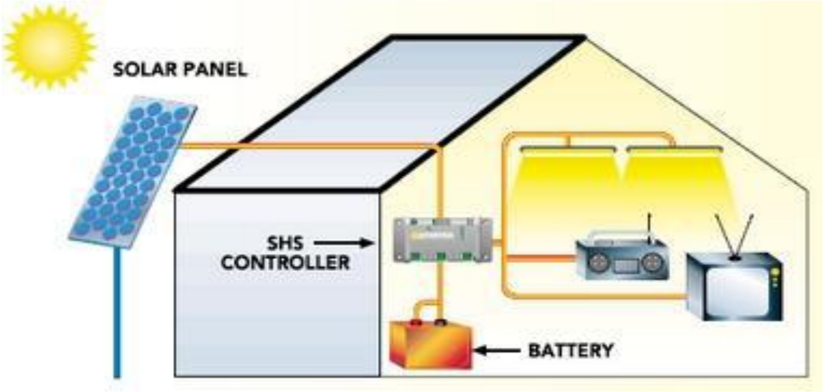
รูปของความร้อนและแสง พลังงานที่ได้เป็นพลังงานปฐมภูมิ ที่สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานชนิดอื่นๆ ต่อไปอีกหลายชนิดได้แก่ การเกิดพลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานจากมหาสมุทรรวมถึงการเกิดพลังงานจากฟอสซิล (Fossil) เช่น ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซชีวภาพ ชีวมวลต่างๆ ซึ่งพลังงานเหล่านี้ก็เกิดมาจากสัตว์ และพืช ซึ่งเมื่อพืช สัตว์ได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์แล้ว ก็ทำการสร้างเซลล์ สร้างเนื้อเยื่อโดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง (Photo synthesis) แล้วทับถมเป็นระยะเวลานานหลายล้านปี การนำพลังงานจากฟอสซิลมาใช้งาน ในระยะเวลานาน ก็จะก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมของโลกมากมาย เนื่องจากมีการปลดปล่อยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ กลับคืนสู่บรรยากาศของโลก พลังงานจากดวงอาทิตย์ที่มนุษย์ใช้งานนั้นเป็นไปแบบที่ค่อยไม่รู้สึกตัวว่ามีการใช้พลังงานอยู่ตลอดเวลา เช่น แสงสว่าง พลังงานความร้อน ซึ่งหากปราศจากพลังงานจากดวงอาทิตย์แล้ว มนุษย์ สัตว์ และพืช ก็จะดำรงชีพอยู่ไม่ได้ ดังนั้นการนำพลังงานที่ได้จากดวงอาทิตย์มาใช้งานโดยตรง ได้แก่ พลังงานลม พลังงานน้ำ และแสงอาทิตย์ จึงเป็นวิธีการที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด สามารถใช้งานได้ทุกๆที่ สะดวก รวดเร็ว ไม่มีมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม มนุษย์มีการนำมาใช้ตั้งแต่โบราณกาลนานมาแล้ว เมื่อโลกมีการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมากขึ้น ก็มีการค้นพบพลังงานใหม่ๆ อีกมากมายหลายชนิด พลังงานไฟฟ้าก็เป็นพลังงานชนิดหนึ่งที่มีประโยชน์มากมาย สามารถทำการควบคุม การส่งกระจายไปในระยะไกลๆได้ สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบของพลังงาน จากรูปแบบหนึ่งเป็นอีกรูปแบบหนึ่งได้ง่าย เช่น การเปลี่ยนจากพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน และการ เปลี่ยนจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือ จากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เป็นต้น

2.1.3 ระบบการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Cell: PV) ดังภาพที่ 2.1 การผลิตไฟฟ้าโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ หรือโซลาเซลล์ (Solar Cell) เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์โดยตรง ระบบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จะประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆได้แก่ แผงโซลาเซลล์ เครื่องควบคุมการชาร์จประจุแบตเตอรี่ เครื่องปรับระบบไฟฟ้า และแบตเตอรี่ เป็นอย่างน้อยซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ได้จะจากแผงโซลาเซลล์ต้องมีการคำนวณค่า เพื่อให้พอเพียงต่ออุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์ต่างๆดังที่กล่าวยังมีขนาด รูปลักษณะ และการทำงานที่หลากหลาย ตามความต้องการของผู้ใช้ ในการออกแบบระบบจึงต้องมีความรู้ความเข้าใจ ในอุปกรณ์ต่างๆเพื่อสามารถใช้งานได้อย่างถูกต้อง และมีประสิทธิภาพ ในการใช้งานของระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้า

จากเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องมีอุปกรณ์ในระบบที่จำเป็นหลายชนิด ซึ่งในการเลือกใช้งานต้องมีความเหมาะสม และสมดุลกันจึงจะเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ในการออกแบบระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากโซลาเซลล์ จะต้องใช้ส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้คือ

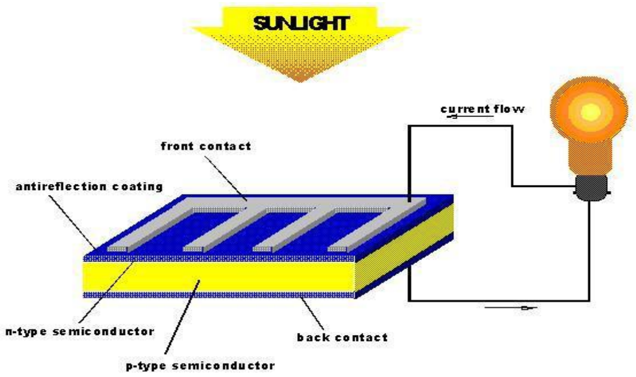


ภาพที่ 2.1 พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Home System)

2.1.4 แผงโซลาเซลล์ (Photovoltaic Cell: PV) ดังภาพที่ 2.2 เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นให้เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกโดย แชปปิน(Chapin) ฟูลเลอร์ (Fuller) และเพียสัน (Pearson) ในปี ค.ศ. 1954 ซึ่งทำงานที่บริษัท เบลเทโลโฟน (Bell Telephone) ซึ่งได้ค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อ P-N ของผลึกซิลิคอน จนได้เซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมาเป็นครั้งแรกในโลก ซึ่งมีประสิทธิภาพเพียง 6 % โดยในระยะเวลาต่อมามีการพัฒนามาขึ้นมากกว่า 15 % ในระยะแรกเริ่มมีการนำไปใช้งานในการผลิตพลังงานไฟฟ้าทางด้านอวกาศ ดาวเทียม ระบบสื่อสารต่างๆ จนในปัจจุบันมีการผลิตใช้งานอย่างแพร่หลาย มีราคาถูกลง และประสิทธิภาพสูงขึ้น

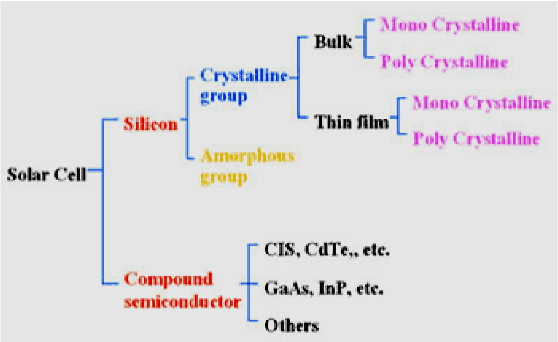
ภาพที่ 2.2 แผงพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Cell)

2.1.5 เซลล์แสงอาทิตย์ทำจากซิลิคอนที่ใช้วัสดุเช่นเดียวกัน ทรานซิสเตอร์และวงจรรวม (Integrated Circuit :IC) ดังภาพที่ 2.3โดยผลึกซิลิคอนจะถูกทำให้ไม่บริสุทธิ์ (Dope) โดยการเติมธาตุที่มีอิเล็กทรอนวงนอกสุดในกลุ่ม 3 และ 5 ซึ่งจะได้ผลึกซิลิคอนที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างกัน (P-Type และ N-type) เมื่อนำมาต่อเชื่อมกันด้วยกรรมวิธีการแพร่สารระหว่างผลึกท้าให้ระหว่างรอยต่อมีสภาวะที่เป็นกลาง (Depletion Region) ผลึกซิลิคอนจะวางซ้อนกันเป็นชั้นบาง (Layer) เมื่อมีอนุภาคโฟตอน (Photon) มาตกกระทบแผ่นชั้นซิลิคอน อิเล็กตรอนที่ได้รับจะท้าให้แผ่นธาตุซิลิคอนมีอิเล็กตรอนที่มีอยู่ไม่สมดุลกันระหว่างชั้นเซลล์ เมื่อมีการต่อเชื่อมขั้วไฟฟ้าออกไปก็จะเกิดการความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วไฟฟ้านั้น เมื่อน้ามาต่อเชื่อมกันเป็นวงจรไฟฟ้าก็จะเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างขั้ว เกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรท้าให้เกิดพลังงานไฟฟ้าขึ้นมาได้



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Cell)

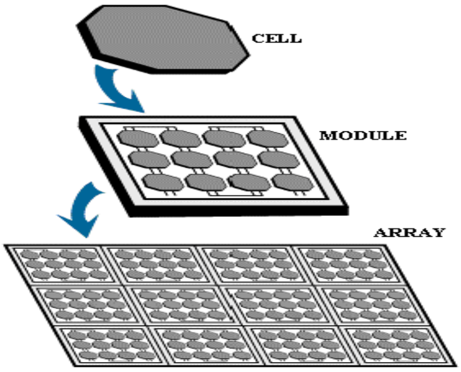
2.1.6 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังภาพที่ 2.4 คือ การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จากสารกึ่งตัวน้าประเภทซิลิคอน กับการผลิตจากสารประกอบชนิดอื่นๆ เช่น แกลเลี่ยมอาเซไน แคดเมียมเทลูไลด์ เป็นต้น กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ที่ท้าจากสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอน จะแบ่งตามลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้นเป็น 2 แบบ ได้แก่ แบบที่อยู่ในรูปของผลึก (Crystal) และแบบที่ไม่เป็นรูปผลึก (Amorphous) แบบที่เป็นรูปผลึก ยังสามารถแบ่งออกได้อีกเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดเป็นก้อนผลึก (Bulk) และแบบฟิล์มบาง (Thin film) โซลาเซลล์ชนิดผลึกทั้งสองชนิดยังแบ่งออกเป็นชนิดเดี่ยวซิลิคอน (Mono Crystalline Silicon Solar Cell) และชนิดผลึกรวมซิลิคอน (Poly Crystalline Silicon Solar Cell) ส่วนแบบที่ไม่เป็นรูปผลึก คือ เป็นชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell)



ภาพที่ 2.4 ชนิดแผงพลังงานแสงอาทิตย์

- ส่วนกลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ที่ท้าจากสารประกอบอื่นๆที่ไม่ใช่ท้ามาจากซิลิคอน เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงถึง 25 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป ซึ่งมีราคาแพง จึงไม่นิยมน้ามาใช้ทั่วไปบนพื้นโลก จึงเหมาะสำหรับใช้งานบนดาวเทียม หรืออวกาศ สามารถร่วมกับระบบรวมแสงที่มีความเข้มของแสงสูงๆ ปัจจุบันมีการพัฒนาด้วยกระบวนการผลิตที่ทันสมัยใหม่ ท้าให้มีราคาถูกลง และคาดว่าจะมีการน้ามาใช้งานมากขึ้นในอนาคต (ปัจจุบันมีใช้เพียง 7 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณที่มีใช้ทั้งหมด)

2.1.7 เซลล์แสงอาทิตย์จะถูกผลิตให้เป็นแผ่นเล็กๆก่อน แล้วจึงนำเซลล์มาต่อเชื่อมเป็นวงจรสำเร็จรูปที่เรียกว่า โมดูล (Module) หรือ พาแนล (Panel) ซึ่งจะท้าให้สามารถกำหนดค่ากำลังวัตต์ ที่มีการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้า และค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม สามารถต่อเชื่อมออกไปใช้งานได้ทันที แต่เมื่อหากต้องการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีกำลังวัตต์สูงๆ ก็สามารถท้าได้โดยน้าแผงโซลาเซลล์มาต่อเชื่อมกันเป็นวงจรขนาดใหญ่ (Array) การต่อเชื่อมกันนี้อาจจะต่อเป็นวงจรแบบขนานหรือแบบอนุกรมก็ได้ โดยสามารถกำหนดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้าได้เช่นเดียวกันกับการต่อเซลล์แบตเตอรี่ ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ขนาดของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

2.1.8 Charge controller ดังภาพที่ 2.6 เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ชาร์จประจุไฟฟ้าที่ได้รับจากแผงโซลาเซลล์ มาประจุ ให้กับแบตเตอรี่ ซึ่งการประจุนี้จะต้องไม่ให้มีการประจุมากเกินไป (Over charge) ซึ่งจะมีผลทำให้แบตเตอรี่ร้อนจัด ทำให้เสื่อมสภาพเร็ว และเมื่อ แบตเตอรี่ มีประจุเต็มแล้วก็จะต้องตัดการชาร์จทันที่ กระแสไฟฟ้าที่ชาร์จแบตเตอรี่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีรูปสัญญาณเป็นพัลล์ (Pulse) และมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงกว่าแบตเตอรี่ประมาณ 15-20% เนื่องจากมีค่าตัวแปรที่มาเกี่ยวข้องในกระบวนการชาร์จแบตอรี่ได้แก่ อุณหภูมิของแบตเตอรี่ ความไม่คงที่ของกระแส ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายที่ป้อนให้โดยเฉพาะจากแหล่งพลังงานทดแทนอื่นๆ เช่น แผงโซลาเซลล์ จากกังหันลม หรืออื่นๆ จึงต้องใช้อุปกรณ์ประมวลผล (Microcontroller) มาทำการประมวลผล และควบคุมการทำงานวงจรชาร์จประจุ และใช้วงจร PWM (Pulse Width Modulation) มาสร้างรูปสัญญาณไฟฟ้า เพื่อให้การประจุแบตเตอรี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ภาพที่ 2.6 ชุดควบคุมวงจรอัดประจุ (Charge controller)

2.1.9 แบตเตอรี่ ดังภาพที่ 2.7 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้จัดเก็บประจุไฟฟ้าที่สามารถผลิตไฟฟ้าออกไปใช้งานได้ทันที ประดิษฐ์ครั้งแรกในปี ค.ศ.1859 โดยนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส แกสตัน พลองค์ (Gaston Plante') ที่เรียกว่าแบตเตอรี่แบบเปียก (Flooded Type หรือ Wet Type) ต่อมาก็พัฒนาเป็นแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ในปี ค.ศ.1957 ออตโต จาเช (Otto Jache) ได้ประดิษฐ์แบตเตอรี่ที่สามารถใช้งานได้ง่าย ไม่ต้องคอยเติมน้ำกลั่น และจัดวางได้ทุกแบบ ไม่จำกัดวิธีวางแบบตั้งเพียงอย่างเดียว ในหลักการจะใช้วัสดุดูดซับน้ำกรดไว้ และผนึกไม่ให้กรดไหลออกมา ทำให้ไม่ต้องคอยเติมน้ำกลั่น หรือเรียกได้ว่าเป็นเซลล์แบบแห้ง หรือแบตเตอรี่แบบแห้ง ต่อมาได้มีการพัฒนาวัสดุที่ใช้ดูดซับกรดได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่ใช้แผ่นซิลิกาไฟเบอร์เป็นตัวดูดซับเรียกว่า แบบ AGM (Absorbed Glass Mats) และแบบที่ใช้เจลเป็นตัวดูดซับกรดเรียกว่า แบบเจล (Gel Battery หรือ Gel cell) ซึ่งเป็นหลักการต้นแบบของแบตเตอรี่ที่พัฒนาต่อๆมาในปัจจุบัน

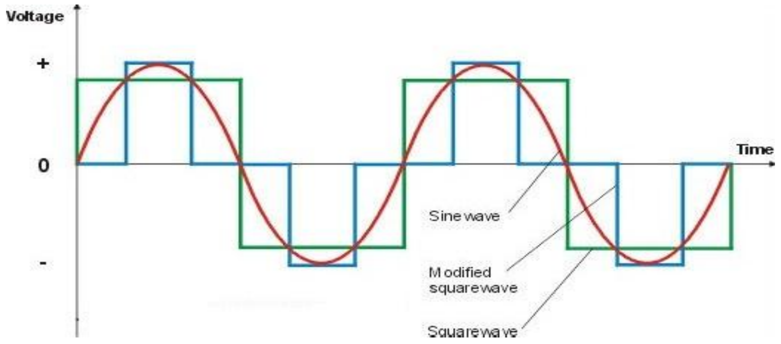
ภาพที่ 2.7 แบตเตอรี่แบบต่างๆ

2.1.10 อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ดังภาพที่ 2.8 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ปรับเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่ เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V สำหรับใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ในบ้าน โดยทั่วไป อินเวอร์เตอร์ จะออกแบบวงจรภายในโดยใช้วงจร Switching แปลงระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับโดยมีสัญญาณความถี่ไฟฟ้า 50 Hz ในระบบที่มีขนาดเล็กๆผู้ผลิตอาจจะรวมวงจรอินเวอร์เตอร์ เข้าเป็นชุดเดียวกับวงจรควบคุมการประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่ (Battery Charger and Controller) ในการใช้งานต้องมีค่ากำลังงานที่สูงกว่ากำลังวัตต์ที่ใช้งาน 15-20 % ทั้งนี้เนื่องจากอินเวอร์เตอร์จะมีประสิทธิภาพประมาณ 80-85 %

ภาพที่ 2.8 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

2.1.11 รูปแบบของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่แปลงได้จากตัวอินเวอร์เตอร์ จะมีรูปแบบของลูกคลื่นที่ผลิตได้อยู่สองแบบใหญ่ๆด้วยกัน [4] **ดังภาพที่ 2.9**

- รูปคลื่นสแควร์เวฟ (Square Wave) มีลักษณะเป็นทรงเหลี่ยม อีกรูปแบบที่ใกล้เคียงกับรูปคลื่นสแควร์เวฟก็คือโมดิฟายซานย์เวฟ (Modified-Sinewave) ซึ่งจุดที่เปลี่ยนระหว่างคลื่นบวกกับลบจะมีความชันน้อยกว่า
- รูปคลื่นไซน์เวฟ (Sine Wave) หรือที่เรียกตามทั่วไปคือเพียวไซน์เวฟ (Pure-Sine Wave) อินเวอร์เตอร์ที่ผลิตรูปคลื่นซานย์จะรองรับการนำไปใช้งานกับเครื่องใช้ไฟฟ้าได้ทุกชนิดโดยไม่ทำให้เกิดปัญหา และมีรูปร่างของคลื่นที่ผลิตได้เหมือนกับรูปคลื่นไฟฟ้าของการไฟฟ้าทุกประการ



ภาพที่ 2.9 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมและรูปคลื่นไซน์

2.1.12 อินเวอร์เตอร์ตามระบบที่ติดตั้งโดยทั่วไป อินเวอร์เตอร์จะแบ่งแยกตามระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากโซล่าเซลล์ซึ่งมีอยู่สองแบบใหญ่ๆ

- อินเวอร์เตอร์ที่ใช้กับระบบสแตนอโลน(Stand-Alone System) หรือระบบอิสระที่ไม่มีปฏิสัมพันธ์กับการไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์แบบนี้จะมีหลักการทำงานเบื้องต้นที่กล่าวไปคือ รับพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ หรือไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่(เวลากลางคืนจากพลังงานที่ชาร์จไว้โดยแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในเวลากลางวัน) แล้วแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ จ่ายให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ
- อินเวอร์เตอร์ที่ใช้กับระบบออนกริต (On-grid System) หรือระบบที่ทำงานสัมพันธ์กับการไฟฟ้า มีชื่อเรียกอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้โดยทั่วไปว่า กริตไทน์อินเวอร์เตอร์(Grid-Tied Inverter) ลักษณะการทำงานของอินเวอร์เตอร์ระบบนี้จะเหมือนกับอินเวอร์เตอร์โดยปกติทั่วไปแต่จะต้องมีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากการไฟฟ้าป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์อีกทางชุดหนึ่งด้วย ตัวอินเวอร์เตอร์แบบนี้ถึงจะทำงาน ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงโซล่าเซลล์จะถูกใช้ไปกับเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆภายใน

บ้าน ถ้าใช้ไฟฟ้ามากกว่าที่ผลิตได้อินเวอร์เตอร์ก็จะดึงไฟฟ้าจากการไฟฟ้าเข้ามาจ่ายให้เพิ่มเติม แต่ถ้าแผงโซล่าเซลล์ผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าที่ใช้ภายในบ้าน ไฟฟ้าก็จะถูกขายให้กับการไฟฟ้าต่อไป (ระบบขายไฟฟ้าคืนให้กับการไฟฟ้า-VSPP) กริดไทน์อินเวอร์เตอร์ในปัจจุบันจะตัดการทำงานตัวมันเองทันทีที่ไฟฟ้าจากการไฟฟ้าดับเพื่อป้องกันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงโซล่าเซลล์ผ่านไปยังสายไฟของการไฟฟ้าซึ่งจะเป็นอันตรายต่อช่างไฟฟ้าที่จะมาซ่อมได้

2.2 ระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า (On-Grid Tie Inverter)

2.2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์แบบชนิดเชื่อมต่อสายส่ง [5] เนื่องจากไฟฟ้าที่ได้จากโซล่าเซลสามารถเชื่อมต่อเข้าโดยตรงกับระบบสายส่งของการไฟฟ้าได้โดยตรง โดยไม่ต้องผ่านแบตเตอรี่ ส่งผลให้ลดต้นทุนของระบบ และไม่ต้องเปลี่ยนแบตเตอรี่ทุก 3-5 ปี ระบบผลิตไฟฟ้าเชื่อมต่อสายส่งนอกจะสามารถใช้เพื่อลดค่าไฟฟ้าแล้ว ยังสามารถออกแบบระบบเพื่อขายไฟฟ้าให้กับการไฟฟ้าได้

2.2.2 อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อสายส่งขนาดเล็ก ออนกริด อินเวอร์เตอร์ [6] ชนิดนี้ได้ถูกออกแบบเพื่อใช้กับแผงโซล่าเซลล์ชนิดที่เป็นผลึก Mono และ Poly crystalline ไม่สามารถใช้กับแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิด Amorphous ได้ การติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับอินเวอร์เตอร์ออนกริด ต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับแรงดันของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งวัตต์รวมของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ต้องไม่เกินขนาดของอินเวอร์เตอร์ออนกริด หลังจากต่อแผงพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านอินเวอร์เตอร์นี้แล้ว สามารถเชื่อมต่อกับไฟฟ้าได้ตามปรกติ เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ออนกริดได้ออกแบบ ให้สามารถใช้ได้กับไฟฟ้าที่มีแรงดัน 220 โวลล์ โดยตรง หลังจากเชื่อมต่อกับไฟฟ้าตามปรกติแล้ว อินเวอร์เตอร์ออนกริดจะทำการตรวจสอบความถี่และเฟสของไฟฟ้า หลังจากนั้นจะปรับรูปแบบความถี่และเฟสของคลื่นสัญญาณให้เหมือนกับไฟฟ้าปรกติ แต่จะมีค่าสูงกว่าไฟฟ้าปรกติเล็กน้อย อย่างไรก็ตามออน กริดอินเวอร์เตอร์จะทำงานเมื่อสถานที่ดังกล่าวมีไฟฟ้าอยู่แล้ว ออนกริดอินเวอร์เตอร์จะไม่ทำงานเมื่อไฟฟ้าดับ หากไฟฟ้าที่เราใช้ในขณะนั้นมากกว่ากำลังผลิตของออนกริดอินเวอร์เตอร์ ไฟฟ้าส่วนที่ใช้เกินจะดึงมาจากไฟฟ้าปกติของการไฟฟ้าฯเข้ามาเสริม ในทางกลับกันหากในขณะนั้นมีการใช้ไฟฟ้าน้อยกว่าการผลิตของระบบ ไฟฟ้าที่ผลิตได้จะไปทำให้มิเตอร์ไฟหมุนย้อนกลับ ระบบนี้จึงช่วยลดค่าภาระการจ่ายไฟฟ้าในรอบเดือนได้เป็นอย่างดี

2.2.3 ขนาดของกริดอินเวอร์ที่ควรจะเป็นสำหรับแผงพลังงานแสงอาทิตย์ [7] กริดอินเวอร์เตอร์เป็นอินเวอร์เตอร์ที่สามารถเชื่อมต่อตรงกับสายส่งไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องอาศัยแบตเตอรี่ แต่การใช้งานของอินเวอร์เตอร์ชนิดดังกล่าวส่วนใหญ่จะมีขนาด 2,000 วัตต์ขึ้นไปและมีราคาค่อนข้างสูงและไม่คุ้มที่จะนำมาใช้กับผลิตกำลังไฟฟ้าจำนวนน้อย ดังนั้นการติดตั้งอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อสายส่งขนาดเล็ก สามารถใช้งานได้สะดวก ใช้ได้กับที่พักอาศัย และมีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูงนั้นต้องพิจารณาดังต่อไปนี้

- ชนิดของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้งานกับกริดอินเวอร์เตอร์
- แผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ต้องมีแรงดันที่เหมาะสมกับกริดอินเวอร์เตอร์
- วัตต์รวมของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ต้องไม่เกินกำลังไฟฟ้าที่กริดอินเวอร์เตอร์รับได้

<u>ตัวอย่าง</u>

กริดอินเวอร์เตอร์ชนิดต่อเชื่อมสายส่งขนาด 250 วัตต์ กริดอินเวอร์เตอร์นี้ได้ถูกออกแบบเพื่อใช้กับแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดที่เป็นผลึก Mono และ Poly crystalline ไม่สามารถใช้กับแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิด Amorphous การติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับกริดอินเวอร์เตอร์จะต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับแรงดันของกริดอินเวอร์เตอร์ คือ 24-52 โวลล์ ซึ่งวัตต์รวมของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ต้องไม่เกิน 200 วัตต์ จากนั้นกริดอนเวอร์เตอร์ก็จะทำงานได้และผลิตกำลังไฟฟ้าขนานเข้าไปยังระบบการไฟฟ้าได้

2.3 ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า [8]

2.3.1 ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2551 ฉบับนี้ ใช้กับผู้ขอใช้บริการ ดังนี้

- ผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (Small Power Producer, SPP)
- ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Very Small Power Producer, VSPP)
- ผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- ผู้ประกอบกิจการไฟฟ้ารายอื่น

2.3.2 ปริมาณกำลังไฟฟ้าของผู้ขอใช้บริการที่จ่ายหรือรับจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า หลักเกณฑ์ปริมาณกำลังไฟฟ้าของผู้ขอใช้บริการที่จะจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าในแต่ละระบบ ดังนี้

- ระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ ไม่เกิน 8.0 เมกะวัตต์ / วงจร
- ระบบจำหน่าย 33 กิโลโวลต์ ไม่เกิน 10.0 เมกะวัตต์ / วงจร
- ระบบจำหน่าย 380/220 โวลต์
- ผู้ขอใช้บริการเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายแรงต่ำ 1 เฟส สามารถจ่ายไฟหรือรับไฟจากระบบได้ไม่เกิน 10 กิโลวัตต์
  - ผู้ขอใช้บริการเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายแรงต่ำ 3 เฟส สามารถจ่ายไฟหรือรับไฟจากระบบได้ไม่เกิน 56 กิโลวัตต์
  - ผู้ขอใช้บริการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า มากกว่า 56 กิโลวัตต์ ให้เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 22 หรือ 33 กิโลโวลต์ ตามความเหมาะสม
  - หากปริมาณกำลังไฟฟ้าเกินกว่าที่กำหนดในข้อ 4.1 หรือ 4.2 ให้เชื่อมต่อกับระบบส่ง 69 หรือ115 กิโลโวลต์ ตามความเหมาะสม ทั้งนี้ไม่เกิน 180 เมกะวัตต์ / วงจร

2.3.3 รูปแบบการเชื่อมต่อและระบบป้องกัน รูปแบบการเชื่อมต่อและระบบป้องกันสำหรับผู้เชื่อมต่อระบบเครือข่ายไฟฟ้าแยกออกได้เป็น 2 กรณี ดังนี้

- กรณีผู้ขอใช้บริการที่เป็นผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก และผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของผู้ขอใช้บริการกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ผู้ขอใช้บริการต้องติดตั้งอุปกรณ์ไม่น้อยกว่าที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนด ดังมีรายละเอียดรูปแบบการเชื่อมต่อตามสิ่งแนบที่ 1
  - อุปกรณ์ตัดการเชื่อมต่อเป็นไปตามที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนด โดยมีรายละเอียดตามสิ่งแนบที่ 2
  - อุปกรณ์ป้องกันและอุปกรณ์ประกอบจะต้องมีมาตรฐานตามที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคยอมรับ
  - หม้อแปลงไฟฟ้าของผู้ขอใช้บริการจะต้องมีการเชื่อมต่อขดลวด (Winding Connection) สอดคล้องต่อปริมาณการจ่ายเข้าระบบ และลักษณะการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบตามสิ่งแนบที่ 1 หากไม่เป็นตามที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนด จะต้องได้รับความเห็นชอบจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคก่อน
  - ระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีรูปแบบการปิดซ้ำอัตโนมัติ (Automatic Reclosing Scheme) ผู้ขอใช้บริการจะต้องแน่ใจว่าอุปกรณ์ตัดการเชื่อมต่อของผู้ขอใช้บริการปลดการจ่ายไฟออกก่อนที่ การปิดซ้ำอัตโนมัติของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะทำงาน มิฉะนั้นการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะไม่รับผิดชอบความเสียหายต่ออุปกรณ์ของผู้ขอใช้บริการ

- หากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคพิจารณาเห็นควรต้องปรับปรุงวิธีการปิดซ้ำ (Reclosing) หรือต้องเพิ่มเติมอุปกรณ์ เช่น ติดตั้งระบบซิงโครไนซ์ (Synchronizing system) ระบบป้องกันระยะไกล (Teleprotection) หรือ ระบบกั้นการปิดซ้ำ (Block Reclosing) ทั้งในส่วนของผู้ขอใช้บริการและในส่วนของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยคิดค่าใช้จ่ายจากผู้ขอใช้บริการ ผู้ขอใช้บริการจะต้องยอมรับและปฏิบัติตาม และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะไม่รับผิดชอบความเสียหายต่ออุปกรณ์ของผู้ขอใช้บริการ เนื่องจากการปิดซ้ำนี้
- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคไม่อนุญาตให้ผู้ขอใช้บริการมีรูปแบบการปิดซ้ำอัตโนมัติสำหรับการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- การซิงโครไนซ์ (Synchronization) ให้ทำที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Circuit Breaker) หรือที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จุดเชื่อมต่อ (Interconnection Circuit Breaker) ตามความเหมาะสม
- ผู้ขอใช้บริการจะต้องออกแบบระบบป้องกัน เพื่อไม่ให้เกิดการจ่ายไฟฟ้าแบบแยกตัวอิสระ (Anti-Islanding) คือไม่ให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าในขณะที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อไม่มีไฟฟ้า โดยหากไม่มีไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ให้ปลดการเชื่อมต่อโดยทันที
- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสงวนสิทธิ์ในการพิจารณาความเหมาะสม ในการจ่ายไฟฟ้าแบบแยกตัวอิสระ (Islanding) จากระบบโครงข่ายไฟฟ้า ให้กับผู้ขอใช้บริการเป็นรายๆ ไป
- ผู้ขอใช้บริการจะต้องติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าของตนเองตามระเบียบนี้ หรือติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันเพิ่มเติมอื่นๆ ตามความเหมาะสม ทั้งนี้การติดตั้งรีเลย์ระบบป้องกันจะต้องทำงานสอดคล้องกับระบบป้องกันของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคหลังจากเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าแล้วหากมีความเสียหายเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความบกพร่องทางด้านอุปกรณ์ระบบไฟฟ้าหรือสาเหตุอื่น ๆ ที่ผู้เชื่อมต่อต้องรับผิดชอบผู้เชื่อมต่อจะต้องเป็นผู้รับผิดชอบต่อความเสียหายดังกล่าวทั้งหมด ระบบป้องกันที่กำหนดโดยการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เป็นการออกแบบระบบป้องกันขั้นต่ำสุด ผู้ขอใช้บริการต้องพิจารณาความเหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันเพิ่มเติมเพื่อป้องกันการผิดพลาดของระบบป้องกันกรณีที่มิได้กำหนดไว้ในระเบียบนี้ เช่น กระแสลัดวงจรผ่านความต้านทานสูง (High Impedance Fault: HIF) การเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระโดยไม่ได้เจตนา (Inadvertent Islanding) ซึ่งหลังจากเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าแล้ว หากเกิดความเสียหายขึ้นต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าและ

หรือบุคคลที่ 3 ที่มีสาเหตุมาจากการจ่ายไฟฟ้าของผู้เชื่อมต่อ ผู้เชื่อมต่อจะต้องรับผิดชอบต่อความเสียหายที่เกิดขึ้น

- ในกรณีที่ไม่มีรูปแบบการเชื่อมต่อและอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมสำหรับผู้ขอใช้บริการรายใด การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคขอสงวนสิทธิ์การพิจารณารูปแบบการเชื่อมต่อที่เหมาะสมเป็นรายๆ ไป
- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสงวนสิทธิ์ในการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเชื่อมต่อและอุปกรณ์ป้องกันตามความเหมาะสม เพื่อความปลอดภัย ความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายไฟฟ้าและผลประโยชน์ต่อส่วนรวมเป็นหลัก

- กรณีผู้ประกอบกิจการไฟฟ้ารายอื่นผู้ประกอบกิจการไฟฟ้ารายอื่นที่ขอเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสงวนสิทธิ์ในการพิจารณาเป็นรายๆ ไป โดยคำนึงถึงความปลอดภัย ความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายไฟฟ้า และผลประโยชน์ต่อส่วนรวมเป็นหลัก

2.3.4 การควบคุมคุณภาพไฟฟ้า ผู้ขอใช้บริการจะต้องออกแบบระบบควบคุมการจ่ายไฟจากการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อ ดังนี้

- การควบคุมระดับแรงดัน และตัวประกอบกำลังไฟฟ้า
  - ผู้ขอใช้บริการต้องออกแบบระบบควบคุมระดับแรงดัน เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ระดับแรงดัน	ภาวะปกติ		ภาะฉุกเฉิน	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
115 kV	120.7	109.2	126.5	103.5
69 kV	72.4	65.5	75.9	62.1
33 kV	34.7	31.3	36.3	29.7
22 kV	23.8	20.9	24.2	19.8
380 V	418	324	413	324
220 V	240	200	240	200

- ผู้ขอใช้บริการต้องออกแบบระบบควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า เพื่อใช้ในการรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ดังนี้
- สำหรับระบบที่มีอินเวอร์เตอร์ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.9 นำหน้าถึง 0.9 ตามหลัง เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตออกมาเกินกว่าร้อยละ 10 ของขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของอินเวอร์เตอร์
- (สำหรับระบบที่ไม่มีอินเวอร์เตอร์ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.9 นำหน้าถึง 0.9 ตามหลัง
- ทั้งนี้ผู้ขอใช้บริการสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้ระบบโครงข่ายไฟฟ้าตามความต้องการของโหลด โดยมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำกว่า 0.9 ตามหลัง ที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้แก่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้

2.3.5 การควบคุมความถี่ไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจะเป็นผู้ควบคุมความถี่ของระบบโครงข่ายไฟฟ้า ให้อยู่ในเกณฑ์ 50±0.5 รอบต่อวินาที ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากจะต้องควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ซิงโครไนซ์กับระบบโครงข่ายไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา ในกรณีเกิดเหตุผิดปกติ ถ้าความถี่ของระบบไม่อยู่ในช่วง 48.00 - 51.00 รอบต่อวินาที ต่อเนื่องเกิน 0.1 วินาที ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากจะต้องออกแบบให้ปลดเซอร์กิตเบรคเกอร์ที่จุดเชื่อมต่อด้วยระบบอัตโนมัติที่เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าทันที สำหรับผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจะต้องปฏิบัติตามที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยกำหนด

2.3.6 การควบคุมแรงดันกระเพื่อม ผู้ขอใช้บริการจะต้องออกแบบ ติดตั้ง และควบคุมอุปกรณ์ไม่ทำให้เกิดแรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuation) ที่จุดต่อร่วมเกินข้อกำหนดเกณฑ์แรงดันกระเพื่อมเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคยอมรับ ตามสิ่งแนบที่ 3 ทั้งนี้ ข้อกำหนดเกณฑ์แรงดันกระเพื่อมเกี่ยวกับไฟฟ้า อาจมีการปรับปรุงเป็นคราวๆไป

2.3.7 การควบคุมฮาร์มอนิก

ผู้ขอใช้บริการจะต้องออกแบบ ติดตั้ง และควบคุมอุปกรณ์ ที่ไม่ทำให้รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมผิดเพี้ยนเกินค่าที่กำหนดตามข้อกำหนดเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคยอมรับ ตามสิ่งแนบที่ 4 ทั้งนี้ ข้อกำหนดเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้า อาจมีการปรับปรุงเป็นคราวๆไป

2.3.8 การควบคุมการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า

ผู้ขอใช้บริการที่มีระบบอินเวอร์เตอร์ จะต้องออกแบบป้องกันการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อเกินร้อยละ 0.5 ของกระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์

2.4 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar-Rooftop) [9]

โซลาร์รูฟ หมายถึง ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา ที่อยู่อาศัย อาคาร ธุรกิจ โรงงาน หรือสถานประกอบการต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อขายไฟฟ้าที่ผลิตได้ในเชิงพาณิชย์ให้แก่การไฟฟ้า ในอัตรารับซื้อไฟฟ้า Feed-in Tariff (FiT) ดังอัตราที่แสดงในตารางด้านล่าง เป็นระยะเวลา 25 ปี นับจากกำหนดวันจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบเชิงพาณิชย์ (Scheduled Commercial Operation Date (SCOD)

ตารางที่ 2.2 อัตรารับซื้อไฟฟ้า Feed-in Tariff (FiT)

กลุ่มประเภทอาคาร	กำลังการผลิตติดตั้ง	อัตรารับซื้อไฟฟ้า (FiT)
(1) บ้านอยู่อาศัย	ไม่เกิน 10 kWp	6.96 บาท/หน่วย
(2) อาคารธุรกิจขนาดเล็ก	มากกว่า 10 ถึง 250 kWp	6.55 บาท/หน่วย
(3) อาคารธุรกิจขนาดกลาง-ใหญ่/ โรงงาน	มากกว่า 250 ถึง 1,000 kWp	6.16 บาท/หน่วย

2.4.1 โครงการโซลาร์รูฟตามมาตรการการรับซื้อไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา (Solar PV Rooftop)

- วัตถุประสงค์เพื่อตอบสนองความสนใจของประชาชน สถานประกอบการผู้สนใจจำหน่ายไฟฟ้าเข้าระบบในเชิงพาณิชย์ตามมาตรการรับซื้อไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา บ้านอยู่อาศัย อาคารธุรกิจขนาดเล็กกลางและใหญ่ ที่จ่ายไฟฟ้าเข้าระบบเชิงพาณิชย์ (Commercial Operation Date) ภายในวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ.2556 ในปริมาณการรับซื้อที่ขนาดกาลังการผลิตติดตั้งรวม 200 MWp

ตารางที่ 2.3 ขนาดกำลังการผลิตติดตั้ง

กลุ่มประเภทอาคาร	ขนาดกำลังการผลิตติดตั้ง	ขนาดกำลังผลิตติดตั้งรวม
(1) บ้านอยู่อาศัย	ไม่เกิน 10 kWp	100 MWp
(2) อาคารธุรกิจขนาดเล็ก	มากกว่า 10 ถึง 250 kWp	100 MWp
(3) อาคารธุรกิจขนาดกลาง-ใหญ่/โรงงาน	มากกว่า 250 ถึง 1,000 kWp	

ตารางที่ 2.4 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่รับซื้อ (MWp)

พื้นที่/เขต	ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่รับซื้อ (MWp)	
	กลุ่มบ้านอาศัย	กลุ่มอาคารธุรกิจขนาดเล็กและอาคารธุรกิจขนาดกลาง-ใหญ่/โรงงาน
(1) การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) รวม	**40**	**40**
3 จังหวัด ประกอบด้วย กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ	**40**	**40**
(2) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ) รวม	**60**	**60**
(2.1) พื้นที่ภาคเหนือ ประกอบด้วย 20 จังหวัด ดังนี้ เชียงใหม่ เชียงราย แม่ฮ่องสอน ลำพูน ลำปาง พะเยา พิษณุโลก อุตรดิตถ์ แพร่ กำแพงเพชร สุโขทัย ตาก พิจิตร น่าน ลพบุรี นครสวรรค์ เพชรบูรณ์ สิงห์บุรี ชัยนาท และอุทัยธานี	**15**	**15**

(2.2) พื้นที่บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ประกอบด้วย 20 จังหวัด ดังนี้ อุดรธานี หนองคาย หนองบัวลำภู สกลนคร นครพนม ขอนแก่น เลย บึงกาฬ อุบลราชธานี ยโสธร อำนาจเจริญ ร้อยเอ็ด ศรีสะเกษ กาฬสินธุ์ มหาสารคาม มุกดาหาร นครราชสีมา ชัยภูมิ สุรินทร์ และบุรีรัมย์	**15**	**15**
(2.3) พื้นที่บริเวณภาคกลาง ประกบด้วย 16 จังหวัด และ 1 อำเภอ ดังนี้ พระนครศรีอยุธยา ปทุมธานี สระบุรี อ่างทอง ปราจีนบุรี นครนายก สระแก้ว ชลบุรี จันทบุรี ตราด ระยอง ฉะเทริงเทรา นครปฐม สุพรรณบุรี กาญจนบุรี สมุครสาคร และอำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี	**15**	**15**
(2.4) พื้นที่บริเวณภาคใต้ ประกอบด้วย 18 จังหวัด ดังนี้ ราชบุรี(ยกเว้นอำเภอบ้านโป่ง) เพชรบุรี สมุทรสงคราม ประจวบคีรีขันธ์ ชุมพร ระนอง นครศรีธรรมราช สุราษฎร์ธานี ภูเก็ต ตรัง กระบี่ พังงา ยะลา ปัตตานี สงขลา นราธิวาส พัทลุง และสตูล	**15**	**15**

หมายเหตุ ทั้งนี้ หากมีข้อจากัดของระบบโครงข่ายไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายจาหน่ายสามาร เปลี่ยนแปลงปริมาณและจุดรับซื้อ

2.4.2 คุณสมบัติผู้ยื่นขอติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคามีคุณสมบัติ ดังนี้

- เป็นเจ้าของบ้าน (อาคารของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภท 1) หรืออาคารธุรกิจหรือโรงงาน (อาคารของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภท 2,3,4 หรือ ประเภท 5) หรือได้รับยินยอมจากผู้ที่เป็นเจ้าของฯ หรือมีสัญญาเช่าเพื่อดำเนินการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าฯ หรือผู้รับมอบอำนาจจากเจ้าของฯ ในการดำเนินการเพื่อยื่นขอผลิตไฟฟ้าฯ หากชื่อเจ้าของบ้านและอาคารไม่ตรงกับชื่อผู้เป็นเจ้าของมิเตอร์กับการไฟฟ้าในพื้นที่ ต้องมีการมอบอำนาจดำเนินการในส่วนดังกล่าวด้วย โดยอาคารนั้นจะต้องไม่เคยติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์โฟโตโวลเทอิค (แผงเซลล์แสงอาทิตย์) มาก่อน

- ไม่เป็นกระทรวง ทบวง กรม รัฐวิสาหกิจ องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น หรือส่วนราชการที่มีชื่ออย่างอื่นและมีฐานะเป็นกรม ส่วนราชการสังกัดรัฐสภา ศาล หรือหน่วยงานอื่นของรัฐ

- อาคารที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ต้องมีเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้า (Meter) ซื้อไฟฟ้าอยู่แล้วตามประเภทผู้ใช้ไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายจาหน่ายซึ่งสอดคล้องกับประเภทอาคาร

- มีความสามารถในการลงทุนค่าใช้จ่ายต่างๆ (หรือมีผู้ลงทุนให้ หรือ มีสถาบันการเงินช่วยตามแต่กรณี)

2.4.3 อัตราค่าธรรมเนียม ตามประกาศของการไฟฟ้าฯ

- สำหรับกลุ่มบ้านอยู่อาศัย (ผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 1)

ตารางที่ 2.5 รายการค่าใช้จ่ายสำหรับกลุ่มบ้านอยู่อาศัย (ผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 1)

รายการค่าใช้จ่าย	**ค่าใช้จ่าย (บาท)**
(1) ค่าก่อสร้างและปรับปรุงระจำหน่าย (1.1) รายที่ผู้ใช้ไฟฟ้าของ กฟน.หรือ กฟภ. (1.2) รายที่ไม่เคยเป็นผู้ใช้ไฟฟ้าของ กฟน.หรือ กฟภ.	 ไม่คิดค่าใช้จ่าย คิดค่าใช้จ่ายตามจริง
(2) ค่าใช้จ่ายเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้า	10,000

- สำหรับอาคารธุรกิจหรือโรงงาน (ผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 2-5)

ตารางที่ 2.6 รายการค่าใช้จ่ายสำหรับอาคารธุรกิจโรงงาน (ผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 2-5)

รายการค่าใช้จ่าย	**ระดับแรงดันที่เชื่อมต่อ**	
	ต่ำกว่า 12 กิโลโวลต์	**12 กิโลโวลต์ขึ้นไป**
(1) ค่าก่อสร้างและปรับปรุงระบบจำหน่าย	คิดตามจริง	คิดตามจริง
(2) ค่าตรวจสอบ ทดสอบอุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายด้านเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้า	15,000 บาท	100,000 บาท

หมายเหตุ

- อาจมีการเปลี่ยนแปลงตามระเบียบของ กฟภ. หรือ กฟน.
- ค่าก่อสร้างและปรับปรุงระบบจาหน่าย ขึ้นกับระยะทางและขนาดหม้อแปลง

- เจ้าของบ้าน อาคารจะต้องชาระค่าใช้จ่ายในการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้า และค่ามิเตอร์ไฟฟ้า ให้กับการไฟฟ้าฯ หลังได้รับ หนังสืออนุญาตรับซื้อไฟฟ้า

2.4.4 การขออนุญาตจากหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

- การที่จะก่อสร้างระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ต้องปฏิบัติการกฎหมาย และระเบียบของหน่วยงานต่างๆ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่บริษัทดำเนินการในโครงการนี้ ส่วนมากจะมีขนาดไม่เกิน 3.7 กิโลวัตต์ ดังนั้น จะมีเพียงหน่วยงานเดียวที่จะเจ้าของบ้านจะต้องขออนุญาต คือ การไฟฟ้านครหลวง หรือ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในกรณีที่ ระบบมีขนาดเล็กกว่า 3.7 กิโลวัตต์ ไม่ถือว่าเป็นโรงงาน จึงไม่ต้องขออนุญาตจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม
- ในกรณีที่ระบบมีขนาดใหญ่กว่า 3.7 กิโลวัตต์ ตามพระราชบัญญัติโรงงานอุตสาหกรรม พ.ศ. 2535 มาตราที่ 5 ถือว่า เป็นโรงงาน ดังนั้น เจ้าของบ้านหรือผู้ลงทุนจึงต้องยื่นขออนุญาตการก่อสร้างต่อกรมโรงงานอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2.7 การยื่นขออนุญาตหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้องเพื่อการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา

ขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (kW)	**< 3.7 (กรณีบ้านที่อยู่อาศัยทั่วไป)**	**3.7 ≤ ขนาด ≤ 1,000**
การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) หรือ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.)	✓	✓
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)	X	X
คณะกรรมการกากับกิจการพลังงาน	X	X

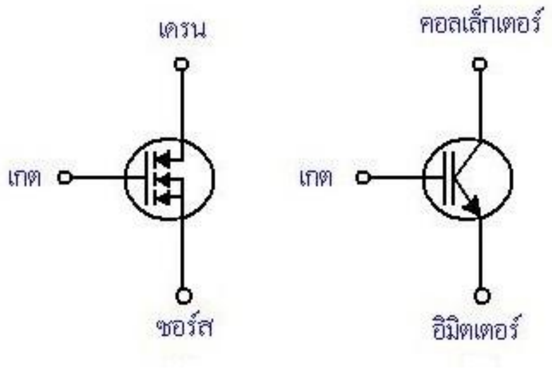
กรมโรงงานอุตสาหกรรม (แบบ รง. 4)	X	✓
องค์การบริหารส่วนตาบล หรือ หน่วยงานอื่น ที่มีลักษณะเทียบเท่า	X	✓
รายงานผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่อ กรมทรัพยากร ธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม	X	X
สานักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน (BOI)	X	ถ้าขอ จะได้รับการยกเว้นภาษีและสิทธิพิเศษต่างๆ

2.5 อุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิคส์คอนโทรล (IGBT) [10]

IGBT ย่อมาจาก Insulatate Gate Bipolar Transistor เป็นอุปกรณ์ที่เอาข้อดีของทรานซิสเตอร์ BJT กับข้อดีของ MOSFET มารวมกัน ซึ่ง BJT มีข้อดีในด้าน การใช้เป็นตัวขยายสัญญาณ ทนกระแสได้สูง ส่วน MOSFET มีข้อดีในด้านการควบคุม ด้วยแรงดัน ความเร็วในการสวิตช์ที่เร็วกว่า การนำเอาเทคโนโลยีทั้งสองนี้มารวมกัน คือการนำเอาโครงสร้างส่วนนำกระแสของ BJT กับส่วนควบคุม MOSFET มารวมกัน ยังคงเป็น Bipolar Transistor อยู่แต่ใช้ Insulatate Gate มาควบคุมแทน

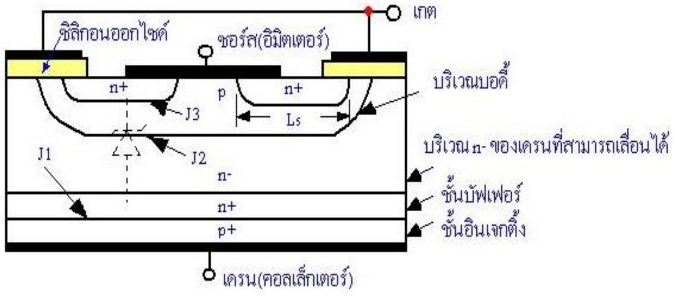
2.5.1 วงจรไอจีบีที (IGBT) ค่อนข้างจะเป็นอุปกรณ์ที่ใหม่อยู่ แต่พอจะมีใช้กันบ้างและมีจำหน่ายกันหลายเบอร์ด้วยกันจึงมีสัญลักษณ์อยู่หลาย รูปแบบด้วยกัน ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตว่าจะใช้สัญลักษณ์ใดเป็นสัญลักษณ์ประจำสินค้าที่ผลิตขึ้น ส่วนมากจะมีอยู่ 2 แบบดังภาพที่ 2.10 ซึ่งเป็นสัญลักษณ์และชื่อเรียกขาต่างๆของ IGBT ชนิดเอ็นแชนเนล

- จะเห็นว่ามีสัญลักษณ์คล้ายกับมอสเฟสมากเพียงแต่สัญลักษณ์จะมีลูกศรเพิ่มขึ้นมาตรงขาเดรน ลักษณะของลูกศรจะชี้เข้าหาตัวหรือชี้เข้าหาชั้นของซิลิคอนภายในตัว IGBT
- จะเหมือนกับสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ แต่ตรงขาเกต (หรือขาเบสของทรานซิสเตอร์) จะเพิ่มขีดขึ้นมาอีกหนึ่งขีด เพื่อให้เห็นว่าขีดที่เพิ่มมานั้นไม่ได้ต่อถึงกันโดยตรงกับขาที่ต่อออกมาภายนอก



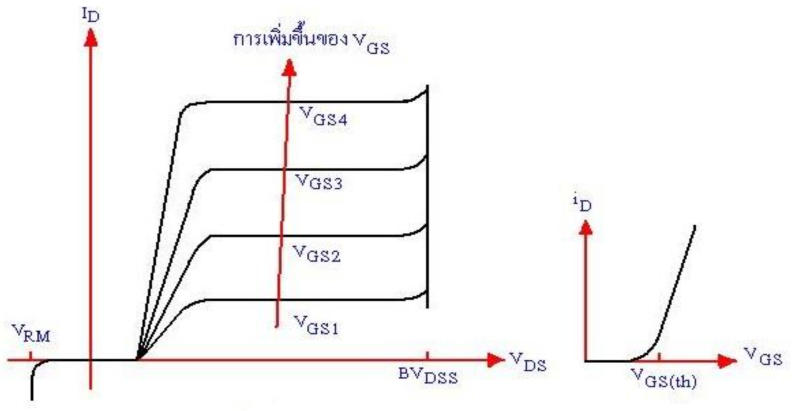
ภาพที่ 2.10 สัญลักษณ์และชื่อเรียกขาของ (ไอจีบีที) ชนิดเอ็นแชนเนล [9]

2.5.2 โครงสร้างของ IGBT ชนิดเอ็นแชนเนล ดังภาพที่ 2.11 โครงสร้างส่วนมากจะมีลักษณะเหมือนมอสเฟต จะแตกต่างตรงที่ IGBT จะมีชั้น P+หรือชั้นอิงเจ็กติ้ง (injecting) ต่ออยู่ระหว่างขาเดรน ซึ่งในมอสเฟตจะไม่มี จากการที่ขาเกตถูกกั้นด้วยชั้นของซิลิคอนออกไซด์ (SiO2) เป็นผลทำให้ความต้านทานอินพุตที่ขาเกตมีค่าสูงมากเหมือนกับเพาเวอร์มอสเฟต โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ช่วง 10 จิกะโอห์ม



ภาพที่ 2.11 โครงสร้างของ (ไอจีบีที) ชนิดเอ็นแชนเนล [9]

2.5.3 ลักษณะของกราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของ IGBT มีลักษณะคล้ายกับกราฟของทรานซิสเตอร์ แต่การควบคุมกระแสเดรนจะอาศัยการควบคุมแรงดันระหว่างขาเกตและขาซอร์สมากกว่า การควบคุมกระแสที่ขานี้เหมือนกับทรานซิสเตอร์ ซึ่งกราฟแสดงแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของ IGBT ดังภาพที่ 2.12 (ก)และภาพที่ 2.12 (ข) เป็นกราฟคุณสมบัติการถ่ายโอนกระแสและแรงดัน



(ก) (ข)

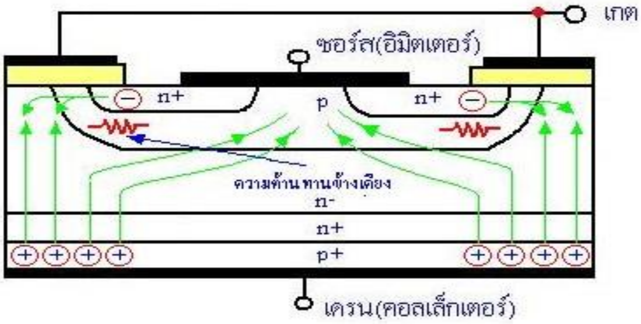
ภาพที่ 2.12 (ก) ลักษณะของกราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของ IGBT [9]

(ข) กราฟคุณสมบัติการถ่ายโอนกระแสและแรงดันของ IGBT [9]

- รูปกราฟแสดงให้เห็นว่าส่วนใหญ่ของเส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงแต่จะเริ่ม โค้งที่กระแส เดรนต่ำๆนั่นก็คือจุดที่แรงดันระหว่างขาเกตและขาซอร์สต่ำลงใกล้แรงดันจุดเริ่มเปลี่ยนสภาวะการทำงาน (จุด threshold voltage:VGS(th)) โดยถ้าแรงดันระหว่างเกตและซอร์สนี้ต่ำกว่าแรงดันที่จุด VGS(th) แล้ว IGBT จะอยู่ในสภาวะหยุดนำกระแสหรือคัทออฟ ในกรณีของ IGBT ชนิดพีแชนเนลนั้นคุณสมบัติจะคล้ายกับเอ็นแชนเนลแต่โครงสร้างและสัญลักษณ์มี ลักษณะตรงกันข้ามกับเอ็นแชนเนล

2.5.4 สภาวะนำกระแสขาเดรนเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง คือเป็นบวกเมื่อเทียบกับซอร์สและแรงดันระหว่างเกตกับซอร์สมีค่าเกิน VGS(th) ประจุไฟฟ้าบวกที่เกิดจากแรงดันที่ขาเกตจะดึงเอาอิเล็กตรอนให้มารวม กันอยู่ในบริเวณภายใต้เกต ทำให้ชั้นบอดี้ตรงส่วนใต้เกตแปรสภาพเป็น n ทำให้เกิดการต่อกันของบริเวณ n-(drift region) เข้ากับบริเวณซอร์ส n+(source region) ซึ่งการทำงาน

เช่นนี้เหมือนกับมอสเฟตกระแสอิเล็กตรอน ที่ไหลจากขาซอร์สผ่านบริเวณใต้เกตมายังบริเวณรอยเลื่อน n-จะรวมกับโฮลที่เป็นพาหนะข้างน้อยที่ถูกฉีดมาจากชั้นอินเจ็กติ้ง p+เพราะรอยต่อ J1ได้รับแรงดันไบอัสตรง ทำให้ IGBT อยู่ในสภาวะนำกระแสเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าจากเดรนไปซอร์สได้ การรวมกันของโฮลและอิเล็กตรอนภายในบริเวณ n- เรียกว่า การมอดูเลตสภาพนำ (conductivity modulation) ผลการมอดูเลตนี้จะทำให้ความต้านทานของบริเวณ n-มีค่าต่ำลงเป็นการเพิ่มความสามารถในการขับผ่านกระแสได้สูงขึ้น ซึ่งมีลักษณะเหมือนเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ผลของความต้านทานที่ลดลงทำให้แรงดันตกคร่อมที่สภาวะนำกระแสลดต่ำลงด้วย การสูญเสียกำลังงานขณะนำกระแสจึงลดลงด้วยทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลดังภาพที่ 2.13 คือทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลในขณะนำกระแส



ภาพที่ 2.13 สภาวะนำกระแสขาเดรนเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง [9]

2.5.5 สภาวะหยุดนำกระแสเมื่อแรงดันระหว่างขาเกตและซอร์สลดลงต่ำกว่าแรงดัน VGS(th) จะทำให้มีแรงดันไม่เพียงพอสำหรับการแปรสภาพชั้นบอดี้ p เป็น n ได้ทำให้บริเวณ n-ไม่ตรงกับบริเวณซอร์ส n+ IGBT จึงอยู่ในสภาวะหยุดนำกระแส ในสภาวะนี้รอยต่อ J2 ที่ได้รับแรงดันไบอัสกลับจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้ยังทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) ขึ้นที่รอยต่อ J2 ด้วย บริเวณปลอดพาหะนี้จะขยายบริเวณกว้างขึ้นจนเกินเข้ามายังบริเวณ n- มากกว่าที่จะขยายไปยังบริเวณชั้นบอดี้ p เพราะชั้นบอดี้ p มีความหนาแน่นของสารที่โด๊ปบริเวณรอยเลื่อย n- มากเพียงพอก็จะทำให้การขยายบริเวณปลอดพาหะไม่สามารถแตะกับชั้นอินเจ็กติ้ง p-ได้ชั้นบัฟเฟอร์ n+(buffer layer) ก็ไม่จำเป็นต้องทำให้เกิดขึ้น หรือไม่จำเป็นต้องโด๊ปสาร ทั้งนี้เพราะการแตะกันของบริเวณทั้งสองจะทำให้เกิดการพังทลายทางด้านไบอัส ตรง สำหรับ IGBT ที่ไม่การโด๊ปสารในชั้นบัฟเฟอร์ n+นี้จะเรียกว่า IGBT แบบสมมาตรซึ่งจะมีอัตราทนแรงดันย้อนกลับ (VRM หรือ BVSDS) เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรไฟฟ้า

กระแสสลับการลดบริเวณความหนาของ n- ลงแต่ยังคงความสามารถของอัตราทนแรงดันตรงไว้ สามารถทำได้โดยเพิ่มชั้นบัฟเฟอร์ n+ เข้าไปเพื่อป้องกันการแตะกันของบริเวณปลอดพาหะกับบริเวณอินเจ็กติ้ง p+ซึ่งจะเรียก IGBT ชนิดนี้ว่า IGBT แบบไม่สมมาตร และจากการลดความหนาแน่นของบริเวณรอยเลื่อน n- จะช่วยส่งผลให้เกิดข้อดีสองประการคือ

- ทำให้แรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำลง เป็นผลให้การสูญเสียกำลังงานลดน้อยลงด้วย
- ช่วยลดช่วงเวลาหยุดนำกระแสให้สั้นลงได้
- แต่ข้อเสียของการเพิ่มชั้นบัฟเฟอร์ n+ ก็คือ จะลดความสามารถของอัตราทนแรงดันย้อนกลับให้เหลือน้อยลงเพียงไม่กี่สิบโวลต์ ทั้งนี้เมื่อ IGBT ได้รับแรงดันไบอัสกลับที่ขาเดรน รอยต่อ J1 ซึ่งทั้งสองข้างมีความหนาแน่นในการโด๊ปของสารมาก จะไม่สามารถทนแรงดันย้อนกลับได้สูง ดังนั้น IGBT ชนิดนี้ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

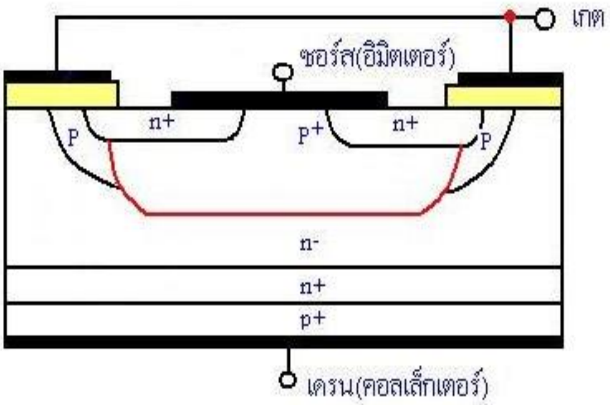
2.5.6 การแลตช์ใน IGBT นอกจากโฮลส่วนใหญ่ที่รวมกับอิเล็กตรอนภายใต้บริเวณ n- แล้วยังมีกระแสโฮลบางส่วนที่ไหลข้ามบริเวณ n- เข้าสู่บริเวณชั้นบอดี้ p โดยตรงผลของกระแสโฮลนี้ทำให้เกิดแรงดันตกตร่อมความต้านทานข้างเคียง (lateral resistance) แรงดันนี้มีค่ามากพอคือประมาณ 0.7 โวลต์ จะทำให้รอยต่อ J3 ได้รับไบอัสตรง เป็นผลให้อิเล็กตรอนจากบริเวณซอร์ส n+ ถูกฉีดเข้ามาในชั้นบอดี้ p หมายถึงขาเบสและอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นได้รับแรงดัน ไบอัสตรง ส่งผลให้ไทริสเตอร์ซึ่งแฝงอยู่ภายในโครงสร้างของ IGBT อยู่ในสภาวะแลตช์การนำกระแส ทำให้ที่ขาเกตไม่สามารถควบคุมปริมาณขิงกระแสเดรนได้อีกต่อไป แต่การควบคุมของกระแสเดรนนี้จะขึ้นอยู่กับตัวต้านทานที่นำมาต่อในวงจรภายนอก ถ้าหากมีการแล็ตช์เกิดขึ้นเป็นเวลานาน อาจทำให้ IGBT เสียหายได้ เพราะมีการสูญเสียกำลังงานเกินค่าพิกัดที่ทนได้ ส่วนใหญ่หรือมาตรฐานคู่มือการผลิต มักจะมีการบอกค่ากระแสเดรนสูงสุด ที่สามารถไหลผ่าน IGBT ได้โดยยังไม่เกิดการแล็ตช์ขึ้น (IDM) แต่เนื่องจากกระแสเดรนถูกกำหนดหรือควบคุมโดยตรงจากแรงดันระหว่างขาเกตและซอร์ส บางครั้งคู่มือบอกแรงดันสูงสุดระหว่างขาเกตและซอร์สสูงสุดที่จะทำให้ไม่เกิด การแลตช์แทนการบอกค่ากระแสเดรนสูงสุด(IDM) การแลตช์ที่กล่าวถึงข้างต้นเรียกว่าการแลตช์ในโหมดสแตติก เพราะเกิดขึ้นเมื่อกระแสที่ไหลในสภาวะนำกระแสมีค่าเกิน IDM แต่ลักษณะการแลตช์นี้ก็สามารถเกิดขึ้นได้ เรียกว่า โหมดไดนามิก ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนการทำงานจากสภานำกระแสเข้าสู่สภาวะหยุดนำ กระแสได้ด้วย บางครั้งการแลตช์นี้เกิดขึ้นได้แม้ว่ากระแสเดรนขณะนำกระแสยังมีค่าต่ำกว่า ค่า IDM ก็ตามทั้งนี้เพราะเมื่อ IGBT เริ่มหยุดนำกระแส กระแสเดรนจะตกลงอย่างรวดเร็วรอยต่อ J2จะต้องรับแรงดันย้อนกลับที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน ผลที่เกิดขึ้นทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายบริเวณชั้นบอดี้ p โดยเฉพาะจะขยายเข้าสู่บริเวณ n-มากกว่า เพราะมีความหนาแน่นของการโด๊ปต่ำกว่า การขยายบริเวณปลอดพาหะอย่างรวดเร็ว จะทำให้โฮลที่ค้างอยู่

บริเวณ n- ขณะนำกระแสและยังไม่ได้รวมกับอิเล็กตรอนหลุดรอดจากการขัดขวางของบริเวณปลอด พาหะเข้าไปสะสมอยู่ในบริเวณรอยต่อ J2 เป็นการเพิ่มกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานข้างเคียงให้สูงขึ้น ทำให้ไทริสเตอร์ภายใน IGBT เกิดดารแลตช์ขึ้นได้ เมื่อเกิดการแล็ตช์ขึ้นแรงดันตกคร่อมขาซอร์สและเดรนขณะนำกระแสจะมีค่าต่ำ กว่าระดับปกติ นอกจากนี้การแลตช์ยังสามารถเกิดขึ้นได้อีก เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิรอยต่อ ในขณะที่กระแสเดรนยังมีค่าต่ำกว่า IDM นั่นเอง

2.5.7 การป้องกันการแลตช์การหลีกเลี่ยงการแลตช์ของ IGBT สามารถทำได้ทั้งผู้ผลิตและผู้ใช้งานเองผู้ผลิตอาจจะออกแบบโครงสร้างในส่วน บริเวณบอดี้ p ให้มีความต้านทานข้างเคียงค่าต่ำที่สุด เพื่อจะได้ค่า IDM เพิ่มขึ้นให้มากที่สุด ซึ่งเป็นการลดโอกาสที่จะเกิดการแลตช์ลงได้มีอยู่สองวิธีดังภาพที่ 2.14

- วิธีแรกอาจทำได้โดยลดความกว้างของบริเวณซอร์ส n+ ลงนั่นคือลดค่า Ls ลงนั่นเอง
- วิธีที่สองเป็นการแบ่งระดับความหนาแน่นในการโด๊ปสารของบริเวณบอดี้ p

จะเห็นว่าบริเวณบอดี้ p ภายใต้เกตจะโด๊ปด้วยความหนาแน่นในระดับปกติ 1,016 cm3 และมีความหนาแน่นน้อยกว่าของบริเวณซอร์ส n+ แต่ส่วนอื่นที่เหลือของบริเวณบอดี้ p จะโด๊ปด้วยความหนาแน่นที่มากกว่าคือ 1,019 cm3 รวมถึงความหนาก็จะมากกว่าด้วยการทำเช่นนี้จะทำให้เพิ่มความสามารถในการนำ กระแสให้สูงขึ้น เป็นการลดความต้านทานข้างเคียงให้น้อยลงได้สำหรับผู้ใช้งานก็สามารถป้องกันการแลตช์ในโหมดสแตติกได้ โดยออกแบบไม่ ให้กระแสที่ไหลในโหลดไหลเกินค่ากระแส IDM และป้องกันการแลตช์ในโหมดไดนามิกได้ โดยหน่วงเวลาขณะหยุดนำกระแสให้ยาวขึ้น เพื่อให้โฮลที่ยังค้างอยู่ในบริเวณ n- มีเวลาพอที่จะรวมกับอิเล็กตรอน เป็นการลดกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานข้างเคียงให้น้อยลงได้ การหน่วงเวลาขณะหยุดนำกระแสให้ยาวนานขึ้น ทำได้โดยการเพิ่มความต้านทานภายนอกอนุกรมเข้ากับขาเกตของ IGBT



ภาพที่ 2.14 การป้องกันการแลตช์ [9]

2.5.8 วงจรสมมูลของ IGBT แสดงในดังภาพที่ 2.15 โดยในภาพที่ (ก) นั้นจะเห็นว่าในบริเวณบอดี้ p ชั้นบริเวณ n- และชั้นอิงเจ็กติ้ง p+ จะคล้ายกับทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็น โดยแทนได้ด้วยขาคอลเล็กเตอร์ ,เบส และอิมิตเตอร์ ตามลำดับและบริเวณภายใต้เกตก็จะแทนได้ด้วยมอสเฟตซึ่งจะมีความต้านทานบริเวณ n- เชื่อมขาเบสของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพีเข้ากับขาเดรนของมอสเฟต ซึ่งเมื่อเขียนวงจรสมมูลออกมาจะได้วงจรดังภาพที่ 2.15 (ข)

- จากภาพที่ 2.15 (ก) จะเห็นว่าเป็นวงจรดาร์ลิงตัน โดยมีมอสเฟตเป็นตัวขับทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี แต่มีจุดพิเศษที่แตกต่างจากวงจรทั่วไป คือกระแสเดรนส่วนใหญ่จะไหลจากอิมิตเตอร์มายังเบส ผ่านความต้านทานบริเวณรอยเลื่อน และผ่านขาเดรนของมอสเฟตมาจบลงที่ขาซอร์ส จะมีกระแสส่วนน้อยเท่านั้นที่ไหลจากอิมิตเตอร์มายังคอลเล็กเตอร์และขาซอร์ส สำหรับวงจรในรูปที่ 2.15 (ค) จะแสดงให้เห็นว่าภายใน IGBT มีไทริสเตอร์แฝงอยู่ด้วย โดยดูได้จากทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็นและพีเอ็นพีต่อเข้าด้วยกันในลักษณะ ที่มีการป้อนกลับ ทำให้เห็นได้ชัดถึงเหตุที่ทำให้เกิดการแลตช์ของ IGBT

- ถ้ากระแสส่วนน้อยที่ไหลผ่านจากอิมิตเตอร์มายังคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ พีเอ็นพี ผ่านความต้านทานข้างเคียงแล้วทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความต้านทานสูงกว่า 0.7 โวลต์ ทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นจะนำกระแส ส่งผลให้เกิดการแลตช์ขึ้นใน IGBT สำหรับแรงดันตกคร่อมขาเดรนและซอร์สของ IGBT ขณะนำกระแส(VDS(on)) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

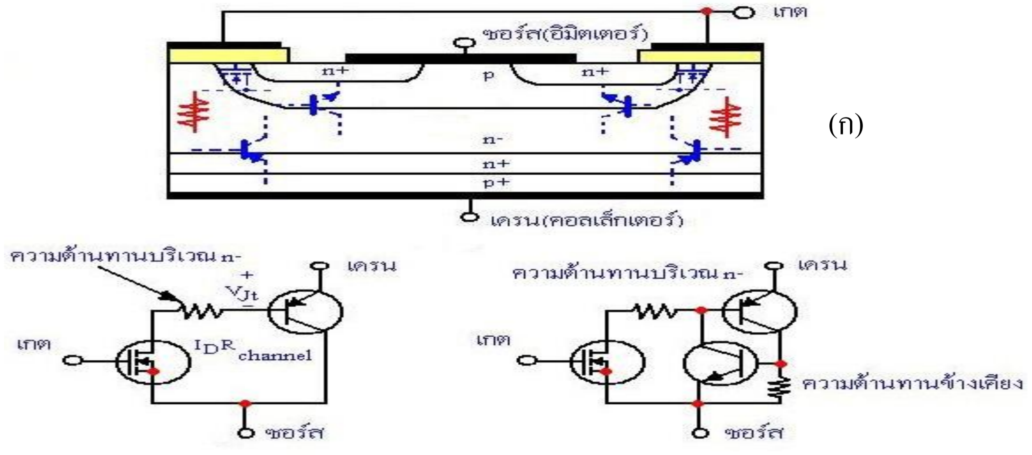
$$VDS(on)=Vj1+Vdrift+IDRchannel \quad (1)$$

- เมื่อ Vj1 เป็นแรงดันไบอัสตรงที่ตกคร่อมรอยต่อพีเอ็น จึงมีค่าค่อนข้างจะคงที่ จะมีการเปลี่ยนแปลงบ้างก็เล็กน้อย เพราะมีความสัมพันธ์โดยตรงในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียลกับกระแส ทำให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.7-1 โวลต์

- Vdrift เป็นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานบริเวณรอยเลื่อน ซึ่งความต้านทานนี้มีค่าค่อนข้างคงที่ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงดันในมอสเฟตแล้วจะมีค่าน้อยกว่าเพราะผลของการมอดู เลตสภาพนำที่เกิดขึ้นใน IGBT Rchannel เป็นค่าความต้านทานในย่าน 1- 1,000 โอห์ม มีค่าค่อนข้างคงที่ IDRchannel เป็นแรงดันตกคร่อมมอสเฟต

- ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า VDS(on)จะมีค่าสูงมากขึ้นตามค่ากระแสเดรนที่สูงขึ้น โดยทั่วไป IGBT จะสามารถทำงานได้ในอุณหภูมิรอยต่อสูงสุดถึง 150 องศาเซลเซียล และผลของการเปลี่ยนอุณหภูมิจากค่าอุณหภูมิห้องไปถึงค่าสูงสุดนี้ จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า VDS(on) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพราะ IGBT มีค่า VDS(on) เป็นผลรวมระหว่างแรงดันตกคร่อมมอสเฟตที่มีสัมประสิทธิ์

ทางอุณหภูมิเป็นบวก (อุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันตกคร่อมความต้านทานบริเวณลอยเลื่อนจะสูงขึ้นตาม) กับแรงดันตกคร่อมความต้านทานบริเวณรอยเลื่อนที่มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นลบ



(ก)

(ข) (ค)

ภาพที่ 2.15 วงจรสมมูลของ (ไอจีบีที) [9]

(ก) ลักษณะภายในของ IGBT

(ข) ลักษณะวงจร IGBT ภายใต้เกตแทนด้วยมอสเฟส

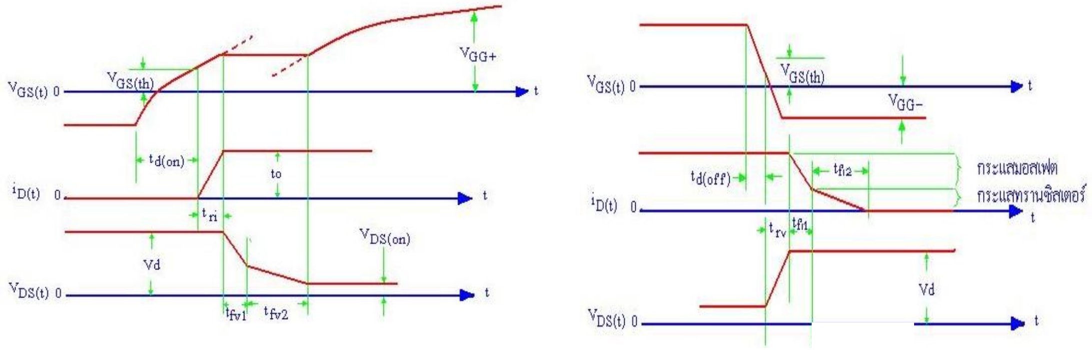
(ค) ลักษณะวงจร IGBT มีไทริสเตอร์แฝงอยู่

2.5.9 ลักษณะการสวิตช์ จะมีลักษณะของสัญญาณกระแสและแรงดันในช่วงเวลาที่เกิดการนำกระแสและหยุดนำกระแส

- โดยช่วงเวลาในการนำกระแสของ IGBT ดังภาพที่ 2.16 (ก) ซึ่งจะมีลักษณะการนำกระแสคล้ายกับการนำกระแสของมอสเฟต คือจะมีเวลาก่อนการนำกระแส (td(on)) นับตั้งแต่เวลาที่แรงดันระหว่างเกตกับซอร์สอยู่ในช่วง VGG- จนถึง VGS(th) ความจริงแล้วการป้อนแรงดันนี้จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดจากค่า VGG- เป็น VGG+ แต่มีลักษณะเป็นเอ็กซ์โปเนนเซียล

- เหตุที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากผลการชาร์จประจุของตัวเก็บประจุระหว่างเก ตกับซอร์สและเกตกับเดรนภายใน IGBT แรงดันที่ขาเดรนจะยังคงที่ในช่วงเวลาขาขึ้น(tri)หรือในช่วงเวลาที่กระแสเดรน ยังไม่ถึงค่ากระแสทำงาน (Io)หลังจากนั้นกระแสเดรนก็จะคงที่แต่แรงดันจะจะตกลงสู่ค่า VSD(on)โดยแบ่งช่วงเวลาลงเป็นสองช่วง คือช่วง tfv1เป็นช่วงที่ทำงานอยู่ในย่านความต้านทานสูง (Rchannel)ส่วน tfv2 ช่วงที่ทำงานอยู่ในช่วงความต้านทานต่ำ (Rchannel)

- ภาพที่ 2.16 (ข) เป็นรูปแสดงลักษณะกระแสและแรงดันในช่วงเวลาที่ IGBT หยุดนำกระแส จะเห็นได้ว่ากระแสเดรนยังคงที่อยู่ตลอดช่วงเวลาที่แรงดันขาเดรนเพิ่มขึ้น และมีช่วงเวลาลงของกระแสเดรนที่แตกต่างชัดเจนสองช่วงโดยช่วงแรก tfi1 จะเป็นช่วงหยุดนำกระแสของมอสเฟตภายใน IGBT และช่วง tfi2 จะเป็นช่วงหยุดนำกระแสของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี ซึ่งจะช้ากว่ามอสเฟต ทำให้ช่วงเวลานี้นานกว่าช่วงแรกและมีการสูญเสียกำลังงานมากในช่วงนี้



(ก) (ข)

ภาพที่ 2.16 (ก) ลักษณะการสวิตช์ของกระแสและแรงดันขณะนำกระแส [9]
(ข) ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะหยุดนำกระแส [9]

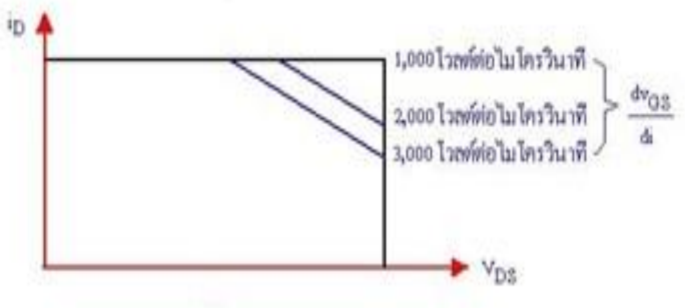
2.5.10 พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัย IGBT มีพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยทั้งในระหว่างนำกระแสและหยุดนำกระแส โดยมีพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยในขณะไบอัสตรง (forward bias safe operating area : FBSOA)ที่กว้างมาก เกือบได้เป็นสี่เหลี่ยมสำหรับเวลาในการสวิตช์ที่สั้นๆ แต่จะแคบลงเมื่อเวลาในการสวิตช์ยาวนานขึ้น ซึ่งถ้าเทียบกับเพาเวอร์มอสเฟตแล้ว IGBT จะทำงานได้ในช่วงพื้นที่ที่กว้างกว่าเมื่อเวลาในการสวิตช์เท่ากัน ดังภาพที่ 2.17

- ในช่วงระยะเริ่มนำกระแสและขณะที่นำกระแสแล้ว จุดการทำงานของ IGBT จะต้องมีขนาดแรงดันและกระแสที่ขาเดรนอยู่ภายในพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยในช่วงไบอัสตรงเสมอ หากไม่เช่นนั้นแล้วจะทำให้เกิดการเสียหายขึ้นกับ IGBT จากรูปพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยของ IGBT นี้แสดงถึงขีดจำกัดของกระแสเดรน , อัตราทนแรงดันไหลตรง และอุณหภูมิรอยต่อของ IGBT ตามลำดับ

- สำหรับการทำงานที่ปลอดภัยในช่วงไบอัสกลับ (reverse bias safe operating area : RBSOA) จะแตกต่างจากในช่วงไบอัสตรง โดยในรูปนี้จะแสดงค่าจำกัดของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขาเดรนต่อเวลา (dvDS/dt) ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงระหว่างหยุดนำกระแส แทนขีดจำกัดทางด้าน

อุณหภูมิรอยต่อ และ จะมีพื้นที่แคบลงถ้า (dvDS/dt) มีค่าสูงมากขึ้น ส่วนเหตุผลที่ถูกจำกัดโดยค่านี้เพราะไม่ต้องการให้เกิดการแลตช์ขึ้นที่ IGBT

- ค่า (dvDS/dt) นี้จะมีผลโดยตรงกับช่วงเวลาหยุดนำกระแส หมายความว่าถ้ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงเร็วจะทำให้ช่วงเวลาหยุดนำกระแสน้อย แต่ก็ยังถือว่าโชคดีที่ขีดจำกัด (dvDS/dt) ของ IGBT มีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ไทริสเตอร์ตัวอื่นๆ ดังนั้นความจำเป็นในการใช้วงจรสนับเบอร์เพื่อป้องกันการแลตช์ก็ไม่มีความจำ เป็นต้องใช้ และการควบคุมค่า (dvDS/dt) ที่เกิดขึ้นยังทำได้ง่ายขึ้นด้วยการออกแบบวงจรขับเกตที่มีค่าความต้านทานที่ ต่อกับขาเกตและค่า VGG- ที่เหมาะสม



ภาพที่ 2.17 พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัย (ไอจีบีที) [9]