

การออกแบบแกนเหล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กสำหรับหม้อแปลงที่มี
การเชื่อมต่อแบบพิเศษในระบบแรงไฟฟ้า



นายอานนท์ อิศรมงคลรักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

**TRANSFORMER CORE DESIGN TO REDUCE CORE
LOSSES FOR SPECIAL CONNECTIONS
TRANSFORMER IN ELECTRIC RAILWAYS SYSTEM**



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Doctor Philosophy in Electrical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2018

การออกแบบแกนเหล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กสำหรับหม้อแปลงที่มี
การเชื่อมต่อแบบพิเศษในระบบรถไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



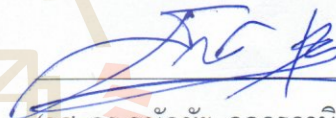
(รศ. ดร. วิจิตร กิณเรศ)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร. เพ็ชร์ เฟ่าละออ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร. ธนัตชัย กุลวรรณิพงษ์)

กรรมการ



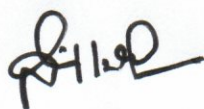
(รศ. ดร. กิรติ ชยะกุลศิริ)

กรรมการ



(รศ. ดร. กฤษณ์ชนม์ กุุมกิตติพิชญ์)

กรรมการ



(ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล





(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อานนท์ อิศรมงคลรักษ์ : การออกแบบแกนเหล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กสำหรับหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษในระบบรถไฟไฟฟ้า (TRANSFORMER CORE DESIGN TO REDUCE CORE LOSSES FOR SPECIAL CONNECTIONS TRANSFORMER IN ELECTRIC RAILWAYS SYSTEM) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ, 233 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของคิกซ์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสองที่มีความสัมพันธ์กับค่าสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษที่ใช้ในระบบรถไฟไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอาศัยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้นจากโปรแกรม MATLAB สำหรับการจำลองผลการกระจายค่าคิกซ์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กที่อยู่ภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยมุ่งเน้นเพื่อออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบรถไฟไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ซึ่งได้นำเสนอทั้งสิ้น 3 รูปแบบคือ การออกแบบรูปร่างแกนเหล็กด้วยวิธีการตัดมุมโค้ง การออกแบบรูปร่างแกนเหล็กด้วยวิธีสร้างแกนโค้งตลอดแนวแกนที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำ และการออกแบบแกนเหล็กด้วยการแทรกสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อนบริเวณรอยต่อแนวเอียงของแกนเหล็ก ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณารูปแบบการเชื่อมต่อแบบพิเศษของหม้อแปลงทั้งสิ้น 3 รูปแบบคือ การเชื่อมต่อแบบวี การเชื่อมต่อแบบสกอตต์และการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ พร้อมทั้งได้พิจารณาหม้อแปลงในขณะที่ทำการจ่ายโหลดที่พิกัด 200% พิกัดและที่สภาวะจ่ายโหลดสูงสุดหลังจากที่หม้อแปลงได้รับการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ซึ่งผลการจำลองจะพิจารณาใน 1 รอบการทำงานที่ประกอบด้วยการสลับคู่เฟสได้แก่ คู่เฟส A-B คู่เฟส B-C และคู่เฟส C-A โดยผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า หม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เป็นรูปแบบการเชื่อมต่อที่มีกำลังสูญเสียในแกนเหล็กน้อยที่สุด และการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กด้วยการสร้างแกนโค้งตลอดแนวแกนที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำเป็นวิธีการออกแบบที่ทำให้กำลังสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าน้อยที่สุด

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

ARNON ISARAMONGKOLRAK : TRANSFORMER CORE DESIGN TO
REDUCE CORE LOSSES FOR SPECIAL CONNECTIONS
TRANSFORMER IN ELECTRIC RAILWAYS SYSTEM. THESIS
ADVISOR : ASSOC. PROF. PADEJ PAO-LA-OR, Ph.D., 233 PP.

SPECIAL CONNECTIONS TRANSFORMER/RAILWAY SYSTEM/CORE
LOSE/CORE DESIGN/3D-FINITE ELEMENT METHOD/MAGNETIC FIELD

This thesis presents the mathematical model of magnetic vector potential in form of the second order partial differential equation which relates to magnetic field of the special connections transformer using in the AC electric railway system. The developed MATLAB program based on 3D finite element method was used for both of the magnetic vector potentials and magnetic fields in core of special connections transformer. This thesis focuses on the designing the core shape of the transformer using the AC electric railway system to reduce the core losses. There are 3 types of special connection are determined in this thesis. First, the core shape with cutting corner to curvature design. Second, creating a curved core along with it without handling the conductor coil design. Finally, inserting a soft magnetic material at the diagonal joints of the core design. Moreover, the thesis has considered the types of special connection in 3 types consisted of V-connection, Scott connection and Le-blanc connection. In addition, analysis the performance of the transformer while supplied the rated load, 200% of full load and peak load with the new core transformer design. The results will be considered in 1 cycle which has the phase sequence, namely, phase A-B, phase B-C and phase C-A. Consequently, the simulation results shown that the transformer with the Scott connection types is the lowest core loss. Therefore, suitable for connection to

reduce the core losses. In addition, the creating a curved core along with it without handling the conductor coil design is the least core loss design.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature _____ *[Signature]*

Advisor's Signature _____ *[Signature]*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้าน

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้ความรู้และสนับสนุนทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการศึกษา รวมทั้งการเผยแพร่ผลงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณอดิศักดิ์-คุณนิศยา-คุณขวัญจิรา อิศรมงคลรักษ์ และ คุณวินัย-คุณสมพาน ประสมกล้า ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ดูแล ห่วงใย และเป็นกำลังใจอย่างใกล้ชิดแก่ผู้วิจัยเสมอมา และขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้กำเนิด ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และดูแลส่งเสริมทางการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

อานนท์ อิศรมงคลรักษ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	4
1.4 ขีดกลางเบื้องต้น.....	4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	5
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ.....	7
2.2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.3 สรุป.....	16
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
3.1 บทนำ.....	17
3.2 หม้อแปลงไฟฟ้า.....	17
3.2.1 การทดสอบแบบลัดวงจร.....	20
3.2.2 การทดสอบแบบเปิดวงจร.....	22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	ระบบรางไฟฟ้าสำหรับรถไฟความเร็วสูง.....	23
3.4	การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบพิเศษในระบบรางไฟฟ้า.....	28
3.4.1	การเชื่อมต่อแบบวี.....	29
3.4.2	การเชื่อมต่อแบบสกอตต์.....	32
3.4.3	การเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์.....	36
3.5	สนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก.....	40
3.6	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก.....	42
3.7	ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์.....	44
3.8	ความสูญเสียในแกนเหล็ก.....	53
3.8.1	ความสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์ซิส.....	53
3.8.2	ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน.....	54
3.9	สรุป.....	56
4	การคำนวณสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ	
4.1	บทนำ.....	57
4.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กแบบ 3 มิติของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	58
4.3	การคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์.....	60
4.3.1	การออกแบบอิลลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา.....	60
4.3.2	ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	65
4.3.3	การสร้างสมการของอิลลิเมนต์.....	66
4.3.4	การประกอบสมการอิลลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ.....	71
4.3.5	การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาค่าผลเฉลย.....	72
4.3.6	การคำนวณค่าตัวแปรอื่นที่ต้องการ.....	73
4.4	สรุป.....	75
5	ผลการจำลองสนามแม่เหล็กและกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า ที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ	
5.1	บทนำ.....	76

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2	โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กแบบ 3 มิติ.....	76
5.2.1	โปรแกรมการสร้างกริด.....	76
5.2.2	โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็ก.....	79
5.3	พารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้จำลองผล.....	82
5.4	ผลการจำลองศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก สนามแม่เหล็กและกำลังงานสูญเสียใน แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษ.....	84
5.4.1	ผลการจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบวี.....	84
5.4.2	ผลการจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์.....	91
5.4.3	ผลการจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์.....	97
5.5	สรุปผล.....	107
6	การออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กหม้อแปลงเพื่อลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก	
6.1	บทนำ.....	108
6.2	การออกแบบแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อลดความสูญเสียในแกนเหล็ก.....	108
6.3	ผลการจำลองศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก สนามแม่เหล็กและกำลังงานสูญเสียใน แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณารูปร่างของแกนเหล็กด้วยวิธี ตัดมุมโค้ง.....	110
6.3.1	ผลการจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบวีเมื่อพิจารณา รูปร่างของแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง.....	110
6.3.2	ผลการจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อพิจารณา รูปร่างของแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง.....	118
6.3.3	ผลการจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ เมื่อพิจารณารูปร่างของแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง.....	125
6.4	การประมวลผลการจำลองพร้อมเปรียบเทียบผล.....	135
6.5	ผลการจำลองศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก สนามแม่เหล็กและกำลังงานสูญเสียใน แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อออกแบบแกนเหล็กด้วยการสร้างความโค้ง ของแกนเหล็กบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกน.....	137

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.6	ผลการจำลองสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก สนามแม่เหล็กและกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อออกแบบแกนเหล็กด้วยการเพิ่มสารแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน.....	150
6.7	สรุป.....	162
7	การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่มุ่งเน้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กเมื่อมีการจ่ายโหลด	
7.1	บทนำ.....	163
7.2	การวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กขณะที่มีการจ่ายโหลด.....	163
7.2.1	การจำลองผลสัคย์เชิงเวกเตอร์เชิงแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กเมื่อหม้อแปลงทำการจ่ายโหลดที่พิกัด.....	166
7.2.2	การจำลองผลสัคย์เชิงเวกเตอร์เชิงแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กเมื่อหม้อแปลงทำการจ่ายโหลดที่ 200% พิกัด.....	174
7.3	การจำลองผลค่าสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กเมื่อหม้อแปลงทำงานในสภาวะจ่ายโหลดสูงสุด.....	184
7.4	สรุป.....	193
8	สรุปและข้อเสนอแนะ	
8.1	สรุป.....	194
8.2	ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต.....	195
	รายการอ้างอิง.....	196
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต.....	202
	ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	207
	ประวัติผู้เขียน.....	233

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
3.1 ระดับแรงดันมาตรฐานการจ่ายไฟฟ้าของระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 25kV.....	24
3.2 ลักษณะข้อมูลของอิทธิพล.....	46
3.3 ลักษณะข้อมูลของจุดต่อ.....	46
5.1 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	83
5.2 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลง สำหรับการเชื่อมต่อแบบวี.....	105
5.3 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลง สำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์.....	106
5.4 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลง สำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์.....	106
6.1 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลง สำหรับการเชื่อมต่อแบบวีเมื่อออกแบบรูปร่างแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง.....	133
6.2 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลง สำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อออกแบบรูปร่างแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง.....	133
6.3 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลง สำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์เมื่อออกแบบรูปร่างแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง.....	134
6.4 เปรียบเทียบคุณลักษณะของแกนหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษ.....	136
6.5 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลง เมื่อออกแบบด้วยการสร้างความโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกน.....	148
6.6 เปรียบเทียบผลการคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงที่ออกแบบด้วย วิธีการตัดมุมโค้งและวิธีการสร้างความโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอด แนวแกน.....	149

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.7 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลง เมื่อเพิ่มสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน.....	159
6.8 เปรียบเทียบผลการคำนวณกำลังสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงที่ออกแบบด้วย วิธีการตัดมุมโค้งและแบบเพิ่มสารแม่เหล็กชนิดอ่อน.....	159
6.9 เปรียบเทียบคุณลักษณะของแกนหม้อแปลงที่มีการออกแบบเพื่อลดกำลังสูญเสีย ในแกนเหล็ก.....	161
7.1 ผลการคำนวณ โหลดทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงของหม้อแปลงที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสีย ที่มีการเชื่อมต่อแบบวีในขณะที่หม้อแปลงมิได้ดำเนินการจ่ายโหลดให้กับรถไฟฟ้.....	164
7.2 ผลการคำนวณ โหลดทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงของหม้อแปลงที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสีย ที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ในขณะที่หม้อแปลงมิได้ดำเนินการจ่ายโหลดให้กับรถไฟฟ้.....	164
7.3 ผลการคำนวณ โหลดทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงของหม้อแปลงที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสีย ที่มีการเชื่อมต่อแบบเลอบลองกัในขณะที่หม้อแปลงมิได้ดำเนินการจ่ายโหลด ให้กับรถไฟฟ้.....	165
7.4 ผลการคำนวณ โหลดทางไฟฟ้าของหม้อแปลงที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสียที่มีการ เชื่อมต่อแบบสกอตต์ในขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดที่พิกัด.....	166
7.5 ผลการคำนวณ โหลดทางไฟฟ้าของหม้อแปลงที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสียที่มีการ เชื่อมต่อแบบสกอตต์ในขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดที่ 200% ของพิกัด.....	174
7.6 ค่าสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็กและค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กของ หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อจ่ายโหลดที่พิกัด.....	183
7.7 ค่าสัคย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็กและค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กของ หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อจ่ายโหลดที่ 200% พิกัด.....	183
7.8 ผลการคำนวณ โหลดทางไฟฟ้าของหม้อแปลงที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสียที่มีการ เชื่อมต่อแบบสกอตต์ในขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดสูงสุดที่พิกัด 400% ของพิกัด.....	184
7.9 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณกำลังสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลง สำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อทำงานอยู่ในสภาวะจ่ายโหลดสูงสุด.....	193

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	การต่อหม้อแปลงกับระบบไฟฟ้ากำลัง 115kV..... 2
3.1	หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดคอร์..... 18
3.2	หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดเชลล์..... 18
3.3	หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 ขดลวด..... 19
3.4	วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้าในทางปฏิบัติ..... 20
3.5	วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้าขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจร..... 21
3.6	วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้าขณะทำการทดสอบแบบเปิดวงจร..... 22
3.7	วงจรสมมูลแบบประมาณขณะทำการทดสอบแบบเปิดวงจร..... 22
3.8	ลักษณะร่างสำหรับรถไฟฟ้ากระแสสลับ..... 23
3.9	การจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้ากระแสสลับ..... 25
3.10	ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้ากระแสสลับ..... 25
3.11	ระบบการจ่ายไฟโดยตรง..... 26
3.12	ระบบการจ่ายไฟผ่านหม้อแปลงบูสเตอร์..... 27
3.13	ระบบการจ่ายไฟผ่านหม้อแปลงออโต..... 27
3.14	วงจรสมมูลนอร์ตัน..... 28
3.15	วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมต่อแบบวิเมื่อด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้า จากคู่เฟส A-B..... 29
3.16	วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมต่อแบบวิเมื่อด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้า จากคู่เฟส B-C..... 30
3.17	วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมต่อแบบวิเมื่อด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้า จากคู่เฟส C-A..... 31
3.18	วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อจุดแท่งกลาง ด้านปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส A..... 32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.19 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อจุดแท็ปกลาง ด้านปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส B.....	34
3.20 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อจุดแท็ปกลาง ด้านปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส C.....	35
3.21 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมต่อแบบเลอบลองก์เมื่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิ ที่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส A และ C และหนึ่งชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส B.....	36
3.22 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมต่อแบบเลอบลองก์เมื่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิ ที่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส A และ B และหนึ่งชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส C.....	38
3.23 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมต่อแบบเลอบลองก์เมื่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิ ที่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส B และ C และหนึ่งชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส A.....	39
3.24 รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย 6 อิลลิเมนต์ 8 โนคเมื่อพิจารณาอิลลิเมนต์ รูปทรงสี่หน้า.....	45
3.25 การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า.....	47
3.26 ความสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส.....	53
3.27 ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน.....	54
3.28 การลดความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนด้วยแผ่นเหล็กบางหลายๆ แผ่นวางซ้อนกัน.....	55
4.1 ขนาดและรายละเอียดของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีและแบบสกอตต์ เมื่อยังไม่มีกรอกแบบรูปร่างของแกนเหล็ก.....	61
4.2 ขนาดและรายละเอียดของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ เมื่อยังไม่มีกรอกแบบรูปร่างของแกนเหล็ก.....	62
4.3 ขนาดแกนของหม้อแปลงเมื่อยังไม่มีกรอกแบบรูปร่างของแกนเหล็ก.....	63
4.4 การแบ่งอิลลิเมนต์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบวีและแบบสกอตต์ เมื่อยังไม่มีกรอกแบบรูปร่างแกนเหล็กในแบบ 3 มิติ.....	64
4.5 การแบ่งอิลลิเมนต์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ เมื่อยังไม่มีกรอกแบบรูปร่างแกนเหล็กในแบบ 3 มิติ.....	64
4.6 การกำหนดตำแหน่งสำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบนอยส์มัน.....	73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 ลักษณะ โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบวีและแบบสกอตต์ในระบบบรอดไฟฟ้ากระแสสลับ.....	77
5.2 ลักษณะ โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ในระบบบรอดไฟฟ้ากระแสสลับ.....	78
5.3 ลักษณะการสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีและแบบสกอตต์.....	78
5.4 ลักษณะการสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์.....	79
5.5 แผนภูมิการดำเนินงานของโปรแกรมจำลองผลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	80
5.6 บริเวณชิ้นงานสำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบนอยส์มัน.....	82
5.7 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีที่ยังมิได้เน้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก.....	86
5.8 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีที่ยังมิได้เน้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก.....	87
5.9 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีที่ยังมิได้เน้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก.....	89
5.10 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีที่ยังมิได้เน้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก.....	90
5.11 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ที่ยังมิได้เน้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก.....	92
5.12 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ที่ยังมิได้เน้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก.....	94
5.13 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ที่ยังมิได้เน้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก.....	95

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ที่ยังมิได้นั้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก.....	97
5.15 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ที่ยังมิได้นั้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก.....	99
5.16 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ที่ยังมิได้นั้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก.....	100
5.17 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ที่ยังมิได้นั้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก.....	102
5.18 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ที่ยังมิได้นั้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก.....	103
6.1 การออกแบบการเรียงและต่อแผ่นเหล็กให้เป็นมุมเอียง.....	109
6.2 การออกแบบ โดยการตัดมุมของแกนเหล็กเพื่อลดความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	110
6.3 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีเมื่อเน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุม โค้ง.....	112
6.4 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุม โค้ง.....	114
6.5 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุม โค้ง.....	115
6.6 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุม โค้ง.....	117
6.7 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุม โค้ง.....	120
6.8 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุม โค้ง.....	121

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.9 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง	123
6.10 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง	124
6.11 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง	127
6.12 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง	128
6.13 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง	130
6.14 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง	131
6.15 การออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยการสร้างความโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกน	138
6.16 การออกแบบกริดและอิลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Solid work ของหม้อแปลงที่ได้ออกแบบด้วยการสร้างความโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกน	140
6.17 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อออกแบบด้วยการสร้างความโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกน	143
6.18 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงเมื่อออกแบบด้วยการสร้างความโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกน	144
6.19 การกระจายสนามแม่เหล็ก (Tesla) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงเมื่อออกแบบด้วยการสร้างความโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกน	146

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.20 การกระจายสนามแม่เหล็ก (Tesla) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงเมื่อออกแบบด้วย การสร้างความโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกน.....	147
6.21 ตำแหน่งการเพิ่มสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน.....	150
6.22 การออกแบบกริดและอิลลิเมนต์สำหรับหม้อแปลงที่เพิ่มสารที่มีคุณสมบัติความเป็น แม่เหล็กแบบอ่อน.....	151
6.23 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของ หม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อเพิ่มสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน.....	153
6.24 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงเมื่อ เพิ่มสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน.....	155
6.25 การกระจายสนามแม่เหล็ก (Tesla) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงเมื่อ เพิ่มสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน.....	156
6.26 การกระจายสนามแม่เหล็ก (Tesla) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงเมื่อเพิ่มสารที่มี คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน.....	158
7.1 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของ หม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่พิกัด.....	169
7.2 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่พิกัด.....	170
7.3 การกระจายสนามแม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลง สำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่พิกัด.....	172
7.4 การกระจายสนามแม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่พิกัด.....	173
7.5 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของ หม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่ 200%พิกัด.....	177
7.6 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่ 200%พิกัด.....	179

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.7 การกระจายสนามแม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลง สำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่ 200%พิกัด.....	180
7.8 การกระจายสนามแม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่ 200%พิกัด.....	182
7.9 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของ หม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อทำงานในสภาวะจ่ายโหลดสูงสุด.....	187
7.10 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อทำงานในสภาวะจ่ายโหลดสูงสุด.....	189
7.11 การกระจายสนามแม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลง สำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อทำงานในสภาวะจ่ายโหลดสูงสุด.....	190
7.12 การกระจายสนามแม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อทำงานในสภาวะจ่ายโหลดสูงสุด.....	192

บทที่ 1

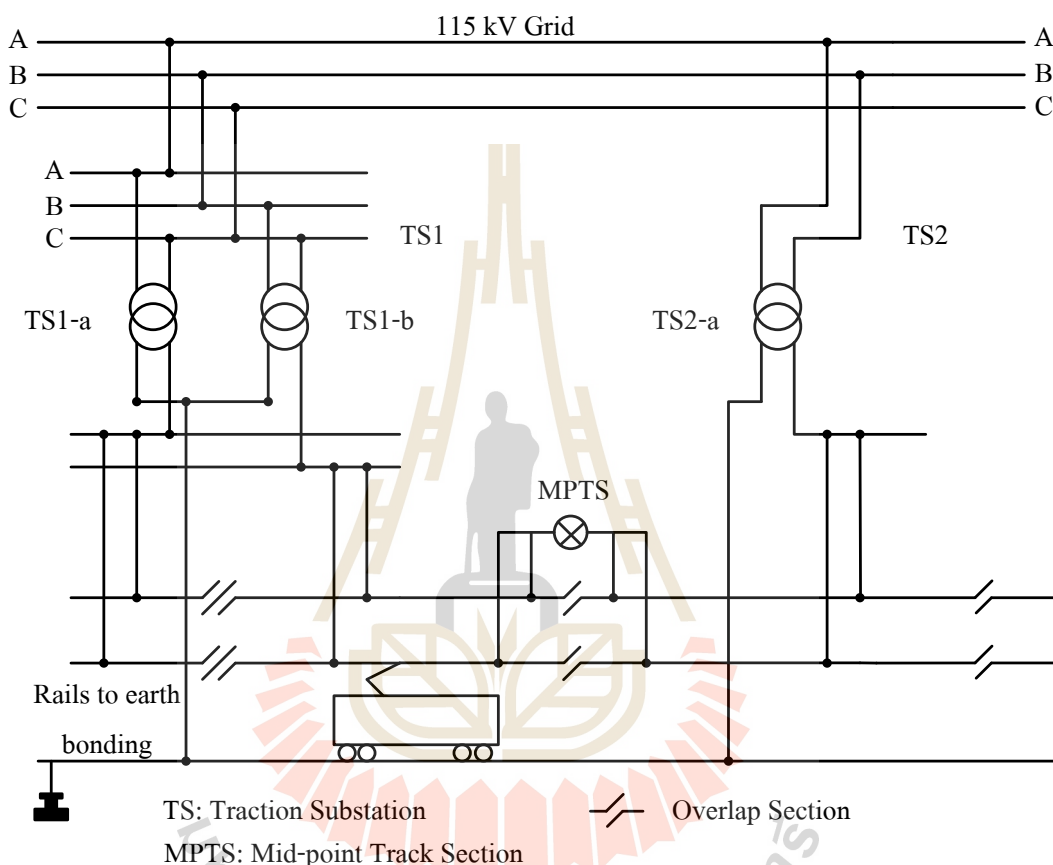
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบการคมนาคมเป็นระบบที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายตั้งแต่ในอดีต และได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วเพื่อให้สามารถเชื่อมต่อและขนส่งได้ทั่วโลก ซึ่งระบบคมนาคมขนส่งในปัจจุบันมีทั้งสิ้น 4 ชนิดคือ ระบบคมนาคมขนส่งทางอากาศ ระบบคมนาคมขนส่งทางเรือ ระบบคมนาคมขนส่งทางบกและระบบคมนาคมขนส่งทางราง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการคมนาคมขนส่งทางรางได้เข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากในประเทศที่มีการพัฒนาแล้วเช่น ประเทศในทวีปยุโรป ญี่ปุ่น จีนและอเมริกา เป็นต้น ประกอบกับการพัฒนาในเขตชุมชนเมือง การใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ และพื้นที่ใช้สอยในชุมชนที่มีขีดจำกัด ไม่สามารถรองรับปริมาณรถโดยสาร หรือรถยนต์ส่วนตัวได้อย่างเพียงพอ ทำให้การคมนาคมขนส่งทางรางเป็นวิธีการเดินทางในสังคมเมืองที่สะดวกมากขึ้น สามารถนำพาผู้โดยสารได้ในปริมาณที่มากและประหยัดเวลา และในทุกวันนี้การคมนาคมทางรางยังเป็นระบบคมนาคมที่มีความปลอดภัยจึงทำให้เกิดการขยายตัวของระบบคมนาคมทางราง โดยการใช้ระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงที่เชื่อมโยงแหล่งชุมชนเมืองขนาดใหญ่ที่มีความห่างไกลกันให้สามารถเดินทางได้สะดวกมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการก่อสร้างระบบรถไฟฟ้าเพื่อใช้สำหรับการคมนาคมขนส่งในตัวเมืองและเมืองใหญ่จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับประชาชนที่อาศัยอยู่ในเมืองหลวงและต่างจังหวัด

ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปแล้วจะต้องสามารถส่งกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ใช้งานได้อย่างสมบูรณ์และทั่วถึง โดยหน่วยงานที่รับผิดชอบจะต้องจัดสรรแหล่งพลังงานให้เกิดความเพียงพอต่อความต้องการ โดยพิจารณากำลังการผลิตไฟฟ้าจากสถิติข้อมูลการใช้ไฟฟ้าในอดีต เพื่อพยากรณ์การใช้กำลังไฟฟ้าสำหรับอนาคตควบคู่กัน ซึ่งทุกวันนี้ชุมชนเมืองและเมืองใหญ่ๆ ในภูมิภาคต่างๆ มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วเห็นได้อย่างชัดเจนจากการก่อสร้างระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูง และเป็นระบบหนึ่งที่สำคัญไฟฟ้าในการทำงานเป็นหลัก ซึ่งสาเหตุหนึ่งที่เกิดผลให้เกิดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งโครงสร้างของระบบรถไฟฟ้ามีลักษณะเป็นโหนดหนึ่งเฟสซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 1.1 ที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงจึงเป็นผลให้การเชื่อมต่อไฟฟ้าไปยังระบบรถไฟฟ้าจะต้องมีโครงสร้างระบบไฟฟ้าที่พิเศษและเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อด้วยวิธีพิเศษ ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาของคุณภาพกำลังไฟฟ้าขึ้นคือ ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งส่งผลต่อผู้ใช้ไฟฟ้าที่รับไฟฟ้าจากกริดเดียวกัน ดังนั้นการแก้ไขปัญหาจำเป็นต้องจัดสรรโหนดให้สามารถรับกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมเพื่อให้เกิดความสมดุล

ของแรงดัน แต่การจัสตรร โหลดก็ไม่สามารถแก้ปัญหาการไม่สมดุลของแรงดัน ไฟฟ้าได้มากพอ ดังนั้นการประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ต่อร่วมในระบบไฟฟ้าของระบบคมนาคมขนส่งทางรางนั้นคือ หม้อแปลงออโตจึงเป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงให้ประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้ามีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น



รูปที่ 1.1 การต่อหม้อแปลงกับระบบไฟฟ้ากำลัง 115kV

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยปกติจะสามารถอธิบายได้ในรูปของสมการอนุพันธ์ (Differential equation) หรือสมการอินทิกรัล (Integral equation) เป็นไปได้ยากที่จะหาผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate solution) ด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณนั้นมีหลายวิธี ที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมาคือ วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference method) ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายแก่การศึกษาและการทำความเข้าใจรวมไปถึงความสะดวกในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ส่วนข้อเสียของการใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมมีหลายประการเช่น

ความไม่สะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และที่สำคัญที่สุดคือ ความยากลำบากในการประยุกต์วิธีการนี้เพื่อใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อน สาเหตุของความยากลำบากดังกล่าว อีกทั้งสมรรถนะของคอมพิวเตอร์ที่สูงขึ้น มีส่วนก่อให้เกิดการคำนวณเชิงตัวเลขที่สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว สำหรับวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณของสมการที่อยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation : PDE) วิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและได้รับความนิยมแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (FEM) โดยเฉพาะงานวิจัยนี้ซึ่งต้องอาศัยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ แบบ 3 มิติมาช่วยดำเนินการ

ระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ เริ่มวิวัฒนาการมาตั้งแต่ต้นปี ค.ศ. 1950 ปัจจุบันเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมนมาก เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ ทำให้สามารถคำนวณงานต่าง ๆ ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ในปัจจุบันได้มีการนำวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ มาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมทุกสาขา และเริ่มนำมาประยุกต์กับปัญหาสนามไฟฟ้าในปี ค.ศ. 1968 ซึ่งระเบียบวิธีนี้ได้แบ่งพื้นที่ของปัญหาเป็นชิ้นส่วนย่อยที่ประกอบขึ้นจากโหนด โดยเชื่อมต่อกันด้วยกริด สำหรับปัญหา 3 มิติ นิยมใช้ชิ้นส่วนย่อยที่เป็นรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (Linear tetrahedral) เพื่อประมาณโดเมนของปัญหาได้ซึ่งข้อดีของระเบียบวิธีนี้คือ สามารถหาผลเฉลยของระบบที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ นอกจากนี้ยังง่ายต่อการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่อาจมีหลายลักษณะผสมกันอยู่ในระบบ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำวิธี FEM มาใช้ในการดำเนินการ โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงค่าสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษสำหรับการใช้งานในระบบรถไฟฟ้าเพื่อใช้ในการออกแบบแกนเหล็กเพื่อลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษทั้งแบบวี (V-connection) แบบสกอตต์ (Scott connection) และแบบเลอบลองก์ (Le-Blanc) เนื่องจากปัญหาสนามแม่เหล็กนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ซึ่งยากในการหาผลเฉลย ดังนั้นระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ จึงเป็นวิธีเชิงตัวเลขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการจำลองผลเพื่อหาผลเฉลยในงานวิจัยนี้

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- เพื่อศึกษาคุณสมบัติและการทำงานของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษทั้งแบบวีแบบสกอตต์ และแบบเลอบลองก์ ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในระบบรถไฟฟ้า
- เพื่อวิเคราะห์การทำงานและค่าสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษทั้งแบบวี แบบสกอตต์ และแบบเลอบลองก์
- เพื่อออกแบบแกนเหล็กเพื่อลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษทั้งแบบวี แบบสกอตต์และแบบเลอบลองก์

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

- หม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อมีการทำงานจะทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียในแกน และค่ากำลังสูญเสียในขดลวด ซึ่งกำลังสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กของหม้อแปลงมีสาเหตุหนึ่งมาจากกระแสไหลวนในแกน และกระแสฮีสเตอร์ซิส
- สนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายในแกนที่ทำหน้าที่เป็นเส้นทางเดินของแม่เหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อรูปร่างของแกนเหล็กหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงไป

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

- ไม่พิจารณาโครงและตัวถังของหม้อแปลงไฟฟ้าและแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นรูปคลื่นไซน์ที่สมบูรณ์
- กำหนดให้ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงมีค่าคงที่
- พิจารณาค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กของวัสดุที่แกนเหล็กของหม้อแปลงมีคุณสมบัติเชิงเส้น
- พิจารณาความถี่การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าคงที่เท่ากับ 50 Hz

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- ใช้ MATLAB™ เพื่อพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติสำหรับวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบรถไฟฟ้า
- ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กที่แกนของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบวี แบบสกอตต์ และแบบเลอบลองก์ เพื่อหารูปแบบการเชื่อมต่อที่เหมาะสมสำหรับการรักษาความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าสามเฟส
- ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวในหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบวี แบบสกอตต์ และแบบเลอบลองก์ สำหรับการออกแบบรูปร่างของแกนหม้อแปลงเพื่อลดค่ากำลังสูญเสียในแกนที่มีการใช้งานในระบบรถไฟฟ้า

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้หลักการและแนวความคิดสำหรับการศึกษาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานในระบบรถไฟฟ้า
- ได้โปรแกรมจำลองผลที่เกิดจากการพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เข้ากับปัญหาจริงในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กในหม้อแปลง

ไฟฟ้า ตลอดจนสามารถนำไปใช้เป็นส่วนประกอบการเรียนการสอนด้านสนามแม่เหล็กและหม้อแปลงไฟฟ้า

- ได้ผลการออกแบบรูปร่างของแกนหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษทั้งแบบวีแบบสกอตต์และแบบเลอบลองก์ที่ทำให้ค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าลดลง

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 8 บท 2 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหาวัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขตและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและระเบียบวิธีการวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยผลจากการสำรวจสืบค้น จะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 นำเสนอทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบไปด้วย ทฤษฎีหม้อแปลงไฟฟ้า โครงสร้างระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูง การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบพิเศษ สนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ และความสัมพันธ์ในแกนเหล็ก ต่างได้ถูกนำมาใช้เป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4 กล่าวถึงขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง และอธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยได้เลือกใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาลเลอร์คิน

บทที่ 5 ได้อธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลพร้อมนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และค่าสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ทั้งนี้เพื่อให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และค่าสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานในระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับทั่วไป ที่ยังมิได้เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก โดยกระบวนการสร้างกริดแบบ 3 มิติได้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Solid Work ในการสร้างกริด พร้อมทั้งแสดงภาพทางกราฟิกแสดงผลการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็ก และคำนวณค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ในขณะที่แกนเหล็กของหม้อแปลงยังมีได้เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก

บทที่ 6 ได้กล่าวถึงการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบพิเศษทั้งแบบวี แบบสกอตต์และแบบเลอบลองก์ที่มีการใช้งานในระบบรถไฟฟ้า

กระแสน้ำเพื่อลดค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลการจำลองที่ได้จากการ ออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ และคำนวณค่ากำลังงาน สูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงในเชิงตัวเลข

บทที่ 7 ได้กล่าวถึงการประเมินการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบบรอดไฟฟ้าเมื่อ ได้รับการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กเพื่อลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กในสถานะที่มีการจ่าย โหลดโดยมุ่งเน้นที่การเชื่อมต่อแบบสกอตต์ เนื่องจากเป็นรูปแบบที่เหมาะสมและมีกำลังสูญเสียใน แกนเหล็กน้อยที่สุดที่ใช้ในระบบบรอดไฟฟ้า

บทที่ 8 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะพร้อมงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อ ภาคผนวกประกอบด้วยเนื้อหา 2 ส่วน ได้แก่

ภาคผนวก ก. เป็นการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต

ภาคผนวก ข. เป็นการรวบรวมผลงานที่ได้รับการเผยแพร่ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในขณะ ดำเนินการศึกษา

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ การออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กเพื่อลดค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่อรูปแบบพิเศษในระบบบรอดไฟฟ้ายาระดับ โดยเลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติมาเป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหา ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงานข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณบดีนักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ ฐานข้อมูลจาก IEEE IEE และ ScienceDirect เป็นต้นงานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อไป

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากเรื่องการวิเคราะห์การกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้า การเชื่อมต่อหม้อแปลงสำหรับบรอดไฟฟ้ายาระดับ และค่ากำลังงานสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน สามารถสรุปโดยย่อเป็นตารางได้ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งสามารถจัดเรียงลำดับได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1973	Mansel, et al.	ได้ศึกษาการออกแบบจุดต่อที่ตำแหน่งมุมของแกนหม้อแปลง 3 เฟส โดยศึกษาผลกระทบของฟลักซ์แม่เหล็กที่เคลื่อนที่ผ่านบริเวณตำแหน่งมุมของจุดต่อรวมทั้งได้ศึกษาผลของค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กที่ตำแหน่งจุดต่อด้วย

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้จัดทำ	การดำเนินงานวิจัย
1982	Zvonimir	ได้ทำการออกแบบแกนของหม้อแปลงที่ตำแหน่งข้อต่อรูปตัวที (T-joint) และรูปตัวเจ(J-joint) โดยให้จุดโค้งทำมุม 45 องศาเพื่อให้สามารถลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก และได้ออกแบบพิเศษที่ตำแหน่งมุมเหลี่ยมให้มีความยาวของแผ่นลามิเนตให้เหลื่อมล้ำกันเป็นชั้นๆ นอกจากนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของมุมโค้งกับความยาวของแผ่นลามิเนตที่เหลื่อมล้ำกันให้ได้ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด โดยได้ทำการทดสอบกับหม้อแปลงทั้งชนิด 1 เฟสและ 3 เฟส
1995	Pern and Yeh	ได้ดำเนินการศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อสนามแม่เหล็กและกำลังงานสูญเสียในขดลวดของหม้อแปลง อีกทั้งยังพิจารณาถึงการเชื่อมต่อขดลวดแบบขนาน 2 แบบได้แก่ แบบที่ไม่มี การไขว้ตัวนำระหว่างชั้น และแบบที่มีการไขว้ตัวนำระหว่างชั้นว่ามีกำลังงานสูญเสียแตกต่างกันอย่างไร ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ
1996	Tekletsadik. and Sarayolac	เป็นการคำนวณค่ากำลังสูญเสียในส่วนของโครงสร้างตัวหม้อแปลงโดยอาศัยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ที่อยู่ในโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS พร้อมทั้งวิเคราะห์ค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (Temperature rise) ซึ่งพิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุวิศวกรรมและมีการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลอง อีกทั้งยังมีการศึกษาถึงผลการเพิ่มจำนวนของอิลลิเมนต์โดยมีการสรุปว่า เมื่อเพิ่มขนาดของอิลลิเมนต์แล้วอาจจะไม่ทำให้ผลการจำลองมีความถูกต้องมากขึ้นเสมอไปโดยยกตัวอย่างปัญหาที่ทำ

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
		ให้ผลการจำลองไม่ถูกต้องเสมอไปคือ ปัญหาที่เกี่ยวกับ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ความหนาแน่นของกระแส เมื่อพิจารณาหาจุดที่มีค่ามากที่สุด
1997	Lin, et al.	ได้ศึกษาในบริเวณแผ่นยึดของแกนเหล็ก (Tie plate) โดยพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลวนและขนาดของแผ่นยึดแกนเหล็กที่มีผลต่อสนามแม่เหล็ก กำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy current) และกำลังงานสูญเสียฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ที่บริเวณแผ่นยึดแกนเหล็ก ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ
2000	Taheri, et al.	ได้ศึกษาจุดอุณหภูมิร้อน (Hot spot temperature) ของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยอาศัยความสัมพันธ์ของกระแสที่มีผลต่อสนามแม่เหล็กและผลของสนามแม่เหล็กต่อกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นซึ่งอยู่ในรูปของความร้อน และได้ศึกษาการออกแบบขนาดของแกนเหล็กเพื่อลดจุดร้อนภายในหม้อแปลงด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติในการหาผลเฉลย
2000	Tang, et al.	ได้นำเสนอการคำนวณสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าจากกระแสไหลวน เมื่อเกิดแรงดันชั่วคราว โดยวิเคราะห์จากสมการกระแสไหลวน ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2004	Myungjin, et al.	ได้ดำเนินการศึกษาความสัมพันธ์ของขดลวดตัวนำที่หุ้มฉนวนด้วยความหนาและมีจำนวนชั้นของขดลวดตัวนำที่แตกต่างกันเมื่อได้รับกระแสที่ขดลวดประกอบด้วยได้รับสนามแม่เหล็กจากภายนอกที่ทำให้เกิดการสูญเสียทางแม่เหล็ก (Magnetization loss) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ
2008	Saraiva, et al.	ได้ดำเนินการศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสฟลักซ์ที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในบริเวณแกนเหล็กและได้ทำการออกแบบช่องว่างอากาศระหว่างขดลวดตัวนำกับแกนเหล็กและระหว่างขดลวดแรงต่ำกับแรงสูงเพื่อให้ค่าสนามแม่เหล็กที่ลดลง โดยในส่วนของการทำงานค่าของสนามแม่เหล็กอันเนื่องมาจากกระแสที่ไหลในขดลวดนั้นทางทีมงานผู้วิจัยได้หาผลเฉลยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ
2008	Shariati. and Seyyedi	เป็นการออกแบบขดลวดหม้อแปลงใหม่ เพื่อให้ความร้อนที่ขดลวดมีค่าลดลง โดยการออกแบบได้อาศัยวิธีการคำนวณด้วยสมการคณิตศาสตร์ และออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกัน โดยการเพิ่มส่วนของช่องว่างอากาศให้มีขนาดที่พอเหมาะในแต่ละชั้นของขดลวดแรงต่ำและแรงสูง และสามารถสรุปได้ว่าการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะทำให้จุดที่ร้อนที่สุดของขดลวดเมื่อเกิดการอิ่มตัวแล้วจะมีอุณหภูมิประมาณ 102.2 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2011	Li, et al.	ได้ทำการจำลองผลการกำบัง(Shield) ของหม้อแปลงกำลังที่มีการเปรียบเทียบตำแหน่งการกำบัง 3 จุดและเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการกำบัง โดยพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาทำเป็นแกนเหล็กแบบไม่เชิงเส้นรวมทั้งมุ่งเน้นที่การวิเคราะห์ผลของกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่มาจากการทำงานกำบังด้วยหลักการสนามแม่เหล็กที่ยึดแอก (Yoke clamp), ถัง (Tank) และ แผ่นแรงดึง (Tensile plate) และสรุปว่าการทำการกำบังด้วยหลักการสนามแม่เหล็ก ที่ถึงจะทำให้ผลของกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนมีค่าน้อยที่สุดโดยลดลงไปได้ 33.25% และเมื่อเพิ่มการทำงานกำบังด้วยหลักการสนามแม่เหล็กชนิดแอล(L-type) และชนิดซี(C-type) ที่ตำแหน่งยึดแอกจะช่วยลดจุดร้อน (Hot spot) ลงได้อีก โดยชนิดซีจะช่วยลดลงได้มากกว่าคิดเป็น 44.15% เมื่อเปรียบเทียบกับแบบไม่มีการกำบังส่วนชนิดแอลจะลดลงไปได้ 57.25%
2012	Ciccarelli, et al.	ได้ศึกษาการต่อหม้อแปลงเพื่อลดค่ากระแสและแรงดันที่ไม่สมดุลเนื่องจากโหลด 1 เฟสในระบบรถไฟฟ้า โดยใช้วิธี phase transformation method จุดที่ร้อนที่สุดของขดลวดเมื่อเกิดการอิ่มตัวแล้วจะมีอุณหภูมิประมาณ 102.2 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

2012	Zhang, et al.	ได้ศึกษาขนาดของหม้อแปลงที่มีโครงสร้างแบบ แกนวิชแบบ ไร้หน้าสัมผัสสำหรับระบบการขนส่ง ในรถไฟความเร็วสูง
2012	Pedota, et al.	ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม มาวิเคราะห์หา คุณลักษณะแรงดัน และกระแสของคลื่นจร ต่อหม้อ แปลงไฟฟ้า จากสมการ Telegraph
2012	Asmontas, et al.	นำเสนอการวิเคราะห์ระดับแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบรถไฟความเร็วสูง เมื่อเกิดแรงดันเกินชั่วคราว เพื่อกำหนดขนาดของกัปดักเล็รจ์
2013	Shirkoochi and Jenkins	ได้ศึกษาการคำนวณอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนต์เอลลิ เมนต์ของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในโครงข่าย ระบบราง
2013	Alan Zupan, et al.	ได้อาศัยแบบจำลองของระบบรถไฟกระแสสลับ ขนาด 25kV เพื่อศึกษาคุณภาพกำลังไฟฟ้าในขณะที่ มีการจ่ายโหลดและมีระยะทางการเคลื่อนที่เป็น ระยะทางไกล อีกทั้งยังได้ปรับปรุงฮามอนิกส์ของ กระแส โดยการออกแบบและจำลองผลผ่าน โปรแกรมสำเร็จรูป EMTP-RV
2013	Zeng Linsuo and Xing Wei	ได้ดำเนินการวิจัยหาลำดับงานสูญเสียเนื่องมาจาก สนามแม่เหล็กเร็วไหลที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงที่ทำ หน้าที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าที่รางรถไฟโดยอาศัย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลลิเมนต์
2014	Zhao, et al.	ได้ศึกษาสมรรถนะการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าของวงจร ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงในระบบรถไฟแบบ ไร้ หน้าสัมผัส

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

2014	Atabak Njafi, et al.	ได้ประเมินถึงปัจจัยที่ทำให้หม้อแปลงจำหน่ายเสื่อมสภาพ ในขณะที่หม้อแปลงทำงานภายใต้สถานะแรงดันไม่สมดุล และจ่ายโหลดที่ไม่สมดุล โดยอาศัยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 2 มิติและ 3 มิติ โดยอาศัยการวิเคราะห์ผ่านพารามิเตอร์ทางด้านสนามแม่เหล็ก เช่น เส้นทางเดินฟลักซ์ ความหนาแน่นฟลักซ์ เป็นต้น
2014	Keiichiro Kondo, et al.	ได้ศึกษาระบบหม้อแปลงกำลังชนิดไร้หน้าสัมผัส โดยศึกษาความเป็นไปได้ที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังยานพาหนะโดยไม่ต้องใช้สายส่งกำลังไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการสร้างพลังงานผ่านช่องว่างซึ่งจะมีขดลวดวางไว้ที่ตำแหน่งภาคพื้นและอีกขดลวดอยู่ที่ยานพาหนะ
2015	Jasmin Smajic, et al.	ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กในสถานะอิ่มตัวในแกนเหล็กของหม้อแปลง ที่ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในขดลวดของหม้อแปลง สวิตซ์ซึ่งในระบบราง โดยใช้กลวิธีโคเมนความถี่แบบเร็วใน 2 และ 3 มิติ
2016	Xiaohui Wang, et al.	ได้นำเสนอวิธีการคำนวณกำลังงานสูญเสียในขดลวดของหม้อแปลงความถี่สูงที่มีผลของสกินเอฟเฟกต์ โดยการคำนวณจะอาศัยการคำนวณจากทฤษฎีของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจรความถี่สูง ซึ่งอาศัยการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 1 มิติ
2018	Qiang Fu, et al.	ได้นำเสนอเทคนิคการวัดกำลังงานสูญเสียที่แกนเหล็กแบบออนไลน์ สำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับ โดยมุ่งเน้นไปยังหม้อแปลงสวิตซ์ที่จ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าที่รางรถ อีกทั้งยังได้จำลองผลในสถานะไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรสมมูลที่มีค่าอินดักแตนซ์แม่เหล็ก

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

2018	Qiang Fu, et al.	แบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยเทคนิคการวัดนี้เป็นการวัดแบบประมาณเท่านั้น
2018	Ammar Mishal Abdelrasool Elagab, et al.	ได้ดำเนินการศึกษาถึงคุณภาพกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการเชื่อมต่อกันของรถไฟฟ้า กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสามเฟส ด้วยการเชื่อมต่อหม้อแปลงที่มีการต่อแบบ V/V โดยอาศัยวิธีองค์ประกอบสมมาตรเข้ามาพิจารณาความไม่สมดุลของกระแส ในขณะที่มีการเคลื่อนที่ของตัวรถไฟฟ้า เพื่อเชื่อมโยงไปยังการวิเคราะห์ผลของฮาร์มอนิกส์สำหรับนำไปออกแบบอุปกรณ์ป้องกันเพื่อควบคุมให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าสามเฟสดีขึ้น

จะเห็นได้จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้สรุปผ่านมาสามารถช่วยให้ผู้ที่ดำเนินการศึกษาหรือพัฒนาเกี่ยวกับงานวิจัยนี้ พอมองภาพออกอย่างกว้างได้ว่า มีคณะนักวิจัยผู้ใดได้ศึกษาสิ่งใดไปแล้วบ้าง แต่ยังไม่สามารถแยกเป็นหมวดหมู่ตามวิธีการดำเนินงานศึกษาได้อย่างชัดเจน ดังนั้นในส่วนถัดไปนี้ จึงได้ทำการเรียบเรียงและคัดสรรงานวิจัยหลัก ๆ ที่สำคัญ และมีความแตกต่างกันอย่างเด่นชัด จากหลาย ๆ ผลงานที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.1 โดยจะได้กล่าวถึงโดยย่อ ดังนี้

Mansel, et al. (1973) ได้ศึกษาการออกแบบจุดต่อที่ตำแหน่งมุมของแกนหม้อแปลง 3 เฟส โดยศึกษาผลกระทบของฟลักซ์แม่เหล็กที่เคลื่อนที่ผ่านบริเวณตำแหน่งมุมของจุดต่อรวมทั้งได้ศึกษาผลของค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กที่ตำแหน่งจุดต่อด้วย อีกทั้งยังได้ทดลองปรับเปลี่ยนช่องว่างที่ตำแหน่งมุมของแกนที่ข้อต่อรูปตัวเจอีกด้วย งานวิจัยของ Driesen, et al. (2000) ได้ดำเนินการศึกษาและจำลองผลของสนามแม่เหล็กและความร้อนของหม้อแปลงในสภาวะจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติและ 3 มิติ ในส่วนการคำนวณสนามแม่เหล็กจะพิจารณาโดยการแปลงจากโดเมนเวลาเป็น โดเมนความถี่ และส่วนของแบบจำลองของอุณหภูมิจะคำนึงถึงวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนกั้นระหว่างขดลวดตัวนำ โดยคำนวณทั้งสถานะคงตัวและสถานะชั่วคราว งานวิจัยของ Myungjin, et al. (2004) ได้ดำเนินการศึกษาความสัมพันธ์ของขดลวดตัวนำที่หุ้มฉนวนด้วยความหนาและมีจำนวนชั้นของขดลวดตัวนำที่แตกต่างกันเมื่อได้รับกระแสที่ขดลวดประกอบด้วยได้รับ

สนามแม่เหล็กจากภายนอก ที่ทำให้เกิด magnetization loss ด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 2 มิติ งานวิจัยของ Schmidt, et al. (2005) ได้ดำเนินการศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสที่มีผลต่อสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในบริเวณแกนเหล็ก ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติในการแก้ปัญหา งานวิจัยของ Preis, et al. (2006) ได้ใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์จำลองผลและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับอุณหภูมิในหม้อแปลงไฟฟ้าและปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิในหม้อแปลงไฟฟ้า งานวิจัยของ Ratajduš, et al. (2008) ได้ออกแบบและวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสเพื่อตรวจสอบการกระจายตัวของความร้อนในวัสดุที่เป็นตัวนำยิ่งยวด งานวิจัยของ Taheri, et al. (2008) ได้ศึกษาจุดร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยอาศัยความสัมพันธ์ของกระแสที่มีผลต่อสนามแม่เหล็กและผลของสนามแม่เหล็กต่อกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นซึ่งอยู่ในรูปของความร้อน และได้ศึกษาการออกแบบขนาดของแกนเหล็กเพื่อลดจุดร้อนภายในหม้อแปลงด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติในการหาผลเฉลย งานวิจัยของ Tsili, et al. (2009) ได้ศึกษาและออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการระบายความร้อน ประสิทธิภาพการระบายความร้อนเป็นปัจจัยที่แสดงถึงอายุการใช้งานของหม้อแปลง ผู้วิจัยได้ใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 2 มิติและ 3 มิติสำหรับการคำนวณการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กและการกระจายตัวของอุณหภูมิรวมถึงจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า งานวิจัยของ Li and Cheng (2010) ได้ศึกษาและพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติเพื่อกำหนดหาสนามแม่เหล็กและเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณขดลวดของหม้อแปลงเมื่อเกิดการลัดวงจร และนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม งานวิจัยของ Ciccarelli, et al. (2012) ได้ศึกษาการต่อหม้อแปลงเพื่อลดค่ากระแสและแรงดันที่ไม่สมดุลเนื่องจากโหลด 1 เฟสในระบบรถไฟฟ้า โดยใช้วิธี phase transformation method จุดที่ร้อนที่สุดของขดลวดเมื่อเกิดการอ้อมตัวแล้วจะมีอุณหภูมิประมาณ 102.2 องศาเซลเซียส งานวิจัยของ Zhang, et al. (2012) ได้ศึกษาขดลวดของหม้อแปลงที่มีโครงสร้างแบบแซนวิชแบบไร้หน้าสัมผัสสำหรับระบบการขนส่งในรถไฟความเร็วสูง งานวิจัยของ Ammar Mishal Abdelrasool Elagab, et al. (2018) ได้ดำเนินการศึกษาถึงคุณภาพกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการเชื่อมต่อกันของรถไฟฟ้า กับ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสามเฟสด้วยการเชื่อมต่อหม้อแปลงที่มีการต่อแบบ V/V โดยอาศัยวิธีองค์ประกอบสมมาตรเข้ามาพิจารณาความไม่สมดุลของกระแสในขณะที่มีการเคลื่อนที่ของตัวรถไฟฟ้า เพื่อเชื่อมโยงไปยังการวิเคราะห์ผลของฮาร์มอนิกส์ สำหรับนำไปออกแบบอุปกรณ์ป้องกันเพื่อควบคุมให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าสามเฟสดีขึ้น โดยการวิเคราะห์ที่ได้อาศัยโปรแกรม PSCAD มาใช้ในการจำลองผล

2.3 สรุป

บทที่ 2 นี้ ได้นำเสนอรายงานผลการสืบค้นวรรณกรรมและงานวิจัยย้อนหลังที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ จากฐานข้อมูล IEEE IEE ScienceDirect และอื่น ๆ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่ผู้วิจัยอื่น ๆ ได้นำมาใช้ ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณະนักวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ไม่เคยปรากฏงานวิจัยที่มุ่งเน้นการศึกษาและออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กเพื่อลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่อแบบพิเศษในระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับด้วยการพัฒนาระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยชิ้นนี้จึงพัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่อแบบพิเศษที่ใช้ในระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ



บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

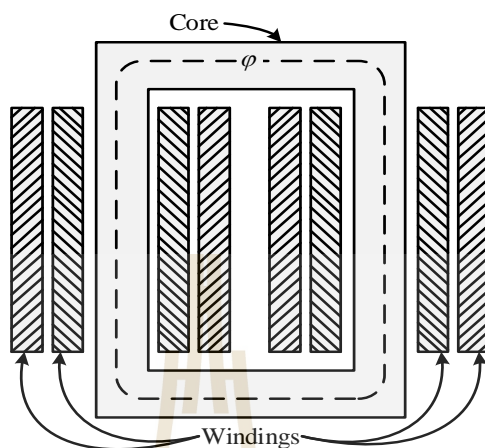
3.1 บทนำ

การศึกษาและเข้าใจถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย นับว่ามีความสำคัญ และเป็นประโยชน์อย่างมากในการดำเนินงาน ทั้งนี้เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้ และความเข้าใจในงานสำหรับนำไปเป็นแหล่งอ้างอิงในการดำเนินงานวิจัย ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย 7 หัวข้อหลัก ได้แก่ (1) หม้อแปลงไฟฟ้า (2) ระบบรางไฟฟ้าสำหรับรถไฟความเร็วสูง (3) การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบพิเศษ (4) สนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (5) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก (6) ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ (7) ความสูญเสียในแกนเหล็ก โดยจะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เป็นประโยชน์หรือถูกกล่าวอ้างถึงต่อการดำเนินงานวิจัย ทั้งนี้เพื่อให้เนื้อหามีความกระชับและชัดเจนยิ่งขึ้น

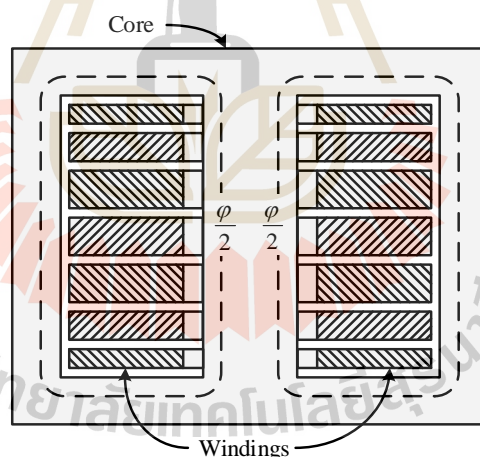
3.2 หม้อแปลงไฟฟ้า (ไชยชาญ หินเกิด, 2545)

หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ไม่มีการเคลื่อนที่ซึ่งทำหน้าที่ในการส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าจากวงจรไฟฟ้าหนึ่งไปยังอีกวงจรหนึ่งโดยอาศัยหลักการของแม่เหล็กไฟฟ้า โดยปกติจะใช้เชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าแรงสูงและไฟฟ้าแรงต่ำ ถือเป็นอุปกรณ์หลักในระบบส่งกำลังไฟฟ้า เนื่องจากสามารถเปลี่ยนขนาดของแรงดันไฟฟ้าหรือขนาดของกระแสไฟฟ้าทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรอกแบบและใช้งาน โดยการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าจะอาศัยการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าจากวงจรหนึ่ง (Primary circuit) ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามาจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux) และแรงแม่เหล็ก (Magnetomotive force) ขึ้นในแกนเหล็ก กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจึงสลับขั้วกลับไปกลับมาด้วยความเร็วเท่ากับความถี่ไฟฟ้า (Frequency) เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ตัดกับขดลวดที่พันอยู่บนแกนเหล็กทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้า (Induce electromotive force) ไปยังอีกวงจรหนึ่ง (Secondary circuit) ส่งถ่ายเป็นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าออกมา โดยมีความถี่ไฟฟ้าเท่ากับความถี่ไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามา โดยการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าจะไม่มีส่วนใดเคลื่อนที่เหมือนมอเตอร์ไฟฟ้า จึงส่งผลให้กำลังงานสูญเสียในขณะทำงานน้อยกว่ามอเตอร์ โดยหม้อแปลงไฟฟ้า

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดตามลักษณะโครงสร้างของแกนเหล็ก ได้แก่ หม้อแปลงชนิดคอร์ (Core type) และหม้อแปลงชนิดเชลล์ (Shell type) แสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ



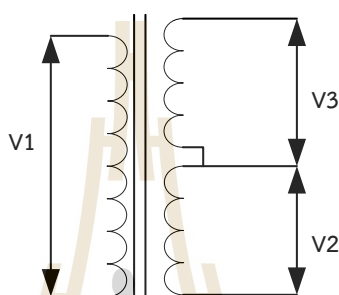
รูปที่ 3.1 หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดคอร์



รูปที่ 3.2 หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดเชลล์

โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองชนิดนั้น โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ส่วนคือ ขดลวด (Coil) ซึ่งประกอบด้วย 2 ขดลวดที่สำคัญคือ ขดลวดทางด้านปฐมภูมิ (Primary winding) เป็นขดลวดที่ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟหรือแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเพื่อรับไฟเข้ามาทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ โดยเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบขดลวด และขดลวดทางด้านทุติยภูมิ (Secondary winding) เป็นขดลวดที่ได้รับการเปลี่ยนพลังงานมาด้วย

การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กทำให้เกิดกระแสไหลในขดลวดสำหรับใช้ในการจ่ายโหลดต่อไป นอกจากนี้ยังมีหม้อแปลงบางชนิดที่ประกอบไปด้วยขดลวดมากกว่า 2 ขดลวดนั่นคือหม้อแปลง 3 ขดลวด โดยแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 โดยที่ขดลวดที่เหลือจะเรียกว่า ขดลวดทางด้านตติยภูมิ (Tertiary winding) ซึ่งจะมีขนาดเล็กกว่าขดลวดทั้งสองด้านก่อนหน้านี้ และแรงดันที่แปลงออกมาจะมีค่าต่ำกว่าขดลวดทุติยภูมิ โดยทั่วไปจะนิยมใช้ต่อเป็นหม้อแปลงสำหรับการทดสอบทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงภายในห้องปฏิบัติการที่ต้องอาศัยการใช้แรงดันสูงเพื่อการทดสอบเป็นต้น



รูปที่ 3.3 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 ขดลวด

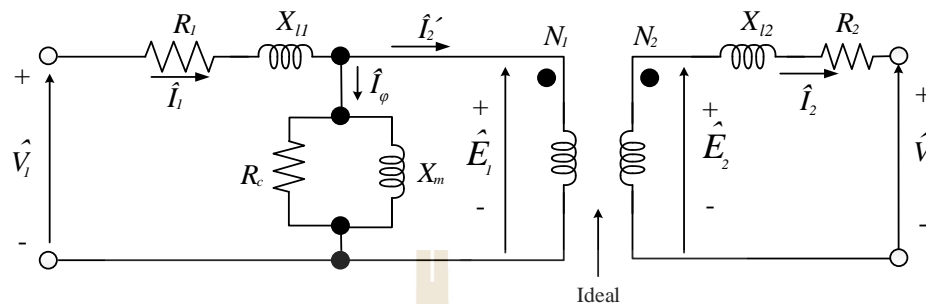
ส่วนประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของหม้อแปลงไฟฟ้าคือ แกนของหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นส่วนสำคัญมากสำหรับใช้เป็นเส้นทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็กเพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวดต่างๆ โดยแกนของหม้อแปลงจะนิยมทำมาจากวัสดุวิศวกรรมที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กที่มีค่าซึมซาบทางแม่เหล็กสูง เช่น เฟอร์ไรท์ หรือแม้แต่หม้อแปลงแกนอากาศ เป็นต้น

หม้อแปลงชนิดแกนเหล็ก (Iron core transformer) จะใช้แผ่นเหล็กอ่อนหลายๆ แผ่น ส่วนใหญ่จะใช้รูปทรงตัว E กับตัว I ประกอบกันเป็นแกนซึ่งส่วนใหญ่จะใช้งานทั่วไปที่มีความถี่ไม่สูงมากนักเช่น หม้อแปลงในงานส่งกำลังไฟฟ้า หรือหม้อแปลงแปลงแรงดันไฟฟ้าตามบ้าน เป็นแรงดันต่ำๆตามที่ต้องการ หม้อแปลงชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

หม้อแปลงชนิดแกนเฟอร์ไรท์ (Ferrite core transformer) หม้อแปลงชนิดนี้ส่วนใหญ่จะใช้งานที่มีความถี่สูง เช่น ในเครื่องรับ เครื่องส่ง วิทยุ หรือในวงจรสวิตชิ่ง เพราะไม่สามารถใช้หม้อแปลงชนิดแกนเหล็กได้

ในการวิเคราะห์การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในทางปฏิบัตินั้น เมื่อพิจารณาเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลในวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าที่แสดงดังรูปที่ 3.4 จะพบว่าเส้นแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องขดลวดด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิที่เกิดขึ้นนั้นไม่ได้ไหลผ่านแกนเหล็กทั้งหมด แต่จะเกิดการไหลวนผ่านอากาศซึ่งจะเรียกเส้นแรงแม่เหล็กนี้ว่า “เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage flux)” ซึ่ง

ก่อให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage inductances) ที่ขดลวดทั้งสองฝั่งของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทั่วไปจะเขียนอยู่ในรูปของค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหล (Leakage reactance) ดังสมการที่ (3.1)



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้าในทางปฏิบัติ

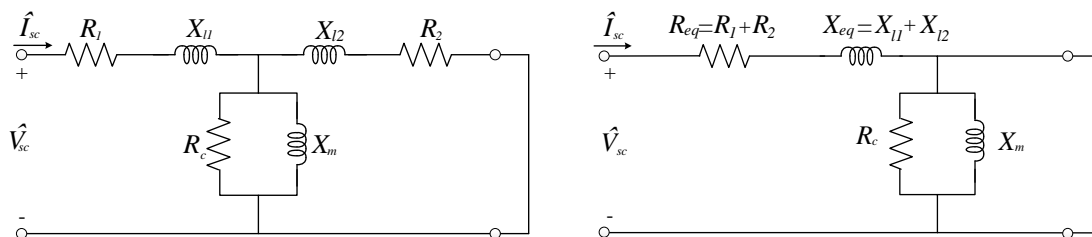
$$X_L = 2\pi fL \quad (3.1)$$

นอกจากนั้นแล้วยังมีค่าความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นในขดลวดทั้งสองฝั่ง ดังนั้นเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าทำงานจะเกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากความต้านทานภายในของขดลวดดังกล่าวนี้ด้วย

ในการหาค่าอิมพีแดนซ์หรือพารามิเตอร์ต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นสามารถกระทำได้โดยทำการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะต้องทดสอบ 2 แบบ ได้แก่ การทดสอบแบบลัดวงจร (Short circuit test) และการทดสอบแบบเปิดวงจร (Open circuit test) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 การทดสอบแบบลัดวงจร

ในการทดสอบแบบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นสามารถกระทำได้โดยการลัดวงจรที่ด้านฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า (นิยมใช้ทางด้านแรงดันต่ำเป็นด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง) จากนั้นทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าทดสอบเข้าที่ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า จนกระทั่งกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิหม้อแปลงไฟฟ้ามีขนาดเท่ากับกระแสพิกัด I_{sc} โดยแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทำให้กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิมีขนาดเท่ากับกระแสพิกัดนั้นจะมีค่าเท่ากับ V_{sc} ซึ่งวงจรทดสอบแบบลัดวงจรนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้าขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจร

จากวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจร สามารถหาค่าหาอิมพีแดนซ์รวมในกรณีที่ทดสอบแบบลัดวงจร Z_{sc} ได้ดังสมการที่ (3.2)

$$Z_{sc} = R_1 + jX_{l1} + \frac{Z_\phi (R_2 + jX_{l2})}{Z_\phi + R_2 + jX_{l2}} \quad (3.2)$$

หากค่าอิมพีแดนซ์ Z_ϕ (ค่า R_c และ X_m) มีค่าสูงจะสามารถประมาณค่าอิมพีแดนซ์รวมในกรณีที่ทดสอบแบบลัดวงจร Z_{sc} ได้ดังสมการที่ (3.3)

$$Z_{sc} \approx R_1 + jX_{l1} + R_2 + jX_{l2} = R_{eq} + jX_{eq} \quad (3.3)$$

ในการทดสอบหม้อแปลงแบบลัดวงจรนั้น นอกจากจะวัดค่ากระแสไฟฟ้า I_{sc} และแรงดันไฟฟ้า V_{sc} แล้วยังจำเป็นต้องวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย P_{sc} ด้วย ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์หรือพารามิเตอร์ต่างๆ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.4) – (3.6)

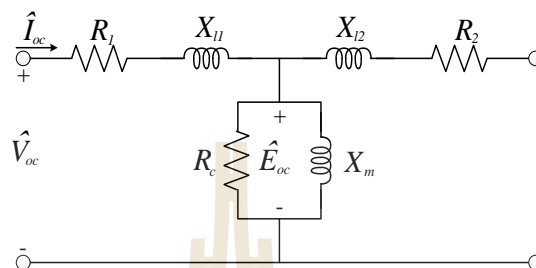
$$|Z_{sc}| = |Z_{eq}| = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \quad (3.4)$$

$$R_{sc} = R_{eq} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} \quad (3.5)$$

$$X_{sc} = X_{eq} = \sqrt{|Z_{sc}|^2 - R_{sc}^2} \quad (3.6)$$

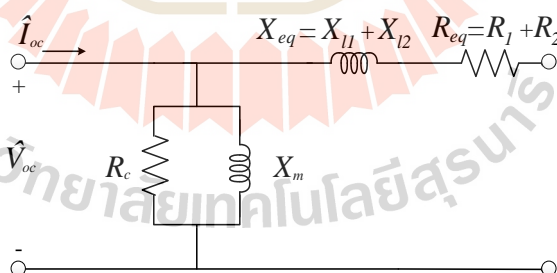
3.1.2 การทดสอบเปิดวงจร

ในการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าอีกแบบหนึ่งนั้นต้องใช้การทดสอบแบบเปิดวงจร โดยทำการเปิดวงจรด้านใดด้านหนึ่งแล้วทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าอีกด้านหนึ่งจนถึงแรงดันพิกัดของด้านนั้น แสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้าขณะทำการทดสอบแบบเปิดวงจร

เมื่อทำการเปิดวงจรที่ขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า และทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าทดสอบเข้าทางขดลวดด้านปฐมภูมิ โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าทดสอบให้มีค่าเท่ากับพิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิโดยจะกำหนดให้ค่าแรงดันทดสอบนี้เท่ากับ V_{oc} โดยค่าอิมพีแดนซ์ของการทดสอบแบบเปิดวงจรสามารถประมาณได้ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลแบบประมาณขณะทำการทดสอบแบบเปิดวงจร

โดยการทดสอบนั้นจะต้องทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า V_{oc} กระแสไฟฟ้า I_{oc} และค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้น P_{oc} โดยจะสามารถทำการคำนวณหาอิมพีแดนซ์หรือพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังสมการที่ (3.7) – (3.9)

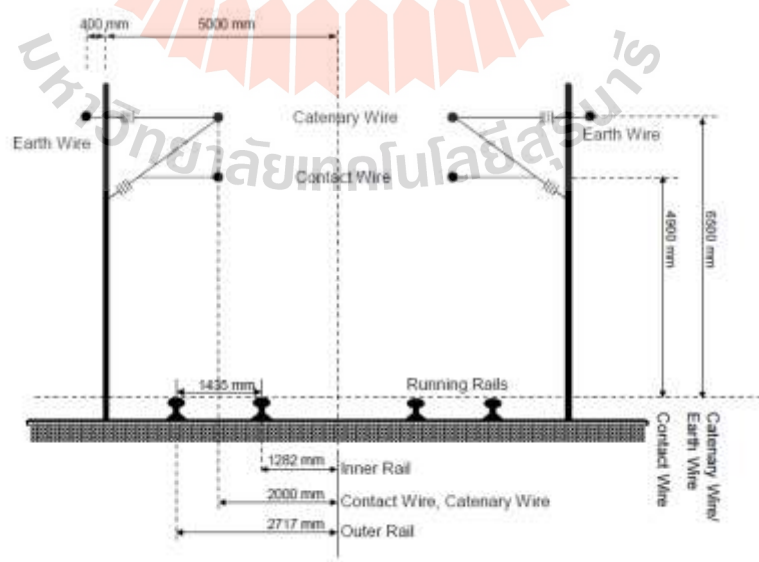
$$R_{oc} = R_c = \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}} \quad (3.7)$$

$$|Z_{oc}| = \frac{V_{oc}}{I_{oc}} \quad (3.8)$$

$$X_m = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{|Z_{oc}|^2}\right) - \left(\frac{1}{|R_c|^2}\right)}} \quad (3.9)$$

3.3 ระบบรางไฟฟ้าสำหรับรถไฟความเร็วสูง

ระบบรางไฟฟ้าสำหรับรถไฟนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบคือ ระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ (AC rail system) และระบบรางไฟฟ้ากระแสตรง (DC rail system) วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอเพียงระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งใช้สำหรับรถไฟความเร็วสูง การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟความเร็วสูงนั้นจะใช้สายจ่ายตัวนำพาอากาศ (Overhead feeding conductor) โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลจากสถานีไฟฟ้ามาสู่ขบวนรถผ่านระบบสายตัวนำพาอากาศเพื่อจ่ายให้กับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า และจะไหลย้อนกลับผ่านรางรถไฟไปยังสถานี หรือไหลย้อนกลับผ่านตัวนำอื่นโดยลักษณะของรางสำหรับรถไฟกระแสสลับแสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ลักษณะรางสำหรับรถไฟกระแสสลับ

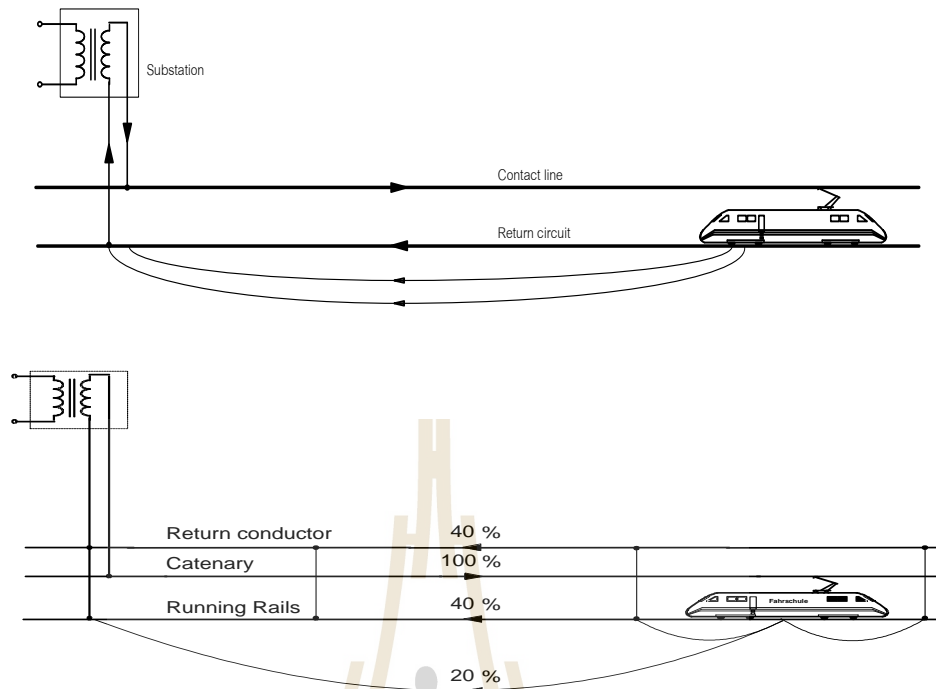
เนื่องจากรางมีคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นสูงเพราะทำจากวัสดุผสมเหล็กกล้าแมงกานีสมาตรฐานการจ่ายไฟให้ระบบรางรถไฟกระแสสลับจะใช้ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 25kV แรงดันพิกัดมาตรฐานมีข้อกำหนดในหัวข้อแรงดันจ่ายไฟของระบบขับเคลื่อนในมาตรฐานนานาชาติที่สำคัญคือ EN50163 Railway applications supply voltages of traction systems และ IEC60850 Railway application supply voltages of traction systems ระดับแรงดันทำงานตามมาตรฐานดังที่ได้กล่าวไว้ของระบบ 25kV แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ซึ่งแสดงค่าแรงดันระดับสูงสุดและต่ำสุดที่ยอมรับได้สำหรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟความเร็วสูง

ตารางที่ 3.1 ระดับแรงดันมาตรฐานการจ่ายไฟฟ้าของระบบรถไฟกระแสสลับ 25kV (ชนิดชั้ย, 2560)

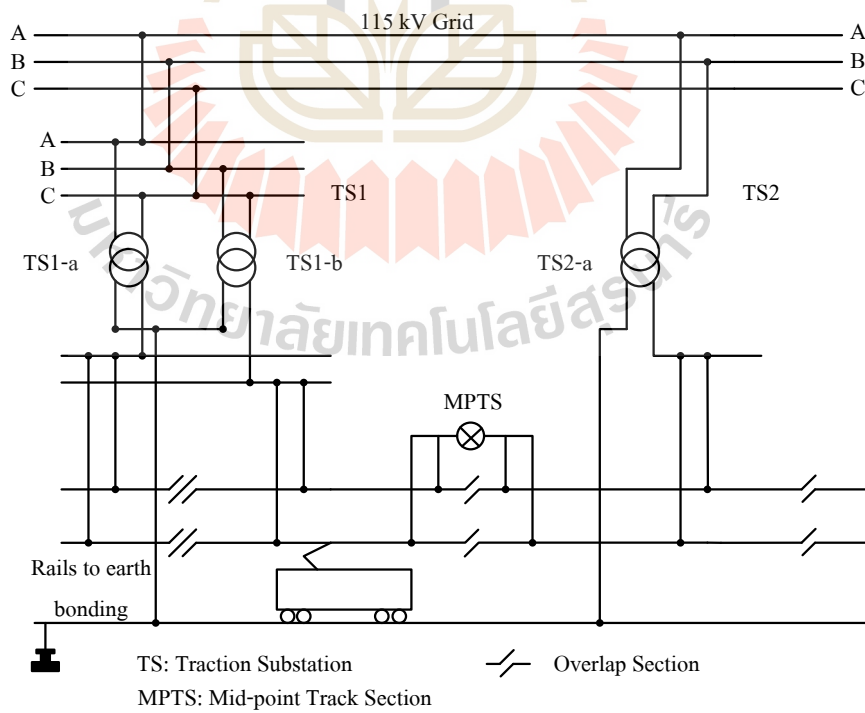
Electrification system	Lowest nonpermanent voltage	Lowest permanent voltage	Nominal Voltage	Highest permanent voltage	Highest nonpermanent voltage
25,000 V 50Hz	17,500 V	19,000 V	25,000 V	27,500 V	29,000 V

ส่วนสำคัญของการจ่ายไฟให้กับระบบรถไฟ โดยประเทศไทยจะมีระดับแรงดันไฟฟ้าสามเฟสขนาด 115kV ซึ่งจะถูปรับลดระดับลงมาเพื่อป้อนให้กับระบบจ่ายไฟของรถไฟ โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ ระบบแรงดันขนาด 25kV 50 Hz แล้วจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านสายตัวนำพาอากาศ ซึ่งอุปกรณ์ที่รับกำลังไฟฟ้าบนตัวรถไฟจะเรียกว่า แพนโทกราฟ โดยทั่วไปจะติดตั้งอยู่บนหลังการรถซึ่งจะถูกยกขึ้นไปสัมผัสกับสายส่งเพื่อรับกำลังไฟฟ้ามาใช้บนรถ ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรโดยผ่านรางหรือตัวนำไหลย้อนกลับ แสดงได้ดังรูปที่ 3.9

เมื่อพิจารณารถไฟกระแสสลับขณะทำงาน โดยกำหนดให้รถไฟวิ่งจากทางด้านขวาไปยังด้านซ้ายสามารถพิจารณาภาพรวมลักษณะการจ่ายกำลังไฟฟ้าขณะทำงานได้ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 การจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้ากระแสสลับ

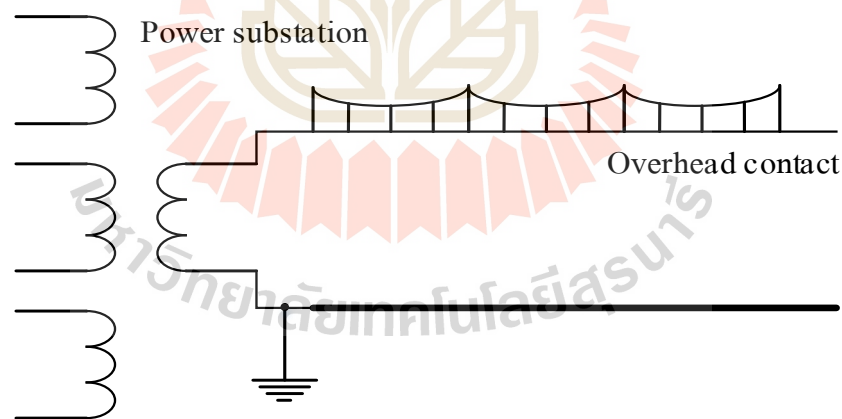


รูปที่ 3.10 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้ากระแสสลับ

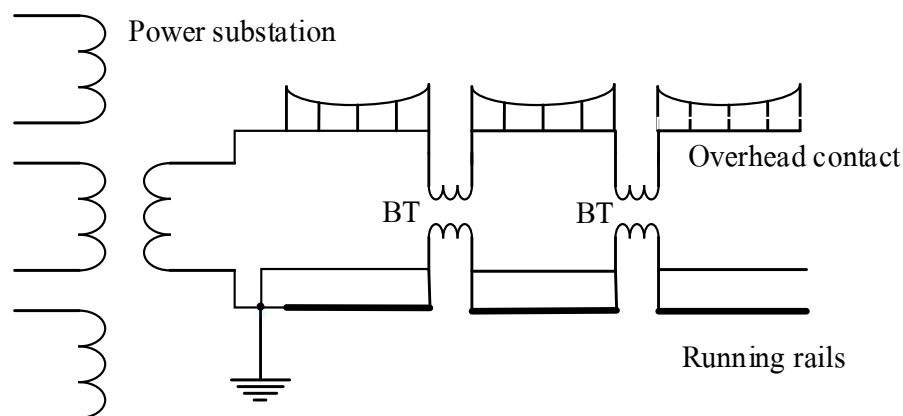
โดยปกติแล้วในการจ่ายกระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า TS1 ติดตั้งหม้อแปลงจำนวน 2 ลูก ได้แก่ TS1-a และ TS1-b สถานีจ่ายไฟถัดไปคือ TS2 ติดตั้งหม้อแปลงจำนวน 2 ลูกเช่นกันคือ TS2-a และ TS2-b แต่ในรูปที่ 3.10 จะแสดงเพียงลูกเดียว หม้อแปลงทั้ง 3 ลูกนี้มีหน้าที่จ่ายไฟให้กับรางรถไฟไฟฟ้า ถ้ารถไฟไฟฟ้าเคลื่อนที่จากด้านขวาไปทางด้านซ้าย การจ่ายกระแสจากหม้อแปลงเข้าไปที่ระบบรางจ่ายไฟจะถูกดึงจาก TS2-a, TS1-b และ TS1-a ตามลำดับ เพื่อให้การดึงกระแสจากตัวนำของระบบ 3 เฟสที่ระดับแรงดันไฟฟ้าขนาด 115kV มีความสมดุล การเชื่อมต่อหม้อแปลงกำลังทั้ง 3 ลูกจะเป็นการเชื่อมต่อจากเฟส A-B, B-C และ C-A ตามลำดับ

หม้อแปลงแบบพิเศษรับไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าสามเฟสและจ่ายไฟฟ้าในลักษณะหนึ่งเฟสสองวงจร หรือกล่าวได้ว่าการเชื่อมต่อหม้อแปลงซึ่งทำหน้าที่แปลงระบบไฟฟ้าสามเฟสเป็นสองเฟส ดังนั้นแบบจำลองของหม้อแปลงแบบพิเศษจะประกอบด้วยวงจรสมมูลนอร์ตันสองวงจร โดยอาศัยกฎกระแสและแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ในการสร้างสมการ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับวงจรสมมูลนอร์ตัน

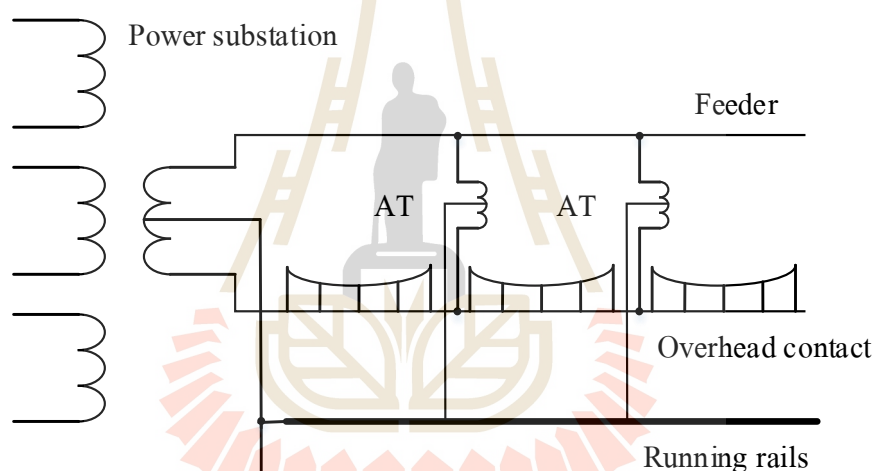
ระบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบรางไฟฟ้าสำหรับรถไฟความเร็วสูงมี 3 ระบบคือ ระบบการจ่ายไฟโดยตรง ระบบการจ่ายผ่านหม้อแปลงบูสเตอร์ และระบบการจ่ายผ่านหม้อแปลงออโต แสดงได้ดังรูปที่ 3.11 – 3.13



รูปที่ 3.11 ระบบการจ่ายไฟโดยตรง



รูปที่ 3.12 ระบบการจ่ายไฟผ่านหม้อแปลงบัสเตอร์



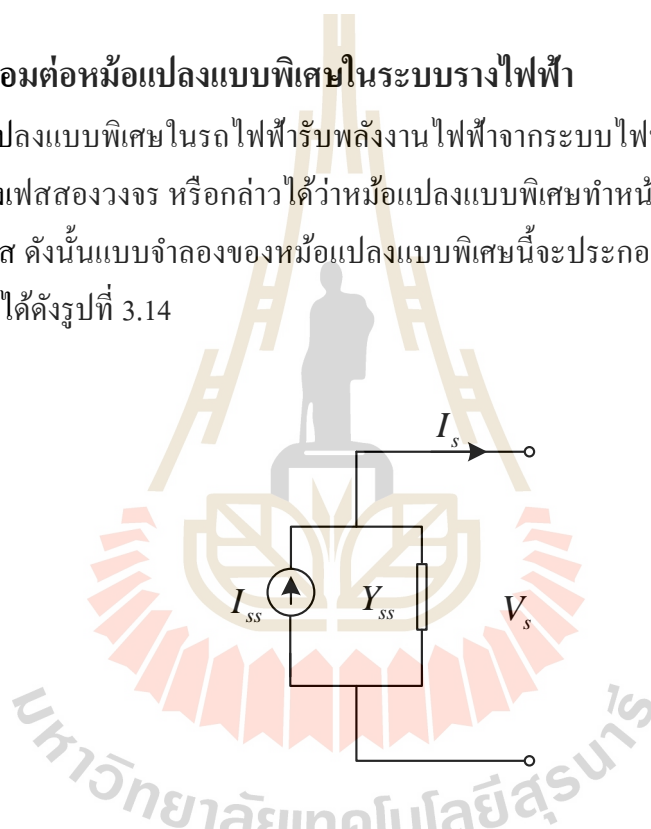
รูปที่ 3.13 ระบบการจ่ายไฟผ่านหม้อแปลงออโต

การจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบรางไฟฟ้าที่มีการติดตั้งหม้อแปลงบัสเตอร์และตัวนำกระแสย้อนกลับที่ต่อขนานกับราง รวมถึงหม้อแปลงออโต ข้อดีของการจ่ายไฟของทั้งสองระบบนี้คือ การลดปัญหาการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า ในกรณีของหม้อแปลงบัสเตอร์กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับรถไฟจะไหลผ่านขดลวดด้านหนึ่งของหม้อแปลงบัสเตอร์ในขณะที่กระแสย้อนกลับจะไหลผ่านขดลวดอีกชุดหนึ่งของหม้อแปลงลูกเดียวกัน ทำให้สนามแม่เหล็กที่ไหลในหม้อแปลงทั้งสองหักล้างกันเอง ส่วนข้อเสียของระบบนี้จะทำให้เกิดแรงดันตกมากกว่าระบบจ่ายโดยตรง สำหรับหม้อแปลงออโตมีลักษณะการทำงานคล้ายหม้อแปลงบัสเตอร์คือ ช่วยลดการแทรกสอดของ

สนามแม่เหล็ก และยังช่วยลดปัญหาแรงดันตกของระบบอีกด้วย ระบบจ่ายไฟผ่านหม้อแปลงอัตโนมัติ จะทำให้กระแสที่ไหลเข้าสู่รถไฟฟ้ามีค่าสูงในช่วงระหว่างหม้อแปลงอัตโนมัติสองตัวที่มีรถไฟฟ้าต่อเชื่อมอยู่ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในระบบกลับไปยังสถานีไฟฟ้าจะถูกลดทอนผ่านสายจ่ายไฟ สายป้อนสัมผัส และสายฟีดเดอร์เส้นละ 50% ทำให้แรงดันตกในสายลดลง และช่วยให้ระยะห่างระหว่างการวางตำแหน่งของสถานีไฟฟ้าเพื่อจ่ายไฟให้กับระบบรางรถไฟเพิ่มขึ้นได้ประมาณ 50-60km ดังนั้นระบบจ่ายผ่านหม้อแปลงอัตโนมัติจึงได้รับความนิยมมากกว่าระบบอื่นๆ พิกัดของหม้อแปลงอัตโนมัติที่นำมาใช้งานมีค่าประมาณ 4-15MVA ที่พิกัดแรงดัน 50kV

3.4 การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบพิเศษในระบบรางไฟฟ้า

หม้อแปลงแบบพิเศษในรถไฟรับพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าสามเฟสและจ่ายไฟฟ้าในลักษณะหนึ่งเฟสสองวงจร หรือกล่าวได้ว่าหม้อแปลงแบบพิเศษทำหน้าที่แปลงระบบไฟฟ้าสามเฟสเป็นสองเฟส ดังนั้นแบบจำลองของหม้อแปลงแบบพิเศษนี้จะประกอบด้วยวงจรสมมูลนอร์ตันสองวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลนอร์ตัน

อาศัยกฎกระแสและแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ในการสร้างสมการซึ่งมีความสัมพันธ์กับวงจรสมมูลนอร์ตัน แสดงได้ดังสมการที่ (3.10)

$$I_s = -Y_{ss}V_s + I_{ss} \quad (3.10)$$

เมื่อ I_s คือ กระแสที่ไหลออกจากวงจรสมมูล (A)

I_{ss} คือ กระแสของแหล่งจ่ายกระแส (A)

Y_{ss} คือ แอดมิตแตนซ์ของแหล่งจ่าย

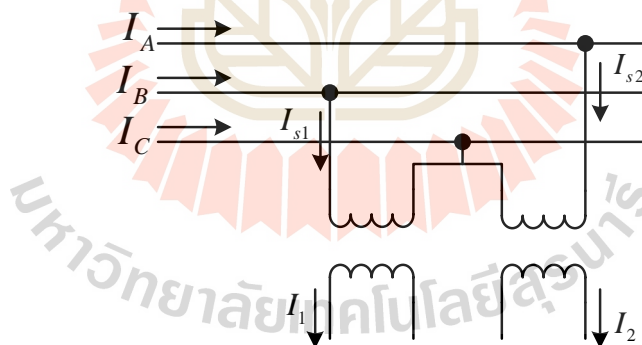
V_s คือ แรงดันคร่อมแหล่งจ่าย (V)

การเชื่อมต่อหม้อแปลงเพื่อใช้ในระบบขนส่งทางราง เช่น ระบบรถไฟความเร็วสูงนั้น เป็นการเชื่อมต่อที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบพิเศษ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขปัญหาความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ใช้จ่ายกับโหลดเพียงสองเฟส วิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณารูปแบบการเชื่อมต่อที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบันคือ รูปแบบการเชื่อมต่อแบบวี (V connection) รูปแบบการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ (Scott connection) และรูปแบบการเชื่อมต่อแบบเลอบลองค์ (Le Blanc connection)

3.4.1 การเชื่อมต่อแบบวี

การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบวีจะมีลักษณะคล้ายหม้อแปลงหนึ่งเฟสสองลูก รับกำลังไฟฟ้าลูกละคู่เฟสด้านปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิทั้งสองจะแยกจ่ายกำลังไฟฟ้าออกเป็นสองวงจร

เมื่อพิจารณาด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส A-B จากระบบไฟฟ้าสามเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมต่อแบบวีเมื่อด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส A-B

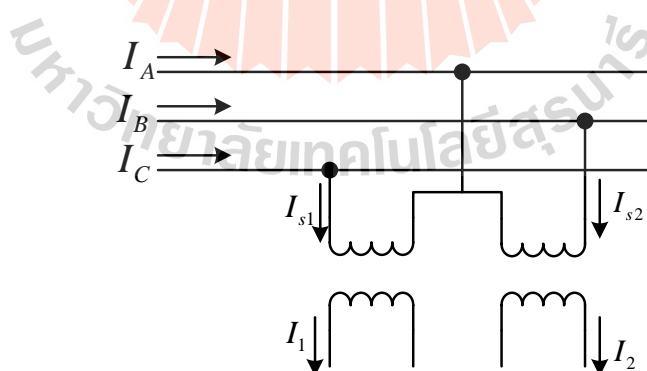
สมการของแบบจำลองและสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบวีเมื่อด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส A-B แสดงได้ดังสมการที่ (3.11) – (3.12)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-a^2}{Z_{eq}} & 0 \\ 0 & \frac{-a^2}{Z_{eq}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{aV_{AC}}{Z_{eq}} \\ \frac{aV_{CB}}{Z_{eq}} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

เมื่อ	Z_{eq}	คือ	อิมพีแดนซ์สมมูลมีค่าเท่ากับ $Z_{eq} = Z_p + a^2 Z_s$
	a	คือ	อัตราส่วนขดลวดของหม้อแปลง
	Z_p	คือ	อิมพีแดนซ์ของขดลวดค้ำปฐมภูมิ
	Z_s	คือ	อิมพีแดนซ์ของขดลวดค้ำทุติยภูมิ
	I_1, I_2	คือ	กระแสฟ้งทุติยภูมิ
	V_1, V_2	คือ	แรงดันฟ้งทุติยภูมิ
	I_A, I_B, I_C	คือ	กระแสในแต่ละเฟสฟ้งปฐมภูมิ

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

เมื่อพิจารณาด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส B-C จากระบบไฟฟ้าสามเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 3.16



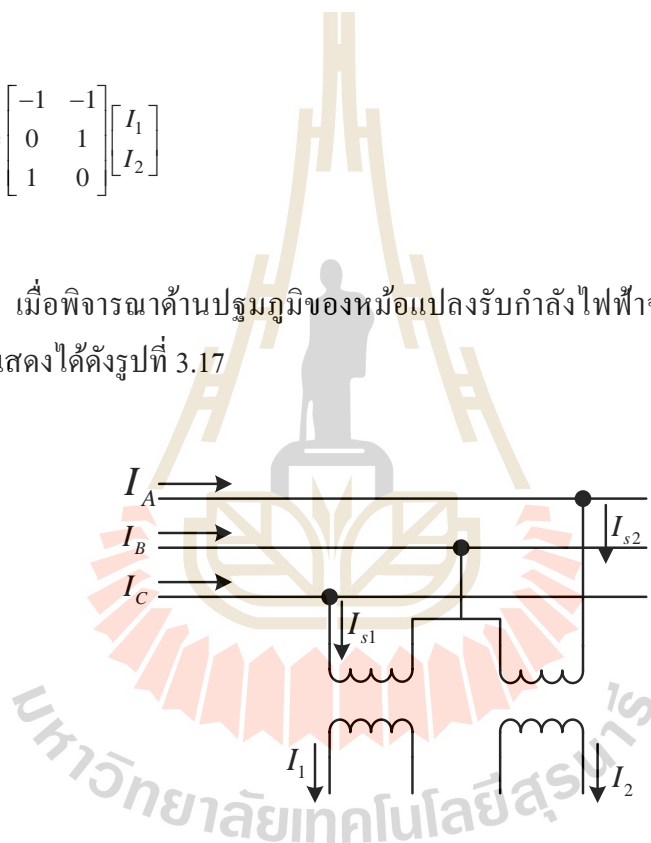
รูปที่ 3.16 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมต่อแบบวีเมื่อค้ำด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส B-C

สมการของแบบจำลองและสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบวีเมื่อด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้า จากคู่เฟส B-C แสดงได้ดังสมการที่ (3.13) – (3.14)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a^2 & 0 \\ Z_{eq} & \\ 0 & -a^2 \\ & Z_{eq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{aV_{CA}}{Z_{eq}} \\ \frac{aV_{AB}}{Z_{eq}} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

เมื่อพิจารณาด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส C-A จากระบบ ไฟฟ้าสามเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมต่อแบบวีเมื่อด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้า จากคู่เฟส C-A

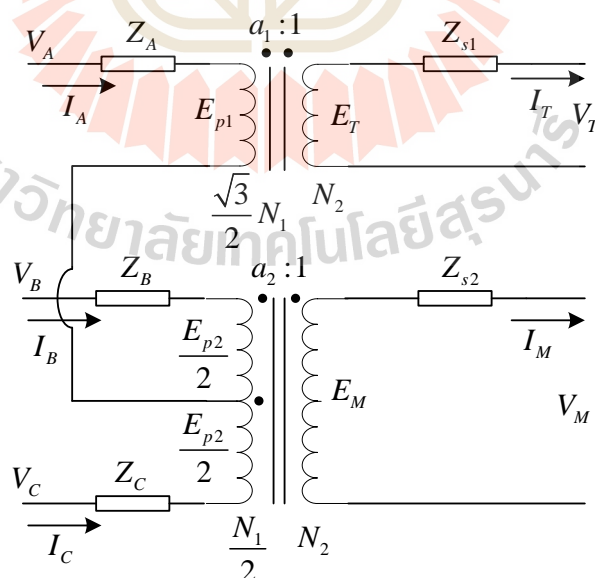
สมการของแบบจำลองและสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบวีเมื่อด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้า จากคู่เฟส C-A แสดงได้ดังสมการที่ (3.15) – (3.16)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-a^2}{Z_{eq}} & 0 \\ 0 & \frac{-a^2}{Z_{eq}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{aV_{AB}}{Z_{eq}} \\ \frac{aV_{BC}}{Z_{eq}} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

3.4.2 การเชื่อมต่อแบบสกอตต์

หม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ประกอบด้วยหม้อแปลงหนึ่งเฟสสองลูก โดยลูกหนึ่งมีจุดแท่ปกลางที่เชื่อมต่อกับอีกลูกหนึ่ง หม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์จะรับกำลังไฟฟ้าสามเฟสเข้าทางด้านปฐมภูมิและจ่ายกำลังไฟฟ้าขาออกเป็นแบบหนึ่งเฟสสองวงจรทางด้านทุติยภูมิ โดยเรียกวจรทางด้านขาออกว่า วงจรเฟสเมน (Main :M) และวงจรเฟสทีเซอร์ (Teaser: T) เมื่อไม่พิจารณาถึงกระแสวนของหม้อแปลงฝั่งปฐมภูมิจะได้วงจรสมมูลของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์โดยทางด้านปฐมภูมิมีจุดแท่ปกลางเชื่อมต่อกันกับเฟส A แสดงได้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อจุดแท่ปกลางด้านปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส A

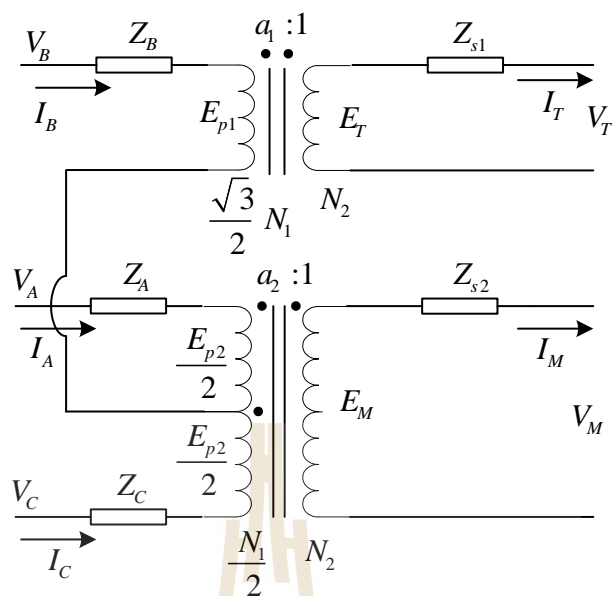
สมการของแบบจำลองและสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อจุดแท่งกลางด้านปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส A สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.17) – (3.18)

$$\begin{bmatrix} I_T \\ I_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-a_1}{Z_1} & 0 \\ 0 & \frac{-a_2}{Z_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_T \\ V_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2Z_1}(2V_A - V_B - V_C) \\ \frac{1}{2Z_2}(V_B - V_C) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a_1} & 0 \\ \frac{-1}{2a_1} & \frac{1}{2a_2} \\ \frac{-1}{2a_1} & \frac{-1}{2a_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_T \\ I_M \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

เมื่อ	Z_1	คือ	อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงตัวที่ 1 มีค่าเท่ากับ $Z_1 = \frac{(2Z_A + Z_B - 2Z_{s1}a_1^2)}{2a_1}$
	Z_2	คือ	อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงตัวที่ 2 มีค่าเท่ากับ $Z_2 = \frac{(Z_C - 2Z_{s2}a_2^2)}{2a_2}$
	a_1	คือ	อัตราส่วนขดลวดของเฟสทีเซอร์
	a_2	คือ	อัตราส่วนขดลวดของเฟสเมน
	Z_A, Z_B, Z_C	คือ	อิมพีแดนซ์ของขดลวดปฐมภูมิที่รับไฟฟ้าจากเฟส A B และ C ตามลำดับ
	Z_{s1}, Z_{s2}	คือ	อิมพีแดนซ์ของขดลวดทุติยภูมิเฟสทีเซอร์และเฟสเมนตามลำดับ

เมื่อไม่พิจารณาถึงกระตุ้นของหม้อแปลงฝั่งปฐมภูมิจะได้วงจรสมมูลของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์โดยทางด้านปฐมภูมิมีจุดแท่งกลางเชื่อมต่อกันกับเฟส B แสดงได้ดังรูปที่ 3.19



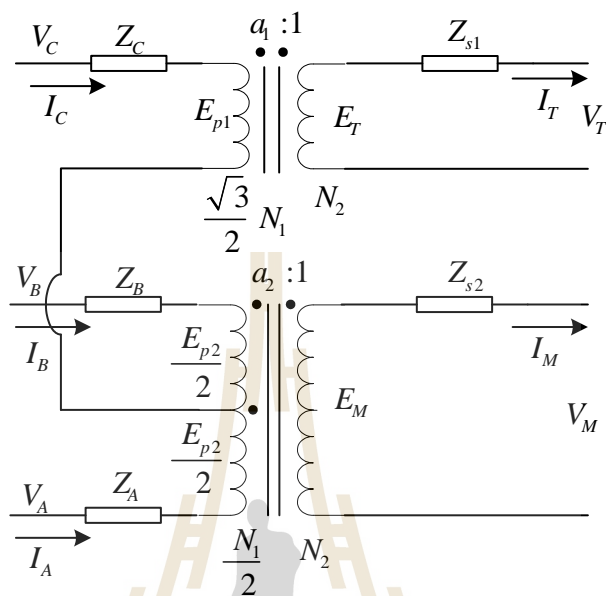
รูปที่ 3.19 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อจุดตัดที่กลางด้านปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส B

สมการของแบบจำลองและสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อจุดตัดที่กลางด้านปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส B สามารถคำนวณ ได้ดังสมการที่ (3.19) – (3.20)

$$\begin{bmatrix} I_T \\ I_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-a_1}{Z_1} & 0 \\ 0 & \frac{-a_2}{Z_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_T \\ V_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2Z_1}(2V_B - V_C - V_A) \\ \frac{1}{2Z_2}(V_C - V_A) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{2a_1} & \frac{1}{2a_2} \\ \frac{1}{a_1} & 0 \\ \frac{-1}{2a_1} & \frac{-1}{2a_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_T \\ I_M \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

เมื่อไม่พิจารณากิ่งกระตุ้นของหม้อแปลงฝั่งปฐมภูมิจะได้วงจรสมมูลของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์โดยทางด้านปฐมภูมิมียุคแท่งปกลางเชื่อมต่อกันกับเฟส C แสดงได้ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อจุดแท่งปกลางด้านปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส C

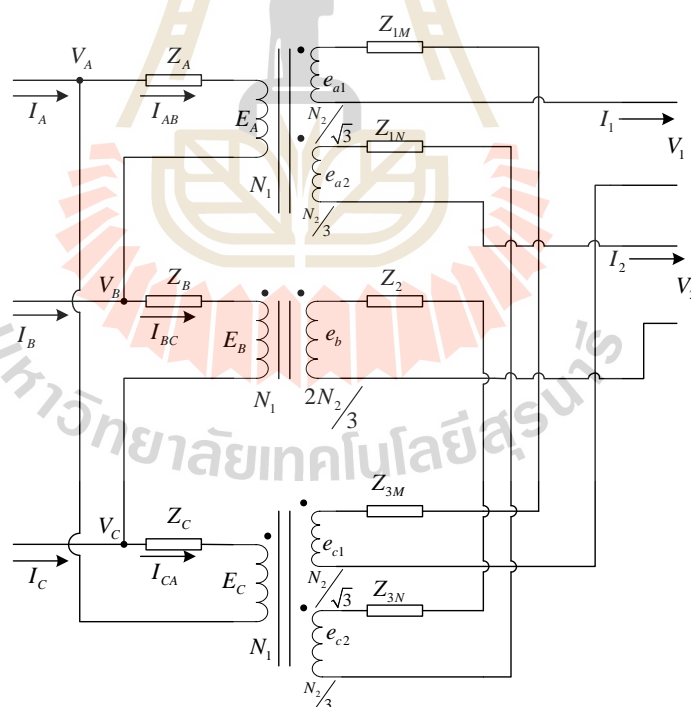
สมการของแบบจำลองและสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อจุดแท่งปกลางด้านปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส C สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.21) – (3.22)

$$\begin{bmatrix} I_T \\ I_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-a_1}{Z_1} & 0 \\ 0 & \frac{-a_2}{Z_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_T \\ V_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2Z_1}(2V_C - V_A - V_B) \\ \frac{1}{2Z_2}(V_A - V_B) \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{2a_1} & \frac{-1}{2a_2} \\ \frac{-1}{2a_1} & \frac{1}{2a_2} \\ \frac{1}{a_1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_T \\ I_M \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

3.4.3 การเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์

หม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ประกอบด้วยหม้อแปลงสามขดลวดสองลูกและหม้อแปลงสองขดลวดหนึ่งลูก โดยขดลวดทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงแบบที่มีการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ต่อแบบเดลต้า ส่วนขดลวดทางด้านทุติยภูมิทั้งห้าขดเชื่อมต่อกันเพื่อให้ได้วงจรขาออกเป็นสองชุด เมื่อพิจารณาขดลวดทางด้านทุติยภูมิสี่ชุดที่ได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส A และ C และอีกหนึ่งชุดที่ได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส B แสดงได้ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมต่อแบบเลอบลองก์เมื่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิสี่ชุดที่ได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส A และ C และหนึ่งชุดที่ได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส B

สมการของแบบจำลองและสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก็เมื่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิที่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส A และ C และอีกหนึ่งชุดที่ได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส B สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.23) – (3.24)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{Z_{ss1}} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{Z_{ss2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{(V_{CA} - V_{AB})}{\sqrt{3a}(Z_{ss1})} \\ \frac{(2V_{BC} - V_{CA} - V_{AB})}{3a(Z_{ss2})} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2}{\sqrt{3}a} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}a} & \frac{1}{a} \\ \frac{1}{\sqrt{3}a} & \frac{-1}{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

เมื่อ $Z_{ss1} = Z_{1M} + Z_{3M} + \frac{2}{3a^2} Z_p$ และ $Z_{ss2} = Z_2 + Z_{3N} + Z_{1N} + \frac{2}{3a^2} Z_p$

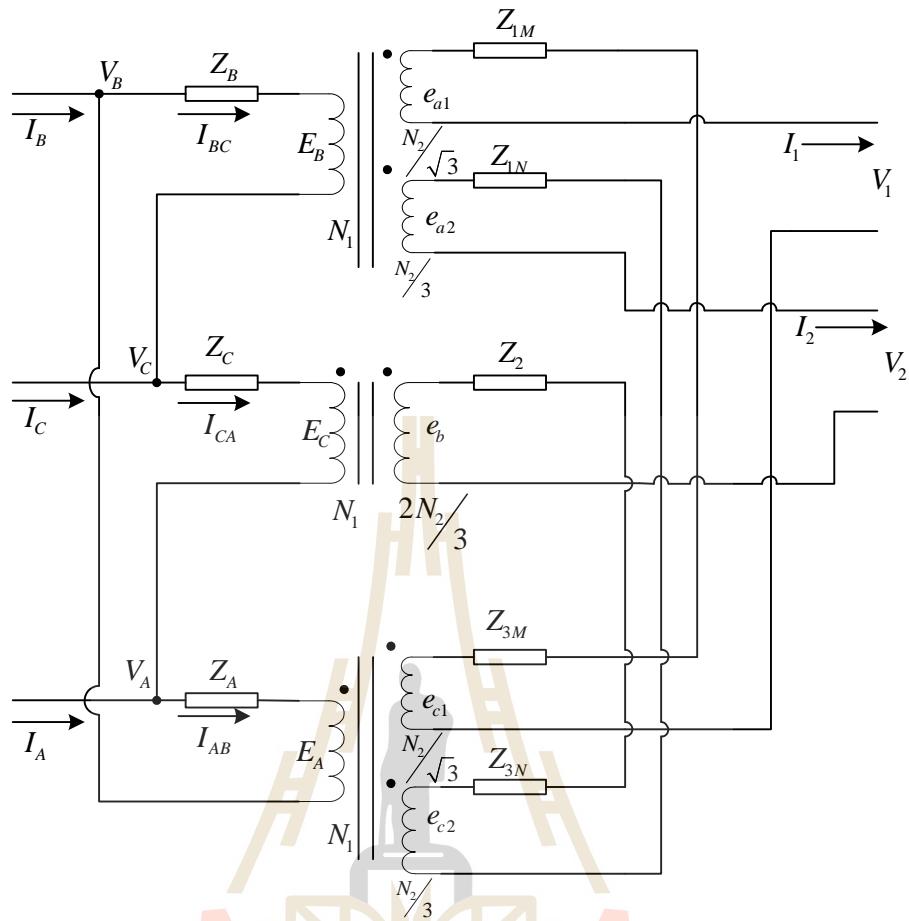
a คือ อัตราส่วนขดลวดของหม้อแปลงมีค่าเท่ากับ $\frac{N_1}{N_2}$

Z_p คือ อิมพีแดนซ์ของขดลวดปฐมภูมิ

Z_{1M}, Z_{3M} คือ อิมพีแดนซ์ของขดลวดทุติยภูมิสองขดลวดสำหรับเฟสที่หนึ่ง

Z_{1N}, Z_{3N} คือ อิมพีแดนซ์ของขดลวดทุติยภูมิสามขดลวดสำหรับเฟสที่สอง

เมื่อพิจารณาขดลวดทางด้านทุติยภูมิที่ชุดที่ได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส A และ B และอีกหนึ่งชุดที่ได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส C แสดงได้ดังรูปที่ 3.22



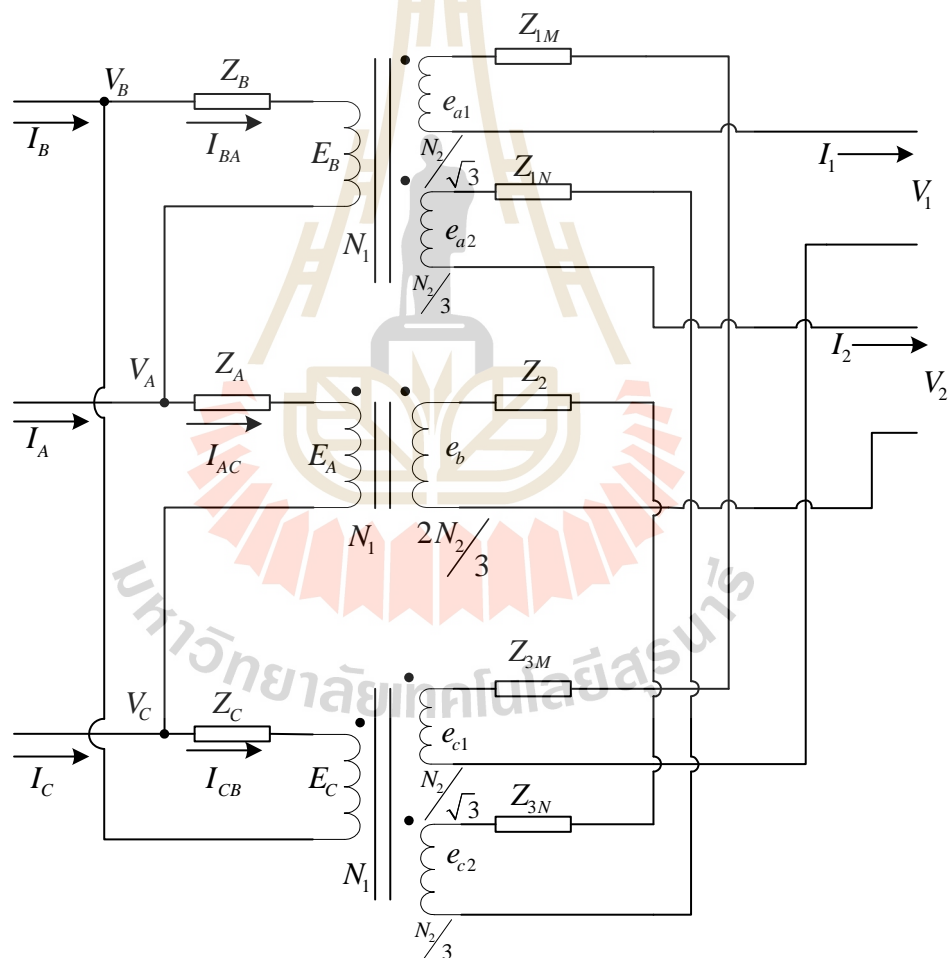
รูปที่ 3.22 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมต่อแบบเลอบลองก์เมื่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิ
สี่ชุดที่ได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส A และ B และหนึ่งชุดที่ได้รับการเหนี่ยวนำจาก
เฟส C

สมการของแบบจำลองและสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสทางด้านปฐม
ภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์เมื่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิสี่ชุด
ได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส A และ B และอีกหนึ่งชุดที่ได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส C สามารถ
คำนวณได้ดังสมการที่ (3.25) – (3.26)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{Z_{ss1}} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{Z_{ss2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{(V_{BC} - V_{AB})}{\sqrt{3}a(Z_{ss1})} \\ \frac{(2V_{CA} - V_{BC} - V_{AB})}{3a(Z_{ss2})} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}a} & \frac{-1}{a} \\ \frac{-2}{\sqrt{3}a} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}a} & \frac{1}{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

เมื่อพิจารณาขดลวดทางด้านทุติยภูมิที่ชุดที่ 1 ได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส B และ C และอีกชุดที่ 2 ได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส A แสดงได้ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมต่อแบบเลอบลองก์เมื่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิที่ชุดที่ 1 ได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส B และ C และชุดที่ 2 ได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส A

สมการของแบบจำลองและสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก็เมื่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิที่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส B และ C และอีกหนึ่งชุดที่ได้รับการเหนี่ยวนำจากเฟส A สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.27) – (3.28)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{Z_{ss1}} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{Z_{ss2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{(V_{CA} - V_{BC})}{\sqrt{3a}(Z_{ss1})} \\ \frac{(2V_{AB} - V_{CA} - V_{BC})}{3a(Z_{ss2})} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3a}} & \frac{1}{a} \\ \frac{1}{\sqrt{3a}} & \frac{-1}{a} \\ \frac{-2}{\sqrt{3a}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

3.5 สนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก

การบอกถึงปริมาณอย่างหนึ่งอย่างใดของสรรพสิ่งในธรรมชาติ อาจกระทำได้โดยการบอกขนาดแต่เพียงอย่างเดียวซึ่งรู้จักกันในนามของปริมาณเชิงสเกลาร์ (Scalar quantities) หรืออาจบอกทั้งขนาดและทิศทางควบคู่กันซึ่งรู้จักกันในนามของปริมาณเชิงเวกเตอร์ (Vector quantities) พื้นฐานสำคัญในการศึกษาสนามแม่เหล็กจะเริ่มต้นจากทฤษฎีของเวกเตอร์ โดยจะเริ่มต้นด้วยพีชคณิตของเวกเตอร์ดังนี้

ถ้ากำหนดให้ \mathbf{A} เป็นเวกเตอร์ใดๆ ในระนาบ xyz จะเขียนเวกเตอร์ \mathbf{A} ภายในปริภูมิ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของพิกัดฉากหรือพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate) เมื่อทราบทฤษฎีและคุณสมบัติของเวกเตอร์ที่จำเป็นแล้วต่อไปจะได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (เฉลิมพล น้ำค้าง, 2538) ซึ่งต้องอาศัยความรู้ของระบบเวกเตอร์จากข้างต้น

ประจุไฟฟ้า (Electric charge) คือปริมาณของความเป็นไฟฟ้าที่สถิตอยู่ในสสารนั้นๆ ซึ่งแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจะเรียกว่าแรงไฟฟ้า (Electric force) และถ้าหากประจุไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่ด้วยจะเกิดแรงที่เรียกว่า แรงแม่เหล็ก (Magnetic force) ด้วยเหตุที่ทั้งแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีแหล่งกำเนิดเดียวกันคือประจุไฟฟ้า การจัดจำแนกกลุ่มของแรงจึงได้จัดให้ทั้งสองแรงนี้

อยู่ในกลุ่มเดียวกันที่เรียกว่า แรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic force) ทุกๆ ประจุในสสารจะมีความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field intensity) หรืออาจเรียกว่า สนามไฟฟ้า (Electric field: E) อยู่ปริมาณหนึ่งที่เป็นตัวกำกับให้ประจุหนึ่งออกแรงกระทำต่อประจุหนึ่งด้วยแรงปริมาณหนึ่ง ส่วนความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density) หรืออาจเรียกว่าสนามแม่เหล็ก (Magnetic field: B) จะเป็นตัวกำกับให้ออกแรงกระทำเฉพาะประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ ซึ่งสนามแม่เหล็กนี้เองที่เป็นรากฐานของกลไกในการผันแปลงพลังงานจากรูปแบบหนึ่งไปสู่รูปแบบอื่นๆ โดยใช้เป็นพื้นฐานสำหรับอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งการผันแปลงพลังงานที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์เหล่านี้จะประกอบด้วยกฎพื้นฐานอยู่ 4 กฎ (Chapman, 1998) คือ

1. เมื่อกระแสไหลในเส้นลวดตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กล้อมรอบเส้นลวดนี้
2. เมื่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นขดลวดที่เกิดจากการพันของเส้นลวดตัวนำ (พื้นฐานปรากฏการณ์หม้อแปลง)
3. เมื่อกระแสไหลในเส้นลวดตัวนำที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงทางกลขึ้น (พื้นฐานปรากฏการณ์มอเตอร์)
4. เมื่อเส้นลวดตัวนำเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้น (พื้นฐานปรากฏการณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า)

ซึ่งปริมาณของสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับวัสดุตัวกลาง สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (3.29)

$$B = \mu H \quad (3.29)$$

เมื่อ μ คือความซาบซึมได้ของแม่เหล็ก (Magnetic permeability) มีค่าเท่ากับ $\mu_0 \mu_r$ โดยที่ μ_0 คือความซาบซึมได้ของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m และ μ_r คือความซาบซึมได้สัมพัทธ์ (Relative permeability) โดยจะขึ้นอยู่กับวัสดุตัวกลาง ส่วน H คือความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity) และจากการศึกษาคุณสมบัติของ B พบว่า โอเปอร์เรเตอร์ เดลของสนามแม่เหล็กจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในสมการที่ (3.30)

$$\nabla \times B = 0 \quad (3.30)$$

จากสมการที่ (3.30) นั่นคือ กฎของเกาส์ (Gauss's law) ในรูปอนุพันธ์ของสนามแม่เหล็ก โดยถ้านำไปประกอบการใช้เอกลักษณ์ดังแสดงในสมการที่ (3.31) จะได้ว่า ไคเวอ์เจนซ์ของ \mathbf{B} เท่ากับศูนย์แล้วย่อมมีอีกเวกเตอร์หนึ่งที่เมื่อกระทำเคิร์ลแล้ว ได้ผลเป็นเวกเตอร์ \mathbf{B} เวกเตอร์ใดที่กระทำเคิร์ลแล้วเท่ากับ \mathbf{B} จะเรียกว่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Magnetic vector potential: \mathbf{A})

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.31)$$

ดังนั้นเมื่อต้องการคำนวณหาสนามแม่เหล็ก \mathbf{B} จึงเลี่ยงโดยการไปคำนวณหาศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก \mathbf{A} ก่อน ซึ่งเป็นการคำนวณที่กระทำได้ง่ายกว่า โดยสนามแม่เหล็ก \mathbf{B} สามารถคำนวณได้ด้วยการเคิร์ลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก \mathbf{A} เท่านั้น

3.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก

เมื่อมีกระแสไหลในขดลวดตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กล้อมรอบเส้นลวดนั้น และเมื่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดที่เกิดจากการพันของเส้นลวดตัวนำ โดยปริมาณของสนามแม่เหล็ก (\mathbf{B}) จะขึ้นอยู่กับวัสดุตัวกลาง ซึ่งได้อธิบายไว้ดังสมการที่ (3.29)

จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) ที่กล่าวว่าสนามแม่เหล็กแปรผันตามเวลาจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า (\mathbf{E}) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (3.32)

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.32)$$

แทนสมการที่ (3.31) ลงในสมการที่ (3.32) จะได้ดังสมการที่ (3.33)

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.33)$$

และจากกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) ที่ใช้กับสนามที่แปรตามเวลา เมื่อสมมติให้ความหนาแน่นของกระแสกระจัด (Displacement current density) มีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากแหล่งจ่ายมีความถี่ต่ำแสดงได้ดังสมการที่ (3.34)

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e \quad (3.34)$$

เมื่อ \mathbf{J}_0 คือความหนาแน่นของกระแสภายนอก (External current density) และ \mathbf{J}_e คือความหนาแน่นของกระแสวน (Eddy current density) โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกระแสวนและค่าสนามไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ (3.35)

$$\mathbf{J}_e = \sigma \mathbf{E} \quad (3.35)$$

เมื่อ σ คือสภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) และจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.33) และสมการที่ (3.35) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกระแสวนและค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเป็นดังสมการที่ (3.36)

$$\mathbf{J}_e = -\sigma \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A} \quad (3.36)$$

นำสมการที่ (3.29) , (3.31) และสมการที่ (3.36) แทนค่าลงในสมการที่ (3.34) จะได้สมการอนุพันธ์ของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเป็นดังสมการที่ (3.37)

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) + \sigma \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A} = \mathbf{J}_0 \quad (3.37)$$

จากการศึกษาคุณสมบัติของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (\mathbf{A}) พบว่า $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ ประกอบกับการใช้เอกลักษณ์ของเวกเตอร์คือ $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$ ทำให้สามารถเขียนสมการของศักย์เวกเตอร์เชิงแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (3.38)

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu \sigma \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}_0 \quad (3.38)$$

และจากคุณสมบัติของ \mathbf{A} จะได้ว่า $\nabla^2 \mathbf{A} = \frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} \mathbf{i} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial y^2} \mathbf{j} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} \mathbf{k}$ จึงสามารถเขียนสมการของศักย์เวกเตอร์เชิงแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (3.39)

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \mu\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right) = -\mu J_0 \quad (3.39)$$

3.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์

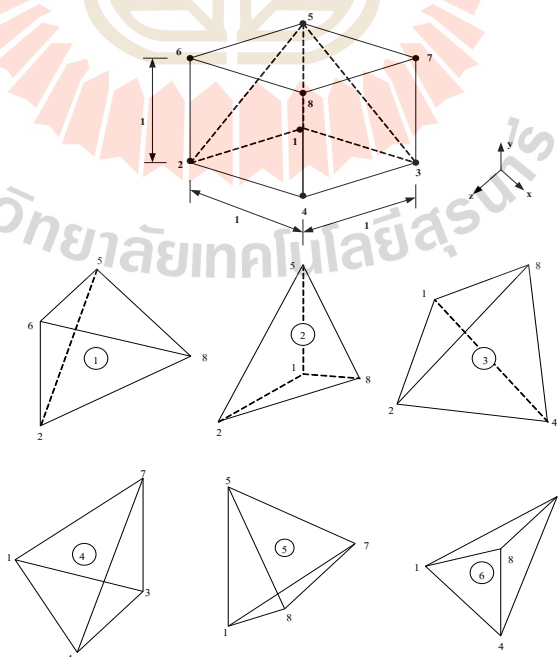
ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนใหญ่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์หรือสมการอินทิกรัล ในกรณีที่เป็สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ส่วนใหญ่แล้วมักจะต้องการผลเฉลยด้วยวิธีประมาณ เนื่องจากความซับซ้อนของสมการ วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณนั้นมีหลายวิธี วิธีที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมาคือ วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม โดยแบ่งวัตถุของปัญหาที่สนใจออกเป็นช่องตารางสี่เหลี่ยม ซึ่งตารางสี่เหลี่ยมเหล่านี้ต่อกันที่จุดต่อตามหัวมุมของสี่เหลี่ยมต่างๆ และขนาดของปัญหาหรือจำนวนตัวไม่รู้ค่าจะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดต่อนี้เอง หากใช้ขนาดตารางสี่เหลี่ยมให้มีขนาดเล็กลงซึ่งหมายถึงต้องเพิ่มจำนวนตารางสี่เหลี่ยมให้มากขึ้นจะสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมของวัตถุดังกล่าวได้ใกล้เคียงมากยิ่งขึ้น แต่ในขณะเดียวกันจำนวนจุดต่อที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้จำนวนสมการผลต่างสี่เหลี่ยมเพิ่มขึ้นด้วย และกระบวนการในการแก้ปัญหาจำเป็นต้องหาหน่วยความจำบนเครื่องคอมพิวเตอร์เพิ่มขึ้นรวมถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะสูงมากขึ้นตามไปด้วย ข้อดีของวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมคือ เป็นวิธีการที่ง่ายแก่การศึกษาและการทำความเข้าใจ รวมไปถึงความสะดวกในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยของปัญหานั้นๆ ส่วนข้อเสียของการใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมมีหลายประการเช่น ความสะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และที่สำคัญที่สุดคือ ความยากลำบากในการประยุกต์วิธีการนี้เพื่อใช้กับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับวัตถุซึ่งมีรูปร่างลักษณะซับซ้อน อย่างเช่น โครงสร้างหรือชิ้นส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้า สาเหตุของความยากลำบากดังกล่าวมีส่วนก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณอีกวิธีหนึ่งที่เรียกว่า วิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ ซึ่งวิธีนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนใดๆ ก็ได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงกว่า

ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้คำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย โดยการแบ่งรูปร่างขอบเขตของปัญหาออกเป็นอิลลิเมนต์ แล้วสร้างสมการของแต่ละอิลลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ และอิลลิเมนต์ต่างๆ จะเชื่อมต่อกันด้วยจุดต่อซึ่งเป็นตำแหน่งที่คำนวณหาค่าผลเฉลย สำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ในงานวิจัยนี้จะดำเนินการคำนวณแบบ 3 มิติ

หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ คือ เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นพื้นที่หลายๆ ส่วนที่เรียกว่าอิลลิเมนต์ โดยที่การกระจัด และแรงภายในแต่ละอิลลิเมนต์ ณ จุดที่อิลลิเมนต์ต่อกันจะต้องเข้ากันได้และสมดุล ซึ่งอิลลิเมนต์ต่างๆนี้ จะขึ้นอยู่กับความละเอียด

ของแต่ละงานว่าต้องการรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับของจริงดั้งเดิมมากเท่าใด ซึ่งถ้าพิจารณาแบบ 3 มิติอาจอยู่ในรูปลักษณะของรูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) รูปทรงหกหน้า (hexahedron) รูปทรงแปดหน้า (octahedron) หรือ รูปทรงพีระมิด (pyramids) ก็ได้ ซึ่งในที่นี้จะใช้อิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) เนื่องจากเป็นรูปทรงที่มีจำนวน โหนดหรือจุดเชื่อมต่อที่น้อยที่สุด อีกทั้งรูปทรงสี่หน้านี้สามารถประกอบกันได้เป็นรูปทรงอื่นๆ ที่กล่าวมาได้ง่าย โดยค่าผลเฉลยโดยประมาณที่มีจำนวนนับที่จะคำนวณออกมานั้นจะมีความแม่นยำขึ้นอยู่กับขนาด และจำนวนอิลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหา นั้น ซึ่งขั้นตอนโดยทั่วไปของวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 6 ขั้นตอน (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2542)

1.แบ่งอิลิเมนต์ย่อยให้กับระบบ แบ่งขอบเขตรูปร่างของระบบปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์ออกเป็นอิลิเมนต์ย่อย ๆ โดยแต่ละอิลิเมนต์จะมีความเป็นปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3.24 ซึ่งเป็นรูปแสดงการแบ่งอิลิเมนต์ของรูปร่างปัญหาแบบ 3 มิติ (ระนาบ xyz) โดยใช้อิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) และเพื่อเป็นแนวทางในการสร้าง โปรแกรมการคำนวณ สำหรับการป้อนข้อมูลของทุก ๆ อิลิเมนต์ จึงขอยกตัวอย่างรูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย อิลิเมนต์ รูปทรงสี่หน้าทั้งหมด 6 อิลิเมนต์ 8 โหนด ซึ่งข้อมูลเบื้องต้นสำหรับ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ต้องการ คือ หมายเลขของอิลิเมนต์และหมายเลขของ โหนด พร้อมทั้งค่าพิกัดของแต่ละ โหนด ซึ่งสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.24 รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย 6 อิลิเมนต์ 8 โหนด เมื่อพิจารณาอิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า

ตารางที่ 3.2 ลักษณะข้อมูลของอิทธิเมนต์

หมายเลข อิทธิเมนต์	หมายเลขโนด			
	โนด i	โนด j	โนด k	โนด l
1	2	8	5	6
2	1	2	8	5
3	1	2	4	8
4	1	3	4	7
5	1	7	8	5
6	1	8	4	7

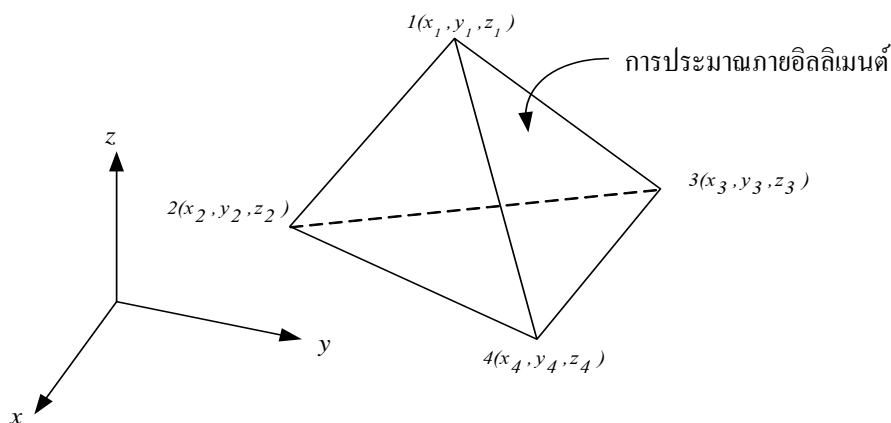
ตารางที่ 3.3 ลักษณะข้อมูลของจุดต่อ

หมายเลขโนด	พิกัดแกน x	พิกัดแกน y	พิกัดแกน z
1	0	0	0
2	0	0	1
3	1	0	0
4	1	0	1
5	0	1	0
6	0	1	1
7	1	1	0
8	1	1	1

2. เลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิทธิเมนต์ อย่างในกรณีอิทธิเมนต์รูปทรงสี่หน้าจะประกอบด้วย 4 โหนดที่มีตัวห้อย 1 2 3 และ 4 ซึ่งเป็นการประมาณค่าภายในอิทธิเมนต์แบบเชิงเส้นดังแสดงในรูป 3.25 ตำแหน่งของโนด (x_n, y_n, z_n) , $i = 1, 2, 3, 4$ เป็นตำแหน่งของตัวที่ไม่ทราบค่า A_i โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพธ์โดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนอิทธิเมนต์ $A(x, y, z)$ เป็นแบบเชิงเส้น ดังสมการที่ (3.40)

$$A_e(x, y, z) = a + bx + cy + dz \quad (3.40)$$

โดยที่ a, b, c, d เป็นค่าคงที่ ซึ่งสามารถหาได้จากโนดทั้งสี่ดังนี้



รูปที่ 3.25 การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนออลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า

$$A_e(x_1, y_1, z_1) = A_1 = a + bx_1 + cy_1 + dz_1$$

$$A_e(x_2, y_2, z_2) = A_2 = a + bx_2 + cy_2 + dz_2$$

$$A_e(x_3, y_3, z_3) = A_3 = a + bx_3 + cy_3 + dz_3$$

$$A_e(x_4, y_4, z_4) = A_4 = a + bx_4 + cy_4 + dz_4$$

นำค่า a, b, c, d ที่ได้จากการแก้สมการทั้งสี่ข้างต้น แทนค่ากลับไปในสมการที่ (3.40) จะได้ลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนออลลิเมนต์เป็นดังสมการที่ (3.41)

$$A_e(x, y, z) = A_1 N_1 + A_2 N_2 + A_3 N_3 + A_4 N_4 \quad (3.41)$$

ซึ่ง $N_i, i = 1, 2, 3, 4$ คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในออลลิเมนต์ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.42)

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad (3.42)$$

โดยที่

$$a_1 = x_4(y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_3(y_4 z_2 - y_2 z_4) + x_2(y_3 z_4 - y_4 z_3)$$

$$a_2 = x_4(y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3(y_1 z_4 - y_4 z_1) + x_1(y_4 z_3 - y_3 z_4)$$

$$a_3 = x_4(y_1 z_2 - y_2 z_1) + x_2(y_4 z_1 - y_1 z_4) + x_1(y_2 z_4 - y_4 z_2)$$

$$a_4 = x_3(y_2 z_1 - y_1 z_2) + x_2(y_1 z_3 - y_3 z_1) + x_1(y_3 z_2 - y_2 z_3)$$

$$b_1 = y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3)$$

$$b_2 = y_4(z_1 - z_3) + y_1(z_3 - z_4) + y_3(z_4 - z_1)$$

$$b_3 = y_4(z_2 - z_1) + y_2(z_1 - z_4) + y_1(z_4 - z_2)$$

$$b_4 = y_3(z_1 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1)$$

$$c_1 = x_4(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_3(z_4 - z_2)$$

$$c_2 = x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3)$$

$$c_3 = x_4(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1)$$

$$c_4 = x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2)$$

$$d_1 = x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3)$$

$$d_2 = x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1)$$

$$d_3 = x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2)$$

$$d_4 = x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1)$$

และ V คือปริมาตรของแต่ละอิลลิเมนต์ หาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ แสดงได้ดังสมการที่ (3.43)

$$6V = \det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

ความแม่นยำของผลเฉลยจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมติขึ้นมา มีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหามากน้อยเพียงใดด้วย

3. สร้างสมการของอิลลิเมนต์ (Element formulation) ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหา ซึ่งขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญของวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ อย่างเช่นกรณีสมการของอิลลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ยมที่ได้ยกมาเป็นตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.25 จะอยู่ในรูปแบบดังแสดงในสมการที่ (3.44)

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{bmatrix}_e \begin{bmatrix} A_i \\ A_j \\ A_k \\ A_l \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} f_i \\ f_j \\ f_k \\ f_l \end{bmatrix}_e \quad (3.44)$$

ซึ่งเขียนโดยย่อได้ว่า $[K]_e[A]_e = [F]_e$ โดย $[A]_e$ คือ เมทริกซ์ตัวไม่ทราบค่าที่โนด และตัวห้อย e แสดงให้ทราบว่าเป็นเมทริกซ์ระดับอีลิเมนต์ ซึ่งสมการของอีลิเมนต์ดังกล่าว จำเป็นต้องถูกสร้างขึ้นมาให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ การสร้างสมการของอีลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการที่ (3.41) สามารถทำได้โดย

- วิธีการโดยตรง (Direct approach) วิธีนี้สามารถใช้ได้เฉพาะกับปัญหาที่เข้าใจได้ง่าย ๆ อย่างเช่น ปัญหาต่าง ๆ ในรูปทรง 1 มิติ เท่านั้น ซึ่งไม่สามารถขยายเปลี่ยนแปลงเพื่อนำไปใช้กับปัญหาใน 2 หรือ 3 มิติโดยทั่วไปได้

- วิธีการแปรผัน (Variational approach) หลักการสำคัญของวิธีการนี้คือ จำเป็นจะต้องทำการหาหรือสร้างฟังก์ชัน ซึ่งเมื่อทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันนั้นแล้ว จะเป็นผลให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับปัญหาที่กำลังสนใจอยู่ อย่างไรก็ตามวิธีการแปรผันเป็นวิธีการดั้งเดิมที่ใช้กันในช่วงต้น ๆ ของการพัฒนาวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องทางด้านโครงสร้าง และยังมีจุดอ่อนอีกคือ จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ ซึ่งปัญหาหลาย ๆ ชนิดในทางปฏิบัติสามารถสร้างสมการอนุพันธ์ขึ้นมาได้ แต่ไม่สามารถหาฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกันนั้นได้

- วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of weighted residuals) วิธีนี้จะใช้วิธีการสร้างสมการไฟไนต์อีลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้อง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการสร้างสมการไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับปัญหาโดยทั่ว ๆ ไป และถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ ในปัจจุบัน

4. นำสมการของแต่ละอีลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน (Assembly) เป็นสมการรวมของระบบจากขั้นตอนที่ 1 หากแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอีลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย n โหนด จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น n สมการ โดยแสดงได้ดังสมการที่ (3.45)

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdot & \cdot & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdot & \cdot & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdot & \cdot & K_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdot & \cdot & K_{nn} \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times n)} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} \quad (3.45)$$

หรือเขียนโดยย่อได้ดังนี้ $[K]_{\text{sys}}[A]_{\text{sys}} = [f]_{\text{sys}}$ จากสมการที่ (3.45) เมทริกซ์ $[K]_{\text{sys}}$ จะมีคุณสมบัติของความเป็นเมทริกซ์สมมาตร กล่าวคือ $[K]_{\text{sys}} = [K]_{\text{sys}}^T$ และมีคุณสมบัติของการจับกลุ่มกันของค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์บริเวณแนวทแยงมุมของเมทริกซ์ ซึ่งจะมีลักษณะอยู่รวมกันเป็นแถบ (Banded matrix) จากคุณสมบัติดังกล่าวนี้ จะก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางปฏิบัติที่จำเป็นต้องใช้จำนวนโนดเป็นจำนวนมากเพื่อที่จะก่อให้เกิดผลเฉลยที่เที่ยงตรง โดยสามารถพัฒนาให้เก็บเฉพาะค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์ไว้ในหน่วยความจำเพื่อใช้ในการคำนวณเท่านั้น

การนำสมการย่อยของแต่ละอิเลลิเมนต์มาประกอบกันเข้าเป็นสมการรวมของระบบ จำเป็นต้องมีหลักการซึ่งหลักการที่จะกล่าวนี้เป็นหลักการที่ง่าย สามารถทำได้โดยสะดวก เหมาะกับรูปร่างของปัญหาที่มีอิเลลิเมนต์ย่อยจำนวนมาก ๆ และหลักการนี้จะถูกนำไปใช้ในการพัฒนาโปรแกรมด้วย โดยสามารถทำความเข้าใจได้จากตัวอย่างรูปร่างของปัญหาดังรูปที่ 3.1 กล่าวคือจะทำการสร้างสมการรวมของระบบซึ่งประกอบด้วย 6 อิเลลิเมนต์ 8 โหนด โดยจะแสดงการรวมของเมทริกซ์ $[K]_{\text{sys}}$ เพื่อเป็นตัวอย่าง

วิธีการนี้ทำได้โดยเขียนสมการของอิเลลิเมนต์ต่าง ๆ พร้อมทั้งกำกับหมายเลขของโนดทางแฉวนอนและแฉวดิ่งของแต่ละอิเลลิเมนต์ให้ถูกต้อง โดยจากรูปที่ 3.24 $[K]_e$ ของอิเลลิเมนต์ที่ 1 ประกอบด้วยโนดหมายเลข 2 8 5 และ 6 ส่วน $[K]_e$ ของอิเลลิเมนต์ที่ 2 ประกอบด้วยโนดหมายเลข 1 2 8 และ 5 ส่วน $[K]_e$ ของอิเลลิเมนต์ที่ 3 ประกอบด้วยโนดหมายเลข 1 2 4 และ 8 ส่วน $[K]_e$ ของอิเลลิเมนต์ที่ 4 ประกอบด้วยโนดหมายเลข 1 3 4 และ 7 ส่วน $[K]_e$ ของอิเลลิเมนต์ที่ 5 ประกอบด้วยโนดหมายเลข 1 7 8 และ 5 ส่วน $[K]_e$ ของอิเลลิเมนต์ที่ 6 ซึ่งเป็นอิเลลิเมนต์สุดท้ายประกอบด้วยโนดหมายเลข 1 8 4 และ 7 โดยสามารถเขียนแสดงให้เห็นได้ดังนี้

$$[K]_{e1} = \begin{bmatrix} (2) & (8) & (5) & (6) \\ (2) & a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ (8) & a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ (5) & a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ (6) & a_4 & b_4 & c_4 & d_4 \end{bmatrix}$$

$$[K]_{e2} = \begin{bmatrix} (1) & (2) & (8) & (5) \\ (1) & e_1 & f_1 & g_1 & h_1 \\ (2) & e_2 & f_2 & g_2 & h_2 \\ (8) & e_3 & f_3 & g_3 & h_3 \\ (5) & e_4 & f_4 & g_4 & h_4 \end{bmatrix}$$

$$[K]_{e3} = \begin{bmatrix} (1) & (2) & (4) & (8) \\ (1) & i_1 & j_1 & k_1 & l_1 \\ (2) & i_2 & j_2 & k_2 & l_2 \\ (4) & i_3 & j_3 & k_3 & l_3 \\ (8) & i_4 & j_4 & k_4 & l_4 \end{bmatrix}$$

$$[K]_{e4} = \begin{bmatrix} (1) & (3) & (4) & (7) \\ (1) & m_1 & n_1 & o_1 & p_1 \\ (3) & m_2 & n_2 & o_2 & p_2 \\ (4) & m_3 & n_3 & o_3 & p_3 \\ (7) & m_4 & n_4 & o_4 & p_4 \end{bmatrix}$$

$$[K]_{e5} = \begin{bmatrix} (1) & (7) & (8) & (5) \\ (1) & q_1 & r_1 & s_1 & t_1 \\ (7) & q_2 & r_2 & s_2 & t_2 \\ (8) & q_3 & r_3 & s_3 & t_3 \\ (5) & q_4 & r_4 & s_4 & t_4 \end{bmatrix}$$

$$[K]_{e6} = \begin{matrix} & \begin{matrix} (1) & (8) & (4) & (7) \end{matrix} \\ \begin{matrix} (1) \\ (8) \\ (4) \\ (7) \end{matrix} & \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & w_1 & x_1 \\ u_2 & v_2 & w_2 & x_2 \\ u_3 & v_3 & w_3 & x_3 \\ u_4 & v_4 & w_4 & x_4 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

เมื่อมีหมายเลขกำกับทั้งทางแถวอนและแถวตั้งกำกับสัมประสิทธิ์ทุกตัวของเมทริกซ์ของทุกอิลลิเมนต์แล้ว จากนั้นนำสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ เหล่านี้มาใส่ลงในเมทริกซ์ระบบรวม $[K]_{\text{sys}}$ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ b_3 ซึ่งอยู่ในแถวอนที่ 5 แถวตั้งที่ 8 ของอิลลิเมนต์ย่อยที่ 1 จะไปปรากฏอยู่ในแถวอนที่ 5 แถวตั้งที่ 8 ของเมทริกซ์ระบบรวมดังแสดงในสมการ เป็นต้น

$$[K]_{\text{sys}} = \begin{matrix} & \begin{matrix} (1) & (2) & (3) & (4) & (5) & (6) & (7) & (8) \end{matrix} \\ \begin{matrix} (1) \\ (2) \\ (3) \\ (4) \\ (5) \\ (6) \\ (7) \\ (8) \end{matrix} & \begin{bmatrix} e_1+i_1+m_1+q_1+u_1 & f_1+j_1 & n_1 & k_1+o_1+w_1 & h_1+t_1 & 0 & p_1+r_1+x_1 & g_1+l_1+s_1+v_1 \\ c_2+i_2 & a_1+f_2+j_2 & 0 & k_2 & c_1+h_2 & d_1 & 0 & b_1+g_2+l_2 \\ m_2 & 0 & n_2 & o_2 & 0 & 0 & p_2 & 0 \\ i_3+m_3+u_3 & j_3 & n_3 & k_3+o_3+w_3 & 0 & 0 & p_3+x_3 & l_3+v_3 \\ e_4+q_4 & a_3+f_4 & 0 & 0 & c_3+h_4+t_4 & d_3 & r_4 & b_3+g_4+s_4 \\ 0 & a_4 & 0 & 0 & c_4 & d_4 & 0 & b_4 \\ m_4+q_2+u_4 & 0 & n_4 & o_4+w_4 & t_2 & 0 & p_4+r_2+x_4 & s_2+v_4 \\ c_3+i_4+q_3+u_2 & a_2+f_3+j_4 & 0 & k_4+w_2 & c_2+h_3+t_3 & d_2 & r_3+x_2 & b_2+g_3+l_4+s_3+v_2 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

5. ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ที่สอดคล้องกับปัญหาในสมการรวมของระบบเพื่อหาค่าผลเฉลย โดยการแก้สมการรวมของระบบเพื่อหาตัวไม่ทราบค่าที่โนด

6. คำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการต่อไป เมื่อทราบค่าผลลัพธ์ที่โนดต่าง ๆ แล้วสามารถคำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับผลลัพธ์นี้ต่อไปได้

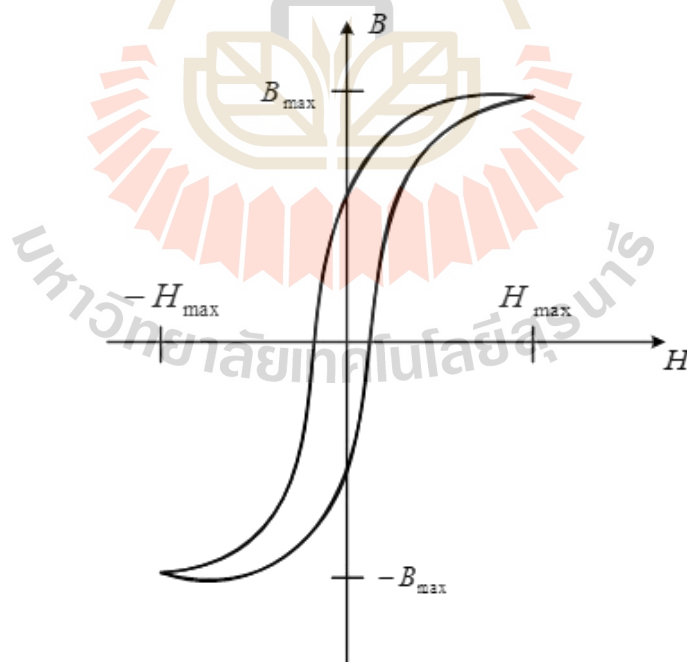
จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอน จะเห็นได้ว่าระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์เป็นวิธีที่มีแบบแผนเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีส่วนที่สำคัญที่สุดคือการสร้างสมการของอิลลิเมนต์ในขั้นตอนที่ 3 ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่กำหนด และในขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้จะนำไปพัฒนาขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณต่อไป

3.8 ความสูญเสียในแกนเหล็ก (เวคิน ปิยรัตน์, 2542)

ในทางปฏิบัตินั้น เครื่องจักรทุกประเภทที่ประกอบด้วยวงจรแม่เหล็กเมื่อมีการใช้งานวงจรแม่เหล็กจะเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กขึ้น โดยทั่วไปมักจะอยู่ในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก โดยความสูญเสียในแกนเหล็กดังกล่าวนี้จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนได้แก่ ความสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis losses) และความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy current losses)

3.8.1 ความสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส

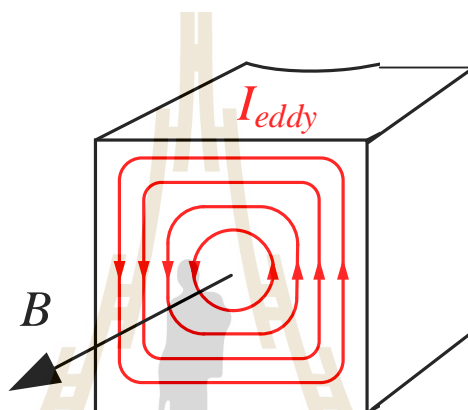
ความสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิสเป็นความสูญเสียที่เกิดจากการกระตุ้นวงจรแม่เหล็กด้วยไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งโดยทั่วไปหมายถึงพลังงานที่สูญเสียไปในการสร้างวงรอบฮิสเทอรีซิส แสดงได้ดังรูปที่ 3.26 พลังงานดังกล่าวนี้จะถูกใช้ไปในการเคลื่อนที่ของไดโพลแม่เหล็ก (Magnetic dipole) ในแกนเหล็กและจะถูกกระจายออกมาอยู่ในรูปของความร้อน โดยทั่วไปแล้วความสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิสนี้จะขึ้นกับขนาดของวงรอบฮิสเทอรีซิสของแกนเหล็กชนิดนั้นๆ หากเป็นแกนเหล็กชนิดที่มีขนาดของวงรอบฮิสเทอรีซิสใหญ่ก็必将มีความสูญเสียมาก นอกจากนี้แล้วความสูญเสียชนิดนี้ยังขึ้นอยู่กับความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับของวงจรอีกด้วย



รูปที่ 3.26 ความสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส

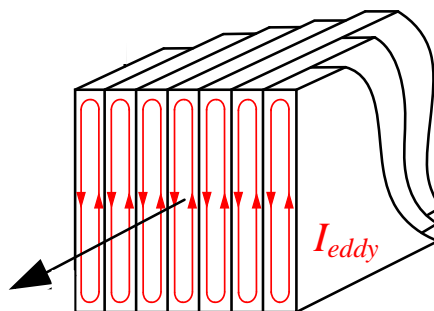
3.8.2 ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนเป็นความสูญเสียอีกชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก ซึ่งจากพฤติกรรมของการกระตุ้นวงจรแม่เหล็กด้วยไฟฟ้ากระแสสลับนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นตามกฎของเลนซ์ (Len's law) จะต้องมีการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสวงรอบปิดเพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็กให้มาต่อต้านการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กนี้ ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นนี้จะถูกเรียกว่า กระแสไหลวน (Eddy current) ซึ่งจะไหลวนในแกนเหล็กแสดงได้ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

โดยทั่วไปแล้วแกนเหล็กจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าค่าหนึ่ง เมื่อกระแสไหลวนดังกล่าวนี้ไหลผ่านค่าความต้านทานในแกนเหล็กจะส่งผลให้เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าซึ่งอยู่ในรูปของความร้อนขึ้น จึงเรียกความสูญเสียที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้ว่า ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน โดยการลดความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนนี้สามารถกระทำได้โดยใช้เหล็กแผ่นบางหลายๆ แผ่นวางซ้อนกันจนได้ขนาดแกนเหล็กตามต้องการซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.28 ซึ่งการที่พื้นที่หน้าตัดแผ่นเหล็กบางน้อยลงจะทำให้ขนาดของกระแสไหลวนลดลงด้วย จึงสามารถลดความสูญเสียลงได้



รูปที่ 3.28 การลดความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนด้วยแผ่นเหล็กบางหลายๆ แผ่นวางซ้อนกัน

การคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงขึ้นอยู่กับขนาดของสนามแม่เหล็ก (B) โดยจะไม่พิจารณาค่าความต้านทานของขดลวดและค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลซึ่งมีปริมาณน้อย โดยที่ค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (Core losses: P_{core}) ประกอบไปด้วย 2 ส่วนดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นคือ กำลังงานสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (P_h) และ กำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (P_e) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.46), (3.47) และ (3.48) ตามลำดับ

$$P_{core} = P_h + P_e \quad (3.46)$$

$$P_h = K_h f B_{max}^n \quad (3.47)$$

โดยที่ K_h คือ ค่า coefficient steinmetz's มีค่าอยู่ระหว่าง 275-500
 n คือ ค่าคงที่ steinmetz's มีค่าอยู่ระหว่าง 1.0-3.0
 B_{max} คือ ค่าความหนาแน่นสูงสุดของสนามแม่เหล็ก (Tesla)
 f คือ ความถี่ของแรงดันไฟฟ้า (Hz)

$$P_h = K_e f^2 B_{max}^n \quad (3.48)$$

โดยที่ K_e คือ ค่า specific resistance of core material ซึ่งมีค่าเท่ากับ $K_e = t^2 V$
 V คือ ปริมาตรของแกนเหล็ก
 t คือ ความหนาของแผ่นเหล็ก

3.9 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย อันได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า ระบบรางไฟฟ้าสำหรับรถไฟความเร็วสูง การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบพิเศษ สนามแม่เหล็กและสัณยศาสตร์แม่เหล็ก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และความสูญเสียในแกนเหล็ก โดยได้กล่าวเฉพาะส่วนที่จะนำมาใช้หรือส่วนที่จะถูกกล่าวอ้างถึงในบทต่อ ๆ ไป ทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้แก่ผู้ดำเนินงานวิจัย



บทที่ 4

การคำนวณสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

4.1 บทนำ

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(Finite element method : FEM) เป็นวิธีที่ใช้ในการหาผลเฉลยแบบประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์หรือสมการอินทิกรัลดังเช่น สมการสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และสมการการกระจายของอุณหภูมิ เป็นต้น และเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์งานที่มีโครงสร้างซับซ้อน หรือรูปร่างที่มีลักษณะโค้งมนได้ อีกทั้งประสิทธิภาพและการประมวลผลที่สูงขึ้นของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันสามารถรองรับการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ นอกจากนี้ในบางระบบที่มีบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์ที่มีพื้นที่ขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับปัญหารวมของระบบที่เป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็สามารถแบ่งกริดขนาดเล็กหรือใหญ่ ที่สามารถเชื่อมความสัมพันธ์ของ 2 บริเวณที่มีขนาดแตกต่างกันได้อย่างครอบคลุมและอิสระ อย่างเช่น งานวิจัยนี้ที่พิจารณาค่าสนามแม่เหล็กที่ปรากฏขึ้นภายในบริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษสำหรับรถไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งพื้นที่บริเวณทั้งสองเป็นพื้นที่ขนาดเล็ก ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็สามารถตีกริดรูปทรงสี่หน้าสำหรับการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติให้มีขนาดเล็กเหมาะสมเพื่อการวิเคราะห์ภายในบริเวณดังกล่าวให้ได้ค่าผลเฉลยที่มีความแม่นยำได้ ในขณะที่บริเวณส่วนใหญ่เป็นน้ำมันหม้อแปลงและไม่มีความจำเป็นสำหรับการศึกษามากนัก ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็สามารถตีกริดให้มีขนาดใหญ่เพื่อลดปริมาณของกริดบริเวณที่ไม่จำเป็นเพื่อช่วยย่นระยะเวลาในการหาผลเฉลยแต่ยังสามารถรักษาความแม่นยำของผลเฉลยได้เช่นกัน ซึ่งการดำเนินการแบบนี้จะก่อให้เกิดจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในระบบที่ศึกษามีจำนวนไม่มาก และสามารถคำนวณหาผลเฉลย ณ บริเวณที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว รวมทั้งยังสามารถจำลองผลระบบที่มีความแตกต่างกันทางด้านวัสดุได้ ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า และขั้นตอนการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมทั้งประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวภายในแกนเหล็กของหม้อแปลงต่อไป

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กแบบ 3 มิติของหม้อแปลงไฟฟ้า

เมื่อมีกระแสไหลในขดลวดตัวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กล้อมรอบเส้นลวดนั้น และเมื่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดที่เกิดจากการพันของเส้นลวดตัวนำ ซึ่งปริมาณของสนามแม่เหล็ก (\mathbf{B}) จะขึ้นอยู่กับวัสดุตัวกลางสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.1)

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (4.1)$$

เมื่อ μ คือ ความซาบซึมได้ของแม่เหล็ก (Magnetic permeability) มีค่าเท่ากับ $\mu_0 \mu_r$
 โดยที่ μ_0 คือ ความซาบซึมได้ของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m
 μ_r คือ ความซาบซึมได้สัมพัทธ์ (Relative permeability) โดยจะขึ้นกับวัสดุตัวกลาง
 \mathbf{H} คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity)

ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็ก \mathbf{B} สามารถดำเนินการได้โดยเรียงไปคำนวณหาศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก \mathbf{A} ก่อน เนื่องจากคำนวณได้ง่ายกว่า โดยที่สนามแม่เหล็ก \mathbf{B} สามารถคำนวณได้ด้วยการเคิร์ลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก \mathbf{A} เท่านั้น ดังสมการที่ (4.2)

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (4.2)$$

จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) ที่กล่าวว่า สนามแม่เหล็กแปรผันตามเวลาจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า \mathbf{E} ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (4.3)

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4.3)$$

แทนสมการที่ (4.2) ลงในสมการที่ (4.3) จะได้เป็นสมการที่ (4.4)

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \mathbf{A} \quad (4.4)$$

และจากกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) ที่ใช้กับสนามที่แปรเปลี่ยนตามเวลา เมื่อสมมติให้ ความหนาแน่นของกระแสกระจัด (Displacement current density) มีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากแหล่งจ่ายมีความถี่ต่ำ แสดงได้ดังสมการที่ (4.5)

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e \quad (4.5)$$

เมื่อ \mathbf{J}_0 คือความหนาแน่นของกระแสภายนอก (External current density) และ \mathbf{J}_e คือความหนาแน่นของกระแสวน (Eddy current density) โดยที่

$$\mathbf{J}_e = \sigma \mathbf{E} \quad (4.6)$$

เมื่อ σ คือสภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) และจากความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.4) จึงได้

$$\mathbf{J}_e = -\sigma \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A} \quad (4.7)$$

นำสมการที่ (4.1), (4.2) และ (4.7) แทนลงในสมการที่ (4.5) จะได้

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) + \sigma \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A} = \mathbf{J}_0 \quad (4.8)$$

จากการศึกษาคุณสมบัติของ \mathbf{A} พบว่า $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ ประกอบกับการใช้เอกลักษณ์ของเวกเตอร์ คือ $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$ ทำให้สามารถเขียนสมการของศักย์เวกเตอร์เชิงแม่เหล็กดังสมการที่ (4.9)

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu \sigma \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}_0 \quad (4.9)$$

ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาหม้อแปลงไฟฟ้าใน 3 มิติตามระนาบ x y และ z ซึ่งแปรผันตามเวลา จะสามารถคำนวณได้ดังสมการที่

(4.10) โดยสมการจะปรากฏอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation : PDE) อันดับสอง

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - \sigma \left(\frac{\partial}{\partial t} A \right) + J_0 = 0 \quad (4.10)$$

ในกรณีปัญหาที่พิจารณาเป็นระบบที่แปลงจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ (Time harmonic) โดยสามารถแทน A อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน $A = Ae^{j\omega t}$ (Christopoulos, 1995) ดังนั้น

$$\frac{\partial}{\partial t} A = j\omega A \quad (4.11)$$

เมื่อพิจารณาใน 3 มิติ แทนค่าสมการที่ (4.11) ลงในสมการที่ (4.10) จะได้สมการเป็น

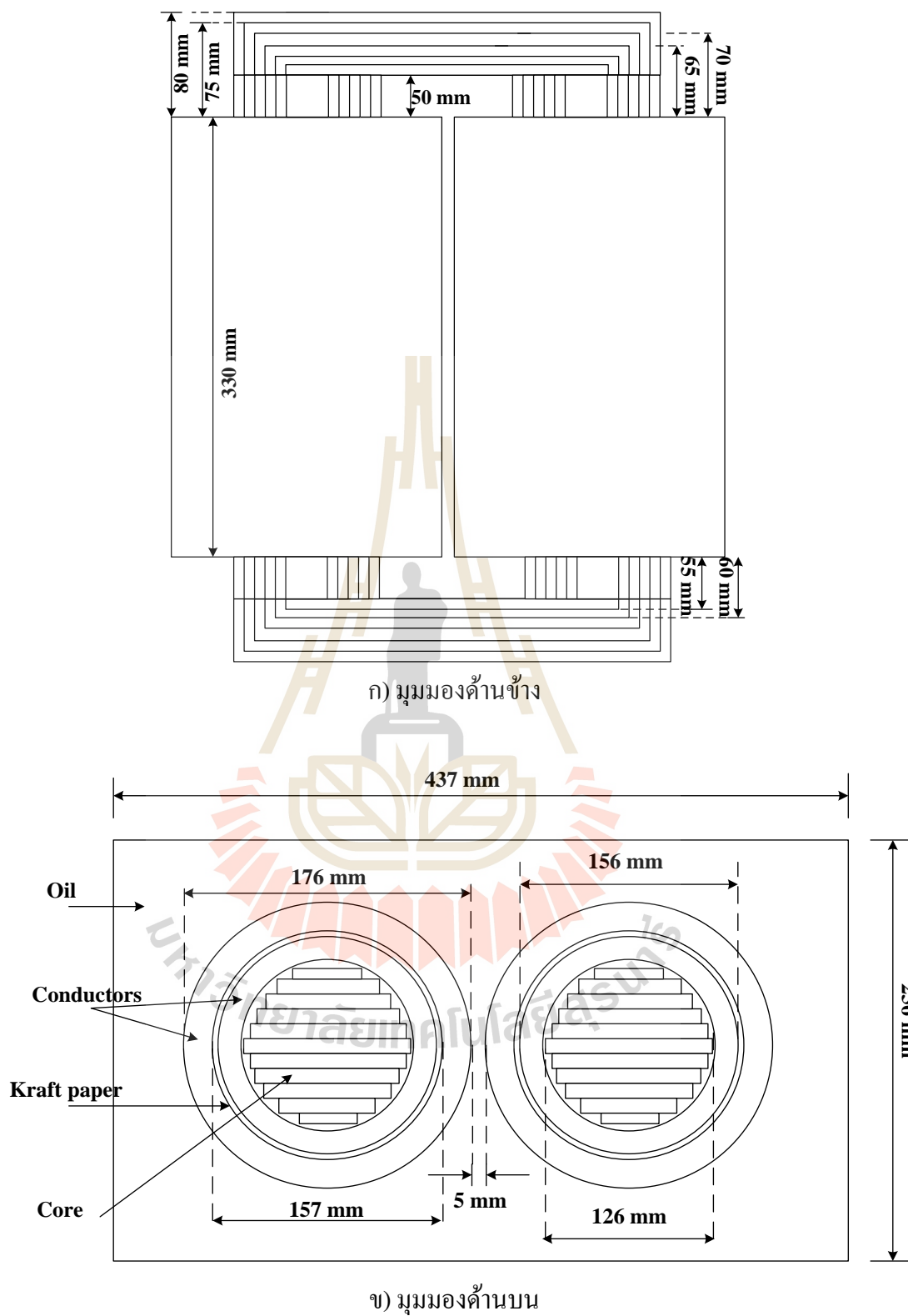
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - j\sigma\omega A + J_0 = 0 \quad (4.12)$$

4.3 การคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

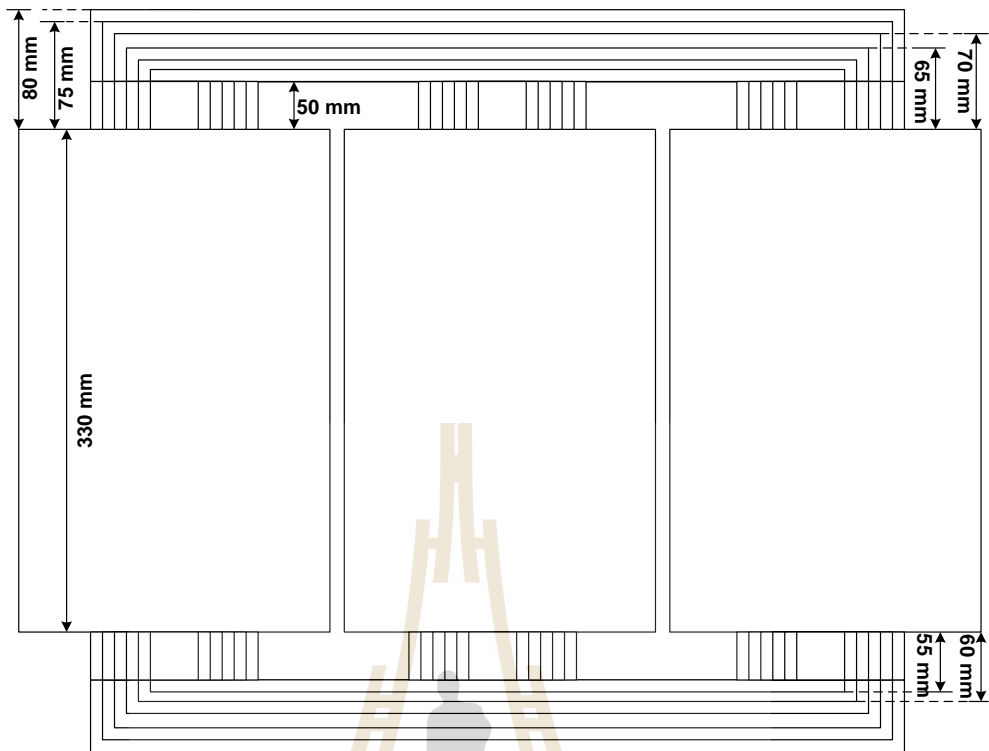
สืบเนื่องจากสมการเชิงอนุพันธ์เพื่อใช้ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าที่แสดงในสมการที่ (4.12) สำหรับปัญหาในรูปแบบ 3 มิตินั้นหาผลเฉลยแม่นยำได้ยาก ดังนั้นการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงถูกนำมาใช้ในการนี้ ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการดำเนินงานต่าง ๆ ดังนี้

4.3.1 การออกแบบเอลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา

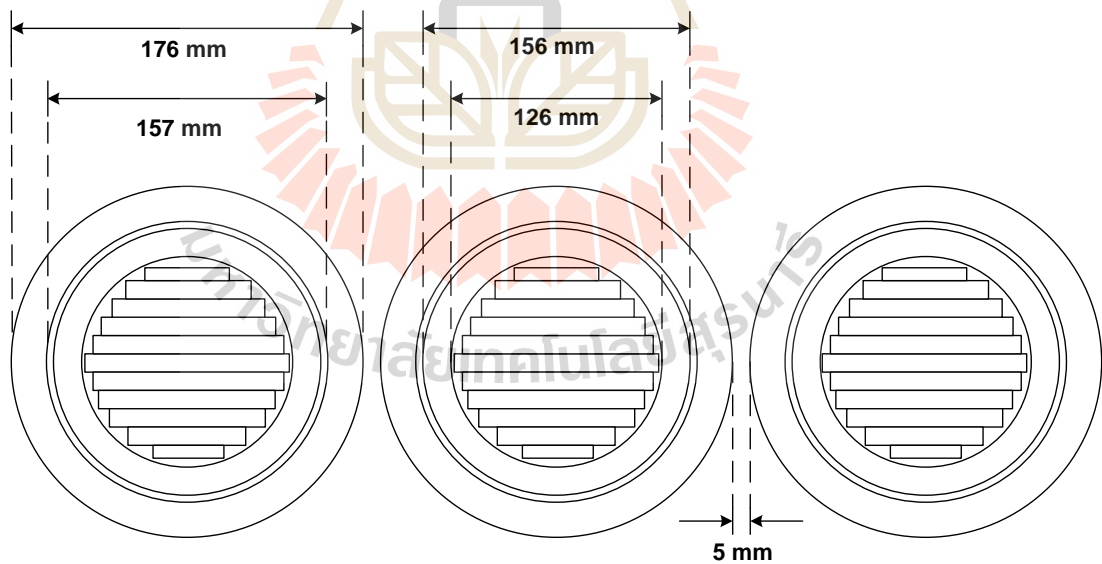
สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษสำหรับใช้งานในระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 20MVA, 69kV/25kV ที่ได้มีการเชื่อมต่อทั้งเส้น 3 รูปแบบ ได้แก่ การเชื่อมต่อแบบวี (V-connection) การเชื่อมต่อแบบสกอตต์ (Scott connection) ซึ่งสามารถแสดงขนาดและพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 4.1 และการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ (Le-Blanc connection) ซึ่งสามารถแสดงขนาดและพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ขนาดและรายละเอียดของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีและแบบสกอตต์เมื่อ
ยังไม่มีกรอกแบบรูปร่างของแกนเหล็ก



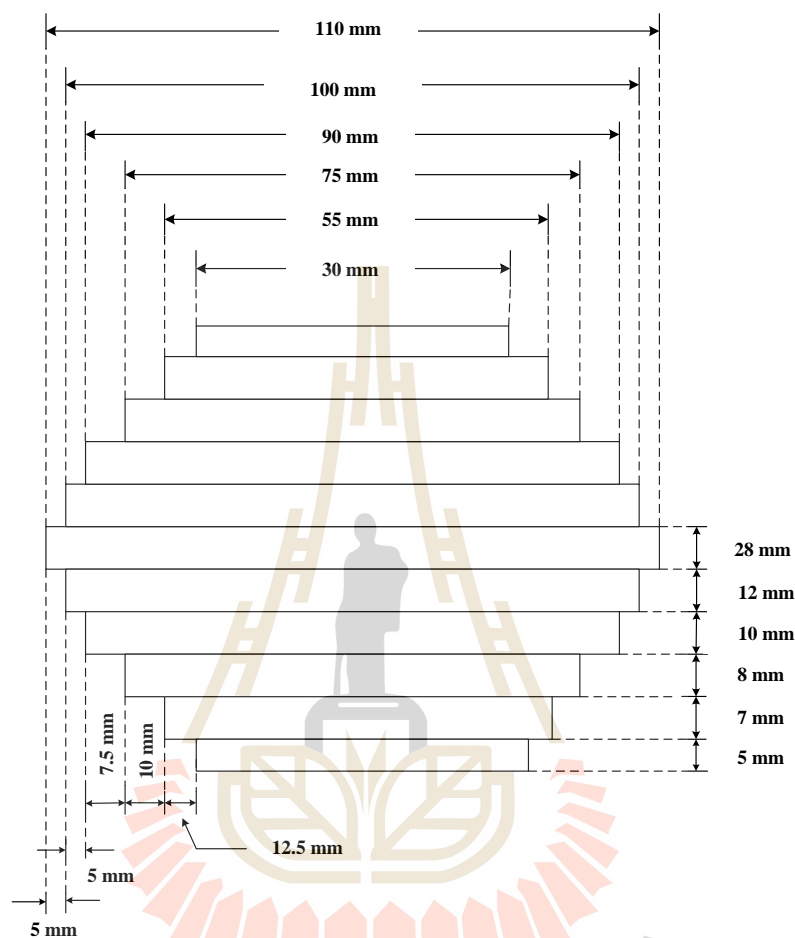
ก) มุมมองด้านข้าง



ข) มุมมองด้านบน

รูปที่ 4.2 ขนาดและรายละเอียดของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์เมื่อยังไม่มี
การออกแบบรูปร่างของแกนเหล็ก

ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ขนาดของแกนเหล็กหม้อแปลงมีขนาดเท่ากันซึ่งแสดงรายละเอียดของขนาดของแกนหม้อแปลงดังรูปที่ 4.3



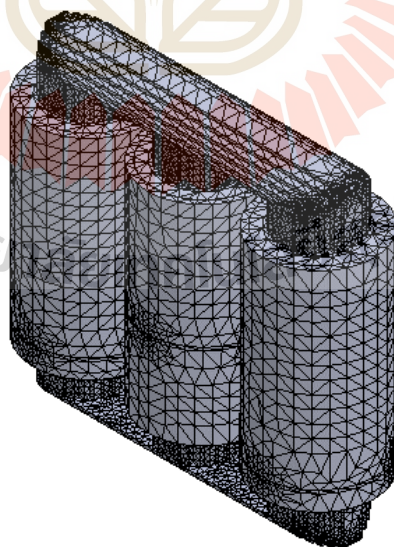
รูปที่ 4.3 ขนาดแกนของหม้อแปลงเมื่อยังไม่มีการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็ก

ขั้นตอนแรกสำหรับปัญหาในแบบ 3 มิติจะเริ่มจากการแบ่งพื้นที่ของหม้อแปลงไฟฟ้าออกเป็นอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral elements) การออกแบบกริดเป็นรูปอิลลิเมนต์ต่างๆ ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Solidwork โดยจะมีจำนวน โหนดและอิลลิเมนต์ที่ใช้ภายในระบบในขณะที่ยังไม่ได้ออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กสำหรับหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบวีและแบบสกอตต์ เป็นจำนวน 43,736 โหนด และ 145,353 อิลลิเมนต์ และสำหรับหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ เป็นจำนวน 83,434 โหนด และ 221,890 อิลลิเมนต์ สำหรับตัวอย่างการออกแบบกริดของปัญหาในแบบ 3 มิติ เมื่อหม้อแปลงมีการเชื่อมต่อแบบวีและสกอตต์สามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การแบ่งอิลลิเมนต์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบวีและแบบสกอตต์เมื่อยังไม่มีการออกแบบรูปร่างแกนเหล็กในแบบ 3 มิติ

สำหรับตัวอย่างการออกแบบกริดของปัญหาในแบบ 3 มิติเมื่อหม้อแปลงมีการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์สามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การแบ่งอิลลิเมนต์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์เมื่อยังไม่มีการออกแบบรูปร่างแกนเหล็กในแบบ 3 มิติ

4.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้เน้นพิจารณาระบบเป็น 3 มิติ โดยเมื่อสมมติให้ลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอิลลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้นจะได้

$$A(x, y, z) = A_1 N_1 + A_2 N_2 + A_3 N_3 + A_4 N_4 \quad (4.13)$$

โดยที่ $N_n, n = 1, 2, 3, 4$ คือฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์และ $A_n, n = 1, 2, 3, 4$ คือผลลัพธ์ของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแต่ละ โหนด $1, 2, 3, 4$ ของอิลลิเมนต์ซึ่งในกรณีอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อจะได้

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, 3, 4 \quad (4.14)$$

โดยที่

$$a_1 = x_4(y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_3(y_4 z_2 - y_2 z_4) + x_2(y_3 z_4 - y_4 z_3)$$

$$a_2 = x_4(y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3(y_1 z_4 - y_4 z_1) + x_1(y_4 z_3 - y_3 z_4)$$

$$a_3 = x_4(y_1 z_2 - y_2 z_1) + x_2(y_4 z_1 - y_1 z_4) + x_1(y_2 z_4 - y_4 z_2)$$

$$a_4 = x_3(y_2 z_1 - y_1 z_2) + x_2(y_1 z_3 - y_3 z_1) + x_1(y_3 z_2 - y_2 z_3)$$

$$b_1 = y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3)$$

$$b_2 = y_4(z_1 - z_3) + y_1(z_3 - z_4) + y_3(z_4 - z_1)$$

$$b_3 = y_4(z_2 - z_1) + y_2(z_1 - z_4) + y_1(z_4 - z_2)$$

$$b_4 = y_3(z_1 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1)$$

$$c_1 = x_4(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_3(z_4 - z_2)$$

$$c_2 = x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3)$$

$$c_3 = x_4(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1)$$

$$c_4 = x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2)$$

$$d_1 = x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3)$$

$$d_2 = x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1)$$

$$d_3 = x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2)$$

$$d_4 = x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1)$$

และ V คือ ปริมาตรของแต่ละอิลลิเมนต์หาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (4.15)$$

4.3.3 การสร้างสมการของอิลลิเมนต์

ขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ซึ่งเป็นการสร้างสมการของอิลลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาต่าง ๆ สำหรับปัญหาของระบบ 3 มิติ ทางระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์จะต้องจัดสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาให้อยู่ในรูปแบบทั่วไป ดังแสดงในสมการที่ (4.12) ก่อนที่จะเข้าสู่การสร้างสมการของอิลลิเมนต์ต่อไป (Larry, 1984)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - j\sigma\omega A + J_0 = 0 \quad (4.16)$$

ในปัจจุบันการประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตค่างถือเป็นวิธีที่ถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ และวิธีนี้ยังสามารถจำแนกออกไปได้อีก เช่น วิธีของกาเลอร์กิน (Galerkin) (Preston, Reece, and Sangha, 1988; Kim, Kwon, and Park, 1999) ซึ่งเมทริกซ์ที่เกิดขึ้นจากวิธีนี้ปกติแล้วจะมีความสมมาตรจึงก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้กับปัญหาขนาดใหญ่ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์เพื่อหาระบบสมการเชิงเส้น โดยอาศัยการประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตค่าง (Weighting functions) ด้วยวิธีกาเลอร์กิน แสดงได้ดังสมการที่ (4.17)

$$\int_V W_n R dV = 0 \quad (4.17)$$

โดยเมื่อพิจารณาปัญหาเป็นแบบ 3 มิติจะได้เศษตค่าง R ดังสมการที่ (4.18)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) - j\omega\sigma\mathbf{A} + \mathbf{J}_0 = R \quad (4.18)$$

โดยที่ A คือ ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า

ซึ่ง R เรียกว่าเศษตกค้าง (Residual) เป็นค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการใช้ผลเฉลยโดยประมาณซึ่งไม่ใช่ผลเฉลยแน่นอนตรงของปัญหา เศษตกค้าง R ที่เกิดขึ้นควรมีค่าต่ำที่สุด เพื่อผลเฉลยโดยประมาณที่เกิดขึ้นจะมีค่าที่เที่ยงตรงมากที่สุด ซึ่งวิธีนี้สามารถกระทำได้โดยการคูณเศษตกค้าง R ด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก (Weighting function : W) แล้วอินทิเกรตตลอดทั้งโดเมนของอิลลิเมนต์ (V) และกำหนดผลที่ได้ให้เท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\int_V W_n R dV = 0 \quad ; n = 1, 2, 3, 4 \quad (4.19)$$

สำหรับอิลลิเมนต์รูปสามทรงสี่หน้า จุดที่ไม่ทราบค่ามี 4 จุด ซึ่งได้แก่จุดต่อทั้งสี่ ดังนั้นจึงต้องการ 4 สมการในการแก้หาจุดที่ไม่ทราบค่า นั้นหมายถึงในสมการที่ (4.19) จะต้องมีการมีค่า $n = 1, 2, 3, 4$ และโดยปกติจะเลือก $W_n = N_n$ ซึ่งเรียกว่า บับโนฟ-กาเลอร์กิน (Bubnov-Galerkin) ดังนั้นเมื่อแทน R ด้วยสมการที่ (4.18) ลงในสมการที่ (4.19) จะได้

$$\int_V N_n \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) - j\omega\sigma\mathbf{A} + \mathbf{J}_0 \right] dV = 0 \quad (4.20)$$

$$\int_V N_n \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) \right] dV - \int_V N_n [j\omega\sigma\mathbf{A}] dV + \int_V (N_n \mathbf{J}_0) dV = 0 \quad (4.21)$$

พิจารณาการอินทิเกรตทีละพจน์ของสมการที่ (4.21) สำหรับพจน์แรกซึ่งเป็นพจน์อนุพันธ์อันดับสองใช้วิธีการอินทิเกรตทีละส่วน (Integrate by parts) โดยจะใช้ทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss's theorem) ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\begin{aligned}
& \int_{\Gamma} N_n \left[\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} n_x + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} n_y + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} n_z \right] d\Gamma \\
& - \int_V \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) dV \\
& - \int_V N_n (j\omega\sigma \mathbf{A}) dV + \int_V (N_n \mathbf{J}_0) dV = 0
\end{aligned} \tag{4.22}$$

พิจารณาพจน์แรกทางด้านซ้ายมือของสมการที่ (4.22) ซึ่งเป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับขอบเขตของอิลลิเมนต์ (Γ) โดยค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก \mathbf{A} ที่บริเวณขอบมีค่าเท่ากับศูนย์ แสดงดังสมการที่ (4.23) ดังนั้นสมการที่ (4.22) จึงลดรูปเหลือดังสมการที่ (4.24) และเนื่องจากสมการที่ (4.24) มีทั้งหมด 4 สมการ ดังนั้นสามารถเขียนสมการไฟไนท์อิลลิเมนต์นี้ให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (4.25)

$$\mathbf{A}(x, y, z) = 0 \quad , \quad (x, y, z) \in \Gamma \tag{4.23}$$

$$\begin{aligned}
& \int_V \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) dV + \int_V N_n (j\omega\sigma \mathbf{A}) dV \\
& = \int_V (N_n \mathbf{J}_0) dV
\end{aligned} \tag{4.24}$$

$$\begin{aligned}
& \int_V \left(\left[\frac{\partial N_n}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} + \left[\frac{\partial N_n}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} + \left[\frac{\partial N_n}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) dV \\
& + \int_V [N_n]_{4 \times 1} (j\omega\sigma \mathbf{A}) dV = \int_V ([N_n]_{4 \times 1} \mathbf{J}_0) dV
\end{aligned} \tag{4.25}$$

และจากสมการที่ (4.13) จึงได้ลักษณะการกระจายของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก \mathbf{A} โดยประมาณในแต่ละอิลลิเมนต์เป็น

$$\mathbf{A}(x, y, z) = [N]_{1 \times 4} [A]_{4 \times 1}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} = \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} [A]_{4 \times 1} \quad , \quad \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} = \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} [A]_{4 \times 1} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} = \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} [A]_{4 \times 1}$$

และสมการไฟไนท์อิลลิเมนต์จึงกลายเป็น

$$\int_V \left(\left[\frac{\partial N_n}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N_n}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N_n}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right]_{1 \times 4} \right) dV + \int_V [N_n]_{4 \times 1} j\omega\sigma [N]_{1 \times 4} d\Omega [A]_{4 \times 1} = \int_V ([N_n]_{4 \times 1} \mathbf{J}_0) dV \quad (4.26)$$

หรือเขียนสมการไฟไนท์อิลลิเมนต์สำหรับแต่ละอิลลิเมนต์ที่ประกอบด้วย 4 สมการได้ดังนี้

$$[M + K]_{4 \times 4} \{A\}_{4 \times 1} = \{F\}_{4 \times 1} \quad (4.27)$$

พิจารณาเมทริกซ์ $[M]_{4 \times 4}$ จะได้ว่า

$$\text{จาก } [M]_{4 \times 4} = \int_V [N]_{4 \times 1} j\omega\sigma [N]_{1 \times 4} dV \quad (4.28)$$

จากสมการที่ (4.14) ฟังก์ชันการประมาณภายในแสดงได้ดังนี้

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad \text{เมื่อ } i = 1 \ 2 \ 3 \ 4 \quad (4.29)$$

จากสมการที่ (4.29) และหากค่าสภาพนำทางไฟฟ้า (σ) มีค่าคงที่ ดังนั้นสมการที่ (4.28) จึงกลายเป็น

$$[M]_{4 \times 4} = j\omega\sigma \int [N]_n [N]_m dx dy dz \quad n, m = 1 \ 2 \ 3 \ 4 \quad (4.30)$$

จากสมการที่ (4.30) นี้สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรเชิงตัวประกอบ (Factorial formula) ในการประมาณการอินทิเกรตตลอดปริมาตรดังสมการที่ (4.31) โดยที่ $N_1 = L_1$, $N_2 = L_2$, $N_3 = L_3$ และ $N_4 = L_4$ จะได้ว่า

$$\int_V L_1^a L_2^b L_3^c L_4^d dV = \frac{a!b!c!d!}{(a+b+c+d+3)!} 6V \quad (4.31)$$

จากสมการที่ (4.30) สามารถแบ่งการพิจารณาเป็น 2 กรณีคือ $L_n = L_m$ และ $L_n \neq L_m$ ดังนั้น จากสมการที่ (4.30) เมื่อประยุกต์ใช้สมการที่ (4.31) จะได้ว่า

$$[M]_{4 \times 4} = \frac{j\omega\sigma V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

พิจารณาเมทริกซ์ $[K]_{4 \times 4}$ จะได้ว่า

$$[K]_{4 \times 4} = \int_V \left(\left[\frac{\partial N_n}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial A}{\partial x} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N_n}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial A}{\partial y} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N_n}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial A}{\partial z} \right]_{1 \times 4} \right) dV \quad (4.33)$$

และจากฟังก์ชันการประมาณภายในดังสมการที่ (4.29) จึงได้

$$\frac{\partial N_n}{\partial x} = \frac{b_n}{6V}, \quad \frac{\partial N_n}{\partial y} = \frac{c_n}{6V} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial N_n}{\partial z} = \frac{d_n}{6V} \quad (4.34)$$

แทนความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.34) ลงในสมการที่ (4.33) จะได้ว่า

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{\mu} \int_V \left(\frac{b_n}{6V} \frac{b_m}{6V} + \frac{c_n}{6V} \frac{c_m}{6V} + \frac{d_n}{6V} \frac{d_m}{6V} \right) dx dy dz \quad (4.33)$$

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{36\mu V^2} (b_n b_m + c_n c_m + d_n d_m) \int_V dx dy dz$$

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{36\mu V} (b_n b_m + c_n c_m + d_n d_m) \quad n, m = 1, 2, 3, 4$$

จะได้เมทริกซ์ $[K]_{4 \times 4}$ ดังสมการที่ (4.34)

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{36\mu V} \begin{bmatrix} b_{11} + c_{11} + d_{11} & b_{12} + c_{12} + d_{12} & b_{13} + c_{13} + d_{13} & b_{14} + c_{14} + d_{14} \\ b_{21} + c_{21} + d_{21} & b_{22} + c_{22} + d_{22} & b_{23} + c_{23} + d_{23} & b_{24} + c_{24} + d_{24} \\ b_{31} + c_{31} + d_{31} & b_{32} + c_{32} + d_{32} & b_{33} + c_{33} + d_{33} & b_{34} + c_{34} + d_{34} \\ b_{41} + c_{41} + d_{41} & b_{42} + c_{42} + d_{42} & b_{43} + c_{43} + d_{43} & b_{44} + c_{44} + d_{44} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

พิจารณาเมทริกซ์โพลีไดอะกอนัล $[F]_{4 \times 4}$ จะได้ว่า

$$\text{จาก } [F]_{4 \times 4} = \int_V [N]_{4 \times 1} J_0 dV \quad (4.35)$$

ใช้สูตรเชิงตัวประกอบในการประมาณการอินทิเกรตตลอดปริมาตรดังสมการที่ (4.31) จะได้ดังสมการที่ (4.36)

$$[F]_{4 \times 4} = \frac{J_0 V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

4.3.4 การประกอบสมการอิลลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ

ขั้นตอนนี้เป็น การนำสมการของแต่ละอิลลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกันเป็นสมการรวมของระบบ โดยจากขั้นตอนในหัวข้อที่ 4.3.1 หากแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย n จุดต่อ จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น n สมการ ดังนั้นจึงได้สมการรวมสำหรับการจำลองผลค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของงานวิจัยนี้ในรูปสมการเชิงเส้นคือ

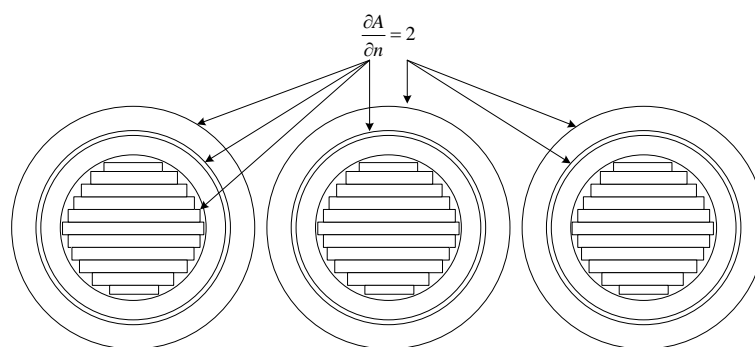
$$[M + K]_{n \times n} \{A\}_{n \times 1} = \{f\}_{n \times 1}$$

$$\begin{bmatrix} M_{11} + K_{11} & M_{12} + K_{12} & M_{13} + K_{13} & \dots & M_{1n} + K_{1n} \\ M_{21} + K_{21} & M_{22} + K_{22} & M_{23} + K_{23} & \dots & M_{2n} + K_{2n} \\ M_{31} + K_{31} & M_{32} + K_{32} & M_{33} + K_{33} & \dots & M_{3n} + K_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{n1} + K_{n1} & M_{n2} + K_{n2} & M_{n3} + K_{n3} & \dots & M_{nn} + K_{nn} \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times n)} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} \quad (4.37)$$

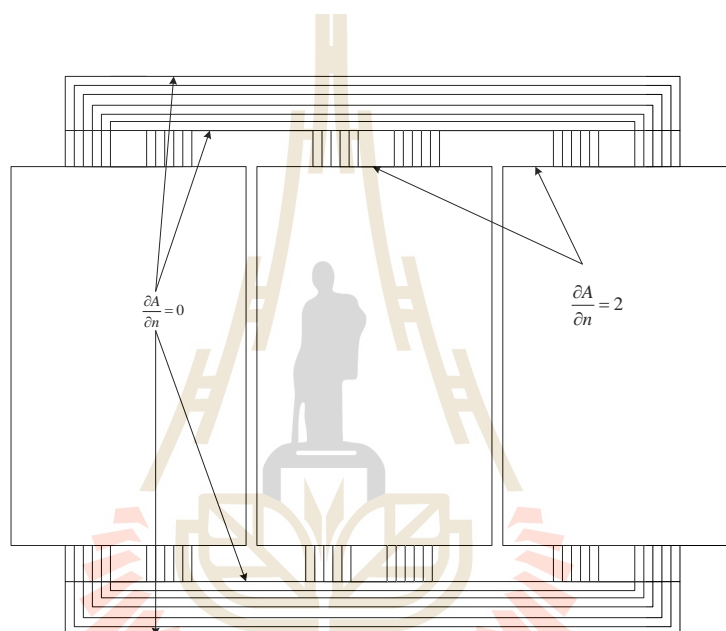
เมื่อ	M	คือ เมทริกซ์ค่าคงที่ของระบบ
	K	คือ เมทริกซ์ค่าซาบซิมทางแม่เหล็ก
	A	คือ ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่ไม่ทราบค่า ณ ตำแหน่ง โหนดต่าง ๆ
	f	คือ โหลดเวกเตอร์ที่มากระทำ ณ ตำแหน่ง โหนดต่าง ๆ

4.3.5 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาค่าผลเฉลย (Eric Weisstein, 1999)

สำหรับขั้นตอนการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตในงานวิจัยนี้เป็นการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบนอยส์มัน (Neumann boundary conditions) โดยจะเป็นการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ตำแหน่งรอยต่อชิ้นงานที่มีคุณสมบัติความเป็นฉนวน โดยในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 3 บริเวณคือ ตำแหน่งรอยต่อระหว่างน้ำมันหม้อแปลงและขดลวดตัวนำ ตำแหน่งระหว่างกระดาษฉนวนกับขดลวดตัวนำ และตำแหน่งระหว่างน้ำมันหม้อแปลงกับแกนเหล็ก โดยมีเงื่อนไขดังนี้คือ บริเวณตำแหน่งรอยต่อระหว่างน้ำมันหม้อแปลงและแกนเหล็กที่ไม่ติดกับส่วนของขดลวดตัวนำกำหนดให้ค่าคงที่นอยส์มันเป็นศูนย์ $\left(\frac{\partial A}{\partial n} = 0\right)$ ส่วนบริเวณฉนวนอื่นๆ ที่ติดกับขดลวดตัวนำนั้นกำหนดให้ค่าคงที่นอยส์มันเท่ากับ 2 $\left(\frac{\partial A}{\partial n} = 2\right)$ โดยรายละเอียดแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์การกระจายสนามแม่เหล็กบริเวณแกนเหล็กดังนั้น ที่บริเวณตำแหน่งขอบตัวถังของหม้อแปลงซึ่งมีค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเท่ากับศูนย์ ($A=0$) โดยทั่วไปจะถูกกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเป็นลักษณะเงื่อนไขขอบเขตแบบดิริเคิล (Dirichlet boundary conditions) จึงไม่ได้ถูกนำมาพิจารณาภายในงานวิจัยนี้



ก) มุมมองด้านบน



ข) มุมมองด้านหน้า

รูปที่ 4.6 การกำหนดตำแหน่งสำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบนอยส์มัน

4.3.6 การคำนวณค่าตัวแปรอื่นที่ต้องการ

เมื่อทราบค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก \mathbf{A} ที่จุดต่อต่างๆ แล้ว จึงสามารถคำนวณหา ค่าต่างๆ ที่สัมพันธ์กันต่อไปได้ โดยสนามแม่เหล็ก \mathbf{B} สามารถคำนวณได้จากการเคิร์ลค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ($\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$) ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.38) ดังนั้นเมื่อพิจารณาห่อแปลงใน 3 มิติ ตามระนาบ x y และ z เมื่อมีกระแสในแนวแกน x และแนวแกน z จึงได้ค่าสนามแม่เหล็กในแนวแกน x (B_x) แนวแกน y (B_y) แนวแกน z (B_z) รวมทั้งค่าสนามแม่เหล็กรวม ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.39), (4.40), (4.41) และ (4.42) ตามลำดับ

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} = \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \mathbf{j} + \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \mathbf{k} \quad (4.38)$$

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} = \frac{c_1 A_1 + c_2 A_2 + c_3 A_3 + c_4 A_4}{6V} \quad (4.39)$$

$$B_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} = \frac{d_1 A_1 + d_2 A_2 + d_3 A_3 + d_4 A_4}{6V} - \frac{b_1 A_1 + b_2 A_2 + b_3 A_3 + b_4 A_4}{6V} \quad (4.40)$$

$$B_z = -\frac{\partial A_x}{\partial y} = -\frac{c_1 A_1 + c_2 A_2 + c_3 A_3 + c_4 A_4}{6V} \quad (4.41)$$

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (4.42)$$

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นไปที่การคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลง ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของสนามแม่เหล็ก โดยที่ค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (Core losses: P_{core}) ประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ กำลังงานสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (P_h) และ กำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (P_e) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.43), (4.44) และ (4.45) ตามลำดับ

$$P_{core} = P_h + P_e \quad (4.43)$$

$$P_h = K_h f B_{max}^n \quad (4.44)$$

โดยที่ K_h คือ ค่า coefficient steinmetz's มีค่าอยู่ระหว่าง 275-500
 n คือ ค่าคงที่ steinmetz's มีค่าอยู่ระหว่าง 1.0-3.0
 B_{max} คือ ค่าความหนาแน่นสูงสุดของสนามแม่เหล็ก (Tesla)
 f คือ ความถี่ของแรงดันไฟฟ้า (Hz)

$$P_e = K_e f^2 B_{\max}^n \quad (4.45)$$

โดยที่ K_e คือ ค่า specific resistance of core material ซึ่งมีค่าเท่ากับ $K_e = t^2 V$
 V คือ ปริมาตรของแกนเหล็ก
 t คือ ความหนาของแผ่นเหล็ก

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับ ประกอบด้วยค่านิ่งถึงคุณสมบัติต่างๆ ทางไฟฟ้าของวัสดุที่แตกต่างกันในระบบ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะปรากฏอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง การประยุกต์ใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กได้ใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาลอ์คิน โดยการคำนวณสนามแม่เหล็กจะพิจารณาระบบที่แปลงจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ และการหาค่าลึงสูญเสียนแกนเหล็กนั้นจะคำนวณลงไปในระดับของอิลลิเมนต์ รายละเอียดต่างๆ ในบทนี้จะนำไปสู่การพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์เพื่อใช้เป็นโปรแกรมจำลองผลระบบที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 5 และบทที่ 6 ต่อไป

บทที่ 5

ผลการจำลองสนามแม่เหล็กและกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

5.1 บทนำ

การจำลองผลของงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณค่าสนามแม่เหล็กและกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบวิ แบบสกอตต์และแบบเลอบลองก์ สำหรับใช้งานในระบบรถไฟฟ้าระบบแรงดันสูง โดยที่หม้อแปลงที่ใช้ในการจำลองผลในบทที่ 5 นี้เป็นหม้อแปลงที่ใช้งานทั่วไปที่มีได้เน้นการลดกำลังงานสูญเสีย ซึ่งค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กที่คำนวณได้นั้นจะมีผลมาจากค่าสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาถึงการกระจายตัวของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในหม้อแปลง ในบทที่ 5 นี้จึงได้กล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองผลและอธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติเพื่อให้เห็นผลเฉลยโดยละเอียดของปัญหา โดยโปรแกรมทั้งหมดถูกออกแบบให้ทำงานบนพื้นฐานการใช้งานของ MATLAB ที่พัฒนาขึ้น

5.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กแบบ 3 มิติ

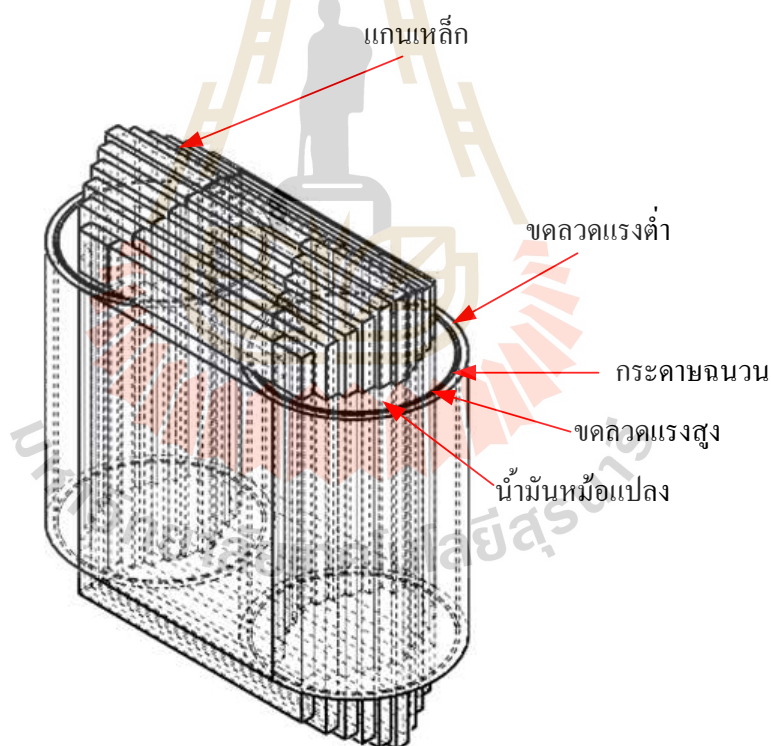
การคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์สามารถดำเนินการคำนวณตามขั้นตอนภายในโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลที่จะได้กล่าวถึงต่อไปนี้ งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการสร้างกริดด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อนำข้อมูลของ โหนดและอิลลิเมนต์มาพัฒนาต่อด้วยโปรแกรม MATLAB™ ที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง โดยอธิบายถึงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลแบบ 3 มิติได้ดังนี้

5.2.1 โปรแกรมการสร้างกริด

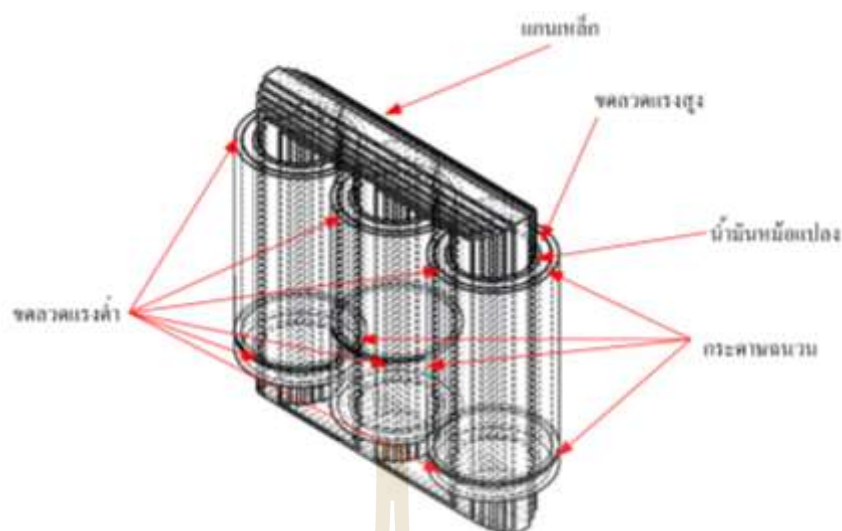
โปรแกรมการสร้างกริดสำหรับปัญหา 3 มิติในงานวิจัยนี้ จะใช้การสร้างกริดจากโปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Solid Work ประโยชน์ของโปรแกรมสำเร็จรูปนี้จะใช้สำหรับเพียงเพื่อสร้างกริดเท่านั้น โดยโปรแกรม Solid Work นี้สามารถสร้างกริดในพิคัด 3 มิติ สำหรับข้อมูลจากโปรแกรม Solid Work ที่จำเป็นต่อการนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติได้แก่ ข้อมูลบอกระยะพิคัดในแนวแกน x y และ z ข้อมูลบอกหมายเลข โหนด ข้อมูลบอกหมายเลขอิลลิเมนต์ ข้อมูลบอกหมายเลขที่แบ่งชนิดของวัสดุในระบบ และข้อมูลบอกหมายเลขของขอบเขตชิ้นงานเพื่อกำหนดเงื่อนไข ส่วนขั้นตอนของระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์อื่น ๆ อันได้แก่ การสร้าง

สมการของแต่ละอิเลิเมนต์ การสร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขตและการแก้สมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าผลเฉลยนั้น จะทำการพัฒนาด้วยโปรแกรม MATLAB™ ที่ประดิษฐ์ขึ้นเองเพื่อจำลองผลต่อไป

งานวิจัยนี้ได้ใช้การวาดภาพและการตีกริดของระบบที่ศึกษาแบบ 3 มิติ โดยการใช้โปรแกรม Solid work ทั้งนี้เพราะโปรแกรม Solid work สามารถวาดภาพที่มีความซับซ้อนในรูปแบบ 3 มิติ ได้สะดวก ดังแสดงภาพรวมของระบบที่ศึกษาเป็นแบบ 3 มิติ ได้ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นการแสดงลักษณะ โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบวี และแบบสกอตต์ในระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับ ส่วนภาพรวมของโครงสร้างของหม้อแปลงที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ในระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 โดยได้แบ่งปริมาตรที่ศึกษาออกเป็นปริมาตรย่อยๆ ได้แก่ ปริมาตรที่เป็นขดลวดแรงต่ำ, ปริมาตรที่เป็นขดลวดแรงสูง, ปริมาตรแกนเหล็ก, ปริมาตรกระดาษฉนวนและปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง



รูปที่ 5.1 ลักษณะ โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบวี และแบบสกอตต์ในระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับ

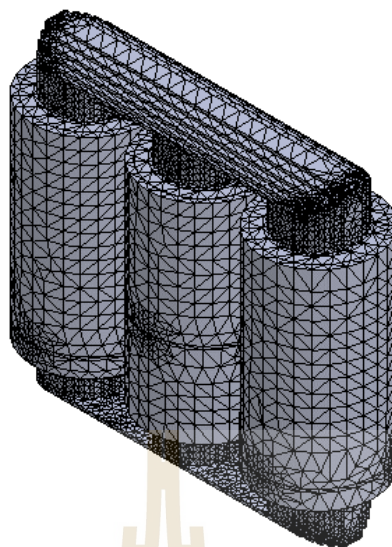


รูปที่ 5.2 ลักษณะ โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์
ในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับ

หลังจากแบ่งปริมาตรของปัญหาออกเป็นหมวดหมู่แล้ว จึงอาศัยโปรแกรม Solid work สร้างกริดและอีลิเมนต์ให้แบบอัตโนมัติ โดยเลือกกริดแบบทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (Tetrahedral element) สามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 5.3 สำหรับหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบวี และแบบสกอตต์ที่ใช้ในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับ และแสดงได้ด้วยรูปที่ 5.4 สำหรับหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ที่ใช้ในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับ



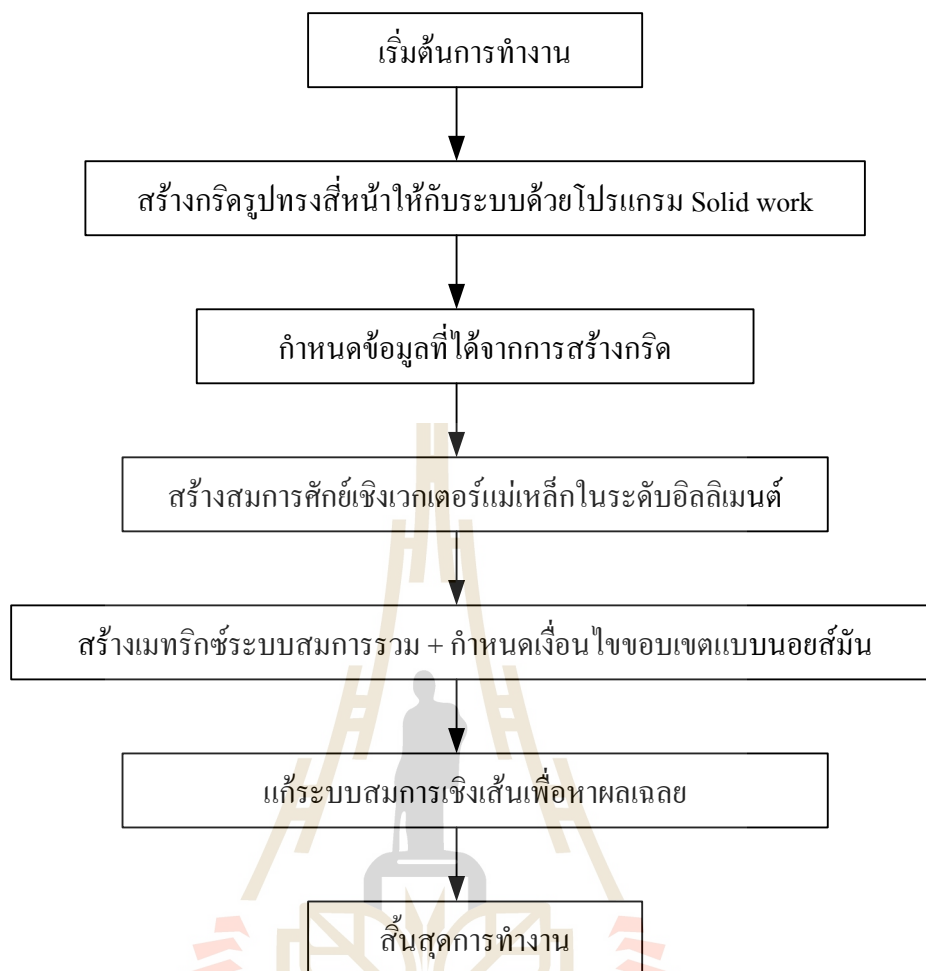
รูปที่ 5.3 ลักษณะการสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อ
แบบวี และแบบสกอตต์



รูปที่ 5.4 ลักษณะการสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์

5.2.2 โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็ก

ในขั้นตอนนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นมาเพื่อจำลองผลค่าสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยข้อมูลที่จำเป็นในการประดิษฐ์โปรแกรมนั้นได้จากในหัวข้อ 5.2.1 ที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กสามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แผนภูมิการดำเนินงานของ โปรแกรมจำลองผลศັกย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

จากแผนภูมิในรูปที่ 5.5 ซึ่งแสดงโครงสร้างโปรแกรมจำลองผลของระบบแบบ 3 มิติ เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงหน้าที่ของโปรแกรมแต่ละขั้นตอนจะได้อธิบายถึงรายละเอียดหน้าที่ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

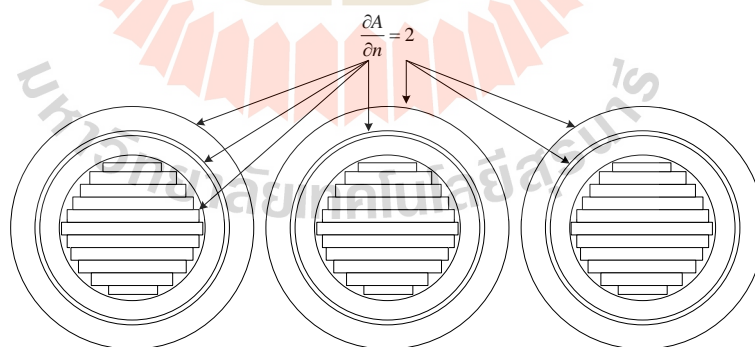
ขั้นตอนการกำหนดข้อมูลที่ได้จากการสร้างกริด : ขั้นตอนนี้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะรับค่าข้อมูลอินพุทซึ่งแสดงถึงลักษณะของ โหนดและอิลลิเมนต์จากโปรแกรมการสร้างกริด Solid Work ซึ่งรายละเอียดของข้อมูลประกอบด้วย จำนวนและตำแหน่งของ โหนด หมายเลข โหนดที่ประกอบขึ้นเป็นอิลลิเมนต์ จำนวนและหมายเลขของอิลลิเมนต์ เป็นต้น

ขั้นตอนการสร้างสมการศັกย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในระดับอิลลิเมนต์ : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะสร้างสมการอิลลิเมนต์เมทริกซ์ในรูปแบบของทรงสี่หน้าสี่จุดต่อเมื่อพิจารณาปัญหา

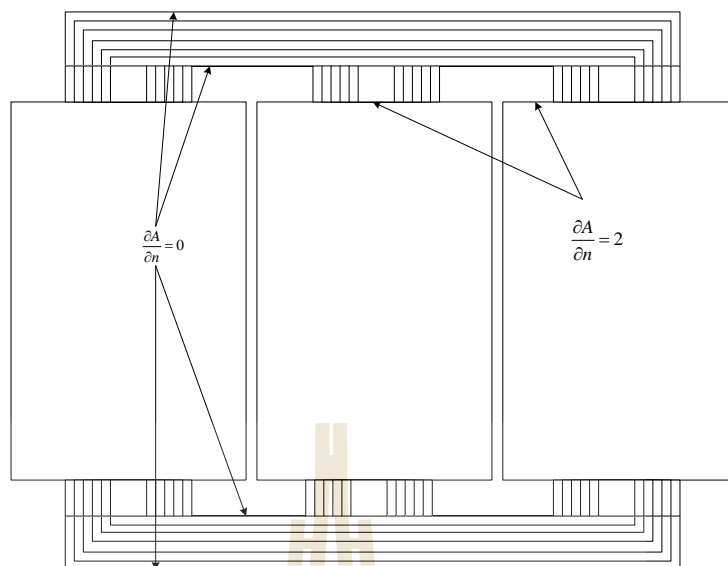
แบบ 3 มิติ ของทุก ๆ อิลลิเมนต์ โดยการสร้างสมการอิลลิเมนต์เมทริกซ์ของแต่ละอิลลิเมนต์จะต้องคำนึงถึงค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัตถุที่เกี่ยวข้องในแต่ละอิลลิเมนต์นั้น ๆ ด้วย

ขั้นตอนการสร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม โปรแกรมจะทำหน้าที่รวมอิลลิเมนต์เมทริกซ์ย่อยๆ เข้าเป็นเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมดังแสดงด้วยสมการที่ (4.37) โดยมีหลักการคือ หาหมายเลขจุดต่อที่แท้จริงของอิลลิเมนต์ที่พิจารณาอยู่แล้วใส่ค่าสัมประสิทธิ์ของอิลลิเมนต์เมทริกซ์นั้นลงในเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมให้ถูกต้อง ดังแสดงรายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 3.7 ของบทที่ 3 ซึ่งหากแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นอิลลิเมนต์ย่อย n จุดต่อ จึงก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยทั้งสิ้น n สมการ

ขั้นตอนกำหนดเงื่อนไขขอบเขต โปรแกรมจะทำหน้าที่ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตแบบนอยส์มัน โดยการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตชนิดนอยส์มันนี้จะเป็นการกระทำในระดับอิลลิเมนต์ ซึ่งจะกระทำอยู่ภายในขั้นตอนเดียวกันกับการสร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม โดยมีหลักการคือ จะเป็นการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในบริเวณรอยต่อวัสดุที่มีฉนวน โดยจะแยกเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 บริเวณรอยต่อที่มีฉนวนติดกับตัวนำ อย่างเช่นในงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วยรอยต่อของน้ำมันหม้อแปลงกับขดลวดตัวนำ และรอยต่อระหว่างขดลวดตัวนำกับกระดาษฉนวน และ กรณีที่ 2 บริเวณรอยต่อของฉนวนกับวัสดุที่ไม่เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก อย่างเช่นในงานวิจัยนี้คือบริเวณแกนเหล็กกับน้ำมันหม้อแปลง งานวิจัยนี้ได้แสดงตำแหน่งบริเวณกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบนอยส์มันแสดงได้ดังรูปที่ 5.6



ก) มุมมองด้านบน



ข) มุมมองด้านหน้า

รูปที่ 5.6 บริเวณชิ้นงานสำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบนอยส์มัน

ขั้นตอนแก้ระบบสมการรวมเพื่อหาค่าผลเฉลย โปรแกรมจะทำหน้าที่แก้สมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าผลเฉลยของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่ประจำโหนดโดยการเลือกใช้ระเบียบวิธีการทำเมทริกซ์ผกผัน

ขั้นตอนการคำนวณตัวแปรอื่นที่ต้องการ ขั้นตอนสุดท้ายนี้จะนำค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติมาคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็ก โดยค่าสนามแม่เหล็กจะหาได้จากการเคิร์ลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก

5.3 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้จำลองผล

การจำลองผลของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กในขั้นตอนนี้ โดยพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวี แบบสกอตต์และแบบเลอบลองก์ที่ใช้ในระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้จำลองผลจะแสดงได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

พารามิเตอร์	การเชื่อมต่อแบบวี	การเชื่อมต่อแบบสกอตต์	การเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์
พิกัดกำลังของหม้อแปลง	20 MVA		
พิกัดแรงดัน	69kV/25kV		
พื้นที่หน้าตัดขดลวดแรงสูง	44.503276 mm ²		
พื้นที่หน้าตัดขดลวดแรงต่ำ	55.9024 mm ²		
สภาพนำทางไฟฟ้าของแกนเหล็ก(σ)	2.08x10 ⁶ s/m		
สภาพนำทางไฟฟ้าของกระดาษฉนวน(σ)	0.9999 s/m		
สภาพนำทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง(σ)	0.108 s/m		
สภาพนำทางไฟฟ้าของขดลวดตัวนำ (σ)	5.80x10 ⁷ s/m		
สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ของแกนเหล็ก (μ_r)	3131		
สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ของกระดาษฉนวน (μ_r)	1.000		
สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ของน้ำมันหม้อแปลง (μ_r)	2.200		
สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ของขดลวดตัวนำ (μ_r)	0.999994		
ความต้านทานสมมูล	0.3159 Ω	-	-
รีแอกแตนซ์สมมูล	11.1200 Ω	-	-
อิมพีแดนซ์แรงสูงเฟส A, B และ C (Z_A, Z_B, Z_C)	-	0.3159+11.1200i	-
อิมพีแดนซ์แรงต่ำ (Z_{s1}, Z_{s2})	-	0.0001+0.0001i	-
อิมพีแดนซ์ปรัณภูมิ (Z_p)	-	-	0.010+0.0830i
อิมพีแดนซ์ทุติยภูมิ (Z_m, Z_n)	-	-	0.0001+0.0001i

5.4 ผลการจำลองสัจย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก สนามแม่เหล็กและกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษ

สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าสัจย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการเชื่อมต่อแบบพิเศษทั้งแบบวี แบบสกอตต์และแบบเลอบลองก์ที่ใช้ในระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยผลการจำลองจะเป็นแบบทั่วไปที่ยังมิได้เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก ซึ่งจะแสดงดังนี้

5.4.1 ผลการจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบวี

การจำลองค่าสัจย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก สนามแม่เหล็กสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีจะดำเนินการตามหัวข้อที่ได้กล่าวมา วิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งพิจารณาการกระจายของของสัจย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งขดลวดและตำแหน่งแกนเหล็กดังนี้

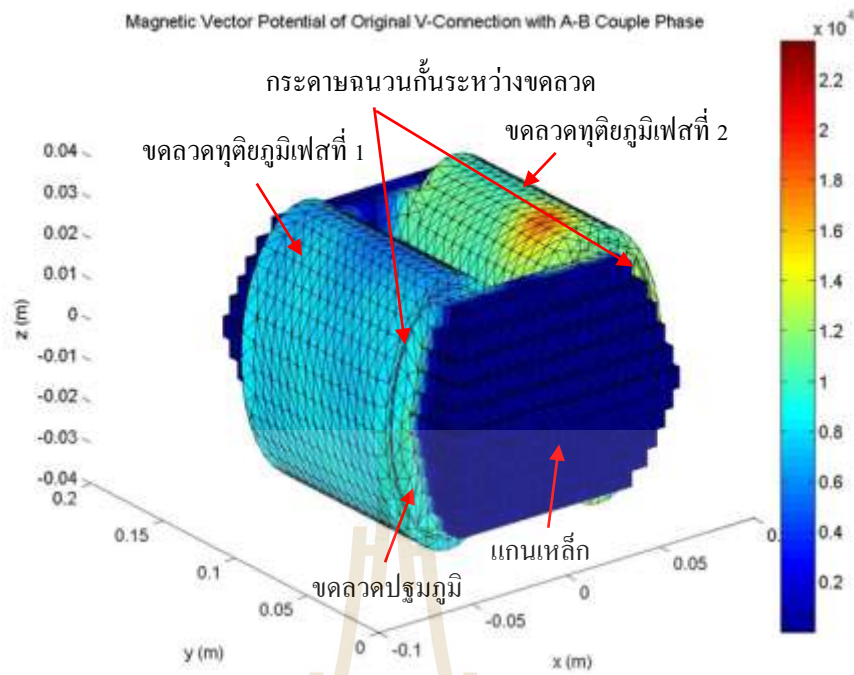
- การกระจายตัวของสัจย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวี ที่ยังมิได้เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 5.7

- การกระจายตัวของสัจย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวี ที่ยังมิได้เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 5.8

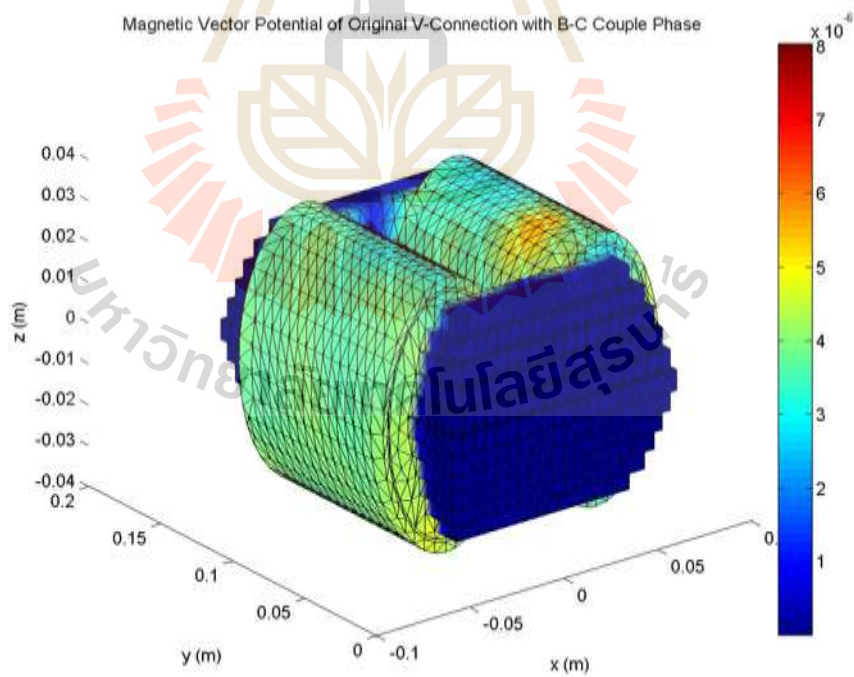
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวี ที่ยังมิได้เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 5.9

- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวี ที่ยังมิได้เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่

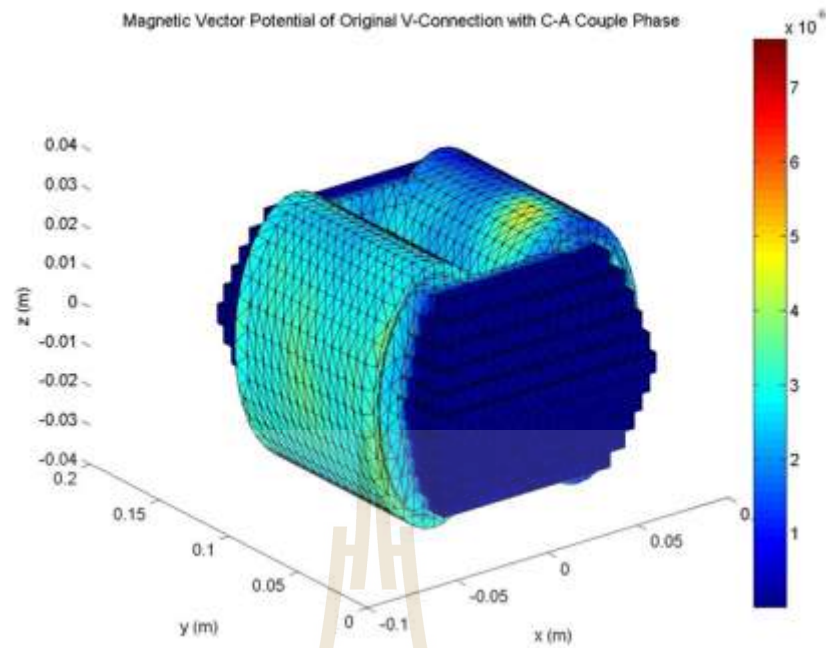
5.10



ก) ขดลวดค้ำปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส A-B

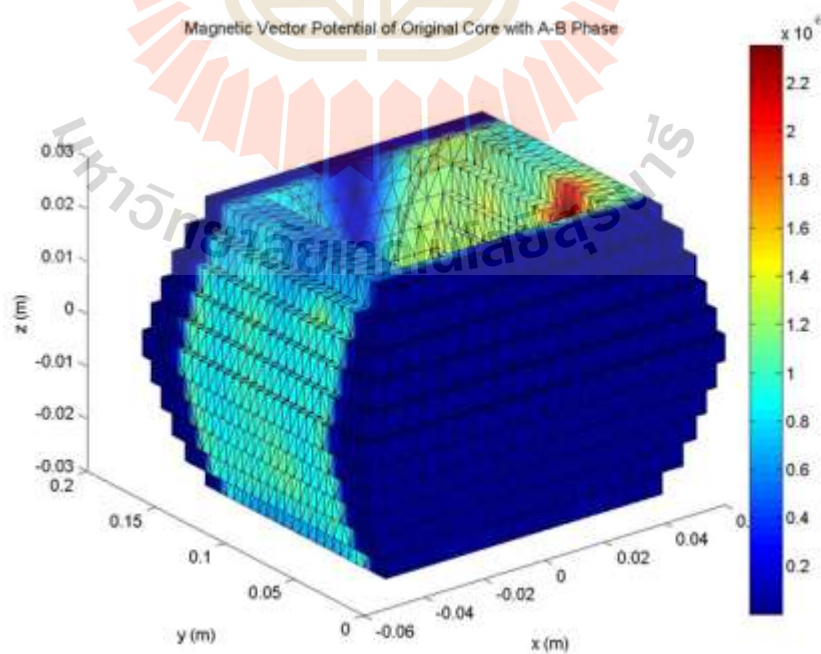


ข) ขดลวดค้ำปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส B-C

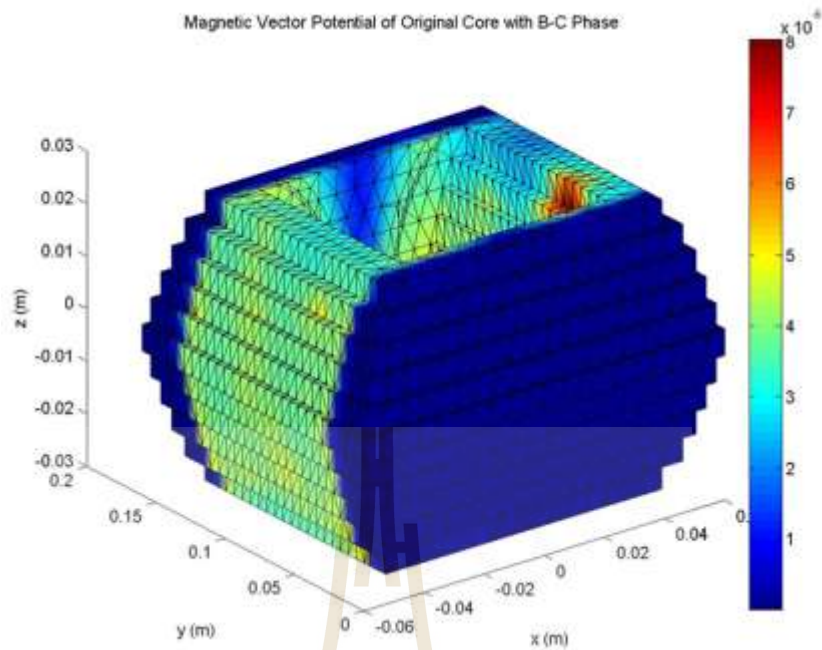


ก) ขดลวดด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส C-A

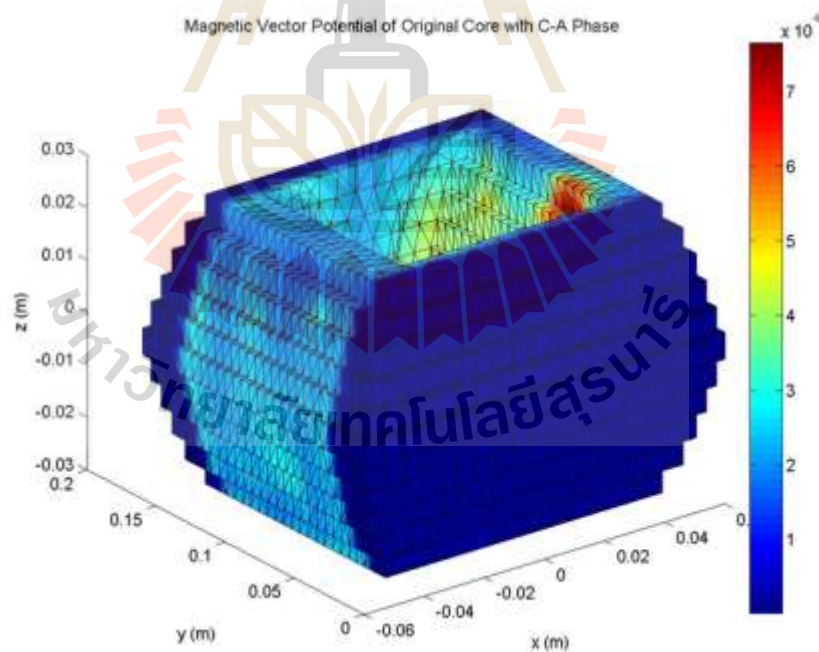
รูปที่ 5.7 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีที่ยังมิได้นับลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก



ก) ขดลวดด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส A-B

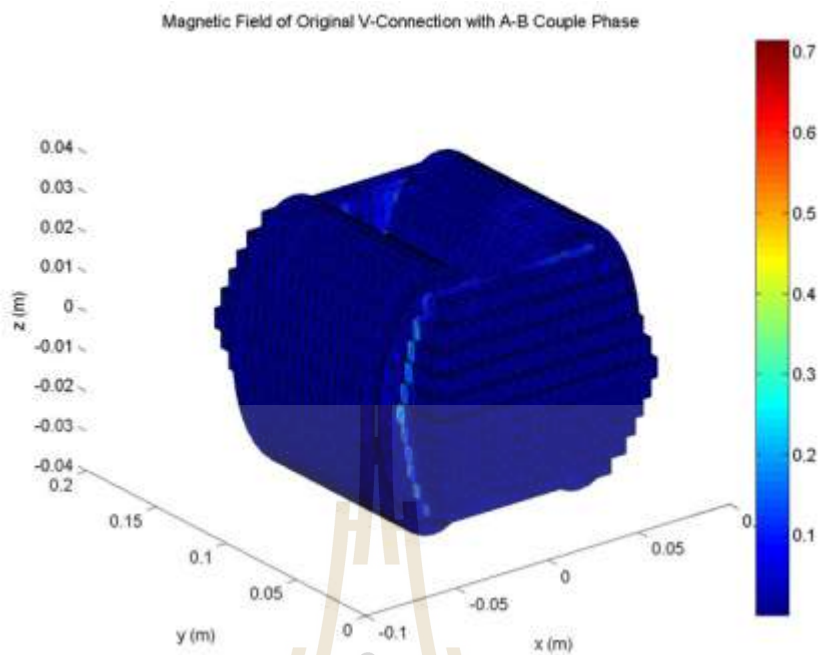


ข) ขดลวดค้ำปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส B-C

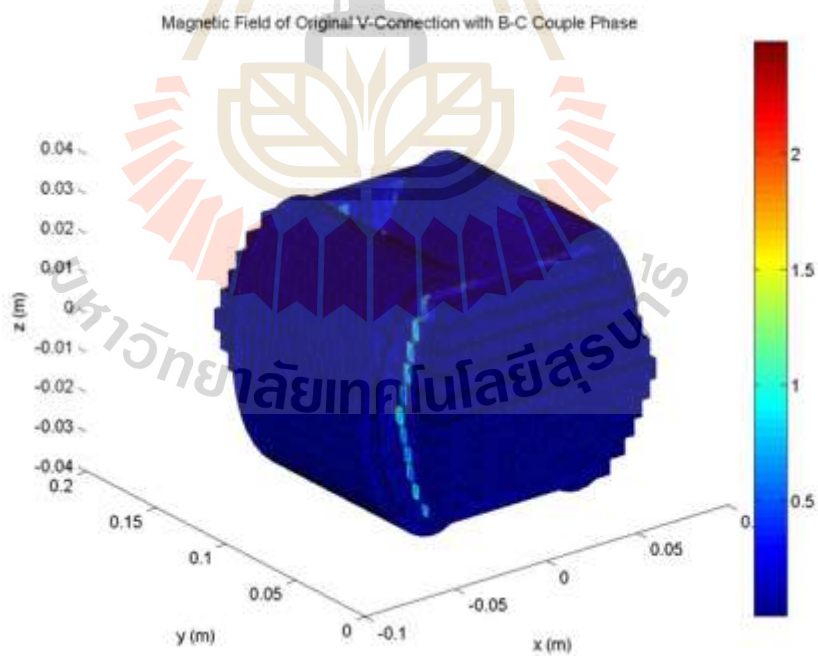


ค) ขดลวดค้ำปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส C-A

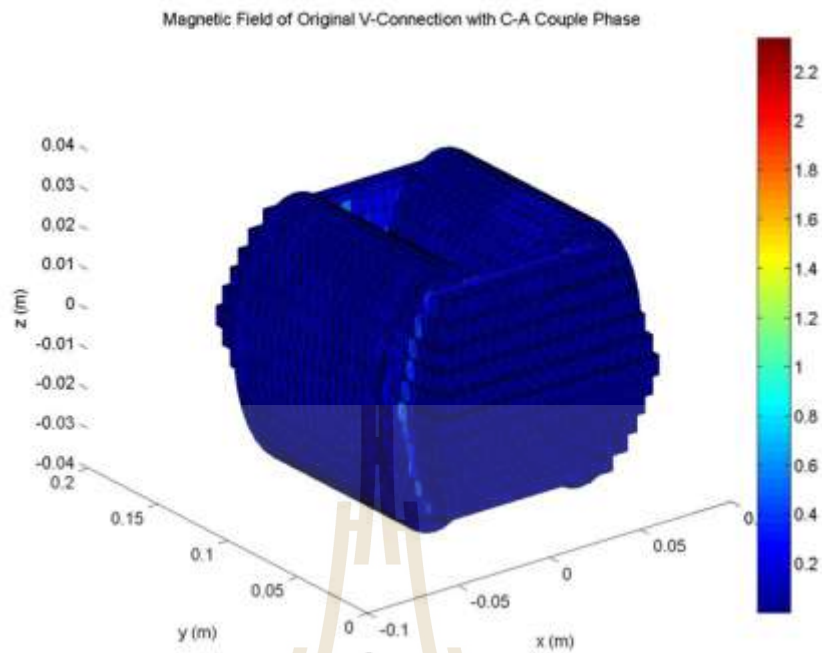
รูปที่ 5.8 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบวีที่ยังมิได้เน้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก



ก) ขดลวดค้ำปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส A-B

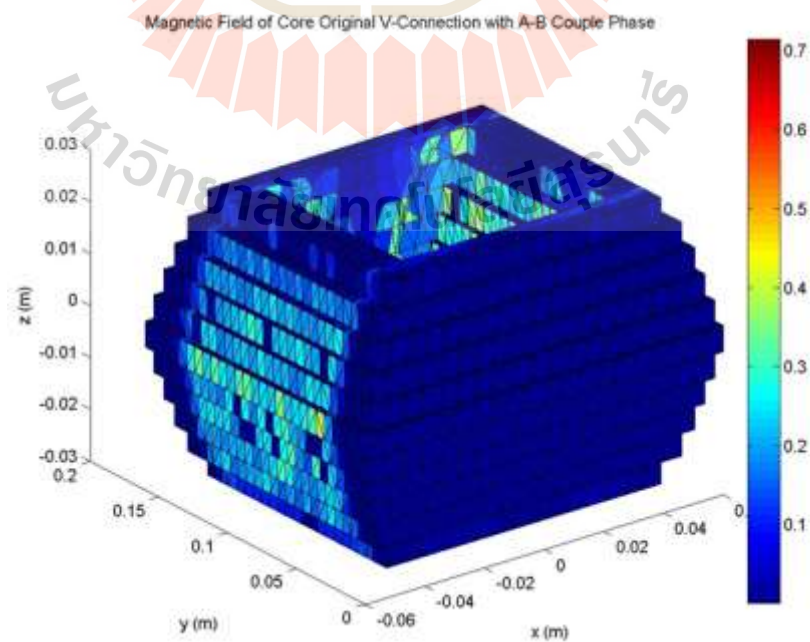


ข) ขดลวดค้ำปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส B-C

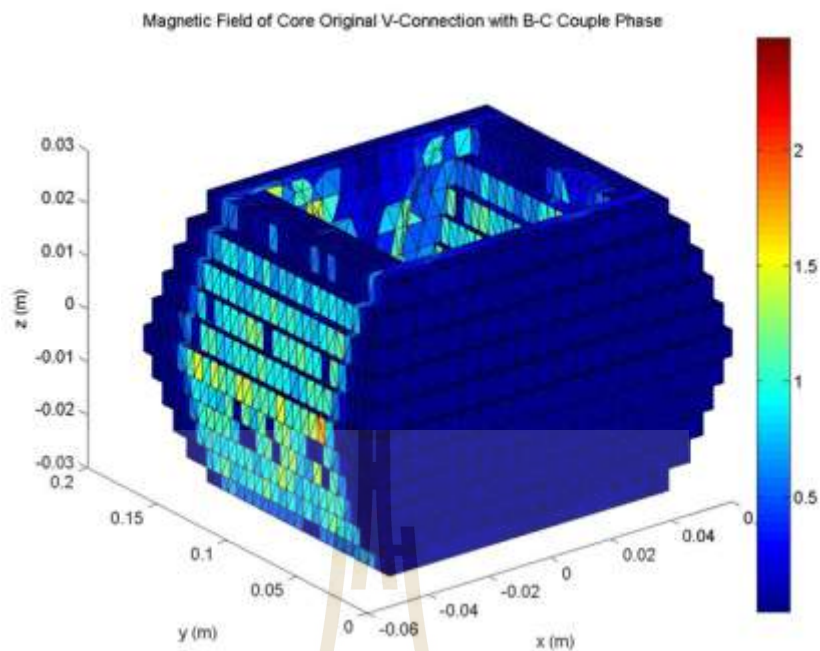


ก) ขดลวดด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส C-A

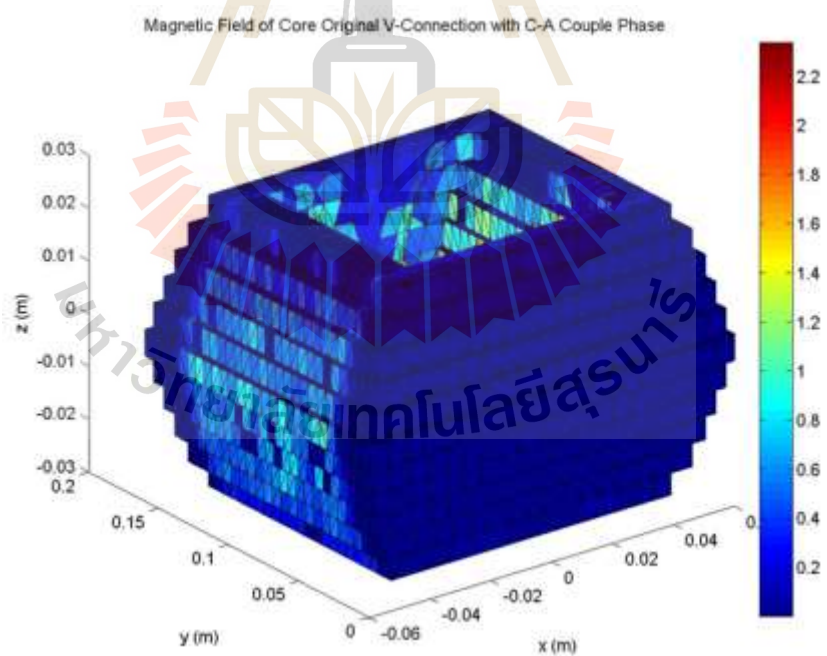
รูปที่ 5.9 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบวีที่ยังมิได้เน้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก



ก) ขดลวดด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส A-B



ข) ขดลวดค้ำปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส B-C



ค) ขดลวดค้ำปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส C-A

รูปที่ 5.10 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีที่ยังมีได้เน้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก

5.4.2 ผลการจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์

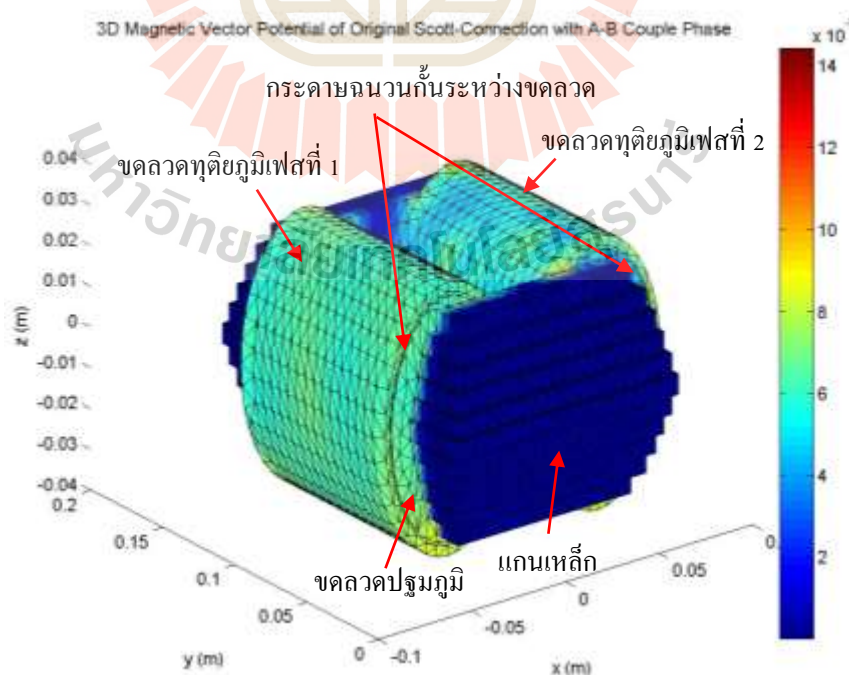
การจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก สนามแม่เหล็กสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์จะดำเนินการตามหัวข้อที่ได้กล่าวมา วิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งพิจารณาการกระจายของของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งขดลวดและตำแหน่งแกนเหล็กดังนี้

- การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ ที่ยังมีได้เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 5.11

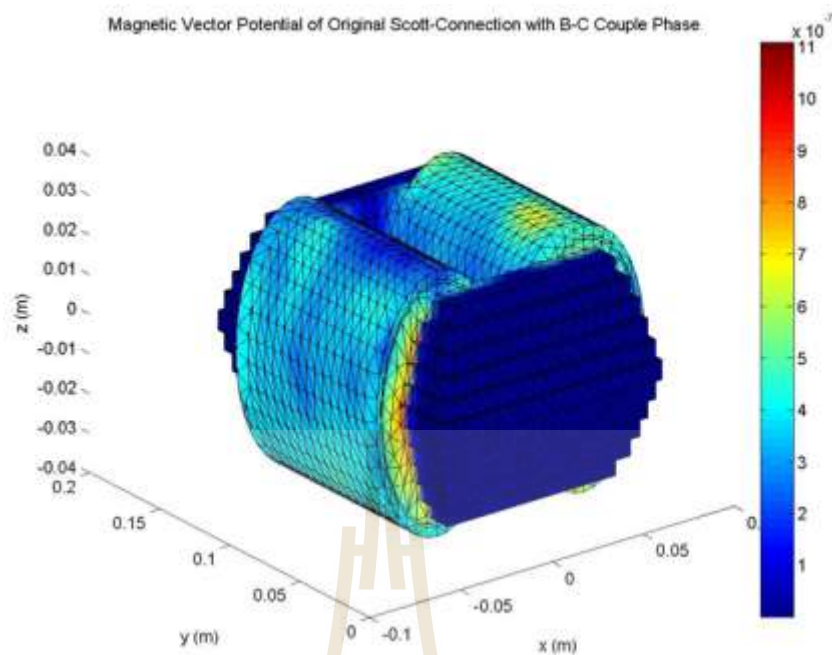
- การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ ที่ยังมีได้เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 5.12

- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ ที่ยังมีได้เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 5.13

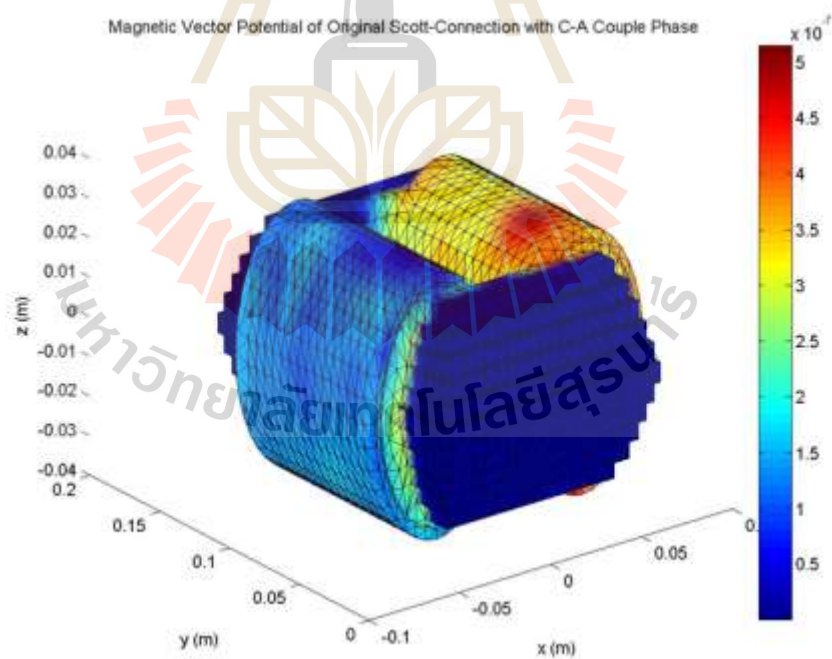
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ ที่ยังมีได้เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 5.14



ก) จุดแท่ปกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส C

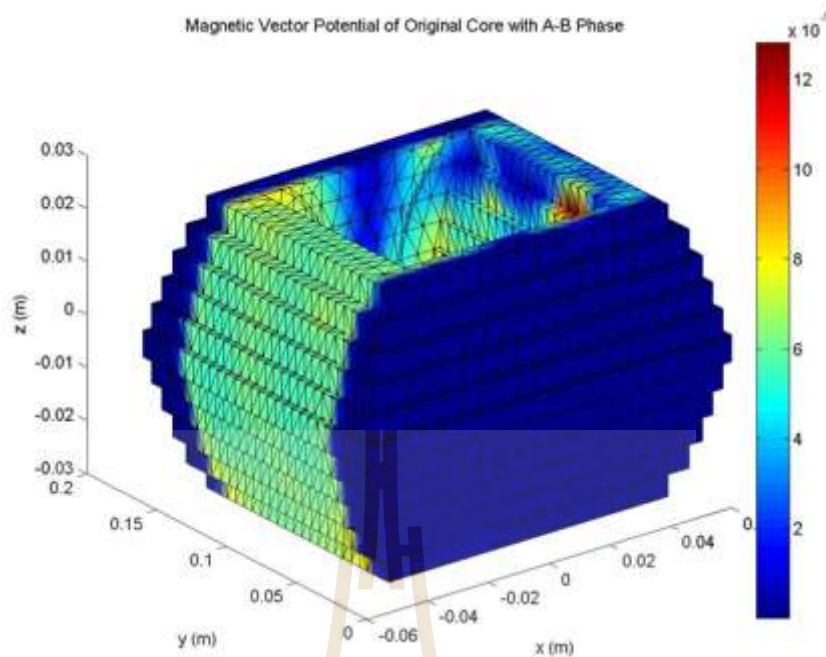


ข) จุดแท่งกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส A

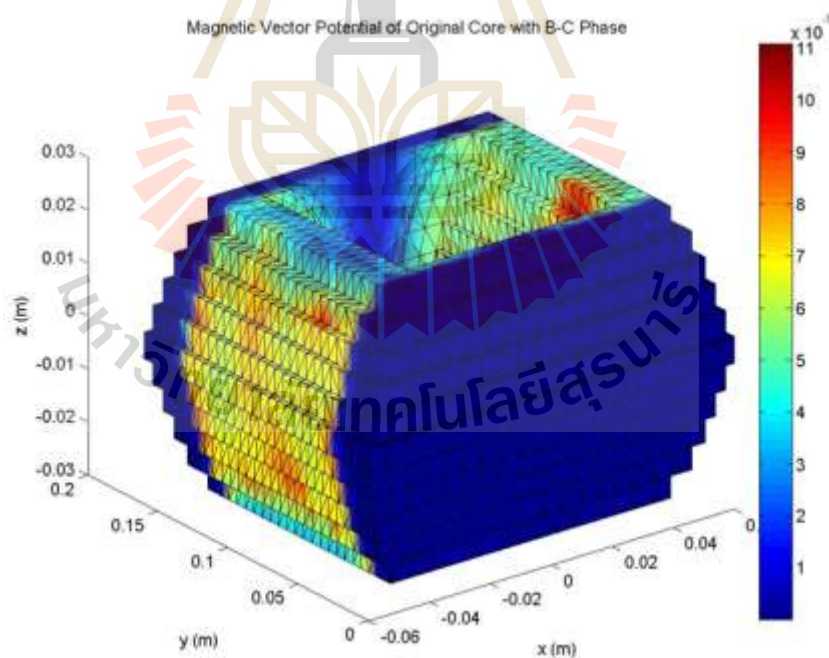


ค) จุดแท่งกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส B

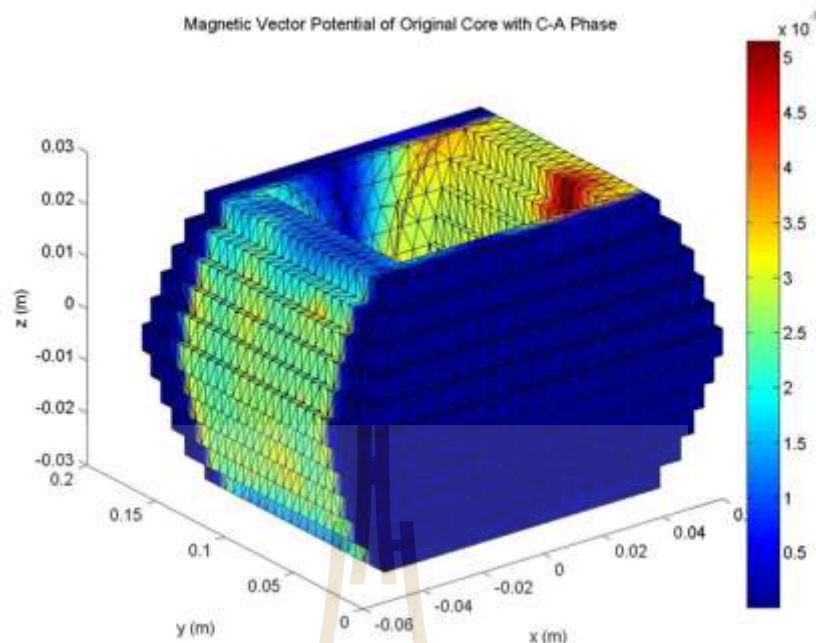
รูปที่ 5.11 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ที่ยังมิได้เน้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก



ก) จุดแท่งกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส C

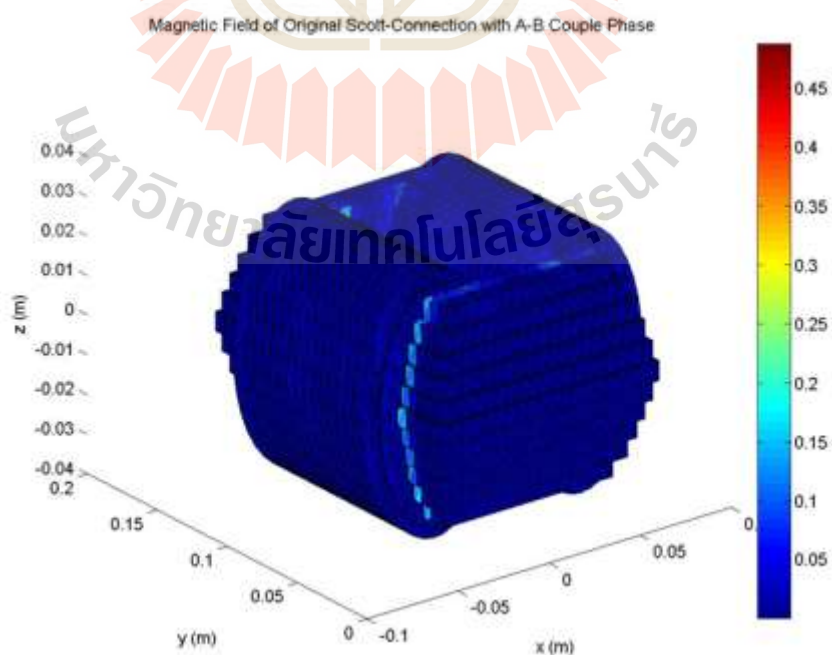


ข) จุดแท่งกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส A

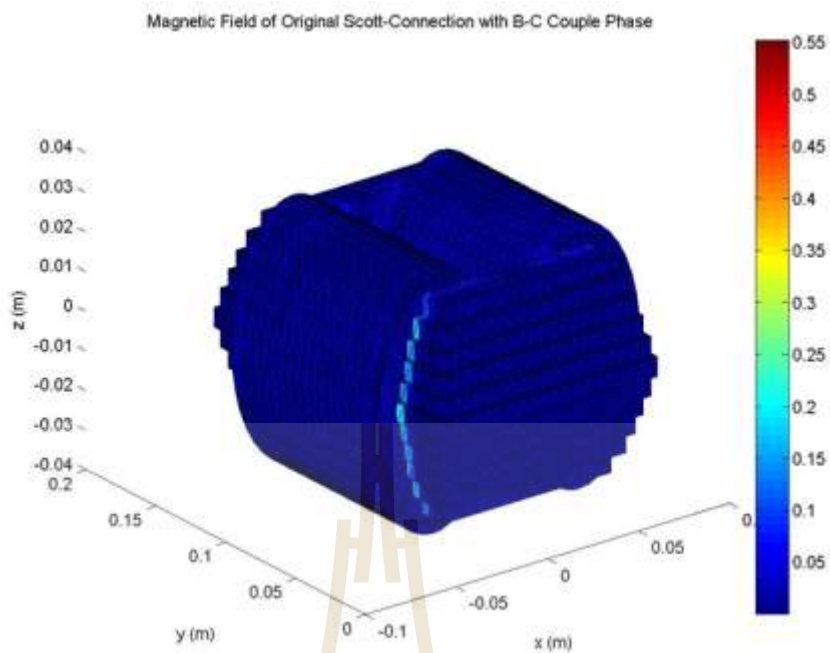


ก) จุดแท้ปกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส B

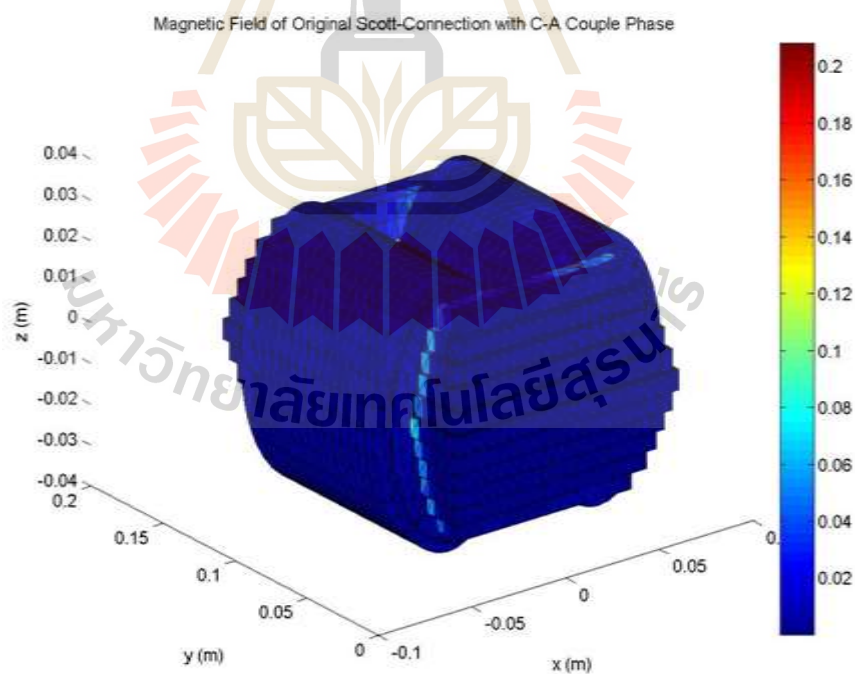
รูปที่ 5.12 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ที่ยังมีได้เน้นลค่าลิ่งสูงขยในแกนเหล็ก



ก) จุดแท้ปกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส C

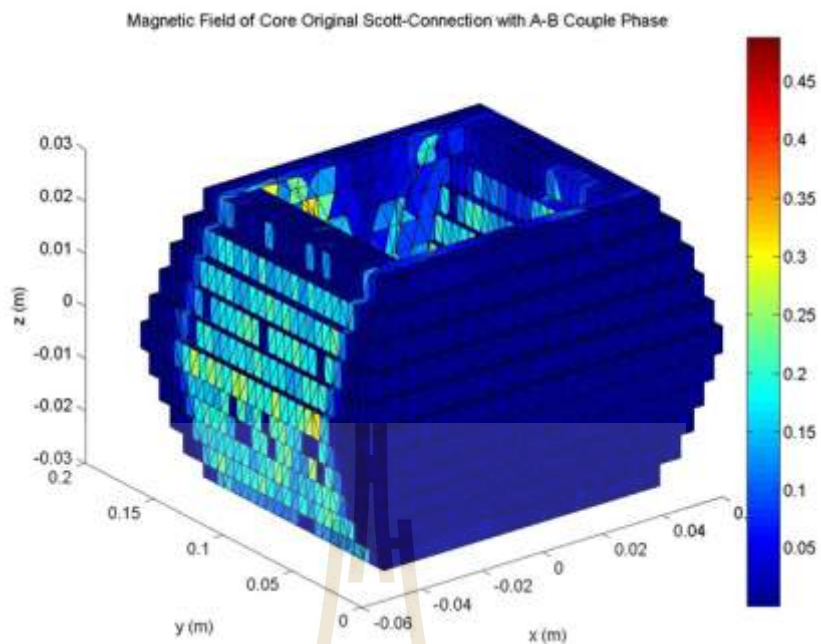


ข) จุดแท่งกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส A

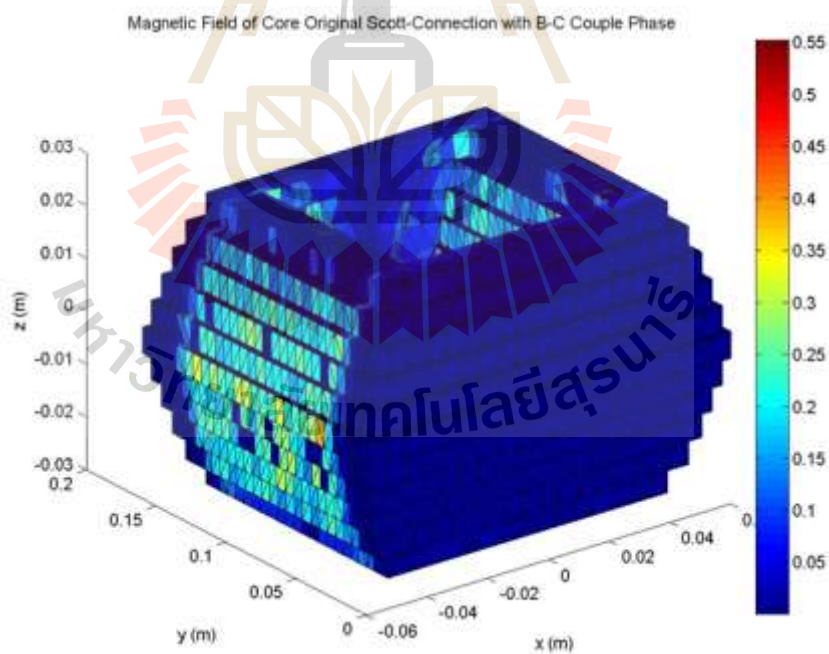


ค) จุดแท่งกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส B

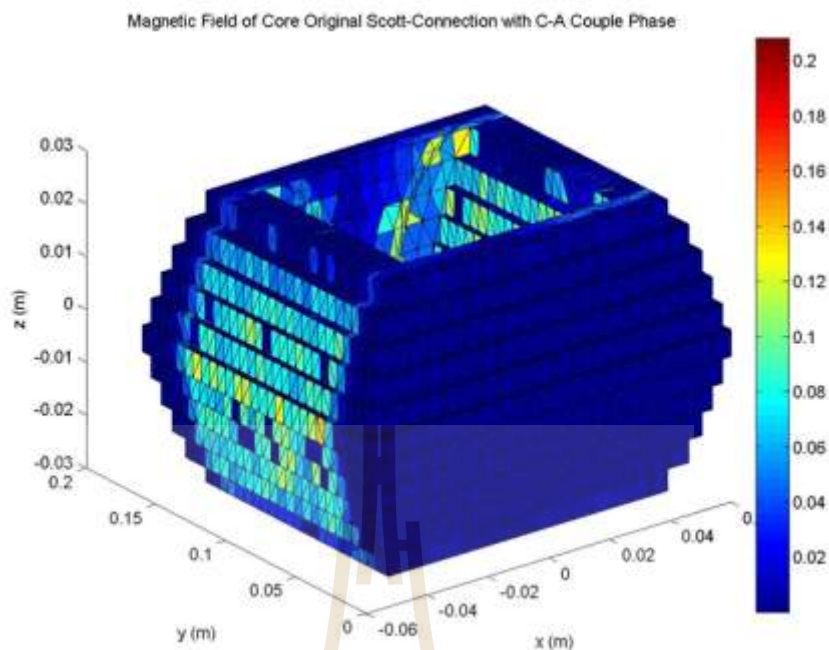
รูปที่ 5.13 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ที่ยังมีได้เน้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก



ก) จุดแท้่ปกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส C



ข) จุดแท้่ปกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส A



ค) จุดแก้ปกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส B

รูปที่ 5.14 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ที่ยังมิได้เน้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก

5.4.3 ผลการจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์

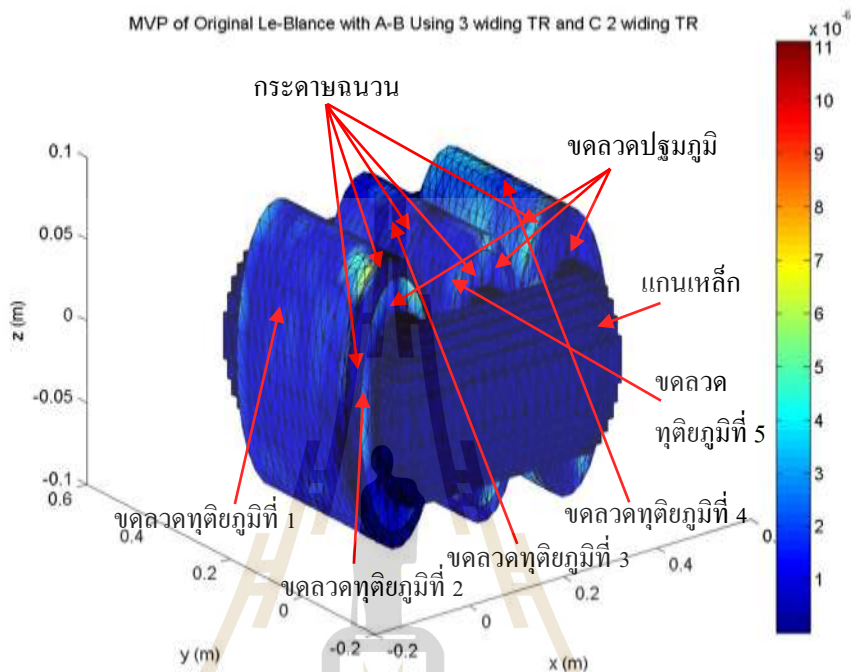
การจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก สนามแม่เหล็กสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์จะดำเนินการตามหัวข้อที่ได้กล่าวมา วิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งพิจารณาการกระจายของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งขดลวดและตำแหน่งแกนเหล็กดังนี้

- การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ ที่ยังมิได้เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 5.15

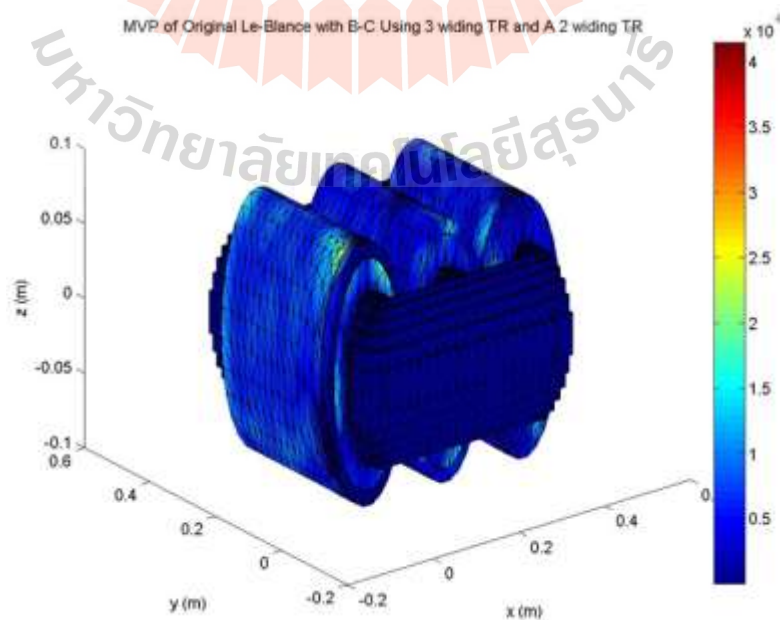
- การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ ที่ยังมิได้เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 5.16

- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ ที่ยังมิได้เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กแบบ 3 มิติแสดงได้ดังรูปที่ 5.17

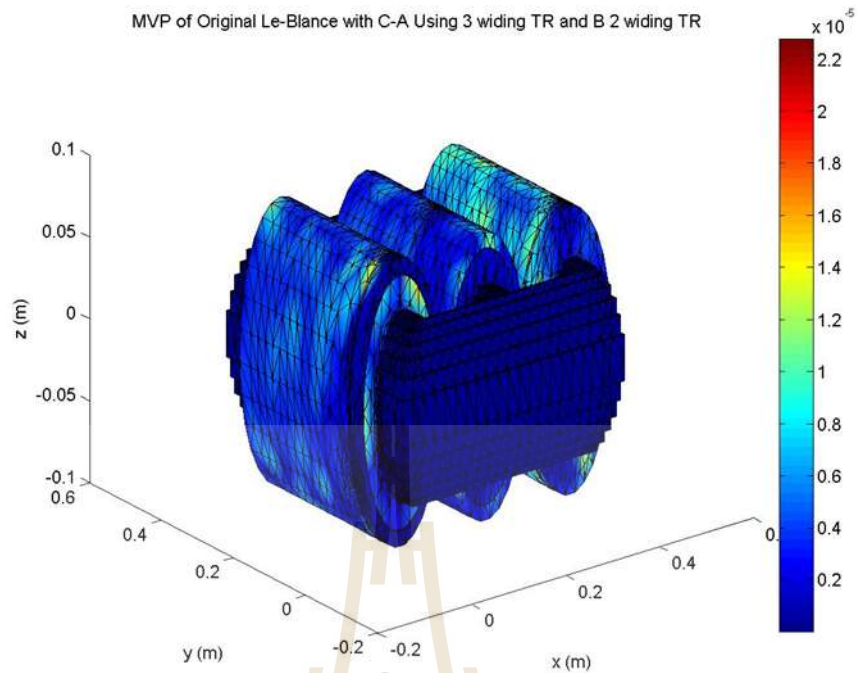
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ ที่ยังมีได้เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 5.18



ก) ขดลวดทุติยภูมิที่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส A และเฟส B

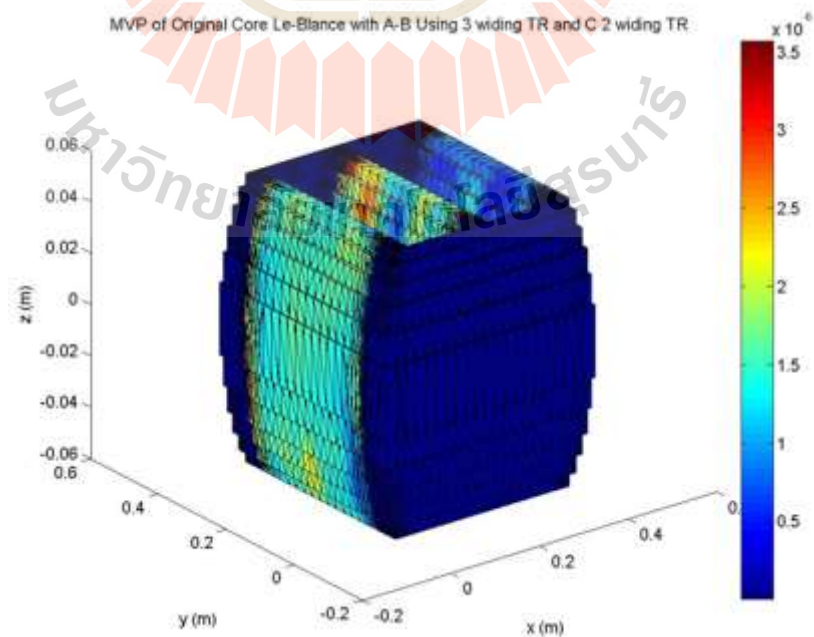


ข) ขดลวดทุติยภูมิที่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส B และเฟส C

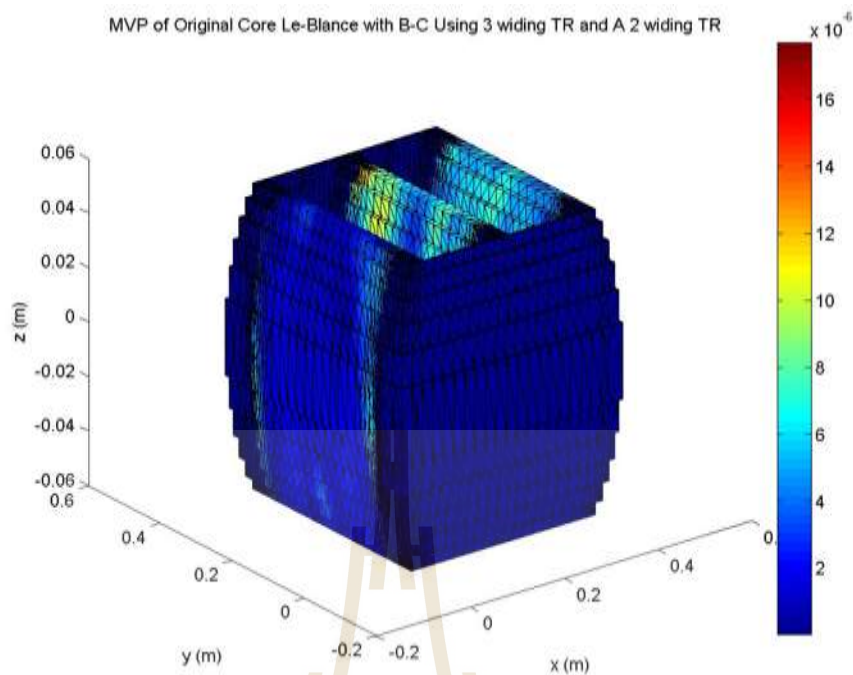


ค) ขดลวดทุติยภูมิที่ชดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส C และเฟส A

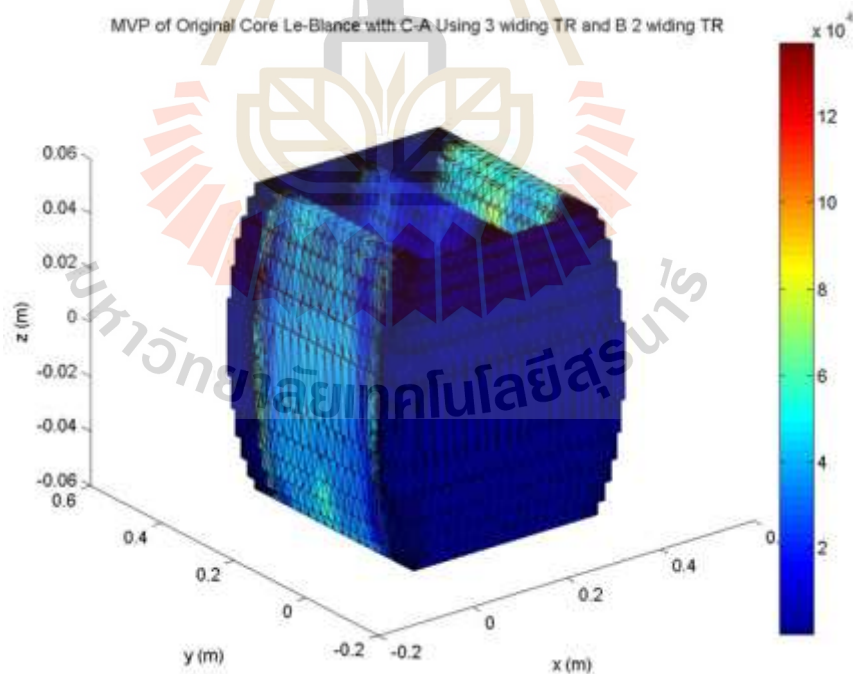
รูปที่ 5.15 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ที่ยังมิได้เน้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก



ก) ขดลวดทุติยภูมิที่ชดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส A และเฟส B

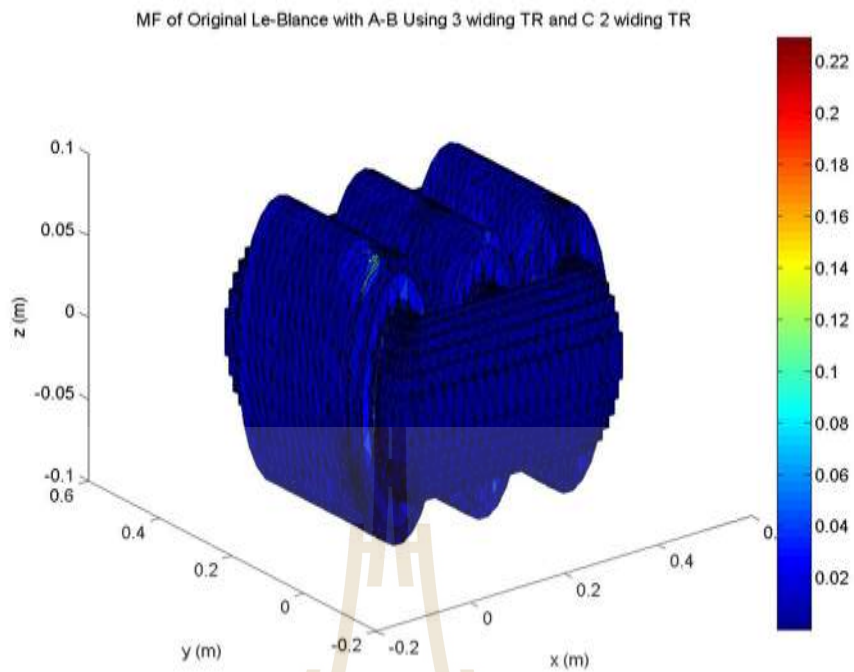


ข) ขดลวดทุติยภูมิที่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส B และเฟส C

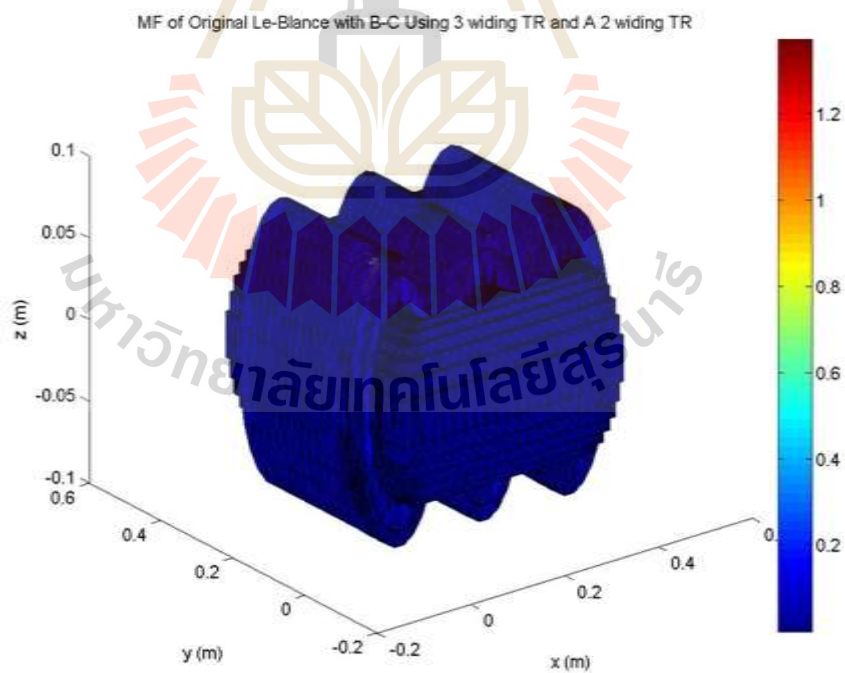


ค) ขดลวดทุติยภูมิที่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส C และเฟส A

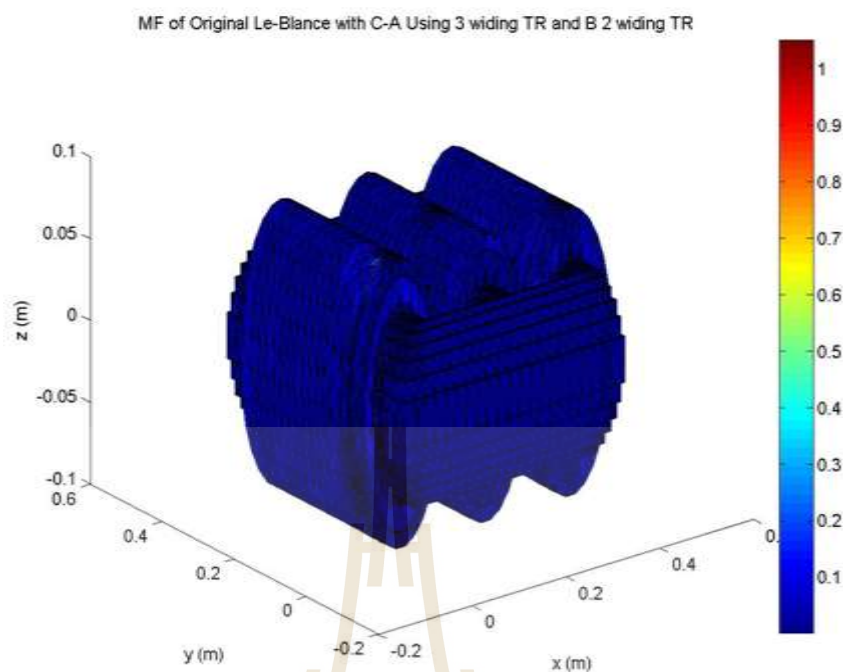
รูปที่ 5.16 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ที่ยังมิได้เน้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก



ก) ขดลวดทุติยภูมิที่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส A และเฟส B

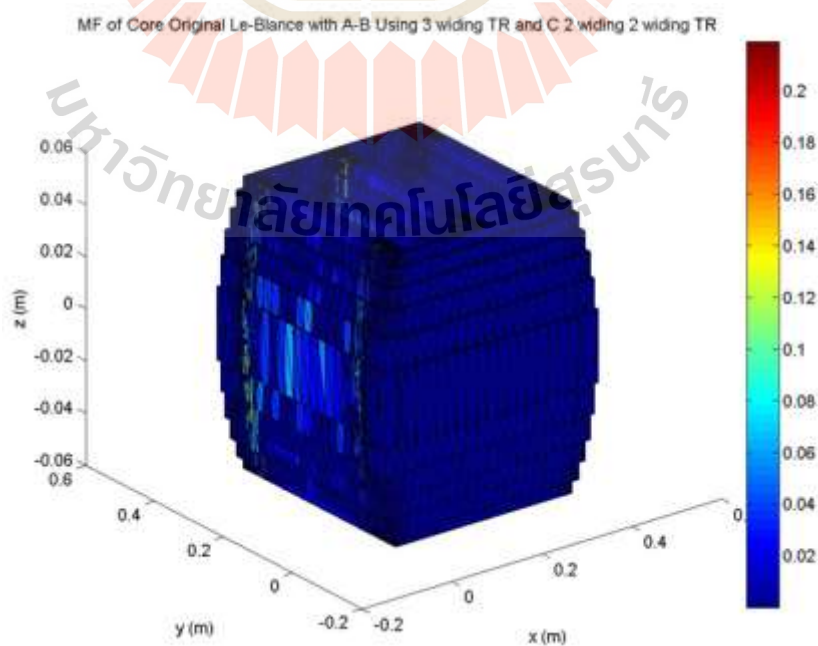


ข) ขดลวดทุติยภูมิที่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส B และเฟส C

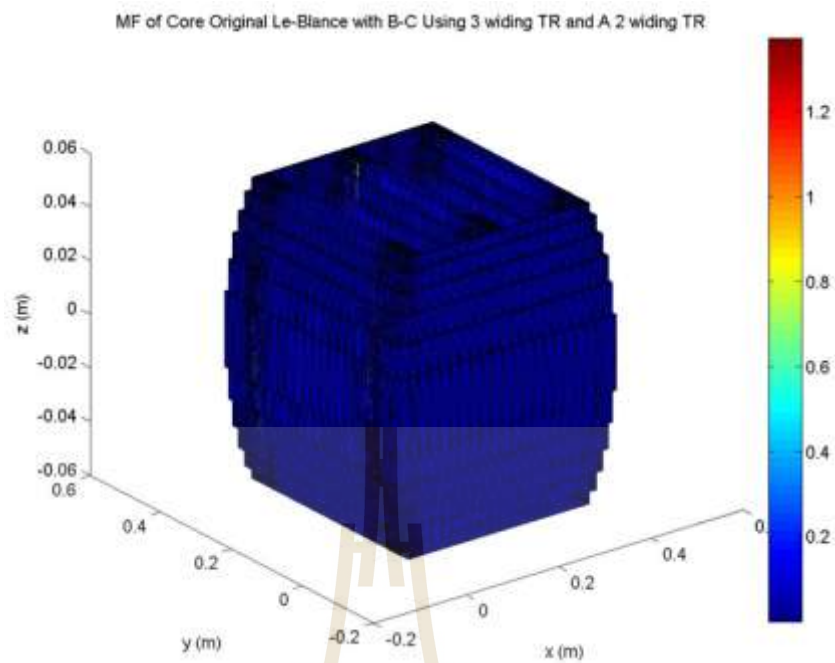


ค) ขดลวดทุติยภูมิที่ขุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส C และเฟส A

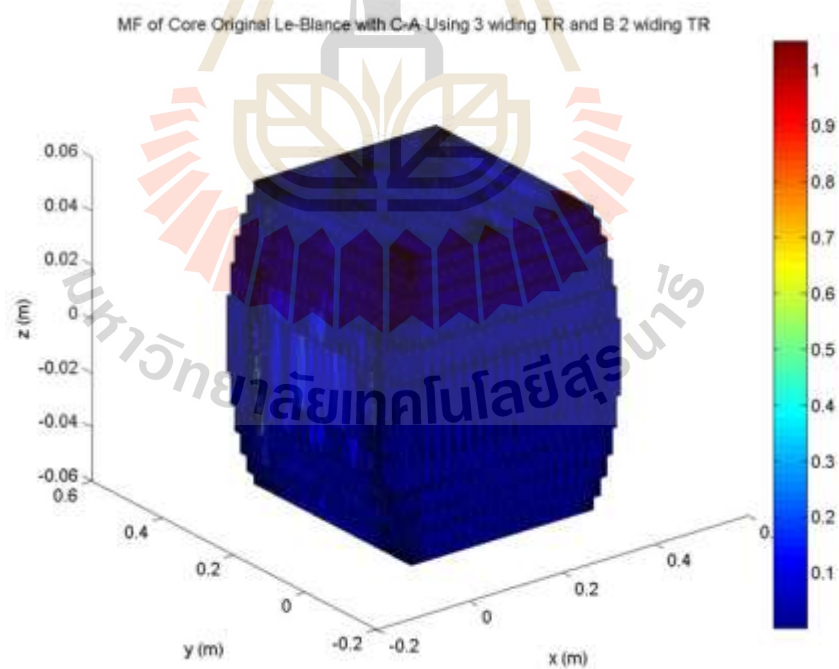
รูปที่ 5.17 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ที่ยังมิได้นั้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก



ก) ขดลวดทุติยภูมิที่ขุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส A และเฟส B



ข) ขดลวดทุติยภูมิที่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส B และเฟส C



ค) ขดลวดทุติยภูมิที่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส C และเฟส A

รูปที่ 5.18 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบลอบลองก์ที่ยังมิได้เน้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก

จากผลการจำลองเชิงกราฟิกของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กของหม้อแปลงที่แสดงด้วยรูปที่ 5.7 – 5.8 จะเห็นได้ว่าค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะมีค่าสูงที่ตำแหน่งบริเวณของขดลวดตัวนำโดยจะแพร่กระจายไปในส่วนของแกนเหล็ก โดยในบริเวณแกนเหล็กที่ตำแหน่งตรงกลางของแกนเหล็กจะเกิดการแพร่กระจายของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กน้อยที่สุด โดยในแต่ละคู่เฟสที่จ่ายกำลังไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงจะทำให้ลักษณะการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเกิดความไม่สมดุล แต่เมื่อพิจารณาตลอดการทำงานโดยให้มีการทำงานสลับคู่เฟสจาก A-B เป็น B-C และ C-A จะทำให้การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กโดยภาพรวมเกิดความสมดุล และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่แสดงด้วยรูปที่ 5.9 – 5.10 จะเห็นได้ว่า ลักษณะการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กจะมีความสอดคล้องกัน โดยมีรูปแบบเดียวกันกับการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก โดยที่ความสัมพันธ์ของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกัน โดยเมื่อพิจารณาเฉพาะในส่วนของแกนเหล็กจะเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กจะแพร่เข้าไปในบริเวณแกนกลางของแกนเหล็กเป็นส่วนใหญ่

จากผลการจำลองเชิงกราฟิกของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กของหม้อแปลงที่แสดงด้วยรูปที่ 5.11 – 5.12 จะเห็นได้ว่าลักษณะการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะมีรูปแบบเดียวกันกับหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีทุกประการ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของหม้อแปลงที่เหมือนกัน แต่เนื่องจากการจำลองผลของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์นั้นอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิแยกจากทางด้านทุติยภูมิจึงทำให้ขนาดของสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงและมีการกระจายที่สม่ำเสมอมากกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวี แต่ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กยังคงมีรูปแบบเดียวกัน โดยจะมีค่ามากที่บริเวณภายในแกนเหล็กและค่อยๆ ลดลงมาเมื่อระยะห่างจากแกนกลางเพิ่มขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 5.13 – 5.14

จากผลการจำลองเชิงกราฟิกของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กของหม้อแปลง และค่าสนามแม่เหล็กที่แสดงด้วยรูปที่ 5.15 – 5.18 จะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์นี้มีโครงสร้างที่แตกต่างจากหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีและแบบสกอตต์เนื่องจากมีจำนวนขดลวดที่มากกว่าดังนั้นการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และค่าสนามแม่เหล็กจึงมีค่าสูงกว่า แต่การกระจายตัวจะมีความสม่ำเสมอมากที่สุด โดยที่การกระจายตัวค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งแกนเหล็กจะมีค่าใกล้เคียงกันตลอดทั้งแกนเหล็ก แต่จะมีค่าสูงในบริเวณภายในแกนเหล็กเพียงเล็กน้อย

จากผลการจำลองเชิงกราฟิกของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อทั้งสามรูปแบบ เพื่อให้เห็นถึงข้อแตกต่างจะขอเสนอผลการจำลองในเชิงตัวเลขและผลการคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กในขณะที่ยังมิได้นำผลการออกแบบเพื่อลดความสูญเสียในแกนเหล็ก โดยผลการจำลองและผลการคำนวณของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่อแบบวี แบบสกอตต์และแบบเลอบ ลอว์ก็แสดงได้ในตารางที่ 5.2 – 5.4 ตามลำดับ โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าให้ค่า coefficient steinmetz's มีค่าเท่ากับ 300 ค่าคงที่ steinmetz's มีค่าเท่ากับ 2 และ ค่า specific resistance of core material มีค่าเท่ากับ 1.60 (อริยศักดิ์ จิตธรรมสาร, 2555)

ตารางที่ 5.2 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลง สำหรับการเชื่อมต่อแบบวี

ปริมาณ	คู่เฟสในระบบไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายกำลังไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ		
	A-B	B-C	C-A
ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กสูงสุด (w/m)	2.3512×10^{-6}	8.0221×10^{-6}	7.6482×10^{-6}
สนามแม่เหล็กสูงสุด (T)	0.4029	1.4363	1.0801
กำลังงานสูญเสียเนื่องจาก ฮิสเทอรีซิส (kW)	2.4349	30.9444	17.4992
กำลังงานสูญเสียเนื่องจาก กระแสไหลวน (kW)	0.6493	8.2518	4.6665
กำลังงานสูญเสีย ในแกนเหล็ก (kW)	3.0842	39.1962	22.1657

ตารางที่ 5.3 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลง
สำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์

ปริมาณ	จุดตัดปีกกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส		
	C	A	B
ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กสูงสุด (w/m)	1.2795×10^{-6}	1.1052×10^{-6}	5.1415×10^{-7}
สนามแม่เหล็กสูงสุด (T)	0.3054	0.2199	0.1354
กำลังงานสูญเสียเนื่องจาก ฮิสเทอรีซิส (kW)	1.3990	0.7253	0.2750
กำลังงานสูญเสียเนื่องจาก กระแสไหลวน (kW)	0.3731	0.1934	0.0733
กำลังงานสูญเสีย ในแกนเหล็ก (kW)	1.7721	0.9187	0.3483

ตารางที่ 5.4 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลง
สำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์

ปริมาณ	ขดลวดสี่ขดด้านทุติยภูมิเหนี่ยวนำจากด้านปฐมภูมิจากคู่เฟส		
	A-B	B-C	C-A
ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กสูงสุด (w/m)	3.5635×10^{-6}	1.7669×10^{-5}	1.3671×10^{-5}
สนามแม่เหล็กสูงสุด (T)	0.1923	0.8794	0.5594
กำลังงานสูญเสียเนื่องจาก ฮิสเทอรีซิส (kW)	0.5547	11.6002	4.6939
กำลังงานสูญเสียเนื่องจาก กระแสไหลวน (kW)	0.1479	3.0934	1.2517
กำลังงานสูญเสีย ในแกนเหล็ก (kW)	0.7026	14.6936	5.9456

จากผลการคำนวณในเชิงตัวเลขของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษทั้ง 3 รูปแบบ เมื่อพิจารณาการทำงานของหม้อแปลงใน 1 รอบการทำงานคือ A-B, B-C และ C-A ตามลำดับ ซึ่งค่าความสูญเสียในแกนเหล็กจะคำนวณได้จากค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดในแต่ละกรณี ซึ่งจะพิจารณาเป็นค่าความสูญเสียรวมตลอดช่วงการทำงานของหม้อแปลงใน 1 รอบการทำงานจะได้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กสำหรับหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบวี แบบสกอตต์และแบบเลอบลองก์เป็น 64.4461kW, 3.0391kW และ 21.3418kW ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์จะมีค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กน้อยที่สุด

5.5 สรุปผล

บทที่ 5 เป็นการอธิบายโปรแกรมจำลองผลและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองผลพร้อมจำลองผลเพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อทั้ง 3 รูปแบบที่ยังมิได้เน้นการลดค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งผลการจำลองที่ได้พบว่าบริเวณขดลวดตัวนำของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อทั้งสามรูปแบบจะมีค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กสูงกว่าบริเวณอื่นๆ ส่งผลให้บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงที่มีขดลวดล้อมรอบอยู่ถูกเหนี่ยวนำโดยขดลวดตัวนำ ทำให้มีค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นตาม ส่งผลให้ค่าสนามแม่เหล็กในบริเวณดังกล่าวมีค่าสูงขึ้น และจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณภายในแกนเหล็กซึ่งเป็นไปตามพฤติกรรมของสนามแม่เหล็ก และเมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าความสูญเสียในแกนเหล็กในเชิงตัวเลขในช่วง 1 รอบการทำงานของหม้อแปลงจะเห็นได้ว่า หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์จะมีค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กน้อยที่สุดซึ่งมีค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กรวมเท่ากับ 3.0391kW โดยจะนำผลการจำลองที่ได้ไปเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กเพื่อลดความสูญเสียในแกนเหล็กในบทต่อไป

บทที่ 6

การออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กหม้อแปลงเพื่อลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก

6.1 บทนำ

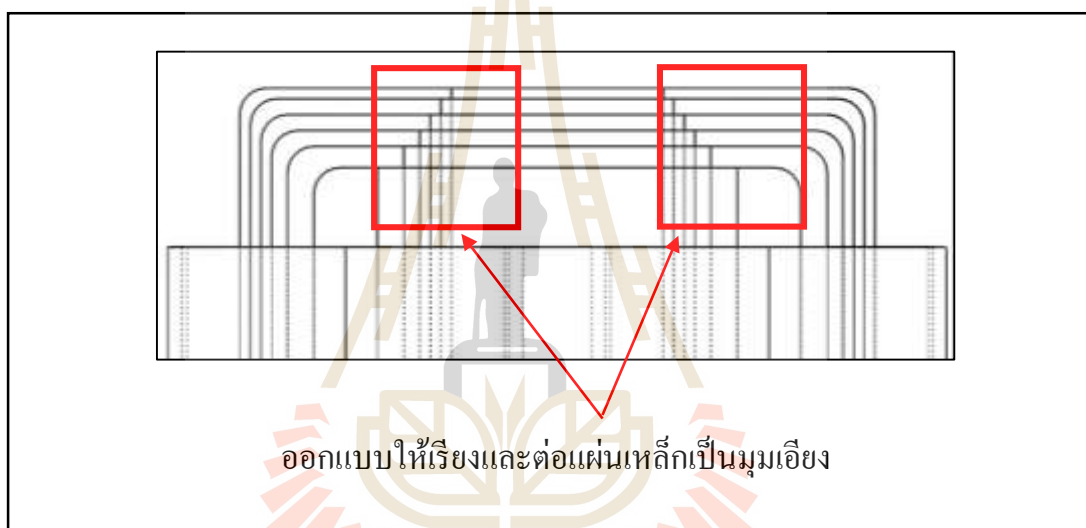
การออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบพิเศษในระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในบทที่ 6 นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อลดกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กให้น้อยลงกว่าเมื่อใช้แกนเหล็กที่มีรูปร่างทั่วไปที่ยังมีได้เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก โดยแกนเหล็กที่ใช้ออกแบบนั้นยังมีปริมาตรและค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็กเท่ากับแกนเหล็กแบบเดิมทุกประการ ซึ่งการออกแบบจะมีทั้งสิ้น 3 รูปแบบคือ แบบที่ 1 จะพิจารณาถึงพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กและการซ้อนแผ่นเหล็กหลายๆ แผ่นให้เกิดความโค้งมนบริเวณรอยต่อของแกนเหล็ก ซึ่งจะสามารถควบคุมความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของแกนเหล็ก และทำให้การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กภายในแกนเหล็กมีความสม่ำเสมอ แบบที่ 2 จะพิจารณาส่วนของแกนเหล็กที่ไม่สัมผัสกับขดลวดให้มีความโค้งมนตลอดแนวแกนเพื่อทำให้การกระจายของสนามแม่เหล็กเกิดความสม่ำเสมอ และแบบที่ 3 จะพิจารณาคูณสมบัติของสารแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน โดยจะเพิ่มเข้าไปที่แกนเหล็กบริเวณรอยต่อของแกนเหล็กเพื่อควบคุมความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก อีกทั้งการนำเสนอผลการจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบพิเศษเมื่อพิจารณาการออกแบบรูปร่างแกนเหล็กสำหรับลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก และคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียในเชิงตัวเลขเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้หลังจากการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็ก

6.2 การออกแบบแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อลดความสูญเสียในแกนเหล็ก

เนื่องจากโดยทั่วไปหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่รับสัญญาณแรงดันกระแสสลับ ดังนั้นการออกแบบแกนเหล็กนั้นจะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบหลายอย่าง อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กจะต้องอยู่ในย่านเชิงเส้น การเรียงและต่อแผ่นเหล็ก รวมทั้งวัสดุที่ใช้ทำแกนเหล็ก เป็นต้น

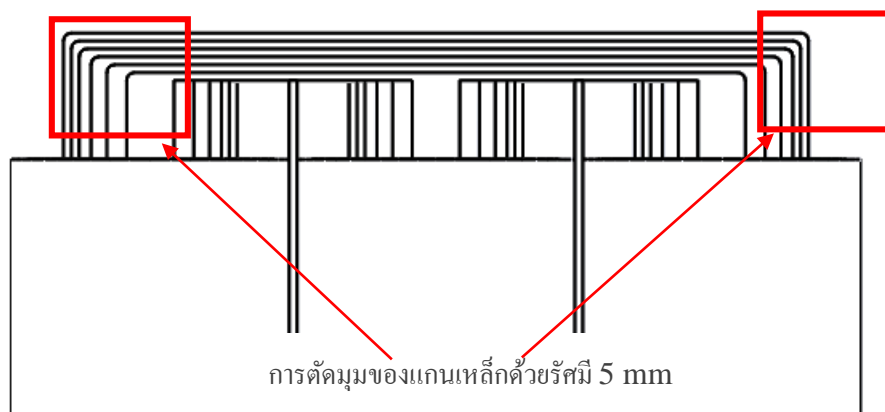
การออกแบบหน้าตัดของแกนเหล็กแบบหลายชั้นนั้นทำให้เกิดประสิทธิภาพการใช้พื้นที่ได้สูงสุด โดยต้องคำนึงถึงขนาดของค่าแฟกเตอร์พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก โดยการออกแบบในลักษณะเช่นนี้จะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กเนื่องจากกระแสไหลวนลดน้อยลงได้ เมื่อ

พิจารณาลักษณะการเรียงและต่อแผ่นเหล็ก โดยทั่วไปแล้วการเรียงแผ่นเหล็กแบบต่อกันเป็นมุมฉาก จะส่งผลให้การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กไม่สะดวกและค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการที่เส้นแรงแม่เหล็กข้ามแผ่นเหล็กจากแผ่นหนึ่งไปยังอีกแผ่นหนึ่ง เส้นแรงแม่เหล็กจะไหลในทิศทางตั้งฉากกับการเรียงตัวของแกนเหล็ก ดังนั้น ค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก รวมทั้งค่ากระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับเส้นแรงแม่เหล็กและทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กด้วย โดยการจัดเรียงแผ่นเหล็กให้เกิดเป็นมุมเอียงนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำโครงสร้างการจัดเรียงแผ่นเหล็กให้เกิดเป็นมุมเอียงมาพิจารณาทั้งก่อนที่แกนเหล็กจะได้รับการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็ก และหลังจากที่ได้รับการออกแบบรูปร่างแกนเหล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 การออกแบบการเรียงและต่อแผ่นเหล็กให้เป็นมุมเอียง

ความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณมุมของแกนเหล็กด้านบน (Top yoke) โดยปกติจะเป็นตำแหน่งสำหรับสวมขดลวดแรงสูงจะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กสูง ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กบริเวณมุมโดยการตัดมุมของแกนเหล็กด้วยรัศมีเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่ารัศมีที่สามารถตัดมุมได้สูงสุดของแผ่นเหล็กย่อย โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากันสำหรับทุกแผ่นเหล็กย่อยเพื่อลดความเข้มของสนามแม่เหล็กแสดงได้ดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 การออกแบบ โดยการตัดมุมของแกนเหล็กเพื่อลดความเข้มสนามแม่เหล็ก

6.3 ผลการจำลองศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก สนามแม่เหล็กและกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อออกแบบแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง

สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการเชื่อมต่อแบบวี แบบสกอตต์และแบบเลอบลองก์ที่ใช้ในระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อได้ดำเนินการออกแบบรูปร่างแกนเหล็กเพื่อการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีการตัดมุมโค้ง ซึ่งจะแสดงดังนี้

6.3.1 ผลการจำลองของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบวีเมื่อพิจารณารูปร่างของแกนเหล็กด้วยการตัดมุมโค้ง

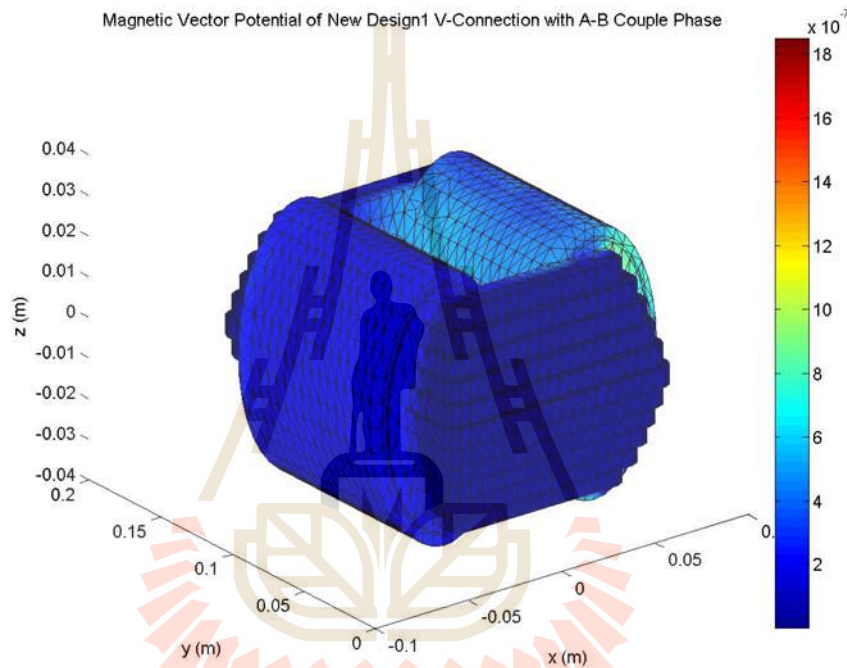
การจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก สนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีเมื่อแกนเหล็กได้รับการออกแบบตามหัวข้อที่ได้อธิบายมาข้างต้น สามารถแสดงผลการจำลองโดยวิธานิพนธ์นี้มุ่งเน้นพิจารณาการกระจายของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และค่าสนามแม่เหล็กในบริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงดังนี้

- การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวี ที่เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้งแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 6.3

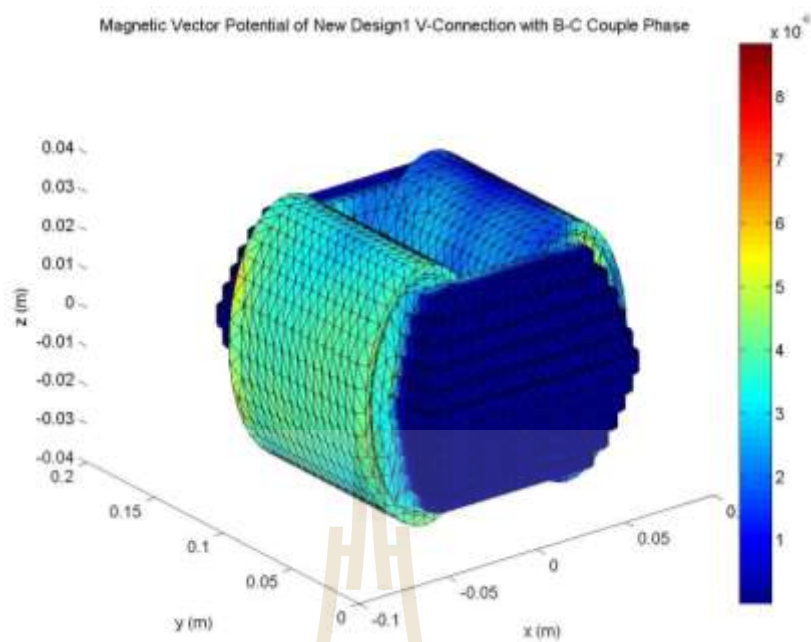
- การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวี ที่เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้งแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 6.4

- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวี ที่เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้งแบบ 3 มิติแสดงได้ดังรูปที่ 6.5

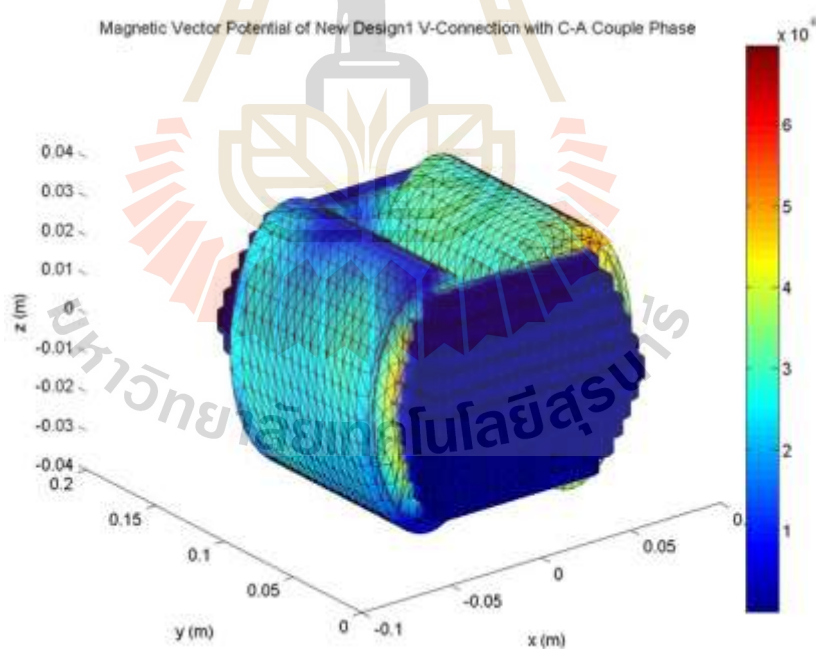
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวี ที่เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้งแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 6.6



ก) ขดลวดด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส A-B

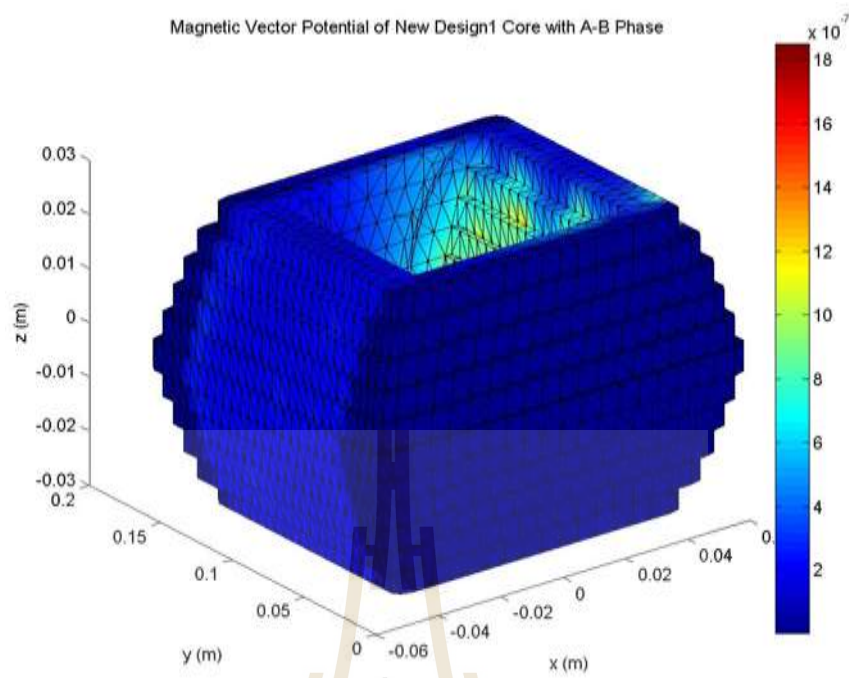


ข) ขดลวดด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส B-C

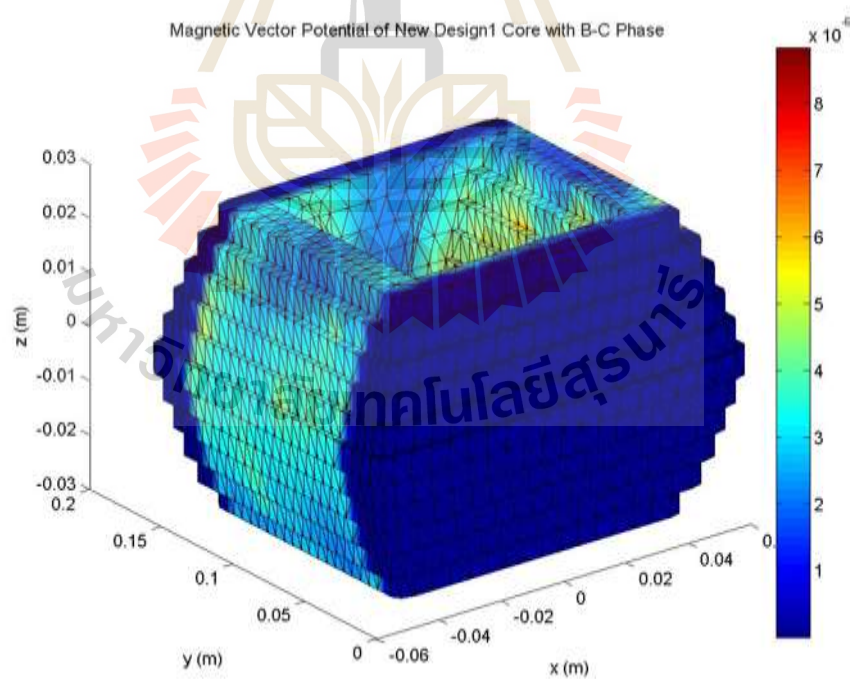


ค) ขดลวดด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส C-A

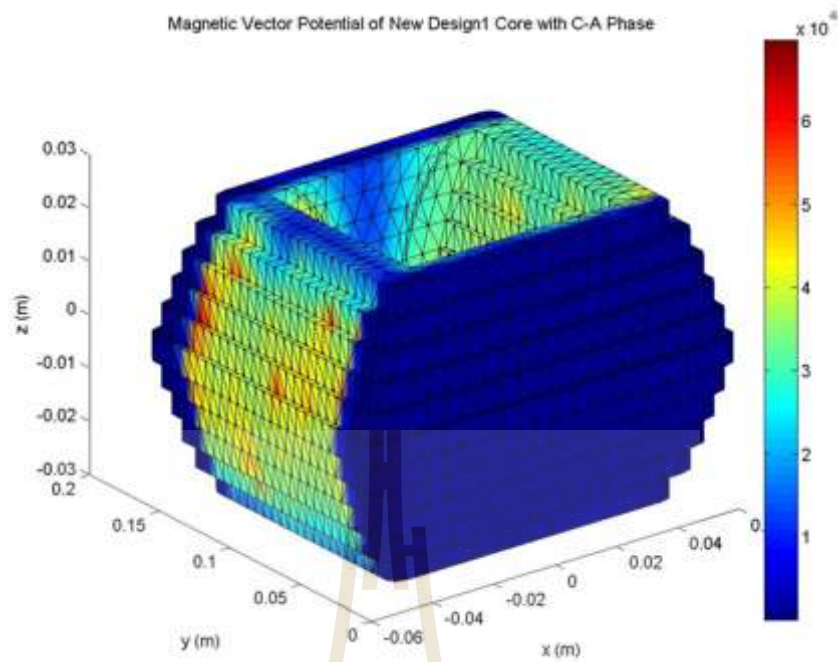
รูปที่ 6.3 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีเมื่อเน้นการลดกำลังสูญเสียที่แกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง



ก) ขดลวดด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส A-B

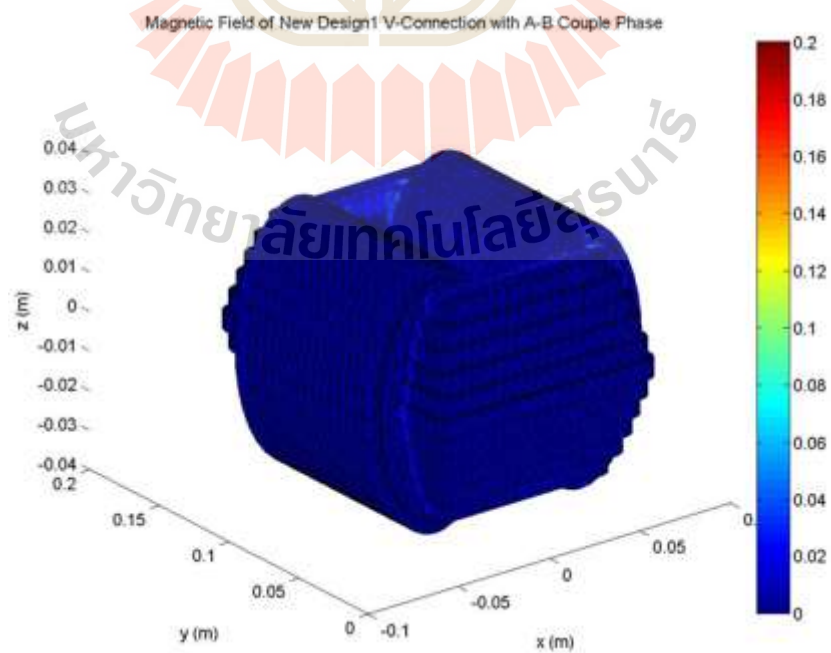


ข) ขดลวดด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส B-C

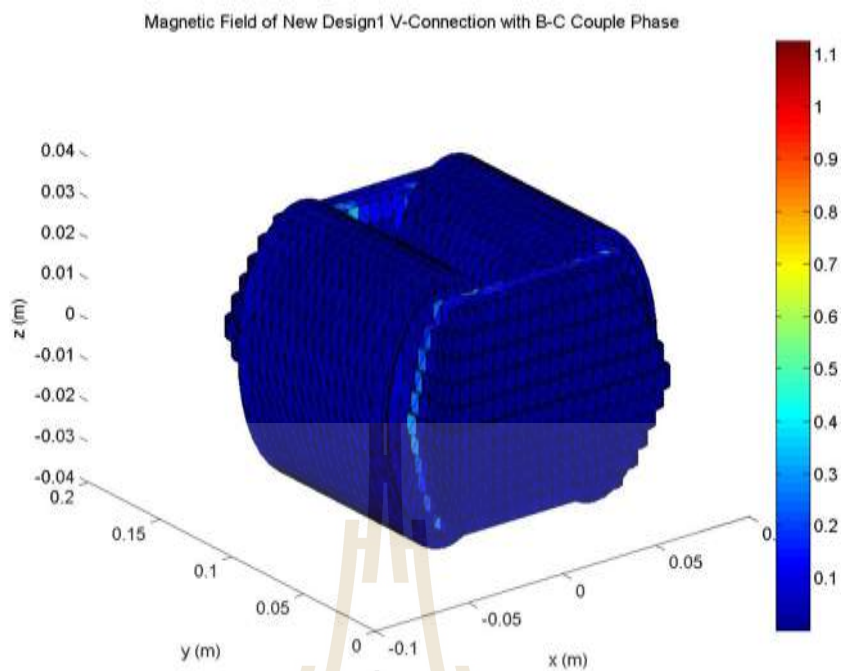


ค) ขดลวดด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส C-A

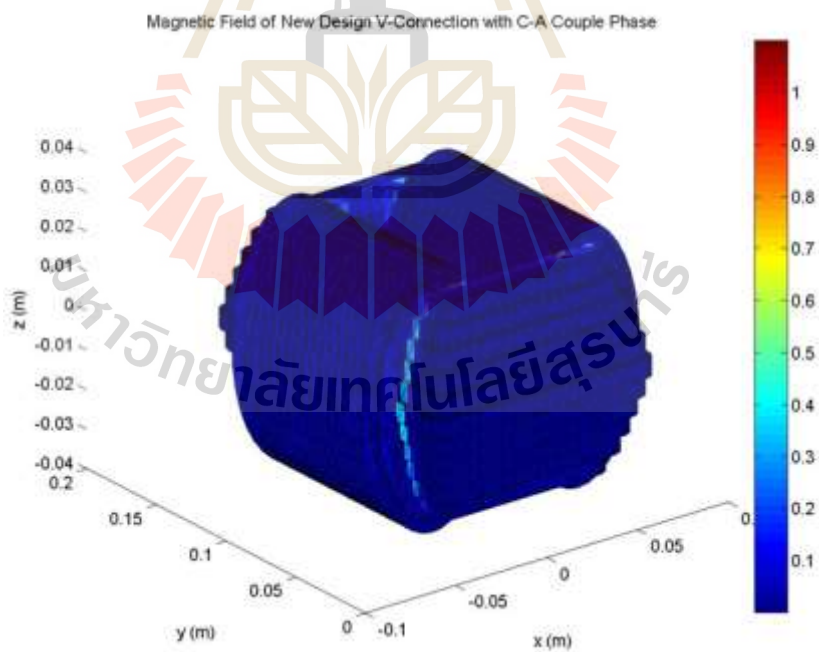
รูปที่ 6.4 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบวีที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง



ก) ขดลวดด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส A-B

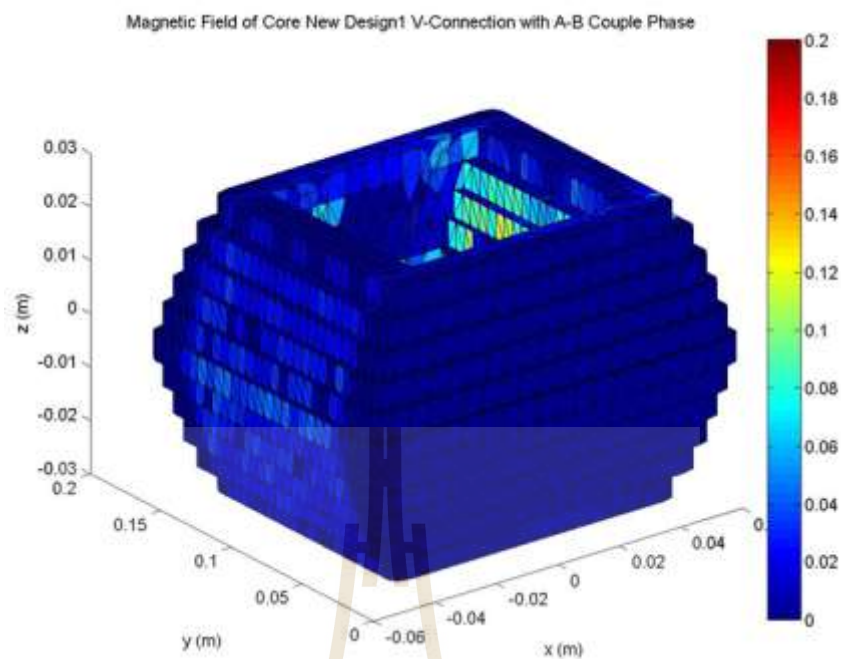


ข) ขดลวดค้ำปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส B-C

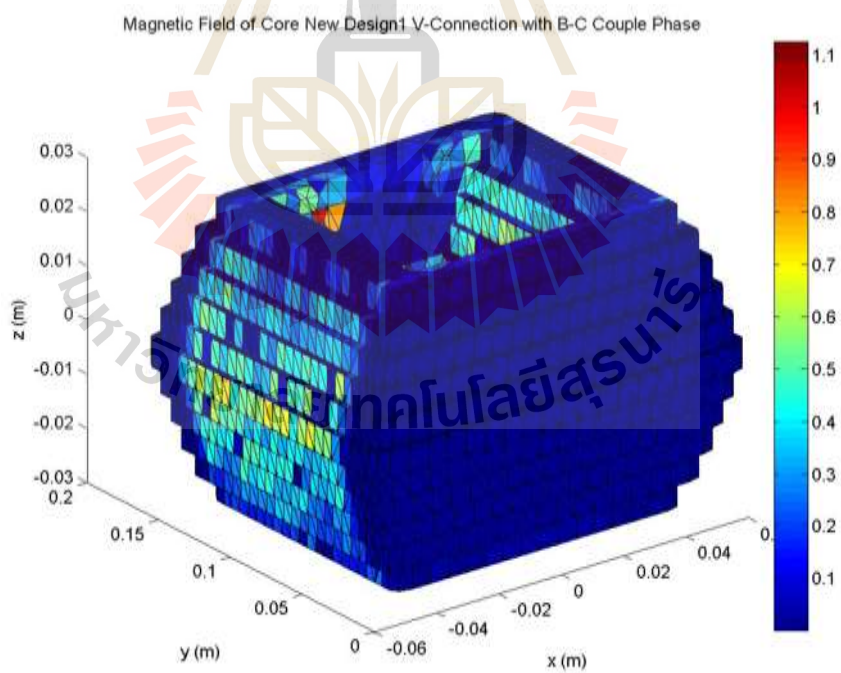


ค) ขดลวดค้ำปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส C-A

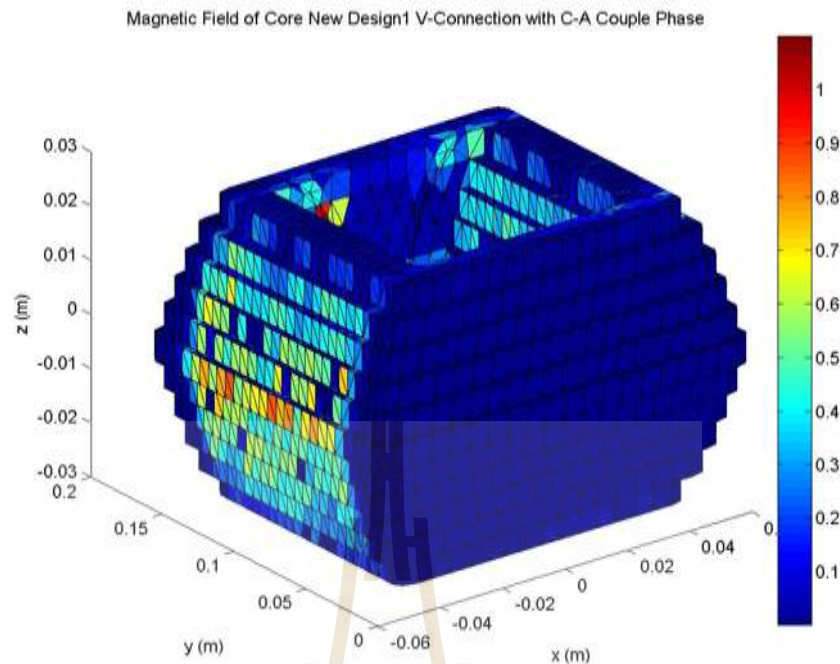
รูปที่ 6.5 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง



ก) ขดลวดด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส A-B



ข) ขดลวดด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส B-C



ค) ขดลวดด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส C-A

รูปที่ 6.6 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง

จากผลการจำลองเชิงกราฟิกเมื่อพิจารณาผลการจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีที่แสดงดังรูปที่ 6.3 – 6.4 จะเห็นได้ว่าค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แต่ยังคงเกิดความไม่สมดุลในสภาวะการทำงานในแต่ละคู่เฟสที่รับกำลังไฟฟ้าจากระบบสามเฟส ซึ่งความไม่สมดุลนี้จะเกิดขึ้นสลับตำแหน่งกันในแต่ละคู่เฟส แต่เมื่อพิจารณาการทำงานของหม้อแปลงตลอดช่วง 1 รอบการทำงานซึ่งประกอบไปด้วยการทำงานเมื่อหม้อแปลงรับกำลังไฟฟ้าจากคู่เฟส A-B, B-C และ C-A จะทำให้ระบบเกิดความสมดุลขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของการออกแบบรูปร่างแกนเหล็กจะเห็นว่าขนาดของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะมีค่าลดน้อยลงในทุกๆ คู่เฟส ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กมีความสม่ำเสมอมากขึ้น และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็กที่แสดงดังรูปที่ 6.5 – 6.6 จะเห็นได้ว่าการกระจายสนามแม่เหล็กจะมีความหนาแน่นมากที่สุดบริเวณแกนกลางของแกนเหล็กที่บริเวณติดกับขดลวด และจะมีค่าน้อยที่สุดที่บริเวณขอบของแกนเหล็กในตำแหน่งที่ติดกับส่วนของฉนวนและน้ำมันหม้อแปลง โดยยังคงมีลักษณะคล้ายคลึงกันกับในกรณีที่ยังมิได้เน้นการออกแบบเพื่อลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก แต่เมื่อพิจารณาขนาดของ

สนามแม่เหล็กจะเห็นได้ว่า ขนาดสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อมีการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กจะทำให้ค่าสนามแม่เหล็กลดลง

6.3.2 ผลการจำลองของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อพิจารณารูปร่างของแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง

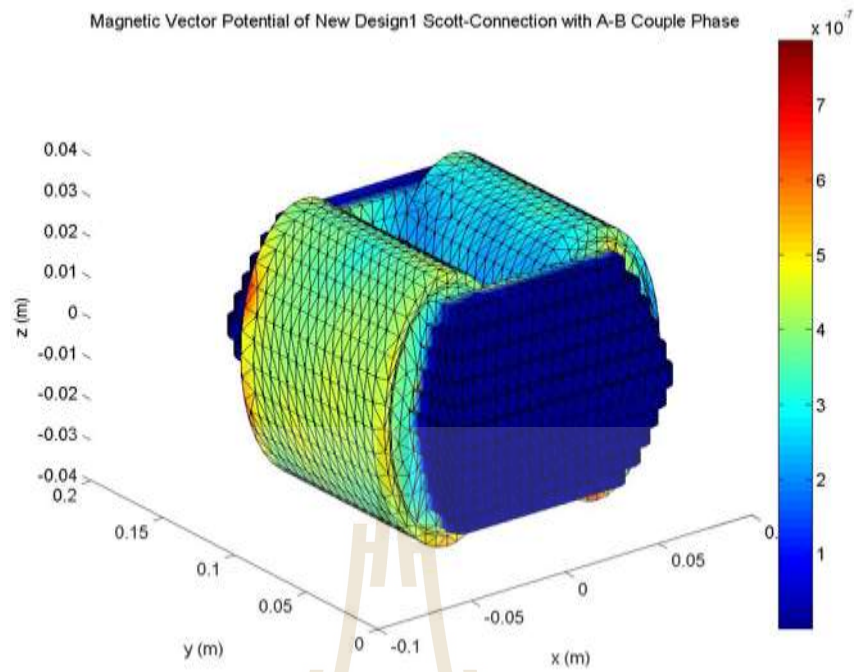
การจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก สนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อแกนเหล็กได้รับการออกแบบตามหัวข้อที่ได้อธิบายมาข้างต้น สามารถแสดงผลการจำลองโดยวิธานิพนธ์นี้มุ่งเน้นพิจารณาการกระจายของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และค่าสนามแม่เหล็กในบริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงดังนี้

- การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ที่เน้นลดค่าความสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้งแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 6.7

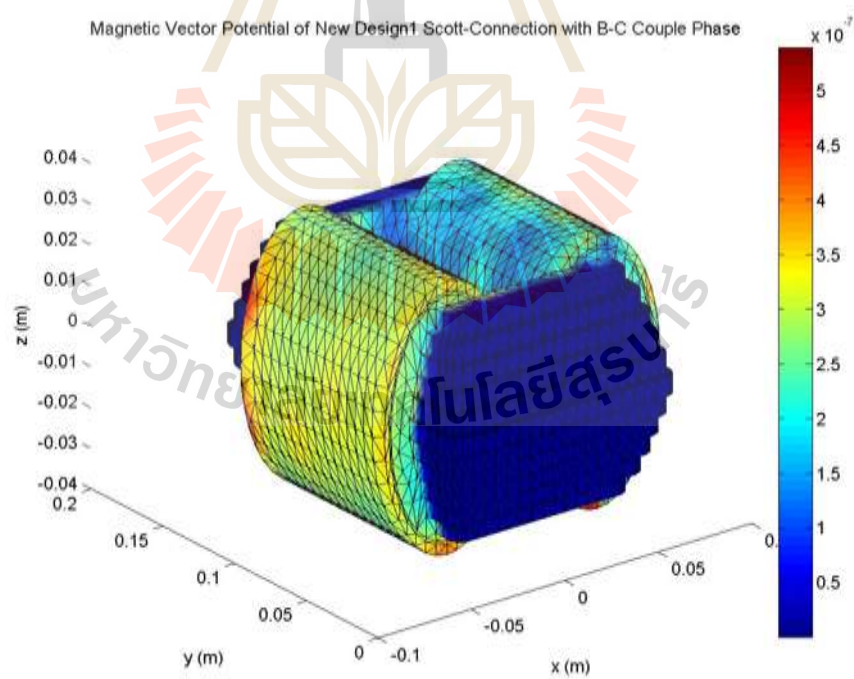
- การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ ที่เน้นการลดค่าความสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้งแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 6.8

- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ ที่เน้นการลดค่าความสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้งแบบ 3 มิติแสดงได้ดังรูปที่ 6.9

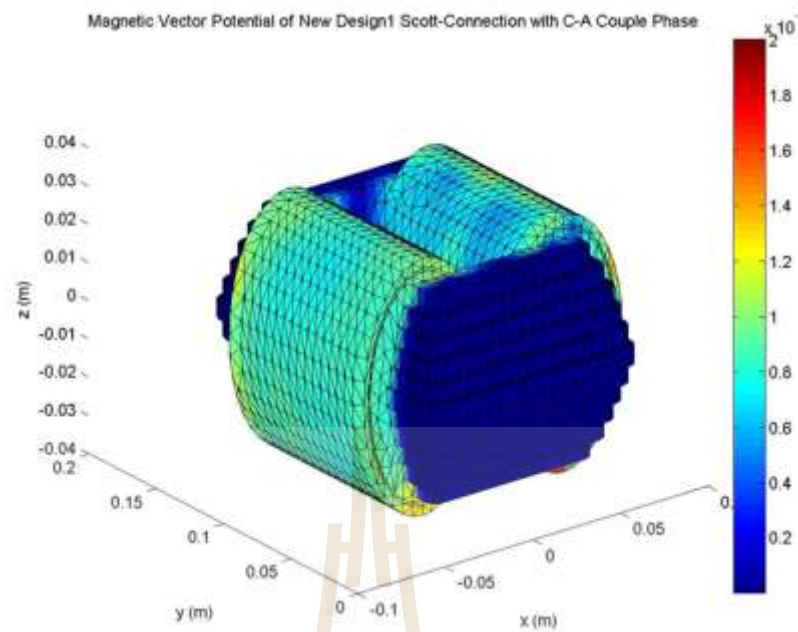
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ ที่เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้งแบบ 3 มิติแสดงได้ดังรูปที่ 6.10



ก) จุดแท้่ปกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส C

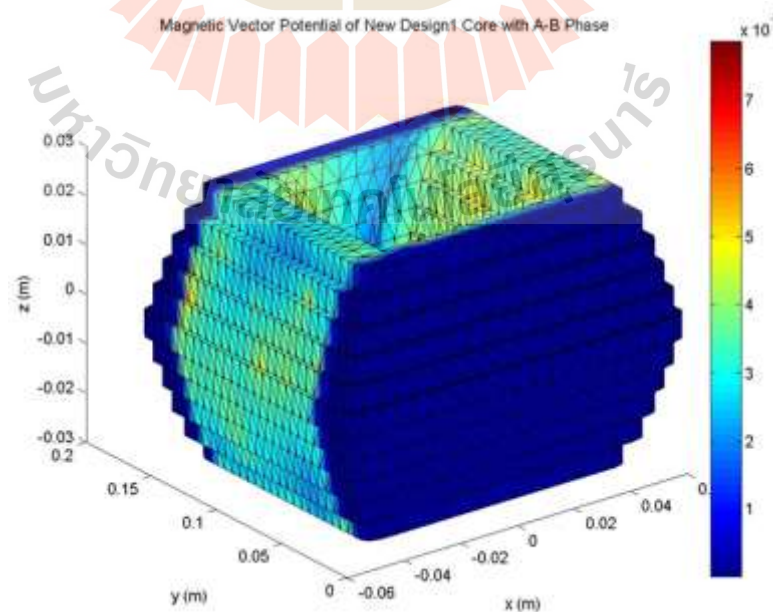


ข) จุดแท้่ปกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส A

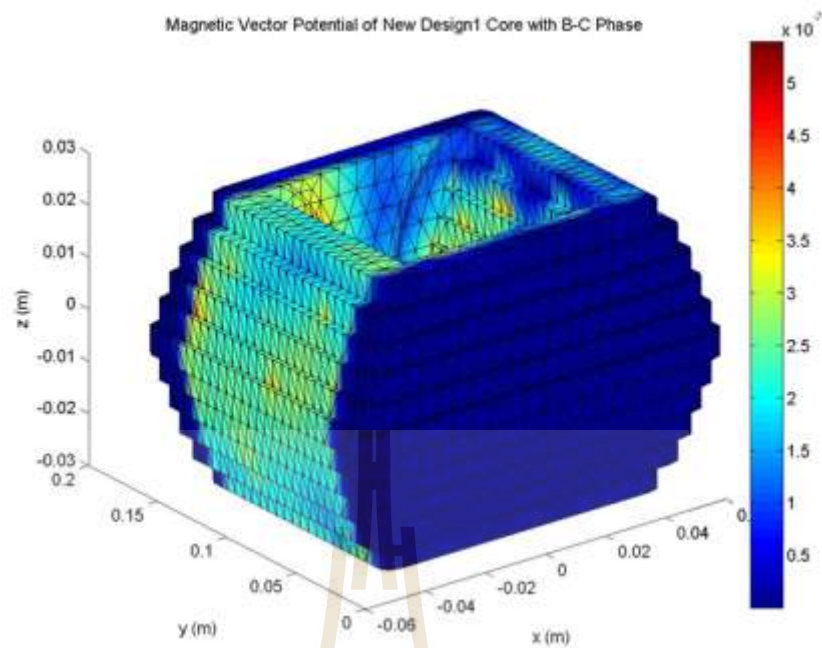


ก) จุดแท่งกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส B

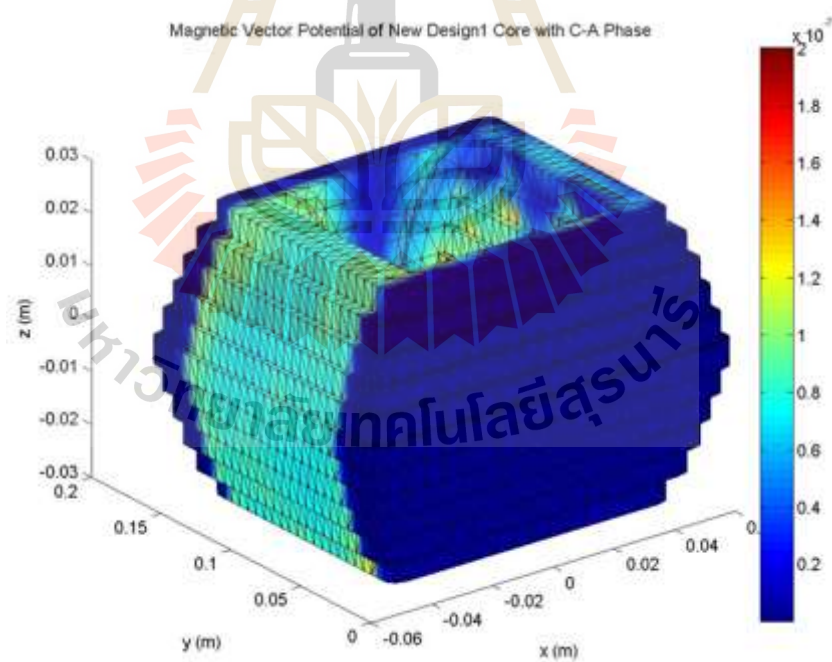
รูปที่ 6.7 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง



ก) จุดแท่งกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส C

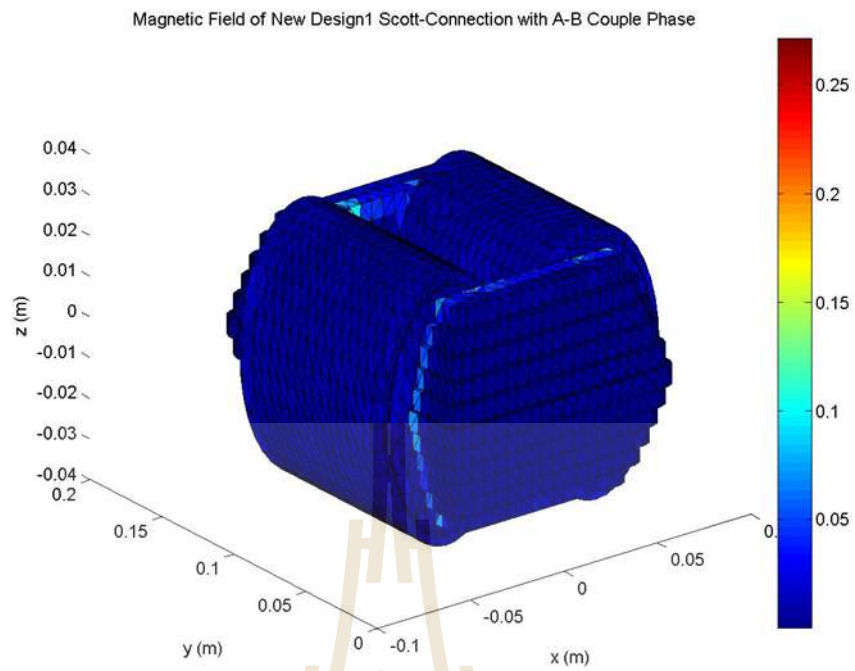


ข) จุดแท่งกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส A

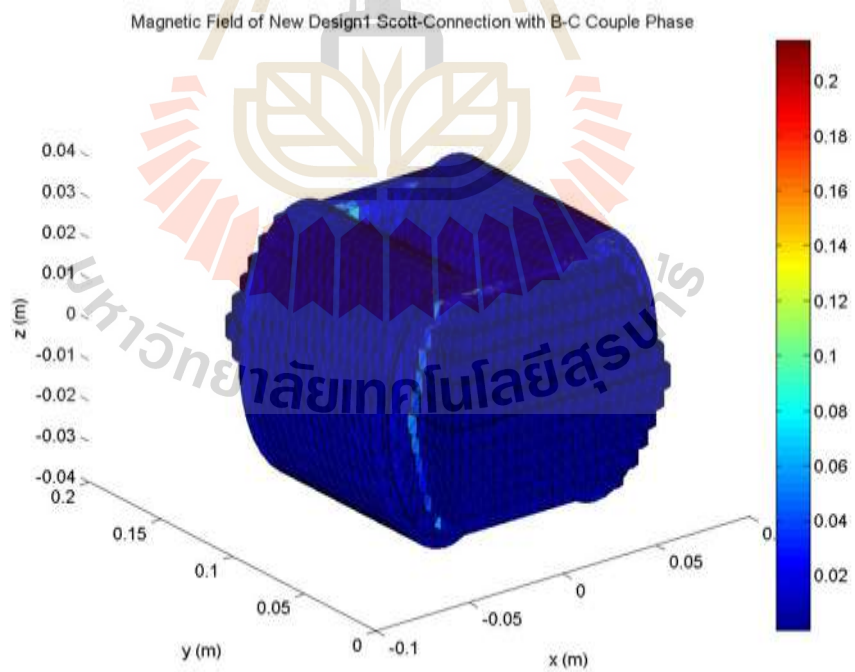


ค) จุดแท่งกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส B

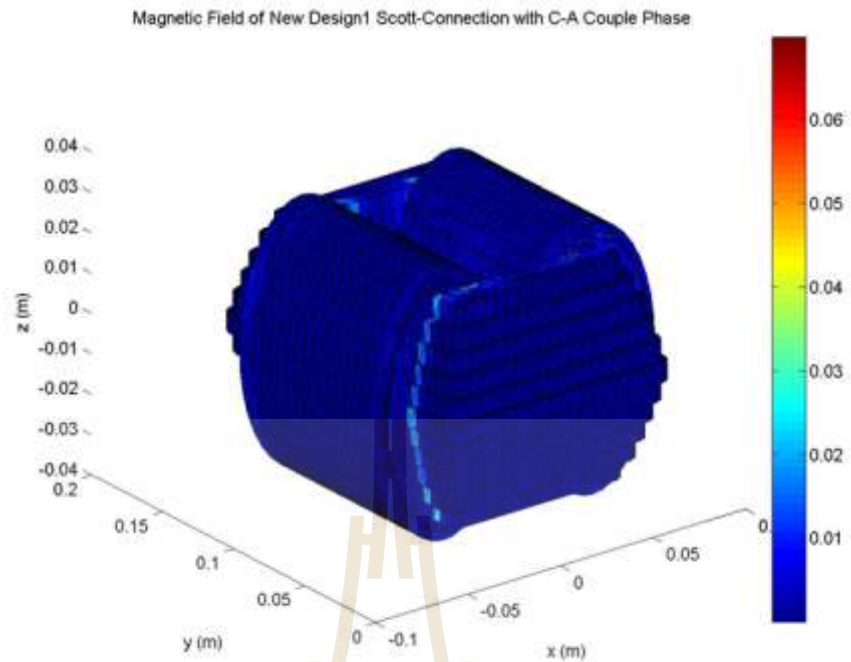
รูปที่ 6.8 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุม โคง



ก) จุดแท่งกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส C

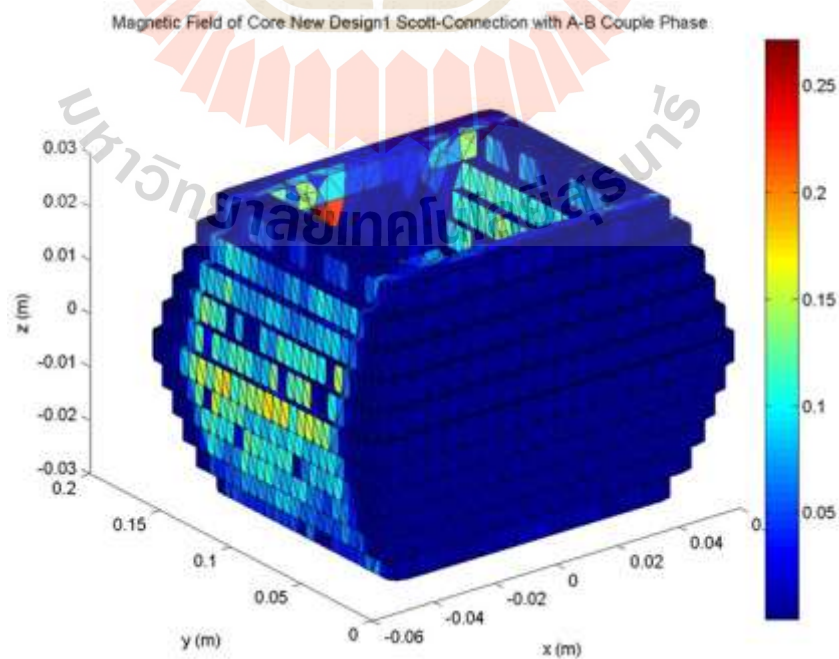


ข) จุดแท่งกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส A

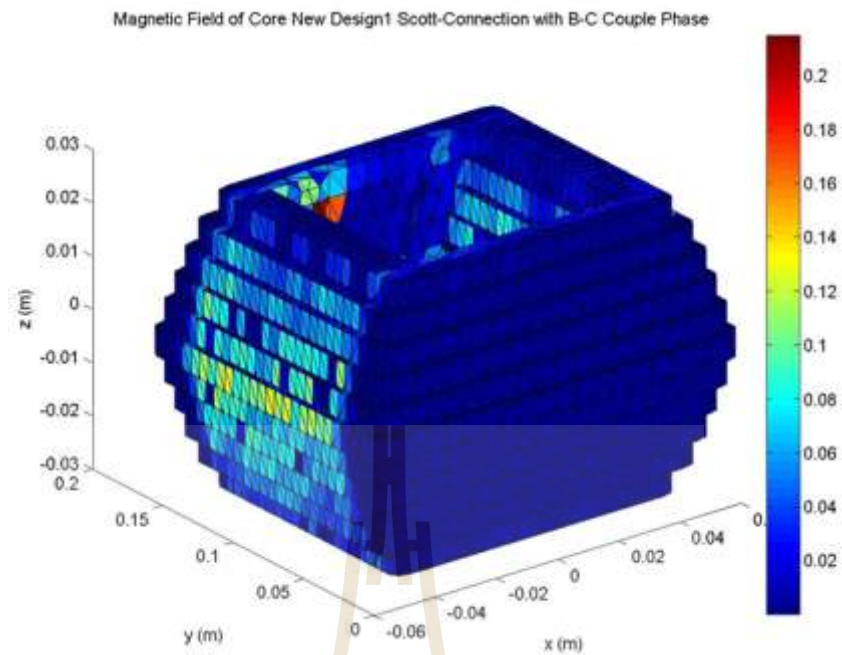


ค) จุดแท่งกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส B

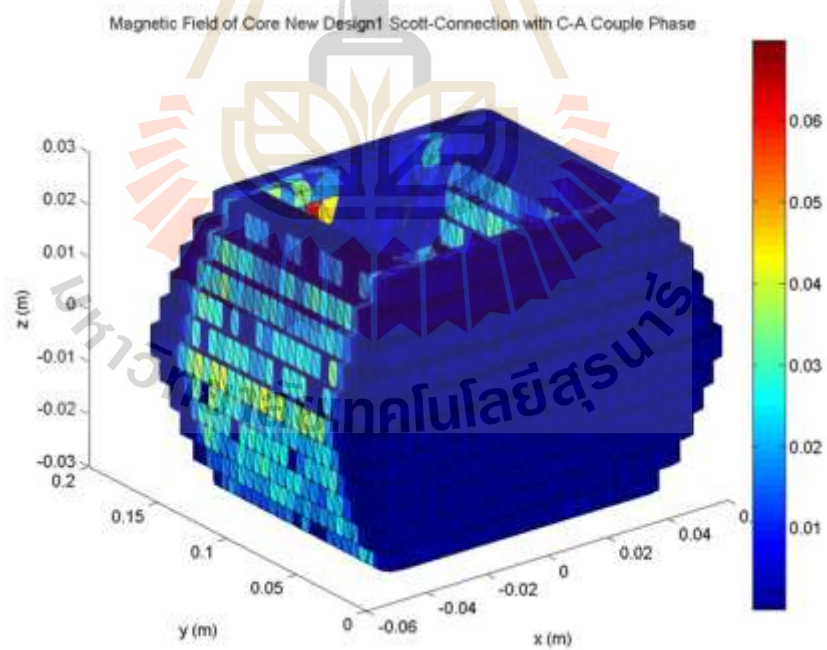
รูปที่ 6.9 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า
สำหรับการเชื่อมต่อแบบสก็อตต์ที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง



ก) จุดแท่งกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส C



ข) จุดแท่งกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส A



ค) จุดแท่งกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส B

รูปที่ 6.10 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง

จากผลการจำลองเชิงกราฟิกของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ เมื่อพิจารณาการกระจายค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่แสดงดังรูปที่ 6.7 – 6.8 จะเห็นว่าลักษณะการกระจายของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กยังคงไม่สมดุลในแต่ละคู่เฟส เช่นเดียวกับหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบวี แต่ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กสูงสุดของหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์จะมีค่าน้อยกว่าหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบวี ทั้งนี้เนื่องจากการเชื่อมต่อแบบสกอตต์จะมีกระแสไฟฟ้าจากแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิไหลในทิศทางสวนกับกระแสที่รับไฟจากระบบไฟฟ้าสามเฟส และเมื่อพิจารณาการทำงานของหม้อแปลงตลอดช่วง 1 รอบการทำงานเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C A และ B ตามลำดับจะทำให้ระบบเกิดความสมดุลขึ้น ในส่วนของการกระจายสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ที่แสดงดังรูปที่ 6.9 – 6.10 จะเห็นได้ว่า ลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็กยังคงมีลักษณะเช่นเดียวกันกับหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีทุกประการ แต่ขนาดของค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดของหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์จะมีค่าน้อยกว่าหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบวี

6.3.3 ผลการจำลองของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์เมื่อพิจารณารูปร่างของแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง

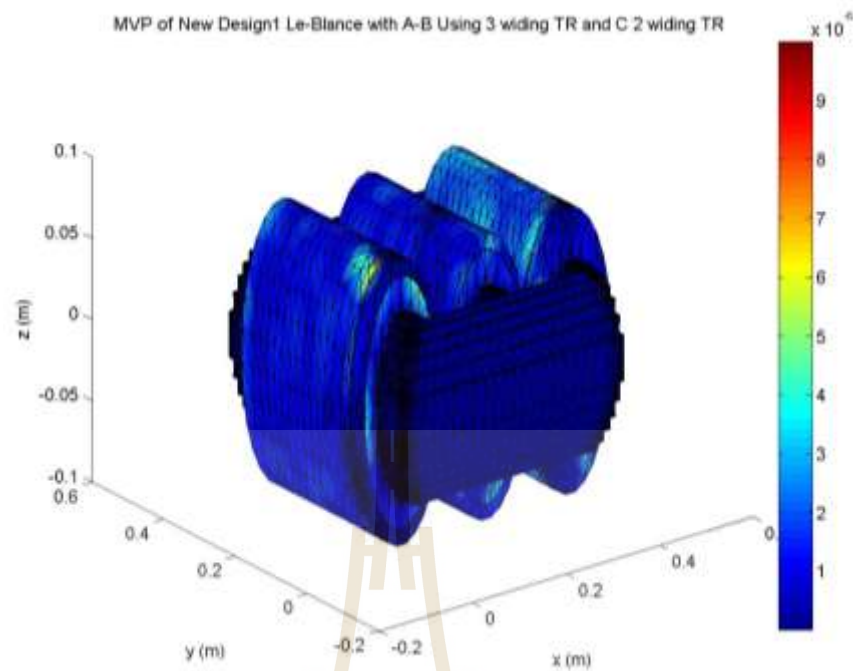
การจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก สนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์เมื่อแกนเหล็กได้รับการออกแบบตามหัวข้อที่ได้อธิบายมาข้างต้นสามารถแสดงผลการจำลองโดยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นพิจารณาการกระจายของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และค่าสนามแม่เหล็กในบริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงดังนี้

- การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ ที่เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้งแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 6.11

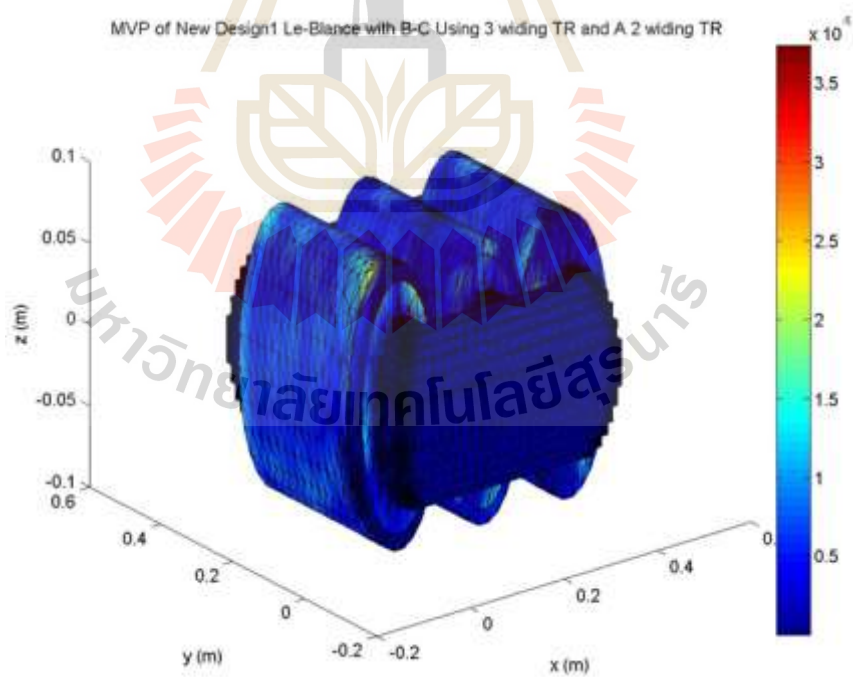
- การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กบริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ ที่เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้งแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 6.12

- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ ที่เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้งแบบ 3 มิติแสดงได้ดังรูปที่ 6.13

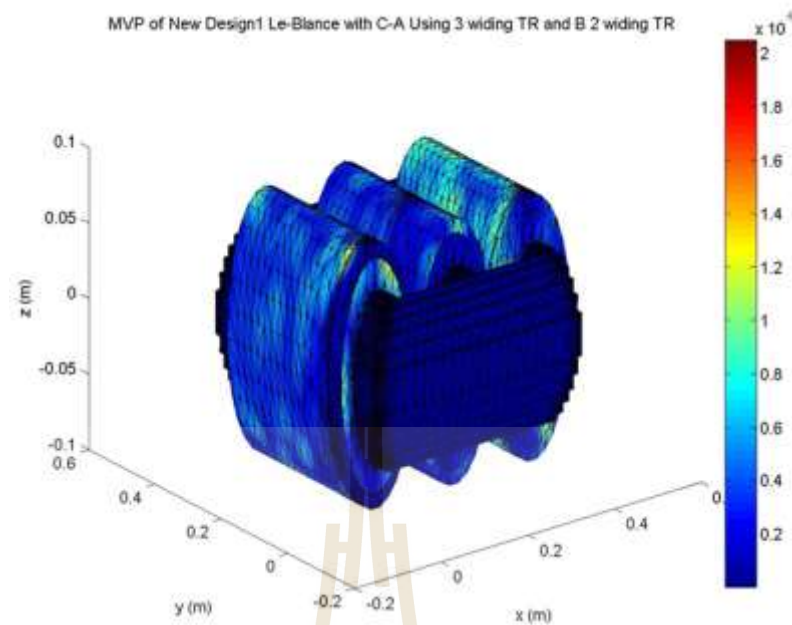
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ ที่เน้นการลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้งแบบ 3 มิติแสดงได้ดังรูปที่ 6.14



ก) ขดลวดทุกขั้วขมิตี่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส A และเฟส B

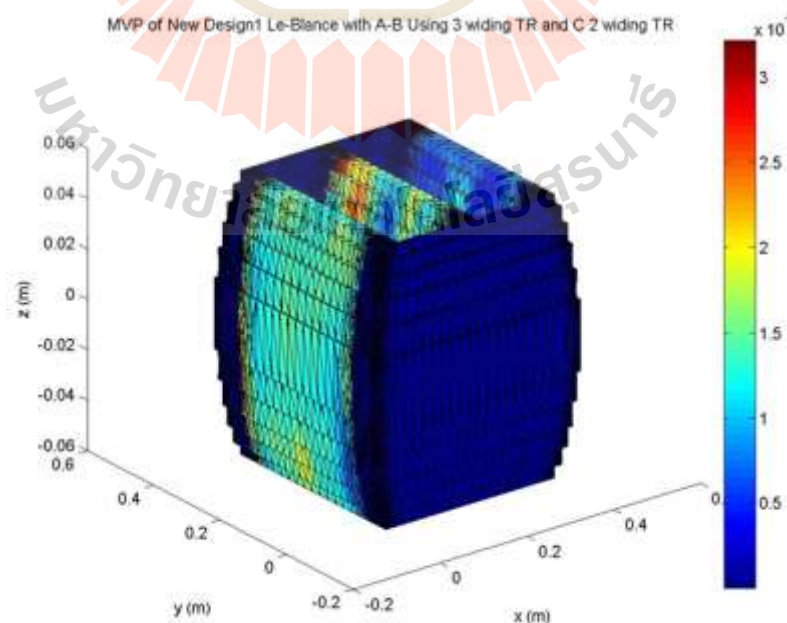


ข) ขดลวดทุกขั้วขมิตี่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส B และเฟส C

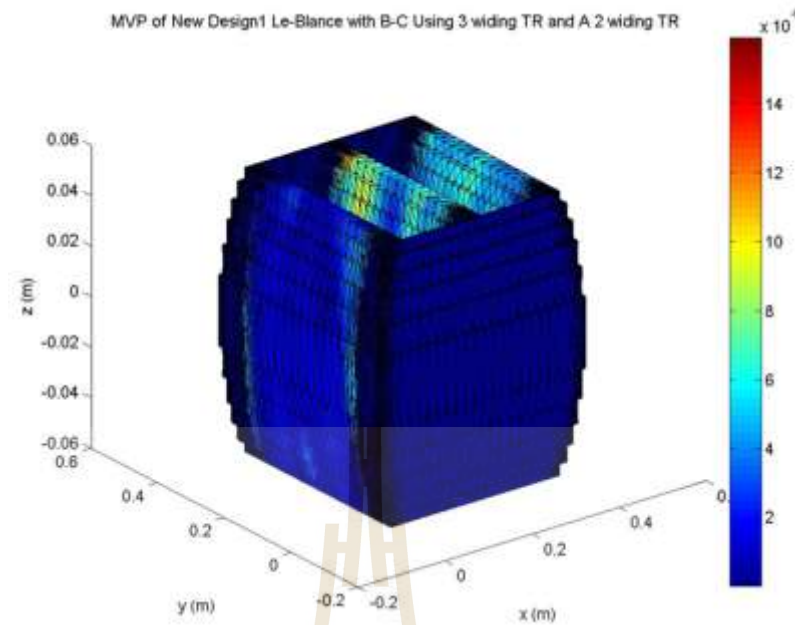


ค) ขดลวดทุติยภูมิสี่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส C และเฟส A

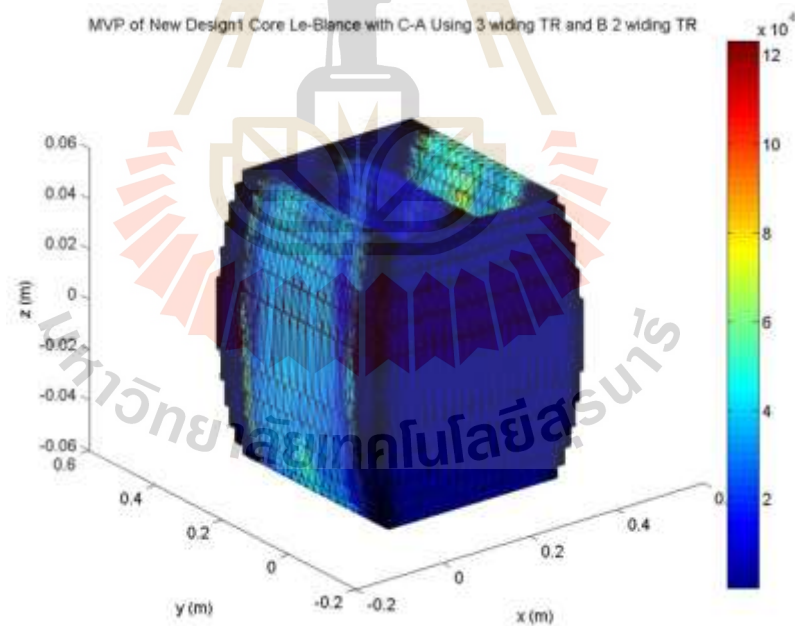
รูปที่ 6.11 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง



ค) ขดลวดทุติยภูมิสี่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส A และเฟส B

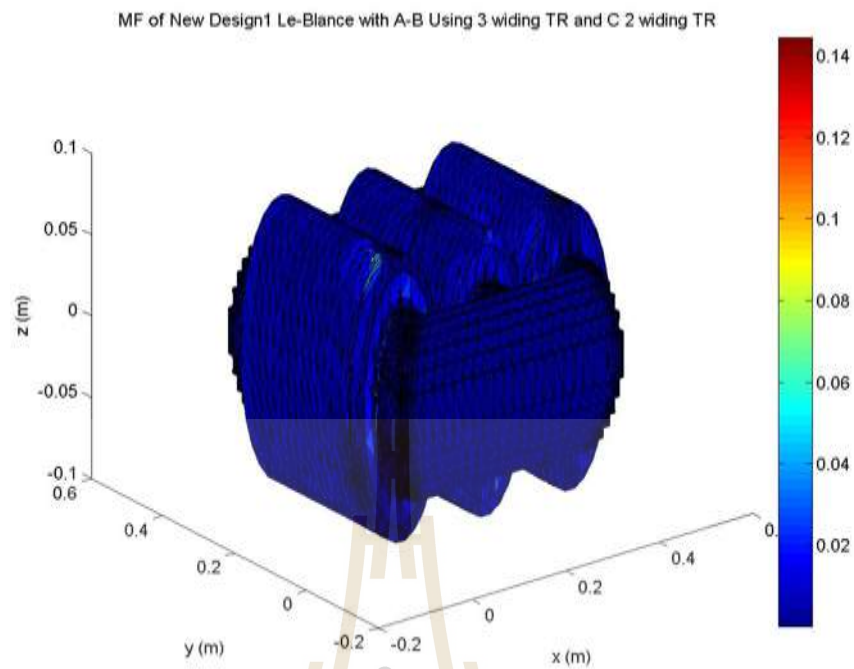


ข) ขดลวดทุติยภูมิที่ซุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส B และเฟส C

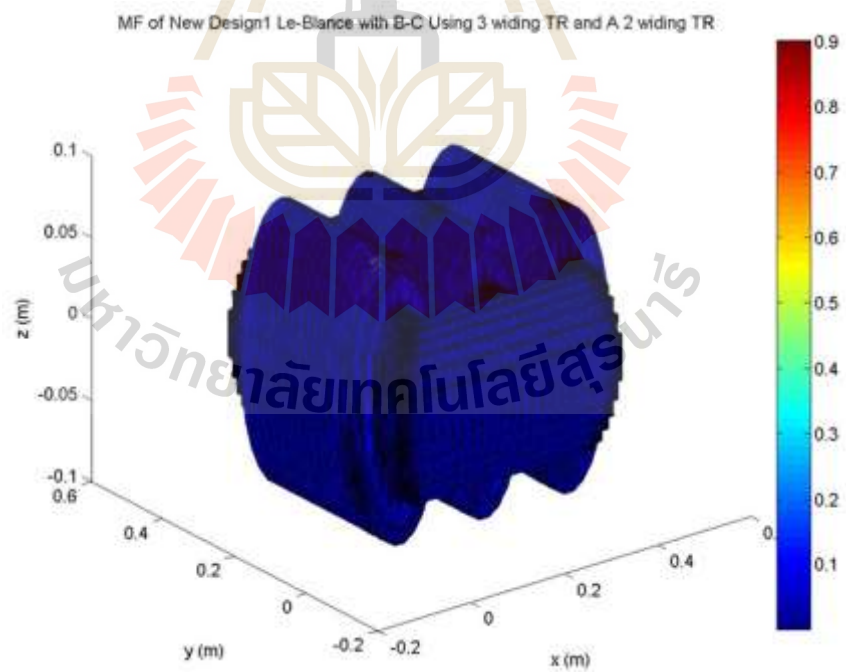


ค) ขดลวดทุติยภูมิที่ซุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส C และเฟส A

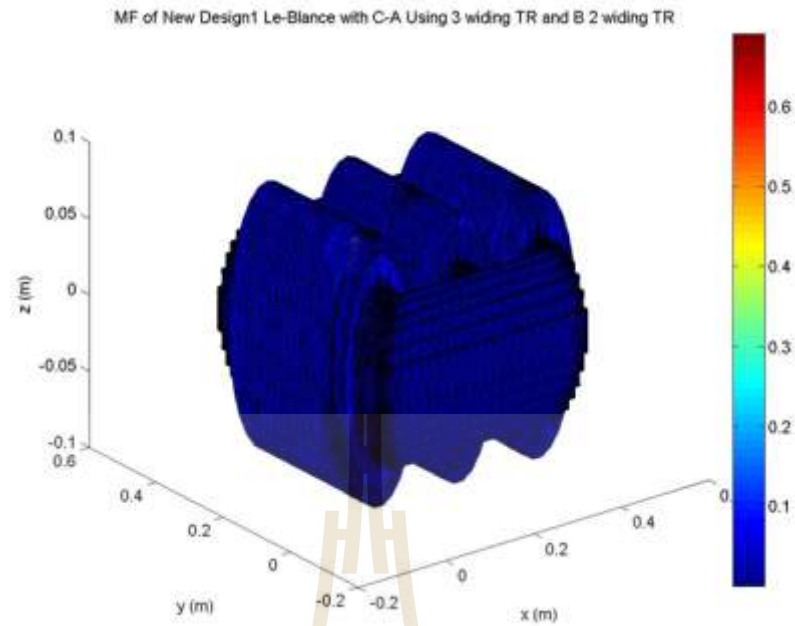
รูปที่ 6.12 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ด้วยวิธีตัดมุม โคง



ก) ขดลวดทุติยภูมิที่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส A และเฟส B

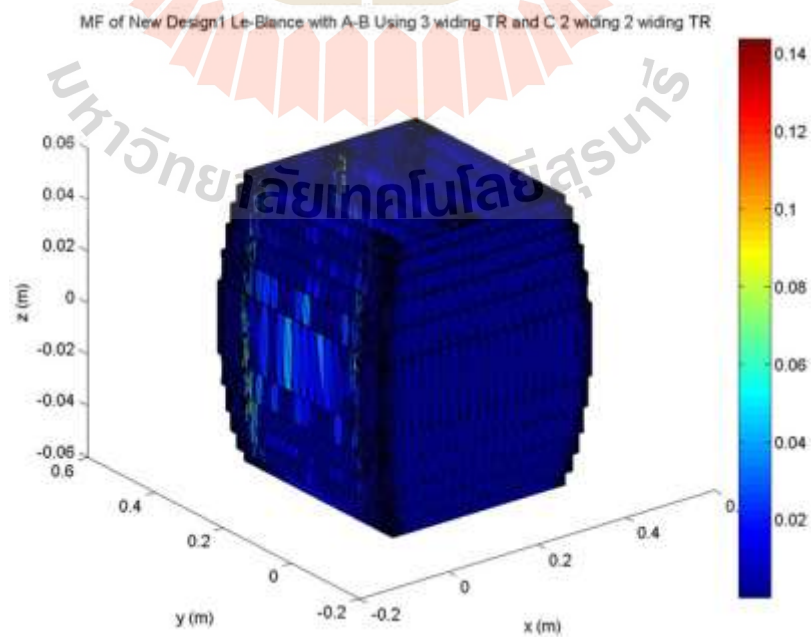


ข) ขดลวดทุติยภูมิที่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส B และเฟส C

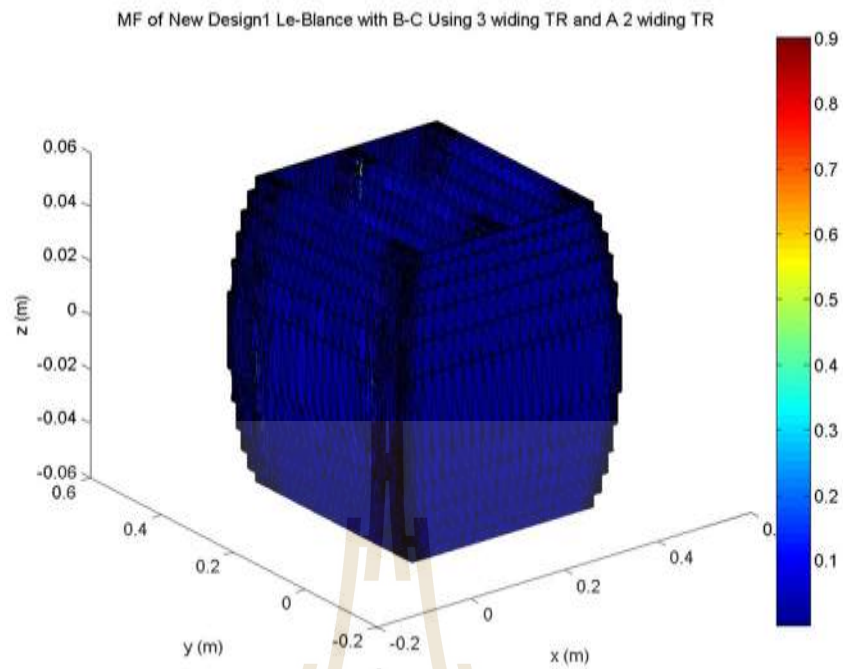


ค) ขดลวดทุติยภูมิที่ซุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส C และเฟส A

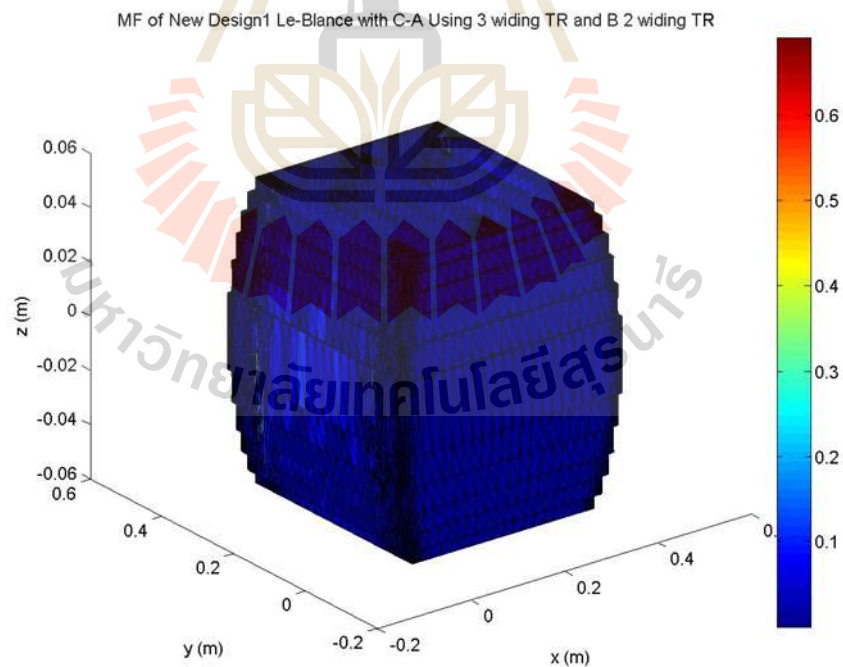
รูปที่ 6.13 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ด้วยวิธีตัดมุมโค้ง



ก) ขดลวดทุติยภูมิที่ซุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส A และเฟส B



ข) ขดลวดทุติยภูมิสี่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส B และเฟส C



ค) ขดลวดทุติยภูมิสี่ชุดได้รับการเหนี่ยวนำจากขดลวดปฐมภูมิเฟส C และเฟส A

รูปที่ 6.14 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ที่เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง

จากผลการจำลองเชิงกราฟิกของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ ซึ่งเป็นหม้อแปลงที่มีลักษณะ 8 ขดลวด โดยขดลวดทางด้านปฐมภูมิ 3 ขดลวดรับไฟจากระบบไฟฟ้าสามเฟส ส่วนทางด้านทุติยภูมิจะมี 5 ขดลวดเพื่อเชื่อมต่อกันให้ได้เป็น 2 เฟส ซึ่งเมื่อพิจารณาการกระจายค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่แสดงดังรูปที่ 6.11 – 6.12 จะเห็นว่าลักษณะของการกระจายมีความไม่สมดุลเช่นเดียวกับหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีและสกอตต์ ทั้งนี้เนื่องจากพฤติกรรมการจ่ายโหลดที่เป็นโหลด 1 เฟสจำนวน 2 ชุด จึงทำให้เกิดความไม่สมดุลขึ้น แต่เมื่อพิจารณาการทำงานครบ 1 ช่วงการทำงานซึ่งประกอบไปด้วย โหลด 1 เฟส 2 ชุดเกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กจากคู่เฟส A-B, B-C และ C-A จะทำให้เกิดความสมดุลขึ้นในระบบเช่นเดียวกันกับการเชื่อมต่อทั้งสองแบบ แต่การเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์นี้มีโครงสร้างทางกายภาพของหม้อแปลงที่แตกต่างกับการเชื่อมต่อแบบวีและสกอตต์นั่นคือ มีจำนวนแกนเหล็กที่มากกว่าและจำนวนชุดขดลวดที่มากกว่า ทำให้ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กมีค่าสูงกว่า และเมื่อพิจารณาการกระจายของสนามแม่เหล็ก ที่แสดงได้ดังรูปที่ 6.13 – 6.14 จะเห็นว่าลักษณะการกระจายมีรูปแบบเดียวกัน โดยจะมีความหนาแน่นมากที่สุดที่ภายในแกนเหล็กและจะมีค่าน้อยที่สุดที่บริเวณขอบแกนเหล็กในช่วงที่ติดกับฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

จากผลการจำลองในเชิงกราฟิก สามารถพัฒนาโปรแกรมเพื่อหาค่าในเชิงตัวเลขสำหรับหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบวี แบบสกอตต์และแบบเลอบลองก์ พร้อมทั้งคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็ก โดยผลการคำนวณสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.2 – 6.4 ตามลำดับ โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่า coefficient steinmetz's มีค่าเท่ากับ 300 ค่าคงที่ steinmetz's มีค่าเท่ากับ 2 และ ค่า specific resistance of core material มีค่าเท่ากับ 1.60 เช่นเดียวกับการคำนวณของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ยังมีการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก

ตารางที่ 6.1 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบวีเมื่อออกแบบรูปรางแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง

ปริมาณ	คู่เฟสในระบบไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายกำลังไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ		
	A-B	B-C	C-A
ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กสูงสุด (w/m)	1.8440×10^{-6}	8.8286×10^{-6}	6.9572×10^{-6}
สนามแม่เหล็กสูงสุด (T)	0.2064	0.9997	1.0559
กำลังงานสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (kW)	0.6390	14.9910	16.7239
กำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (kW)	0.1704	3.9976	4.4597
กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (kW)	0.8094	18.9886	21.1836

ตารางที่ 6.2 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อออกแบบรูปรางแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง

ปริมาณ	จุดแท้ปกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส		
	C	A	B
ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กสูงสุด (w/m)	7.8574×10^{-7}	5.3866×10^{-7}	2.0001×10^{-7}
สนามแม่เหล็กสูงสุด (T)	0.2397	0.1633	0.0580
กำลังงานสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (kW)	0.8618	0.4000	0.0505
กำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (kW)	0.2298	0.1065	0.0135
กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (kW)	1.0916	0.5065	0.0640

ตารางที่ 6.3 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์เมื่อออกแบบรูปร่างแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง

ปริมาณ	ขดลวดสี่ขุดด้านทุติยภูมิเหนี่ยวนำจากด้านปฐมภูมิจากคู่เฟส		
	A-B	B-C	C-A
ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กสูงสุด (w/m)	3.2077×10^{-6}	1.5900×10^{-5}	1.2302×10^{-5}
สนามแม่เหล็กสูงสุด (T)	0.1211	0.5540	0.3524
กำลังงานสูญเสียเนื่องจากฮีเทอริซิส (kW)	0.2200	4.6037	1.8628
กำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (kW)	0.0587	1.2277	0.4967
กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (kW)	0.2787	5.8314	2.3595

จากผลการคำนวณในเชิงตัวเลขจะเห็นได้ว่าเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าทำงานครบ 1 รอบการทำงานและพิจารณาค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กโดยคิดจากผลรวมของค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กในเมื่อหม้อแปลงรับกำลังไฟฟ้าจากระบบสามเฟสเป็น A-B, B-C และ C-A จะทำให้ค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบวี แบบสกอตต์และแบบเลอบลองก์มีค่าเป็น 40.9816kW, 1.6621kW และ 8.4696kW จะเห็นได้ว่าสำหรับหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์จะมีค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กน้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการจำลองในเชิงตัวเลขในกรณีที่มีได้เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 5 และเมื่อออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กเพื่อลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้งจะเห็นว่าผลการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กเพื่อลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กเมื่อใช้กับหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อทั้ง 3 รูปแบบคือ วี สกอตต์ และเลอบลองก์สามารถลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กได้จริง โดยวิทยานิพนธ์นี้จะดำเนินการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการคำนวณในหัวข้อถัดไป

6.4 การประมวลผลการจำลองพร้อมเปรียบเทียบผล

การออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กเพื่อลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้อาศัยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ 3 มิติมาช่วยในการจำลองผลในเชิงกราฟิกและในเชิงตัวเลข พร้อมทั้งเพื่อใช้ผลการจำลองเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็ก ซึ่งผลการจำลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า การออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กเพื่อลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้งของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบวี แบบสกอตต์ และแบบเลอบลองก็สามารถลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กได้จริง ดังผลการจำลองที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อก่อนหน้า ในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์คุณลักษณะที่สำคัญในวงจรแม่เหล็กหลังจากที่มีการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็ก ซึ่งประกอบไปด้วยค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็ก (\mathcal{R}_c) เส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) ปริมาตรแกนเหล็ก (V_c) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6.1) – (6.3) ตามลำดับและผลการคำนวณแสดงได้ดังตารางที่ 6.4

$$\mathcal{R}_c = \frac{l_c}{\mu A_c} \quad (6.1)$$

เมื่อ \mathcal{R}_c คือ ความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็ก (A · turns/Wb)
 l_c คือ ระยะเฉลี่ยที่เส้นแรงแม่เหล็กเดินทางในแกนเหล็ก (m)
 A_c คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก (m²)

$$\phi = B_c A_c \quad (6.2)$$

เมื่อ ϕ คือ เส้นแรงแม่เหล็ก (Wb)
 B_c คือ สนามแม่เหล็ก (T)

$$V_c = A_c \cdot l_c \quad (6.3)$$

เมื่อ V_c คือ ปริมาตรของแกนเหล็ก (m³)

ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบคุณลักษณะของแกนหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษ

รูปแบบการเชื่อมต่อ	คุณลักษณะของแกนหม้อแปลง	มิได้เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก	ออกแบบรูปร่างแกนเหล็กด้วยวิธีตัดมุมโค้ง	การเปลี่ยนแปลงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์
การเชื่อมต่อแบบวี	ค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็ก (A.turns/wb)	474,915	467,767	1.5051%
	เส้นแรงแม่เหล็ก (wb)	1.6854×10^{-2}	1.2164×10^{-2}	27.8272%
	ปริมาตรแกนเหล็ก (mm ³)	7.4517	7.4509	0.0107%
	กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (kW)	64.4461	40.9816	36.4095%
การเชื่อมต่อแบบสกอตต์	ค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็ก (A.turns/wb)	474,915	467,767	1.5051%
	เส้นแรงแม่เหล็ก (wb)	3.5182×10^{-3}	2.7613×10^{-3}	21.5138%
	ปริมาตรแกนเหล็ก (mm ³)	7.4517	7.4509	0.0107%
	กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (kW)	3.0391	1.6621	45.3095%
การเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์	ค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็ก (A.turns/wb)	790,451	782,348	1.0251%
	เส้นแรงแม่เหล็ก (wb)	5.5534×10^{-3}	3.4985×10^{-3}	37.0026%
	ปริมาตรแกนเหล็ก (mm ³)	12.4027	12.0675	2.7026%
	กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (kW)	21.3418	8.4696	60.3145%

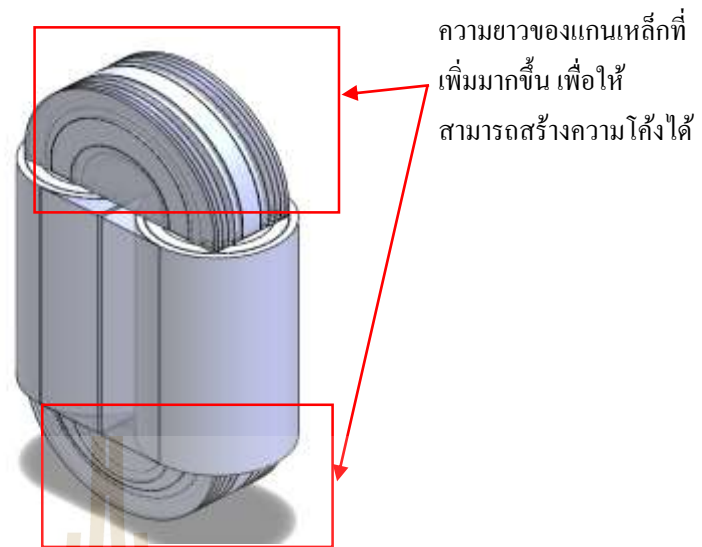
หมายเหตุ การคำนวณเส้นแรงแม่เหล็กจะดำเนินการคำนวณโดยเลือกพิจารณาค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด

จากตารางที่ 6.4 จะเห็นได้ว่า การออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กเพื่อลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กโดยการตัดมุมโค้งและจัดเรียงแผ่นเหล็กในแนวเอียงส่งผลให้ค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าลดน้อยลงได้จริง แต่อย่างไรก็ตาม ก็ทำให้คุณลักษณะของแกนเหล็กในส่วนของเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการออกแบบโดยการตัดมุมของ

แผ่นเหล็กย่อยเป็นมุม โค้งพร้อมกันกับกำหนดคุณลักษณะของปริมาตรแกนเหล็กให้คงที่หรือเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ซึ่งจากผลการคำนวณค่าปริมาตรแกนเหล็กและค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็กจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กสำหรับลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีการตัดมุม โค้งและการเรียงแผ่นเหล็กไม่เป็นมุมฉากจะช่วยลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบวี แบบสกอตต์ และแบบเลอบลองก์ คิดเป็น 36.4095%, 45.3095% และ 60.3145% ตามลำดับ จากผลการจำลองและการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียด้วยวิธีการตัดมุม โค้งนั้นจะเห็นได้ว่า หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์จะทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียน้อยที่สุด ดังนั้นการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในรูปแบบที่ 2 คือออกแบบด้วยการสร้างความโค้งของแกนเหล็กบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกนและ 3 คือออกแบบด้วยการเพิ่มสารแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อนนั้น วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะนำเสนอเพียงการจำลองผลเพื่อเปรียบเทียบวิธีการออกแบบในรูปแบบที่ 2 และ 3 ของการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เท่านั้น

6.5 ผลการจำลองศักยภาพเชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก สนามแม่เหล็กและกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อออกแบบแกนเหล็กด้วยการสร้างความโค้งของแกนเหล็กบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกน

สำหรับการออกแบบรูปร่างแกนเหล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กรูปแบบที่ 2 ด้วยการสร้างความโค้งของแกนเหล็กบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดทั้งแนวแกนนั้นจะอาศัยผลการจำลองในรูปแบบที่ 1 โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อแผ่นเหล็กมีความโค้งจะทำให้ค่ากำลังสูญเสียมูลค่าลดลง และเนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดเงื่อนไขการออกแบบโดยให้ปริมาตรของแกนเหล็กและค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็กคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดเพื่อรักษาให้คุณสมบัติของแกนเหล็กยังคงเดิม นั้น การออกแบบในรูปแบบที่ 2 จึงได้เพิ่มเติมความยาวช่วงโค้งของแกนให้มีค่ามากขึ้นเพื่อให้สามารถสร้างแกนเหล็กให้มีความโค้งได้ตลอดแนวแกน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 การออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วยการสร้างความโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกน

โดยการออกแบบความโค้งสูงสุดของแกนเหล็กสามารถพิจารณาได้ดังนี้
รัศมีของแกนเหล็กบริเวณที่ไม่ติดส่วนของขดลวดวงในมีค่าเท่ากับ 52.5 mm
และรัศมีของแกนเหล็กบริเวณที่ไม่ติดกับส่วนของขดลวดวงนอกมีค่าเท่ากับ 126 mm
จะได้พื้นที่ของแกนเหล็กที่ไม่ติดกับส่วนของขดลวดตัวนำคือพื้นที่ของวงแหวนจะได้

$$A = \pi r_o^2 - \pi r_i^2 \quad (6.4)$$

เมื่อ r_o คือ รัศมีของวงกลมภายใน
 r_i คือ รัศมีของวงกลมภายนอก

แทนค่ารัศมีลงในสมการที่ 6.4 จะได้พื้นที่ของแกนเหล็กที่ไม่ติดกับส่วนของขดลวดเป็น

$$A = \pi(126)^2 - \pi(52.5)^2$$

$$A = 16971.67 \text{ mm}^2$$

ค่ารัศมีเฉลี่ยของแกนเหล็กบริเวณที่ไม่ติดกับขดลวดตัวนำมีค่าเท่ากับ 90.5 mm
เมื่อพิจารณาในส่วนของแกนเหล็กบริเวณที่ไม่ติดกับขดลวดตัวนำจะได้ปริมาตรของแกนเหล็กคือ

$$V = A \times L_{avg} \quad (6.5)$$

แทนค่าในสมการที่ 6.5 จะได้

$$V = 16971.67 \times 90.5 = 1,534,239.10$$

พิจารณาพื้นที่ที่ติดกับส่วนของขดลวดตัวนำจะได้ว่า

รัศมีของแกนเหล็กที่ติดกับส่วนของตัวนำมีค่าเท่ากับ 63 mm

จะได้พื้นที่ที่ติดกับส่วนของตัวนำคือ

$$A = \pi r^2 = \pi (63)^2$$

$$A = 12,468.98 \text{ mm}^2$$

และจะได้ปริมาตรของแกนเหล็กในส่วนที่ติดกับขดลวดคือ

$$V = 16971.67 \times 90.5 = 1,534,239.10$$

ดังนั้นจะได้ปริมาตรแกนเหล็กเมื่อออกแบบแกนให้มีความโค้งตลอดแนวแกนเป็น

$$V = 4,114,763.81 + 1,534,239.10 = 5,649,002.91 \text{ mm}^3$$

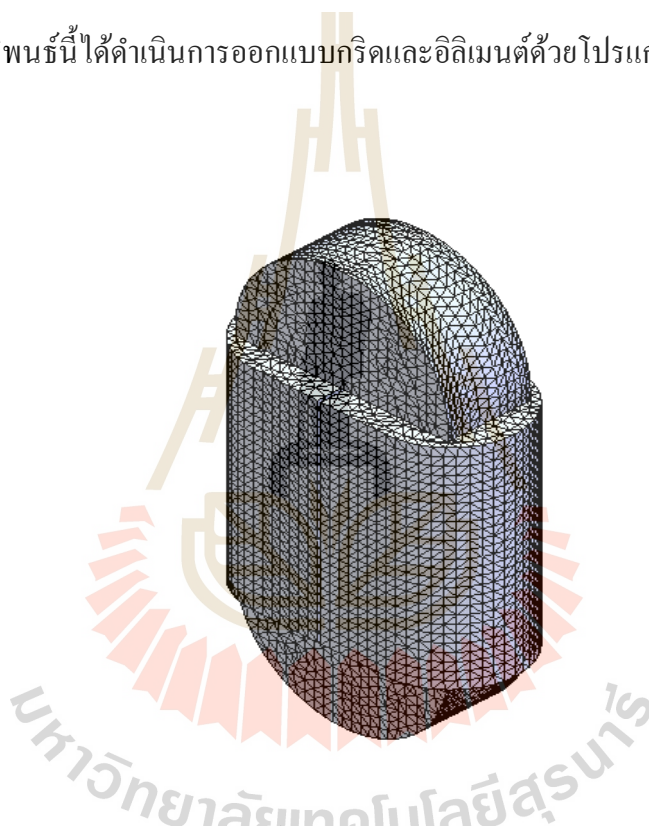
ดังนั้นปริมาตรของแกนเหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าเท่ากับ

$$V = 7,451,700 - 5,649,002.91 = 1,802,697.09 \text{ mm}^3$$

และจากข้อกำหนดของวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ค่าปริมาตรของแกนเหล็กมีค่าคงที่ และเนื่องจากข้อจำกัดของ โครงสร้างหม้อแปลงทำให้ไม่สามารถเพิ่มความหนาของแกนเหล็กได้ ดังนั้นเพื่อให้ปริมาตรของแกนเหล็กยังคงเดิมจึงอาศัยการเพิ่มเติมความยาวของแกนเหล็กให้เพิ่มมากขึ้นในส่วนของแกนเหล็กที่ติดอยู่กับขดลวดตัวนำ จะได้ความยาวที่เพิ่มเติมมีค่าเท่ากับ

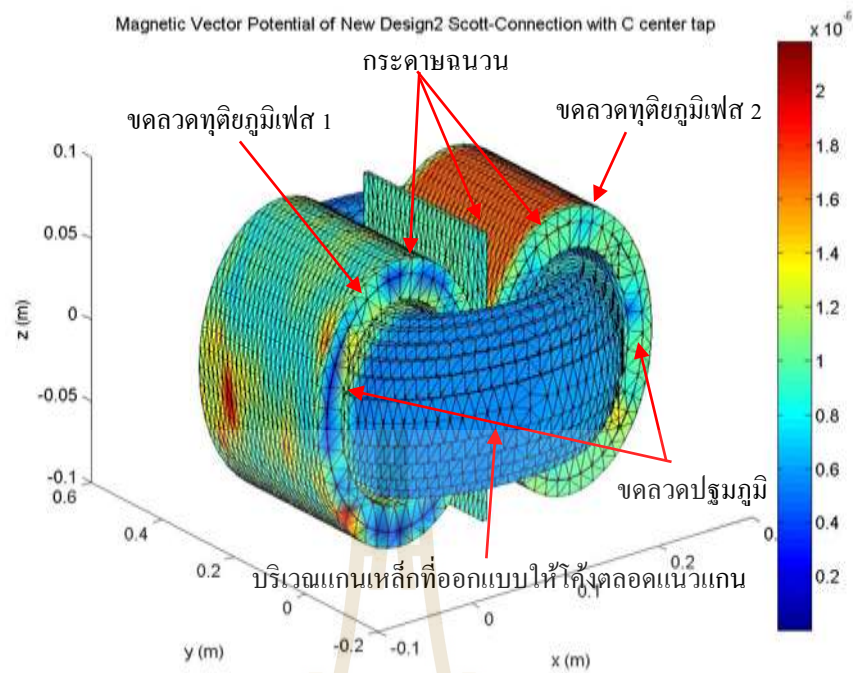
$$L = \frac{V}{A} = \frac{1,802,697.09}{12,468.98} = 144.57 \text{ mm}$$

วิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการออกแบบกริดและอิลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Solid work ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6.16

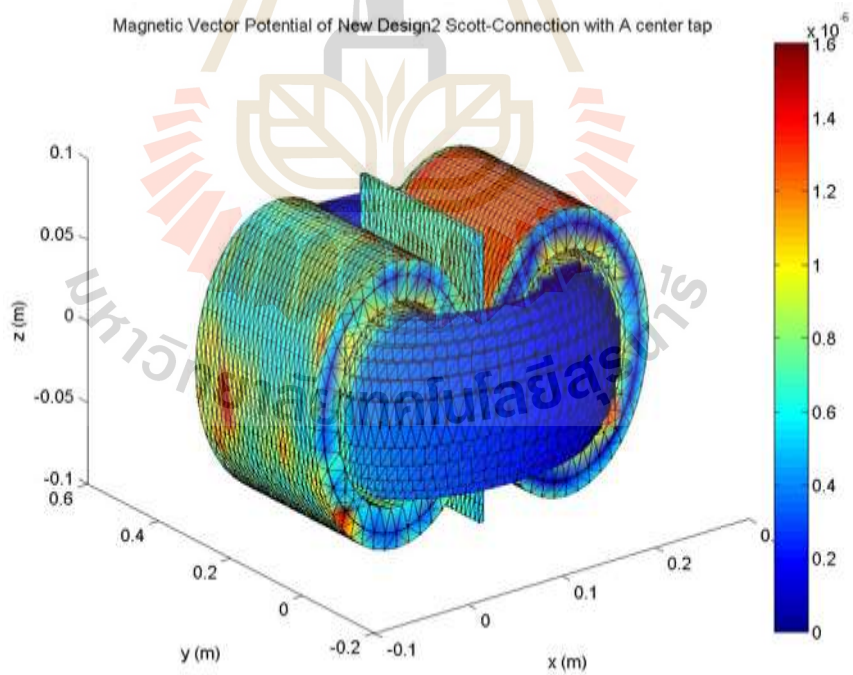


รูปที่ 6.16 การออกแบบกริดและอิลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Solid work ของหม้อแปลงที่ได้ออกแบบด้วยการสร้างความโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกน

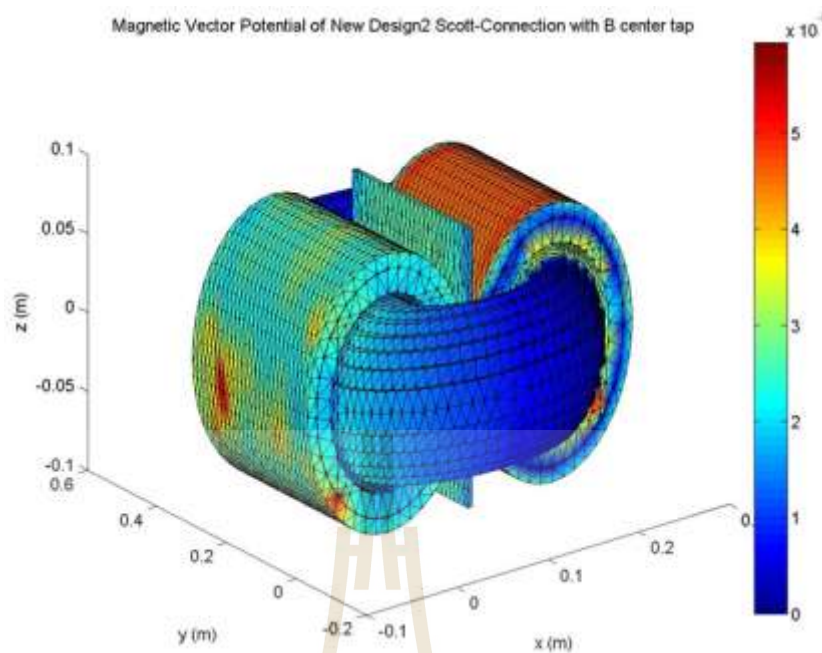
จากรูปที่ 6.16 วิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการออกแบบกริดและอิลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Solid work ซึ่งประกอบไปด้วยจำนวน โหนดทั้งหมด 44,600 โหนด และอิลิเมนต์ทั้งหมด 227,701 อิลิเมนต์ เพื่อนำไปเข้าสู่กระบวนการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยผลการจำลองในเชิงกราฟิกสามารถแสดงได้ดังนี้
กระจายศักย์แรงแม่เหล็กเมื่อตัดกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส C เมื่อพิจารณาขดลวดและแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 6.17 (ก)



ก) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C

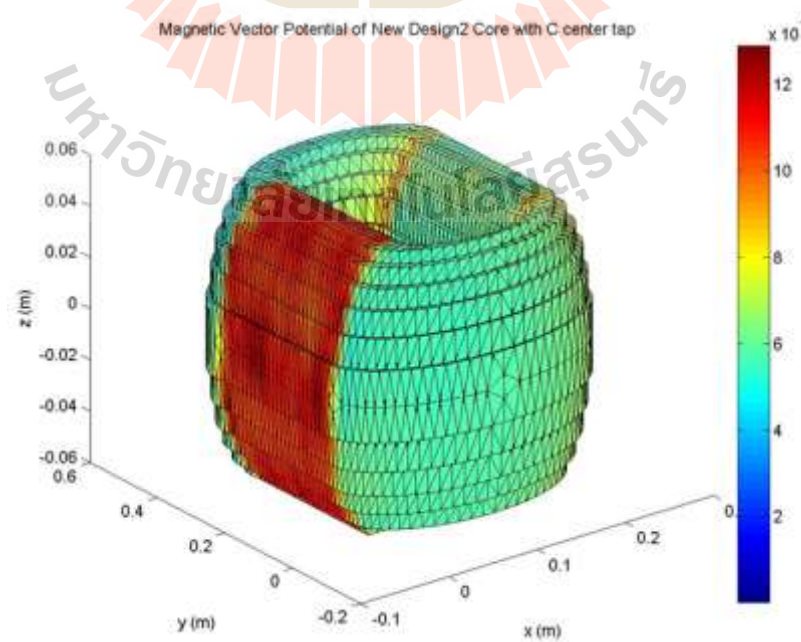


ข) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส A

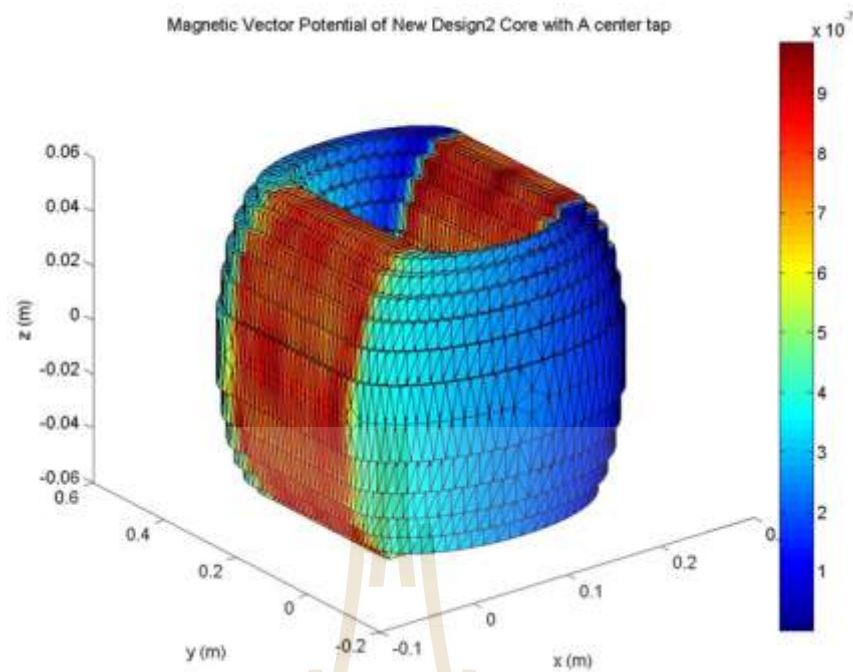


ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส B

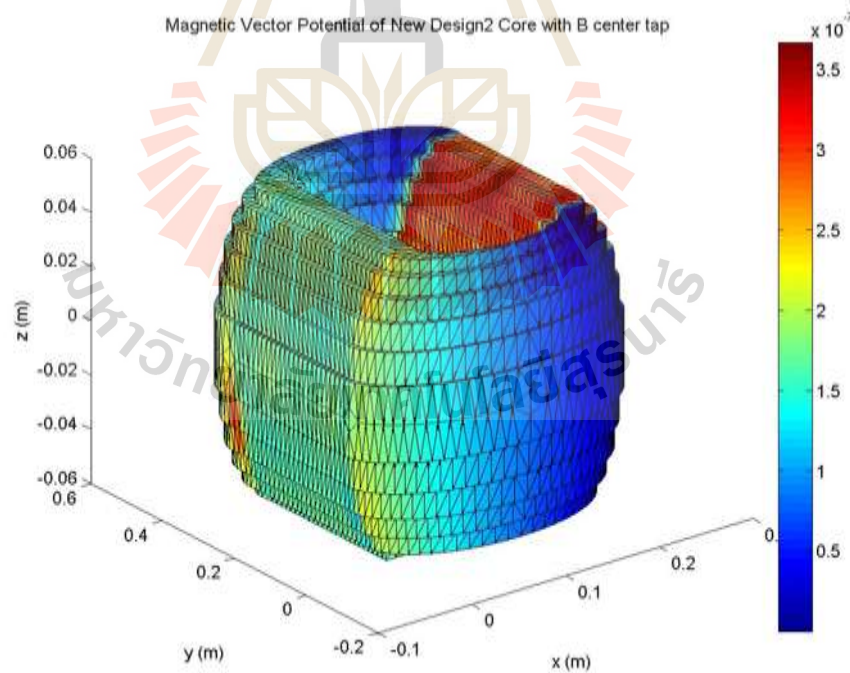
รูปที่ 6.17 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงเมื่อออกแบบด้วยการสร้างความโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกน



ก) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C

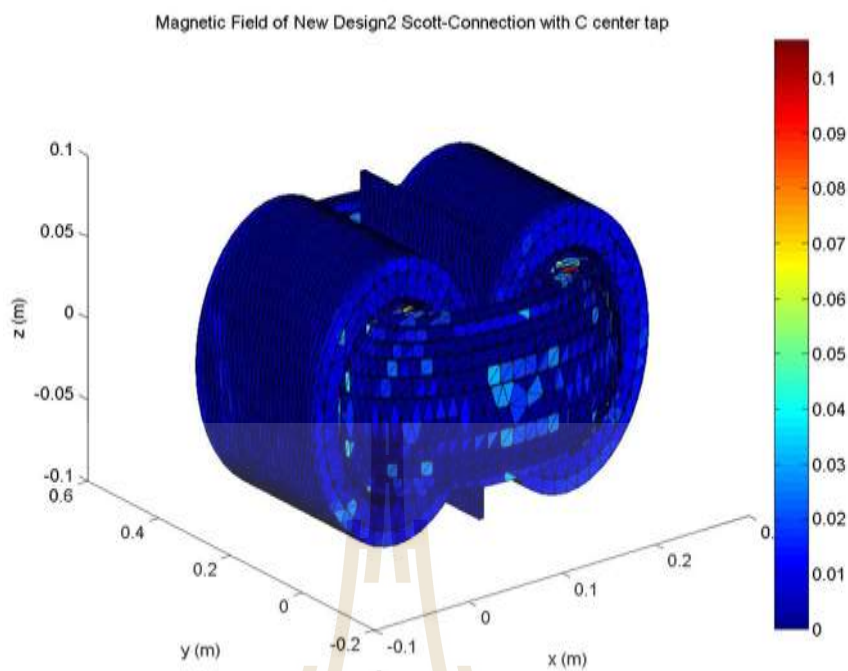


ข) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส A

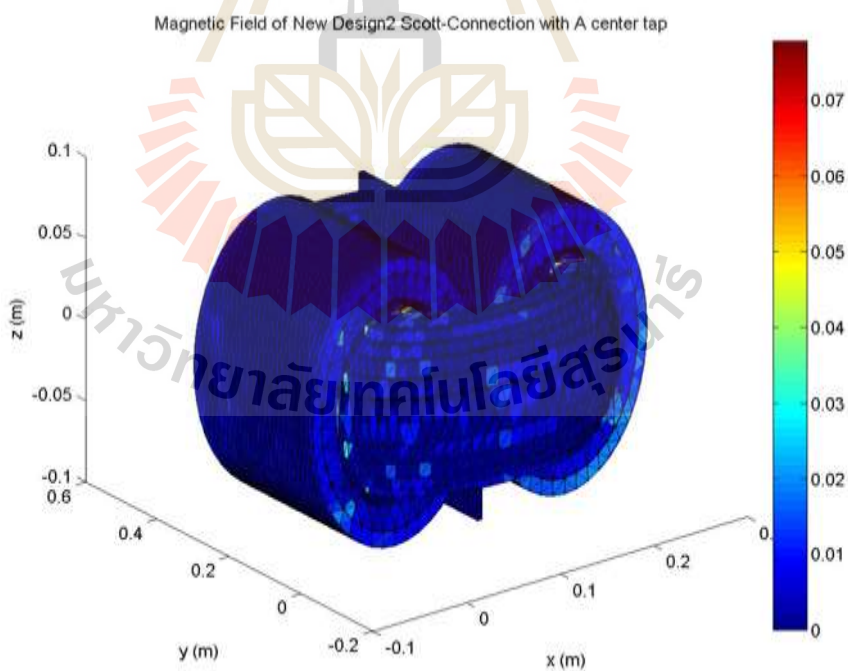


ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส B

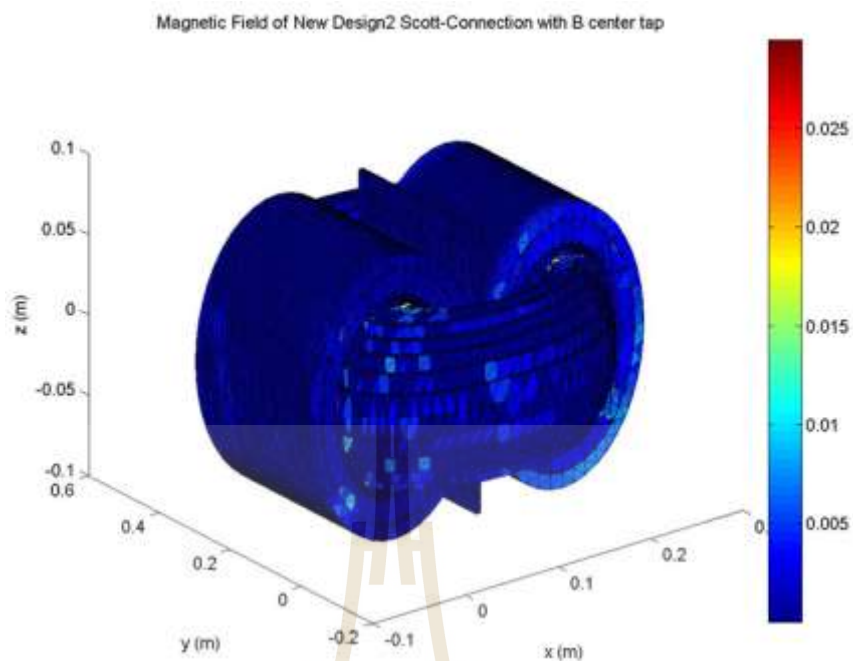
รูปที่ 6.18 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลง
เมื่อออกแบบด้วยการสร้างความโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกน



ก) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C

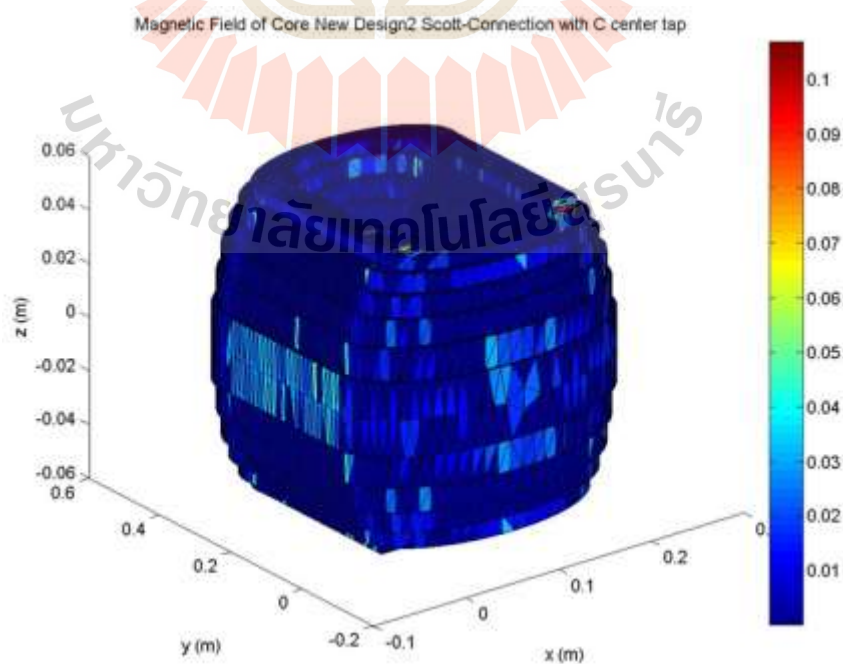


ข) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส A

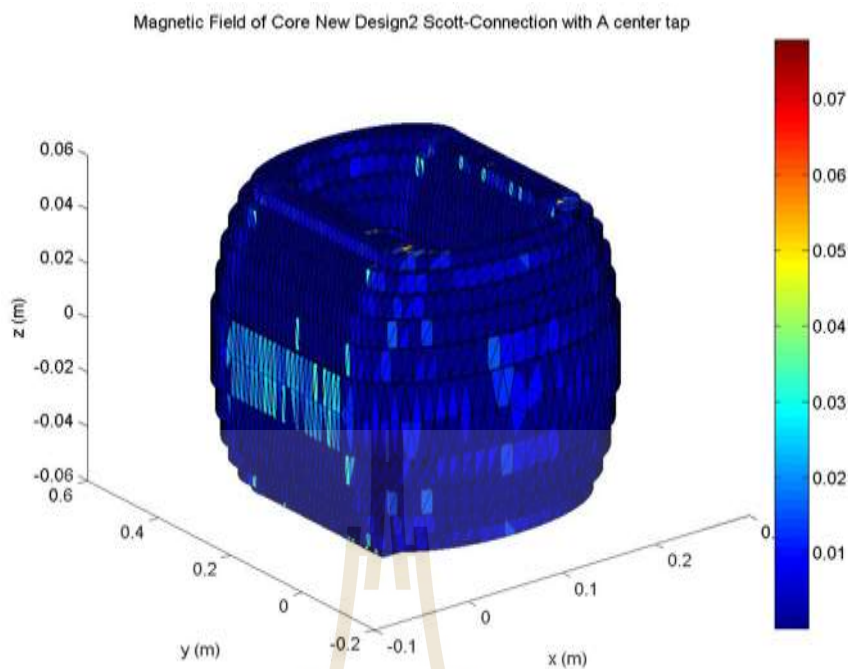


ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส B

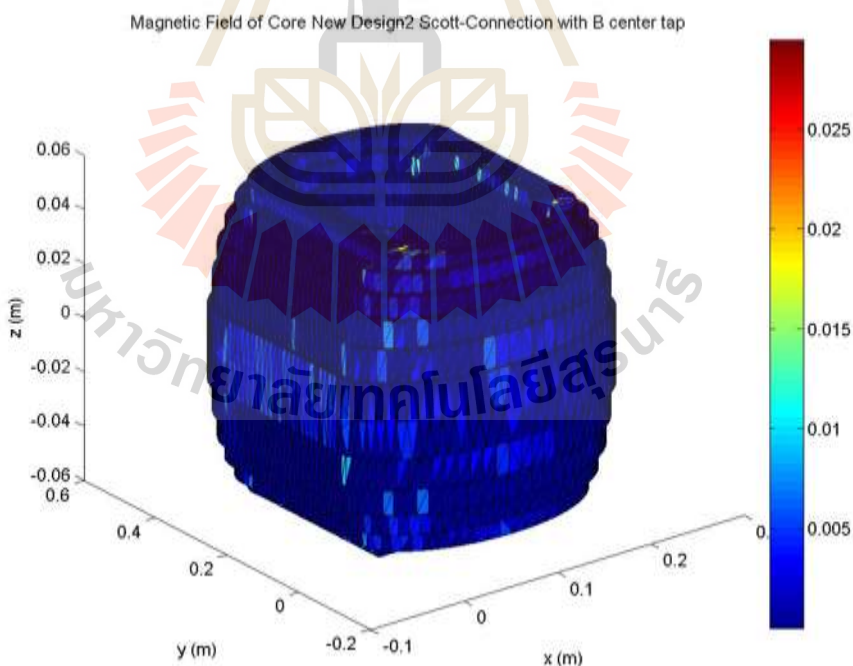
รูปที่ 6.19 การกระจายสนามแม่เหล็ก (Tesla) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลง
เมื่อออกแบบด้วยการสร้างความโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกน



ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C



ข) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส A



ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส B

รูปที่ 6.20 การกระจายสนามแม่เหล็ก (Tesla) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงเมื่อออกแบบด้วยการสร้างความโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกน

จากผลการจำลองในเชิงกราฟิกจะเห็นได้ว่า ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอไปตามแนวของแกนเหล็กและขดลวด โดยจะมีค่าสูงและหนาแน่นบริเวณขดลวด ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแต่ละกรณีที่มีการรับ ไฟของแท่งปกลางด้านปฐมภูมิจะเห็นว่าค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเกิดความไม่สมดุลขึ้นในแต่ละกรณี แต่เมื่อนำมาพิจารณาการทำงานครบทั้ง 3 กรณีซึ่งเป็น 1 รอบการทำงานของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ในระบบรถไฟฟ้าจะเห็นว่าค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะทำให้เกิดความสมดุลขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าสนามแม่เหล็กจะสังเกตเห็นว่า ค่าสนามแม่เหล็กจะมีการกระจายตัวไปตามแกนเหล็กที่มีความโค้งแต่จะกระจายไปในแกนกลางของแกนเหล็กมากกว่าบริเวณขอบของแกนเหล็ก โดยสามารถนำค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดเพื่อคำนวณหากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กในเชิงตัวเลขได้ดังตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงเมื่อออกแบบด้วยการสร้างความโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกน

ปริมาณ	จุดแท่งปกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส		
	C	A	B
ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กสูงสุด (w/m)	1.2872×10^{-6}	9.8442×10^{-7}	3.6620×10^{-7}
สนามแม่เหล็กสูงสุด (T)	0.0837	0.0665	0.0246
กำลังงานสูญเสียเนื่องจาก ฮิสเทรีซิส (kW)	0.1051	0.0663	0.0091
กำลังงานสูญเสียเนื่องจาก กระแสไหลวน (kW)	0.0280	0.0177	0.0024
กำลังงานสูญเสีย ในแกนเหล็ก (kW)	0.1331	0.0840	0.0115

จากผลการคำนวณในเชิงตัวเลขจะเห็นได้ว่าเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ทำงานครบ 1 รอบการทำงานที่ประกอบด้วยกรณีที่หม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิซึ่งมีแท่งปกลางรับไฟจากเฟส C เฟส A และ เฟส B จะทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมเป็น 0.2286 kW

ในสภาวะไร้โหลด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรอกแบบรูปร่างแกนเหล็กด้วยวิธีการตัดมุมโค้ง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.6

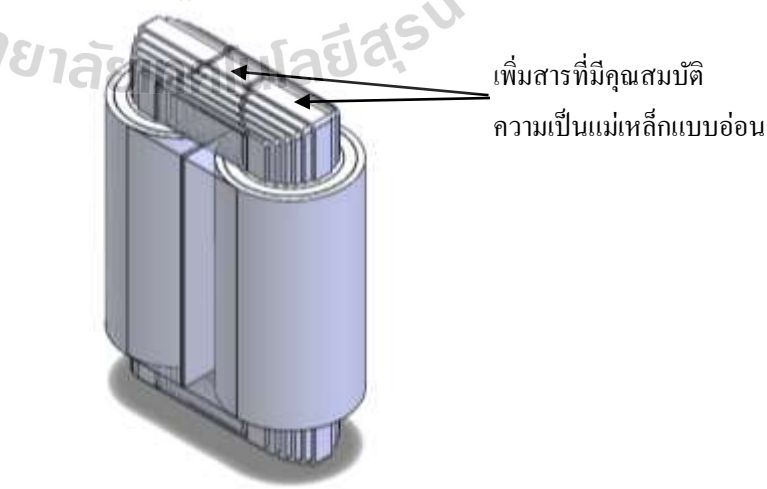
ตารางที่ 6.6 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงที่ออกแบบด้วยวิธีการตัดมุมโค้งและวิธีการสร้างความโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวด ตั้วนำตลอดแนวแกน

ปริมาณ	จุดตัดกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส					
	C		A		B	
การออกแบบ	ตัดมุมโค้ง	โค้งตลอดแนวแกน	ตัดมุมโค้ง	โค้งตลอดแนวแกน	ตัดมุมโค้ง	โค้งตลอดแนวแกน
ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กสูงสุด (w/m)	7.8574×10^{-7}	1.2872×10^{-6}	5.3866×10^{-7}	9.8442×10^{-7}	2.0001×10^{-7}	3.6620×10^{-7}
สนามแม่เหล็กสูงสุด (T)	0.2397	0.0837	0.1633	0.0665	0.0580	0.0246
กำลังงานสูญเสียฮิสเทอรีซิส (kW)	0.8618	0.1051	0.4000	0.0663	0.0505	0.0091
กำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (kW)	0.2298	0.0280	0.1065	0.0177	0.0135	0.0024
กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (kW)	1.0916	0.1331	0.5065	0.0840	0.0640	0.0115

จากตารางที่ 6.6 เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กสำหรับหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์จะเห็นได้ว่า การออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กให้มีลักษณะเป็นแกนโค้งตลอดแนวแกนที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำจะสามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กได้ดีกว่าที่มีการออกแบบด้วยวิธีการตัดมุม โค้งและเรียงแผ่นให้เป็นแนวเอียง ซึ่งการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กให้มีลักษณะเป็นแกนโค้งตลอดแนวแกนที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำนั้นเมื่อพิจารณาในส่วนของกระบวนการผลิตอาจจะทำให้เกิดความยุ่งยากในขั้นตอนการผลิตจริง แต่สามารถนำไปเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการสร้างและใช้งานจริงในอนาคต

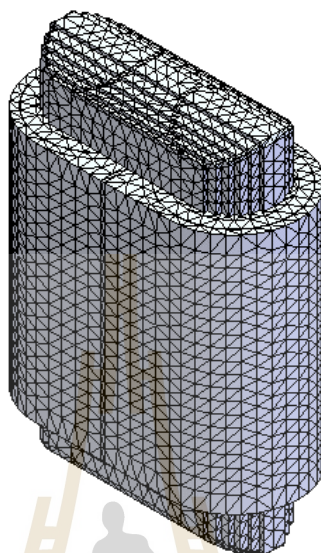
6.6 ผลการจำลองศักยภาพเชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก สนามแม่เหล็กและกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อออกแบบแกนเหล็กด้วยการเพิ่มสารแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กนอกจากจะทำให้รูปร่างของแกนเหล็กมีการเปลี่ยนแปลงไปตามหลักการออกแบบแล้ว สารแม่เหล็กที่ใช้สำหรับการทำแกนเหล็กของหม้อแปลงก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้คุณสมบัติของแกนเหล็กมีการเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของสารที่ใช้สำหรับการทำแกนเหล็กจะส่งผลให้การสร้างวงรอบฮิสเทอรีซิสมีความเร็วและแหลม สำหรับสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการออกแบบแกนเหล็กโดยการเพิ่มสารชนิด silicon iron ซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อนและนิยมใช้สำหรับการทำแกนหม้อแปลง โดยจะเพิ่มสารชนิดนี้เข้าไปที่ตำแหน่งรอยต่อแนวเอียงของแกนเหล็กที่วางตัวแบบแนวนอนและแนวตั้ง ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6.21



รูปที่ 6.21 ตำแหน่งการเพิ่มสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน

วิทยานิพนธ์นี้ได้อาศัยการสร้างกริดและอิลลิเมนต์ด้วยโปรแกรม solid work ที่แสดงได้ดังรูปที่ 6.22



รูปที่ 6.22 การออกแบบกริดและอิลลิเมนต์สำหรับหม้อแปลงที่เพิ่มสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน

จากการออกแบบกริดและอิลลิเมนต์จะได้จำนวน โหนดทั้งหมด 53,200 โหนด และอิลลิเมนต์ทั้งหมด 267,820 อิลลิเมนต์ และจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ที่จะได้ผลการจำลองของการกระจายของศักย์แวกเตอร์เชิงแม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กดังนี้

กระจายศักย์แวกเตอร์เชิงแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส C เมื่อพิจารณาตลอดและแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 6.23 (ก)

กระจายศักย์แวกเตอร์เชิงแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส A เมื่อพิจารณาตลอดและแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 6.23 (ข)

กระจายศักย์แวกเตอร์เชิงแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส B เมื่อพิจารณาตลอดและแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 6.23 (ค)

กระจายศักย์แวกเตอร์เชิงแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส C เมื่อพิจารณาเฉพาะแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 6.24 (ก)

กระจายศักย์แวกเตอร์เชิงแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส A เมื่อพิจารณาเฉพาะแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 6.24 (ข)

กระจายศักย์แวกเตอร์เชิงแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส B เมื่อพิจารณาเฉพาะแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 6.24 (ค)

กระจายสนามแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส C เมื่อพิจารณาขดลวดและแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 6.25 (ก)

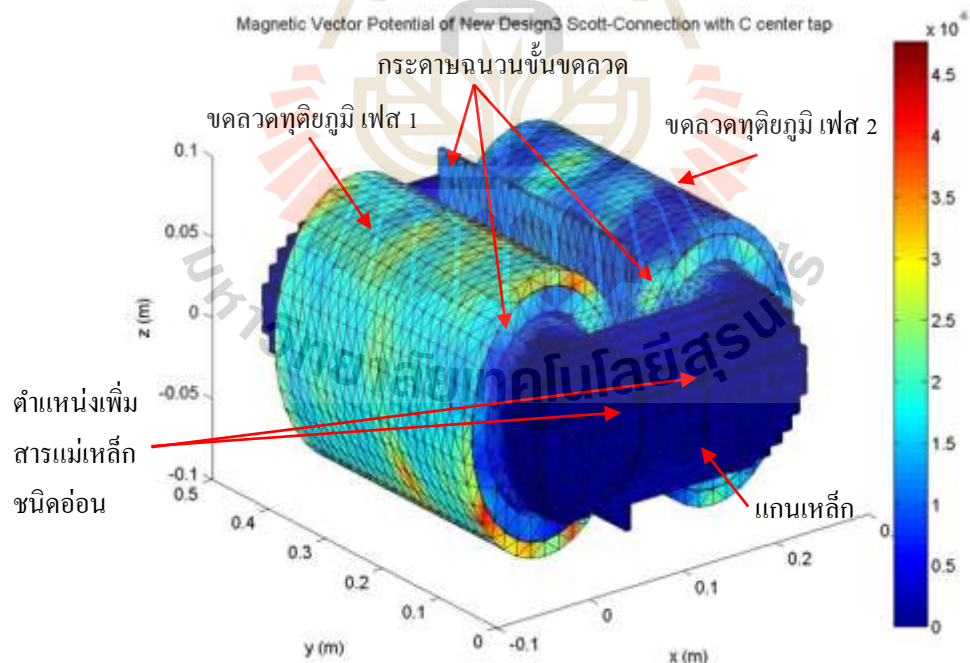
กระจายสนามแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส A เมื่อพิจารณาขดลวดและแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 6.25 (ข)

กระจายสนามแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส B เมื่อพิจารณาขดลวดและแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 6.25 (ค)

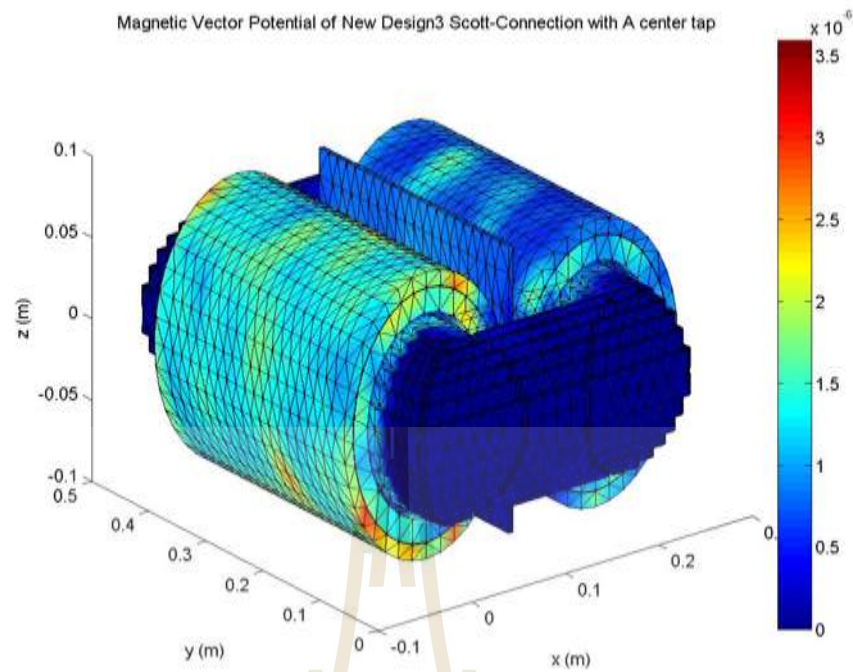
กระจายสนามแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส C เมื่อพิจารณาเฉพาะแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 6.26 (ก)

กระจายสนามแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส A เมื่อพิจารณาเฉพาะแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 6.26 (ข)

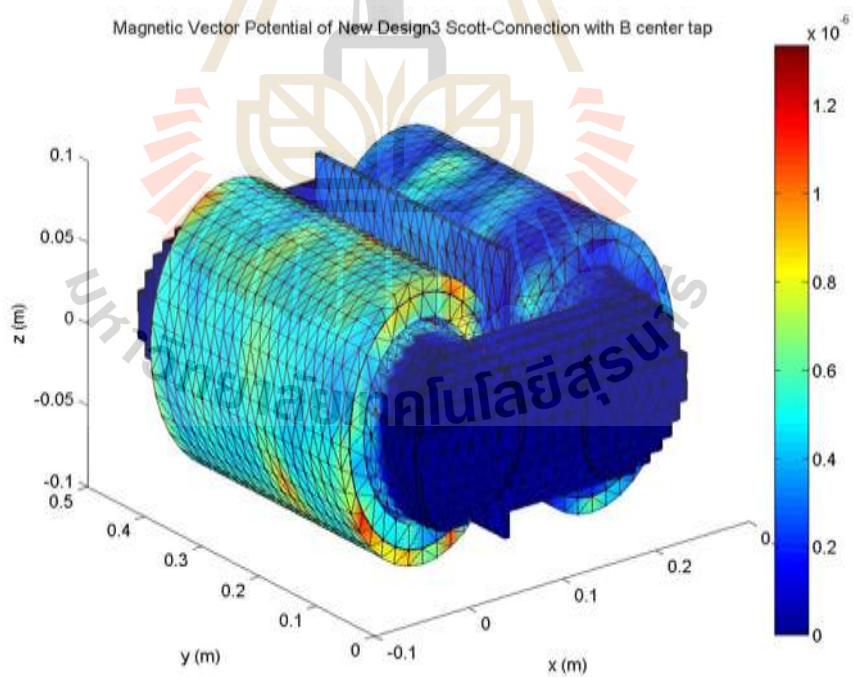
กระจายสนามแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส B เมื่อพิจารณาเฉพาะแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 6.26 (ค)



ก) แท่งกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C

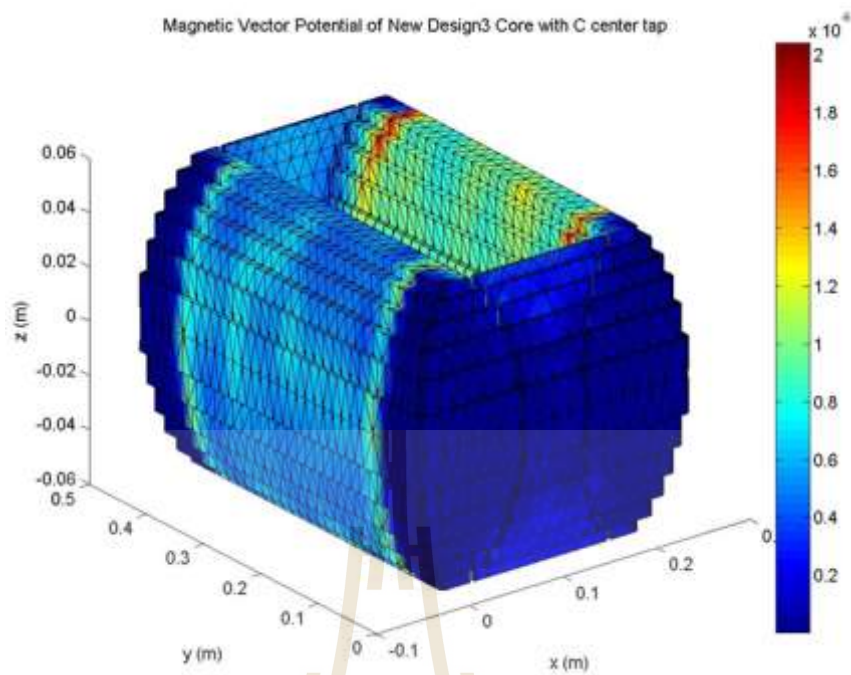


ข) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส A

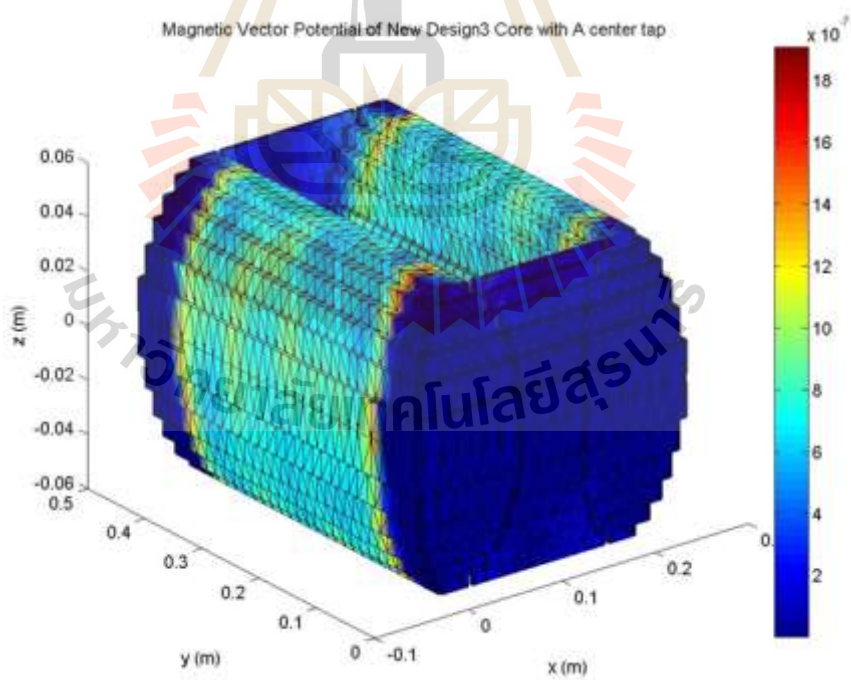


ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส B

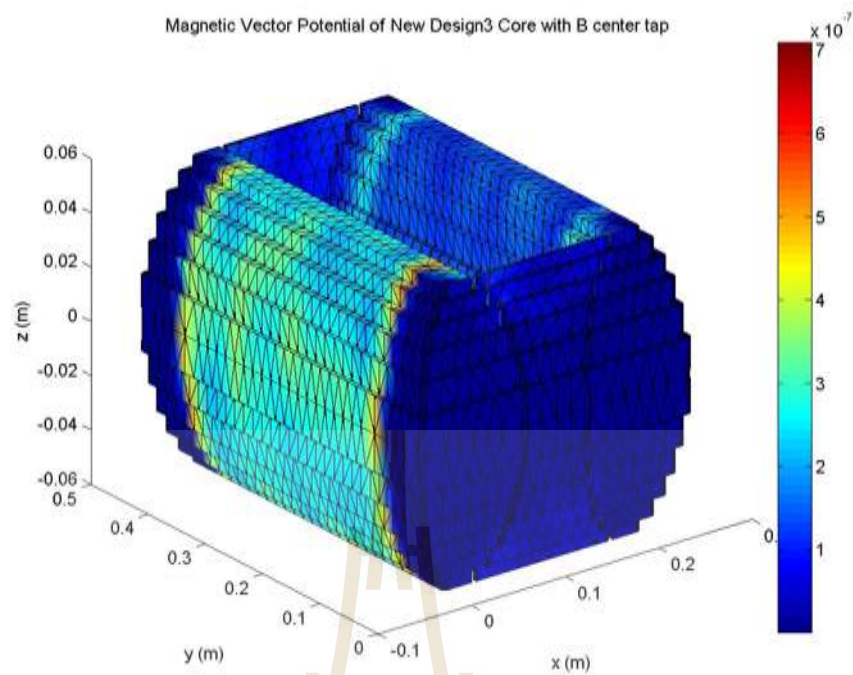
รูปที่ 6.23 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงเมื่อเพิ่มสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน



ก) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C

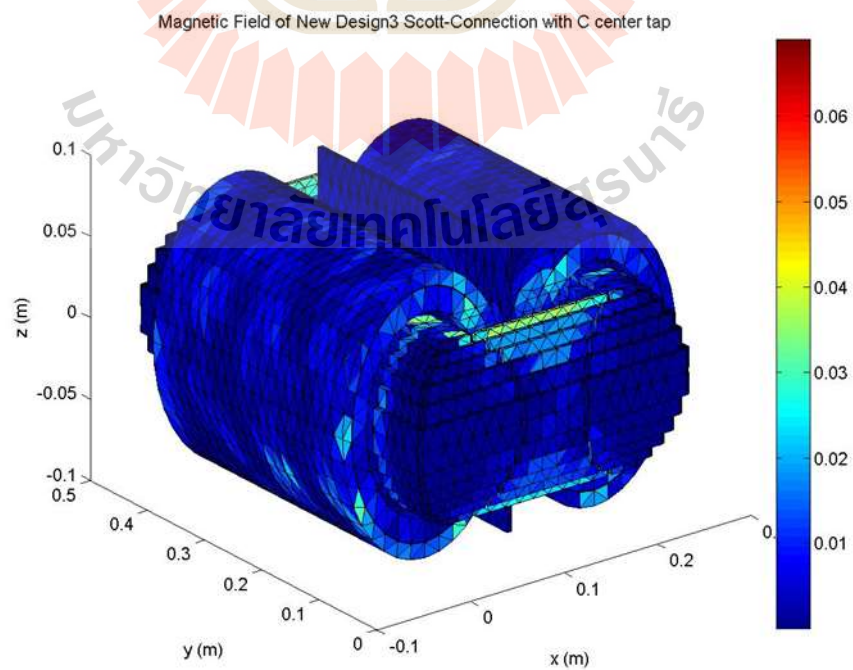


ข) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส A

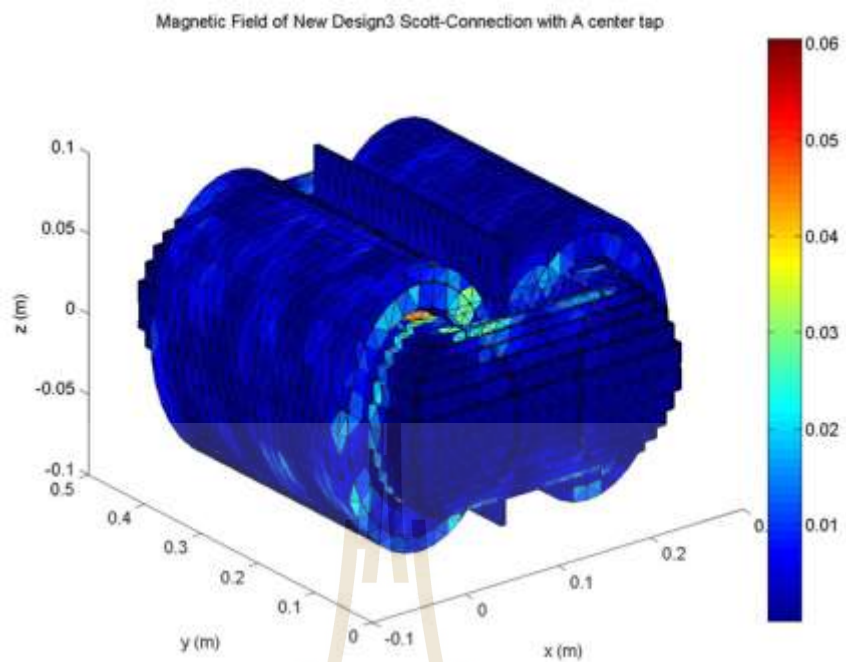


ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส B

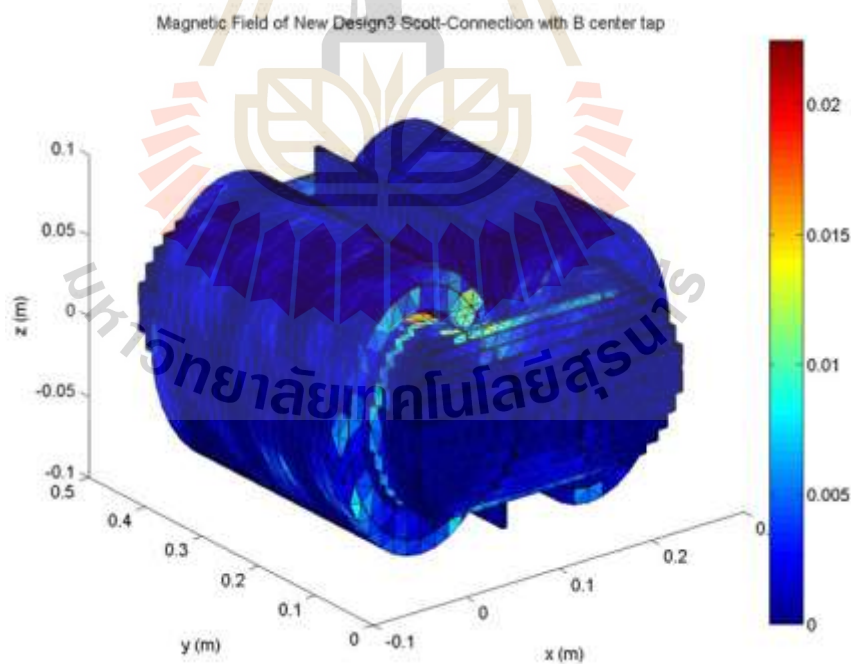
รูปที่ 6.24 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลง เมื่อเพิ่มสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน



ก) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C

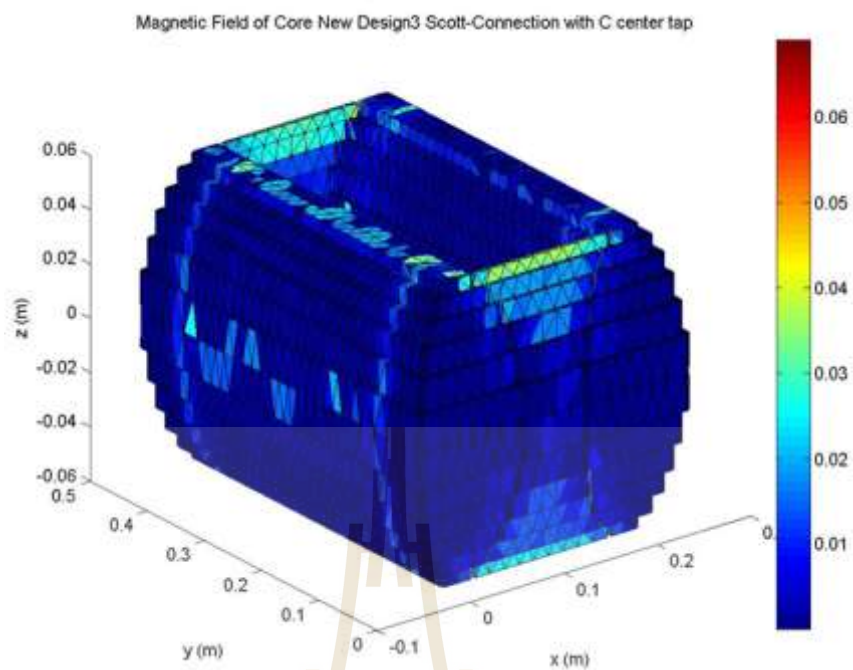


ข) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส A

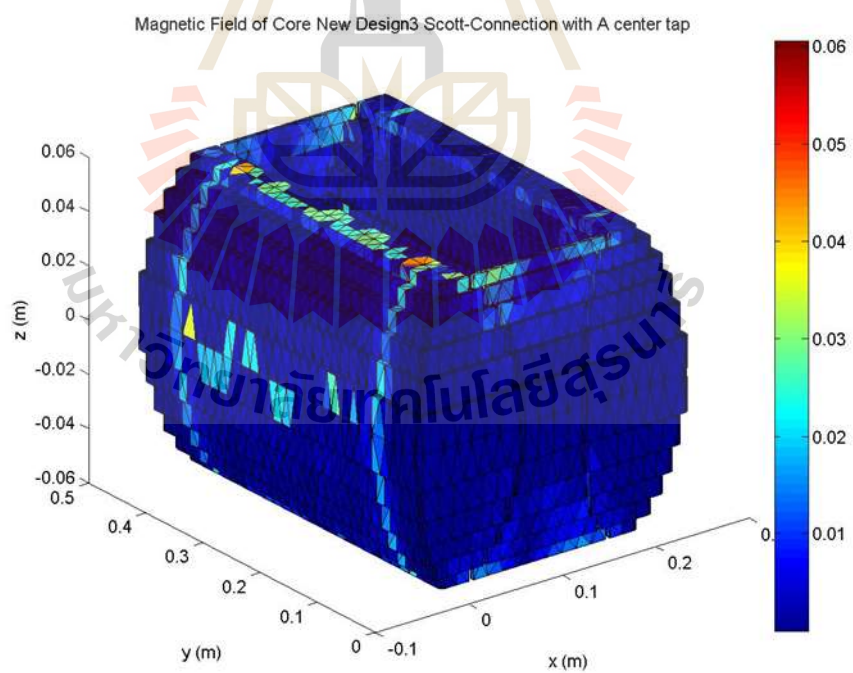


ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส B

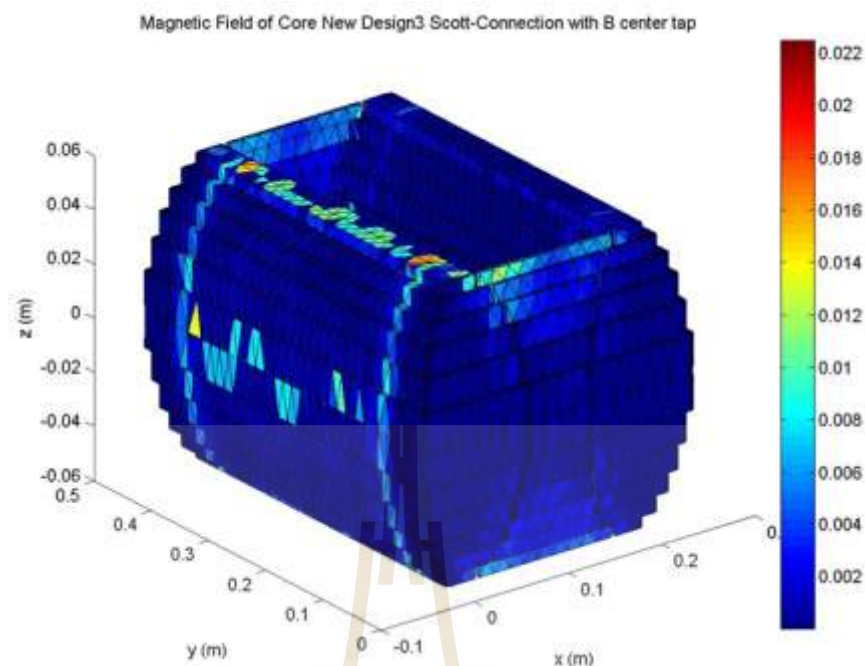
รูปที่ 6.25 การกระจายสนามแม่เหล็ก (Tesla) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลง เมื่อเพิ่มสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน



ก) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C



ข) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส A



ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส B

รูปที่ 6.26 การกระจายสนามแม่เหล็ก (Tesla) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงเมื่อเพิ่มสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน

จากผลการจำลองเชิงกราฟิกจะเห็นได้ว่า การกระจายของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อเพิ่มสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อนจะทำให้เกิดการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ โดยจะมีความไม่สมดุลของการกระจายตัวสลับกันไปขึ้นกับการรับกระแสไฟของแท้ปกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ แต่เมื่อพิจารณาการทำงานของหม้อแปลงครบ 1 รอบการทำงานจะทำให้การกระจายค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กมีความสมดุลมากขึ้น แต่การกระจายตัวยังมีความไม่สม่ำเสมอเมื่อเปรียบเทียบกับกรอกแบบด้วยการตัดมุมโค้งและการกรอกแบบด้วยการทำแกนโค้งที่บริเวณที่ไม่ได้สัมผัสกับตัวนำ ในทำนองเดียวกัน การกระจายค่าสนามแม่เหล็กเมื่อเพิ่มสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อนจะทำให้เกิดการกระจายสนามแม่เหล็กที่บริเวณแกนของหม้อแปลงในตำแหน่งที่ไม่มีการสัมผัสกับขดลวดตัวนำมากขึ้น และมีความสม่ำเสมอขึ้น แต่ขนาดของสนามแม่เหล็กสูงสุดจะลดน้อยลง แต่เมื่อหม้อแปลงมีการทำงานครบ 1 รอบการทำงานก็ยังคงรักษาการกระจายสนามแม่เหล็กเกิดความสมดุลและเมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดไปคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในเชิงตัวเลขจะสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงเมื่อเพิ่มสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน

ปริมาณ	จุดที่ปกกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส		
	C	A	B
ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กสูงสุด (w/m)	2.0370×10^{-6}	1.9041×10^{-6}	7.0760×10^{-7}
สนามแม่เหล็กสูงสุด (T)	0.2298	0.1658	0.0610
กำลังงานสูญเสียเนื่องจาก ฮิสเทอรีซิส (kW)	0.7921	0.4123	0.0558
กำลังงานสูญเสียเนื่องจาก กระแสไหลวน (kW)	0.2112	0.1099	0.0149
กำลังงานสูญเสีย ในแกนเหล็ก (kW)	1.0033	0.5222	0.0707

จากผลการคำนวณค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กจะดำเนินการเปรียบเทียบกับการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กด้วยการตัดมุมโค้งกับการเพิ่มสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กชนิดอ่อนแสดงได้ดังตารางที่ 6.8

ตารางที่ 6.8 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์แบบตัดมุมโค้งและแบบเพิ่มสารแม่เหล็กชนิดอ่อน

ปริมาณ	จุดที่ปกกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส					
	C		A		B	
การ ออกแบบ	มุมโค้ง 5mm	เพิ่มสาร แม่เหล็ก	มุมโค้ง 5mm	เพิ่มสาร แม่เหล็ก	มุมโค้ง 5mm	เพิ่มสาร แม่เหล็ก
ศักย์เชิง เวกเตอร์ แม่เหล็ก สูงสุด (w/m)	7.8574×10^{-7}	2.0370×10^{-6}	5.3866×10^{-7}	1.9041×10^{-6}	2.0001×10^{-7}	7.0760×10^{-7}

ตารางที่ 6.8 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์แบบตัดมุมโค้งและแบบเพิ่มสารแม่เหล็กชนิดอ่อน(ต่อ)

ปริมาณ	จุดแท่งกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส					
	C		A		B	
การออกแบบ	มุมโค้ง 5mm	เพิ่มสารแม่เหล็ก	มุมโค้ง 5mm	เพิ่มสารแม่เหล็ก	มุมโค้ง 5mm	เพิ่มสารแม่เหล็ก
สนามแม่เหล็กสูงสุด (T)	0.2397	0.2298	0.1633	0.1658	0.0580	0.0610
กำลังงานสูญเสียฮิเทอริซิส (kW)	0.8618	0.7921	0.4000	0.4123	0.0505	0.0558
กำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (kW)	0.2298	0.2112	0.1065	0.1099	0.0135	0.0149
กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (kW)	1.0916	1.0033	0.5065	0.5222	0.0640	0.0707

เมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่ากำลังสูญเสียในเชิงตัวเลขจะเห็นได้ว่าการเพิ่มเติมสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กชนิดอ่อน จะสามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารที่เพิ่มเติมเข้าไปเป็นสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กชนิดอ่อนที่มีคุณสมบัติช่วยทำให้วงจรฮิสเทอริซิสมีความเร็วและแคบ ส่งผลให้เกิดความร้อนที่บริเวณแกนเหล็กมีค่า

น้อยลง ประกอบกับการเพิ่มเติมสารเข้าไปบริเวณตำแหน่งรอยต่อของแกนเหล็กที่มีการจัดเรียงแผ่นเหล็กที่ไม่เป็นมุมฉาก ซึ่งจะทำให้เส้นทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็กมีการเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น

จากแนวทางการออกแบบรูปร่างแกนเหล็กเพื่อลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กทั้ง 3 แนวทางได้แก่ การออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กด้วยการตัดมุมแผ่นเหล็กให้เกิดความโค้งที่มีรัศมี 5mm การออกแบบแกนเหล็กของหม้อแปลงบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำให้มีความโค้งตลอดแนวแกน และการเพิ่มสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กชนิดอ่อนสามารถนำมาแสดงผลเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 6.9

ตารางที่ 6.9 เปรียบเทียบคุณลักษณะของแกนหม้อแปลงที่มีการออกแบบเพื่อลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก

คุณลักษณะของแกนหม้อแปลง	มิได้เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก	การตัดมุมโค้งรัศมี 5mm	เปลี่ยนแกนโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำ	การเพิ่มสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กชนิดอ่อน
ค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็ก (A.turns/wb)	474,915	467,767	478,210	514,540
เส้นแรงแม่เหล็ก (wb)	3.5182×10^{-3}	2.7613×10^{-3}	9.6422×10^{-4}	2.6473×10^{-3}
ปริมาตรแกนเหล็ก (mm ³)	7.4517	7.4509	7.5502	7.4509
กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (kW)	3.0391	1.6621	0.2286	1.5962

หมายเหตุ การคำนวณเส้นแรงแม่เหล็กจะดำเนินการคำนวณโดยเลือกพิจารณาค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด

จากการเปรียบเทียบคุณลักษณะของแกนเหล็กหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ในตารางที่ 6.9 โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้การออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กมีปริมาตรคงที่หรือใกล้เคียงกัน จะเห็นได้ว่า การออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กสามารถลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กได้ทั้ง 3 วิธี โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลดลงของวิธีการตัดมุมโค้งรัศมี 5mm วิธีเปลี่ยนแกนโค้งตลอดแนวแกนที่ไม่ได้สัมผัสกับขดลวดตัวนำ และวิธีการเพิ่มสารที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กชนิดอ่อนคือ 45.31% 92.48% และ 47.48% ตามลำดับ โดย

ที่การออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กด้วยวิธีทำแกนโค้งตลอดแนวแกนที่ไม่ได้สัมผัสกับขดลวดตัวนำจะทำให้กำลังสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าน้อยที่สุด

6.7 สรุป

ในบทที่ 6 นี้ ได้ดำเนินการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่อแบบวี แบบสกอตต์และแบบเลอบลองก์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งประกอบไปด้วย 3 วิธีคือวิธีที่ 1 วิธีการตัดมุมโค้งของแผ่นเหล็กร่วมกับการจัดเรียงและต่อแผ่นเหล็กแบบในแนวเอียง วิธีที่ 2 วิธีสร้างแกนเหล็กให้มีความโค้งบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกน และวิธีที่ 3 วิธีการเพิ่มสารแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กแบบอ่อน พร้อมทั้งคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กเมื่อออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กที่มุ่งเน้นเพื่อลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก ซึ่งจากผลการจำลองและผลการคำนวณที่ได้จะเห็นได้ว่าหลังจากที่แกนเหล็กได้รับการออกแบบแล้วนั้นจะทำให้ค่ากำลังงานสูญเสียที่แกนเหล็กของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์มีค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กน้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาการออกแบบด้วยวิธีตัดมุมโค้งสามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ช่วยลดค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบวี แบบสกอตต์ และแบบเลอบลองก์ คิดเป็น 36.4095%, 45.3095% และ 60.3145% ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาวิธีการออกแบบทั้ง 3 วิธีจะเห็นได้ว่าทั้ง 3 วิธีสามารถช่วยลดค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กได้จริงและวิธีออกแบบรูปร่างแกนเหล็กด้วยการสร้างแกนโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกนจะเป็นวิธีที่ลดค่ากำลังงานสูญเสียได้มากที่สุด

บทที่ 7

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก เมื่อมีการจ่ายโหลด

7.1 บทนำ

การวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กในขณะที่หม้อแปลงมีการจ่ายโหลดในบทที่ 7 นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การทำงานของหม้อแปลงเมื่อหม้อแปลงมีการใช้งานในระบบแรงดันไฟฟ้าที่มีการใช้งานจริงทั้งในกรณีที่ไม่มีโหลด ขณะที่จ่ายโหลดเต็มพิกัด ขณะที่จ่ายโหลด 200% ของพิกัดและขณะที่มีการจ่ายโหลดสูงสุด โดยจากผลการจำลองและผลการคำนวณที่ได้อธิบายไปแล้วในบทที่ 6 นั้นจะเห็นได้ว่าการเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบสกอตต์จะเป็นรูปแบบที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงมีค่าต่ำที่สุด ดังนั้นในบทที่ 7 จึงได้มุ่งเน้นวิเคราะห์เพียงการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เท่านั้น อีกทั้งวิธีการออกแบบด้วยวิธีการตัดมุมโค้งถือเป็นวิธีการออกแบบที่ทำให้ลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กและเป็นวิธีที่ไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตมากนักสามารถผลิตใช้งานได้จริงในกระบวนการผลิต ดังนั้นในบทที่ 7 จึงเลือกดำเนินการจำลองผลหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์และแกนของหม้อแปลงที่มีการตัดมุมโค้งเท่านั้น

7.2 การวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ขณะที่มีการจ่ายโหลด

การออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กสำหรับการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 6 นั้นเป็นการออกแบบและจำลองผลเมื่อหม้อแปลงอยู่ในสภาวะไร้โหลด ซึ่งสามารถแสดงผลการคำนวณโหลดทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงในสภาวะไร้โหลดของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบวี แบบสกอตต์และแบบเลอบลองก์ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 7.1 – 7.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 7.1 ผลการคำนวณโหลดทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงของหม้อแปลงที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสีย
ที่มีการเชื่อมต่อแบบวีในขณะที่หม้อแปลงมิได้ดำเนินการจ่ายโหลดให้กับรถไฟฟ้า

ขดลวดปฐมภูมิ รับไฟจาก	โหลดด้านทุติยภูมิ	หนึ่งเฟสชุดที่ 1	หนึ่งเฟสชุดที่ 2
A-B	กระแสเฟส (A)	1.4147+j0.0402	-7.7589-j0.8904
	แรงดันเฟส (V)	25000+j0	0+j25000
	กำลังไฟฟ้า (VA)	35367.5+j1005	22260-j193972
	เปอร์เซ็นต์โหลด (%)	0.531%	0.334%
B-C	กระแสเฟส (A)	-2.2302+j1.2849	-0.6994-j2.7834
	แรงดันเฟส (V)	25000+j0	0+j25000
	กำลังไฟฟ้า (VA)	-55755+j32122.5	69585-j17845
	เปอร์เซ็นต์โหลด (%)	0.965%	1.076%
C-A	กระแสเฟส (A)	-2.1536-j1.4094	1.5958-j1.3699
	แรงดันเฟส (V)	25000+j0	0+j25000
	กำลังไฟฟ้า (VA)	-53840+j35235	34247.5+j39895
	เปอร์เซ็นต์โหลด (%)	0.964%	0.789%

ตารางที่ 7.2 ผลการคำนวณโหลดทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงของหม้อแปลงที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสีย
ที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ในขณะที่หม้อแปลงมิได้ดำเนินการจ่ายโหลดให้
กับรถไฟฟ้า

แท่งกลาง รับไฟจากเฟส	โหลดด้านทุติยภูมิ	หนึ่งเฟสชุดที่ 1	หนึ่งเฟสชุดที่ 2
C	กระแสเฟส (A)	-0.6959+j0.1748	-0.3497-j1.3918
	แรงดันเฟส (V)	25000+j0	0+j25000
	กำลังไฟฟ้า (VA)	-17398-j4370	34795-j8742.5
	เปอร์เซ็นต์โหลด (%)	0.268%	0.538%
A	กระแสเฟส (A)	-3.4251-j3.9896	7.9791-j6.8501
	แรงดันเฟส (V)	25000+j0	0+j25000
	กำลังไฟฟ้า (VA)	-85628+j99.740	171252.5+j199478
	เปอร์เซ็นต์โหลด (%)	1.284%	3.944%

ตารางที่ 7.2 ผลการคำนวณโหลดทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงของหม้อแปลงที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสียที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ในขณะที่หม้อแปลงมิได้ดำเนินการจ่ายโหลดให้กับรถไฟฟ้า(ต่อ)

แท่งกลางรับไฟจากเฟส	โหลดด้านทุติยภูมิ	หนึ่งเฟสชุดที่ 1	หนึ่งเฟสชุดที่ 2
B	กระแสเฟส (A)	-0.2227+j1.9398	-3.7896+j0.4455
	แรงดันเฟส (V)	25000+j0	0+j25000
	กำลังไฟฟ้า (VA)	-5568-j48495	-11137.5-j94740
	เปอร์เซ็นต์โหลด (%)	0.729%	1.431%

ตารางที่ 7.3 ผลการคำนวณโหลดทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงของหม้อแปลงที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสียที่มีการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ในขณะที่หม้อแปลงมิได้ดำเนินการจ่ายโหลดให้กับรถไฟฟ้า

ขดลวดเหนี่ยวนำจากเฟส	โหลดด้านทุติยภูมิ	หนึ่งเฟสชุดที่ 1	หนึ่งเฟสชุดที่ 2
A-B	กระแสเฟส (A)	-0.6555+j1.6353	-1.6353-j0.6555
	แรงดันเฟส (V)	25000+j0	0+j25000
	กำลังไฟฟ้า (VA)	-16388+j40883	16388-j40883
	เปอร์เซ็นต์โหลด (%)	0.661%	0.661%
B-C	กระแสเฟส (A)	-6.5085+j0.9329	-0.9329-j6.5085
	แรงดันเฟส (V)	25000+j0	0+j25000
	กำลังไฟฟ้า (VA)	-162712+j23322	-23322-j162712
	เปอร์เซ็นต์โหลด (%)	2.466%	2.466%
C-A	กระแสเฟส (A)	-3.7847+j2.9737	3.7847-j2.9737
	แรงดันเฟส (V)	25000+j0	0+j25000
	กำลังไฟฟ้า (VA)	-94617.5+j74342.5	74342.5+j94617.5
	เปอร์เซ็นต์โหลด (%)	1.805%	1.805%

จากผลการคำนวณในตารางที่ 7.1 – 7.3 จะเห็นได้ว่าหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษทั้ง 3 แบบคือ แบบวี แบบสกอตต์และแบบเลอบลองก์ ได้รับการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กที่

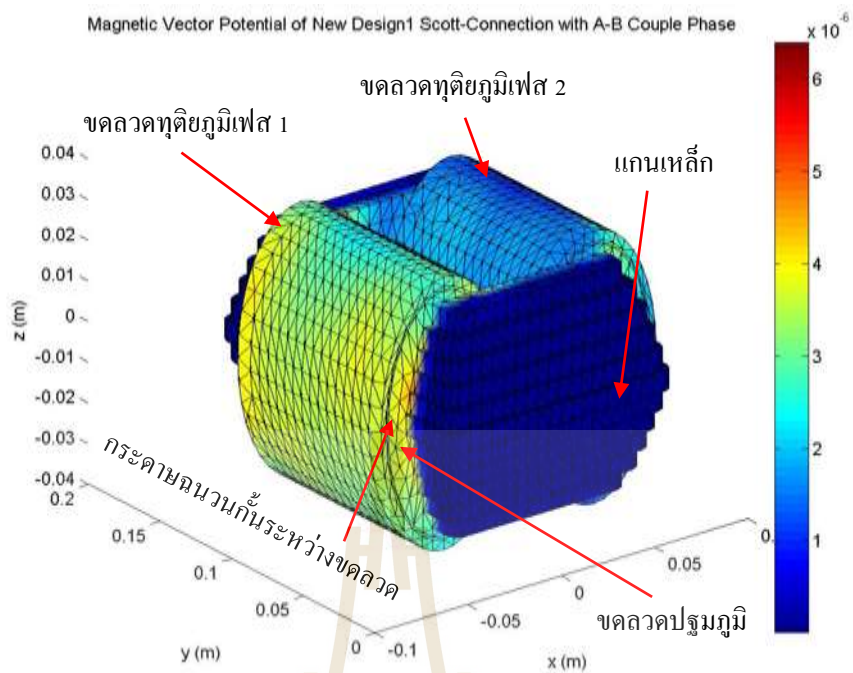
มุ่งเน้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กโดยมีการทำงานในสภาวะที่โหลดมีค่าน้อยมากๆ เทียบได้กับในสภาวะไร้โหลด โดยจะมีค่าโหลดสูงสุดเพียง 3.944% เทียบกับโหลดเต็มพิกัดต่อเฟสที่ 6.67MVA เมื่อหม้อแปลงมีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์

7.2.1 การจำลองผลสัทธิ่วงเวกเตอร์เชิงแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กเมื่อหม้อแปลงทำการจ่ายโหลดที่พิกัด

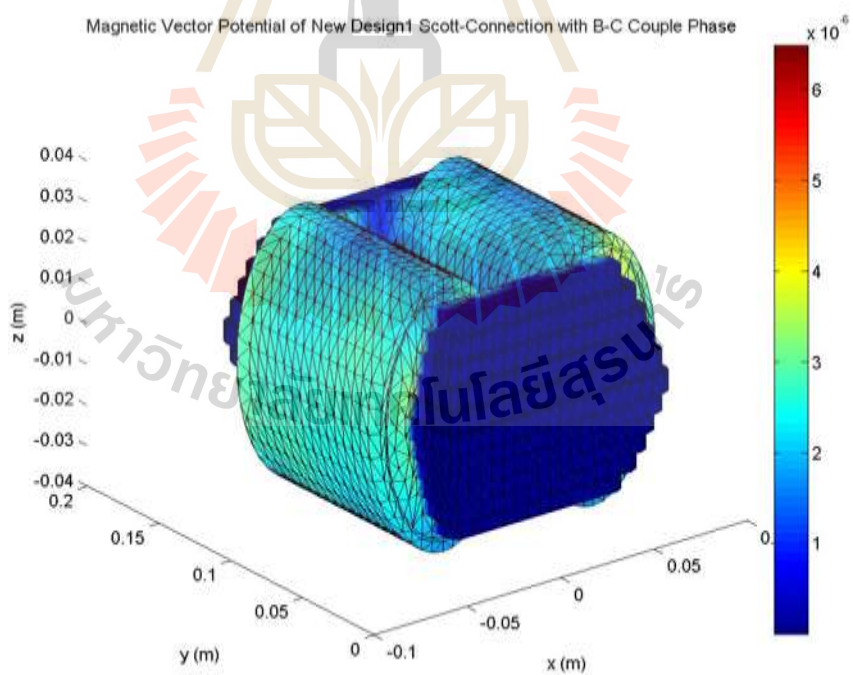
การออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กเพื่อมุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กโดยทั่วไปจะนิยมกระทำในสภาวะไร้โหลด ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการประเมินสภาวะการทำงานของหม้อแปลงหลังจากได้รับการออกแบบแล้ว โดยที่หม้อแปลงยังคงสามารถจ่ายโหลดได้ในสภาวะเต็มพิกัด ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้จึงได้จำลองผลการกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กเมื่อหม้อแปลงทำการจ่ายโหลดในสภาวะเต็มพิกัดที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ โดยสามารถแสดงค่ากระแสโหลดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อมีการจ่ายโหลดที่พิกัดได้ดังตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.4 ผลการคำนวณ โหลดทางไฟฟ้าของหม้อแปลงที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสียที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ในขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดที่พิกัด

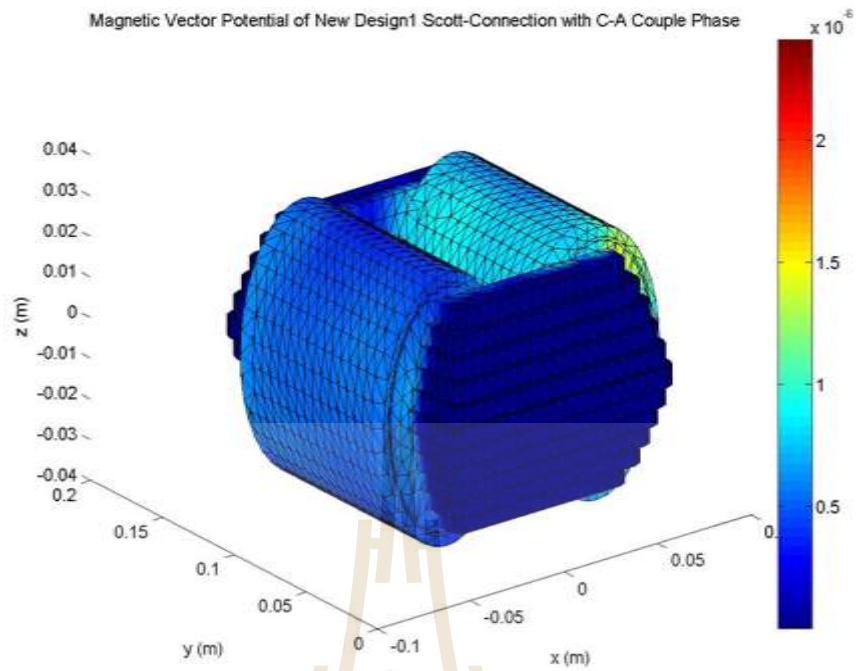
ขดลวด เหนี่ยวนำจาก เฟส	โหลดด้านทุติยภูมิ	หนึ่งเฟสชุดที่ 1	หนึ่งเฟสชุดที่ 2
C	กระแสเฟส (A)	-258.633+j64.964	-64.964-j258.633
	แรงดันเฟส (V)	25000+j0	0+j25000
	กำลังไฟฟ้า (VA)	-6452475+j1608775	6465813-j1624100
	เปอร์เซ็นต์โหลด (%)	100.00%	100.00%
A	กระแสเฟส (A)	-266.666+j0.4654	202.472-j173.540
	แรงดันเฟส (V)	25000+j0	0+j25000
	กำลังไฟฟ้า (VA)	-6666656.5+j11635.5	4338494.8+5061808.7
	เปอร์เซ็นต์โหลด (%)	100.00%	100.00%
B	กระแสเฟส (A)	-30.188-j264.952	-264.846+j31.112
	แรงดันเฟส (V)	25000+j0	0+j25000
	กำลังไฟฟ้า (VA)	-754688.09-j6623812.4	-777804.9-j6621137.66
	เปอร์เซ็นต์โหลด (%)	100.00%	100.00%



ก) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C

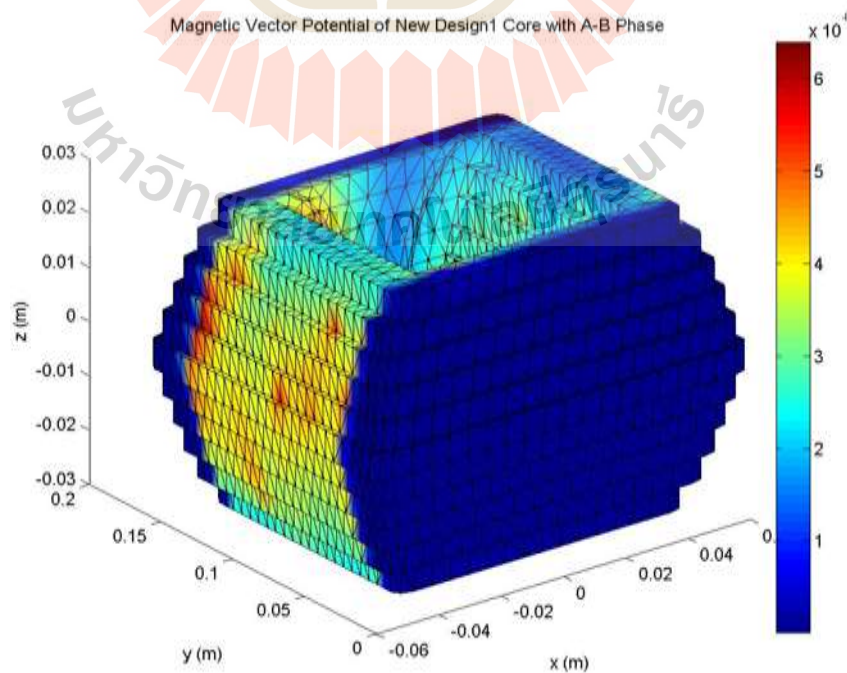


ข) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส A

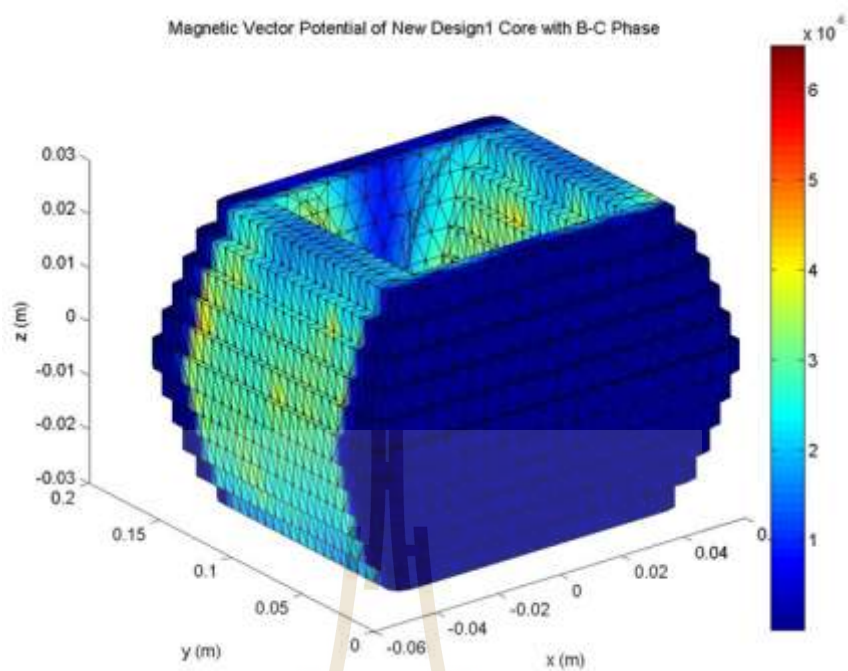


ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส B

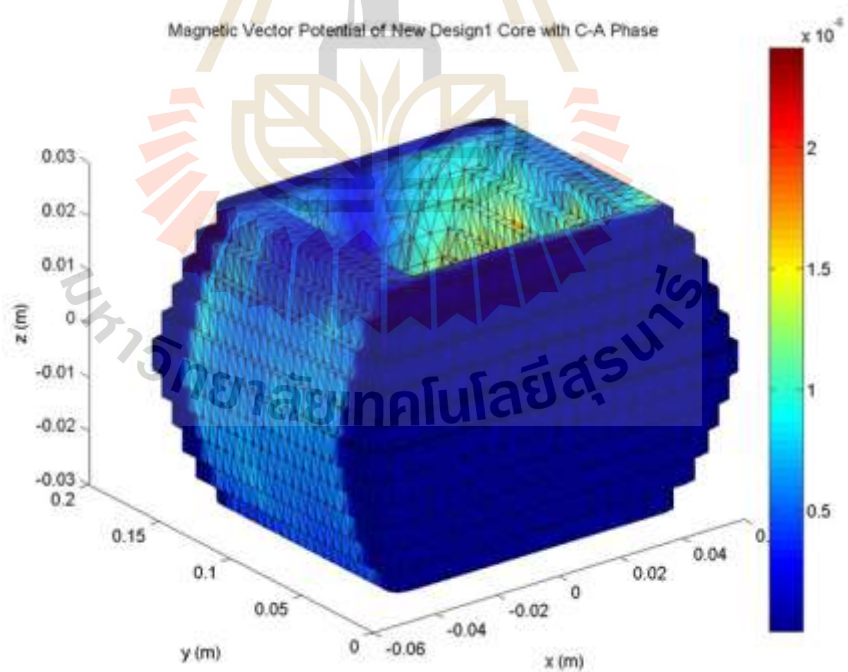
รูปที่ 7.1 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่พิกัด



ก) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C

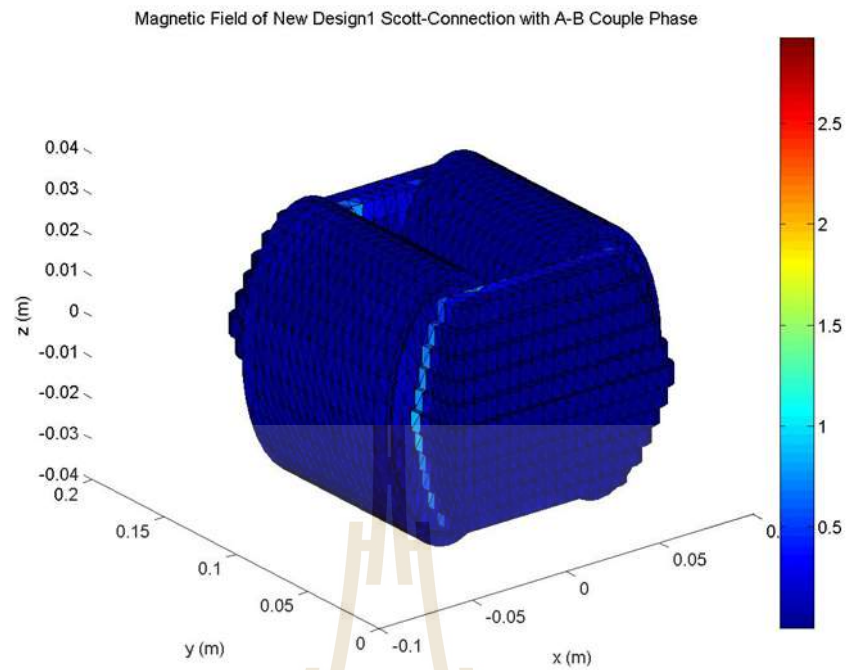


ข) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส A

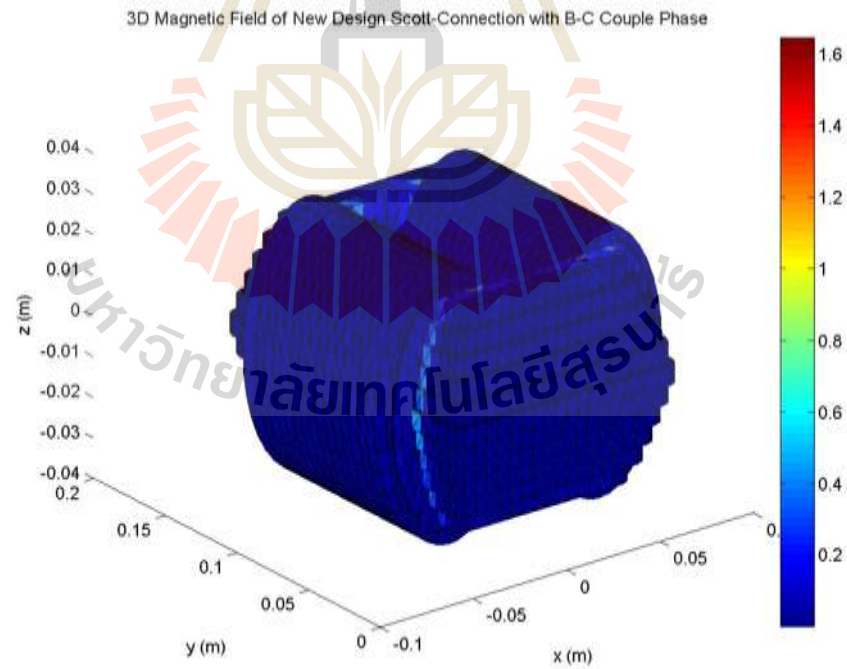


ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส B

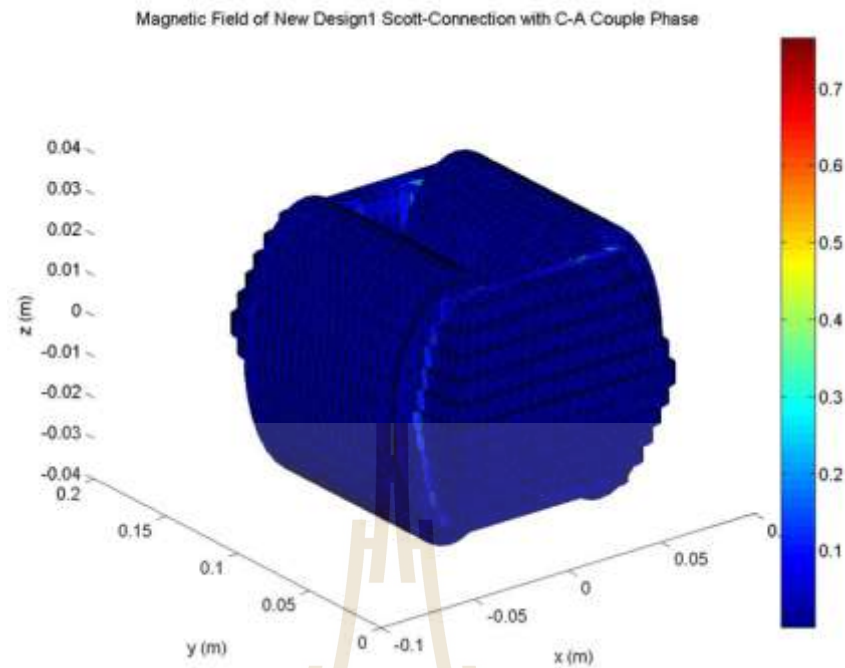
รูปที่ 7.2 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่พิกัด



ก) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C

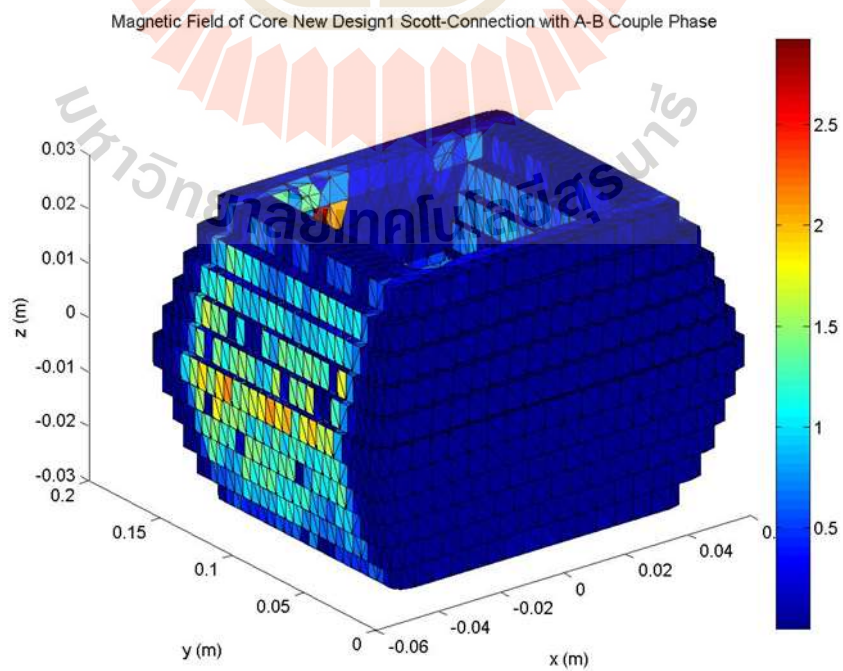


ข) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส A

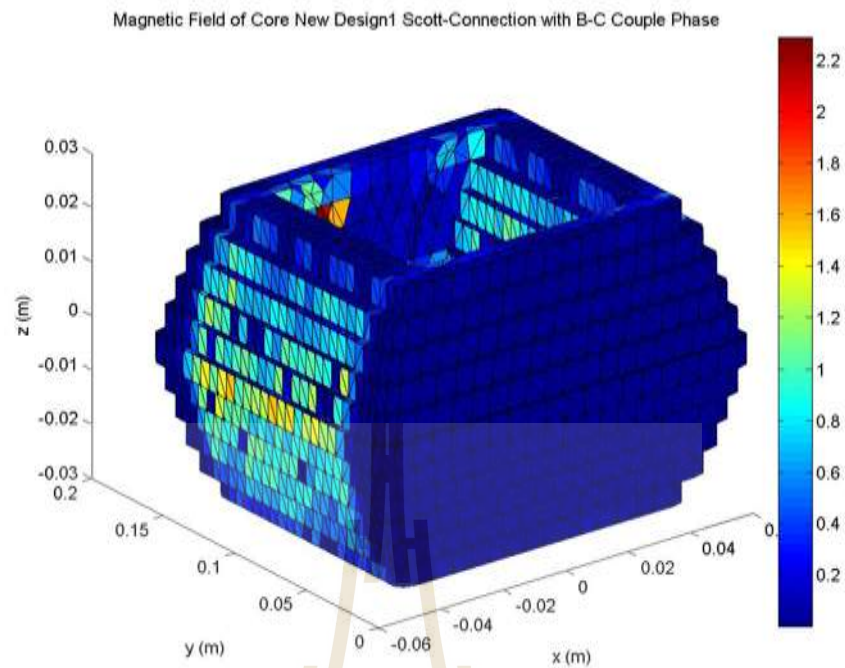


ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส B

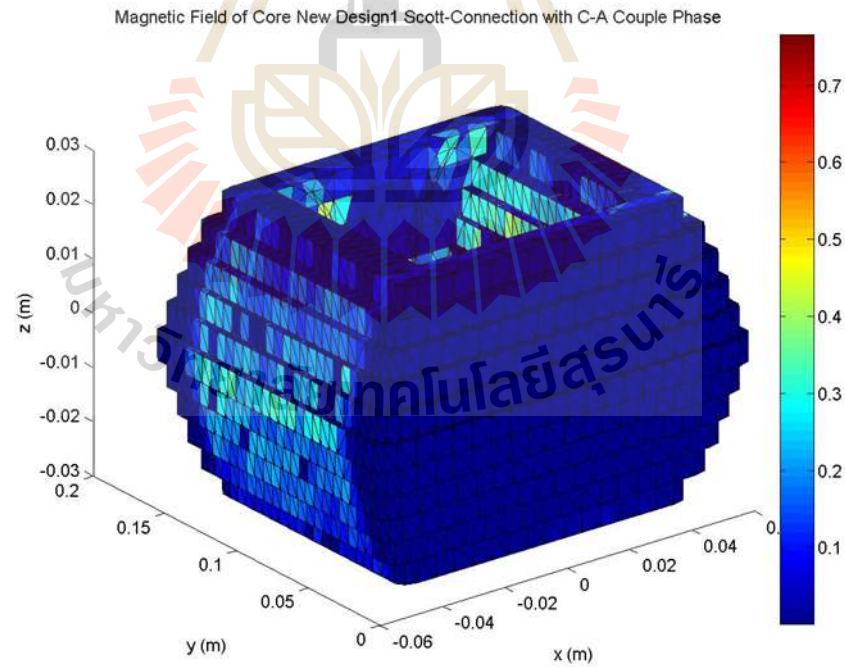
รูปที่ 7.3 การกระจายสนามแม่เหล็ก (Tesla) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่พิกัด



ก) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C



ข) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส A



ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส B

รูปที่ 7.4 การกระจายสนามแม่เหล็ก (Tesla) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่พิกัด

จากผลการจำลองในเชิงกราฟจะเห็นได้ว่า ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในขณะที่หม้อแปลงมีการจ่ายโหลดที่พิกัดจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อพิจารณาการกระจายตัวในแต่ละกรณีจะยังคงมีความไม่สมดุลเกิดขึ้นทั้งนี้เนื่องจากความไม่สมดุลของค่ากระแสทุติยภูมิ แต่เมื่อพิจารณาตลอดช่วงการทำงาน 1 รอบจะส่งผลให้การกระจายตัวของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเกิดความสมดุลขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าสนามแม่เหล็กก็จะเป็นไปทำนองเดียวกันกับค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก แต่กระจายค่าสนามแม่เหล็กจะกระจายเข้าไปยังแกนกลางของแกนเหล็กมากกว่าบริเวณขอบรอบนอกของแกนเหล็ก

7.2.2 การจำลองผลศักย์เวกเตอร์เชิงแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กเมื่อหม้อแปลงทำการจ่ายโหลดที่ 200% พิกัด

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กที่มุ่งเน้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กสำหรับหม้อแปลงที่มีการใช้งานในระบบรถไฟฟ้า ซึ่งจะเห็นได้ว่า โหลดของหม้อแปลงเป็นโหลดหนึ่งเฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้ตลอดเวลา โดยในบางครั้งอาจจะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของโหลดมีค่าสูงมากถึง 200% พิกัด ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้จึงได้จำลองผลการกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กเมื่อหม้อแปลงทำการจ่ายโหลดในสภาวะ 200% ของพิกัดที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ โดยสามารถแสดงค่ากระแสโหลดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อมีการจ่ายโหลดที่ 200% ของพิกัดได้ดังตารางที่ 7.5

ตารางที่ 7.5 ผลการคำนวณ โหลดทางไฟฟ้าของหม้อแปลงที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสียที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ในขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดที่ 200% ของพิกัด

ขดลวด เหนี่ยวนำจาก เฟส	โหลดด้านทุติยภูมิ	หนึ่งเฟสชุดที่ 1	หนึ่งเฟสชุดที่ 2
C	กระแสเฟส (A)	517.265-j129.928	-129.928-j517.265
	แรงดันเฟส (V)	25000+j0	0+j25000
	กำลังไฟฟ้า (VA)	12931626.87-j3248200	12931626.87-j3248200
	เปอร์เซ็นต์โหลด (%)	200.00%	200.00%
A	กระแสเฟส (A)	-533.33+j0.931	404.944-j347.080
	แรงดันเฟส (V)	25000+j0	0+j25000
	กำลังไฟฟ้า (VA)	-13333313.03+j23271.04	8676989.56+j10123617.43
	เปอร์เซ็นต์โหลด (%)	200.00%	200.00%

ตารางที่ 7.5 ผลการคำนวณโหลดทางไฟฟ้าของหม้อแปลงที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสียที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ในขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดที่200%ของพิกัด (ต่อ)

ขดลวด เหนี่ยวนำจาก เฟส	โหลดด้านทุติยภูมิ	หนึ่งเฟสชุดที่ 1	หนึ่งเฟสชุดที่ 2
B	กระแสเฟส (A)	-60.375-j529.904	-529.691+j62.224
	แรงดันเฟส (V)	25000+j0	0+j25000
	กำลังไฟฟ้า (VA)	-1509376.2-j13247624.7	-1555609.83-j13242275.3
	เปอร์เซ็นต์โหลด (%)	200.00%	200.00%

จากข้อมูลโหลดในตารางที่ 7.5 สามารถนำไปจำลองผลการกระจายศักย์แวกเตอร์เชิงแม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กเมื่อหม้อแปลงทำการจ่ายโหลดในสภาวะ 200%พิกัดที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์จะได้ผลการจำลองดังนี้ได้ดังนี้

กระจายศักย์แวกเตอร์เชิงแม่เหล็กเมื่อที่ปกกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส C เมื่อพิจารณาขดลวดและแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.5 (ก)

กระจายศักย์แวกเตอร์เชิงแม่เหล็กเมื่อที่ปกกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส A เมื่อพิจารณาขดลวดและแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.5 (ข)

กระจายศักย์แวกเตอร์เชิงแม่เหล็กเมื่อที่ปกกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส B เมื่อพิจารณาขดลวดและแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.5 (ค)

กระจายศักย์แวกเตอร์เชิงแม่เหล็กเมื่อที่ปกกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส C เมื่อพิจารณาเฉพาะแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.6 (ก)

กระจายศักย์แวกเตอร์เชิงแม่เหล็กเมื่อที่ปกกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส A เมื่อพิจารณาเฉพาะแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.6 (ข)

กระจายศักย์แวกเตอร์เชิงแม่เหล็กเมื่อที่ปกกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส B เมื่อพิจารณาเฉพาะแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.6 (ค)

กระจายสนามแม่เหล็กเมื่อที่ปกกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส C เมื่อพิจารณาขดลวดและแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.7 (ก)

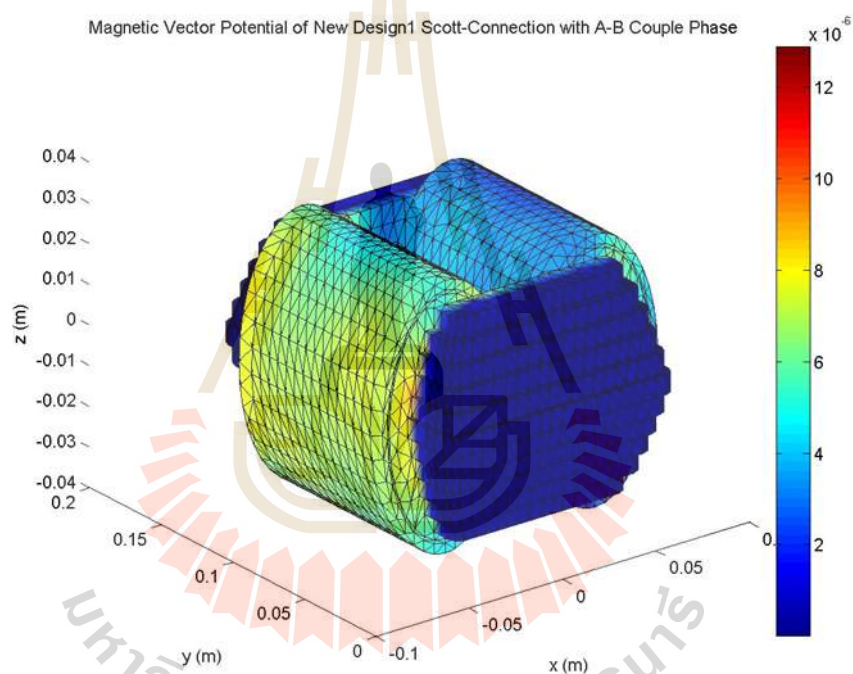
กระจายสนามแม่เหล็กเมื่อที่ปกกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส A เมื่อพิจารณาขดลวดและแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.7 (ข)

กระจายสนามแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส B เมื่อพิจารณาตลอดและแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.7 (ค)

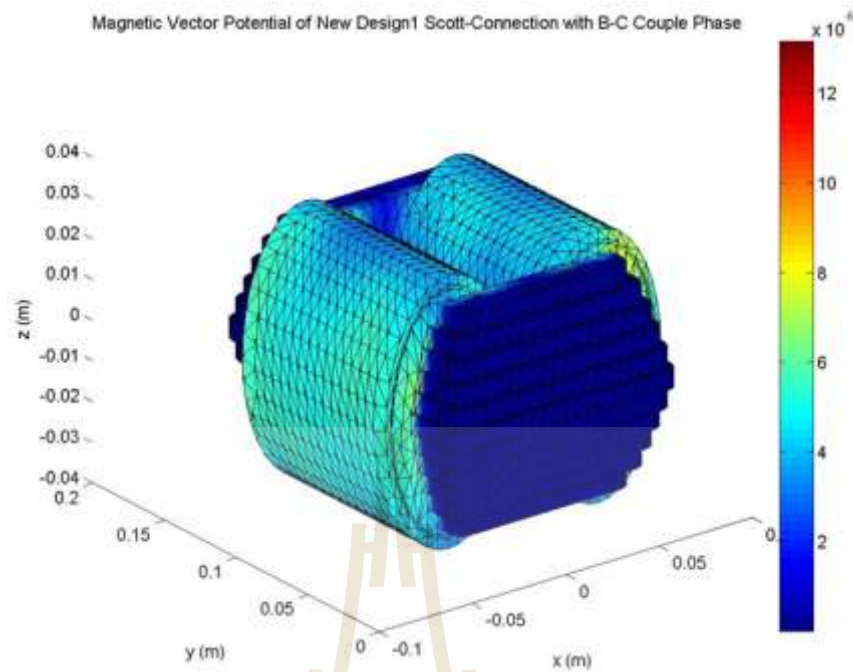
กระจายสนามแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส C เมื่อพิจารณาเฉพาะแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.8 (ก)

กระจายสนามแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส A เมื่อพิจารณาเฉพาะแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.8 (ข)

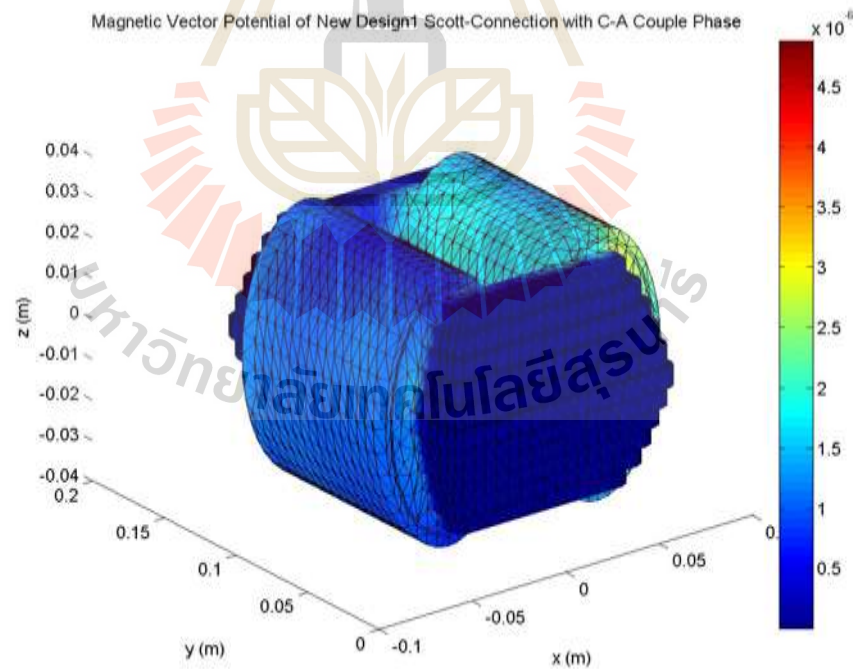
กระจายสนามแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส B เมื่อพิจารณาเฉพาะแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.8 (ค)



ก) แท่งกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C

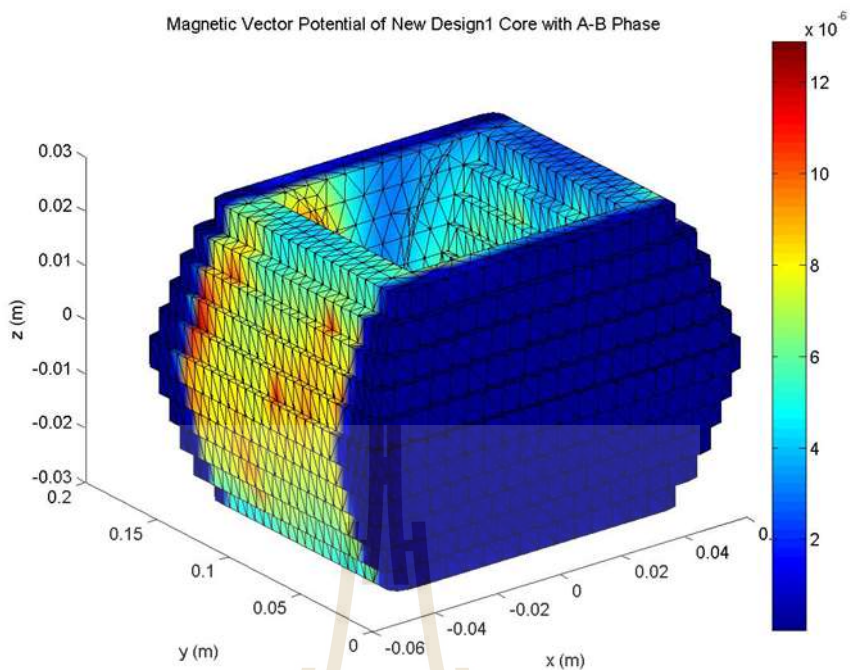


ข) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส A

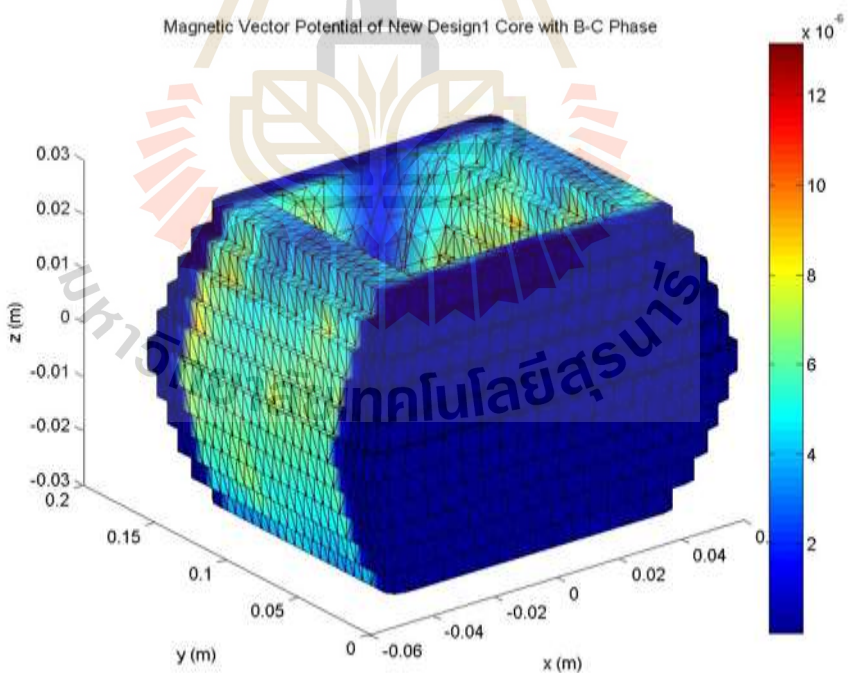


ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส B

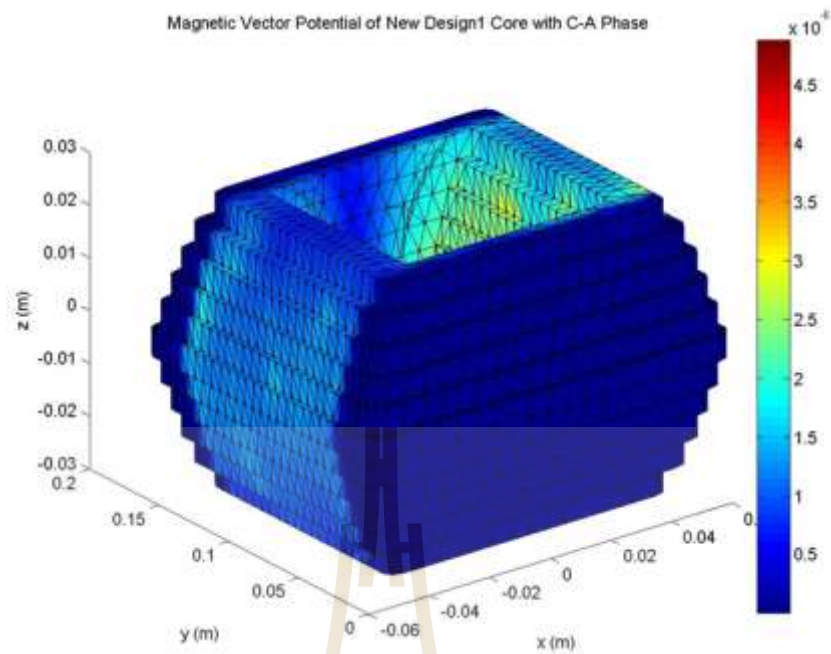
รูปที่ 7.5 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่ 200% พิกัด



ก) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C

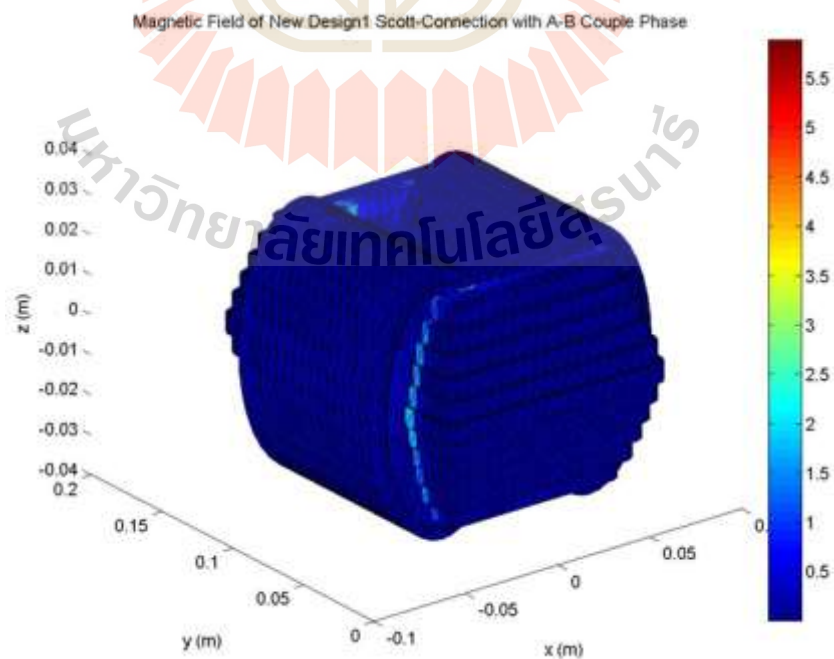


ข) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส A

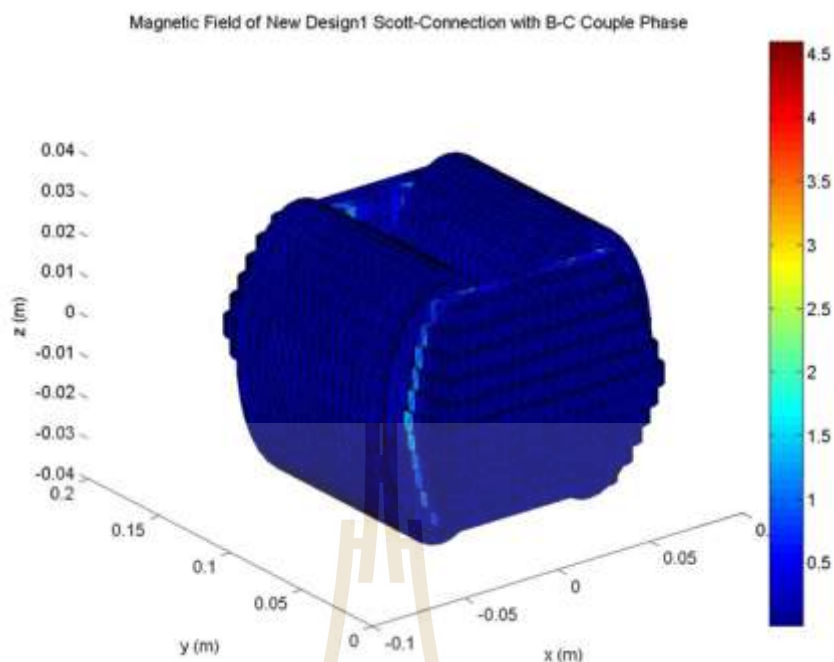


ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส B

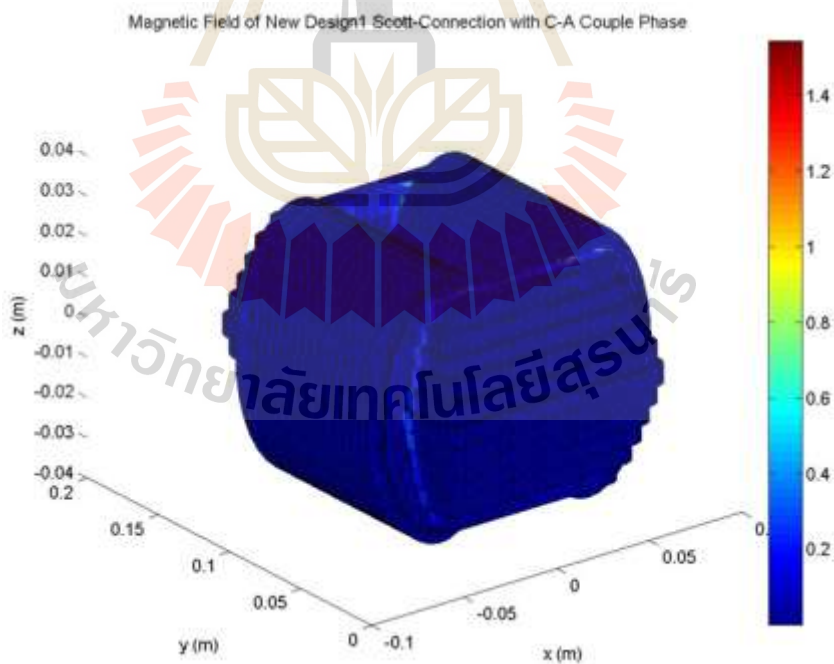
รูปที่ 7.6 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่ 200% พิกัด



ก) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C

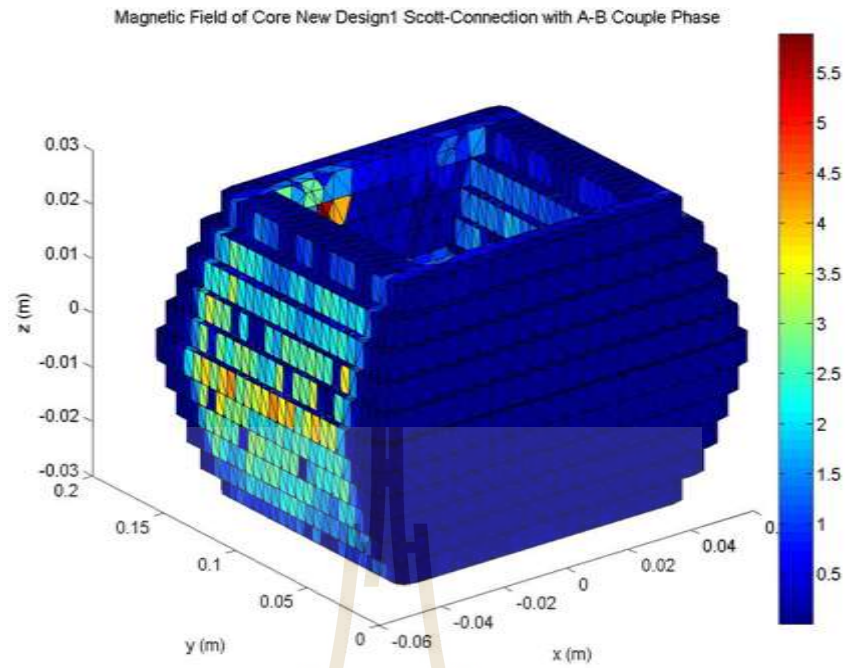


ข) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส A

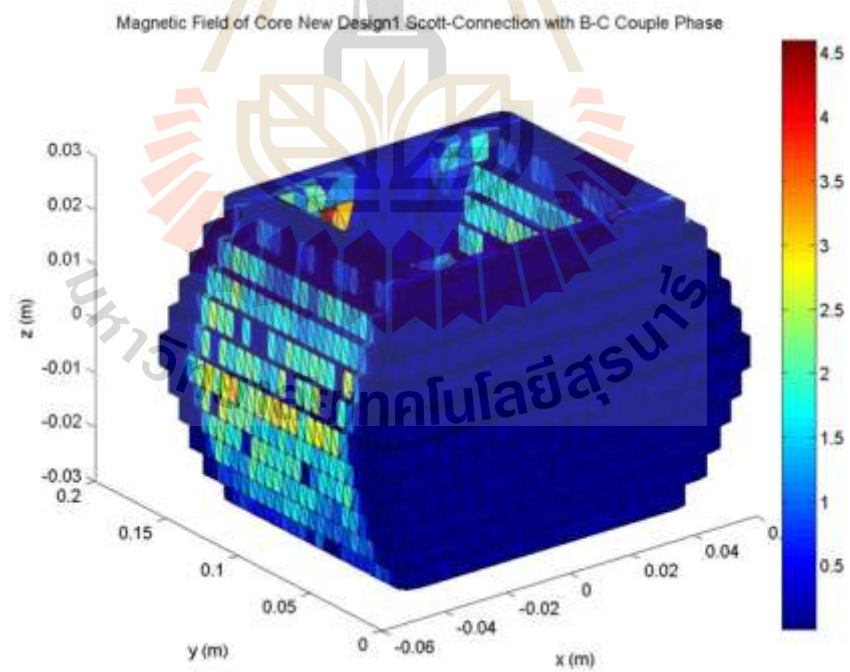


ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส B

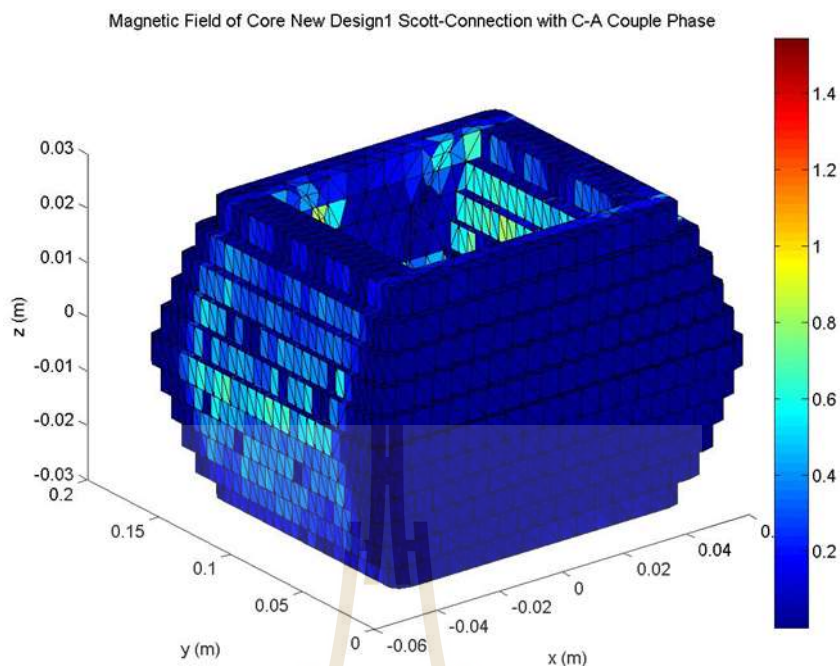
รูปที่ 7.7 การกระจายสนามแม่เหล็ก (Tesla) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่ 200% พิกัด



ก) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C



ข) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส A



ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส B

รูปที่ 7.8 การกระจายสนามแม่เหล็ก (Tesla) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่ 200% พิกัด

จากผลการจำลองในเชิงกราฟิกจะเห็นได้ว่า ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในขณะที่หม้อแปลงมีการจ่ายโหลดที่ 200% พิกัดจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อพิจารณาการกระจายตัวในแต่ละกรณีจะยังคงมีความไม่สมดุลเกิดขึ้นทั้งนี้เนื่องจากความไม่สมดุลของค่ากระแสฟลักซ์ แต่เมื่อพิจารณาตลอดช่วงการทำงาน 1 รอบจะส่งผลให้การกระจายตัวของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเกิดความสมดุลขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าสนามแม่เหล็กก็จะเป็นไปทำนองเดียวกันกับค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก แต่กระจายค่าสนามแม่เหล็กจะกระจายเข้าไปยังแกนกลางของแกนเหล็กมากกว่าบริเวณขอบรอบนอกของแกนเหล็ก สามารถแสดงผลในเชิงตัวเลขของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็ก ค่ากำลังสูญเสียได้ในกรณีที่จ่ายโหลดที่พิกัดและจ่ายโหลดที่ 200% พิกัดดังตารางที่ 7.6 และ ตารางที่ 7.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 7.6 ค่าศักย์เวกเตอร์เชิงแม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็กและค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อจ่ายโหลดที่พิกัด

ปริมาณ	แท่งกลางด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส		
	C	A	B
ศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กสูงสุด (wb/m)	6.3803×10^{-6}	6.4835×10^{-6}	2.4077×10^{-6}
สนามแม่เหล็กสูงสุด (Tesla)	2.5672	1.8606	0.6596
กำลังสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอรีซิส (kW)	98.8577	51.9275	6.5261
กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (kW)	26.3621	13.8473	1.7403
กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก(kW)	125.2198	65.7748	8.2664

ตารางที่ 7.7 ค่าศักย์เวกเตอร์เชิงแม่เหล็ก ค่าสนามแม่เหล็กและค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อจ่ายโหลดที่ 200% พิกัด

ปริมาณ	แท่งกลางด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส		
	C	A	B
ศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กสูงสุด (wb/m)	1.2875×10^{-5}	1.3122×10^{-5}	4.8729×10^{-6}
สนามแม่เหล็กสูงสุด (Tesla)	5.1798	3.7544	1.3412
กำลังสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอรีซิส (kW)	402.4549	211.4328	26.9823
กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (kW)	107.3213	56.3821	7.1953
กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก(kW)	509.7762	267.8149	34.1776

จากผลการคำนวณค่ากำลังสูญเสียในเชิงตัวเลขเมื่อหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ทำการจ่ายโหลดที่พิกัดและที่ 200%พิกัด จะเห็นได้ว่า ค่ากำลังสูญเสียจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นในทุกกรณีทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของโหลดส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิมีค่าสูงขึ้น จึงทำให้ค่าสนามแม่เหล็กสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อหม้อแปลงทำงานครบ 1 รอบการทำงานซึ่งประกอบด้วยการเทปหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟสลับเฟสกันได้แก่ เฟส C เฟส A และ เฟส B จะทำให้ผลรวมของกำลังสูญเสียในแกนเหล็กเมื่อเทียบกับพิกัดของกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่พิกัดและที่ 200%พิกัดคิดเป็น 2.99% และ 12.18% ตามลำดับ

7.3 การจำลองผลค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กเมื่อหม้อแปลงทำงานในสถานะจ่ายโหลดสูงสุด

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอผลการจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อหม้อแปลงทำงานในสถานะจ่ายโหลดสูงสุด เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วระบบรถไฟฟ้าจะเกิดสถานะจ่ายโหลดสูงสุดขึ้นในบางครั้งที่ผู้โดยสารมีปริมาณที่มากเกินไป ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้พิจารณาสถานะจ่ายโหลดที่เป็นโหลดสูงสุด โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้สถานะจ่ายโหลดสูงสุดคือสถานะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดมากกว่าค่าพิกัดเป็นจำนวน 4 เท่าและเป็นตำแหน่งสุดท้ายก่อนที่แกนเหล็กของหม้อแปลงจะเกิดสถานะอิ่มตัว โดยสามารถแสดงค่ากระแสโหลดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเมื่อมีการจ่ายโหลดสูงสุดที่ 400%ของพิกัดได้ดังตารางที่ 7.8

ตารางที่ 7.8 ผลการคำนวณ โหลดทางไฟฟ้าของหม้อแปลงที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสียที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์ในขณะที่หม้อแปลงจ่าย โหลดสูงสุดที่400%ของพิกัด

ขดลวด เหนี่ยวนำจาก เฟส	โหลดด้านทุติยภูมิ	หนึ่งเฟสชุดที่ 1	หนึ่งเฟสชุดที่ 2
C	กระแสเฟส (A)	1034.53-j259.86	-259.86-j1034.53
	แรงดันเฟส (V)	25000+j0	0+j25000
	กำลังไฟฟ้า (VA)	25863253.7-j6496400.3	25863253.7-j6496400.3
	เปอร์เซ็นต์โหลด (%)	400.00%	400.00%

ตารางที่ 7.8 ผลการคำนวณ โหลดทางไฟฟ้าของหม้อแปลงที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสียที่มีการ
เชื่อมต่อบีบสกอตต์ในขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดสูงสุดที่400%ของพิกัด (ต่อ)

ขดลวด เหนี่ยวนำจาก เฟส	โหลดด้านทุติยภูมิ	หนึ่งเฟสชุดที่ 1	หนึ่งเฟสชุดที่ 2
A	กระแสเฟส (A)	-1066.67+j1.862	809.89-j694.16
	แรงดันเฟส (V)	25000+j0	0+j25000
	กำลังไฟฟ้า (VA)	$-26.67 \times 10^6 + j46.54 \times 10^3$	$17.35 \times 10^6 + j20.25 \times 10^3$
	เปอร์เซ็นต์โหลด (%)	400.00%	400.00%

ตารางที่ 7.8 ผลการคำนวณ โหลดทางไฟฟ้าของหม้อแปลงที่มุ่งเน้นการลดกำลังสูญเสียที่มีการ
เชื่อมต่อบีบสกอตต์ในขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดสูงสุดที่400%ของพิกัด (ต่อ)

ขดลวด เหนี่ยวนำจาก เฟส	โหลดด้านทุติยภูมิ	หนึ่งเฟสชุดที่ 1	หนึ่งเฟสชุดที่ 2
B	กระแสเฟส (A)	-120.75-j1059.81	-1059.38+j124.45
	แรงดันเฟส (V)	25000+j0	0+j25000
	กำลังไฟฟ้า (VA)	$-3.02 \times 10^6 - j26.50 \times 10^6$	$-3.11 \times 10^6 - j26.48 \times 10^6$
	เปอร์เซ็นต์โหลด (%)	400.00%	400.00%

โดยจะพิจารณาการกระจายของสัทธิเชิงแม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กที่อยู่ใน
สภาวะคงตัว ซึ่งสามารถแสดงผลการจำลองได้ดังนี้

กระจายสัทธิเชิงแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส C
เมื่อพิจารณาขดลวดและแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.9 (ก)

กระจายสัทธิเชิงแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส A
เมื่อพิจารณาขดลวดและแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.9 (ข)

กระจายสัทธิเชิงแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส B
เมื่อพิจารณาขดลวดและแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.9 (ค)

กระจายสัทธิเชิงแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส C
เมื่อพิจารณาเฉพาะแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.10 (ก)

กระจายศักย์แวกเตอร์เชิงแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส A เมื่อพิจารณาเฉพาะแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.10 (ข)

กระจายศักย์แวกเตอร์เชิงแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส B เมื่อพิจารณาเฉพาะแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.10 (ค)

กระจายสนามแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส C เมื่อพิจารณาขดลวดและแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.11 (ก)

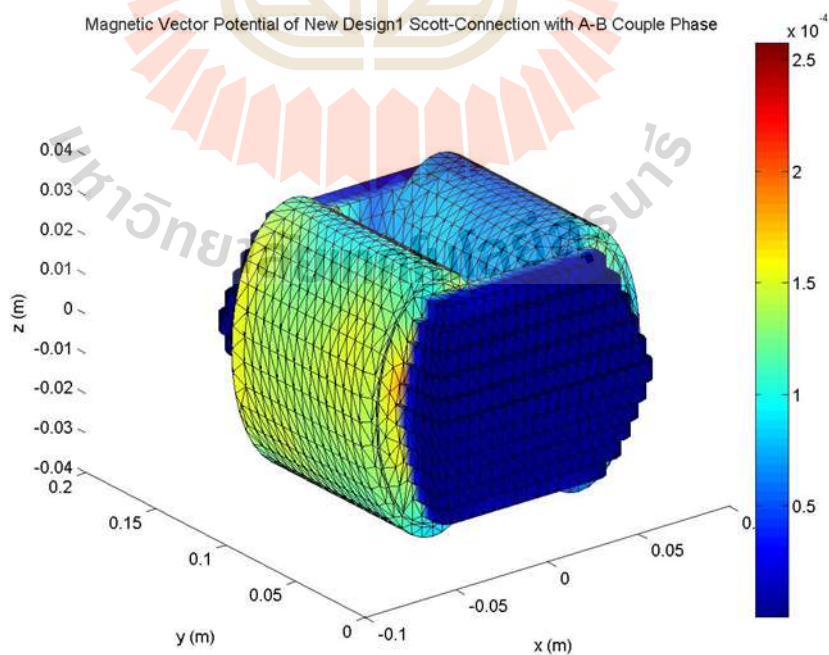
กระจายสนามแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส A เมื่อพิจารณาขดลวดและแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.11 (ข)

กระจายสนามแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส B เมื่อพิจารณาขดลวดและแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.11 (ค)

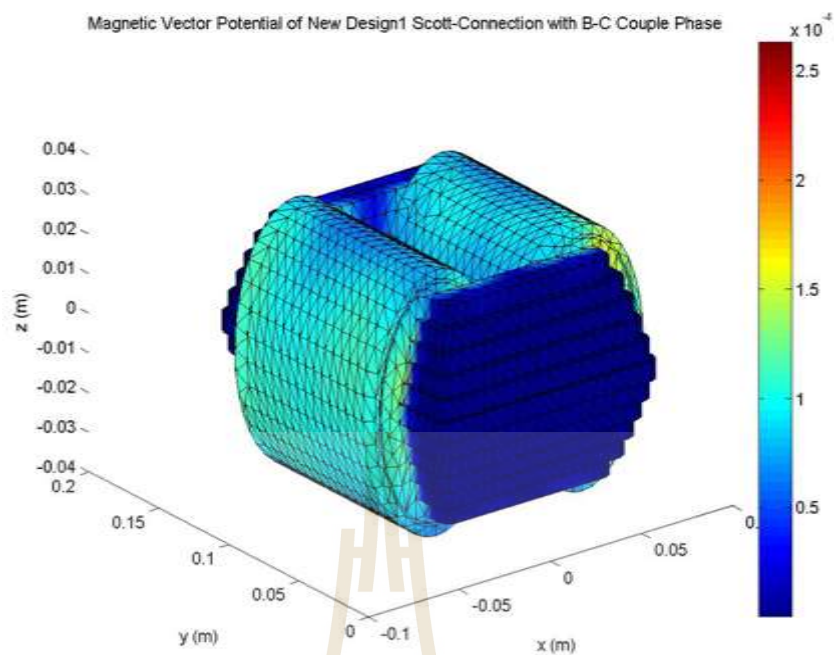
กระจายสนามแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส C เมื่อพิจารณาเฉพาะแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.12 (ก)

กระจายสนามแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส A เมื่อพิจารณาเฉพาะแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.12 (ข)

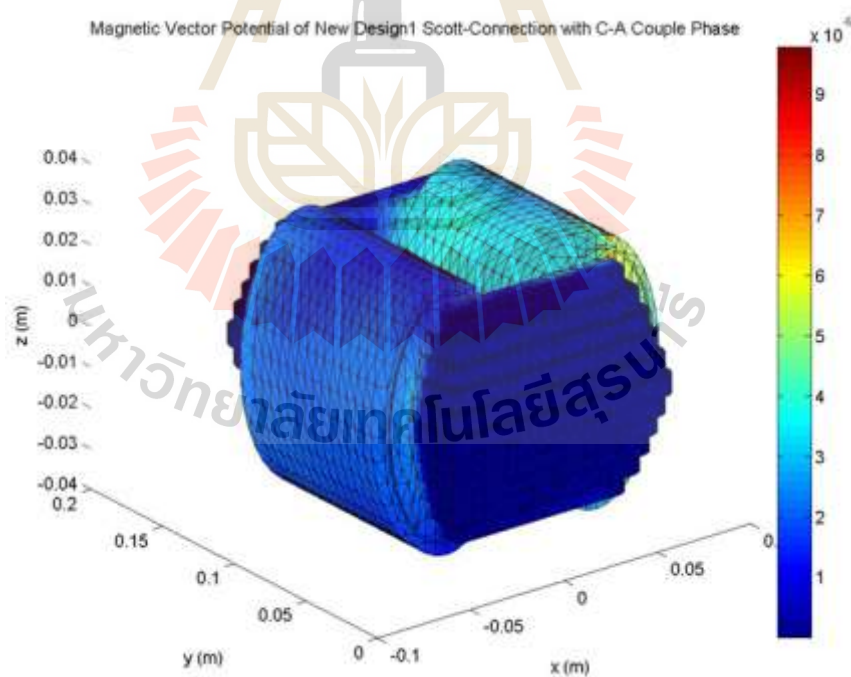
กระจายสนามแม่เหล็กเมื่อแท่งกลางของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิรับไฟจากเฟส B เมื่อพิจารณาเฉพาะแกนเหล็กจะได้ดังรูปที่ 7.12 (ค)



ก) แท่งกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C

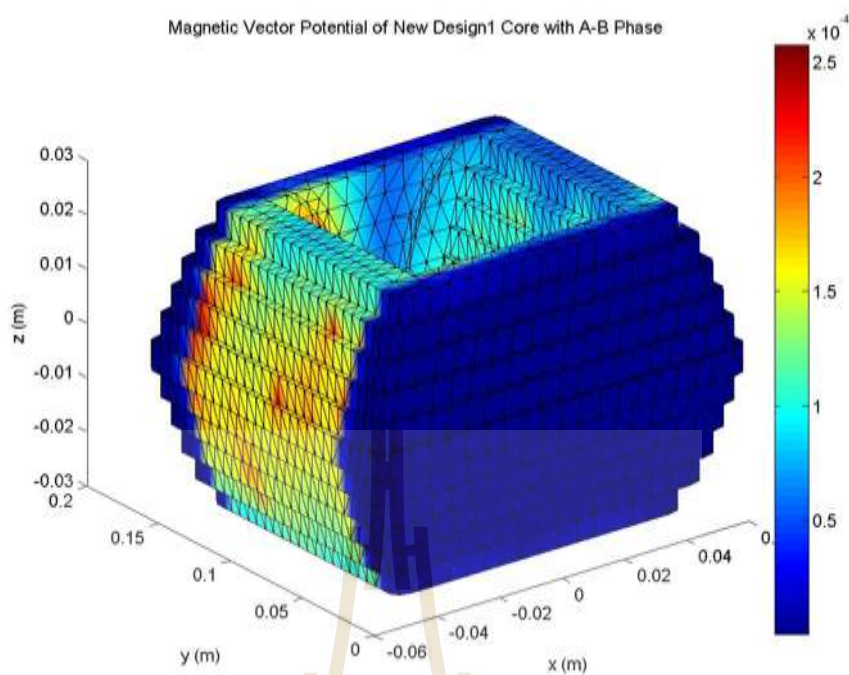


ข) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส A

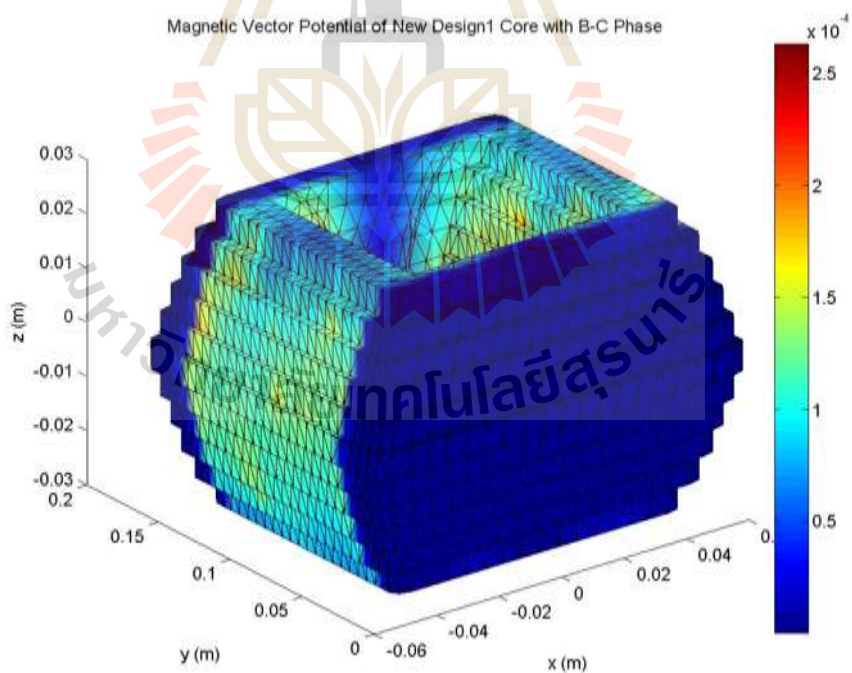


ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส B

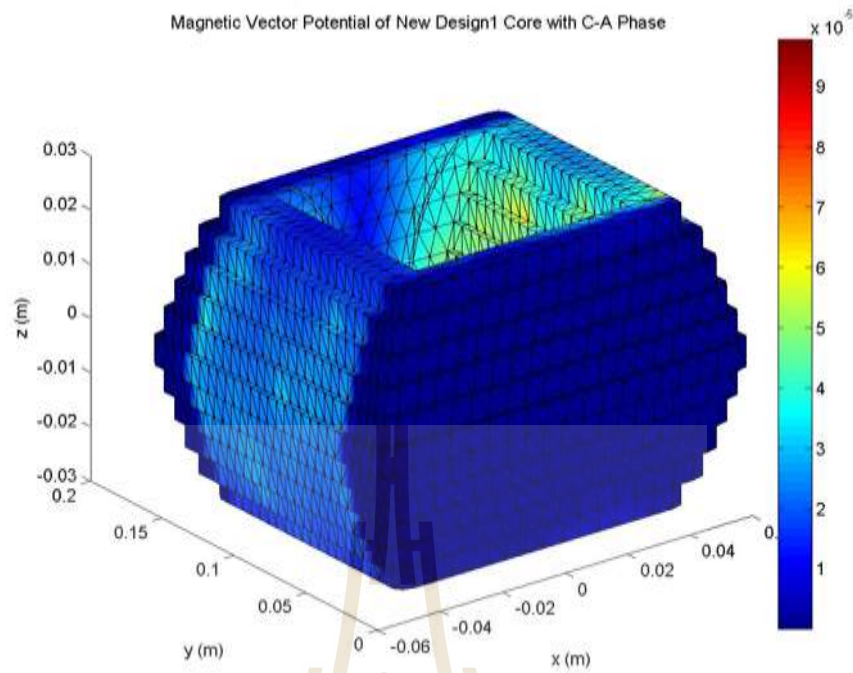
รูปที่ 7.9 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อทำงานในสภาวะจ่ายโหลดสูงสุด



ก) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C

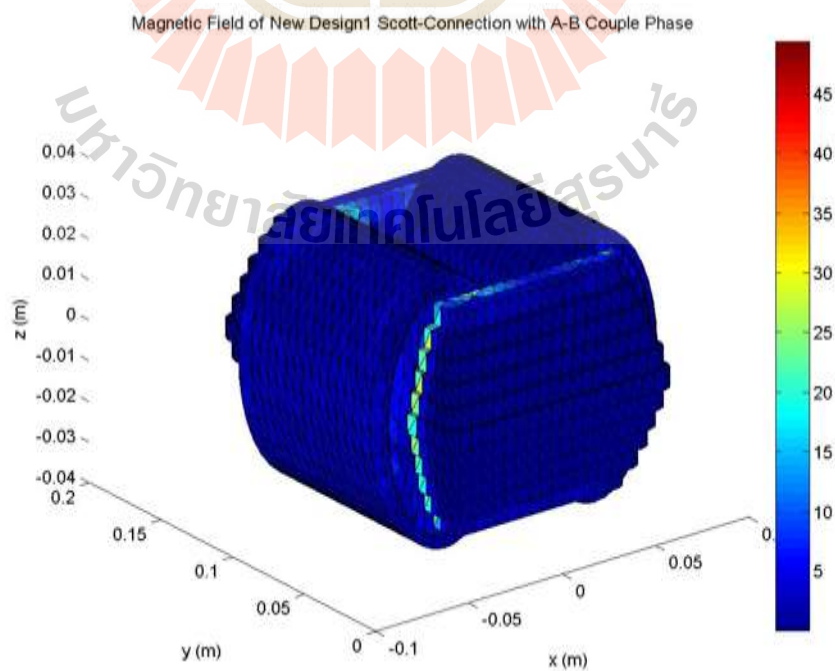


ข) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส A

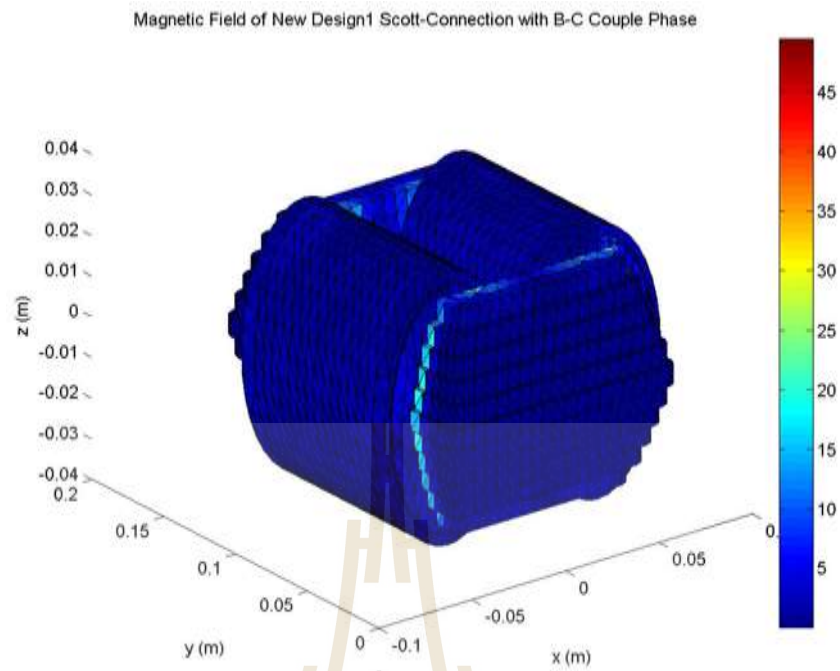


ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส B

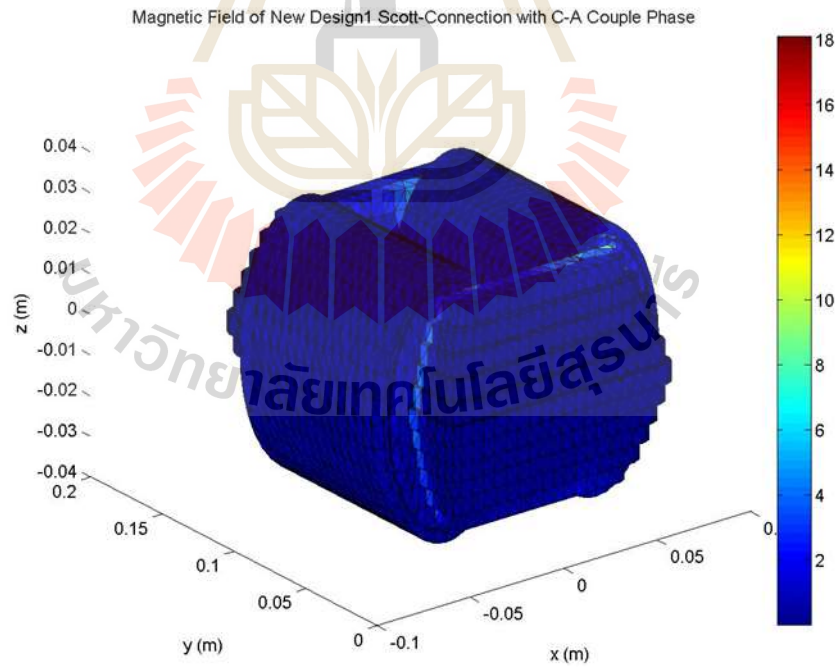
รูปที่ 7.10 การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (wb/m) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อทำงานในสภาวะจ่ายโหลดสูงสุด



ก) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C

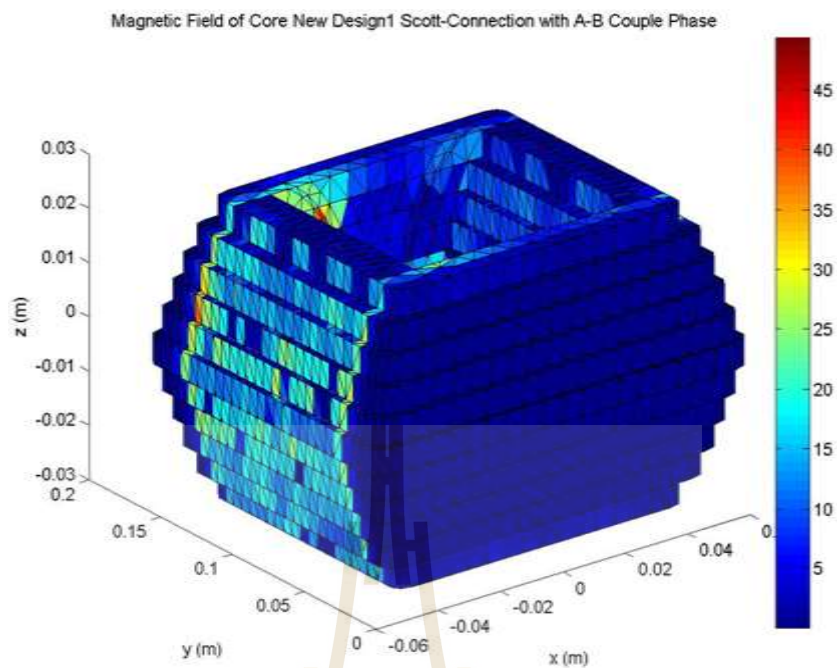


ข) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส A

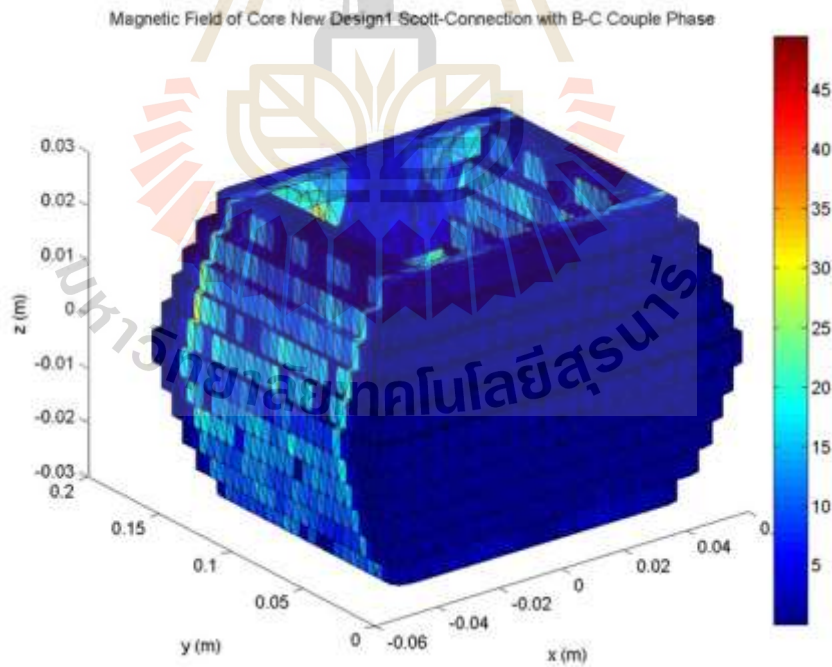


ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส B

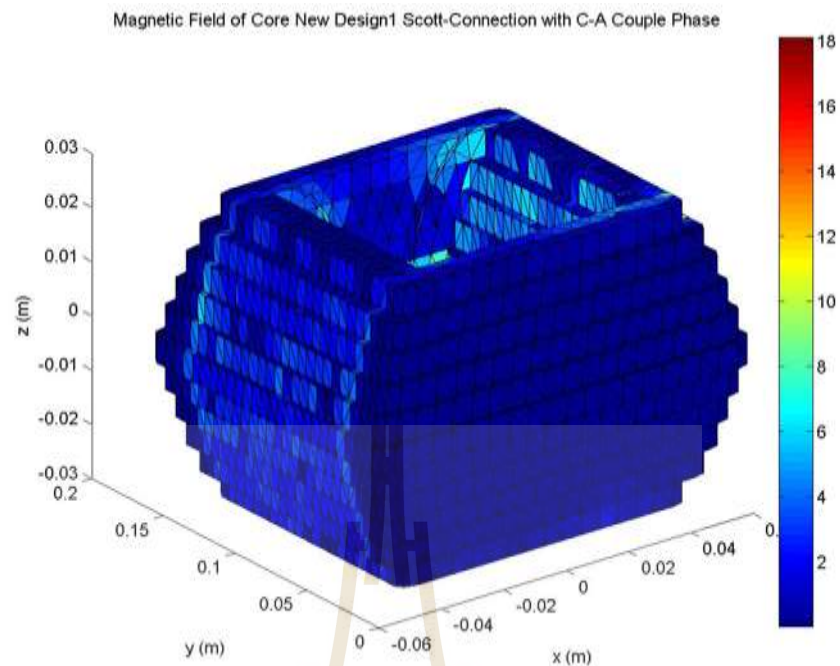
รูปที่ 7.11 การกระจายสนามแม่เหล็ก (Tesla) ที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อทำงานในสภาวะจ่ายโหลดสูงสุด



ก) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส C



ข) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส A



ค) แท้ปกลางด้านปฐมภูมิรับกำลังไฟฟ้าจากเฟส B

รูปที่ 7.12 การกระจายสนามแม่เหล็ก (Tesla) ที่บริเวณแกนเหล็กของหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อทำงานในสภาวะจ่ายโหลดสูงสุด

จากผลการจำลองเมื่อหม้อแปลงทำงานในสภาวะจ่ายโหลดสูงสุดจะส่งผลให้ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กกระจายตัวไม่สม่ำเสมอตามแกนเหล็กและมีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับการทำงานในสภาวะจ่ายโหลดที่ปกติ ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะที่จ่ายโหลดสูงสุดนั้นคุณสมบัติของแกนเหล็กเกิดการอิ่มตัว จึงทำให้การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางไม่แน่นอนทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอ และเมื่อพิจารณาการกระจายของค่าสนามแม่เหล็กก็เป็นไปในทำนองเดียวกันกับศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก โดยที่สามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กในกรณีที่หม้อแปลงทำงานในสภาวะจ่ายโหลดสูงสุดได้ดังตารางที่ 7.9

ตารางที่ 7.9 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงสำหรับการเชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อทำงานอยู่ในสภาวะจ่ายโหลดสูงสุด

ปริมาณ	จุดที่ปกกลางของขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับเฟส		
	C	A	B
ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กสูงสุด (w/m)	2.5722×10^{-4}	2.6286×10^{-4}	9.7573×10^{-5}
สนามแม่เหล็กสูงสุด (T)	44.9860	34.4768	12.5247
กำลังงานสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (MW)	30.3561	17.8297	2.3530
กำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (MW)	8.0950	4.7546	0.6275
กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (MW)	38.4511	22.5843	2.9805

จากผลการจำลองในเชิงตัวเลขเมื่อหม้อแปลงทำงานที่สภาวะจ่ายโหลดสูงสุดนั้น จะทำให้การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเกิดความไม่สม่ำเสมอขึ้นตลอดทั้งแกนเหล็ก และในทำนองเดียวกันกับค่าสนามแม่เหล็กก็จะไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากผลของการอิ่มตัวในแกนเหล็ก

7.4 สรุป

ในบทที่ 7 นี้ ได้ดำเนินการจำลองผลและวิเคราะห์ผลการจำลองของหม้อแปลงที่เชื่อมต่อแบบสกอตต์เมื่อหม้อแปลงได้รับการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กด้วยวิธีการตัดมุมโค้งด้วยรัศมีความโค้ง 5mm ในขณะที่หม้อแปลงทำการจ่ายโหลดที่พิกัดจ่ายโหลดที่ 200% ของพิกัด และจ่ายโหลดสูงสุดโดยผลที่ได้ในเชิงกราฟิกจะเห็นได้ว่าการกระจายค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและการกระจายสนามแม่เหล็กจะเกิดความไม่สม่ำเสมอขึ้นภายในแกนเหล็กเมื่อมีการจ่ายโหลดในสภาวะสูงสุด และส่งผลให้ค่าสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอขึ้นและเป็นสาเหตุที่ทำให้สัญญาณแรงดันและกระแสผิดเพี้ยน

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย และการจำลองผลค่าสนามแม่เหล็กและการคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษทั้งสิ้น 3 รูปแบบคือ แบบวี แบบสกอตต์และแบบเลอบลองก์ที่ใช้ในระบบรถไฟ เพื่อนำเสนอวิธีการออกแบบโดยพิจารณาจากการตัดมุม โค้งของแผ่นเหล็กควบคู่กับการเรียงแผ่นเหล็กไม่ให้เป็นมุมฉาก การออกแบบโดยสร้างแกนเหล็กให้เป็นแกนโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกน และการออกแบบโดยการเพิ่มสารแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กแบบอ่อน ซึ่งการจำลองผลจะพิจารณาในขณะที่หม้อแปลงมีการทำงานครบ 1 รอบการทำงาน การจำลองผลอาศัยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม MATLAB ที่พัฒนาขึ้นเอง พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมให้เป็นที่น่าเชื่อถือ

การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ถือเป็นรากฐานที่สำคัญในการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ในงานวิจัย การศึกษาทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในบทที่ 3 ศึกษาทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทั้งเรื่องหม้อแปลงไฟฟ้า ระบบรถไฟความเร็วสูง การเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบพิเศษ ทฤษฎีกำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้า และระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ต่างได้ถูกนำมาใช้เป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในการดำเนินงานวิจัย ส่วนการดำเนินงานในบทที่ 4 เป็นขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง และอธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยได้เลือกใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตค่างของกาลเลอร์กิน ในบทที่ 5 ได้อธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลพร้อมนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าสนามแม่เหล็กและกำลังสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบพิเศษที่ได้เน้นการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก โดยกระบวนการสร้างกริดแบบ 3 มิติได้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Solid Work ในการสร้างกริด พร้อมทั้งแสดงภาพทางกราฟิกแสดงผลการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก และผลการคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียภายในแกนเหล็กของหม้อแปลง ในบทที่ 6 ได้อธิบายถึง

ขั้นตอนการออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กของหม้อแปลงเพื่อลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก โดยพิจารณาจากการตัดมุมโค้งของแกนเหล็กและการจัดเรียงแผ่นเหล็กไม่ให้เกิดเป็นมุมฉากบริเวณรอยต่อของแผ่นเหล็ก การออกแบบโดยสร้างแกนเหล็กให้เป็นแกนโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกน และการออกแบบโดยการเพิ่มสารแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กแบบอ่อน พร้อมทั้งนำเสนอผลการจำลองการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และผลการคำนวณกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก รวมถึงพิจารณาคุณลักษณะของแกนเหล็กหลังจากที่มีการออกแบบรูปร่างใหม่ พบว่า คุณลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็กจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของสนามแม่เหล็ก สำหรับค่าปริมาตรของแกนเหล็กและค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็กนั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือประมาณได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง และเมื่อพิจารณาการออกแบบแกนเหล็กทั้ง 3 รูปแบบจะเห็นว่า การออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กด้วยวิธีการสร้างแกนเหล็กให้เป็นแกนโค้งบริเวณที่ไม่สัมผัสกับขดลวดตัวนำตลอดแนวแกนจะเป็นวิธีการออกแบบที่ทำให้ค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าน้อยที่สุด รวมทั้งรูปแบบการเชื่อมต่อของหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อแบบสกอตต์จะเป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าน้อยที่สุดและ ในบทที่ 7 ได้อธิบายถึงผลการจำลองค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กหลังจากที่แกนเหล็กได้รับการออกแบบรูปร่างแกนเหล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก โดยการพิจารณาในสภาวะที่หม้อแปลงมีการจ่ายโหลดที่พิกัด 200% พิกัดและที่สภาวะที่มีการจ่ายโหลดสูงสุดซึ่งผลการจำลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าหม้อแปลงที่ได้รับการออกแบบรูปร่างแกนเหล็กเพื่อลดกำลังการสูญเสียสามารถจ่ายโหลดได้ทั้งสภาวะโหลดที่พิกัด 200% พิกัด และสภาวะจ่ายโหลดสูงสุด

8.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต

1. การออกแบบรูปร่างของแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่อแบบพิเศษที่ใช้ในงานในระบบรถไฟฟ้าเมื่อแกนเหล็กของหม้อแปลงทำงานในสภาวะไม่เป็นเชิงเส้น
2. การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่อแบบพิเศษที่เน้นลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กควบคู่กับลดกำลังสูญเสียในขดลวดเพื่อให้ได้กำลังสูญเสียน้อยที่สุด

รายการอ้างอิง

- เฉลิมพล น้ำค้าง. (2538). **ทฤษฎีสถนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก** (พิมพ์ครั้งที่4). กรุงเทพฯ: ศูนย์ส่งเสริมกรุงเทพ.
- ชวลิต ดำรงรัตน์. (2533). **การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า**. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- ชัยรัตน์ วิเชียรมงคลกุล. (2544). **การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากรอบตัวนำบางโดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับวิธีบาวนด์อีลีเมนต์**. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- นวพงศ์ นุดาดี. (2556). **การวิเคราะห์แรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงระบบจำหน่ายจากการเกิดลัดวงจรภายนอก**. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี.
- นิรันดร์ คำประเสริฐ. (2545). **วิศวกรรมแม่เหล็กและวิศวกรรมไมโครเวฟ เล่ม2**. (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพมหานคร: ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ.
- ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2557). **การจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน**. เอกสารประกอบการสอน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2557). **แบบจำลองและการจำลองผลระบบการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าหลายขบวน**. เอกสารประกอบการสอน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2557). **ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรางรถไฟสายหลัก**. เอกสารประกอบการสอน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- รัชชัย นัยสถิต และวีริยะ พิเชฐจำเริญ. (2551). **การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า 50-kHz โดยใช้วิธีผลคูณพื้นที่**. วิศวกรรมลาดกระบัง. 25(2): 31-37.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2547). **ไฟไนต์อีลีเมนต์ในงานวิศวกรรม** (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2549). **ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม** (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เวकिन ปียรัตน์. (2542). **เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1**. กรุงเทพฯ: วีเจ พรินติ้ง.
- ไชยชาญ หินเกิด. (2545). **เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1**. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

- ไชยชาญ หินเกิด. (2559). เครื่องกลไฟฟ้าเบื้องต้น. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- Alan, Z., Ana, T. and Bozidar, F. (2013). Modeling of 25kV Electric Railway System for Power Quality Studies. **IEEE Euro Conference**: 844-849.
- Ammar, M., Ibrahim, M. and Ahmed, H. (2018). The Power Quality issues Due To connecting an Electric Train To a Power Supply System Through V/V Transformer. **International Conference on Computer, Control, Electrical and Electronics Engineering**: 978-983.
- Atabak, N., Ires, I. and Naci, G. (2014). Evaluating and Derating of Three-Phase Distribution Transformer under Unbalanced Voltage and Unbalance Load Using Finite Element Method. **International Power Engineering and Optimization Conference**: 160-165
- Basak, A. and Higgs, C.R.G. (1982). Flux distribution in three phase transformer core with various T-joint geometries. **IEEE Transactions on Magnetic**. 18 (2): 670-673.
- Chiampi, M., Negro A.L. and Tartaglia, M. (1980). A finite element method to compute three dimensional magnetic field distribution in transformer cores. **IEEE Transactions on Magnetic**. 16 (6): 1413-1419.
- Chien-Hsing Lee (2005). Evaluation of the maximum potential rise in Taipei rail transit systems. Power Delivery, **IEEE Transactions**, Vol. 20, Issue 2, Part 2, pp. 1379-1384.
- Ed, G.T., Gunter, F.M. and Ramsis, S.G. (2000). Flux Distribution and Core Loss Calculation for Single Phase and Five Limb Three Phase Transformer Core Designs. **IEEE Transactions on Power delivery**. 15(1): 204-209.
- Eric Weisstein. (1999). **Neumann Boundary Conditions**. A Wolfram Mathworld.
- Friedemann, L., Helmut, P. and Thomas, B. (1994). Influence of Air Gaps in Stacked Transformer Cores Consisting of Several Packages. **IEEE Transactions on magnetics**. 30(2): 913-915.
- Gunther, F. M. and Ramsis S.G. (2000). Magnetic Flux Distributions in Transformer Core Joints. **IEEE Transactions on Power delivery**. 15(1): 198-203.
- Hernandez, I., Leon, D.F., Canedo, J.M. and Olivares, J.C. (2010). Modelling transformer core joints using Gaussian models for the magnetic flux density and permeability. **IET Electric Power Applications**. 4(9): 761-771.

- Jansak, L., Zizek, F., Jelinek, Z., Timoransky, Z., Piel, H. and Polak, M. (2003). Loss Analysis of a Model Transformer Winding. **IEEE Transactions on applied superconductivity**. 13(2): 2352-2355.
- Jasmin, S., Giorgio, D. P., Christoph, S., Wolfgang, M. and Martin, C. (2015). Numerical Study of the Core Saturation Influence on the Winding Losses of Traction Transformers. **IEEE Transactions on magnetics**. 51(3): 1-8.
- Juan, C.O., Eduardo, C.L., Jose, L.H. and Rafael, E.P. (2012). Evaluation of Stray Losses in Throats of Distribution Transformers Using Finite Element Simulation. **Andean Region International Conference**: 7-10.
- Juan, C.O., Yilu, L., Jose, M., Rafael, E.P., Johan, D. and Pablo, M. (2003). Reducing Losses in distribution Transformers. **IEEE Transactions on Power delivery**: 18(3): 821-826.
- Kawase, Y., Mori, T. and Ota, T. (1998). Magnetic field analysis of coupling transformers for electric vehicle using 3-D finite element method. **IEEE Transactions on Magnetic**. 34 (5): 3186-3189.
- Keiichiro, K., Kohei, Y. and Satochi, K. (2014). Contactless High Power Transformer Technologies for Railway Vehicles. **The 2014 IEEE International Power Electronics Conference**: 1438-1443.
- Khan, S.H., El-Shawish, J.M., Finkelstein, L. and Grattan T.V. (2001). Finite element modeling of saturation and eddy current effects in commercial variable transformer. **IEEE Transactions on Magnetic**. 37 (4): 2783-2786.
- Lin, L., Xiang, C., Yuanlu, Z., Zhiguang, C., Guoqiang, Z. and Yinhan, Z. (1998). Losses calculation in transformer tie plate using the finite element method. **IEEE Transactions on Magnetic**. 34 (5): 3644-3647.
- Mansel, A.J., Anthony, J.M. and John, E.T. (1973). Flux Distribution and Power Loss in the Mitered Overlap Joint in Power Transformer Core. **IEEE Transactions on magnetics**. 9(2): 114-122.
- Marina, A., Antonios, G., Pavlos, S., Athanassios, T. and Dimitrios, G. (2004). Wound Core Power Transformer Design: Classical Methodology and Advanced Magnetic Field Analysis Techniques. **Advanced Research Workshop on Modern Transformer**. 23-28.

- Martinez, C., Lazaro, A., Lucena, C., Quesada, I., Zumel, P. and Barrado, A. (2013). Improved Modulator for Losses Reduction in Auxiliary Railway Power Supplies. **IEEE Trans on Ind.** 2324-2331.
- Mihail, D., Krste, N. and Goran, R. (2013). Prediction of Core Losses of Three-Phase Distribution Transformer. **Journal of Energy and Power Engineering.** 7(1): 2347-2353.
- Min, C., Yunjia, J.Y., Liye, Y.X., Qiuliang, L.W., Wooho, C., Keeman, K. and Sungkeun, B. (2003). Magnetic Field Analysis of HTS Transformer Windings with High Currents. **IEEE Transactions on applied superconductivity.** 13(2): 2302-2305.
- Nakata, T., Takahashi, N., Fujiwara, K. and Sakaguchi, M. (1988). 3-D Magnetic field analysis of corner joints of a transformer core using finite element method. **IEEE Transactions Journal on Magnetic in Japan.** 3 (10): 706-708.
- Omid, S. and Amir, H.S. (2008). Comparative Analysis of Dry Transformers Thermal Design by Applying Finite Element Method. **Proceeding of the International Conference on Electrical Machines.** 1-5
- Park, M., Choi, M., Hahn, S., Cha G. and Lee J. (2004). Effect of the stack in HTS tapes exposed to external magnetic field. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity.** 14 (2): 1106-1109.
- Pern, J.F. and Yeh, S.N. (1995). Calculating the current distribution in power transformer windings using finite element analysis with circuit constraints. **IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.** 142 (3): 231-236.
- Phillip, M., Anthony, J. M. and Jeremy, P. H. (2010). Effect of DC Voltage on AC Magnetisation of transformer core steel. **Journal of Electrical Engineering.** 16(7): 123-125.
- Qiang, F., Jiaojia, Z., Zhi-Hong, M., Guixin, Z. and Tefang, C. (2018). Online Condition Monitoring of Onboard Traction Transformer Core Based on Core-Loss Calculation Model. **IEEE Transactions on industrial electronics.** 65(4):3499-3508.
- Qian, S., Hu, H., Xu, J. and Shao, Y. (2009). Three-dimensional Temperature field Modelling of Large Transformer using Finite Element Method. **ICROS-SICE International Joint Conference:** 1594-1598.

- Ramiss, S.G. and Ed, G.T. (1998). Experimental Investigations On Effect Of Core Production Attributes On Transformer Core Loss Performance. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 13(2):526-531.
- Salon, S.J. (1995). **Finite element analysis of electrical machines**. USA: Kluwer Academic Publishers.
- Saraiva, E., Chaves, M.L.R. and Camacho J.R. (2008). Three-phase transformer representation using FEMM, and methodology for air gap calculation. **IEEE Proceedings International Conference on Electrical Machines**. 1-6.
- Schmidt, E., Schoberl, J. and Hamberger P. (2005). Nested multigrid finite element analyses of eddy current losses in power transformers. **IEEE Proceedings International Conference on Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics**. 674-677.
- Seyed Ali Mousavi. (2015). **Electromagnetic Modelling of Power Transformers for Study and Mitigation of Effects of GICs**. Doctoral Thesis. School of Electrical Engineering Division of Electromagnetic Engineering Royal Institute of Technology. Stockholm. Sweden.
- Sim, J., Cha, G., Lee, Y.W., Hahn, S.Y., Lee, J.K. and Choi, K.D. (2000). Performance evaluation of an HTS transformer using finite element method. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**. 10 (1): 857-860.
- Shirkoochi, G. and Jenkins, A. (2017). Computation of Rectifier Transformers employed in Railway Networks. **IEEE International Conference on Industrial Technologies**. 1-6.
- Taheri, Sh., Vahedi, A., Gholami, A. and Taheri, H. (2008). Estimation of hot spot temperature in distribution transformer considering core design using FEM. **IEEE International Conference on Power and Energy**. 1408-1413.
- Timko, M., Kopcansky, P., Molcan, M., Tomco, L., Marton, K., Molokac, S., Rybar, P., Stoian, F., Holotescu, S. and Taculescu, A. (2011). Magnetodielectric Properties of Transformer Oil Based Magnetic Fluids. **Proceedings of the European Conference Physics of Magnetism**: 121(5-6): 1253-1256.
- Xiao, Y., Anthony, M., Juan, S. and Fatih, A. (2007). Influence of Switching Frequency on Eddy-Current Losses in a Three-Phase, Three-Limb Transformer Core Subjected to PWM Voltage Excitation. **IEEE Power Engineering**: 324-329.

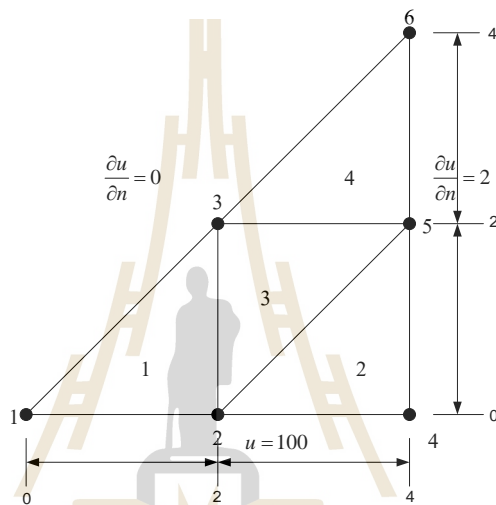
- Xiaosong, L., Qiaofu, C., Jianbo, S., Yu, Z. and Guzong, L. (2005). Analysis of Magnetic Field and Circulating Current for HTS Transformer Windings. **IEEE Transactions on applied superconductivity**. 15(3): 3808-3813.
- Yamada, S., Biringer, P.P., Hirano, K. and Bessho, K. (1990). Finite element analysis of nonlinear dynamic magnetic field with DC component in the harmonic domain. **IEEE Transactions on Magnetic**. 26 (5): 2199-2201.
- Yan, L., Longnv, L., Yongteng, J. and Fangxu, H. (2013). Research on Numerical Simulation of 3D Leakage Magnetic Field and Short-circuit Impedance of Axial Dual-low-voltage Split-winding Transformer. **Energy and Power Engineering**. 1093-1096.
- Yeong-Hwa, C., Chang-Hung, H. and Ching-Pei, T. (2010). Magnetic Properties Improvement of Amorphous Cores Using Newly Developed Step-Lap Joints. **IEEE Transactions on magnetics**. 46(6): 1791-1794.
- Zeng, L. and Xing, W. (2013). Research on Loss of Traction Transformer Leakage Magnetic Field. **4th International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications**: 484.
- Zhang, Y., Du, Y., Zhang, R. and Shi, L. (2012). Study on a novel flat winding transformer with sandwich construction magnet core in CPS system for high speed transportation. **IEEE International Conference on Electrical Machine and System**. 1-4.
- Zhao, Y., Du, Y., Cai, H., Zhang, R. and Shi, L. (2014). Study on Performance of Multi-Secondary Movable Loosely Coupled Transformer for Contactless Power Transfer System. **IEEE Conference and Expo on Transportation Electrification Asia-Pacific**. 1-4.



ภาคผนวก ก

การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต

การประยุกต์เงื่อนไขค่าขอบเขตเป็นส่วนสำคัญอีกอย่างหนึ่งในขั้นตอนการจำลองผล ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการประยุกต์ใช้เงื่อนไขค่าขอบเขตอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตแบบนอยมันน์ (Neumann) และการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตแบบดิริคเลต (Dirichlet) ซึ่งจะทำให้การยกตัวอย่างระบบขนาดเล็กเพื่อให้เห็นภาพการประยุกต์เงื่อนไขค่าขอบเขตทั้ง 2 แบบ โดยสามารถแสดงกริดของปัญหา รวมทั้งการระบุขอบเขตของปัญหาทั้งแบบนอยมันน์และดิริคเลตได้ดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ตัวอย่างปัญหาสำหรับประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต

กำหนดให้เมทริกซ์ $[K_{sys}]$ ของสมการเชิงเส้นระบบรวม $[K_{sys}]\{u\} = \{f_{sys}\}$ เป็นดังสมการที่ (ก.1)

$$[K_{sys}] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 5 & 2 & 1 & 3 & 4 & 6 \\ 6 & 5 & 3 & 2 & 1 & 4 \\ 4 & 2 & 3 & 6 & 5 & 1 \\ 2 & 3 & 4 & 1 & 6 & 5 \\ 3 & 6 & 5 & 2 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (ก.1)$$

กำหนดให้โหนดเวกเตอร์แต่ละอิลลิเมนต์เมื่ออิลลิเมนต์นั้นไม่มีขอบใดเป็นขอบเขตของปัญหาแสดงได้ดังสมการที่ (ก.2) และเมื่ออิลลิเมนต์นั้นมีขอบเป็นขอบเขตของปัญหาแสดงได้ดังสมการที่ (ก.3)

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

$$\{f^{(e)}\} = \frac{Qh_{mn}d\Delta_e}{3} \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} \quad (\text{ก.3})$$

โดยที่ Q คือ ค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งในที่นี้สมมติให้มีค่าเท่ากับ 1
 h_{mn} คือ ระยะห่างระหว่าง โหนด m และ n
 d คือ ค่าเงื่อนไขขอบเขตแบบนอยมันน์
 Δ_e คือ พื้นที่ประจำอิลลิเมนต์
 i, j, k คือ ค่าประจำโหนดของแต่ละอิลลิเมนต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อโหนดนั้นเป็นโหนดที่ติดกับขอบแบบนอยมันน์ที่พิจารณาและมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่ติดกับขอบนอยมันน์

เนื่องจากการกำหนดเงื่อนไขแบบนอยมันน์จะมีความสัมพันธ์กับโหนดเวกเตอร์แต่ละอิลลิเมนต์โดยตรง ดังนั้นจึงต้องทำการกำหนดเงื่อนไขแบบนอยมันน์ในแต่ละอิลลิเมนต์ก่อนที่จะทำการสร้างสมการโหนดเวกเตอร์ระบบรวมแล้วจึงกำหนดเงื่อนไขแบบคิริเคิลเพื่อทำการแก้ระบบสมการเชิงเส้นต่อไป

การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตแบบนอยมันน์

การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตแบบนอยมันน์จะกระทำกับอิลลิเมนต์ที่อยู่บริเวณขอบของเงื่อนไขซึ่งจากรูปที่ ก.1 ประกอบกับจากสมการที่ (ก.2) และ (ก.3) เมื่อพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตแบบนอยมันน์สามารถเขียนเป็นสมการโหนดเวกเตอร์แต่ละอิลลิเมนต์ได้ดังนี้ (เมื่อสมมติให้ $Q = 1$)

$$\{f^{(1)}\} = \frac{(2\sqrt{2})(0)(2)}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\{f^{(2)}\} = \frac{(2)(2)(2)}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.67 \\ 2.67 \end{bmatrix}$$

$$\{f^{(3)}\} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.67 \\ 0.67 \\ 0.67 \end{bmatrix}$$

$$\{f^{(4)}\} = \frac{(2)(2)(2)}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{(2\sqrt{2})(0)(2)}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.67 \\ 2.67 \end{bmatrix}$$

จากโหลดเวกเตอร์แต่ละอิเลเมนต์สามารถเขียนเป็น โหลดเวกเตอร์ระบบรวม ได้ดังนี้

$$\{f_{\text{sys}}\} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.67 \\ 0.67 \\ 2.67 \\ 6.01 \\ 2.67 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นจะได้สมการระบบรวมสำหรับปัญหาในรูปที่ ก.1 ดังสมการที่ (ก.4)

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 5 & 2 & 1 & 3 & 4 & 6 \\ 6 & 5 & 3 & 2 & 1 & 4 \\ 4 & 2 & 3 & 6 & 5 & 1 \\ 2 & 3 & 4 & 1 & 6 & 5 \\ 3 & 6 & 5 & 2 & 4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.67 \\ 0.67 \\ 2.67 \\ 6.01 \\ 2.67 \end{bmatrix}$$

(ก.4)

การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตแบบดิริเคิล

หลังจากได้สมการระบบรวมดังสมการที่ (ก.4) แล้ว จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบดิริเคิล โดยจากรูปที่ ก.1 ทราบค่าคำตอบที่โนด 1, 2 และ 4 มีค่าเป็น 100 ดังนั้นเมื่อทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตแบบดิริเคิลจึงได้ดังสมการที่ (ก.5)

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 6 & 5 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100 \\ 100 \\ 0.67 - 6(100) - 5(100) - 2(100) \\ 100 \\ 6.01 - 2(100) - 3(100) - 1(100) \\ 2.67 - 3(100) - 6(100) - 2(100) \end{bmatrix} \quad (\text{ก.5})$$

จากสมการที่ (ก.5) สามารถนำไปแก้สมการเชิงเส้นเพื่อหาผลเฉลยได้ในขั้นตอนถัดไป



ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

- A. Isaramongkolrak, P. Pao-la-or (2016). Influence of the Gap Insertion Patterns in Core Transformer Effecting to Magnetic Field using Finite Element Method. **Asia-Pacific Conference on Engineering and Applied Science**. 25-27 August 2016, Tokyo, Japan. pp. 573-575.
- P. Pao-la-or, A. Isaramongkolrak (2019). New design and magnetic field analysis of transformer shape with V-connection for core loss reduction in railway system. **International Review on Modelling and Simulations** . Vol. 12, No. 1, pp.56-65.
- P. Pao-la-or, A. Isaramongkolrak (2018). Magnetic vector potential analysis for new design of transformer shape with V-connection in railway system. **International Journal of Smart Grid and Clean Energy** . Vol. 8, No. 6.

APCEAS-687

Influence of the Gap Insertion Patterns in Core Transformer Effecting to Magnetic Field using Finite Element Method

A. Isaramongkolrak, P. Pao-la-or

School of electrical Engineering, Suranaree University of technology, Thailand

E-mail address: anone_91@hotmail.com^a

P. Pao-la-or

School of electrical Engineering, Suranaree University of technology, Thailand

E-mail address: padej@sut.ac.th^b

1. Background/ Objectives and Goals

Distribution transformer is an important device in electrical power system by acting increase or decrease the voltage for suiting an application. One factor to relate the efficiency of the transformer is magnetic field in core transformer. Assembling a transformer cores gaps will naturally arise at the sheet butts. Respectively gaps length may between 0-3 mm. Magnetic circuit is one of the most important active parts of transformer. It consists of laminated iron core and carries flux linked to windings. Energy is transferred from one electrical circuit to another through the magnetic field carried by the core. Magnetic field behavior in core transformer depends on the step lapping of the gaps insertion. This paper aim to comparative the gaps insertion pattern of core transformer which 100kVA 22kV/400V three phase rated effecting to magnetic field behavior for guideline to new designing the core transformer.

2. Mathematical Modeling and Finite Element Method

The mathematic model of magnetic field caused by high voltage conductors of distribution transformer by using a set of second-order partial differential equations. The modification for complex magnetic field analysis and time-harmonic simulation are also utilized. Computer-based utilizing the three-dimensional finite element method is exploited as a tool for visualizing magnetic fields distribution volume a distribution transformer. Finite element Method is one among popular numerical methods that is able to handle problem complexity in various forms. Even for problems of magnetic field distribution. The mathematical model is usually expressed in the wave equation as equation (1) derived from Maxwell's law

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) + \sigma \frac{\partial}{\partial t} A = J_0 \quad (1)$$

Transform to alternative form of three dimensions in time-harmonics system therefore,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - j\sigma\omega A + J_z = 0 \quad (2)$$

For the finite element formulation, an equation governing each element is derived from the Maxwell's equations directly by using galerkin approach, which is the particular weighted residual method for which the weighting functions are the same as the shape functions in form of tetrahedral element and shape function showed as equation (3)

$$N_n = \frac{1}{6V} (a_n + b_n x + c_n y + d_n z) \quad , \text{ where } n = i, j, k \text{ and } l \quad (3)$$

For the simulation system, the pattern of gaps insertion are three cases considered as follow figure (1)-(3)

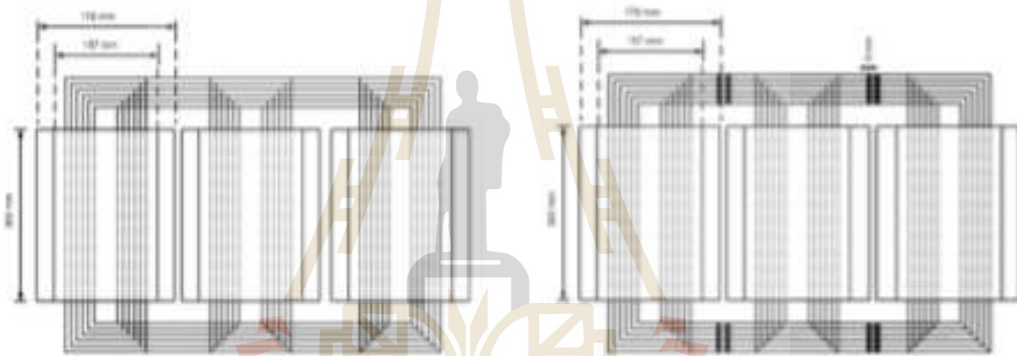


Fig 1. Case I: No insert the gaps

Fig 2. Case II: Insert the gaps vertical

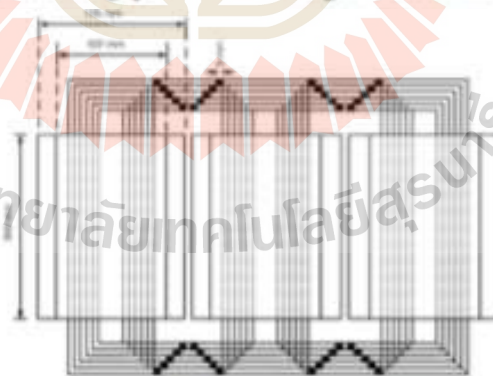


Fig 3. Case III: Insert the gaps diagonal

3. Expected Results/ Conclusion/ Contribution

The simulation result based on length 3 mm of the gaps insertion with 3 cases study. A transformer operates at the 80% of rated is considered of each case. Node Quantities are average of three cases about 36,000 nodes. The lowest magnitude of magnetic field is diagonal insertion pattern as Table I.

Table I. Magnitude of magnetic field in core transformer

Pattern	Maximum(Tesla)
No gap	0.021769852212268
3mm with Diagonal	0.012060680748742
3mm with Vertical	0.021769853044245

Keywords: magnetic field, core transformer, gaps insertion, finite element method



New Design and Magnetic Field Analysis of Transformer Shape with V-Connection for Core Loss Reduction in Railway System

P. Pao-la-or, A. Isaramongkolrak

Abstract – This paper presents a new design of transformer shape core used in railway system for loss reduction analyzed via the magnetic vector potential in the form of partial differential equation related to magnetic field. Finite element method is used in order to simulate a three-dimensional system. This paper focuses on the core loss reduction which is calculated from magnetic vector potential and magnetic field behavior on core transformer with V-connection, while the transformer has supplied voltage from three-phase system. The unbalanced input voltage is divided into three case studies in this paper: C-A couple phase, A-B couple phase and B-C couple phase from three-phase system. In addition, a design of transformer shape core has occurred on the corner that is the intersection between vertical core and horizontal core with 5 mm radius curves. The simulation results compare core loss of transformer between the original shape of transformer core and the new design of transformer core even though the supplied voltage is unbalanced. However, the results have shown that the new design of transformer core can decrease the core loss and it can lead to develop the shape of transformer core in order to reduce the core loss in term of manufacturing. Copyright © 2019 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved.

Keywords: Transformer Design, Core Loss Reduction, V-Connection Transformer, Magnetic Field, Finite Element Method, Railway System

Nomenclature

A	Magnetic vector potential (Wb/m)
A_C	Cross-sectional area of conductor (m^2)
a	Turns ratio of transformer
B	Magnetic field (T)
f	Frequency (Hz)
I	Current (A)
J_0	Current density (A/m^2)
K_e	Eddy current constant
K_h	Steinmetz hysteresis coefficient
N	Shape function
N_C	Number of coil turns (turn)
n	Steinmetz exponent
P_{core}	Core loss (W)
P_e	Eddy current loss (W)
P_h	Hysteresis loss (W)
R	Residual function
V	Volume of element (m^3)
V_{MN}	Potential difference between two points (V)
Z_{eq}	Equivalent impedance (Ω)
σ	Electrical conductivity (S/m)
μ	Permeability of material (H/m)
μ_0	Permeability of free space (H/m)

ω	Angular frequency (rad/s)
∇	Del operator

I. Introduction

The transportation system is important in order to connect systems. There are many types such as the airfreight, the sea freight and the rail transportations. The rail transportations are the most comfortable system in metropolitan society and a main public transportation system in many countries due to the great advantages related to deliver many people and a lot of merchandise anywhere and due to the reduced time for travelling [1]-[26]. Especially, the electric rail transportation system is more advantageous than the diesel one in term of motor drive and renewable energy [1]. Thus, the main key for electric rail transportation is the electric power qualities to support the electric railway system that should have efficiency even the electrical equipment that is the part of the railway system such as transformer converter system and supplied sources etcetera. In case of using the rail transportations affecting the main electrical system, which unbalance system since working of the electric rail system has been the single-phase load while the power supply has been the three-phase system, which has regulated the primary voltage through the primary side of autotransformer with V-connection [2]. There are losses in many sections of the rail system, for

example the catenary supplied, the feeder conductor, the electrical source and the transformer. The core loss of transformer in the system is a factor that affects the efficiency of the system. There are many research related to the transformer especially the material in transformer and inrush current in transformer used in power system [3]-[6], [21]-[26]. Therefore, this paper focuses on the design of a shape transformer with V-connection for improving a performance of the transformer while used in the railway system with 3D-finite element analyzed the magnetic vector potential. However, the result would be practical in term of improving the voltage of three-phase main system that will be balanced [7].

II. Catenary Autotransformer

The electric energy of the rail system is supplied with high voltage to catenary feeder substations where the voltage is reduced to a suitable level and fed to the railway catenary conductors in order to be used by locomotives and trains. The overhead catenary system is the supplied system of the railway system consisted of the bare wire conductors connected to the insulator which the current through the pantograph into the train's propulsion system and then it becomes a closed loop system [8]. Electricity flows through the rail or the fourth rail, which is grounded as depicted in Fig. 1. The overhead power supply is usually connected to a high-voltage system in order to reduce the loss of power transmission over long distance. For Thailand, electric railways using this system such as Airport Rail Link (ARL) contain with substation sub power station electric multiple unit pantograph and catenary wire. Catenary autotransformer one of the electrical equipment in the rail system, which is used in modern high power railway catenary systems fed with two phases with 180° phase shift with the midpoint connected between two phases and the secondary voltage winding between the catenary phase and earth return conductor [9]. The secondary voltage can be divided into the catenary voltage and the earth return from the primary voltage.

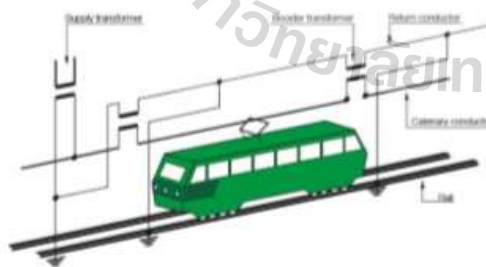


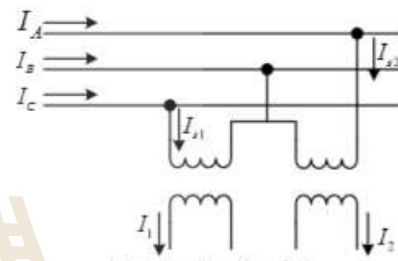
Fig. 1. Autotransformer in Electric Railway System

III. V-Connection Transformer

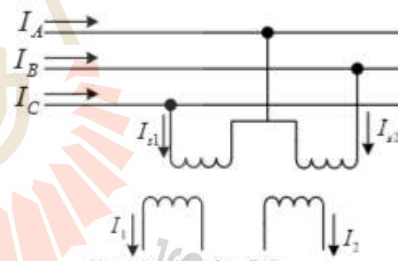
Each one of the two electrical substation transformers could be connected to a different phase of the primary

side. The completely supplied catenary is thus divided into sectors of lower length, which are separated from neutral sections, both of the electrical substations and at the halfway. The secondary voltages are out of phase with each other $2\pi/3$ [10]. The equivalent supplied single-phase load corresponds approximately to the higher powers of a traction load. Its main drawback is that if a traction transformer fails, another one should cross phase supply while the three-phase supply will be interrupted.

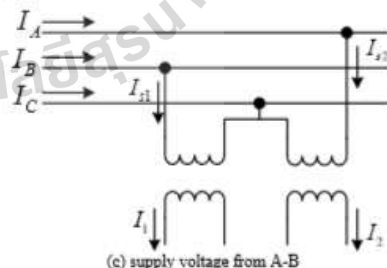
After the switching process has been completed, virtually, it becomes single-phase connection traction substation, and then the impact on the negative sequence in power system will increase. The diagram of a V-connection shows all the three cases of supply from C-A, B-C and A-B double phase of main system as in Figs. 2(a)-(c) respectively.



(a) supply voltage from C-A



(b) supply voltage from B-C



(c) supply voltage from A-B

Figs. 2. V-connection transformer double phase supplied from main system

This paper has considered three schemes of the V-connection transformer is C-A, A-B and B-C, which are coupled phase of main three-phase system supplied with primary side of autotransformer shown in Fig. 3.

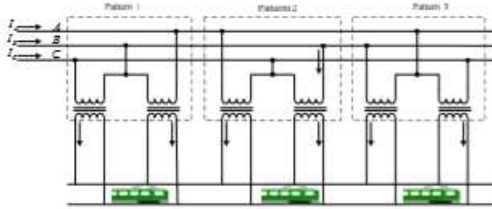


Fig. 3. AC electrical traction substation with V-connection patterns

This paper has considered the autotransformer with V-connection. Therefore, a secondary current can be explained by eq. (1) [11], where a is turns ratio of transformer:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a^2 & 0 \\ Z_{eq} & 0 \\ 0 & -a^2 \\ & Z_{eq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{aV_{AB}}{Z_{eq}} \\ \frac{aV_{BC}}{Z_{eq}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

In term of the primary current, the couple phase supplied condition can be divided into three couple phase supplied currents such as C-A supplied current, A-B supplied current and B-C supplied current as shown in Eqs. (2)-(4) respectively [12]-[13]:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

This paper has considered the autotransformer with the rated voltage on secondary 25 kV single-phase system and 115kV three-phase system supplied with primary side [14]. In addition, the equivalent impedance of the autotransformer from open circuit test and short circuit test is $0.3159+j11.1200 \Omega$ and constant of all case studies.

IV. Mathematical Modelling for Magnetic Vector Potential and Simulation Parameters

Finite element method is the most efficient numerical technique for solving the partial differential equations (PDE) such as electromagnetic problem, temperature rise

and heat transfer problem. In terms of electromagnetic problems, mostly differential equation starting from magnetic vector potential form as follows [15]:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = J_0 \quad (5)$$

Vector identification properties are as Eq. (6)

$$\nabla \times (\nabla \times A) = \nabla (\nabla \cdot A) - \nabla^2 A \quad (6)$$

Consequently, Eq. (5) can be written to the magnetic vector potential equation while $\nabla \cdot A$ is zero as the A properties. Therefore, the magnetic vector potential is:

$$\nabla^2 A - \mu \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = -\mu J_0 \quad (7)$$

This paper has considered the problem in three dimensions in cartesian coordinate therefore, the magnetic vector potential equation in x, y and z direction follows in Eq. (8):

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right) + J_0 = 0 \quad (8)$$

This paper has considered the system governing by using time harmonic mode and representing the magnetic vector potential in complex form therefore [16]:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = j\omega A \quad (9)$$

Eq. (9), substituting the complex form to Eq. (8) can be converted to the following alternative form:

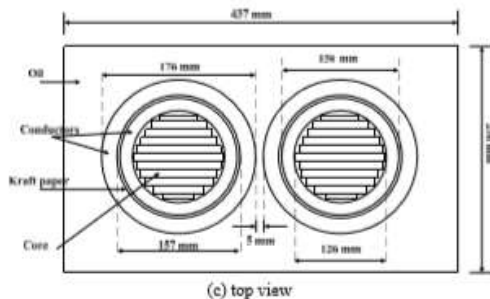
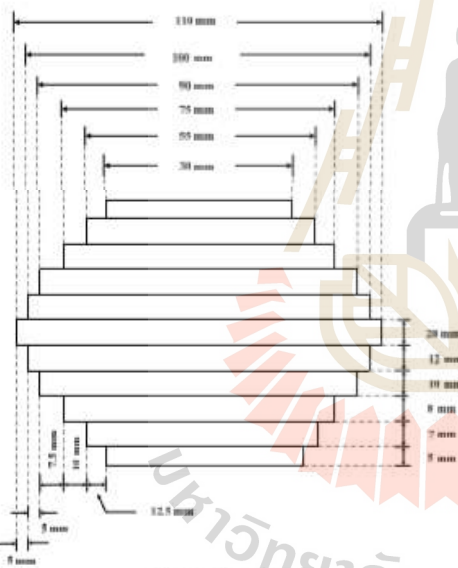
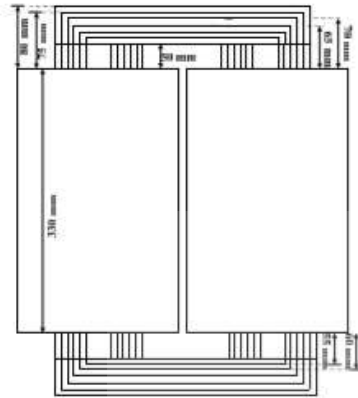
$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - j\sigma\omega A + J_0 = 0 \quad (10)$$

The current density (J_0) determines the current quantities through the area of conductors and can be defined by Eq. (11):

$$J_0 = \frac{N_C \times I}{A_C} \quad (11)$$

where N_C is number of coil turns and A_C is cross-sectional area of conductor (m^2). This paper refers to the autotransformer scaling of dimension, which is the real transformer as shown in Figs. 4. After that, the finite element method is applied for solving the PDE as Eq. (10), these steps follow. First, both of nodes and elements of discretization of the system are determined. The general of element in three dimensions is linear tetrahedral.

This can be accomplished by using Solid works for 3-D grid generation, which has 23,792 nodes, and 136,846 elements can be seen in Fig. 5.



Figs. 4. Dimension of autotransformer



Fig. 5. Tetrahedral elements of the autotransformer

Second, formulating the interpolation function of each element in three dimensions is derived from the Maxwell's equations directly by using Galerkin approach, which is the particular weight residual methodology for which the weighting functions are similar as the shape functions. According to this method, the magnetic vector potential is expressed as follows [17]:

$$A(x, y, z) = A_i N_i + A_j N_j + A_k N_k + A_l N_l \quad (12)$$

where, N_i, N_j, N_k, N_l are the element shape functions of node i, j, k, l respectively, and A_i, A_j, A_k, A_l are the magnetic vector potential at node i, j, k, l respectively.

The weighting functions that are similar as shape function can be written as Eq. (13):

$$N_n = \frac{a_n + b_n x + c_n y + d_n z}{6V} \quad (13)$$

where, $n = i, j, k, l$ and V is the volume of each linear tetrahedral element, which is expressed in Eq. (14).

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{vmatrix} \quad (14)$$

and the positional coefficient is defined by:

$$\begin{aligned} a_i &= x_j (y_k z_l - y_l z_k) + x_k (y_l z_j - y_j z_l) + x_l (y_j z_i - y_i z_j) \\ a_j &= x_i (y_k z_l - y_l z_k) + x_k (y_l z_i - y_i z_l) + x_l (y_i z_k - y_k z_i) \\ a_k &= x_i (y_l z_j - y_j z_l) + x_j (y_l z_i - y_i z_l) + x_l (y_j z_i - y_i z_j) \\ a_l &= x_k (y_j z_i - y_i z_j) + x_j (y_i z_k - y_k z_i) + x_i (y_k z_j - y_j z_k) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 b_i &= y_i(z_k - z_j) + y_k(z_j - z_i) + y_j(z_i - z_k) \\
 b_j &= y_i(z_i - z_k) + y_i(z_k - z_i) + y_k(z_i - z_i) \\
 b_k &= y_i(z_j - z_i) + y_j(z_i - z_i) + y_i(z_i - z_j) \\
 b_l &= y_k(z_i - z_j) + y_i(z_j - z_k) + y_j(z_k - z_i) \\
 c_i &= x_i(z_j - z_k) + x_j(z_k - z_i) + x_k(z_i - z_j) \\
 c_j &= x_i(z_k - z_i) + x_k(z_i - z_i) + x_i(z_i - z_k) \\
 c_k &= x_i(z_i - z_j) + x_i(z_j - z_i) + x_j(z_i - z_i) \\
 c_l &= x_k(z_j - z_i) + x_j(z_i - z_k) + x_i(z_k - z_j) \\
 d_i &= x_i(y_k - y_j) + x_k(y_j - y_i) + x_j(y_i - y_k) \\
 d_j &= x_i(y_i - y_k) + x_i(y_k - y_i) + x_k(y_i - y_i) \\
 d_k &= x_i(y_j - y_i) + x_j(y_i - y_i) + x_i(y_i - y_j) \\
 d_l &= x_k(y_i - y_j) + x_i(y_j - y_k) + x_j(y_k - y_i)
 \end{aligned}$$

Third, each element of the equations is formulated by integration by parts of Eq. (10) and substituting the approximate results in Eq. (10) which is equal to the residual function gives Eq. (15):

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - j\sigma\omega A + J_0 = R \quad (15)$$

Integration by parts is made using Gauss's theory. Therefore, the residual function is expressed in Eq. (16):

$$\int_V \left[N_n \left[\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right) - j\sigma\omega A + J_0 \right] dV = 0 \quad (16)$$

Eq. (16) can be divided into three parts as follows:

$$\int_V \left[N_n \left[\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right) \right] dV = 0 \quad (17)$$

$$-\int_V (N_n [-j\sigma\omega A]) dV = 0 \quad (18)$$

$$\int_V (N_n [J_0]) dV = 0 \quad (19)$$

Using the factorial formula with Eqs. (17)-(19) each element of the equation can be written in term of matrix with 4x4 size depending on types of elements.

Thus, eq. (17) becomes the permeability matrix depending on the coordination of the grid along with x, y and z direction, which is showed in term of positional

coefficient in Eq. (20):

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{36\mu V} \begin{bmatrix} b_{11} + c_{11} + d_{11} & b_{12} + c_{12} + d_{12} & \dots & \dots \\ b_{21} + c_{21} + d_{21} & b_{22} + c_{22} + d_{22} & \dots & \dots \\ b_{31} + c_{31} + d_{31} & b_{32} + c_{32} + d_{32} & \dots & \dots \\ b_{41} + c_{41} + d_{41} & b_{42} + c_{42} + d_{42} & \dots & \dots \\ \dots & b_{13} + c_{13} + d_{13} & b_{14} + c_{14} + d_{14} & \dots \\ \dots & b_{23} + c_{23} + d_{23} & b_{24} + c_{24} + d_{24} & \dots \\ \dots & b_{33} + c_{33} + d_{33} & b_{34} + c_{34} + d_{34} & \dots \\ \dots & b_{43} + c_{43} + d_{43} & b_{44} + c_{44} + d_{44} & \dots \end{bmatrix} \quad (20)$$

Eq. (18) becomes the constant matrix depending on the constant of electrical conductivity and angular frequency as follows:

$$[M]_{4 \times 4} = \frac{j\omega\sigma V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Eq. (19) becomes the load vector depending on the current density of transformer as follows:

$$[F]_{4 \times 1} = \frac{J_0 V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Fourth, the boundary conditions in term of Neumann are applied. Both of the edges between oil and conductors and between oil and the frame of the transformer are shown in Fig. 6.

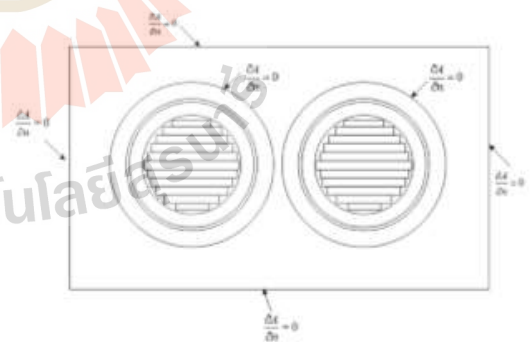


Fig. 6. Define the boundary condition of the system

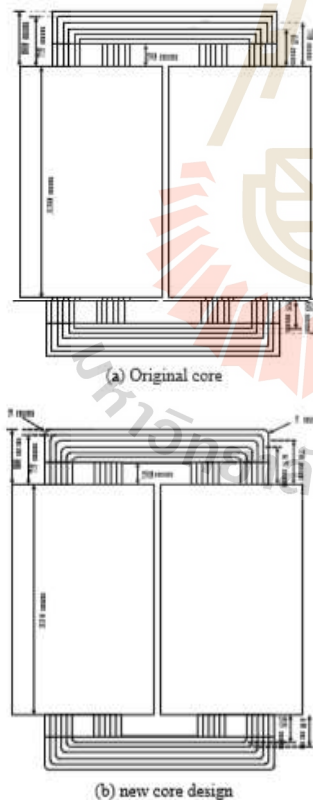
Fifth, the linear equation for calculation a result of magnetic vector potential is solved. For the simulation parameters, the finite element method has been used for solving the PDE in this paper. The parameters for simulation depend on the magnetic vector potential equation, defined in Eqs. (20)-(22). However, all the parameters of the simulation are shown in Table I.

TABLE I
PARAMETERS OF AUTOTRANSFORMER SIMULATION

Materials Constant	Material	Values
Permeability	Steel	40,000
	Copper	0.9999
	Mineral oil	2.2000
	Kraft paper	1.0000
	Free space	$4\pi \times 10^{-7}$ H/m
Electrical conductivity	Steel	2.08×10^7 S/m
	Copper	5.80×10^7 S/m
	Mineral oil	0.1080 S/m
	Kraft paper	0.9999 S/m

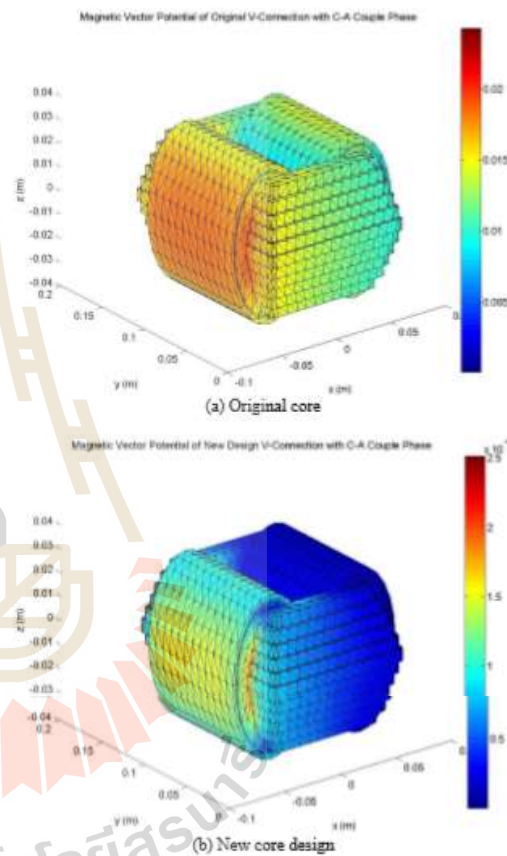
V. New Design and Simulation Results

This paper has considered the magnetic vector potential, which is related to magnetic field in the core part of the V-connection of the autotransformer, compared to the original core and new core design for the analysis of the core losses of autotransformer when operating in the railway system supplied from unbalanced three-phase system. Moreover, the new shape design of transformer core using the electromagnetic field behavior by making all of core corner curvature with 5 mm of the radius and the new design can be seen in Figs. 7.



Figs. 7. Autotransformer structure

For the simulation results, this paper has considered the magnetic vector potential of transformer core using finite element method and it has been divided into three cases of supplying voltage from three-phase system, which unbalance couple phase: C-A couple phase, A-B couple phase and B-C couple phase. For the magnetic vector potential of transformer core, which supplied from C-A, A-B and B-C couple phase of three-phase system are shown in Figs. 8-10, respectively.



Figs. 8. A magnetic vector potential (Wb/m) for C-A couple phase

According to Figs. 8-10, the magnetic vector potential distribution all over the transformer core can be described by the electromagnetic field theory that the magnetic field will have a decrease when is low changing rate of a magnetic vector potential or magnetic vector potential is minimum. In term of couple phase analysis, the graphical results have shown that the magnetic vector potential in each couple phase has maximum value different side of color bar. However, the system will balance system when all of the three couple phase are considered. For safety and general usage, most of the designs have to focus in term of maximum value. Thus, the maximum numerical results of a magnetic vector

potential can be seen in Table II.

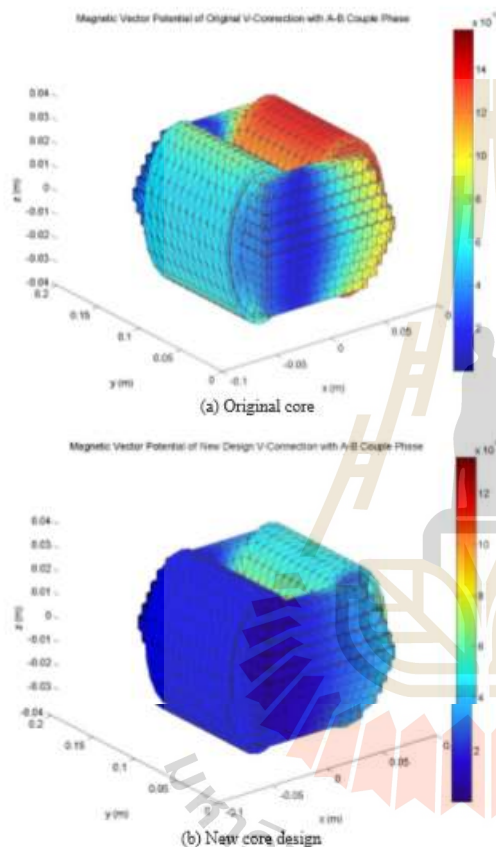
TABLE II
MAXIMUM MAGNETIC VECTOR POTENTIAL
OF V-CONNECTION TRANSFORMER

Three-phase supplied to primary	Original transformer core	New transformer core
C-A	0.0285 Wb/m	0.000251 Wb/m
A-B	0.0186 Wb/m	0.000134 Wb/m
B-C	0.0318 Wb/m	0.000327 Wb/m

$$B_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} = \frac{d_i A_i + d_j A_j + d_k A_k + d_l A_l}{6V} - \frac{b_i A_i + b_j A_j + b_k A_k + b_l A_l}{6V} \quad (24)$$

$$B_z = -\frac{\partial A_x}{\partial y} = -\frac{c_i A_i + c_j A_j + c_k A_k + c_l A_l}{6V} \quad (25)$$

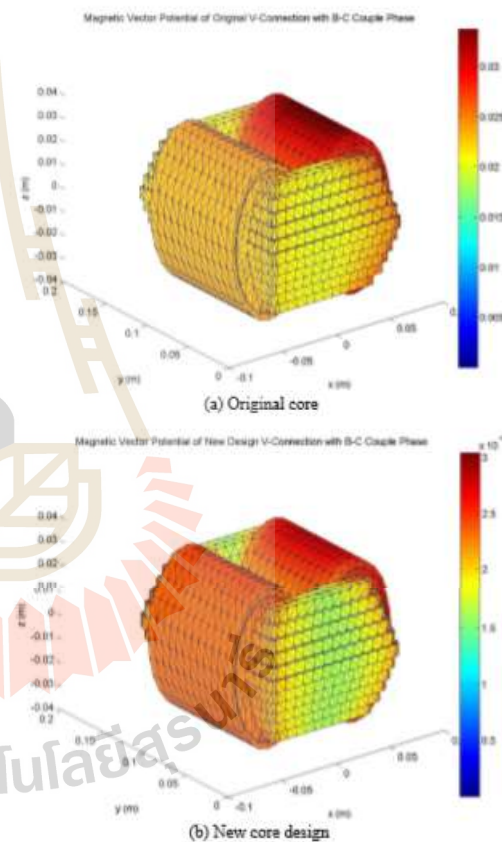
$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (26)$$



Figs. 9. A magnetic vector potential (Wb/m) for A-B couple phase

However, the analysis the core loss of transformer has been widely used in magnetic field form [18]. According to the electromagnetic field theory, the curl of magnetic vector potential is described as magnetic field ($B = \nabla \times A$). The finite element method based simulation conducted in this paper is coded with MATLAB programming for calculation of magnetic field dispersion via shape function along x, y, z direction and total magnetic field as Eqs. (23)-(26) respectively.

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} = \frac{c_i A_i + c_j A_j + c_k A_k + c_l A_l}{6V} \quad (23)$$



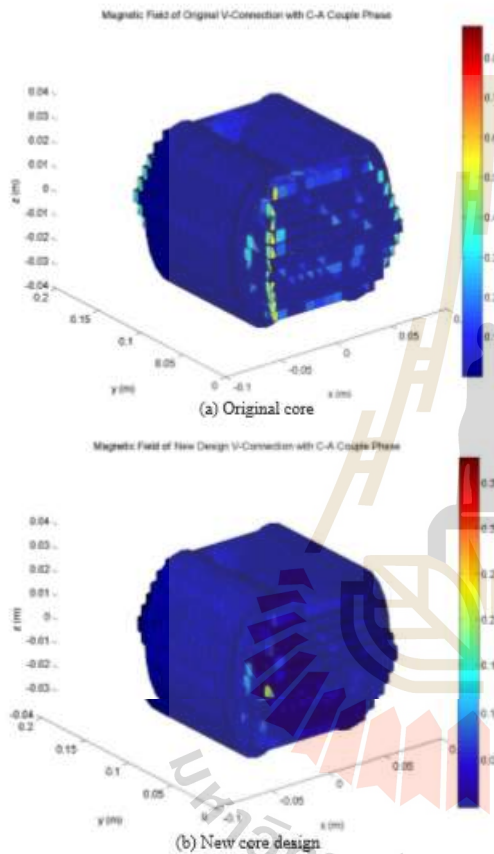
Figs. 10. A magnetic vector potential (Wb/m) for B-C couple phase

The curl of the magnetic vector potential is a magnetic field, for which three dimension finite element method results can be graphically presented in the filled polygon of magnetic fields dispersed thoroughly the volume of study. Figs. 11-13 show the magnetic field plot of the V-connection transformer for C-A couple phase, A-B couple phase and B-C couple phase, which have been compared with original case and new design case of all respectively.

A maximum of magnetic field can be seen in the Table III.

TABLE III
MAXIMUM MAGNETIC FIELD OF V-CONNECTION
TRANSFORMER WHILE UNBALANCE OPERATION

Three-phase supplied to primary	Original transformer core	New transformer core
C-A	0.8767 T	0.3688 T
A-B	0.6161 T	0.1944 T
B-C	1.0867 T	0.5822 T



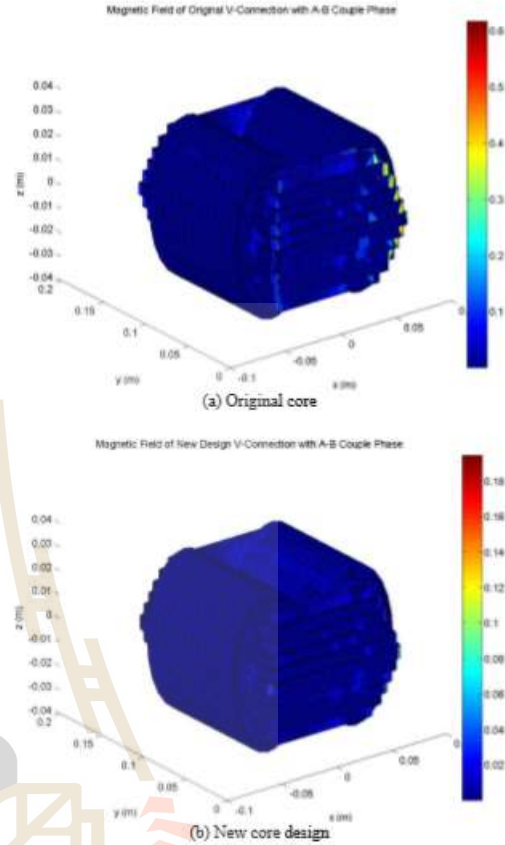
Figs. 11. A magnetic field (T) for C-A couple phase

This paper aims to calculate the core loss of transformer with new designed the core and compare with the original core by using the maximum magnetic field [19]. The core losses analysis can be divided into two parts, hysteresis loss (P_h) and eddy current losses (P_e) which are shown in Eqs.(27)-(29):

$$P_h = K_h B_{max}^n f \quad (27)$$

$$P_e = K_e B_{max}^2 f^2 \quad (28)$$

$$P_{core} = P_h + P_e \quad (29)$$



Figs. 12. A magnetic field (T) for A-B couple phase

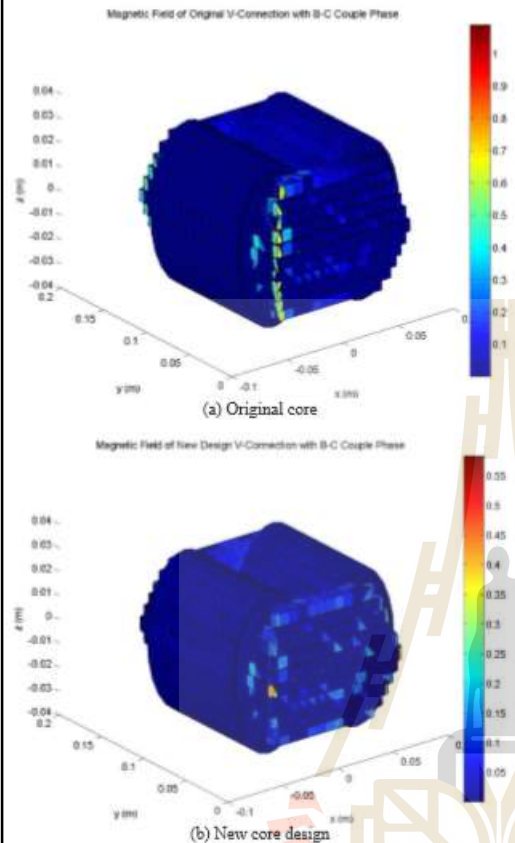
For calculation the core loss of this paper, Steinmetz hysteresis coefficient (K_h) and eddy current constant (K_e) are 300 which is the regular value and Steinmetz exponent (n) is 2 in all the case studied [20]. Therefore, the core losses of V-connection transformer can be seen in Table IV.

TABLE IV
CORE LOSSES OF TRANSFORMER AND DECREASING PERCENTAGE
WHILE SUPPLIED UNBALANCE ON PRIMARY SIDE

Three-phase supplied to primary	Original transformer core	New transformer core	Decreasing Percentage
C-A	587.98 kW	104.05 kW	82.30
A-B	290.38 kW	28.91 kW	90.04
B-C	903.40 kW	259.30 kW	71.30

The results from Table IV show that the new design of core transformer can decrease the core loss while the transformer has supplied unbalanced voltage in railway system.

In term of decreasing percentage the three phase has supplied primary side with C-A, A-B and B-C couple phase is 82.30%, 90.04% and 71.30% respectively.



Figs. 13. A magnetic field (T) for B-C couple phase

VI. Conclusion

This paper has simulated the partial differential equation of magnetic vector potential and magnetic field via the finite element method in order to design and to calculate the loss on the core of autotransformer with V-connection while operating in the unbalance of three-phase system. In addition, the simulation presents a new design shape of transformer core, which improves the efficiency of the transformer. The simulation results have shown that the shape that has curvature of the corner of transformer core can decrease a core loss of V-connection transformer while operated in unbalance system. Therefore, this is the one choice for designing the shape of the transformer core. On the other hand, in terms of manufacturing there are many factors to determine.

References

- [1] D. Santivanon, K. Hongesombut, and S. Srisophon, Simulation on voltage unbalance reduction in railway electrification system by different special transformers, *Proceeding of the international electrical engineering congress (iEECON2016)*, 2016, pp. 1373-1376.
- [2] Y. Mochinaga, Y. Hisamizu, M. Takeda, T. Miyashita and K. Hasuike, Static power conditioner using GTO converters for AC electric railway, *IEEE Conference Record of the Power Conversion Conference*, 1993, pp. 641-646.
- [3] Yulistya Negara, I., Asfani, D., Fahmi, D., Baskoro, S., Arief K., B., Materials and Cutting Method Effects of Three Phase Transformer-Core on Magnetization Curve and Inrush Current: Simulation Approach, (2015) *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, 8 (3), pp. 370-376. doi: <https://doi.org/10.15866/iremos.v8i3.6108>
- [4] Vujević, S., Lovrić, D., Balaž, Z., Gaurina, S., Time-Harmonic Modelling of Two-Winding Transformers Using the Finite Element Technique, (2013) *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, 6 (6), pp. 1922-1928.
- [5] C. D. Xu, K. W.E. Cheng., Y. Zou., X.L. Wang., S. Raghu Raman and X.D. Xue. Electromagnetic Scattering of High Power Traction Transformer in High Speed Railway Based on FEM. *International Symposium on Electrical Engineering (ISEE)*. Hong Kong, China, 2016, pp.1-6.
- [6] Z. Linsuo and X. Wei. Research on Loss of Traction Transformer Leakage Magnetic Field. *4th International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications*. China., 2013, pp.484-487.
- [7] Z. Alan., T. T Ana and F. G. Bozidar, Modeling of 25kV electric railway system for power quality studies, *EuroCon*, Zagreb, Croatia, 2013, pp. 844-849.
- [8] Y. C. Liu and J. F. Chen, Control scheme for reducing rail potential and stray current in MRT systems *In IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, 152(3), 2005, pp. 612-618.
- [9] EN 50122-1, *Railway applications-Fixed installations-Electrical safety, earthing and the return circuit - Part 1: Protective provisions against electric shock*, 2011.
- [10] Z. Zhang, B. Wu, J. Kang, and L. Luo, A Multi-Purpose Balanced Transformer for Railway Traction Applications, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24 (issue 2), 711-718, April 2009.
- [11] B. Park, T. Kim, K. Lee, R. Kim, and D. Hyun, Magnetic-Field Analysis on Winding Disposition of Transformer for Distributed High-speed Train Applications, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 46 (Issue 6): 1766-1769, June 2010.
- [12] I. M. Abdulaziz, *Mathematical modelling and computer simulations of induced voltage calculations in AC electric traction*, Ph.D. philosophy, Dept. Philosophy., Napier Univ., Edinburgh, ENG, 2003.
- [13] Y. Zhao, Y. Du, H. Cail, R. Zhang, and L. Shi, The influence on characteristics of movable loosely coupled transformer from metal units in urban railway system, *17th International conference on electrical machines and system*, Hangzhou, China, 2014, pp. 250-253.
- [14] F. Gagliardi, D. Lauria, A.M. Luciano, E. Tironi, G. Ubezio. "New Current Balancing and Power Factor Improving Scheme". *Eupean Trans. Electrical Power Engineering*, Vol.1, 5, Sept/Oct, 261-265, 1991.
- [15] A. Bunmat, and P. Pao-La-Or, Analysis of Magnetic Field Effects Operators Working a Power Transmission Line Using 3-D Finite Element Method. *The 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2015)*, Pattaya, Thailand, 2015, pp.1187-1191
- [16] P. Pao-la-or, A. Isaramongkolrak, and T. Kulworawanichpong, Finite Element Analysis of Magnetic Field Distribution for 500-kV Power Transmission System, *Engineering Letters*, No.1, Vol.18, 1-9, 2010.
- [17] S. Vacharakup, M. Peerasaksothol, T. Kulworawanichpong, and P. Pao-la-or, Study of Natural Frequencies and Characteristics of Piezoelectric Transformers by Using 3-D Finite Element Method. *Applied Mechanics and Materials*, Vols.110-116, 61-66, 2012.
- [18] Frivaldsky, M., Spanik, P., Jaros, V., Kanovsky, A., Rapid Design Procedure of High Frequency Transformer for Switched Mode Power Supply - Analysis and Verification, (2017) *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 12 (5), pp. 424-430. doi: <https://doi.org/10.15866/iree.v12i5.13061>
- [19] Mahmood, F., Rizk, M., Lehtonen, M., Evaluation of Lightning

P. Pao-la-or, A. Isaramongkolrak

- Overvoltage Protection Schemes for Pole-Mounted Distribution Transformers, (2015) *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 10 (5), pp. 616-624.
doi:<https://doi.org/10.15866/iree.v10i5.7266>
- [20] Otmanc-Cherif, T., Mufidzada, N., Benamrouche, N., Influence of the Number of Nodes in the Winding's Equivalent Circuit on the Surge Voltages in Transformers, (2016) *International Journal on Energy Conversion (IRECON)*, 4 (1), pp. 13-16.
- [21] Fahmi, D., Yulistya Negara, I., Asfani, D., Hernanda, I., Wahyudi, M., Andriani, N., Investigation of Transformer Oil Characteristics by the Effect of Rapid Temperature Fluctuation, (2018) *International Journal on Energy Conversion (IRECON)*, 6 (5), pp. 160-167.
doi:<https://doi.org/10.15866/irecon.v6i5.15893>
- [22] Khemmook, P., Khomfoi, S., Transient Stability Improvement Using Coordinated Control of Solar PVs and Solid State Transformers, (2018) *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 13 (6), pp. 486-494.
doi:<https://doi.org/10.15866/iree.v13i6.15869>
- [23] Taha, I., Ghoneim, S., Zaini, H., A Fuzzy Diagnostic System for Incipient Transformer Faults Based on DGA of the Insulating Transformer Oils, (2016) *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 11 (3), pp. 305-313.
doi:<https://doi.org/10.15866/iree.v11i3.8453>
- [24] Phadungthin, R., Haema, J., Proposed Risk Model of Maintenance Management for Power Transformer in Transmission System, (2016) *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 11 (1), pp. 88-96.
doi:<https://doi.org/10.15866/iree.v11i1.7703>
- [25] Hernanda, I., Yulistya Negara, I., Soeprijanto, A., Asfani, D., Fahmi, D., Wahyudi, M., Damara, D., Impact of Windings Configuration of Three-Phases Power Distribution Transformer on Ferroresonance, (2018) *International Journal on Energy Conversion (IRECON)*, 6 (1), pp. 9-16.
doi:<https://doi.org/10.15866/irecon.v6i1.15185>
- [26] Penttonen, J., Lehtonen, M., Data Driven Analytical Modeling of Power Transformers, (2017) *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, 10 (2), pp. 85-93.
doi:<https://doi.org/10.15866/iremos.v10i2.11515>

Authors' information



Padej Pao-la-or is an associate professor of the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. He received B. Eng. (1998), M. Eng. (2002) and D. Eng. (2006) in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand. His fields of research interest include a broad range of power systems, finite element analysis, optimization and artificial intelligence, electromagnetic field, electrical machinery and energy conversion. He has joined the school since December 2005 and is currently a member in Power System Research, Suranaree University of Technology.



Arnon Isaramongkolrak is graduated student of the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. He received B. Eng. (2005) and M. Eng. (2010) in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand. His fields of research interest include a power system analysis, finite element analysis, electromagnetic fields and renewable energy.

Magnetic vector potential analysis for new design of transformer shape with V-connection in railway system

Padej Pao-la-or^a, Arnon Isaramongkolrak^b, a*

^a*School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhonwachasima 30000, Thailand*

Abstract

This paper presents a new design of transformer shape core with used in railway system via analyzed the magnetic vector potential in the form of partial differential equation. Finite element method is used to simulate three-dimensional system. This paper focuses on the magnetic vector potential behavior on core transformer with V-connection, while the transformer was supplied voltage from three-phase system. The unbalance input voltage is divided to three case studies in this paper: C-A couple phase, A-B couple phase and B-C couple phase from three-phase system. In addition, a design of transformer shape core occurred on the corner that is the intersection between vertical core and horizontal core with 5 mm radius curves. The simulation results compare magnetic vector potential between the original shape of transformer core and the new design of transformer core even though the supplied voltage are unbalanced. Nevertheless, the results shown that the new design of transformer core is more highly uniform a magnetic vector potential distribution in the transformer core and suitable for guideline for improving the shape of transformer core to reduce the core losses.

Keywords: Transformer design, V-connection transformer, magnetic vector potential, finite element method, railway system

1. Introduction

The transportation system is important connecting systems. There are many types such as the air freight, sea freight and rail transportations. The rail transportations are the most comfortable system in metropolitan society and a main public transportation system in many countries due to the great advantages related to deliver many people to anywhere and reduced the time for travelling. The electric power qualities to support the electric railway system must be high efficiency even the electrical equipment that is the part of the railway system such as transformer converter system and supplied sources etcetera. In case of using the rail transportations affecting the main electrical system, which unbalance system since working of the electric rail system was the single-phase load while the power supply was the three-phase system, which regulated the primary voltage through the primary side of autotransformer with V-connection. Therefore, this paper focused on the design of a shape transformer with V-connection for improving a performance of the transformer while used in the railway system with analyzed the magnetic vector potential. However, the result would be practical in term of improving the voltage of three phase main system will be balance.

2. Catenary autotransformer

The electric energy of the rail system is supplied with high voltage to catenary feeder substations where the voltage is reduced to a suitable level and fed to the railway catenary conductors to be used by locomotives and trains. The overhead catenary system is the supplied system of the railway system consisted of the bare wire conductors connected to the insulator which the current through the pantograph into the train's propulsion system and became a closed loop system [1]. Electricity will flow through the

* Manuscript received MMDD, 2018; revised MMDD, 2018.

Corresponding author. Tel.: +66-44-22-4400; E-mail address: padej@sut.ac.th

rail or the fourth rail, which is grounded as follow the Fig. (1). The overhead power supply is usually connected to a high-voltage system to reduce the loss of power transmission over long distance [2-3]. For Thailand, electric railways using this system such as an Airport Rail Link (ARL) contains with substation sub power station electric multiple unit pantograph and catenary wire. Catenary autotransformer is the one of electrical equipment in the rail system, which is used in modern high power railway catenary systems fed with two phases with 180° phase shift with the midpoint connected between two phases and the secondary voltage winding between the catenary phase and earth return conductor [4]. The secondary voltage is the catenary voltage again the earth and the primary voltage is two times.

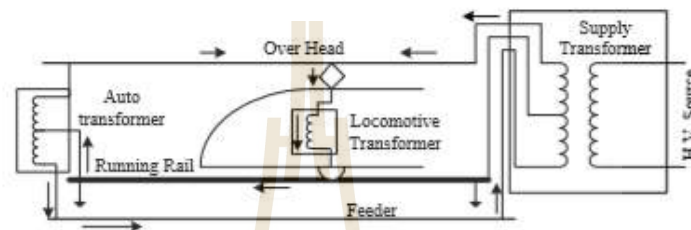


Fig.1. Autotransformer for electric railway system

3. V-connection transformer

V-connection transformer, each of the two electrical substation transformers could be connected a different phase of the primary side. The completely supplied catenary is thus divided into sectors of lower length, which are separated from neutral sections. Both of the electrical substations and at the halfway. The secondary voltages are out of phase with each other $2\pi/3$ [5]. The equivalent supplied single-phase load corresponds approximately to the higher powers of a traction load. Its main drawback is that if a traction transformer fails, another one should cross phase supply while the three-phase supply will be interrupted. The diagram of a V-connection all three cases of supply from C-A, B-C and A-B double phase of main system shown as the Fig. (2).

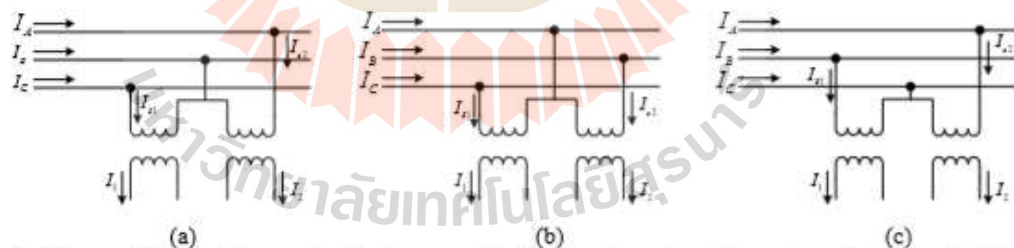


Fig.2. V-connection transformer double phase supplied from main system (a) supply voltage from C-A (b) supply voltage from B-C (c) supply voltage from A-B

This paper has considered in three schemes of the V-connection transformer is C-A, A-B and B-C which are coupled phase of main three-phase system supplied with primary side of autotransformer can be shown as the Fig. (3).

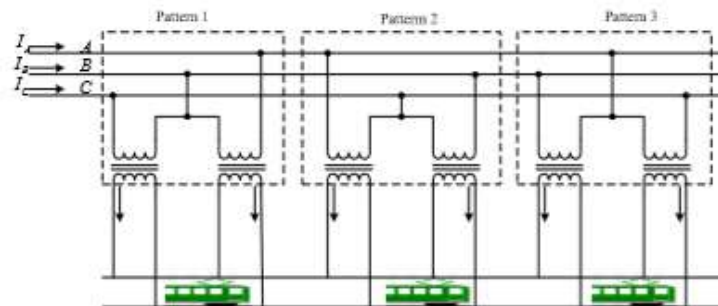


Fig. 3. AC electrical traction substation with V-connection patterns

Due to this paper has considered the autotransformer with V-connection. Therefore, a secondary current can explain by the eq. (1)[6].

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a^2 & 0 \\ Z_{eq} & 0 \\ 0 & -a^2 \\ & Z_{eq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} aV_{AB} \\ Z_{eq} \\ aV_{BC} \\ Z_{eq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

On the other hand, a primary current can explain depends on couple phase supplied condition where C-A supplied current, A-B supplied current and B-C supplied current can explain by eq. (2) - (4), respectively [7-8].

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

This paper considered the autotransformer with the rated voltage on secondary 25kV single-phase system and 115kV three-phase system supplied with primary side [9]. In addition, the equivalent impedance of the autotransformer from open circuit test and short circuit test is $0.3159+j11.1200 \Omega$ and constant of all case studies.

4. Mathematical modelling for magnetic vector potential and simulation parameters

Finite element method is the most efficient numerical technique [10] for solving the partial differential equations (PDE) such as electromagnetic problem, temperature rise and heat transfer problem [11]. In terms of electromagnetic problems, mostly differential equation starting from magnetic vector potential form as

follows eq. (5) [12].

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = J_0 \quad (5)$$

Where, A is magnetic vector potential (S/m)
 σ is electrical conductivity of material (Mho/m)
 μ is permeability of material, while permeability of free space is $4\pi \times 10^{-7}$ H/m
 J_0 is electrical current density (A/m²)

Vector identification properties as eq. (6).

$$\nabla \times (\nabla \times A) = \nabla (\nabla \cdot A) - \nabla^2 A \quad (6)$$

Consequently, the equation 5 can be written to the magnetic vector potential equation while $\nabla \cdot A$ is zero as the A properties. Therefore, the magnetic vector potential as follows eq. (7).

$$\nabla^2 A - \mu \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = -\mu J_0 \quad (7)$$

This paper has considered the problem in three dimensions therefore, the magnetic vector potential equation in x , y and z direction follows in eq. (8).

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right) + J_0 = 0 \quad (8)$$

This paper has considered the system governing by using time harmonic mode and representing the magnetic vector potential in complex form therefore [13].

$$\frac{\partial A}{\partial t} = j\omega A \quad (9)$$

Where, ω is the angular frequency (rad/s).

From the eq. (9), substituting the complex form to eq. (8) can be converted to an alternative form as follows eq. (10).

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - j\sigma\omega A + J_0 = 0 \quad (10)$$

The current density determines from the current quantities through the area of conductors can define by eq. (11), where N is turn number of conductors (turn), I is current quantities (A) and A is area of conductors (m²).

$$J_0 = \frac{N \times I}{A} \quad (11)$$

This paper refers the autotransformer scaling of dimension, which is the real transformer as follows Fig. (4).

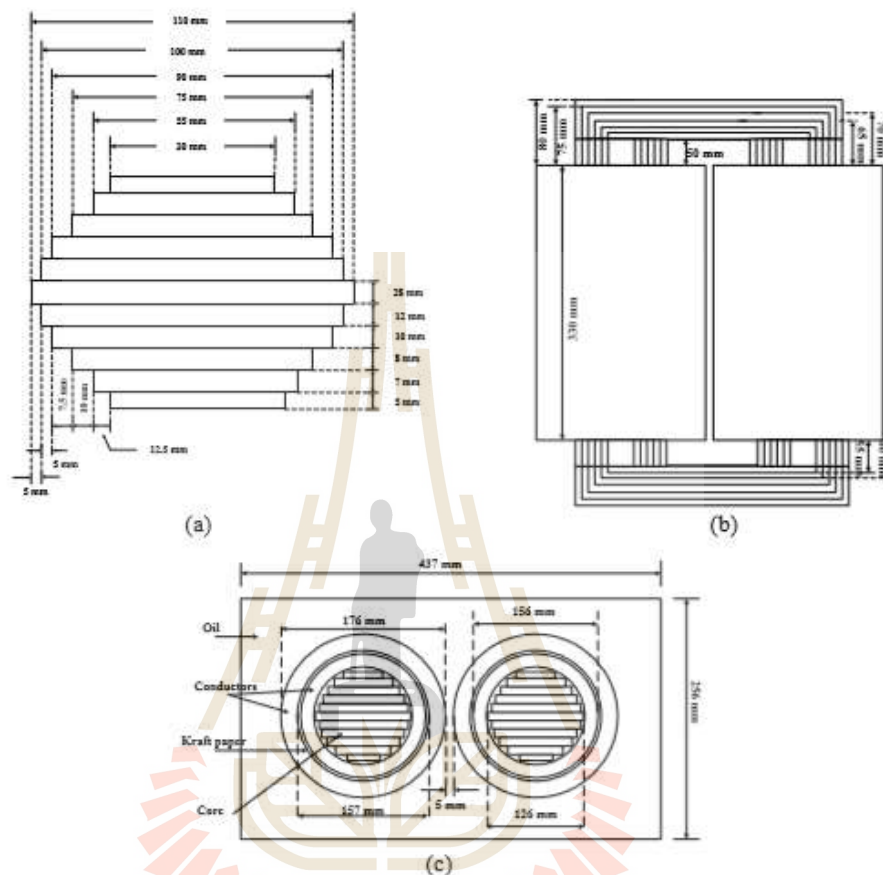


Fig.4. Dimension of autotransformer (a) core of transformer (b) right view (c) top view

Applying the finite element method for solving the PDE as eq. (10) follow these steps.

First, determined both of nodes and elements of discretization the system. The general of element in three dimensions is tetrahedral which has number of nodes is 23792 and the number of elements is 136846 can be shown in Fig. (5).



Fig.5. Tetrahedral elements of the autotransformer

Second, formulating the interpolation function of each element in three dimensions is derived from the Maxwell's equations directly by using Galerkin methodology, which is the definite weight residual technique for which the weighting functions are similar as the shape functions. According to this method, the magnetic vector potential is expressed as follows eq. (12) [14].

$$A(x, y, z) = A_i N_i + A_j N_j + A_k N_k + A_l N_l \quad (12)$$

Where, N_i, N_j, N_k, N_l are the element shape functions of node i, j, k, l respectively, and A_i, A_j, A_k, A_l are the magnetic vector potential at node i, j, k, l respectively. The weighting functions that are similar as shape function can be written as eq. (13).

$$N_n = \frac{a_n + b_n x + c_n y + d_n z}{6V} \quad (13)$$

Where, $n = i, j, k, l$ and V is the volume of each tetrahedral element, which defined as the eq. (14).

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{vmatrix} \quad (14)$$

And the positional coefficient defined by

$$\begin{aligned} a_i &= x_j(y_k z_l - y_l z_k) + x_k(y_l z_j - y_j z_l) + x_l(y_j z_i - y_i z_j) & b_i &= y_l(x_k - z_j) + y_k(z_j - z_l) + y_j(z_l - z_k) \\ a_j &= x_l(y_k z_i - y_i z_k) + x_k(y_i z_l - y_l z_i) + x_i(y_l z_k - y_k z_l) & b_j &= y_l(z_i - z_k) + y_i(z_k - z_l) + y_k(z_l - z_i) \\ a_k &= x_i(y_l z_j - y_j z_l) + x_j(y_j z_i - y_i z_j) + x_l(y_j z_i - y_i z_j) & b_k &= y_l(z_j - z_i) + y_j(z_i - z_l) + y_i(z_l - z_j) \\ a_l &= x_k(y_j z_i - y_i z_j) + x_j(y_i z_k - y_k z_i) + x_i(y_k z_j - y_j z_k) & b_l &= y_k(z_i - z_j) + y_i(z_j - z_k) + y_j(z_k - z_i) \\ c_i &= x_l(z_j - z_k) + x_j(z_k - z_l) + x_k(z_l - z_j) & d_i &= x_l(y_k - y_j) + x_k(y_j - y_l) + x_j(y_l - y_k) \\ c_j &= x_l(z_k - z_i) + x_k(z_i - z_l) + x_i(z_l - z_k) & d_j &= x_l(y_i - y_k) + x_i(y_k - y_l) + x_k(y_l - y_i) \\ c_k &= x_l(z_i - z_j) + x_i(z_j - z_l) + x_j(z_l - z_i) & d_k &= x_l(y_j - y_i) + x_j(y_i - y_l) + x_i(y_l - y_j) \\ c_l &= x_k(z_j - z_i) + x_j(z_i - z_k) + x_i(z_k - z_j) & d_l &= x_k(y_i - y_j) + x_i(y_j - y_k) + x_j(y_k - y_i) \end{aligned}$$

Third, formulating the each element equations by integration by parts of the eq. (10) and substituting the approximate results in eq. (10) which is equal residual function as follow eq. (15).

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - j\omega A + J_0 = R \quad (15)$$

Where, R is the residual function and make an integration by parts using Gauss's theory. Therefore, the residual function expresses as eq. (16).

$$\int_V \left(N_n \left[\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right) - j\sigma\omega A + J_0 \right] \right) dV = 0 \quad (16)$$

From eq. (16) can be divided into three parts as follows eq. (17) - (19).

$$\int_V \left(N_n \left[\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right) \right] \right) dV = 0 \quad (17)$$

$$-\int_V \left(N_n [-j\sigma\omega A] \right) dV = 0 \quad (18)$$

$$\int_V \left(N_n [J_0] \right) dV = 0 \quad (19)$$

Using the factorial formula with eq. (17) - (19) and then each element equation can be written in term of matrix with 4x4 size depends on types of elements. Thus, from eq. (17) became the permeability matrix depends on the coordination of the grid along with x, y and z direction, which showed in term of positional coefficient as follow eq. (20), where $[K]$ is the permeability matrix of problem.

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{36\mu V} \begin{bmatrix} b_{11} + c_{11} + d_{11} & b_{12} + c_{12} + d_{12} & b_{13} + c_{13} + d_{13} & b_{14} + c_{14} + d_{14} \\ b_{21} + c_{21} + d_{21} & b_{22} + c_{22} + d_{22} & b_{23} + c_{23} + d_{23} & b_{24} + c_{24} + d_{24} \\ b_{31} + c_{31} + d_{31} & b_{32} + c_{32} + d_{32} & b_{33} + c_{33} + d_{33} & b_{34} + c_{34} + d_{34} \\ b_{41} + c_{41} + d_{41} & b_{42} + c_{42} + d_{42} & b_{43} + c_{43} + d_{43} & b_{44} + c_{44} + d_{44} \end{bmatrix} \quad (20)$$

For the eq. (18) became the constant matrix depends on the constant of electrical conductivity and angular frequency as follows eq. (21), where $[M]$ is the constant matrix of problem.

$$[M]_{4 \times 4} = \frac{j\omega\sigma V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

For the eq. (19) became the load vector depends on the current density of transformer as follows eq. (22), where $[F]$ is the load vector of problem.

$$[F]_{4 \times 1} = \frac{J_0 V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Fourth, applying the boundary conditions in term of Neumann, both of the edges between oil and conductors and between oil and the frame of the transformer as Fig. (6).

Fifth, solving the linear equation for calculation a result of magnetic vector potential.

For the simulation parameters, the finite element method was used for solving the PDE in this paper. The parameters for simulation depends on the magnetic vector potential equation, which defined in eq. (20) - (22). However, All of parameter simulation shown in the Table 1.[15-16]

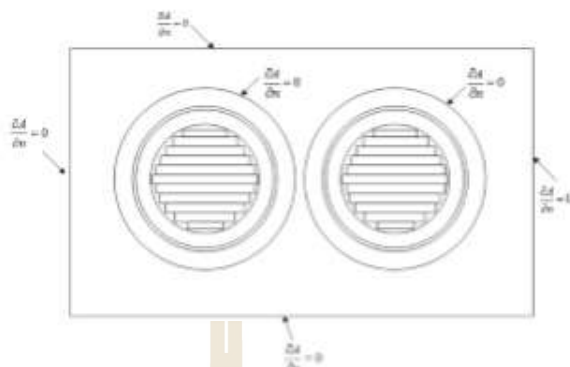


Fig.6. Define the boundary condition of the simulation system

Table 1. Parameters of autotransformer simulation

Materials constant	Material	Values
Permeability	Steel	40,000
	Copper	0.9999
	Mineral oil	2.2000
	Kraft paper	1.0000
	Free space	$4\pi \times 10^{-7}$ H/m
Electrical conductivity	Steel	2.08×10^6 S/m
	Copper	5.80×10^7 S/m
	Mineral oil	0.1080 S/m
	Kraft paper	0.9999 S/m

5. New design and simulation results

This paper has considered the magnetic vector potential in the core part of the V-connection of the autotransformer, which compare to the original core and new core design for analyzation the core losses of autotransformer when operating in the railway system which supplied from unbalance three phase system[17-19]. Moreover, the new shape design of transformer core using the electromagnetic field behavior by making all of core corner curvature with 5 mm of the radius and the new design can be shown in Fig. (7).

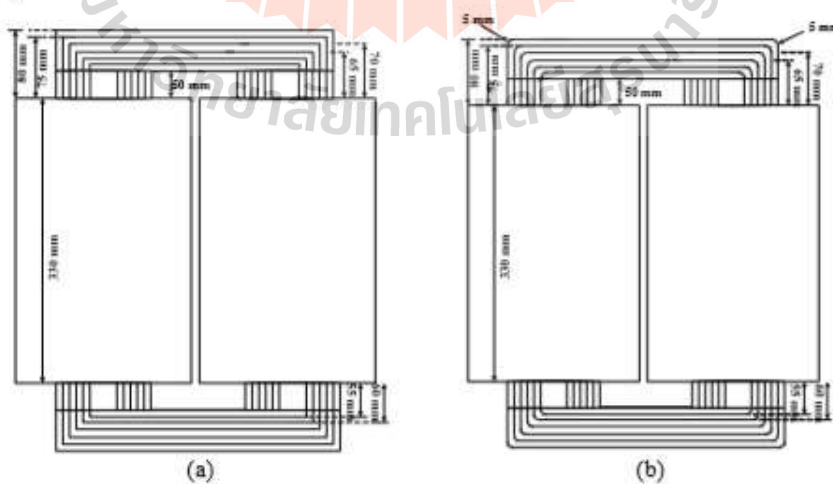


Fig.7. Structure of autotransformer (a) original core (b) new core design

For the simulation results, this paper has considered the magnetic vector potential of transformer core using finite element method and divided into three cases of supplying voltage from three-phase system, which unbalance couple phase: C-A couple phase, A-B couple phase and B-C couple phase. For the magnetic vector potential of transformer core which supplied from C-A, A-B and B-C couple phase of three-phase system shown as Fig. (8) - (10), respectively.

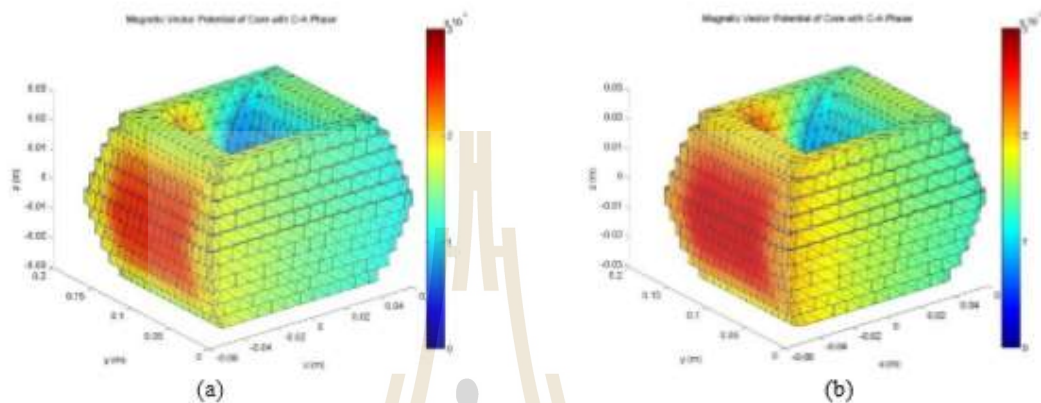


Fig. 8 A magnetic vector potential (Wb/m) for C-A couple phase (a) original core (b) new core design

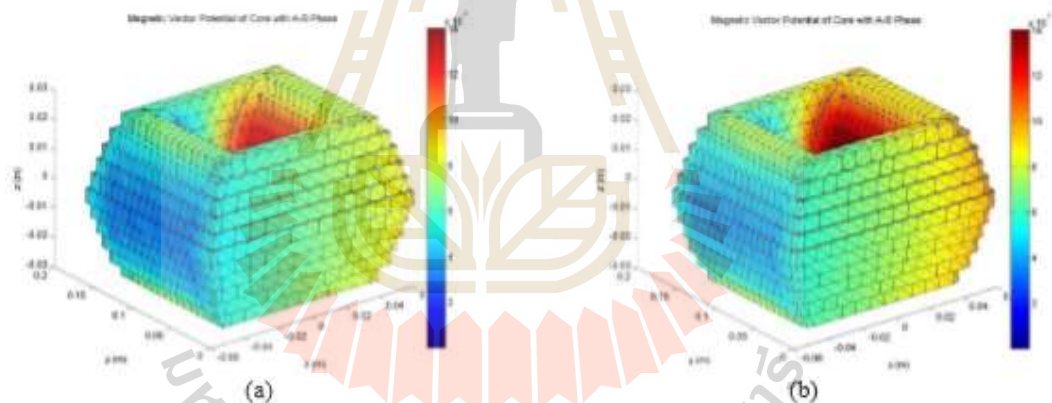


Fig. 9 A magnetic vector potential (Wb/m) for A-B couple phase (a) original core (b) new core design

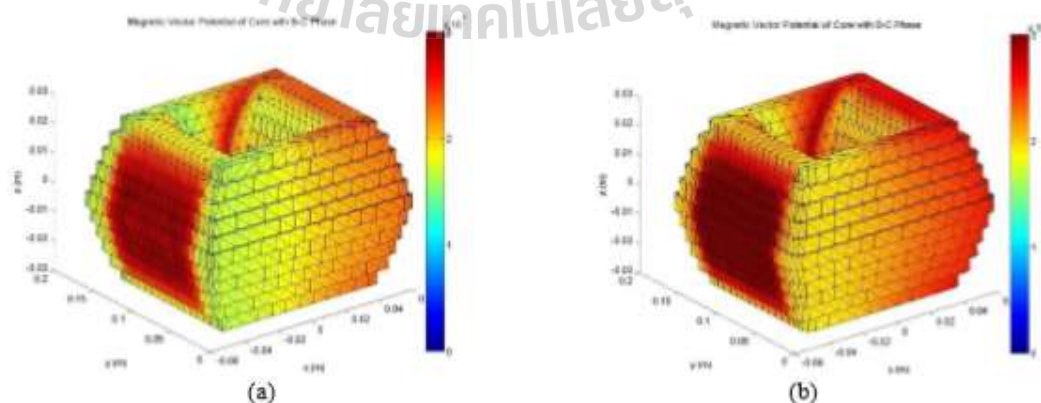


Fig. 10 A magnetic vector potential (Wb/m) for B-C couple phase (a) original core (b) new core design

According to the Fig. (8) - (10), the magnetic vector potential distribution all over the transformer core can be described by the electromagnetic field theory that the magnetic field will have a decreased when is low changing rate of a magnetic vector potential that mean more highly uniform a magnetic vector potential distribution or have a low standard deviation. This simulation result can be helped to the guideline for designing the core of the transformer. For a standard deviation comparison of magnetic vector potential of transformer core can be shown in the Table 2, which all couple phases of new transformer core have a standard deviation lower than original transformer core.

Table 2. A standard deviation of magnetic vector potential of transformer core

Three-phase supplied to primary	Original transformer core	New transformer core
A-B	0.00267	0.00237
B-C	0.00609	0.00538
C-A	0.00507	0.00449

6. Conclusion

This paper simulation via the finite element method for solving the partial differential equation of magnetic vector potential to design the core of autotransformer with V-connection while operating in the unbalance of three-phase system. In addition, the simulation presents a new design shape of transformer core for guideline to improve an efficient of transformer. The simulation results shown that the shape that has curvature of the corner of transformer core can more highly uniform a magnetic vector potential distribution. Therefore, designing technology of the core shape of the transformer is the alternating way for reducing the core loss of the transformer using in rail systems that leads to more energy saving in rail systems. On the other hand, In terms of manufacturing there are many factors to determine.

Acknowledgements

This work was supported by School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.

References

- [1] Liu, Y.C. and Chen, J.F., "Control scheme for reducing rail potential and stray current in MRT systems", In IEE Proc.-Electr. Power Appl. 152(3), pp. 612-618, May 2005
- [2] Isaramongkolrak, A. and Pao-la-or, P., Comparative study of transient voltage drop detection techniques in electric power distribution system under fault operation. *International Journal of smart grid and clean energy*, No. 3, Vol. 07, 201-206, 2017.
- [3] Dadkhah A., Bayati N., Khodadadi A., "An Investigation of the impact of size and location of DG on system reliability by employing sequential monte carlo simulation," *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications (IJEEETC)*, Vol.5, No. 1, 2016, pp. 1-11.
- [4] EN 50122-1, "Railway applications - Fixed installations - Electrical safety, earthing and the return circuit - Part 1: Protective provisions against electric shock", 2011
- [5] Zhang, Z, Wu, B., Kang, J., and Luo, L., A Multi-Purpose Balanced Transformer for Railway Traction Applications, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24(Issue 2): 711-718, April 2009.
- [6] Park, B., Kim, T., Lee, K., Kim R., and Hyun, D., Magnetic-Field Analysis on Winding Disposition of Transformer for Distributed High-speed Train Applications, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 46 (Issue 6): 1766-1769, June 2010.
- [7] Abdulaziz, I. M., *Mathematical modelling and computer simulations of induced voltage calculations in AC electric traction*, Ph.D. philosophy, Dept. Philosophy., Napier Univ., Edinburgh, ENG, 2003.
- [8] Zhao, Y., Du, Y., Cail, H., Zhang, R., and Shi, L., The influence on characteristics of movable loosely coupled transformer from metal units in urban railway system, *17th International conference on electrical machines and system*, pp. 250-253, Hangzhou, China, 2014.
- [9] Gagliardi, F., Lauria, D., Luciano, A.M., Tironi, E., Ubezio, G., New Current Balancing and Power Factor Improving Scheme. *European Trans. Electrical Power Engineering*, Vol.1, 5, Sept/Oct, 261-265, 1991.
- [10] Chari M.V.K., and Salon S.J., "Numerical Methods in Electromagnetism," *Academic Press*, USA, 2000.
- [11] Lewis W., Nithiarasu P., Seetharamu N., "Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow," John Wiley & Sons, USA, 2004.

- [12] Bunmat, A., and Pao-La-Or, P., Analysis of Magnetic Field Effects Operators Working a Power Transmission Line Using 3-D Finite Element Method. *The 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2015)*, pp.1187-1191, Pattaya, Thailand, 2015.
- [13] Pao-la-or, P., Isaramongkolrak, A., and Kulworawanichpong, T., Finite Element Analysis of Magnetic Field Distribution for 500- kV Power Transmission System. *Engineering Letters, No.1, Vol.18*, 1-9, 2010.
- [14] Vacharakup, S., Peerasaksophol, M., Kulworawanichpong, T., and Pao-la-or, P., Study of Natural Frequencies and Characteristics of Piezoelectric Transformers by Using 3-D Finite Element Method. *Applied Mechanics and Materials, Vols.110-116, 61-66*, 2012.
- [15] Demerdash, N.A., Gillett, D.H., "A new approach for determination of eddy current and flux penetration in nonlinear ferromagnetic materials," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.74, pp. 682-685, 1974.
- [16] Shahsavari, S., and Sarfi, H., "Study of The System Characteristics on The Performance of The Sheet Metal Electromagnetic Forming," *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications (JEETC)*, Vol. 6, No. 1, 2017, pp. 1-11.
- [17] Gayathri, G., Sindhu Bharathi, K., Kamal, C., "A Modification of Railway Electrification System using Converter," *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications (JEETC)*, Vol. 1, No. 1, 2015, pp. 367-375.
- [18] Uma Siva Naga Prasad, A., "High Efficiency Three Phase Transformer Less MOSFET Inverter to drive PMSM Motor," *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications (JEETC)*, Vol.4, No. 3, 2015, pp. 85-90.
- [19] Ramesh, K., Mallikharjuna Rao, Y., "Power Transformer Protection Using Wavelets," *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications (JEETC)*, Vol.3, No. 4, 2014, pp. 14-21.

ประวัติผู้เขียน

นายอานนท์ อิศรมงคลรักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 5 สิงหาคม พ.ศ.2526 เกิดที่อำเภอเมือง จังหวัดศรีสะเกษ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) และปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ.2548 และ พ.ศ.2553 ตามลำดับ และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอกวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ.2558 โดยขณะกำลังศึกษาระดับปริญญาเอกได้เป็นผู้สอนในวิชาปฏิบัติการต่างๆของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีผลงานตีพิมพ์ดังปรากฏรายละเอียดในภาคผนวก ข

