# บทที่ 5 สรุป

## 5.1 สรุปงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้หาแบบจำลองของอินเวอร์เตอร์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าในสภาวะการทำงานต่างๆ โดยใช้วิธีหาอัตลักษณ์ของระบบ ในการทดลองเก็บข้อมูลด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ทำหน้าที่แทนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ด้านเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ต่อกับโหลดและระบบจำหน่ายที่จุดต่อร่วม Point of Common Coupling (PCC) วัดอินพุตและเอาท์พุตในเทอมของแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ขนาด 1,500 วัตต์และ 5,000 วัตต์ แบ่งข้อมูลที่วัดมาทั้งหมดออกเป็น 3 ชุด คือ ข้อมูลชุดสอน ข้อมูลชุดตรวจสอบ และข้อมูลชุดทดสอบ เลือกข้อมูลการทดลองมาประมวลตามกระบวนทางคณิตศาสตร์และสถิติ โดยเปรียบเทียบข้อมูลจริงกับค่าจากแบบจำลอง เลือกแบบจำลองที่ความเหมาะสมที่สุดตามสภาวะการทำงาน จากการพิจารณาความถูกต้องของแบบจำลอง (Goodness of Fit) ลำดับดีกรีของแบบจำลอง (Model order) ค่าความผิดพลาดและความน่าเชื่อถือของแบบ จำลอง (Final Prediction Error - FPE และ Akaike Information Criterion - AIC)

ในขั้นต้น ให้ระบบอินเวอร์เตอร์ฯทำงานในสภาวะคงตัว หาแบบจำลอง 8 แบบ จัดได้เป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มแบบจำลองเชิงเส้นจำนวน 4 แบบ โดยใช้วิธีAuto Regressive with Exogenous (ARX) Auto Regressive Moving Average with Exogenous (ARMAX, Output Error (OE), Box Jenkins (BJ) และกลุ่มแบบไม่เป็นเชิงเส้นจำนวน 4 แบบ ใช้วิธี Nonlinear Auto Regressive with Exogenous (NARX), Hammerstein, Wiener, Hammerstein-Wiener นอกจากนั้นได้ทดลองใช้ฟังก์ชันตัวประมาณความไม่เป็นเชิงเส้น 5 ฟังชันคือ Deadzone, Saturation, Piecewise linear, Sigmoid network และ Wavelet network ผลแสดงว่าเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานในสถาะคงตัว แบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นมีคุณสมบัติที่ดีกว่าแบบเชิงเส้น แบบจำลอง Hammerstein-Wiener มีคุณสมบัติที่อธิบายพฤติกรรมของระบบได้ดี มีค่าความถูกต้องของแบบจำลองสูงประมาณ 90% ลำดับของแบบจำลองต่ำ ค่าความผิดพลาด FPE และ AIC ที่ต่ำกว่าวิธีอื่นทั้ง 8 แบบ

ขั้นต่อมา ทดลองเพิ่มความถูกต้องให้กับแบบจำลองซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิค Cross Validation โดยการเพิ่มจำนวนชุดข้อมูลสำหรับการสอนและการทดสอบ ให้หลากหลายครอบคลุมสถานการณ์จริงของการทำงานระบบ โดยใช้ข้อมูลจากสภาวะคงตัวทั้งหมด 6

สภาวะในการสอนและทดสอบแบบจำลอง Hammerstein-Wiener ผลแสดงว่าเทคนิค Cross Validation ทำให้แบบจำลองมีความถูกต้องเพิ่มขึ้นจริง

ในส่วนจำนวนตัวแปรข้อมูลที่ใช้ในการหาแบบจำลอง ได้ทดลองหาแบบจำลองทั้งแบบอินพุต-เอาท์พุตตัวแปรเดียว (Single-input Single output Modeling : SISO) และแบบอินพุตหลายตัวแปร-เอาท์พุตหลายตัวแปร (Multiple-input Multiple-output Modeling : MIMO) ซึ่งการจำลองระบบมีตัวแปรหลายตัวจะใช้เวลาในการหาแบบจำลองที่มากกว่า แต่ก็อธิบายพฤติกรรมได้ใกล้เคียงระบบจริง เนื่องจากมีการพิจารณาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องละเอียดมากขึ้น

แบบจำลองคณิตศาสตร์ Hammerstein-Wiener สามารถจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ได้หลายสภาวะ การวิจัยแสดงว่าที่สภาวะคงตัวที่กำลังไฟฟ้าระดับต่างๆ สภาวะทรานเซียนท์ และสภาวะไอส์แลนดิ้ง แบบจำลองให้ความรูปคลื่นแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า เทียบได้กับสัญญาณจริง มีค่าความถูกต้องสูงกว่าร้อยละ 85

ผลการจำลองสภาวะทรานเซียนท์สามารถนำไปหาเสถียรภาพของระบบได้ เมื่อมีปัจจัยรบกวนจากภายนอก จากแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น ใช้เทคนิคการทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) โดยใช้เทคนิคคณิตศาสตร์ First-order Taylor's Series Approximation ให้ได้แบบจำลองเชิงเส้นผลลัพธ์ จากแบบจำลองเชิงเส้นได้วิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีการควบคุมเชิงเส้นหาฟังชั่นการถ่ายโอน การตอบ สนองเชิงความถี่จากโบเดพล็อต การตอบสนองต่ออินพุทแบบหนึ่งหน่วย (Unit step) การตอบสนองอิมพัลส์ การหาโพลและซีโร่ การหา Nyquist Plot และ Nichol's chart

ในส่วนสุดท้าย ได้ประยุกต์แบบจำลองในการหาคุณภาพไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า ความถี่ ค่าอาร์เอมเอสและอัมพลิจูด ค่าฮาร์มอนิกแรงดันและฮาร์มอนิก กระแส ในสภาวะคงตัวและสภาวะทรานเซียนท์ พบว่าคุณภาพไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงที่วัดได้ ผลการจำลองค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้ากำลังเทียบกับสัญญาณจริง มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% สร้างความมั่นใจในเทคนิคการการหาแบบจำลองเพื่อประเมินผลกระทบของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งระบบจริง นอกจากนี้แบบจำลองยังสามารถเปลี่ยนสภาวะการทำงานของระบบให้เป็นไปตามต้องการ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผน เลือกที่ตั้ง และทำให้การไฟฟ้าทราบถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้า ก่อนติดตั้งระบบจริง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

หลักสำคัญของการหาแบบจำลองคือพัฒนาแบบจำลองให้ความถูกต้องใกล้เคียงกับระบบจริงให้มากที่สุด และนำแบบจำลองที่มีความถูกต้องนั้นไปประยุกต์ ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนองานทั้งสองส่วนดังได้กล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตามการวิจัยและการพัฒนาแบบจำลองที่นำเสนอยังมีข้อจำกัดอยู่บางประการ ยังสามารถนำไปศึกษาและพัฒนาต่อได้ ดังนี้

1. ในกรณีแบบจำลองที่พัฒนาได้แล้วมีความถูกต้องแม่นยำสูง แต่มีอันดับของแบบจำลอง (Model order) ที่สูง จะทำให้สมการของระบบยากต่อการคำนวณ วิเคราะห์และการออกแบบระบบควบคุม ทั้งฮาร์ดแวร์ของระบบที่มีอันดับสูงก็มีความยุ่งยาก ซับซ้อน ราคาแพงกว่า ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการใช้เทคนิค Model Order Reduction ซึ่งเป็นการลดจำนวนอันดับของระบบลงโดยที่ยังคงความถูกต้องของแบบจำลองให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เทคนิค Model Order Reduction จึงเป็นเทคนิคหนึ่งควรศึกษาและทำความเข้าใจ เพื่อให้สามารถนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้ได้อย่างเหมาะสม

2. วิธีการที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้ สร้างแบบจำลองโดยมองระบบเป็นกล่องดำ (Black box system identification) คือ พิจารณาว่าไม่ทราบคุณลักษณะ รายละเอียด วงจรไฟฟ้า ระบบควบคุมภายในเลย ซึ่งทำให้แบบจำลองที่ได้ขาดข้อมูลบางส่วนไป หากใช้เทคนิค Gray box system identification ที่มีการป้อนข้อมูลบางส่วนของระบบที่ผู้จำลองทราบลงไป ก็จะทำให้แบบจำลองที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำ และมีรายละเอียดเชิงภายภาพมากขึ้น เพราะวิธีการ Gray box นั้น จะใช้ข้อมูล 2 ส่วนคือ

ก. ข้อมูลส่วนแรก คือ ข้อมูลทางเทคนิคจากผู้ออกแบบ เช่น ลักษณะวงจรไฟฟ้า จำนวนชนิดสวิตซ์และอุปกรณ์วงจร ชนิดของระบบควบคุม ทำให้ทราบสมการอนุพันธ์ของระบบ ในแต่ละสถานะ ซึ่งเป็นพื้นฐานของวิธีหาแบบจำลองด้วยการวิเคราะห์ และ

ข. ข้อมูลส่วนที่สอง คือ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับที่ใช้ในวิธี Black box system identification

ดังนั้นเมื่อรวมข้อมูลทั้งสองส่วนของระบบมาใช้ในการหาแบบจำลอง จึงทำให้แบบจำลองที่ได้จาก Gray box จะมีความถูกต้องแม่นยำได้มากขึ้น

3. การหาแบบจำลองที่ทำในวิทยานิพนธ์ เป็นการเก็บข้อมูลในช่วงสภาวะเวลาใดเวลาหนึ่งและนำข้อมูลนั้นมาใช้ในการหาแบบจำลอง ซึ่งมีลักษณะเป็นการประมวลผลแบบ Batch Processing แต่ในสภาวะการทำงานจริงนั้น ระบบมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นการพัฒนาแบบจำลองในลักษณะเวลาจริง (real time) โดยใช้เทคนิค Recursive System Identification ก็จะทำให้แบบจำลองของระบบมีความถูกต้องแม่นยำ และเป็นลักษณะไดนามิก ซึ่งวิธีการ Recursive จะใช้เทคนิค Kalman

Filtering เป็นกระบวนการในการปรับปรุงแบบจำลองให้มีความเหมาะสมกับสภาพของระบบให้มีความเป็นจริงอยู่ตลอดเวลา

4. แบบจำลองที่มีความถูกต้องแม่นยำที่พัฒนาได้นั้น สามารถนำไปวิเคราะห์และศึกษาในแง่มุมต่างๆ ได้มากมาย เช่น การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุม เช่น วิธีการควบคุมแบบทำนาย (Model predictive control) เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า การชดเชยฮาร์มอนิก และอื่นๆ นอกจากนี้แบบจำลองที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์ผลกระทบของระบบที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น เสถียรภาพของระบบ ความน่าเชื่อถือ การไหลของกำลังไฟฟ้า ตลอดจนการออกแบบและวางแผนสร้างระบบเซลล์แสงอาทิตย์ การกำหนดขนาดและตำแหน่งที่ตั้งของระบบ (site and allocation) เป็นต้น