

การเพิ่มประสิทธิภาพการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วงจรซิงโครนัสซีต้า
คอนเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

IMPROVEMENT PERFORMANCE MAXIMUM POWER POINT TRACKING
USING SYNCHRONOUS ZETA CONVERTER FOR PHOTOVOLTAIC

กวีพจน์ วรเนตรสุทธิกุล

KAWEEPOJ WORANETSUTTIKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2557

KMITL-2014-EN-M-020-221

การเพิ่มประสิทธิภาพการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วงจรซิงโครนัสซีต้า
คอนเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

IMPROVEMENT PERFORMANCE MAXIMUM POWER POINT TRACKING
USING SYNCHRONOUS ZETA CONVERTER FOR PHOTOVOLTAIC



T138757

กวีพจน์ วรเนตรสุทธิกุล

KAWEEPOJ WORANETSUTTIKUL

เลขหมู่
เลขทะเบียน 138757
วันเดือนปี 16 ต.ค. 2558

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2557

KMITL-2014-EN-M-020-221

IMPROVEMENT PERFORMANCE MAXIMUM POWER POINT TRACKING
USING SYNCHRONOUS ZETA CONVERTER FOR PHOTOVOLTAIC

KAWEEPOJ WORANETSUTTIKUL

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2014

KMITL-2014-EN-M-020-221

COPYRIGHT 2014

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเพิ่มประสิทธิภาพการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์
สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

Thesis Title Improvement Performance Maximum Power Point Tracking Using
Synchronous Zeta Converter for Photovoltaic

นักศึกษา นายกวีพจน์ วรเนตรสุทธิกุล

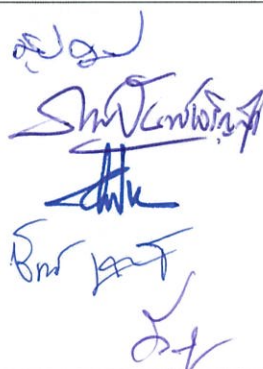
รหัสประจำตัว 55610732

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2014-EN-M-020-221

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สุพัฒน์	กิตติรัตน์สัจจา	
ดร.ภพ	จันทร์เจริญสุข	
รศ.ดร.วิบูลย์	ชินแขก	
ผศ.ดร.ชัยยันต์	เจตนาเสน	
รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์	ชันเงิน	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2557 เวลา 12.00-14.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ห้อง E12-404

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2557

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มประสิทธิภาพการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วงจร ซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์
นักศึกษา	นายกวีพจน์ วรเนตรสุทธิกุล
รหัสประจำตัว	55610732
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชนิดซิงโครนัสซีต้าที่เน้นการเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพของรูปคลื่นทั้งด้านออกและด้านเข้า โดยคอนเวอร์เตอร์ชนิดซิงโครนัสซีต้านี้ได้ออกแบบและพัฒนามาจากคอนเวอร์เตอร์ชนิดซีต้า ด้วยการเลือกใช้มอสเฟตที่มีการสูญเสียต่ำกว่าการสูญเสียของไดโอด ที่ทำงานในโหมดบั๊กและบูสต์ โหมดแบบกระแสต่อเนื่องในช่วงค่าวัฏจักรตั้งแต่ 0-0.65 ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่กำลังไฟฟ้า 0-160 วัตต์ ที่ค่าประสิทธิภาพสูงสุดไม่น้อยกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ โดยกระแสรีปเปิ้ลและแรงดันรีปเปิ้ลทั้งด้านเข้าและด้านออกถูกออกแบบให้มีค่าน้อยกว่า 1.0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งวงจรที่นำเสนอนี้สามารถนำไปใช้และถูกทดสอบในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดในระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

Thesis	Improvement Performance Maximum Power Point Tracking Using Synchronous Zeta Converter for Photovoltaic
Student	Mr. Kaweepoj Woranetsuttikul
Student ID.	55610732
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2014
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Cpt. Dr. Werachet Khan-ngern

ABSTRACT

This thesis presents the proposed synchronous zeta converter focusing on performance improvement and ripple waveform of voltage and current. The proposed synchronous zeta converter is developed based on the conventional zeta converter by replacement of low loss MOSFET on the diode. The synchronous zeta converter is operated on current continuous mode at buck-boost operation with 0-0.65 duty cycle, 20 kHz switching frequency and 0-160 watts. The maximum power efficiency is achieved 95% at current and voltage ripple for both input and output less than 1 %. The synchronous converter can be applied and tested in maximum power point tracking with photovoltaic system.

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยเรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ ได้รับความร่วมมือจากหลายท่านทำให้บทความนี้ประสบความสำเร็จและด้วยความวิริยะอุตสาหะของผู้จัดทำเองจึงทำให้ประสบความสำเร็จ คำแนะนำและการสนับสนุนหากไม่ได้เลยอาจจะทำให้เกิดความเสียหายหรือเกิดการล่าช้าขึ้นได้ ทางผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณในความอนุเคราะห์ดังกล่าว ดังมีรายนามต่อไปนี้

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณในความกรุณาของ รศ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำชี้แนวทางของปัญหาและนำไปสู่ความสำเร็จและยังได้อนุเคราะห์ห้องทำงานและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณนายนครศักดิ์ แสงศรีเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้เบิกใช้เครื่องมือในการทดลอง ขอขอบคุณฝ่ายอาคารและสถานที่ที่อนุเคราะห์พื้นที่ลาดฟ้าให้ใช้ในการทดลองตลอดจนอาจารย์ในสาขาวิชาที่ได้ถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ ขอขอบคุณนายณัฐวรราช จำปาศรีที่ได้ช่วยในเรื่องของการเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ขอขอบคุณนายกฤตภาส ผินสันเทียะ ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือการเขียนลายวงจร ขอขอบพระคุณนาวาตรีเทวินทร์ นิลสาครที่ได้ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำเล่มและภาษาอังกฤษ ขอขอบคุณนายภูมิ คงห้วยรอบที่ช่วยให้คำแนะนำในการทำรูปเล่มและเรื่องเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ ผู้จัดทำของกราบขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่งของข้าพเจ้า ด้วยความรักและการช่วยเหลือทุกอย่างทั้งทางด้านค่าเล่าเรียนค่าใช้จ่ายในชีวิตประจำวัน ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอย่างหาที่สุดมิได้

กวีพจน์ วรเนตรสุทธิกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	IX
สารบัญตาราง.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	3
1.6 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 DC-DC converter.....	6
2.1.1 หลักการทำงานของวงจรสวิตชิง.....	6
2.1.2 วงจรทอนระดับแรงดัน(Buck converter).....	8
2.1.2.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์.....	8
2.1.2.2 หลักการทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์.....	9
2.1.3 วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า(Boots converter).....	9
2.1.3.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรบูตส์คอนเวอร์เตอร์.....	9
2.1.3.2 หลักการการทำงานของวงจรบูตส์คอนเวอร์เตอร์.....	10
2.1.4 วงจรลดทอน-ทบระดับแรงดันไฟฟ้า(Buck-Boots converter).....	11
2.1.4.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรบัก-บูตส์คอนเวอร์เตอร์.....	11
2.1.4.2 หลักการการทำงานของวงจรบัก-บูตส์คอนเวอร์เตอร์.....	11
2.1.5 วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์(Cuk converter).....	12
2.1.5.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์.....	12
2.1.5.2 หลักการการทำงานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์.....	12
2.1.6 วงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์(Sepic converter).....	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.6.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์	13
2.1.6.2 หลักการการทำงานของวงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์	14
2.1.7 วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์(Zeta converter).....	14
2.1.7.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์.....	15
2.1.7.2 หลักการการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์.....	15
2.1.7.3 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก	17
2.2 เซลล์แสงอาทิตย์(Photovoltaic).....	20
2.2.1 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์.....	21
2.2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน	21
2.2.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน	22
2.2.1.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอน.....	22
2.2.2 คุณสมบัติและหลักการทำงานโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์.....	23
2.2.3 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์	24
2.2.4 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์	27
2.2.4.1 ความเข้มแสง.....	27
2.2.4.2 อุณหภูมิ.....	27
2.2.4.3 จำนวนเซลล์	28
2.2.4.4 พื้นที่เซลล์.....	28
2.2.4.5 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์.....	28
2.3 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยวิธีการรบกวนและสังเกต.....	28
2.3.1 ขั้นตอนของวิธีการรบกวนและสังเกต (Perturbation and Observation).....	29
2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	30
บทที่ 3 ซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์.....	32
3.1 ซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์.....	32
3.1.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์	33
3.1.2 หลักการทำงานของวงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์.....	33
3.1.3 การสูญเสียของวงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์	36
3.1.3.1 การสูญเสียทางด้าน High-Side (Q_1)	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.3.2 การสูญเสียทางด้าน Low-Side (Q_2)	37
3.2 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ	37
3.2.1 ตัวเก็บประจุ C ที่ด้านเข้า.....	38
3.2.2 ตัวเก็บประจุ Cfly ที่อยู่ระหว่างกลาง	38
3.2.3 ตัวเก็บประจุ C ที่ด้านออก	39
3.2.4 ตัวเหนี่ยวนำ L1	39
3.2.5 ตัวเหนี่ยวนำ L2	40
3.3 ออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์.....	41
3.3.1 วงจรกำลังซีต้าคอนเวอร์เตอร์.....	41
3.3.2 วงจรขับเกต (Gate drive)	41
3.3.3 วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller).....	42
3.3.4 วงจรตรวจจับกระแส (Current sensor).....	43
3.3.5 วงจรตรวจจับแรงดันไฟตรง (Voltage divider sensor)	43
3.3.6 วงจรแสดงผลผ่าน LCD (LCD monitoring).....	44
3.3.7 วงจรแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์ (computer monitoring & Data logger)	45
3.3.8 วงจรไฟเลี้ยง (Regulator).....	46
3.4 การออกแบบสร้างชุดต้นแบบ	46
3.4.1 ลายวงจรที่ได้ออกแบบและชุดต้นแบบ	46
3.5 การออกแบบระบบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	48
3.5.1 ระบบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต	49
บทที่ 4 การจำลองและผลการทดลอง	51
4.1 การสร้างแบบจำลองให้มีลักษณะเหมือนจริง	51
4.1.1 ปรับค่าพารามิเตอร์.....	51
4.1.2 สร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีลักษณะคล้ายของจริง.....	52
4.1.3 การเปรียบเทียบกรณีมี C_{in} และไม่มี C_{in}	53
4.1.4 การเปรียบเทียบกรณีการใช้มอสเฟสเข้ามาทำงานแทนที่ได้โอด	54
4.2 การจำลองและผลการจำลอง.....	55
4.2.1 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Psim	55
4.2.2 ผลการจำลอง.....	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2.1 การเปรียบเทียบ %Ripple current (zeta converter).....	58
4.2.2.2 การเปรียบเทียบ %Ripple voltage (zeta converter).....	59
4.2.2.3 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้า (zeta converter).....	60
4.2.2.4 การเปรียบเทียบ %Ripple current (Synchronous zeta).....	60
4.2.2.5 การเปรียบเทียบ %Ripple voltage (Synchronous zeta).....	61
4.2.2.6 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้า (Synchronous zeta).....	52
4.2.2.7 การเปรียบเทียบ %Ripple current ของทั้งสองวงจร.....	63
4.2.2.8 การเปรียบเทียบ %Ripple voltage ของทั้งสองวงจร.....	64
4.2.2.9 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้า ของทั้งสองวงจร.....	65
4.3 การทดลอง.....	66
4.3.1 สัญญาณตรรกะรวมตัวเหนี่ยวนำ L1 ต่อสัญญาณ PWM 1H.....	67
4.3.2 สัญญาณตรรกะรวมตัวเหนี่ยวนำ L1 ต่อสัญญาณ PWM 1L.....	68
4.3.3 สัญญาณ PWM 1H ต่อ สัญญาณ PWM 1L.....	68
4.3.4 สัญญาณแรงดัน Ripple voltage (Zeta converter).....	69
4.3.5 สัญญาณกระแส Ripple current (Zeta converter).....	70
4.3.6 สัญญาณแรงดัน Ripple voltage (Synchronous zeta converter).....	71
4.3.7 สัญญาณกระแส Ripple current (Synchronous zeta converter).....	71
4.4 ผลการทดลอง.....	72
4.4.1 ผลการทดลองวงจร Zeta converter.....	73
4.2.1.1 การเปรียบเทียบ %Ripple current.....	73
4.2.1.2 การเปรียบเทียบ %Ripple voltage.....	74
4.2.1.3 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้า.....	74
4.4.2 ผลการทดลองวงจร Synchronous zeta converter.....	75
4.2.2.1 การเปรียบเทียบ %Ripple current.....	75
4.2.2.2 การเปรียบเทียบ %Ripple voltage.....	76
4.2.2.3 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้า.....	77
4.4.3 ผลการทดลองของทั้งสองวงจร.....	78
4.4.3.1 การเปรียบเทียบ %Ripple current.....	78
4.4.3.2 การเปรียบเทียบ %Ripple voltage.....	79

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.3.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ.....	80
4.5 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลอง.....	81
4.6 การนำไปใช้งานในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	82
4.6.1 ไดอะแกรมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด	83
4.6.2 ผลการทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	83
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา.....	86
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	86
5.2 ข้อเสนอแนะและข้อควรระวัง.....	86
5.3 แนวทางการพัฒนา.....	87
เอกสารอ้างอิง	88
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก.....	92
ภาคผนวก ข.....	98
ภาคผนวก ค.....	110
ภาคผนวก ง	113

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์.....	9
2.2 วงจรบูตส์คอนเวอร์เตอร์.....	10
2.3 วงจรบั๊ก-บูตส์คอนเวอร์เตอร์	11
2.4 วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์.....	13
2.5 วงจรซีปิกคอนเวอร์เตอร์.....	14
2.6 วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์.....	15
2.7 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยวบวก	22
2.8 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกโพลี.....	22
2.9 เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอน	23
2.10 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	24
2.11 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์โดยต่อเข้ากับโหลด.....	25
2.12 กราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นำ.....	26
2.13 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	27
2.14 จุดที่เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดคือจุดที่อยู่สูงสุดของยอดภูเขา.....	29
2.15 Flow Chart การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบรบกวนและสังเกต	30
2.16 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	31
3.1 วงจรสมมูลของ Synchronous Zeta converter	32
3.2 สวิตช์ขณะ Q1 ทำงาน Q2 หยุดทำงาน.....	34
3.3 สวิตช์ขณะ Q1 หยุดทำงาน Q2 ทำงาน.....	35
3.4 แรงดันตกคร่อมไดโอดภายในมอสเฟตต่ำลง ขณะ Q2 ทำงาน.....	35
3.5 รูปคลื่นกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ	35
3.6 แสดงช่วงเวลาการสูญเสียที่เกิดจากสวิตช์ซึ่ง loss	37
3.7 วงจรกำลัง.....	41
3.8 วงจรขับเคลื่อนเมื่อมีการต่อเข้ากับวงจรกำลัง.....	42
3.9 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	43
3.10 วงจรตรวจจับกระแส	43
3.11 วงจรตรวจจับแรงดัน	44
3.12 วงจรแสดงผลผ่านหน้าจอ LCD	45
3.13 วงจรเก็บและแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์	45
3.14 วงจรไฟเลี้ยง 5 V และ 12 V	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 มุมมองด้านล่าง.....	47
3.16 Schematic	47
3.17 ชุดต้นแบบ.....	48
3.18 Flow chart การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	50
4.1 การจำลองคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์	52
4.2 แสดงแบบการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงต่างๆที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	53
(ก) ที่ความเข้มแสง 250 W/m ²	53
(ข) ที่ความเข้มแสง 500 W/m ²	53
(ค) ที่ความเข้มแสง 750 W/m ²	53
(ง) ที่ความเข้มแสง 1000 W/m ²	53
4.3 จำลองและการทดลองกรณีมี C_{in} และไม่มี C_{in}	53
(ก) การจำลอง	53
(ข) การทดลอง.....	53
4.4 จำลองแรงดันตกคร่อมไดโอดและมอสเฟส.....	54
(ก) 1 A	54
(ข) 5 A	54
4.5 แรงดันตกคร่อมมอสเฟส.....	54
(ก) 1A	54
(ข) 5 A	54
4.6 แรงดันตกคร่อมไดโอด	54
(ก) 1 A	54
(ข) 5 A	54
4.7 การจำลองการทำงานของวงจร Zeta และ Synchronous Zeta converter.....	56
4.8 รูปคลื่นสัญญาณกระแสที่ตกคร่อมที่ตัวเหนี่ยวนำ L1 และ L2	56
(ก) ตัวเหนี่ยวนำ L1.....	56
(ข) ตัวเหนี่ยวนำ L2.....	56
4.9 รูปคลื่น ripple current ด้านบนเป็นกระแสด้านออก ด้านล่างเป็นกระแสด้านเข้า.....	57
(ก) Zeta converter.....	57
(ข) Synchronous zeta converter.....	57
4.10 รูปคลื่น ripple voltage ด้านบนเป็นแรงดันขาเข้า ด้านล่างเป็นแรงดันขาออก.....	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ก) การจำลอง	57
(ข) การทดลอง.....	57
4.11 รูปคลื่นเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้งสองวงจร.....	57
4.12 ผลการจำลอง Ripple current ของวงจร Zeta converter.....	58
4.13 ผลการจำลอง Ripple voltage ของวงจร Zeta converter.....	59
4.14 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าทางด้านขาและขาออกของวงจร Zeta converter.....	60
4.15 ผลการจำลอง Ripple current ของวงจร Synchronous zeta converter.....	61
4.16 ผลการจำลอง Ripple voltage ของวงจร Synchronous zeta converter.....	62
4.17 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าทางด้านขาและขาออกของวงจร Synchronous zeta converter .	63
4.18 ผลการจำลองเปรียบเทียบ Ripple current ของทั้งสองวงจร	64
4.19 ผลการจำลองเปรียบเทียบ Ripple current ของทั้งสองวงจร	65
4.20 ผลการจำลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้งสองวงจร.....	66
4.21 การทดลอง	67
4.22 แสดงรูปสัญญาณ PWM 1H และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L1.....	67
(ก) Buck mode.....	67
(ข) Boots mode.....	67
4.23 แสดงรูปสัญญาณ PWM 1L และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L1.....	68
(ก) Buck mode.....	68
(ข) Boots mode.....	68
4.24 แสดงรูปสัญญาณ PWM 1H 1L และช่วงเวลา Deadtime.....	69
(ก) PWM 1H ต่อ PWM 1L.....	69
(ข) Deadtime.....	69
4.25 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันกระแสเฟืองของวงจร zeta converter	69
(ก) Buck mode.....	69
(ข) Boots mode.....	69
4.26 แสดงรูปคลื่นสัญญาณกระแสกระแสเฟืองขาเข้าของวงจร zeta converter	70
(ก) Buck mode.....	70
(ข) Boots mode.....	70
4.27 แสดงรูปคลื่นสัญญาณกระแสกระแสเฟืองขาออกของวงจร zeta converter.....	70
(ก) Buck mode.....	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ข) Boots mode.....	70
4.28 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันกระแสเพื่อมของวงจร Synchronous zeta converter	71
(ก) Buck mode.....	71
(ข) Boots mode.....	71
4.29 แสดงรูปคลื่นสัญญาณกระแสกระแสเพื่อมขาเข้าของวงจร Synchronous zeta converter.....	72
(ก) Buck mode.....	72
(ข) Boots mode.....	72
4.30 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันกระแสเพื่อมขาออกของวงจร Synchronous zeta converter	72
(ก) Buck mode.....	72
(ข) Boots mode.....	72
4.31 ผลการเปรียบเทียบ Ripple current ของวงจร zeta converter	73
4.32 ผลการเปรียบเทียบ Ripple voltage ของวงจร zeta converter	74
4.33 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของวงจร zeta converter	75
4.34 ผลการเปรียบเทียบ Ripple current ของวงจร Synchronous zeta converter	76
4.35 ผลการเปรียบเทียบ Ripple voltage ของวงจร Synchronous zeta converter	77
4.36 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของวงจร Synchronous zeta converter	78
4.37 ผลการเปรียบเทียบ Ripple current ของทั้งสองวงจร.....	79
4.38 ผลการเปรียบเทียบ Ripple voltage ของทั้งสองวงจร.....	80
4.39 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้งสองวงจร.....	81
4.40 การทดลองติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์	82
4.41 ไดอะแกรมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	83
4.42 กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ เวลานั้นๆ	84
4.43 แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ เวลานั้นๆ	84
4.44 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ เวลานั้นๆ	85

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบทิศทางการรบกวน การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าและทิศทางครึ่งต่อไป	29
4.1 การเปรียบเทียบการจำลองกับการทดลอง	82

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

จากปัญหาการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้าในปัจจุบัน และมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น ผลกระทบการโรงไฟฟ้าถ่านหิน นิวเคลียร์ และโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิง มีมลพิษที่สูงขึ้น ดังนั้น จึงได้มีการหันมาใช้พลังงานหมุนเวียนเพิ่มมากขึ้น และใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ได้แก่ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานชีวมวล และ ไฮโดรเจน เป็นต้น[1] ในประเทศไทยมีความเหมาะสมในการที่จะสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพราะเป็นประเทศที่มีแสงอาทิตย์ค่อนข้างมาก ส่วนพลังอย่างอื่นเช่น พลังงานจากน้ำ หรือ ลมก็ลดน้อยลงตามมา ซึ่งในปัจจุบันมีผู้สนใจในพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นจำนวนมาก[2][3] นักวิชาการและผู้สนใจทางด้านพลังงานทดแทน ได้นำเอาเทคโนโลยีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ มาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพอย่างแพร่หลาย เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้าเป็นชนิดไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งจำเป็นที่จะต้องมี อินเวอร์เตอร์เข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อที่จะแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ในมาใช้งานกับบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรม[4][5]

ปัญหาที่พบโดยส่วนมากของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ การเกิดสภาวะเมฆหมอกมาบังในบางส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้ไม่สามารถให้พลังงานได้เต็มที่ อีกทั้งเซลล์แสงอาทิตย์จะมีจุดที่ให้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุด จุดนั้นๆจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพความเข้มของแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิได้แผงของเซลล์แสงอาทิตย์[7][8] ด้วยเหตุนี้ เซลล์แสงอาทิตย์จึงจำเป็นที่จะต้องมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ตลอดเวลา หรือที่เรียกกันว่า MPPT (Maximum Power Point Tracking) ดังนั้น Power Electronics จึงมีความสำคัญในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด วงจรที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ยกตัวอย่างเช่น วงจร DC-DC converter อาทิ Buck, Boost, Buck-Boost, Cuk, Sepic และ Zeta เป็นต้น[9]

ในการวิจัยนี้ได้เลือกวงจร DC-DC converter ขึ้นมาหนึ่งวงจรคือ วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งมันสามารถ ที่จะลดระดับแรงดัน และ เพิ่มระดับแรงดันได้ในวงจรเดียว ผู้วิจัยได้เลือกวงจรนี้เพราะมีคุณสมบัติที่โดดเด่นของวงจรคือ สามารถเพิ่มหรือลดระดับแรงดันได้แล้ว ยังมีค่าแรงดันกระแสเพิ่มและกระแสกระเพื่อมที่ต่ำมาก อีกทั้งยังสามารถรองรับพลังงานได้สูง[10] วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ถูก

พัฒนาขึ้นจากวงจร ชุกคอนเวอร์เตอร์และซีพิกคอนเวอร์เตอร์ซึ่งข้อเสียของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์คือกลับขั้วไฟฟ้าด้านขาออก ส่วนข้อเสียของซีพิกคอนเวอร์เตอร์ คือ กระแสกระแสเพื่อและแรงดันกระแสเพื่อทางด้านขาออกมีค่าที่สูง วงจรซีต้า ภายใน Circuit จะเห็นว่ามี LC ที่ด้านขาออกที่ทำหน้าที่เสมือน Low pass filter ดีๆนั่นเอง อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพที่สูง ข้อเสียของวงจร Zeta หรือ วงจร Buck, Boost, Buck-Boost, Cuk, Sepic คือ การเกิด Over Voltage เกิดขึ้นและ การสูญเสียที่ Diode จึงได้มีการพัฒนาขึ้นเพื่อลดปัญหาเหล่านี้ และเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรให้สูงขึ้นนั่นเอง คือ การเปลี่ยนจากวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจร ชิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์นั้นคือการเปลี่ยนไดโอด เป็น มอสเฟต เข้ามาแทนที่ และทำหน้าที่ on/off สลับการทำงานกับ Mosfet ตัวแรก ผลที่ได้ วงจรชิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ไม่ทำให้เกิด Over Voltage เกิดขึ้น ทั้งในขณะที่มีโหลดและไม่มีโหลด ทั้งในโหมดกระแสต่อเนื่อง(Continuous current mode : CCM) และไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous current mode : DCM) คุณภาพไฟฟ้าที่ด้านขาออกมีคุณภาพที่ดี Ripple Voltage และ Ripple Current ต่ำ[11]

การติดตามหากำลังไฟฟ้าสูงสุด จะใช้ทฤษฎีรบกวนและสังเกต(Perturbation and Observation :P&O) เพราะสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างรวดเร็วและสะดวกต่อการนำมาใช้งาน ถึงจะมีข้อเสียในเรื่องที่เมื่ออยู่ในสภาวะคงตัวนั้น จะมีการแกว่งรอบๆจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด ทำหน้าเกิดการสูญเสียพลังงานบางส่วนไป[16][18]

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วงจรชิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์ติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ตลอดเวลา ทุกๆช่วงความเข้มของแสงที่เวลานั้นๆ คอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการควบคุม คือ dsPic30F4011 ส่วนเทคนิคที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT) คือ วิธีการรบกวนและสังเกต (Perturbation and Observation :P&O) ความถี่ของชิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์ คือ 20 kHz

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานของวงจร ชิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ในโหมดกระแสต่อเนื่อง (Continuous current mode: CCM)

1.2.2 เพื่อศึกษาการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และผลกระทบที่เกิดจากเงาบังบางส่วน

1.2.3 เพื่อนำเอาเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์

1.2.4 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรชิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์ 2% ขึ้นไป

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของงานวิจัย

โครงการนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการทำงานของวงจร ชิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์ กับการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด ผลึกโพลีซิลิกอน พิกัดกำลัง 285 W เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวงจรและแก้ปัญหาการเกิด Over Voltage จำลองการทำงานและสร้างชุดต้นแบบขึ้นเพื่อใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง และใช้เทคนิค การ รบกวนและสังเกต (Perturbation and Observation :P&O) เข้ามาติดตามหากำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT) เปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างวงจรเดิมคือ ซีต้าคอนเวอร์เตอร์ และ วงจรที่ได้ถูกพัฒนาขึ้น คือ วงจรชิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์ การจำลองจะใช้โปรแกรม Psim เข้ามาช่วยในการจำลองการทำงานทั้งของเซลล์แสงอาทิตย์และคอนเวอร์เตอร์

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัย เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานทดแทน การติดตามหากำลังไฟฟ้าสูงสุดคอนเวอร์เตอร์ ที่ใช้ในการวิจัย ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องการชิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์

1.4.2 ศึกษาเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย ทดลองใช้เครื่องมือ และ ศึกษาโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรชิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์

1.4.3 ออกแบบและสร้างวงจรที่ใช้ในการทำวิจัยขึ้น เพื่อเป็นต้นแบบที่จะใช้ในการทดลอง และ นำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งบริเวณที่ได้รับแสงแดดตลอดทั้งวัน

1.4.4 ทดลองและปรับปรุงวงจรที่ถูกสร้างขึ้น ให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และสามารถนำไปใช้งานได้จริงและป้องกันการเกิดอันตรายจำเป็นต้องนำวงจรใส่ในกล่อง

1.4.5 สรุปผลของงานวิจัย และจัดทำวิทยานิพนธ์ต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 งานวิจัยนี้ทำให้ผู้วิจัยได้รับความรู้ความสามารถ ทักษะ ในการที่จะติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้

1.5.2 ทำให้ผู้วิจัยได้รู้และเข้าใจการทำงานของระบบ MPPT ที่ใช้ในการติดตามหา กำลังไฟฟ้าสูงสุด

1.5.3 มีความรู้ความสามารถในการจำลองและสร้างชุดต้นแบบขึ้นใช้งานเอง อีกทั้งยังมี ประสบการณ์ในการสร้างชุดต้นแบบขึ้น

1.5.4 สามารถสร้างชุดต้นแบบที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด และมีประสิทธิภาพที่สูง โดยการประยุกต์ใช้งานกับ Power Electronics เข้ามาเกี่ยวข้องกับพลังงาน

1.5.5 ทำให้มีการวิจัยพลังงานทางเลือกเพิ่มมากขึ้น และเป็นประโยชน์ต่อผู้ศึกษาและพัฒนา ต่อไป

1.6 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบไปด้วยเนื้อหาสาระที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพการ ติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วงจรชิงโครนส์ซีต้าคอนเวอร์เตอร์ที่พิกัดกำลัง 285 วัตต์ ซึ่งมีเนื้อหา สาระแบ่งออกเป็น 5 บทดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ของโครงการ ข้อกำหนดของโครงการ ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน รวมถึงประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ ทฤษฎีของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ และชิงโครนส์ ซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ทฤษฎีของเซลล์แสงอาทิตย์ การประยุกต์ใช้งาน ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการทำงานของคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ และรวมถึงทฤษฎีที่ใช้ในการติดตาม กำลังไฟฟ้าสูงสุด โดนใช้เทคนิค รบกวนและสังเกต (Perturbation and Observation :P&O)

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและสร้างชุดต้นแบบขึ้น จะประกอบด้วยวงจรที่เป็นส่วนประกอบใน ระบบการทำงาน อาทิ เช่น วงจรตรวจจับกระแส วงจรตรวจจับแรงดัน วงจรขั้วเกิด วงจรกำลัง วงจร ควบคุมการทำงานของคอนโทรลเลอร์ วงจรไฟเลี้ยง วงจรเก็บข้อมูลและแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์ วงจรแสดงผลผ่าน LCD รวมถึงอธิบาย หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ Flow chart ลายวงจร ตลอดจนไปจนถึงบอร์ดที่ใช้ทดลองจริง

บทที่ 4 กล่าวถึงการจำลองและการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดผ่านโปรแกรม Psim และผลการ เปรียบเทียบของวงจร ซีต้าคอนเวอร์เตอร์ กับวงจรที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็น ชิงโครนส์ซีต้าคอนเวอร์เตอร์ รวมทั้งการจำลองคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ตรงกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลองจริง การทดลองจริงและผลการทดลองจริง ที่ใช้หลักการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยใช้เทคนิค รบกวน

และสังเกต (Perturbation and Observation :P&O) เข้ามาเกี่ยวข้อง เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้ รวมถึงการลดปัญหาที่เกิดขึ้น

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปที่ได้จากการจำลอง และการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่ ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ มีประสิทธิภาพอยู่ที่เท่าไร และสามารถลดปัญหาที่เกิดจาก Over voltage ได้หรือไม่ รวมถึงข้อเสนอแนะและแนวทางการที่จะนำไปพัฒนาต่อไป

ภาคผนวก สำหรับในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ ภาษาที่ใช้ในการควบคุม คอนโทรลเลอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ และ โปรแกรมเขียนลายวงจร

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาถึงองค์ความรู้ที่ใช้ในงานวิจัยมีส่วนสำคัญมาก เพื่อที่จะช่วยให้ผู้วิจัยเดินไปในเส้นทางที่ถูกต้องจำเป็นที่จะต้องม้องค์ความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีอย่างชัดเจนเพื่อความเข้าใจในการทำวิจัยต่อไป ในบทนี้จะประกอบไปด้วยหลายส่วน ทั้งคอนเวอร์เตอร์ เซลล์แสงอาทิตย์ การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดตลอดจนไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 DC-DC Converter

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหรือดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ หรือ วงจรช้อปเปอร์เป็นที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมและคอมพิวเตอร์อย่างแพร่หลาย โดยที่พัฒนาการของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสตรง เริ่มต้นตั้งแต่ปี ค.ศ.1950 โดยแบ่งพัฒนาการออกเป็น 5 ยุคด้วยกัน ได้แก่ ยุคแรก classical converter ยุคที่สอง multi quadrant converter ยุคที่สาม switched-component converter ยุคที่สี่ soft-switching converter และยุคที่ห้า synchronous rectifier converter การวิวัฒนาการของคอนเวอร์เตอร์ถูกเปลี่ยนแปลงไปตามยุคสมัย ทำให้มีขนาดที่เล็กลงการทำงานซับซ้อนขึ้น ประสิทธิภาพที่ได้มีค่าที่สูงขึ้น การนำไปประยุกต์ใช้งานง่ายขึ้น และสามารถที่จะรองรับโหลดได้สูงขึ้น [10]

2.1.1 หลักการทำงานของวงจรสวิตชิง

อุปกรณ์สวิตชิง เช่น มอสเฟต หรือ ไอจีบีที จะทำหน้าที่เป็นสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ มีโหมดการทำงานคือ โหมดนำกระแส และหยุดนำกระแส โดยสมมติให้ มอสเฟต หรือ ไอจีบีที ที่ใช้ เป็นสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ในอุดมคติ หลักการทำงานคือ เมื่อสวิตซ์นำกระแส แรงดันไฟฟ้าออกจะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า

$V_0 = V_s$ และ เมื่อสวิตซ์ไม่นำกระแส แรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือ

$$V_0 = 0$$

ช่วงเวลาในการนำกระแสและหยุดนำกระแส จะได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นพัลส์ ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยหรือค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกได้จากสมการ

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_s dt \quad (2.1)$$

เมื่อ V_s = แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

D = ดิวตี้ไซเคิล

จะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกจะถูกควบคุมได้จากการปรับค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle หรือ Duty ratio : D) ซึ่ง D หมายถึง อัตราส่วนของช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแสต่อ ช่วงเวลาหนึ่งคาบการสวิตช์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.2)$$

$$t_{on} = DT \quad (2.3)$$

$$t_{off} = (1 - D)T \quad (2.4)$$

เมื่อ t_{on} = ช่วงเวลานำกระแส

t_{off} = ช่วงเวลาไม่นำกระแส

T = เวลาหนึ่งคาบ

การกำหนดค่า D นิยมบอกเป็นสองลักษณะ คือ เป็นเลขเต็มหนึ่งและบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ ค่าต่ำสุดของ D คือศูนย์และค่าสูงสุดคือหนึ่ง ขณะที่บอกเปอร์เซ็นต์จะมีค่าต่ำสุดเป็นศูนย์เปอร์เซ็นต์ และค่าสูงสุดคือหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์

ตัวอย่างเช่น $D = 0.4$ หรือ $D = 40\%$ หมายถึงช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแสมีอยู่ 0.4 ส่วน จากช่วงเวลาหนึ่งคาบ หรือหมายถึงช่วงเวลาสวิตช์นำกระแสมีอยู่สี่สิบเปอร์เซ็นต์จากช่วงเวลาหนึ่ง คาบหรือหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์ ในกรณีศึกษาเบื้องต้นนี้ เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษา จะสมมติให้ในขณะที่ สวิตช์นำกระแส แรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์มีค่าเป็นศูนย์ ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการคำนวณ และจะไม่ คำนึงถึงการสูญเสียจากการทำงานของสวิตช์ ซึ่งหมายถึงวงจรนี้มีประสิทธิภาพหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์

2.1.2 วงจรทอนระดับแรงดัน(Buck converter)

วงจรทอนระดับหรือวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ คือ วงจรที่ทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า และเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกที่มีความเป็นกระแสตรงมากๆ จะนิยมใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) ซึ่งโดยมากจะเลือกใช้วงจรกรองแบบ LC เพราะมีอัตราลดทอนสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการ ผกผันกับกำลังสองของความถี่

2.1.2.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ การวิเคราะห์การทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ ในช่วงที่เป็นสภาวะคงตัว (steady state) จะมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงาน of วงจรบักคอนเวอร์เตอร์ ดังนี้

1. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากัน

$$i_L(t+T) = i_L(t) \quad (2.5)$$

หมายถึงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากัน ณ ตำแหน่งเดียวกันในทุกคาบเวลา

2. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} V_L(\lambda) dx = 0 \quad (2.6)$$

หมายถึงผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา (volt-second) ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

3. กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวเก็บประจุในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$I_C = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_C(t) dt = 0 \quad (2.7)$$

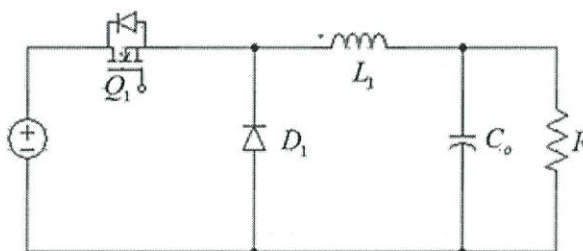
หมายถึงประจุที่ถูกเก็บ (charged) และที่คาย (discharged) ของตัวเก็บประจุ ในแต่ละคาบเวลาจะต้องเท่ากัน

4. กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกระแสไฟฟ้าด้านออก

$$P_s = P_o \quad (2.8)$$

กรณีนี้กำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้ไม่มีการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจร ประสิทธิภาพของวงจรจึงเท่ากับร้อยเปอร์เซ็นต์

2.1.2.2 หลักการทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ เพื่อจะออกแบบให้ได้ แรงดันไฟฟ้าด้านออกตามที่ต้องการ คือ ต้องเริ่มจากเงื่อนไขที่ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมที่ตัวเหนี่ยวนำ ในแต่ละคาบเวลามีค่าเท่ากับศูนย์ จากนั้นก็จะสามารถหากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ การวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ ในแต่ละโหมด จะต้องวิเคราะห์ในสภาวะคงตัว รูปที่ 2.1 แสดง วงจรสมมูลของบักคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.1 วงจรบักคอนเวอร์เตอร์

ขณะสวิตช์นำกระแส กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวสวิตช์ ผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังโหลด โดยที่กระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะไปเก็บที่ตัวเก็บประจุ ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส ไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้า (Forward bias) ให้นำกระแส ทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดการไหลอย่างต่อเนื่อง

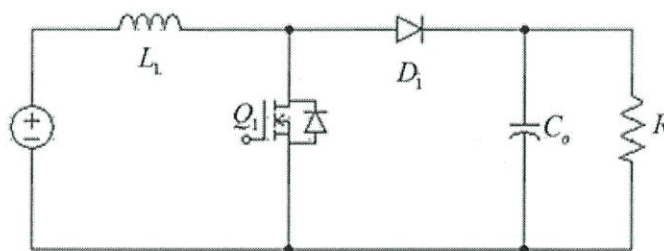
2.1.3 วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า(Boost converter)

วงจรทบระดับหรือวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ คือ วงจรที่ทำการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกให้สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า ที่เรียกวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์(Boost converter) ก็เพราะแรงดันไฟฟ้าด้านออกสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้านั่นเอง

2.1.3.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ การวิเคราะห์การทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ ในช่วงที่เป็นสภาวะคงตัว (steady state) จะมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ ดังนี้

1. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละคาบ จะมีค่าเท่ากันและมีค่าเป็นบวกเสมอ
2. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์ หมายถึงผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา (volt-second) ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์
3. ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าคงที่
4. กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกระแสไฟฟ้าด้านออก กรณีนี้กำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้ไม่มีการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจร ประสิทธิภาพของวงจรจึงเท่ากับร้อยเปอร์เซ็นต์

2.1.3.2 หลักการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกตามต้องการ จะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ และสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้โดยวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด ทั้งนี้การทำงานจะต้องอยู่ในช่วงสภาวะคงตัว รูปที่ 2.2 แสดงวงจรสมมูลของบูสต์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.2 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

ขณะสวิตช์นำกระแส กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ โดยผ่านสวิตช์ ขณะเดียวกันไดโอดจะถูกไบอัสย้อนกลับทำให้ไม่สามารถนำกระแสได้

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้าให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง

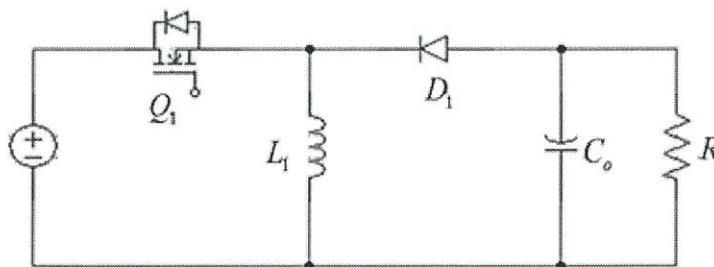
2.1.4 วงจรลดทอน-ทบระดับแรงดันไฟฟ้า(Buck-Boots converter)

วงจรลดทอน-ทบระดับแรงดันไฟฟ้าหรือวงจรบัก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ คือ วงจรที่ทำการลดหรือเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกให้ต่ำหรือสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้าได้

2.1.4.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรบัก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ การวิเคราะห์การทำงานของวงจรบัก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ ในช่วงที่เป็นสภาวะคงตัว (steady state) จะมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรบัก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ ดังนี้

1. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละคาบ จะมีค่าเท่ากันและมีค่าเป็นบวกเสมอ
2. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์ หมายถึงผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา (volt-second) ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์
3. ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าคงที่
4. กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกระแสไฟฟ้าด้านออก กรณีนี้กำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้ไม่มีการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจร ประสิทธิภาพของวงจรจึงเท่ากับร้อยเปอร์เซ็นต์

2.1.4.2 หลักการทำงานของวงจรบัก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออก มีค่าลดลงหรือเพิ่มขึ้นตามต้องการโดยจะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ได้โดยการวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด ทั้งนี้ต้องอยู่ในสภาวะคงตัว ในรูปที่ 2.3 แสดงวงจรสมมูลของวงจรบัก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.3 วงจรบัก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์

ขณะสวิตช์นำกระแส กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านสวิตช์และผ่านตัวเหนี่ยวนำ ในขณะที่ไดโอดจะถูกไบอัสย้อนกลับ

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้าให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง

2.1.5 วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์(Cuk converter)

วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์มีการทำงานแบบเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้า โดยที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกมาทิศทางตรงข้ามกับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าเช่นเดียวกับ วงจรบัก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แต่ปัญหาในวงจรบัก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ก็คือ มีขนาดกระแสฮาร์มอนิกส์สูงเนื่องจากไม่มีตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่กรองกระแสทางด้านเข้า และมีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านชนิด LC ทางด้านออก ส่วนการเชื่อมต่อระหว่างด้านเข้ากับด้านออกของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์จะใช้ตัวเก็บประจุ ซึ่งแตกต่างจากวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ และวงจรบัก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ผ่านมาที่มีการเชื่อมต่อด้านเข้ากับด้านออกโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำ นอกจากนั้นเมื่อเทียบอุปกรณ์ของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ กับวงจรที่ผ่านมาจะเห็นว่า วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์จะมีจำนวนตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นอย่างละหนึ่งตัว

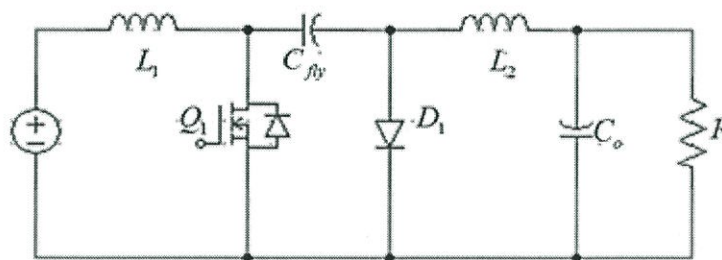
2.1.5.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ การวิเคราะห์การทำงานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ ในช่วงที่เป็นสภาวะคงตัว (steady state) จะมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ดังนี้

1. ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่เป็นผลทำให้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่
2. ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่เป็นผลทำให้ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าคงที่
3. กระแสและแรงดันไฟฟ้า ณ เวลาซ้ำกันในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากัน
4. กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก กรณีนี้จะไม่คำนึงถึงการสูญเสียที่เกิดจากการทำงานของวงจร เนื่องจากอุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติทำให้ประสิทธิภาพรวมของวงจรเป็นหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์

5. ช่วงเวลานำกระแสคือ DT และช่วงเวลาหยุดนำกระแสคือ $(1 - D)T$

2.1.5.2 หลักการทำงานของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออก มีค่าลดลงหรือเพิ่มขึ้นตามต้องการโดยจะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ได้

โดยการวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด ทั้งนี้ต้องอยู่ในสภาวะคงตัว ในรูปที่ 2.4 แสดงวงจรสมมูลของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.4 วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์

ขณะสวิตช์นำกระแส กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และผ่าน สวิตช์ในขณะที่ไดโอดยังไม่ถูกไบอัสย้อนกลับ

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้าให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง

2.1.6 วงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์(Sepic converter)

วงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์มีการทำงานแบบเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้า โดยที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกมาทิศทางเดียวกันกับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าเช่นเดียวกันกับ แต่ปัญหาในวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ก็คือ แรงดันกลับชั่วคราวไฟฟ้าที่ขาออก ส่วนการเชื่อมต่อระหว่างด้านเข้ากับด้านออกของวงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์จะใช้ตัวเก็บประจุในการเชื่อมต่อด้านเข้ากับด้านออก นอกจากนั้นเมื่อเทียบอุปกรณ์ของวงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์ กับวงจรที่ผ่านมาจะเห็นว่าวงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์จะมีจำนวนตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นอย่างละหนึ่งตัว เช่นเดียวกับวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์

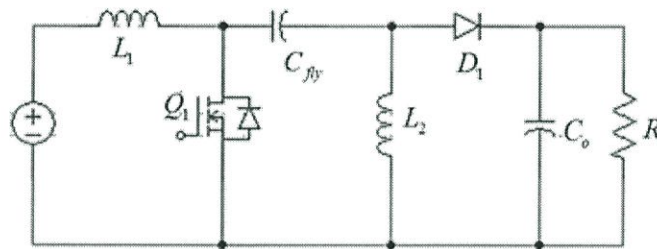
2.1.6.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์ การวิเคราะห์การทำงานของวงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์ ในช่วงที่เป็นสภาวะคงตัว (steady state) จะมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์ดังนี้

1. ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่เป็นผลทำให้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่
2. ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่เป็นผลทำให้ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าคงที่
3. กระแสและแรงดันไฟฟ้า ณ เวลาซ้ำกันในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากัน

4. กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก กรณีนี้จะไม่คำนึงถึงการสูญเสียที่เกิดจากการทำงานของวงจร เนื่องจากอุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติทำให้ประสิทธิภาพรวมของวงจรเป็นหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์

5. ช่วงเวลานำกระแสคือ DT และช่วงเวลาหยุดนำกระแสคือ $(1-D)T$

2.1.6.2 หลักการทำงานของวงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออก มีค่าลดลงหรือเพิ่มขึ้นตามต้องการโดยจะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้ โดยการวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด ทั้งนี้ต้องอยู่ในสภาวะอยู่ตัว ในรูปที่ 2.5 แสดงวงจรสมมูลของวงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.5 วงจรซีพิกคอนเวอร์เตอร์

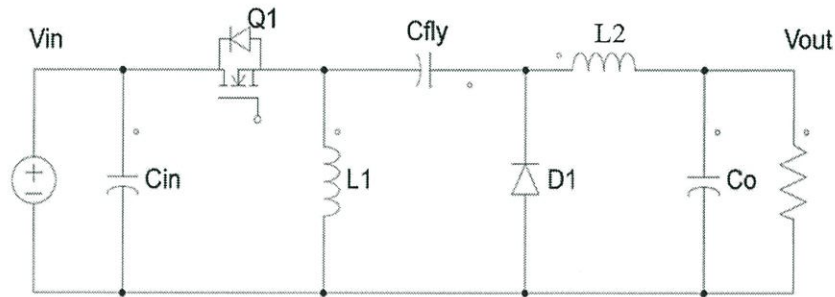
ขณะสวิตช์นำกระแส กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และผ่าน สวิตช์ในขณะที่ไดโอดยังไม่ถูกไบอัสไปด้านหน้า

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้าให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง

2.1.7 วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์(Zeta converter)

วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์มีการทำงานเป็นแบบเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้า โดยที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีทิศทางตรงกันกับแรงไฟฟ้าด้านเข้า และมีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านชนิด LC ทางด้านออก ส่วนการเชื่อมต่อระหว่างด้านเข้าและด้านออกของวงจร Zeta converter จะใช้ตัวเก็บประจุ ซึ่งแตกต่างจากวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ บูสต์ และวงจรบัก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อด้านเข้าและด้านออก ข้อดีของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์คือกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์

ทางด้านขาออกมีค่าต่ำ วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ จะประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุสามตัว ตัวเหนี่ยวนำสองตัว มอสเฟตหนึ่งตัว และไดโอดหนึ่งตัว ดังรูปด้านล่างนี้



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของซีต้าคอนเวอร์เตอร์

2.1.7.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ในการวิเคราะห์การทำงานของวงจร ซีต้าคอนเวอร์เตอร์จะต้องกำหนดให้วงจรทำงานในสภาวะคงตัว และกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ เป็นดังนี้

1. ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่เป็นผลทำให้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่
2. ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่เป็นผลทำให้ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าคงที่
3. กระแสและแรงดัน ณ เวลาในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากัน
4. กำลังไฟฟ้าด้านเข้าจะเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก กรณีนี้จะไม่คำนึงถึงการสูญเสียที่เกิด

จากการทำงานของวงจร เนื่องจากอุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติทำให้ประสิทธิภาพรวมของวงจรเป็นร้อยเปอร์เซ็นต์

5. ช่วงเวลานำกระแสคือ DT และช่วงเวลาหยุดนำกระแสคือ $(1 - D)T$

2.1.7.2 หลักการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ขั้นตอนที่หนึ่งก็คือ การหาค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_{fly} โดยเริ่มพิจารณาจากสมการแรงดันวงนอกสุด โดยแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์ $V_{L1} = V_{L2} = 0$ และแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_{fly} สามารถคำนวณจากสมการที่ 2.9 ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ 2.10

$$-V_s + V_{L1} - V_{C1} + V_{L2} + V_o = 0 \quad (2.9)$$

$$-V_s - V_{C1} + V_o = 0$$

$$V_{C1} = V_o - V_s \quad (2.10)$$

หลักการการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ขั้นตอนที่สอง เริ่มเมื่อสวิตช์นำกระแส ไดโอดจะไม่นำกระแส ซึ่งสามารถหาสมการของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_{fb} ได้ดังสมการที่ 2.11

$$i_{C1,on} = I_{L2} \quad (2.11)$$

หลักการการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ขั้นตอนที่สาม พิจารณาเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวจะไหลในทิศทางที่ทำให้ไดโอดนำกระแส ดังนั้นกระแสไฟฟ้าในตัวเก็บประจุ C_{fb} จะเป็นดังสมการที่ 2.12

$$i_{C1,off} = I_{L1} \quad (2.12)$$

หลักการการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ขั้นตอนสี่ กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับ กำลังไฟฟ้าด้านออก กรณีนี้จะไม่คำนึงถึงการสูญเสียที่เกิดจากการทำงานของวงจร เนื่องจากอุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติทำให้ประสิทธิภาพรวมของวงจรเป็นร้อยเปอร์เซ็นต์

$$V_s I_{L1} = V_o I_{L2} \quad (2.13)$$

หลักการการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ขั้นตอนห้า กระแสและแรงดันไฟฟ้าหากเทียบที่จุดใดๆ ในแต่ละคาบจะมีค่าเท่ากัน เพราะเป็นสภาวะอยู่ตัว กระแสเฉลี่ยในตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยได้จากสมการที่ 2.11 ซึ่งคิดขณะที่สวิตช์นำกระแส และสมการที่ 2.12 คิดขณะที่สวิตช์ไม่นำกระแส

$$i_{C1,on}(DT) + i_{C1,off}(1-D)T = 0 \quad (2.14)$$

$$(-I_{L2})(DT) + (I_{L1})(1-D)T = 0 \quad (2.15)$$

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{D}{1-D} \quad (2.16)$$

หลักการทํางานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ขั้นตอนทีหก คือ กําลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับ กําลังไฟฟ้าด้านออก จากสมการที่ 2.17

$$P_s = P_o$$

$$V_s I_{L1} = V_o I_{L2} \quad (2.17)$$

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{V_o}{V_s} \quad (2.18)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.10 และสมการที่ 2.13 จะได้อัตราการขยายแรงดันในสมการที่ 2.14

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{1-D} \quad (2.19)$$

2.1.6.3 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก เนื่องจากในส่วนวงจรด้านออกของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์จะคล้ายกับวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ คือ มีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ LC และมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเช่นเดียวกับบักคอนเวอร์เตอร์ ดังนั้นการคํานวณหาค่าอัตราระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก จะเหมือนกับวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ คือ

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8L_2 C_o f^2} \quad (2.20)$$

เมื่อคํานวณแรงดันระลอกคลื่นใน C_{fly} เมื่อสวิตช์ไม่นํากระแส กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_{fly} จะเท่ากัน และจากขั้นตอนการทํางานในข้อที่สองคือตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าคงที่ ดังสมการที่ 2.21 สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.22

$$\Delta V_{C_{fly}} \approx \frac{1}{C_{fly}} \int_{DT}^T I_{L1} d(t) \quad (2.21)$$

$$\Delta V_{Cfly} \approx \frac{1}{C_{fly}} I_{L1} (1-D) T \quad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.18) และ (2.19)

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{1-D}$$

จัดรูปใหม่เพื่อหา I_{L1} และ V_o ได้เป็น

$$I_{L1} = \frac{V_o}{V_s} \times I_{L2}$$

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

จากสมการที่ 2.22 เป็น

$$\Delta V_{Cfly} \approx \frac{1}{C_{fly}} \left(\frac{V_o I_{L2}}{V_s} \right) \frac{1-D}{f} \quad (2.23)$$

และเมื่อกระแสโหลดมีขนาดตรงกันกระแส L_2

$$I_{L1} = \frac{V_o}{R}$$

$$\Delta V_{Cfly} \approx \frac{1}{C_{fly}} \left(\frac{1}{V_s} \right) \left(\frac{V_o}{R} \right) (V_s) \left(\frac{D}{1-D} \right) \left(\frac{1-D}{f} \right) \quad (2.24)$$

$$\Delta V_{Cfly} \approx \frac{1}{C_{fly} R} \left(\frac{1}{V_s} \right) (V_s) \left(\frac{D}{1-D} \right) \left(\frac{1-D}{f} \right)$$

สรุป คือ

$$\Delta V_{C_{fly}} \approx \frac{V_s}{C_{fly} R f} \left(\frac{D^2}{1-D} \right) \quad (2.25)$$

หรือกล่าวได้ว่าระลอกคลื่นของแรงดัน C_{fly} คือ

$$\Delta V_{C_{fly}} \approx \frac{V_o D}{C_{fly} R f} \quad (2.26)$$

ทำนองเดียวกันเมื่อหาระลอกคลื่นของกระแส จะหาได้จากสมการแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.27 และ 2.28

$$V_{L1} = V_s = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} \quad (2.27)$$

$$\frac{\Delta i_{L1}}{DT} = \frac{V_s}{L_1}$$

$$\Delta i_{L1} = \frac{V_s}{L_1} DT = \frac{V_s D}{L_1 f} \quad (2.28)$$

ทำนองเดียวกันเมื่อคำนวณหากระแสระลอกคลื่นใน L_2 เมื่อสวิตช์นำกระแส จะหาได้จากสมการแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_2 สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 2.29 และ 2.30

$$V_{L2} = V_o + (V_s - V_o) = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} \quad (2.29)$$

$$\Delta i_{L2} = \frac{V_s}{L_2} DT = \frac{V_s D}{L_2 f} \quad (2.30)$$

การทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง เงื่อนไขที่ทำให้ได้ตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบได้เล็กที่สุดและทำงานโหมดกระแสต่อเนื่อง อ้างอิง [10]

$$L_{1,\min} = \frac{(1-D)^2}{2Df} \times R \quad (2.31)$$

$$L_{2,\min} = \frac{(1-D)}{2Df} \times R \quad (2.32)$$

$$C_{fly} = \frac{I_o \times V_o}{(V_s + V_o) \times f \times V_{ripple}} \quad (2.33)$$

$$C_m = I_o \times \frac{1}{2 \times f \times I_{ripple} \times V_s} \quad (2.34)$$

$$C_o = \frac{1-D}{8 \times L \times V_{ripple} \times f^2} \quad (2.35)$$

2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic)

เซลล์แสงอาทิตย์ หรือเซลล์ Photovoltaic ซึ่งล้วนมีที่มาจากคำว่า Photovoltaic โดยแยกออกเป็นคำว่า Photo ซึ่งหมายถึง แสง และ Volt หมายถึง แรงดันไฟฟ้า เมื่อรวมคำแล้วหมายถึง กระบวนการผลิตจากการตกกระทบของแสงบนวัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง แนวความคิดนี้ได้ถูกค้นพบมาตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1839 แต่เซลล์แสงอาทิตย์ก็ยังไม่ถูกสร้างขึ้นมา จนกระทั่งใน ปี ค.ศ. 1954 จึงมีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ และได้ถูกนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับดาวเทียมในอวกาศ เมื่อ ปี ค.ศ. 1959 ดังนั้น สรุปได้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์คือ สิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน (Silicon) แกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide) อินเดียม ฟอสไฟด์ (Indium Phosphide) แคดเมียม เทลลูไรด์ (Cadmium Telluride) เป็นต้น ซึ่งเมื่อได้รับแสงอาทิตย์โดยตรงก็จะเปลี่ยนเป็นพาหะนำไฟฟ้า และจะถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและประจุไฟฟ้าลบเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองข้างของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งสามารถนำไปต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงได้โดยตรง หรือนำมาผ่านคอนเวอร์เตอร์เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

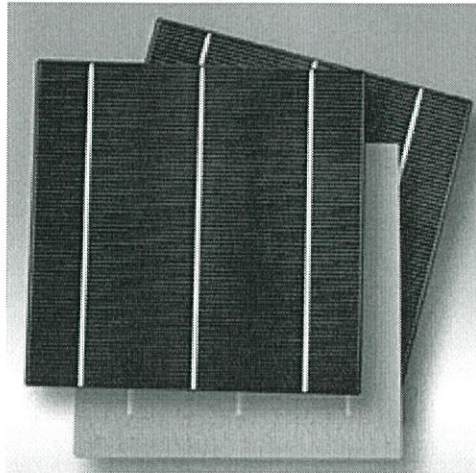
พลังงานแสงจากดวงอาทิตย์ เป็นพลังงานที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมาย และมีอยู่อย่างไม่จำกัด ไม่ว่าจะนำไปใช้เกี่ยวกับวิธีพื้นบ้านหรือวิธีทางวิทยาศาสตร์ก็ตาม แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งได้นำพลังงานแสงไปใช้ในการผลิตไฟฟ้า โดยผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) สามารถดึงพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้ได้โดยตรง และสามารถเก็บ

สะสมพลังงานไฟฟ้าจากแสงได้ในรูปของแบตเตอรี่เพื่อใช้งานในด้านต่างๆ เช่น ใช้เปิดไฟในตอนกลางคืนสำหรับบ้านพักอาศัยที่ไม่มีไฟฟ้าเข้าถึง เป็นต้น จะเห็นว่าปัจจุบันนี้คนส่วนใหญ่หันมาให้ความสนใจพลังงานทางด้านนี้มากขึ้น เนื่องจากมีความสะอาด บริสุทธิ์ ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม และในเชิงพาณิชย์จะสามารถช่วยประหยัดค่าไฟฟ้าได้ แต่มีข้อเสียในเรื่องของต้นทุนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาสูงและมีน้ำหนักมาก ทำให้นักวิจัยต่างๆ มีความต้องการที่จะพัฒนาเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ในหลายๆด้าน ไม่ว่าจะเป็นด้าน การติดตั้งพลังงานไปใช้ให้ได้มากที่สุด หรือด้านของวัสดุที่ใช้ทำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีต้นทุนที่ต่ำลง เป็นต้น

2.2.1 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

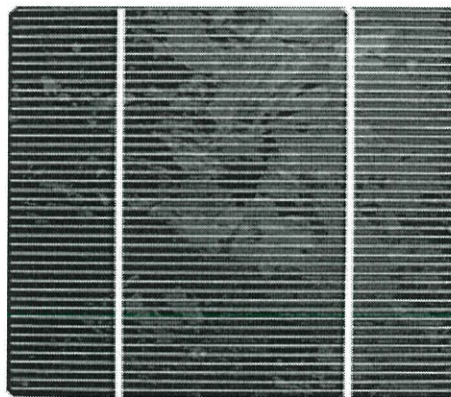
เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาและใช้งานในปัจจุบันนั้น แทบทั้งหมดทำจากธาตุ silicon ซึ่งเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับสองบนโลกรองจากออกซิเจน โดยสิ่งที่เห็นรอบตัว เช่น ทรายตามชายหาดหินต่างๆ ล้วนมีซิลิคอนเป็นส่วนประกอบหลักๆ นั่นคือ เป็นธาตุที่มีมากมายเหลือใช้ (การนำมาทำให้บริสุทธิ์ใช้งานได้ ต้องมีเทคนิคและใช้พลังงาน รวมถึงต้องมีค่าใช้จ่าย) ซิลิคอนเป็นวัตถุดิบที่ใช้มากในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำในปัจจุบัน ซึ่งเรียกได้ว่าเป็นเมล็ดข้าวสารของอุตสาหกรรมเลยที่เดียว ทรานซิสเตอร์, ไอซี (Integrated Circuit : IC) และวงจรรวมแอลเอสไอ (Large Scale Integration :LSI) โดยส่วนใหญ่แล้วมักสร้างจากซิลิคอนทั้งสิ้น ซึ่งในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ในแง่ของวัตถุดิบได้มีอุตสาหกรรมรองรับอยู่แล้ว โดยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนแบ่งตามโครงสร้างได้ 3 แบบคือ

2.2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Single crystalline silicon solar cell : c-Si) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Mono crystalline Silicon Solar Cell ลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก ซิลิคอนเป็นธาตุที่มีมากที่สุดในโลกชนิดหนึ่ง สามารถถลุงได้จากหินและทราย โดยนิยมใช้ธาตุซิลิคอนในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ใช้ทำทรานซิสเตอร์ ไอซี และเซลล์แสงอาทิตย์ เทคโนโลยี c-Si ได้รับความนิยมและใช้งานกันอย่างแพร่หลาย นิยมใช้งานในพื้นที่เฉพาะได้แก่ ในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีไฟฟ้าใช้เป็นหลัก



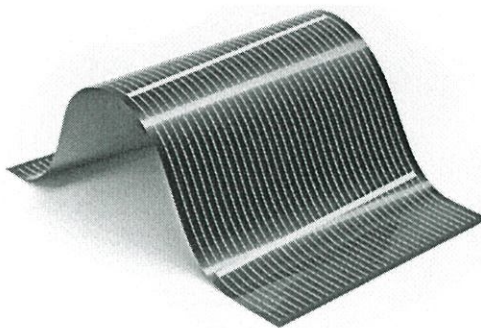
รูปที่ 2.7 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว[13]

2.2.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน (Polycrystalline silicon solar cell :p-Si) เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกโพลีได้ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อแก้ปัญหาต้นทุนสูงของแบบผลึกเดี่ยวซิลิคอนโดยทำให้ลดต้นทุนให้ต่ำกว่าถึงร้อยละ 10 อย่างไรก็ตาม เทคนิค p-Si ได้รับความนิยมและใช้งานอย่างแพร่หลายเช่นกัน



รูปที่ 2.8 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกโพลี[15]

2.2.1.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous silicon solar cell: a-Si) ลักษณะเป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมครอน (0.0005 มม.) น้ำหนักเบามาก และประสิทธิภาพเพียง 5-10% เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ธาตุซิลิคอนเช่นกัน แต่จะไม่ใช่ผลึก แต่ผลของสารอะมอร์ฟัสจะทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางของซิลิคอน ซึ่งมีความบางประมาณ 300 นาโนเมตร ทำให้ไม่สิ้นเปลืองเนื้อวัสดุ น้ำหนักเบา การผลิตทำได้ง่าย และข้อดีของ a-Si ไม่เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อม จึงเหมาะที่จะประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่กินไฟฟ้าน้อย เช่น เครื่องคิดเลข นาฬิกาข้อมือ วิทยุทรานซิสเตอร์ เป็นต้น



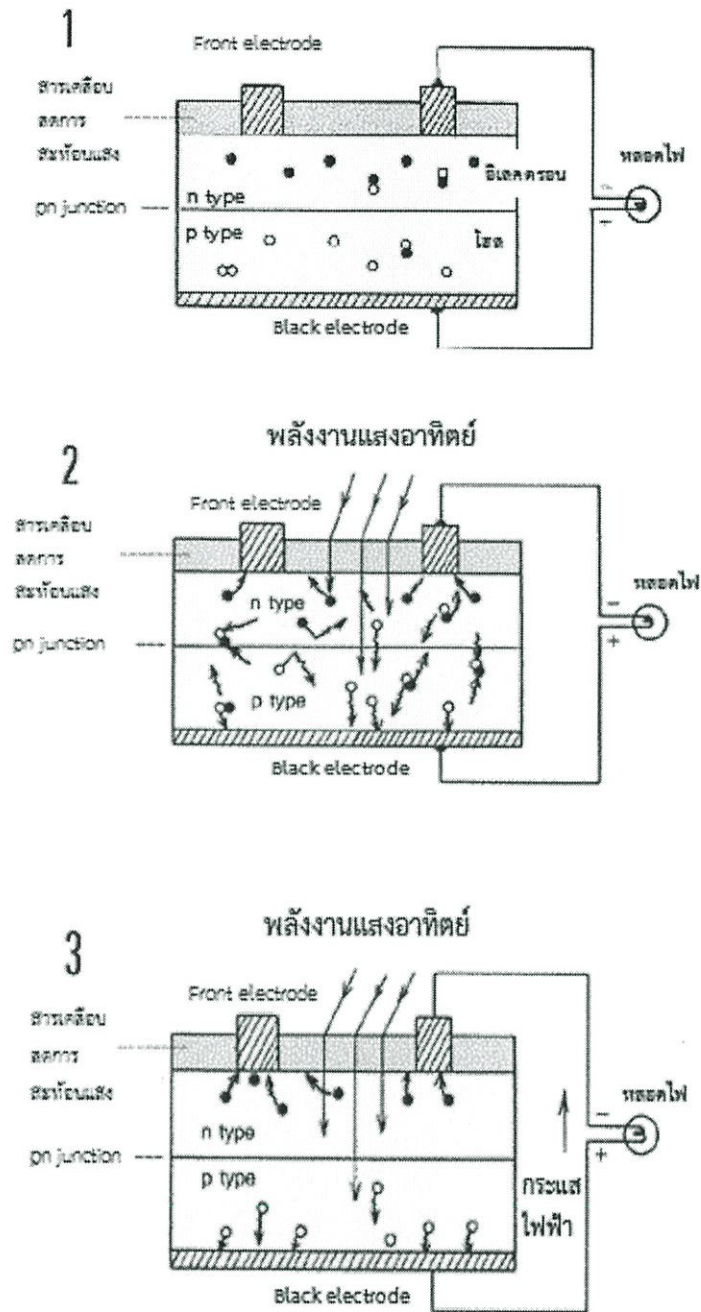
รูปที่ 2.9 เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอน[12]

2.2.2 คุณสมบัติและหลักการทำงานโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์

1. n type ซิลิคอน ซึ่งอยู่ด้านหน้าของเซลล์ คือ สารกึ่งตัวนำที่ผ่านการโด๊ปกับสารฟอสฟอรัส มีคุณสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอนเมื่อรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ n type ซิลิคอน คือสารกึ่งตัวนำที่ผ่านการโด๊ปกับสารโบรอน ทำให้โครงสร้างของอะตอมสูญเสียอิเล็กตรอน (โฮล) เมื่อรับพลังงาน จากแสงอาทิตย์จะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เมื่อนำซิลิคอนทั้ง 2 ชนิด มาประกบต่อกันด้วย pn junction จึงทำให้เกิดเป็น เซลล์แสงอาทิตย์ ในสภาวะที่ยังไม่มีแสงแดด n type ซิลิคอนซึ่งอยู่ด้านหน้าของเซลล์ ส่วนประกอบส่วนใหญ่พร้อมจะให้อิเล็กตรอน แต่ก็ยังมีโฮลปะปนอยู่บ้างเล็กน้อย ด้านหน้าของ n type จะมีแถบโลหะเรียกว่า Front Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ส่วน p type ซิลิคอนซึ่งอยู่ด้านหลังของเซลล์ โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นโฮล แต่ยังคงมีอิเล็กตรอนปะปนบ้างเล็กน้อย ด้านหลังของ p type ซิลิคอนจะมีแถบโลหะเรียกว่า Back Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมโฮล

2. เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบ แสงอาทิตย์จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนและโฮลทำให้เกิดการเคลื่อนไหว เมื่อพลังสูงพอทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะวิ่งเข้าหาเพื่อจับคู่กัน อิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังชั้น n type และโฮลจะวิ่งไปยังชั้น p type

3. อิเล็กตรอนวิ่งไปรวมกันที่ Front Electrode และโฮลวิ่งไปรวมกันที่ Back Electrode เมื่อมีการต่อวงจรไฟฟ้าจาก Front Electrode และ Back Electrode ให้ครบวงจร ก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าขึ้น เนื่องจากทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะวิ่งเพื่อจับคู่กัน

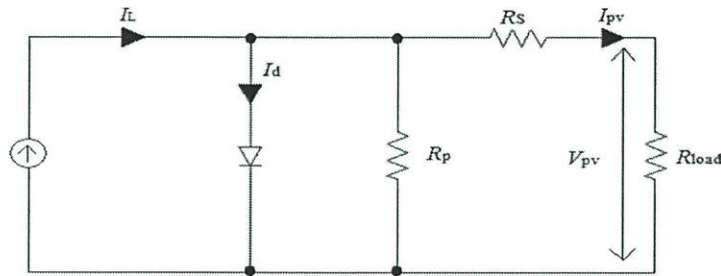


รูปที่ 2.10 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์[17]

2.2.3 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตมาจากวัสดุสารกึ่งตัวนำเหมือนกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป โครงสร้างของวัสดุสารกึ่งตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะรอยต่อพี-เอ็น (P-N Junction) เหมือนไดโอด ดังนั้นคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติจึงสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูล ประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าขนานกับไดโอดได้ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งปริมาณกระแส I_{sc} นี้กำเนิดมา

จากปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกที่มีความเข้มข้นของแสงค่าหนึ่ง ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ส่วนไดโอดจะแสดงถึงคุณลักษณะของสารกึ่งตัวนำที่เป็นรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นค่ากระแสจ่ายออกจึงสามารถอธิบายได้ด้วยความแตกต่างของกระแส I_{sc} ที่กำเนิดจากแสงอาทิตย์กับกระแสของไดโอดแสดงในสมการที่ 2.36



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์โดยต่อเข้ากับโหลด

จากรูปที่ 2.11 เป็นรูปวงจรสมมูลซึ่งแสดงรายละเอียดภายในเซลล์แสงอาทิตย์ โดย R_s คือ ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ R_p คือ ความต้านทานขนานโดยที่ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงออกมาในรูปของสมการได้ดังนี้

$$I_{pv} = I_L - I_d \left[\exp\left(\frac{V_{pv}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (2.36)$$

$$V_{pv} = V_T \ln \left[\frac{I_L - I_{pv}}{I_d} + 1 \right] \quad (2.37)$$

ตัวแปรต่างๆในสมการสำหรับคำนวณหากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ มีความหมายดังนี้

I_{pv} คือ กระแสที่ได้เมื่อแผงโซลาร์เซลล์ได้รับแสง (แอมป์)

I_d คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (แอมป์)

I_L คือ กระแสเอ๊าท์พุท (แอมป์)

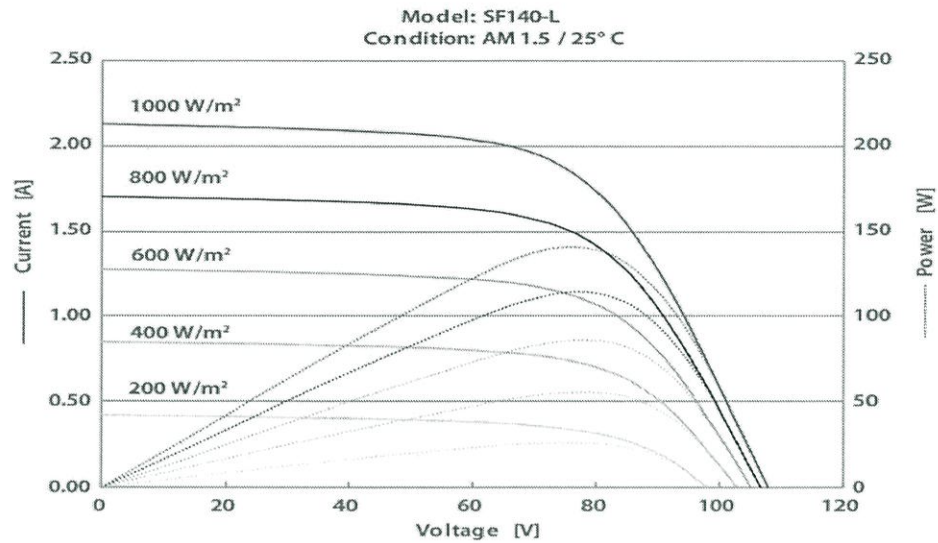
V_{pv} คือ แรงดันที่ได้เมื่อแผง PV ได้รับแสง (โวลต์)

V_T คือ แรงดันที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเท่ากับ $(nK_B T) / q$

K_B คือ ค่าคงที่ของโบลท์มาน

- T คือ อุณหภูมิ
 N คือ ideality factor
 q คือ ประจุอิเล็กตรอน (คูลอมบ์)

จากความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าใน I-V Curve

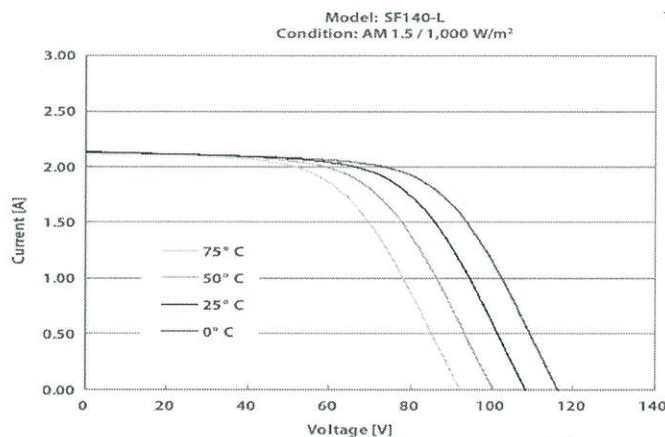


รูปที่ 2.12 กราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์[21]

เมื่อทำการปรับค่าความต้านทานที่ต่อตรงเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่จุดทำงานต่างๆ จะได้กราฟของกำลังไฟฟ้าซึ่งพล็อตระหว่างแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าก็จะได้ลักษณะเดียวกัน และจะพบว่าจุดที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่จุด V_{mpp} กับจุด I_{mpp} ผลคูณของกระแสและแรงดันที่จุดพลังงานสูงสุดจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความชันของกราฟ คือ ถ้ากราฟมีความชันมากลักษณะกราฟที่ได้จะใกล้เคียงกับสี่เหลี่ยมมาก ผลคูณของกระแสและแรงดันก็จะมีค่ามากตามไปด้วย การที่กราฟของเซลล์แสงอาทิตย์มีความชันแตกต่างกันนั้นเป็นผลมาจากความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์นั้นมีความแตกต่างกัน จากกราฟคุณสมบัติของเซลล์นี้จะมีค่าค่าหนึ่งซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซลล์สามารถจะจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับค่าในอุดมคติมากเท่าใด ค่านี้จะเรียกว่าค่า ฟิลแฟคเตอร์ (FF: Fill Factor) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งคิดมาจากอัตราส่วนต่อไปนี้

2.2.4 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

2.2.4.1 ความเข้มแสงตัวแปรที่สำคัญที่มีส่วนทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการทำงานในแต่ละพื้นที่ต่างกัน และมีความสำคัญในการพิจารณานำไปใช้ในแต่ละพื้นที่ตลอดจนการนำไปคำนวณระบบหรือคำนวณจำนวนแผงแสงอาทิตย์ที่ต้องใช้ในแต่ละพื้นที่ ความเข้มของกระแสไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของแสง หมายความว่าเมื่อความเข้มของแสงสูง กระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าหรือโวลต์แทบจะไม่แปรไปตามความเข้มของแสงมากนัก ความเข้มของแสงที่ใช้วัดเป็นมาตรฐานคือ ความเข้มของแสงที่วัดบนพื้นโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่ง ปราศจากเมฆหมอกและวัดที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก ซึ่งความเข้มของแสงจะมีค่าเท่ากับ 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรหรือ 1,000 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ AM 1.5 (air mass 1.5) และถ้าแสงอาทิตย์ทำมุม 60 องศา กับพื้นโลก ความเข้มของแสง จะมีค่าเท่ากับประมาณ 75 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรหรือ 750 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ AM2 กรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะใช้ค่า AM 1.5 เป็นมาตรฐานในการวัดประสิทธิภาพของแผง ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ[21]

2.2.4.2 อุณหภูมิ อุณหภูมิกระแสไฟฟ้าจะไม่แปรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่แรงดันไฟฟ้า (โวลต์) จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วทุกๆ 1 องศาที่เพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง 0.5% และในกรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพของแผงแสงอาทิตย์คือ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เช่น กำหนดไว้ว่าแผงแสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าที่วงจรเปิด (open circuit voltage หรือ Voc) ที่ 21 โวลต์ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสก็จะหมายความว่าแรงดันไฟฟ้าที่จะได้จากแผงแสงอาทิตย์ เมื่อยังไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า

ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสจะเท่ากับ 21 โวลต์ ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส เช่น อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของแผงแสงอาทิตย์ลดลง 2.5% ($0.5\% \times 5$ องศาเซลเซียส) นั่นคือ แรงดันของแผงแสงอาทิตย์ที่ V_{oc} จะลดลง 0.525 โวลต์ (21 โวลต์ $\times 2.5\%$) เหลือเพียง 20.475 โวลต์ (21 โวลต์ $- 0.525$ โวลต์) สรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แรงดันไฟฟ้าก็จะลดลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงแสงอาทิตย์ลดลงด้วย ดังรูปที่ 2.13

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 องศาเซลเซียส แล้ว จะพบว่าแผงที่ระบุว่าให้กำลังไฟฟ้า 80 วัตต์ จะให้กำลังไฟฟ้าต่ำกว่า จากสาเหตุดังกล่าว ผู้ที่จะใช้แผงจึงต้องคำนึงถึงข้อกำหนดเหล่านี้ในการเลือกใช้แผงแต่ละชนิดด้วย

2.2.4.3 จำนวนเซลล์ โดยปกติเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าประมาณ 0.5 โวลต์/เซลล์ การต่อเซลล์แสงอาทิตย์จะต่อเป็นอนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น โดยจะมีผลต่อกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์น้อยมาก

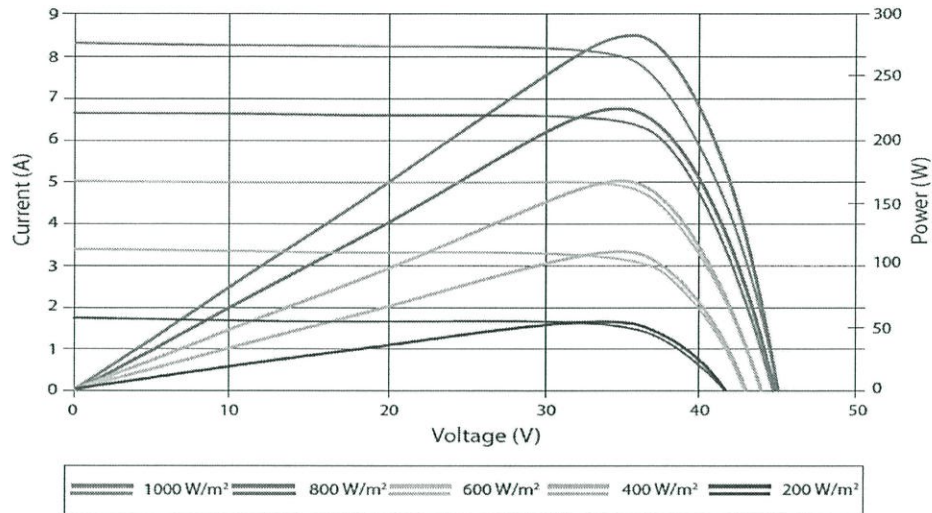
2.2.4.4 พื้นที่เซลล์ เซลล์ที่มีพื้นที่ในการรับแสงมากส่งผลต่อการเพิ่มค่าของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรให้มากขึ้น

2.2.4.5 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์ผลึกเดี่ยว (Crystalline) จะผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงกว่าเซลล์แบบแผ่นบาง (Thin-film cells) แต่แรงดันไฟฟ้าที่ได้รับมีค่าต่ำกว่า

2.3 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยวิธีการรบกวนและสังเกต

การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) หมายถึง ขั้นตอนวิธีที่ถูกรวมเข้าไว้ในอุปกรณ์ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้สูงสุด (Maximum Power) ทั้งนี้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความเข้มของแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสภาพแวดล้อม และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell Temperature) ระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้รับการ

ออกแบบให้ใช้หน่วยประมวลผลสำหรับการตรวจสอบกำลังไฟฟ้าขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดเวลา เพื่อให้ได้ค่ากำลังผลิตสูงสุดในแต่ละเวลาตามค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ได้รับ ในรูปของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ด้วยขั้นตอนวิธีของการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่จะทำให้ได้กำลังไฟฟ้ามากขึ้น หากตรวจสอบพบว่า ตำแหน่งที่จุดทำงานไม่ใช่จุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด จะทำการย้ายจุดทำงานนั้นไปยังตำแหน่งที่คาดว่าจะจะเป็นจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อไป



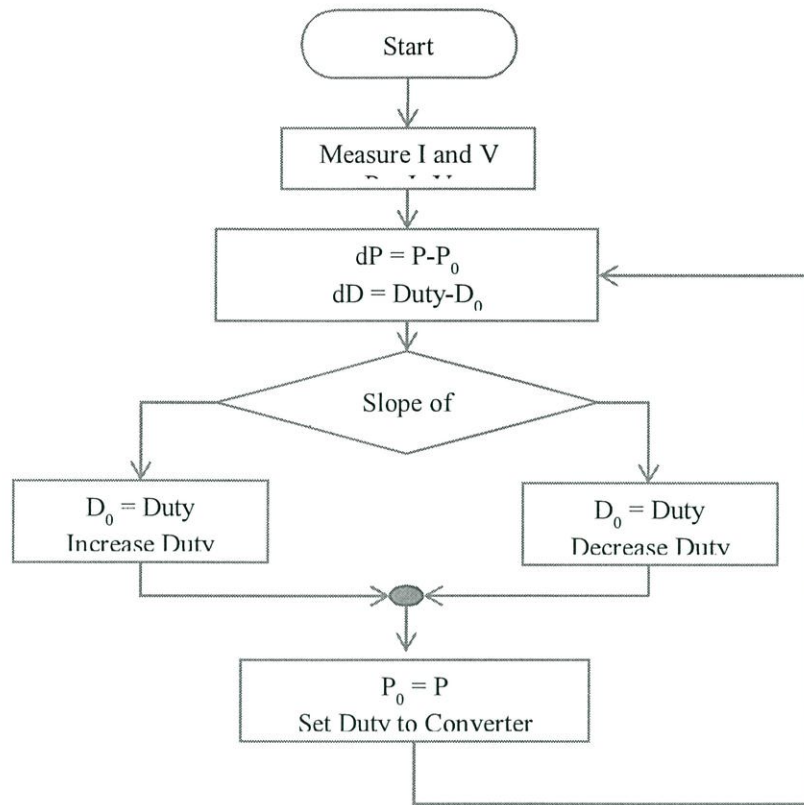
รูปที่ 2.14 จุดที่เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดคือจุดที่อยู่สูงสุดของยอดภูเขา[22]

2.3.1 ขั้นตอนของวิธีการรบกวนและสังเกต (Perturbation and Observation)

วิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อนโดยลักษณะการคิดค่ากำลังไฟฟ้า ณ เวลาปัจจุบัน $P_{pv}(k)$ ค่ากำลังไฟฟ้าคำนวณจาก $I_{pv}(k) \times V_{pv}(k)$ นำมาเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าก่อนหน้า $P_{pv}(k-1)$ ถ้าอัตราการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นหรือน้อยลงระบบจะปรับทิศทางของแรงดันอ้างอิงตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าโดยสามารถสรุปได้ดังตาราง

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบทิศทางการรบกวนการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า และทิศทางครั้งต่อไป

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

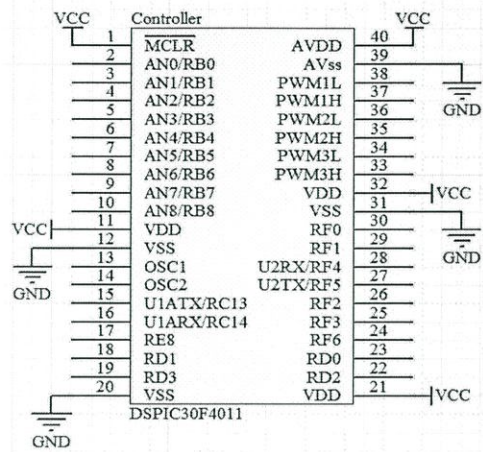


รูปที่ 2.15 Flow Chart การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบรบกวนและสังเกต

2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์(Microcontroller)

dsPIC30F2010/4011 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล dsPIC30F ซึ่งเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น 28 Pin เบอร์ dsPIC30F2010 หรือ รุ่น 40 Pin เบอร์ dsPIC30F4011 ของ Microchips เป็น MCU ประจำบอร์ด โดย dsPIC30F2010/4011 เป็น MCU ซึ่งใช้การประมวลผลข้อมูลแบบ 16 บิต จากค่าย Microchips ซึ่งมีจุดเด่นในด้านของความสามารถในการประมวลผลข้อมูลสัญญาณแบบดิจิทัลเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในงานควบคุมต่างๆ โดยโครงสร้างภายในจะเป็นการผสมผสานระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) และวงจรร DSP (Digital Signal Processing) รวมเข้าไว้ด้วยกัน หรืออาจเรียก MCU ตระกูล dsPIC30F ว่าเป็น DSC หรือ Digital Signal Controller ก็ได้ โดยโครงสร้างของบอร์ด ET-BASE dsPIC30F2010/4011 ได้รับการออกแบบให้บอร์ดมีขนาดเล็ก เหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นหลัก โดยภายในบอร์ดได้บรรจุเอาวงจรรที่จำเป็นต่อการใช้งาน และสะดวกต่อการพัฒนาโปรแกรม มีความยืดหยุ่น สามารถปรับเปลี่ยนสัญญาณ I/O เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะต่างๆ ให้สอดคล้องและเหมาะสมกับ

ความต้องการใช้งานได้ในหลายลักษณะตามต้องการคุณสมบัติของบอร์ด เลือกใช้ MCU ตระกูล dsPIC30F2010 หรือ dsPIC30F4011 ของ Microchips เป็น MCU ประจำบอร์ด โดยคุณสมบัติเด่นๆของ MCU



รูปที่ 2.16 ไมโครคอนโทรลเลอร์

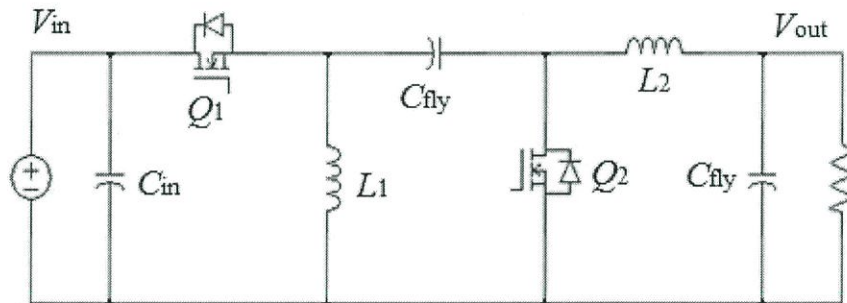
ในงานวิจัยนี้ได้มีการเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 ผลิตโดยบริษัท Microchip Inc. เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 16 บิต ที่รวมความสามารถของไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) เข้ากับการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing, DSP) ซึ่งนอกจากประสิทธิภาพในการควบคุมอุปกรณ์ภายนอกแล้ว ยังสามารถนำมาใช้งานทางด้านการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลได้เป็นอย่างดี การเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน สามารถเขียนด้วยภาษา C (MPLAB IDE&MPLAB C30) ที่ครอบคลุมคุณสมบัติทั้งหมดของ dsPIC30F4011 รวมถึงการใช้งานโมดูล DSP ภายในตัวของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 มีโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลที่มีความละเอียด 10 บิต จำนวน 6 ช่องสัญญาณใช้การแปลงแบบประมาณค่า (Successive Approximation)

บทที่ 3

ซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์

การออกแบบวงจรไฟฟ้ากระแสตรงดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ ของวงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์ จะถูกออกแบบให้มีลักษณะเหมือนวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ตำแหน่งที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนวงจรจากวงจรเดิม(ซีต้าคอนเวอร์เตอร์) คือตำแหน่ง Q_2 เพื่อพัฒนาตัววงจรให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น แต่การทำงานของตัววงจรจะมีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้นจากเดิม ซึ่งจำเป็นจะต้องมีการควบคุมการทำงานของ การเกิดสัญญาณ PWM การออกแบบวงจรเพื่อที่จะเปรียบเทียบการทำงานและประสิทธิภาพของตัววงจร จำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์เดียวกัน ผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบตัววงจรเพื่อที่จะสามารถเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์จากไดโอดเป็นมอสเฟต หรือจากมอสเฟตเปลี่ยนเป็นไดโอด โดยใช้บอร์ดการทดลองเพียงหนึ่งบอร์ดเท่านั้น

3.1 ซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์(Synchronous Zeta converter)



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของ Synchronous Zeta converter

จากรูปเป็นการแสดงวงจรที่ถูกปรับเปลี่ยนพัฒนาขึ้นให้เป็นวงจรซิงโครนัส ในส่วนที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมเข้าไป คือ ไดโอด $D1$ ถูกเปลี่ยนเป็นมอสเฟต เข้ามาแทนที่ตำแหน่ง Q_2 ส่วนอื่นๆยังคงเป็นอุปกรณ์ตัวเดิม สมการที่ใช้เหมือนกับวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ หลักการทำงานจะมีการเกิดสัญญาณเพิ่มเข้ามามีอีกหนึ่งที่มอสเฟต Q_2 ทำให้การทำงานมีความซับซ้อนเพิ่มเข้ามามากขึ้น อุปกรณ์ภายในตัววงจรจะประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำ L สองตัว ตัวเก็บประจุ C สามตัว มอสเฟต 2 ตัว การสร้างวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ จะต้องประกอบไปด้วยวงจรมากมายเข้ามารวมกัน และมีการเขียนโปรแกรมเข้าไปควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ภายในวงจรจำเป็นต้องมีไฟฟ้าเลี้ยง

ให้กับตัวเอง เพื่อให้ระบบการทำงานสามารถทำงานได้ การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นสิ่งที่จำเป็นมาก เพื่อที่จะได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ ความถี่สวิตช์ซึ่งควรจะมีการเลือกให้มากกว่าหุของ คนเราได้ยิน คือมากกว่า 16 kHz ขึ้นไป ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการเขียนโปรแกรมควบคุม สัญญาณ PWM ที่ความถี่สวิตช์ซึ่ง 20 kHz และสิ่งที่สำคัญเหนือสิ่งอื่นใดจำเป็นที่จะต้องมีการ Dead time เข้ามาเกี่ยวข้อง เนื่องจากการทำงานแบบซิงโครนัส การทำงานจะต้องทำในทิศทางตรงข้าม กันและอยู่ภายในกึ่งเดียวกัน จะสลับการทำงานทันทีทันใดเลยไม่ได้ จำเป็นที่จะต้องมีการถ่วงเวลา ก่อนที่จะมีการสวิตช์ของมอสเฟตอีกตัว เพื่อไม่ให้เกิดการ Short กันภายในกึ่ง อาจทำให้เกิด การเสียหายได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการเขียนโปรแกรมเข้าไปควบคุมการทำงานของสัญญาณ PWM ที่ใช้ในการขับเคลื่อนของมอสเฟต โดยการใส่ค่า $DT = 2 \mu s$ เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ การเลือกมอสเฟตเข้ามาใช้เป็นตัวส่งผ่านกำลัง เนื่องจากมอสเฟตมีคุณสมบัติในการทำงานที่ความถี่สูง การสูญเสียขณะสวิตช์ซึ่งน้อย ทำงานที่แรงดันต่ำ รองรับกระแสได้พอสมควร และมีคุณสมบัติตามที่ ต้องการ

3.1.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ ในช่วงที่เป็นสภาวะอยู่ตัว (steady state) จะมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์ดังนี้

1. ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่เป็นผลทำให้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่
2. ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่เป็นผลทำให้ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าคงที่
3. กระแสและแรงดันไฟฟ้า ณ เวลาซ้ำกันในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากัน
4. กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก กรณีนี้จะไม่คำนึงถึงการสูญเสียที่เกิดจาก

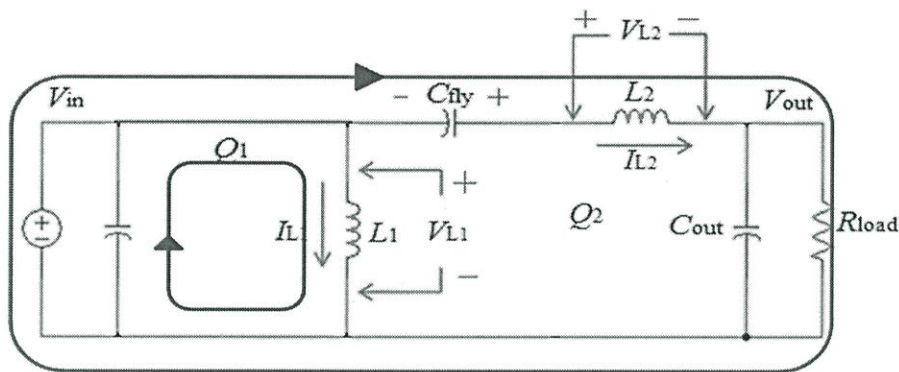
การทำงานของวงจร เนื่องจากอุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติทำให้ประสิทธิภาพรวมของวงจรเป็นหนึ่งร้อย เปอร์เซ็นต์

5. ช่วงเวลานำกระแสคือ DT และช่วงเวลาหยุดนำกระแสคือ $(1-D)T$

3.1.2 หลักการทำงานของวงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์

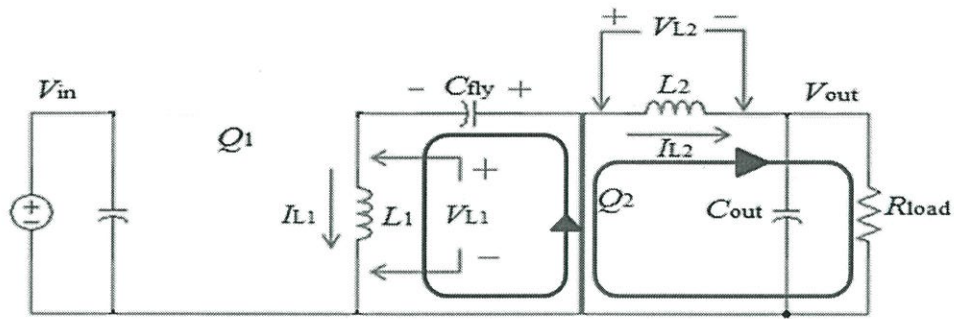
การซิงโครนัส คือการทำงานที่พร้อมกันในช่วงเวลาเดียวกัน ภายในคาบเวลาเดียวกันและความถี่เดียวกัน หรือ การทำงานตรงกันข้ามในช่วงคาบเวลาเดียวกันที่ความถี่เดียวกัน การซิงโครนัสของวงจรจะไม่สามารถสลับการทำงานทันทีทันใดได้ จำเป็นที่จะต้องมีการถ่วงเวลาหน่วงเพื่อทำให้เกิดการ Short circuit เกิดขึ้น ภายในช่วงเวลา Deadtime กระแสจะถูกไปอัสผ่านไดโอดที่อยู่ภายในตัว

มอสเฟต เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออก มีค่าลดลงหรือเพิ่มขึ้นตามความต้องการโดยจะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ได้โดยการวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด การทำงานจะประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนหลักๆ คือ ขณะสวิตช์นำกระแสและหยุดนำกระแส อุปกรณ์สวิตช์ซึ่งตัวแรก Q_1 และตัวที่สอง Q_2 จะทำงานตรงข้ามกัน ขณะที่ Q_1 นำกระแส Q_2 จะไม่นำกระแส กระแสจะไหลสองเส้นทาง เส้นทางแรกจากแหล่งจ่ายผ่านสวิตช์ซึ่งตัวแรก ไปยังตัวเก็บประจุ C_{fy} ผ่านตัวเหนี่ยวนำทางด้านขาออกและไปยังโหลด ท้ายที่สุดจะวนกลับมาที่โหลดผ่านกราวด์ เส้นทางที่สองจากแหล่งจ่ายผ่านสวิตช์ซึ่งตัวแรกไปยังกราวด์อ้างอิงของตัวเหนี่ยวนำ L_1 และกลับมายังแหล่งจ่ายผ่านกราวด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

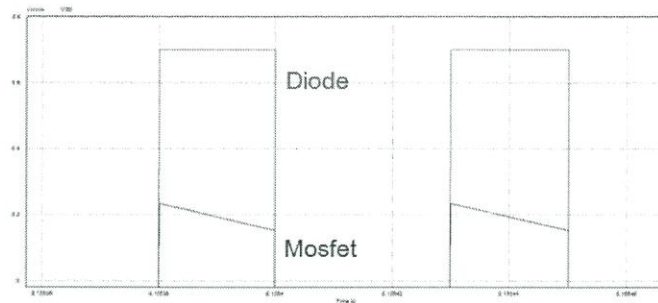


รูปที่ 3.2 ขณะสวิตช์ Q_1 ทำงาน, Q_2 หยุดการทำงาน

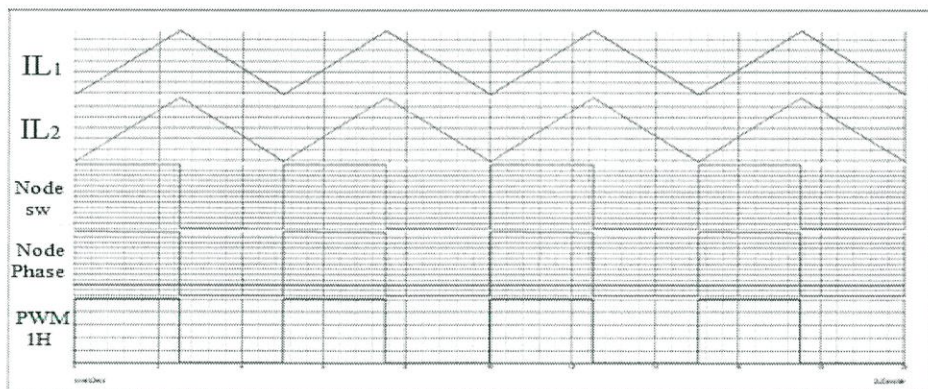
ในขณะที่ Q_2 นำกระแส Q_1 จะหยุดนำกระแส ตัวเก็บประจุทางด้านขาเข้าจะถูกตัดออกจากระบบแต่กระแสยังคงไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสองเส้นทาง เส้นทางแรกจากตัวเหนี่ยวนำทางด้านขาออกไหลผ่านโหลดและลงกราวด์ และผ่านไดโอดภายในอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งตัวที่สองกลับมายังตัวเหนี่ยวนำทางด้านออก เส้นทางที่สอง จากกราวด์อ้างอิงของตัวเหนี่ยวนำ พลังงานไปยังตัวเก็บประจุไหลผ่านไดโอดอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งตัวที่สองกลับมายังกราวด์อ้างอิงของตัวเหนี่ยวนำ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 การสวิตช์ซึ่ง Q_2 เป็นผลทำให้แรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าที่ต่ำลง เนื่องจาก สวิตช์ซึ่งที่ Q_2 จะทำให้ความต้านทานตกคร่อมไดโอดมีค่าที่ต่ำลงส่งผลให้แรงดันตกคร่อมไดโอดต่ำลงไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 3.4 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 จะถูกแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.3 ขณะสวิตช์ Q_1 หยุดการทำงาน, Q_2 ทำงาน



รูปที่ 3.4 แรงดันตกคร่อมไดโอดภายในโมสเฟตต่ำลง ขณะที่ Q_2 ทำงาน



รูปที่ 3.5 รูปคลื่นกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ[5]

จากรูปจะเป็นการแสดงให้เห็นรูปคลื่นสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ จะเห็นว่าเมื่อ Q_1 ทำงาน พลังจะถูกเก็บที่ตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 หลังจากนั้นเมื่อสวิตช์ Q_1 หยุดการทำงาน Q_2 ทำงาน จะเห็นว่า พลังงานจะถูกคายที่ตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 การเท่ากันของแรงดันที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และการถ่ายเทพะจุของตัวเก็บประจุทำให้หาสมการ ดีซีคอนเวอร์เตอร์ได้ดังสมการที่ 2.19 ค่าแรงดันกระแสเพิ่มทางด้านขาเข้าสามารถหาได้ดังสมการที่ 3.1 ค่าแรงดันกระแสเพิ่มทางด้านขาออกสามารถหาได้ดังสมการที่ 3.2 ค่ากระแสกระเพื่อมทั้งทางด้านขาเข้าและขาออก

สามารถหาได้ดังสมการที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ สุดท้ายจะเป็นการหาประสิทธิภาพของวงจรดังแสดงในสมการที่ 3.5

$$\%V_{ripple(input)} = \frac{\Delta V_{in}}{V_{in}} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\%V_{ripple(output)} = \frac{\Delta V_{out}}{V_{out}} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\%I_{ripple(input)} = \frac{\Delta I_{in}}{I_{in}} \times 100 \quad (3.3)$$

$$\%I_{ripple(output)} = \frac{\Delta I_{out}}{I_{out}} \times 100 \quad (3.4)$$

$$\%Efficiency = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (3.5)$$

3.1.3 การสูญเสียของวงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ทำให้ประสิทธิภาพต่ำลงเนื่องมาจากการสูญเสียที่เกิดจากอุปกรณ์สวิตซ์ซิงและการสูญเสียภายในวงจร อุปกรณ์สวิตซ์ซิงมีทั้งหมดสองตัวคือ Q_1 และ Q_2 ซึ่งสามารถคำนวณการสูญเสียที่เกิดจาก conduction loss และ switching loss ได้ดังนี้

3.1.3.1 การสูญเสียทางด้าน High-Side (Q_1) สามารถคำนวณการสูญเสียที่ตัวอุปกรณ์ได้ดังสมการด้านล่างนี้

$$P_{HS} = P_{sw} + P_{conduction} \quad (3.6)$$

$$P_{conduction} = I_{out}^2 \times R_{DS(ON)} \times \frac{V_{out}}{V_{in}} \tag{3.7}$$

$$P_{sw} = \left(\frac{V_{in} \times I_{out}}{2}\right)(F_{sw})(t_2 + t_3) \tag{3.8}$$

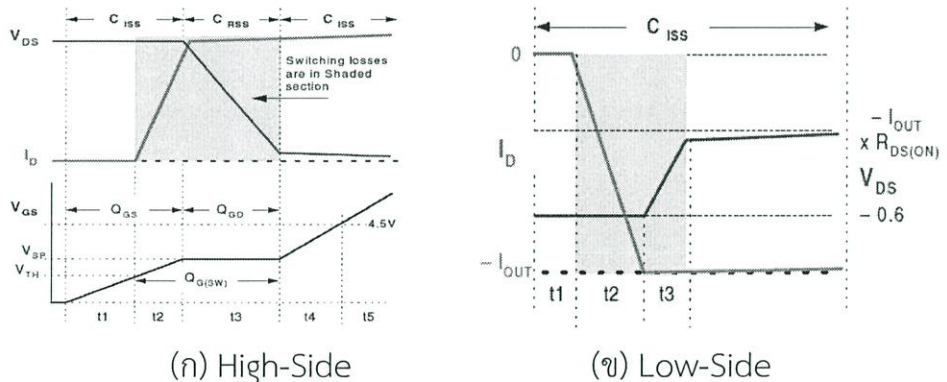
3.1.3.2 การสูญเสียทางด้าน Low-Side (Q_2) สามารถคำนวณการสูญเสียที่ตัวอุปกรณ์ได้ดังสมการด้านล่างนี้

$$P_{LS} = P_{sw} + P_{conduction} \tag{3.9}$$

$$P_{conduction} = I_{out}^2 \times R_{DS(ON)} \times (1 - D) \tag{3.10}$$

$$P_{sw} \approx (t_2 \times V_F \times t_3 \times \frac{(V_F + I_{out}) \times 1.1 \times R_{DS(ON)}}{2}) \times F_{sw} \tag{3.11}$$

ช่วงระยะเวลา t_2 และ t_3 แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงช่วงเวลาการสูญเสียที่เกิดจากสวิทซ์ซิ่ง loss [14]

3.2 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ LC

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เป็นปัจจัยสำคัญต่อคอนเวอร์เตอร์ การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เป็นการกำหนดพิคกิ้งของโพลต์ที่ใช้ คำนวณจากกระแสด้านเข้าและออกของคอนเวอร์เตอร์ แรงดันทางด้านเข้าและด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ รวมทั้งการคำนวณเพื่อกำหนด Ripple

voltage และ Ripple current ที่ด้านขาออกให้มีค่าน้อยที่สุด ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จำเป็นที่จะต้องสอดคล้องกับความถี่ที่เลือกใช้ และ พิกัดกำลังที่ต้องการรองรับ

3.2.1 ตัวเก็บประจุ C_{in} ที่ด้านเข้า

จากสูตรที่ใช้ในการคำนวณได้จากสมการที่ (2.34)

$$C_m = I_0 \times \frac{1}{2 \times f \times I_{ripple} \times V_s}$$

แทนค่าในสมการ $I_0 = 8 \text{ A}$ (กระแสด้านออก)

$f = 20 \text{ kHz}$ (ความถี่สวิตซ์ซิ่ง)

$V_s = 28 \text{ V}$ (แรงดันขาเข้า)

$I_{ripple} = 0.005 \text{ A}$ (กระแสริปเปิ้ล)

$$C_m = 8 \times \frac{1}{2 \times 20000 \times 0.005 \times (28)}$$

$$C_m = 1428 \text{ } \mu\text{F}$$

ในการออกแบบ ควรใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ เพื่อให้ค่า ripple ที่เกิดขึ้นมามีค่าน้อยที่สุด ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ C_m ขนาด 2000 μF

3.2.2 ตัวเก็บประจุ C_{fly} ที่อยู่ระหว่างกลาง

จากสูตรที่ใช้ในการคำนวณได้จากสมการที่ (2.33)

$$C_{fly} = \frac{I_0 \times V_0}{(V_s + V_0) \times f \times V_{ripple}}$$

แทนค่าในสมการ $I_0 = 8 \text{ A}$ (กระแสด้านออก)

$V_0 = 28 \text{ V}$ (แรงดันด้านออก)

$f = 20,000 \text{ Hz}$ (ความถี่สวิตซ์ซิ่ง)

$V_s = 28 \text{ V}$ (แรงดันขาเข้า)

$$V_{ripple} = 0.2 \quad (\text{ค่าแรงดันกระเพื่อมที่ต้องการ})$$

$$C_{fly} = \frac{8 \times 28}{(28 + 28) \times 20000 \times 0.2}$$

$$C_{fly} = 1000 \mu\text{F}$$

ในการออกแบบ ควรใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ เพื่อให้ค่า ripple ที่เกิดขึ้นมาค่าน้อยที่สุด ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ C_{fly} ขนาด 1000 μF

3.2.3 ตัวเก็บประจุ C_o ที่ด้านออก

จากสูตรที่ใช้ในการคำนวณได้จากสมการที่ (2.35)

$$C_o = \frac{1 - D}{8 \times L \times V_{ripple} \times f^2}$$

$$\text{แทนค่าในสมการ} \quad L_{1,\min} = 50 \mu\text{H} \quad (\text{ค่าตัวเหนี่ยวนำ})$$

$$V_{ripple} = 0.005 \quad (\text{ค่าแรงดันกระเพื่อมที่ต้องการ})$$

$$f = 20 \text{ kHz} \quad (\text{ความถี่สวิตซ์ซิ่ง})$$

$$D = 0.5 \quad (\text{ดิวตี้ไซเคิล})$$

$$C_o = \frac{0.5}{8 \times 0.005 \times 20000}$$

$$C_o = 625 \mu\text{F}$$

ในการออกแบบ ควรใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ เพื่อให้ค่า ripple ที่เกิดขึ้นมาค่าน้อยที่สุด ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ C_o ขนาด 2000 μF

3.2.4 ตัวเหนี่ยวนำ L_1

จากสูตรที่ใช้ในการคำนวณได้จากสมการที่ (2.31)

$$L_{1,\min} = \frac{(1 - D)^2}{2Df} \times R$$

แทนค่าในสมการ	$D = 0.5$	(ดิวตี้ไซเคิล)
	$f = 20,000 \text{ Hz}$	(ความถี่สวิตซ์ซิ่ง)
	$R = 4$	(ค่าโหลดที่ใช้)

$$L_{1,\min} = \frac{(1-0.5)^2}{2(0.5)(20000)} \times 4$$

$$L_{1,\min} = 50 \mu\text{H}$$

ในการออกแบบ ควรใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดใหญ่ เพื่อให้ค่า ripple ที่เกิดขึ้นมาค่าน้อยที่สุด ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ $L_{1,\min}$ ขนาด 190 μH

3.2.5 ตัวเหนี่ยวนำ L_2

จากสูตรที่ใช้ในการคำนวณได้จากสมการที่ (2.32)

$$L_{2,\min} = \frac{(1-D)}{2Df} \times R$$

แทนค่าใน	$D = 0.5$	(ดิวตี้ไซเคิล)
	$f = 20 \text{ kHz}$	(ความถี่สวิตซ์ซิ่ง)
	$R = 4$	(ค่าโหลดที่ใช้)

$$L_{2,\min} = \frac{(1-0.5)}{2(0.5)(20000)} \times 4$$

$$L_{2,\min} = 50 \mu\text{H}$$

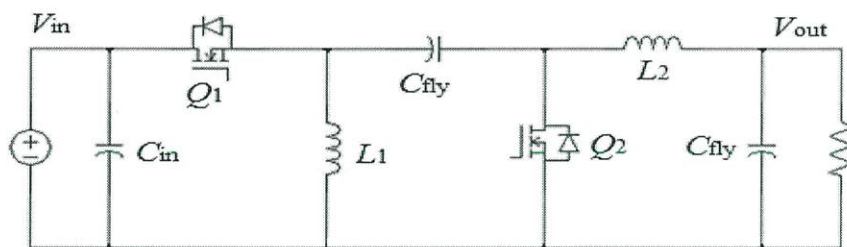
ในการออกแบบ ควรใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดใหญ่ เพื่อให้ค่า ripple ที่เกิดขึ้นมาค่าน้อยที่สุด ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ $L_{2,\min}$ ขนาด 190 μH

3.3 ออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของวงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์

การออกแบบสร้างคอนเวอร์เตอร์ จะประกอบไปด้วยวงจรต่างๆ เช่น ทั้งวงจรไฟเลี้ยง วงจรควบคุมการทำงาน วงจรตรวจจับสัญญาณ วงจรแสดงเก็บและแสดงผล เป็นต้น ทุกๆวงจรมีความสำคัญแตกต่างกันตามหน้าที่การทำงาน เมื่อนำวงจรแต่ละวงจรมารวมเข้าด้วยกันเพื่อให้เกิดเป็นระบบการทำงานขึ้น การทำงานของแต่ละวงจรสามารถแบ่งออกได้เป็นดังนี้

3.3.1 วงจรกำลัง

จะประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำทั้งหมดสองตัว ในกรณีนี้ได้กำหนดค่าตัวเหนี่ยวนำที่ใช้เป็น $190 \mu\text{H}$ ทั้งสองตัว ตัวเก็บประจุจะใช้ขนาด $2000 \mu\text{F}$ ทั้งด้านขาเข้าและด้านขาออกของวงจร ส่วนตัวเก็บประจุที่อยู่ตรงกลางจะเลือกใช้ขนาด $1000 \mu\text{F}$ การเลือกมอสเฟตเข้ามาใช้จำเป็นต้องคำนึงถึงพิกัดกำลัง กระแส และ แรงดันที่รองรับ ผู้วิจัยได้เลือกใช้มอสเฟตเบอร์ IRF2807 ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะสมให้หลายด้าน ทั้งในเรื่อง ของกระแสและแรงดัน อีกทั้งยังมีค่า $R_{ds(on)}$ ที่ต่ำมาก ส่วนไดโอด ที่ใช้ได้ทำการเลือกใช้เบอร์ NFA39 เป็นชนิด Schottky Diode ซึ่งมีค่าแรงดันตกคร่อมเพียง 0.254 รองรับกระแสได้ 15 A และรองรับแรงดันได้ 200 V ตัวถังของมอสเฟตและไดโอด ทั้งคู่เป็น TO-220

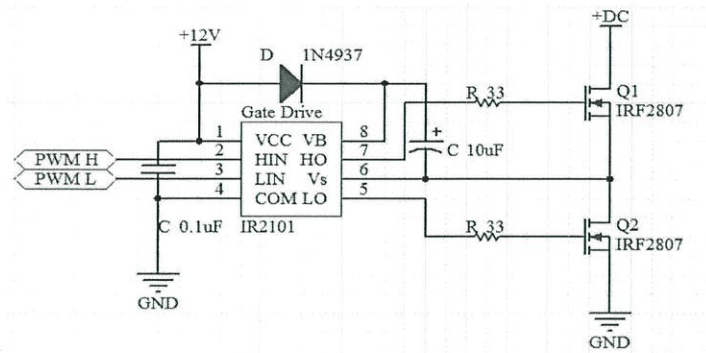


รูปที่ 3.7 วงจร Synchronous zeta converter

3.3.2 วงจรขับเคลื่อน(Gate drive)

วงเกตขับเคลื่อนจะประกอบไปด้วย IC ที่ใช้ในการยกระดับแรงดัน จาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็น 12 V เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนของมอสเฟต โดย IC ที่ใช้เบอร์ IR2101 ไฟเลี้ยงที่ใช้จะอยู่ในช่วง $10 - 20 \text{ V}$ ตัววงจรจะประกอบไปด้วย Diode 1N4937 เป็นชนิด Fast switching diode และ ตัวเป็นประจุ C_{boost} ที่ทำหน้าที่ในการ boost แรงดันให้กับขาเกตทางด้าน High เนื่องจากทางด้านขา High ตัวมอสเฟต ขาซอสไม่ได้ต่อลงกราวด์ จึงทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องมีการต่อ Diode และ C เข้าไป

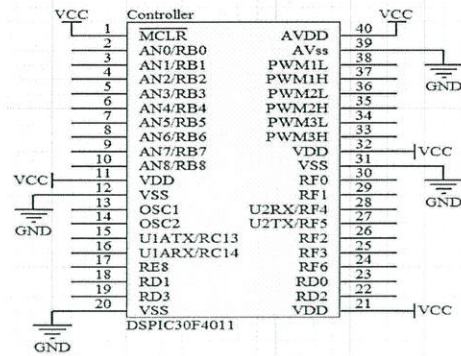
เพื่อช่วยในการ boost แรงดันขาเกต ส่วนทางด้านขา Low ไม่จำเป็นต้อง boost เนื่องจาก ตัวมอสเฟต ขาซอสต์อลงกราวด์อยู่แล้ว พิกัดกำลังที่ใช้ในการเลือกมอสเฟต เข้ามาใช้ เนื่องจากเป็นการนำไปประยุกต์ใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีระดับแรงดันไม่เกิน 40 V และ กระแสไม่เกิน 10 A จึงได้ทำการเลือกมอสเฟตเบอร์ IRF2807 ที่สามารถรองรับแรงดันได้ไม่เกิน 75 V และกระแสไม่เกิน 82 A อีกทั้งยังมีค่า $R_{ds(on)} = 13 \text{ m}\Omega$ ที่ต่ำมาก เพื่อให้ตัววงจรมีประสิทธิภาพที่สูง แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรขับเกตเมื่อมีการต่อเข้ากับวงจรกำลัง

3.3.3 วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

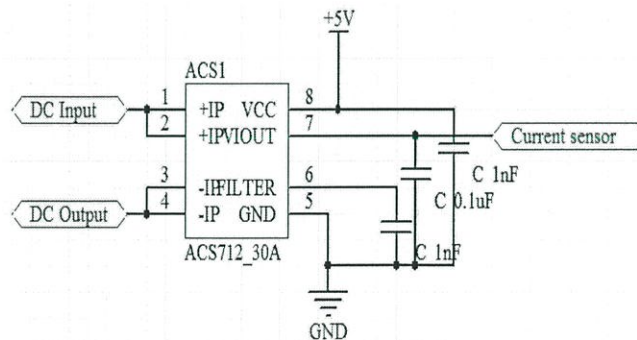
การควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถเขียนโปรแกรมควบคุมได้หลายภาษา ได้แก่ แอสเซมบลี เบสิก ซี และ พาสคาล แต่เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์มีด้วยกันหลายประเภทหรือตระกูลแบ่งตามสถาปัตยกรรม (การผลิตและกระบวนการทำงานระบบการประมวลผล) บางประเภทสามารถเขียนได้ทุกภาษา แต่บางประเภทก็ใช้ได้บางภาษาทั้งนี้ขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิตซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม รวมถึงผู้ผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ใช้เบอร์ dsPIC30F4011 จะประกอบไปด้วยขาทั้งหมด 40 ขา ซึ่งไฟเลี้ยงจะมีทั้งหมด 5 ขา คือขาที่ 1,11,21,32 และ 40 ส่วนกราวด์จะมีทั้งหมด 4 ขา แต่ละขาอยู่ที่ 12,20,31 และ 39 ไมโครคอนโทรลเลอร์ นี้มีฟังก์ชันการทำงาน อนุล็อกเป็นดิจิตอล(ADC) การสร้างสัญญาณ PWM ตัวประมวลผล(CPU) ส่วนประกอบอื่นที่สำคัญเมื่อนำไปใช้งานจำเป็นต้องมีการต่อสัญญาณนาฬิกาเข้าไปเพื่อใช้ในการกำหนดคาบเวลาให้กับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะอยู่ที่ขา 13 และ 14 แล้วแต่จะเลือกความถี่ที่ใช้ ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้ Clock ที่ความถี่ 4 MHz มาใช้เป็นตัวกำหนดคาบเวลาให้กับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งได้แสดงตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ไมโครคอนโทรลเลอร์

3.3.4 วงจรตรวจจับกระแส (Current sensor)

วงจรตรวจจับกระแสที่ใช้เป็น IC เบอร์ ACS712-30A สามารถตรวจจับกระแสอยู่ในช่วง 0 – 30 A ซึ่งหลักการทำงานของ IC เบอร์นี้จะเป็นการตรวจจับการไหลของประจุที่เกิดขึ้น ซึ่งจะมี Hall effect sensor ทำหน้าที่ในการตรวจจับอัตราการไหลของประจุไฟฟ้า สามารถตรวจวัดได้ทั้งกระแส AC และ DC แปลงค่าที่ได้ออกมาในรูปของสัญญาณ DC 0 – 5 V ไฟเลี้ยงที่ใช้งานจะอยู่ที่ 5 V ซึ่งจะทำให้เมื่อไม่มีค่ากระแสเกิดขึ้นสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจะอยู่ที่ 2.5 V และจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงแล้วแต่ทิศทางของกระแส ซึ่งค่ากระแสในแต่ละแอมแปร์จะเป็น 66 mV/A แสดงวงจรดังรูปที่ 3.10 วงจรตรวจจับกระแส



รูปที่ 3.10 วงจรตรวจจับกระแส

3.3.5 วงจรตรวจจับแรงดัน (Voltage divider sensor)

วงจรตรวจจับแรงดันจะเป็นการนำตัวต้านทานสองตัวมาต่ออนุกรมกันและเป็นการแบ่งแรงดันออกไปเป็นสัญญาณ ซึ่งมีสูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าตัวต้านทานหนึ่งและสองดังสมการ

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.6)$$

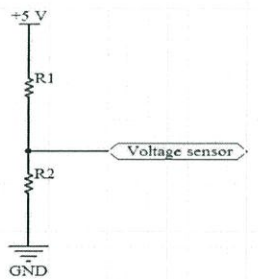
เช่น กำหนด $V_{in} = 28 \text{ V}$, $R_1 = 50 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 3 \text{ k}\Omega$

แทนค่าในสมการจะได้

$$V_{out} = 28 \times \frac{3}{50 + 3}$$

$$V_{out} = 1.58 \text{ V}$$

นำค่าที่ได้ในแต่ละช่วงของแรงดันขาเข้าไปสร้างเป็นสมการแรงดัน เพื่อใช้ในการควบคุม ไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์จะสามารถรับแรงดันได้อยู่ในช่วง 0 - 5 V ต้องวิจัยต้องคำนวณค่าสัญญาณแรงดันให้ดี เพื่อไม่ให้เกินค่าตามที่ต้องการ ซึ่งจะเห็นว่าหากกำหนดพิกัด ไม่เกิน 5 V จะสามารถตรวจจับแรงดันขาเข้าได้มากที่สุดถึง 88 V ซึ่งค่าความต้านทานที่ใช้ควรจะเป็นหลักกิโลโอห์ม

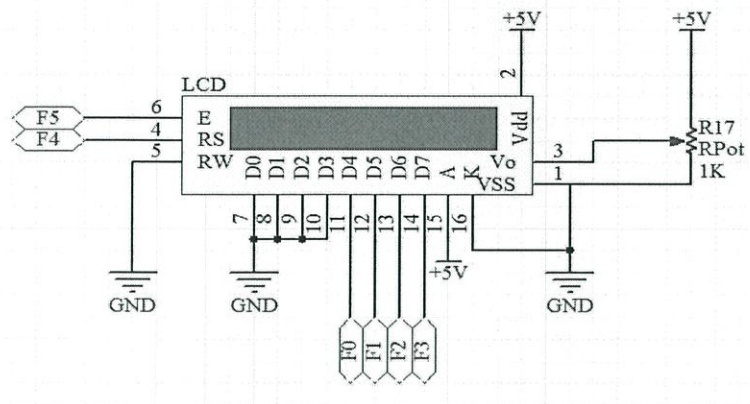


รูปที่ 3.11 วงจรตรวจจับแรงดัน

3.3.6 วงจรแสดงผลผ่าน LCD (LCD Monitoring)

เป็นการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับการแสดงผล เพื่อให้สามารถทราบการทำงานของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ และสามารถบอกค่ากระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นได้ รวมทั้งสามารถแสดงการทำงานในช่วงเวลาต่างๆได้อย่างรวดเร็วแสดงค่าตัวเลขที่เคล็ดที่เกิดขึ้นกำลังไฟฟ้าที่ด้านขาเข้าและ กำลังไฟฟ้าที่ด้านขาออก ภายในตัววงจรจะประกอบไปด้วยหน้าจอ 16X4 ซึ่งสามารถแสดงผลได้เป็น เลขหรือตัวอักษรได้ทั้งหมด 64 ตัว แถวละ 16 ตัว 4 แถว ไฟเลี้ยงที่ใช้ 5 V ตัวต้านทานปรับค่าได้เป็นการแสดงความเข้มของตัวเลขหรือตัวหนังสือ ส่วนไฟ 5 V ที่ขา 15 เป็นไฟแสดงความสว่างที่หน้าจอ

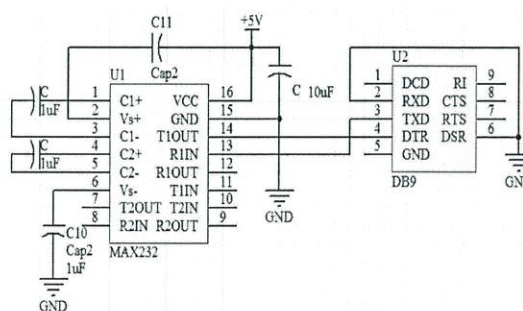
LCD ในข้อเสียของการต่อ LCD นี้คือไม่สามารถที่จะเก็บค่าที่ได้ไว้เป็น Data logger ได้แสดงผลได้อย่างเดียว แสดงดังรูปที่ 3.12 วงจรแสดงผลผ่านจอ LCD



รูปที่ 3.12 วงจรแสดงผลผ่านหน้าจอ LCD

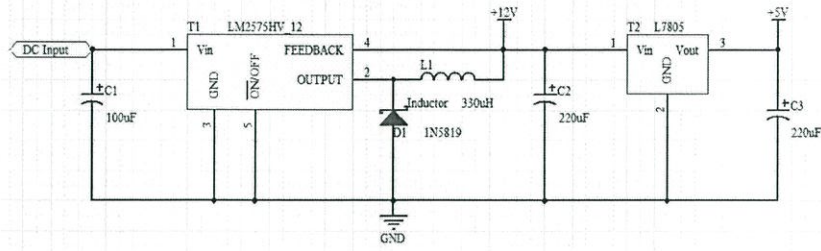
3.3.7 วงจรเก็บข้อมูลแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์ (Computer monitor)

วงจรเก็บข้อมูลแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์ เป็นการใช้ IC เบอร์ MAX232 ในการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์ ซึ่งใช้ไฟเลี้ยงให้กับวงจร 5 V แล้ว จำเป็นที่จะต้องมียุ้ว DB9 ซึ่งเป็นสายที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับ USB ของคอมพิวเตอร์ การเก็บข้อมูลและแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์มีความสำคัญอย่างมาก เพราะสามารถที่จะแสดงผลได้ทันทีทันใดแล้ว ยังสามารถที่จะเก็บข้อมูลเป็น Data logger ได้ เพื่อสามารถนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผลเป็นกราฟได้ รูปวงจรได้แสดงในรูปที่ 3.13 วงจรเก็บและแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.13 วงจรเก็บและแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์

3.3.8 วงจรไฟเลี้ยง (Regulators)



รูปที่ 3.14 วงจรไฟเลี้ยง 5 V และ 12 V

ชุดต้นแบบจำเป็นที่จะต้องมีไฟเลี้ยงเพื่อใช้ในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ และจำเป็นที่จะต้องมีไฟเลี้ยงสำหรับวงจรขับเคลื่อน โดยแบ่งเป็นสองระดับแรงดันดังนี้ LM2575HV-12 (Switching regulators step down) ทำหน้าที่แปลงแรงดันขาเข้าตั้งแต่ 12 - 60 V เหลือเพียง 12 V ใช้เป็นไฟเลี้ยงให้กับวงจรขับเคลื่อน L7805 (Linear regulators) ทำหน้าที่แปลงแรงดันขาเข้าตั้งแต่ 5 - 35 V เหลือเพียง 5 V ใช้เป็นไฟเลี้ยงให้กับ Microcontroller วงจรตรวจจับกระแส วงจรแสดงผลผ่าน LCD และ ผ่านคอมพิวเตอร์ พิกัดกระแสด้านออกไม่เกิน 1 A วงจรไฟเลี้ยงแสดงดังรูปที่ 3.14

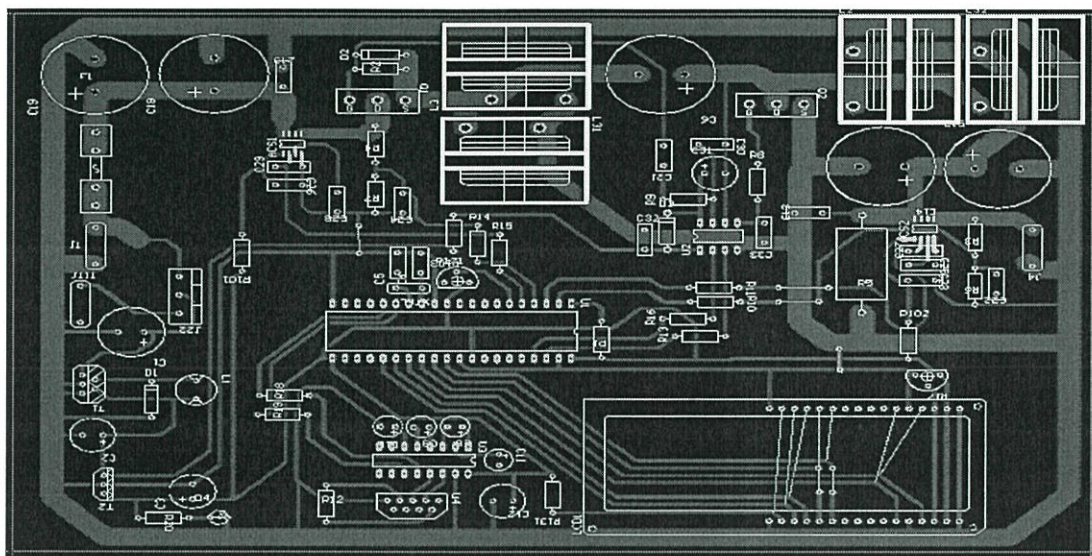
3.4 การสร้างชุดต้นแบบ

การออกแบบลายวงจรจำเป็นที่จะต้องคำนวณถึงขนาดของเส้นทองแดง การวางอุปกรณ์ที่เหมาะสม ขนาดของตัวถัง ขนาดของอุปกรณ์ และการเลือกใช้อุปกรณ์เข้ามาใส่ในตัววงจร ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรมที่ไว้สำหรับการเขียนลายวงจรคือ โปรแกรม Altium เข้ามาช่วยในการออกแบบและเขียนวงจรต้นแบบขึ้น การออกแบบชุดทดลองหากเขียนลายวงจรออกมาดี จะทำให้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก และทำให้มีการปรับปรุงแก้ไขตัววงจรได้ง่ายและสะดวก ขนาดพื้นที่ในการออกแบบไม่ควรใหญ่มาก และใช้พื้นที่ให้คุ้มค่าและเหมาะสมกับขนาดที่กำหนด

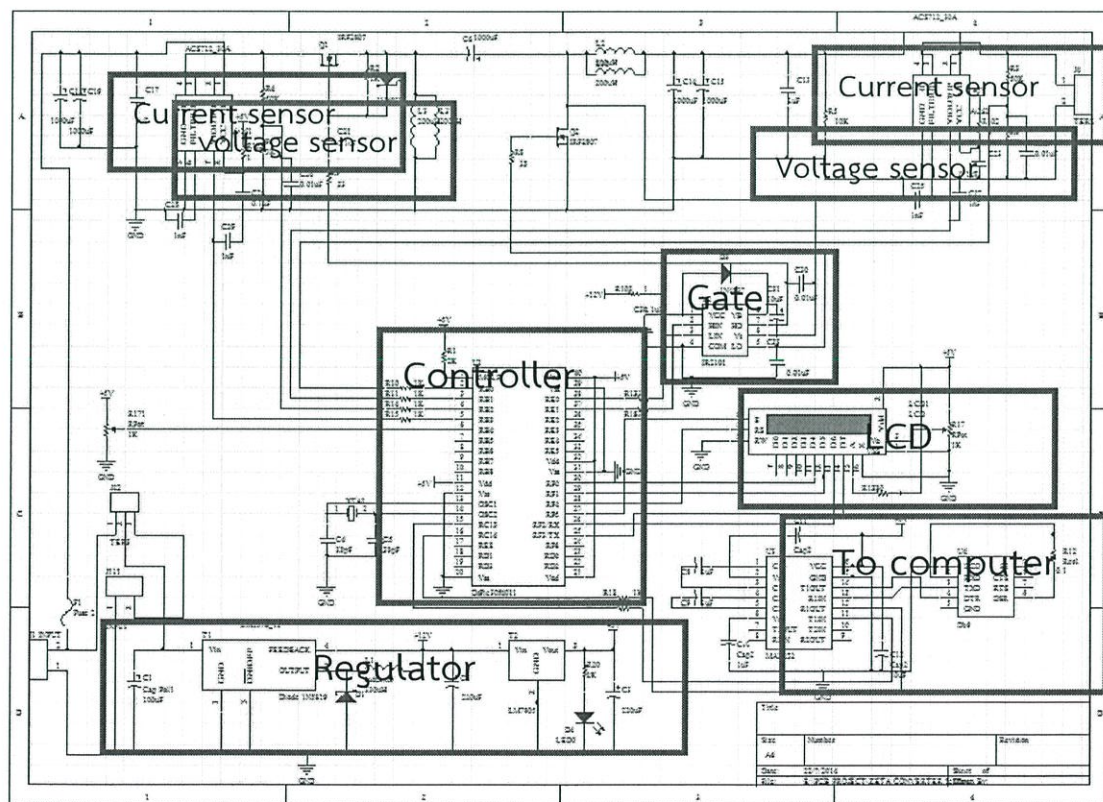
3.4.1 ลายวงจรที่ได้ออกแบบและชุดต้นแบบ

ขนาดของบอร์ดที่ได้ออกแบบ 6 x 8 นิ้ว เส้นสีจางบอกถึงตัวอุปกรณ์ ส่วนเส้นสีเข้มคือลายวงจรที่ถูกเขียนขึ้น จะสังเกตเห็นว่าขนาดของรูอุปกรณ์และขนาดของอุปกรณ์แต่ละตัวจะไม่เหมือนกัน ซึ่งต้องให้ความสำคัญในเรื่องนี้เพราะหากขนาดผิดพลาดไปจะทำให้ไม่สามารถใส่อุปกรณ์ลงไปได้สนิท

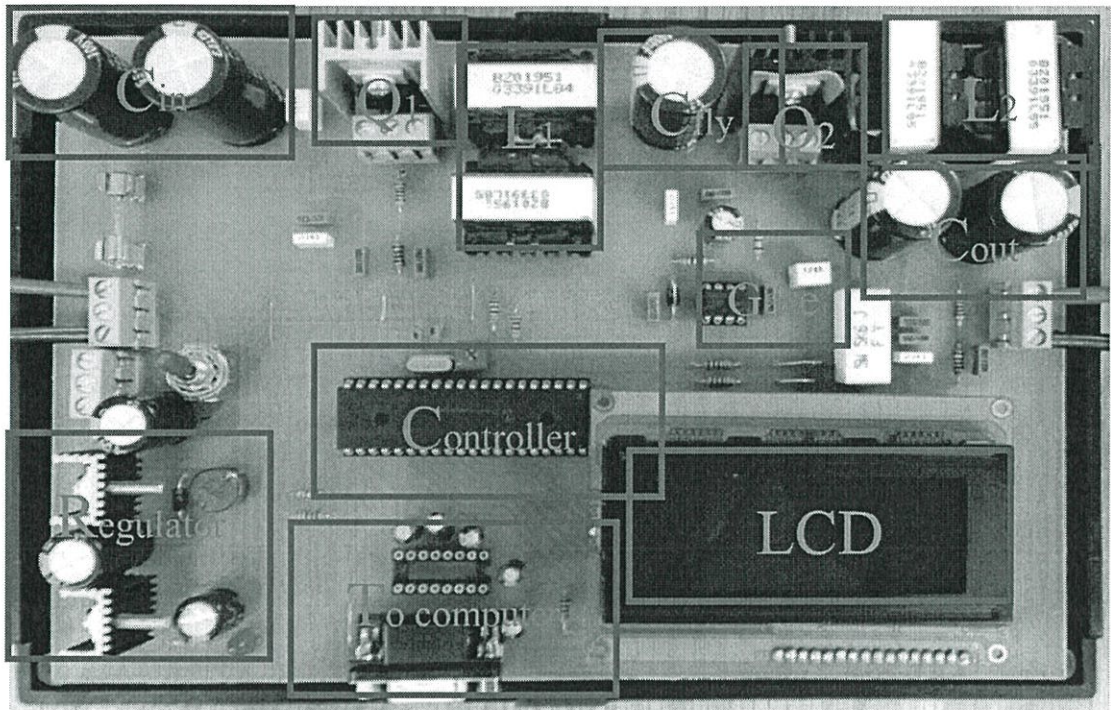
ดี แสดงดังรูปที่ 3.15 ส่วนในรูปที่ 3.16 Schematic ชุดต้นแบบที่ถูกสร้างขึ้นแสดงในรูปที่ 3.17 มีลักษณะเหมือนวงจรที่ได้ถูกออกแบบทุกประการ



รูปที่ 3.15 ลายวงจร



รูปที่ 3.16 Schematic



รูปที่ 3.17 ชุดต้นแบบ

3.5 การออกแบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้ทฤษฎีการรบกวนและสังเกต (Perturbation and Observation)

เทคนิคการรบกวนและสังเกตจะทำการปรับค่าดิวิตีไซเคิลเพื่อวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสและแรงดันทางด้านขาเข้า ซึ่งเทคนิคและวิธีการนี้จำเป็นที่จะต้องมีความถี่การรบกวนเข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อที่จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ได้รับมีค่ากำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อม ความเข้มของแสงอาทิตย์และอุณหภูมิภายใต้เซลล์แสงอาทิตย์ ขั้นตอนและเงื่อนไขที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะถูกอธิบายด้านล่างนี้ เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้น การออกแบบระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ผู้วิจัยได้ทำการ กำหนดช่วงดิวิตีไซเคิลไม่เกิน 65 % ดิวิตีไซเคิลเพื่อเป็นการป้องกันแรงดันทางด้านขาออกให้มีค่าไม่สูงเกินไป ข้อเสียของการใช้เทคนิคและวิธีการนี้คือการแกว่งของกำลังไฟฟ้ามีค่ามากเกินไป เนื่องจากทำการปรับค่าดิวิตีไซเคิลทุกๆ 1% ดิวิตีไซเคิล จะทำให้ระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีการแกว่งขึ้นลงของกำลังไฟฟ้า ซึ่งหากมีการปรับค่าดิวิตีไซเคิลที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดให้ต่ำลงจะทำให้สามารถลดค่าการแกว่งของกำลังไฟฟ้าลงได้ แต่จะทำให้การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีการทำงานที่ช้าลงไปเนื่องจากการปรับให้ละเอียดขึ้น ทำให้ต้องใช้ช่วงระยะเวลาที่นานขึ้นเพื่อที่จะถึงจุดสูงสุดของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ที่ระยะเวลานั้นๆ ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบเงื่อนไข

ที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยทำการอธิบายวิธีการที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดดังรูปที่ 3.18

3.5.1 ขั้นตอนของการทำงาน

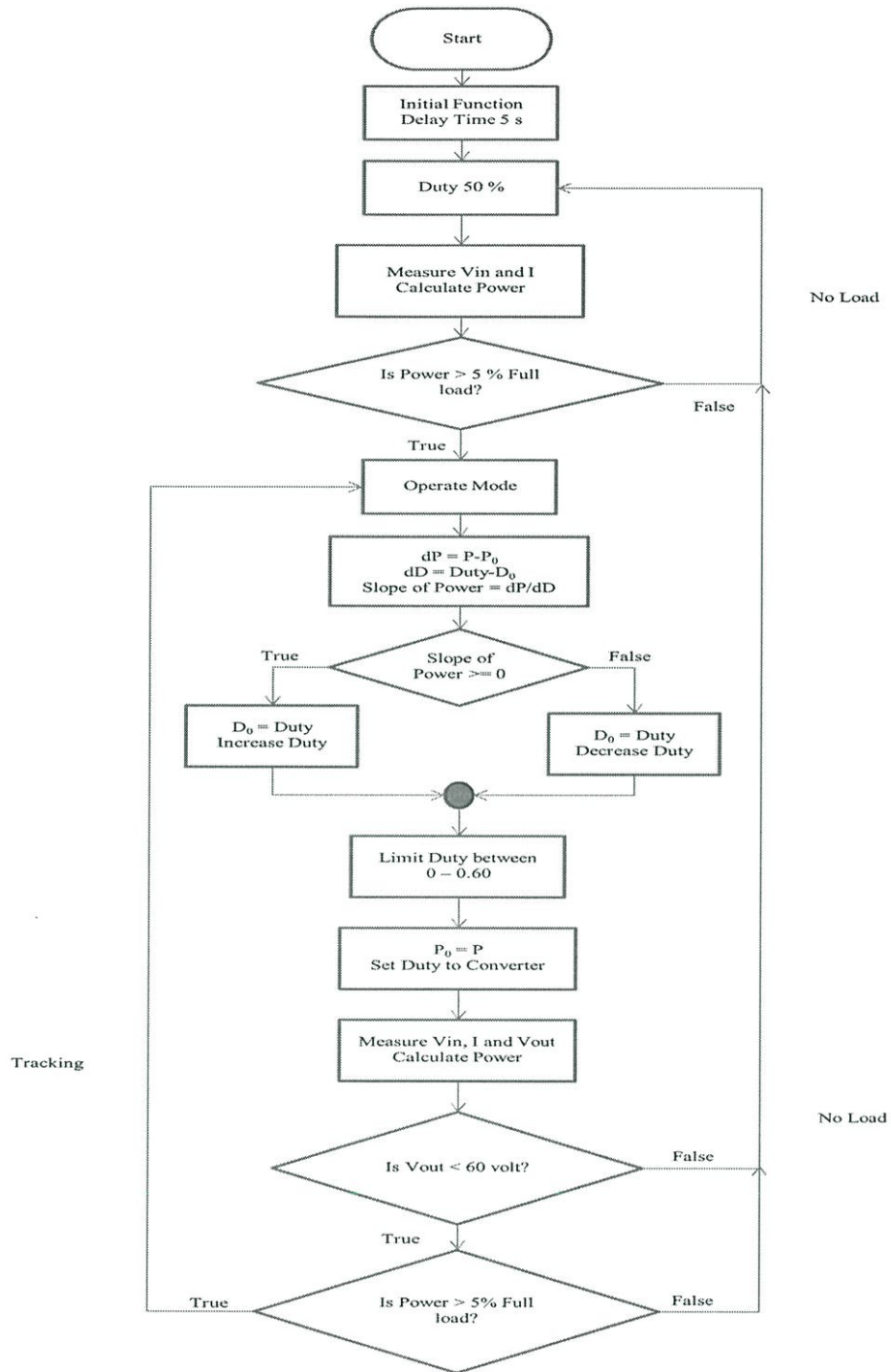
ขั้นตอนที่หนึ่ง เมื่อได้รับพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ จะทำการดีเลย์ 5 วินาที เพื่อเซตระบบการทำงานเพื่อให้พร้อมที่จะทำงาน หลังจากนั้นจะทำการกำหนดค่าดิวตี้ไซเคิลที่ 50 % ดิวตี้ไซเคิล

ขั้นตอนที่สอง จะเป็นการตรวจสอบสถานะไม่มีภาวะโหลด หรือมีการต่อโหลดเข้ามา โดยทำการตรวจสอบจากกำลังไฟฟ้าขาเข้า ซึ่งรับค่าจากกระแสและแรงดันทางด้านขาเข้า ซึ่งหากมีกำลังไฟฟ้ามกกว่า 5% ของกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด จะเข้าสู่ขั้นตอนที่สาม คือการเริ่มติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด หากมีค่าต่ำกว่าที่กำหนดจะยังคงอยู่ในสถานะคงตัวที่ 50 % ดิวตี้ไซเคิล

ขั้นตอนที่สาม ระบบจะทำการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยการปรับค่าดิวตี้ไซเคิล เพื่อหาค่าที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ตลอดระยะเวลาการทำงาน จะทำการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลทุกๆ 1% ดิวตี้ไซเคิล ค่าดิวตี้ไซเคิลกำหนดไว้ไม่เกิน 65 % ดิวตี้ไซเคิล

ขั้นตอนที่สี่ เป็นการตรวจสอบการทำงาน โดยการรับค่าแรงดันทางด้านขาออกซึ่งหากมีค่าสูงเกินกว่าแรงดันที่กำหนด หรือ หากเกิดสถานะไม่มีภาวะโหลดเกิดขึ้นอยู่ยังคงอยู่ในช่วงของการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด จะทำการเข้าสู่ขั้นตอนที่ห้า

ขั้นตอนที่ห้า เป็นการหยุดการทำงานในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดจาก เงื่อนไขในขั้นตอนที่สี่ และกลับไปเซตค่าดิวตี้ไซเคิลตั้งต้นที่ 50 % ดิวตี้ไซเคิล กลับเข้าสู่ขั้นตอนที่สองต่อไป



รูปที่ 3.18 Flow chart การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

บทที่ 4

การจำลองและการทดลอง

การจำลองและการทดลอง ในบทนี้จะกล่าวถึงการจำลองการทำงานของทั้งสองวงจร คือ วงจรเดิม Zeta converter และวงจรที่ได้ถูกพัฒนาขึ้น คือ Synchronous zeta converter นำผลการจำลองที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อหาค่า ripple voltage , ripple current และประสิทธิภาพของทั้งสองวงจร จากนั้นจะเป็นการทดลองจริงซึ่งลักษณะการทดลองจะเหมือนการจำลอง เพียงแต่การทดลองจะมีสภาพแวดล้อมภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง และมีการสูญเสียเกิดขึ้นที่สายไฟ ขั้วต่อ วงจรไฟเลี้ยง ดังนั้นการทดลองจะทำให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าการจำลอง นำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองว่ามีความสอดคล้องกัน และเป็นไปตามทฤษฎี หรือไม่ การจำลองและการทดลองนี้จะใช้ความถี่สวิตซ์ซึ่งที่ 20 kHz และ Deadtime เท่ากับ 2 μ s ในบทนี้จะถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆ คือเริ่มจากการจำลอง และผลของการจำลองจากนั้น จะเป็นการทดลองและผลการทดลอง เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดลอง สุดท้ายจะเป็นการวงจรที่ได้ออกแบบขึ้นไปใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละช่วงที่มีแสงอาทิตย์ ซึ่งจะได้อธิบายตามหัวข้อหลักๆ ดังนี้

4.1 สร้างแบบจำลองให้มีลักษณะเสมือนจริง

การจำลองจำเป็นที่จะต้องกำหนดค่าอุปกรณ์ในตรงตามที่ต้องการ โดยการปรับค่าต่างๆที่ตัวอุปกรณ์ และมีลำดับขั้นตอนและวิธีการในการจำลองเป็นดังนี้ เพื่อให้สอดคล้องกับการทดลองจริง ซึ่งจากการจำลองจะมีความสอดคล้องกับทฤษฎีหรือไม่ ผลที่ได้จะเป็นอย่างไร

4.1.1 ปรับค่าพารามิเตอร์

1. ตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 เท่ากับ 190 μ H
2. ตัวเก็บประจุขาเข้า C_{in} และ ขาออก C_o เท่ากับ 2000 μ F
3. ตัวเก็บประจูดตรงกลางที่ใช้เชื่อมต่อ C_{gy} เท่ากับ 1000 μ F
4. $R_{ds(on)}$ ของมอสเฟต เท่ากับ 13 m Ω
5. แรงดันตกคร่อมไดโอด เท่ากับ 0.254 V

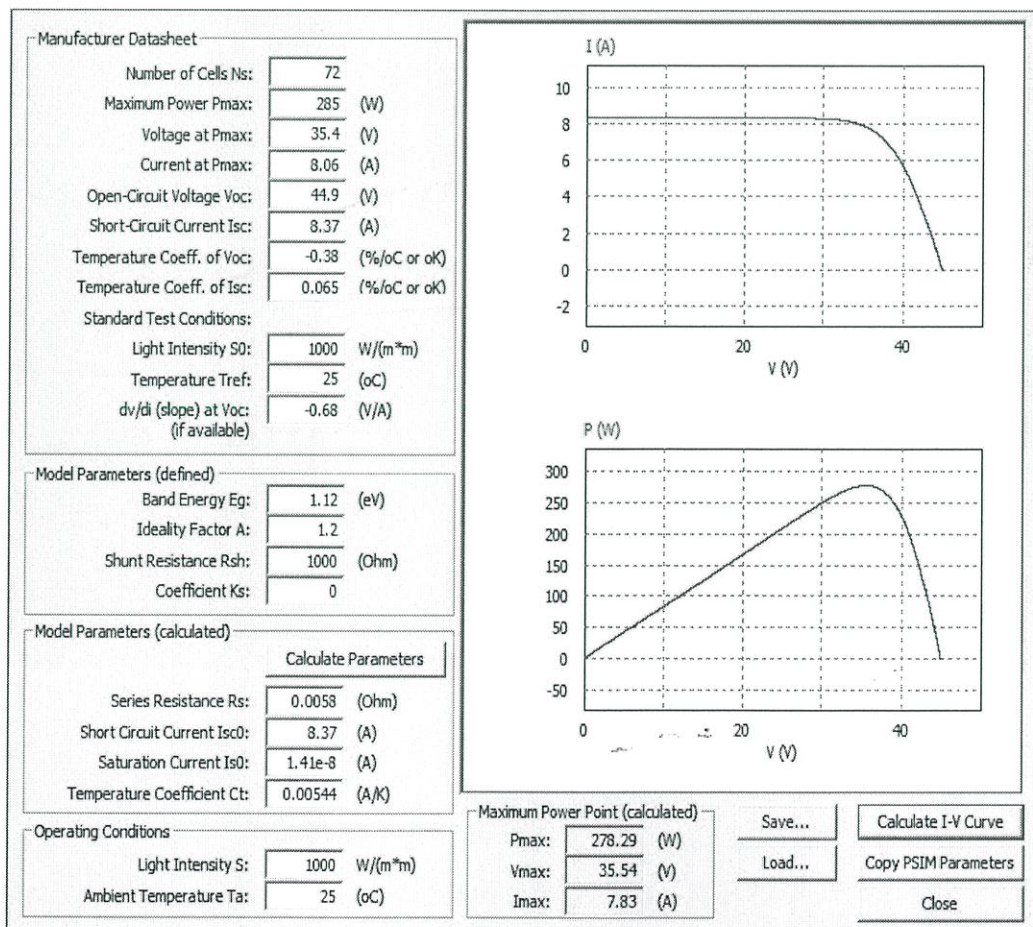
6. โหลด R เท่ากับ 4 Ω

4.1.2 สร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีลักษณะเสมือนจริง

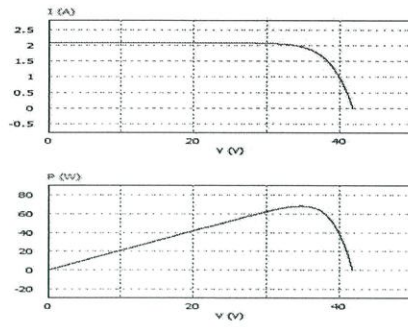
คุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นดังนี้

ขนาดกำลังสูงสุด	285	วัตต์
แรงดันไฟฟ้าที่กำลังสูงสุด	35.4	โวลต์
กระแสไฟฟ้าที่กำลังสูงสุด	8.37	แอมป์
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร	7.64	แอมป์
แรงดันไฟฟ้าเมื่อเปิดวงจร	44.9	โวลต์

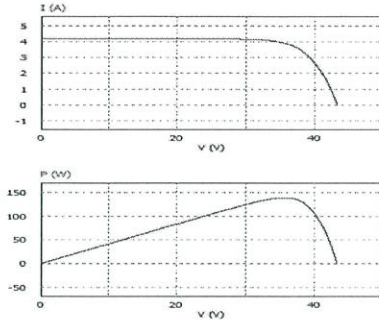
สภาพมาตรฐานที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 1 องศาเซลเซียส จะทำให้แรงดันลดลง 0.5% ซึ่งจะแสดงแบบจำลองการจำลองในรูปที่ 4.1 การจำลองคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์



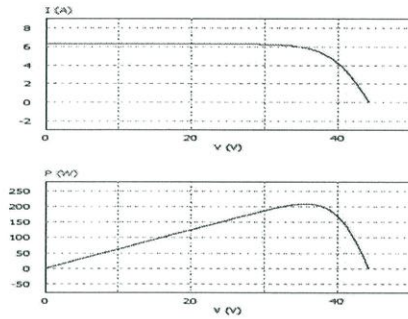
รูปที่ 4.1 การจำลองคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์



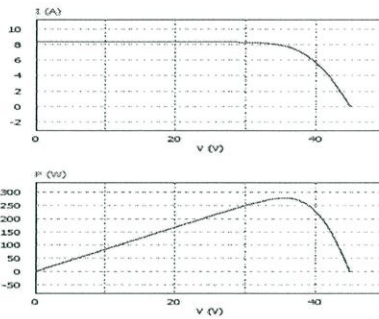
(ก) 250 W/m²



(ข) 500 W/m²



(ค) 750 W/m²

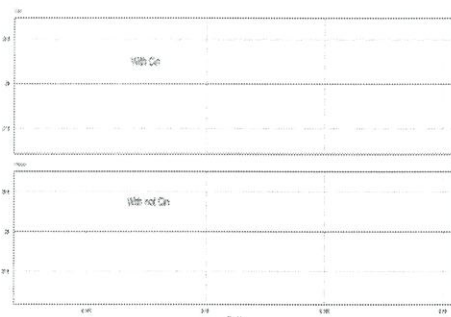


(ง) 1000 W/m²

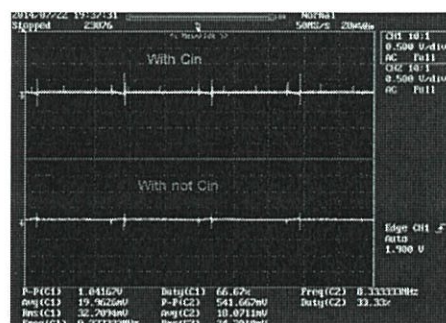
รูปที่ 4.2 แสดงแบบการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงต่างๆที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.2 เป็นการแสดงการจำลองคุณลักษณะให้ตรงตามเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลองจริง ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มของแสงแดดที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มต่างๆ จะเห็นได้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ทำการสร้างแบบจำลองขึ้นมามีลักษณะตรงกับเซลล์แสงอาทิตย์จริง หากทำการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ได้ไม่ตรงกับเซลล์แสงอาทิตย์จริง จะทำให้ผลการจำลองกับผลการทดลอง ไม่มีความสอดคล้องกันหรืออาจจะทำให้ผลที่ได้มีความผิดพลาดคลาดเคลื่อนไปได้ ดังนั้นการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นจำเป็นที่จะต้องให้มีลักษณะตรงตามเซลล์แสงอาทิตย์จริง

4.1.3 การเปรียบเทียบกรณีมี C_m และไม่มี C_m



(ก) การจำลอง



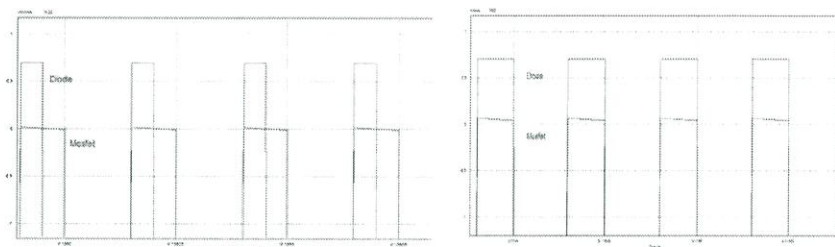
(ข) การทดลอง

รูปที่ 4.3 จำลองและการทดลองกรณีมี C_m และไม่มี C_m

จากการจำลองและการทดลองกรณีมี C_m และกรณีไม่มี C_m ไม่มีความแตกต่าง เนื่องจากทางด้านขาเข้าเป็นแหล่งจ่ายแรงดันมีการต่อ C_o ไว้แล้ว จึงทำให้ค่าแรงดันกระแสเพิ่มมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่ กรณีการนำไปใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นที่จะต้องมี C_m เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายกระแสไม่สามารถที่จะเก็บและคายพลังงานได้เหมือนแหล่งจ่ายไฟ DC หรือ battery ได้จึงจำเป็นที่จะต้องมี C_m เข้ามาในระบบ

4.1.4 การเปรียบเทียบกรณีการใช้ออสเฟตเข้ามาทำงานแทนที่ไดโอด

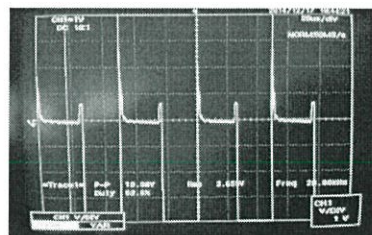
ทำการจำลองและทดลองที่กระแส 1 A และ 5A วัดค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดและมอสเฟต เพื่อเปรียบเทียบความกรณีการใช้ออสเฟตเข้ามาทำงานแทนที่ไดโอด



(ก) 1 A

(ข) 5 A

รูปที่ 4.4 จำลองแรงดันตกคร่อมไดโอดและมอสเฟต

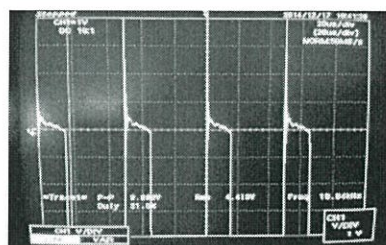


(ก) 1 A

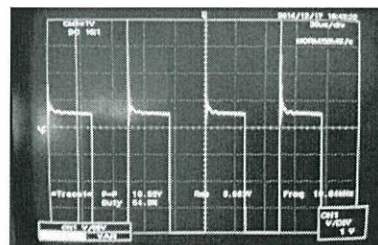


(ข) 5 A

รูปที่ 4.5 แรงดันตกคร่อมมอสเฟต



(ก) 1 A



(ข) 5 A

รูปที่ 4.6 แรงดันตกคร่อมไดโอด

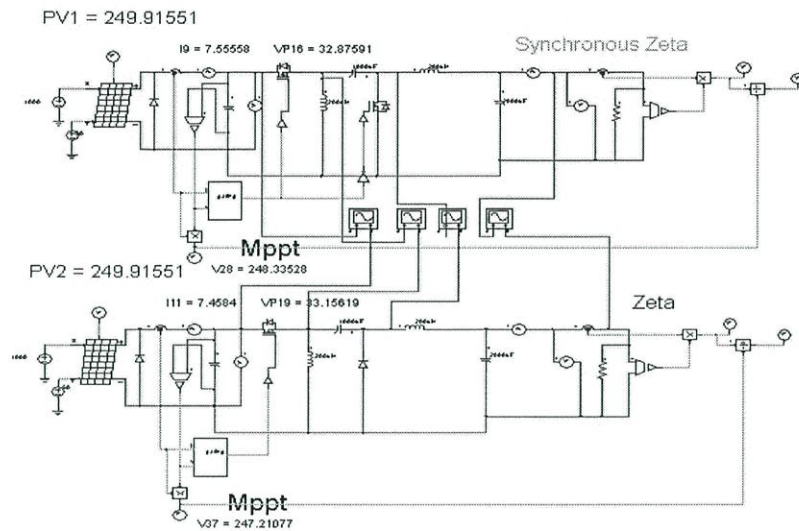
จากการเปรียบเทียบแรงดันตกคร่อมไดโอดและมอสเฟตสรุปได้ว่า แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดมีค่าที่สูงกว่าแรงดันตกคร่อมมอสเฟตทั้งกระแสต่ำและกระแสที่สูง เมื่อเพิ่มค่ากระแสให้มีค่าที่สูงขึ้น แรงดันตกคร่อมไดโอดจะมีค่าที่สูงขึ้นตาม แต่มอสเฟตแรงดันตกคร่อมจะมีค่าคงที่ ทำให้การใช้มอสเฟตเข้ามาทำงานแทนที่ไดโอดมีการสูญเสียที่ต่ำกว่าไดโอด ดังแสดงการจำลองและการทดลองในส่วนถัดไป

4.2 การจำลองและผลการจำลอง

การจำลองจะเป็นการจำลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้ทฤษฎีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด P&O เข้ามาเกี่ยวข้อง เงื่อนไขในการจำลองจะประกอบไปด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 1 แผง อุณหภูมิที่ใช้ในการจำลองจะอยู่ที่ 50 องศาเซลเซียสตามสถานะความเป็นจริง โหลดที่ใช้ในการทดลองและการจำลองจะเป็นโหลดตัวต้านทาน 4 โอห์ม ซึ่งหัวข้อนี้จะประกอบไปด้วยหัวข้อหลักด้วยกันสองอย่างคือ การจำลอง และ ผลการจำลอง ซึ่งจะได้ทำการอธิบายดังต่อไปนี้

4.2.1 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Psim

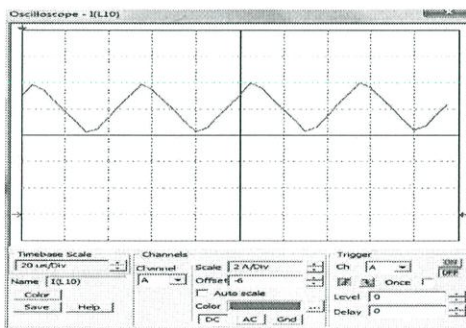
การจำลองจะทำการปรับค่าดิวตี้ไซเคิล โดยจะทำการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลตั้งแต่ 0 % ไปจนถึง 65 % ดิวตี้ไซเคิล ปรับค่าดิวตี้ไซเคิลเพิ่มขึ้นทีละ 5 % ดิวตี้ไซเคิล ทำการเก็บผลข้อมูลทั้งกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้น และทำการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ นำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองของวงจร Zeta converter และวงจรที่ถูกพัฒนาขึ้นเป็น Synchronous zeta converter เพื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับกรทดลองจริง ว่ามีความสอดคล้องกับการจำลองหรือไม่ และเป็นไปตามทฤษฎีที่ตั้งเอาไว้หรือไม่ โดยผลการจำลองจะเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ripple current และ ripple voltage สัญญาณกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นที่ตัวเหนี่ยวนำ จากรูปที่ 4.7 จะเป็นการจำลองการทำงานของทั้งสองวงจร และผลการจำลองจะเป็นดังต่อไปนี้



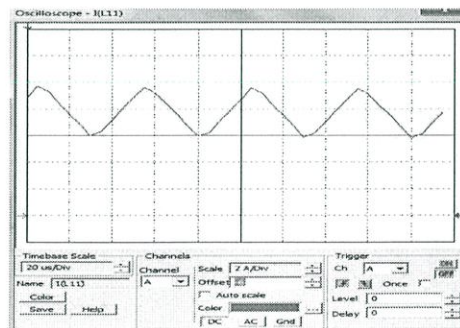
รูปที่ 4.7 การจำลองการทำงานของวงจร Zeta และ Synchronous Zeta converter

4.2.2 ผลการจำลอง

ผลการจำลองจะประกอบไปด้วย Ripple voltage, Ripple current และ ประสิทธิภาพของทั้งสองวงจร โดย ผลการจำลองที่ได้จะทำการเปรียบเทียบกัน ระหว่างวงจรทั้งสอง และนำข้อมูลเหล่านี้ไปเปรียบเทียบกับกรทดลองจริง ทำการตรวจจับรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง L_1 และ L_2 จะเห็นว่าทั้งสองวงจรมีการทำงานอยู่ในโหมดกระแสต่อเนื่อง ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.8 รูปคลื่นสัญญาณกระแสที่ตกคร่อมที่ตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2

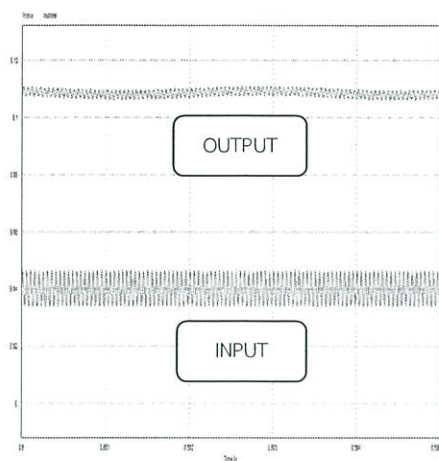


(ก) L1

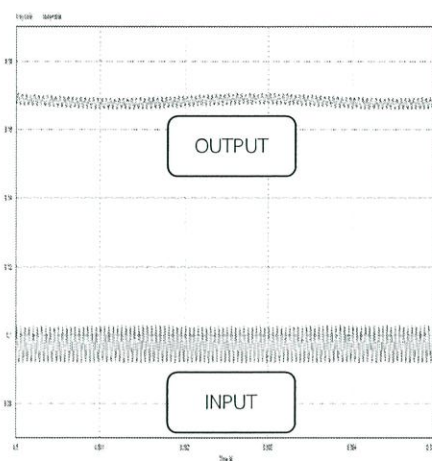


(ข) L2

รูปที่ 4.8 รูปคลื่นสัญญาณกระแสที่ตกคร่อมที่ตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2

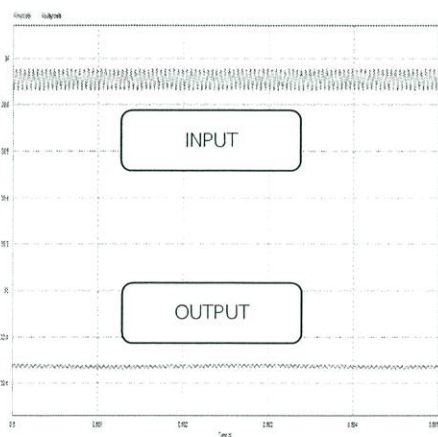


(ก) Zeta converter

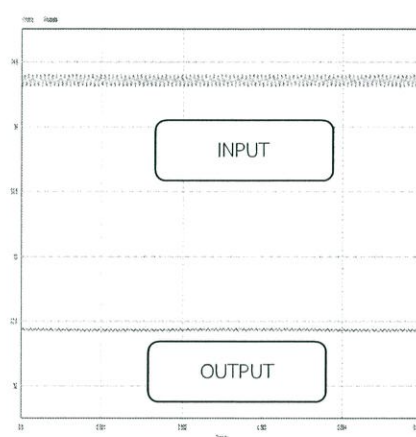


(ข) Synchronous zeta converter

รูปที่ 4.9 รูปคลื่น ripple current ด้านบนเป็นกระแสด้านออก ด้านล่างเป็นกระแสด้านเข้า

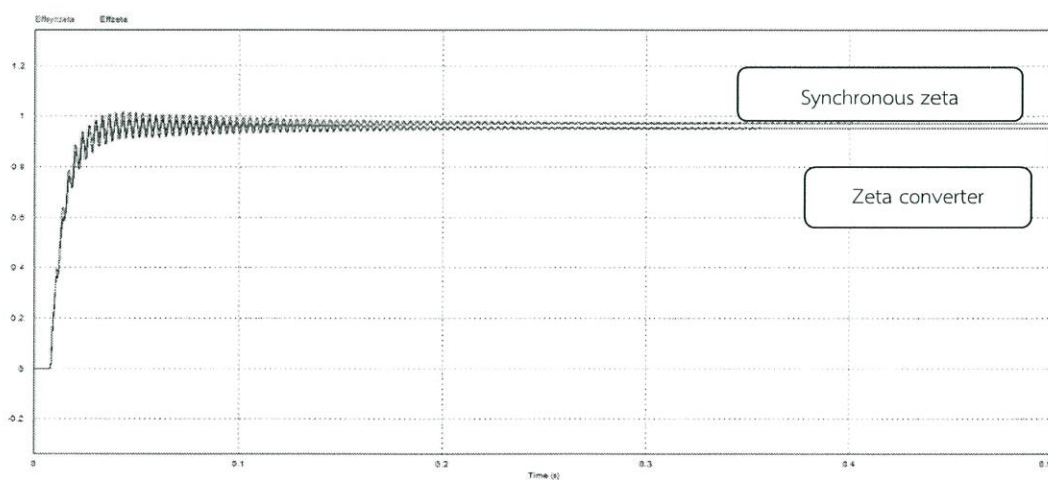


(ก) Zeta converter



(ข) Synchronous zeta converter

รูปที่ 4.10 รูปคลื่น ripple voltage ด้านบนเป็นแรงดันขาเข้า ด้านล่างเป็นแรงดันขาออก

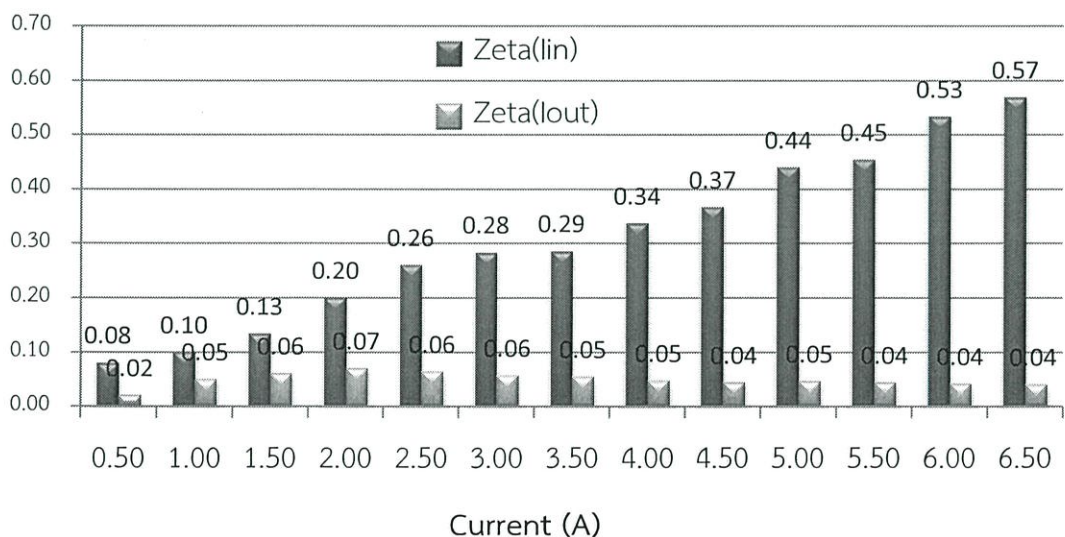


รูปที่ 4.11 รูปคลื่นของประสิทธิภาพของทั้งสองวงจร

จากการจำลองจะเห็นว่ารูปคลื่นกระแสของทั้งสองวงจร ทางด้านขาเข้าจะมา Ripple current ที่มากกว่าด้านขาออก ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.9 ในส่วนของแรงดัน พบว่า Ripple voltage ทางด้านขาเข้าจะมีค่ามากกว่าด้านขาออก ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.10 จากนั้นได้ทำการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งผลการจำลองทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์และแสดงในลักษณะแผนภูมิแท่ง ทั้งในส่วนของ Ripple current, Ripple voltage และ ประสิทธิภาพของทั้งสองวงจร ดังแสดงในแผนภูมิด้านล่าง

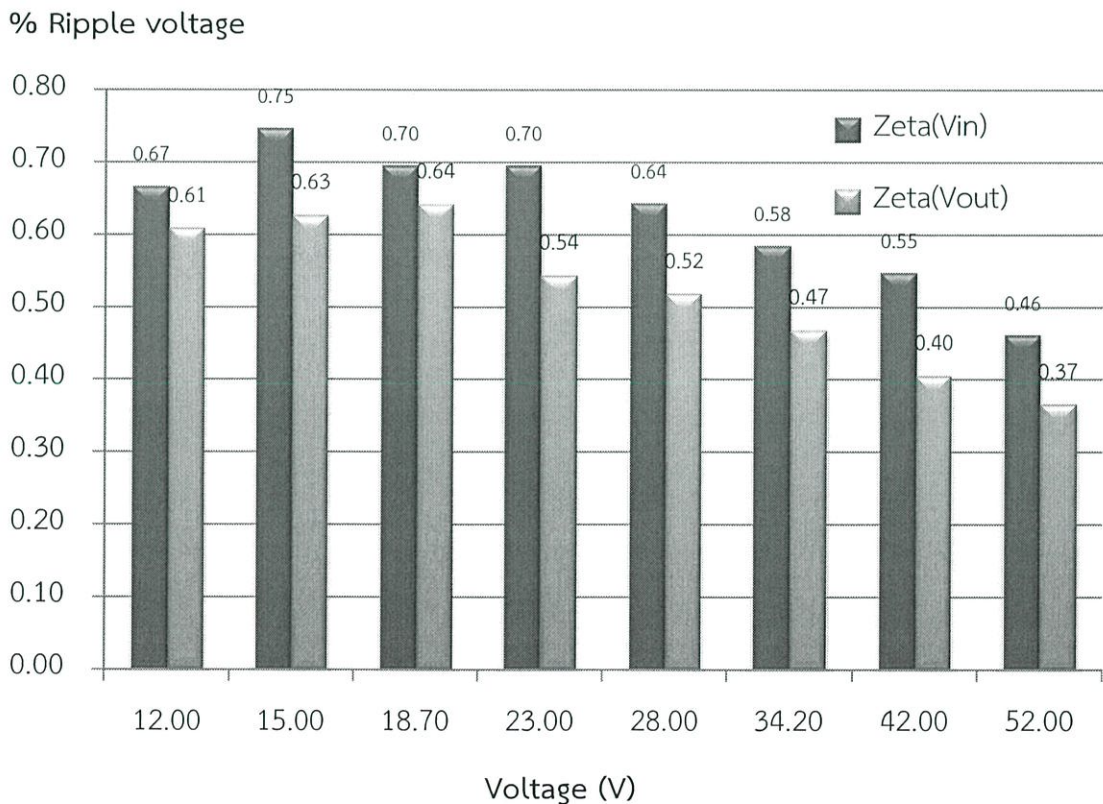
4.2.2.1 การเปรียบเทียบ Ripple Current ของวงจร zeta converter ผลการจำลองเป็นการเปรียบเทียบ Ripple current ของวงจร zeta converter โดยสี่เทาเข้มจะเป็นกระแสทางด้านขาเข้า ส่วนสี่เทาอ่อนจะเป็นกระแสทางด้านขาออก ผลการจำลองจะนำเสนอในรูปแบบของกราฟแท่ง แสดงผลการจำลองดังกราฟด้านล่าง ซึ่งจากผลการจำลอง Ripple current ของกระแสที่ไหลผ่านวงจร zeta converter พบว่า Ripple current ทางด้านขาเข้ามีค่ามากกว่า Ripple current ที่ด้านขาออก เนื่องจากทางด้านขาออกตัววงจรประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ซึ่งมีลักษณะเป็น Low pass filter จึงทำให้กระแสฮาร์มอนิกทางด้านขาออกมีค่าน้อยกว่ากระแสทางด้านขาเข้า เมื่อกระแสมีค่าสูงขึ้น Ripple current ทางด้านขาเข้าจะมีค่าสูงขึ้นตาม เนื่องจากทางด้านขาเข้ามีลักษณะเป็นมอสเฟต และ ตัวเก็บประจุ จึงทำให้ Ripple current มีค่าสูงกว่า Ripple current ทางด้านขาออก มีกระแสกระเพื่อมอยู่ที่ประมาณ 0.32 % Ripple current ดังแสดงในรูปที่ 4.12

% Ripple current



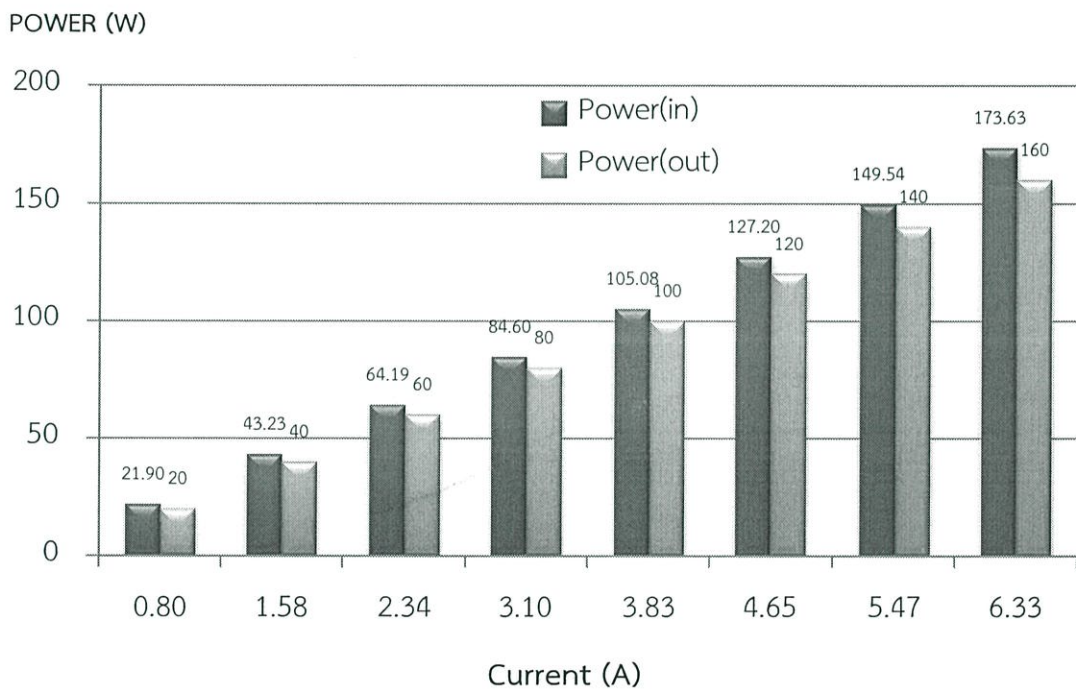
รูปที่ 4.12 ผลการจำลอง Ripple current ของวงจร Zeta converter

4.2.2.2 การเปรียบเทียบ Ripple voltage ของวงจร zeta converter ผลการจำลองเป็นการเปรียบเทียบ Ripple voltage ของวงจร Zeta converter ทั้งในส่วนของแรงดันทางด้านขาเข้าและแรงดันทางด้านขาออก สีเทาเข้มจะเป็นแรงดันทางด้านขาเข้า ส่วนสีเทาอ่อนจะเป็นแรงดันทางด้านขาออก ผลการจำลองดังกล่าว จะแสดงดังแสดงในรูปที่ 4.13 ผลการจำลองแรงดันที่เกิดขึ้นทั้งแรงดันทางด้านขาเข้าและแรงดันทางด้านขาออก พบว่า แรงดันทางด้านขาเข้ามีค่า Ripple voltage ที่สูงกว่าแรงดันทางด้านขาออก มีค่าอยู่ที่ 0.75 % Ripplr voltage ส่วนแรงดันทางด้านขาออกมีค่าอยู่ที่ 0.64 % Ripple voltage ซึ่งทั้งแรงดันทางด้านขาเข้าและแรงดันทางด้านขาออก มีค่า %Ripple voltage ที่ต่ำมากไม่ถึง 1 % Ripple voltage เป็นผลเนื่องมาจากตัวเก็บประจุ C มีค่ามากจึงทำให้ Ripple ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย แรงดันที่ขาออกจะมี ripple voltage ที่น้อยกว่าแรงดันทางด้านขาเข้า เนื่องจากทางด้านเข้าออก จะมีตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งทำหน้าที่ส่วนให้ Ripple voltage มีค่าที่ต่ำลง เมื่อแรงดันมีค่าสูง Ripple voltage จะมีค่าสูงขึ้นตาม แต่ % Ripple voltage จะมีค่าต่ำลงเนื่องจาก อัตราส่วนตัวหารมีค่าที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.13 ผลการจำลอง Ripple voltage ของวงจร Zeta converter

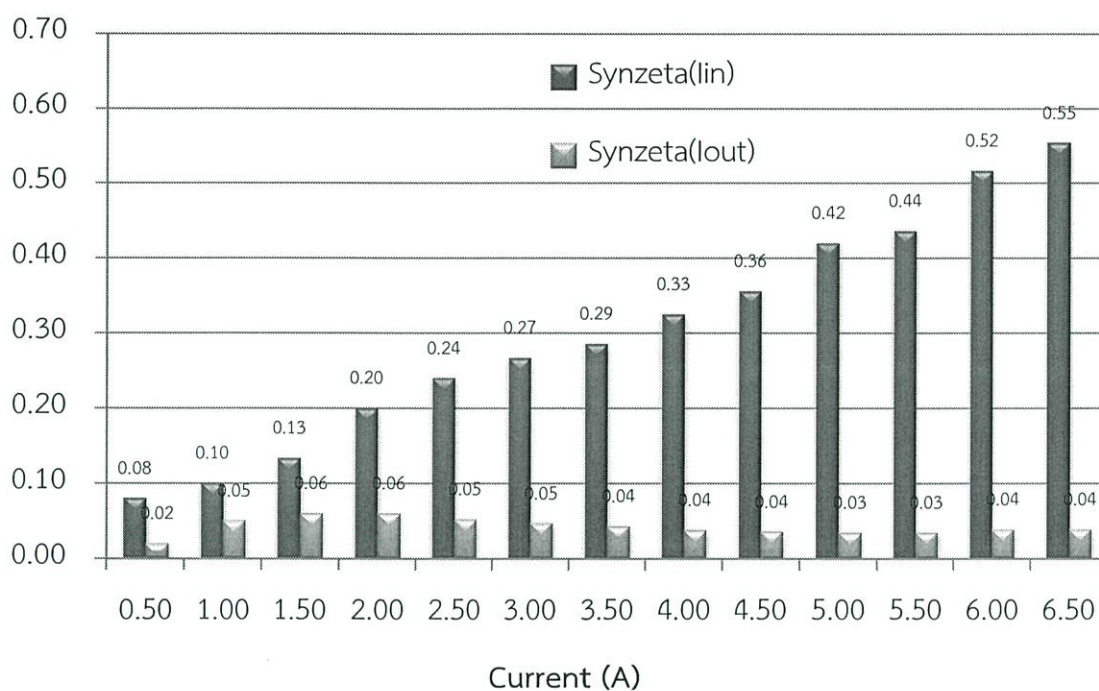
4.2.2.3 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้า ของวงจร zeta converter ผลการจำลองเป็นการจำลองเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าและกำลังไฟฟ้าทางด้านขาออกของวงจร Zeta converter ซึ่งจะแสดงผลการจำลองออกมาเป็นแผนภูมิแท่ง สีเทาเข้มคือกำลังไฟฟ้าที่ขาเข้า ส่วนสีเทาอ่อนคือกำลังไฟฟ้าที่ขาออก หรือ กำลังไฟฟ้าที่โหลด การจำลองจะทำการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าที่โหลดเพิ่มขึ้นทีละ 20 W จาก 20 W ไปจนถึง 160 W ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จากผลการจำลองเป็นการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้งในด้านของกำลังไฟฟ้านด้านขาเข้าและกำลังไฟฟ้าด้านขาออก พบว่า กำลังไฟฟ้าที่โหลดหรือกำลังไฟฟ้าที่ขาออกมีค่าน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่ขาเข้า ประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นจึงไม่ใช่ 100 % เนื่องจากเกิดจากการสูญเสียที่มอสเฟต ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และไดโอด จึงทำให้ประสิทธิภาพที่ได้อยู่ที่ 95.17 %



รูปที่ 4.14 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าทางด้านขาและขาออกของวงจร Zeta converter

4.2.2.4 การเปรียบเทียบ Ripple Current ของวงจร Synchronous zeta converter ผลการจำลองจะแสดงเป็นกราฟแท่ง ซึ่งสีเทาเข้มจะเป็นกระแสทางด้านขาเข้า ส่วนสีเทาอ่อนจะเป็นกระแสทางด้านออกของวงจร Synchronous zeta converter

% Ripple current

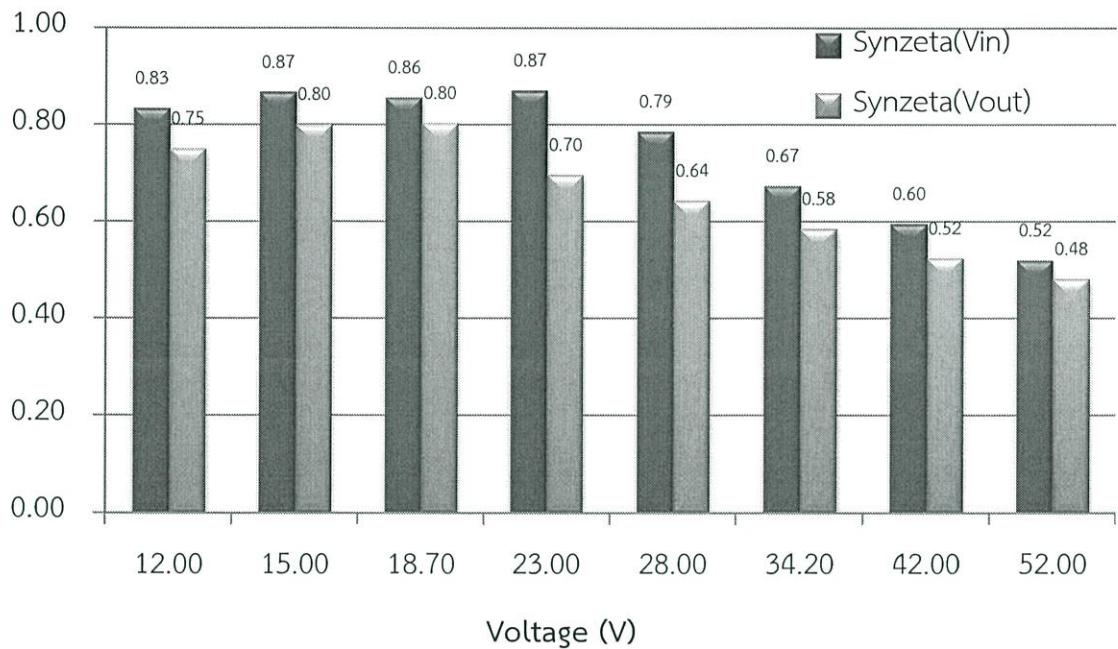


รูปที่ 4.15 ผลการจำลอง Ripple current ของวงจร Synchronous zeta converter

จากการจำลอง พบว่า Ripple current กระแสทางด้านขาออกของวงจรมีค่าน้อยกว่า Ripple current ของกระแสทางด้านขาเข้า ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจาก ทางด้านขาออกจะเป็นลักษณะเด่นของตัววงจร คือ จะประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ L2 และ ตัวเก็บประจุ C ซึ่งมีลักษณะเป็น Low pass filter จึงทำให้กระแสทางด้านขาออกมี Ripple ที่ต่ำกว่ากระแสทางด้านขาเข้า เมื่อกระแสมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ ripple current ทางด้านขาเข้ามีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย อยู่ที่ประมาณ 0.31 % ripple current ซึ่งมีค่าน้อยมาก และในส่วนของกระแสทางด้านขาออกจะเห็นว่า ripple current จะมีค่าที่ต่ำมากถึง 0.04 % ripple current เนื่องจากทางด้านออกมีลักษณะเป็น L C low pass filter จึงทำให้เมื่อมีกระแสที่สูงขึ้น ripple current กลับมาค่าที่ไม่สูงขึ้นตาม ซึ่งเป็นข้อดีของวงจร Synchronous zeta converter ดังได้แสดงในรูปที่ 4.15 ผลการจำลอง ripple current ของวงจร Synchronous zeta converter

4.2.2.5 การเปรียบเทียบ Ripple voltage ของวงจร Synchronous zeta converter ผลการการจำลองจะแสดงเป็นกราฟแท่ง ซึ่งสีเทาเข้มจะเป็นแรงดันทางด้านขาเข้า ส่วนสีเทาอ่อนจะเป็นแรงดันทางด้านขาออกของวงจร Synchronous zeta converter

% Ripple voltage

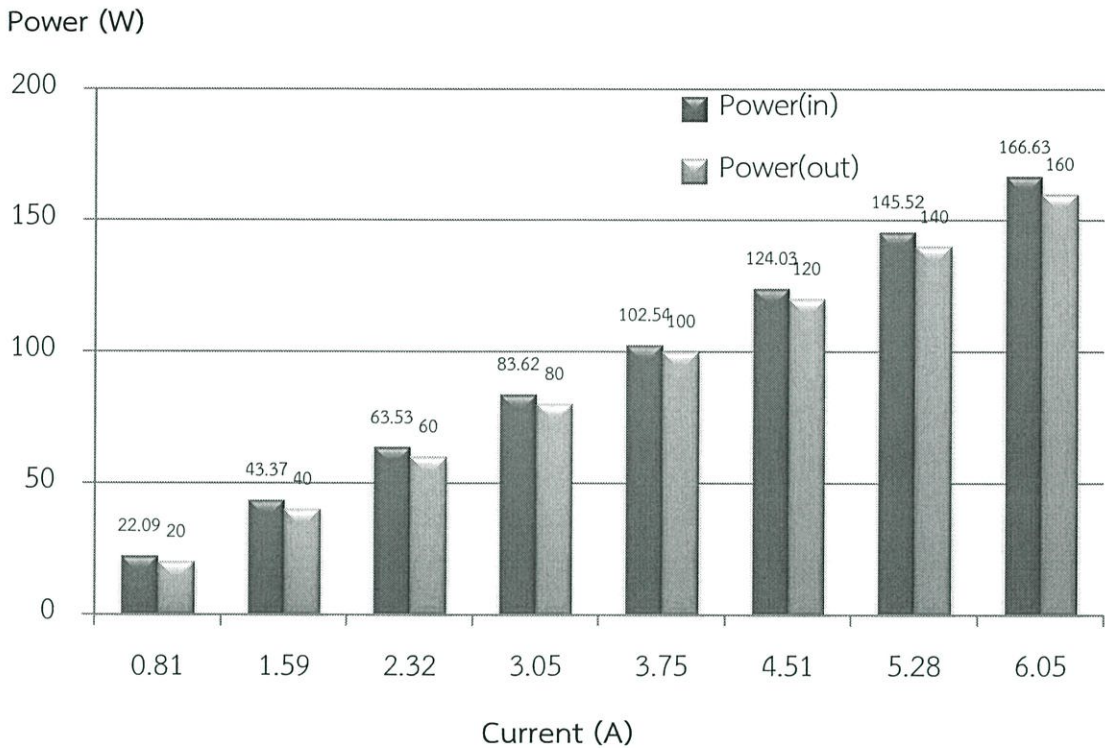


รูปที่ 4.16 ผลการจำลอง Ripple voltage ของวงจร Synchronous zeta converter

จากการจำลอง พบว่า Ripple voltage แรงดันทางด้านขาออกของวงจรมีค่าน้อยกว่า Ripple voltage ของแรงดันทางด้านขาเข้า ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจาก ทางด้านขาออกจะเป็นลักษณะเด่นของตัววงจร คือ จะประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ ตัวเก็บประจุ C ซึ่งมีลักษณะเป็น Low pass filter จึงทำให้แรงดันทางด้านขาออกมี Ripple ที่ต่ำกว่าแรงดันทางด้านขาเข้า เมื่อแรงดันมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ ripple voltage ทางด้านขาเข้ามีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย อยู่ที่ประมาณ 0.73 % ripple voltage ซึ่งมีค่าน้อยมาก และในส่วนของกระแสทางด้านขาออกจะเห็นว่า Ripple voltage จะมีค่าที่ต่ำมากถึง 0.04 % ripple current เนื่องจากทางด้านออกมีลักษณะเป็น LC low pass filter จึงทำให้เมื่อมีแรงดันที่สูงขึ้น Ripple voltage กลับมาค่าที่ไม่สูงขึ้นตาม ซึ่งเป็นข้อดีของวงจร Synchronous zeta converter ดังได้แสดงในรูปที่ 4.16 ผลการจำลอง Ripple voltage ของวงจร Synchronous zeta converter

4.2.2.6 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้า ของวงจร Synchronous zeta converter ผลการจำลองจะเป็นการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าและขาออกของวงจร Synchronous zeta converter ซึ่งจะแสดงเป็นแผนภูมิแท่ง สีเทาเข้มจะเป็นกำลังไฟฟ้าขาเข้า ส่วนสีเทาอ่อนจะเป็นกำลังไฟฟ้าที่ขาออก หรือ ที่โหลดนั่นเอง ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น

หากนำกำลังไฟฟ้าที่โหลดหารด้วยกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าจะได้เป็นประสิทธิภาพของตัววงจร ซึ่งจะแสดงดังแสดงในรูปที่ 4.17



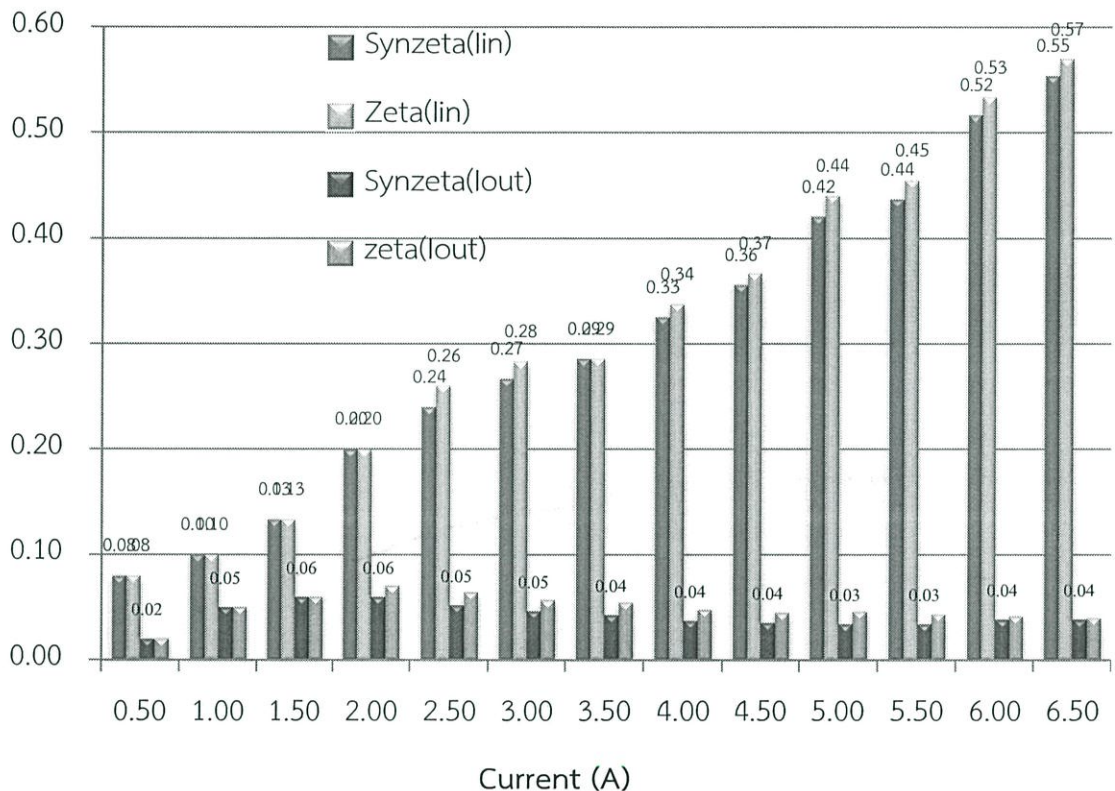
รูปที่ 4.17 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของวงจร Synchronous zeta converter

จากการจำลอง ได้ทำการจำลองโดยการเพิ่มค่าโหลดขึ้นทีละ 20 W ขึ้นไปจนถึง 160 W นี้ ผลที่ได้มาวิเคราะห์พบว่ากำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้ามีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าทางด้านขาออก เนื่องมาจากการสูญเสียเนื่องจากการสวิตซ์ซิ่ง และการสูญเสียที่ตัวเหนี่ยวนำ L และตัวเก็บประจุ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพมีค่าไม่เต็ม 100 % หรือกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าไม่เท่ากับกำลังไฟฟ้าทางด้านขาออก ประสิทธิภาพของวงจร Synchronous zeta converter ที่เกิดขึ้นหากคิดที่ 100 W ทางด้านขาออกหรือโหลดจะมีค่าเท่ากับ 97.52 % Efficiency

4.2.2.7 การเปรียบเทียบ Ripple Current ของทั้งสองวงจร ผลการจำลอง Ripple current ของทั้งสองวงจรจะถูกนำเสนอในรูปของแผนภูมิแท่ง เรียงลำดับหนึ่งและสองจะเป็นกระแสทางด้านขาเข้า ส่วนลำดับสามและสี่จะเป็นกระแสทางด้านขาออก นำผลการจำลองที่ได้มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบความแตกต่างกันของทั้งสองวงจร ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งจากผลการจำลองพบว่า Ripple current ของทั้งสองวงจรมีค่าเหมือนกัน หรือไม่แตกต่างกันมาก เพราะว่ามีอุปกรณ์ที่ใช้

ของทั้งสองวงจรเหมือนกัน เพียงแต่ต่างกันในส่วนของการที่มีมอสเฟตเข้ามาทำงานแทนการไบแอสด้วยไดโอด ทางด้านขาเข้าของวงจรยังคงเป็นตัวเก็บประจุและมอสเฟตเหมือนเดิม จึงทำให้ Ripple current ยังคงเหมือนเดิม และกระแสทางด้านขาออกก็เช่นเดียวกัน ยังคงเป็นตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ดังนั้นวงจรทั้งสองวงจรคือวงจร Zeta converter และ Synchronous zeta converter มีค่า Ripple current เหมือนกัน หรือไม่แตกต่างกัน ผลทางด้านกระแส ทั้งสองวงจรมีลักษณะเหมือนกัน

% Ripple current

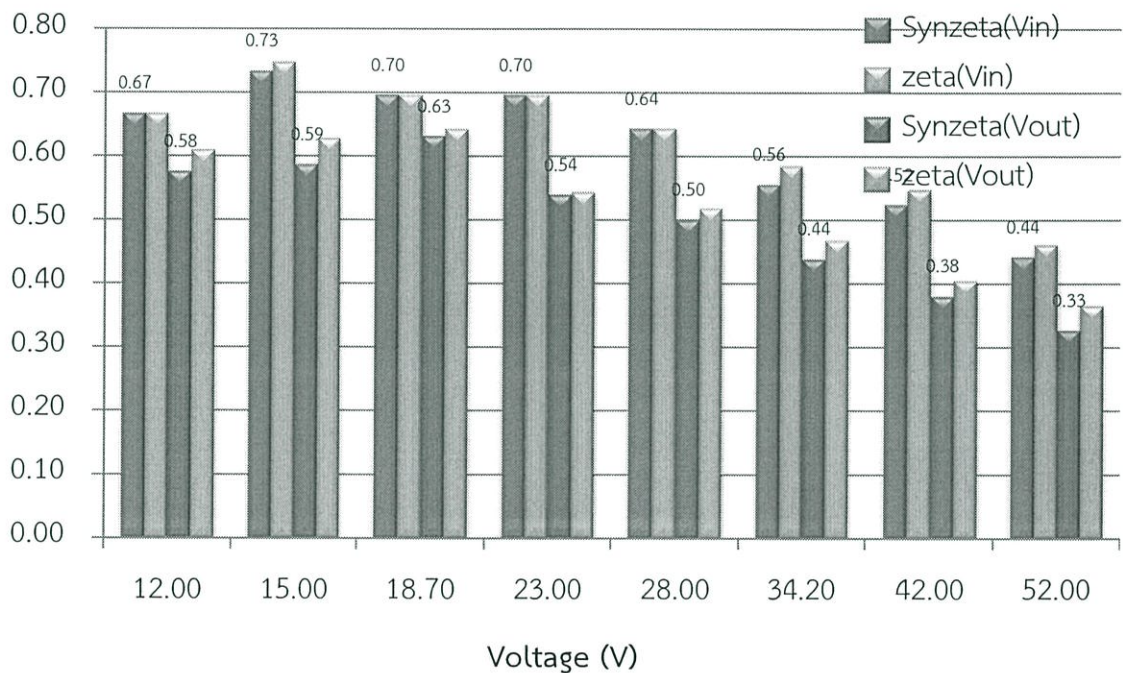


รูปที่ 4.18 ผลการจำลองเปรียบเทียบ Ripple current ของทั้งสองวงจร

4.2.2.8 การเปรียบเทียบ Ripple voltage ของทั้งสองวงจร ผลการจำลอง Ripple voltage ของทั้งสองวงจรจะถูกนำเสนอในรูปแบบของแผนภูมิแท่ง เรียงลำดับหนึ่งและสองจะเป็นแรงดันทางด้านขาเข้า ส่วนลำดับสามและสี่จะเป็นแรงดันทางด้านขาออก นำผลการจำลองที่ได้มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบความแตกต่างกันของทั้งสองวงจร ดังแสดงในรูปที่ 4.19 จากผลการจำลองพบว่าแรงดันของทั้งสองวงจรทั้งแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออก มีลักษณะเหมือนกันหรือไม่แตกต่างกันมาก เพราะว่าทั้งสองวงจรไม่ได้ถูกปรับปรุงแก้ไขในส่วน of Ripple voltage ของทั้งสองวงจรนี้ วงจรเดิมคือ zeta converter จะเป็นการคายพลังงานโดยใช้ไดโอดทำหน้าที่ในการไบแอส

ผลจากการที่ไดโอดทำหน้าที่ในการไบอัส ซึ่งข้อเสียของไดโอดเมื่อทำงานขณะไม่มีโหลดเกิดขึ้น แรงดันทางด้านขาออกจะมากค่าที่สูงขึ้นมาก ส่งผลให้ตัวเก็บประจุทางด้านขาออกเสียหายได้และส่งผลกระทบต่อระบบได้ ส่วนวงจรที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นจะใช้มอสเฟตเข้ามาทำงานแทนที่ ซึ่งผลที่ได้จะทำให้วงจรไม่เกิด Over voltage เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันที่อยู่ในช่วงของการคายพลังงานเมื่อมีการสวิตช์ จะมีแรงดันเท่ากับแรงดันก่อนหน้า และไม่สามารถสะสมแรงดันให้สูงขึ้นได้

% Ripple voltage

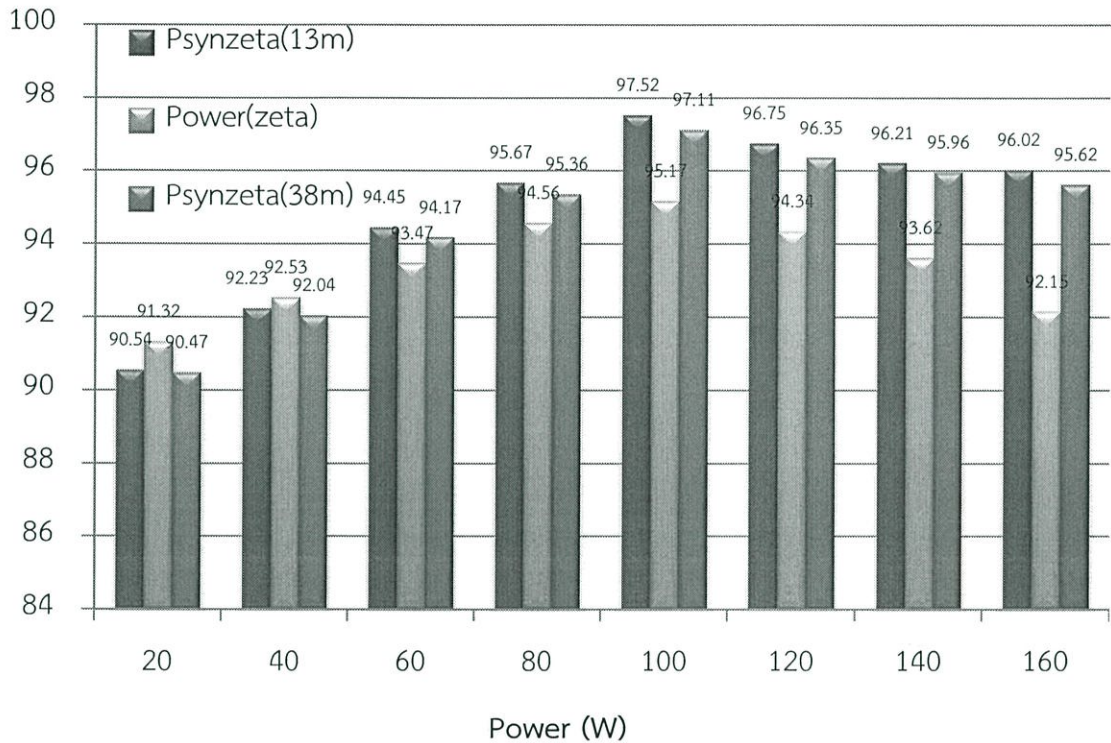


รูปที่ 4.19 ผลการจำลองเปรียบเทียบ Ripple current ของทั้งสองวงจร

4.2.2.9 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้งสองวงจร จากผลการจำลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้งสองวงจร โดยสีเทาอ่อนคือวงจร Zeta converter ส่วนสีเทาเข้มคือวงจรที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็น Synchronous zeta converter ซึ่งทั้งสองวงจรมีข้อแตกต่างอยู่เพียงจุดเดียวคือวงจรที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นจะเป็นการเปลี่ยนไดโอดที่ทำหน้าที่ในการไบอัสสัญญาณเปลี่ยนเป็นมอสเฟตแทนเพื่อช่วยทำให้ประสิทธิภาพของวงจรสูงขึ้นอีกทั้งยังช่วยทำให้ไม่เกิด Over voltage เกิดขึ้น วงจรที่ถูกพัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพสูงถึง 97.52 % Efficiency ($R_{ds(on)}=13 \text{ m}\Omega$) และ 97.11 % Efficiency ($R_{ds(on)}=38 \text{ m}\Omega$) ส่วนวงจรเดิมมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 95.17 % Efficiency จากผลการจำลองสรุปได้ว่าการสูญเสียที่ไดโอดมีค่ามากกว่าการสูญเสียที่มอสเฟต อยู่ 2-3 % ผลการจำลอง

จะถูกนำเสนอเป็นแผนภูมิแท่ง ดังแสดงในรูปด้านล่างที่ 4.20 ผลการจำลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้งสองวงจร

% Efficiency



รูปที่ 4.20 ผลการจำลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้งสองวงจร

4.3 การทดลอง

การทดลองจะทำการทดลองวงจรต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง หาค่าประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น ค่า Ripple current และ Ripple voltage ที่เกิดขึ้น กราฟช่วงการทำงานที่ดิวตี้ไซเคิลต่างๆ โหลดที่ใช้ในการทดลอง เป็นแบบ Electronics Load 300 W การทดลองจะทำการเพิ่มค่าดิวตี้ไซเคิลเพิ่มขึ้นทีละ 5 % ดิวตี้ไซเคิล ไปจนถึง 65 % ดิวตี้ไซเคิล ความถี่ที่ใช้ในการสวิตซ์ซึ่งใช้ที่ความถี่ 20 kHz และช่วงเวลา Deadtime เท่ากับ 2 μ s การทดลองจะทำการทดลองให้มีลักษณะเหมือนการจำลองมากที่สุด จากนั้นทำการบันทึกผลการทดลองและนำผลการทดลองมีวิเคราะห์และสรุปผลต่อไป เมื่อได้ข้อสรุปเป็นที่แน่นอนจากนั้นจะทำการทดลองโดยการนำวงจรที่มีประสิทธิภาพที่สูงไปใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยใช้ทฤษฎีการรบกวนและสังเกต (P&O) เก็บผลการทดลองตลอดช่วงระยะเวลาที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้ นำผลการทดลองมีวิเคราะห์และสรุปผลการ

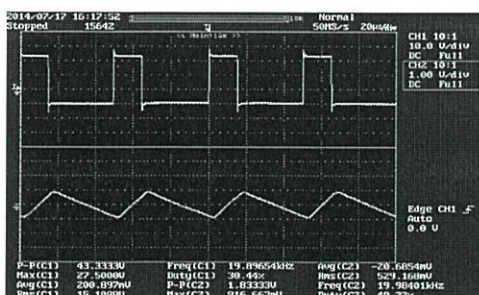
ทดลอง จากรูปด้านล่างจะเป็นการนำแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาต่อกับวงจรที่ได้ทำการออกแบบขึ้น แรงดันเข้าเข้าและขาออกเปรียบเทียบกับตั้งแต่ 12 V จนถึง 52 V กระแสขาเข้าและกระแสขาออกกำหนดไม่เกิน 6.5 A กำลังไฟฟ้าที่โหลดกำหนดไม่เกิน 160 W เริ่มต้นที่ 20 W เพิ่มขึ้นทีละ 20 W จนกระทั่งถึง 160 W



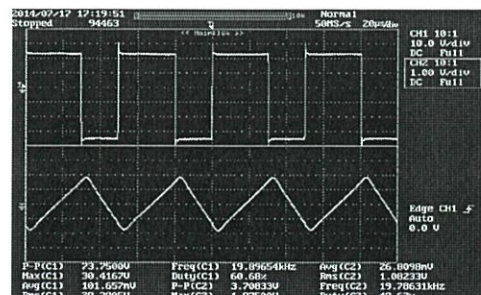
รูปที่ 4.21 การทดลองภายใต้สภาวะที่กำหนด

4.3.1 สัญญาณกระแสคกร้อม ตัวเหนี่ยวนำ L1 ต่อ สัญญาณ PWM 1H

จากการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบสัญญาณ PWM 1H ต่อ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L1 ผลที่ได้ จะเห็นได้ว่า เมื่อสัญญาณ PWM 1H on gate รูปคลื่นกระแสจะทำการเก็บพลังงาน มีลักษณะ slope สูงขึ้น เมื่อสัญญาณ PWM 1H off gate รูปคลื่นกระแสจะทำการคายพลังงาน ซึ่งมีลักษณะ slope ต่ำลง ดังแสดงในรูปด้านล่าง รูปคลื่นกระแสมีความต่อเนื่อง ซึ่งอยู่ใน โหมดการทำงานกระแสต่อเนื่อง นั่นเอง จากรูปด้านล่างเป็นการแสดงรูปคลื่นกระแสในโหมดการทำงานทั้ง buck mode และ boost mode ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎี หากอยู่ในช่วง buck mode การเก็บพลังงานจะมีช่วงเวลาที่สั้นกว่าช่วงเวลาคายพลังงาน ในทางกลับกัน หากอยู่ในช่วง boost mode การเก็บพลังงานจะมีช่วงเวลาที่ยาวกว่าช่วงเวลาคายพลังงาน



(ก) Buck mode

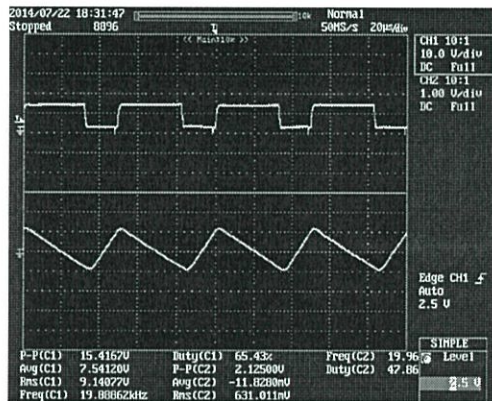


(ข) Boost mode

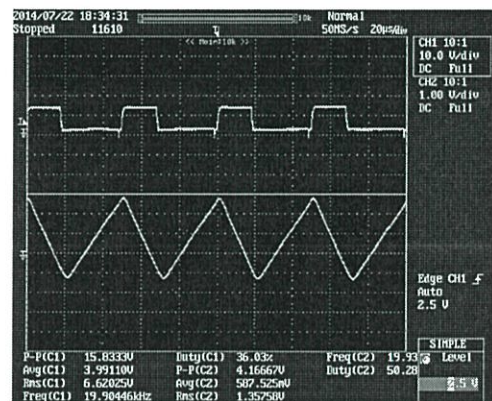
รูปที่ 4.22 แสดงรูปสัญญาณ PWM 1H และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L1

4.3.2 สัญญาณกระแสคร่อม ตัวเหนี่ยวนำ L1 ต่อ สัญญาณ PWM 1L

จากการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบสัญญาณ PWM 1L ต่อ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L1 ผลที่ได้ จะเห็นได้ว่า เมื่อสัญญาณ PWM 1H on gate รูปคลื่นกระแสจะทำการคายพลังงาน มีลักษณะ slope ต่ำลง เมื่อสัญญาณ PWM 1L off gate รูปคลื่นกระแสจะทำการเก็บพลังงาน ซึ่งมีลักษณะ slope สูงขึ้น ดังแสดงในรูปด้านล่าง รูปคลื่นกระแสมีความต่อเนื่อง ซึ่งอยู่ในโหมดการทำงานกระแสต่อเนื่อง จากรูปด้านล่างเป็นการแสดงรูปคลื่นกระแสในโหมดการทำงานทั้ง buck mode และ boost mode ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎี หากอยู่ในช่วง buck mode การเก็บพลังงานจะมีช่วงเวลาที่สั้นกว่าช่วงเวลาคายพลังงาน ในทางกลับกัน หากอยู่ในช่วง boost mode การเก็บพลังงานจะมีช่วงเวลาที่ยาวกว่าช่วงเวลาคายพลังงาน สัญญาณ PWM 1L ทำหน้าที่เหมือน Diode ที่ทำการไบอัสสัญญาณด้านฝั่งขาออก จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับ สัญญาณ PWM 1H นั้นเอง



(ก) Buck mode

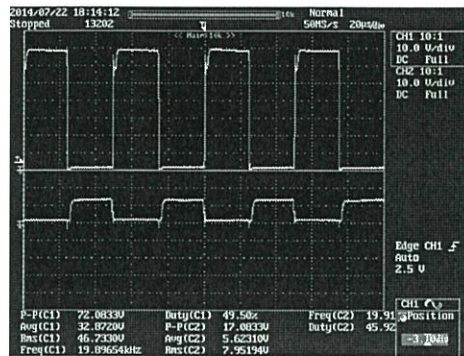


(ข) Boost mode

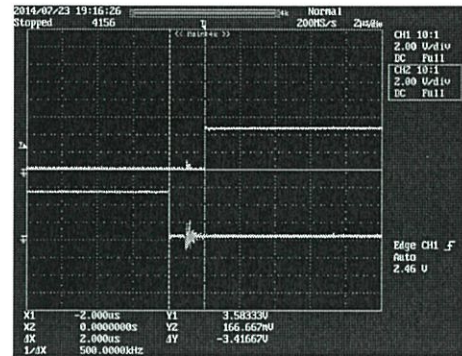
รูปที่ 4.23 แสดงรูปสัญญาณ PWM 1L และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L₁

4.3.3 สัญญาณ PWM 1H ต่อ PWM 1L

จากการทดลอง ได้ทำการตรวจจับความถี่สวิตซ์ซึ่งที่ใช้ในการทดลองที่ 20 kHz เปรียบเทียบสัญญาณเกต 1H และ 1L พบว่าขาเกตด้าน 1H มีความสูงกว่าขาเกตด้าน 1L เนื่องจากด้าน 1H มีการ Boost แรงดันให้สูงขึ้นตามกึ่งของมอสเฟตด้านบนทำให้สามารถรักษาระดับแรงดันที่ใช้เกตมอสเฟตได้ ส่วนทางด้าน 1L ตัวมอสเฟตที่ถูกเกตขาออกสลดกรวดอยู่แล้วจึงไม่จำเป็นต้อง Boost ช่วงเวลาที่ใช้สลับการทำงานด้าน 1H และ 1L คือช่วงเวลาที่เรียกว่า Deadtime เพื่อไม่ให้กึ่งด้านบนกับกึ่งด้านล่างของตัวมอสเฟต Short circuit กันระหว่างสองกึ่ง ทำให้อุปกรณ์เสียหายได้ กำหนดช่วงเวลาที่ใช้ 2 μ s ดังแสดงในรูปด้านล่าง



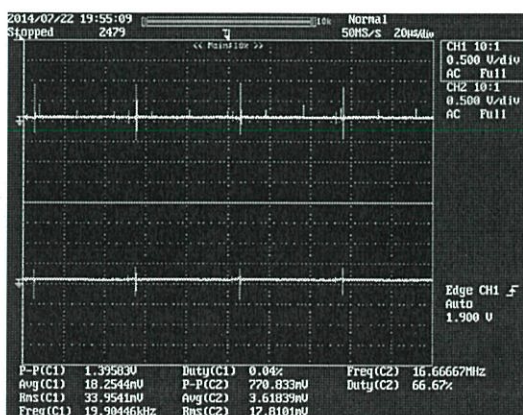
(ก) PWM 1H ต่อ PWM 1L

(ข) Deadtime 2 μ s

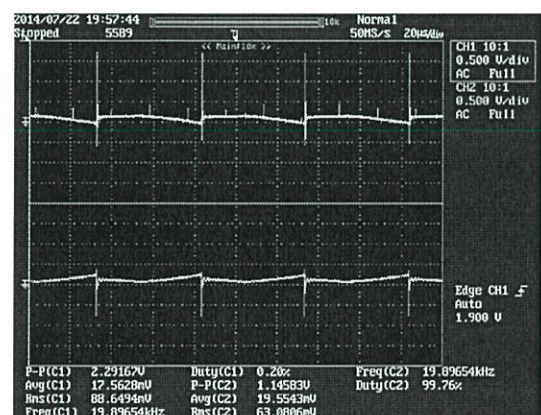
รูปที่ 4.24 แสดงรูปสัญญาณ PWM 1H 1L และช่วงเวลา Deadtime

4.3.4 สัญญาณแรงดัน Ripple voltage ของวงจร zeta converter

จากการทดลองได้ทำการตรวจจับสัญญาณแรงดัน เพื่อหาค่า Ripple voltage รูปคลื่นด้านบนคือสัญญาณแรงดันด้านขาเข้า ส่วนรูปคลื่นด้านล่าง คือสัญญาณแรงดันด้านขาออก พบว่าสัญญาณแรงดันด้านขาเข้ามีค่า Ripple voltage ที่สูงกว่าแรงดันด้านขาออกอยู่ และสัญญาณแรงดันที่อยู่ในโหมด Boost มีค่า Ripple voltage ที่สูงกว่าสัญญาณแรงดันที่อยู่ในโหมด Buck เนื่องจากโหมด Boost มีช่วงเวลาการทำงานที่นานกว่าจึงทำให้มี Ripple voltage ที่สูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันของวงจร zeta converter



(ก) Buck mode

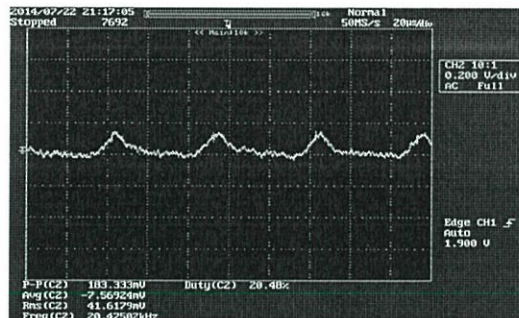


(ข) Boost mode

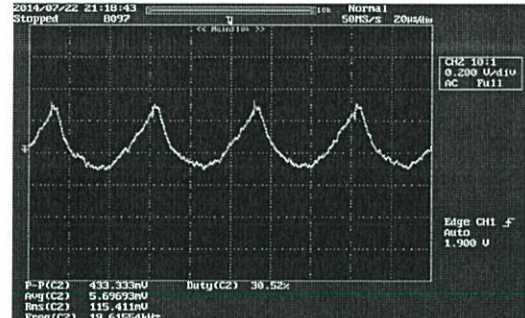
รูปที่ 4.25 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันกระเพื่อมของวงจร zeta converter

4.3.5 รูปคลื่นสัญญาณ Ripple current ของวงจร zeta converter

จากการทดลอง ได้ทำการตรวจวัดสัญญาณกระแส ทางด้านขาเข้าและขาออกของวงจร Zeta converter พบว่า Ripple current ที่เกิดขึ้นของทางด้านกระแสขาเข้า มีค่าสูงกว่าสัญญาณกระแสทางด้านขาออก และ Ripple current ที่อยู่ในช่วงโหมดการทำงาน Boost มีค่า Ripple current ที่สูงกว่าการทำงานในช่วงโหมด Buck เนื่องจากโหมด Boost มีช่วงเวลาการทำงานที่นานกว่า จึงทำให้ Ripple current มีค่าที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณกระแสทางด้านขาเข้ากับสัญญาณกระแสทางด้านขาออก พบว่า Ripple current ของกระแสทางด้านขาเข้ามีค่าสูงกว่า Ripple current ของกระแสทางด้านขาออก ดังจะแสดงในรูปที่ รูปที่ 4.22 แสดงรูปคลื่นสัญญาณกระแสกระแสเพิ่ม Ripple current ขาเข้าของวงจร zeta converter และ รูปที่ 4.23 แสดงรูปคลื่นสัญญาณกระแสกระแสเพิ่มขาออกของวงจร zeta converter ช่วงเวลา Time/div อยู่ที่ 20 μ s ช่วงแรงดัน Volt/div อยู่ที่ 0.2 V/div ผลการทดลอง Ripple current ทั้งทางด้านขาเข้าและทางด้านขาออกของวงจร Zeta converter จะถูกนำเสนอในรูปของแผนภูมิแท่ง ซึ่งจะอธิบายในลำดับขั้นตอนต่อไป

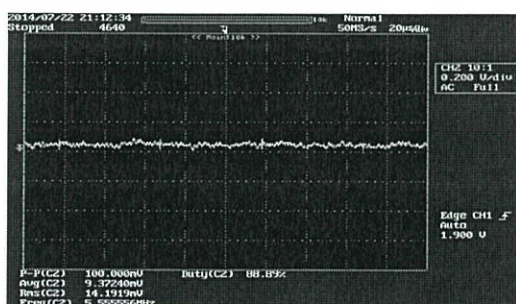


(ก) Buck mode

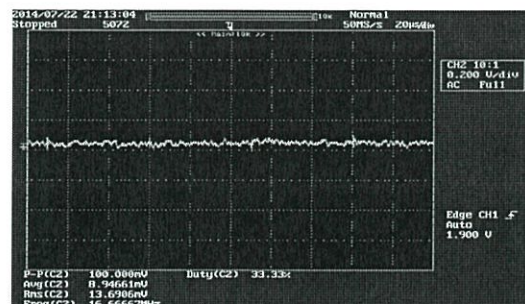


(ข) Boost mode

รูปที่ 4.26 แสดงรูปคลื่นสัญญาณกระแสกระแสเพิ่มขาเข้าของวงจร zeta converter



(ก) Buck mode

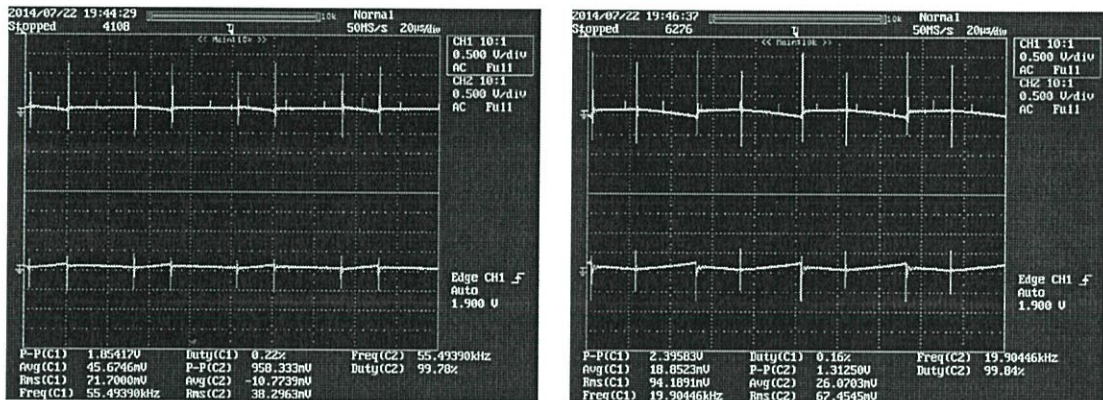


(ข) Boost mode

รูปที่ 4.27 แสดงรูปคลื่นสัญญาณกระแสกระแสเพิ่มขาออกของวงจร zeta converter

4.3.6 รูปคลื่นสัญญาณ Ripple voltage ของวงจร synchronous zeta converter

จากการทดลอง สัญญาณ Ripple voltage ที่เกิดจากการกระเพื่อมของแรงดันทั้งทางด้านขาเข้าของตัววงจรและขาออกของตัววงจร พบว่า Ripple voltage ที่ขาเข้ามีค่าสูงกว่า Ripple voltage ที่ขาออกอยู่เพียง เล็กน้อย และค่าแรงดันที่เกิดขึ้นมีค่าแรงดันกระเพื่อมที่น้อย ส่งผลให้ประสิทธิภาพของตัววงจรมีประสิทธิภาพ ที่สูงขึ้น การใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าสูง ช่วยทำให้ Ripple voltage ที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำลง การทำงานให้โหมด Buck ค่า Ripple voltage จะมีค่าน้อยกว่าการทำงานในโหมด Boost เนื่องจากโหมด Boost มีช่วงเวลาการทำงานนานกว่า โหมด Buck ดังจะแสดงในรูปด้านล่างที่ 4.28 สัญญาณแรงดันด้านบนคือแรงดันทางด้านขาเข้า ส่วนสัญญาณด้านล่างคือแรงดันทางด้านขาออกของตัววงจร ช่วงเวลา Time/div= 20us แรงดัน Volt/div = 0.5 Volt



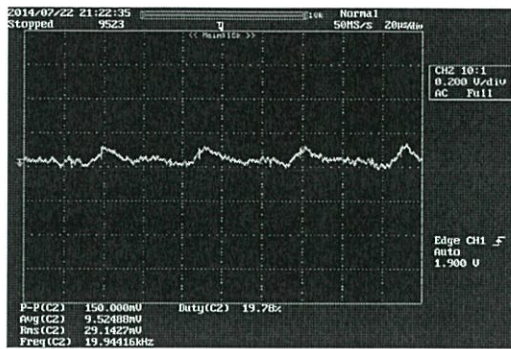
(ก) Buck mode

(ข) Boost mode

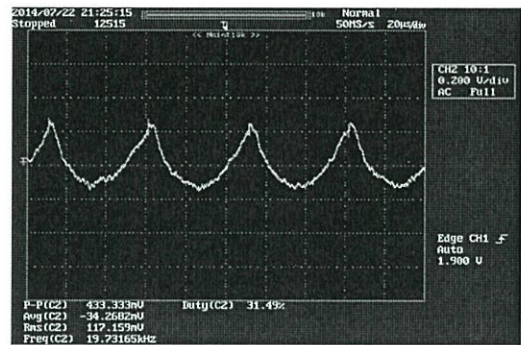
รูปที่ 4.28 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันกระเพื่อมของวงจร Synchronous zeta converter

4.3.7 รูปคลื่นสัญญาณ ripple current ขาเข้าของวงจร Synchronous zeta converter

จากการทดลอง ได้ทำการตรวจวัดสัญญาณกระแส ทางด้านขาเข้าและขาออกของวงจร Synchronous zeta converter พบว่า Ripple current ที่เกิดขึ้นของทางด้านกระแสขาเข้า มีค่าสูงกว่าสัญญาณกระแสทางด้านขาออก และ Ripple current ที่อยู่ในช่วงโหมดการทำงาน Boost มีค่า Ripple current ที่สูงกว่าการทำงานในช่วงโหมด Buck เนื่องจากโหมด Boost มีช่วงเวลาการทำงานที่นานกว่า จึงทำให้ Ripple current มีค่าที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณกระแสทางด้านขาเข้ากับสัญญาณกระแสทางด้านขาออก พบว่า Ripple current ของกระแสทางด้านขาเข้ามีค่าสูงกว่า Ripple current ของกระแสทางด้านขาออก ดังจะแสดงในรูปที่ 4.29 และ รูปที่ 4.30

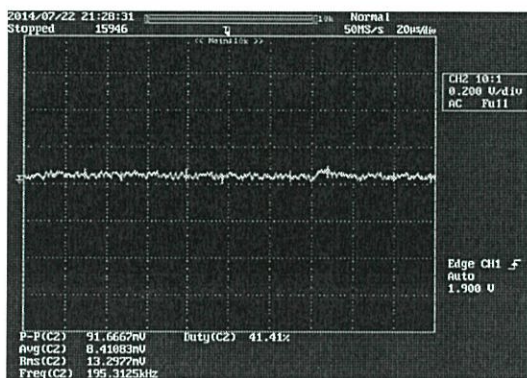


(ก) Buck mode

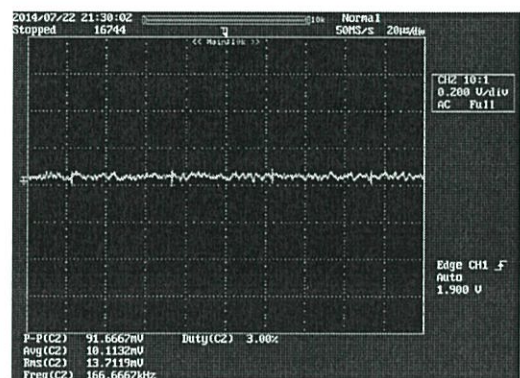


(ข) Boost mode

รูปที่ 4.29 แสดงรูปคลื่นสัญญาณกระแสเพื่อมาเข้าของวงจร Synchronous zeta converter



(ก) Buck mode



(ข) Boost mode

รูปที่ 4.30 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันกระแสเพื่อมาออกของวงจร Synchronous zeta converter

4.4 ผลการทดลอง

จากการทดลองทั้งสองวงจร ได้ผลการทดลองโดยการต่อโหลดเข้าไปที่ตัววงจร เพื่อหาค่าของ Ripple voltage, Ripple current และประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นของทั้งสองวงจร นำผลการทดลองมาวิเคราะห์เป็นแผนภูมิแท่ง และสรุปผลการทดลองต่อไป อีกทั้งยังนำวงจรที่ได้ออกแบบไปใช้ในการติดตามกำลังไฟสูงสุด เพื่อหาค่ากำลังไฟสูงสุดตลอดระยะเวลาที่มีเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ โดยจะทำการเก็บค่าทุกๆ 10 วินาที ผลการทดลองจะถูกแบ่งแยกออกเป็นส่วนๆ ดังจะอธิบายด้านล่างนี้

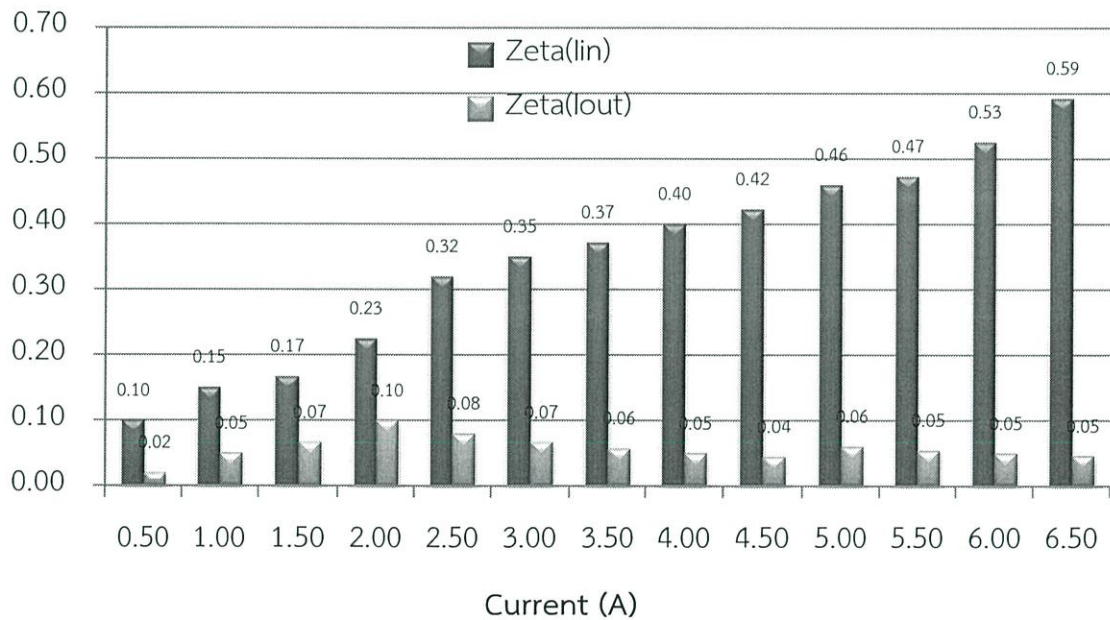
1. Ripple Current (zeta converter)
2. Ripple Voltage (zeta converter)
3. Efficiency (zeta converter)
4. Ripple Current (Synchronous zeta converter)

5. Ripple Voltage (Synchronous zeta converter)
6. Efficiency (Synchronous zeta converter)
7. เปรียบเทียบ Ripple Current, Ripple Voltage, Efficiency

4.4.1 ผลการทดลองวงจร zeta converter

4.4.1.1 การเปรียบเทียบ Ripple Current จากการทดลองเป็นการเปรียบเทียบค่ากระแส Ripple Current ของวงจร zeta converter โดยการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่โหลด ทำให้กระแสที่ไหลมีค่าเพิ่มขึ้น กระแสที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 A จนถึง 6.5 A ผลการทดลองจะถูกนำเสนอในรูปแบบของแผนภูมิแท่ง ซึ่งสีเทาเข้มคือกระแสทางด้านขาเข้า ส่วนสีเทาอ่อนคือกระแสทางด้านขาออก ดังแสดงในแผนภูมิด้านล่าง

% Ripple current

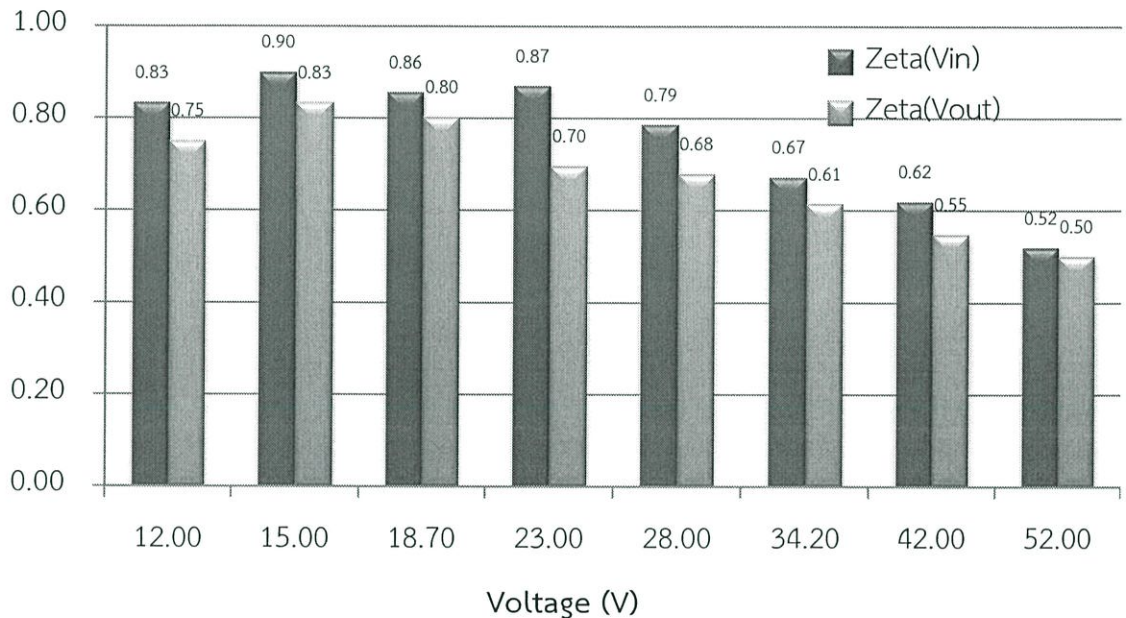


รูปที่ 4.31 ผลการเปรียบเทียบ Ripple current ของวงจร zeta converter

จากผลการทดลอง พบว่ากระแสฮาร์มอนิกส์ทางด้านขาเข้ามีค่ามากกว่ากระแสฮาร์มอนิกส์ทางด้านขาออก เนื่องจากทางด้านขาเข้ามีลักษณะตัวอุปกรณ์ที่เป็นตัวเก็บประจุ C และ มอสเฟต ที่ทำหน้าที่ในการสวิตซ์ซึ่ง ซึ่งจะทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์สูง จึงทำให้กระแสด้านเข้ามีค่าที่สูง ส่วนกระแสทางด้านขาออกจะประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำ L2 และตัวเก็บประจุ C ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับ Low pass filter จึงทำให้ Ripple Current ทางด้านขาออกมีค่าน้อยกว่าทางด้านขาเข้า

4.4.1.2 การเปรียบเทียบ Ripple Voltage จากการทดลอง ได้ทำการเก็บผลการทดลองการหาค่าแรงดัน Ripple Voltage ที่เกิดขึ้นทั้งทางด้านขาเข้าและขาออกของวงจร zeta converter ผลการทดลองได้แสดงเป็นแผนภูมิแท่ง สีเทาเข้มคือแรงดันทางด้านขาเข้า ส่วนสีเทาอ่อนคือแรงดันทางด้านขาออก ดังแสดงในรูปด้านล่างนี้

% Ripple voltage

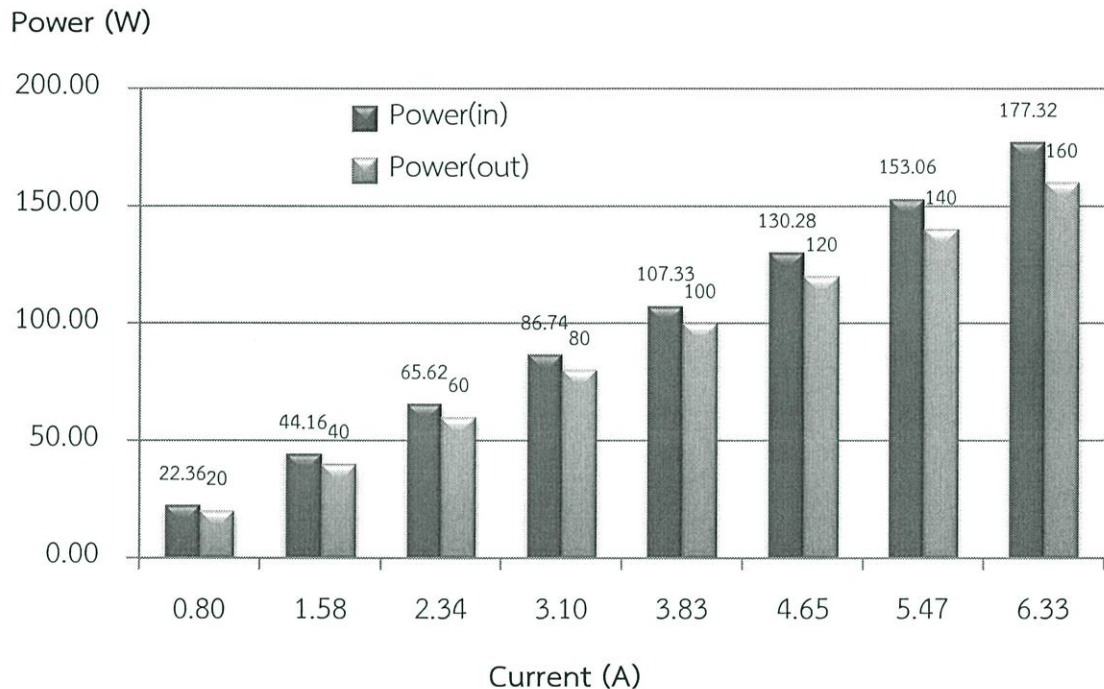


รูปที่ 4.32 ผลการเปรียบเทียบ Ripple voltage ของวงจร zeta converter

จากการทดลอง พบว่า แรงดันทางด้านขาเข้ามีค่ามากกว่าแรงดันทางด้านขาออกเพียงเล็กน้อย เนื่องจากทางด้านขาออกของตัววงจรจะประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุและตั้งเหนี่ยวนำ ซึ่งมีลักษณะเป็น Low pass filter จึงทำให้ค่า Ripple voltage มีค่าน้อย และตัวเก็บประจุ C ที่มีขนาดใหญ่ช่วยทำให้ค่า Ripple มีค่าที่ต่ำ หากคิดที่แรงดันที่ทำให้เกิด Ripple voltage สูงสุดคือ 15 V ค่า Ripple voltage ทางด้านขาเข้ามีค่า เท่ากับ 0.90 % Ripple voltage ส่วนแรงดันทางด้านขาออกมาค่าอยู่ที่ 0.83 % Ripple voltage แรงดันทางด้านขาเข้าและแรงดันทางด้านขาออกมีค่า % Ripple voltage ไม่ถึง 1 % ซึ่งเป็นผลดีกับตัววงจร ในการที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป เนื่องจากสัญญาณแรงดันมีค่าระลอกคลื่นที่ต่ำ เหมาะกับการนำไปใช้งานกับอุปกรณ์ที่ต้องการแรงดันคงที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อย

4.4.1.3 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้า จากการทดลอง เป็นการทดลองกำลังไฟฟ้า ทางด้านขาเข้าและทางด้านขาออกหรือกำลังไฟฟ้าที่โหลด ของวงจร zeta converter ทำการทดลอง

โดยการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่โหลดขึ้น เริ่มต้นที่ 20 W เพิ่มขึ้นทีละ 20 W จนถึง 160 W นำผลการทดลองมาแสดงในรูปของแผนภูมิแท่ง สีเทาเข้มคือกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้า ส่วนสีเทาอ่อน คือ กำลังไฟฟ้าทางด้านขาออก หรือกำลังไฟฟ้าที่โหลด หากคิดเป็นประสิทธิภาพของตัววงจร โดยการนำ กำลังไฟฟ้าที่โหลด ส่วนด้วยกำลังไฟฟ้าจะจ่ายทางด้านเข้า จะเป็นกำลังไฟฟ้าของวงจร ดังได้แสดงใน รูปด้านล่างนี้



รูปที่ 4.33 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของวงจร zeta converter

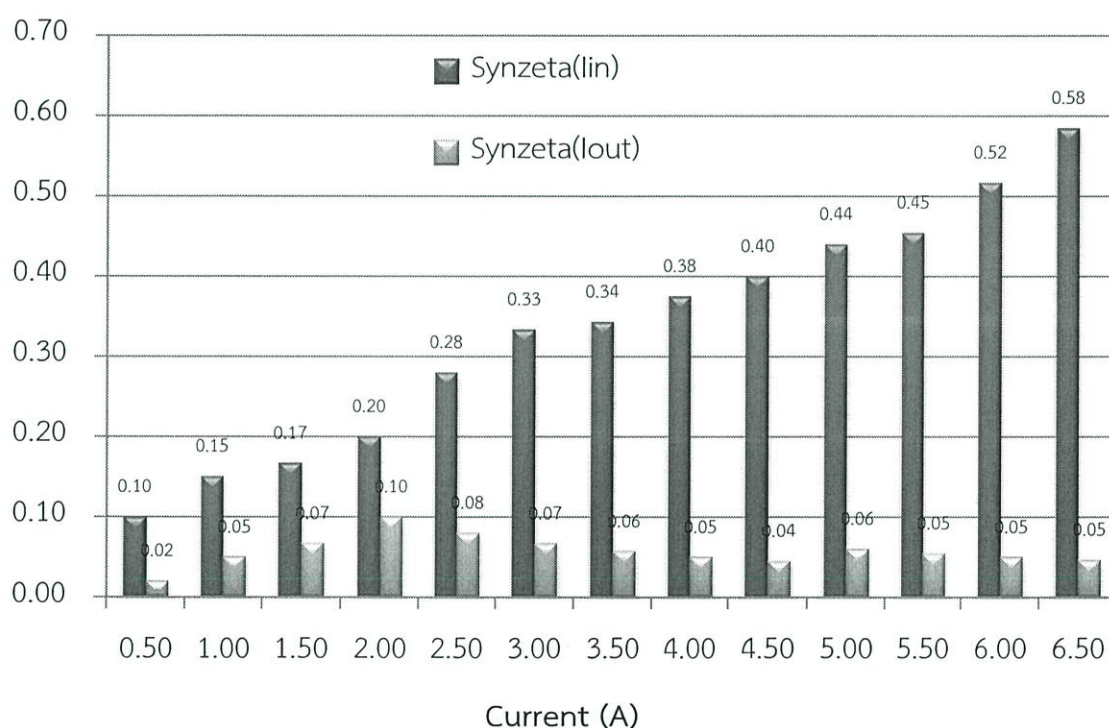
จากการทดลองพบว่า กำลังไฟฟ้าทางด้านเข้าเข้าหรือกำลังไฟฟ้าที่จ่ายมีค่ามากกว่า กำลังไฟฟ้าที่ขาออกหรือกำลังไฟฟ้าที่โหลด เนื่องจากวงจรที่ได้ทำการออกแบบมีประสิทธิภาพไม่ถึง 100 % จึงทำให้กำลังไฟฟ้าที่ด้าน ขาเข้าไม่เท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ด้านขาออก จากผลการทดลองหากคิด กำลังไฟฟ้าที่โหลด 100 W กำลังไฟฟ้าที่จ่าย จะมีค่า 107.3 W เมื่อนำมาคิดเป็นประสิทธิภาพของ วงจรจะมีค่าอยู่ที่ 93.17 % Efficiency เนื่องจากตัววงจรมีการสูญเสียเนื่องจากการสวิตช์ซิ่งและ แรงดันตกคร่อมไดโอด

4.4.2 ผลการทดลองวงจร Synchronous zeta converter

4.4.2.1 การเปรียบเทียบ Ripple Current จากการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบ Ripple Current ของวงจร Synchronous zeta converter ทั้งทางด้านกระแสเข้าและกระแสที่ไหล

ของของตัววงจร นำผลการทดลองที่ได้มาแสดงผลเป็นแผนภูมิแท่ง เพื่อต่อการวิเคราะห์และสรุปผล โดยสี่เหลี่ยมคือกระแส Ripple Current ทางด้านขาเข้า ส่วนสี่เหลี่ยมอ่อนคือกระแส Ripple Current ทางด้านขาออก การทดลองจะทำการเพิ่มกระแสขึ้นทีละ 0.5 A ขึ้นไปจนถึง 6.5 A ดังแสดงในแผนภูมิด้านล่างนี้ ซึ่งจากการทดลอง พบว่ากระแสฮาร์มอนิกส์ด้านขาเข้ามีค่ามากกว่ากระแสฮาร์มอนิกส์ด้านขาออก จึงทำให้ค่า Ripple current ที่ค่าเข้ามีค่ามากกว่าด้านขาออก ทางด้านกระแสขาออกมีค่า Ripple current ที่ต่ำเนื่องจากทางด้านขาเอาเป็นลักษณะเด่นของตัววงจรที่ประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำ L2 และตัวเก็บประจุ C ซึ่งมีลักษณะเดียวกับ Low pass filter จึงทำให้กระแสฮาร์มอนิกส์ ด้านขาออกมีค่าน้อยกว่าด้านขาเข้า

% Ripple current

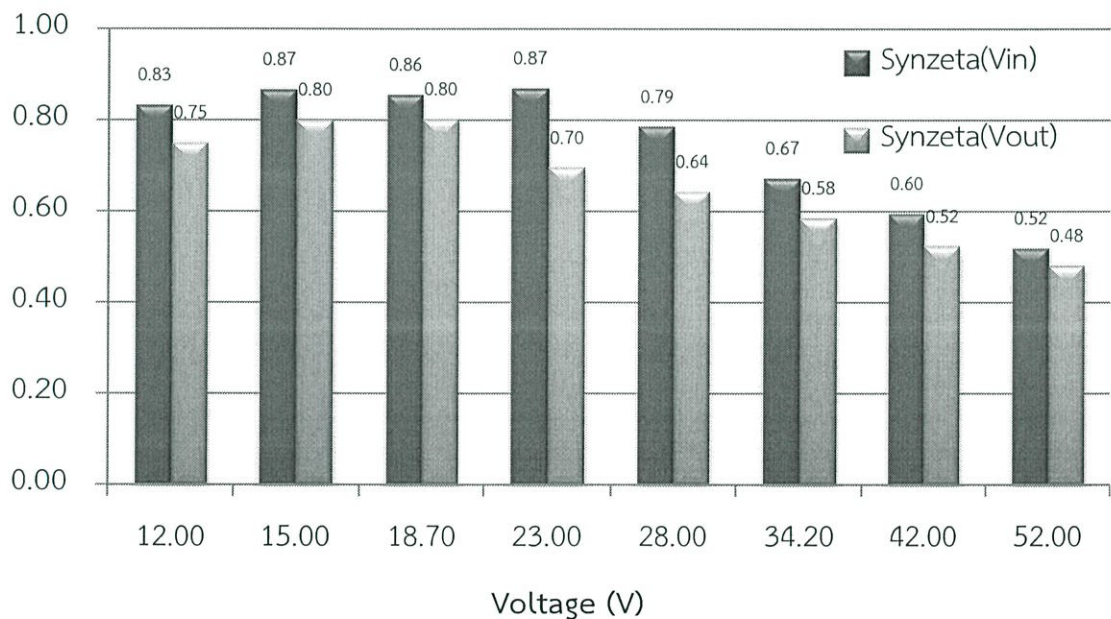


รูปที่ 4.34 ผลการเปรียบเทียบ Ripple current ของวงจร Synchronous zeta converter

4.4.2.2 การเปรียบเทียบ Ripple Voltage จากการทดลองนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ในรูปของแผนภูมิแท่ง ดังแสดงในแผนภูมิด้านล่าง สี่เหลี่ยมเข้มคือแรงดัน Ripple Voltage ทางด้านขาเข้า ส่วนสี่เหลี่ยมอ่อนคือ Ripple Voltage ทางด้านขาออก ผลการทดลองได้ทำการปรับค่าแรงดันเพิ่มขึ้น จนถึง 52 V ซึ่งผลการทดลองการเปรียบเทียบ Ripple Voltage ทางด้านขาเข้าและขาออกของวงจร Synchronous zeta converter พบว่าแรงดันทางด้านขาเข้ามีค่า Ripple

Voltage มากกว่าแรงดันทางด้านขาออก ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันทางด้านขาออกประกอบไปด้วย หัวเหนี่ยวนำ L2 และตัวเก็บประจุ C ซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับ Low pass filter ในส่วนของแรงดันขาเข้ามีค่ามากกว่า เนื่องจากประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุ C และมอสเฟต ตัวมอสเฟต เมื่อมีการเกต จะทำให้เกิด Ripple Voltage เกิดขึ้น จึงส่งผลให้แรงดัน Ripple Voltage ทางด้านขาเข้ามีค่าที่สูงกว่า ซึ่งแรงดัน Ripple Voltage ขาเข้ามีค่าอยู่ที่ 0.87 % Ripple Voltage ส่วนแรงดัน Ripple Voltage ทางด้านขาออกมีค่าอยู่ที่ 0.80 % Ripple Voltage ซึ่งแรงดันทั้งสองด้านมีค่า Ripple Voltage ไม่ถึง 1% ซึ่งมีค่าน้อยตามต้องการเนื่องจากการใช้ตัวเก็บประจุ C ที่มีค่ามากช่วยทำให้ Ripple Voltage มีค่าที่ต่ำ

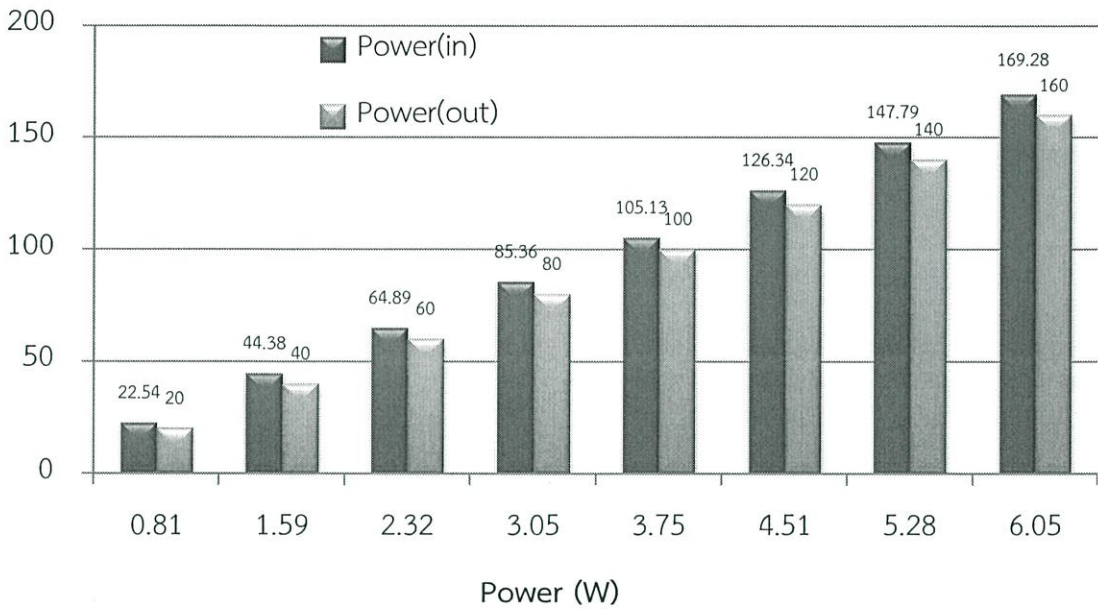
% Ripple voltage



รูปที่ 4.35 ผลการเปรียบเทียบ Ripple voltage ของวงจร Synchronous zeta converter

4.4.2.3 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้า จากการทดลอง ทำการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าและทางด้านขาออกหรือทางด้านโหลดเพื่อหาประสิทธิภาพของตัววงจร Synchronous zeta converter โดยสี่เทาเข้มคือกำลังไฟฟ้านำเข้า ส่วนสี่เทาอ่อนคือกำลังไฟฟ้าทางด้านขาออก การทดลองจะทำการเพิ่มโหลดให้มีค่าที่สูงขึ้นทีละ 20 W ไปจนถึง 160 W ดังได้แสดงในแผนภูมิแท่ง

% Efficiency



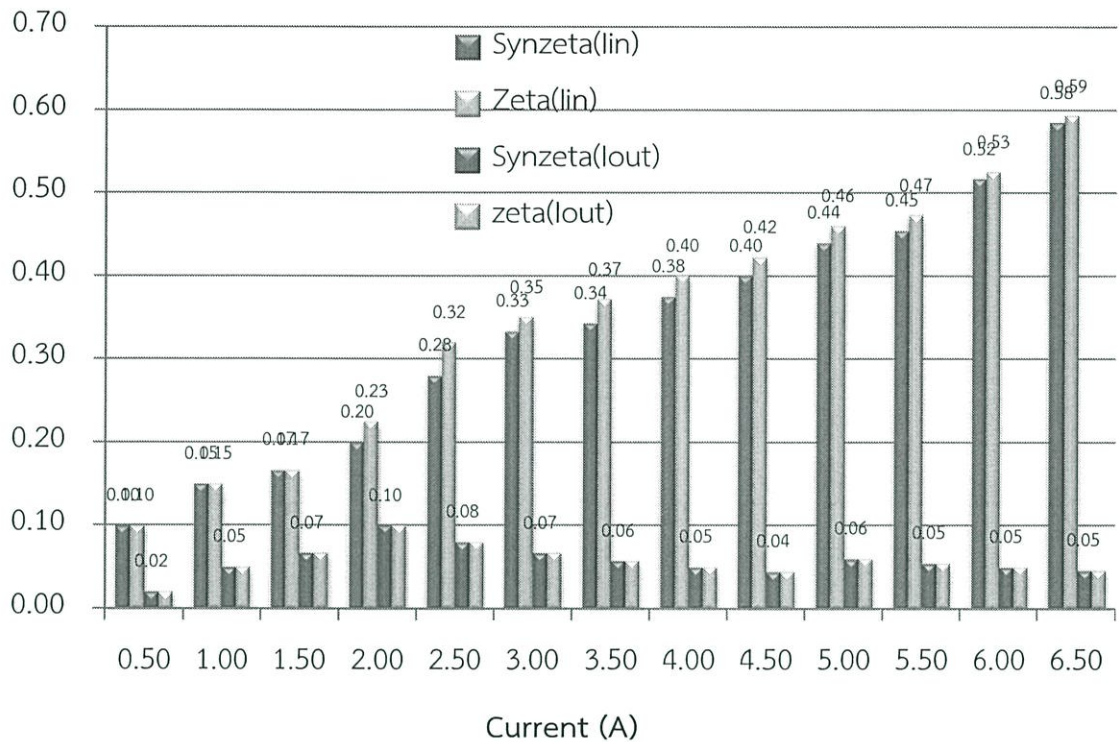
รูปที่ 4.36 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของวงจร Synchronous zeta converter

จากผลการทดลอง พบว่ากำลังไฟฟ้านำเข้ามีกำลังไฟฟ้ามากกว่ากำลังไฟฟ้านำออก เนื่องจากวงจรมีประสิทธิภาพไม่เต็ม 100 % จึงทำให้กำลังไฟฟ้าทั้งสองด้านมีค่าไม่เท่ากัน จะถูกสูญเสียในรูปแบบของการสวิตซ์ซิ่งและแรงดันตกคร่อมตัวอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งประสิทธิภาพที่นำกำลังไฟฟ้าด้านโหลด 100 W มีประสิทธิภาพอยู่ที่ 95.12 % Efficiency ซึ่งหากคิดเป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียที่ตัวอุปกรณ์และการสวิตซ์ซิ่งจะอยู่ที่ 5.13 W ซึ่งมีค่าการสูญเสียที่น้อยหากเทียบกับวงจรแปลงผัน DC-DC converter ชนิดอื่นๆ กำลังไฟฟ้าที่นำออกหรือที่โหลด จะถูกควบคุมโดยการปรับค่าตัวต้านทานด้านด้วย Electronics Load

4.4.3 ผลการเปรียบเทียบการทดลองของทั้งสองวงจร

4.4.3.1 การเปรียบเทียบ Ripple Current ของทั้งสองวงจร จากการทดลองเป็นการนำผลการทดลองของทั้งสองวงจร คือวงจรเดิมและวงจรที่ได้ถูกพัฒนาขึ้น มาเปรียบเทียบผลการทดลอง เพื่อหาข้อสรุป โดยทำการเปรียบเทียบกระแส Ripple current ทั้งในด้านกระแสที่ไหลเข้า และ กระแสที่ไหลออก นำผลอัตรากระแสระลอกคลื่นมาเปรียบเทียบเป็นแผนภูมิแท่ง ดังรูปด้านล่าง

% Ripple current

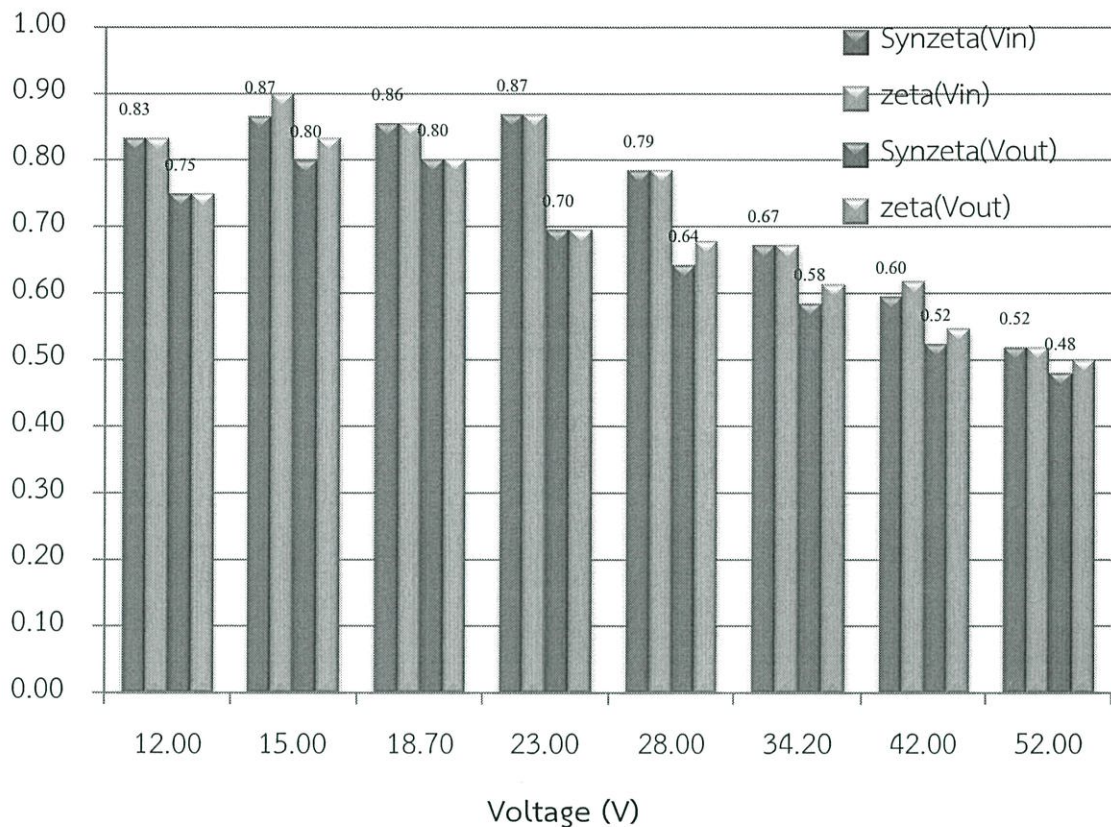


รูปที่ 4.37 ผลการเปรียบเทียบ Ripple current ของทั้งสองวงจร

จากผลการทดลอง พบว่า ะลอกคลื่นของกระแสทั้งทางด้านกระแสที่ไหลเข้าและกระแสที่ไหลออกของทั้งสองวงจรมีค่าไม่แตกต่างกัน เนื่องจากทั้งในส่วนทางด้านขาเข้าและขาออกของตัววงจรเหมือนกัน เพียงแต่วงจรที่ถูกพัฒนา เป็นการเปลี่ยนจากไดโอดที่ทำหน้าที่ในการไบอัส เปลี่ยนเป็นการใช้มอสเฟตเข้ามาทำงานแทนเพื่อช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของตัววงจร จึงไม่มีผลทำให้ค่ากระแส Ripple current ของทั้งสองวงจรมีค่าที่แตกต่างกัน

4.4.3.2 การเปรียบเทียบ Ripple Voltage ของทั้งสองวงจร จากการทดลอง เป็นการนำผลการทดลองของทั้งสองวงจร คือวงจรเดิมและวงจรที่ได้ถูกพัฒนาขึ้น มาเปรียบเทียบผลการทดลอง เพื่อหาข้อสรุป โดยทำการเปรียบเทียบกระแส Ripple voltage ทั้งในด้านแรงดันที่ไหลเข้า และ แรงดันที่ไหลออก นำผลลัพธ์รระลอกคลื่นแรงดันมาเปรียบเทียบเป็นแผนภูมิแท่ง ดังรูปด้านล่าง

% Ripple voltage

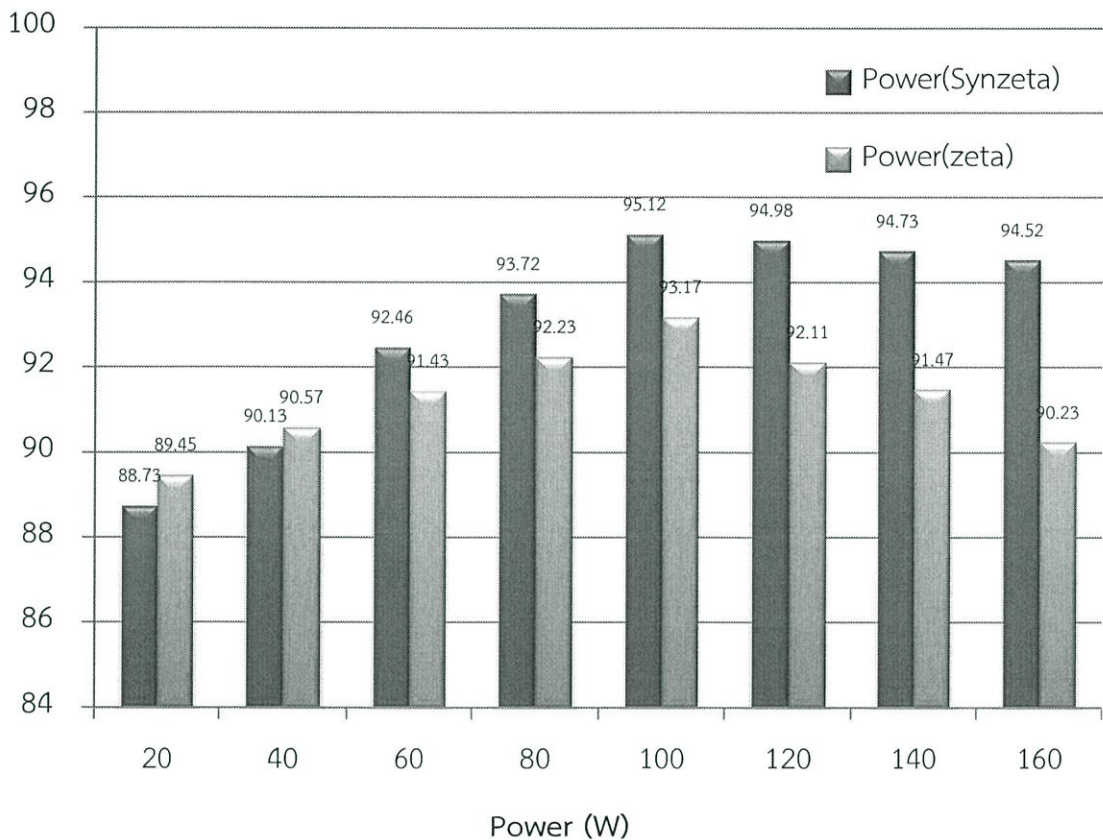


รูปที่ 4.38 ผลการเปรียบเทียบ Ripple voltage ของทั้งสองวงจร

จากผลการทดลอง พบว่า ะลอกคลื่นของแรงดันทั้งทางด้านแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออกของทั้งสองวงจรมีค่าไม่แตกต่างกัน เนื่องจากทั้งสองวงจรมีอุปกรณ์ที่เหมือนกัน เพียงต่างกันที่วงจรเดิมใช้ไดโอดทำหน้าที่ในการไบอัส ถูกเปลี่ยนมาใช้มอสเฟตทำหน้าที่ในการสวิตช์ช่วงของการคายพลังงาน แทน ผลที่ได้คือไม่ทำให้เกิด Over voltage และยังทำให้ประสิทธิภาพของตัววงจรสูงขึ้น % Ripple voltage ที่เกิดขึ้นทั้งทางด้านของแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออกมีค่าไม่ถึง 1% เนื่องจากตัวเก็บประจุ C ที่มีขนาดใหญ่ช่วยให้ % Ripple voltage มีค่าที่ต่ำ ทำให้สัญญาณแรงดันมีคุณภาพสูง

4.4.3.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ จากการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรเดิมและวงจรที่ได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบเป็นแผนภูมิแท่ง สีเทาเข้มคือประสิทธิภาพของวงจรที่ถูกพัฒนา (Synchronous zeta converter) ส่วนสีเทาอ่อน คือวงจรเดิม (zeta converter) การทดลองจะทำการเพิ่มโหลดขึ้นทีละ 20 W จาก 20 W ขึ้นไปถึง 160 W ดังแผนภูมิด้านล่างนี้

% Efficiency



รูปที่ 4.39 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้งสองวงจร

จากผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพของวงจร Synchronous zeta converter ที่ถูกพัฒนาขึ้นมี ประสิทธิภาพมากกว่า วงจรเดิม(zeta converter) ซึ่งหากคิดโหลดที่ 100 W จะมี ประสิทธิภาพสูงถึง 95.12 %Efficiency แต่วงจรเดิมจะมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 93.17 % Efficiency เป็นผลเนื่องมาจากการใช้มอสเฟตเข้ามาทำงานแทนที่ไดโอด ค่า $R_{ds(on)}$ ที่น้อยถึง 13 m Ω ส่งผลให้วงจรที่ถูกพัฒนาขึ้นมี ประสิทธิภาพที่สูงกว่าวงจรเดิมที่ใช้ไดโอดในการไบอัสช่วงคาบเวลาของการคายพลังงาน และ เมื่อเพิ่มโหลดขึ้นประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นไม่ตกลงมาก ยังคงรักษาประสิทธิภาพไว้ได้ค่อนข้างดี

4.5 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดลอง

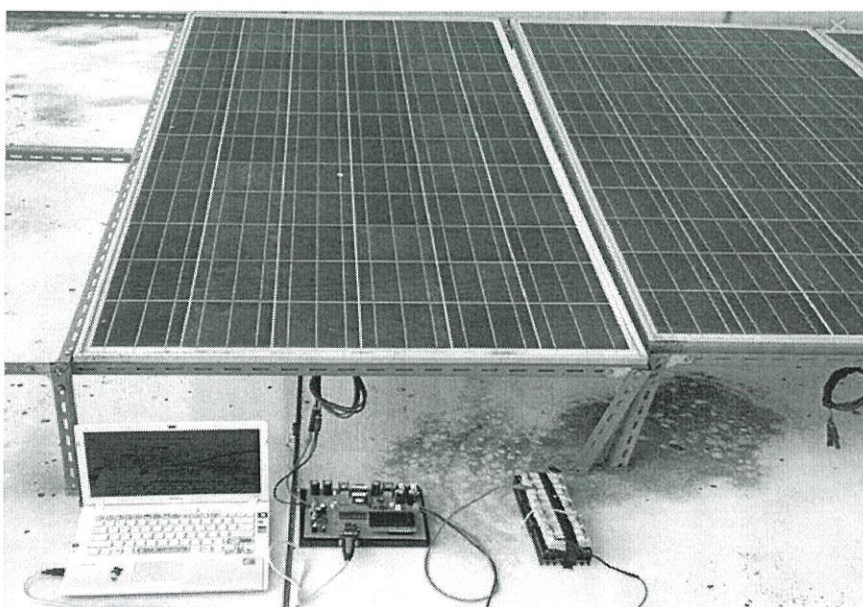
ผลการจำลองและการทดลองทำการเปรียบเทียบที่ กำลังไฟฟ้า 100 W ที่ โหลด แรงดันขาเข้า และขาออกที่ 28 V กระแสขาเข้าและขาออกที่ 3.5 A

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลอง

	ผลการจำลอง		ผลการทดลอง	
	Zeta converter	Synchronous zeta converter	Zeta converter	Synchronous zeta converter
%ripple I(in)	0.30	0.29	0.37	0.34
%ripple I(out)	0.05	0.04	0.06	0.06
%ripple V(in)	0.64	0.64	0.79	0.79
%ripple V(out)	0.52	0.50	0.68	0.64
กำลังไฟฟ้าขาเข้า	105.08	102.54	107.30	105.13
% Efficiency	95.17	97.52	93.17	95.12

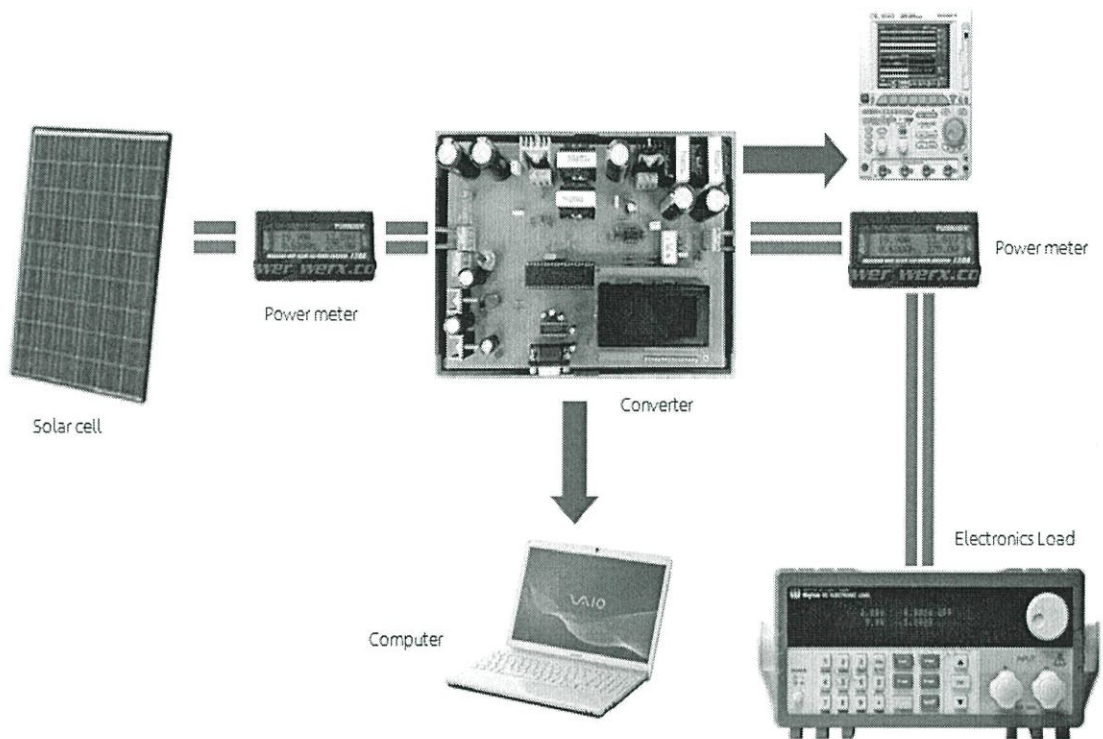
4.6 การนำไปใช้งานในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ทำการทดลองบนตึก ECC สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งผู้ทดลองได้ทำการเก็บผลข้อมูลการทดลองและนำผลการทดลองมาสรุปผล ดังจะแสดงรายละเอียดต่อไป อุณหภูมิใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ประมาณ 40-60 องศาเซลเซียส ความเข้มของแสงอาทิตย์สามารถกำหนดให้มีค่าคงที่ได้จะเปลี่ยนไปตามสภาพอากาศและเมฆที่ทำให้เกิดเงาบังทุกอย่างเป็นไปตามสภาพแวดล้อมจริง เซลล์แสงอาทิตย์ทำมุม 13 องศาหันไปทางทิศใต้



รูปที่ 4.40 การทดลองติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

4.6.1 Diagram การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 4.41 Diagram การทำงานในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

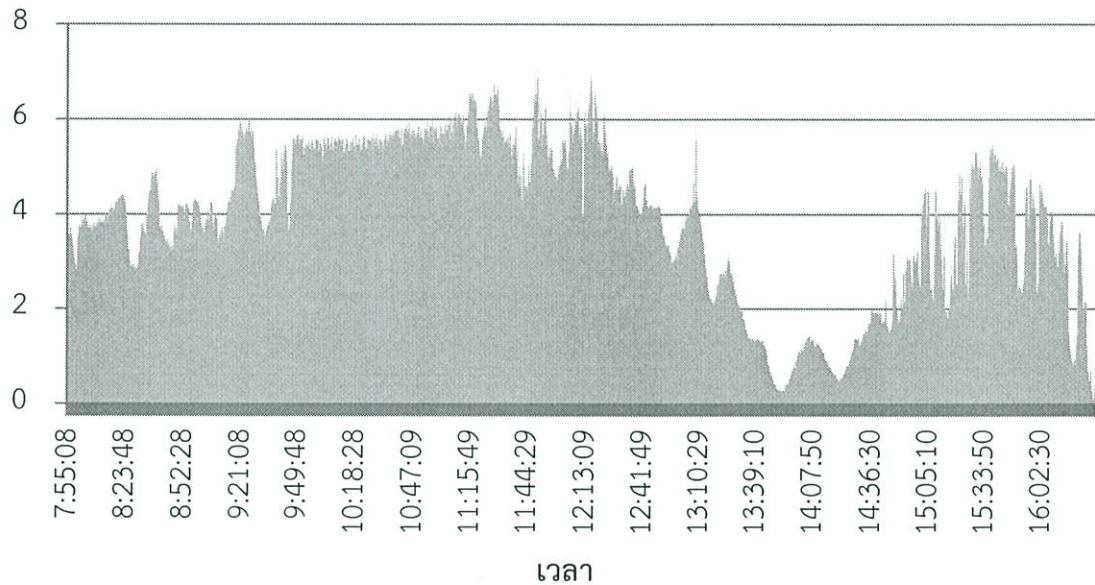
การทดลองติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้จะประกอบไปด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ 285 W จำนวน 1 แผง Power meter จำนวน 2 ตัว คอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับการรับส่งข้อมูลจำนวน 1 เครื่อง โหลด (Electronics Load) พิกัดกำลัง 300 W จำนวน 1 เครื่อง digital oscilloscope จำนวน 1 เครื่อง ผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกแสดงในส่วนของการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

4.6.2 ผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ จะทำการต่อโหลดตลอดระยะเวลาการทำงาน โดยจะทำการเริ่มเก็บค่าพลังงานตั้งแต่ 8.00 น. จนถึง 16.00 น. ทำการเก็บค่าข้อมูลทุกๆ 10 วินาที ส่งผ่านข้อมูลเก็บไว้ที่คอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถทราบพฤติกรรมของจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดตลอดช่วงระยะเวลาที่มีแสงอาทิตย์ จุดที่เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเปลี่ยนไปตามความเข้มของแสงอาทิตย์ และจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผู้วิจัยได้นำข้อมูลมาทำการเขียนกราฟ ทั้งกระแสและแรงดันทางด้านขาเข้า รวมทั้งกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้า ซึ่งมีลักษณะเป็นไปตามทฤษฎี ผลการทดลองจะไม่สามารถมีพฤติกรรมเหมือนการจำลองในอุดมคติ เนื่องจากไม่สามารถที่จะ

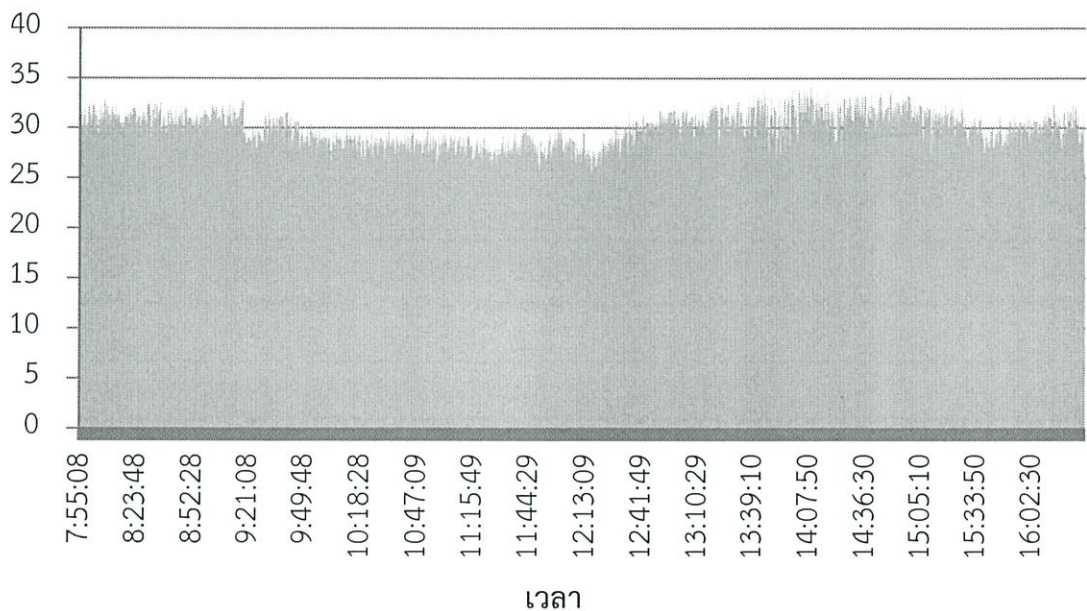
กำหนดธรรมชาติของแสงอาทิตย์และสภาวะแวดล้อมนั้นได้ การเกิดเงาบังเนื่องจากเมฆที่เกิดขึ้นหรือการเกิดฝนตก ความเข้มของแสงอาทิตย์จะมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมในแต่ละช่วง อุณหภูมิก็เช่นเดียวกัน การทดลองในแต่ละช่วงเวลาค่าที่ได้จะมีค่าที่ไม่เหมือนกัน เนื่องจากไม่สามารถควบคุมตัวแปรเหล่านี้ได้นั่นเอง ดังรูปด้านล่างนี้

Current (A)

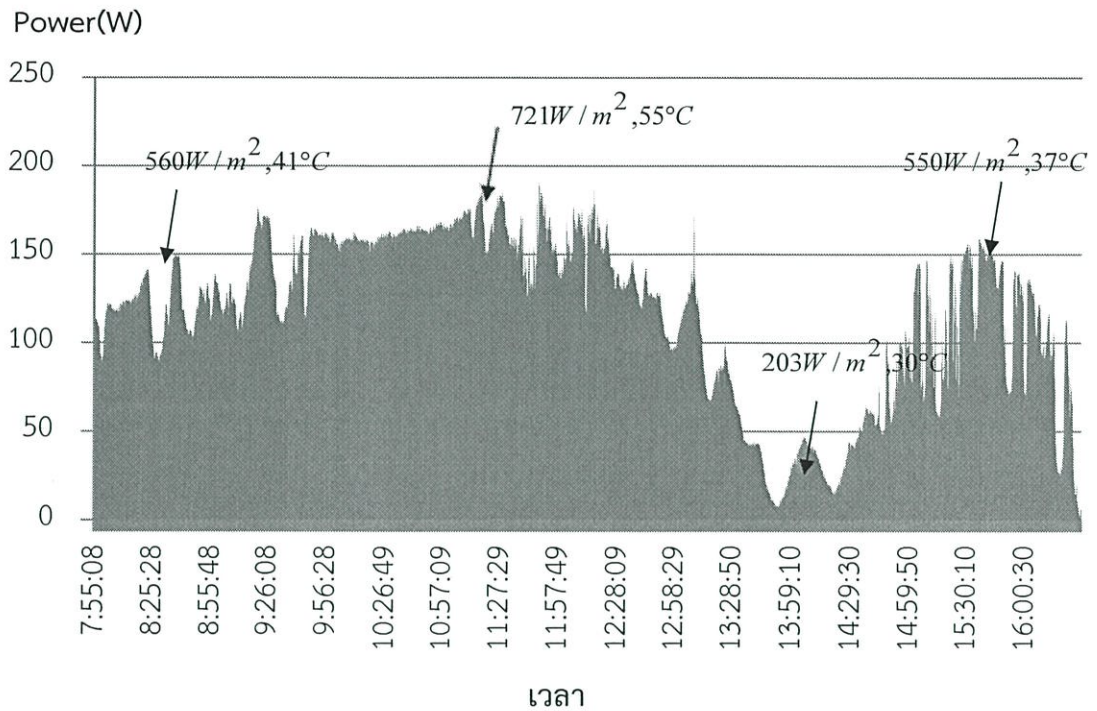


รูปที่ 4.42 กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ เวลานั้นๆ

Voltage(V)



รูปที่ 4.43 แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ เวลานั้นๆ



รูปที่ 4.44 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ เวลานั้นๆ

จากการทดลอง พบว่ากระแสของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะเหมือนกำลังไฟฟ้า เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง จึงทำให้กระแสไฟฟ้ามีผลกับความเข้มของแสงอาทิตย์มาก ส่วนกราฟแรงดันพบว่า แรงดันจะไม่มีเปลี่ยนแปลงมาก เนื่องจากจุดที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะขึ้นอยู่กับกระแสเป็นส่วนใหญ่ หากเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิที่ต่ำ จะทำให้แรงดันมีค่าที่สูงขึ้น ในทำนองเดียวกันหากอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นจะทำให้แรงดันมีค่าที่ต่ำลงนั่นเอง การทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดนี้ ทำให้เห็นพฤติกรรมของกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดระยะเวลาการทำงานทั้งในตอนเช้าที่มีเมฆน้อยอุณหภูมิที่ต่ำ ตอนที่ขมแดดสูงขึ้นอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น ตอนบ่ายเกิดฝนตกทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิที่ต่ำลง และความเข้มของแสงอาทิตย์ต่ำลง และมีเมฆมาก ซึ่งหากมีการเปรียบเทียบกับอุดมคติ กรณีที่ไม่มีเมฆบังหรือสภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลง จะไม่สามารถเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ควรได้ในแต่ละวันได้ การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของวงจรซิงโครนัสซีดีคอนเวอร์เตอร์ มีประสิทธิภาพอยู่ที่ 90-95 % Efficiency

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาต่อไป

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการจำลองและผลการทดลองมีลักษณะแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันเพียงแต่การจำลองจะทำให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์อยู่ที่ 2 %Efficiency ซึ่งจากการทดลองพบว่าวงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ทั้งนี้เป็นเพราะการเลือกใช้การสูญเสียในโหมดที่มอสเฟตทำงานขณะที่มีการนำกระแสที่ไดโอด ดังนั้นการเลือกชนิดของมอสเฟตกับไดโอดมีความสำคัญกับประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ ผลการทดลองยังเปรียบเทียบ % Ripple voltage และ % Ripple current ทั้งกระแสและแรงดันทั้งทางด้านขาเข้าและขาออก พบว่าทั้งวงจรเดิมและวงจรที่ถูกพัฒนาไม่มีความแตกต่างกันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแก้ไขจะเน้นไปที่การเลือกใช้มอสเฟตเข้ามาทำงานแทนที่การทำงานของไดโอดที่ทำหน้าที่ในการไบอัส โดยค่า% Ripple voltage อยู่ที่ไม่เกิน 0.8 % ส่วนค่า % Ripple current อยู่ที่ไม่เกิน 0.4 % วงจรเดิมที่ใช้ไดโอดทำหน้าที่ในการไบอัสมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 93.17 % ส่วนวงจรที่ถูกพัฒนามีประสิทธิภาพอยู่ที่ 95.12 % ซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าอยู่ที่ 2 % และวงจรที่ถูกพัฒนายังสามารถแก้ปัญหาการเกิด Over voltage ขณะไม่มีภาระโหลดได้ ทำให้อุปกรณ์ไม่เกิดความเสียหายเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจากการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วงจรที่ถูกพัฒนาขึ้นทำให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงอยู่ในช่วง 90-95 % Efficiency และยังสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ตลอดช่วงระยะเวลาที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้ที่ความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ค่าต่างๆกัน ไม่ว่าจะมีความเข้มของแสงหรือไม่มีก็ตาม ยังคงสามารถทำงานได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเลือกใช้วงจรไฟเลี้ยงเข้ามาใช้งาน ควรที่จะเลือกแบบ switchingแทนที่แบบ linear เพื่อให้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าที่สูงขึ้นและยังลดการสูญเสียที่เกิดจากการรับพลังงานไฟฟ้าทางด้านขาเข้ามาใช้เลี้ยงระบบคอนโทรลและระบบกำลัง

2. การเลือกใช้ความถี่สวิตซ์ซึ่ง ควรเลือกใช้ความถี่สวิตซ์ซึ่งที่เหมาะสม ควรเลือกใช้ไม่น้อยกว่า 16 kHz เนื่องจากเสียงที่หูเราได้ยินจะเป็นช่วงที่มีความถี่ต่ำกว่านี้ และการเลือกใช้ความถี่ที่สูงเกินไปจะทำให้เกิด switching loss มาก

3. การออกแบบลายวงจรควรคำนึงถึง EMC และ EMI ที่เกิดขึ้นควรจะมีการเขียนลายวงจร โดยมีเส้นกราวด์เข้ามาตีคู่ขนานทุกเส้น และควรเลือกใช้ตัวเก็บประจุให้ถูกประเภทการใช้งาน ขนาดเส้นที่ใช้ในการเขียนลายวงจร ควรเลือกขนาดที่เหมาะสมกับการรองรับกระแสทั้งทางด้านกระแสขาเข้าและกระแสขาออกของวงจร เพื่อให้ไม่เกิดการสูญเสียเนื่องจากสายส่งกำลังมีขนาดที่ไม่เพียงพอ หากกระแสมีค่ามากเกินที่กำหนด จะทำให้เส้นลายวงจรเกิดขาดได้และเป็นผลเสียกับตัววงจร

4. ทฤษฎีที่ใช้การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ผู้วิจัยได้นำเสนอทฤษฎีการรบกวนและสังเกต (P&O) ควรมีการศึกษาทฤษฎีอื่นๆเพิ่มเติมเพื่อให้การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีเสถียรภาพสูงขึ้น

5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป

จากผลทดลองที่ผ่านมาพบว่าวงจรที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด มีประสิทธิภาพที่สูง มีค่ากระแสและแรงดันกระแสที่ต่ำ และยังสามารถแก้ปัญหาการเกิด Over voltage ขณะไม่มีภาระโหลดได้ เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ ข้อเสียที่ยังคงต้องพัฒนาต่อไปคือการลดขนาดของอุปกรณ์ให้เล็กลงเพื่อที่จะสามารถติดกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ และคงต้องมีการตรวจจับอุณหภูมิและความชื้นของแสงอาทิตย์ เพื่อความแม่นยำให้การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ ช่วงเวลานั้นๆ

การเก็บข้อมูลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์ เป็นสิ่งที่จะเป็นนាំการนำข้อมูลเข้ามาวิเคราะห์ควรจะมีการรับข้อมูลได้หลายส่วนและสามารถที่จะรับข้อมูลแบบไร้สาย ซึ่งจะทำได้ง่ายและสะดวกต่อการใช้งานในการเลือกดึงข้อมูลเข้ามาวิเคราะห์ ซึ่งจากเดิมที่ใช้สายสัญญาณ สามารถเชื่อมต่อได้เพียงหนึ่งตัวเท่านั้นและยังมีข้อเสียตรงที่ต้องวางคอมพิวเตอร์ไว้ใกล้ๆ ทำให้ไม่สามารถที่จะวิเคราะห์ค่าต่างๆได้สะดวก ซึ่งหากใช้การรับสัญญาณแบบไร้สายและสามารถรับข้อมูลได้หลายวงจร จะทำได้ง่ายต่อการใช้งานและสะดวกต่อการรับข้อมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละวงจร

เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Blaabjerg, A. Consoli, J. A. Ferreira, J. D. Vanwyk. "The future of electronic power processing and conversion", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, No. 1, 2005, pp. 3-8.
- [2] B. K. Bose. "The past, present, and future of power electronics – Guest introduction", *IEEE on Industrial Electronics Magazine*, vol. 3, No. 2, 2009, pp. 7-11.
- [3] O. Stalter, D. Kranzer, S. Rogalla, B. Burger. "Advanced Solar Power Electronics", in *Proc. of International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs - ISPSD*, 2010, pp. 3-10.
- [4] E. Niculescu, M. C. Niculescu, D. M. Purcaru "Modelling the PWM Zeta Converter in Discontinuous Conduction Mode" *Electrotechnical Conference*, 2008, pp. 651-657.
- [5] Matthew C. Kessler. "Synchronous Inverse SEPIC Using the ADP1870/ADP1872 Provides High Efficiency for Noninverting Buck/Boost Applications" AN-1075, pp. 1-7.
- [6] W. Gu. "Designing A SEPIC Converter", *National Semiconductor*, Application Note 1484, June 2007, pp.1-6.
- [7] R. C. Viero, H. F. M. Lopez, C. A. Zollmann, F. S. dos Reis "Dynamic Modeling of a Sinusoidal Inverter Based on ZETA Converter Working in DCM for PV Arrays" *Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2010, pp.439 – 444.
- [8] J. Falin. "Designing DC/DC converters based on SEPIC topology", *Analog Applications Journal*, 2008, pp.1-6.
- [9] T. Kerekes, R. Teodorescu, M. Liserre, R. Mastromauro, and A. Dell'Aquila, "MPPT algorithm for Voltage Controlled PV Inverters," *Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, 2008. OPTIM 2008. 11th International Conference on, No. 22-24, 2008, pp. 427-432
- [10] รศ.ดร.วีรเชษฐ์ ชันเงิน, วุฒิพล ชาราธิ์เศรษฐ์ "อิเล็กทรอนิกส์กำลัง" พิมพ์ครั้งที่ 3 สำนักพิมพ์ ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ.พรินติ้ง, 2548

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [11] บริษัท บางกอกโซลาร์ จำกัด. ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบอิสระ (Stand Alone Solar Systems). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก:<http://www.bangkokksolar.com/th/products/detail.php?id=21&SystemModuleKey=product>
- [12] บริษัท Solar watt จำกัด. Thin film solar panels. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก:<http://www.solarwattage.org/thinfilmsolar-panels/>
- [13] Ningbo Huashun Solar Energy Technology Co., LTD. monocrystalline solar cell.[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://nbsolar.en.hisupplier.com/product-188089-Monocrystalline-Solar-Cell.html>
- [14] Jon klein “Synchronous buck MOSFET loss calculations with Excel model” เข้าถึงได้จาก:<https://www.fairchildsemi.com/application-notes/AN/AN-6005.pdf>.2557
- [15] Ningbo Huashun Solar Energy Technology Co., LTD. Polycrystalline solar cell.[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://nbsolar.en.hisupplier.com/product-188247-Polycrystalline-Solar-Cell.html>.2557
- [16] K. H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and M. Osakada, “Maximum photovoltaic power tracking: An algorithm for rapidly changing atmospheric conditions”, *IEEE Proceedings on Generation, Transmission, and Distribution*, 142, 1995, pp. 59-64.
- [17] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. แผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้า. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก:http://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=782&Itemid=889.2557
- [18] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method”, *IEEE Transactions on industrial electronics.*, Vol. 20, No. 4, 2005, pp. 963-973
- [19] กรมพลังงานทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงานทหาร. หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www1.mod.go.th/opsd/dedweb/Km%20web/Solar%20working/KM%20solar%20working.htm>

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [20] บริษัท Fairchildsemi จำกัด. “Design and Application Guide of Bootstrap Circuit for High-Voltage Gate-Drive IC” 2008 Semiconductor Corporation. Fairchild [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://www.fairchildsemi.com/application-notes/AN/AN-6076.pdf>
- [21] บริษัท Solar frontier จำกัด. Thin-film Solar Frontier’s new SF130–150 module [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.solarclarity.nl/wp-content/uploads/2011/09/Solar-Frontier-datasheet.pdf>
- [22] บริษัท Suntect Power จำกัด. POLYCRYSTALLINE SOLAR MODULE [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.civicsolar.com/sites/default/files/documents/datasheetstp285vdpoly20pcscardboardpackaging-69707.pdf>

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่

*i*EECON 2014

2014 INTERNATIONAL ELECTRICAL ENGINEERING CONGRESS

Pattaya, Thailand
March 19-21, 2014

SEART IEEE

Conference at a Glance Message from General Chair Keynote Speakers Paper List Paper Search
iEECON 2014 Committee Message from TPC Chair PDF Viewer Download Sponsor Venue

Copyright © 2014 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.
IEEE Catalog Number CP1402X-USB
ISBN 978-1-4799-3173-6

Comparison on Performance between Synchronous Single-ended Primary-inductor Converter (SEPIC) and Synchronous ZETA Converter

Kaweepoj Woranetsuttikul, Kittapas Pinsuntia , Nattawat Jumpasri,
Taywin Nilsakorn and Werachet Khan-ngern

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

Abstract--This paper presents the performance comparison of synchronous single-ended primary-inductor converter (SEPIC) and synchronous ZETA focusing on the converter efficiency and the output waveform quality. The conventional SEPIC and ZETA converters operated in Buck and Boost modes were modified to the synchronous SEPIC and synchronous ZETA converters to improve the converter efficiency. The operating conditions were setup where the duty cycle was operated from 0.3 to 0.7 for covering buck-boost modes at the continuous current mode. Two switching frequencies at 20 kHz and 40 kHz were operated to compare the effect of switching loss and conduction loss where the efficiency was concerned. Finally, the converter efficiency and the ripple factor of the output voltage were concluded.

Index Terms -Synchronous SEPIC converter, Synchronous Zeta converter, Efficiency, Ripple factor

I. INTRODUCTION

The PV energy technology evolution is rapidly grown. The power electronic was applied to the MPPT for increasing the highest power, low loss and compact size by the high efficiency equipment. The system can work in standalone mode by tiny power which is produced from itself [1] [2] [4]. Therefore the power electronic equipment is necessary to produce in the PV system. So the equipment were made for lifetime and high efficiency [3] [4].

In present, DC-DC converters were used even more. So the converters have to work in buck mode and boost mode for step-up or step-down voltage as required. In this paper presents the synchronous single-ended primary-inductor converter (SEPIC) system and the synchronous ZETA converter system. The characteristic is as buck-boost mode. The circuit design was the same as the ripple voltage and efficiency parameters. Those circuits used two inductors which can join the core for reducing the PCB size and for economic reason. The capacitor C_{fly} released the power to output side and protected the shorted load [5]. Both circuits can work in the continuous conduction mode (CCM) and the discontinuous conduction mode (DCM) [6] [7]. Section II introduces the basic converter operation. Section III presents the simulation

and their results. Section IV shows the experimental results and the analysis of the two circuits with two operating switching frequencies. Section V concludes the performance comparison.

II. Synchronous SEPIC and Synchronous ZETA converters

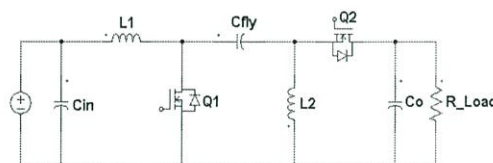


Fig. 1. Equivalent circuit of synchronous SEPIC converter

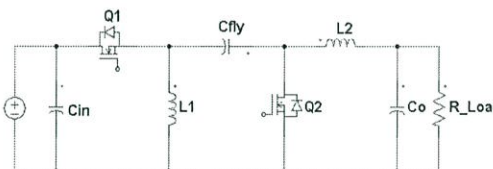


Fig. 2. Equivalent Circuit of Synchronous ZETA converter

Fig. 1 shows the equivalent circuit of Synchronous SEPIC converter and Fig. 2 shows the equivalent circuit of Synchronous Zeta converter, consist of an input capacitor, C_{in} ; an output capacitor, C_o ; coupled inductors L_1 and L_2 ; an AC coupling capacitor, C_{fly} ; a power FET, Q_1 and Q_2 [8].

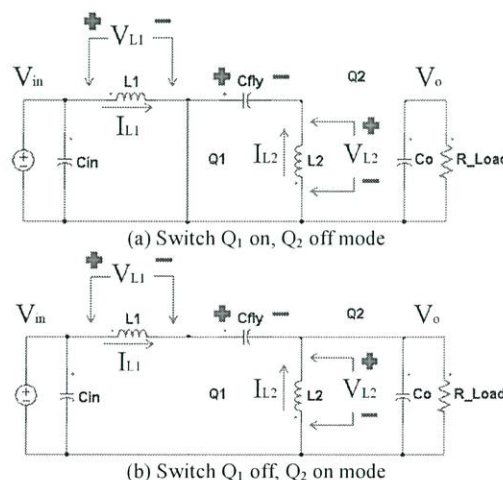


Fig. 3. Synchronous SEPIC during CCM operation

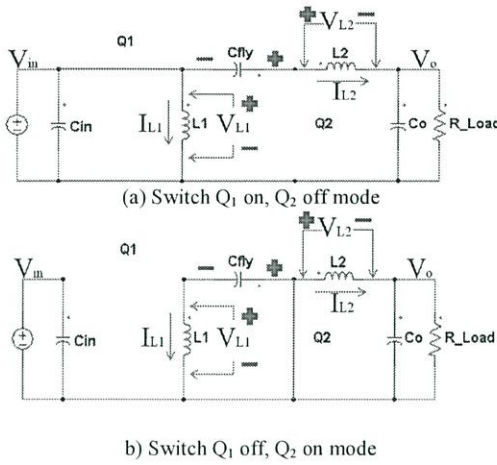


Fig. 4 Synchronous ZETA during CCM operation

Fig. 3 and Fig. 4 show the Synchronous SEPIC and Synchronous ZETA operating in continuous conduction mode (CCM). They used dsPIC30F4011 to generate PWM signals for gate controlling. Q_1 is on, Q_2 is off shown in Figures 3 (a) and 4 (a) respectively. Q_1 is off, Q_2 is on shown in Figures 3 (b) and 4 (b) respectively. To understand the voltages at the various circuit nodes, it is important to analyze the circuit at DC when Q_1 is off, Q_2 is on. During steady-state CCM, pulse-width modulation (PWM) operation, and neglecting ripple voltage, capacitor C_{fly} is charged to the input voltage, V_{in} . Knowing this, it can easily determine the voltages.

When Q_1 is off, Q_2 is on, the voltage across L_2 must be V_{out} . Since C_{in} is charged to V_{in} , the voltage across Q_1 when Q_1 is off, Q_2 is on equals $V_{in} + V_{out}$, so the voltage across L_1 is V_{out} . When Q_1 is on, Q_2 is off, capacitor C_{fly} , charged to V_{in} , is connected in parallel with L_2 , so the voltage across L_2 is $-V_{in}$. Q_1 is on, Q_2 is off, energy is being stored in L_1 from the input and in L_2 from C_{fly} . When Q_1 turns off, Q_2 turns on, L_1 's current continues to flow through C_{fly} and Q_2 , and into C_{out} and the load. Both C_{out} and C_{fly} get recharged so that they can provide the load current and charge L_2 , respectively, when Q_1 turns back on and Q_2 turns back off [4][5][8]. Both operation are open loop system.

A. Duty cycle

Assuming 100% efficiency, the duty cycle, D for synchronous SEPIC converter and synchronous ZETA converter operating in CCM is given by

$$V_0 = V_{in} \times \frac{D}{1-D} \quad (1)$$

B. Component selection for Synchronous SEPIC and Synchronous zeta

$$L1 = \frac{V_{in,max} \times V_0}{I_{ripple} \times f \times (V_{in,max} + V_0)} \quad (2)$$

Where $L_1 = L_2$,

$$I_{DC} = \frac{I_0 \times V_0}{V_{in,min} \times Eff} \quad (3)$$

$$I_{sat} \geq 1.15 \times I_{DC} \quad (4)$$

$$C_{fly} = \frac{I_0 \times V_0}{(V_{in} + V_0) \times f \times V_{ripple}} \quad (5)$$

$$C_{in} = I_0 \times \frac{1}{2 \times f \times 0.18V} \quad (6)$$

$$C_o = \frac{I_{ripple}}{8 \times V_{ripple} \times f} \quad (7)$$

The main parameters for both Synchronous SEPIC and ZETA converter are summarized in Equation (2) to (8) [8].

C III. SIMULATION RESULTS

The simulation results worked in the Powersim program. The system switching frequency was at 20 kHz. Simulation parameters are setup as shown in Table 1.

A. parameters component for simulation

Table 1 Simulation parameters

C_{in}	1000 μF	C_{out}	1000 μF
L_1	100 μH	C_{fly}	1000 μF
MOFET	IRF 2807	$R_{ds(on)}$	13 m Ω

B. The simulation comparison of Synchronous SEPIC and Synchronous ZETA converters

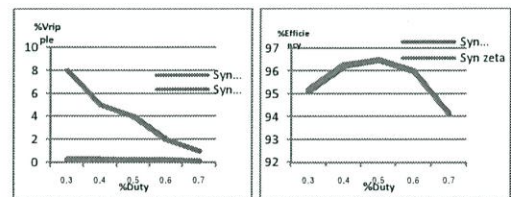


Fig. 5 The efficiency and output ripple voltage comparison of Synchronous SEPIC and Synchronous ZETA converter

The efficiency of Synchronous Zeta is little more than Synchronous SEPIC at 0.3-0.7 duty cycle. The output ripple voltage of Synchronous Zeta is significant lower than that of Synchronous SEPIC converters because there is the characteristic of LC low pass filter of the Synchronous ZETA converter.

IV. Experimental Results and Analysis

The experiment aims to evaluate the two performance parameters of converter efficiency and output waveform quality in term of voltage ripple factor for both of Synchronous SEPIC and ZETA converters based on the operating as follows:

1. To vary duty ratio from 0.3 step to 0.7 to cover the Buck mode and Boost mode,
 2. To compare the losses system at 20 kHz and 40 kHz,
 3. To control the DC load via electronic load from 0 W to 160 W with 20 W stepping,
- The parameter and testing circuit of Synchronous SEPIC and ZETA converters are shown in Table 2 and Figures 6 and 7. The DC input voltage is supplied at 28V.

A. Component parameters for experiments

Table 2 the experimental parameters

C_{in}	1000 μ F	C_{out}	1000 μ F
L_1	100 μ H	L_2	100 μ H
C_{fly}	1000 μ F	f_s	20 kHz
MOSFET	IRF 2807	$R_{ds(on)}$	13 m Ω

B. Experimental circuit

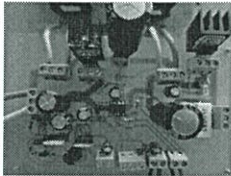


Fig. 6 Synchronous SEPIC circuit

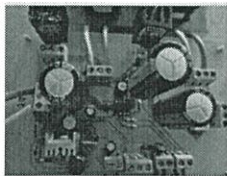


Fig. 7 Synchronous ZETA circuit

C. Synchronous SEPIC results

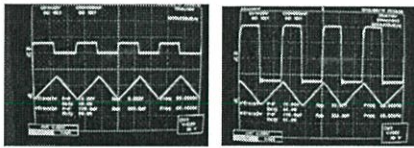


Fig. 8 Gate Signal at Q₁, Q₂ and Current at L₁

The complementary gate signals of Synchronous SEPIC converter between Q₁ and Q₂ are shown in Figure 8 where the inductance current through L₁ result in opposite direction.

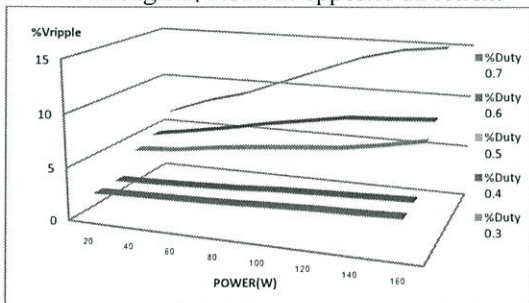


Fig. 9 Output voltage ripple factor at 0.3-0.7 duty cycle

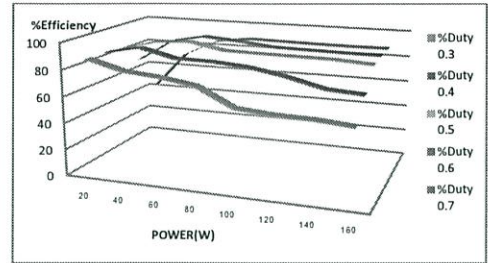


Fig. 10 The output power efficiency at 0.3-0.7 duty cycle

The Synchronous SEPIC results in higher output voltage ripple factor when the duty cycle is increased. Higher load also results in higher output ripple voltage factor shown in Figure 9. At duty cycle 0.7, 160W, output voltage ripple factor reach 15%.

The efficiency of the Synchronous SEPIC is higher at high load when the duty cycle is increased from 0.3 to 0.7. while at lower load, efficiency is lower when the duty cycle is increased from 0.3 to 0.7 shown in Figure 10.

D. Synchronous ZETA results

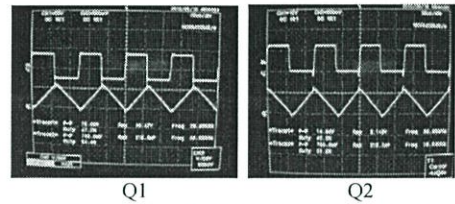


Fig. 11 Gate Signal at Q₁, Q₂ and Current at L₁

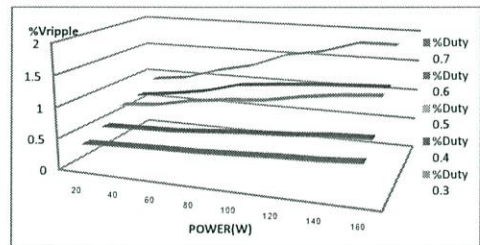


Fig. 12 Ripple voltage output at various duty cycle

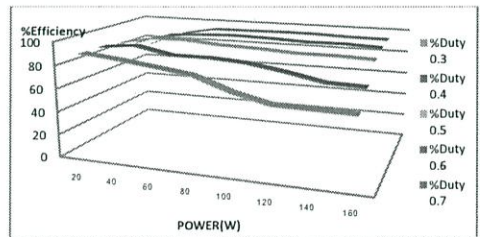
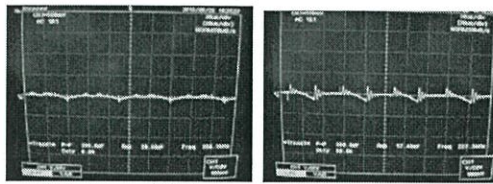


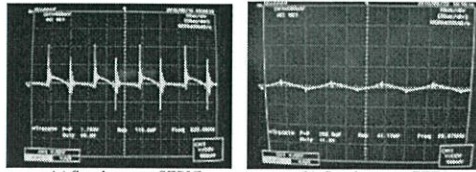
Fig. 13 The output power efficiency at 0.3-0.7 duty cycle

The pattern of Synchronous ZETA results the trend of output ripple voltage factor and efficiency as in the Synchronous SEPIC converter as shown in Figures 12 and 13 except the output ripple voltage factor of the Synchronous SEPIC converter much higher than of that Synchronous ZETA converter.

E. The Performance Comparison between Synchronous SEPIC and Synchronous ZETA converter

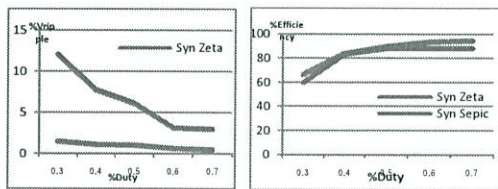


(a) Synchronous SEPIC (b) Synchronous ZETA
Fig. 14 Input ripple voltage



(a) Synchronous SEPIC (b) Synchronous ZETA
Fig. 15 Output ripple voltage

It is clarified that the Synchronous SEPIC results in better in input ripple voltage while worse in output ripple voltage shown in Figures 14, 15 and 16 (a). Figure 16 (b) and Figure 17 shown the slightly advantage of Synchronous ZETA converter comparing to of that Synchronous SEPIC converter in term of efficiency.



(a) output ripple voltage (b) efficiency
Fig. 16 comparison of output ripple voltage and output power efficiency at 0.3-0.7 duty cycle

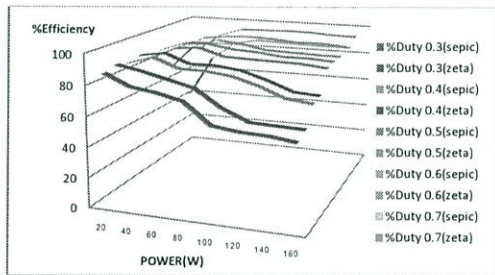
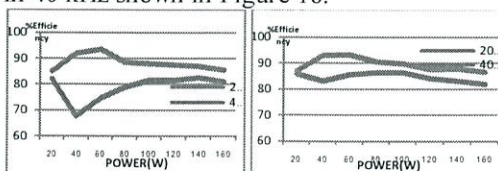


Fig. 17 The output power efficiency at 0.3-0.7 duty cycle

F. 20 kHz and 40 kHz switching frequency comparison

The comparison of both converters with double switching frequency shows the effect of switching loss to reduce the peak efficiency from 93% down to 85.6% at 50% duty cycle. In general, the synchronous ZETA results in higher efficiency in wide load range particular in 40 kHz shown in Figure 18.



(a) Synchronous SEPIC converter (b) Synchronous ZETA converter
Fig. 18 Comparison of power efficiency of Synchronous SEPIC and ZETA converter at 20 kHz and 40 kHz

V. CONCLUSIONS

The performance of the Synchronous ZETA converter and the Synchronous SEPIC converter was setup and compared. The component parameter and the operating condition are controlled at wide range of duty cycle, wide loads and two selected switching frequencies. It is clarified that the Synchronous ZETA converter performs a better performance than of that Synchronous SEPIC converter in term of efficiency at low switching frequency and result more benefit if the switching loss domination in the total loss.

In term of power quality of output ripple voltage factor, the Synchronous ZETA converter gives a better solution over the Synchronous SEPIC converter. This can lead the choice of DC-DC converter output quality due to their LC parameters, However, the Synchronous SEPIC converter can be selected in term of application on conducted electromagnetic interference issue due to a lower output ripple voltage factor.

REFERENCES

- [1] F. Blaabjerg, A. Consoli, J. A. Ferreira, J. D. Vanwyk. "The future of electronic power processing and conversion", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, No. 1, 2005, pp. 3-8.
- [2] B. K. Bose. "The past, present, and future of power electronics - Guest introduction", *IEEE on Industrial Electronics Magazine*, vol. 3, No. 2, 2009, pp. 7-11.
- [3] O. Stalter, D. Kranzer, S. Rogalla, B. Burger. "Advanced Solar Power Electronics", in *Proc. of International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs - ISPSD*, 2010, pp. 3-10.
- [4] E. Niculescu, M. C. Niculescu, D. M. Purcaru "Modelling the PWM Zeta Converter in Discontinuous Conduction Mode" *Electrotechnical Conference*, 2008, pp. 651-657.
- [5] Matthew C. Kessler. "Synchronous Inverse SEPIC Using the ADP1870/ADP1872 Provides High Efficiency for Noninverting Buck/Boost Applications" AN-1075, pp. 1-7.
- [6] W. Gu. "Designing A SEPIC Converter", *National Semi-conductor*, Application Note 1484, June 2007, pp.1-6.
- [7] R. C. Viero, H. F. M. Lopez, C. A. Zollmann, F. S. dos Reis "Dynamic Modeling of a Sinusoidal Inverter Based on ZETA Converter Working in DCM for PV Arrays" *Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2010, pp.439 – 444.
- [8] J. Falin. "Designing DC/DC converters based on SEPIC topology", *Analog Applications Journal*, 2008, pp.1-6.

ภาคผนวก ข

โปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

```

//-----:Include & Config clock
#include <p30fxxx.h>           // generic header file for dsPIC
#include <stdio.h>            // for sprintf();
#include <math.h>             // for sqrt();

_FOSC(CSW_FSCM_OFF & XT_PLL4); // Sw Disabled, Mon Disabled,XT w/PLL 1x
_FWDT(WDT_OFF);              // Watchdog timer off

//-----:Define
#define FULL_DUTY             400           //for Fpwm 20 kHz
#define TRUE                  1
#define FCY                   4000000UL
#define BAUDRATE              9600
#define ROUND                 20
#define DISABLE_FIRING       PWMCON1=0x0000
#define ENABLE_FIRING        PWMCON1=0x0011
#define START_TIMER          T1CONbits.TON=1
#define STOP_TIMER           T1CONbits.TON=0
#define DONE                 ADCON1bits.DONE

//-----:Global Variable
double per_duty=0;
int duty=0;
int tick=0;
unsigned update_lcd=0;
unsigned update_uart=0;
unsigned int RB0d, RB1d, RB2d, RB3d;      //RB Digital Value (0-1023)
double RB0a, RB1a, RB2a, RB3a;          //RB Analog Value (0-3.3)
double RB0Avg, RB1Avg, RB2Avg, RB3Avg;

```

```

double Vin, Vout, Iin, Iout, Pin, Pout;

double Po;

int Do;

//-----:Function Prototype
void Setup_PWM(void);
void Setup_ADC(void);
void Delay_MS(unsigned int ms);
void Setup_TIMER(void);
void Setup_UART(void);
void SendMsg(const char *TXPtr);
void Read_sensor(void);
void PnOb(void);

//-----:Library
#include "LCD16x4.c"

//-----:ISRs
//-----:TIMER Interrupt
void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _T1Interrupt (void)
{
    STOP_TIMER;    // หยุดนับเวลา
    update_lcd=1;  // เซ็ตแฟลกอัปเดท LCD เป็น 1
    if(++tick==10)
    {
        update_uart=1;
        tick=0;
    }

    IFS0bits.T1IF = 0;
    return;
}

```

```

//-----:Main
int main(void)
{
    char buf[17];
    char buf2[100];
    LCDInit();           // เรียกใช้ฟังก์ชัน LCD
    LCDClrscr();        // เคลียร์หน้าจอ
    LCDPrintxy(1,1,0,"Synchronous ZETA");           // บรรทัดที่ 1
    LCDPrintxy(1,2,0," By MoJo ");                 // บรรทัดที่ 2
    Setup_TIMER();     // เรียกใช้ฟังก์ชัน Timer (นับเวลาเพื่อให้จออัปเดต)
    Setup_PWM();       // เรียกใช้ฟังก์ชัน PWM
    Setup_ADC();       // เรียกใช้ฟังก์ชัน ADC
    Setup_UART();      // เรียกใช้ฟังก์ชัน UART
    Delay_MS(5000);    // ดีเลย์ 5 วินาที
    while(1)
    {
        LCDClrscr();   // เคลียร์หน้าจอ
        // แสดงว่าเป็นโหมด No load
        LCDPrintxy(1,1,0,"NOLOAD [ 0.0]");           // บรรทัดที่ 1
        LCDPrintxy(1,2,0,"Pin : 0.0 W ");           // บรรทัดที่ 2
        LCDPrintxy(1,3,0,"Pout: 0.0 W ");           // บรรทัดที่ 3
        LCDPrintxy(1,4,0,"Eff : 0.0% ");           // บรรทัดที่ 4
        per_duty=50;                                  // เซ็ตค่าดีวตีไซเคิลเริ่มต้นที่ 50%
        duty = per_duty/100.0*FULL_DUTY;
        PDC1 = duty;
        ENABLE_FIRING;                               // เริ่มจ่าย PWM ตามค่าดีวตีไซเคิล
        do{
            Read_sensor(); // อ่านค่ากระแส และแรงดัน
        }while(!(Pin>10)); // เช็คว่กำลังไฟฟ้ามากกว่า 10 วัตต์หรือไม่
        // ถ้าเกิน 10 วัตต์แสดงว่ามีโหลด ให้หาจุด MPP ได้
        // ถ้าไม่ถึง 10 วัตต์แสดงว่าไม่มีโหลดให้วนลูปเช็คไปเรื่อยๆจนกว่าจะมีการต่อโหลด
    }
}

```

```

LCDClrscr(); // เคลียร์หน้าจอ
// แสดงว่าเป็นโหมด Tracking
LCDPrintxy(1,1,0,"NOLOAD [ 0.0]"); // บรรทัดที่ 1
LCDPrintxy(1,2,0,"Pin : 0.0 W "); // บรรทัดที่ 2
LCDPrintxy(1,3,0,"Pout: 0.0 W "); // บรรทัดที่ 3
LCDPrintxy(1,4,0,"Eff : 0.0% "); // บรรทัดที่ 4

Po=Pin; // เก็บค่า P1
Do=per_duty; // เก็บค่า D1

per_duty++; // เพิ่มค่าตัวชี้ไซเคิลขึ้น 1
duty = per_duty/100.0*FULL_DUTY;
PDC1 = duty; // เซ็ตให้คอนเวอร์เตอร์
Delay_MS(50);
START_TIMER; // เริ่มนับเวลาเพื่ออัปเดตหน้าจอ
while( TRUE ) // ลูปอินฟินิตี
{
    if(update_lcd) // อัปเดตหน้าจอทุกๆ 200 ms
    { // แสดงผลออกทาง LCD
        sprintf(buf,"%4.1f",per_duty); // โหลดค่าไว้ในตัวแปร buf
LCDPrintxy(12,1,0,buf); // แสดงผลค่าใน buf ที่บรรทัดที่ 1
        sprintf(buf,"%5.1f",Pin); // โหลดค่าไว้ในตัวแปร buf
LCDPrintxy(7,2,0,buf); // แสดงผลค่าใน buf ที่บรรทัดที่ 2
        sprintf(buf,"%5.1f",Pout); // โหลดค่าไว้ในตัวแปร buf
LCDPrintxy(7,3,0,buf); // แสดงผลค่าใน buf ที่บรรทัดที่ 3
        sprintf(buf,"%4.1f",Pout/Pin*100); // โหลดค่าไว้ในตัวแปร buf
LCDPrintxy(8,4,0,buf); // แสดงผลค่าใน buf ที่บรรทัดที่ 4
        update_lcd=0; // เซ็ตแฟลกอัปเดต LCD เป็น 0
    }
    if(update_uart)

```

```

    { Read_sensor(); // อ่านค่าจากเซนเซอร์
      // แสดงผลออกทาง UART
    sprintf(buf2,"Vin : %.2fV\t\tVout : %.2fV\t\tlin : %.2fA\t\tlout : %.2fA\t\tPin : %.2fW\t\t
    Pout : %.2fW\t\tDuty : %.2f\r\n",Vin,Vout,lin,lout,Pin,Pout,per_duty);
      // โหลดค่าไว้ในตัวแปร buf2
    SendMsg(buf2);
    update_uart=0; // เซ็ตแฟลกอัปเดต UART เป็น 0
    }
    START_TIMER; // เริ่มนับเวลาเพื่ออัปเดตหน้าจอ
    }
    PnOb();
    if(Vout>60 || Pin<10) // เช็คค่าโวลตยังเชื่อมต่ออยู่หรือไม่ หรือ เกิด over voltage หรือ
    break; // ถ้าเกิดขึ้นให้หยุดการหาจุด MPP
    }
    }
    return 0;
    }

//-----:Function
//-----:Setup PMW
void Setup_PWM(void)
{
    PTPER = FULL_DUTY/2; // With 4 MHz Fcy and no prescaler

    SEVTCMP = FULL_DUTY/2; // Trigger occurs just before switch turns off
    PWMCON1 = 0x0000; // Enable pwm #1, Complementary mode
    DTCON1 = 8; // Deadtime 2 us (2us*4M=8)
    PDC1 = 0; // Duty 0

    PWMCON2 = 0x0002; // No Special Event Prescale, Fast Overrides, Updates enabled

```

```

PTCON = 0x8000; // Timebase On, runs in idle, no post or prescaler, free-running
IFS2bits.PWMIF = 0;
return;
}

//-----:Setup ADC10bits
void Setup_ADC(void)
{
    ADPCFG = 0xFFE0; // AN0-4 is Analog PORT
    ADCON1 = 0x006E; // Use PWM Trigger, continuous simulatenous sampling
    ADCON2 = 0x043C; // Use Avdd/Avss, 1 samples, scan CH0+, 16 sequence/interrupt
    ADCHS = 0x0000; // Connect AN0->CH0
    ADCON3 = 0x1F3F; // Not using auto sample, sampling 31TAD, clock of 128*TQ
    ADCSSL = 0xFFFF; // Scan input select unused
    IFS0bits.ADIF = 0; // Clear Off Any Interrupt Due To Configuration
    IPC2bits.ADIP = 3; // ADC Priority 3 (medium)
    ADCON1bits.ADON= 1; // Turn on ADC Module
return;
}

//-----:Delay_MS
void Delay_MS(unsigned int ms)
{
    unsigned int i;
    for (; ms>0; ms--)
        for (i=0; i<728; i++)
            Nop(); // delay 1 mch cycle
return;
}

//-----:Timer
void Setup_TIMER(void)

```

```

{
    //      1s  100ms  200ms
    PR1=3125;//15625;//1563;//3125;    // update every 1 s
    T1CON=0x0030; // Prescale 1:256
    IFS0bits.T1IF = 0;
    IPC0bits.T1IP = 1;
    IEC0bits.T1IE = 1;

    return;
}
//-----:UART
void Setup_UART(void)
{
    U1MODE = 0x8400; //UART enable & run in IDEL & ALTX,ALRX & no-wake-up
    U1STA  = 0x0000;//Interrupt on TXBUF becoming empty & UART TX
    U1BRG  = (FCY/(16.0*BAUDRATE))-1; //set buadrte 9600
    U1STAbits.UTXEN = 1; //Enable TX
    return;
}
//-----:Sent Data
void SendMsg(const char *TXPtr)
{
    while(*TXPtr)
    {
        while(U1STAbits.UTXBF);
        U1TXREG = *TXPtr++;
    }
    return;
}
//-----:Read sensor

```

```

void Read_sensor(void)
{
    unsigned int i;

    RB0Avg = 0;
    RB1Avg = 0;
    RB2Avg = 0;
    RB3Avg = 0;
    for(i=0; i<20; i++){
        DONE = 0;
        while(!DONE);
        RB0d = ADCBUF0;
        RB0a = (float)RB0d / 100.0;
        RB0Avg += pow(RB0a,2);
    }
    RB0Avg /= 20.0;
    RB0Avg = sqrt(RB0Avg);

//-----config Vout-----
Vout = 8.6982 * RB0Avg + 0.107746;      //<---แทนค่าสมการ Vout
if( Vout<0 ) Vout = 0;

    for(i=0; i<40; i++){
        DONE = 0;
        while(!DONE);
        RB1d = ADCBUF1;
        RB1a = (float)RB1d / 100.0;
        RB1Avg += pow(RB1a,2);
    }
    RB1Avg /= 40.0;
    RB1Avg = sqrt(RB1Avg);

//-----config Iout-----

```

```

lout = 2.6985 * RB1Avg + (-13.924);    //<----แทนค่าสมการ lout
                                        if( lout<0 ) lout = 0;
                                        for(i=0; i<10; i++){
                                            DONE = 0;
                                            while(!DONE);
                                            RB2d = ADCBUF2;
                                            RB2a = (float)RB2d / 100.0;
                                            RB2Avg += pow(RB2a,2);
                                        }
                                        RB2Avg /= 10.0;
                                        RB2Avg = sqrt(RB2Avg);

//-----config Vin-----
Vin = 8.7719 * RB2Avg + 0.45088;    //<----แทนค่าสมการ Vin
                                        if( Vin<0 ) Vin = 0;
                                        for(i=0; i<50; i++){
                                            DONE = 0;
                                            while(!DONE);
                                            RB3d = ADCBUF3;
                                            RB3a = (float)RB3d / 100.0;
                                            RB3Avg += pow(RB3a,2);
                                        }
                                        RB3Avg /= 50.0;
                                        RB3Avg = sqrt(RB3Avg);

//-----config lin-----
lin = 1.6334 * RB3Avg + (-8.4349);    //<----แทนค่าสมการ lin
                                        if( lin<0 ) lin = 0;

//-----config Pin-----
                                        Pin = lin*Vin;

//-----config Pout-----

```

```

Pout = Iout*Vout;
return;
}
/*
//-----:Read pot
void Read_pot(void)
{
    unsigned int pot=ADCBUF4;
    actual_pot=actual_pot+pot;
    // ทำ digital filter แบบง่าย
    actual_pot=actual_pot>>1;
    duty=0.4251*actual_pot-17.4282;
    // ปุ่มปรับทำงานในช่วง 0.2v - 4.8v
    if(duty>240) duty=240;
    // จำกัดดิวตี้ที่ 60 % (0.6*400=240)
    else if(duty<0) duty=0;
    else;
    per_duty=duty/(double)FULL_DUTY*100;    // คำนวณค่าดิวตี้เป็นเปอร์เซ็นต์
    //PDC1=duty;
    // เซ็ตดิวตี้ให้ 1H 1L
return;
}
*/
//-----:Perturb and Observe Methods
void PnOb(void)
{
    Read_sensor();
    float dP = Pin-Po;
    float dD = per_duty-Do;

```

```

if(dD!=0){
    if( dP/dD >= -0.5 ) {Do=per_duty;per_duty++;}
        // PP is to the right of the MPPT
    else {Do=per_duty;per_duty--;}
        // PP is to the left of the MPPT
}
if(per_duty>60) {per_duty=60;Do=59;}
    // ลิมิตค่าดิวิตั้ไซเคิลที่ 0-60%
else if(per_duty<0) {per_duty=0;Do=1;}
else;
Po=Pin;
duty = per_duty/100.0*FULL_DUTY;
PDC1 = duty; // เซ้ตค่าดิวิตั้ไซเคิลให้กั้บคอนเวอร์เตอร์
Delay_MS(100);
}
//-----:End

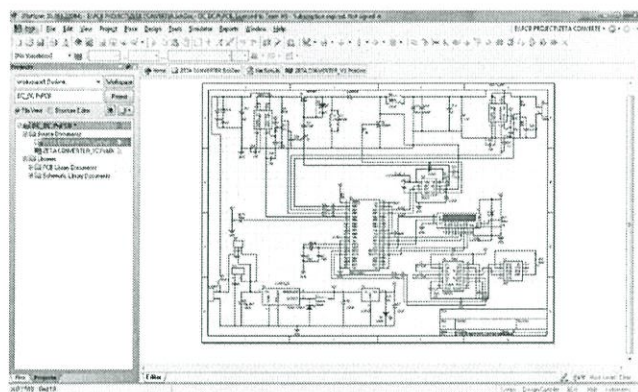
```

ภาคผนวก ค
การออกแบบลายวงจร

โปรแกรมที่ใช้ในการเขียนลายวงจรมีอยู่หลายโปรแกรม อาทิ เช่น Protel 99SE , Altium เป็นต้น ในที่นี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม Altium เข้ามาใช้ในการเขียนลายวงจร รูปร่างหน้าตาของตัวโปรแกรมจะเป็นดังรูปด้านล่างนี้



Altium Designer Program



เมนูการทำงานของโปรแกรม Altium

จากรูปด้านบน จะเป็นด้านหน้าของตัวโปรแกรม ส่วนในรูปด้านล่าง จะเป็นรายละเอียดในตัวโปรแกรมซึ่ง สามารถแบ่งออกเป็นรายละเอียดได้ดังนี้

3.4.1.1 Schematic คือการนำอุปกรณ์ที่ถูกสร้างขึ้น เข้ามาเชื่อมต่อกันให้เป็นวงจร ในหน้านี้จะเป็นการต่อวงจรแต่ละวงจรให้เสร็จสิ้น เพื่อที่จะสามารถนำอุปกรณ์ไปเขียนเป็นลายวงจรได้ หรือเป็นการอัปเดตเข้าไปสู่ชั้นเขียนลายวงจร (PCB) นั้นเอง สามารถเพิ่มหรือลดอุปกรณ์ได้ การนำเอา R, L, C เข้ามาต่อในวงจร วงจรชั้บเกต ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ได้ออกแบบ วงจรแสดงผล และวงจรตรวจจับสัญญาณ เข้ามาเชื่อมต่อกัน

3.4.1.2 PCB คือการเขียนลายวงจร การวางตำแหน่งของอุปกรณ์ที่เหมาะสม การเลือกตำแหน่งในการเรียงอุปกรณ์ การกำหนดขนาดของเส้นทองแดง และการเลือกขนาดความกว้างยาวของบอร์ด PCB กำหนดขนาดของรูที่ใช้ในการเจาะ ในขั้นตอนนี้จะสามารถเห็นรูปร่างหน้าตาของบอร์ดที่ถูกสร้างขึ้น

3.4.1.3 Schematic library คือการสร้างอุปกรณ์ขึ้นมาเพื่อที่จะนำไปใช้งานในหน้า Schematic ได้เช่น ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ตัวขับเคลื่อน regulator ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ไม่มีในโปรแกรม เราจำเป็นต้องสร้างมันขึ้นมาเอง

3.4.1.4 PCB library คือการเลือกขนาดของอุปกรณ์ อ้างอิงตามขนาดจริง รูปร่างที่ใช้สำหรับเจาะ รูปร่างหน้าตาของอุปกรณ์ ขนาดของขาอุปกรณ์ และ ความกว้างยาวของอุปกรณ์ ซึ่งหากกำหนดขนาดอุปกรณ์ผิด เมื่อปริ้นลายวงจรไปแล้ว จะทำให้ไม่สามารถใส่อุปกรณ์ขึ้นนั้นลงไปได้พอดี หรือใส่ไม่ได้เลย

ภาคผนวก ง

ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011

dsPIC30F เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล 4011/2010dsPIC30F ซึ่งเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น 28 Pin เบอร์ dsPIC30F40 หรือ รุ่น 2010 Pin เบอร์ dsPIC30F ของ 4011 Microchips เป็น MCU ประจำบอร์ด โดย dsPIC30F เป็น 4011/2010MCU ซึ่งใช้การประมวลผลข้อมูลแบบ บิต จากค่า 16ย Microchips ซึ่งมีจุดเด่นในด้านของความสามารถในการประมวลผลข้อมูลสัญญาณแบบดิจิตอลเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในงานควบคุมต่างๆ โดยโครงสร้างภายในจะเป็นการผสมผสานระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) และวงจร DSP (Digital Signal Processing) รวมเข้าไว้ด้วยกัน หรืออาจเรียก MCU ตระกูล dsPIC30F ว่าเป็น DSC หรือ Digital Signal Controller ก็ได้ โดยโครงสร้างของบอร์ด ET-BASE dsPIC30Fได้รับการ 4011/2010 ออกแบบให้บอร์ดมีขนาดเล็ก เหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นหลัก โดยภายในบอร์ดได้บรรจุเอาวงจรถูกจำเป็นต้องการใช้งาน และสะดวกต่อการพัฒนาโปรแกรม มีความยืดหยุ่น สามารถปรับเปลี่ยนสัญญาณ/I/O เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะต่างๆให้สอดคล้องและเหมาะสมกับความต้องการใช้งานได้ในหลายๆลักษณะตามต้องการคุณสมบัติของบอร์ด เลือกใช้ MCU ตระกูล dsPIC30F หรือ 2010dsPIC30F ของ 4011Microchips เป็น MCU ประจำบอร์ด โดยคุณสมบัติเด่นๆของ MCU ได้แก่

1. หน่วยความจำ Flash 12 Kbyte (dsPIC20F2010) หรือ 48 Kbyte (dsPIC30F4011)
2. มีหน่วยความจำ RAM ขนาด 512 Byte (dsPIC30F2010) หรือ 2 Kbyte(dsPIC30F40)
3. มีหน่วยความจำ EEPROM ขนาด 1 Kbyte สำหรับเก็บข้อมูลใช้งาน
4. มีพอร์ต I/O ขนาด 19 Bit (dsPIC30F2010) หรือ 29 Bit (dsPIC30F4011)
5. มี 16Bit Timer/Counter จำนวน 3 ชุด (dsPIC30F2010) หรือ 5 ชุด (dsPIC30F4011)
6. มี Input Capture จำนวน 4 ช่อง
7. มี Output Compare จำนวน 2 ช่อง (dsPIC30F2010) หรือ 4 ช่อง (dsPIC30F4011)
8. มี ADC10Bit/500 Ksps จำนวน 6 ช่อง (dsPIC30F2010) หรือ 9 ช่อง (dsPIC30F4011)
9. มี PWM Motor Control จำนวน 6 ช่อง พร้อม Quadrature Encode Interface(QEI)
10. มี UART จำนวน 1 ช่อง (dsPIC30F2010) หรือ 2 ช่อง (dsPIC30F4011)
11. มี SPI จำนวน 1 ช่อง และ มี I2C จำนวน 1 ช่อง
12. มีวงจรถูก Watchdog, Power-ON Reset, PWM
13. ใช้ Crystal ความถี่ 7.3728MHz สามารถใช้ PLLคูณความถี่เพื่อ Run ความถี่

29.491MHz

14. มีพอร์ตสื่อสารอนุกรม UART แบบ RS232 จำนวน 1ช่อง สำหรับdsPIC30F2010 และ 2ช่อง สำหรับ dsPIC30F4011 พร้อม Jumper สำหรับเลือกใช้งาน UART หรือ GPIO ได้ตามต้องการ โดยใช้ขั้วต่อ UART แบบ CPA-4 Pin มาตรฐาน อีทีที

15. มีขั้ว ICSP มาตรฐาน ICD2 แบบ RJ11 สำหรับใช้ร่วมกับชุดพัฒนาโปรแกรมและ Debugger ที่รองรับการทำงานตามมาตรฐาน ICD2 ของ Microchips เช่น ICD2 หรือ Pickit2 ได้

16. มี Switch สำหรับสลับสัญญาณระหว่าง Program/Debug(PGM) และ ใช้งานปรกติ (RUN) พร้อม LED แสดงโหมดการทำงานของบอร์ด

17. มีขั้วต่อสัญญาณ I/O แบบ Header ขนาด 2x5 จำนวน 3ชุดและHeader 1x8 Pinอีก 1ชุด

18. มี Header 14Pin สำหรับ Character LCD พร้อม VR ปรับความสว่าง

19. มี Switch Reset สำหรับสั่ง Reset การทำงานของ MCU ภายในบอร์ด

20. มี LED สำหรับทดสอบการทำงาน โดยใช้ RB0 ในการควบคุม พร้อม Jumper ตัดต่อสัญญาณ

21. Power AC/DC Input พร้อม Regulate แบบ Switching เบอร์ LM2575 ขนาด 5V/1A ลดปัญหาความร้อนจากวงจร Regulate และ LED แสดงสถานะแหล่งจ่าย Power

22. ขนาด PCB Size เล็กเพียง 8 x 6 cm.

โมดูลแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลโมดูลแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 10 บิต (10-bit high-speed analog-to-digital converter) หรือโมดูล ADC เป็นโมดูลรับแรงดันอนาลอกแปลงสัญญาณเป็นตัวเลขความละเอียดขนาด 10 บิต โมดูล ADC ของ dsPIC30F4011 มีจำนวน 9 ช่องสัญญาณ ประกอบไปด้วยขา AN0/RB0, AN1/RB1, AN2/RB2, AN3/RB3, AN4/RB4, AN5/RB5, AN6/RB6, AN7/RB7 และ AN8/RB8 บล็อกไดอะแกรมและวงจรการทำงานของโมดูล ADC

โดยมีคุณสมบัติพื้นฐานของโมดูลดังนี้

1. แปลงสัญญาณข้อมูลแบบประมาณค่าหรือซัคเซสซีฟ แอ็ปพร็อกซิเมชัน (Successive Approximation : SAR)
2. ความเร็วในการแปลงสัญญาณมากถึง 500 ksps (500,000 จุดตัวอย่างต่อวินาที)
3. มีช่องอินพุตสัญญาณอนาลอก 9 ช่อง
4. อินพุตรับแรงดันอ้างอิงจากภายนอกได้
5. มีวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ (S/H amplifiers) 4 ชุด

6. สุ่มเก็บสัญญาณได้มากถึง 4 ช่องอินพุตสัญญาณอนาลอก
7. กำหนดช่องการอ่านค่าสัญญาณได้อัตโนมัติ
8. เลือกแหล่งกระตุ้นการแปลงสัญญาณอนาลอกได้
9. มีบัฟเฟอร์เก็บข้อมูลสัญญาณ 16 ตัวขนาด 16 บิต
10. เลือกโหมดการเก็บข้อมูลแบบเต็มบัฟเฟอร์ได้
11. กำหนดการแสดงผลข้อมูลสัญญาณดิจิตอลได้ 4 รูปแบบ
12. กำหนดการทำงานได้ในโหมดสลิปและโอเตล

รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของโมดูล 10-bit ADC การทำงานของโมดูลแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลจะเกี่ยวข้องกับรีจิสเตอร์ 2 กลุ่มด้วยกันคือ รีจิสเตอร์ควบคุมและรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์ข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. รีจิสเตอร์บัฟเฟอร์ข้อมูล (ADC Data Buffer) รีจิสเตอร์บัฟเฟอร์ข้อมูลจำนวน 16 ตัวขนาด 10 บิต ใช้ในการเก็บข้อมูลที่ได้อจากการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล (อ่านได้อย่างเดียว) ประกอบไปด้วย ADCBUF0 ถึง ADCBUFF (ADC Buffers 0 – ADC Buffers F)

2. รีจิสเตอร์ควบคุมโมดูล ADC โมดูล ADC มีรีจิสเตอร์ควบคุมและแสดงสถานะการทำงานของโมดูล 6 ตัวดังนี้

- 2.1 รีจิสเตอร์ควบคุม ADCON1 (ADC Control Register 1)

- 2.2 รีจิสเตอร์ควบคุม ADCON2 (ADC Control Register 2)

- 2.3 รีจิสเตอร์ควบคุม ADCON3 (ADC Control Register 3) รีจิสเตอร์ ADCON1 ถึง ADCON3 เป็นรีจิสเตอร์ควบคุมและกำหนดการทำงานของโมดูล ADC

- 2.4 ADCHS (ADC Input Channel Select Register) รีจิสเตอร์เลือกขาอินพุตสำหรับเชื่อมต่อกับวงจร S/H (Sample and Hold amplifiers)

- 2.5 ADPCFG (ADC Port Configuration) รีจิสเตอร์กำหนดเงื่อนไขการทำงานของขาพอร์ตอินพุตเป็นอินพุตอนาลอก หรืออินพุตเอาต์พุตสัญญาณดิจิตอล

- 2.6 ADCSSL (ADC Input Scan Select Register) เป็นรีจิสเตอร์เลือกขาอินพุตสำหรับการเรียงลำดับการอ่านสัญญาณอนาลอก

การใช้งานโมดูล ADC มีขั้นตอนดังนี้

1. การเปิดใช้งานโมดูล ADC

- a. เลือกขาพอร์ตสำหรับอินพุตอนาลอกผ่านทางรีจิสเตอร์ ADPCFG<15:0> บิตที่ 0 ถึงบิตที่ 15

- b. เลือกแหล่งแรงดันอ้างอิงสำหรับอินพุตอนาล็อกผ่านทางรีจิสเตอร์ ADCON2<15:13> บิตที่ 13 ถึงบิตที่ 15
- c. เลือกสัญญาณนาฬิกาสำหรับใช้ในการแปลงสัญญาณอนาล็อกผ่านทางรีจิสเตอร์ ADCON3<5:0> บิตที่ 0 ถึงบิตที่ 5
- d. กำหนดจำนวนช่องสุ่มเก็บสัญญาณ (S/H) ผ่านทางรีจิสเตอร์ ADCON2<9:8> บิตที่ 8 ถึงบิตที่ 9 ควบคู่กับรีจิสเตอร์ ADPCFG<15:0>
- e. กำหนดช่องสุ่มสัญญาณ (Sampling) ผ่านทางรีจิสเตอร์ ADCON1<3> บิตที่ 3 ควบคู่กับการสแกนสัญญาณอินพุตผ่านทางรีจิสเตอร์ ADCSSL<15:0> บิตที่ 0 ถึงบิตที่ 15
- f. กำหนดจำนวนอินพุตที่จองไว้สำหรับช่องสุ่มเก็บสัญญาณผ่านทางรีจิสเตอร์ ADCHS<15:0>
- g. เลือกรูปแบบการสุ่มและแปลงสัญญาณผ่านทางรีจิสเตอร์ ADCON1<7:0> บิตที่ 0 ถึงบิตที่ 7 และรีจิสเตอร์ ADCON3<12:8> บิตที่ 8 ถึงบิตที่ 12
- h. กำหนดรูปแบบของข้อมูลที่ได้จากการแปลงสัญญาณผ่านทางรีจิสเตอร์ ADCON1<9:8> บิตที่ 8 ถึงบิตที่ 9
- i. เลือกรูปแบบการเกิดอินเตอร์รัปต์ผ่านทางรีจิสเตอร์ ADCON2<5:2> บิตที่ 2 ถึงบิตที่ 5

2. เปิดใช้งานโมดูล ADC ผ่านทางรีจิสเตอร์ ADCON1<15> บิตที่ 15

- a. การเปิดใช้งานอินเตอร์รัปต์ (หากต้องการ)
- b. เคลียร์บิต ADIF อินเตอร์รัปต์แฟล็ก
- c. เลือกระดับความสำคัญของอินเตอร์รัปต์

โมดูล MCPWM โมดูล Motor Control PWM (MCPWM) เป็นโมดูลพื้นฐานสำหรับสร้างสัญญาณ PWM (pulse width modulated) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ชนิดต่างๆ เช่น

1. มอเตอร์แบบเฟสเดียว
2. มอเตอร์กระแสสลับแบบสามเฟส (Three-Phase AC Induction Motor)
3. มอเตอร์แบบสวิตช์ต้านทานแม่เหล็ก SR (Switched Reluctance Motor)
4. มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน BLDC (Brushless DC Motor)
5. UPS (Uninterruptable Power Supply) เครื่องสำรองไฟฉุกเฉินและสามารถประยุกต์ใช้กับการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ได้อีกด้วย

คุณสมบัติที่สำคัญของโมดูล MCPWM

1. ฐานเวลาที่ใช้มีความละเอียด $T_{cy}/2$ ของขอบสัญญาณ PWM
2. เลือกให้ทำงานในโหมดเอาต์พุตพร้อมกัน (Complementary Output Mode)

หรือทำงานในโหมดเอาต์พุตอิสระ (Independent Output) ได้

3. ฮาร์ดแวร์สามารถสร้างค่าเวลาวิกฤต (dead time) ได้
4. กำหนดสัญญาณเอาต์พุตได้ด้วยกระบวนการทางซอฟต์แวร์ (Configuration bit)
5. กำหนดโหมดเอาต์พุตคู่ได้
6. มีฮาร์ดแวร์อินพุตตรวจสอบความผิดพลาด (fault) ได้ด้วยการโปรแกรม
7. สร้างสัญญาณกระตุ้นพิเศษสำหรับโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลได้

dsPIC30F ได้เตรียมโมดูลสร้างสัญญาณ MCPWM จำนวนเอาต์พุต 6 และ 8 ช่อง โดยมี

คุณสมบัติ สำหรับ dsPIC30F4011 จะมีจำนวนเอาต์พุต 6 ช่อง และอินพุต 1 ช่องประกอบไปด้วย

1. ขาพอร์ตเอาต์พุตควบคุมสัญญาณ PWM ได้แก่
 - เอาต์พุต PWM ชุดที่ 1: ขาพอร์ต PWM1L/RE0, PWM1H/RE1
 - เอาต์พุต PWM ชุดที่ 2: ขาพอร์ต PWM2L/RE2, PWM2H/RE3
 - เอาต์พุต PWM ชุดที่ 3: ขาพอร์ต PWM3L/RE4, PWM3H/RE5
2. ขาพอร์ตอินพุตตรวจสอบความผิดพลาด ได้แก่ ขาพอร์ต FLTA/RE8 สำหรับโมดูล

MCPWM แบบ 6 ช่องเอาต์พุต ถูกใช้ในงานควบคุมแบบ 3 เฟส ขณะที่ 8 ช่องเอาต์พุตจะถูกใช้ในงานมอเตอร์แบบ 4 เฟส

รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงาน รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของโมดูล MCPWM มีรายละเอียดดังนี้

1. รีจิสเตอร์ PTCN (PWM Time Base Control register) รีจิสเตอร์กำหนดโหมดการทำงานและควบคุมของโมดูล MCPWM เช่น เปิด/ปิดการทำงานของโมดูล กำหนดค่าการนับ (ค่าโพสสเกลเลอร์) ต่อการเกิดอินเตอร์รัปต์ ค่าปรีสเกลเลอร์สำหรับฐานเวลาและโหมดการทำงานของโมดูล MCPWM

2. รีจิสเตอร์ PTMR (PWM Time Base register) รีจิสเตอร์ฐานเวลาการนับของโมดูล MCPWM นับเวลาได้สูงสุดเท่ากับ 32768 ค่า (ใช้เพียง 15 บิตในการนับ) โดยบิตสูงสุดบิตที่ 15 บิต PTDIR เป็นบิตตรวจสอบการนับของฐานเวลาว่าเป็นการนับขึ้น (PTDIR = 0) หรือเป็นการนับลง (PTDIR = 1)

3. รีจิสเตอร์ PTPER (PWM Time Period register) รีจิสเตอร์ควบคุมการนับของรีจิสเตอร์ PTMR เป็นรีจิสเตอร์กำหนดคาบเวลาหรือความถี่ของโมดูล MCPWM
4. รีจิสเตอร์ SEVCMP (PWM Special Event Compare register) จะกำหนดค่าเวลาเพื่อกระตุ้นการทำงานโมดูลแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอล (A/D)
5. รีจิสเตอร์ PWMCON1 (PWM Control register #1) กำหนดหน้าที่การทำงานของขาขับสัญญาณ PWM ให้ทำงานอิสระหรือทำงานเป็นคู่และกำหนดให้เป็นขาขับสัญญาณเอาต์พุต PWM หรือเป็นขาอินพุต/เอาต์พุตดิจิตอลปกติ
6. รีจิสเตอร์ PWMCON2 (PWM Control register #2) เป็นรีจิสเตอร์กำหนดค่าโพสสเกลเลอร์ (Post scale) สำหรับกระตุ้นการทำงานของโมดูล A/D, กำหนดโหมดการทำงานของสัญญาณสัมพันธ์กับ PWM หรือสัญญาณนาฬิกา (Tcy), เปิด/ปิดการแปลงสัญญาณ PWM กับรีจิสเตอร์บัพเฟอร์คาบเวลาและรีจิสเตอร์กำหนดดิวิตีไซเคิล
7. รีจิสเตอร์ DTCON1 (Dead Time Control register #1) มีหน้าที่กำหนดค่า Dead Time และค่าปรีสเกลเลอร์ของสัญญาณนาฬิกา
8. รีจิสเตอร์ DTCON2 (Dead Time Control register #2) จะกำหนดค่า Dead Time สำหรับเอาต์พุตสัญญาณ PWM
9. รีจิสเตอร์ FLTACON (Fault A Control register) กำหนดโหมดการทำงานของส่วนตรวจสอบข้อผิดพลาดชุด A และเปิดการใช้งานส่วนอินพุตตรวจสอบข้อผิดพลาดชุด A สำหรับสัญญาณ PWM
10. รีจิสเตอร์ FLTBCON (Fault B Control register) กำหนดโหมดการทำงานของส่วนตรวจสอบข้อผิดพลาดชุด B และเปิดการใช้งานส่วนอินพุตตรวจสอบข้อผิดพลาดชุด B สำหรับสัญญาณ PWM
11. รีจิสเตอร์ PDC1 – PDC4 (PWM Duty Cycle register #1-#4) สำหรับกำหนดค่าดิวิตีไซเคิลสัญญาณเอาต์พุต PWM ชุดที่ 1 ถึง 4
12. รีจิสเตอร์ FBORPOR (BOR and POR Device Configuration register) เป็นรีจิสเตอร์กำหนดชุดควบคุมการรีเซตของสัญญาณจากอินพุตเอาต์พุตพอร์ตหรือโมดูลของชุดขับสัญญาณ PWMxH และ PWMxL

ไดอะแกรมการทำงานของโมดูล MCPWM รายละเอียดบล็อกไดอะแกรมโมดูล MCPWM โดยแบ่งชุดควบคุมและทำงานออกเป็นดังนี้

1. รีจิสเตอร์ควบคุมเวลานับ (PTMR period register)

รีจิสเตอร์ PTMR นำไปเปรียบเทียบกับรีจิสเตอร์ PTPER เพื่อกำหนดคาบเวลาหรือความถี่ให้กับสัญญาณ MCPWM และเปรียบเทียบกับรีจิสเตอร์ PDC1 ถึง PDC4

2. ชุดสร้างสัญญาณ PWM (PWM Generator)

โมดูล MCPWM สามารถที่จะสร้างสัญญาณ PWM ได้มากถึง 4 ชุดเอาต์พุต ที่มีคาบเวลาเดียวกันแต่มีค่าดิวตี้ไซเคิลที่แตกต่างกันได้ โดยที่ชุดสร้างสัญญาณเอาต์พุต PWM จำนวน 4 ชุดจะพบได้ใน dsPIC30F ที่มีจำนวนขาพอร์ตตั้งแต่ 64 ขาเป็นต้นไป การสร้างดิวตี้ไซเคิลใน PWM Generator นั้นจะผ่านชุดควบคุมการสร้างค่าเวลาวิกฤตและชุดควบคุมลอจิก (Dead Time Generator and Override Logic) โดยสัญญาณเอาต์พุตจะผ่านไปยังชุดควบคุมลอจิกก่อนที่จะให้สัญญาณเอาต์พุต PWM ไปที่ขา MCPWM ที่เปิดใช้งานและให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นคู่ (PWMxH และ PWMxL) เพื่อความสะดวกในการขับสัญญาณทางด้านต่ำและทางด้านสูงของอุปกรณ์จำพวก Power Half-Bridge

3. ขาอินพุต PMW Fault

มีคุณสมบัติตรวจสอบเพื่อป้องกันไม่ให้โมดูล MCPWM ทำงานผิดพลาด โดยขาอินพุต FLTA และ FLTB จะถูกต่อเข้ากับสัญญาณเอาต์พุตของอุปกรณ์เพื่อรับอินพุตเข้าสู่ส่วนตรวจสอบความผิดปกติในโมดูล เพื่อให้ทำงานตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ 2 รูปแบบคือ

1. โหมดแลตช์(Latched Mode) สัญญาณเอาต์พุต PWM จะทำงานตามสัญญาณที่กำหนดไว้ในรีจิสเตอร์ FLTxCAN และยังคงทำงานจนกว่าขา FLTA หรือ FLTB กลับมามีสถานะ High หรือลอจิก '1' และต้องเคลียร์บิตแฟลกอินเตอร์รัปต์ FLTxFIF ด้วยซอฟต์แวร์
2. โหมดไซเคิลต่อไซเคิล(Cycle-by-Cycle Mode) สัญญาณเอาต์พุต PWM จะทำงานตามที่กำหนดไว้ในรีจิสเตอร์ FLTxCAN และสัญญาณยังคงทำงานจนกว่าขา FLTA หรือ FLTB กลับมามีสถานะ High หรือ ลอจิก '1'

สัญญาณกระตุ้นพิเศษ (PMW Special Event Trigger) คุณสมบัติที่สำคัญของฐานเวลา PWM มีดังนี้

1. ฐานเวลาหรือคาบเวลาของ PWM มีขนาด 15 บิต ควบคุมการนับได้สูงสุดเท่ากับ 32768 ใช้เพื่อเพื่อกำหนดโหมดการทำงานดังนี้
 - โหมดการทำงานอิสระ (Free Running mode)
 - โหมดการนับครั้งเดียว (Single Event mode)
 - โหมดการนับขึ้นลงต่อเนื่อง (Continuous Up/Down Count mode)

- โหมดการนับขึ้นลงต่อเนื่องพร้อมอินเทอร์รัปต์ปรับปรุงค่า (Continuous Up/Down Count mode with interrupts for double-updates)

2. ความละเอียดของสัญญาณ PWM เท่ากับ $T_{cy}/2$

3. ทำงานร่วมกับปริสเกลเลอร์และโพสสเกลเลอร์ บล็อกไดอะแกรมของฐานเวลา PWM แสดงดังรูปที่ xxx โดยมีรีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือ PTMR การนับขึ้นหรือนับลงตรวจสอบได้ในบิต PTDIR (PTMR<15>) ถ้าเท่ากับ '1' นับลง เท่ากับ '0' นับขึ้น การทำงานของฐานเวลาจะถูกควบคุมด้วยบิต PTEN (PTCON<15>) รีจิสเตอร์ PTMR จะไม่ถูกเคลียร์ค่าเมื่อบิต PTEN (บิตควบคุมการทำงานของฐานเวลา PWM) จะถูกเคลียร์ด้วยกระบวนการทางซอฟต์แวร์

การปรับของสัญญาณ (PWM Edge-Aligned PWM) การปรับของสัญญาณ PWM การทำงานในรูปแบบนี้เป็นผลมาจากฐานเวลาของ PWM ในโหมดการทำงานอิสระ (Free Running Mode) สัญญาณ PWM จะถูกควบคุมจากรีจิสเตอร์ PTPER (รีจิสเตอร์คาบเวลาควบคุมการนับของรีจิสเตอร์ฐานเวลาการนับ), PDC1 และ PDC2 จากรูปที่ xxx ที่รีจิสเตอร์ PTMR เท่ากับ 0 ขอบขาสัญญาณของ PWM1H และ PWM2H จะขับสัญญาณ High (ลอจิก '1') และจะยังคงสัญญาณ High เมื่อ PTMR นับขึ้น จนมีค่าเท่ากับรีจิสเตอร์ PDC1 สัญญาณของ PWM1H จะขับสัญญาณ Low (ลอจิก '0') และเมื่อ PTMR นับต่อไปจนเท่ากับ PDC2 สัญญาณของ PWM2H จะขับสัญญาณ Low จากรูปแสดงให้เห็นว่ารีจิสเตอร์ PDC1 และ PDC2 เป็นรีจิสเตอร์กำหนดค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ของสัญญาณ PWM1H และ PWM2H

เมื่อ PTMR นับจนเท่ากับรีจิสเตอร์ PTPER สัญญาณเอาต์พุต PWM1H และ PWM2H จะกลับเป็น High อีกครั้ง ค่าคาบเวลา (Period) หรือความถี่ PWM ของสัญญาณเอาต์พุต PWM1H และ PWM2H ขึ้นอยู่กับรีจิสเตอร์ PTPER และหากรีจิสเตอร์ PDCx เป็นศูนย์ สัญญาณ PWM จะไม่ทำงาน

การปรับปรุงค่าดิวตี้ไซเคิล จะเกิดขึ้นเมื่อรีจิสเตอร์นับเวลา PTMR เกิดการรีเซตหรือเป็น 0 และเริ่มต้นนับใหม่อีกครั้ง ระหว่างที่แอปพลิเคชันกำลังทำงานเราสามารถที่จะปรับปรุงค่าดิวตี้ไซเคิลได้ตลอดเวลา เมื่อรีจิสเตอร์การนับ PTMR รีเซตหรือมีค่าเท่ากับรีจิสเตอร์ PTPER จะทำให้เกิดอินเทอร์รัปต์ขึ้น (หากมีการเปิดใช้งาน)

การทำงานสัญญาณ PWM เดี่ยว (Single Event Mode) การทำงานในรูปแบบนี้จะให้สัญญาณพัลส์ทางเอาต์พุตเพียงพัลส์เดียว หรือที่เรียกว่าโหมดทำงานสัญญาณ PWM เดี่ยว รูปแบบของสัญญาณ PWM เมื่อบิต PTEN ถูกเซตด้วยกระบวนการทางซอฟต์แวร์เป็น '1' รีจิสเตอร์ PTMR จะเริ่มต้นนับขึ้น สัญญาณของ PWM2H และ PWM1H จะขับสัญญาณ High เมื่อมีค่าเท่ากับรีจิสเตอร์ PDC2 สัญญาณของ PWM2H จะขับสัญญาณ Low และเมื่อ PTMR นับต่อไปจนเท่ากับ PDC1

สัญญาณของ PWM1H จะขับสัญญาณ Low จากนั้น PTMR จะยังคงนับต่อไป เมื่อมีค่าเท่ากับ PTPER บิต PTEN จะถูกเคลียร์ด้วยกระบวนการทางฮาร์ดแวร์ รีจิสเตอร์ PTMR จะถูกรีเซ็ตพร้อมกับหยุดทำงาน เมื่อรีจิสเตอร์ PTMR รีเซ็ต บิต PWM1F ถูกเซตทำให้เกิดอินเตอร์รัปต์ขึ้น (หากมีการเปิดใช้งาน) ต้องเคลียร์ด้วยกระบวนการทางซอฟต์แวร์

การปรับสัญญาณกึ่งกลาง PWM (Center Aligned PWM) การปรับสัญญาณกึ่งกลาง PWM หรือที่เรียกว่าโหมดนับขึ้นลง (Up/Down Counting mode) การทำงานในโหมดนี้ สัญญาณ PWM จะทำงานในโหมดนับขึ้นลง การเปรียบเทียบสัญญาณเอาต์พุต PWM

การนับขึ้นของค่ารีจิสเตอร์ฐานเวลาการนับ (PTMR) PWMxH ขับสัญญาณ High จนกระทั่ง PTMR เท่ากับดิวตี้ไซเคิล(PDCx) จากนั้นสัญญาณ PWMxH จะขับสัญญาณ Low และ PTMR จะยังคงนับต่อไปจนกระทั่งเท่ากับ PTPER จากนั้น PTMR จะนับลง

การนับลงของค่ารีจิสเตอร์ฐานเวลาการนับ(PTMR) PWMxH ขับสัญญาณ High จนกระทั่ง PTMR เท่ากับ PDCx จากนั้นสัญญาณ PWMxH จะขับสัญญาณ High การปรับปรุงค่าดิวตี้ไซเคิล จะเกิดขึ้นเมื่อรีจิสเตอร์ PTMR เป็น 0 พร้อมกับแฟลกอินเตอร์รัปต์จะถูกเซต จะเห็นรูปสัญญาณ PWM จุดกึ่งกลางของสัญญาณจะเป็นค่าเวลาสูงสุดและพร้อมกับการนับลง

การปรับสัญญาณกึ่งกลาง PWM พร้อมการปรับปรุงค่า)Center Aligned PWM with Double Update(การปรับสัญญาณกึ่งกลาง PWM พร้อมการปรับปรุง 2 ครั้ง มีรูปแบบการทำงานเช่นเดียวกับโหมดการปรับสัญญาณกึ่งกลาง PWM ในหัวข้อที่ 13.7 ฐานเวลาการนับในโหมดนี้จะนับขึ้นนับลง ที่แตกต่างคือ บัฟเฟอร์ของดิวตี้ไซเคิลจะมีการปรับปรุงค่า 2 ครั้ง เมื่อรีจิสเตอร์ PTMR เป็น 0 และเมื่อ PTMR เท่ากับ PTPER รูปแบบสัญญาณ

เอาต์พุต PWM โดยตรง (PWM Output Override)โหมดขับสัญญาณเอาต์พุต PWM โดยตรง ในโหมดนี้สามารถขับสัญญาณ PWM, ขับสัญญาณแอกทีฟหรือขับสัญญาณอินแอกทีฟได้ ควบคุมการทำงานผ่านบิต POVDxH และ POVDxL เมื่อต้องการควบคุมการทำงานด้วยการกำหนดค่าโดยตรง และกำหนดค่าผ่านบิต POUTxH และ POUTxL เมื่อต้องการควบคุมผ่านส่วนสร้างสัญญาณ PWM แสดงรูปแบบการควบคุมของโหมดนี้ ในการควบคุมความเร็วการหมุนของมอเตอร์ สัญญาณเอาต์พุต PWM จะถูกขับทางทรานซิสเตอร์ด้านสูง (high side transistors) และในส่วนของดิวตี้ไซเคิลจะเป็นตัวกำหนดขนาดแรงดันปานกลางให้กับมอเตอร์และความเร็ว

ขาตรวจสอบข้อผิดพลาด (PWM Fault Pins)ขาอินพุต Fault A (FLTA) และ B (FLTB) เป็นขาอินพุตตรวจสอบความผิดพลาดของสัญญาณเอาต์พุต PWM เมื่อกำหนดให้ขา PWMxL และ PWMxH ทำงานในโหมดเอาต์พุตสัญญาณ PWM การทำงานของขาอินพุตสัญญาณ Fault A และ B

จะอยู่นอกเหนือการควบคุมของซอฟต์แวร์ทำให้ตอบสนองต่อความผิดพลาดของสัญญาณเอาต์พุต PWM ได้อย่างรวดเร็วและปลอดภัย ขาอินพุต Fault A และ B จะทำงานที่ลอจิก '0' (Active Low) โดยที่ขา Fault A จะควบคุมผ่านทางรีจิสเตอร์ FLTACON และ Fault B ควบคุมผ่านทางรีจิสเตอร์ FLTBCON รูปแบบการควบคุมสัญญาณตรวจสอบความผิดพลาด

การซิงโครไนส์กับโมดูล ADC (A/D Synchronization) โมดูล MCPWM สามารถนำไปใช้ในการกระตุ้นการทำงานของโมดูล A/D ได้ ผ่านทางความสัมพันธ์ของฐานเวลาของโมดูล MCPWM การกระตุ้นการทำงานของโมดูล A/D ค่าเวลาวิกฤตต่ำสุดจะอยู่ระหว่างการได้ผลลัพธ์ของการแปลงสัญญาณ A/D และการปรับปรุงค่าตัวตั้งไซเคิล

การกระตุ้นการทำงานของโมดูล A/D จะเริ่มต้นเมื่อค่าในรีจิสเตอร์ฐานเวลา PTMR มีค่าตรงกันกับค่าในรีจิสเตอร์ SEVTCMP โดยกำหนดโหมดการเปรียบเทียบนับขึ้นหรือนับลง ผ่านทางบิต SEVTDIR (SEVTCMP<15>) และบิตนี้จะไม่ส่งผล หากกำหนดให้โมดูล MCPWM ทำงานในโหมดนับขึ้นลง คุณสมบัติการทำงานในโหมดกระตุ้นสัญญาณนี้ จะถูกใช้มากเพื่อให้เกิดความสัมพันธ์ของช่วงการจับสัญญาณเพื่ออ่านค่าการแบ่งกระแส (shunt currents) หรืออ่านค่ากลับของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) ในการควบคุมมอเตอร์แบบ sensorless BLDC มอเตอร์

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล	นายกวีพจน์ วรเนตรสุทธิกุล
วัน เดือน ปีเกิด	6 มีนาคม 2532 ที่บุรีรัมย์
ที่อยู่	39 ม.8 ต.ท่าม่วง อ.สตึก จ.บุรีรัมย์ 31150
ประวัติการศึกษา	2554 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) ระบบไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2.) การออกแบบสายวงจร 3.) ชุดควบคุมมอเตอร์ BLDC 3 เฟส
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2553-2553	นักศึกษาฝึกงาน โรงไฟฟ้าบางปะกง ฝ่ายประสิทธิภาพ
พ.ศ.2555-2557	ตำแหน่งนักวิจัยการประดิษฐ์เครื่องมือที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ร่วมกับบริษัท IEC
ปัจจุบัน	ศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง