

อภิวัดสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

Metamaterials for Optimizing Wireless Power Transfer

วัชระ อมศิริ* และวันชัย ไพจิตโรจนา

กลุ่มวิจัยเทคโนโลยีควอนตัมและแม่เหล็กไฟฟ้า

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Watchara Amasiri* and Wanchai Pijitrojana

Quantum Technology and Electromagnetic Research Group,

Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering,

Thammasat University, Rangsit Centre,

Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนออภิวัดสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย โดยนำเสนอโครงสร้างพื้นฐานของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย แนวโน้มการนำระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ จากนั้นนำเสนออภิวัด ประเภทและประโยชน์ของอภิวัด การวิเคราะห์อภิวัดเชิงวิศวกรรมแม่เหล็กไฟฟ้า รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และความเป็นไปได้ในการสร้างอภิวัดเพื่อใช้ในระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบต่าง ๆ โดยแสดงแนวโน้มว่ามีความเป็นไปได้ในการนำอภิวัดเพื่อใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

คำสำคัญ : อภิวัด; การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย; การปรับปรุงประสิทธิภาพ

Abstract

Metamaterials for optimizing wireless power transfer (WPT) were studied by examining WPT trends in different areas. Classifying, using, and analyzing metamaterials in terms of electromagnetic properties was considered. Related research and the possibility of creating metadata for use in different WPT systems was also taken into account. Results were that in all likelihood, metamaterials may be used in optimizing WPT.

Keywords: metamaterial; wireless power transfer; efficiency improvement

1. บทนำ

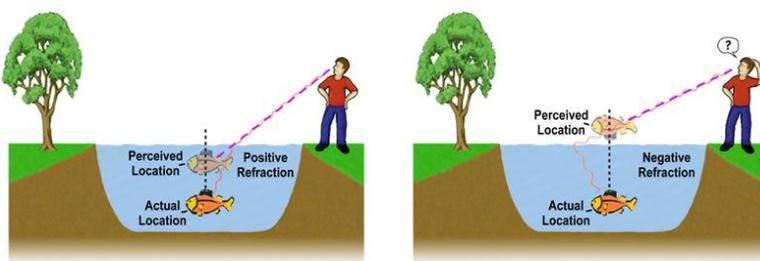
การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย (wireless power transfer, WPT) หมายถึง การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยไม่อาศัยตัวนำ ซึ่งหมายความถึงการที่ไม่มีส่วนของต้นทางของแหล่งพลังงาน (source) สัมผัสกับปลายทาง (target) ของการส่งพลังงาน โดยมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ทำให้สามารถส่งพลังงานได้มีระยะทางโดยไม่ต้องอาศัยตัวนำ ตัวอย่างของการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายที่เห็นได้ชัด และมีบทบาทมากในชีวิตประจำวัน คือ การส่งพลังงานจากดวงอาทิตย์มายังโลก จากนั้นนำมาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) รวมไปถึงการส่งพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายเพื่อประจุพลังงานให้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งเป็นอุปกรณ์พื้นฐานในโทรศัพท์เคลื่อนที่หลายแบบ

อย่างไรก็ตาม การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย แม้จะไม่ใช้ตัวนำในการส่งพลังงานระหว่างกัน แต่ก็ยังจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนพลังงาน ซึ่งจากเดิมอยู่ในรูปแบบของกระแสไฟฟ้าที่ส่งผ่านตัวนำชนิดต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปแบบอื่น ได้แก่ พลังงานแสง สนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายมีข้อจำกัด เนื่องจากสมบัติทางกายภาพของการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายชนิดนั้น ๆ ทำให้ประสิทธิภาพในการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายจากต้นทางไปยังปลายทางต่ำลง ซึ่งรูปแบบของการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายต่าง ๆ และปัจจัยอันเป็นสาเหตุที่ทำให้

ประสิทธิภาพของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายลดลงซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

ด้วยองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์กายภาพและวิศวกรรมแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งใช้อธิบายสมบัติของวัสดุต่าง ๆ นั้น มีการตั้งข้อสังเกตเกี่ยวกับวัสดุชนิดหนึ่งที่มีความยอมทางแม่เหล็กไฟฟ้า (permittivity) และค่าความซึบซาบทางแม่เหล็กไฟฟ้า (permeability) อย่างที่ไม่เคยปรากฏในธรรมชาติมาก่อน กล่าวคือ มีความสนใจในพฤติกรรมของวัสดุที่มีค่าความยอม และ/หรือค่าความซึบซาบเป็นลบ หรือมีค่าเข้าใกล้หรือเป็นศูนย์ ซึ่งการที่ค่าความยอมและค่าความซึบซาบของวัสดุเป็นลบนี้ จะทำให้มีค่าดัชนีหักเห (refractive index) ของวัสดุนั้นเป็นลบ เรียกว่าวัสดุนี้อีกว่าอภิวัด (metamaterial) เป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่างจากวัสดุทั่วไป โดยสามารถออกแบบอภิวัดนี้ให้มีพฤติกรรมทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ตามต้องการ

ค่าดัชนีหักเหสามารถพิจารณาให้เข้าใจได้ง่าย โดยสังเกตจากการหักเหของแสงที่จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งในน้ำ ซึ่งมีค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นบวก มุมของการหักเหของแสงจะทำให้การมองเห็นวัตถุใต้น้ำอยู่สูงชันจากความเป็นจริง แต่ในกรณีที่มีค่าดัชนีหักเหของอภิวัดเป็นลบนั้น อาจทำให้การมองเห็นวัตถุลอยสูงชันใต้น้ำได้ เนื่องจากพฤติกรรมการหักเหของแสงที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากค่าดัชนีหักเหเป็นลบ

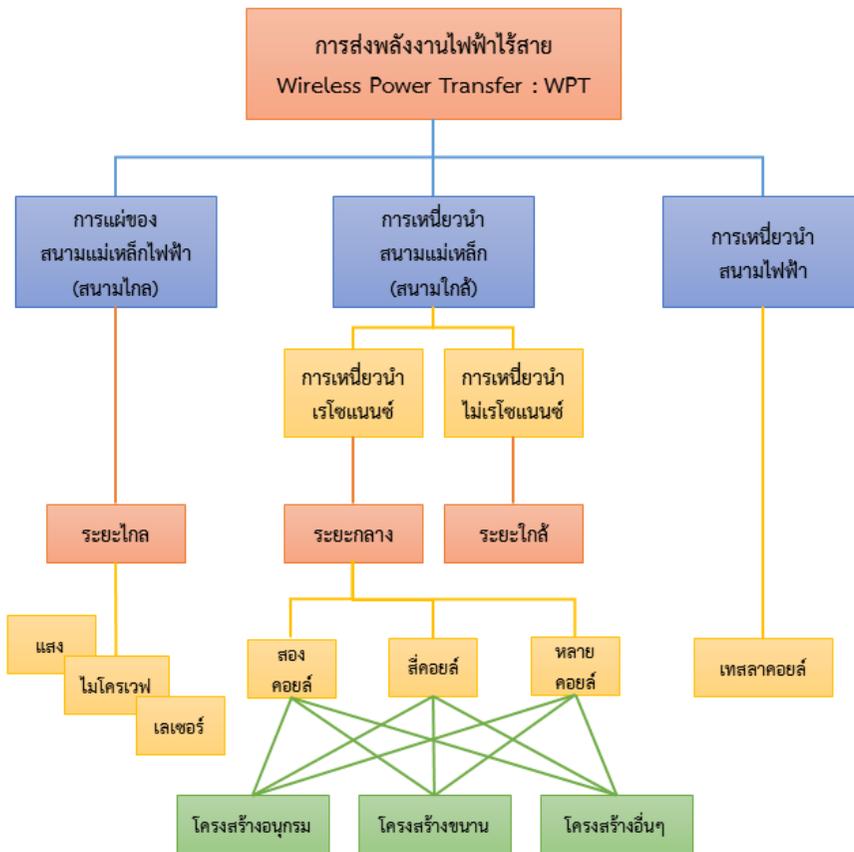


รูปที่ 1 การแบ่งประเภทของการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

ด้วยการที่อภิวัดสามารถปรับปรุงพฤติกรรมทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้นี้ ทำให้มีความเป็นไปได้ในการนำอภิวัดมาใช้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย ซึ่งจะได้มีการปริทัศน์วรรณกรรม รวมถึงวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำอภิวัดมาใช้ในการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย บทความวิชาการนี้ประกอบด้วยหัวข้อที่ 1 บทนำ หัวข้อที่ 2 กล่าวถึงระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายและอภิวัดโดยย่อ หัวข้อที่ 3 ระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย ซึ่งครอบคลุมการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายที่มีการวิจัยและพัฒนาในปัจจุบัน หัวข้อที่ 4 อภิวัดชนิดต่าง ๆ และความสัมพันธ์ในการนำไปใช้งานในระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย และหัวข้อที่ 5 เป็นบทสรุปการปริทัศน์

2. ระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย หมายถึง การส่งพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดต้นทาง (source) ไปยังปลายทาง (target) โดยไม่อาศัยตัวนำทางไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายสามารถจัดได้เป็นประเภทตามลักษณะของการแพร่ (radiation) หรือการเหนี่ยวนำ (coupling) ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่ปลายทาง แบ่งเป็น 3 ลักษณะ คือ (1) การแพร่ของแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) (2) การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (magnetic coupling) และ (3) การเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้า (electric coupling) โดยรูปที่ 2 แสดงการแบ่งประเภทของการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย



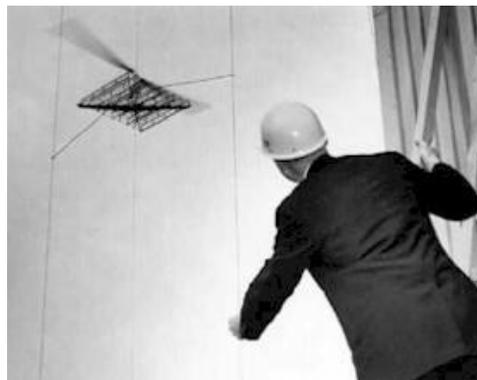
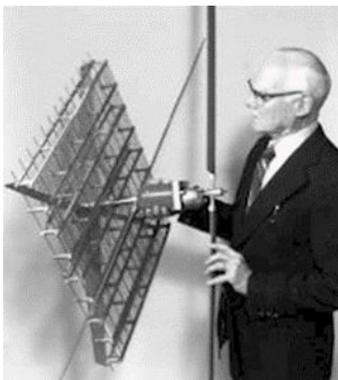
รูปที่ 2 การแบ่งประเภทของการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

2.1 การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยอาศัยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (สนามไกล)

การส่งพลังงานไร้สายที่มีมาตลอดในอารยธรรมของมวลมนุษยชาติ คือ การส่งพลังงานจากดวงอาทิตย์มายังโลกในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งนำมาใช้ในชีวิตประจำวัน ต่อมาได้มีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อใช้ในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกทางหนึ่งและนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังมีความพยายามในการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายในระยะทางที่ไกลขึ้นโดยไม่อาศัยตัวนำ ได้แก่ การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยใช้สายอากาศรูปสี่เหลี่ยม การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยใช้แสงที่มีความเข้มสูงหรือเลเซอร์ เมื่อพิจารณาการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายเหล่านี้ด้วยความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมแม่เหล็กไฟฟ้า จะเห็นลักษณะว่าเป็นการใช้ประโยชน์จากสนามไกล (far field) ซึ่งสามารถทำให้ส่งพลังงานได้ในระยะทางไกล

การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยคลื่นไมโครเวฟเริ่มต้นศึกษาวิจัยพัฒนาในปี ค.ศ. 1964 โดย วิลเลียม ซี บราวน์ ซึ่งได้รับการขนานนามจากสถาบัน

วิชาชีพวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) ว่าเป็นบิดาแห่งการส่งพลังงานด้วยไมโครเวฟ โดยสาธิตการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ความถี่ย่านไมโครเวฟให้กับโมเดลเฮลิคอปเตอร์ได้สำเร็จ (รูปที่ 3) โดยในการวิจัยใช้สายอากาศแบบสี่เหลี่ยม (rectenna) ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ จากนั้นแปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงไปใช้กับมอเตอร์กระแสตรง ได้เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ที่ระยะทาง 1 ไมล์ มีค่าประสิทธิภาพร้อยละ 54 ต่อมาการแปลงพลังงานในรูปแบบของคลื่นไมโครเวฟเป็นไฟฟ้ากระแสตรงนี้ได้รับการจดทะเบียนทรัพย์สินทางปัญญาในปี ค.ศ. 1969 [1] และได้นำไปสู่แนวความคิดให้กับกระทรวงพลังงานสหรัฐอเมริกา และองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ สหรัฐอเมริกา (NASA) ในการพัฒนาการส่งพลังงานผ่านพื้นที่ว่างด้วยไมโครเวฟ (free space power transmission by microwave) เพื่อสำหรับการส่งพลังงานไฟฟ้าจากสถานีอวกาศกลับมายังพื้นโลกด้วยไมโครเวฟ และนำไปสู่การริเริ่มการส่งพลังงานด้วยเลเซอร์ในยุคต่อมา

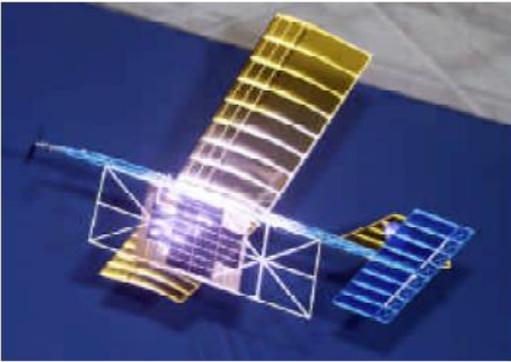


รูปที่ 3 วิลเลียม ซี บราวน์ กับผลงานการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยไมโครเวฟและสายอากาศแบบสี่เหลี่ยม [2]

แนวความคิดการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยแสงที่มีความเข้มสูงหรือเลเซอร์สร้างขึ้นโดยศูนย์

วิจัยการบินอวกาศ จอร์จ ซี มาแชล ขององค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ สหรัฐอเมริกา

(NASA) [3] ในเดือนกันยายนปี ค.ศ. 2003 โดยการใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ขนาด 1 กิโลวัตต์ ส่งไปยังแผงกำเนิดไฟฟ้าจากแสง (photovoltaic cell) ที่ไวต่อช่วงความถี่อินฟราเรดซึ่งติดตั้งอยู่ใต้แบบจำลองอากาศยาน



ขนาดเล็กน้อยในอาคารปิด ผลจากการทดลองนี้ทำให้สามารถส่งพลังงานด้วยเลเซอร์ไปยังปลายทางที่เป็นแบบจำลองอากาศยานขนาดเล็กซึ่งติดตั้งมอเตอร์ขับเคลื่อนขนาด 6 วัตต์ (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยเลเซอร์สำหรับอากาศยานไร้คนขับ [3]

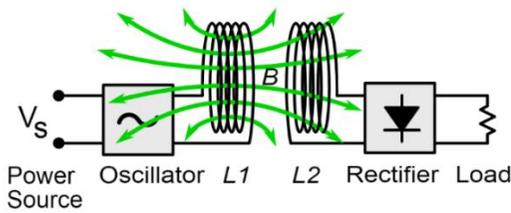
แม้แนวความคิดนี้จะไม่ประสบความสำเร็จเท่าไรนัก เนื่องจากค่าประสิทธิภาพที่หายไปมากในการส่งพลังงานในรูปแบบของแสงเลเซอร์และการเปลี่ยนพลังงานแสงเลเซอร์เป็นพลังงานไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม องค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติได้นำเสนอแนวโน้มความเป็นไปได้ในการใช้การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายลักษณะนี้ เพื่อนำไปใช้กับอากาศยานที่บินอยู่ในความสูงมาก ๆ อากาศยานควบคุมระยะไกล และยานอวกาศต่าง ๆ

2.2 การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยอาศัยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก (สนามใกล้)

การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยการอาศัยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กนี้ อาศัยพฤติกรรมของการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้า เมื่อสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับปรากฏที่สายอากาศสนามแม่เหล็กนี้ เมื่อเคลื่อนผ่านตัวนำหรือสายอากาศที่ฝั่งรับ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำเกิดขึ้น โดยกระแสไฟฟ้าที่ได้มีลักษณะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเช่นกัน

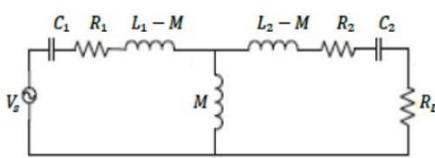
พฤติกรรมของการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กนี้โดยมากอาศัยลักษณะของสนามใกล้ (near field) ซึ่งต่อมานิโคลา เทสลา ได้พัฒนาการเหนี่ยวนำที่ความถี่เรโซแนนซ์ขึ้นเพื่อให้สามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กมาก ทำให้สามารถส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายได้ในระยะทางไกลขึ้น อย่างไรก็ตาม ระยะทางที่ได้จากการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยอาศัยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กนี้มักจัดอยู่ในระยะกลาง (medium range) กล่าวคือ มีระยะทางไม่เกิน 1 เมตร การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กที่ความถี่เรโซแนนซ์นี้เป็นการสร้างให้พฤติกรรมของแหล่งกำเนิด (หรือนิยมเรียกว่าเครื่องส่ง) และปลายทาง (หรือนิยมเรียกว่าเครื่องรับ) เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่หนึ่ง ๆ โดยองค์ประกอบของการเรโซแนนซ์ขึ้นกับค่าความเหนี่ยวนำ (inductance) ค่าความเก็บประจุ (capacitance) ของระบบเครื่องส่งและเครื่องรับในขณะเดียวกันดังกล่าวนี ทำให้สามารถพิจารณาโครงสร้างของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

ด้วยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก โดยจำแนกจากโครงสร้างการเรโซแนนซ์ได้เป็น 4 ชนิด ได้แก่ (1) โครงสร้างอนุกรม-อนุกรม (2) โครงสร้างอนุกรม-ขนาน (3) โครงสร้างขนาน-อนุกรม และ (4) โครงสร้างขนาน-ขนาน โดยรูปที่ 5 แสดงโครงสร้างของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กอย่างง่าย และ รูปที่ 6 แสดงวงจรสมมูลของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กแบบต่าง ๆ

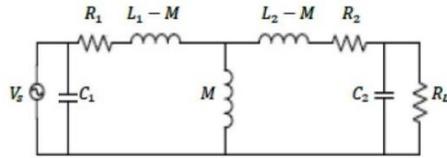


รูปที่ 5 โครงสร้างของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กอย่างง่าย [4]

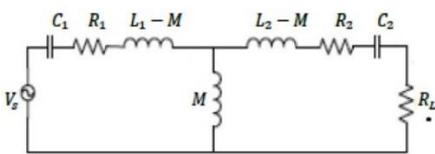
ด้วยลักษณะของการเรโซแนนซ์ที่ฝั่งเครื่องส่งและเครื่องรับโดยตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ปฐมภูมิ (primary capacitance, C_1) และตัวเก็บประจุทุติยภูมิ (secondary capacitance, C_2) นี้ จะทำให้เกิดการ เรโซแนนซ์และการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายมีประสิทธิภาพมากขึ้น ปัจจุบันมีงานวิจัยหลายฉบับที่มีความสนใจในการคำนวณค่าความเก็บประจุเรโซแนนซ์ที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดย อาทิตย์ [5] ได้วิจัยและพัฒนาวิธีการคำนวณค่าตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ที่มีความแม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า โครงสร้างเรโซแนนซ์ในแต่ละแบบนั้นจะมีผลของประสิทธิภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายที่ช่วงความถี่แตกต่างกันไป เช่น โครงสร้างอนุกรม-ขนานจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างอื่นเมื่อออกแบบให้ทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ต่ำกว่า 100 กิโลเฮิร์ตซ์



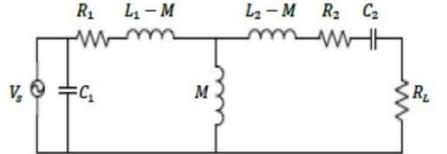
(ก) โครงสร้างแบบอนุกรม-อนุกรม



(ข) โครงสร้างแบบขนาน-ขนาน



(ค) โครงสร้างแบบอนุกรม-ขนาน



(ง) โครงสร้างแบบขนาน-อนุกรม

รูปที่ 6 วงจรสมมูลของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กแบบต่างๆ

นอกจากประเด็นเกี่ยวกับช่วงความถี่เรโซแนนซ์ โครงสร้างที่เหมาะสม และการคำนวณค่าตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ที่มีความแม่นยำแล้ว ค่าความเหนี่ยวนำร่วมกัน (mutual inductance, M) ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำ (coupling

coefficient) ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะทางกายภาพของลักษณะการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กระหว่างกันของสายอากาศทั้งสองนั้น มีผลต่อประสิทธิภาพของการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยอาศัยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กนี้ด้วย การวิจัยเพื่อปรับปรุงค่าความ

เห็นยวนำร่วมกัน จึงได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

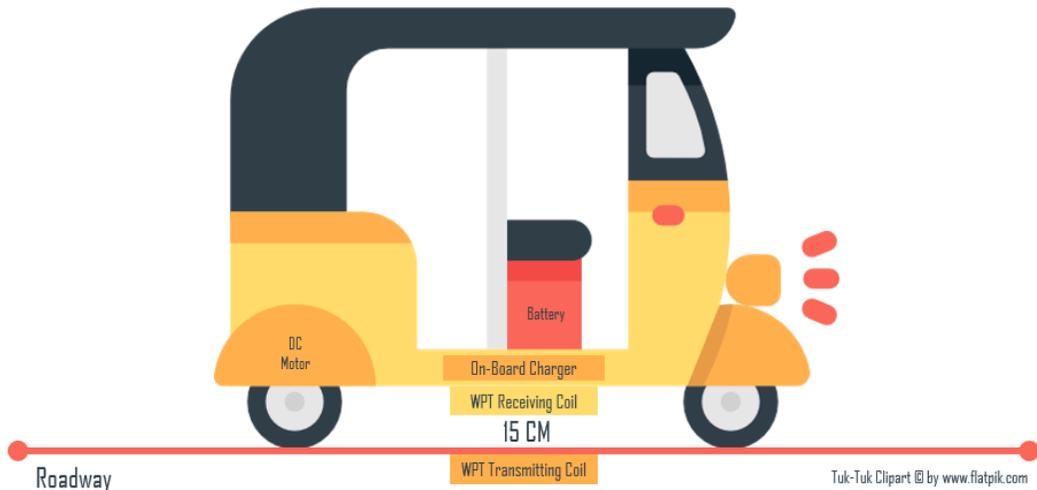
การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กนี้ได้รับการวิจัยและพัฒนา และนำไปสู่การสร้างเป็นระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย เพื่อใช้งานในชีวิตประจำวันหลายแบบ เช่น การวิจัยและพัฒนาการประจุไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ทางการแพทย์แบบฝังในร่างกายมนุษย์ เพื่อลดการผ่าตัดเพื่อเปลี่ยนแบตเตอรี่ การประจุพลังงานไฟฟ้าไร้สายสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ การประจุพลังงานไฟฟ้าไร้สายสำหรับแปรงสีฟันไฟฟ้า และโดยเฉพาะการประจุพลังงานไฟฟ้าไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าซึ่งเป็นประเด็นที่นักวิจัยให้ความสนใจในปัจจุบัน

วัชระ [6] ได้วิจัยและพัฒนาระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายสำหรับประจุพลังงานไฟฟ้าให้กับรถสามล้อไฟฟ้า พบว่าระบบที่วิจัยและพัฒนานั้นสามารถทำงานได้ดีในย่านความถี่ต่ำมาก (very low frequency, VLF) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ

อาทิตย์ [5] ที่ได้กล่าวไว้แล้ว โดยระบบประจุพลังงานไฟฟ้าไร้สายที่ออกแบบนี้ทำงานร่วมกันกับระบบปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยความถี่เรโซแนนซ์อินดิวทีฟร่วมกับ วัชระ และคณะ [7] โดยประโยชน์ของการประจุพลังงานไฟฟ้าไร้สายให้กับยานยนต์ไฟฟ้าที่เห็นได้ชัด คือ มีความสะดวก รวดเร็ว และปลอดภัยในการประจุพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากไม่มีส่วนของตัวนำไฟฟ้าที่มีโอกาสที่มนุษย์จะสัมผัสได้ขณะประจุพลังงานไฟฟ้าไร้สาย เมื่อเปรียบเทียบกับระบบประจุพลังงานไฟฟ้าแบบมีสายเดิม รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างของระบบประจุพลังงานไฟฟ้าไร้สายสำหรับรถสามล้อไฟฟ้า

2.3 การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยอาศัยการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้า

ในปี ค.ศ. 1891 การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายที่นับเป็นต้นแบบของการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยอาศัยการเหนี่ยวนำได้กำเนิดขึ้นโดย นิโคเลา เทสลา ด้วยการสร้างหลอดแก้ว Geissler และใช้ไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงที่ความถี่เรโซแนนซ์เพื่อส่งพลังงานไฟฟ้า

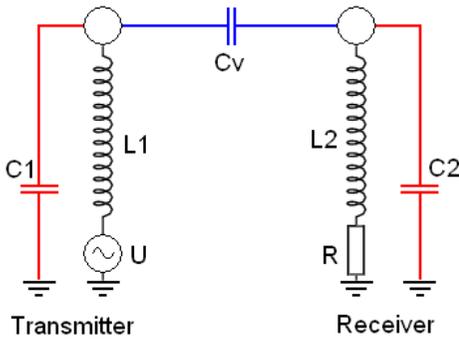


รูปที่ 7 โครงสร้างของระบบประจุพลังงานไฟฟ้าไร้สายสำหรับรถสามล้อไฟฟ้า

ในรูปแบบของสนามไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยอาศัยการเหนี่ยวนำของ

สนามไฟฟ้านี้ไม่ได้รับความนิยมมากนัก เนื่องจากโดยทั่วไปแล้ววัตถุส่วนใหญ่มีความเป็นฉนวนสูง

ทำให้ประสิทธิภาพของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย โดยอาศัยการเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้านี้ตกลงมาก รูปที่ 8 แสดงวงจรสมมูลระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้า



รูปที่ 8 วงจรสมมูลระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้า

รูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าวงจรสมมูลของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย โดยอาศัยการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้า พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำได้จากค่าความเก็บประจุร่วมกัน (mutual capacitance) เนื่องจากเป็นพฤติกรรมของการเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้า ซึ่งแตกต่างจากการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยอาศัยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก ซึ่งพิจารณาค่าความเหนี่ยวนำร่วมกัน (mutual inductance) ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวนี้มีความสอดคล้องกับสมบัติของอภิวัดแต่ละประเภท ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

รูปที่ 2 และการปริทัศน์วรรณกรรมในหัวข้อที่ 2.1 ถึง 2.3 ทำให้สามารถสรุปการเปรียบเทียบสมบัติของการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยจำแนกในเป็นแต่ละประเภทได้ดังตารางที่ 1

จะเห็นได้ว่าการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายนี้ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง และมีการสั่งสมองค์ความรู้มาอย่างต่อเนื่องและยาวนาน โดยการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำในแต่ละ

กรณีนั้น ได้รับการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นในการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าแล้วแต่กรณี โดยการปรับปรุงลักษณะการแพร่กระจาย การตัดผ่านของสนามแม่เหล็ก หรือการตัดผ่านของสนามไฟฟ้าโดยปรับปรุงโครงสร้างสายอากาศและจำนวนของสายอากาศเป็นหลัก หัวข้อถัดไปจะเป็นการนำเสนออภิวัดหรือที่เรียกอย่างเข้าใจง่ายว่าวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ ซึ่งเป็นวัสดุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำมาปรับปรุงประสิทธิภาพระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายได้อีกวิธีหนึ่ง โดยการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้า นอกจากการปรับปรุงโครงสร้างสายอากาศของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายเพียงอย่างเดียว

3. อภิวัด

โดยทั่วไปแล้วในโครงสร้างของวัสดุใด ๆ พฤติกรรมตอบสนองของวัสดุนั้น ๆ ต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดขึ้นในระดับอะตอมและอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นผลจากการเกิดแบบเกี่ยวเนื่องกันเป็นทอด ๆ ทำให้วัสดุนั้น มีค่าสภาพความยอมทางแม่เหล็กไฟฟ้า (permittivity, ϵ) หรือค่าสภาพความซึมซาบ (permeability, μ) เป็นสมบัติเฉพาะในวัสดุนั้น ๆ ต่างกันออกไป ซึ่งโดยทั่วไปแล้ววัสดุตามธรรมชาติเหล่านี้มักมีค่าความซึมซาบและค่าความยอมเป็นบวก แต่สำหรับวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์หรืออภิวัด (metamaterial) นั้น มีค่าความซึมซาบและค่าความยอมแตกต่างไปจากวัสดุธรรมชาติ

อภิวัดสร้างจากวัสดุธรรมชาติที่มีโครงสร้างเฉพาะ โดยส่วนใหญ่จะมีขนาดโครงสร้างแต่ละชุดน้อยกว่าความยาวคลื่นที่จะให้อภิวัดมีพฤติกรรมทางแม่เหล็กไฟฟ้ามาก ๆ (sub-wavelength) ซึ่งโครงสร้าง

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบสมบัติของหลักการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

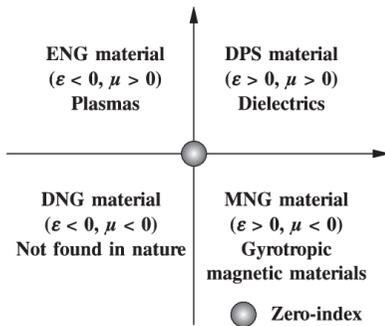
หลักการ	ลักษณะการส่งพลังงาน	ข้อดี	ข้อเสีย
เทสลา คอยล์	สนามไฟฟ้าในย่าน ความถี่วิทยุ	ส่งพลังงานได้รอบทิศ	1. สนามไฟฟ้าถูกหักเหได้ง่ายเมื่อมีวัตถุ มากัน 2. ข้อกังวลเกี่ยวกับอันตรายของ สนามไฟฟ้าต่อสิ่งมีชีวิต
คลื่น ไมโครเวฟ	สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในย่านความถี่ ไมโครเวฟ	1. ส่งพลังงานได้ระยะที่ไกล 2. ไม่หักเหกับอากาศและชั้น บรรยากาศ	1. เป็นอันตรายกับสิ่งมีชีวิต 2. รบกวนระบบสื่อสารและ อิเล็กทรอนิกส์ 3. ยากต่อการควบคุมคลื่นให้ส่งตรงกับ เป้าหมาย
เลเซอร์	สนามแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานสูงใน ย่านความถี่ ใกล้เคียงแสง	1. ส่งพลังงานสูงได้ระยะที่ไกล 2. ตัวรับพลังงานมีน้ำหนักที่เบา 3. ไม่รบกวนสัญญาณสื่อสารบริเวณ ใกล้เคียง 4. ตัวรับพลังงานสามารถถูกออกแบบ ให้ใช้เฉพาะกับเลเซอร์นั้นได้	1. เป็นอันตรายกับสิ่งมีชีวิตมากกว่าคลื่น ไมโครเวฟ 2. ตัวรับมีราคาแพง 3. ยากต่อการควบคุมคลื่นให้ส่งตรงกับ เป้าหมาย 4. เกิดการสูญเสียพลังงานอย่างมากเกือบ 100 % เมื่อผ่านชั้นบรรยากาศ เมฆ ฝน
ขดลวด เหนี่ยวนำ	สนามแม่เหล็กใน ย่านความถี่วิทยุ	1. สนามแม่เหล็กที่ผ่านวัตถุโดยรอบ จะสูญเสียพลังงานน้อยมากเหมือน เทียบกับการส่งด้วยสนามไฟฟ้า 2. ไม่เป็นอันตรายกับสิ่งมีชีวิต 3. ขดลวดเหนี่ยวนำออกแบบได้ง่าย และราคาถูก	1. ส่งระยะทางได้ไม่ไกล 2. ไม่สามารถส่งพลังงานได้รอบทิศ

นี้เรียกว่ายูนิตเซลล์ (unit cell) นำมาประกอบรวมเข้าด้วยกันเพื่อให้เกิดสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งแตกต่างจากวัสดุที่พบในธรรมชาติโดยทั่วไป กล่าวคือ วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุธรรมชาติที่ให้เป็นอภิวัดุมิโครงสร้างเฉพาะเพื่อให้เกิดสมบัติพิเศษทางแม่เหล็กไฟฟ้า จะมีค่าความยอมหรือค่าความซึบซายเป็นลบ

เป็นศูนย์ หรือเข้าใกล้ศูนย์มาก ๆ ซึ่งไม่อาจพบได้ในธรรมชาติ ลักษณะดังกล่าวนี้จะเห็นได้ว่ามนุษย์สามารถสร้างอภิวัดุมิให้มีพฤติกรรมทางแม่เหล็กไฟฟ้าเฉพาะต่องานต่าง ๆ ที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้

ค่าความยอมและค่าความซึบซายนี้เป็นผลประกอบของค่าดัชนีหักเห (refractive index) ซึ่งเกิด

จากรากที่สองของความยอมกับค่าความซึมซาบ เมื่อค่าความยอมและค่าความซึมซาบติดลบ เป็นศูนย์ หรือเข้าใกล้ศูนย์ ทำให้ค่าดัชนีหักเหเป็นลบ เป็นศูนย์ หรือเข้าใกล้ศูนย์ด้วย จึงทำให้มีสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าแตกต่างไปจากวัสดุทั่วไปที่มีค่าความซึมซาบเป็นบวก ค่าความยอมเป็นบวก ซึ่งทำให้มีค่าดัชนีหักเหเป็นบวกด้วย (double positive medium, DPS)



รูปที่ 9 แผนผังการแบ่งประเภทวัสดุจากค่าความยอมและค่าความซึมซาบ

การพิจารณาค่าความยอมและค่าความซึมซาบนี้ทำให้สามารถจัดแบ่งวัสดุต่าง ๆ ในรูปแบบของแผนผังค่าความยอมและค่าความซึมซาบ (ϵ - μ diagram) เป็น 5 แบบ คือ (1) วัสดุที่มีค่าความยอมและมีค่าความซึมซาบเป็นบวก (2) วัสดุที่มีค่าความซึมซาบเป็นลบ (μ -negativity medium, MNG) (3) วัสดุที่มีค่าความยอมเป็นลบ (epsilon-negativity medium, ENG) (4) วัสดุที่มีค่าความยอมและค่าความซึมซาบเป็นลบ (double negativity medium, DNG) และ (5) วัสดุที่มีดัชนีหักเหเป็นศูนย์และเข้าใกล้ศูนย์ (zero refractive index, ZRI และ low refractive index) รูปที่ 9 แสดงแผนผังการแบ่งประเภทวัสดุจากค่าความยอมและค่าความซึมซาบ

อย่างไรก็ตาม บทความวิชาการบางฉบับในยุคแรกเริ่มของอภิวัดุมักจะพิจารณาจัดวัสดุที่มีค่าความ

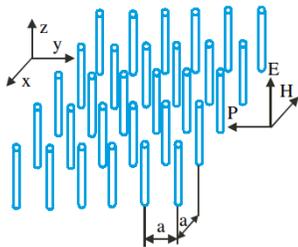
ยอมและค่าความซึมซาบเป็นลบให้เป็นอภิวัดุมัก อธิบายปรากฏการณ์ของอภิวัดุมันนี้ร่วมกัน แต่เนื่องจากพิจารณาโครงสร้างอภิวัดุมันที่มีค่าความยอมและค่าความซึมซาบเป็นลบนี้ จำเป็นต้องมีความเข้าใจโครงสร้างของวัสดุที่มีค่าความยอมเป็นลบ และโครงสร้างของวัสดุที่มีค่าความซึมซาบเป็นลบก่อน ในหัวข้อนี้จึงได้นำเสนอโครงสร้างทั้งสองแยกจากกัน เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจได้โดยง่าย ซึ่งอภิวัดุมันนี้เรียกว่าอภิวัดุมันที่มีสมบัติแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นลบด้านเดียว (single negativity medium, SNG) ในหัวข้อ 3.1 นำเสนออภิวัดุมันที่มีค่าความยอมเป็นลบ และในหัวข้อที่ 3.2 วัสดุที่มีค่าความซึมซาบเป็นลบ และหัวข้อที่ 3.3 นำเสนออภิวัดุมันที่มีค่าความยอมและค่าความซึมซาบเป็นลบ และนำไปสู่การนำเสนออภิวัดุมันที่มีดัชนีหักเหเป็นศูนย์และเข้าใกล้ศูนย์ อีกกรณีหนึ่งในหัวข้อที่ 3.4 ต่อไป

3.1 อภิวัดุมันที่มีค่าความยอมเป็นลบ

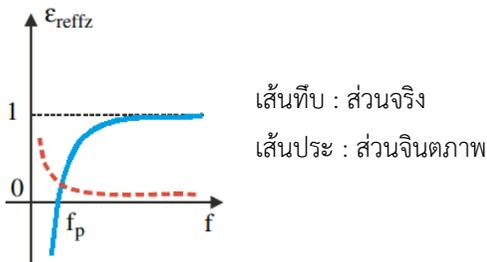
วัสดุที่มีค่าความยอมเป็นลบ (epsilon negative medium) นี้ถูกจัดเป็นอภิวัดุมัน เนื่องจากที่วัสดุมีค่าความยอมซึ่งเป็นสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นลบ ทำให้ค่าดัชนีหักเห (refractive index, n) มีค่าเป็นลบด้วย ความเข้าใจในการโครงสร้างของอภิวัดุมันที่มีค่าความซึมซาบเป็นลบนี้ ทำให้นำไปสู่การออกแบบโครงสร้างวัสดุที่มีค่าความซึมซาบและค่าความยอมเป็นลบ (DNG) ได้ในที่สุด (รูปที่ 10)

พื้นฐานของโครงสร้างของวัสดุที่มีค่าความยอมเป็นลบ เริ่มจากการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างเส้นลวดบางยาวอนันต์ที่วางเป็นแนวนานกัน (array of parallel thin wire) ซึ่งเมื่อถูกกระทำด้วยระนาบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โครงสร้างของเส้นลวดบางซึ่งมีลักษณะยาวไปในทิศทางเดียวกับทิศทางของสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่าน ทำให้สมบัติของโครงสร้างวัสดุนี้คล้ายคลึงกับสมบัติของพลาสมา

ต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [9-11] กล่าวคือ ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่พลาสมาหรือบางครั้งเรียกว่าความถี่ตัด (cutoff frequency) จะไม่มีการแผ่ของคลื่นผ่านไปได้ และจะเกิดการสะท้อนกลับหมด ซึ่งความถี่พลาสมานี้จะขึ้นกับลักษณะของระยะห่างของเส้นลวดและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด โดยค่าความยอมที่เป็นลบนี้จะเกิดขึ้นที่ต่ำกว่าความถี่พลาสมานั้นเอง ด้วยลักษณะนี้ทำให้ค่าความยอมเมื่อพิจารณาในรูปของตัวแปรทางความถี่มีลักษณะแบบดรูด์ (Drude model) ซึ่งสามารถพบได้ทั่วไปในโครงสร้างของอภิวัดที่มีค่าความยอมเป็นลบ รูปที่ 11 แสดงช่วงของค่าความยอมที่เป็นลบที่เกิดขึ้นก่อนช่วงความถี่พลาสมา



รูปที่ 10 โครงสร้างเส้นลวดบางยาวอนันต์ที่วางเป็นแนวขนานกัน [8]



รูปที่ 11 ช่วงของค่าความยอมที่เป็นลบที่เกิดขึ้นก่อนช่วงความถี่พลาสมา [8]

ค่าความยอมเป็นลบ (negative epsilon, $\epsilon < 0$) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเส้นลวดบางยาวอนันต์ที่วางเป็นแนวขนานกันนี้ จะเกิดขึ้นตามแนวยาวของเส้นลวดบางยาวอนันต์ (z direction) เท่านั้น ซึ่งเป็นทิศ

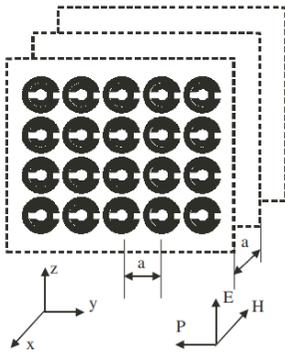
ทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า ทำให้ในทิศทางแนวแกนอื่น ๆ วัสดุจะมีค่าความยอมเป็นบวก (positive epsilon, $\epsilon > 0$) ตามปกติในธรรมชาติ ฉะนั้นการออกแบบอภิวัดที่มีค่าความยอมเป็นลบ นอกจากความถี่พลาสมาซึ่งเป็นผลจากระยะห่างของเส้นลวด และเส้นผ่านศูนย์กลางแล้ว จะต้องคำนึงถึงทิศทางของสนามไฟฟ้าด้วย

3.2 อภิวัดที่มีค่าความซึมซาบเป็นลบ

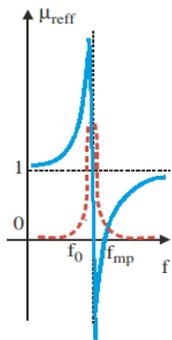
วัสดุที่มีค่าความซึมซาบเป็นลบ (mu negative medium) นี้ถูกจัดเป็นอภิวัด เนื่องจากการที่วัสดุมีค่าความซึมซาบซึ่งเป็นสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นลบ จะทำให้ค่าดัชนีหักเห (refractive index, n) มีค่าเป็นลบด้วย ความเข้าใจในโครงสร้างของอภิวัดที่มีค่าความซึมซาบเป็นลบนี้ จะทำให้นำไปสู่การออกแบบโครงสร้างวัสดุที่มีค่าความซึมซาบและค่าความยอมเป็นลบได้ในที่สุด

พื้นฐานของของโครงสร้างของวัสดุที่มีค่าความซึมซาบเป็นลบ เริ่มจากการศึกษาโครงสร้างของตัวสั่นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วน (split ring resonator, SRR) ดังรูปที่ 12 [12] เมื่อถูกกระทำด้วยระนาบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่สั่นพ้อง (resonance frequency) โดยสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าสู่ตัวสั่นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วนที่ออกแบบขึ้น จะแตกต่างกันกับโครงสร้างอภิวัดที่มีค่าความยอมผ่านเป็นลบที่เป็นลักษณะของสนามไฟฟ้าตามความยาวของเส้นลวดบาง โครงสร้างของตัวสั่นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วนนี้ ทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กที่มีค่าสูงและแสดงผลของค่าความซึมซาบที่เป็นลบในช่วงของความถี่สั่นพ้องทางแม่เหล็ก (magnetic resonance frequency) และ ความถี่พลาสมาทางแม่เหล็ก (magnetic plasma frequency) [13-15] ด้วยลักษณะนี้ทำให้ค่าความซึมซาบเมื่อพิจารณาในตัวแปรทางความถี่มีลักษณะแบบลอเรนซ์ (Lorentz model) ดังรูปที่ 13 ซึ่งสามารถพบได้ทั่วไป

ในโครงสร้างของอิวีสตูดที่มีค่าความซึมซาบเป็นลบ



รูปที่ 12 โครงสร้างตัวลั่นฟองแบบวงแหวนแยกส่วน [8]



เส้นทึบ : ส่วนจริง
 เส้นประ : ส่วนจินตภาพ
 f_0 แสดงความถี่เรโซแนนซ์
 f_{mp} แสดงความถี่พลาสมา

รูปที่ 13 ช่วงของค่าความซึมซาบที่เป็นลบที่เกิดขึ้นหลังช่วงความถี่ลั่นฟองและก่อนช่วงความถี่พลาสมา [8]

บางกรณีเรียกลักษณะของการกระจายตัวของค่าความซึมซาบในแต่ละช่วงความถี่ที่มีลักษณะแบบลอเรนซ์นี้ว่าการกระจายตัวเลเรนเซียน (Lorentzian dispersion) ซึ่งพบมากในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอิวีสตูดต่าง ๆ

3.3 อิวีสตูดที่มีค่าความซึมซาบและค่าความยอมเป็นลบ

เมื่อพิจารณารูปที่ 9 บทความนี้ได้นำเสนออิวีสตูดที่มีสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นพื้นฐานไปแล้ว คือ อิวีสตูดที่มีค่าความซึมซาบเป็นลบและค่าความยอมเป็นลบ ซึ่งสามารถออกแบบได้โดยโครงสร้าง

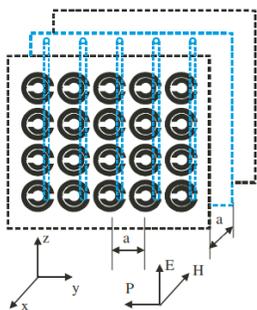
แบบต่าง ๆ กัน และพิจารณาสมบัติจากพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบด้วยสมบัติของสนามแตกต่างกันไป ในหัวข้อนี้จะนำเสนออิวีสตูดที่สร้างขึ้นจากองค์ความรู้ของโครงสร้างทั้งสองผนวกกัน ทำให้สามารถสร้างอิวีสตูดซึ่งมีสมบัติพิเศษที่ไม่พบในธรรมชาติมาก่อน และนำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

เนื่องจากโครงสร้างในหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 นั้น จะให้สมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าแตกต่างกัน เนื่องจากโครงสร้างและพฤติกรรมที่เกิดขึ้นต่อสนามที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปแล้วเมื่อพิจารณาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้ว จะพบว่าจะมีลักษณะของการเกิดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นควบคู่กันไป ทำให้เกิดแนวคิดที่จะนำโครงสร้างทั้งสองมาผนวกกัน ให้โครงสร้างหนึ่งเกิดพฤติกรรมของอิวีสตูดจากสนามชนิดหนึ่ง และอีกโครงสร้างหนึ่งเกิดพฤติกรรมของอิวีสตูดจากสนามอีกชนิดหนึ่ง

งานวิจัยของ Simovski และ He [16] ได้นำโครงสร้างเส้นลวดบางยาวอนันต์ที่วางเป็นแนวขนานกันทำให้ค่าความยอมติดลบที่ก่อนความถี่พลาสมา และโครงสร้างตัวลั่นฟองแบบวงแหวนแยกส่วน ซึ่งให้ค่าความซึมซาบติดลบที่หลังความถี่เรโซแนนซ์และก่อนความถี่พลาสมา มาผนวกรวมกัน ทำให้สามารถสร้างโครงสร้างของอิวีสตูดที่มีค่าความซึมซาบและค่าความยอมเป็นลบทั้งคู่ได้ รูปที่ 14 แสดงโครงสร้างผสมระหว่างเส้นลวดบางยาวอนันต์ที่วางเป็นแนวขนานกันและตัวลั่นฟองแบบวงแหวนแยกส่วน

เมื่อพิจารณาจากทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำต่อโครงสร้างผสมนี้แล้ว จะพบว่าสนามไฟฟ้าจะมีทิศทางพุ่งไปทางเดียวกันกับความยาวอนันต์ของเส้นลวดบาง และสนามแม่เหล็กจะพุ่งเข้าสู่ตัวลั่นฟองแบบวงแหวนแยกส่วน ซึ่งลักษณะนี้จะทำให้เกิดสมบัติของอิวีสตูดที่มีค่าความซึมซาบ และค่าความ

ยอมเป็นลบเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันด้วย



รูปที่ 14 โครงสร้างผสมระหว่างเส้นลวดบางยาวอนันต์ที่วางเป็นแนวขนานกันและตัวสั้นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วน [8]

อย่างไรก็ตาม ยังมีการวิจัยและพัฒนาโครงสร้างของอภิวัดที่มีค่าความซึมซาบและค่าความยอมเป็นลบอย่างต่อเนื่อง โดยผสมผสานโครงสร้างผสมระหว่างเส้นลวดบางยาวอนันต์ที่วางเป็นแนวขนานกันและตัวสั้นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วนเข้าด้วยกันเป็นโครงสร้างใหม่ ตัวอย่าง เช่น โครงสร้างตัวสั้นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วนที่มีเหลี่ยม (edge-coupled SRR) [12,13] โครงสร้างตัวสั้นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วนรูปตัวโอเมก้า (Ω , omega) [16,17] โครงสร้างตัวสั้นพ้องรูปตัวเอสซ็อนทับกัน (s ring) [18]

3.4 อภิวัดที่มีค่าความซึมซาบและค่าความยอมเข้าใกล้หรือเป็นศูนย์

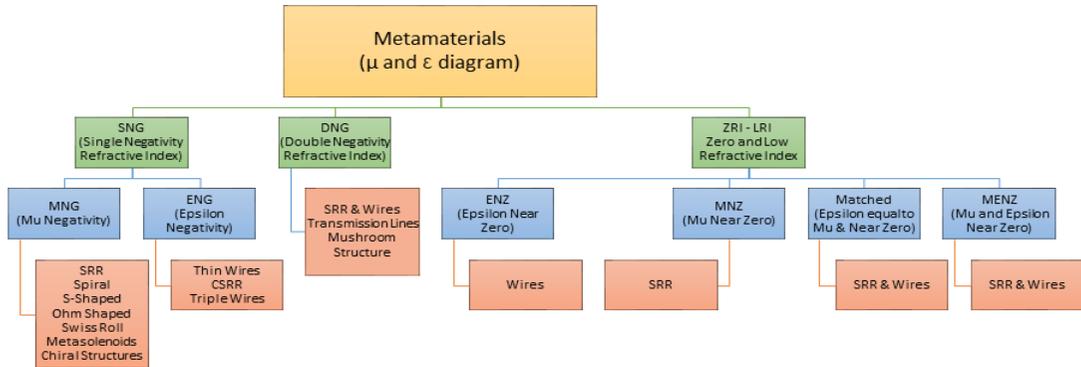
นอกจากอภิวัดที่มีสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้า (ค่าความยอมหรือค่าความซึมซาบ) ตัวใดตัวหนึ่งเป็นลบ (SNG) และอภิวัดที่มีสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งคู่เป็นลบ (DNG) แล้ว ยังมีอภิวัดอีกชนิดหนึ่งที่สร้างขึ้นและนำมาใช้อย่างแพร่หลาย คือ อภิวัดที่มีค่าความซึมซาบและค่าความยอมเข้าใกล้ศูนย์หรือเป็นศูนย์ ซึ่งจะเห็นได้จากการพิจารณาค่าความยอมและค่าความซึมซาบของอภิวัดทั้งสองชนิดข้างต้น จะพบว่าที่ความถี่สั้นพ้องหรือใกล้เคียงความถี่สั้นพ้อง และที่

ความถี่พลาสมาหรือใกล้เคียงความถี่พลาสมา ทำให้โครงสร้างอภิวัดนั้นมีค่าความซึมซาบและค่าความยอมเป็นศูนย์หรือเข้าใกล้ศูนย์ ด้วยเหตุนี้เมื่อค่าความซึมซาบ และ/หรือ ค่าความยอมเข้าใกล้ศูนย์หรือเป็นศูนย์ จะส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหเป็นศูนย์ด้วย กรณีดังกล่าวนี้ทำให้สมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านอภิวัดที่มีค่าความซึมซาบและค่าความยอมแตกต่างไปจากที่กระทำกับวัสดุในธรรมชาติ

กรณีของการที่ค่าความซึมซาบและค่าความยอมเข้าใกล้ศูนย์หรือเป็นศูนย์นี้ เมื่อพิจารณาสมบัติของโครงสร้างอภิวัดที่เกิดขึ้นกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้สามารถแบ่งย่อยเป็น 4 ประเภท คือ (1) ค่าความซึมซาบเข้าใกล้ศูนย์ (μ near zero, MNZ) (2) ค่าความยอมเข้าใกล้ศูนย์ (epsilon near zero, ENZ) (3) ค่าความยอมและค่าความซึมซาบเข้าใกล้ศูนย์ (μ -epsilon near zero, MENZ) และ (4) ค่าความยอมมีค่าเท่ากับค่าความซึมซาบและเข้าใกล้ศูนย์ (matched-impedance medium)

การออกแบบโครงสร้างอภิวัดที่มีค่าความซึมซาบและค่าความยอมเข้าใกล้หรือเป็นศูนย์นี้ใช้วิธีการพิจารณาเดียวกันกับการออกแบบโครงสร้างอภิวัดที่มีค่าความซึมซาบ และ/หรือ ค่าความยอมเป็นลบ แต่เลือกใช้ปรากฏการณ์ของสมบัติแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่าความซึมซาบและค่าความยอมเข้าใกล้ศูนย์ ที่ความถี่สั้นพ้องหรือความถี่พลาสมา แทนการใช้ปรากฏการณ์ในช่วงความถี่หนึ่ง ๆ ที่ให้ผลของค่าความยอมหรือค่าความซึมซาบเป็นลบ

การพิจารณาแผนผังการแบ่งประเภทวัสดุจากค่าความยอมและค่าความซึมซาบในรูปที่ 9 และการทบทวนวรรณกรรมในหัวข้อที่ 3.1, 3.2, 3.3 และ 3.4 ทำให้สามารถแบ่งประเภทและโครงสร้างของตัวอย่างการออกแบบอภิวัดชนิดต่าง ๆ ในรูปแบบของแผนภาพได้ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 แผนภาพประเภทและโครงสร้างของตัวอย่างการออกแบบอภิวัดชนิดต่าง ๆ

หัวข้อต่อไป บทความนี้จะนำเสนอถึงการนำอภิวัดมาใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายชนิดต่าง ๆ ตามที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 1 รวมถึงลักษณะของพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยคร่าว ๆ เมื่อนำอภิวัดแต่ละชนิดที่ยกตัวอย่างขึ้นไปใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย ทั้งนี้เพื่อให้มีความเข้าใจมากขึ้น

4. การปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยอภิวัด

อภิวัดมีปรากฏการณ์หลายประการที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า โดยวิธีหนึ่งสามารถพิจารณาได้จากพฤติกรรมการกระเจิงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อกระทบอภิวัด (scattering) ในรูปแบบของค่าคงที่การหักเหและการส่งผ่าน (reflection and transmission coefficient) ซึ่งเมื่อกำหนดให้อภิวัดมีความยาวในทิศทางตรงข้ามกันการกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นอนันต์ โดยอภิวัดมีความหนา d ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบ ซึ่งค่าความเข้มและค่าความยอมก่อนตกกระทบและอภิวัดมีค่าเป็น ϵ_1, μ_1 และ ϵ_2, μ_2 ตามลำดับ สามารถพิจารณาค่าคงที่การหักเหและการส่งผ่านได้ดังสมการ [8]

$$R = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \frac{1 - e^{-j2k_2d}}{1 - \frac{[\eta_2 - \eta_1]^2}{\eta_2 + \eta_1} e^{-j2k_2d}}$$

$$T = \frac{4\eta_2\eta_1}{(\eta_2 + \eta_1)^2} \frac{e^{-j2k_2d}}{1 - \frac{[\eta_2 - \eta_1]^2}{\eta_2 + \eta_1} e^{-j2k_2d}}$$

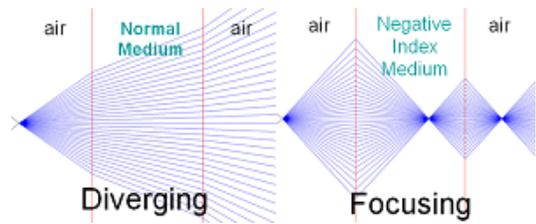
เมื่อ $\eta_i = \sqrt{\frac{\mu_i}{\epsilon_i}}$ โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots$
 $n_i = \sqrt{\mu_i \epsilon_i}$ โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots$

โดยที่หมายเลขของคลื่น $k_i = \omega \sqrt{\epsilon_i} \sqrt{\mu_i}$ และ η_i คือ อิมพีแดนซ์ของคลื่น

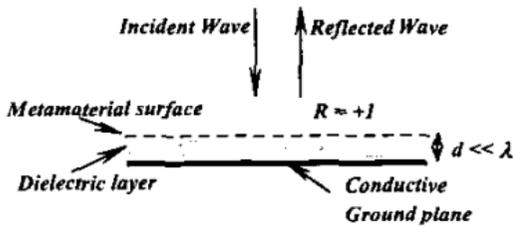
จะเห็นว่าผลของการหักเหและการส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบบอภิวัดนี้ สามารถกำหนดได้โดยการปรับปรุงค่าความยอมและค่าความเข้มของอภิวัดที่ออกแบบขึ้น ซึ่งหมายถึงการกำหนดพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบบอภิวัดสามารถทำได้โดยการออกแบบอภิวัดให้มีสมบัติที่เหมาะสม อีกพฤติกรรมหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อตกกระทบบอภิวัดที่มีค่าดัชนีหักเหเป็นลบ ซึ่งสามารถอธิบายได้อย่างเห็นได้ชัด คือ โดยทั่วไปแล้วเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบบอภิวัดใด ๆ ที่มีค่าดัชนีหักเหเป็นบวก คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะมีทิศทางกระจายออก (diverging) แต่เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบบอภิวัดแล้ว คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะมีการหักเหเข้ามารวมกัน (focusing) [19] โดยเป็นผลจากค่าดัชนีหักเหเป็นลบ ซึ่งเกิดจากค่าความยอมและค่าความเข้มเป็นลบ (รูปที่ 16)

นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายปรากฏการณ์ของอภิวัดต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ในหลายลักษณะ เช่น การอธิบายด้วยการพิจารณาการสวนทางของคลื่นในอภิวัด (backward waves) [21] การอธิบายด้วยการพิจารณาเฟสของคลื่นในอภิวัดที่เป็นลบ (negative refraction) ร่วมกับกฎของสเนลล์ (Snell's law) [22] การอธิบายด้วยการพิจารณาลักษณะของการชดเชยทางเฟสของอภิวัดเมื่อมีค่าสัมประสิทธิ์ของค่าดัชนีหักเหในวัสดุและอภิวัดเท่ากัน (phase compensation) [23] และการอธิบายด้วยปรากฏการณ์เลนส์สมบูรณ์แบบ (perfect lens) [24,25] ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นปรากฏการณ์

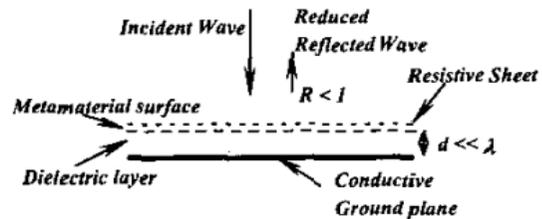
ของอภิวัดที่เกิดขึ้นได้ด้วยการปรับปรุงค่าความยอมและค่าความซึมซาบทั้งสิ้น



รูปที่ 16 การหักเหของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อผ่านวัสดุ (ซ้าย) และการหักเหของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อผ่านอภิวัด (ขวา) [20]



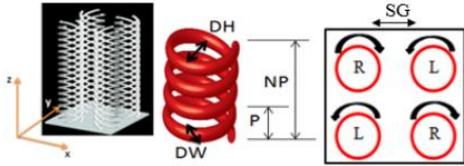
รูปที่ 17 แนวความคิดการฉาบอภิวัดลงบนพื้นผิวเพื่อลดการสะท้อนของคลื่น [24]



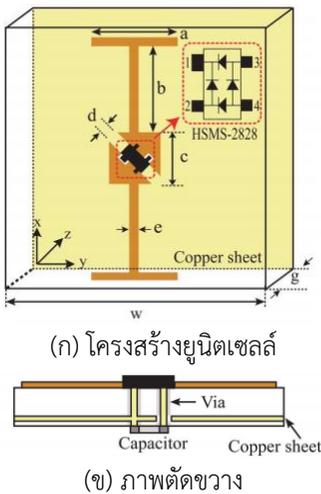
4.1 อภิวัดสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยแสง

งานวิจัยของ Engheta [26] ได้นำเสนอแนวคิดในการออกแบบวัสดุสำหรับซึมซับ (absorber) ด้วยอภิวัดซึ่งมีความถี่เฉพาะในการซึมซับทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยได้นำเสนอวิธีการนำอภิวัดมาฉาบลงบนพื้นผิวเพื่อลดการสะท้อนของคลื่น ต่อมางานวิจัยของ Agarwal และ Prajapati [27] ได้ออกแบบตัวซึมซับสมบูรณ์แบบ (perfect absorber) โดยอาศัยโครงสร้างของอภิวัดแบบเกลียวหมุนทวนเข็มนาฬิกาและหมุนตามเข็มนาฬิกา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยออกแบบให้ซึมซับในช่วงความถี่แสงที่มองเห็นได้และมีความถี่สั้นพ้องของการออกแบบโครงสร้างวัสดุที่ 614.4 เทราเฮิรตซ์ มีค่าอัตราการซึม

ซับในช่วงความถี่แสงที่มองเห็นได้สูงถึง 99.7 % และมีความกว้างของแถบความถี่การซึมซับ (absorption bandwidth) ร้อยละ 15.5 มีพฤติกรรมตอบสนองกับทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางและโพลาริเซชันแตกต่างกันด้วยสมบัติของอภิวัด ซึ่งมีลักษณะเด่นกว่าตัวซึมซับแสงอื่น ๆ ที่เคยมีการวิจัยและพัฒนาไว้ คือ มีช่วงความถี่การทำงาน (operating region) ที่ความยาวแสงกว้างตลอดย่านความถี่แสง ตั้งแต่ 340 ถึง 1,680 นาโนเมตร ต่างกับวัสดุอื่น ๆ ที่มีช่วงความถี่การทำงานดีในช่วงความถี่หนึ่ง ๆ เท่านั้น รูปที่ 17 แสดงแนวความคิดการฉาบอภิวัดลงบนพื้นผิวเพื่อลดการสะท้อนของคลื่น และ รูปที่ 18 แสดงโครงสร้างอภิวัดสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยแสงในงานวิจัยนี้



รูปที่ 18 โครงสร้างอภิวัดสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยแสง [25]



รูปที่ 19 อภิวัดสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยไมโครเวฟ [28]

4.2 อภิวัดสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยไมโครเวฟ

งานวิจัยของ Wang และคณะ [28] ออกแบบวิธีการรับคลื่นไมโครเวฟสำหรับสถานีอวกาศที่ใช้ส่งพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในอวกาศมายังโลก โดยใช้หลักการของการออกแบบพื้นผิวสังเคราะห์ที่สมบูรณ์แบบ (artificial perfect matched layer) โดยฝังอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดไดโอดและตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ลงบนอภิวัดที่ได้รับการออกแบบมาอย่างดี โครงสร้างของพื้นผิวสังเคราะห์

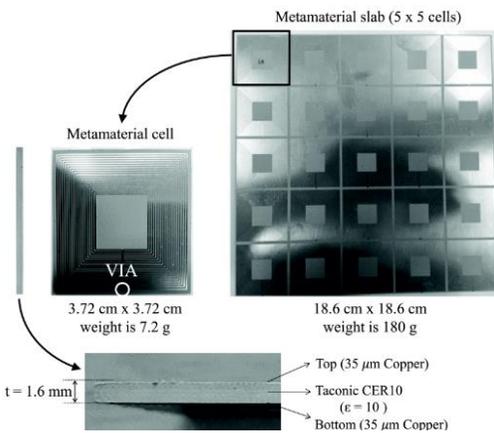
ที่สมบูรณ์แบบนี้ทำให้เกิดการเข้ากันได้ของอิมพีแดนซ์ (strong impedance matching) ที่ความถี่สั้นพ้อง (resonance frequency) ทำให้เกิดการส่งพลังงานได้เพิ่มขึ้น และเกิดความเข้ากันไม่ได้อย่างยิ่งยวดของอิมพีแดนซ์ (strong impedance mismatching) ที่ความถี่ฮาร์โมนิก ซึ่งขจัดผลของความถี่ฮาร์โมนิกในระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายนี้ออกไป

โดยโครงสร้างดังกล่าวนี้สร้างขึ้นบนแผ่นลายวงจรพิมพ์แบบหลายชั้นที่ออกแบบให้มีลักษณะของความเป็นอภิวัดในแต่ละเซลล์ แล้วนำมาประกอบกันหลาย ๆ เซลล์ จากผลการวิจัยพบว่าการออกแบบโครงสร้างของแผ่นลายวงจรพิมพ์ให้มีความหนาใกล้เคียง 1 ใน 40 ส่วน ของความยาวคลื่นในอวกาศว่างสามารถสร้างการดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้สูงถึงร้อยละ 99.92 และสามารถกำจัดฮาร์โมนิกที่สองได้สูงถึง 56.16 เดซิเบล รูปที่ 19 แสดงอภิวัดสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยไมโครเวฟและภาพตัดขวาง

4.3 อภิวัดสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

งานวิจัยของ Cho และคณะ [29] พิจารณาว่าประสิทธิภาพของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแปรผกผันกับการรั่วไหลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (EMF leakage) และเนื่องจากสมบัติของอภิวัดมีความสามารถในการปรับปรุงทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ จึงได้พัฒนาอภิวัดใหม่ที่มีโครงสร้างแต่ละยูนิตเซลล์แบบวงแหวนแยกส่วนบนแผ่นวงจรพิมพ์แบบบาง (thin PCB) เพื่อปรับปรุงทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า งานวิจัยนี้ได้เลือกออกแบบอภิวัดที่มีสมบัติค่าความซึมซาบเป็นลบ (MNG) เนื่องจากต้องการนำไปใช้งานการปรับปรุงประสิทธิภาพของการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยสนามแม่เหล็กในระยะ 20 เซนติเมตร ที่ความถี่ 6.78 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยจากผลการ

ออกแบบอภิวัดของงานวิจัยนี้พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายได้สูง 44.2 เปอร์เซ็นต์ และจากการวัดสนามแม่เหล็กด้วยอุปกรณ์ที่ออกแบบขึ้น พบว่าในจุดที่สังเกตสามารถลดสนามแม่เหล็กรั่วไหลได้สูงถึง 3.49 เดซิเบลมิลลิวัตต์ รูปที่ 20 แสดงเซลล์ของอภิวัดแบบแผ่นลายวงจรพิมพ์บางที่ออกแบบขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพระบบส่งพลังงานไร้สายที่ส่งด้วยผลของสนามแม่เหล็กและอภิวัดที่ประกอบขึ้นจากยูนิเซลล์



รูปที่ 20 อภิวัดแบบแผ่นลายวงจรพิมพ์บางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพระบบส่งพลังงานไร้สายที่ส่งด้วยผลของสนามแม่เหล็ก [29]

นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Cho และคณะ [30] ยังได้พัฒนาอภิวัดแบบไฮบริด ซึ่งประกอบด้วย การนำยูนิเซลล์ของอภิวัดที่มีความซึมซาบเป็นลบในงานวิจัยที่แล้ว มาประกอบกับยูนิเซลล์อภิวัดที่มีความซึมซาบเป็นศูนย์ด้วย โดยประกอบยูนิเซลล์อภิวัดที่มีความซึมซาบเป็นลบจำนวน 40 เซลล์ วั้รอบ ๆ ยูนิเซลล์ของอภิวัดที่มีความซึมซาบเป็นศูนย์จำนวน 9 เซลล์ และอาศัยผลของการหักเหสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของอภิวัดที่มีความซึมซาบเป็นลบ ร่วมกับผลของการเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กของอภิวัด

ที่ความซึมซาบเป็นศูนย์ ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายจากเดิมร้อยละ 34.5 เป็นร้อยละ 41.8 และลดการรั่วไหลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากเดิม -19.21 เดซิเบลมิลลิวัตต์ เป็น -26.03 เดซิเบลมิลลิวัตต์ ที่ความถี่ 6.78 เมกะเฮิร์ตซ์ รูปที่ 21 แสดงแนวคิดของการใช้อภิวัดแบบผสมและอภิวัดแบบผสมบนแผ่นลายวงจรพิมพ์บางที่ออกแบบขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพระบบส่งพลังงานไร้สายด้วยสนามแม่เหล็ก

5. สรุป

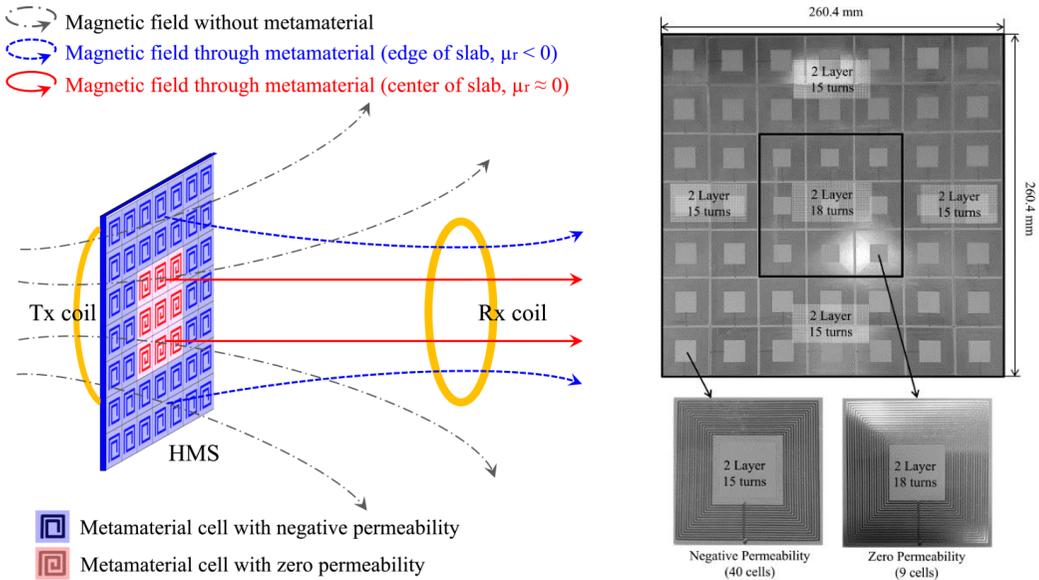
บทความนี้นำเสนอการปรับทัศนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยชี้ให้เห็นถึงการแบ่งประเภทของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายหลักการพื้นฐานของการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายชนิดต่าง ๆ และข้อจำกัดที่เกิดขึ้น จากนั้นจึงได้นำเสนออภิวัด โครงสร้างของอภิวัดแต่ละชนิด พฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อโครงสร้างของอภิวัดนั้น ๆ และได้ยกตัวอย่างการนำอภิวัดมาใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายตามที่ได้แบ่งประเภทไว้ในข้างต้น ผลการปรับทัศนปรากฏว่ามีความเป็นไปได้ในการนำอภิวัดมาใช้ในการระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายชนิดต่าง ๆ

นอกจากนี้ยังให้ความสนใจในการวิจัยพัฒนาอภิวัดสำหรับปรับปรุงประสิทธิภาพของสถานีประจุพลังงานไฟฟ้าไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งมีลักษณะพิเศษแตกต่างไปจากระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยทั่วไปคือ ใช้ความถี่ต่ำกว่า 100 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยเฉพาะความถี่ในย่านความถี่ต่ำมาก (very low frequency band, VLF) ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่เสียงที่มนุษย์ได้ยิน (acoustic frequency) ในการส่งพลังงาน ทำให้อภิวัดในย่านความถี่ต่ำมากนี้ จึงต้องมีสมบัติทางกายภาพและการออกแบบโครงสร้างของอภิวัด

แตกต่างไปจากอภิวัดที่ได้มีการวิจัยและพัฒนาในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม อภิวัดถือเป็นเรื่องที่จะต้องค้นคว้าวิจัยต่อไปอย่างต่อเนื่อง

ขอขอบคุณทุนปริญญาเอก มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และทุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ซึ่งได้ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้

6. กิตติกรรมประกาศ



รูปที่ 21 แนวคิดของการใช้อภิวัดแบบผสม (ซ้าย) และอภิวัดแบบผสมบนแผ่นลายวงจรมัลติเพล็กซ์บาง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพระบบส่งพลังงานไร้สายที่ส่งด้วยผลของสนามแม่เหล็ก (ขวา) [30]

7. รายการอ้างอิง

[1] Brown, W.C., George, R.H., Heenan, N.I., Wonson, R.C., 1969, Microwave to DC Converter, US Patent, No. US3434678A.

[2] Brown, W.C., 1969, Experiments Involving a Microwave Beam to Power and Position a, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 5: 692-702.

[3] Dryden Flight Research Center, 2004, Beamed Laser Power for UAVs, NASA Facts, p. 1-2.

[4] Wikipedia Contributors, Wireless Power

Transfer, Available Source: https://en.wikipedia.org/w/Wireless_power_transfer, February 13, 2018.

[5] อาทิตย์ ฤทธิผลลง, 2558, การเพิ่มประสิทธิภาพระบบส่งพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายโดยออกแบบโครงสร้างให้เหมาะสมและใช้ค่าตัวเก็บประจุปฐมภูมิที่แม่นยำ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี.

[6] วิชระ อมศิริ, 2559, ระบบรักษาประสิทธิภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยการปรับความถี่เรโซแนนซ์อัตโนมัติ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี.

- [7] วัชร อมศิริ, พัฒนวิ โพธิ์ทอง, ธนสร ภิญญธนา บัตร และวันชัย ไพจิตรโรจนา, 2560, ระบบรักษา ประสิทธิภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยการ ปรับความถี่เรโซแนนซ์ฮัตโนมัติ, ว.วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี 25: 870-879.
- [8] Nader, E. and Richard, W.Z., 2006, *Metamaterials Physic and Engineering Explorations*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [9] Rotman, W., 1962, *Plasma Simulation by Artificial Dielectrics and Parallel-plate media*, IEEE Trans. Anten. Propag. 1: 82-95.
- [10] Pendry, J.B., Holden, J.A., Robbins, J.D. and Stewart, J.W., 1998, Low frequency plasmons in thin-wire structures, *J. Phys. Condensed Mat.* 10: 4785-4809.
- [11] Tretyakov, S., 2003, *Analytical Modeling in Applied Electromagnetics*, Artech House, Norwood, Massachusetts.
- [12] Pendry, J.B., Holden, J.A., Robbins, J.D. and Stewart, J.W., 1999, Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena, *IEEE Trans. MTT.* 47: 2075-2084.
- [13] Smith, D.R., Padilla, W.J., Vier, D.C., Nemat-Nasser, S.C. and Schultz, S., 2000, Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity, *Phys. Rev. Lett.* 84: 4184.
- [14] Marqués, R., Medina, F. and Ráfii-El-Idrissi, R., 2002. Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed meta materials, *Phys. Rev. B* 65: 144440.
- [15] Hrbar, S., Bartolic, J. and Sipus, Z., 2005, Waveguide miniaturization using uniaxial negative permeability metamaterial, *IEEE Trans. Anten. Propag.* 53: 110-119.
- [16] Simovski, C.R. and He, S., 2003, Frequency range and explicit expressions for negative permittivity and permeability for an isotropic medium formed by a lattice of perfectly conducting Ω particles, *Phys. Lett. A* 311: 254-263.
- [17] Huangfu, J., Ran, L., Chen, H., Zhang, X.M., Chen, K., Grzegorzcyk, T.M. and Kong, J.A., 2004. Experimental confirmation of negative refractive index of a metamaterial composed of Ω -like metallic patterns, *Appl. Phys. Lett.* 84: 1537-1539.
- [18] Chen, H., Ran, L., Huangfu, J., Zhang, X., Chen, K., Grzegorzcyk, T.M. and Kong, J.A., 2004, Left-handed materials composed of only S-shaped resonators, *Phys. Rev. E* 70: 057605.
- [19] Veselago, V.G., 1968. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ , *Sov. Phys. Usp.* 10: 509.
- [20] Center of Nanoscale Science, *Novel Electromagnetic Metamaterials*, Pennsylvania State University, Available Source: <http://cearl.ee.psu.edu>, February 13, 2018.
- [21] Alù, A. and Engheta, N., 2002, Radiation from a traveling-wave current sheet at the interface between a conventional material and a metamaterial with

- negative permittivity and permeability, *Microw. Opt. Technol. Lett.* 35: 460-463.
- [22] Ziolkowski, R.W., 2003, Pulsed and CW Gaussian beam interactions with double negative metamaterial slabs, *Opt. Exp.* 11: 662-681.
- [23] Engheta, N. and Ziolkowski, R.W., 2005, A positive future for double-negative metamaterials, *IEEE Trans. Microw. Theo. Tech.* 53: 1535-1556.
- [24] Pendry, J.B., 2000, Negative refraction makes a perfect lens, *Phys. Rev. Lett.* 85: 3966.
- [25] Ziolkowski, R.W. and Heyman, E., 2001, Wave propagation in media having negative permittivity and permeability, *Phys. Rev. E* 64: 056625.
- [26] Engheta, N., 2002, Thin absorbing screens using metamaterial surfaces, *IEEE Anten. Propag. Soc. Int. Symp.* 2: 392-395.
- [27] Agarwal, S. and Prajapati, Y.K., 2017, Analysis of metamaterial-based absorber for thermo-photovoltaic cell applications, *IET Optoelectron.* 11: 208-212.
- [28] Wang, R., Ye, D., Dong, S., Peng, Z., Salamin, Y., Shen, F., Huangfu, J., Li, C. and Ran, L., 2014, Optimal matched rectifying surface for space solar power satellite applications, *IEEE Trans. Microw. Theo. Tech.* 62: 1080-1089.
- [29] Cho, Y., Kim, J.J., Kim, D.H., Lee, S., Kim, H., Song, C., Kong, S., Kim, H., Seo, C., Ahn, S. and Kim, J., 2016, Thin PCB-type metamaterials for improved efficiency and reduced EMF leakage in wireless power transfer systems, *IEEE Trans. Microw. Theo. Tech.* 64: 353-364.
- [30] Cho, Y., Lee, S., Kim, D.H., Kim, H., Song, C., Kong, S., Park, J., Seo, C. and Kim, J., 2018, Thin hybrid metamaterial slab with negative and zero permeability for high efficiency and low electromagnetic field in wireless power transfer systems, *IEEE Trans. Electromag. Compat.* 60: 1001-1009.