



รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัย

ระบบชาร์จรถไฟฟ้าแบบสมาร์ตพร้อมระบบเซลล์แสงอาทิตย์
เชื่อมต่อกิริตสมรรถนะสูง
Smart Electric Vehicle Charger with High Performance PV
Grid Connected System

นายสมยศ เกียรติวนิชวิไล

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2557
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำนำ

รายงานการวิจัยนี้เป็นรายงานผลงานวิจัยในโครงการ ระบบชาร์จรถไฟฟ้าแบบสมาร์ทพร้อมระบบ เซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดสมรรถนะสูง โดยมีสาระสำคัญที่แสดงถึงความเป็นไปได้ในการออกแบบรวมทั้ง สร้างเครื่องต้นแบบที่สามารถประยุกต์ใช้ได้จริง รวมทั้งแสดงแนวทางการออกแบบในสามด้านได้แก่ ในด้านการ การตามรอยกำลังไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยพัฒนาระบบการตามรอยโดยใช้วงจรถูกควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ อย่างง่าย โดยเทคนิคที่นำเสนอสามารถเพิ่มเสถียรภาพของแรงดันเอาต์พุตให้มีการแกว่งที่น้อย สำหรับในด้าน ของการส่งผ่านพลังงานไร้สาย ได้พัฒนาชุดขดลวดรับและขดลวดส่งพลังงานที่ใช้ความถี่เดียวกันกับความถี่เรโซแนนซ์ของผลคูณของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุซึ่งทำให้สามารถส่งพลังงานแบบไร้สายได้ดี นอกจากนี้ ในด้านการอัดประจุแบตเตอรี่ได้ประยุกต์ใช้การอัดประจุแบบพัลส์ชาร์จเพื่อช่วยกระตุ้นเซลล์ของ แบตเตอรี่ ให้สามารถชาร์จได้รวดเร็วขึ้น ชุดวงจรต้นแบบได้รับการทดสอบซึ่งผลของการทดสอบสามารถ ยืนยันได้ว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการชาร์จรถไฟฟ้าแบบไร้สายได้จริง

ทางผู้วิจัยคาดหวังว่ารายงานฉบับนี้คงเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านและผู้สนใจในการพัฒนาที่เกี่ยวข้อง ไม่มากก็น้อย

รศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล

นักวิจัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการดำเนินงานในการออกแบบระบบการชาร์จรถไฟฟ้าแบบไร้สายซึ่งประกอบไปด้วยระบบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบรักษาระดับแรงดันขาออกให้มีเสถียรภาพ ระบบการส่งพลังงานไร้สายแบบส่งผ่านด้วยความถี่เรโซแนนซ์ และการชาร์จแบตเตอรี่รถไฟฟ้าด้วยเทคนิคการชาร์จแบบพัลส์ โดยทั้งสามระบบถูกออกแบบและเพื่อให้ทำงานร่วมกันให้เป็นชิ้นงานต้นแบบได้ ในส่วนการพัฒนาตัวอัดประจุไฟฟ้าได้พัฒนาด้วยเทคนิคแบบพัลส์ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการชาร์จแบบเดิมทำให้ชาร์จได้รวดเร็วกว่า ซึ่งเป็นข้อเด่นและจำเป็นต่อโครงการนี้ จากผลที่ได้ทำการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบที่นำเสนอสามารถใช้งานได้จริง โดยการทดสอบในหลากหลายเงื่อนไขช่วยยืนยันได้ว่าระบบสามารถชาร์จรถไฟฟ้าแบบไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การดำเนินงานในอนาคตและข้อจำกัดของขั้นตอนที่นำเสนอถูกรวบรวมและสรุปไว้ในบทที่ 4 ของรายงานฉบับนี้

คำสำคัญ : การอัดประจุไฟฟ้าแบบพัลส์ชาร์จ, การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด, การส่งผ่านพลังงานไร้สาย, ความถี่เรโซแนนซ์

Abstract

This research report presents the results of work on the design of a wireless charging system which composes of the maximum power point tracker from a photovoltaic system, wireless energy transfer using resonant frequency adjustment, and the battery charger with pulse charging technique. All parts are designed to able to be connected. In the development of charger, the faster the charging system is achieved by the pulse charge technique which is an important issue to the project objective. As shown in experimental result, the wireless charging system with the MPPT can be achieved..

The future work, limitation of work and problems are summarized in Chapter 4 of this report.

Keywords: Pulse Charger, Maximum Power Point Tracker, Wireless Power Transfer, Resonant Frequency

กิตติกรรมประกาศ

ทีมวิจัยขอขอบคุณหน่วยงานต่อไปนี้ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัย

- ก. คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ สำหรับงบประมาณ
- ข. กองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้การสนับสนุน ด้านการดำเนินการเกี่ยวกับทุนวิจัย
- ค. ส่วนบริหารงานวิจัยและวิชาการสำหรับการประสานงานด้านงานวิจัยและรายงาน
- ง. ส่วนงานวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

สารบัญ

	หน้าที่
คำนำ	2
บทคัดย่อ	3
Abstract	4
กิตติกรรมประกาศ	5
สารบัญ	6
สารบัญรูป	10
สารบัญตาราง	14
บทที่ 1 บทนำ	15
1.1 บทนำ	15
1.2 วัตถุประสงค์โครงการ	19
1.3 เป้าหมาย / ผลงานของโครงการ	19
1.4 เอ้าท์พุทที่ได้จากโครงการ	19
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	20
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบการตามรอยกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์	20
2.1.1 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์	23
2.1.2 พารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์	24
2.1.3 วงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้า (Boost Converter)	26
2.1.3.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้า	26
2.1.3.2 หลักการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้า	27
2.1.4 เทคนิคการควบคุมแบบรบกวนและสังเกต (P&O)	30
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบการส่งพลังงานไร้สาย	31
2.2.1 วงจรเรโซแนนซ์	31
2.2.2 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)	34
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบการอัดประจุแบตเตอรี่	37
2.3.1 ความจุของแบตเตอรี่ (Battery Capacity)	37
2.3.2 การอัดและการคายประจุ (Charging and Discharging)	38
2.3.2.1 สถานะการอัดประจุ (State of Charge, SOC)	38
2.3.2.2 ประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
2.3.3 ระดับแรงดันในการชาร์จแบตเตอรี่แบบตะกั่ว – กรด	40
2.3.3.1 การชาร์จปกติ (Floating Charge)	40
2.3.3.2 การชาร์จจูนแรง (Equalizing Charge)	40
2.3.4 ผลกระทบต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่	41
2.3.5 วิธีการอัดประจุแบตเตอรี่	41
2.3.5.1 การอัดประจุแบบกระแสไฟฟ้าตรงคงที่ (Constant Current Charging)	42
2.3.5.2 การอัดประจุแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant Voltage Charging)	42
2.3.5.3 การอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าตรงคงที่และแรงดันไฟฟ้าคงที่	43
2.3.5.4 การอัดประจุแบบพัลส์ (Pulse Charging)	43
2.3.5.5 พัลส์ชาร์จแบบปรับดิวตีไซเคิล (Duty-varied voltage pulse charger)	45
2.4 การมีอดดูเลชัน	46
2.4.1 การมีอดดูเลชันความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation: PWM)	46
2.5 การเชื่อมต่อระบบกริดการไฟฟ้า	46
2.6 การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กของหม้อแปลงความถี่สูง	47
บทที่ 3 วิธีการออกแบบและเทคนิคที่นำเสนอและผลการทดลอง	51
3.1 การออกแบบวงจรสคอนเวอร์เตอร์และเทคนิคการควบคุมการตามรอยกำลังไฟฟ้า	
แบบรักษาระดับแรงดันขาออก	51
3.1.1 วงจรทระดับแรงดันไฟฟ้า	51
3.1.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ (L) ที่ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องของวงจรทระดับแรงดัน	52
3.1.3 การหาขนาดตัวเก็บประจุ(C) ที่ทำให้เกิดการกระเพื่อมที่ ($r < 1\%$)	53
3.1.4 การออกแบบตัวติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบใหม่โดยใช้วิธีการรบกวนและสังเกต (P&O)แบบมีขอบเขตเพื่อรักษาระดับแรงดันขาออกให้มีเสถียรภาพ	54
3.1.5 การทดลองและผลการทดลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์	57
3.2 การออกแบบการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า	59
3.2.1 วงจรสมมูลของขดลวดตัวส่ง (Transmitter) และขดลวดตัวรับ (Receiver)	59
3.2.2 ส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน ของการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าแบบไร้สาย	61
3.2.2.1 แหล่งจ่ายพาวเวอร์กระแสตรง	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
3.2.2.2 อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง	61
3.2.3 การออกแบบขดลวดตัวส่ง (Transmitter) และขดลวดตัวรับ (Receiver)	62
3.2.3.1 หลักการออกแบบโครงสร้างของขดลวด	63
3.3 การออกแบบระบบการอัดประจุแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า	68
3.3.1 การออกแบบวงจร ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องชาร์จแบบพัลส์ (Pulse Charge)	68
3.3.2 ผังการทำงาน (Flow Chart)	71
3.3.2.1 การทำงานในโหมดการชาร์จแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่โดยจำกัดกระแสชาร์จ	71
3.3.2.2 การทำงานในโหมดการชาร์จแบบพัลส์	72
3.3.3 ผลการทดสอบการอัดประจุ	73
3.3.3.1 ผลการทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยแรงดันคงที่แบบจำกัดกระแสชาร์จ	73
3.3.3.2 ผลการทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยการชาร์จแบบพัลส์	75
3.3.3.3 ผลการทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยการชาร์จแบบพัลส์แบบมีการดีสชาร์จ	76
3.3.4 เปรียบเทียบคุณลักษณะการอัดประจุแบตเตอรี่ระหว่างแรงดันคงที่แบบจำกัดกระแสชาร์จและแบบพัลส์และพัลส์ดีสชาร์จ	77
3.4 อินเวอร์เตอร์ฟลายแบ็คเชื่อมต่อกิริต	79
3.4.1 พิกัดอุปกรณ์ของอินเวอร์เตอร์	79
3.4.1.1 พิกัดกำลังของวงจรฟลายแบคอินเวอร์เตอร์	79
3.4.1.2 พิกัดกระแสไฟฟ้ของวงจรฟลายแบคอินเวอร์เตอร์	80
3.4.1.3 ขนาดพิกัดของตัวสวิตช์	80
3.4.1.4 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	81
3.4.2 ผลการเชื่อมต่อบรรยากาศ	82
3.4.2.1 สัญญาณกระแสต้านปฏิกิริยาของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	82
3.4.3 สัญญาณนำขั้วสวิตช์ด้านปฐมภูมิ	83
3.4.4 สัญญาณนำขั้วสวิตช์ด้านทุติยภูมิ	83
3.4.5 สัญญาณกระแสไฟฟ้จากวงจรฟลายแบคอินเวอร์เตอร์เมื่อทำการเชื่อมต่อบรรยากาศการไฟฟ้	84
3.4.6 สัญญาณแรงดันกริดการไฟฟ้เปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้หลังตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้	86

สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
3.5 ผลการเชื่อมต่อระบบและชิ้นงานต้นแบบ	87
3.5.1 อุปกรณ์ต้นแบบที่ใช้ในการเชื่อมต่อ	87
3.5.2 ผลการเชื่อมต่อระบบส่งผ่านพลังงานแบบไร้สายเข้ากับอุปกรณ์ชาร์จแบตเตอรี่	87
3.5.3 อุปกรณ์ต้นแบบที่ประยุกต์ใช้กับรถไฟไฟฟ้าโดยชาร์จแบตเตอรี่แบบไร้สาย	90
บทที่ 4 บทสรุปของโครงการ	92
4.1 สรุปผลการดำเนินงาน	92
4.2 แนวทางการดำเนินงานวิจัยต่อไปและข้อเสนอแนะ	93
เอกสารอ้างอิง	94
ภาคผนวก ก. ต้นแบบระบบชาร์จรถไฟฟ้าไร้สายประสิทธิภาพสูง	96
ภาคผนวก ข. งานประชุมวิชาการที่จัดส่งบทความ	102
ภาคผนวก ค. การจัดอบรมสัมมนาเผยแพร่ผลงานวิจัย	118

สารบัญรูป

	หน้าที่
รูปที่ 1.1 ตัวอย่างอุปกรณ์แปลงผันกำลังไฟฟ้าและระบบควบคุมที่ใช้ในจุดต่างๆ	14
รูปที่ 1.2 ระบบ 3 stage การอัดประจุ	18
รูปที่ 1.3 สิ่งที่ต้องคำนึงและปัจจัยในการพิจารณาในการควบคุมของระบบควบคุมที่จะออกแบบ	18
รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบการเชื่อมต่อ PV Inverter	21
รูปที่ 2.2 แสดงปัญหาการเกิด Partial Shading	22
รูปที่ 2.3 แสดงผลการเกิด Multiple local maxima ในปัญหา Partial Shading	22
รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์โดยต่อเข้ากับโหลด	23
รูปที่ 2.5 กราฟคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	24
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของกำลังและแรงดันเมื่อความเข้มแสงจากมากไปน้อย	25
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	25
รูปที่ 2.8 วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า	27
รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส	27
รูปที่ 2.10 กราฟแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า	28
รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส	28
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันกับ D	30
รูปที่ 2.13 แผนภาพบล็อกของการควบคุมแบบพีไอดี	31
รูปที่ 2.14 ผลของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่มีต่อกระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ	32
รูปที่ 2.15 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series resonant)	33
รูปที่ 2.16 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel resonant)	33
รูปที่ 2.17 ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็กในแกนที่มีลักษณะต่างกัน	34
รูปที่ 2.18 แสดงการเกิดความเหนี่ยวนำตัวเอง	35
รูปที่ 2.19 ตัวเหนี่ยวนำ	36
รูปที่ 2.20 ความสามารถในการคายประจุกับเวลาในการคายประจุ	37
รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ charge cut-off voltage	38
รูปที่ 2.22 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในช่วงเวลาที่เกิดกระบวนการอัดและการคายประจุ	39
รูปที่ 2.23 โครงสร้างพื้นฐานของการอัดประจุแบตเตอรี่ขณะทำการอัดประจุ	42
รูปที่ 2.24 วิธีการอัดประจุแบตเตอรี่	43
รูปที่ 2.25 ความเข้มข้นของการกระจาย	44
รูปที่ 2.26 ปรับค่าดิวิตีไซเคิลของ DVVPC	46
รูปที่ 3.1 วงจรแปลงผันทบระดับ	52

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 3.2	กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ	53
รูปที่ 3.3	แผนภูมิกระบวนการลำดับขั้นตอนของตัวติดตามจุดกำลังสูงสุด โดยใช้วิธีการรบกวนและสังเกตแบบมีขอบเขต	55
รูปที่ 3.4	กราฟคุณลักษณะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์	56
รูปที่ 3.5	กราฟคุณลักษณะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์	56
รูปที่ 3.6	วงจรจริงที่ใช้ในการทดสอบ	57
รูปที่ 3.7	กำลังไฟฟ้าและแรงดันขาออกเปรียบเทียบกับเวลาความเข้มแสง $700-900 \text{ W/m}^2$	58
รูปที่ 3.8	วงจรของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย	59
รูปที่ 3.9	วงจรสมมูลของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย	60
รูปที่ 3.10	วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย	60
รูปที่ 3.11	วงจรแหล่งจ่ายพาวเวอร์กระแสตรง	61
รูปที่ 3.12	วงจรอินเวอร์เตอร์	62
รูปที่ 3.13	การพันขดลวดตัวส่ง (Transmitter) และขดลวดตัวรับ (Receiver)	63
รูปที่ 3.14	ทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างขดลวดส่งและขดลวดรับ	63
รูปที่ 3.15	โครงสร้างการทำงานของระบบ	64
รูปที่ 3.16	ระบบการส่งพลังงานไร้สายจริงที่ใช้ทำการทดสอบ	64
รูปที่ 3.17	สัญญาณกระแส, แรงดัน และกำลังไฟฟ้า จากขดลวดฝั่งส่ง, ฝั่งรับ, โหลดที่ระยะ 4 cm	66
รูปที่ 3.18	ประสิทธิภาพการส่งพลังงานเทียบกับระยะในแนวแกนราบ	67
รูปที่ 3.19	วงจร ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องอัดประจุแบบพัลส์	68
รูปที่ 3.20	ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องอัดประจุแบบพัลส์	69
รูปที่ 3.21	$L=100$ ไมโครเฮนรี่ของวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องอัดประจุแบบพัลส์	70
รูปที่ 3.22	ผังการทำงานในโหมดการชาร์จแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่โดยจำกัดกระแสชาร์จ	71
รูปที่ 3.23	ผังการทำงานในโหมดการชาร์จแบบพัลส์	72
รูปที่ 3.24	เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ต้นแบบ	73
รูปที่ 3.25	คุณลักษณะการชาร์จแบตเตอรี่ ด้วยแรงดันคงที่แบบจำกัดกระแสชาร์จ	74
รูปที่ 3.26	แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ และ กระแสชาร์จแบตเตอรี่ ด้วยแรงดันคงที่แบบจำกัดกระแสชาร์จ	74
รูปที่ 3.27	แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ และ กระแสชาร์จแบตเตอรี่ แบบพัลส์ 100 Hz $D=0.5$	75
รูปที่ 3.28	แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ และ กระแสชาร์จแบตเตอรี่ แบบพัลส์ 100 Hz $D=0.75$	75
รูปที่ 3.29	แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ และ กระแสชาร์จแบตเตอรี่ แบบดิสชาร์จ 100 Hz $D=0.5$	76
รูปที่ 3.30	แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ และ กระแสชาร์จแบตเตอรี่ แบบดิสชาร์จ 100 Hz $D=0.75$	76

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 3.31	เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะทำการชาร์จระหว่างแบบแรงดันคงที่ โดยจำกัดกระแสชาร์จและการชาร์จแบบพัลส์	78
รูปที่ 3.32	เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะทำการชาร์จระหว่างแบบแรงดันคงที่ โดยจำกัดกระแสชาร์จและการชาร์จแบบพัลส์	79
รูปที่ 3.33	สัญญาณกระแสต้านปฏิกิริยาของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าความถี่สูง (20 A/div)	82
รูปที่ 3.34	สัญญาณนำขั้วสวิตช์ด้านปฏิกิริยา (10 V/div)	83
รูปที่ 3.35	สัญญาณนำขั้วสวิตช์ด้านทุติยภูมิ (10 V/div)	83
รูปที่ 3.36	วงจรฟลายแบ็คอินเวอร์เตอร์ต้นแบบเชื่อมต่อกิริต	84
รูปที่ 3.37 (ก)	สัญญาณกระแสไฟฟ้าจากวงจรฟลายแบ็คอินเวอร์เตอร์เมื่อทำการเชื่อมต่อระบบ กิริตการไฟฟ้าเปรียบเทียบกับแรงดันกิริตการไฟฟ้า ที่ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 21 kHz เท่ากัน (ก) ค่า dp เท่ากับ 0.5	84
รูปที่ 3.37 (ข)	สัญญาณกระแสไฟฟ้าจากวงจรฟลายแบ็คอินเวอร์เตอร์เมื่อทำการเชื่อมต่อระบบ กิริตการไฟฟ้าเปรียบเทียบกับแรงดันกิริตการไฟฟ้า ที่ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 21 kHz เท่ากัน (ข) ค่า dp เท่ากับ 0.6	85
รูปที่ 3.37 (ค)	สัญญาณกระแสไฟฟ้าจากวงจรฟลายแบ็คอินเวอร์เตอร์เมื่อทำการเชื่อมต่อระบบ กิริตการไฟฟ้าเปรียบเทียบกับแรงดันกิริตการไฟฟ้า ที่ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 21 kHz เท่ากัน (ค) ค่า dp เท่ากับ 0.7	85
รูปที่ 3.37 (ง)	สัญญาณกระแสไฟฟ้าจากวงจรฟลายแบ็คอินเวอร์เตอร์เมื่อทำการเชื่อมต่อระบบ กิริตการไฟฟ้าเปรียบเทียบกับแรงดันกิริตการไฟฟ้า ที่ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 21 kHz เท่ากัน (ง) ค่า dp เท่ากับ 0.8	86
รูปที่ 3.38	การเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง สัญญาณแรงดันกิริตการไฟฟ้ากับสัญญาณแรงดัน ไฟฟ้าหลังตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า (100 V/div)	86
รูปที่ 3.39	อุปกรณ์ต้นแบบที่ใช้ในการต่อเชื่อม	87
รูปที่ 3.40 (ก)	แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าก่อนเข้าวงจรส่งผ่านพลังงานไร้สาย ที่พิกัด 100 วัตต์	87
รูปที่ 3.40 (ข)	แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าที่วงจรซาร์ทแบต ที่พิกัด 100 วัตต์	87
รูปที่ 3.41 (ก)	แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าก่อนเข้าสู่ชุดส่งผ่านพลังงานไร้สาย ที่พิกัด 227 วัตต์ ระยะ 4 cm	88
รูปที่ 3.41 (ข)	แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าที่วงจรซาร์ทแบต ที่พิกัด 227 วัตต์	88
รูปที่ 3.42 (ก)	แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าก่อนเข้าสู่ชุดส่งผ่านพลังงานไร้สาย ที่พิกัด 420 วัตต์ ระยะ 4 cm	88
รูปที่ 3.42 (ข)	แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าที่วงจรซาร์ทแบต ที่พิกัด 420 วัตต์	88

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 3.43 (ก) แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าก่อนเข้าสู่ดส่งผ่านพลังงานไร้สาย ที่พิกัด 508 วัตต์ ระยะ 4 cm	89
รูปที่ 3.43 (ข) แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าที่วงจรถาร์ตแบบ ที่พิกัด 508 วัตต์	89
รูปที่ 3.44 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ขาเข้าสู่ดส่งผ่านพลังงานไร้สายขณะทำการชาร์จ และกำลังไฟฟ้าที่เข้าสู่ดอุปกรณ์ชาร์ตเตอร์ด้วยวิธีการชาร์ตแบบแรงดัน และกระแสคงที่ ของกำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ กัน	89
รูปที่ 3.45 ประสิทธิภาพของระบบ	90
รูปที่ 3.46 ระบบต้นแบบชาร์ตไฟฟ้าแบบไร้สายที่ประยุกต์ร่วมกับรถไฟฟ้าขนาดเล็ก	90

สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 2.1 อัตราการขยายแรงดันของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่า D	29
ตารางที่ 2.2 การทำงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า	30
ตารางที่ 2.3 ระดับแรงดันในการชาร์ตแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด	40
ตารางที่ 3.1 สรุปผลการตอบสนองของระบบที่ออกแบบเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการควบคุมแบบเดิมที่การเปลี่ยนความเข้มแสงจาก 900 วัตต์ต่อตารางเมตร เป็น 700 วัตต์ต่อตารางเมตร	58
ตารางที่ 3.2 ผลการทดลองที่กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 4 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม	66
ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบผลการชาร์จแบบจำกัดกระแสชาร์จและแบบพัลส์ที่กระแสชาร์จเฉลี่ย 2 แอมป์ที่ความถี่ 100 Hz	77
ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบผลการชาร์จแบบพัลส์ที่กระแสชาร์จเฉลี่ย 2 แอมป์ที่ความถี่ไซเคิลที่ 0.75	77
ตารางที่ 3.5 เปรียบเทียบผลการชาร์จแบบพัลส์แบบดิสชาร์จที่กระแสชาร์จเฉลี่ย 2 แอมป์	77
ตารางที่ 3.6 เปรียบเทียบผลการชาร์จแบบพัลส์และแบบพัลส์ดิสชาร์จที่กระแสชาร์จเฉลี่ย 2 แอมป์	78

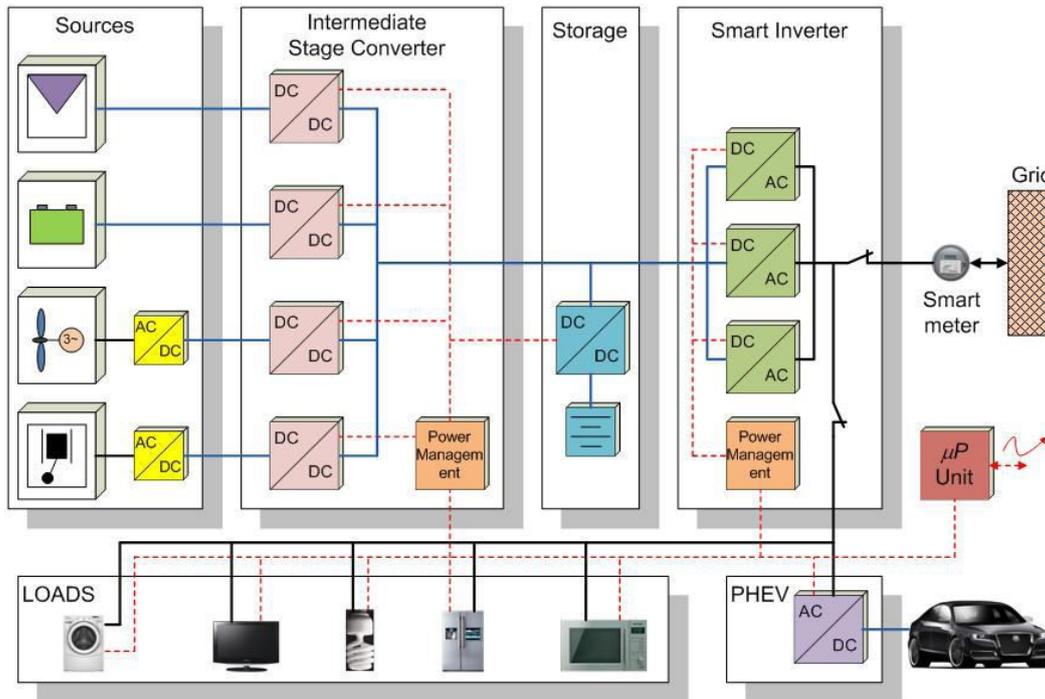
บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ปัจจุบันปัญหาโลกร้อนและปัญหาทางด้านพลังงานนับว่ามีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาทางสังคม เศรษฐกิจและด้านต่างๆ ดังจะเห็นได้จากหลายหน่วยงานตระหนักและให้ความสำคัญต่อการพัฒนาและ เสริมสร้างความเข้มแข็งทางด้านพลังงาน อาทิเช่น การกำหนดแผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี [1] การออก มาตรการและกฎหมายด้านการอนุรักษ์พลังงาน [2] เป็นต้น นอกจากนี้เหตุการณ์หลายเหตุการณ์ในปัจจุบันยัง บ่งบอกถึงปัญหาด้านพลังงานและการจัดการพลังงานที่ทวีความรุนแรงขึ้น อาทิเช่น การเกิดไฟฟ้าดับครั้งใหญ่ ในปี ค.ศ. 2003 ที่อเมริกาเหนือ การเกิดไฟฟ้าดับครั้งใหญ่ในรอบสิบปีของประเทศอินเดียในปี ค.ศ. 2012 หรือปีที่น่าเสนอข้อเสนองานวิจัยนี้ ราคาพลังงานต่อหน่วยมีแนวโน้มสูงมากขึ้น เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงได้มี งานวิจัยจำนวนมากมุ่งไปพัฒนาระบบที่เกี่ยวข้องกับพลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือกเพื่อให้เกิด นวัตกรรมและเกิดผลดีต่อการจัดการด้านพลังงานในอนาคต แหล่งพลังงานที่งานวิจัยดังกล่าวมุ่งเน้นจะ ดำเนินการและพัฒนาได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำและพลังงานไฮโดรเจน อย่างไรก็ตาม การพิจารณาการใช้พลังงานดังกล่าวจะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมในเชิงพลังงานและความคุ้มค่าเป็นสำคัญ

นอกจากการพัฒนาทางด้านระบบสมาร์ตกริดที่กล่าวมาแล้ว การพัฒนาทางด้านยานยนต์ซึ่งเป็นกลุ่ม ที่ใช้พลังงานสูงก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะการให้ความสนใจในการใช้แหล่งพลังงานไฟฟ้าทดแทนน้ำมันมาก ขึ้น อาทิเช่น การผลิตรถไฟฟ้า การผลิตรถไฮบริดจ์ เป็นต้น ในอนาคตเป็นที่คาดการณ์ว่าปริมาณการผลิตที่ ใช้ไฟฟ้าหรือรถไฮบริดจ์จะมีมากขึ้นเนื่องจากข้อดีในแง่ประสิทธิภาพการใช้พลังงานและความขาดแคลนพลังงาน ในเรื่องของน้ำมันและก๊าซ ในอนาคตอันใกล้ความต้องการระบบชาร์จที่สะดวกและมีราคาต่ำและใช้พลังงาน ต่ำลงจะเป็นที่ต้องการมากขึ้น



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างอุปกรณ์แปลงผันกำลังไฟฟ้าและระบบควบคุมที่ใช้ในจุดต่างๆ [3]

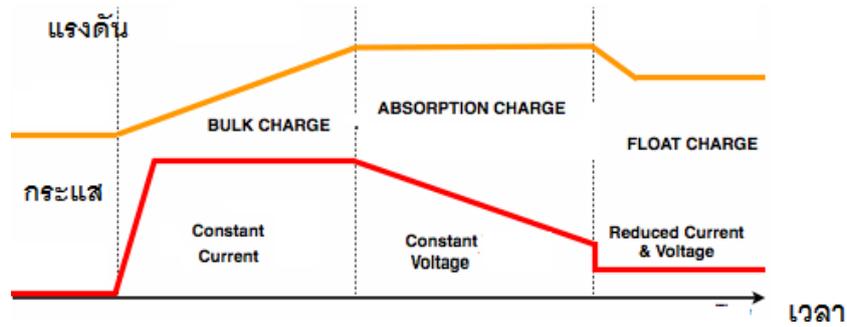
จากตัวอย่างในรูปที่ 1.1 แสดงโหนดทางไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดพลังงานชนิดต่างๆ จากรูปจะเห็นว่า ในอนาคตโหนดที่มีความสำคัญชนิดหนึ่งในระบบพลังงานคือ โหนดชนิด PHEV (Plug in Hybrid Electric Vehicle) ซึ่งคือระบบชาร์จรถไฟฟ้าแบบไฮบริดซึ่งในอนาคตจะมีการใช้งานมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงการสร้างระบบชาร์จที่ทันสมัย ประหยัดค่าพลังงานต่อหน่วยและมีความคล่องตัวในการใช้งานสำหรับโหนดชนิดนี้ด้วย โดยหากมีการจัดการเรื่องการชาร์จอย่างเหมาะสมจะทำให้ผู้ใช้ (Demand side) ได้รับราคาถูกในแง่การค่าพลังงานและความสะดวกสบายในการใช้งาน ส่วนในด้านการผลิตไฟฟ้า (Supply side) ก็มีประสิทธิผลมากขึ้นด้วย ส่งผลดีต่อระบบสมาร์ตกริดและไมโครกริดที่จะเกิดขึ้นอย่างแน่นอนในอนาคต

แนวทางหนึ่งในการพัฒนางานทางด้านนี้คือการพัฒนาระบบกริดเชื่อมต่อกับพลังงานทดแทนเหล่านี้ ซึ่งจะต้องคำนึงถึงเทคนิคการเปลี่ยนรูปพลังงานจากแหล่งกำเนิดให้เหมาะสมกับโหนดของระบบไฟฟ้า ความมีเสถียรภาพและประสิทธิภาพสูงสุดของระบบ รวมทั้งจะมีตัวควบคุมเสถียรภาพเชื่อมต่อกับระบบเพื่อให้เป็นอุปกรณ์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงและมีเสถียรภาพหากมีการเชื่อมต่อกับกริดแบบสมาร์ตกริดและ/หรือไมโครกริด โดยปกติการสร้างระบบพลังงานที่เชื่อมต่อกับกริดจะต้องคำนึงถึงเรื่องต่อไปนี้

- ก. ประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมที่สุด
- ข. ความมีเสถียรภาพของระบบ
- ค. การต่อเข้าระบบและการใช้งานทำได้ง่าย ในกรณีที่ระบบไม่มีการใช้โหนดจะสามารถป้อนไฟฟ้าหรือขายไฟให้การไฟฟ้าได้
- ง. มีระบบป้องกันความเสียหาย
- จ. การควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทเป็นไปอย่างเหมาะสมและมีสมรรถนะสูง

- ฉ. คุณภาพกำลังไฟฟ้าสูง (Power Quality)
- ช. การจัดการโหลดและการลำดับโหลด
- ซ. การควบคุมระบบเก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy Storage System) กรณีนี้เพื่อให้เกิดความสามารถจ่ายโหลดทันทีทันใดได้
- ฅ. ตัวตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ชาญฉลาด
- ญ. ระบบสื่อสารและการควบคุมแบบรวมศูนย์และแบบแยกส่วน (Centralized and decentralized Control)

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวและลดข้อเสียข้างต้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการสร้างระบบไฮบริดจ์โดยใช้แหล่งพลังงานทดแทนได้แก่แผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ในการลดต้นทุนการใช้พลังงานจากกริดการไฟฟ้านอกจากนี้ต้นแบบที่นำเสนอยังสามารถส่งพลังงานขายคืนให้การไฟฟ้าในกรณีที่ซาร์จเจอร์ไม่ต้องการชาร์จอีกด้วย โดยระบบจะมีความสามารถในการเลือกโหมดการทำงานได้อย่างอัตโนมัติโดยใช้การสื่อสารและการเข้ารหัสเพื่อป้องกันและเสริมสร้างความปลอดภัย การส่งถ่ายพลังงานอาจทำได้หลายวิธีอาทิเช่น electromagnetic induction method, Capacitive Couplings เป็นต้น มีผู้ได้แสดงงานวิจัยและเทคนิคต่างๆจำนวนมากอาทิเช่น Leyh และ Kennan [4] ได้แสดงผลงานวิจัยโดยใช้เทคนิค disturbed charge of ground and air method ซึ่งพบว่าได้ประสิทธิภาพการส่งถ่ายพลังงานได้ดีกว่าเทคนิคแบบ electro-dynamic induction ในแง่ประสิทธิภาพการส่งถ่ายพลังงาน ในปี 2009 Lasermotive ใช้เลเซอร์ไดโอดในการทำการส่งกำลังในหน่วยกิโลวัตต์ได้หลายร้อยเมตรซึ่งทำให้ได้รางวัลจากนาซ่าและเป็นการทำลายสถิติการส่งพลังงาน [5] ในปีเดียวกันบริษัท Sony ได้แสดงการส่งพลังงานไร้สายแบบ electro-dynamic-induction ในโทรศัพท์ขนาด 60 วัตต์ระยะทาง 50 เซนติเมตร [6] กลุ่ม System On Chip (SoC) จากมหาวิทยาลัยบริติชโคลัมเบียได้พัฒนาตัวส่งกำลังไฟฟ้าแบบ 4 คอยล์ซึ่งได้แสดงให้เห็นการส่งที่ได้ประสิทธิภาพสูงประมาณ 82% [7] ในงานวิจัยหลายๆงานในด้านการทำการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายนั้นจะต้องออกแบบคอยล์และวงจรเพื่อที่จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ส่งได้ ความกว้างแบนด์ของความถี่รวมถึงประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้ามี่ค่ามากที่สุดเท่าที่จะทำได้ [8] นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงการชาร์จที่มีคุณลักษณะของแรงดันและกระแสชาร์จที่เหมาะสมด้วย ตัวอย่างของการสายสามช่วงได้แก่ Bulk, Absorption และ Float แสดงดังรูปที่ 1.2 เป็นวิธีการที่นิยม โดยแต่ละช่วงจะมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน

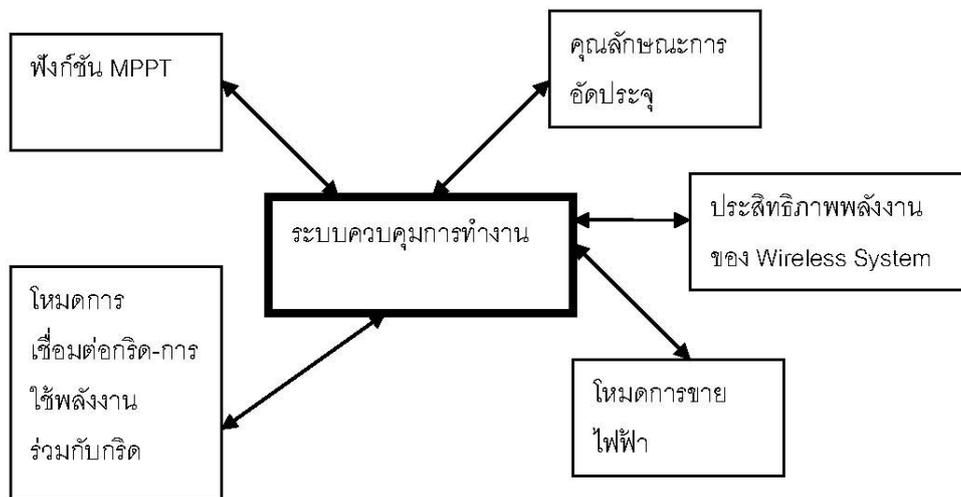


รูปที่ 1.2 ระบบ 3 stages การอัดประจุ

(ที่มา <http://www.infinitemstore.my/2009/07/3-stage-charging-process/>)

ในฟังก์ชันของเครื่องอัดประจุไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้านี้ จำเป็นต้องต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนหนึ่งซึ่งจะมีการต่อเป็นอนุกรม การคำนึงถึงการบังเงาบางส่วนของการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโดยออกแบบจะเป็นสิ่งที่งานวิจัยนี้ดำเนินการและแสดงผลเปรียบเทียบในเชิงประสิทธิภาพกับระบบแบบเดิม นอกจากนี้การดำเนินการเพื่อให้เกิดผลกระทบน้อยและเกิดความปลอดภัยทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า

กล่าวโดยสรุปการจัดการระบบในงานวิจัยนี้จะต้องดำเนินการดังนี้ในส่วนการควบคุมด้วยซึ่งต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้ซึ่งปกติจะไม่สามารถทำได้ค่าที่ดีที่สุดทุกค่าในแต่ละช่วงเวลาจึงต้องมีการควบคุมอย่างเหมาะสม สิ่งที่ต้องคำนึงแสดงในรูปที่ 3 โดยงานวิจัยจะควบคุมในส่วนการทำงานของ DC-DC Converter ที่ทำหน้าที่เป็น MPPT และ Charger และ Inverter ที่เชื่อมต่อกับกริดด้วยปัจจัยการควบคุมต่างๆดังแสดงในรูป



รูปที่ 1.3 สิ่งที่ต้องคำนึงและปัจจัยในการพิจารณาในการควบคุมของระบบควบคุมที่จะออกแบบ

1.2 วัตถุประสงค์โครงการ

- ก. เพื่อพัฒนาต้นแบบที่ใช้ได้จริงในเครื่องอัดประจุไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับรถไฟฟ้าแบบสมาร์ตและลดการนำเข้าซึ่งจะมีสูงขึ้นในอนาคต
- ข. ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ได้และมีระบบการจัดการพลังงานอัจฉริยะในต้นแบบเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด คำนึงถึงการบังเงาบางส่วนในระบบเซลล์แสงอาทิตย์
- ค. เพื่อลดการใช้พลังงานและเตรียมความพร้อมต่อระบบชาร์จในรถชนิดใช้พลังงานไฟฟ้าในอนาคต
- ง. เพื่อศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในกรณีเครื่องอัดประจุที่มีแหล่งกำเนิดเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริด และต้นแบบที่สามารถขายไฟฟ้าหรือจ่ายไฟฟ้าเข้ากริดในกรณีที่ไม่มีการใช้งานการอัดประจุหรือมีโหลดได้
- จ. เพื่อเสริมสร้างความเข้มแข็งด้านพลังงานและสร้างสิ่งประดิษฐ์ในเชิงพาณิชย์

1.3 เป้าหมาย/ผลงานหลักของโครงการ

- ก. ต้นแบบและระบบที่ใช้งานจริงสำหรับรถไฮบริดจ์ ระบบชาร์จแบบไร้สาย ไม่ต้องถอดแบตเตอรี่
- ข. บทความประชุมวิชาการระดับชาติจำนวน 2 บทความ

1.4 เอาท์พุทที่ได้จากโครงการ

ก. บทความประชุมวิชาการระดับชาติ

1. บทความเรื่อง การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายสำหรับรถยนต์พลังงานไฟฟ้า การประชุมวิชาการด้านหุ่นยนต์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ครั้งที่ 7 จัดโดยสมาคมวิชาการหุ่นยนต์ไทย ระหว่างวันที่ 12 ถึง 13 มิถุนายน 2557
2. บทความเรื่อง การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการรักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าขาออก การประชุมวิชาการด้านหุ่นยนต์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ครั้งที่ 7 จัดโดยสมาคมวิชาการหุ่นยนต์ไทย ระหว่างวันที่ 12 ถึง 13 มิถุนายน 2557

ข. สัมมนา

ได้ดำเนินการประชาสัมพันธ์และจัดสัมมนาเรื่อง การสร้างต้นแบบระบบชาร์จไร้สายและการเชื่อมต่อปัญหาและแนวทางแก้ไข ครั้งที่ 1 ในวันที่ 29 มีนาคม 2557
และสัมมนาเรื่อง ระบบชาร์จแบบไร้สาย ครั้งที่ 2 ในวันที่ 30 กันยายน 2557

ค. ต้นแบบ

ต้นแบบระดับพร้อมใช้ จำนวน 1 ต้นแบบ

บทที่ 2

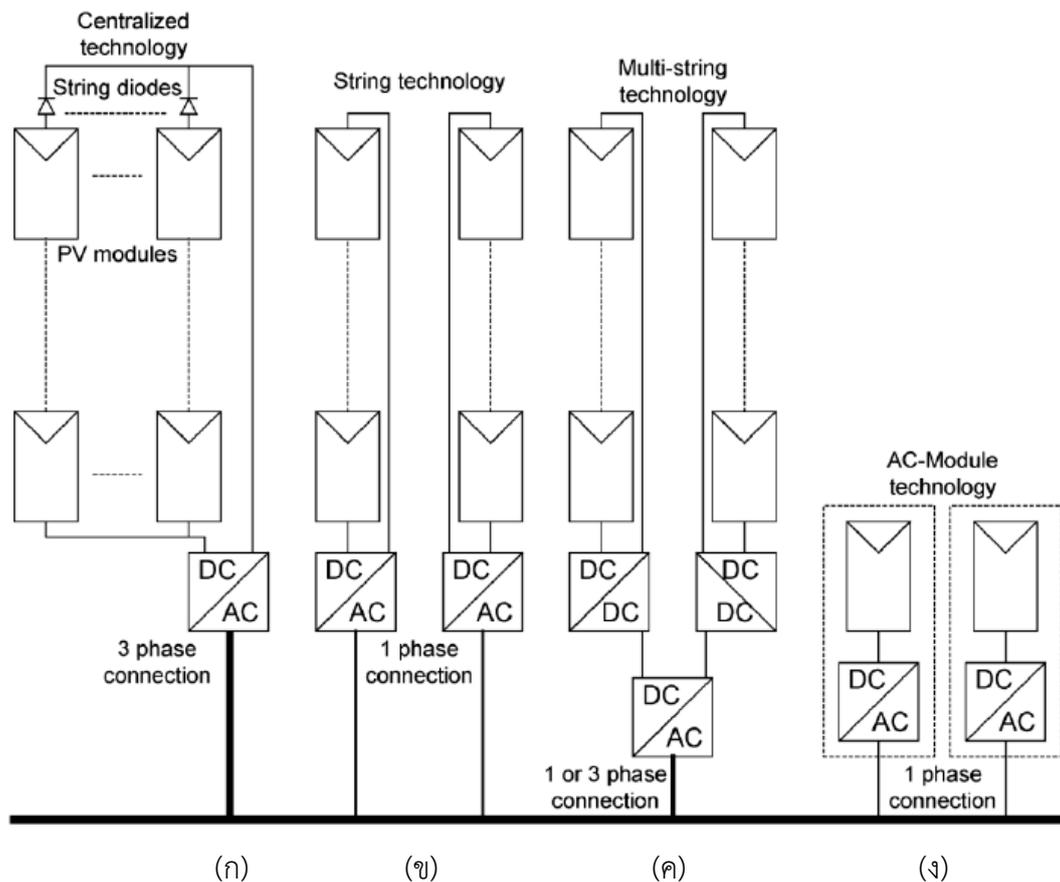
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในโครงการนี้ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนหลัก 3 ส่วน ได้แก่ ระบบการตามรอยกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์, ระบบการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย และระบบการอัดประจุของแบตเตอรี่ โดยที่ในส่วนของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ จะกล่าวถึงคุณลักษณะ พฤติกรรม และโมเดลของเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งเทคโนโลยีการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด สำหรับส่วนของระบบส่งพลังงานไร้สาย จะอธิบายถึงหลักของการส่งพลังงานด้วยความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งมีคุณสมบัติในการส่งได้ดีกว่าความถี่อื่นสุดท้ายในส่วนของการอัดประจุ จะอธิบายถึงวิธีการชาร์จหรืออัดประจุทั้งการชาร์จแบบคงที่กระแสคงที่แรงดัน การชาร์จแบบใช้พัลส์ชาร์จ รวมถึงการชาร์จประเภทพัลส์ชาร์จแต่เพิ่มในส่วนของการชาร์จเพื่อเป็นการกระตุ้นเซลล์แบตเตอรี่ให้สามารถประจุได้รวดเร็วขึ้น

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบการตามรอยกำลังไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์

ในส่วนตัวแปลงผันกำลังไฟฟ้าและการควบคุมการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดกรณีพลังงานแสงอาทิตย์ ยังมีความจำเป็นในการพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสมด้วยเช่นกัน แม้เทคนิคที่พัฒนาขึ้นในปัจจุบันจะสามารถควบคุมการทำงานได้แต่ปัญหาเรื่องประสิทธิภาพและประสิทธิภาพของระบบยังต้องการการพัฒนาและมีผู้วิจัยในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นระบบที่ยังมีศักยภาพในการนำมาใช้งานทั้งในรูปแบบผลิตกำลังไฟฟ้าของครัวเรือนและเชิงพาณิชย์อย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ดังจะเห็นได้จากการสนับสนุนทุนวิจัยจากแหล่งทุนวิจัยต่างๆและการสนับสนุนให้เอกชนผลิตแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและทางการไฟฟ้ารับซื้อในราคาที่สูงกว่าปกติ เป็นต้น เพื่อให้เห็นภาพแนวทางการพัฒนาในอนาคต ในข้อเสนอโครงการนี้จะยกตัวอย่างปัญหาสำคัญในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ปัญหาหนึ่ง คือระบบโดยรวมมีราคาแพงและคุ้มทุนช้า นักวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจและมุ่งพัฒนานวัตกรรมทางด้านนี้ทำให้เกิดความคาดหวังว่า ราคาเงินลงทุนของระบบนี้จะลดลงเป็น 1 เหรียญสหรัฐต่อวัตต์ได้ก่อนปี ค.ศ. 2020 [9-10] ในระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกับกริดนี้ ราคาต้นทุนของระบบจะลดลงมากเนื่องจากสามารถลดการติดตั้งแบตเตอรี่เพื่อเก็บพลังงานซึ่งแบตเตอรี่ถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่เป็นต้นสูงในระบบนี้ ในแง่ของการลดต้นทุนของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับกริดนี้งานวิจัยทั้งหลายมุ่งเน้นในการลดขั้นตอนการแปลงผันพลังงาน เพิ่มประสิทธิภาพและลดจำนวนอุปกรณ์ในการแปลงผันพลังงานแต่ละขั้น ตัวอย่างเช่น ระบบแบบขั้นเดียว(single stage) มีข้อดีในเรื่องการลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ PV ซึ่งมีนักวิจัยบางส่วนได้นำเสนออินเวอร์เตอร์ PV สำหรับเชื่อมต่อกับกริดแบบหนึ่งเฟสขั้นเดียว (Single Stage) รูปแบบต่างๆ [11-18] อาทิเช่น Ciobataru et al.[11] นำเสนออินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสขั้นตอนเดียวที่ใช้กระแสตัวตรวจจับกระแสสองตัว Jain และ Agarwal [12] นำเสนอเทคนิคอื่นในระบบเดียวกันนี้โดยทำหน้าที่ทั้ง MPPT และ current shaping อย่างไรก็ตามเทคนิคทั้งสองต้องอาศัยตัวตรวจจับกระแสสองตัวเพื่อตรวจจับกระแสอ้างอิงผ่านตัวเหนี่ยวนำและกระแสเอาต์พุตของแผง

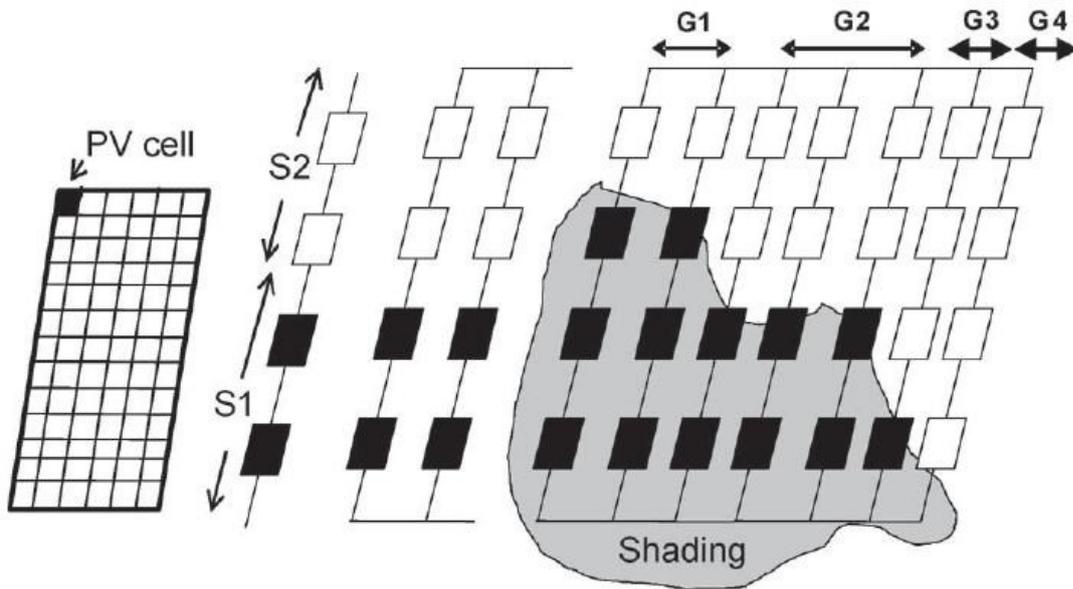
PV เพื่อใช้ในตัวตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด Patel และ Agarwal [19] นำเสนอเทคนิคใหม่ของ MPPT โดยใช้ เซนเซอร์เพียง 1 ตัวในการทำงานโหมดกระแสต่อเนื่องของ SSSP (Single Stage-Single Phase) อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับกริด



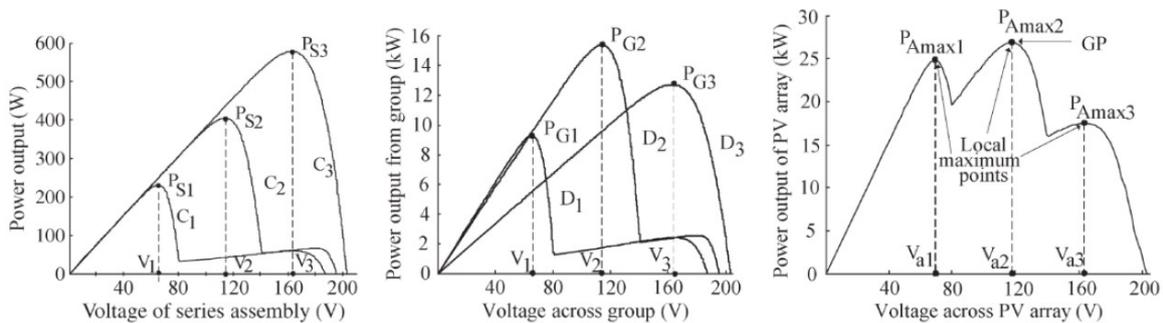
รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบการเชื่อมต่อ PV Inverter (ก) ระบบในอดีตแบบศูนย์กลาง (ข) ระบบปัจจุบันแบบ string technology (ค) ระบบในปัจจุบันและในอนาคตแบบ Multi-string technology (ง) ระบบในปัจจุบัน และในอนาคตแบบ AC Module [20]

โดยที่ปัญหาที่พบในการต่อแผง PV หลายแผงซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อระบบไมโครกริดเพื่อให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ตามพิกัดที่ต้องการดังแสดงในผลงานวิจัยของ Bruendinger และคณะ[21] โดยได้ทำการทดสอบอินเวอร์เตอร์ PV ที่มีขายในท้องตลาดในเงื่อนไขการบังเงาบางส่วนพบว่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปเนื่องจากปัญหานี้อาจสูงถึง 70% ในกรณีที่เกิดการบังเงาบางส่วนจะก่อให้เกิดจุดสูงสุดของกำลังไฟฟ้าแบบ local หลายจุดที่มักนิยมเรียกว่า Multiple Local Maxima การโมเดลระบบที่เกิดปัญหานี้ทำได้ไม่ง่ายเนื่องจากคุณลักษณะของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีเกิดการบังเงาบางส่วนจะขึ้นกับลักษณะของการบังเงา จำนวนและรูปแบบการต่อแผง PV เข้าด้วยกัน ใน [22] ใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองผลเปรียบเทียบกับกริดทดลองในปัญหาการบังเงาบางส่วนนี้ (Partial Shading Problem) พบว่าให้ผล

ความถูกต้องเป็นที่น่าพอใจ รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบการต่อแผง PV และการเกิดการบังเงาบางส่วนเนื่องจากสภาพอากาศ



รูปที่ 2.2 แสดงปัญหาการเกิด Partial Shading [22]

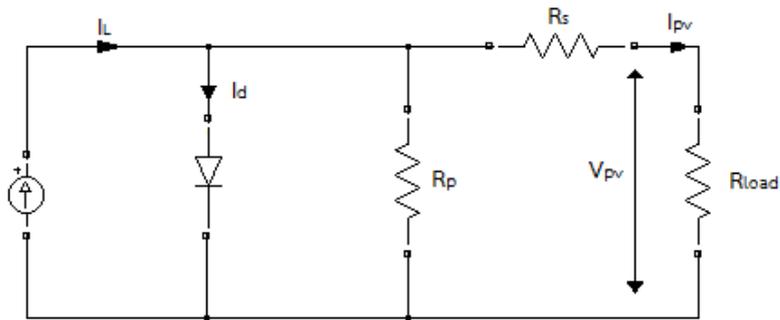


รูปที่ 2.3 แสดงผลการเกิด Multiple local maxima ในปัญหา Partial Shading [22]

มีผู้วิจัยส่วนหนึ่งนำเสนอวิธีการเพื่อแก้ปัญหานี้ อาทิเช่น Miyatake และคณะ [23] ได้ใช้เทคนิคลำดับ Fibonacci ในการหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริงหรือที่เรียกกันว่า Global Peak (GP) ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วนแต่ไม่สามารถรับประกันได้ทุกเงื่อนไขของสถานะ [23-24] Kobayashi และคณะนำเสนอวิธีสองชั้นในการตามรอยจุดสูงสุด ในขั้นตอนแรกจุดทำงานจะเคลื่อนที่ไปยังใกล้ๆ เส้นโหลด ($R_{pm} = V_{pm}/I_{pm}$) V_{pm} และ I_{pm} ประมาณจาก 80% แรงดันเปิดวงจรและ 90% ของกระแสลัดวงจรตามลำดับ ในขั้นที่สองจะพยายามลู่เข้าสู่ GP อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ไม่สามารถครอบคลุมในทุกกรณี [24] แนวทางงานวิจัยแนวทางหนึ่งในการกำจัดผลของการบังเงาบางส่วนคือการพัฒนาคอนเวอร์เตอร์หรือ MPPT ที่ทำงานเป็นโมดูลต่อหนึ่งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจำเป็นต้องมีการสื่อสารกับส่วนกลางเพื่อกำหนดจุดทำงานที่เหมาะสมที่ทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกและแรงดันขาออกมีค่าเหมาะสมที่สุด เพื่อที่จะออกแบบระบบควบคุมของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมจำเป็นต้องเข้าใจพฤติกรรมรวมทั้งคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังจะกล่าวต่อไป

2.1.1 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตมาจากวัสดุสารกึ่งตัวนำเหมือนกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป โครงสร้างของวัสดุสารกึ่งตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะรอยต่อพี-เอ็น (P-N Junction) เหมือนไดโอด ดังนั้นคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติจึงสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าขนานกับไดโอดได้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งปริมาณกระแส I_{SC} นี้กำเนิดมาจากปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกที่มีความเข้มของแสงค่าหนึ่ง ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ส่วนไดโอดจะแสดงถึงคุณลักษณะของสารกึ่งตัวนำที่เป็นรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นค่ากระแสจ่ายออกจึงสามารถอธิบายได้ด้วยความแตกต่างของกระแส I_{SC} ที่กำเนิดจากแสงอาทิตย์กับกระแสของไดโอดแสดงในสมการที่ 2.1 [25]



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์โดยต่อเข้ากับโหลด

จากรูปที่ 2.4 เป็นรูปวงจรมูลซึ่งแสดงรายละเอียดภายในเซลล์แสงอาทิตย์ โดย R_s คือความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ R_p คือ ความต้านทานขนาน

โดยที่ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงออกมาในรูปของได้ดังนี้

$$I_{PV} = I_L - I_d [\exp(V_{PV} / V_T) - 1] \quad (2.1)$$

$$V_{PV} = V_T \ln[(I_L - I_{PV}) / I_d + 1] \quad (2.2)$$

ตัวแปรต่างๆในสมการสำหรับคำนวณหากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีความหมายดังนี้

I_{PV} คือ กระแสที่ได้เมื่อแผงโซลาร์เซลล์ได้รับแสง (แอมป์)

I_d คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (แอมป์)

I_L คือ กระแสเอ๊าท์พุท (แอมป์)

V_{PV} คือ แรงดันที่ได้เมื่อแผง PV ได้รับแสง (โวลต์)

V_T คือ แรงดันที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเท่ากับ $(nK_B T) / q$

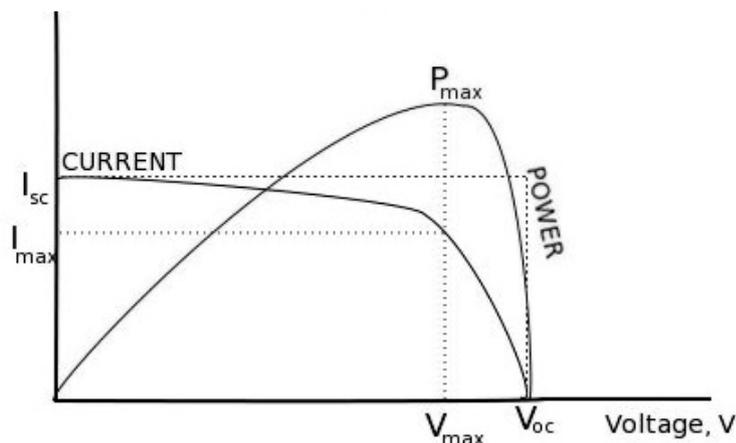
K_B คือ ค่าคงที่ของโบลท์มาน

T คือ อุณหภูมิ

n คือ ideality factor

q คือ ประจุอิเล็กตรอน (คูลอมบ์)

จากความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าใน I-V Curve



รูปที่ 2.5 กราฟคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

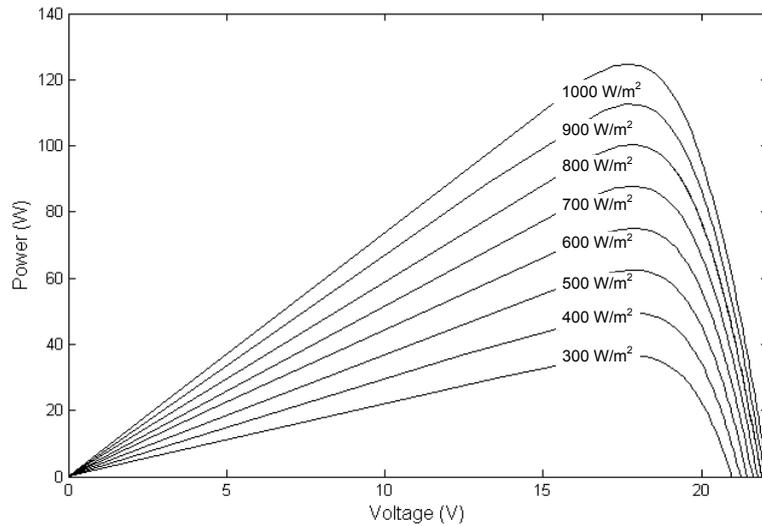
เมื่อทำการปรับค่าความต้านทานที่ต่อตรงเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่จุดทำงานต่างๆ จะได้กราฟของกำลังไฟฟ้าซึ่งพล็อตระหว่างแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าก็จะได้ลักษณะเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และจะพบว่าจุดที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่จุด V_{mpp} กับจุด I_{mpp}

ผลคูณของกระแสและแรงดันที่จุดพลังงานสูงสุดจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความชันของกราฟคือ ถ้ากราฟมีความชันมากลักษณะกราฟที่ได้จะใกล้เคียงกับสี่เหลี่ยมมาก ผลคูณของกระแสและแรงดันก็จะมีค่ามากตามไปด้วย การที่กราฟของเซลล์แสงอาทิตย์มีความชันแตกต่างกันนั้นเป็นผลมาจากความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์นั้นมีความแตกต่างกัน จากกราฟคุณสมบัติของเซลล์นี้จะมีค่าค่าหนึ่งที่แสดงให้เห็นว่าเซลล์สามารถจะจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับค่าในอุดมคติมากเท่าใด ค่านี้จะเรียกว่าค่า ฟิลแฟคเตอร์ (FF: Fill Factor) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งคิดมาจากอัตราส่วนต่อไปนี้

2.1.2 พารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

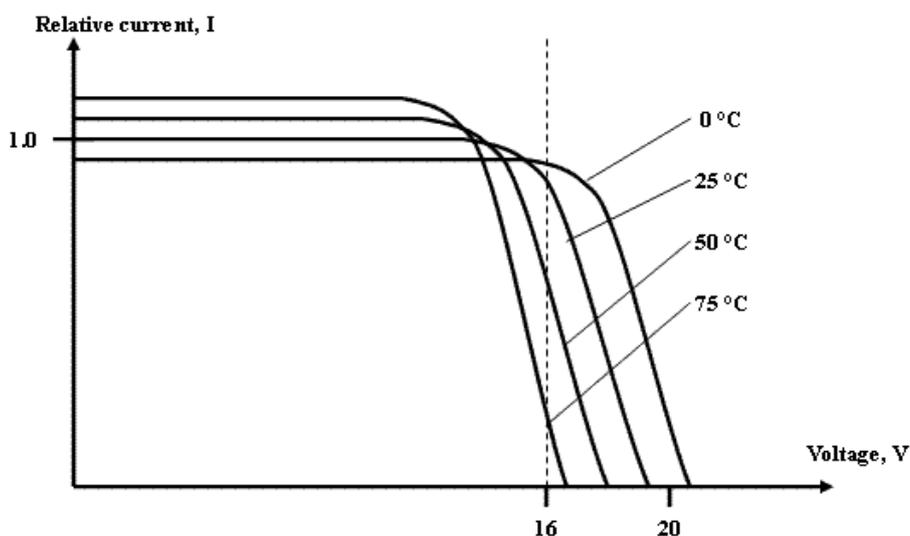
ความเข้มแสง

ตัวแปรที่สำคัญที่มีส่วนทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการทำงานในแต่ละพื้นที่ต่างกัน และมีความสำคัญในการพิจารณานำไปใช้ในแต่ละพื้นที่ ตลอดจนการนำไปคำนวณระบบหรือคำนวณจำนวนแผงแสงอาทิตย์ที่ต้องใช้ในแต่ละพื้นที่ มีดังนี้



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของกำลังและแรงดันเมื่อความเข้มแสงจากมากไปน้อย

ความเข้มของกระแสไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของแสง หมายความว่าเมื่อความเข้มของแสงสูง กระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าหรือโวลต์แทบจะไม่แปรไปตามความเข้มของแสงมากนัก ความเข้มของแสงที่ใช้วัดเป็นมาตรฐานคือ ความเข้มของแสงที่วัดบนพื้นโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่ง ปราศจากเมฆหมอกและวัดที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก ซึ่งความเข้มของแสงจะมีค่าเท่ากับ 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรหรือ 1,000 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ AM 1.5 (air mass 1.5) และถ้าแสงอาทิตย์ทำมุม 60 องศากับพื้นโลกความเข้มของแสง จะมีค่าเท่ากับประมาณ 75 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรหรือ 750 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตรซึ่งมีค่าเท่ากับ AM2 กรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะใช้ค่า AM 1.5 เป็นมาตรฐานในการวัดประสิทธิภาพของแผง ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

อุณหภูมิ

อุณหภูมิกระแสไฟฟ้าจะไม่แปรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่แรงดันไฟฟ้า (โวลต์) จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วทุกๆ 1 องศาที่เพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง 0.5% และในกรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพของแผงแสงอาทิตย์คือ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เช่น กำหนดไว้ว่าแผงแสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าที่วงจรมืด (open circuit voltage หรือ Voc) ที่ 21 โวลต์ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสก็จะหมายความว่า แรงดันไฟฟ้าที่จะได้จากแผงแสงอาทิตย์ เมื่อยังไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสจะเท่ากับ 21 โวลต์ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียสเช่น อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสจะทำให้แรงดันไฟฟ้าของแผงแสงอาทิตย์ลดลง 2.5% ($0.5\% \times 5$ องศาเซลเซียส) นั่นคือ แรงดันของแผงแสงอาทิตย์ที่ V_{oc} จะลดลง 0.525 โวลต์ ($21 \text{ โวลต์} \times 2.5\%$) เหลือเพียง 20.475 โวลต์ ($21 \text{ โวลต์} - 0.525 \text{ โวลต์}$) สรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แรงดันไฟฟ้าก็จะลดลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงแสงอาทิตย์ลดลงด้วยดังรูปที่ 2.7

จากข้อกำหนดดังกล่าวข้างต้น ก่อนที่ผู้ใช้จะเลือกใช้แผงแสงอาทิตย์ จะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของแผงที่ระบุไว้ในแผงแต่ละชนิดด้วยว่า ใช้มาตรฐานอะไร หรือมาตรฐานที่ใช้วัดแตกต่างกันหรือไม่ เช่นแผงชนิดหนึ่งระบุว่า ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 80 วัตต์ ที่ความเข้มแสง 1,200 วัตต์ต่อตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสขณะที่อีกชนิดหนึ่งระบุว่า ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 75 วัตต์ ที่ความเข้มแสง 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิมาตรฐาน 25 องศาเซลเซียสแล้ว จะพบว่าแผงที่ระบุว่าให้กำลังไฟฟ้า 80 วัตต์จะให้กำลังไฟฟ้าต่ำกว่า จากสาเหตุดังกล่าว ผู้ที่จะใช้แผงจึงต้องคำนึงถึงข้อกำหนดเหล่านี้ในการเลือกใช้แผงแต่ละชนิดด้วย

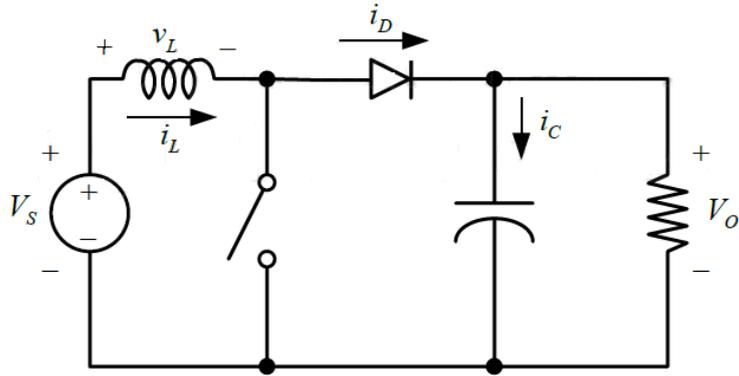
2.1.3 วงจรทระดับแรงดันไฟฟ้า (Boost Converter)

วงจรทระดับแรงดันไฟฟ้าเป็นวงจรที่สามารถเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออกให้สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า โดยอาศัยอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งในการตัดต่อวงจรทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสต่อเวลา จึงให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจะใช้แรงดันที่ตกคร่อมที่ตัวเหนี่ยวนำให้การเพิ่มระดับแรงดันทางด้านขาออก

2.1.3.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรทระดับแรงดันไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์การทำงานของวงจรทระดับแรงดันไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งทำการวิเคราะห์ในช่วงสถานะอยู่ตัวเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ โดยมีเงื่อนไขดังนี้

- 1) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละคาบ จะมีค่าเท่ากันและมีค่าเป็นบวกเสมอหรือมีกระแสไหลในทิศทางเดียวเสมอ
- 2) แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์ ($V_{L,avg} = 0$) หมายถึงผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา ในแต่ละคาบเท่ากับศูนย์
- 3) ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ทำให้ช่วยการคลื่อนระลอกของแรงดันไฟฟ้าด้าน
- 4) กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก กรณีนี้ไม่คำนึงถึงการสูญเสียในอุปกรณ์ โดยกำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ จึงสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพของวงจรเป็นหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์

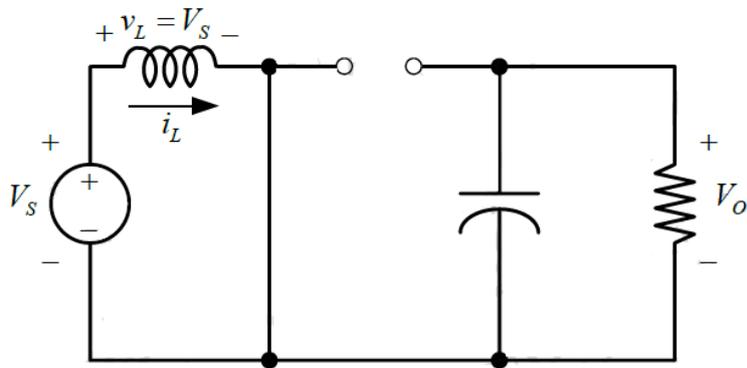


รูปที่ 2.8 วงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้า

2.1.3.2 หลักการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้า

เริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกรวมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาเท่ากับศูนย์ และสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้โดยวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด โดยการทำงานต้องอยู่ในช่วงสภาวะอยู่ตัวดังนี้

ขณะสวิตช์นำกระแส จากรูปที่ 2.8 กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นช่วงที่กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น โดยผ่านสวิตช์ ขณะเดียวกันไดโอดจะถูกย้อนกลับทำให้ไม่สามารถนำกระแสได้ดังแสดงในรูปที่ 2.9 จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าดังนี้



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส

$$-V_s + V_L = 0 \quad (2.3)$$

$$V_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.4)$$

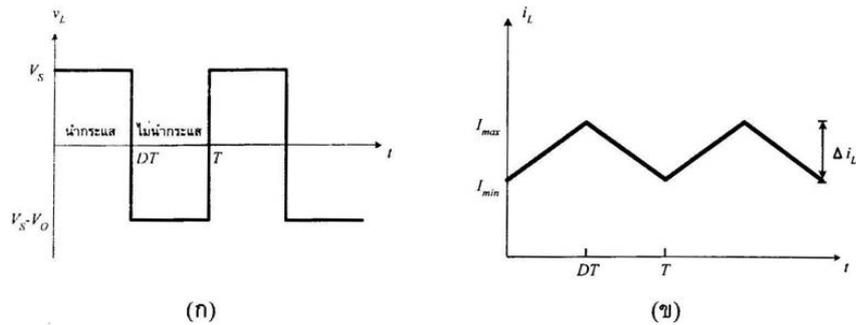
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad (2.5)$$

เมื่อขณะที่สวิตช์นำกระแส $dt = DT$ เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสคงที่อาจจะถือว่าการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s}{L} \quad (2.6)$$

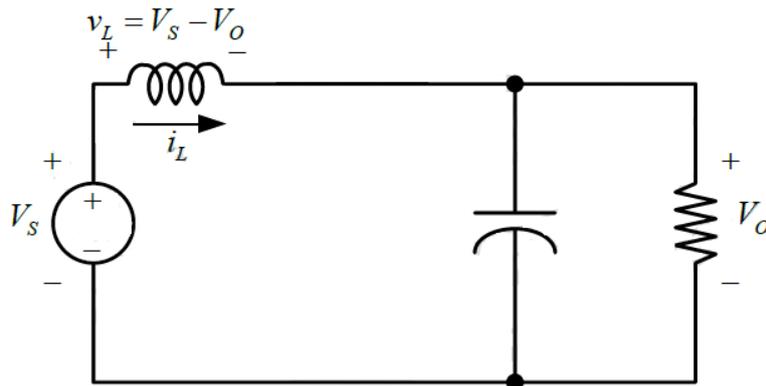
$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_s D T}{L} \quad (2.7)$$

$\Delta i_{L,on}$ หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแส



(ก) แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (ข) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
รูปที่ 2.10 กราฟแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้จึงมีทิศทางการไหลในทิศทางเดิม ซึ่งไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้าให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่องสมมติแรงดันไฟฟ้าที่ด้านออกมีค่าคงที่ จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังนี้

$$-V_s + V_L + V_o = 0 \quad (2.8)$$

$$V_L = V_s - V_o$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2.9)$$

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส $dt = (1-D)T$ ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ และจะถือว่าการลดลงของกระแสเป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 2.11 ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta i_{L,off} = \frac{V_s - V_o}{L}(1-D)T \quad (2.10)$$

ที่สภาวะอยู่ตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์จากสมการที่ (2.7) และสมการที่ (2.10) จะได้ว่า

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad (2.11)$$

$$\left(\frac{V_s}{L}\right)DT + \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} = 0 \quad (2.12)$$

$$V_s D + (V_s - V_o)(1-D) = 0$$

$$V_s D + V_s - V_s D - V_o + V_o D = 0$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (2.13)$$

ซึ่งสมการอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า จากสมการที่ (2.13) ทำให้สามารถคำนวณค่าอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าได้จากการปรับค่าของ D ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อัตราการขยายแรงดันของวงจรทระดับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่า D

Duty ratio (D)	อัตราการขยายแรงดัน(Voltage gain) (V_o/V_s)
0.0	1.00
0.1	1.10
0.2	1.25
0.3	1.43
0.7	3.33
0.8	5
0.9	10
1.0	Infinity

ในทางปฏิบัติเมื่อค่า D เพิ่มขึ้นค่าอัตราการขยายแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้น แต่ในทางปฏิบัติ นิยมปรับอัตราการขยายแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 4 เท่า

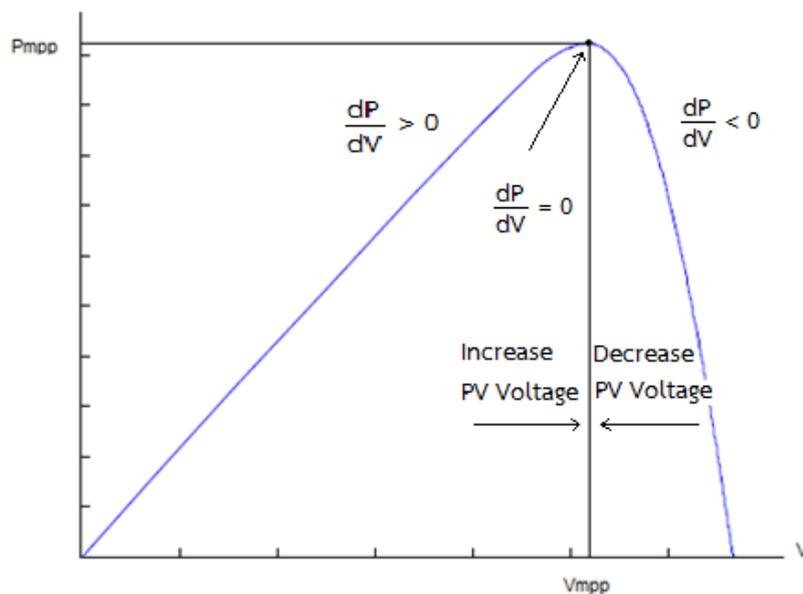
2.1.4 เทคนิคการควบคุมแบบรบกวนและสังเกต (P&O)

เทคนิค P&O ใช้หลักการปรับกระแสโดยพิจารณาจากกำลังไฟฟ้า ดังสมการ

$$\Delta P = P_k - P_{k-1} \quad (2.14)$$

ซึ่งระบบจะเริ่มทำการตามรอยจากจุดเริ่มต้นจุดหนึ่งไปจนผลต่างกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงศูนย์ ($dP \approx 0$) จะหยุดการเปลี่ยนแปลงจุดทำงาน การเปลี่ยนแปลงจุดทำงานโดยการควบคุมกระแสอาจพิจารณาได้รูปที่ 2.12

1. กรณีที่ dP/dV เป็นบวก ให้ทำการเพิ่มแรงดัน
2. กรณีที่ dP/dV เป็นลบ ให้ทำการลดแรงดัน



รูปที่ 2.12 การคำนวณหา slope ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P-V curve

ตารางที่ 2.2 การทำงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า

กรณี	dP	dV	dP/dV	การตามรอย
1	+	+	+	ถูกทางให้ทำการเพิ่มแรงดัน
2	+	-	-	ถูกทางให้ทำการลดแรงดัน
3	-	+	-	ผิดทางให้ทำการลดแรงดัน
4	-	-	+	ผิดทางให้ทำการเพิ่มแรงดัน

โดยถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ามีค่าเป็นบวกระบบจะปรับทิศทางของแรงดัน (เพิ่มหรือลดแรงดัน) ตามทิศทางเดิม และถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ามีค่าเป็นลบระบบจะปรับทิศทางของแรงดันสวนทางกับทิศทางเดิมเพื่อวิ่งเข้าหาจุดจ่ายกำลังสูงสุด

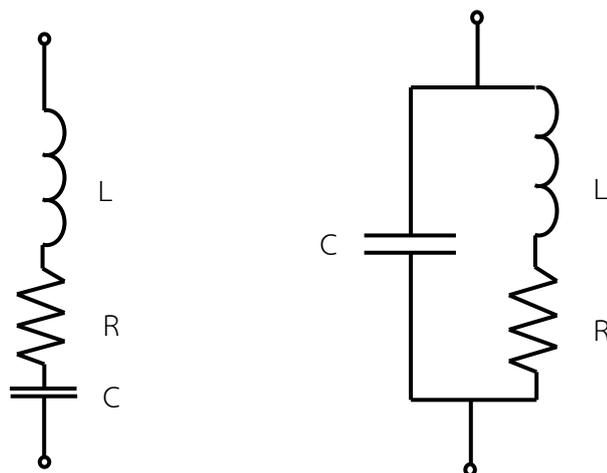
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบการส่งพลังงานไร้สาย

การส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าใช้หลักการเหนี่ยวนำพื้นฐานของฟาราเดย์และหลักการของวงจรเรโซแนนซ์ ต้นแบบที่พัฒนานี้จะเปลี่ยนรูปแบบของพลังงานจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแม่เหล็กและส่งไปยังตัวรับพลังงาน ซึ่งจะเปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กกลับมาเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้งเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ เนื่องจากการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศนั้นได้ถูกนำมาใช้กับตัวต้นแบบ ข้อดีที่เกิดขึ้นคือ สามารถใช้งานได้ง่ายและสะดวกขึ้น นอกจากนี้ยังมีความปลอดภัยโดยที่ได้พิจารณาผลของขีดจำกัดในการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนไว้ในการออกแบบอีกด้วย

2.2.1 วงจรเรโซแนนซ์

วงจรเรโซแนนซ์เป็นวงจรผสมระหว่างตัวเก็บประจุกับขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งมีความสำคัญในการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบอนาล็อก ด้วยผลต่อสัญญาณระแแสสลับของขดลวดและตัวเก็บประจุซึ่งแตกต่างกัน ในทางตรงกันข้าม จะทำให้เกิดผลต่อแรงดันในกระแสตรง และกระแสสลับในลักษณะต่างๆ เช่น เกิดการจ่ายและรับกระแสให้ซึ่งกันและกัน ทำให้เกิดสัญญาณกระแสสลับตกคร่อมวงจรขึ้น เมื่อวงจรได้รับแรงดันกระแสตรงจะเกิดการต่อต้านและยอมให้สัญญาณกระแสสลับบางความถี่ผ่าน เป็นต้น

วงจรเรโซแนนซ์ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน



รูปที่ 2.13 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและแบบขนาน

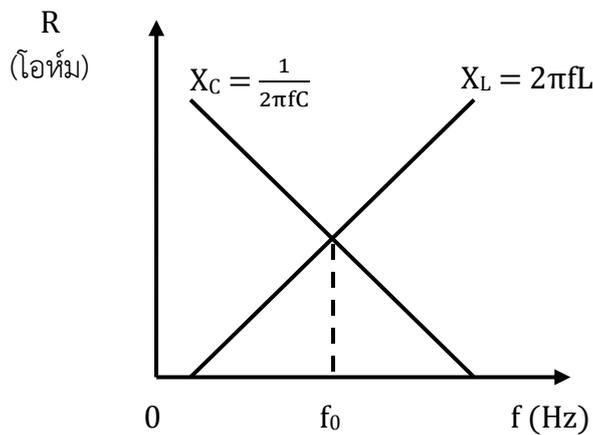
วงจรเรโซแนนซ์ประกอบด้วยตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งมีผลต่อกระแสไฟฟ้าสลับตรงกันข้ามกัน กล่าวคือ ตัวเก็บประจุจะมีค่าความต้านทานต่อไฟกระแสสลับ ในส่วนแปรผกผันต่อความถี่ คือค่าความถี่สูงจะผ่านตัวเก็บประจุได้ดี ค่าความต้านทานต่อกระแสสลับของตัวเก็บประจุหาได้จาก

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \Omega \quad (2.15)$$

สำหรับขดลวดเหนี่ยวนำจะมีคุณสมบัติต้านไฟกระแสสลับในทางตรงกันข้ามกับตัวเก็บประจุคือมีสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนผ่าน ซึ่งเป็นดังสมการ

$$X_L = 2\pi fL \Omega \quad (2.16)$$

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับวงจรเรโซแนนซ์ จะเกิดผลอย่างไรขึ้นอยู่กับลักษณะของวงจรเรโซแนนซ์ว่าเป็นแบบอนุกรมหรือขนาน แต่ผลที่เหมือนกันคือ ถ้าค่าความถี่สูงค่า X_L จะมากและค่า X_C จะต่ำ ซึ่งจะเห็นว่าค่า X_L และ X_C จะมีค่าที่สวนทางกัน ดังนั้นหากมีค่าความถี่ที่ทำให้ X_L และ X_C มีค่าเท่ากันจะทำให้ค่ารีแอกแตนซ์หักล้างกันหมดจึงเหลือเฉพาะค่าความต้านทาน(R) ซึ่งค่าความถี่ที่ทำให้เกิดผลดังกล่าวเราเรียกว่าค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_0)



รูปที่ 2.14 ผลของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่มีต่อกระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.17)$$

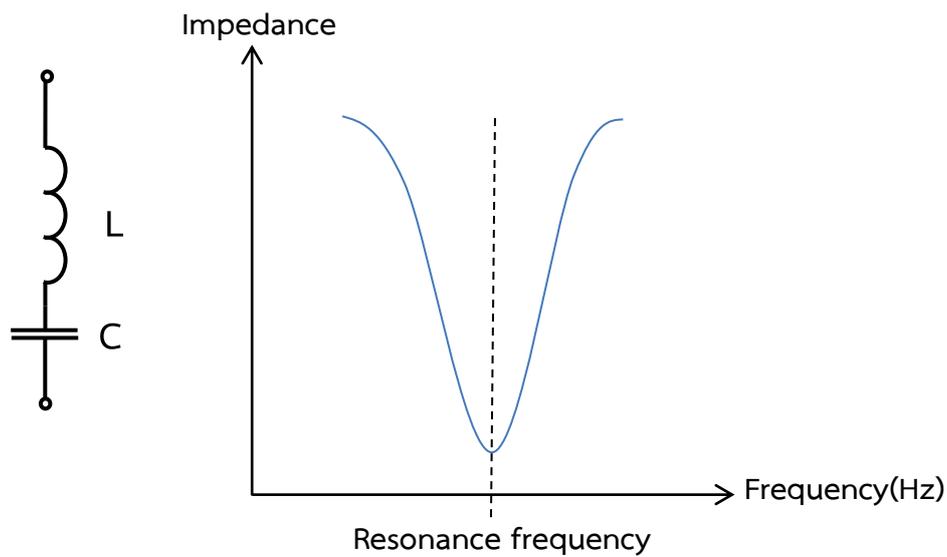
f_0 คือ ค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในวงจร มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์(Hz)

2π เป็นค่าคงที่

L คือ ค่าของขดลวดในวงจร มีหน่วยเป็น เฮนรี (H)

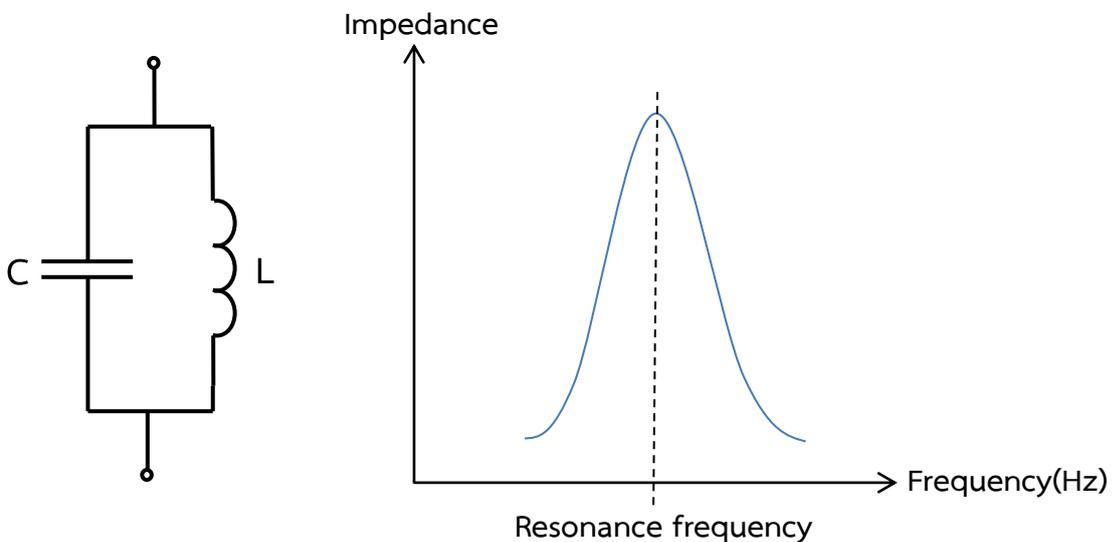
C คือ ค่าของตัวเก็บประจุในวงจร มีหน่วยเป็น ฟารัด (F)

ความถี่เรโซแนนซ์ คือความถี่ที่ทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ สามารถทำได้โดยการปรับค่าความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดันที่ความถี่ค่าหนึ่งทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ $X_L = X_C$ ทำให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ $Z = R$ ส่งผลให้แรงดันและกระแสในวงจรมีเฟสตรงกันตัวคูณกำลังของวงจรมีค่าเป็นหนึ่งตามทฤษฎี ซึ่งสามารถแสดงผลต่อวงจรอาร์แอลซี (RLC) แบบอนุกรม และแบบขนานได้ดังรูปที่ 2.15 และ 2.16



รูปที่ 2.15 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series resonant)

ที่ความถี่ที่ทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ส่งผลให้ผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าต่ำสุดกระแสที่ไหลในวงจรจะมีค่าสูงสุด

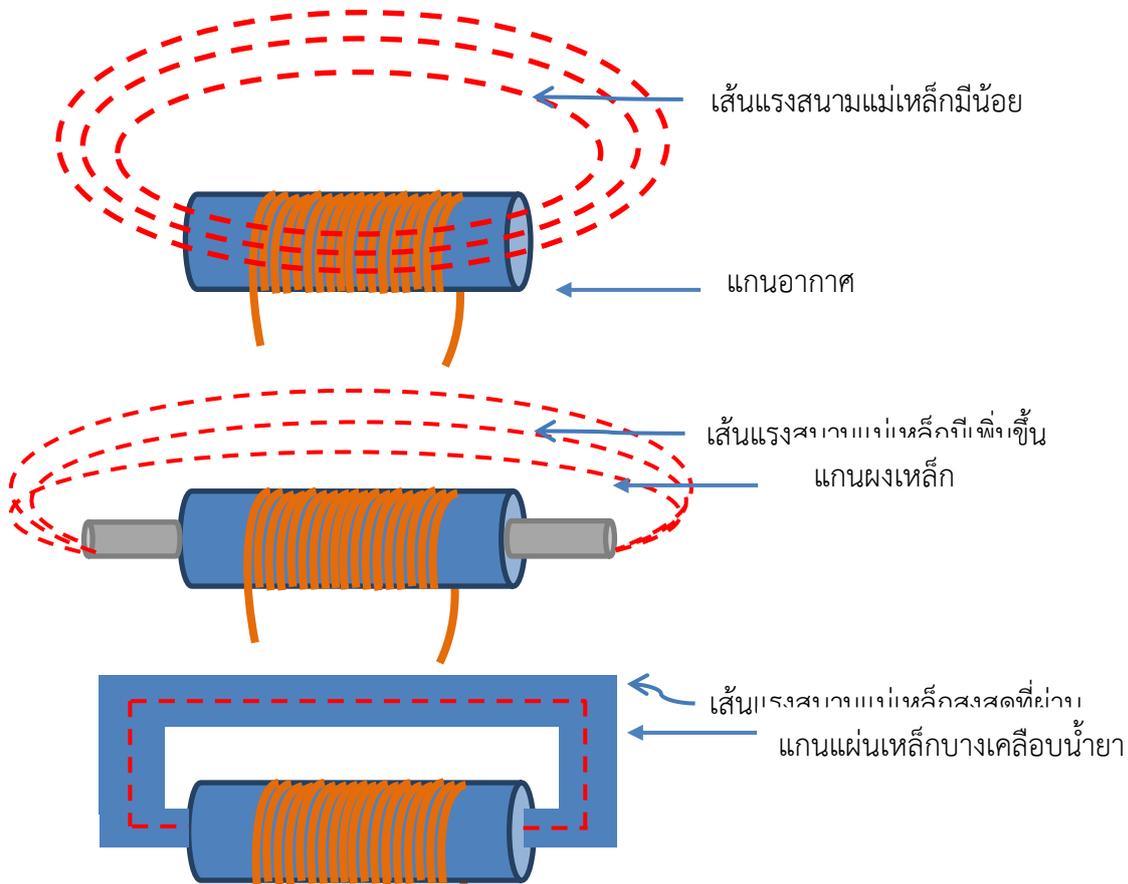


รูปที่ 2.16 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel resonant)

ที่ความถี่ที่ทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ส่งผลให้ผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมีค่าเป็นศูนย์วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานอิมพีแดนซ์มีค่าสูงสุด กระแสที่ไหลในวงจรมีค่าต่ำสุดแต่มีค่าแรงดันตกคร่อมสูงสุด

2.2.2 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

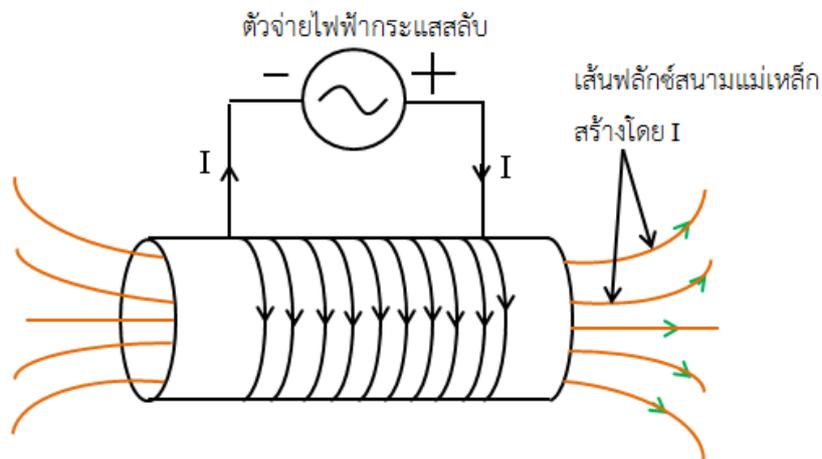
ตัวเหนี่ยวนำ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด จะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้น ตัวเหนี่ยวนำเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อินดักเตอร์หรือเรียกย่อๆว่าตัวแอล (L) หน่วยของการเหนี่ยวนำคือ เฮนรี (Henry) ตัวเหนี่ยวนำนั้น นิยมนำไปใช้ในการปรับความถี่โดยอาศัยหลักการของลวดทองแดงนำมาขดหลายๆ รอบที่เรียกว่าคอยล์ (Coil) แล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไป เพื่อให้แสดงคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ โครงสร้างประกอบด้วยขดลวด (Coil) พันรอบแกน (Core) ซึ่งแกนนี้อาจจะเป็นแกนอากาศ, แกนเหล็ก, หรือแกนเฟอร์ไรต์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการเหนี่ยวนำไฟฟ้าและลักษณะการพันเส้นลวดตัวนำแตกต่างกัน ทำให้ตัวเหนี่ยวนำแตกต่างกัน เมื่อนำเส้นลวดตัวนำมาพันเป็นขดจะส่งผลให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบเส้นลวดตัวนำเกิดการเสริมแรงกันเกิดเป็นสนามแม่เหล็กขึ้นและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีความเข้มเพิ่มมากขึ้น ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็กในแกนที่มีลักษณะต่างกัน

การทำงานของตัวเหนี่ยวนำอาศัยสมบัติที่เรียกว่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self-inductance) คือ เมื่อกระแสไหลผ่านขดลวดจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้น ถ้ากระแสที่ผ่านขดลวดเปลี่ยนแปลงจะทำให้ฟลักซ์ที่เชื่อมผ่านขดลวดจะเปลี่ยนแปลงด้วย ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งจะมีทิศทางที่ต้านการเปลี่ยนแปลงของ

กระแส นั่นคือ ถ้ากระแสกำลังเพิ่มขึ้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะอยู่ในทิศทางที่พยายามให้กระแสลดลง แต่ถ้ากระแสกำลังลดลง แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะอยู่ในทิศทางที่ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นซึ่งกระแสสลับในขดลวดทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเปลี่ยนกับเวลาซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดในทิศทางที่ต้านการเปลี่ยนของกระแส ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงการเกิดความเหนี่ยวนำตัวเอง

ปัจจัยที่มีผลต่อความเหนี่ยวนำ

ค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตัวแปร 4 ประการคือ

1. จำนวนรอบของขดลวดเขียนแทนด้วยอักษร N ถ้าจำนวนรอบของขดลวดมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับจำนวนรอบของขดลวด
2. วัสดุที่นำมาทำเป็นแกน เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ μ วัสดุที่นำมาทำเป็นแกนมีหลายชนิดเช่น อากาศ, เหล็ก, เฟอร์ไรต์, โคบอล ฯลฯ เป็นต้น แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติในการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กที่เรียกว่า ความซึมซาบ (Permeability) แตกต่างกันในกรณีที่มีความซึมซาบมากก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมาก ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับค่าความซึมซาบของแกน
3. พื้นที่หน้าตัดของแกน เขียนแทนด้วยอักษร A ถ้าพื้นที่ของแกนมีปริมาณมากก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับพื้นที่ของแกน
4. ความยาวของแกนเขียนแทนด้วยอักษร l ถ้าความยาวของแกนมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำน้อย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผกผันกับความยาวของแกน จากปัจจัยทั้ง 4 ประการจึงสามารถหาสัมพันธของค่าความเหนี่ยวนำได้จากสมการ

$$L = \frac{N^2 A \mu}{l} \quad (2.18)$$

เมื่อ

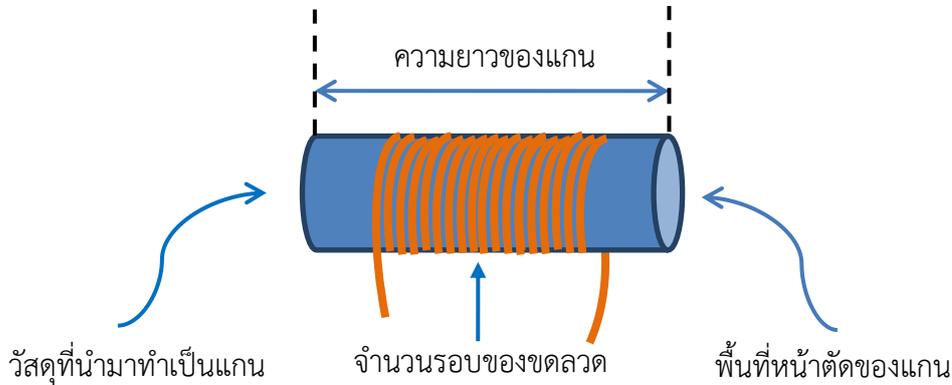
L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น เฮนรี่ (H)

N คือ จำนวนรอบของขดลวด มีหน่วยเป็น รอบ

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

μ คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability)

l คือ ความยาวของแกน มีหน่วยเป็น เมตร(m)



รูปที่ 2.19 ตัวเหนี่ยวนำ

เส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux, ϕ) คือจำนวนของเส้นแรงแสนามแม่เหล็กที่พุ่งออกจากขั้วเหนือของแม่เหล็ก แม่เหล็กที่มีอำนาจมากจะมีจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กมากตามไปด้วย

ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก(Flux density, B) คือ จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กนั้น

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (2.19)$$

แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magneto-motive force, mmf) คือ อำนาจแม่เหล็กของแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการขับเคลื่อนเส้นแรงแม่เหล็กออกไปภายนอกมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวดตัวนำและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดนั้น

$$\text{mmf} = NI \quad (2.20)$$

ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance, \mathcal{R}) คือ ค่าความต้านทานแม่เหล็กที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่าน

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (2.21)$$

ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Field Intensity, H) คือ ปริมาณแรงเคลื่อนแม่เหล็กตามแนวแกนของขดลวด มีความสัมพันธ์กับสัดส่วนระหว่าง แรงเคลื่อนแม่เหล็กกับความยาวของแกนของขดลวด

$$H = \frac{\text{mmf}}{l} \quad (2.22)$$

ความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability, μ) คือความตัวเลขค่าคงที่แสดงความสามารถในการนำเส้นแรงแม่เหล็กของแกนของแม่เหล็ก

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.23)$$

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบการอัดประจุแบตเตอรี่

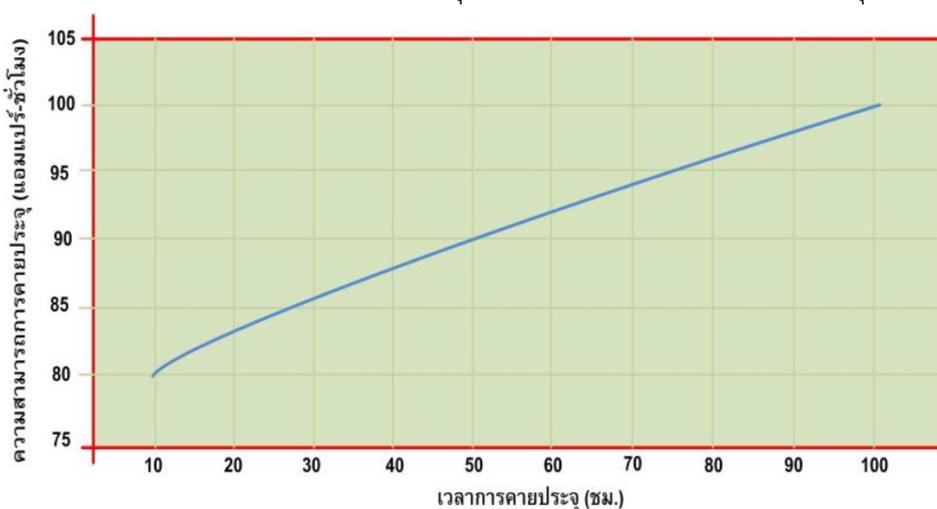
แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่มีการนำเซลล์ไฟฟ้าหลายๆเซลล์มาต่อรวมกัน ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าและจัดเก็บพลังงาน ซึ่งสามารถนำไปจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ต่างๆได้ ดังนั้นเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่จึงถือเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญสำหรับการเชื่อมต่อแบตเตอรี่กับระบบไฟฟ้า

2.3.1 ความจุของแบตเตอรี่ (Battery Capacity)

ความจุของแบตเตอรี่เป็นปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายออกไปหรือคายประจุได้จนกระทั่งหยุดจ่ายพลังงานหรือหยุดคายประจุโดยความจุปกติของแบตเตอรี่ (Nominal Capacity, C_n) มีค่าเท่ากับค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ขณะคายประจุ (I_n) คูณด้วยเวลาทั้งหมดในการคายประจุจนหมด (t_n) ดังสมการที่ (2-7)

$$C_n = I_n \times t_n \quad (2.24)$$

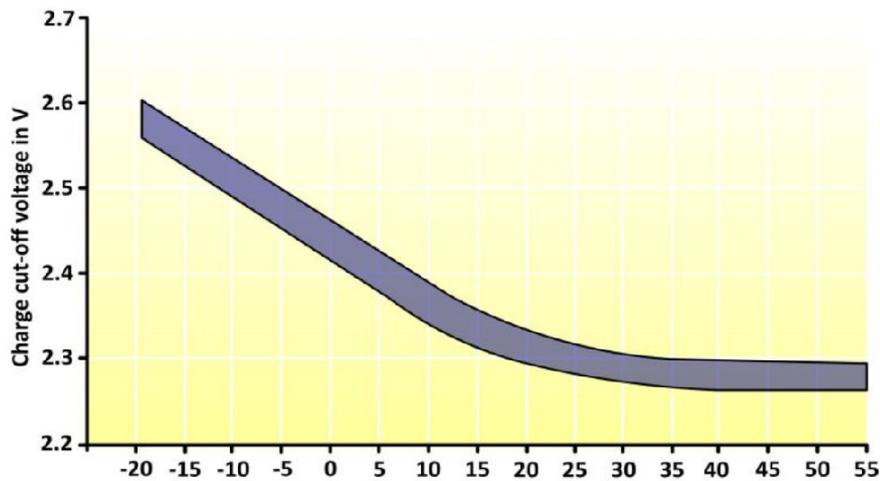
ค่าความจุของแบตเตอรี่จะไม่คงที่โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแรงดันไฟฟ้าขณะคายประจุจนหมดและกระแสไฟฟ้าขณะคายประจุ ทั้งนี้หากกระแสไฟฟ้าขณะคายประจุมีค่าต่ำ ดังนั้นในกรณีที่ต้องการกำลังไฟฟ้าของการคายประจุมากจึงต้องพยายามให้กระแสไฟฟ้าขณะคายประจุมีค่าต่ำและใช้เวลานานขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการคายประจุกับค่าความสามารถในการคายประจุของแบตเตอรี่



รูปที่ 2.20 ความสามารถในการคายประจุกับเวลาในการคายประจุ (กรมพัฒนาทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน)

2.3.2 การอัดและการคายประจุ (Charging and Discharging)

สำหรับกระบวนการอัดประจุค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งที่จะเริ่มเกิดก๊าซ (gassing voltage) นั่นคือน้ำถูกแยกตัวออกเป็นออกซิเจนและไฮโดรเจนเรียกว่า oxyhydrogen gas ซึ่งสามารถจุดติดไฟและระเบิดได้ง่าย ผู้ผลิตเครื่องควบคุมการประจุแบตเตอรี่จึงควรจำกัดแรงดันไฟฟ้าตอนอัดประจุไม่ให้เกินค่าๆหนึ่งเป็นค่าแรงดันปลดออกเมื่ออัดประจุหรือ charge cut-off voltage นอกจากนี้เนื่องจากค่าแรงดันที่เริ่มเกิดก๊าซขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิของแบตเตอรี่ดังนั้นเครื่องควบคุมการประจุแบตเตอรี่ควรต้องมีการวัดอุณหภูมิเพื่อนำมาคำนวณหาค่า charge cut off voltage อย่างถูกต้องดังรูป



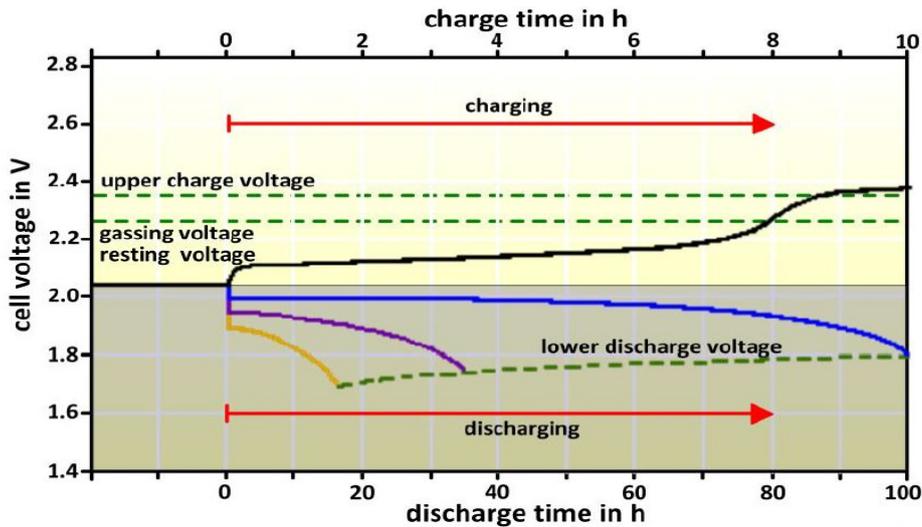
รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ charge cut-off voltage

(ที่มาของภาพ: กรมพัฒนาทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน)

สำหรับกระบวนการคายประจุเมื่อเริ่มต้นแรงดันไฟฟ้าจะตกลงอย่างทันทีเนื่องจากแรงดันส่วนหนึ่งตกคร่อมบนตัวต้านทานภายในของแบตเตอรี่เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรจากนั้นแรงดันไฟฟ้าจะค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่องและจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใกล้สิ้นสุดกระบวนการหรือจนถึงค่าแรงดันปลดออกเมื่อคายประจุหรือ discharge cut-out voltage หากปล่อยให้แรงดันไฟฟ้าลดลงต่อไปจนกระทั่งต่ำกว่าค่า discharge cut-out voltage จะทำให้ความเข้มข้นของกรดจะมีค่าสูงมากจนเกิดเป็นผลึกซัลเฟตหรือเรียกว่าเกิดซัลเฟตชันซึ่งควรหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดสภาวะนี้

2.3.2.1 สถานะการอัดประจุ (State of Charge, SOC)

ในการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระที่มีแบตเตอรี่จำเป็นต้องทราบจำนวนเวลาที่ระบบยังสามารถจ่ายไฟให้แก่ภาระทางไฟฟ้าได้ในเวลาที่ไม่มีแดดเพื่อประมาณการหรือเตรียมมาตรการรองรับหรือป้องกันการขาดแคลนไฟฟ้างั้นจึงจำเป็นต้องทราบตลอดเวลาว่ามีปริมาณพลังงานที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่มากน้อยเพียงใดซึ่งโดยทั่วไปมี 2 วิธีที่จะทำให้ทราบปริมาณพลังงานที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่ดังรูปแสดงลักษณะแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในช่วงเวลาที่เกิดกระบวนการอัดและการคายประจุ



รูปที่ 2.22 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในช่วงเวลาที่เกิดกระบวนการอัดและการคายประจุ (ที่มาของภาพ: กรมพัฒนาทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน)

วิธีที่ 1 สำหรับ unsealed แบตเตอรี่หรือแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์เป็นของเหลวสามารถทราบได้จากค่าความหนาแน่นของกรด (Acid density) ซึ่งวัดโดยไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer) โดยแบตเตอรี่แต่ละชนิดจะมีค่าต่างกัน

วิธีที่ 2 สำหรับ sealed แบตเตอรี่หรือแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์เป็นแบบเจลซึ่งไม่สามารถวัดค่าความหนาแน่นของกรด (Acid density) และจำเป็นต้องทราบระดับแรงดันวงจรเปิดขณะเริ่มต้น (resting voltage) ก่อนทุกครั้งเพื่อใช้อ้างอิงเป็นค่าเริ่มต้นที่สภาวะการประจุเป็น 0 เปอร์เซ็นต์และต้องปล่อยแบตเตอรี่ไว้โดยไม่ต่อวงจรไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมงก่อนทำการวัดแรงดัน

2.3.2.2 ประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่

แฟคเตอร์ของการประจุ (charge factor) คือสัดส่วนระหว่างปริมาณของไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่แบตเตอรี่มีหน่วยเป็นแอมแปร์- ชั่วโมง (Ah) ต่อปริมาณไฟฟ้าที่แบตเตอรี่สามารถคายประจุออกมาได้โดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 1.02 ถึง 1.2 ขึ้นอยู่กับค่าความลึกของการคายประจุ (discharge depth) และชนิดของแบตเตอรี่ ประสิทธิภาพของการอัดประจุ (charge efficiency) คือส่วนกลับของ charge factor มีค่าอยู่ระหว่าง 83 ถึง 98 เปอร์เซ็นต์ซึ่งหากผู้ผลิตไม่ระบุค่า charge efficiency สามารถจะประมาณได้โดยใช้วิธีดังนี้

- ที่สภาวะการอัดประจุ 90 เปอร์เซ็นต์มีประสิทธิภาพการอัดประจุมากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์
- ที่สภาวะการอัดประจุ 75 เปอร์เซ็นต์มีประสิทธิภาพการอัดประจุมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์
- ที่สภาวะการอัดประจุต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์มีประสิทธิภาพการอัดประจุมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์

ประสิทธิภาพของพลังงาน (energy efficiency) จะพิจารณาถึงความสูญเสียพลังงานจากการกักเก็บหรือเก็บสะสมสำหรับแบตเตอรี่ใหม่จะมีค่าอยู่ระหว่าง 70 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการอัดประจุของแบตเตอรี่ด้วย

2.3.3 ระดับแรงดันในการชาร์จแบตเตอรี่แบบตะกั่ว - กรด [13]

ขนาดแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่ตะกั่ว - กรดที่มาตรฐานมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าประมาณ 2 โวลต์ต่อเซลล์ ซึ่งเป็นขนาดแรงดันที่น้อยมาก ไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้งานได้ ดังนั้นการนำแบตเตอรี่ไปใช้งานทำได้โดยการนำเอาแบตเตอรี่หลายๆเซลล์มาต่อกันในลักษณะอนุกรม (Series) จนมีขนาดแรงดันเพียงพอกับความต้องการระดับแรงดันในการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด แบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ

2.3.3.1 การชาร์จปกติ (Floating Charge)

การชาร์จปกติมีความสำคัญต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ การปรับระดับแรงดันของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด จะใช้แรงดันระหว่าง 2.15-2.20 โวลต์ต่อเซลล์ การหาระดับแรงดันในการชาร์จปกติในแต่ละชุดของแบตเตอรี่ จะเท่ากับระดับแรงดันในการชาร์จต่อเซลล์คูณด้วยจำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่ในชุดนั้นเช่น แบตเตอรี่ขนาด 24 เซลล์ หรือ 48 โวลต์ แรงดันที่ใช้ในการชาร์จอย่างน้อยคือ 2.15×24 เท่ากับ 51.6 โวลต์

2.3.3.2 การชาร์จรูนแรง (Equalizing Charge)

การชาร์จปกติอย่างเดียวเป็นระยะเวลานานๆ ไม่เพียงพอที่จะรักษาแบตเตอรี่ให้อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ และมีอายุการใช้งานนาน เพราะการชาร์จปกติไม่สามารถแก้ไขการคายประจุโดยตัวมันเอง (Self-Discharge) และโลคอลแอคชั่น (Local Action) ได้ 100% ส่งผลให้แรงดันที่ตกคร่อมเซลล์แตกต่างกัน แต่ละเซลล์ของแบตเตอรี่ได้รับอุณหภูมิไม่เท่ากัน ทำให้อุณหภูมิของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ภายในเซลล์ไม่เท่ากัน ขั้วต่อแบตเตอรี่ได้รับแรงดันที่ตกคร่อมไม่เท่ากันอันเนื่องมาจากความหนาแน่นที่ไม่เท่ากัน

การทำการชาร์จแบตเตอรี่รูนแรง คือการเพิ่มระดับแรงดันในการชาร์จให้สูงกว่าระดับแรงดันเพื่อให้กระแสไหลในแบตเตอรี่สูงขึ้น เป็นการแก้การสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลภายในวงจรแบตเตอรี่และรักษาไว้ซึ่งประสิทธิภาพในการเก็บและคายประจุไฟของแบตเตอรี่ ระดับแรงดันที่ใช้ในการทำการชาร์จรูนแรงใช้ที่ 2.45 โวลต์ต่อเซลล์ โดยระดับแรงดันที่ใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่จะแสดงไว้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ระดับแรงดันในการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

จำนวนเซลล์	ระดับแรงดันในการชาร์จ (โวลต์)	
	Float	Equalize
6	13.2	14.7
12	26.4	25.97
24	52.8	55.92
30	66	73.5
48	105.6	111.84
60	132.00	139.80
120	264.00	279.60

หมายเหตุ ระดับแรงดันของการชาร์จปกติใช้ในแรงดันเท่ากับ 2.20 โวลต์ต่อเซลล์
ระดับแรงดันของการชาร์จรุนแรงใช้ในแรงดันเท่ากับ 2.45 โวลต์ต่อเซลล์

2.3.4 ผลกระทบต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ [13]

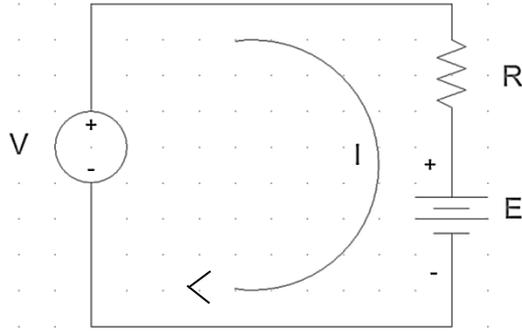
ระดับแรงดันในการชาร์จแบตเตอรี่มีความสำคัญมาก หากมีการปรับระดับแรงดันในการชาร์จไม่ถูกต้อง ขณะที่มีการชาร์จในทุกๆวัน โอกาสที่จะทำให้เกิดผลกระทบต่อแบตเตอรี่มี 2 ลักษณะ ดังนี้

Under-Charging คือ การใช้แรงดันในการชาร์จแบตเตอรี่ในระดับแรงดันปกติ (Floating Charge) ต่ำกว่า 2.15 โวลต์ต่อเซลล์ ถ้าหากใช้แรงดันในการชาร์จระดับนี้ไปนานๆ จะทำให้เกิดซัลเฟตเกาะจับที่บริเวณแผ่นเพลททั้งบวกและลบ หากทิ้งไว้นานๆ ปริมาณซัลเฟตจะเพิ่มมากขึ้น เป็นสาเหตุให้การทำปฏิกิริยาระหว่างแผ่นเพลทบวกและลบกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้งการชาร์จและดิสชาร์จเป็นไปด้วยความยากลำบาก ส่งผลให้ความจุของแบตเตอรี่ลดลง หากทิ้งไว้นานจะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ดังนั้นหากพบว่าแบตเตอรี่เกิดอันเดอร์ชาร์จ (Under Charging) ขึ้นต้องทำการปรับปรุงแก้ไข

Over-Chargingคือการใช้แรงดันในการชาร์จแบตเตอรี่ในระดับแรงดันปกติ (Floating Charge) สูงกว่า 2.15 โวลต์ต่อเซลล์ ซึ่งเป็นระดับแรงดันที่สูงกว่าปกติ เกิดกระแสไหลในแบตเตอรี่สูง ทำให้การทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับแผ่นเพลทเป็นไปอย่างรุนแรงและรวดเร็วกว่าปกติ ซึ่งทำให้แผ่นเพลททั้งสองเกิดการสึกกร่อนอย่างรวดเร็ว ทำให้อายุการใช้งานลดลง

2.3.5 วิธีการอัดประจุแบตเตอรี่

การอัดประจุแบตเตอรี่เป็นการจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแรงดันคร่อมขั้วแบตเตอรี่ จึงทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ โดยขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่แบตเตอรี่สามารถกำหนดได้โดยค่าความต่างศักย์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงกับแรงดันไฟฟ้าคร่อมขั้วแบตเตอรี่ โดยกระแสที่ทำการชาร์จจะมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของกระแสที่แบตเตอรี่จ่ายออกมา จึงทำให้ได้สมการการอัดประจุแบตเตอรี่ดังสมการที่ 2.2 จากรูปโครงสร้างพื้นฐานการอัดประจุแบตเตอรี่ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 โครงสร้างพื้นฐานของการอัดประจุแบตเตอรี่ขณะทำการอัดประจุ
จากรูปที่ 2.23 ได้สมการ

$$V = E + IR \quad (2.25)$$

$$I = \frac{V-E}{R} \quad (2.26)$$

- โดยที่ V คือ ค่าแรงดันในการอัดประจุแบตเตอรี่
- E คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่
- R คือ ค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่
- I คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดประจุแบตเตอรี่

การประจุแบตเตอรี่ แบ่งออกเป็น 4 วิธี ดังนี้

2.3.5.1 การอัดประจุแบบกระแสไฟฟ้าตรงคงที่ (Constant Current Charging)

การอัดประจุแบตเตอรี่แบบกระแสไฟฟ้าตรงคงที่เป็นการชาร์จที่มีประสิทธิภาพมากกว่าการชาร์จแบบแรงดันคงที่ และใช้เวลาน้อยกว่า เพราะการชาร์จแบบกระแสไฟฟ้าตรงคงที่จะถูกจำกัดกระแสชาร์จไว้ ถ้ากระแสที่ใช้ชาร์จมีค่าสูง จะทำให้เวลาในการชาร์จสั้นลง แต่ถ้ากระแสที่ใช้ชาร์จมีค่ามากเกินไป แบตเตอรี่เกิดความเสียหาย

การชาร์จด้วยกระแสไฟฟ้าตรงคงที่ การชาร์จจะช้าลงเร็วไม่ได้เนื่องจากกระแสที่ใช้ในการชาร์จจะถูกจำกัดไว้ตามข้อมูลของแบตเตอรี่ชนิดนั้นกำหนด ข้อดีของการชาร์จแบบกระแสไฟฟ้าตรงคงที่ คือเซลล์ทุกๆเซลล์จะได้รับกระแสในสัดส่วนเท่าๆกันทุกเซลล์ของชุดแบตเตอรี่

2.3.5.2 การอัดประจุแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant Voltage Charging)

การอัดประจุแบตเตอรี่แบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ จะใช้เวลาในการชาร์จมากกว่าการชาร์จแบบกระแสไฟฟ้าตรงคงที่ โดยความเร็วในการชาร์จขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องชาร์จ การชาร์จแบบนี้ทำได้โดยเครื่องอัดประจุเป็นตัวจ่ายแรงดันป้อนเข้าไปในแบตเตอรี่ แต่แรงดันที่จ่ายจะไม่คงที่ จึงต้องมีวงจรควบคุมแรงดันคงที่ จะช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

2.3.5.3 การอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าตรงคงที่และแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant Current – Constant Voltage Charging)

การอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าตรงคงที่และแรงดันไฟฟ้าคงที่คือ การรวมวิธีชาร์จแบบกระแสคงที่กับแรงดันคงที่เข้าด้วยกัน โดยจะแบบเป็น 2 ช่วงคือ

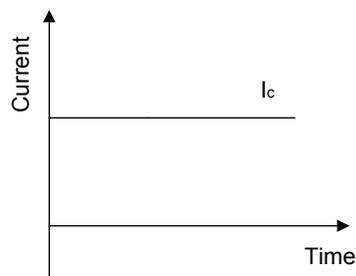
ช่วงแรก : ชาร์จด้วยกระแสเต็มพิกัดคงที่แรงดันจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนเซลล์ได้รับความต่างศักย์ของแบตเตอรี่ใกล้เต็ม

ช่วงที่สอง : ชาร์จด้วยแรงดันเต็มพิกัดคงที่ กระแสที่ชาร์จเข้าเซลล์ของแบตเตอรี่จะค่อยๆลดลง และจะหยุดชาร์จเมื่อกระแสน้อยกว่า 3% ของแบตเตอรี่

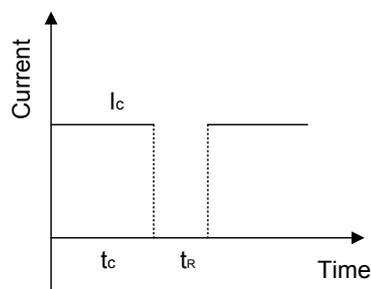
2.3.5.4 การอัดประจุแบบพัลส์ (Pulse Charging)

วิธีการชาร์จแบบพัลส์เป็นการชาร์จโดยใช้อิมพัลส์รูปคลื่นแรงดัน สามารถชาร์จได้เร็วกว่าแบบแรงดันคงที่ และใช้เวลาใกล้เคียงกับการชาร์จแบบกระแสคงที่ แต่มีข้อดีกว่าแบบกระแสคงที่เนื่องจากช่วยระบายความร้อนของแบตเตอรี่ได้ ทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สูงขึ้น

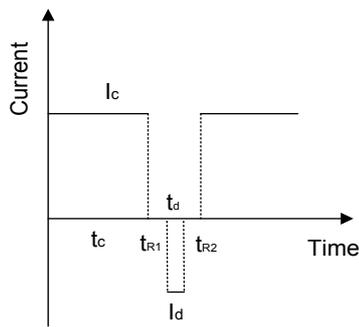
วิธีการชาร์จที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและมีอายุการใช้งานยาวนาน สิ่งที่สำคัญคือความต้านทานภายในต้องมีค่าต่ำ พบว่าการชาร์จด้วยกระแสคงที่ ค่าความต้านทานภายในเซลล์มีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการชาร์จ การชาร์จด้วยกระแสพัลส์โดยมีการดิสชาร์จ ค่าความต้านทานภายในมีค่าลดลงส่งผลให้ประสิทธิภาพการชาร์จดีขึ้น



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.24 วิธีการอัดประจุแบตเตอรี่

(ก) กระแสคงที่

(ข) กระแสพัลส์ไม่มีการดิสชาร์จ

(ค) กระแสพัลส์ที่มีการดิสชาร์จ

การชาร์จแบตเตอรี่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้โดยพิจารณาจากคุณลักษณะทางเคมีของขั้วอิเล็กโทรด โดยพัลส์ชาร์จจะสามารถอธิบายการแพร่กระจายของอิเล็กโทรไลต์มากขึ้น ทำให้เพิ่มความเร็วในการชาร์จมากขึ้นและอายุการใช้งานนานขึ้น จากสมการที่ 2.27

$$i_0 = Fk_0(1-\theta)^{1-\alpha} \theta^\alpha c^{1-\alpha} \quad (2.27)$$

เมื่อ F = Faraday's constant (96,487 C/equiv)

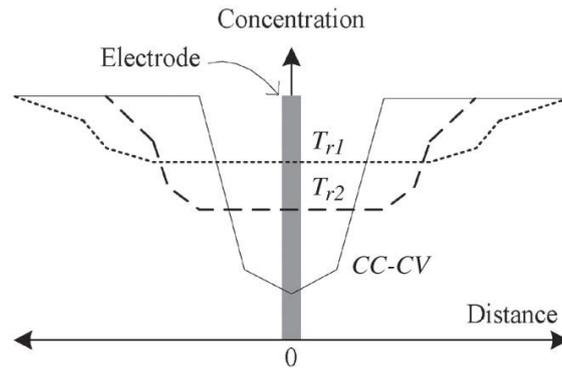
k_0 = ค่าคงที่มาตรฐานที่ต่างชนิดกัน

θ = ชั้นส่วนของโมเลกุล

α = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอน

c = ค่าความเข้มข้นบนพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด

วิธีการชาร์จแบบพัลส์มีระยะพัก T_r สำหรับให้ออออนแพร่กระจายได้มากขึ้น โดยวัดจากความเข้มข้นบนพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ความเข้มข้นของการกระจาย [10]

2.3.5.5 พัลส์ชาร์จแบบปรับดิวตี้ไซเคิล (Duty-varied voltage pulse charger)

การชาร์จแบบพัลส์โดยการปรับดิวตี้ไซเคิล จะทำการปรับค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ไปเรื่อยๆ ตั้งแต่ $D=0.5$ ถึง $D=0.95$ เมื่อทำการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลตั้งแต่ $0.50 - 0.95$ จนได้ค่าพัลส์ชาร์จแพคเตอร์ที่ดีที่สุด จึงใช้ค่ากระแสเฉลี่ยที่พัลส์ชาร์จแพคเตอร์ที่ดีที่สุด

$$i_{b,n} = \frac{1}{T} \times \int_0^{D_n T} \tilde{i}_{b,n}(t) dt \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2.28)$$

เมื่อ $\tilde{i}_{b,n}(t)$ = กระแสชาร์จแบบเตอริชวล (Transient battery - charge current)
 $i_{b,n}$ = กระแสชาร์จเฉลี่ย (Average charge current)

$$\tilde{i}_{b,n}(t) = k \cdot i_{o,n} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \cdot (u(t) - u(t - D_n T)) \quad (2.29)$$

เมื่อ k = ค่าคงที่
 $i_{o,n}$ = ความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยน (Exchange current density)

$$i_{b,n} = \frac{k \cdot i_{o,n}}{T} \cdot (D_n T \cdot + \tau \cdot e^{-\frac{D_n T}{\tau}} - \tau) \quad (2.30)$$

เมื่อ τ = ค่าคงตัวเวลา (Transfer time constant)

$$i_{b,n} \cong k \cdot i_{o,n} \cdot \frac{T}{2\tau} \cdot D_n^2 \quad (2.31)$$

$$\frac{i_{b,n}}{D_n} = k \cdot i_{o,n} \cdot D_n \quad (2.32)$$

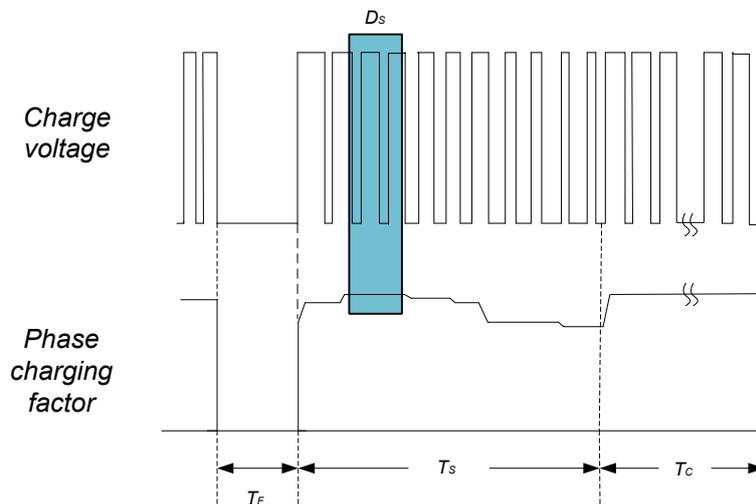
เมื่อ $k \cong \left(\frac{kT}{2\tau}\right)$ จะได้

$$\eta = \frac{i_b}{D} \quad (2.33)$$

เมื่อ $\eta =$ พัลส์ชาร์จแฟคเตอร์ (pulse-charge factor)

$D =$ ดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle)

$I_b =$ ค่ากระแสเฉลี่ย



รูปที่ 2.26 ปรับค่าดิวตี้ไซเคิลของ DWPC [10]

2.4 การมอดดูเลชัน

2.4.1 การมอดดูเลชันความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation: PWM)

Pulse Width Modulation ซึ่งถ้าจะแปลให้เข้าใจง่ายๆ ก็คือ การมอดดูเลตความกว้างของพัลส์ โดยการนำเอาสองสัญญาณมาเปรียบเทียบกับและสองสัญญาณที่ว่าเป็นสัญญาณ "สามเหลี่ยม" กับสัญญาณที่ต้องการปรับความกว้างของพัลส์ ยกตัวอย่างเช่น ถ้านำสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม อย่างในงานวิจัยนี้ นำสัญญาณแอมพลิจูดไซน์มาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม

2.5 การเชื่อมต่อระบบกริดการไฟฟ้า

ด้วยการพัฒนาด้านเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (power electronics) ทำให้เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก เปิดโอกาสในการนำเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียน ซึ่งมักจะเป็นระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงและมีลักษณะการผลิตที่ไม่สม่ำเสมอขึ้นกับแหล่งกำเนิดพลังงาน ให้สามารถเชื่อมต่อกับระบบกริดไฟฟ้าแบบกระแสสลับได้ การผลิตไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีที่ใช้พลังงานหมุนเวียนมีข้อได้เปรียบเหนือการผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในเชิงการลดสภาวะโลกร้อนและการปลดปล่อยก๊าซมลภาวะ เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากเหล่านี้สามารถทำให้เกิดไมโครกริด (micro grid) ซึ่งหมายถึงการเชื่อมต่อระหว่างกลุ่มผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กกับกลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้าที่อยู่ไม่ไกลจากกัน หลักการสำคัญของการผลิตไฟฟ้าด้วย ไมโครกริดคือการสร้างสมดุลระหว่างการผลิตไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากดังกล่าวข้างต้น ให้พอดีกับภาระทางไฟฟ้าภายในไมโครกริด โดยขนาดของระบบผลิตไฟฟ้ามีขนาดใกล้เคียงกับภาระทางไฟฟ้าของไมโครกริดนั้นๆ แนวคิดดังกล่าว จะอนุญาตให้ผู้ใช้และผู้ผลิตไฟฟ้าภายในไมโครกริดใดๆ สามารถผลิตและใช้ไฟฟ้า

ในขณะที่มีการเชื่อมต่อกับระบบกริดการไฟฟ้าขนาดใหญ่ หรือไมโครกริดอื่นๆ ได้ ซึ่งไมโครกริดจะมองเห็นการเชื่อมต่อนั้นๆ เป็นแหล่งกำเนิด/ภาระไฟฟ้าอีกแหล่งหนึ่งที่เพิ่มเข้ามา หรือจ่ายออกไปนั่นเอง

ในการเชื่อมต่อนระบบกริดการไฟฟ้าจำเป็นที่จะต้องมีความเป็นข้อกำหนดในการเชื่อมต่อด้วยดังนี้ จากข้อกำหนดของการเกิดสถานะ Islanding ระบบต้องหยุดการเชื่อมต่อภายใน 2 วินาที ตามมาตรฐาน UL1741/IEEE1547 ตามมาตรฐานของ IEEE 519 – 1992 ค่า THD_v ต้องไม่เกิน 5% ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ ต้องไม่ต่ำกว่า 0.85

2.6 การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กของหม้อแปลงความถี่สูง

กำหนดพิกัดกำลังของวงจรฟลายแบคอินเวอร์เตอร์คือ 100 วัตต์ เมื่อมองด้านปฏุมภูมิจะได้สมการแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำคือ

$$V_{dc} = L_m \frac{di_{dc}(t)}{dt} \quad (2.34)$$

เมื่อ L_m คือ ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (μH) หรือเขียนเป็นฟังก์ชันของกระแสได้คือ

$$i_{dc,p} = \frac{V_{dc}}{L_m} t_{on} \quad (2.35)$$

โดย $i_{dc,p}$ คือค่ากระแสสูงสุดทางด้านปฏุมภูมิของหม้อแปลง, t_{on} คือช่วงเวลา on ของสวิตซ์ จะได้สมการ

$$i_{dc,p} = \frac{V_{dc}}{L_m f_s} d \quad (2.36)$$

เมื่อ $d = \frac{t_{on}}{T_s}$ เมื่อ d คือค่า Duty Cycle, T_s คือคาบเวลาในการสวิตซ์ และ f_s คือความถี่สวิตซ์

เมื่อเขียนสมการ $i_{dc,p}$ ในฟังก์ชันรูปคลื่นไซน์

$$i_{dc,p} = I_{dc,p} \sin \omega t, \omega t \in [0, \pi] \quad (2.37)$$

โดยที่ค่า duty cycle เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$$d(t) = d_p \sin \omega t \quad (2.38)$$

โดยที่ค่า d_p เป็นค่า duty cycle ที่เวลา $\omega t = \frac{\pi}{2}$

เนื่องจากการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง

$$t_{off} \leq T_s - t_{on,p} \quad (2.39)$$

โดย $t_{on,p}$ คือ เวลาในการ on ของสวิตช์ที่เวลา $\omega t = \frac{\pi}{2}$

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.9

$$u_{ac}(t) = \frac{dni_{dc}(t)}{dt} \frac{L_m}{n^2} \quad (2.40)$$

โดยที่ค่า $ni_{dc}(t)$ คือ ค่ากระแสสูงสุดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง L_m / n^2 คือค่าตัวเหนี่ยวนำทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

จาก Appendix A จะได้สมการ t_{off} คือ

$$\frac{t_{off}}{T_s} = \frac{\lambda}{n} d_p = \text{constant} \quad (2.41)$$

เมื่อ

$$\lambda = \frac{V_{dc}}{V_{ac,p}} \quad (2.42)$$

เมื่อ V_{dc} คือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และ $V_{ac,p}$ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสูงสุด ดังนั้นค่า dp จะต้องมีค่าตามสมการที่ 2.10 เพื่อจะทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง

$$dp \leq \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{n}} \quad (2.43)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง $P_{ac} = P_{dc} = P$

$$P = V_{dc} I_{dc,avg} \quad (2.44)$$

เมื่อ P คือ กำลังที่ใช้ในการส่งผ่าน, P_{ac} คือ กำลังไฟฟ้าในการส่งผ่านไประบบกริดการไฟฟ้า, P_{dc} คือ กำลังไฟฟ้ากระแสตรง และ $I_{dc,avg}$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง แทนค่า $I_{dc,avg}$ จากสมการ

$$I_{dc,avg} = \frac{1}{T_{hl}} \int_0^{T_{hl}} i_{dc}(t) dt \quad (2.45)$$

หรือเขียนเป็นสมการใหม่ได้คือ

$$I_{dc,avg} = \frac{1}{T_{hl}} \left[\int_0^{T_s} i_{dc}(t) dt + \dots + \int_{(w-1)T_s}^{wT_s} i_{dc}(t) dt + Q \right] \quad (2.46)$$

เมื่อ W คือ $\frac{T_{hl}}{T_s}$ โดยที่ Q เป็นส่วนที่เหลือจากการอินทิเกรต เนื่องจากในเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของลูกคลื่น เราจึงสามารถละทิ้งในส่วนนี้ได้จากสมการ 2.1, 2.5 และ 2.13 เมื่อ

$$\omega t = \left(\frac{\pi}{T_{hl}} \right) (iT_s) \approx \frac{\pi}{\omega} i \quad (2.47)$$

จาก

$$I_{dc,avg} = \frac{d_p^2 V_{dc}}{2f_s L_m} \left[\frac{1}{\omega} \sum_{i=1}^{\omega} \sin^2 \left(\frac{\pi}{\omega} i \right) \right] = \frac{d_p^2 V_{dc}}{4f_s L_m} = \frac{1}{4} g_L d_p^2 V_{dc} \quad (2.48)$$

กำหนดให้

$$g_L = \frac{1}{f_s L_m} \quad (2.49)$$

เมื่อนำไปแทนค่าในสมการกำลังไฟฟ้า

$$P = \frac{1}{4} d_p^2 g_L V_{dc}^2 \quad (2.50)$$

จากสมการที่ 2.42

$$P = \frac{1}{2} \lambda^2 d_p^2 g_L V_{ac,rms}^2 \quad (2.51)$$

หรือ

$$P = g_s V_{ac,rms}^2 \quad (2.52)$$

โดยที่ g_s คือ ค่าความนำไฟฟ้า ดังนั้นจะหาความสัมพันธ์ของ $\frac{g_s}{g_L}$ คือ

$$\frac{g_s}{g_L} = \frac{1}{2} \lambda^2 d_p^2 \quad (2.53)$$

จากสมการที่ 2.42

$$\left(\frac{g_s}{g_L} \right)_{\max} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{n} \right)^{-2} \quad (2.54)$$

จากสมการที่ 2.54 เมื่อค่าจำนวนรอบของหม้อแปลงเพิ่มขึ้นถึง Infinite ค่า $\left(\frac{g_s}{g_L} \right)_{\max}$ จะได้ตามสมการคือ

$$\left(\frac{g_s}{g_L} \right)_{\max} \Big|_{n \rightarrow \infty} = \frac{\lambda^2}{2} \quad (2.55)$$

ซึ่งหมายความว่าถึงแม้ค่าจำนวนรอบหม้อแปลงจะเพิ่มขึ้นมากเพียงใด ค่ากำลังไฟฟ้าก็จะคงที่

บทที่ 3

วิธีการออกแบบและเทคนิคที่นำเสนอและผลการทดลอง

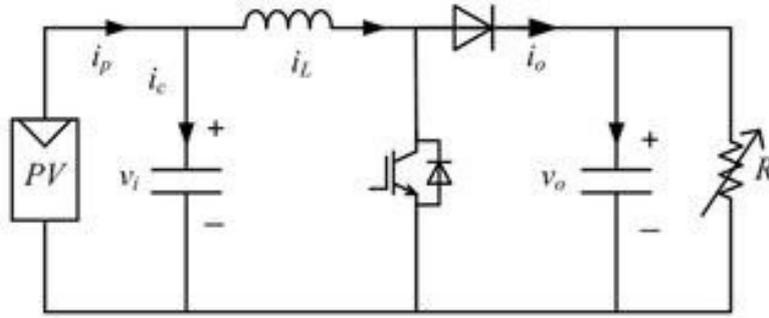
ในส่วนแรกของบทนี้จะนำเสนอผลการออกแบบวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ โดยออกแบบตัวเหนี่ยวนำให้ทำงานได้ครอบคลุมในโหมดกระแสต่อเนื่องและรักษาการตามรอยกำลังไฟฟ้าให้สามารถตามรอยได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้โดยให้แรงดันขาออกมีเสถียรภาพ จากนั้นนำเสนอผลที่ออกแบบระบบการตามรอยกำลังไฟฟ้าที่มีการทดสอบเพื่อยืนยันว่าการออกแบบรวมทั้งเทคนิคที่นำเสนอสามารถใช้ได้จริงกับระบบทั่วไป โดยที่ทำการเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ได้รักษาเสถียรภาพที่แรงดันขาออก ในส่วนนี้จะนำเสนอเฉพาะในส่วนของการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำและเทคนิคการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยรักษาระดับแรงดันให้มีเสถียรภาพ

3.1 การออกแบบวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์และเทคนิคการควบคุมการตามรอยกำลังไฟฟ้าแบบรักษาระดับแรงดันขาออก

3.1.1 วงจรทระดับแรงดันไฟฟ้า

ในการออกแบบวงจรการติดตามจุดกำลังสูงสุดของโซลาเซลล์จะต้องใช้วงจรแปลงผันแบบทระดับออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ 50 kHz แรงดันและกระแสอินพุตมีค่าเท่ากับแรงดันและกระแสที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยกำหนดแรงดันไฟตรงเอาต์พุตเท่ากับ 35 โวลต์ โหลดความต้านทาน 10 โอห์ม วงจรแปลงผันแบบทระดับแสดงดังรูปที่ 3.1 จากข้อมูลของเซลล์แสงอาทิตย์จะได้คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานดังนี้

กำลังสูงสุดที่จ่ายได้ (P_{MAX})	125	วัตต์
แรงดันที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด (V_{MAX})	17	โวลต์
กระแสที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด (I_{MAX})	7.36	แอมป์
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{OC})	21.6	โวลต์
กระแสลัดวงจร (I_{SC})	7.64	แอมป์



รูปที่ 3.1 วงจรแปลงผันทระดับ

คำนวณหาดีวีทีซีเคิลสำหรับการทำงานของสวิตช์จากสมการจะได้

$$V_a = \frac{V_s}{1-D}$$

$$35 = \frac{17}{1-D}$$

$$D=0.5$$

3.1.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ (L) ที่ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องของวงจรทระดับแรงดัน

ถ้าสมมติการสูญเสียภายในวงจรทระดับแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่ออกจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับ จะได้ว่า

$$P_s = P_o = \frac{V_o^2}{R} \quad (3.1)$$

$$P_s = V_s I_s = V_s I_L \quad (3.2)$$

$$\frac{V_o^2}{R} = V_s I_L$$

$$V_o = \frac{V_s}{(1-D)}$$

$$V_s I_L = \frac{\left(\frac{V_s}{1-D}\right)^2}{R}$$

$$I_L = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} \quad (3.3)$$

ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุดสามารถคำนวณหาได้จากค่าเฉลี่ยและการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า ในช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแส ดังในสมการที่ (3.4)

$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_s D T}{L}$$

จะได้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุดคือ

$$I_{L,max} = i_L + \frac{\Delta i_L}{2}$$

$$I_{L,max} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} + \frac{1}{2} \left(\frac{V_s D T}{L} \right) \quad (3.4)$$

$$I_{L,min} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{1}{2} \left(\frac{V_s D T}{L} \right) \quad (3.5)$$

เมื่อสมมติให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและมีค่าเป็นบวก ดังนั้นจะหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด ที่ทำให้วงจรพบระดับแรงดันไฟฟ้าทำงานได้ในขอบเขตระหว่างโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องสามารถคำนวณหาได้จากการกำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์ดังสมการที่ (3.6)

$$I_{L,min} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{1}{2} \left(\frac{V_s D T}{L} \right) = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{V_s}{(1-D)^2 R} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_s D T}{L} \right)$$

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (3.7)$$

สามารถคำนวณจากสมการจะได้

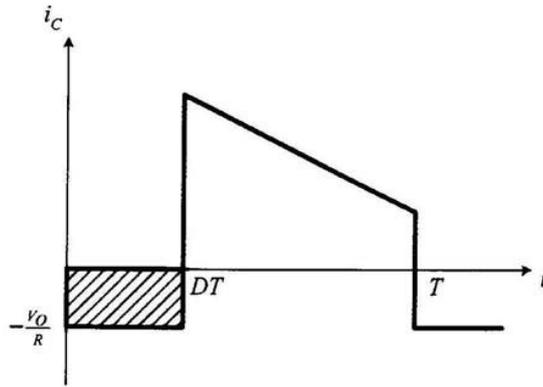
$$L_{min} = \frac{0.5 \times (1-0.5)^2 \times 9}{2 \times 20 \times 10^3}$$

$$L_{min} = 28.125 \mu H$$

โดยปกติแล้วการออกแบบตัวเหนี่ยวนำจำเป็นต้องคำนึงถึงความต่อเนื่องของกระแสด้วย เพื่อให้กระแสสามารถจ่ายไปยังเอาต์พุตได้อย่างต่อเนื่อง โดยต้องเลือกค่าความเหนี่ยวนำที่มีค่ามากกว่า L_{min} ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำที่ $300 \mu H$ เพื่อลดกระแสคลื่นระลอก

3.1.3 การหาขนาดตัวเก็บประจุ (C) ที่ทำให้เกิดการกระเพื่อมที่ ($r < 1\%$)

การที่มีตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะสามารถรักษาให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกคงที่หรือลดค่าคลื่นระลอกของแรงดันลงได้ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่มากๆ ได้เนื่องจากมีราคาแพงและใช้พื้นที่มากจึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสม และค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ การคำนวณหาค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจากยอดถึงยอด สามารถหาได้จากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

$$|\Delta Q| = C\Delta V_o = I_o\Delta t_{on} \quad (3.8)$$

$$I_o = \frac{V_o}{R}$$

$$\Delta t_{on} = DT$$

$$\Delta V_o = \frac{I_o\Delta t_{on}}{C} = \frac{V_oDT}{RC} \quad (3.9)$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad (3.10)$$

เมื่อต้องการจะลดอัตราระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก จะทำได้โดยการลดค่า D ให้เข้าใกล้ศูนย์ หรือการเพิ่มค่าโหลด หรือเพิ่มค่าของตัวเก็บประจุหรือเพิ่มค่าความถี่ในการสวิตซ์ให้สูงขึ้น โดยสามารถคำนวณได้จากสมการจะได้

โดยที่ $r = \frac{\Delta V_c}{V_c}$ คือค่าแฟคเตอร์คลื่นระลอก (ในที่นี้ใช้ $r < 1\%$)

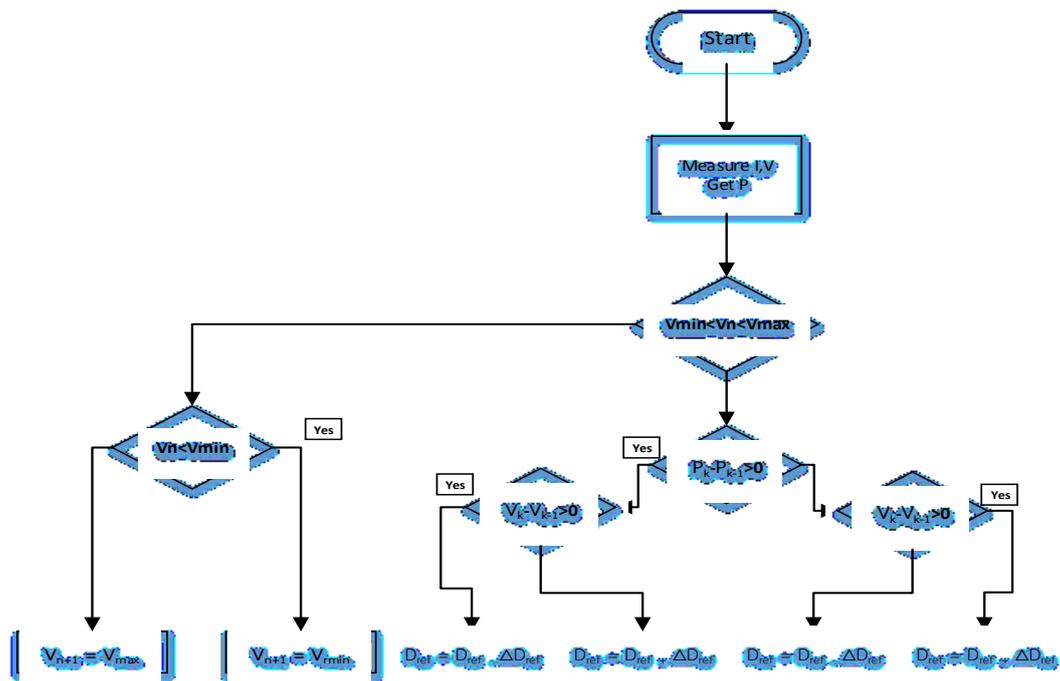
$$C = \frac{0.5}{0.01 \times 20 \times 20 \times 10^3}$$

$$C = 125 \mu F$$

3.1.4 การออกแบบตัวติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบใหม่โดยใช้วิธีการรบกวนและสังเกต (P&O) แบบมีขอบเขตเพื่อรักษาระดับแรงดันขาออกให้มีเสถียรภาพ

การออกแบบลำดับขั้นตอนของวิธีการรบกวนและสังเกตแบบเดิม ให้มีการติดตามจุดกำลังสูงสุดโดยมีขอบเขตของแรงดันทางด้านขาออกและที่แรงดันขาออกจะไม่เกินช่วงที่กำหนดไว้ โดยช่วงที่กำหนดจะใช้ช่วงที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ได้กำลังที่สูงที่สุดของแรงดันทางด้านขาออกที่ยังคงมีเสถียรภาพอยู่ ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถใช้สวิตซ์ซึ่งเพียงตัวเดียวที่สามารถทั้งติดตามจุดกำลังสูงสุดและมีเสถียรภาพทางด้านแรงดันขาออกหรือมีแรงดันขาออกคงที่จากเดิมซึ่งต้องใช้สวิตซ์อย่างน้อย 2 ตัว แต่วิธีนี้ส่งผลให้ค่ากำลังขาออกนั้นต่ำลงเพราะจะถูกจำกัดเขตการติดตามจุดกำลังสูงสุดเอาไว้ เพื่อรักษาระดับแรงดันทางด้านขาออก

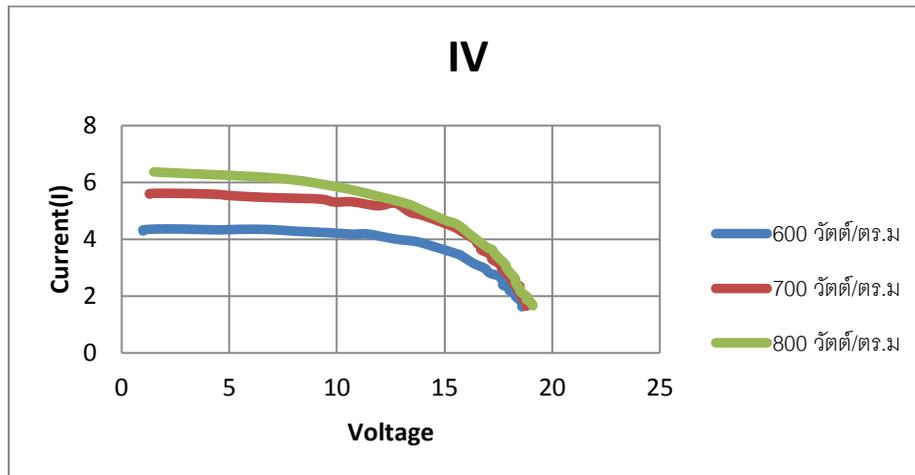
การออกแบบลำดับขั้นตอนของตัวติดตามจุดกำลังสูงสุดโดยใช้วิธีการรบกวนและสังเกตแบบมีขอบเขตโดยมีกระบวนการตามรูปที่ 3.3 และสังเกตได้ว่าจะมีการเพิ่มเงื่อนไขในส่วนของการกำหนดขอบเขตของแรงดันขาออก(V_{dc}) โดยถูกจำกัดอยู่ในช่วงระหว่าง V_{max} กับ V_{min} ที่ได้กำหนดไว้ โดยเมื่อแรงดันขาออก (V_{dc}) ไม่อยู่ในช่วงระหว่าง V_{max} กับ V_{min} ก็จะลัดขั้นตอนในส่วนของการติดตามกำลังสูงสุดแบบรบกวนและสังเกตทั้งหมด โดยให้คงระดับแรงดันขาออกไว้ที่ค่าขอบเขตบนหรือขอบเขตล่าง ทำให้สามารถจำกัดกับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขาออก (V_{dc}) ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตลอด ด้วยเหตุผลดังนี้ 1) ตามความเข้มแสง 2) ข้อเสียของวิธีการติดตามจุดกำลังสูงสุดโดยใช้วิธีการรบกวนและสังเกตซึ่งเงื่อนไข $P_k - P_{k-1} = 0$ ไม่สามารถเป็นไปได้หาแรงดันขาออก (V_{dc}) จึงเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา



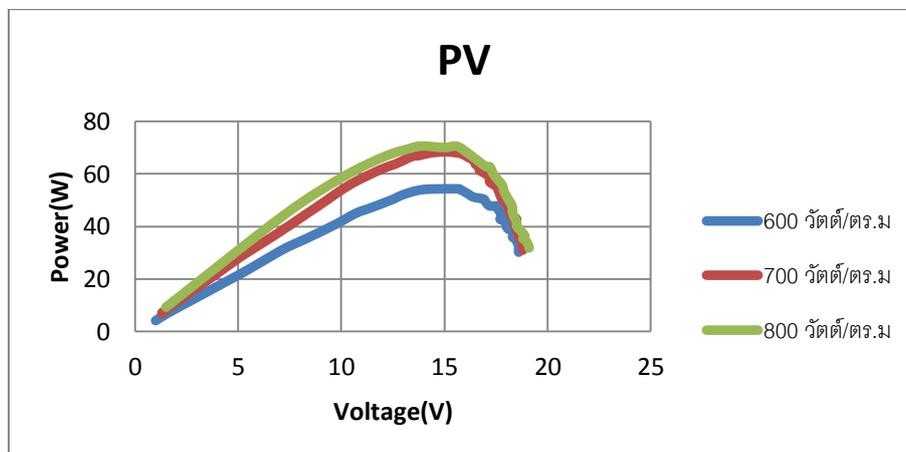
รูปที่ 3.3 แผนภูมิกระบวนการลำดับขั้นตอนของตัวติดตามจุดกำลังสูงสุดโดยใช้วิธีการรบกวนและสังเกตแบบมีขอบเขต

หลังจากทำการออกแบบวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์รวมทั้งการเขียนโปรแกรมการคำนวณตามวิธีการที่นำเสนอไป จำเป็นต้องใช้วงจรขับสวิตช์ เพื่อลดความเสียหายภายในวงจรจึงใช้ไอซีเบอร์ TLP250 เป็นชนิด Opto Isolated Gate Drive มีหน้าที่แยกไฟแรงสูงกับแรงต่ำ ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ Opto Isolator กับส่วนที่เป็น current boost โดยใช้แสงเป็นตัวกลางในการเชื่อมระบบโดยใช้แสงที่ได้ไปขับในส่วนของ current boost เพื่อขยายกระแสขึ้นให้มากขึ้นเพื่อขับมอสเฟตโดยสร้างสัญญาณพัลส์จากการเขียนโปรแกรมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด STM32 โดยจะสัญญาณที่ได้ออกมาจากการประมวลผลที่ MPP โดยใช้เทคนิคที่นำเสนอซึ่งสัญญาณดิวิตีไซเคิลจะอาศัยการสร้างความถี่จากภายในของตัว STM32 เอง ซึ่งสามารถนำสัญญาณไปป้อนให้อุปกรณ์แยกกันทางไฟฟ้า (Isolation) ได้โดยตรง โดยใช้วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตามรอยกำลังไฟสูงสุดแบบรักษาเสถียรภาพของเอาต์พุต

เพื่อทดสอบพฤติกรรมรวมทั้งคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ใช้การปรับค่าความเข้มแสงแล้วทำการเก็บผลเพื่อสร้างกราฟดังกล่าวขึ้น ซึ่งจะช่วยให้การออกแบบรูปแบบการตามรอยกำลังไฟฟ้าได้ดีขึ้น โดยผลที่ทำการทดสอบจะแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน และกำลัง-แรงดัน โดยใช้ความเข้มแสงที่ 600, 700 และ 5600 วัตต์ต่อตารางเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และ 3.5



รูปที่ 3.4 กราฟคุณลักษณะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์

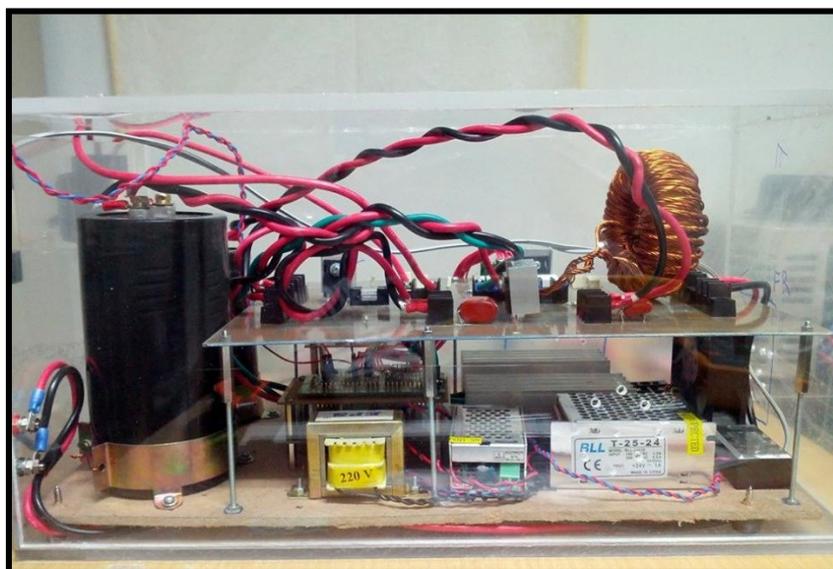


รูปที่ 3.5 กราฟคุณลักษณะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

จากการเปรียบเทียบผลของกราฟคุณลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระดับความเข้มแสงแตกต่างกันพบว่าความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อกำลังไฟฟ้า เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นกำลังไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นไม่คงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีความไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้ข้อมูลนี้ยังเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย

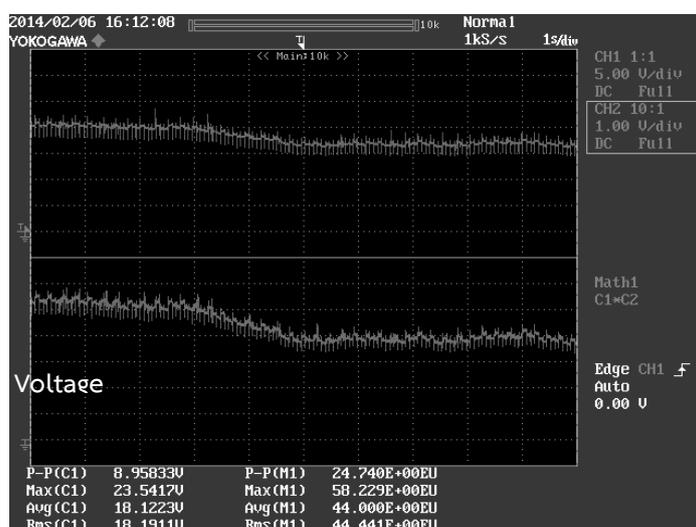
3.1.5 การทดลองและผลการทดลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการติดตามจุดกำลังสูงสุดโดยใช้วิธีการรบกวนและสังเกตกับวิธีการรบกวนและสังเกตแบบเทคนิคที่นำเสนอ ซึ่งทำการทดลองสองรูปแบบการทดลองคือ ทดลองที่สถานะความเข้มแสงคงที่ และที่สถานะความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง โดยใช้อุปกรณ์บรูสคอนเวอร์เตอร์ที่ได้รับการออกมาแบบมาตามรูปที่ 3.6

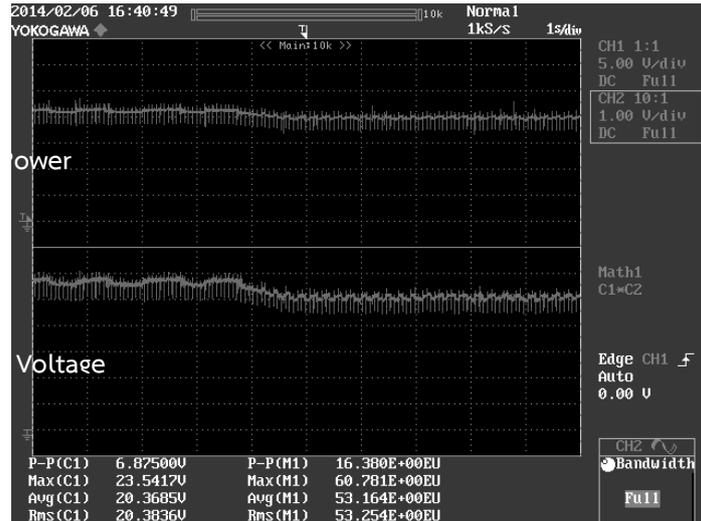


รูปที่ 3.6 วงจรจริงที่ใช้ในการทดสอบ

เมื่อนำชุดควบคุมที่ได้จากการออกแบบไปใช้กับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยให้ระบบตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดและมีการเปลี่ยนค่าความเข้มแสงจาก 900 วัตต์/ตารางเมตร - 700 วัตต์/ตารางเมตร โดยใช้เทคนิคการตามรอยแบบ P&O ธรรมดา เปรียบเทียบกับแบบเทคนิคการตามรอยที่นำเสนอโดยรูปที่ 3.7 (ก) แสดงกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจบบรูสคอนเวอร์เตอร์แบบเทคนิคเดิม และรูปที่ 3.7 (ข) แสดงกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจบบรูสคอนเวอร์เตอร์ที่ควบคุมด้วยเทคนิคที่นำเสนอ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.7 กำลังไฟฟ้า และแรงดันขาออกของวงจรเปรียบเทียบกับเวลา โดยใช้เทคนิคเดิม (ก)
กำลังไฟฟ้า และแรงดันขาออกของวงจรเปรียบเทียบกับเวลา โดยใช้เทคนิคที่นำเสนอ (ข)
ที่ความเข้มแสง 700 วัตต์/ตารางเมตรและ 900 วัตต์/ตารางเมตร

ตารางที่ 3.1 สรุปผลการตอบสนองของระบบที่ออกแบบเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการควบคุมแบบเดิม
ที่การเปลี่ยนความเข้มแสงจาก 900 วัตต์ต่อตารางเมตร เป็น 700 วัตต์ต่อตารางเมตร

ความเข้มแสง (W/m ²)	การควบคุมด้วยเทคนิคที่นำเสนอ		การควบคุมด้วยเทคนิคแบบเดิม	
	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)
900	54.2	28.1	53.2	27.2
700	50.4	25.3	47.5	20.4
ค่าความแตกต่าง	$\Delta P=3.8$	$\Delta V=2.8$	$\Delta P=5.7$	$\Delta V=6.8$

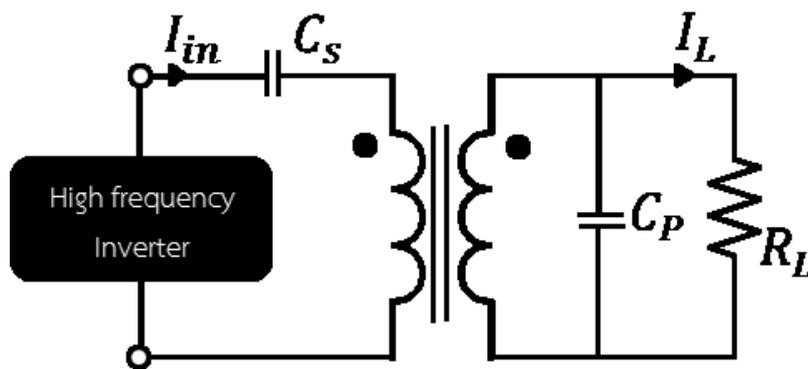
สรุปผล

จากผลที่ได้พบว่าระบบที่ควบคุมโดยรักษาระดับแรงดันให้มีเสถียรภาพของเทคนิคที่นำเสนอสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยชุดควบคุมสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกได้ดีแม้ว่าจะมีความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเปรียบเทียบกับการควบคุมในเทคนิคเดิมจากตารางที่ 3.1 พบว่า เทคนิคที่นำเสนอรักษาระดับแรงดันขาออกโดยมีการแกว่งของแรงดันเพียง 2.8 โวลต์ ในขณะที่เทคนิคเดิมมีการแกว่งของแรงดันอยู่ที่ 6.8 โวลต์ นอกจากนั้นเทคนิคที่นำเสนอยังมีการแกว่งของกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าการควบคุมในเทคนิคเดิมถึง 30% ภายใต้การเปลี่ยนความเข้มแสงจาก 900 วัตต์ต่อตารางเมตร เป็น 700 วัตต์ต่อตารางเมตร

3.2 การออกแบบการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

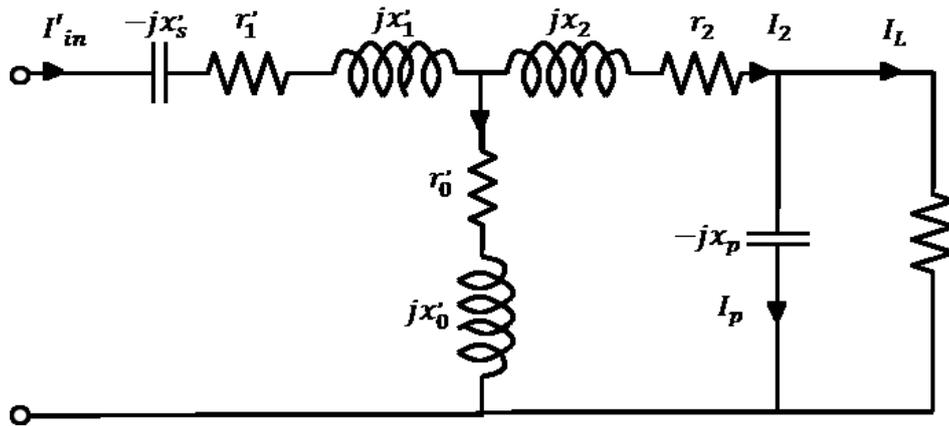
ในส่วนที่สองของงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองออกแบบถึงความเป็นไปได้ในการส่งพลังงานแบบไร้สาย โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านพลังงานด้วยความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร LC จากขดลวดฝั่งส่งไปยังขดลวดฝั่งรับด้วยการออกแบบและสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่เรโซแนนซ์ค่าเดียวกับของ LC แล้วนำไปเชื่อมต่อโหลดความต้านทาน 30 โอห์ม แล้วทดสอบความสามารถในการส่งพลังงานกำลังสูงโดยได้เปลี่ยนค่ากำลังจาก 0-500 วัตต์ เพื่อทดสอบเสถียรภาพว่าระบบสามารถใช้กับระบบทั่วไปได้จริง นอกจากนี้ยังทดสอบเกี่ยวกับระยะเวลาการส่งทั้งแนวตั้งและแนวราบเพื่อหาโมเดลของตำแหน่งเพื่อให้ส่งได้ดีที่สุด นอกจากนี้ในส่วนของการออกแบบขดลวดฝั่งรับและฝั่งส่งได้ใช้ขดลวดชนิดตีเกลียวหลายเส้น (Riz wire) เพื่อลดความสูญเสียอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์กระแสไฟฟ้าวิ่งที่ขอบของขดลวด (Skin effect) ซึ่งช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้น หลังจากส่งผ่านพลังงานได้แล้ว ได้ต่อเชื่อมเข้ากับวงจรเรียงกระแสแล้วกรองสัญญาณแรงดันให้เรียบด้วยตัวเก็บประจุขนาดใหญ่เพื่อส่งให้ระบบการอัดประจุต่อไป

3.2.1 วงจรสมมูลของขดลวดตัวส่ง (Transmitter) และขดลวดตัวรับ (Receiver)



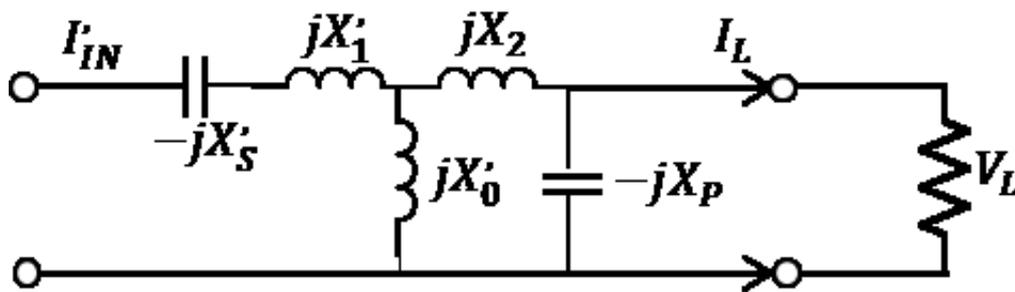
รูปที่ 3.8 วงจรของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

โดยจากรูปวงจรสมมูลของการส่งพลังงานแบบไร้สายจะมีลักษณะเช่นเดียวกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงต่างกันที่วงจรสมมูลแบบไร้สายส่งพลังงานผ่านแกนอากาศทำให้ช่วยลดความสูญเสียอันเนื่องมาจากแกนเหล็ก โดยวงจรสมมูลระหว่างขดลวดตัวส่งและขดลวดตัวรับจะแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

จากรูปที่ 3.9 แสดงวงจรสมมูลอย่างละเอียดของระบบ โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์ เราจะพบว่า ความต้านทานขดลวด (winding resistance, r_1 และ r_2) และความสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite core-loss, r_0) จะมีค่าน้อยมากๆเมื่อเทียบกับความสูญเสียร่วม (Mutual reactance, jx_0') และความสูญเสียรั่วไหล (Leakage reactance, jx_2) เราจึงสามารถวาดวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

เพื่อให้ระบบทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ จึงทำการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน (C_p) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ mutual reactance (x_0') บวกกับ leakage reactance (x_2)

$$\frac{1}{\omega_0 C_p} = x_p = x_0' + x_2 \quad (3.11)$$

ส่วนตัวเก็บประจุที่ต่อต้านขดลวดปฏิกิริยา C_s (C_s คือ การย้ายค่ามาฝั่งขดลวด)

$$\frac{1}{\omega_0 C_s} = X'_s = \frac{x_0 x_2}{x_0 + x_2} + x_1 \quad (3.12)$$

ประสิทธิภาพของวงจร (η)

$$\eta = \frac{R_L I_L^2}{R_L I_L^2 + r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2} = \frac{R_L}{R_L + \frac{r_1}{b^2} + r_2 \left[1 + \left(\frac{R_L}{x_p} \right)^2 \right]} \quad (3.13)$$

โดยวงจรจะเกิดประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อ $R_L = R_{L_{\max}}$

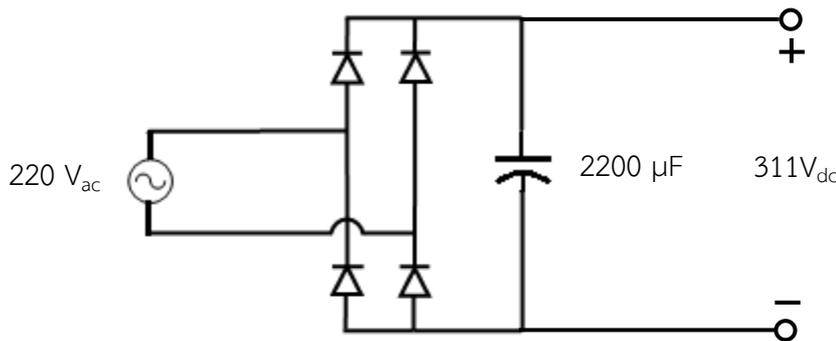
$$R_{L_{\max}} = x_p \sqrt{\frac{1}{b^2} \frac{r_1}{r_2} + 1} \quad (3.14)$$

$$\eta_{\max} = \frac{1}{1 + \frac{2r_2}{x_p} \sqrt{\frac{1}{b^2} \frac{r_1}{r_2} + 1}} \quad (3.15)$$

3.2.2 ส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน ของการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าแบบไร้สาย

3.2.2.1 แหล่งจ่ายพาวเวอร์กระแสตรง

วงจรสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงมีความสำคัญต่อการสร้างสัญญาณความถี่สูง โดยวงจรจะทำการแปลงแรงดันจาก $\sim 220V_{ac}$ เป็น $311V_{dc}$ โดยประกอบด้วยบริดจ์ไดโอดและตัวเก็บประจุ ดังรูป 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรแหล่งจ่ายพาวเวอร์กระแสตรง

3.2.2.2 อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

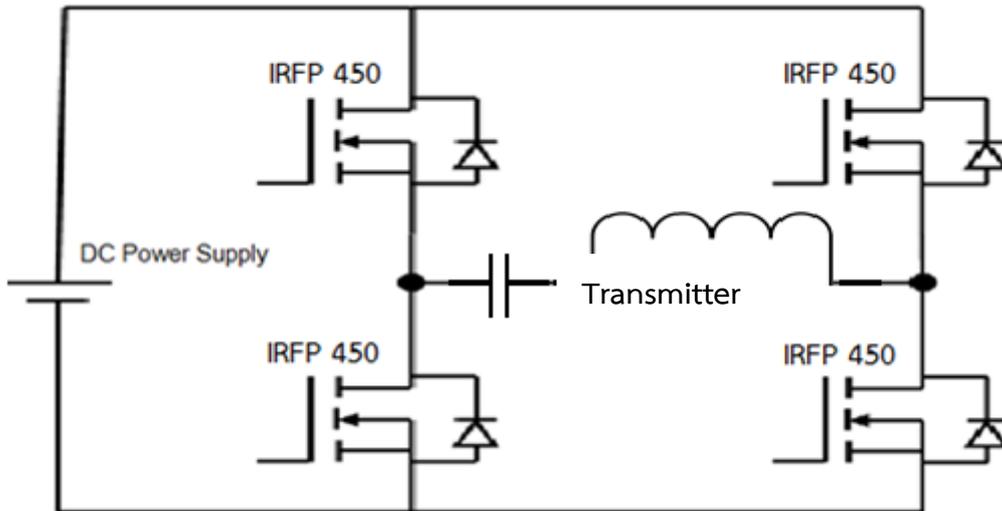
เป็นส่วนที่แปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับเพื่อใช้เป็นตัวสร้างความถี่ (Oscillator) ที่จะจ่ายให้กับขดลวดตัวส่ง (Transmitter) จากการทดลองใช้ขนาดตัวเก็บประจุที่ 180 nF และใช้ขนาดตัวเหนี่ยวนำที่ 0.37 mH โดยความถี่เรโซแนนซ์สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 2.3

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.16)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.37 \times 0.001 \times 180 \times 10^{-9}}}$$

$$f_0 = 19.5 \text{ kHz}$$

โดยเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณความถี่สูงเพื่อใช้ในการขับมอสเฟตในที่นี้จะใช้บอร์ด stm32vldiscovery ในการกำเนิดสัญญาณ และจะใช้ออปโตคัปเปิลทำการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าสำหรับขับขาเกตของมอสเฟตจาก 0, 3.3 โวลต์ที่มาจากบอร์ดไปเป็น -5 , 15 โวลต์ รวมถึงการแยก (Isolated) กราวด์ (GND) ระหว่างบอร์ดอาร์มกับมอสเฟตด้วย เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับบอร์ดหากมีการลัดวงจรโดยวงจรสวิตซ์ซิง (Switching circuit) ที่เลือกออกแบบนำมาใช้เป็นวงจรแบบฟูลบริดอินเวอร์เตอร์ที่สร้างสัญญาณรูปพัลส์ทั้งฝั่งบวกและฝั่งลบดังรูปที่ 3.12 ซึ่งประกอบด้วยมอสเฟตจำนวน 4 ตัว สำหรับสวิตซ์ซิงทิศทางของกระแสไฟฟ้าจากกระแสตรงให้เป็นกระแสสลับซึ่งจะได้รูปสัญญาณเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.12 วงจรอินเวอร์เตอร์

หลักการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

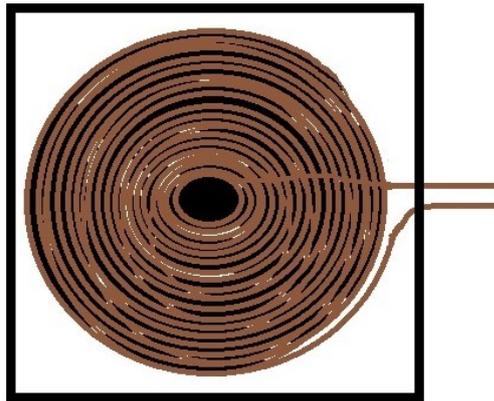
1. หม้อแปลง 220/18 V แบบแท๊ป 1 แอมแปร์
2. ใช้ไอซี 7815 เป็นตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Voltage regulator) ให้จ่ายไฟเลี้ยงกระแสตรงขนาด 5 โวลต์เข้าออปโตคัปเปิล (OPTO TLP250)
3. ใช้ไอซี 7905 เป็นตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Voltage regulator) ให้จ่ายไฟเลี้ยงกระแสตรงขนาด -5 โวลต์เข้าออปโตคัปเปิล (OPTO TLP250)
4. ใช้มอสเฟต (MOSFET IRFP450) เป็นตัวสวิตซ์ซิง
5. ใช้ออปโตคัปเปิล (OPTO TLP250) เป็นตัวขับขาเกต (Gate) ของมอสเฟต
6. ใช้อาร์ม (arm stm32 vldiscovery) เป็นตัวสร้างสัญญาณพัลส์ (PWM) เพื่อสั่งสวิตซ์ซิง

3.2.3 การออกแบบขดลวดตัวส่ง (Transmitter) และขดลวดตัวรับ (Receiver)

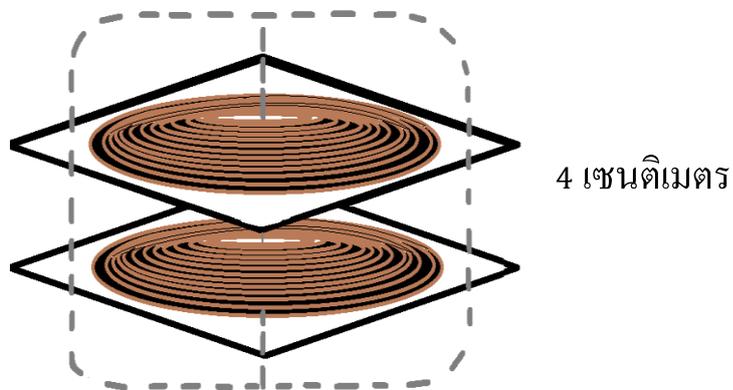
การส่งพลังงานแบบไร้สายจำเป็นต้องใช้ขดลวดในการสร้างฟลักแม่เหล็กโดยขดลวดตัวส่ง (Transmitter) เป็นขดลวดที่ใช้กำเนิดเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อส่งพลังงานไปขดลวดตัวรับ (Receiver) ในที่นี่จะใช้แกนอากาศ (Air) เป็นสื่อกลางในการส่งผ่านพลังงานโดยออกแบบให้ความเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ 0.37 มิลลิเฮนรี่ และต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ 180 นาโนฟารัด เช่นเดียวกับขดลวดของฝั่งรับแต่จะสลับรูปแบบการต่อเป็นต่อตัวเหนี่ยวนำขนานกับตัวเก็บประจุ

3.2.3.1 หลักการออกแบบโครงสร้างของขดลวด

ในการพันขดลวด เพื่อที่จะมีประสิทธิภาพสูงสุดจึงจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงการรั่วไหลของฟลักซ์ให้น้อยที่สุด หากเป็นไปได้จึงควรออกแบบให้พันไปในลักษณะแบนและเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อลดผลของการรั่วไหลของฟลักซ์ เพราะหากออกแบบไปในรูปแบบของทรงกระบอก จะทำให้เกิดการรั่วไหลของฟลักซ์มาก โดยการพันได้ออกแบบไปในลักษณะดังรูปที่ 3.13

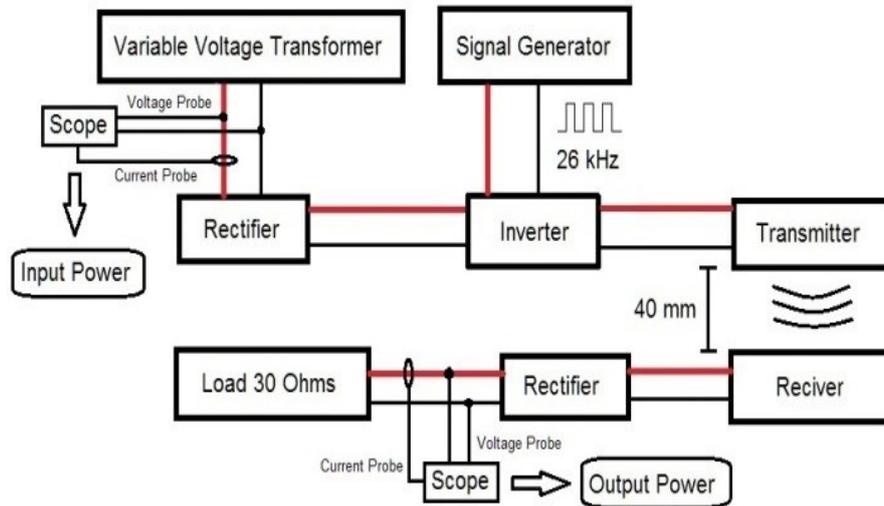


รูปที่ 3.13 การพันขดลวดตัวส่ง (Transmitter) และขดลวดตัวรับ (Receiver)

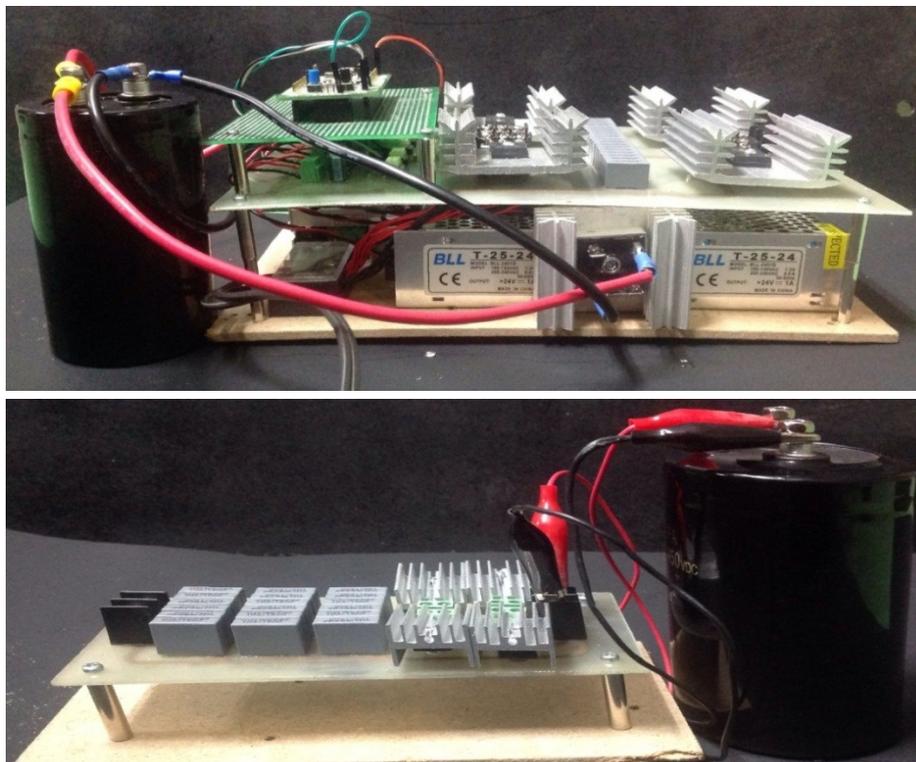


รูปที่ 3.14 ทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างขดลวดส่งและขดลวดรับ

เมื่อทำการออกแบบขดลวดทั้งฝั่งส่งและฝั่งรับ โดยทำการวัดค่าตัวเหนี่ยวนำรวมทั้งเลือกตัวเก็บประจุ จากความถี่ที่ต้องการ หลังจากนั้นทำการรับแรงดันไฟตรงเข้าสู่วงจรฟลูบริดอินเวอร์เตอร์ที่ได้รับสัญญาณขับ สวิตซ์จาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32 ซึ่งสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่เดียวกับความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร LC ที่ได้ทำการออกแบบโดยรูปที่ 3.14 เป็นโครงสร้างการทำงานของระบบและรูปที่ 3.15 เป็นระบบการส่งผ่าน พลังงานไร้สายที่ใช้ทำการทดสอบ

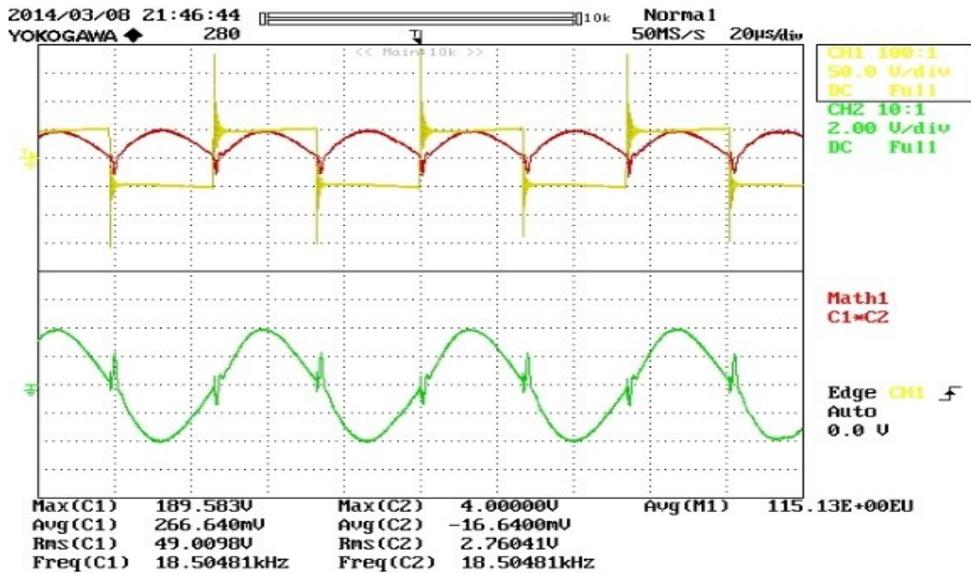


รูปที่ 3.15 โครงสร้างการทำงานของระบบ

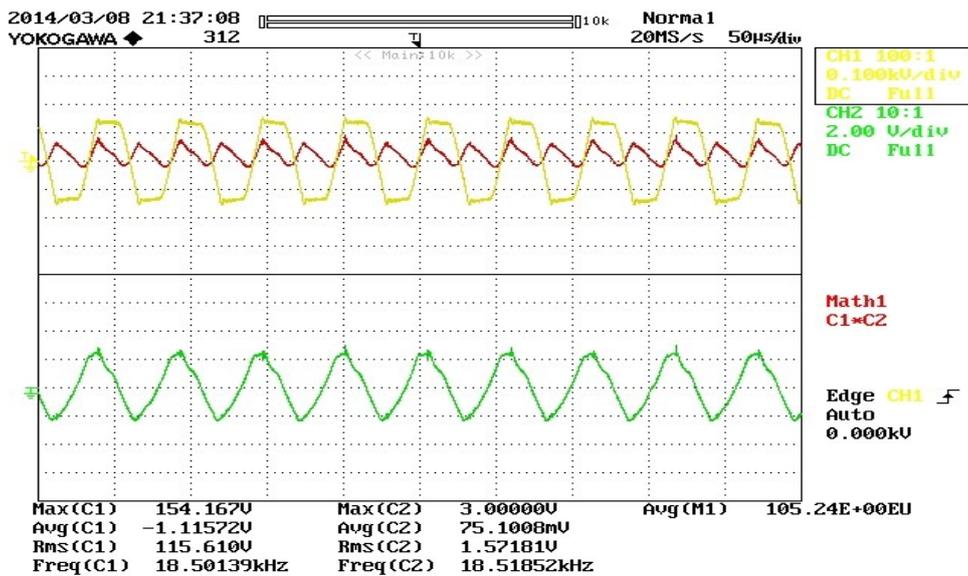


รูปที่ 3.16 ระบบการส่งพลังงานไร้สายจริงที่ใช้ทำการทดสอบ

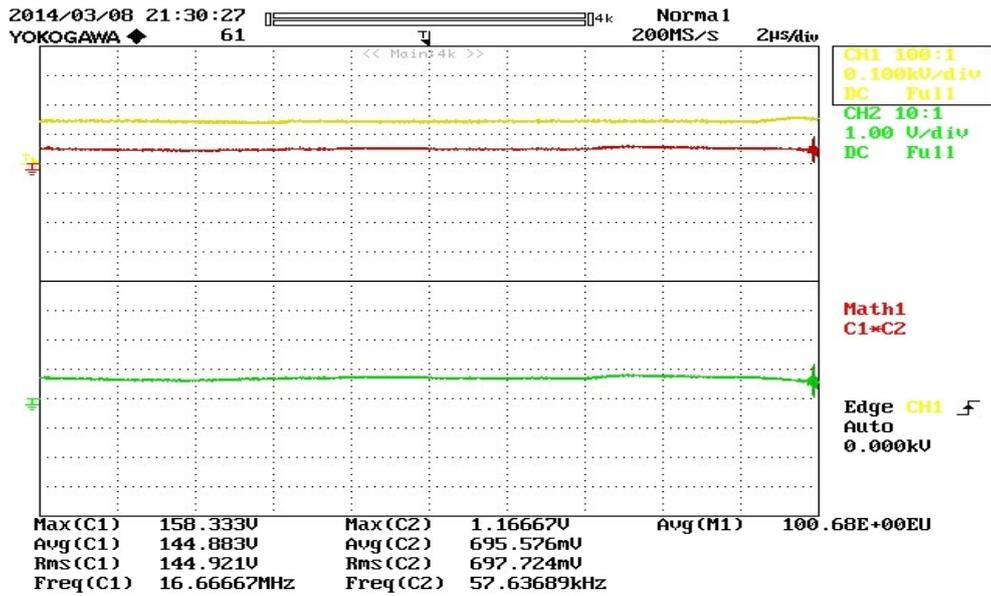
เมื่อนำขดลวดที่ใช้ในการส่งพลังงานไร้สายที่ได้รับการออกแบบไปใช้กับการสร้างสัญญาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันของวงจรฟูลบริดอินเวอร์เตอร์ พบว่าระบบสามารถส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าไร้สายได้อย่างต่อเนื่อง เพื่อทดสอบความสามารถของระบบที่นำเสนอได้ทำการเปลี่ยนพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ส่งตั้งแต่ 100-500 วัตต์ ที่ระยะห่าง 4 เซนติเมตร แล้วทำการเก็บผลการทดสอบลงในตารางที่ 3.2 พบว่าระบบที่ใช้ส่งพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย ยังสามารถส่งผ่านพลังงานได้ดี แต่ที่ 500 วัตต์ เริ่มมีความร้อนเกิดขึ้นที่ขดลวด โดยรูปสัญญาณที่อินเวอร์เตอร์ถูกแสดงดังรูปที่ 3.17 (ก) และรูปสัญญาณที่ขั้วของขดลวดฝั่งรับรวมทั้งสัญญาณที่โหลด แสดงดังรูปที่ 3.17 (ข) และ (ค) ตามลำดับ



(ก)



(ข)



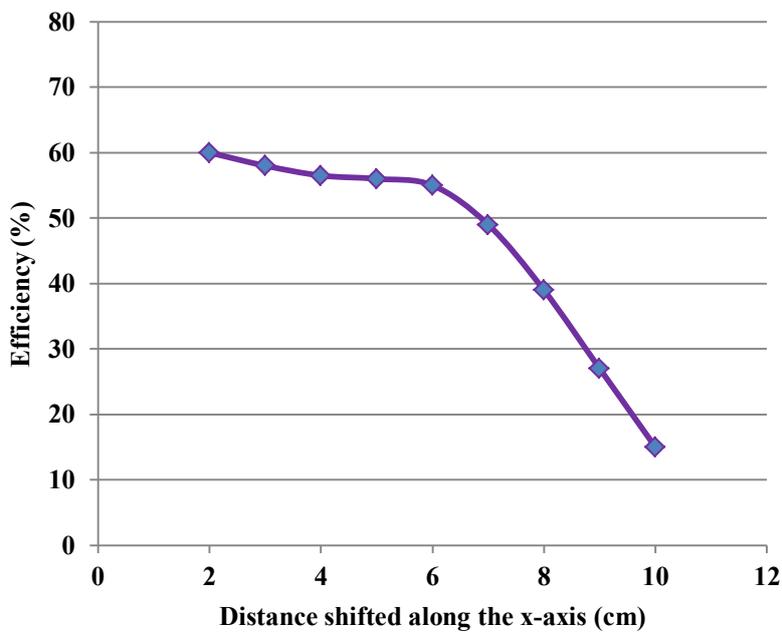
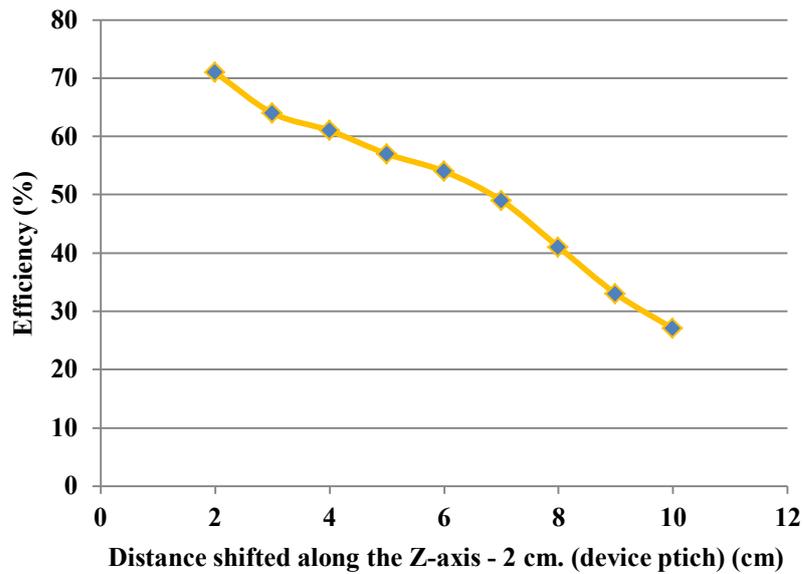
(ค)

รูปที่ 3.17 สัญญาณกระแส, แรงดัน และกำลังไฟฟ้า จากขดลวดฝั่งส่ง (ก)
 สัญญาณกระแส, แรงดัน และกำลังไฟฟ้า จากขดลวดฝั่งรับ (ข)
 และสัญญาณกระแส, แรงดัน และกำลังไฟฟ้า จากโหลดหลอดไฟ (ค)
 ที่กำลังไฟฟ้าขาออก 100 วัตต์ ระยะ 4 เซนติเมตร

ตารางที่ 3.2 ผลการทดลองที่ กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ระยะห่างแกน z 4 เซนติเมตร ณ ความถี่ 19.5 kHz โดยใช้กับโหลด 30 โอห์ม

Input Power (W)	139.38	254.42	388.68	525.36	690.83
Input Voltage (V)	44.0512	59.3019	72.9366	84.3388	96.4829
Input Current (A)	4.27945	5.57655	6.85526	7.98579	9.13074
Output Power DC (W)	100.38	202.95	301.48	403.57	504.18
Output Voltage DC (V)	142.475	223.542	291.287	379.150	433.352
Output Current DC (A)	0.7085	0.91943	1.06206	1.17885	1.2657
Efficiency (%)	72.02	79.77	77.57	76.82	72.98

จากตารางที่ 3.2 พบว่าแม้ว่าพลังงานจะเพิ่มเพียงใดระบบก็ยังสามารถส่งพลังงานเพิ่มได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยคงค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ประมาณ 72-79% เมื่อทำการปรับค่าพิกัดการส่งกำลังไฟฟ้าที่ฝั่งส่งไปตั้งแต่ 139 วัตต์ จนถึง 690 วัตต์ นอกจากนั้นยังทำการปรับค่าระยะห่างในแนวแกนตั้ง รวมทั้งแนวแกนราบเพื่อดูค่าประสิทธิภาพ พบว่าระบบสามารถส่งพลังงานได้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงเดิมตั้งแต่ 3 - 5 เซนติเมตร แต่เมื่อระยะเพิ่มขึ้นอีกจะมีประสิทธิภาพลดต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 3.18 รวมทั้งการหาค่าประสิทธิภาพในแนวแกนตั้ง พบว่าเมื่อระยะในแนวแกนตั้งเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการส่งพลังงานน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ประสิทธิภาพการส่งพลังงานเทียบกับระยะในแนวแกนราบ

สรุปผล

จากผลที่ได้พบว่าระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายที่ได้รับการออกแบบ สามารถส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าได้ดี โดยวิธีการส่งกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่สูงแบบเรโซแนนซ์ ซึ่งสามารถส่งพลังงานได้มากถึง 500 วัตต์ ซึ่งมีประสิทธิภาพคงที่ แม้ว่าจะเปลี่ยนขนาดพิกัดกำลังที่ใช้ตั้งแต่ 100 – 500 วัตต์ก็ตาม นอกจากนี้ ยังศึกษาถึงผลของระบบในแนวแกนต่างๆ โดยทำการเปลี่ยนแปลงในระยะ 3 – 10 เซนติเมตรทั้งสองแกนพบว่าที่ระยะห่างจากขดลวดตัวส่งพลังงานมีผลต่อประสิทธิภาพของวงจร ซึ่งเมื่อระยะห่างมากขึ้นพลังงานก็จะไม่

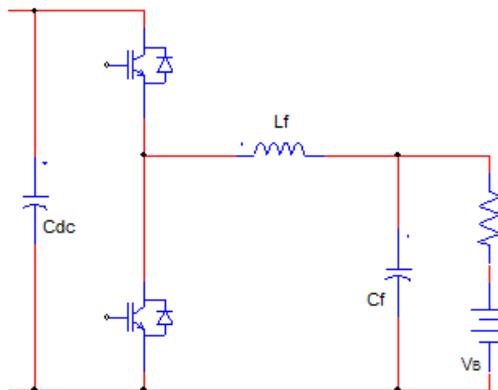
สามารถส่งได้ดีโดยจะลดลงเรื่อยๆ จนไม่สามารถส่งผ่านพลังงานได้ นอกจากนี้ในส่วนของการออกแบบขดลวด ครอบออกแบบด้วยสายตัวนำที่เกลียวเพื่อช่วยลดความสูญเสียอันเนื่องจากปรากฏการณ์ skin effect นอกจากนี้ระบบยังนำวงจรบริดไดโอดความถี่สูงมาใช้ในการปรับสัญญาณให้เป็นสัญญาณกระแสตรง ความถี่สูงพร้อมกรองกระแสให้เรียบเพื่อเตรียมส่งให้ระบบชาร์จแบตเตอรี่ต่อไป

3.3 การออกแบบระบบการอัดประจุแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

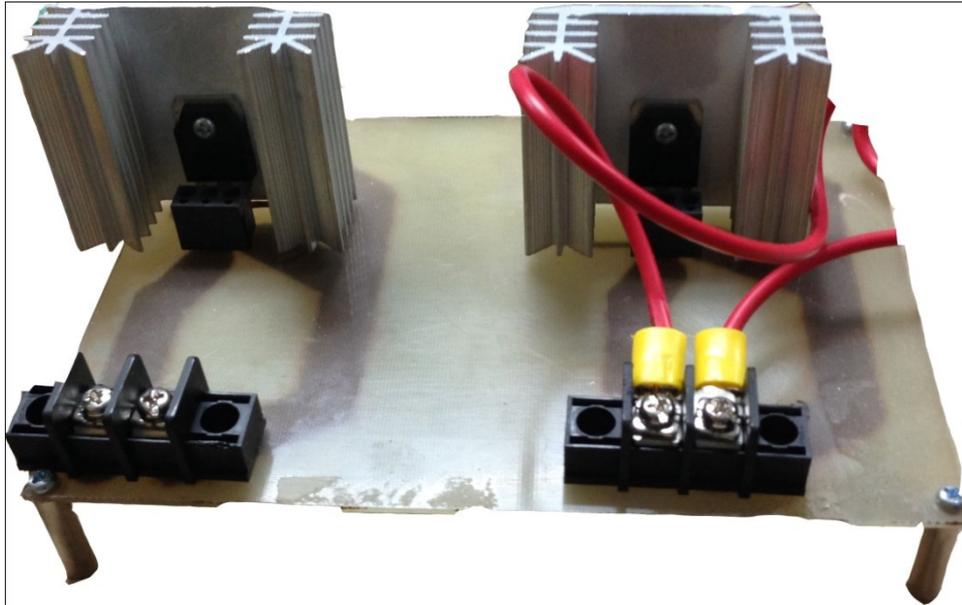
สำหรับในส่วนสุดท้ายนี้จะกล่าวถึงการอัดประจุในรูปแบบการชาร์จต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบระบบ การชาร์จที่ดีที่สุด โดยได้นำเสนอในเทคนิคการชาร์จแบบคงที่แรงดันคงที่กระแส, การชาร์จแบบพัลส์ และการ ชาร์จแบบดิสชาร์จ เพื่อทดสอบการทำงานรวมทั้งประสิทธิภาพและความเร็วในการอัดประจุ นอกจากนี้จะ อธิบายในส่วนของการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ ซึ่งจะประกอบด้วยสอง ส่วนหลักๆคือ ส่วนของวงจรกำลัง (Power Circuit) และส่วนของวงจรควบคุม (Control Circuit) โดยอาศัย ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ในการควบคุม

3.3.1 การออกแบบวงจร ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องชาร์จแบบพัลส์ (Pulse Charge)

การออกแบบสำหรับการชาร์จแบบพัลส์นั้นมีหลักการการทำงานแบบบักคอนเวอร์เตอร์ โดยรับ แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ดังรูปที่ 3.19 และ 3.20 การชาร์จแบบพัลส์จะใช้โหมด การทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Current Mode) ดังนั้น การออกแบบจะเลือกค่าความ เหนี่ยวนำและขนาดของตัวเก็บประจุให้มีความเหมาะสม เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านเอาต์พุต เป็นแบบพัลส์ สำหรับการชาร์จแบตเตอรี่



รูปที่ 3.19 วงจร ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องอัดประจุแบบพัลส์



รูปที่ 3.20 ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องอัดประจุแบบพัลส์

ในการออกแบบวงจร ให้แรงดันด้านอินพุตเท่ากับแรงดันที่ดีซีลิงค์ เท่ากับ 155 โวลต์ และต้องการแรงดันเข้าแบตเตอรี่เท่ากับ 48 โวลต์ โดยนำแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ขนาด 12 โวลต์ 4 ลูกมาต่ออนุกรมกัน จึงต้องเลือกใช้แรงดันด้านออกสำหรับชาร์จแบตเตอรี่เท่ากับ 56 โวลต์เนื่องจากในการชาร์จจะต้องให้แรงดันเข้าแบตเตอรี่เซลล์ละ 2.15 โวลต์ จึงเท่ากับ $2.15 \times 48 = 56$ โวลต์ และความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์มีค่าเท่ากับ 31.25 กิโลเฮิร์ต โดยจำกัดกระแสชาร์จไว้ที่ 2 แอมป์ จากสมการ

$$D = \frac{V_o}{V_s}$$

$$= \frac{56 \text{ V}}{155 \text{ V}}$$

$$= 0.36$$

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวงจรการชาร์จแบตเตอรี่แบบพัลส์ โดยค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรจะต้องมีการเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน สามารถหาได้จากสมการ

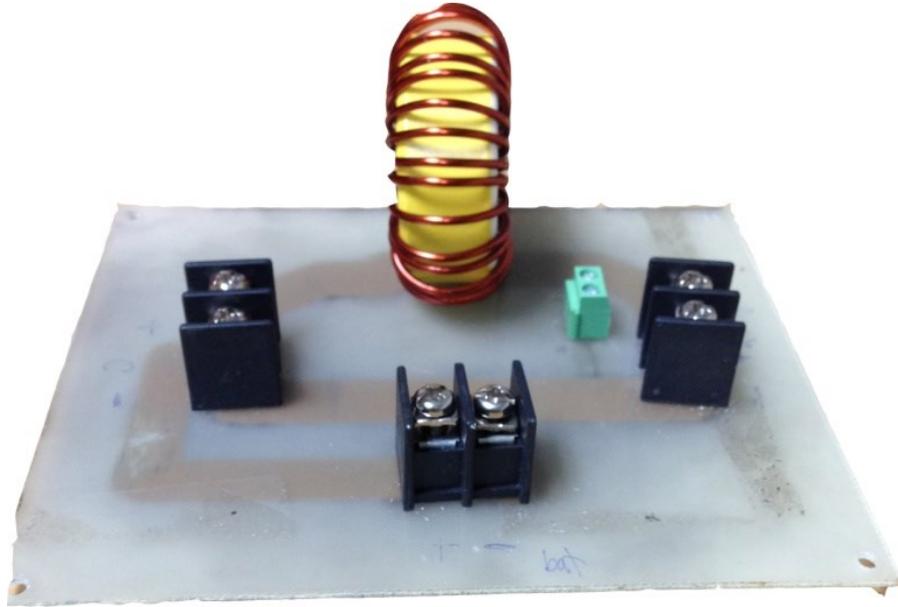
$$L_{min} = \frac{1-D}{2f} \times \frac{V_o}{I_o}$$

$$= \frac{1-0.36}{2 \times (31.25 \times 10^3)} \times \frac{56}{2}$$

$$= 288 \mu\text{H}$$

ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้จึงควรเลือกใช้ค่าต่ำกว่า 288 ไมโครเฮนรี่ เพื่อให้การทำงานอยู่ช่วงกระแสไม่ต่อเนื่อง สำหรับค่าของตัวเก็บประจุก็ควรที่จะมีค่าต่างๆ เพื่อให้ลักษณะการชาร์จเป็นแบบพัลส์ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 100 ไมโครเฮนรี่ และค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 90 ไมโครฟารัด

จะเห็นได้ว่าเทคนิคการชาร์จแบบพัลส์นั้น จะต้องเลือกค่าความเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมีค่าน้อยๆ และเหมาะสม เพื่อให้กระแสที่ไหลอยู่ในช่วงการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง

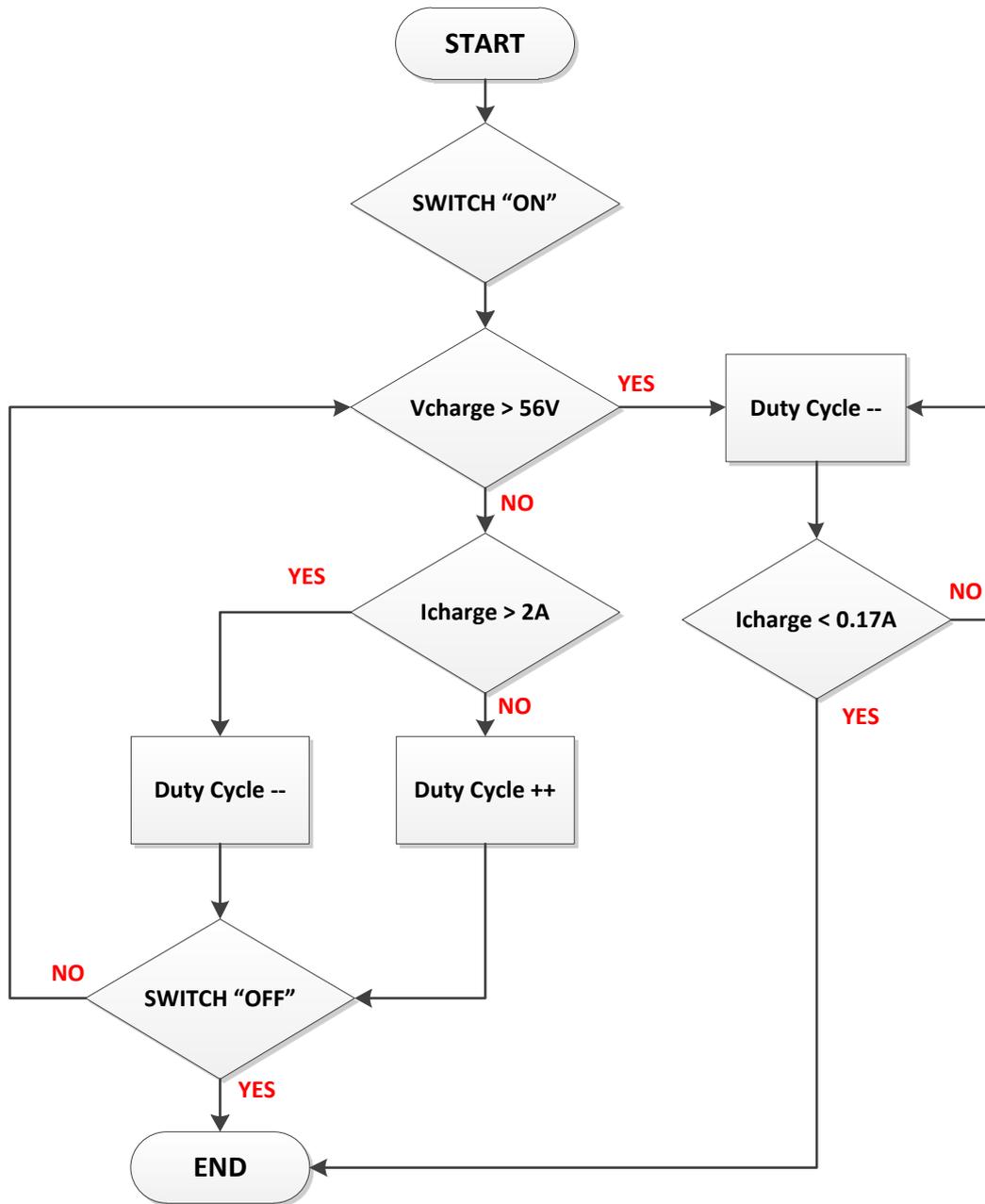


รูปที่ 3.21 ตัวเหนี่ยวนำ 100 ไมโครเฮนรี่ของวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องอัดประจุแบบพัลส์

การออกแบบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฮบริดจ์ โดยงานวิจัยนี้จะเลือกใช้การชาร์จแบบพัลส์ โดยจะจำกัดกระแสชาร์จไม่ให้เกิน 8 แอมป์ อาศัยการทำงานของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ 1 ชุดโดยให้โหมดการทำงานเป็นแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง วงจรควบคุมจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสร้างสัญญาณสวิทช์ที่นำไปขับขาเกต โดยวิธีการชาร์จจะใช้วิธีการตามผังการทำงานทั้งสองรูปแบบ ดังรูปที่ 3.22 และ 3.23

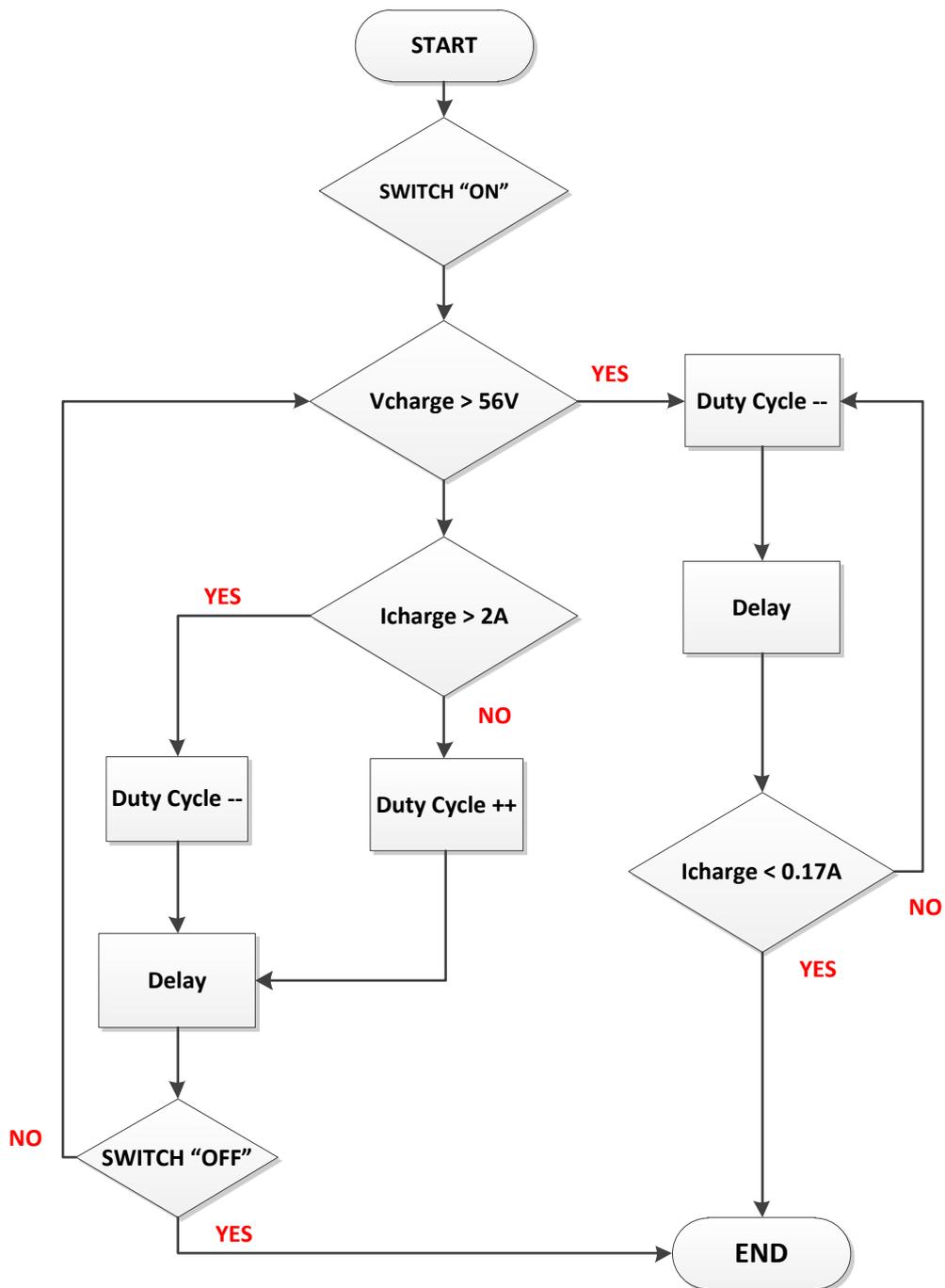
3.3.2 ผังการทำงาน (Flow Chart)

3.3.2.1 การทำงานในโหมดการชาร์จแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่โดยจำกัดกระแสชาร์จ



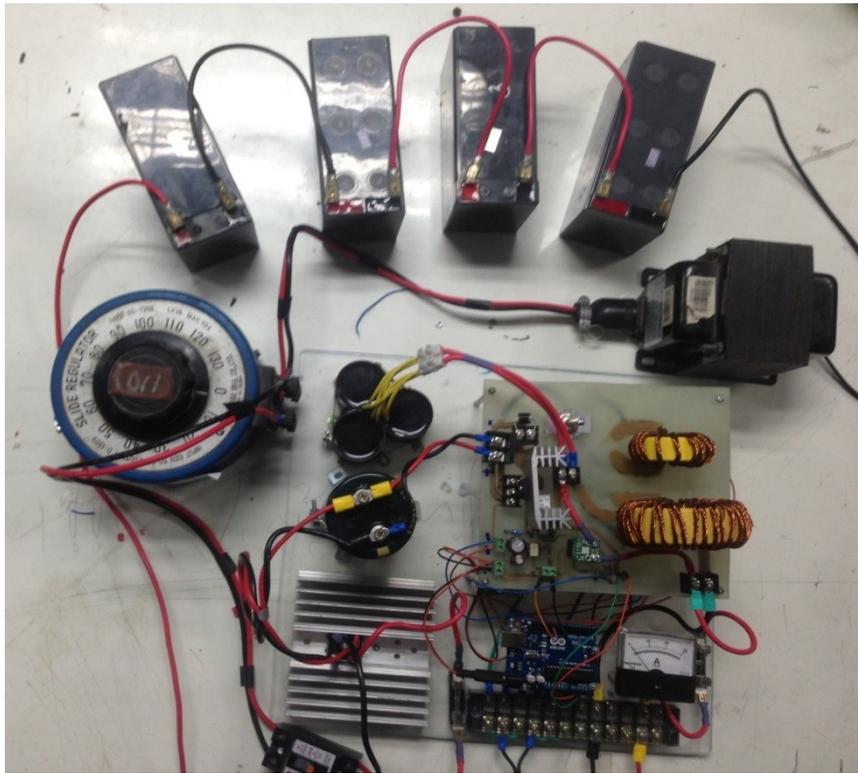
รูปที่ 3.22 ผังการทำงานในโหมดการชาร์จแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่โดยจำกัดกระแสชาร์จ

3.3.2.2 การทำงานในโหมดการชาร์จแบบพัลส์



รูปที่ 3.23 ผังการทำงานในโหมดการชาร์จแบบพัลส์

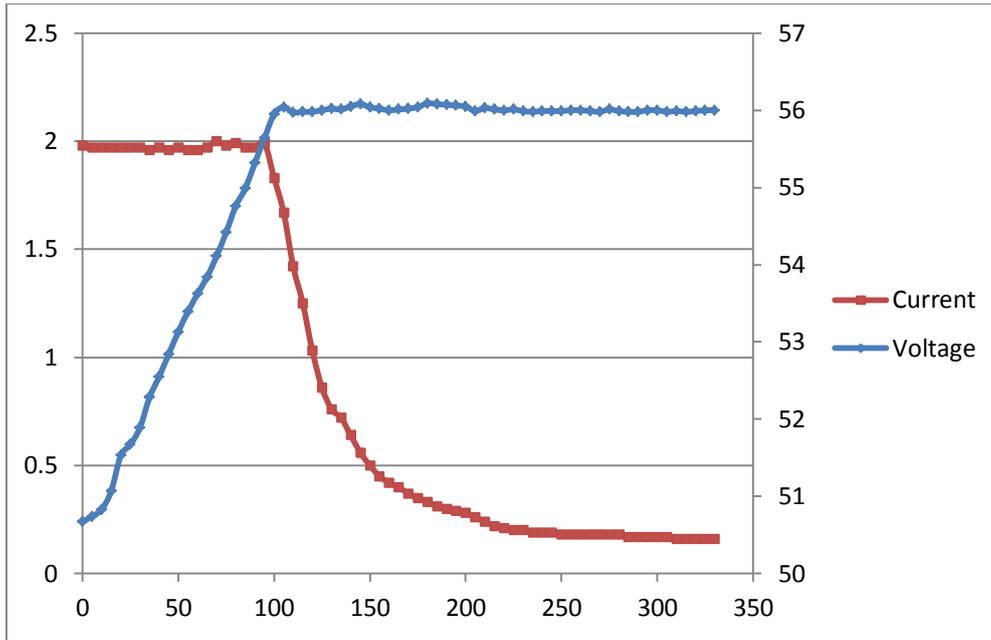
3.3.3 ผลการทดสอบการอัดประจุ



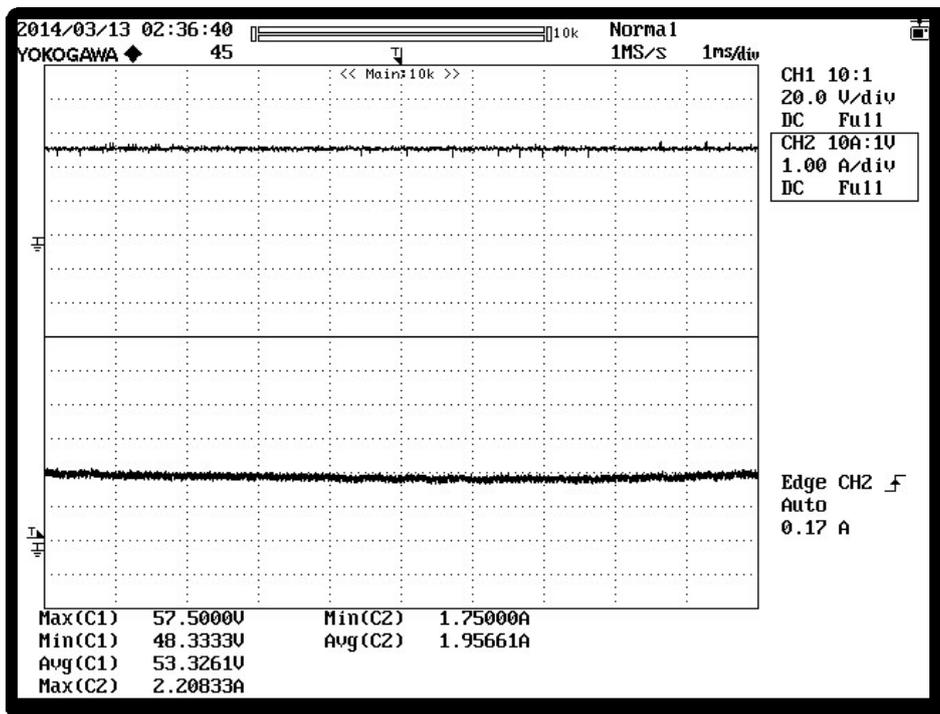
รูปที่ 3.24 เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ต้นแบบ

3.3.3.1 ผลการทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยแรงดันคงที่แบบจำกัดกระแสชาร์จ

การชาร์จแบบนี้จะแบ่งการช่วงออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแรกจะชาร์จแบบจำกัดกระแสชาร์จของแบตเตอรี่ไม่เกิน 8 แอมป์ หรือตามคุณลักษณะของแบตเตอรี่นั้นๆ ช่วงที่สองเมื่อแรงดันของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 56 โวลต์ จะเปลี่ยนโหมดการทำงานมาเป็นการชาร์จแบบแรงดันคงที่ที่ 56 โวลต์โดยค่ากระแสชาร์จของแบตเตอรี่จะมีค่าน้อยกว่า 2 แอมป์ในการชาร์จช่วงที่สอง

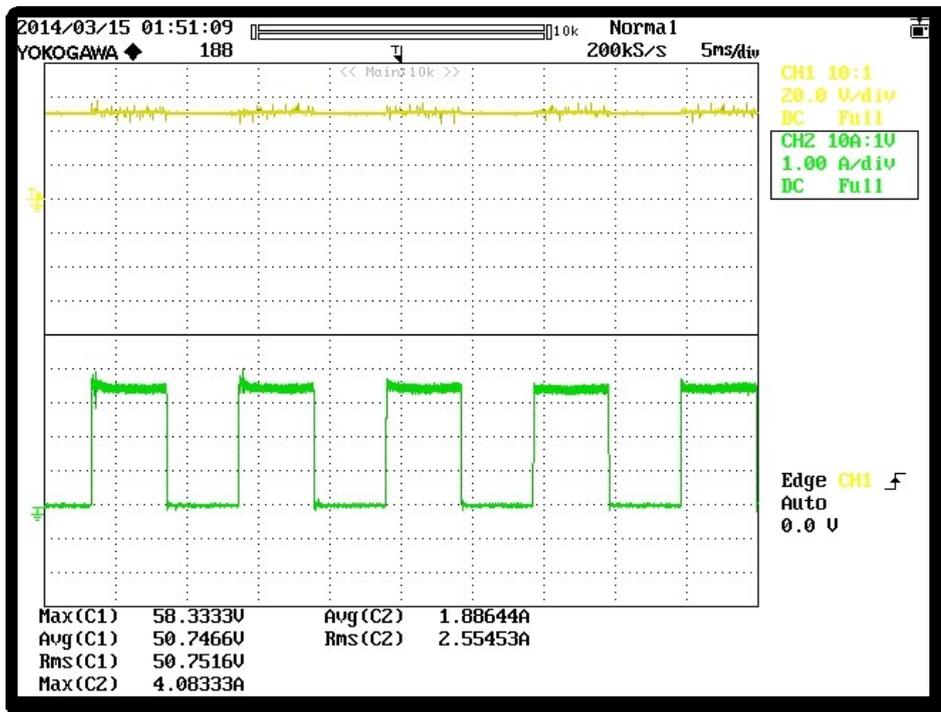


รูปที่ 3.25 คุณลักษณะการชาร์จแบตเตอรี่ ด้วยแรงดันคงที่แบบจำกัดกระแสชาร์จ

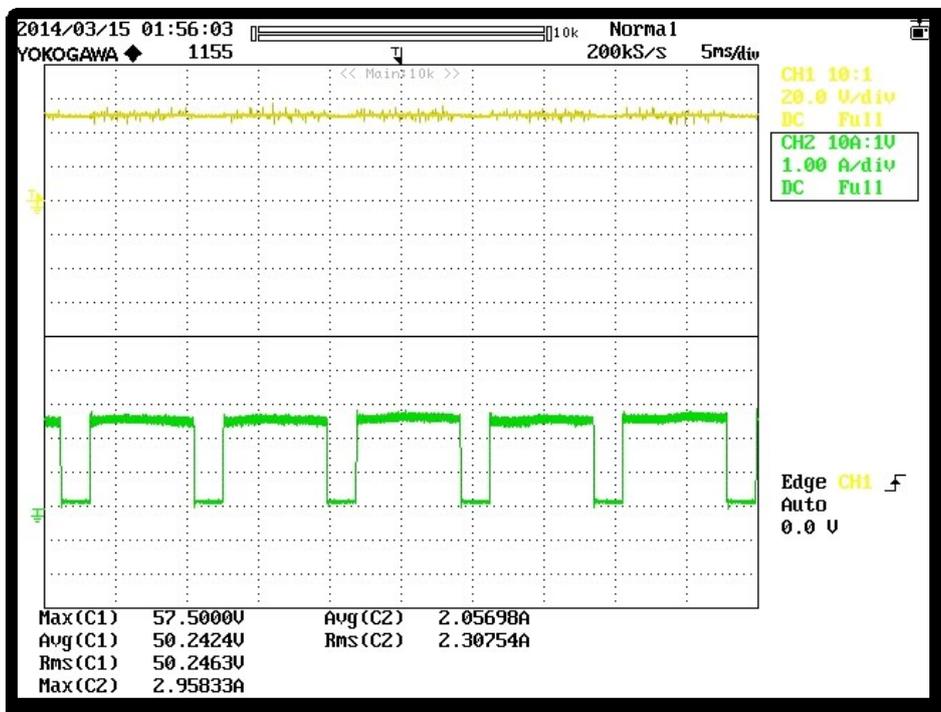


รูปที่ 3.26 แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ และ กระแสชาร์จแบตเตอรี่ ด้วยแรงดันคงที่แบบจำกัดกระแสชาร์จ

3.3.3.2 ผลการทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยการชาร์จแบบพัลส์

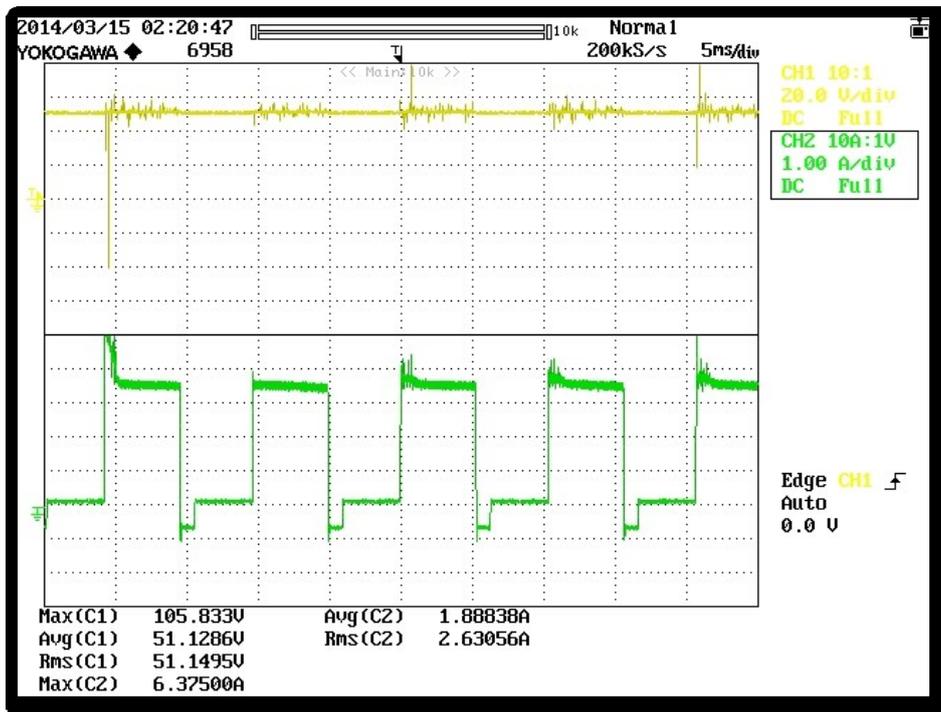


รูปที่ 3.27 แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ และ กระแสชาร์จแบตเตอรี่
(ความถี่ 100 Hz และ Duty Cycle = 0.5 ที่กระแสชาร์จเฉลี่ย 2 แอมป์)



รูปที่ 3.28 แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ และ กระแสชาร์จแบตเตอรี่
(ความถี่ 100 Hz และ Duty Cycle = 0.75 ที่กระแสชาร์จเฉลี่ย 2 แอมป์)

3.3.3 ผลการทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยการชาร์จแบบพัลส์แบบมีการดิสชาร์จ



รูปที่ 3.29 แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ และ กระแสชาร์จแบตเตอรี่
(ความถี่ 100 Hz และ Duty Cycle = 0.5 ที่กระแสชาร์จเฉลี่ย 2 แอมป์)



รูปที่ 3.30 แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ และ กระแสชาร์จแบตเตอรี่
(ความถี่ 100 Hz และ Duty Cycle = 0.75 ที่กระแสชาร์จเฉลี่ย 2 แอมป์)

3.3.4 เปรียบเทียบคุณลักษณะการอัดประจุแบตเตอรี่ระหว่างแรงดันคงที่แบบจำกัดกระแสชาร์จและแบบพัลส์และพัลส์ดิสชาร์จ

เปรียบเทียบผลของการชาร์จแบตเตอรี่ระหว่างวิธีการชาร์จแบบแรงดันคงที่โดยจำกัดกระแสชาร์จและการชาร์จแบบพัลส์ ให้ได้ผลดีที่สุด ต้องหารูปแบบการชาร์จที่เหมาะสม จากการทดลองจะเลือกใช้ความถี่เท่ากับ 100 Hz, 200 Hz และ ดิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 0.5 และ 0.75 เมื่อทำการเปรียบเทียบความถี่ 200 Hz โดยการเปลี่ยนค่าดิวตี้ไซเคิลเป็น 0.5 และ 0.75

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบผลการชาร์จแบบจำกัดกระแสชาร์จและแบบพัลส์ที่กระแสชาร์จเฉลี่ย 2 แอมป์ที่ความถี่ 100 Hz

Condition		Time (Minutes)
Frequency (Hz)	Duty Cycle	
100	0.5	270
100	0.75	240
CCCV		300

จากตารางที่ 3.3 พบว่าการชาร์จแบบพัลส์มีระยะเวลาการชาร์จน้อยกว่าการชาร์จแบบจำกัดกระแสชาร์จและการชาร์จแบบพัลส์ที่ค่าดิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 0.75 มีระยะเวลาการชาร์จน้อยกว่าการชาร์จแบบพัลส์ที่ค่าดิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 0.5

ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบผลการชาร์จแบบพัลส์ที่กระแสชาร์จเฉลี่ย 2 แอมป์ที่ดิวตี้ไซเคิลที่ 0.75

Condition		Time (Minutes)
Frequency (Hz)	Duty Cycle	
100	0.75	240
200	0.75	200

จากตารางที่ 3.4 พบว่าการชาร์จแบบพัลส์ที่ดิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 0.75 ที่ความถี่ 200 เฮิรท์ มีระยะเวลาการชาร์จน้อยกว่าความถี่ 100 เฮิรท์ ที่ดิวตี้ไซเคิลเท่ากัน

ตารางที่ 3.5 เปรียบเทียบผลการชาร์จแบบพัลส์แบบดิสชาร์จที่กระแสชาร์จเฉลี่ย 2 แอมป์

Condition		Time (Minutes)
Frequency (Hz)	Duty Cycle	
100	0.5	270
100	0.75	260

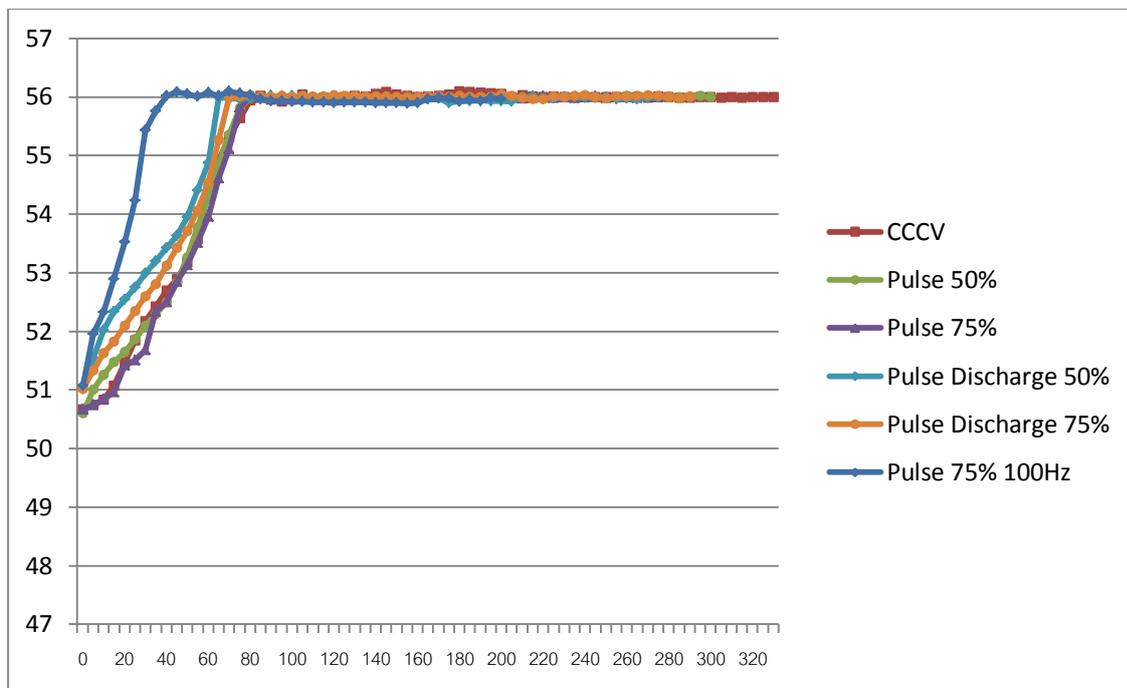
จากตารางที่ 3.5 พบว่าการชาร์จแบบพัลส์ที่ดิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 0.75 ที่ความถี่ 100 Hz มีระยะเวลาการชาร์จน้อยกว่าความถี่ 0.5 ที่ดิวตี้ไซเคิลเท่ากัน

ตารางที่ 3.6 เปรียบเทียบผลการชาร์จแบบพัลส์และแบบพัลส์ดิสชาร์จที่กระแสชาร์จเฉลี่ย 2 แอมป์

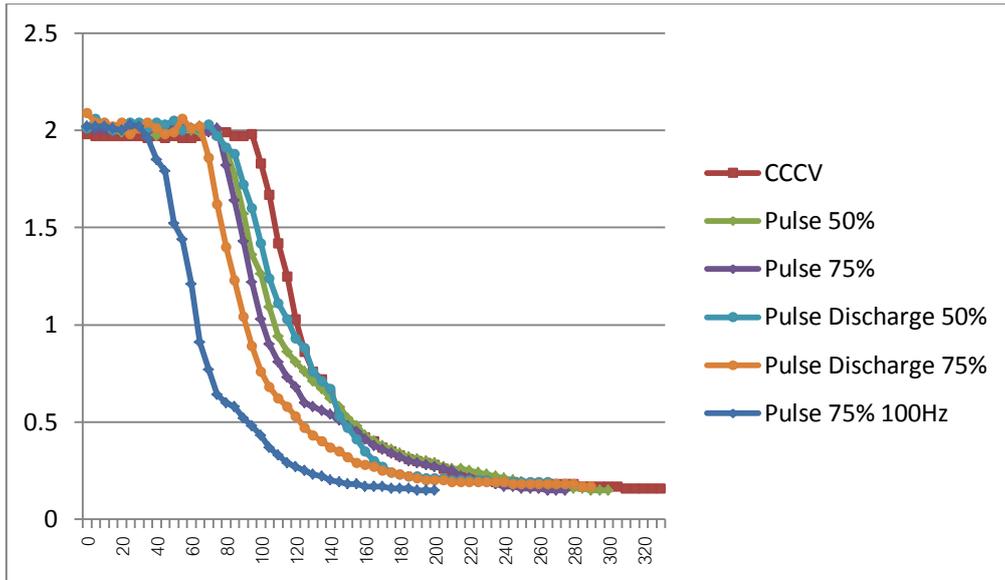
Condition			Time (Minutes)
	Frequency (Hz)	Duty Cycle	
Pulse	100	0.75	240
Pulse Discharge	100	0.75	260

จากตารางที่ 3.6 พบว่าการชาร์จแบบพัลส์มีระยะเวลาการชาร์จน้อยกว่าการชาร์จแบบพัลส์แบบมีการดิสชาร์จ ที่ความถี่ 100 Hz และดิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 0.75

เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพการชาร์จในแต่ละรูปแบบ รูปที่ 3.32 และ 3.33 ได้ทำการเปรียบเทียบคุณลักษณะใน 2 รูปแบบคือ คุณลักษณะทางด้านแรงดัน และคุณลักษณะทางด้านกระแส ซึ่งสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าการชาร์จแบบพัลส์ที่ความถี่ 200 Hz ดิวตี้ 75% สามารถอัดประจุได้รวดเร็วที่สุดในขณะที่การชาร์จรูปแบบอื่นมีลักษณะใกล้เคียงกัน



รูปที่ 3.31 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะทำการชาร์จระหว่างแบบแรงดันคงที่ โดยจำกัดกระแสชาร์จและการชาร์จแบบพัลส์



รูปที่ 3.32 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะทำการชาร์จระหว่างแบบแรงดันคงที่ โดยจำกัดกระแสชาร์จและการชาร์จแบบพัลส์

สรุปผล

จากผลที่ทำการทดสอบในรูปแบบการอัดประจุในหลากหลายรูปแบบ พบว่าการชาร์จแบตเตอรี่ต้องคำนึงถึงวิธีการชาร์จเป็นหลัก และปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งเรื่องของ อุณหภูมิขณะการชาร์จ ปริมาณกระแสที่ใช้ชาร์จ สำหรับการชาร์จแบบพัลส์ยังต้องคำนึงถึงค่าความถี่ และคาบเวลาของการชาร์จอีกด้วย โดยรูปแบบการชาร์จแบบพัลส์ที่ความถี่สูง จึงถูกเลือกใช้ในการอัดประจุของแบตเตอรี่รีไซเคิลในโครงการวิจัยนี้ เนื่องจากการอัดประจุได้รวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับการชาร์จในรถยนต์พลังงานไฟฟ้า ทำให้สะดวกและไม่เสียเวลามาก

3.4 อินเวอร์เตอร์ฟลายแบ็คเชื่อมต่อกิต

3.4.1 พิกัดอุปกรณ์ของอินเวอร์เตอร์

3.4.1.1 พิกัดกำลังของวงจรฟลายแบ็คอินเวอร์เตอร์

จากหัวข้อที่ 2.6 การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กของหม้อแปลงความถี่สูง [7] เมื่อ $P = 100$ วัตต์ และ $V_{ac,rms}^2 = 220^2$ แทนลงในสมการที่ 2.19 จะคำนวณหาค่า

$$g_s = 2.06612 \times 10^{-3}$$

$$\text{กำหนดให้ } \lambda = \frac{V_{dc}}{V_{ac,p}} = \frac{17}{311} = 0.0546623 \text{ และ } n = \frac{N_p}{N_s} = 0.5$$

เมื่อแทนลงในสมการที่ 2.21 จะได้ค่าความสัมพันธ์คือ

$$\frac{g_s}{g_L} = 1.21403 \times 10^{-3}$$

นำค่า g_s ไปแทนสมการที่ 3.1 จะได้ค่า

$$g_L = 1.701869$$

จากสมการที่ 2.16 แทนค่า $g_L = 1.701869$ และ $f_s = 27\text{kHz}$

$$L_m = 21.76\mu\text{H}$$

ดังนั้นถ้าต้องการพิกัดกำลังของวงจรถ่ายแบบอินเวอร์เตอร์ 100 วัตต์ จะต้องใช้ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก 21.76 ไมโครเฮนรี่

3.4.1.2 พิกัดกระแสไฟฟ้าของวงจรถ่ายแบบอินเวอร์เตอร์

จากหัวข้อที่ 2.4 การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กของหม้อแปลงความถี่สูงจากสมการที่ 2.47

$$I_{dc,avg} = \frac{1}{4} g_L d_p^2 V_{dc}$$

เมื่อแทนค่า $g_L = 1.701869$, $d_p \leq \frac{1}{1 + \frac{0.0546623}{0.5}} \leq 0.901449$ และ $V_{dc} = 17V$

$$I_{dc,avg} = 5.87\text{A}$$

และรวมสมการที่ 2.35, 2.42 และ 2.47 จะได้ความสัมพันธ์คือ

$$\frac{I_{dc,peak}}{I_{dc,avg}} = 4 \left(1 + \frac{\lambda}{n} \right)$$

เมื่อแทน $I_{dc,avg} = 5.87756$ แอมแปร์ ลงในสมการที่ 3.2 จะได้ค่า

$$I_{dc,peak} = 26.08049\text{A}$$

3.4.1.3 ขนาดพิกัดของตัวสวิตช์

จากค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่คำนวณได้คือ 26.08049 แอมแปร์ ดังนั้นเราจึงเลือกใช้อุปกรณ์สวิตช์ในด้านปฐมภูมิดังนี้ อุปกรณ์สวิตช์ปฐมภูมิ มอสเฟต เบอร์ IRFP260 พิกัดแรงดัน 200 โวลต์ พิกัดกระแส 50 แอมแปร์ อุปกรณ์สวิตช์ด้านทุติยภูมิ ไอจีบีที เบอร์ GW30NC80W พิกัดแรงดัน 800 โวลต์ พิกัดกระแส 30

แอมแปร์ หลักการที่เลือกใช้อุปกรณ์ตามนี้เนื่องจากเพื่อให้อุปกรณ์มีความทนทานสามารถรองรับกระแสไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดได้

3.4.1.4 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงโดยวิธีผลคูณพื้นที่ [7] ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แกนเหล็กชนิดแกนเฟอร์ไรต์ซึ่งเป็นแกนแม่เหล็กสำหรับคอนเวอร์เตอร์สวิตซิ่งความถี่สูง ซึ่งมีค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กอิ่มมีค่าประมาณ 0.3 เทสลา จากสมการผลคูณพื้นที่ของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์จะได้ค่า A_p ดังสมการที่ 3.3

$$A_p = \frac{P_o \left(\frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{4d_p}{3}} + \sqrt{\frac{4(1-d_p)}{3}} \right)}{JK_w B_m f_s} \quad (3.3)$$

โดยที่ $A_p = A_c \times A_w$

เมื่อ A_c หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของแกน

A_w หมายถึง พื้นที่ภายในกรอบว่างของแกน

P_o หมายถึง กำลังไฟฟ้าทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์

η หมายถึง ประสิทธิภาพของหม้อแปลง

J หมายถึง ค่าความหนาแน่นกระแสโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 3.5-5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

K_w หมายถึง window utilization factor โดยทั่วไปมีค่าอยู่ที่ 0.3-0.4

B_m หมายถึง ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ที่ 0.2 เทสลา

F_s หมายถึง ความถี่สวิตซิ่ง

ดังนั้นจะคำนวณหาค่า

$$A_p = \frac{100 \left(\frac{1}{0.7} \sqrt{\frac{4(0.9)}{3}} + \sqrt{\frac{4(1-0.9)}{3}} \right)}{(3.5)(0.35)(10^6)(0.2)(27 \times 10^3)}$$

$$A_p = 2.917 \times 10^{-8} m^4$$

จากค่า A_p ข้างต้นจะนำไปพิจารณาในการเลือกแกน โดยเลือกแกนที่มีค่า A_p มากกว่าที่คำนวณได้จากตารางภาคผนวก ง. ตารางผลคูณพื้นที่แกนเฟอร์ไรต์ จะเลือกแกนชนิด EE42/21/15 ซึ่งมีค่า $A_p = 2.917 \times 10^{-8} m^4$ และ $A_c = 1.82 \times 10^{-4} m^2$ การคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดสามารถคำนวณได้จาก

$$N_1 = \frac{d_p V_{dc}}{A_c B_m f_s} \quad (3.4)$$

โดย N_1 คือ จำนวนรอบของขดลวดที่พันอยู่บนแกนแม่เหล็กซึ่งได้ค่า

$$N_1 = \frac{(0.9)(0.7)}{(1.82 \times 10^{-4})(0.2)(27 \times 10^3)}$$

ดังนั้นจำนวนรอบของขดลวดที่พันอยู่บนแกนแม่เหล็กจำนวน 15 รอบ จากค่าอัตราส่วนรอบของหม้อแปลง $n = 0.5$ ดังนั้นจะได้ว่า $N_2 = 30$ รอบ การคำนวณหาความยาวช่องว่างอากาศสามารถคำนวณได้จาก

$$l_g = \frac{\mu_0 N_1^2 A_c}{L_m} \quad (3.5)$$

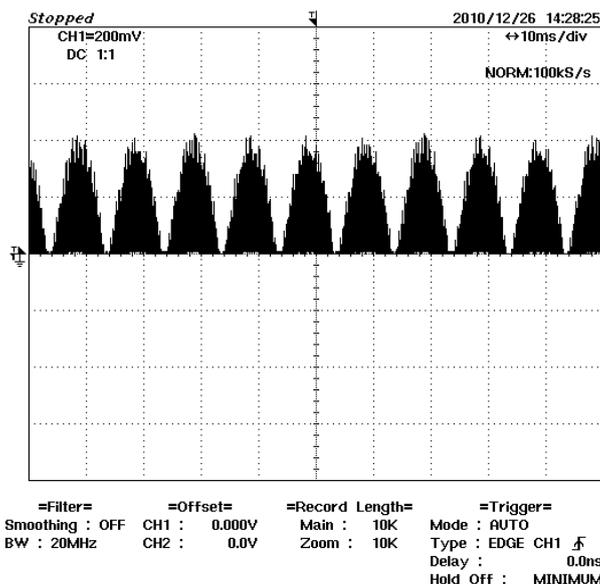
โดย l_g คือ ความยาวช่องว่างอากาศ

$$l_g = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(15^2)(1.82 \times 10^{-4})}{21.76 \times 10^{-6}}$$

$$l_g = 2.4504 \times 10^{-3} m = 2.4504 mm$$

3.4.2 ผลการเชื่อมต่อระบบกริด

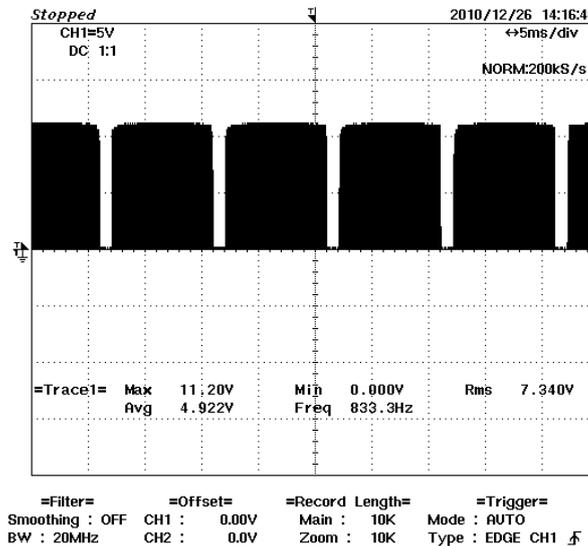
3.4.2.1 สัญญาณกระแสต้านปฏิกิริยาของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง



รูปที่ 3.33 สัญญาณกระแสต้านปฏิกิริยาของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าความถี่สูง (20 A/div)

จากการทดลองวัดสัญญาณกระแสต้านปฐมภูมิของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าความถี่สูง มีลักษณะสัญญาณเป็นรูปแบบสัญญาณแอมป์ชูลูทไซน์

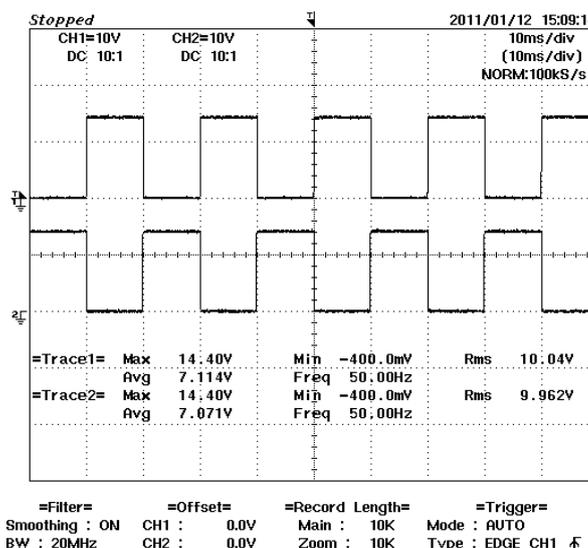
3.4.3 สัญญาณนำขั้วสวิตซ์ด้านปฐมภูมิ



รูปที่ 3.34 สัญญาณนำขั้วสวิตซ์ด้านปฐมภูมิ (10 V/div)

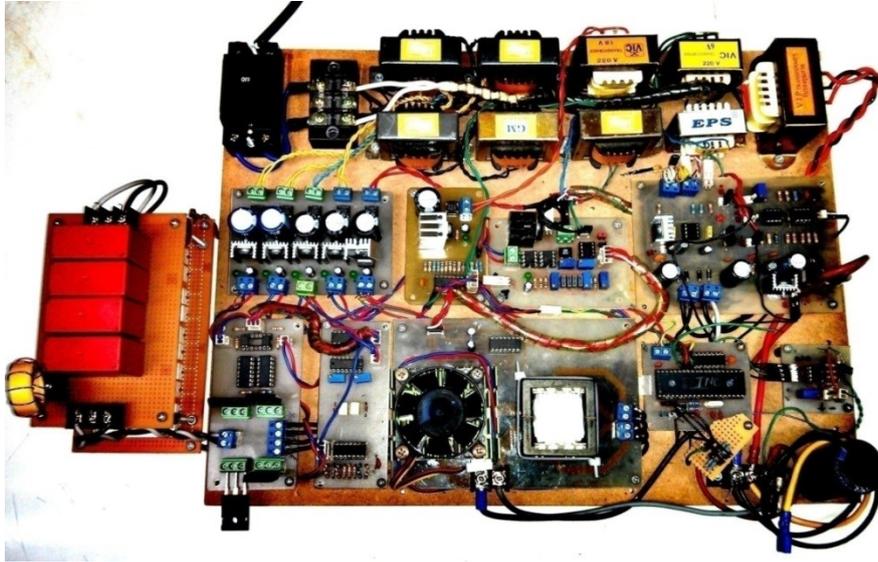
จากการทดลองวัดสัญญาณขั้วสวิตซ์ด้านปฐมภูมิรูปมีลักษณะเป็นสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มที่สวิตซ์ซึ่งด้วยความถี่ 27 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งเกิดจากการมอดดูเลชันของสัญญาณสามเหลี่ยมและสัญญาณแอมป์ชูลูทไซน์ ดังนั้นจากการเปรียบเทียบของทั้ง 2 สัญญาณนั้น ถ้าออสซิลโลสโคปมีการปรับ Time/Div ต่ำจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสัญญาณในแต่ละช่วงเวลานั้นจะมีความกว้างของพัลส์ที่ไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 3.34

3.4.4 สัญญาณนำขั้วสวิตซ์ด้านทุติยภูมิ



รูปที่ 3.35 สัญญาณนำขั้วสวิตซ์ด้านทุติยภูมิ (10 V/div)

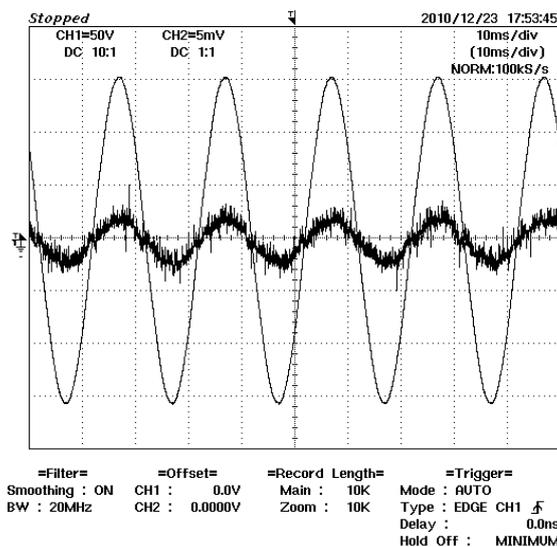
จากการทดลองวัดสัญญาณนำขั้วสวิตซ์ด้านทุติยภูมิมีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์ความถี่ 50 เฮิรตซ์ โดยที่รูปสัญญาณนั้นคือสัญญาณที่ได้จากวงจรเครื่องตรวจวัดจุดตัดศูนย์ ที่ไม่กลับเฟสและกลับเฟสกับสัญญาณพัลส์ ดังรูปที่ 3.35



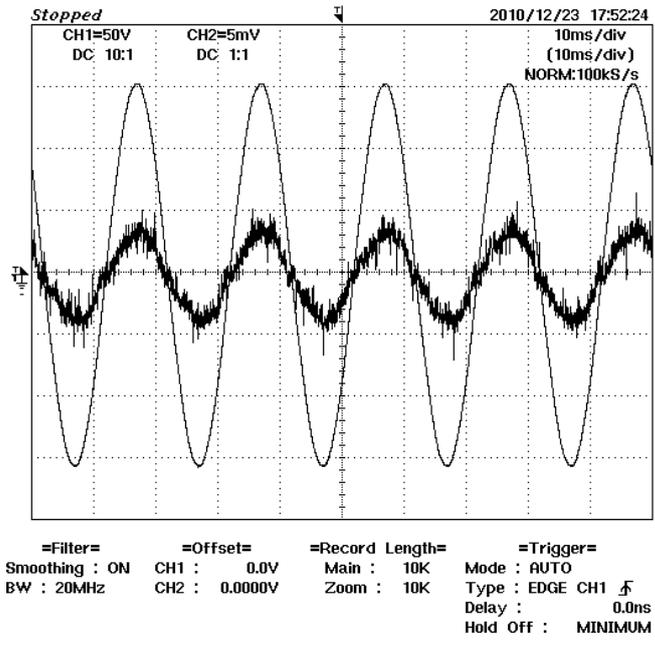
รูปที่ 3.36 วงจรฟลายแบ็คอินเวอร์เตอร์ต้นแบบเชื่อมต่อกริด

3.4.5 สัญญาณกระแสไฟฟ้าจากวงจรฟลายแบ็คอินเวอร์เตอร์เมื่อทำการเชื่อมต่อระบบกริดการไฟฟ้า

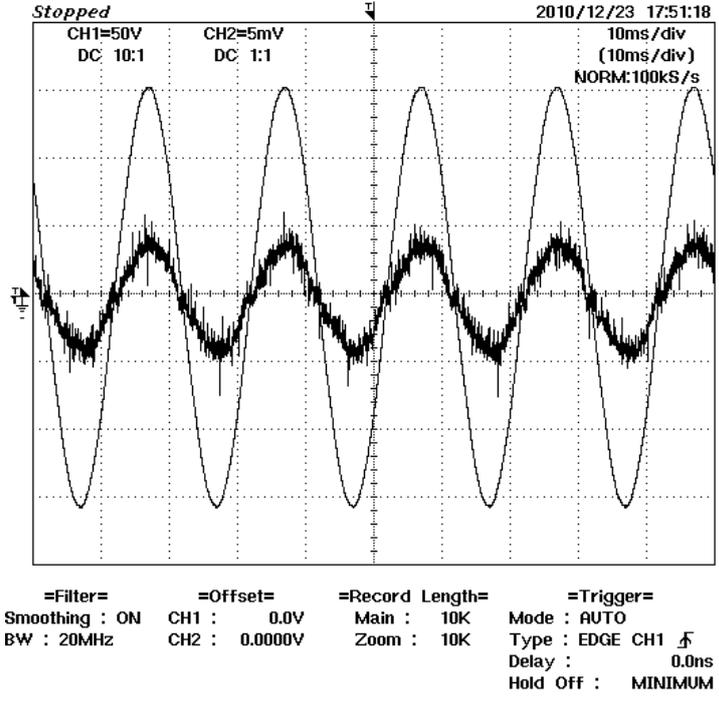
จากการทดลองมีการเก็บผลการทดลองสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากวงจรฟลายแบ็คอินเวอร์เตอร์เมื่อทำการเชื่อมต่อระบบกริดการไฟฟ้าและเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันกริดการไฟฟ้าที่ความถี่สวิตซ์และค่ามอดดูเลชันอินเดคที่ค่าต่างๆ เพื่อทำการวิเคราะห์แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่ความถี่สวิตซ์ซึ่งเท่ากัน เมื่อปรับค่ามอดดูเลชันลดลงแล้วขนาดของสัญญาณกระแสไฟฟ้าของวงจรฟลายแบ็คอินเวอร์เตอร์ลดลง



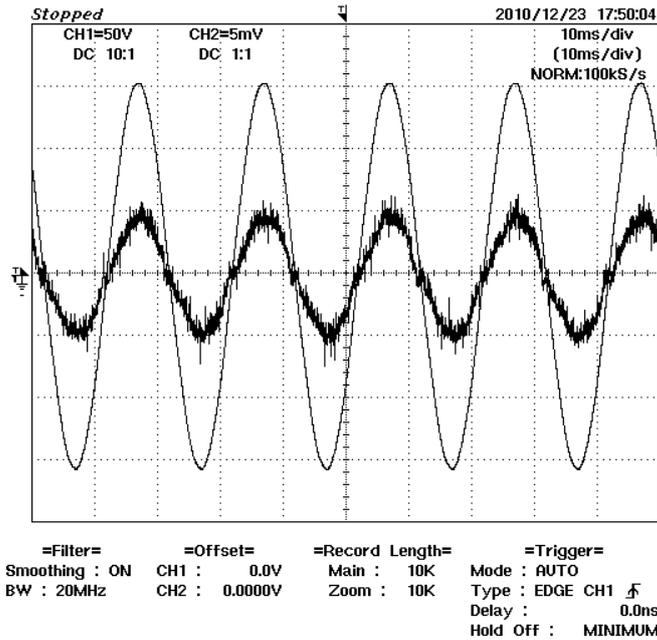
(ก)



(g)



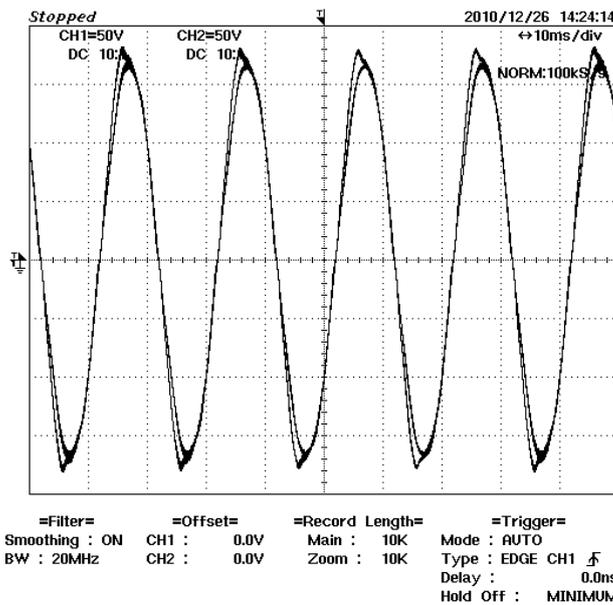
(h)



(ง)

รูปที่ 3.37 สัญญาณกระแสไฟฟ้าจากวงจรฟลายแบคอินเวอร์เตอร์เมื่อทำการเชื่อมต่อระบบ กริดการไฟฟ้าเปรียบเทียบกับแรงดันกริดการไฟฟ้า ที่ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 21 kHz เท่ากัน (ก) ค่า dp เท่ากับ 0.5 (ข) ค่า dp เท่ากับ 0.6 (ค) ค่า dp เท่ากับ 0.7 (ง) ค่า dp เท่ากับ 0.8 (100 V/div, 1 A/div)

3.4.6 สัญญาณแรงดันกริดการไฟฟ้าเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าหลังตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

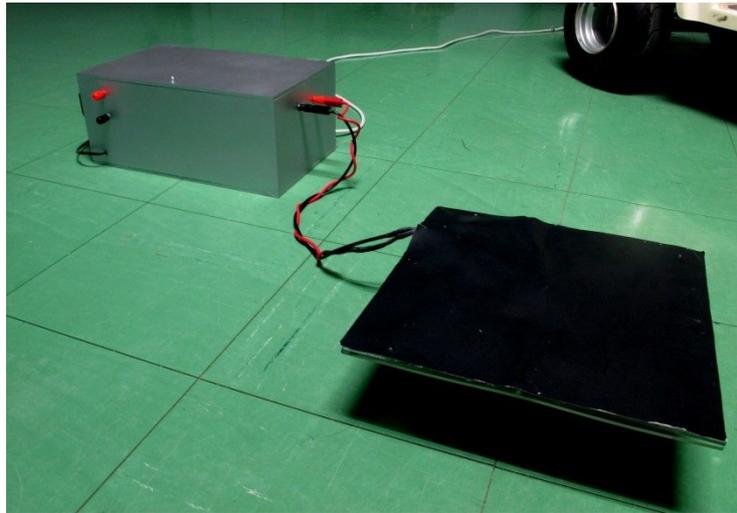


รูปที่ 3.38 การเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง สัญญาณแรงดันกริดการไฟฟ้ากับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าหลังตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า (100 V/div)

จากการทดลองการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณระหว่างสัญญาณแรงดันด้านวงจรฟลายแบคอินเวอร์เตอร์และสัญญาณแรงดันของการไฟฟ้าพบว่าแรงดันด้านอินเวอร์เตอร์มีความผิดเพี้ยนจากรูปสัญญาณไซน์ไปเล็กน้อยและมีมุมเฟสหน้าหน้าแรงดันการไฟฟ้าอยู่เล็กน้อยเนื่องจากผลของตัวเหนี่ยวนำที่ต่อระหว่างวงจรฟลายแบคอินเวอร์เตอร์กับระบบของการไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.38

3.5 ผลการเชื่อมต่อระบบและชิ้นงานต้นแบบ

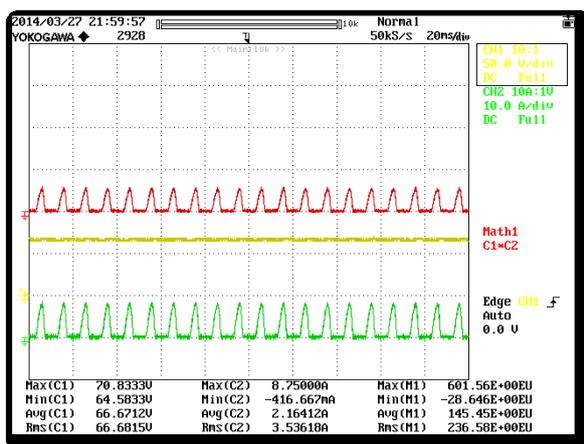
3.5.1 อุปกรณ์ต้นแบบที่ใช้ในการเชื่อมต่อ



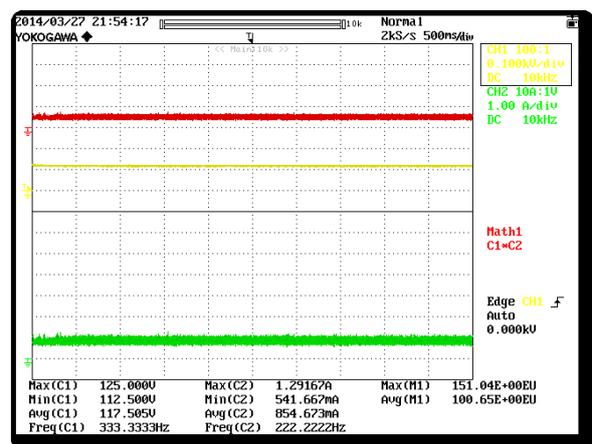
รูปที่ 3.39 อุปกรณ์ต้นแบบที่ใช้ในการต่อเชื่อม

3.5.2 ผลการเชื่อมต่อระบบส่งผ่านพลังงานแบบไร้สายเข้ากับอุปกรณ์ชาร์จแบตเตอรี่

สำหรับเทคนิคการชาร์จที่นำมาใช้เป็นการชาร์จแบบกระแสและแรงดันคงที่ โดยนำมาประยุกต์ใช้เพื่อชาร์จเข้าแบตเตอรี่ ซึ่งเก็บผลการเชื่อมต่อระบบที่กำลังไฟฟ้าที่เครื่องชาร์จแบตเตอรี่ต้นแบบที่พิกัด 100, 227, 420 และ 508 วัตต์ ตามลำดับ



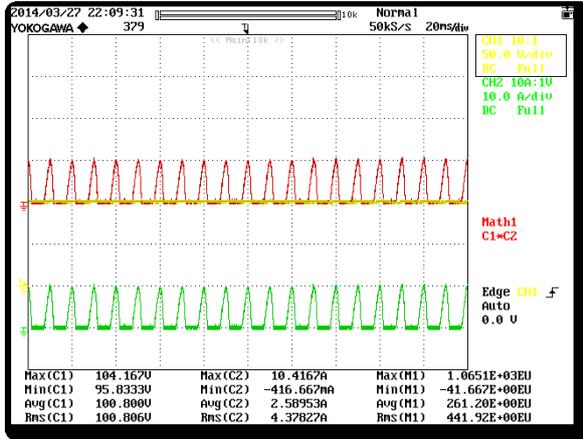
(ก)



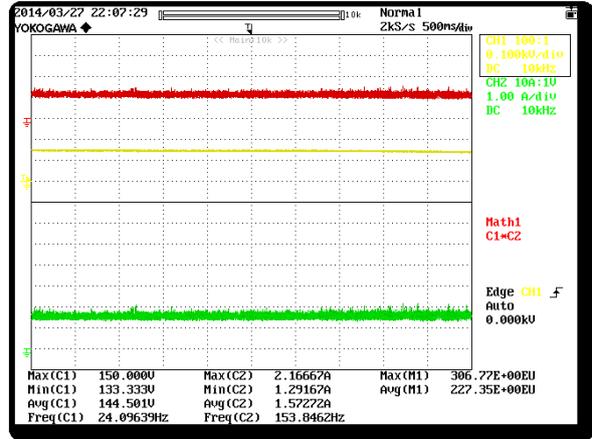
(ข)

รูปที่ 3.40 (ก) แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าก่อนเข้าวงจรส่งผ่านพลังงานไร้สาย พิกัด 100 วัตต์

(ข) แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าที่วงจรชาร์จแบตเตอรี่ ที่พิกัด 100 วัตต์



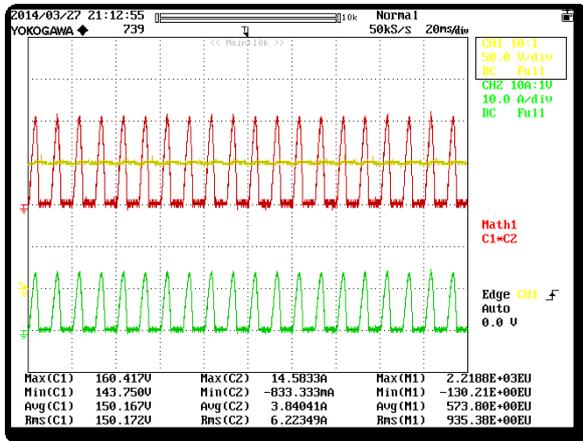
(ก)



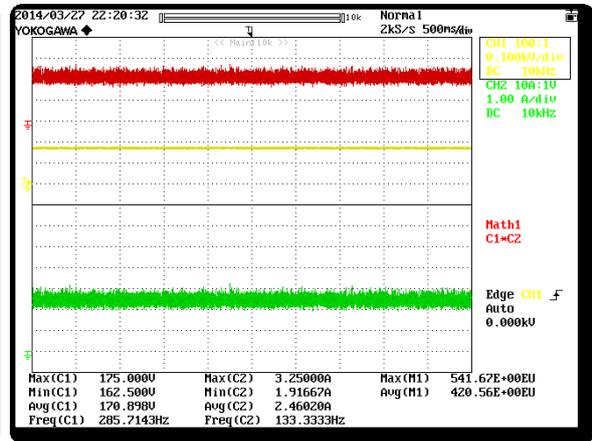
(ข)

รูปที่ 3.41 (ก) แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าก่อนเข้าสู่ชุดส่งผ่านพลังงานไร้สาย
ที่พิกัด 227 วัตต์ ระยะ 4 cm

(ข) แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าที่วงจรรีเซตที่พิกัด 227 วัตต์



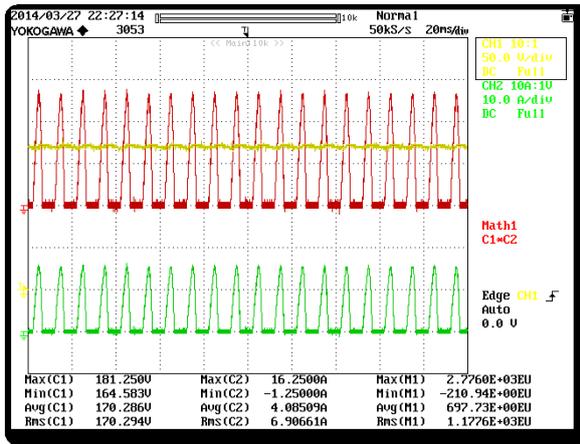
(ก)



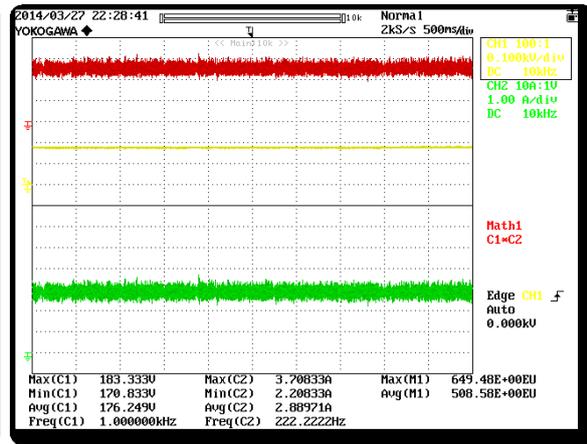
(ข)

รูปที่ 3.42 (ก) แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าก่อนเข้าสู่ชุดส่งผ่านพลังงานไร้สาย
ที่พิกัด 420 วัตต์ ระยะ 4 cm

(ข) แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าที่วงจรรีเซตที่พิกัด 420 วัตต์



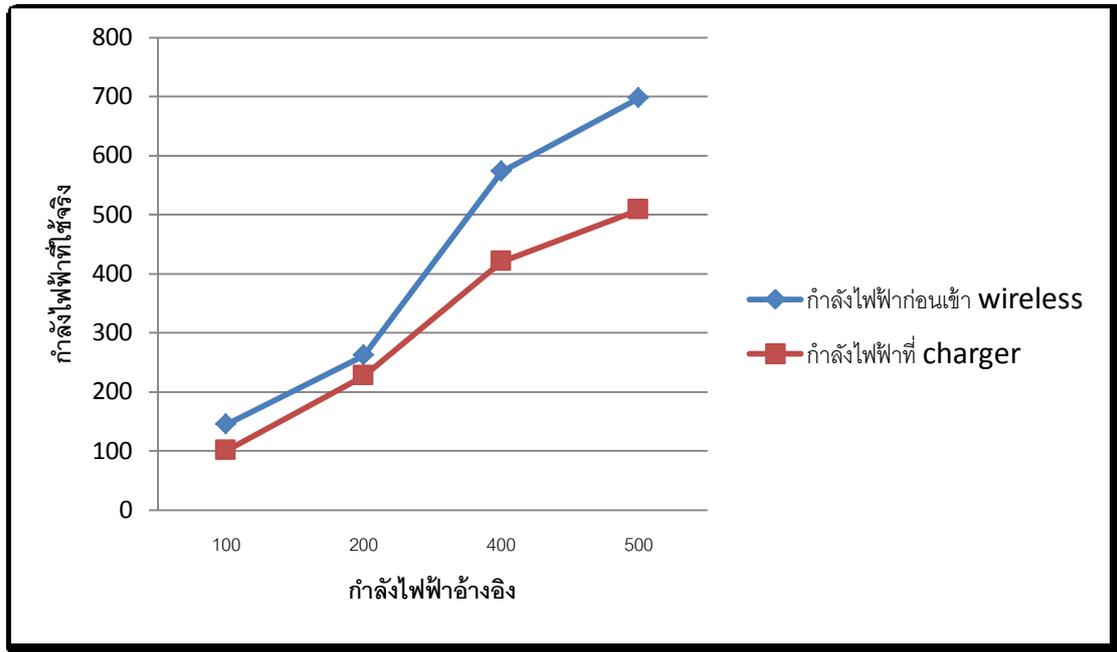
(ก)



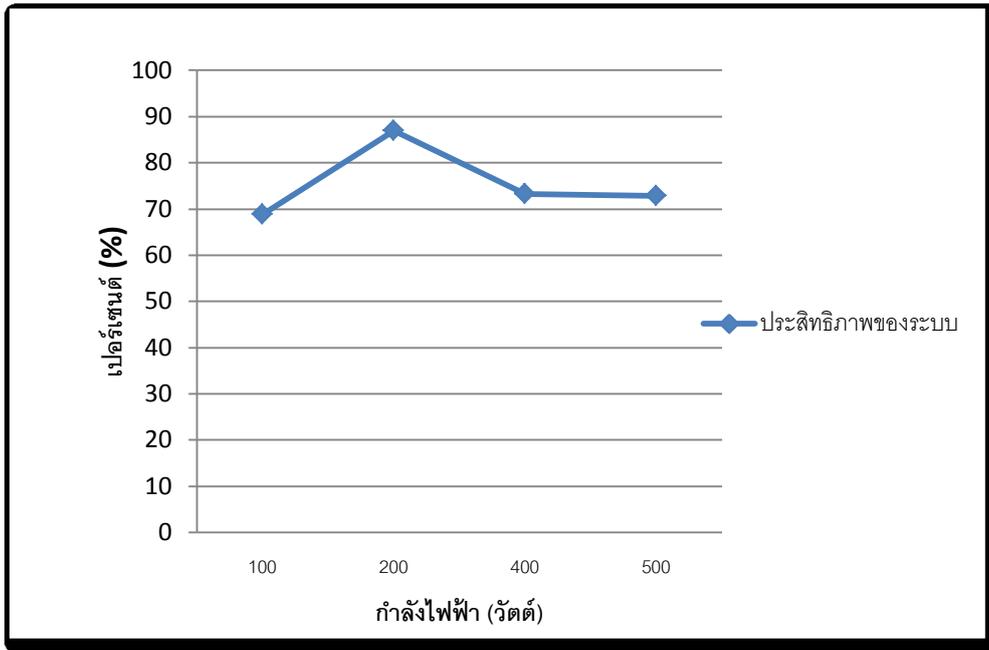
(ข)

รูปที่ 3.43 (ก) แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าก่อนเข้าสู่ชุดส่งผ่านพลังงานไร้สาย
ที่พิกัด 508 วัตต์ ระยะ 4 cm

(ข) แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าที่วงจรชาร์จแบบ ที่พิกัด 508 วัตต์



รูปที่ 3.44 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ขาเข้าสู่ชุดส่งผ่านพลังงานไร้สายขณะทำการชาร์จ
และกำลังไฟฟ้าที่เข้าสู่ชุดอุปกรณ์ชาร์จแบบเตออร์รี่ด้วยวิธีการชาร์จแบบแรงดัน
และกระแสคงที่ ของกำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ กัน



รูปที่ 3.45 ประสิทธิภาพของระบบ

3.5.3 อุปกรณ์ต้นแบบที่ประยุกต์ใช้กับรถไฟฟ้าโดยชาร์จแบตเตอรี่แบบไร้สาย



รูปที่ 3.46 ระบบต้นแบบชาร์จรถไฟฟ้าแบบไร้สายที่ประยุกต์ร่วมกับรถไฟฟ้าขนาดเล็ก

สรุปผล

จากผลการเชื่อมต่อระบบชาร์จแบตเตอรี่เข้ากับระบบส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไร้สาย ระบบสามารถเชื่อมต่อกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งทำการทดลองโดยชาร์จที่พิกัดกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ชาร์จแบตเตอรี่ที่ 100 – 500 วัตต์ โดยประมาณ จากผลที่ได้ระบบโดยรวมที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าค่าต่างมีค่าประสิทธิภาพของระบบประมาณ 72 เปอร์เซ็นต์ แต่ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงเมื่อพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น และต้นแบบระบบที่สร้างขึ้นสามารถนำไปประยุกต์เพื่อชาร์จแบตเตอรี่ให้กับรถไฟฟ้าได้จริง

บทที่ 4

บทสรุปของโครงการ

4.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการออกแบบระบบการอัดประจุไฟฟ้าไร้สายเข้ากับแบตเตอรี่โดยใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับกริด โดยทำการทดสอบทั้งสามส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนของการตามรอยกำลังไฟฟ้าโดยรักษา ระดับแรงดันไฟฟ้าขาออก, ส่วนของการส่งพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายโดยใช้การส่งที่ความถี่เรโซแนนซ์ และการอัดประจุไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่แบบใช้การชาร์จแบบพัลส์ชาร์จ โดยได้ทำการทดสอบการทำงานรวมทั้ง ประสิทธิภาพทั้งแบบการจำลองและแบบการใช้งานจริง โดยในส่วนของการตามรอยได้ทำการเปรียบเทียบกับ วิธีการบวกรวมและสังเกตแบบเดิม และในส่วนของการอัดประจุได้ทำการเปรียบเทียบการอัดประจุในหลายๆ กรณีเพื่อหาลักษณะการชาร์จที่เหมาะสมกับการใช้ในงานวิจัยนี้

กล่าวโดยสรุป ระบบการอัดประจุแบบไร้สายด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับกริดที่นำเสนอมีข้อที่พัฒนาขึ้น ดังนี้

1. ระบบสามารถตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ โดยรักษาระดับแรงดันให้มีการกระเพื่อมต่ำ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบการอัดประจุรวมทั้งระบบการส่งพลังงานไร้สาย
2. การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าจากกริด ช่วยลดต้นทุนด้านค่าไฟฟ้าที่นำมาใช้สำหรับการชาร์จไฟเข้าแบตเตอรี่ในรถยนต์ไฟฟ้าได้ดี
3. ระบบการส่งพลังงานแบบไร้สายช่วยลดความยุ่งยากด้านการชาร์จรูปแบบเดิมลง โดยไม่จำเป็นต้องมีสายไฟในการชาร์จอีกต่อไป
4. จากผลที่ได้จากการเปรียบเทียบรูปแบบการชาร์จในแต่ละเทคนิคทำให้ได้โมเดลที่เหมาะสมที่สุดที่ช่วยให้การอัดประจुरวดเร็ว โดยที่มีความเหมาะสมกับการชาร์จเข้ากับระบบรถพลังงานไฟฟ้า
5. การสร้างชุดอุปกรณ์ต้นแบบขึ้น ช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านราคาที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในอนาคตได้ โดยช่วยส่งเสริมความเข้มแข็งด้านการประดิษฐ์และการผลิตผลงานเชิงพาณิชย์

อย่างไรก็ดีในอุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างขึ้นอาจจะมีตัวแปรหรือพารามิเตอร์ส่วนอื่นที่ส่งผลต่อค่าความสูญเสียที่ทำให้ประสิทธิภาพในการส่งแบบไร้สาย น้อยกว่าการใช้การส่งแบบเสียบปลั๊กเพื่อชาร์จ แต่ด้วยการนำระบบเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ จึงช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าลงได้ นอกจากนี้ยังได้ออกความรู้ในการผลิตต้นแบบเชิงพาณิชย์สำคัญในหลากหลายรูปแบบอีกด้วย

4.2 แนวทางการดำเนินงานวิจัยต่อไปและสิ่งที่ต้องพัฒนาต่อ

ในส่วน of ระบบส่งพลังงานไร้สาย หากทำการเพิ่มความถี่เรโซแนนซ์ในการส่งให้เพิ่มขึ้นสูงมากๆ อาจจะทำให้การส่งมีประสิทธิภาพสูงขึ้น รวมทั้งอาจจะส่งได้ระยะไกลขึ้น นอกจากนี้ในส่วนของการตามรอย กำลังไฟฟ้าถ้ามีการพิจารณาถึงองค์ประกอบอื่น เช่น อุณหภูมิ รวมทั้งเพิ่มเทคนิคให้สามารถตามรอย กำลังไฟฟ้าได้รวดเร็วรวมทั้งมีการแกว่งที่น้อย ซึ่งจะคำนึงถึงทั้งช่วงสถานะคงตัวและพลศาสตร์ไปพร้อมๆกัน จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพในระบบให้มากขึ้นได้ การเลือกอุปกรณ์ให้มีกำลังสูญเสียต่ำจะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมดีขึ้น

จากการสัมมนาและสรุปผลการทดลองพบว่า แนวโน้มการใช้งานของงานวิจัยนี้จะมีผู้ต้องการใช้ เช่น ในระบบหุ่นยนต์ที่ไม่ต้องการวิ่งกลับไปอัดประจุที่สถานีอัดประจุระหว่างทาง ก็สามารถใช้ Wireless Charger ในการอัดประจุได้

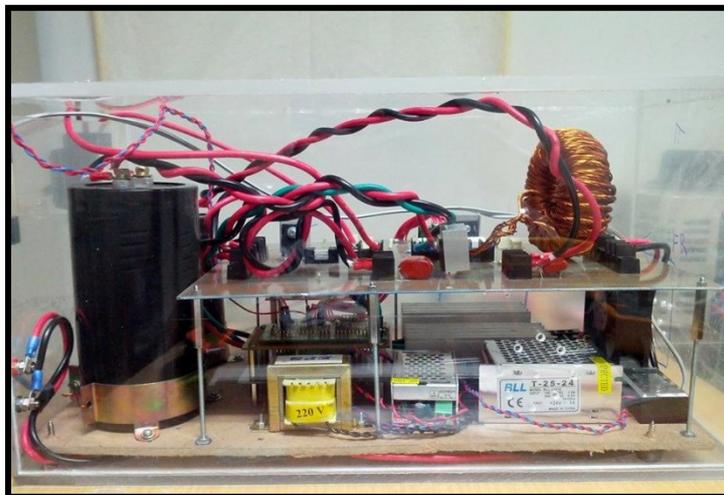
เอกสารอ้างอิง

- [1] เว็บไซต์ www.eppo.go.th/ccep/download/NEEP2030_FINAL.pdf
- [2] เว็บไซต์ <http://www.dede.go.th/dede/images/stories/energysaving12/01new.pdf>
- [3] เว็บไซต์ <http://www.engr.du.edu/vahid/EnPo4.html>
- [4] Leyh, G. E. and M. D. Kennan, "Efficient Wireless Transmission of Power Using Resonators with Coupled Electric Fields," 2008 North American Power Symposium.
- [5] เว็บไซต์ <http://www.nasa.gov/offices/oct/home/index.html>
- [6] เว็บไซต์ <http://presscentre.sony.eu/content/detail.aspx?NewsAreaId=2&ReleaseID=4993>
- [7] Anil Kumar RamRakhyani; Shahriar Mirabbasi; Mu Chiao; , "Design and Optimization of Resonance-Based Efficient Wireless Power Delivery Systems for Biomedical Implants," IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems", Feb, 2011.
- [8] "Anil Kumar RamRakhyani; Gianluca Lazzi;, "On the Design of Efficient Multi-Coil Telemetry System for Biomedical Implants," IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems,"No. 99, April, 2012.
- [9] H. Patel and V. Agarwal, "MPPT Scheme for a PV-Fed Single-Phase Single-Stage Grid-Connected Inverter Operating in CCM With Only One Current Sensor," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 24, No. 1, pp. 256-263, MARCH 2009.
- [10] Q. Li and P. Wolfs, "Recent development in the topologies for photovoltaic module integrated converters," in Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf., Jun. 2006, pp. 1-8.
- [11] M. Ciobotaru, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "Control of single-stage single-phase PV inverter," in Proc. Eur. Conf. Power Electron. Appl., Dresden, Germany, Sep. 2005, pp. 1-10.
- [12] S. Jain and V. Agarwal, "A new current control based MPPT technique for single-stage grid connected PV systems," Energy Convers. Manag., vol. 48, pp. 625-644, 2006.
- [13] N. Kasa, T. Iida, and H. Iwamoto, "An inverter using buck-boost type chopper circuits for popular small-scale photovoltaic power systems," in Proc. IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON 1999), San Jose, CA, Nov./Dec., pp. 185-190.
- [14] C. M. Wang, "A novel single-stage full-bridge buck-boost inverter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 1, pp. 150-159, Jan. 2004.
- [15] S. B. Kjaer and F. Blaabjerg, "A novel single-stage inverter for the ac module with reduced low-frequency ripple penetration," in Proc. Eur. Conf. Power Electron. Appl., Toulouse, France, Sep. 2-4, 2003, pp. 1-10.

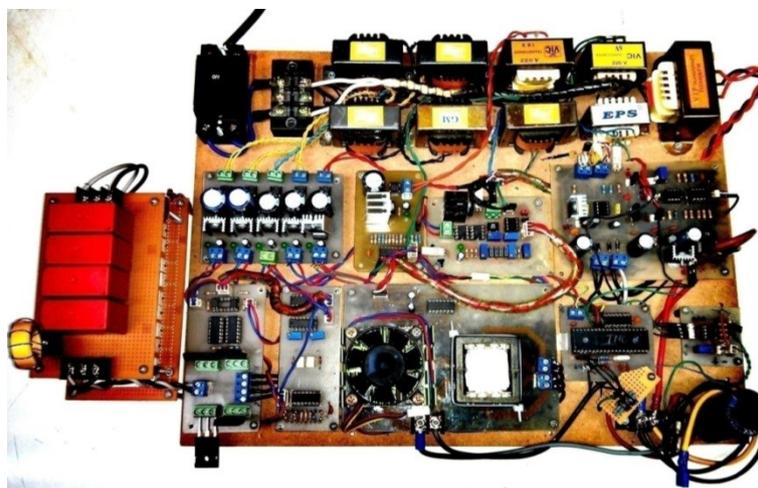
- [16] S. Jain and V. Agarwal, "A single-stage grid connected inverter topology for solar PV systems with maximum power point tracking," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 5, pp. 1928–1940, Sep. 2007.
- [17] N. Kasa, T. Iida, and H. Iwamoto, "Maximum power point tracking with capacitor identifier for photovoltaic power system," in *Proc. Inst. Elect. Eng. Elect. Power Appl.*, Nov. 2000, vol. 147, no. 6, pp. 497–502.
- [18] M. Kusakawa, H. Nagayoshi, K. Kamisako, and K. Kurokawa, "Further improvement of a transformerless, voltage-boosting inverter for ac modules," *Solar Energy Mater., Solar Cells*, vol. 67, pp. 379–387, Mar. 2001.
- [19] S. B. Kjaer, J. K. Pederson, and F. Blaabjerg, "A review of single-phase grid connected inverters for photovoltaic modules," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 5, pp. 1292–1306, Sep. 2005.
- [20] R. Bruendlinger, B. Bletterie, M. Milde, and H. Oldenkamp, "Maximum power point tracking performance under partially shaded PV array conditions," in *Proc. 21st EUPVSEC*, Dresden, Germany, Sept. 2006, pp. 2157–2160.
- [21] H. Patel and V. Agarwal, "MATLAB-Based Modeling to Study the Effects of Partial Shading on PV Array Characteristics," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 23, NO. 1, pp. 302–310, March 2008.
- [22] M. Miyatake, T. Inada, I. Hiratsuka, H. Zhao, H. Otsuka, and M. Nakano, "Control characteristics of a Fibonacci-search-based maximum power point tracker when a photovoltaic array is partially shaded," in *Proc. IEEE IPEMC*, 2004, vol. 2, pp. 816–821.
- [23] Hiren Patel and Vivek Agarwal, "Maximum Power Point Tracking Scheme for PV Systems Operating Under Partially Shaded Conditions," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, VOL. 55, NO. 4, pp. 1689–1698, April 2008.
- [24] เว็บไซต์ http://en.wikipedia.org/wiki/File:Inductive_charging.svg
- [25] Jianwu Zeng. **A Single-Switch Isolated DC-DC Converter for Photovoltaic Systems**. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE 2012

ภาคผนวก ก.

ต้นแบบระบบชาร์ตรถไฟฟ้าไร้สายประสิทธิภาพสูง



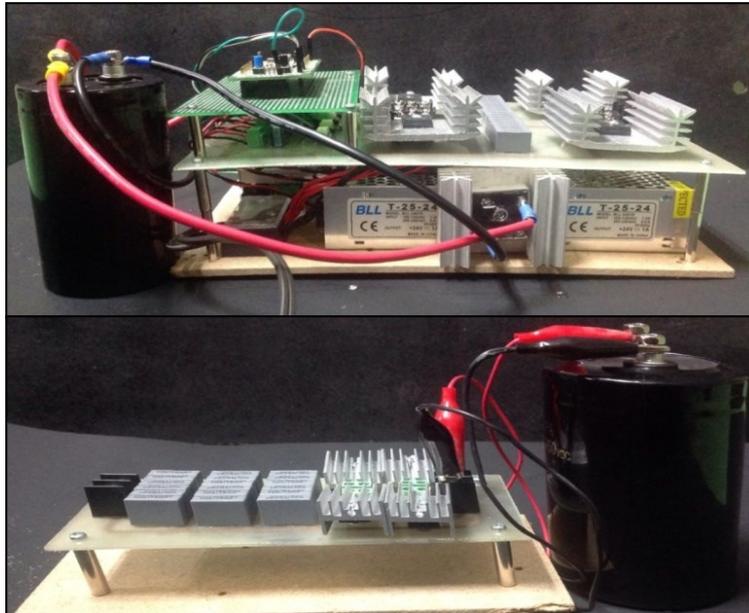
ก1. ต้นแบบระบบตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์



ก2. ต้นแบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกิริต



ก3. ระบบโซลาร์เซลล์ที่ใช้สำหรับการทดลอง



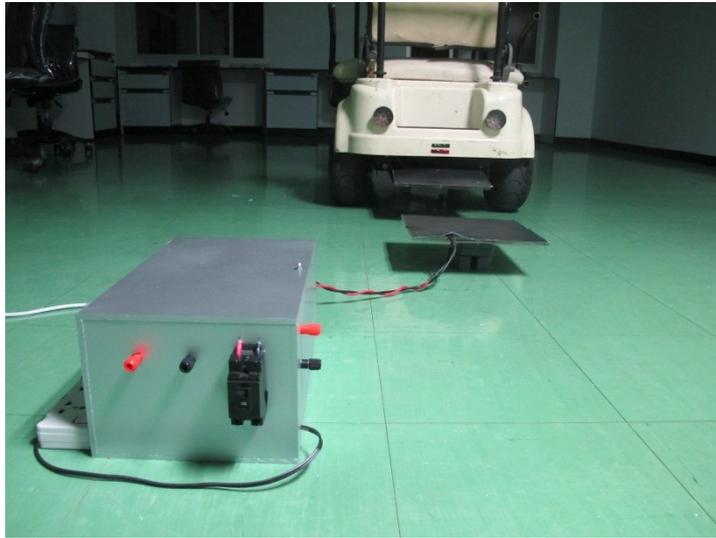
ก4. ต้นแบบระบบส่งไฟฟ้าไร้สาย



ก5. ติดตั้งขดลวดตัวรับเข้ากับรถไฟฟ้า



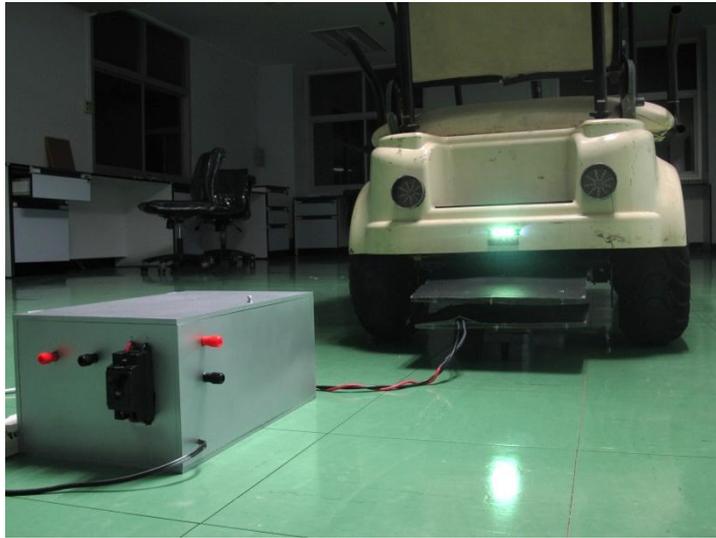
ก6. ติดตั้งชุดแปลงพลังงานสำหรับชาร์จแบตเตอรี่ไฟฟ้า



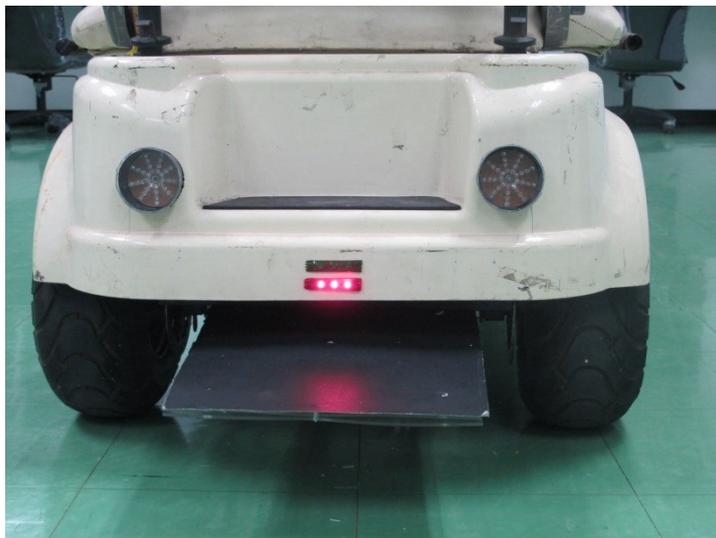
ก7. อุปกรณ์ส่งกำลังไฟฟ้าต้นแบบ



ก8. ต้นแบบระบบขาร์ทรถไฟฟ้าไร้สายประสิทธิภาพสูง



ก9. รูปแบบการส่งผ่านพลังงานขณะชาร์จแบตเตอรี่
(จุดชาร์จให้ตำแหน่งขดลวดตัวส่งและตัวรับอยู่ในแนวเดียวกัน)



ก10. สัญญาณเตือนขณะแบตเตอรี่ใกล้หมด

ภาคผนวก ข
งานประชุมวิชาการที่จัดส่งบทความ

CRIT

7th conference

การประชุมวิชาการทางเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและหุ่นยนต์ 2557
12 - 13 มิถุนายน 2557 TRS Conference on Robotics and Industrial Technology 2014
วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ

www.dstar.kmitl.ac.th/crit2014



CALL FOR PAPERS

ประธานจัดประชุมวิชาการ

ผศ.ดร.ศิริเดช บุญแสง (KMITL)

ผศ.ดร.อติลา มณีวรรณ (KMUTT)

คณะกรรมการที่ปรึกษา

ศ.ดร.ประภาส จงสถิตยวัฒน์ (CU)

รศ.ดร.มนูกิจ พานิชกุล (AIT)

รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (CU)

รศ.ดร.ชิต เหล่าวัฒนา (KMUTT)

ผศ.ดร.จักรกฤษณ์ สุทธากรณ์ (MU)

ดร.สุธี มุขวิภูษณะชัย (NECTEC)

คณะกรรมการวิชาการ

รศ.ดร.ราชวัติ กิลลาพันธ์ (KMUTT)

ผศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล (KMITL)

ผศ.ดร.ปิ่นวิไล สุทธิประวี (MU)

ดร.ธันยวีร์ สมใจทวีพร (PIM)

คณะกรรมการจัดงาน

รศ.ดร.ชนินทร์ บุญถักกษณาสุรณ (KMITL)

รศ.ดร.ภูสิต ถักกษณะเจริญ (KMUTNB)

รศ.ดร.วรา วราวิทย์ (KMUTNB)

รศ.ดร.สยาม เจริญเสียง (KMUTT)

รศ.ดร.สิริญา มิตรวอม (TU)

ผศ.ดร.ชัยพล ธงชัยสุริยกุล (KMUTNB)

ผศ.ดร.สาทิสม์ ทรงชน (KMUTT)

ผศ.ดร.ธีรบุษ จันทโสภิตพันธ์ (KMUTT)

ดร.จิตพงษ์ ศิลีสโทยกุล (KMUTNB)

ดร.ทศิเทพ วงศ์สุวรรณ (KU)

ดร.ปายาณ ภูลาวานิช (MOST)

น.ท.ดร.กฤติวัฒน์ สุทธิวีธี ร.น. (NAVY)

ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์ (RMUTT)

อ.ธีรวิทย์ ปานกลาง (BSRU)

อ.ปริญญ์ เหล่าอนันต์ธนา (KU)

อ.อรรถพล กิ่งแหวก (MUT)

รายละเอียดเกี่ยวกับการประชุมวิชาการ

สมาคมวิชาการหุ่นยนต์แห่งประเทศไทย กำหนดจัดการประชุมวิชาการทางเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและหุ่นยนต์ 2557 ครั้งที่ 7 โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อเปิดโอกาสให้นักศึกษานักวิชาการ นักวิจัย อาจารย์ วิศวกร และผู้ที่สนใจ ตลอดจนผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมของประเทศทางด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและหุ่นยนต์ ได้มาร่วมนำเสนอผลงานใหม่ๆ ตลอดจนการแลกเปลี่ยนความคิดเห็น และมุมมองด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและหุ่นยนต์ในอนาคต ซึ่งมีหัวข้อดังนี้

- Robotics and Automation
- Modeling and Identification
- Adaptive and Robust Control
- Embedded Computer System,
- Mechatronics
- Manufacturing Systems
- Computer Vision, Image Processing and Applications
- Industrial Technology
- Control Theory
- Intelligent Control and Intelligent Systems
- Biomedical and Biomedical Electronics
- Industrial Electronics and automation
- Power Electronics

กำหนดการประชุมวิชาการทางเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและหุ่นยนต์ 2557

30 มีนาคม 2557 วันสุดท้ายของการส่งบทความฉบับสมบูรณ์

20 เมษายน 2557 แจ้งผลการพิจารณาบทความ

15 พฤษภาคม 2557 วันสุดท้ายของการส่งบทความฉบับสมบูรณ์ที่แก้ไขแล้ว

12-13 มิถุนายน 2557 การประชุมวิชาการทางเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและหุ่นยนต์

วิธีเขียนบทความ

ผู้ที่สนใจส่งบทความ สามารถจัดทำบทความเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ความยาวไม่เกิน 6 หน้า กระดาษ A4 ในรูปแบบของ IEEE format โดยให้บทความอยู่ในขอบเขตของหัวข้อข้างต้น สามารถดูรายละเอียด และตัวอย่างการเขียนบทความสามารถดาวน์โหลด

ได้จาก www.dstar.kmitl.ac.th/crit2014

*การประชุมวิชาการทางเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและหุ่นยนต์ 2557 เป็นการประชุมวิชาการทางด้านหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติระดับชาติ ซึ่งมีความสำคัญและมีผู้ที่เกี่ยวข้องในสาขาวิชาเป็นผู้อ่านบทความ บทความที่ได้รับเลือกอยู่ในเกณฑ์ดีมาก จะได้รับสิทธิ์ในเผยแพร่ทางวารสารวิชาการของทางสมาคมฯ อีกด้วย

สมาคมวิชาการหุ่นยนต์แห่งประเทศไทย สถาบันวิชาการหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140 โทรศัพท์: 0-2470-9721 โทรสาร: 0-2470-9714 www.tr.or.th

บทความวิชาการ

บทความเรื่อง การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการรักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า
ขาออก ของการประชุมวิชาการด้านหุ่นยนต์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ครั้งที่ 7 จัดโดย
สมาคมวิชาการหุ่นยนต์ไทย ระหว่างวันที่ 12 ถึง 13 มิถุนายน 2557

และ

บทความเรื่อง การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายสำหรับรถยนต์พลังงานไฟฟ้า ของการประชุมวิชาการด้านหุ่นยนต์และ
เทคโนโลยีอุตสาหกรรม ครั้งที่ 7 จัดโดยสมาคมวิชาการหุ่นยนต์ไทย
ระหว่างวันที่ 12 ถึง 13 มิถุนายน 2557

การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยการรักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าขาออก MPPT for PV with Stabilize Output Voltage

ฐิตินันท์ ก้นคำ¹, ชาคร จันทนไชยวงศ์¹, ชัชฌพงษ์ พรหมสุรินทร์¹, ชุตติวัฒน์ ภาษา¹ สมยศ เกียรติวนิชวิไล¹ และ อนรรฆพล แสนทน²
¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: titinan@gmail.com

²วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 02-329-8264 ต่อ 2157 E-Mail: sanakkapon@gmail.co.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคใหม่สำหรับการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคการรักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าขาออกโดยใช้อุปกรณ์สวิตช์เพียงตัวเดียว เนื่องด้วยเทคนิคการรบกวนและสังเกตรูปแบบเดิมไม่ได้คำนึงถึงการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกให้คงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกมีการแกว่งและขึ้นอยู่กับระดับความเข้มแสงและอุณหภูมิในขณะนั้น เพื่อแก้ปัญหาที่ดังกล่าวบทความนี้ประยุกต์เทคนิคการควบคุมใหม่ที่ช่วยทั้งรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกให้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยรวมทั้งคำนึงถึงการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ ผลการทดลองพบว่าเทคนิคที่ใช้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าเทคนิคแบบ P&O อย่างเห็นได้ชัด

คำสำคัญ: สวิตช์ตัวเดียว การรักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าขาออก การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด การรบกวนและสังเกต

Abstract

This paper presents the new design technique for the maximum power point tracking that can stabilize output voltage with only one switch. Due to the general technique such as Perturbation and Observation: P&O cannot stabilize the output voltage which depends on the irradiance level and temperature, the oscillation of the output voltage is normally being problem in the conventional technique. To solve this problem, this paper proposes a new control algorithm for the maximum power tracking that makes a better quality of the output voltage waveform. As the experimental results indicated, the proposed technique gains lower oscillation and achieve the near maximum power point when compared with the conventional P&O technique.

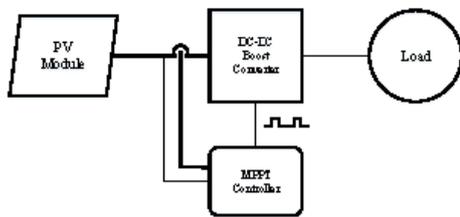
Keywords: single switch, stabilized output voltage, MPPT, perturbation and observation

1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการพลังงานเพิ่มสูงขึ้น รวมทั้งพลังงานที่ได้จากฟอสซิลเริ่มไม่เพียงพอต่อความต้องการ พลังงานทางเลือกที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับการพิจารณาเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาด รวมทั้งเป็นพลังงานที่มีอยู่อย่างไม่จำกัด ยิ่งไปกว่านั้นราคาค่าต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์มีแนวโน้มที่ลดต่ำลงทำให้พลังงานที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง [1]

โดยปกติพลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิในขณะนั้น ที่ความเข้มแสงสม่ำเสมอและอุณหภูมิคงที่ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้จะมีเพียงจุดเดียวและมีความสม่ำเสมอในขณะนั้น การใช้เทคนิคการตามรอยกำลังไฟฟ้าจึงเป็นวิธีการสำคัญวิธีการหนึ่งในการใช้กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้รับประสิทธิภาพสูงสุด [2] ในปัจจุบันมีนักวิจัยจำนวนมากนำเสนอเทคนิคการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดหลายวิธี [3-7] ตัวอย่างเช่น วิธีวงจแรงดันเปิด (open circuit voltage method), วิธีการเพิ่มค่าความนำ (incremental conductance method) วิธีการควบคุมแบบฟัซซี (fuzzy control method) วิธีการรบกวนและสังเกต (perturb and observe) วิธีการคงที่แรงดัน (constant voltage) เป็นต้น ในบรรดาเทคนิคดังกล่าวข้างต้นเทคนิคการรบกวนและสังเกตเป็นเทคนิคที่ง่ายต่อการควบคุม สะดวกต่อการใช้งานจริงและถูกใช้อย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้มีข้อเสีย คือ ระบบการตามรอยด้วยวิธีนี้อาจตามรอยกำลังไฟฟ้าผิดทิศทางได้ง่ายขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศและแสง รวมทั้งช่วงการเปลี่ยนการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์กำลังเช่น ค่าดีวีดี มีผลต่อความเร็วในการตามรอยกำลังไฟฟ้รวมทั้งการแกว่งของกำลังไฟฟ้า นอกจากนี้ระดับแรงดันขาออกจะเปลี่ยนไปตามความเข้มแสงและไม่สม่ำเสมอโดยเฉพาะในขณะมีการตามรอยกำลังไฟฟ้า เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น บทความนี้เสนอการใช้การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่คำนึงถึงทั้งแรงดันไฟฟ้าขาออกให้มีค่า

แกว่งในระบอบที่กำหนดยุทธศาสตร์ตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่าที่ทำได้ โดยคำนึงถึงการตามรอยกำลังไฟฟ้าและการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าไปพร้อมกัน การทำงานจะทำได้โดยใช้วิธีหนึ่งเดียว จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และผลจากการทดลองพบว่า มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยระบบสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าขาออกได้และยังคงรักษากำลังไฟฟ้าในช่วงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแสงได้ใกล้เคียงกับจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบ ระดับแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเทคนิคการควบคุมแบบรบกวนและสังเกตแบบเดิม การทดลองดำเนินการบนระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งถูกควบคุมการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์รูปที่ 1 แสดงแผนภาพการเชื่อมต่อของวงจรกำลังที่ใช้ในภาวนิจัยนี้



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงวงจรมูลฐานการเชื่อมต่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในบทความ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

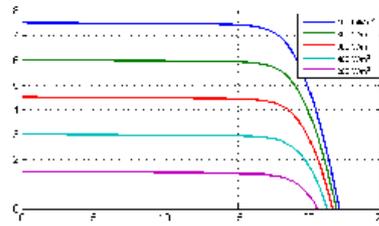
2.1 เทคนิคการรบกวนและสังเกต

ส่วนสำคัญของเทคนิคการรบกวนและสังเกตคือการเปลี่ยนแปลงการนำกระแส เพื่อให้ระบบทำงานบริเวณใกล้เคียงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าและแรงดันค่านวนได้จากสมการต่อไปนี้

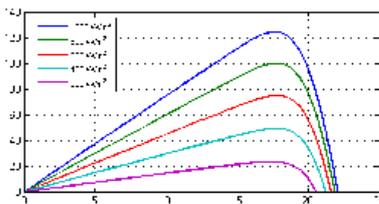
$$\Delta P = P_k - P_{k-1} \quad (1)$$

$$\Delta V = V_k - V_{k-1} \quad (2)$$

รูปที่ 2 และ 3 แสดงกราฟคุณลักษณะเฉพาะของกระแสต่อแรงดันและกำลังไฟฟ้าต่อแรงดัน ตามลำดับ จากรูปสังเกตได้ว่าเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและที่ความเข้มแสงต่างๆ จะมีจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพียงจุดเดียวเท่านั้น



รูปที่ 2 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของกระแสต่อแรงดัน

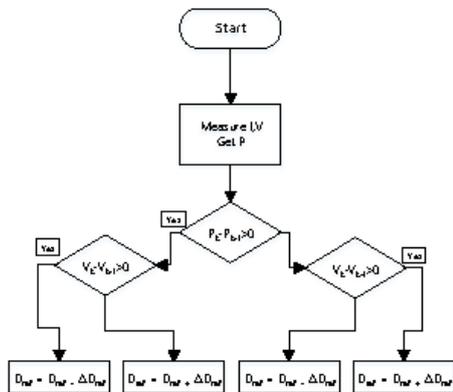


รูปที่ 3 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของกำลังต่อแรงดัน

รูปที่ 4 แสดงแผนผังการทำงานของเทคนิคการรบกวนและสังเกต ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อน โดยลักษณะการคิดค่ากำลังไฟฟ้า ณ เวลาปัจจุบัน $P_{pv}(k)$ ค่ากำลังไฟฟ้าค่านวนจากผลคูณของกระแสและแรงดัน แล้วนำมาเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าก่อนหน้า $P_{pv}(k-1)$ ถ้าอัตราการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นหรือน้อยลงระบบจะปรับทิศทางของแรงดันอ้างอิงไปตามทิศการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า กล่าวโดยสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบทิศทางการรบกวนและสังเกตของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าและทิศทางการตามรอยกำลังไฟฟ้า

ทิศทางการรบกวน	การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า	ทิศทางการรบกวนครั้งต่อไป
บวก	บวก	บวก
บวก	ลบ	ลบ
ลบ	บวก	ลบ
ลบ	ลบ	บวก

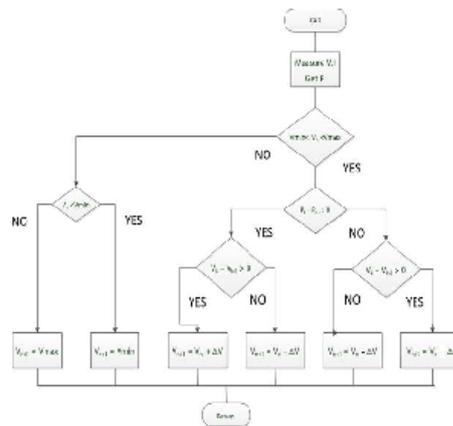


รูปที่ 4 แผนผังการทำงานของเทคนิคการควบคุมและสังเกต

2.2 เทคนิคการควบคุมและสังเกตด้วยระบบรักษาเสถียรภาพแรงดัน

จากหลักการควบคุมในหัวข้อ 2.1 เทคนิคการควบคุมสังเกตแบบเดิมมีการปรับทิศทางของระบบ โดยค่าหนึ่งตั้งกำลังไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว โดยปกติแรงดันไฟฟ้าในระบบนี้จะมีการแกว่งและไม่คงที่เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น บทความนี้เสนอการประยุกต์ใช้เทคนิคการควบคุมและสังเกตโดยรักษาแรงดันไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพ โดยการกำหนดขอบเขตแรงดันไฟฟ้าขาออก ซึ่งเมื่อจุดทำงานของการตามรอยกำลังไฟฟ้าทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกอยู่ในช่วงขอบเขตที่กำหนดไว้ ระบบจะควบคุมการตามรอยด้วยวิธีการควบคุมและสังเกตแบบปกติ แต่เมื่อตรวจพบว่าจุดทำงานนั้นอยู่นอกขอบเขตที่กำหนด ระบบจะบังคับการตามรอยกำลังไฟฟ้าให้อย่างน้อยที่สุดให้ทำงานอยู่ในบริเวณขอบที่กำหนดขึ้นเท่านั้น โดยเปลี่ยนเป็นโหมดควบคุมแรงดันที่เหมาะสมเท่านั้น การดำเนินการดังกล่าวใช้เพียงการจำกัดการต้านออสกิลที่มิสในไมโครโปรเซสเซอร์ราคาถูก ซึ่งเทคนิคที่นำไปใช้บทความนี้จะใช้สวิตช์เพียงหนึ่งตัวเดียว สำหรับหลักการพื้นฐานของเทคนิคที่นำเสนอ แสดงดังแผนภาพในรูปที่ 5

จากแผนผังการทำงานในรูปที่ 5 กลไกการทำงานส่วนหนึ่งจะคล้ายคลึงกับการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคการควบคุมและสังเกตแบบเดิม โดยส่วนที่เพิ่มขึ้นมาเป็นการกำหนดขอบเขตของแรงดันที่ต้องการ และบังคับให้การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดให้อยู่ในช่วงขอบเขตของแรงดันที่ยอมรับได้

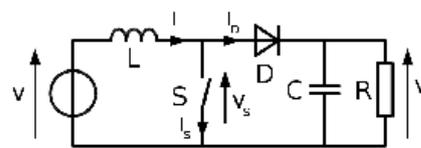


รูปที่ 5 แผนผังการทำงานของเทคนิคที่ใช้ในบทความ

3. การออกแบบวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์สำหรับตัวตามรอยกำลังไฟฟ้า

บัสคอนเวอร์เตอร์ เป็นวงจรที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระดับแรงดันเอาพุตที่สูงขึ้นจากเดิม โดยใช้สวิตช์เพียงตัวเดียว โดยใช้การควบคุมค่าตัวชี้เซ็คเคิล ซึ่งในบทความนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32 cortex M3 โดยทำการตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของเซ็คเคิลแอสอาทิพย์ รวมทั้งตรวจจับแรงดันไฟฟ้าขาออกของคอนเวอร์เตอร์ เพื่อนำมาใช้เป็นอินพุตของเทคนิคที่ใช้เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขาออก โดยสมการความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาพุตของแรงดันจะถูกแสดงดังสมการที่ 3

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (3)$$



รูปที่ 6 วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์

โดยที่ค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์สามารถออกแบบโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f_s} \quad (4)$$

$$C = \frac{D}{rRf_s} \quad (5)$$

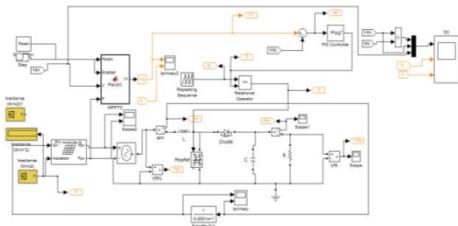
การออกแบบดังกล่าวเป็นการออกแบบให้ทำงานในโหมด กระแสต่อเนื่อง

4. ผลการจำลอง

ระบบจำลองวงจรแปลงผันกระแสตรงกระแสตรงสำหรับงานระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink บน SimPower System Toolbox รูปที่ 7 แสดงแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาขึ้น โดยการทดสอบกระทำภายใต้ความเข้มแสง 700 W/m² และ 900 W/m² โดยที่คุณสมบัติของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลองเป็นไปตามดังตารางที่ 2

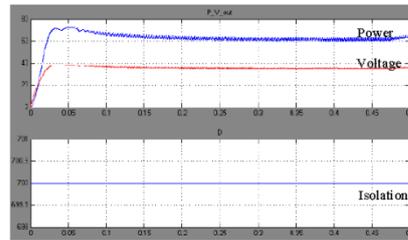
ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลอง

รายการ	ค่า
แรงดันเปิดวงจร	22.1 V
กระแสลัดวงจร	7.54 A
แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด	17.7 V
กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด	7.05 A

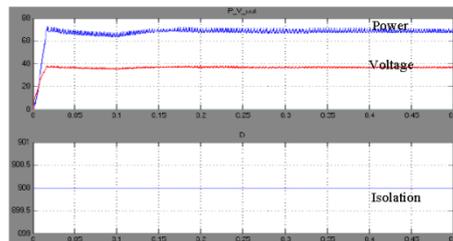


รูปที่ 7 ระบบที่ได้รับการพัฒนาขึ้นของเทคนิคแบบควบคุมแรงดัน-ตามรอยกำลังไฟฟ้า

รูปที่ 8 และ 9 แสดงการจำลองการทำงานของเทคนิคที่นำเสนอโดยตั้งขอบเขตของแรงดันขอบบนไว้ที่ 37 โวลต์ และขอบเขตล่างไว้ที่ 35 โวลต์ จากรูปจะเห็นว่าระบบสามารถตามรอยกำลังไฟฟ้าโดยรักษาแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในขอบเขตที่ต้องการไว้ได้ โดยที่ยังสามารถตามรอยกำลังให้อยู่ในช่วงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ใกล้เคียงเดิม

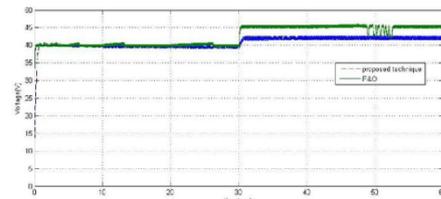


รูปที่ 8 กราฟกำลังไฟฟ้ากับเวลาและแรงดันไฟฟ้ากับเวลาของเทคนิคแบบควบคุมแรงดัน-ตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ความเข้มแสง 700 W/m²

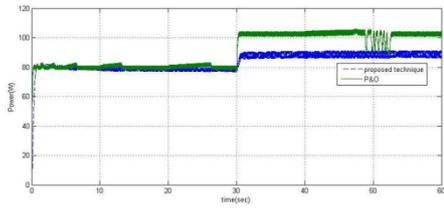


รูปที่ 9 กราฟกำลังไฟฟ้ากับเวลาและแรงดันไฟฟ้ากับเวลาของเทคนิคแบบควบคุมแรงดัน-ตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ความเข้มแสง 900 W/m²

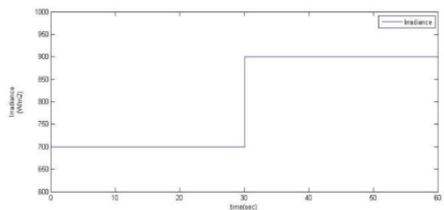
ค่าสมรรถนะการทำงานของเทคนิคที่นำเสนอถูกนำมาเปรียบเทียบกับเทคนิคการตามรอยกำลังไฟฟ้าแบบรบกวนและสังเกตแบบเดิม ภายใต้สภาวะและความเข้มแสงเดียวกัน ดังรูปที่ 10 และ 11 ผลการเปรียบเทียบเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิคการรบกวนและสังเกตแบบเดิมที่เปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ 700 W/m² ไปเป็น 900 W/m² ซึ่งกำหนดขอบเขตของแรงดันขาออกไว้ที่ 40-42 โวลต์



รูปที่ 10 แรงดันต่อเวลาของเทคนิคที่นำเสนอเปรียบเทียบกับเทคนิคเดิม ที่ความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 700-900 W/m²



รูปที่ 11 กำลังไฟฟ้าต่อเวลาของเทคนิคที่นำเสนอเปรียบเทียบกับเทคนิคเดิม ที่ความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 700-900 W/m²



รูปที่ 12 ความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 700-900 W/m²

จากรูปที่ 10 พบว่าค่าของแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันของเทคนิคที่นำเสนอ คือ 2 โวลต์ แต่ในขณะที่เทคนิคแบบเดิมอยู่ที่ 5 โวลต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่เสนอสามารถรักษาระดับแรงดันเอาท์พุทไว้ได้โดยการจำกัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดไว้ที่ 40-42 โวลต์ตามที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟ้าของเทคนิคที่นำเสนอที่ได้รับจะมีค่าลดลงบางส่วนเนื่องจากถูกจำกัดขอบเขตไว้ที่ 42 โวลต์ ซึ่งแต่เดิมเป็น 45 โวลต์ ดังรูปที่ 12

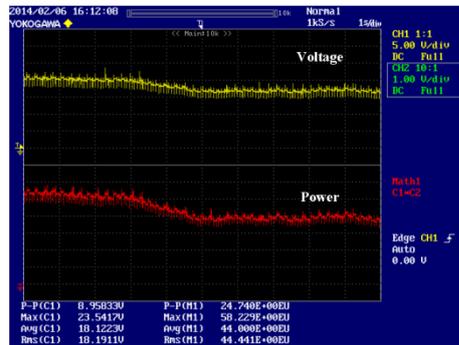
5. ผลการทดลอง

เทคนิคที่ใช้การควบคุมระดับแรงดันและกำลังไฟฟ้าถูกนำไปใช้ในวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ซึ่งได้รับการออกแบบและพัฒนาขึ้นให้ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง การทดลองได้ทำการเปลี่ยนความเข้มแสงจาก 600 ไปยัง 800 W/m² โดยที่คุณสมบัติของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง

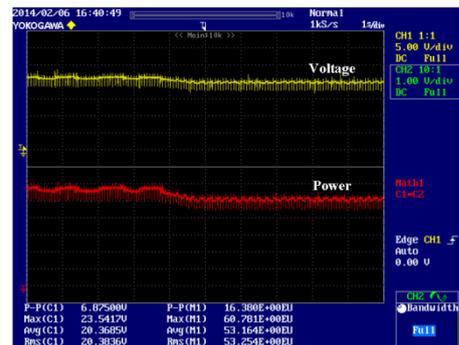
รายการ	ค่า
แรงดันเปิดวงจร	22.1 V
กระแสลัดวงจร	7.54 A
แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด	17.7 V
กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด	7.05 A

เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการทำงานของเทคนิคที่ใช้จึงนำมาเปรียบเทียบกับการตามรอยกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับรอบและสังเกตรูปแบบเดิม โดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 13 -14



รูปที่ 13 แรงดันต่อเวลาและกำลังไฟฟ้าต่อเวลา ของการตามรอยด้วยเทคนิคเดิม ที่ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 600-800 W/m²

จากรูปที่ 13-14 แรงดันไฟฟ้าขาออกของเทคนิคการตามรอยแบบเดิมมีระดับการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ 3 โวลต์ แต่ในขณะที่แรงดันของเทคนิคที่นำเสนอมีแรงดันเปลี่ยนแปลงเพียง 1 โวลต์ ที่สภาวะความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงเท่ากันที่ 600-800 W/m² ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้จริงและสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 14 แรงดันต่อเวลาและกำลังไฟฟ้าต่อเวลาของการตามรอยด้วยเทคนิคที่นำเสนอที่ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 600-800 W/m²

จากรูปจะเห็นได้ว่าเทคนิคที่ใช้จะสามารถมีระดับแรงดันไฟฟ้าที่สม่ำเสมออย่างไรก็ตาม การได้รับกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะน้อยกว่าระบบเดิม

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเสถียรภาพแรงดันเอาท์พุท โดยจะทำการปรับปรุงควบคุมแรงดันเอาท์พุทไปพร้อมกับการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาเพื่อลดปัญหาหลัก

ของวิธีการเดิม ซึ่งใช้แนวคิดการทำงานพื้นฐานของการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าขอบนและระดับแรงดันไฟฟ้าขอล่าง เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าออกมีเสถียรภาพในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งจะต้องอาศัยการเลือกขนาดของการเปลี่ยนแปลงคัตซีโวลต์ที่เหมาะสม โดยถ้ามากเกินไปจะส่งผลต่อการแกว่งของกำลังและแรงดันไฟฟ้า แต่มีข้อเสียบางประการเนื่องจากผลของการส่งออกพลังงานที่ต่ำกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเทคนิคเดิม อย่างไรก็ตาม ในอนาคตที่จะมีการเชื่อมต่อกับระบบไมโครกริด การคำนึงถึงเสถียรภาพแรงดันขาออกเป็นสิ่งสำคัญพอๆกับการได้กำลังไฟสูงสุดจากระบบพลังงานทดแทน

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้แต่งขอขอบคุณทุนสนับสนุนวิจัยงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2557 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 2557A11802297 โครงการ Smart Electric Vehicle Charger with High Performance PV Grid Connected System

เอกสารอ้างอิง

- [1] Werachet Khan-Ngern and Wutthiphol Tharateeraset, Power Electronic 9th (in Thai), 162 Moo 4 Ratphatthana Rd, Bangpakok Ratburana Bangkok 10140: VJ Printing Limited part, 2009.
- [2] Moacyr Aureliano Gomes de Brito, Luigi Galotto, Jr., Leonardo Poltronieri Sampaio, Guilherme de Azevedo e Melo, and Carlos Alberto Canesin, "Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications," IEEE Trans On Industrial Electronics, Vol. 60, No. 3, March 2013.
- [3] Mohammed A. Elgendy, Bashar Zahawi, and David J. Atkinson, "Assessment of Perturb and Observe MPPT Algorithm Implementation Techniques for PV Pumping Applications," IEEE Trans. On sustainable energy, Vol. 3, No. 1, January 2012.
- [4] Rosa A. Mastromauro, Marco Liserre, Antonio Dell'Aquila, "Control Issues in Single-Stage Photovoltaic Systems: MPPT, Current and Voltage Control," IEEE Trans. On Industrial Informatics, Vol. 8, No. 2, May 2012.
- [5] Chuanzong Fu and Shiping Su, "Simulation studying of MPPT control by a new method for photovoltaic power system," Electrical and Control Engineering (ICE) 2011., Pp. 1274-1278, 2011.
- [6] Jae Ho Lee, HyunSu Bae and Bo Hyung Cho, "Advanced Incremental Conductance MPPT Algorithm with a Variable Step Size," Power Electronics and Motion Control Conference 2006., Pp. 603-607, 2006.
- [7] Kyritsis, A.Ch.; Tatakis, E.C.; Papanikolaou and N.P, "Optimum Design of the Current-Source Flyback Inverter for Decentralized Grid-Connected Photovoltaic Systems," Energy Conversion, IEEE Transactions on., Vol. 23, No. 1, pp. 281-293, 2008.
- [8] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnolo and M. Vitelli, "Optimizing Duty-Cycle Perturbation of P&O MPPT Technique," 35th Annual IEEE Power Electronics., Vol. 3, pp. 1939-1944, 2004.
- [9] Nicola Femia, Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, etc. "Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method," IEEE Trans. on Power Electronics., Vol. 20, No. 4, pp. 963-973, 2005.
- [10] I. H. Atlas and A.M. Sharaf, "A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment," Clean Electrical Power, 2007. ICCEP '07. International Conference on., pp. 341-345, 2007.
- [11] Konghuayrob, P and Kaitwanidvilai, S., "Maximum Power Point tracking using neural network in flyback MPPT inverter for PV systems," SCIS-ISIS 2012, Kobe, Japan, November 20-24, 2012.
- [12] I. H. Atlas and A.M. Sharaf, "A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment," Clean Electrical Power, 2007. ICCEP '07. International Conference on., Pp. 341-345.
- [13] L. Piegari R. Rizzo, "Adaptive perturb and observe algorithm for photovoltaic maximum power point tracking," IET Renew. Power Gener., 2010, Vol. 4, Iss. 4, pp. 317-328.

การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายสำหรับรถยนต์พลังงานไฟฟ้า Wireless Power Transmission for Electric Vehicle

ภัทรธร เฝ้าจินดา ภาณุ มัทธวรัตน์ ภูธร สุขวณิช ราชกากร สุวจสุวรรณ และ สมยศ เกียรติวนิชวิไล
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: somyotk@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าด้วยหลักการเรโซแนนซ์ของวงจรแอลซีและทฤษฎีการเหนี่ยวนำไฟฟ้าของฟาราเดย์ วงจรที่ได้ออกแบบสามารถสร้างฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าจากพลังงานไฟฟ้าได้และส่งพลังงานในรูปแบบของฟลักซ์ไฟฟ้าจากขดลวดส่งไปยังขดลวดรับ จากนั้นขดลวดรับจะเปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้สำหรับการอัดประจุแบตเตอรี่ในรถยนต์ไฟฟ้า หลักการเรโซแนนซ์ในการออกแบบใช้ให้ระบบสามารถส่งพลังงานโดยมีพลังงานไฟฟ้ามากที่สุด ซึ่งใช้ขดลวดคัปปลิงทั้งหมดสองชุด โดยใช้วงจรอินเวอร์ชันดิฟเฟอเรนเชียลในการสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่เรโซแนนซ์ ในส่วนของอุปกรณ์ต้นแบบที่ได้พัฒนาขึ้นใช้หลักการออกแบบที่ง่ายต่อการใช้งานปลอดภัย รวมทั้งได้มาตรฐานตามข้อกำหนดทางแม่เหล็กไฟฟ้า

คำสำคัญ: การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย เรโซแนนซ์ การเหนี่ยวนำ

Abstract

This paper presents the wireless power transmission system for electric vehicle (EV) by using a basic principle of Faraday's induction theory and resonance LC circuit. The developed prototype can convert the electricity energy to magnetic flux and transfer it to the receiving coil. Then the receiving coil converts the magnetic flux back to the electrical energy for generating the charging current for battery. Based on the concept of power wireless transmission using resonance method, the maximum power can transfer to the receiving coil. The developed prototype composes of a full bridge inverter for generating AC voltage and current at resonance frequency. The developed prototype is simple, user friendly interface, and achieves the standard regarding the magnetic.

Keywords : Wireless Power Transmission, Resonance, Inductive Coupling

1. บทนำ

ปัจจุบันรถยนต์ไฟฟ้า (EV) ได้รับความสนใจเป็นทางเลือกสำหรับการคมนาคมในอนาคต ที่ต้องการลดการใช้เชื้อเพลิงปิโตรเลียมในการขับเคลื่อน รถยนต์ไฟฟ้าทุกวันนี้เริ่มมีการใช้งานในเชิงพาณิชย์มากขึ้น จากปัญหาราคาน้ำมันที่สูงขึ้นและรถยนต์ไฟฟ้าเป็นพลังงานสะอาด โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ในการขับเคลื่อน อย่างไรก็ตาม ความต้องการการอัดประจุด้วยการต่อสายไฟในบางครั้งไม่สะดวก เปลี่ยนพื้นที่และเคลื่อนย้ายลำบาก เพื่อแก้ไขปัญหา งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายขึ้นมาเพื่ออัดประจุแบตเตอรี่โดยไม่ต้องต่อสายโดยใช้หลักการทางแม่เหล็กไฟฟ้าและพื้นฐานจากทฤษฎีของฟาราเดย์และวงจรเรโซแนนซ์

งานวิจัยทางด้านระบบส่งกำลังไร้สายและอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้ถูกนำเสนออย่างแพร่หลาย [1-12] หยานบิง เหยา ฮองยาน ชาง และทีมนักวิจัยจากสถาบัน CAS ของปักกิ่ง ประเทศจีน ได้นำเสนอต้นแบบการอัดประจุพลังงานไฟฟ้าไร้สาย ด้วยหลักการคัปปลิงทางแม่เหล็กที่สภาวะเรโซแนนซ์ ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวเป็นระบบอัดประจุแบตเตอรี่ในโทรศัพท์มือถือแบบไร้สาย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายบนทฤษฎีคัปปลิงทางแม่เหล็กที่สภาวะเรโซแนนซ์ ระบบได้รับการประยุกต์ใช้และทดลองกับโทรศัพท์มือถือรุ่น โนเกีย 5130 [9]

อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ของโทรศัพท์มีขนาดเล็กกว่าแบตเตอรี่ของรถยนต์มากจึงไม่สามารถนำมาใช้กับระบบอัดประจุไฟฟ้าสำหรับรถยนต์ได้ ปีเตอร์ ฟิชเชอร์ โรเบิร์ต มอฟเฟตและทีมนักวิจัยจาก MIT ได้ประสบความสำเร็จในการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายผ่านอากาศไปยังโหนดที่ห่างออกไปไกล 2 เมตรซึ่งเป็นโหนดหลอดไฟขนาด 60 วัตต์ โดยมีประสิทธิภาพการส่งที่ประมาณ 60% โดยใช้การคัปปลิงที่สภาวะเรโซแนนซ์ระหว่างขดลวด 2 ชุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ประมาณ 10 เมกะเฮิร์ต อย่างไรก็ตาม กำลังวัตต์ขนาด 60 วัตต์ไม่สามารถนำไปใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าได้เช่นกัน นากา ชูเกะ

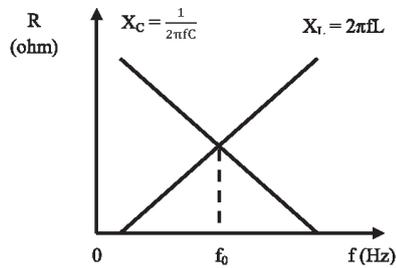
อารา คาเนโกะ และทีมนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยไซตามะ ประเทศญี่ปุ่นได้ประสบความสำเร็จในการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายไปยังหลอดด้วยกำลังไฟฟ้า 1500 วัตต์ มีเทคโนโลยีสองอย่างที่นำมาใช้ เทคโนโลยีแรกคือ การกำหนดค่าตัวเก็บประจุที่สภาวะเรโซแนนซ์ โดยตัวเก็บประจุที่ฝั่งส่งจะต่อแบบอนุกรม ส่วนตัวเก็บประจุที่ฝั่งรับจะต่อแบบขนาน ส่วนเทคโนโลยีที่สองคือหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีโครงสร้างใหม่ที่หลอดสองด้านจะพันรอบแกนรูปสี่เหลี่ยม บทความนี้นำเสนอระบบส่งไฟฟ้าไร้สายที่สามารถส่งไฟฟ้าได้กำลังสูงสำหรับอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า เพื่อช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิลที่มีอยู่อย่างจำกัด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเรโซแนนซ์ระหว่างด้านส่งและด้านรับ

วงจรเรโซแนนซ์ประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุกับขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งมีผลต่อไฟฟ้ากระแสสลับ โดยเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับวงจรเรโซแนนซ์ ไม่ว่าจะจ่ายแบบอนุกรมหรือขนาน ผลที่ได้คือ ถ้าค่าความถี่สูงค่า X_L จะมากและค่า X_C จะต่ำ ดังนั้นค่าความถี่ที่ทำให้ X_L และ X_C มีค่าเท่ากัน ค่าความถี่นั้นคือความถี่เรโซแนนซ์ (f_0) [1] โดยปกติวงจรแอลซีมีความถี่เรโซแนนซ์ตามสมการที่ 1

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

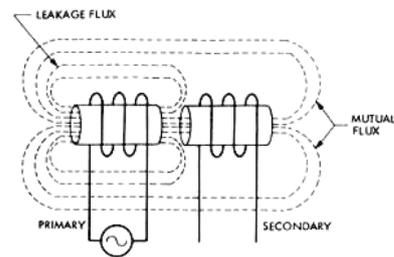


รูปที่ 1 ผลของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่อกระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ

เมื่อปรับความถี่เรโซแนนซ์ของด้านฝั่งส่งและฝั่งรับให้มีค่าเท่ากัน จะเกิดการถ่ายเทพลังงานจากฝั่งส่งไปยังฝั่งรับผ่านอากาศโดยผ่านการเหนี่ยวนำของขดลวด โดยสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้สูงที่สุด

2.2 การเหนี่ยวนำของขดลวดในการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ

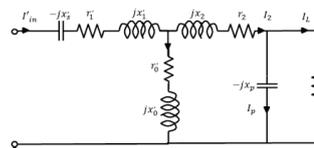
การเหนี่ยวนำเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับขดลวด โดยจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่รอบขดลวดนั้นเกิดเป็นพลังงานแม่เหล็ก ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจะถูกส่งไปเกี่ยวคดล้อมผ่านขดลวดอีกฝั่ง เรียกว่าเกิดฟลักซ์เกี่ยวคดล้อมกัน โดยเมื่อสนามแม่เหล็กฝั่งส่งตัดผ่านขดลวดฝั่งรับจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวด ซึ่งส่งผลให้หลอดที่ต่ออยู่ได้รับพลังงานที่ส่งมาจากขดลวดฝั่งส่งได้ โดยหลอดที่เราพิจารณานำมาใช้ในบทความนี้เป็นชุดอุปกรณ์ชาร์จแบตเตอรี่รถไฟฟ้า



รูปที่ 2 การเกิดฟลักซ์เกี่ยวคดล้อมในขดลวด

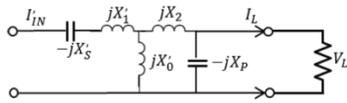
สำหรับแกนของขดลวดนั้นมีอยู่หลายประเภท เช่น แกนอากาศ แกนเหล็ก และแกนเฟอร์ไรท์ เป็นต้น แกนอากาศมีการเหนี่ยวนำน้อยกว่าชนิดอื่นเนื่องจากค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กมีน้อย จะเหมาะสมที่ใช้ในย่านความถี่สูงได้ดี

2.3 วงจรสมมูลของวงจรส่ง และ วงจรรับ



รูปที่ 3 วงจรสมมูลของระบบส่งไฟฟ้าแบบไร้สาย

จากรูปที่ 3 แสดงถึงวงจรสมมูลของระบบที่ความถี่เรโซแนนซ์ จากรูปพบว่า ความต้านทานขดลวด r_1 , r_2 และ ความต้านทานสูญเสียในแกนเฟอร์ไรท์ มีค่าน้อยกว่า ความต้านทานร่วม X_0 และ ความต้านทานรั่วไหล X_0 ดังนั้นจึงวาดวงจรสมมูลขึ้นมาใหม่แบบง่าย ๆ ตามรูปที่ 4 [9]



รูปที่ 4 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

โดยประสิทธิภาพของวงจร (η) [3] สามารถหาได้จาก

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + \frac{r_1'}{b^2} + r^2 \left[1 + \left(\frac{R_L}{x_p} \right)^2 \right]} \quad (2)$$

และจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อ $R_L = R_{Lmax}$ [11, 13]

$$R_{Lmax} = x_p \sqrt{\frac{1}{b^2} \frac{r_1'}{r_2} + 1} \quad (3)$$

$$\eta_{max} = \frac{1}{1 + \frac{2r_2}{x_p} \sqrt{\frac{1}{b^2} \frac{r_1'}{r_2} + 1}} \quad (4)$$

$$b = \frac{x_0'}{x_0' + x_2} \quad (5)$$

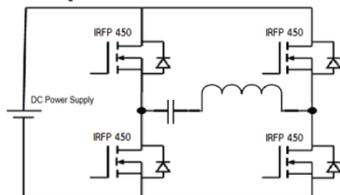
3. การออกแบบการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านอากาศ

3.1 วงจรเรียงกระแส

ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น ซึ่งประกอบไปด้วยบริดจ์ไดโอดกำลังและตัวตัวเก็บประจุขนาด 2200 ไมโครฟารัด

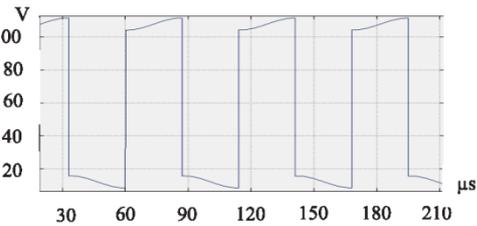
3.2 อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

อินเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้นเป็นชนิดฟูลบริดจ์ประกอบด้วย มอสเฟตจำนวน 4 ตัว ทำหน้าที่สวิตช์เพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง [8-8]

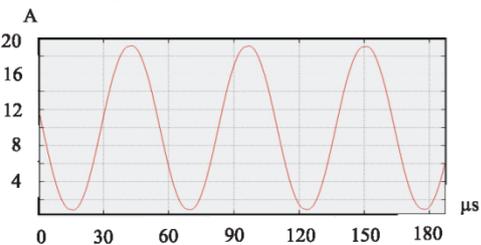


รูปที่ 5 วงจรอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง ประกอบไปด้วยการใช้หม้อแปลง 220/18 โวลต์ ไอซีเบอร์ 7815 สำหรับรักษาระดับแรงดัน 15 โวลต์สำหรับจ่ายให้ออฟได TLP 250 และ ไอซีเบอร์ 7905 สำหรับรักษาระดับแรงดัน -5 โวลต์ สำหรับจ่ายให้ออฟได TLP250 และ มอสเฟต IRFP450 สำหรับสวิตซ์ซึ่งความถี่สูง ผลการจำลองการทำงานเป็นดังรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 6 กราฟแรงดันจากการจำลอง



รูปที่ 7 กราฟกระแสจากการจำลอง

3.3 การออกแบบขดลวดฝั่งรับและฝั่งส่ง

ขดลวดฝั่งส่งสร้างเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นเพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กไปเกี่ยวค้ำยังขดลวดฝั่งรับ โดยตัวเหนี่ยวนำที่เลือกมีขนาด 0.19 มิลลิเฮนรีต่อแบบอนุกรมและตัวเก็บประจุขนาด 180 นาโนฟารัด สำหรับขดลวดฝั่งรับ เลือกใช้ที่ค่าเท่ากับเพื่อให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ขึ้นที่ความถี่เดียวกับขดลวดฝั่งส่งเพื่อให้ส่งผ่านพลังงานได้สูงที่สุด [12]

จาก

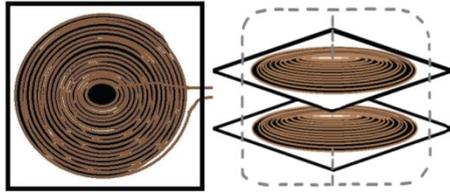
$$L = \frac{(NR)^2}{8R + 11W} \quad (6)$$

โดย L = ความเหนี่ยวนำของขดลวด มีหน่วยเป็น ไมโครเฮนรี

R = รัศมีของขดลวด มีหน่วยเป็นนิ้ว

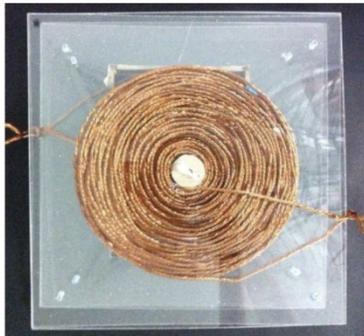
N = จำนวนรอบ

W = ความกว้างของขดลวด มีหน่วยเป็นนิ้ว



รูปที่ 8 ขดลวดฝั่งรับและส่ง และลักษณะเส้นทางการเคลื่อนที่ของฟลักซ์แม่เหล็ก

ขดลวดทั้งสองฝั่งถูกออกแบบให้อยู่ในรูปแบบของกันหอยรวมทั้งมีการใช้แกนเฟอร์ไรท์เพื่อลดฟลักซ์รั่วไหล (Leakage flux) ชนิดของตัวนำเราเลือกใช้ลวดทองแดงแบบตีเกลียวประกอบด้วย 10 เส้นขนาดเล็กเพื่อลดความสูญเสียจากความต้านทานในลวดตัวนำและความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าไหลที่ผิวของลวดตัวนำขณะที่ความถี่สูง [12, 14]

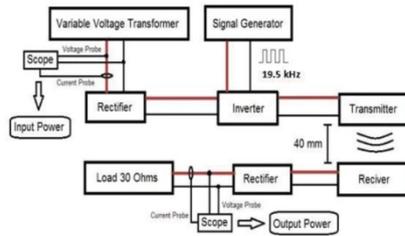


รูปที่ 9 ขดลวดฝั่งส่งและฝั่งรับของวงจรที่ได้รับการออกแบบ

4. ผลจากการทดลอง

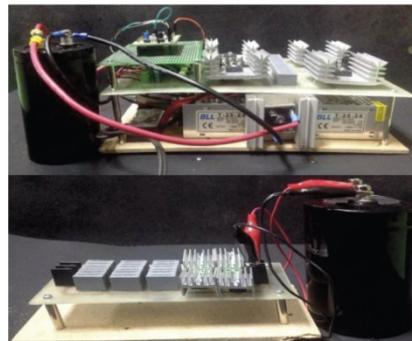
ประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายสามารถหาได้จากประสิทธิภาพของวงจรส่งและรับกำลังไฟฟ้าไร้สาย โดยมีความสัมพันธ์กับระยะทางของการส่งกำลังไฟฟ้าและปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ส่งได้ซึ่งระบบที่ได้ออกแบบ สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้ถึง 504.18 วัตต์ ด้วยระยะทาง 40 มิลลิเมตร โดยมีประสิทธิภาพรวม

เท่ากับ 72.98% โดยระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายได้ถูกติดตั้งเพื่อทดสอบตามรูปที่ 10



รูปที่ 10 การติดตั้งจัดวางอุปกรณ์เพื่อการทดสอบ

รูปที่ 11 แสดงต้นแบบและการทดสอบและตารางที่ 1 แสดงผลทดสอบที่ได้ในระยะต่างๆ

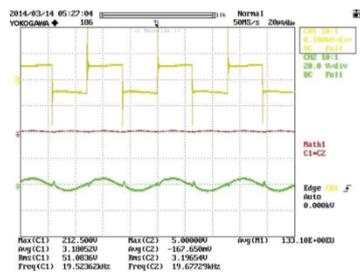


รูปที่ 10 วงจรอินเวอร์เตอร์ฝั่งส่งและฝั่งรับที่ได้รับการออกแบบ

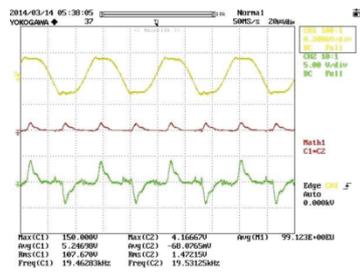
ตารางที่ 1 แสดงจำนวนกำลังไฟฟ้าขาเข้า กำลังไฟฟ้าที่ได้รับ ประสิทธิภาพที่ระยะทาง 4 เซนติเมตร

Input Power (W)	139.38	254.42	388.68	525.36	690.83
Output Power (W)	100.38	202.95	301.48	403.57	504.18
Efficiency (%)	72.02	79.77	77.57	76.82	72.98

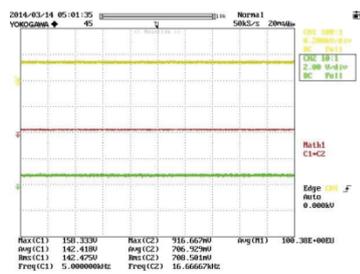
ค่าที่ประสิทธิภาพถูกแสดงในตารางที่ 1 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเข้าที่ขดลวดฝั่งรับและกำลังไฟฟ้าขาออกที่ขดลวดฝั่งส่ง โดยระบบที่ทำการทดสอบมีพารามิเตอร์ดังนี้ ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้คือ 0.19 มิลลิเฮนรี่, ตัวเก็บประจุ 180 นาโนฟารัด, ความถี่เรโซแนนซ์ที่ใช้คือ 19.5 กิโลเฮิรตซ์ ระยะห่างระหว่างขดลวดรับและส่งมีระยะทาง 4 เซนติเมตร



รูปที่ 11 รูปสัญญาณจากอินเวอร์เตอร์

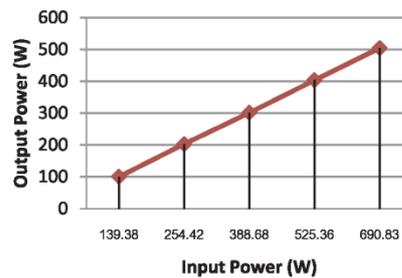


รูปที่ 12 รูปสัญญาณจากขดลวดฝั่งรับ

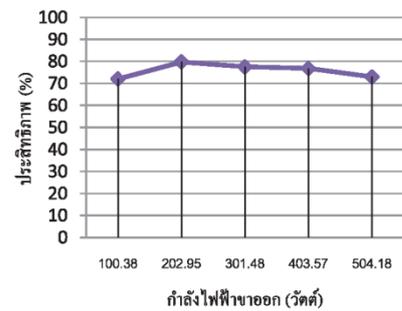


รูปที่ 13 รูปสัญญาณของโหลด 30 โอห์ม

รูปที่ 11-13 แสดงรูปแบบสัญญาณของระบบที่บริเวณจุดตรวจวัดต่างๆ กัน ในรูปที่ 11 เป็นสัญญาณจากอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีลักษณะเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีทั้งซีกบวกและลบซึ่งถูกสวิตช์ด้วยความถี่ 19.5 kHz รูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ที่ถูกแสดงในรูปที่ 12 แสดงสัญญาณแรงดัน กระแส และ กำลังไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดฝั่งรับ ซึ่งพบว่ามีลักษณะเป็นไซน์ที่มีความถี่ 19.5 kHz อันเนื่องมาจากผลของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ต่อคร่อมอยู่ และในรูปที่ 13 แสดง แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าตกคร่อมโหลดความต้านทาน 30 โอห์ม หลังจากผ่านวงจรเรียงกระแสและกรองด้วยตัวเก็บประจุเรียบร้อยแล้ว

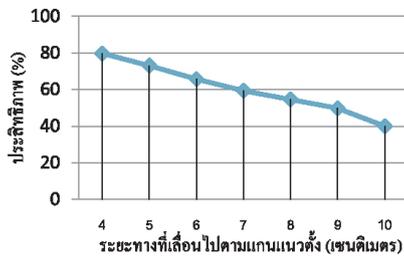


รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังไฟฟ้าเข้าและกำลังไฟฟ้าออกที่ระยะห่าง 4 เซนติเมตร

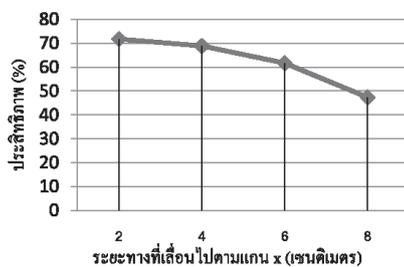


รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าออกและประสิทธิภาพที่ระยะห่าง 4 เซนติเมตร

จากรูปที่ 14-15 แสดงค่าประสิทธิภาพเมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นพบว่าเมื่อกำลังไฟฟ้าฝั่งส่งเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพจะสูงขึ้นในช่วงต้นและจะค่อยๆลดลงในช่วงที่ กำลังไฟฟ้ามักขึ้นเนื่องจากการอิมพีแดนซ์



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างในแนวแกน Z และประสิทธิภาพ



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างตามแนวแกน X และ ประสิทธิภาพ

รูปที่ 16-17 แสดงผลตอบสนองที่ระยะห่างของขดลวดเคลื่อนที่ในรูปแบบต่างๆ จากรูปที่ 16 พบว่าเมื่อระยะห่างของขดลวดฝั่งส่งและฝั่งรับห่างกันมากขึ้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการส่งของกำลังไฟฟ้าของระบบให้ลดลง เช่นเดียวกับรูปที่ 17 เมื่อขดลวดฝั่งส่งและฝั่งรับไม่อยู่ในแนวแกนเดียวกันโดยเลื่อนออกไปทางด้านข้างพบว่าระยะห่างจากแนวแกนกลางมีผลต่อค่าประสิทธิภาพด้วยเช่นกัน

5. สรุป

ระบบการอัดประจุแบบเคอร์รี่แบบไร้สายนี้ ช่วยเพิ่มความสะดวกให้กับผู้ใช้งาน โดยไม่จำเป็นต้องใช้สายเพื่ออัดประจุ และ เมื่อรถไฟฟ้าที่มีระบบอัดประจุแบบไร้สายมายังตำแหน่งที่เหมาะสมก็สามารถอัดประจุได้ทันที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระบบที่สร้างขึ้นสามารถส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายได้และแสดงให้เห็นถึงผลของระยะห่างในแนวตั้งและในแนวราบ มีผลต่อประสิทธิภาพในการส่งพลังงาน โดยที่ระยะ 40 mm ประสิทธิภาพของระบบอยู่ที่ 79.77% โดยแสดงให้เห็น

ว่าผลการทดลองที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกับทฤษฎีที่ใช้ แต่อย่างไรก็ดีระบบสามารถออกแบบเพิ่มเติมให้มีความสูญเสียที่ต่ำลง อาทิการเลือกใช้ชนิดของสวิตซ์ซึ่งให้ความร้อนต่ำ รวมถึงการออกแบบขดลวดให้รองรับการอัดตัวได้สูงขึ้น เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้แต่งขอขอบคุณทุนสนับสนุนวิจัยงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2557 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 2557A11802297 โครงการ Smart Electric Vehicle Charger with High Performance PV Grid Connected System

เอกสารอ้างอิง

- [1] Werachet Khan-Ngem and Wutthiphol Tharateeraset, 9th published, 162 Moo 4 Ratphatthana Rd, Bangpakok Ratburana Bangkok 10140 : VJ Printing Limited part, 2009.
- [2] S. Sheik Mohammed, K. Ramasamy and T. Shanmuganatham, "Wireless Power Transmission – A Next Generation Power Transmission System", International Journal of Computer Applications (0975-8887), Vol. 1 No.13, 2012, pp. 100-103.
- [3] Hiroya Takanashi, Yukiya Sato, Yasuyoshi Kaneko, Shigeru Abe and TomioYasuda, "A large air gap 3 kW wireless power transfer system for electric vehicles", Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE., 2012, pp. 269-274.
- [4] Ki Young Kim, "Wireless Power Transfer – Principles and Engineering Explorations", Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, Intech, 2012.
- [5] H. Zenkner and W. Khan-ngem, "High Power Density and High Efficient Wireless Energy Transfer by Resonance Coupling", Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2010 International Conference on., 2010, pp. 1281-1284.
- [6] Dr. Morris Kesler, "Highly Resonant Wireless Power Transfer : Safe, Efficient, and over Distance", Witricity Corporation Magazine, 2013, pp. 1-32.
- [7] B.-J. Jang, S. Lee, and H. Yoon, "HF-BAND WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM : CONCEPT, ISSUES, AND DESIGN", Progress In Electromagnetics Research, Vol. 124, No.211-231, 2012, pp. 1-21.

- [8] A. James Swart, H. Christo vZ. Plenaar and Mike J. Case, "A Radio Frequency Mosfet driver", AFRICON, 2004. 7th AFRICON Conference in Africa, Vol. 1, 2004, pp. 543-546.
- [9] Yanping Yao ; Hongyan Zhang ; Zheng Geng , "Wireless charger prototype based on strong coupled magnetic resonance", Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), 2011 International Conference , Vol.5 , 2011 , pp. 2252-2254.
- [10] Kawamura, Y. Shoyama, M., "Wireless power transmission using LC cancellation", ECCE Asia Downunder (ECCE Asia), 2013 IEEE., 2013, pp. 1041-1045.
- [11] Moshfegh, J. ; Shahabadi, M. ; Rashed-Mohassel, J., "Conditions of maximum efficiency for wireless power transfer between two helical wires", Microwaves, Antennas & Propagation , IET, Vol.5, 2011, pp. 545-550.
- [12] Jiseong Kim ; Jonghoon Kim ; Sunkyu Kong ; Hongseok Kim ; In-Soo Suh ; Nam Pyo Suh ; Dong-Ho Cho ; Joungho Kim ; Seungyoung Ahn. "Coil Design and Shielding Methods for a Magnetic Resonant Wireless Power Transfer System", Proceedings of the IEEE, Vol.101, 2013, pp. 1332-1342.
- [13] JinWook Kim ; Hyeon-Chang Son ; Kwan-Ho Kim ; Young-Jin Park, "Efficiency Analysis of Magnetic Resonance Wireless Power Transfer With Intermediate Resonant Coil", Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, Vol.10, 2011, pp. 389-392.
- [14] Dukju Ahn ; Songcheol Hong , "A Transmitter or a Receiver Consisting of Two Strongly Coupled Resonators for Enhanced Resonant Coupling in Wireless Power Transfer", Industrial Electronics, IEEE Transactions, Vol.61, Issue 3, 2014, pp. 1193-1203.
- [15] Di Tommaso, A.O.; Genduso, F.; Miceli, R., "A small power transmission prototype for electric vehicle wireless battery charge applications", Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2012 International Conference, 2012, pp. 1-6.

ภาคผนวก ค

การจัดอบรมสัมมนาเผยแพร่งานวิจัย
โดยจัดอบรมจำนวน 2 ครั้ง

ครั้งที่ 1 วันที่ 29 มีนาคม 2557

หัวข้อ : การสร้างต้นแบบระบบชาร์จไร้สายและการเชื่อมต่อ ปัญหาและแนวทางแก้ไข

ครั้งที่ 2 วันที่ 29 กันยายน 2557

หัวข้อ : ระบบชาร์ตรถไฟฟ้าแบบสมาร์ตพร้อมระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดสมรรถนะสูง

การจัดอบรมสัมมนาครั้งที่ 1





การจัดอบรมสัมมนาครั้งที่ 2

อังคารที่ 30 กันยายน 2557 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ECC 404

