

# วงจรแปลงผันพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไม่มีหม้อแปลงสำหรับระบบไฟฟ้า สามเฟส

## Transformerless Photovoltaic Inverters for Three Phase Power Systems

ชลธิ์ โพร้ทอง

หน่วยวิจัยพลังงานรังสีอาทิตย์และแหล่งพลังงานสำรอง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

Chonlatee Photong

Solar Energy and Energy Resources Research Unit, Faculty of Engineering, Mahasarakham University,  
Kantarawichai, Maha Sarakham 44150

Tel: 0-4375-4316 Ext. 3040 E-mail: chonlatee.p@msu.ac.th

### บทคัดย่อ

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งไม่สามารถป้อนเข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับโดยทั่วไปได้โดยตรง ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องใช้วงจรแปลงผันพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับเพื่อให้ได้ระดับแรงดันและความถี่ที่เหมาะสมกับระบบสายส่ง บทความนี้ได้ทำการรวบรวมโครงสร้างและหลักการทำงานของวงจรแปลงผันพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไม่มีหม้อแปลงสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสทั้งที่มีใช้งานและที่ปรากฏในงานวิจัยในปัจจุบันจำนวน 8 วงจร พร้อมกันนี้ได้นำเสนอผลการเปรียบเทียบสมรรถนะและประสิทธิภาพของวงจรด้วย

**คำหลัก** วงจรแปลงผันพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ วงจรแปลงผันชนิดไม่มีหม้อแปลง วงจรแปลงผันสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟส

### Abstract

Electric power produced from photovoltaic cells is DC which cannot be fed directly into the conventional AC power systems; thus, photovoltaic inverters that can convert DC power into AC power at suitable voltage level and frequency are necessary. This article reviews circuit structures and operation principles of transformerless photovoltaic inverters for three phase power systems. The

inverters under investigation are selected from those currently used or tested in research area; having 8 inverters available. The comparison in terms of performance and efficiency among those inverters is also included.

**Keywords:** Photovoltaic inverters, transformerless inverters, inverters for three phase power systems

### 1. บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง อย่างไรก็ตามพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งไม่สามารถป้อนเข้าสู่ระบบสายส่งซึ่งเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับได้โดยตรง ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องใช้วงจรแปลงผันพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีความสามารถในการแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ระดับแรงดันและความถี่ที่เหมาะสมกับระบบสายส่งจึงมีความจำเป็นต้องใช้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากระดับแรงดันไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้โดยทั่วไปมีระดับต่ำไม่เหมาะที่จะป้อนเข้าสู่ระบบสายส่งซึ่งมีระดับแรงดันไฟฟ้าสูง ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นต้องยกระดับแรงดันจากเซลล์ให้สูงขึ้นก่อน

หม้อแปลงขยายแรงดันเป็นเทคโนโลยีที่ง่ายที่สุดที่นิยมใช้ในการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้พอเหมาะกับระดับแรงดันระบบสายส่ง [1] อย่างไรก็ตาม การมีหม้อแปลงในวงจรแปลงผันพลังงาน

เซลล์แสงอาทิตย์อาจมีข้อเสียเกี่ยวกับขนาดของหม้อแปลงที่ใหญ่และมีน้ำหนักมาก ถึงแม้ว่าหม้อแปลงความถี่สูงซึ่งมีขนาดเล็กและน้ำหนักที่เบาว่าหม้อแปลงปกติมาก แต่อาจมีความซับซ้อนในกระบวนการแปลงความถี่ไปมาระหว่างความถี่สูงสำหรับหม้อแปลงและความถี่ต่ำสำหรับระบบสายส่ง อีกทั้งอาจทำให้เกิดความสูญเสียภายในวงจรมากขึ้นด้วย [2-3]

บทความนี้จึงได้ทำการศึกษาและรวบรวมวงจรแปลงผันพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไม่มีหม้อแปลงสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสทั้งที่ใช้งานอยู่และปรากฏในงานวิจัยในปัจจุบัน เนื่องจากการไม่มีหม้อแปลงภายในวงจรทำให้วงจรชนิดนี้มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา อีกทั้งมีแนวโน้มประสิทธิภาพที่สูงกว่าวงจรชนิดที่มีหม้อแปลง เนื่องจากมีโอกาสมีขั้นตอนการแปลงพลังงานที่น้อยลง ซึ่งจากการศึกษาและรวบรวมพบว่า มีวงจรที่ใช้งานกันทั่วไปทั้งสิ้น 8 วงจร [4-7] ดังแสดงในตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 วงจรแหล่งจ่ายแรงดัน วงจรที่ (1) เป็นหนึ่งในวงจรที่มีอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในวงจรมีน้อยที่สุด จึงเป็นวงจรที่นิยมมากที่สุดในการใช้งานด้านการแปลงพลังงานด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่ [8] อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวงจรแหล่งจ่ายแรงดันนี้ต้องการระดับแรงดันไฟฟ้าด้านเซลล์แสงอาทิตย์ที่สูง (อย่างน้อยมากกว่าค่าแรงดันยอดถึงยอดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเสมอ) ทำให้ต้องต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมจำนวนมากเพื่อให้มีระดับแรงดันที่เพียงพอ ซึ่งอาจทำให้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีระดับแรงดันสูงจนเกินไปซึ่งอาจเสี่ยงต่อความปลอดภัยได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงนิยมต่อวงจรขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หรือ boost converter วงจรที่ (2) เพื่อทำการขยายแรงดันจากเซลล์ก่อนแทนการต่อโดยตรงเข้าวงจรแหล่งจ่ายแรงดัน [8] ซึ่งช่วยให้แรงดันด้านขาเข้าที่ส่งมาจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถมีระดับแรงดันที่ต่ำลงได้ อย่างไรก็ตาม อาจมีความสูญเสียกำลังเพิ่มเติมที่เกิดจากการทำงานของวงจรขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้อาจมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่ลดลง แนวทางเลือกอื่นอาจใช้วงจรต่อกับตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับอนุกรม วงจรที่ (3) แทน [9] เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ไม่ต้องการการสวิตช์ทำให้กำลังสูญเสียน้อยกว่า อย่างไรก็ตามการต่อตัวเก็บประจุอาจทำให้การควบคุมตัวประกอบกำลัง (power factor) ไม่สามารถทำได้โดยอิสระ

ตารางที่ 1 วงจรแปลงผันพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไม่มีหม้อแปลงที่นำเสนอในบทความนี้

วงจรที่	ชื่อวงจร	ชื่อย่อวงจร
(1)	วงจรแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter)	VSI
(2)	วงจรแหล่งจ่ายแรงดันร่วมกับวงจรขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (VSI with a Boost Converter)	VSI+Boost
(3)	วงจรแหล่งจ่ายแรงดันร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับอนุกรม (VSI with Series AC Capacitors)	VSI+SCaps
(4)	วงจรแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter)	CSI
(5)	วงจรแหล่งจ่ายกระแสร่วมกับวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (CSI with a Buck Converter)	CSI+Buck
(6)	วงจรแหล่งจ่ายกระแสร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับอนุกรม (CSI with Series AC Capacitors)	CSI+SCaps
(7)	วงจรแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ชนิดป้อนแรงดัน (Impedance or Z- Source Inverter with Voltage Fed)	ZSI-VF
(8)	วงจรแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ชนิดป้อนกระแส (Impedance or Z- Source Inverter with Current Fed)	ZSI-CF

วงจรแหล่งจ่ายกระแส วงจรที่ (4) เป็นวงจรอีกทางเลือกหนึ่งที่มีอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำภายในวงจรมีน้อย อีกทั้งมีความสามารถในการรับแรงดันระดับต่ำจากเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงกว้างซึ่งเหมาะในการทำงานร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ [10-11] อย่างไรก็ตาม วงจรนี้มีข้อจำกัดคือไม่สามารถรับแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้สูงกว่า 0.866 เท่าของค่ายอดถึงยอดของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาออกได้ ทำให้วงจรต้องส่งผ่านพลังงานที่ระดับช่วงแรงดันที่ต่ำ ในขณะที่กระแสที่ไหลผ่านวงจรมีปริมาณสูงขึ้นเพื่อรักษาสมดุลการส่งผ่านพลังงานระหว่างขาเข้าและขาออก ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานต่ำไปด้วย เพื่อเพิ่มขีดความสามารถวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หรือ buck converter วงจรที่ (5) อาจนำมาใช้กับวงจรได้ เพื่อให้ระบบสามารถรับแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่สูงขึ้นได้ [12] โดยวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จะทำการปรับระดับแรงดันลงมาที่ระดับที่วงจรแหล่งจ่าย

กระแสทำงานได้ดีที่สุดเสมอ ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพ การแปลงพลังงานสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม กำลังสูญเสียบางส่วนอาจเกิดขึ้นเพิ่มเติมจากการทำงานของวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง การใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับอนุกรม วงจรที่ (6) จึงอาจเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ใช้แทนวงจรลดทอนแรงดันนี้เพื่อลดการสูญเสีย [13] อย่างไรก็ตามอาจประสบปัญหาเกี่ยวกับตัวประกอบกำลังที่ไม่สามารถควบคุมได้อย่างอิสระเช่นเดียวกับวงจรแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับอนุกรม วงจรที่ (3)

วงจรแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ชนิดป้อนแรงดัน วงจรที่ (7) และ วงจรแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ชนิดป้อนกระแส วงจรที่ (8) เป็นวงจรแปลงผันพลังงานแบบใหม่ที่ถูกออกแบบโดย F. Z. Peng เมื่อปี ค.ศ. 2002 [14] วงจรนี้มีความสามารถทั้งขยายและลดทอนแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยอาศัยการทำงานของวงจรอิมพีแดนซ์แบบพิเศษ (ทำจากตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำและไดโอด) ทำงานร่วมกับการสวิตช์ซึ่งภายในวงจรแบบพิเศษ แต่เนื่องจากวงจรอิมพีแดนซ์นี้ไม่มีสวิตช์ทำให้มีความสูญเสียน้อย เมื่อเทียบกับวงจร boost converter หรือ buck converter อย่างไรก็ตาม เมื่ออัตราการขยายหรือลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้ามีสูงขึ้น ค่าแรงดันและกระแสสูงสุดที่ปรากฏภายในวงจรจะมีค่าสูงขึ้นด้วยเป็นอย่างมาก ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายสำหรับอุปกรณ์ภายในวงจรได้ หรือไม่อาจจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่ทนแรงดันและกระแสได้สูงขึ้น แต่อาจมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นแทน [15-16]

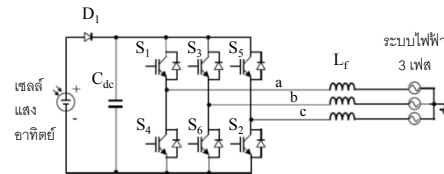
เพื่อให้เข้าใจและเห็นข้อแตกต่างของวงจรแปลงผันพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไม่มีหม้อแปลงสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสที่กล่าวมาแล้วข้างต้น บทความนี้จะได้นำเสนอรายละเอียดโครงสร้างและหลักการการทำงานของวงจรเหล่านี้ พร้อมผลเปรียบเทียบกับสมรรถนะและประสิทธิภาพของวงจร ซึ่งได้นำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

## 2. โครงสร้างและหลักการการทำงานของวงจร

### 2.1 วงจรแหล่งจ่ายแรงดัน (VSI)

รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของวงจรแหล่งจ่ายแรงดันวงจรประกอบไปด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์จำนวน 6 ตัว ( $S_1$   $S_2$   $S_3$   $S_4$   $S_5$  และ  $S_6$ ) ต่อขนานกับไดโอดซึ่งจะให้

กระแสไหลผ่านในทิศทางตรงข้ามกับกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์เมื่อสวิตช์ไม่ทำงาน ด้านขาเข้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นิยมต่อตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ ( $C_{dc}$ ) เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สม่ำเสมอ ด้านขาออกมีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ( $L_f$ ) เพื่อกรองกระแส นอกจากนี้ วงจรนี้ได้ต่อไดโอด ( $D_1$ ) แบบอนุกรมที่ด้านขาเข้าของวงจรเพื่อป้องกันกระแสไหลย้อนกลับเข้าเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย



รูปที่ 1 วงจรแหล่งจ่ายแรงดัน (VSI)

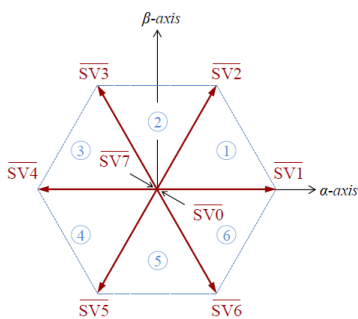
หลักการการทำงานของวงจรแหล่งจ่ายเป็นการแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นกระแสสลับ เทคนิคดังกล่าวมีอยู่หลายวิธีการด้วยกัน [17-22] แต่ในบทความนี้จะเลือกเทคนิคที่นิยมมากที่สุดสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสในปัจจุบัน คือเทคนิคที่เรียกว่า Space Vector Pulse Width Modulation หรือ SPWM [23-24] ทั้งนี้เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ทำให้การออกแบบและวิเคราะห์ระบบทำได้ง่ายขึ้นโดยผู้ออกแบบจะพิจารณาเพียงเวกเตอร์เดี่ยวแทนการพิจารณาสัญญาณคลื่นในระบบจริงทั้งสามเฟสพร้อมกัน

ข้อจำกัดของวงจรแหล่งจ่ายคือ ระดับแรงดันไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นต้องสูงกว่าระบบสายส่งเสมอ จึงจะสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเข้าระบบสายส่งได้ และเนื่องจากเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน สวิตช์ในวงจรจะต้องไม่ก่อให้เกิดการลัดวงจรแหล่งจ่าย มิฉะนั้นแล้วกระแสปริมาณมหาศาลจะไหลผ่านสวิตช์และสร้างความเสียหายแก่สวิตช์ในที่สุด เรียกว่า สภาวะ shoot-through

จากเงื่อนไขข้างต้นเมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 1 จะได้ว่า วงจรนี้สามารถมีสภาวะการทำงานของสวิตช์ที่ปลอดภัยได้เพียง 8 สภาวะเท่านั้น ได้แก่ ( $S_4S_6S_2$ ) ( $S_1S_6S_2$ ) ( $S_1S_3S_2$ ) ( $S_4S_3S_2$ ) ( $S_4S_3S_5$ ) ( $S_4S_6S_5$ ) ( $S_1S_3S_2$ ) และ ( $S_1S_3S_5$ ) โดยที่ชื่อสวิตช์แทนสวิตช์ที่นำกระแส (ON) เมื่อใช้หลักการของ SPWM จะได้ว่า สภาวะการทำงานเหล่านี้สามารถเปลี่ยนให้เป็นเวกเตอร์ที่มีคุณสมบัติดังตารางที่ 2 ซึ่งวางอยู่ในระบบแกนคาร์ทีเซียนได้ดังแสดงในรูปที่ 2

ตารางที่ 2 เวกเตอร์สภาวะด้วยเทคนิค SPWM สำหรับวงจร VSI

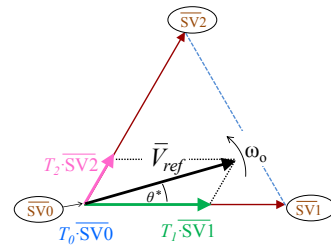
สภาวะ	ชื่อเวกเตอร์	แอมพลิจูด	$V_{ab}$	$V_{bc}$	$V_{ca}$
(S <sub>4</sub> S <sub>6</sub> S <sub>2</sub> )	<b>SV0</b>	0	0	0	0
(S <sub>1</sub> S <sub>6</sub> S <sub>2</sub> )	<b>SV1</b>	(2/3)*V <sub>dc</sub>	+V <sub>dc</sub>	0	-V <sub>dc</sub>
(S <sub>1</sub> S <sub>3</sub> S <sub>2</sub> )	<b>SV2</b>	(2/3)*V <sub>dc</sub>	0	+V <sub>dc</sub>	-V <sub>dc</sub>
(S <sub>4</sub> S <sub>3</sub> S <sub>2</sub> )	<b>SV3</b>	(2/3)*V <sub>dc</sub>	-V <sub>dc</sub>	+V <sub>dc</sub>	0
(S <sub>4</sub> S <sub>3</sub> S <sub>5</sub> )	<b>SV4</b>	(2/3)*V <sub>dc</sub>	-V <sub>dc</sub>	0	+V <sub>dc</sub>
(S <sub>4</sub> S <sub>6</sub> S <sub>5</sub> )	<b>SV5</b>	(2/3)*V <sub>dc</sub>	0	-V <sub>dc</sub>	+V <sub>dc</sub>
(S <sub>1</sub> S <sub>3</sub> S <sub>2</sub> )	<b>SV6</b>	(2/3)*V <sub>dc</sub>	+V <sub>dc</sub>	-V <sub>dc</sub>	0
(S <sub>1</sub> S <sub>3</sub> S <sub>5</sub> )	<b>SV7</b>	0	0	0	0



รูปที่ 2 ตำแหน่งของเวกเตอร์บนระนาบคาร์ทีเซียนสำหรับวงจร VSI ด้วยเทคนิคการสร้างสัญญาณแบบ SPWM

เมื่อกำหนดเวกเตอร์อ้างอิงซึ่งใช้แทนสัญญาณสามเฟสที่มีความสมดุลและแอมพลิจูดคงที่ตามที่ต้องการ จะได้ว่าเวกเตอร์อ้างอิงนั้นจะมีขนาดคงที่และหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่บนแกนระนาบคาร์ทีเซียน ด้วยหลักการของ SPWM จะได้ว่า เมื่อเวกเตอร์นั้นวางตัวอยู่ระหว่างเวกเตอร์คู่ใด เวกเตอร์คู่นั้น (หรืออีกนัยหนึ่งคือสภาวะการสวิตช์คู่นั้น) จะถูกเลือกมาใช้ โดยระยะเวลาการทำงานของสภาวะที่ถูกเลือกแต่ละสภาวะนั้นจะขึ้นอยู่กับระยะห่างของเวกเตอร์สภาวะนั้นกับเวกเตอร์อ้างอิง โดยยิ่งใกล้ก็จะใช้ระยะเวลาการทำงานสภาวะนั้นนานกว่า อย่างไรก็ตาม เวลารวมของการทำงานของทั้งสองสภาวะต้องเท่ากับคาบการสวิตช์ซึ่งกำหนดโดยความเร็วรอบการสวิตช์ ซึ่งในกรณีที่ผลรวมของเวลาทั้ง 2 สภาวะไม่เท่ากับคาบการสวิตช์ เวกเตอร์ SV0 หรือ SV7 จะถูกนำมาใช้งานเพื่อเติมเต็มเวลาให้เท่ากับคาบการสวิตช์ เนื่องจากเวกเตอร์ SV0 หรือ SV7 นี้เป็นเวกเตอร์ศูนย์จึงไม่มีผลต่อขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณที่ผลิตแต่อย่างใด

รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างการทำงานของการ SPWM สำหรับวงจร VSI ที่ได้กล่าวข้างต้น โดยเป็นกรณีนี้



รูปที่ 3 ตัวอย่างการเลือกสภาวะการทำงานของสวิตช์วงจร VSI ด้วยเทคนิคการสร้างสัญญาณแบบ SPWM สำหรับระนาบช่อง 1

เวกเตอร์อ้างอิง ( $V_{ref}$ ) วางตัวในช่อง 1 บนระนาบคาร์ทีเซียน ซึ่งในกรณีนี้เวกเตอร์ VS1 และ VS2 จะถูกเลือกใช้ ซึ่งจะสังเกตว่า ระยะเวลาการทำงานสภาวะเวกเตอร์ VS1 ( $T_1$ ) จะมากกว่าเวกเตอร์ VS2 ( $T_2$ ) เนื่องจากมีระยะห่างจากเวกเตอร์อ้างอิงน้อยกว่า และเพื่อเติมเต็มคาบการสวิตช์ ( $T_s$ ) เวกเตอร์ศูนย์ (VS0 และ VS7) จะถูกเรียกมาทำงานด้วยระยะเวลา  $T_0$  ซึ่งสามารถสรุปเวลาการสวิตช์สำหรับแต่ละเวกเตอร์ได้ดังแสดงในสมการ (1)-(3)

$$T_1 = m_v T_s \sin(\pi/3 - \theta^*); \quad 0 \leq \theta^* < \pi/3 \quad (1)$$

$$T_2 = m_v T_s \sin(\theta^*); \quad 0 \leq \theta^* < \pi/3 \quad (2)$$

$$T_0 = T_s - T_1 - T_2 \quad (3)$$

โดยที่  $m_v$  คือ ดัชนีการมอดูเลชันของวงจร VSI ซึ่งคืออัตราค่าแรงดันที่ขาออกวงจรต่อขาเข้าดังแสดงในสมการ (4)  $m_v$  มีค่าระหว่าง 0 กับ 1

$$m_v = |\hat{V}_{ac}| / V_{dc} \quad (4)$$

เมื่อได้เวกเตอร์สภาวะแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการเรียงลำดับการทำงานเวกเตอร์เพื่อให้การสวิตช์ซึ่งในวงจรเกิดขึ้นน้อยที่สุดทั้งภายในและระหว่างคาบการสวิตช์ซึ่งในทฤษฎีคือ มีเพียง 2 สวิตช์เท่านั้นที่มีการเปลี่ยนสภาวะการทำงานระหว่างเปิดกับปิด ไม่ว่าจะเป็นระหว่างการเปลี่ยนเวกเตอร์สภาวะหรือระหว่างคาบการสวิตช์ซึ่งทำให้ลำดับการสวิตช์ในแต่ละช่องระนาบในรูปที่ 2 นั้นแตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 3

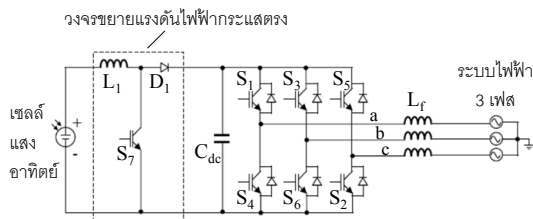
เพื่อให้มั่นใจว่าการลัดวงจรแหล่งจ่ายจะไม่เกิดขึ้น ผู้ออกแบบนิยมหน่วงเวลาสวิตช์ที่กำลังจะทำงานเป็นระยะเวลาหนึ่ง เรียกว่า dead time เพื่อให้มั่นใจว่าสวิตช์ในขาเดียวกันในวงจรจะไม่ทำงานพร้อมกัน เวลาที่หน่วงนี้จำเป็นต้องถูกชดเชยด้วยวิธีการใดวิธีการหนึ่ง มิฉะนั้นแล้ว อัตราการส่งผ่านพลังงานจะลดลง [25]

ตารางที่ 3 รูปแบบลำดับการสวิตช์สำหรับแต่ละช่องระนาบสำหรับ วงจร VSI ด้วยเทคนิค SPWM

ช่อง	เวกเตอร์และเวลา						
	$T_d/4$	$T_r/2$	$T_j/2$	$T_d/2$	$T_j/2$	$T_r/4$	
1	SV0	SV1	SV2	SV7	SV2	SV1	SV0
2	SV7	SV2	SV3	SV0	SV3	SV2	SV7
3	SV0	SV3	SV4	SV7	SV4	SV3	SV0
4	SV7	SV4	SV5	SV0	SV5	SV4	SV7
5	SV0	SV5	SV6	SV7	SV6	SV5	SV0
6	SV7	SV6	SV1	SV0	SV1	SV6	SV7

**2.2 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันร่วมกับวงจรขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (VSI + Boost)**

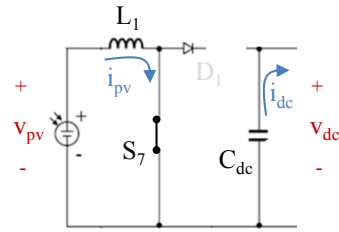
รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างวงจรแหล่งจ่ายแรงดันเมื่อมีการต่อวงจรขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (boost converter) รวมในวงจรเพื่อช่วยในการลดระดับแรงดันพิกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ต่ำลงดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยวงจรขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประกอบด้วย สวิตช์ ( $S_7$ ) ตัวเหนี่ยวนำ ( $L_1$ ) และ ไดโอด ( $D_1$ ) [8]



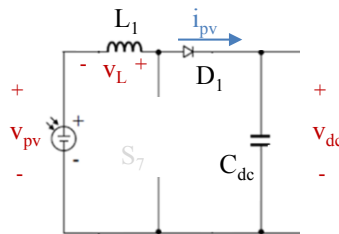
รูปที่ 4 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันร่วมกับวงจรขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (VSI+Boost)

วงจรนี้มีหลักการการทำงานเหมือนกับวงจรแหล่งจ่ายแรงดัน (VSI) ดังที่ได้บรรยายในหัวข้อ 2.1 ส่วนที่แตกต่างก็คือ วงจรนี้มีการเพิ่มวงจรขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (boost converter) เข้าไปด้วยเพื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีระดับเพียงพอและคงที่ โดยให้มีดัชนีการมอดูเลชันมีค่ามากที่สุด ( $m_v$  มีค่าใกล้เคียง 1) ซึ่งเป็นสภาวะที่วงจรส่งผ่านพลังงานด้วยระดับแรงดันและกระแสที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นจึงทำการส่งระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ปรับเพียงพอและคงที่แล้วนั้นให้กับวงจรแหล่งจ่ายแรงดัน VSI เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับต่อไป ในส่วนนี้จะนำเสนอเฉพาะการทำงานของวงจรขยายแรงดันไฟฟ้า

กระแสตรงเท่านั้น ซึ่งสามารถแบ่งการทำงานได้เป็น 2 สภาวะ คือ สภาวะที่สวิตช์ทำงานและสภาวะที่สวิตช์ไม่ทำงาน ซึ่งจากรูปที่ 4 สามารถแสดงการทำงานใน 2 สภาวะนี้ได้ดังแสดงในรูปที่ 5(ก) และ 5(ข) ตามลำดับ



(ก) สภาวะสวิตช์ทำงาน



(ข) สภาวะสวิตช์ไม่ทำงาน

รูปที่ 5 การทำงานของวงจรขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับ วงจร VSI+Boost

สมมุติให้เริ่มต้นตัวเก็บประจุ  $C_{dc}$  เก็บพลังงานไว้เต็ม จะได้ว่า แรงดันเริ่มต้นขณะเข้าสู่สภาวะสวิตช์ทำงาน 4(ก) กระแสจากเซลล์แสงอาทิตย์  $i_{pv}$  จะไหลผ่านสวิตช์  $S_7$  ทั้งหมด พร้อมสะสมพลังงานให้กับตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ในขณะที่ขาออกแรงดันจะมีค่าเท่ากับแรงดันของตัวเก็บประจุ ( $V_{dc} = V_{pv}$ ) เมื่อวงจรทำงานในสภาวะสวิตช์ไม่ทำงาน 4(ข) พลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  จะคายออกมาเทียบได้กับเป็นแหล่งแรงดันย่อยขึ้น  $V_L$  ทำให้แรงดันสุทธิด้านขาออก  $V_{dc}$  คือ ผลบวกของแรงดันจากแหล่งจ่ายกับแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ( $V_{dc} = V_{pv} + V_L$ ) ซึ่งถ้านำแรงดันขาออกทั้งสองสภาวะมาเฉลี่ยจะเห็นแรงดันขาออกจะมีค่ามากกว่าแรงดันขาเข้าเสมอ ซึ่งถ้ากำหนดให้  $T_{ON}$  เป็นเวลาที่สวิตช์ทำงานในช่วงคาบการสวิตช์  $T_{SB}$  ก็จะได้ว่า

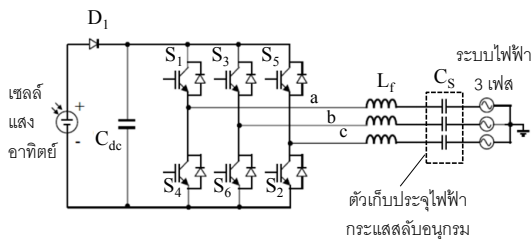
$$V_{dc} = \left( \frac{T_{SB}}{T_{SB} - T_{ON}} \right) V_{pv} \tag{5}$$

จากสมการ (5) เมื่อระดับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) เปลี่ยนแปลง หากปรับค่าเวลาการ

ทำงานของสวิตช์  $S_7$  ( $T_{ON}$ ) ให้เหมาะสม ก็จะสามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ ) ให้เพียงพอและคงที่สำหรับวงจรแหล่งจ่ายแรงดันเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับในขั้นตอนต่อไป

### 2.3 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับอนุกรม (VSI+SCaps)

รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างวงจรแหล่งจ่ายแรงดันร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับอนุกรม โดยวงจรนี้ได้เพิ่มตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับ ( $C_S$ ) โดยการต่ออนุกรมกับแต่ละเฟสของสายไฟฟ้านำออก [9]



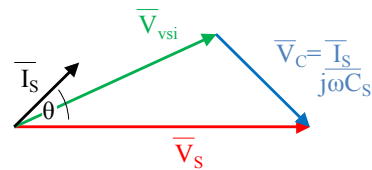
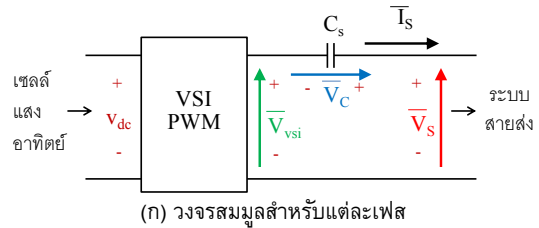
รูปที่ 6 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับอนุกรม (VSI+SCaps)

การทำงานของวงจรนี้อาศัยหลักการการทำงานจาก 2 ส่วนเช่นเดียวกับวงจร VSI+Boost คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ขยายแรงดัน และ ส่วนที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ แต่วงจร VSI+SCaps ไม่ได้ทำการขยายแรงดันที่ด้านขาเข้าเหมือนวงจร VSI+Boost แต่อย่างใด แต่กลับทำการขยายและปรับระดับแรงดันที่ด้านขาออก ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแทนโดยอาศัยการทำงานของตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับ ( $C_S$ )

เนื่องจากส่วนที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเป็นอุปกรณ์ชุดเดียวกับวงจร VSI ทำให้เทคนิคการแปลงสัญญาณ SPWM สามารถใช้กับวงจร VSI+SCaps ได้โดยตรง โดยวงจรจะทำงานที่  $m_v$  ใกล้เคียงกับ 1 เช่นเดียวกับ VSI+Boost เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานมากที่สุด ดังนั้นในหัวข้อนี้จะอธิบายหลักการปรับและลดทอนแรงดันที่ด้านขาออกของวงจร VSI โดยใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับ ( $C_S$ ) เท่านั้น

เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายและวิเคราะห์วงจร แต่ละเฟสของวงจร VSI+SCaps ด้านขาออกในรูปที่ 6 สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายได้ดังแสดงในรูปที่

7(ก) และจากรูป 7(ก) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแผนภาพเฟเซอร์ (phasor diagram) ได้ดังแสดงในรูปที่ 7(ข)



รูปที่ 7 วงจรสมมูลและแผนภาพเฟเซอร์สำหรับแต่ละเฟสของวงจร VSI+SCaps

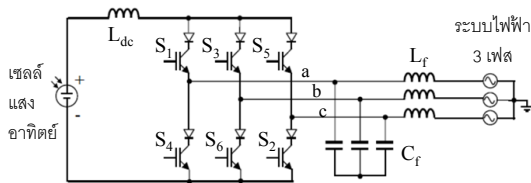
จากรูปที่ 7 จะเห็นว่า แอมพลิจูดของเฟเซอร์แรงดันเฟสของระบบสายส่ง ( $V_S$ ) เป็นผลรวมทางเวกเตอร์แรงดันขาออกวงจร VSI ( $V_{vsi}$ ) กับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_S$  ( $V_C$ ) โดยที่แอมพลิจูดของเฟเซอร์แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_S$  ( $V_C$ ) จะขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดและมุมของกระแสเฟสของระบบสายส่ง ( $I_S$ ) โดยมีเฟเซอร์ตามกระแสระบบสายส่งอยู่ 90 องศา ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$\bar{V}_C = \bar{I}_S \cdot \left( \frac{1}{j\omega C_S} \right) = -j \frac{\bar{I}_S}{\omega C_S} \quad (6)$$

จากหลักการที่กล่าวมาข้างต้นนี้ สามารถใช้ในการควบคุมแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ขาออกของวงจร VSI ( $V_{vsi}$ ) ในขณะที่รักษาแอมพลิจูดของแรงดันสายส่งให้คงที่และสูงกว่าแอมพลิจูดของแรงดันที่ขาออกของวงจร VSI ได้ด้วยการปรับมุมของกระแสขาออกบนสายส่ง ( $I_S$ ) ซึ่งโดยนัยคือ เป็นการปรับตัวประกอบกำลัง (power factor) ของระบบไฟฟ้าสามเฟสนั้นเอง ด้วยวิธีนี้ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ปรากฏที่วงจร VSI จึงมีระดับต่ำกว่าแรงดันที่ปรากฏที่สายส่ง ทำให้วงจร VSI และพิกัดแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่จำเป็นต้องทำงานที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าด้านกระแสสลับที่สูงอีกต่อไป

**2.4 วงจรแหล่งจ่ายกระแส (CSI)**

รูปที่ 8 แสดงโครงสร้างของวงจรแหล่งจ่ายกระแส วงจรประกอบไปด้วยสวิทช์ขั้วเล็กทรอนิกส์จำนวน 6 ตัว ( $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$  และ  $S_6$ ) เช่นเดียวกับวงจรแหล่งจ่ายแรงดัน แต่สวิทช์เหล่านี้ต่ออนุกรมกับไดโอดแทน ซึ่งมีผลทำให้กระแสไหลผ่านวงจรจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังระบบสายส่งได้เพียงทิศทางเดียว ทำให้ไม่ต้องใช้ไดโอดป้องกันกระแสย้อนกลับ ด้านขาเข้านิยมต่อตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ ( $L_{dc}$ ) เพื่อรักษาระดับกระแสให้มีความสม่ำเสมอและต่อเนื่อง ส่วนด้านขาออกต่อเข้ากับตัวกรองชนิด LC ( $C_f$  และ  $L_f$ ) เพื่อกรองกระแสและแรงดันด้านขาออกก่อนป้อนเข้าสู่ระบบสายส่ง [10]



รูปที่ 8 วงจรแหล่งจ่ายกระแส (CSI)

วงจรนี้ทำการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังระบบสายส่งในรูปของแหล่งจ่ายกระแส ดังนั้นระดับกระแสด้านเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นต้องสูงกว่าด้านระบบสายส่งเสมอ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ระดับแรงดันทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นต้องต่ำกว่าระดับแรงดันทางด้านระบบสายส่งเสมอ ซึ่งในทางทฤษฎีแล้ว ต้องไม่เกิน 0.866 เท่าของแรงดันยอดถึงยอดของแรงดันระบบสายส่ง และเนื่องจากวงจรทำงานในสภาวะแหล่งจ่ายกระแส การทำงานของสวิทช์ขั้วเล็กทรอนิกส์ในวงจรจำเป็นต้องไม่ก่อให้เกิดการเบียดวงจร (open circuit) ของแหล่งจ่ายกระแส มิฉะนั้นแล้ว แรงดันปริมาตรมหาศาลจะตกคร่อมสวิทช์ เกิดการเสียหายและสูญเสียการทำงานในที่สุด จากเงื่อนไขข้างต้นเมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 8 จะได้ว่า วงจรนี้สามารถมีสภาวะการทำงานของสวิทช์ที่ปลอดภัยได้เพียง 9 สภาวะเท่านั้น ได้แก่ ( $S_1S_2$ ) ( $S_3S_2$ ) ( $S_3S_4$ ) ( $S_5S_4$ ) ( $S_5S_6$ ) ( $S_1S_6$ ) ( $S_1S_4$ ) ( $S_3S_6$ ) และ ( $S_5S_2$ ) โดยที่ชื่อสวิทช์แทนสวิทช์ที่นำกระแสพร้อมกัน และเมื่อใช้หลักการของ SPWM จะได้ว่าสภาวะการทำงานเหล่านี้สามารถเปลี่ยนให้เป็นเวกเตอร์ที่มีคุณสมบัติดังตารางที่ 4 ซึ่งวางอยู่ในระบบแกนคาร์ทีเซียนได้ดังแสดงในรูปที่ 9

ด้วยหลักการเดียวกันกับที่กล่าวมาแล้วเกี่ยวกับการเลือกเวกเตอร์สภาวะโดยใช้เวกเตอร์อ้างอิง และเมื่อพิจารณาการสวิทช์ที่น้อยที่สุดระหว่างเปลี่ยนสภาวะการสวิทช์ซึ่งทั้งภายในและระหว่างคาบการสวิทช์ซึ่ง จะได้ว่าในทางทฤษฎีแล้วจะมีเพียง 2 สวิทช์ที่เปลี่ยนสภาวะการทำงานพร้อมกันเช่นเดียวกับ SPWM ที่ใช้ในวงจร VSI แต่เนื่องจากจำนวนสวิทช์เพียง 2 สวิทช์เท่านั้นที่ต้องทำงานในทุกช่วงสภาวะ (ดังแสดงในตารางที่ 4) ทำให้รอบการสวิทช์ซึ่งนั้นใช้เพียง 5 สภาวะในหนึ่งรอบ ซึ่งน้อยกว่าเมื่อใช้กับวงจร VSI ซึ่งใช้ 7 สภาวะ ดังสามารถสรุปรูปแบบลำดับการสวิทช์ที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 5 โดยที่ค่าตัวแปรสามารถคำนวณได้จากสมการ (7)-(10)

$$T_1 = m_i T_s \sin(\pi/3 - \theta^*); \quad 0 \leq \theta^* < \pi/3 \quad (7)$$

$$T_2 = m_i T_s \sin(\theta^*); \quad 0 \leq \theta^* < \pi/3 \quad (8)$$

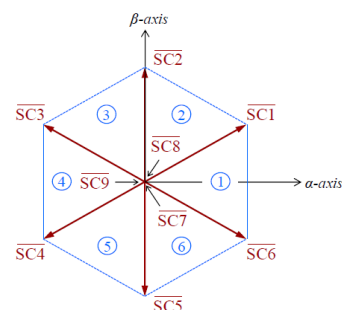
$$T_0 = T_s - T_1 - T_2 \quad (9)$$

$$m_i = |\hat{I}_{ac}| / I_{dc} \quad (10)$$

โดยที่  $m_i$  คือ ดัชนีการมอดูเลชันของวงจร CSI มีค่าระหว่าง 0 กับ 1

ตารางที่ 4 เวกเตอร์สภาวะด้วยเทคนิค SPWM สำหรับวงจร CSI

สภาวะ	ชื่อเวกเตอร์	แอมพลิจูด	$I_a$	$I_b$	$I_c$
( $S_1S_2$ )	<b>SC1</b>	$(2/3)*I_{dc}$	$+I_{dc}$	0	$-I_{dc}$
( $S_3S_2$ )	<b>SC2</b>	$(2/3)*I_{dc}$	0	$+I_{dc}$	$-I_{dc}$
( $S_3S_4$ )	<b>SC3</b>	$(2/3)*I_{dc}$	$-I_{dc}$	$+I_{dc}$	0
( $S_5S_4$ )	<b>SC4</b>	$(2/3)*I_{dc}$	$-I_{dc}$	0	$+I_{dc}$
( $S_5S_6$ )	<b>SC5</b>	$(2/3)*I_{dc}$	0	$-I_{dc}$	$+I_{dc}$
( $S_1S_6$ )	<b>SC6</b>	$(2/3)*I_{dc}$	$+I_{dc}$	$-I_{dc}$	0
( $S_1S_4$ )	<b>SC7</b>	0	0	0	0
( $S_3S_6$ )	<b>SC8</b>	0	0	0	0
( $S_5S_2$ )	<b>SC9</b>	0	0	0	0



รูปที่ 9 ตำแหน่งของเวกเตอร์บนระนาบคาร์ทีเซียนสำหรับวงจร CSI ด้วยเทคนิคการสร้างสัญญาณแบบ SPWM

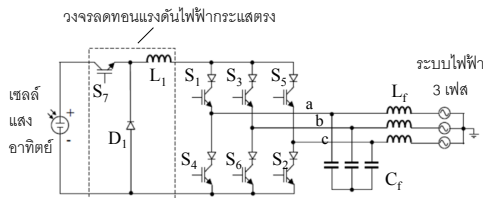
ตารางที่ 5 รูปแบบลำดับการสวิตช์สำหรับแต่ละช่องระนาบสำหรับ วงจร CSI ด้วยเทคนิค SPWM

ช่อง	เวกเตอร์และเวลา			
	$T_0/2$	$T_1$	$T_2$	$T_0/2$
1	SC7	SC6	SC1	SC7
2	SC8	SC1	SC2	SC8
3	SC9	SC2	SC3	SC9
4	SC7	SC3	SC4	SC7
5	SC8	SC4	SC5	SC8
6	SC9	SC5	SC6	SC9

เพื่อให้มั่นใจว่าการเปิดวงจร (open circuit) ของ แหล่งจ่ายในวงจร CSI จะไม่เกิดขึ้น ผู้ออกแบบนิยม หน่วงเวลาสวิตช์ที่กำลังจะหยุดทำงาน (off) ออกไปเป็น ระยะเวลาหนึ่ง เรียกว่า overlap time ทั้งนี้เพื่อให้สวิตช์ ส่งผ่านกระแสจากขั้วบวกของเซลล์แสงอาทิตย์ถึงขั้วลบ ของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม เวลาที่ ใช้หน่วงสวิตช์นี้จำเป็นต้องถูกชดเชยด้วยวิธีการใด วิธีการหนึ่ง มิฉะนั้นแล้ว อัตราการส่งผ่านพลังงานจะ ลดลง หรืออาจลดคุณภาพของสัญญาณขาออกได้ [26]

### 2.5 วงจรแหล่งจ่ายกระแสร่วมกับวงจรลดทอน แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (CSI+Buck)

รูปที่ 10 แสดงโครงสร้างวงจรแหล่งจ่ายกระแสเมื่อมี การต่อวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (buck converter) ร่วมในวงจรเพื่อช่วยในการเพิ่มระดับแรงดัน พิกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้น โดยวงจรลดทอน แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประกอบด้วย สวิตช์ ( $S_7$ ) ตัว หนึ่งเหนี่ยวนำ ( $L_1$ ) และ ไดโอด ( $D_1$ ) [12]

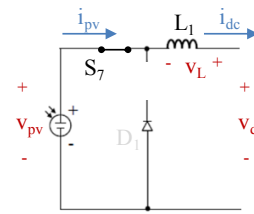


รูปที่ 10 วงจรแหล่งจ่ายกระแสร่วมกับวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง (CSI+Buck)

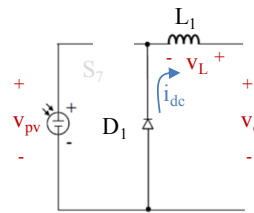
ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นเนื่องจากวงจรแหล่งจ่าย กระแสอาจไม่สามารถใช้งานได้เมื่อพิกัดแรงดันของเซลล์ แสงอาทิตย์มีขนาดเกิน 0.866 เท่าของค่าขั้วต่อถึงขั้วต่อ แรงดันระบบสายส่ง ปัญหานี้อาจแก้ไขได้ด้วยการนำวงจร ลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (buck converter) มาใช้ ร่วมด้วย เนื่องจากวงจรนี้สามารถปรับระดับแรงดันไฟฟ้า

กระแสตรงจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่สูงเกินขีดความสามารถ ของวงจร CSI ให้ต่ำลงมาอยู่ในช่วงที่วงจร CSI ทำงาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด คือ เมื่อดัชนีการมอดูเลชัน ( $m$ ) มีค่าใกล้เคียงกับ 1

ด้วยเหตุนี้ หลักการการสวิตช์ซึ่งวงจรแหล่งจ่าย กระแส (CSI) ในหัวข้อ 2.4 จึงสามารถใช้งานกับวงจร CSI+Buck ได้โดยตรง ในส่วนนี้จะนำเสนอเฉพาะการ ทำงานของวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 สภาวะ คือ สภาวะที่สวิตช์ ทำงานและสภาวะที่สวิตช์ไม่ทำงาน ซึ่งจากรูปที่ 10 สามารถแสดงการทำงานใน 2 สภาวะนี้ได้ดังแสดงในรูปที่ 11(ก) และ 11(ข) ตามลำดับ



(ก) สภาวะสวิตช์ทำงาน



(ข) สภาวะสวิตช์ไม่ทำงาน

รูปที่ 11 การทำงานของวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับวงจร CSI+Buck

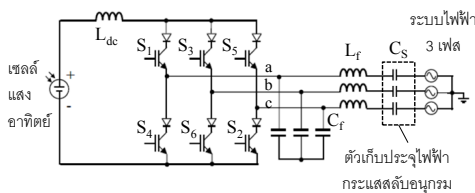
สมมติให้เริ่มต้นตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ไม่มีพลังงานสะสม เมื่อเข้าสู่การทำงานสภาวะสวิตช์ทำงาน 11(ก) กระแส จากเซลล์แสงอาทิตย์ ( $i_{pv}$ ) จะไหลผ่านสวิตช์  $S_7$  ทั้งหมด พร้อมสะสมพลังงานให้กับตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ในขณะที่ แรงดันขาออกจะมีค่าลดลงเนื่องจากต้องแบ่งแรงดันกับ แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  เมื่อวงจรทำงานใน สภาวะสวิตช์ไม่ทำงาน (รูปที่ 11(ข)) พลังงานที่สะสมอยู่ ในตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  จะคายออก ทำให้แรงดันสุทธิด้านขา ออก ( $V_{dc}$ ) มีขนาดแรงดันประมาณเท่ากับแรงดันตกคร่อม ตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  เท่านั้น ด้วยเหตุนี้แรงดันเฉลี่ยด้านขา ออกจึงมีขนาดน้อยกว่าแรงดันด้านขาเข้าเสมอ ซึ่งถ้า กำหนดให้  $T_{OFF}$  เป็นเวลาที่สวิตช์ไม่ทำงานในช่วงคาบ การสวิตช์  $T_{SB}$  ก็จะได้ว่า

$$V_{dc} = \left( \frac{T_{SB} - T_{OFF}}{T_{SB}} \right) V_{pv} \quad (11)$$

จากสมการ (11) เมื่อระดับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) เปลี่ยนแปลง หากปรับค่าเวลาการหยุดทำงานของสวิตช์  $S_7$  ( $T_{OFF}$ ) ให้เหมาะสม ก็จะสามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ ) ให้เพียงพอและคงที่สำหรับวงจรแหล่งจ่ายกระแสเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับในขั้นตอนต่อไปได้

### 2.6 วงจรแหล่งจ่ายกระแสร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับอนุกรม (CSI+SCaps)

รูปที่ 12 แสดงโครงสร้างวงจรแหล่งจ่ายกระแสร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับอนุกรม โดยวงจรนี้ได้เพิ่มตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับ ( $C_s$ ) โดยการต่ออนุกรมกับแต่ละเฟสของสายไฟฟ้านำออก [13]



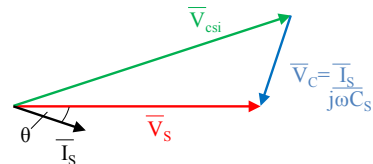
รูปที่ 12 วงจรแหล่งจ่ายกระแสร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับอนุกรม (CSI+SCaps)

หลักการการทำงานของวงจรนี้มีลักษณะคล้ายกับวงจร VSI+SCaps คือ อาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับและส่วนที่เปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับสำหรับวงจร CSI+SCaps คือ วงจรแหล่งจ่ายกระแส (CSI) และส่วนที่เปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับคือตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับอนุกรม โดยตัวเก็บประจุดังกล่าวทำหน้าที่เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้สูงขึ้นกว่าปกติเพื่อให้วงจร CSI สามารถทำงานกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าพิกัดแรงดันสูงขึ้นได้

เนื่องจากส่วนที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเป็นอุปกรณ์ชุดเดียวกับวงจร CSI ทำให้เทคนิคการแปลงสัญญาณด้วยเทคนิค SPWM ที่อธิบายในหัวข้อ 2.4 สามารถใช้สำหรับวงจร CSI+SCaps ได้โดยตรง โดยวงจรจะทำงานที่  $m$ , ใกล้เคียงกับ 1 เช่นเดียวกับ CSI+Buck เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการ

ส่งผ่านพลังงานมากที่สุด ดังนั้นในหัวข้อนี้จะอธิบายหลักการปรับและขยายแรงดันที่ด้านขาออกของวงจร CSI โดยใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับ ( $C_s$ ) เท่านั้น

ด้วยเทคนิคเดียวกับที่ใช้ในการควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับวงจร VSI+SCaps สามารถใช้กับวงจร CSI+SCaps ได้โดยตรง แต่มีข้อแตกต่างคือการปรับค่ามุมของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับวงจร CSI+SCaps จะทำในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับวงจร VSI+SCaps ซึ่งสามารถแสดงด้วยเฟเซอร์ไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 13 ได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเฟเซอร์ไดอะแกรมของวงจร VSI+SCaps ในรูปที่ 7(ข) จะเห็นว่า เพื่อให้ระดับแรงดันไฟฟ้านำออกจาก CSI ( $V_{csi}$ ) สูงขึ้น ตัวประกอบกำลังสำหรับวงจร CSI+SCaps จะเป็นแบบล่าหลัง (lagging) ในขณะที่สำหรับวงจร VSI+SCaps จะเป็นแบบนำหน้า (leading)

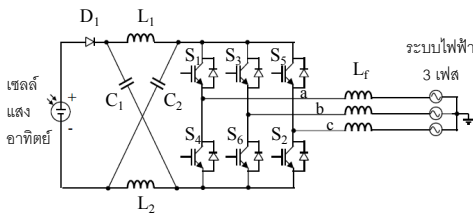


รูปที่ 13 แผนภาพเฟเซอร์ไดอะแกรมแสดงการทำงานสำหรับแต่ละเฟสของวงจร CSI+SCaps

### 2.7 วงจรแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ชนิดป้อนแรงดัน (ZSI-VF)

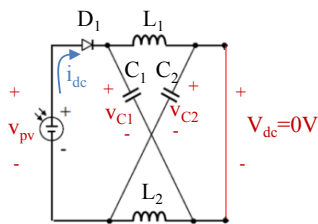
รูปที่ 14 แสดงโครงสร้างวงจรแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ชนิดป้อนแรงดัน วงจรมีลักษณะคล้ายกับวงจรแหล่งจ่ายแรงดัน (VSI) ส่วนที่แตกต่างคือ ด้านขาเข้าของวงจรมีวงจรที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ ( $L_1$  และ  $L_2$ ) ตัวเก็บประจุ ( $C_1$  และ  $C_2$ ) และไดโอด ( $D_1$ ) เรียกว่า วงจรอิมพีแดนซ์ (Impedance or Z circuit) ซึ่งเป็นวงจรหลักที่สร้างกลไกการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาออกสำหรับวงจร [14]

วงจร ZSI-VF มีการทำงานอยู่ 2 สภาวะด้วยกันคือ สภาวะเมื่อระดับแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์สูงเพียงพอและสภาวะเมื่อระดับแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์สูงไม่เพียงพอ ในสภาวะแรกเมื่อระดับแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์เพียงพอวงจรจะทำงานในสภาวะเช่นเดียวกับ



รูปที่ 14 วงจรแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ชนิดบ่อนแรงดัน (ZSI-VF)

วงจร VSI ทุกประการ แต่ถ้าระดับแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์สูงไม่เพียงพอ วงจรจะทำงานในสภาวะพิเศษคือ ทำงานในสภาวะลัดวงจรไฟฟ้าด้านขาออก (shoot-through) ซึ่งเป็นสภาวะต้องห้ามสำหรับวงจร VSI โดยทั่วไป แต่เนื่องจากวงจร ZSI-VF มีวงจรอิมพีแดนซ์ทางด้านขาเข้าไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งทำหน้าที่ชะลอการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของกระแสไฟฟ้าในวงจรลง ในขณะที่ทำการขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สูงขึ้นภายในวงจรอิมพีแดนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 การทำงานของวงจร ZSI-VF ในขณะทำงานในสภาวะ Shoot-Through

ตารางที่ 6 เวกเตอร์สภาวะลัดวงจร (Shoot-Through) สำหรับวงจร ZSI-VF ด้วยเทคนิค SPWM

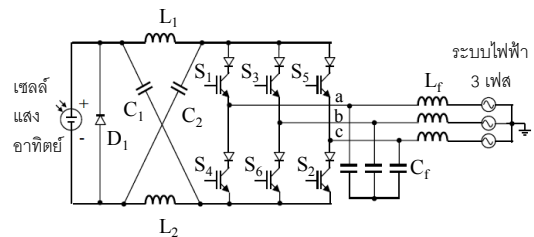
ชื่อเวกเตอร์	สภาวะสวิตช์ (1=ON, 0=OFF)						เฟสที่ลัดวงจร
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	
ST01	1	1	0	1	0	1	a
ST02	0	1	1	1	0	1	b
ST03	0	1	0	1	1	1	c
ST04	1	0	1	1	1	0	a
ST05	1	1	1	0	1	0	b
ST06	1	0	1	0	1	1	c
ST07	1	1	1	0	0	1	a, b
ST08	1	1	1	1	0	0	b, c
ST09	0	1	1	1	1	0	c, a
ST10	0	0	1	1	1	1	a, b
ST11	1	0	0	1	1	1	b, c
ST12	1	1	0	0	1	1	c, a
ST13	1	1	1	1	1	1	a, b, c

ซึ่งระดับแรงดันที่สามารถปรับขยายขึ้นนั้น ( $V_{dc}$ ) จะอยู่กับระยะเวลาที่ทำการลัดวงจรระบบ ( $T_{ST}$ ) ด้วยเวกเตอร์สภาวะ shoot-through ซึ่งแทรกอยู่ระหว่างการทำงานของเวกเตอร์ศูนย์ ( $T_0$ ) เพื่อไม่ให้มีผลกระทบกับค่าดัชนีการมอดูเลชัน โดยเวกเตอร์สภาวะลัดวงจรแสดงในตารางที่ 6 โดยมีระดับการขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังแสดงในสมการ (12)

$$V_{dc} = \left( \frac{T_S}{T_S - 2T_{ST}} \right) V_{pv} \quad (12)$$

## 2.8 วงจรแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ชนิดบ่อนกระแส (ZSI-CF)

รูปที่ 16 แสดงโครงสร้างวงจรแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ชนิดบ่อนกระแส โครงสร้างหลักของวงจรมีลักษณะคล้ายกับวงจรแหล่งจ่ายกระแส (CSI) ส่วนที่แตกต่างคือ ด้านขาเข้าของวงจรมีวงจรที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ ( $L_1$  และ  $L_2$ ) ตัวเก็บประจุ ( $C_1$  และ  $C_2$ ) และไดโอด ( $D_1$ ) เรียกว่า วงจรอิมพีแดนซ์ (Impedance or Z circuit) ซึ่งเป็นวงจรหลักที่สร้างกลไกการลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาเข้าสำหรับวงจรแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ชนิดบ่อนกระแสเมื่อต้องการ [14]

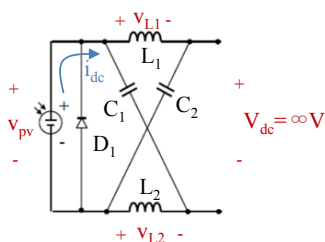


รูปที่ 16 วงจรแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ชนิดบ่อนกระแส (ZSI-CF)

หลักการการทำงานของวงจร ZSI-CF มีลักษณะคล้ายกับวงจร ZSI-VF คือ ประกอบไปด้วย 2 สภาวะ คือ สภาวะเมื่อระดับแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์มีระดับที่เพียงพอไม่เกินขีดจำกัด (มากกว่า 0.866 เท่าของค่ายอดถึงยอดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาออก) ของวงจร CSI ซึ่งเป็นวงจรหลักในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับในวงจร ZSI-CF และ สภาวะเมื่อระดับแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์เกินขีดจำกัดของวงจร CSI

ในสภาวะแรกเมื่อระดับแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่เกินขีดจำกัดวงจร CSI วงจร ZSI-CF จะทำงานในสภาวะเช่นเดียวกับวงจร CSI ทุกประการ ด้วยวิธีการ

สร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับดังอธิบายในหัวข้อ 2.4 แต่เมื่อระดับแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์เกินขีดจำกัดของวงจร CSI วงจร ZSI-CF จะทำงานในสภาวะพิเศษคือทำงานในสภาวะเปิดวงจรไฟฟ้าด้านขาออก (open circuit) ซึ่งแท้จริงแล้วเป็นสภาวะต้องห้ามสำหรับวงจร CSI แต่เนื่องจากวงจร ZSI-CF มีวงจรอิมพีแดนซ์ทางด้านขาเข้าไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งทำหน้าที่ชะลอการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของแรงดันไฟฟ้าขณะเกิดการเปิดวงจร ในขณะที่ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงลดลงภายในวงจรอิมพีแดนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 การทำงานของวงจร ZSI-CF ในขณะที่ทำงานในสภาวะ Open-Circuit

ซึ่งระดับแรงดันที่สามารถปรับลดลงนั้น ( $V_{dc}$ ) จะอยู่กับระยะเวลาที่ทำการเปิดวงจรระบบ ( $T_{oc}$ ) ด้วยเวกเตอร์สภาวะ open-circuit ซึ่งแทรกอยู่ระหว่างการทำงานของเวกเตอร์ศูนย์ ( $T_0$ ) เพื่อไม่ให้มีผลกระทบกับค่าดัชนีการมอดูเลชัน โดยเวกเตอร์สภาวะเปิดวงจรนี้แสดงในตารางที่ 7 โดยมีระดับการขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังแสดงในสมการ (13)

$$V_{dc} = \left( \frac{T_s - 2T_{oc}}{T_s} \right) V_{pv} \quad (13)$$

ตารางที่ 7 เวกเตอร์สภาวะเปิดวงจร (Open-Circuit) สำหรับวงจร ZSI-CF ด้วยเทคนิค SPWM

ชื่อเวกเตอร์	สภาวะสวิตช์ (1=ON, 0=OFF)						เฟสที่ล้ดวงจร
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	
OC01	1	0	0	0	0	0	a
OC02	0	1	0	0	0	0	b
OC03	0	0	1	0	0	0	c
OC04	0	0	0	1	0	0	a
OC05	0	0	0	0	1	0	b
OC06	0	0	0	0	0	1	c
OC07	0	0	0	0	0	0	a, b

### 3. เปรียบเทียบสมรรถนะและประสิทธิภาพ

เพื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะและประสิทธิภาพระหว่างวงจร แต่ละวงจรได้ถูกทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยแต่ละวงจรสามารถมีระดับแรงดันและกระแสที่แตกต่างกันเพื่อความเหมาะสมสำหรับการทำงานของแต่ละวงจร แต่ทุกวงจรถูกกำหนดให้ทำงานที่สภาวะเดียวกันคือ บ่อนกำลังไฟฟ้าสูงสุดขนาด 16 kW จากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อบ่อนเข้าระบบไฟฟ้าสามเฟสขนาด 415V 50 Hz ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลเปรียบเทียบสมรรถนะและประสิทธิภาพระหว่างวงจรที่นำเสนอ

หัวข้อเปรียบเทียบ	วงจร							
	VSI	VSI+ Boost	VSI+ SCaps	CSI	CSI+ Buck	CSI+ SCaps	ZSI-VF	ZSI-CF
จำนวนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่ำสุด (ตัว)	13	14	13	6	8	6	14	7
พื้นที่สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ C และ L (pu)	0.44	0.71	0.60	0.16	0.15	0.22	1.00	0.12
คุณภาพสัญญาณขาเข้า (% ripple กระแส)	1.9	17.4	1.5	12.4	3.0	10.0	16.6	7.8
คุณภาพสัญญาณขาออก (%THD กระแส)	14.2	11.9	10.1	4.2	3.8	3.0	7.4	3.2
ตัวประกอบกำลังสัญญาณขาออก (no unit)	1.0	1.0	0.84	1.0	1.0	0.79	1.0	1.0
ความเครียดแรงดันสูงสุดต่อสวิตช์ (kV)	0.93	0.70	0.62	0.75	0.66	0.59	0.72	1.21
ความเครียดกระแสสูงสุดต่อสวิตช์ (A)	31.0	31.3	31.2	40.1	31.8	39.6	59.8	37.0
ประสิทธิภาพวงจรเมื่อทำงานที่พ้กัก (%)	97.2	96.2	96.9	96.3	95.8	96.6	94.6	92.0

จากข้อมูลในตารางที่ 8 จะเห็นว่า

1) เมื่อเปรียบเทียบจำนวนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในวงจรแล้ว วงจร CSI และวงจรประกอบของ CSI จะมีจำนวนอุปกรณ์น้อยกว่า (6-8 ตัว) เมื่อเทียบกับวงจรแบบ VSI (13-14 ตัว) ทั้งนี้เนื่องจากไดโอดที่ต่อแบบอนุกรมกับสวิตช์อาจไม่จำเป็นต้องใช้ เพราะอาจใช้สวิตช์จำพวก reverse-blocking แทนได้ซึ่งสวิตช์ชนิดนี้มีไดโอดอนุกรมภายในตัวอยู่แล้ว

2) วงจร ZSI-CF ต้องการพื้นที่ติดตั้งอุปกรณ์จำพวก L และ C ในวงจรน้อยที่สุด (0.12 pu) และวงจรประกอบของวงจร CSI ต้องการพื้นที่ติดตั้งอุปกรณ์จำพวก L และ C ในวงจรน้อย กว่าเมื่อเทียบกับวงจร

ประกอบของ VSI (0.15-0.22 pu เทียบกับ 0.44 -1.0 pu) ทั้งนี้เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้วเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายกระแส ทำให้วงจรจำพวก CSI ต้องการตัวกรองกระแสที่ทำจาก L และ C ขนาดเล็กกว่าแบบ VSI ซึ่งทำให้ขนาดของชุดแปลงผันแบบ CSI มีขนาดเล็กกว่าแบบ VSI

3) ด้านคุณภาพสัญญาณ โดยภาพรวมแล้วที่ขนาดตัวกรองสัญญาณใกล้เคียงกัน วงจรที่มีตัวเก็บประจุอนุกรม ซึ่งได้แก่ วงจร VSI+SCaps และ CSI+SCaps ให้คุณภาพสัญญาณทั้งขาเข้าและขาออกที่ดีขึ้น (ประมาณ 20-30%) เมื่อเทียบกับวงจร VSI และ CSI ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากตัวเก็บประจุดังกล่าวทำหน้าที่เป็นตัวกรองเสริมให้กับวงจรด้วย อย่างไรก็ตาม การมีตัวเก็บประจุอนุกรมด้านขาออกของวงจรจะทำให้ตัวประกอบกำลัง (power factor) ที่สัญญาณขาออกมีค่าต่ำลงเมื่อเทียบกับวงจรอื่น ๆ (0.79-0.84 เมื่อเทียบกับ 1.0) ส่วนวงจร CSI+Buck เป็นวงจรให้คุณภาพสัญญาณดีทั้งขาเข้าและขาออกเทียบกับวงจรอื่น ๆ ทั้งหมด เมื่อพิจารณาโดยภาพรวมแล้ว จะพบว่าวงจร CSI และวงจรประกอบของ CSI ให้คุณภาพสัญญาณขาออกที่ดีกว่าวงจร VSI และวงจรประกอบของ VSI (THD= 3.0 - 4.2% เทียบกับ 7.4 -14.2%)

4) วงจร ZSI-CF มีค่าความเครียดแรงดันต่อสวิตช์สูงสุด (1.21 kV) ในขณะที่วงจร ZSI-VF มีค่าความเครียดกระแสต่อสวิตช์สูงสุด (59.8A) ซึ่งคิดเป็นเกือบ 2 เท่า เมื่อเทียบกับวงจรอื่น ๆ ที่สภาวะส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากวงจรทั้งสองทำงานในสภาวะต้องห้ามของวงจร CSI และวงจร VSI (สภาวะ open-circuit และ สภาวะ shoot-through ตามลำดับ) ทำให้การประยุกต์ใช้วงจรแบบอิมพีแดนซ์จำเป็นต้องใช้สวิตช์ที่มีขนาดพิกัดแรงดันและกระแสที่สูงกว่าปกติ ทำให้อาจมีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นได้ วงจรที่มีส่วนประกอบของตัวเก็บประจุอนุกรม (VSI+SCaps และ CSI+SCaps) กลับส่งผลให้วงจรมีค่าความเครียดแรงดันต่อสวิตช์ที่มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับวงจร VSI และ CSI ตามลำดับ คิดเป็น 21- 33% โดยประมาณ ทั้งนี้เนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุอนุกรมดังกล่าวจะทำให้หน้าที่ปรับระดับแรงดันไฟฟ้าในระหว่างการเชื่อมต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากเซลล์แสงอาทิตย์และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของระบบสายส่งให้มีค่าที่เหมาะสมตลอดเวลา

5) ประสิทธิภาพเมื่อประมาณจากความสูญเสียที่เกิดจากสารกึ่งตัวนำภายในวงจร เมื่อทำงานที่ค่าพิกัด จะพบว่า วงจร VSI เป็นวงจรที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (97.2%) โดยวงจรชนิด VSI โดยภาพรวมมีประสิทธิภาพสูงกว่า วงจรชนิด CSI (94.6-97.2% เทียบกับ 92.0-96.6%) โดยวงจร CSI+SCaps มีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเทียบกับวงจรชนิด CSI ด้วยตัวเอง โดยวงจรอิมพีแดนซ์ (ZSI-VF และ ZSI-CF) มีประสิทธิภาพต่ำกว่าวงจรชนิดอื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากวงจรทั้งสองมีค่าความสูญเสียกำลังงานเนื่องจากการสวิตช์ของสวิตช์ที่ระดับแรงดันหรือกระแสยอด (ความเครียดแรงดันหรือกระแส) ที่สูงกว่า วงจรอื่นๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

#### 4. สรุป

บทความนี้ได้รวบรวมวงจรแปลงผันพลังงานเซลล์อาทิตย์สำหรับบ่อนกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบไฟฟ้าสายส่งกำลังสามเฟส วงจรที่รวบรวมและนำเสนอเป็นวงจรชนิดไม่มีหม้อแปลง โดยวงจรที่นำเสนอได้คัดเลือกมาจากวงจรทั้งหมดที่มีใช้งานอยู่จริงและที่ปรากฏในงานวิจัยต่าง ๆ ในปัจจุบันรวมทั้งสิ้น 8 วงจร ได้แก่ วงจรแหล่งจ่ายแรงดัน วงจรแหล่งจ่ายแรงดันร่วมกับวงจรขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรแหล่งจ่ายแรงดันร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรแหล่งจ่ายกระแส วงจรแหล่งจ่ายกระแสร่วมกับวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรแหล่งจ่ายกระแสร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ชนิดบ่อนแรงดัน และวงจรแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ชนิดบ่อนกระแส บทความได้นำเสนอในส่วนของโครงสร้างวงจรและหลักการทํางาน พร้อมทั้งผลเปรียบเทียบสมรรถนะและประสิทธิภาพของวงจรด้วย

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณ ห้องวิจัยพลังงานรังสีอาทิตย์และแหล่งพลังงานสำรอง และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ซึ่งเป็นผู้สนับสนุนอุปกรณ์และอำนวยความสะดวกในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Goldberg, A.F. and Schlecht, M.F. 1992. The relationship between size and power dissipation in a 1-10 MHz transformers. *IEEE transactions on Power Electronics*, vol. 7, 1992:63-64.
- [2] Kjaer, S.B. Pedersen, J.K. and Blaabjerg, F. 2005. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. *IEEE transactions on Industrial Applications*, vol. 41, issue 5, 2005:1292-1306.
- [3] Hurley, W.G. Wolfe, W.H. and Breslin, J.G. 1998. Optimized transformer design: inclusive of high frequency effects. *IEEE transactions on Power Electronics*, vol. 13, issue 4, 1998:651-659.
- [4] Teodorescu, R. 2007. Grid converters for photovoltaic and wind power systems. John Wiley, USA.
- [5] Gonzalez, R. Lopez, J. Sanchis, P. and Marroyo, L. 2007. Transformerless inverter for single-phase photovoltaic systems, *IEEE transactions on Power Electronics*, vol. 22, issue 2, 2007: 693-697.
- [6] Kerekes, T. Liserre, M. Teodorescu, R. Klumpner, C. and Sumner, M. 2009. Evaluation of three phase transformerless photovoltaic inverter topologies, *IEEE transactions on Power Electronics*, vol. 24, issue 9, 2009:2202-2211.
- [7] Photong, C. Klumpner, C. and Wheeler, P. 2010. Evaluation of single stage power converter topologies for grid-connected photovoltaic, *IEEE Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2010:1161-1168.
- [8] Luque, A. L. 2011. Handbook of photovoltaic science and engineering. John Wiley, USA.
- [9] Photong, C. and Niwat, A. 2013. More efficient power inverters for large DC voltage variation sources using series AC capacitors. The proceeding of Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being conference (STISWB 2013), 4-6 September 2013, Luang Prabang, Lao PDR.
- [10] Bernet, S and et al. 1996. A matrix converter using reverse blocking NPT-IGBTs and optimized pulse patterns. *IEEE proceeding of Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, vol. 1, 1996:107-113.
- [11] Klumpner, C. 2007. A new single-stage current source inverter for photovoltaic and fuel cell applications using reverse blocking IGBTs. *IEEE proceeding of Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, 2007:1683-1689.
- [12] Photong, C. 2013. A current source inverter with series AC capacitors for transformerless grid-tied photovoltaic applications. Thesis, The University of Nottingham, Nottingham, UK.
- [13] Klumpner, C. Photong, C. and Wheeler, P. 2009. A more efficient current source inverter with series connected ac capacitors for photovoltaic and fuel cell applications. *Proceeding of PCIM Europe Conference*, Germany, 2009.
- [14] Peng, F.Z. 2002. Z-source inverter. *IEEE proceeding of Industry applications (IAS)*, vol.2, 2002:775-781.
- [15] Peng, F.Z. and et al. 2005. Maximum boost control of the Z-source inverter. *IEEE transactions on Power Electronics*, vol. 20, 2005:833-838.
- [16] Miaosen, S. and et al. 2006. Constant boost control of the Z-source inverter to minimize current ripple and voltage stress. *IEEE transactions on Industry Applications*, vol. 42, 2006:770-778.
- [17] Holmes, D.G. and Lipo, T.A. 2003. Pulse width modulation for power converters: principles and practice. Hoboken, John Wiley, 2003.

- [18] Holtz, J. 1992. Pulse width modulation-a survey. IEEE transactions on Industrial Electronics, vol. 39, 1992:410-420.
- [19] Holmes, D.G. 1996. The significance of zero space vector placement for carrier-based PWM schemes. IEEE transactions on Industry Applications, vol. 32, 1996:1122-1129.
- [20] Boost, M.A. and Ziogas, P.D. 1988. State-of-the-art carrier PWM techniques: a critical evaluation. IEEE transactions on Industry Applications, vol. 24, 1988:271-280.
- [21] Sahali, Y. and Fellah, M.K. 2003. Selective harmonic eliminated pulse-width modulation technique (SHE PWM) applied to three-level inverter/converter. IEEE Symposium on Industrial Electronics (ISIE), vol. 2, 2003:1112-1117.
- [22] Rashid, M.H. 2004. Power Electronics: circuits, devices, and applications. Upper Saddle River, Pearson Education, USA.
- [23] Park, R.H. 1929. Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part I. Transaction of American Institute of Electrical Engineers, vol. 48, 1929:716-727.
- [24] Kron, G. 1938. The application of tensors to the analysis of rotating electrical machinery. Schenectady, General Electric Review, USA.
- [25] Lihua, C. and Peng, F.Z. 2008. Dead time elimination for voltage source inverters. IEEE transactions on Power Electronics, vol. 23, 2008:574-580.
- [26] Halkosaari, T. and et all. 2001. Effect of nonidealities on the performance of the 3-phase current source PWM converter. IEEE conference of Power Electronics Specialists Conference (PESC), vol. 2, 2001:654-659.