



รายงานการวิจัย

การป้องกันผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่พาดผ่าน
สายส่งไฟฟ้าแรงต่ำในขณะปฏิบัติหน้าที่
(Prevention of the Electromagnetic Field Effects from
HV Transmission Line over LV Transmission Line during Operation)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เป่าละออ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายอานนท์ อิศรมงคลรักษ์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2552

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กรกฎาคม 2553

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการนี้ โดยการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2552

บทคัดย่อ

การตรวจสอบ บำรุงรักษา และงานซ่อมแซม ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า เป็นหน้าที่หลักของวิศวกรไฟฟ้ากำลังซึ่งต้องปฏิบัติงานดังกล่าวเป็นประจำทุกวัน สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในเขตภูมิภาคและพื้นที่ชนบท งานดังกล่าวจะอยู่ในความรับผิดชอบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) ด้วยเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ ระบบสายส่งไฟฟ้าสองวงจรหรือมากกว่านั้นจะถูกติดตั้งอยู่บนเสาไฟฟ้าต้นเดียวกัน โดยปกติระบบที่มีแรงดันสูงกว่าจะอยู่ในส่วนบนสุดของเสา ซึ่งในทางปฏิบัติรูปแบบที่พบเห็นคือสายส่ง 115 kV ถูกติดตั้งร่วมกับสายจำหน่าย 22 kV ในแง่ความปลอดภัยของเจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับระบบสายส่งในลักษณะดังกล่าวนี้ต้องใช้ความระมัดระวังเพื่อหลีกเลี่ยงความเสี่ยงทุกรูปแบบที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะระบบสายส่งที่อยู่ร่วมกันสองวงจรหรือมากกว่า แม้ว่าจะทำการตัดวงจรใดวงจรหนึ่งออกไปแล้วก็ตาม จำเป็นต้องมีการคำนึงถึงผลของการเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากวงจรที่อยู่ใกล้เคียงด้วย งานวิจัยนี้ได้ใช้ระเบียบวิธีไฟในท้อลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อใช้เป็นเครื่องมือวิเคราะห์สำหรับจำลองสภาพสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายตัวรอบสายส่งกำลังไฟฟ้า พร้อมศึกษาอุปกรณ์ป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้ในการลดผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งที่อยู่ใกล้เคียง โดยได้ทำการศึกษาและรายงานผลโครงสร้างของหลังคากระเช้ารถยกที่มีผลต่อการป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ABSTRACT

Monitoring, maintenance and repairing works of electric power transmission systems are main functions of power engineers in their daily schedule. Provincial Electric Authority of Thailand (PEA), state own organization in which regional power transmission systems and rural electric power distribution systems are its major services. For economic purposes, two or more circuits are normally hung on the same towers. Typically, a circuit of higher voltage is on the top of the tower. A practice of this configuration is a combination of a 115-kV power transmission line and a 22-kV distribution feeder. Safety of operators working in this circumstance depends on carefulness of all possible risks. Even when one circuit is disconnected from the supply source, electromagnetic induction becomes a serious issue where two or more circuits are located close enough to each other. In this research, three-dimensional finite element analysis is exploited as a tool for visualizing electromagnetic field distribution around a power transmission line. In addition, electromagnetic shielding devices are investigated in order to reduce the electromagnetic induction on the nearby circuit. The configurations of a crane's cabin roof is studied and reported.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
1.6 การจัดรูปแบบรายงานการวิจัย.....	3
บทที่ 2 การคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่งโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	5
2.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้า 3 มิติ.....	5
2.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก 3 มิติ.....	7
2.3 การคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์.....	8
2.3.1 การแบ่งอิลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา.....	8
2.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์.....	11
2.3.3 การสร้างสมการของอิลิเมนต์.....	12
2.3.4 การประกอบสมการอิลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ.....	22
2.3.5 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาผลเฉลย.....	23
2.4 สรุป.....	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและผลการจำลองแบบ 3 มิติ	26
3.1 บทนำ	26
3.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล	26
3.2.1 โปรแกรมสร้างกริด	26
3.2.2 โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	30
3.3 ผลการจำลองพร้อมวิเคราะห์ผล	32
3.4 สรุป	37
บทที่ 4 การป้องกันอันตรายจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อปฏิบัติงานด้วยกระเช้ารถยก	38
4.1 บทนำ	38
4.2 การปฏิบัติงานด้วยกระเช้ารถยกของการไฟฟ้าพร้อมการจำลองผล	38
4.3 การป้องกันอันตรายจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	47
4.4 สรุป	53
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	54
5.1 สรุป	54
5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต	55
บรรณานุกรม	56
ภาคผนวก	
การเผยแพร่ผลงานวิจัย	60
ประวัติผู้วิจัย	61

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิวของตัวนำ.....	24
2.2 ค่าสนามแม่เหล็กที่บริเวณผิวของตัวนำ.....	24
3.1 สนามไฟฟ้า (kV/m) ของระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV เมื่อพิจารณาที่ระดับภาพตัดขวางต่าง ๆ	36
3.2 สนามแม่เหล็ก (μT) ของระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV เมื่อพิจารณาที่ระดับภาพตัดขวางต่าง ๆ	37
4.1 คุณสมบัติต่าง ๆ ทางไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้จำลองผลในระบบ	42
4.2 ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุวิศวกรรม.....	47

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 kV พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	9
2.2 การแบ่งอิตีเมนต์ของระบบไฟฟ้า 115 kV ที่พาดผ่านระบบไฟฟ้าขนาด 22 kV ในแบบ 3 มิติ.....	10
3.1 โครงสร้างแบบ 3 มิติ ของระบบที่ศึกษา.....	27
3.2 ลักษณะการสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าของระบบส่งจ่ายไฟฟ้า 115 kV และ 22 kV ในงานวิจัย.....	28
3.3 ลักษณะการสร้างกริดรูปสามเหลี่ยมของระบบส่งจ่ายไฟฟ้า 115 kV และ 22 kV ในงานวิจัย.....	28
3.4 ขยายให้เห็นถึงการสร้างกริดแบบ 3 มิติ ในบริเวณตัวนำ 115 kV.....	29
3.5 ขยายให้เห็นถึงการสร้างกริดแบบ 3 มิติ ในบริเวณตัวนำ 22 kV.....	29
3.6 ขยายให้เห็นถึงการสร้างกริดแบบ 3 มิติ ในบริเวณสายดินเหนือศีรษะ.....	30
3.7 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	31
3.8 การกระจายสนามไฟฟ้า (kV/m) บริเวณขอบของระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่าน ระบบจำหน่าย 22 kV.....	33
3.9 การกระจายสนามไฟฟ้า (kV/m) บริเวณภายในของระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่าน ระบบจำหน่าย 22 kV.....	33
3.10 ภาพตัดขวางการกระจายสนามไฟฟ้า (kV/m) ของระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่าน ระบบจำหน่าย 22 kV.....	34
3.11 การกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) บริเวณขอบของระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่าน ระบบจำหน่าย 22 kV.....	34
3.12 การกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) บริเวณภายในของระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่าน ระบบจำหน่าย 22 kV.....	35
3.13 ภาพตัดขวางการกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) ของระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่าน ระบบจำหน่าย 22 kV.....	35
4.1 การปฏิบัติงานของบุคลากรทางไฟฟ้าด้วยกระเช้ารดยกของการไฟฟ้า.....	39
4.2 บริเวณที่มีคนวนหุ้มของรดยกของการไฟฟ้า.....	39
4.3 โครงสร้างกระเช้ารดยกของการไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองผล.....	40
4.4 โครงสร้างของระบบทั้งหมดที่ใช้ในการจำลองผลแบบ 3 มิติ.....	41
4.5 การสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าของระบบเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยกระเช้ารดยก.....	42
4.6 การสร้างกริดรูปสามเหลี่ยมของระบบเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยกระเช้ารดยก.....	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ขยายให้เห็นถึงการสร้างกริดแบบ 3 มิติเมื่ออนุภาคนำขึ้น ไปปฏิบัติงานด้วยกระแสรัยยก	43
4.8 การกระจายสนามไฟฟ้า (kV/m) แบบ 3 มิติบริเวณภายในของระบบเมื่ออนุภาคนำขึ้น ไปปฏิบัติงานด้วยกระแสรัยยก	44
4.9 การกระจายสนามไฟฟ้า (kV/m) แบบ 3 มิติบริเวณกระแสรัยเมื่ออนุภาคนำขึ้น ไปปฏิบัติงานด้วยกระแสรัยยก	44
4.10 ภาพตัดขวางการกระจายสนามไฟฟ้า (kV/m) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์ของระบบ เมื่ออนุภาคนำขึ้น ไปปฏิบัติงานด้วยกระแสรัยยก	45
4.11 การกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) แบบ 3 มิติบริเวณภายในของระบบเมื่ออนุภาคนำขึ้น ไปปฏิบัติงานด้วยกระแสรัยยก	45
4.12 การกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) แบบ 3 มิติบริเวณกระแสรัยเมื่ออนุภาคนำขึ้น ไปปฏิบัติงานด้วยกระแสรัยยก	46
4.13 ภาพตัดขวางการกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์ของระบบ เมื่ออนุภาคนำขึ้น ไปปฏิบัติงานด้วยกระแสรัยยก	46
4.14 โครงสร้างกระแสรัยยกพร้อมการติดตั้งหลังคา	48
4.15 ขยายให้เห็นถึงการสร้างกริดแบบ 3 มิติเมื่ออนุภาคนำขึ้น ไปปฏิบัติงานด้วยกระแสรัยยก ที่ติดตั้งหลังคา	49
4.16 การกระจายสนามไฟฟ้า (kV/m) แบบ 3 มิติบริเวณภายในของระบบเมื่ออนุภาคนำขึ้น ไปปฏิบัติงานด้วยกระแสรัยยกที่ติดตั้งหลังคา	49
4.17 การกระจายสนามไฟฟ้า (kV/m) แบบ 3 มิติบริเวณกระแสรัยเมื่ออนุภาคนำขึ้น ไปปฏิบัติงานด้วยกระแสรัยยกที่ติดตั้งหลังคา	50
4.18 ภาพตัดขวางการกระจายสนามไฟฟ้า (kV/m) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์ของระบบ เมื่ออนุภาคนำขึ้น ไปปฏิบัติงานด้วยกระแสรัยยกที่ติดตั้งหลังคา	50
4.19 การกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) แบบ 3 มิติบริเวณภายในของระบบเมื่ออนุภาคนำขึ้น ไปปฏิบัติงานด้วยกระแสรัยยกที่ติดตั้งหลังคา	51
4.20 การกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) แบบ 3 มิติบริเวณกระแสรัยเมื่ออนุภาคนำขึ้น ไปปฏิบัติงานด้วยกระแสรัยยกที่ติดตั้งหลังคา	51
4.21 ภาพตัดขวางการกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์ของระบบ เมื่ออนุภาคนำขึ้น ไปปฏิบัติงานด้วยกระแสรัยยกที่ติดตั้งหลังคา	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

การตรวจสอบ บำรุง และซ่อมแซม สายส่งไฟฟ้าเป็นหน้าที่อย่างหนึ่งที่วิศวกรหรือบุคลากรทางด้านไฟฟ้าต้องดำเนินการอย่างต่อเนื่องเป็นประจำ ซึ่งการทำงานในลักษณะเช่นนี้กับสายส่งในระบบจำหน่ายอย่างเช่นระบบ 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่มีสายส่งในระบบส่งจ่ายอย่างเช่นระบบ 115 kV พาดผ่านอยู่ด้านบนในเสาต้นเดียวกันนั้น โดยทั่วไปแล้วจะทำการตัดกระแสไฟฟ้าเฉพาะของสายส่งในระบบจำหน่ายในช่วงที่ต้องการจะปฏิบัติงานออก โดยที่กระแสไฟฟ้าของสายส่งในระบบส่งจ่ายที่อยู่ด้านบนก็ยังคงไหลในสายเพื่อทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อไปได้ ซึ่งการดำเนินงานเช่นนี้ก็มักจะมีความปลอดภัยต่อบุคลากรที่จะปฏิบัติหน้าที่ แต่ในความเป็นจริงนั้นผลของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายที่อยู่เหนือศีรษะของผู้ปฏิบัติงาน ได้มีการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าขึ้นที่สายส่งในระบบจำหน่ายทั้งที่ได้หยุดการจ่ายไฟแล้วก็ตาม จึงส่งผลให้บุคลากรที่ปฏิบัติงานอยู่ในระบบจำหน่ายได้รับอันตราย

ปัญหาสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในทางวิศวกรรมศาสตร์ โดยปกติจะสามารถอธิบายได้ในรูปของสมการอนุพันธ์ (Differential equation) หรือสมการอินทิกรัล (Integral equation) เป็นไปได้ยากที่จะหาผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate solution) ด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข อีกทั้งสมรรถนะของคอมพิวเตอร์ที่สูงขึ้น จึงทำให้การคำนวณเชิงตัวเลขสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว สำหรับวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณของสมการที่อยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation : PDE) วิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและได้รับความนิยมแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่ วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element method : FEM) โดยเฉพาะงานวิจัยนี้ซึ่งต้องอาศัยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติมาช่วยดำเนินการ

ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เริ่มวิวัฒนาการมาตั้งแต่ต้นปี ค.ศ. 1950 ปัจจุบันเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมมาก เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ ทำให้สามารถคำนวณงานต่าง ๆ ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ในปัจจุบันได้มีการนำวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์มาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมแทบทุกสาขา และเริ่มนำมาประยุกต์กับปัญหาสนามไฟฟ้าในปี ค.ศ. 1968 ซึ่งระเบียบวิธีนี้จะแบ่งพื้นที่ของปัญหาเป็นชิ้นส่วนย่อยที่ประกอบขึ้นจากโนด โดยเชื่อมต่อกันด้วยกริด สำหรับปัญหา 2 มิตินิยมใช้ชิ้นส่วนย่อยที่เป็นรูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อ (Linear triangle) และสำหรับปัญหา 3 มิตินิยมใช้ชิ้น

ส่วนย่อยที่เป็นรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (Linear tetrahedral) เพื่อประมาณ โดเมนของปัญหาได้ ซึ่งข้อดีของระเบียบวิธีนี้คือ สามารถหาผลเฉลยของระบบที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ นอกจากนี้ยังง่ายต่อการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่อาจมีหลายลักษณะผสมกันอยู่ในระบบ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำวิธี FEM มาใช้ในการดำเนินการ โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงค่าสนามแม่เหล็กและค่าสนามไฟฟ้าที่กระจายตัวในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อใช้หาแนวทางการป้องกันอันตรายที่เกิดกับบุคลากรที่ปฏิบัติงานที่ระบบจำหน่าย 22 kV และเนื่องจากปัญหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ซึ่งยากในการหาผลเฉลย ดังนั้นระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์จึงเป็นวิธีเชิงตัวเลขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการจำลองผลเพื่อหาผลเฉลยในงานวิจัยนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- พัฒนางานความรู้ในการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันอันตรายผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายส่ง
- พัฒนาโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับคำนวณค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายส่ง ให้สามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็ว ถูกต้อง และแม่นยำ
- พัฒนานักวิจัยใหม่และบุคลากรทางด้านการวิเคราะห์และออกแบบอุปกรณ์ป้องกันอันตรายผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายส่ง ด้วยเทคนิคการคำนวณขั้นสูง

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- พื้นที่ในการทดสอบระบบเป็นพื้นที่โล่ง ปราศจากการกีดขวางของอาคารและสิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ
- สายตัวนำเป็นสายเปลือย (Bared wire) รูปทรงกระบอกตัน และมีผิวเรียบ
- กำหนดให้แรงดันและกระแสในสายตัวนำแต่ละเส้นมีค่าแรงดันและกระแสคงที่สม่ำเสมอตลอดทั้งเส้น
- กำหนดให้สภาพพื้นดินในระบบที่พิจารณาเป็นพื้นดินในสภาพทั่วไปปราศจากน้ำขังหรือความชื้นบนหน้าดินสูง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- พัฒนาโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

- พิจารณาสายส่งไฟฟ้าแรงสูงในระบบส่งจ่ายขนาด 115 kV ที่พาดผ่านสายส่งไฟฟ้าในระบบจำหน่ายขนาด 22 kV ที่อยู่บนเสาต้นเดียวกันของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเป็นแบบ 3 มิติ
- ดำเนินการคำนวณเพื่อหาแนวทางการป้องกันอันตรายผลของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในสายส่งระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV เมื่อบุคลากรปฏิบัติหน้าที่กับสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV ที่ตัดไฟออกโดยสายส่งในระบบส่งจ่าย 115 kV ยังคงมีกระแสไหลได้ตามปกติ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- ได้หลักการและแนวความคิดสำหรับการศึกษาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
- ได้โปรแกรมจำลองผลที่เกิดจากการพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เข้ากับปัญหาจริงในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในสายส่ง ตลอดจนสามารถนำไปใช้เป็นส่วนประกอบการเรียนการสอนด้านสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้าและสายส่งกำลังไฟฟ้า
- ได้แนวทางการออกแบบอุปกรณ์สำหรับป้องกันอันตรายจากผลของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

1.6 การจัดรูปแบบรายงานการวิจัย

รายงานการวิจัยนี้ประกอบด้วย 5 บท และ 1 ภาคผนวก บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัย รวมทั้งขอบเขตของงานวิจัย ส่วนบทอื่นๆ ประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายตัวรอบสายส่ง และนำเสนอการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยได้อธิบายขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ เพื่อดำเนินการหาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายรอบ ๆ บริเวณระบบส่งจ่ายขนาด 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่ายขนาด 22 kV ที่อยู่บนเสาต้นเดียวกันของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

บทที่ 3 อธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้าพร้อมผลการจำลองของระบบสายส่งแบบ 3 มิติ โดยกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ประยุกต์ใช้ในการจำลองผล รวมถึงอธิบายโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล

บทที่ 4 มีเนื้อหาว่าด้วยการหาแนวทางการป้องกันอันตรายผลของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่กระจายตัวรอบสายส่งกำลังไฟฟ้าขนาด 115 kV ที่พาดผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าขนาด 22 kV เมื่อมีผู้ปฏิบัติงานที่สายส่งกำลังไฟฟ้า 22 kV ที่ตัดไฟออกโดยที่สายส่ง 115 kV ยังคงมีกระแสไหลปกติ โดยเน้นที่การปฏิบัติงานของบุคลากรด้วยกระเช้ารถยกของการไฟฟ้า

บทที่ 5 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ส่วนภาคผนวก เป็นการกล่าวถึงผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทที่ 2

การคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่งโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.1 บทนำ

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) เป็นวิธีที่ใช้ในการหาผลเฉลยแบบประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์และเป็นที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์งานที่มีโครงสร้างซับซ้อน หรือรูปร่างที่มีลักษณะโค้งมนได้อีกทั้งประสิทธิภาพและการประมวลผลที่สูงขึ้นของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน นอกจากนี้ในบางระบบที่มีบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์มีพื้นที่ขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับปัญหาของระบบที่เป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็สามารถแบ่งกริดขนาดเล็กหรือใหญ่ ที่สามารถเชื่อมความสัมพันธ์ของ 2 บริเวณที่มีขนาดแตกต่างกันได้อย่างครอบคลุมและอิสระอย่างเช่น งานวิจัยนี้ที่พิจารณาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปรากฏขึ้นรอบตัวนำภายในสายส่ง 115 kV และค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปรากฏรอบ ๆ บุคลากรที่ปฏิบัติงานหน้าทีในสายส่งกำลังไฟฟ้า 22 kV ซึ่งพื้นที่บริเวณทั้งสองเป็นพื้นที่ขนาดเล็ก ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็สามารถตีกริดรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบ 3 มิติให้มีขนาดเล็กเพื่อการวิเคราะห์ภายในบริเวณดังกล่าวได้ ในขณะที่บริเวณส่วนใหญ่เป็นอากาศและไม่มีความจำเป็นสำหรับการศึกษามากนัก ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็สามารถตีกริดให้มีขนาดใหญ่ได้เช่นกัน ซึ่งการดำเนินการแบบนี้จะก่อให้เกิดจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในระบบที่ศึกษามีจำนวนไม่มาก และสามารถคำนวณหาผลเฉลย ณ บริเวณที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า พร้อมทั้งประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายตัวรอบสายส่งต่อไป

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า

2.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้า 3 มิติ

สำหรับปัญหาค่าสนามไฟฟ้าใน 3 มิติในระบบพิกัดฉาก ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นิยมจัดรูปสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปสมการที่ (2-1)

$$D_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - G\phi + Q = 0 \quad (2-1)$$

โดยที่ ϕ คือ ฟังก์ชันใด ๆ ที่ต้องการทราบค่า ส่วน D_x, D_y, D_z, G และ Q คือ ค่าคงที่สัมประสิทธิ์

แบบจำลองของสนามไฟฟ้าที่กระจายรอบบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูงในรูปแบบ 3 มิติ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2-2) (Christopoulos, 1995)

$$\left(\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2}\right) - \mu\epsilon\left(\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}\right) - \mu\sigma\left(\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\right) = 0 \quad (2-2)$$

โดยที่ $\mathbf{E}$ คือ สนามไฟฟ้า (Electric field)

t คือ เวลา (Time)

μ คือ สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก (Permeability)

ϵ คือ สภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity)

σ คือ สภาพนำทางไฟฟ้า (Conductivity)

โดยที่ $\mu = \mu_0\mu_r$ และ $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$ เมื่อ μ_r คือ สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ และ ϵ_r คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ ซึ่ง $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

จากคุณสมบัติของระบบที่เป็น time-harmonic อย่างเช่นในระบบสายส่งไฟฟ้าจะได้

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \approx j\omega \mathbf{E} \quad (2-3)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \approx -\omega^2 \mathbf{E} \quad (2-4)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2-2) จึงได้

$$\left(\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2}\right) + (j\mu\omega\sigma - \mu\omega^2\epsilon)\mathbf{E} = 0 \quad (2-5)$$

เปรียบเทียบสมการที่ (2-1) กับ (2-5) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ D_x, D_y, D_z, G และ Q จะได้

$$\begin{aligned}
D_x &= D_y = D_z = 1 \\
G &= -\mu\epsilon\omega^2 + j\mu\sigma\omega \\
Q &= 0
\end{aligned} \tag{2-6}$$

2.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก 3 มิติ

สำหรับปัญหาค่าสนามแม่เหล็กใน 3 มิติในระบบพิกัดฉาก ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ นิยมจัดรูปสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปสมการที่ (2-7)

$$D_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - G\phi + Q = 0 \tag{2-7}$$

โดยที่ ϕ คือ ฟังก์ชันใด ๆ ที่ต้องการทราบค่า ส่วน D_x , D_y , D_z , G และ Q คือ ค่าคงที่สัมประสิทธิ์

แบบจำลองของสนามแม่เหล็กที่กระจายรอบบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูงใน รูปแบบ 3 มิติ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2-8) (Christopoulos, 1995)

$$\left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} \right) - \mu\epsilon \left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \right) - \mu\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \right) = 0 \tag{2-8}$$

โดยที่ $\mathbf{H}$ คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity)
 t คือ เวลา (Time)
 μ คือ สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก (Permeability)
 ϵ คือ สภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity)
 σ คือ สภาพนำทางไฟฟ้า (Conductivity)

โดยที่ $\mu = \mu_0 \mu_r$ และ $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ เมื่อ μ_r คือ สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ และ ϵ_r คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ ซึ่ง $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

จากคุณสมบัติของระบบที่เป็น time-harmonic อย่างเช่นในระบบสายส่งไฟฟ้าจะได้

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \approx j\omega \mathbf{H} \tag{2-9}$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \approx -\omega^2 \mathbf{H} \quad (2-10)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2-8) จึงได้

$$\left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right) + (j\mu\omega\sigma - \mu\omega^2\varepsilon)H = 0 \quad (2-11)$$

เปรียบเทียบกับสมการที่ (2-7) กับ (2-11) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ D_x , D_y , D_z , G และ Q จะได้

$$\begin{aligned} D_x &= D_y = D_z = 1 \\ G &= -\mu\varepsilon\omega^2 + j\mu\sigma\omega \\ Q &= 0 \end{aligned} \quad (2-12)$$

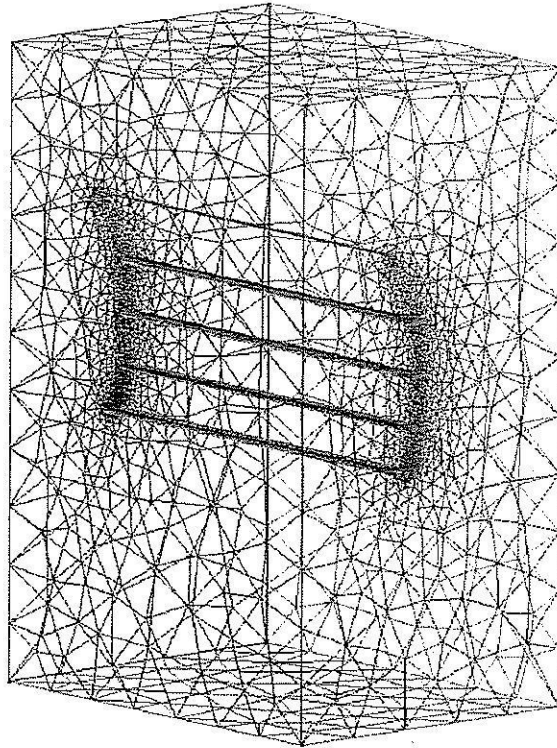
2.3 การคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

สืบเนื่องจากสมการเชิงอนุพันธ์เพื่อใช้ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงดังแสดงในสมการที่ (2-5) และ สมการที่ (2-11) นั้นหาผลเฉลยแน่นอนตรงได้ยากเพราะด้วยเหตุที่ติดอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง ดังนั้นการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์จึงถูกนำมาใช้ในการนี้ ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการดำเนินงานต่าง ๆ ดังนี้

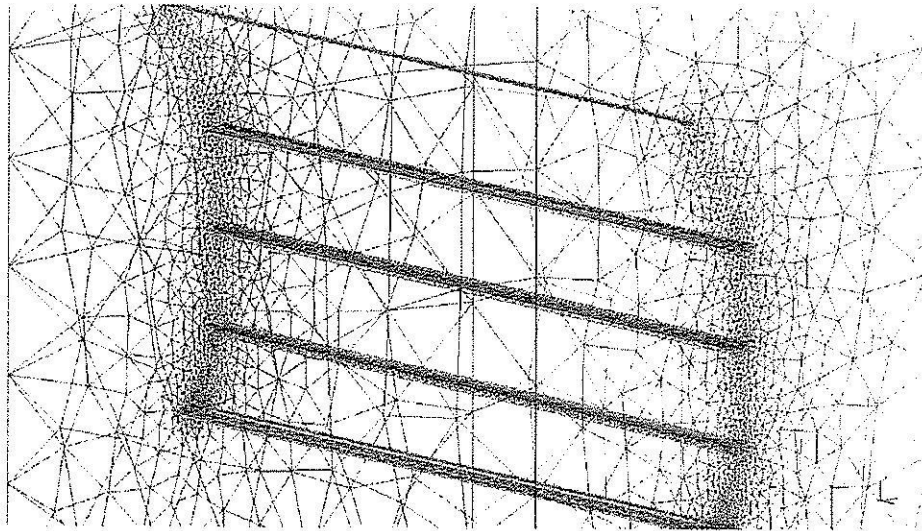
2.3.1 การแบ่งอิลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 115 kV ที่พาดผ่านสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคดังแสดงในรูปที่ 2.1 การออกแบบกริดให้มีขนาดเล็กหรือใหญ่นั้นจะแปรเปลี่ยนตามความต้องการในการวิเคราะห์บริเวณพื้นที่ที่สนใจภายในส่วนต่าง ๆ ของระบบ

ขั้นตอนแรกเริ่มจากการแบ่งพื้นที่ของระบบสายส่งออกเป็นอิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral elements) สำหรับปัญหาในแบบ 3 มิติ โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพธ์โดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนอิลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งผ่านการเชื่อมต่อกันระหว่างโนดและอิลิเมนต์ต่าง ๆ การออกแบบกริดเป็นรูปอิลิเมนต์ต่าง ๆ ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อ



ก) การแบ่งอีลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าและการเชื่อมต่อระหว่างอีลิเมนต์ภายในโครงสร้าง



ข) ภาพการขยายการแบ่งอีลิเมนต์และการเชื่อมต่ออีลิเมนต์บนบริเวณที่สำคัญ

รูปที่ 2.2 การแบ่งอีลิเมนต์ของระบบไฟฟ้า 115 kV ที่พาดผ่านระบบไฟฟ้าขนาด 22 kV ในแบบ 3 มิติ

2.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์

ขั้นตอนนี้เป็นทางเลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ โดยเมื่อสมมติให้ลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอิลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้น ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างของสนามไฟฟ้าจากสายส่งกำลังไฟฟ้าจะได้

$$E(x, y, z) = E_1 N_1 + E_2 N_2 + E_3 N_3 + E_4 N_4 \quad (2-13)$$

โดยที่ N_n , $n = 1, 2, 3, 4$ คือฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ และ E_n , $n = 1, 2, 3, 4$ คือผลลัพธ์ของค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละโนด 1, 2, 3, 4 ของอิลิเมนต์ ซึ่งในกรณีอิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อจะได้

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, 3, 4 \quad (2-14)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} a_1 &= x_4 (y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_3 (y_4 z_2 - y_2 z_4) + x_2 (y_3 z_4 - y_4 z_3) \\ a_2 &= x_4 (y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3 (y_1 z_4 - y_4 z_1) + x_1 (y_4 z_3 - y_3 z_4) \\ a_3 &= x_4 (y_1 z_2 - y_2 z_1) + x_2 (y_4 z_1 - y_1 z_4) + x_1 (y_2 z_4 - y_4 z_2) \\ a_4 &= x_3 (y_2 z_1 - y_1 z_2) + x_2 (y_1 z_3 - y_3 z_1) + x_1 (y_3 z_2 - y_2 z_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_1 &= y_4 (z_3 - z_2) + y_3 (z_2 - z_4) + y_2 (z_4 - z_3) \\ b_2 &= y_4 (z_1 - z_3) + y_1 (z_3 - z_4) + y_3 (z_4 - z_1) \\ b_3 &= y_4 (z_2 - z_1) + y_2 (z_1 - z_4) + y_1 (z_4 - z_2) \\ b_4 &= y_3 (z_1 - z_2) + y_1 (z_2 - z_3) + y_2 (z_3 - z_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_1 &= x_4 (z_2 - z_3) + x_2 (z_3 - z_4) + x_3 (z_4 - z_2) \\ c_2 &= x_4 (z_3 - z_1) + x_3 (z_1 - z_4) + x_1 (z_4 - z_3) \\ c_3 &= x_4 (z_1 - z_2) + x_1 (z_2 - z_4) + x_2 (z_4 - z_1) \\ c_4 &= x_3 (z_2 - z_1) + x_2 (z_1 - z_3) + x_1 (z_3 - z_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
d_1 &= x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3) \\
d_2 &= x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1) \\
d_3 &= x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2) \\
d_4 &= x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1)
\end{aligned}$$

และ V คือปริมาตรของแต่ละอิลิเมนต์ หาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (2-15)$$

2.3.3 การสร้างสมการของอิลิเมนต์

ขั้นตอนนี้อธิบายว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ซึ่งเป็นการสร้างสมการของอิลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาต่าง ๆ สำหรับปัญหาของระบบ 3 มิติ ทางระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์จะต้องจัดสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาให้อยู่ในรูปแบบทั่วไป ดังแสดงในสมการที่ (2-1) ก่อนที่จะเข้าสู่การสร้างสมการของอิลิเมนต์ต่อไป

$$D_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - G\phi + Q = 0$$

ประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Weighting functions) ดังสมการที่ (2-16) ซึ่งวิธีนี้สามารถกระทำได้โดยการคูณเศษตกค้าง R ด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก W แล้วอินทิเกรตตลอดทั้งโดเมนของอิลิเมนต์ (v) และกำหนดผลที่ได้ให้เท่ากับศูนย์ ในปัจจุบันการประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างถือเป็นวิธีที่ถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ ซึ่งเมทริกซ์ที่เกิดขึ้นจากวิธีนี้ปกติแล้วจะมีความสมมาตร จึงก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้กับปัญหามหาศาล

$$-\int_v W_n R dv = 0 \quad (2-16)$$

การสร้างสมการของอีลิเมนต์ด้วยการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างมีหลักการดังนี้ คือ การแทนค่าผลเฉลยโดยประมาณลงในสมการที่ (2-1) จะไม่ก่อให้เกิดค่าเท่ากับศูนย์ หากแต่จะมีค่าเท่ากับ R แทน ดังแสดงด้วยสมการที่ (2-17)

$$R = D_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - G\phi + Q \quad (2-17)$$

โดยที่ ϕ คือ ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า

ซึ่ง R เรียกว่าเศษตกค้าง (Residual) เป็นค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการใช้ผลเฉลยโดยประมาณ ซึ่งไม่ใช่ผลเฉลยแน่นอนตรงของปัญหา เศษตกค้าง R ที่เกิดขึ้นควรมีค่าต่ำที่สุด เพื่อผลเฉลยโดยประมาณที่เกิดขึ้นจะมีค่าเที่ยงตรงมากที่สุด

งานวิจัยนี้เลือกกริดรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อในการคำนวณ ดังนั้นจุดที่ไม่ทราบค่าจะมี 4 จุดซึ่งได้แก่จุดต่อทั้งสี่ ดังนั้นจึงต้องการ 4 สมการในการแก้หาจุดที่ไม่ทราบค่า ดังนั้นจากสมการที่ (2-16) จะต้องมีค่า $n = 1, 2, 3, 4$ และในงานวิจัยนี้ วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างได้เลือกใช้วิธีของกาลอร์คิน (Galerkin) (Preston, Reece, and Sangha, 1988) และ (Kim, Kwon, and Park, 1999) ซึ่งวิธีนี้จะกำหนดให้ $W_n = N_n$ ดังนั้นเมื่อแทน R ด้วยสมการที่ (2-17) ลงในสมการที่ (2-16) จะได้

$$0 = - \int_v [N]^T \left(D_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - G\phi + Q \right) dv \quad (2-18)$$

โดยที่ $[N]^T$ คือ เวกเตอร์เมทริกซ์แนวตั้งของฟังก์ชันการประมาณภายในอีลิเมนต์

เนื่องจากฟังก์ชันที่ต้องการประมาณ $\phi(x, y, z)$ ไม่มีความต่อเนื่องของอนุพันธ์ระหว่างแต่ละอีลิเมนต์ ดังนั้นสมการอนุพันธ์อันดับสองตามสมการที่ (2-18) สามารถแทนได้ด้วยสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งได้ดังนี้

$$[N]^T \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left([N]^T \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2-19)$$

จากสมการที่ (2-18) จะได้

$$0 = \underbrace{-\int_v [N]^T D_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} dv}_{(A)} - \underbrace{\int_v [N]^T D_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} dv}_{(B)} - \underbrace{\int_v [N]^T D_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} dv}_{(C)} + \underbrace{\int_v [N]^T G \phi dv}_{(D)} - \underbrace{\int_v [N]^T Q dv}_{(E)} \quad (2-20)$$

เทอม A ในสมการที่ (2-20) จะสามารถแทนได้ด้วยสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งโดยอาศัยสมการที่ (2-19) จะได้สมการใหม่ดังสมการที่ (2-21)

$$-\int_v [N]^T D_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} dv = -\int_v D_x \frac{\partial}{\partial x} \left([N]^T \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dv + \int_v D_x \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} dv \quad (2-21)$$

นอกจากนี้ยังสามารถประมาณพจน์ $-\int_v D_x \frac{\partial}{\partial x} \left([N]^T \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dv$ โดยอาศัยสมการที่ (2-22) ได้ดังนี้

$$\int_v \frac{\partial}{\partial x} \left([N]^T \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dv = \int_{\Gamma} [N]^T \frac{\partial \phi}{\partial x} \cos \theta d\Gamma \quad (2-22)$$

โดยที่ θ คือ มุมที่กระทำกับอีลิเมนต์

Γ คือ ขอบเขตของอีลิเมนต์

แทนค่าสมการที่ (2-22) ใน (2-21) จึงได้เทอม A เป็น

$$-\int_v D_x [N]^T \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} dv = -\int_{\Gamma} D_x [N]^T \frac{\partial \phi}{\partial x} \cos \theta d\Gamma + \int_v D_x \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} dv \quad (2-23)$$

เทอม B และ C ก็สามารทดแทนได้ด้วยสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งในทำนองเดียวกัน ดังนั้นสมการที่ (2-20) จึงกลายเป็น

$$\begin{aligned}
0 = & - \int_{\Gamma} [N]^T (D_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \cos \theta + D_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \cos \theta + D_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \cos \theta) d\Gamma + \int_v (D_x \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} + D_y \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial \phi}{\partial y} + D_z \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial \phi}{\partial z}) dv \\
& + \int_v G[N]^T \phi dv - \int_v Q[N]^T dv
\end{aligned} \tag{2-24}$$

จาก $\phi^{(e)} = [N]\{\Phi^{(e)}\}$ แทนค่าในสมการที่ (2-24) จะได้

$$\begin{aligned}
0 = & - \int_{\Gamma} [N]^T (D_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \cos \theta + D_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \cos \theta + D_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \cos \theta) d\Gamma \\
& + \left(\int_v (D_x \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + D_y \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + D_z \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z}) dv \right) \{\Phi^{(e)}\} \\
& + \left(\int_v G[N]^T [N] dv \right) \{\Phi^{(e)}\} - \int_v Q[N]^T dv
\end{aligned} \tag{2-25}$$

และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้เป็น

$$0 = \{I^{(e)}\} + [K^{(e)}]\{\Phi^{(e)}\} - \{f^{(e)}\} \tag{2-26}$$

โดยที่

$$\{I^{(e)}\} = - \int_{\Gamma} [N]^T (D_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \cos \theta + D_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \cos \theta + D_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \cos \theta) d\Gamma$$

$$[K^{(e)}] = \int_v (D_x \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + D_y \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + D_z \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z}) dv + \int_v G[N]^T [N] dv$$

$$\{f^{(e)}\} = \int_v Q[N]^T dv$$

โดยที่ $[K^{(e)}]$ สามารถจัดรูปใหม่โดยการดำเนินการต่อไปนี้

$$[D] = \begin{bmatrix} D_x & 0 & 0 \\ 0 & D_y & 0 \\ 0 & 0 & D_z \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

และเวกเตอร์เกรเดียนต์ (Gradient vector : gv)

$$\{gv\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial [N]}{\partial x} \\ \frac{\partial [N]}{\partial y} \\ \frac{\partial [N]}{\partial z} \end{bmatrix} \{\Phi^{(e)}\} = [B] \{\Phi^{(e)}\}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial [N]}{\partial x} \\ \frac{\partial [N]}{\partial y} \\ \frac{\partial [N]}{\partial z} \end{bmatrix}$$

$$[B]^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial [N]}{\partial x} & \frac{\partial [N]}{\partial y} & \frac{\partial [N]}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2-28)$$

จาก $[B]$, $[B]^T$ และ $[D]$ สามารถเขียน $[K^{(e)}]$ ใหม่ได้เป็น

$$[K^{(e)}] = \int_V [B]^T [D] [B] dv + \int_V G [N]^T [N] dv$$

$$[K^{(e)}] = [K_D^{(e)}] + [K_G^{(e)}] \quad (2-29)$$

สำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ งานวิจัยนี้เลือกกริดรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อการคำนวณ ดังนั้นค่า ϕ ในรูปทรงสี่หน้าจึงสามารถกำหนดได้เป็น

$$\phi^{(e)} = [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4] \{\Phi^{(e)}\} \quad (2-30)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{6V}(a_1 + b_1x + c_1y + d_1z) \\ N_2 &= \frac{1}{6V}(a_2 + b_2x + c_2y + d_2z) \\ N_3 &= \frac{1}{6V}(a_3 + b_3x + c_3y + d_3z) \\ N_4 &= \frac{1}{6V}(a_4 + b_4x + c_4y + d_4z) \end{aligned} \quad (2-31)$$

และจะได้เวกเตอร์เกรเดียนต์สำหรับอิลิเมนต์นี้เป็น

$$\{gv\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial z} & \frac{\partial N_4}{\partial z} \end{bmatrix} \{\Phi^{(e)}\} \quad (2-32)$$

แทนค่าสมการที่ (2-31) ในสมการที่ (2-32) จะได้

$$\begin{aligned} \{gv\} &= \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ d_1 & d_1 & d_1 & d_1 \end{bmatrix} \{\Phi^{(e)}\} = [B]\{\Phi^{(e)}\} \\ [B] &= \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ d_1 & d_1 & d_1 & d_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-33)$$

จากสมการที่ (2-29) จะสังเกตเห็นได้ว่า

$$[K_D^{(e)}] = \int_V [B]^T [D] [B] dv$$

เนื่องจาก $[B]$ และ $[D]$ เป็นค่าคงที่จะได้

$$[K_D^{(e)}] = [B]^T [D] [B] \int_v dv$$

$$[K_D^{(e)}] = [B]^T [D] [B] V \quad (2-34)$$

แทนค่า $[B]$ และ $[D]$ จัดอยู่ในรูปสมการ $[K_D^{(e)}]$ ใหม่ได้เป็น

$$[K_D^{(e)}] = \begin{bmatrix} b_1 & c_1 & d_1 \\ b_2 & c_2 & d_2 \\ b_3 & c_3 & d_3 \\ b_4 & c_4 & d_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_x & 0 & 0 \\ 0 & D_y & 0 \\ 0 & 0 & D_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \end{bmatrix} V \left(\frac{1}{6V} \right) \left(\frac{1}{6V} \right)$$

$$[K_D^{(e)}] = \frac{1}{36V} \begin{bmatrix} D_x b_1 & D_y c_1 & D_z d_1 \\ D_x b_2 & D_y c_2 & D_z d_2 \\ D_x b_3 & D_y c_3 & D_z d_3 \\ D_x b_4 & D_y c_4 & D_z d_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \end{bmatrix}$$

$$[K_D^{(e)}] = \frac{1}{36V} \begin{bmatrix} D_x b_1^2 + D_y c_1^2 + D_z d_1^2 & D_x b_1 b_2 + D_y c_1 c_2 + D_z d_1 d_2 & D_x b_1 b_3 + D_y c_1 c_3 + D_z d_1 d_3 & D_x b_1 b_4 + D_y c_1 c_4 + D_z d_1 d_4 \\ D_x b_2 b_1 + D_y c_2 c_1 + D_z d_2 d_1 & D_x b_2^2 + D_y c_2^2 + D_z d_2^2 & D_x b_2 b_3 + D_y c_2 c_3 + D_z d_2 d_3 & D_x b_2 b_4 + D_y c_2 c_4 + D_z d_2 d_4 \\ D_x b_3 b_1 + D_y c_3 c_1 + D_z d_3 d_1 & D_x b_3 b_2 + D_y c_3 c_2 + D_z d_3 d_2 & D_x b_3^2 + D_y c_3^2 + D_z d_3^2 & D_x b_3 b_4 + D_y c_3 c_4 + D_z d_3 d_4 \\ D_x b_4 b_1 + D_y c_4 c_1 + D_z d_4 d_1 & D_x b_4 b_2 + D_y c_4 c_2 + D_z d_4 d_2 & D_x b_4 b_3 + D_y c_4 c_3 + D_z d_4 d_3 & D_x b_4^2 + D_y c_4^2 + D_z d_4^2 \end{bmatrix}$$

$$\therefore [K_D^{(e)}] = \frac{D_x}{36V} \begin{bmatrix} b_1^2 & b_1 b_2 & b_1 b_3 & b_1 b_4 \\ b_2 b_1 & b_2^2 & b_2 b_3 & b_2 b_4 \\ b_3 b_1 & b_3 b_2 & b_3^2 & b_3 b_4 \\ b_4 b_1 & b_4 b_2 & b_4 b_3 & b_4^2 \end{bmatrix} + \frac{D_y}{36V} \begin{bmatrix} c_1^2 & c_1 c_2 & c_1 c_3 & c_1 c_4 \\ c_2 c_1 & c_2^2 & c_2 c_3 & c_2 c_4 \\ c_3 c_1 & c_3 c_2 & c_3^2 & c_3 c_4 \\ c_4 c_1 & c_4 c_2 & c_4 c_3 & c_4^2 \end{bmatrix} + \frac{D_z}{36V} \begin{bmatrix} d_1^2 & d_1 d_2 & d_1 d_3 & d_1 d_4 \\ d_2 d_1 & d_2^2 & d_2 d_3 & d_2 d_4 \\ d_3 d_1 & d_3 d_2 & d_3^2 & d_3 d_4 \\ d_4 d_1 & d_4 d_2 & d_4 d_3 & d_4^2 \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

จากสมการที่ (2-29) ถ้ากำหนดให้ G เป็นค่าคงที่ ภายในแต่ละอีลิเมนต์จะได้

$$[K_G^{(e)}] = \int_v G [N]^T [N] dv$$

$$= G \int_v \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{bmatrix} [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4] dv$$

$$= G \int_v \begin{bmatrix} N_1^2 & N_1 N_2 & N_1 N_3 & N_1 N_4 \\ N_2 N_1 & N_2^2 & N_2 N_3 & N_2 N_4 \\ N_3 N_1 & N_3 N_2 & N_3^2 & N_3 N_4 \\ N_4 N_1 & N_4 N_2 & N_4 N_3 & N_4^2 \end{bmatrix} dv \quad (2-36)$$

ใช้สูตรเชิงตัวประกอบ (Factorial formula) ในการประมาณการอินทิเกรตตลอดปริมาตรดังสมการที่ (2-37) โดยที่ $N_1 = L_1$, $N_2 = L_2$, $N_3 = L_3$ และ $N_4 = L_4$ จะได้

$$\int_v L_1^a L_2^b L_3^c L_4^d dv = \frac{a!b!c!d!}{(a+b+c+d+3)!} 6V \quad (2-37)$$

จากสมการที่ (2-36) สามารถแบ่งพิจารณาออกเป็น 2 กรณีคือ $L_n = L_m$ และ $L_n \neq L_m$ ในกรณีที่ $L_n = L_m$ จะขอยกตัวอย่างการพิจารณาจุดต่อที่ 1 ของรูปทรงสี่หน้าจะได้ $a=2$, $b=c=d=0$ ดังนั้นจากสมการที่ (2-37) จะได้

$$\begin{aligned} \int_v L_1^2 dv &= \frac{2!0!0!0!}{(2+0+0+0+3)!} 6V \\ &= \frac{12V}{120} = \frac{2V}{20} \end{aligned}$$

ในกรณีที่ $L_n \neq L_m$ จะขอยกตัวอย่างการพิจารณาจุดต่อที่ 1 และ 2 ของรูปทรงสี่หน้าจะได้ $a=b=1$, $c=d=0$ ดังนั้นจากสมการที่ (2-37) จะได้

$$\begin{aligned} \int_v L_1^1 L_2^1 dv &= \frac{1!1!0!0!}{(1+1+0+0+3)!} 6V \\ &= \frac{6V}{120} = \frac{1V}{20} \end{aligned}$$

ที่จุดต่ออื่น ๆ ของรูปทรงสี่หน้าก็พิจารณาในลักษณะเช่นเดียวกัน ดังนั้นจากสมการที่ (2-36) จะได้

$$[K_G^{(e)}] = \frac{GV}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2-38)$$

จาก $[K^{(e)}] = [K_D^{(e)}] + [K_G^{(e)}]$

$$\begin{aligned} [K^{(e)}] = & \frac{D_x}{36V} \begin{bmatrix} b_1^2 & b_1b_2 & b_1b_3 & b_1b_4 \\ b_2b_1 & b_2^2 & b_2b_3 & b_2b_4 \\ b_3b_1 & b_3b_2 & b_3^2 & b_3b_4 \\ b_4b_1 & b_4b_2 & b_4b_3 & b_4^2 \end{bmatrix} + \frac{D_y}{36V} \begin{bmatrix} c_1^2 & c_1c_2 & c_1c_3 & c_1c_4 \\ c_2c_1 & c_2^2 & c_2c_3 & c_2c_4 \\ c_3c_1 & c_3c_2 & c_3^2 & c_3c_4 \\ c_4c_1 & c_4c_2 & c_4c_3 & c_4^2 \end{bmatrix} \\ & + \frac{D_z}{36V} \begin{bmatrix} d_1^2 & d_1d_2 & d_1d_3 & d_1d_4 \\ d_2d_1 & d_2^2 & d_2d_3 & d_2d_4 \\ d_3d_1 & d_3d_2 & d_3^2 & d_3d_4 \\ d_4d_1 & d_4d_2 & d_4d_3 & d_4^2 \end{bmatrix} + \frac{GV}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-39)$$

จากสมการที่ (2-26) สำหรับการหาค่า $\{f^{(e)}\}$ แสดงได้ดังนี้

$$\{f^{(e)}\} = \int_v Q[N]^T dv$$

$$\{f^{(e)}\}_e = Q \int_v \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{bmatrix} dv$$

ใช้สูตรเชิงตัวประกอบในการประมาณการอินทิเกรตตลอดปริมาตรดังสมการที่ (2-37) โดยที่ $N_1 = L_1$, $N_2 = L_2$, $N_3 = L_3$ และ $N_4 = L_4$ และสำหรับกรณีนี้ที่ $Q \neq 0$ จะได้

$$\{f^{(e)}\} = Q \int_v \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \end{bmatrix} dv$$

$$\therefore \{f^{(e)}\} = \frac{QV}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-40)$$

จากสมการที่ (2-26) สำหรับการหาค่า $\{I^{(e)}\}$ แสดงได้ดังนี้

$$\{I^{(e)}\} = - \int_{\Gamma} [N]^T (D_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \cos \theta + D_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \cos \theta + D_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \cos \theta) d\Gamma$$

โดยที่ค่าขอบเขตของแต่ละอีลิเมนต์ Γ ได้ประยุกต์เงื่อนไขแบบนอยมันน์ (Neumann condition) โดยกำหนดให้ $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$ เมื่อ $\vec{n}$ คือ เวกเตอร์ตั้งฉากกับขอบเขตของเวกเตอร์ตั้งนั้นจึงได้

$$\{I^{(e)}\} = 0 \quad (2-41)$$

เมื่อแทนสมการที่ (2-40) และ (2-41) ในสมการที่ (2-26) จะได้ดังนี้

$$0 = [K^{(e)}] \{\Phi^{(e)}\} - \frac{QV}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-42)$$

เมื่อพิจารณาปัญหาสนามไฟฟ้าแบบ 3 มิติ โดยการแทนค่าสัมประสิทธิ์จากสมการที่ (2-6) ลงในสมการที่ (2-42) จะได้

$$0 = [K^{(e)}] \{\Phi^{(e)}\} \quad (2-43)$$

โดยที่

$$[K^{(e)}] = \frac{1}{36V} \begin{bmatrix} b_1^2 & b_1b_2 & b_1b_3 & b_1b_4 \\ b_2b_1 & b_2^2 & b_2b_3 & b_2b_4 \\ b_3b_1 & b_3b_2 & b_3^2 & b_3b_4 \\ b_4b_1 & b_4b_2 & b_4b_3 & b_4^2 \end{bmatrix} + \frac{1}{36V} \begin{bmatrix} c_1^2 & c_1c_2 & c_1c_3 & c_1c_4 \\ c_2c_1 & c_2^2 & c_2c_3 & c_2c_4 \\ c_3c_1 & c_3c_2 & c_3^2 & c_3c_4 \\ c_4c_1 & c_4c_2 & c_4c_3 & c_4^2 \end{bmatrix} + \frac{1}{36V} \begin{bmatrix} d_1^2 & d_1d_2 & d_1d_3 & d_1d_4 \\ d_2d_1 & d_2^2 & d_2d_3 & d_2d_4 \\ d_3d_1 & d_3d_2 & d_3^2 & d_3d_4 \\ d_4d_1 & d_4d_2 & d_4d_3 & d_4^2 \end{bmatrix} \\ + \frac{(-\mu\epsilon\omega^2 + j\mu\sigma\omega)V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาปัญหาสนามแม่เหล็กแบบ 3 มิติ โดยการแทนค่าสัมประสิทธิ์จากสมการที่ (2-12) ลงในสมการที่ (2-42) จะได้ดังสมการที่ (2-43) เช่นเดียวกันทุกประการ

2.3.4 การประกอบสมการอิลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ

ขั้นตอนนี้เป็นกรนำสมการของแต่ละอิลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกันเป็นสมการรวมของระบบ โดยจากขั้นตอนในหัวข้อที่ 2.3.1 หากเราแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย n จุดต่อ จึงก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น n สมการ ดังนั้นจึงได้สมการรวมสำหรับการจำลองผลค่าสนามไฟฟ้าของงานวิจัยนี้ในรูปสมการเชิงเส้นคือ

$$[K]\{E\} = \{f\}$$

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdot & \cdot & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdot & \cdot & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdot & \cdot & K_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdot & \cdot & K_{nn} \end{bmatrix}_{sys(n \times n)} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ E_n \end{bmatrix}_{sys(n \times 1)} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n \end{bmatrix}_{sys(n \times 1)} \quad (2-44)$$

เมื่อ E คือ ค่าสนามไฟฟ้าที่ไม่ทราบค่า ณ ตำแหน่งโนดต่าง ๆ

ในทำนองเดียวกันจะได้สมการรวมสำหรับการจำลองผลค่าสนามแม่เหล็กของงานวิจัยนี้ในรูปสมการเชิงเส้น คือ

$$[K]\{H\} = \{f\}$$

เมื่อ H คือ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ไม่ทราบค่า ณ ตำแหน่งโนดต่าง ๆ

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีความแตกต่างกันของเนื้อวัสดุที่มีอยู่ภายในระบบ เมื่อมีความแตกต่างกันระหว่างวัสดุเกิดขึ้น นั้นหมายถึงสมการของระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์จะต้องเกิดการเปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด สำหรับงานวิจัยนี้มีวัสดุที่แตกต่างกันอยู่ คือ อากาศ และเหล็ก ทั้งสองมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ (ϵ_r) เท่ากับ 1 และ 3.5 ตามลำดับ ค่าความนำไฟฟ้า (σ) เท่ากับ 0 และ 0.8×10^7 S/m ตามลำดับ และค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ (μ_r) เท่ากับ 1 และ 300 ตามลำดับ

2.3.5 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาผลเฉลย

สำหรับขั้นตอนการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตในงานวิจัยนี้จะมีทั้งหมดอยู่สองบริเวณที่กำหนดเงื่อนไขค่าขอบ คือ บริเวณขอบตัวนำของสายส่งและพื้นดิน ซึ่งค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ป้อนให้กับระบบบริเวณขอบของตัวนำสามารถคำนวณได้จาก พิกัดขั้วป้อนองศา (2545) โดยสิ่งที่ต้องทราบสำหรับใช้คำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณขอบของตัวนำ คือ ขนาดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำ ระยะห่างระหว่างตัวนำ รัศมีตัวนำ ค่าความสูงระหว่างตัวนำกับพื้นดินและค่าพิกัดที่ต้องการคำนวณ โดยค่าขอบเขตของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 ค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิวของตัวนำ

ตำแหน่งผิวของตัวนำ	ค่าสนามไฟฟ้า (kV/m)
115 kV เฟส A1	$76.8192 \angle 0.5972^\circ$
115 kV เฟส A2	$76.8775 \angle -1.6258^\circ$
115 kV เฟส B1	$86.5803 \angle -7.1082^\circ$
115 kV เฟส B2	$86.6616 \angle 10.1435^\circ$
115 kV เฟส C1	$84.0464 \angle 7.1522^\circ$
115 kV เฟส C2	$82.9595 \angle -12.1602^\circ$
22 kV เฟส A	$4.2147 \angle 87.6353^\circ$
22 kV เฟส B	$5.6390 \angle -76.8926^\circ$
22 kV เฟส C	$7.9585 \angle -45.9062^\circ$
Overhead Ground Wire (OHGW)	$0 \angle 0^\circ$
พื้นดิน	$0 \angle 0^\circ$

ตารางที่ 2.2 ค่าสนามแม่เหล็กที่บริเวณผิวของตัวนำ

ตำแหน่งผิวของตัวนำ	ค่าสนามแม่เหล็ก (μT)
115 kV เฟส A1	$102.2829 \angle 86.4787^\circ$
115 kV เฟส A2	$102.2829 \angle -86.4787^\circ$
115 kV เฟส B1	$101.7424 \angle -81.9398^\circ$
115 kV เฟส B2	$101.7424 \angle 81.9398^\circ$
115 kV เฟส C1	$102.2830 \angle -77.2734^\circ$
115 kV เฟส C2	$102.2830 \angle 77.2734^\circ$
22 kV เฟส A	$6.2588 \angle 49.2607^\circ$
22 kV เฟส B	$6.9940 \angle -0.4702^\circ$
22 kV เฟส C	$7.4435 \angle 6.7152^\circ$
Overhead Ground Wire (OHGW)	$0 \angle 0^\circ$
พื้นดิน	$0 \angle 0^\circ$

หลังจากประยุกต์เงื่อนไขค่าขอบเขตให้กับระบบแล้ว จากสมการที่ (2-44) จะสามารถหาค่าสนามไฟฟ้า (E) ณ โหนดต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ (2-45)

$$E = K^{-1} f$$

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \dots & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \dots & K_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)}^{-1} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} \quad (2-45)$$

ในทำนองเดียวกันก็สามารถหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ณ โหนดต่าง ๆ ได้เป็น

$$H = K^{-1} f$$

และสามารถหาค่าสนามแม่เหล็ก (B) ต่อได้จากความสัมพันธ์ $B = \mu H$

2.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ประกอบกับคำนึงถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ทางไฟฟ้าของวัสดุที่แตกต่างกันในระบบ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะปรากฏอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง การประยุกต์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติเพื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาเลอร์ติน รายละเอียดต่างๆ ในบทนี้จะนำไปสู่การพัฒนาโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้เป็นโปรแกรมจำลองผลระบบที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและผลการจำลองแบบ 3 มิติ

3.1 บทนำ

การจำลองผลของงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ในการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากผลของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในระบบ ภายในบทที่ 3 จึงได้กล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่ใช้ในการจำลองผลและอธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น ระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติของงานวิจัยนี้ได้ใช้การสร้างกริดจากโปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Gmesh ซึ่งเป็นโปรแกรม Freeware ซึ่งใช้กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยได้ดำเนินการประมวลผลให้ทำงานบนพื้นฐานการใช้งานของ MATLAB™

3.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล

การคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายใต้ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ สามารถดำเนินการคำนวณตามขั้นตอนภายในโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลที่จะได้กล่าวถึงต่อไปนี้ งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการสร้างกริดด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อนำข้อมูลของโนดและอีลิเมนต์มาพัฒนาต่อด้วยโปรแกรม MATLAB™ ที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง โดยอธิบายถึงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลแบบ 3 มิติได้ดังนี้

3.2.1 โปรแกรมสร้างกริด

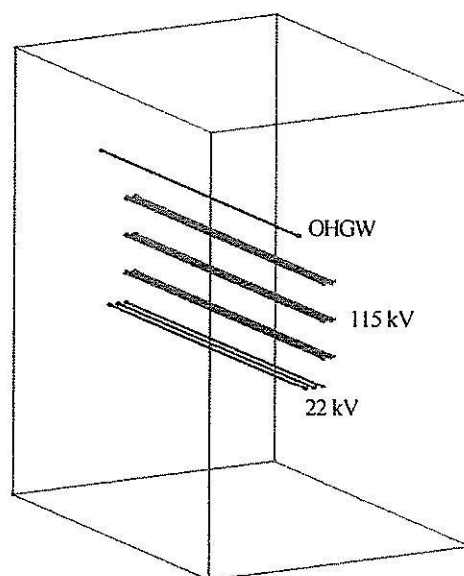
โปรแกรมการสร้างกริดสำหรับปัญหา 3 มิติในงานวิจัยนี้ จะใช้การสร้างกริดจากโปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Gmesh ซึ่งเป็นโปรแกรม Freeware และประโยชน์ของโปรแกรมสำเร็จรูปนี้จะใช้สำหรับเพียงเพื่อสร้างกริดเท่านั้น สำหรับข้อมูลจากโปรแกรม Gmesh ที่จำเป็นต่อการนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติได้แก่ ข้อมูลบอกระยะพิกัดในแนวแกน x , y และ z ข้อมูลบอกหมายเลขโนด ข้อมูลบอกหมายเลขอีลิเมนต์ ข้อมูลบอกหมายเลขที่แบ่งชนิดของวัสดุในระบบ และข้อมูลบอกหมายเลขของขอบเขตชิ้นงานเพื่อกำหนดเงื่อนไข ส่วนขั้นตอนของระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์อื่น ๆ อันได้แก่ การสร้างสมการของแต่ละอีลิเมนต์ การสร้าง

เมทริกซ์ระบบสมการรวม การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขต และการแก้สมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าผลเฉลยนั้น จะทำการพัฒนาด้วยโปรแกรมMATLAB ที่ประดิษฐ์ขึ้นเองเพื่อจำลองผลต่อไป

งานวิจัยนี้ได้แบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็นพื้นที่ย่อย ๆ ได้แก่ พื้นที่ที่เป็นตัวนำและพื้นที่ที่เป็นอากาศ (Space) โดยพื้นที่ตัวนำประกอบไปด้วย

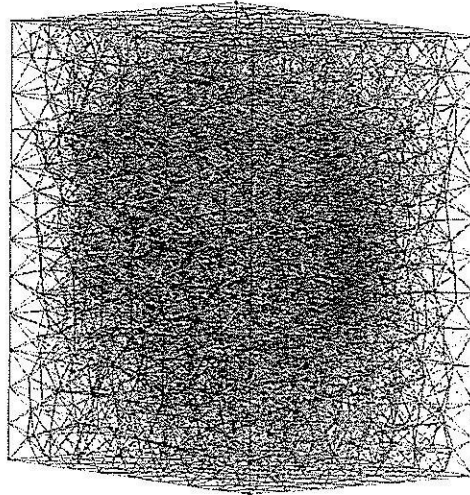
- ระบบส่งจ่ายขนาด 115 kV วงจรเดี่ยว เฟส A, 2 bundle
- ระบบส่งจ่ายขนาด 115 kV วงจรเดี่ยว เฟส B, 2 bundle
- ระบบส่งจ่ายขนาด 115 kV วงจรเดี่ยว เฟส C, 2 bundle
- ระบบส่งจ่ายขนาด 22 kV วงจรเดี่ยว เฟส A, 1 bundle
- ระบบส่งจ่ายขนาด 22 kV วงจรเดี่ยว เฟส B, 1 bundle
- ระบบส่งจ่ายขนาด 22 kV วงจรเดี่ยว เฟส C, 1 bundle
- สายดินเหนือศีรษะ (Overhead ground wire : OHGW)

สำหรับขอบเขตของระบบที่ศึกษา ได้กำหนดพื้นที่ของปัญหาให้มีความกว้าง 15 เมตร สูงจากพื้นดิน 30 เมตร และมีความลึก 20 เมตร ซึ่งเป็นพื้นที่ของปัญหาที่มีความเหมาะสมต่องานวิจัย ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้การวาดภาพของระบบที่ศึกษาแบบ 3 มิติ โดยการใช้โปรแกรม Solid work ทั้งนี้เพราะ โปรแกรม Solid work สามารถวาดภาพที่มีความซับซ้อนในรูปแบบ 3 มิติ ได้สะดวกกว่าการวาดลงที่โปรแกรม Gmesh โดยตรง อีกทั้งคุณสมบัติของโปรแกรม Gmesh ก็สามารถนำเข้าไฟล์จากโปรแกรม Solid work ได้โดยบันทึกไฟล์ที่จะนำเข้าจากโปรแกรม Solid work ด้วยนามสกุล STEP ดังแสดงภาพรวมของระบบที่ศึกษาเป็นแบบ 3 มิติ ได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นการแสดงสายส่งในระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV

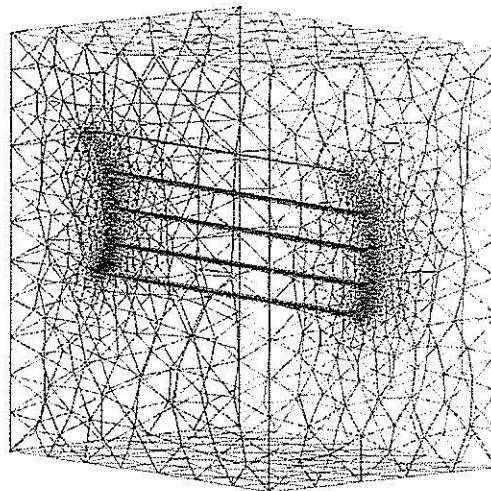


รูปที่ 3.1 โครงสร้างแบบ 3 มิติ ของระบบที่ศึกษา

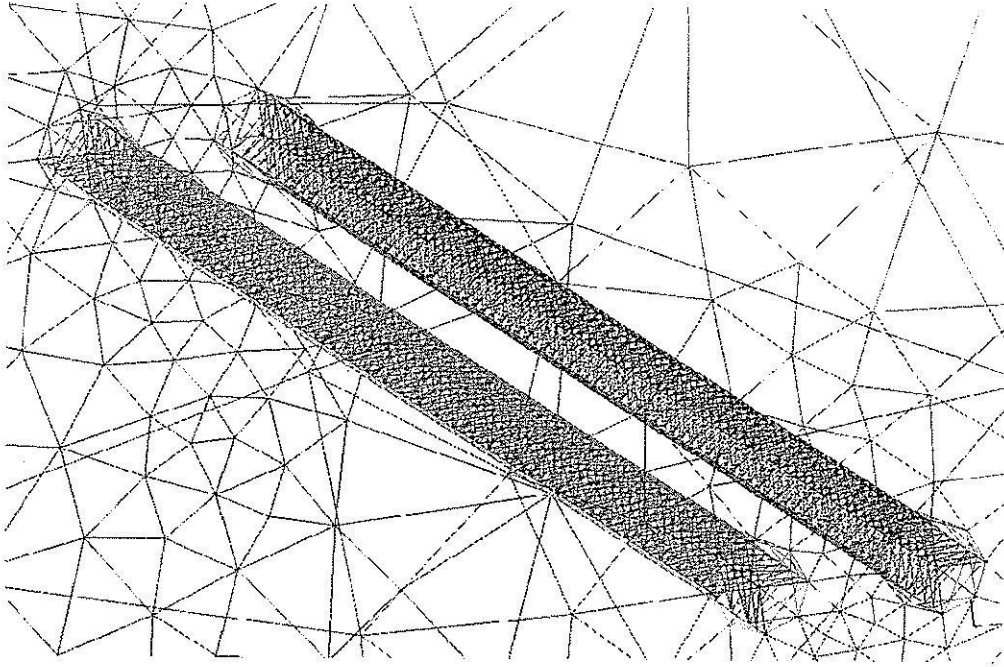
หลังจากแบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นหมวดหมู่แล้ว จึงทำการสร้างกริดจากโปรแกรม Gmesh เป็นรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อดังแสดงด้วยรูปที่ 3.2 และยังสามารถแสดงภาพการสร้างกริดเป็นรูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อ (กริดเฉพาะบริเวณพื้นผิว) ของระบบดังกล่าวได้ดังรูปที่ 3.3 พร้อมแสดงการขยายให้เห็นกริดอย่างชัดเจนเฉพาะบริเวณที่เป็นตัวนำของระบบ 115 kV ตัวนำของระบบ 22 kV และสายดินเหนือศีรษะได้ดังรูปที่ 3.4-3.6 ตามลำดับ



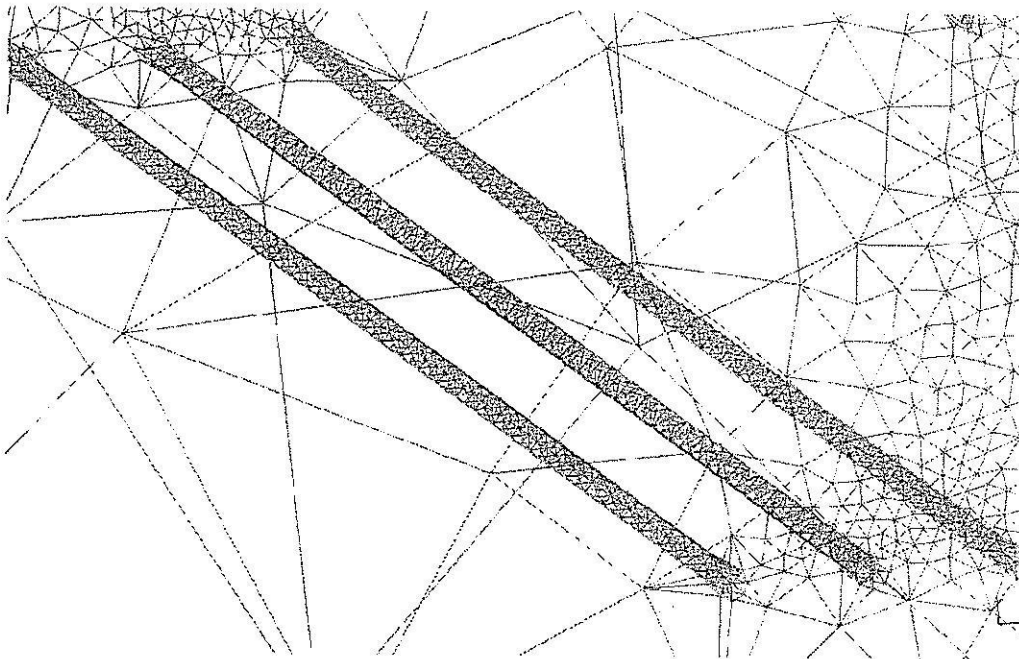
รูปที่ 3.2 ลักษณะการสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อของระบบส่งจ่ายไฟฟ้า 115 kV และ 22 kV ในงานวิจัย



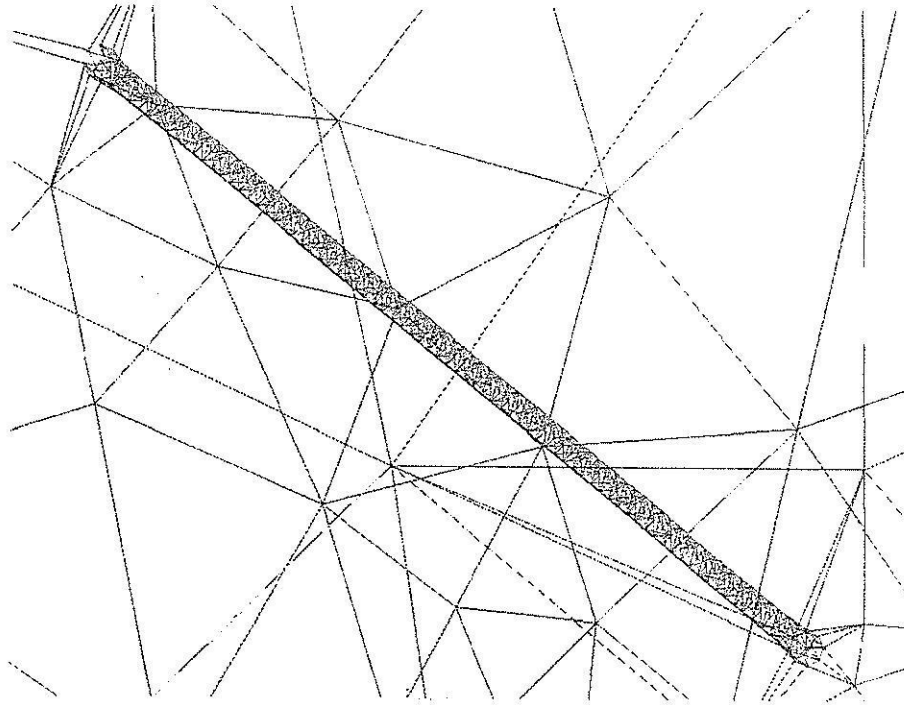
รูปที่ 3.3 ลักษณะการสร้างกริดรูปสามเหลี่ยมของระบบส่งจ่ายไฟฟ้า 115 kV และ 22 kV ในงานวิจัย



รูปที่ 3.4 ขยายให้เห็นถึงการสร้างกริดแบบ 3 มิติ ในบริเวณตัวนำ 115 kV



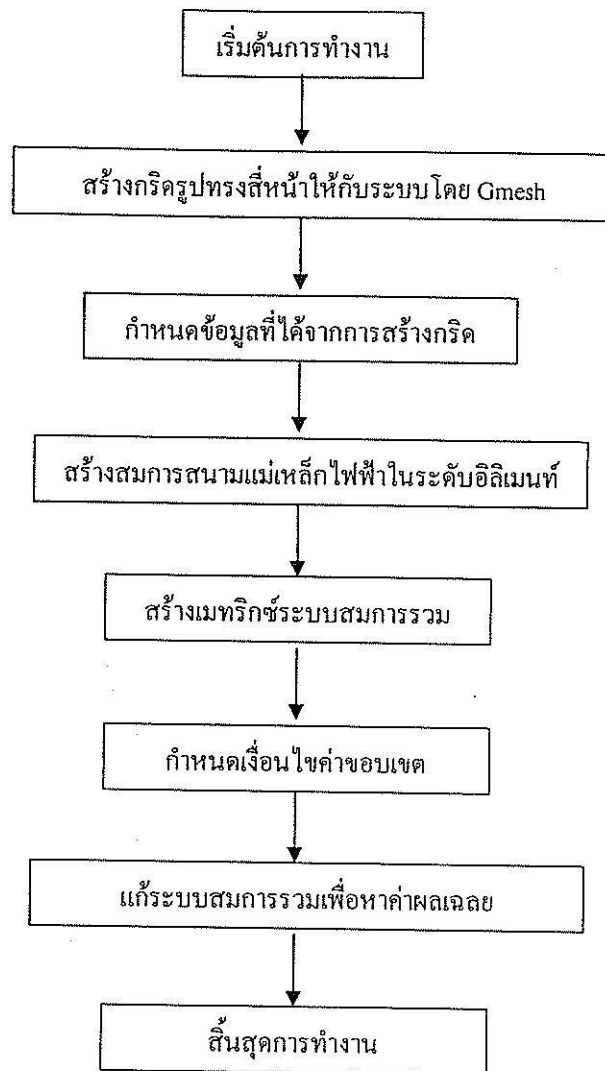
รูปที่ 3.5 ขยายให้เห็นถึงการสร้างกริดแบบ 3 มิติ ในบริเวณตัวนำ 22 kV



รูปที่ 3.6 ขยายให้เห็นถึงการสร้างกริดแบบ 3 มิติ ในบริเวณสายดินเหนือศีรษะ

3.2.2 โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ในขั้นตอนนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นมาเพื่อจำลองผลค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยข้อมูลที่จำเป็นในการประดิษฐ์โปรแกรมนั้นได้จากในหัวข้อ 3.2.1 ที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

จากแผนภูมิในรูปที่ 3.7 ซึ่งแสดงโครงสร้างโปรแกรมจำลองผลของระบบแบบ 3 มิติ เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงหน้าที่ของโปรแกรมแต่ละขั้นตอนจะได้อธิบายถึงรายละเอียดหน้าที่ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนการกำหนดข้อมูลที่ไดจากการสร้างกริด : ขั้นตอนนี้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะรับค่าข้อมูลอินพุตซึ่งแสดงถึงลักษณะของโนดและอิลิเมนต์จากโปรแกรมการสร้างกริด Gmesh ซึ่งรายละเอียดของข้อมูลประกอบด้วย จำนวนและตำแหน่งของโนด หมายเลขโนดที่ประกอบขึ้นเป็นอิลิเมนต์ จำนวนและหมายเลขของอิลิเมนต์ เป็นต้น

ขั้นตอนการสร้างสมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระดับอิลิเมนต์ : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะสร้างสมการอิลิเมนต์เมทริกซ์ในรูปแบบของทรงสี่หน้าสี่จุดต่อเมื่อพิจารณาปัญหาแบบ 3 มิติ ของทุก ๆ อิลิเมนต์ เนื่องจากภายในระบบมีชิ้นงานที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันอยู่ 2 ชนิด คือ อากาศ และ

สายส่งตัวนำ ซึ่งวัตถุทั้งสองมีค่าคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปได้แก่ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ (ϵ_r) เท่ากับ 1 และ 3.5 ตามลำดับ ค่าความนำไฟฟ้า (σ) เท่ากับ 0 และ 0.8×10^7 ตามลำดับ และ ค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ (μ_r) เท่ากับ 1 และ 300 ตามลำดับ โดยการสร้างสมการอิลิเมนต์เมทริกซ์ของแต่ละอิลิเมนต์จะต้องคำนึงถึงค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัตถุที่เกี่ยวข้องในแต่ละอิลิเมนต์นั้น ๆ ด้วย

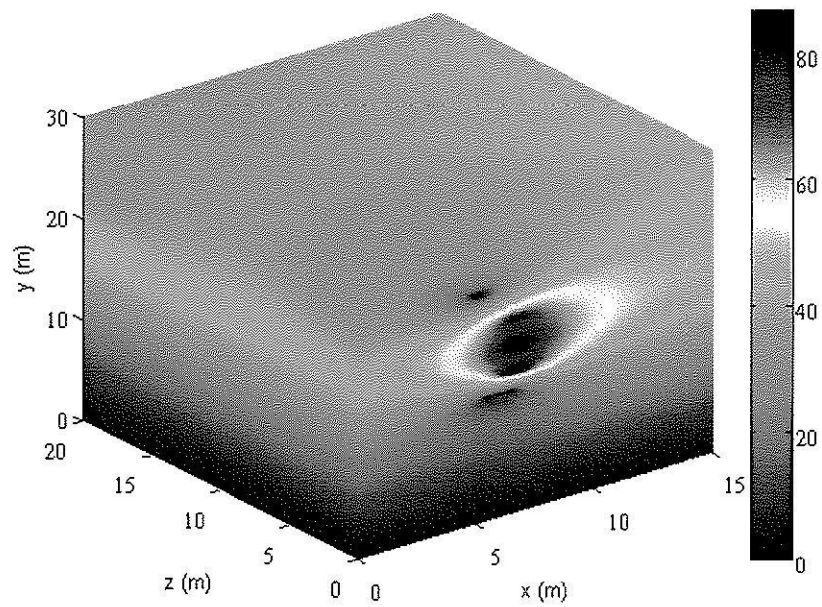
ขั้นตอนการสร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะทำหน้าที่รวมสมการของอิลิเมนต์ย่อยเข้าเป็นเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวม ซึ่งหากแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ทั้งหมด n โหนดจะก่อให้เกิดเมทริกซ์ระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการทั้งสิ้น n สมการ

ขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขต : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะทำหน้าที่ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตก่อนทำการแก้ระบบสมการรวม โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตดังตารางที่ 2.1 ในบทที่ 2 สำหรับปัญหาสนามไฟฟ้า และดังตารางที่ 2.2 สำหรับปัญหาสนามแม่เหล็ก

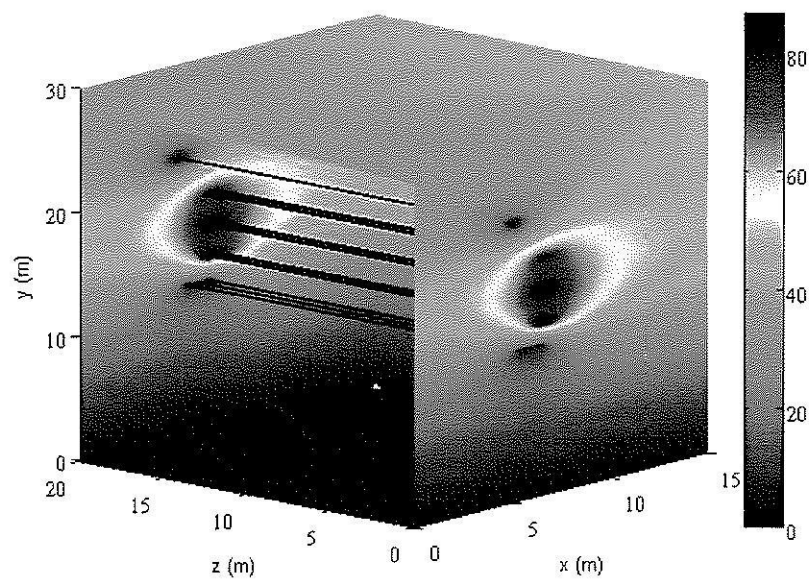
ขั้นตอนการแก้ระบบสมการรวมเพื่อหาค่าผลเฉลย : ในขั้นตอนสุดท้ายนี้ โปรแกรมจะทำการแก้ระบบสมการรวมซึ่งเป็นสมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าผลเฉลยของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประจำโหนดโดยการเลือกใช้ระเบียบวิธีการทำเมทริกซ์ผกผัน

3.3 ผลการจำลองพร้อมวิเคราะห์ผล

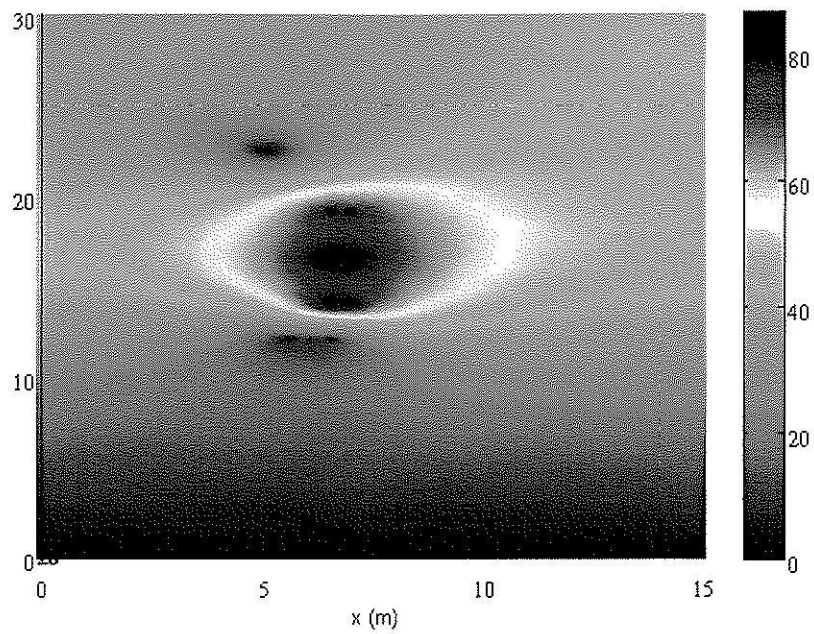
สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าสนามไฟฟ้าและค่าสนามแม่เหล็กของระบบสายส่งไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยจะทำการจำลองระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคโดยสามารถแสดงผลทางกราฟิกได้ดังรูปที่ 3.8-3.13



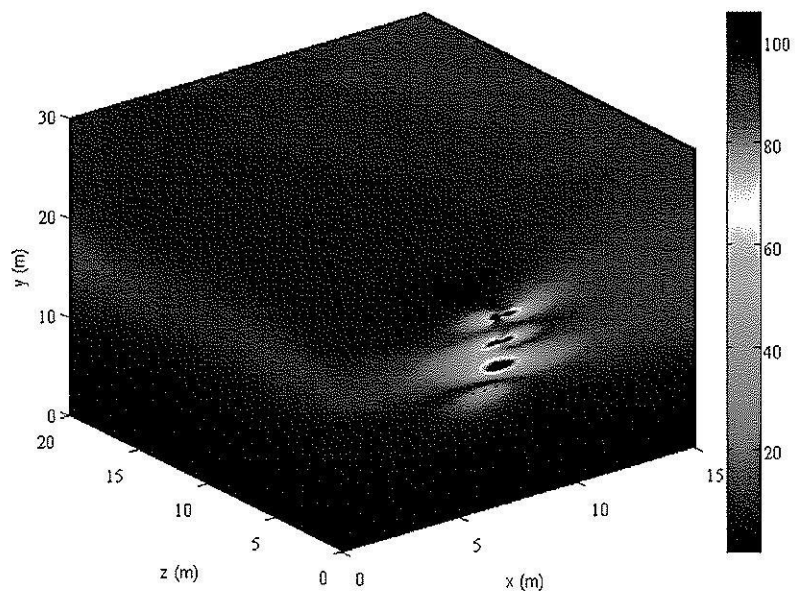
รูปที่ 3.8 การกระจายสนามไฟฟ้า (kV/m) บริเวณขอบของระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านระบบ
จำหน่าย 22 kV



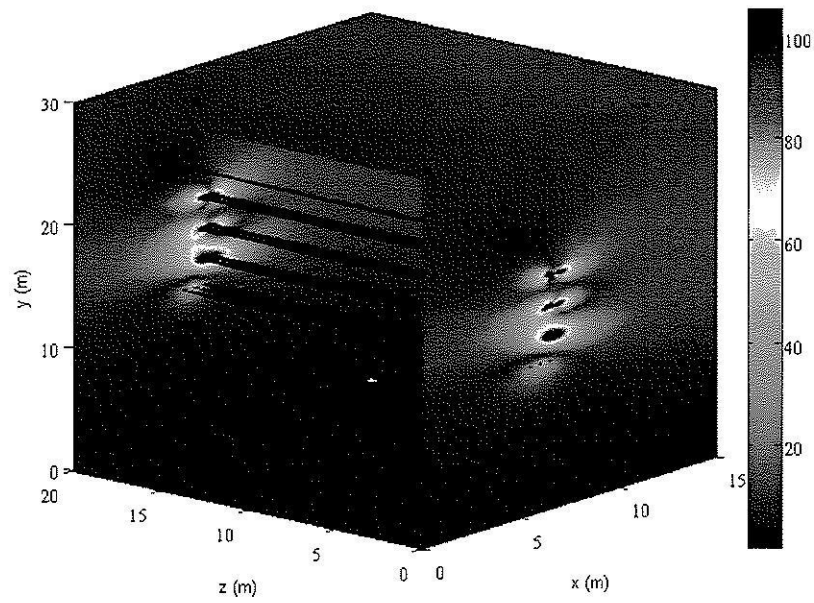
รูปที่ 3.9 การกระจายสนามไฟฟ้า (kV/m) บริเวณภายในของระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านระบบ
จำหน่าย 22 kV



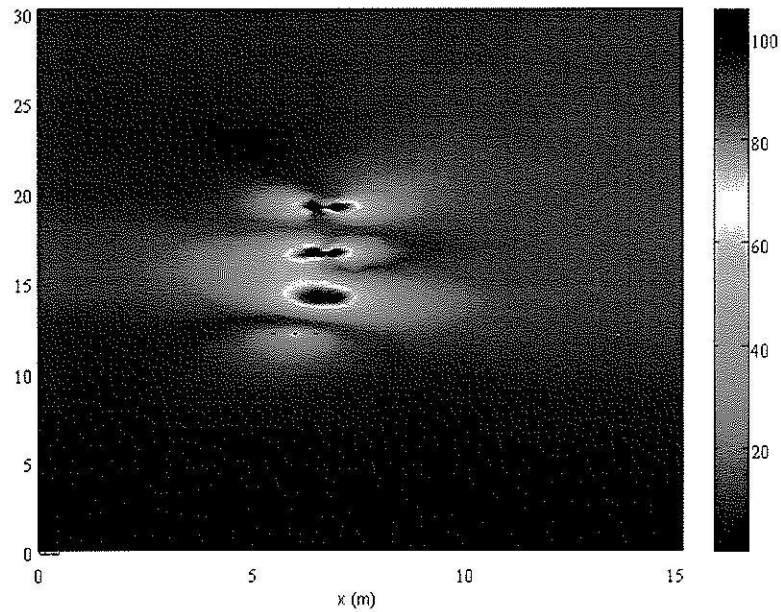
รูปที่ 3.10 ภาพตัดขวางการกระจายสนามไฟฟ้า (kV/m) ของระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านระบบ
จำหน่าย 22 kV



รูปที่ 3.11 การกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) บริเวณขอบของระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านระบบ
จำหน่าย 22 kV



รูปที่ 3.12 การกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) บริเวณภายในของระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านระบบ
จำหน่าย 22 kV



รูปที่ 3.13 ภาพตัดขวางการกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) ของระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านระบบ
จำหน่าย 22 kV

จากผลการจำลองเชิงกราฟที่แสดงด้วยรูปที่ 3.8-3.13 ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีปริมาณสูงที่ตำแหน่งสายส่งตัวนำและจะมีค่าน้อยลงเมื่อระยะห่างจากสายส่งตัวนำมีค่ามากขึ้นโดยจะมีค่าน้อยสุดที่บริเวณพื้นดิน และเมื่อพิจารณาภาพตัดขวางที่ช่วงความลึกใด ๆ ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะกระจายตัวในลักษณะคล้ายคลึงกันในทุก ๆ ช่วงความลึก ทั้งนี้เพราะลักษณะของปัญหามีรูปแบบเดียวกันตลอดช่วงความลึก และจากผลการจำลองผลทางกราฟิกข้างต้นสามารถสรุปเป็นตารางเพื่อให้เห็นความแตกต่างในเชิงตัวเลขอย่างชัดเจนของการกระจายตัวสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แสดงด้วยตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ โดยจากข้อมูลในตารางทั้งสองสามารถเสนออยู่ในรูปแบบทางกราฟิกเพื่อแสดงให้เห็นถึงค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.14 และ 3.15 ตามลำดับ

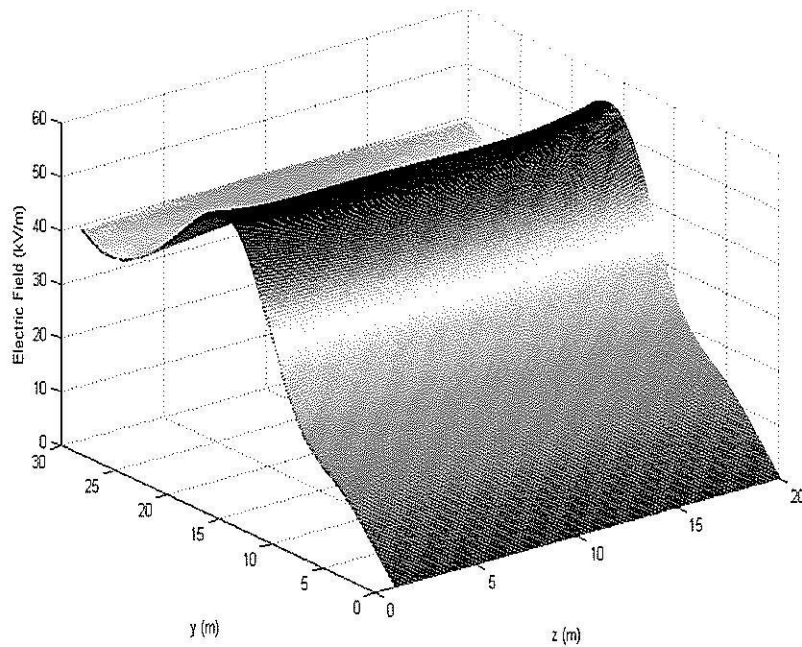
จากตารางที่ 3.1 และ 3.2 ประกอบกับรูปที่ 3.14 และ 3.15 จะสังเกตเห็นว่าค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีค่ามากที่สุดที่ช่วงตำแหน่งของสายส่งตัวนำและค่าจะลดน้อยลงไปเมื่อห่างจากสายส่งตัวนำมากขึ้น โดยจะมีค่าน้อยสุดที่ตำแหน่งพื้นดิน และเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 3.1 และ 3.2 ที่ช่วงความลึกระดับ 1, 5, 10, 15 และ 20 m จะเห็นว่า ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าใกล้เคียงกันมากในทุก ๆ ช่วง

ตารางที่ 3.1 สนามไฟฟ้า (kV/m) ของระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV เมื่อพิจารณาที่ระดับภาพตัดขวางต่าง ๆ

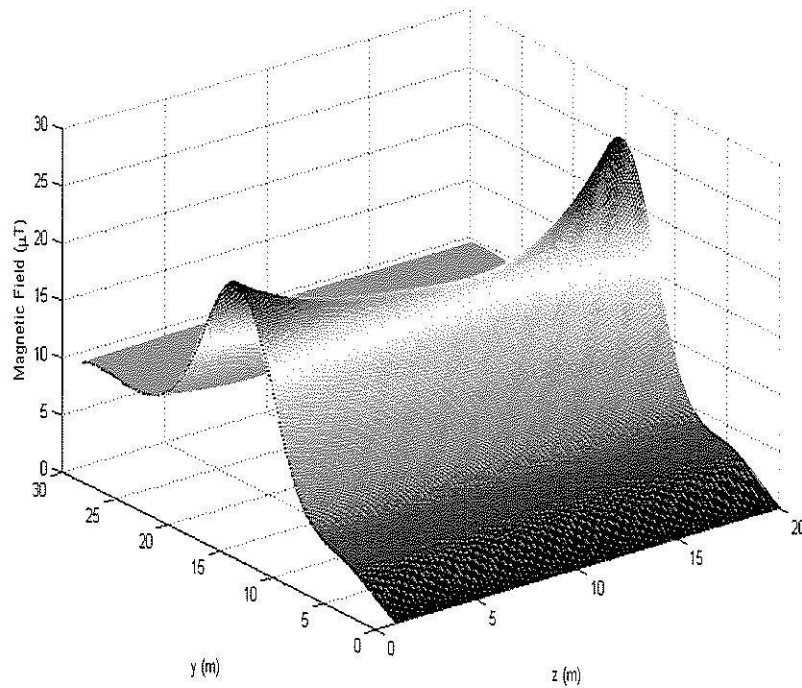
ความสูง y (m)	z = 1 m	z = 5 m	z = 10 m	z = 15 m	z = 20 m
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	2.5312	2.5673	2.5981	2.5673	2.5473
5	12.5813	12.8488	13.0396	12.8811	12.6894
10	24.2928	26.2552	26.4997	26.0123	24.9503
15	51.7148	48.9594	47.5166	47.6246	52.297
20	48.4726	48.2287	48.3686	47.903	48.5463
25	37.8757	39.6346	40.6815	39.4862	37.7115
30	38.8293	39.3872	39.8971	39.3176	38.6812

ตารางที่ 3.2 สนามแม่เหล็ก (μT) ของระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV เมื่อพิจารณาที่ระดับภาพตัดขวางต่าง ๆ

ความสูง y (m)	z = 1 m	z = 5 m	z = 10 m	z = 15 m	z = 20 m
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.6163	0.6254	0.6397	0.6387	0.6411
5	3.1365	3.1707	3.243	3.2475	3.257
10	8.2404	7.1069	7.0457	7.1698	7.8904
15	22.5336	18.8718	17.0578	16.9379	24.8453
20	13.2992	11.209	11.2864	11.5584	14.958
25	8.8108	9.1443	9.4638	9.4354	9.2853
30	8.9804	9.1131	9.313	9.3455	9.3099



รูปที่ 3.14 การแสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าเพื่อให้เห็นถึงบริเวณที่เกิดค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด



รูปที่ 3.15 การแสดงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กเพื่อให้เห็นถึงบริเวณที่เกิดค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด

3.4 สรุป

บทที่ 3 เป็นการอธิบายโปรแกรมจำลองผลพร้อมจำลองผลเพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิดังรูปที่ 3.7 และโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในบทนี้จะนำไปสู่การพัฒนาองค์ความรู้ในการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

การป้องกันอันตรายจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อปฏิบัติงานด้วยกระแสรั่ว

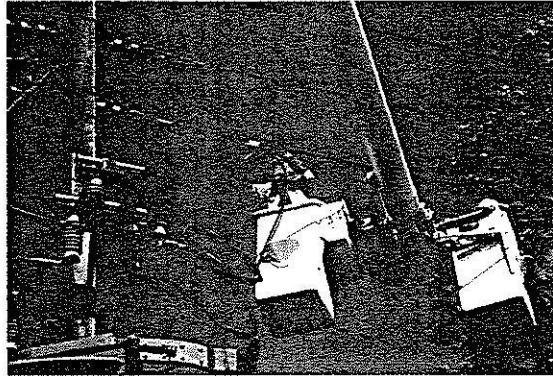
4.1 บทนำ

ในบทที่ 3 ที่ผ่านมาเป็นการจำลองผลค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อได้ความสมจริงของระบบส่งจ่ายขนาด 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยผลการจำลองในบทที่ 3 นั้น เป็นการจำลองในสภาวะทั่วไปที่ยังไม่มีบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยกระแสรั่วของการไฟฟ้า สำหรับในบทที่ 4 นี้เป็นการป้องกันสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายขนาด 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่ายขนาด 22 kV เมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติหน้าที่กับสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV ที่ตัดไฟออก ด้วยกระแสรั่วของการไฟฟ้า โดยสายส่งในระบบส่งจ่าย 115 kV ยังคงมีกระแสไหลได้ตามปกติ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้พัฒนาองค์ความรู้ในการออกแบบอุปกรณ์เพื่อป้องกันอันตรายจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยได้ติดตั้งหลังคาให้แก่กระแสรั่วของการไฟฟ้า และได้ทำการจำลองผลค่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อเปรียบเทียบผลเฉลยทั้งก่อนและหลังที่มีการติดตั้งหลังคาเข้ามา

4.2 การปฏิบัติงานด้วยกระแสรั่วของการไฟฟ้าพร้อมการจำลองผล

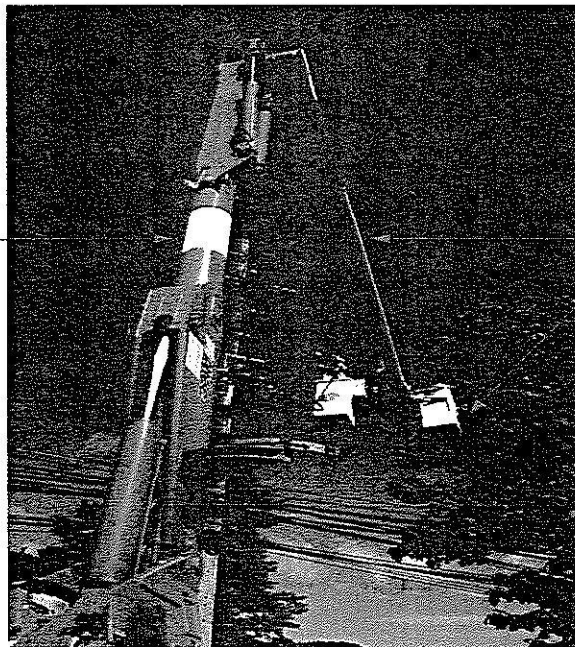
การดำเนินการตรวจสอบ ซ่อมแซม และบำรุงสายส่งกำลังไฟฟ้าของบุคลากรทางไฟฟ้าที่ปฏิบัติงานในการเข้าถึงสายส่งกำลังไฟฟ้ามีอยู่หลายวิธี วิธีการหนึ่งที่นิยมปฏิบัติคือการใช้กระแสรั่วของการไฟฟ้าขึ้นไปปฏิบัติงาน ณ ตำแหน่งสายส่งกำลังไฟฟ้างดแสดงด้วยรูปที่ 4.1 ซึ่งการปฏิบัติงานด้วยกระแสรั่วลักษณะนี้ผู้ปฏิบัติงานไม่ได้คำนึงถึงอันตรายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองด้วยตาเปล่าไม่เห็นที่อาจเกิดขึ้นต่อผู้ปฏิบัติงานที่อยู่บนกระเช้านั้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วกระแสรั่วของการไฟฟ้าจะมีส่วนที่เป็นฉนวนหุ้มที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงด้วยรูปที่ 4.2 ทั้งนี้เพื่อให้สามารถทนต่อกระแสและแรงดันไฟฟ้าได้ แต่ยังไม่มีการรายงานถึงความสามารถในการลดทอนค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า งานวิจัยนี้จึงได้ทำการจำลองหาค่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ากับระบบของบทที่ 3 ที่ผ่านมาเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยกระแสรั่วของการไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งสามารถแสดงภาพโดยเน้นให้เห็นถึงโครงสร้างของกระแสรั่วของการไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองในระบบได้ดังรูปที่ 4.3 และเนื่องจากระบบที่พิจารณาในงานวิจัยนี้มีฉนวนซึ่งมีผลต่อขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในกระบวนการไฟไนต์อิเลเมนต์ โดยบริเวณฉนวนค่า

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะไม่มีเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ตั้งฉาก ซึ่งคือการกำหนดเงื่อนไขแบบ
นอยมันน์ (Neumann) นั่นเอง



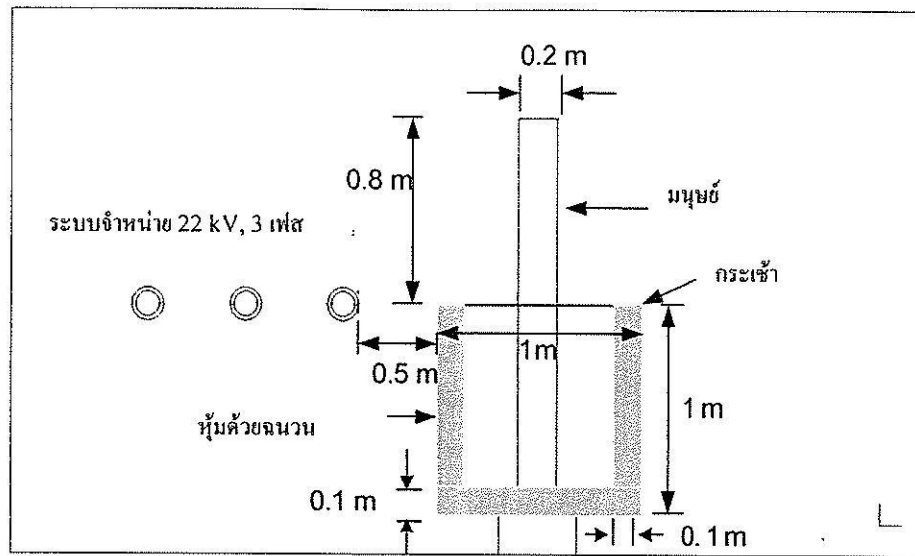
รูปที่ 4.1 การปฏิบัติงานของบุคลากรทางไฟฟ้าด้วยกระเช้ารถยกของการไฟฟ้า

ทำด้วยเหล็กหุ้ม
ด้วยฉนวน



ทำด้วยเหล็กหุ้ม
ด้วยฉนวน

รูปที่ 4.2 บริเวณที่มีฉนวนหุ้มของรถยกของการไฟฟ้า



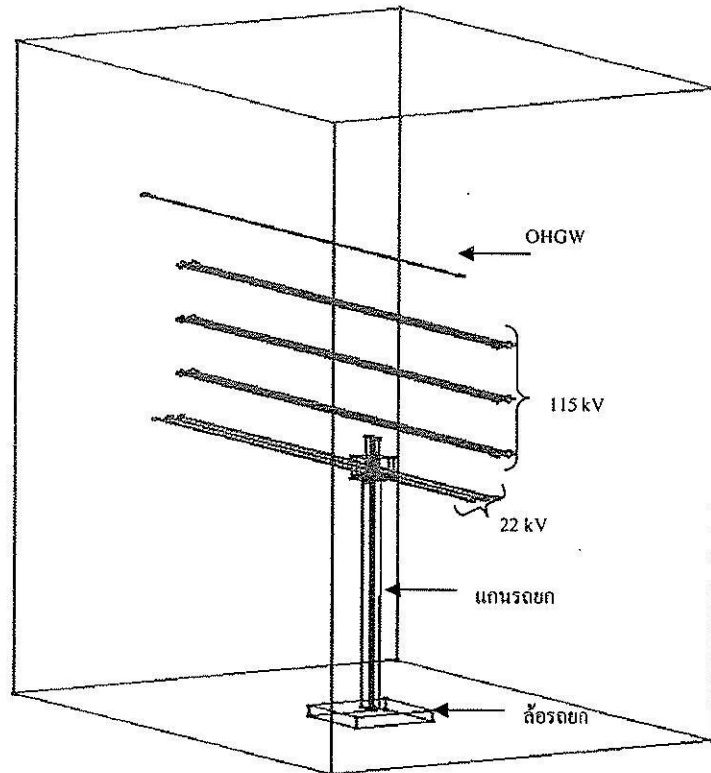
รูปที่ 4.3 โครงสร้างกระเช้ารอกของการไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองผล

จากรูปที่ 4.3 ซึ่งเน้นให้เห็นถึงโครงสร้างของกระเช้ารอกที่ใช้จำลองในระบบจะเห็นว่า ระบบประกอบด้วย

- กระเช้าที่มีขนาดความกว้าง 1 m สูง 1 m และ ยาว 1 m โดยที่กระเช้าจะหุ้มด้วยฉนวนหนา 0.1 m โดยสมมติให้ฉนวนที่หุ้มเหล็กมีความหนาว่าเหล็กมาก ดังนั้นจึงไม่นำเหล็กมาพิจารณา ซึ่งแทนด้วยแผ่นสี่เหลี่ยมที่ปิดล้อมรอบด้านทั้ง 5 โดยแต่ละแผ่นมีความกว้าง 1 m ยาว 1 m และ หนา 0.1 m โดยวางตัวอยู่ในตำแหน่งตรงกลางแนวแกน z ของสายส่งพอดิ และตัวกระเช้ารอกมีระยะความสูงจากพื้นดินเท่ากับ 12 m ซึ่งตรงกับตำแหน่งกึ่งกลางของตัวนำสายส่งระบบจำหน่าย 22 kV พอดิดังแสดงในรูป โดยที่มีระยะห่างจากสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV เท่ากับ 0.5 m

- บุคลากรที่ปฏิบัติงานอยู่บนกระเช้าซึ่งแทนด้วยแท่งลูกบาศก์สี่เหลี่ยมที่มีความกว้าง 0.2 m สูง 1.8 m และหนา 0.5 m ยืนอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางกระเช้าพอดิ

ส่วนรูปที่ 4.4 เป็นการแสดงโครงสร้างภาพรวมของระบบทั้งหมดที่ใช้ในการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ



รูปที่ 4.4 โครงสร้างของระบบทั้งหมดที่ใช้ในการจำลองผลแบบ 3 มิติ

ซึ่งจากรูปที่ 4.4 รายละเอียดของล้อยกและแกนรอกในระบบใหญ่ที่ใช้ในการจำลองผลมีรายละเอียดดังนี้

- ล้อยกซึ่งแทนด้วยกล่องลูกบาศก์สี่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้าง 3 m ยาว 3 m และสูง 0.5 m จากพื้นดิน

- แกนรอกซึ่งแทนด้วยแท่งลูกบาศก์สี่เหลี่ยมเช่นกันที่มีขนาดความกว้าง 0.4 m ยาว 0.4 m และสูง 10.5 m จากพื้นดินโดยสมมติให้แกนตั้งตรงไม่มีความโค้งงอเหยียดขึ้นมาตรงกึ่งกลางของฐานล้อยก

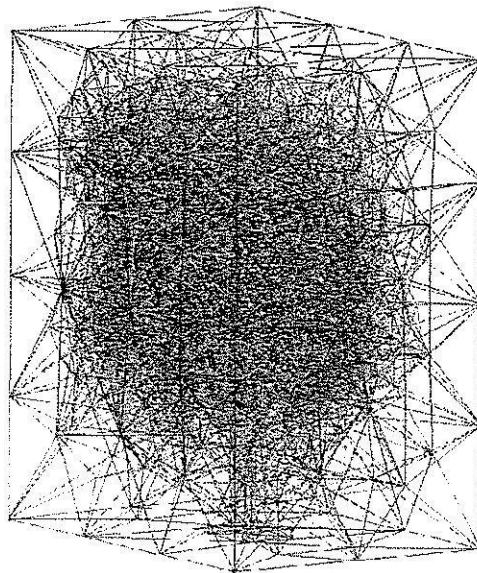
ส่วนค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ทางไฟฟ้าของวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้ในการจำลองผลแสดงได้ดังตารางที่

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติต่าง ๆ ทางไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้จำลองผลในระบบ

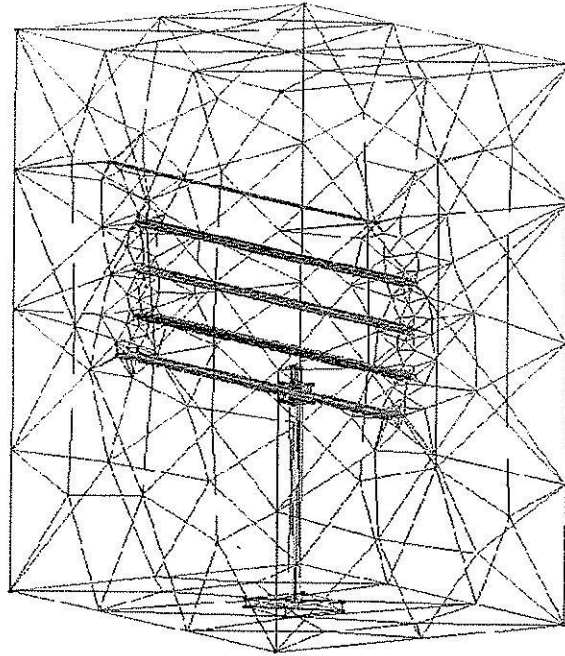
ประเภทชิ้นส่วน	ความนำไฟฟ้า (S/m)	สภาพยอมทางไฟฟ้า สัมพัทธ์	ความซึมซาบทาง แม่เหล็กสัมพัทธ์
ล้อยอดก	0.004	7.0	1.089
แกนรอยก	0.1	1.17	8.0
กระเช้ารอยก	0.1	1.17	8.0
มนุษย์	0.21	5.0	18.8
อากาศ	0	1.0	1.0
ตัวนำไฟฟ้า	0.8×10^7	3.5	300

หมายเหตุ แหล่งที่มาของพารามิเตอร์เหล่านี้ได้จากการรวบรวมข้อมูลจากหนังสือและบทความวิชาการจากหลายแหล่ง เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่สมบูรณ์ต่อการจำลองผล

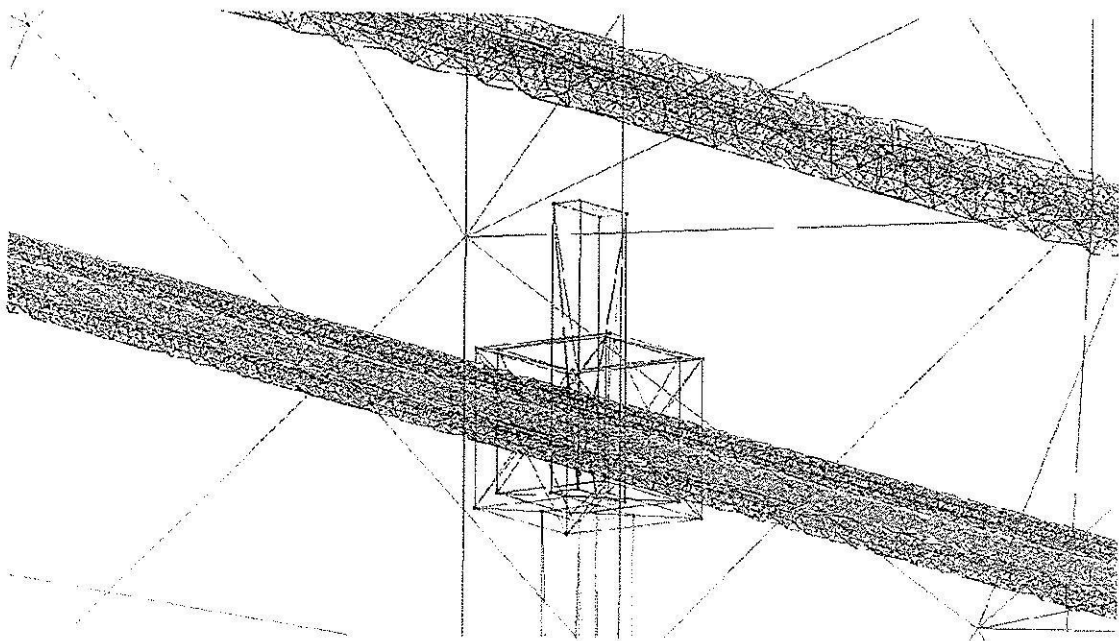
จากรูปที่ 4.4 และข้อมูลในตารางที่ 4.1 สามารถแสดงการสร้างกริดและผลการจำลองเชิงกราฟิกด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติหน้าที่บนรถกระเช้ากับสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV ที่ตัดไฟออกโดยที่สายส่งในระบบส่งจ่าย 115 kV ยังคงมีกระแสไหลได้ตามปกติได้ดังรูปที่ 4.5-4.13



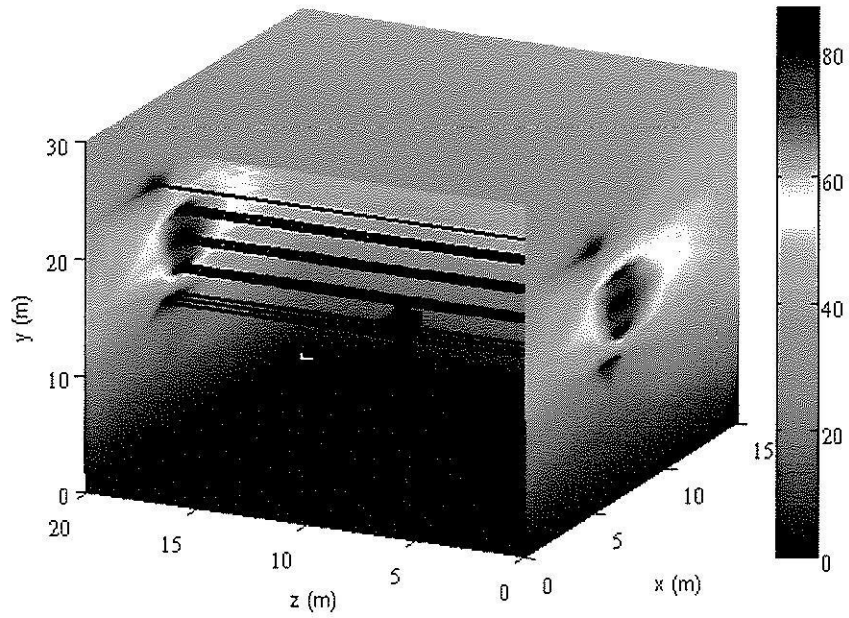
รูปที่ 4.5 การสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าของระบบเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยกระเช้ารอยก



รูปที่ 4.6 การสร้างกริดรูปสามเหลี่ยมของระบบเมื่อนุคลากรขึ้น ไปปฏิบัติงานด้วยกระเช้าลอย



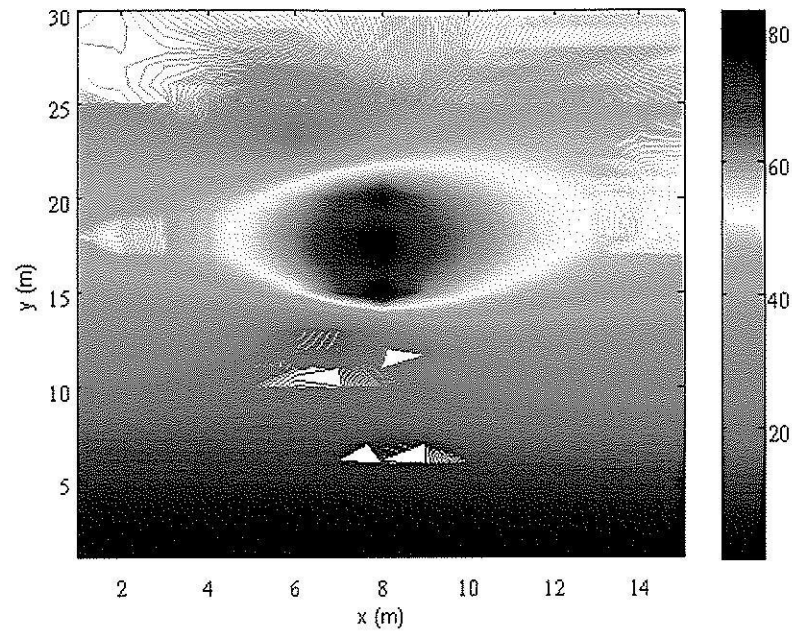
รูปที่ 4.7 ขยายให้เห็นถึงการสร้างกริดแบบ 3 มิติเมื่อนุคลากรขึ้น ไปปฏิบัติงานด้วยกระเช้าลอย



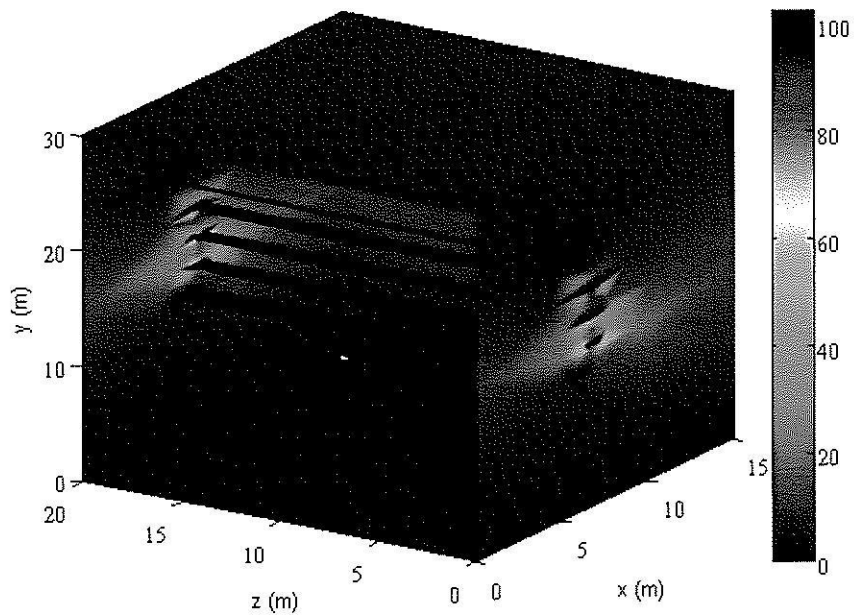
รูปที่ 4.8 การกระจายสนามไฟฟ้า (kV/m) แบบ 3 มิติบริเวณภายในของระบบเมื่อนุคลาตรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยกระเช้ารดยก



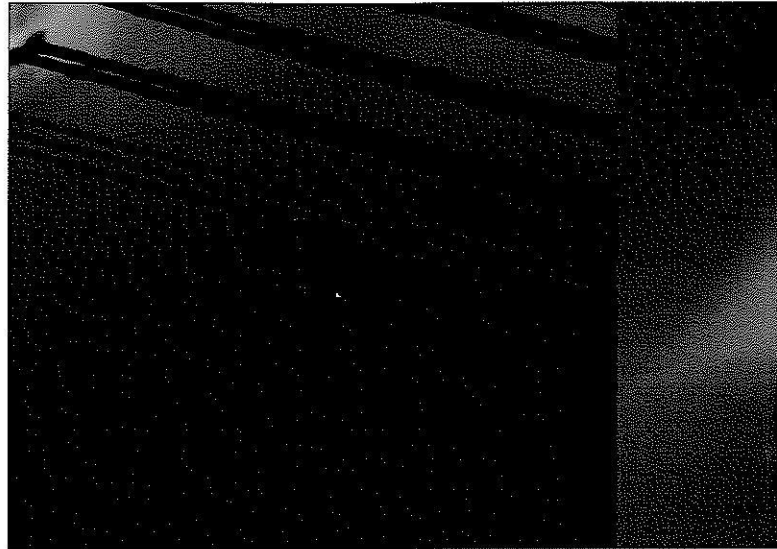
รูปที่ 4.9 การกระจายสนามไฟฟ้า (kV/m) แบบ 3 มิติบริเวณกระเช้าเมื่อนุคลาตรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยกระเช้ารดยก



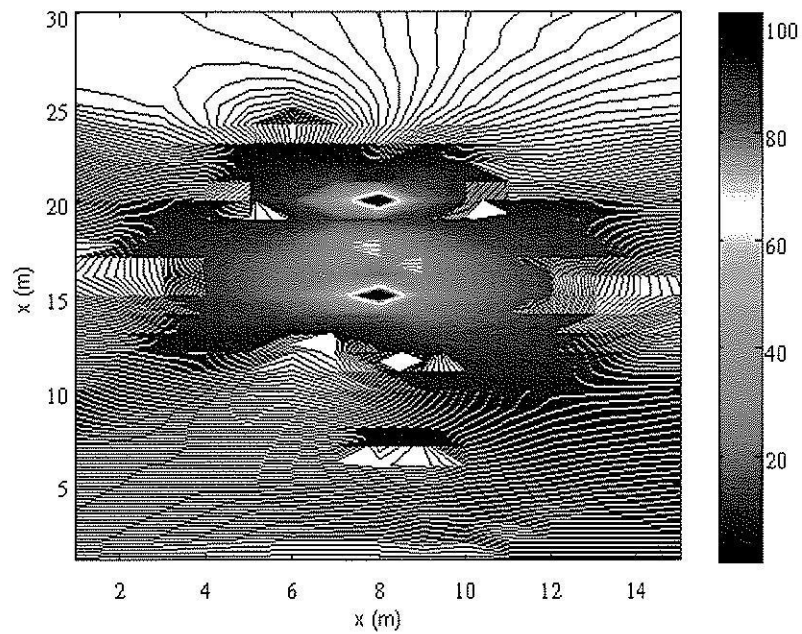
รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางการกระจายสนามไฟฟ้า (kV/m) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์ของระบบเมื่อนุคลาตรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยกระเช้ารถยก



รูปที่ 4.11 การกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) แบบ 3 มิติบริเวณภายในของระบบเมื่อนุคลาตรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยกระเช้ารถยก



รูปที่ 4.12 การกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) แบบ 3 มิติบริเวณกระเช้าเมื่อนักทดลองขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยกระเช้ารอกยก



รูปที่ 4.13 ภาพตัดขวางการกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์ของระบบเมื่อนักทดลองขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยกระเช้ารอกยก

จากการจำลองผลในระบบเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยกระเช้ารอกของการไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติโดยที่สายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV ถูกตัดไฟออก ในขณะที่สายส่งในระบบส่งจ่าย 115 kV ยังคงมีกระแสไหลได้ตามปกติ จะได้ค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตัวมนุษย์มีค่า 25.7123 kV/m และสนามแม่เหล็กเฉลี่ยที่ตัวมนุษย์มีค่า 22.6136 μ T

จากทฤษฎีการป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และองค์ความรู้ที่ได้จากการจำลองผลในข้างต้น ถ้างานวิจัยนี้ดำเนินการติดตั้งหลังคากระเช้าของรอกด้วยวัสดุวิศวกรรมที่มีคุณสมบัติความนำไฟฟ้าสูงจะทำให้ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวัสดุตัวนำเกิดการเหนี่ยวนำหักล้างกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเดิมส่งผลให้ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณที่มีการหักล้างเบาบางลงได้ ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบที่เหมาะสมเพื่อลดค่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

4.3 การป้องกันอันตรายจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

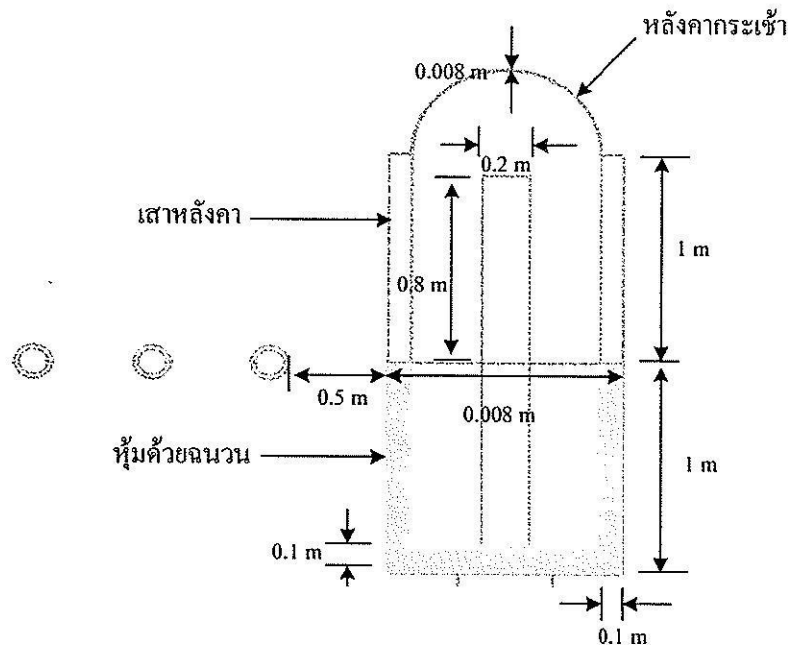
วัสดุวิศวกรรมที่นิยมใช้กำบังเพื่อลดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้แก่ เหล็ก (Steel) อลูมิเนียม (Aluminum) และซิลิกอน (Silicon) (Lopez, D and Dular, P., 2003) โดยวัสดุวิศวกรรมเหล่านี้จะมีค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งได้แสดงค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุวิศวกรรมแต่ละชนิดได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุวิศวกรรม

วัสดุวิศวกรรม	ความนำไฟฟ้า (S/m)	สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์	ความซึมซาบทางแม่เหล็กสัมพัทธ์
เหล็ก	0.8×10^7	3.5	300
อลูมิเนียม	3.82×10^7	8.8	1.00000065
ซิลิกอน	2300	11.8	3500

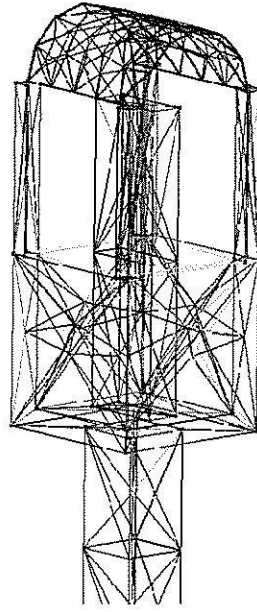
จากทฤษฎีการป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้า วัสดุที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าได้สูงจะทำให้ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าลดลง ดังนั้นจากข้อมูลที่ได้ในตารางที่ 4.2 ทำให้งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วัสดุวิศวกรรมคือ อลูมิเนียม เนื่องจากในตารางที่ 4.2 อลูมิเนียมเป็นวัสดุวิศวกรรมที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเหล็กและซิลิกอน และนอกจากนี้ยังหาได้ง่ายและมีราคาถูก โดยอลูมิเนียมที่เลือกใช้ในการจำลองผลสำหรับเป็นหลังคากระเช้าจะมีลักษณะเป็นแผ่นที่มีความหนา 0.008 m ซึ่งเป็นค่าความหนาที่ได้จากการวัดจริงของหลังคาโดยทั่วไปวางตัวโค้งสอดรับกับกระเช้า เนื่องจากแผ่นอลูมิเนียมตามท้องตลาดมีขนาดความหนาอยู่ที่ไม่เกิน 0.004 m ดังนั้นจะใช้แผ่นอลูมิเนียม

หนา 0.008 m ซ้อนกันเป็นจำนวน 2 แผ่น โดยมีเสาหลังคาทำจากอลูมิเนียมเช่นกันทั้ง 4 ต้นที่ตำแหน่งมุมของกระเช้าเหยียดตั้งตรงขึ้นเป็นฐานซึ่งแทนด้วยแท่งสี่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้าง 0.1 m ยาว 0.1 m และสูง 1 m โดยโครงสร้างของกระเช้ารถยนต์ที่ติดตั้งด้วยหลังคาซึ่งมีบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14

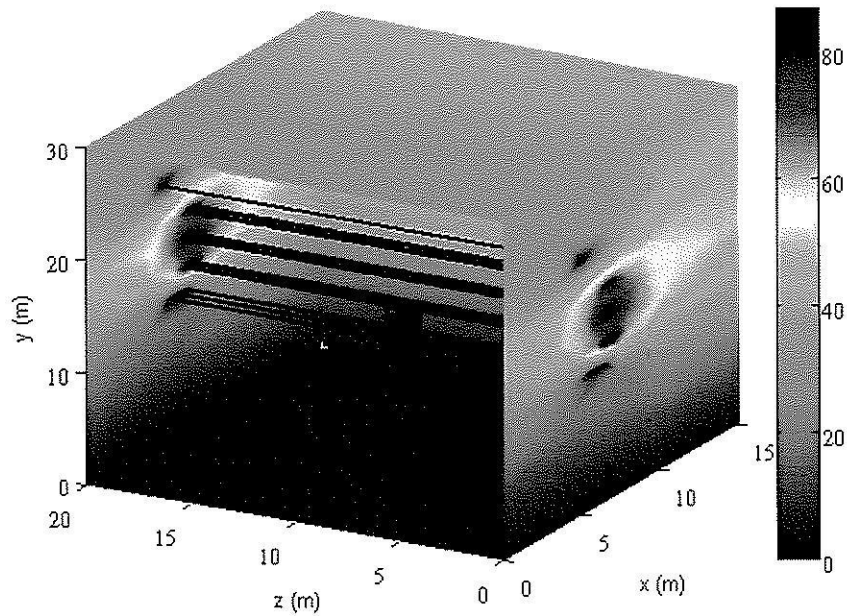


รูปที่ 4.14 โครงสร้างกระเช้ารถยนต์พร้อมการติดตั้งหลังคา

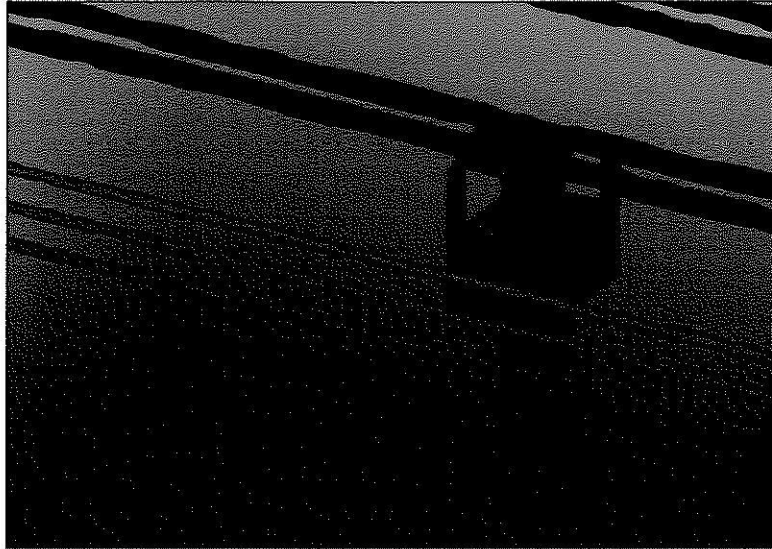
โดยสามารถแสดงภาพขยายการสร้างกริดและผลการจำลองเชิงกราฟิกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติหน้าที่บนรถกระเช้าที่ติดตั้งด้วยหลังคา กับสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV ที่ตัดไฟออกโดยที่สายส่งในระบบส่งจ่าย 115 kV ยังคงมีกระแสไหลได้ตามปกติได้ดังรูปที่ 4.15-4.21



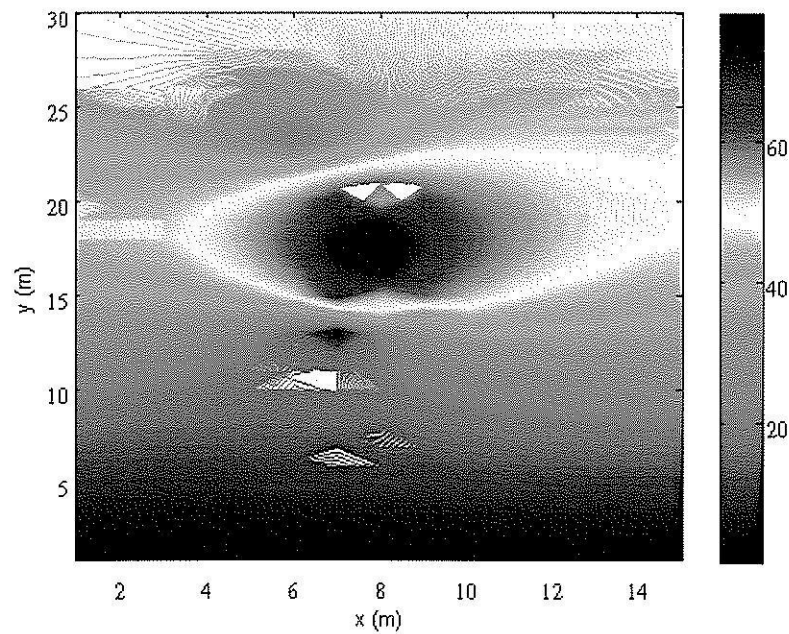
รูปที่ 4.15 ขยายให้เห็นถึงการสร้างกริดแบบ 3 มิติเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยกระเช้ารอกยถที่ติดตั้งหลังคา



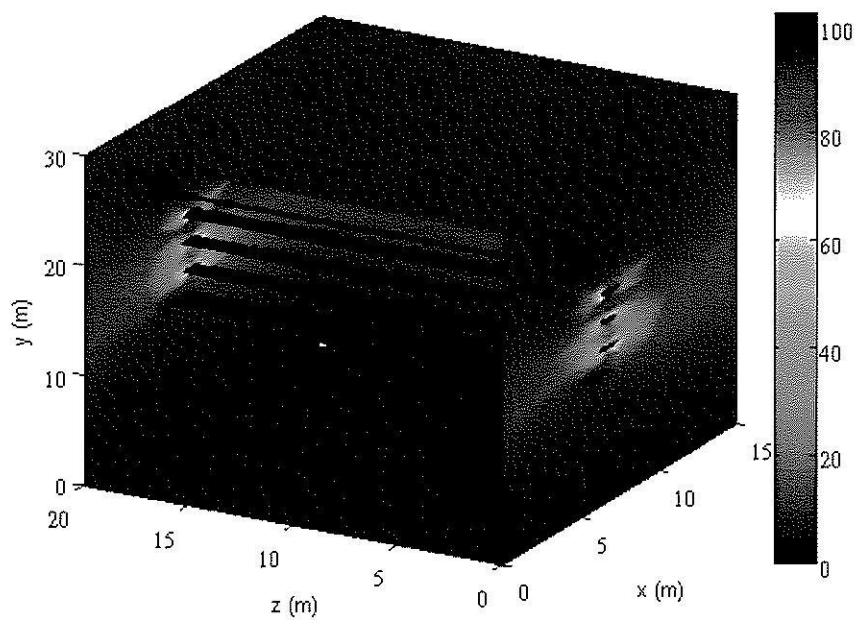
รูปที่ 4.16 การกระจายสนามไฟฟ้า (kV/m) แบบ 3 มิติบริเวณภายในของระบบเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยกระเช้ารอกยถที่ติดตั้งหลังคา



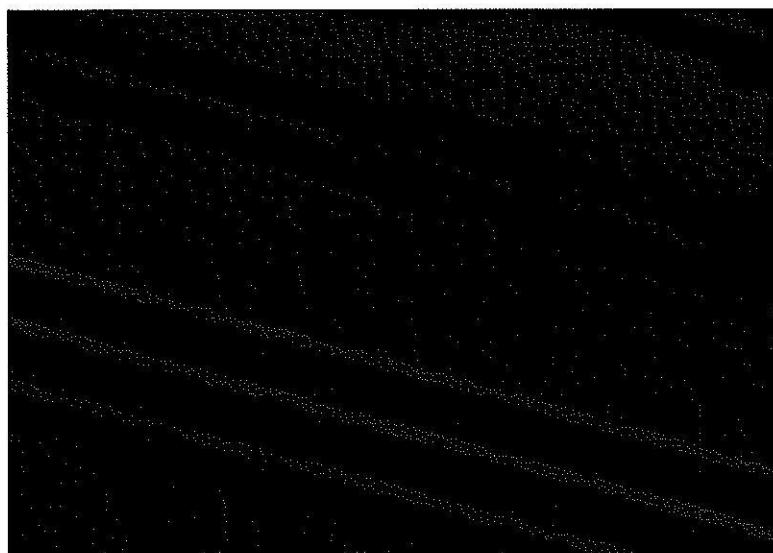
รูปที่ 4.17 การกระจายสนามไฟฟ้า (kV/m) แบบ 3 มิติบริเวณกระเช้าเมื่อนุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงาน
ด้วยกระเช้ารถยนต์ที่ติดตั้งหลังคา



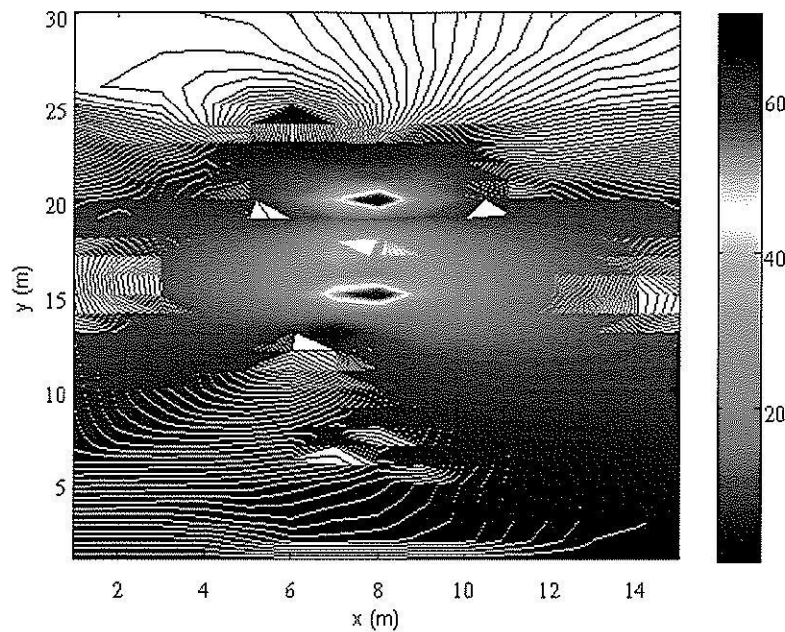
รูปที่ 4.18 ภาพตัดขวางการกระจายสนามไฟฟ้า (kV/m) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์ของระบบ
เมื่อนุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยกระเช้ารถยนต์ที่ติดตั้งหลังคา



รูปที่ 4.19 การกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) แบบ 3 มิติบริเวณภายในของระบบเมื่อนุคลาตรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยกระเช้ารถยกที่ติดตั้งหลังคา



รูปที่ 4.20 การกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) แบบ 3 มิติบริเวณกระเช้าเมื่อนุคลาตรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยกระเช้ารถยกที่ติดตั้งหลังคา



รูปที่ 4.21 ภาพตัดขวางการกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์ของระบบ เมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยกระเช้ารถยกที่ติดตั้งหลังคา

จากผลลัพธ์ทางกราฟิกที่ได้จากการจำลองผลเมื่อพิจารณาการติดตั้งหลังคา ทำให้ทราบถึงลักษณะการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงไป โดยที่ค่าสนามแม่เหล็กและค่าสนามไฟฟ้าจะกระจายตัวมีค่ามากที่สุดที่บริเวณตำแหน่งตัวนำและค่าลดลงมาเมื่อระยะห่างจากตัวนำมีค่ามากขึ้น และค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีค่าน้อยที่สุดที่ตำแหน่งพื้นดิน โดยเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งของหลังคากระเช้าซึ่งทำจากอลูมิเนียมที่เป็นวัสดุวิศวกรรมที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูง จึงทำให้สนามแม่เหล็กกระจายตัวอยู่ภายในหลังคาอลูมิเนียมมากกว่าที่จะกระจายตัวเข้ามาที่ตำแหน่งบุคลากรที่ปฏิบัติงาน ทำให้ภายในกระเช้ารถยกที่มีหลังคาปิดกั้นมีค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยน้อยลงส่งผลให้ค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยที่ตกกระทบบนตัวบุคลากรมีค่าลดลงไปด้วย สำหรับค่าสนามไฟฟ้านั้นหลังคาที่ทำจากอลูมิเนียมจะไม่ส่งผลการกระจายตัวของสนามไฟฟ้ามากนักทำให้ยังมีสนามไฟฟ้าตกกระทบบนตัวบุคลากรที่ปฏิบัติงานบนกระเช้า ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำหลังคาไม่ได้เป็นวัสดุที่เคลือบไว้ด้วยฉนวน โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาภาพตัดขวางในบริเวณที่มีบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานบนรถกระเช้าจะเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

จากการจำลองผลในระบบเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยกระเช้ารถยกที่มีการติดตั้งหลังคา จะได้ค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตัวมนุษย์มีค่า 22.1313 kV/m และสนามแม่เหล็กเฉลี่ยที่ตัวมนุษย์มีค่าเฉลี่ยเพียง $9.7610 \mu\text{T}$ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณจะเห็นว่า การติดตั้งหลังคาจะกำบังผลของสนามแม่เหล็กได้ดีกว่าสนามไฟฟ้าโดยเปรียบเทียบผลกับหัวข้อที่ 4.2 ที่ผ่านมา ซึ่งเมื่อยังไม่มี

ติดตั้งหลังคาต้านสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเฉลี่ยที่ตัวมนุษย์จะมีค่าถึง 25.7123 kV/m และ 22.6136 μ T ตามลำดับ ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่า เมื่อมีการติดตั้งหลังคาเพิ่มเข้าไปที่กระเช้ารถจะช่วยในการกำบังสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าได้จริง

4.4 สรุป

ในบทที่ 4 นี้ ได้ดำเนินการจำลองผลการติดตั้งหลังคาให้แก่กระเช้ารถของการไฟฟ้าที่เหมาะสมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานบนกระเช้า โดยที่สายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV ถูกตัดไฟออก ในขณะที่สายส่งในระบบส่งจ่าย 115 kV ยังคงมีกระแสไหลได้ตามปกติ ซึ่งการติดตั้งหลังคาให้กับรถกระเช้าจะช่วยกำบังค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบบนตัวมนุษย์ได้ โดยการติดตั้งหลังคาจะป้องกันอันตรายผลของสนามแม่เหล็กได้ดีกว่าสนามไฟฟ้า

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยและการจำลองผลค่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากระบบส่งจ่ายขนาด 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV ที่อยู่บนเสาดันเดียวกันของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อพิจารณาผลกระทบของค่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับบุคลากรที่ปฏิบัติงาน การจำลองผลได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม MATLABTM ที่พัฒนาขึ้นเอง ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาและติดตั้งหลังคากระเช้ารถยกของการไฟฟ้าสำหรับป้องกันค่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อบุคลากรที่ขึ้นไปปฏิบัติงานบนกระเช้ารถยก เมื่อพิจารณาระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV ซึ่งตัดไฟออกแล้ว

ในบทที่ 2 เป็นขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง และอธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยได้เลือกใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาลอริคิน ส่วนในบทที่ 3 เป็นการอธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ พร้อมนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยกระบวนการสร้างกริดแบบ 3 มิติได้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Gmesh ซึ่งเป็นโปรแกรม Freeware และในบทที่ 4 เป็นการพัฒนาองค์ความรู้ในการออกแบบอุปกรณ์เพื่อป้องกันอันตรายจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานบนกระเช้ารถยกของการไฟฟ้า โดยที่สายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV ถูกตัดไฟออกในขณะที่สายส่งในระบบส่งจ่าย 115 kV ยังคงมีกระแสไหลได้ตามปกติ โดยเน้นที่การติดตั้งหลังคาให้แก่กระเช้ารถยก การติดตั้งหลังคาให้กับรถกระเช้าจะช่วยกับบางค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบบนตัวมนุษย์ได้ ผลของการกับบางจะส่งผลต่อค่าสนามแม่เหล็กมากกว่าสนามไฟฟ้าทั้งนี้เนื่องจากวัสดุที่เลือกมาทำหลังคาเป็นวัสดุที่มีความนำไฟฟ้าสูง แต่ไม่มีฉนวนเคลือบ ดังนั้นในการป้องกันสนามไฟฟ้าอาจจะต้องหาวัสดุที่มีความเป็นฉนวนมาเคลือบเพิ่มเติม หรือติดตั้งวัสดุที่เป็นฉนวนเพิ่มเพื่อกับบางค่าสนามไฟฟ้าได้ด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต

1. โครงสร้างของระบบทั้งหมดที่ใช้ในการจำลองผลอาทิเช่น กระเช้ารถยก, ล้อรถยก, แกนรถยกมนุษย์ และอื่น ๆ ควรมีความเหมือนจริงมากยิ่งขึ้น เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่ถูกต้องและชัดเจนมากขึ้น แต่ทั้งนี้ก็เป็น การเพิ่มความยุ่งยากและความซับซ้อนในการพิจารณาตามมา
2. สร้างอุปกรณ์ต้นแบบในการกำบังผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จริงกับการจำลองผล

บรรณานุกรม

- ชวลิต คำรงรัตน์. (2533). การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า. กรุงเทพฯ ฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- ชัยรัตน์ วิเชียรมงคลกุล. (2544). การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากรอบตัวนำบางโดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับวิธีบาวนด์อีลีเมนต์. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิรันดร์ คำประเสริฐ. (2545). วิสวกรรมแม่เหล็กและวิสวกรรมไมโครเวฟ เล่ม2. (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ ฯ: ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ.
- ปราโมทย์ เจริญอำไพ. (2544). ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิสวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ ฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เผด็จ เผ่าละออ. (2548). การออกแบบแนวใหม่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อลดการสั่นสะเทือนโดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- พิทักษ์ ปิ่นอนงค์. (2545). การวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อมใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนือพื้นดินและกรณีศึกษาการลดผลกระทบที่เกิดขึ้น. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Chen, Z., Ney, M. M., and Hoefer, W. J. R. (1991). A new finite-difference time-domain formulation and its equivalence with the TLM symmetrical condense node. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**. 39(12): 2160-2169.
- Christopoulos, C., (1995). **The transmission-line modeling method: TLM**. USA: IEEE Press.
- Christophe, G and Jean, F. R. (2008). **Gmesh** [On-line]. Available: <http://geuz.org/gmsh>.
- Elhribawy, M. A., Jennings, L. S., Al Dhalaan, S. M., and Keerthipala, W. W. L. (2003). Practical results and finite difference method to analyze the electric and magnetic field coupling between power transmission line and pipeline. **ISCAS'03, Proceeding of the International Symposium, IEEE**. 3: 431-434.
- Elhribawy, M. A., Jennings, L. S., and Keerthipala, W. W. L. (2002). Variable step size for calculation of electromagnetic fields of power transmission line using finite difference techniques. **Proceeding of IEEE, TENCON'02**. 1830-1833.

- Elhribawy, M. A., Nguyen, T. T., Jennings, L., and Keerthipala, W. W. L. (2002). Calculation of electromagnetic fields established by power transmission line using finite difference techniques. **Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering**, 311-316.
- Fagan, M. J. (1992). **Finite element analysis theory and practice**. Singapore: Longman singapore publishers.
- Frazier, M. J., and Dabkowski, J. (1985). Magnetic coupled longitudinal electric field measurements on two transmission lines. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**, 104(4): 933-940.
- Haber, F. (1974). The magnetic field in the vicinity of parallel and twisted three wire cable carrying balanced three-phased current. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, 16(2): 76-82.
- Hagel, R., Gong, L., and Unbehauen, R. (1994). On the magnetic field of an infinitely long helical line current. **IEEE Transactions on Magnetics**, 30(1): 80-84.
- Hernandez, R. M., and Karady, G. G. (1998). Attenuation of low frequency magnetic fields using active shielding. **Electric Power System Research**, 45: 57-63.
- Hossam-Eldin, A. A. (2001). Effect of electromagnetic fields from power lines on living organisms. **International Conference on Solid Dielectrics, IEEE**, 438-441.
- Huebner, K. H., Dewhurst, D. L., Smith, D. E., and Byrom, T. G. (2001). **The finite element method for engineer** (4th ed.). USA: John Wiley & Sons Inc.
- Kaune, W. T., and Zaffanella, L. E. (1992). Analysis of magnetic fields produced far from electric power lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 7(4): 2082-2091.
- Karim, W., Vasundara, V. V., and Vijay, K. V. (1998). Magnetic field shielding concepts for power transmission lines. **IEEE Transaction on Magnetics**, 34(3): 649-654.
- Keikko, T., Kuusiluoma, S., Sauramaki, T., and Korpinen, L. (2002). Comparison of electric and magnetic fields near 400 kV electric substation with exposure recommendations of the european union. **Transmission and Distribution Conference, Asia Pacific, IEEE/PES**, 1230-1234.
- Kirawanich, P., Gleason, D., Cornell, A., and Islam, N. E. (2005). Analysis of field through apertures by applying transmission line matrix method to electromagnetic topology simulations. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, 883-887.

- Krajewski, W. (1997). BEM analysis of electric field excited by overhead HV lines erected in built-up areas. **IEE Proceedings Sci, Meas, Technol.** 144(2): 81-86.
- Kuusiluoma, S., Keikko, T., Hovila, and Korpinen, L. (2000). Comparison of electric and magnetic fields from electric power systems with exposure recommendations of the european union. **IEEE Proceeding International Conference.** 843-848.
- Lindberg, L. (1998). Reduction of magnetic fields from electric power and installation lines. **IEE Proceeding Sci, Meas, Technol.** 145(5): 215-221.
- Lopez, D, and Dular, P. (2003). Parametric analysis of magnetic field mitigation shielding for underground power cables. **International conference on renewable energies and power quality.** 326-333.
- Maruvada, P. S. (1993). Characterization of power frequency magnetic fields in different environments. **IEEE Transactions on Power Delivery.** 8(2): 598-606.
- Moser, J. R., and Spencer, R. F., JR. (1968). Predicting the magnetic fields from a twisted-pair cable. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility.** 10(3): 324-329.
- Olsen, R. G., Deno, D., and Baishiki, R. S. (1998). Magnetic fields from electric power lines theory and comparison to measurements. **IEEE Transactions on Power Delivery.** 3: 2127-2136.
- Pettersson, P. (1996). Principles in transmission line magnetic field reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery.** 11(3): 1587-1593.
- Sadiku, M. N. O., and Peterson, A. F. (1990). A comparison of numerical methods for computing electromagnetic fields. **Southeastcon'90 proceeding, IEEE.** 42-47.
- Shenfeld, S. (1969). Magnetic fields of twisted-wire pairs. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility.** 11(4): 164-169.
- Singiresu, S. R. (2005). **The finite element method in engineering** (4th ed). Butterworth Heinemann
- Takuma, T., Kawamoto, T., Yasui, M., Morooka, M., and Katoh, J. (1985). Analysis of effect of shield wires on electrostatic induction by ac transmission line. **IEEE Transactions on Power Apparatus and System.** 104(9): 2612-2618.
- Tirupathi, R. C., and Ashok, D. B. (2002). **Introduction to finite elements in engineering** (3rd ed). New Jersey: Prentice Hall.

- Voelker, R. H., and Lomax, R. J. (1990). A finite-difference transmission line matrix method incorporating a nonlinear device model. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**. 38(3): 302-312.
- Weiner, M., (2001). **Electromagnetic analysis using transmission line variables**. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Wikipedia., (2009). **Relative permittivity** [On-line]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Relative_permittivity.
- Yang, X., and Xu, X. (1996). Interference of nonlinear ferromagnetic pipeline on magnetic field produced by power lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 11(2): 644-649.
- Zhang, D., (2000). Flux-canceling effect and its application to shielding magnetic field from power transmission lines. **IEEE International symposium electromagnetic compatibility**. (2): 681-684.

ภาคผนวก

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการนานาชาติ

1. A. Isaramongkolrak, T. Kulworawanichpong, and P. Pao-la-or. (2008). Influence of an Overhead Ground Wire on Electric Fields around the HV Power Transmission Line. **The 8th WSEAS International Conference on Electric Power Systems. Venice, Italy.:** 128-132.
2. A. Isaramongkolrak, T. Kulworawanichpong, and P. Pao-la-or. (2008). Finite Element Approach to Electric Field Distribution Resulting from Phase-Sequence Orientation of a Double-Circuit High Voltage Transmission Line. **The 8th WSEAS International Conference on Electric Power Systems. Venice, Italy.:** 207-211.

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

1. P. Pao-la-or, A. Isaramongkolrak, and T. Kulworawanichpong. (2008). Electromagnetic Fields Distribution of Phase-sequence Orientation of a Double-Circuit Power Transmission Line Based on Finite Element Method. **WSEAS Transaction on Power System**, No. 10, Vol. 3, 2008, pp 653-663.
2. P. Pao-la-or, A. Isaramongkolrak, and T. Kulworawanichpong. (2008). Study of Influence of an Overhead Ground Wire on Electric Fields around the HV Transmission Line Using 2D and 3D Finite Element Method. **WSEAS Transaction on Power System**, No. 11, Vol. 3, 2008, pp 675-684.

ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ เป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี ปริญญาโท และปริญญาเอก จากสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดำเนินงานวิจัยด้าน Applied FEM for Electromagnetic Field, for Electrical Machine, and for Heat Transfer และ Applied AI มีผลงานวิจัยตีพิมพ์ระดับชาติและนานาชาติมากกว่า 20 เรื่อง จดสิทธิบัตร 1 ผลงาน และ ลิขสิทธิ์โปรแกรม 3 ผลงาน

นายอานนท์ อิศรมงคลรักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 5 สิงหาคม พ.ศ.2526 เกิดที่อำเภอเมือง จังหวัด ศรีสะเกษ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนศรีสะเกษวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2545 ภายหลังได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในปี พ.ศ.2549 ภายหลัง สำเร็จการศึกษาได้เข้าปฏิบัติงานที่บริษัทอิตาซี คอมซูเมอร์ โปรดักส์ (ประเทศไทย) จำกัด อำเภอ กบินทร์บุรี จังหวัดปราจีนบุรี ตำแหน่งวิศวกรฝ่ายประกันคุณภาพ ในปี พ.ศ.2551 เข้าศึกษาต่อระดับ บัณฑิตศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี โดยได้เป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนัก วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจำนวน 4 รายวิชา ได้แก่ ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า มูลฐาน ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2 ปฏิบัติการการแปลงผันพลังงานกลไฟฟ้า และปฏิบัติการวงจร อิเลคทรอนิกส์ ทั้งนี้มีความสนใจในด้านการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและการ ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ในงานระบบไฟฟ้ากำลัง