บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ประเทศไทยได้จัดทำแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ ปีพ.ศ. 2553-2573 หรือ (Power Development Plan - PDP 2010) โดยมีการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเป็นผู้ผลิตไฟฟ้าหลักของประเทศ ประเทศไทยใช้ฟอสซิล(แก๊สธรรมชาติและลิกไนท์) เป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตไฟฟ้า แต่ด้วยทรัพยากรที่มีอย่างจำกัด ประกอบกับปัญหาสภาวะแวดล้อมที่มีความรุนแรงขึ้น ภาครัฐจึงส่งเสริมให้มีโรงไฟฟ้าพ่ลังงานหมุนเวียนมากขึ้น โดยในปี พ.ศ. 2573 ได้กำหนดเป้าหมายกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนขนาดเล็กรวม 5,242 เมกะวัตต์ [1] โดยจะส่งเสริมให้ผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนเข้ามาผลิตและจำหน่ายไฟฟ้าให้กับภาครัฐมากขึ้น ผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชน แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ ผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ (Independent Power Producer) ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (Small Power Producer - SPP) ซึ่งมีขนาดกำลังผลิตไม่เกิน 90 เมกะวัตต์ และผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Very small Power Producer - VSPP) ขนาดกำลังผลิตไม่เกิน 1 เมกะวัตต์

กระทรวงพลังงานได้จัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี พ.ศ. 2551-2565 [2] ซึ่งพบว่าศักยภาพของพลังงานแสงอาทิตย์มีสูงถึง 50,000 เมกะวัตต์ และกำหนดเป้าหมายการผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ในปี พ.ศ. 2565 อยู่ที่ 500 เมกะวัตต์ ในปัจจุบันปี พ.ศ. 2554 มีระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอยู่ในระบบประมาณ 32 เมกะวัตต์ ดังแสดงในตารางที่ 1.1 ซึ่งห่างจากศักยภาพที่มีและต่ำกว่าเป้าในปี พ.ศ. 2565 มาก

ตารางที่ 1.1 ศักยภาพและเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน [2]

ประเภทพลังงาน	ศักยภาพ	ปัจจุบัน	พ.ศ. 2551-2554		พ.ศ. 2555-2559		พ.ศ. 2560-2565	
ไฟฟ้า	เมกะวัตต์	เมกะวัตต์	เมกะวัตต์	ktoe	เมกะวัตต์	ktoe	เมกะวัตต์	ktoe
แสงอาทิตย์	50,000	32	55	6	95	11	500	56
ลม	1,600	1	115	13	375	42	800	89
พลังน้ำ	700	56	165	43	281	73	324	85
ชีวมวล	4,400	1,610	2,800	1,463	3,220	1,682	3,700	1,933
ก๊าซชีวภาพ	190	46	60	27	90	40	120	54
ขยะ	400	5	78	35	130	58	160	72
ไฮโดรเจน		-	-	-	-	-	4	1
รวม	57,290	1,750	3,273	1,587	4,191	1,906	5,608	2,290

จากวิกฤตการณ์ด้านพลังงาน และนโยบายของรัฐบาล พบว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Photovoltaic - PV Grid connected system) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก

ทั้งในเขตเมืองและพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง บ้านเรือนผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่เรียกว่า Roof top/domestic photovoltaic system ได้ โดยใช้อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวในการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ข้อดีของระบบนี้ คือผลิตไฟฟ้าใช้ (บนหลังคาบ้านพัก) ณ จุดใช้ต้องการใช้ไฟฟ้า ลดการสูญเสียในระบบที่ต้องส่งไฟฟ้ามาจากระยะไกลจากโรงจักรไฟฟ้า เพิ่มเสถียรภาพและปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อ นอกจากนี้ยังสามารถลดภาระของอุปกรณ์สำรองพลังงานที่มีอายุการใช้งานสั้นและราคาแพง การทำงานของระบบแบ่งเป็น 2 ช่วงเวลา กล่าวคือ ในช่วงเวลากลางวัน เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าจ่ายให้แก่โหลดได้ อินเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และหากมีพลังงานไฟฟ้าส่วนที่เกินจะถูกจ่ายเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าจะหมุนกลับทางกับปกติที่มีไฟฟ้าไหลเข้าบ้าน(โหลด)จากสายจำหน่าย ส่วนในช่วงกลางคืนเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ กระแสไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายจะจ่ายให้แก่โหลดแทน มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าจะหมุนปกติ

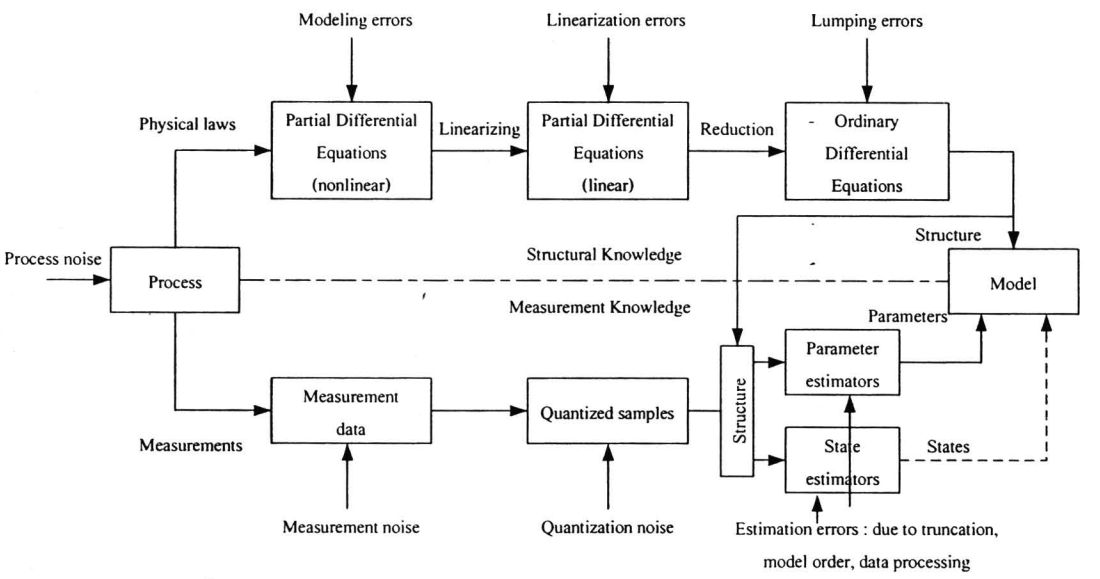
เพื่อส่งเสริมกำลังการผลิตระบบเซลล์แสงอาทิตย์ให้บรรลุเป้าหมาย ภาครัฐจึงมีมาตรการส่งเสริมระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่สำคัญ คือการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าหมุนเวียนแบบ VSPP ในราคาที่จูงใจ โดยกำหนดส่วนเพิ่มราคารับซื้อไฟฟ้า (Adder) โดยการรับซื้อไฟฟ้าจาก VSPP และการเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า ต้องคำนึงถึงผลกระทบด้านคุณภาพไฟฟ้า เสถียรภาพและความมั่นคงของระบบ ระบบป้องกัน และเศรษฐศาสตร์ [4, 5, 6] ซึ่งการไฟฟ้าที่ดูแลระบบจำหน่ายทั่วโลกได้กำหนดให้มีการศึกษาผลกระทบดังกล่าวก่อนเชื่อมโยงระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบจำหน่ายด้วย [7, 8, 9, 10] อุปกรณ์ที่สำคัญของระบบต้องได้รับการทดสอบตามมาตรฐาน เช่น มาตรฐานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มาตรฐานของอินเวอร์เตอร์ และวิธีการเชื่อมต่อต้องถูกต้องตามระเบียบการเชื่อมต่อของระบบ VSPP นอกเหนือจากการปฏิบัติตามมาตรฐานแล้ว การทราบคุณลักษณะและพฤติกรรมของระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่อินพุตและเอาท์พุตของระบบมีความผันแปรอยู่ตลอดเวลา ขึ้นกับความเข้มแสงอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม การเปลี่ยนแปลงของโหลดและระบบไฟฟ้า จึงเป็นแนวทางที่สำคัญที่จะทำให้ระบบไฟฟ้ามีคุณภาพไฟฟ้าดี มีเสถียรภาพ และประสิทธิภาพสูง

การศึกษาคุณลักษณะและพฤติกรรมของระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กสามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองพลวัตหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระบบในด้านต่างๆ ในเชิงลึก ถึงทฤษฎี สมการ แบบจำลอง การควบคุม การออกแบบและติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายได้ หากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบมีความถูกต้องแม่นยำ ก็จะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ และการศึกษาเสถียรภาพ คุณภาพไฟฟ้ากำลัง

ผลกระทบของระบบที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง ตลอดจนการบริหารจัดการและวางแผนการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายต่อไปได้

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย อุปกรณ์ประกอบระบบ (Balance of system : BOS) หรืออินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากต่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์และระบบของการไฟฟ้า เนื่องจากอินเวอร์เตอร์แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ ส่งผลต่อประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้า เสถียรภาพ ความปลอดภัยของระบบ และสภาวะการทำงานของอินเวอร์เตอร์ตามมาตรฐานการเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้า ในปัจจุบันอินเวอร์เตอร์มีโครงสร้างภายในเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังและควบคุมด้วยระบบดิจิตอล ทำให้ระบบมีความซับซ้อน (complex) มีพฤติกรรมของเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) แปรผันตามเวลา (time varying) และทำงานแบบสัญญาณไม่ต่อเนื่อง (discrete time) [11]

แนวทางการหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แบบวิเคราะห์จากกฎกายภาพ (Physical laws) โดยการหาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยไม่เชิงเส้น (nonlinear partial differential equation) และแปลงให้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเชิงเส้น (linear partial differential equation) โดยใช้เทคนิค linearization จากนั้นจึงแปลงเป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ ordinary differential equation จะทำให้ได้โครงสร้างของแบบจำลอง ในส่วนของการหาแบบจำลองจากการตรวจวัดจะใช้วิธีเก็บข้อมูลและสุ่มประมวลผลข้อมูล นำไปป้อนให้กลับโครงสร้างสมการ เพื่อประมาณค่าพามิเตอร์ และประมาณค่าสถานะ state estimators จึงจะทำให้ได้แบบจำลอง ซึ่งทั้งสองกระบวนการต่างมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ในแต่ละขั้นตอนของการหาแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 กระบวนการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไดนามิก [12]

ในอดีตแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ส่วนใหญ่หาได้จากการวิเคราะห์ (Analytical Approach) หรือหาจากกฎทางกายภาพ (Physical laws) ซึ่งเป็นวิธีดั้งเดิมที่ใช้หาแบบจำลองของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง อาศัยความรู้วงจรไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบควบคุม และทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ ช่วยในการวิเคราะห์หาแบบจำลองซึ่งมีลักษณะไม่เชิงเส้น Nonlinear equation ในการวิเคราะห์หาแบบจำลองของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังอย่างง่าย จะใช้วิธีการทำให้วงจรเสมือนว่าเป็นระบบที่เป็นเชิงเส้น (Equivalent to a linear circuit or Linearization) โดยพิจารณาสถานะของสวิตซ์เป็น ON และ OFF ซึ่งจะทำให้เกิดวงจรสมมูลแบบเชิงเส้นขึ้นในสถานะต่างๆ ตามสถานะของสวิตซ์ที่เกิดขึ้น วงจรในแต่ละสถานะจะถูกนำมาวิเคราะห์และรวมเพื่อหาค่าเฉลี่ย ตัวอย่างของวิธีการหาแบบจำลองด้วยวิธีวิเคราะห์ ได้แก่ วิธีหาสถานะปริภูมิเฉลี่ย (State space averaging) [13], Average Modeling with PSPICE [14], แผนภาพสวิตชิ่ง(Signal flow graph) [15], Bond graph theory [16, 17], Wavelet transform approximation [18] เป็นต้น

การหาแบบจำลองด้วยวิธีตรวจวัด (Measurement) หรือวิธีสังเคราะห์(Synthesis) [19] เป็นการวัดค่าสัญญาณจากการทดลองและใช้เทคนิคทางทฤษฎีในการหาแบบจำลอง การหาแบบจำลองแบบนี้แบ่งออกได้เป็น การหาแบบจำลองด้วยสัญญาณขนาดเล็ก (Small signal modeling) [20, 21] การหาแบบจำลองด้วยสัญญาณขนาดใหญ่ (Large signal modeling) [22, 23] การวิเคราะห์ด้วยสัญญาณขนาดเล็กนี้เหมาะสมกับวงจรแบบ (Passive circuit) และแบบสถิต (Static) และเป็นระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรตามเวลา (Linear Time Invariant - LTI) โดยใช้หลักการการวัดอิมพีแดนซ์อุปกรณ์พาสซีฟ (Passive impedance measurement) หรือการวัดแบบ Off line test ซึ่งเครื่องมือทางระบบควบคุมที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองได้แก่ เครือข่ายสองทาง (Two port network) ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยสัญญาณขนาดใหญ่เหมาะสำหรับระบบที่มีคุณลักษณะไดนามิก มีวงจรผสมทั้งแบบ passive และแบบ active เป็นระบบไม่เชิงเส้นที่แปรตามเวลา(Nonlinear time varying) ในการตรวจวัดอาจใช้หลักการการวัดอิมพีแดนซ์อุปกรณ์แอกทีฟ (Active impedance measurement) หรือวัดแบบ On line test และใช้ทฤษฎีทางวงจรเช่น Thevinin, Norton Theorem หาอิมพีแดนซ์ของวงจร [24]

ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลายวิธีที่ได้กล่าวมา ต้องทราบโครงสร้าง อุปกรณ์และวงจรภายในของอินเวอร์เตอร์ ข้อมูลรายละเอียดทางเทคนิคของวงจร ทั้งนี้อินเวอร์เตอร์เชิงพาณิชย์ ผู้ผลิตส่วนใหญ่จะไม่เปิดเผยข้อมูล เนื่องจากเป็นความลับทางการค้า ทำให้ผู้ทดสอบไม่ทราบคุณลักษณะภายในของวงจร ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์จึงไม่สามารถหาแบบจำลองไดนามิกได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

1.2 แนวทางในการแก้ปัญหา

การหาแบบจำลองไดนามิกด้วยวิธีวิเคราะห์ ต้องทราบวงจร หรือวิธีการควบคุม จึงสามารถจะได้แบบจำลองที่ถูกต้อง แต่เพราะอินเวอร์เตอร์พาณิชย์ไม่เปิดเผยวงจรหรือวิธีควบคุม จึงไม่สามารถหาแบบจำลองไดนามิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ได้

งานวิจัยนี้จึงหาแบบจำลองไดนามิกด้วยวิธีอัตลักษณ์ ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

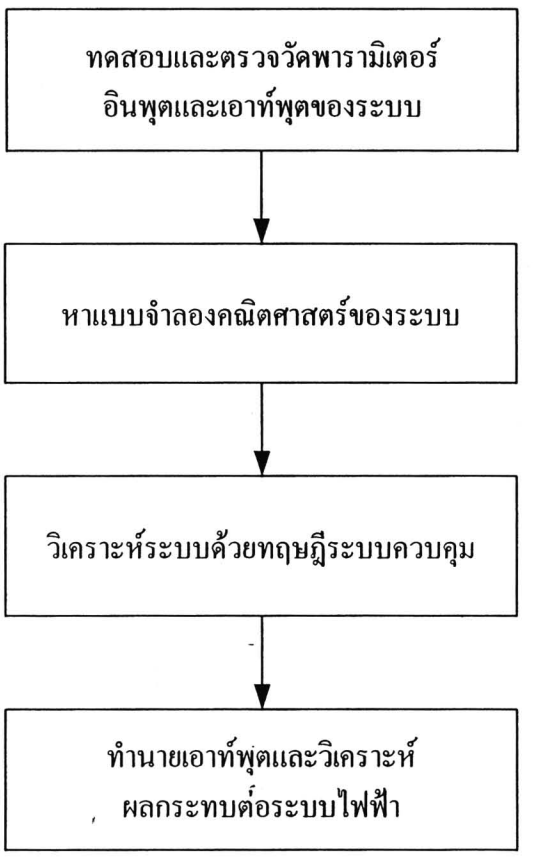
ก. วัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของอินพุตและเอาท์พุตของระบบ

ข. ใช้กระบวนการทางสถิติหาสมการทางคณิตศาสตร์ให้ได้แบบจำลอง

ค. วิเคราะห์ระบบโดยใช้ทฤษฎีระบบควบคุม เพื่อทดสอบความถูกต้องแม่นยำ

ง. ทำนายเอาท์พุตจากแบบจำลองและหาผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลัง

ทั้งนี้ไม่จำเป็นต้องทราบข้อมูลโครงสร้างและวงจรภายในของระบบ [25, 26] ตามที่แสดงในรูป 1.2



รูปที่ 1.2 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนของแนวทางในการแก้ปัญหา

สำหรับอินเวอร์เตอร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย มีอินพุตที่สำคัญ คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง กับกระแสไฟฟ้ากระแสตรง และเอาท์พุต คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ กับกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ ปริมาณทั้ง 4 จะเป็นข้อมูลสำคัญที่ใช้ในกระบวนการหาแบบจำลองด้วย

วิธีอัตลักษณ์ของระบบ (System identification) ซึ่งใช้หลักการทางสถิติและคณิตศาสตร์ [27] เพื่อให้ได้แบบจำลองไดนามิกและสมการคณิตศาสตร์ ในการทดสอบอินเวอร์เตอร์จะออกแบบการทดลองให้มีเงื่อนไขที่เหมาะสมและใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานจริงของระบบ เช่น การทำงานในสภาวะคงตัว (steady state) สภาวะทรานเซียนท์ (transient) สภาวะไอส์แลนดิ้ง (islanding) และปรับเปลี่ยนสภาวะการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆเป็นต้น บันทึกข้อมูลรูปคลื่นแรงดัน กระแส หรือค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แล้วจึงนำไปหาสมการทางคณิตศาสตร์ในแต่ละสภาวะ เพื่อให้แบบจำลองมีความถูกต้อง

1.3 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อหาแบบจำลองไดนามิกและสมการทางคณิตศาสตร์ของอินเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของอินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย
3. เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลังในด้านเสถียรภาพและคุณภาพไฟฟ้ากำลังจากแบบจำลองไดนามิกและสมการทางคณิตศาสตร์
4. เพื่อนำแบบจำลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานทางด้านระบบควบคุม

1.4 ขอบเขตการศึกษา

ก. หาแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุตเอาท์พุตของระบบ หรือวิธีการหาอัตลักษณ์ของอินเวอร์เตอร์สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ขนาดพิกัดอินเวอร์เตอร์ 1,500 วัตต์และ 5,000 วัตต์

ข. สร้างแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น และไม่เป็นเชิงเส้น 8 แบบ

ค. นำแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด ไปวิเคราะห์เชิงระบบควบคุมและระบบไฟฟ้ากำลัง

1.5 ประโยชน์จากการวิจัย

1. ได้แนวทางหาแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นของอินเวอร์เตอร์สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายด้วยวิธีหาอัตลักษณ์ ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมของอินเวอร์เตอร์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์
2. ได้แบบจำลองเพื่อการออกแบบและพัฒนาอินเวอร์เตอร์ให้ได้มาตรฐานของการเชื่อมต่อระบบ
3. นำไปสู่การบริหารจัดการ และวิเคราะห์ผลกระทบของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ต่อกับระบบจำหน่าย เช่น เสถียรภาพ คุณภาพไฟฟ้า เศรษฐศาสตร์ไฟฟ้า ระบบป้องกัน เป็นต้น