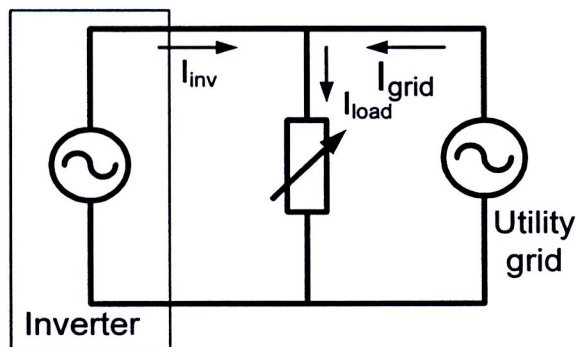


บทที่ 3 การทดสอบ Unintentional Islanding

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า การนำอินเวอร์เตอร์มาใช้งานในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้นต้องผ่านการทดสอบตามมาตรฐานดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 จึงสามารถนำระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายนั้นมาใช้ได้อย่างปลอดภัยต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า วิทยานิพนธ์นี้มุ่งศึกษาถึงผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าในขณะเกิดฟอลท์ กล่าวคือในระบบจำหน่ายที่มีระบบผลิตไฟฟ้ารายย่อยต่ออยู่ หากเกิดสิ่งผิดปกติขึ้นในระบบจำหน่ายไม่ว่าจะเป็นการเกิดลัดวงจรระหว่างสายตัวนำในระบบจำหน่าย ดันไม้ล้มใส่สายไฟฟ้าระบบจำหน่ายตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้า ทำให้ระบบจำหน่ายไม่มีกระแสไฟฟ้าอยู่ในระบบจำหน่าย จะเกิดปรากฏการณ์การจ่ายไฟฟ้าแบบแยกตัวอิสระ (Islanding) คือการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าบางส่วนในขณะที่ระบบจำหน่ายไม่มีการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจำหน่ายไฟฟ้า ปรากฏการณ์ Islanding เป็นปรากฏการณ์อย่างหนึ่งของระบบผลิตไฟฟ้ารายย่อยที่มีผลต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าและจะทำให้กระแสฟอลท์สูงขึ้น ซึ่งไดอะแกรมการต่ออินเวอร์เตอร์แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมอินเวอร์เตอร์ที่ต่อกับระบบจำหน่าย

ปรากฏการณ์ Islanding นี้เป็นอันตรายอย่างมากต่อผู้ปฏิบัติงานในระบบจำหน่าย หากระบบผลิตไฟฟ้ารายย่อยมีจำนวนมาก ซึ่งเมื่อเกิดฟอลท์ขึ้นในระบบจำหน่ายแล้วระบบผลิตไฟฟ้ารายย่อยอาจไม่รับรู้ว่าจะระบบจำหน่ายรอบข้างหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าและยังคงจ่ายกระแสไฟฟ้าอยู่ ด้วยเหตุนี้นระบบผลิตไฟฟ้ารายย่อยจึงต้องสามารถตรวจจับ Islanding และหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยทันที ในการนำอินเวอร์เตอร์มาใช้งานกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้น จำเป็นต้องมีการทดสอบเพื่อป้องกันการเกิด Islanding เพื่อลดผลกระทบดังกล่าว ในบทนี้จะ

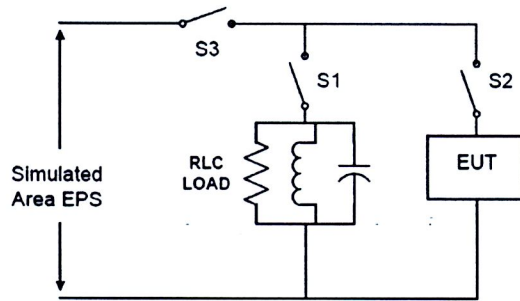
กล่าวถึงขั้นตอนการทดสอบ Unintentional Islanding และผลของการทดสอบ Unintentional Islanding ตามมาตรฐาน IEEE-1547

อีกวัตถุประสงค์ของการทดสอบอินเวอร์เตอร์คือหาพฤติกรรมการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์และเวลาที่อินเวอร์เตอร์ทำการหยุดจ่ายกระแสขณะเกิด Islanding ซึ่งเมื่อในระบบจำหน่ายเกิดฟอลต์และหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าแล้วอินเวอร์เตอร์ตรวจจับการหยุดจ่ายกระแสนั้นได้และทำการตัดตัวเองออกจากระบบจำหน่าย ซึ่งเวลาการหยุดจ่ายกระแสและรูปคลื่นกระแสและแรงดันของอินเวอร์เตอร์ขณะหยุดจ่ายกระแสเป็นสิ่งที่เราศึกษาเพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ในการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายต่อไป

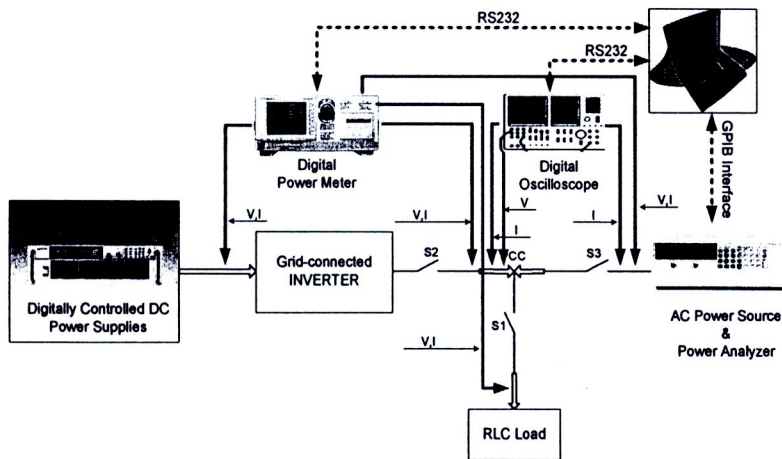
3.1 การทดสอบอินเวอร์เตอร์

การทดสอบอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้านี้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE-1547 [16] แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบการทำงานตามฟังก์ชัน และการทดสอบระบบการป้องกัน (Protection) ซึ่งมีมาตรฐานอ้างอิงในการทดสอบได้แก่ มาตรฐาน IEEE 929-2000 [15] (ยกเลิกไปแล้ว) และมาตรฐาน IEEE-1547 ดังนั้นในการทดสอบอินเวอร์เตอร์นี้จะทดสอบตามมาตรฐาน IEEE-1547 ซึ่งในการทดสอบนี้จะทดสอบเฉพาะหัวข้อ Unintentional Islanding เป็นการทดสอบอินเวอร์เตอร์เพื่อไม่ให้เกิด Islanding กล่าวคือในขณะที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อไม่มีไฟฟ้าที่มีสาเหตุจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าเกิดฟอลต์หรือระบบจำหน่ายหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อการซ่อมบำรุง อินเวอร์เตอร์ต้องตรวจจับเหตุการณ์นั้นได้และต้องทำการปลดการเชื่อมต่อโดยทันทีภายในเวลาที่กำหนด ทั้งนี้หากอินเวอร์เตอร์ไม่รับรู้เหตุการณ์เหล่านั้นและยังคงจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าอยู่จะทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยต่อเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าในกรณีระบบผลิตไฟฟ้ารายย่อยมีจำนวนมาก เพื่อความปลอดภัยต่อพนักงานเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานและอินเวอร์เตอร์ที่จะนำมาใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย จะต้องมียระบบป้องกันการเกิด Islanding นั้นด้วย

การทดสอบนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการหยุดจ่ายกระแสและเวลาการหยุดจ่ายกระแส ของอินเวอร์เตอร์ในขณะที่เกิด Islanding สำหรับการทดสอบได้ดำเนินการตามขั้นตอนในมาตรฐาน IEEE 1547.1 หัวข้อ 5.7 และมีวงจรการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 แสดงไดอะแกรมการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ Unintentional Islanding



รูปที่ 3.2 โค้ดแกรมการต่อวงจรทดสอบ Unintentional Islanding ตามมาตรฐาน IEEE-1547 [16]



รูปที่ 3.3 โค้ดแกรมการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ Unintentional Islanding

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและเก็บข้อมูล

ในการทดสอบ Unintentional Islanding ตามมาตรฐาน IEEE-1547 ต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ ประกอบในการวัดและบันทึกผล ดังปรากฏในรายการข้างล่างนี้

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจำลองระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ยี่ห้อ Xantrex รุ่น XDC300-20
2. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแบบโปรแกรม ยี่ห้อ Agilent รุ่น 6813B
3. เครื่องมือวัดและวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า (Digital power meter) ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น WT1600
4. ออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล ยี่ห้อ Agilent รุ่น DSO 6014A
5. คอมพิวเตอร์
6. อินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อบนหน้า ยี่ห้อ SMA รุ่น SWR 1700E รายละเอียดข้อมูลต่างๆ ทางด้านเทคนิคที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์ที่ทำการทดสอบ

Technical Data-SMA SWR 1700E	
Input Values	
Recommended max. generator (PPV)	2050Wp
Max. DC power (PDC, max)	1850 W
Max. DC Voltage (VDC, max)	400 V
PV voltage range (MPPT VPV)	139 V ...400V
Max. input current (IPV, max)	12.6 A
Voltage ripple of input voltage (VSS)	< 10%
Max. number of strings(in parallel)	2
Output values	
Max. AC power	1700 W
Nominal AC power	1500 W
Harmonic distortion of output (K _{IAC})	<4%
Operating range grid voltage (VAC)	198 V – 251 V
Mains Frequency (FAC)	49.8 Hz – 50.2 Hz
Efficiency	
Max. Efficiency	93.5%
Europ. Efficiency	91.8%

7. โหลดไฟฟ้าประกอบด้วย
- โหลด ความต้านทาน (R)
 - โหลด อินดักเตอร์ (L)
 - โหลด คาปาซิเตอร์ (C)

3.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

เมื่อดังค่าเครื่องมือและอุปกรณ์ตามหัวข้อที่กล่าวมาแล้ว ทำการทดสอบอินเวอร์เตอร์แบบต่อกับระบบจำหน่าย ซึ่งขั้นตอนการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE-1547 หัวข้อ Unintentional Islanding ซึ่งแสดงตามหัวข้อด้านล่าง

- 1) ติดตั้งอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อบรรยากาศตามรูปที่ 3.2
- 2) ติดตั้งเครื่องมือวัด ตามรูปที่ 3.3
- 3) ตั้งค่าพารามิเตอร์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทางอินพุตอินเวอร์เตอร์ให้อยู่ในช่วงที่อินเวอร์เตอร์ทำงานในสภาวะที่ปกติ
- 4) ตั้งค่าพารามิเตอร์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ให้อยู่ในค่าการทำงานปกติ
- 5) ปรับค่าแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงด้านอินพุตให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่พิกัด (100%) ของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต
- 6) บันทึกการตั้งค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ปรับตั้งได้แก่ ค่ากระแส แรงดันไฟฟ้า ที่จ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ และค่ากำลังไฟฟ้าจริง(P) กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ (S) กำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ เป็นต้น
- 7) ตัดอินเวอร์เตอร์ออกจากวงจร
- 8) ต่อโหลด RLC และตั้งค่าให้ได้ quality factor Q_f เท่ากับ 1.0 ± 0.05 ($Q_f = 1.0$ เมื่อ $Q_L = P_{qC} = 1.0 \cdot P$) ค่าของ Q_f ที่เหมาะสมพิจารณาโดยใช้สมการดังนี้

$$Q_f = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (3.1)$$

หรือ

$$Q_f = \frac{\sqrt{P_{qL} \times P_{qC}}}{P} \quad (3.2)$$

เมื่อ

Q_f	=	ตัวประกอบคุณภาพของโหลด RLC แบบขนาน
R	=	ความต้านทาน (Ω)
L	=	โหลดเหนี่ยวนำ (H)
C	=	โหลดตัวเก็บประจุ (F)
P_{qL}	=	Reactive Power ต่อเฟส ประกอบด้วย Inductive Load (VARs)
P_{qC}	=	Reactive Power ต่อเฟส ประกอบด้วย Capacitive Load (VARs)
P	=	กำลังไฟฟ้าต่อเฟสด้านเอาต์พุต (W)
f	=	ความถี่ (Hz)

เมื่อปรับกำลังไฟฟ้าสำหรับการสมดุลระหว่าง RLC แล้ว

- 9) สับ S1, S2 และ S3 และรอกจนกว่าอินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าตามที่กำหนด

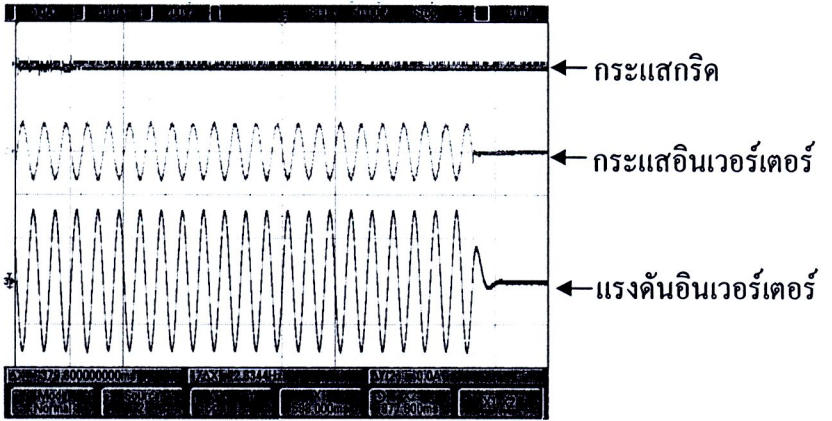
- 10) สังเกตและปรับโหลด R L และ C จนกระแส (fundamental frequency) ที่ผ่าน S3 น้อยกว่า 2% ของกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์
- 11) เปิด S3 และบันทึกรูปคลื่นกระแสและแรงดันของอินเวอร์เตอร์ จนอินเวอร์เตอร์หยุดจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด *RLC*
- 12) ทำการทดสอบซ้ำอีกครั้งด้วยการปรับโหลด (Capacitive หรือ Inductive) ปรับขึ้น 1% และปรับลงถึง 105% และ 95% ตามลำดับ
- 13) ตรวจสอบผลลัพธ์ของขั้นตอนก่อนหน้านี้ ถ้าพบว่า เวลาในการหยุดทำงานของอินเวอร์เตอร์มากที่สุดสามค่าติดกันให้ทดสอบซ้ำอีกสองครั้ง ถ้าเวลาหยุดยาวที่สุดสามค่าปรากฏไม่เป็นไปตามลำดับตามค่าที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง 1% ให้ทดสอบซ้ำ 2 สองครั้งตลอดค่าที่อยู่ระหว่างทั้งหมด
- 14) ทำซ้ำขั้นตอน 4 ถึง 13 ด้วยการจำกัดค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ 66% ของพิกัดค่านี้จะอยู่ระหว่าง 50% และ 95% ของเอาต์พุต และมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินอินเวอร์เตอร์ที่น้อยกว่าพลังงานที่พิกัด และการจำกัดกำลังไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขนี้จำกัดโดยการควบคุมกำลังไฟฟ้านานอินพุต
- 15) ทำซ้ำขั้นตอน 4 ถึง 13 อีกครั้งด้วยจำกัดพลังงานเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ 33% ของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่พิกัดและการจำกัดกำลังไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขนี้จำกัดโดยการควบคุมกำลังไฟฟ้านานอินพุต

ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบหากอินเวอร์เตอร์ใช้เวลามากกว่าที่กำหนดในการหยุดจ่ายกระแสให้ถือว่า การทดสอบไม่ผ่านเวลาที่กำหนดคือ 2 วินาที

3.2 ผลการทดสอบ Unintentional Islanding

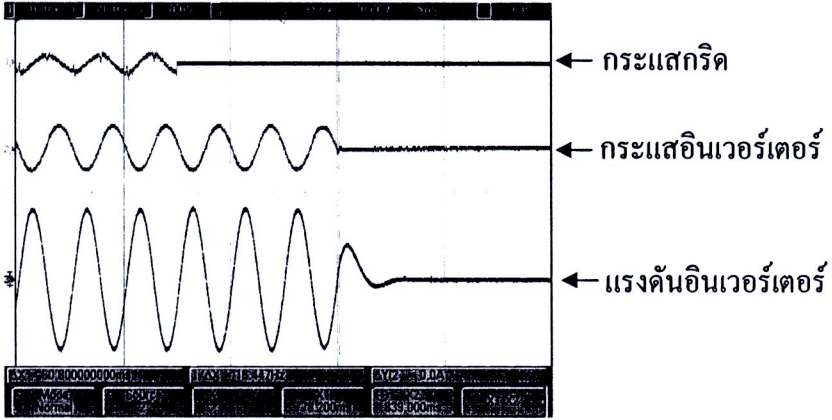
การทดสอบ Unintentional Islanding ตามมาตรฐาน IEEE-1547 ตามหัวข้อที่กล่าวมาข้างต้นเป็นขั้นตอนการทดสอบอินเวอร์เตอร์ตามมาตรฐาน เพื่อทดสอบหน้าที่การป้องกันการเกิด Islanding ของอินเวอร์เตอร์ เมื่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าฟอลต์หรือระบบจำหน่ายหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อการซ่อมบำรุงหรือเหตุใดก็ตาม อินเวอร์เตอร์ที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบจำหน่ายต้องหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าภายในเวลาที่กำหนด เพื่อความปลอดภัยต่อพนักงานเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานและเพื่อลดกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย และนี่คือตัวอย่างผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์รุ่น SWR1700E ในหัวข้อ Unintentional Islanding ตามมาตรฐาน IEEE-1547

ตัวอย่างการทดสอบ Unintentional Islanding ที่ภาระ 33% ของอินเวอร์เตอร์ ผลของการทดสอบเวลาที่อินเวอร์เตอร์หยุดจ่ายกระแสคือ 397.60 มิลลิวินาที ซึ่งอยู่ภายในเวลาที่กำหนด ซึ่งมาตรฐานกำหนดไว้ 2 วินาที ซึ่งผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.4



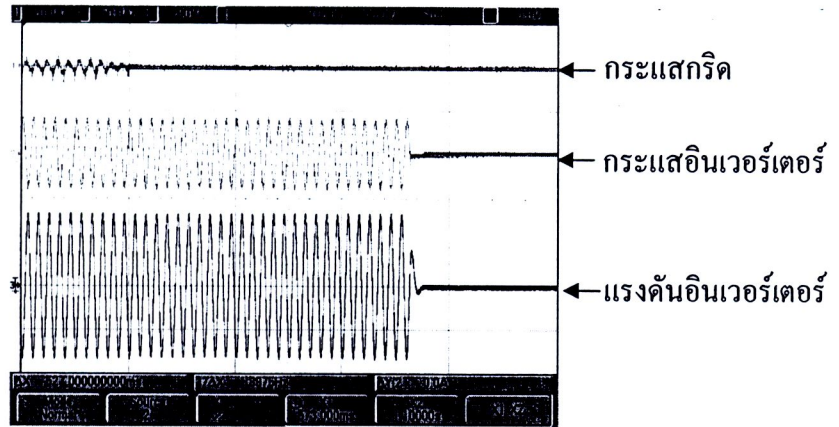
รูปที่ 3.4 รูปคลื่นกระแสกริด กระแสและแรงดันอินเวอร์เตอร์ ที่ภาระ 33% ของกำลังรวมอินเวอร์เตอร์

ตัวอย่างการทดสอบ Unintentional Islanding ที่ภาระ 66% ของอินเวอร์เตอร์ ผลการทดสอบเวลาที่อินเวอร์เตอร์หยุดจ่ายกระแสคือ 60.80 มิลลิวินาที ซึ่งอยู่ภายในเวลาที่มาตรฐานกำหนด มาตรฐานกำหนดไว้ 2 วินาที ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 รูปคลื่นกระแสกริด กระแสและแรงดันอินเวอร์เตอร์ ที่ภาระ 66% ของกำลังรวมอินเวอร์เตอร์

ตัวอย่างการทดสอบ Unintentional Islanding ที่ภาระ 100% ของอินเวอร์เตอร์ ผลการทดสอบเวลาที่อินเวอร์เตอร์หยุดจ่ายกระแสคือ 527.0 มิลลิวินาที ซึ่งอยู่ภายในเวลาที่มาตรฐานกำหนด มาตรฐานกำหนดไว้ 2 วินาที ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 รูปคลื่นกระแสดกริด กระแสและแรงดันอินเวอร์เตอร์ ที่ภาระ 100% ของกำลังรวมอินเวอร์เตอร์

รายละเอียดการทดสอบในช่วง $33 \pm 5\%$, $66 \pm 5\%$ และ $100 \pm 5\%$ จะแสดงในภาคผนวก ง จากผลการทดสอบการเกิด Unintentional Islanding ตามมาตรฐาน IEEE-1547 นั้นเมื่อสังเกตที่รูปคลื่นกระแสและแรงดันของอินเวอร์เตอร์ขณะเวลาที่ขนาดของรูปคลื่นลดลงเป็นศูนย์ พฤติกรรมของการลดขนาดของรูปคลื่นนั้น ไม่เหมือนกับรูปคลื่นของเครื่องจักรกลชนิดหมุนซึ่งเมื่อเกิดฟอลต์แล้วกระแสจะมีขนาดสูงและลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งพฤติกรรมการหยุดจ่ายกระแสของอินเวอร์เตอร์นี้จะนำมาหาแบบจำลองแทนระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในบทถัดไป

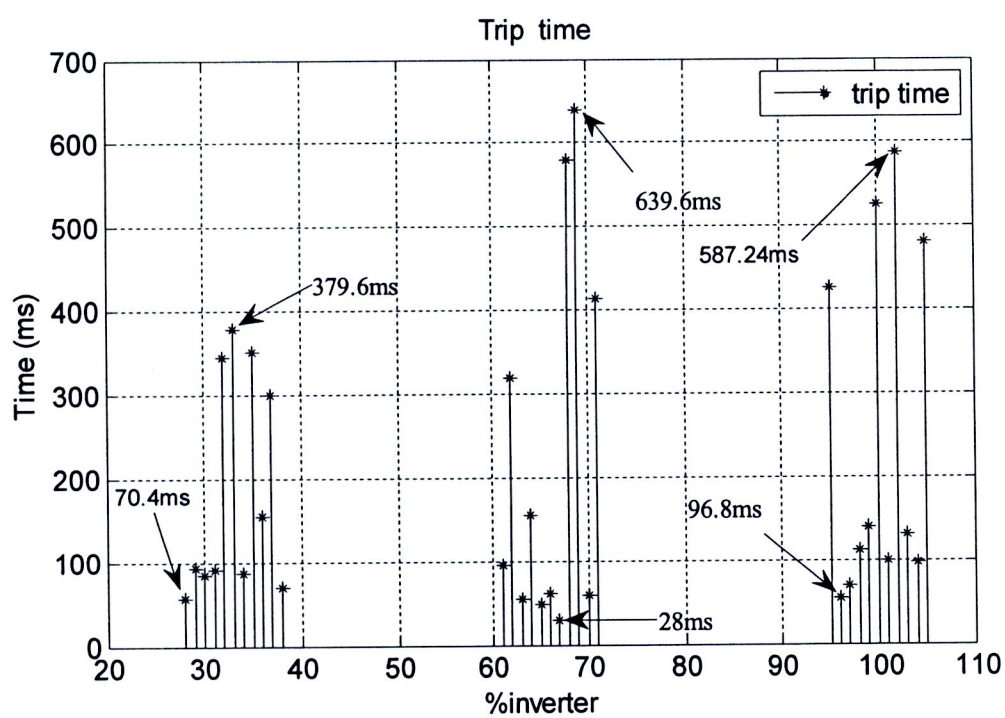
ตารางที่ 3.2 แสดงให้เห็นถึงเวลาที่อินเวอร์เตอร์ใช้ในการหยุดจ่ายกระแสกรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเกิดฟอลต์และตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์ก็จะต้องสามารถตรวจจับแรงดันในระบบจำหน่ายไฟฟ้าและเมื่อพบว่าระบบจำหน่ายหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์ก็หยุดการจ่ายกระแสซึ่งเวลานานที่สุดเมื่อขณะระบบจำหน่ายเกิดฟอลต์ อินเวอร์เตอร์ตรวจจับการหยุดจ่ายกระแสของระบบจำหน่ายนั้นได้และหยุดจ่ายกระแสจนเหลือประมาณศูนย์ (จากการทดสอบ) คือ 639.6 มิลลิวินาที ที่กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 69% และเวลาที่สั้นที่สุดคือ 28 มิลลิวินาที ที่กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 67% ตามลำดับ จากการที่อินเวอร์เตอร์มีพฤติกรรมเช่นนี้คือใช้เวลาในการหยุดจ่ายกระแส ซึ่งอินเวอร์เตอร์ไม่ได้หยุดจ่ายกระแสในทันทีทันใด การที่อินเวอร์เตอร์ไม่หยุดจ่ายกระแสทันทีทันใดย่อมส่งผลกระทบต่อกระแสฟอลต์ จากตารางที่ 3.2 นำไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและเปอร์เซ็นต์การจ่ายโหลดของอินเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5

ตารางที่ 3.2 แสดงเวลาที่อินเวอร์เตอร์หยุดจ่ายกระแสที่โหลดค่าต่างๆ

เวลาที่อินเวอร์เตอร์หยุดจ่ายกระแสที่โหลดค่าต่างๆ					
LOAD	Trip time (ms)	LOAD	Trip time (ms)	LOAD	Trip time (ms)
95%	426.0	61%	94.8	28%	56.2
96%	54.8	62%	319.0	29%	92.8
97%	70.4	63%	53.4	30%	84.0
98%	111.2	64%	155.6	31%	91.6
99%	139.2	65%	48.6	32%	345.0
100%	527.0	66%	60.8	33%	379.6
101%	98.3	67%	28.0	34%	86.4
102%	587.24	68%	578.4	35%	351.0
103%	131.4	69%	639.6	36%	155.0
104%	96.2	70%	59.0	37%	300.0
105%	482.2	71%	414	38%	70.4
ค่าเฉลี่ยเวลา	182.9	ค่าเฉลี่ยเวลา	222.83	ค่าเฉลี่ยเวลา	247.63

จากรูปที่ 3.5 แสดงเวลาหยุดจ่ายกระแสของอินเวอร์เตอร์ที่ขนาดของภาระต่าง ๆ จากการทดสอบอินเวอร์เตอร์ตามมาตรฐาน IEEE-1547 ได้แบ่งการทดสอบอินเวอร์เตอร์ออกเป็น 3 ช่วงคือ $33\pm5\%$, $66\pm5\%$ และ $100\pm5\%$ ของภาระอินเวอร์เตอร์ตามลำดับ จากรูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นเวลาที่อินเวอร์เตอร์ใช้ในการหยุดจ่ายกระแส เวลาการหยุดจ่ายกระแสของอินเวอร์เตอร์ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละช่วง กล่าวคือที่ภาระช่วง $33\pm5\%$ ของกำลังไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์จ่ายออกมาเวลานานที่สุดที่อินเวอร์เตอร์ใช้ในการหยุดจ่ายกระแสคือ 379.6 มิลลิวินาที และเวลาน้อยที่สุดที่อินเวอร์เตอร์ใช้ในการหยุดจ่ายกระแสคือ 70.4 มิลลิวินาที ค่าเฉลี่ยเวลาที่อินเวอร์เตอร์ใช้ในการหยุดจ่ายกระแสในช่วงนี้คือ 182.9 มิลลิวินาที ที่ภาระช่วง $66\pm5\%$ ของกำลังไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์จ่ายออกมาเวลานานที่สุดที่

อินเวอร์เตอร์ใช้ในการหยุดจ่ายกระแสคือ 639.6 มิลลิวินาที และเวลาน้อยที่สุดที่อินเวอร์เตอร์ใช้ในการหยุดจ่ายกระแสคือ 28 มิลลิวินาที ค่าเฉลี่ยเวลาที่อินเวอร์เตอร์ใช้ในการหยุดจ่ายกระแสในช่วงนี้คือ 222.83 มิลลิวินาที และสุดท้ายที่ภาระช่วง $100\pm5\%$ ของ กำลังไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์จ่ายออกมา เวลานานที่สุดที่อินเวอร์เตอร์ใช้ในการหยุดจ่ายกระแสคือ 587.24 มิลลิวินาที และเวลาน้อยที่สุดที่อินเวอร์เตอร์ใช้ในการหยุดจ่ายกระแสคือ 96.8 มิลลิวินาที ค่าเฉลี่ยเวลาที่อินเวอร์เตอร์ใช้ในการหยุดจ่ายกระแสในช่วงนี้คือ 247.63 มิลลิวินาที เวลาเฉลี่ยที่อินเวอร์เตอร์ใช้ในการหยุดจ่ายกระแสตลอดการทดสอบคือ 217.79 มิลลิวินาที



รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบเวลาหยุดจ่ายกระแสของอินเวอร์เตอร์

จากรูปกราฟที่ได้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานแต่ละมาตรฐาน ซึ่งมาตรฐานสากลที่เป็นที่ยอมรับคือมาตรฐาน IEEE-1547 และ มาตรฐาน IEC 61727 ซึ่งทั้งสองมาตรฐานได้กำหนดให้อินเวอร์เตอร์ที่ใช้สำหรับต่อเชื่อมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า เมื่อเกิด Islanding แล้วต้องหยุดจ่ายกระแสภายใน 2 วินาที ซึ่งเราสามารถนำมาสร้างเป็นตารางเปรียบเทียบเวลาการหยุดจ่ายกระแสกับมาตรฐานต่างๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบ trip time ของอินเวอร์เตอร์เทียบกับมาตรฐานต่างๆ

% Inverter	Trip time (ms)	มาตรฐาน	
		IEC 61727	IEEE-1547
28%	56.2	✓	✓
29%	92.8	✓	✓
30%	84.0	✓	✓
31%	91.6	✓	✓
32%	345.0	✓	✓
33%	379.6	✓	✓
34%	86.4	✓	✓
35%	351.0	✓	✓
36%	155.0	✓	✓
37%	300.0	✓	✓
38%	70.4	✓	✓
61%	94.8	✓	✓
62%	319.0	✓	✓
63%	53.4	✓	✓
64%	1 55.6	✓	✓
65%	48.6	✓	✓
66%	60.8	✓	✓
67%	28.0	✓	✓
68%	578.4	✓	✓
69%	639.6	✓	✓
70%	59.0	✓	✓
71%	414	✓	✓
95%	426.0	✓	✓

✓ หมายถึงผ่านมาตรฐาน

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบ trip time ของอินเวอร์เตอร์เทียบกับมาตรฐานต่างๆ (ต่อ)

% Inverter	Trip time (ms)	มาตรฐาน	
		IEC 61727	IEEE-1547
96%	54.8	✓	✓
97%	70.4	✓	✓
98%	111.2	✓	✓
99%	139.2	✓	✓
100%	527.0	✓	✓
101%	98.3	✓	✓
102%	587.24	✓	✓
103%	131.4	✓	✓
104%	96.2	✓	✓
105%	482.2	✓	✓

✓ หมายถึงผ่านมาตรฐาน

จากตารางที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบ trip time ของอินเวอร์เตอร์เทียบกับมาตรฐาน IEC 61727 และ IEEE-1547 แล้วจะพบว่า การทดสอบอินเวอร์เตอร์ตัวนี้ผ่านการทดสอบตามมาตรฐานเวลาคือเมื่อเกิด Islanding อินเวอร์เตอร์จะตัดตัวเองออกจากระบบจำหน่ายภายใน 2 วินาที

3.3 สรุปผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์

ผลของกระแสที่จ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์หลังจากที่เปิดวงจร S3 ไปแล้วในการทดสอบอินเวอร์เตอร์ จะพบว่าอินเวอร์เตอร์สามารถหยุดการทำงานที่ก่อน 2 วินาทีตามมาตรฐาน IEEE-1547 ที่กำหนดไว้ ซึ่งมาตรฐานกำหนดว่าอินเวอร์เตอร์จะต้องหยุดจ่ายกระแสภายใน 2 วินาที ผลจากการทดสอบด้าน เวลาในการหยุดจ่ายกระแสของอินเวอร์เตอร์ดังได้แสดงแล้วในรูปที่ 3.4 และได้สรุปผลการทดสอบ ด้านเวลาในตารางที่ 3.2 ซึ่งสามารถนำมาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงผลของเวลาตามช่วง ของภาระต่างๆได้ดังรูปที่ 3.37 ซึ่งแสดงค่าเวลาที่มากที่สุดและน้อยที่สุดที่อินเวอร์เตอร์ใช้ในการหยุด จ่ายกระแส พบว่าเวลาที่อินเวอร์เตอร์ใช้ในการหยุดจ่ายกระแสนั้น เวลานานที่สุดคือ 639.6 มิลลิวินาที

และเวลาสั้นที่สุดคือ 28.0 มิลลิวินาทีและจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังในระบบจำหน่ายที่มีระบบผลิตไฟฟ้ารายย่อยเชื่อมต่ออยู่ ในที่นี้หมายถึงระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ จากผลของเวลาที่อินเวอร์เตอร์ใช้ในการหยุดจ่ายกระแส พบว่าเวลาที่อินเวอร์เตอร์ใช้ในการหยุดจ่ายกระแสนั้นแตกต่างกันไป พฤติกรรมของการลดขนาดของกระแสและแรงดันที่อินเวอร์เตอร์จ่ายออกมานั้น ไม่เหมือนกับรูปคลื่นของเครื่องจักรกลชนิดหมุนซึ่งมีขนาดสูงและลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว และรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของอินเวอร์เตอร์ มีขนาดคงที่ตลอดจนถึงช่วงหยุดจ่ายกระแสซึ่งพฤติกรรมการหยุดจ่ายกระแสของอินเวอร์เตอร์นี้จะนำมาหาแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในบทถัดไป