

การพัฒนาอินเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้า



นายสาคร ธีรชัยสกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-511-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

119437067

1 1 81.9. 2546

DEVELOPMENT OF A GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC INVERTER

MR. Sakorn Theerachaisakul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-346-511-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ : การพัฒนาอินเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบการ
ไฟฟ้า

โดย : นายสาคร ชีรัชสกุล

ภาควิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า

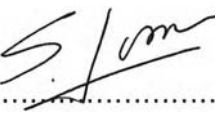
อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์

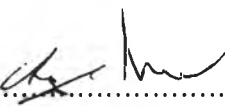
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)


.....กรรมการ
(อาจารย์ เจ็ดกุล โสภวานิชย์)

ศาสตราจารย์ ดร. ชีรชัยสกุล : การพัฒนาอินเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้า (DEVELOPMENT OF A GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC INVERTER) อ.ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์, 82 หน้า. ISBN 974-346-511-1.

วิทยานิพนธ์นี้แสดงถึงการพัฒนาอินเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติการจ่ายกระแสด้านออกคั่นแก่ระบบการไฟฟ้าเป็นคลื่นรูปไซน์ความถี่ต่ำ และมีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง รวมทั้งควบคุมให้เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายพลังงาน ณ จุดที่ให้กำลังออกสูงสุด โดยวิธีการควบคุมแรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังออกต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (dP_{PV}/dV_{PV}) เป็นศูนย์ ซึ่งตรงกับจุดกำลังสูงสุดเสมอแม้ว่าสถานะแวดล้อมจะเปลี่ยนไป ผลการทดลองกับตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ยืนยันถึงการเข้าสู่จุดกำลังสูงสุดในสภาวะปริมาณแสงต่างๆ กัน นอกจากนี้วิธีการป้องกันกลับเฟสแบบบวกในวงรอบบล็อกเฟสจะทำให้เกิดการเลื่อนความถี่จนตรวจพบปรากฏการณ์ไอส์แลนด์ (Islanding) ที่อาจจะเกิดขึ้นหลังการไฟฟ้าหยุดส่งจ่ายพลังงานได้ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานแบบเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้า

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2543

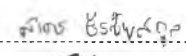

ลายมือชื่อนิติสด.....ศาสตราจารย์ ดร. ชีรชัยสกุล
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

#4070562021 : MAJOR POWER ELECTRONICS

KEYWORD : PHOTOVOLTAIC ARRAY / MAXIMUM POWER POINT / INVERTER /
ISLANDING / UNITY POWER FACTOR

SAKORN THEERACHAISAKUL : DEVELOPMENT OF A GRID-
CONNECTED PHOTOVOLTAIC INVERTER.THESIS ADVISOR : DR.
SOMBOON SANGWONGWANICH 82pp. ISBN 974-346-511-1.

This thesis presents the development of a grid-connected photovoltaic inverter that has a low distortion output current at unity power factor and maximum power point tracking (MPPT) control. The maximum power point can be obtained by regulating the derivative of the output power (P_{pv}) with respect to the output voltage (V_{pv}) of the photovoltaic array (dP_{pv}/dV_{pv}) to zero. The MPPT is confirmed by experimental results under changing insolation. The method using the positive feedback in the phase-locked loop control is proposed to detect the islanding operation. After disconnecting the utility supply, the system will be unstable, and the frequency will drift until the islanding operation is detected.

Department..... Electrical Engineering..... Student's signature..... 
Field of study..... Electrical Engineering..... Advisor's signature..... 
Academic year..... 2000..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดียิ่งของอาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือด้านต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยตลอดมา รวมทั้งท่านอาจารย์ทั้งหลายที่ให้ความรู้ตั้งแต่อดีตจนกระทั่งปัจจุบัน

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษา ให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน และให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญภาพ.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 อินเวอร์เตอร์และการควบคุมกระแส.....	9
3 การตรวจหาจุดกำลังสูงสุด.....	18
4 ผลการทดสอบ.....	32
5 การตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนดิง.....	40
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	57
รายการอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก.....	61
ภาคผนวก ก.....	62
ภาคผนวก ข.....	66
ภาคผนวก ค.....	76
ภาคผนวก ง.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	82

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าตัวประกอบกำลังและความเพี้ยนรวมของกระแสนอกที่โหลดค่าต่างๆ.....	17
ตารางที่ ข.1 ค่าขององค์ประกอบต่างๆของระบบ.....	71

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ระบบพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้ในบ้าน.....	1
รูปที่ 1.2 แผนภาพบล็อกระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีวงจรแปลงผันพลังงาน 2 ภาค ..3	3
รูปที่ 1.3 แผนภาพบล็อกของระบบอินเวอร์เตอร์สำหรับระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์.....	4
รูปที่ 1.4 แผนภาพบล็อกการควบคุมกระแสแบบมีฮิสเทอรีซิส.....	5
รูปที่ 1.5 แผนภาพบล็อกการควบคุมกระแสแบบมอดูเลตความกว้างพัลส์.....	6
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์.....	9
รูปที่ 2.2 แผนภาพเฟสเซอร์กรณีเฟสของกระแส I_u ตรงกับเฟสของแรงดัน V_u	10
รูปที่ 2.3 แผนภาพบล็อกการควบคุมกระแส.....	11
รูปที่ 2.4 กระแสผิดพลาดจากผลการประวิงเวลาที่เป็นสัญญาณขึ้นขนาดหนึ่งหน่วย.....	13
รูปที่ 2.5 กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์และกระแสผิดพลาดที่ไม่มีการชดเชยผลของการประวิงเวลา ที่โหลด 0.6 kW.....	15
รูปที่ 2.6 กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์และกระแสผิดพลาดที่มีการชดเชยผลของการประวิงเวลา ที่โหลด 0.6 kW.....	15
รูปที่ 2.7 กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์และกระแสผิดพลาดที่ไม่มีการชดเชยผลของการประวิงเวลา ที่โหลด 1.4 kW.....	16
รูปที่ 2.8 กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์และกระแสผิดพลาดที่มีการชดเชยผลของการประวิงเวลา ที่โหลด 1.4 kW.....	16
รูปที่ 2.9 ความเพี้ยนของกระแสด้านออกที่โหลดพิกัด 3.0 kW.....	17
รูปที่ 3.1 ลักษณะสมบัติ $p_{PV}-v_{PV}$ และ $dp_{PV}/dv_{PV}-v_{PV}$ ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	18
รูปที่ 3.2 แผนภาพบล็อกการตรวจหาจุดกำลังสูงสุด โดยวิธีควบคุมให้ $dp_{PV}/dv_{PV} = 0$	19
รูปที่ 3.3 แผนภาพบล็อกของแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กและการควบคุมแรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์.....	21
รูปที่ 3.4 ขั้วของวงรอบควบคุมแรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์ที่แรงดัน 350-450 โวลต์ โดยมีเกณฑ์ $K_p = 0.2$ และ $K_i = 2.5$	22
รูปที่ 3.5 แรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก กรณีที่สัญญาณอ้างอิงเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได.....	23

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.6 แรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์จากการจำลองระบบจริงกรณีที่สัญญาณอ้างอิงเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได... 23

รูปที่ 3.7 ภาวะชั่วคราวของค่ายอดกระแสกำลังกรณีที่สัญญาณอ้างอิงเปลี่ยนแปลงแบบขั้น 24

รูปที่ 3.8 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของการควบคุม dP_{pv}/dV_{pv} 24

รูปที่ 3.9 อัตราขยายวงรอบเปิดของระบบการควบคุม dP_{pv}/dV_{pv}25

รูปที่ 3.10 แรงดันอ้างอิงของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะทำการตรวจหาจุดกำลังสูงสุดของระบบที่มีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงแบบขั้น.....26

รูปที่ 3.11 แรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์ขณะทำการตรวจหาจุดกำลังสูงสุดของระบบที่มีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงแบบขั้น..... 27

รูปที่ 3.12 ค่ายอดกระแสอ้างอิงขณะทำการตรวจหาจุดกำลังสูงสุดของระบบที่มีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงแบบขั้น..... 27

รูปที่ 3.13 กำลังค่านอกของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะทำการตรวจหาจุดกำลังสูงสุดของระบบที่มีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงแบบขั้น.....28

รูปที่ 3.14 การควบคุมอนุพันธ์ของกำลังเทียบกับกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์ให้เท่ากับศูนย์..... 29

รูปที่ 3.15 กำลังค่านอกของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะทำการตรวจหาจุดกำลังสูงสุดของระบบที่มีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงแบบต่อเนื่อง..... 29

รูปที่ 3.16 ค่ายอดกระแสอ้างอิงขณะทำการตรวจหาจุดกำลังสูงสุดของระบบที่มีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงแบบต่อเนื่อง..... 30

รูปที่ 3.17 แรงดันอ้างอิงของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะทำการตรวจหาจุดกำลังสูงสุดของระบบที่มีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงแบบต่อเนื่อง..... 30

รูปที่ 3.18 แรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์ขณะทำการตรวจหาจุดกำลังสูงสุดของระบบที่มีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงแบบต่อเนื่อง.....31

รูปที่ 4.1 แผนภาพบล็อกของระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์และการทดสอบระบบ.....32

รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบการควบคุมแรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีสัญญาณอ้างอิงเพิ่มขึ้นแบบขั้นบันได.....33

รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบการควบคุมแรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีสัญญาณอ้างอิงลดลงแบบขั้นบันได.....34

รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบการกวาดแรงดันแบบต่อเนื่องที่สถานะแสงลดลงจาก ระดับแสง 1-4....34

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของกำลังกับแรงดันของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ของผลการทดสอบ	
รูปที่ 4.4.....	35
รูปที่ 4.6 การติดตามหาจุดกำลังสูงสุดในสภาวะปริมาณแสงคงตัว ที่ระดับแสง 4.....	36
รูปที่ 4.7 การติดตามหาจุดกำลังสูงสุดในสภาวะปริมาณแสงคงตัว ที่ระดับแสง 3.....	37
รูปที่ 4.8 การติดตามหาจุดกำลังสูงสุดในสภาวะปริมาณแสงคงตัว ที่ระดับแสง 2.....	37
รูปที่ 4.9 การติดตามหาจุดกำลังสูงสุดในสภาวะปริมาณแสงคงตัว ที่ระดับแสง 1.....	38
รูปที่ 4.10 การติดตามหาจุดกำลังสูงสุดในสภาวะที่แสงมีการเปลี่ยนระดับ.....	38
รูปที่ 4.11 การติดตามหาจุดกำลังสูงสุดในสภาวะที่แสงมีการเปลี่ยนระดับ.....	39
รูปที่ 5.1 แผนภาพลือกของวงรอบลือกเฟส.....	41
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกำลังที่จุดสมดุลกำลังงาน.....	42
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์กำลังจริงและกำลังจินตภาพของโหลดที่จุดสมดุลกำลังงานของระบบ ที่ไม่มี การป้อนกลับเฟสแบบบวก.....	43
รูปที่ 5.4 จุดสมดุลกำลังงานของระบบที่มีการป้อนกลับแบบบวก เมื่อ $Q = 2.5$	45
รูปที่ 5.5 แผนภาพลือกของวงรอบลือกเฟสที่มีการป้อนกลับแบบบวก.....	46
รูปที่ 5.6 แผนภาพลือกของแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของวงรอบลือกเฟสที่มีการ ป้อนกลับแบบบวกขณะการไฟฟ้าหยุดจ่ายพลังงาน.....	47
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ของ K_L กับ โหลดที่มีความถี่เรโซแนนซ์ $\omega_r = 100\pi$	48
รูปที่ 5.8 ความถี่จากวงรอบลือกเฟส ที่ไม่มี การป้อนกลับเฟสแบบบวก ($K_F = 0$).....	51
รูปที่ 5.9 ความถี่จากวงรอบลือกเฟส ที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.021$	51
รูปที่ 5.10 ความถี่จากวงรอบลือกเฟส ที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.028$	52
รูปที่ 5.11 ความถี่จากวงรอบลือกเฟส ที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.042$	52
รูปที่ 5.12 ความถี่จากวงรอบลือกเฟส ที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.072$	53
รูปที่ 5.13 แผนภาพลือกชุดทดสอบปรากฏการณ์ไอส์แลนด์.....	54
รูปที่ 5.14 การตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนด์ของระบบที่ไม่มี การป้อนกลับเฟสแบบบวก... 55	
รูปที่ 5.15 การตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนด์ของระบบที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.021$	55
รูปที่ 5.16 การตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนด์ของระบบที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.028$	56
รูปที่ 5.17 การตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนด์ของระบบที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.042$	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.17 การตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนด์ของระบบที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.042$	56
รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	63
รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ของกำลังกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	64
รูปที่ ข.1 แผนภาพบล็อกของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์.....	66
รูปที่ ข.2 แผนภาพบล็อกการควบคุมของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์.....	67
รูปที่ ข.3 วงจรควบคุมแรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง.....	67
รูปที่ ข.4 แผนภาพบล็อกของการควบคุมแรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง.....	68
รูปที่ ข.5 แผนภาพบล็อกของวงจรควบคุมกระแสด้านออก.....	69
รูปที่ ข.6 แผนภูมิโบเดของฟังก์ชัน โอนย้ายวงรอบเปิดของระบบควบคุมกระแส.....	70
รูปที่ ข.7 แผนภาพบล็อกชุดทดสอบตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์.....	71
รูปที่ ข.8 คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง.....	73
รูปที่ ข.9 คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์.....	73
รูปที่ ข.10 คุณลักษณะของกำลัง-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง.....	74
รูปที่ ข.11 คุณลักษณะของกำลัง-แรงดันของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์.....	74
รูปที่ ข.12 แรงดันค่านอกของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เทียบกับแรงดันคร่อมเซลล์แสง อาทิตย์อ้างอิง.....	75
รูปที่ ข.13 กระแสด้านออกของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เทียบกับกระแสของเซลล์แสง อาทิตย์อ้างอิง.....	75
รูปที่ ค.1 แผนภาพบล็อกของตัวเปรียบเทียบเฟส.....	76
รูปที่ ค.2 สัญญาณจากตัวเปรียบเทียบเฟสที่ผลต่างเฟสของสัญญาณเข้าทั้งสอง เท่ากับ 0 องศา 90 องศา และ -90 องศา ตามลำดับ.....	76
รูปที่ ค.3 สัญญาณด้านออกเทียบกับผลต่างเฟสของสัญญาณด้านเข้า.....	77
รูปที่ ค.4 แผนภาพบล็อกของวงรอบล็อกเฟส.....	77
รูปที่ ค.5 ขนาดและเฟสของอัตราขยายวงรอบเปิดของวงรอบล็อกเฟส.....	78
รูปที่ ง.1 แผนภาพบล็อกวงรอบการควบคุมกระแส.....	80
รูปที่ ง.2 อัตราการลดทอนและเฟสของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ I_{L2} ต่อแรงดันอินเวอร์เตอร์.....	80
รูปที่ ง.3 ช่วงปลอดภัยเชิงอัตราขยายและช่วงปลอดภัยเชิงเฟสของระบบควบคุมกระแส.....	81