ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246180

การขึ้นรูปลวดโลหะผสมเชิงอัลตราอีลาสติกแบบเย็นต่อกับระบบล่างหน่วย

นายนพพร พัชรประกิติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีแม่พิมพ์
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

b00251892

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246180

แบบจำลองไดนามิกระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

นายนพพร พัชรประกิติ วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ดร. จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร. กฤษณพงศ์ กีรติกร)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. ธีรยุทธ์ เจนวิทยา)

..... กรรมการ
(อ. ชาย ชีวะเกตุ)

..... กรรมการ
(ผศ. ดร. อนวัช แสงสว่าง)

..... กรรมการ
(ดร. กนกเวทย์ ตั้งพิมลรัตน์)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองไดนามิกของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย
หน่วยกิต	42
ผู้เขียน	นายนพพร พัชรประกิติ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. กฤษณพงศ์ กีรติกร
	ดร. ธีรยุทธ์ เจนวิทยา
หลักสูตร	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน
สายวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ.	2554

บทคัดย่อ

246180

ทิศทางการผลิตไฟฟ้าในอนาคตทั่วโลก เปลี่ยนจากการผลิตรวมศูนย์ที่โรงจักรไฟฟ้าขนาดใหญ่หลายร้อยหลายพันเมกกะวัตต์ เป็นการกระจายการผลิตไฟฟ้า(Distributed power generation) เกิดผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก(Small Power Producer - SPP) ซึ่งมีขนาดกำลังผลิตไม่เกิน 90 เมกะวัตต์ และผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Very Small Power Producer - VSPP) ขนาดกำลังผลิตไม่เกิน1 เมกะวัตต์ แนวทางดังกล่าวเอื้อให้ใช้พลังงานหมุนเวียนเช่น ชีวมวล พลังงานลม เซลล์แสงอาทิตย์ พลังน้ำขนาดเล็ก ในระบบ VSPP ที่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์มีความสำคัญ นอกจากเปลี่ยนไฟฟ้าตรงเป็นไฟฟ้าสลับแล้ว ยังควบคุมระบบเซลล์แสงอาทิตย์ให้ทำงานใกล้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ควบคุมคุณภาพไฟฟ้าสลับให้ได้ตามข้อกำหนดของการเชื่อมต่ออุปกรณ์การผลิตไฟฟ้าแบบกระจายกับระบบสายจำหน่ายไฟฟ้าตามมาตรฐาน จึงมีการศึกษาเพื่อสร้างแบบจำลองระบบอินเวอร์เตอร์กับระบบเชื่อมต่อระบบจำหน่าย ใช้ทำนายพฤติกรรมของระบบในสภาวะการทำงานแบบต่างๆ ก่อนการสร้างระบบจริง รวมทั้งการวางแผนการควบคุมระบบ

วิทยานิพนธ์นี้หาแบบจำลองของอินเวอร์เตอร์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกับระบบสายจำหน่ายไฟฟ้าในสภาวะการทำงานต่างๆ โดยใช้วิธีการหาอัตลักษณ์ระบบ ในการทดลองเก็บข้อมูลด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ทำหน้าที่แทนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ด้านเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ต่อกับโหลดและระบบสายจำหน่ายที่จุด Point of Common Coupling (PCC) วัดอินพุตและเอาท์พุตในเทอมของแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ขนาด 1,500 วัตต์ และ5,000 วัตต์ แบ่งข้อมูลที่วัดมาทั้งหมดออกเป็น 3 ชุด คือ ข้อมูลชุดสอน ข้อมูลชุดตรวจสอบ และ

246180

ข้อมูลชุดทดสอบ เลือกข้อมูลการทดลองมาประมวลตามกระบวนทางคณิตศาสตร์และสถิติ เปรียบเทียบข้อมูลจริงกับค่าจากแบบจำลอง เลือกแบบจำลองที่ความเหมาะสมที่สุดตามสภาวะการทำงาน จากการพิจารณาความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลอง (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 นอกจากนั้นได้ทดลองใช้ฟังก์ชั่นตัวประมาณความไม่เป็นเชิงเส้น 5 ฟังชั่นคือ Deadzone, Saturation, Piecewise linear, Sigmoid network และ Wavelet network ผลแสดงว่าเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานในสถานะคงตัว แบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นมีคุณสมบัติที่ดีกว่าแบบเชิงเส้น แบบจำลอง Hammerstein-Wiener มีสมบัติที่อธิบายพฤติกรรมของระบบได้ดี มีค่าความถูกต้องของแบบจำลองสูงประมาณ 90% ลำดับของแบบจำลองต่ำ และค่าความผิดพลาดที่ต่ำกว่าวิธีอื่นทั้ง 8 แบบ

ขั้นต่อมา ทดลองเพิ่มความถูกต้องให้กับแบบจำลองซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิค Cross Validation โดยการเพิ่มจำนวนชุดข้อมูลสำหรับการสอนและการทดสอบให้หลากหลายครอบคลุมสถานการณ์จริงของการทำงานระบบ 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 สามารถจำลองอินเวอร์เตอร์ได้หลายสภาวะ การวิจัยแสดงว่าที่สภาวะคงตัวที่กำลังไฟฟ้าระดับต่างๆ สภาวะชั่วครู่ และสภาวะไอส์แลนดิ้ง แบบจำลองให้ความรูปคลื่นแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า เทียบได้กับสัญญาณจริง มีค่าความถูกต้องสูงกว่าร้อยละ 85

246180

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

ในส่วนสุดท้าย ได้ประยุกต์แบบจำลองในการหาคุณภาพไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันกระแส กำลังไฟฟ้า ความถี่ ค่าอาร์เอมเอสและอัมพลิจูด ค่าฮาร์มอนิกแรงดันและฮาร์มอนิคกระแสในสภาวะคงตัวและสภาวะชั่วครู่ พบว่าคุณภาพไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงที่วัดได้ ผลการจำลองค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้ากำลังเทียบกับสัญญานจริง มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 5% สร้างความมั่นใจในเทคนิคการการหาแบบจำลองเพื่อประเมินผลกระทบ ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งระบบจริง นอกจากนี้ แบบจำลองยังสามารถเปลี่ยนสภาวะการทำงานของระบบให้เป็นไปตามต้องการ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผน เลือกที่ตั้งและทำให้การไฟฟ้าทราบถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้า ก่อนติดตั้งระบบจริง

คำสำคัญ : แบบจำลองไดนามิก/การหาอัตลักษณ์ระบบ/ระบบไม่เชิงเส้น
Hammerstein-Wiener Model/อินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมโยงกับระบบจำหน่าย

Dissertation Title	Dynamic Modeling of Grid Connected Photovoltaic System
Dissertation Credits	42
Candidate	Mr. Nopporn Patcharaprakiti
Dissertation Advisors	Dr. Krissanapong Kirtikara
	Dr. Dhirayut Chenvidhya
Program	Doctor of Philosophy
Field of Study	Energy Technology
Department	Energy Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
B.E.	2554

Abstract

246180

This research proposes about dynamic modeling of grid connected photovoltaic inverter by using system identification approach. The advantage of this approach is use only measured input and output of system and it does not need the prior information of inverter. The system identification modeling of inverter is divided into 2 stages. A first stage is experimental and collect input – output data of inverter. The next stage is data processing by mean of statistic and mathematical theory. Finally the optimize modeling with represent the system will be obtained and use to analyzed or system evaluation. We choose 2 sizes of inverter for modeling follow as small size with 1,500 Watts and large size 5,000 Watts.

The research experimental is classified into 4 sessions follow as First session, PV inverters are tested by steady condition. In this condition 4 types of linear model and 4 types of nonlinear model are chosen to evaluate the performance of model. The result of modeling found that nonlinear model can generate output of system with high accuracy than the linear model. The best model which can represent system with low order equation and high accuracy is Hammerstein-Wiener model. A Hammerstein-Wiener model has structure with nonlinear input part, linear part and nonlinear output part. The structures of PV grid connected inverter are composed of controller, power electronics and sensors respectively. Comparatively, a controller and a sensor have nonlinear behavior and power electronics circuit represent the linear system. With this reason, the Hammerstein-Wiener model is selected for explain the behavior of PV grid connected system.

246180

In this session, PV inverter under various conditions are experimented and modeled. The Step up and Step down transient condition are designed for imitate an uncertainty behavior of solar irradiance, temperature, load and utility. An Islanding condition is experimented for represent a behavior of PV inverter when the utility collapse. The experimental setup is implemented and input-output parameter are collected and transmitted into the computer. The Hammerstein-Wiener model is selected for modeling both conditions. The result found that the obtained model can generate output which has accuracy more than 85%.

The next session, accuracy improvement of modeling is concentrated. The two techniques are studied follow as cross validation techniques and Multi input Multi output system identification approach. The goal of cross-validation is to estimate the expected level of fit of a model to a data set that is independent of the data that were used to train the model. An inverter of a grid-connected photovoltaic system has been tested and its model determined. The inverter operates in six steady state conditions and their modelings is done using Hammerstein Wiener Model and leave one out cross validation techniques. The average percentage accuracy of system identification with cross validation data and no cross validation is 81.89 and 63.83 respectively. A multiple input multiple output model is realized that a relationship between each input-output of parameter should be considered simultaneously. A single input multiple output (SIMO) model, multiple input single output (MISO) and multiple input multiple output (MIMO) are investigated. The experimental is implemented and more input-output are collected and modeling approach is operated. The accuracy of SIMO, MISO and MIMO are more than 90%.

The final session of this research is studied about modeling utilization. The obtained model from the prior part can be analyzed by using nonlinear theory. The nonlinear model is linearized and then the linear theory is used the analyzed. The system analysis which composed of time response, frequency response and stability analysis are characterized. The electrical output predictions from model are studied the power quality analysis based on IEEE standard.

Keyword: Dynamic modeling/System Identification/Hammerstein-Wiener/Photovoltaic inverter

กิตติกรรมประกาศ

งานวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร. กฤษณพงศ์ กีรติกร และ ดร. ธีรยุทธ์ เจนวิทยา อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่กรุณาให้ความรู้ตลอดจนให้คำปรึกษา แนะนำทั้งในการทำงาน การใช้ชีวิตและการแก้ปัญหาต่างๆ และขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ชาย ชีวะเกตุ ดร. จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน ผศ.ดร. อนวัช แสงสว่าง และดร. กนกเวทย์ ตั้งพิมลรัตน์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาสละเวลาในการตรวจทานและคำแนะนำช่วยเหลือในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.วีระพล โมนยะกุล ดร.ขรรค์ชัย ตุลละสกุล และคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และให้คำปรึกษา คำแนะนำต่างๆ แก่ผู้วิจัยตลอดระยะเวลาของการศึกษาในสถาบันแห่งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.ณรงฤทธิ์ สมบัติสมภพ อาจารย์ผู้ประสานงานโครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่างมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุทุกท่านที่อำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาในการศึกษา ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา และสำนักพัฒนานโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการศึกษาและทุนวิจัย

ขอขอบคุณคุณบัลลังก์ หมื่นพินิจ และเจ้าหน้าที่ศูนย์ทดสอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือเรื่องเครื่องมือ อุปกรณ์การทำวิจัย และการเก็บข้อมูล

ขอขอบคุณคุณจีรวรรณ แซ่เล้า เพื่อนๆ นักศึกษาปริญญาเอก เพื่อนคณาจารย์จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา และเจ้าหน้าที่สาขาเทคโนโลยีพลังงานทุกท่านที่เป็นกำลังใจและสร้างบรรยากาศวิชาการที่ดีตลอดมา

ท้ายสุดนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของผู้วิจัยที่ให้ชีวิตและอบรมสั่งสอนแก่ข้าพเจ้าตลอดจนครอบครัว พี่ น้องและญาติมิตรที่คอยส่งเสริมและสนับสนุนในทุกเรื่องๆ และเป็นกำลังใจจนประสบความสำเร็จมาได้ถึงทุกวันนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ	ซ
รายการตาราง	ญ
รายการรูปประกอบ	ฎ
รายการสัญลักษณ์	ฑ
บทที่	
1. บทนำ	**1**
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 แนวทางในการแก้ปัญหา	5
1.3 วัตถุประสงค์การวิจัย	6
1.4 ขอบเขตการศึกษา	6
1.5 ประโยชน์จากการวิจัย	6
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	**7**
2.1 ระบบไดนามิกและทฤษฎีระบบควบคุม	7
2.2 แบบจำลองไดนามิกด้วยวิธีอัตลักษณ์	22
2.3 การหาแบบจำลองด้วยเทคนิค cross validation	25
2.4 ประเภทของการหาอัตลักษณ์	29
2.5 อัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้สมการ	42
2.6 เงื่อนไขที่ใช้ในการพิจารณาเลือกแบบจำลอง	44
3. การดำเนินงานวิจัย	**46**
3.1 แนวคิดในการออกแบบวิธีการดำเนินงานวิจัย	46
3.2 การเก็บข้อมูลและการหาแบบจำลองด้วยวิธีหาอัตลักษณ์	48
3.3 การพัฒนาโปรแกรมหาแบบจำลองและวิเคราะห์แบบจำลอง	51
3.4 การทดสอบแบบจำลองในสภาวะต่างๆ	54
3.5 การทดสอบแบบจำลอง Hammerstein-Weiner โดยเทคนิค Cross validation	56
3.6 การหาจำลองแบบ Hammerstein-Weiner โดยใช้ตัวแปรหลายอินพุตเอาท์พุท	59
3.7 การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้ากำลังของเอาท์พุตที่ได้จากแบบจำลอง	61

4. ผลการทดลอง **62**

4.1 การหาแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ในสภาวะคงตัว 62

4.2 การหาแบบจำลองในสภาวะคงตัว ด้วยวิธี Hammerstein-Wiener 66

4.3 การวิเคราะห์แบบจำลอง 68

4.4 การทดสอบการทำงานของแบบจำลองวิธี Hammerstein-Wiener ด้วย Simulink 79

4.5 การหาแบบจำลอง Hammerstein-Weiner ในสภาวะทรานเซียนท์ 80

4.6 การหาแบบจำลองในสภาวะไอส์แลนดิ้ง 86

4.7 การหาแบบจำลองโดยใช้เทคนิค Cross validation 89

4.8 การจำลองระบบหลายอินพุตเอาท์พุต (MIMO) 91

4.9 การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้ากำลังจากแบบจำลอง 94

5. สรุป **96**

5.1 สรุปงานวิจัย 96

5.2 ข้อเสนอแนะ 98

เอกสารอ้างอิง 100

ภาคผนวก

ก. รายละเอียดอินเวอร์เตอร์ที่นำมาทดสอบ 105

ประวัติผู้วิจัย 110

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 ศักยภาพและเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน	1
2.1 ชนิดและสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุม	9
2.2 รูปแบบของสมการปริภูมิแต่ละแบบตามคุณลักษณะ	17
2.3 โครงสร้างแบบจำลองชนิดเชิงเส้น (Model Structure of Linear System)	33
2.4 สมบัติของตัวประมาณค่าในบล็อกไม่เป็นเชิงเส้น	37
3.1 แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น 4วิธี และแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น 4 วิธีที่ใช้ในการจำลอง	53
3.2 สภาวะการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในสภาวะเพิ่มขึ้น/ลดลงทรานเซียนท์	55
3.3 เงื่อนไขในการจำลองสภาวะการทำงานไอสแลนดิ้ง	56
3.4 เงื่อนไขการทดสอบในสภาวะคงตัว 6 กรณี สำหรับทำ Cross Validation	57
4.1 สมบัติแบบจำลองเชิงเส้นของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า	64
4.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น กับผลการทดลองจริง	65
4.3 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดัน กระแสและกำลังเมื่อใช้ฟังก์ชั่นไม่เป็นเชิงเส้น	67
4.4 สมบัติตัวประมาณค่าแบบ Deadzone inputnonlinear และ outputnonlinear	69
4.5 สมบัติตัวประมาณค่าแบบ Saturaion inputnonlinear และ outputnonlinear	69
4.6 สมบัติตัวประมาณค่าแบบ Piecewise linear	70
4.7 สมบัติของตัวประมาณค่าแบบ Sigmoid network	71
4.8 สมบัติของตัวประมาณค่าแบบ Wavelet network	72
4.9 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้า ในช่วงสภาวะทรานเซียนท์แบบเพิ่มขึ้น	82
4.10 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้า ในช่วงสภาวะทรานเซียนท์แบบลดลง	84
4.11 เงื่อนไขการทดสอบอินเวอร์เตอร์ในสภาวะไอส์แลนดิ้ง	86
4.12 สมบัติแบบจำลองไอส์แลนดิ้งในกรณีที่ 1	88
4.13 สมบัติของแบบจำลองไอส์แลนดิ้งทั้ง 6 กรณี	89
4.14 การเปรียบเทียบแบบจำลองด้วยเทคนิค Cross validation	91
4.15 เปรียบเทียบผลการใช้อินพุทเอาท์พุทแบบ MISO, SIMO และ MIMO	92
4.16 การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าในสภาวะคงตัวและสภาวะทรานเซียนท์	94

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
1.1 กระบวนการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไดนามิก	3
1.2 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนของแนวทางในการแก้ปัญหา	5
2.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า	10
2.2 Nonlinear feedback system— The Lure's problem	11
2.3 การประมาณค่าฟังก์ไม่เชิงเส้นให้เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น	15
2.4 ผลตอบสนองทางเวลาของระบบ	19
2.5 ลักษณะโมเดไดอะแกรม	20
2.6 ไนควิสท์พล็อต	22
2.7 การแบ่งระบบตามโครงสร้างและพารามิเตอร์	23
2.8 กระบวนการหาแบบจำลองระบบด้วยวิธีการหาอัตลักษณ์	23
2.9 กระบวนการสอน ตรวจสอบและทดสอบแบบจำลอง	25
2.10 การสุ่มแบบร้อยละ	26
2.11 Repeated random subsampling data	27
2.12 k-fold Cross Validation	28
2.13 Leave One Out Cross Validation	28
2.14 การแบ่งประเภทของการหาอัตลักษณ์ของระบบ	29
2.15 โครงสร้างแบบจำลองชนิดเชิงเส้น	30
2.16 การหาแบบจำลองวิธี Nonlinear Autoregressive with Exogenous (NARX)	34
2.17 แบบจำลอง Hammerstein Model	34
2.18 แบบจำลอง Weiner Model	35
2.19 แบบจำลอง Hammerstein-Weiner	36
2.20 ฟังก์ชันประมาณค่า แบบ Deadzone	37
2.21 ฟังก์ชันประมาณค่า แบบ Saturation	38
2.22 ฟังก์ชันประมาณค่า แบบ Piecewise	39
2.23 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม	39
3.1 แนวคิดในการหาแบบจำลองของระบบด้วยวิธีการหาอัตลักษณ์ของระบบ	47
3.2 หลักการในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ	47
3.3 ขั้นตอนการหาแบบจำลองด้วยวิธีหาอัตลักษณ์	48
3.4 ไดอะแกรมการตรวจวัดข้อมูลสำหรับการหาแบบจำลอง	49
3.5 ไดอะแกรมการตรวจวัดข้อมูลสำหรับการหาแบบจำลองในสภาวะคงตัวและทรานเซียนท์	49

รูป (ต่อ) **หน้า**

3.6 ไดอะแกรมการตรวจวัดข้อมูลสำหรับการหาแบบจำลองในสภาวะไอส์แลนดิ้ง 50
3.7 การหาแบบจำลองด้วยวิธีการหาอัตลักษณ์ของอินเวอร์เตอร์ 51
3.8 ไดอะแกรมการหาแบบจำลองด้วยวิธีอัตลักษณ์ระบบ 52
3.9 ไดอะแกรมการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงระบบควบคุม 53
3.10 การหาแบบจำลองด้วยเทคนิค K-fold Cross Validation 58
3.11 การหาแบบจำลองด้วยเทคนิค Leave One Out Cross Validation 58
3.12 การหาแบบจำลองโดยไม่ใช้ No Cross Validation 58
3.13 แบบจำลองของระบบ Single Input Single Output (SISO model) 59
3.14 แบบจำลองของระบบ Multiple Input Single Output (MISO model) 60
3.15 แบบจำลองของระบบ Single Input Multiple Output (SIMO model) 60
3.16 แบบจำลองของระบบ Multiple Input Multiple Output (MIMO model) 60
3.17 การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้ากำลังจากการตรวจวัดและการจำลอง 61
4.1 รูปคลื่นที่บันทึกได้จากการทดลอง 62
4.2 การแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ Estimate data และ Validate data 63
4.3 สัญญาณแรงดันจริงและค่าผิดพลาดแบบจำลองวิธี Hammestein-Wiener ฟังก์ชัน PWlinear 67
4.4 กราฟคุณลักษณะของ Input nonlinearity estimator ชนิดฟังก์ชัน Deadzone 69
4.5 กราฟคุณลักษณะของ Output nonlinearity estimator ชนิดฟังก์ชัน Saturation 70
4.6 กราฟคุณลักษณะของ Output nonlinearity estimator ชนิดฟังก์ชัน PWlinear 70
4.7 กราฟคุณลักษณะของ Output nonlinearity estimator ชนิดฟังก์ชัน Sigmoidnetwork 71
4.8 กราฟคุณลักษณะของ Input nonlinearity estimator ชนิดฟังก์ชัน Waveletnetwork 72
4.9 สมบัติของแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น 74
4.10 Bode plot diagram 75
4.11 การตอบสนองทางเวลา Step response 76
4.12 การตอบสนองทางเวลา Impulse response 76
4.13 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ Nyquist plot 77
4.14 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ Nichols chart 78
4.15 I/O Pole zero 78
4.16 การทดสอบการทำงานของแบบจำลอง 79
4.17 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันจากแบบจำลองวิธี Hammerstein-Wiener โดยใช้ฟังก์ชัน Piecewise Linear กับข้อมูลชุดทดสอบ (Testing data) 79
4.18 รูปคลื่นในสภาวะทรานเซียนท์เพิ่มขึ้น 81

รูป (ต่อ) หน้า

4.19 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากแบบจำลองกับข้อมูลจริง 81
4.20 รูปคลื่นในสภาวะทรานเซียนท์ลดลง 83
4.21 การเปรียบเทียบผลกำลังไฟฟ้าจากแบบจำลองกับสัญญาณจริงในสภาวะลดลง 84
4.22 เครื่องมือวิเคราะห์แบบกราฟระบบเชิงเส้นของแบบจำลองในสภาวะลดลงฉับพลัน 85
4.23 กราฟแสดงตำแหน่งโพล –ซีโร่ของระบบ 86
4.24 รูปคลื่นอินพุตและเอาท์พุตของการทดลองในสภาวะไอส์แลนดิ้งทั้ง 6 กรณี 87
4.25 การเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับสัญญาณจริงในสภาวะไอส์แลนดิ้ง 89
4.26 รูปคลื่นกำลังไฟฟ้าเมื่อควบคุมกระแสตรงให้คงที่ (11 A) และปรับแรงดัน 90
4.27 รูปคลื่นเมื่อควบคุมแรงดันตรงให้คงที่ (240 V) และปรับกระแส 90
4.28 รูปคลื่นกำลังที่นำมาต่อกันเป็นข้อมูลประเมินค่าและข้อมูลตรวจสอบและผลการจำลอง 91
4.29 รูปคลื่นกำลังเอาท์พุตกับสัญญาณจริง แบบจำลอง MISO 93
4.30 การเปรียบเทียบแรงดันและกระแสเอาท์พุตแบบจำลอง SIMO 93
4.31 การเปรียบเทียบแรงดันและกระแสเอาท์พุตแบบจำลอง MIMO 93
4.32 ผลการทดลองและการจำลองรูปคลื่นกระแสเอาท์พุตในสภาวะทรานเซียนท์ลดลง 94

รายการสัญลักษณ์

			หน่วย
G	=	ความเข้มแสง	W/m^2
T	=	อุณหภูมิ	^oC
Ts	=	คาบเวลาสุ่ม (sampling time)	second
R	=	Resistance	Ω
L	=	Inductance	Henry
C	=	Capacitance	Farad
X_L	=	Inductive reactance	Ω
X_C	=	Capacitive reactance	Ω
Vdc	=	Direct current voltage	V
Idc	=	Direct current	A
Pdc	=	Direct current power	W
Vac	=	Alternating current voltage	V
Iac	=	Alternating current	A
Pac	=	Alternating Power	W
Iinv	=	Inverter current	A
Igrid	=	Grid current	A
Iload	=	Load current	A
P	=	real power	W
Q	=	reactive power	VAR
S	=	apparent power	VA
f	=	frequency	Hz
THDv	=	Total Harmonic Distortion of Voltage	%
THDi	=	Total Harmonic Distortion of Current	%
PCC	=	Point of Common Coupling	
SS	=	stage space equation	
TF	=	transfer function	
ZPK	=	zero pole gain	
$X(\cdot)$	=	เวกเตอร์ตัวแปรสถานะ (state vector)	
$Y(\cdot)$	=	เวกเตอร์สัญญาณขาออก (output vector)	

$U(\cdot)$	=	เวกเตอร์สัญญาณขาเข้าหรือสัญญาณควบคุม (input or control vector)
$A(\cdot)$	=	เมทริกซ์ตัวแปรสถานะหรือพลวัต (state matrix, dynamics matrix)
$B(\cdot)$	=	เมทริกซ์ขาเข้า (input matrix)
$C(\cdot)$	=	เมทริกซ์ขาออก (output matrix)
$D(\cdot)$	=	เมทริกซ์ป้อนผ่าน (feed-through or feed-forward matrix)
NUM	=	numerator
DEN	=	denumerator
Z(z)	=	zeros
P(z)	=	poles
tr	=	rising time
ts	=	settling time
b	=	overshoot
e_{ss}	=	steady state error
μ	=	mean
σ	=	standard deviation
σ^2	=	variance
AR	=	Auto Regressive Model
ARX	=	Auto Regressive with Exogenous Model
ARMA	=	Auto Regressive Moving Average Model
ARMAX	=	Auto Regressive Moving Average with Exogenous Model
BJ	=	Box Jenkins model
OE	=	Output error model
u(t)	=	Input
y(t)	=	Output
q	=	Time shift operator
A(q)	=	ค่าสัมประสิทธิ์เอาท์พุต
B(q)	=	สัมประสิทธิ์ของตัวเศษของอินพุต
C(q)	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวส่วนของอินพุต
D(q)	=	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวเศษของสัญญาณรบกวน
E(q)	=	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวส่วนของสัญญาณรบกวน
nb	=	จำนวนโพล
nf	=	จำนวนซีโร่ บวก 1

nk	=	จำนวนตัวหน่วงเวลา (Time delay)
NARX	=	Nonlinear Auto Regressive with Exogenous Model
HM	=	Hammerstein Model
WM	=	Wiener Model
HW	=	Hammerstein-Wiener Model
DZ	=	Deadzone estimator
ST	=	Saturation estimator
PW	=	Piecewise Linear estimator
SN	=	Sigmoidnet estimator
WN	=	Wavelet Network estimator
u	=	input function
y	=	output function
r	=	ตัวถดถอย (regressor)
Q	=	nonlinear subspace
P	=	linear subspace
L	=	linear coefficient
D	=	เอาท์พุตออฟเซ็ต (output offset)
b	=	dilation coefficient
a	=	output coefficient
c	=	translation coefficient
f(·)	=	Sigmoid function
as	=	scaling coefficient
aw	=	wavelet coefficient
bs	=	scaling dilation coefficient
bw	=	wavelet dilation coefficient
cs	=	scaling translation coefficient
cw	=	wavelet translation coefficient
f(.)	=	scaling function (radial function)
g(.)	=	wavelet function (radial function)
fit	=	Goodness of fit
AIC	=	Akaike Information Criterion
V	=	Loss function

FPE	=	Final Prediction Error
THD	=	Total Harmonic Distortion
Vrms	=	Root Mean Square Voltage
Irms	=	Root Mean Square Current
FCLV	=	Fix Current Low Voltage
FCMV	=	Fix Current Medium Voltage
FCHV	=	Fix Current High Voltage
FVMC	=	Fix Voltage Medium Current
FVLC	=	Fix Voltage Low Current
FVHC	=	Fix Voltage High Current
SISO	=	Single Input Single output
MISO	=	Multiple Input Single output
SIMO	=	Single Input Multiple output
MIMO	=	Multiple Input Multiple output