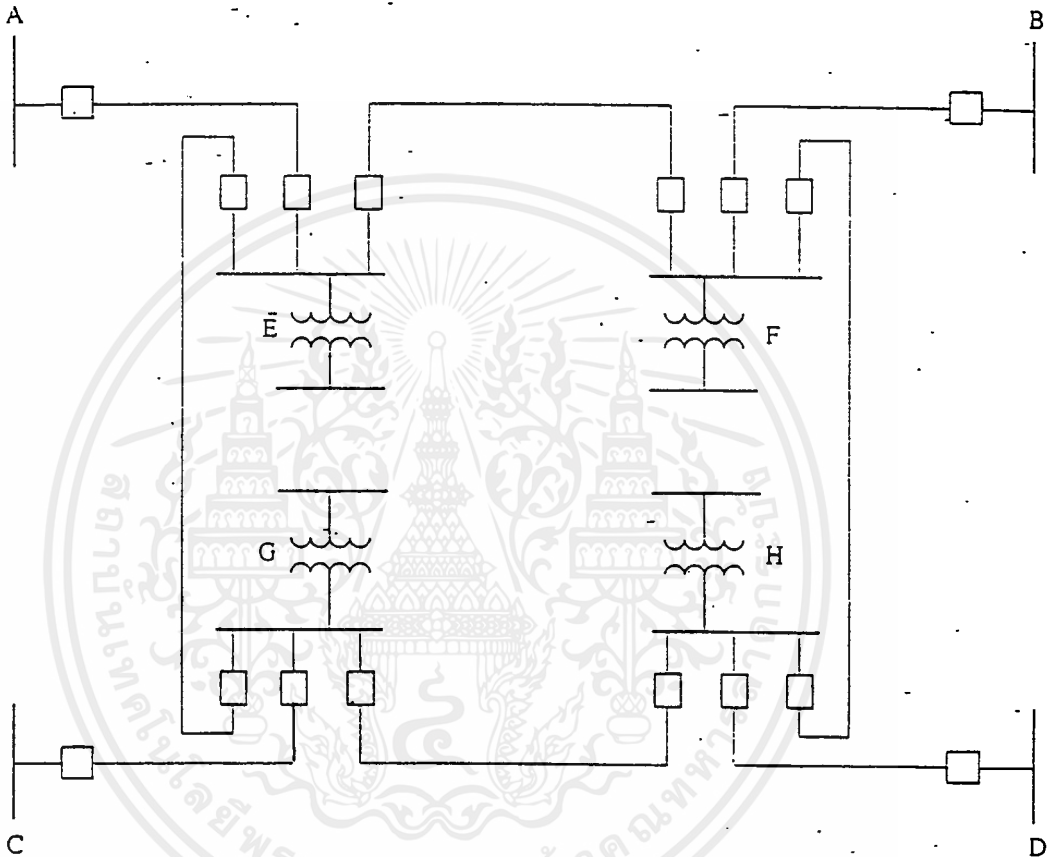
□ คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ปกติปิด

รูปที่ 2.7 รูปแบบวงจรสายส่งระบบรูปที่มีแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า 2 แหล่ง

ถึงแม้ว่าจะไม่มีไฟฟ้าดับเลย โดยไม่ว่าจะเกิดฟอลต์ขึ้นที่สายส่งหรือบัสของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแห่งหนึ่งแห่งใดก็ตาม แต่เนื่องจากระบบมีการต่อเชื่อมถึงกันหมด ทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบต่ำ จึงทำให้ระดับของกระแสฟอลต์ (fault level) สูง

2.2.5. ระบบวงจรตาข่าย (Network System)

รูปที่ 2.8 จะแสดงการจัดรูปแบบของวงจรสายส่งระบบวงจรตาข่าย โดยระบบนี้จะต่อเชื่อมสถานีไฟฟ้าย่อยถึงกันหมด และมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับสถานีไฟฟ้าย่อยจากหลายแหล่งจ่าย จึงทำให้การส่งและจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบวงจรตาข่ายมีความเชื่อถือได้มากที่สุด แต่ระบบนี้ต้องลงทุนในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า (power flow) และระบบมีระยะค่อนข้างมาก อีกทั้งอิมพีแดนซ์ของระบบก็ต่ำเช่นกัน



A,B,C, และ D คือ บัสของสถานีไฟฟ้าต้นทาง

E,F,G, และ H คือ สถานีไฟฟ้าย่อย

□ คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ปกติ

รูปที่ 2.8 รูปแบบวงจรสายส่งระบบวงจรตาข่าย

2.3. การจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบจำหน่าย (Power Distributed in Distribution System) [9]

การจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบจำหน่ายจะเริ่มที่สวิตช์เกียร์แรงดันปานกลางของสถานีไฟฟ้าย่อยแล้วจ่ายไฟฟ้าออกไปด้วยสายป้อนหลักไปตามถนน และสายป้อนย่อยตามตรอกหรือซอย เพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลด โดยผ่านหม้อแปลงจำหน่ายและสายแรงต่ำ สำหรับสายป้อนหลักอาจ

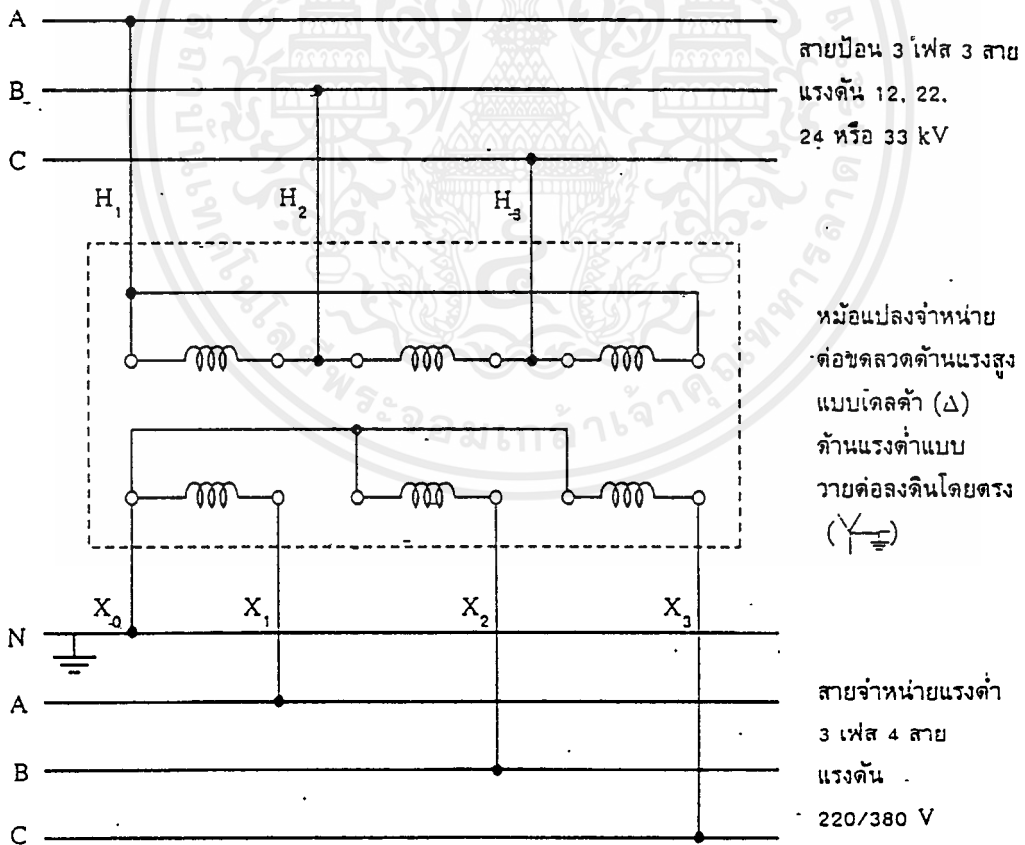
เป็นสายในอากาศ หรือสายไฟฟ้าใต้ดินก็ได้ โดยรูปแบบการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของสายป้อนหลักที่เป็นสายในอากาศมีดังนี้

1. วงจรสายป้อนหลักแบบเรเดียล (Radial - Type Primary Feeder)
2. วงจรสายป้อนหลักแบบลูป (Loop - Type Primary Feeder)
3. วงจรสายป้อนหลักแบบตาข่าย (Network - Type Primary Feeder)

โดยสายป้อนหลักและสายป้อนย่อยจะจ่ายไฟฟ้าด้วยระบบ 3 เฟส 3 สาย มีระดับแรงดัน 12 หรือ 24 kV สำหรับการไฟฟ้านครหลวง และ 22 หรือ 33 kV สำหรับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

2.4. ระบบจำหน่ายแรงต่ำ (Low Voltage System) [9]

ในระบบไฟฟ้ากำลังจะถือว่าระบบจำหน่ายแรงต่ำ คือส่วนประกอบสุดท้าย ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว โหลดที่นำมาใช้งานจะมีระดับแรงดันสอดคล้องกับแรงดันต่ำ ดังนั้นขั้นตอนการดำเนินงานในระบบจำหน่ายแรงต่ำก็คือ การเปลี่ยนระดับแรงดันปานกลาง 12, 22, 24 หรือ 33 kV 3 เฟส 3 สาย จากสายป้อนให้เป็นแรงดันต่ำ 220/380 V 3 เฟส 4 สาย ดังแสดงในรูป 2.9

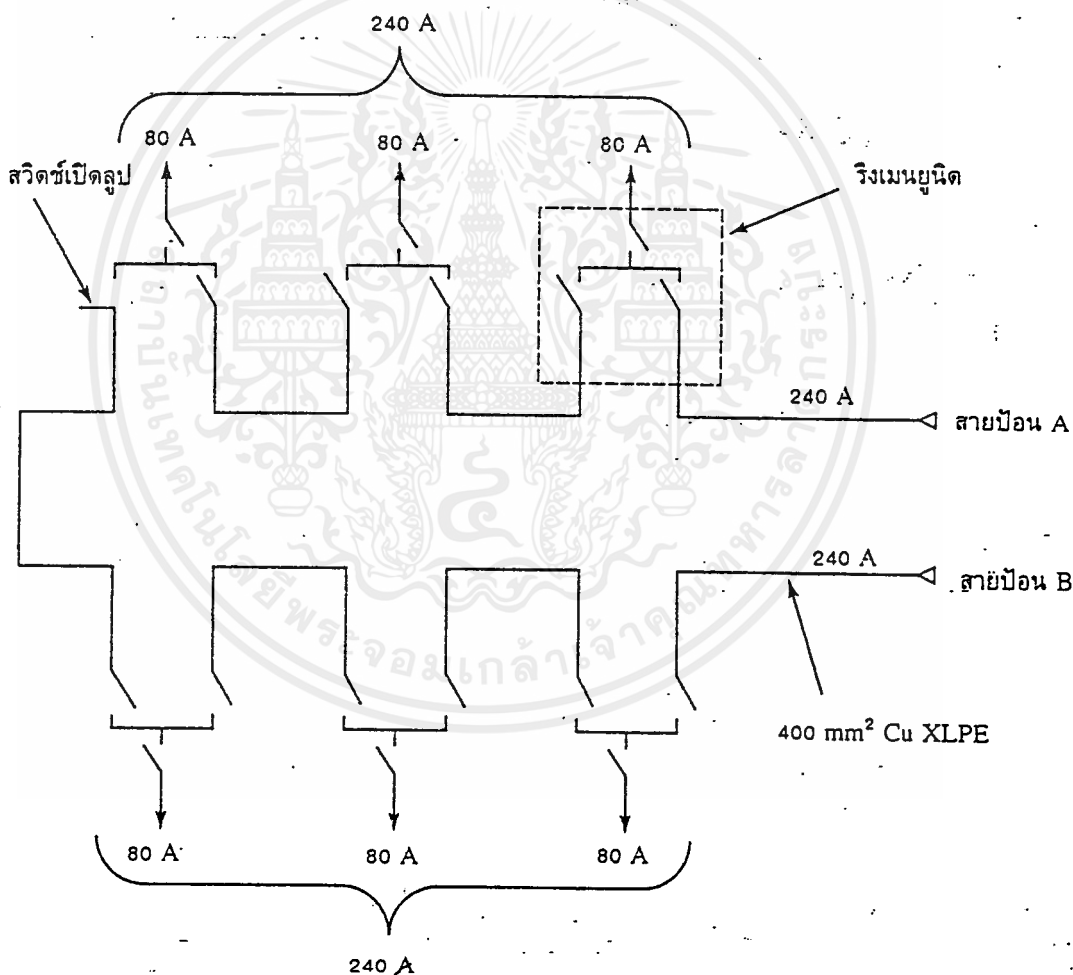


รูปที่ 2.9 โดอะแกรมการต่อหม้อแปลงจำหน่าย 3 เฟสเพื่อเปลี่ยนแรงดันจากสายป้อนเป็นแรงดันระบบจำหน่ายแรงต่ำ

2.5. การจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบสายป้อนใต้ดิน (Power Distribution by Underground Feeder) [9]

2.5.1. ระบบรูปเปิด (Underground Open Loop System)

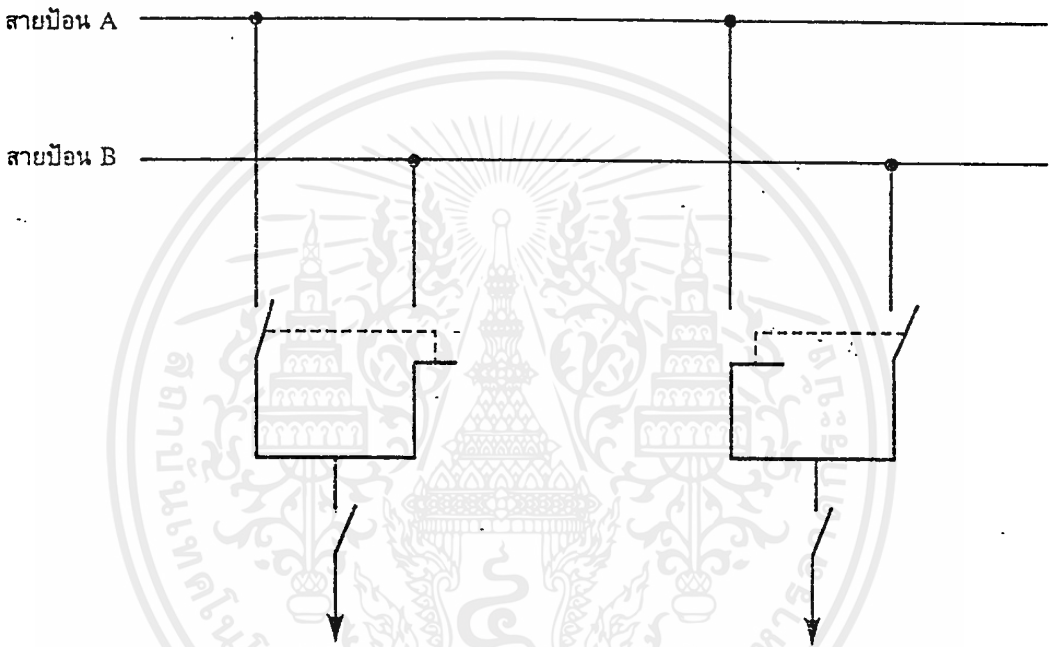
รูปแบบของการจ่ายไฟฟ้าของระบบรูปเปิดจะเหมือนกับระบบรูปของสายในอากาศที่ได้กล่าวถึงมาแล้ว โดยการจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดด้วยสายป้อนใต้ดิน 2 วงจร แต่ละวงจรจะจ่ายพลังงานไฟฟ้าเพียง 50 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดกำลังของสายป้อน ส่วนอีก 50 เปอร์เซ็นต์จะสำรองไว้เพื่อจ่ายให้กับโหลดแทนอีกสายป้อนหนึ่งเมื่อเกิดฟอลต์ รูปแบบการจ่ายไฟระบบรูปเปิดใต้ดินได้แสดงไว้ในรูป 2.10



รูปที่ 2.10 การจ่ายไฟฟ้าของสายป้อนใต้ดินในระบบรูปเปิด

2.5.2. ระบบเลือกสายป้อนใต้ดิน (Primary Selective System)

การจ่ายไฟฟ้าด้วยระบบนี้จะมีสายป้อนใต้ดิน 2 วงจรจ่ายไฟฟ้าขนานกันไป ซึ่งโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถเลือกรับไฟฟ้าจากสายป้อนใดสายป้อนหนึ่งด้วย สวิตช์ถ่ายโอนอัตโนมัติ (Automatic Transfer Switch) ส่วนสายป้อนอีกวงจรหนึ่งจึงเป็นวงจรสำรอง ถ้าหากเกิดฟอลต์ขึ้นกับสายป้อนที่โหลดรับไฟฟ้าอยู่ สวิตช์ถ่ายโอนอัตโนมัติสามารถที่จะเลือกรับไฟฟ้าจากสายป้อนวงจรสำรองได้ เนื่องจากระบบนี้จะมีปัญหาในการบำรุงรักษาและการสับถ่ายโหลดจึงไม่เป็นที่นิยมใช้.

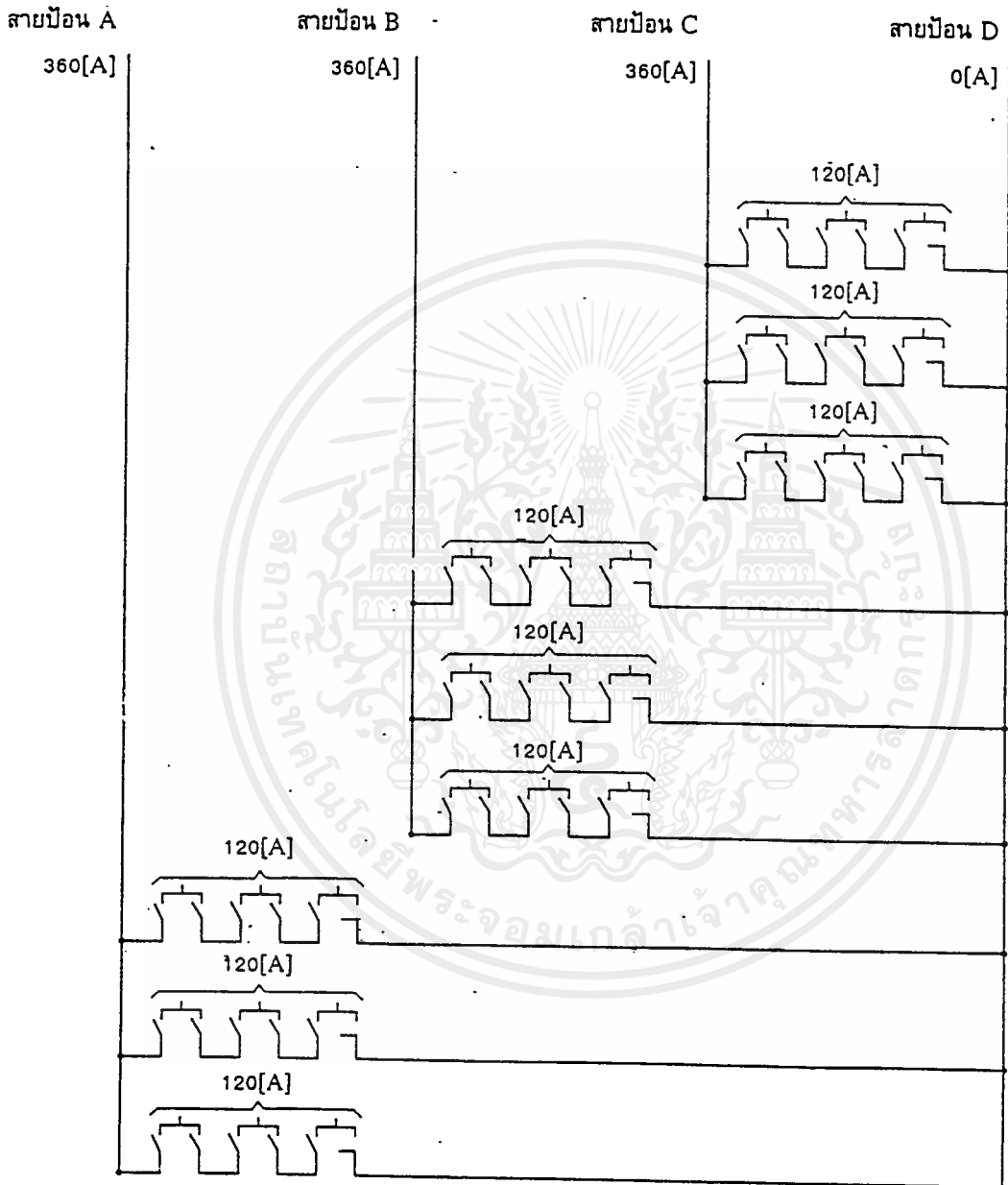


รูปที่ 2.11 การจ่ายไฟฟ้าของสายป้อนใต้ดินด้วยระบบเลือกสายป้อนใต้ดิน

2.5.3. ระบบสายป้อนใต้ดินสำรองพิเศษ (Special Spare Line System)

การจ่ายไฟฟ้าด้วยสายป้อนใต้ดินระบบนี้ จะประกอบด้วยสายป้อน 4 วงจร โดยมีสายป้อนที่จ่ายไฟฟ้า 3 วงจร และสายป้อนที่ไม่ได้จ่ายไฟฟ้าอีก 1 วงจร ซึ่งเป็นวงจรสำรองพิเศษ ดังแสดงในรูปที่ 2.12

จาก 2.12 จะเห็นได้ว่าในแต่ละสายป้อนหลัก จะมีสายป้อนย่อยได้สูงสุด 3 วงจรต่อเชื่อมกับสายป้อนหลักที่เป็นวงจรสำรองพิเศษ โดยแต่ละสายป้อนหลักและสายป้อนย่อยจะจ่ายโหลดได้สูงสุดประมาณ 360 A และ 120 A ตามลำดับ ซึ่งเป็นการจ่ายโหลดได้ประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ (จ่ายไฟฟ้า 3 สายป้อนในจำนวนทั้งหมด 4 สายป้อน) โดยสามารถจ่ายไฟฟ้าได้มากกว่าระบบรูปเปิดที่จ่ายได้ 50 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.12 การจ่ายไฟฟ้าของสายป้อนใต้ดินด้วยระบบสำรองพิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อุปกรณ์และการติดตั้งในระบบไฟฟ้าใต้ดิน

(Equipment and Installation in Underground System)

3.1. สายไฟฟ้าใต้ดิน (Underground Cable) [1]

สายไฟฟ้าเป็นส่วนที่ใช้ในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ซึ่งโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. แบ่งตามชนิดของฉนวนที่ใช้
2. แบ่งตามลักษณะการใช้งาน
3. แบ่งตามจำนวนตัวนำ (Conductor) ที่มีอยู่ในสายแต่ละเส้น

3.1.1. แบ่งตามชนิดของฉนวนที่ใช้

ก. โซลิดไดอิเล็กตริกเคเบิล (Solid Dielectric Cable) ได้แก่ สายที่มีฉนวนเป็นพวกรอสลิงค์โพลีเอททีลีน (Cross-Linked Polyethylene ; XLPE) เป็นต้น

ข. ออยล์ฟิลเคเบิล (Oil Filled Cable) ได้แก่ สายที่มีฉนวนเป็นน้ำมัน (Insulation Oil) อาจจะอยู่ในรูปของกระดาษอบน้ำมัน เช่น พวก ฉนวนกระดาษชุบน้ำมัน (Paper Insulated Cable ; PILC) เป็นต้น

ค. ก๊าซฟิลเคเบิล (Gas Filled Cable) ได้แก่ สายที่มีฉนวนเป็นก๊าซเฉื่อย (Inert Gas) เช่น ไนโตรเจน (N_2) , ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (Sulphur Hexafluoride ; SF_6)

3.1.2. แบ่งตามลักษณะการใช้งาน

ก. แบบฝังดินโดยตรง (Direct Burial Cable) เป็นสายพวกที่ติดตั้งใต้ดินโดยตรงเลย ตัวสายใต้ดินเองจะมีตัวหุ้มปิด (Armour) หรืออาจจะใช้แผ่นคอนกรีต (Concrete Slab) เป็นเครื่องป้องกัน ในการติดตั้งใช้วางลงไปโดยไม่ต้องมีการดึงหรือลาก การติดตั้งสายแบบนี้ข้อเสียคือ การหาฟอลต์ (Fault) ยาก การแก้ไขซ่อมแซมมีค่าใช้จ่ายสูง

ข. แบบเดินในท่อ (Conduit หรือ Duct Cable) เป็นสายที่ใช้ติดตั้งอยู่ในท่อสำหรับร้อยสาย ในการติดตั้งต้องมีการดึงลาก ดังนั้นโครงสร้างของสายต้องทนต่อการดึงลาก ข้อดีของการติดตั้งแบบนี้คือ การหาฟอลต์ง่าย ซ่อมง่ายกว่า มีโอกาสขยายระบบได้ง่าย แต่มีการลงทุนสูงมาก

ค. แบบเดินใต้น้ำ (Submarine Cable) เป็นสายที่ใช้ติดตั้งใต้น้ำ ข้ามแม่น้ำ ข้ามช่องแคบ ในทะเล เป็นพวกสายที่มีตัวหุ้มปิด ซึ่งตัวหุ้มปิดต้องรับแรงดึงได้และต้องทนต่อการสุก ร้อน สายชนิดนี้จะมีขนาดช่วงสายยาวมาก

3.1.3. แบ่งตามจำนวนตัวนำที่มีอยู่ในสายไฟฟ้าแต่ละเส้น

ก. สายตัวนำเดี่ยว (Cable Single Core ; 1/C) หมายถึงสายไฟฟ้าที่มีตัวนำพร้อมจำนวนอยู่เพียง 1 เส้น และใช้สำหรับระบบไฟฟ้าเฟสเดียว (Single Phase)

ข. สายตัวนำคู่ (Cable Two Core ; 2/C) หมายถึงสายไฟฟ้าที่มีตัวนำพร้อมจำนวนอยู่ 2 เส้น และใช้สำหรับระบบไฟฟ้าเฟสเดียว

ค. สายตัวนำ 3 แกน (Cable Three Core ; 3/C) หมายถึงสายไฟฟ้าที่มีตัวนำพร้อมจำนวนอยู่ 3 เส้น และสามารถใช้งานในระบบไฟ 3 เฟสได้

ง. สายตัวนำ 4 แกน (Cable Four Core ; 4/C) หรือมากกว่า จะใช้งานเป็นสายควบคุม หรือสายสัญญาณ

- โครงสร้างส่วนประกอบของสายไฟฟ้าใต้ดิน [6]

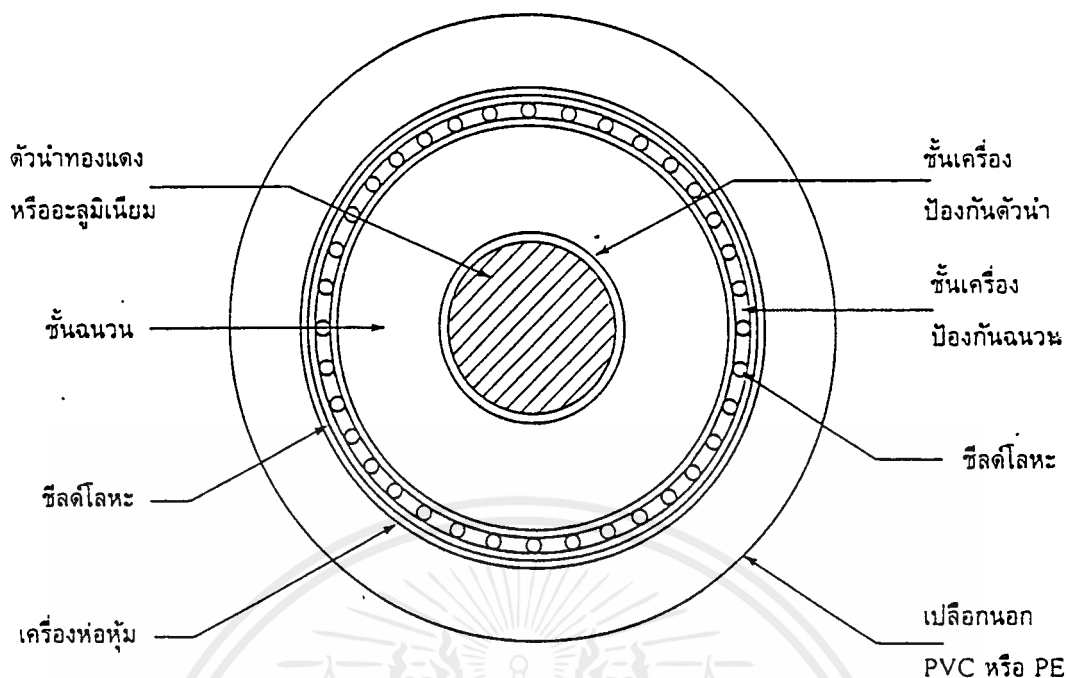
สายตัวนำที่จะกล่าวนี้เป็นสายตัวที่ใช้ในระดับแรงดัน 12 kV และ 24 kV ซึ่งเป็นสายทองแดงหุ้มฉนวนครอสลิงค์โพลีเอททีลีน

ส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับ ที่สำคัญมีดังนี้

- ตัวนำ (Conductor)
- เครื่องป้องกันตัวนำ (Conductor Screen)
- ฉนวน (Insulation)
- เครื่องป้องกันฉนวน (Insulation Shield or Screen)
- เครื่องป้องกันหรือชิลด์โลหะ (Metallic Shield)

1. ตัวนำ อาจเป็นได้ทั้งทองแดงหรืออลูมิเนียม โดยการใช้อลูมิเนียมของ กฟน. มีการใช้เฉพาะส่วนที่เป็นสายอากาศ (Overhead Line) เท่านั้น ส่วนที่เป็นสายใต้ดิน หรือเคเบิลและบัสบาร์ (Bus bar) ที่สถานีย่อยจะใช้ทองแดงเป็นตัวนำ

ในงานวิศวกรรมนั้น องค์ประกอบที่จะต้องพิจารณามีมากมาย ซึ่งได้แก่ ความปลอดภัย ราคาเหมาะสม (Economics) ความเชื่อถือได้ (Reliability) ความยืดหยุ่น (Flexibility) การใช้งาน (Operation) การป้องกัน การก่อสร้าง การติดตั้ง การบำรุงรักษา รายละเอียดข้อกำหนด ราคา มาตรฐาน กฎ กำหนดเวลา การจัดหา มลภาวะ สภาพอันตราย การขยายในอนาคต ความสวยงาม (Aesthetic Consideration) ซึ่งตารางที่ 3.1 เป็นตารางการเปรียบเทียบสายที่มีตัวนำทำมาจากทองแดงและอลูมิเนียมในงานวิศวกรรม



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายไฟฟ้าใต้ดิน (Underground Cable)

ตารางที่ 3.1 ตารางเปรียบเทียบสายไฟฟ้าทองแดงและอลูมิเนียมในงานวิศวกรรม

ลำดับที่	ข้อพิจารณา	สายไฟฟ้าทองแดง	สายไฟฟ้าอลูมิเนียม	หมายเหตุ
1	ความปลอดภัย	เท่ากัน	เท่ากัน	
2	ราคาเหมาะสม	-	ดีกว่า	
3	ความเชื่อถือได้	เท่ากัน	เท่ากัน	
4	ความยืดหยุ่น	เท่ากัน	เท่ากัน	
5	การใช้งาน	เท่ากัน	เท่ากัน	
6	การป้องกัน	เท่ากัน	เท่ากัน	
7	การก่อสร้าง (การผลิต)	-	ง่ายกว่า	
8	การติดตั้ง	ง่ายกว่า	-	สายที่ขนาดกระแสเท่ากัน
9	การบำรุงรักษา	ง่ายกว่า	-	สายที่ขนาดกระแสเท่ากัน
10	รายละเอียดข้อกำหนด	เท่ากัน	เท่ากัน	
11	การพิเคราะห์ราคา	เท่ากัน	เท่ากัน	
12	มาตรฐาน	เท่ากัน	เท่ากัน	
13	กฎ	เท่ากัน	เท่ากัน	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ข้อพิจารณา	สายไฟฟ้า ทองแดง	สายไฟฟ้า อลูมิเนียม	หมายเหตุ
14	กำหนดเวลา	เท่ากัน	เท่ากัน	
15	การจัดหา	-	ดีกว่า	
16	มลภาวะ	เท่ากัน	เท่ากัน	
17	สภาพอันตราย	เท่ากัน	เท่ากัน	
18	การขยายในอนาคต	เท่ากัน	เท่ากัน	
19	ความสวยงาม	เท่ากัน	เท่ากัน	

คุณสมบัติทั่วไปของทองแดงและอลูมิเนียม

ทองแดงและอลูมิเนียมมีคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญดังต่อไปนี้

	ทองแดง	อลูมิเนียม
Density kg/dm^3 at 20°C	8.89	2.68
Melting point	1082.8	657.8
Specific Heat $\text{J/kg. At Room Temperature}$	385.19	946.22
Linear Coefficient of Thermal Expansion per at room temperature $\times 10^{-6}$	16.6	23
Thermal conductivity $\text{Cal/m}^2/\text{m/hr/}$ at 20°C	3.62	2.02
Electrical Resistivity $\times \text{mm}^2/\text{m}$ at 20°C	0.018	0.029
Electrical conductivity m/ $\times \text{mm}^2$ at 20°C	56	35
Ultimate Strength - Hard N/mm^2	379.2	186.1
- Soft N/mm^2	220.6	82.7

หมายเหตุ

Ultimate Strength = คือหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ ณ จุดนี้แท่งวัสดุจะยืดออกอย่างสม่ำเสมอตลอดช่วงความยาว ถ้าการยืดเพิ่มขึ้นอีกจะเกิดรอยคอดบนแท่งวัสดุ

Yield Strength = คือหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในขณะที่วัสดุยืดหรือหดตัวอย่างถาวรตามค่าที่กำหนดไว้ เช่น กำหนด 0.2% ของหน่วยการยืดหด



Elongation = อัตราส่วนการยืดตัวของวัสดุเมื่อรับแรงดึง
 = $\frac{\text{ความยาวหลังสุด} - \text{ความยาวเดิม}}{\text{ความยาวเดิม}}$

Modulus of elasticity = อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรง กับหน่วยการยืดหดตัว
 = $\frac{\text{Stress}}{\text{Strain}}$

ตัวนำจะทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำจะเกิดความร้อน (I^2R) ถ้ามีกระแสไหลมาก หรือสายมีความต้านทานสูงก็จะเกิดความร้อนสูง ความร้อนนี้จะกระจายผ่านส่วนต่าง ๆ ของสายไฟฟ้าส่วนที่ห่อหุ้มตัวนำ การระบายความร้อนนี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้หุ้มสายและอุณหภูมิของอากาศโดยรวม

ความร้อนที่เกิดในสายตัวนำนี้จะทำให้สายตัวนำร้อนขึ้น อุณหภูมิของสายตัวนำนี้จะต้องไม่เกินอุณหภูมิที่สามารถทนได้ เช่น ฉนวนประเภทครอสลิงค์โพลีเอทิลีน จะทนอุณหภูมิได้สูงประมาณ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ กล่าวโดยทั่วไปคือ ความสามารถในการนำกระแสของสายไฟขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่สายตัวนำนั่นเอง จะเห็นได้ว่าระหว่างสายทองแดงกับสายอลูมิเนียม สายทองแดงมีความต้านทานต่ำกว่า จึงสามารถนำกระแสได้สูงกว่าสายอลูมิเนียม และสายเปลือยจะนำกระแสได้สูงกว่าสายหุ้มฉนวนเนื่องจากการระบายความร้อนดีกว่า

สำหรับลักษณะของตัวนำภายในสายไฟฟ้านั้น อาจเป็นสายเดี่ยว (Solid) หรือสายตีเกลียวหลาย ๆ เส้น (Stranded) ซึ่งอาจเป็นเส้นกลม ๆ หรืออาจเป็นเส้นที่ถูกบีบอัด (Compact) แล้วนำมาตีเกลียวก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ใช้ ซึ่ง กฟน. ใช้ตามมาตรฐาน IEC. (IEC Standard)

ขนาดของพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ จะเป็นตัวบ่งบอกถึงขนาดพิกัดแรงดันของสายไฟฟ้าฟ้านั้น ๆ ซึ่งขนาดของสายไฟฟ้าที่การไฟฟ้านครหลวงใช้จะมีขนาดตั้งแต่ 35, 70, 240, 400, 500, 800 mm^2 จนถึง 1200 mm^2 โดยสามารถจำแนกตามระดับของแรงดันได้ดังนี้

- แรงดัน 12 kV ใช้สายไฟฟ้าได้ดินขนาด 35, 70, 240, 400 mm^2
- แรงดัน 24 kV ใช้สายไฟฟ้าได้ดินขนาด 400, 800 mm^2
- แรงดัน 69 kV ใช้สายไฟฟ้าได้ดินขนาด 500, 800 mm^2
- แรงดัน 115 kV ใช้สายไฟฟ้าได้ดินขนาด 800 mm^2
- แรงดัน 230 kV ใช้สายไฟฟ้าได้ดินขนาด 800, 1200 mm^2

2. เครื่องป้องกันตัวนำ ส่วนประกอบชิ้นนี้ถ้าเป็นสายไฟฟ้าฉนวนกระดาศ เครื่องป้องกันตัวนำจะทำมาจากกระดาศ และสายไฟฟ้าฉนวนด้วยครอสลิงค์โพลีเอททิลีน เครื่องป้องกันตัวนำจะทำมาจากวัสดุโพลีเมอร์นำกระแส (Conductive Polymer Material) ซึ่งจัดได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ชั้นเครื่องป้องกันตัวนำจะเคลือบบนผิวนอกของตัวนำโดยตรง เพื่อให้ผิวนอกของตัวนำมีความเรียบ และไม่ทำให้เกิดการแตกต่างของอากาศ ในช่องว่างดังกล่าวเมื่อสายเคเบิลได้รับแรงดันสูงซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้ตัวนำได้รับความเสียหายได้ ดังนั้นสายเคเบิลได้ดินที่นำมาใช้กับแรงดันมากกว่า 24 kV จึงต้องมีชั้นเครื่องป้องกันตัวนำ

3. ฉนวน เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของเคเบิล มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้พลังงานรั่วออกมาทำอันตรายต่อบุคคลหรือสภาพแวดล้อม และป้องกันมิให้เกิดการลัดวงจร คุณค่าและคุณภาพของสายไฟฟ้านั้นจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำฉนวน

4. เครื่องป้องกันฉนวน เป็นชั้นบาง ๆ หุ้มฉนวนอีกชั้นหนึ่ง มีคุณสมบัติเป็นตัวนำ (Conductive Material) อาจเป็นสารคาร์บอนอิมเพกเนทโคทเทป (Carbon Impregnated Cloth Tape) ทำหน้าที่คล้ายกับชิลด์ตัวนำ (Conductor Shield) โดยมีหน้าที่หลักอยู่ 3 ประการ คือ

- จะต้องไม่ให้เกิดช่องว่างระหว่างฉนวนและเครื่องป้องกัน มิฉะนั้นจะเป็นสาเหตุให้เกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge)
- ลดสัญญาณความถี่วิทยุ (Radio Frequency Interference)
- เพิ่มความปลอดภัยต่อบุคคลที่อาจสัมผัสถูกสายไฟฟ้า

5. เครื่องป้องกันหรือชิลด์โลหะ ทำมาจากทองแดง (Copper Wire Screen or Copper Wire Shield) ตะกั่ว (Lead Sheath) อลูมิเนียม หรืออาจทำด้วยเทปโลหะ (Metal Tape, Corrugated Metal or Metal Drain Wire ที่นำมาประกอบขึ้นรูปเป็นลวด เทป หรือปลอกคลุม โดยทำหน้าที่ดังนี้

- ทำหน้าที่ปล่อย (Drain) หรือเป็นทางผ่านสำหรับกระแสคายประจุ (Discharge) ต่าง ๆ หรือกระแสรั่วไหล (Leakage Current) ลงดิน และยังทำหน้าที่ปรับระดับความต่างศักย์ของเครื่องป้องกันฉนวนให้เท่ากับดินอีกด้วย โดยการทำการกราวด์ (Grounding) ของระบบไฟฟ้า 12 kV และ 24 kV อีกทั้งยังช่วยในการทำครอสบอนดิง (Cross-Bonding) สำหรับสายไฟฟ้าที่ใช้กับระดับแรงดัน 69 kV และ 115 kV เพื่อที่จะลดแรงดันเหนี่ยวนำ (Induce Voltage) ที่เกิดขึ้นในเครื่องป้องกันฉนวน

- ช่วยลดความเสียหายของสายอันเนื่องจากแรงดันชั่วขณะ (Surge Voltage)
- สามารถออกแบบให้เป็นตัวนำสำหรับกระแสลัดวงจรเนื่องจากฟอลต์ไหลกลับได้ตามต้องการ

6. เครื่องห่อหุ้ม (Non-Metallic Sheath) สามารถแบ่งเป็นส่วนประกอบย่อยได้อีก 2 ส่วน คือ

- เครื่องห่อหุ้ม (Armouring หรือ Separator หรือ Cushion) บางครั้งจะใช้เครื่องห่อหุ้มเป็นชั้นต่อจากเครื่องป้องกันหรือชีลด์ เพื่อทำหน้าที่ป้องกันแรงทางกล ความดัน หรือความเครียดต่าง ๆ ที่กระทำต่อฉนวนหรือตัวนำของสายไฟฟ้าใต้ดิน และป้องกันไม่ให้ส่วนที่เป็นโลหะไปทำให้เกิดรอยหรือสัมผัสโดยตรงกับส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ซึ่งอาจจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความถี่ระหว่างเปลือกนอกกับเทปโลหะ กรณีที่สายมีความคดโค้งหรือของวัสดุที่ใช้โดยมากจะเป็นผ้าหรือใยสังเคราะห์ หรือเทป จากการสังเคราะห์ เช่น ไมลาร์ (Mylar) ไนลอน (Nylon) เป็นต้น

- เปลือกนอก (Jacket) เป็นชั้นนอกสุดของสายไฟฟ้าใต้ดิน มีหน้าที่ป้องกันแรงทางกล ความชื้น และการกัดกร่อน (Corosion) ที่จะเกิดขึ้นกับสายไฟฟ้า เปลือกนอกผลิตจากโพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride ; PVC) ซึ่งต่อมาได้ถูกเปลี่ยนเป็นโพลีเอทิลีน (Polyethylene) ซึ่งทนสภาวะแวดล้อมได้ดีกว่า

เครื่องห่อหุ้มภายนอกนี้อาจจะมีส่วนประกอบมากกว่า 2 ส่วนนี้ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิตที่มองเห็นถึงปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้น เช่น อาจจะมีบรรจุชั้นของวัสดุที่ใช้ป้องกันน้ำซึม (Water Blocking) เข้าไปในสายไฟฟ้าอีกชั้นหนึ่ง โดยมีลักษณะเป็นสารสังเคราะห์ วางคั่นอยู่ระหว่างเครื่องป้องกันฉนวน กับ ชีลด์โลหะซึ่งถ้าสารสังเคราะห์นี้ถูกน้ำมันจะพองตัวพร้อมกับปิดกั้นน้ำไม่ให้ซึมไปยังจุดอื่น หรืออาจใช้แผ่นอลูมิเนียม (Aluminium Foil) ติดตั้งเพื่อทำให้การป้องกันความชื้นสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สำหรับโครงสร้างของสายไฟฟ้าใต้ดินที่การไฟฟ้านครหลวงใช้ในปัจจุบันสามารถแยกออกตามลักษณะของฉนวนได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

- สายไฟฟ้ากระดาษบรรจุด้วยน้ำมัน (Paper Insulated Oil Filled Cable) โดยทั่วไปมักจะนำมาใช้กับระบบส่งแรงดัน 230 kV ในชั้นของฉนวนที่ทำด้วยกระดาษชุบน้ำมัน (Impregnated Paper) และที่จุดศูนย์กลางสายไฟฟ้าในชั้นตัวนำจะเป็นท่อทางของน้ำมัน (Oil Duct)

- สายไฟฟ้าฉนวนของแข็ง (Solid Dielectric Cable) โดยทั่วไปจะนำมาใช้กับระบบส่งย่อยระดับแรงดัน 115 kV และ 69 kV รวมทั้งในระบบแรงดันปานกลาง 12 kV และ 24 kV และระบบจำหน่ายแรงดันต่ำด้วย ในชั้นของฉนวนทำมาจากสารโพลีเมอร์ (Polymer) ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายก็คือ ครอสลิงค์โพลีเอทิลีน ซึ่งในปัจจุบันนี้สายฉนวนของแข็งได้พัฒนาและนำมาใช้ในระบบส่งแรงดันสูงแล้ว

3.2. ท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน (Duct or Duct Bank) [9]

ท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินที่ใช้กันในปัจจุบันมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 115, 140 และ 200 mm จะเลือกใช้ขนาดใดก็ขึ้นอยู่กับขนาดของสายที่นำมาวางในท่อเหล่านี้ นอกจากนี้ท่อร้อยสายยังสามารถแบ่งชนิดได้ดังนี้

- ท่อเหล็กหนา (Rigid Steel Conduit ; RSC) ท่อชนิดนี้สามารถที่จะวางใต้ดิน วางใต้ทางเท้า หรือวางใต้ถนนก็ได้

คุณสมบัติ - ทนต่อแรงกดและแรงกระแทกได้ดี

- ระบายความร้อนได้ดี

ข้อเสีย - ถ้าใช้ฝังใต้ดินอายุการใช้งานจะสั้นกว่าท่อโพลิเอทิลีน

- เมื่อมีกระแสไหลผ่านจะเกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ทำให้เกิดความร้อนขึ้น

- ราคาแพง

- ท่อเอชดีพีอี (High Density Polyethylene Duct ; HDPE) เป็นท่อที่มีความยาว 6 m และ 10 m ใช้สำหรับวางใต้พื้นผิวทางเท้าหรือถนน โดยไม่หุ้มคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งหมด แต่จะหุ้มเฉพาะส่วนที่เป็นรอยต่อของท่อหรือบางส่วนของท่อที่ไม่อยู่ใต้ดินดิน นอกจากนี้ยังใช้เป็นท่อข้องอ (Elbow) ขึ้นเสาไรเซอร์(Riser) อีกด้วย

คุณสมบัติ - ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี

- ฉนวนโพลีเอทิลีนไม่ทำให้เกิดกระแสไหลวน

- ยืดหยุ่นและตัดโค้งได้ง่าย

- ทนต่อความร้อนและความชื้นได้ดี

ข้อเสีย - ทนแรงกดและแรงกระแทกได้จำกัด

- ท่อโพลีไวนิลคลอไรด์ หรือ พีวีซี (Polyvinyl Chloride ; PVC) ในปัจจุบันเลิกใช้แล้ว เนื่องจากไม่ทนต่อสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ

- ท่อแร่ใยหิน (Asbestos Cement Duct) เป็นท่อที่ผลิตจากส่วนผสมของแร่ใยหินและปูนซีเมนต์มีความยาวท่อนละ 4 m ใช้วางใต้พื้นทางเท้าหรือถนน โดยจะวางอยู่ระหว่างบ่อพัก หรือวางไปยังเสาไรเซอร์ ซึ่งเป็นเสาที่ใช้ติดตั้งอุปกรณ์มีดปลายสายเคเบิลเพื่อเป็นจุดต่อระหว่างสายเคเบิลกับสายในอากาศ ท่อชนิดนี้ต้องหุ้มด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กตลอดแนว

คุณสมบัติ - ทนทานต่อการผุกร่อน

- สามารถระบายความร้อนได้ดี

- ราคาถูก
- ข้อเสีย - เปราะและแตกหักง่าย
- มีน้ำหนักมาก
- โยหินทำให้เกิดมลภาวะเป็นพิษ

- ท่อเอฟอาร์อี (Fiberglass Reinforce Epoxy ; FRE) ปัจจุบันได้นำท่อร้อยสายชนิดเอฟอาร์อี มาใช้งานแทนท่อชนิดเรย์หินสำหรับมาตรฐานของท่อจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 2, 3, 4, 5, 6 และ 8 นิ้ว มีความยาว 6 m ในการติดตั้งใช้งานสามารถที่จะฝังดินได้โดยตรง หรือหุ้มด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในกรณีที่ดินมีการทรุดตัวมาก

- คุณสมบัติ - มีความแข็งแรงและทนทานต่อแรงที่มากกระทำได้สูง
- น้ำหนักเบา มีแรงเสียดทานในขณะลากสายเคเบิลต่ำ
- เป็นท่อที่ไม่เป็นพิษเพราะผลิตมาจากเส้นใยแก้ว (E-Glass) และอีพ็อกซีซึ่งทนต่อการกัดกร่อน (Corrosion Resistance

Epoxy Resin)

- ใช้งานที่อุณหภูมิจาก 40 °C ถึง 110 °C
- ข้อเสีย - ราคาแพง
- ปร่าง่าย

- ท่อพีเอฟพี (Polyester Concrete Fiberglass Reinforce Plastic Pipe ; PFP) เป็นท่อร้อยสายใต้ดินที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่ โดยมีคุณสมบัติสูงกว่าท่อเอชดีพีอีและท่อเรย์หิน กล่าวคือ ในบริเวณที่มีการทรุดตัวของพื้นดินไปมาก ท่อชนิดพีเอฟพี สามารถวางโดยไม่ต้องหุ้มคอนกรีตเสริมเหล็กและใช้งานได้โดยไม่เกิดความเสียหาย เพราะจุดต่อของท่อชนิดพีเอฟพี มีความยืดหยุ่น และในคุณสมบัติเฉพาะตัวของท่อเองก็มีความสามารถในการรับแรงที่มากกระทำได้สูง เช่นเดียวกับท่อร้อยสายชนิดเอฟอาร์อี อย่างไรก็ตามท่อชนิดพีเอฟพี จะมีความหนามากกว่าท่อชนิดเอฟอาร์อี

3.3.บ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน (Manhole and Handhole) [1]

บ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน เป็นชนิดคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งส่วนใหญ่จะก่อสร้างอยู่ใต้ผิวดิน ซึ่งมีการจราจรของยานพาหนะต่าง ๆ ซึ่งจะต้องรับน้ำหนักสูงสุดได้ 18 ตัน (Ton) ผนังด้านบนของบ่อพักส่วนบนจะต้องอยู่ใต้ระดับผิวดินไม่น้อยกว่า 40 cm. บ่อพักจะมีฝาปิด (Manhole Frame and Cover) ทำด้วยเหล็ก ที่ก้นของบ่อพักจะต้องทำซัม (Sump) ไว้สำหรับสูบน้ำออกเมื่อเวลาจะทำงานในบ่อพัก ลักษณะของการจัดหน้าต่างของบ่อพักขึ้นอยู่กับกรวางท่อที่

จะออกจากบ่อพักนั้น ๆ บ่อพักที่มีขนาดเล็ก ๆ เราสามารถจะหล่อสำเร็จรูป และยกลงมาวางในที่ที่จะติดตั้ง แต่ถ้าเป็นบ่อพักขนาดใหญ่จำเป็นต้องก่อสร้างในที่ที่จะใช้งานเพราะมีน้ำหนักมาก

- หน้าที่ของบ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน

1. ใช้วางและจัดทำหัวต่อสาย (Cable Splice) เนื่องจากไม่สามารถลากสายออกจากเคเบิลเทรนช์ (Cable Trench) ไปขึ้นเสาไรเซอร์ (Riser) ได้ (กรณีที่มีระยะทางตรงมากกว่า 150.00 เมตร)

2. ใช้ในการทำระบบกราวด์สำหรับระบบสายป้อน (12, 24 kV:) และทำครอสบอนด์สำหรับระบบสายส่ง (69, 115, 230 kV.)

3. ใช้ในการเปลี่ยนหรือแยกทิศทางของท่อร้อยสาย

4. เพื่อช่วยในการลากสายให้สะดวกมากยิ่งขึ้น

- ชนิดของบ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน

ชนิดของบ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดินสามารถจำแนกออกตามระดับของแรงดันได้ดังนี้

1. ระดับแรงดัน 69 - 115 kV ประกอบด้วย แมนโฮล (Manhole ; MH) ชนิด A-4/1, A-4/2, B-3/1S, B-3/2, L-1/1, T-3/1 และ T-5/1

2. ระดับแรงดัน 12 - 24 kV สามารถแยกออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

- แฮนด์โฮล (Handhole ; HH) ซึ่งประกอบด้วย ชนิด C, C-1 < C-2/1 และ C-3

- แมนโฮล (Manhole ; MH) ซึ่งประกอบด้วย ชนิด A-1/1, A-1/2, A-2/1, A-3/1, B-4/1, B-4/2, L-2/1, L-2/2 และ T-4/1

3.4. หัวต่อสายไฟฟ้าหรือจุดต่อสาย (Cable Joint and Termination) [6]

ในการติดตั้งระบบไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นสายส่ง สายจำหน่ายที่เป็นสายไฟฟ้า กรณีที่มีระยะทางยาว ๆ จำเป็นต้องมีการเชื่อมต่อ (Joint) แต่ละส่วนของสาย เพื่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางการผลิต (เนื่องจากไม่สามารถผลิตสายที่มีระยะทางยาว ๆ ได้) ในทุก ๆ สายไฟฟ้า แต่ละวงจร จะต้องมีจุดต่อสายอย่างน้อย 2 จุด เพื่อเป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศกับสายใต้ดิน บัสดาร์กับสายใต้ดิน หม้อแปลงกับสายใต้ดิน และอื่น ๆ

3.5. หัวต่อสายไฟฟ้าใต้ดิน (Splice) [1]

หัวต่อของสายไฟฟ้าใต้ดิน เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการใช้สายไฟฟ้าใต้ดิน การออกแบบจะต้องมีการพัฒนาให้ดียิ่งขึ้น โดยจะคำนึงถึงความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดต่อ

อุปกรณ์ที่จะนำมาทำเป็นหัวต่อของสายไฟฟ้าใต้ดิน ควรจะมีคุณสมบัติดังนี้ คือ

- มีค่าความแข็งแรงของฉนวน (Dielectric Strength) สูง
- มีค่าการสูญเสีย (Dielectric Power Factor)

อุปกรณ์เหล่านี้ไม่เพียงแต่จะทนต่อการทดสอบเพียงเวลาสั้น ๆ เท่านั้น จะต้องสามารถทนและใช้งานได้ตลอดไป ในทางอุดมคติ หัวต่อของสายไฟฟ้าใต้ดินนี้ควรมีคุณสมบัติทางกลการยึดหยุ่นใกล้เคียงกับสายไฟฟ้า ซึ่งจุดประสงค์ของอุปกรณ์เหล่านี้มีไว้เพื่อ

- ต่อตัวนำของเคเบิลเข้าด้วยกัน
- ทำหน้าที่แทนฉนวนของสาย

3.6. หัวสายไฟฟ้าใต้ดิน (Terminator) [1]

หน้าที่ของหัวสายไฟฟ้าใต้ดิน

ในระบบไฟฟ้าใต้ดิน ส่วนสำคัญอันหนึ่งของระบบก็คือ หัวสายไฟฟ้าใต้ดิน หรือ พอทเฮด (Pot head) ซึ่งส่วนมากจะติดตั้งอยู่บนเสาที่เรียกว่าหัวไรเซอร์ (Riser Pole) หรืออยู่ในแผงควบคุมในสถานีย่อย หรือบางครั้งอาจอยู่บนเสาว่างหม้อแปลง ตรงบริเวณสวิตช์เกียร์ และติดตั้งอยู่อีกหลาย ๆ ที่ ตามบริเวณที่เราต้องการใช้สายไฟฟ้าไปสิ้นสุด เพื่อจะต่อเป็นสายอากาศไปหรือเพื่อจุดประสงค์อื่น การที่สายใต้ดินมาสิ้นสุดตรงนี้ ทำให้ชิลด์ ของสายใต้ดินมาสิ้นสุดด้วย เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเรเดียลสเตรส (Radial Stress) , ลองจิจูดสเตรส (Longitude Stress) ถ้าชิลด์ของสายใต้ดินไม่ขาดสเตรส (Stran) ทั้งสองอย่างเหล่านี้ก็จะถูกควบคุมให้คงที่สม่ำเสมอ และมีค่าตามที่กำหนดไว้ เมื่อชิลด์ของสายใต้ดินขาดลง ผลจากการเปลี่ยนแปลงของสเตรส ทั้งสองทำให้ฉนวนของเคเบิลตรงจุดที่ชิลด์ขาดนี้เสียหาย ดังนั้นเพื่อป้องกันความเสียหายอันนี้ เราจึงจำเป็นต้องมีการทำการป้องกัน ซึ่งเรียกว่า การทำหัวสาย (Terminator)

ชนิดของหัวสายเรียกตามสถานที่ใช้หรือชนิดของสาย

1. ชนิดใช้ภายนอกอาคาร (Outdoor Type) เป็นหัวต่อสาย ที่สามารถใช้อยู่ภายนอกอาคารและใช้งานได้ในสภาพทุกภาวะอากาศ
2. ชนิดใช้ภายในอาคาร (Indoor Type) เป็นหัวต่อสาย ที่ใช้งานเฉพาะอยู่ในอาคาร ไม่สามารถจะทนทานต่อ สภาวะได้ทุกสภาวะ
3. ชนิดแกนเดี่ยว (Single Core Type) เป็นหัวต่อสาย สำหรับสายไฟฟ้าแบบแกนเดี่ยว แต่อาจจะใช้กับสาย 3 แกนก็ได้ โดยเพิ่มส่วนประกอบบางอย่าง
4. ชนิด 3 หรือ 4 แกน (Three or Four Core Type) เป็นหัวต่อสาย ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้กับสายแกนเดี่ยว หรือหลาย ๆ เส้นก็ได้

3.7. เสาโรเซอร์ (Riser Pole) [1]

คือส่วนของท่อยึดสายที่โผล่พื้นดินขึ้นมา เพื่อใช้สำหรับเป็นตัวให้สายไฟฟ้าได้ดิน ผ่านไปเชื่อมต่อกับระบบของสายอากาศ โดยโรเซอร์นี้จะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ ได้แก่

1. ข้องอ 90° (90° Elbow) มีลักษณะเป็นข้อโค้ง 90° วัสดุที่ใช้ทำมาจาก เหล็กกล้า วาไนซ์ (Galvanized Steel), พีวีซี, เอชดีพีอี
2. ท่อโรเซอร์ (Riser Conduit) เป็นท่อที่ต่อจากข้องอขึ้นไป โดยจะแนบอยู่กับเสาคอนกรีต (Concrete Pole) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันทางกลให้กับสายไฟฟ้าได้ดิน เมื่อโผล่พื้นดินขึ้นมาแล้ว วัสดุที่ใช้ทำมาจากท่อเหล็กหนา (Rigid Steel) หรือ เอชดีพีอี

3.8. เทป (Tape) [1]

ชนิดของเทป

1. เทปฉนวนสำหรับแรงดันสูง (High Voltage Insulating Tape) ใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ทำด้วยวัสดุหลัก คือเอททิลีนโพรพิลีนรีบเบอร์ (Ethylene Propylene Rubber ; EPR) จะต้องมีคุณสมบัติยึดแนบกับสิ่งที่ต้องการจะพันหุ้มได้ง่าย และสามารถหลอมประสานตัวเองเป็นเนื้อเดียวกันได้ เทปนี้ไม่ผ่านวิธีการอบ สามารถเก็บไว้ใช้งานได้นาน และสามารถใช้ทำการต่อสายและทำขั้วปลายสายของสายไฟฟ้าแรงสูง
2. เทปกึ่งตัวนำไฟฟ้า (Electrical Semi-Conducting Tape) เป็นเทปกึ่งตัวนำไฟฟ้า ทำด้วยวัสดุหลักคือเอททิลีนโพรพิลีนรีบเบอร์ เทปนี้ทำหน้าที่ลดความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างฉนวนไฟฟ้าแรงสูงกับตัวนำไฟฟ้า เช่น ใช้พันหัวต่อสายไฟฟ้าแรงสูง เพื่อลดความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างชั้นของฉนวนไฟฟ้าแรงสูง กับชั้นของฉนวน
3. เทปตาข่าย (Copper Mesh Tape) เป็นเทปที่ทอด้วยเส้นลวดทองแดงอบตีบุก ใช้พันหัวต่อสายไฟฟ้าแรงสูง ทำหน้าที่เป็นฉนวนของหัวต่อ เพื่อคลุมสนามไฟฟ้าให้ต่อเนื่องกับฉนวนของสายไฟฟ้าแรงสูง และใช้พันเป็นผิวตัวนำไฟฟ้า รูปทรงกรวยของขั้วปลายสายไฟฟ้าแรงสูงเพื่อลดความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณปลายฉนวนของสายไฟฟ้าแรงสูง
4. เทปยางซิลิโคน (Silicone Rubber Electrical Tape) เทปนี้ประกอบด้วย สารอินออร์แกนิก (Inorganic Silicone) ที่ผ่านการอบอย่างเต็มที่แล้ว ตัวเทปถูกฉาบด้วยสารซิลิโคน ชนิดหนึ่ง และสามารถหลอมประสานตัวเองเป็นเนื้อเดียวกันได้ และสามารถทนอุณหภูมิสูงมาก เทปนี้ใช้พันขั้วปลายสายไฟฟ้าแรงสูง เพื่อลดการเกิดไฟลุกไหม้ที่หัวปลายสายไฟฟ้าแรงสูงเนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ เช่น ผุ่นละออง ความชื้น

5. เทปพีวีซี (PVC Electrical Adhesive Tape) จะต้องเป็นเทปชนิดติดไฟช้ามาก มีความทนทานต่อความชื้นและทนแดดทนฝนได้ดี มีคุณสมบัติในการห่อหุ้ม และยึดแน่นกับสิ่งที่ผูกพันได้อย่างดีเลิศ คงทนต่อการขูด ถนความชื้น ทนกรดบางชนิด ทนด่าง และทนสนิม

3.9. การออกแบบการก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน [1]

การก่อสร้างระบบสายไฟฟ้าใต้ดินในปัจจุบันมีหลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทจะมีค่าใช้จ่ายมากน้อยแตกต่างกันออกไป จึงจำเป็นต้องพิจารณาออกแบบที่ใช้ในการก่อสร้างให้เหมาะสมและคุ้มค่ากับค่าใช้จ่ายที่ได้ลงทุนไป ในปัจจุบันเราแบ่งแบบการก่อสร้างออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

ก. ประเภทหุ้มท่อร้อยสายด้วยคอนกรีต (Concrete Encased Duct Bank)

เป็นแบบการก่อสร้างเดิมของ กฟน. ที่ยังคงใช้อยู่ในปัจจุบัน ใช้กับงานก่อสร้างในระบบจำหน่ายและระบบส่ง ลักษณะการก่อสร้างเป็นแบบใช้ท่อแอสเบสตอส (Asbestos Cement Duct) แล้วหุ้มทับด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งเป็นตัวป้องกันทางกลให้กับสายไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี การก่อสร้างท่อร้อยสาย นี้จะต้องมีบ่อพักสาย เป็นระยะ ๆ สำหรับใช้ในการลากสาย ต่อสายต่อแยกสาย หรือในกรณีที่มีการหักมุมของสายไฟฟ้า การก่อสร้างชนิดนี้มีข้อดีดังนี้

- ความปลอดภัยของเคเบิลสูงมาก
- จัดวางเคเบิลเป็นจำนวนมาก ๆ ได้ง่ายกว่า
- การบำรุงรักษาทำได้สะดวก

ข้อเสีย คือ

- ค่าใช้จ่ายสูงมาก
- ความสามารถในการระบายความร้อนต่ำ ทำให้นำกระแสไฟฟ้าต่ำ
- ใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างนานมาก
- การตัดโค้งเมื่อพบอุปสรรค ทำได้ลำบากมาก (ต้องใช้ระยะทางยาว)

ข. ประเภทฝังดินโดยตรง (Semi - Direct Burial)

เป็นแบบการก่อสร้างแบบใหม่ ซึ่งใช้กับงานก่อสร้างระบบจำหน่ายและระบบส่ง โดยนำท่อชนิดใหม่ ซึ่งสามารถคดงอได้ (Flexible) มาใช้ ลักษณะการก่อสร้างจะใช้บล็อกคอนกรีต (Concrete Spacer Block) บังคับท่อดังกล่าวเป็นระยะ ๆ เพื่อช่วยรักษาระยะห่างระหว่างท่อให้คงที่ การก่อสร้างชนิดนี้จะไม่มีการหุ้มท่อร้อยสายด้วย คอนกรีตเสริมเหล็ก แต่จะมีแผ่นคอนกรีตปิดด้านบนเป็นตัวป้องกัน การก่อสร้างแบบนี้จำเป็นต้องมีบ่อพักสาย เช่นเดียวกับการก่อสร้างประเภทแรก การก่อสร้างชนิดนี้มีข้อดีดังนี้

- ค่าใช้จ่ายต่ำกว่าแบบแรก

- ระยะเวลาในการก่อสร้างน้อยกว่าแบบแรก
- ความสามารถในการระบายความร้อนดีกว่าแบบแรก
- การตัดโค้งเมื่อพบอุปสรรค ทำได้ง่ายกว่าแบบแรก

แต่มีข้อเสีย คือ

- ความปลอดภัยของเคเบิลต่ำกว่าแบบแรก

ค. ประเภทฝังดินโดยตรง (Direct Burial)

เป็นแบบการวางสายไฟฟ้าให้มีความลึกตามมาตรฐานโดยไม่ใช้ท่อร้อยสายและไม่มี การหุ้มทับด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก มีแต่การวางแผนคอนกรีตเสริมเหล็ก และแถบเตือนอันตราย (Warning Sign Strip) ใต้ดินเหนือแนวสายไฟฟ้า และบนพื้นดินจะมีเป็นตัวที่ใช้แสดงแนวของ การก่อสร้าง แสดงให้ทราบแนวสายเคเบิลใต้ดินเพื่อความสะดวกในการบำรุงรักษาภายหลัง นอกจากนี้ยังเป็นจุดสังเกตเพื่อไม่ให้หน่วยงานอื่นมาขุดเจาะบริเวณแนวสายเคเบิลอีกด้วย

ข้อดีของการก่อสร้างชนิดนี้

- ค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด (เมื่อเทียบทั้ง 3 แบบ)
- ระยะเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างน้อยที่สุด (เมื่อเทียบทั้ง 3 แบบ)
- ความสามารถในการระบายความร้อนดีที่สุด (เมื่อเทียบทั้ง 3 แบบ)
- การตัดโค้งเมื่อพบอุปสรรคทำได้ง่ายที่สุด (เมื่อเทียบทั้ง 3 แบบ)

ข้อเสีย

- ความปลอดภัยของสายไฟฟ้าต่ำที่สุด (เมื่อเทียบทั้ง 3 แบบ)
- การบำรุงรักษาทำได้ยากที่สุด (เมื่อเทียบทั้ง 3 แบบ)

3.10. การออกแบบบ่อพักสาย [1]

3.10.1. บ่อพัก (Manhole)

เป็นชนิดก่อสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่วนใหญ่จะอยู่ใต้ผิวดินสามารถรับน้ำหนักได้สูง สุด 18 ตัน บ่อพักจะมีฝาปิด (Manhole Frame & Cover) ทำด้วยเหล็ก

เราสามารถแบ่งประเภทของบ่อพักตามการใช้งานได้ 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้กับแรงดัน 12 , 24 kV. และประเภทที่ใช้กับแรงดัน 69 , 115 kV. ส่วนการเลือกชนิดของบ่อพักที่ใช้ใน ระดับแรงดันใด ๆ นั้นจะขึ้นกับส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้

1. ทิศทางของแนวท่อร้อยสายไฟฟ้า จะเป็นแนวตรง , เลี้ยวซ้าย , เลี้ยวขวา หรือแยก ออกเป็น 2 ทาง เป็นต้น

2. จำนวนของท่อร้อยสายไฟฟ้า หากมีจำนวนท่อมาก ๆ ขนาดของบ่อพักก็จำเป็นต้องใหญ่ตามไปด้วย เพราะจะมีสายไฟฟ้าย่อยผ่าน หรือมีการต่อสายภายในบ่อพักเป็นจำนวนมาก ในลักษณะนี้จึงควรใช้แบบที่มีฝาบ่อ 2 ฝา เพื่อทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดี เมื่อผู้ปฏิบัติงานลงไปติดตั้งหรือซ่อมแซม และยังมีที่ว่างพอจะทำงานได้ด้วยความสะดวก

3. โอกาสของโครงการที่จะดำเนินการต่อไปในอนาคตว่าจะต่อไปในทิศทางใด

- การลงตำแหน่งบ่อพัก ตำแหน่งบ่อพักที่ดีคือ

1. ไม่กีดขวางการจราจรในขณะก่อสร้าง และทำการลากสายหรือในการซ่อมบำรุง ในกรณีที่เป็นเขตที่มีการจราจร หรือประชากรหนาแน่น

2. อยู่ใกล้ตำแหน่งเสาไรเซอร์ ให้มากที่สุด

3. ไม่อยู่ใกล้กันมาก เพราะจะทำให้ค่าใช้จ่ายสูง

4. มีระยะห่างระหว่างบ่อพักไม่เกิน 240.00 m ถ้ามากกว่านี้จะลากสายลำบาก และเปลืองสายหรือตัวนำอาจยึดตัว เนื่องจากแรงดึงที่ใช้ในการลากสายมากเกินไปจนทำให้เสียคุณสมบัติทางด้านกายภาพหรือทางด้านไฟฟ้า

5. ไม่เปลี่ยนระดับหรือคดเคี้ยวมาก เพราะจะทำให้ลากสายลำบาก

6. กระทบกระเทือนต่อสิ่งปลูกสร้างหรือสภาวะแวดล้อมเดิมให้น้อยที่สุด ที่พบบ่อยคือ แผ่นคอนกรีตพื้นถนน, คันหินของทางเท้า (Curb) และต้นไม้ เวลาที่ก่อสร้างจำเป็นต้องปักเสา (Sheet Pile) กันดินพัง ซึ่งจะมีความหนาประมาณ 20 cm. เมื่อทำการตัดแบ่งส่วน และกำหนดระยะห่างระหว่างผนังบ่อกับขอบถนนก็ต้องเผื่อระยะไว้ด้วย และต้องไม่อยู่ใกล้รอยต่อของแผ่นคอนกรีตพื้นถนน เพื่อจะได้ไม่ต้องเสียเงินค่าซ่อมถนนเพิ่มขึ้น เพราะเวลาซ่อมต้องซ่อมหมดทั้งแผ่นที่มีการชำรุด

7. เลือกชนิดและรูปร่างของบ่อพักให้เหมาะสมกับการใช้งาน

8. ควรจัดระยะห่างระหว่างบ่อพักให้มีขนาดใกล้เคียงกัน ตลอดแนวเพื่อประโยชน์ในการออกแบบกรอบสπονดิ่ง สำหรับระบบสายส่ง

แต่ในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถที่จะออกแบบให้ครอบคลุมหัวข้อเหล่านี้ได้ทั้งหมด ผู้ออกแบบต้องใช้วิจารณญาณของตัวเองที่จะประนีประนอม (Compromise) องค์กรประกอบเหล่านี้เข้าด้วยกัน เพื่อที่จะสามารถออกแบบได้ดีที่สุด

3.10.2. ท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน (Duct Bank)

หลักการพิจารณาการออกแบบท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน

1. การออกแบบขนาดของท่อต้องพิจารณาถึงขนาดของสายไฟฟ้าที่ใช้ และลักษณะการจัดวางสายภายในท่อ โดยแยกการพิจารณาได้ 2 ลักษณะดังนี้

1.1 การวางสาย 3 เส้น ต่อ 1 ท่อ (ระบบ 22 และ 24 kV.)

โดยให้ D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ

d = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของสายไฟฟ้าแต่ละเส้น

ในการออกแบบท่อต้องพิจารณาค่าอัตราส่วนอัด (Jam Ratio ; D/d) โดยถ้ามีค่ามากกว่า 3.0 จะทำให้สายแต่ละเส้นข้ามอีก 2 เส้นได้ ในการออกแบบที่ดีค่าดังกล่าว ไม่ควรเกิน 2.5 เนื่องจากจะได้สายไฟฟ้าวางอยู่ในรูปสามเหลี่ยม (Triangular) ซึ่งทำให้การเกิดการสูญเสีย (Electrical Loss) น้อยกว่าการวางแบบอื่น

1.2. การวางสาย 1 เส้น ต่อ 1 ท่อ (ระบบ 69 และ 115 kV.)

ขนาดของท่ออย่างน้อยที่สุดประมาณ 1.25 เท่าของขนาดสายที่ใช้ แต่ค่าที่ใช้โดยทั่วไปประมาณ 1.5 - 2.5 เท่าของขนาดสายไฟฟ้า

2. ควรเลือกลักษณะการจัดรูปร่างของท่อร้อยสายให้เหมาะสม

3. พยายามให้เป็นช่วงตรงมากที่สุด เพื่อสะดวกในการลากสาย

4. การวางท่อควรออกแบบให้สามารถระบายน้ำที่ขังในท่อออกไปส่วนอื่นได้

5. ระดับหลังท่อร้อยสาย จะต้องมีความลึกไม่ควรต่ำกว่า 1 m จากผิวการจราจร เพราะป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นต่อท่อร้อยสายไฟฟ้า และก็ไม่ควรที่จะมีความลึกมากเกินไป เพราะจะทำให้สายไฟฟ้าที่ร้อยอยู่ภายในระบายความร้อนได้ไม่ดีเท่าที่ควร

6. ในกรณีที่ต้องออกแบบท่อร้อยสาย ตามแนวโค้งจะต้องคำนึงถึงค่ารัศมีการโค้งงอ (Bending Radius) ของสายไฟฟ้าด้วย ซึ่งค่ารัศมีการโค้งงอ ควรมีค่าอย่างน้อยที่สุดประมาณ 7 ถึง 20 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของสายไฟฟ้าเส้นที่ใหญ่ที่สุด

7. การออกแบบหลบสิ่งกีดขวาง มุมที่มีการเปลี่ยนระดับไม่ควรที่จะเปลี่ยนอย่างทันทีทันใด ควรจะค่อยๆ เปลี่ยนระดับไป หลังจากพ้นสิ่งกีดขวางแล้วก็ค่อย ๆ ปรับระดับให้มาอยู่แนวเดิม ทั้งนี้เนื่องจากจะได้ลดปัญหาที่เกิดจากการลากสาย

3.10.3. เสาไรเซอร์ (Riser Pole and Stub)

ในการออกแบบท่อร้อยสาย ในส่วนที่จะไปต่อกับเสาไรเซอร์ หรือในส่วนที่สำรอง (Spare) ไว้สำหรับต่อกับโครงการในอนาคต (Stub) นั้น มีหลักในการพิจารณาดังนี้

1. การขึ้นเสาไรเซอร์ สำหรับ 12, 24 kV. นั้นจะใช้ท่อจำนวน 2 ท่อ ส่วน 69, 115 kV. จะใช้ท่อ 3 ท่อ (Single Circuit) หรือ 6 ท่อ (Bundle Circuit)

2. การขึ้นเสาไรเซอร์ ควรจะขึ้นด้านในของเสาคอนกรีต ทั้งนี้เพื่อป้องกันการถูกรวดชน

3.11. การวางสายไฟฟ้าใต้ดิน [8]

สายไฟฟ้าใต้ดินเป็นสายหุ้มฉนวนซึ่งออกแบบให้สามารถทนแรงดันที่กำหนดไว้ได้ โดยไม่ชำรุดเสียหายภายในช่วงอายุการใช้งานของสาย การพิจารณาระบบไฟฟ้าใต้ดินมาใช้แทนระบบสายอากาศนั้น จุดประสงค์หลักอันหนึ่งก็คือ เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้ให้แก่ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้า หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า โอกาสที่ไฟฟ้าดับนั้นมีน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้สายอากาศ แต่การที่จะได้มาซึ่งความเชื่อถือได้ของระบบนั้น นอกจากจะต้องใช้สายไฟฟ้าและอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ดีแล้ว การติดตั้งสายเคเบิลจะต้องกระทำอย่างถูกต้องละเอียดรอบคอบ ซึ่งหมายรวมถึงการวางสาย การต่อสาย และการทำเทอร์มินเตอร์ นั้นเอง

เนื่องจากสายไฟฟ้า ชุดหัวต่อ หรือเทอร์มินเตอร์ต่างได้รับการออกแบบและทดสอบมาแล้วเป็นอย่างดีว่าสามารถใช้งานได้ดี และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ดังนั้นการชำรุดของสายไฟฟ้าภายในระยะเวลาอันสั้นหลังจากใช้งานไม่ว่าจะเกิดขึ้นที่สาย หัวต่อ หรือเทอร์มินเตอร์ก็ตาม น่าจะมีสาเหตุมาจากความผิดพลาดที่เกิดจากการติดตั้ง ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การติดตั้งก็เป็นหัวใจสำคัญในการคงอายุการใช้งานของระบบไฟฟ้าใต้ดินให้ยาวนานดังจุดประสงค์ที่ผู้ผลิตออกแบบไว้

ในการติดตั้งสายไฟฟ้าใต้ดินจะต้องมีการลากดึงสาย และการลากดึงอาจจะกระทำต่อตัวนำของสายโดยตรง หรือฉนวน หรือชีลด์ของสายก็ได้ ในกรณีเช่นนี้ย่อมจะเกิดแรงกด การยืดและการเคลื่อนที่ได้ โดยเหตุดังกล่าวจึงต้องมีค่าของแรงดึง (Tension) ที่จะสามารถยอมรับได้ในกรณีที่มาดึงสายไฟฟ้างกล่าว ทั้งนี้เพื่อไม่ต้องการให้เกิดความเสียหายต่อสายหรือตัวนำ หรือฉนวน โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการดึงสายให้ผ่านส่วนโค้งหรือต้องการโค้งงอสายเอง แรงดึงที่จะกระทำต่อสายจะต้องชนะแรงเสียดทานที่กระทำต่อสาย ยิ่งในกรณีที่มีการโค้งงอมากแรงเสียดทานดังกล่าวจะมีค่ามากขึ้น ทำให้ต้องใช้แรงอย่างมากในการที่จะชนะแรงเสียดทานดังกล่าว นอกจากนี้ในขณะที่สายไฟฟ้ามีการโค้งงอย่อมจะเกิดการอัดบนฉนวนที่อยู่ในรัศมีด้านในของการโค้งงอ และถ้าแรงที่ใช้ดึงมีค่ามากย่อมจะก่อให้เกิดความเสียหายบนตัวนำ หรือฉนวนของสายได้ ดังนั้นในการใช้งานของสายไฟฟ้าจำเป็นต้องมีความสมบูรณ์ทางไฟฟ้าซึ่งจะนำมาเสี่ยงภัยต่อการดึงของแรงที่มีต่อสายไม่ได้ ทำให้สายจำเป็นต้องมีชีลด์เพิ่มขึ้นตามมา ทั้งนี้เพื่อต้องการลดความเสียหายจากการอัด การลาก ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อนำสายไฟฟ้าไปใช้งาน

การติดตั้งทางเดินสายหรือท่อร้อยสายไฟ การเลือกขนาดทางเดินสาย (Duct) หรือท่อร้อยสายไฟ (Conduit) นั้น จะขึ้นอยู่กับการศึกษาหลักการพื้นฐานของเปอร์เซ็นต์ในการแก้ปัญหาที่

จะเกิดขึ้นเมื่อมีการลากดิ่งสายเคเบิล ซึ่งทำให้ต้องพิจารณาถึงจำนวนเนื้อตัวนำทั้งหมดที่มีอยู่ในท่อนอกจากนี้รัศมีของท่อย่อยสายไฟมาตรฐานและความโค้งงอของทางเดินสายก็จะเป็นสิ่งจำเป็นหรือในการโค้งงอรัศมีด้านในต่ำสุดของความโค้งงอที่จะยินยอมให้มีการโค้งงอได้ก็จะต้องนำมาพิจารณาใช้ในการติดตั้งสายไฟฟ้าด้วย

จำนวนของการโค้งงอและรัศมีจะมีผลต่อการใช้แรงดึงสายในการที่จะดึงให้ผ่านความโค้งดังกล่าว การที่จะต้องออกแรงดึงเพิ่มขึ้นซึ่งสัมพันธ์กับรัศมีความโค้งที่ยิ่งเล็กจะทำให้เกิดความเสียหายต่อสายได้ อีกประการหนึ่งแรงกดที่กระทำต่อด้านข้างจะมีค่ามากจนเป็นอันตรายต่อสายได้ ดังนั้นจึงควรมีอุปกรณ์ที่จะช่วยในการดึง ซึ่งอาจได้แก่ สารหล่อลื่นอันจะช่วยให้การทำงานง่ายขึ้น

3.12. การหล่อลื่น [10]

แรงดึงในการลากสาย เป็นผลอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานระหว่างสายกับท่อย่อยสาย ซึ่งเราสามารถลดแรงดึงลงได้ด้วยการลดแรงเสียดทานดังกล่าวให้น้อยลง โดยใช้วัสดุที่มีความลื่นทาสาย หรือท่อย่อยสายอย่างใดอย่างหนึ่ง โดยที่วัสดุหล่อลื่นนี้จะต้องไม่เป็นอันตรายต่อสายและจะต้องไม่ยึดเกาะกับสายเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานาน ทำให้ยากต่อการลากสายออก

วัสดุหล่อลื่นที่ใช้กันทั่วไปมีหลายชนิด เช่น โซปสโตน (Soapstone) , แวกซ์-เบส (Wax-Base) เป็นต้น

โดยสารหล่อลื่นดังกล่าวจะลดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างสายกับท่อย่อยสายหรือทางเดินสายประมาณครึ่งหนึ่งของการดึงเมื่อไม่ได้ใช้สารหล่อลื่น ซึ่งจะสามารถทำให้ดึงด้วยแรงดึงที่ต่ำกว่า และดึงสายได้ยาวกว่า สารหล่อลื่นที่ใช้จะต้องไม่ทำอันตรายต่อแจ็คเก็ต (Jacket) และเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการหล่อลื่นจึงควรจะใช้ประมาณ 15 - 22 กิโลกรัมที่ทุก ๆ ความยาว 100 m ของสายเคเบิล และยังขึ้นอยู่กับขนาดของสายเคเบิลเองด้วย

3.13. การตรวจสอบและล้างท่อย่อยสายไฟฟ้าใต้ดิน [8]

ก่อนที่จะทำการร้อยสายไฟฟ้าต้องตรวจสอบท่อเสียก่อน เพื่อให้แน่ใจว่าท่อไม่ตันและไม่มีสิ่งกีดขวางซึ่งอาจจะทำให้สายชำรุดเสียหายและเป็นอุปสรรคในการร้อยสาย โดยปกติแล้วท่อย่อยสายเป็นท่อคอนกรีตเรียงกันเป็นแถว ฝังอยู่ในแท่งคอนกรีตซึ่งเป็นตัวยึดท่อหุ้มท่อทั้งหมดไว้อีกทีหนึ่ง โดยนำผงท่อเหล่านี้มาต่อกันให้ได้ความยาวตามที่ต้องการ ตรงช่วงรอยต่อเหล่านี้หากต่อกันไม่สนิทหรือเหลื่อมล้ำกันอยู่ จะทำให้น้ำปูนหรือเศษทราย ดิน เข้าไปในท่อได้ ซึ่งทั้งหมดนี้ย่อมทำให้เกิดการติดขัด หรือชำรุดเสียหายต่อสายได้ การฝังท่อที่มีระยะยาวมากนั้น

อาจจะทำให้ท่อคดเคี้ยวไปมา ไม่ได้แนวตรงก็เป็นอุปสรรคอีกอันหนึ่ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือ และวิธีการสำหรับตรวจสอบเพื่อที่จะได้ทราบว่าท่อไหนใช้งานได้หรือไม่ได้ เพื่อที่จะได้ทำการวางสายต่อไป

วิธีการตรวจสอบท่อที่นับว่ามีประโยชน์มาก อันดับสุดท้ายคือ การใช้เศษสายไฟฟ้าที่มีความยาว 3 m ลากผ่านเพื่อตรวจสอบสภาพของท่อ โดยการวินิจฉัยสิ่งคดค้างในท่อ หรือรอยต่อของท่อว่าเรียบร้อยหรือไม่ โดยการดูว่าสภาพเปลือกสายมีรอยขาด ขูดขีดมากน้อยเพียงใด ซึ่งนับว่าเป็นวิธีการตรวจสอบที่ดีวิธีหนึ่ง สำหรับท่อโค้งมาก เช่น ท่อเสาไรเซอร์ เราจะใช้สายยาวประมาณ 7 m ลากผ่านและตรวจดูที่เปลือกสายถ้าหากไม่มีรอยขาด หรือชำรุดมากก็นับว่าใช้งานได้

การตรวจสอบท่อในบางครั้งมีสิ่งอุดตันอยู่ในท่อเป็นจำนวนมาก เช่น เศษหิน ดิน ทราย หรือน้ำปูนมากเกินกว่าที่จะใช้เครื่องมือตรวจสอบท่อดังกล่าวไว้ จำเป็นจะต้องมีเครื่องมืออย่างอื่น เช่น เครื่องขุดท่อ พลั่วแบบอ่อนตัวได้ โซ่กากบาท โซ่ธรรมดา พลั่วแบบโซ่ เป็นต้น ส่วนท่อที่มีทรายหรือเศษหินละเอียดอัดอยู่อาจขาระล้างออกได้โดยใช้น้ำฉีด หรือถ้าสามารถรื้อยเชือกและลวดสลิงผ่านได้และใช้โซ่ลากผ่านแล้วจึงใช้น้ำฉีดออกก็นับว่าเป็นวิธีที่ใช้ได้ผลดีวิธีหนึ่ง

- สาเหตุชำรุดของสายไฟฟ้า

สาเหตุชำรุดของสายไฟฟ้านั้น เราสามารถแยกเป็น 2 กรณี คือ

1. ชำรุดก่อนการติดตั้ง โดยปกติแล้วสายจะต้องผ่านการทดสอบมาแล้วจากบริษัทผู้ผลิต ดังนั้นจึงถือได้ว่าสายที่ออกมาจากโรงงานจะเป็นสายที่มีสภาพดี การชำรุดเสียหายของสายก่อนการติดตั้งนี้ มีสาเหตุมาจากความผิดพลาดในการขนส่ง การขนย้ายและการเก็บรักษา เมื่อเมิกสายใหม่มาจะต้องตรวจสอบสภาพภายนอกของซึลด์สายเสียก่อนว่าอยู่ในสภาพเรียบร้อยหรือไม่ นอกจากนั้นการแกะเปลือกซึลด์จะต้องทำด้วยความระมัดระวังเกี่ยวกับตะปู หรือเหล็กงัดซึ่งอาจทำให้เปลือกสายชำรุดได้ การยกสายขึ้นรถเทรลเลอร์ก็ต้องปฏิบัติด้วยความระมัดระวังเช่นกัน

2. ชำรุดเนื่องจากการติดตั้ง โดยทั่วไปแล้วสายที่ชำรุด เนื่องจากการลากจะเกิดจากสภาพของท่อหรือสายไม่ดีพอ และการป้อนสายเข้าท่อหรือสาย ดังนั้นการก่อสร้าง การตรวจสอบและทำความสะอาดท่อหรือสายจะต้องกระทำอย่างดี เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดจากท่อหรือสาย สาเหตุที่พบบ่อยอีกอย่างหนึ่ง คือ สายไขว้ หรือบิดตัวก่อนเข้าท่อหรือสายทำให้สายเคเบิลอัดกับท่อทำให้สายชำรุดได้ ดังนั้นการป้อนสายเข้าท่อหรือสายจะต้องกระทำอย่างระมัดระวัง ตลอดจนการลากสายเคเบิล โดยต้องมีผู้ปฏิบัติงานดูแลอย่างใกล้ชิด

จากการที่ได้กล่าวในเบื้องต้นแล้วว่า การติดตั้งหรือการลากสายนั้นเป็นงานที่มีความสำคัญเป็นจุดเริ่มแรกของคุณภาพของงาน ถ้าลากสายชำรุดแล้วการต่อสายหรือการทำปลายสายที่ดีก็ไม่มี

สามารถทำให้อายุการใช้งานของสายดีขึ้นได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหัวต่อบางชนิดไม่สามารถป้องกัน
น้ำที่ไหลมาตามซิปต์ของสายได้ จะเห็นว่าผลต่อเนื้องที่ตามมาทำให้หัวต่อมีอายุการใช้งานสั้นลง
ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

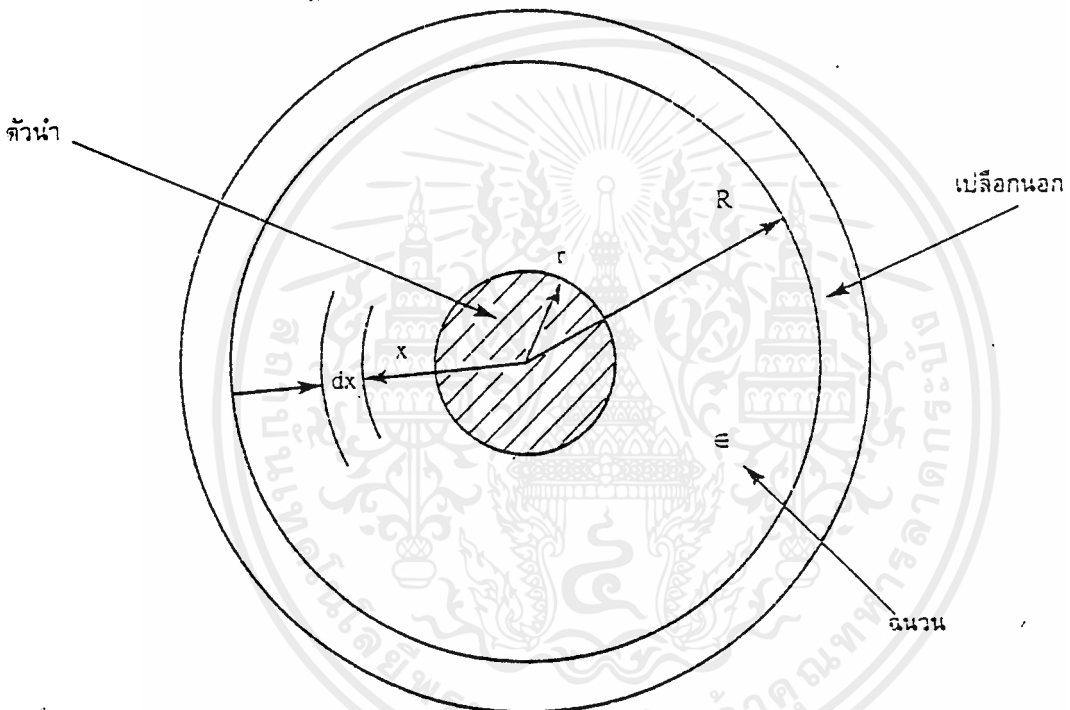
พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าใต้ดิน

(Parameters of Underground System)

พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าใต้ดินนี้จะเป็นค่าพารามิเตอร์ของสายตัวนำแกนเดียว

(Parameters of Single-Core Cable)

4.1. คาปาซิแตนซ์ (Capacitance) [9]



รูปที่ 4.1 พื้นที่หน้าตัดของสายไฟฟ้าตัวนำแกนเดียว

ถ้าสายไฟฟ้าตัวนำแกนเดียวตามรูปที่ 4.1 มีรัศมีจากจุดศูนย์กลางของตัวนำไปยังผิวนอกของตัวนำ และผิวในของเปลือกนอกคือ r และ R ตามลำดับ และที่ผิวของตัวนำจะมีประจุ Q ซึ่งมีหน่วยเป็น C/m ดังนั้นแรงดันหรือความต่างศักย์ระหว่างตัวนำและเปลือกนอกของสายไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการที่ 4.1 ดังนี้

$$V = \frac{Q}{2\pi \epsilon} \ln \frac{R}{r} \quad (4.1)$$

- เมื่อ V คือ แรงดันระหว่างตัวนำและเปลือกนอกของสาย, V
 ϵ คือ เพอร์มิททิวิตีสัมบูรณ์ของฉนวน
 r คือ รัศมีของตัวนำ, m
 R คือ รัศมีภายนอกของฉนวน, m

ดังนั้น คาปาซิแตนซ์ระหว่างตัวนำและเปลือกนอก คือ

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi \epsilon}{\ln(R/r)} \quad F/m \quad (4.2)$$

โดย

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (4.3)$$

ดังนั้น

$$C = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln(R/r)} \quad F/m \quad (4.4)$$

เมื่อ ϵ_0 สำหรับอากาศ คือ

$$\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8.85 \times 10^{-12} \quad F/m \quad (4.5)$$

และ ϵ_r คือ ค่าคงที่ของไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของฉนวนสายไฟฟ้า ดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

เมื่อแทนสมการที่ (4.5) ลงในสมการที่ (4.4) จะได้

$$C = \frac{10^{-9} \epsilon_r}{18 \ln(R/r)} \quad F/m \quad (4.6)$$

หรือ

$$C = \frac{\epsilon_r}{18 \ln(R/r)} \quad \mu F / km \quad (4.7)$$

หรือ

$$C = \frac{0.0241 \epsilon_r}{\log(R/r)} \quad \mu F / km \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกที่ใช้เป็นวัสดุฉนวนสายไฟฟ้า

วัสดุไดอิเล็กทริก	ϵ_r
อากาศ	1
กระดาษหุ้มน้ำมัน	3.3
โพลีไวนิลคลอไรด์	3.5-3.8
เอททิลีนโพรพิลีนรับเบอร์	2.8-3.5
โพลีเอททิลีน	2.3
ครอสลิงค์โพลีเอททิลีน	2.3-6.0

4.2. กระแสอัดประจุ (Charging Current) [9]

แอดมิตแตนซ์ (Admittance) ที่สอดคล้องกับ C คือ

$$Y = jB_c = j2\pi fC \quad S \quad (4.9)$$

สำหรับกระแสอัดประจุสามารถหาได้จาก

$$I_c = YV_{(L-N)} \quad (4.10)$$

ถ้าไม่พิจารณาค่า j จากสมการที่ (4.9) และ (4.10) จะได้

$$I_c = 2\pi fCV_{(L-N)} \quad (4.11)$$

4.3. อินдукแตนซ์ (Inductance) [9]

จากรูปที่ 4.1 ถ้ามีกระแสไหลผ่านตัวนำของสายเคเบิลจะทำให้เกิดความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field strength) ขึ้นรอบ ๆ สายตามสมการ

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi x} \quad (4.12)$$

และมีความหนาแน่นของปลั๊กซ์แม่เหล็ก คือ

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4.13)$$

เมื่อ μ คือความซึมซาบได้ของไดอิเล็กทริก = $\mu_0 \mu_r$
 μ_0 คือความซึมซาบได้สัมบูรณ์ของไดอิเล็กทริก = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m
 μ_r คือความซึมซาบได้สัมพัทธ์ของไดอิเล็กทริก

ดังนั้น

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_0 \vec{H} \quad (4.14)$$

แทนค่าสมการที่ (4.12) ลงในสมการที่ (4.14) จะได้

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} \quad \left(r < x < R \right) \quad (4.15)$$

จากปลั๊กซ์แม่เหล็ก $\vec{\Phi} = \int \vec{B} ds$ (4.16)

เมื่อ ds คือ ดิฟเฟอเรนเชียลตามพื้นที่ของไดอิเล็กทริก จากรูปที่ 4.1 จะได้

$$ds = l dx \quad (4.17)$$

แทนสมการที่ (4.15) และ (4.17) ลงในสมการที่ (4.16) จะได้

$$\begin{aligned} \vec{\Phi} &= \int \frac{\mu_0 I}{2\pi x} l dx \\ &= \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \int_r^R \frac{dx}{x} \\ \vec{\Phi} &= \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \end{aligned} \quad (4.18)$$

ความเหนี่ยวนำหรืออินดักแตนซ์จะมีค่าตามสมการ

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (4.19)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4.18) และ (4.19) อินดักแตนซ์ของสายไฟฟ้าตัวนำแกนเดี่ยวยาวต่อความ

ยาว 1 m คือ

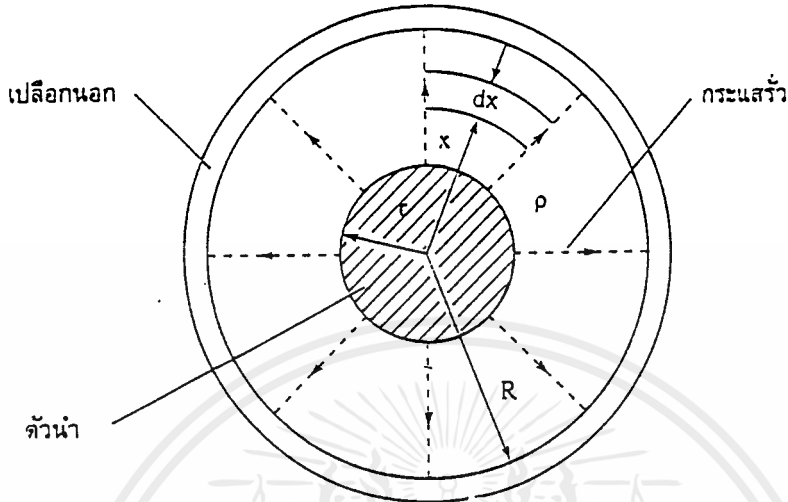
$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \quad \text{H / m} \quad (4.20)$$

เมื่อ r คือรัศมีของตัวนำ, m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R คือรัศมีภายในของฉนวน , m

4.4. การหาความต้านทานของฉนวนของสายไฟฟ้าตัวนำแกนเดียว [9]



รูปที่ 4.2 กระแสรั่วในฉนวนของสายไฟฟ้าตัวนำแกนเดียว

โดยปกติสายไฟฟ้าใต้ดินจะมีกระแสรั่ว (leakage current) ไหลตามแนวรัศมี ดังแสดงด้วย ลูกศรและเส้นประในรูปที่ 4.2 ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องจำกัดกระแสรั่วนี้ด้วยความต้านทานของฉนวนของสายไฟฟ้า โดยความต้านทานของฉนวนที่เพิ่มขึ้นตามแนวรัศมีของทรงกระบอกคือ

$$dR_i = \frac{\rho}{2\pi l} \frac{dx}{x} \quad (4.21)$$

ดังนั้นความต้านทานรวมของฉนวนระหว่างตัวนำและเปลือกนอกของสายคือ

$$R_i = \int_r^R \frac{\rho}{2\pi l} \frac{dx}{x}$$

$$R_i = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{R}{r} \quad (4.22)$$

เมื่อ R_i คือ ความต้านทานรวมของฉนวน , Ω

ρ คือ ความต้านทานของฉนวน , Ω -m

l คือ ความยาวรวมของสายไฟฟ้า , m

r คือ รัศมีของตัวนำ

R คือ รัศมีของฉนวน

4.5. รีแอกแตนซ์ของสายไฟฟ้าตัวนำแกนเดี่ยว (Reactance of Single Core Cables) [9]

เมื่อมีกระแสไหลในตัวนำของสายไฟฟ้า จะมีผลทำให้ไปเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันขึ้นที่เครื่องป้องกันหรือชิลด์โลหะของสายด้วย และเมื่อชิลด์ที่ปลายสายต่อเข้าด้วยกันก็จะมีกระแสไหลในชิลด์จึงทำให้เกิดกำลังสูญเสีย I^2R ขึ้นในชิลด์ ซึ่งกำลังสูญเสียนี้อจะไปรวมกับกำลังสูญเสียในตัวนำของสายโดยการเพิ่มความต้านทานของตัวนำ สำหรับสายไฟฟ้าตัวนำแกนเดี่ยวที่ต่อชิลด์เข้าด้วยกันใช้งานในระบบสามเฟส และจัดวางตัวนำให้อยู่ในรูปแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า จะมีความต้านทานในตัวนำเพิ่มขึ้นตามสมการ

$$\Delta r = r_s \frac{X_m^2}{r_s^2 + X_m^2} \quad (4.23)$$

เมื่อ X_m คือ รีแอกแตนซ์ร่วมระหว่างตัวนำและชิลด์ต่อเฟส, Ω / km

r_s คือ ความต้านทานของชิลด์ต่อเฟส, Ω / km

ค่ารีแอกแตนซ์ร่วมระหว่างตัวนำและชิลด์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$X_m = 0.1746 \frac{f}{60} \log \frac{2S}{r_o + r_i} \quad (4.24)$$

และความต้านทานของชิลด์ต่อกันสามารถหาได้จากสมการ

$$r_s = \frac{0.81}{(r_o + r_i)(r_o - r_i)} \quad (4.25)$$

เมื่อ f คือ ความถี่, Hz

S คือ ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวนำ, cm

r_o คือ รัศมีภายนอกของชิลด์, cm

r_i คือ รัศมีภายในของชิลด์, cm

จากสมการที่ (4.24) จะได้

$$GMR = D_s = \frac{1}{2}(r_o + r_i)$$

$$GMD = D_m = S$$

ดังนั้น สำหรับการจัดวางตัวนำรูปแบบอื่นก็จะมีค่ารีแอกแตนซ์ร่วมแตกต่างกันไปจากการจัดวางสายไฟฟ้ารูปแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าตามสมการ

$$X_m = 0.1746 \frac{f}{60} \log \frac{D_m}{D_s} \quad \Omega / km / phase \quad (4.26)$$

ด้วยเหตุนี้รีแอกแตนซ์ของสายไฟฟ้าตัวนำแกนเดี่ยวนะที่มีกระแสไหลในซีลด์จึงหาได้จาก

$$\text{สมการ} \quad X_m = 0.1746 \frac{f}{60} \log \left(\frac{D_m}{D_s} - \frac{X_m^3}{X_m^2 + r_s^2} \right) \quad (4.27)$$

หรือ

$$X_m = 0.1746 \frac{f}{60} \log \left(\frac{D_m}{0.7788 r} - \frac{X_m^3}{X_m^2 + r_s^2} \right) \quad (4.28)$$

เมื่อ	X	คือ รีแอกแตนซ์ของตัวนำสายไฟฟ้า, Ω / km
	D_m	คือ ระยะเฉลี่ยทางเรขาคณิตของตัวนำ, cm
	D_s	คือ รัศมีเฉลี่ยทางเรขาคณิตของตัวนำ, cm
	r	คือ รัศมีของตัวนำ, cm
	X_m	คือ รีแอกแตนซ์ร่วมระหว่างตัวนำและซีลด์ต่อเฟส, Ω / km
	r_s	คือ ความต้านทานของซีลด์ต่อเฟส, Ω / km

สำหรับเทอมสุดท้ายของสมการ (4.27) และ (4.28) จะเป็นค่าแก้ไข เนื่องจากมีกระแสไหลในซีลด์ โดยที่เศษจะแทน r_s ของสมการที่ (4.23) ด้วย X_m และที่คิดเครื่องหมายลบเพราะกระแสที่ไหลในซีลด์มีทิศทางตรงข้ามกับกระแสที่ไหลในตัวนำ ดังนั้นจึงทำให้ไปจำกัดฟลักซ์ในบริเวณระหว่างตัวนำและซีลด์

4.6. ความเครียดสนามไฟฟ้าในสายไฟฟ้าตัวนำแกนเดี่ยว (Electric Stress in Single-Core Cables) [9]

ฉนวนในสายไฟฟ้าใต้ดินจะผลิตมาจากวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีความคงทนของไดอิเล็กทริกต่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูง แต่ถ้าความคงทนของไดอิเล็กทริกมีค่าต่ำกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสายขณะใช้งาน ผลที่เกิดขึ้นก็คือ ฉนวนของสายจะเบรกดาวน์ (Break Down) ดังนั้นสายต้องออกแบบให้ฉนวนสามารถรับต่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่จะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวนำสายโดยไม่เบรกดาวน์

จากรูปที่ 4.1 แสดงพื้นที่หน้าตัดของสายไฟฟ้าตัวนำแกนเดียวโดยสมมติให้สายไฟฟ้านี้มีความยาว 1 m สายไฟฟ้านี้มีไดอิเล็กทริกเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ และระยะระหว่างตัวนำกับฉนวนสมมาตรกัน

ถ้ากำหนดให้ประจุที่ผิวของตัวนำมีค่าเป็น Q อนุกรมต่อหน่วยความยาว ดังนั้นเมื่อประยุกต์กฎของเกาส์ (Gauss's Law) สามารถหาความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้าที่รัศมี r ได้คือ

$$Q = \int \vec{D} \cdot d\vec{s} = \vec{D}(2\pi x l) \quad (4.29)$$

เมื่อ 1 เป็นความยาวของสายไฟฟ้าที่ให้เท่ากับ 1 m ดังนั้น

$$\vec{D} = \frac{\vec{Q}}{2\pi x} \quad C/m^2 \quad (4.30)$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้าที่รัศมี x อนุกรมต่อตารางเมตร (C/m^2)

Q คือ ประจุบนผิวของตัวนำ, อนุกรมต่อเมตร (C/m)

x คือ รัศมีจากจุดศูนย์กลางของตัวนำ, เมตร ($r < x < R$)

ฉนวนจะมีความสัมพันธ์ของเพอร์มิตทิวิตี ตามสมการ

$$\epsilon = \frac{\vec{D}}{\vec{E}} \quad (4.31)$$

ความเข้มสนามไฟฟ้าหรือความเครียดสนามไฟฟ้าหรือเกรเดียนต์แรงดัน E ที่รัศมี r คือ

$$\vec{E} = \frac{\vec{D}}{\epsilon} = \frac{\vec{Q}}{2\pi \epsilon x} \quad V/m \quad (4.32)$$

ถ้าเกรเดียนต์แรงดันที่รัศมี x คือ dV/dx ดังนั้นความต่างศักย์หรือแรงดัน V ระหว่างตัวนำและเปลือกนอกของสาย คือ

$$V = \int_r^R \vec{E} dx = \int_r^R \frac{Q}{2\pi \epsilon x} dx \quad (4.33)$$

$$V = \frac{Q}{2\pi \epsilon} \ln \frac{R}{r} \quad (4.34)$$

จากสมการที่ (4.32) จะได้

$$\frac{Q}{2\pi \epsilon} = E_x \quad (4.35)$$

แทนค่าสมการที่ (4.35) ลงในสมการที่ (4.34) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = E_x \ln \frac{R}{r} \quad (4.36)$$

ดังนั้น

$$E = \frac{V}{x \ln \frac{R}{r}} \quad V/m \quad (4.37)$$

เมื่อ	E	คือ ความเค้นสนามไฟฟ้าของสาย, V/m
	V	คือ ความต่างศักย์หรือแรงดันระหว่างตัวนำกับเปลือกนอก, V
	r	คือ รัศมีของตัวนำ, m
	R	คือ รัศมีภายนอกของฉนวนหรือรัศมีภายในของเปลือกนอก, m

4.7. ความต้านทานของตัวนำสายไฟฟ้า (Resistance of Conductor) [9]

ในทำนองเดียวกันกับสายอากาศความต้านทานของตัวนำสายไฟฟ้าได้ดัดแปลงมีอยู่ 2 ชนิด เช่นกัน ได้แก่ ความต้านทานกระแสดตรงและความต้านทานกระแสถัด สำหรับการคำนวณหาความต้านทานทั้ง 2 ชนิด สามารถทำได้ดังนี้

4.7.1. ความต้านทานกระแสดตรง

ความต้านทานกระแสดตรง R_{dc} ของตัวนำ คือ

$$R_{dc} = \frac{\rho l}{A}$$

เมื่อ ρ คือ สภาพต้านทานของตัวนำ, $\Omega \cdot m$

l คือ ความยาวของตัวนำ, m

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ, m^2

สำหรับสภาพต้านทานของตัวนำสายไฟฟ้าที่อุณหภูมิ $20^\circ C$ มีค่าดังนี้

- ตัวนำทองแดงรีดแข็ง

$$\rho = 1.77 \times 10^{-8} \quad \Omega \cdot m$$

- ตัวนำอลูมิเนียมรีดแข็ง

$$\rho = 2.83 \times 10^{-8} \quad \Omega \cdot m$$

ความต้านทานกระแสดตรงของตัวนำจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ โดยสามารถหาได้จากสมการ

การ

$$\frac{R_{t2}}{R_{t1}} = \frac{M + t_2}{M + t_1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	R_{t_2}	คือ ความต้านทานของตัวนำที่อุณหภูมิ, t_2
	R_{t_1}	คือ ความต้านทานของตัวนำที่อุณหภูมิ, t_1
	t_1, t_2	คือ อุณหภูมิของตัวนำมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส, °C
	M	คือ ค่าคงที่สำหรับวัสดุตัวนำใด ๆ
		= 234.5 สำหรับทองแดงอบเหนียว
		= 241.5 สำหรับทองแดงรีดแข็ง
		= 288.1 สำหรับอลูมิเนียมรีดแข็ง

4.7.2. ความต้านทานกระแสสลับ

เมื่อสายไฟฟ้าได้รับการจ่ายไฟด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ จะทำให้ความต้านทานมีค่าสูงกว่าความต้านทานกระแสตรงอันเนื่องมาจากแฟกเตอร์ 2 สิ่ง คือ

- ปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect) เป็นปรากฏการณ์ที่มีกระแสไหลที่ผิวด้านนอกของตัวนำมากกว่าที่ศูนย์กลางของตัวนำ เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กเคลื่อนที่บริเวณศูนย์กลางของตัวนำมีค่าสูงกว่าฟลักซ์แม่เหล็กเคลื่อนที่ผิวของตัวนำ ดังนั้นอินดักแตนซ์ซึ่งเป็นสัดส่วนกับฟลักซ์แม่เหล็กต่อกระแสที่บริเวณศูนย์กลางและผิวของตัวนำก็จะมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งจะส่งผลให้รีแอกแตนซ์ที่ผิวของตัวนำมีค่าน้อยกว่าที่ใกล้ศูนย์กลางของตัวนำ จึงทำให้กระแสส่วนมากจะไหลอยู่ที่ผิวของตัวนำ

- ผลกระทบข้างเคียง (Proximity Effect) เป็นผลกระทบที่คล้ายกับปรากฏการณ์ทางผิว กล่าวคือ เป็นการเพิ่มความต้านทานของตัวนำโดยความหนาแน่นของกระแสมีค่าไม่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ ซึ่งมีสาเหตุมาจากฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลในตัวนำอื่น ๆ ที่วางอยู่ใกล้เคียงกันมาเคลื่อนผ่าน เช่น สายไฟฟ้าที่วางอยู่ในท่อรับสายเดียวกัน

สำหรับค่าความต้านทานกระแสสลับที่เพิ่มขึ้นไปจากความต้านทานกระแสตรง เนื่องจากปรากฏการณ์ทางผิวและผลกระทบข้างเคียงสามารถกำหนดได้ด้วยแฟกเตอร์ตัวคูณ ดังแสดงในตารางที่ เป็นแฟกเตอร์ตัวคูณของตัวนำทองแดงและอลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 25 °C

หมายเหตุ

* เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจาก 25 °C เป็น t ให้คำนวณค่าความต้านทานกระแสตรงจากสมการต่อไปนี้

$$\text{สำหรับทองแดง} \quad R_t = R_{25} + \frac{345 \cdot .5 + t}{259 \cdot .5}$$

$$\text{สำหรับอลูมิเนียม} \quad R_t = R_{25} + \frac{228 \cdot .1 + t}{253}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ R_t คือ ความต้านทานกระแสตรงค่าใหม่ที่อุณหภูมิ t

R_{25} คือ ความต้านทานกระแสตรงจากตารางที่ 4.1

** รวมผลกระทบจากปรากฏการณ์ทางผิวเพียงอย่างเดียว (ใช้สำหรับสายเคเบิลที่วางแยกท่อร้อยสาย)

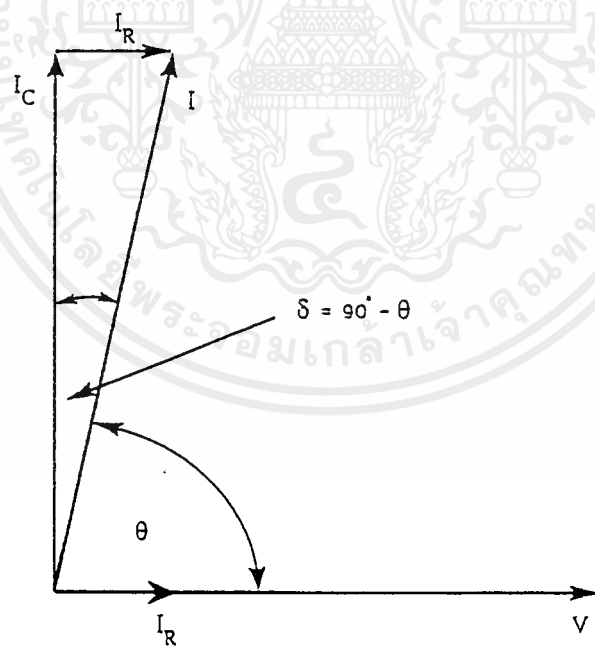
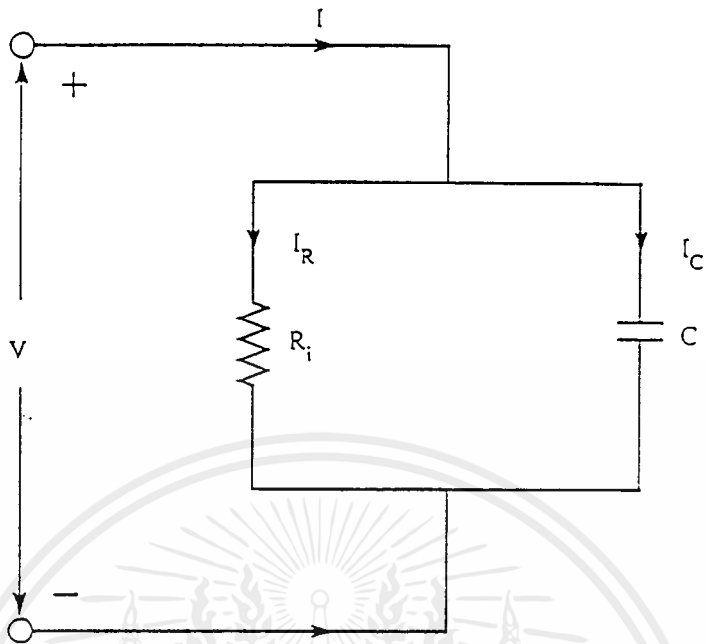
*** รวมผลกระทบจากปรากฏการณ์ทางผิวและผลกระทบข้างเคียง (ใช้สำหรับสายไฟฟ้าตัวนำหลายแกน หรือสายไฟฟ้าตัวนำแกนเดียวที่วางในท่อร้อยสายเดียวกัน)

ตารางที่ 4.2. ความต้านทานกระแสตรงและแฟกเตอร์ตัวคูณสำหรับความต้านทานกระแสสลับ

ขนาดตัวนำ MCM หรือ kcmil	ความต้านทานกระแสตรง $\Omega / 304.8 \text{ m ที่ } 25^\circ \text{ C}^*$		แฟกเตอร์ตัวคูณสำหรับความต้านทานกระแสสลับ			
			สายเคเบิลตัวนำ แกนเดียว**		สายเคเบิลตัวนำ หลายแกน***	
	ทองแดง	อะลูมิเนียม	ทองแดง	อะลูมิเนียม	ทองแดง	อะลูมิเนียม
250	0.04315	0.07077	1.005	1.002	1.06	1.02
300	0.03595	0.05897	1.006	1.003	1.07	1.02
350	0.03082	0.05055	1.009	1.004	1.08	1.03
500	0.02157	0.03538	1.018	1.007	1.13	1.06
750	0.01438	0.02359	1.039	1.015	1.21	1.12
1000	0.01079	0.01796	1.067	1.026	1.30	1.19
1500	0.00719	0.01179	1.142	1.058	1.53	1.36
2000	0.00539	0.00885	1.233	1.100	1.82	1.56

4.8. เพาเวอร์แฟกเตอร์และกำลังสูญเสียของไดอิเล็กทริก (Dielectric Power Factor and Dielectric Loss) [9]

เมื่อจ่ายแรงดันให้กับสายไฟฟ้าใต้ดินจะทำให้เกิดความร้อนเนื่องจากกำลังสูญเสีย ในตัวนำ เปลือกนอก และกำลังสูญเสียของไดอิเล็กทริก โดยกำลังสูญเสียของไดอิเล็กทริกในฉนวนของสายเกิดขึ้นได้เนื่องจากกระแสรั่ว หรืออาจกล่าวได้ว่าเราไม่สามารถทำฉนวนให้เป็นไดอิเล็กทริกที่สมบูรณ์แบบได้ ดังนั้นเมื่อพิจารณาวงจรสมมูลของไดอิเล็กทริกจึงประกอบด้วยพารามิเตอร์ 2 ส่วน คือ ความต้านทานและคาปาซิแตนซ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ส่วนของกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานคือ จะมีเฟสเดียวกันกับแรงดัน ส่วนกระแสที่ไหลผ่านคาปาซิแตนซ์ คือ จะนำหน้าแรงดันเป็นมุม 90° เมื่อรวมกระแสทั้งสองส่วนก็จะได้กระแส ซึ่งมีมุมนำหน้าแรงดัน น้อยกว่า 90°



รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลย์และเฟสเซอร์ไดอะแกรมสำหรับไดอิเล็กทริกของสายไฟฟ้าใต้ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 (ข) เพาเวอร์แฟกเตอร์ของไดอิเล็กทริก คือ โคไซน์ของมุม ซึ่งจะใช้วัดคุณภาพของไดอิเล็กทริกของสายเคเบิล และมีค่าตามสมการ

$$\cos \theta = \frac{\text{กำลังสูญเสียในไดอิเล็กทริก (W)}}{\text{กำลังปรากฏในไดอิเล็กทริก (VA)}}$$

สำหรับเพาเวอร์แฟกเตอร์ของกระดาษชุบน้ำมันมีค่าน้อยมาก ประมาณ 0.003 ซึ่งเพาเวอร์แฟกเตอร์ของไดอิเล็กทริกจะเป็นตัวแทนของกำลังสูญเสียในไดอิเล็กทริก ดังนั้นจึงควรลดให้มีค่าน้อยที่สุด เมื่อใช้วัสดุไดอิเล็กทริกที่ดีเป็นฉนวนจะทำให้มุม θ มีค่าใกล้เคียง 90° ดังนั้นมุมการสูญเสียของไดอิเล็กทริก (Dielectric loss angle) ในหน่วยเรเดียนจะมีค่าเป็น

$$\delta \cong \tan \delta \cong \sin \delta = \cos \theta$$

เมื่อ $\delta = 90 - \theta$ และสายไฟฟ้าส่วนมากจะมีมุม $\delta < 0.5^\circ$ ซึ่งกำลังสูญเสียในไดอิเล็กทริกมีค่าเป็นสัดส่วนกับมุมนี้

ถ้าพิจารณากำลังสูญเสียในไดอิเล็กทริกของฉนวนสายเคเบิลจากรูปที่ 4.3 (ก) เราจะได้กำลังสูญเสียเนื่องจากมีกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานของฉนวน คือ

$$P_{R_i} = \frac{V^2(L-N)}{R_i}$$

และกำลังสูญเสียรวมในไดอิเล็กทริก คือ

$$P_d = I_c V \cos \theta = \omega C V_{(L-N)}^2 \cos \theta = \omega C V_{(L-N)}^2 \delta$$

เมื่อ P_d คือ กำลังสูญเสียรวมในไดอิเล็กทริก

C คือ คาปาซิเตอร์รวมระหว่างตัวนำกับนิวทรัล

$V_{(L-N)}$ คือ แรงดันระหว่างไลน์กับนิวทรัล

$\cos \theta$ คือ เพาเวอร์แฟกเตอร์และมุมการสูญเสียของไดอิเล็กทริก

บทที่ 5

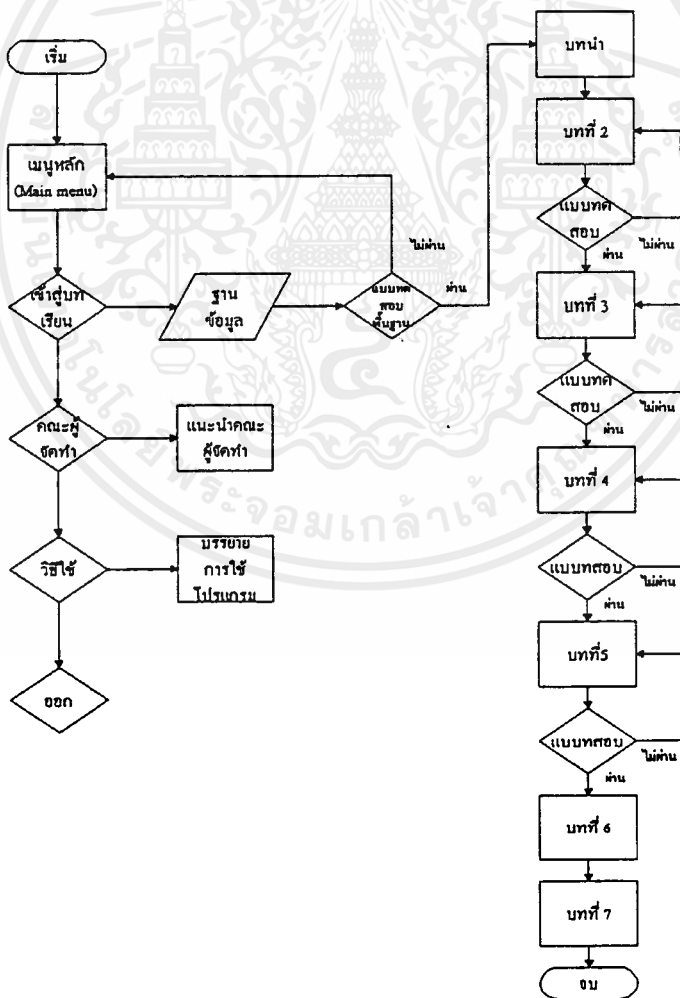
การทำงานโดยรวมของโปรแกรม

เนื่องจากโครงการนี้ เป็นการนำเสนอความรู้เรื่องของระบบไฟฟ้าได้ดินผ่านทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อให้การศึกษาแต่ละครั้งสัมฤทธิ์ผลที่วางไว้ ดังนั้นผู้จัดทำจึงได้กำหนดให้มีการวัดผลความเข้าใจของผู้ที่เข้ามาใช้โปรแกรมซึ่งผู้ใช้จะต้องศึกษาเนื้อหาในแต่ละบท และทำแบบทดสอบท้ายบทด้วยตัวเอง ดังนั้นในบทนี้จะได้กล่าวถึงขั้นตอนในการใช้งานของโปรแกรมโดยจะมีรูปประกอบเพื่อความเข้าใจที่ดียิ่งขึ้น

- การทำงานโดยรวมของโครงการ

การทำงานโดยรวมของโครงการสามารถอธิบายได้ด้วยแผนผังการทำงาน (FLOW CHART)

ผังรูป 5.1



รูปที่ 5.1 FLOW CHART การทำงานโดยรวมของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 5.1 จะเห็นว่าการใช้งานของโปรแกรมในทางปฏิบัติจริงเป็นดังต่อไปนี้
 1. เมื่อเข้าสู่โปรแกรมจะพบกับหน้าจอ “เมนเมนู (Main Menu)” ดังรูป



รูปที่ 5.2 เมนเมนู (Main menu)

จากรูป 5.2 เมนเมนูจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆดังนี้

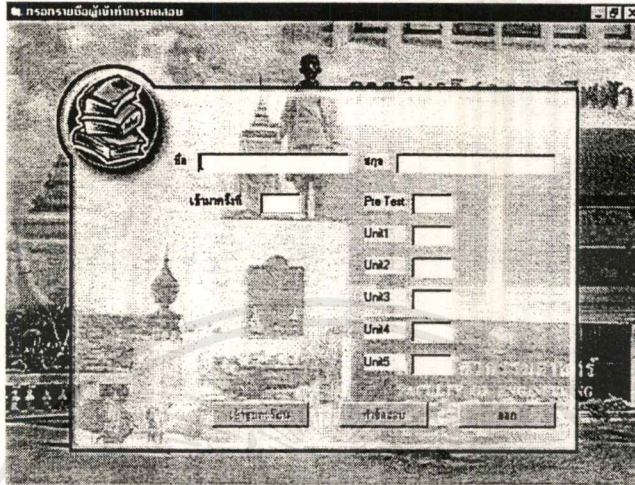
- ปุ่มเข้าสู่บทเรียน เมื่อต้องการเข้าไปศึกษาในส่วนเนื้อหาของระบบไฟฟ้าได้คลิกคลิก (Click) ที่ปุ่มเข้าสู่บทเรียน
- ปุ่มคณะผู้จัดทำ เป็นปุ่มที่ใช้คลิกสำหรับเข้าไปดู คณะผู้จัดทำและอาจารย์ที่ปรึกษาของโครงการนี้
- ปุ่มวิธีใช้ เป็นปุ่มที่ใช้สำหรับให้ความช่วยเหลือและอธิบายการใช้งานในส่วนต่างๆของโปรแกรม
- ปุ่มออกจากโปรแกรม

2. เมื่อทำการคลิก ที่ปุ่มเข้าสู่โปรแกรมแล้วจะพบกับหน้าจอ “ฐานข้อมูล” ดังรูป 5.3

ซึ่งจากรูป จะประกอบไปด้วยปุ่มต่างๆ ที่ผู้เรียนจะต้องพิมพ์ข้อมูลของตัวเองลงไปและหน้าจอ โดยที่ฐานข้อมูลนี้เองจะแบ่งกลุ่มผู้เรียนออกเป็นสองกลุ่มดังนี้

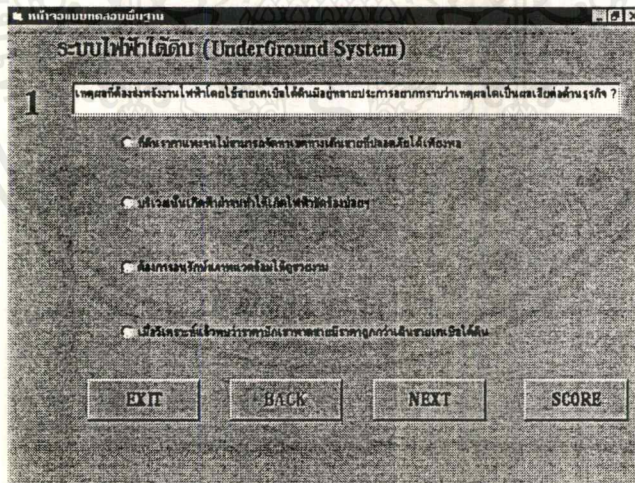
- กลุ่มแรก คือกลุ่มที่เคยเข้ามาใช้โปรแกรมแล้วซึ่งเมื่อผู้เรียนกลุ่มนี้พิมพ์ชื่อและสกุลของตัวเองลงไปโปรแกรมก็จะนำเอาข้อมูลเดิมที่เก็บไว้ขึ้นมาปรากฏในช่องต่างๆ
- กลุ่มที่สอง คือกลุ่มที่ยังไม่เคยเข้ามาใช้โปรแกรม ฉะนั้นเมื่อผู้เรียนกลุ่มนี้พิมพ์ชื่อและสกุลของตนเองลงไปโปรแกรมก็จะบังคับให้เข้าไปทำแบบทดสอบพื้นฐานก่อน (แบบทดสอบพื้นฐานถูกออกแบบมาเพื่อวัดความรู้ของผู้เรียนโดยผู้เรียนจะต้องมีความรู้ตั้งแต่ ระดับ ประกาศนียบัตรวิชา

ชีพชั้นสูงหรือเทียบเท่า) ถ้าทำคะแนนได้ถึงเกณฑ์ที่กำหนดไว้จึงจะสามารถผ่านเข้าไปศึกษาเนื้อหาในส่วนต่างๆ ต่อไป



รูปที่ 5.3 หน้าจอฐานข้อมูล

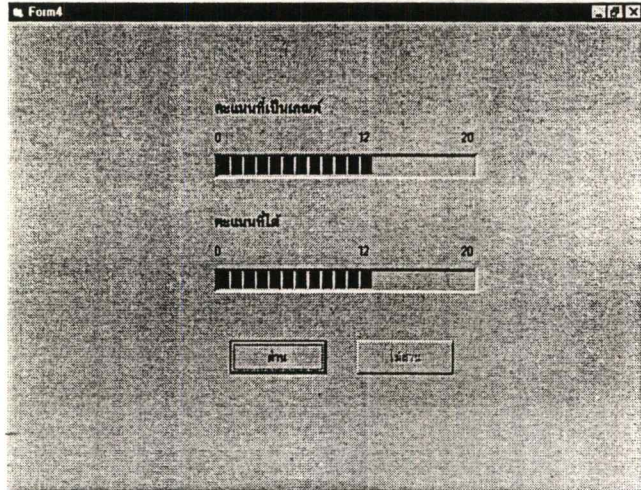
เมื่อคลิกที่ปุ่ม เข้าทำแบบทดสอบ จะพบกับแบบทดสอบซึ่งมีหน้าตา ดังรูป 5.4



รูปที่ 5.4 หน้าจอแบบทดสอบ

จากหน้าจอของแบบทดสอบจะเป็นแบบทดสอบที่เป็นข้อสอบแบบปรนัย มีทั้งหมด 20 ข้อ เมื่อผู้เรียนทำจนครบแล้วก็คลิกที่ปุ่ม “คะแนน” โปรแกรมก็จะเช็คคะแนนให้และแสดงผลดังรูป 5.5

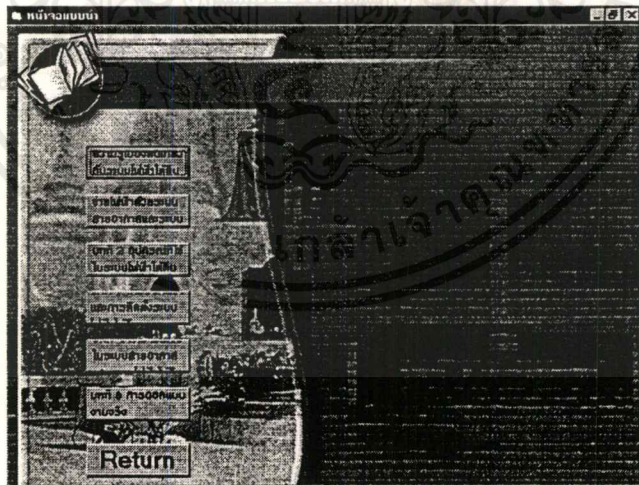
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 หน้าจอรวมคะแนน

จากรูปเมื่อผู้เรียนทำคะแนนได้น้อยกว่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้ คือ 12 คะแนนก็จะไม่สามารถผ่านเข้าไปในส่วนต่อไปของโปรแกรมได้ (ดังจะสังเกตได้จากปุ่มเข้าสู่บทเรียนจะเป็นสีจาง) แต่ถ้าผู้เรียนทำคะแนนได้ตามเกณฑ์ก็จะสามารถเข้าไป ในส่วนของเนื้อหาได้โดยการคลิก ที่ปุ่มเข้าสู่บทเรียนต่อไป

3. เมื่อผ่านเข้ามาสู่บทเรียนระบบไฟฟ้าได้คิณก็จะพบกับหน้าจอ “บทเรียน” ดังรูป 5.6

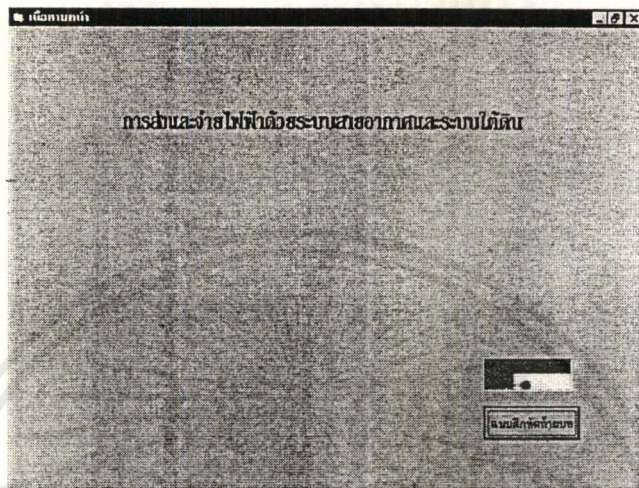


รูปที่ 5.6 หน้าจอบทเรียน

จากรูป ที่หน้าจอบทเรียนี้จะเป็นทางผ่านเข้าไปสู่เนื้อหาบทต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าได้คิณ ซึ่งผู้เรียนจะสามารถผ่านไปได้ทีละบท ดังจะเห็นได้จากปุ่มเข้าสู่บทต่างๆ (นอกจากบทนำ) จะเป็นสี

จาก หมายความว่าผู้เรียนจะต้องผ่านบทนำและบทที่ 1 ก่อนโดยการทำแบบทดสอบท้ายบท ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 คลิกที่ปุ่มบทที่ 2 เข้าสู่บท “การส่งและจ่ายไฟฟ้าด้วยระบบสายอากาศกับระบบใต้ดิน”
 ดังรูป 5.7



รูปที่ 5.7 หน้าจอ บทที่ 2

จากรูป 5.7 เป็นหน้าปกของบทที่ 2 เมื่อผู้เรียนต้องการจะเปิดเข้าสู่เนื้อหาภายในบทก็ คีบเบิ้ล (Double Click) ดังแสดงไว้ในรูป และเมื่อเข้าไปศึกษาเนื้อหาภายในบทเรียนเสร็จแล้วโปรแกรมจะกลั้บออกมายังหน้าปกของบทที่ 2 เพื่อให้ผู้เรียนทำแบบทดสอบท้ายบทโดยการ คลิกที่ปุ่ม แบบทดสอบท้ายบทก็จะพบกับหน้าจอของแบบทดสอบ ซึ่งขั้นและวิธีทำรวมทั้งรูปแบบของแบบทดสอบก็เหมือนกับแบบทดสอบพื้นฐานที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้น แต่เนื้อหาของแบบทดสอบจะเป็นของบทที่ 2

3.1.1 เมื่อทำแบบทดสอบบทที่ 2 แล้วได้คะแนนต่ำกว่าเกณฑ์ตามที่กำหนดไว้คือ 12 คะแนน โปรแกรมจะถือว่าผู้เรียนไม่ผ่านในบทเรียนนี้ โปรแกรมจะไม่ยอมให้ผ่านไปยังบทต่อไป ผู้เรียนต้องกลับศึกษาเนื้อหาในบทเรียนเดิมแล้วทำแบบทดสอบให้ผ่าน

3.1.2 เมื่อผู้เรียนทำแบบทดสอบผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนด โปรแกรมจะกลับมายังหน้าจอ “บทเรียน” เพื่อให้ผู้เรียนสามารถเข้าไปยังบทเรียนต่อไปได้

3.2 ทำเหมือนกับ ข้อ 3.1 ในบทที่ 3

3.3 สำหรับบทที่ 4 ขั้นตอนและวิธีการศึกษาก็เหมือนกับบทที่ผ่านมา แต่จะแตกต่างออกไปก็คือแบบทดสอบ เพราะเป็นบทที่เกี่ยวกับการคำนวณ ดังนั้นแบบทดสอบจึงเป็นในลักษณะที่

ต้องการประเมินความรู้ในการ คำนวณของระบบไฟฟ้าได้คืนของผู้เรียน เมื่อผู้เรียนเข้าไปทำแบบทดสอบของบทนี้จะพบกับรูปแบบของแบบทดสอบดังรูปข้างล่าง

test4

พหุามิเตอร์ในระบบสายอากาศและระบบไฟฟ้าได้คืน

1 สายเคเบิลตัวนำแกนเดียวใช้งานในระบบจำหน่าย 12 kV 50 Hz ตัวนำมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 CM และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเปลือกนอกเท่ากับ 4 CM สภาพต้านทานของฉนวนคือ 1.2×10^{10} โอห์มต่อเซ็นติเมตร สายเคเบิลมีความยาว 4.30 กม จงคำนวณหา ความต้านทานรวมของฉนวน ?

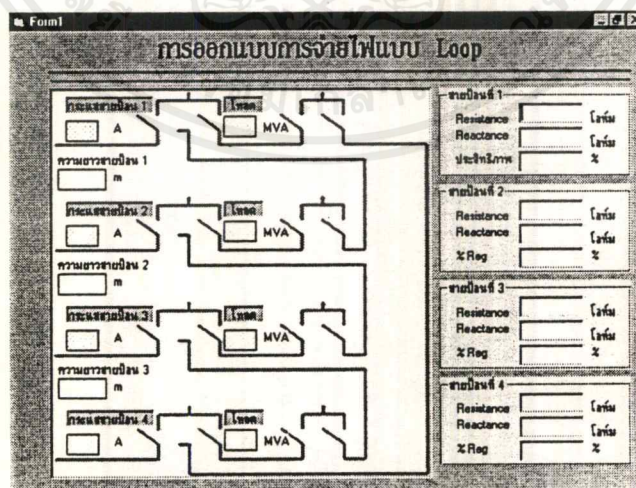
เมื่อกะโหล่ม

EXIT BACK NEXT SCORE

รูปที่ 5.8 แบบทดสอบบทที่ 4

จากรูปวิธีการทำแบบทดสอบนี้คือ ผู้เรียนเพียงคำนวณตัวเลขจากโจทย์แล้วนำผลที่คำนวณได้มาพิมพ์ลงในช่องคำตอบที่กำหนดไว้ แล้วก็คลิกที่ ปุ่ม Next เพื่อไปทำข้อถัดไปจนครบ 20 ข้อ จากนั้นก็คลิก ปุ่ม Score เพื่อวัดผลต่อไป

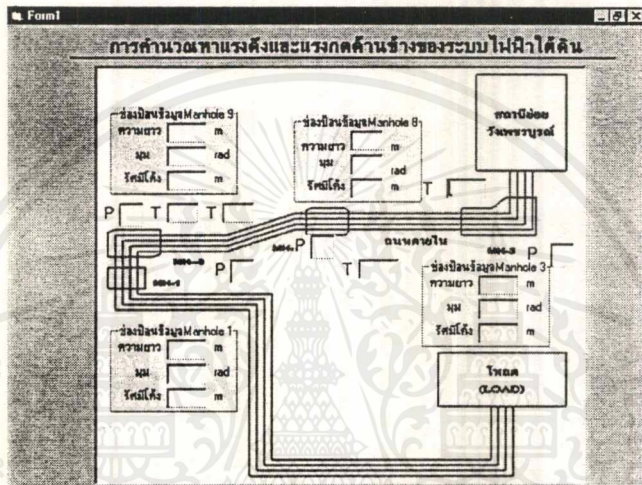
3.4 บทที่ 6 เป็นบทที่นำเอาความรู้ที่ได้จากบทที่ผ่านมาใช้ในการออกแบบระบบไฟฟ้าจากงานจริง ซึ่งวิธีการนำเสนอของบทนี้ก็จะเป็นการนำแบบงานจริงมาให้ดังรูป



รูปที่ 5.9 หน้าจอแบบงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปเป็นแบบงานจริงซึ่งเป็นเป็นการออกแบบระบบไฟฟ้าใต้ดิน ที่จ่ายไฟฟ้าให้กับ ศูนย์การค้า World Trade Center ของการไฟฟ้านครหลวง ผู้เรียนสามารถเห็นภาพโดยรวมของการออกแบบ ซึ่งผู้เรียนจะเห็นว่าเมื่อป้อนโหลด และความยาวของสายป้อนที่ต้องการลงไปในระบบแล้ว โปรแกรมจะนำค่าที่ป้อนนั้นไปประมวลผล เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่ารีซิสแตนซ์ และค่ารีแอคแตนซ์ ค่าแรงดันตกในสาย ค่าเปอร์เซ็นต์แรงกูดเรชั่น และค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันตก แล้วโปรแกรมก็จะนำค่าที่คำนวณได้ดังกล่าวมาแสดงผลลงบนหน้าจอ



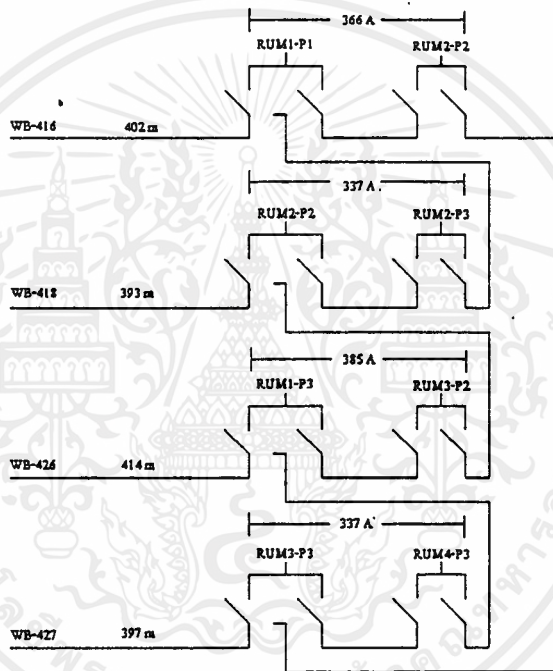
รูปที่ 5.10 หน้าจอแบบงานจริง

จากรูปข้างบนเป็นลักษณะการออกแบบงานจริงอีกหนึ่งตัวอย่างที่โครงการนี้ได้นำมาเป็นตัวอย่างในการคำนวณค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับการติดตั้งในงานสนาม เช่น การคำนวณหาค่าแรงดึงสายระหว่างบ่อพักสาย และการคำนวณหาค่าแรงดันกุดด้านข้างในทางกายภาพ จากรูปหน้าจอเมื่อผู้เรียนต้องการทราบค่าแรงดึงหรือแรงกูดด้านข้างที่จุดต่างๆ ก็ป้อนรายละเอียดเข้าไปในช่องรับข้อมูลจากนั้น โปรแกรมก็จะนำค่าที่ป้อนไปคำนวณ และแสดงผลบนหน้าจอ

บทที่ 6

การคำนวณและการออกแบบงานจริง

หลังจากที่ได้ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าได้ติดตั้งระบบการจ่ายไฟ, อุปกรณ์และการออกแบบในการติดตั้งระหว่างไฟฟ้าได้ดิน และการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายป้อน ดังนั้นในบทนี้จะเป็นนำเอาความรู้ดังกล่าวข้างต้นมาใช้ในการออกแบบงานจริง โดยจะนำเอาแบบงานจริงที่การไฟฟ้านครหลวงได้ออกแบบไว้ คือที่บริเวณสถานีย่อยวังเพชรบูรณ์ซึ่งจ่ายไฟให้กับ “ ศูนย์การค้า เวิลด์เทรดเซ็นเตอร์ (World Trade Center) ” ซึ่งมีรายละเอียดและขั้นตอนในการคำนวณดังนี้



รูปที่ 6.1 ระบบการจ่ายไฟแบบ Loop

ระบบการจ่ายไฟแบบ Loop เป็นระบบที่ไม่มีสายป้อนย่อย โดยรับไฟจากสายป้อนหลัก 4 เส้น แต่ละสายป้อนรับโหลดไม่เกิน 10 MVA หากเกิดฟอลต์ที่สายป้อนใด สายป้อนที่เหลือจะรับโหลดได้เต็มที่ไม่เกิน 20 MVA

6.1. ขั้นตอนการคำนวณค่าต่างๆในงานจริง

สายป้อน WB-416

รับโหลดจาก RMU-P1 (TR1, TR2, TR3, TR4 และ TR5) ขนาด 5 x 2000 kVA

รับโหลดจาก RMU-P2 (TR1, TR2 และ TR3) ขนาด 2 x 1600 + 2000 kVA

รวมโหลด 15.2 MVA

กระแสในสายป้อน

$$I = \frac{15.2 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 24 \text{ kV}} = 366 \text{ A}$$

สายป้อน WB-418

รับโหลดจาก RMU2-P2 (TR4, TR5 และ TR6) ขนาด 3 x 2000 kVA

รับโหลดจาก RMU2-P3 (TR5, TR6, TR7 และ TR8) ขนาด 4 x 1600 + 2000 kVA

รวมโหลด 14 MVA

กระแสในสายป้อน

$$I = \frac{14 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 24 \text{ kV}} = 337 \text{ A}$$

สายป้อน WB-426

รับโหลดจาก RMU1-P3 (TR1, TR2, TR3 และ TR4) ขนาด 4 x 2000 kVA

รับโหลดจาก RMU3-P2 (TR7, TR8, TR9 และ TR10) ขนาด 4 x 2000 kVA

รวมโหลด 16 MVA

กระแสในสายป้อน

$$I = \frac{16 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 24 \text{ kV}} = 385 \text{ A}$$

สายป้อน WB-427

รับโหลดจาก RMU3-P3 (TR9, TR10, TR11 และ TR12) ขนาด 4 x 2000 kVA

รับโหลดจาก RMU4-P3 (TR13, TR14 และ TR15) ขนาด 3 x 2000 kVA

รวมโหลด 14 MVA

กระแสในสายป้อน

$$I = \frac{14 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 24 \text{ kV}} = 337 \text{ A}$$

การคำนวณแรงดันตกของสายในงานจริง

สายป้อนที่ 1

จากตาราง (กฟน. คลองเตย)

$$R = 0.0633 \quad \Omega / km$$

$$x = 0.0954 \quad \Omega / km$$

ที่ระยะทาง 402 m

$$R = 0.0633 \times \frac{402}{1,000} = 0.0254 \quad \Omega$$

$$x = 0.0954 \times \frac{402}{1,000} = 0.0384 \quad \Omega$$

แรงดันทางด้านส่งระหว่างไลน์กับนิวทรัล (Line to Neutral)

$$V_{S(L-N)} = \frac{24 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 13,856.4 \quad V$$

กระแสในสายส่ง

$$I = \frac{15.2 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 24 \text{ kV}} = 366 \quad A$$

แรงดันทางด้านรับ (ถ้า p.f. ของหม้อแปลง = 0.85 ล้าหลัง)

จาก

$$\begin{aligned} V_S &\cong V_R + I(R \cos \theta + X \sin \theta) \\ &= 13.841 \quad \text{kV}_{(L-N)} \\ &= 23.973 \quad \text{kV}_{(L-N)} \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของสายส่ง

$$\text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง} = 3I^2 R = 3 \times 366^2 \times 0.0254 = 0.1 \quad MW$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าทางด้านรับของสายส่ง} = 15.2 \text{ MVA} \times 0.85 = 12.95 \text{ MVA}$$

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพของสายส่ง} &= \frac{\text{Power Output}}{\text{Power Output}} \times 100 \\ &= \frac{12.92}{12.92 \times 0.1} = 99.23 \quad \% \end{aligned}$$

เปอร์เซ็นต์การควบคุมแรงดัน (% Reg)

$$\begin{aligned} \% Reg &= \frac{|V_s| - |V_r|}{|V_r|} \times 100 \\ &= \frac{13856.4 - 13841}{13841} \times 100 \\ &= 0.12 \% \end{aligned}$$

เปอร์เซ็นต์ Voltage Drop ในสาย (% VD)

$$\begin{aligned} \% VD &= \frac{S_r (R \cos \theta + X \sin \theta)}{V_r V_b} \times 100 \\ S_r &= 15.2 \text{ MVA} \\ V_r &= V_b = 24 \text{ kV} / \sqrt{3} \\ \% VD &= 15.2 \text{ MVA} \frac{(0.0254 \times 0.85 + 0.0384 \times 0.526)}{(24 \text{ kV} / \sqrt{3})^2} \times 100 \\ &= 0.33 \% \end{aligned}$$

หมายเหตุ กฟน. % VD ไม่เกิน 3% ที่ปลายสายที่มีค่า p.f. = 0.85

สายป้อนที่ 2

ที่ระยะทาง 393 m

$$R = 0.0633 \times \frac{393}{1,000} = 0.0249 \quad \Omega$$

$$x = 0.0954 \times \frac{393}{1,000} = 0.0375 \quad \Omega$$

กระแสในสาย

$$I = \frac{14 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 24 \text{ kV}} = 337 \text{ A}$$

เปอร์เซ็นต์ Voltage Drop ในสาย (% VD)

$$\begin{aligned} \% VD &= \frac{S_r (R \cos \theta + X \sin \theta)}{V_r V_b} \times 100 \\ S_r &= 14 \text{ MVA} \\ V_r &= V_b = 24 \text{ kV} / \sqrt{3} \\ \% VD &= 14 \text{ MVA} \frac{(0.0249 \times 0.85 + 0.0375 \times 0.527)}{(24 \text{ kV} / \sqrt{3})^2} \times 100 \\ &= 0.3 \% \end{aligned}$$

หมายเหตุ กฟน. % VD ไม่เกิน 3% ที่ปลายสายที่มีค่า p.f. = 0.85

สายป้อนที่ 3

ที่ระยะทาง 414 m

$$R = 0.0633 \times \frac{414}{1,000} = 0.0262 \quad \Omega$$

$$x = 0.0954 \times \frac{414}{1,000} = 0.0395 \quad \Omega$$

กระแสในสาย

$$I = \frac{16 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 24 \text{ kV}} = 385 \quad A$$

เปอร์เซ็นต์ Voltage Drop ในสาย (% VD)

$$\% VD = \frac{S_r (R \cos \theta + X \sin \theta)}{V_r V_b} \times 100$$

$$S_r = 16 \text{ MVA}$$

$$V_r = V_b = 24 \text{ kV} / \sqrt{3}$$

$$\% VD = 16 \text{ MVA} \frac{(0.0262 \times 0.85 + 0.0395 \times 0.527)}{(24 \text{ kV} / \sqrt{3})^2} \times 100$$

$$= 0.36 \%$$

หมายเหตุ กฟน. % VD ไม่เกิน 3% ที่ปลายสายที่มีค่า p.f. = 0.85

สายป้อนที่ 4

ที่ระยะทาง 397 m

$$R = 0.0633 \times \frac{397}{1,000} = 0.0251 \quad \Omega$$

$$x = 0.0954 \times \frac{397}{1,000} = 0.0379 \quad \Omega$$

กระแสในสาย

$$I = \frac{14 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 24 \text{ kV}} = 337 \quad A$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์ Voltage Drop ในสาย (% VD)

$$\% VD = \frac{S_r (R \cos \theta + X \sin \theta)}{V_r V_b} \times 100$$

$$S_r = 14 \text{ MVA}$$

$$V_r = V_b = 24 \text{ kV} / \sqrt{3}$$

$$\% VD = 14 \text{ MVA} \frac{(0.0251 \times 0.85 + 0.0379 \times 0.527)}{(24 \text{ kV} / \sqrt{3})^2} \times 100$$

$$= 0.3 \%$$

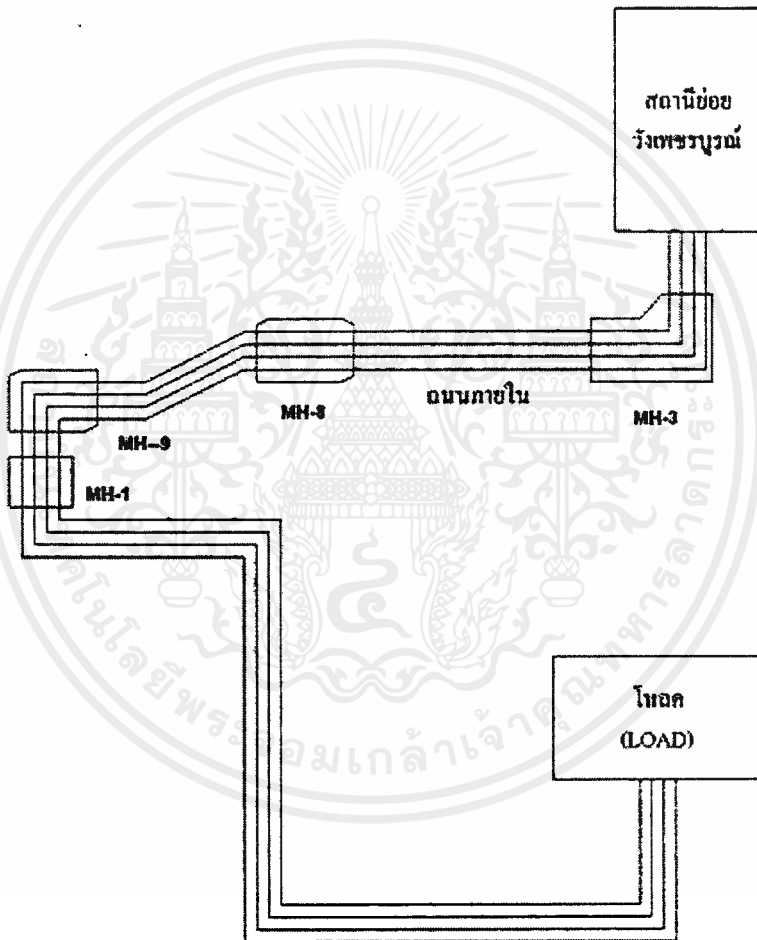
หมายเหตุ กฟน. % VD ไม่เกิน 3% ที่ปลายสายที่มีค่า p.f. = 0.85



6.2. การคำนวณแรงดึงและแรงกดด้านข้างของสายไฟฟ้าใต้ดิน

- แรงดึง แรงดึงที่กระทำต่อสายไฟฟ้าจะต้องไม่เกินกว่าการทนแรงดึงของสายไฟฟ้าที่จะยอมรับได้ สำหรับสายไฟฟ้าขนาด 25 กิโลโวลต์หรือต่ำกว่า ค่าการทนแรงดึงสูงสุดจะมีค่า 7 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตรของพื้นที่หน้าตัดของสายไฟฟ้า

- แรงกดด้านข้าง แรงกดด้านข้างจะเกิดขึ้นเมื่อเดินสายไฟฟ้าให้มีการโค้งงอและมีการใช้แรงดึง ย่อมจะทำให้มีแรงกดที่ด้านข้างของสายไฟฟ้า ซึ่งจะทำอันตรายต่อฉนวนของสายไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงมีข้อกำหนดว่าแรงกดด้านข้างจะต้องไม่เกิน 150 กิโลกรัมต่อรัศมีความโค้ง 1 เมตร



รูปที่ 6.2 สถานีย่อยวังเพชรบูรณ์

ขั้นตอนการคำนวณหาค่าแรงดึงและแรงกดด้านข้างของสายใต้ดินจากแบบงานจริง
แรงดึงตามแนวยาว

$$T = lwfC$$

แรงดึงทางด้านที่ออกจากช่องอ

$$T_{out} = T_{in} e^{cf\alpha}$$

Weight Correction Factor

$$C = \frac{1}{\sqrt{1 - \left[\frac{d}{D-d}\right]^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left[\frac{48}{147-48}\right]^2}} = 1.43$$

แรงกดด้านข้างจะมีค่าเท่ากับแรงในช่องอาหารด้วยรัศมีความโค้ง

$$P = \frac{CT_{out}}{2r}$$

น้ำหนักของสายเคเบิล (400 mm²)

$$w = 4.95 \text{ kg/m}$$

สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

$$f = 0.209$$

แรงดึงจาก Sub ถึง MH 3

$$T = 5.5 \times 4.95 \times 0.209 \times 1.143 = 6.5 \text{ kg}$$

แรงดึงผ่านช่องอ MH 3

$$T_{out} = 6.9 \times e^{1.143 \times 0.209 \times \pi/2} = 10.04 \text{ kg}$$

แรงกดด้านข้างจะมีค่าเท่ากับแรงในช่องอาหารด้วยรัศมีความโค้ง

$$P = \frac{1.143 \times 10.04}{2 \times 3} = 1.91 \text{ kg}$$

แรงดึงจากMH 3 ถึง MH 8

$$T_{out} = 92.83 \times e^{1.143 \times 0.209 \times \pi / 2} = 135.1 \text{ kg}$$

$$T = 78.5 \times 4.95 \times 0.209 \times 1.143 = 92.83 \text{ kg}$$

แรงดึงผ่านข้ออ MH 8

แรงกดด้านข้างจะมีค่าเท่ากับแรงในข้ออหารด้วยรัศมีความโค้ง

$$P = \frac{1.143 \times 135.1}{2 \times 2.22} = 34.78 \text{ kg}$$

แรงดึงโค้งหลัง MH8

$$T_{out} = 135.1 \times e^{1.143 \times 0.209 \times \pi / 4} = 162.98 \text{ kg}$$

แรงกดด้านข้างจะมีค่าเท่ากับแรงในข้ออหารด้วยรัศมีความโค้ง

$$P = \frac{1.143 \times 162.98}{2 \times 3} = 31.05 \text{ kg}$$

แรงดึงโค้งก่อน MH 9

$$T_{out} = 162.98 \times e^{1.143 \times 0.209 \times \pi / 4} = 196.62 \text{ kg}$$

แรงกดด้านข้างจะมีค่าเท่ากับแรงในข้ออหารด้วยรัศมีความโค้ง

$$P = \frac{1.143 \times 196.62}{2 \times 3} = 37.46 \text{ kg}$$

แรงดึงผ่าน MH 9

$$T_{out} = 196.62 \times e^{1.143 \times 0.209 \times \pi / 2} = 286.15 \text{ kg}$$

แรงกดด้านข้างจะมีค่าเท่ากับแรงในช่องอาหารด้วยรัศมีความโค้ง

$$P = \frac{1.143 \times 286.15}{2 \times 3} = 54.51 \text{ kg}$$

แรงดึงจาก MH 9 ถึง MH 1

$$T = 3.5 \times 4.95 \times 0.209 \times 1.143 = 4.18 \text{ kg}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปผลและวิจารณ์

จากการศึกษาเรื่องระบบไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้านครหลวง เราพอจะสรุปได้ว่าลักษณะการจ่ายไฟของระบบไฟฟ้าใต้ดินจะลักษณะที่คล้ายกับระบบสายอากาศ จะมีแตกต่างกันก็คือในส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ โดยเราพอจะสรุปรายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับระบบการจ่ายไฟและอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าใต้ดินได้ดังนี้คือ

รูปแบบการจ่ายไฟของระบบไฟฟ้าใต้ดินจะมีหลายลักษณะแตกต่างกันออกไปซึ่งได้แก่

- ระบบเรเดียล ระดับไฟฟ้าแรงดันต่ำที่ต่อออกจากหม้อแปลงจำหน่ายจะมีลักษณะการต่อเป็นวงจรถายเชื่อมโยงถึงกันหมดทุกวงจร ทำให้เหมาะกับโหลดที่ต้องการความเชื่อถือได้สูง แต่มีข้อเสียคือการออกแบบมีความยุ่งยากและซับซ้อน
- ระบบลูบ ระบบนี้เหมาะสำหรับการจ่ายให้กับโหลดรายย่อย เป็นระบบที่มีความเชื่อถือได้ของระบบสูง
- ระบบไพรมารี ซีเล็กทีฟ เป็นระบบที่มีการรับไฟจาก 2 สายป้อนหลักที่ขนานกันมาเหมาะกับการจ่ายให้กับโหลดที่ต้องการไฟเกือบเต็มสายป้อน โดยจะใช้งานจริง 1 สายและสำรองอีก 1 สาย
- ระบบสเปเชียลสเปร์ไลน์ จะประกอบด้วยสายป้อน 4 วงจร (4 สายป้อน) โดยเป็นสายป้อนสำหรับการจ่ายโหลดจริง 1 สายป้อน อีก 1 สายป้อนจะถูกสำรองไว้ ระบบนี้จะเหมาะสำหรับการจ่ายโหลดให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าย่อย และรายใหญ่ร่วมกัน

สำหรับรายละเอียดและลักษณะของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าใต้ดินมีดังนี้

สายไฟฟ้าใต้ดิน การไฟฟ้านครหลวงจะใช้สายทองแดงแกนเดี่ยวหุ้มฉนวนครอสลิงค์โพลีเอทิลีน (XLPE) ท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน ในปัจจุบันใช้ท่อชนิด เอฟอาร์อี (FRE) เนื่องจากมีความแข็งแรงทนทาน น้ำหนักเบา ไม่เป็นพิษ เมื่อเทียบกับท่อชนิดอื่น ๆ เช่น ท่อแร่ใยหิน ซึ่งในปัจจุบันได้เลิกใช้ไปแล้ว เนื่องจากจะเกิดมลภาวะเนื่องจากใยหิน บ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน เป็นที่สำหรับลากสาย ทำจุดต่อสาย ใช้ในการเปลี่ยนหรือแยกทิศทางของสาย โดยขนาดของบ่อพักจะขึ้นอยู่กับจำนวนของสายที่จะลากผ่าน หัวต่อสายไฟฟ้าใต้ดิน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการต่อสาย ซึ่งมีอยู่หลายชนิดเช่น ข้อต่อตรง ข้อต่อ Y ข้อต่อ T หรือข้อต่อแบบแยก ซึ่งจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน หัวสายไฟฟ้าใต้ดิน หรือเทอร์มินเตอร์ เป็นจุดสิ้นสุดของสายหรือเป็นจุดต่อระหว่างสายไฟฟ้าใต้ดินกับสายอากาศ ไรเซอร์โพล หรือเสาไรเซอร์ คือส่วนที่โผล่พื้นดินขึ้นมา เพื่อไปเชื่อมต่อกับระบบสายอากาศก่อนเข้าสู่อาคาร

สำหรับการออกแบบและก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน ในปัจจุบันทางการไฟฟ้านครหลวงจะทำการก่อสร้างเป็นแบบเทคอนกรีตทับท่อร้อยสาย เพื่อป้องกันความเสียหายของท่อ อันเกิดจากแรงกระแทก และจำเป็นต้องมีบ่อพักสายเพื่อใช้สำหรับการลากสายและต่อแยกสาย ซึ่งทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสูงกว่าระบบสายอากาศ ในระบบไฟฟ้าใต้ดินสามารถเพิ่มวงจรในอนาคตได้ โดยการสำรองท่อร้อยสายเอาไว้

- การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบระบบไฟฟ้าใต้ดิน

ในการออกแบบระบบไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้านครหลวง ในขั้นต้นจำเป็นที่จะต้องรู้ขนาดของโหลดก่อน หลังจากนั้นจึงทำการเลือกรูปแบบของการจ่ายไฟ ซึ่งในแต่ละแบบจะมีความสามารถในการจ่ายโหลดแตกต่างกันออกไปทั้งในปัจจุบัน และที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต โดยในการพิจารณาเลือกรายละเอียดต้องพิจารณาถึง ความน่าเชื่อถือของระบบ ความสะดวกในการติดตั้งและที่สำคัญค่าใช้จ่ายในการลงทุนจะต้องคุ้มค่าต่อการลงทุน ซึ่งในการออกแบบงานจริง รูปแบบการจ่ายไฟที่เหมาะสมกับทางด้านวิศวกรรมอาจจะไม่คุ้มค่ากับเงินลงทุนก็เป็นได้ ดังนั้นในการที่จะนำเอาโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบระบบไฟฟ้าใต้ดิน เราจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบอื่น ๆ ร่วมด้วย เพราะ โปรแกรมไม่สามารถคาดคะเนโหลดที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคตได้ อีกทั้งยังไม่สามารถตัดสินใจได้ว่าทำการก่อสร้างจริง ๆ แล้วจะสะดวกและเหมาะสมหรือไม่ และบอกไม่ได้ว่าจะคุ้มกับการลงทุนหรือไม่ ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วจำเป็นจะต้องอาศัยวิศวกร ผู้ซึ่งมีความรู้และมีประสบการณ์ในการดำเนินงานเป็นอย่างมาก

ดังนั้น ในส่วนของการนำเอาโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบในบทที่ 6 เป็นเพียงการคำนวณค่าของกระแส ขนาดของสายป้อน เฟอร์เซนต์เรกกูเลชัน เฟอร์เซนต์แรงดันตก เป็นต้น ซึ่งผู้ศึกษาจะต้องป้อนค่าของโหลดและความยาวของสายเข้าไป แต่ในที่สุดแล้วจะพบว่าการตัดสินใจเลือกรูปแบบใดมาใช้ในงานจริงนั้นจะต้องขึ้นอยู่กับความเหมาะสมทั้งทางด้านวิศวกรรม และทางด้านเศรษฐศาสตร์ ร่วมกัน

- ปัญหาและอุปสรรคในส่วนของคุณข้อมูล

- รายละเอียดของระบบไฟฟ้าใต้ดินมีมาก และยังไม่มีการรวบรวมเป็นเล่มที่สมบูรณ์ ซึ่งแหล่งข้อมูลมีหลายหน่วยงานที่รับผิดชอบ จึงยากแก่การรวบรวมข้อมูล
- ข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงบ่อย เช่น ขนาดและชนิดของอุปกรณ์ ซึ่งมีการพัฒนาและปรับปรุงอยู่เสมอ ดังนั้นข้อมูลบางอย่างที่ได้จึงไม่เป็นปัจจุบัน
- ข้อมูลบางอย่างเป็นความลับของทางการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งไม่สามารถนำมาแสดงได้

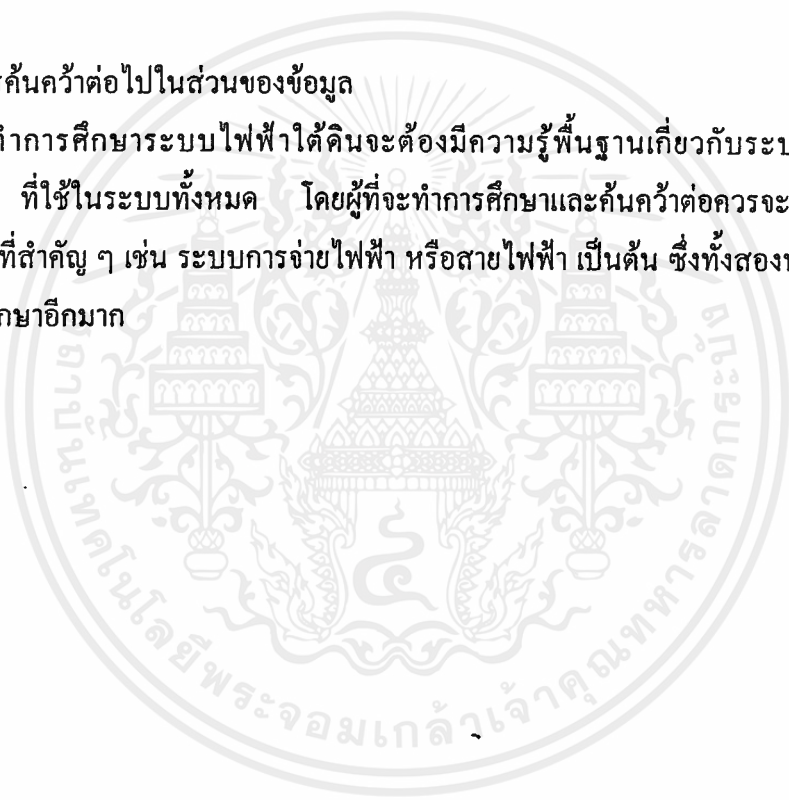
- การจะทำความเข้าใจระบบไฟฟ้าได้ดินให้ได้คั้นั้น จะต้องอาศัยประสบการณ์จากการทำงานจริงเท่านั้น

- การบรรลุถึงวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ภายหลังจากที่ได้ศึกษาระบบไฟฟ้าได้ดินแล้ว ทำให้รู้ถึงความแตกต่างของระบบไฟฟ้าได้ดินกับระบบสายอากาศ ทั้งทางด้านกรอกแบบ การติดตั้ง และอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งทำให้สามารถออกแบบระบบการจ่ายไฟในขั้นต้นได้ แล้วนำความรู้ที่ได้มาถ่ายทอดผ่านคอมพิวเตอร์ให้ผู้สนใจได้ศึกษา

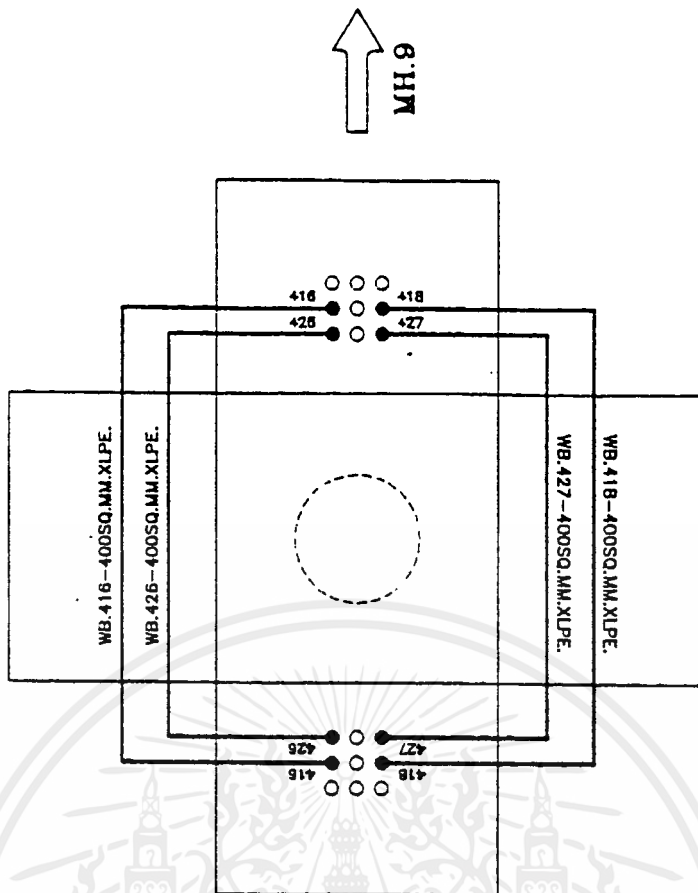
- แนวทางการค้นคว้าต่อไปในส่วนของคุณ

ผู้ที่ทำการศึกษาระบบไฟฟ้าได้ดินจะต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบการจ่ายไฟ อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในระบบทั้งหมด โดยผู้ที่ทำการศึกษาและค้นคว้าต่อควรที่จะเจาะลึกในรายละเอียดหัวข้อที่สำคัญ ๆ เช่น ระบบการจ่ายไฟฟ้า หรือสายไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งทั้งสองหัวข้อ ยังมีรายละเอียดที่น่าศึกษาอีกมาก





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



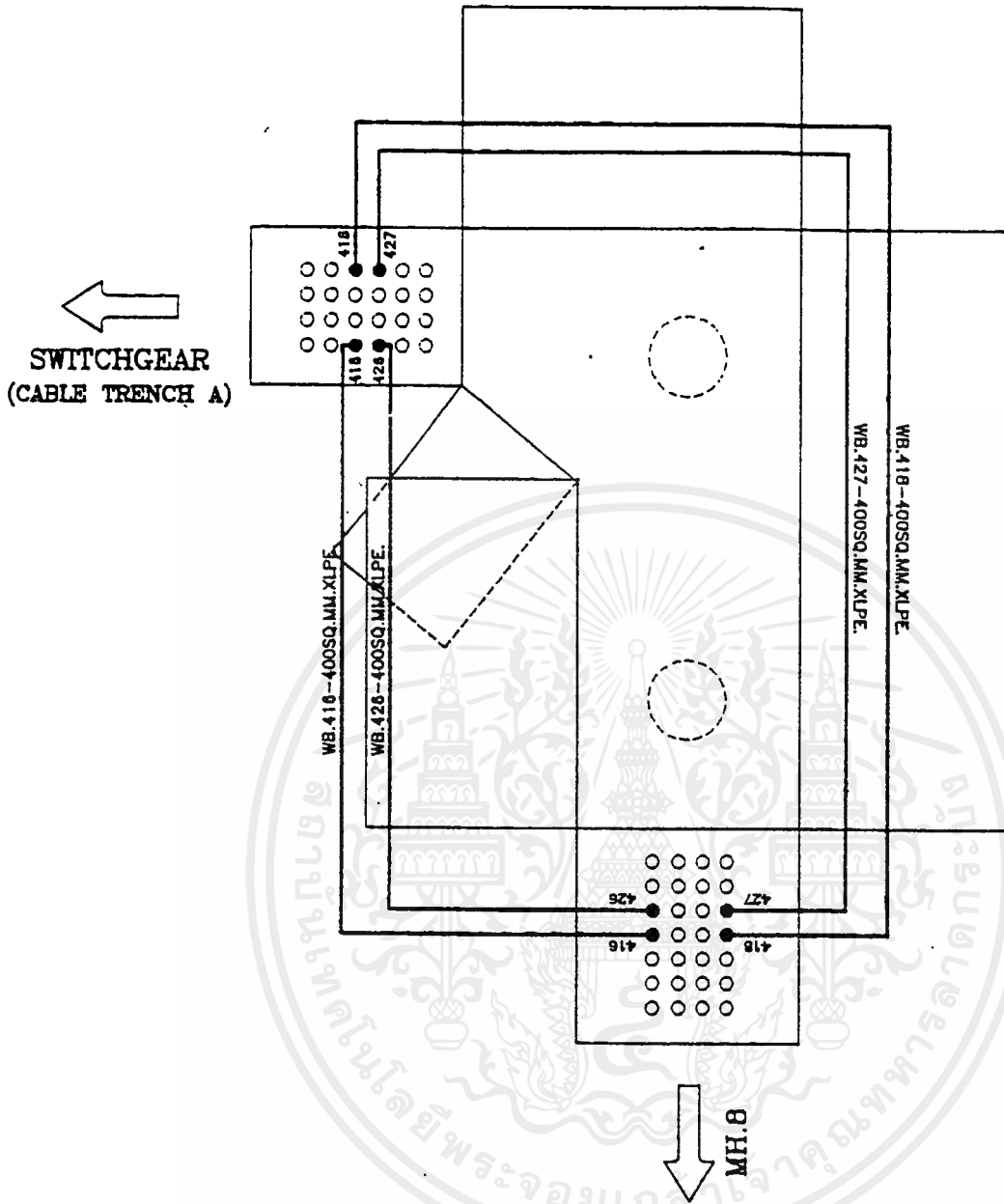
- RMU1-P1 BY WB-416
- RMU1-P2 BY WB-416
- RMU2-P2 BY WB-426
- RMU3-P2 BY WB-418
- RMU1-P3 BY WB-418
- RMU2-P3 BY WB-426
- RMU3-P3 BY WB-427
- RMU4-P3 BY WB-427

WORLD TRADE CENTER PHASE 1-3

REFERENCE DRAWINGS:-

- DWG.NO. 05A4-62WB21 SH.1 HANDHOLE DEVELOPMENT (TYPE C-1 SPECIAL)
- A3-036P4-4 SH.1 24KV.UG. CIRCUIT SCHEMATIC PATHUMWAN PROJECT

REV.NO.	DESCRIPTION	OF	REVISIONS	BY	DATE
METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY ELECTRICAL DESIGNS AND CIVIL ENGINEERING WORK DEPARTMENT					A4
ELECTRICAL DESIGN DIV	GENERAL MANAGER		DATE	NETWORK DESIGN SECT.	
DRN. <i>Somporn</i>	CABLE ARRANGEMENT HANDHOLE 1 TYPE C-1 PATHUMWAN PROJECT			SCALE	NONE
CHK. <i>ENGR. chai pat</i>				DATE	3.5.97
CHF.OF SECT. <i>109</i>				SUPERSEDING	
CHF.OF DIV.				SH.NO.	4 OF 7
EXC.MGR.				DWG. NO.	A4-036P6-4
DTY.GEN.MGR.					

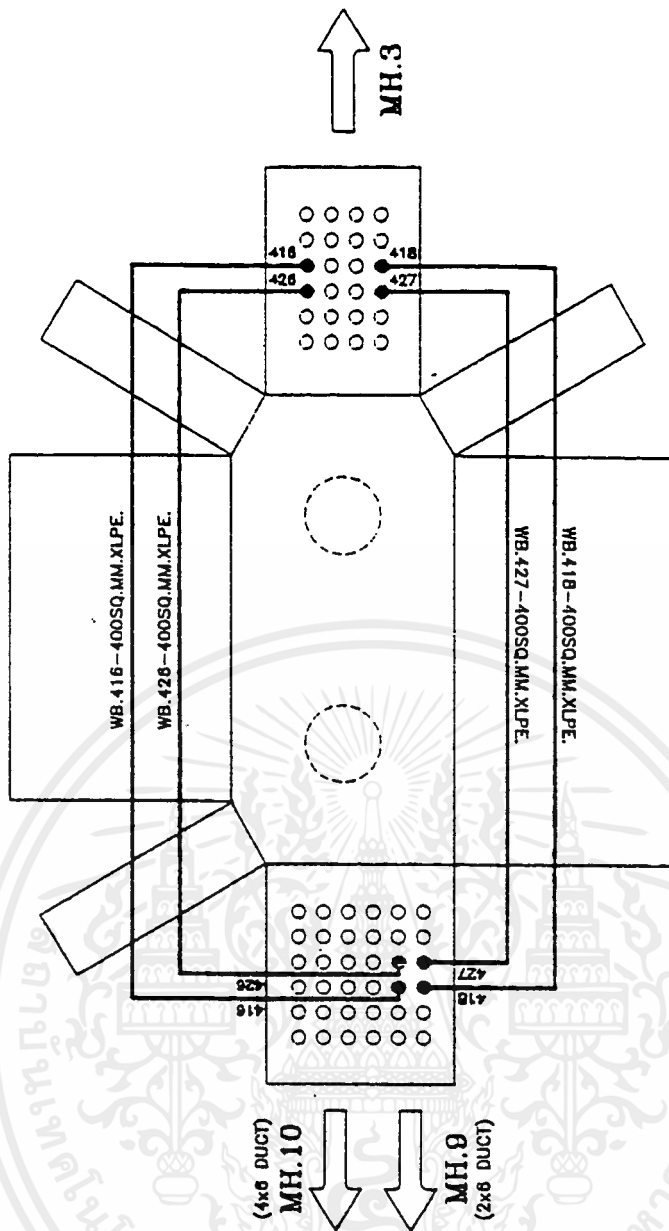


REFERENCE DRAWINGS:-

DWG.NO. 05A4-62WB21 SH.3 MANHOLE DEVELOPEMENT.

A3-036P4-4 SH.1 24KV.UG. CIRCUIT SCHEMATIC PATHUMWAN PROJECT.

REV.NO.	DESCRIPTION	OF	REVISIONS	BY	DATE
METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY					A4
ELECTRICAL DESIGNS AND CIVIL ENGINEERING WORK DEPARTMENT					
ELECTRICAL DESIGN DIV	GENERAL MANAGER		DATE	NETWORK DESIGN SECT.	
DRN. <i>Somporn</i>	CABLE ARRANGEMENT MANHOLE 3 TYPE L-1/1 PATHUMWAN PROJECT			SCALE	NONE
CHK. <i>Engr. Chairot</i>				DATE	3.5.97
CHF.OF SECT. <i>Chairot</i>				SUPERSEDING	ตามการค้
CHF.OF DIV.				SH.NO.	1 OF 7
EXC.MGR.				DWG. NO.	A4-036P6-4
DTY.GEN.MGR.					

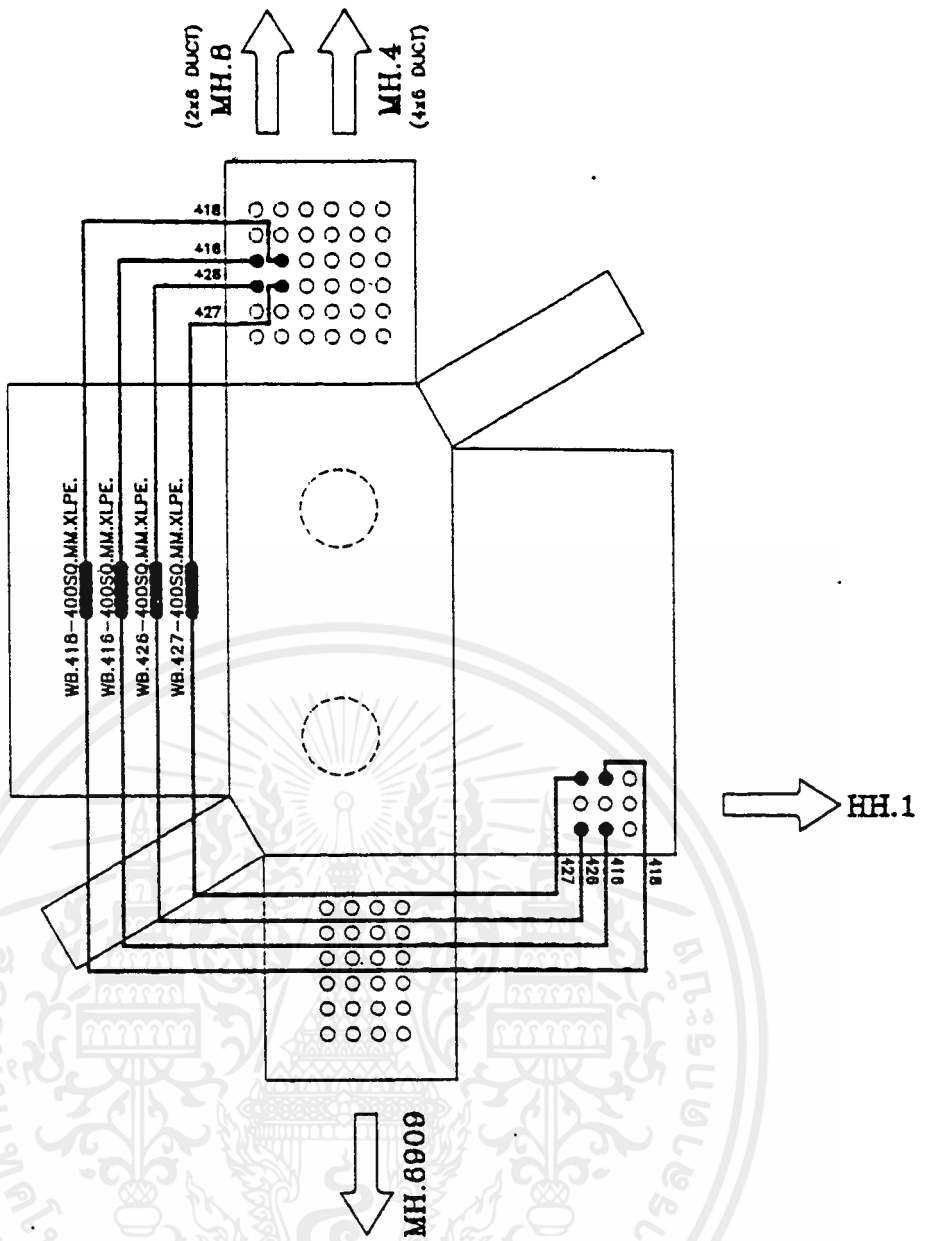


REFERENCE DRAWINGS:-

DWG.NO. 05A4-62WB21 SH.8 MANHOLE DEVELOPMENT.

A3-036P4-4 SH.1 24KV.UG. CIRCUIT SCHEMATIC PATHUMWAN PROJECT.

REV. NO.	DESCRIPTION	OF	REVISIONS	BY	DATE	
<p align="center">METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY ELECTRICAL DESIGNS AND CIVIL ENGINEERING WORK DEPARTMENT</p>					A4	
ELECTRICAL DESIGN DIV		GENERAL MANAGER		DATE		
DRN. <i>Somporn</i>		<p align="center">CABLE ARRANGEMENT MANHOLE 8 TYPE B-3/2C PATHUMWAN PROJECT</p>		NETWORK DESIGN SECT.		
CHK. <i>ENGR. Charipat</i>				SCALE	NONE	
CHF.OF SECT. <i>Engr. Somporn</i>				DATE	3.5.97	
CHF.OF DIV.				SUPERSEDING		ด้วยคำสั่ง
EXC.MGR.				SH.NO.	2 OF 7	
DTY.GEN.MGR.		DWG. NO.	A4-036P6-4			



REFERENCE DRAWINGS:-

DWG.NO. 05A4-62WB21 SH.8 MANHOLE DEVELOPMENT.

A3-036P4-4 SH.1 24KV.UG. CIRCUIT SCHEMATIC PATHUMWAN PROJECT.

REV.NO.	DESCRIPTION	OF	REVISIONS	BY	DATE
METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY					A4
ELECTRICAL DESIGNS AND CIVIL ENGINEERING WORK DEPARTMENT					
ELECTRICAL DESIGN DIV	GENERAL MANAGER		DATE	NETWORK DESIGN SECT.	
DRN. <i>Somporn</i>	CABLE ARRANGEMENT.			SCALE	NONE
CHK. <i>Asst. ENGR. Chaiyap</i>				DATE	3.5.97
CHF. OF SECT. <i>...</i>				SUPERSEDING	
CHF. OF DIV.				SH.NO.	3 OF 7
EXC. MGR. <i>...</i>				DWG. NO.	A4-036P6-4
DTY. GEN. MGR.	MANHOLE 9 TYPE B-3/2C				
PATHUMWAN PROJECT					



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHYSICAL CHARACTERISTIC 12 / 20 kV.XLPE COPPER CABLE

Size (mm ²)	35	70	120	240	400
Conductor Diameter (mm)	6.95	9.73	12.95	18.47	23.39
Max. Overall Diameter (mm.)	27	30	35	42.2	48
AC. Resistance (Ohms / kilometre)	0.6683	0.3421	0.1958	0.0633	0.035
Reactance (Ohms / kilometre)	0.1395	0.1232	0.1133	0.102	0.0954

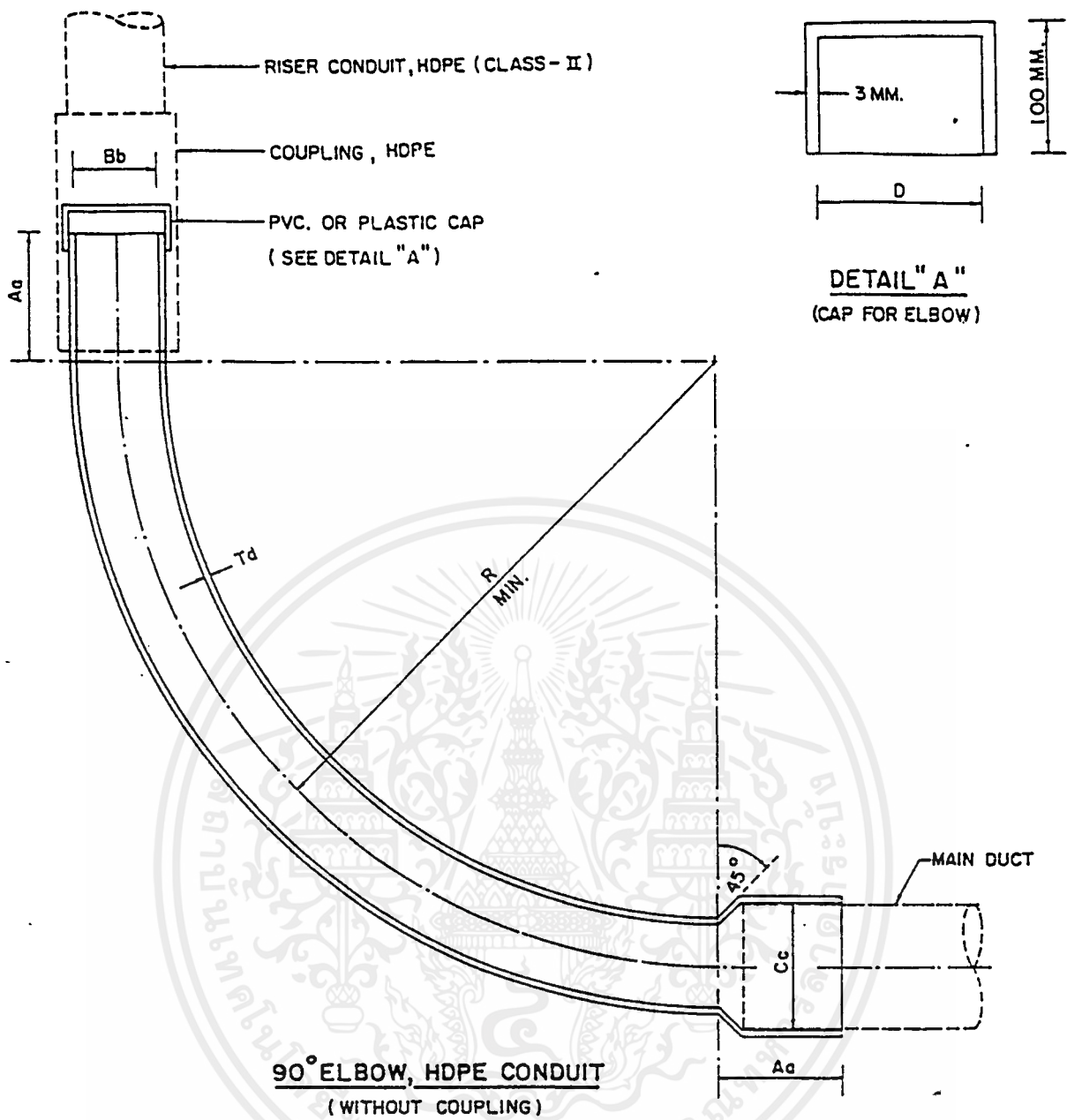
ความสามารถในการนำกระแสและพลังไฟฟ้าของสายป้อนใต้ดิน

ขนาดของสายเคเบิลใต้ดิน ตัวนำทองแดงฉนวนด้วย XLPE	ความสามารถในการนำกระแสและพลังไฟฟ้า				
	กระแส (A)	12 kV (MVA)	22 kV (MVA)	24 kV (MVA)	33 kV (MVA)
35 mm ² CU. XLPE	161	3.3	6.1	6.6	9.2
70 mm ² CU. XLPE	235	4.8	9	9.7	13.4
240 mm ² CU. XLPE	478	9.9	18.2	19.8	27.3
400 mm ² CU. XLPE	614	12.7	23.4	25.5	35.1

NUMBER OF CABLE IN DUCT

CABLE SIZE		ASBESTOS CEMENT DUCT SIZE (mm.)											
		100				115				140			
MCM.	sq.mm	600V	15kV	25kV	69kV	600V	15kV	25kV	69kV	600V	15kV	25kV	69kV
2		4	3	3									
2/0		4	3	3									
4/0		4	3	3									
350		4	3	3									
500						4	3	3					
650										4	3	3	
750										4	3	3	
	35		3	3									
	70		3	3									
	120	4											
	185	4											
	240		3			4	3	3					
	400									4	3	3	
	500												1
	800											3	1

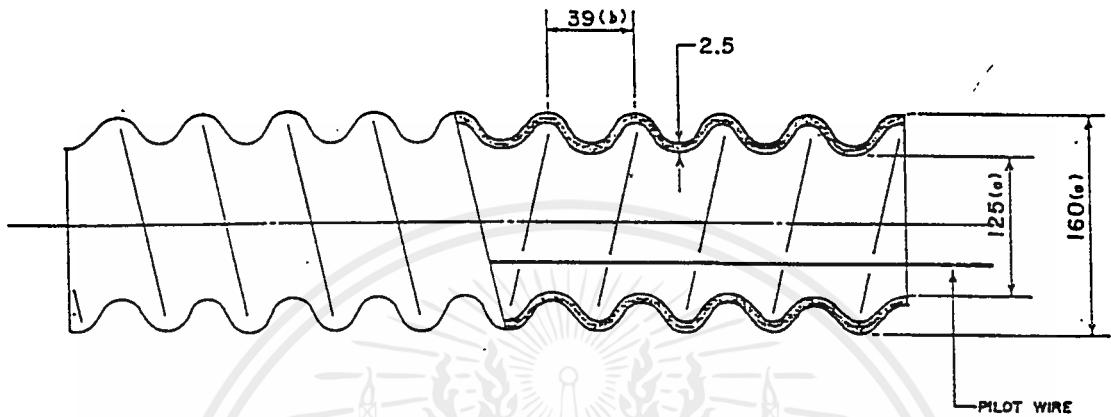
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MAIN DUCT		90° ELBOW, HDPE			DIMENSION (MM.)					
SIZE (MM.)	TYPE	NOM. DIA. (MM.)	CODE NO.	TYPE	A	B	C	D	R	T
115 ID.	ASBESTOS	125	493-115	A	200	115.4	128.5	126	1000	4.8
140 ID.		140	493-140	B	200	129.2	155.5	141	1000	5.4
140 ID.		160	493-160	E	250	147.6	155.5	161	1840	6.2
125 OD.	HDPE	125	494-125	C	200	115.4	126	126	1000	4.8
140 OD.		140	494-140	D	200	129.2	141	141	1000	5.4
160 OD.		160	494-160	F	250	147.6	161	161	1840	6.2

NOTE. ALLOWABLE VARIATIONS: a = ± 5.0 MM, b = ± 1.0 MM, c = ± 1.0 MM, d = ± 0.5 MM.

3	ADDED CAP FOR ELBOW AND ADDED ELBOW TYPE E & F.	Sombat.	18/2/30
2	ADDED CODE NO. OF 90° ELBOW	Sombat.	7/10/29
1	CHANGED DWG. NO. FROM IOA4-0195 TO BE UG-8-004 AND ADDED VARIATIONS.	Sombat.	6/2/29
REV. NO.	DESCRIPTION OF REVISIONS	BY	DATE
DR. <i>SK</i>	CHK. <i>Sombat.</i>	METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY	
DIV. CHIEF <i>Suchit</i>	SCALE NONE		SUPERSEDING
EXC. MGR. <i>Tomyay</i>	SH. NO. 3 OF 3		
DTY. GEN. MGR. <i>Am. Abba.</i>	DWG. NO. UG-8-004		
DATE 15/10/2528			



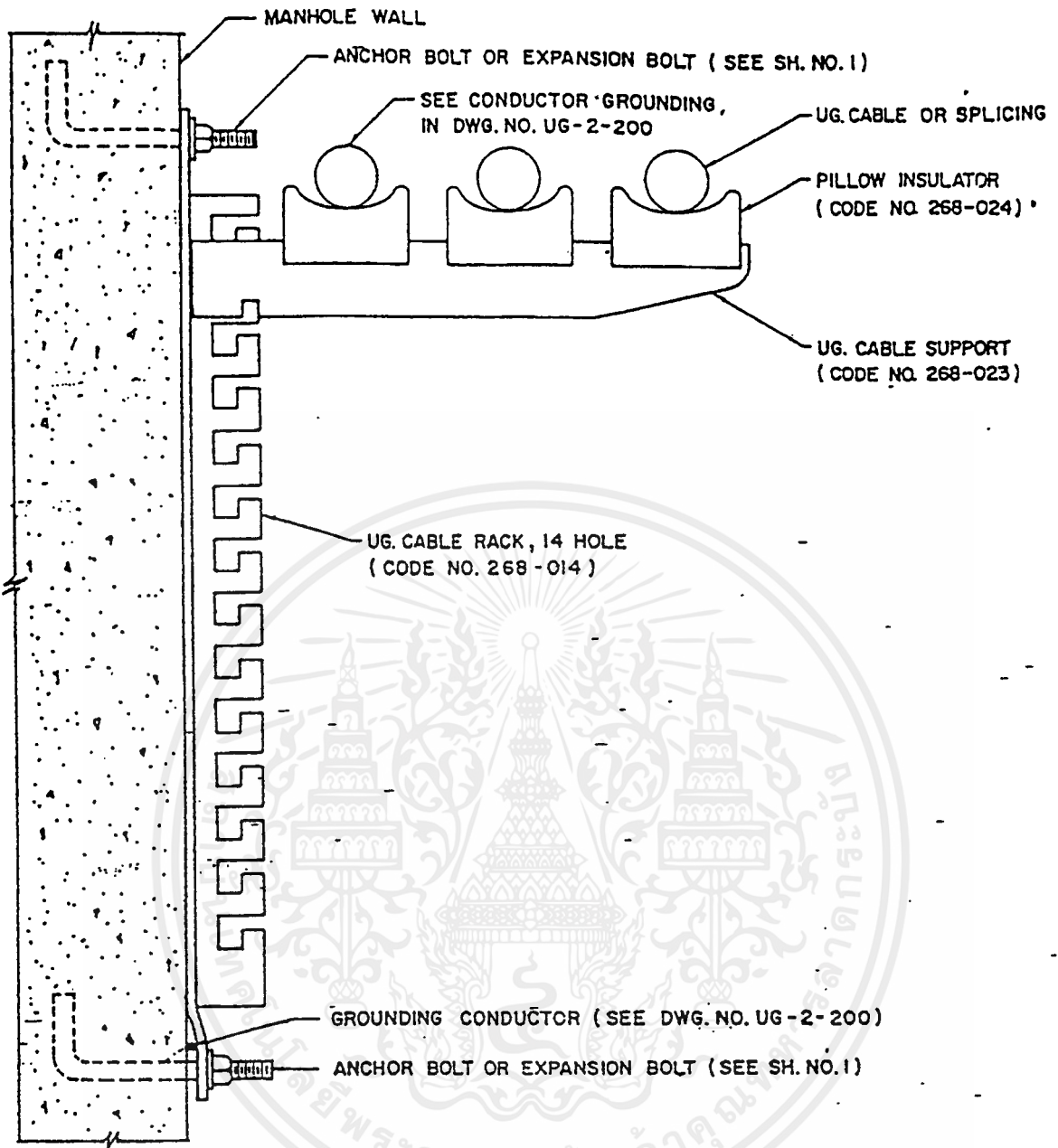
Ø 125 mm. CORRUGATED PIPE MAIN BODY

NOTE

DIMENSION IN MILLIMETER

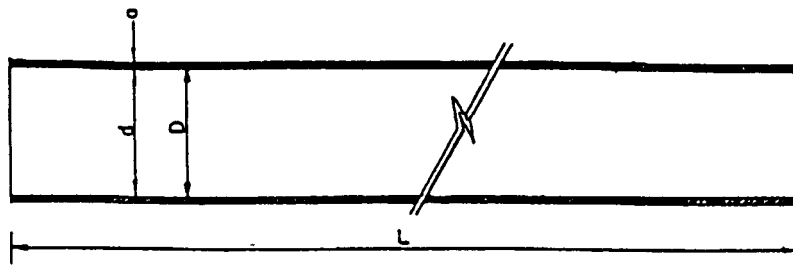
- MAIN BODY**
- PARTIAL MINIMUM WALL THICKNESS SHALL NOT BE LESS THAN 1.65 mm.
 - TOLERANCE : $a = \pm 3 \text{ mm.}, b = \pm 1 \text{ mm.}$
 - MATERIAL : HIGH-DENSITY POLYETHYLENE
 - COLOR : BLACK
 - COIL LENGTH : 100 M. OR 50 M.
- PILOT WIRE**
- MATERIAL : VINYL COVERED IRON WIRE 2.0/2.6
 - COLOR : GREEN

REV. NO.	DESCRIPTION	OF	REVISIONS	BY	DATE
METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY					A 4
ENGINEERING DEPARTMENT					
ELECTRICAL	DESIGN	DIV.	GENERAL MANAGER	DATE	UDG. DESIGN SECT.
DRN.	Samret				SCALE. NONE
CHK.	ENGR. ๗๗.				DATE. 21 Oct 1988
CHF. OF SECT.	Montri		CORRUGATED PIPE MAIN BODY		SUPERSEDING.
CHF. OF DIV.	Prasert				SH. NO. 1 OF
EXC. MGR.					DWG. NO. 08A4-1122
DTY. GEN.MGR.			(CODE 491-125)		

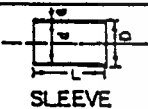

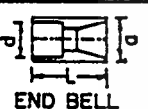


TYPICAL INSTALLATION OF UG. CABLE ON UG. CABLE RACK

REV. NO.	DESCRIPTION	OF	REVISIONS	BY	DATE
DR <i>sk</i>	CHK. <i>Sombuf.</i>	METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY		SCALE	NONE
DIV. CHIEF <i>Suchart B.</i>	UG. CABLE RACK, SUPPORT AND PILLOW INSULATOR		SUPERSEDING		2412
EXC. MGR. <i>สาร ท.ท.</i>	FOR		SH. NO.	3	OF 3
DTY. GEN. MGR. <i>Benj...</i>	SUPPORTING UG. CABLE & SPLICE UP TO 400 MM. ²		DWG. NO.	UG-2-220	
DATE	31/3/2530				



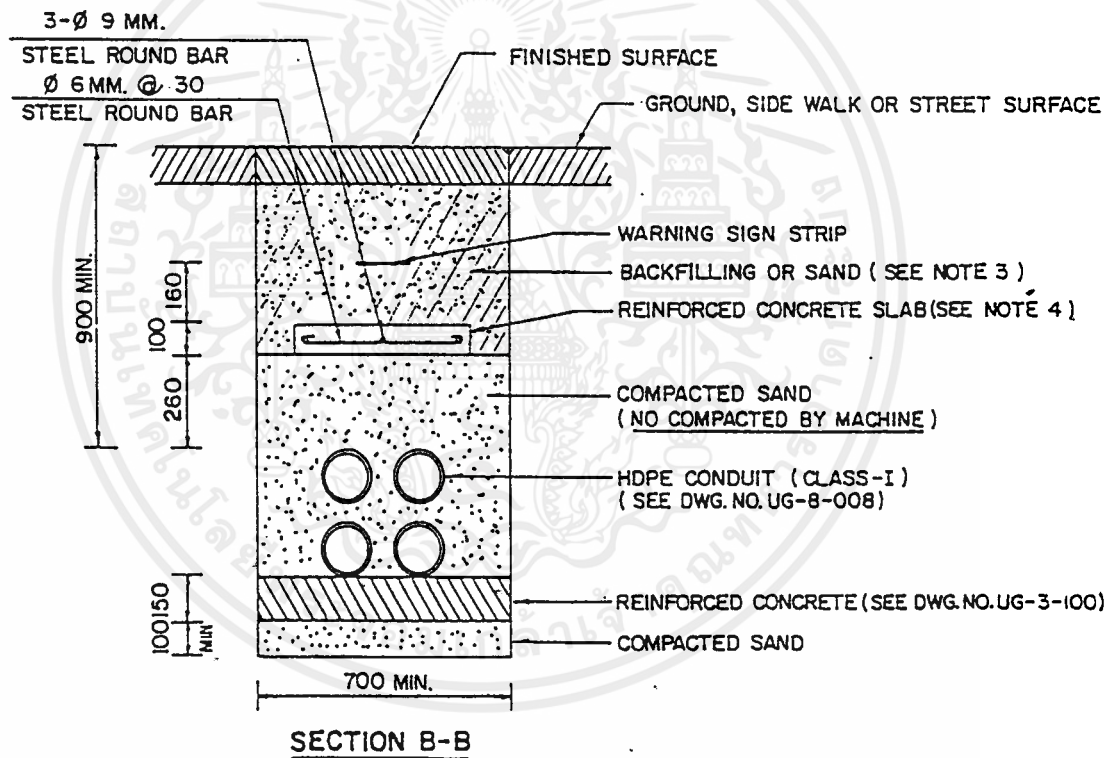
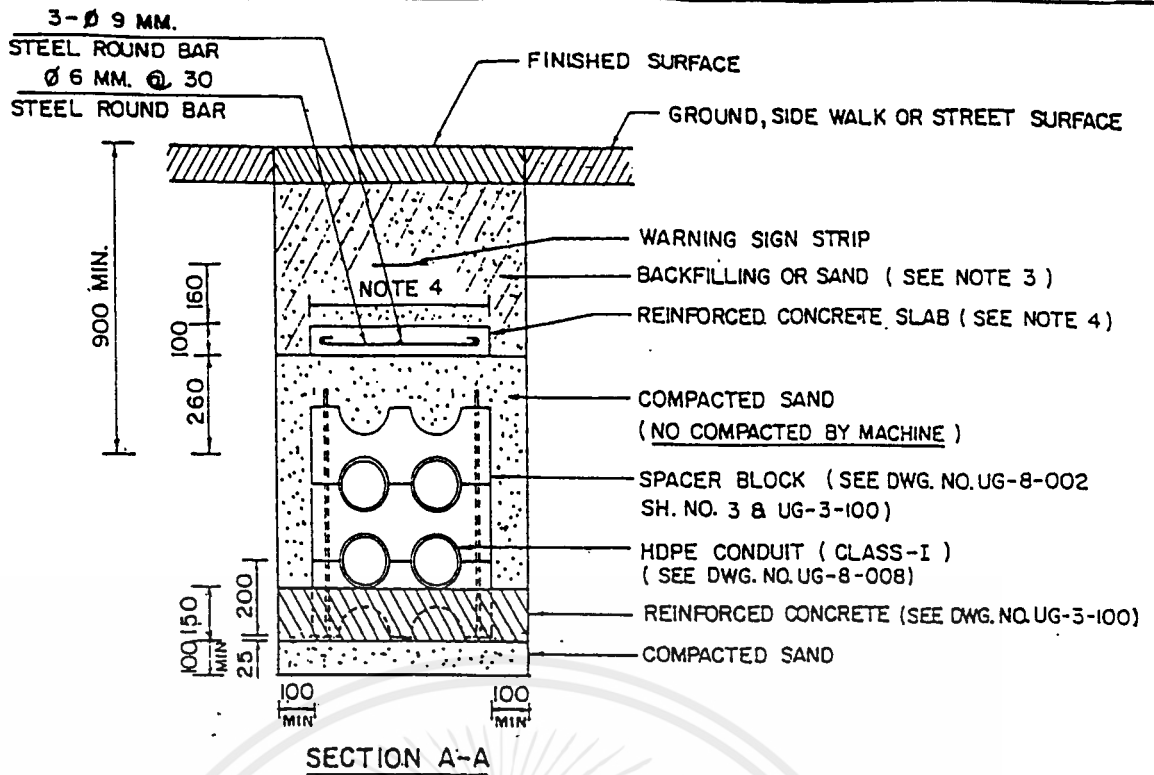
ASBESTOS CEMENT DUCT					
CODE NO.	d (NOTE 2)	a	D	L	WEIGHT KGS.
	MM.			M.	
563 - 100	100	6	112	4.00	18.0
563 - 115	115	6	127	4.00	20.0
563 - 140	140	7	154	4.00	29.1
563 - 200	200	8	216	4.00	—

DESCRIPTION	CODE NO.	A/D SIZE	a	d	D	L	WEIGHT KGS.
		MM.					
 SLEEVE	563-101	∅ 100	6	115	127	178	1.00
	563-116	∅ 115	6	130	142	178	1.20
	563-141	∅ 140	8	160	176	178	1.60
	563-201	∅ 200	8	220	236	178	—
 DEFLECTION COUPLING (5°)	563-102	∅ 100	—	115	150	185	3.10
	563-117	∅ 115	—	130	165	185	3.50
	563-142	∅ 140	—	157	195	185	4.90
	563-202	∅ 200	—	220	260	185	—
 END BELL	563-414	∅ 100	—	115	150	185	3.10
	563-415	∅ 115	—	130	165	185	3.20
	563-416	∅ 140	—	157	195	185	4.50
	563-413	∅ 200	—	220	260	185	—

NOTES

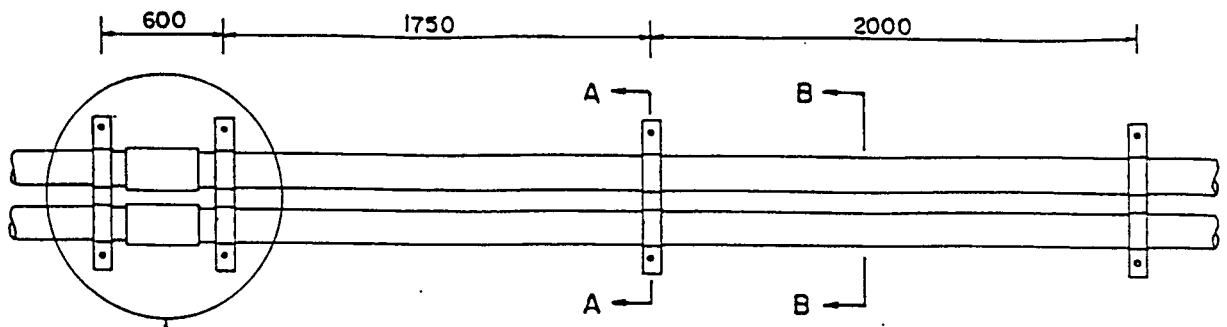
1. "A/D" MEANS ASBESTOS CEMENT DUCT.
2. THE INSIDE DIAMETERS (d) INDICATE SIZES OF ASBESTOS CEMENT DUCTS.

1	ADDED ∅ 200 MM. A/D AND ACCESSORIES	Sombat	19/7/33
REV. NO.	DESCRIPTION OF REVISIONS	BY	DATE
DR. <i>Sombat</i>	CHK <i>Sombat</i>	METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY	
DIV. CHIEF <i>Suehant B.</i>	ASBESTOS CEMENT DUCT		SCALE NONE
EXC. MGR. <i>T.H.</i>	DEFLECTION COUPLING (5°)		SUPERSEDING
DTY. GEN. MGR. <i>Banyid</i>	SLEEVE & END BELL		SH. NO. 1 OF 2
DATE 14 / 5 / 2530			DWG NO. UG-8-001



- NOTES.**
1. DIMENSIONS ARE IN MM.
 2. FOR CIRCUIT SEQUENCE AND NO. OF UG. CABLE IN HDPE CONDUIT, SEE DWG. NO.UG-4-002 & UG-4-003.
 3. BACKFILLING (OR SAND) IS COMPACTED ACCORDING TO REQUIREMENTS SET BY THE SIDE WALK OR STREET STRUCTURE.
 4. THE WIDTH OF CONCRETE SLAB IS THE SAME AS OF SPACER BLOCK.

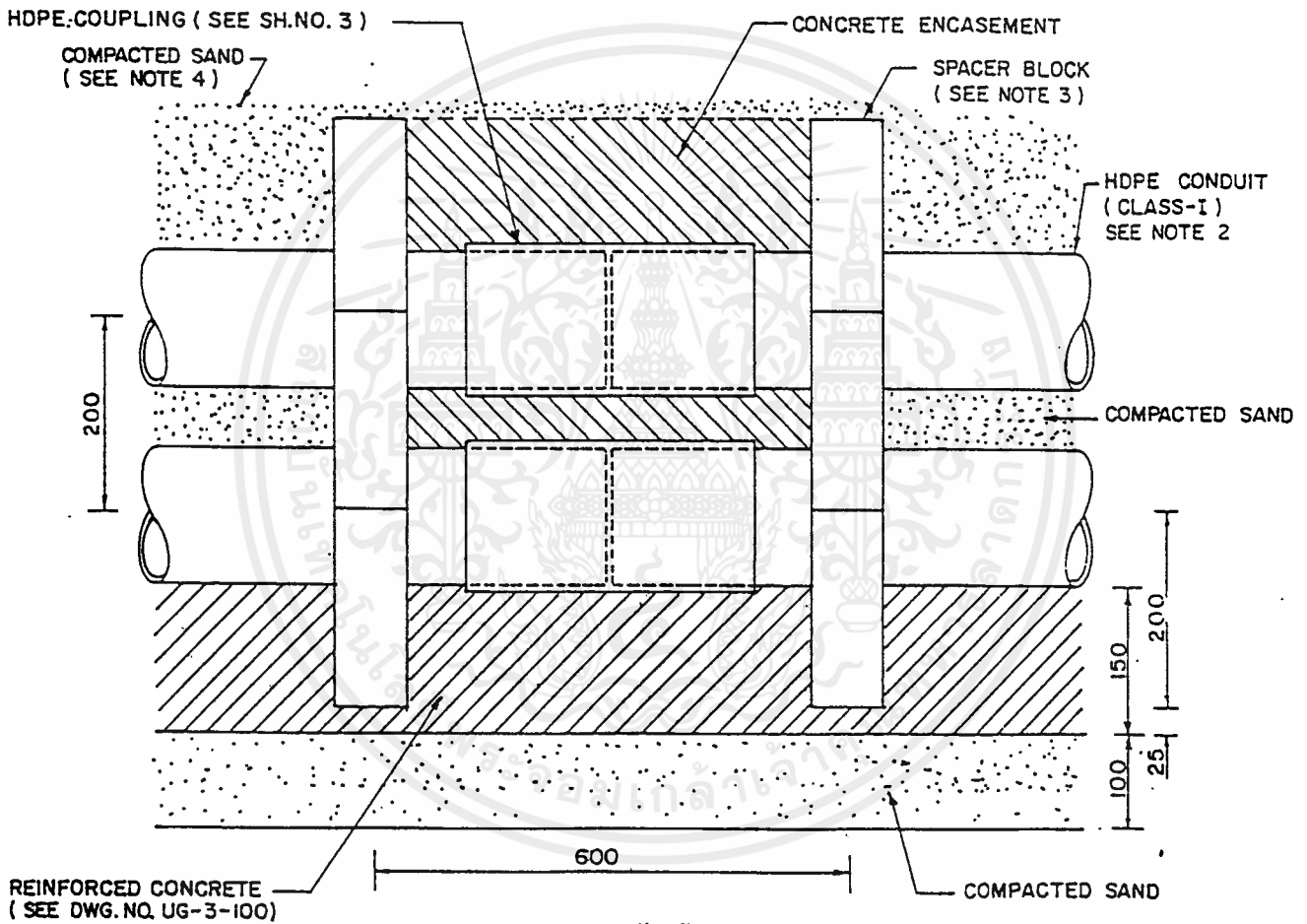
REV. NO.	DESCRIPTION	OF	REVISIONS	BY	DATE	
DR. <i>[Signature]</i>	CHK. <i>Sombal.</i>	METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY			SCALE	1:20
DIV. CHIEF	UG. PRIMARY & SUBTRANSMISSION			SUPERSEDING		
EXC. MGR.	CONSTRUCTION			SH. NO. 2 OF 3		
DTY. GEN. MGR.	HDPE DUCT BANK			DWG. NO. UG-6-100		
DATE						



SEE DETAIL "A"

TOP VIEW

TYPICAL 2x2 DUCT BANK, Ø 140 MM. HDPE CONDUIT



DETAIL "A"

(FRONT VIEW-SCALE 1:7.5)

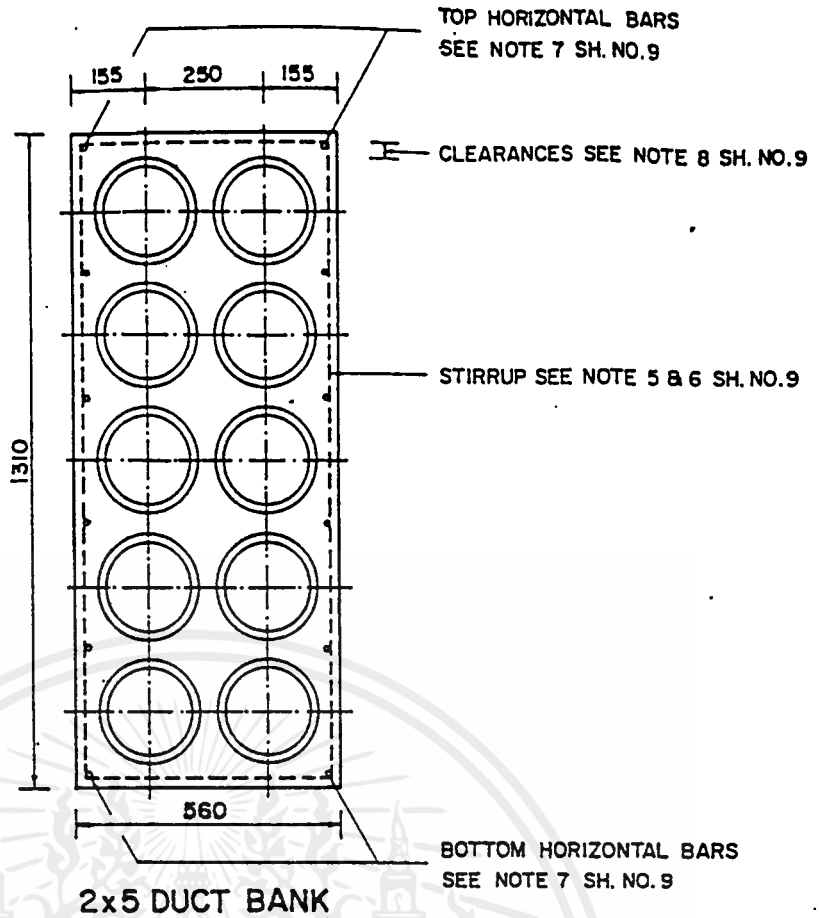
NOTES 1. DIMENSIONS ARE IN MM.

2. FOR DETAILS OF HDPE CONDUIT, SEE DWG. NO. UG-8-008.

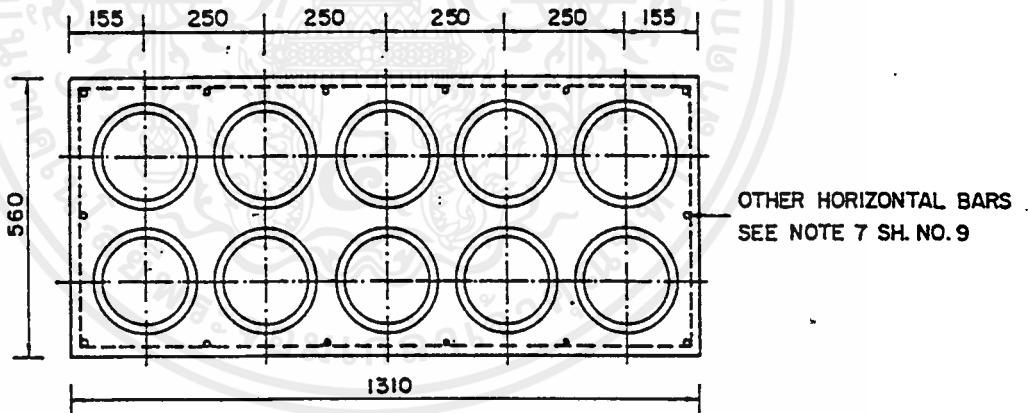
3. SEE DETAILS ON DWG. NO. UG-8-002 (SH. NO. 3) & UG-3-100.

4. NO COMPACTED BY MACHINE..

REV. NO.	DESCRIPTION OF REVISIONS		BY	DATE
DR. <i>[Signature]</i>	CHK. <i>Somhal.</i>	METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY	SCALE 1:30	
DIV. CHIEF	UG. PRIMARY & SUBTRANSMISSION		SUPERSEDING	
EXC. MGR.	CONSTRUCTION		SH. NO. 1 OF 3	
DTY. GEN. MGR.	HDPE DUCT BANK		DWG NO. UG-6-100	
DATE				



2x5 DUCT BANK



5x2 DUCT BANK

NOTE

DIMENSIONS ARE IN MM.

CONFIGURATION USING 140 MM. DUCT

REV. NO.	DESCRIPTION OF REVISIONS	BY	DATE
DR. <i>Apichart</i>	CHK. <i>Sambath</i>	METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY	
DIV. CHIEF <i>Suchart B.</i>	EXC. MGR. <i>T.H.</i>	SCALE	1:15
DTY. GEN. MGR. <i>Benjumin</i>	DATE	REINFORCED DUCT BANK SECTIONS USING ASBESTOS CEMENT DUCTS	
31/3/2530		SUPERSEDING 2409	
		SH. NO. 6 OF 9	
		DWG. NO. UG-3-010	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบทดสอบท้ายบทที่ 1

1. Right of way (ROW) หมายถึงพื้นที่ตามข้อใด

- ก. พื้นที่ ๆ สะดวกในการปักเสาและพาดสายไฟฟ้า
- ข. พื้นที่ ๆ ไม่สามารถปักเสาและพาดสายไฟฟ้าในระบบสายอากาศได้
- ค. พื้นที่ ๆ เกิดความปลอดภัยในการปักเสาและพาดสายไฟฟ้า
- ง. พื้นที่ ๆ จะทำการเดินสายระบบไฟฟ้าใต้ดิน

2. ในบริเวณพื้นที่วางโครงข่าย (Network Area) เป็นการจ่ายไฟระบบใด

- ก. ระบบเรเดียลสายอากาศ (Overhead Radial System)
- ข. ระบบเรเดียลสายใต้ดิน (Underground Radial System)
- ค. ระบบวงรอบสายอากาศ (Overhead loop System).
- ง. ระบบวงรอบสายใต้ดิน (Underground loop System)

3. การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบส่งที่มีพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟสู่โหลดเพียงวงจรวจรเดียว เป็นการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ารูปแบบใด

- ก. ระบบเรเดียล (Radial System)
- ข. ระบบวงรอบ (Loop System)
- ค. ระบบตาข่าย (Network System)
- ง. ระบบฉุกเฉิน (Emergency System)

4. การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบส่งที่มีพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปสู่โหลดมากกว่าหนึ่งวงจรเป็นการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ารูปแบบใด

- ก. ระบบเรเดียล (Radial System)
- ข. ระบบวงรอบ (Loop System)
- ค. ระบบตาข่าย (Network System)
- ง. ระบบฉุกเฉิน (Emergency System)

5. การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบส่งที่มีพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปสู่โหลดและกลับไปสู่แหล่งจ่ายเดียวกัน เป็นการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ารูปแบบใด

- ก. ระบบเรเดียล (Radial System)
- ข. ระบบวงรอบ (Loop System)
- ค. ระบบตาข่าย (Network System)
- ง. ระบบฉุกเฉิน (Emergency System)

6. การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบส่งที่มีความน่าเชื่อถือ (Reliability) มากที่สุด

- ก. ระบบเรเดียล (Radial System)
- ข. ระบบวงรอบ (Loop System)
- ค. ระบบตาข่าย (Network System)
- ง. ระบบฉุกเฉิน (Emergency System)

7. ข้อเสียของการจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบใด เมื่อเกิดฟอลต์ที่สายป้อนใดจะทำให้ไฟฟ้าดับหมดทั้งสายป้อน

- ก. ระบบเรเดียล (Radial System)
- ข. ระบบวงรอบ (Loop System)
- ค. ระบบตาข่าย (Network System)
- ง. ระบบฉุกเฉิน (Emergency System)

8. การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบสายป้อนที่มีการต่อเชื่อมสายป้อนจากหลาย ๆ สถานีไฟฟ้าย่อยเข้าด้วยกันเป็นวงจรสายป้อนแบบใด

- ก. วงจรสายป้อนหลักแบบเรเดียล (Radial – Type Primary Feeder)
- ข. วงจรสายป้อนหลักแบบรูป (Loop- Type Primary Feeder)
- ค. วงจรสายป้อนหลักแบบตาข่าย (Network – Type Primary Feeder)
- ง. วงจรสายป้อนใต้ดินสำรองพิเศษ (Special Spare Line System)

9. หม้อแปลงในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวงมีการต่อขดลวดทางด้านแรงสูง (High Voltage) และทางด้านแรงต่ำ (Low Voltage) ให้มีกลุ่มเวกเตอร์ (Vector Group) เป็นแบบใด

- ก. Dyn 1
- ข. Dyn 7
- ค. Dyn 11
- ง. Yd 0

10. การจ่ายไฟฟ้าด้วยสายป้อนใต้ดินจะแตกต่างจากสายป้อนอากาศคือต้องมีอุปกรณ์ตัดตอนเพื่อเป็นจุดแยกในการจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลด อุปกรณ์นั้นคือข้อใด

- ก. Disconnecting Switch
- ข. Ring Main Unit
- ค. Reclosing Relay
- ง. Automatic Reclosing Sectionalizer

11. อุปกรณ์ที่แสดงให้เห็นว่ามีกระแสลัดวงจรไหลผ่านได้แก่ “ Fault Indicator ” ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คืออะไร

- ก. Manual Reset และ Automatic Reset
- ข. High Voltage และ Reset Low Voltage Reset
- ค. Current Reset และ Time Reset
- ง. Selfed Reset และ Excited Reset

12. การจ่าย ไฟฟ้าด้วยสายป้อนใต้ดิน 2 วงจรจ่ายไฟฟ้าขนานกันไป ซึ่งผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถเลือก รับไฟฟ้าจากสายป้อนใดสายป้อนหนึ่งด้วยสวิตช์ถ่ายโอนอัตโนมัติ เป็นการจ่ายไฟฟ้าด้วยระบบใด

- ก. Underground Open Loop System
- ข. Primary Selective System
- ค. Special Spare Line System
- ง. Network Primary System

13. ระบบการจ่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล (Radial System) ที่จ่ายโหลดเป็นระบบสายอากาศนิยมใช้ หม้อแปลงแบบใดในระบบจำหน่าย

- ก. Completely Self Protected
- ข. Unit Substation
- ค. Pad-mounted Transformer
- ง. Transformer Vault

14. ระบบจ่ายไฟแบบเรเดียล (Radial System) ที่จ่ายโหลดเป็นระบบสายใต้ดินสามารถใช้หม้อ แปลงได้หลายประเภท ยกเว้นข้อใด

- ก. Completely Self Protectd
- ข. Unit Substation
- ค. Pad-mounted Transformer
- ง. Transformer Vault

15. อุปกรณ์ระบบสายใต้ดินแรงสูง ที่จ่ายอยู่ในประเภทอุปกรณ์ต่อสาย ยกเว้นข้อใด

- ก. Terminator
- ข. Splice
- ค. Pulling Iron
- ง. Connector

16. ข้อใดไม่ใช่ขนาดของหม้อแปลงที่ใช้ในการไฟฟ้าแรงหลวง

- ก. 250 KVA
- ข. 500 KVA
- ค. 750 KVA
- ง. 1000 KVA

17. Fault Indicator ซึ่งเป็นอุปกรณ์แสดงว่ามีกระแสลัดวงจรไหลผ่าน ในระบบไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้านครหลวงควรใช้ Fault Indicator แบบใด

- ก. High Voltage Reset
- ข. Low Voltage Reset
- ค. Current Reset
- ง. Time Reset

18. ในระบบไฟฟ้าใต้ดิน 12 kV. ในระยะเริ่มแรกใช้สายประเภทใด

- ก. Oil-Filled Cable
- ข. Polyvinyl Chloride
- ค. Cross-Linked Polyethylene
- ง. Paper Insulated Lead Covered

19. ระบบการจ่ายไฟสายใต้ดินของระบบรูป Loop System ใช้สายใต้ดินขนาดเท่าใด

- ก. 240 mm² , 400 mm²
- ข. 400 mm² , 800 mm²
- ค. 500 mm² , 800 mm²
- ง. 800 mm² , 1200 mm²

20. ฟิวส์ป้องกันที่ใช้ใน Ring Main Unit (RMU) เป็นประเภทใด

- ก. HRC Fuse
- ข. Current Limiting Fuse
- ค. Voltage Limiting Fuse
- ง. Aerial Fuse

แบบทดสอบท้ายบทที่ 2

- ข้อใดไม่ใช่ชนิดของฉนวนของสายไฟฟ้าใต้ดิน
 - Solid Dielectric Cable
 - Liquid Dielectric Cable
 - Oil Filled Cable
 - Gas Filled Cable
- สาย XLPE (Cross-Linked Polyethylene) ที่นิยมใช้ในระบบไฟฟ้าใต้ดินชนิดของฉนวนที่ใช้เป็นประเภทใด
 - Solid Dielectric Cable
 - Liquid Dielectric Cable
 - Oil Filled Cable
 - Gas Filled Cable
- ประเภทของสายเคเบิลที่ใช้ในการติดตั้งบริเวณแม่น้ำ ลำคลอง ทะเล คือสายเคเบิลประเภทใด
 - Submarine Cable
 - Aerial Cable
 - Direct Burial Cable
 - Pipe Type Cable
- ขนาดของสายไฟฟ้าใต้ดินที่ใช้กันในปัจจุบัน มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กที่สุด ใหญ่ที่สุดขนาดเท่าใด
 - 35 mm^2 , 800 mm^2
 - 35 mm^2 , 1200 mm^2
 - 70 mm^2 , 800 mm^2
 - 70 mm^2 , 1200 mm^2
- สายไฟฟ้ากระดาษบรรจุด้วยน้ำมัน (Paper Insulated ; Oil Filled Cable)
 - 12 kV. และ 24 kV.
 - 69 kV.
 - 115 kV.
 - 230 kV.
- การทำ Cross-Bonding ในสายไฟฟ้าใต้ดิน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ก. การเชื่อมต่อสายไฟฟ้า
 - ข. การทำเครื่องหมายเพื่อแสดงว่าเป็นช่วงต่อของสายไฟฟ้า
 - ค. การสลับสายไฟฟ้าเป็นช่วง ๆ
 - ง. การแก้ปัญหาาระบบสายไฟฟ้า เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้น
7. การทำ Cross-Bonding มีวัตถุประสงค์เพื่ออะไร
- ก. เพื่อให้ระบบการจ่ายไฟมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น
 - ข. เพื่อแสดงตำแหน่งของสายไฟฟ้า
 - ค. เพื่อลดปัญหาเกี่ยวกับแรงดันเหนี่ยวนำระหว่างสาย
 - ง. เพื่อลดปัญหาการเกิดฟอลต์ในสายไฟฟ้า
8. เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ จะทำให้เกิดความร้อน ซึ่งอยู่ในรูปของตัวแปรอะไร
- ก. V.I
 - ข. V^2/R
 - ค. $I^2.R$
 - ง. ถูกทุกข้อ
9. ส่วนประกอบของสายไฟฟ้าที่มีความสำคัญที่สุด เนื่องจากเป็นส่วนที่ป้องกันไม่ให้พลังงานรั่วออกมาทำอันตรายต่อบุคคลหรือสภาพแวดล้อม พร้อมมิให้เกิดการลัดวงจรอีกสาย
- ก. เครื่องป้องกันตัวนำ (Conductor Screen)
 - ข. ฉนวน (Insulation Compound)
 - ค. เครื่องป้องกันฉนวน (Insulation Screen)
 - ง. เปลือกนอก (Jacket)
10. ส่วนประกอบของสายไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ลดปัญหาการเกิดดิซชาร์จบางส่วน (Partial Discharge)
- ก. เครื่องป้องกันตัวนำ (Conductor Screen)
 - ข. ฉนวน (Insulation Compound)
 - ค. เครื่องป้องกันฉนวน (Insulation Screen)
 - ง. ชีลด์โลหะ (Metallic Sheath)
11. ข้อใดไม่ใช่แฟคเตอร์ที่สำคัญ ที่มีผลต่อการไหลของกระแสในสายไฟฟ้า
- ก. อุณหภูมิสูงสุดที่ยอมรับได้
 - ข. คุณสมบัติการแพร่กระจายความร้อนของสายไฟฟ้า
 - ค. การติดตั้งและเงื่อนไขภายนอกอื่น ๆ
 - ง. ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายไฟฟ้า

12. ท่อร้อยสายไฟฟ้าที่ใช้วางอยู่ระหว่างบ่อพัก (Manhole ; Handhole) หรือวางไปยังเสาโรเซอร์ (Riser Pole) ที่นิยมใช้กันคือประเภท

- ก. ท่อแอสเบสตอสซีเมนต์ (Asbestos Cement Duct)
- ข. ท่อ PVC (Polyvinyl Chloride)
- ค. ท่อ HDPE (High Density Polyethylene)
- ง. ท่อเหล็ก (Rigid Steel Conduit)

13. ข้อใดไม่ใช่อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งสายไฟฟ้าระบบ 12 kV. และ 24 kV.

- ก. Hanger
- ข. Cable Rack
- ค. Cable Support
- ง. Pillow Insulator

14. ระบบไฟฟ้าใต้ดินในระบบจำหน่ายส่วนมากจะเป็นระบบแรงดัน 24 kV. สายไฟฟ้าที่ใช้ในระบบแรงดัน 24 kV. คือสายไฟฟ้าที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่าใด

- ก. 240 mm² , 400 mm²
- ข. 400 mm² , 800 mm²
- ค. 500 mm² , 800 mm²
- ง. 800 mm² , 1200 mm²

15. ข้อใดไม่ใช่การแบ่งประเภทของสายไฟฟ้า

- ก. แบ่งตามชนิดของขนาดที่ใช้
- ข. แบ่งตามลักษณะการใช้งาน
- ค. แบ่งตามจำนวนตัวนำในสายไฟฟ้า
- ง. แบ่งตามชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นตัวนำ

16. ท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินประเภทใด ที่ปัจจุบันการไฟฟ้านครหลวงเลิกใช้ เนื่องจากไม่ทนต่อสภาวะแวดล้อม

- ก. Polyvinyl Chloride ; PVC
- ข. Asbestos Cement ; AC
- ค. Rigid Steel Conduit ; RSC
- ง. High Density Polyethylene ; HDPE

17. อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าใต้ดินที่ใช้ในการต่อสายหุ้มฉนวนเข้ากับสายเปลือย คืออุปกรณ์ใด

- ก. Pillow Insulator

ข. Terminator

ค. Riser Pole

ง. Hanger

18. ท่อแอสเบสตอสซีเมนต์ (Asbestos Cement Conduit) มีความยาวที่อนุญาตให้ติดตั้งได้กี่เมตร

ก. 4 m.

ข. 6 m.

ค. 8 m.

ง. 10 m.

19. อุปกรณ์ในข้อใดไม่เกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้าใต้ดิน

ก. Spacer

ข. Splice

ค. Terminator

ง. Ground Rod

20. ประเภทของหัวสาย (Terminator) มีหลายประเภท ยกเว้นข้อใด

ก. Indoor Type

ข. Outdoor Type

ค. Single Core Type

ง. Double Core Type

แบบทดสอบท้ายบทที่ 3

- การออกแบบการก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ยกเว้นข้อใด
 - Concrete Encased Duct Bank
 - Semi-Direct Burial
 - Direct Burial
 - Duck Bank
- การออกแบบการก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดินประเภทใด มีความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าได้ดีที่สุด
 - Concrete Encased Duct Bank
 - Semi-Direct Burial
 - Direct Burial
 - Duck Bank
- ข้อใดไม่ใช่ลักษณะการจ่ายไฟของการไฟฟ้านครหลวง
 - ผู้ใช้ไฟฟ้ารับไฟแรงสูงด้วยสายไฟฟ้าใต้ดินจากสายป้อนอากาศของการไฟฟ้า
 - ผู้ใช้ไฟฟ้ารับไฟแรงสูงด้วยสายไฟฟ้าใต้ดินจากสายป้อนใต้ดินของการไฟฟ้า
 - ผู้ใช้ไฟฟ้ารับไฟแรงสูงด้วยสายไฟฟ้าใต้ดินจากสายป้อนอากาศของการไฟฟ้า
 - ผู้ใช้ไฟฟ้ารับไฟแรงสูงด้วยสายไฟฟ้าใต้ดินจากสายป้อนใต้ดินของการไฟฟ้า
- ข้อใดไม่ใช่ระดับแรงดันในระบบสายส่ง (Transmission Line) ของการไฟฟ้านครหลวง
 - 69 kV.
 - 115 kV.
 - 230 kV.
 - 500 kV.
- อัตราการปรับแท็บ (Tap) ของหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านขดลวดปฐมภูมิของการไฟฟ้านครหลวง เป็นแบบใด
 - $\pm 4\%$
 - $\pm 5\%$
 - $-4 \times 2.5\%$
 - $\pm 2 \times 2.5\%$
- อัตราส่วน Jam Ratio ในการออกแบบระบบไฟฟ้าใต้ดินหมายถึงข้อใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ก. อัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อด้านในต่อเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของตัวนำ
- ข. อัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อด้านนอกต่อเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของตัวนำ
- ค. อัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อด้านในต่อเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของตัวนำ
- ง. อัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อด้านนอกต่อเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของตัวนำ
7. ในการออกแบบระบบไฟฟ้าใต้ดินที่ดีค่าอัตราส่วน JAM RATIO ควรมีค่าไม่เกินเท่าใด
- ก. 1.5
- ข. 2.0
- ค. 2.5
- ง. 3.0
8. อัตราส่วน JAM RATIO ที่เหมาะสมจะทำให้ตัวนำวางอยู่ในรูปแบบใด
- ก. Cradled
- ข. Triangular
- ค. Square
- ง. Pentagon
9. การลากสายเคเบิลใต้ดินขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ ด้าน ยกเว้นข้อใด
- ก. ความยาวของสายเคเบิล
- ข. น้ำหนักของสายเคเบิล
- ค. ชนิดของสายเคเบิล
- ง. สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
10. ระยะห่างระหว่างบ่อพักสาย Manhole กับ Handhole ควรมีค่าไม่เกินเท่าใด
- ก. 200 m.
- ข. 240 m.
- ค. 300 m.
- ง. 360 m.
11. สัญลักษณ์ที่ใช้แสดงแนวของการก่อสร้างท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดิน เรียกว่าอะไร
- ก. Cable Conduit Area
- ข. Cable Route Marker
- ค. Urban Area
- ง. Rural Area
- 12. การออกแบบการก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดินประเภทใด ที่ให้ระยะเวลาในการก่อสร้างน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. Concrete Encased Duct Bank

ข. Semi-Direct Burial

ค. Direct Burial

ง. Duck Bank

13. การออกแบบการก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดินประเภทใด ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างน้อยที่สุด

ก. Concrete Encased Duct Bank

ข. Semi-Direct Burial

ค. Direct Burial

ง. Duct Bank

14. ในการจ่ายไฟของการไฟฟ้านครหลวง จำเป็นต้องใช้ในส่วนของสวิตช์เกียร์แรงสูง (H.V. Switchgear) และชุดริงเมนูนิต (Ring Main Unit) ยกเว้นการจ่ายไฟในระบบใด

ก. ระบบเรเดียลสายอากาศซึ่งรับไฟจากสายอากาศ

ข. ระบบเรเดียลสายใต้ดินซึ่งรับไฟจากสายอากาศ

ค. ระบบรูปสายใต้ดินซึ่งรับไฟจากสายอากาศ

ง. ระบบรูปสายใต้ดินซึ่งรับจากสายใต้ดิน

15. ในส่วนของสวิตช์เกียร์แรงสูง (H.V. Switchgear) มีข้อกำหนดว่าจะต้องมีระยะห่างจากหม้อแปลงไฟฟ้าไม่เกินกี่เมตร

ก. 9 m.

ข. 12 m.

ค. 15 m.

ง. 18 m.

16. ท่อประเภทใดที่ใช้ทำเป็นข้องอ (Elbow) สำหรับขึ้นห้วเสา Riser Pole

ก. Polyvinyl Chloride

ข. Polyethylene

ค. Asbestos Cement Conduit

ง. High Density Polyethylene Duct

17. การวางสายเคเบิลใต้แบบสามเหลี่ยม Triangular สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ดีเนื่องจากเหตุผลของข้อใด

ก. มีการระบายความร้อนได้ดี

ข. จำนวนสายพอดีกับขนาดท่อร้อยสาย

ค. มีแรงกดด้านข้างน้อยมาก

ง. ทุกข้อรวมกัน

18. ค่าของ Weight-Correction Factor คือสมการในข้อใด

เมื่อ $\sum F$ = แรงลัพธ์ทั้งหมด

$\sum W$ = น้ำหนักรวมทั้งหมด

$\sum T$ = แรงดึงทั้งหมด

ก. $\sum F / \sum W$

ข. $\sum W / \sum F$

ค. $\sum F / \sum T$

ง. $\sum T / \sum W$

19. การหาค่าแรงดึงที่กระทำต่อสายเคเบิลได้เบ็ด เป็นไปตามสมการในข้อใด

เมื่อ T = แรงดึงตามแนวยาว (kg.)

L = ความยาวของสายเคเบิล (m.)

W = น้ำหนักของสายเคเบิล (kg/m)

F = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ก. $T = LWF$

ข. $T = L/WF$

ค. $T = L/(W + F)$

ง. $T = LF/W$

20. หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง มีข้อกำหนดเกี่ยวกับค่า BIL :

(Basic Impulse Insulation Level) ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าเท่าใด

ก. 100 kV.

ข. 125 kV.

ค. 150 kV.

ง. 175 kV.

แบบทดสอบท้ายบทที่ 4

1. จากสมการ $E = \frac{V}{x \ln \frac{R}{r}}$ ข้อใดถูกต้อง

- ก. V คือ ความต่างศักย์หรือแรงดันระหว่างตัวนำกับเปลือกนอก หน่วย V/m
- ข. V คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำกับเปลือกนอก หน่วย V
- ค. E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล หน่วย V/m
- ง. E คือ ความต่างศักย์หรือแรงดันระหว่างตัวนำกับเปลือกนอก หน่วย V

2. ข้อใดถูกต้อง

ก. $E_{\max} = \frac{V}{r \ln \frac{R}{r}}$

ข. $E_{\max} = \frac{V}{R \ln \frac{R}{r}}$

ค. $E_{\min} = \frac{Vr}{r \ln \frac{R}{r}}$

ง. $E_{\min} = \frac{V}{\frac{R}{r} \ln \frac{R}{r}}$

3. ข้อใดผิด

- ก. ฉนวนในสายเคเบิลใต้ดินจะมีความคงทนของไดอิเล็กตริกต่อความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ
- ข. ฉนวนในสายเคเบิลใต้ดินจะมีความคงทนของไดอิเล็กตริกต่อความเครียดสนามไฟฟ้า

สูง

ค. ถ้าความคงทนของไดอิเล็กตริกมีค่าต่ำกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าฉนวนของสายจะเบรกดาวน

ง. ฉนวนที่มีความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดได้จะไม่เบรกดาวน

4. วัสดุไดอิเล็กตริกคืออะไร

- ก. การจัดลำดับชั้นฉนวนของสายเคเบิล
- ข. ผิวชั้นนอกสุดของฉนวน
- ค. ฉนวนที่ใช้คั่นระหว่างตัวนำในกับตัวนำนอกของเคเบิลเพื่อให้ทนแรงดันได้สูง
- ง. ไม่มีข้อใดถูก

5. สายเคเบิลฉนวนชั้นเดียวจะเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดตรงบริเวณใด

- ก. ผิวชั้นนอกสุดของฉนวน
- ข. ตรงกลางของฉนวน
- ค. ภายในตัวนำ
- ง. บริเวณผิวของตัวนำ

6. สายเคเบิลฉนวนชั้นเดียวจะเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำสุดตรงบริเวณใด

- ก. ผิวชั้นนอกสุดของฉนวน
- ข. ตรงกลางของฉนวน
- ค. ภายในตัวนำ
- ง. บริเวณผิวของตัวนำ

7. ข้อใดกล่าวไม่ถูกต้องเกี่ยวกับอัตราส่วนรัศมีของตัวนำ (R/r) ที่ประหยัดที่สุด

ก. $\frac{d}{dr} (r \ln \frac{R}{r}) = 0$

ข. $\frac{R}{r} = e = 2.718$

ค. $\ln \frac{R}{r} = 1$

ง. $\frac{R}{r} = 2$

8. ความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลหมายถึงข้อใด

- ก. แรงดันที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์
- ข. ความสามารถในการทนแรงดันไฟฟ้าของฉนวนสายเคเบิลโดยไม่เกิดการเบรกดาวน์
- ค. ค่าแรงดันต่อหน่วยความยาวของสาย
- ง. ความหนาของฉนวนต่อค่าแรงดัน

9. ข้อใดไม่ได้หมายถึง การเกรดิง (Grading)

- ก. การจัดลำดับชั้นฉนวนของสายเคเบิล
- ข. ความเครียดสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจากค่าสูงสุดที่ผิวด้านนอกของฉนวน
- ค. การทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้ากระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดความหนาของฉนวน
- ง. การทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดมีความแตกต่างกันน้อยที่

• สด

10. โดยทั่วไปการทำเกรดดิ้ง (Grading) แบ่งเป็นกี่วิธี

- ก. 1
- ข. 2
- ค. 3
- ง. 4

11. ข้อใดไม่ใช่คาปาซิแตนซ์เกรดดิ้ง (Capacitance Grading)

- ก. การจัดลำดับชั้นของไดอิเล็กตริกฉนวนชั้นเดียว
- ข. การจัดลำดับชั้นของไดอิเล็กตริกต่างชนิดกันสองชั้น
- ค. การจัดลำดับชั้นของไดอิเล็กตริกต่างชนิดกันมากกว่าสองชั้น
- ง. ไม่มีข้อใดถูก

12. ข้อใดกล่าวไม่ถูกต้องเกี่ยวกับ การอินเทอร์ชีทเกรดดิ้ง (Intersheath Grading)

- ก. ใช้ปลอกหรือชีทโลหะแกนร่วม (Coaxial Metallic Sheath) คั่นวัสดุไดอิเล็กตริก
- ข. เป็นการจัดลำดับชั้นของวัสดุไดอิเล็กตริกต่างชนิดกัน
- ค. วัสดุไดอิเล็กตริกถูกแยกออกเป็นชั้นๆ
- ง. ฉนวนของสายเคเบิลจะมีวัสดุไดอิเล็กตริกชนิดเดียว

13. ข้อใดถูกต้อง

- ก. $C = 2\pi \epsilon \ln\left(\frac{r}{R}\right) \quad F/m$
- ข. $C = 2\pi \epsilon_0 \ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad F/m$
- ค. $C = 2\pi \epsilon_r / \ln(R/r) \quad F/m$
- ง. $C = 2\pi \epsilon / \ln(R/r) \quad F/m$

14. ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกที่ใช้เป็นวัสดุฉนวนสายเคเบิลชนิดใดมีค่าต่ำสุด

- ก. อากาศ
- ข. กระดาษชุบน้ำมัน
- ค. โพลีเอททิลีน
- ง. ครออสลิงค์โพลีเอททิลีน

15. จากสมการกระแสอัดประจุ (Charging Current) ข้อใดถูกต้อง

- ก. $I_C = V_{(L-L)} / X_C$
- ข. $I_C = \omega C V_{(L-L)}$

ก. $I_C = 2\pi f CV_{(L-N)}$

ง. $I_C = V_{(L-N)} / 2\pi f C$

16. ข้อใดคือสมการอินทิกรัลของสายเคเบิลแกนเดี่ยว

ก. $L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{R}{r}$

ข. $L = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{R}{r}$

ค. $L = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \ln \frac{r}{R}$

ง. $L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r}{R}$

17. ความต้านทานของสายเคเบิลขึ้นอยู่กับอะไรบ้าง

ก. ความยาวของสายเคเบิล

ข. รัศมีของตัวนำ

ค. รัศมีของฉนวน

ง. ค่าคงที่ของไดอิเล็กทริก

18. กำลังสูญเสียในไดอิเล็กทริกของฉนวนสายเคเบิลไม่ได้ขึ้นอยู่กับข้อใด

ก. กระแสอัดประจุในสายเคเบิล (I_C)

ข. ความต้านทานของฉนวน (R_f)

ค. เพาเวอร์แฟคเตอร์ของไดอิเล็กทริก ($\cos\theta$)

ง. ความยาวของตัวนำ

19. ข้อใดไม่ถูกต้องเกี่ยวกับกำลังสูญเสียในไดอิเล็กทริก

ก. เพาเวอร์แฟคเตอร์ของไดอิเล็กทริก ($\cos\theta$) จะใช้วัดคุณภาพของไดอิเล็กทริกของสายเคเบิล

ข. เพาเวอร์แฟคเตอร์ของไดอิเล็กทริก ($\cos\theta$) มีค่าน้อยจะทำให้กำลังสูญเสียในไดอิเล็กทริกมีค่ามากขึ้น

ค. วัสดุไดอิเล็กทริกที่ดีทำให้มุม θ มีค่าใกล้เคียง 90°

ง. มุมการสูญเสีย (δ) มีค่าต่ำ ($\delta < 0.5^\circ$)

20. ความต้านทานกระแสตรงของตัวนำ (R_{DC}) ไม่ได้ขึ้นอยู่กับข้อใด

ก. วัสดุไดอิเล็กทริก

ข. อุณหภูมิ

ค. ค่า ρ ของตัวนำ

21. ในสภาวะปกติอุณหภูมิสูงสุดของตัวนำที่ขอมให้เกิดขึ้นได้มีค่าเท่าใด
- ก. 90°C
 - ข. 110°C
 - ค. 130°C
 - ง. 150°C
22. ในสภาวะฉุกเฉินอุณหภูมิสูงสุดของตัวนำที่ขอมให้เกิดขึ้นได้มีค่าอย่างไร
- ก. 90°C
 - ข. 110°C
 - ค. 130°C
 - ง. 150°C
23. ความต้านทานกระแสสลับของตัวนำ (R_{AC}) ไม่ได้ขึ้นอยู่กับข้อใด
- ก. ปปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect)
 - ข. ผลกระทบข้างเคียง (Proximity Effect)
 - ค. อุณหภูมิ
 - ง. ฉนวนของสายเคเบิล
24. ลักษณะสำคัญที่ไม่เป็นตัวบ่งบอกถึงคุณสมบัติและคุณภาพของ ไดอิเล็กทริกคือข้อใด
- ก. อุณหภูมิ
 - ข. ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก
 - ค. แฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย
 - ง. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของ ไดอิเล็กทริก

คำตอบบทที่ 1

1. ค
2. ข
3. ก
4. ค
5. ข
6. ค
7. ก
8. ค
9. ก
10. ข
11. ก
12. ข
13. ก
14. ก
15. ค
16. ก
17. ง
18. ง
19. ก
20. ข

คำตอบบทที่ 2

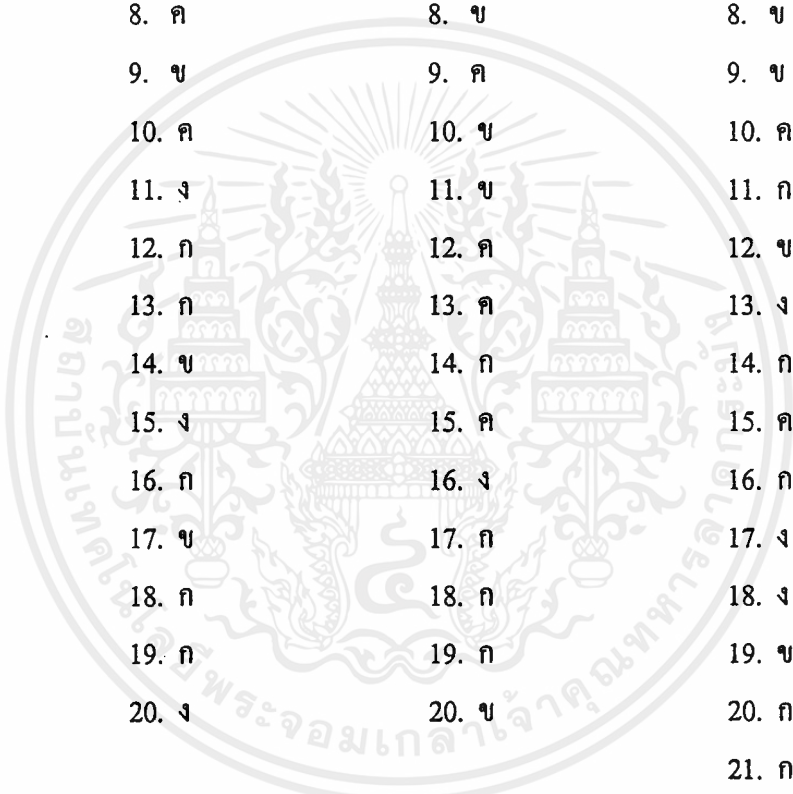
1. ข
2. ก
3. ก
4. ง
5. ง
6. ค
7. ค
8. ค
9. ข
10. ค
11. ง
12. ก
13. ก
14. ข
15. ง
16. ก
17. ข
18. ก
19. ก
20. ง

คำตอบบทที่ 3

1. ง
2. ค
3. ง
4. ง
5. ค
6. ก
7. ค
8. ข
9. ค
10. ข
11. ข
12. ค
13. ค
14. ก
15. ค
16. ง
17. ก
18. ก
19. ก
20. ข

คำตอบบทที่ 4

1. ค
2. ก
3. ข
4. ค
5. ง
6. ก
7. ง
8. ข
9. ข
10. ค
11. ก
12. ข
13. ง
14. ก
15. ค
16. ก
17. ง
18. ง
19. ข
20. ก
21. ก
22. ค
23. ง
24. ก



กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ คุณศิริชัย พลายนะหาญ และคุณสาธิต เจริญธรรม วิศวกรออกแบบระบบไฟฟ้าใต้ดิน และหน่วยงานต่างๆ ภายในการไฟฟ้านครหลวง สำหรับข้อเสนอแนะและความช่วยเหลือในด้านข้อมูลต่างๆ และท้ายที่สุดต้องขอขอบคุณ ผศ.ดร.ชัชวดี นัครอุทัย ซึ่งได้ให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะจนทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้านครหลวง, “คู่มือฝึกอบรมงานออกแบบระบบสายใต้ดิน” , กพน. , 2533
- [2] การไฟฟ้านครหลวง, “คำแนะนำการติดตั้งระบบสายใต้ดินในพื้นที่จัดสรร” , กพน. , 2539
- [3] การไฟฟ้านครหลวง, “Underground Construction Standard” , กพน. , 2530
- [4] การไฟฟ้านครหลวง, “การจัดเตรียมอุปกรณ์ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในพื้นที่จ่ายไฟฟ้าด้วยแรงดันไฟฟ้า 12,000 โวลต์ และ 24,000 โวลต์” , กพน. , 2537
- [5] การไฟฟ้านครหลวง, “การทำ Splicing แบบ Tapping” , กพน. , 2533
- [6] การไฟฟ้านครหลวง, “โครงการฝึกอบรมช่างสายใต้ดิน” , กพน. , 2533
- [7] การไฟฟ้านครหลวง, “กฎการเดินสาย และติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า” , 2537
- [8] ไพจิตร สุขนธมาน, “การวางสายใต้ดิน” , กพน. , 2533
- [9] โดศักดิ์ ทัศนานุตริยะ, “การผลิต การส่ง และจ่ายไฟฟ้า” , บ. ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด , 2539
- [10] สุทธิ บรรจงจิตร, “อุปกรณ์และการติดตั้งในงานระบบไฟฟ้า” , บ. ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด , 2521
- [11] สุทธิ บรรจงจิตร, “หลักการและเทคนิคการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง” , บ. ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด , 2532