Journal of Technological & Innovative Vocational Education: TIVE Vol. 2 * No. 1 * January – June 2025

# การออกแบบอินเวอร์เตอร์คลาสอีสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายที่รักษาสภาวะสวิตช์แรงดันศูนย์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำร่วม

# DESIGN OF A CLASS-E INVERTER FOR MAINTAINING ZERO-VOLTAGE SWITCHING IN WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEMS WITH VARYING MUTUAL INDUCTANCE

ชูชาติ ดอนเลย[1] เอกชัย-ชัยดี[1*]และอนนท์ นำอิน[1]
Chuchat Donlai[1], Ekkachai Chaidee[1*]and Anon Namin[1]

Received: 7 April 2025
Revised: 17 April 2025
Accepted: 2 May 2025

**บทคัดย่อ**

การเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำร่วม (M) ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายทำให้วงจรอินเวอร์เตอร์คลาสอีทำงานในสภาวะสวิตช์แรงดันไฟฟ้าไม่เป็นศูนย์ และส่งผลต่อการทำงานของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยตรง ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายใช้อินเวอร์เตอร์คลาสอีที่สามารถรักษาสภาวะสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ (ZVS) ได้ตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงของ M ร่วมกับการใช้คาปาซิเตอร์ปรับค่าได้ด้วยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม($C_{PWM}$) เพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงของค่า M ทำให้ระบบกลับมาอยู่ในสภาวะรีโซแนนซ์ ทำการวิเคราะห์วงจร โดยรวมวงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์คลาสอีเข้ากับวงจรสมมูลระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การคล้องสนามแม่เหล็กกับมุมเฟสของแรงดันและกระแสขาเข้าสำหรับระบุช่วงการทำงานที่อินเวอร์เตอร์สามารถรักษาสภาวะสวิตช์แรงดันศูนย์ได้ และวิเคราะห์สมการที่ใช้ในการออกแบบพารามิเตอร์ของระบบ ทำการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ ซึ่งพบว่าอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานในสภาวะ ZVS ได้เมื่อสัมประสิทธิ์การคล้องสนามแม่เหล็ก (k) อยู่ในช่วง $0 < k \leq k_{design}$ สำหรับการชดเชยค่าความเหนี่ยวนำร่วม ได้ใช้การปรับค่าคาปาซิเตอร์ที่ควบคุมด้วยสัญญาณ PWM ทางด้านส่งกำลัง ช่วยให้ระบบกลับเข้าสู่สภาวะเรโซแนนซ์ได้

**คำสำคัญ**: ระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย; อินเวอร์เตอร์คลาสอี; สวิตช์แรงดันศูนย์; ความเหนี่ยวนำร่วม; คาปาซิเตอร์ควบคุมด้วยพีดับเบิลยูเอ็ม

[1]มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดเชียงราย 57120

[1]Rajamangala University of Technology Lana, Chiang Rai, 57120, Thailand

*Corresponding Author, E-mail: ekkachai@rmutl.ac.th

Journal of Technological & Innovative Vocational Education: TIVE Vol. 2 * No. 1 * January – June 2025

**Abstract**

Variations in mutual inductance (M) in wireless power transfer (WPT) systems cause Class-E inverters to deviate from zero-voltage switching (ZVS) conditions, directly affecting system performance. This study aims to design a WPT system using a Class-E inverter that maintains ZVS across a range of mutual inductance values. A PWM-controlled variable capacitor (CPWM) is employed to compensate for changes in M and restore the system to resonance. The circuit is analyzed by combining the equivalent model of the Class-E inverter with that of the WPT system. The relationship between the magnetic coupling coefficient and the input impedance phase angle is examined to determine the ZVS operating range. Design equations are also derived for parameter selection. Computer simulations were conducted to validate the analytical results. The findings confirm that the inverter can maintain ZVS when the magnetic coupling coefficient (k) is within the range $0< k \leq k_{design}$. To compensate for variations in mutual inductance, a PWM-controlled capacitor on the transmitter side is used, enabling the system to return to its resonant condition effectively.

**Keywords**: Wireless power transfer; Class E inverter; Zero voltage switching; Mutual inductance; PWM-controlled variable capacitors

**บทนำ**

เทคโนโลยีการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบเหนี่ยวนำอาศัยสนามแม่เหล็กจากด้านส่งกำลังในการเชื่อมต่อกับขดลวดด้านรับผ่านตัวกลางอากาศ เทคโนโลยีนี้ได้รับการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย อาทิ การชาร์จแบบไร้สายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า การส่งพลังงานให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา และการใช้งานทางการแพทย์ (Alabsi et al., 2025; Liang, 2024; Van Nunen, 2023) ข้อดีของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ได้แก่ ความปลอดภัยในการใช้งาน ลดความจำเป็นในการสัมผัสอุปกรณ์โดยตรง และเพิ่มความสะดวกในการใช้งาน (Sagar, 2023; Moisello, 2023) ระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายเริ่มต้นจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งถูกแปลงเป็นกระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแสทางด้านส่งกำลัง จากนั้นกระแสตรงจะถูกแปลงกลับเป็นกระแสสลับความถี่สูงด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ กระแสความถี่สูงนี้ไหลผ่านขดลวดส่งกำลังซึ่งต่อร่วมกับตัวเก็บประจุเพื่อให้ระบบทำงานในสภาวะเรโซแนนซ์ สนามแม่เหล็กความถี่สูงที่เกิดขึ้นจะส่งผ่านตัวกลางอากาศไปยังขดลวดรับกำลังซึ่งต่อกับตัวเก็บประจุเช่นกัน การตัดผ่านของสนามแม่เหล็กกับขดลวดด้านรับทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งจะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแสก่อนส่งต่อให้กับโหลด

การทำงานของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายในทางปฏิบัตินั้น การจัดวางตำแหน่งระหว่างขดส่งและขดรับกำลังงานควรอยู่ในแนวตรง ซึ่ง ณ ตำแหน่งนี้ให้อัตราการคล้องสนามแม่เหล็กระหว่างขดรับและทางด้านขดส่งกำลังงานมีค่าสูง อย่างไรก็ตามการใช้งานระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายในทางปฏิบัติสามารถเกิดระยะเยื้องหรือการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขดตัวนำเกิดขึ้นได้ ทำให้อัตราการคล้องแม่เหล็กระหว่างทั้งสองด้านลดลง ส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพการส่งกำลังงาน จากปัญหาดังกล่าว งานวิจัยที่ผ่านมาได้เสนอแนวทางแก้ไขหลายวิธี เช่น

Journal of Technological & Innovative Vocational Education: TIVE Vol. 2 * No. 1 * January – June 2025

การติดตามความถี่เรโซแนนซ์ (Yang et al., 2025) ซึ่งต้องปรับความถี่ของระบบเพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำร่วม อย่างไรก็ตาม วิธีนี้อาจทำให้ความถี่สูงเกินขอบเขตที่กำหนดไว้ในมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง การติดตามประสิทธิภาพสูงสุดโดยการปรับค่าโหลดความต้านทานผ่านวงจรคอนเวอร์เตอร์ทางฝั่งส่งหรือฝั่งรับ (Roshan & Park, 2018) วิธีนี้แม้จะมีประสิทธิภาพ แต่ต้องเพิ่มวงจรคอนเวอร์เตอร์เข้าระบบ ส่งผลให้ระบบมีขนาดใหญ่ขึ้นและซับซ้อนมากขึ้น การขยายระยะการใช้งานด้วยการออกแบบขดลวดส่งและรับกำลังงาน (Aditya et al., 2017; Aditya & Williamson, 2019) แม้จะช่วยเพิ่มระยะการส่งพลังงาน แต่ก็ยังทำได้จำกัด ระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบหลายขดส่งกำลังงาน (Chaidee et al., 2022) วิธีการนี้จำเป็นต้องใช้งานร่วมกับวิธีการตรวจจับเพื่อเลือกจ่ายขดส่งที่เหมาะสม การปรับค่าอิมพีแดนซ์โดยการปรับค่าคาปาซิเตอร์ (Issi & Kaplan, 2021) วิธีการจำเป็นนี้ต้องปรับคาปาซิเตอร์ที่ประกอบขึ้นจากคาปาซิเตอร์หลายๆ ตัวมารวมกันเป็นโมดูล และควบคุมการปิด-เปิด ผ่านสวิตช์รีเลย์ทำให้โมดูลคาปาซิเตอร์แบบปรับค่าได้มีขนาดใหญ่และวิธีการเลือกต่อคาปาซิเตอร์ผ่านรีเลย์มีความซับซ้อน

อินเวอร์เตอร์มีบทบาทสำคัญในระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย อินเวอร์เตอร์มีใช้งานมีหลายรูปแบบ เช่น อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ ฮาล์ฟบริดจ์ และอินเวอร์เตอร์คลาสอี อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์สี่ตัว ทำให้จำนวนองค์ประกอบในวงจรเพิ่มขึ้น ยุ่งยากต่อการทำงานในสภาวะ ZVS ในขณะที่อินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ จำนวนสวิตช์และวงจรที่เกี่ยวข้องลดลงเมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์แบบแบบฟูลบริดจ์ อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟ้าที่จ่ายได้มีค่าลดลงด้วยเช่นกัน อินเวอร์เตอร์คลาสอีเป็นอีกตัวเลือกที่มีความเหมาะสมเมื่อพิจารณาด้านประสิทธิภาพ ขนาด และความคุ้มค่าทางต้นทุน เนื่องจากใช้งานเพียงสวิตช์เดียว และทำงานภายใต้สภาวะ ZVS ได้

อย่างไรก็ตามในการใช้งานอินเวอร์เตอร์คลาสอีร่วมกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย การเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำร่วมจากการเยื้องตำแหน่งหรือเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขดลวดอาจทำให้อินเวอร์เตอร์สูญเสียสภาวะ ZVS งานวิจัยที่ผ่านมา (Suetsugu, 2006; He et al., 2020; Corti et al., 2021) พบว่า การรักษาสภาวะ ZVS ของอินเวอร์เตอร์คลาสอีมักต้องเพิ่มองค์ประกอบเพิ่มเติมเข้าไปในวงจรเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของงานวิจัยที่ผ่านมาในการรักษาสภาวะ ZVS ของอินเวอร์เตอร์ และการชดเชยการเปลี่ยนแปลงของอัตราการคล้องสนามเหล็ก การศึกษานี้จึงเสนอการออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายที่ใช้อินเวอร์เตอร์คลาสอีร่วมกับการปรับค่าคาปาซิแตนซ์ผ่านสัญญาณ PWM ($C_{PWM}$) เพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงของอัตราการคล้องสนามแม่เหล็ก โดยการปรับค่าดังกล่าวช่วยให้ระบบกลับเข้าสู่สภาวะเรโซแนนซ์ และยังคงเงื่อนไขการทำงานภายใต้ ZVS ของอินเวอร์เตอร์ได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่ต้องเพิ่มองค์ประกอบวงจรที่ซับซ้อนเพิ่มเติม

Journal of Technological & Innovative Vocational Education: TIVE Vol. 2 * No. 1 * January – June 2025

**วัตถุประสงค์การวิจัย**

ออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายที่ใช้อินเวอร์เตอร์คลาสอีที่สามารถทำงานภายใต้สวิตช์แรงดันศูนย์ร่วมกับการปรับค่าคาปาซิแตนซ์ที่ควบคุมด้วยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มสำหรับชดเชยการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำร่วมของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

**ทบทวนวรรณกรรม**

จากปัญหาการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance; M) ที่เกิดจากการเยื้องตำแหน่งหรือระยะห่างระหว่างขดลวดในระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ส่งผลกระทบต่อสภาวะรีโซแนนซ์และสภาวะ ZVS ของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการส่งพลังงาน งานวิจัยที่ผ่านมาได้เสนอแนวทางในการแก้ไขปัญหานี้หลายแนวทาง ดังนี้

Seo & Lee (2017) เสนอวิธีการติดตามความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance Frequency Tracking) โดยปรับความถี่การทำงานของระบบเพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำร่วม อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้อาจทำให้ความถี่ใช้งานเกินกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

Roshan & Park (2018) เสนอวิธีการติดตามประสิทธิภาพสูงสุด (Maximum Efficiency Tracking) โดยการปรับค่าโหลดความต้านทานผ่านวงจรคอนเวอร์เตอร์ด้านฝั่งส่งหรือฝั่งรับ วิธีการนี้จำเป็นต้องเพิ่มวงจรคอนเวอร์เตอร์เข้าไปในระบบ ซึ่งส่งผลให้ขนาดของระบบเพิ่มขึ้นและมีความซับซ้อนในการควบคุมมากขึ้น

Aditya et al. (2017) และ Aditya & Williamson (2019) นำเสนอวิธีการเพิ่มระยะการใช้งานโดยการออกแบบขดรับและขดส่งกำลังงานด้วยขนาดไม่สมมาตร วิธีการนี้สามารถเพิ่มระยะการใช้งาน แต่ยังคงมีข้อจำกัดด้านเพิ่มระยะการใช้งานได้อย่างจำกัด ขณะที่ Chaidee et al. (2022) เสนอแนวคิดระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบหลายขดลวดส่งกำลัง (multiple transmitter coils) เพื่อขยายพื้นที่การส่งพลังงาน โดยต้องอาศัยระบบตรวจจับและเลือกขดลวดที่เหมาะสมในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งเพิ่มความซับซ้อนของระบบโดยรวม

Fatih et al. (2021) นำเสนอการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบผ่านการปรับค่าคาปาซิเตอร์แบบแปรค่าได้ ซึ่งประกอบด้วยคาปาซิเตอร์หลายตัวรวมเป็นโมดูล และควบคุมการปิด-เปิดผ่านสวิตช์รีเลย์ วิธีนี้แม้จะช่วยรักษาสภาวะเรโซแนนซ์ได้ แต่โมดูลคาปาซิเตอร์มีขนาดใหญ่ และกระบวนการเลือกค่าที่เหมาะสมผ่านรีเลย์ยังคงมีความซับซ้อน

Komanaka et al. (2022) ได้เสนออินเวอร์เตอร์คลาสอีแบบกลับขั้ว (inverse class-E) ที่สามารถให้กระแสคงที่และคงสภาวะ ZVS ได้ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของโหลด แต่ยังไม่ได้พิจารณาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การคล้องสนามแม่เหล็ก และSensui & Koizumi (2021) ได้พัฒนาอินเวอร์เตอร์คลาสอีแบบขนานซึ่งสามารถคงสภาวะ ZVS ได้โดยไม่ขึ้นกับโหลด ด้วยการควบคุมแรงดัน

Journal of Technological & Innovative Vocational Education: TIVE Vol. 2 * No. 1 * January – June 2025

ที่สวิตช์ให้ลดลงเป็นศูนย์ก่อนเปิดสวิตช์ ในขณะที่ Huang et al. (2022) ได้ออกแบบโครงสร้างอินเวอร์เตอร์แบบ Push–Pull Class-E² ร่วมกับขดลวดสามขดและถังเรโซแนนซ์ LCC-S ที่สามารถทำงานในช่วงโหลดกว้างโดยไม่ต้องใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ และยังคง ZVS ได้ He & Guo (2021; 2020) ได้เสนอวงจร Class-E พร้อมวงจรเสริมที่ช่วยลดแรงดันตกค้าง พร้อมทั้งรักษา ZVS ได้เมื่อมีเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างตัวนำ

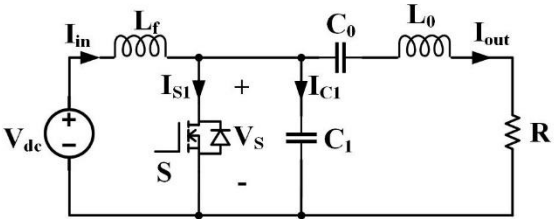
Issi & Kaplan (2022) ได้พัฒนาโครงข่ายแมตชิ่งแบบปรับได้อัตโนมัติ ร่วมกับอัลกอริธึมค้นหาเพื่อเลือกค่าคาปาซิเตอร์แบบอนุกรม/ขนานให้เหมาะสมกับระยะระหว่างขดลวด ส่วน Ahmadi, et al. (2022) ได้นำเสนอการควบคุมมุมเฟสของวงจรเรโซแนนซ์ด้านส่งผ่านคาปาซิเตอร์ที่ควบคุมด้วยสัญญาณ PWM เพื่อคงสภาวะเรโซแนนซ์ Zhang et al. (2022) ได้เสนอการใช้การชดเชยแบบอนุกรม–อนุกรม (series–series compensation) โดยเชื่อมสวิตช์ควบคุมเข้ากับคาปาซิเตอร์ฝั่งรับ เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ของวงจรและรักษา ZVS ขณะที่ Zhu et al. (2021) ได้เสนอวิธีออกแบบวงจร Class-E ด้วยอัลกอริธึม PSO แม้ว่าระบุว่าเหมาะสมกับระบบ WPT แต่ยังไม่มีการทดลองจริง ส่วน Corti et al. (2021) ได้เสนอวิธีการออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบคาปาซิทีฟ ระบบทำงานภายใต้สภาวะ ZVS โดยการปรับค่าคอมโพเนนต์ LC ร่วมกับการชดเชยรีแอกแตนซ์โหลด อย่างไรก็ตาม งานนี้ยังไม่ครอบคลุมการใช้งานกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบเหนี่ยวนำ

Suetsugu & Kazimierczuk (2006) ได้ออกแบบคลาสอีแอมพลิฟายเออร์แบบ off-nominal โดยใช้วิธีควบคุมความชันของแรงดันขณะเปิดสวิตช์เพื่อให้ได้ ZVS แต่ยังไม่ได้นำไปประยุกต์ใช้กับระบบ WPT โดยตรง และ Sekiya et al. (2023) ได้ออกแบบระบบส่งกำลังไร้สายที่ใช้การปรับค่าแบบ dual-resonance ร่วมกับรีแอกแตนซ์คงที่ทางด้านรับและวงจรเรียงกระแสแบบ Class-D ทำให้เกิด ZVS ได้โดยไม่ต้องใช้การควบคุม และได้ทดสอบกับงานในระบบแขนกล เช่นเดียวกัน Van Nunen et al. (2023) ได้นำเสนอการใช้งานอินเวอร์เตอร์คลาสอีร่วมกับวงจรเรียงกระแสแบบ Class-DE สำหรับงานทางการแพทย์ ซึ่งสามารถคงสภาวะ ZVS ได้ผ่านการออกแบบวงจร

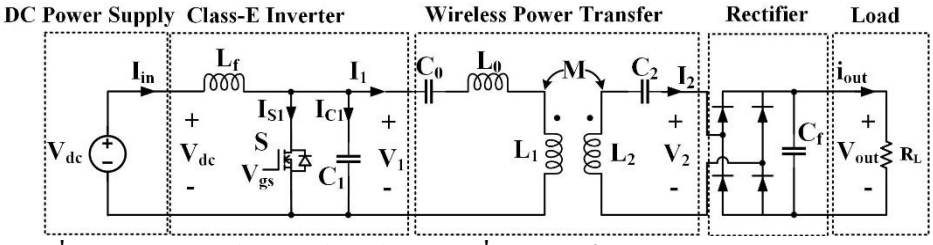
จากการทบทวนงานวิจัยข้างต้น พบว่าแนวทางที่ใช้ในปัจจุบันแม้จะสามารถแก้ปัญหาได้บางส่วน แต่ยังคงมีข้อจำกัดในด้านความซับซ้อนของวงจร ขนาดของระบบ และการปฏิบัติงานจริงภายใต้สภาพแวดล้อมที่ไม่คงที่ การศึกษาในครั้งนี้จึงมุ่งเสนอแนวทางใหม่ในการควบคุมค่าคาปาซิแตนซ์แบบเรียลไทม์ร่วมกับอินเวอร์เตอร์คลาสอี เพื่อรักษาสภาวะ ZVS และสภาวะเรโซแนนซ์อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้การเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำร่วม

**วิธีดำเนินการวิจัย**

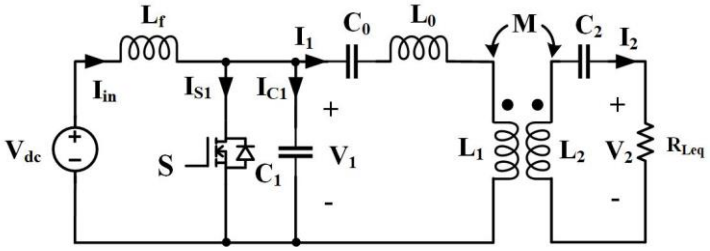
1. วิเคราะห์วงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย



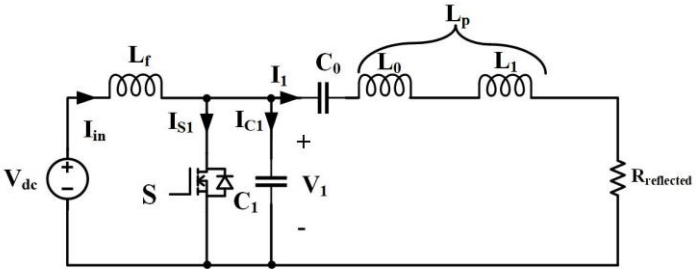

ภาพที่ 1 วงจรสมมูลย์อินเวอร์เตอร์คลาสอี




ภาพที่ 2 วงจรสมมูลย์อินเวอร์เตอร์คลาสอีเมื่อโหลดเป็นระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย




ภาพที่ 3 วงจรสมมูลย์เมื่อรวมวงจรเรียงกระแสกับโหลดความต้านทาน




ภาพที่ 4 วงจรสมมูลย์อย่างง่ายของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

วงจรสมมูลย์ของอินเวอร์เตอร์คลาสอีโดยทั่วไปแสดงตามภาพที่ 1 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ($V_1$) ความเหนี่ยวนำโช้ก ($L_f$) สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ (S) ตัวเก็บประจุแบบชันต์ ($C_1$) แทนความจุแฝงของสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์และความจุแฝงของความเหนี่ยวนำโช้ก ความเหนี่ยวนำ (L0) อนุกรมกับตัวเก็บประจุ (C0) และความต้านทานโหลด (R) เพื่อให้วงจรสามารถทำงานในสภาวะเรโซแนนซ์ได้ จากนั้นทำการแทนที่โหลดความต้านทาน (R) ด้วยวงจรสมมูลย์ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายได้วงจรสมมูลย์แสดงตามภาพที่ 2 ส่วนประกอบของวงจร WPT ได้แก่ ความเหนี่ยวนำขดส่งกำลังงาน ($L_1$) และความเหนี่ยวนำขดรับกำลังงาน ($L_2$) ตัวเก็บประจุด้านรับกำลังงาน ($C_2$) สำหรับการทำงานสภาวะเรโซแนนซ์ ไดโอด ($D_1$-$D_4$) ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงเป็นกระแสตรง ตัวเก็บประจุกรอง ($C_f$) และความต้านทานโหลด ($R_L$) โดยที่วงจรเรียงกระและความ

ต้านทานโหลดสามารถยุบรวมเป็นความต้านทานสมมูลย์ ($R_{Leq}$) ได้วงจรสมมูลย์แสดงดังภาพที่ 3 ซึ่งวงจรสมมูลย์ทางด้านรับกำลังงานสามารถย้ายไปรวมกับวงจรสมมูลย์ทางด้านส่งกำลังงานได้วงจรสมมูลย์อย่างง่ายแสดงตามภาพที่ 4

1.1 การออกแบบพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์คลาสอีใช้กับระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย พิจารณาวงจรสมมูลย์ในภาพที่ 2 ความต้านทานโหลด ($R_L$) คำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต ($V_o$) และกระแสเอาต์พุต ($I_o$) ตามที่ให้ไว้ในสมการ (1)

$$R_L = \frac{V_o}{I_o} \tag{1}$$

ความต้านทานสมมูลย์ของวงจรเรียงกระแสและโหลดความต้านทานคำนวณตามสมการที่ (2)

$$R_{Leq} = \frac{8R_L}{\pi^2} \tag{2}$$

ค่าของตัวเก็บประจุทางด้านรับกำลังงาน ($C_2$) สามารถกำหนดได้โดยใช้สมการ (3)

$$C_2 = \frac{1}{4\pi f_s^2 L_2} \tag{3}$$

โดยที่ $f_s$ คือความถี่ใช้งานของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ความเหนี่ยวนำรวม ($L_1$) ทางด้านส่งกำลังงานสามารถคำนวณได้ตามสมการ (4) $Q_L$ แทนตัวประกอบคุณภาพ (quality factor) $\omega_0$ มีค่าเท่ากับ $2\pi f_s$

$$L_1 = \frac{Q_L R_{Ti}}{\omega_0} \tag{4}$$

ในส่วนค่าความเหนี่ยวนำ $L_0$ คำนวณได้ตามสมการที่ (5)

$$L_0 = L_1 - L_P \tag{5}$$

คาปาซิแตนซ์ ($C_1$) สามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ (6) ดังนี้

$$C_1 = -\frac{2\sin 2\left(\cos^{-1}\left(\frac{\pi}{V_{dc}}\sqrt{\frac{P_{out}R_{Ti}}{8}}\right)\right)}{\omega_0 \pi^2 R_{Ti}} \tag{6}$$

คาปาซิแตนซ์ ($C_0$) ทางด้านส่งกำลังงานสามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ (7) ดังนี้

$$C_0 = \frac{1}{\omega\left(R_{reflected}Q_L - X\right)} \tag{7}$$

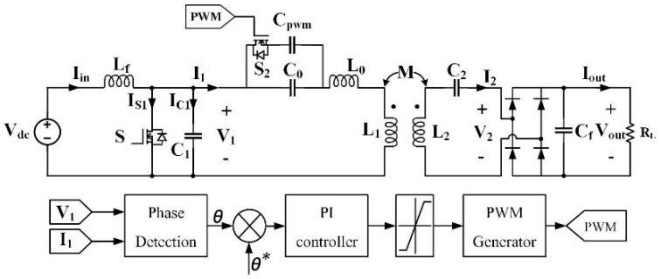
เมื่อ $X = R_{reflected}\left(\cot\phi - \frac{\pi^2}{4}\cos ec 2\phi\right)$. ความเหนี่ยวนำโช้ก ($L_f$) และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินพุท ($V_{dc}$) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (8) และ (9) ดังนี้

$$L_f = 2\left(\frac{\pi^2}{4}+1\right)\frac{R_{reflected}}{f_s}. \tag{8}$$

$$V_{dc} = \sqrt{\frac{R_{reflected}\left(\pi^2+4\right)}{8}}. \tag{9}$$

Journal of Technological & Innovative Vocational Education: TIVE Vol. 2 * No. 1 * January – June 2025

2. การออกแบบระบบควบสำหรับชดเชยการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำร่วมด้วยคาปาซิเตอร์ควบคุมด้วยพีดับเบิลยูเอ็ม




ภาพที่ 5 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้อินเวอร์เตอร์คลาสอีและระบบควบคุมคาปาซิเตอร์ด้วยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม

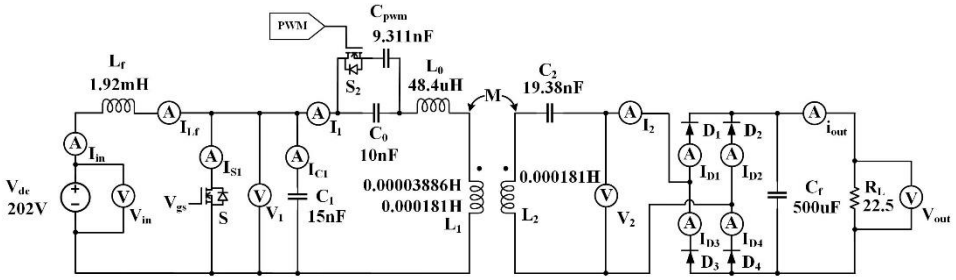
การศึกษานี้นำเสนอระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้อินเวอร์เตอร์คลาสอี ซึ่งสามารถทำงานภายใต้สภาวะ ZVS และใช้คาปาซิเตอร์ปรับค่าได้ตามสัญญาณ PWM โครงสร้างของระบบแสดงดังภาพที่ 5 โดยองค์ประกอบหลักประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Vdc) ตัวเหนี่ยวนำโช้ก ($L_f$) และอินเวอร์เตอร์คลาสอี ในขณะที่โหลดเป็นระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย คาปาซิแตนซ์ทางด้านส่งกำลังถูกควบคุมด้วยสัญญาณ PWM เพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำร่วม สำหรับระบบควบคุมเริ่มจากการวัดค่าแรงดันและกระแสทางด้านต้นทาง เพื่อนำไปคำนวณค่ามุมเฟสระหว่างแรงดันและกระแส จากนั้นค่ามุมเฟสที่ได้จะถูกเปรียบเทียบกับค่ามุมเฟสอ้างอิง โดยค่าความผิดพลาดจะถูกชดเชยผ่านตัวควบคุมแบบ PI ก่อนส่งสัญญาณไปยัง PWM Generator เพื่อสร้างสัญญาณ PWM ควบคุมสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ($S_2$) ซึ่งดิวตี้ไซเคิลของ PWM จะส่งผลต่อค่าคาปาซิเตอร์ $C_{PWM}$ ทำให้สามารถปรับค่าคาปาซิเตอร์ได้ผ่านการปรับดิวตี้ไซเคิลของ PWM นั่นเอง

3. การออกแบบชุดทดลองต้นแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายใช้คลาสอีอินเวอร์เตอร์ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบประกอบด้วยกำลังไฟฟ้าขาออก($P_{out}$) เท่ากับ 1 kW แรงดันกำลังไฟฟ้าขาออก ($V_{out}$) เท่ากับ 164.5 V ได้ค่ากระแสขาออก ($i_o$) 7.48 A ค่าความเหนี่ยวนนำขดส่งกำลังงาน($L_1$) 181.57 uH ความเหนี่ยวนำขดรับกำลังงาน ($L_2$) 171.50 uH ตัวประกอบคุณภาพ ($Q_L$) เท่ากับ 3 ค่าความเหนี่ยวนำ (M) เท่ากับ 38.8 uH ซึ่งจากการวัดค่าที่ระยะห่างระหว่างขดส่งและขดรับกำลังงาน 17 cm ความถี่สวิตอิเล็กทรอนิกส์ ($f_0$) เท่ากับ 85 kHz ใช้แรงดันกระแสตรงอินพุต ($V_{dc}$) 200 V ทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์โดยใช้สมการที่ (1)-(9) ได้ค่าดังนี้ ความต้านทานโหลด ($R_L$) 22.5 Ω ความต้านทานสมมูลย์ ($R_{Leq}$) 18.23 Ω คาปาซิแตนซ์ด้านรับกำลังงาน ($C_2$) 19.38 nF, อิมพีแดนซ์สะท้อนกลับ ($R_{reflected}$) 23.59Ω, ความเหนี่ยวนำร่วมด้านส่งกำลังงาน ($L_P$) 132.59 uH, ความเหนี่ยวนำ ($L_0$) 48.4uH มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแสทางด้านส่งกำลังงาน ($\phi$) = -32.11 คาปาซิแตนซ์ขนาดสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ ($C_1$) 15nF และคาปาซิแตนซ์เรโซแนนซ์ทางด้านส่งกำลังงาน ($C_0$) 19.311nF

Journal of Technological & Innovative Vocational Education: TIVE Vol. 2 * No. 1 * January – June 2025

4. ทำการจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

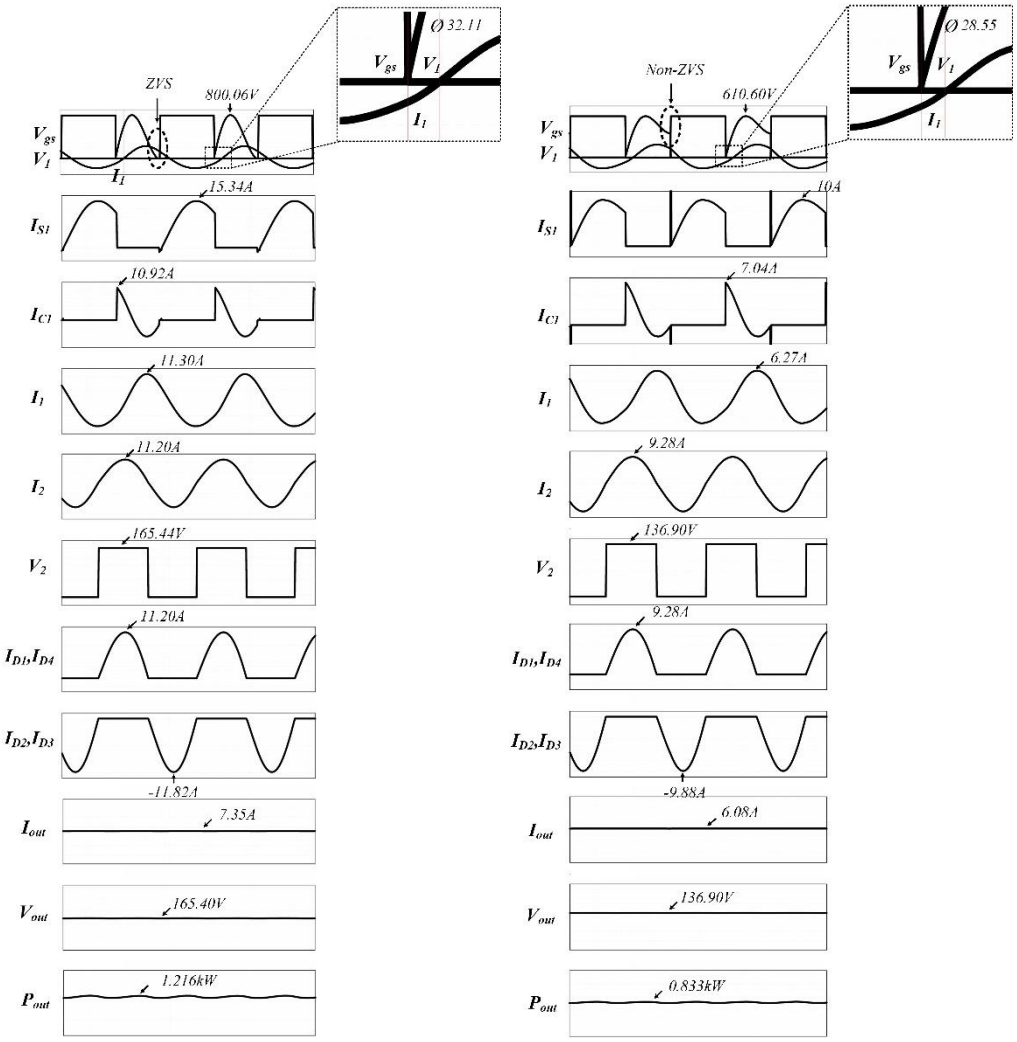
ทำการจำลองในสามกรณีดังนี้ กรณีที่หนึ่ง $k = k_{design}$ กรณีที่สอง $k < k_{design}$ และกรณีที่สาม $k > k_{design}$ วงจรที่ใช้ในการจำลองแสดงดังภาพที่ 6 ดังนี้




ภาพที่ 6 การจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

## ผลการวิจัย

1. ผลการจำลองในกรณี $k = k_{design}$ และ $k > k_{desing}$



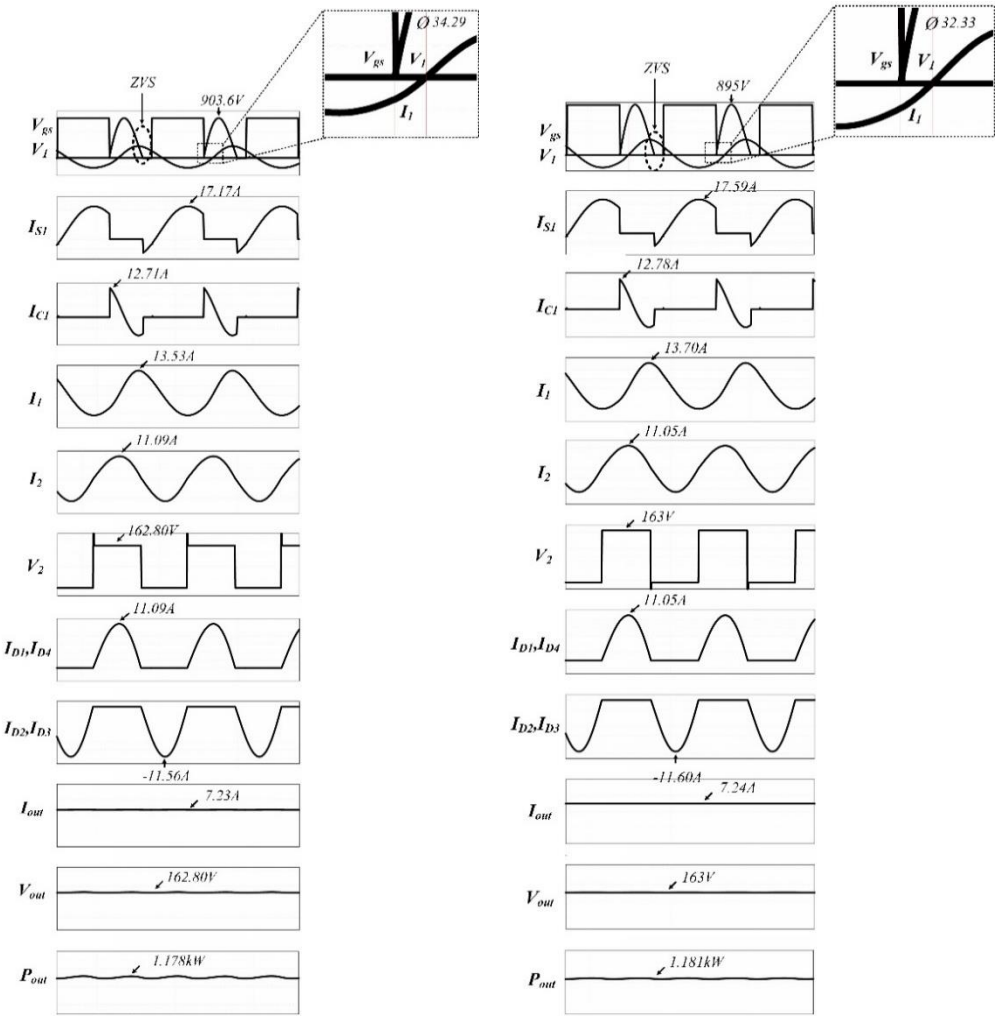

ภาพที่ 7 คลื่นสัญญาณของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย กรณี $k = k_{design}$ และ $k > k_{design}$

Journal of Technological & Innovative Vocational Education: TIVE Vol. 2 * No. 1 * January – June 2025

ภาพที่ 7 ก) แสดงผลการจำลองในกรณี $k = k_{design}$ ซึ่งอินเวอร์เตอร์ทำงานภายใต้สภาวะ ZVS โดยสังเกตุได้จากแรงดันคร่อมสวิตช์ (หรือแรงดันอินพุต $V_1$) ลดลงถึงศูนย์ก่อนขอบขาขึ้นของสัญญาณ Vgs หรือก่อนที่สวิตช์จะเริ่มเปิด มุมเฟสระหว่างแรงดันอินพุท $V_1$ และกระแสอินพุท $I_1$ วัดได้ -32.11 องศา ใกล้เคียงกับมุมที่เหมาะสมคือ -32.48 องศา แสดงให้เห็นว่าว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถใช้งานได้

ภาพที่ 7 ข) แสดงผลการจำลองในกรณี $k > k_{design}$ กรณีนี้อินเวอร์เตอร์ทำงานภายใต้สภาวะ non-ZVS โดยสังเกตได้จากแรงดัน V1 ลดลงไม่ถึงศูนย์ก่อนขอบขาขึ้นของ Vgs หรือสวิตซ์เริ่มเปิดมีกระแสไหลผ่านสวิตซ์ ($I_{S1}$) และเกิดสัญญาณกระแสไปค์ชั่วขณะซึ่งอาจทำให้ระบบทำงานไม่เสถียร มุมเฟสระหว่างแรงดันอินพุท $V_1$ และกระแสอินพุท $I_1$ วัดได้ -28.55 องศา ห่างออกจากมุมที่เหมาะสม แสดงให้เห็นว่าต้องทำการปรับค่าคาปาซิแตนซ์เพื่อทำให้ระบบกลับมาทำงานในสภาวะที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามพบว่ากรณีที่ k>kdesing วิธีการที่นำเสนอในบทความนี้ไม่สามารถทำให้ระบบกลับมาทำงานในสภาวะที่เหมาะสมได้ซึ่งเป็นไปตามที่ได้วิเคราะห์ไว้

2. ผลการจำลองในกรณี $k < k_{design}$ ก่อนและหลังปรับค่าคาปาซิเตอร์

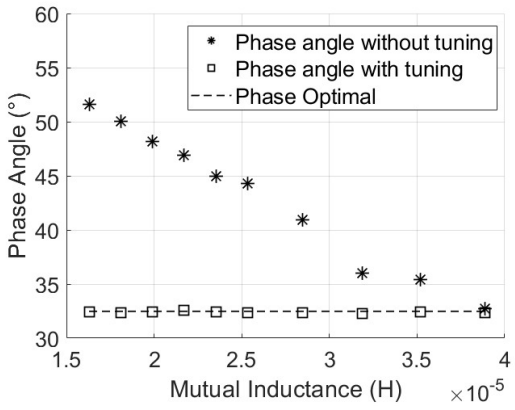



ภาพที่ 8 คลื่นสัญญาณของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย กรณี $k < k_{design}$

Journal of Technological & Innovative Vocational Education: TIVE Vol. 2 * No. 1 * January – June 2025

ภาพที่ 8 ก) แสดงผลการจำลองในกรณี $k < k_{design}$ ก่อนปรับค่าคาปาซิเตอร์ ซึ่งอินเวอร์เตอร์ทำงานภายใต้สภาวะ ZVS โดยสังเกตุได้จากแรงดันคร่อมสวิตช์ (หรือแรงดันอินพุต $V_1$) ลดลงถึงศูนย์ก่อนขอบขาขึ้นของสัญญาณ Vgs หรือก่อนที่สวิตช์จะเริ่มเปิด ถึงแม้ว่าระบบทำงานภายใต้สภาวะ ZVS แต่มีข้อสังเกตุคือแรงดัน $V_1$ ลดลงถึงศูนย์เร็วกว่าและมีค่าแอมพลิจูดของแรงดันสูงกว่ากรณี $k = k_{design}$ มุมเฟส วัดได้ -34.29 องศา ห่างออกจากมุมที่เหมาะสม แสดงให้เห็นว่าต้องทำการปรับค่าคาปาซิแตนซ์เพื่อทำให้ระบบกลับมาทำงานในสภาวะที่เหมาะสม ภาพที่ 8 ข) แสดงผลการจำลองกรณี $k < k_{design}$ หลังปรับค่าคาปาซิแตนซ์ โดยอินเวอร์เตอร์ยังคงทำงานในสภาวะ ZVS มุมเฟสวัดได้ -32.33 องศา ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสม แสดงให้เห็นว่าการปรับค่าคาปาซิแตนซ์สามารถทำให้ระบบกลับเข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมได้ ตามที่ได้วิเคราะห์ไว้

3. ผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสและความเหนี่ยวนำร่วม




ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสและความเหนี่ยวนำร่วม

จากผลการจำลองในภาพที่ 9 แสดงให้เห็นว่ามุมเฟสเปลี่ยนแปลงเมื่อความเหนี่ยวนำร่วมเปลี่ยนแปลง ในขณะที่เมื่อมีการปรับค่าคาปาซิแตนซ์ชดเชยการเปลี่ยนเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำร่วม ดังกล่าวสามารถทำให้มุมเฟสกลับมามีค่าคงที่ใกล้เคียงกับค่ามุมเฟสที่เหมาะสมได้แสดงผล

**อภิปรายและสรุปผลการวิจัย**

จากผลการจำลองพบว่าอินเวอร์เตอร์คลาสอีสามารถรักษาสภาวะ ZVS ได้เมื่อสัมประสิทธิ์การคล้องสนามแม่เหล็กอยู่ในช่วง $0 < k \leq k_{design}$ สอดคล้องกับการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ $k > k_{design}$ ระบบไม่สามารถทำงานในสภาวะ ZVS ได้ แม้จะมีการปรับค่าคาปาซิแตนซ์ ส่งผลให้เกิดความสูญเสียที่สวิตช์และกำลังไฟฟ้าขาออกลดลง สำหรับกรณี $k < k_{design}$ แม้ระบบยังอยู่ในสภาวะ ZVS แต่มุมเฟสเบี่ยงเบนจากค่าที่เหมาะสม การปรับค่าคาปาซิแตนซ์ ($C_{PWM}$) ช่วยให้ระบบกลับเข้าสู่

สภาวะเรโซแนนซ์ และปรับมุมเฟสให้อยู่ใกล้ค่าที่ออกแบบไว้ งานที่จะพัฒนาถัดไป คือการพัฒนาต้นแบบฮาร์ดแวร์จริงเพื่อยืนยันผลการจำลอง และประเมินประสิทธิภาพของระบบในสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงจริง เช่น การเยื้องตำแหน่งขดลวด การเปลี่ยนแปลงของโหลด และการพัฒนาวิธีการที่มีความแม่นยำและตอบสนองรวดเร็วเพื่อควบคุมค่าคาปาซิแตนซ์ได้อย่างต่อเนื่องและแม่นยำ

**References**

Aditya, K., Sood, V. K., & Williamson, S. S. (2017). Magnetic characterization of unsymmetrical coil pairs using Archimedean spirals for wider misalignment tolerance in IPT systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification, 3*(2), 454–463.

Aditya, K., & Williamson, S. S. (2019). Design guidelines to avoid bifurcation in a series–series compensated inductive power transfer system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 66*(5), 3973–3982.

Alabsi, A., Hawbani, A., Wang, X., Al-Dubai, A. Y., Hu, J., Abdel Aziz, S., Kumar, S., Zhao, L., Shvetsov, A. V., & Alsamhi, S. H. (2025). Wireless power transfer technologies, applications, and future trends: A review. *IEEE Transactions on Sustainable Computing, 10*(1), 1–17.

Chaidee, E., Sangswang, A., Naetiladdanon, S., & Nutwong, S. (2022). An inverter topology for multi-transmitter wireless power transfer systems. *IEEE Access, 10*, 36592–36605.

Corti, F., Reatti, A., Wu, Y.-H., Czarkowski, D., & Musumeci, S. (2021). Zero voltage switching condition in Class-E inverter for capacitive wireless power transfer applications. *Energies, 14*(4), 1–21.

Huang, X., Lin, Y., Dou, Y., Lin, S., & Huang, J. (2023). Load-independent push–pull Class-$\Phi^2$ inverter with single compact three-winding inductor. *IEEE Transactions on Power Electronics, 38*(10), 11916–11927.

He, L., & Guo, D. (2021). A clamped and harmonic injected Class-E converter with ZVS and reduced voltage stress over wide range of distance in WPT system. *IEEE Transactions on Power Electronics, 36*(6), 6339–6350.

He, L., & Guo, D. (2020). Compound voltage clamped Class-E converter with ZVS and flexible power transfer for WPT system. *IEEE Transactions on Power Electronics, 35*(7), 7123–7133.

Issi, F., & Kaplan, O. (2022). Design and application of wireless power transfer using Class-E inverter based on adaptive impedance-matching network. *ISA Transactions, 126*, 415–427.

Komanaka, A., Zhu, W., Wei, X., Nguyen, K., & Sekiya, H. (2022). Load-independent inverse class-E ZVS inverter and its application to wireless power transfer systems. *IET Power Electronics, 15*(11), 644–658.

Moisello, E., Liotta, A., Malcovati, P., & Bonizzoni, E. (2023). Recent trends and challenges in near-field wireless power transfer systems. *IEEE Open Journal of the Solid-State Circuits Society, 3*, 197–213.

Roshan, Y. M., & Park, E. J. (2018). Maximum power transfer control for wireless charging of portable devices. In *2018 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)* (pp. 1–6).

Sagar, A., Kashyap, A., Nasab, M. A., Padmanaban, S., Bertoluzzo, M., Kumar, A., & Blaabjerg, F. (2023). A comprehensive review of the recent development of wireless power transfer technologies for electric vehicle charging systems. *IEEE Access, 11*, 83703–83751.

Sensui, T., & Koizumi, H. (2021). Load-independent Class E zero-voltage-switching parallel resonant inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics, 36*(11), 12805–12818.

Suetsugu, T., & Kazimierczuk, M. K. (2006). Design procedure of class-E amplifier for off-nominal operation at 50% duty ratio. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 53*(7), 1468–1476.

Seo, D.-W., & Lee, J.-H. (2017). Frequency-tuning method using the reflection coefficient in a wireless power transfer system. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 27*(11), 959–961.

Van Nunen, T. P. G., Mestrom, R. M. C., & Visser, H. J. (2023). Wireless power transfer to biomedical implants using a Class-E inverter and a Class-DE rectifier. *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology, 7*(3), 202–209.

Yang, L., Chen, X., Tian, L., Zhang, Y., Xing, D., Bu, Z., Sun, J., Feng, B., Wen, H., Zhao, Y., Yang, T., Huang, J., Zhu, D., Zhang, A., & Tong, X. (2025). Constant voltage and constant current control method of undersea wireless power supply system based on frequency tracking method. *IEEE Transactions on Power Electronics, 40*(4), 6359–6369.

Zhang, J., Zhao, J., Mao, L., Zhao, J., Jiang, Z., & Qu, K. (2022). ZVS operation of Class-E inverter based on secondary side zero compensation switching at variable coupling coefficient in WPT. *IEEE Transactions on Industry Applications, 58*(1), 1022–1031.

Zhu, W., Komiyama, Y., Nguyen, K., & Sekiya, H. (2021). Comprehensive and simplified numerical design procedure for Class-E switching circuits. *IEEE Access, 9*, 149971–149981.