



อินเวอร์เตอร์แปลงผันกำลังงานแสงอาทิตย์เฟสเดียวด้วยวงจรแหล่งจ่ายกระแสร่วมกับวงจรลดทอน แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม



A Single Phase Solar Inverter using a Current Source Inverter with a DC-DC Buck

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายกิตติวัฒน์ จีบแก้ว แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิท<mark>ยา</mark>ลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพน<mark>ธ์</mark>

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. อนันต์ เครือท<mark>รัพย์ถ</mark>าวร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. ชลธี โพ<mark>ธิ์ทอง)</mark>

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. นิว<mark>ัตร์ อังควิศิษฐูพันธ์)</mark>

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ณัฐวุฒิ สุวรรณทา)

.....กรรมการ

(รศ. ดร. วรวัฒน์ เส^{รุ่}ยมวิบูล)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัย

มหาสารคาม (รศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง) คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	อินเวอร์เตอร์แปลงผันกำลังงา	นแสงอาทิตย์	้เฟสเดียวด้วยวงจรแหล่งจ่ายกระแส
	ร่วมกับวงจรลดทอนแรงดันไฟเ่	ฟ้ากระแสตรง	1
ผู้วิจัย	กิตติวัฒน์ จีบแก้ว		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชลธี โ	พธิ์ทอง	
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2562

บทคัดย่อ

พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการแปลงแสงอาทิตย์ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มีข้อได้เปรียบ หลายประการโดยเฉพาะด้านสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม การแปลงผันกำลังงานเพื่อป้อนให้กับระบบ สายส่งจำเป็นต้องมีอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นกระแสสลับที่ ระดับแรงดันและความถี่ที่เหมาะสม อินเวอร์เตอร์มีหลายประเภทแต่ อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส มีข้อได้เปรียบด้านความสามารถในการรักษาสภาวะการทำงานให้ทำงานได้แม้เกิดการลัดวงจรหรือ แรงดันตกด้านระบบสายส่งได้ อย่างไรก็ตาม อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสจะมีประสิทธิภาพการ ทำงานต่ำเมื่อระดับแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์และระบบสายส่งมีระดับแตกต่างกันมากเกินไป

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนออินเวอร์เตอร์แปลงผันกำลังงานแสงอาทิตย์เฟสเดียวด้วย อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสร่วมกับวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ ของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสเมื่อทำงานที่สภาวะระดับแรงดันต่ำอันเนื่องจากระดับความเข้ม แสงอาทิตย์ต่ำ ผลการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอพบว่า อินเวอร์เตอร์มีระดับฮาร์โม นิคแรงดันและกระแสด้านขาเข้าไม่แตกต่างจากอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสมาตรฐาน แต่ให้ คุณภาพกระแสขาออกที่ 50 เฮิรตซ์ ตัวประกอบกำลัง 0.98 ที่มีค่าความผิดเพี้ยนที่ระดับ 1.83-4.60% ซึ่งมีคุณภาพดีขึ้น 31.46-51.86% เทียบกับอินเตอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสมาตรฐาน 2.67-6.98% ตลอดย่านระดับความเข้มแสง 5 – 100% โดยมีค่าความเพี้ยนสัญญาณต่ำสุด 1.83% ที่ค่า ความเข้มของแสง 50% ซึ่งเป็นย่านที่ความเข้มแสงที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากที่สุด นอกจากนี้ ค่าความเครียดแรงดันและกระแสลดลง 3.99 % และ 15.77% ตามลำดับ ประสิทธิภาพของ อินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอมีประสิทธิภาพสูงกว่าอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสมาตรฐาน ตลอดย่าน ระดับความเข้มทดสอบที่ระดับ 99.55-97.47% เทียบกับ 95.30-94.44% ซึ่งเมื่อพิจารณา ประสิทธิภาพยูโรเปียนได้ว่า ค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอมีค่า 98.89% เทียบกับ อินเวอร์เตอร์มาตรฐาน 95.01% ซึ่งสูงขึ้นโดยเฉลี่ย 3.88%

คำสำคัญ : พลังงานแสงอาทิตย์, วงจรทอนแรงดันไฟฟ้า, อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส



TITLE	A Single Phase Solar Inve	rter using a Cu	urrent Source Inverter with a
	DC-DC Buck Converter		
AUTHOR	Kittiwath Jeebkaew		
ADVISORS	Assistant Professor Chonl	atee Photong	g, Ph.D.
DEGREE	Doctor of Philosop <mark>h</mark> y	MAJOR	Electrical and Computer
			Engineering
UNIVERSITY	Mahasarakham	YEAR	2019
	University		
		RACT	

Electric power converted from sunlight by photovoltaic cells has several advantages especially in terms of environmental aspect. However, converting and feeding DC power from the cells into the electric AC power system requires an inverter to convert DC power into AC at suitable voltage level and frequency. There are a number of inverters available but a Current Source Inverter (CSI) has an advantage of being able to operate under short-circuit or low grid power voltage conditions. However, a CSI has low operation efficiency when operating under large different voltage levels between the cells and the power grid.

This article presents a single phase CSI with a DC buck converter that improves efficiency of a conventional CSI when operating at low voltage levels of the photovoltaic cells due to low solar irradiance. The simulated results showed the proposed inverter provided similar harmonic levels for both input voltage and current compared to a conventional CSI. However, providing improved output current with 50 Hz, power factor 0.98 at THD of 1.83-4.60% , which is 31.46-51.86% improvement compared to 2.67-6.98% of a conventional CSI for the solar irradiance of5-100%, as well as, achieved the lowest THD of 1.83% at50% solar irradiance which is the situation that closed to the practical implementation. Moreover, the current and voltage stresses were reduced by 3.99% and 15.77%, respectively compared with the CSI. In summary, the proposed inverter achieved better efficiency than a conventional CSI for the whole operating range of solar irradiance with 99.55-97.47% efficiencies compared to 95.30-94.44% of the conventional CSI. When considering by using the European Efficiency evaluation, the propose inverter achieved 98.89% compared to 95.01% of the conventional CSI, which was 3.88% higher.

Keyword : current source inverter, buck converter, solar energy



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีโดยได้รับความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่ง จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลธี โพธิ์ทอง อาจารย์ที่ปรึกษา ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.นิวัตร์ อังควิศิษฐพันธ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ สุวรรณทา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร ประธาน กรรมการสอบและเป็นผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิ<mark>ทย</mark>าลัยขอนแก่น

ขอขอบพระคุณห้องวิจัยพลังงานรังสีอาทิตย์และแหล่งพลังงานสำรอง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความอนุเคราะห์ สถานที่ทดลองและเก็บข้อมูล ขอขอบพระคุณสาขา ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์สำนักงานในการทำ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ที่ได้มอบทุนการศึกษาตลอดการเรียน การสอนในหลักสูตร ๆ



	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	٩
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ຊ
กิตติกรรมประกาศ	უ
สารบัญ	ฌ
สารบัญตาราง	ຖິ
สารบัญภาพประกอบ	ฑ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ภูมิหลัง	1
1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	5
บทที่ 2 ปริทัศน์เอกสารข้อมูล	6
2.1 ทฤษฎีและหลักการทำงานของเซ <mark>ลล์แสงอาทิตย์</mark>	6
2.2 หลักการพื้นฐานวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง	25
2.3 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	
2.4 อินเว <mark>อร์เตอร์แหล่งจ่า</mark> ยกระแส	
2.5 ความสามารถข้ามผ่านความผิดพร่องของระบบสายส่ง	
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	53
2.7 สรุป	77
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	79
3.1 โครงสร้างวงจร	79
3.2 หลักการทำงานของวงจร	79

สารบัญ

3.3 คุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์8	31
3.4 วิธีการทดลองและเก็บผลการทดลอง8	32
3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	38
3.6 การออกแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอ <mark>ม</mark> พิวเตอร์	8
3.8 สรุป10)0
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย10)2
4.1 ผลการทำงานของอินเวอร์เตอร์แหล่ง <mark>จ่าย</mark> กระแสกับวงจรลดทอนแรงดัน)2
4.2 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพ <mark>สัญญ</mark> าณคลื่นขาเข้า	.5
4.3 การทดสอบเปรียบเทียบคุณภาพสัญ <mark>ญาณ</mark> คลื่นขาออก (output AC power quality) 11	.6
4.4 เปรียบเทียบค่าความเครียดบนอุปก <mark>รณ์สา</mark> รกึ่งตัวนำในวงจร (Electric Stress on	
Semiconductor Devices)12	29
4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพวงจร (C <mark>ircuit Eff</mark> iciency)13	5
4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์โดยประมาณ	3
4.7 สรุป14	4
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ14	-5
5.1 สรุปผล14	15
5.2 อภิปรายผล	6
5.3 ข้อเ <mark>สนอแนะ</mark>	6
บรรณานุกรม	7
ภาคผนวก	6
ภาคผนวก ก.1	57
ภาคผนวก ก.2	52
ภาคผนวก ข.1	54
ภาคผนวก ข.2	6



สารบัญตาราง

ตาราง 2.1 อัตราการขยายแรงดันของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์	. 32
ตาราง 2.3 ฮาร์มอนิกของ $\left(\hat{V}_{AO}\right)_{h} / (Vd / 2)$. 38
ตาราง 2.4 เงื่อนไขการสวิตซิ่งแรงดันเฟสแล <mark>ะแร</mark> งดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบ	. 43
ตาราง 2.5 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียการ <mark>สวิต</mark> ชิ่งแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์กับยูนิโพลาร์	. 45
ตาราง 2.6 อัตราการใช้ประโยชน์ของสวิตซ์ใ <mark>นอ</mark> ินเวอร์เตอร์	. 48
ตาราง 2.7 สรุปประสิทธิภาพและสมรรถนะ <mark>อินเ</mark> วอร์เตอร์จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	.73
ตาราง 3.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แ <mark>สง</mark> อาทิตย์ที่สามารถใช้ได้กับแต่ละวงจร	84
ตาราง 3.2 เปรียบเทียบค่าระลอกสัญญาณค <mark>ลื่น</mark> สัญญาณขาเข้าระหว่างวงจร	. 85
ตาราง 3.3 เปรียบเทียบค่าตัวแปรที่ได้จาก <mark>การวัด</mark> คลื่นสัญญาณขาออกของวงจร	. 85
ตาราง 3.4 เปรียบเทียบค่าตัวแปรที่ได้จาก <mark>การวัด</mark> คลื่นสัญญาณขาออกของวงจร	. 86
ตาราง 3.5 ข้อมูลกำลังขาเข้าและกำลังสูญ <mark>เสียเนื่อ</mark> งจากการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำของวง	จร
	. 87
ตาราง 3.6 ข้อมูลเปรียบเทียบประสิทธิภ <mark>าพระหว่าง</mark> วงจร	. 87
ตาราง 3.7 Electrical Characteristics of Sharp 300W-72M Solar Cell	. 88
ตาราง 3.8 พารามิเตอร์สำหรับได <mark>โอดโปรแกรม Pspice</mark>	. 88
ตาราง 3.9 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเซ <mark>ลล์แสงอาท</mark> ิตย์	.92
ตาราง 3.10 เปรียบเทียบคุณสมบัติขอ <mark>งเซลล์แสงอา</mark> ทิตย์ standard CSI ที่ระดับพลังงานแตกต่าง	กัน
	.94
ตาราง 3.11 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ CSI + Buck ที่ระดับพลังงานแตกต่างกัน	197
ตาราง 3.12 <mark>สรุปมาตรฐานที่น่าสนใจ</mark> ที่สุดที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อ <mark>มต่อระบบ PV กั</mark> บ GRID	. 98
ตาราง 3.13 ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม (PRC-Po	QG-
01-1998), การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้านครหลวง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 1998	. 98
ตาราง 4.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถใช้ได้กับแต่ละวงจรพารามิเตอร์ใ	ช้ใน
แบบจำลองของโครงสร้างอินเวอร์เตอร์ภายใต้ระดับพลังงานแตกต่างกัน (1-phase 230V/50Hz):	102
ตาราง 4.2 เปรียบเทียบค่าระลอกสัญญาณคลื่นสัญญาณขาเข้าระหว่างวงจร	115
ตาราง 4.3 เปรียบเทียบค่าตัวแปรที่ได้จากการวัดคลื่นสัญญาณขาออกของวงจร (Is @ 50Hz)	116
ตาราง 4.4 เปรียบเทียบค่าตัวแปรที่ได้จากการวัดคลื่นสัญญาณขาออกของวงจร	135
ตาราง 4.5 ค่าประมาณการสูญเสียพลังงาน	137

หน้า

ตาราง 4.6 ข้อมูลกำลังขาเข้าและกำลังสูญเสียเนื่	องจากการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำของวงจร
ตาราง 4.7 ข้อมูลเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว	ว่างวงจร143



สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1.1 ประเภทของอินเวอร์เตอร์จำแนกตามจำนวนขั้นตอนการแปลงผันกำลังงาน (ก)	
อินเวอร์เตอร์แปลงผันขั้นตอนเดียว (ข) อินเว <mark>อ</mark> ร์เตอร์แปลงผันแบบสองขั้นตอน และ (ค) อินเวอร์เ	ตอร์
แปลงผันแบบหลายขั้นตอน	2
ภาพประกอบ 1.2 โครงสร้างที่แตกต่างกันขอ <mark>ง</mark> PV ที่เชื่อมต่อระบบสายส่ง (ก) อินเวอร์เตอร์	
แหล่งจ่ายกระแส และ (ข) อินเวอร์เตอร์แหล่ <mark>งจ่</mark> ายแรงดัน	3
ภาพประกอบ 1.3 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอ <mark>าท</mark> ิตย์	3
ภาพประกอบ 2.1 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเ <mark>ซล</mark> ล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ต่ออยู่กับโหลด	7
ภาพประกอบ 2.2 การเกิดขึ้นของเส้นโค้งข <mark>องเซ</mark> ลล์แสงอาทิตย์จากเส้นโค้งไดโอด	7
ภาพประกอบ 2.3 วงจรสมมูลของเซลล์แสง <mark>อาทิต</mark> ย์ขณะวงจรเปิด	8
ภาพประกอบ 2.4 เส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและจ <mark>ุดกำลั</mark> งไฟฟ้าสูงสุด (MPP)	9
ภาพประกอบ 2.5 วงจรสมมูลของเซลล์แส <mark>งอาทิต</mark> ย์ที่ใช้งานจริง	10
ภาพประกอบ 2.6 กราฟเส้นโค้งของ I-V ที่ <mark>มีความ</mark> ต้านทานอนุกรมค่าต่าง ๆ กัน	11
ภาพประกอบ 2.7 กราฟเส้นโค้งของ I-V ที่ <mark>มีความ</mark> ต้านทานขนานค่าต่าง ๆ กัน	11
ภาพประกอบ 2.8 เส้นโค้งคุณลักษณ <mark>ะของ I-V ที่ค่าแสง</mark> สว่างที่ต่างกัน	13
ภาพประกอบ 2.9 กราฟ I-V ที่อุ <mark>ณหภูมิต่าง ๆ</mark>	14
ภาพประกอบ 2.10 ตัวอย่างการ <mark>ต่อเซลล์แบบขนาน 3 เซลล์</mark>	15
ภาพประกอบ 2.11 ตัวอย่างกราฟ I-V ข <mark>องการต่อแบ</mark> บขนาน 3 เซลล์	15
ภาพประกอบ 2.12 หนึ่งเซลล์ถูกบังแ สง (Shading)	16
ภาพประกอบ 2.13 ตัวอย่างการต่ <mark>อเซลล์แบบ</mark> อนุกรม 3 เซลล์	17
ภาพประกอบ 2.14 กราฟ I-V ของการต่อเซลล์แบบอนุกรม 3 เซลล์	17
ภาพประกอบ 2.15 หนึ่งเซลล์ถูกบังแสง	. 18
ภาพประกอบ 2.16 การต่อบายพาสไดโอด	19
ภาพประกอบ 2.17 กราฟ I-V ของการต่อแบบอนุกรมสามเซลล์โดยมีหนึ่งเซลล์อับแสง	. 19
ภาพประกอบ 2.18 การต่อแบบอนุกรมสามเซลล์โดยมีหนึ่งเซลล์อับแสงบางส่วน	20
ภาพประกอบ 2.19 กราฟ I-V ของเซลล์ไม่มีการอับแสง	20
ภาพประกอบ 2.20 กราฟ I-V ของเซลล์เมื่อมีการอับแสงบางส่วน	21
ภาพประกอบ 2.21 วงจรสมมูลและสัญลักษณ์ของเซลล์แสงอาทิตย์	21
ภาพประกอบ 2.22 พื้นฐานวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง	25

ภาพประกอบ 2.23 หลักการควบคุมสัญญาณพี่ดับเบิลยูเอ็ม : (ก) วงจรแปลงผันไฟฟ้าใช้	
ทรานซิสเตอร์กำลังเป็นสวิช์ (ข) รูปคลื่นของแรงดันขาออก $V_2^{}$ แบบ (PFM) ที่ $t_{_{on1}} eq t_{_{on2}}$, T =	
constant (ค) รูปคลื่นของแรงดันขาออก V_2 แบบ (PFM) ที่ $T_1 \neq T_2$. 26
ภาพประกอบ 2.24 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบล <mark>ด</mark> ทอนแรงดัน กรณีโหลดตัวต้านทาน : (ก) วงจร ,	. 28
ภาพประกอบ 2.25 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบ <mark>ล</mark> ดทอนแรงดัน กรณีโหลดตัวต้านทานและ	. 29
ภาพประกอบ 2.26 รูปคลื่นแรงดันและกระแ <mark>สว</mark> งจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันโหลดตัว	
ต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ	. 30
ภาพประกอบ 2.27 สวิตซ์โหมดอินเวอร์เตอร์ <mark>เฟ</mark> สเดียว	. 33
ภาพประกอบ 2.28 สวิตซ์โหมดอินเวอร์เตอร์ <mark>เฟ</mark> สเดียวที่หนึ่งกิ่ง	. 34
ภาพประกอบ 2.29 การสร้างสัญญาณสวิตซ์ <mark>ชิ่งแ</mark> บบพีดับเบิลยูเอ็ม	. 35
ภาพประกอบ 2.30 พี่ดับเบิลยูเอ็มแบบไซน <mark>์ (Sin</mark> usoidal Pulse Width Modulation: SPWM)	. 36
ภาพประกอบ 2.31 รูปคลื่นพีดับเปิลยูเอ็มแ <mark>บบโอ</mark> เวอร์มอดูเลชั่น	. 39
ภาพประกอบ 2.32 สเปคตรัมของรูปคลื่น <mark>พี่ดับเบิ</mark> ลยูเอ็มแบบโอเวอร์มอดูเลชั่น	. 39
ภาพประกอบ 2.33 การควบคุมค่าแรงดัน <mark>ไฟฟ้าทา</mark> งด้านออกของอินเวอร์เตอร์พีดับเบิลยูเอ็มโดยก	าร
ปรับค่า m _a	. 39
ภาพประกอบ 2.34 รูปคลื่นพีดับเบิลยูเ <mark>อ็มแบบรูปคลื่นสี่เหลี่</mark> ยม	. 40
ภาพประกอบ 2.35 อินเวอร์เตอร์ <mark>เฟสเดียวแบบฮาร์ฟบริดจ์</mark> และแบบฟูลบริดจ์	. 41
ภาพประกอบ 2.36 การสวิตชิ่งแร <mark>งดันแบบไบโพลาร์</mark>	. 42
ภาพประกอบ 2.37 การสวิตชิ่งแรงดันไฟฟ้าแบบยู _่ นิโพลาร์	. 44
ภาพประกอบ 2.38 วงจรพีดับเบิลยูเอ <mark>็มฟูลบริดจ์อินเว</mark> อร์เตอร์	. 45
ภาพประกอบ 2.39 สัญญาณการ <mark>ทำงานของฟูลบริดจ์อินเวอ</mark> ร์เตอร์	. 46
ภาพประกอบ 2.40 <mark>ค่าแรงดันระลอกคลื่น</mark> แรงดันกระแสไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์	. 47
ภาพประกอบ 2.41 ขนาดแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ย่านการทำงานเชิงเส้น	. 48
ภาพประกอบ 2.42 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสเฟสเดียว	. 49
ภาพประกอบ 2.43 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายไฟจ่ายกระแสคงที่	. 50
ภาพประกอบ 2.44 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสคงที่ 3 เฟส	. 51
ภาพประกอบ 2.45 เวลากำหนดในการต่ออยู่คงสภาวะที่เจาะจงของแรงดันระบบสายส่งที่กำหนด	โดย
รหัส ระบบสายส่งของ E.On-Netz 2006	. 52
ภาพประกอบ 2.46 ความต้องการการตอบสนองของกระแสสำหรับระดับแรงดันระบบสายส่งที่ลด	ลง
ตามรหัสระบบสายส่ง E.On-Netz 2006	. 53
ภาพประกอบ 2.47 โครงสร้างวงจรที่นำเสนอโดยบทความ	. 54

ภาพประกอบ 2.48 The proposed DC-AC boost converter	. 55
ภาพประกอบ 2.49 Inverter using Buck-Boost type chopper circuits	. 55
ภาพประกอบ 2.50 Complete schematic diagram of the proposed single-stage grid	
connected PV system along with the control strategy	. 56
ภาพประกอบ 2.51 วงจรนำเสนอ	. 57
ภาพประกอบ 2.52 the proposed three-switch Buck-Boost Inverter	. 57
ภาพประกอบ 2.53 Newly proposed buck-boost inverter with 3 switching devices	. 58
ภาพประกอบ 2.54 Traditional single-ph <mark>ase</mark> Z-source H-bridge inverter and its	
modulation method	. 59
ภาพประกอบ 2.55 circuit configuration and switching signals of the proposed	. 59
ภาพประกอบ 2.56 Configuration of the proposed inverter	. 60
ภาพประกอบ 2.57 circuit topology of t <mark>he fu</mark> ll-bridge series-resonant buck-boost	
inverter	. 60
ภาพประกอบ 2.58 Proposed single st <mark>age inv</mark> erter	.61
ภาพประกอบ 2.59 Proposed topology named as "iH5."	. 62
ภาพประกอบ 2.60 Proposed single-phase transformerless inverter for grid-connected	k
PV systems	.63
ภาพประกอบ 2.61 Proposed time sharing dual-mode sinewave modulated single-ph	ase
inverter with boost chopper	. 64
ภาพประกอบ 2.62 Power Circuit of the proposed	. 64
ภาพประกอบ 2.63 Conergy Nutral Point Clamped Half Bridge	. 65
ภาพประกอบ 2.64 Proposed DC-DC converter operation stages	. 66
ภาพประกอบ 2.65 Proposed DC-DC converter with grounded generator and half-brid	lge
inverter in the output	. 66
ภาพประกอบ 2.66 Circuit configuration of the proposed transformerless negative	
grounding photovoltaic generation system.	.67
ภาพประกอบ 2.67 The proposed photovoltaic parallel resonant DC-link	. 68
ภาพประกอบ 2.68 Circuit configuration of proposed grid-connection converter	
composed of ZCC converter and H-bridge converter.	. 68

ภาพประกอบ 2.69 PSIM simulation of the proposed inverter, showing PV array (4-diode
model), DC link inductor, wave shaper, unfolding circuit, output filter model, MPPT
controller , and PWM signal generator69
ภาพประกอบ 2.70 The proposed high step multilevel converter
ภาพประกอบ 2.71 A schematic view of <mark>a</mark> full NPC bridge71
ภาพประกอบ 2.72 Proposed single-phase π -type 5-level inverter
ภาพประกอบ 3.1 วงจรแปลงผันกำลังงานเ <mark>ซล</mark> ล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบไฟฟ้าเฟสเดียวด้วยวงจร
แหล่งจ่ายกระแสร่วมกับวงจรลดทอนแรงดันไ <mark>ฟ</mark> ฟ้ากระแสตรง
ภาพประกอบ 3.2 ตัวอย่างภาพแสดงหลักกา <mark>รท</mark> ำงานของวงจรที่ออกแบบ: (ก) และ (ข) เป็นสภาวะ
การทำงานในขณะทำงานที่ระดับความเข้มแ <mark>สง 1</mark> 00% และ 50% ตามลำดับ ส่วน (ค) และ (ง) เป็น
สภาวะการทำงานในขณะที่ระดับแรงดันไฟ <mark>ฟ้าด้าน</mark> ขาออกลดต่ำลง 50% และ 100% ตามลำดับ80
ภาพประกอบ 3.3 เปรียบเทียบกราฟคุณส <mark>มบัติขอ</mark> งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความเหมาะสมในการ
ทำงานร่วมกับวงจร
ภาพประกอบ 3.4 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์ <mark>ผันกำลัง</mark> งานแสงอาทิตย์เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบภายใต้
การวิจัยในครั้งนี้: (ก) วงจร CSI มาตรฐาน (ข) วงจร CSI with a buck converter
ภาพประกอบ 3.5 การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในการจำลอง 89
ภาพประกอบ 3.6 PV Array
ภาพประกอบ 3.7 จำลองวงจรอิน <mark>เวอร์เตอร์แปลงผันกำลังง</mark> านแสงอาทิตย์เฟสเดียวด้วยอินเวอร์เตอร์
แหล่งจ่ายกระแส
ภาพประกอบ 3.8 วงจรอินเวอร์เตอร์แ <mark>ปลงผันกำลังงา</mark> นแสงอาทิตย์เฟสเดียวด้วยอินเวอร์เตอร์
แหล่งจ่ายกระแสร่วมกับวงจรลดทอนแรงดัน
ภาพประกอบ 3.9 ผ <mark>ลการจำลองเ</mark> ปรียบเทียบกราฟคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความ
เหมาะสมในการทำงานร่วมกับวงจร (ก) I-V curve และ (ข) จุดกำลังสูงสุด
ภาพประกอบ 3.10 ผลการจำลองเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ standard CSI ที่ระดับ
พลังงานแตกต่างกัน
ภาพประกอบ 3.11 ผลการจำลองเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ CSI + Buck ที่ระดับ
พลังงานแตกต่างกัน
ภาพประกอบ 3.12 ผลการจำลองสัญญาณสวิตซ์ sinusoidal pulse width modulation ที่ 96
ภาพประกอบ 3.13 ผลการจำลองสัญญาณสวิตซ์ sinusoidal pulse width modulation ที่ความถึ่
1 kHz96

ภาพประกอบ 4.1 DC ด้าน (บน) และด้าน AC (ด้านล่าง) รูปแบบการจำลองของ standard CSI เมื่อ
ทำงานที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 100% (OP1)103
ภาพประกอบ 4.2 DC ด้าน (บน) และด้าน AC (ด้านล่าง) รูปแบบการจำลองของ CSI +buck เมื่อ
ทำงานที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 100% (OP1)
ภาพประกอบ 4.3 DC ด้าน (บน) และด้าน A <mark>C</mark> (ด้านล่าง) รูปแบบการจำลองของ standard CSI เมื่อ
ทำงานที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 50% (O <mark>P</mark> 2)105
ภาพประกอบ 4.4 DC ด้าน (บน) และด้าน A <mark>C</mark> (ด้านล่าง) รูปแบบการจำลองของ CSI +buck เมื่อ
ทำงานที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 50% (O <mark>P2</mark>)106
ภาพประกอบ 4.5 DC ด้าน (บน) และด้าน A <mark>C (</mark> ด้านล่าง) รูปแบบการจำลองของ standard CSI เมื่อ
ทำงานที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 30% (<mark>OP3</mark>)107
ภาพประกอบ 4.6 DC ด้าน (บน) และด้าน <mark>AC (ด้</mark> านล่าง) รูปแบบการจำลองของ CSI +buck เมื่อ
ทำงานที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 30% (<mark>OP3)</mark> 108
ภาพประกอบ 4.7 DC ด้าน (บน) และด้าน <mark>AC (ด้</mark> านล่าง) รูปแบบการจำลองของ standard CSI เมื่อ
ทำงานที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 20% <mark>(OP4)</mark> 109
ภาพประกอบ 4.8 DC ด้าน (บน) และด้าน AC (ด้านล่าง) รปแบบการจำลองของ CSI +buck เมื่อ
ે ગ
ทำงานที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 20% (OP4)

ภาพประกอบ 4.16 แรงดันไฟฟ้าขาออกเฟส (Vs) และเฟสกระแสแหล่งจ่าย (Is) จำลองรูปคลื่นและ
สเปกตรัม FFT ของกระแสเฟส CSI+Buck ทำงานที่พลังงานแสง 50 %
ภาพประกอบ 4.17 แรงดันไฟฟ้าขาออกเฟส (Vs) และเฟสกระแสแหล่งจ่าย (Is) จำลองรูปคลื่นและ
สเปกตรัม FFT ของกระแสเฟส standard C <mark>SI</mark> ทำงานที่พลังงานแสง 30 %
ภาพประกอบ 4.18 แรงดันไฟฟ้าขาออกเฟส <mark>(V</mark> s) และเฟสกระแสแหล่งจ่าย (Is) จำลองรูปคลื่นและ
สเปกตรัม FFT ของกระแสเฟส ทำงานที่พลังงานแสง 30 %
ภาพประกอบ 4.19 แรงดันไฟฟ้าขาออกเฟส <mark>(V</mark> s) และเฟสกระแสแหล่งจ่าย (Is) จำลองรูปคลื่นและ
สเปกตรัม FFT ของกระแสเฟส standard C <mark>SI</mark> ทำงานที่พลังงานแสง 20 %
ภาพประกอบ 4.20 แรงดันไฟฟ้าขาออกเฟส <mark>(V</mark> s) และเฟสกระแสแหล่งจ่าย (Is) จำลองรูปคลื่นและ
สเปกตรัม FFT ของกระแสเฟส CSI+Buck <mark>ทำงา</mark> นที่พลังงานแสง 20 %
ภาพประกอบ 4.21 แรงดันไฟฟ้าขาออกเฟ <mark>ส (Vs</mark>) และเฟสกระแสแหล่งจ่าย (Is) จำลองรูปคลื่นและ
สเปกตรัม FFT ของกระแสเฟส standard <mark>CSI ท</mark> ำงานที่พลังงานแสง 10 %
ภาพประกอบ 4.22 แรงดันไฟฟ้าขาออกเฟ <mark>ส (Vs)</mark> และเฟสกระแสแหล่งจ่าย (Is) จำลองรูปคลื่นและ
สเปกตรัม FFT ของกระแสเฟส CSI+Buc <mark>k ทำงาน</mark> ที่พลังงานแสง 10 %
ภาพประกอบ 4.23 แรงดันไฟฟ้าขาออกเฟ <mark>ส (Vs) แ</mark> ละเฟสกระแสแหล่งจ่าย (Is) จำลองรูปคลื่นและ
สเปกตรัม FFT ของกระแสเฟส standard CSI ทำงานที่พลังงานแสง 5 %
ภาพประกอบ 4.24 แรงดันไฟฟ้า <mark>ขาออกเฟส (Vs) และเฟส</mark> กระแสแหล่งจ่าย (Is) จำลองรูปคลื่นและ
สเปกตรัม FFT ของกระแสเฟส C <mark>SI+Buck ทำงานที่พลังงา</mark> นแสง 5 %
ภาพประกอบ 4.25 แรงดันไฟฟ้า DC-link voltage (Vdc) และรูปแบบการจำลองกระแสไฟ DC
(ldc) ทำงานที่พลังงานแสง 100 %
ภาพประกอบ 4.26 แรงดันไฟฟ้า DC-link voltage (Vdc) และรูปแบบการจำลองกระแสไฟ DC
(ldc) ทำงานที่พลังงานแสง 50 %
ภาพประกอบ 4.27 แรงดันไฟฟ้า DC-link voltage (Vdc) และรูปแบบการจำลองกระแสไฟ DC
(ldc) ทำงานที่พลังงานแสง 30 %131
ภาพประกอบ 4.28 แรงดันไฟฟ้า DC-link voltage (Vdc) และรูปแบบการจำลองกระแสไฟ DC
(ldc) ทำงานที่พลังงานแสง 20 %
ภาพประกอบ 4.29 แรงดันไฟฟ้า DC-link voltage (Vdc) และรูปแบบการจำลองกระแสไฟ DC
(ldc) ทำงานที่พลังงานแสง 10 %
ภาพประกอบ 4.30 แรงดันไฟฟ้า DC-link voltage (Vdc) และรูปแบบการจำลองกระแสไฟ DC
(Idc) ทำงานที่พลังงานแสง 5 %134

ภาพประกอบ 4.31 วิธีที่ใช้กำหนด VCE-O และ rd สำหรับการประมาณค่าของการสูญเสียพลังงาน
จากเซมิคอนดักเตอร์
ภาพประกอบ 4.32 วิธีการที่ใช้ในการหา (ก) ton + rr และ (ข) toff สำหรับการประมาณค่าของการ
สูญเสียพลังงานจากเซมิคอนดักเตอร์
ภาพประกอบ 4.33 (ก) สัญญาณกระแสที่ไห <mark>ลผ่</mark> านสวิตซ์ (ข) ภาพสัญญาณในการหาค่ากระแสสูญเสีย
138
ภาพประกอบ 4.34 (ก) สัญญาณกระแสและแ <mark>ร</mark> งดันไฟฟ้าที่ไหลผ่านสวิตซ์ (ข) ภาพสัญญาณช่วงเวลา
ในการหาค่ากำลังสูญเสียสวิตซ์139
ภาพประกอบ 4.35 พื้นที่ใต้กราฟ I _{c-on} 140
ภาพประกอบ 4.36 พื้นที่ใต้กราฟ V _{ce-on}
ภาพประกอบ 4.37 พื้นที่ใต้กราฟ I _{c-off} 141
ภาพประกอบ 4.38 พื้นที่ใต้กราฟ V _{ce-off}
ภาพประกอบ 4.39 เส้นโค้งประสิทธิภาพ <mark>ของ CS</mark> I+buck เทียบกับ standard CSI



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานทางเลือกที่ได้รับความสนใจมากที่สุดและมี แนวโน้มการใช้งานเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีปริมาณพลังงานที่สูงมากและสามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ง่าย [1,2] ให้พลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ปราศจากมลภาวะ และลดการพึ่งพามลพิษเชื้อเพลิง ฟอสซิล ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซและนิวเคลียร์ [1,3-6] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตพลังงานเซลล์ แสงอาทิตย์ที่สะอาด [7,8] เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Cells, PV cells, PV) หรือ โซล่าเซลล์ (Solar Cells) ที่ใช้พลังงานโดยตรงจากดวงอาทิตย์ การผลิตไฟฟ้าที่สะอาดโดยเซลล์แสงอาทิตย์ เทคโนโลยีที่แพร่หลาย [7] ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาต่ำและไม่มีเสียงดังรบกวน [1,6,9] ระบบผลิตไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์ถูกนำมาใช้มักจะอยู่ใน<mark>ที่อยู่อา</mark>ศัยและพื้นที่อุตสาหกรรม [10]

เซลล์แสงอาทิตย์ให้กำลังงานในรูปแบบพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง [2,6,11] ดังนั้นการเชื่อมต่อ เซลล์แสงอาทิตย์ไปยังระบบส่งจ่ายไฟฟ้า จึงไม่สามารถเชื่อมต่อได้โดยตรง [5] จึงจำเป็นต้องมี อินเวอร์เตอร์ (Inverter) เพื่อแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ ซึ่งอาจรวม เซลล์แสงอาทิตย์หลาย ๆ เซลล์เพื่อได้ระดับแรงดัน [12] นอกจากนี้อินเวอร์เตอร์ยังช่วยให้การควบคุม แรงดันและความถี่ เป็นไปอย่างต่อเนื่องและและมีระดับที่เหมาะสม [4] อินเวอร์เตอร์ยังช่วยให้การควบคุม แต่แบ่งตามจำนวนเฟสไฟฟ้าได้เป็น 2 ประเภท [13] ได้แก่ อินเวอร์เตอร์ชนิดเฟสเดียวและ อินเวอร์เตอร์สามเฟส

อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว มีโครงสร้างง่ายและเหมาะในการใช้งานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังไม่สูง เช่น ที่อยู่อาศัย เป็นต้น ส่วนอินเวอร์เตอร์สามเฟสมีข้อดีคือ สามารถกำจัดฮาร์โมนิกได้ดี ให้สัญญาณ มีคุณภาพสูง แต่นิยมใช้ในระบบไฟฟ้าแรงดันสูง ซึ่งการวิจัยนี้มุ่งเน้นการใช้งานสำหรับครัวเรือนจึง พิจารณาอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวเท่านั้น [11]

อินเวอร์เตอร์แบบเฟสเดียวมีหลายประเภท แต่หากจำแนกตามจำนวนขั้นตอนการแปลงผัน พลังงาน จะสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ [14] อินเวอร์เตอร์แปลงผันขั้นตอนเดียว, อินเวอร์เตอร์แปลงผันสองขั้นตอน และอินเวอร์เตอร์แปลงผันหลายขั้นตอน ซึ่งมีลักษณะดังแสดงใน ภาพประกอบ 1.1



ภาพประกอบ 1.1 ประเภทของอินเวอร์เ<mark>ตอร์จำ</mark>แนกตามจำนวนขั้นตอนการแปลงผันกำลังงาน (ก) อินเวอร์เตอร์แปลงผันขั้นตอนเดียว (ข) อิน<mark>เวอร์เต</mark>อร์แปลงผันแบบสองขั้นตอน และ (ค) อินเวอร์เตอร์ แปลงผันแบบหลายขั้นตอน [14]

อินเวอร์เตอร์สำหรับขั้นต<mark>อนเดียว,พลังสูงสุดที่จุดใน</mark>การติดตามและการควบคุมลูป (ปัจจุบัน และควบคุมแรงดันไฟฟ้าลูป) ได้รับการจัดการทั้งหมดในขั้นตอนเดียวดังภาพประกอบ 1.1 (ก)

อินเวอร์เตอร์สำหรับสองขั้นตอน, การติดตามจุดสูงสุดจะถูกจัดการโดยเพิ่มเติม DC-DC converter ในระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอินเวอร์เตอร์และการควบคุมลูปจะนำไปใช้ อินเวอร์เตอร์ดังภาพประกอบ 1.1 (ข)

สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบหลายขั้นตอน ซึ่งเป็น DC-DC converter การควบคุมดูแลของการ ติดตามจุดไฟสูงสุดของแต่ละสายและการควบคุมอินเวอร์เตอร์จัดการควบคุมลูป ดังภาพประกอบ 1.1 (ค) [14]

นอกจากการแบ่งประเภทข้างต้นแล้วอินเวอร์เตอร์ยังสามารถแบ่งตามประเภทแหล่งจ่ายได้ด้วย โดยแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverters ; VSI) และ อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverters ; CSI) : ซึ่งอินเวอร์เตอร์ทั้งสองนี้มี คุณสมบัติที่แตกต่างกัน [14-19] อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันและอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส แปลงผันกำลังขั้นตอนเดียวดังแสดงในภาพประกอบ 1.2 จัดเป็นอินเวอร์เตอร์ประเภท



ภาพประกอบ 1.2 โครงสร้างที่แตกต่าง<mark>กัน</mark>ของ PV ที่เชื่อมต่อระบบสายส่ง (ก) อินเวอร์เตอร์ แหล่งจ่ายกระแส และ (ข) อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน [14]

อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน (VSI) มีความสามารถการกรองระลอกกระแสได้สูง โดยใช้ตัว เก็บประจุ แต่ตัวเก็บประจุมีค่าสูญเสียสูงที่เกิดจากการใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังมี ปัญหาในการถ่ายผ่านกำลังหากระดับแรงดันด้านขาเข้าไม่สูงพอ ส่วนอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส (CSI) ให้ระลอกกระแสขาเข้าที่มีค่าต่ำ การกรองกระแสใช้ตัวเหนี่ยวนำเป็นส่วนประกอบ นอกจากนี้ ยังใช้ในการจัดเก็บพลังงาน เป็นตัวกรองที่มีความทนทานและอายุการใช้งานนาน เมื่อเทียบกับตัวเก็บ ประจุ [20] ในขณะที่ใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเล็กได้ นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันการลัดวงจรของ แหล่งจ่าย และควบคุมการจ่ายกระแสในทิศทางเดียวด้วยลักษณะวงจรได้อีกด้วย [21-23]

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ศึกษาในงานวิจัยนี้จัดเป็นแหล่งจ่ายกระแส ดัง แสดง้วยวงจรสมมูลภาพประกอบที่ 1.3 ซึ่งการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์มีสภาวะการทำงานที่อาจ เป็นได้ทั้งเปิดวงจร (Open-Circuit) จนถึงสภาวะลัดวงจร (Short-Circuit) ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบแล้ว อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสจึงสามารถทำงานได้ดีกับเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์ แหล่งจ่ายแรงดัน [24-27]



ภาพประกอบ 1.3 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ [34]

สรุปได้ว่าอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส (CSI) มีศักยภาพที่เหมาะสำหรับการเชื่อมต่อระบบ เซลล์แสงอาทิตย์และระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสสับ ด้วยเหตุผลดังนี้ [24-27] , [28]

 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสให้กระแสด้านขาเข้าวงจรที่ เรียบซึ่งเป็นคุณลักษณะที่พึง ประสงค์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

 การองกระแสด้วยตัวเหนี่ยวนำของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสทำให้อินเวอร์เตอร์มีอายุ การใช้งานนานกว่าของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันซึ่งใช้ตัวเก็บประจุเป็นหลัก

3) อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสสาม<mark>ารถ</mark>ส่งกำลังไฟฟ้าสู่ระบบแรงดันสูงได้แม้เซลล์แสงอาทิตย์ จะมีแรงดันไฟฟ้าต่ำทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้หม<mark>้อแ</mark>ปลงแรงดันขึ้น (Step up transformer)

4) ด้วยเทคโนโลยีการปิดกั้นการย้อนก<mark>ลับ</mark>ภายในสวิตซ์โดยตรง (Reverse-Blocking ;RB) ขอทำ ให้ไม่ต้องใช้ไดโอดอนุกรม ส่งผลให้อินเวอร์เ<mark>ตอร์ม</mark>ีโครงสร้างง่ายและช่วยลดการสูญเสียของไดโอดได้

5) ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีล่าสุ<mark>ดในตั</mark>วนำยิ่งยวด (Super Conductor) ซึ่งได้นำไปสู่การ พัฒนาการจัดเก็บพลังงานแม่เหล็ก (SMEs) ระบบสามารถลดการสูญเสียแกนแม่เหล็กของตัว เหนี่ยวนำของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแ<mark>สได้</mark>

การเชื่อมต่อกับระบบสายส่งโดยอิน<mark>เวอร์เตอ</mark>ร์แหล่งจ่ายกระแส (CSI) มีข้อดีดังนี้: [19,29]

1) การป้องกันการลัดวงจร

การจัดการข้อผิดเพี้ยนได้ง่ายและขึ้น (มีความผิดเพี้ยนในกระแสน้อย)

การตอบสนองการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้เนื่องจากการควบคุมกระแสโดยตรง

4) ความสามารถในการเริ่มทำงานใหม่สภาวะลัดวงจร

5) รูปคลื่นที่มีคุณภาพสูง

6) ไม่มีตัวเก็บประจุที่ด้านขาเข้า<mark>กระแสไฟตรง [3</mark>0]

เพื่อให้ระดับแรงดันไม่สูงมากเกินไปและมีระดับเหมาะสมในการทำงานตลอดเวลา จึงมีความ จำเป็นต้องควบคุมระดับแรงดันขาเข้าของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำวงจร ลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Buck Converter) [31] มาใช้งาน

1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาและออกแบบอินเวอร์เตอร์แปลงผันกำลังงานแสงอาทิตย์เฟสเดียวเพื่อปรับปรุง ประสิทธิภาพและสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสด้วยวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง

1.2.2 ทดสอบอินเวอร์เตอร์ที่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเปรียบเทียบกับ อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสแบบมาตรฐาน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาและออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสเฟสเดียวเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ และสมรรถนะ ด้วยวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ระดับกำลังสำหรับการทดสอบด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ใช้กำลังไม่เกิน 5 kW ซึ่งเหมาะกับการใช้งานในครัวเรือนที่ใช้กำลังไฟฟ้าไม่สูง



บทที่ 2 ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

บทนี้นำเสนอทฤษฎีและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการพื้นฐานวงจรแปลงผัน ไฟฟ้ากระแสตรง อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส ความสามารถข้ามผ่าน ความผิดพร่องของระบบสายส่ง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การเรียนรู้ทฤษฎีและหลักการทำงานของ เซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้เข้าใจในคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ เรียนรู้หลักการพื้นฐานวงจรแปลง ผันไฟฟ้ากระแสตรงและอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสเพื่อช่วยในการออกแบบ นำไปสู่การจำลอง ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีรายละเอีย<mark>ดดั</mark>งนี้

2.1 ทฤษฎีและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

2.1.1 ทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์

เป็นที่ทราบกันดีว่า เมื่อมีแสงขาว (White Light) จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สร้างประจุพาหะ อิสระซึ่งจะไหลผ่านโหลดที่ต่ออยู่ โดยจำนวนของประจุพาหะนี้จะเป็นสัดส่วนกับความเข้มของแสงที่ ตกกระทบเซลล์ ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสโหลดขึ้น (Photo Current ; Iph) ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคตินั้นจึงสามารถเขียนแทนด้วยวงจรตามภาพประกอบ 2.1 รอยต่อพี เอ็น (P-N junction) นั้นจะเขียนแทนด้วย ไดโอด และแหล่งจ่ายกระแสซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดตามความ เข้มของแสงที่ตกกระทบ ส่วนความต้านทานปรับค่าได้ก็คือ โหลดนั่นเอง สมการทางคณิตศาสตร์ที่ อธิบายรูปแบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic หรือ PV cells ; PV) หรือ โซล่าเซลล์ (Solar Cells) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน [32] ดังนี้

(1) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์กับอุณหภูมิห้อง

(2) กระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

(3) แรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V Curve ; I-V) เซลล์แสงอาทิตย์ ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 2.2 ผลจากการ ทดลองวงจรดังภาพประกอบ 2.1 พบว่าลักษณะของเส้นโค้งของกระแสและแรงดัน (I-V) เมื่อปริมาณ แสงตกกระทบคงที่จะทำให้เกิดตามภาพประกอบ 2.2

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_o \cdot (\frac{qV}{e^{kT}} - 1)$$
(2.1)



ภาพประกอบ 2.1 วงจรสมมูลอย่างง่าย<mark>ของ</mark>เซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ต่ออยู่กับโหลด [33]



ภาพประกอบ 2.2 การเกิดขึ้นข<mark>องเส้นโค้งขอ</mark>งเซลล์แสงอาทิตย์จากเส้นโค้งไดโอด [33]

สมมุติให้ขั้วต่อโหล<mark>ดเกิดการลัดวงจรขึ้น (R lo</mark>ad = 0) แรงดันด้านออกและแรงดันด้านที่ตก คร่อมไดโอ<mark>ดมีค่า 0 ตามสมการที่</mark> 2.2 แรงดัน V=0 (จุด<mark>ที่ 1 ในภาพประกอบ</mark>2.2) ดังนั้นกระแส ้ทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์จะไหลไปที่เอาท์พุต ดังนั้นกระแสสูงสุดที่มีที่จุดนี้จะ เรียกว่า กระแสลัดวงจร (Shot-Circuit Current, I_{sc}) โต ชี่ไว

ถ้าความต้านทานของโหลดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จะเพิ่มสูงขึ้น ค่าของกระแสจะมีค่าเท่าเดิม ดังนั้นกระแสด้านออกจะสัมพันธ์กันกับกระแสของแหล่งจ่าย (Photo Current)

 $I_{sc} = I_{cell} = I_{ph}$

(2.2)

เมื่อแรงดันไดโอดเริ่มมากขึ้นหลังจากค่าความต้านทานโหลดเพิ่มขึ้นแล้วสัดส่วนที่เพิ่มอย่าง รวดเร็วของกระแสของแหล่งจ่ายทำให้ไดโอดนำกระแสและกระแสจะไหลผ่านไดโอด กระแสนี้ทำให้ เกิดการสูญเสียกำลังภายในไดโอดเอง ซึ่งจะสัมพันธ์กับพื้นที่เส้นโค้งของกระแสของแหล่งจ่าย และ เส้นโค้งกระแสเซลล์ เนื่องจากผลรวมของกระแสโหลดและกระแสไดโอดต้องมีค่าเท่ากับค่าคงที่ของ กระแสของแหล่งจ่าย ดังนั้นกระแสด้านออกจะมีขนาดลดลง (จุดที่ 3 ในภาพประกอบ 2.2)

สำหรับโหลดที่มีค่าความต้านทานมาก ๆ (Open Circuit) แสดงในภาพประกอบ 2.3 กระแส ด้านออกมีค่าเท่ากับ 0 (*I_{cell}* =0) ดังนั้นผลรวมของกระแสของแหล่งจ่ายที่ไหลผ่านไดโอดภายใน (จุดที่ 4 ในภาพประกอบ 2.2) ขณะเปิดวงจร open-circuit voltage (*V_{oc}*) สามารถหาได้โดยสมการ (2.3) และมีลักษณะวงจรสมมูลดังภาพประกอบ 2.3



ภาพประกอบ 2.3 วงจร<mark>สมมูลของเซล</mark>ล์แสงอาทิตย์ขณะวงจรเปิด [33]

ซึ่งค่าของแรงดันเปิดวงจรการของซิลิคอนเซลล์จะมีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 0.6 และสำหรับอะ-มอร์ฟัสมีค่าระหว่าง 0.6 ถึง 0.9 ซึ่งกล่าวโดยสรุปแล้วจะเห็นว่าเส้นโค้งคุณลักษณะของเซลล์ แสงอาทิตย์มีลักษณะเหมือนเส้นโค้งตรงข้ามกับคุณสมบัติไดโอด

เนื่องจากกำลังไฟฟ้าเกิดจากผลคูณของกระแสและแรงดัน ดังนั้นเส้นโค้งของการส่งผ่าน กำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถจ่ายได้ขึ้นอยู่กับระดับของแสงที่ได้รับ และเป็นไปตามกราฟ คุณสมบัติ I-V ที่ตรงข้ามไดโอดตามภาพประกอบ 2.4 ซึ่งจะเกิดจุดที่เซลล์ให้พลังงานสูงสุด ที่เรียกว่า maximum power point หรือ MPP



ภาพประกอบ 2.4 เส้นโค้งกำ<mark>ลังไฟ</mark>ฟ้าและจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPP) [33]

ถึงแม้ว่าค่ากระแสสูงสุดของเซลล์จะอยู่ที่จุดลัดวงจรก็ตาม แต่จุดดังกล่าวให้ค่ากำลังเป็น 0 W และในทางกลับกันที่จุดเปิดวงจร ค่าของกำลังที่จุดนี้ก็เป็น 0 ด้วย แม้จะมีแรงดันสูงสุด ในระหว่าง ที่มีผลที่เกิดจากการรวมกันของกระแสและแรงดันที่ทำให้มีค่าของกำลังมี ซึ่งเป็นจุดที่เซลล์ แสงอาทิตย์ทำงานโดยได้รับความเข้มจากการส่องแสงส่งผ่านกำลังสูงสุด เมื่อพิจารณาที่เส้นกราฟส่วน โค้งของ I-V ค่าของและสามารถคำนวณจาก [33]

$$V_{MMP} \approx (0.75 - 0.9) V_{oc}$$
 (2.4)
 $I_{MMP} \approx (0.85 - 0.95) I_{sc}$ (2.5)

และค่า Fill Factor (FF) เป็นค่าที่นำมาพิจารณาเพื่อหาคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์โดยอธิบาย โดยสมการ (2.6)

$$FF = \frac{(V_{MPP}, I_{MPP})}{(V_{oc}, I_{sc})}$$
(2.6)

ซึ่งค่า คุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (Fill Factor) ซึ่งมันจะแสดงว่า กราฟคุณลักษณะเส้น โค้งของ I-V มีค่าเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมมากน้อยเพียงใด โดยปกติแล้วซิลิคอนเซลล์ จะมีค่าประมาณ 0.7-0.8 ส่วนกำลังด้านออกของเซลล์ก็คือ

$$P_{MPP} = V_{MPP} \cdot I_{MPP} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF$$
(2.7)

ดังนั้นค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประมาณค่าได้จาก อัตราส่วนของพลังงานไฟฟ้า ด้านออก ต่อ พลังงานแสงอาทิตย์ด้านเข้า (P_{in}) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\eta = \frac{V_{oc.} I_{sc}.FF}{P_{in}}$$
(2.8)

ในปัจจุบันนี้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ซิลิ<mark>คอ</mark>นเซลล์ ได้รับแสงอาทิตย์ขนาด 1.5 AM จาก การ ทดลองในห้องปฏิบัติการมีค่าประมาณ 24% และในส่วนที่มีใช้งานทั่วไปนั้นจะมีประสิทธิภาพ 10-14% ถึงแม้ทางทฤษฎีมีประสิทธิภาพปรัมาณ 26-27% ก็ตาม [33]

2.1.2 วงจรการทำงานเบื้องต้น

เมื่อพิจารณาถึงพฤติกรรมของเซล<mark>ล์แสง</mark>อาทิตย์ในทางปฏิบัติ จะพบว่ามีส่วนประกอบความ ต้านทานเพิ่มอีก 2 ค่า ภายในเซลล์ก็คือ R_{s} ที่ต่ออนุกรมและ R_{p} ที่ต่อขนานอยู่ซึ่งพิจารณาได้จากรูป วงจรสมมูลในภาพประกอบ 2.5 โดย R_{s} เปรียบได้กับการสูญเสียทางไฟฟ้าและ R_{p} เปรียบได้กับ ความต้านทานที่จุดต่อ ค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรม (R_{s}) เกิดจากความต้านทานของซิลิคอนที่เรียง กันเป็นชั้น และ ความต้านทานของขั้วโลหะด้านหน้าและด้านหลังที่เป็นผลมาจากการต่อกับขั้วต่อ ภายนอก ส่วนค่า ความต้านทานที่ต่อขนานส่วนใหญ่เกิดจากการรั่วไหลของกระแสเนื่องจากรอยต่อ N-P junction ที่ ไม่สมบูรณ์ ซึ่งทำให้เกิดการลัดวงจรบางส่วนโดยเฉพาะใกล้กับขอบของเซลล์ แต่ อย่างไรก็ดีการลดค่าความต้านทานอนุกรมลงก็มีลักษณะเช่นเดียวกับการลัดวงจร ค่าต่าง ๆ เหล่านี้ก็ จะมีผลกับค่าของ Fill Factor จะส่งผลให้ค่ากำลังด้านออกสูงสุดลดลง ภาพประกอบ 2.6 คือ ผล ของ R_{s} ส่วนภาพประกอบ 2.7 คือ ผลของ R_{s}



ภาพประกอบ 2.5 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริง [33]

จากวงจรดังภาพประกอบ 2.5 จะสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



ภาพประกอบ 2.6 กราฟเส้นโค้งข<mark>อง I-V ที่</mark>มีความต้านทานอนุกรมค่าต่าง ๆ กัน [33]



2.1.3 ความสูญเสียต่าง ๆ ในเซลล์แสงอาทิตย์

2.1.3.1 ความสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนแสงจากการส่องแสงในอากาศไปยังสารกึ่ง ตัวนำ เนื่องจากมีดัชนีการหักเหแสงที่ต่างกัน โดยความสูญเสียเหล่านี้ลดลงได้โดยการเคลือบผิวสาร กัน สะท้อนหรือปรับโครงสร้างของผิวเซลล์อีกส่วนคือ การสะท้อนของโลหะที่เชื่อมต่อด้านหน้าของ แผงเซลล์

2.1.3.2 ความเข้มของแสงซึ่งลักษณะการส่องของแสงอาทิตย์ในช่วงกว้าง ๆ (Wide Spectrum) โฟตอนมีพลังงานไม่เท่ากัน โฟตอนที่มีพลังงานเพียงเล็กน้อยกว่าอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ และช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Energy gap หรือ band-gap, Eg) band-gap จะทำให้ไม่สามารถ ดูดซับและนำไปใช้ได้เนื่องจากไม่มีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ และจะไม่เกิด พันธะคู่ระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล ในกรณีที่โฟตอนมีขนาดพลังงานมากกว่า band-gap หรือ เท่ากับ band-gap เท่านั้นที่จะถูกนำไปใช้ได้ ถ้ามีแสงมากเพียงใดก็ตาม แต่พลังงานไม่ถึง band-gap ก็ไปใช้ ประโยชน์ไม่ได้ ซึ่งส่วนนี้ไม่ได้ใช้ประโยชน์แต่กลับจะทำให้เกิดความร้อนภายในผลึกได้

2.1.3.3 เนื่องจากกระแสโของแหล่งจ่ายจะเป็นสัดส่วนกันโดยตรงจำนวนโฟตอนที่ดูด ซับได้ต่อหน่วยเวลา เมื่อกระแสของแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้น band-gap จะลดลง และ band-gap ก็เป็น ตัวกำหนดแรงดันที่บริเวณ รอยต่อ P-N junction เมื่อ band-gap ที่มีขนาดเล็กลงจะเป็นผลให้ แรงดันลดลง ในกรณีที่ band-gap มีขนาดใหญ่จะมีค่าแรงดันสูงขึ้น แต่แสงอาทิตย์เพียงส่วนน้อยที่ ถูกดูดซับได้ ก็จะเป็นผลให้เกิดกระแสของแหล่งจ่ายขึ้นมาเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัด กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซลล์

2.1.3.4 กระแสมืด (Dark Current , I_o) มีค่ามากกว่าค่าในทางทฤษฎีทำให้แรงดัน ลดลงซึ่งเป็นไปตาม สมการที่ (2.3)

2.1.3.5 ประจุพาหะรวมตัวกันไม่หมด (Recombination) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่จุดที่มี ความไม่สมบูรณ์ เช่น ความบกพร่องภายในผลึกหรือความบริสุทธิ์ ดังนั้นวัสดุที่นำมาทำจะต้องมีความ เป็นผลึกที่สมบูรณ์และมีความบริสุทธิ์ให้มากที่สุด ในทำนองเดียวกัน ผิวของวัสดุกึ่งตัวนำจะต้องอยู่ใน โครงสร้างผลึกที่มีความแข็งแรงทนต่อการรบกวนภายนอก

2.1.3.6 ค่าความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานที่เกิดขึ้นส่งผลให้ Fill Factor ลดลง

2.1.4 ผลกระทบจากระดับของแสงอาทิตย์

ตามความสัมพันธ์ของกระแสของแหล่งจ่ายที่เกิดขึ้นต่อแสงอาทิตย์จะมีสัดส่วนที่เป็นเชิงเส้น กับแสงอาทิตย์ เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์และกราฟ คุณลักษณะของเส้นโค้ง จะ พบว่าเส้นโค้งเกี่ยวข้องกับแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดภายใน ซึ่งสัมพันธ์กับคุณลักษณะของไดโอดและ เมื่อความเข้มของแสงสว่างต่ำ V_c และ I_x ก็ต่ำตามไปด้วยดังภาพประกอบ 2.8



ภาพประกอบ 2.8 เส้นโค้งคุ<mark>ณลักษณ</mark>ะของ I-V ที่ค่าแสงสว่างที่ต่างกัน [37]

2.1.5 ผลของอุณหภูมิ

ถ้าอุณหภูมิของเซลล์สูงขึ้นจะทำให้อิเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อ P-N สามารถที่จะมีพลังงาน ในการเคลื่อนตัว จึงทำให้กระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แต่ไม่มากนัก ประมาณ 0.07% [37]

ผลของ $oldsymbol{V}_{_{\!\mathcal{D}}}$ ปกติจะขึ้นอยู่<mark>กับปริมาณของแสง อย่</mark>างไรก็ดีตามกฎของซอกลีย์จะได้ค่า

$$I_{o} = qN_{v}N_{c}\left[\exp(\frac{-E_{g}}{kT}\right]\left(\frac{L_{n}}{n_{n}\tau_{n}} + \frac{L_{p}}{p_{p}\tau_{p}}\right)$$
(2.10)

 N_{ν}, N_{c} คือ ค่าความน้ำที่รอยต่อ E_{s} คือ พลังงานที่รอยต่อ $L_{n}, L_{p}n_{n}, p_{p}, \tau_{n}, \tau_{p}$ ระยะ การกระจายความเข้มอิเล็กตรอน อายุของอิเล็กตรอนและโฮล, ดังนั้นจากสมการ (2.8) และ (2.3), ให้ $I_{ph} \gg I_{o}$ จะได้ว่า

$$V_{oc} = \frac{E_g}{q} - \frac{kT}{q} \cdot \ln\left[\frac{1}{I_{ph}} \cdot q N_v N_c\right] \left(\frac{L_n}{n_n \tau_n} + \frac{L_p}{p_p \tau_p}\right)$$
(2.11)

จะเห็นว่า V_c จึงมีผลกับอุณหภูมิเช่นกัน คือ V_c ลดลงประมาณ 0.4% ต่อองศาเคลวิน ใน การติดตั้งใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ต้องคำนึงถึงอุณหภูมิด้วย เพราะการติดตั้งกลางแจ้งอุณหภูมิอาจสูง มากกว่า 40 องศาเคลวินจากอุณหภูมิมาตรฐาน ดังนั้นการระบายความร้อนอาจจะต้องจำเป็นในบาง โอกาส อย่างไรก็ดี เมื่ออุณหภูมิมีผลกับแรงดันดังนั้นกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ก็มีผลกระทบ



ด้วย พลังงานลดลง 0.4-0.5% จากผลกระทบดังกล่าวสามารถที่จะนำมาแสดงได้ดังภาพประกอบ 2.9

ค่าปกติในการทดสอบเซ<mark>ลล์แสงอาทิตย์ที่วัตต์สูงสุด</mark> (Watt peak ,Wp) การควบคุมสภาวะที่ เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Stand Test Conditions ,STC) ซึ่งมีความเข้ม แสง 1000 W/m² อุณหภูมิ 25 °C และ AM1.5 (Air Mass 1.5) ดังนั้น พลังงานสูงสุดสามารถจะเกิน ได้ถ้าแสงมากกว่าและอุณหภูมิกว่าที่กำหนดและสามารถจะลดลงได้ในทางตรงกันข้ามเช่นกัน

2.1.6 การต่อเซลล์เป็นแผงเซ<mark>ลล์ (PV Module</mark>)

การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่ถูกนำมาใช้เพียงเซลล์เดียว แต่เซลล์จะถูกต่อรวมกันเป็น วงจรเพื่อจะได้รับค่าพลังงานที่สูงขึ้น เรียกว่า แผงหรือโมดูล (Modules) ซึ่งจากนั้นจะถูกรวมต่อวงจร เข้า ด้วยกันจนเป็นกลุ่มเพื่อใช้งานที่เรียกว่า อัลเรย์ (Arrays) ซึ่งสามารถต่อรวมกันได้เป็นตั้งแต่ไม่กี่ W จนถึงMW

2.1.6.1 การต่อแบบขนาน (Parallel Connection)

ถ้าต้องการกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์จะถูกต่อในแบบขนานดัง ภาพประกอบ 2.10



ภาพประกอบ 2.10 ตัวอย่<mark>างก</mark>ารต่อเซลล์แบบขนาน 3 เซลล์ [33]

จากภาพประกอบ 2.10 จะเห็นได้ว่<mark>าลัก</mark>ษณะของการต่อรูปแบบนี้ แรงดันไฟฟ้าที่ข้ามผ่านไป ในแต่ล่ะเซลล์นั้นจะเท่ากันในขณะที่กระแสไฟฟ้าทั้งหมดจะเป็นจุดรวมของเซลล์ กระแสไฟฟ้าแต่ละ เซลล์ย่อยรวมกัน ดังนั้นจะได้กราฟ I-V ตามที่ได้แสดงในภาพประกอบ 2.11



ภาพประกอบ 2.11 ตัวอย่างกราฟ I-V ของการต่อแบบขนาน 3 เซลล์ [33]

ปัญหาของการทำงานของโมดูลแบบขนานจะเกิดขึ้นเมื่อส่วนหนึ่งของโมดูลถูกบังแสง (Shading) ตามที่ชี้ให้เห็นในภาพประกอบ 2.12 ซึ่งเป็นตัวอย่างการต่อเซลล์แบบขนาน 3 เซลล์


ภาพประกอบ 2.12 ห<mark>นึ่ง</mark>เซลล์ถูกบังแสง (Shading) [33]

โดยเซลล์ที่เหมือนกัน 3 เซลล์ (Identical Cells) จะถูกต่อกันในแบบขนาน และจะมีเซลล์ หนึ่งที่ถูกแสงบังอย่างเต็มที่ ซึ่งต่อมาก็จะหยุดการผลิต กระแสไฟฟ้า และในกรณีที่แย่ที่สุดนั้นจะ เกิดขึ้นเมื่อวงจรเปิด (Open-Circuit Condition) นั่นคือ การไม่มีโหลดเนื่องจากเซลล์ที่ถูกบังแสงนั้น จะมีสภาพที่เย็นกว่าอีก 2 เซลล์ที่เหลือ, แรงดันเปิดวงจรจึงสูงขึ้นตามเส้นลักษณะ I-V ด้วยดัง ภาพประกอบ 2.9 แต่ด้วยการต่อแบบขนานแรงดันไฟฟ้าผ่านเซลล์ทั้ง 3 เซลล์นั้นเท่ากันและไดโอด ของเซลล์ที่ถูกบังก็ไม่มีกระแส แต่มีแรงดันตกคร่อมจึงสามารถที่จะทำให้กระแสไหลผ่านไดโอดเกิน พิกัดได้ การต่อแบบขนานนี้จึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานตามปกติ รวมทั้งกระแสสูงต้องใช้ตัวนำ ขนาดใหญ่ขึ้นมีราคาแพง จึงนิยมใช้งานต่อแบบอนุกรมมากกว่า

2.1.6.2 การต่อแบบอนุกรม (Series Connection) ในลักษณะของการต่อเซ<mark>ลล์แบบอนุกรม แสดงดังใน</mark>ภาพประกอบ 2.13 กระแสไฟฟ้าจะไหล ผ่านเซลล์แต่ละเซลล์ ขณะที่แร<mark>งดันไฟฟ้าทั้งหมดจะเท่ากั</mark>บผลรวมของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ กราฟ I-V จะแสดงภาพประกอบ 2.14

การเชื่อมต่อแบบอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นเหตุให้เกิดผลกระทบอันไม่พึงปรารถนา เมื่อบางเซลล์ถูกแสงบังและในกรณีที่แย่ที่สุ<mark>ดจะเกิดขึ้นเมื่อวง</mark>จรปิด





ในกรณีเซลล์ถูกบังตามที่แสดงในภาพประกอบ 2.15 เซลล์ที่ถูกบังแสงจะไม่ผลิตกระแสไฟฟ้า และจะทำงานเหมือนการเปิดวงจร ดังนั้นจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรของเซลล์ได้ ในทางตรง ข้ามกันแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากเซลล์อีก 2 เซลล์จะตกคร่อมเซลล์ที่ถูกบังและสามารถทำให้เซลล์ที่ถูก บังเสียหายได้



ภาพประกอบ <mark>2.15</mark> หนึ่งเซลล์ถูกบังแสง [33]

เนื่องด้วยในความเป็นจริงไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจร พลังงานที่ถูกผลิตออกมาในกรณีนี้ จึงเป็นศูนย์โดยวิธีการแก้ไขอาจทำได้โดย เชื่อมต่อบายพาสไดโอด (Bypass Diode) ไปยังเซลล์ดัง ภาพประกอบ 2.16 เพื่อแรงดันจะไม่ตกคร่อมเซลล์ที่อับแสงและที่สำคัญกระแสก็สามารถ ผ่าน บายพาสไดโอดไปได้ด้วยภายใต้สภาพธรรมดา เช่น ไม่มีการอับแสง บายพาสไดโอดจะอยู่ในสภาวะ รีเวิร์สไบอัส (Reverse bias) จึงไม่มีผลกับวงจรและเซลล์แต่ละเซลล์ดังที่แสดงในภาพประกอบ 2.16 จะเห็นได้ว่า เมื่อเซลล์ลำดับที่ 3 ถูกบังแสงบายพาสไดโอดจะนำกระแสและส่งกำลังไฟฟ้าได้ และ กราฟ I-V จะเป็นดังภาพประกอบ 2.17







ในกรณีที่เซลล์ลำดับที่ 3 ถูกบังแสงเป็นบางส่วน ดังภาพประกอบ 2.18 20% ของเซลล์ ได้รับแสง เซลล์ยังสามารถที่จะผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีก 20% ในส่วนของการเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้า แบบอนุกรม แม้ว่าเซลล์อีก 2 เซลล์จะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าเองได้ 100% แต่ปริมาณของกระแส ที่ไหลเวียนในวงจรนั้นมีค่าเท่ากับปริมาณของกระแสที่ผลิตโดยเซลล์ที่ 3 ดังภาพประกอบ 2.19 ส่วน ที่ เหลือของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตโดยเซลล์แรก จะไหลไปยังไดโอดของตัวมันเองและของเซลล์ที่ 3 รวมทั้งแรงดันตกคร่อมเซลล์ที่อับแสงบางส่วนจะทำให้ส่วนนี้เกิดความร้อน (Hot spot) ทำให้เซลล์ เสียหาย



ภาพประกอบ 2.18 การต่อแบบอ<mark>นุกรมส</mark>ามเซลล์โดยมีหนึ่งเซลล์อับแสงบางส่วน [33]





สำหรับการต่อเซลล์แบบอนุกรม เซลล์ที่มีคุณภาพต่ำสุดจะเป็นตัวกำหนดพลังงานที่ ได้ด้วย เหตุนี้การต่ออนุกรมแผงที่มาจากหลายบร<mark>ิษัทหรือ</mark>จากการผลิตที่แตกต่างกัน จึงไม่ควรทำ นอกจากนี้ ไม่ใช่โมดูลทั้งหมดที่ประกอบด้วย บายพาสไดโอด ดังนั้นจึงต้องตรวจสอบให้ดี และที่ดี ที่สุดต้อง หลีกเลี่ยงเงา เช่น จากเคเบิล ส่วนสูงของต้นไม้โครงสร้างรอบ ๆ ที่อยู่ใกล้ และควรทำความสะอาด เซลล์เป็นประจำเพื่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่ดีกว่า

เพื่อให้เข้าใจและง่ายต่อก<mark>ารเขียนหรือออกแบบใช้</mark>งานเซลล์แสงอาทิตย์ ในปัจจุบันจึง อธิบาย วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ด้วย<mark>สัญลักษณ์ [3</mark>3] ดังภาพประกอบ 2.21



2.1.7 คุณสมบัติและตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

ตัวแปรที่สำคัญที่มีส่วนทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการทำงานในแต่ละพื้นที่ ต่างกัน และมีความสำคัญในการพิจารณานำไปใช้ในแต่ละพื้นที่ ตลอดจนนำไปคำนวณระบบหรือ คำนวณ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องใช้ในแต่ละพื้นที่ มีดังนี้

2.1.7.1 ความเข้มของแสง (Solar Intensity)

กระแสไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของแสง หมายความว่า เมื่อความ เข้มของ แสงสูงกระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าหรือโวลต์แทบจะไม่ แปรไปตามความเข้มของแสงมากนัก ความเข้มของแสงที่ใช้วัดเป็นมาตรฐาน 1000 W/m² จะใช้ค่า AM1.5 เป็นมาตรฐานในการวัดประสิทธิภาพข<mark>อ</mark>งเซลล์

2.1.7.2 อุณหภูมิ (Temperature)

เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตกระแสไฟฟ้าที่ไม่แปรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปมากนัก ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเมื่อ อุณหภูมิสูงขึ้นโดยเฉลี่ยแล้วทุก ๆ 1 องศาเซลเซียสที่เพิ่มขึ้นจะทำ ให้แรงดันไฟฟ้าลดลง 0.4-0.5% และแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพของแผง เซลล์คือ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เช่น กำหนดไว้ว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าที่วงจร เปิด (Open Circuit Voltage , V_{cc}) ที่ 21 โวลต์ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะหมายความว่า แรงดันไฟฟ้าที่จะได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อยังไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 25 องศา เซลเซียส จะเท่ากับ 21 โวลต์ ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส เช่น อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของแผงแสงอาทิตย์ลดลง 2.5% (0.5% X 5 องศาเซลเซียส) นั่นคือ แรงดันของ แผงแสงอาทิตย์ที่ V_{cc} จะลดลง 0.525 โวลต์ (21 โวลต์ X 2.5%) เหลือเพียง 20.475 โวลต์ (21 โวลต์ - 0.525 โวลต์) สรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันไฟฟ้าจะลดลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสูดของ แผงแสงอาทิตย์คลดลงด้วย

2.1.8 แบบจำลองแผงเซ<mark>ลล์แสงอาทิตย์</mark>

การศึกษาคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์โดยการจำลองจะสามารถที่เข้าใจการทำงานของ เซลล์แสงอาทิตย์ได้มากขึ้น การนำสมการคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์มาวิเคราะห์โดยการ จำลองสามารถทำได้ด้วยสมการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ดังภาพประกอบ 2.1 โดยเพิ่มค่า $R_{,}$ เข้ ไปในวงจรเพื่อศึกษาผลกระทบตามการใช้งานจริง

จ<mark>ากวงจรสมมูล สามา</mark>รถเขียนสมการได้ดังสมการ (2.1<mark>2)</mark>

 $I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_{sat} \left[e^{\frac{V + IR_s}{V_t}} \right]$

ใน

เปื่อ

(2.12)

ลีเว

I_{ph} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่าย (A)

- V, คือ Thermal Voltage (V)
- I_{sat} คือ ค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอด(A)
- I_D คือ ค่ากระแสที่ไหลผ่านไดโอด (A)

ในสภาวะลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ กระแสจะไหลผ่านไดโอดน้อยมากจนไม่มีผลต่อ การ คำนวณที่สภาวะลัดวงจร แต่เนื่องจากกระแสของแหล่งจ่ายเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง ซึ่ง สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (2.13)

$$I_{ph}(Ga,T) = I_{scs} \frac{Ga}{Gas} [1 + \Delta I_{sc} (T - T_s)]$$
(2.13)

เมื่อ

 Ga
 คือ ค่าความเข้มแสง

 I
 คือ อุณหภูมิสมบูรณ์

 I_scs
 คือ ค่ากระแสลัดวงจรที่ทดสอบภายใต้สภาวะมาตรฐาน

 Gas
 คือ ค่าความเข้มแสงมาตรฐาน 1000 W/m²

 ΔI_{sc} คือ ค่ากระแสลัดวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงตามสัมประสิทธิ์ของ

 T_
 คือ ค่าอุณหภูมิมาตรฐาน 298 K

ในสภาวะเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์สา<mark>มารถค</mark>ำนวณแรงดันเปิดวงจรได้ดังสมการที่ (2.14)

$$\mathbf{V}_{\rm oc}(\mathbf{T}) = \mathbf{V}_{\rm ocs} + \Delta \mathbf{V}_{\rm oc}(\mathbf{T} - \mathbf{T}_s)$$
(2.14)

เมื่อ **V**_{ocs} คือ ค่าแรงดันเปิดวงจ<mark>รที่ทดสอบภายใต้สภาวะม</mark>าตรฐาน

∆V_{cc} คือ ค่าแรงดันเปิดวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงตามสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิจากวงจรสมมูล ของเซลล์สามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสได้ดังสมการที่ (2.15)

$$I_{ph}(Ga,T) = I_D(Ga,T)$$
(2.15)

ซึ่งดังที่กล่าวมาแล้วว่<mark>าสมการกระแสของไดโอ</mark>ดสามารถ<mark>หาได้จากสมการที่</mark> (2.16)

3163 (2.16)

เมื่อ thermal voltage สามารถหาได้จาก สมการที่ (2.17)

 $I_D = I_{sat} \times [e^{\frac{V_{ac}}{\bar{V}_t}} - 1]$

$$V_{t} = \frac{AkT}{q}$$
(2.17)

เมื่อ

คือ ค่า Ideality

Α

- คือ ค่ากระแสอิ่มตัวที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงและอุณหภูมิ T_{sat}
- คือ ขนาดประจุมีค่า 1.602 X 10-19 คูลอมบ์ q
- คือ ค่าคงที่ Boltzmann มีค่า 1.38 X 10⁻²³ J/k k

้ดังนั้นกระแสอิ่มตัวของไดโอดสามารถหาได้จา<mark>ก</mark>สมการที่ (2.18)

$$I_{sat} = \frac{I_{ph}}{\frac{V_{oc}}{V_t} - 1}$$
(2.18)

้นอกจากนี้ในการศึกษาพลังงานที่ไ<mark>ด้จา</mark>กเซลล์แสงอาทิตย์นั้น เพียงสมการพื้นฐานของเซลล์ ้แสงอาทิตย์ที่ได้ตามทฤษฎีของสารกึ่งตัวน<mark>ำอาจ</mark>จะไม่มีความเหมาะสมที่จ<mark>ะ</mark>นำมาวิเคราะห์ทางด้าน ้วิศวกรรม ดังนั้นความสามารถของเซลล์แ<mark>สงอาทิ</mark>ตย์ที่รับพลังงานแสงอาทิตย์แล้วผลิตเป็น พลังงาน ้ ไฟฟ้าได้รายชั่งโมงนำมาคำนวณหาค่ากระ<mark>แสด้าน</mark>ออกของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถหาได้จากสมการ ี้ ที่ (2.17) และ (2.16) ส่วนการหาค่าแรง<mark>ดันด้านอ</mark>อกของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.17) ແລະ (2.20)

$$\Delta I_{pv} = \alpha \left[\frac{G_{\beta}}{G_{ref}} \right] \Delta T_{ref} + \left[\frac{G_{\beta}}{G_{ref}} \right]^2 - 1$$

$$I_{pv} = I_{sc} + \Delta I_{pv}$$
(2.19)
(2.20)

$$\Delta V_{pv} = -v\Delta T_{ref} - R_s \Delta I_{pv}$$

$$V_{nv} = V_{ref} + \Delta V_{nv}$$
(2.21)
(2.22)

$$V_{pv} = V_{ref} + \Delta V_{pv} \tag{2.22}$$

้ดังนั้นสมการพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ที่เวลาใด ๆ คำนวณได้จากสมการที่ (2.23)

$$W_{pv} = \int_{i}^{y} (V_{pv}(t)I_{pv}(t))dt$$

(2.23)

เมื่อ

ะแสด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (แอมแปร์) I_{p} คือ กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (แอมแปร์) I_{sc} คือ กระแสอ้างอิงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (แอมแปร์) I_{ref} คือ แรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (โวลต์) V_{pv}

6

- V_{ref} คือ แรงดันอ้างอิงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (โวลต์)
- **R**_s คือ ความต้านทานอนุกรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (โอห์ม)
 - คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสเมื่อจากอุณหภูมิของแผงเซลล์ แสงอ<mark>าท</mark>ิตย์ (เปอร์เซ็นต์/องศาเซลเซียส)
 - คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันเมื่อจากอุณหภูมิของแผงเซลล์ แสงอ<mark>าท</mark>ิตย์ (เปอร์เซ็นต์/องศาเซลเซียส)

2.2 หลักการพื้นฐานวงจรแปลงผันไฟฟ้ากร<mark>ะแ</mark>สตรง

α

การแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง (DC to DC Converter) หมายถึง การแปลงผันกำลังไฟฟ้า จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอีกระดับหนึ่ง ซึ่งระดับแรงดันขาออกอาจต่ำกว่าหรือสูงกว่าแรงดัน ด้านขาเข้าก็ได้ หลักการเบื้องต้นของวงจรแปลงผันไฟฟ้า คือ ใช้สวิตซ์กำลังเป็นตัวตัดและต่อ แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายให้แก่โหลดเป็นสัดส่วนกับคาบเวลาสวิตซ์ เพื่อควบคุมสวิตซ์เป็นสัดส่วนกับ เวลาจะทำให้ค่าแรงดันเฉลี่ยขาออกมีระดับแรงดันตามต้องการ วิธีการแปลงผันแบบนี้เรียกว่า วงจร แปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง (DC Chopper Circuit) ซึ่งอาจเรียกสั้น ๆ ได้ว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้า [37]

การแปลงผันกำลังไฟฟ้าโดยวงจรแปลงผันไฟฟ้าสามารถออกแบบให้แรงดันเฉลี่ยทางขาออก มีค่าสูงกว่าแรงดันทางขาเข้าหรือ ให้แรงดันทางขาเข้ามีค่าสูงกว่าแรงดันเฉลี่ยทางขาออกขึ้นอยู่กับ อัตราการแปลงผัน a (a = output voltage/input voltage) ถ้า a น้อยกว่าหรือเท่ากับหนึ่งจะเป็น วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน (Voltage step down chopper) และถ้า a มากกว่าหนึ่ง วงจรนี้จะเรียกว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบทบแรงดัน (Voltage step up chopper) วงจรแปลงผัน ไฟฟ้าโดยทั่วไปสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานควบคุมโหลดดังภาพประกอบ 2.22 ขาเข้าจะเป็น แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนภาคแรงดันขาออกสามารถลดหรือเพิ่มแรงดันโดยสวิตซ์สารกึ่งตัวนำ เช่น บีเจที มอสเฟต ไอจีบีที ซึ่งง่ายต่อการควบคุมเกต ส่วนการใช้เอสซีอาร์หรือ จีทีโอเป็นสวิตซ์จะใช้ กับกำลังไฟฟ้าสูง จะมีความยุ่งยากมากขึ้นในวงจรสับเปลี่ยนกระแสด้วยสวิตซ์ (Commutation)



ภาพประกอบ 2.22 พื้นฐานวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง [8]

2.2.1 หลักการควบคุมสัญญาณพี่ดับเบิลยูเอ็ม

การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในวงจรแปลงผันไฟฟ้า สามารถควบคุมค่ารอบทำงาน หรือ ดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle , D) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า _t , r หรือความถี่ เพื่อทำให้แรงดันขา ออก (_V) เปลี่ยนแปลงค่าได้การควบคุมการส[ุ]วิตซ์นี้แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ



ภาพประกอบ 2.23 หลักการควบคุมสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม : (ก) วงจรแปลงผันไฟฟ้าใช้ ทรานซิสเตอร์กำลังเป็นสวิช์ (ข) รูปคลื่นของแรงดันขาออก V₂ แบบ (PFM) ที่ t_{on1}≠t_{on2}, T = constant (ค) รูปคลื่นของแรงดันขาออก V₂ แบบ (PFM) ที่ T₁ ≠ T₂ [36]

2.2.1.1 การควบคุมแบบความถี่สวิตซ์คงที่ (Constant switch frequency) การควบคุมแรงดันขาออกแบบความถี่สวิตซ์คงที่ เป็นการปรับช่วงเวลา t_m และ
 t_m โดยคาบเวลาสวิตซ์จะคงที่ การควบคุมแบบนี้เรียกว่า การควบคุมโดยปรับความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation , PWM) รูปร่างของรูปคลื่นขาออกแสดงในภาพประกอบ 2.23 (ข)

2.2.1.2 การควบคุมแบบความถี่สวิตซ์เปลี่ยนแปลง (Variable switch frequency) การควบคุมแรงดันขาออกโดยให้ความถี่สวิตซ์เปลี่ยนแปลงโดยให้ t_m คงที่และปรับ เฉพาะ t_{off} การควบคุมนี้เรียกว่าควบคุมโดยปรับความถี่พัลส์ (Pulse Frequency Modulation , PFM) รูปคลื่นของแรงดันขาออกแสดงได้ในภาพประกอบ 2.23 (ค)

$$V_{o} = \int_{0}^{t_{on}} V_{o} dt = \frac{t_{on}}{T} V_{s} = ft_{on} V_{s} = DV_{s}$$

$$D = t_{on} / T = f \times t_{on} \text{ (duty cycle)}$$

$$D = \text{hiseuvinnu (duty cycle)}$$

$$V_{s} = \text{ussonunnu (duty cycle)}$$

$$V_{o} = \text{ussonunnu (duty cycle)}$$

$$T = \text{hiseuvinnu (duty cycle)$$

2.2.2 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน (Step-down chopper)

วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันจะให้แรงดันขาออกต่ำกว่าหรือเท่ากับแรงดันขาเข้า เสมอมีหลักการควบคุมเบื้องต้นเช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้ว ในทางปฏิบัติการสวิตซ์จะมีแรงดันตก คร่อมสวิตซ์กำลังประมาณ 1-2 โวลต์ ซึ่งจะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่สวิตซ์และแรงดันขาออก ลดลง แต่ในการการคำนวณทางทฤษฎีต่อไปนี้จะถือว่าเป็นสวิตซ์อุดมคติไม่คิดค่าแรงดันตกคร่อม สวิตซ์กำลัง

2.2.2.1 กรณีโหลดตัวต้านทาน

กรณีโหลดตัวต้านทานรูปคลื่นแรงดันและกระแสโหลดจะมีลักษณะเหมือนกัน นั่น คือ เมื่อสวิตซ์ปิดวงจรแรงดันตกคร่อมโหลดจะมีค่าเท่ากับแรงดันขาเข้า เมื่อสวิตซ์เปิดวงจรแรงดันตก คร่อมโหลดจะมีค่าเป็นศูนย์ แสดงในภาพประกอบ 2.24

ค่าเฉลี่ยแรงดันขาออก $(\overline{V_{_{o(AV)}}})$

$$V_{o(AV)} = \int_{0}^{t_{1}} V_{o} dt = \frac{t_{1}}{T} V_{s} = ft_{1} V_{s} = DV_{s}$$
(2.26)

ค่าอาร์เอ็มเอสแรงดันขาออก ($V_{\scriptscriptstyle o(RMS)}$)

$$V_{o(RMS)} = \left(\frac{1}{T} \int_{0}^{DT} V_{o}^{2} dt\right)^{1/2} = \sqrt{D} V_{s}$$
(2.27)

ค่ากำลังขาเข้า (**P**;)

$$P_{o} = P_{i} = \frac{1}{T} \int_{0}^{DT} V_{o} i dt = \frac{1}{T} \int_{0}^{DT} \frac{V_{o}^{2}}{R} dt = D \frac{V_{s}^{2}}{R}$$
(2.28)



(ข) รูปคลื่น [36]

2.2.2.2 กรณีโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

กรณีที่วงจรแปลงผันไฟฟ้าแปลงแบบลดทอนแรงดันมีโหลดตัวต้านทานและตัว เหนี่ยวนำ แสดงดังภาพประกอบ 2.25 แบ่งการทำงานเป็น 2 โหมดคือ โหมด 1 เมื่อสวิตซ์ปิดวงจร และ โหมด 2 เมื่อสวิตซ์เปิดวงจร โหมด 1 เมื่อสวิตซ์ปิดวงจร (turn on) กระแสจะไหลจากแหล่งจ่าย ผ่านสวิตซ์กำลังไปสู่โหลด สามารถหาค่ากระแ<mark>ส</mark>ในโหมดนี้ได้จากสมการ

$$V_s = Ri_1 + L\frac{di_1}{dt} + E$$
(2.29)

จากสมการ (2.28) กระแสเริ่มต้น $i_1(t=0)=I_1$ จะได้กระแสโหลด

$$i_{1}(t) = I_{1}e^{-tr/L} + \frac{V_{s} - E}{R}(1 - e^{-tR/L})$$
(2.30)

ในช่วงเวลาของโหมดนี้คือ $0 \le t \le t_1 (= DT)$ จนถึงเวลาสิ้นสุดของโหมดนี้กระแ<mark>สของโ</mark>หลดจะมีค่าเท่ากับ

ภาพประกอบ 2.25 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน กรณีโหลดตัวต้านทานและ ตัวเหนี่ยวนำ [36]

โหมด 2 เมื่อสวิตซ์เปิดวงจร (turn off) แรงดันขาออกเป็นศูนย์ แต่กระแสโหลดจะไหล ต่อเนื่องโดยผ่านไดโอดหมุนเปล่าสามารถหาค่ากระแสได้จาก

$$0 = Ri_2 + L\frac{di_2}{dt} + E$$
(2.32)

จากสมการ (2.31) กระแสเริ่มต้น $t_2(t=0) = I_2$ จะได้

$$i_{2}(t) = I_{2}e^{-tR/L} - \frac{E}{R}(1 - e^{-tR/L})$$
(2.33)

ในช่วงเวลาของโหมดที่ 2 นี้ $0 \le t \le t_1 (= [1 - D]T)$ จนถึงเวลาสิ้นสุดของโหมดนี้ กระแสโหลดมีค่าเท่ากับ $i_2(t=t_2)=I_3$



ภาพประกอบ 2.26 รูปคลื่นแรงดัน<mark>และกระแสวงจ</mark>รแปลงผันไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันโหลดตัว ้ต้าน<mark>ทานและตัวเ</mark>หนี่ยวนำ [36]

ค่าระลอกคลื่<mark>นกระแสยอดคลื่</mark>นถึงยอดคลื่น (ΔI)

ในสภาวะคงตัว (Steady-State Condition) กระแส I₁, I₃ ค่าระลอกคลื่นของกระแสยอด คลื่นสูงสุดถึงต่ำสุดของโหลด สามารถวิเคราะห์และหาได้จากสมการดังต่อไปนี้ $\Delta I = I_2 - I_1$ $\Delta I = \Lambda = \Lambda = \Lambda$

จากสมการ (2.29) และสมการ (2.30) หาค่า I_2 ได้

$$I_2 = \frac{-E}{R} = \frac{V_s}{R} \frac{1 - e^{-Ton/\tau}}{1 - e^{-Ton/\tau}}$$
(2.35)

และหาค่า $I_3 = I_1$ จากสมการ

$$I_{1} = \frac{-E}{R} + \frac{V_{s}}{R} \frac{e^{-Toff/\tau} - e^{-Ton/\tau}}{1 - e^{-T/\tau}}$$
(2.36)

้จากสมการ (2.34) หาค่าระลอกคลื่น<mark>ก</mark>ระแสยอดคลื่นถึงยอดคลื่นจาก

$$\Delta I = \frac{V_s}{R} \frac{1 - e^{-DTR/L} - e^{-(1-D)TR/L}}{1 - e^{-TR/L}}$$
(2.37)

โดยมีเงื่อนไขที่ทำให้ค่าระลอกคลื่น<mark>มีค่า</mark>สูงสุด

$$\frac{d(\Delta I)}{dk} = 0 \tag{2.38}$$

เมื่อให้ $e^{-DTR/L} - e^{-(1-D)TR/L} = 0$ หรือ -D = -(1-D)หรือ D= 0.5 ค่าระลอกคลื่นของ

$$\Delta I_{max} = \frac{Vs}{R} \tanh \frac{R}{4fL}$$
(2.39)

สำหรับกรณี 4 $fL \gg R$, $tanh \Theta \approx \Theta$ ระลอกคลื่นกระแสสูงสุดจะมีค่าประมาณ

$$\Delta I_{max} = \frac{V_s}{4fL}$$
(2.40)

ค่าอาร์เอ็มเอสกระแสขาออก ($I_{o(RMS)}$) สมมุติให้การเพิ่มของกระแสที่โหลดจาก I_1 ถึง I_2 เป็นเชิงเส้นสามารถหาค่าอาร์เอ็มเอส กระแสที่โหลดได้ $I_{o(RMS)} = \frac{\mathrm{DV}_{\mathrm{s}}}{R}$ (2.41)

ค่าเฉลี่ยกระแสขาออก ($I_{\scriptscriptstyle o(\mathrm{AV})})$

$$I_{o(\text{AV})} = \sqrt{D}I_{o(\text{RMS})}$$
(2.42)

จากสมการ (2.29) ถึง (2.40) ใช้เฉพาะเมื่อกระแสไหลอย่างต่อเนื่องเท่านั้น คือ $L/R \gg T$ หรือ $Lf \gg R$ ส่วนในกรณีกระแสไหลไม่ต่อเ<mark>นื่อ</mark>ง $I_1 = 0$ จากสมการ (2.30) ได้

$$i_{1}(t) = \frac{V_{s} - E}{R} (1 - e^{-tR/L})$$
(2.43)

และในช่วงเวลา $0 \le t_1 \le t_2$ ได้ $t_2(t = t_2) = I_3 = I_1 = 0$ ดังนั้น

$$t_2 = \frac{L}{R} \ln\left(1 + \frac{RI_2}{E}\right) \tag{2.44}$$

	ູ	ູ	ູ	6 6	
ตาราง 2.1	อตราการขยา	เยแรงดนของวง	จรบกคอ	นเวอรเตอร	136

duty ratio (D)	อัตราการขยาย <mark>แรงดัน</mark> (Voltage gain : $V_0^{}/V_{_{y}}^{}$)	
	วงจรบักคอนเวอร์เตอร์ ^V V _s	
0.0	0.00	
0.1	0.10	
0.2	0.20	
0.3	0.30	
0.4	0.40	
0.5	0.50	
0.6	0.60	
0.7	0.70	6.0
0.8	0.80	
0.9	0.90	
1.0	1.00	

2.2.3 สวิตซ์โหมดอินเวอร์เตอร์

การแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับในภาพประกอบ 2.27 (ก) สมมติว่าแรงดันไฟฟ้าด้านออก (v_{p}) และกระแสไฟฟ้าด้านออก (i_{p}) ผ่านวงจรกรองความถี่ สูงออกไปเหลือเฉพาะความถี่ต่ำ ดังนั้นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จะเป็นรูปไซน์ กรณีที่แสดงใน ภาพประกอบ 2.27 (ก) โหลดจะเป็นค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำดังนั้นกระแสไฟฟ้าจะล้า หลังแรงดันไฟฟ้าสำหรับในภาพประกอบ 2.27 (ข) กำลังไฟฟ้าด้านออก (P_{p}) จะพิจารณาเป็นผลคูณ ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออก (I_{p})



ภาพประกอ<mark>บ 2.27 สวิตซ์โหมดอินเว</mark>อร์เตอร์เฟสเดียว [36]

โหมดที่ 1 โหมดอินเวอร์เตอร์

 v_{j} เป็นบวก i_{j} เป็นบวก P_{j} เป็นบวก คือ กำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสตรง (V_{j}) ไปด้านไฟฟ้ากระแสสลับ (V_{j})

โหมดที่ 2 โ<mark>หมดเรียงกระแส</mark>

 v_{j} เป็นลบ i_{j} เป็นบวก P_{j} เป็นลบ คือ กำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสสลับ (v_{j}) ไปด้านไฟฟ้ากระแสตรง (v_{j})

โหมดที่ 3 โหมดอินเวอร์เตอร์

 $v_{_{J}}$ เป็นลบ $i_{_{J}}$ เป็นลบ $P_{_{J}}$ เป็นบวก คือ กำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสตรง ($V_{_{J}}$) ไปด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ($v_{_{J}}$)

โหมดที่ 4 โหมดเรียงกระแส

 $v_{_{\mathcal{S}}}$ เป็นบวก $i_{_{\mathcal{S}}}$ เป็นลบ $P_{_{\mathcal{S}}}$ เป็นลบ คือ กำลังไฟฟ้าถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ($V_{_{\mathcal{S}}}$) ไป ด้านไฟฟ้ากระแสตรง ($V_{_{\mathcal{S}}}$) สรุปรูปแบบในการทำงานดังแสดงในภาพประกอบ 2.27 (ค)

โดยในภาพประกอบ 2.28 จะแสดงเพียงหนึ่งกิ่งของวงจรอินเวอร์เตอร์ คือ กิ่ง A หรือ เฟส A ที่สมมติ ให้แรงดันไฟฟ้าด้านเข้ามีค่าคงที่และกำหนดให้การสวิตซ์ทำงานเป็นแบบพีดับเบิลยูเอ็ม เป็นวงจรที่ใช้ แสดงการทำงานของอินเวอร์เตอร์



้ **ภาพประกอบ 2.28** สวิตซ์โ<mark>หม</mark>ดอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่หนึ่งกิ่ง [36]

2.2.4 การสวิตซ์ชิ่งแบบพีดับเบิลยูเอ็ม

ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ต้องการจะสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นรูปไซน์ที่สามารถปรับ ขนาด และความถี่ตามต้องการได้ โดยจะใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ (Sinusoidal control signal) ตาม ความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular waveform) ดังใน ภาพประกอบ 2.29 (ก) ความถี่ของการสวิตซ์ซิ่ง (ƒ) จะเท่ากับความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยม คำย่อ และความหมายที่สำคัญของการสวิตซ์ซิ่งแบบพีดับเบิลยูเอ็ม มีดังต่อไปนี้

_{v_____} สัญญาณควบคุม<mark>รูปไซน์ที่ต้องการนำมาสร้า</mark>งแรงดันไฟฟ้าและความถี่ทางด้านออก

- v_m สัญญาณรูปสาม<mark>เหลี่ยมที่เป็นตัวกำหนดคว</mark>ามถี่สวิตซ์ชิ่ง
- f₁ ความถี่หลักมูลทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์
- f_s ความถี่ของการสวิตซ์ซึ่งของอินเวอร์เตอร์
- m_a อัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด
- m_f อัตราการมอดูเลต<mark>ด้า</mark>นความถึ

ค่า m จะนิยามจากสมการที่ (2.45)

เมื่อ $\hat{V}_{control}$ คือ ค่ายอดของสัญญาณควบคุมรูปไซน์

ถ้าค่า $0 \leq m_a \leq 1$ จะเป็นช่วงการมอดูเลตเชิงเส้นซึ่งหมายถึงองค์ประกอบหลักของ แรงดันไฟฟ้าด้านออก (Fundamental-frequency component of the output voltage) โดยจะ

0

(2.45)

แปรผันเชิงเส้นกับค่า *m*_a ในกรณี *m*_a>1 จะเป็นช่วงการควบคุมแบบโอเวอร์มอดูเลต (Over Modulation) ซึ่งผลของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกสูงกว่าช่วงการมอดูเลตเชิง เส้น สำหรับเงื่อนไข ของการสร้างสัญญาณสวิตซ์ซิ่งแบบพีคับเบิลยูเอ็ม อธิบายด้วยสมการ (2.46) และ (2.47)



ภาพประกอบ 2.29 การสร้างสัญญาณสวิตซ์ซิ่งแบบพีดับเบิลยูเอ็ม [36]

การทำงานของสวิตซ์ $T_{_{A^+}}$ และ $T_{_{A^-}}$ จะขึ้นอยู่กับผลการเปรียบเทียบของ $v_{_{control}}$ กับ $v_{_{Ir}}$ โดย จะมีเงื่อนไขดังสมการที่ (2.45) และ (2.46) และจะไม่ขึ้นกับทิศทางของกระแส ภาพประกอบ 2.29 แสดง ตัวอย่างเมื่อกำหนดเงื่อนไขที่ $m_a = 0.8$ และ $m_f = 15$ ฮาร์มอนิกสเปคตรา (Harmonic Spectrum) ของ $v_{_{AO}}$ โดยเขียนกราฟเทียบกับค่าแกนตั้ง $(\hat{V}_{_{AO}})_{_h}/(Vd/2)$ แสดงในภาพประกอบ 2.29 (ค) จะมีส่วนสำคัญสามส่วนคือ

ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล $(\hat{V}_{Ao})_{1} = m_{a} \left(V_{d} / 2 \right)$ โดยมีความสัมพันธ์จาก $V_{Ao} = \frac{V_{control}}{\hat{V}_{tri}} \cdot \frac{V_{d}}{2}, \qquad V_{control} \leq \hat{V}_{tri}$ $(2.48)
 V_{control} = \hat{V}_{control} \sin \omega_{1} t, \qquad V_{control} \leq \hat{V}_{tri}
 (2.48)
 (V_{Ao})_{1} = \left(\frac{V_{control}}{\hat{V}_{tri}} \cdot \frac{V_{d}}{2} \right) \sin (\omega_{1} t), \qquad m_{a} \leq 1.0$

$$(\hat{V}_{Ao})_1 = m_a (V_d/2), \qquad m_a \le 1.0$$
 (2.49)

 $m_a \leq 1.0$

สมการที่ (2.48) พิจารณาประกอบจากภาพประกอบ 2.30 แสดงให้เห็นว่า แรงดันไฟฟ้าที่ ความถี่หลักมูลจะแปรผันเป็นเชิงเส้นกับค่า man ซึ่ง man จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

 $(V_{Ao})_{I} = m_a \cdot (V_d/2) \operatorname{sin} \omega_{I} t,$



ภาพประกอบ 2.30 พีดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์ (Sinusoidal Pulse Width Modulation: SPWM) [36]

ค่าโซด์แบนด์ฮาร์มอนิก (Sideband Harmonic) จะเกิดขึ้นรอบ ๆ 1*m_f*, 2*m_f*,3*m_f*,... ดัง แสดงในสมการที่ (2.49) หรือ (2.50)

$$f_h = (jm_f \pm k)f_1$$

$$(2.50)$$

$$h = j(m_f) \pm k$$

$$(2.51)$$

เมื่อ h = 1 คือ ความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency)

ถ้าค่า *j* เป็นเลขคี่ ค่าฮาร์มอนิกจะเท่ากับค่า *j* (ที่เป็นเลขคู่และถ้าค่า *j* เป็นเลขคู่ ค่าฮาร์มอ นิกจะเท่ากับค่า *k* ที่เป็นเลขคี่เช่น ตัวอย่างไซด์แบนด์ฮาร์มอนิกในภาพประกอบ 2.29 (ค) และแสดง ค่าฮาร์มอนิก $(\hat{V}_{AO})_{\mu}/(Vd/2)$ ในตาราง 2.1 ซึ่งมีข้อสังเกตว่าค่า $(\hat{V}_{AO})_{\mu}/(Vd/2)$ จะเป็น ฟังก์ชั่นกับ m_{a}

ค่า m_f ฮาร์มอนิกควรจะเป็นเลขคี่ เพราะถ้ากำหนดให้ค่า m_f เป็นเลขคี่ก็จะทำให้เกิด การ สมมาตรเลขคี่ ซึ่งแสดงได้จากสมการ f(-t) = -f(t)ผลที่ได้คือ จะมีเพียงฮาร์มอนิกเลขคี่เท่านั้นที่ ยังปรากฏอยู่ใน $v_{_{AO}}$ ส่วนฮาร์มอนิกเลขคู่จะหักล้างกัน โดยที่ช่วง $m_f > 21$ จะถือว่า m_f มีค่ามากโดย ที่ขนาดของฮาร์มอนิกย่อย (Sub-harmonics) จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า m_f

สำหรับกรณีโอเวอร์มอดูเลชั่น (m_a >1) จะเกิดขึ้นเมื่อ $\hat{V}_{control} > \hat{V}_{\mu}$ โดยค่ารูปคลื่นพีดับเบิล ยูเอ็มจะมีช่วงที่เป็นบวกหรือลบกว้างกว่าหนึ่งคาบการสวิตซ์ชิ่งแสดงดังในภาพประกอบ 2.31 โอ เวอร์มอดูเลชั่นมีข้อดีคือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าของความถี่หลักมูลจะมีค่าสูงกว่าในกรณี m_a m< 1 แต่ การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าจะไม่เป็นเชิงเส้นจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง และช่วงแรงดันยอดทางด้านออก ของความถี่หลักมูลจะมีค่าอยู่ระหว่าง $V_a/2$ ถึง $4V_a/2\pi$ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้



m _a	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	
1 องค์ประกอบ	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	
ความถี่หลักมูล						
m _f	1.242	1.150	1.006	0.818	0.601	
$m_{f} + 2$	0.016	0.061	0.131	0.220	0.318	
$m_{f} + 4$					0.018	
$2m_{f} + 1$	0.190	0.326	0.370	0.314	0.181	
$2m_f \pm 3$		0.024	0.071	0.139	0.212	
$2m_f \pm 5$				0.013	0.033	
3 <i>m</i> _f	0.335	0.123	0.083	0.171	0.113	
$3m_{f} + 2$	0.044	0.139	0.203	0.176	0.062	
$3m_f \pm 4$		0.012	0.047	0.104	0.157	
$3m_f \pm 6$				0.016	0.44	
$4m_f \pm 1$	0.163	0.157	0.008	0.105	0.068	
$4m_{f} \pm 3$	0.012	0.070	0.132	0.115	0.009	
$4m_{f\pm}5$			0.034	0.084	0.119	
$4m_{f} \pm 7$				0.017	0.050	
$(a) = \begin{bmatrix} (a) & /1 \end{bmatrix}$						

ตาราง 2.2 ฮาร์มอนิกของ $(\hat{V}_{AO})_{h}/(Vd/2)$ [36]

หมายเหตุ: $(\hat{V}_{AO})_h / (Vd/2) = (\hat{V}_{AN})_h / \frac{1}{2} Vd$ เป็นฟังก์ชั่นของ m_a

อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของกรณีโอเวอร์มอดูเลชั่นคือ ทำให้เกิดฮาร์มอนิกอันดับต่ำ ๆ ที่อยู่ ใกล้ กับฮาร์มอนิกอันดับที่หนึ่งหรือความถี่หลักมูล เช่น ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5, 7 เป็นต้น เช่นใน ภาพประกอบ 2.32 ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดผลเสียมากหากนำไปใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการ นำไปขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพราะฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5, 7 จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและทำให้ เกิด ความเร็วหลายความเร็วในเวลาเดียวอันทำให้มอเตอร์ไพฟ้าหมุนไม่สม่ำเสมอ

ମ୍ୟ ଶ୍ୱୀ



ปรับค่า *m_a*[35]

2.2.5 การสวิตชิ่งแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

เมื่อปรับเพิ่มค่า *m*_a จนกระทั่งถึงช่วงแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกโอเวอร์มอดูเลชั่นซึ่ง แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกจะมีการเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้น จนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่งที่มีค่าตัวประกอบ 4/π สำหรับแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกต่อค่า *m*_a จะมีแนวโน้มดังแสดงใน ภาพประกอบ 2.33 กล่าวคือ เมื่อปรับเพิ่มค่า *m*_a จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกไม่สามารถ เพิ่มขึ้นได้อีกต่อไป ดังแสดงในภาพประกอบ 2.33 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า *m*_a ตั้งแต่ 3.24 ขึ้นไปจะจัดการ ทำงานอยู่ในโหมดการสวิตซิ่งแบบรูปคลื่นสีเหลี่ยม ซึ่งจะได้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกที่ ความถี่หลักมูลดังในสมการที่ (2.52)



สมการที่ (2.53) แสดงให้เห็นว่า แรงดันไฟฟ้ายอดด้านขาออกที่ฮาร์มอนิกใด ๆ จะมีค่า เท่ากับ แรงดันไฟฟ้ายอดด้านขาออกของความถี่หลักมูลหารด้วยค่าอันดับฮาร์มอนิกนั้น ๆ ข้อดีของ การทำงานในช่วงการสวิตซิ่งแบบรูปคลื่นลี่เหลี่ยมคือ แรงดันไฟฟ้ายอดด้านขาออกของความถี่หลักมูล จะมีค่าสูงเป็น 1.273 เท่าของครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า และอุปกรณ์สวิตซิ่งจะ ทำงานที่ความถี่ต่ำทำให้สามารถเลือกใช้อุปกรณ์สวิตซิ่งที่ทำงานที่ความถี่ต่ำได้ แต่มีข้อเสียคือ จะไม่ สามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกด้วยการปรับค่า m_a ดังนั้นหากต้องการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า ด้านขาออกจะทำได้เพียงการปรับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า นอกจากนั้นยังมีข้อเสีย เช่นเดียวกับการทำงานในโหมดโอเวอร์มอดูเลชั่นคือ จะมีฮาร์มอนิกอันดับต่ำ ๆ ที่อยู่ใกล้กับฮาร์มอ-นิกอันดับที่หนึ่ง เช่น ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5, 7, ... เกิดขึ้น แสดงในภาพประกอบที่ 2.34

2.3 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวสามารถแบ่งตามลักษณะลูกคลื่นได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบฮาร์ฟ บริดจ์ (Half-bridge) และแบบฟูลบริดจ์ (Full-bridge) แบบฮาร์ฟบริดจ์จะมีตัวเก็บประจุสองตัวต่อ ลำดับกันอยู่ระหว่าง แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและหากกำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุสองตัวมีค่า เท่ากัน จะทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีค่าเท่ากันคือ V₄ / 2 จุดกึ่งกลาง แรงดันไฟฟ้า (จุด 0 ในภาพประกอบ 2.35 (ก))จะมีค่าคงที่เมื่อเทียบกับบัสลบ (N) ดังแสดงใน ภาพประกอบ 2.35 (ก) ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์เฟสเดียวจะประกอบไปด้วยสองกิ่งคือ กิ่ง A และ กิ่ง B ในภาพประกอบ 2.35 (ข) โดยแบบฟูลบริดจ์จะมีกำลังไฟฟ้าสูงกว่าแบบฮาร์ฟบริดจ์ สองเท่าจึงเหมาะที่จะเลือกใช้เมื่อต้องการ จ่า<mark>ยก</mark>ำลังไฟฟ้าโหลดสูงขึ้น

เงื่อนไขสำคัญที่อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฮาร์ฟบริดจ์และแบบฟูลบริดจ์คือ การทำงาน ของ สวิตซ์ T_{A^+} และ T_{A^-} ต้องไม่ทำงานพร้อมกันในทุกช่วงเวลา มิฉะนั้นแล้วจะเกิดการลัดวงจร ระหว่าง บัสบวกกับบัสลบ ในอุดมคติเวลาการสวิตซิ่งของ T_{A^+} และ T_{A^-} จะตรงข้ามกัน แต่ในทาง ปฏิบัติจะ ต้องการช่วงเวลาที่สวิตซ์ทั้งคู่ไม่นำกระแส ซึ่งจะเรียกว่าเดดโทม์ (Deadtime) โดยเดดโทม์ จะอยู่ใน ช่วงเวลาก่อนจะเปลี่ยนสถานะการสวิตซ์จากนำกระแสเป็นไม่นำกระแส หรือจากไม่นำกระแสเป็น นำกระแส



ภาพประกอบ 2.35 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฮาร์ฟบริดจ์และแบบฟูลบริดจ์ [36]

(ข)

2.3.1 การสวิตชิ่งแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์

(ก)

การสวิตซิ่งแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ (Bipolar voltage switching) คือ การควบคุมให้ สวิตซ์แบบบริดจ์ทำงานพร้อมกันเป็นคู่ เช่น ในภาพประกอบ 2.35 (ข) การทำงานของสวิตซ์ $T_{_{\!A^+}}$ และ $T_{_{\!B^-}}$ จะถูกควบคุมให้ทำงานพร้อมกันในแต่ละช่วงเวลา อีกคู่หนึ่งคือ การทำงานของสวิตซ์ $T_{_{\!A^-}}$ และ $T_{_{\!B^+}}$ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าด้านออกของกิ่ง A จะเท่ากับ [35]

$$V_{Ao} = -\frac{1}{2} V_{d} {}_{lj} {}_{0} V_{control} < V_{tri}, \quad a \widehat{\Im} \mathfrak{g} \mathfrak{g} T_{A-} \quad \mathbf{liae} \quad T_{B+} \quad \mathfrak{selinase}$$
(2.56)

เมื่อคิดจากหนึ่งกิ่งของอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ แรงดันไฟฟ้าด้านออกของกิ่ง B จะเท่ากับ ค่า ลบของแรงดันไฟฟ้าด้านออกของกิ่ง A คือ _{v_{Bo}} =--_{v_{Ao} ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าด้านออกของ อินเวอร์เตอร์หรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างกิ่ง A <mark>กับ</mark>กิ่ง B คือ}

$$V_{o} = V_{Ao} - V_{Bo} = 2V_{Ao}$$

$$\hat{V}_{o1} = m_{a}N_{d}$$

$$\tilde{U}_{a} = V_{a}N_{d}$$

$$\tilde{U}_{a} = 1.0$$

$$V_{d} < \hat{V}_{o1} < \frac{4}{\pi}V_{d}$$

$$\tilde{U}_{a} = m_{a} > 1.0$$
(2.57)
(2.58)

หรืออาจจะสรุปได้ว่า แรงดันไฟฟ้<mark>ายอดด้</mark>านขาออกจะเท่ากับสมการที่ (2.57) เมื่อ *m*_a อยู่ใน ย่านเชิงเส้น และแรงดันไฟฟ้ายอดด้านขาอ<mark>อกจะเ</mark>ท่ากับสมการที่ (2.58) เมื่อ *m*_a อยู่ในช่วงโอเวอร์มอ ดูเลชั่น

โดยที่แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกจะสวิตซ์อยู่ระหว่าง +_{V_a} กับ -_{V_a ดังแสดงในภาพประกอบ 2.36 ส่วน ไซด์แบนฮาร์มอนิกจะเกิดขึ้นรอบ ๆ m_f, 2m_f, 3m_f, ... เช่น หากความถี่สวิตชิ่งเท่ากับ 20 kHz ไซด์แบนฮาร์มอนิกก็จะเกิดขึ้นที่ 20 kHz, 40 kHz และ 60 kHz เป็นต้น}



2.3.2 การสวิตชิ่งแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์

ข้อแตกต่างระหว่างการสวิตซิ่งแรงดันไฟฟ้าแบบโบโพลาร์ กับแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar voltage switching) ก็คือ ในแบบยูนิโพลาร์การควบคุมสวิตซ์ในกิ่ง A กับกิ่ง B จะแยกสัญญาณ ควบคุมออกจากกันคือ สวิตซ์ในกิ่ง A จะถูกควบคุมจากสัญญาณ _{verned} เทียบกับสัญญาณรูป สามเหลี่ยม (_{v_{rr}}) ขณะที่สวิตซ์ในกิ่ง B จะถูกควบคุมจากสัญญาณ -_{verned} เทียบกับสัญญาณรูป สามเหลี่ยม (_{v_{rr}}) การสวิตซิ่งจะมีเงื่อนไขดังนี้

ตาราง 2.3 เงื่อนไขการสวิตชิ่งแรงดันเฟส<mark>และแร</mark>งดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบ ยูนิโพลาร์ [36]

やない ひんのうちの むしつ

เงื่อนไข	สวิตซ์นำกระแส	สวิตซ์นำกระแส	V _{AN}	V _{BN}	V o
1	T_{A+}	T_{B-}	V_{d}	0	V_{d}
2	T_{A-}	T_{B+}	0	V_{d}	$-V_d$
3	T_{A+}	T_{B+}	V_{d}	V_{d}	0
4	T_{A-}	T_{B-}	0	0	0



ภาพประกอบ 2.37 การสวิตชิ่งแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ [36]

เงื่อนไขในการสร้างแรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกตกคร่อมโหลด (_v) แสดงใน ตารางที่ 2.4 ผลที่ได้จากเงื่อนไขการทำงานในตารางที่ 2.4 และภาพประกอบ 2.37 คือ แรงดันไฟฟ้า ด้านขาออก มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันไฟฟ้าค่าบวกไปยังศูนย์และศูนย์ไปยังบวกในครึ่งคาบ ส่วนอีกครึ่ง คาบจะมีแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันไฟฟ้าค่าลบไปยังศูนย์และ จากศูนย์ไปยัง ลบ ซึ่งจากลักษณะการทำงานดังกล่าวจึงเรียกวิธีการสวิตชิ่งนี้ว่า ยูนิโพลาร์ ส่วนขนาด ของแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกจะเท่ากันกับแบบโบโพลาร์ และเมื่อเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการ สวิตชิ่ง ทั้งสองแบบจะได้ตามตารางที่ 2.4

ประเด็น	ไบโพลาร์	ยูนิโพลาร์	
แรงดันไฟฟ้าด้านออก (_{V̂o1})	$\hat{V}_{O1} = m_a V_d$	$\hat{V}_{O1} = m_a V_d$	
$m_a \leq 1.0$			
แรงดันไฟฟ้าด้านออก ($\hat{V_{o1}})$	$V < \hat{V} < \frac{4}{-V}$	$V \leq \hat{V} \leq \frac{4}{-V}$	
$m_a > 1.0$	π^{\prime}	π^{\prime_d}	
แรงดันไฟฟ้าด้านออก		$V_d \Longleftrightarrow 0$	
(_{V_o})	$V_d \iff (-V_d)$	$(-V_d) \Longleftrightarrow 0$	
ไซด์แบนฮาร์มอนิก	$m_{f}, 2m_{f}, 3m_{f},$	$2m_{f}, 4m_{f}, 6m_{f},$	
การกรองความถี่สูง	ดี	ดีมาก	
การควบคุม	ง่าย	ซับช้อน	

ตาราง 2.4 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียการสวิตซิ่งแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์กับยูนิโพลาร์ [36]

2.3.3 วงจรอินเวอร์เตอร์พีดับเบิล<mark>ยูเอ็มแ</mark>บบฟูลบริดจ์

พีดับเบิลยูเอ็มฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (PWM full bridge inverter) เป็นรูปแบบหนึ่งของ แหล่งจ่ายกำลังงานแบบสวิตซ์โหมดอินเวอร์เตอร์มีหลักการทำงานโดยอาศัยการสวิตซ์ของอุปกรณ์ สวิตซ์ส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าตรงไปสู่โหลด ซึ่งใช้อุปกรณ์สวิตซ์ ทั้งหมด 4 ตัวด้วยกันคือ S1, S2, S3 และ S4 วงจรของพีดับเบิลยูเอ็มฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ การ ทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์จะทำงานพร้อมกันเป็นคู่ S1–S3 และ S2–S4 ทำงานสลับกันคู่ละครึ่ง คาบเวลาการสวิตช์



ภาพประกอบ 2.38 วงจรพีดับเบิลยูเอ็มฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ [36]

เมื่อคู่อุปกรณ์สวิทซ์ S1–S3 ทำงาน อุปกรณ์สวิตซ์ทั้งสองตัวปิดวงจรแรงดันไฟฟ้าจาก แหล่งจ่าย _{V_{bc}} ตกคร่อมโหลด _{Z_L} วัดแรงดันไฟฟ้าที่จุด AB ได้ +_{V_{bc}} จากนั้นที่ครึ่งคาบหลังคู่ อุปกรณ์สวิตซ์ S1–S3 หยุดทำงานและ S2–S4 ทำงาน อุปกรณ์สวิตซ์ทั้งสองตัวปิดวงจรแรงดันไฟฟ้า

จากแหล่งจ่าย V_{pc} ตกคร่อมโหลด Z_{L} วัดแรงดันไฟฟ้าที่จุด AB ได้ $-V_{pc}$ การทำงานจะสลับกันไป ตามคาบสัญญาณการสวิตช์แสดงในภาพประกอบ 2.38 ในกรณีที่โหลดเป็นอุปกรณ์แบบสะสม พลังงาน การสวิตช์แบบ ฮาร์ดสวิตช์ (Hard switch) ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียที่อุปกรณ์สวิตช์สูง สาเหตุเพราะการถ่ายเทพลังงานออกจากอุปกรณ์สะสมพลังงานในช่วงเวลาขณะที่อุปกรณ์สวิตช์กำลัง หยุด (turn off) หรือนำกระแสไฟฟ้า (turn <mark>o</mark>n) แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน อุปกรณ์สวิตช์ในช่วงเวลานี้คือ กำลังงานสูญเสีย กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นเรียกว่า การสูญเสียขณะ สวิตช์ (Switching loss) การลดการสูญเสีย<mark>ขณ</mark>ะสวิตช์เรียกว่า ซอฟต์สวิตช์ (Soft switch) วิธีการทำ ได้โดยการกำหนดความถี่สวิตช์ (Switching <mark>fre</mark>quency) โดยให้สูงกว่าความถี่รีโซแนนท์ (Resonant frequency) เล็กน้อย ขณะที่ S1-S3 turn <mark>on</mark> แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมค่อย ๆ ลดลง กระแสไฟฟ้าที่ ้ไหลผ่านเป็นลบ จากนั้นเมื่อแรงดันไฟฟ้า<mark>ลด</mark>ลงเป็นศูนย์กระแสไฟฟ้าจึงค่อยเพิ่มขึ้น ผลคูณของ กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจึงเท่ากับ<mark>ศูนย์</mark>สวิตช์แบบนี้อุปกรณ์สวิตช์ถูกบังคับให้ทำงานที่ ้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเป็นศูนย์ก่อนที่กร<mark>ะแสไฟ</mark>ฟ้าซีกบวกจะไหลผ่านจึงเรียกว่า Zero voltage switch (ZVS) ในขณะที่ S1–S3 turn of<mark>f กระแส</mark>ไฟฟ้าเปลี่ยนมาไหลผ่านตัวเก็บประจุที่ต่อขนานอยู่ ้กับอุปกรณ์สวิตช์แทน แรงดันไฟฟ้าตกคร่<mark>อมตัวเก็</mark>บประจุเท่ากับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ ้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากการที่ตัวเก็บประจุถูกชาร์จ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอุปกรณ์ ้สวิตช์เป็นศูนย์ ผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจึงเป็นศูนย์ การสวิตช์แบบนี้อุปกรณ์ ้สวิตช์ทำงานขณะกระแสไฟฟ้าท<mark>ี่ไหลผ่านเป็นศูนย์ก่อนที่</mark>แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจึงเรียกว่า Zero current switch (ZCS)



ภาพประกอบ 2.39 สัญญาณการทำงานของฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ [36]

2.3.4 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

ค่าแรงดันระลอกคลื่นของแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ที่มีการสวิตซิ่งแบบ รูปคลื่นสี่เหลี่ยมกับแบบ ไบโพลาร์ โดยนิยามของค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าคือ แรงดันไฟฟ้า ด้านขาออกลบด้วยแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกความถี่มูล (เช่นภาพประกอบ 2.40) ค่าระลอกคลื่นของ ค่ากระแสไฟฟ้าด้านขาออกของสวิตซิ่งแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะมีค่ามากกว่าแบบไบโพลาร์ ซึ่งความ ต้องการในออกแบบหรือประยุกต์ใช้งานต้องการค่าระลอกคลื่นที่ค่าน้อยที่สุด



ภาพประกอบ 2.40 ค่าแรงดันระลอกคลื่นแรงดันกระแสไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ เฟสเดียว [36]

2.3.5 การใช้ประโยชน์ของสวิ<mark>ตช์ในอินเวอร์เ</mark>ตอร์เฟสเดียว

มีการใช้สวิตช์ในอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่มีโหมดการทำงานหลายชนิด จึงเปรียบเทียบการ ทำงานของอินเวอร์เตอร์แต่ละแบบโดยสมมุติให้วงจรเป็นแบบอุดมคติ และกระแสไฟฟ้าด้านออกเป็น รูปไซน์ เมื่ออัตราการใช้ประโยชน์ของสวิตช์หาได้จากกำลังไฟฟ้าได้ต่อพิกัดของสวิตช์โดยแรงดันไฟฟ้า ซึ่งอยู่ในรูปผลคูณของค่ายอดของแรงดันและกระแสไฟฟ้า

$$MSUR = \frac{V_{o1}I_{o,\text{max}}}{qV_{T}I_{T}}$$
(2.59)

เมื่อ SUR มาจากคำว่า Switch Utilization Ratio คือ อัตราการใช้ประโยชน์ของสวิตซ์ MSUR (Maximum Switch Utilization Ratio) คือ อัตราการใช้ประโยชน์ของสวิตซ์สูงสุด V_r และ I_r คือ ค่าพิกัดของสวิตซ์ในรูปแรงดันไฟฟ้ายอดและกระแสไฟฟ้ายอดตามลำดับ $V_{o1}I_{o,max}$ คือ ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดัน- กระแสไฟฟ้าด้านออกที่ความถี่หลักมูล $V_{d,max}$ คือ ค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า ที่ใช้กำหนดพิกัดแรงดันของสวิตซ์qคือ จำนวนสวิตซ์ที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์	$V_{_T}$	$I_{_T}$	V _{o1,max}	q	MSUR
ฮาร์ฟบริดจ์	$V_{d,\max}$	$\sqrt{2}I_{o,\max}$	$\frac{4}{\pi\sqrt{2}} \cdot \frac{V_{d,\max}}{2}$	2	$\frac{1}{2\pi} = 0.16$
ฟลูบริดจ์	V _{d,max}	$\sqrt{2}I_{o,\max}$	$\frac{4}{\pi\sqrt{2}}.V_{d,\max}$	4	$\frac{1}{2\pi} = 0.16$
୴ୄ୰-୴ୄର	$2V_{d,\max}$	$\sqrt{2} \frac{I_{o,\max}}{n}$	$\frac{4}{\pi\sqrt{2}} \cdot \frac{V_{d,\max}}{n}$	2	$\frac{1}{2\pi} = 0.16$

ตาราง 2.5 อัตราการใช้ประโยชน์ของสวิตซ์ในอินเวอร์เตอร์ [36]

ในทางปฏิบัติค่าอัตราการใช้ประโยชน์ของสวิตช์สูงสุดจะมีค่าน้อยกว่า 0.16 ทั้งนี้เพราะต้อง ออกแบบให้มีค่าความปลอดภัยโดยให้ทำงานไม่ถึงค่าสูงสุดและพิกัดกระแสไฟฟ้าของสวิตช์ สำหรับในกรณีที่ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏด้านออก (volt – amperes) จะมีค่าต่ำกว่าพิกัด กำลังไฟฟ้าสูงสุดทางด้านออกมาก สำหรับการสวิตชิ่งแบบพีดับเบิลยูเอ็มกรณีมอดูเลตเชิงเส้น จะมีค่า น้อยกว่าแบบรูปคลื่นไซน์สี่เหลี่ยมด้วยประกอบ (π / 4)m

$$MSUR_{pwm} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\pi}{4} m_a = \frac{1}{8} m_a$$
(2.60)

เมื่อ m_a ≤1.0 ดังนั้นจะเห็<mark>นว่า ค่าอัตราก</mark>ารใช้ประโยชน์ของสวิตช์สูงสุดของการสวิตชิ่ง แบบพีดับเบิลยูเอ็มกรณีมอดูเลตเชิงเส้น จะเท่ากับ 0.125 เมื่อ m_a =1.0 และมีค่าน้อยกว่าอัตราการ ใช้ประโยชน์ของสวิตช์สูงสุดแบบรูปคลื่นเป็นสี่เหลี่ยมซึ่งเท่ากับ 0.1



ภาพประกอบ 2.41 ขนาดแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ย่านการทำงานเชิงเส้น [36]

ขนาดแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ย่านการทำงานเชิงเส้น

กรณีเฟสเดียว

$$V_{o1,rms,L-L} = 0.707 \,\mathrm{m_a} \times V_d \tag{2.61}$$

ยกตัวอย่าง กรณีแหล่งจ่ายแรงดัน 100 โวลต์ _m =0.9 จะได้ V_{01,rms,L-L} =63.63 โวลต์ ขนาดแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ย่านการทำงานรูปคลื่นสี่เหลี่ยม กรณีเฟสเดียว

$$V_{o1,rms,L-L} = 0.9xV_d \tag{2.62}$$

ยกตัวอย่าง กรณีแหล่งจ่ายแรงดัน 100 โวลต์ จะได้ $V_{{}_{o1,rms,L-L}}$ =90 โวลต์ ข้อควรระวังในกรณีรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ต้องไม่นำ m_a มาคูณด้วย

2.4 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส

2.4.1 รายละเอียดและทำงานอิน<mark>เวอร์เตอ</mark>ร์แหล่งจ่ายกระแสเฟสเดียว



ภาพประกอบ 2.42 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกร<mark>ะแสเฟ</mark>สเดียว [32]

จากภาพประกอบ 2.42 แสดงโครงสร้างแบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าเฟสเดียว ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง (v,),เหนี่ยวนำ (L), PWM แบบกระแสเฟสเดียว แบบอินเวอร์เตอร์ใช้สวิทช์ทิศทางเดียวสี่ตัว และตัวกรองสัญญาณขาออก (c) โหลดถือว่าเป็นตัว ต้านทาน (R,) [32]

สมการอธิบายการทำงานของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสสามารถเขียนเป็น

$$L\frac{di_s}{dt} + ri_s = V_s - v_i \tag{2.63}$$

$$C\frac{dv_o}{dt} = i_o - \frac{v_o}{R_L}$$
(2.64)

โดยที่ r คือความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำและ $v_i = dv_o$ และ $i_o = di_s$ คือ แรงดันไฟฟ้าขา เข้า กระแสรง และกระแสไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งผลิตโดยการทำงาน PWM ของอินเวอร์เตอร์แหล่ง กระแสไฟฟ้าตามลำดับ ฟังก์ชันการสลับที่แสดงว่า d ใช้ค่าในเซ็ต จำกัด {-1, 0, +1} และทำหน้าที่ เป็นตัวแปรควบคุมการป้อนข้อมูล ตัวเหนี่ยวนำดูดซับแรงดันไฟฟ้าฮาร์โมนิกที่ผลิตโดยอินเวอร์เตอร์ แหล่งจ่ายกระแสและทำงานเป็นแหล่งกระแ<mark>สอิน</mark>เวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส

อีกด้านหนึ่ง ตัวเก็บประจุจะดูดซั<mark>บฮ</mark>าร์มอนิกที่เกิดขึ้นในกระแสไฟฟ้า โดยอินเวอร์เตอร์ แหล่งจ่ายกระแส และกำหนดค่ารูปคลื่นแรง<mark>ดันไ</mark>ฟฟ้า

2.4.2 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายไฟจ่ายกระแสคงที่

วงจรอินเวอร์เตอร์ที่เป็นแหล่งจ่ายไฟจ่ายกระแสคงที่ (Constant-current source inverter) ซึ่งทำได้โดยการมีอินดัคเตอร์ L ขนาดใหญ่ต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายไฟ ดังแสดงใน ภาพประกอบ 2.43 ไดโอดที่ต่ออนุกรมกับ<mark>เอสซีอา</mark>ร์ เพื่อไม่ให้ตัวเก็บประจุคายประจุผ่านโหลด



. ภาพประกอบ 2.43 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายไฟจ่ายกระแสคงที่ [15]

ในภาพประกอบ 2.43 เมื่อเอสซีอาร์ T1 และ T2 ถูกทริกให้นำกระแส ตัวเก็บประจุทั้งสองจะ ประจุให้ด้านซ้ายมือมีแรงดันเป็นบวก และเมื่อเอสซีอาร์ T3 และ T4 ถูกทริกให้นำกระแส ตัวเก็บ ประจุจะจ่ายรีเวอร์ดไบอัสให้เอสซีอาร์ T1 และ T2 ทำให้เอสซีอาร์ T1 และ T2 หยุดนำกระแส กระแสจะไหลผ่าน T3, C1, D1 , LOAD, D2, C2, T4 และเมื่อแรง ดันคร่อมตัวเก็บประจุกลับทิศทาง ไดโอด D3 และ D4 จะนำกระแสแทนไดโอด D1, D2

ในภาพประกอบ 2.44 เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสทุก ๆ เวลาจะมีเอสซีอาร์ เพียง 2 ตัว นำกระแสพร้อมกัน เมื่อเอสซีอาร์ T3 ถูกทริกให้นำกระแส เอสซีอาร์ T1 จะถูกทำให้หยุดนำกระแส และเมื่อเอสซีอาร์T4 ถูกทริกให้นำไกระแสเอสซีอาร์ T2 จะหยุด นำกระแสข้อดีของอินเวอร์เตอร์แบบ แหล่งจ่ายกระแสคงที่ คือ

2.4.2.1 ไม่จำเป็นต้องใช้เอสซีอาร์ชนิดอินเวอร์เตอร์เอสซีอาร์ หรือ Fastswitching SCR สามารถใช้เอสซีอาร์ชนิด Phase control SCR

2.4.2.2 การที่มีอินดัค<mark>เตอ</mark>ร์ค่าสูงต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายไฟ จะทำให้มีกระแส ไหลคงที่ จึงทำให้ถ้าเกิดการลัดวงจร กระแสจะไม่ไหลมาก



2.4.2.3 ไม่จำเป็นต้อง<mark>มี co</mark>mmutating reactor

ภาพประกอบ 2.44 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสคงที่ 3 เฟส [35]

วงจรอินเวอร์เตอร์สามารถใช้สารกึ่งตัวนำที่ทนแรงดันและกระแสไฟฟ้าสูง ๆ ได้เช่น เพาเวอร์ ทรานซิสเตอร์ เอสซีอาร์ซึ่งในอนาคตเมื่อเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์สามารถ ผลิตให้ทนแรงดันและกระแส สูง ๆ ได้เท่ากับเอสซีอาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะเข้ามาแทนเอสซีอาร์ เพราะทรานซิสเตอร์ไม่ต้องมี วงจรมาทำให้มีการหยุดนำกระแส ซึ่งเรียกกันว่า วงจรคอมมูเตชั่น (Commutation Circuits) แต่ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ จะต้องใช้กระแสควบคุมสูงมากกว่าเอสซีอาร์ในปัจจุบันเอสซีอาร์ยังมีขีดจำกัด สูงมากกว่าทรานซิสเตอร์ ฉะนั้นในระบบอินเวอร์เตอร์ขนาดกิโลวัตต์สูงระดับ 50 kW ยังใช้เอสซี-อาร์ เป็นอุปกรณ์หลักอยู่
2.5 ความสามารถข้ามผ่านความผิดพร่องของระบบสายส่ง

ระบบอินเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เช่อมต่อระบบจะมีความสามารถ ข้ามผ่าน ความผิดพร่องของระบบสายส่ง (Ride-through grid faults) เพื่อให้การดำเนินงานของเครือข่าย ไฟฟ้ามีเสถียรภาพและมั่นคง ความสามารถ ข้ามผ่านความผิดพร่องของระบบสายส่งคือ ความสามารถที่ ยังคงมีเสถียรภาพชั่วคราวและเชื่อมต่อกับตารางโดยไม่สะดุดเป็นเวลาที่กำหนด ระหว่างการรบกวนของระบบสายส่ง อินเวอร์เตอร์จะต้องสามารถรองรับระบบสายส่งที่มีกระแส ในช่วงผิดพลาดและจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับร<mark>ะบบ</mark>สายส่งทันที [37]

จากภาพประกอบที่ 2.45 แสดงให้เห็นถึงความต้องการ การต่ออยู่คงสภาวะ (Stayconnected) เวลาจะแปรผันตามระดับของแรงดันไฟฟ้าตามข้อกำหนดของรหัสระบบสายส่ง E.On-Netz 2006 อินเวอร์เตอร์จำเป็นต้องเชื่อมต่อกับระบบสายส่งเป็นเวลา 150ms เมื่อแรงดันไฟฟ้าของ ตารางลดลงเป็นศูนย์ก่อนที่จะมีการตัดการเชื่อมต่อ เวลาในการเชื่อมต่อระยะเวลาที่ยาวนานขึ้นใน ระดับแรงดันสูง (เช่น 750ms เมื่อแรงดันไฟฟ้าของระบบสายส่งลดลงถึง 40% ของระดับที่ระบุ) อินเวอร์เตอร์ต้องไม่ตัดออกจาก ระบบสายส่งหากแรงดันไฟฟ้าของระบบสายส่งสูงกว่า 90% ของ ระดับที่ระบุ พลังงานที่ได้จะต้องถูกส่งผ่านเข้าไปใน ระบบสายส่งทันทีหลังจากกลับมาในสภาวะปกติ ด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างน้อย 20% ของกำลังกำหนดต่อวินาที



ข้อสังเกตของระยะเวลาการต่ออยู่คงสภาวะสำหรับการข้ามผ่านความผิดพร่องของระบบสาย ส่งจะต่างกันออกไปในแต่ละประเทศ ยกตัวอย่างเช่น ระดับแรงดันระบบลดลง 85% จากสภาวะปกติ อาจอยู่ที่ 625 ms สหรัฐอเมริกา แต่ในสหราชอาณาจักรกำหนดที่ 140 ms ระบบอินเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เชื่อมต่อระบบยังจำเป็นที่จะต้องส่งผ่านกระแส เพื่อรองรับแรงดันระบบสายส่งเมื่อลดลง 10% ของระดับที่ระบุ (นอกช่วงไร้การตอบสนอง (Dead band)) ดังแสดงภาพประกอบ 2.48 อินเวอร์เตอร์ต้องตอบสนองส่งผ่านกระแสที่ 2% ของกระแสที่ กำหนดจากทุก ๆ 1% ของแรงดันไฟฟ้าระบบสายส่งที่ลดลง ยกตัวอย่าง การตอบสนองของกระแส 50% ของกระแสที่กำหนด คือ แรงดันระบบสายส่งต้องลดลง 25% การตอบสนองของกระแสเพิ่ม เป็น 100% เป็นไปได้ถ้าจำเป็น



ภาพประกอบ 2.46 ความต้องการการตอบสนองของกระแสสำหรับระดับแรงดันระบบสายส่งที่ลดลง ตามรหั<mark>สระบบสายส่ง E.On-N</mark>etz 2006 [37]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาค<mark>้นคว้าและรวบ</mark>รวมสาระความรู้จากสิ่งตีพิมพ์ที่หน้าสนใจ เพื่อ ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวข้องกับอินเวอร์เตอร์ที่ต่อร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ ตลอดจนหลักการออกแบบ วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพ โดยผู้วิจัยได้ทำการแบ่งกลุ่มประเภทของอินเวอร์เตอร์แปลงผันตามจำนวน ขั้นตอนดังนี้

2.6.1 อินเวอร์เตอร์แปลงผันขั้นตอนเดียว (Single-stage topology)

2.6.1.1 (B. S. Prasad, S. Jain and V. Agarwal, 2008) Universal Single-Stage Grid-Connected Inverter [41]

นำเสนออินเวอร์เตอร์แบบระบบสายส่งเฟสเดียวที่เหมาะกับการใช้งานโดยทั่วไป สามารถเปลี่ยนแปลงโดยใช้ buck, boost และ buck-boost โดยการปรับความกว้างของ pulse width modular (PWM) อย่างเหมาะสม มีการใช้โหมดไม่ต่อเนื่องเพื่อความสะดวกในการสับเปลี่ยน ค่าที่กำหนดระหว่างการทำงานของการแปรผัน ความยืดหยุ่นดังกล่าวทำให้เกิดประโยชน์สูงสุดใช้ buck, boost และ buck-boost (เช่นความเครียดของอุปกรณ์ต่ำ ประสิทธิภาพสูงขึ้น ความสามารถ ในการส่งกำลังดีขึ้น) PWM สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบรูปคลื่นความถี่สูง (รูปสามเหลี่ยม) กับ รูปคลื่นอ้างอิงที่เหมาะสมซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นรูปไซน์ (Sinusoidal) แต่มีรูปร่างที่เฉพาะเจาะจง สำหรับการกำหนดค่าจำเพาะและได้มาจากการใช้พลังงานที่ป้อนเข้าไปในระบบสายส่งที่ดึงออกมา จากแหล่งจ่ายในแต่ละรอบการสลับ ค่าของส่วนประกอบ (ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ) ต้องได้รับ การปรับปรุงเพื่อให้การใช้โหมดไม่ต่อเนื่องได้รับการรักษาและปริมาณพลังงานที่ต้องการจะถูกโอนไป ยังระบบสายส่งในการกำหนดค่าทั้งสามอย่างในระหว่างการดำเนินการตามลำดับ ส่วนการออกแบบ ทั้งหมดได้รับมาแล้ว คุณสมบัติเด่นของอินเวอร์เตอร์นี้คือ การทำงานร่วมกันได้กับแหล่งต่าง ๆ (PV array, fuel cell าลา) โดยมีระดับแรงดันและข้อกำหนดในการควบคุมที่แตกต่างกัน วิธีการนี้เสนอ เสนอข้อดีเพิ่มเติมเช่น อินเวอร์เตอร์ต้นแบบนี<mark>้มีค</mark>วามมั่นคงและต้นทุนต่ำ



ภาพประกอบ 2.47 โค<mark>รงสร้างว</mark>งจรที่นำเสนอโดยบทความ [41]

2.6.1.2 (R. O. Caceres and I. Barbi, 1999) A Boost DC–AC Converter: Analysis, Design, and Experimentation [42]

บทความนี้เสนออินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบใหม่ เรียกว่าอินเวอร์เตอร์ เพิ่มหรือเพิ่มตัวแปลง DC -AC หลักของอินเวอร์เตอร์ใหม่คือ สร้างแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท AC สูงกว่า อินพุท DC ทันที คุณสมบัตินี้ไม่พบในอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันแบบธรรมดาซึ่งทำให้แรงดันไฟฟ้า ขาออกของ AC ต่ำกว่าขาเข้า DC ในตัว เพื่อวัตถุประสงค์ในการเพิ่มประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่ เพิ่มขึ้นในขณะเดียวกันก็มั่นใจได้ว่าจะสามารถใช้งานได้อย่างถูกต้องในทุกสภาวะการทำงาน ประโยชน์หลักของการควบคุมโหมดการควบคุมแบบธรรมดาคือ ความทนทานสำหรับตัวแปรของตัว แปร ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงแบบคงที่และการตอบสนองต่อสภาวะคงที่ในกรณีที่เหมาะสม การ ดำเนินงานการวิเคราะห์การควบคุมและผลการทดลอง อินเวอร์เตอร์รุ่นใหม่นี้มีจุดประสงค์เพื่อใช้ใน การจ่ายไฟสำรอง (UPS) และการออกแบบระบบ AC driver เมื่อใดก็ตาม ที่ต้องการแรงดันไฟฟ้า AC มากกว่าแรงดันไฟฟ้าแบบ DC โดยไม่ต้องใช้ขั้นตอนการแปลงพลังงานที่สอง



ภาพประกอบ 2.48 The proposed DC-AC boost converter [42]

2.6.1.3 (N. Kasa, H. Ogawa, T. Iida and H. Iwamoto, 1 9 9 9) A Transformer-Less Inverter using Buck-Boost Type Chopper Circuit for Photovoltaic Power System [43]

อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบไม่ใช้หม้อแปลงสำหรับระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ระบบที่เสนอประกอบด้วยชุด จำนวน 2 ชุดคือ PV array และวงจร Buck-Boost แต่มีความกังวลใน ระบบจะมี "การใช้อัตรา" พลังงานของ PV ที่ต่ำกว่าระบบ PV ธรรมดาเนื่องจากอาร์เรย์ PV แต่ละ ช่วงจะใช้งานได้เพียงครึ่งหนึ่งของความถี่ AC วิธีเพิ่ม "อัตราการใช้" โดยการเปลี่ยนตัวเก็บประจุ ระหว่างตัวเชื่อมต่อระหว่างจุดต่อ PV array ข้อมูลการจำลองและการทดลองแสดงให้เห็นว่า อินเวอร์เตอร์ที่เสนอสามารถจ่ายกระแสไฟ AC ให้กับสายไฟฟ้าส่งได้โดยมีค่ากำลังรวมใกล้เคียงกัน



2.6.1.4 (S. Jain and V. Agarwal, 2007) A Single-Stage Grid Connected
 Inverter Topology for Solar PV Systems With Maximum Power Point Tracking [40]
 บทความนี้เสนอโครงสร้างแบบผ่านขั้นตอนเดียวที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับระบบ
 PV ที่เชื่อมตอระบบสายส่ง การกำหนดค่าที่นำเสนอไม่เพียง แต่ช่วยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของเซลล์
 แสงอาทิตย์ (PV) แต่ยังสามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าคุณภาพสูงสำหรับป้อนลง

ในระบบสายส่งขณะที่กำลังติดตามกำลังไฟสูงสุดจากแผง PV ความผิดเพี้ยนของฮาร์โมนิกทั้งหมดที่ เกิดขึ้นในกระแสไฟฟ้าป้อนลงในระบบสายส่งถูก จำกัดตามมาตรฐาน IEEE-519 วิธีการที่เสนอมี คุณสมบัติที่น่าสนใจหลายอย่างเช่นการใช้แผง PV ที่ดีขึ้นประสิทธิภาพที่สูงขึ้นต้นทุนต่ำและขนาด กะทัดรัด นอกจากนี้เนื่องจากลักษณะของวิธีการที่เสนอแผง PV จะปรากฏเป็นแหล่งที่ส่งไปยังระบบ สายส่งซึ่งจะช่วยเพิ่มความปลอดภัยโดยรวมของระบบ วิธีการที่มีอยู่ซึ่งเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ PV แบบขั้นตอนเดียวจะถูกนำมาใช้และจะมีการเปรียบเทียบรายละเอียดกับวิธีการที่นำเสนอ รวมถึง ขั้นตอนการออกแบบและคำนวณสำหรับความเครียดของอุปกรณ์เสริม เงื่อนไขที่จำเป็นในการมอดู เลต สำหรับการควบคุมแบบมอดูเลตไซน์ (Sinusoidal pulse width modulated control) ของ วิธีการที่นำเสนอสำหรับการดำเนินการในโห<mark>มดก</mark>ารนำสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง



ภาพประกอบ 2.50 Complete schematic diagram of the proposed single-stage grid connected PV system along with the control strategy [40]

2.6.1.5 (H. Patel and V. Agarwal, 2009) A Single-Stage Single-Phase Transformer-Less Doubly Grounded Grid-Connected PV Interface [44]

หม้อแปลงไฟฟ้าและการต่อสายดินของระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ใน อินเวอร์เตอร์ที่ต่อเชื่อมแบบ PV-fed อย่างไรก็ตาม การรวมหม้อแปลงไฟฟ้าอาจเพิ่มต้นทุนและ / หรือจำนวนอุปกรณ์ระบบมากขึ้น เพื่อให้สามารถลดข้อเสียนี้ได้จึงมีการนำเสนอแบบเฟสเดียว (ไม่มี ตัวแปลงพิเศษสำหรับการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าหรือการติดตามจุดกำลังไฟสูงสุด (MPPT)) ซึ่งจะมีการ เชื่อมต่อ PV interface ซึ่งจะใช้หลักการ buck-boost การกำหนดค่าที่มีขนาดกะทัดรัดและใช้ ส่วนประกอบที่น้อยกว่า ใช้แหล่งพลังงาน PV เพียงตัวเดียวและตัวเหนี่ยวนำการกระตุ้นด้วยตัวเดียว (Buck-boost inductor) และใช้ร่วมกันระหว่างสองช่วง เพื่อป้องกันการทำงานที่ไม่สมมาตรและ ปัญหาที่ไม่ตรงกันของพารามิเตอร์ ความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกรวมและส่วนประกอบของ กระแสไฟฟ้า DC ที่จ่ายให้กับระบบสายส่งต่ำเมื่อเทียบกับโครงสร้างที่มีอยู่และสอดคล้องกับมาตรฐาน เช่น IEEE 1547



2.6.1.6 (G. h. Tan, J. Wang, R. Wang and Y. Ji, 2006) A New SPWM Controlled Three-Switch Buck-Boost Inverter for Distributed Generation Applications [45]

บทความนำเสนอเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบสามสวิตซ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพใน การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบจำหน่าย ได้มีการวิเคราะห์โดยละเอียดและแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์จะขึ้นอยู่กับหลักการสมดุลพลังงานขาเข้า / ขาออก ใช้วิธีควบคุม SPWM เพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ เมื่อเทียบกับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้นตอน อินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอมีโครงสร้างที่เรียบง่ายมีสวิตซ์ไฟเพียงสามตัวและสามารถรองรับแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับได้ทั้งขนาดสูงและต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ในเครื่องเดียว วงจรอินเวอร์เตอร์ใหม่ ใช้สวิตซ์สำหรับการเปิดเครื่องที่สวิตซ์กระแสเป็นศูนย์ (ZCS) เพื่อให้เกิดการสูญเสียการสวิตซ์โดยชุด แบบเรโซแนนซ์ นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มอุปกรณ์ของอินเวอร์เตอร์เพื่อลดแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง



ภาพประกอบ 2.52 the proposed three-switch Buck-Boost Inverter [45]

2.6.1.7 (Bing Hu, Liuchen Chang and Yaosuo Xue, 2008) Study of a Novel Buck-Boost Inverter for Photovoltaic Systems [46] บทความนำเสนออินเวอร์เตอร์สำหรับระบบ PV (inverter-based photovoltaic (PV)) ในการใช้งานที่เชื่อมต่อกับระบบสายส่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำหน่าย (DG) ตัวแปรแหล่งจ่าย มักจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกว้างในแรงดันไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์ด้านบนและด้านล่างของ แรงดันไฟฟ้าขาออกจึงต้องดำเนินการเพิ่ม buck-boost ของอินเวอร์เตอร์ ตัวแปลงสัญญาณ buck แบบเต็มบริดจ์ อินเวอร์เตอร์แบบสองขั้นตอนอินเวอร์เตอร์แบบ buck-boost ประสิทธิภาพแบบ ขั้นตอนเดียวมีโครงสร้างที่ซับซ้อนหรือมีแรงดันไฟฟ้า จำกัด ผู้เขียนได้เสนอและพัฒนานวัตกรรม อินเวอร์เตอร์ flyback-based buck-boost เฟสเดียวสำหรับระบบพลังงานทดแทนโดยเฉพาะอย่าง ยิ่งสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในการเชื่อม<mark>ต่อ</mark>ระบบสายส่ง



ภาพประกอบ 2.53 Newly proposed buck-boost inverter with 3 switching devices [46]

2.6.1.8 (Cao, S. Jiang, X. Yu and F. Z. Peng, 2011) Low-Cost Semi-Zsource Inverter for Single-Phase Photovoltaic Systems [47]

นำเสนอเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กแบบ semi-Z-source สำหรับระบบ ไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฟสเดียวที่มีคุณสมบัติต้นทุนต่ำ เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าชนิด semi-Z นี้ ใช้เครือข่าย Z-source / quasi-Z-source และมีสวิตช์ที่ใช้งานได้เพียงสองตัวเพื่อให้ได้แรงดัน เอาท์พุทเดียวกันเช่นเดียวกับตัวแปลงความถี่แบบบริดจ์ที่ใช้แรงดันไฟฟ้าแบบดั้งเดิม สวิทช์ที่ใช้งาน ได้สองตัวของตัวแปลงอินพุท Z-source จะได้รับการควบคุมโดยสมบูรณ์ แตกต่างจากตัวแปลง สัญญาณ Z-source / quasi-Z แหล่งเดียวแบบดั้งเดิมซึ่งสถานะ zero-shoot ใช้กับอินเวอร์เตอร์ semi-Z ไม่ได้ แหล่งสัญญาณ DC และแรงดันไฟฟ้าขาออกของตัวแปลงอินพุท Z-source ใช้ร่วมกัน ดังนั้นจึงนำไปสู่การลดการรั่วไหลของแรงดันไฟฟ้าในอินเวอร์เตอร์ที่ไม่ต่อเนื่องอื่น ๆ เช่น อินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่นแรงดันไฟฟ้านี่คือ คุณลักษณะที่ต้องการสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับ ระบบสายส่งที่ไม่แยกตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ มีการเสนอวิธีการมอดู เลตความกว้างของพัลส์ไซน์แบบไม่เซิงเส้นสำหรับตัวแปลงสัญญาณแบบ semi-Z เมื่อใช้วิธีนี้วงจร ต้องการสามารถสร้างขึ้นเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าไซน์ ตัวแปลง DC-DC ตัวอื่นสามารถนำมาใช้เป็น อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวได้



ภาพประกอบ 2.54 Traditional single-phase Z-source H-bridge inverter and its modulation method [47]

2.6.1.9 (Tey KS, Mekhilef S. 2016) A reduced leakage current transformerless photovoltaic inverter [3]

อินเวอร์เตอร์แปลงกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ที่เชื่อมต่อ ด้วยระบบสายส่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ารั่วเนื่องจากไม่มีการแยกตัวและแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ร่วมกันที่ไม่ เสถียร ถึงแม้ว่ากระแสไฟฟ้ารั่วจะลดลงโดยใช้โครงสร้างพิกัด H5 แต่ก็ถือว่ายังคงสูงอยู่เนื่องจากมีตัว เก็บประจุของการเชื่อมต่ออยู่ในสวิทช์ในโหมด ในบทความนี้จะมีสวิตช์หกตัวและไดโอดที่ไม่มี ตัวแปลงกับอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟรั่วลดลง



ภาพประกอบ 2.55 circuit configuration and switching signals of the proposed topology [3]

2.6.1.10 (Funabiki S, Tanaka T, Nishi T, editors. 2002) A New Buck-Boost-Operation-Based Sinusoidal Inverter Circuit [15]

บทความนี้เสนอแนวความคิดวงจรอินเวอร์เตอร์ขาออกเป็นรูปคลื่นไซน์ ประสิทธิภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์นี้ขึ้นอยู่กับการทำงานของ buck-boost ซึ่งเป็นที่รู้จักในวงจร DC chopper อินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอมีคุณสมบัติโดดเด่นของแรงดันไฟฟ้าขาขึ้นและลง แรงดันขาออก ของอินเวอร์เตอร์จะได้รับโดยใช้ตัวเปรียบเทียบรูปแบบไซน์ ลักษณะการทำงานของวงจร อินเวอร์เตอร์จะอธิบายรายละเอียดโดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการสลับและโหมดการทำงาน



ภาพประกอบ 2.56 Configuration of the proposed inverter [15]

2.6.1.11 (Chien-Ming W. 2004) A Novel Single-Stage Full-Bridge Buck-Boost Inverter [4]

มีการนำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพแบบ buck-boost (FB-SRBBI) ชุดเดียวแบบ แบบเต็มคลื่นแบบใหม่ในเอกสารฉบับนี้ อินเวอร์เตอร์ที่เสนอจะประกอบไปด้วยวิธีการแบบบริดจ์ และตัวกรอง LC ไม่มีสวิทซ์เสริม แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่เสนอสามารถเพิ่มขนาดให้สูงหรือ ต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า DC ที่เกิดขึ้นทันที นี้ในอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบธรรมดา จะไม่สามารถทำได้ ซึ่งทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกของ AC ต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า DC เสมอ วงจร กำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่เสนอให้สวิตช์หลักสำหรับการเปิดเครื่องที่ ZCS โดยตัวกรอง LC วิธีการ ควบคุมแบบไม่เชิงเส้นถูกออกแบบมาเพื่อป้อน DC เข้าและระเบียบแบบไดนามิกที่ดี ใช้วิธีการเฉลี่ย ในการวิเคราะห์ระบบ ตัวอย่างการออกแบบอินเวอร์เตอร์ 500 วัตต์ / DC / AC ตรวจสอบประเมิน ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์และให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงกว่า 90% ภายใต้กำลังไฟพิกัด



ภาพประกอบ 2.57 circuit topology of the full-bridge series-resonant buck-boost

inverter [4]

2.6.1.12 (Abdel-Rahim O, Orabi M, Ahmed ME, 2010) Buck-Boost Interleaved Inverter for Grid Connected Photovoltaic System [12]

ในบทความนี้เราขอนำเสนอ อินเวอร์เตอร์แบบขั้นตอนเดียวแบบ buck-boost สำหรับระบบ PV ที่เชื่อมต่อด้วยระบบสายส่งที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงมาก อินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอไม่เพียง ช่วยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขาออกของโมดูล PV แต่ยังแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่จำเป็นสำหรับ การเชื่อมต่อด้วยระบบสายส่ง โหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง (DCM) ใช้เพื่อให้ได้ค่าความ แรงดันไฟฟ้าของระบบสายส่งและการควบคุมจุดกำลังงานสูงสุด (MPPT) วิธีการที่เสนอมีคุณสมบัติที่ น่าสนใจหลายอย่าง เช่น ได้ประสิทธิภาพสูง ต้นทุนต่ำ ขนาดกะทัดรัดและการควบคุมที่ง่าย มีสวิตซ์ เพียง 2 ตัวทำงานที่ความถี่สลับสูงและลดการสูญเสีย



ภาพประกอบ 2.58 Proposed single stage inverter [12]

2.6.1.13 (H. Xiao and S. Xie, 2010) Leakage Current Analytical Model and Application in Single-Phase Transformerless Photovoltaic Grid-Connected Inverter [48]



ภาพประกอบ 2.59 Proposed topology named as "iH5." [48]

เนื่องจากรูปแบบของต้นทุนต่ำและมีประสิทธิภาพสูงจึงทำให้อินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อ ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แปลงกระแสไฟฟ้า (Transformersless photovoltaic inverters) ได้รับความ นิยมในการประยุกต์ใช้ระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับที่อยู่อาศัย แต่น่าเสียดายที่กระแสไฟฟ้า รั่วไหลผ่านตัวเก็บประจุงระหว่างแผง PV และกราวด์เป็นอันตราย บทความนี้มุ่งเน้นไปที่วิธีการ ป้องกันการรั่วไหล ซึ่งจะพิจารณาเส้นทางเดินทางไฟฟ้าทั่วไปทั้งหมด ขั้นแรกได้มีการพัฒนารูปแบบ การวิเคราะห์แบบทั่วไปที่ความถี่สวิตชิ่งและกฎของการขจัดความถี่ในการเปลี่ยนโหมดทั่วไป ตัว แปลงแบบ full-bridge และ half-bridge ได้รับการวิเคราะห์โดยใช้รูปแบบและกฎที่ได้รับการพัฒนา จากนั้นได้มีการนำเสนอโครงสร้างตัวแปลงแบบ full-bridge และกลยุทธ์การซดเซยสำหรับ อินเวอร์เตอร์แบบ half-bridge ในที่สุด

2.6.1.14 (Y. W. Cho, W. J. Cha, J. M. Kwon and B. H. Kwon, 2016) Improved single-phase transformerless inverter with high power density and high efficiency for grid-connected photovoltaic systems [49]

การศึกษาครั้งนี้เสนอตัวแปลงกระแสเฟสเดียวที่สูงและมีประสิทธิภาพสูงสำหรับ ระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อด้วยระบบสายส่ง อินเวอร์เตอร์ที่เสนอประกอบด้วย อินเวอร์เตอร์แบบ dual-paralleled-buck และอีกสองวงจรเสริมสำหรับการปิดสวิตช์กระแสไฟฟ้า เป็นศูนย์ในไดโอด อินเวอร์เตอร์แบบช่องคู่ขนานและมีตัวเสริมด้วยตัวเหนี่ยวนำสองตัวเข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้ความหนาแน่นของพลังงานสูง อินเวอร์เตอร์จะทำงานที่ความถี่สูงที่ 40 kHz นำไปสู่ตัว เหนี่ยวนำตัวกรองที่ลดลงและความสูญเสียที่ต่ำกว่าของตัวเหนี่ยวนำของอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น ทั่วไป นอกจากนี้สองวงจรเสริมช่วยลดการสูญเสียสวิทช์ที่เกิดจากการทำงานความถี่สูง นอกจากนี้ อินเวอร์เตอร์ที่เสนอให้กระแสไฟรั่วต่ำซึ่งตรงตามเกณฑ์ที่กำหนดโดย VDE-0126-1-1 ดังนั้น อินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอมีประสิทธิภาพสูงสุดถึง 99%



ภาพประกอบ 2.60 Proposed single-phase transformerless inverter for grid-connected PV systems [49]

2.6.2 อินเวอร์เตอร์แปลงผันสองขั้<mark>นตอน (</mark>Two-stage topologies)

2.6.2.1 (K. Ogura, T. Nishida, E. Hiraki, M. Nakaoka and S. Nagai, 2004) Time-sharing Boost Chopper Cascaded Dual Mode Single-phase Sinewave Inverter for Solar Photovoltaic Power Generation System [50]

บทความนี้นำเสนออินเวอร์เตอร์ต้นแบบใหม่และรูปแบบการควบคุมของวงจร PWM แบบ sinewave แบบ single-phase ประสิทธิภาพสูงสำหรับระบบการสร้างพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็ก ซึ่งประกอบดวยสวิตชิ่ง PWM แบบ sinewave absolute PWM ในขั้นตอนการแรกและ sinewave PWM การควบคุมบางสวน หลักการทำงานที่เป็นสองขั้นตอน การประมวลผลด้วยโหมดการปรับ คลื่นไซน์ ในการควบคุมแบบ PWM แบบ sinewave เฟสเดียวเป็นแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับระบบการ สร้างพลังงานแสงอาทิตย์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมกับการใช้งานที่อยู่อาศัยจะได้รับการประเมินและ อภิปรายบนพื้นฐานของการจำลองคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง

พนูน ปณุสุโต ซีเว



ภาพประกอบ 2.61 Proposed time sharing dual-mode sinewave modulated singlephase inverter with boost chopper [50]

2.6.2.2 (M. F. Rahman and L. Zhong, 1997) A new, transformerless, photovoltaic array to utility grid interconnection [51]

บทความนี้จะอธิบายถึงอินเทอร์เฟซใหม่ระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) และระบบ ไฟฟ้าหลักที่มีเฟสเดียวเพื่อหลีกเลี่ยงหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่ (50 หรือ 60 Hz) ที่ด้าน AC อินเทอร์เฟซใช้ตัวแปลงเพิ่มกำลังโดยการ PWM ในด้าน DC และตามด้วยกระแสไฟฟ้าด้าน AC ยังคง เป็นไซน์และอยู่ในช่วงเวลาที่แน่นอน วงจรยังมีข้อดีคือ ใช้อุปกรณ์น้อยกว่าวงจรที่ที่มีอยู่ปัจจุบัน ตัว ควบคุมสำหรับปรับกำลังเพิ่มในด้านDC ประกอบด้วยตัวติดตามพลังงานสูงสุด (MPT) และเครื่อง แปลงกระแสไฟฟ้ากระแสสลับในฝั่ง AC ป้อนพลังงาน PV สูงสุดที่มีอยู่ไปในระบบ บทความนี้อธิบาย ถึงโมเดลแบบได-นามิกแบบเต็มรูปแบบของการเชื่อมต่อระบบสายส่ง ซึ่งรวมถึงคอนโทรลเลอร์โดยใช้ พารามิเตอร์ในการควบคุมต่าง ๆ และพารามิเตอร์วงจรไฟฟ้าที่สามารถปรับให้เหมาะสมและ ประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อระบบ



ภาพประกอบ 2.62 Power Circuit of the proposed [51]

2.6.2.3 (L. Ma, T. Kerekes, R. Teodorescu, X. Jin, D. Floricau and M. Liserre, 2009) The High Efficiency Transformer-less PV Inverter Topologies Derived From NPC Topology [52]

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อด้วยระบบสายส่ง (Grid) เป็นส่วนสำคัญของแหล่ง พลังงานทดแทนกำลังแพร่หลายมากขึ้น เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานจริงและความ น่าเชื่อถือของระบบ PV รูปแบบของอินเวอร์เตอร์ใหม่ได้รับการเสนอเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้หม้อแปลง แยกสายส่ง โครงสร้างวิธีการ NPC ถูกนำเสนอและวิเคราะห์ ตรวจสอบโดยการทดลองทำให้เหมาะ สำหรับใช้ในงานด้าน PV เนื่องจากมีประสิทธ<mark>ิภา</mark>พสูงมีกระแสไฟฟ้ารั่วต่ำและ EMI



<mark>ภาพประกอบ 2.63</mark> Conergy Nutral Point C</mark>lamped Half Bridge [52]

2.6.2.4 (J. L. Duran-Gomez, E. Garcia-Cervantes, D. R. Lopez-Flores, P. N. Enjeti and L. Palma, 2006) Analysis and Evaluation of a Series-Combined Connected Boost and Buck-Boost DC-DC Converter for Photovoltaic Application [53]

ในบทความนี้นำเสนอแนวทางในการปรับกำลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเซลล์แสงอาทิตย์ถือว่าเป็นทรัพยากรทดแทน เพื่อจัดหาพลังงานไฟฟ้าที่ สะอาดให้กับที่อยู่อาศัยนอกภาคพื้นชนบทหรืออุตสาหกรรม วิธีนี้มีการใช้ตัวเชื่อมต่อแบบรวม ผัน กำลัง DC-DC buck-boost สำหรับการปรับแรงดันไฟฟ้า DC จากเซลล์แสงอาทิตย์ แรงดันไฟฟ้าเข้า กับตัวแปลง 100 V จากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการแปลงและเพิ่มเป็น 400 V ที่แรงดันไฟฟ้าขาออก DC อนุกรม buck-boost DC-DC converters ต่อเข้ากันที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะช่วยลดกระแสขาเข้าและให้ แรงดันไฟฟ้า 400 โวลต์ที่อินเวอร์เตอร์สามเฟส การวิเคราะห์ชุด DC-DC แบบรวมสองชุด จะ นำเสนอพร้อมกับผลการจำลอง การประเมินผลวิธีการแบบรวมและแบบอนุกรมจะดำเนินการเพื่อ เปรียบเทียบสมรรถนะของพวกเขากับโครงสร้างการปรับกำลังไฟฟ้าแต่ละตัว การจำลองแบบของ ตัวแปลง DC-DC แบบรวมจะถูกนำเสนอด้วยแรงดันไฟฟ้าขาออก DC ที่ 400 โวลต์และกำลังส่งออก สูงสุดของ Po = 600 วัตต์



ภาพประกอบ 2.64 Proposed DC-DC converter operation stages. [53]

2.6.2.5 (S. V. Araujo, P. Zacharias and B. Sahan, 2008) Novel Grid-Connected Non-Isolated Converters for Photovoltaic Systems with Grounded Generator [54]



ภาพประกอบ 2.65 Proposed DC-DC converter with grounded generator and half-bridge inverter in the output [54]

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบไม่ใช้หม้อแปลง ปัจจุบันส่วนใหญ่ของระบบที่ ติดตั้งในยุโรปเนื่องจากประสิทธิภาพในระดับที่สูงขึ้นและต้นทุนและน้ำหนักที่ลดลงเมื่อเทียบกับหม้อ แปลงไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นรูปแบบความถี่ต่ำหรือแบบความถี่สูง อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดบางอย่าง เกิดขึ้นสำหรับการทำงานของระบบดังกล่าวส่วนใหญ่เกี่ยวกับแผงควบคุมไม่สามารถต่อสายดินได้ ตัวอย่างเช่นไม่ได้รับอนุญาตในประเทศสหรัฐอเมริกา การทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ ประกอบด้วยเซลล์ใหม่ บางเทคโนโลยีอาจทำให้เกิดผลกระทบที่ไม่พึงประสงค์เช่นการเสื่อมสภาพ ของเซลล์และการลดประสิทธิภาพ นอกจากนี้เรื่องความปลอดภัยเกี่ยวกับการรั่วไหลของกระแส เนื่องจากการเก็บประจุของแผงยังเป็นปัญหาที่พบบ่อยในระบบดังกล่าว เพื่อที่จะเสนอตัวแปลง DC- DC แบบใหม่สำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformerless photovoltaic systems) เป็นลักษณะหลักจะช่วยให้เอาท์พุทของแผง photovoltaic และให้แรงดันไฟฟ้าขาออก ตามข้อเสนอของวงจรการวิเคราะห์และประเมินผล ดำเนินการ

2.6.2.6 (J. M. Shen, H. L. Jou and J. C. Wu, 2012) Novel Transformerless Grid-Connected Power Converter with Negative Grounding for Photovoltaic Generation System [55]





บทความนี้เสนอตัวแปลงกระแสไฟฟ้าแบบไม่ใช้หม้อแปลง สำหรับระบบการสร้าง เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic generation system) สามารถเชื่อมต่อโดยตรงกับดินในตัว แปลงไฟที่เชื่อมต่อกับระบบสายส่งเพื่อป้องกันการสึกกร่อนของออกไซด์โปร่งใสที่เกิดขึ้นในเซลล์ แสงอาทิตย์บางชนิด ตัวแปลงไฟที่เชื่อมต่อกับระบบสายส่งประกอบด้วยตัวแปลงไฟ DC-DC และ อินเวอร์เตอร์ DC-AC คุณสมบัติเด่นของตัวแปลงไฟฟ้าที่เสนอคือ สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังใช้พร้อม กันทั้งในตัวแปลงไฟฟ้า DC-DC และอินเวอร์เตอร์ DC-AC และมีเพียงสวิทช์ไฟฟ้าสองชุดที่ทำงานด้วย ความถี่สวิตช์สูงในเวลาเดียวกัน การรั่วไหลของระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลงเนื่องจากขั้วลบ ของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับดินโดยตรง ต้นแบบได้รับการพัฒนาเพื่อตรวจสอบ ประสิทธิภาพของตัวแปลงไฟที่เชื่อมต่อกับระบบสายส่ง

2.6.2.7 (Kim YH, Kim JG, Ji YH, Won CY, Jung YC, 2010) Photovoltaic Parallel Resonant DC-link Soft Switching Inverter using Hysteresis Current Control [9] บทความนี้เสนอตัวแปลงกระแสไฟฟ้าแบบ DC-link soft switching เซลล์ แสงอาทิตย์แบบขนานโดยใช้การควบคุมกระแส ระบบที่นำเสนอประกอบด้วยสวิตช์ DC-link สำหรับการสลับ เมื่อสวิทช์ DC-link ถูกปิดสวิทช์ อินเวอร์เตอร์จะเปิดและปิดโดยใช้ซอฟสวิตช์ แรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์โดยใช้ตัวควบคุมกระแส ดังนั้นสวิทช์ทั้งหมดในที่เสนออินเวอร์เตอร์จะเปิดและ ปิดโดยใช้ซอฟสวิตช์ เป็นผลให้วงจรที่เสนอสามารถลดการสูญเสีย



ภาพประกอบ 2.67 The proposed photovoltaic parallel resonant DC-link [9]

2.6.2.8 (H. Fujita M. Mabuchi Y. Tsubota T. Mizogami, 2012) Solar Power Conditioners Using Bidirectional Chopper Circuits Connected in Series [56]

เสนออินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อระบบสายส่งที่มีประสิทธิภาพสูงที่เหมาะสมกับการ เชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซึ่งประกอบด้วยตัวแปลงสัญญาณคู่แบบสองทิศทางและ ตัวแปลง PWM ของ H-bridge ที่ต่ออยู่เป็นชุดความถี่สวิตช์ของตัวแปลงสัญญาณแบบแบตเตอรี่แบบ สองทิศทางแรกเท่ากับความถึ่ของระบบสายส่งในขณะที่ความถี่ที่สองใช้ความถี่ระบบสายส่งสองเท่า การรวมกันของตัวแปลงทั้งสองนี้จะสังเคราะห์วงจรแรงดันไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสจากกระแสไฟเข้า DC ตัวแปลง PWM ของ H-bridge ทำงานที่ 20 kHz และมีแรงดันไฟฟ้าประจุ DC Capacitor ต่ำ เพื่อชดเซยแรงดันไฟฟ้าฮาร์โม-นิกที่รวมอยู่ในวงจรสร้างแรงดันไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เป็นผลให้ อินเวอร์เตอร์การต่อสายที่เสนอให้สามารถลดการสูญเสียและแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ร่วมกันได้ ผลการ ทดลองที่ได้จากเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า single-phase ขนาด 1 กิโลวัตต์แสดงให้เห็นถึง ประสิทธิภาพสูงถึง 98%



ภาพประกอบ 2.68 Circuit configuration of proposed grid-connection converter composed of ZCC converter and H-bridge converter. [56]

2.6.2.9 (G. Ertasgin, D. M. Whaley, W. L. Soong and N. Ertugrul, 2015) Performance analysis of a low-cost current-source 1-ph grid-connected PV Inverter [57]

บทความนี้ศึกษาการออกแบบและสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์ 150 วัตต์เฟสเดียวที่ มีแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าจากแผง PV และตัวเหนี่ยวนำกระแสตรงที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้า กระแสตรง อินเวอร์เตอร์ดำเนินการโดยใช้สวิตช์ boot อินเวอร์เตอร์ H และ CL เป็นตัวกรองด้าน ออก กระแสขาเข้าขาออกถูกควบคุมโดยใช้สวิตช์ boot และการควบคุมแบบเปิดหรือการควบคุม feed forward ใช้คอนโทรลเลอร์ I-V ที่มืดที่สุดเพื่อจำลองโมดูล PV สองชุด ผลการทดสอบที่ ตรวจสอบผลการจำลองแบบคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ความสามารถในการส่งกระแสรูปคลื่นไซน์ที่ เสนอไปยังระบบระบบสายส่งในขณะที่สอดคล้องกับมาตรฐานที่เหมาะสมได้แก่ฮาร์โมนิกรวมและ ข้อกำหนดเกี่ยวกับค่ากำลังไฟฟ้ายังมีการตรวจสอบค่าดัชนีการมอดูเลตต่าง ๆ



ภาพประกอบ 2.69 PSIM simulation of the proposed inverter, showing PV array (4-diode model), DC link inductor, wave shaper, unfolding circuit, output filter model, MPPT controller , and PWM signal generator [57]

2.6.3 อินเวอร์เตอร์แปลงผันหลายขั้นตอน (multi-stage topology)

2.6.3.1 (Hu Y, Cao W, Ji B, Si J, Chen X, 2015) New multi-stage DC-DC converters for grid-connected photovoltaic Systems [6]

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ที่เชื่อมต่อกับตารางเป็นเทคโนโลยียอดนิยมในการ แปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นกระแสไฟฟ้า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีอยู่มีแรงดันไฟฟ้าขาออกต่ำและ แตกต่างกัน ตัวผันกำลังที่ติดตั้งระหว่าง PVs และระบบสายส่ง ควรมีความสามารถในการควบคุมขั้น สูงและหลากหลาย นอกจากนี้กระแสไฟฟ้าขาออกของระบบ PV ยังอุดมไปด้วย harmonics ซึ่ง ส่งผลกระทบต่อคุณภาพพลังงานของระบบสายส่ง ในบทความนี้จะมีการนำเสนอการควบคุมแบบ hysteresis multistage แบบใหม่ของตัวแปลง DC-DC แบบ step-up ร่วม PVs เข้ากับ ระบบ ระบบสายส่งเฟสเดียว วงจรและวิธีการควบคุมที่นำเสนอจะได้รับการตรวจสอบโดยการทดสอบด้วย ตัวแปลงต้นแบบ 600 วัตต์ เทคโนโลยีที่พัฒนาแล้วมีนัยสำคัญทางเศรษฐกิจและสามารถประยุกต์ใช้ กับระบบการกระจายแบบกระจาย (DG) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับประเทศกำลังพัฒนาซึ่งมี PVs ขนาดเล็กจำนวนมากที่เชื่อมต่อกับระบบระบบสายส่งเฟสเดียว



ภาพประกอบ 2.70 The proposed high step multilevel converter [6]

2.6.4 Multilevel converter

2.6.4.1 (Panagiotis Kakosimos, Konstantinos Pavlou, Antonios Kladas, Stefanos Manias, 2015) A single-phase nine-level inverter for renewable energy systems employing model predictive control [58]





ภาพประกอบ 2.71 A schematic view of a full NPC bridge. [58]

ในบทความนี้ได้มีการตรวจสอบ cascaded Multilevel Inverter (MI) แบบเฟส เดียว ซึ่งประกอบด้วยบริดจ์ NPC เต็มคลื่นสำหรับระบบพลังงานทดแทน การพัฒนาวิธีการควบคุมที่ แนะนำขึ้นอยู่กับการใช้เทคนิคการควบคุมแบบจำลอง (Predictive control) ซึ่งเป็นไปตาม ข้อกำหนดสำหรับการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าของแต่ละแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและจุดสมดุล ของแรงดันไฟฟ้าที่เป็นกลางภายใต้ปัจจัย แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของตัวควบคุมที่พัฒนาแล้ว จะถูกควบคุมในขณะที่อยู่ภายใต้ปรากฏการณ์ชั่วขณะที่เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขในแง่ของรังสีดวงอาทิตย์ และรูปแบบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง อินเวอร์เตอร์ NPC แบบเต็มคลื่นช่วยให้สามารถใช้ THD Factor ต่ำ ในกระแสได้โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำง่าย ๆ แทนตัวกรอง LCL ที่ซับซ้อนซึ่งได้รับประโยชน์จากตัวเก็บ ประจุต่ำในบัส DC-link ประสิทธิภาพการทำงานได้รับการตรวจสอบโดยการทดลองที่ดำเนินการกับ วิธีการแบบ cascaded ซึ่งส่งพลังงานจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 2.6.4.2 (Y. Hu, Y. Xie, D. Fu and L. Cheng, 2016) A New Single-Phase π -Type 5-Level Inverter Using 3-Terminal Switch-Network [59]

มีการนำเสนอเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระดับ 5 ขั้นตอนแบบใหม่โดยใช้ 3-terminal switchnetwork (3TSN) วิธีการมีตัวแปรของโครงสร้าง **π**-type ระดับ 3 หรืออินเวอร์เตอร์แบบแฝดคู่กับ ตัวเหนี่ยวนำคู่ อินเวอร์เตอร์ใหม่เหมาะสำหรับพลังงานหลายระดับที่มีแรงดันไฟฟ้า DC-bus ต่ำ ข้อดีของวิธีการที่เสนอคือ การใช้สวิตช์ไฟที่ใช้งานเพียง 4 ตัวเพื่อให้ได้การทำงานระดับ 5 ระดับ ประโยชน์อื่น ๆ ได้แก่ การทำงานความถี่สองเท่าของตัวเหนี่ยวนำขาออกและการแบ่งกระแสที่เท่ากัน ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสวิตช์ไฟและตัวเหนี่ยวนำตัวกรอง ดังนั้นจึงนำไปสู่ประสิทธิภาพและฮาร์ โมนิคส์ต่ำ ลักษณะนี้ช่วยให้สามารถกระจายการสูญเสียและลดปริมาณของตัวเหนี่ยวนำตัวกรอง เอาท์พุท การดำเนินการกับการมอดูเลต pulse width sinusoidal (SPWM) ได้อธิบายไว้ใน รายละเอียด ในขณะเดียวกันได้มีการศึกษาและอภิปรายเกี่ยวกับการวิเคราะห์และออกแบบด้วย แม่เหล็ก



ภาพประกอบ 2.72 Proposed single-phase π -type 5-level inverter. [59]



1. single-stage topolo	gy							
title	Vin	Po	Vo	Fs	Max	THD	Filter	reference
	(V)	(vv)	(vrms)	(КН2)	(%)	(%)		
Universal Single-Stage	100-	500	230	10	-	-	<i>Cf</i> = 4.0 µF,	[41]
Grid-Connected Inverter	200						and <i>Lf =</i> 8	
A Boost DC–AC	100	500	127	30	_	4.47	<i>Cf</i> = 80 μF,	[42]
Converter:Analysis,Design							and <i>Lf =</i>	
, and Experimentation		L					550 mH.	
A New Buck-Boost-	100	6 <mark>36</mark>	100	9.8	-	5	<i>Cf</i> = 500 µF,	[15]
Operation-Based							and <i>Lf</i> = 5	
Sinusoidal Inverter							mH.	
Circuit								
A Transformer-Less	48	500	100	4	-	6	<i>Cf</i> = 12 μF,	[43]
Inverter using Buck Boost							and <i>Lf1 =</i>	
Type Chopper Circuit for							20 mH. <i>Lf2</i>	
Photovoltaic Power							= 20 mH.	
System			Y					
A Novel Single-Stage	75	500	Y	5	90	5-8	$Cf = 4.7 \mu F$,	[4]
Full-Bridge Buck Boost							and <i>Lf</i> = 1	
Inverter			Ĭ				mH.	
Buck-Boost Interleaved	20	170	314	10	87	-	$Cf = 1 \ \mu F$,	[12]
Inverter for Grid							and <i>Lf</i> =	
Connected Photovoltaic						9	3.5 mH.	
System			0	5	3	5	0	
A Single-Stage Single-	92 6	193.2	141	10	-	4.9	<i>Cf</i> = 20 μF,	[44]
Phase Transformer-Less							and <i>Lf</i>	
Doubly Grounded Grid-							=2.3 μH.	
Connected PV Interface								

ตาราง 2.6 สรุปประสิทธิภาพและสมรรถนะอินเวอร์เตอร์จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

title	Vin	Po	Vo	Fs	Max	THD	Filter	reference
	(V)	(W)	(Vrms)	(kHz)	eff	(%)		
					(%)			
A New SPWM Controlled	50	1000	100	2.3	-	5	<i>Cf</i> = 4.7 μF,	[45]
Three-Switch Buck-Boost							and <i>Lf</i> = 1	
Inverter for Distributed							mH.	
Generation Applications								
Study of a Novel Buck-	300	100 <mark>0</mark>	120	5	-	4.9	CL	[46]
Boost Inverter for								
Photovoltaic Systems								
Low-Cost Semi-Z-source	40	40	<mark>1</mark> 20	50	_	8.3	<i>L</i> = 1.3mH	[47]
Inverter for Single-Phase							and <i>Cf</i> = 4	
Photovoltaic Systems							μF,	
A reduced leakage	240	-	<mark>1</mark> 69.7	10	94.		<i>Cf</i> = 5.6 μF,	[3]
current transformerless					75		and <i>Lf</i> =2mH.	
photovoltaic inverter								
Leakage Current	400	1000	240	20	-	-	<i>Cf</i> = 6.6 μF,	[48]
Analytical Model and							and <i>Lf =</i> 8 mH	
Application in Single-			=	Þ				
Phase Transformerless								
Photovoltaic Grid-								
Connected Inverter								
Improved single-phase	380	1000	220	40	98.	_	<i>Lf</i> = 4 mH.	[49]
transformerless inverter					5			
with high power density						6	163	
and high efficiency for	1/5		9	50	3			
grid-connected	6	4	el /					
photovoltaic systems								

ตาราง 2.6 สรุปประสิทธิภาพและสมรรถนะอินเวอร์เตอร์จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

title	Vin	Ро	Vo	Fs	Max	THD	Filter	reference
	(V)	(W)	(Vrms)	(kHz)	eff	(%)		
2.Two-Stage Topologies					(%)			
Time-sharing Boost	160	-	200	20	-	3	<i>Cf =</i> 10µF,	[50]
Chopper Cascaded Dual							and <i>Lf =</i>	
Mode Single-phase							1 mH.	
Sinewave Inverter for								
Solar Photovoltaic Power								
Generation System								
Photovoltaic Parallel	100			30	-	-	CL	[9]
Resonant DC-link Soft								
Switching Inverter using								
Hysteresis Current								
Control								
A NEW,	120	-	240	6.2	-	-	Cf =	[51]
TRANSFORMERLESS,				6			4700µF,	
PHOTOVOLTAIC ARRAY							and <i>Lf =</i>	
TO UTILITY GRID							1mH.	
INTERCONNECTION								
The High Efficiency	800	5000	20	10	96.		<i>Cf</i> = 1000	[52]
Transformer-less PV					2		μF,	
Inverter Topologies	F						and <i>Lf =</i>	
Derived From NPC							2mH.	
Topology						5	6.9	
Analysis and Evaluation	120	600	100	100	9	-	Cf =	[53]
of a Series-Combined		4	6(1)				3.675 μF,	
Connected Boost and							and <i>Lf =</i>	
Buck-Boost DC-DC							350uH.	
Converter for								
Photovoltaic Application								

ตาราง 2.6 สรุปประสิทธิภาพและสมรรถนะอินเวอร์เตอร์จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

title	Vin	Ро	Vo	Fs	Max	THD	Filter	reference
	(V)	(W)	(Vrms)	(kHz)	eff	(%)		
Noval Grid Connected	100	1000		25	(%)		(f = 1 7E	[54]
Novet and-connected	400	1000		23			$C_{f} = 4.7 \mu$	[54]
Non-Isolated Converters							and $LJ =$	
for Photovoltaic Systems		5					4.5mH.	
with Grounded								
Generator								
Novel Transformerless	175	-	120	20	96.	7.5	$Cf = 1 \ \mu F$,	[55]
Grid-Connected Power					17		and <i>Lf =</i>	
Converter With Negative							3mH.	
Grounding for								
Photovoltaic Generation								
System								
Solar Power Conditioners	260	1000		20	98	-	<i>Cf</i> = 10 μF,	[56]
Using Bidirectional							and <i>Lf =</i>	
Chopper Circuits							0.65mH.	
Connected in Series								
Performance analysis of	35	142	53.5	4	98	8.1	<i>Cf</i> = 21 μF,	[57]
a low-cost current-			\square				and <i>Lf =</i>	
source 1-ph grid-							2.9mH.	
connected PV inverter								
3. multi-stage topology								
New multi-stage DC-DC	80	600	220	20	94.	3.6	<i>Cf</i> = 100 μF,	[6]
converters for grid-	1/5		6	50	4		and <i>Lf =</i>	
connected photovoltaic	76	Ц	ญ \	0			2.5mH.	
systems								

ตาราง 2.6 สรุปประสิทธิภาพและสมรรถนะอินเวอร์เตอร์จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

title	Vin	Ро	Vo	Fs	Max	THD	Filter	reference		
	(V)	(W)	(Vrms)	(kHz)	eff	(%)				
					(%)					
4. Multilevel Inverter										
A single-phase nine-level	103.	100	110	TS	-	3.7	Cf =	[58]		
inverter for renewable	8	0		120u		6	2200 µF,			
energy systems				S			and <i>Lf =</i>			
employing model							5.85 mH.			
predictive control										
A New Single-Phase π -	200	130		5	93.		Cf =	[59]		
Type 5-Level Inverter					5		100 µ⊧,			
Using 3-Terminal Switch-							and <i>Lf</i> =			
Network							900µH.			

ตาราง 2.6 สรุปประสิทธิภาพและสมรรถนะอินเวอร์เตอร์จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

2.7 สรุป

การผลิตพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ขึ้นอยู่กับจำนวนของประจุพาหะนี้จะเป็นสัดส่วนกับ ความเข้มของแสงแดดที่ตกกระทบ เซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคตินั้นจะเขียนแทนด้วย ไดโอด และ แหล่งจ่ายกระแสซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดตามความเข้มของแสงที่ตกกระทบ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์กับอุณหภูมิห้อง กระแสลัดวงจรของ PV แรงดันไฟฟ้าวงจรไฟฟ้า กระแสสลับและ ความสูญเสียต่าง ๆ ในเซลล์แสงอาทิตย์ การต่อเซลล์ทำได้โดยการต่อเซลล์แบบ ขนานและการต่อเซลล์แบบอนุกรม

การแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง ใช้ในการแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอีกระดับหนึ่ง ซึ่งระดับแรงดันขาออกอาจต่ำกว่าหรือสูงกว่าแรงดันด้านขา เข้าก็ได้ อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวจะแบ่งออกเป็นสองชนิด คือ แบบฮาร์ฟบริดจ์ และ แบบฟูลบริดจ์ สามารถควบคุมการทำงานได้หลายวิธี เช่นการสวิตซิ่งแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์,การสวิตซิ่ง แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์,วงจรอินเวอร์เตอร์พีดับเบิลยูเอ็มแบบฟูลบริดจ์ โดยที่อินเวอร์เตอร์ที่เข้า

กับระบบระบบสายส่งจะมีความสามารถข้ามผ่านความผิดพร่องของระบบสายส่งตามมาตราฐาน จากงานวิจัยเรื่องวงจรแปลงผันพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไม่มีหม้อแปลงสำหรับระบบ ไฟฟ้าสามเฟส ได้ทำการรวบรวมโครงสร้างและหลักการทำงานของวงจรแปลงผันพลังงานเซลล์ แสงอาทิตย์ชนิดไม่มีหม้อแปลงสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟส [60] ด้านคุณภาพที่มีวงจรลดทอน





บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้ ผู้วิจัยนำเสนอวิธีดำเนินการวิจัยสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้แปลงผันกำลังไฟฟ้า กระแสตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วยวงจรที่ผู้วิจัยได้ออกแบบขึ้น คือ อินเวอร์เตอร์แปลงผันกำลังงานเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบไฟฟ้าเฟสเดียวด้วยอินเวอร์เตอร์ แหล่งจ่ายกระแสเฟสเดียวร่วมกับวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (A Single Phase Grid Connected PV Inverter using a CSI with a Buck Converter) โดยมีเนื้อหาประกอบด้วยการ อธิบายโครงสร้างวงจร หลักการทำงานวงจร คุณสมบัติของวงจร วิธีการดำเนินการทดลองและการ เก็บผลการทดลอง รวมถึงอุปกรณ์และเครื่องมือที่ต้องใช้ในการทดลองและการวิเคราะห์ผลการ ทดลองทั้งในส่วนของการทดลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

3.1 โครงสร้างวงจร

วงจรแปลงผันกำลังงานแสงอาทิตย์มีหลายโครงสร้าง แต่ในที่นี้เพื่อให้เห็นต่างแตกต่างและ สามารถวิเคราะห์สมรรถนะของวงจรที่ออกแบบได้ชัดเจน ผู้วิจัยได้เลือกโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลัง แบบไม่ใช้หม้อแปลง ได้แก่ วงจรแปลงผันกำลังแบบแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter; CSI) เพียงอย่างเดียวและวงจรแปลงผันกำลังแบบแหล่งจ่ายกระแสร่วมกับวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง (CSI with a buck converter) ที่ได้ออกแบบในการวิจัยนี้ โดยวงจรดังกล่าวนี้มีลักษณะ ดังแสดงในภาพประกอบ 3.1



ภาพประกอบ 3.1 วงจรแปลงผันกำลังงานเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบไฟฟ้าเฟสเดียวด้วยวงจร แหล่งจ่ายกระแสร่วมกับวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

3.2 หลักการทำงานของวงจร

หลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ที่ออกแบบสามารถแสดงให้ เข้าใจได้ง่ายด้วยสภาวะการทำงานของวงจรที่แสดงในภาพประกอบ 3.2 (ก)-(ง) ซึ่งแสดงตัวอย่าง สภาวะการทำงานของวงจรที่สภาวะกำลังสูงสุด (Maximum Power Point; MPP) ของแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ ณ ขณะที่ระดับความเข้มรังสีอาทิตย์ (Sun irradiance) มีค่าที่ระดับสูง ปานกลาง และ ต่ำ ตามลำดับ





จากภาพจะเห็นได้ว่า ณ สภาวะระดับความเข้มของรังสีอาทิตย์มีค่าสูง (ภาพประกอบ 3.2 (ก)) ทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าสูง วงจรลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง (Buck converter) ภายในวงจรแปลงผันกำลังที่ออกแบบจะปรับระดับแรงดันไฟฟ้าลงมา เล็กน้อย เพื่อให้แรงดันด้านขาเข้าอินเวอร์เต<mark>อ</mark>ร์แหล่งจ่ายกระแส (CSI) อยู่ในระดับที่วงจรทำงานได้ ้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เป็นสภาวะที่มีกร<mark>ะ</mark>แสไหลสูงสุดภายในวงจรและมีการถ่ายโอนกำลังงาน ้จากเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังระบบไฟฟ้าได้อย่<mark>างม</mark>ีประสิทธิภาพสูงสุดตามหลักการ ในขณะที่เมื่อระดับ ้ความเข้มของรังสีอาทิตย์มีความเข้มลดลงป<mark>ระ</mark>มาณ 50% ดังแสดงในภาพประกอบ 3.2 (ข) ซึ่งเป็น ้สภาวะที่แรงดันไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอา<mark>ทิต</mark>ย์มีค่าลดลงเล็กน้อยแต่กระแสไฟฟ้าลดลงประมาณ 50% วงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจ<mark>ะท</mark>ำการปิดวงจรตลอดทำให้กระแสไหลอย่างต่อเนื่องไป ้ยังอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสซึ่งยังคงท<mark>ำงานไ</mark>ด้ดีเนื่องจากระดับแรงดันมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากการไม่สับสวิตซ์ของวงจรลดทอ<mark>นแรงด</mark>ันไฟฟ้ากระแสตรงในสภาวะนี้ ทำให้กำลังสูญเสีย ้สวิตชิ่ง (Switching loss) ของวงจรจึงไม่<mark>มี สภา</mark>วะการทำงานที่แสดงในภาพประกอบ 3.2 (ค) และ 3.2 (ง) เป็นสภาวะที่ระบบไฟฟ้ามีระดับแ<mark>รงดันตก</mark>ลงไป 50% และ 100% (Short Circuit) ตามลำดับ ในสภาวะนี้ ปกติหากเป็นอินเวอร์เตอร์แห<mark>ล่งจ่ายแ</mark>รงดันจะเปรียบเสมือนการลัดวงจรแหล่งจ่ายซึ่งจะ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในระบบที่ค่าสู<mark>งสุดในขณะที่</mark>ตัวเก็บประจุ (DC-link capacitor) ของวงจรมี การลัดวงจร ซึ่งอาจทำให้เกิดกา<mark>รระเบิดและเสียหายได้ห</mark>ากไม่มีวงจรป้องกันที่ดีพอ อย่างไรก็ตาม ้อินเวอร์เตอร์จะหยุดการทำงาน <mark>แต่สำหรับวงจรแปลงผัน</mark>กำลังที่ได้ออกแบบทำจากอินเวอร์เตอร์ แหล่งจ่ายกระแส วงจรยังคงสามารถให้กระแสไหลผ่านได้ทำให้อินเวอร์เตอร์ไม่เกิดความเสียหาย จึง ถือเป็นข้อได้เปรียบของวงจรเป็นอย่างยิ่ง

3.3 คุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์

อ<mark>ินเวอร์เตอร์แปลงผัน</mark>กำลังงานแสงอาทิตย์ที่ออกแบบมี<mark>คุณสมบัติที่สำคัญ</mark>ดังนี้

3.3.1 การมีวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จะช่วยให้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส สามารถทำงานในระดับแรงดันที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงตลอดเวลา ทำให้ประสิทธิภาพการ แปลงผันกำลังไฟฟ้าในภาพรวมมีประสิทธิภาพสูงด้วย ซึ่งแตกต่างจากการใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่าย กระแสเพียงลำพังซึ่งจะทำให้สามารถออกแบบระดับแรงดันได้ในระดับที่ไม่สูงเท่าที่ควร ภาพประกอบ 3.3 แสดงตัวอย่างกราฟเปรียบเทียบแรงดันและกระแสที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของวงจร เมื่อให้ ค่ากำลังงานที่ระดับเท่ากัน ซึ่งจะเห็นว่า อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสที่ทำงานร่วมกับวงจรลดทอน แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสามารถทำงานในระดับแรงดันที่มีค่าสูงขึ้น ในขณะที่กระแสมีขนาดต่ำลง เมื่อ เทียบกับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสเพียงอย่างเดียว ทำให้มีแนวโน้มสูญเสียกำลังงาน (Copper loss) น้อยกว่า



```
ภาพประกอบ 3.3 เปรียบเทียบกราฟคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความเหมาะสมในการ
ท<mark>ำงานร่</mark>วมกับวงจร
```

3.3.2 การใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่<mark>ายกระ</mark>แสในการแปลงรูปแบบแรงดันไฟฟ้าจากกระแสตรง เป็นกระแสสลับนั้น ทำให้วงจรแปลงผันกำลังสามารถทำงานได้โดยไม่เกิดความเสียหายแม้ขณะโหลด (ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ) เกิดการลัดวงจร รู้จักกันในชื่อ การมีความสามารถ Low grid fault ridethrough

3.4 วิธีการทดลองและเก็บผลกา<mark>รทดลอง</mark>

เพื่อวิเคราะห์และศึกษาสมรรถนะของวงจรที่ออกแบบ ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบวิธีการทดลอง และเก็บผลการทดลองรวมทั้งหมด 5 การทดลอง ได้แก่ เปรียบเทียบโครงสร้างวงจร (Circuit Topology) กับวงจรที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน การเปรียบเทียบสมรรถนะคุณภาพสัญญาณคลื่นขาเข้า (Input DC power quality) การเปรียบเทียบคุณภาพสัญญาณคลื่นขาออก (Output AC power quality) การเปรียบเทียบค่าความเครียดบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในวงจร (Electric stress on semiconductor devices) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพวงจร (Circuit Efficiency) โดยมี รายละเอียดดังนี้



3.4.1 การเปรียบเทียบโครงสร้างวงจร (Circuit Topology)

ภาพประกอบ 3.4 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์ผันกำลังงานแสงอาทิตย์เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบภายใต้ การวิจัยในครั้งนี้: (ก) วงจร CSI มาตรฐาน (ข) วงจร CSI with a buck converter

ภาพประกอบ 3.4 แสดงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังงานเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับ ระบบไฟฟ้าที่ออกแบบ วงจรประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ วงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Buck converter) อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter หรือ CSI) เฟสเดียว และ วงจรกรองสัญญาณขาออก (Output filter) โดยวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบด้วยอุปกรณ์ 3 ชิ้น ได้แก่ สวิตซ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor switch) ไดโอดกำลัง (Power diode) และ ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์ S5, D5 และ L1 ที่แสดงใน ภาพประกอบ 3.4 (ข) โดยด้านขาเข้าของวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมต่อกับแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ (Photovoltaic หรือ PV panel) ส่วนด้านขาออกของวงจรต่อกับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่าย กระแส โดยอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสประกอบด้วยอุปกรณ์ 8 ขึ้น ได้แก่ สวิตซ์สารกึ่งตัวนำและ ไดโอดที่ต่ออนุกรมที่ต่อกับสวิตซ์ จำนวนอย่างละ 4 ตัว โดยชุดสวิตซ์ต่อในรูปแบบบริดจ์เต็มรูปคลื่น (Full wave bridge) ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์ S1-S4 และ D1-D4 ที่แสดงในภาพประกอบ 3.4 ซึ่ง อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสนี้จะทำการแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกปรับให้มีระดับแรงดันที่ เหมาะสมแล้วจากวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ระดับแรงดันที่ เหมาะสมแล้วจากวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ระดับแรงดันเละ ความถี่ที่ต้องการ แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสเฟสเดียวจะถูกส่งไปยังวงจร กรองแรงดันขาออก ซึ่งจะประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ L2 และตัวเก็บประจุ (C1 และ C2) เพื่อปรับ สัญญาณแรงดันและกระแสขาออกให้มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ตามต้องการ โดยตัวเก็บประจุ 2 ตัวมี ค่าที่เท่ากัน เพื่อสร้างความสมดุล (Balance) ของสัญญาณขั้วบวกและลบมีลักษณะสมดุลและทำให้ ขั้วขาลบของวงจรไม่เชื่อมกับกราวด์ (Common ground)

ซึ่งในการเก็บผลการทดลองนั้น ได้ออกแบบเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ดัง แสดงในตารางที่ 3.1 โดยใช้ระดับความเข้มแสงตามมาตรฐาน European Efficiency [34] ซึ่งแต่ละ วงจรจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน จึงมีความจำเป็นต้อง เปรียบเทียบในกรณีที่วงจรนั้น ๆ ทำงานได้ดีที่สุด

จุดทำงาน			ค่าของอุปกรณ์ก	รองสัญญาณที่ต้องก	าาร
(PV Operating Point)	2392	L _{dc} (mH)	C _{dc} (uF)	L _f (mH)	C _f (uF)
	Standard CSI				
	CSI+Buck	7			
OP (MPD 50.06)	Standard CSI				
	CSI+Buck				
	Standard CSI				
	CSI+Buck				
OP (MPP 20.06)	Standard CSI		~	2100	
OF (IVIFF 20.90)	CSI+Buck	5	9		
OP (MPP 10 %)	Standard CSI				
	CSI+Buck				
	Standard CSI				
	CSI+Buck				

ตาราง 3.1 เปรียบเทียบคุณสม<mark>บัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่</mark>สามารถใช้ได้กับแต่ละวงจร

3.4.2 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพสัญญาณคลื่นขาเข้า (Input DC power quality) เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลการวัดค่าระลอกคลื่น (Ripple) ลักษณะสัญญาณแรงดันและ กระแสขาเข้าของวงจรที่นำเสนอในหัวข้อ 3.4.1 เปรียบเทียบกัน โดยมีการทดสอบทั้งโปรแกรม คอมพิวเตอร์และการทดสอบด้วยอุปกรณ์ที่จัดสร้างขึ้นมาจริงเพื่อทำการเปรียบเทียบ

ระดับความเข้ม แสงอาทิตย์		ค่าระ	ลอกคลื่นบนสั	บูญาณขาเข้าทิ	่วัดได้ (%pe	eak-peak)	
	วงจร		แรงดัน		กระแส			
		ส <mark>ูงสุ</mark> ด	ต่ำสุด	%	สูงสุด	ต่ำสุด	%	
OP	standard CSI							
(MPP %)	CSI+Buck	X						

ตาราง 3.2 เปรียบเทียบค่าระลอกสัญญาณ<mark>ค</mark>ลื่นสัญญาณขาเข้าระหว่างวงจร

3.4.3 การทดสอบเปรียบเทียบคุณภาพสัญญาณคลื่นขาออก (Output AC Power Quality) ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบวงจรในลักษณะเดียวกับหัวข้อ 3.4.2 แต่เป็นการทดสอบ คุณภาพสัญญาณคลื่นขาออกจากแต่ละวงจร โดยใช้การตรวจสอบค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (Total Harmonic Distortion; THD) และค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) โดยมีลักษณะข้อมูลที่ ต้องการทดลองและเก็บผลดังแสดงในตาราง 3.3

ตาราง 3.3 เปรียบเทียบค่าตัวแปรที่ได้จากการวัดคลื่นสัญญาณขาออกของวงจร

ระดับความเข้ม	วงจร	Is (THD)	Power Factor
แยงดามผอ		(%)	(-)
OP	standard CSI		
(MPP %)	CSI+Buck		

3.4.4 เปรียบเทียบค่าความเครียดบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในวงจร (Electric Stress on Semiconductor Devices)

เป็นการเปรียบเทียบค่าความเครียดบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในวงจรเพื่อให้สามารถคาดคะเน ในส่วนของงบประมาณ ความเสี่ยงที่จะเกิดการเสียหายเนื่องจากกระแสหรือแรงดันหรือกำลังงานเกิน (overcurrent, overvoltage, overload) ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบขณะแต่ละวงจรทำงานในสภาวะ กำลังสูงสุด (Maximum Power Point; MPP) โดยมีรายละเอียดการตัวแปรที่ต้องการจัดเก็บข้อมูล ดังแสดงในตาราง 3.4

ระดับความเข้ม แสงอาทิตย์	วง จร	V _{dc-peak} (V)	I _{dc-peak} (A)		
OP	standard CSI				
(MPP %)	CSI+Buck				

ตาราง 3.4 เปรียบเทียบค่าตัวแปรที่ได้จากการวัดคลื่นสัญญาณขาออกของวงจร

3.4.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ<mark>วง</mark>จร (Circuit Efficiency)

เพื่อให้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ (**ท**) ระหว่างวงจร ผู้วิจัยได้อาศัยมาตรฐานการประเมิน ประสิทธิภาพโดยใช้มาตรฐานการคำนวณแบบ European Efficiency ซึ่งจะเป็นการวัดประสิทธิภาพ ของวงจรที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ที่ 5%, 10%, 20%, 30%, 50% และ 100% จากนั้นใช้ความถี่ ของการเกิดระดับความเข้มแสงอาทิตย์ดังกล่าวตลอดทั้งปีโดยวัดที่ภาคกลางของทวีปยุโรป จากนั้นทำ การคำนวณด้วยค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักดังแส<mark>ดงในสม</mark>การ (3.1) [34]

$$\eta_{euro} = 0.03\eta_{5\%} + 0.06\eta_{10\%} + 0.13\eta_{20\%} + 0.1\eta_{30\%} + 0.48\eta_{50\%} + 0.2\eta_{100\%}$$
(3.1)

โดยข้อมูลที่ต้องการจัดเก็บได้แสดงในตาราง 3.5 และตาราง 3.6 โดยตาราง 3.5 แสดงตัว แปรที่ค่าที่วัดได้จากการทดลองด้ว<mark>ยโปรแกรมคอมพิวเตอร์</mark>



		ตัวแปรและค่าที่วัดได้								
ระกับออกแล้น		ตัว	วแปรขา	เข้า	ŕ	กำลังสูญเสียใน วงจรหลัก	l	กำลังสูญเสียใน วงจรเสริม	กำลังสูญเสียรวม	
ระดบท รามเขม แสงอาทิตย์	2495	V _{pv} (V)	I _{pv} (A)	P _{pv} (W)	P _{sw} - on+rr (W)	P _{sw-off} (W)	P _{cond-} igbt (W)	P _{cond-frd} (W)	P _{loss(total)} (W)	
OP	Standard CSI									
(MPP 100 %)	CSI+Buck									
OP	Standard CSI									
(MPP 50 %)	CSI+Buck									
OP	Standard CSI									
(MPP 30 %)	CSI+Buck									
OP	Standard CSI									
(MPP 20 %)	CSI+Buck									
OP	Standard CSI									
(MPP 10 %)	CSI+Buck		Ų.							
OP	Standard CSI									
(MPP 5 %)	CSI+Buck									

ตาราง 3.5 ข้อมูลกำลังขาเข้าและกำลังสูญเสียเนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำของวงจร

3.4.6 การเปรียบเทียบประสิท<mark>ธิภาพของอินเว</mark>อร์เตอร์โดยประมาณ

การคำนวณค่าประสิทธิภาพได้ตามตาราง 3.6 ทั้งนี้ ในการทดลองจริงจะได้ใช้เครื่อง Power Analyzer ในการทดสอบหาค่าปร<mark>ะสิทธิภา</mark>พการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังแบบแหล่งจ่ายกระแส ร่วมกับวงจร<mark>ลดทอนแรงดันไฟฟ้าก</mark>ระแสตรง (CSI with a buck converter) ตามที่ได้ออกแบบไว้

ตาราง 3.6 ข้อมูลเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวงจร

2495	ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานโดยประมาณ (%)											
	η 1%	η10%	η20%	η30%	η50%	η100%	η_{euro}					
Standard CSI		2										
CSI+Buck												

de
3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการศึกษาและทดลองในการวิจัยนี้ มีเครื่องมือและอุปกรณ์หลักที่จำเป็นในการวิจัยดังนี้ โปรแกรม PSpice ใช้เป็นโปรแกรมในการทดสอบสมรรถนะของทั้งวงจรแปลงผันที่ได้ออกแบบ และวงจรที่ใช้ในการเปรียบเทียบดังที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อง 3.4 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วย โปรแกรมนี้จะนำมาใช้ในการคำนวณและวิเคร<mark>า</mark>ะห์สมรรถนะด้านต่าง ๆ ของวงจร

3.6 การออกแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอม<mark>พิ</mark>วเตอร์

อินเวอร์เตอร์ที่ได้ออกแบบด้วยโป<mark>รแ</mark>กรมคอมพิวเตอร์ โดยเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์ แหล่งจ่ายกระแสแบบมาตรฐาน เพื่อให้ได้ผ<mark>ลข้อ</mark>มูลสนับสนุนสมมติฐานการวิจัย โดยมีผลดังนี้

3.6.1 การจำลองรูปแบบของแผงเซ<mark>ลล์แส</mark>งอาทิตย์

ส่วนนี้อธิบายถึงวิธีการสร้างโมเดลจากข้อมูลแผ่นข้อมูล โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เชิงพาณิชย์ 300W-72M [60] ที่มีข้อกำหนดข้อมูลที่แส<mark>ดงในต</mark>ารางที่ 3.7 ถูกใช้สำหรับการวิจัยนี้

Electrical Pe <mark>rforma</mark> nce						
Max Power (Pmax)	300 W					
Operating Voltage (Vmp)	37.0 V					
Operating Current (I <mark>mp</mark>)	<mark>8.</mark> 11 A					
Open Circuit Voltag <mark>e (Voc)</mark>	45.5 V					
Short Circuit Current (Isc)	8.64 A					
All rating at STC 1000W/m ² ,AM 1.5 spectrum, 25 [°] C						

ตาราง 3.7 Electrical Characteristics of Sharp 300W-72M Solar Cell [60]

ค่าความเป็นอุดมคติของไดโอด (n) ค่าของ n พารามิเตอร์ที่กำหนดสูงกว่า ไดโอดจริง เปรียบเทียบกับไดโอดทางทฤษฎี ระดับพลังงานสามารถผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งอาจแตกต่าง กันไปขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีและวัสดุของเซลล์แสงอาทิตย์โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของไดโอดที่อยู่ใน วงจรสมมูลย์

Model	Туре	Parameters/Values
Name		
Dbody3	Diode	.model Dbody3 D IS={IS} N={N} RS=0.1 IKF=94.81 XTI={3*N}
		+EG={1.110*N} CJO=51.17E-12 M=.2762 VJ=0.3905 FC=.5
		+ ISR=100.0E-11 NR={N*2} BV=100.1 IBV=10 TT=4.761E-6

ตาราง 3.8 พารามิเตอร์สำหรับไดโอดโปรแกรม Pspice



ภาพประกอบ 3.5 การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในการจำลอง (ข) กระแสขาออก (ค) กำลังไฟฟ้าขาออก



จากภาพประกอบ 3.5 ผลการจำลองแผงโมดูล 300W-72M ขนาด Pmax= 290W,

จากภาพประกอบ 3.6 ผลการจำลองโดยนำแผงโมดูล 300W-72M 6 strings ใน 1 strings มีแผงโมดูลต่ออนุกรมกัน 3 แผง ได้กพลังขาออก Pmax= 5.2kW, Vmax=135V และ Imax=50.7A ที่ 25 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบ 3.7 จำลองวงจรอินเวอร์เตอร์แปลงผันกำลังงานแสงอาทิตย์เฟสเดียวด้วยอินเวอร์เตอร์ แหล่งจ่ายกระแส

ภาพประกอบ 3.7 เป็นการจอลองวงจรอินเวอร์เตอร์แปลงผันกำลังงานแสงอาทิตย์เฟส เดียวด้วยวงจร standard CSI ควบคุมการการทำงานด้วย การควบคุมโดย Pulse width modulation ความถี่ fs= 40kHz ใช้ความถี่ในการอ้างอิงด้านขาออก 50Hz



ภาพประกอบ 3.8 วงจรอินเว<mark>อร์เตอร์แปลงผันกำลังงาน</mark>แสงอาทิตย์เฟสเดียวด้วยอินเวอร์เตอร์ แหล่งจ่ายกระแสร่วมกับวงจรลดทอนแรงดัน

ภาพประกอบ 3.8 เป็นการจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์แปลงผันกำลังงานแสงอาทิตย์เฟส เดียวด้วยอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสร่วมกับวงจรลดทอนแรงดัน กำหนดความถี่ให้กับวงจรลดทอน แรงดัน 60kHz ค่า D=0.8

3.6.2 ผลการดำเนินงานภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าของระบบระบบสายส่งปกติ จุดกำลังสูงสุด (MPP) ของ PV ที่จำเป็นต่อการทำงาน อยู่ใกล้แรงดันสูงสุดของ PV อินเวอร์เตอร์เริ่มต้นการทำงานเมื่อต่อร่วมกับกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกันจนถึงระดับที่เกือบไม่มี แรงดันไฟฟ้า นำเสนอผลของ standard CSI เมื่อทำงานที่จุดเดียวกัน ในการเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ ของ CSI+buck



ภาพประกอบ 3.9 ผลการจำลองเปรียบเทียบกราฟคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความ เหมาะสมในการทำงานร่วมกับวงจร (ก) I-V curve และ (ข) จุดกำลังสูงสุด

โครงสร้าง	กระแสลัดวงจร	แรงดันเปิดวงจร	แรงดันสูงสุด	กระแสสูงสุด	กำลังสูงสุด
อินเวอร์เตอร์	(lsc)	(Vo)	(Vm)	(Im)	(Pm)
standard CSI	16A	311.33 V	263.94 V	15.4 A	4101.1 W
CSI+Buck	12.85 A	388.89 V	337.42 V	12.85 A	4129.8 W

363

21	9
ตาราง 3.9	เปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

3.6.3 ผลการดำเนินงานที่ระดับพลังงานแตกต่างกัน

ภาพประกอบ 4.2 แสดงจุดปฏิบัติการ 6 จุด (OP1 ถึง OP6) ที่ใช้ สังเกตประสิทธิภาพของ standard CSI เมื่อทำงานกับระดับพลังงานที่แตกต่างกันที่ MPP (100%, 50%, 30%, 20%, 10%, และ 5 %)



ภาพประกอบ 3.10 ผลการจำลองเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ standard CSI ที่ ระดับพลังงานแตกต่างกัน

โครงสร้าง	กำลังสูงสุด	กระแสลัดวงจร	กระแสสูงสุด	แรงดันเปิดวงจร	แรงดันสูงสุด
อินเวอร์เตอร์	(Pm ,W)	(Isc, A)	(Im ,A)	(Vo, V)	(Vm ,V)
100	4093.3	15.99	15.06	311.16	270.20
50	1966.9	7.99	7.51	301.54	262.62
30	1141.4	4.79	4.50	293.97	254.50
20	736.79	3.19	2.91	293.77	254.45
10	341.62	1.59	1.39	286.18	246.48
5	150.57	0.79	0.635	278.32	238.61

ตาราง 3.10 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ standard CSI ที่ระดับพลังงานแตกต่างกัน





ภาพประกอบ 3.11 ผลการจำลองเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ CSI + Buck ที่ระดับ พลังงานแตกต่างกัน



ภาพประกอบ 3.12 และ 3.13 เป็นสัญญาณสวิตซ์ชิ่งแบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ได้จากการจำลอง จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมอินเวอร์เตอร์แปลงผันกำลังงานแสงอาทิตย์เฟสเดียว โดย การทำงานของสวิตซ์ S1 และ S2 จะทำงานร่วมกันเพื่อนำกระแส ในเวลาเดียวกันสวิตซ์ S4 จะ ทำงานสลับกับสวิตซ์ S2 เพื่อให้กระแสขาออกเป็นรูปคลื่นไซน์

โครงสร้าง อินเวอร์เตอร์	กำลังสูงสุด (Pm ,W)	กระแส ลัดวงจร (Isc <mark>, A</mark>)	กระแสสูงสุด (Im ,A)	แรงดันเปิด วงจร (Vo, V)	แรงดันสูงสุด (Vm ,V)
100	4049.7	12 <mark>.8</mark> 4	12.20	388.56	331.70
50	1945.5	6. <mark>42</mark>	6.00	381.22	323.78
30	1121.6	3. <mark>85</mark>	3.54	373.53	316.00
20	716.80	2.56	2.32	365.76	307.73
10	323.68	1.28	1.078	350.00	301.19
5	134.10	<mark>0.64</mark>	0.472	340.47	283.92

ตาราง 3.11 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ CSI + Buck ที่ระดับพลังงานแตกต่างกัน

3.7 วิธีการออกแบบสำหรับส่วนประกอ<mark>บอินเวอร์</mark>เตอร์

3.7.1 การออกแบบชิ้นส่วนการกรองสัญญาณ

3.7.1.1 การออก<mark>แบบส่วนการกรองสัญญ</mark>าณส่วน DC-Link

โดยปกติแล้วเกณฑ์สำหรับการเลือกส่วนประกอบของตัวกรองจะขึ้นอยู่กับระดับ ระลอกคลื่นบนสัญญาณ DC หรือความถี่เรโซแนนซ์ ตัวกรองเมื่อมีการใช้ส่วนประกอบในวงจร (Loc และ Coc) ตัวกรองกระแสตรงอินพุทควรต่ออนุกรม เพื่อให้สามารถรับกระแสขาเข้า (iL) ในโหมด ต่อเนื่องและลดค่าระลอกให้น้อยกว่าค่าที่ระบุ ตัวเก็บประจุต้องคำนึงถึงการกระเพื่อมของ แรงดันไฟฟ้าของเอาท์พุท (Vc) ให้น้อยกว่าค่าที่ระบุ [37] มาตรฐาน IEEE และ IEC มีข้อจำกัด จำนวนสูงสุดที่อนุญาตให้ฉีดเข้าไปในระบบสายส่งได้ [61] วัตถุประสงค์ของการจำกัดการฉีดคือการ หลีกเลี่ยงความอิ่มตัวของหม้อแปลง อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดมีค่อนข้างน้อย (0.5% และ 1.0% ของ กระแสไฟฟ้าที่จัดอยู่ในเกณฑ์ดี) [61]

ISSUE	IEC61727	IEEE 1547	EN61000-3-2
Nominal power	10 kw	30 kw	16 Ax 230 V = 3.7 kW
Harmonic currents (Order - h) Limits	(3-9) 4.0%	(2-10)4.0%	(3)2.30 A
	(11-15)2.0%	(11-16)2.0%	(5) 1.14 A
	(17-21) 1.5%	(17-22) 1.5%	(7) 0.77 A
	(23-33) 0.6%	(23-34) 0.6%	(9) 0.40 A
		(> 35) 0.3%	(11)0.33 A
			(13)0.21 A
			(15-39) 2.25/h
	Even harmonics in	Approximately 30% of	
	be less than 25% o	the odd harmonics -see	
	harmonic limits lis	standard.	
Maximum current THD	5.0%		-
Power factor at 50% of rated power	0.90	-	
DC current injection	Less than 1.0% of	Less than 0.5% of	< 0.22 A -corresponds to
	rated output	rated output	a 50 W half-wave
	current.	current.	rectifier.
Voltage range for normal operation	85% - 110%	88% - 110%	-
	(196 ∨-253 V)	(97 v- 121 V)	
Frequency range for normal operation	50 ± 1 Hz	59.3 Hz to 60.5 Hz	-

ตาราง 3.12 สรุปมาตรฐานที่น่าสนใจที่สุดที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อระบบ PV กับ GRID [61]

ตาราง 3.13 ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์<mark>มอนิกเกี่ยวกับไฟ</mark>ฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม (PRC-PQG-01-1998), การไฟฟ้าฝ่ายผล<mark>ิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้านครหลวง</mark> การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค,

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุด			ų	Ľ		อันดัง	บฮาร์มเ	อนิกแล	ะขีดจำ	กัดของ	เกระแส	(A r	ms)					
ต่อร่วม (KV)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0.400	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	50	5	6	4	6
11 and 12	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1
22,24 and 33	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1
69	8.8	5.9	4.3	7.3	3.3	4.9	2.3	1.6	1.6	4.9	1.6	4.3	1.6	1	1	1.6	1	1
115 and above	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1

1998. [64]

ในประเทศไทยหรือสากลมีมาตรฐานที่ใช้บังคับ แนะนำหรือเป็นเกณฑ์เพื่อการพิจารณาเพื่อ ปรับปรุงแก้ไขให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยและไม่สร้างผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่น ตารางที่ 3.13 แสดงขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกที่ยอมให้เกิดขึ้นกับผู้ใช้ไฟฟ้าใด ๆ ในระบบจำหน่ายซึ่งกำหนดโดย หน่วยงานด้านไฟฟ้าของประเทศไทย

ในกรณีที่ A คือ ค่าระลอกของกระแสที่ยอมรับได้, I_{LDC} เป็นกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำอินพุท และ fs หมายถึงความถี่สวิตซ์ สามารถหาค่า inductor อินพุทจาก [62]

$$L_{DC} \frac{V_{pv}}{A.IL_{DC}} f_s$$
(3.2)

3.7.1.2 ออกแบบส่วนประก<mark>อ</mark>บกรองสัญญาณขาออก

ส่วนประกอบ AC ที่เป็นการทำงาน (ตัวเหนี่ยวนำ AC และ / หรือตัวเก็บประจุ AC) มักจะใช้สร้างตัวกรองกระแสไฟ AC สำหรับแปลงกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่เพื่อลดสัญญาณลบกวนที่ ด้าน AC Im คือกระแสที่จุดสูงสุดที่ฉีดเข้าระบบสายส่งและ B คือ เปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมที่อนุญาต Lf สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้ [63]

$$L_f > \frac{0.05V_m}{B.I_m \cdot f_s} \tag{3.3}$$

การออกแบบตัวกรองตัวเก็บประจ<mark>ุ, Cf และ fc หมายถึงคว</mark>ามถี่ของมุม [63]

$$f_{c} \propto \frac{1}{10} \cdot f_{s}$$
(3.4)
$$f = \frac{1}{L_{f} (2\pi \cdot f_{c})^{2}}$$
(3.5)

3.7.1.3 A Buck Converter เงื่อนไขสำหรับการทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะต้องเป็นกระแสบวกเสมอ [13]

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \tag{3.6}$$

หาค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้อัตราระลอกคลื่นตามที่กำหนด หาได้จาก

$$\frac{\Delta V_{DC}}{V_{DC}} = \frac{D}{RCf}$$
(3.7)

(3.8)

เปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแต่ละวงจรจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผง เซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน จึงมีความจำเป็นต้องเปรียบเทียบในกรณีที่วงจรนั้น ๆ ทำงานได้ดีที่สุด

 $C_{DC} = \frac{D}{(\frac{\Delta V_{DC}}{V})Rf}$

3.8 สรุป

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แปลงผันกำลังงานเซลล์อาทิตย์แบบต่อกับระบบไฟฟ้าที่ออกแบบ วงจรประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ วงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่าย กระแส เฟสเดียว และ วงจรกรองสัญญาณขาออกโดยมีหลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังงาน เซลล์แสงอาทิตย์ที่ออกแบบในสภาวะการทำงานของวงจรที่สภาวะกำลังสูงสุด) ของแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ วงจรลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ภายในวงจรแปลงผันกำลังที่ออกแบบจะปรับ ระดับแรงดันไฟฟ้าลงมาเล็กน้อย เพื่อให้แรงดันด้านขาเข้าอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส อยู่ในระดับ ที่วงจรทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เป็นสภาวะที่มีกระแสไหลสูงสุดภายในวงจรและมีการถ่าย โอนกำลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังระบบไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยอินเวอร์เตอร์ แหล่งจ่ายกระแสในการแปลงรูปแบบแรงดันไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับนั้น ทำให้วงจร แปลงผันกำลังสามารถทำงานได้โดยไม่เกิดความเสียหายแม้ขณะโหลด (ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ) เกิด การลัดวงจร รู้จักกันในชื่อ การมีความสามารถ Low grid fault ride-through

โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังงานแสงอาทิตย์เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบภายใต้การวิจัยในครั้ง นี้ได้แก่วงจร Current Source Inverter (CSI) และ วงจร CSI with a buck converter โดยทำการ เปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถใช้ได้กับแต่ละวงจร ระลอกสัญญาณ คลื่นสัญญาณขาเข้าระหว่างวงจร ค่าตัวแปรที่ได้จากการวัดคลื่นสัญญาณขาออกของวงจร ค่า ความเครียดบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในวงจร ค่าตัวแปรที่ได้จากการวัดคลื่นสัญญาณขาออกของวงจร และประสิทธิภาพวงจร

ผลการการจำลองรูปแบบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจำลองได้อย่างถูกต้องโดย สามารถกำหนดแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาออกได้ตามโมดูล การจำลองการควบคุมการทำงาน ของวงจรอินเวอร์เตอร์แปลงผันกำลังงานแสงอาทิตย์เฟสเดียวด้วยอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสและ วงจรลดทอนแรงดัน สามารถทำงานได้ปกติ ผลจากการเปรียบเทียบการทำงานพบว่า CSI + Buck ให้กำลังขาเข้าที่ดีกว่า และกระแสไฟฟ้า AC ขาออกและ FFT วงจรอินเวอร์เตอร์แปลงผันกำลังงาน แสงอาทิตย์เฟสเดียวด้วยอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสและวงจรลดทอนแรงดัน ให้รูปคลื่น กระแสไฟฟ้า AC ที่ดีกว่า



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปราย

4.1 ผลการทำงานของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสกับวงจรลดทอนแรงดัน

ในส่วนนี้เป็นผลการจำลองของทำง<mark>า</mark>นของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสกับวงจรลดทอน แรงดันเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสแบบมาตรฐาน ภายใต้ระดับความเข้ม แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน

จุดทำงาน		ค่าข <mark>องอุป</mark> กรณ์	์กรองสัญญาย	นที่ต้องการ	
(PV operating point)	วงจร	L _{DC} (H)	C _{DC} (F)	L _f (H)	C _f (F)
	CSI	1 <mark>.03E-0</mark> 3	-	4.47E-04	3.00E-06
OF (MF F 100 70)	CSI+Buck	1 <mark>.03E-0</mark> 3	1.53E-06	4.47E-04	3.00E-06
	CSI	2.01E-03	-	8.74E-04	1.53E-06
OF (MFF 30 %)	CSI+Buck	2.01E-03	7.72E-07	8.74E-04	1.53E-06
	CSI	3.27E-03	-	1.41E-03	9.48E-07
OF (MFF 30 90)	CSI+Buck	3.27E-03	4.67E-07	1.41E-03	9.48E-07
	CSI	5.05E-03	-	2.19E-03	6.13E-07
OF (MFF 20 70)	CSI+Buck	5.05E-03	3.14E-07	2.19E-03	6.13E-07
OP (MPP 10 %)	CSI	1.03E-02	-	4.43E-03	3.02E-07
OF (MIFF 10 %)	CSI+Buck	1.03E-02	1.49E-07	4.43E-03	3.02E-07
OR (MDD 506)	CSI	2.19E-02		9.39E-03	1.43E-07
OP (IMPP 5%)	CSI+Buck	2.19E-02	6.93E-08	9.39E-03	1.43E-07

ตาราง 4.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์<mark>แสง</mark>อาทิตย์ที่สามารถใช้ได้กับแต่ละวงจรพารามิเตอร์ใช้ ในแบบจำลองของโครงสร้างอินเวอร์เตอร์ภา<mark>ยใต้</mark>ระดับพลังงานแตกต่างกัน (1-phase 230V/50Hz)

ภาพประกอบ 4.4 ถึง 4.9 แสดงรูปคลื่นจำลองที่ด้าน DC และด้าน AC ของ standard CSI และ CSI +buck เมื่อใช้งานจุดและเงื่อนไขการจำลอง ด้าน DC คือรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า PV (Vpv), กระแส PV (Ipv), DC-link voltage (Vbc) และรูปคลื่นด้าน AC เป็นแรงดันไฟฟ้า AC ด้าน อินเวอร์เตอร์ (Vcs), แรงดันไฟฟ้าระบบสายส่ง (Vs) และกระแส AC (Is)







ภาพประกอบ 4.3 DC ด้าน (บน) และด้าน AC (ด้านล่าง) รูปแบบการจำลองของ standard CSI เมื่อทำงานที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 50% (OP2)



พประกอบ 4.4 DC ดาน (บน) และดาน AC (ดานลาง) รูปแบบการจำลองของ CSI +buck เ ทำงานที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 50% (OP2)







ภาพประกอบ 4.7 DC ด้าน (บน) และด้าน AC (ด้านล่าง) รูปแบบการจำลองของ standard CSI

9

เมื่อทำงานที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 20% (OP4)

2





ภาพประกอบ 4.9 DC ด้าน (บน) และด้าน AC (ด้านล่าง) รูปแบบการจำลองของ standard CSI เมื่อทำงานที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 10% (OP5)





ภาพประกอบ 4.11 DC ด้าน (บน) และด้าน AC (ด้านล่าง) รูปแบบการจำลองของ standard CSI เมื่อทำงานที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 5% (OP6)



ภาพประกอบ 4.12 DC ด้าน (บน) และด้าน AC (ด้านล่าง) รูปแบบการจำลองของ CSI +buck เมื่อ ทำงานที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 5% (OP6)

ระดับความ		ค่าระลอกคลื่นบนสัญญาณขาเข้าที่วัดได้ (%peak-peak)								
เข้ม	วงจร		แรงดัน		กระแส					
แสงอาทิตย์		สูงสุด	ต่ำสุด	%	สูงสุด	ต่ำสุด	%			
OP	standard CSI	277.68	-100.40	100.00	18.07	13.73	24.03			
(MPP 100 %)	CSI+Buck	337.43	15.63	95.37	15.22	10.41	31.60			
OP	standard CSI	276.97	-69.61	100.00	8.90	7.11	20.13			
(MPP 50 %)	CSI+Buck	339.11	3.04	99.10	7.18	5.48	23.68			
OP	standard CSI	272.84	-101.91	100.00	5.56	3.95	28.92			
(MPP 30 %)	CSI+Buck	313.53	3.11	99.01	4.59	3.35	27.02			
OP	standard CSI	303.55	-101.61	100.00	3.72	2.63	29.25			
(MPP 20 %)	CSI+Buck	320.41	2.04	99.36	3.17	2.07	34.70			
OP	standard CSI	274.77	-101.23	100.00	1.88	1.27	32.35			
(MPP 10 %)	CSI+Buck	312.11	4.09	98.69	1.70	1.02	39.86			
OP	standard CSI	272.18	-100.89	100.00	0.94	0.63	32.66			
(MPP 5%)	CSI+Buck	314.28	0.52	99.83	0.88	0.49	44.32			

4.2 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพสัญญาณคลื่นขาเข้า (input DC power quality)

ตาราง 4.2 เปรียบเทียบค่าระลอกสัญญาณคลื่นสัญญาณขาเข้าระหว่างวงจร

จากภาพประกอบ 4.4 ถึง 4.<mark>9 และจากตาราง</mark> 4.6 พบว่า

standard CSI สามารถทำงานได้ทุกจุด OP ได้แรงดันไฟ DC ของ standard CSI (V_{dc} = 277.68-272.18 V) ที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 5% แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าที่สุด (272.18 V) กระแส DC ของ standard CSI มีค่า% peak-peak อยู่ในช่วง 20.13-32.66% มีค่าสูงสุดที่ 18.07 A ที่ระดับ ความเข้มแสงอาทิตย์ 100%

CSI +buck สามารถทำงานได้ทุกจุด OP ได้แรงดันไฟ DC (Vdc = 339.11-272.84V) ทุก ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าของระบบระบบสายส่ง (VS = 220V) กระแส DC มี ค่า% peak-peak อยู่ในช่วง 23.68-44.32 % มีค่าสูงสุดที่ 15.22 A ที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 100%

4.3 การทดสอบเปรียบเทียบคุณภาพสัญญาณคลื่นขาออก (output AC power quality)

PV ในระบบระบบสายส่งจะต้องให้ผลผลิตพลังงานขาออกคุณภาพสูง สอดคล้องกับรหัสและ มาตรฐาน ในเรื่องนี้ คุณภาพพลังงานขาออกในแง่ของความผิดเพี้ยนของสัญญาณรวม (total harmonic distortion: THD) และ power factor (PF) ที่ผลิตโดย CSI +buck จะได้รับการประเมิน เมื่อเทียบกับ standard CSI จำเป็นต้อง THD ของกระแส ต่ำกว่า 5% (ระบุโดย IEEE 1547) และให้ PF สูงกว่า 0.9 รูปแบบจำลองสำหรับแรงดันไฟฟ้าขาออกเฟส (Vs) เฟสกระแสไฟฟ้า (Is) และ fast fourier transform (FFT) สำหรับกระแส (FFT (Is)) ที่ Is @ 50Hz, THD และ PF แสดงในตาราง 4.7

ระดับความเข้ม		Is (THD)(%)	pow	er factor
แสงอาทิตย์	9/0/9				
OP	standard CSI	6.98	3		0.98
(MPP 100 %)	CSI+Buck	3.36	5		0.99
OP	standard CSI	2.67	7		0.98
(MPP 50 %)	CSI+Buck	1.83	3		0.99
OP	stand <mark>ard CSI</mark>	5.54	1		0.98
(MPP 30 %)	CSI+Buck	1.97	7		0.99
OP	standard CSI	6.05	5		0.98
(MPP 20 %)	CSI+Buck	4.00)		0.99
OP	standard CSI	5.85			0.98
(MPP 10 %)	CSI+Buck	4.43	3		0.98
OP	standard CSI	6.23	3		0.98
(MPP 5%)	CSI+Buck	4.60)	di	0.98

ตาราง 4.3 เปรียบเทียบค่าตัวแปรที่ไ<mark>ด้จา</mark>กการวัดคลื่นสัญญาณขาออกของวงจร (Is @ 50Hz)

ทุกโครงสร้างสามารถแหล่งจ่ายสัญญาณแบบ sinusoidal ได้รูปคลื่นกระแส แต่มี แอมพลิจูด ,เฟสและคุณภาพที่แตกต่างกัน

โครงสร้าง standard CSI มีค่า THD ของกระแสสูงกว่าเกณฑ์ที่ระบุ (5%) ที่ทุก OP ส่วน โครงสร้างของ CSI+Buck มีค่า THD ของกระแสที่ต่ำกว่า standard CSI และจะมีค่า THD ต่ำลงที่ OP (MPP 50 % และ 30%) ทุกโครงสร้างมีค่า Power Factor สูง (0.98-0.99)



ภาพประกอบ 4.13 แรงดันไฟฟ้าขาออกเฟส (Vs) และเฟสกระแสแหล่งจ่าย (Is) จำลองรูปคลื่นและ สเปกตรัม FFT ของกระแสเฟส standard CSI ทำงานที่พลังงานแสง 100 %



ภาพประกอบ 4.14 แรงดันไฟฟ้าขาออกเฟส (Vs) และเฟสกระแสแหล่งจ่าย (Is) จำลองรูปคลื่นและ สเปกตรัม FFT ของกระแสเฟส CSI+Buck ทำงานที่พลังงานแสง 100 %



ภาพประกอบ 4.15 แรงดันไฟฟ้าขาออกเฟส (Vs) และเฟสกระแสแหล่งจ่าย (Is) จำลองรูปคลื่นและ สเปกตรัม FFT ของกระแสเฟส standard CSI ทำงานที่พลังงานแสง 50 %



ภาพประกอบ 4.16 แรงดันไฟฟ้าขาออกเฟส (Vs) และเฟสกระแสแหล่งจ่าย (Is) จำลองรูปคลื่นและ สเปกตรัม FFT ของกระแสเฟส CSI+Buck ทำงานที่พลังงานแสง 50 %



ภาพประกอบ 4.17 แรงดันไฟฟ้าขาออกเฟส (Vs) และเฟสกระแสแหล่งจ่าย (Is) จำลองรูปคลื่นและ

สเปกตรัม FFT ของกระแสเฟส standard CSI ทำงานที่พลังงานแสง 30 %

พนูน ปณุสุโต ชีเว






ภาพประกอบ 4.20 แรงดันไฟฟ้าขาออกเฟส (Vs) และเฟสกระแสแหล่งจ่าย (Is) จำลองรูปคลื่นและ สเปกตรัม FFT ของกระแสเฟส CSI+Buck ทำงานที่พลังงานแสง 20 %



ภาพประกอบ 4.21 แรงดันไฟฟ้าขาออกเฟส (Vs) และเฟสกระแสแหล่งจ่าย (Is) จำลองรูปคลื่นและ สเปกตรัม FFT ของกระแสเฟส standard CSI ทำงานที่พลังงานแสง 10 %



ภาพประกอบ 4.22 แรงดันไฟฟ้าขาออกเฟส (Vs) และเฟสกระแสแหล่งจ่าย (Is) จำลองรูปคลื่นและ สเปกตรัม FFT ของกระแสเฟส CSI+Buck ทำงานที่พลังงานแสง 10 %



ภาพประกอบ 4.23 แรงดันไฟฟ้าขาออกเฟส (Vs) และเฟสกระแสแหล่งจ่าย (Is) จำลองรูปคลื่นและ

สเปกตรัม FFT ของกระแสเฟส standard CSI ทำงานที่พลังงานแสง 5 %

พาราร่าง สาราสาราสารา



ภาพประกอบ 4.24 แรงดันไฟฟ้าขาออกเฟส (Vs) <mark>และเฟสกระแสแหล่ง</mark>จ่าย (Is) จำลองรูปคลื่นและ สเปกตรัม FFT ของกระแสเฟส CSI+Buck ทำงานที่พลังงานแสง 5 %

สามารถสังเกตจากภาพประกอบ 4.13 ถึง 4.24 จะพบว่า:

CSI + Buck มีค่าสเปกตรัม FFT ของกระแสเฟสขาออกต่ำกว่า standard CSI ส่งผลดีต่อ ระบบโดยรวมเมื่อต่อเข้ากับระบบสายส่ง เป็นผลมาจากการเพิ่มวงจรลดทอนแรงดันไปยังวงจร CSI และขีดจำกัดของกระแสตามข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและ อุตสาหกรรมทุกระดับพลังงานแสง

4.4 เปรียบเทียบค่าความเครียดบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในวงจร (Electric Stress on Semiconductor Devices)

ส่วนนี้ประเมินแรงดันและความเค้นในกระแสของเซมิคอนดักเตอร์กำลังใช้ใน CSI +buck เมื่อเปรียบเทียบกับ standard CSI แรงดันและความตึงเครียดในกระแสอาจลดอายุการใช้งานของเซ-มิคอนดักเตอร์ อุปกรณ์ได้เร็วขึ้นและเพิ่มโอกาสในการทำลายอุปกรณ์ได้ซึ่งควรหลีกเลี่ยง ในงานวิจัยนี้ แรงดันและความเค้นกระแสของเซมิคอนดักเตอร์โดยวัดจากแรงดันไฟฟ้า DC-link สูงสุดและ กระแสไฟสูงสุด DC-link มีดังนี้



(ข) CSI+ Buck

ภาพประกอบ 4.25 แรงดันไฟฟ้า DC-link voltage (Vdc) และรูปแบบการจำลองกระแสไฟ DC (Idc) ทำงานที่พลังงานแสง 100 %







(ldc) ทำงานที่พลังงานแสง 30 %









ภาพประกอบ 4.29 แรงดันไฟฟ้า DC-link voltage (Vdc) และรูปแบบการจำลองกระแสไฟ DC (Idc) ทำงานที่พลังงานแสง 10 %





(ldc) ทำงานที่พลังงานแสง 5 %

ระดับความเข้ม แสงอาทิตย์	2งจร	V _{dc-peak} (V)	I _{dc-peak} (A)
OP	standard CSI	351.48	18.07
(MPP 100 %)	CSI+Buck	337.43	15.22
OP	standard CSI	335.90	8.93
(MPP 50 %)	CSI+Buck	339.11	7.18
OP	standard CSI	329.71	5.56
(MPP 30 %)	CSI+Buck	313.53	4.59
OP	standard CSI	326.81	3.72
(MPP 20 %)	CSI+Buck	320.41	3.17
OP	standard CSI	326.86	1.88
(MPP 10 %)	CSI+Buck	312.11	1.70
OP	standard CSI	322.43	0.94
(MPP 5%)	CSI+Buck	314.28	0.88

ตาราง 4.4 เปรียบเทียบค่าตัวแปรที่ได้จากการวัดคลื่นสัญญาณขาออกของวงจร

จากภาพประกอบ 4.16 <mark>ถึง 4.20 และตาราง 4.8 พ</mark>บว่า

standard CSI มีค่าแรงดัน V_{dc-peak} อยู่ในช่วง 351.48-322.43 V มีค่าสูงสุด (351.48 Vpk) ที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 100 % มีกระแส I_{dc-peak} อยู่ในช่วง 18.07-0.94 A มีค่าสูงสุด (18.07 Apk) ที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 100 %

CSI+Buck มีค่าแรงดัน Vdc-peak อยู่ในช่วง 337.43-312.111 V มีค่าสูงสุด (337.43 Vpk) ที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 100 % มีกระแส I_{dc-peak}, อยู่ในช่วง 15.22-0.88 A มีค่าสูงสุด (15.22 Apk) ที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 100 %

4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพวงจร (Circuit Efficiency)

ส่วนนี้ประเมินการสูญเสียพลังงานของเซมิคอนดักเตอร์กำลังสำหรับ CSI +buck เปรียบเทียบกับ standard CSI การสูญเสียพลังงานของเซมิคอนดักเตอร์เป็นความสูญเสียที่สำคัญที่ ลดประสิทธิภาพกำลังไฟโดยรวมของอินเวอร์เตอร์ การสูญเสียพลังงานของเซมิคอนดักเตอร์สามารถ แบ่งออกได้เป็นสองประเภทคือการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า (P_{cond}) และพลังงานสูญเสียพลังงานขณะ





ภาพประกอบ 4.32 วิธีการที่ใช้ในการหา (ก) ton + rr และ (ข) toff สำหรับการประมาณค่าของการ สูญเสียพลังงานจากเซมิคอนดักเตอร์ [37]

การหาค่าพลังงานสูญเสียของเซมิคอนดักเตอร์โดยใช้สมการ (4.1) และ (4.2) ในการหาค่า

T_{on+rec} และค่า T_{off} [37]

$$T_{on+rec} = \frac{2 \times (E_{on} + E_{rec})}{\{V_{CE} \times I_c\} datasheet}$$
(4.1)

$$T_{off} = \frac{2 \times (E_{off})}{\{V_{CE} \times I_c\} datasheet}$$

(4.2)

ตาราง 4.5 ค่าประมาณการสูญเสียพลังงาน

ระดับความ									
เข้ม		Vceo	Rd	Eon	Erec	Eoff	ton+rec	Toff	
แสงอาทิตย์	วงจร	(v)	(Ω)	(mJ)	(mJ)	(mJ)	(s)	(s)	
100	standard CSI	0.84	0.06	8.02	4.67	0.24	2.80E-03	5.33E-05	
	CSI+Buck	0.80	0.07	6.46	4.17	0.18	2.90E-03	4.83E-05	
50	standard CSI	0.68	0.09	8.02	4.67	0.24	5.63E-03	1.07E-04	
	CSI+Buck	0.69	0.11	6.46	4.17	0.18	5.90E-03	9.81E-05	
30	standard CSI	0.60	0.13	8.02	4.67	0.24	9.40E-03	1.79E-04	
	CSI+Buck	0.57	0.16	6.46	4.17	0.18	1.00E-02	1.66E-04	
20	standard CSI	0.55	0.19	8.02	4.67	0.24	1.45E-02	2.76E-04	
	CSI+Buck	0.51	0.22	6.46	4.17	0.18	1.53E-02	2.54E-04	
10	standard CSI	0.48	0.35	8.02	4.67	0.24	3.04E-02	5.78E-04	
	CSI+Buck	0.43	0.40	6.46	4.17	0.18	3.29E-02	5.46E-04	
5	standard CSI	0.40	0.63	8.02	4.67	0.24	6.66E-02	1.27E-03	
	CSI+Buck	0.36	0.76	6.46	4.17	0.18	7.51E-02	1.25E-03	





ในการหาค่ากำลังสูญเสียสวิตซ์





			ตัวแปรและค่าที่วัดได้					
							กำลัง	
					กำลังสก	แสียใบ	สูญเสีย	กำลัง
ระดับความ		ตั	ัวแปรข <mark>า</mark> เ	ข้า	างจรหลัก		ใน	สูญเสีย
เข้ม	วงจร				0100		วงจร	รวม
แสงอาทิตย์							เสริม	
		V _{DV}	l _{ov}	P _{pv}	P _{sw}	Pcond	P_{cond}	Ploss(total)
		(Vp)	(A)	(W)	(W)	(W)	frd	(W)
							(mW)	
OP (MPP 100	standard	270	15 <mark>.09</mark>	4074	156.51	56.41	-	212.92
%)	CSI+Buck	331.7	1 <mark>2.2</mark>	4046.74	48.30	43.21	26.10	102.36
	standard	262.62	7.51	1972.27	75.71	22.19	-	97.90
(MPP 50 %)	CSI							
	CSI+Buck	323.78	-6	1942.68	5.82	4.12	0.91	10.98
OP (MPP 30 %)	standard CSI	25 <mark>4.5</mark>	4.5	1145.25	41.87	11.67	-	53.55
	CSI+Buck	316	3.54	1118.64	2.285	2.19	4.25	5.03
OP (MPP 20 %)	standard CSI	254.45	2.91	740.44	27.76	7.36	-	35.12
	CSI+Buck	307.73	2.32	713.93	1.37	5.80	0.92	8.63
OP (MPP 10 %)	standard CSI	246.48	1.39	342.60	13.94	3.29	-	17.24
M	CSI+Buck	301.19	1.07	324.68	0.85	2.62	0.14	4.13
OP (MPP 5%)	standard CSI	238.61	0.63	151.51	6.93	1.42	-	8.35
	CSI+Buck	283.92	0.47	134.01	1.02	1.16	0.01	2.46

ตาราง 4.6 ข้อมูลกำลังขาเข้าและกำลังสูญเสียเนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำของวงจร

standard CSI มีกำลังสูญเสียในวงจรหลัก คือ P_{sw} และ P_{cond} โดยมีกำลังสูญเสียสวิตซ์ อยู่ ในช่วง 156.51-6.93 W มีกำลังสูญเสียสวิตซ์สูงสุด (156.51 W) ที่ระดับความเข้มแสง 100 % มีค่า กำลังการนำไฟฟ้าสูญเสียอยู่ในช่วง 56.41-1.42 W มีกำลังสูญเสียการนำไฟฟ้าสูงสุด (56.41 W) ที่ ระดับความเข้มแสง 100 % ค่ากำลังสูญเสียรวมสูงสุด (212.92 W) ที่ระดับความเข้มแสง 100 %

CSI+Buck มีกำลังสูญเสียในวงจรหลัก คือ P_{sw}, P_{cond} และ P_{cond-frd} โดยมีกำลังสูญเสียสวิตซ์ อยู่ในช่วง 48.30-0.85W กำลังสูญเสียสวิตซ์สูงสุด (48.30 W) ที่ระดับความเข้มแสง 100 % มีค่า กำลังการนำไฟฟ้าสูญเสียอยู่ในช่วง 43.21-1.16 W กำลังสูญเสียการนำไฟฟ้าสูงสุด (43.21 W) ที่ ระดับความเข้มแสง 100 % มีค่ากำลังสูญเสียวงจรเสริมอยู่ในช่วง 26.10-0.1 mW ค่ากำลังสูญเสีย รวมสูงสุด (102.36 W) ที่ระดับความเข้มแสง 100 %

4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์โดยประมาณ

เพื่อที่จะเปรียบเทียบวิธีการคำนวณประสิทธิภาพเช่นยุโรปควรใช้ประสิทธิภาพ (**η**euro) โดยใช้มาตราฐาน European Efficiency พิจารณาเปรียบเทียบสำหรับประสิทธิภาพของ CSI + buck และ standard CSI ตามที่กำหนดโดย ประสิทธิภาพ (**ท**) การทำงานที่ MPP ระดับของรังสี ดวงอาทิตย์ ต่ำกว่า 5%, 10%, 20%, 30%, 50% และ 100% ใช้ประเมินกำลังของเซมิคอนดักเตอร์ การสูญเสียจากตารางที่ 4.10 ใช้เพื่อหาประสิทธิภาพโดยใช้สมการ (4.6)

$$\mathbf{\eta} x = \frac{P_{mpp}(x) - P_{loss(total,x)}}{P_{mpp}(x)} \times 100 \quad ; x = 5\%, 10\%, 20\%, 30\%, 50\% \text{ Lat } 100\% \quad (4.6)$$

$$\mathbf{\eta}_{euro} = 0.03\mathbf{\eta}_{5\%} + 0.06\mathbf{\eta}_{10\%} + 0.13\mathbf{\eta}_{20\%} + 0.1\mathbf{\eta}_{30\%} + 0.48\mathbf{\eta}_{50\%} + 0.2\mathbf{\eta}_{100\%} \quad (4.7)$$

0105		< F	ประสิทธิภาพ	การแปลงพลังงานโ	โดยประมาณ (%)	
3143	η _{5%}	η _{10%}	η _{20%}	η _{30%}	$\eta_{50\%}$	$\mathbf{\eta}_{100\%}$	$\mathbf{\eta}_{euro}$
standard CSI	94.449	94.953	95.233	95.308	95.022	94.798	95.012
CSI+Buck	98.160	98.725	98.797	99.552	99.435	97.472	98.890

ตาราง 4.7 ข้อมูลเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวงจร

จากตาราง 4.7 พบว่า standard CSI มีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 94.449 - 95.308 % สูงสุด (95.308 %) ที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 30 % CSI+Buck มีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 99.552 -97.472 % สูงสุด (99.552 %) ที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 30 % และ CSI+Buck มี มาตราฐาน



European Efficiency ที่สูงกว่า (98.890%) ของ standard CSI ภายใต้แสงอาทิตย์ระดับพลังงาน แสง

ภาพประกอบ 4.39 เส้นโค้งประสิทธิภาพ ของ CSI+buck เทียบกับ standard CSI

4.7 สรุป

ผลจากการทำงานงานของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสกับวงจรลดทอนแรงดัน โดยการ ออกแบบพารามิเตอร์ใช้ในแบบจำลองของโครงสร้างอินเวอร์เตอร์ภายใต้ระดับพลังงานแตกต่างกัน มี ค่าระลอกสัญญาณคลื่นสัญญาณขาเข้าของแรงดันสูงเนื่องจากการทำงานของสวิตซ์ แต่ยังคงค่า ระลอกคลื่นกระแสต่ำ ค่า Is (THD) ของ standard CSI จะสูงกว่าเกณฑ์อยู่เล็กน้อย เนื่องจากความถื่ fs ค่าความเครียดบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในวงจร standard CSI จะมีมากกว่า มีความสูญเสีย มากกว่า CSI+Buck ส่วนประสิทธิภาพ จึงส่งผลให้ CSI+Buck มีประสิทธิภาพที่สูงกว่า

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้นำเสนอสรุปผลการทดลอง อภิปรายผลและข้อเสนอแนะจากผลการวิจัยโดยมี รายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผล

การศึกษาและออกแบบอินเวอร์เตอร์แปลงผันกำลังงานแสงอาทิตย์เฟสเดียวเพื่อปรับปรุง ประสิทธิภาพและสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสด้วยการใช้วงจรลดทอน แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การทำงานของอินเวอร์เตอร์<mark>แหล่</mark>งจ่ายกระแสกับวงจรลดทอนแรงดัน

ในส่วนนี้ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสกับวงจรลดทอนแรงดัน พบว่า สามารถ ทำงานได้เป็นไปตามหลักการและการออกแบบ

5.1.2 คุณภาพสัญญาณคลื่นขาเข้<mark>า</mark>

CSI +buck มีค่าแรงดันไฟ DC ที่สูงกว่า standard CSI อยู่ 0.24-18.11% กระแส DC มี ค่า% peak-peak สูงกว่า เนื่องจากวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทำงานที่ความถี่ 60kHz ส่งผลคุณภาพคุณภาพสัญญาณคลื่นขาเข้า

5.1.3 การทดสอบเปรีย<mark>บเทียบคุณภาพสัญญาณคลื่</mark>นขาออก

CSI+Buck สามารถแหล่งจ่ายสัญญาณแบบ sinusoidal ได้รูปคลื่นกระแส แต่มี แอมพลิจูด ,เฟสและคุณภาพที่แตกต่างกันโครงสร้าง CSI+Buck มีค่า THD ของกระแสต่ำกว่าเกณฑ์ที่ระบุ (ต่ำ กว่า 5%) ที่ทุกระดับความเข้มแสงอาทิตย์ มีค่า Power Factor สูง (0.98-0.99)

5.1.4 ค่าความเครียดบนอุปก<mark>รณ์สารกึ่งตัวนำในวง</mark>จร

standard CSI มีค่าแรงดัน Vdc-peak อยู่ในช่วง 337.43-312.111 V มีค่าสูงกว่า CSI+Buck ทุกระดับความเข้มแสงอาทิตย์ มีกระแส I_{dc-peak} อยู่ในช่วง 15.22-0.88 A ต่ำกว่า standard CSI ค่าความเคลียดแรงดันและกระแส 3.99 % และ 15.77% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ อุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบ

5.1.5 ประสิทธิภาพวงจร

CSI+Buck มีกำลังสูญเสียสวิตซ์สูงสุดต่ำกว่า 69.13-85.2 % ค่ากำลังการนำไฟฟ้าสูญเสีย 18.30-23.40 % มีกำลังสูญเสียโดยรวมต่ำกว่า 51.92-70.53 % เนื่องจาก CSI+Buck มีค่ากำลัง สูญเสียวงจรเสริมอยู่ ที่ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ 50 % CSI+Buck ให้ประสิทธิภาพสูงสุด และมี ประสิทธิภาพสูงกว่า standard CSI ภายใต้ทุกแสงอาทิตย์ระดับพลังงานแสง

5.2 อภิปรายผล

5.2.1 จากการศึกษาและการออกแบบอินเวอร์เตอร์แปลงผันกำลังงานแสงอาทิตย์เฟสเดียวเพื่อ ปรับปรุงประสิทธิภาพและสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสด้วยการใช้วงจรลดทอน แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ค่าพารามิเตอร์ที่ออกแบบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถจำลองผลได้ค่า เป็นไปตามทฤษฎี

5.2.2 จากผลการทดสอบอินเวอร์เต<mark>อร์</mark>ที่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นไปตาม สมมติฐานที่ตั้งไว้ โดยมีค่าคุณภาพที่ดีขึ้น เนื่<mark>อง</mark>จากระดับแรงดันไม่สูงมากเกินไปและมีระดับเหมาะสม ในการทำงานตลอดเวลา [37]

5.3 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาและออกแบบอินเวอร์เตอร์แปลงผันกำลังงานแสงอาทิตย์เฟสเดียวเพื่อปรับปรุง ประสิทธิภาพและสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสด้วยการใช้วงจรลดทอน แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในครั้งนี้ทำการจำลองโดยใช้สวิตซ์ที่เป็นในอุดมคติ ค่าที่ได้จึงยังเป็นค่าในอุดม คติ โดยผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลของสารกึ่งตัวนำเพื่อการหาประสิทธิภาพเท่านั้น จึงควรเลือกชนิดของ อุปกรณ์ให้เสมือนจริง รวมถึงการจำลองระบบสายส่ง





บรรณานุกรม

- [1] Amorndechaphon D, Premrudeepreechacharn S, Higuchi K, editors. Modified grid-connected current source inverter for multi-string PV system. 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT); 2012 16-20 Jan. 2012.
- [2] Punitha K, Devaraj D, Sakthivel S. Adaptive Hysteresis Current Controlled Multilevel Inverter for Solar Photovoltaic Applications. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences. 2014;84(3):447-55.
- [3] Tey KS, Mekhilef S. A reduced leakage current transformerless photovoltaic inverter. Renewable Energy. 2016;86:1103-12.
- [4] Chien-Ming W. A novel single-stage full-bridge buck-boost inverter. IEEE Transactions on Power Electronics. 2004;19(1):150-9.
- [5] Chavarria J, Biel D, Guinjoan F, Meza C, Negroni JJ. Energy-Balance Control of PV Cascaded Multilevel Grid-Connected Inverters Under Level-Shifted and Phase-Shifted PWMs. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013;60(1):98-111.
- [6] Hu Y, Cao W, Ji B, Si J, Chen X. New multi-stage DC–DC converters for gridconnected photovoltaic systems. Renewable Energy. 2015;74:247-54.
- [7] Yamegueu D, Azoumah Y, Py X, Kottin H. Experimental analysis of a solar
 PV/diesel hybrid system without storage: Focus on its dynamic behavior.
 International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2013;44(1):267-74.
- [8] Garcia LS, Buiatti GM, Freitas LCd, Coelho EAA, Farias VJ, Freitas LCGd. Dual Transformerless Single-Stage Current Source Inverter With Energy Management Control Strategy. IEEE Transactions on Power Electronics. 2013;28(10):4644-56.

- [9] Kim YH, Kim JG, Ji YH, Won CY, Jung YC, editors. Photovoltaic parallel resonant dc-link soft switching inverter using hysteresis current control. 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC); 2010 21-25 Feb. 2010.
- [10] Ohnuma Y, Orikawa K, Itoh Ji. A Single-Phase Current-Source PV Inverter With Power Decoupling Capability Using an Active Buffer. IEEE Transactions on Industry Applications. 2015;51(1):531-8.
- [11] Ebrahimi A, Fathi HS, Gholamrezaei H. Novel Switching pattern for single-stage current source inverter for grid-connected photovoltaics. IET Power Electronics. 2014;7(10):2447-54.
- [12] Abdel-Rahim O, Orabi M, Ahmed ME, editors. Buck-boost interleaved inverter for grid connected Photovoltaic system. 2010 IEEE International Conference on Power and Energy; 2010 Nov. 29 2010-Dec. 1 2010.
- [13] วีระเซษฐ์ ขันเงิน,วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์. "อิเล็กทรอนิกส์กำลัง Power Electronics". กรุงเทพๆ:ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง; 2550.
- [14] Gaurav M.Kulkarni URH, S.S.Khule. A Review on Single Phase single stage transformer less Grid connected PV system. Spvryan's International Journal of Engineering Sciences & Technology (SEST). Aug. 2015;2(4):1-5.
- [15] Funabiki S, Tanaka T, Nishi T, editors. A new buck-boost-operation-based sinusoidal inverter circuit. 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Proceedings (Cat No02CH37289); 2002 2002.
- [16] Roseline JA, Kumaran MS, Rajini V. Generalized space vector control for current source inverters and rectifiers. Archives of Electrical Engineering2016.p. 235.
- [17] Vazquez N, Lopez H, Hernandez C, Vazquez E, Osorio R, Arau J. A Different Multilevel Current-Source Inverter. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010;57(8):2623-32.

- [18] Sahan B, Araújo SV, Nöding C, Zacharias P. Comparative Evaluation of Three-Phase Current Source Inverters for Grid Interfacing of Distributed and Renewable Energy Systems. IEEE Transactions on Power Electronics. 2011;26(8):2304-18.
- [19] Radwan AAA, Mohamed YARI. Power Synchronization Control for Grid-Connected Current-Source Inverter-Based Photovoltaic Systems. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2016;31(3):1023-36.
- [20] Geury T, Pinto S, Gyselinck J. Current source inverter-based photovoltaic system with enhanced active filtering functionalities. IET Power Electronics. 2015;8(12):2483-91.
- [21] Chen HC, Huang HH. Design of buck-type current source inverter fed brushless DC motor drive and its application to position sensorless control with squarewave current. IET Electric Power Applications. 2013;7(5):416-26.
- [22] Anand S, Gundlapalli SK, Fernandes BG. Transformer-Less Grid Feeding Current Source Inverter for Solar Photovoltaic System. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2014;61(10):5334-44.
- [23] Vekhande V, K. V K, Fernandes BG. Control of Three-Phase Bidirectional Current-Source Converter to Inject Balanced Three-Phase Currents Under Unbalanced Grid Voltage Condition. IEEE Transactions on Power Electronics. 2016;31(9):6719-37.
- [24] Grogan SAS, Holmes DG, McGrath BP. High-Performance Voltage Regulation of Current Source Inverters. IEEE Transactions on Power Electronics. 2011;26(9):2439-48.
- [25] Gao F, Loh PC, Blaabjerg F, Vilathgamuwa DM. Five-Level Current-Source Inverters With Buck–Boost and Inductive-Current Balancing Capabilities. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010;57(8):2613-22.

- [26] Liu F, Wu B, Pande M, Zargari NR. Zero-Speed Operation of High-Power PWM Current-Source-Inverter-Fed Induction Motor Drive. IEEE Transactions on Power Electronics. 2012;27(6):3020-7.
- [27] Nimrod Vázquez LdCG, Claudia Hernández,Eslí Vázquez,Héctor López,Ilse Cervantes, Juan Iturria. A Grid-Connected Multilevel Current Source Inverter and Its Protection for Grid-Disconnection. International Journal of Photoenergy. 2013;Volume 2013:10.
- [28] Dash PP, Kazerani M. Dynamic Modeling and Performance Analysis of a Grid-Connected Current-Source Inverter-Based Photovoltaic System. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2011;2(4):443-50.
- [29] Basu K, Sahoo AK, Chandrasekaran V, Mohan N. Grid-Side AC Line Filter Design of a Current Source Rectifier With Analytical Estimation of Input Current Ripple. IEEE Transactions on Power Electronics. 2014;29(12):6394-405.
- [30] Bao J, Bao W, Wang S, Zhang Z, editors. Multilevel current source inverter topologies based on the duality principle. 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC); 2010 21-25 Feb. 2010.
- [31] Komurcugil H, editor Integral sliding mode control of a single-phase currentsource inverter. 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics; 2009 3-5 Nov. 2009.
- [32] Komurcugil H. Steady-State Analysis and Passivity-Based Control of Single-Phase PWM Current-Source Inverters. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010;57(3):1026-30.
- [33] ชาญณรงค์ น้อยบางยาง,ถาวร สุวรรณกิจ. "การประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่าย พลังงานให้กับระบบเฝ้าระวังและสัญญาณเตือนภัยจากไฟฟ้ารั่วเนื่องจากภาวะน้าท่วม ฉับพลันระบบไร้สาย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ". พระนครศรีอยุธยา: มหาวิทยาลัยราชภัฏ พระนครศรีอยุธยา; 2556.

- [34] Weidong X, Dunford WG, Capel A, editors. A novel modeling method for photovoltaic cells. 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat No04CH37551); 2004 20-25 June 2004.
- [35] N. Mohan, T. M. undeland, and W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 2nd ed. New York: Wiley, 1995.
- [36] เกรียงไกร ปัญญาใหญ่. "ชุดทดลองบัก บูสต์คอนเวอร์เตอร์". เชียงใหม่: มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่; 2553.
- [37] Chonlatee Photong. "A Current Source Inverter with Series AC Capacitors for Transformerless Grid-Tied Photovoltaic Applications " [T Technology].
 Nottingham: University of Nottingham; 2013.
- [38] D. Meneses, F. Blaabjerg, Ó. García and J. A. Cobos, "Review and Comparison of Step-Up Transformerless Topologies for Photovoltaic AC-Module Application," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 6, pp. 2649-2663, June 2013.
- [39] L. G. Junior, M. A. G. de Brito, L. P. Sampaio and C. A. Canesin, "Single stage converters for power stand-alone and grid-connected PV systems," 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Gdansk, 2011, pp. 1112-1117.
- [40] S. Jain and V. Agarwal, "A Single-Stage Grid Connected Inverter Topology for Solar PV Systems With Maximum Power Point Tracking," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 5, pp. 1928-1940, Sept. 2007
- [41] B. S. Prasad, S. Jain and V. Agarwal, "Universal Single-Stage Grid-Connected Inverter," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 1, pp. 128-137, March 2008.
- [42] R. O. Caceres and I. Barbi, "A boost DC-AC converter: analysis, design, and experimentation," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 14, no. 1, pp. 134-141, Jan 1999.

- [43] N. Kasa, H. Ogawa, T. Iida and H. Iwamoto, "A transformer-less inverter using buck-boost type chopper circuit for photovoltaic power system," Power Electronics and Drive Systems, 1999. PEDS '99. Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on, 1999, pp. 653-658 vol.2.
- [44] H. Patel and V. Agarwal, "A Single-Stage Single-Phase Transformer-Less Doubly Grounded Grid-Connected PV Interface," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 24, no. 1, pp. 93-101, March 2009.
- [45] G. h. Tan, J. Wang, R. Wang and Y. Ji, "A New SPWM Controlled Three-Switch Buck-Boost Inverter for Distributed Generation Applications," 2006 International Conference on Power System Technology, Chongqing, 2006, pp. 1-6.
- [46] Bing Hu, Liuchen Chang and Yaosuo Xue, "Study of a novel buck-boost inverter for photovoltaic systems," 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems, Wuhan, 2008, pp. 2602-2606.
- [47] Cao, S. Jiang, X. Yu and F. Z. Peng, "Low-Cost Semi-Z-source Inverter for Single-Phase Photovoltaic Systems," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 12, pp. 3514-3523, Dec. 2011.
- [48] H. Xiao and S. Xie, "Leakage Current Analytical Model and Application in Single-Phase Transformerless Photovoltaic Grid-Connected Inverter," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 52, no. 4, pp. 902-913, Nov. 2010.
- [49] Y. W. Cho, W. J. Cha, J. M. Kwon and B. H. Kwon, "Improved single-phase transformerless inverter with high power density and high efficiency for gridconnected photovoltaic systems," in IET Renewable Power Generation, vol. 10, no. 2, pp. 166-174, 2 2016
- [50] K. Ogura, T. Nishida, E. Hiraki, M. Nakaoka and S. Nagai, "Time-sharing boost chopper cascaded dual mode single-phase sinewave inverter for solar photovoltaic power generation system," 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551), 2004, pp. 4763-4767 Vol.6.

- [51] M. F. Rahman and L. Zhong, "A new, transformerless, photovoltaic array to utility grid interconnection," Proceedings of Second International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 1997, pp. 139-143 vol.1.
- [52] L. Ma, T. Kerekes, R. Teodorescu, X. Jin, D. Floricau and M. Liserre, "The high efficiency transformer-less PV inverter topologies derived from NPC topology," 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, 2009, pp. 1-10.
- [53] J. L. Duran-Gomez, E. Garcia-Cervantes, D. R. Lopez-Flores, P. N. Enjeti and L. Palma, "Analysis and evaluation of a series-combined connected boost and buck-boost dc-dc converter for photovoltaic application," Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06., Dallas, TX, 2006, pp. 7 pp.-.
- [54] S. V. Araujo, P. Zacharias and B. Sahan, "Novel grid-connected non-isolated converters for photovoltaic systems with grounded generator," 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, 2008, pp. 58-65.
- [55] J. M. Shen, H. L. Jou and J. C. Wu, "Novel Transformerless Grid-Connected Power Converter With Negative Grounding for Photovoltaic Generation System," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 4, pp. 1818-1829, April 2012.
- [56] H. Fujita M. Mabuchi Y. Tsubota T. Mizogami, "Solar Power Conditioners Using Bidirectional Chopper Circuits Connected in Series," IEEJ Transactions on Industry

Applications , January 2012, pp. 50-57.

- [57] G. Ertasgin, D. M. Whaley, W. L. Soong and N. Ertugrul, "Performance analysis of a low-cost current-source 1-ph grid-connected PV inverter," Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2015, pp. 1981-1995.
- [58] Panagiotis Kakosimos, Konstantinos Pavlou, Antonios Kladas, Stefanos Manias, A single-phase nine-level inverter for renewable energy systems employing model predictive control, Energy Conversion and Management, Volume 89, 1 January 2015, Pages 427-437

- [59] Y. Hu, Y. Xie, D. Fu and L. Cheng, " A New Single-Phase π-Type 5-Level Inverter Using 3-Terminal Switch-Network," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.63,no.11, Nov. 2016, pp.-.
- [60] HJA Italia S.R.L. (2017, January). MONO CRYSTALLINE MODULE 300-350 Watt 300W-72M datasheet. Available: http://www.tenkasolar.com/prodotti/ monocrystalline-panels/mono-crystalline-module-300-330-watt/?lang=en
- [61] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen and F. Blaabjerg, "A review of single-phase gridconnected inverters for photovoltaic modules," in *IEEE Transactions on Industry Applications,* vol. 41, no. 5, pp. 1292-1306, Sept.-Oct. 2005.
- [62] S. Saeidabadi, S. H. Hosseini, K. Varesi and M. Sabahi, "A modified gridconnected current source inverter for photovoltaic application," *The 6th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC2015)*, Tehran, 2015, pp. 218-223.
- [63] R. Afzal, M. Jamil, A. Waqas, A. Nawaz, M. A. Ali and M. H. Mailk, "Design and Analysis of Second Order Passive Filters for Grid Connected Inverter with Series and Parallel Damping Resistors," Indian Journal of Science and Technology, Vol 9(21), June 2016
- [64] คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า, "ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิก เกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจแลอุตสาหกรรม" https://www.pea.co.th/Desktop Modules /EasyDNNNews/DocumentDownload.ashx?portalid=0&moduleid=606 &articleid=763&documentid=295, 2556,หน้า 3/19
- [65] IXYS_Cooperation. (2018, February). "IXRH 40N120 datasheet". Available: http://www.ixys.com/



ภาคผนวก ก.1 IXRH 40N120 datasheet [65]

ZS

IGBT with Reverse Blocking capability

IXRH 40N120

V_{CES} = ±1200 V $I_{C25} = 55 A$ V_{CE(sat)} = 2.3 V typ.



IGBT			
Symbol	Conditions	Maximum I	Ratings
V _{CES}	$T_{vJ} = 25^{\circ}C$ to $150^{\circ}C$	±1200	v
V _{GES}		± 20	v
l _{C25} l _{C90}	$T_{c} = 25^{\circ}C$ $T_{c} = 90^{\circ}C$	55 35	A A
I _{CM} V _{CEK}	$\label{eq:V_GE} \begin{array}{l} V_{GE} = 0/15 \; V; \; R_{_G} = 22 \; \Omega; \; T_{_{V\!U}} = 125^\circ C \\ RBSOA, \; Clamped \; inductive \; load; \; \; L = 100 \; \mu H \end{array}$	80 600	A V
Piet	T _c = 25°C	300	W

Symbol	Conditions (T _{vJ} = 25°C	Characteristic Valu (T _{vJ} = 25°C, unless otherwise specific min. typ. max.				
V _{CE(sat)}	$I_{c} = 30 \text{ A}; V_{GE} = 15 \text{ V}; T_{VJ} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{VJ} = 125^{\circ}\text{C}$		2.3 2.8	2.7	v v	
V _{GE(III)}	$I_c = 2 \text{ mA}; V_{GE} = V_{CE}$	4		8	۷	
ICES	$V_{CE} = V_{CES}; V_{GE} = 0 V; T_{VJ} = 25^{\circ}C$ $T_{VJ} = 125^{\circ}C$		3.0	50	μA mA	
I _{CES}	$V_{_{\rm CE}} = 0 \text{ V}; \text{ V}_{_{\rm GE}} = \pm 20 \text{ V}$			500	nA	
Q	V _{ce} = 120V; V _{ce} = 15 V; I _c = 35 A		90		nC	

Features

- IGBT with NPT (non punch through) structure
- · reverse blocking capability
- function of series diode monolithically integrated, no external series diode required
- soft reverse recovery
- · positive temperature coefficient of saturation voltage
- Epoxy of TO-247 package meets UL 94V-0

Applications

converters requiring reverse blocking capability:

- current source inverters
- matrix converters
- bi-directional switches
- resonant converters
- induction heating
 auxiliary switches for soft switching in the main current path

.

1-5

IXYS reserves the right to change limits, test conditions and dimensions.

© 2005 IXYS All rights reserved

IXYS Semiconductor GmbH Edisonstr. 15, D-68623 Lampertheim Phone: +49-6206-503-0, Fax: +49-6206-503627 IXYS Corporation 3540 Bassett Street, Santa Clara CA 95054 Phone: (408) 982-0700, Fax: 408-496-0670

Symbol

T_{vj} T_{sig} M_d F_c Conditions

mounting torque mounting force with clip

IXRH 40N120

TO-247 AD Outline

IGBT			
Symbol	Conditions	Characteristic Va (T _{vJ} = 25°C, unless otherwise spec typ.	i lues ified)
	External diode DSEP30-12	- diagram see Fig. 17	
Luno 1)	31	ns
L.	Inductive load, Tru = 125°C	54	ns
L.	$V = 600 V \cdot 1 = 35 A$	184	ns
L.	$V_{ce}^{ce} = +15 V \dot{R} = 15 O$	24	ns
Ė,,,	GE = 110 +, H _G = 10 12	3.0	mJ
E _{of} ,)	0.7	mJ
	Internal diode - diagram se	e Fig. 18	
turne 1	-	29.5	ns
ulan)		47	ns
Luna .	Inductive load, T _{VJ} = 125°C	183	ns
	$V_{ce} = 600 \text{ V}; I_c = 35 \text{ A}$	46	ns
É_	$V_{GE} = \pm 15 \text{ V}; \text{R}_{G} = 15 \Omega$	19.2	mJ
E,		1.0	mJ
E _{rec int})	7	mJ
	l _e = 35 A; di,./dt = -50 A/μs; T	vi = 125°C 28.5	Α
ς)	Ý _{ce} = -600 Ў; V _{ge} = 15 Ý	2.1	μs
R _{euc}		0.42	K/W
Componer	nt		

b1-				A2	
Dim.	MIII	meter	Inc	hes	1
	Min	Max	Min	Max	
	Min.	Max.	Min.	Max. 209	{
A A,	Min. 4.7 2.2	Max. 5.3 2.54	Min. .185 .087	Max. .209 .102	
A A, A,	Min. 4.7 2.2 2.2	Max. 5.3 2.54 2.6	Min. .185 .087 .059	Max. .209 .102 .098	
A A, A ₂ b	Min. 4.7 2.2 2.2 1.0	Max. 5.3 2.54 2.6 1.4	Min. .185 .087 .059 .040	Max. .209 .102 .098 .055	
A A, A, A, D D,	Min. 4.7 2.2 2.2 1.0 1.65	Max. 5.3 2.54 2.6 1.4 2.13	Min. .185 .087 .059 .040 .065	Max. .209 .102 .098 .055 .084	
	Min. 4.7 2.2 2.2 1.0 1.65 2.97	Max. 5.3 2.54 2.6 1.4 2.13 3.12	Min. .185 .087 .059 .040 .065 .113	Max. .209 .102 .098 .055 .084 .123	
 < < <	Min. 4.7 2.2 2.2 1.0 1.65 2.87 .4	Max. 5.3 2.54 2.6 1.4 2.13 3.12 .8	Min. .185 .087 .069 .040 .065 .113 .016 .016	Max. .209 .102 .098 .055 .084 .123 .031	
	Min. 4.7 2.2 2.2 1.0 1.65 2.97 .4 20.90 15.75	Max. 5.3 2.54 2.6 1.4 2.13 3.12 .8 21.46 16.26	Min. .185 .087 .059 .040 .065 .113 .016 .819 .610	Max. .209 .102 .098 .055 .084 .123 .031 .845 .640	
	Min. 4.7 2.2 2.2 1.0 1.65 2.87 .4 20.80 15.75 5.20	Max. 5.3 2.54 2.6 1.4 2.13 3.12 .8 21.46 16.26 5.72	Min. .185 .087 .059 .040 .065 .113 .016 .819 .610 0.205	Max. .209 .102 .098 .055 .084 .123 .031 .845 .640 0.225	
A A, A₂ b b, b, C D ⊑ e L	Min. 4.7 2.2 2.2 1.0 1.65 2.87 .4 20.80 15.75 5.20 19.81	Max. 5.3 2.54 2.6 1.4 2.13 3.12 .8 21.46 16.26 5.72 20.32	Min. .185 .087 .059 .040 .065 .113 .016 .819 .610 0.205 .780	Max. .209 .102 .098 .055 .084 .123 .031 .845 .640 0.225 .800	
A A, A, b b, b, C D E e L L1	Min. 4.7 2.2 2.2 1.0 1.65 2.97 .4 20.80 15.75 5.20 19.81	Max. 5.3 2.54 2.6 1.4 2.13 3.12 8 21.46 16.26 5.72 20.32 4.50	Min. .185 .087 .059 .040 .065 .113 .016 .819 .610 0.205 .780	Max. .209 .102 .098 .055 .084 .123 .031 .845 .640 0.225 .800 .177	
A A, A₂ b b, b₂ C D E L L1 ØP	Min. 4.7 2.2 2.2 1.0 1.65 2.87 .4 20.80 15.75 5.20 19.81 3.55	Max. 5.3 2.54 2.6 1.4 2.13 3.12 .8 21.46 16.26 5.72 20.32 4.50 3.65	Min. .185 .087 .059 .040 .065 .113 .016 .819 .610 0.205 .790 .140	Max. .209 .102 .098 .055 .084 .123 .031 .845 .640 0.225 .900 .177 .144	
A A, A, b b, b, C D LL P. O	Min. 4.7 2.2 2.2 1.0 1.65 2.87 .4 20.80 15.75 5.20 19.81 3.55 5.89	Max. 5.3 2.54 2.6 1.4 2.13 3.12 .8 21.46 16.26 5.72 20.32 4.50 3.65 6.40	Min. .185 .087 .059 .040 .065 .113 .016 .819 .610 0.205 .780 .140 0.232	Max. .209 .102 .098 .055 .084 .123 .031 .845 .640 0.225 .800 .177 .144 0.252	
A A A A B D D D C D E e L L Ø C R	Min. 4.7 2.2 2.2 1.0 1.65 2.87 .4 20.80 15.75 5.20 19.81 3.55 5.89 4.32	Max. 5.3 2.54 2.6 1.4 2.13 3.12 .8 21.46 16.26 5.72 20.32 4.50 3.65 6.40 5.49	Min. .185 .087 .059 .040 .065 .113 .016 .819 .610 0.205 .780 .140 0.232 .170	Max. .209 .102 .098 .055 .084 .123 .031 .845 .640 0.225 .800 .177 .144 0.252 .216	
A A Ă A D D D D C D H e L L Q C R S	Min. 4.7 2.2 2.2 1.0 1.65 2.87 .4 20.80 15.75 5.20 19.81 3.55 5.89 4.32 6.15	Max. 5.3 2.54 2.6 1.4 2.13 3.12 .8 21.46 16.26 5.72 20.32 4.50 3.65 6.40 5.49 BSC	Min. .185 .087 .059 .040 .065 .113 .016 .819 .610 0.205 .790 .140 0.232 .170 242	Max. 209 .102 .098 .055 .084 .123 .031 .845 .640 0.225 .900 .177 .144 0.252 .216 BSC	

Symbol	Conditions	Ch	Characteristic Values				
R _{INCH}	with heatsink compound		0.25	K/W			
Weight			6	a			

Maximum Ratings

°C ℃

Nm

Ν

-55...+150

-55...+125

0.8 - 1.2

20...120

IXYS reserves the right to change limits, test conditions and dimensions.

© 2005 IXYS All rights reserved

P

IXRH 40N120


IXRH 40N120

t_{alon)}

٠t

80

t



YS

800

ns

600

400

200

0

240

ns

160 t

80

0

900

ns

600

300

0

100

Α

L(off)

80 Ω

80

I_c

Ω 100

IXYS reserves the right to change limits, test conditions and dimensions. © 2005 IXYS All rights reserved

IXRH 40N120





ภาคผนวก ก.2 MONO CRYSTALLINE MODULE 300-350 Watt 300W-72M datasheet t [60]







APPLICATIONS

On-grid residential roof-tops







MONO CRYSTALLINE MODULE 300-350 Watt



Our solar cells offer high cor the highest quality Our high performing mod tolerance of +5% (optional)

odules can withstand high and extreme temperatures

d IEC 5400 Pa mecha 11

QUALITY & SAFETY

Industry leading power output warranty (10 years/90%, 25 years/80%)

10-year warranty on materials & workmanship (optional)

Premium Performance Warranty



Based on customer requirements and contract terms

SO9001:2008, SO14001:2004, OHSAS18001 certified factory EC61215 EC61730 certified products





Off-grid systems

Engineering Drawings







Packaging Configuration

(Two boxes=One pallet)

26pcs/box, 54pcs/pallet, 648pcs/40'HQ Container

26pcs/box, 52pcs/pallet, 286pcs/20'FT Container



Electrical Performance & Temperature Dependence

Mechanica	I Characteristics
Cell Type	Mono-crystalline 156×156mm (6 inch)
No.of cells	72 (6×12)
Dimensions	1956×992×40mm (77.01×39.05×1.57 in
Weight	22.5 kg (49.58 lbs.)
Front Glass	3.2mm, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP65 Rated
Output Cables	TÜV 1×4.0mm²/ UL 12AWG , Length:900mm

SPECIFICATION	S					
Module Type	300W-72M	310W-72M	320W-72M	330W-72M	340W-72M	350W-72M
Maximum Power at STC(Pmax)	300Wp	310Wp	320Wp	330Wp	340Wp	350Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	37.0V	37.4V	37.8V	38.0V	38.7V	39.1V
Maximum Power Current (Imp)	8.11A	8.29A	8.47A	8.68A	8.79A	8.94A
Open-circuit Voltage (Voc)	45.5V	45.9V	46.4V	47.1V	47.6V	47.1V
Short-circuit Current (Isc)	8.64A	8.80A	8.98A	9.2A	9.32A	48.1A
Cell Efficiency(%)	18.2%	18.6%	19.00%	19.40%	19.80%	20.2%
Module Efficiency(%)	15.46%	15.98%	16.49%	17.00%	16.49%	17.00%
Operating Temperature(°C)			-40°C~+85	°C		
Maximum system voltage			1000V (IEC)	DC		
Maximum series fuse rating			15A			
Temperature coefficients of Pma	x		-0.45%/	°C		
Temperature coefficients of Voc			-0.27%/	°C		
Temperature coefficients of Isc			0.05%/%	с		
Nominal operating cell temperat	ture (NOCT)		45±2℃			

STC: **W**Irradiance 1000W/m²

Module Temperature 25°C AM=1.5

* Power measurement tolerance: + 5%

The company reserves the final right for explanation on any of the information presented hereby.

							Pcon = (Vceo-	
	_		If IC-ON				(rd.Ic-on))*	
order	Time	lsw1	<0=0	Vceo	rd	Δt	Ic-on	$*\Delta$
1	0	2.12E-07	2.12E-07	0.84	0.060	0	1.78E-07	0
2	8.00E-13	0.000606591	6.07E-04	0.84	0.060	8.00000E-13	5.10E-04	4.07647E-16
3	1.60E-12	0.000607056	6.07E-04	0.84	0.060	8.00000E-13	5.10E-04	4.07959E-16
4	3.20E-12	0.000607516	6.08E-04	0.84	0.060	1.59998E-12	5.10E-04	8.16528E-16
5	6.40E-12	0.000608437	6.08E-04	0.84	0.060	3.19997E-12	5.11E-04	1.63553E-15
6	1.28E-11	0.000610288	6.10E-04	0.84	0.060	6.39993E-12	5.13E-04	3.28102E-15
7	2.56E-11	0.000614137	6.14E-04	0.84	0.060	1.27999E-11	5.16E-04	6.60342E-15
8	5.12E-11	0.000621722	6.22E-04	0.84	0.060	2.55997E-11	5.22E-04	1.337E-14
9	1.02E-10	0.000636761	6.37E-04	0.84	0.060	5.11995E-11	5.35E-04	2.73868E-14
10	1.63E-10	0.000654372	6.54E-04	0.84	0.060	6.08386E-11	5.50E-04	3.34429E-14
11	2.37E-10	0.000676045	6.76E-04	0. <mark>84</mark>	0.060	7.37258E-11	5.68E-04	4.18693E-14
12	3.84E-10	0.000719484	7.19E-04	0.84	0.060	1.47452E-10	6.04E-04	8.91194E-14
13	6.79E-10	0.000806267	8.06E-04	0.84	0.060	2.94903E-10	6.77E-04	1.99739E-13
14	1.22E-09	0.000964168	9.64E-04	0 <mark>.84</mark>	0.060	5.36721E-10	8.10E-04	4.34721E-13
15	2.27E-09	0.001274541	1.27E-03	0 <mark>.84</mark>	0.060	1.05463E-09	1.07E-03	1.1292E-12
16	4.38E-09	0.001895408	1.90E-03	0 <mark>.84</mark>	0.060	2.10926E-09	1.59E-03	3.3587E-12
17	8.58E-09	0.003133602	3.13E-03	0.84	0.060	4.20064E-09	2.63E-03	1.10595E-11
18	1.38E-08	0.004669927	4.67E-03	0.84	0.060	5.22435E-09	3.92E-03	2.05006E-11
19	2.43E-08	0.007748559	7.75E-03	0.84	0.060	1.04487E-08	6.51E-03	6.8046E-11
20	4.32E-08	0.01331706	1.33E-02	0.84	0.060	1.89483E-08	1.12E-02	2.12164E-10
21	8.11E-08	0.024463854	2.45E-02	0.84	0.060	3.78966E-08	2.06E-02	7.80123E-10
22	1.57E-07	0.046752334	4.68E-02	0.84	0.060	7.57933E-08	3.94E-02	2.98649E-09
23	2.59E-07	0.076810397	7.68E-02	0.84	0.060	1.02270E-07	6.49E-02	6.63472E-09
24	4.64E-07	0.13689192	1.37E-01	0.84	0.060	2.04539E-07	1.16E-01	2.37498E-08
25	7.40E-07	0.218069838	2.18E-01	0.84	0.060	2.75850E-07	1.86E-01	5.1317E-08
26	1.20E-06	0.353515338	3.54E-01	0.84	0.060	4.61721E-07	3.04E-01	1.40572E-07
27	1.78E-06	0.522566237	5.23E-01	0.84	0.060	5.77927E-07	4.55E-01	2.63153E-07
28	2.94E-06	0.860646219	8.61E-01	0.84	0.060	1.15585E-06	7.67E-01	8.86985E-07
29	5.25E-06	1.532092969	1.53E+00	0.84	0.060	2.31171E-06	1.43E+00	3.30065E-06
30	9.87E-06	2.862676397	2.86E+00	0.84	0.060	4.62341E-06	2.90E+00	1.3391E-05
31	1.25E-05	3.611283535	3.61E+00	0.84	0.060	2.62983E-06	3.82E+00	1.00353E-05
32	1.34E-05	3.872833131	3.87E+00	0.84	0.060	9.24683E-07	4.15E+00	3.84031E-06
33	1.53E-05	4.393886737	4.39E+00	0.84	0.060	1.84937E-06	4.85E+00	8.96801E-06
34	1.90E-05	5.43098464	5.43E+00	0.84	0.060	3.69873E-06	6.33E+00	2.34195E-05
35	1.97E-05	5.635435786	5.64E+00	0.84	0.060	7.53403E-07	6.64E+00	5.00203E-06
36	2.03E-05	5.783114028	5.78E+00	0.84	0.060	5.27382E-07	6.86E+00	3.6202E-06
37	2.13E-05	6.072184038	6.07E+00	0.84	0.060	1.05476E-06	7.31E+00	7.7134E-06
38	2.34E-05	6.651452422	6.65E+00	0.84	0.060	2.10953E-06	8.24E+00	1.73862E-05
39	2.36E-05	6.708513887	6.71E+00	0.84	0.060	1.97768E-07	8.34E+00	1.64848E-06
40	2.38E-05	6.748747904	6.75E+00	0.84	0.060	1.38438E-07	8.40E+00	1.16311E-06
41	2.40E-05	6.818845166	6.82E+00	0.84	0.060	2.76852E-07	8.52E+00	2.35812E-06
42	2.46E-05	6.969858265	6.97E+00	0.84	0.060	5.53703E-07	8.77E+00	4.85565E-06
43	2.46E-05	6.984189784	6.98E+00	0.84	0.060	5.19231E-08	8.79E+00	4.56584E-07
44	2.47E-05	6.994239356	6.99E+00	0.84	0.060	3.63461E-08	8.81E+00	3.20221E-07
45	2.47E-05	7.014382352	7.01E+00	0.84	0.060	7.26938E-08	8.84E+00	6.42917E-07
46	2.48E-05	7.019427158	7.02E+00	0.84	0.060	1.81735E-08	8.85E+00	1.60883E-07
47	2.48E-05	7.029527659	7.03E+00	0.84	0.060	3.63469E-08	8.87E+00	3.22385E-07
48	2.49E-05	7.049772283	7.05E+00	0.84	0.060	7.26938E-08	8.90E+00	6.47249E-07
49	2.49E-05	7.054208334	7.05E+00	0.84	0.060	1.59010E-08	8.91E+00	1.41697E-07
50	2.49E-05	7.054596618	7.05E+00	0.84	0.060	1.39132E-09	8.91E+00	1.23993E-08
51	2.49E-05	7.055373291	7.06E+00	0.84	0.060	2.78279E-09	8.91E+00	2.48036E-08
52	2.49E-05	7.056926894	7.06E+00	0.84	0.060	5.56558E-09	8.92E+00	4.96218E-08
53	2.49E-05	7.060035125	7.06E+00	0.84	0.060	1.11312E-08	8.92E+00	9.9302E-08
54	2.49E-05	7.060812397	7.06E+00	0.84	0.060	2.78279E-09	8.92E+00	2.48291E-08

ภาคผนวก ข.1 ตัวอย่างข้อมูลกำลังสูญเสียนำไฟฟ้าของสวิตซ์ตัวที่ 1 (S1) standard CSI ที่ระดับ ความเข้มแสงอาทิตย์ 100 %

order	Time	lsw1	if Ic-on <0=0	Vceo	rd	۸t	Pcon = (Vceo- (rd.Ic-on))*	*\	
oruer	11110	13001	\U-U	VCEO	Tu			*\(\Delta\)	
55	2.49E-05	7.062367198	7.06E+00	0.84	0.060	5.56558E-09	8.93E+00	4.96729E-08	
50	2.49E-05	7.062755951	7.06E+00	0.84	0.060	1.39140E-09	8.93E+00	1.24191E-08	
57	2.49E-05	7.062853143	7.06E+00	0.84	0.060	3.47849E-10	8.93E+00	3.10484E-09	
58	2.49E-05	7.062877441	7.06E+00	0.84	0.060	8.69622E-11	8.93E+00	7.76214E-10	
59	2.49E-05	7.062926038	7.06E+00	0.84	0.060	1.73924E-10	8.93E+00	1.55244E-09	
60	2.49E-05	7.063023232	7.06E+00	0.84	0.060	3.47849E-10	8.93E+00	3.10494E-09	
61	2.49E-05	7.063217624	7.06E+00	0.84	0.060	6.95698E-10	8.93E+00	6.21011E-09	
62	2.49E-05	7.063266223	7.06E+00	0.84	0.060	1.73924E-10	8.93E+00	1.55254E-09	
63	2.49E-05	7.063363422	7.06E+00	0.84	0.060	3.47849E-10	8.93E+00	3.10514E-09	
64	2.49E-05	7.063387721	7.06E+00	0.84	0.060	8.69622E-11	8.93E+00	7.76289E-10	
65	2.49E-05	7.063393796	7.06E+00	0.84	0.060	2.17406E-11	8.93E+00	1.94072E-10	
66	2.49E-05	7.063395315	7.06E+00	0.84	0.060	5.43514E-12	8.93E+00	4.85181E-11	
67	2.49E-05	7.063398353	7.06E+00	0.84	0.060	1.08703E-11	8.93E+00	9.70363E-11	
68	2.49E-05	7.063404428	7.06E+00	0.84	0.060	2.17406E-11	8.93E+00	1.94073E-10	
69	2.49E-05	7.063416578	7.06E+00	0.84	0.060	4.34811E-11	8.93E+00	3.88146E-10	
70	2.49E-05	7.063419615	7.06E+00	0.84	0.060	1.08703E-11	8.93E+00	9.70367E-11	
71	2.49E-05	7.06342569	7.06E+00	0.84	0.060	2.17406E-11	8.93E+00	1.94074E-10	
72	2.49E-05	7.06342588	7.06E+00	0.84	0.060	6.79392E-13	8.93E+00	6.0648E-12	
73	2.49E-05	7.06342626	7.06E+00	0.84	0.060	1.35879E-12	8.93E+00	1.21296E-11	
74	2.49E-05	7.063427019	7.06E+00	0 <mark>.84</mark>	0.060	2.71757E-12	8.93E+00	2.42592E-11	
75	2.49E-05	7.063428538	7.06E+00	0.84	0.060	5.43514E-12	8.93E+00	4.85184E-11	
76	2.49E-05	7.063431575	7.06E+00	0.84	0.060	1.08703E-11	8.93E+00	9.70369E-11	
77	2.49E-05	7.063434343	7.06E+00	0.84	0.060	9.90549E-12	8.93E+00	8.84244E-11	
78	2.49E-05	7.063438131	7.06E+00	0.84	0.060	1.35566E-11	8.93E+00	1.21017E-10	
79	2 49F-05	7 063443771	7.06F+00	0.84	0,060	2.01806E-11	8 93E+00	1 80149E-10	
80	2.49E-05	7.063455049	7.06E+00	0.84	0.060	4.03612E-11	8.93E+00	3 60298E-10	
81	2.492-05	7.063477605	7.065±00	0.84	0.000	9.07224E-11	8.935+00	7 20599E-10	
82	2.496-05	7.063522719	7.000+00	0.84	0.000	1.61445E-10	8.935+00	1.441215-09	
02	2.496-05	7.003322713	7.000+00	0.84	0.000	2 22800E 10	8.932+00	2,882475,00	
83	2.49E-05	7.063612946	7.06E+00	0.84	0.060	3.22890E-10	8.93E+00	2.88247E-09	
84	2.49E-05	7.063793405	7.06E+00	0.84	0.060	6.45779E-10	8.93E+00	5.76514E-09	
85	2.49E-05	7.064154336	7.06E+00	0.84	0.060	1.29156E-09	8.93E+00	1.15311E-08	
86	2.49E-05	7.064876254	7.06E+00	0.84	0.060	2.58312E-09	8.93E+00	2.30653E-08	
87	2.49E-05	7.066320311	7.07E+00	0.84	0.060	5.16623E-09	8.93E+00	4.61431E-08	
88	2.49E-05	7.069209311	7.07E+00	0.84	0.060	1.03325E-08	8.94E+00	9.23367E-08	
89	2.50E-05	7.074982513	7.07E+00	0.84	0.060	2.06351E-08	8.95E+00	1.84608E-07	
168770	0.39995322	3.82E-05	3.82E-05	0.84	0.060	1.25904E-06	3.21E-05	4.03816E-11	
168771	0.39995544	3.75E-05	3.75E-05	0.84	0.060	2.21634E-06	3.15E-05	6.98536E-11	
168772	0.39995913	3.64E-05	3.64E-05	0.84	0.060	3.68652E-06	3.06E-05	1.1286E-10	
168773	0.3999625	3.55E-05	3.55E-05	0.84	0.060	3.37481E-06	2.98E-05	1.00603E-10	
168774	0.39996324	3.49E-05	3.49E-05	0.84	0.060	7.37305E-07	2.93E-05	2.1638E-11	
168775	0.39996471	3.44E-05	3.44E-05	0.84	0.060	1.47457E-06	2.89E-05	4.26564E-11	
168776	0.39996766	3.35E-05	3.35E-05	0.84	0.060	2.94914E-06	2.81E-05	8.2891E-11	
168777	0.39997356	3.16E-05	3.16E-05	0.84	0.060	5.89828E-06	2.65E-05	1.56505E-10	
168778	0.399975	3.45E-05	3.45E-05	0.84	0.060	1.44070E-06	2.90E-05	4.17913E-11	
168779	0.39997532	3.47E-05	3.47E-05	0.84	0.060	3.22437E-07	2.92E-05	9.41167E-12	
168780	0.39997586	3.46E-05	3.46E-05	0.84	0.060	5.40638E-07	2.91E-05	1.57 <u>358E-</u> 11	
168781	0.39997638	3.46E-05	3.46E-05	0.84	0.060	5.12218E-07	2.90E-05	1.48685E-11	
168782	0.39997716	3.44E-05	3.44E-05	0.84	0.060	7.83920E-07	2.89E-05	2.26616E-11	
168783	0.39997873	3.37E-05	3.37E-05	0.84	0.060	1.56784E-06	2.83E-05	4.43736E-11	
168784	0.39998186	3.26E-05	3.26E-05	0.84	0.060	3.13568E-06	2.74E-05	8.59439E-11	
168785	0.3999875	3.08E-05	3.08E-05	0.84	0.060	5.63726E-06	2.59E-05	1.45844E-10	
168786	0.39998813	3.06E-05	3.06E-05	0.84	0.060	6.27136E-07	2.57E-05	1.61211E-11	
168787	0.39998938	3.02F-05	3.02E-05	0.84	0.060	1,25427F-06	2,54E-05	3.18309F-11	
168788	0.39999189	2 94F-05	2.94F-05	0.84	0.060	2.50854F-06	2.47F-05	6.20479F-11	
168789	0 39999691	2 80F-05	2.54E 05	0.84	0.060	5.01709E-06	2 355-05	1 17883F-10	
168700	0.33333031	2.001-03	2.300-03	0.04	0.000	3 002065 06	2.351-05	7 00655 11	
100/90	0.4	2./3E=03	2.730-03	0.04	0.000	3.03230E-00	2.25E=03	5 755617201	
						Beond (suit)	Z/taim	14 20004245	
		1		1		PLONG(SW1)	∠/ isim	14.30904345	

เข้มแล	สงอาทิเ	ตย์ 10	0 %											
								1/2*(At)*				1/2*(At)*		1/2*(At)*
order	Time	lsw	Vsw	Δt	Δi	ic-off	ic off<0	Δi	ic on	1/2*(∆t)*∆ i	Voff	Δi	von	Δί
1	0	0.0003031	303.8149	0	0	0		0 0	0	0	0	0	0	0
2	8.00E-13	0.0006066	0.626339	8.00E-13	3.03E-04	0	c	0 0	0	0	C	0	0	0
3	1.60E-12	0.0006068	0.627691	8.00E-13	2.33E-07	0	C	0 0	0	0	0	0	0	0
4	3.20E-12	0.0006073	0.630219	1.60E-12	4.77E-07	0	C	0 0	0	0	0	0	0	0
196	0.000219	17.123612	19.74248	2.37E-06	-1.62E-01	0	C	0 0	0	0	0	0	0	0
197	0.0002219	16.927490	19.49417	2.90E-06	-1.96E-01	0		0	0	0	0	0	0	0
198	0.0002247	4.74E-0	47.83148	2.83E-06	-1.69E+01	4.74E-05	4.736E-05	6./11E-11	0	0	0	0	47.831479	6.78E-05
200	0.000225	4.00E-U	51 63/58	2.05E-07	2.69E-06	0			0	0		0	0	0
200	0.0002255	5 18F-0	52 36892	1 53E-07	3 48F-07	0		0	0	0	0	0	0	0
202	0.000226	16.389951	18.93593	3.07E-07	1.64E+01	0		0 0	16.389899	2.513E-06	18.93593	2.903E-06	0	0
203	0.0002265	16.445456	18.86766	5.05E-07	5.55E-02	0	C	0 0	0	0	C	0	0	0
204	0.000227	16.271301	18.80259	4.86E-07	-1.74E-01	0		0 0	0	0	C	0	0	0
205	0.0002279	16.159352	18.67947	9.19E-07	-1.12E-01	0	C	0 0	0	0	C	0	0	0
206	0.0002297	15.937760	18.43241	1.84E-06	-2.22E-01	0	0	0 0	0	0	C	0	0	0
207	0.0002334	15.503649	17.96489	3.68E-06	-4.34E-01	0	c	0	C	0	C	0	0	0
208	0.0002375	15.034246	17.52897	4.09E-06	-4.69E-01	0	C	0 0	0	0	C	0	0	0
209	0.0002382	14.951439	17.46795	7.35E-07	-8.28E-02	0	C	0 0	0	0	C	0	0	0
210	0.0002397	14.959163	17.35772	1.47E-06	7.72E-03	0	C	0 0	0	0	0	0	0	0
211	0.0002426	14.828379	17.21392	2.94E-06	-1.31E-01	0	C	0 0	0	0	C	0	0	0
212	0.0002473	14.816619	17.2004	4.62E-06	-1.18E-02	0	C	0 0	0	0	0	0	0	0
213	0.00025	4.52E-0	45.71665	2.73E-06	-1.48E+01	4.52E-05	4.521E-05	6.182E-11	0	0	0	0	45.716654	6.25E-05
214	0.0002503	4.63E-0	46.88251	2.73E-07	1.10E-06	0		0	0	0	0	0	0	0
215	0.0002508	14.909698	17.30613	5.47E-07	7.455.02	0			14.909652	4.076E-06	17.30613	4.731E-06	0	0
210	0.0002519	15.052757	17.36470	1.09E-06	7.45E-02	0			0	0		0	0	0
217	0.0002525	15 149778	17 59769	1.00L-00	9 70E-02	0			0	0		0	0	0
219	0.0002571	15.345701	17.90097	2.82E-06	1.96E-01	0		0 0	0	0	0	0	0	0
220	0.0002607	15.844617	18.33204	3.54E-06	4.99E-01	0	0	0 0	0	0	C	0	0	0
221	0.0002625	16.106684	18.56062	1.81E-06	2.62E-01	0	C	0 0	0	0	C	0	0	0
222	0.0002632	16.210079	18.64997	7.08E-07	1.03E-01	0	0	0 0	0	0	C	0	0	0
223	0.0002646	16.418860	18.82629	1.42E-06	2.09E-01	0	C	0	0	0	C	0	0	0
224	0.0002675	16.592368	19.1559	2.83E-06	1.74E-01	0	C	0 0	0	0	C	0	0	0
225	0.0002731	16.944903	19.6469	5.66E-06	3.53E-01	0	0	0	0	0	C	0	0	0
226	0.000275	4.30E-0	43.46788	1.88E-06	-1.69E+01	4.3E-05	4. <mark>305E-05</mark>	4.049E-11	0	0	C	0	43.467884	4.09E-05
227	0.0002752	4.39E-0	44.43119	1.92E-07	8.17E-07	0	C	0 0	0	0	C	0	0	0
228	0.0002756	4.59E-0	46.44925	3.85E-07	2.01E-06	0		0 0	0	0	0	0	0	0
229	0.0002763	17.122778	19.74685	7.70E-07	1.71E+01	0	c c	0 0	17.122733	6.591E-06	19.74685	7.602E-06	0	0
230	0.0002775	17.223177	19.7704	1.11E-06	1.00E-01	0	0	00	0	0	0	0	0	0
231	0.0002786	17.157044	19.77907	1.1/E-06	-6.61E-02	0		0	0	0	0	0	0	0
232	0.0002801	16.012810	10 66659	1.46E-06	-8.18E-02	0			0	0	0	0	0	0
233	0.000283	16 8371	19 58643	1.37E-06	-7.56E-02	0			0	0		0	0	0
235	0.0002866	16,716226	19.41713	2.20E-06	-1.21E-01	0		0	0	0			0	0
236	0.0002875	16.666065	19.33331	9.18E-07	-5.02E-02	0		0	0	0		0	0	0
237	0.0002877	16.655162	19.31399	2.00E-07	-1.09E-02	0	0		90	0	0	0	0	0
238	0.0002881	16.633379	19.27417	4.00E-07	-2.18E-02	0	6	0 0	b Y o	0	0	0	0	0
239	0.0002889	16.589896	19.19191	7.99E-07	-4.35E-02	0	c	0	0	0	0	0	0	0
240	0.0002905	16.503273	19.0167	1.60E-06	-8.66E-02	0	c	0	0	0	0	0	0	0
241	0.0002937	16.120992	18.63725	3.20E-06	-3.82E-01	0	C	0 0	0	0	C	0	0	0
242	0.0003	5.05E-0	50.9815	6.31E-06	-1.61E+01	5.05E-05	5.045E-05	1.591E-10	0	0	C	0	50.981497	0.000161
243	0.0003006	5.33E-0	53.85212	6.39E-07	2.83E-06	0	C	0 0	0	0	C	0	0	0
244	0.0003008	5.42E-0	54.71877	1.93E-07	8.80E-07	0	0	0 0	0	0	C	0	0	0
245	0.0003012	15.223577	17.6511	3.87E-07	1.52E+01	0	C	0 0	15.223524	2.944E-06	17.6511	3.413E-06	0	0
246	0.000302	15.15716	17.57535	7.72E-07	-6.64E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
247	0.0003027	15.096433	17.51628	7.09E-07	-6.07E-02	0	0	0 0	0	0	0	0	0	0

ภาคผนวก ข.2 ตัวอย่างข้อมูลกำลังสูญเสียสวิตซ์ของสวิตซ์ตัวที่ 1 (S1) standard CSI ที่ระดับความ เข้มแสงอาทิตย์ 100 %

1						1				1				1	
									1/2*(∆t)*				1/2*(∆t)*		1/2*(∆t)*
	order	Time	lsi	Vsw	Δt	Δi	ic-off	ic off<0	Δi	ic on	1/2*(∆t)*∆ i	Voff	Δi	von	Δi
	248	0.0003034	15.033560	17.46023	7.37E-07	-6.29E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	249	0 0003049	14 908598	17 36543	1 47E-06	-1 25E-01	0	0	0	0	0	٥	0	0	٥
	245	0.0003045	14.500550	17.50545	1.472 00	1.250 01									
	250	0.0003079	14.86264	17.25097	2.95E-06	-4.60E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	251	0.0003125	14.790648	17.27484	4.64E-06	-7.20E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	252	0.000313	14.783432	17.29219	4.66E-07	-7.22E-03	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	253	0 0003139	14 936227	17 33251	9 32F-07	1 53E-01	0	0	0	0	0	٥	0	0	٥
	255	0.0003135	14.550227	17.55251	5.522 07	1.550 01									
	254	0.0003158	15.032645	17.4381	1.86E-06	9.64E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	255	0.0003195	15.227354	17.73943	3.73E-06	1.95E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	256	0.000325	5.80E-0	58.54645	5.51E-06	-1.52E+01	5.8E-05	5.8E-05	1.597E-10	0	0	0	0	58.546449	0.000161
	257	0.0003257	6.18E-0	62.09607	7.46E-07	3.82E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	258	0 0003259	6 28F-0	63 02269	1 95F-07	1.03E-06	0		0	0	0	0	0	0	0
	250	0.0003255	15 021010	40.00140	2.005.07	1.505.01	, in the second se		0	45 004750	2 0025 00	10 22112	2 5 6 6 5 0 6	0	0
	259	0.0003263	15.831819	18.32112	3.89E-07	1.58E+01	0	0	0	15.831756	3.082E-06	18.32112	3.566E-06	0	0
	260	0.0003271	15.913605	18.4088	7.79E-07	8.18E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	261	0.0003278	15.988780	18.49612	7.12E-07	7.52E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	262	0.0003286	16.066276	18.58548	7.31E-07	7.75E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	263	0.00033	16.222398	18,76206	1.46E-06	1.56E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	264	0.0002220	16 520207	10.00422	2.025.06	2 175 01	0		-	-			-	0	0
	204	0.0003329	10.339207	15.05422	2.922-00	5.172-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	265	0.0003375	17.046534	19.50366	4.57E-06	5.07E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	266	0.0003381	16.943863	19.54428	5.84E-07	-1.03E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	267	0.0003393	17.006263	19.61164	1.17E-06	6.24E-02	0	0	0	0	o	0	0	0	0
	268	0 0003416	17 131753	19 71088	2 34F-06	1 25E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	200	0.0002462	17 110007	10 725 94	1 695 06	1 275 02	0	0	0	0		0	0	0	0
	209	0.0003403	17.119007	19.75564	4.08E-00	-1.276-02	0	0	0	0		0	0	0	0
	270	0.00035	6.05E-0	61.05094	3.73E-06	-1.71E+01	6.05E- <mark>05</mark>	6.051E-05	1.129E-10	0	0	0	0	61.05094	0.000114
	271	0.0003504	6.25E-0	62.96832	4.18E-07	1.96E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	272	0.0003513	16.785750	19.37482	8.36E-07	1.68E+01	0	0	0	16.785688	7.02E-06	19.37482	8.102E-06	0	0
	273	0.0003525	16.782059	19.27603	1.27E-06	-3.69E-03	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	274	0.0002520	16 590610	10 15202	1 405 06	1 025 01	0		0	0		0	0	0	0
	274	0.0003559	10.569019	19.15562	1.40E-06	-1.92E-01	U	0	0	0	0	0	0	0	0
	275	0.0003567	16.211333	18.87905	2.79E-06	-3.78E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	276	0.0003623	15.813128	18.29573	5.59E-06	-3.98E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	277	0.0003625	15.799124	18.27427	1.99E-07	-1.40E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	278	0.0003629	15.771154	18,23176	3.98E-07	-2.80E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	270	0 0002627	15 715 261	10 1/007	7 065 07	E E 9E 02	0	0	0	-		-	0	0	0
	279	0.0003037	15.715501	10.14007	7.90E-07	-3.36E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	280	0.0003653	15.604368	17.98822	1.59E-06	-1.11E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	281	0.0003685	15.384727	17.71386	3.18E-06	-2.20E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	282	0.0003748	6.13E-0	61.87577	6.37E-06	-1.54E+01	6.13E-05	6.131E-05	1.952E-10	0	0	0	0	61.875766	0.000197
	283	0.000375	6.21E-0	62.54771	1.60E-07	7.86E-07	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	284	0 0003753	6 36E-0	63 8804	3 20E-07	1 515-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	204	0.0003733	0.302-0	05.0034	5.201-07	1.512-00	0	0	0	0		0	0	0	0
	285	0.000376	6.60E-0	00.50898	0.40E-07	2.38E-06	U	0	0	0	0	0	0	0	0
	286	0.0003772	14.808183	17.20104	1.28E-06	1.48E+01	0	0	0	14.808118	9.479E-06	17.20104	1.101E-05	0	0
	287	0.0003793	14.947169	17.26023	2.02E-06	1.39E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	288	0.0003814	15.097729	17.37413	2.16E-06	1.51E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	289	0.0003841	15,285908	17.57611	2.67E-06	1.88E-01	0	0	0	0	0		0	n	0
	200	0.0002975	15 520029	17 0126	3 415 00	2 425 01						0	-		
	250	0.0003075	15.525030	17.5150	5.412-00	2.432-01	0	0	0			0	0	0	0
	291	0.000388	15.567557	17.97367	5.35E-07	3.85E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	292	0.0003891	15.644880	18.09629	1.07E-06	7.73E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	293	0.0003912	15.800681	18.34921	2.14E-06	1.56E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	294	0.0003955	16.318175	18.85446	4.28E-06	5.17E-01	0	0	0	0	0		0	0	0
	205	0.0004	6 525-0	65 76756	4 48F-06	-1 63F±01	6 52E-05	6 5215-05	1 46F-10	0	0			65 76756	0 000147
	255	0.0004	0.521-0	03.70730	4.482-00	-1.031101	0.522-05	0.3211-05	1.401-10				0	03.70730	0.000147
	296	0.0004007	6.82E-0	68.73357	0.59E-07	3.00E-06	0	0	0		0	0	0	0	0
	297	0.000402	16.729024	19.31591	1.32E-06	1.67E+01	0	0	0	16.728956	1.102E-05	19.31591	1.272E-05	0	0
	298	0.0004046	16.90261	19.49827	2.63E-06	1.74E-01	0	60	0	0	0	0	0	0	0
	299	0.000407	17.061095	19.60941	2.38E-06	1.58E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	300	0 0004102	17 055201	19 66651	3 17F-06	-5 70F-02	0	0	0	0	0	0	0	0	n
	300	0.0004102	17.054400	10 6 6 6 6	3.1/1-00	4.245.05	0	0	0	-			-	-	0
	301	0.0004125	17.051182	19.6403	2.34E-06	-4.21E-03	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	302	0.0004131	17.050042	19.62072	6.34E-07	-1.14E-03	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	303	0.0004144	17.047761	19.5714	1.27E-06	-2.28E-03	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	304	0.0004163	16.875193	19.46863	1.91E-06	-1.73E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	305	0.0004176	16,754782	19.3765	1.34E-06	-1.20F-01	n	n	٥	n	n	n	٥	٥	0
	205	0.0004107	16 572625	10 20750	2 055 00	-1 935 04	-		-				-	~	0
	306	0.0004197	10.372035	13.20/50	2.05E-00	-1.020-01	U		0	0	0	0	0	0	U
	307	0.0004236	16.234748	18.82842	3.86E-06	-3.38E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0

							1							
								1/2*(∆t)*				1/2*(∆t)*		1/2*(∆t)*
order	Time	lsi	Vsw	Δt	Δi	ic-off	ic off<0	Δi	ic on	1/2*(∆t)*∆ i	Voff	Δi	von	Δi
308	0.000425	5.55E-0	56.07425	1.45E-06	-1.62E+01	5.55E-05	5.554E-05	4.014E-11	0	0	0	0	56.074253	4.05E-05
310	0.0004258	5.91F-0	59 56101	5 40F-07	2.69E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0
311	0.0004265	15.921126	18.42392	7.32E-07	1.59E+01	0	0	0	15.921067	5.824E-06	18.42392	6.74E-06	0	0
312	0.0004278	15.798786	18.28316	1.28E-06	-1.22E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
313	0.000429	15.682545	18.15246	1.22E-06	-1.16E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
314	0.0004314	15.461726	17.91877	2.35E-06	-2.21E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
315	0.0004361	15.029371	17.56366	4.70E-06	-4.32E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
316	0.0004375	15.082891	17.49394	1.40E-06	5.35E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
317	0.0004378	15.093491	17.48223	2.77E-07	1.06E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
318	0.0004383	15.114/12	17.46109	5.53E-07	2.12E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
320	0.0004334	14.998263	17.40097	2.21E-06	-2.45E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
321	0.0004461	15.082592	17.49414	4.43E-06	8.43E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
322	0.00045	5.17E-0	52.21358	3.92E-06	-1.51E+01	5.17E-05	5.168E-05	1.014E-10	0	0	0	0	52.213584	0.000102
323	0.0004506	5.44E-0	54.67297	5.93E-07	2.77E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0
324	0.0004518	15.310622	17.75339	1.19E-06	1.53E+01	0	0	0	15.310568	9.075E-06	17.75339	1.052E-05	0	0
325	0.0004541	15.521566	17.97695	2.37E-06	2.11E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
326	0.0004563	15.715197	18.20094	2.15E-06	1.94E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
327	0.0004592	15.97885	18.51323	2.88E-06	2.64E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
328	0.0004625	16.288014	18.8699	3.32E-06	3.09E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
329	0.0004631	16.342305	18.92864	5.77E-07	5.43E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
330	0.0004642	16.451438	19.03951	1.15E-06	2.20E-01	0	0	0	0		0	0	0	0
332	0.0004711	16 934628	19 53382	4.61E-06	2.20L-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
333	0.000475	5.38E-0	54.30176	3.85E-06	-1.69E+01	5.38E <mark>-05</mark>	5.379E-05	1.036E-10	0	0	0	0	54.301765	0.000105
334	0.0004756	5.67E-0	57.234	6.32E-07	2.87E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0
335	0.0004769	16.902846	19.50764	1.26E-06	1.69E+01	0	0	0	16.90279	1.068E-05	19.50764	1.233E-05	0	0
336	0.0004794	16.85794	19.44873	2.53E-06	-4.49E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
337	0.0004817	16.81730	19.34531	2.29E-06	-4.06E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
338	0.000484	16.630797	19.19965	2.31E-06	-1.87E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
339	0.0004863	16.451108	19.02285	2.25E-06	-1.80E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
340	0.0004875	16.354723	18.91606	1.22E-06	-9.64E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
341	0.0004878	16.332258	18.89003	2.85E-07	-2.25E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
342	0.0004884	16.287423	18.83734	5.70E-07	-4.48E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
343	0.0004895	16.198121	18.72953	1.14E-06	-8.93E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
344	0.0004918	15 672500	18 0911	2.28E-06	-1.77E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
346	0.0005	5.23E-0	52,79755	3.67E-06	-1.57E+01	5.23E-05	5.226E-05	9.584E-11	0	0	0	0	52,797548	9.68E-05
347	0.0005006	5.46E-0	55.12706	5.74E-07	2.31E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0
348	0.0005017	15.167955	17.59559	1.15E-06	1.52E+01	0	0	0	15.167901	8.704E-06	17.59559	1.01E-05	0	0
349	0.000504	15.091705	17.50323	2.30E-06	-7.62E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
350	0.0005061	15.022934	17.46359	2.08E-06	-6.88E-02	- 0	-0	0	0	0	0	0	0	0
351	0.0005089	15.066761	17.47668	2.79E-06	4.38E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
352	0.0005125	15.123733	17.60053	3.61E-06	5.70E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
353	0.0005131	15.132547	17.63099	5.58E-07	8.81E-03	0	0	0	0	0	0	0	0	0
354	0.0005142	15.150192	17.70078	1.12E-06	1.76E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
355	0.0005164	15.414738	17.85883	2.23E-06	2.65E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
350	0.0005209	5 40E-0	18.23/5/	4.46E-06	3.43E-01	5.4E-05	5 45-05	1 115E-10		0	0	0	54 52786	0 000113
358	0.0005256	5.40E-0	57 34736	6 29F-07	2 77F-06	3.4E-03	3.4E-03	1.1132-10		0	0	0	0	0.000113
359	0.0005269	16.152001	18.67963	1.26E-06	1.62E+01			0	16.151944	1.015E-05	18.67963	1.174E-05	0	0
360	0.0005294	16.347191	18.88638	2.51E-06	1.95E-01	0	_0	0	0	0	0	0	0	0
361	0.0005317	16.526809	19.07464	2.29E-06	1.80E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
362	0.0005339	16.700211	19.22777	2.18E-06	1.73E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
363	0.0005375	16.822433	19.41048	3.63E-06	1.22E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
364	0.0005379	16.837212	19.42483	4.37E-07	1.48E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
365	0.0005388	16.866810	19.45019	8.74E-07	2.96E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
366	0.0005406	16.926161	19.48033	1.75E-06	5.94E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
367	0.0005441	16.865072	19.45736	3.50E-06	-6.11E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	-	-	-	-	-		-	-						
order	Time	ls	Vsw	Δt	Δi	ic-off	ic off<0	1/2*(Δt)* Δi	ic on	1/2*(∆t)*∆ i	Voff	1/2*(Δt)* Δi	von	1/2*(Δt)* Δ i
368	0.00055	6.37E-0	64.232	5.95E-06	-1.69E+01	6.37E-05	6.367E-05	1.893E-10	0	0	0	0	64.232004	0.000191
369	0.0005507	6.72E-0	67.49773	6.99E-07	3.57E-06	0	C	0	0	0	0	0	0	0
370	0.0005521	16.298073	18.83352	1.40E-06	1.63E+01	0	c	0	16.298007	1.139E-05	18.83352	1.317E-05	0	0
371	0.0005542	16.232613	18.67074	2.15E-06	-6.55E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
372	0.0005566	15.982851	18.48549	2.35E-06	-2.50E-01	0	C	0	0	0	0	0	0	0
373	0.0005595	15.682140	18.26535	2.88E-06	-3.01E-01	0	C	0	0	0	0	0	0	0
374	0.0005625	15.591241	18.05345	3.03E-06	-9.09E-02	0	C	0	C	0	0	0	0	0
375	0.0005631	15.574064	18.01802	5.75E-07	-1.72E-02	0	C	0	0	0	0	0	0	0
376	0.0005642	15.539764	17.95451	1.15E-06	-3.43E-02	0	C	0	0	0	0	0	0	0
377	0.0005665	15.471392	17.84707	2.30E-06	-6.84E-02	0	C	0	0	0	0	0	0	0
378	0.0005711	15.301015	17.7323	4.60E-06	-1.70E-01	0	C 1215 05	0	0	0	0	0	0	0
3/9	0.000575	6.12E-C	61.76948	3.8/E-06	-1.53E+01	6.12E-05	6.121E-05	1.186E-10	0	0	0	0	61.76948	0.00012
381	0.0005750	6.84E-0	68 956/3	1.14E-06	2.32E-00	0		0	0		0	0	0	0
382	0.0005787	15 304262	17 66789	1.14L-00	4.83L-00	0		0	15 304195	1 501E-05	17 66789	1 732E-05	0	0
383	0.0005818	15 488206	17 85344	3 10F-06	1.84F-01	0		0	15.504155	1.5012-05	17.00785	1.7522-05	0	0
384	0.0005849	15.674546	18.09225	3.10E-06	1.86E-01	0		0	0	0	0	0	0	0
385	0.0005875	15.834407	18.31887	2.63E-06	1.60E-01	0		0	0	0	0	0	0	0
386	0.0005879	15.856765	18.35206	3.66E-07	2.24E-02	0		0	0	0	0	0	0	0
387	0.0005886	15.901576	18.41866	7.31E-07	4.48E-02	0	C	0	0	0	0	0	0	0
388	0.0005901	15.991578	18.55208	1.46E-06	9.00E-02	0	C	0	0	0	0	0	0	0
389	0.000593	16.17311	18.8109	2.93E-06	1.82E-01	0	C	0	0	0	0	0	0	0
390	0.0005988	7.18E-0	72.32832	5.85E-06	-1.62E+01	7.18E- <mark>05</mark>	7.176E-05	2.099E-10	0	0	0	0	72.328322	0.000212
391	0.0006	7.70E-0	77.76066	1.17E-06	5.24E-06	0	C	0	0	0	0	0	0	0
392	0.000601	8.17E-0	82.3493	9.92E-07	4.70E-06	0	C	0	0	0	0	0	0	0
393	0.000603	16.5212	19.08144	1.98E-06	1.65E+01	0	c	0	16.521168	1.64E-05	19.08144	1.894E-05	0	0
394	0.0006063	16.726437	19.1837	3.36E-06	2.05E-01	0	c	0	0	0	0	0	0	0
395	0.0006098	16.64653	19.21488	3.43E-06	-7.99E-02	0	C	0	0	0	0	0	0	0
396	0.0006125	16.583246	19.18459	2.73E-06	-6.33E-02	0	C	0	0	0	0	0	0	0
397	0.0006129	16.573314	19.17479	4.29E-07	-9.93E-03	0	C	0	0	0	0	0	0	0
398	0.0006138	16.553469	19.15286	8.59E-07	-1.98E-02	0	C	0	0	0	0	0	0	0
399	0.0006155	16.513850	19.09564	1.72E-06	-3.96E-02	0	C	0	0	0	0	0	0	0
400	0.0006189	16.434896	18.93439	3.44E-06	-7.90E-02	0	C	0	0	0	0	0	0	0
401	0.0006207	16.394348	18.83184	1.77E-06	-4.05E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
402	0.0006233	7.25E-0	73.06759	2.63E-06	-1.64E+01	7.25E-05	7.249E-05	9.51/E-11	0	0	0	0	73.067595	9.59E-05
403	0.000625	7.96E-U	80.06933	1.66E-06	7.13E-06	0		0	0	0	0	0	0	0
404	0.0006255	8.11E-0	81.46019	5.39E-07	3.135-06	0		0	0	0	0	0	0	0
405	0.0006274	15 63876	18 1197	1.36E-06	1 56E+01	0		0	15 638682	1.062E-05	18 1192	1 23E-05	0	0
407	0.0006294	15.613573	18.01142	2.02E-06	-2.52E-02	0		0	15.050002	1.0021 05	10.1152	1.252 05	0	0
168777	0.3999736	4.79E-0	5.302107	5.90E-06	1.73E-06	0		0	0	0	0	0	0	0
168778	0.399975	16.057424	18.56614	1.44E-06	1.61E+01	0		0	16.057419	1.157E-05	18,56614	1.337E-05	0	0
168779	0.3999753	1.31E-0	1.795553	3.22E-07	-1.61E+01	1.31E-06	1.307E-06	2.108E-13	0	0	0	0	1.7955534	2.89E-07
168780	0.3999759	1.38E-0	1.86017	5.41E-07	7.30E-08	0		0	0	0	0	0	0	0
168781	0.3999764	1.50E-0	1.976356	5.12E-07	1.15E-07	0	C	0		0	0	0	0	0
168782	0.3999772	1.70E-0	2.195045	7.84E-07	2.10E-07	0	C	0	0	0	0	0	0	0
168783	0.3999787	2.14E-0	2.632251	1.57E-06	4.33E-07	0	0	0	0	0	0	0	0	0
168784	0.3999819	3.02E-0	3.507222	3.14E-06	8.82E-07	0	0	0	0	0	0		0	0
168785	0.3999875	4.57E-0	5.08882	5.64E-06	1.55E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0
168786	0.3999881	4.79E-0	5.265799	6.27E-07	2.16E-07	0	0	0	0	0	0	0	0	0
168787	0.3999894	5.10E-0	5.620205	1.25E-06	3.14E-07	0	61	0	0 0	0	0	0	0	0
168788	0.3999919	5.79E-0	6.331424	2.51E-06	6.91E-07	0	c	0	0	0	0	0	0	0
168789	0.3999969	7.23E-0	7.757329	5.02E-06	1.44E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0
168790	0.4	8.11E-0	8.631532	3.09E-06	8.81E-07	0	C	0	0	0	0	0	0	0
							Σ	0.0001566	Σ	0.2500489	Σ	0.2902174	Σ	2.380427
		1	1	1			IC of	0.0003914	IC on	0.6251221	Vce off	0.7255436	Vce on	5.951068

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายกิตติวัฒน์ จีบแก้ว
วันเกิด	วันที่ 22 มิถุนาย <mark>น</mark> พ.ศ. 2522
สถานที่เกิด	อำเภอชุมแพ จังห <mark>ว</mark> ัดขอนแก่น
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 91/6 <mark>1 ถนนเลี่ยงเมือง ตำบลธาตุเชิงชุม</mark> อำเภอเมือง จังหวัด
	สกลนคร รหัสไป <mark>รษ</mark> ณีย์ 47000
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยราช <mark>ภัฏ</mark> สกลนคร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
	เลขที่ 680 หมู่ 11 ถนนนิตโย ตำบลธาตุเชิงชุม อำเภอเมือง
	จังหวัดสกลนค <mark>ร รหัส</mark> ไปรษณีย์ 47000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2 <mark>540 ป</mark> ระกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาช่างไฟฟ้า สถาบัน
	เทคโนโลยีราช <mark>มงคล วิ</mark> ทยาเขตขอนแก่น
	พ.ศ. 2 <mark>542 ปร</mark> ะกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาช่างไฟฟ้า
	อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น
	<mark>พ.ศ. 2544 ปริญญาครุ</mark> ศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (ค.อ.บ.)
	สาขา <mark>วิชาวิศวกรรมไฟฟ้า – ไฟฟ้</mark> ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี
	<mark>พ.ศ. 2553 ปริญญาครุ</mark> ศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต (ค.อ.ม.)
	สาขาวิชาไฟ <mark>ฟ้าควบคุม ม</mark> หาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
	พ. <mark>ศ. 2562 ปริญ</mark> ญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาวิชา
	<mark>วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอ</mark> ร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	ศึกษาการสัมผัสแล <mark>ะรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นอันตราย</mark>
	มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร,ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยสำหรับบุคลากร
9110	มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร จากงบประมาณแผ่นดิน (วช.) ประจำปี
41	งบประมาณ พ.ศ. 2556 (หัวหน้าโครงการวิจัย)
3 - 0	การออกแบบโครงสร้างศาลาในสวนหย่อมรองรับแผงโซล่าเซลล์และ
	การนำพลังงานไปใช้ในการจัดภูมิทัศน์เพื่อเป็นต้นแบบทางด้านการศึกษา ,
	ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยสำหรับบุคลากรมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
	จากงบประมาณแผ่นดิน (วช.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

1