สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ	5
2.2 สนามไฟฟ้า	5
2.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า	5
2.2.2 สมการปัวส์ซองและสมการลาปลาซ	7
2.3 สายส่งกำลังไฟฟ้า	9
2.3.1 โครงสร้างระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสและ 3 เฟส	9
2.3.2 หลักการเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าภายในระบบสายส่ง	11
2.4 โทรศัพท์มือถือ	17
2.5 ระเบียบวิธีไฟไนท์ดิฟเฟอร์เรนท์	19
2.6 ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์	25
2.7 สรุป	31
บทที่ 3 การคำนวณสนามไฟฟ้าของสายส่งโดยระเบียบวิธีไฟไนท์ดิฟเฟอร์เรนท์	
3.1 บทนำ	32
3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง	32
3.3 การคำนวณสนามไฟฟ้าโดยระเบียบวิธีไฟไนท์ดิฟเฟอร์เรนท์	36
3.3.1 การออกแบบกริดของพื้นที่ศึกษา	36

3.3.2 การประกอบสมการโนดขึ้นเป็นระบบ 38
3.3.3 เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขค่าขอบเขต 40
3.3.4 คำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ภายในระบบ 41
3.4 สรุป 42
บทที่ 4 การคำนวณสนามไฟฟ้าของสายส่งด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์
4.1 บทนำ 43
4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 43
4.3 การคำนวณค่าสนามไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ 44
4.3.1 การออกแบบกริดของพื้นที่ศึกษา 44
4.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนท์ 45
4.3.3 การสร้างสมการของอิลิเมนท์ 49
4.3.4 การประกอบสมการอิลิเมนท์ขึ้นเป็นระบบ 58
4.3.5 ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาผลเฉลย 59
4.4 สรุป 59
บทที่ 5 โปรแกรมจำลองผลสนามไฟฟ้าและผลการจำลองของระบบสายส่งแบบ 2 มิติ
5.1 บทนำ 60
5.2 ระเบียบวิธีไฟไนท์ดิฟเฟอร์เรนท์ 61
5.2.1 โปรแกรมออกแบบกริดรูปสี่เหลี่ยมให้กับระบบ 62
5.2.2 กำหนดค่าเริ่มต้น 62
5.2.3 การสร้างสมการค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละโนด 63
5.2.4 การสร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม 64
5.2.5 กำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขต 66
5.2.6 แก้ระบบสมการรวมเพื่อหาผลเฉลย 69
5.3 ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ 69
5.3.1 โปรแกรมออกแบบกริดรูปสี่เหลี่ยมให้กับระบบ 69
5.3.2 กำหนดค่าเริ่มต้น 76
5.3.3 การสร้างสมการค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละโนด 76
5.3.4 การสร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม 76
5.3.5 กำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขต 77
5.3.6 แก้ระบบสมการรวมเพื่อหาผลเฉลย 77

5.4 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์ดิฟเฟอร์เรนท์ 78
5.5 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ 95
5.6 เปรียบเทียบผลการจำลองแบบ 2 มิติกับโปรแกรมสำเร็จรูป 111
5.7 สรุป 117
บทที่ 6 การจำลองสนามไฟฟ้าของสายส่งโดยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์แบบ 3 มิติ
6.1 บทนำ 118
6.2 การกำหนดพารามิเตอร์และเงื่อนไขขอบเขต 118
6.3 ระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟส 120
6.3 ระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล 123
6.4 สรุป 128
บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ
7.1 สรุป 129
7.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต 130
รายการอ้างอิง 131
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก การพิสูจน์สมการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าภายใต้ระบบสายส่ง 135
ภาคผนวก ข การประยุกต์เงื่อนไขค่าขอบเขต 140
ภาคผนวก ค บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 142
ประวัติผู้เขียน 144

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละด้านของโทรศัพท์มือถือในระหว่างการรับสาย (Incoming call phase) โทรออก (Outgoing call phase) และสนทนา (Talking phase) 18
ตารางที่ 2.2 ลักษณะข้อมูลของโนด 20
ตารางที่ 2.3 ลักษณะพิกัดในแต่ละโนด 21
ตารางที่ 2.4 ลักษณะข้อมูลของอิลิเมนท์ 26
ตารางที่ 2.5 ลักษณะข้อมูลของตำแหน่งโนด 27
ตารางที่ 3.1 การประมาณค่าระเบียบวิธีไฟไนท์ดิฟเฟอร์เรนท์ ณ ตำแหน่งโนด บริเวณค่าขอบ 35
ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับระเบียบวิธีไฟไนท์ดิฟเฟอร์เรนท์ 63
ตารางที่ 5.2 กำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับโปรแกรม PDETOOL 112
ตารางที่ 5.3 ระดับสูงสุดของสนามไฟฟ้าที่มนุษย์สามารถสัมผัสได้อย่างปลอดภัย 116
ตารางที่ 6.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์โครงสร้างของระบบไฟฟ้าแบบ 3 มิติ 118
ตารางที่ 6.2 ค่าพารามิเตอร์การวางตำแหน่งตัวนำของระบบไฟฟ้าแบบ 3 มิติ 120

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบริเวณรอบตัวนำ 2 เส้น ที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไหลผ่าน 9

รูปที่ 2.2 โครงสร้างระบบสายส่ง 1 เฟสขนาด 69 kV 10

รูปที่ 2.3 โครงสร้างระบบสายส่ง 3 เฟสขนาด 230 kV 10

รูปที่ 2.4 โครงสร้างระบบสายส่ง 3 เฟสขนาด 500 kV 11

รูปที่ 2.5 ความเข้มสนามไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า 1 เฟส 12

รูปที่ 2.6 ความเข้มสนามไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล 13

รูปที่ 2.7 ความเข้มสนามไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล 16

รูปที่ 2.8 การตีกริดรูปสี่เหลี่ยมของระเบียบวิธีไฟไนท์ดิฟเฟอร์เรนท์ 2 มิติ 19

รูปที่ 2.9 รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วยกริดสี่เหลี่ยมจำนวน 9 โนด 20

รูปที่ 2.10 การประมาณค่าอนุพันธ์แบบต่าง ๆ 22

รูปที่ 2.11 โครงสร้างโนดย่อยสำหรับปัญหา 2 มิติ 23

รูปที่ 2.12 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลิเมนท์ 25

รูปที่ 2.13 รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย 3 อิลิเมนท์ 4 โนด 26

รูปที่ 2.14 การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอิลิเมนท์รูปสามเหลี่ยม 27

รูปที่ 3.1 โครงสร้างของระเบียบวิธีไฟไนท์ดิฟเฟอร์เรนท์ 34

รูปที่ 3.2 โครงสร้างของระบบไฟฟ้าขนาด 69 kV 37

รูปที่ 3.3 แบบจำลองมนุษย์สำหรับระเบียบวิธีไฟไนท์ดิฟเฟอร์เรนท์ 39

รูปที่ 3.4 บริเวณรอยประสานระหว่างบริเวณที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 40

รูปที่ 3.5 เงื่อนไขค่าขอบเขตของโทรศัพท์มือถือสำหรับ ระเบียบวิธีไฟไนท์ดิฟเฟอร์เรนท์ 41

รูปที่ 4.1 โครงสร้างของระบบไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 69 kV 46

รูปที่ 4.2 โครงสร้างของระบบไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV 47

รูปที่ 4.3 โครงสร้างของระบบไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 500 kV 48

รูปที่ 5.1 แผนภูมิการดำเนินงานของโปรแกรมคำนวณสนามไฟฟ้า ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์ดิฟเฟอร์เรนท์ 61

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 5.2 โครงสร้างของระเบียบไฟไนท์ดิฟเฟอร์เรนท์ 63
รูปที่ 5.3 การสร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม 65
รูปที่ 5.4 ลักษณะการวางตัวของสมาชิกภายในเมทริกซ์ของระบบสมการรวม 65
รูปที่ 5.5 แผนภูมิการดำเนินงานของโปรแกรมคำนวณสนามไฟฟ้า
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ 71
รูปที่ 5.6 การแบ่งพื้นที่เป็นหมวดหมู่ตามลักษณะความแตกต่างของวัตถุ 73
รูปที่ 5.7 ลักษณะการสร้างกริดภายในระบบไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 69 kV 73
รูปที่ 5.8 ลักษณะการสร้างกริดในบริเวณที่เป็นอากาศ 74
รูปที่ 5.9 ลักษณะการสร้างกริดในบริเวณที่เป็นตัวนำสายส่งตัวที่ 1 และ 3 74
รูปที่ 5.6 การแบ่งพื้นที่เป็นหมวดหมู่ตามลักษณะความแตกต่างของวัตถุ 73
รูปที่ 5.7 ลักษณะการสร้างกริดภายในระบบไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 69 kV 73
รูปที่ 5.8 ลักษณะการสร้างกริดในบริเวณที่เป็นอากาศ 74
รูปที่ 5.9 ลักษณะการสร้างกริดในบริเวณที่เป็นตัวนำสายส่งตัวที่ 1 และ 3 74
รูปที่ 5.10 ลักษณะการสร้างกริดในบริเวณที่เป็นตัวนำสายส่งตัวที่ 2 75
รูปที่ 5.11 ลักษณะการสร้างกริดในบริเวณที่เป็นมนุษย์ 75
รูปที่ 5.12 ลักษณะการวางตัวของสมาชิกภายในเมทริกซ์ของระบบสมการรวม 77
รูปที่ 5.13 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 69 kV
เมื่อมนุษย์ใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่ง x = 1 m 78
รูปที่ 5.14 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 69 kV
เมื่อมนุษย์ใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่ง x = 4 m 79
รูปที่ 5.15 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 69 kV
เมื่อมนุษย์ใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่ง x = 7 m 79
รูปที่ 5.16 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลขนาด 230 kV
ณ ตำแหน่ง x = 3 m 80
รูปที่ 5.17 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลขนาด 230 kV
ณ ตำแหน่ง x = 10 m 81
รูปที่ 5.18 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลขนาด 230 kV
ณ ตำแหน่ง x = 17 m 81

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลขนาด 230 kV 82

รูปที่ 5.20 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลขนาด 500 kV ณ ตำแหน่ง x = 2 m 83

รูปที่ 5.21 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลขนาด 500 kV ณ ตำแหน่ง x = 10 m 83

รูปที่ 5.22 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลขนาด 500 kV ณ ตำแหน่ง x = 22 m 84

รูปที่ 5.23 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลขนาด 500 kV 84

รูปที่ 5.24 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle 0^\circ$ kV $V_B = 207\angle -120^\circ$ kV $V_C = 253\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =3 m 85

รูปที่ 5.25 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 253\angle 0^\circ$ kV $V_B = 230\angle -120^\circ$ kV $V_C = 207\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =3 m 86

รูปที่ 5.26 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 207\angle 0^\circ$ kV $V_B = 253\angle -120^\circ$ kV $V_C = 230\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =3 m 86

รูปที่ 5.27 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle 0^\circ$ kV $V_B = 207\angle -120^\circ$ kV $V_C = 253\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =10 m 87

รูปที่ 5.28 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 253\angle 0^\circ$ kV $V_B = 230\angle -120^\circ$ kV $V_C = 207\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =10 m 87

รูปที่ 5.29 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 207\angle 0^\circ$ kV $V_B = 253\angle -120^\circ$ kV $V_C = 230\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =10 m 88

รูปที่ 5.30 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle 0^\circ$ kV $V_B = 207\angle -120^\circ$ kV $V_C = 253\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =17 m 88

รูปที่ 5.31 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 253\angle 0^\circ$ kV $V_B = 230\angle -120^\circ$ kV $V_C = 207\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =17 m 89

รูปที่ 5.32 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 207\angle 0^\circ$ kV $V_B = 253\angle -120^\circ$ kV $V_C = 230\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =17 m 89

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 5.33 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (ขนาด) 230 kV แบบที่ 1 90

รูปที่ 5.34 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (ขนาด) 230 kV แบบที่ 2 90

รูปที่ 5.35 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (ขนาด) 230 kV แบบที่ 3 91

รูปที่ 5.36 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle 0^\circ$ kV $V_B = 230\angle -150^\circ$ kV $V_C = 230\angle 150^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =3 m 91

รูปที่ 5.37 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle 30^\circ$ kV $V_B = 230\angle -120^\circ$ kV $V_C = 230\angle 90^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =3 m 92

รูปที่ 5.38 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle -30^\circ$ kV $V_B = 230\angle -90^\circ$ kV $V_C = 230\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =3 m 92

รูปที่ 5.39 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (เฟส) 230 kV แบบที่ 1 93

รูปที่ 5.40 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (เฟส) 230 kV แบบที่ 2 94

รูปที่ 5.41 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (เฟส) 230 kV แบบที่ 3 94

รูปที่ 5.42 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 69 kV เมื่อมนุษย์ใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่ง x = 1 m 95

รูปที่ 5.43 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 69 kV เมื่อมนุษย์ใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่ง x = 4 m 96

รูปที่ 5.44 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 69 kV เมื่อมนุษย์ใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่ง x = 7 m 96

รูปที่ 5.45 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลขนาด 230 kV ณ ตำแหน่ง x = 3 m 97

รูปที่ 5.46 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลขนาด 230 kV ณ ตำแหน่ง x = 10 m 98

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 5.47 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลขนาด 230 kV ณ ตำแหน่ง x = 17 m 98

รูปที่ 5.48 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลขนาด 230 kV 99

รูปที่ 5.49 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลขนาด 500 kV ณ ตำแหน่ง x = 2 m 100

รูปที่ 5.50 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลขนาด 500 kV ณ ตำแหน่ง x = 10 m 100

รูปที่ 5.51 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลขนาด 500 kV ณ ตำแหน่ง x = 22 m 101

รูปที่ 5.52 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลขนาด 500 kV 101

รูปที่ 5.53 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle 0^\circ$ kV $V_B = 207\angle -120^\circ$ kV $V_C = 253\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =3 m 102

รูปที่ 5.54 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 253\angle 0^\circ$ kV $V_B = 230\angle -120^\circ$ kV $V_C = 207\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =3 m 103

รูปที่ 5.55 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 207\angle 0^\circ$ kV $V_B = 253\angle -120^\circ$ kV $V_C = 230\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =3 m 103

รูปที่ 5.56 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle 0^\circ$ kV $V_B = 207\angle -120^\circ$ kV $V_C = 253\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =10 m 104

รูปที่ 5.57 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 253\angle 0^\circ$ kV $V_B = 230\angle -120^\circ$ kV $V_C = 207\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =10 m 104

รูปที่ 5.58 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 207\angle 0^\circ$ kV $V_B = 253\angle -120^\circ$ kV $V_C = 230\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =10 m 105

รูปที่ 5.59 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle 0^\circ$ kV $V_B = 207\angle -120^\circ$ kV $V_C = 253\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =17 m 105

รูปที่ 5.60 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 253\angle 0^\circ$ kV $V_B = 230\angle -120^\circ$ kV $V_C = 207\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =17 m 106

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 5.61 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 207\angle 0^\circ$ kV $V_B = 253\angle -120^\circ$ kV $V_C = 230\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =17 m 106

รูปที่ 5.62 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (ขนาด) 230 kV แบบที่ 1 107

รูปที่ 5.63 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (ขนาด) 230 kV แบบที่ 2 107

รูปที่ 5.64 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (ขนาด) 230 kV แบบที่ 3 108

รูปที่ 5.65 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle 0^\circ$ kV $V_B = 230\angle -150^\circ$ kV $V_C = 230\angle 150^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =3 m 108

รูปที่ 5.66 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle 30^\circ$ kV $V_B = 230\angle -120^\circ$ kV $V_C = 230\angle 90^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =3 m 109

รูปที่ 5.67 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle -30^\circ$ kV $V_B = 230\angle -90^\circ$ kV $V_C = 230\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง x =3 m 109

รูปที่ 5.68 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (เฟส) 230 kV แบบที่ 1 110

รูปที่ 5.69 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (เฟส) 230 kV แบบที่ 2 110

รูปที่ 5.70 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (เฟส) 230 kV แบบที่ 3 111

รูปที่ 5.71 การออกแบบกริดด้วย PDETOOL ของระบบสายส่งไฟฟ้าขนาด 230 kV 113

รูปที่ 5.72 การกระจายสนามไฟฟ้าที่กระจายรอบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV ด้วย PDETOOL 113

รูปที่ 5.73 การกระจายค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์ดิฟเฟอร์เรนท์ 114

รูปที่ 5.74 การกระจายค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ 114

รูปที่ 5.75 คำตอบโนดต่อโนดภายในช่วงโนด 1-847 116

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 6.1 ลักษณะการกำหนดค่าพารามิเตอร์โครงสร้างของระบบไฟฟ้าแบบ 3 มิติ 119
รูปที่ 6.2 โครงสร้างของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 69 kV (x = 7.5 m) 120
รูปที่ 6.3 การออกแบบกริดของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 69 kV (x = 7.5 m) 121
รูปที่ 6.4 คอนทัวร์ค่าสนามไฟฟ้าแบบ 2 มิติของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟส ขนาด 69 kV (x = 7.5 m) 121
รูปที่ 6.5 ลักษณะค่าสนามไฟฟ้าแบบ 3 มิติบริเวณภายในระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 69 kV (x = 7.5 m) 122
รูปที่ 6.6 ลักษณะค่าสนามไฟฟ้าแบบ 3 มิติบริเวณพื้นผิวภายนอกของ ระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 69 kV (x = 7.5 m) 122
รูปที่ 6.7 การออกแบบกริดของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV (x = 10 m) 123
รูปที่ 6.8 คอนทัวร์ค่าสนามไฟฟ้าแบบ 2 มิติของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV เมื่อ $V_A = 230\angle 0^\circ$ kV $V_B = 230\angle -120^\circ$ kV $V_C = 230\angle 120^\circ$ kV (x = 10 m) 124
รูปที่ 6.9 ลักษณะค่าสนามไฟฟ้าแบบ 3 มิติบริเวณภายในระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV เมื่อ $V_A = 230\angle 0^\circ$ kV $V_B = 230\angle -120^\circ$ kV $V_C = 230\angle 120^\circ$ kV (x = 10 m) 124
รูปที่ 6.10 ลักษณะค่าสนามไฟฟ้าแบบ 3 มิติบริเวณพื้นผิวภายนอกของระบบไฟฟ้า 3 เฟส 230 kV เมื่อ $V_A = 230\angle 0^\circ$ kV $V_B = 230\angle -120^\circ$ kV $V_C = 230\angle 120^\circ$ kV (x = 10 m) 125
รูปที่ 6.11 โครงสร้างของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 500 kV (x = 12.5 m) 125
รูปที่ 6.12 การออกแบบกริดของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 500 kV (x = 12.5 m) 126
รูปที่ 6.13 คอนทัวร์ค่าสนามไฟฟ้าแบบ 2 มิติของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 500 kV เมื่อ $V_A = 500\angle 0^\circ$ kV $V_B = 500\angle -120^\circ$ kV $V_C = 500\angle 120^\circ$ kV (x = 12.5 m) 126
รูปที่ 6.14 ลักษณะค่าสนามไฟฟ้าแบบ 3 มิติบริเวณภายในระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 500 kV เมื่อ $V_A = 500\angle 120^\circ$ kV $V_B = 500\angle 0^\circ$ kV $V_C = 500\angle -120^\circ$ kV (x = 12.5 m) 127
รูปที่ 6.15 ลักษณะค่าสนามไฟฟ้าแบบ 3 มิติบริเวณพื้นผิวภายนอกของระบบไฟฟ้า 3 เฟส 500 kV เมื่อ $V_A = 500\angle 0^\circ$ kV $V_B = 500\angle -120^\circ$ kV $V_C = 500\angle 120^\circ$ kV (x = 12.5 m) 127
รูปที่ ก.1 ประจุตัวนำและประจุตัวนำเทียมที่เป็นเส้นยาวอนันต์ 136
รูปที่ ก.2 ประจุตัวนำและประจุตัวนำเทียมในระบบสายส่ง 138