บทที่ 1

บทนำ

ในสภาวะปัจจุบันความต้องการกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเป็นลำดับ อันเนื่องมาจากการพัฒนาอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีต่างๆที่ก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ยังผลให้มีการผลิตกระแสไฟฟ้าสลับ ส่งกระแสไฟฟ้าสลับ และจำหน่ายกระแสไฟฟ้าสลับเป็นปริมาณมาก เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นเป็นลำดับ สิ่งหนึ่งที่เกิดขึ้นในบริเวณที่มีกระแสไฟฟ้าสลับไหลผ่านเป็นปริมาณมาก คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ได้แก่ บริเวณบัสบาร์ (busbar), บริเวณใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง, ห้องควบคุมภายในสถานีไฟฟ้าย่อย เป็นต้น (ปิยะบุตร พฤกษานุบาล, 2541) ลักษณะสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จัดว่าเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ต่ำมาก ($f < 1000\,Hz$) หรือที่รู้จักกันในชื่อช่วงความถี่ ELF (extremely low frequency) อำนาจของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะมีลักษณะของสนามแม่เหล็กสถิตคล้าย (quasi-static magnetic fields) เนื่องจากกระแสกระจัด (displacement current) ที่เกิดขึ้นในอวกาศว่างมีค่าน้อยมาก สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่เกิดขึ้นเหล่านี้ จะมีผลกระทบหรือรบกวนต่อการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวต่อสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก อาทิเช่น เครื่องมือทางการแพทย์, อุปกรณ์ที่มีหลอดภาพเป็นส่วนประกอบ เป็นต้น ยังผลให้การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้มีความผิดพลาด เช่น การบันทึกข้อมูลของเครื่องคอมพิวเตอร์, การอ่านค่าของเครื่องวัดต่างๆ เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจมีอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ด้วย (Hasselgren and Luomi, 1995)

การศึกษาผลการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำมากเป็นปัญหาที่มีผู้สนใจทำวิจัยกันมาก อาทิเช่น

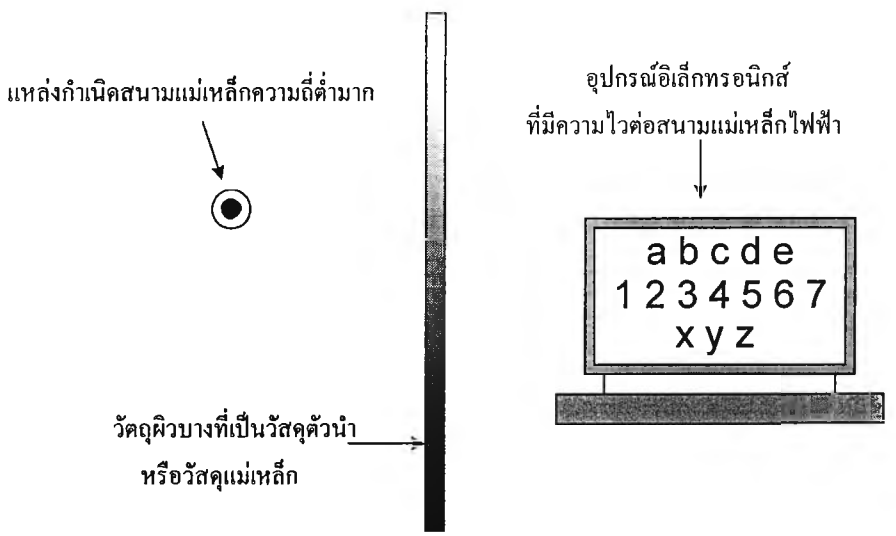
LaMacchia (1992) ศึกษาถึงผลกระทบของสิ่งมีชีวิตที่ได้รับจากจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

Scherer (1994) ศึกษาถึงผลกระทบของอวัยวะต่างๆที่ได้รับจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า อาทิเช่น สมอง เม็ดเลือดแดง เป็นต้น

Grissom (1996) ศึกษาถึงผลกระทบของปฏิกิริยาเอมไซม์ที่ได้รับจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยกระบวนการทางเคมี

The Stewart report (2000) ศึกษาถึงผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่จากโทรศัพท์เคลื่อนที่ต่อมนุษย์

การปิดกั้นหรือลดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากสามารถทำได้ โดยการนำวัตถุที่เป็นวัสดุแม่-เหล็ก (ferromagnetic material) หรือวัสดุตัวนำ (conductor material) มาปิดกั้นหรือล้อมรอบแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากไว้ดังรูปที่ 1.1 วัสดุที่นำมาทำหน้าที่ปิดกั้นหรือลดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก จะเรียกว่า "วัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากหรือชีลด์แม่เหล็ก" (magnetic shield material)



รูปที่ 1.1 การนำวัสดุแม่เหล็กหรือวัสดุตัวนำมาปิดกั้นหรือลดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก

1.1 กลไกการปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก

การปิดกั้นหรือลดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากด้วยวัสดุแม่เหล็กและวัสดุตัวนำ สามารถเกิดขึ้นได้โดยกลไกการปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก ดังนี้ (Hoburg,1995)

1. The flux shunting shielding mechanism

การปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากตามกลไกนี้จะเกิดขึ้นกับวัสดุแม่เหล็ก (ferromagnetic material) หรือวัสดุที่มีความซาบซึมได้สูง (high peameability :μ_r) อาทิเช่น mild steel (μ_r=2000), Silicon iron (μ_r=7000) เป็นต้น เมื่อวางวัสดุแม่เหล็กลงในสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่อยู่ภายในบริเวณอวกาศว่างตามทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า พฤติกรรมของความเข้มสนามแม่เหล็ก $\vec{H}$ และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก $\vec{B}$ ที่บริเวณผิวของวัสดุแม่เหล็กจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขต 2 ประการ ดังต่อไปนี้

1.องค์ประกอบในทิศทางแนวสัมผัสของเวกเตอร์ความเข้มสนามแม่เหล็ก $\bar{H}$ ต้องต่อเนื่องกันตลอดในวัสดุแม่เหล็กและในอากาศเพื่อที่จะสอดคล้องกับกฎของแอมป์แปร์ (ampere's law)

2.องค์ประกอบในทิศทางแนวตั้งฉากของเวกเตอร์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก $\bar{B}$ ต้องต่อเนื่องกันตลอดในวัสดุแม่เหล็กและในอากาศเพื่อที่จะสอดคล้องกับกฎของเกาส์ (gauss's law)

เนื่องจากความแตกต่างของความซาบซึมได้ระหว่างวัสดุแม่เหล็กและอากาศมีมาก จึงเป็นสาเหตุให้ทิศทางของความเข้มสนามแม่เหล็ก $\bar{H}$ และทิศทางของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก $\bar{B}$ ที่บริเวณผิวรอยต่อจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเพื่อที่จะสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขต โดยทิศทางของความเข้มสนามแม่เหล็ก $\bar{H}$ และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก $\bar{B}$ ในวัสดุแม่เหล็กจะมีทิศทางในลักษณะลู่ขนานไปกับผิวรอยต่อ ขณะเดียวกันทิศทางของความเข้มสนามแม่เหล็ก $\bar{H}$ ในอากาศจะมีทิศทางลักษณะลู่ตั้งฉากกับผิวรอยต่อดังรูปที่ 1.2 ก. แสดงลักษณะกลไกการปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากวัสดุที่มีความซาบซึมได้สูงและมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกกลม จะพบว่าปริมาณฟลักซ์แม่เหล็ก $\bar{B}$ จะหนาแน่นมากในบริเวณผิววัสดุ ขณะเดียวกันฟลักซ์แม่เหล็ก $\bar{B}$ ในบริเวณอื่นก็จะลดลง จึงเป็นสาเหตุให้ความเข้มสนามแม่เหล็ก $\bar{H}$ ภายในทรงกระบอกกลมลดลง กลไกการปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่สามารถลดความเข้มสนามแม่เหล็ก $\bar{H}$ ได้โดยวัสดุที่มีความซาบซึมได้สูง จะมีชื่อเรียกว่า "The flux shunting shielding mehanism"

นอกจากวัสดุมีความซาบซึมได้สูงแล้ว การลดขนาดความเข้มสนามแม่เหล็ก $\bar{H}$ ยังขึ้นกับความหนาของวัสดุแม่เหล็กด้วย เนื่องจากวัสดุแม่เหล็กมีความหนามากขึ้นเท่าใดก็จะทำให้ปริมาณฟลักซ์แม่เหล็ก $\bar{B}$ ลู่เข้าไปในเนื้อวัสดุได้มากขึ้น จึงทำให้ความเข้มสนามแม่เหล็ก $\bar{H}$ ในบริเวณอากาศมีค่าลดน้อยลง

ข้อดีการปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากตามกลไกนี้ คือ ปิดกั้นหรือลดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากได้ดีกับวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่มีขนาดใหญ่และหนามาก

ข้อเสียการปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากตามกลไกนี้ คือ ทำให้วัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากมีน้ำหนักมากและวัสดุมีราคาแพง

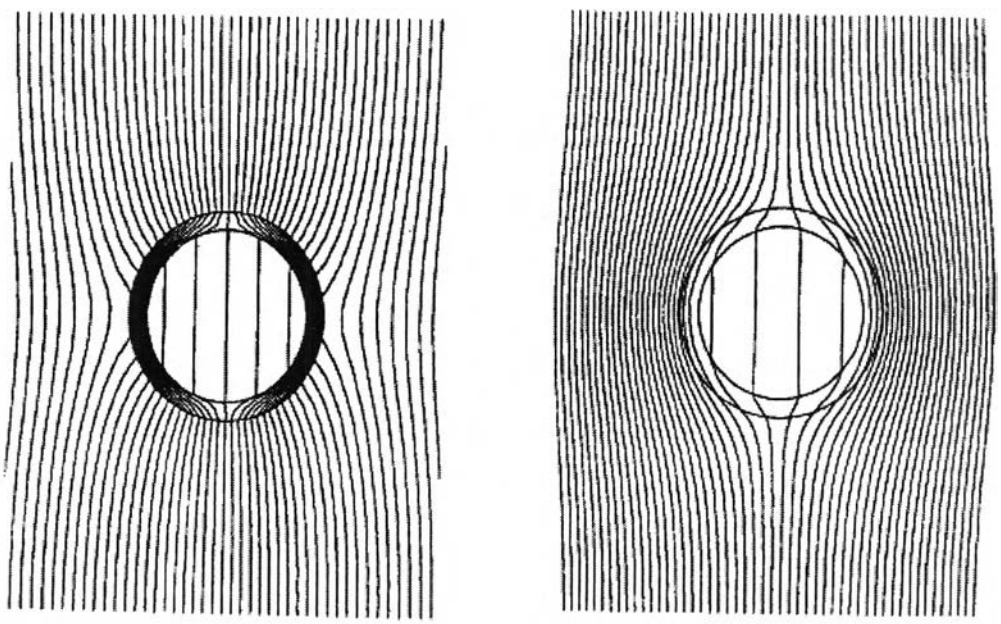
2. The induce current shielding mechanism

การปิดกั้นหรือลดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากตามกลไกนี้เกิดขึ้นกับวัสดุตัวนำ (conductor material) หรือวัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูง (high conductivity : σ) อาทิเช่น เงิน (σ=6.1*10^7S/m), ทองแดง (σ=5.76*10^7S/m), อลูมิเนียม (σ=3.96*10^7S/m) เป็นต้น กลไกนี้จะเกิดขึ้นเมื่อวางวัสดุตัวนำลงในสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นในวัสดุตัวนำ ทั้งนี้เป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ (faraday's law) สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวัสดุตัวนำนี้จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลบนผิวตัวนำ กระแสเหนี่ยวนำนี้มีชื่อเรียกว่า "กระแสเอ็ดดี" (eddy current)

กระแสเอ็ดดีนี้จะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาหักล้างกับสนามแม่เหล็กเดิม ทำให้สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากภายในบริเวณนั้นมีค่าลดลงดังรูปที่ 1.2 ข. แสดงลักษณะกลไกการปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากด้วยวัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงและมีรูปร่างทรงกระบอกกลม อันเนื่องมาจากการเกิดกระแสเอ็ดดีที่ผิวของวัสดุตัวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาหักล้างกับสนามแม่เหล็กเดิม ทำให้สนามแม่เหล็กภายในวัสดุตัวนำมีค่าลดลง สำหรับกลไกการปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่สามารถลดความเข้มสนามแม่เหล็ก $\bar{H}$ ได้โดยใช้วัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงและเกิดขึ้นกับสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลง จะมีชื่อเรียกว่า "The induced current shielding mechanism"

ข้อดีการปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากตามกลไกนี้ คือ ปิดกั้นหรือลดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากได้ดีกับวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่มีขนาดเล็ก

ข้อเสียการปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากตามกลไกนี้ คือ ค่าสัมประสิทธิการสะท้อนและการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย (Schulz, Plantz and Brush, 1988)



ก. ข.

The flux shunting shielding mechanism The induce current shielding mechainsm

รูปที่ 1.2 ลักษณะการลดลงของสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่เกิดขึ้นจาก
กลไกการปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก

1.2 การศึกษางานวิจัยในอดีต

จากการศึกษางานวิจัยที่ได้นำเสนอในอดีต สามารถแบ่งการวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากออกเป็น 2 วิธีดังนี้

1. วิธีเชิงวิเคราะห์ (analytic method) สามารถวิเคราะห์ได้ดีกับวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่มีรูปร่างสมมาตรเท่านั้น อาทิเช่น แผ่นระนาบ ทรงกระบอก ทรงกลม เป็นต้น ขณะเดียวกับวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่มีรูปร่างใดๆ (arbitrary shape) จะหาผลเฉลยที่เกิดขึ้นได้ยากหรือไม่ได้เลย วิธีเชิงวิเคราะห์จะให้ผลเฉลยในระยะเวลาอันสั้นและมีความแม่นตรงสูง (Krawczyk and Tegopoulos, 1993) สำหรับตัวอย่างงานวิจัยที่มีผู้เสนอใช้วิธีเชิงวิเคราะห์มาวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก ได้แก่ Schulz, Plantz and Brush (1988) Hoburg (1995) เป็นต้น

2. วิธีเชิงตัวเลข (numerical method) จากข้อจำกัดของวิธีเชิงวิเคราะห์ในการวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กตวามถี่ต่ำมาก จึงได้มีผู้วิจัยกลุ่มหนึ่งนำเสนอวิธีเชิงตัวเลขขึ้นแทนวิธีเชิงวิเคราะห์ ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

2.1 กลุ่มวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่มักจะถูกนำเสนอขึ้นมาวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากอยู่เสมอ เนื่องจากวิเคราะห์วัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่มีรูปร่างใดๆได้ดี ขณะเดียวกันมีจุดด้อย คือ ไม่สามารถที่จะหาผลเฉลยบริเวณเงื่อนไขขอบเขตเปิดโล่งได้ เนื่องจากไม่สามารถที่จะแบ่งอีลีเมนต์ตามขั้นตอนของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ถึงระยะอนันต์ได้และปัญหาหน่วยความจำ (memory) ที่ไม่เพียงพอในการคำนวณ สำหรับตัวอย่างงานวิจัยที่มีผู้เสนอโดยใช้วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์วิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก ได้แก่

Hasselgren and Luomi (1995) นำเสนอวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์วิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากกรณีวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากมีรูปร่างต่างๆ อาทิเช่น ทรงกลม ทรงกระบอกกลม แผ่นระนาบ สี่เหลี่ยมมุมฉากที่ด้านเปิดด้านหนึ่ง เป็นต้น การวิเคราะห์เริ่มจากสมการสเกลาร์เฮลม์โฮมส์ ดำเนินการหาผลเฉลยผ่านเทอมศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก แบ่งโดเมนที่ต่อเนื่องทั้งหมดของปัญหาออกเป็นอีลีเมนต์สามเหลี่ยม และประมาณผลเฉลยคำตอบด้วยฟังก์ชันรูปร่างเชิงเส้น (linear element) จากแนวคิดที่ได้นำเสนอพบว่าจำนวนอีลีเมนต์ที่ใช้หาผลเฉลยจะมีจำนวนมาก คือ ประมาณ 2,000-5,000 อีลีเมนต์

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Feliziani and Maradei (1998) นำเสนอวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ร่วมกับความสัมพันธ์เงื่อนไขขอบเขตอิมพีแดนซ์ (impedace boundary condition) ที่บริเวณผิววัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก โดยประมาณให้ผลเฉลยของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากเป็นคลื่นระนาบที่เดินทางไปตามความหนาของวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก จากแนวความคิดนี้ ทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากผิวด้านหนึ่งไปยังผิวอีกด้านหนึ่งของวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากได้โดยไม่ต้องแบ่งอีลีเมนต์ในเนื้อวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากแต่อย่างใด อย่างไรก็ตามการประมาณดังกล่าวไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่มีลักษณะวางเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ (laminate shields)

2.2 กลุ่มวิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์ จากข้อด้อยของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ในการหาผลเฉลยที่บริเวณเงื่อนไขขอบเขตเปิดโล่ง จึงมีผู้วิจัยกลุ่มหนึ่งนำเสนอวิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์ขึ้นมาแทน วิธีบาวน์ดารี-อีลีเมนต์จะแบ่งอีลีเมนต์ที่ใช้หาผลเฉลยเฉพาะบนขอบเขตปัญหาเท่านั้น ทำให้จำนวนอีลีเมนต์ที่ใช้หาผลเฉลยมีจำนวนน้อย ซึ่งจุดนี้เป็นจุดเด่นของวิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์ที่จะนำมาใช้หาผลเฉลยบริเวณเงื่อนไขขอบเขตเปิดโล่ง แต่วิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์มีจุดด้อย คือ การเกิดจุดเอกฐาน (singularity) ขึ้นในระบบสมการได้ สำหรับตัวอย่างงานวิจัยที่มีผู้เสนอโดยใช้วิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์มาวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก ได้แก่

Pawluk and Kucharska (1996) นำเสนอการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่บริเวณเงื่อนไขขอบเขตเปิดโล่งบนฉากตัวนำผ่านเทอม bi-scalar $\tau_m - \sigma_m$ โดยที่ τ_m คือ ความหนาแน่นผิวไดโพลของประจุแม่เหล็กบนฉากตัวนำ σ_m คือ ความหนาแน่นผิวโมโนโพลของประจุแม่เหล็กบนขอบเขตคอยล์ (coil)

Zheng and Davey (1996) นำเสนอการหาผลเฉลยสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากโดยใช้การพิจารณากระแสเชิงผิว (K) บนผิวแต่ละด้านของวัสดุแม่เหล็กและประมาณผลเฉลยคำตอบด้วยฟังก์ชันรูปร่างเชิงเส้น จากแนวคิดนี้พบว่าสามารถใช้ได้ดีในกรณีที่วัสดุแม่เหล็กยังมีความหนาอยู่มาก คือ 5 มิลลิเมตรและ 10 มิลลิเมตรตามลำดับและแนวคิดที่นำเสนอจะเหมาะสมกับวัสดุแม่เหล็กเท่านั้น

2.3 กลุ่มวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับวิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์ จากจุดด้อยของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์และวิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์ในการวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก จึงได้มีผู้วิจัยกลุ่มหนึ่งเสนอการรวมวิธีทั้งสองเข้าด้วยกัน เพื่อที่จะวิเคราะห์หาสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่เกิดขึ้นได้ตลอดทั้งโดเมนปัญหา คือ บริเวณวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากและบริเวณเงื่อนไขขอบเขตเปิดโล่ง

สำหรับตัวอย่างงานวิจัยที่มีผู้เสนอวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับวิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์มาวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก ได้แก่

Wakao and Onuki (1995) นำเสนอการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากกรณีปัญหา 3 มิติด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับวิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์ โดยประมาณผลเฉลยคำตอบด้วยอีลีเมนต์ขอบ (edge element) ดำเนินการหาผลเฉลยโดยพิจารณาความเข้มสนามแม่เหล็ก $\vec{H}$ และศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก (A^*) การวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ คือ

1. บริเวณภายในตัวนำวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากจะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์

2. บริเวณอวกาศว่าง ซึ่งแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากจะอยู่ภายในบริเวณนี้ด้วยจะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์

3. บริเวณที่เป็นวัสดุแม่เหล็กจะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์ ดำเนินการหาผลเฉลยของความเข้มสนามแม่เหล็ก $\vec{H}$

บริเวณที่มีการรวมวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์และวิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์เข้าด้วยกัน คือ บริเวณขอบเขตของผิวตัวนำวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก อย่างไรก็ตามแนวคิดที่ได้นำเสนอพบว่าจำนวนอีลีเมนต์ที่แบ่งในเนื้อวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากจะมีจำนวนมาก และปัญหาการเกิดจุดเอกฐานขึ้นในระบบสมการอยู่

Junyou, Renyuan, Chengyuan, Meiwen and Yongbin (1996) นำเสนอการวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากตัวนำที่มีกระแสสูงๆ (heavy current carring conductors) ในหม้อแปลงด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับวิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์ โดยบริเวณเงื่อนไขขอบเขตเปิดโล่งจะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์ การวิเคราะห์เริ่มจากสมการเบาวน์ดารีอินทิกรัล ดำเนินการหาผลเฉลยโดยใช้เทอมศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กและศักย์ไฟฟ้า (electric scalar potential : φ) สำหรับบริเวณหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กจะวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ ดำเนินการหาผลเฉลยผ่านเทอมของ $T-\Omega$ โดยที่ T คือ ศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้า (electric vector potential) และ Ω คือ ศักย์แม่เหล็ก (magnetic scalar potential)

1.3 แนวทางและขอบเขตการวิจัย

จากการนำเสนอวิธีวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก จะพบว่าวิธีเชิงตัวเลขเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เนื่องจากมีความยืดหยุ่นกับการวิเคราะห์วัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่มีรูปร่างใดๆได้ดีเมื่อเทียบกับวิธีเชิงวิเคราะห์ และจากการนำเสนอ

งานวิจัยในอดีตจะพบปัญหาการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากด้วยวิธีเชิงตัวเลขอยู่ 2 ประการ คือ

1. การแบ่งอีลีเมนต์สามเหลี่ยมในเนื้อวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่มีลักษณะบางอีลีเมนต์ที่ถูกแบ่งในเนื้อวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากและโดยรอบจะมีขนาดเล็ก ทำให้จำนวนอีลีเมนต์ที่ใช้หาผลเฉลยมีจำนวนมาก

2. การหาผลเฉลยบริเวณเงื่อนไขขอบเขตเปิดโล่ง เนื่องจากไม่สามารถที่จะแบ่งอีลีเมนต์ตามขั้นตอนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ถึงระยะอนันต์ได้และปัญหาหน่วยความจำ (memory) ที่ไม่เพียงพอในการนำมาคำนวณหาผลเฉลย

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับวิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์ขึ้นมาเป็นวิธีวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก สำหรับเหตุผลที่ได้นำเสนอวิธีดังกล่าว คือ

1.จะทำให้ทราบผลเฉลยสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่เกิดขึ้นตลอดทั้งโดเมนที่ต่อเนื่องของปัญหา คือ บริเวณรอบวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก จะหาผลเฉลยด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ และบริเวณเงื่อนไขขอบเขตเปิดโล่ง จะหาผลเฉลยด้วยวิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์ ซึ่งทำให้ทราบค่าสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากตลอดบริเวณโดเมนของปัญหา

2. ทำให้ไม่ประสบปัญหาการเกิดจุดเอกฐานขึ้นในระบบสมการ เนื่องจากบริเวณที่เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากจะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์

3. ลดจำนวนอีลีเมนต์ที่หาผลเฉลยลง โดยวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งเนื้อวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากออกเป็นอีลีเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าแทนอีลีเมนต์สามเหลี่ยม ลักษณะของอีลีเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าจะมีด้านยาวยาวกว่าด้านกว้างอยู่มาก จึงทำให้อีลีเมนต์สามเหลี่ยมรอบวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากจะมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย ยังผลให้ลดจำนวนอีลีเมนต์ที่ใช้หาผลเฉลยลง

การวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากในวิทยานิพนธ์นี้ จะเริ่มจากสมการสเกลาร์เฮลม์โฮมส์ (Helmholtz equation) ดำเนินการหาผลเฉลยโดยใช้ศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก (magnetic vector potential : A) เช่นเดียวกับงานวิจัยในอดีต ประมาณผลเฉลยคำตอบด้วยฟังก์ชันรูปร่างอันดับสอง (quadratic element) และวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยเนื้อหาต่างๆ ดังนี้

บทที่ 1. บทนำ กล่าวถึง ความเป็นมาของงานวิจัย กลไกการปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากด้วยวัสดุแม่เหล็กและวัสดุตัวนำ นำเสนองานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก ตลอดจนแนวทางและขอบเขตการวิจัย รวมทั้งประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 2. วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับวิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์ กล่าวถึง ที่มาของสมการพื้นฐานการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากในรูปของสมการสเกลาร์เฮลมโฮลม์ (Scalar Helmholtz) แบบจำลองการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากกรณี 2 มิติ แนวคิดของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับวิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์ รวมทั้งการนำเสนอผลการทดสอบความถูกต้องของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับวิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์กรณีสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่เกิดจากกระแสไหลเป็นเส้นตรงยาวอนันต์

บทที่ 3. วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ กล่าวถึง รายละเอียดของการหาผลเฉลยบริเวณรอบวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ อีลีเมนต์สามเหลี่ยมและอีลีเมนต์สี่เหลี่ยมที่นำมาหาผลเฉลยสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก รวมทั้งการนำเสนอผลการทดสอบความถูกต้องของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กรณีสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่เกิดจากกระแสไหลเป็นเส้นตรงยาวอนันต์

บทที่ 4. วิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์ กล่าวถึง การจัดรูปสมการการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่อยู่ในรูปสมการลาปาซให้อยู่ในรูปสมการเบาวน์ดารีอินทิกรัล ซึ่งเป็นสมการเริ่มต้นในการหาผลเฉลยบริเวณเงื่อนไขขอบเขตเปิดโล่งด้วยวิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์ การหาผลเฉลยสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากด้วยวิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์

บทที่ 5. ตัวอย่างผลการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก กล่าวถึง ผลการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่เกิดขึ้นก่อนและหลังการมีวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก ซึ่งนำเสนอในรูปค่าประสิทธิผลการชีลด์โดยเทียบกับงานวิจัยในอดีต พร้อมทั้งผลการศึกษาค่าปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าประสิทธิผลการชีลด์ อาทิเช่น ความซาบซึมได้ ค่าสภาพนำไฟฟ้า ความถี่ ความหนา และระยะห่างของวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก

บทที่ 6. บทสรุปและข้อเสนอแนะ กล่าวถึง ข้อสรุปการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ พร้อมกับข้อเสนอแนะและแนวทางในการนำไปพัฒนาปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่มีคุณภาพและประสิทธิภาพให้มากยิ่งขึ้น

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

1.ได้องค์ความรู้ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากทั้งก่อนและหลังการมีวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับวิธีบาวน์ดารีอีลีเมนต์

2.โปรแกรมการวิเคราะห์สำหรับออกแบบวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก

3.ทราบคุณสมบัติการปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากของวัสดุชนิดต่างๆที่มีรูปร่างใดๆ