ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า	วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การคำนวณหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำสูงเกินสำหรับการป้องกันสายบริการโทรคมนาคม

Computation of Induced Overvoltages for the Protection of Telecommunication Subscriber Lines

นามผู้วิจัย นายกิตติวุฒิ จีนนะบุตร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(รองศาสตราจารย์สันติ อัศวศรีพงศ์ธร, M.Eng.Sc.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(อาจารย์วินัย พฤกษะวัน, D.Ing.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปฐมาภรณ์ ศรีผดุงธรรม, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(รองศาสตราจารย์มงคล รักษาพัชรวงศ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การคำนวณหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำสูงเกินสำหรับการป้องกันสายบริการโทรคมนาคม

Computation of Induced Overvoltages for the Protection of Telecommunication Subscriber Lines

โดย

นายกิตติวุฒิ จีนนะบุตร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2552

กิตติวุฒิ จีนนะบุตร 2552: การคำนวณหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำสูงเกินสำหรับการป้องกันสายบริการโทรคมนาคม ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์สันติ อัศวศรีพงศ์ธร, M.Eng.Sc. 125 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประเมินและวิเคราะห์เพื่อการคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำสูงเกินที่เหนี่ยวนำเข้าไปในสายบริการโทรศัพท์อันเนื่องจากการเกิดฟอลต์ในสายส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังที่สายเคเบิลโทรศัพท์ติดตั้งขนานไปใกล้ๆ กัน ในกรณีศึกษานี้เลือกใช้แนวสายเคเบิลโทรศัพท์ของบริษัท ทีโอที (TOT) สิงห์บุรีที่ติดตั้งขนานไปกับสายส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง 115 กิโลโวลต์ และ 22 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) โดยระบบ 115 กิโลโวลต์มีระยะความยาวเท่ากับ 5.5 กิโลเมตร มีส่วนของสายเคเบิลโทรศัพท์ติดตั้งขนานไปด้วยเป็นระยะความยาว 2.8 กิโลเมตร

งานวิจัยนี้ทำการรวบรวมข้อมูลต่างๆ ที่ต้องใช้สำหรับการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำเมื่อเกิดฟอลต์ในระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) ได้แก่ ข้อมูลการจัดวางตำแหน่งสายโทรศัพท์ ข้อมูลเส้นทางติดตั้งสายเคเบิล พารามิเตอร์ของสาย ความยาวสาย และระยะที่แยกห่างระหว่างตัวนำสายส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังกับสายโทรศัพท์ ในการคำนวณได้ใช้โปรแกรม MatLab โปรแกรมตารางคำนวณ (Excel) และโปรแกรม ATP/EMTP เป็นเครื่องมือช่วยในการจำลอง เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณและจากเครื่องมือช่วยการจำลองผลที่ได้สอดคล้องกัน และพบว่าขณะเกิดการลัดวงจรลงดินแบบเฟสเดียวในสายส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง 115 กิโลโวลต์ที่อยู่ใกล้ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำระหว่างคู่สาย 0.9545 โวลต์/เมตร เมื่อคิดที่ความยาวเคเบิลสายโทรศัพท์ 2.8 กิโลเมตร จะได้แรงดันระหว่างคู่สายมีค่าสูงถึง 2,672.6 โวลต์ แบบจำลองเคเบิลสายโทรศัพท์ที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำนี้ตรวจสอบความถูกต้องว่าเป็นจริงด้วยการวัดแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจริงที่จุดต่อเข้าที่ชุมสายโทรศัพท์ซึ่งทำงานอยู่ในภาวะอยู่ตัวขณะการใช้งานตามปกติ

ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าแรงดันเหนี่ยวนำสูงเกินเนื่องจากการเกิดฟอลต์ของสายส่งไฟฟ้ากำลังก่อให้เกิดอันตรายต่อบริภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ของระบบโทรคมนาคมได้จริง ทำให้สรุปได้ว่ามีความจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ป้องกันเพื่อลดความเสี่ยงที่จะก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบโทรคมนาคมที่อุบัติขึ้นจากเหตุการณ์ฟอลต์ทางด้านสายส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังและการเหนี่ยวนำแรงดันสูงเกินเนื่องจากฟ้าผ่าที่ผนวกเข้ามาด้วย

_____ / _____ / _____

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Kittiwut Chinnabutr 2009: Computation of Induced Overvoltages for the Protection of Telecommunication Subscriber Lines. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Santi Asawasripongtorn, M.Eng.Sc. 125 pages.

This thesis describes an evaluation and analysis on the computation of induced overvoltages into telephone subscriber lines due fault occurring in adjacent parallel power lines. A TOT cable route in Singburi Province in parallel with 115 kV and 22 kV PEA power lines is selected in this study. The length of 115 kV line is 5.50 kilometers in parallel with adjacent telephone cables portion of 2.8 kilometers.

The research work in this thesis include collecting information on telephone geometric data, geographic cable routing, line parameters, line length and the separating distances from power line conductors required for the calculation of induced voltages due to PEA power line faults. Calculation was done with the aid of MatLab, Exel and ATP/EMTP Simulation tool. Comparison of the results shows good agreement between them. It was found that during a single line to ground fault occurring in the nearest 115 kV power line a longitudinal induced voltage of 0.9545 V/m along the 2.8 kilometers of telephone cables. Total longitudinal voltage amounted to 2,672.6 volts. The telephone cable model used in the calculation of induced voltage is verified with field test by measuring induced voltage during normal steady state operating condition at the terminal station

The calculated results show that the induced overvoltages due to power line fault present a real danger for electronic equipments of communication system. It was concluded that addition of a suitable protective device is required in order to minimize damage risk for the existing communication system from the threat of damages due to both power line fault and lightning induced overvoltages.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องนี้สำเร็จได้ด้วยความสนับสนุนช่วยเหลือ และได้รับคำแนะนำปรึกษาจาก รศ.สันติ อัศวศรีพงศ์ธร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ดร.วินัย พฤกษะวัน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผศ.ดร.ปฐมาภรณ์ ศรีผดุงธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และได้รับความช่วยเหลือด้านข้อมูลจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ความช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันจากบริษัท สตาบิล จำกัด ส่วนวิจัยและพัฒนางาน ตอนนอกและระบบป้องกัน ฝ่ายวิจัยและพัฒนา บริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน) รวมถึงความช่วยเหลือด้านข้อมูลข่ายสายโทรศัพท์จากส่วนบริการลูกค้าโทรศัพท์จังหวัดสิงห์บุรี ขอขอบพระคุณท่านผศ.ดร.พีระยศ แสนโภชน์ เป็นอย่างสูงที่ได้สละเวลาเป็นประธานสอบ และ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่สละเวลาอันมีค่าเป็นกรรมการสอบ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณทุกท่านทุกส่วนไว้ ณ โอกาสนี้

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ มารดา และครูบาอาจารย์ทุกท่าน ซึ่งให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้การศึกษาและจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งขอบคุณครอบครัวที่เป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมาจนกระทั่งทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

กิตติวุฒิ จีนนะบุตร

กันยายน 2552

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	65
อุปกรณ์	65
วิธีการ	65
ผลและวิจารณ์	90
ผล	90
วิจารณ์	97
สรุปและข้อเสนอแนะ	99
สรุป	99
ข้อเสนอแนะ	102
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	103
ภาคผนวก	108
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	125

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ระยะ H สำหรับความต้านทานจำเพาะของดินที่ความถี่ 50 Hz	12
2	ขนาดสายมาตรฐานสำหรับสายเคเบิลในงานโทรคมนาคม	19
3	จำนวนคู่สายของลวดตัวนำขนาดต่างๆ	20
4	วัสดุฉนวนและค่าทนต่ออุณหภูมิ	21
5	คาปาซิเตอร์ในสายโทรศัพท์แต่ละคู่	22
6	ค่าความต้านทานของลวดตัวนำ	22
7	ตารางแม่สีสำหรับแบบหลายสี	28
8	ขนาดแรงดันเหนี่ยวนำที่ยอมให้มีได้ในสายโทรคมนาคม	43
9	ชนิดและลักษณะสมบัติของปรากฏการณ์ของแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง	48
10	ค่ากระแสลัดวงจรของสถานีไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสิงห์บุรี	66
11	ค่ากระแสลัดวงจรของผู้ใช้ไฟ 115 kV	67
12	ค่าแรงดันเหนี่ยวนำในคู่สายในภาวะปกติ ภาวะฟอลต์เฟสเดียวและสามเฟส	94

ตารางผนวกที่

1	ข้อมูลทางเทคนิค (Technical Data) ตัวป้องกันเสิร์จสำหรับสายโทรศัพท์	116
2	ค่าแรงดันที่วัดได้ระหว่างคู่สาย (วัดครั้งที่ 1)	117
3	ค่าแรงดันที่วัดได้ระหว่างคู่สายกับกราวนด์ (วัดครั้งที่ 1)	118
4	แรงดันระหว่างคู่สาย a – b (วัดครั้งที่ 2)	118
5	ค่าแรงดันที่วัดได้ระหว่างคู่สายกับกราวนด์ (วัดครั้งที่ 2)	119
6	แรงดันระหว่างตัวนำ a – b (วัดครั้งที่ 2)	119
7	ค่าแรงดันที่วัดได้ระหว่างคู่สายกับกราวนด์ (วัดครั้งที่ 3)	120
8	ค่าแรงดันที่วัดได้ระหว่างคู่สายกับกราวนด์ (วัดครั้งที่ 4)	121
9	ค่าแรงดันที่วัดได้ระหว่างคู่สายกับกราวนด์ (วัดครั้งที่ 5)	122
10	ข้อมูลความต้านทานสายจากตู้ปลายทาง	123

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แรงดันโหมดผลต่างและโหมดร่วม	2
2	ตัวนำมีกระแส i(t) ไหลผ่าน	7
3	พื้นที่หน้าตัดของตัวนำตันทรงกระบอก	8
4	ตัวนำที่ใช้ดินเป็นทางไหลกลับของกระแส	11
5	ระบบสื่อสารทางโทรศัพท์	13
6	โทรศัพท์อย่างง่าย	16
7	การต่อลงกราวนด์ของระบบโทรศัพท์	17
8	สายบิดเกลียวคู่	23
9	แบบกลุ่มดาว	24
10	แบบเกลียวสองคู่	24
11	ลักษณะของเคเบิลวางในอาคาร	25
12	เคเบิลวางนอกอาคาร	26
13	เคเบิลวางใต้ดินโดยตรง	27
14	สายโทรศัพท์ ring กับ Tip ระบุด้วยรหัสสี	28
15	ภาคตัดขวางของสายคู่บิดเกลียว	30
16	พารามิเตอร์ของสายคู่บิดเกลียวแบบกระจาย	30
17	ความต้านทานอนุกรม	31
18	ความเหนี่ยวนำอนุกรมแบบกระจาย	32
19	ความจุขนานระหว่างสาย	32
20	ความยาวสาย 1 วงรอบไมล์ (Loop Mile)	33
21	โครงสร้างระบบสายส่งไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์และเคเบิลโทรศัพท์	36
22	การเชื่อมโยงทางแม่เหล็กไฟฟ้า	37
23	การเชื่อมโยงทางสนามไฟฟ้า	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	จุดต่อลงดินมากกว่าหนึ่งแห่ง	39
25	การลดการเชื่อมโยงทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้สายคู่บิดเกลียว	44
26	การจัดกำบังทางทฤษฎีหรืออุดมคติ	44
27	วงจรเทียบเท่าทางปฏิบัติในการลดการเชื่อมโยงทางสนามไฟฟ้า	45
28	คลื่นไฟฟ้าที่มีเสิร์จปรากฏอยู่ด้วยเป็นช่วงสั้นๆ	50
29	รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs	51
30	ส่วนเล็กๆ ที่มีความยาว x อยู่ห่างจากต้านส่งเท่ากับ x ทั้ง v และ i	52
31	ลักษณะคลื่นจรที่เคลื่อนที่ไปในทิศทาง + x	54
32	หลอดคายประจุผ่านก๊าซ (GDT) แบบสามขั้ว	56
33	ตำแหน่งติดตั้งหลอดคายประจุผ่านก๊าซ	56
34	กลไกการเหนี่ยวนำแรงดันจากสายจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังระบบโทรคมนาคม	59
35	วัสดุที่มีประจุและไม่มีประจุไม่ต่อลงกราวนด์	60
36	วัตถุฉนวนทั้งสองใช้ประจุร่วมกัน	60
37	วัตถุทั้งสองต่อลงกราวนด์ทำให้ไม่มีประจุ	61
38	วงจรสมมูลของคู่สายโทรศัพท์	61
39	วงจรสมมูลของคู่สายโทรศัพท์แบบโหมดร่วม (ละเลยความนำระหว่างสาย G)	62
40	การแบ่งย่านป้องกันฟ้าผ่า	63
41	ภาพร่างโครงสร้างระบบจำหน่ายและสายส่งไฟฟ้ากำลัง	66
42	ข้อมูลของ Line ในส่วนของ Conductor card	69
43	ข้อมูลของ Line ในส่วนของ Conductor card	70
44	รูปการโมเดลสายในระบบสายส่ง 115 kV และระบบจำหน่าย 22 kV	72
45	รูปโปรแกรม LCC	73
46	หน้าต่าง Edit Commands เพื่อ set ค่าให้สร้างไฟล์ .PCH	74
47	ค่าที่กำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดัน	75
48	ค่า RLC ในส่วนของ Zth (สามเฟสฟอลต์)	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

49	ค่าที่ใส่ใน RLC แทนส่วนของ Zth (1 เฟสฟอลต์ลงดิน)	77
50	โหลดของบริษัท นอร์ดเค้ สคุ๊ด ไทยแลนด์ จำกัด	78
51	การหาระยะห่างระหว่างสายส่งกำลังและสายเคเบิลโทรศัพท์	81
52	มิติของเสาส่งและทรงกลมกลิ้งในระนาบ x,y	84
53	การเกิดการคัปปลิงระหว่างระบบไฟฟ้าและแรงดันเหนี่ยวนำในวงจรใกล้เคียง	85
54	แรงดันสูงเกินระหว่างคู่สายเมื่อเกิดฟ้าผ่าโดยตรงบนสาย OHGW	91
55	กระแสในคู่สายเมื่อเกิดฟ้าผ่าโดยตรงบนสาย OHGW	91
56	แรงดันสูงเกินระหว่างคู่สายเมื่อเกิดฟ้าผ่าโดยตรงบนสายเฟสระบบ 115 kV	92
57	กระแสในคู่สายเมื่อเกิดฟ้าผ่าโดยตรงบนสายเฟสระบบ 115 kV	92
58	แรงดันระหว่างคู่สายโทรศัพท์เมื่อเกิดฟ้าผ่าโดยตรงบนสายเฟสระบบ 22 kV	93
59	กระแสระหว่างคู่สายโทรศัพท์เมื่อเกิดฟ้าผ่าโดยตรงบนสายเฟสระบบ 22 kV	93
60	กลไกการเหนี่ยวนำแรงดันจากสายจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังระบบโทรคมนาคม	98

ภาพผนวกที่

1	หน้าต่างโปรแกรม ATPDraw version 2.4	110
2	โปรแกรม Matlab ใช้ช่วยหาค่า L, C ของระบบสายส่งจ่าย 115 kV และ 22 kV	111
3	ตัวประกอบการเชื่อมโยงสำหรับวงจรที่ใช้ดินเป็นทางกลับ	111
4	ข่ายสายโทรศัพท์แบบ Direct Feed	112
5	ข่ายสายโทรศัพท์แบบ Indirect Feed	112
6	สายโทรศัพท์ภายนอกอาคาร แบบมีสะพาน (FIG 8)	113
7	มิติการจัดวางสายวงจรเดี่ยวบัลเดิลแบบ 2 ตัวนำ/เฟส ของระบบจำหน่าย 115 kV	113
8	แบบโครงสร้างเสาและตำแหน่งสายไฟฟ้าคู่วงจรเดี่ยว 115 kV	115
9	ตัวป้องกันเสิร์จสำหรับโทรคมนาคม	116
10	การวัดแรงดันคู่สายด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ/รุ่น APPA 650	117

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่

11	ข้อมูลการบันทึกค่าโหลดสูงสุดและค่าเฉลี่ย ตั้งแต่ ม.ค.- ธ.ค. 2008	123
12	ไดอะแกรมการติดตั้งสายโทรศัพท์และตู้สายปลายทาง	124

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CCITT	=	คณะกรรมการให้คำปรึกษาด้านการโทรศัพท์และโทรเลขระหว่างชาติ (เดิม)
ITU–T	=	ชื่อย่อ (ใหม่) ขององค์กรมาตรฐานระหว่างประเทศมีชื่อเต็มว่า คณะกรรมการที่ปรึกษาด้านโทรศัพท์และโทรเลขระหว่างชาติ (International Telephone and Telegraph Consultative Committee)
SPD	=	Surge Protective Device
SLIC	=	Subscriber line Interface Circuit
LEMP	=	Lightning Electromagnetic Pulse
LPZ	=	Lightning Protection Zone
GPR	=	Ground Potential Rise
EEB	=	Equipotential Bonding Bar
SELV	=	Safety Extra Low Voltage
MDF	=	Main Distribution Frame
Vd	=	แรงดันโหมดผลต่าง
Vc	=	แรงดันโหมดร่วม
A.W.G	=	American Wire Gauge
MCOV	=	Maximum Continuous Operating Voltages
MOV	=	Metal Oxide Varistor
MVW	=	Maximum Voltage Withstand
DFA	=	Death End Feed (Distribute)
Lm	=	ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจร
CO	=	ชุมสายโทรศัพท์ (Central office)
GDT	=	หลอดก๊าซคายประจุ (Gas Discharge Tube)
Zm	=	อิมพีแดนซ์ร่วมหาจากสมการของ คาร์สัน (โอห์ม/พันฟุต)
S_F	=	ตัวประกอบการกำบัง
TVSS	=	Transient Voltage Surge Suppressor
GDT	=	Gas Discharge Tube
TCO	=	Thermal cut–out devices
PTC	=	Positive Temperature Coefficient

การคำนวณหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำสูงเกินสำหรับการป้องกันสายบริการโทรคมนาคม

Computation of Induced Overvoltages for the Protection of Telecommunication Subscriber Lines

คำนำ

โครงข่ายสื่อสารสายเคเบิลโทรศัพท์ในประเทศไทย ในส่วนของระบบสายตอนนอก มีการติดตั้งจัดวางตัวนำโครงข่ายเคเบิลโทรศัพท์แขวนในอากาศบนเสาไฟฟ้าร่วมกับตัวนำสายส่ง/สายจำหน่ายแรงดันสูงที่ระดับแรงดัน 22 เควี 33 เควี 69 เควี และระดับแรงดัน 115 เควี และแขวนใช้งานบนเสาไฟฟ้าร่วมกับตัวนำสายจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำที่ระดับแรงดัน 400/240 โวลต์ ที่เป็นทรัพย์สินของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย ได้แก่ การไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เป็นต้น

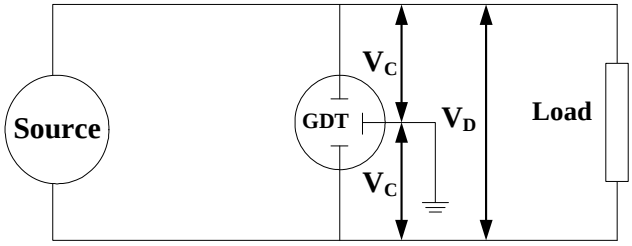
การวางโครงข่ายสายเคเบิลโทรศัพท์แขวนใช้งานร่วมกับตำนำสายส่ง/สายจำหน่ายแรงดันไฟฟ้าสูงย่อมก่อให้เกิดปัญหาการรบกวนทางไฟฟ้าและทางด้านสัญญาณไฟฟ้าต่อโครงข่ายสายเคเบิลโทรศัพท์ จากการศึกษา (ITU–Recommendation K.11, 1993) พบว่าการรบกวนทางไฟฟ้าที่มีต่อโครงข่ายเคเบิลโทรศัพท์ ประกอบด้วย

- ฟ้าผ่าลงโครงข่ายเคเบิลโทรศัพท์โดยตรง
- ฟ้าผ่าลงในบริเวณใกล้เคียง
- การลัดวงจรในระบบสายจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูง
- สายตัวนำไฟฟ้าพาดแตะสายเคเบิลโทรศัพท์
- แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสายเคเบิลโทรศัพท์ในสถานการณ์ปกติและในสถานการณ์ฉุกเฉิน
- เหตุการณ์ศักย์ไฟฟ้าของดินในบริเวณใกล้เคียงยกสูงขึ้น

การรบกวนทางด้านสัญญาณไฟฟ้า จะส่งผลกระทบต่อโทรศัพท์ของผู้ใช้บริการในลักษณะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงเกินเข้าไปในสายเคเบิลโทรศัพท์ของผู้ให้บริการและ

ผู้ใช้บริการเนื่องจากผลของการเชื่อมโยงสนามแม่เหล็ก ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายของอุปกรณ์ทั้งทางด้านผู้ให้บริการและด้านปลายทางคือด้านของผู้ใช้บริการซึ่งเกิดเป็นแรงดันเหนี่ยวนำสูงเกิน

การรบกวนทางไฟฟ้าจากสาเหตุต่างๆ อาจแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบหลักๆ คือ แรงดันโหมดผลต่าง(V_D) และแรงดันโหมดร่วม (V_C) ดังภาพที่ 1 (ประมุข และคณะ, 2549)



ภาพที่ 1 แรงดันโหมดผลต่างและโหมดร่วม
ที่มา: ประมุข และคณะ (2549)

การรบกวนทางไฟฟ้าใน 2 รูปแบบหลักนี้ ในกรณีที่แรงดันสูงเกินผิดปกติย่อมก่อให้เกิดผลกระทบต่อการทำงานตามปกติของบริภัณฑ์/ อุปกรณ์ในโครงข่ายเคเบิลโทรศัพท์ (Hughes, 1998; Gundrum, 1988) ประกอบด้วย

การติดต่อสื่อสารขัดข้องชั่วขณะเครื่องอุปกรณ์ปลายทางในระบบของผู้ใช้บริการ เช่น โทรศัพท์ โทรสารชำรุดเสียหาย

บริภัณฑ์ อุปกรณ์ในชุมสายโทรศัพท์ของผู้ให้บริการ เช่น การ์ดชุมสายไหม้เสียหาย บริภัณฑ์อุปกรณ์ในโครงข่ายเคเบิลโทรศัพท์ชำรุดเสียหาย เหตุการณ์ไฟฟ้าดูดต่อผู้ปฏิบัติงาน

การรบกวนทางไฟฟ้าดังกล่าวยังอาจมีผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานเกี่ยวกับการตรวจสอบ บำรุงรักษาโครงข่ายเคเบิลโทรศัพท์อีกด้วย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ

1. สร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าของโครงข่ายเคเบิลโทรศัพท์ และโครงข่ายสายตัวนำไฟฟ้าแรงดันสูง ที่ติดตั้งใช้งานร่วมกัน เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์คำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโครงข่ายเคเบิลโทรศัพท์

2. คำนวณหาขนาดแรงดันเกินแบ่งตามประเภทของการรบกวน

3. อธิบายมาตรการ วิธีการต่างๆ ที่มีประสิทธิผลในการลดผลกระทบจากแรงดันเหนี่ยวนำสูงเกินที่มีโอกาสปรากฏในโครงข่ายสายเคเบิลโทรศัพท์ เพื่อให้โครงข่ายเคเบิลโทรศัพท์สามารถใช้งานได้อย่างมั่นคง ปลอดภัยและประหยัด

วัตถุประสงค์

1. สร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าของโครงข่ายเคเบิลโทรศัพท์ และโครงข่ายสายตัวนำไฟฟ้าแรงดันสูง ที่ติดตั้งใช้งานร่วมกัน เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์คำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโครงข่ายเคเบิลโทรศัพท์

2. คำนวณหาขนาดแรงดันเกินแบ่งตามประเภทของการรบกวน

3. อธิบายมาตรการ วิธีการต่างๆ ที่มีประสิทธิผลในการลดผลกระทบจากแรงดันเหนี่ยวนำสูงเกินที่มีโอกาสปรากฏในโครงข่ายสายเคเบิลโทรศัพท์ เพื่อให้โครงข่ายเคเบิลโทรศัพท์สามารถใช้งานได้อย่างมั่นคง ปลอดภัยและประหยัด

การตรวจเอกสาร

1. สาเหตุของแรงดันสูงเกินและกระแสสูงเกินที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อบริภัณฑ์ต่างๆ ในระบบโทรคมนาคม

1.1 ฟ้าผ่าโดยตรง (Direct lightning strikes)

เมื่อมีฟ้าผ่าโดยตรงลงบนสายตัวนำไฟฟ้าจะทำให้มีกระแสจำนวนมาก (เป็นพันแอมแปร์) ไหลไปตามสายหรือเคเบิลเป็นช่วงเวลาสั้นๆ เป็นมิลลิวินาทีอาจทำให้เกิดความเสียหายทางกายภาพได้ โดยขนาดของแรงดันเสิร์จสูงเกินหลายกิโลโวลต์ทำให้เกิดความเครียดในไดอิเล็กตริกของสายและอุปกรณ์พ่วงต่อต่างๆ

1.2 ฟ้าผ่าในบริเวณใกล้เคียง (Lightning strikes nearby)

การไหลของกระแสฟ้าผ่าจากก้อนเมฆไปยังดินหรือก้อนเมฆทำให้เกิดแรงดันสูงเกินในสายแขวนอากาศหรือในสายใต้ดินที่อยู่ใกล้ตำแหน่งฟ้าผ่าลง บริเวณที่มีความต้านทานจำเพาะของดินสูงจะมีผลกระทบมากขึ้นตามไปด้วย

1.3 การเหนี่ยวนำจากกระแสฟอลต์ในสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง

กราวนด์ฟอลต์ในระบบกำลังไฟฟ้าเป็นเหตุให้สายโทรศัพท์ที่อยู่ใกล้ได้รับการเหนี่ยวนำแรงดันสูงได้ ซึ่งโดยปกติสายเคเบิลโทรศัพท์จะติดตั้งไปด้วยกันกับระบบไฟฟ้ากำลัง แรงดันสูงเกินนี้อาจมีขนาดหลายกิโลโวลต์แต่มีช่วงเวลาสั้นๆ อยู่ระหว่าง 200 ถึง 1000 มิลลิวินาที (อาจมากหรือน้อยกว่านี้) ขึ้นกับความเร็ว (speed) ในการกำจัด (clearing) ฟอลต์ของระบบไฟฟ้ากำลัง

1.4 การแตะสัมผัสกับระบบกำลังไฟฟ้า (Contact with power lines)

การแตะกันระหว่างสายไฟฟ้ากำลังและสายโทรศัพท์อาจเกิดขึ้นเมื่อมีภัยพิบัติในที่นั้นๆ เช่น พายุ ไฟไหม้ หรือแผ่นดินไหว ก่อให้เกิดความเสียหายต่อทั้งของระบบไฟฟ้ากำลังและ

ระบบโทรคมนาคม หรือเมื่อตัวป้องกันทำงานแยกออกได้ตามปกติแต่เป็นผลมาจากฉนวนไม่สามารถกั้นได้ ในเมืองใหญ่แรงดันสูงเกินเป็นค่าแรงดันใช้งานกระแสสลับมีค่าไม่เกิน 240 โวลต์ เทียบกับดินเกิดได้ไม่บ่อยนักเมื่อแรงดันใช้งานอยู่ในสภาวะปกติ แต่อาจต่อเนื่องเป็นคาบเวลาไม่แน่นอนจนกระทั่งถูกสังเกตได้ เมื่อแรงดันมีค่าสูงกว่า เช่น แรงดันขนาด 2 kV ต้องมีการจัดให้อุปกรณ์ป้องกันตัดแยกแรงดันออกในเวลาอันสั้นเมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้น แรงดันสูงเกินนี้อาจเป็นเหตุให้มีกระแสเกินไหลตามสายไปยังดินของสถานีชุมสาย เป็นเหตุให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์และไม่ปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน

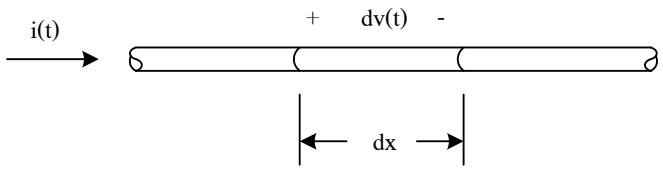
1.5 แรงดันไฟฟ้าสูงเกินจากศักย์ไฟฟ้าดินยกขึ้น (Ground Potential Rise)

ศักย์ไฟฟ้าดินยกขึ้น เรียกย่อๆ ว่า GPR คือการที่ระบบต่อลงดินและบริเวณใกล้เคียงระบบต่อลงดินมีศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นมามากผิดสังเกต ซึ่งปกติมีค่าเป็นศูนย์ ในขณะที่มีกระแสปริมาณมากๆ ไหลผ่านระบบสายตัวนำต่อลงดิน ซึ่งกระแสปริมาณมากๆ นี้อาจเป็นกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าลงดินหรืออาจเป็นกระแสจากฟ้าผ่าก็ได้ ความเสียหายที่เกิดจาก GPR เกิดจากความแตกต่างของแรงดันอย่างมาก (แรงดันเกิน) ที่บริเวณที่เกิด GPR กับจุดดินอ้างอิงที่อยู่ไกลออกไป (Remote ground)

กราวนด์ฟอลต์ในระบบกำลังไฟฟ้าสามารถทำให้มีแรงดันไฟฟ้าสูงเกินจากศักย์ไฟฟ้าดินยกขึ้นในบริเวณใกล้เคียงจุดที่เกิดกราวนด์ฟอลต์เทียบกับจุดที่ต่อหลักดินของระบบไฟฟ้า อาจทำให้ระบบโทรคมนาคมหรือในที่นี้คือระบบโทรศัพท์ทำงานผิดพลาดหรือเสียหายได้โดยขึ้นอยู่กับขนาดของศักย์ไฟฟ้าดินยกขึ้น (ฐิติพงษ์, 2546)

2. การจำลองสายส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission Line Modeling)

2.1 ความเหนี่ยวนำของสาย (Line Inductance)



ภาพที่ 2 ตัวนำมีกระแส i(t) ไหลผ่าน
ที่มา: Sakis (1988)

Meliopoulos (1988) เมื่อมีกระแส i(t) ไหลผ่านตัวนำจะทำให้มีสนามแม่เหล็กแปรตามเวลารอบตัวนำ กำหนดให้ $d\lambda(t)$ เป็นเส้นแรงแม่เหล็กคล้องเกี่ยว เมื่อกระแส i(t) ไหลผ่านตัวนำยาว dx ความเหนี่ยวนำของตัวนำยาว dx กำหนดได้เป็น dL ดังสมการ(1)

$$dL = \frac{d\lambda(t)}{i(t)} \qquad (1)$$

เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กคล้องเกี่ยวแปรตามเวลาแล้วแรงดัน v(t) จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นตลอดระยะความยาว dx ของตัวนำ

$$dv(t) = \frac{d\lambda(t)}{dt} = dL\frac{di(t)}{dt}$$

หากกำหนดให้ความเหนี่ยวนำของตัวนำเป็น L เฮนรี่ต่อเมตร แล้วจะได้ว่า

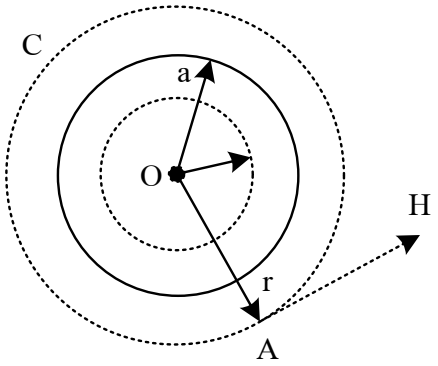
$$dL = Ldx$$

เมื่อแทนลงในสมการแรงดันก่อนหน้านี้เพื่อหาค่า L เราจะเขียนสมการได้คือ

$$L = \frac{dv(t)/dx}{di(t)/dt} \quad \text{เฮนรี่/เมตร} \quad (2)$$

จากสมการที่กล่าวถึงในที่นี้ไม่รวมเส้นทางไหลกลับของกระแสซึ่งมีผลกระทบต่อแรงดันเหนี่ยวนำที่และความเหนี่ยวนำของตัวนำที่เกิดขึ้น ซึ่งในสายส่งจ่ายจริงมีโครงสร้างที่ซับซ้อน เนื่องจากประกอบด้วยตัวนำมากกว่าหนึ่งตัวนำ ในที่นี้จะกำหนดลักษณะสมบัติของแต่ละตัวนำด้วยความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self Inductance) และลักษณะสมบัติระหว่างตัวนำด้วยความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance) และรวมถึงเส้นทางกระแสไหลกลับด้วย (รายละเอียดสามารถศึกษาได้จากการจัดรูปแบบสายส่งจ่าย)

2.2 สนามแม่เหล็กของตัวนำทรงกระบอก



ภาพที่ 3 พื้นที่หน้าตัดของตัวนำตันทรงกระบอก
ที่มา: Sakis (1988)

พิจารณาตัวนำที่ไม่เป็นสารแม่เหล็กที่มีกระแส i(t) ไหลผ่านและมีการกระจายของกระแสแบบสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ (ความหนาแน่นกระแสคงที่) จากภาพที่ 3 ความเข้มสนามแม่เหล็ก H ที่จุด A ตั้งฉากกับแนวรัศมี OA และขนาดจะมีค่าคงที่บนเส้นทางที่เป็นวงกลมมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ O หรือกล่าวได้ว่าขนาดของความเข้มสนามแม่เหล็ก H เป็นฟังชันของรัศมี OA = r เท่านั้น (นั่นคือ H(r)) ซึ่ง H(r) สามารถคำนวณได้โดยตรงจากกฎของแอมแปร์ พิจาณาจากรูปแบบที่ใช้อธิบายแบ่งออกเป็นสองกรณีคือ กรณีจุด A อยู่นอกตัวนำ และจุด A อยู่ในตัวนำ

กรณีจุด A อยู่นอกตัวนำ **OA** > a ประยุกต์ใช้กฎของแอมแปร์ได้เป็น

$$i(t) = \int_C H(r)\cdot d\ell = 2\pi(OA)H(r) = 2\pi rH(r) \quad (3)$$

จากสมการ (3) เราสามารถหาค่า H(r) ได้เป็น

$$H(r) = \frac{i(t)}{2\pi r} \quad (4)$$

ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกำหนดไว้เป็นสมการ

$$B(r) = \mu_0 H(r) = \frac{\mu_0 i(t)}{2\pi r} \quad (5)$$

กรณีจุด A อยู่ในตัวนำ **OA** < a ประยุกต์ใช้กฎของแอมแปร์ได้ดังต่อไปนี้

กระแสในวงปิด C

$$= \int_C H(r)\cdot d\ell = 2\pi(OA)H(r) = 2\pi aH(r)$$

โดยคิดความหนาแน่นกระแสในตัวนำมีค่าคงที่ จะได้กระแสในวงปิด C เป็นดังสมการ

กระแสในวงปิด C

$$= \frac{\pi r^2}{\pi a^2} i(t) = \left(\frac{r}{a}\right)^2 i(t)$$

แทนค่าแล้วหาค่า H(r) ได้

$$H(r) = \frac{ri(t)}{2\pi a^2} \quad (6)$$

$$\text{และ } B(r) = \mu_0 H(r) = \frac{\mu_0 r i(t)}{2\pi a^2} \quad (7)$$

กำหนดให้เส้นแรงแม่เหล็กคล้องเกี่ยวผ่านผิวตัวนำ S แรงดันเหนี่ยวนำ v(t) ตามเขตรอบนอกของผิวตัวนำคำนวณได้จากสมการ

$$v(t) = \frac{d\lambda(t)}{dt}$$

โดยที่เส้นแรงแม่เหล็กคล้องเกี่ยวภายในตัวนำ $d\lambda_{int}(t)$ และภายนอกตัวนำ $d\lambda_{ext}(t)$ เป็นดังสมการ

$$d\lambda_{int}(t) = \frac{\pi r^2}{\pi a^2} B(r) \ell \, dr = \frac{\mu_0 r^3 i(t)}{2\pi a^4} \ell \, dr$$

$$\text{และ } d\lambda_{ext}(t) = \frac{\mu_0 i(t)}{2\pi r} \ell \, dr$$

ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กคล้องเกี่ยวรวมจะได้จากผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กคล้องเกี่ยวภายในและภายนอกดังนี้

$$\lambda(t) = \int_{r=0}^{a} \frac{\mu_0 r^3 i(t)}{2\pi a^4} \ell \, dr + \int_{r=a}^{D} \frac{\mu_0 i(t)}{2\pi r} \ell \, dr$$

$$\lambda(t) = \frac{\mu_0 \ell i(t)}{2\pi r} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D}{a} \right) \quad (8)$$

สามารถเขียนสมการที่ (8) ในรูปสมการทั่วไปได้ดังสมการที่ (9)

$$\lambda(t) = \frac{\mu_0 \ell i(t)}{2\pi} \ln \frac{D}{d} \quad (9)$$

โดยที่ D = ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางตัวนำ

$$d = ae^{(-1/4)} = 0.778 \text{ (GMR ของตัวนำ)}$$

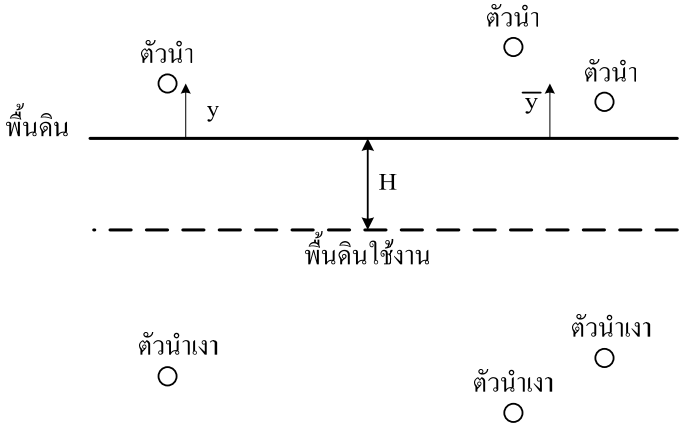
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

สำหรับระยะ D และ d ต้องมีหน่วยหรือมิติเดียวกัน เช่น ม.ม. นิ้ว เมตร หรือ ฟุต เป็นต้น และสามารถคำนวณความเหนี่ยวนำได้จากนิยามของความเหนี่ยวนำได้จากสมการ

$$L' = \frac{\lambda(t)}{i(t)} = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \ln \frac{D}{d} \quad \text{เฮนรี่}$$

เมื่อคิดต่อหน่วยความยาวจะได้เป็น เฮนรี่/เมตร ดังสมการ

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{d} \quad \text{เฮนรี่/เมตร} \qquad (10)$$



ภาพที่ 4 ตัวนำที่ใช้ดินเป็นทางไหลกลับของกระแส
ที่มา: Hughes (1998)

ความต้านทานของดิน r_d มีค่าเป็นฟังชันของความถี่และคาร์สัน (Carson) ได้ทำการแปลงมาจากสูตรที่ได้จากการทดลอง (empirical formula) (Anderson, 1976)

$$r_d = 1.588 \times 10^{-3} f \quad \Omega/\text{mi}$$

$$= 9.869 \times 10^{-4} f \quad \Omega/\text{km}$$

สำหรับตัวนำที่แขวนตามเสาซึ่งมีแนวของสายตัวนำขนานไปกับผิวดินกรณีใช้ดินเป็นทางเดินกลับของกระแสสามารถคิดให้ดินเป็นตัวนำเดี่ยวมี Self GMD 1 ฟุตหรือ 1 เมตร อยู่ห่างจากตัวนำลงไปในผิวดินเป็นระยะ H ซึ่งคิดได้จากสมการ (Hughes, 1998)

$$H = 330\sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad \text{meters} \qquad (11)$$

เมื่อ f = ความถี่ (Hz)

ρ = ความต้านทานจำเพาะของดิน (Ω.meters)

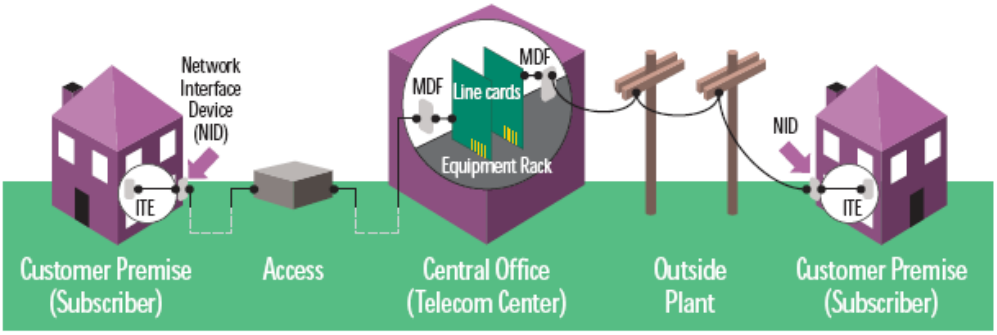
H = ระยะความสูงใช้งานของผิวดิน (meters)

ตารางที่ 1 ระยะ H สำหรับความต้านทานจำเพาะของดินที่ความถี่ 50 Hz

Return Earth Condition	Resistivity (Ω– m)	H(m)
Sea water	0.01–1.0	4.67–46.67
Swampy ground	10–100	147.58–466.69
Average damp earth, Moist sand	100	466.69
Dry earth, Dry sand	1000	1475.80
Stony ground	3000	2556.17
Gneiss, granite	10 000	4666.90
Pure slate	10 000 000	147580.48
Sandstone	1 000 000 000	1475804.86

ที่มา : Hughes (1998)

3. ลักษณะกายภาพของระบบสื่อสารทางโทรศัพท์



ภาพที่ 5 ระบบสื่อสารทางโทรศัพท์
ที่มา: Bourns (2006)

การสื่อสารโทรคมนาคมคือการติดต่อสื่อสารระยะทางไกล เป็นขั้นตอนของการส่งผ่านข่าวสารระยะไกลๆ โดยวิธีการทางไฟฟ้า ซึ่งจะถูกส่งผ่านไปยังปลายทางโดยใช้ตัวนำหุ้มฉนวน หรือวิธีส่งผ่านชั้นบรรยากาศโดยการเชื่อมต่อของสัญญาณวิทยุโดยไม่ต้องใช้ลวดตัวนำใดๆ รูปแบบของพลังงานข่าวสารจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าส่งผ่านตัวกลางไปยังปลายทางที่อยู่ห่างไกลออกไป เมื่อถึงปลายทางก็จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากลับมาเป็นรูปแบบเดิม (ข่าวสาร) ซึ่งยังคงมีความหมายเหมือนเดิม

3.1 พัฒนาการของโทรศัพท์

ประเทศไทยได้นำเอาโทรศัพท์มาใช้เป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2424 โดยสมเด็จพระราชปิตุลาบรมวงศาภิมุข เจ้าฟ้าภาณุรังสี สว่างวงศ์ เจ้ากรมกลาโหม โดยทดลองนำเครื่องโทรศัพท์มาติดตั้งที่กรมอู่ทหารเรือกรุงเทพมหานคร 1 เครื่อง และป้อมยามปากน้ำเจ้าพระยา จังหวัดสมุทรปราการ 1 เครื่องรวมเป็น 2 เครื่องเพื่อใช้แจ้งข่าวเรือเข้าและออกที่ปากน้ำสมุทรปราการให้ทางกรุงเทพฯ ทราบ (สุชิน, 2524, สมาร์ทเลิร์นนิ่ง, 2551)

โดยข้อมูลจากบริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน) (ม.ป.ป.) สรุปวิวัฒนาการทางโทรศัพท์ในประเทศไทยได้ดังนี้

ปี พ.ศ. 2424 โทรศัพท์เข้าสู่ประเทศไทยครั้งแรกตรงกับรัชสมัยของพระบาทสมเด็จพระจุลจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวรัชการที่ 5 เพื่อใช้แจ้งข่าวเรือเข้าและออกที่ปากน้ำสมุทรปราการให้ทางกรุงเทพฯทราบ

ปี พ.ศ. 2429 กระทรวงกลาโหมได้โอนกิจการโทรศัพท์ให้อยู่ในความดูแลของกรมไปรษณีย์โทรเลขเพื่อให้ประชาชนทั่วไปเริ่มมีโอกาสใช้โทรศัพท์เป็นครั้งแรก ซึ่งโทรศัพท์ที่ใช้นั้นจะเป็นระบบแม็กนีโต (Magneto) หรือระบบไฟประจำเครื่อง (Local Battery :LB) โดยขณะนั้นมีผู้เช่าประมาณ 60 รายระยะทางสายยาวเพียง 80 กิโลเมตร

ปี พ.ศ. 2450 ติดตั้งระบบโทรศัพท์ไฟกลางใช้พนักงานต่อ (Central Battery :CB) ซึ่งเป็นชุมสายโทรศัพท์ระบบแรกที่ถูกผลิตขึ้นมาเป็นชุมสายกึ่งอัตโนมัติ ทั้งนี้เป็นการติดต่อต้องผ่านพนักงานซึ่งทำหน้าที่ต่อสายระหว่างผู้เช่าทั้งสองทาง โดยติดตั้งที่โทรศัพท์กลางวัดเลียบ

ปี พ.ศ. 2478 กระทรวงพาณิชย์และคมนาคมโดยพลเอกพระเจ้าบรมวงศ์เธอกรมพระกำแพงเพชรอัครโยธิน ได้สั่งซื้อเครื่องชุมสายระบบอัตโนมัติ STEP–BY–STEP จากประเทศอังกฤษ เป็นชุมสายโทรศัพท์ระบบแรกที่ผู้เช่าสามารถหมุนหน้าปัดถึงกันได้โดยตรง และปี พ.ศ. 2480 ติดตั้งใช้ชุมสายอัตโนมัติครั้งแรก

ปี พ.ศ. 2497 พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดช ทรงมีพระราชโองการให้ตราพระราชบัญญัติจัดตั้งองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย เป็นรัฐวิสาหกิจ สังกัดกระทรวงคมนาคม

ปี พ.ศ. 2502 เริ่มใช้ชุมสายครอสบาร์ และในปี พ.ศ. 2507 ติดตั้งชุมสายครอสบาร์ในนครหลวงและรับโอนโทรศัพท์ทางไกล

ปี พ.ศ. 2517 เปลี่ยนเลขหมายโทรศัพท์ในชุมสายครอสบาร์จาก 5 ตัวเป็นหมายเลข 6 ตัว

ปี พ.ศ. 2520 เริ่มใช้โทรศัพท์แบบกดปุ่ม และอีกหนึ่งปีต่อมาก็ได้ให้บริการโทรศัพท์ไร้สาย

ปี พ.ศ. 2522 เปิดบริการโทรศัพท์สาธารณะแบบไม่มีผู้ดูแลและอีกหนึ่งปีต่อมาก็ได้ให้บริการโทรศัพท์จากทางไกลอัตโนมัติ

ปี พ.ศ. 2526 เปิดใช้ชุมสายโทรศัพท์ระบบ SPC (Storage Program Control) และอีกหนึ่งปี ต่อมาได้ให้บริการโทรศัพท์ต่างประเทศอัตโนมัติ

ปี พ.ศ. 2529 เปิดให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ และอีกหนึ่งปีต่อมาได้เปิดโอกาสให้ผู้เช่าซื้อเครื่องโทรศัพท์ใช้เองโดยต้องผ่านการรับรองคุณภาพจาก ทศท. และให้ผู้เช่าเดินสายโทรศัพท์ภายในอาคารได้เอง

ปี พ.ศ. 2532 เชื่อมโยงเครือข่ายโทรคมนาคมด้วยเคเบิลใยแก้วและไมโครเวฟ และในปี พ.ศ. 2534 นำเทคโนโลยีใหม่มาใช้ เช่น เปิดสัมปทานโทรศัพท์สาธารณะแบบใช้บัตร (Card Phone) ติดตั้งสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน เพื่อใช้เป็นโครงข่ายโทรคมนาคมสำรอง เปิดให้บริการสื่อสารข้อมูลเพื่อธุรกิจผ่านดาวเทียม (ISBN) เพื่อรับและส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ โทรสาร โทรศัพท์และอื่นๆ และเปิดบริการประชุมทางไกลผ่านจอภาพ (Tele Conference)

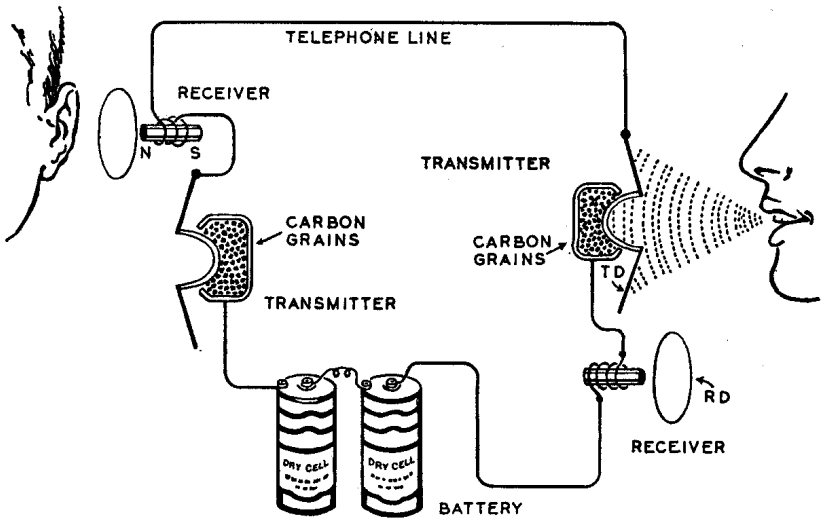
ปี พ.ศ. 2536 ติดตั้งและเปิดให้บริการสมัยใหม่ เช่น ติดตั้งโทรศัพท์ในโครงการโทรศัพท์สาธารณะทางไกลชนบท เปิดบริการโทรศัพท์สาธารณะทางไกลต่างประเทศชนิดหยอดเหรียญ เปิดให้บริการสื่อสารร่วมระบบดิจิตอล (ISDN) และเปิดบริการระบบข้อมูลธุรกิจ (Video TEX)

ปี พ.ศ. 2545 แปลงสภาพจากองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทยเป็น บริษัท ทศท. คอร์เปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) (TOT Corporation Public Company Limited) เมื่อวันที่ 31 กรกฎาคม 2545 ซึ่งเป็นการแปรรูปองค์การโทรศัพท์จากรัฐวิสาหกิจมาเป็นบริษัทในกำกับของรัฐบาล ทั้งนี้เมื่อมีการปรับปรุงโครงสร้างราชการแล้ว บริษัท ทศท คอร์เปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) ได้ไปสังกัดกระกรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร

ปี พ.ศ. 2548 บริษัท ทศท คอร์เปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) ได้มีการปรับเปลี่ยนชื่อเป็น บริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน) เมื่อวันที่ 1 กรกฎาคม 2548 เพื่อเป็นการเตรียมแข่งขันในภาคเอกชน แต่ยังไม่ได้เป็นเอกชนอย่างเต็มรูปแบบ เนื่องจากยังไม่ได้กระจายหุ้นในตลาดหลักทรัพย์ จึงยังคงเป็นบริษัทในกำกับของรัฐบาลอยู่จนถึงปัจจุบัน (สมาร์ทเลิร์นนิ่ง, 2551)

3.2 หลักการทำงานของโทรศัพท์

โทรศัพท์ถูกพัฒนาขึ้นจากโทรเลข โดยโทรศัพท์ทำงานเปลี่ยนเสียงพูดเป็นสัญญาณไฟฟ้าและส่งไปตามสายสัญญาณ (สายโทรศัพท์) เมื่อถึงปลายทางแล้วก็จะถูกเปลี่ยนกลับเป็นเสียงอีกครั้ง



ภาพที่ 6 โทรศัพท์อย่างง่าย

ที่มา: Tom Farley Production (2009).

การให้บริการโทรศัพท์ในงานจริงจะมีจำนวนผู้ใช้เป็นจำนวนมาก จึงจำเป็นต้องมีชุมสายโทรศัพท์เพื่อช่วยในการเชื่อมต่อเลขหมายที่ต้องการต่อถึงกันและควบคุมการทำงานของโทรศัพท์ให้ถูกต้องด้วย

3.3 ชุมสายโทรศัพท์ (Central office)

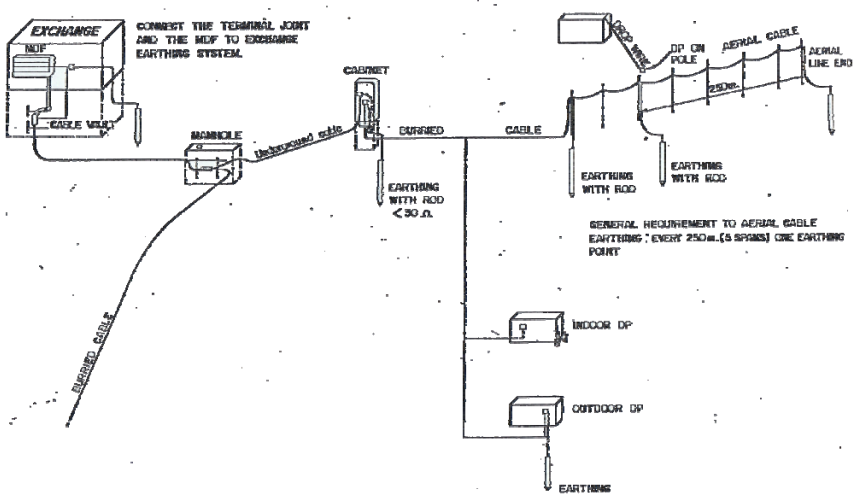
ชุมสายโทรศัพท์เป็นศูนย์กลางของระบบการสื่อสารด้วยโทรศัพท์ มีหน้าที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการเชื่อมต่อเลขหมาย และควบคุมการทำงานของโทรศัพท์ มี 2 ประเภทคือ

ก. ชุมสายท้องถิ่น เป็นชุมสายที่มีเครื่องแต่ละเลขหมายของผู้เช่าต่อใช้งานอยู่

ข. ชุมสายอัตโนมัติ ใช้เป็นชุมสายผ่านสัญญาณโทรศัพท์และต่อผ่านทางไกล

ชุมสายทั้งสองแบบดังกล่าวแบ่งตามลักษณะการทำงานเป็น 2 แบบคือแบบใช้พนักงานต่อและแบบอัตโนมัติ สำหรับชุมสายอัตโนมัตินั้นเมื่อผู้ใช้ยกหูโทรศัพท์ขึ้นจะมีแรงดันไฟฟ้าเลี้ยงวงจรจากชุมสายส่งมาพร้อมสัญญาณเสียงบอกให้ผู้ใช้ทราบว่าพร้อมใช้งาน (Dial tone) ผู้ใช้สามารถกดเลขหมายที่ต้องการติดต่อและหากต่อได้ชุมสายจะส่งสัญญาณกลับให้แก่ผู้โทรออกพร้อมจ่ายกระแสสัญญาณเรียกไปกระดิ่งของเครื่องรับผู้รับปลายทาง เมื่อผู้รับปลายทางยกหู โทรศัพท์ขึ้นก็จะเป็นการตัดวงจรกระดิ่งออก และสามารถพูดคุยได้ หากไม่สามารถต่อเลขหมายปลายทางได้ชุมสายก็จะส่งสัญญาณเสียงไม่ว่าง (Busy tone) กลับมายังผู้โทรออก เช่น ติดต่อผิด เป็นเลขหมายที่ยังไม่มีการติดตั้งหรือถูกยกเลิกการใช้ไปแล้ว ชุมสายจะส่งสัญญาณเสียงบอกให้ทราบว่าหาเลขหมายไม่พบกลับมายังผู้โทรออก เป็นต้น (สุชิน, 2524)

3.4 การต่อลงกราวนด์ของระบบโทรศัพท์



ภาพที่ 7 การต่อลงกราวนด์ของระบบโทรศัพท์

ที่มา: Telephone Organization of Thailand (1994)

การต่อลงกราวนด์ของระบบโทรศัพท์ทางปฏิบัติในประเทศไทยตามมาตรฐานการติดตั้งของบริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน) จะทำการต่อลงดินทุกๆ ระยะห่าง 250 เมตร หากเป็นตำแหน่งเดียวกับจุดลงกราวนด์ของการไฟฟ้า จะเลื่อนจุดต่อลงกราวนด์ไปที่ห่างออกไปอีกหนึ่งช่วงระหว่างเสาหรือก็คือลงกราวนด์ที่เสาต้นถัดไปเพื่อไม่ให้เป็นจุดเดียวกันกับกราวนด์ของการไฟฟ้า ซึ่งเป็นสิ่งที่เข้าใจกันว่าเมื่อมีความผิดพร่องหรือการลัดวงจรหรือเกิดฟ้าผ่าระบบไฟฟ้าแล้วจะทำให้เกิดการกวนระบบโทรศัพท์โดยมีเส้นทางเข้าทางแท่งกราวนด์ที่ต่อถึงกันนั่นเอง

3.5 คุณสมบัติทั่ว ๆ ไปของเคเบิลโทรศัพท์

สายเคเบิลโทรศัพท์ ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างชุมสายกับผู้เช่านั้น เรียกว่าวงรอบประจำถิ่น (local loop) เป็นคู่สายลวดทองแดงที่เดินจากเครื่องโทรศัพท์หรือตู้ PBX (Private Branch Exchange) ไปยังชุมสายโทรศัพท์ คู่สายทองแดงนี้จะเดินมาภายในเคเบิลขนาดใหญ่ที่เป็นสายป้อน ซึ่งประกอบด้วยคู่สายทองแดง 25 คู่สาย หรือเป็นจำนวนเท่าของ 25 คู่สาย บางครั้งยาวเพียงไม่กี่ร้อยเมตร แต่บางครั้งบางพื้นที่ระยะทางอาจมากถึง 10 กิโลเมตร ดังนั้นด้วยเหตุที่ระยะทางมากจึงต้องมีการกำหนดคุณสมบัติของสายเคเบิลโทรศัพท์เพื่อให้เป็นมาตรฐาน การออกแบบชุมสายหรือออกแบบเครื่องโทรศัพท์ รวมทั้งอื่น ๆ เพื่อจุดประสงค์ให้สัญญาณมีความชัดเจนและระบบมีความมั่นคงมากที่สุด

การจ่ายสัญญาณโทรศัพท์จะจ่ายสัญญาณจากต้นทางไปยังปลายทางผ่านสายโทรศัพท์ ซึ่งก็แล้วแต่ว่าการออกแบบขนาดของสายว่าเป็นขนาดกี่คู่สาย โดยการจ่ายสัญญาณ ทางต้นทางต้องมีคู่สีที่ตรงกับทางปลายทาง

3.6 ขนาดของลวดตัวนำ

ลวดตัวนำที่นำมาทำสายเคเบิลโทรศัพท์นั้นมีหลายขนาด ซึ่งขนาดเล็กจะใช้สำหรับระยะทางสั้น ๆ ถ้าขนาดใหญ่ ๆ ก็สามารถใช้กับระยะทางไกล ๆ ได้ ตามมาตรฐานของอเมริกันจะใช้ขนาดต่าง ๆ ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ขนาดสายมาตรฐานสำหรับสายเคเบิลในงานโทรคมนาคม

เส้นผ่านศูนย์กลาง (ม.ม.)	AWG	เส้นผ่านศูนย์กลาง (นิ้ว)	ปอนด์ /ไมล์	กิโลกรัม /กิโลเมตร	ความต้านทาน /กิโลเมตร
0.30	29	0.012	2.25	0.64	239.5
0.32	28	0.0126	2.5	0.70	210.5
0.40	26	0.0159	4.0	1.13	134.7
0.50	24	0.0201	6.5	1.84	85.06
0.65	22	0.0253	10	2.82	54.4
0.90	19	0.0359	20	5.65	27.0
1.20	17	0.0473	36	10.2	16.0
1.30	16	0.050	40	11.3	13.6

ที่มา: อุดม (2536)

สำหรับในประเทศไทยจะนิยมใช้ขนาดตาม AWG ตั้งแต่ 19, 22, 24 และ 26 AWG ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำเป็น 0.90, 0.65, 0.50 และ 0.40 มิลลิเมตรตามลำดับ

3.7 จำนวนคู่สายของลวดตัวนำขนาดต่าง ๆ

ลวดตัวนำแต่ละขนาดนั้นเมื่อนำมาทำเป็นเคเบิลโทรศัพท์แล้ว จะมีจำนวนคู่สายต่างกัน ซึ่งถ้าลวดตัวนำใหญ่ก็จะมีจำนวนคู่สายน้อย และถ้าขนาดลวดตัวนำเล็กก็จะทำเป็นเคเบิลที่มีคู่สายมากได้ ดังตารางที่ 3

ทางปฏิบัติในการต่อใช้งานจะต่อออกจากสถานีชุมสายโทรศัพท์ไปถึงด้านผู้ใช้บริการ (ลูกค้า) โดยจะเลือกใช้ตัวนำขนาดเล็กและมีจำนวนคู่สายมากทางต้นทางและใช้ตัวนำขนาดโตขึ้นเมื่อมีการต่อกับสายเคเบิลที่มีคู่สายน้อยลง เพื่อทำให้ความต้านทาน (อิมพีแดนซ์รวม) ของสายมีค่าคงเดิมตลอดระยะทาง ซึ่งอาจเรียกว่าวงรอบประจำถิ่น หรือเส้นทางของแนวสาย (Route)

ตารางที่ 3 จำนวนคู่สายของลวดตัวนำขนาดต่าง ๆ

AWG	19	22	24	26
จำนวนคู่	6	6	6	–
	12	12	12	–
	18	18	18	–
	25	25	25	25
	–	50	50	50
	–	75	75	75
	–	100	100	100
	–	150	150	150
	–	200	200	200
	–	300	300	300
	–	400	400	400
	–	–	600	600
	–	–	–	900

ที่มา: อุดม (2536)

3.7.1 ฉนวน

วัสดุที่นำมาทำเป็นฉนวนของเคเบิลโทรศัพท์นั้นมีหลายชนิดแต่ละชนิดมีคุณสมบัติในการทนต่อความร้อนได้ต่างกัน ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 วัสดุฉนวนและค่าทนต่ออุณหภูมิ

วัสดุฉนวน	อุณหภูมิสูงสุดที่ทนได้
PVC	น้อยกว่า 100
Polyethylene	115 ± 1°C
Crystalline	130 ± 1°C
Propylene	130 ± 1°C
Ethylene	130 ± 1°C
Copolymer	130 ± 1°C

ที่มา: อุดม (2536)

3.7.2 คาปาซิเตอร์ในเคเบิลโทรศัพท์ (Mutual Capacitor)

คาปาซิเตอร์ในเคเบิลนั้น เกิดจากโครงสร้างของเคเบิล ซึ่งก็คือ ลวดตัวนำ 2 เส้นขนานกัน ทำให้เกิดค่าความจุขึ้นระหว่างเส้นลวดตัวนำได้ ค่าความจุนี้มีผลต่อสัญญาณที่จะส่งในสายเคเบิลโทรศัพท์ เพราะจะทำให้สัญญาณความถี่สูงในสายเคเบิลสูญเสียไป เนื่องจากคาปาซิเตอร์จะผ่านสัญญาณลงกราวด์ได้ ขึ้นอยู่กับความจุและระยะทางหรือความยาวสาย โดยปกติค่าคาปาซิเตอร์ที่เกิดขึ้นในเคเบิลโทรศัพท์จะมีค่าน้อย เป็น pF หรือ nF ซึ่งค่าประมาณนี้จะทำให้สามารถผ่านสัญญาณความถี่สูงของสัญญาณเสียงที่ส่งไปใช้เป็นทางผ่านสัญญาณลงกราวด์ได้ ดังนั้นจึงมีการกำหนดมาตรฐานเกี่ยวกับเรื่องนี้ไว้เพื่อให้เป็นมาตรฐาน ดังนี้

ก. คาปาซิเตอร์ในเคเบิลแต่ละคู่ ในแต่ละคู่สายของเคเบิลแต่ละคู่จะมีคาปาซิเตอร์ระหว่างตัวนำ 2 เส้นด้วยเช่นกัน และได้มีการกำหนดค่าคาปาซิเตอร์สูงสุดไว้ตามตารางที่ 5 ดังนี้

ตารางที่ 5 คาปาซิเตอร์ในสายโทรศัพท์แต่ละคู่

จำนวนคู่ของเคเบิล	คาปาซิเตอร์ในสายโทรศัพท์	
	nF/Km	nF/mi
6 และ 12	52 ± 4%	83 ± 7%
มากกว่า 12	52 ± 2%	83 ± 4%

ที่มา: อุดม (2536)

ข. ความต้านทานของฉนวน (Insulation Resistance) ฉนวนที่นำมาหุ้มสายเคเบิลโทรศัพท์นั้นโดยปกติแล้ว ควรจะต้องมีค่าความต้านทานไม่น้อยกว่า 16,000 MΩ / Km ที่อุณหภูมิ 23 ±1°C

ค. ความต้านทานของลวดตัวนำ (Conductor Resistance) ค่าความต้านทานของลวดตัวนำที่ใช้ตามมาตรฐานทั่วไป มีค่าตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าความต้านทานของลวดตัวนำ

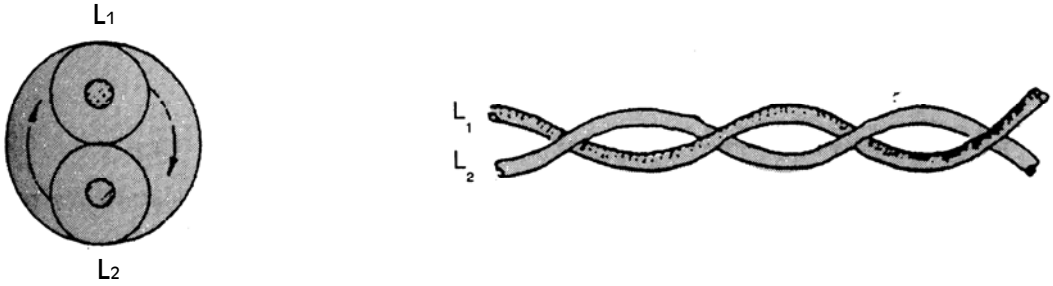
ลวดตัวนำ AWG	เส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำ (mm)	ความต้านทานสูงสุด Ω /Km
19	0.9	28.5
22	0.65	57.1
24	0.5	90.2
26	0.4	144.4

ที่มา: Hughes (1998)

3.8 การฟอร์มเคเบิลโทรศัพท์

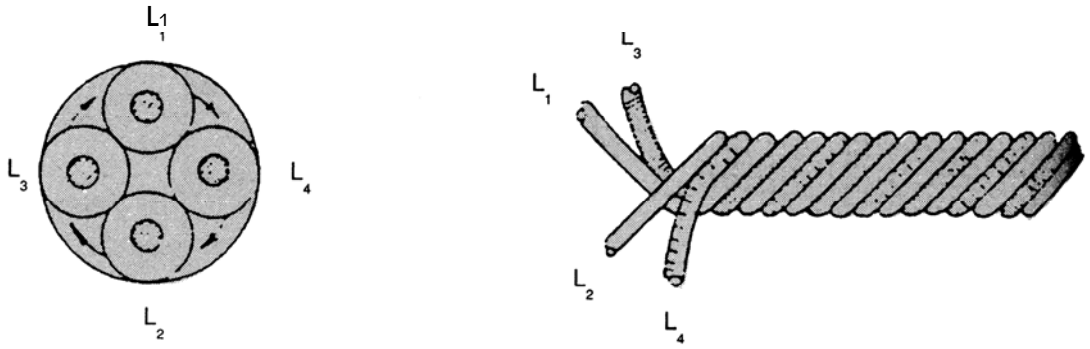
สายลวดตัวนำเมื่อนำมาทำเป็นเคเบิลโทรศัพท์ มีการฟอร์มหรือจัดระเบียบคู่สายก่อนที่จะนำไปรวมเป็นเคเบิลใหญ่ การฟอร์มเคเบิลดังกล่าวนี้ทำเพื่อลดค่าการลดทอน (Attenuation) และสะดวกต่อการแยกคู่สายเวลานำออกมาใช้งาน การฟอร์มคู่สายมีอยู่ 3 แบบ ดังนี้

3.8.1 แบบเกลียวคู่ (Twin Type) คือการนำเอาคู่สายทีละคู่มาบิดเกลียวกันแต่ละคู่แยกอิสระกันเสร็จแล้วจึงนำมารวมกันเป็นเคเบิลใหญ่ วิธีการฟอร์มแบบนี้เป็นที่นิยมกันมาก เพราะคู่สายแต่ละคู่แยกอิสระกัน เวลานำไปใช้งานจึงสะดวก ดังแสดงตามภาพที่ 8



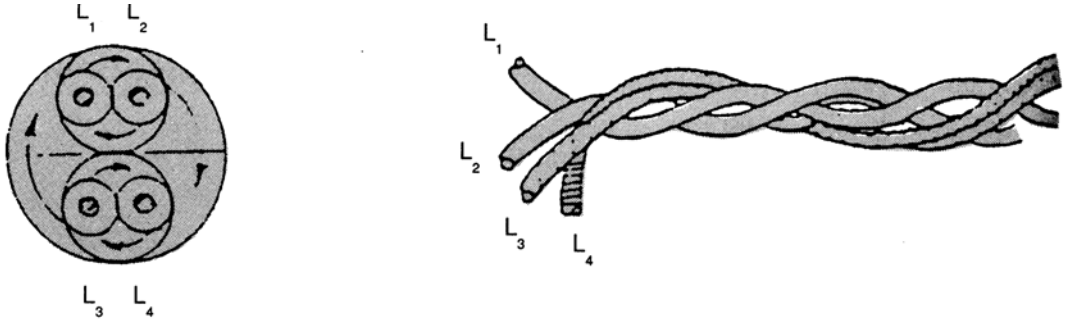
ภาพที่ 8 สายบิดเกลียวคู่
ที่มา: อุดม (2536)

3.8.2 แบบกลุ่มดาว การฟอร์มแบบกลุ่มดาว (Star Guard Type) จะเป็นการนำเอาสายลวดตัวนำครั้งละ 4 เส้น มาตีเกลียวเข้าด้วยกัน พร้อม ๆ กันดังแสดงตามภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แบบกลุ่มดาว
ที่มา: อุดม (2536)

3.8.3 แบบเกลียวสองคู่ การฟอร์มแบบเกลียวสองคู่ (Multiple Twin Type) เป็นการนำเอาแบบเกลียวคู่ทีละ 2 คู่มาบิดเกลียวเข้าด้วยกันอีกครั้ง ซึ่งทำให้แบบเกลียวสองคู่แต่ละชุดจะมี 2 คู่สาย แล้วจึงนำเอาแต่ละชุดมารวมกันเป็นเคเบิลใหญ่ ดังแสดงตามภาพที่ 10



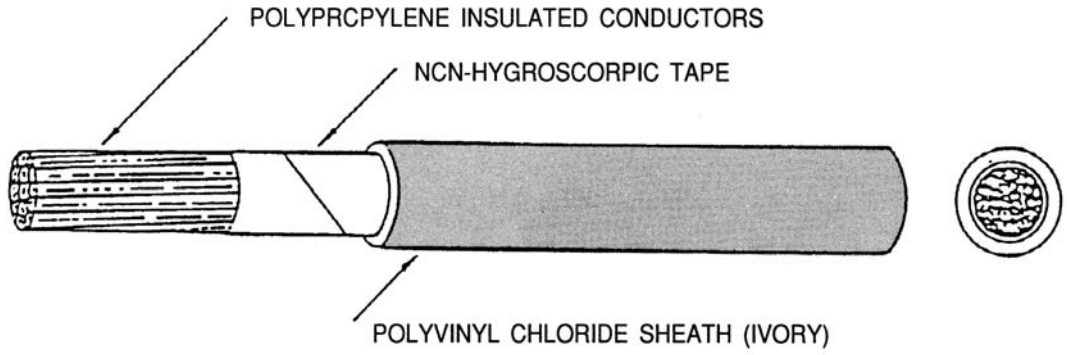
ภาพที่ 10 แบบเกลียวสองคู่
ที่มา: อุดม (2536)

3.9 ประเภทของเคเบิลโทรศัพท์

เคเบิลโทรศัพท์แบ่งตามลักษณะการนำไปใช้งานได้ 2 ประเภทดังนี้

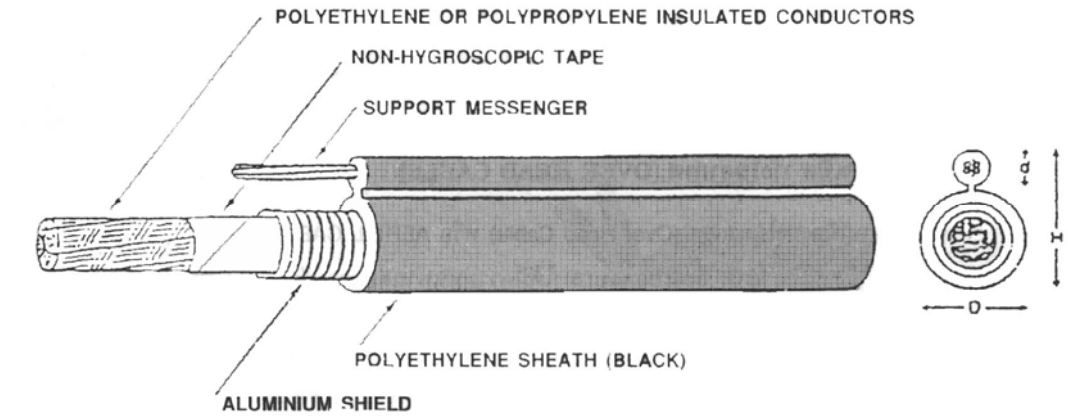
3.9.1 เคเบิลแขวนในอากาศ (Overhead Cable) เคเบิลแขวนในอากาศ หรือ Airial Cable เป็นเคเบิลที่ออกแบบมาให้เหมาะกับการใช้งานในอากาศ มีความทนทานต่อความร้อน ความชื้น และรับแรงดึงได้ดี

3.9.2 เคเบิลวางในอาคาร (Indoor Cable) เป็นเคเบิลที่ออกแบบมาให้ใช้งานภายในอาคารเท่านั้น โครงสร้างฉนวนจะใช้ พีวีซี (PVC : Poly vinyl chloride) ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ค่อยจะทนทานต่อความร้อนไม่เหมาะที่จะใช้ภายนอกอาคาร โดยทั่ว ๆ ไป เคเบิลภายในอาคารนี้ จะมีสีของฉนวนเป็นแบบโทนอ่อน ๆ เช่น สีครีม สีขาว หรือสีเทาอ่อน เป็นต้น เคเบิลภายในอาคารนี้มีชื่อเรียกทั่วๆไปว่า พีวีซี



ภาพที่ 11 ลักษณะของเคเบิลวางในอาคาร
ที่มา: อุดม (2536)

3.9.3 เคเบิลวางนอกอาคาร (Outdoor Cable) เป็นเคเบิลที่ออกแบบมาสำหรับใช้งานกลางแจ้งหรือภายนอกอาคาร ทนแดด ทนความร้อน ความชื้น และทนแรงดึงได้ดีมาก เหมาะสำหรับแขวนตามเสาไฟหรืองานกลางแจ้งทั่วๆ ไป เคเบิลแบบนี้จะมีสายสะพาน (Sling or messenger) ด้วยเพื่อช่วยในการยึดติดกับเสาไฟ เพื่อป้องกันไม่ให้สายยืดหรือหย่อน อันอาจทำให้สายขาดในได้



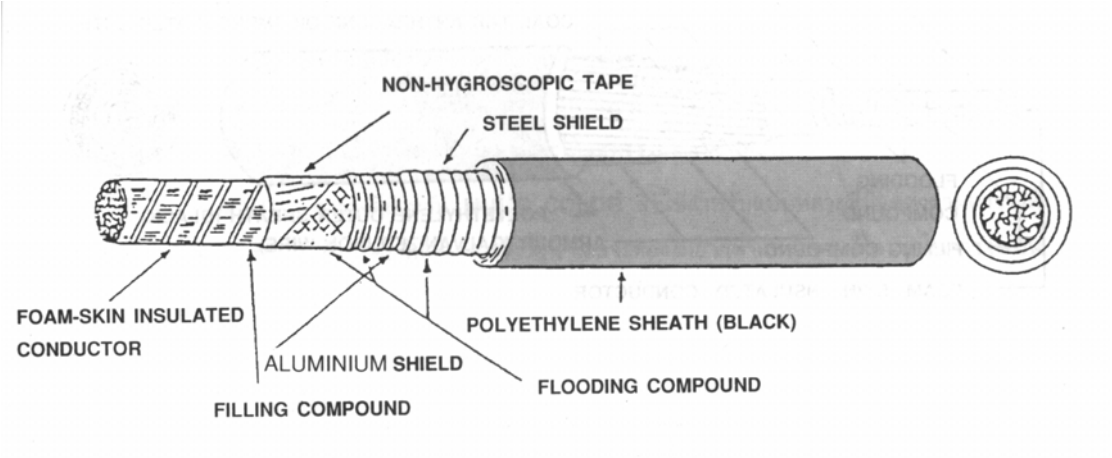
ภาพที่ 12 เคเบิลวางนอกอาคาร
ที่มา: อุดม (2536)

สายเคเบิลแบบวางนอกอาคาร มีหลายชื่อหลายแบบดังต่อไปนี้

1. ALPETH SHEATHED CABLE (AP)
2. FIGURE 8 ALPETH SHEATHED CABLE (AP–8)
3. FOAM/SKIN INSULATION AP SHEATHED FIELD CABLE (AP–FSF)

3.9.4 เคเบิลวางใต้ดิน (Underground Cable) เคเบิลวางใต้ดินนี้ออกแบบมาให้สามารถทนต่อสภาพภูมิประเทศใต้ดินหรือใต้น้ำ ซึ่งเคเบิลต้องมีความทนทานต่อกรด ด่าง ความชื้น แรงดึง แรงดัน แรงกด และความร้อน ซึ่งอาจเกิดได้จากภูเขาไฟใต้ดิน เป็นต้น เคเบิลใต้ดินจะมีโครงสร้างที่ออกแบบดีที่สุดและราคาแพงที่สุด ในปัจจุบันเคเบิลใต้ดินได้ออกแบบมามากมายหลายชนิด เพื่อให้เหมาะกับภูมิประเทศที่แตกต่างกัน ซึ่งขณะนี้ประเทศต่าง ๆ กำลังหันมานิยมใช้เคเบิลใต้ดินกันมากขึ้น เคเบิลวางใต้ดินแบ่งได้ 2 ชนิด คือเคเบิลวางใต้ดินโดยตรง และเคเบิลวางใต้น้ำ

3.9.5 เคเบิลวางใต้ดินโดยตรง (Direct Buried) เป็นเคเบิลที่ออกแบบมาให้วางใต้ดินโดยเฉพาะ หรือวางในท่อร้อยสายใต้ดิน



ภาพที่ 13 เคเบิลวางใต้ดินโดยตรง
ที่มา: อุดม (2536)

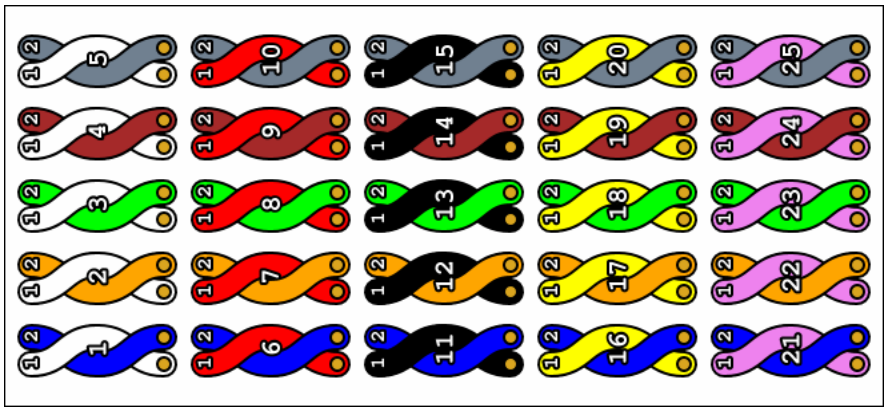
3.10 รหัสสีของเคเบิลโทรศัพท์

รหัสสีของสายเคเบิลโทรศัพท์มีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับเคเบิลโทรศัพท์ เพราะในเคเบิลมีจำนวนคู่สายมากมาย ถ้าใช้รหัสสีจะช่วยลดความยุ่งยากในการหาคู่สายต้นทางกับปลายทางให้เป็นคู่เดียวกัน รหัสสีจะช่วยให้สามารถจัดลำดับการใช้งานก่อนหรือหลังได้ โดยผู้ปฏิบัติงาน จะใช้ตามที่ได้มีการกำหนดในเรื่องการใช้รหัสสีว่าจะใช้คู่ไหนก่อนหรือหลัง รหัสสีของเคเบิลโทรศัพท์มี 2 แบบดังนี้

3.10.1 แบบสีเดียว (Single Color) แบบสีเดียวก็คือการอาศัยสีหรือแม่สีทั่วๆ ไปมาใช้งาน โดยสายเคเบิลแต่ละคู่นั้นจะเคลือบสีเดียวกันทั้ง 2 เส้น คู่อื่น ๆ ก็เคลือบสีอื่นๆ อีกตามธรรมชาติของสีที่มีอยู่ และนำเอาแต่ละคู่มารวมกันเป็นเคเบิล ก็จะได้เคเบิลที่มีคู่สายต่างสีกัน หรือแต่ละคู่สายจะมีสีที่ไม่ซ้ำกัน การใช้รหัสสีแบบนี้ไม่ค่อยได้รับความนิยมกัน เพราะได้จำนวนคู่สายน้อยตามจำนวนสีที่มีอยู่

3.10.2 แบบหลายสี (Multi Color) แบบหลายสีนี้นิยมใช้กันทั่ว ๆ ไป เพราะสามารถสลับสีกันไปมาทำให้สามารถใช้ได้กับคู่สายจำนวนมากตามต้องการได้ ลักษณะการเคลือบสีแบบหลายสีนี้คือ ฉนวนลวดตัวนำแต่ละเส้นในคู่ใด ๆ จะเคลือบสีไม่เหมือนกัน เช่น คู่ที่ 1 จะเป็นเส้นสีขาวกับเส้นสีน้ำเงิน เป็นต้น ซึ่งจะได้แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 7

ตารางสีสำหรับ**แบบหลายสี** สีที่ใช้สำหรับแบบหลายสีนี้ แสดงตามตารางที่ 7 ซึ่งแบ่งสีออกเป็น 2 ส่วน คือสีหลัก และสีเวียน มาตรฐาน AT&T (American Telephone & Telegraph) สำหรับระบบโทรศัพท์ คู่สาย 1 กลุ่มมี 25 คู่สาย แต่ละคู่สายถูกระบุด้วยรหัสสี 2 กลุ่ม ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 สายโทรศัพท์ Ring กับ Tip ระบุด้วยรหัสสีที่

ที่มา: Wikipedia (2008)

โดยที่สาย **Ring** (ต่อกับสายสัญญาณ –) เข้ารหัสสี น้ำเงิน ส้ม เขียว น้ำตาล เทา และสายที่เรียกว่าสาย **Tip** (ต่อกับ Ground +) จะเข้ารหัสสี ขาว แดง ดำ เหลือง ม่วง ซึ่งสามารถแสดงเป็นตารางแม่สีได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ตารางแม่สีสำหรับแบบหลายสี

สีหลัก (+)	สีเวียน (–)
ขาว	น้ำเงิน
แดง	ส้ม
ดำ	เขียว
เหลือง	น้ำตาล
ม่วง	เทา

ที่มา: อุดม (2536)

โดย 25 คู่สายนี้เรียกว่า 1 กลุ่ม (Group) และเมื่อต้องการคู่สายมากกว่า 25 คู่สาย หรือ 1 กลุ่ม (Group) ทำได้โดยนำเอาหลาย ๆ กลุ่มมารวมกัน ซึ่งจะต้องใช้เชือกหรือริบบิ้นพันรอบๆ แต่ละกลุ่มไว้เพื่อไม่ให้มาคละกัน การใช้ริบบิ้นมาพันรอบแต่ละกลุ่มนั้นจะต้องใช้ริบบิ้นสีตามตารางสีแสดงในตารางที่ 7 ซึ่งการจัดสายตามรหัสสีจะสามารถทำให้ใช้ได้กับคู่สายของเคเบิลได้มากถึง 3,000 คู่สาย ซึ่งเราเรียกเคเบิลชุดนี้ว่า ซุปเปอร์ยูนิตไบน์เดอร์ (Super Unit Binder) โดยสรุปการจัดกลุ่มสายตามรหัสสีได้ดังนี้

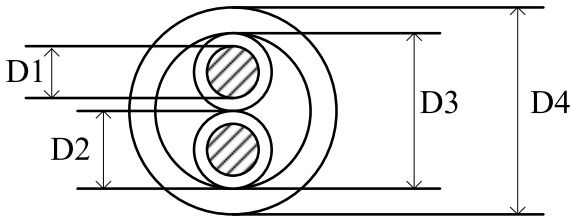
25	คู่	=	1	กลุ่ม
24	กลุ่ม	=	1	ไบน์เดอร์
5	ไบน์เดอร์	=	1	ซุปเปอร์ยูนิตไบน์เดอร์

จะเห็นว่าเราสามารถเรียงรหัสสีได้โดยใช้สีเพียง 10 สี เท่านั้นก็สามารถทำให้ได้เคเบิลขนาดต่าง ๆ ตามต้องการ ในทางปฏิบัติจำนวนคู่สายที่ผลิตออกมาในท้องตลาดนั้น จะมีหลายขนาดให้เลือกใช้

3.11 แบบจำลองพารามิเตอร์ของสายคู่บิดเกลียวแบบกระจาย

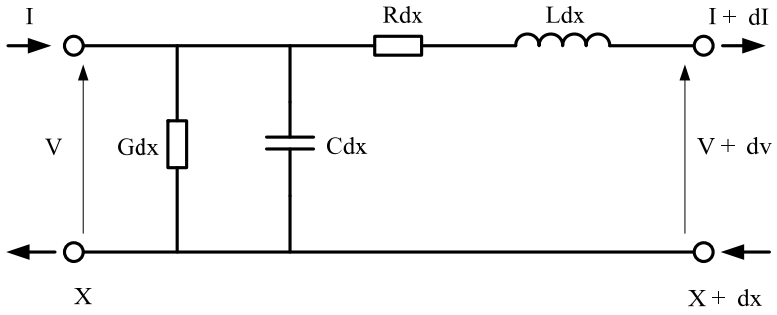
ในระบบโทรศัพท์นิยมใช้สายตัวนำทองแดงมาตรฐาน ปกติกำหนดขนาดตามมาตรฐานการวัดขนาดสายตัวนำของอเมริกา (AWG) และมีขนาดเป็น 19 22 24 และ 26 AWG คู่สายโทรศัพท์ที่อยู่ในเคเบิลจะเป็นสายตัวนำหุ้มฉนวนแล้วแต่ละคู่สายจะบิดเกลียวเข้าด้วยกัน (เพื่อลดผลของการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากวงจรของคู่สายอื่นและสนามแม่เหล็กภายนอก) และนำแต่ละคู่สายมาบิดเกลียวอีกครั้งเพื่อลดผลของการเหนี่ยวจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่ผ่านกำบังเข้ามาในสายเคเบิลได้

3.12 สายคู่บิดเกลียว (Twisted pair wire)



ภาพที่ 15 ภาคตัดขวางของสายคู่บิดเกลียว
ที่มา: Celozzi (1990)

แต่ละคู่สายที่บิดเกลียวเข้าด้วยกันสามารถจำลองเป็นวงจรทางไฟฟ้าในรูปแบบพารามิเตอร์ของสายต่อหน่วยความยาว (เมื่อแบ่งสายออกเป็นส่วนๆ) เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาและวิเคราะห์ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 พารามิเตอร์ของสายคู่บิดเกลียวแบบกระจาย
ที่มา: Chen (2003)

การส่งกำลังงานในระบบไฟฟ้ากำลัง (Power) หรือระบบทางการสื่อสาร (Communication) แบบใช้สายตัวนำจะใช้สายตัวนำเป็นมัชฌิม (ตัวกลาง) เหมือนกัน ต่างกันที่ระดับกำลังของทั้งสองระบบนี้มากน้อยไม่เท่ากันเท่านั้น

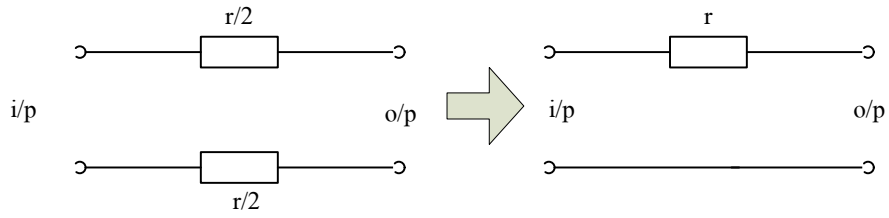
เมื่อมีการส่งพลังงานจากต้นทางไปปลายทางผ่านสายส่ง พลังงานที่ปลายทางได้รับจะมีค่าน้อยกว่าที่ส่งต้นทาง นั่นคือสายส่งทำให้พลังงานเกิดการสูญเสียซึ่งเกิดตลอดความยาว

ของสาย โดยกระจายออกไปอย่างสม่ำเสมอตลอดสายส่ง ความสูญเสียดังกล่าวเกิดจากลักษณะของสายส่งอันเนื่องมาจากตัวคงที่ของสายส่งซึ่งแบ่งได้เป็นสองแบบคือ

1. ตัวคงที่เป็นจุดหรือกลุ่มก้อน (Lumped Constants) หมายถึงการสูญเสียที่เกิดขึ้นเป็นจุด ๆ ไป เช่น ถ้าคิดความต้านทานเป็นจุดๆ ในสายส่งจะเกิดความสูญเสียขึ้นที่ จุดต่างๆ นั้นไม่สม่ำเสมอ

2. ตัวคงที่กระจาย (Distributed Constants) เป็นตัวคงที่ที่ทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า โดยสม่ำเสมอตลอดสายส่ง การสูญเสียนี้แบ่งออกได้เป็น 4 ชนิดคือ

ก) ความต้านทานอนุกรม คือค่าความต้านทานของตัวนำที่ใช้ทำสายส่งต่อหน่วยความยาวโดยใช้สัญลักษณ์ r มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω) นั่นคือความต่านทานต่อหน่วยความยาว = r โอห์ม จะได้ว่าความต้านทานของสายแต่ละเส้น = r / 2 โอห์ม ดังภาพที่ 17

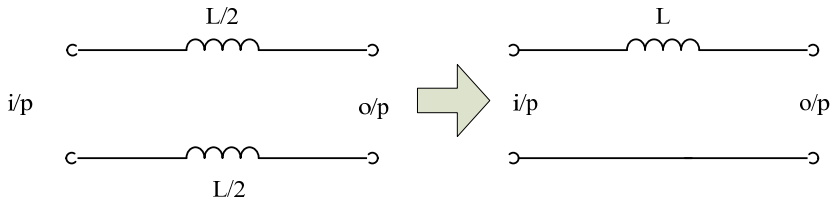


ภาพที่ 17 ความต้านทานอนุกรม

ความต้านทานรวมของสายส่งได้จากค่าความต้านทานต่อหน่วยความยาวคูณกับความยาวทั้งหมด เช่น ถ้าความต้านทานอนุกรมของสายมีค่า 10 โอห์มต่อไมล์ และสายมีความยาว 100ไมล์ ความต้านทานรวมจะมีค่าเท่ากับ 1000 โอห์ม ขนาดความต้านทานกระจายของสายส่งขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่หน้าตัดสาย และความยาว

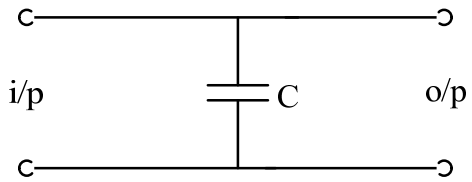
ข) ความเหนี่ยวนำอนุกรม เป็นสมบัติของวงจรที่เรียกว่า ความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self inductance) ที่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนต่อต้าน (Counter Electromotive Force) มีทิศทางตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสภายในวงจร แรงเคลื่อนนี้จะเกิดขึ้นตลอดความยาวของสายส่งนั่นคือ มีความเหนี่ยวนำอนุกรมอยู่ตลอดสายอย่างสม่ำเสมอ นิยมใช้สัญลักษณ์แทนด้วยอักษร L

และมีหน่วยเป็นเฮนรี่ ต่อหน่วยความยาว ค่าความเหนี่ยวนำรวมจะเท่ากับความเหนี่ยวนำต่อหน่วยความยาวคูณด้วยความยาวของสายส่ง การเขียนแทนด้วยวงจรจะคล้ายๆ กับความต้านทานอนุกรมของสาย พิจารณาได้ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ความเหนี่ยวนำอนุกรมแบบกระจาย

ค) ความจุไฟฟ้าระหว่างสายตัวนำ เป็นปฏิกิริยาที่เกิดระหว่างสายตัวนำสองสายที่เปรียบได้กับเป็นแผ่นเพลตและมีอากาศหรือวัสดุอื่นเป็นฉนวนกั้น (Dielectric) เขียนแทนเป็นตัวเก็บประจุขนานกับสายส่งดังภาพที่ 19 และอาจเป็นเส้นทางลัดวงจรกลับแหล่งจ่ายสัญญาณได้ ทำให้กระแสสัญญาณจากแหล่งจ่ายไปถึงปลายทางได้น้อยลง สำหรับค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุ จะหาได้จาก $Xc = 1/2\pi fC$ มีหน่วยเป็นโอห์ม ค่า C มีค่าต่ำ ๆ จะดี เพราะทำให้ส่งผ่านสัญญาณไปที่ปลายทางเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 19 ความจุขนานระหว่างสาย

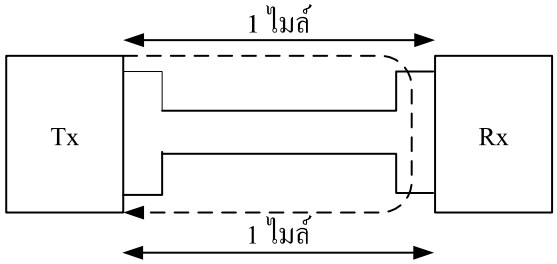
ง) ความนำระหว่างสายตัวนำ เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของฉนวนที่กั้นระหว่างตัวนำเขียนแทนด้วยความต้านทานต่อถึงกันระหว่างสาย ดังภาพที่ 16 และใช้สัญลักษณ์แทนเป็นตัวอักษร G มีค่าเป็นส่วนกลับของค่าความต้านทานมีหน่วยวัดเป็น ซีเมนต์ (Semen) บางครั้งอาจเรียกค่าความต้านทานรั่วไหล ซึ่งขึ้นกับสภาวะแวดล้อมของตัวนำ

โดยกำหนดให้ R = ความต้านทานของสายตัวนำ
L = ความเหนี่ยวนำของสายตัวนำ
G = ความนำระหว่างสายตัวนำ
C = ความจุไฟฟ้าระหว่างสายตัวนำ

พารามิเตอร์หลักเหล่านี้จะแปรตามหรือขึ้นอยู่กับความถี่ ในที่นี้แทนด้วยค่าต่อหน่วยความยาว (Per Unit Length) dx วงจรเทียบเท่าของเคเบิลสายคู่บิดเกลียวจะได้จากการนำแต่ละหน่วยความยาวดังกล่าวต่อเข้าด้วยกัน

3.13 หน่วยความยาว (Unit Length)

หน่วยความยาวหมายถึงสายส่งมีความยาว 1 วงรอบ (Loop) ดังภาพที่ 20 เป็นความยาวจริงของสายส่งตั้งแต่ต้นทางไปถึงปลายทางและกลับไปยังต้นทางนั่นคือความยาวในหนึ่งหน่วยความยาวของสายส่งซึ่งมีความยาวเป็น 2 ไมล์นั่นเอง



ภาพที่ 20 ความยาวสาย 1 วงรอบไมล์ (Loop Mile)

การพิจารณาลักษณะสมบัติของสาย จะพิจารณาจากวงจรสมมูลของสาย คลื่นการแพร่กระจายคลื่น และผลที่เกิดขึ้นทางกายภาพ

3.14 อิมพิแดนซ์อนุกรม (Series Impedance), Z

จากภาพที่ 16 อิมพิแดนซ์อนุกรม หมายถึง ผลรวมของความต้านทาน (R) กับความต้านทานไฟสลับของตัวเหนี่ยวนำ (L)

$$Z = R + j\omega L \quad \Omega/m \qquad \text{.....(12)}$$

3.15 แอดมิตแตนซ์ขนาน (Shunt Admittance: Y)

จากภาพที่ 16 แอดมิตแตนซ์ขนาน หมายถึง ผลรวมของความนำไฟฟ้า (G) กับความนำไฟฟ้าซึ่งเนื่องมาจากตัวเก็บประจุ (C) ดังสมการ

$$Y = G + j\omega C \quad S/m \qquad \text{.....(13)}$$

3.16 อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance), Z_C

อิมพีแดนซ์คุณลักษณะหาได้จากสมการ

$$Z_C = \sqrt{\frac{Z_{\text{อนุกรม}}}{Y_{\text{ขนาน}}}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad \Omega \qquad \text{.....(14)}$$

ซึ่งจะเห็นว่าค่า Z_C เป็นจำนวนเชิงซ้อน ในทางปฏิบัติเราเลือกใช้สายที่มีการสูญเสียน้อยที่สุด และหากมีการใช้งานสายในย่านความถี่วิทยุ ซึ่งเป็นย่านความถี่สูง ทำให้ความต้านทานไฟสลับของสายเนื่องจาก L มีค่ามากกว่าค่าความต้านทาน R มากๆ ($j\omega L >> R$) และความนำไฟฟ้าสลับเนื่องจากตัวเก็บประจุมีค่ามากกว่าความนำไฟฟ้าจากกระแสรั่วซึมมาก ๆ ($j\omega C >> G$) จึงประมาณให้ค่า $R = G = 0$ ดังนั้นจึงได้

$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \Omega \qquad \text{....(15)}$$

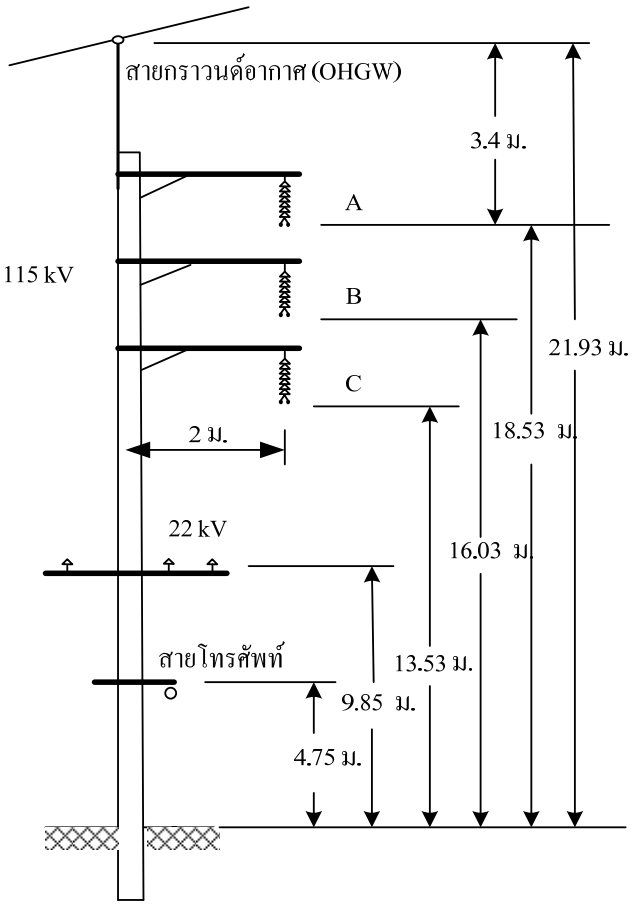
4. ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าและระบบส่งจ่ายไฟฟ้าย่อย (Transmission and Sub transmission)

สายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นส่วนที่เชื่อมจากโรงจักรไฟฟ้ากับสถานีไฟฟ้าแรงดันสูง (HV substation) ระดับแรงดันส่งจ่ายตามมาตรฐานอเมริกัน(ANSI) กำหนดมาตรฐานแรงดันระหว่างสายที่สูงกว่า 60 กิโลโวลต์ เช่น 69 **115** 138 161 230 จัดว่าเป็นระบบส่งจ่ายแรงดันสูง และที่เกินกว่า 230 กิโลโวลต์ขึ้นไป เช่น 345 500 และ 765 กิโลโวลต์ จัดว่าเป็นระบบส่งจ่ายแรงดันสูงพิเศษ (Extra–high voltage :EHV)

สำหรับระบบส่งจ่ายย่อยเป็นส่วนที่เชื่อมต่อจากสถานีไฟฟ้าแรงดันสูงไปยังสถานีย่อยของระบบจำหน่าย หรือส่งตรงไปยังผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่โดยตรงเลย โดยทั่วไปมีระดับแรงดันอยู่ระหว่าง 69 ถึง 138 กิโลโวลต์ ทำให้บางครั้งอาจสับสนระหว่างระดับแรงดันของสายส่งจ่ายและสายส่งจ่ายย่อย อย่างไรก็ตามการจ่ายกำลังไฟฟ้าในปริมาณสูงผ่านสายส่งทำให้เกิดปัญหาหลายประการ เช่น แรงดันตก กำลังงานไฟฟ้าสูญเสีย เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังต่อการกวนระบบแบบต่างๆ ในปัจจุบันจึงมีการนำอุปกรณ์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นได้มาใช้งาน (Flexible AC Transmission Systems : FACTS) แก้ปัญหาข้างต้น

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้สร้างระบบส่งจ่าย 115 กิโลโวลต์ เพื่อจ่ายให้กับสถานีไฟฟ้าย่อย 115 กิโลโวลต์ เพื่อลดกำลังงานสูญเสียในสายป้อนจำหน่าย อุปกรณ์หลักในส่วนนี้ได้แก่ ระบบสายส่ง หม้อแปลงกำลัง อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เป็นต้น

4.1 ลักษณะโครงสร้างเสาไฟฟ้าระบบแรงดัน 115 กิโลโวลต์



ภาพที่ 21 โครงสร้างระบบสายส่งไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์ และเคเบิลโทรศัพท์

4.2 สายจำหน่าย (Distribution System)

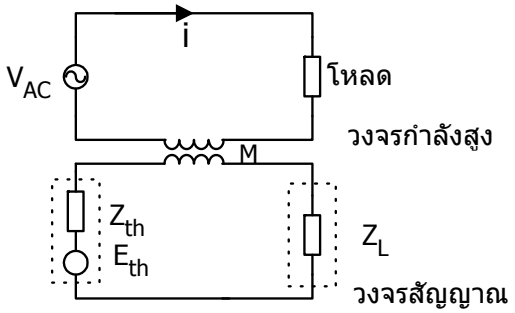
สายจำหน่ายประกอบด้วยสายส่งในระดับแรงดันปานกลางถึงแรงดันต่ำ สายป้อนจำหน่ายใช้เพื่อกระจายกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ใช้โดยตรง เป็นระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สายเป็นส่วนใหญ่ สำหรับประเทศไทยเป็นของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะมีระดับแรงดันมาตรฐานเป็น 22 กิโลโวลต์ ในการศึกษาเพื่อคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำสูงเกินในระบบโทรคมนาคมเนื่องจากระบบสายส่งไฟฟ้ากำลัง จะพิจารณาที่ระบบส่งจ่ายและส่งจ่ายย่อย ขนาดแรงดันระหว่างสาย 115 กิโลโวลต์ และระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคขนาดแรงดัน 22 กิโลโวลต์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. สายเคเบิลโทรศัพท์แบบสายคู่บิดเกลียว 25 คู่สายติดตั้งขนานไปใต้แนวสายไฟฟ้ากำลัง ระบบส่งจ่ายย่อย 115 กิโลโวลต์ และระบบ 22 กิโลโวลต์เดินคู่ขนานกัน

2. สายเคเบิลโทรศัพท์แบบสายคู่บิดเกลียว 25 คู่สายติดตั้งขนานไปในแนวสายไฟฟ้ากำลังระบบจำหน่ายระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์

4.3 กลไกการเชื่อมโยง ผ่านความเหนี่ยวนำ ความต้านทาน ความจุไฟฟ้า (Coupling Mechanisms to Parameter) (Bentley, 1976; Elmoel, 2004)

4.3.1 การเชื่องโยงผ่านความเหนี่ยวนำ (Inductive Coupling)



ภาพที่ 22 การเชื่อมโยงทางแม่เหล็กไฟฟ้า

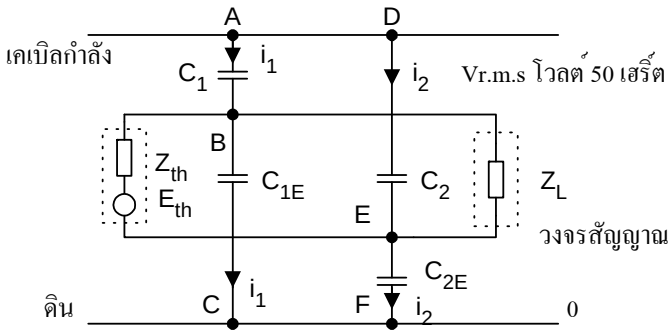
จากภาพที่ 22 แสดงการเหนี่ยวนำหรือ การเชื่อมโยงทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Coupling) ระหว่างวงจรการสื่อสาร และวงจรกำลังที่อยู่ใกล้ ๆ ถ้าวงจรใกล้กันมาก อาจเกิดความเหนี่ยวนำร่วม M ระหว่างวงจรทั้งสองที่มีขนาดมากพอ หมายความว่ากระแสสลับในวงจรกำลังจะเหนี่ยวนำแรงดันให้เกิดขึ้นในวงจรโทรศัพท์ในแบบอนุกรม มีขนาดดังนี้

$$V_{SM} = M\frac{di}{dt} \quad \text{โวลต์} \qquad (16)$$

ค่าแรงดันที่อนุกรมเข้าในวงจรการสื่อสารโดยใช้สาย V_{SM} นี้จะเป็นสัญญาณที่เพิ่มเข้าไปในสัญญาณที่ทำการสื่อสาร ความเหนี่ยวนำร่วม M จะขึ้นกับลักษณะทางเรขาคณิตของวงจรทั้งสองที่กล่าวคือขึ้นกับระยะของช่วงทับซ้อน และระยะห่างแยกจากกัน แต่จะมีการกระจาย

ตลอดระยะของวงจรมากกว่าเป็นกลุ่มก้อน (Lumped) ตามที่เทียบเคียงในวงจรตามภาพที่ 24 และการเชื่อมโยงความเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นได้แม้ว่าวงจรจะมีการแยกดิน (Earth) จากกันอย่างเด็ดขาดก็ตาม

4.3.2 การเชื่อมโยงแบบความจุ (Capacitive Coupling) กลไกการเชื่อมโยงที่สำคัญอีกอย่างคือ ความจุ หรือ การเชื่อมโยงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Coupling) ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 23 วงจรการสื่อสารอยู่ใกล้กับสายจ่ายกำลังไฟฟ้าสลับ ขนาดแรงดันซึ่งมีระดับแรงดันต่างๆ นิยมระบุเป็นค่าแรงดันใช้งาน (rms) เทียบกับดิน สายไฟสัญญาณ และสายดิน ต่างก็เป็นตัวนำไฟฟ้า จึงทำให้เกิดเป็นความจุระหว่างสายกำลังและสายสัญญาณ ตลอดจนถึงความจุระหว่างสายสัญญาณและสายดิน



ภาพที่ 23 การเชื่อมโยงทางสนามไฟฟ้า

โดยที่ค่าความจุนี้จะกระจายอยู่โดยตลอดวงจรการสื่อสาร ในที่นี้แสดงเป็นกลุ่มเทียบเท่าคือค่า C_1 และ C_2 เป็นความจุระหว่างสายกำลังและสายสัญญาณ ส่วน C_{1E} และ C_{2E} แทนความจุระหว่างสายโทรคมนาคมกับดิน ความจุทั้งสี่ส่วนจะเป็นสัดส่วนกับระยะของวงจรการสื่อสาร ซึ่งอาจมีระยะความยาวต่างๆ เมื่อไม่คิดแรงดัน E_{th} ของสัญญาณ แรงดันที่จุด B และ E หาได้จากการแบ่งแรงดันในส่วน ABC และ DEF

$$V_B = \text{ขนาดแรงดัน r.m.s} \left[\frac{1/(j\omega C_{1E})}{1/(j\omega C_1) + 1/(j\omega C_{1E})} \right]$$

$$= \text{ขนาดแรงดัน}_{r.m.s}\left[\frac{\dfrac{1}{(j\omega C_{1E})}}{\dfrac{(j\omega C_1)+(j\omega C_{1E})}{(j\omega C_1)(j\omega C_{1E})}}\right]$$

$$= V_{r.m.s.}\frac{1}{(j\omega C_{1E})}\cdot\frac{(j\omega C_1)(j\omega C_{1E})}{(j\omega C_1)(j\omega C_{1E})} = V_{r.m.s.}\frac{C_1}{C_1+C_{1E}}$$

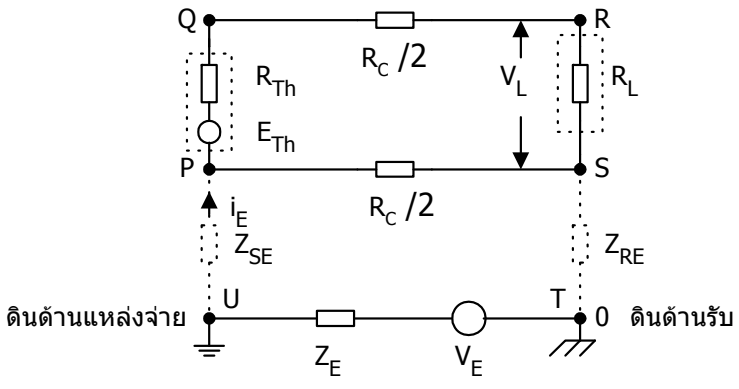
ทำนองเดียวกัน

$$V_E = V_{r.m.s}\left[\frac{1/(j\omega C_{2E})}{1/(j\omega C_2)+1/(j\omega C_{2E})}\right]$$

$$= V_{r.m.s}\frac{C_2}{C_2+C_{2E}} \qquad (17)$$

ดังนั้นแรงดันการรบกวนในแบบอนุกรมจะเป็นศูนย์เมื่อ ความจุเชื่อมโยง $C_1 = C_2$ และ $C_{1E} = C_{2E}$ แต่ในทางปฏิบัติจะเกิดความไม่สมดุลเนื่องจากมีระยะห่างระหว่างสายสัญญาณ และสายเคเบิลกำลังกับดินที่มีความแตกต่างกันเล็กน้อย และถ้าหากมีการใช้สายที่มีกำบัง และกำบังมีการต่อลงดินก็จะลดผลการเชื่อมโยงเนื่องจากความจุไปได้บ้าง

4.3.3 ระบบที่มีจุดต่อลงดินมากกว่าหนึ่งแห่ง (Multiple Earths) (Bentley, 1989)



ภาพที่ 24 จุดต่อลงดินมากกว่าหนึ่งแห่ง

ในหัวข้อที่ผ่านมาหากเราสมมติให้ดินมีค่าแรงดันเป็นศูนย์ (0) ที่ทุก ๆ จุด บริภัณฑ์ไฟฟ้าที่ใช้กำลังมาก ๆ กระแสที่ไหลผ่านดินก็จะมากด้วยทำให้เกิดแรงดันแตกต่างขึ้นในแต่ละจุด ถ้าวงจรแยกออกจากดินโดยเด็ดขาดก็จะไม่มีปัญหา แต่ในทางปฏิบัติอาจมีการรั่วไหลที่เป็นเส้นทางต่อเชื่อมส่วนของแหล่งจ่ายสัญญาณกับดิน และทางด้านปลายทางที่ห่างออกไปก็เช่นกัน ทำให้มีจุดต่อลงดินได้ที่ระยะห่างกัน ถ้าทั้งสองจุดมีแรงดันแตกต่างกันจะทำให้เกิดแรงดันโหมดร่วม และแรงดันโหมดผลต่างขึ้นในวงจรโทรคมนาคม ภาพที่ 26 แสดงปัญหาของระบบที่มี**การต่อลงดินหลายจุด** เนื่องจากแหล่งกำเนิดสัญญาณโทรคมนาคม E_{Th} ต่อผ่านสายที่มีความต้านทานไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณปลายทางซึ่งแทนด้วยโหลดความต้านทาน R_L การจัดให้ $R_L >> R_C + R_{Th}$ ทำให้สามารถที่จะไม่คิดค่ากระแสที่ไหลในวง PQRS ได้ และทำให้ $V_L \approx E_{Th}$ โดยต้องจัดให้วงจรแยกออกจากดินอย่างเด็ดขาด อย่างไรก็ตามอิมพีแดนซ์รั่วไหล Z_{SE} และ Z_{RE} ของแหล่งจ่ายกับดินและอุปกรณ์ปลายทางกับดินก็ยังคงมีอยู่ ถ้าแทน V_E เป็นแรงดันแตกต่างระหว่างแหล่งจ่ายกับดินและอุปกรณ์ปลายทางกับดินแล้วจะสามารถหาค่ากระแส i_E ที่ไหลในวงจร UPST ได้จากสมการ

$$i_E = \frac{V_E}{Z_E + Z_{SE} + (R_C/2) + Z_{RE}} \qquad (18)$$

ดังนั้น

แรงดันที่จุด P $= V_E - i_E(Z_E+Z_{SE})$

แรงดันที่จุด Q, R $= V_E - i_E(Z_E+Z_{SE}) + E_{Th}$

แรงดันที่จุด S $= i_E Z_{RE}$

นั่นคือแรงดันที่เข้ามาแบบโหมดร่วมจะได้เป็น

$$V_{CM} = V_S = V_E \frac{Z_{RE}}{Z_E + Z_{SE} + (R_C/2) + Z_{RE}} \qquad (19)$$

เมื่อต้องการหาแรงดันลบที่เข้ามาแบบผลต่างที่อนุกรมเข้ามาเราจะคำนวณค่าแรงดันคร่อมโหลด R_L ได้จากสมการ

$$V_L = V_R - V_S = V_E - i_E(Z_E + Z_{SE} + Z_{RE}) + E_{Th}$$
$$= E_{Th} + i_E R_C/2$$

นั่นคือ แรงดันที่เข้ามาแบบโหมดผลต่างจะเป็น

$$V_{SM} = V_E \frac{R_C / 2}{Z_E + Z_{SE} + (R_C / 2) + Z_{RE}} \quad (20)$$

ในทางทฤษฎีเราต้องการให้ทั้ง Z_{SE} และ Z_{RE} มีค่ามากเท่าที่จะทำได้เพื่อให้กระแส i_E และ V_{SM} มีค่าน้อยที่สุด แต่การประยุกต์ใช้ในงานจริงอาจทำไม่ได้เสมอไป ตัวอย่างง่าย ๆ เช่น การติดตั้งสายโทรคมนาคม โดยที่ตัวชิลด์ป้องกันถูกยึดด้วยสลักเข้ากับโลหะหรือส่วนที่ต่อกับจุดดิน นั่นคือ Z_{SE} จะมีค่าน้อยมากและอาจประมาณให้ค่า Z_{SE} มีค่าต่ำๆ เช่น 10 โอห์ม ดังนั้นต้องแยกอุปกรณ์ด้านรับสัญญาณปลายทางออกจากจุดดินเพื่อให้ V_{SM} มีค่าต่ำ เป็นต้น

กรณีแย่ที่สุดคือเมื่ออุปกรณ์ด้านรับมีการต่อกับดินโดยตรง นั่นคือค่า $Z_{RE} \approx 0$ จะมีทำให้มีค่าแรงดัน V_{SM} ได้ ดังนั้นถ้าวงจรสายโทรศัพท์ต้องต่อกับดิน ให้ทำการต่อเพียงจุดเดียวเท่านั้น

5. การคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำ (Calculation of the induced voltages)

กระแสที่ไหลในตัวนำทั้งในภาวะปกติและภาวะฟอลต์จะทำให้เกิดมีแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในสายเคเบิลที่อยู่ใกล้เคียง ดังนั้นต้องมีการตรวจสอบให้มีค่าไม่เกินค่าที่ปลอดภัย นอกจากนี้กระแสฟอลต์ในดินจะไหลผ่านตัวนำดินและเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันบนตัวนำอื่นด้วย ดังนั้นต้องทราบข้อมูลที่จำเป็นขณะอยู่ในขั้นการออกแบบคือ

- ตัวนำเฟส ตัวนำดิน และอิมพีแดนซ์ของเสา
- มิติและระยะห่างของเสา
- กระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าย่อย
- อิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างตัวนำเฟสและเคเบิลของระบบโทรคมนาคม
- อิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างตัวนำสายดินและเคเบิลของระบบโทรคมนาคม

จากนั้นนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์เพื่อคำนวณให้ทราบค่าแรงดันเหนี่ยวนำ กระแสในตัวนำดินก็สามารถนำมาคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำได้เหมือนกันกับตัวนำเฟส อย่างไรก็ตาม กระแสในสายตัวนำสายดินจะลดลงที่เสาที่เกิดฟอลต์ซึ่งยอมให้กระแสไหลกลับไปยังดินผ่านสายกราวนด์ของเสานั่นเอง

แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเป็นผลต่างระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำโดยตัวนำเฟสที่เกิดฟอลต์และสายดิน ค่าแรงดันเหนี่ยวนำคำนวณได้โดยใช้สมการ (Dean sharafi :Western Power)

$$V = M \ell I \, sf \qquad (21)$$

เมื่อ V = แรงดันเหนี่ยวนำ

M = อิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำร่วมต่อหน่วยความยาว (โอห์ม/กิโลเมตร)

ℓ = ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับโทรคมนาคมเคเบิล (กิโลเมตร)

I = กระแสลัดวงจร (A)

sf = แฟคเตอร์การกำบัง (shielding factor = 1 เมื่อไม่มีกำบัง)

กำหนดให้อิมพีแดนซ์ร่วมของสองวงจรที่ขนานกันและมีสายดินกลับ เป็นดังสมการ

$$M = 2\pi f \left| \ln\left(1 + \frac{6\times10^{5}}{d^{2} f}\rho \right) \right| \times 10^{-4} \quad \text{โอห์ม / กิโลเมตร} \qquad (22)$$

เมื่อ d = ระยะแยกห่างระหว่างสายดินกลับและวงจร (เมตร)

ρ = ความต้านทานดิน (โอห์ม–เมตร)

f = ความถี่ของระบบ (Hz)

ตารางที่ 8 ขนาดแรงดันเหนี่ยวนำที่ยอมให้มีได้ในสายโทรคมนาคม (ITU–K.33)

Induced duration t(s)	**Induced voltage U_3 (Vrms)**
$t < 0.1$	430
$0.1 \leq t \leq 1$	300
Note – U_3 has been derived from Recommendation K.33 for severe situation.	

6. วิธีการลดผลของการรบกวนและการแทรกสอด

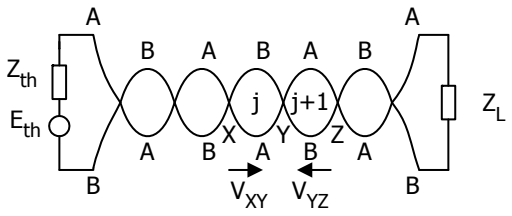
(Methods of Reducing Effect of Noise and Interference)

6.1 การแยกทางกายภาพ (Physical Separation)

โดยที่ความเชื่อมโยงจากค่าความเหนี่ยวนำร่วม และค่าความจุระหว่างวงจรสายโทรศัพท์และวงจรกำลัง เป็นส่วนกลับกับระยะห่างของวงจร เราจะลดผลการรบกวนได้โดยการแยกวงจรออกจากกันให้ห่างกันมากเท่าที่จะเป็นไปได้ ก็จะสามารถลดผลของการรบกวนดังกล่าวได้ (Bentley, 1989)

6.2 การกำบังแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Shielding)

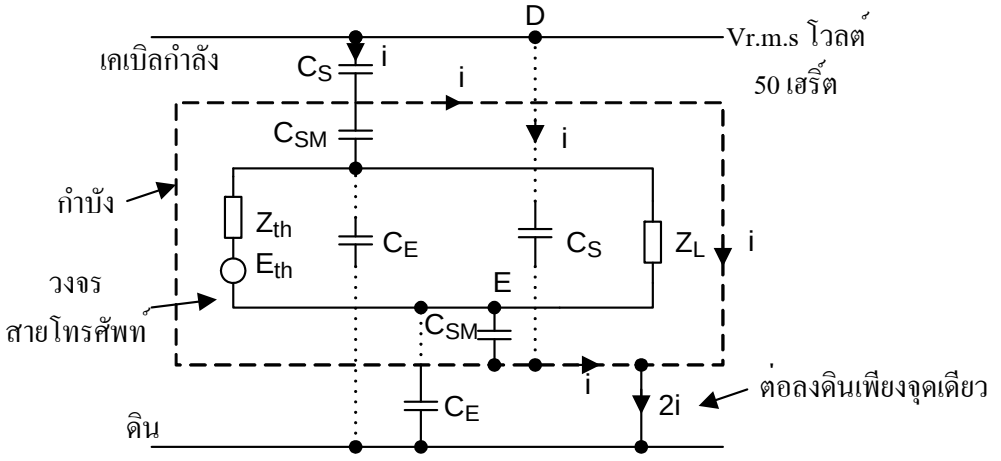
เป็นวิธีที่ง่ายในการลดผลของ การเชื่อมโยงด้วยการเหนี่ยวนำกับแหล่งรบกวนสัญญาณภายนอก ดังแสดงในภาพที่ 25 ตัวนำ A(Tip) และ B(Ring) ของวงจรสายโทรศัพท์ถูกบิดเป็นเกลียวเป็นลูปที่มีพื้นที่ประมาณเท่ากัน เรียกว่าสายคู่บิดเกลียว (Twisted Pairs) ขนาดของแรงดันที่เหนี่ยวนำเข้ามาในแต่ละลูปเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ของลูปและอัตราการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กภายนอก เครื่องหมายของแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นกับทิศทางของตัวนำ A และ B ดังนั้นถ้าแรงดัน V_{XY} ถูกเหนี่ยวนำขึ้นในลูป j ระหว่างจุด X และ Y แล้วแรงดันตรงข้าม V_{YZ} ถูกเหนี่ยวนำในลูป j+1 ระหว่างจุด Y และ Z ในเชิงทฤษฎีลูปทั้งสองจะมีลักษณะเหมือนกันทำให้ขนาดของสนามแม่เหล็กเท่ากัน ดังนั้น $|V_{XY}| = |V_{YZ}|$ นั่นคือแรงดันเหนี่ยวนำระหว่างจุด X และ Y เป็นศูนย์และเป็นแบบเดียวกันตลอดความยาวของสายคู่บิดเกลียว ทำให้แรงดันที่เกิดขึ้นถูกกำจัดหมดไป



ภาพที่ 25 การลดการเชื่อมโยงทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้สายคู่บิดเกลียว

6.3 การกันสนามไฟฟ้าและการกำบัง (Electrostatic Screening and Shielding)

วิธีที่ดี คือ การหลีกเลี่ยงปัญหาจากการเชื่อมโยงทางความจุไฟฟ้ากับวงจรกำลัง โดยการปิดหุ้มทางเข้าของส่วนที่ต้องการป้องกันโดยใช้โลหะกำบังป้องกัน ภาพที่ 26 เป็นการจัดป้องกันเชิงทฤษฎี ตัวกำบังต่อเข้ากับดินเพียงจุดเดียวโดยตรงอาจเป็นที่ตำแหน่งด้านแหล่งจ่ายสัญญาณหรือด้านรับสัญญาณและไม่มีการเชื่อมต่อระหว่างตัวกำบังกับวงจรโทรคมนาคม เพื่อให้มีเฉพาะเส้นทางรั่วไหลที่มีอิมพีแดนซ์สูง (ค่าความจุ C_{SM}) เท่านั้น ตัวกำบังจะทำให้อิมพีแดนซ์ของทางผ่านกระแสที่ไม่ต้องการ i มีค่าต่ำ (ไหลผ่าน C_{SM} และ C_E ไปยังดิน) จัดเป็นการลดแรงดันแบบอนุกรมและโหมดร่วมลงนั่นเอง



ภาพที่ 26 การจัดกำบังทางทฤษฎีหรืออุดมคติ

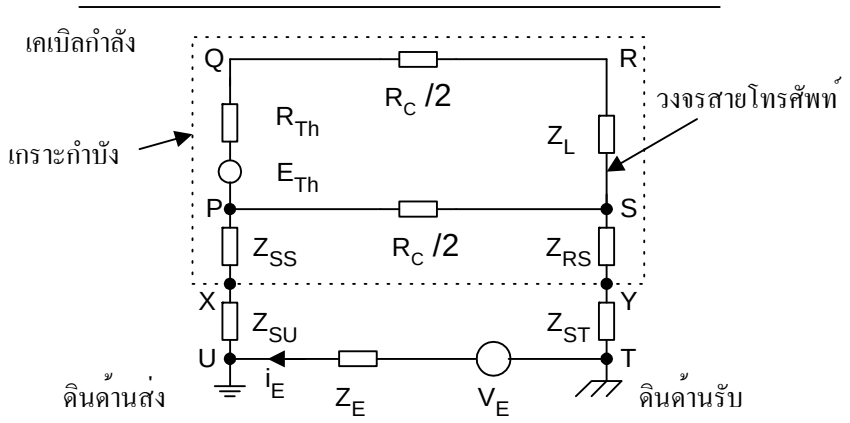
ที่มา: Elmore (2004)

จากที่กล่าวข้างต้นการที่จะป้องกันหรือแยกวงจรการสื่อสารออกจากกำบัง และการต่อลงดินของกำบังเพียงจุดเดียวเท่านั้นในทางปฏิบัติ ทำได้ยาก เนื่องจากเหตุผลต่อไปนี้

ก) แหล่งจ่ายสัญญาณอาจต่อลงดินโดยตรงโดยผ่านโครงสร้างที่ติดตั้งอยู่

ข) อุปกรณ์ปลายทางอาจมีการต่อลงดิน เช่น ระบบที่ใช้คอมพิวเตอร์ เมื่ออุปกรณ์ด้านรับสัญญาณต้องต่อกับดินของคอมพิวเตอร์โดยตรง

ค) อาจมีการต่อโดยทางอ้อมผ่านอิมพีแดนซ์รั่วไหล



ภาพที่ 27 วงจรเทียบเท่าทางปฏิบัติในการลดการเชื่อมโยงทางสนามไฟฟ้า

ภาพที่ 27 แสดงให้เห็นปัญหาการจัดวงจร PQRS ต่อกับกำบังผ่านอิมพีแดนซ์ Z_{SS} และอิมพีแดนซ์ Z_{RS} ด้านปลายทางของเกราะกำบัง และเกราะกำบังต่อกับจุดดิน U ของด้านส่งสัญญาณผ่าน Z_{SU} และจุดดินด้านรับสัญญาณที่ T ผ่านทางอิมพีแดนซ์ Z_{ST}

วงจรโทรศัพท์ได้รับผลจากแรงดันที่เข้ามาทั้งจาก V_E (แรงดันแตกต่างระหว่างจุด U และ T) และวงจรส่งกำลังที่อยู่ใกล้ๆ สามารถวิเคราะห์วงจรได้เช่นเดียวกับหัวข้อกลไกการเชื่อมโยง ซึ่งเขียนสมการสำหรับหาค่าแรงดันที่เข้ามาแบบโหมดร่วม และแบบอนุกรมที่เกิดจาก V_E ได้ดังนี้

$$V_{CM} = V_E \frac{Z_{RS} + Z_{ST}}{Z_E + Z_{SU} + Z_{SS} + R_C/2 + Z_{RS} + Z_{ST}} \qquad (23)$$

$$V_{SM} = V_E \frac{R_C/2}{Z_E + Z_{SU} + Z_{SS} + R_C/2 + Z_{RS} + Z_{ST}} \qquad (24)$$

นอกจากนี้ในการคำนวณหาค่าเพื่อสร้างเป็นแบบจำลองสำหรับช่วยให้เข้าใจถึงการเกิดในเชิงทฤษฎีจะต้องทราบความหนาของฉนวนที่ใช้หุ้มตัวนำเพื่อนำไปสู่การคิดระยะห่างระหว่างตัวนำของคู่สายทำให้สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างคู่สายกับคู่สาย และระหว่างคู่สายกับระบบไฟฟ้ากำลัง จะทำให้สามารถประมาณค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดในคู่สายโทรศัพท์เนื่องมาจากระบบไฟฟ้ากำลังทั้งในภาวะปกติ และภาวะที่ผิดปกติ เช่น มีฟอลต์ หรือมีการสับสวิตช์ต่างๆ (ปลดหรือเพิ่มโหลด) เกิดขึ้น เมื่อทราบค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่ทำให้เกิดแรงดันสูงเกินแล้วจะทำให้สามารถนำไปประกอบการพิจารณาเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันให้มีพิกัดที่เหมาะสมกับวงจรที่ต้องการป้องกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7. แรงดันไฟฟ้าสูงเกินชั่วครู่ในระบบสายส่ง

7.1 แรงดันไฟฟ้าสูงเกิน (Overvoltages) นิยามตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159–1995 คือการเพิ่มสูงขึ้นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ที่ความถี่กำลังไฟฟ้ามีขนาดตั้งแต่ 1.1 ถึง 1.2 pu ของค่าปกติ โดยมีช่วงเวลาการเกิดขึ้นนานมากกว่า 1 นาที

การเกิดแรงดันเกินชั่วครู่ (Transient Overvoltage) หรือแรงดันเสิร์จในระบบสายส่งอาจเกิดจากสาเหตุภายนอกระบบ เช่น การเกิดฟ้าปรากฏการณ์ฟ้าผ่าซึ่งถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะที่มีความรุนแรงซึ่งผลกระทบจากฟ้าผ่าต่อระบบได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม ถ้าหากกระแสฟ้าผ่าได้ดิสชาร์จลงสู่สายตัวนำ เช่น สายจ่ายกำลังไฟฟ้า สายตัวนำทางด้านสัญญาณ ซึ่งสายตัวนำต่างๆ เหล่านี้ถือเป็นระบบๆ หนึ่งเมื่อสายตัวนำเหล่านี้ได้รับการดิสชาร์จเข้ามาของกระแสฟ้าผ่าซึ่งเป็นสัญญาณในลักษณะอิมพัลส์ส่งผลให้ค่าขนาดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและค่าความถี่ในช่วงเวลาที่สายตัวนำมีการตอบสนอง เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมที่ควรจะเป็น นั่นคือมีค่าขนาดของแรงดันสูงขึ้น ค่าขนาดกระแสสูงขึ้น ค่าความถี่มีสูงขึ้น ตลอดถึงลักษณะของรูปคลื่นมีความผิดแปลกไปจากที่ควรจะเป็น หรืออาจเกิดจากสาเหตุภายในระบบคือ การสวิตชิ่ง (switching operation) ผลของการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะในระบบสายส่ง อาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งติดตั้งในระบบได้รับความเสียหาย เนื่องจากแรงดันเกินชั่วครู่นี้จะทำลายสภาพฉนวนของอุปกรณ์เหล่านั้น ดังนั้นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จะติดตั้งในระบบไฟฟ้ากำลังจึงต้องได้รับการทดสอบสภาพฉนวนก่อนการทดสอบสภาพฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแบ่งเป็น 3 ลักษณะคือ

1) การทดสอบแรงดันเกินที่ความถี่ของระบบ เป็นการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันเกินที่ความถี่ของระบบ ระดับแรงดันที่จะทดสอบขึ้นอยู่กับมาตรฐานโดยพิจารณาระดับแรงดันของระบบที่จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านั้น

2) การทดสอบแรงดันอิมพัลส์ (BIL) เป็นการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดัน อิมพัลส์ซึ่งมีลักษณะเดียวกับแรงดันที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

3) การทดสอบแรงดันเสิร์จสวิตชิ่ง (SIL) เป็นการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันเสิร์จที่เกิดจากการทำการสวิตชิ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง

สำหรับระบบสายส่งที่มีระดับแรงดันต่ำกว่า 230 kV แรงดันเกินชั่วขณะที่มีผลต่อสภาพฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าคือแรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ส่วนระบบส่งที่มีระดับแรงดันระหว่าง 230 kV ถึง 700 kV แรงดันเกินชั่วครู่ที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าและการสวิตชิ่งจะมีผลต่อสภาพฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งคู่ ส่วนระบบส่งที่มีระดับแรงดันเกิน 700 kV แรงดันเกินชั่วครู่ที่เกิดจากการสวิตชิ่งเท่านั้นที่ผลต่อสภาพฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า

การป้องกันสายส่งเหนือดิน (Overhead ground wire) จากผลของปรากฏการณ์ฟ้าผ่านั้น จะใช้สายดิน (ground wire) โดยทำการติดตั้งเหนือสายส่ง ขอบเขตของการป้องกันจะเท่ากับส่วนที่มีมุม 60 องศา สายดินที่ติดตั้งเหนือสายส่งจะถูกต่อลงดิน ดังนั้นเมื่อเกิดฟ้าผ่าลงสายดินกระแสฟ้าผ่าชั่วขณะที่เกิดขึ้นจะไหลลงดินอย่างรวดเร็ว ทำให้เมื่อฟ้าผ่าเกิดขึ้นในระบบส่งจะไม่ผ่าลง สายส่งโดยตรง แต่ก็อาจเกิดแรงดันเกินชั่วครู่ในสายส่งอันเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำร่วมทางแม่เหล็กระหว่างสายดินกับสายส่งได้

ในขณะที่เกิดแรงดันเกินชั่วขณะในระบบสายส่ง ซึ่งไม่ว่าจะเกิดจากฟ้าผ่าหรือการสวิตชิ่งก็ตาม แรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นอาจอธิบายได้ในลักษณะของคลื่นจร ซึ่งประกอบด้วยคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนที่เคลื่อนที่ไปในสายส่ง ซึ่งอาจทำให้แรงดันที่ด้านปลายของสายส่งทั้งสองด้านมีขนาดเกินจากปกติมาก ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ที่ติดตั้งที่ปลายทั้งสองด้านของสายส่ง การป้องกันอันตรายนี้ทำได้โดยใช้กับดักฟ้าผ่า (Lightning arrester) โดยติดตั้งที่ปลายทั้งสองด้านของสายส่ง โดยกับดักฟ้าผ่าจะใช้เป็นทางผ่านลงดินของแรงดันและกระแสเกินชั่วขณะที่เกิดขึ้น ทำนองเดียวกันในระบบโทรคมนาคมเช่นสายโทรศัพท์ที่ติดตั้งขนานไปกับระบบไฟฟ้ากำลังก็จะมีค่าแรงดันและกระแสสูงเกินในสายตัวนำได้ด้วย

กระบวนการลดทอนค่าแรงดันเสิร์จ (Surge Voltage) เราสามารถนำวัสดุประเภท Surge Suppression (TVSS) เข้ามาใช้งานได้ โดยการทำงานของวัสดุเหล่านี้จำเป็นจะต้องอาศัยค่าความต้านทานหรืออิมพีแดนซ์ของระบบกราวนด์ที่มีค่าต่ำ เพื่อสามารถระบายกระแสไฟกระโชกให้สูญสลายไปในดินได้เร็วที่สุด และไม่ก่อให้เกิดค่าศักย์ไฟฟ้าปรากฏตกคร่อมที่ระบบกราวนด์ (ผิวดิน) มากเกินไป แต่ถ้าเป็นตรงกันข้ามหากค่าความต้านทานหรืออิมพีแดนซ์ของระบบกราวนด์มีค่าสูงนั่นย่อมหมายถึงการสูญสลายไปของกระแสไฟเสิร์จต้องใช้เวลาที่มากขึ้น จะก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะหรือศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งปรากฏขึ้นที่ระบบกราวนด์ หรือที่เรียกว่า Earth Potential Rise หรือ Ground Potential Rise ซึ่งเกิดจากผลคูณระหว่างค่ากระแสเสิร์จที่ไหลลงสู่ระบบกราวนด์กับค่าความต้านทานหรืออิมพีแดนซ์ของระบบกราวนด์

ตารางที่ 9 ชนิดและลักษณะสมบัติของปรากฏการณ์ของแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

Categories	Typical spectral content	Typical Duration	Typical voltage magnitude
1.0 Transients			
1.1 Impulsive			
1.1.1 Nanosecond	5 – ns rise	< 50 ns	
1.1.2 Microsecond	1 – μs rise	50 ns – 1 ms	
1.1.3 Millisecond	0.1 – ms rise	> 1 ms	
1.2 Oscillatory			
1.2.1 Low frequency	< 5 kHz	0.3 – 50 ms	0 – 4 pu
1.2.2 Medium frequency	5 – 500 kHz	20 μs	0 – 8 pu
1.2.3 high frequency	0.5 – 5 MHz	5 μs	0 – 4 pu
2.0 Short – duration variations			
2.1 Instantaneous			
2.1.1 Interruption		0.5 – 30 cycles	< 0.1 pu
2.1.2 Sag (dip)		0.5 – 30 cycles	0.1 – 0.9 pu
2.1.3 Swell		0.5 – 30 cycles	1.1 – 1.8 pu

ตารางที่ 9 (ต่อ)

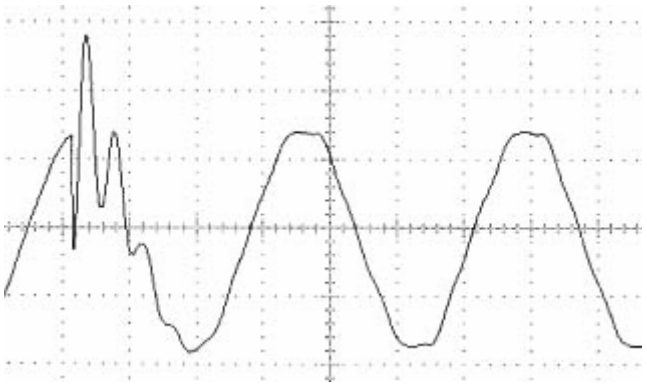
	Categories	Typical spectral content	Typical Duration	Typical voltage magnitude
2.2	Momentary			
	2.2.1 Interruption		30 cycles – 3s	< 0.1 pu
	2.2.2 Sag (dip)		30 cycles – 3 s	0.1 – 0.9 pu
	2.2.3 Swell		30 cycles – 3 s	1.1 – 1.4 pu
2.3	Temporary			
	2.3.1 Interruption		3 s – 1 min	< 0.1 pu
	2.3.2 Sag (dip)		3 s – 1 min	0.1 – 0.9 pu
	2.3.3 Swell		3 s – 1 min	1.1 – 1.2 pu
3.0	Long – duration variations			
3.1	Interruption, sustained		> 1 min	0.0 pu
3.2	Undervoltages		> 1 min	0.8 – 0.9 pu
3.3	Overvoltages		> 1 min	1.1 – 1.2 pu
4.0	Voltage unbalance		Steady state	0.5 – 2%
5.0	Waveform distortion			
	5.1 DC offset		Steady state	0 – 0.1%
	5.2 Harmonics	$0 – 100^{th}$ harmonic	Steady state	0 – 20%
	5.3 Inter harmonics	0 – 6 kHz	Steady state	0 – 2%
	5.4 Notching		Steady state	
	5.5 Noise	Broadband	Steady state	0 – 1%
6.0	Voltage fluctuations	< 25 Hz	Intermittent	0.1 – 7%
7.0	Power frequency variations		< 10 s	0.2 – 2 Pst

หมายเหตุ: s – second, ns = nanosecond, μs = microsecond, ms = millisecond, kHz = kilohertz, MHz = megahertz, min = minute, pu = per unit.

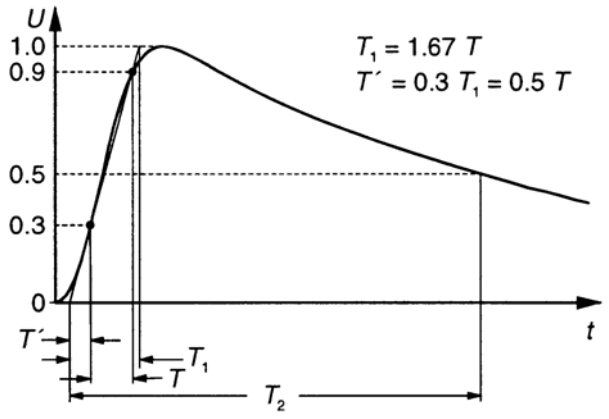
ที่มา: Dugan (2002)

7.2 เสิร์จ (Surge)

ความหมายของ “เสิร์จ (Surge)” หมายถึง ความเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าชั่วคราวซึ่งสิ่งที่เปลี่ยนแปลงไปก็คือ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า หรือ ความถี่ และเนื่องจากเป็นปรากฏการณ์ชั่วขณะจึงหมายถึง รูปลักษณะที่ปรากฏเป็นพัลส์แคบๆ (Short Duration Pules) ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นกับสายจ่ายไฟฟ้าจึงเกิดในลักษณะที่ผสมรวม (Superimposing) ไปบนรูปคลื่นไซน์ของไฟกระแสสลับปกติโดยที่อาจเกิดขึ้นในลักษณะไฟลบหรือไฟ บวก ดังตัวอย่างในภาพที่ 28 บางแห่งนิยมเรียกอีกชื่อหนึ่งคือ ไฟกระโชก ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นจะก่อให้เกิดสภาพของแรงดันเกินแบบทันทีทันใดขึ้นกับระบบไฟฟ้าเสิร์จอาจมีขนาดเป็น**สองถึงสามเท่า**ของ แรงดันไฟฟ้าปกติหรืออาจสูงถึงหลายสิบเท่าในช่วงเวลาสั้นๆ เพียง 0.5 ไมโครวินาที ไปจนถึงหลายมิลลิวินาที ลักษณะที่เกิดนอกจากเป็นพัลส์เดียวเดี่ยวๆ แล้วก็อาจเกิดลักษณะหลายพัลส์ต่อ เนื่อง (Multipulse) หรือแบบออสซิลเลชั่นพัลส์ (Oscillation Pulse) ได้ด้วย แหล่งกำเนิดหลักๆ ของเสิร์จทางสายจ่ายกำลังไฟฟ้าก็คือ ฟ้าผ่า (Lightning Surge)



ภาพที่ 28 คลื่นไฟฟ้าที่มีเสิร์จปรากฏอยู่ด้วยเป็นช่วงสั้นๆ



ภาพที่ 29 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs
ที่มา: IEEE (1991)

จากภาพที่ 29 แสดงรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าซึ่งมีความชันหน้าคลื่นสูงมาก และช่วงเวลาการลดลงจะมีอัตราการลดลงนานกว่าความชันหน้าคลื่น แรงดันและกระแสฟ้าผ่าโดยทั่วไปถูกอธิบายด้วยช่วงเวลาหน้าคลื่น และช่วงเวลาหลังคลื่น คือ

ช่วงเวลาหน้าคลื่น โดยเริ่มจากศูนย์ที่แท้จริง(ความชันเดียวกัน) จนถึงค่าสูงสุด แสดงด้วย T_1

ช่วงเวลาหลังคลื่น โดยเริ่มจากศูนย์ที่แท้จริง(ความชันเดียวกัน) จนถึงค่าที่รูปคลื่นลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด แสดงด้วย T_2

“เสิร์จ (Surge)” หรือบางครั้งอาจเรียกว่าไฟกระโชก ในทางไฟฟ้าหมายถึงการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าชั่วคราวซึ่งสิ่งที่เปลี่ยนแปลงไปก็คือ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า หรือ ความถี่ และเนื่องจากเป็นปรากฏการณ์ชั่วขณะจึงหมายถึง รูปลักษณะที่ปรากฏเป็นพัลซ์แคบๆ (Short Duration Pulse) เมื่อเกิดขึ้นกับสายจ่ายไฟฟ้าจะเกิดในลักษณะที่ผสมรวม (Superimposing) ไปบนรูปคลื่นไซน์ของไฟกระแสสลับปกติ

ไฟกระโชกมีลักษณะเป็นแรงดันไฟฟ้าสูงเกินชั่วขณะ มีช่วงเวลาการเกิดขึ้นในย่านเวลา1/1,000,000 วินาที หรือ ไมโครวินาที พารามิเตอร์ของไฟกระโชกสำคัญที่สร้างความเสียหายให้เกิดขึ้นกับเครื่องใช้ไฟฟ้า–อิเล็กทรอนิกส์ หรืออุปกรณ์ที่เปราะบางได้แก่

ก) ค่าขนาดของไฟกระโชก ซึ่งจะหมายถึง ขนาดค่าแรงดัน หรือค่ากระแสของไฟกระโชก

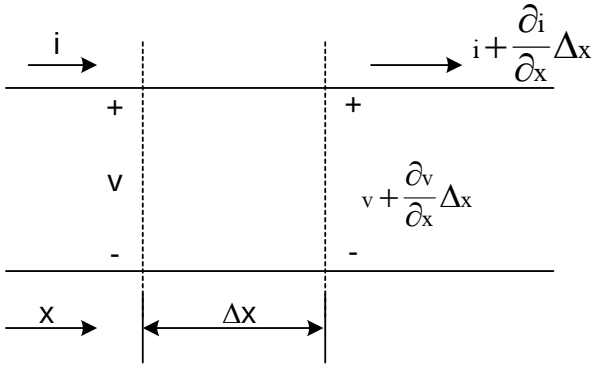
ข) ค่าความชันหน้าคลื่นของไฟกระโชก หรือ ค่า dv/dt

ค่าความชันหน้าคลื่นของไฟกระโชกจะสร้างความเสียหายหรือทำให้เสื่อมสภาพกับวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอาจจะไม่มีรอยไหม้ดำเหมือนกับความเสียหายที่เกิดจากพารามิเตอร์ที่มีค่าเป็นขนาดของไฟกระโชก (วัฒนา, 2551)

7.3 สมการคลื่นจร

เนื่องจากลักษณะของแรงดันและกระแสสูงเกินชั่วขณะที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งสามารถอธิบายได้ในลักษณะของคลื่นจร จึงจะกล่าวถึงคลื่นจรในสายส่งแต่การวิเคราะห์คลื่นจรในสายส่งเป็นเรื่องยุ่งยากพอสมควร เพื่อความสะดวกจึงจะกล่าวเฉพาะกรณีสายส่งไม่มีการสูญเสีย (โดยแท้จริงแล้วแรงดันสูงเกินที่เกิดขึ้นจะมีความถี่สูงซึ่งทำให้ค่าอินดักตีฟรีแอคแตนซ์และคาปาซิตีฟซัสเซปแตนซ์มีค่ามากกว่าค่าความต้านทานและค่าความนำมากๆ จึงพิจารณาว่า $R = 0$ และ $G = 0$)

หากพิจารณาส่วนเล็กๆ ส่วนหนึ่งของสายส่งที่มีความยาว Δx ดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 ส่วนเล็กๆ ที่มีความยาว x อยู่ห่างจากด้านส่งเท่ากับ x ทั้ง v และ i จะเป็นฟังชั่นของ x และ t

แรงดันตกคร่อมในส่วนเล็ก ๆ จะเกิดจากอิมพีแดนซ์อนุกรมของส่วนนี้เท่านั้น

$$\begin{aligned} v-(v+\frac{\partial v}{\partial x}\Delta x) &= L\Delta x\frac{\partial i}{\partial t} \\ \therefore \quad -\frac{\partial v}{\partial x} &= L\frac{\partial i}{\partial t} \\ \frac{\partial v}{\partial x} &= -L\frac{\partial i}{\partial t} \end{aligned} \tag{25}$$

กระแสรั่วไหลในส่วนเล็กๆ นี้เกิดจากชั้นต์แอดมิตแตนซ์ของส่วนนี้เท่านั้น

$$\begin{aligned} i-(i+\frac{\partial i}{\partial x}\Delta x) &= C\Delta x\frac{\partial v}{\partial t} \\ \therefore \quad \frac{\partial i}{\partial x} &= -C\frac{\partial v}{\partial t} \end{aligned} \tag{26}$$

แปลงลาปลาซ (Laplace transform) สมการ (25) , (26) จากโดเมนเวลา t ไปเป็นโดเมนความถี่ s ได้

$$\frac{d}{dx}v(x,s) = -L\,[SI(x,s) - i(x,0)] \tag{27}$$

$$\frac{d}{dx}I(x,s) = -C[SV(x,s) - v(x,0)] \tag{28}$$

ถ้า $i(x,0) = 0$ และ $v(x,0) = 0$

$$\frac{d}{dx}v(x,s) = -SLI(x,s) \tag{29}$$

$$\frac{d}{dx}I(x,s) = -SCV(x,s) \tag{30}$$

ดิฟเฟอเรนซิเอทเทียบกับ x ตลอดสมการ (29), (30)

$$\frac{d^2}{d^2x}V(x,s) = -SL\frac{d}{dx}I(x,s) \tag{31}$$

$$\frac{d^2}{d^2x}I(x,s) = -SC\frac{d}{dx}V(x,s) \tag{32}$$

แทนในสมการ (29) ใน (31) และแทน (30) ใน (32) จะได้

$$\frac{d^2}{d^2x}V(x,s) = -S^2LC\frac{d}{dx}V(x,s) \quad (33)$$

$$\frac{d^2}{d^2x}I(x,s) = -S^2LC\frac{d}{dx}I(x,s) \quad (34)$$

แก้สมการ (33), (34) จะได้

$$V(x,s) = V^+(s)e^{-S\sqrt{LC}\,x} + V^-(s)e^{+S\sqrt{LC}\,x} \quad (35)$$

$$I(x,s) = {}^+(s)e^{-S\sqrt{LC}\,x} + v^-(s)e^{+S\sqrt{LC}\,x} \quad (36)$$

แปลงลาปลาซสมการ (35), (36) กลับเป็นโดเมนเวลาจะได้

$$v(x,t) = v^+(x-kt) + v^-(x+kt) \quad (37)$$

$$i(x,t) = i^+(x-kt) + i^-(x+kt) \quad (38)$$

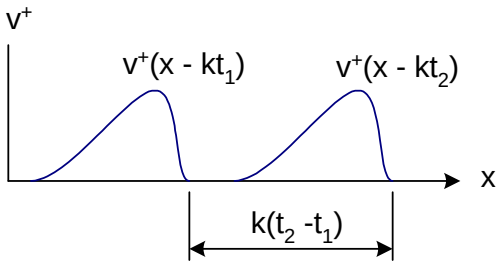
โดย

$$k = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{m/sec} \quad (39)$$

v^+, i^+ = คลื่นแรงดันและกระแสที่เคลื่อนที่ไปในทิศทาง +x

v^-, i^- = คลื่นแรงดันและกระแสที่เคลื่อนที่ไปในทิศทาง –x

ถ้าผู้สังเกตการเคลื่อนที่ของคลื่นเคลื่อนที่ไปพร้อมกับคลื่นในทิศทาง + x ผู้สังเกตจะเห็นคลื่นแรงดัน หรือกระแสมีลักษณะเหมือนเดิมดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 ลักษณะคลื่นจรที่เคลื่อนที่ไปในทิศทาง + x

ที่มา: Stevenson (1986)

ซึ่ง $x - kt$ = ค่าคงที่ (constant)

$$\therefore \quad \frac{dx}{dt} = k = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{m/sec} \qquad (40)$$

โดย $\frac{dx}{dt}$ คือความเร็วของการเคลื่อนที่ของผู้สังเกตและคลื่นนั่นเอง

ความสัมพันธ์ระหว่าง v^+, i^+ และ v^-, i^- คือ

$$i^+ = \frac{1}{\sqrt{LC}} v^+(x - kt) \qquad (41)$$

$$i^- = -\frac{1}{\sqrt{LC}} v^-(x - kt) \qquad (42)$$

ดังนั้น $$\frac{v^+}{i^+} = \sqrt{\frac{L}{C}} \qquad (43)$$

และ

$$\frac{v^-}{i^-} = -\sqrt{\frac{L}{C}} \qquad (44)$$

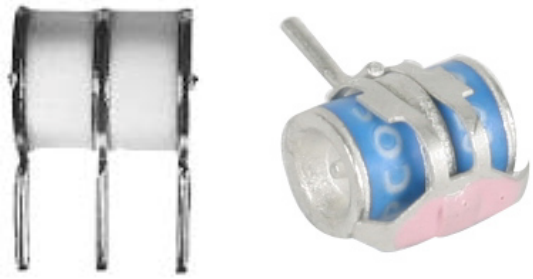
8. ชนิดของตัวป้องกัน

ตัวป้องกันหรืออุปกรณ์ป้องกันที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันทุกชนิดทำงานด้วยการเบี่ยงถ่ายพลังงานของไฟกระโชกลงสู่ดินมิให้ผ่านเข้าไปสู่ระบบงานแบ่งออกได้ 2 ชนิดดังนี้

ก.) ชนิดลัดวงจรไฟฟ้า (Crowbar Device)

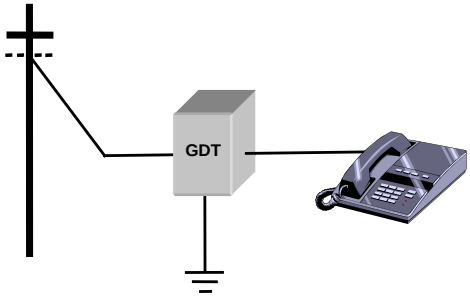
อุปกรณ์ประเภทนี้จะทำงานเมื่อมีแรงดันตกคร่อมตัวของมันเกินกว่าค่าแรงดันพลังทลายประจำตัว (Breakdown Voltage) ตัวของมันจะเปลี่ยนสภาพจากค่าความต้านทานสูงเป็นค่าความต้านทานต่ำมากจนถือได้ว่าลัดวงจรไฟฟ้าลงดิน อุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ สปาร์คแกป (Spark Gap Arrester) หลอดคายประจุผ่านก๊าซ (Gas Discharge Tube) อุปกรณ์ประเภทนี้มีข้อดีคือสามารถรองรับพลังงานของเสิร์จได้สูงและมีอายุการใช้งานนาน แต่ก็มีข้อเสีย คือขณะเมื่อทำงานจะลัดวงจรไฟฟ้าไปชั่วขณะ (ประมาณครึ่งลูกคลื่น) ซึ่งในระหว่างนั้นจะเกิดกระแสไหลตาม

(Follow On Current) ซึ่งเกิดจากแรงดันไฟปกติที่ความถี่ไฟฟ้ากำลังที่มีผลต่อค่าอิมพิแดนซ์ลัดวงจรของตัวป้องกันคืออาจจะทำให้เกิดความเสียหายแก่ตัวป้องกันได้



ภาพที่ 32 หลอดคายประจุผ่านก๊าซ (GDT) แบบสามขั้ว

การป้องกันแรงดันเกินโดยส่วนมากผู้ให้บริการจะทำการ ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จแบบหลอดคายประจุผ่านก๊าซ (GDT) ดังภาพที่ 32 โดยติดตั้งที่ปลายทางด้านของผู้ใช้บริการดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 ตำแหน่งติดตั้งหลอดคายประจุผ่านก๊าซ

GDT เป็นอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินในระบบสื่อสารในที่นี้ จะหมายถึงข่ายสายโทรศัพท์โดยทั่วไปจะใช้แบบ 3 ขั้ว ซึ่งคุณสมบัติได้กล่าวไว้อย่างละเอียดใน (ITU–Recommendation K.12 , 1993) ในบางครั้ง GDT อาจชำรุดเสียหายเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ได้แก่

1. แรงดันสูงเกินที่มีขนาดสูงมากจนเกินขนาดพิกัดความสามารถทนได้ของ GDT

2. แรงดันสูงเกินที่มีขนาดไม่สูงมากนัก แต่มีระยะเวลาในการเกิดยาวนานทำให้มีพลังงานความร้อนสะสมในตัว GDT และส่งผลให้เกิดความเสียหายตามมาได้

3. การที่มีสิ่งแปลกปลอมเข้าไปอยู่ระหว่างขั้วของ GDT เช่น ฝุ่นละอองหรือมดแมลงต่างๆ ในขณะจังหวะที่เกิดแรงดันสูงเกินจนส่งผลให้เกิดการลัดวงจรหรือการอาร์คที่ขั้วอุปกรณ์ป้องกันและทำให้ขั้วเกิดการหลอมละลายต่อวงจรถึงกัน

ปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมานี้นอกจากจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อโทรศัพท์ของผู้ใช้บริการแล้ว ยังสามารถส่งผลให้อุปกรณ์ชุมสายต้นทางของผู้ให้บริการได้รับความเสียหายด้วย หากมีแรงดันเหนี่ยวนำสูงเกินสามารถผ่านระบบป้องกันเข้าไปได้

ดังนั้นในทางปฏิบัติจะไม่ใช้อุปกรณ์ป้องกันเพียงชนิดเดียวนี้เดี่ยวๆ แต่จะใช้ร่วมกับอุปกรณ์ที่สามารถจำกัดกระแสไหลตามได้ นอกจากปัญหากระแสไหลตามแล้ว ความเร็วในการตอบสนอง (Response Time) ก็มีค่าต่ำ และมีค่าแรงดันคงเหลือผ่านได้มีค่าสูง (High Let Through Voltage) ซึ่งถือว่าเป็นข้ออ่อนด้อยอันหนึ่งของอุปกรณ์ป้องกันแบบนี้

ข.) ชนิดควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Clamping Device)

อุปกรณ์ประเภทนี้ทำงานเมื่อมีแรงดันตกคร่อมตัวมันเกินกว่าค่าแรงดันแค้มป์ (Clamping Voltage) โดยตัวอุปกรณ์จะเปลี่ยนสภาพจากค่าความต้านสูงเป็นค่า ความต้านทานต่ำแต่ไม่ถึงกับลัดวงจรอุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ MOV (Metal Oxide Varistor) ซึ่งมีข้อดีตรงที่ไม่ลัดวงจรไฟฟ้า และมีความเร็วการตอบสนองสูง แรงดันผ่านทะลุต่ำกว่า ข้อเสียคือความสามารถในการรองรับพลังงานต่ำกว่าและจะเสื่อมสภาพลงทุกครั้งที่รองรับไฟกระโชก

การเลือก MOV มาใช้งานให้เกิดความเหมาะสมจะต้องทราบข้อมูลทางสถิติทั้งลักษณะและรูปคลื่น ค่าความรุนแรงของแรงดันไฟฟ้าชั่วครู่ที่เกิดขึ้นในระบบว่ามีอยู่ระดับใดจะทำให้เราสามารถเลือกคุณสมบัติของ MOV ได้อย่างถูกต้องที่สุด ตัวแปรหลักในการเลือก MOV มาใช้งานจะพิจารณาตัวแปร 5 ตัวแปรหลักคือ

ก. ค่าแรงดันไฟฟ้าสภาวะคงที่ (Steady Stage) เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าทำงานปกติของระบบงานหรือค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเนื่องสูงสุด(Maximum Continuous Operating Voltage:MCOV)

ข. ค่าพลังงานที่ MOV ต้องซึมซับ (Energy Absorption)

ค. ค่ากระแสไฟชั่วขณะสูงสุดที่คาดว่าจะไหลผ่าน MOV (Surge Current Capacity)

ง. กำลังไฟฟ้าที่สูญสลาย (Power Dissipation)

จ. ค่าแรงดัน Clamping หรือแรงดันไฟฟ้าปล่อยผ่าน (Let through voltage)

9. เกณฑ์หรือเงื่อนไขที่ช่วยให้ผลกระทบมีระดับลดลง

1. การเพิ่มระยะห่างระหว่างระบบส่งกำลังและระบบโทรคมนาคม (โทรศัพท์) โดยการเพิ่มระยะห่าง 8 ถึง 107 เมตร สามารถช่วยลดแรงดันเหนี่ยวนำลงได้เพียง 50 % เท่านั้น ทำนองเดียวกันการนำสายตัวนำลงใต้ดิน (ฝังดิน) ยังคงไม่สามารถลดผลกระทบได้มากเพราะดินในทางปฏิบัติไม่เป็นตัวกำบังผลของการรบกวนจากแม่เหล็กไฟฟ้าได้สมบูรณ์

2. การใช้ตัวกำบังโลหะ (metallic shield) จะลดหรือกำจัดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตได้อย่างมีประสิทธิผล แต่ถ้ามีการต่อกำบัง (โล่) ลงดิน (Grounded) แล้วเกิดวงรอบจะทำให้กระแสไหลได้โดยมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสในระบบส่งกำลังไฟฟ้า พิจารณาภาพที่ 34

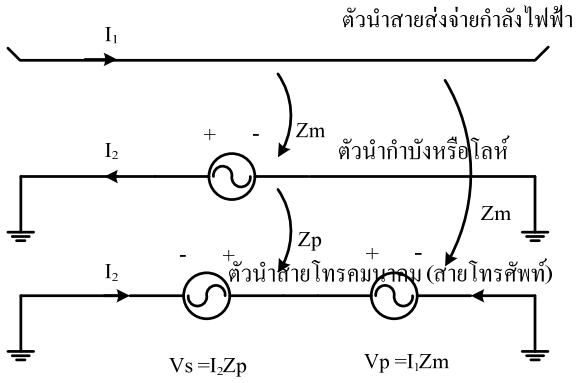
3. จากข้อ 2 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในกำบังจะเหนี่ยวนำแรงดันที่มีขั้วตรงข้าม (ต่างเฟสกัน 180 องศา) ทำให้เกิดการหักล้าง (Cancel) กับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้ากำลัง ซึ่งกำบังจะทำหน้าที่ได้ผลดี**หาก**ตัวนำกำบังมีระยะห่างจากระบบสายส่งกำลังไม่เกิน 9 เมตร

4. องค์ประกอบการกำบัง (Shield factor) เป็นอัตราส่วนของแรงดันคงเหลือที่มีอยู่ในวงจรกำบังต่อแรงดันในวงจรเดียวกันที่ไม่มีการกำบัง ซึ่งมีค่าสูงสุดและต่ำสุดดังนี้

S_F = 1 หมายถึงไม่มีการกำบัง

และ S_F = 0 หมายถึงมีการกำบังและได้ผลเป็นอย่างดีเยี่ยม

โดยทั่วๆ ไปนิยมใช้ค่า 0.4 (Parts, 2004)



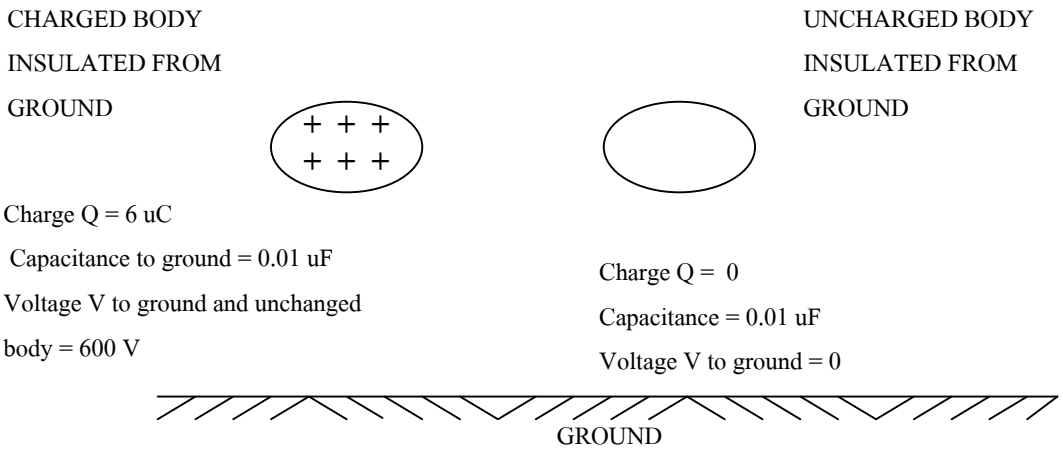
ภาพที่ 34 กลไกการเหนี่ยวนำแรงดันจากสายจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังระบบโทรคมนาคม
ที่มา: Gundrum (1988)

10. การต่อถึงกันหรือการประสาน (Bonding)

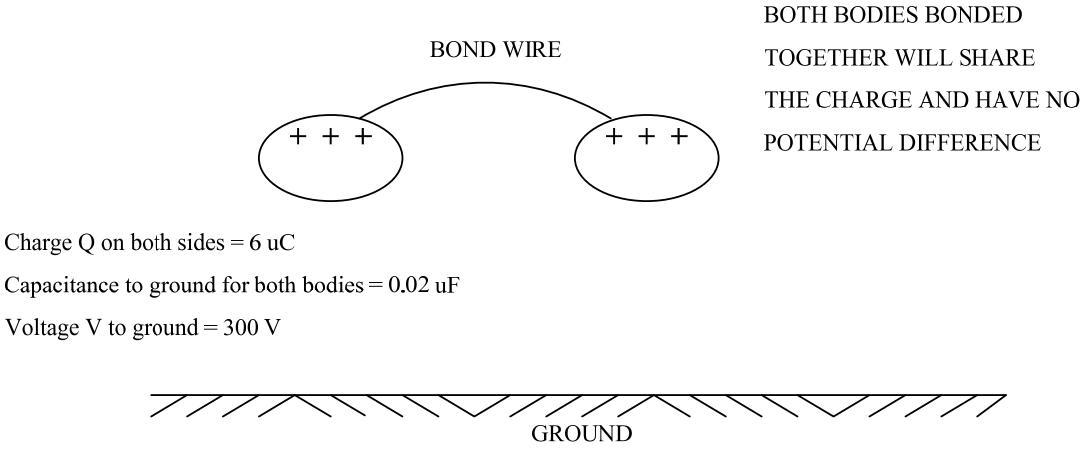
การต่อประสานมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างชิ้นส่วนโลหะกับระบบภายในปริมาตรที่จะป้องกัน การต่อถึงกันระหว่างตัวนำโล่กำบังของระบบกับกราวนด์ก็เพื่อให้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันไม่มีแรงดันแตกต่างตกคร่อมหรือเรียกอีกอย่างว่า **การประสานศักย์** เช่น ในระบบไฟฟ้ากำลังจะต่อกราวนด์กับนิวทรัลเข้าด้วยกัน ในระบบโทรคมนาคมก็มีการต่อถึงกันของตัวนำโล่กำบังเข้ากับกราวนด์เช่นกัน

การจัดให้มีการต่อถึงกันของตัวนำต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นของระบบกับกราวนด์ในสภาวะปกติจะต้องไม่มีกระแสหรือเกิดกระแสไฟฟ้าไหล ดังนั้นก่อนทำการต่อถึงกันจะต้องแน่ใจว่าไม่มีแรงดันไฟฟ้าปรากฏตกคร่อมระหว่างระบบกราวนด์กับนิวทรัลสูงกว่าปกติ หากมีจะต้องหาต้นเหตุและแก้ไขก่อนที่จะทำการต่อถึงกัน

ปัญหาด้านไฟฟ้าสถิตต่างๆ สามารถแก้ได้โดยการจัดให้มีการต่อถึงกันของอุปกรณ์หลายๆ ส่วนเข้าด้วยกันและต่อเข้ากับกราวนด์ของระบบ การต่อถึงกันดังกล่าวระหว่างวัตถุจะทำให้แรงดันแตกต่างระหว่างวัตถุนั้นมีค่าต่ำจึงเป็นการป้องกันการกระโดดข้ามระหว่างวัตถุดังแสดงดังภาพที่ 35 และ 36



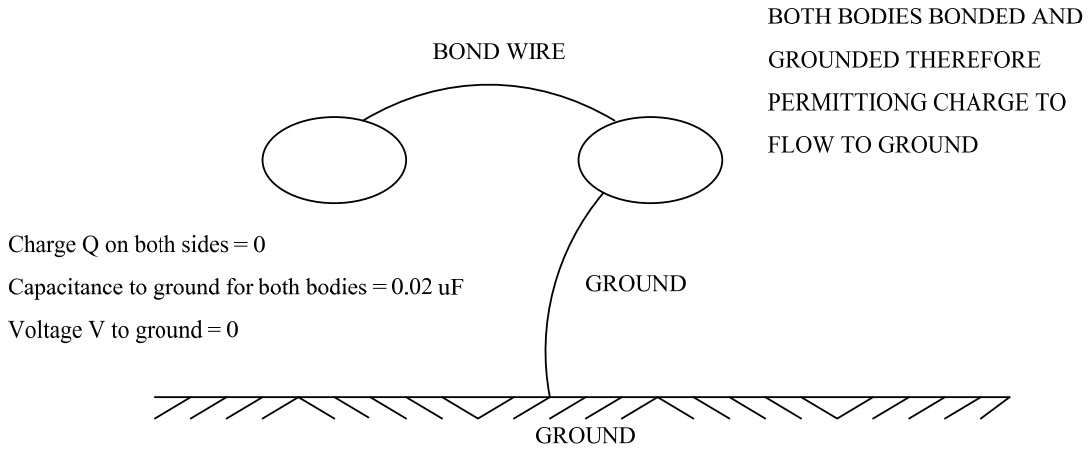
ภาพที่ 35 วัตถุที่มีประจุและไม่มีประจุไม่ต่อลงกราวนด์
ที่มา: IEEE (2007)



ภาพที่ 36 วัตถุฉนวนทั้งสองใช้ประจุร่วมกัน
ที่มา: IEEE (2007)

การกราวนด์ช่วยทำให้แรงดันแตกต่างระหว่างวัตถุและกราวนด์มีค่าต่ำดังภาพที่ 37 การต่อเข้าด้วยกันและการกราวนด์จะใช้สายเปลือยหรือสายหุ้มฉนวนเบอร์ 6 หรือ 4 AWG (เพื่อความแข็งแรงทางกล) แม้ว่ากระแสจะอยู่ในระดับไมโครแอมป์ (10^{-6} A) กราวนด์ใดๆ ของวงจรกำลังหรือระบบป้องกันฟ้าผ่าอาจกล่าวได้ว่าเพียงพอที่จะป้องกันไฟฟ้าสถิต ความต้านทานกราวนด์ 1 MΩ ก็พอเพียงสำหรับการกราวนด์ แต่ถ้าหากสายกราวนด์หรือสายที่ใช้ต่อถึงกันเสี่ยงต่อความเสียหายจะต้องเดินในท่อสายไฟชนิดโลหะหนาหรือท่อ อุปกรณ์หรือแทงค์ที่มี

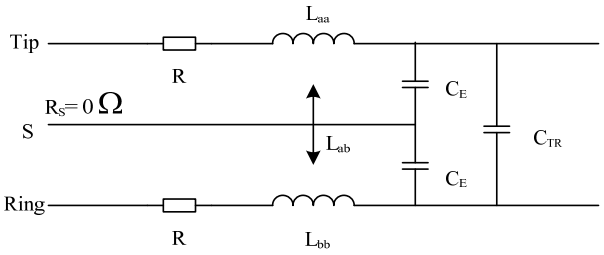
การกราวนด์แฝงอยู่ในตัวหรือโดยการสัมผัสกับกราวนด์แล้วอาจไม่จำเป็นต้องเชื่อมต่อด้วยวิธีพิเศษก็ได้ สำหรับวัตถุที่เคลื่อนที่อาจใช้ตัวเลื่อนที่เป็นแปรงถ่านที่ทำด้วยคาร์บอน ทองเหลือง หรือสปริงที่ทำด้วยบรอน ต่อลงกราวนด์



ภาพที่ 37 วัตถุทั้งสองต่อลงกราวนด์ทำให้ไม่มีประจุ
ที่มา: IEEE (2007)

11. วงจรสมมูลของคู่สายโทรศัพท์

ในการพิจารณาประมาณค่าแรงดันสูงเกินที่ปลายสายหรือปลายทางของคู่สายโทรศัพท์พิจารณาได้จากวงจรสมมูลของคู่สายโทรศัพท์ดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 วงจรสมมูลของคู่สายโทรศัพท์
ที่มา: สุรพัฒน์ (2544)

จากภาพที่ 38 เป็นวงจรสมมูลของคู่สายโทรศัพท์ ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ R, L และ C ต่อหน่วยความยาวดังนี้

R = ความต้านทาน (โอห์ม / กิโลเมตร)

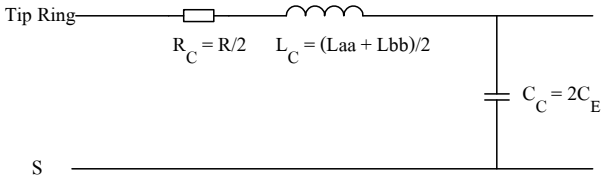
$L_{aa} = L_{bb}$ = ความเหนี่ยวนำของสายตัวนำ (มิลลิเฮนรี่ / กิโลเมตร)

L_{ab} = ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างสายตัวนำ ((มิลลิเฮนรี่ / กิโลเมตร)

C_E = ความจุไฟฟ้าของสายกับกำบัง (นาโนฟารัด/กิโลเมตร)

C_{TR} = ความจุไฟฟ้าระหว่างสายตัวนำ (นาโนฟารัด/กิโลเมตร)

กรณีศึกษาเกี่ยวกับเสิร์จจะพิจารณาคู่สายเป็นแบบโหมดร่วม (common mode) เสมือนว่าตัวนำ Tip และ Ring ต่อเข้าด้วยกัน สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ใหม่ดังภาพที่ 39

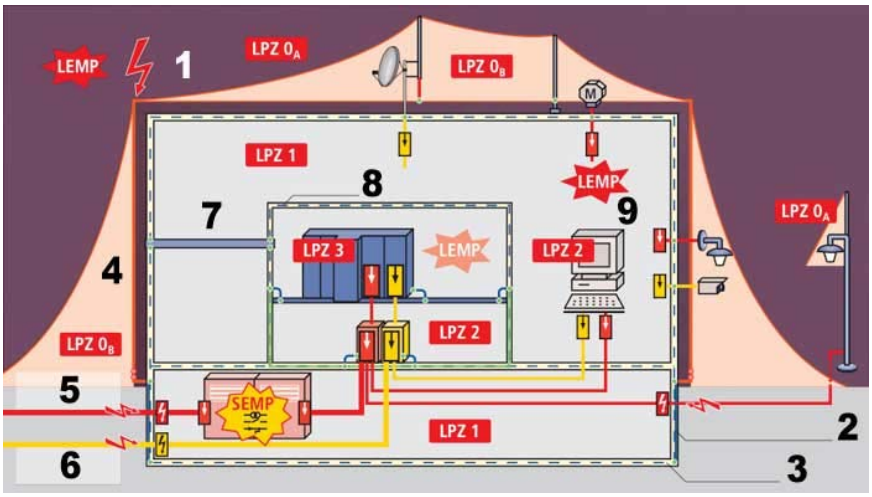


ภาพที่ 39 วงจรสมมูลของคู่สายโทรศัพท์แบบโหมดร่วม (ละเลยความนำระหว่างสาย G)
ที่มา: สุรพัฒน์ (2544)

เมื่อทราบค่าต่างๆ ทางกายภาพจากข้อมูลการทดสอบจริงของคู่สายของโทรศัพท์ที่นำมาใช้ เราก็จะสามารถทราบค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของคู่สายได้เช่นเดียวกับสายส่งจ่ายกำลัง ที่นี้นำข้อมูลการทดสอบมาจากการตรวจสอบสายเคเบิลขององค์การโทรศัพท์ โดยค่าต่างๆ ที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบหลายๆ ครั้ง จากภาพที่ 39 และจากสมการ

$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \Omega \qquad (45)$$

ย่านป้องกันฟ้าผ่า (Lightning Protection Zones)



ภาพที่ 40 การแบ่งย่านป้องกันฟ้าผ่า
ที่มา: Dehn (2007)

นิยามของย่านป้องกันฟ้าผ่า

ย่าน LPZ 0_A หมายถึง ย่านที่ถูกฟ้าผ่าโดยตรง อาจต้องรับกระแสฟ้าผ่าทั้งหมดไม่มีการลดทอนสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ย่าน LPZ 0_B หมายถึง ย่านที่ไม่ถูกฟ้าผ่าโดยตรงเนื่องจากมีการป้องกันด้วยตัวนำล่อฟ้า แต่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ลดทอน

ย่าน LPZ 1 หมายถึง ย่านที่ไม่ถูกฟ้าผ่าโดยตรง และกระแสบนส่วนที่เป็นตัวนำทั้งหมดที่อยู่ภายในย่านมี ขนาดลดลงเมื่อเทียบกับย่าน LPZ 0_B สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านนี้ลดทอนลงได้ขึ้นกับมาตรการการกำบัง

ย่านป้องกันสืบเนื่อง

ใช้ในกรณีที่ต้องการลดค่าของกระแสฟ้าผ่า และ/หรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าลงไปอีก ในที่นี้คือ ย่าน LPZ 2 และ LPZ 3

ย่าน LPZ 2 หมายถึงย่านป้องกันสืบเนื่อง

ย่าน LPZ 3 หมายถึงย่านที่อยู่ภายในอาคาร ไม่มีแหล่งกำเนิดกระแสทรานเซียนต์ หรือแรงดันเกินกว่าค่าจำกัดการรบกวนการกำบังและการวางวงจรแยกจากกันซึ่งอาจรบกวนกันและกัน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (หน่วยประมวลผล Pentium แรมไม่ต่ำกว่า 256 เมกกะไบต์)
2. ออสซิลโลสโคป Tektronix รุ่น TDS 1001B , ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ APPA 650
3. โปรแกรมวิเคราะห์สำหรับช่วยจำลองระบบไฟฟ้าและแบบจำลองสายเคเบิ้ลโทรศัพท์ต่อไปนี้

Matlab/simulink

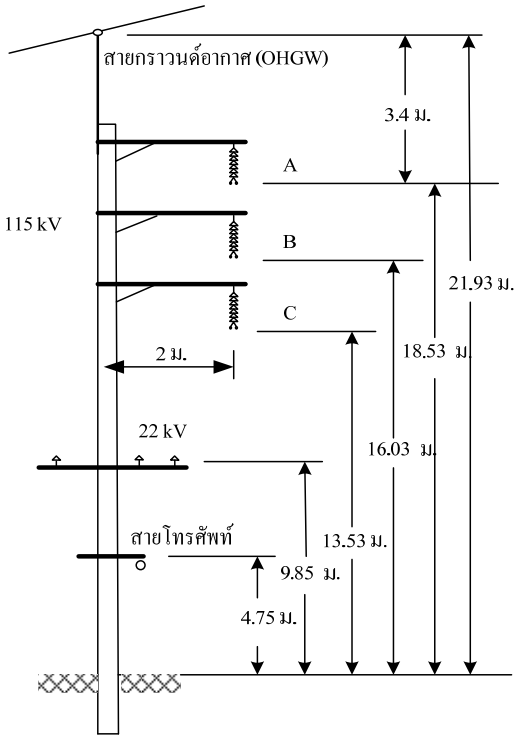
Excel

ATP/EMTP

วิธีการ

1. ศึกษารูปแบบของระบบการติดตั้งสายเคเบิ้ลโทรศัพท์ไปกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
2. ศึกษาปัญหาที่ทำให้เกิดความเสียหายของอุปกรณ์และระบบจากงานจริง
3. สร้างแบบจำลองของสายเคเบิ้ลที่ใช้ในระบบของการสื่อสาร (โทรศัพท์) และจำลองการเกิดแรงดันเกินขึ้นในสายเคเบิ้ลเมื่อมีการรบกวนระบบจากสาเหตุเนื่องจากการเหนี่ยวนำจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
4. ศึกษารูปแบบการป้องกันแรงดันเกินของอุปกรณ์และระบบของการสื่อสาร (โทรศัพท์)
5. สรุปและเสนอแนะแนวทางการป้องกันที่เหมาะสมสำหรับปัญหาที่ทำการศึกษา

รูปแบบของระบบจำหน่ายและส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง



ภาพที่ 41 ภาพร่างโครงสร้างระบบจำหน่ายและสายส่งไฟฟ้ากำลัง
ที่มา: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2543)

ตารางที่ 10 ค่ากระแสลัดวงจรของสถานีไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสิงห์บุรี

สถานีไฟฟ้าในเขต กฟน. 3 (กฟผ.)								
รายชื่อสถานีไฟฟ้า	BUS KV	หม้อแปลง MVA	TPH kA	SLG kA	R1	X1	R0	X0
	115		**5.777**	**3.544**	**0.02820**	**0.08309**	**0.05416**	**0.24844**
สิงห์บุรี	22–KT2A	50	8.086	7.196	0.04866	0.32977	0.00000	0.45994
	22–KT3A	50	8.261	7.271	0.04399	0.32214	0.00000	0.46034

ที่มา: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2549)

ตารางที่ 11 ค่ากระแสลัดวงจรของผู้ใช้ไฟ 115 kV

รายชื่อสถานีไฟฟ้า	BUS KV	TPH kA	SLG kA	R1	X1	R0	X0
1.บ.Betagro	115	5.455	2.660	0.01437	0.10021	0.06505	0.41543
2. บ.Indoworth	115	6.882	04.201	0.01974	0.07778	0.05341	0.22771
3. บ.Lucky Spinning	115	5.854	3.242	0.02077	0.09203	0.06637	0.22771
4. บ.Mahapan Fiber	115	5.999	2.964	0.01292	0.09114	0.05780	0.37035
5. บ.Minibear	115	4.197	1.985	0.03190	0.12765	0.13982	0.55419
6. บ.Nam Heng Steel	115	4.979	2.400	0.01595	0.10976	0.07274	0.22629
7. บ.Pan Asia Paper *	115	7.245	4.307	0.01790	0.07410	0.05199	0.22629
8. บ.Saraburi Cement	115	7.678	3.959	0.00972	0.07126	0.04187	0.27143
9. บ.Surin Aomya Cemical	115	5.826	2.866	0.01336	0.09385	0.05997	0.38383
10. บ.Thaimapan Trading	115	9.601	6.524	0.01495	0.05554	0.0371	0.13385

* ผู้ใช้ไฟฟ้ารายที่ 7 ปัจจุบันเปลี่ยนชื่อเป็นบริษัท นอร์ดเค้ สคุ๊ค ไทยแลนด์ จำกัด

ที่มา: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2549)

กระแสในระบบ 115 kV

กระแสในระบบสายส่งจ่ายไฟฟ้าระดับแรงดัน 115 kV คิดจากสายที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสิงห์บุรีซื้อจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตและจ่ายตรงให้กับบริษัท นอร์ดเค้ สคุ๊ค ไทยแลนด์ จำกัด อีกทอดหนึ่ง ใช้ค่ากระแสที่คิดจากการใช้โหลดสูงสุดที่บันทึกโดยการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประจำเดือนในปี พ.ศ. 2551 มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ย 13.2 เมกกะวัตต์ (MW)

$$I_{max(normal)} = \frac{MW}{\sqrt{3}\cdot kV\cdot\cos\theta} = \frac{13.2\cdot 10^{6}}{\sqrt{3}\cdot 115\cdot 10^{3}\cdot 0.85} = 77.9622 \text{ แอมแปร์}$$

การโมเดลระบบโดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP

ในการโมเดลระบบด้วยโปรแกรม ATP/EMTP ใช้ ค่าพารามิเตอร์ที่ป้อนเข้าได้จากข้อมูลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และอาจมีค่าต่างจากที่เป็นจริงไปบ้างเนื่องจากสภาพแวดล้อมจริง

ขั้นตอนที่ 1 การโมเดลสายส่ง

สามารถทำได้โดยใช้โปรแกรม ATP_LCC ซึ่งเป็นโปรแกรมแยกย่อยออกมาจาก ATP/EMTP ข้อมูลที่ต้องใช้คือ

– IP คือ หมายเลขของเฟส เช่น หมายเลข 1 , 2 , และ 3 กำหนดให้เป็นเฟส A , B , และ C ของระบบสายส่ง 115 kV ตามลำดับ ส่วนหมายเลข 4 , 5 , และ 6 กำหนดให้เป็นเฟส A , B , และ C ของระบบจำหน่ายของ 22 kV

– SKIN คือ ค่า Skin effect มีการกำหนดค่าดังนี้ ถ้า SKIN=0 หมายถึงไม่มีค่า Skin effect แต่ถ้า SKIN=T/D หมายถึง มีค่า Skin effect ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่าง ความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ ตัวนำที่เป็นแท่งตัน T/D=0.5

– RESIS คือ ค่าความต้านทานของสายไฟฟ้า หน่วย Ω/ mile หรือ Ω/ km ก็ได้ ถ้าเลือกหน่วยใดแล้วให้ใช้หน่วยนั้นไปตลอด เช่น เลือกใช้หน่วยอังกฤษ (Ω/ mile , ft , inch) จะต้องไม่ใช้หน่วยสลับกันไปมาเพราะอาจทำให้โปรแกรมคำนวณผิดพลาดได้

– IX มีความหมายดังนี้

IX = 0: REACT=reactance for one unit spacing (m or foot) at Freq.

IX = 1: REACT=reactance for one unit spacing (m or foot) at 60 Hz

IX = 2: REACT=Geometric mean radius (cm or inch)

IX = 3: REACT=GMR/R (Solid conductor: 0.7788)

IX = 4: REACT=Blank. Correction for skin effect.

– REACT คือ ค่าอินดักแตนซ์ที่ขึ้นอยู่กับ IX เช่น เลือก IX=3 ค่า REACT=0.7788

– DIAM คือ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกสำหรับหนึ่งตัวนำ (หน่วย cm หรือ inch)

– HORIZ คือ ระยะทางตามแนวนอนจากจุดศูนย์กลางของบันเดิล ถึงจุดอ้างอิงที่ผู้ใช้งานอ้างอิง (หน่วย m หรือ ft)

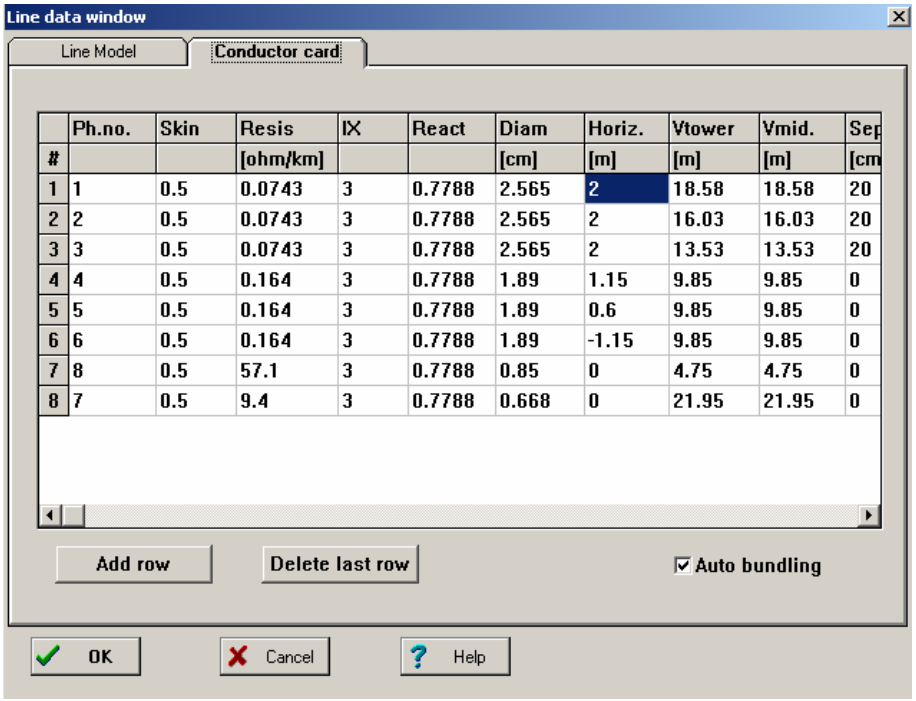
– VTower คือ ความสูงของบันเดิลตามแนวตั้งที่เสา (หน่วย m หรือ ft)

– VMid คือ ความสูงของบันเดิลตามแนวตั้งที่กึ่งกลางสแปน (หน่วย m หรือ ft) มักมีค่าเท่ากับ VTower

– SEPAR คือ ระยะห่างระหว่างตัวนำในบันเดิล (หน่วย cm หรือ inch)

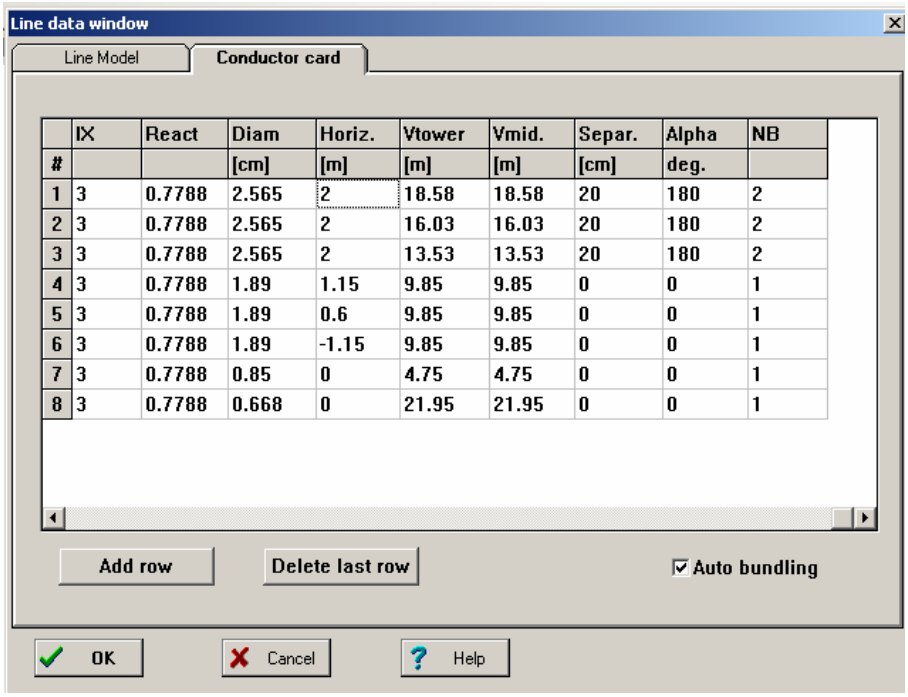
– ALPHA คือ ตำแหน่งมุมของหนึ่งตัวนำในบันเดิล วัดในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจากเส้นแนวนอน

– NB คือ จำนวนตัวนำในบันเดิล



#	Ph.no.	Skin	Resis [ohm/km]	IX	React	Diam [cm]	Horiz. [m]	Vtower [m]	Vmid. [m]	Sep [cm
1	1	0.5	0.0743	3	0.7788	2.565	2	18.58	18.58	20
2	2	0.5	0.0743	3	0.7788	2.565	2	16.03	16.03	20
3	3	0.5	0.0743	3	0.7788	2.565	2	13.53	13.53	20
4	4	0.5	0.164	3	0.7788	1.89	1.15	9.85	9.85	0
5	5	0.5	0.164	3	0.7788	1.89	0.6	9.85	9.85	0
6	6	0.5	0.164	3	0.7788	1.89	-1.15	9.85	9.85	0
7	8	0.5	57.1	3	0.7788	0.85	0	4.75	4.75	0
8	7	0.5	9.4	3	0.7788	0.668	0	21.95	21.95	0

ภาพที่ 42 ข้อมูลของ Line ในส่วนของ Conductor card



#	IX	React	Diam [cm]	Horiz. [m]	Vtower [m]	Vmid. [m]	Separ. [cm]	Alpha deg.	NB
1	3	0.7788	2.565	2	18.58	18.58	20	180	2
2	3	0.7788	2.565	2	16.03	16.03	20	180	2
3	3	0.7788	2.565	2	13.53	13.53	20	180	2
4	3	0.7788	1.89	1.15	9.85	9.85	0	0	1
5	3	0.7788	1.89	0.6	9.85	9.85	0	0	1
6	3	0.7788	1.89	-1.15	9.85	9.85	0	0	1
7	3	0.7788	0.85	0	4.75	4.75	0	0	1
8	3	0.7788	0.668	0	21.95	21.95	0	0	1

ภาพที่ 43 ข้อมูลของ Line ในส่วนของ Conductor card (ต่อ)

ในช่องที่ 1 Ph.no.

– บรรทัดที่ 1, 2 และ 3 เป็นเฟส A, B และ C ของระบบสายส่งของ 115kV เรียงตามลำดับ บรรทัดที่ 4, 5 และ 6 เป็นเฟส A, B และ C ของระบบจำหน่ายของ 22 kV เรียงตามลำดับ

ในช่องที่ 2 Skin

– เลือกใช้ตัวนำที่เป็นของแข็งมีค่า Skin=T/D=0.5

ในช่องที่ 3 Resis

– สาย AAC ขนาด 400 ตารางมิลลิเมตร มีความต้านทานเท่ากับ 0.0743 Ω/km สาย PIC และ สาย SAG ขนาด 185 ตารางมิลลิเมตร มีค่าความต้านทานเท่ากับ 0.164 Ω/km

ในช่องที่ 4 IX

– ให้เท่ากับ 3 เพื่อจะได้ใช้ค่า React = 0.7788

ในช่องที่ 5 React

– ผลจาก IX=3 จึงทำให้ React = 0.7788

ในช่องที่ 6 diam

– จากข้อมูลสาย AAC (2.565 cm. =25.65 mm.; 1.89 ; 0.85 และ 0.668 cm) .

ในช่องที่ 7 Horiz

– จากข้อมูลของคอนเหล็กแบบท้าวแขน เฟส A , B และ C ของระบบสายส่งของ 115kV ห่างจากกึ่งกลางเสา (2000 mm. = 2 m.)

ในช่องที่ 8 Vtower

– จากข้อมูลการวางเสา เสามีความยาว 22 m. ปักลงดิน 2 m. ในระบบสายส่ง 115 kV เฟส A = 18.53 m. , เฟส B = 16.03 m. , เฟส C = 13.53 m.

– ส่วนในระบบจำหน่าย 22kV สายแบบ PIC เฟส A = 9.85 m. , เฟส B = 9.85 m. เฟส C = 9.85 m.

ในช่องที่ 9 Vmid

– กำหนด mid span ที่พื้นดินในที่นี้ให้ Vmid = Vtower

ในช่องที่ 10 Spar

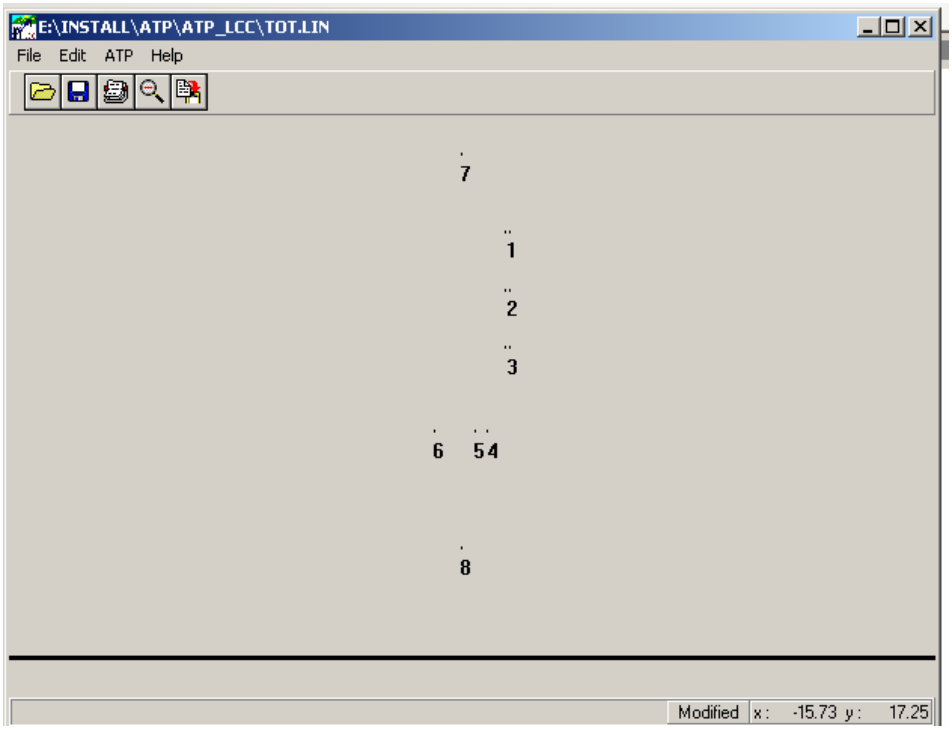
– เนื่องจากในระบบสายส่ง 115 kV มี 2 ตัวนำต่อเฟสมีระยะห่างระหว่างบันเดิล 20cm. และในระบบจำหน่าย 22 kV มี 1 ตัวนำต่อเฟสจึงไม่มีระยะห่างระหว่างบันเดิลให้ใส่ 0

ในช่องที่ 11 Alpha

– เนื่องจากในระบบสายส่ง 115 kV มี 2 ตัวนำต่อเฟส มุมในตัวนำให้เป็น 180 องศา ส่วนในระบบจำหน่าย 22 kV มี 1 ตัวนำต่อเฟส มุมในตัวนำให้เป็น 0 องศา

ในช่องที่ 12 NB

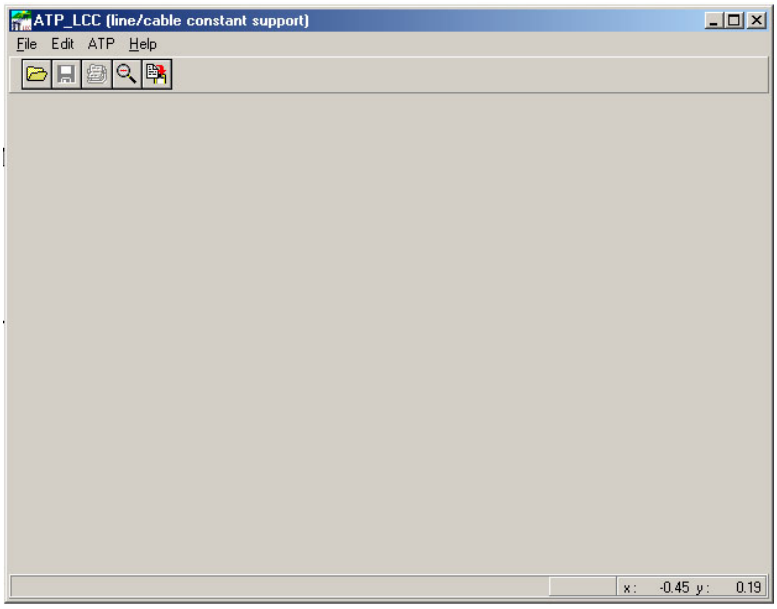
– เนื่องจากในระบบสายส่ง 115 kV มี 2 ตัวนำต่อเฟส จำนวนตัวนำในบันเดิลจึงเท่ากับ 2 และระบบจำหน่าย 22 kV มี 1 ตัวนำต่อเฟส มี 1 ตัวนำต่อเฟส จำนวนตัวนำในบันเดิลจึงเท่ากับ 1



ภาพที่ 44 รูปการโมเดลสายในระบบสายส่ง 115 kV ระบบจำหน่าย 22 kV และสายโทรศัพท์

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อใส่ค่าในโปรแกรม LCC เสร็จแล้ว

1. เปิดหน้าโปรแกรม LCC ขึ้นมา ซึ่งโปรแกรมจะมีหน้าตาดังนี้



ภาพที่ 45 รูปโปรแกรม LCC

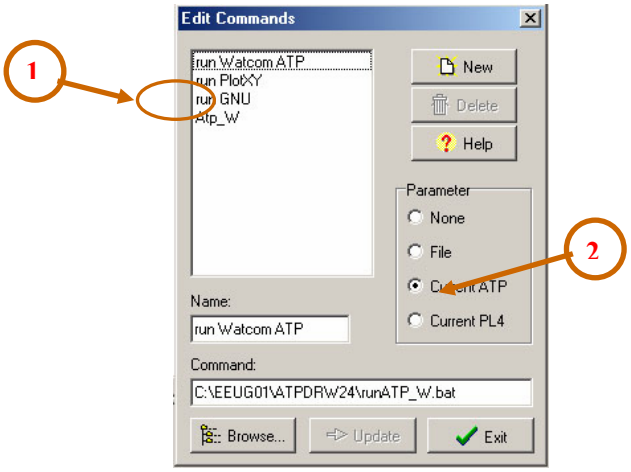
2. สร้างสายส่งใหม่ เข้าไปที่ File> New line แต่ถ้าสายส่งมีอยู่แล้วให้ไปที่ File> open ใส่ข้อมูลที่จำเป็นให้ครบ

3. บันทึกข้อมูล โดยถ้าเป็นสายไฟล์ที่ได้จะมีนามสกุลเป็น .lin และถ้าเป็นเคเบิลไฟล์จะมีนามสกุลเป็น .cbl

4. ทำการแปลงไฟล์ที่มีนามสกุลเป็น .lin ให้เป็นนามสกุล .atp โดยไปที่เมนูคำสั่ง ATP> Create Data Case

5. ทำการแปลงไฟล์ที่มีนามสกุลเป็น .atp ที่ได้จากข้อ 4 ให้เป็นนามสกุล .pch โดยใช้คำสั่ง run GNU ในเมนูคำสั่ง ATP ในโปรแกรม ATPDraw 2.4 แต่ก่อนจะใช้คำสั่งนี้จะต้องมี การ set คำสั่งนี้ให้เป็นแบบทำงานโดยใช้ File เป็น input เสียก่อนดังนี้

– เปิดโปรแกรม ATPDraw 2.4 แล้วไปที่เมนูคำสั่ง ATP>edit Commands



ภาพที่ 46 หน้าต่าง Edit Commands เพื่อ set ค่าให้สร้างไฟล์ .PCH

– แล้วเลือกคำสั่ง run GNU ต่อจากนั้น เปลี่ยน ค่าในช่อง parameter โดยเลือกเป็น File

– คลิกเลือกปุ่ม Update แล้วคลิกปุ่ม Exit ตามลำดับ

ไฟล์นามสกุล .PCH ที่ได้จาก 5 สามารถเรียกได้จาก ATPDraw 2.4 โดยการคลิกเมาส์ ปุ่มขวาในบริเวณพื้นที่ว่างแล้วเลือก Overhead Line (PCH)

ขั้นตอนที่ 3

เมื่อการโมเดลสายเสร็จเรียบร้อย ก็ถึงการโมเดลระบบ โดยการใช้โปรแกรม ATPDraw2.4 ซึ่งเป็นโปรแกรมแยกย่อยในชุดของ EMTP การโมเดลนี้ต้องการข้อมูลต่อไปนี้

– Source (แรงดันไฟฟ้า)
– Driving Point Current (ค่ากระแสลัดวงจร)
– Load (R,L,C)

การใส่ข้อมูลให้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า

เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าคือสถานีไฟฟ้าย่อย การโมเดลระบบต้องใช้ค่ากระแสลัดวงจร (Driving Point) ช่วยในการหาค่า Z_{th} แบบการเทียบเคียงวงจรเทวินินของสถานีไฟฟ้าโดยกำหนดพารามิเตอร์ในกล่องโต้ตอบดังนี้

– U/I ถ้ากำหนดให้เท่ากับ 0 หมายถึง แหล่งจ่ายแรงดัน แต่ถ้ากำหนดให้เท่ากับ –1 หมายถึง แหล่งจ่ายกระแส ในที่นี้เลือกกำหนดให้เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน จึงกำหนดให้ช่องโต้ตอบช่อง U/I ให้เป็นค่า = 0

– Amp เป็นการกำหนดค่า peak ของกระแสหรือแรงดัน (ขึ้นอยู่กับ U/I) ในที่นี้เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าค่า Peak ต่อเฟส ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{115\times\sqrt{2}}{\sqrt{3}}=93.8971 \text{ kV}=93897.1 \text{ V}$

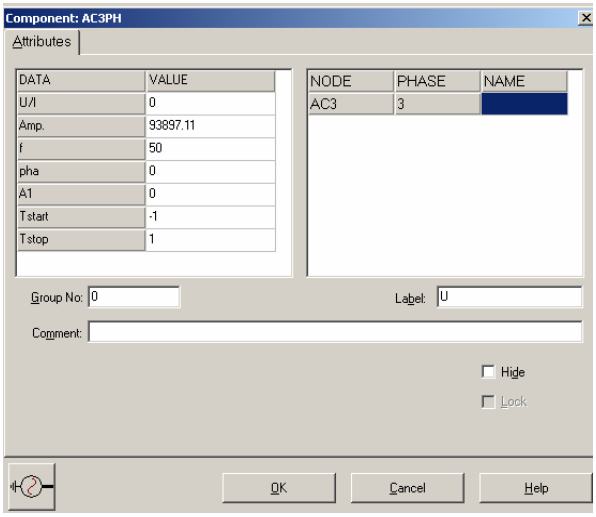
– f เป็นค่าความถี่ของระบบไฟฟ้า (f = 50 Hz)

– Pha เป็นค่ามุมเริ่มต้นของเฟส A ซึ่งเป็นฟังก์ชันโคไซน์มีหน่วยจะเป็นองศา หรือคิดเป็นเวลาในหน่วยวินาทีซึ่งขึ้นอยู่กับ A1 กรณีนี้ให้เท่ากับ 0 องศา

– A1 เมื่อกำหนดให้เท่ากับ 0 หมายถึงหน่วยใน Pha จะเป็นองศา แต่หากกำหนดให้เป็นเลขมากกว่า 0 หน่วยของ Pha จะเป็นเวลาในหน่วยวินาที กรณีนี้ให้เท่ากับ 0

– T start เวลาเริ่มต้น (หน่วยเป็นวินาที) กรณีนี้ให้เท่ากับ –1 s

– T stop เวลาสุดท้าย (หน่วยเป็นวินาที) กรณีนี้ให้เท่ากับ 1 s



ภาพที่ 47 ค่าที่กำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดัน

การหาค่า Z_{th} เทียบเคียงวงจรเทวินินของระบบไฟฟ้ากำลัง

กรณีสามเฟสฟอลต์

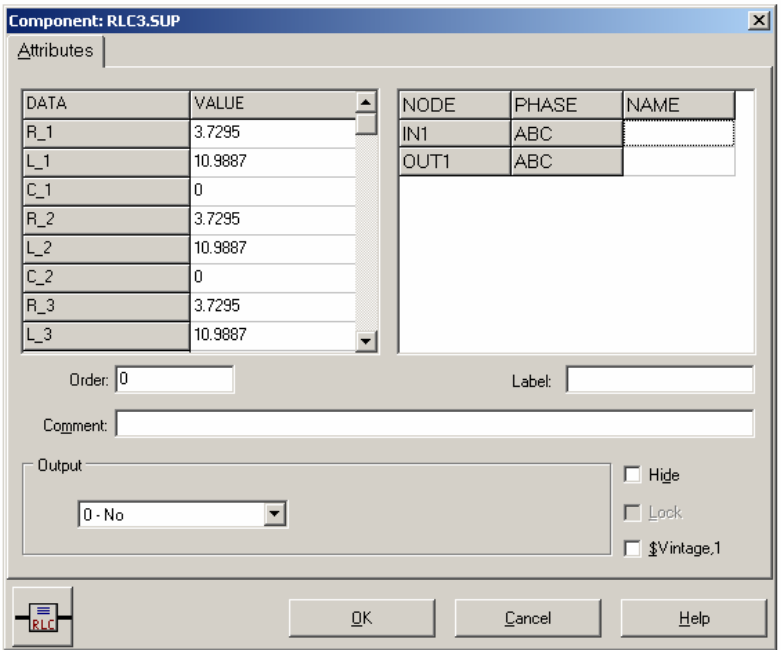
เมื่อเลือก Base MVA = 100

$$Z_B = \frac{115^2}{100} = 132.25 \quad \text{โอห์ม}$$

$$R1 = (132.25)(0.02820) = 3.7295 \quad \text{โอห์ม}$$

$$X1 = (132.25)(0.08309) = 10.9887 \quad \text{โอห์ม}$$

ค่าที่ได้เป็น Z_{th} นำไปใส่ในกล่อง RLC ดังภาพที่ 48



ภาพที่ 48 ค่า RLC ในส่วนของ Z_{th} (สามเฟสฟอลต์)

กรณีกราวนด์ฟอลต์ 1 เฟส

ค่า Z_{th} หาได้จากข้อมูลกระแสลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน = 3544 แอมแปร์

$$I_B = \frac{100}{\sqrt{3}\cdot 115} = 502.0294 \text{ แอมแปร์}$$

$$I_{f(pu.)} = \frac{I_f}{I_B} = \frac{3544}{502.0294} = 7.0593 \text{ pu.}$$

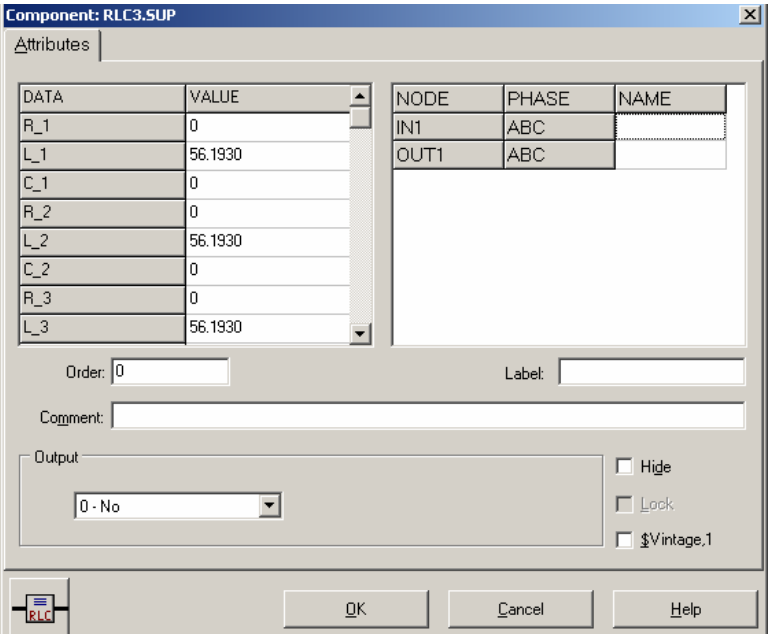
$$I_0 = \frac{I_f}{3} = 2.3531 \text{ pu.}$$

$$Z_{th} = \frac{1}{2.3531} = 0.4249 \text{ pu.}$$

$$Z_B = 132.25 \text{ โอห์ม}$$

$$Z_{th} = (Z_B)(Z_{th(pu.)}) = (132.25)(0.4249) = 56.1930 \text{ โอห์ม}$$

ค่าที่ได้เป็น Z_{th} นำไปใส่ในโหลด RLC ดังภาพที่ 49



ภาพที่ 49 ค่าที่ใส่ใน RLC แทนส่วนของ Z_{th} (1 เฟสฟอลต์ลงดิน)

การคำนวณโหลดที่ต้องเติมใน RLC

เนื่องจากในวงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์ เริ่มตั้งแต่สถานีไฟฟ้าสิงห์บุรีซึ่งมีโหลดของระบบ 115 kV เพียงแห่งเดียวคือ บริษัท นอร์ดเค้ สคุ๊ค ไทยแลนด์ จำกัด มีข้อมูลของระบบเป็นดังนี้

V = 115 kV , P = 13.1 MW , Q = 15.53 Mvar , p.f. 0.85

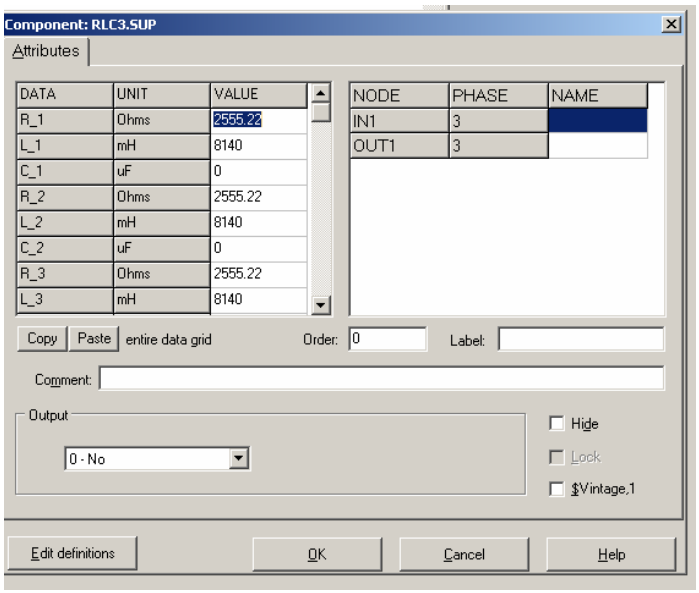
$$I = \frac{MW}{\sqrt{3} \times 115kV \times 0.85} = \frac{13.2MW}{169307.967} = 77.96\ A$$

$$\therefore \quad R = \frac{13.2MW}{77.96^2} = 2171.85\ \Omega$$

$$X = \frac{Q}{I^2} = \frac{15.53M\ var}{77.96^2} = 2555.22\ \Omega$$

$$\therefore L = \frac{X}{2\pi f} = \frac{2555.22}{2 \times \pi \times 50} = 8.14\ H$$

ค่าที่ใส่ใน RLC แทนส่วนของโหลดของบริษัท นอร์ดเค้ สคุ๊ค ไทยแลนด์ จำกัด แสดงดังภาพที่ 50



ภาพที่ 50 โหลดของบริษัท นอร์ดเค้ สคุ๊ค ไทยแลนด์ จำกัด

ระบบแรงดัน 115 kV

1. ความต้านทานสาย/เฟส = 0.0743 โอห์ม (Ω) /กิโลเมตร (km)
2. ค่าความจุไฟฟ้า/เฟส = 0.01346 ไมโครฟารัด (μF) / กิโลเมตร
3. ค่าความเหนี่ยวนำ/เฟส = 0.851 มิลลิเฮนรี (mH) / กิโลเมตร
4. ค่าแรงดัน / เฟส = $\frac{115}{\sqrt{3}}$ = 66.3953 กิโลโวลต์ (kV)
   = 93.8971 กิโลโวลต์ (ค่าสูงสุด)
5. เสิร์จอิมพีแดนซ์ (Zc) = $\sqrt{\frac{L}{C}}$ = 251.44 โอห์ม
6. ระยะความยาวสายส่ง = 5.5 กิโลเมตร

ระบบแรงดัน 22 kV

1. ความต้านทานสาย/เฟส = 0.1643 โอห์ม (Ω)/กิโลเมตร(km)
2. ค่าความจุไฟฟ้า/เฟส = 0.0178 ไมโครฟารัด (μF) / กิโลเมตร
3. ค่าความเหนี่ยวนำ/เฟส = 0. 44989 มิลลิเฮนรี (mH) / กิโลเมตร
4. ค่าแรงดัน / เฟส = $\frac{22}{\sqrt{3}}$ = 12.7017 กิโลโวลต์ (kV)
   = 17.9602 กิโลโวลต์ (ค่าสูงสุด)
5. เสิร์จอิมพีแดนซ์ (Zc) = $\sqrt{\frac{L}{C}}$ = 602 โอห์ม
6. ระยะความยาวสายส่ง = 2.8 กิโลเมตร

ระบบสายโทรศัพท์

ใช้สายเคเบิลแบบสายคู่บิดเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำต่าง ๆ จากตารางที่ 6

ค่าแรงดันเหนี่ยวนำในคู่สายจากการคำนวณ

ค่าแรงดันเหนี่ยวนำคิดที่ระยะห่างระหว่างสายเฟส C ของระบบ 115 kV และคู่สายโทรศัพท์ โดยใช้สมการที่ (22) คำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำร่วมและนำผลที่ได้คำนวณค่าแรงดันเหนี่ยวนำในคู่สาย ได้ผลดังตารางที่ 13

$$M = 2\pi f \left| \ln\left(1+\frac{6\times10^{5}}{d^{2}f}\rho\right)\right| \times 10^{-4} \quad \text{โอห์ม / กิโลเมตร} \qquad (22)$$

การหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

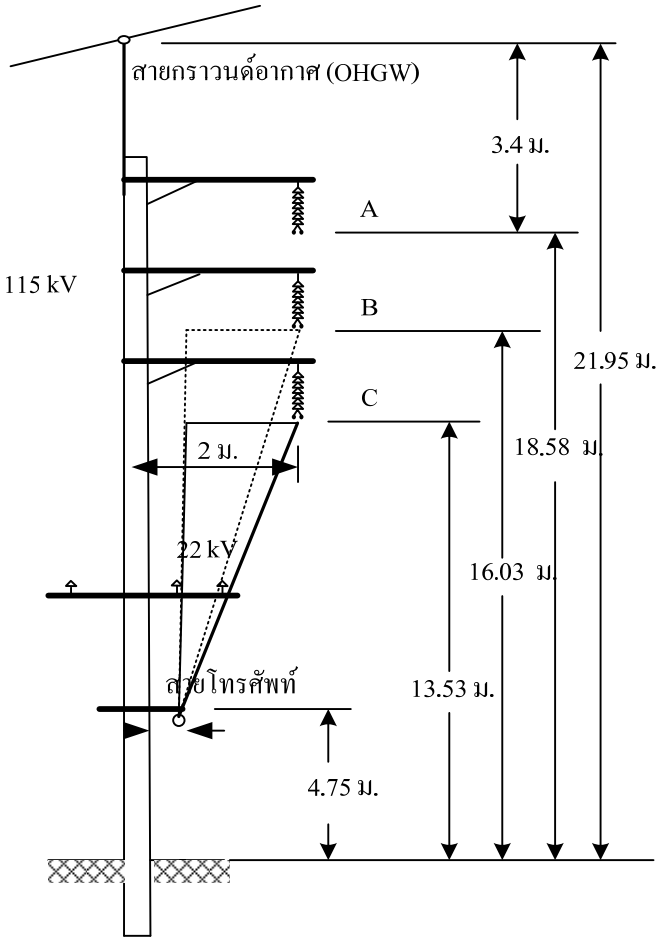
การหาความเข้มสนามแม่เหล็กเมื่อทราบค่ากระแสในสายส่งกำลังอาจเป็นกระแสเสิร์จหรือกระแสลัดวงจร จะได้ค่า H คือ

$$H = \frac{I}{2\pi R}$$

เนื่องจากในวงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์ เริ่มตั้งแต่สถานีไฟฟ้าสิงห์บุรีซึ่งมีโหลดของระบบ 115 kV เพียงแห่งเดียวคือ บริษัท นอร์ดเค้ สคุ๊ค ไทยแลนด์ จำกัด มีข้อมูลกระแสลัดวงจรของระบบมีค่าดังนี้ (กองแผนงานระบบไฟฟ้า ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า, 2549)

รายชื่อสถานีไฟฟ้า	BUS KV	TPH kA	SLG kA	R1	X1	R0	X0
*7. บ.Pan Asia Paper	115	7.245	4.307	0.01790	0.07410	0.05199	0.22629

เมื่อทราบค่ากระแสลัดวงจรจะเลือกใช้ค่าที่มีค่ามากที่สุด ในที่นี้คือค่าการลัดวงจรเฟสเดียว (SLG) มีค่าเท่ากับ 4.307 kA และหาระยะห่างระหว่างสายส่งกำลังไฟฟ้ากับสายเคเบิ้ลโทรศัพท์ ได้จากภาพที่ 51



ภาพที่ 51 การหาระยะห่างระหว่างสายส่งกำลังและสายเคเบิลโทรศัพท์

จากภาพที่ 51 ระยะระหว่างสายส่งกำลังไฟฟ้าเฟส C และเคเบิลโทรศัพท์เท่ากับ

$$R = \sqrt{(8.78)^2 + (1.5)^2}$$

$$= 8.9072 \quad \text{เมตร}$$

เมื่อทราบค่ากระแสในสายส่งกำลังในที่นี้คือกระแสลัดวงจรแบบเฟสเดียว จะได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก H คือ

$$H = \frac{I}{2\pi R}$$

$$= \frac{(4.307 \cdot \text{kA}) * 2.241}{2\pi \cdot 8.9072\text{m}}$$

$$= 86.2753 \text{ A/m}$$

คำนวณแรงดันเหนี่ยวนำในคู่สาย

แรงดันเหนี่ยวนำในคู่สายโทรศัพท์เกิดได้จากกรณีฟ้าผ่าลงสายป้องกันแขวนอากาศ (OHGW) กรณีฟ้าผ่าลงสายเฟสของระบบ 115 kV และระบบ 22 kV กรณีระบบไฟฟ้าทำงานในสภาวะปกติโหลดสมดุล แต่การจัดวางสายของระบบทำให้เกิดความไม่สมดุลทางสนามแม่เหล็ก และกรณีผิดปกติในระบบไฟฟ้า คือการลัดวงจรแบบ 3 เฟส และ แบบเฟสเดียว ซึ่งจะมีกระแสในสายไหลมากกว่าปกติมากๆ แรงดันเหนี่ยวนำก็จะมีค่ามากตามด้วย

การประมาณค่ากระแสฟ้าผ่า

จากสมการระยะฟ้าผ่าจะสามารถใช้ประมาณค่าของกระแสฟ้าผ่าได้ ซึ่งตามธรรมชาติกระแสฟ้าผ่าอาจมีขนาดต่ำกว่า 200 kA โดยกระแสฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นแต่ละครั้งจะมีอิมพัลส์ต่อเนื่องกันได้หลายอิมพัลส์ ค่าพารามิเตอร์กระแสฟ้าผ่าจากคณะกรรมการ CIGRE กำหนดค่าความน่าจะเป็นของโอกาสที่จะเกิดกระแสฟ้าผ่าและรูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่าไว้ดังนี้ (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2550)

1. ลำฟ้าผ่าลำแรก (first stroke) กำหนดรูปคลื่นของกระแสเป็น 10/350 μs และโอกาสที่จะเกิดกระแสสูงสุด 200 kA

2. ลำฟ้าผ่าลำต่อมา (subsequent stroke) กำหนดรูปคลื่นกระแสเป็น 0.25/100 μs และโอกาสที่จะเกิดกระแสสูงสุด 50 kA สำหรับเมืองไทยใช้ 40 kA

ในการวิเคราะห์ความคงทนของอุปกรณ์และคุณสมบัติของฉนวนสำหรับแรงดันเกินฟ้าผ่า ซึ่งมีค่ามาตรฐานของรูปคลื่นเป็น 1.2/50 μs และขนาดของแรงดันสูงเกินสามารถประมาณได้จากกระแสฟ้าผ่าและเสิร์จอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ ซึ่งในการออกแบบจะเลือกใช้ช่วงเวลาต่ำกว่า 10 μs

โดยการพิจารณากระแสฟ้าผ่าจะคิดที่ช่วงเวลาหน้าคลื่นเท่านั้น กรณีของการเกิดการเหนี่ยวนำจะใช้รูปคลื่นของลำฟ้าผ่าลำดับถัดมา เนื่องจากมีความถี่สูง

การวิเคราะห์การเกิดแรงดันสูงเกินจากเสิร์จฟ้าผ่าในคู่สายโทรศัพท์ที่แขวนร่วมไปกับเสาสายส่งจ่ายขนาดแรงดัน 115 และ 22 kV สามารถแยกพิจารณาได้เป็น

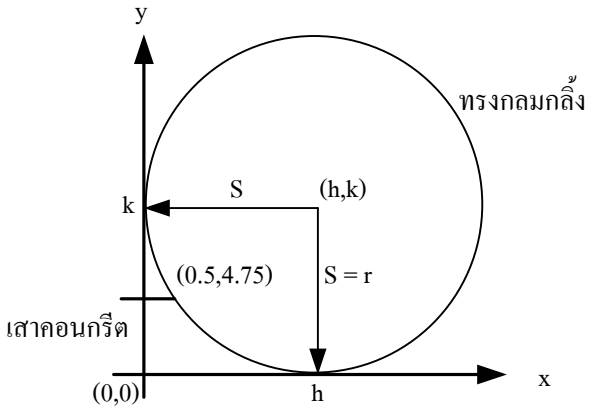
1. กรณีฟ้าผ่าโดยตรงที่เคเบิลโทรศัพท์ ซึ่งโอกาสเกิดได้น้อยมากเนื่องจากระบบสายส่งจ่ายจะมีการป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้สายตัวนำแขวนบนอากาศ(OHGW) ติดตั้งเหนือสายเฟสตามมาตรฐานการก่อสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าที่รับผิดชอบ

2. กรณีที่ฟ้าผ่าลงสายเฟสของระบบส่งจ่าย 115 หรือ 22 kV และทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำเข้าคู่สายโทรศัพท์

3. กรณีฟ้าผ่าลงที่สายตัวนำแขวนบนอากาศและทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำเข้าคู่สายโทรศัพท์

การประมาณค่าของแรงดันสูงเกินที่เกิดขึ้นเนื่องจากเสิร์จฟ้าผ่านี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้ทั้งสามกรณี โดยพิจารณาจากโครงสร้างของเสาส่งจ่ายขนาด 115 และ 22 kV

สายเคเบิลโทรศัพท์ปกติถูกแขวนอยู่กับเสาโดยสูงจากพื้นดิน 4.75 เมตร และห่างจากเสา 0.5 เมตร รัศมีของทรงกลมกลิ้งที่ใหญ่ที่สุดที่สัมผัสกับเคเบิลและพื้นดินก็คือระยะทางสูงสุดของโอกาสที่ฟ้าจะผ่าลงเคเบิล ดังภาพที่ 52



ภาพที่ 52 มิติของเสาส่งและทรงกลมกลิ้งในระนาบ x, y
ที่มา: สุรพัฒน์ (2544)

สมการวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุด (h, k) และรัศมี r คือ

$$(x–h)^2 + (y–k)^2 = r^2 \qquad (46)$$

เมื่อกำหนดให้ระยะรัศมีทรงกลมคือ s จะได้ h = k = r = s และแทนค่าต่างๆ ด้วย s เพื่อลดตัวแปรลงในสมการ (46) จะได้สมการเป็น

$$(x–s)^2 + (y–s)^2 = s^2$$

นำค่าตำแหน่งเคเบิล (x,y) = (0.5, 4.75) แทนค่าลงในสมการและแก้สมการหาระยะ s และเลือกค่าที่จะใช้ได้เท่ากับ 7.43 เมตร ดังนี้

$$(0.5–s)^2 + (4.75 – s)^2 = s^2$$
$$(0.25–2(0.5)s+s^2) + (22.56 – 2(4.75)s+s^2) = s^2$$
$$s^2 – 10.58 + 22.81 = 0$$
$$s = 7.4294, 3.0705 \text{ เมตร}$$

เลือกค่ามากจะได้ $s = 7.43$ เมตร

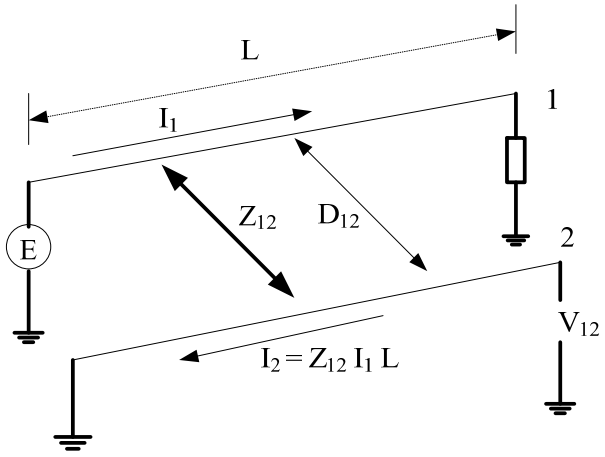
หาค่ากระแสฟ้าผ่าจากสมการระยะฟ้าผ่า

$$I = 0.041\ s^{1.54} \qquad (47)$$

$$I = 0.041\ s^{1.54} = 0.8997\ \text{kA}$$

กระแสฟ้าผ่าที่คำนวณได้น้อยกว่า 2 kA ซึ่งมีโอกาสเกิดน้อยมาก สำหรับการคำนวณนี้เป็นกรณีทางทฤษฎี (อุดมคติ) จากค่าที่ได้คือ 0.8997 kA หากใช้รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าครั้งแรกเป็น 10/350 μs และพิจารณาว่ากระแสฟ้าผ่าแยกไหลไปตามตัวนำทุกคู่สาย ในที่นี้คิดสำหรับ 25 คู่สาย (pair) กระแสแยกไหลออกไปทั้งสองด้านของเคเบิลและแต่ละคู่สายจะคำนวณค่าสูงสุดของกระแสฟ้าผ่าของแต่ละคู่สายได้ 17.99 แอมแปร์/คู่สาย

การคำนวณค่าแรงดันเหนี่ยวนำจากการคัปปลิ้งสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



ภาพที่ 53 การเกิดการคัปปลิงระหว่างระบบไฟฟ้าและแรงดันเหนี่ยวนำในวงจรข้างเคียง
ที่มา: Hughes (1988)

ฟ้าผ่าลงสายเฟส 115 kV

กรณีเกิดฟ้าผ่าลงสายเฟสของระบบ 115 kV จะแทนค่ากระแส I ด้วยกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA จะได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็น 78.034 A/m ใช้คลื่นกระแสฟ้าผ่าลำต่อมา 0.25/100 μs

จะได้แรงดันไฟฟ้าในคู่สายโทรศัพท์ที่คำนวณได้จากสมการ (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2550)

$$Vtel = \mu_0 \times b \times len \times H/t1 \quad (48)$$

เมื่อ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$

b = ระยะห่างของตัวนำของคู่สายโทรศัพท์ (5 mm.)

len = ความยาวคู่สาย (2.8 กิโลเมตร)

t_1 = ช่วงเวลาหน้าคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำต่อมา (0.25 μs)

จะได้ค่าแรงดันเหนี่ยวนำเนื่องจากฟ้าผ่าลงสายเฟสระบบ 115 kV เท่ากับ 5,491.4 โวลต์ เมื่อคิดที่กระแสสูงสุดที่สายส่งยอมให้ผ่านได้เนื่องจากเสิร์จอิมพีแดนซ์ 252 โอห์มและ BIL = 550 กิโลโวลต์ ที่รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่า และได้ค่ากระแสแต่ละคู่สายเท่ากับ 44 แอมแปร์

ฟ้าผ่าลงสายเฟสระบบ 22 kV

ระบบ 22 kV กรณีอยู่ใต้ระบบ 115 kV โอกาสถูกฟ้าผ่าโดยตรงมีน้อยมาก แต่ถ้าเกิดขึ้นแล้วจะทำให้มีแรงดันเหนี่ยวนำเข้าคู่สายโทรศัพท์มากกว่าเนื่องจากระยะห่างถึงสายโทรศัพท์มีค่าน้อยกว่าระบบไฟฟ้ากำลัง 115 kV ดังนั้นจำเป็นต้องทราบค่าแรงดันเหนี่ยวนำดังกล่าวเพื่อใช้ประกอบการเลือกขนาดแรงดันและกระแสที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ป้องกันอุปกรณ์ชุมสายหรือเครื่องรับด้านผู้ใช้บริการ

การคำนวณพิจารณาเช่นเดียวกันกับระบบ 115 kV โดยการนำระยะห่างการจัดวางสายมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยสายเคเบิ้ลโทรศัพท์จะวางสูงจากพื้น 4.75 เมตร และสายเฟส A B และ C ของระบบ 22 kV จะห่างกันในแนวนอน วัดจากแกนกลางเสาถึงตัวนำเฟส A = 1.15 เมตร เฟส B = 0.6 เมตร และเฟส C = - 1.15 เมตร และสูงจากพื้นในแนวตั้งเท่ากัน 9.8 เมตร ห่างจากสายเคเบิ้ลโทรศัพท์ในแนวตั้งเท่ากัน 5.05 เมตร

แทนค่ากระแส I ด้วยกระแสฟ้าผ่าขนาด 498.34 A จะได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็น 15.62 A/m และใช้คลื่นกระแสฟ้าผ่าลำต่อมา 0.25/100 μs จะคำนวณแรงดันไฟฟ้าในคู่สายโทรศัพท์ที่เกิดขึ้นได้จากสมการ (48)

จะได้ค่าแรงดันเหนี่ยวนำในคู่สายเนื่องจากฟ้าผ่าลงสายเฟส A ระบบ 22 kV เท่ากับ 1,099.2 โวลต์ เมื่อคิดที่กระแสสูงสุดที่สายส่งยอมให้ผ่านได้เนื่องจากเสิร์จอิมพีแดนซ์ 602 โอห์ม และ BIL = 150 กิโลโวลต์ ที่รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่า และกระแสแต่ละคู่สายเท่ากับ 1.83 แอมแปร์

กรณีระบบ 22 kV จ่ายกระแสโหลดปกติ

กระแสเฟส B จะอยู่ใกล้สายโทรศัพท์มากที่สุด และประกอบกับการบันทึกการใช้พลังงานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กรณีกระแสเป็นแบบไม่สมดุลโดยมีเฉพาะค่าในเฟส B เฉลี่ยได้ 601.4 แอมแปร์ สามารถคำนวณค่าแรงดันเหนี่ยวนำได้จากสมการ

$$V_M = Z_{MA} \cdot I_A + Z_{MB} \cdot I_B + Z_{MC} \cdot I_C \quad \text{Volt/km}$$

$$Z_{MA} = 0.04935 + j\,0.0628\ \ell n \frac{933}{D_A} \quad \text{Ohms/km}$$

$$Z_{MB} = 0.04935 + j\,0.0628\ \ell n \frac{933}{D_B} \quad \text{Ohms/km}$$

$$Z_{MC} = 0.04935 + j\,0.0628\ \ell n \frac{933}{D_C} \quad \text{Ohms/km}$$

เมื่อ I_A, I_B, I_C คือ กระแสโหลดที่ไหลอยู่ในระบบสายส่ง 22 kV ในรูปของเวกเตอร์ ส่วน D_A, D_B, D_C คือระยะห่างระหว่างสายตัวนำเฟส A, B, C ในระบบสายส่ง 22 kV กับสายตัวนำที่พิจารณาในที่นี้คือสายโทรศัพท์ ในที่คิดกระแสเฉพาะเฟส B ซึ่งใกล้มากที่สุดคิดเป็นระยะห่าง 5.051 เมตร กระแสเฉลี่ย 601.4 ได้ค่าแรงดันเหนี่ยวนำในคู่สาย 200 โวลต์/กิโลเมตร

คำนวณค่าแรงดันเหนี่ยวนำในคู่สายโทรศัพท์ได้

$$V_{MB} = 601.4 \angle 120^{*}(0.04935 + j\,0.0628\ \ell n \frac{933}{5.051}) \quad \text{Volts}$$

$= 200 \angle -2.7674$ โวลต์/กิโลเมตร

การคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำในคู่สายเนื่องจากระบบ 115 kV

พิจารณาระยะห่างระหว่างระบบ 115 kV และ สายโทรศัพท์ จากภาพที่ 51

$$D_A = \sqrt{(2-0.5)^2 + (18.53-4.75)^2} = 13.8614 \text{ m}$$

$$D_B = \sqrt{(2-0.5)^2 + (16.03-4.75)^2} = 11.3793 \text{ m}$$

$$D_C = \sqrt{(2-0.5)^2 + (13.53-4.75)^2} = 8.9072 \text{ m}$$

$$Z_{MA} = 0.04935 + j\,0.0628 \ln \frac{933}{13.8614}$$

$$= 0.04935 + j\,0.2643 \quad \text{Ohms/km}$$

$$Z_{MB} = 0.04935 + j\,0.0628 \ln \frac{933}{11.3793}$$

$$= 0.04935 + j\,0.2767 \quad \text{Ohms/km}$$

$$Z_{MC} = 0.04935 + j\,0.0628 \ln \frac{933}{8.9072}$$

$$= 0.04935 + j\,0.2921 \quad \text{Ohms/km}$$

ในภาวะปกติมีกระแสไฟฟ้าในระบบ 115 kV 80 A (Balance Load) จะมีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้น

$$V_M = (80) \cdot ((1\angle 0) \cdot (0.04935 + j\,0.2643) + (1\angle 120) \cdot (0.04935 + j\,0.2767) + (1\angle -120) \cdot (0.04935 + j\,0.2921)) \quad \text{Volt/km}$$

$$V_M = 80 \cdot (0.0797 + j0.3155) = (6.376 + j25.24)$$

$$= 26.0329 \angle 75.8297 \quad \text{Volt/km}$$

เมื่อคิดที่ภาวะ ฟอลต์ไม่สมดุลเฟสเดียว (SLG) กระแสฟอลต์ = 4307 A จะคำนวณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นได้

$$V_M = 4307\ A*(0.0797 + j0.3155)$$
$$= 1401.5 \angle 75.8297 \quad \text{Volt/km}$$

สามารถสรุปได้ว่า แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำระหว่างระบบสายส่ง 115 kV กับระบบสายโทรศัพท์ที่อยู่ใกล้ในสภาวะโหลดของระบบ 115 kV ใช้งานปกติและสมดุลจะมีค่าเท่ากับ 26.0329 โวลต์ต่อกิโลเมตร (Volt/km) หากคิดที่ 2.8 กิโลเมตรมีค่าเท่ากับ 72.8921 โวลต์ ซึ่งมีค่าสูงเมื่อคิดเป็นค่าสูงสุด (Peak) จะเท่ากับ $\sqrt{2}$ *72.8921 มีค่าประมาณ 103.08499 โวลต์ เมื่อคิดรวมค่าแรงดันกระแสตรงที่จ่ายให้ระบบโทรศัพท์ 48 $\pm$2 โวลต์ จะมีค่าสูงขึ้นไปเป็น 151.069 $\pm$2 โวลต์

จากค่าที่ได้แสดงให้เห็นว่ามีค่าต่ำกว่าขนาดแรงดันใช้งานที่ระบบสามารถทนได้เมื่อพิจารณาพิกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันมีขนาดแรงดันสปาร์คโอเวอร์ 190 – 250 โวลต์ (ตารางผนวกที่ 1 ซึ่งจะเป็นแรงดันที่คงอยู่ในระบบตลอดเวลาที่มีการเหนี่ยวนำเชื่อมโยงขณะระบบไฟฟ้ากำลังมีกระแสโหลดใช้งานปกติ

ผลและวิจารณ์

ผล

เมื่อมีแรงดันสูงเกินในระบบสายโทรศัพท์ไม่ว่าจะเนื่องจากการเหนี่ยวนำจากสาเหตุฟ้าผ่าลงระบบไฟฟ้ากำลังหรือเกิดจากการสับสวิตช์ของระบบไฟฟ้ากำลัง ก็จะทำให้เกิดแรงดันสูงเกินในระบบสายโทรศัพท์ได้เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐาน สามารถอธิบายได้โดยใช้สมการ

$V = Z_C I$

เมื่อ V = แรงดัน

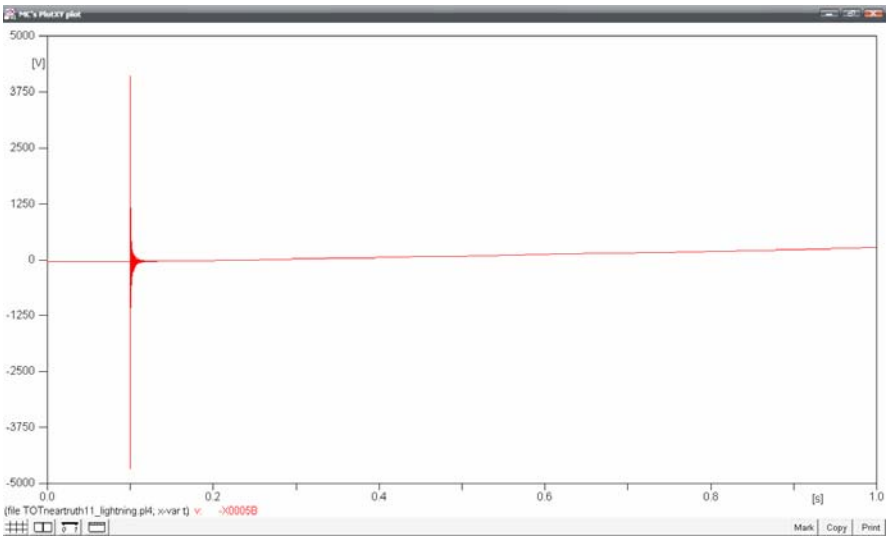
Z_C = อิมพีแดนซ์ของสาย

I = กระแสที่ไหลในสาย

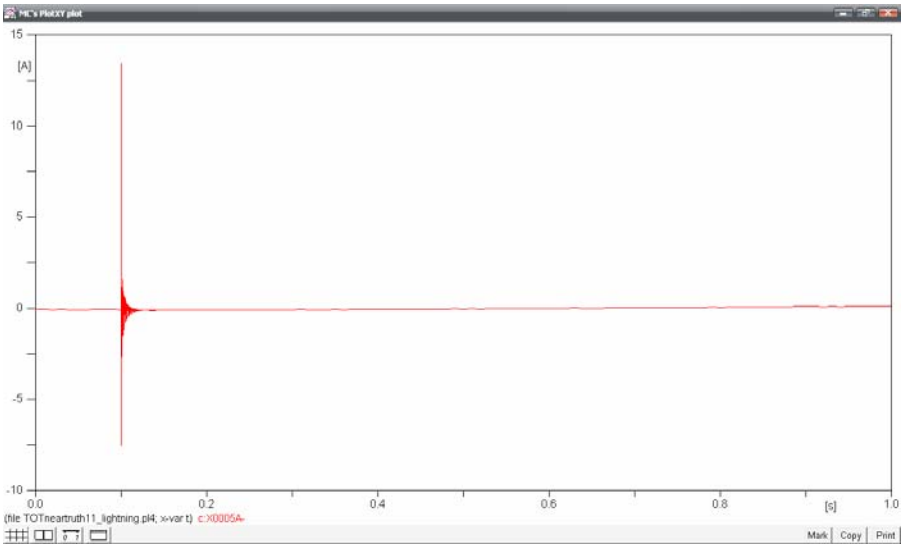
โดยการจำลอง (Simulation) ด้วยโปรแกรม ATP/EMTP ใช้ค่าพารามิเตอร์ของสายในระบบกำลังและสายของระบบโทรศัพท์ในงานจริง แล้วรันโปรแกรม ผลลัพธ์ที่ได้เป็นค่าแรงดันสูงเกินซึ่งค่าที่ได้สอดคล้องกับสมมติฐาน จึงสามารถกล่าวได้ว่าการเลือกแบบจำลองแทนสายโทรศัพท์ที่ใช้มีแนวโน้มถูกต้อง

ผลการจำลองฟ้าผ่าโดยตรง

เมื่อฟ้าผ่าลงสายดินอากาศ (OHGW) จะเกิดอิมพัลส์ฟ้าผ่าแยกไหลในสองทิศทางและทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำคับปลิงเข้าไปในคู่สายโทรศัพท์ ซึ่งผลการจำลองได้ขนาดแรงดันและกระแสในคู่สาย 4680 โวลต์ และ 14 แอมแปร์ ดังภาพที่ 54 และ 55 ตามลำดับ

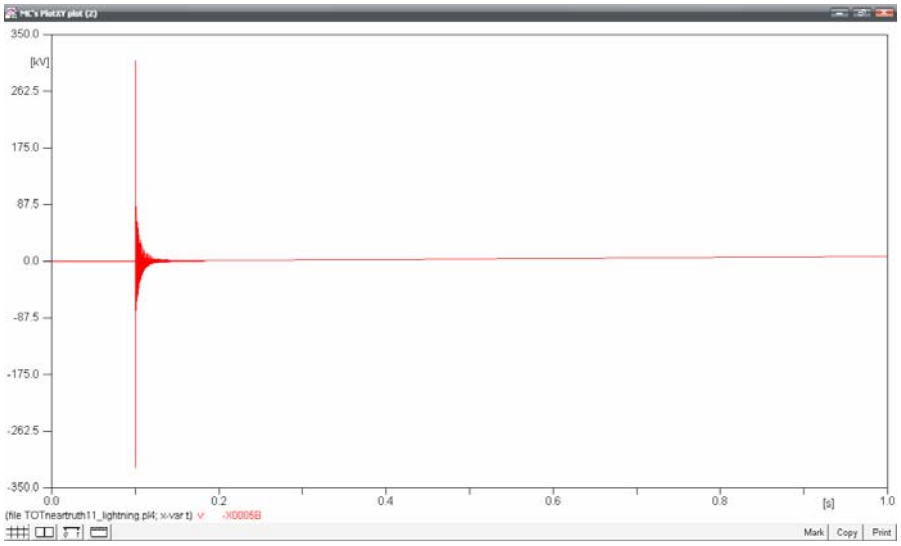


ภาพที่ 54 แรงดันสูงเกินระหว่างคู่สายเมื่อเกิดฟ้าผ่าโดยตรงบนสาย OHGW

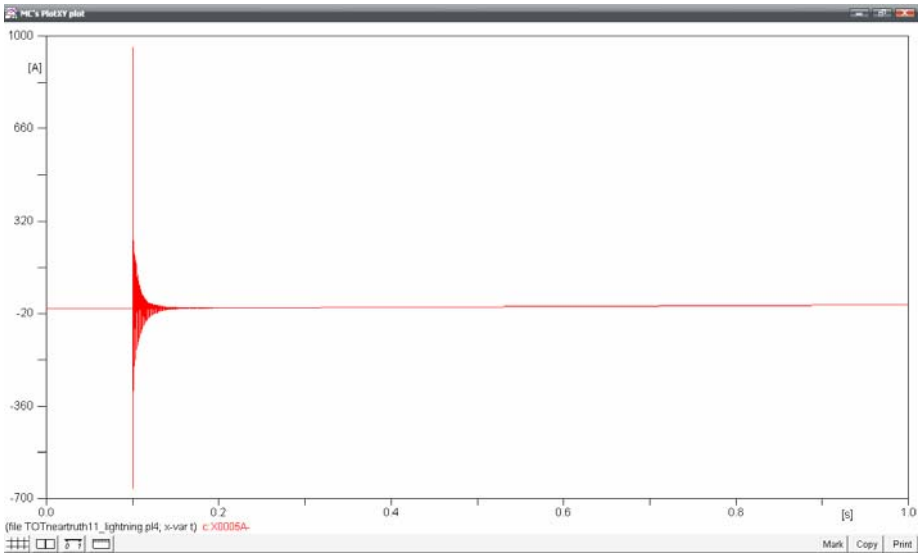


ภาพที่ 55 กระแสในคู่สายเมื่อเกิดฟ้าผ่าโดยตรงบนสาย OHGW

กรณีฟ้าผ่าลงสายเฟสของระบบไฟฟ้ากำลัง 115 kV โดยตรงทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำและกระแสในคู่สายโทรศัพท์ที่มีค่า 328 กิโลโวลต์ และ 897 แอมแปร์มากกว่ากรณีฟ้าผ่าลงสายดินอากาศ แสดงดังภาพที่ 56 และ 57 ตามลำดับ

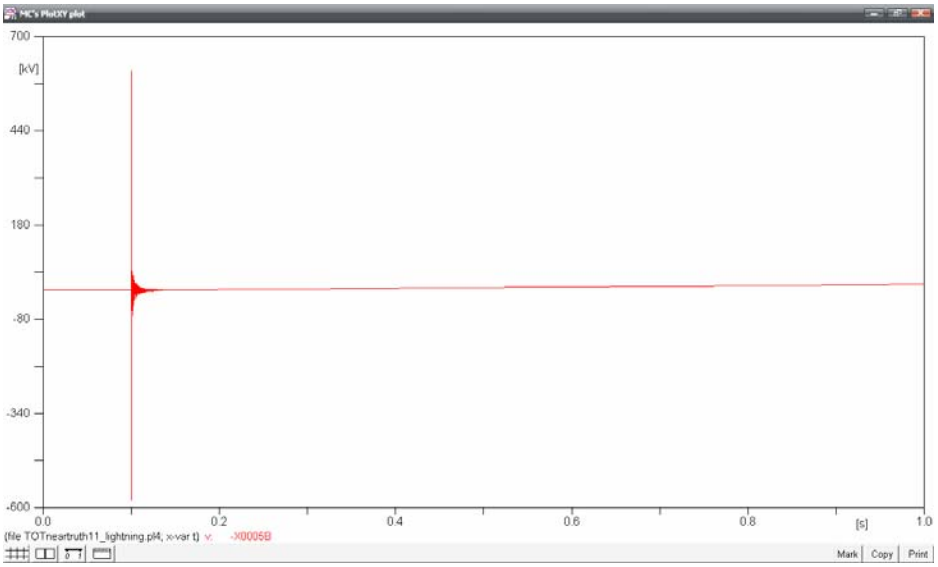


ภาพที่ 56 แรงดันระหว่างคู่สายโทรศัพท์เมื่อเกิดฟ้าผ่าโดยตรงบนสายเฟสระบบ 115 kV

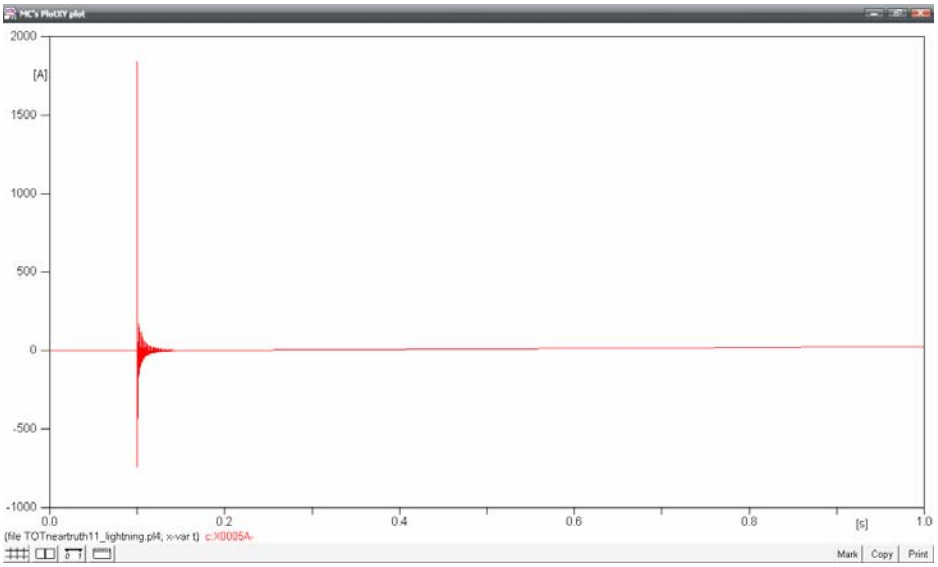


ภาพที่ 57 กระแสในคู่สายโทรศัพท์เมื่อเกิดฟ้าผ่าโดยตรงบนสายเฟสระบบ 115 kV

กรณีฟ้าผ่าลงสายเฟสของระบบไฟฟ้ากำลัง 22 kV โดยตรงทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำและกระแสในคู่สายโทรศัพท์ที่มีค่า 630 กิโลโวลต์ และ 1800 แอมแปร์ ซึ่งมากกว่ากรณีฟ้าผ่าลงสายระบบ 115 kV ดังภาพที่ 58 และ 59 ตามลำดับ



ภาพที่ 58 แรงดันระหว่างคู่สายโทรศัพท์เมื่อเกิดฟ้าผ่าโดยตรงบนสายเฟสระบบ 22 kV



ภาพที่ 59 กระแสในคู่สายโทรศัพท์เมื่อเกิดฟ้าผ่าโดยตรงบนสายเฟสระบบ 22 kV

กรณีเกิดการลัดวงจรของระบบไฟฟ้ากำลัง

ในที่นี้จะแทนสายส่งจ่ายด้วยแบบจำลอง (model) เป็นแบบ 1 เฟส โดยพารามิเตอร์ต่างๆ จะเป็นค่าต่อเฟส (per–phase) แรงดันเป็นค่าแรงดันระหว่างสายกับนิวทรัล กระแสเป็นกระแสใน

สายผลที่ได้เป็นดังตารางที่ 12 ที่ระยะห่างระหว่างคู่สายโทรศัพท์กับเฟส C ของระบบ 115 kV ห่างกัน 8.9 เมตร ในภาวะปกติมีกระแสในสาย 80 แอมแปร์ มีแรงดันเหนี่ยวนำเกิดขึ้น 67.70399 โวลต์

เมื่อเกิดฟอลต์แบบ SLG กระแสมีค่าสูงขึ้นและไม่สมดุลทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในคู่สายสูงขึ้นมีค่าเป็น 2,999.287 โวลต์

ตารางที่ 12 ค่าแรงดันเหนี่ยวนำในคู่สายในภาวะปกติ ภาวะเกิดฟอลต์เฟสเดียวและสามเฟส

	ค่าแรงดันเหนี่ยวนำในคู่สาย(โวลต์/กิโลเมตร)						
ระยะห่าง (เมตร)	5	8.9	10	20	40	60	80
ความเหนี่ยวนำร่วม	0.33845	0.30224	0.29493	0.25141	0.20791	0.18250	0.16450
กระแสปกติ	27.07679	24.17999	23.59458	20.11283	16.63297	14.60009	13.16061
(80A)	75.81501	**67.70399**	66.06481	56.31593	46.57232	40.88026	36.84972
กระแสฟอลต์ 3 เฟส	651.76091	582.03271	567.9411	484.1326	400.3695	351.4364	316.787
(1925.667 A)	1824.93055	1629.69159	1590.235	1355.571	1121.035	984.0219	887.0035
กระแสฟอลต์ 1 เฟส	1199.50182	1071.17393	1045.24	890.9985	736.8406	646.7841	583.0152
(3544 A)	3358.60509	**2999.28701**	2926.671	2494.796	2063.154	1810.995	1632.443

วงจรสมมูลของคู่สายโทรศัพท์

การพิจารณาประมาณค่าแรงดันสูงเกินที่ปลายสายหรือปลายทางของคู่สายโทรศัพท์ พิจารณาได้จากวงจรสมมูลของคู่สายโทรศัพท์ดังภาพที่ 38

กรณีนี้พิจารณาคู่สายเป็นแบบโหมดร่วม (Common mode) ตัวนำของ Tip และ Ring จะต่อร่วมเข้าด้วยกัน สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ใหม่ดังภาพที่ 39

เมื่อทราบค่าต่างๆ ทางกายภาพจากข้อมูลของคู่สายของโทรศัพท์ที่นำมาใช้ สามารถทราบค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของคู่สายได้จากสมการที่ (45) เช่นเดียวกับสายส่งจ่ายกำลัง (ในที่นี้นำข้อมูลการทดสอบมาจากการตรวจสอบสายเคเบิลขององค์การโทรศัพท์) โดยค่าต่างๆ ที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบหลายๆ ครั้ง ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของคู่สายหาได้จากสมการ (45)

$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{โอห์ม}$$

จะได้

$$Z_C = \sqrt{\frac{0.327 \times 10^{-3}}{22 \times 10^{-9}}} = 123.85 \quad \text{โอห์ม}$$

$$\cong 124 \quad \text{โอห์ม}$$

และหาค่าแรงดันสูงเกินที่คู่สายโทรศัพท์ได้จากสมการ

$$V = IZ_C$$

กำหนดให้ V = แรงดันสูงเกินที่คู่สายโทรศัพท์

I = กระแสเสิร์จฟ้าผ่า

Z_C = เสิร์จอิมพีแดนซ์ของคู่สายโทรศัพท์

ค่าแรงดันสูงเกินเนื่องจากฟ้าผ่าที่คู่สายของเคเบิล 25 คู่สายคือ

$$V = 18 \times 124 = 2{,}232 \text{ โวลต์}$$

ดังนั้นประมาณค่าแรงดันสูงเกินที่เกิดจากฟ้าผ่าโดยตรงที่คู่สายเคเบิลโทรศัพท์ 25 คู่สาย เมื่อมีค่ากระแสผ่านแต่ละคู่สายสูงสุดประมาณ 18 แอมแปร์ที่รูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่าครั้งแรก (first stroke) 10 /350 μs ผ่านคู่สายที่มีอิมพีแดนซ์ประมาณ 124 โอห์ม ได้แรงดันสูงเกินสูงสุดที่คู่สายโทรศัพท์มีค่า 2,232 โวลต์

สามารถสรุปได้ว่าการติดตั้งระบบโทรคมนาคม (โทรศัพท์) ไปกับระบบจำหน่ายหรือส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังจะมีการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้นในคู่สายโทรศัพท์อย่างแน่นอนและมีค่ามาก

เมื่อเกิดเหตุผิดปกติคือ ฟ้าผ่าลงสายป้องกันแขวนอากาศ ฟ้าผ่าลงสายเฟสของระบบไฟฟ้ากำลัง และฟ้าผ่าลงสายโทรศัพท์โดยตรง

การเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในคู่สายโทรศัพท์เมื่อมีการเกิดการลัดวงจรทั้งแบบสามเฟส (สมดุล) และแบบ SLG (ไม่สมดุล) จะก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงเกินขึ้นมาได้ ส่วนนี้แม้ว่าจะมีค่าสูงแต่เกิดขึ้นเพียงระยะเวลาชั่วครู่เท่านั้น ถ้าเลือกหรือกำหนดขนาดอุปกรณ์ป้องกันให้เหมาะสมจะสามารถผ่านช่วงเวลาดังกล่าวได้

นอกจากเหตุการณ์ฟ้าผ่าและการลัดวงจรดังกล่าวแล้วยังต้องตระหนักถึงขนาดของแรงดันเหนี่ยวนำที่เหนี่ยวนำให้เกิดในคู่สายตลอดเวลา แม้ว่าระบบไฟฟ้ากำลังอยู่ในสภาวะจ่ายโหลดปกติ หากค่าแรงดันมีค่าสูงใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานแต่ไม่ถึงค่าที่จะทำงานได้เป็นเวลานานๆ ก็จะสามารถทำให้เกิดความเสียหายกับตัวอุปกรณ์ป้องกันและอุปกรณ์หรือบริภัณฑ์ที่เปราะบางได้เช่นกัน ซึ่งหากหน่วยงานทั้งสองส่วนคือการไฟฟ้าและหน่วยงานด้านการโทรคมนาคมได้ทำความเข้าใจปัญหาและร่วมมือกันแก้ไขปัญหาดังกล่าวก็จะสามารถทุเลาหรือน้อยลงได้ และก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศในอันที่จะไม่ต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงหรือโอกาสในทางธุรกิจมากโดยไม่จำเป็น

วิจารณ์

เมื่อมีแรงดันสูงเกินเกิดขึ้นในระบบสายโทรศัพท์ไม่ว่าจะเนื่องจากการเหนี่ยวนำจากสาเหตุฟ้าผ่าลงระบบไฟฟ้ากำลัง หรือเกิดจากการสับสวิตช์ของระบบไฟฟ้ากำลัง ก็จะทำให้เกิดแรงดันสูงเกินเนื่องจากการเหนี่ยวนำ ถ้าหากมีค่าเกินความสามารถทนทานได้ของอุปกรณ์จะทำให้อุปกรณ์ปลายสายซึ่งอาจเป็นอุปกรณ์ด้านต้นทางที่ให้บริการหรือด้านทางที่รับบริการเกิดความเสียหายได้ แต่ถ้าหากเราทำการป้องกันไม่ให้แรงดันสูงเกินดังกล่าวผ่านเข้าไปยังอุปกรณ์ที่มีความเปราะบางดังกล่าวได้ หรือป้องกันไม่ให้แรงดันสูงเกินที่ผ่านเข้ามาได้มีค่ามากกว่าความสามารถทนได้ของอุปกรณ์ อุปกรณ์ปลายทางทั้งด้านให้และรับบริการก็จะปลอดภัยคือไม่เกิดความเสียหาย โดยยังคงทำงานได้ดังเดิมเมื่อสภาวะแรงดันสูงเกินได้ผ่านไปแล้ว

การป้องกันแรงดันสูงเกินที่เกิดจากสาเหตุดังกล่าวข้างต้น หากเราสามารถทราบค่าแรงดันดันสูงเกินดังกล่าวได้ก็จะสามารถเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันได้ถูกต้องและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกัน ตลอดจนทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการที่จะสุ่มเลือกอุปกรณ์ป้องกันให้มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็นตลอดจนเป็นการลดต้นทุน และค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมหรือจัดหาของใหม่ทดแทน แม้ว่าหากคิดเป็นมูลค่าเป็นจำนวนเงินต่ออุปกรณ์แต่ละชิ้นอาจไม่มากนัก หากแต่ในความเป็นจริงจะต้องคำนึงถึงความสูญเสียโอกาสในการให้บริการ และการส่งผลกระทบถึงธุรกิจในภาพรวม เช่น หากผู้ใช้บริการกำลังติดต่อผ่านเครือข่ายโทรศัพท์ที่ให้บริการและเป็นการเจรจาตกลงหรืออนุมัติโครงการที่มีมูลค่าสูงที่ต้องทำในวินาทีนั้นเท่านั้น หากเกินเวลานั้นแล้วมูลค่าการตกลงอาจไม่มีการตกลงหรือไม่อนุมัติโครงการดังกล่าว ก็จะทำให้เกิดความเสียหายในด้านการเสียโอกาส ซึ่งไม่สามารถเทียบได้กับระบบป้องกันที่จำเป็นต้องมีประสิทธิภาพ สามารถป้องกันระบบให้ปลอดภัยได้อย่างดีสามารถให้บริการได้โดยไม่มีการขัดจังหวะ ดังนั้นการศึกษาในเรื่องนี้จึงถือได้ว่าเป็นสิ่งที่สำคัญและมีคุณค่าในเชิงวิศวกรรมที่มีผลต่อธุรกิจการให้บริการโทรคมนาคมยิ่ง

เกณฑ์หรือเงื่อนไขที่ช่วยให้ผลกระทบมีระดับลดลง

1. การเพิ่มระยะห่างระหว่างระบบส่งกำลังและระบบโทรคมนาคม (โทรศัพท์) โดยการเพิ่มระยะห่าง 8 ถึง 107 เมตร สามารถช่วยลดแรงดันเหนี่ยวนำลงได้เพียง 50 % เท่านั้น ทำนองเดียวกันการนำสายตัวนำลงใต้ดิน (ฝังดิน) ยังไม่สามารถลดผลกระทบได้มากเพราะดินในทางปฏิบัติไม่เป็นตัวกำบังการรบกวนจากแม่เหล็กไฟฟ้าได้สมบูรณ์

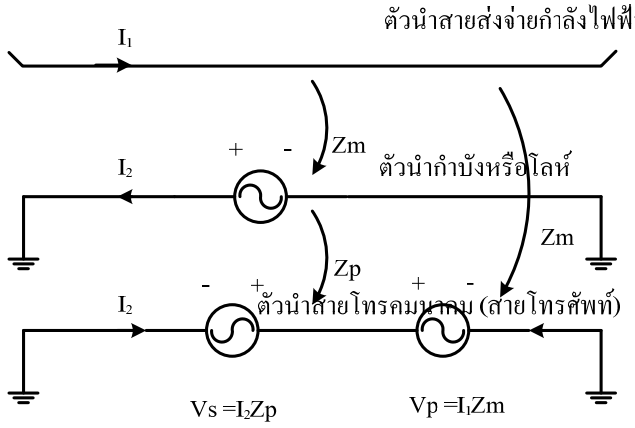
2. สามารถใช้ตัวกำบังโลหะ (metallic shield) ลดหรือกำจัดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตได้อย่างมีประสิทธิผล แต่ถ้ามีการต่อกำบัง (โล่) ลงดิน (Grounded) แล้วเกิดวงรอบจะทำให้กระแสไหลได้โดยมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสในระบบส่งกำลังไฟฟ้า พิจารณาภาพที่ 60

3. จากข้อ 2 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในกำบังจะเหนี่ยวนำแรงดันที่มีขั้วตรงข้ามกัน (ต่างเฟสกัน 180 องศา) ทำให้เกิดการหักล้าง (Cancel) กับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้ากำลัง ซึ่งตัวกำบังจะทำหน้าที่ได้ผลดี**หาก**ตัวนำกำบังมีระยะห่างจากระบบสายส่งกำลังไม่เกิน 9 เมตร และมีค่าความต้านทานต่ำๆ

4. องค์ประกอบการกำบัง (Shield factor) เป็นอัตราส่วนของแรงดันคงเหลือที่มีอยู่ในวงจรกำบังต่อแรงดันในวงจรเดียวกันที่ไม่มีการกำบัง ซึ่งมีค่าสูงสุดและต่ำสุดดังนี้

S_F = 1 หมายถึงไม่มีการกำบัง

และ S_F = 0 หมายถึงมีการกำบังและได้ผลเป็นอย่างดีเยี่ยม



ภาพที่ 60 กลไกการเหนี่ยวนำแรงดันจากสายจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังระบบโทรคมนาคม

ที่มา: Gundrum (1988)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การป้องกันอุปกรณ์ที่มีความเปราะบางในระบบโทรคมนาคมที่ได้ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ จัดได้ว่าเป็นการประยุกต์ใช้ตัวป้องกันเสิร์จสำหรับบริภัณฑ์แรงดันต่ำมาก (Very Low Voltage Device) เพื่อช่วยลดความรุนแรงของเสิร์จที่จะเข้ามาในระบบไม่ให้มีความรุนแรงจนทำให้อุปกรณ์ดังกล่าวเกิดความเสียหาย โดยพิจารณาผลของแรงดันสูงเกินที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในภาวะปกติ สภาวะฟ้าผ่าลงสายป้องกัน OHGW ฟ้าผ่าลงสายของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง และสภาวะเมื่อเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

อย่างไรก็ตามแม้จะมีการนำมาตรการต่างๆ ดังกล่าวซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้องมาใช้แล้วก็ตาม อุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องการป้องกันก็ยังมีโอกาสที่จะเกิดความล้มเหลวเนื่องจากเสิร์จได้ แต่ยังถือว่ามีผลดีกว่าที่จะไม่มีการป้องกันอะไรเลย เพราะหากพิจารณาถึงความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายและในมุมมองของค่าใช้จ่ายที่จะต้องเสียไปในการซ่อมแซม การเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ตลอดจนโอกาสที่จะมีรายได้จากการให้บริการที่ต้องสูญเสียไป

การคำนวณเพื่อประเมินค่าแรงดันเหนี่ยวนำมีความสำคัญอย่างมากเพราะช่วยให้ง่ายต่อการกำหนดค่าพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันเพื่อให้สามารถทนต่อค่าแรงดันสูงเกินที่เกิดขึ้นเป็นเวลานานกว่าอิมพัลส์ที่มีช่วงเวลาสั้นๆ ได้ง่ายขึ้น แต่ขั้นตอนอาจจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนเพราะมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายตัว ในงานจริงหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้สนับสนุนช่วยเหลือด้านเทคนิคต่างๆ กับผู้ปฏิบัติงานโดยจัดการอบรมสัมมนาเพื่ออธิบายเกี่ยวกับการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีพื้นฐานเพื่อให้ใช้คำนวณและปรับปรุงให้สามารถประยุกต์ใช้ได้จริง ร่วมกับจัดให้มีการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นจากประสบการณ์ที่พบเห็นในงานภาคสนามจริงของพนักงานเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องด้วย การคำนวณในงานวิจัยนี้จึงสามารถใช้เป็นแนวทางช่วยอธิบายการเกิดการเหนี่ยวนำแรงดันสูงเกินเข้ามาในระบบโทรคมนาคมให้ผู้ปฏิบัติงานเข้าใจได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้มีความตระหนักถึงอันตรายจากสิ่งที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า โดยเมื่อมีความรู้ความเข้าใจแล้วก็จะปฏิบัติงานด้วยความระมัดระวังมากยิ่งขึ้น

การพิจารณาเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกัน

อุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันที่ใช้ในการป้องกันระบบโทรศัพท์มีหลายแบบในปัจจุบันจะนิยมใช้อุปกรณ์หลายชนิดต่อร่วมเข้าด้วยกันเป็นแบบผสม เพื่อให้สามารถรับเสิร์จที่เกิดขึ้นและเข้ามาในข่ายสายโทรคมนาคมทั้งแบบที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นแบบช่วงสั้น(คลื่นฟ้าผ่า) และช่วงยาว (จากการเหนี่ยวนำเข้ามา) ได้ หากผู้ใช้หรือออกแบบมีความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับการเกิดเสิร์จและหลักการประสานการป้องกันของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จชนิดต่างๆ เข้าด้วยกันให้ทำงานสอดคล้องกันโดยจัดให้อุปกรณ์ที่สามารถรับเสิร์จขนาดโตกว่าไว้ด่านแรก และด่านถัดไปก็จัดให้มีขนาดและความไวที่เข้ากันได้ดี จะทำให้สามารถป้องกันอุปกรณ์หรือบริภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เปราะบางได้ มาตรการที่เหมาะสมและมีประสิทธิผล ในที่นี้พิจารณาที่สภาวะการทำงานต่างๆ คือ

กรณีปกติ (ไม่คิดผลของฟ้าผ่า)

1. พิจารณาอุปกรณ์ที่จะป้องกัน กำหนดจากค่าสูงสุดแรงดันชั่วครู่แบบชั่วคราวที่อุปกรณ์สามารถทนได้ (V_{MVW})

2. เลือกขนาดแรงดันระหว่างสายของอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสม กำหนดจากแรงดันทำงานต่อเนื่องของอุปกรณ์ที่จะป้องกัน (V_{MCOV})

3. เลือกตัวป้องกันเสิร์จ โดยพิจารณาค่าต่อไปนี้คือ

3.1 ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์สูงสุดที่เลือกใช้ควรให้มีค่าต่ำกว่า V_{MVW}

3.2 แรงดันเบรกดาวน์กระแสตรง (DC) น้อยกว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงที่สามารถทนได้ รวมค่าตัวประกอบความปลอดภัย (Safety factor) ค่าจะต้องมีค่ามากกว่า แรงดันระหว่างสายสูงสุดของอุปกรณ์ที่ต้องการจะป้องกัน

3.3 แรงดันและกระแสที่อุปกรณ์ป้องกันทนได้ต้องมากกว่าแรงดัน V_{MCOV}

4. การประสานการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันต้องเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันปฐมให้มีความไวในการทำงานก่อนที่อุปกรณ์ที่ต้องการป้องกันเกิดความเสียหายเสียก่อน

กรณีฟ้าผ่าโดยตรง

ขนาดของแรงดันสูงเกินหรือกระแสลัพธ์มีความสำคัญน้อยกว่าลักษณะของรูปคลื่นของกระแสเนื่องจากรูปคลื่นกระแสเป็นตัวทำให้เกิดพลังงานที่ทำให้เกิดความเสียหาย

กรณีมีฟ้าผ่าโดยตรงจะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านเข้าระบบโทรคมนาคมเนื่องจากใช้จุดดินอ้างอิงด้านนอกซึ่งนอกเหนือจากกราวนด์เฉพาะที่ (Local Ground) เราจะพิจารณาเลือก SPD ที่มีลักษณะสมบัติที่สามารถรับอิมพัลส์กระแสฟ้าผ่าขนาด 10/350 ไมโครวินาทีได้มาใช้ป้องกัน

สำหรับสายโทรคมนาคมหรือสายสัญญาณแบบมีโล่กำบังหากไม่ทราบอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อเวลาของคลื่นฟ้าผ่า (ทรานเซียนฟ้าผ่า) จะเลือกใช้ค่า 100 V/ms และสำหรับสายที่ไม่มีโล่กำบังจะเลือกใช้ค่า 500 V/ms ส่วนอัตราการเปลี่ยนแปลงสำหรับ EMP ใช้ค่า 100 kV/ms ส่วนทรานเซียนจากการสวิตชิ่งของแหล่งจ่ายกำลังไฟสลับใช้ค่า 5 kV/ms การป้องกันแรงดันสูงเกินในระบบความถี่ 50 หรือ 60 เฮิร์ต ทั่วไปจะเลือกขนาดแรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงสูงสุดให้มีค่าเท่ากับค่าพีคของแรงดันสูงเกินกระแสสลับ

กรณีมีฟ้าผ่าบริเวณใกล้เคียง

กรณีมีฟ้าผ่าบริเวณใกล้เคียงไม่ใช่ผ่าโดยตรง กระแสที่ถูกเหนี่ยวนำจะพิจารณาว่ามีช่วงเวลาขาขึ้น 8 ไมโครวินาทีและมีเวลาที่ขนาดกระแสลดลงถึงครึ่งของค่ายอดเป็น 20 ไมโครวินาทีเรียกคลื่นนี้ว่าเป็นชนิด 8/20 ไมโครวินาที ซึ่งเราจะใช้เป็นเกณฑ์การพิจารณาความสามารถรับกระแสของ SPD ไม่ใช่คาดหมายให้ SPD นี้ทนกระแสเนื่องจากฟ้าผ่าโดยตรงได้

ข้อเสนอแนะ

การเลือกใช้ขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกันเสิร์จสำหรับระบบโทรคมนาคม (โทรศัพท์) หากสามารถพิจารณาถึงโอกาสที่น่าจะเป็นไปได้ที่จะเกิดเสิร์จและความรุนแรงของเสิร์จรวมถึงค่าใช้จ่ายที่อาจเป็นไปได้เมื่อเกิดความล้มเหลวของระบบและไม่สามารถให้บริการได้

แรงดันสูงเกินอาจเกิดจากการเหนี่ยวนำเข้ามาในระบบโทรคมนาคมได้ในทางปฏิบัติ ซึ่งอาจมีค่ามากถึงค่าที่ระบบอาจเกิดความเสียหายหรือทำงานผิดปกติไปจากเดิม ดังนั้นจึงแนะนำว่า ควรจัดให้มีการป้องกันแรงดันสูงเกินที่เรียกว่าตัวป้องกันเสิร์จแบบพิเศษติดตั้งไว้ป้องกันระบบด้วย

การติดตั้งอุปกรณ์ลดเสิร์จที่เลือกใช้ เพื่อให้ถูกต้องเหมาะสมจะต้องตรวจดูรายละเอียดต่างๆ จากข้อมูลของผู้ผลิตจะทำให้การติดตั้งใช้งานทำได้อย่างถูกต้องยิ่งขึ้น

นอกจากนี้การป้องกันเสิร์จจะต้องคำนึงถึงค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (dv/dt) เพื่อไม่ให้ได้รับความเสียหายจากเสิร์จ สืบเนื่องจากตัวแปรของเสิร์จที่สามารถสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์โทรคมนาคมที่เปราะบางซึ่งไม่ได้มีเฉพาะค่าขนาดของเสิร์จเท่านั้น แต่ยังคงมีค่าความชันหน้าคลื่น หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันอีกค่าหนึ่งที่สร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์โทรคมนาคมที่เปราะบาง ถึงแม้ว่าเมื่อดำเนินการติดตั้งเครื่องป้องกันที่มีคุณภาพสำหรับป้องกันเสิร์จปิดกั้นทุกเส้นทางที่เสิร์จสามารถเข้ามาทำลายระบบได้แล้วก็ยังไม่สามารถประกันได้ว่าระบบจะปลอดภัยเต็มที่ เพราะในระบบไฟฟ้ายังคงมีปัญหาในเรื่องอื่นๆ อีก ซึ่งเป็นปัญหาที่สามารถส่งผลกระทบให้ระบบได้รับความเสียหายได้ เครื่องป้องกันเสิร์จมีหน้าที่ป้องกันไฟกระโชกเท่านั้น ดังนั้นนอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้วยังต้องคำนึงถึงระบบกราวนด์ด้วย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กองแผนงานระบบไฟฟ้า ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า. 2550. **รายงานค่ากระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าของ กฟภ**. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, กรุงเทพฯ.

กองวิศวกรรมระบบเครือข่าย. 2537. **คู่มือการย้ายเคเบิลลงใต้ดิน (Aerial Cable Removal)**. Telephone Organization of Thailand, กรุงเทพฯ.

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2543. **มาตรฐานการก่อสร้างสายส่งระบบ 115 กิโลโวลต์**. ม.ป.ท., กรุงเทพฯ .

_____. 2549. **รายงานค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรในระบบไฟฟ้าของ กฟภ**. ม.ป.ท., กรุงเทพฯ.

_____. ม.ป.ป. **แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็ก**. ม.ป.ท., กรุงเทพฯ.

ฐิติพงษ์ อินทรสินธุ์. 2546. **ปัญหาการชำรุดของระบบโทรศัพท์ที่พาดสายบนเสาร่วมกับสายส่งจ่ายไฟฟ้า**. การไฟฟ้านครหลวง, กรุงเทพฯ.

ทศท จำกัด (มหาชน), บริษัท. 2551. **DFA Cable General Plan OP-25-2-670102**. สิงห์บุรี.

ทีโอที จำกัด (มหาชน), บริษัท. ม.ป.ป. **กำเนิดโทรศัพท์**. [แผ่นพับ]. แหล่งที่มา: www.tot.co.th/toten/images/dmdocuments/past-future.doc. 15 มกราคม 2551.

ประมุข อุณหเลขกะ แสงอุทัย ไพจิตร และสันติ อัศวศรีพงศ์ธร. 2549. "อิทธิพลของการเหนี่ยวนำจากสายไฟฟ้ากำลังต่อโทรศัพท์ของผู้ใช้บริการขณะหลอดคายประจุผ่านก๊าซชำรุด," ใน **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29, 9 – 10 พฤศจิกายน 2549**. น. 285 – 288. คณะวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี.

ยุทธนา ขาวอุปถัมภ์. 2549. **Grounding System**. สถาบันนวัตกรรมระบบตอนนอกและระบบป้องกัน, ปทุมธานี.

วัฒนา สุนทรานุรักษ์. 2551. **การลดทอนแรงดังไฟฟ้าเกินชั่วขณะ**. Power Quality Knowledge, กรุงเทพฯ.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2550. **มาตรฐานการป้องกันแม่เหล็กไฟฟ้าจากฟ้าผ่า**. โกลบอลกราฟฟิค, กรุงเทพฯ.

สตาบิล จำกัด, บริษัท. 2551. **อุปกรณ์ป้องกันไฟกระโชกทางคู่สายโทรศัพท์ (Telephone Line Surge Protector)**. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.stabil.co.th/register.asp. 26 พฤศจิกายน 2551.

สมาร์ทเลิร์นนิ่ง. 2551. **เรียนรู้ไฟฟ้าสื่อสาร.** ครั้งที่ 1. ห้างหุ้นส่วนสามัญสมาร์ทเลิร์นนิ่ง, กรุงเทพมหานคร.

สุชิน จำจด. 2524. **วิศวกรรมโทรศัพท์**. กรุงเทพฯ **:** สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สุรพัฒน์ ฉัตรเจริญพัฒน์. 2544. **การป้องกันชุมสายโทรศัพท์จากแรงดันเกินที่เหนี่ยวนำโดยเสิร์จฟ้าผ่า**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

อุดม คำม่วง และคณะ. 2536. **งานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก**. **:** เอกสารฝึกอบรม และสัมมนา. ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาชีวศึกษา 1 กรมอาชีวศึกษา, กรุงเทพฯ.

Anderson, Paul M. 1976. **Analysis of Faulted Power Systems**. Revised ed. The Iowa State University Press, U.S.A.

Bentley, John P. 1989. **Principles of Measurement Systems**. 2nd ed. Longman–Scientific & Technical, New York.

Bergen, Arthur R., Vijay Vittal. 2000. **Power Systems Analysis**. Prentice Hall. New Jersey. U.S.A.

Bourns. 2007. **Selection Guide Telecom Circuit Protection.** [Online]. แหล่งที่มา: http://www.bourns.com/data/global/pdfs/telecom_cp_selection_guide.pdf. 7 สิงหาคม 2551.

Bussman, Cooper. nd. **ESD Suppression Selection GuidePolymer ESD Suppressors**. [Online]. Available: http://www.cooperet.com/library/products/PolySurg% 20Selection%20Guide.pdf. 2008, October.

Celozzi, S and M. Felliziani. 1990. **Emp – Couping to Twisted – Wire Cable**. IEEE int,symp. on EMC, p. 21 – 23, Washinton DC.

Chen, Walter Y. 2003. **Home Networks Basis: Transmission Environments and Wired/Wireless Protocols**. Prentice Hall.

Dehn. 2007. **Lightning Protection Guide**. 2nd ed. Hans–Dehn. Neumarkt. Germany.

DellaSala, Gene. 2003. **Calculating Cable Inductance of Twin Feeder Cables (Zip Cord)**.

_____. 2004. **Calculating Cable Inductance of Zip Cord**. [Online]. แหล่งที่มา: http://www.audioholics.com/techtips/audioprinciples/interconnects/CableInductance.html October 3, 2006.

Dugan, Roger C. and Other. 2002. **Electrical Power Systems Quality**. 2nd ed. McGraw – Hill, New York.

Elmore, Walter A. 2004. **Protective Relaying Theory and Applications**. 2nded. Marcel Dekker, New York, U.S.A.

Gundrum, Russ. 1988. Power Line Interference; Problems & ASolutions. **abc of the Telephone** 1988 (14):1–49.

Hughes, Harold. 1998. **Telecommunications Cables Design, Manufacture and Installation**. 2nd ed. John Wiley & Sons, Chichester England.

ITU – T Recommedation K.11. 1993. **Principle of Protection Against Overvoltaged and Overcurrents**. International Telecommunication Union, np.

ITU – T Recommendation K.33. 1996. **Limits for People Safety Related to Coupling into Telecommunications System from A.C. Electric Power and A.C. Electrified Railway Installation in Fault Conditions**. International Telecommunication Union, np.

Lao, Richard. 2002. **The Twisted–Pair Telephone Transmission Line**. High Frequency Electronics. Summit Technical Media, LLC.

Morrison, Ralph and Warren H. Lewis. 1990. **Grounding and Shielding in Facilities**. A Wiley – Interscience references, Canada.

Saadat, Hadi. 2004. **Power System Analysis.** 2nd ed. McGraw–Hill, Singapore.

Sakis, A. P. Meliopoulos. 1988. **Power System Grounding and Transients**. Marcel Dekker, New York, U.S.A.

Stevenson Jr, William D. 1982. **Elements of Power System Analysis**. 4th ed. McGraw–Hill, Singapore.

Telephone Organization of Thailand. 1994. **Standard & Guideline for Outside Plant**. TOT Thailand, Bangkok.

The Institute of Electrical Engineer, Inc. 1991. **Recommendation Practice on Surge Voltages in Low – Voltages AC Power Circuits**. IEEE std. c62.41-1991.

_____. 2007. **Recommendation Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power system (Green Book)**. IEEE std.142 – 2007.

Tom Farley Production. 2009. **Tom Farley's Telephone History Series**. [Online]. Available: http://www.privateline.com/TelephoneHistory/History1.htm. 2009, January.

Unahalekhaka, P., K. Chinnabutr, S. Paijit and S. Asawasripongtorn. 2007. Risk Assessment of Damages due to Lightning Discharges: A Case Study to a Telecommunication System in Singburi Province of Thailand, **WASEAS Conference**, Gold Coast, Queensland, Australia, January 17–19.

Wadhwa, C. L. 2008. **Electrical Power Systems**. 4th ed. New Age International Publishers. Delhi, India.

Wikipedia. 2008. **25 - Pair color Code**. [Online]. แหล่งที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/25-pair_color _code. 1 ตุลาคม 2551.

ภาคผนวก

โปรแกรม ATP–EMTP

การติดตั้ง ATP–EMTP

1. ใส่แผ่นซีดีรอม (CD–ROM) แล้วเลือกเมนู (menu) “Programs”

2. เลือกโปรแกรมที่จำเป็นต้องใช้ในการติดตั้ง ดังต่อไปนี้

ATP Control Center 1.0 เป็นศูนย์กลางในการเรียกใช้โปรแกรมต่างๆ
GNU–Ming32 ATP เป็นโปรแกรมแปลภาษา (compiler) ตัวแรก
Watcom ATP เป็นโปรแกรมแปลภาษาตัวที่สอง
ATPDraw version 2.4 เป็นโปรแกรม ในการสร้าง Drawing
PlotXY เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลลัพธ์
Programer’s File Editor 32 เป็นโปรแกรมในตระกูลแก้ไขตัวอักษร (Text editor)

3. ระหว่างการติดตั้ง ถ้าโปรแกรมตัวใดถามว่าจะเริ่มสตาร์ท (Restart) เครื่องใหม่ ใช่หรือไม่ ให้ตอบว่า No แล้วข้ามไปก่อนแล้วจึงกลับมาทำการเริ่มสตาร์ทใหม่หลังจากติดตั้งทุกโปรแกรมแล้ว

4. เมื่อติดตั้งทุกโปรแกรมตามที่กำหนดแล้วให้ทำการเริ่มสตาร์ทใหม่

การใช้งานโปรแกรม ATP–EMTP

1. สร้างแฟ้มจากเมนูไฟล์ แล้วจัดเก็บแฟ้มข้อมูลได้เป็นแฟ้มที่มีนามสกุลเป็น .adp

2. ก่อนสั่งให้ประมวลผล (run) ต้องสร้างแฟ้มที่มีนามสกุล .atp จากแฟ้มที่มีนามสกุล .adp ในข้อที่ 1 ก่อน โดยไปที่เมนู (menu)

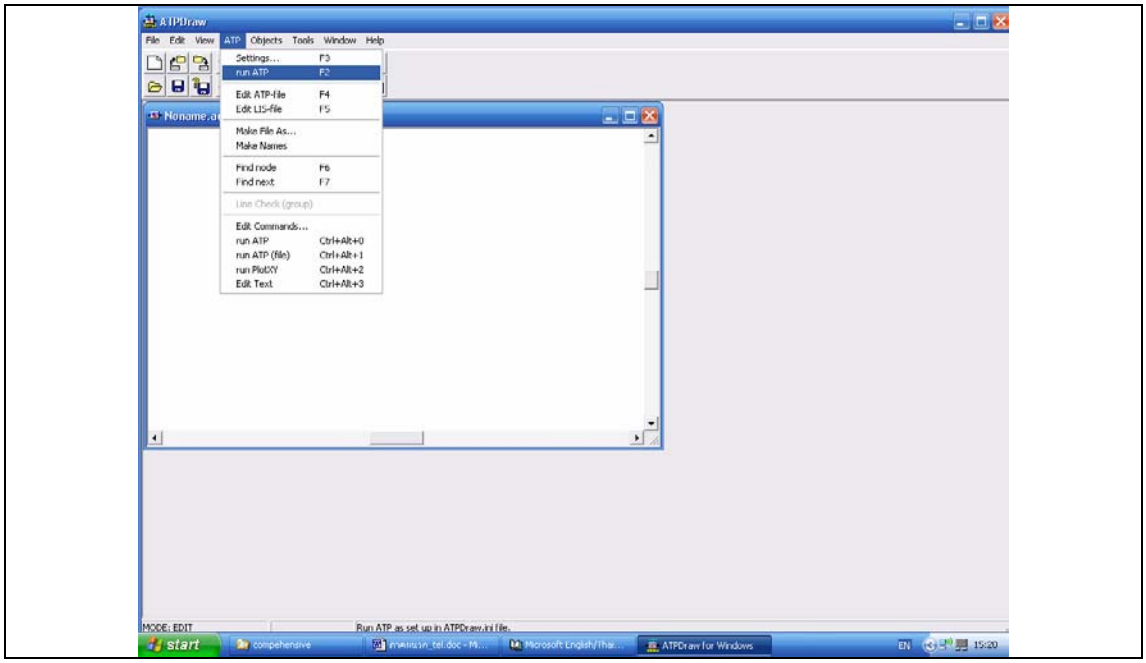
3. ประมวลผลการจำลอง (run simulation) ไปที่เมนู ATP–> run ATP

3.1 ก่อนจะสั่ง Run ควรเข้าไปดูคำสั่งที่ตั้งไว้ใน Menu ATP–>Settings ก่อนเพื่อกำหนดค่าช่วงเวลาในการทำ simulation ที่ tap simulation

3.2 ถ้ามีความผิดพลาด (error) เกิดขึ้นในการ run simulation สามารถดูสาเหตุของความผิดพลาดได้ที่เมนู ATP –>Edit LIS–file

4. ดูผลลัพธ์การประมวลผล ไปที่เมนู ATP –> run plotxy

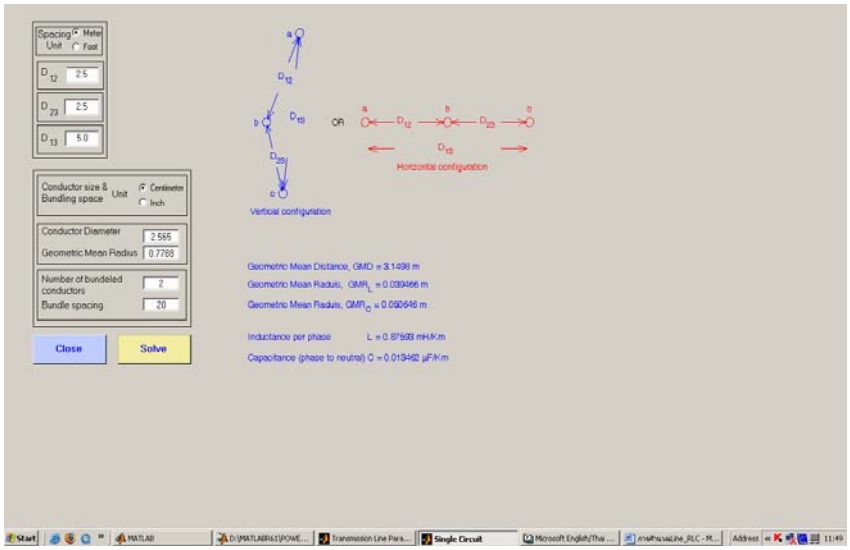
5. การเพิ่มคำสั่งในเมนู ATP สามารถทำได้โดยไปที่เมนู ATP –>Edit Commands



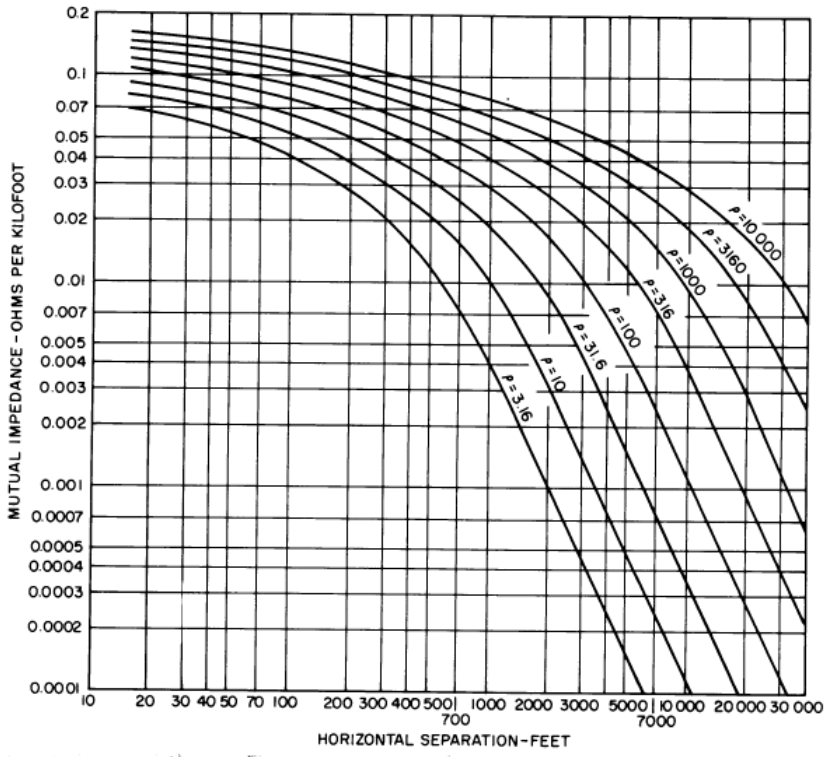
ภาพผนวกที่ 1 หน้าต่างโปรแกรม ATPDraw version 2.4

โปรแกรม MatLab

การคำนวณความเหนี่ยวนำ ความจุ ของสายส่งจ่าย 115 kV และ 22 kV ใช้โปรแกรม Matlab ช่วยคำนวณเป็นแบบ GUI แสดงดังภาพผนวกที่ 2



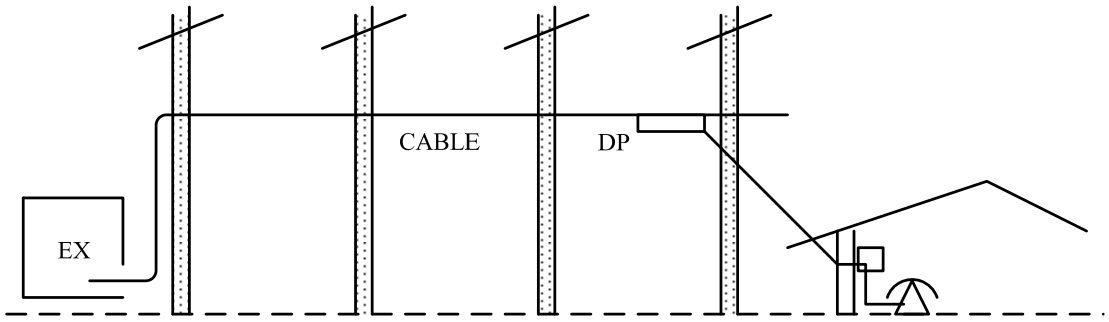
ภาพผนวกที่ 2 โปรแกรม Matlab ใช้ช่วยหาค่า L, C ของระบบสายส่งจ่าย 115 kV และ 22 kV



ภาพผนวกที่ 3 ตัวประกอบการเชื่อมโยงสำหรับวงจรที่ใช้ดินเป็นทางกลับ

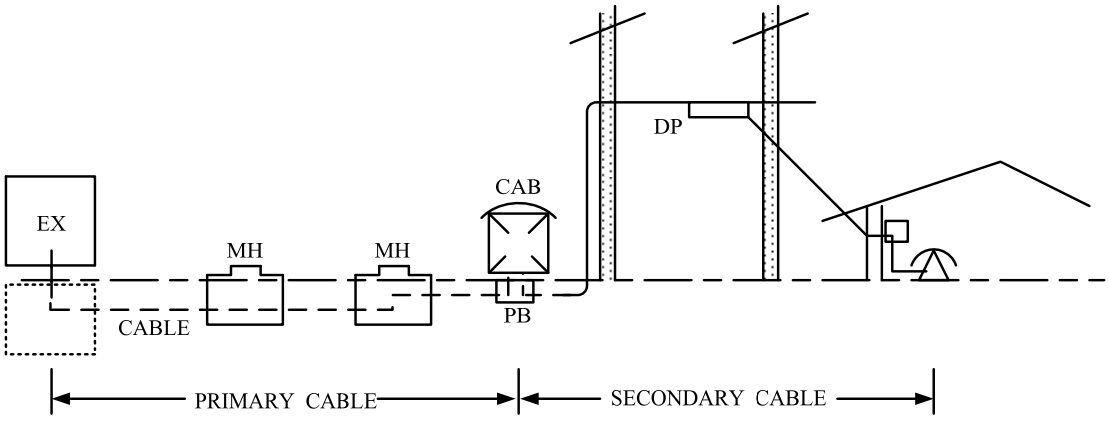
ที่มา: Gundrum (1988)

ข่ายสายโทรศัพท์แบบ Direct Feed และ Indirect Feed



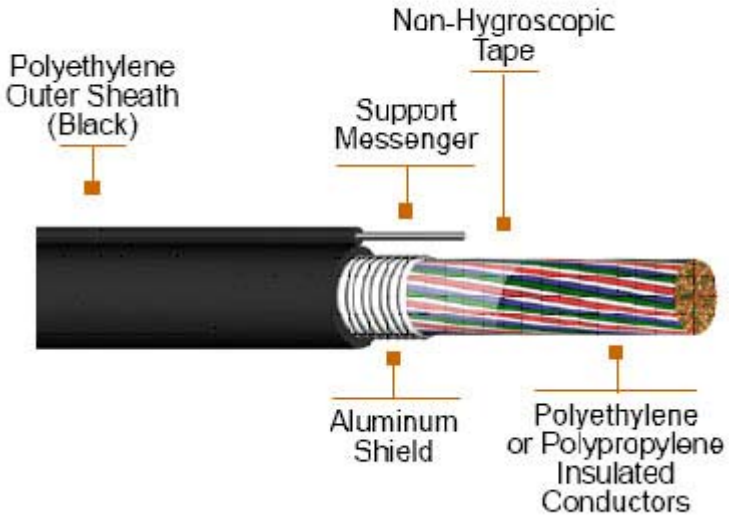
ภาพผนวกที่ 4 ข่ายสายโทรศัพท์แบบ Direct Feed

ที่มา: Telephone Organization of Thailand (1994)



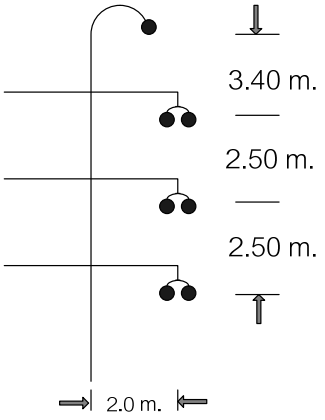
ภาพผนวกที่ 5 ข่ายสายโทรศัพท์แบบ Indirect Feed

ที่มา: Telephone Organization of Thailand (1994)



ภาพผนวกที่ 6 สายโทรศัพท์ภายนอกอาคาร แบบมีสะพาน (FIG 8)

ระบบจำหน่าย 115 kV



ระยะระหว่างตัวนำบันเดิล = 20 เซนติเมตร

ภาพผนวกที่ 7 มิติการจัดวางสายวงจรเดี่ยวบัลเดิลแบบ 2 ตัวนำ/เฟส ของระบบจำหน่าย 115 kV
ที่มา: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2543)

การคำนวณ L และ C ระบบไฟฟ้า

พิจารณาจากการจัดวางสายเป็นแบบวงจรเดี่ยวและใช้บัลเดิลแบบ 2 ตัวนำ/เฟส แต่ละตัวนำ (สาย) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.565 ซม. จัดวางดังภาพผนวกที่ 8 คำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำต่อกิโลเมตรต่อเฟสของระบบ 115 kV โดยไม่คิดผลของการสลับสายได้ ดังนี้

$$Ds = \sqrt{(0.012825)(0.2)(0.7788)} = 0.0447 \text{ เมตร}$$

$$Dm = \sqrt[3]{2.5 \times 5.0 \times 2.5} = 3.1498 \text{ เมตร}$$

ความเหนี่ยวนำหาได้จากสมการ (Hadi., 2004)

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{Dm}{Ds} \quad \text{เฮนรี่/กิโลเมตร/เฟส}$$

$$= 2 \times 10^{-7} \ln \frac{3.1498}{0.0447} = 0.851 \quad \text{มิลลิเฮนรี่/กิโลเมตร/เฟส}$$

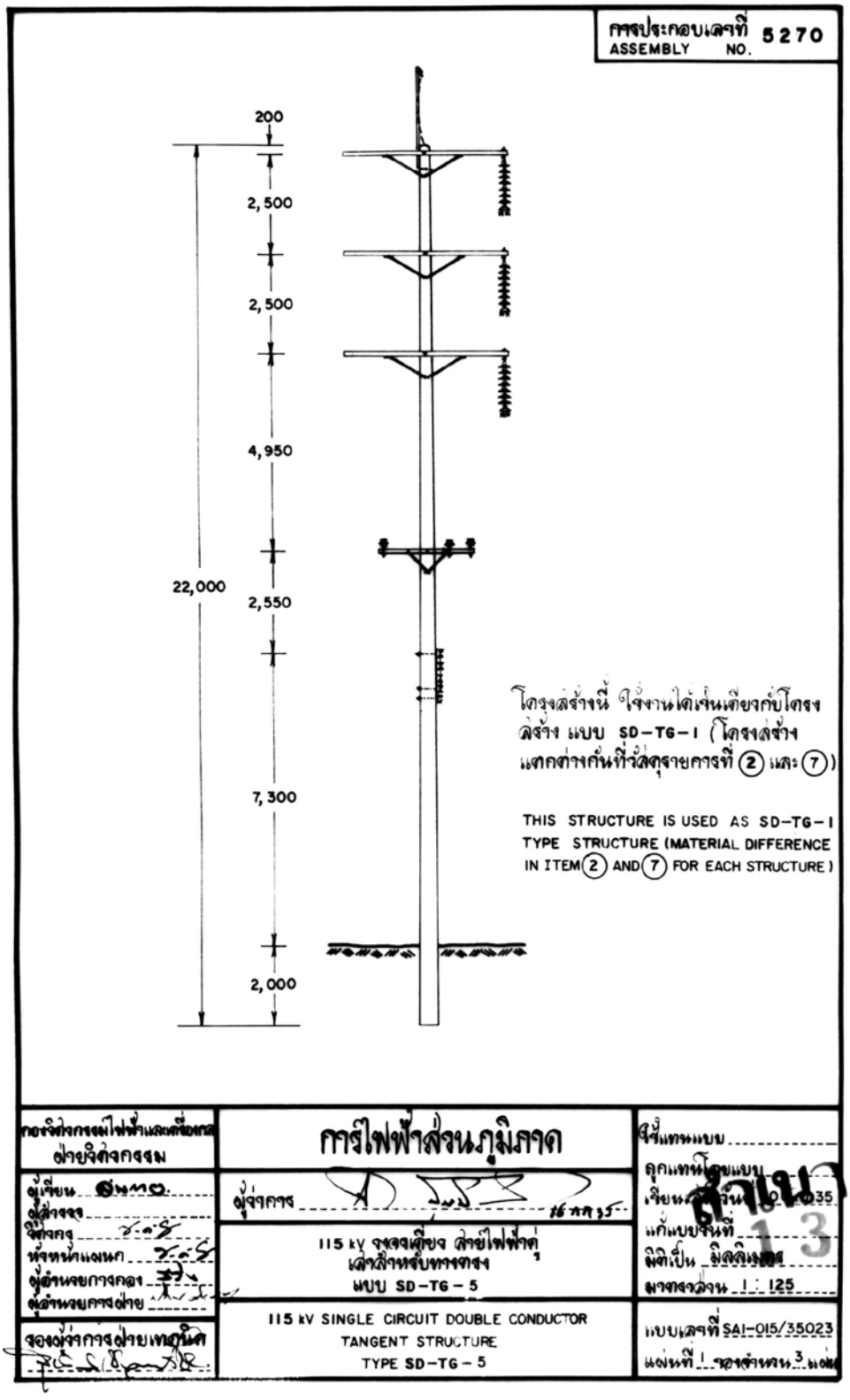
ความจุไฟฟ้าหาได้จากสมการ

$$r^b = \sqrt{r \times d}\ ,\ d = \text{ระยะห่างของตัวนำบัลเดิล} = 20 \text{ เซนติเมตร}$$

$$C = \frac{\pi \varepsilon_0}{\ln \frac{D}{r^b}} = \frac{0.0556}{\ln \frac{D}{r^b}} \quad \text{ไมโครฟารัด/กิโลเมตร/เฟส}$$

$$C = \frac{0.0556}{\ln \frac{3.1498}{0.0506}} = 0.01346 \quad \text{ไมโครฟารัด/กิโลเมตร/เฟส}$$

$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{0.851 \cdot 10^{-3}}{0.01346 \cdot 10^{-6}}} = 251.2968 \quad \text{โอห์ม}$$



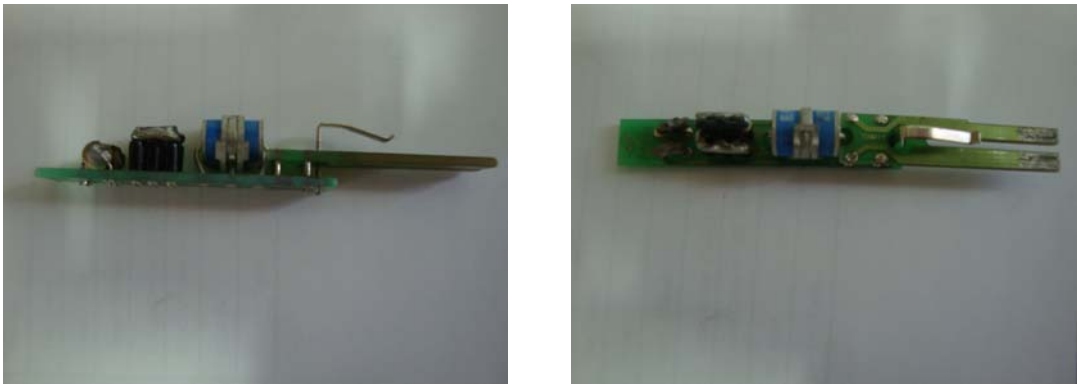
ภาพผนวกที่ 8 แบบโครงสร้างเสาและตำแหน่งสายไฟฟ้าคู่ วงจรเดี่ยว 115 kV

ที่มา: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2543)

ตารางผนวกที่ 1 ข้อมูลทางเทคนิค (Technical Data) ตัวป้องกันเสิร์จสำหรับสายโทรศัพท์

Description	Telephone line surge protector (Model: SPM–1PT–STA, SB–SB–1PT, SB–2PT)
DC spark–over voltage	190 – 250 V at 100 V/sec
Output voltage	< 250 V at 1 kV/μsec
Response time	< 0.1 nsec
Insulation resistance	> 1,000 MΩ at 100 VDC
Capacitance	< 200 pF at 1 kHz
Operating temperature	– 20° C + 60° C
DC resistance	< 30 Ω
Max. nominal current	120 mA at 25° C
Trip time	< 3 sec at 500 mA, 250 V
Surge current	10 A at 50 Hz, 1 sec
AC discharge current	10 A at 50 Hz, 1 sec
Surge life	100 A at 10/1000 msec for 300 times
Fall safe time	< 10 sec at 3 A

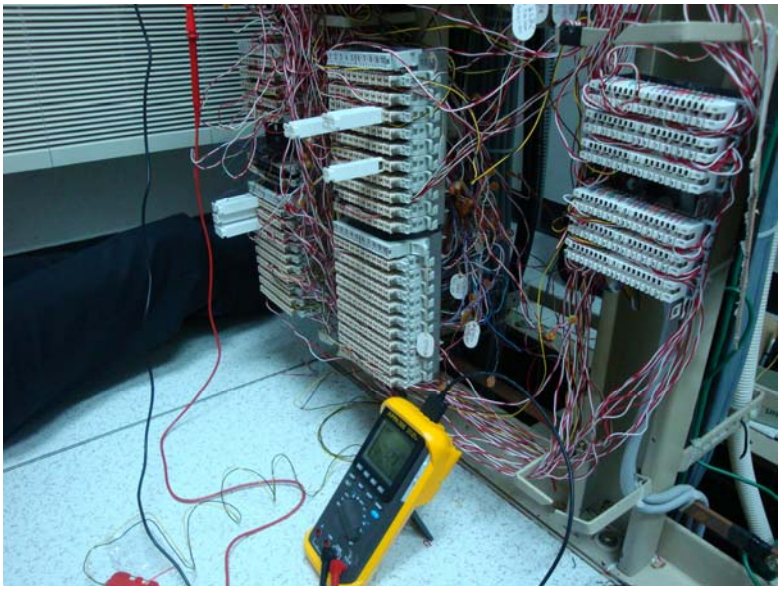
ที่มา: สตาบิล (2008)



ภาพผนวกที่ 9 ตัวป้องกันเสิร์จสำหรับสายโทรศัพท์แบบผสม

ค่าแรงดันคู่สายโทรศัพท์วัดที่ MDF

ค่าแรงดันที่วัดได้จากสายโทรศัพท์ที่วางแขวนขนานไปกับระบบ 115 kV และระบบ 22 kV โดยวัดด้วย **ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ/รุ่น APPA 650**



ภาพผนวกที่ 10 การวัดแรงดันคู่สายด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ/รุ่น APPA 650

ตารางผนวกที่ 2 ค่าแรงดันที่วัดได้ระหว่างคู่สาย (วัดครั้งที่ 1)

ลำดับคู่สาย (Pair)	เวลาที่วัด (Time)	ความถี่(Hz)	แรงดัน (mV)
2	11.07 น.	50	350
4		50	111
5		50	157
6		50	165
9		50	163
10		50	193
14		50	57
18		50	101
43		50	202

ตารางผนวกที่ 3 ค่าแรงดันที่วัดได้ระหว่างคู่สายกับกราวนด์ (วัดครั้งที่ 1)

ลำดับคู่สาย (Pair)	เวลาที่วัด (Time)	ความถี่ (Hz)	แรงดันระหว่าง A (Tip)–G (grounded) (V)	แรงดันระหว่างสาย B (ring)–G (grounded) (V)
2	10.30 น.	50	350	0.66
4		50	1.03	1.04
5		50	1.1	1.1
6		50	0.92	1.02
9		50	0.92	1.02
10		50	1.1	0.93
14		50	1.045	1.08
18		50	0.97	1.06
43	12.12	50	0.44	0.25

ตารางผนวกที่ 4 แรงดันระหว่างคู่สาย A – B (วัดครั้งที่ 2)

ลำดับคู่สาย (Pair)	เวลาที่วัด (Time)	ความถี่(Hz)	แรงดัน (mV)
2	13.07 น.	50	310
4		50	101
5		50	148
6		50	161
9		50	158
10		50	192
14		50	54
18		50	103
43		50	210

ตารางผนวกที่ 5 ค่าแรงดันที่วัดได้ระหว่างคู่สาย กับกราวนด์ (วัดครั้งที่ 2)

ลำดับคู่สาย (Pair)	เวลาที่วัด (Time)	ความถี่ (Hz)	แรงดันระหว่าง A (Tip)–G (grounded) (V)	แรงดันระหว่างสาย B (ring)–G (grounded) (V)
2	13.54 น.	50	0.97	0.75
4		50	1.076	1.12
5		50	1.1	1.2
6		50	0.9	1.1
9	14.05 น.	50	0.02	0.021
10		50	1.11	0.96
14		50	1.11	1.14
18		50	1.03	0.77
43	14.08	50	0.02	0.12

ตารางผนวกที่ 6 แรงดันระหว่างตัวนำ A–B (วัดครั้งที่ 3)

ลำดับคู่สาย (Pair)	เวลาที่วัด (Time)	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (mV)
2	14.15 น.	50	254
4		50	102
5		50	151
6		50	154
9		50	160
10		50	185
14		50	57
18		50	105
43		50	232

ตารางผนวกที่ 7 ค่าแรงดันที่วัดได้ระหว่างคู่สาย กับกราวนด์ (วัดครั้งที่ 3)

ลำดับคู่สาย (Pair)	เวลาที่วัด (Time)	ความถี่ (Hz)	แรงดันระหว่าง A (Tip)–G (grounded) (V)	แรงดันระหว่างสาย B (ring)–G (grounded) (V)
2	13.54 น.	50		0.76
4			1.05	1.09
5		50	1.04	1.12
6		50	0.97	1.06
9	14.05 น.	50	0.948	0.98
10		50	1.12	0.95
14		50	1.1	1.2
18		50	1.02	1.09
43	14.09	50	0.02	0.028

ค่าแรงดันที่วัดได้จากสายโทรศัพท์ที่วางแขวนขนานไปกับระบบ 115 kV และระบบ 22 kV โดยวัดด้วย ออสซิลโลสโคป **Tektronix รุ่น TDS 1001B**

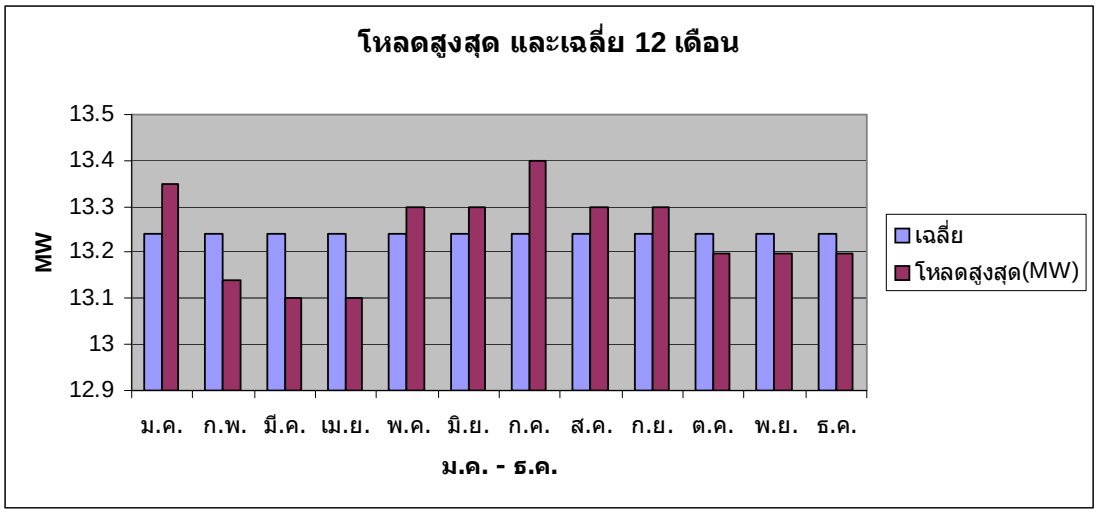
ตารางผนวกที่ 8 ค่าแรงดันที่วัดได้ระหว่างคู่สาย และคู่สายกับกราวนด์ (วัดครั้งที่ 4)

คู่สาย	แรงดันระหว่าง A – B (mV)	ความถี่ (Hz)	แรงดันระหว่าง A – G (V)	ความถี่ (Hz)	แรงดันระหว่าง B – G (V)	ความถี่	เวลา (Time)
2	80	50	1.16	50.1	1.16	50.09	15:42:24
4	160	50	1.24	50	1.32	49.86	15:43:09
5	240	49.95	1.16	50	1.36	50.06	16:43:39
6	280	50.56	1.08	50.1	1.28	49.99	15:44:36
9	240	49.8	1.08	50.1	1.28	50.17	15:45:00
10	320	49.9	1.36	49.9	1.04	50.03	15:45:48
14	80	49.95	1.44	49.81	1.48	49.98	15:47:07
15	80	50	1.32	50	1.32	50.32	15:48:43
16	80	49.95	1.36	50.1	1.44	49.81	15:49:24
17	80	50.1	1.6	49.95	1.56	49.97	15:49:59
18	160	50.07	1.2	50.05	1.4	49.99	15:50:41
19	80	50.1	1.2	50.4	1.2	49.96	15:51:11
21	80	50.15	1.24	49.65	1.24	49.96	15:52:34
22	80	47.17	1.2	49.9	1.16	49.54	15:54:13
23	40	49.9	1.24	49.9	1.24	49.99	15:55:26
24	80	49.9	1.28	49.93	1.28	49.99	15:56:21
25	40	49.9	1.2	49.8	1.24	49.95	15:57:00

ตารางผนวกที่ 9 ค่าแรงดันที่วัดได้ระหว่างคู่สาย กับและคู่สายกับกราวนด์ (วัดครั้งที่ 5)

คู่สาย	แรงดันระหว่าง A – B (mV)	ความถี่ (Hz)	แรงดันระหว่าง A – G (V)	ความถี่ (Hz)	แรงดันระหว่าง B – G (V)	ความถี่ (Hz)	เวลา (Time)
2	80	49.7	1.12	50	1.08	49.08	16:39:32
4	80	49.85	1.12	50	1.12	49.98	16:40:05
5	40	49.9	1.16	49.9	1.16	49.9	16:40:53
6	80	49.95	1.12	50.2	1.16	49.93	16:42:09
9	80	50	1.2	50	1.2	50.09	16:43:13
10	80	50.4	1.16	50.1	1.16	49.93	16:43:49
14	80	50.4	1.16	50.1	1.16	49.93	16:43:49
15	80	50.1	1.08	50.2	1.08	50	16:45:54
16	80	50	0.96	50.1	0.96	49.98	16:46:32
17	80	50.1	1.24	50.1	1.2	49.94	16:46:59
18	80	49.9	1.12	50.2	1.12	50.01	16:47:48
19	80	49.6	1.12	49.9	1.12	49.91	16:48:23
21	80	49.6	1.08	50.6	1.08	50.19	16:49:02
22	80	50.03	1.12	50	1.16	50.02	16:49:35
23	40	50	1.16	50.2	1.16	50.02	16:50:21
24	80	50.25	1.2	49.7	1.2	49.99	16:50:55
25	80	50	1.2	50	1.2	50.02	16:52:06

ขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ยของระบบ 115 kV ที่ใช้คำนวณแรงดันเหนี่ยวนำในสภาวะปกติ



ภาพผนวกที่ 11 ข้อมูลการบันทึก ค่าโหลดสูงสุดและค่าเฉลี่ยตั้งแต่ ม.ค. – ธ.ค. 2008
ที่มา: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2543)

ตารางผนวกที่ 10 ข้อมูลความต้านทานสายจากตู้ปลายทาง

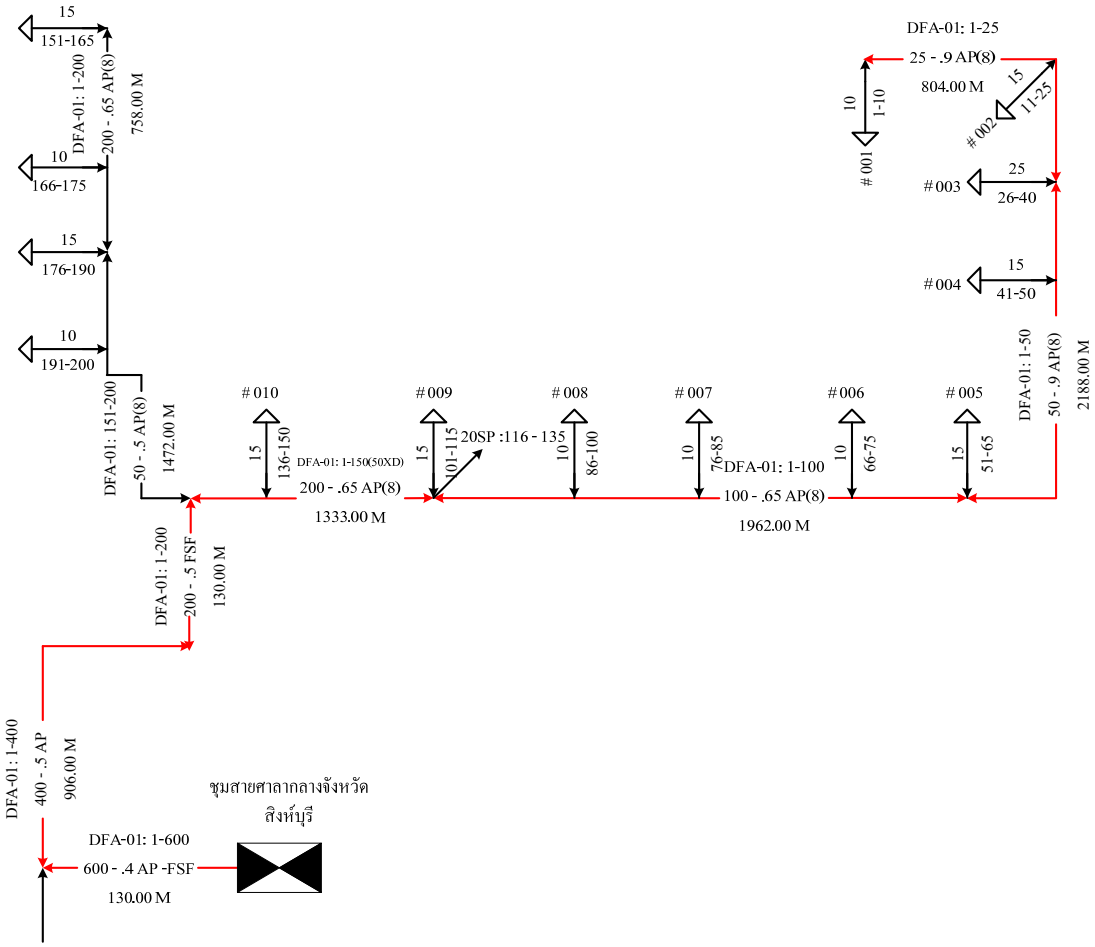
DFA #01				
DP#001				
	GAUGE	DIST(Km.)	Ω	dB
D	0.4	0.07	20.23	0.13
F	0.5	1.11	205.3	1.66
A	0.65	3.36	376.4	3.96
	0.9	3.11	173.9	2.55
	TOTAL	7.65	776	8.3

อักษรย่อและความหมาย:

DFA = จุดสิ้นสุดปลายสาย

DP = จุดกระจายสาย (Distribution point)

ผังตำแหน่งตู้ปลายทางระยะความยาว และตัวนำของสายโทรศัพท์ที่ทำการศึกษา



ภาพผนวกที่ 12 ไดอะแกรมการติดตั้งสายโทรศัพท์และตู้สายปลายทาง

ที่มา: ทศท จำกัด (มหาชน), (2551)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายกิตติวุฒิ จีนนะบุตร
วัน เดือน ปี ที่เกิด	27 มีนาคม 2504
สถานที่เกิด	อ.นครหลวง จ.พระนครศรีอยุธยา
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมไฟฟ้า
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	อาจารย์ระดับ 7
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	–
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนพัฒนาบุคลากร ปีการศึกษา 2548 (มทร.อีสาน)