



รายงานการวิจัย

การวิเคราะห์ผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อมนุษย์
ใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV
(Analysis of Electromagnetic Field Effects to Human
under 500 kV High Voltage Transmission Line)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การวิเคราะห์ผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อมนุษย์
ใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV
(Analysis of Electromagnetic Field Effects to Human
under 500 kV High Voltage Transmission Line)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาวสุกัญญา ทัพศรี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ธันวาคม 2555

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการนี้ โดยการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2553



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับที่สอง โดยได้วิเคราะห์การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กรอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมบริเวณนั้นรวมถึงบุคลากรที่ทำงานบริเวณพื้นด้านล่าง โดยได้พิจารณาสายส่งขนาด 500 kV ทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ ซึ่งเป็นระดับแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุดในประเทศไทย การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB โดยพิจารณาปัญหาเป็นแบบ 2 มิติ ซึ่งอาศัยการแปลงระบบจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ พร้อมแสดงผลทางกราฟิกของค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น จากผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ ในระดับความสูง 1 m จากพื้นดินที่บุคลากรทำงานอยู่ จะมีค่าไม่เกินระดับของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ ซึ่งถูกกำหนดโดยมาตรฐานของ ICNIRP



ABSTRACT

This research presents a mathematical model of electromagnetic fields in transmission system which performs in second-order partial differential equation by analyzing the electric field and magnetic field distribution around high voltage transmission line. It effects to environment and workman on the ground when consider single and double circuit 500 kV transmission line, which is the highest voltage in Thailand. The computer simulation is applied using finite element method that is developed by MATLAB program. The problem is considered to two dimensions, which is the time harmonic system with the graphical performance of electric field and magnetic field occurred. The simulation result of electric field and magnetic field that is from 500 kV HV transmission line both single and double circuit at high 1 m from ground that working human, the level of electric field and magnetic field which effects to human not over ICNIRP standard.



สารบัญ

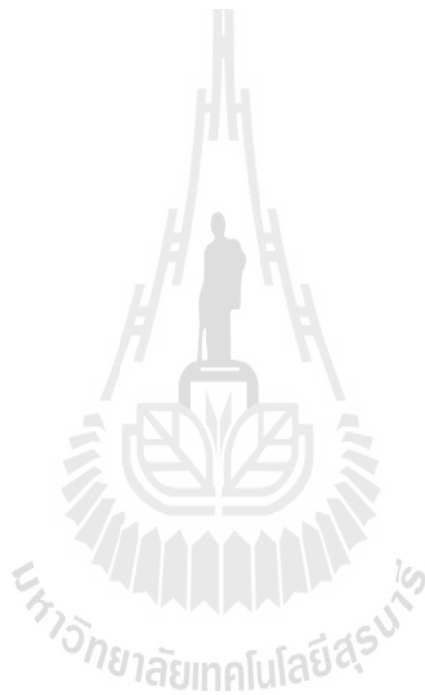
	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
1.6 การจัดรูปแบบรายงานการวิจัย.....	3
บทที่ 2 การคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่งโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	4
2.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้า 2 มิติ.....	4
2.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก 2 มิติ.....	6
2.3 การคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์.....	7
2.3.1 การแบ่งอิลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา.....	7
2.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์.....	9
2.3.3 การสร้างสมการของอิลิเมนต์.....	9
2.3.4 การประกอบสมการอิลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ.....	18
2.3.5 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาผลเฉลย.....	19
2.4 สรุป.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	21
3.1 บทนำ.....	21
3.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล.....	21
3.2.1 โปรแกรมสร้างกริด.....	21
3.2.2 โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	23
3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล.....	25
3.4 สรุป.....	25
บทที่ 4 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กพร้อมวิเคราะห์ผล.....	27
4.1 บทนำ.....	27
4.2 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าพร้อมวิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อมนุษย์ได้สายส่ง.....	27
4.3 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กพร้อมวิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อมนุษย์ได้สายส่ง.....	33
4.4 สรุป.....	39
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	40
5.1 สรุป.....	40
5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต.....	40
บรรณานุกรม.....	42
ภาคผนวก	
การเผยแพร่ผลงานวิจัย.....	46
ประวัติผู้วิจัย.....	47

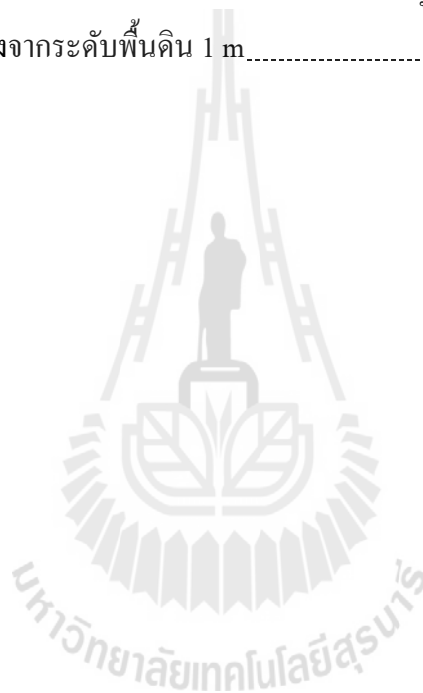
สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ความสูงจากระดับพื้นดิน 1 m.....	30
4.2 ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้าที่ความสูงระดับต่างๆ จากพื้นดิน.....	33
4.3 การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ความสูงจากระดับพื้นดิน 1 m.....	36
4.4 ค่าเฉลี่ยของสนามแม่เหล็กที่ความสูงระดับต่างๆ จากพื้นดิน.....	39



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV.....	8
3.1 การแบ่งอิลิเมนต์ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV.....	23
3.2 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	24
4.1 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV.....	28
4.2 ค่าสนามไฟฟ้าที่ความสูงจากระดับพื้นดิน 1 m.....	29
4.3 การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV.....	34
4.4 ค่าสนามแม่เหล็กที่ความสูงจากระดับพื้นดิน 1 m.....	35



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (Electricity Generating Authority of Thailand: EGAT) เป็นระดับแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุดในประเทศไทย ณ ขณะนี้ ส่งจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ถึงสถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก จังหวัดนครสวรรค์ ด้วยสายส่งวงจรรคู่ (double circuit) แล้วส่งต่อด้วยสายส่งวงจเดี่ยว (single circuit) จนถึงสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก จังหวัดกรุงเทพฯ โดยผลของสนามไฟฟ้าที่กระจายตัวรอบสายส่งจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันแรงดันของสายส่งซึ่งโดยปกติแล้วก่อนข้างจะคงที่ ส่วนผลของสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งซึ่งจะขึ้นอยู่กับผู้ใช้ไฟในขณะนั้น ดังนั้นกรณีที่พิจารณาสายส่งขนาด 500 kV ซึ่งเป็นระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงมาก ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งก็จะมีค่าสูงตามความต้องการของผู้ใช้ไฟด้วยเช่นกัน จึงเป็นผลให้เกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวรอบสายส่งในปริมาณที่สูง ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ที่สัญจรไปมาในระดับพื้นดินข้างล่างได้ จึงเป็นหัวข้อวิจัยที่ผู้ศึกษาได้นำเสนอในงานวิจัยนี้

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมมาก เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ ทำให้สามารถคำนวณงานต่างๆ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ในปัจจุบันได้มีการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมแทบทุกสาขา เนื่องจากสามารถหาผลเฉลยได้แม้กระทั่งปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear problem) และปัญหาที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-dependent problem) ดังนั้นการพิจารณาผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายตัวรอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่อาศัยการแปลงระบบจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ และลักษณะของสายส่งที่รูปร่างมีความโค้งมน จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ดำเนินการ

งานวิจัยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่ นั้น จะมุ่งเน้นไปที่การป้องกัน (shielding) สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายออกจากสายส่งไฟฟ้า หรืออาจมีบางงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อมแต่เลือกใช้วิธีพื้นฐานในการคำนวณ โดยยังไม่มีทีมนักวิจัยใดได้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวรอบสายส่งไฟฟ้าที่มีผลต่อความปลอดภัยของมนุษย์ที่สัญจรไปมาข้างล่าง อย่างละเอียดถี่ถ้วน โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาก่อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเกิดขึ้นเพื่อศึกษาผลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวรอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ซึ่งเป็นระดับแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุด

ในประเทศไทยทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ ที่อาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ที่มีการสัญจรไปมาในระดับพื้นดินข้างล่าง โดยได้อ้างถึงมาตรฐานของ International Commission of Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) ซึ่งเป็นผู้กำหนดระดับของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ปลอดภัยต่อมนุษย์ การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้น โดยพิจารณาปัญหาเป็นแบบ 2 มิติ ที่อาศัยการแปลงระบบจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ พร้อมแสดงผลทางกราฟิกด้วย MATLAB™ ของค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- พัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์สำหรับคำนวณค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในสายส่งให้สามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็ว ถูกต้อง และแม่นยำ
- พัฒนาองค์ความรู้เพื่อหาแนวทางในการป้องกันการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่อาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์
- พัฒนานักวิจัยใหม่และบุคลากรทางด้านการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อมนุษย์ได้สายส่งกำลังไฟฟ้า ด้วยเทคนิคการคำนวณขั้นสูง

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

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

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- ใช้ MATLAB™ เพื่อพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายส่งไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส
- พิจารณาสายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ของ EGAT ซึ่งเป็นระดับแรงดันสูงสุดในประเทศไทย ทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่
- ดำเนินการคำนวณเพื่อพัฒนาองค์ความรู้ในการป้องกันผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่อาจมีผลต่อความปลอดภัยของมนุษย์ที่สัญจรไปมาข้างล่าง

- วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแบบ 2 มิติ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- ได้หลักการและแนวความคิดสำหรับการศึกษาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
- ได้โปรแกรมจำลองผลที่เกิดจากการพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เข้ากับปัญหาจริงในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในสายส่ง ตลอดจนสามารถนำไปใช้เพื่อประกอบการเรียนการสอนด้านสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้าและสายส่งกำลังไฟฟ้า
- ได้ข้อสรุปอันเป็นประโยชน์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อมนุษย์ได้สายส่งไฟฟ้าขนาด 500 kV ที่เป็นระดับแรงดันสูงสุดในประเทศไทย

1.6 การจัดรูปเล่มรายงานการวิจัย

รายงานการวิจัยนี้ประกอบด้วย 5 บท และ 1 ภาคผนวก บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความ เป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัย รวมทั้งขอบเขตของ งานวิจัย ส่วนบทอื่นๆ ประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายตัวรอบสายส่ง และนำเสนอการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 2 มิติ โดยได้ อธิบายขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ เพื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าที่กระจายรอบ ๆ บริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

บทที่ 3 อธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ ของระบบสายส่งไฟฟ้าแบบ 2 มิติ โดยกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ประยุกต์ใช้ในการจำลองผล รวมถึง อธิบายโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล

บทที่ 4 มีเนื้อหาว่าด้วยผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวรอบสาย ส่งกำลังไฟฟ้าขนาด 500 kV ของ EGAT ทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ พร้อมวิเคราะห์ผลกระทบของ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อมนุษย์ได้สายส่ง

บทที่ 5 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ส่วนภาคผนวก เป็นการกล่าวถึงผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทที่ 2

การคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่งโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.1 บทนำ

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) เป็นวิธีที่ใช้ในการหาผลเฉลยแบบประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์และเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์งานที่มีโครงสร้างซับซ้อน หรือรูปร่างที่มีลักษณะโค้งมนได้อีกทั้งประสิทธิภาพและการประมวลผลที่สูงขึ้นของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน นอกจากนี้ในบางระบบที่มีบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์หมีพื้นที่ขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับปัญหาของระบบที่เป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็สามารถแบ่งกริดขนาดเล็กหรือใหญ่ ที่สามารถเชื่อมความสัมพันธ์ของ 2 บริเวณที่มีขนาดแตกต่างกันได้อย่างครอบคลุมและอิสระอย่างเช่น งานวิจัยนี้ที่พิจารณาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปรากฏขึ้นบริเวณอากาศรอบๆ ตัวนำสายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ซึ่งพื้นที่ตัวนำเป็นพื้นที่ขนาดเล็กส่วนบริเวณอากาศรอบๆ เป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติก็สามารถตีกริดรูปสามเหลี่ยมให้มีขนาดเล็กเพื่อการวิเคราะห์ภายในบริเวณตัวนำ ในขณะที่บริเวณส่วนใหญ่เป็นอากาศและไม่มีความจำเป็นสำหรับการศึกษามากนัก ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็สามารถตีกริดให้มีขนาดใหญ่ได้เช่นกัน ซึ่งการดำเนินการแบบนี้จะก่อให้เกิดจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในระบบที่ศึกษามีจำนวนไม่มาก และสามารถคำนวณหาผลเฉลย ณ บริเวณที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า พร้อมทั้งประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายตัวรอบสายส่งต่อไป

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า

2.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้า 2 มิติ

สำหรับปัญหาค่าสนามไฟฟ้าใน 2 มิติในระบบพิกัดฉาก ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นิยมจัดรูปสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปสมการที่ (2-1)

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

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

แบบจำลองของสนามไฟฟ้าที่กระจายรอบบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูงในรูปแบบ 2 มิติสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2-2) (Christopoulos, 1995)

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \varepsilon \left(\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \right) - \mu \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) = 0 \quad (2-2)$$

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 $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ เมื่อ μ_r คือ สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ และ ε_r คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ ซึ่ง $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Hm, $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m

จากอาศัยการแปลงระบบจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ 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

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + (\mu \varepsilon \omega^2 - j \mu \sigma \omega) E = 0 \quad (2-5)$$

เปรียบเทียบสมการที่ (2-1) กับ (2-5) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ D_x , D_y , G และ Q จะ
 ได้

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

2.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก 2 มิติ

สำหรับปัญหาค่าสนามแม่เหล็กใน 2 มิติในระบบพิกัดฉาก ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นิยมจัดรูปสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปสมการที่ (2-7)

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

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

แบบจำลองของสนามแม่เหล็กที่กระจายรอบบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูงในรูปแบบ 2 มิติ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2-8) (Christopoulos, 1995)

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \left(\frac{1}{v^2}\right) \left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2}\right) - \mu\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}\right) = 0
 \tag{2-8}$$

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 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ 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

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu\epsilon \left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \right) - \mu\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \right) = 0 \quad (2-11)$$

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

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

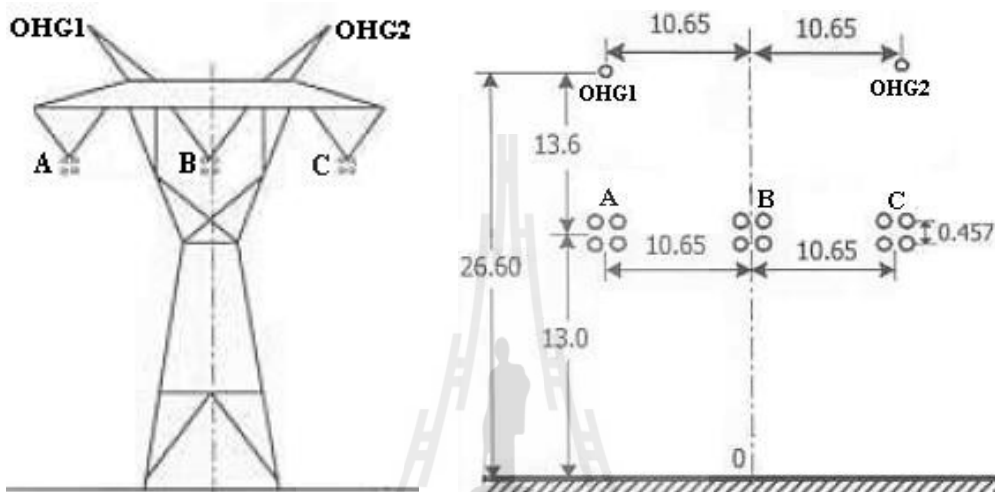
2.3 การคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

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

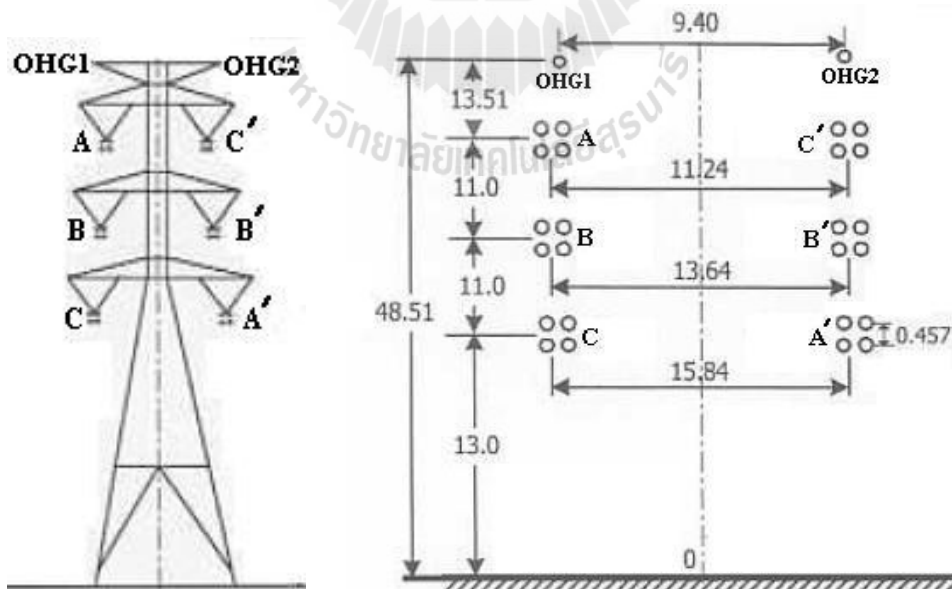
2.3.1 การแบ่งอิลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (Electricity Generating Authority of Thailand: EGAT) ซึ่งเป็นระดับแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุดในประเทศไทย ทั้งสายส่งวงจรเดี่ยว (single circuit) และสายส่งวงจรคู่ (double circuit) โดยทั้งสองวงจรเป็นแบบสายควบชนิด 4 เส้น (4 bundle conductors) ซึ่งสามารถแสดงระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าพร้อมมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยได้พิจารณาความสูงของสายส่งทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ที่ตำแหน่งคกท้องซ้าง (midspan) ซึ่งมีระยะหย่อนของสายส่งที่สูงที่สุด (maximum sag) โดยกำหนดให้ค่าความสูงของสายส่งที่ตำแหน่งนี้อยู่สูงจากพื้นดินเป็นระยะเท่ากับระยะความปลอดภัยต่ำสุด ซึ่งสายส่งขนาด 500 kV จะมีระยะเท่ากับ 13.00 m (พิทักษ์ ปันอนงค์, 2545) และพิจารณาสาย

ตัวนำแต่ละเส้นมีขนาด 795 MCM (เส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.02772 m) และสายดินเหนือศีรษะ (overhead ground wire: OHGW) แต่ละเส้นมีขนาด 3/8 inch (เส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.009114 m) โดยชั้นตอนแรกเริ่มจากการแบ่งพื้นที่ของปัญหาออกเป็นอิเลเมนต์รูปสามเหลี่ยม (Triangular elements) ตลอดพื้นที่หน้าตัดที่ศึกษา สำหรับปัญหาในแบบ 2 มิติ โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพธ์โดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนอิเลเมนต์เป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งผ่านการเชื่อมต่อกันระหว่างโนดและอิเลเมนต์ต่าง ๆ



ก) สายส่งวงจรถัด (m)



ข) สายส่งวงจรถู (m)

รูปที่ 2.1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV

2.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์

ขั้นตอนนี้เป็นทางเลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ โดยเมื่อสมมติให้ลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอิลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้น ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างของสนามไฟฟ้าจากสายส่งกำลังไฟฟ้าจะได้

$$E(x, y) = E_i N_i + E_j N_j + E_k N_k \quad (2-13)$$

โดยที่ N_n , $n = i, j, k$ คือฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ และ E_n , $n = i, j, k$ คือผลลัพธ์ของค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละโนด i, j, k ของอิลิเมนต์ ซึ่งในกรณีอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อจะได้

$$N_n = \frac{a_n + b_n x + c_n y}{2\Delta_e} \quad (2-14)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} a_i &= x_j y_k - x_k y_j, & b_i &= y_j - y_k, & c_i &= x_k - x_j \\ a_j &= x_k y_i - x_i y_k, & b_j &= y_k - y_i, & c_j &= x_i - x_k \\ a_k &= x_i y_j - x_j y_i, & b_k &= y_i - y_j, & c_k &= x_j - x_i \end{aligned}$$

และ Δ_e คือ พื้นที่ของแต่ละอิลิเมนต์ ซึ่งหาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$\Delta_e = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix} \quad (2-15)$$

2.3.3 การสร้างสมการของอิลิเมนต์

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

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

ประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Weighting functions) ดังสมการที่ (2-16) ซึ่งวิธีนี้สามารถกระทำได้โดยการคูณเศษตกค้าง R ด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก W แล้วอินทิเกรตตลอดทั้งโดเมนของอีลิเมนต์ (Δ_e) และกำหนดผลที่ได้ให้เท่ากับศูนย์ ในปัจจุบันการประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างถือเป็นวิธีที่ถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ ซึ่งเมทริกซ์ที่เกิดขึ้นจากวิธีนี้ปกติแล้วจะมีความสมมาตร จึงก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้กับปัญหาขนาดใหญ่

$$-\int_{\Delta_e} W_n R d\Delta_e = 0 \quad (2-16)$$

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

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

โดยที่ ϕ คือ ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า

ซึ่ง R เรียกว่าเศษตกค้าง (Residual) เป็นค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการใช้ผลเฉลยโดยประมาณ ซึ่งไม่ใช่ผลเฉลยแน่นอนตรงของปัญหา เศษตกค้าง R ที่เกิดขึ้นควรมีค่าต่ำที่สุดเพื่อผลเฉลยโดยประมาณที่เกิดขึ้นจะมีค่าเที่ยงตรงมากที่สุด

งานวิจัยนี้เลือกกริดรูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อในการคำนวณ ดังนั้นจุดที่ไม่ทราบค่าจะมี 3 จุดซึ่งได้แก่จุดต่อทั้งสี่ ดังนั้นจึงต้องการ 3 สมการในการแก้หาจุดที่ไม่ทราบค่า ดังนั้นจากสมการที่ (2-16) จะต้องมีค่า $n = 1, 2, 3$ และในงานวิจัยนี้ วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างได้เลือกใช้วิธีของกาลเลอร์กิน (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

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

โดยที่ $[N]^T$ คือ เวกเตอร์เมทริกซ์แนวตั้งของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์

เนื่องจากฟังก์ชันที่ต้องการประมาณ $\phi(x, y, z)$ ไม่มีความต่อเนื่องของอนุพันธ์ระหว่างแต่ละอิลิเมนต์ 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

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

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

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

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

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

โดยที่ θ คือ มุมที่กระทำกับอิลิเมนต์

Γ คือ ขอบเขตของอิลิเมนต์

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

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

เทอม B ก็สามารทดแทนได้ด้วยสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งในทำนองเดียวกัน ดังนั้นสมการที่ (2-20) จึงกลายเป็น

$$0 = -\int_{\Gamma} [N]^T \left(D_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \cos \theta + D_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \sin \theta \right) d\Gamma + \int_{\Delta_e} \left(D_x \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} + D_y \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) d\Delta_e \quad (2-24)$$

$$+ \int_{\Delta_e} G [N]^T \phi d\Delta_e - \int_{\Delta_e} Q [N]^T d\Delta_e$$

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

$$0 = -\int_{\Gamma} [N]^T \left(D_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \cos \theta + D_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \sin \theta \right) d\Gamma \quad (2-25)$$

$$+ \left(\int_{\Delta_e} \left(D_x \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + D_y \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} \right) d\Delta_e \right) \{ \Phi^{(e)} \}$$

$$+ \left(\int_{\Delta_e} G [N]^T [N] d\Delta_e \right) \{ \Phi^{(e)} \} - \int_{\Delta_e} Q [N]^T d\Delta_e$$

และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้เป็น

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

โดยที่

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

$$[K^{(e)}] = \int_{\Delta_e} \left(D_x \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + D_y \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} \right) d\Delta_e + \int_{\Delta_e} G [N]^T [N] d\Delta_e$$

$$\{f^{(e)}\} = \int_{\Delta_e} Q[N]^T d\Delta_e$$

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

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

และเวกเตอร์เกรเดียนต์ (Gradient vector : gv)

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

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

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

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

$$[K^{(e)}] = \int_{\Delta_e} [B]^T [D] [B] d\Delta_e + \int_{\Delta_e} G [N]^T [N] d\Delta_e$$

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

สำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ งานวิจัยนี้เลือกกริดรูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อในการคำนวณ ดังนั้นค่า ϕ ในรูปสามเหลี่ยมจึงสามารถกำหนดได้เป็น

$$\phi^{(e)} = [N_i \quad N_j \quad N_k] \{\Phi^{(e)}\} \quad (2-30)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} N_i &= \frac{1}{2\Delta_e}(a_i + b_i x + c_i y) \\ N_j &= \frac{1}{2\Delta_e}(a_j + b_j x + c_j y) \\ N_k &= \frac{1}{2\Delta_e}(a_k + b_k x + c_k y) \end{aligned} \quad (2-31)$$

และจะได้เวกเตอร์เกรเดียนต์สำหรับอติเมาน์นี้ เป็น

$$\{gv\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_j}{\partial x} & \frac{\partial N_k}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_j}{\partial y} & \frac{\partial N_k}{\partial y} \end{bmatrix} \{\Phi^{(e)}\} \quad (2-32)$$

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

$$\begin{aligned} \{gv\} &= \frac{1}{2\Delta_e} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix} \{\Phi^{(e)}\} = [B]\{\Phi^{(e)}\} \\ [B] &= \frac{1}{2\Delta_e} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-33)$$

จากสมการที่ (2-29) จะสังเกตเห็นได้ว่า

$$[K_D^{(e)}] = \int_{\Delta_e} [B]^T [D] [B] d\Delta_e$$

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

$$[K_D^{(e)}] = [B]^T [D] [B] \int_{\Delta_e} d\Delta_e$$

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

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

$$[K_D^{(e)}] = \begin{bmatrix} b_i & c_i \\ b_j & c_j \\ b_k & c_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_x & 0 \\ 0 & D_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix} \Delta_e \left(\frac{1}{2\Delta_e} \right) \left(\frac{1}{2\Delta_e} \right)$$

$$[K_D^{(e)}] = \begin{bmatrix} D_x b_i & D_y c_i \\ D_x b_j & D_y c_j \\ D_x b_k & D_y c_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix} \left(\frac{1}{4\Delta_e} \right)$$

$$[K_D^{(e)}] = \begin{bmatrix} D_x b_i^2 + D_y c_i^2 & D_x b_i b_j + D_y c_i c_j & D_x b_i b_k + D_y c_i c_k \\ D_x b_i b_j + D_y c_i c_j & D_x b_j^2 + D_y c_j^2 & D_x b_j b_k + D_y c_j c_k \\ D_x b_k b_i + D_y c_k c_i & D_x b_k b_j + D_y c_k c_j & D_x b_k^2 + D_y c_k^2 \end{bmatrix} \left(\frac{1}{4\Delta_e} \right)$$

$$[K_D^{(e)}] = \frac{D_x}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} b_i^2 & b_i b_j & b_i b_k \\ b_i b_j & b_j^2 & b_j b_k \\ b_i b_k & b_k b_j & b_k^2 \end{bmatrix} + \frac{D_y}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} c_i^2 & c_i c_j & c_i c_k \\ c_i c_j & c_j^2 & c_j c_k \\ c_i c_k & c_k c_j & c_k^2 \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

จากสมการที่ (2-29) ถ้ากำหนดให้ G เป็นค่าคงที่ ภายในแต่ละอีลิเมนต์จะได้อ

$$[K_G^{(e)}] = \int_{\Delta_e} G [N]^T [N] d\Delta_e$$

$$= G \int_{\Delta_e} \begin{bmatrix} N_i \\ N_j \\ N_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_i & N_j & N_k \end{bmatrix} d\Delta_e$$

$$= G \int_{\Delta_e} \begin{bmatrix} N_i^2 & N_i N_j & N_i N_k \\ N_j N_i & N_j^2 & N_j N_k \\ N_i N_k & N_j N_k & N_k^2 \end{bmatrix} d\Delta_e \quad (2-36)$$

ใช้สูตรเชิงตัวประกอบ (Factorial formula) ในการประมาณการอินทิเกรตตลอด ปริมาตรดังสมการที่ (2-37) โดยที่ $N_i = L_1$ $N_j = L_2$ และ $N_k = L_3$ จะได้อ

$$\int_{\Delta_e} L_1^a L_2^b L_3^c d\Delta_e = \frac{a!b!c!}{(a+b+c+2)!} 2\Delta_e \quad (2-37)$$

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

$$\begin{aligned} \int_{\Delta_e} L_1^2 d\Delta_e &= \frac{2!0!0!}{(2+0+0+2)!} 2\Delta_e \\ &= \frac{4\Delta_e}{4!} = \frac{2\Delta_e}{12} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \int_{\Delta_e} L_1^1 L_2^1 d\Delta_e &= \frac{1!1!0!}{(1+1+0+2)!} 2\Delta_e \\ &= \frac{2\Delta_e}{4!} = \frac{\Delta_e}{12} \end{aligned}$$

ที่จุดต่ออื่น ๆ ของรูปสามเหลี่ยมก็พิจารณาในลักษณะเช่นเดียวกัน ดังนั้นจากสมการที่ (2-36) จะได้

$$\therefore [K_G^{(e)}] = \frac{G\Delta_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2-38)$$

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

$$[K^{(e)}] = \frac{D_x}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} b_i^2 & b_i b_j & b_i b_k \\ b_i b_j & b_j^2 & b_j b_k \\ b_i b_k & b_k b_j & b_k^2 \end{bmatrix} + \frac{D_y}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} c_i^2 & c_i c_j & c_i c_k \\ c_i c_j & c_j^2 & c_j c_k \\ c_i c_k & c_k c_j & c_k^2 \end{bmatrix} + \frac{G\Delta_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

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

$$\{f^{(e)}\} = \int_{\Delta_e} Q[N]^T d\Delta_e$$

$$\{f^{(e)}\}_e = Q \int_{\Delta_e} \begin{bmatrix} N_i \\ N_j \\ N_k \end{bmatrix} d\Delta_e$$

ใช้สูตรเชิงตัวประกอบในการประมาณการอินทิเกรตตลอดพื้นที่ดังสมการที่ (2-37) โดยที่ $N_i = L_1$ $N_j = L_2$ และ $N_k = L_3$ และสำหรับกรณีนี้ $Q \neq 0$ จะได้

$$\{f^{(e)}\} = Q \int_{\Delta_e} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} d\Delta_e$$

$$\{f^{(e)}\} = \frac{Q\Delta_e}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-40)$$

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

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

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

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

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

$$0 = [K^{(e)}]\{\Phi^{(e)}\} - \frac{Q\Delta_e}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-42)$$

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

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

โดยที่

$$[K^{(e)}] = \frac{1}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} b_i^2 & b_i b_j & b_i b_k \\ b_i b_j & b_j^2 & b_j b_k \\ b_i b_k & b_j b_k & b_k^2 \end{bmatrix} + \frac{1}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} c_i^2 & c_i c_j & c_i c_k \\ c_i c_j & c_j^2 & c_j c_k \\ c_i c_k & c_j c_k & c_k^2 \end{bmatrix} - \frac{(-\mu\epsilon\omega^2 + j\mu\sigma\omega)\Delta_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาปัญหาสนามแม่เหล็กแบบ 2 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

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

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

เมื่อ E คือ ค่าสนามไฟฟ้าที่ไม่ทราบค่า ณ ตำแหน่งโนดต่าง ๆ

ในทำนองเดียวกันจะได้สมการรวมสำหรับการจำลองผลค่าสนามแม่เหล็กของงานวิจัยนี้ในรูปสมการเชิงเส้น คือ

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

เมื่อ H คือ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ไม่ทราบค่า ณ ตำแหน่งโนดต่าง ๆ

2.3.5 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาผลเฉลย

สำหรับขั้นตอนการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตในงานวิจัยนี้จะมีทั้งหมดอยู่สองบริเวณที่กำหนดเงื่อนไขค่าขอบ คือ บริเวณขอบตัวนำของสายส่งและพื้นดิน ซึ่งค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ป้อนให้กับระบบบริเวณขอบของตัวนำสามารถคำนวณได้จาก พิทักษ์ ปิ่นอนงค์ (2545) โดยสิ่งที่ต้องทราบสำหรับใช้คำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบริเวณขอบของตัวนำ คือ ขนาดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำ ระยะห่างระหว่างตัวนำ รัศมีตัวนำ ค่าความสูงระหว่างตัวนำกับพื้นดินและค่าพิกัดที่ต้องการคำนวณ โดยค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งซึ่งจะขึ้นอยู่กับผู้ใช้ไฟ (load current) ในขณะนั้น โดยทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ได้พิจารณาที่ภาระในการจ่ายโหลดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 3.15 kA ต่อเฟส (พิทักษ์ ปิ่นอนงค์, 2545) และสมมติให้เป็นการจ่ายโหลดสมดุล เพราะในทางปฏิบัติจะมีการเปลี่ยนแปลงในส่วนนี้น้อยมาก ส่วนค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบริเวณพื้นดินและสายดินเหนือศีรษะถูกกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์

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

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

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

ในการทำงานเดียวกันก็สามารถหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ณ โหนดต่าง ๆ ได้เป็น

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

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

2.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ประกอบกับคำนึงถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ทางไฟฟ้าของวัสดุที่แตกต่างกันในระบบ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะปรากฏอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง การประยุกต์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาลอริคิน รายละเอียดต่างๆ ในบทนี้ จะนำไปสู่การพัฒนาโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้เป็นโปรแกรมจำลองผลระบบที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 บทนำ

การจำลองผลของงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ในการป้องกันอันตรายจากผลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในระบบ ภายในบทที่ 3 จึงได้กล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่ใช้ในการจำลองผลและอธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ เพื่อให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติของงานวิจัยนี้ได้ใช้การสร้างกริดจากกล่องเครื่องมือสำเร็จรูปที่ชื่อว่า PDETOOL ของโปรแกรม MATLAB™ ซึ่งใช้กริดรูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อ โดยได้ดำเนินการประมวลผลให้ทำงานบนพื้นฐานการใช้งานของ MATLAB™

3.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล

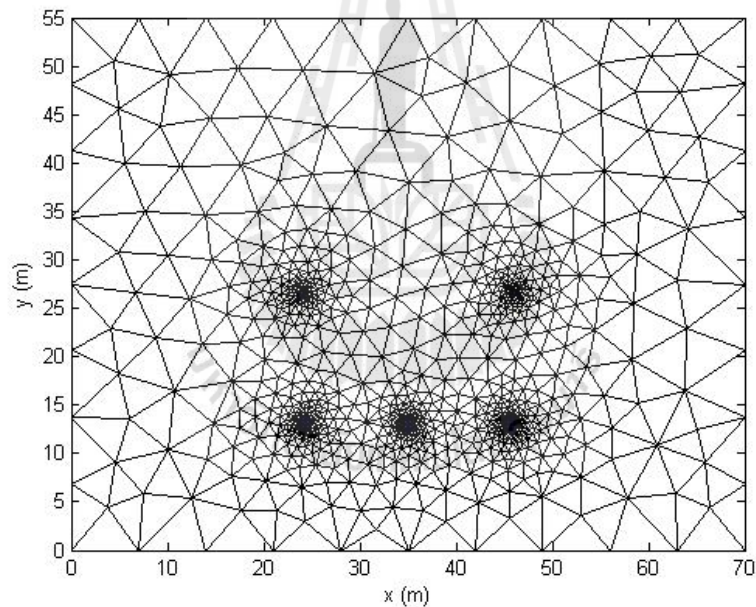
การคำนวณค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายใต้ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถดำเนินการคำนวณตามขั้นตอนภายในโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลที่จะได้กล่าวถึงต่อไปนี้ งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการสร้างกริดด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อนำข้อมูลของโนดและเอลิเมนต์มาพัฒนาต่อด้วยโปรแกรม MATLAB™ ที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง โดยอธิบายถึงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลแบบ 2 มิติได้ดังนี้

3.2.1 โปรแกรมสร้างกริด

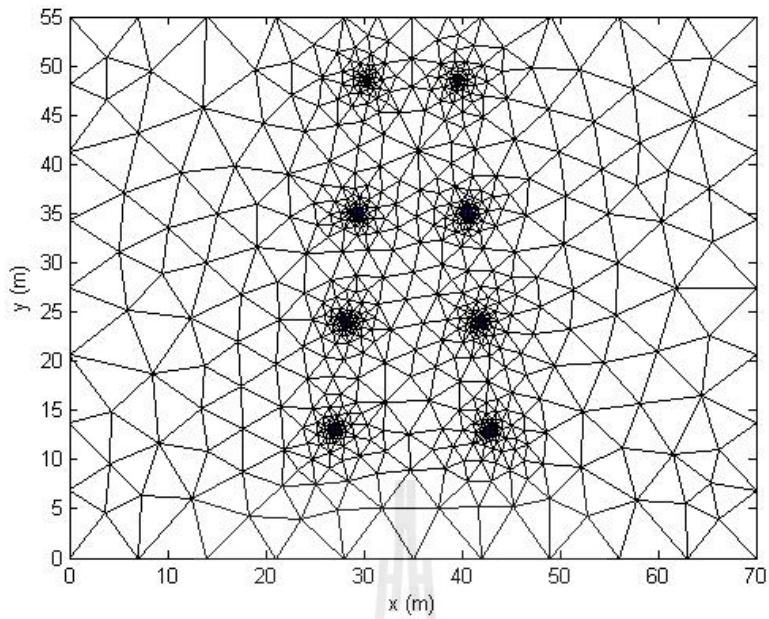
โปรแกรมการสร้างกริดในงานวิจัยนี้ จะใช้การสร้างกริดจากกล่องเครื่องมือสำเร็จรูปที่ชื่อว่า PDETOOL ของโปรแกรม MATLAB™ ซึ่งสามารถสร้างกริดได้เฉพาะปัญหาแบบ 2 มิติ เท่านั้น โดยสามารถเลือกความละเอียดของกริดให้เหมาะสมกับระบบได้ จากนั้นจึงนำข้อมูลของการสร้างกริดที่จำเป็นมาพัฒนาเป็นโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป ข้อมูลที่ได้จากการสร้างกริดได้แก่ ข้อมูลบอกระยะพิกัดในแนวแกน x และ y ข้อมูลบอกหมายเลขโนด ข้อมูลบอกหมายเลขเอลิเมนต์ ข้อมูลบอกหมายเลขที่แบ่งชนิดของวัสดุในระบบ และข้อมูลบอกหมายเลขของขอบเขตชั้นงานเพื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ส่วนข้อจำกัดของกล่องเครื่องมือสำเร็จรูปนี้คือ

ไม่สามารถระบุค่าเงื่อนไขขอบเขตให้กับระบบที่มีหลากหลายเนื้อวัสดุในชั้นเดียวกันได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำประโยชน์ของกล่องเครื่องมือนี้มาเพื่อช่วยในการสร้างกริดแต่เพียงเท่านั้น ส่วนขั้นตอนของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อื่น ๆ อันได้แก่ การสร้างสมการของแต่ละเอลิเมนต์ การสร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขต และการแก้สมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าผลเฉลยนั้น จะทำการพัฒนาด้วยโปรแกรม MATLAB ที่ประดิษฐ์ขึ้นเองเพื่อจำลองผลต่อไป

งานวิจัยระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV นี้ ได้แบ่งพื้นที่ที่ศึกษาออกเป็นพื้นที่ย่อย ๆ ได้แก่ พื้นที่ที่เป็นตัวนำและพื้นที่ที่เป็นอากาศด้วยเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อสำหรับขอบเขตของระบบที่ศึกษาทั้งเมื่อพิจารณาสายส่งวงจรเดี่ยวและสายส่งวงจรร่วมได้กำหนดพื้นที่ของปัญหาให้มีความกว้าง 70 เมตร และสูงจากพื้นดิน 55 เมตร ซึ่งเป็นพื้นที่ของปัญหาที่มีความเหมาะสมต่องานวิจัย สำหรับกริดแบบ 2 มิติ ของปัญหาในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ทั้งสายส่งวงจรเดี่ยวและสายส่งวงจรร่วม สามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 3.1



ก) การแบ่งเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมของสายส่งวงจรเดี่ยว

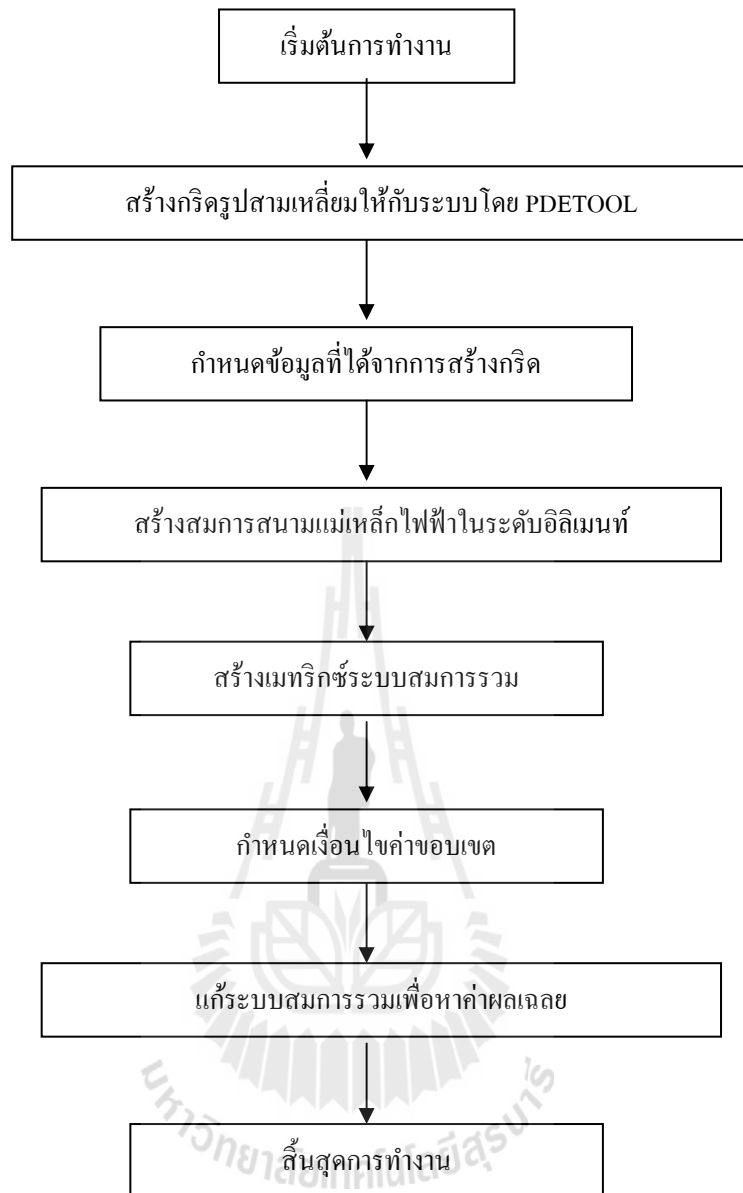


ข) การแบ่งอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมของสายส่งวงจรคู่

รูปที่ 3.1 การแบ่งอิลิเมนต์ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV

3.2.2 โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ในขั้นตอนนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นมาเพื่อจำลองผลค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบ 2 มิติ โดยข้อมูลที่จำเป็นในการประดิษฐ์โปรแกรมนั้นได้จากในหัวข้อ 3.2.1 ที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

จากแผนภูมิในรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงโครงสร้างโปรแกรมจำลองผลของระบบแบบ 2 มิติ เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงหน้าที่ของโปรแกรมแต่ละขั้นตอนจะได้อธิบายถึงรายละเอียดหน้าที่ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนการกำหนดข้อมูลที่ได้จากการสร้างกริด : ขั้นตอนนี้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะรับค่าข้อมูลอินพุตซึ่งแสดงถึงลักษณะของ โหนดและอีลิเมนต์จากโปรแกรมการสร้างกริด PDETOOL ซึ่งรายละเอียดของข้อมูลประกอบด้วย จำนวนและตำแหน่งของ โหนด หมายเลขโหนด ที่ประกอบขึ้นเป็นอีลิเมนต์ จำนวนและหมายเลขของอีลิเมนต์ เป็นต้น

ขั้นตอนการสร้างสมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระดับอิลิเมนต์ : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะสร้างสมการอิลิเมนต์เมทริกซ์ในรูปแบบของสามเหลี่ยมสามจุดต่อเมื่อพิจารณาปัญหาแบบ 2 มิติ ของทุก ๆ อิลิเมนต์ เนื่องจากภายในระบบมีชิ้นงานที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันอยู่ 2 ชนิด คือ อากาศ และสายส่งตัวนำ ซึ่งวัตถุทั้งสองมีค่าคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นการสร้างสมการอิลิเมนต์เมทริกซ์ของแต่ละอิลิเมนต์จะต้องคำนึงถึงค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัตถุที่เกี่ยวข้องในแต่ละอิลิเมนต์นั้น ๆ ด้วย

ขั้นตอนการสร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะทำหน้าที่รวมสมการของอิลิเมนต์ย่อยเข้าเป็นเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวม ซึ่งหากแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ทั้งหมด n โหนดจะก่อให้เกิดเมทริกซ์ระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการทั้งสิ้น n สมการ

ขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะทำหน้าที่ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตก่อนทำการแก้ระบบสมการรวม โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ที่ผ่านมา

ขั้นตอนการแก้ระบบสมการรวมเพื่อหาค่าผลเฉลย : ในขั้นตอนสุดท้ายนี้ โปรแกรมจะทำการแก้ระบบสมการรวมซึ่งเป็นสมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าผลเฉลยของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประจำโหนดโดยการเลือกใช้ระเบียบวิธีการทำเมทริกซ์ผกผัน

3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล

งานวิจัยระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV นี้ มีความแตกต่างกันของเนื้อวัสดุที่มีอยู่ภายในระบบ เมื่อมีความแตกต่างกันระหว่างวัสดุเกิดขึ้น นั้นหมายถึงสมการของระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์จะต้องเกิดการเปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ระบบมีความถี่ 50 Hz และสมมติให้สายส่งทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่เป็นสายเปลือย (bare wire) ทำจากอะลูมิเนียมแกนเหล็ก (Aluminum Conductor Steel Reinforced: ACSR) ซึ่งมีสภาพนำทางไฟฟ้า (σ) = 0.8×10^7 S/m ความซาบซึมสัมพัทธ์ทางแม่เหล็ก (μ_r) = 300 โดยความซาบซึมทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m และค่าไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) = 3.5 โดยไดอิเล็กทริกของอากาศ (ϵ_0) = 8.854×10^{-12} F/m (Hayt and Buck, 2006)

3.4 สรุป

บทที่ 3 เป็นการอธิบายโปรแกรมจำลองผลเพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบ 2 มิติ ซึ่งโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถ

แสดงได้ด้วยแผนภูมิดังรูปที่ 3.2 และ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในบทนี้จะนำไปสู่การจำลองผลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ ที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 4 ต่อไป



บทที่ 4

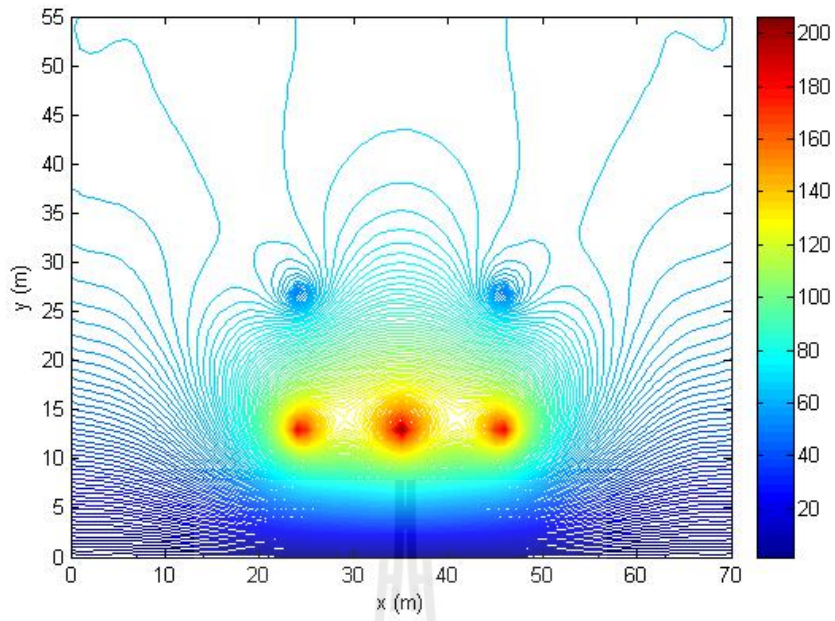
ผลการจำลองสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กพร้อมวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

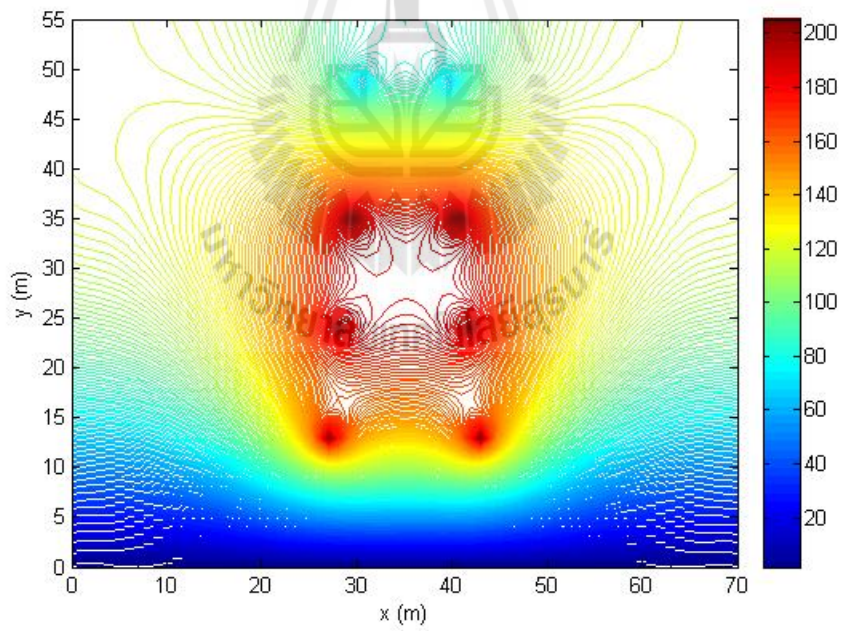
ในบทที่ 4 นี้จะนำเสนอผลการจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของระบบสายส่งไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ เพื่อศึกษาถึงผลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่อาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ที่มีการสัญจรไปมาในระดับพื้นดินข้างล่าง โดยทำการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ทั้งสายส่งวงจรเดี่ยวและสายส่งวงจรคู่ ซึ่งในการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ใช้ MATLAB ในการพัฒนาโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับคำนวณการกระจายตัว พร้อมแสดงผลทางกราฟิกของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

4.2 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าพร้อมวิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อมนุษย์ได้สายส่ง

การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ได้ใช้ MATLAB ในการพัฒนาโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับคำนวณการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า พร้อมแสดงผลทางกราฟิกของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยการพล็อตเส้นโครงร่าง (contour) ค่าขนาดของสนามไฟฟ้าที่กระจายตัวตลอดพื้นที่หน้าตัดที่ศึกษา เมื่อพิจารณาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



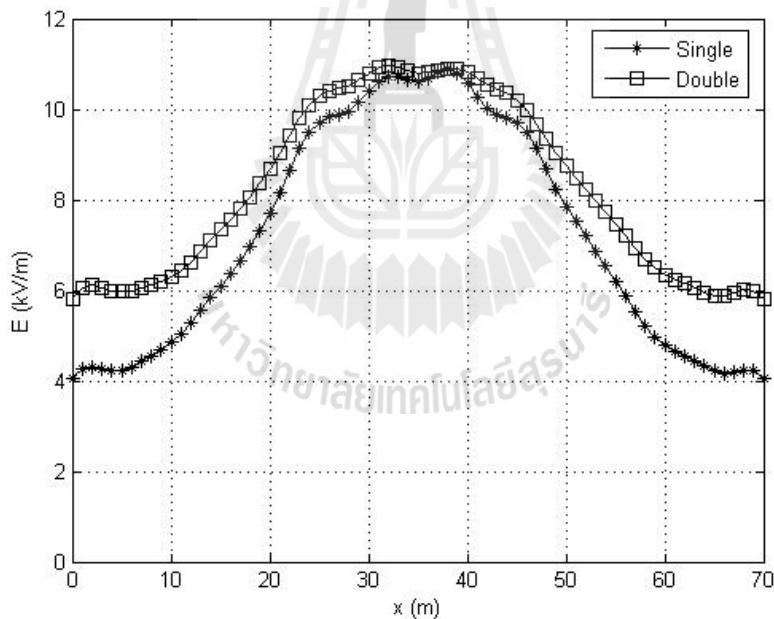
ก) ผลของสนามไฟฟ้า (kV/m) ของสายส่งวงจรเดียว



ข) ผลของสนามไฟฟ้า (kV/m) ของของสายส่งวงจรถู

รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV

จากรูปการคอนทัวร์ค่าขนาดของสนามไฟฟ้าที่วงจรถั่วและวงจรถั่วที่ปรากฏจะสังเกตเห็นว่า ที่ตำแหน่งตัวนำของสายส่งจะมีค่าสนามไฟฟ้าในปริมาณสูง และจะมีค่าน้อยลงเมื่อระยะห่างจาก ตำแหน่งตัวนำมีค่ามากขึ้น โดยค่าสนามไฟฟ้าจะมีค่าน้อยที่สุดที่ตรงบริเวณพื้นดิน เมื่อพิจารณา สนามไฟฟ้าที่กระจายตัวออกไปทางด้านซ้ายและขวาด้านละ 35 m จากตำแหน่งบริเวณกลางแนวสาย ส่งไฟฟ้า (บริเวณกึ่งกลางรูป) การกระจายตัวจะมีความสมดุลตลอดทั้งพื้นที่ศึกษา โดยกรณีที่พิจารณา สายส่งวงจรถั่ว ค่าขนาดของสนามไฟฟ้าที่กระจายตัวตลอดสิ่งแวดล้อมบริเวณนั้นจะมีค่าสูงกว่ากรณีที่ พิจารณาสายส่งวงจรถั่ว และเมื่อพิจารณาเฉพาะเจาะจงที่ความสูงจากระดับพื้นดิน 1 m ($y = 1$ m) ซึ่งเป็นบริเวณที่บุคลากรทำงานอยู่หรือเป็นบริเวณที่มนุษย์มีการสัญจรไปมา จะได้ผลลัพธ์ค่า สนามไฟฟ้าที่วงจรถั่วและวงจรถั่วแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจากรูปที่ 4.2 จะสังเกตเห็นว่า กราฟ สนามไฟฟ้าที่วงจรถั่วและวงจรถั่วจะมีลักษณะเป็นเส้น โค้งปกติ (normal curve) โดยจะมีค่าสูงสุด ที่ตำแหน่งบริเวณกลางแนวสายส่งไฟฟ้า เพราะที่ตำแหน่งนี้จะมีการเสริมกันของสนามไฟฟ้ามาก ที่สุด และจะมีค่าลดลงเมื่อมีระยะห่างออกไปจากแนวสายส่งทั้งซ้ายและขวา



รูปที่ 4.2 ค่าสนามไฟฟ้าที่ความสูงจากระดับพื้นดิน 1 m

ตารางที่ 4.1 เป็นผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตลอดระยะทาง x เมื่อ พิจารณาสายส่งวงจรถั่วและวงจรถั่วที่ความสูงจากระดับพื้นดิน 1 m ที่บุคลากรทำงานอยู่ โดยค่า สนามไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดระยะทาง x ของสายส่งวงจรถั่วและวงจรถั่วเมื่อพิจารณาความสูงของสายส่ง ที่ตำแหน่งตงห้องข้าง (midspan) จะมีค่าเท่ากับ 7.19 kV/m และ 8.23 kV/m ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อย

กว่าระดับของสนามไฟฟ้าที่เป็นอันตรายต่อบุคลากรที่ทำงานอยู่ด้านล่าง ที่ถูกกำหนดโดย International Commission of Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP, 1998) โดย ICNIRP ได้กำหนดระดับของสนามไฟฟ้าที่ปลอดภัยต่อมนุษย์ในสถานประกอบการที่อยู่ตลอดชั่วโมงการทำงาน ให้มีค่าสนามไฟฟ้าได้ไม่เกิน 10 kV/m และตารางที่ 4.2 เป็นการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้าที่ความสูงระดับต่างๆ เมื่อพิจารณาสายส่งวงจรเดี่ยวและสายส่งวงจรรู ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณาที่ความสูงจากพื้นดินในระดับเดียวกันสายส่งวงจรรูจะมีปริมาณสนามไฟฟ้าสูงกว่าสายส่งวงจรเดี่ยว

ตารางที่ 4.1 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ความสูงจากระดับพื้นดิน 1 m

x (m)	วงจรเดี่ยว (kV/m)	วงจรรู (kV/m)
1	4.07	5.82
2	4.28	6.07
3	4.31	6.11
4	4.26	6.06
5	4.21	6.00
6	4.23	5.97
7	4.31	6.00
8	4.43	6.05
9	4.55	6.11
10	4.69	6.18
11	4.85	6.28
12	5.05	6.43
13	5.29	6.63
14	5.56	6.87
15	5.84	7.12
16	6.10	7.35
17	6.36	7.57
18	6.65	7.81
19	6.96	8.07
20	7.32	8.36
21	7.72	8.67

ตารางที่ 4.1 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ความสูงจากระดับพื้นดิน 1 m (ต่อ)

x (m)	วงจรเดี่ยว (kV/m)	วงจรรู (kV/m)
22	8.17	9.03
23	8.67	9.42
24	9.13	9.79
25	9.50	10.10
26	9.72	10.30
27	9.83	10.41
28	9.87	10.46
29	9.96	10.51
30	10.16	10.65
31	10.41	10.81
32	10.61	10.92
33	10.71	10.97
34	10.71	10.94
35	10.64	10.86
36	10.60	10.80
37	10.69	10.82
38	10.82	10.87
39	10.88	10.91
40	10.80	10.89
41	10.58	10.82
42	10.27	10.68
43	10.01	10.55
44	9.88	10.45
45	9.81	10.36
46	9.70	10.20
47	9.48	9.97
48	9.13	9.68
49	8.69	9.35

ตารางที่ 4.1 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ความสูงจากระดับพื้นดิน 1 m (ต่อ)

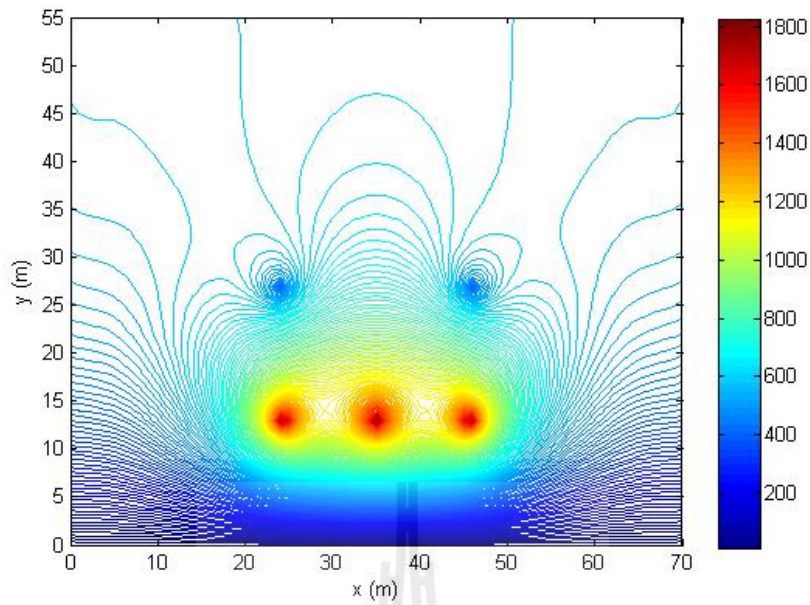
x (m)	วงจรเดี่ยว (kV/m)	วงจรรู (kV/m)
50	8.23	9.03
51	7.85	8.74
52	7.52	8.49
53	7.20	8.24
54	6.87	7.99
55	6.53	7.72
56	6.20	7.46
57	5.86	7.19
58	5.53	6.93
59	5.23	6.69
60	4.98	6.50
61	4.79	6.35
62	4.65	6.24
63	4.55	6.15
64	4.44	6.06
65	4.32	5.96
66	4.22	5.89
67	4.17	5.88
68	4.18	5.93
69	4.23	6.00
70	4.22	6.00
ค่าเฉลี่ย	7.19	8.23

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้าที่ความสูงระดับต่างๆ จากพื้นดิน

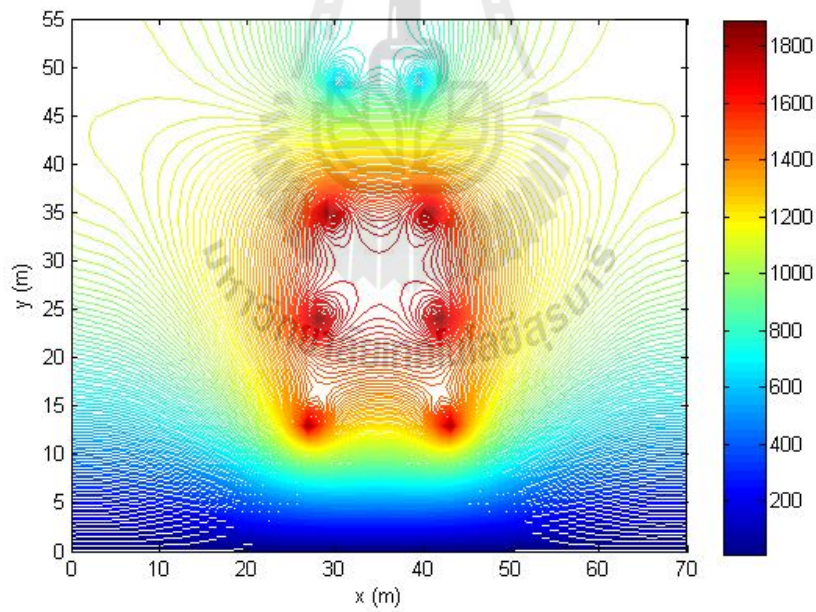
y (m)	วงจรเดี่ยว (kV/m)	วงจรรู (kV/m)
1	7.19	8.23
5	35.85	41.23
10	71.37	82.15
15	88.70	112.57
20	79.28	127.57
25	69.69	139.69
30	66.53	142.66
35	66.49	144.75
40	66.50	131.71
45	66.51	118.04
50	66.51	108.58
55	66.53	108.32

4.3 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กพร้อมวิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อมนุษย์ได้สายส่ง

การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ได้ใช้ MATLAB ในการพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์สำหรับคำนวณการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก พร้อมแสดงผลทางกราฟิกของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยการพล็อตเส้นโครงร่าง (contour) ค่าขนาดของสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวตลอดพื้นที่หน้าตัดที่ศึกษา เมื่อพิจารณาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าวงจรเดี่ยว และวงจรรู สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



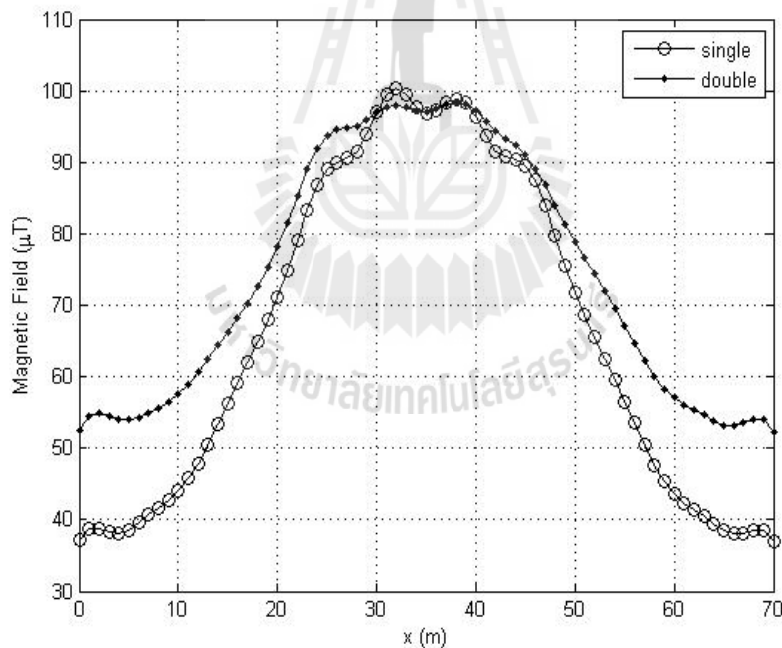
ก) ผลของสนามแม่เหล็ก (μT) ของสายส่งวงจรเดี่ยว



ข) ผลของสนามแม่เหล็ก (μT) ของสายส่งวงจรคู่

รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV

จากรูปการคอนทัวร์ค่าขนาดของสนามแม่เหล็กทั้งวงจรถั่วและวงจรถั่วที่ปรากฏจะสังเกตเห็นว่า ที่ตำแหน่งตัวนำของสายส่งจะมีค่าสนามแม่เหล็กในปริมาณสูง และจะมีค่าน้อยลงเมื่อระยะห่างจากตำแหน่งตัวนำมีค่ามากขึ้น โดยค่าสนามแม่เหล็กจะมีค่าน้อยที่สุดที่ตรงบริเวณพื้นดิน เมื่อพิจารณาสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวออกไปทางด้านซ้ายและขวาด้านละ 35 m จากตำแหน่งบริเวณกลางแนวสายส่งไฟฟ้า (บริเวณกึ่งกลางรูป) การกระจายตัวจะมีความสมมูลตลอดทั้งพื้นที่ศึกษา โดยกรณีที่พิจารณาสายส่งวงจรถั่ว ค่าขนาดของสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวตลอดสิ่งแวดล้อมบริเวณนั้นจะมีค่าสูงกว่ากรณีที่พิจารณาสายส่งวงจรถั่ว และเมื่อพิจารณาเฉพาะเจาะจงที่ความสูงจากระดับพื้นดิน 1 m ($y = 1$ m) ซึ่งเป็นบริเวณที่บุคลากรทำงานอยู่หรือเป็นบริเวณที่มนุษย์มีการสัญจรไปมา จะได้ผลลัพธ์ค่าสนามแม่เหล็กทั้งวงจรถั่วและวงจรถั่วแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งจากรูปที่ 4.4 จะสังเกตเห็นว่า กราฟสนามแม่เหล็กทั้งวงจรถั่วและวงจรถั่วจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งปกติ (normal curve) โดยจะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งบริเวณกลางแนวสายส่งไฟฟ้า เพราะที่ตำแหน่งนี้จะมีการเสริมกันของสนามแม่เหล็กมากที่สุด และจะมีค่าลดลงเมื่อมีระยะห่างออกไปจากแนวสายส่งทั้งซ้ายและขวา



รูปที่ 4.4 ค่าสนามแม่เหล็กที่ความสูงจากระดับพื้นดิน 1 m

ตารางที่ 4.3 เป็นผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กตลอดระยะทาง x เมื่อพิจารณาสายส่งวงจรถั่วและวงจรถั่วที่ความสูงจากระดับพื้นดิน 1 m ที่บุคลากรทำงานอยู่ โดยค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยตลอดระยะทาง x ของสายส่งวงจรถั่วและวงจรถั่วเมื่อพิจารณาความสูงของสาย

สิ่งที่ตำแหน่งตงท้องซ้าง (midspan) และพิจารณาภาระในการจ่ายโหลดสูงสุด จะมีค่าเท่ากับ 65.88 μT และ 74.18 μT ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับของสนามแม่เหล็กที่เป็นอันตรายต่อบุคลากรที่ทำงานอยู่ด้านล่าง ที่ถูกกำหนดโดย International Commission of Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP, 1998) โดย ICNIRP ได้กำหนดระดับของสนามแม่เหล็กที่ปลอดภัยต่อมนุษย์ในบริเวณสาธารณะทั่วไป (general public) ที่อยู่ตลอดทั้งวันให้มีค่าสนามแม่เหล็กได้ไม่เกิน 100 μT และในสถานประกอบการที่อยู่ตลอดชั่วโมงการทำงานให้มีค่าสนามแม่เหล็กได้ไม่เกิน 500 μT และตารางที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของสนามแม่เหล็กที่ความสูงระดับต่างๆ เมื่อพิจารณาสายส่งวงจรเดี่ยวและสายส่งวงจรคู่ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณาที่ความสูงจากพื้นดินในระดับเดียวกันสายส่งวงจรคู่จะมีปริมาณสนามไฟฟ้าสูงกว่าสายส่งวงจรเดี่ยว ทั้งนี้เพราะสายส่งวงจรคู่มีปริมาณตัวนำมากกว่าสายส่งวงจรเดี่ยว

ตารางที่ 4.3 การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ความสูงจากระดับพื้นดิน 1 m

x (m)	วงจรเดี่ยว (μT)	วงจรคู่ (μT)
1	37.11	52.54
2	38.67	54.57
3	38.74	54.84
4	38.34	54.42
5	38.18	54.00
6	38.60	53.96
7	39.56	54.34
8	40.72	54.98
9	41.74	55.69
10	42.77	56.52
11	44.06	57.59
12	45.76	58.94
13	47.95	60.60
14	50.60	62.52
15	53.46	64.49
16	56.25	66.34
17	59.04	68.23

ตารางที่ 4.3 การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ความสูงจากระดับพื้นดิน 1 m (ต่อ)

x (m)	วงจรเดี่ยว (μT)	วงจรรู (μT)
18	61.92	70.33
19	64.88	72.69
20	67.91	75.33
21	71.14	78.25
22	74.83	81.59
23	79.13	85.38
24	83.39	89.00
25	86.83	91.85
26	89.02	93.68
27	90.05	94.54
28	90.52	94.75
29	91.50	94.99
30	93.94	95.91
31	96.97	97.02
32	99.43	97.78
33	100.33	98.00
34	99.47	97.74
35	97.81	97.24
36	97.17	97.41
37	98.28	98.04
38	98.87	98.36
39	98.28	98.10
40	96.38	97.20
41	93.77	95.79
42	91.59	94.35
43	90.74	93.35
44	90.40	92.39
45	89.49	91.02

ตารางที่ 4.3 การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ความสูงจากระดับพื้นดิน 1 m (ต่อ)

x (m)	วงจรรเดียวน (μT)	วงจรรวม (μT)
46	87.40	89.13
47	84.04	86.75
48	79.83	84.04
49	75.54	81.33
50	71.87	78.94
51	68.64	76.71
52	65.57	74.44
53	62.54	72.07
54	59.54	69.63
55	56.58	67.17
56	53.59	64.72
57	50.54	62.29
58	47.72	60.11
59	45.41	58.36
60	43.66	57.04
61	42.39	56.10
62	41.44	55.37
63	40.51	54.64
64	39.40	53.81
65	38.46	53.18
66	38.03	53.07
67	38.18	53.51
68	38.57	54.12
69	38.54	54.11
70	37.03	52.37
ค่าเฉลี่ย	65.88	74.18

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยของสนามแม่เหล็กที่ความสูงระดับต่างๆ จากพื้นดิน

y (m)	วงจรเดี่ยว (μT)	วงจรรู (μT)
1	66	74
5	327	371
10	652	740
15	810	1016
20	719	1157
25	627	1269
30	596	1288
35	596	1299
40	596	1182
45	596	1061
50	596	978
55	596	977

4.4 สรุป

ในบทที่ 4 นี้ ได้ดำเนินการจำลองผลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่อาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ที่มีการสัญจรไปมาในระดับพื้นดินข้างล่างหรือบุคลากรที่กำลังทำงานอยู่ ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จากผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผลจึงสรุปได้ว่าค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรรู ในระดับความสูงจากพื้นดิน 1 m ซึ่งเป็นบริเวณที่บุคลากรทำงานอยู่หรือเป็นบริเวณที่มนุษย์มีการสัญจรไปมา จะมีค่าไม่เกินระดับของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ ซึ่งถูกกำหนดโดยมาตรฐานของ ICNIRP และเมื่อพิจารณาค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความสูงจากพื้นดินในระดับต่างๆ สายส่งวงจรรูจะมีปริมาณทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงกว่าสายส่งวงจรเดี่ยว

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยและการจำลองผลของค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ทั้งสายส่งวงจรเดี่ยวและสายส่งวงจรคู่ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เพื่อพิจารณาผลกระทบของค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่อาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ที่มีการสัญจรไปมาในระดับพื้นดินข้างล่างหรือบุคลากรที่กำลังทำงานอยู่ การจำลองผลได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ ด้วยโปรแกรม MATLABTM ที่พัฒนาขึ้นเอง พร้อมแสดงผลทางกราฟิกของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

ในบทที่ 2 เป็นขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง และอธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ โดยได้เลือกใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตค้างของกาลเลอร์กิน ส่วนในบทที่ 3 เป็นการอธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยได้กล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล รวมถึงอธิบายโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลซึ่งแสดงได้ดังแผนภูมिरูปที่ 3.2 และในบทที่ 4 ได้นำเสนอผลการจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ เพื่อศึกษาถึงผลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่อาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ที่มีการสัญจรไปมาในระดับพื้นดินข้างล่าง ซึ่งจากผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ ในระดับความสูงจากพื้นดิน 1 m ซึ่งเป็นบริเวณที่บุคลากรทำงานอยู่หรือเป็นบริเวณที่มนุษย์มีการสัญจรไปมา จะมีค่าไม่เกินระดับของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ ซึ่งถูกกำหนดโดยมาตรฐานของ International Commission of Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)

5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต

1. โครงสร้างของระบบทั้งหมดที่ใช้ในการจำลองผล อาทิเช่น ลูกถ้วย, เสาไฟฟ้า และอื่น ๆ ควรมีเข้ามาเพิ่มเติมในระบบ เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่ถูกต้องและชัดเจนมากขึ้น แต่ทั้งนี้ก็เป็นการเพิ่มความยุ่งยากและความซับซ้อนในการพิจารณาตามมา
2. พัฒนาโปรแกรมระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อความเสมือนจริงมากยิ่งขึ้น

3. ศึกษาถึงผลกระทบของการใช้งานโทรศัพท์มือถือที่อาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ที่ใช้งานบริเวณใต้แนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูง



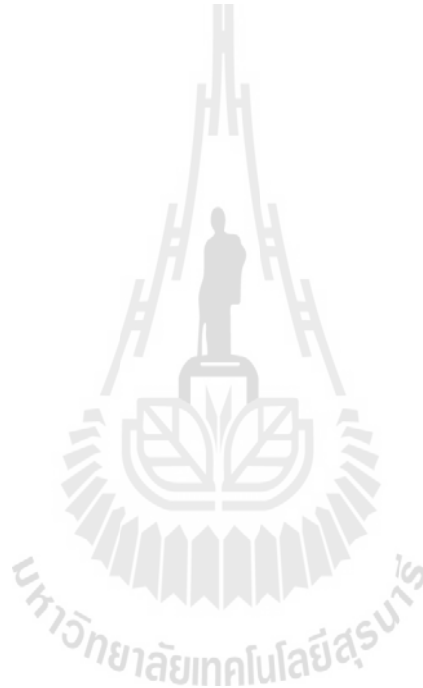
บรรณานุกรม

- ชวลิต คำรงรัตน์. (2533). การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า. กรุงเทพฯ ฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- นิรันดร์ คำประเสริฐ. (2545). วิศวกรรมแม่เหล็กและวิศวกรรมไมโครเวฟ เล่ม2. (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ ฯ: ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2544). ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ ฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เผด็จ เผ่าละอ. (2548). การออกแบบแนวใหม่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อลดการสั่นสะเทือนโดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- พิทักษ์ ปิ่นอนงค์. (2545). การวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อมใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนือพื้นดินและกรณีศึกษาการลดผลกระทบที่เกิดขึ้น. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Chari, M.V.K., and Salon, S.J. (2000). **Numerical Methods in Electromagnetism**. USA: Academic Press.
- Chen, Z., Ney, M. M., and Hofer, 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.
- Du, Y., Cheng, T.C., and Farag, A.S. (1996). Principles of power-frequency magnetic field shielding with flat sheets in a source of long conductors. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**. 38(3): 450-459.
- 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.

- Elhirbawy, 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.
- 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.
- Harrington, R. F., (2001). **Time-harmonic electromagnetic fields**. USA: IEEE Press.
- Hayt, Jr.W.H., and Buck, J.A. (2006). **Engineering electromagnetics (7th edition)**. Singapore: McGraw-Hill.
- Hossam-Eldin, A. A. (2001). Effect of electromagnetic fields from power lines on living organisms. **International Conference on Solid Dielectrics, IEEE**. 438-441.
- International Commission of Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) (1998). Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). **Health Phys**. 74(4): 494-522.
- Iyyuni, G.B., and Sebo, S.A. (1990). Study of transmission line magnetic fields. **Proceedings of the Twenty-Second Annual North American, IEEE Power Symposium**. 222-231.
- 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.
- 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.
- Kim, B.T., Kwon, B.I., and Park, S.C. (1999). Reduction of electromagnetic force harmonics in asynchronous traction motor by adapting the rotor slot number. **IEEE Transactions on Magnetics**. 35(5): 3742-3744.

- 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.
- Li, L., and Yougang, G. (1998). Analysis of magnetic field environment near high voltage transmission lines. **Proceedings of the International Conferences on Communication Technology**. S26-05-1 - S26-05-5.
- Lindberg, L. (1998). Reduction of magnetic fields from electric power and installation lines. **IEE Proceeding Sci, Meas, Technol**. 145(5): 215-221.
- Maruvada, P. S. (1993). Characterization of power frequency magnetic fields in different environments. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 8(2): 598-606.
- Memari, A.R., and Janischewskyj, W. (1996). Mitigation of magnetic field near power lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 11(3): 1577-1586.
- 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., Baishiki, R.S., Abbot, J.R., Conti, R., Frazier, M., Jaffa, K., Niles, G.B., Stewart, J.R., Wong, R., and Zavadil, R.M. (1988). Magnetic fields from electric power lines theory and comparison to measurements. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 3(4): 2127-2136.
- Pettersson, P. (1996). Principles in transmission line magnetic field reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 11(3): 1587-1593.
- Preston, T.W., Reece, A.B.J., and Sangha, P.S. (1988). Induction motor analysis by time-stepping techniques. **IEEE Transactions on Magnetics**. 24(1): 471-474.
- 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.

- 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.
- Wassef, K., Varadan, V.V., and Varadan, V.K. (1998). Magnetic field shielding concepts for power transmission lines. **IEEE Transactions on Magnetics**. 34(3): 649-654.
- Weiner, M., (2001). **Electromagnetic analysis using transmission line variables**. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- 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.



ภาคผนวก

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

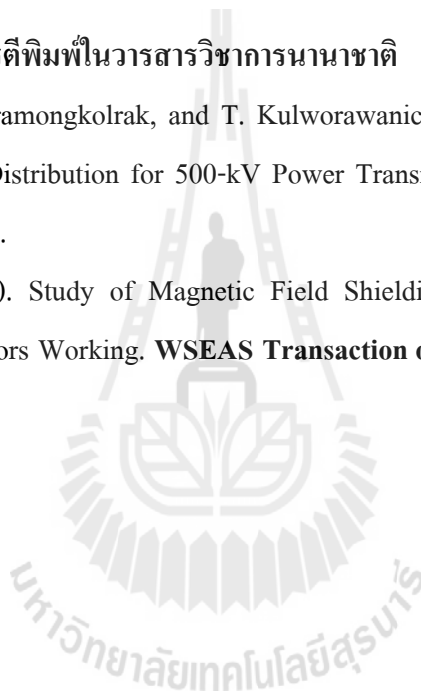
รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ

1. สุกัญญา ทัพศรี, ธนัชชัย กุลวรรวานิชพงษ์, อนันท์ อุ่นศิริไธย์, กิตติ อัดถกิจมงคล และ เผด็จ เผ่าละออ, การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่มีผลต่อสภาพแวดล้อมรอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, ปีที่ 20, ฉบับที่ 4, 2552, หน้า 45-51.

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

1. P. Pao-la-or, A. Isaramongkolrak, and T. Kulworawanichpong. (2010). Finite Element Analysis of Magnetic Field Distribution for 500-kV Power Transmission Systems. **Engineering Letters**, No. 1, Vol. 18, pp 1-9.

2. P. Pao-la-or. (2011). Study of Magnetic Field Shielding Roof of Cabin Electricity Authority Resulting in Operators Working. **WSEAS Transaction on Systems**, No. 6, Vol. 10, pp 163-172.



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 30 เรื่อง จดสิทธิบัตร 1 ผลงาน และ ลิขสิทธิ์โปรแกรม 3 ผลงาน

นางสาวสุกัญญา ทัพศรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ.2548 ภายหลังสำเร็จการศึกษาได้เข้าปฏิบัติงานที่สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัย ในปี พ.ศ.2550 เข้าศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้เป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ทั้งนี้มีความสนใจในด้านการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานระบบไฟฟ้ากำลัง

