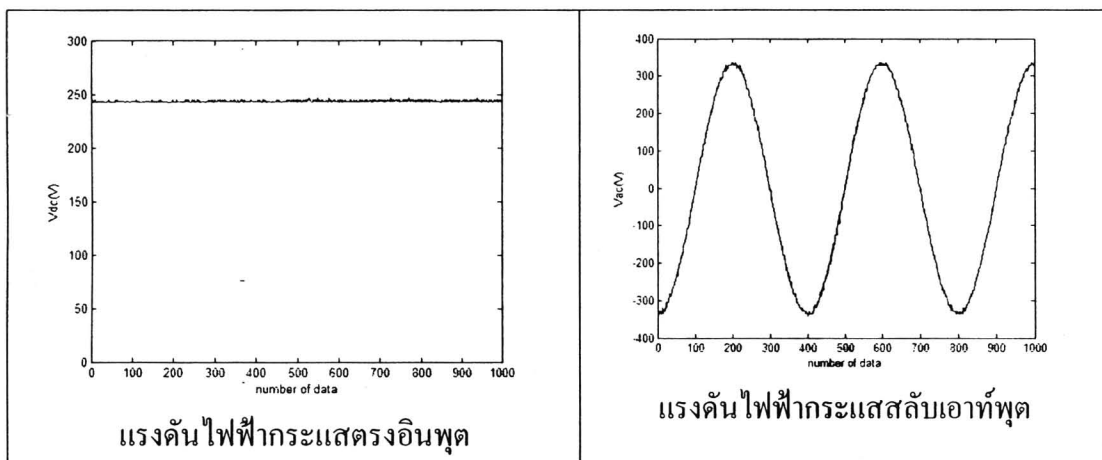


บทที่ 4 ผลการทดลอง

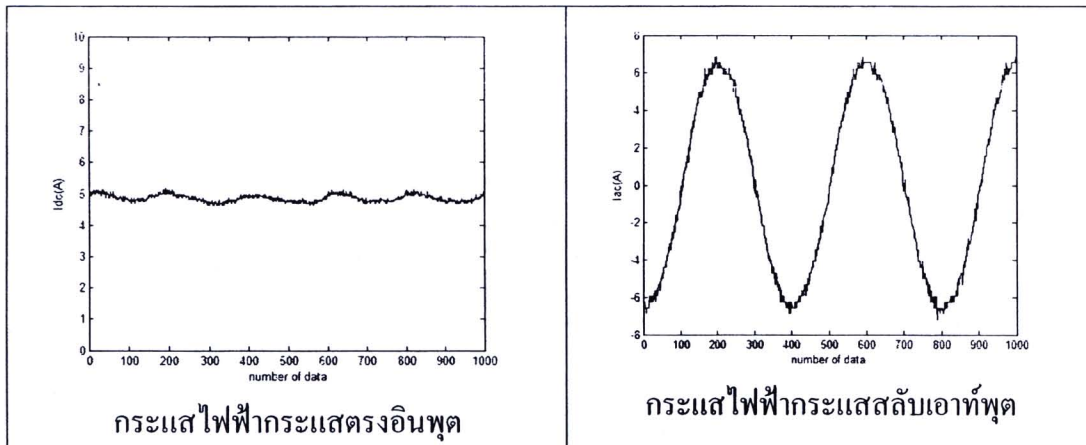
ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลองอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย โดยใช้แบบจำลองเชิงเส้นที่ใช้วิธี 4 วิธีคือ ARX, ARMAX, BJ, OE และแบบไม่เป็นเชิงเส้น 4 วิธีคือ NARX, Hammerstein, Wiener, Hammerstein-Wiener จากนั้นเลือกใช้แบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นวิธี Hammerstein-Weiner ซึ่งพบว่า เป็นวิธีที่ดีที่สุดในการวิเคราะห์ต่อไป โดยหาแบบจำลองในพฤติกรรมสามสถานะคือ สถานะคงตัว สถานะทรานเซียนท์ สถานะโอเวอร์แลนดิ่ง การปรับปรุงแบบจำลองด้วยเทคนิคสองเทคนิคคือ เทคนิค Cross validation และเทคนิคตัวแปรหลายอินพุตและหลายเอาต์พุต และการใช้แบบจำลองวิธี Hammerstein-Weiner วิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า

4.1 การหาแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ในสถานะคงตัว

ในการทดสอบอินเวอร์เตอร์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเฟสเดียว ขนาด 2000 วัตต์ ในสถานะคงตัว ตามหัวข้อที่ 3.5 และต่อวงจรการทดลองตามรูปที่ 3.5 ตรวจสอบวัดข้อมูลทางไฟฟ้าทั้ง 4 ค่าของรูปคลื่น แรงดันและกระแสไฟฟ้า โดยบันทึกข้อมูลจำนวน 1000 ข้อมูล โดยมีอัตราการสุ่ม (sample rate) ที่ 50 ไมโครวินาที และบันทึกรูปคลื่นจำนวน 2.5 รูปคลื่น คิดเป็นเวลา 0.05 วินาที ได้ดังรูปที่ 4.1

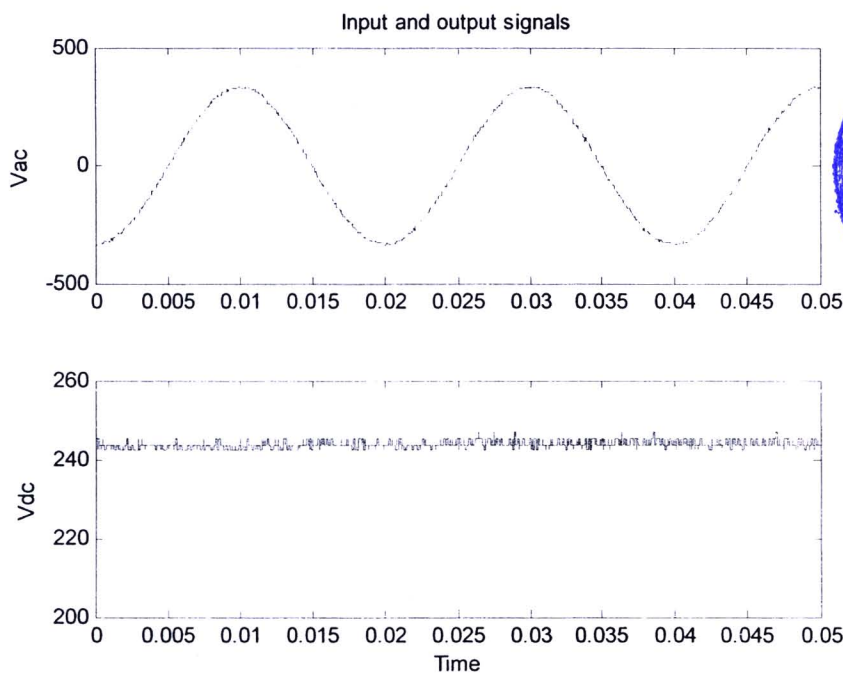


รูปที่ 4.1 รูปคลื่นที่บันทึกได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.1 (ต่อ) รูปคลื่นที่บันทึกได้จากการทดลอง

ข้อมูลที่ตรวจวัดได้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ข้อมูลสำหรับการประมาณค่า 500 ข้อมูล และข้อมูลสำหรับตรวจสอบ 500 ข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ Estimate data และ Validate data

การจำลองใช้เงื่อนไขการพิจารณาตามที่กล่าวมาในบทที่ 2 โดย

ก. พิจารณาความถูกต้อง เป็นเงื่อนไขสำคัญหลักและ

ข. พิจารณาค่าอันดับของโมเดลในลำดับถัดมา อันดับแบบจำลองหาได้จากผลบวกโพลและ

ซีโรรวมกัน หรือหาได้จากผลบวกค่า n_a n_b n_c n_d และ n_f ไปด้วยหนึ่ง (1)

แบบจำลองที่ดีควรมีอันดับของโมเดลต่ำ เพื่อความง่ายในการวิเคราะห์และควบคุมระบบ และการสร้างฮาร์ดแวร์ยุ่งยากซับซ้อนน้อยกว่า ส่วนค่าความผิดพลาด Final Prediction Error (FPE) และ Loss function ควรมีค่าน้อยๆ

ตัวอย่างความถูกต้องของแบบจำลองและค่าความผิดพลาดของสัญญาณข้อมูลตรวจวัดกับแบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ พารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองอินเวอร์เตอร์ ของแบบจำลองเชิงเส้นด้วยวิธี 4 วิธีคือ ARX, ARMAX, BJ, OE และแบบไม่เป็นเชิงเส้น 4 วิธี คือ NARX, Hammerstein, Wiener, Hammerstein-Wiener แสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 สุ่มบัติแบบจำลองเชิงเส้นของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

Model	Linear Polynomial Parameters						Model properties			
	na	nb	nc	nd	nf	nk	order	% fit	FPE	AIC
ARX	10	10	-	-	-	9	19	26.49	3,292	8.09
ARMAX	5	1	3	-	-	3	8	92.03	2,584	7.85
BJ	-	5	5	1	3	1	13	92.82	2,655	7.88
OE	-	3	-		3	5	5	93.56	2,910	7.97

จากผลแบบจำลองเชิงเส้น 4 แบบด้วยวิธี ARX, ARMAX, BJ, OE มีข้อสรุปที่สำคัญดังนี้

ก. แบบจำลองวิธี ARX มีค่าความถูกต้องที่ต่ำเพียง 26.49% และจำนวนอันดับแบบจำลองสูงถึง 19 แบบจำลองชนิดนี้มีเพียงตัวคูณสัมประสิทธิ์เอาต์พุตและสัมประสิทธิ์ตัวเศษอินพุต ทำให้ระบบไม่เสถียร

ข. แบบจำลองวิธี ARMAX เพิ่มสัมประสิทธิ์ตัวเศษสัญญาณรบกวน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าซีโรของระบบ จึงทำให้สมการรูปแบบนี้มีความถูกต้องถึง 92.03% และมีจำนวนอันดับลดลงเหลือ 8

ค. แบบจำลองวิธี BJ จะมีสัมประสิทธิ์ทั้งเศษและส่วนของอินพุต และสัมประสิทธิ์ทั้งเศษและส่วนของสัญญาณรบกวน ซึ่งเป็นชนิด color noise/disturbance จึงทำให้มีอันดับของแบบจำลองสูง

ง. แบบจำลองวิธี OE มีลักษณะคล้ายกับ BJ แต่ไม่มีสัมประสิทธิ์ตัวคูณของสัญญาณรบกวน จึงถือว่าสัญญาณรบกวนเป็น white noise/disturbance หรือ gaussian noise ซึ่งหมายถึง สัญญาณรบกวนที่ไม่มีการคูณหรือขยายสัญญาณ และวิธี output error ของแบบจำลองนี้มีความถูกต้องสูง และมีอันดับต่ำที่สุดในจำนวน 4 วิธีของแบบจำลองเชิงเส้น

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบสมบัติแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น กับผลการทดลองจริง

Model	Nonlinear		Linear parameters			Model properties			
	I/P	O/P	na	nb	nk	order	% fit	FPE	AIC
NARX	-	WN	9	1	9	9	81.02	5,012	8.51
	-	SN	10	7	8	16	81.01	4,086	8.30
Model	Nonlinear		Linear parameters			Model properties			
	I/P	O/P	nb	nf	nk	order	% fit	FPE	AIC
Hammerstein	SN	-	3	3	1	5	92.79	4,022	9.54
	WN	-	3	3	1	5	92.88	3,037	9.47
Wiener	-	SN	2	5	0	6	53.86	3,790	11.86
	-	WN	4	2	2	5	61.03	3,013	10.28
Hammerstein-Wiener	SN	SN	3	2	2	4	93.75	3,323	7.06
	WN	WN	1	3	2	3	98.01	2,670	7.54

หมายเหตุ : WN คือ Wavelet neural network และ SN คือ Sigmoid network

จากวิธีหาแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นจำนวน 4 วิธีคือ NARX, Hammerstein, Wiener, Hammerstein-Wiener model พบว่า

ก. แบบจำลองวิธี NARX มีความถูกต้องมากขึ้นกว่าวิธี ARX เนื่องจากมีการเพิ่มฟังก์ชันไม่เชิงเส้นเข้ามา โดยฟังก์ชันชนิด Wavelet Neural Network (WN) ให้ค่าอันดับแบบจำลองเท่ากับ 9 ซึ่งต่ำกว่า Sigmoid Network (SN) ที่มีค่าอันดับแบบจำลองเท่ากับ 16

ข. แบบจำลองวิธี Hammerstein ที่ใช้ฟังก์ชัน Wavelet Network และ Sigmoid Network มีความถูกต้องมากกว่าร้อยละ 90 และมีอันดับของแบบจำลองเท่ากับ 5

ค. แบบจำลองวิธี Wiener ที่ใช้ฟังก์ชัน Wavelet network และ Sigmoid network มีค่าความถูกต้องเพียง 53.86 และ 61.03 ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบและการจัดเรียงโครงสร้างของแบบจำลองพบว่า แบบจำลองวิธี Hammerstein มีฟังก์ชันไม่เชิงเส้นอยู่ด้านหน้า ตรงกับตำแหน่งของชุดควบคุม และ Wiener มีฟังก์ชันไม่เชิงเส้นอยู่ด้านหลัง ตรงกับตำแหน่งของ sensor feedback แสดงว่าระบบมีความไม่เชิงเส้นสูงที่ชุด

ควบคุม ดังนั้นกรณี Wiener เมื่อไม่มีฟังก์ชันไม่เชิงเส้นด้านหน้า จึงทำให้ระบบมีค่าความถูกต้องลดลงมาก

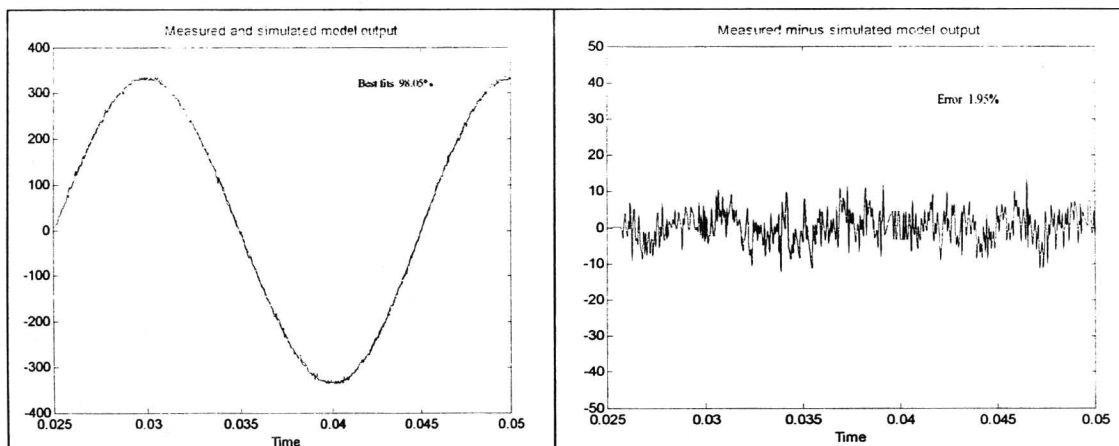
ง. แบบจำลองวิธี Hammerstein-Wiener ที่ใช้ฟังก์ชัน Sigmoidnet และ Wavelet Network ให้ค่าความถูกต้องค่อนข้างสูงและมีอันดับแบบจำลองต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นของ Lure's problem โดยโครงสร้างประกอบด้วยบล็อกไม่เชิงเส้นอินพุต (input nonlinear block) บล็อกเชิงเส้น (linear block) และบล็อกไม่เป็นเชิงเส้น (output nonlinear block) ซึ่งเทียบเคียงกับวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ประกอบด้วยระบบควบคุม สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรกรองและเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ทั้งนี้ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ซึ่งอยู่ส่วนภาคอินพุตมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงมาก ทำหน้าที่ควบคุมการสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีความเป็นเชิงเส้น วงจรกรอง วงจรเชื่อมโยงและตัวตรวจจับซึ่งมีความไม่เป็นเชิงเส้นน้อยกว่าชุดควบคุม

จากการเปรียบเทียบสองกลุ่มทั้งแบบจำลองเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น แบบจำลองวิธี Hammerstein-Wiener มีความเหมาะสมที่สุด เพราะมีค่าความถูกต้องสูงสุด และมีอันดับของแบบจำลองต่ำที่สุด

4.2 การหาแบบจำลองในสถานะคงตัว ด้วยวิธี Hammerstein-Wiener

การทดลองนี้หาแบบจำลองระบบในสถานะคงตัว ได้ใช้วิธี Hammerstein-Wiener และเปลี่ยนฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น 5 ฟังก์ชัน ได้แก่ Deadzone , Saturation, Piecewiselinear, Wavenet, Sigmoid ในการแทนคุณสมบัติบล็อกไม่เป็นเชิงเส้นอินพุตและเอาท์พุต

จากแบบจำลองที่ได้ ได้จำลองสัญญาณแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า โดยการจำลองสัญญาณแรงดันใช้ฟังก์ชัน Piecewise linear ให้ค่าความถูกต้องสูงสุดที่ 98.05% อันดับแบบจำลองเท่ากับสอง และค่า FPE กับ AIC มีค่าค่อนข้างต่ำ และมีค่าความผิดพลาด ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ในส่วนฟังก์ชัน Wavelet network, Sigmoid network, Saturation และ Deadzone ก็มีค่าความถูกต้องสูงมากกว่าร้อยละ 85 เช่นกัน และค่าอันดับแบบจำลองต่ำเช่นกัน



รูปที่ 4.3 ค่าความถูกต้องและค่าผิดพลาดแบบจำลอง Hammerstein-Wiener ฟังก์ชัน Pwlinear

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดัน กระแสและกำลังเมื่อใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น 5 ฟังก์ชัน จากการทดลองและแบบจำลอง Hammerstein-Wiener

Data	Input/Output Nonlinear	Nb	nf	nk	Model order	% fit	FPE	AIC
Voltage	Deadzone	1	5	1	5	87.23	3,079.8	10.33
	Saturation	4	5	2	8	93.54	729.03	6.59
	Pwlinear	1	2	2	2	98.05	26.27	3.26
	Sigmoid	3	2	2	4	93.75	3,323	7.06
	Wavenet	1	3	2	3	98.01	2,670	7.54
Current	Deadzone	3	8	2	10	91.76	0.07	2.57
	Saturation	3	4	2	6	95.02	0.23	2.99
	Pwlinear	4	6	7	9	94.51	0.05	1.53
	Wavenet	9	17	2	25	93.22	19.08	15.19
	Sigmoidnet	5	8	3	12	91.68	25.61	18.14
Power	Deadzone	3	7	5	9	91.05	8,688.3	9.06
	Saturation	6	4	1	9	92.28	1,262.7	9.44
	Pwlinear	8	6	2	13	92.32	3,263	8.08
	Sigmoidnet	4	9	3	12	92.82	8,480	6,010
	Wavenet	5	7	2	11	93.62	2008	1429

ในการจำลองสัญญาณกระแส ฟังก์ชัน Saturation มีค่าความถูกต้องสูงสุด 95.02% และอันดับแบบจำลองเท่ากับ 6 ขณะที่ฟังก์ชันอื่นๆ ก็มีค่าความถูกต้องสูงเช่นกัน แต่ก็มีค่าอันดับที่สูงด้วย และเมื่อพิจารณาเทียบกับแรงดันพบว่า สัญญาณกระแสมีค่าอันดับสูงขึ้นมา ซึ่งแสดงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของสัญญาณกระแสมีค่าสูงขึ้นมาว่าสัญญาณแรงดัน

ในการจำลองสัญญาณกำลังไฟฟ้า พบว่าทุกฟังก์ชันจำลองเอาต์พุตมีที่ค่าความถูกต้องมากกว่า 90 แต่มีค่าอันดับที่สูงกว่าสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสมาก โดยฟังก์ชัน Wavenet ให้ค่าความถูกต้องสูงสุด 93.62 แต่มีอันดับสูงถึง 11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กำลังไฟฟ้ามีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงกว่าสัญญาณแรงดันและกระแส

จากการวิเคราะห์ผลการจำลองที่แสดงมาพบว่า พฤติกรรมของสัญญาณแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงขึ้นมาตามลำดับ ความสามารถของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นกลุ่มแรกมีความซับซ้อนน้อย ได้แก่ ฟังก์ชัน Deadzone, Saturation และ Piecewise ส่วนฟังก์ชันที่มีความซับซ้อนมาก ได้แก่ ฟังก์ชัน Sigmoidnet และ Wavenet

อย่างไรก็ตาม ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าฟังก์ชันใดมีความเหมาะสมมากกว่ากัน ต้องพิจารณาพฤติกรรมของข้อมูล ระบบ ประกอบกับความสามารถของฟังก์ชัน เพื่อให้มีค่าความถูกต้องน้อยที่สุด อันดับของแบบจำลองมีค่าต่ำสุดและค่าความผิดพลาด FPE และ AIC มีค่าต่ำสุดด้วยเช่นกัน ซึ่งการวิเคราะห์คุณสมบัติและพฤติกรรมของแบบจำลองจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

4.3 การวิเคราะห์แบบจำลอง

เมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีความถูกต้องแล้ว ก็พิจารณาสมบัติแบบจำลอง โดยใช้คำสั่งในโปรแกรม โดยสามารถดูรายละเอียดการจำลอง วิธีการที่ใช้ จำนวน สมบัติทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง โดยแต่ละฟังก์ชันจะให้ค่าพารามิเตอร์ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน และสามารถนำไปวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีระบบควบคุมต่อไป

หลังจากทราบวิธีการจำลอง และข้อมูลเบื้องต้นการจำลองแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ การวิเคราะห์แบบจำลองซึ่งแบ่งออกเป็นการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีควบคุมไม่เชิงเส้นและทฤษฎีควบคุมเชิงเส้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ ในการคัดกรองและเลือกแบบจำลองให้มีความถูกต้องใกล้เคียงกับระบบจริงให้มากที่สุด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

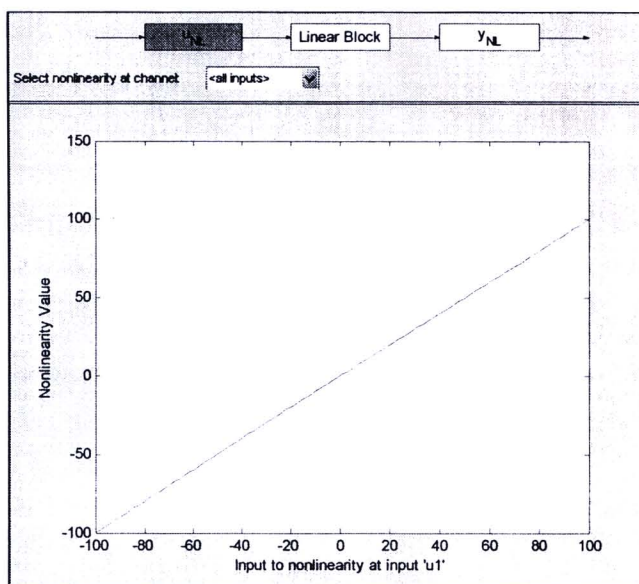
- 1) สมบัติแบบไม่เป็นเชิงเส้น

แบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นสามารถวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์หรือกราฟตามคุณลักษณะฟังก์ชันได้ โดยในหัวข้อนี้จะแสดงฟังก์ชันไม่เชิงเส้นทั้ง 5 ชนิด ที่ใช้กับแบบจำลอง Hammerstein-Wiener ดังแสดงในตารางที่ 4.4-4.8 และกราฟรูปที่ 4.8-4.13 ตามลำดับ

ก) ฟังก์ชันประมาณค่าไม่เชิงเส้น Deadzone

ตารางที่ 4.4 สมบัติตัวประมาณค่าแบบ Deadzone inputnonlinear และ outputnonlinear

ข้อมูลจากแบบจำลอง	ความหมาย	ค่าจากแบบจำลอง
Nonlinear Estimator		Dead Zone
Input ZeroInterval	ช่วงzero interval ของอินพุต	[244.4929 244.6995]
Output ZeroInterval	ช่วงzero interval ของเอาต์พุต	

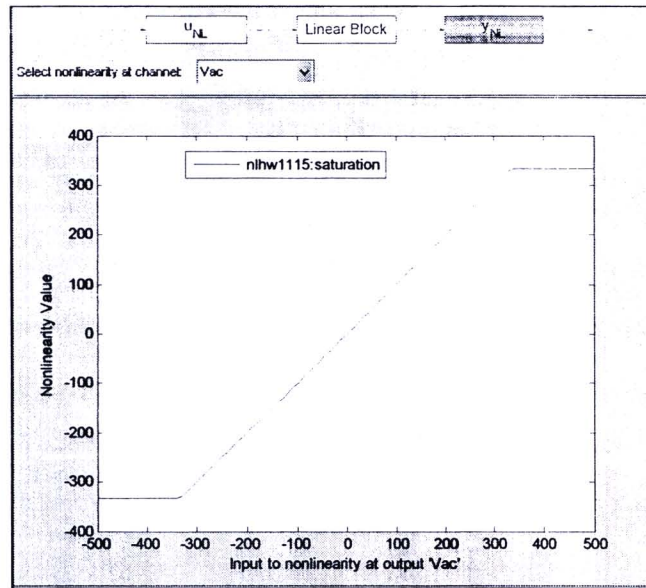


รูปที่ 4.4 กราฟคุณลักษณะของ Input Nonlinearity Estimator ชนิดฟังก์ชัน Deadzone

ข) ฟังก์ชันประมาณค่าไม่เชิงเส้น Saturation

ตารางที่ 4.5 สมบัติตัวประมาณค่าแบบ Saturation inputnonlinear และ outputnonlinear

ข้อมูลจากแบบจำลอง	ความหมาย	ค่าจากแบบจำลอง
Nonlinear Estimator	ชนิดฟังก์ชันไม่เชิงเส้น	Saturation
Input LinearInterval:	ช่วงอินพุตเชิงเส้น	[239.3431 245.4578]
Output LinearInterval:	ช่วงเอาต์พุตเชิงเส้น	[-305.9890 296.6166]

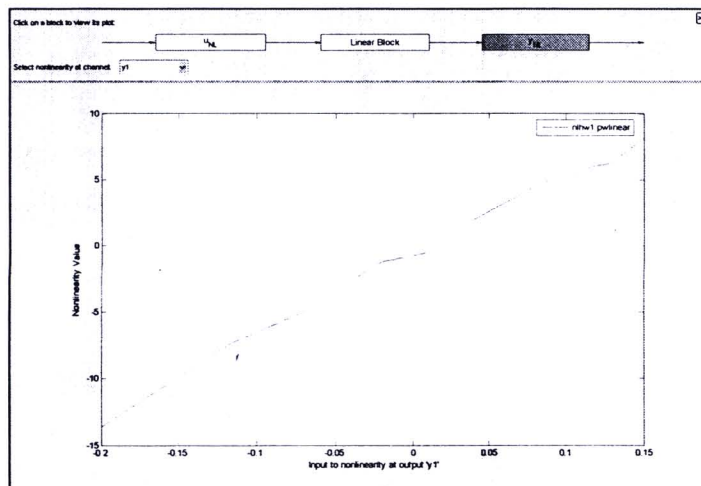


รูปที่ 4.5 กราฟคุณลักษณะของ Output nonlinearity Estimator ชนิดฟังก์ชัน Saturation

ค) ฟังก์ชันประมาณค่าไม่เชิงเส้น Piecewise linear

ตารางที่ 4.6 สมบัติตัวประมาณค่าแบบ Piecewise linear

ข้อมูลจากแบบจำลอง	ความหมาย	ค่าจากแบบจำลอง
Nonlinear Estimator	ชนิดฟังก์ชัน ไม่เชิงเส้น	Piece-wise Linear:
Number Of Units: 10	จำนวนช่วง	
Break Points:	จุดแยก	[2x10 double]



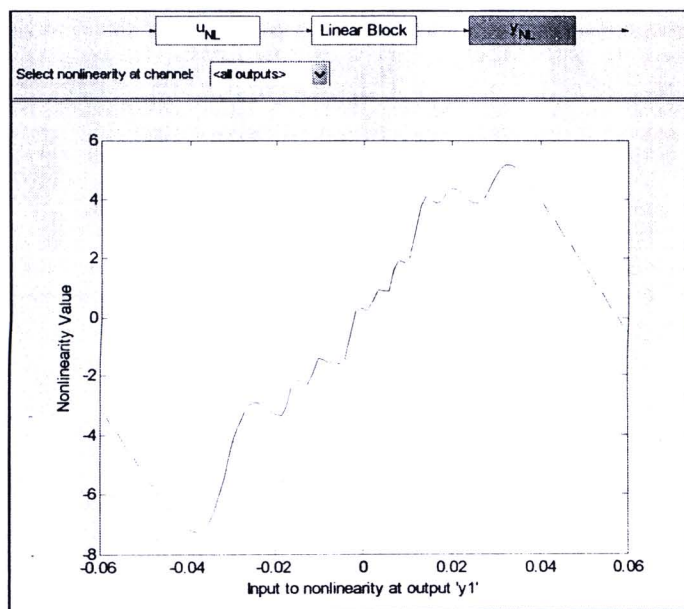
รูปที่ 4.6 กราฟคุณลักษณะของ Output nonlinearity estimator ชนิดฟังก์ชัน Piecewise Linear

ง) ฟังก์ชันประมาณค่าไม่เชิงเส้น Sigmoid Network

ตารางที่ 4.7 สมบัติของตัวประมาณค่าแบบ Sigmoid Network

Properties	Input nonlinear	Output nonlinear
Regressor Mean	0.0052	-9.61×10^{-17}
NonLinear Subspace	1	1
Linear Subspace	1	1
Linear Coef	-0.1387	-6.1046
Dilation	[1x10 double*]	[1x10 double]
Translation	[1x10 double]	[1x10 double]
Output Coef	[10x1 double]	[10x1 double]
Output Offset	-0.0527	1.1208

Note : * double is type of data structure



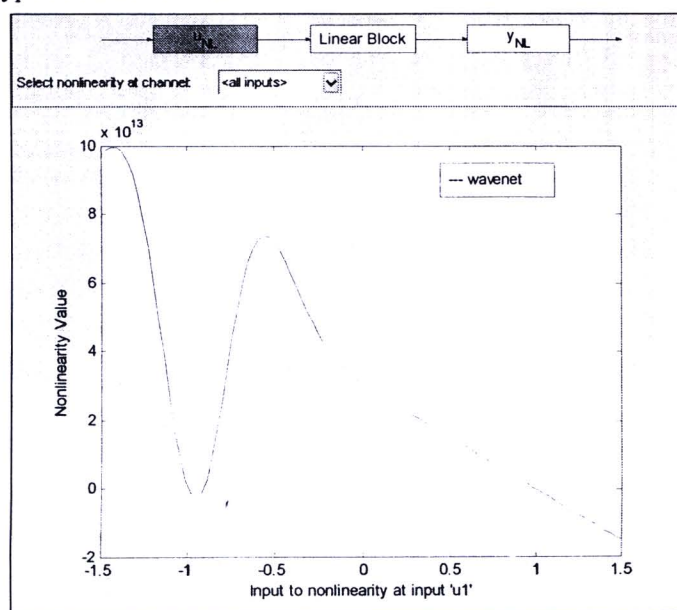
รูปที่ 4.7 กราฟคุณลักษณะของ Output nonlinearity Estimator ชนิดฟังก์ชัน Sigmoidnetwork

จ) ฟังก์ชันประมาณค่าไม่เชิงเส้น Wavelet Network

ตารางที่ 4.8 สมบัติของตัวประมาณค่าแบบ Wavelet Network

Properties	Input nonlinear	Output nonlinear
Number of Unit	6	11
Regressor Mean	- 8.5126	-98.55
Nonlinear Subspace	0.0056	4.58e-4
Linear Subspace	0.0056	4.58e-4
Output Offset	-7.0973	-0.4855
Linear Coef ⁶	176.51	3.1140
Scaling Coef	[0x1 double*]	[3x1 double]
Wavelet Coef	[6x1 double]	[8x1 double]
Scaling Dilation	[0x1 double]	[3x1 double]
Wavelet Dilation	[6x1 double]	[8x1 double]
Scaling Translation	[0x1 double]	[3x1 double]
Wavelet Translation	[6x1 double]	[8x1 double]

Note : * double is type of data structure



รูปที่ 4.8 กราฟคุณลักษณะของ input nonlinearity Estimator ชนิดฟังก์ชัน waveletnetwork

2) การวิเคราะห์สมบัติเชิงเส้น

นอกเหนือจากการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยสมบัติไม่เชิงเส้นแล้ว ระบบสามารถใช้เครื่องมือเชิงเส้นในการวิเคราะห์ได้ โดยในโปรแกรมจะใช้คำสั่ง `linapp(model)` หรือ `linearize(model)` และ `findop` ซึ่งเป็นเทคนิคการแปลงระบบไม่เป็นเชิงเส้นให้มีลักษณะเป็นเชิงเส้นด้วยทฤษฎี Linear approximation Taylor's series โดยในที่นี้ได้แสดงตัวอย่างแบบจำลองสัญญาณแรงดันด้วยวิธี Hammerstein-Wiener ที่ใช้ฟังก์ชันไม่เชิงเส้น Piecewise Linear estimator

สำหรับสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบเชิงเส้นที่แปลงจากระบบไม่เชิงเส้น Hammerstein-Wiener piecewise linear มีดังนี้

1) สมการพหุนามในรูปของสัญญาณไม่ต่อเนื่อง (Discrete-Time IDPOLY model)

มีรูปแบบดังสมการที่ 4.1

$$y(t) = \left[\frac{B(q)}{F(q)} \right] u(t) + e(t) \quad 4.1$$

$$B(q) = -1.486e - 05 \cdot q^{-2}$$

$$F(q) = 1 - 1.99q^{-1} + q^{-2}$$

2) แบบจำลองปริภูมิแบบไม่ตามเวลาชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง (Discrete time invariant state space model)

สมการเชิงเส้น (lm) สามารถแปลงเป็นสมการปริภูมิได้โดยใช้คำสั่ง `ss (lm)` ซึ่งโปรแกรมจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าเชิงเส้นของแบบจำลอง ดังแสดงตามสมการที่ 4.2

$$\begin{aligned} x(t+Ts) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad 4.2$$

where

$$A = \begin{pmatrix} 1.99 & 1 & 0 & 0 & -0.83 \\ -0.99 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0.48 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.65 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.079 \end{bmatrix}$$

$$C = [-10.69 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$D = [0]$$

1) ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function)

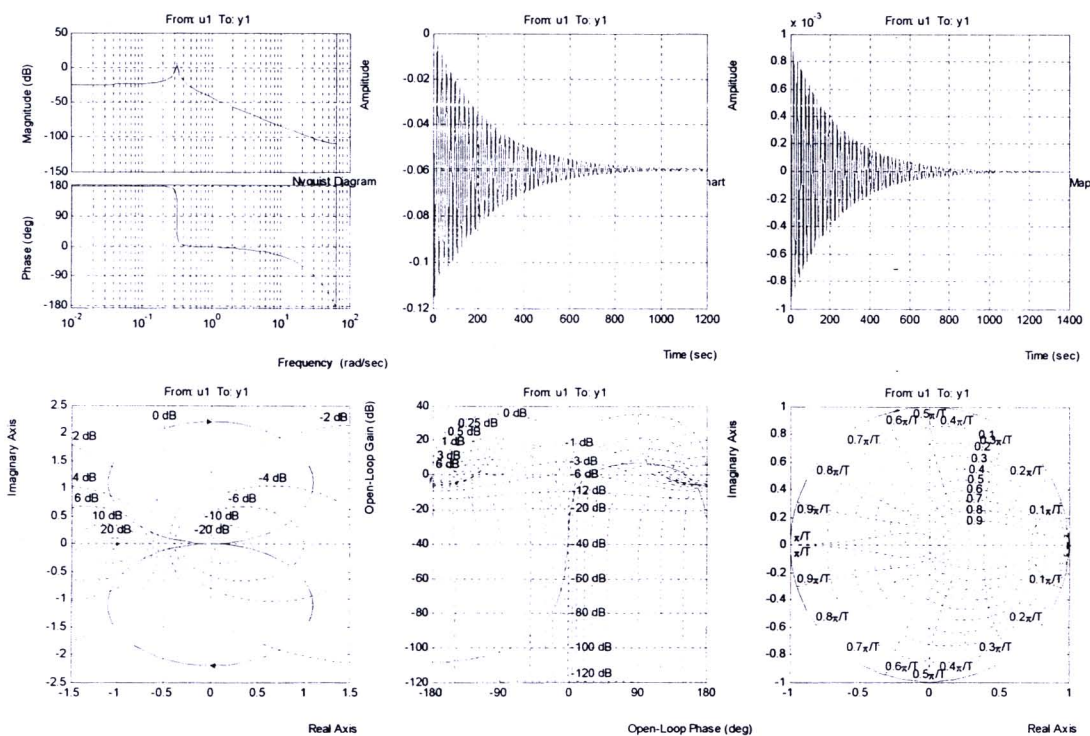
ฟังก์ชันถ่ายโอนที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกระแสตรงและเอาต์พุตกระแสตรง แสดงดังสมการที่ 4.3

$$G(z) = \frac{0.9z^3 - 0.85z^2 - 0.41z + 0.56}{z^5 - 1.99z^4 + 0.99z^3} \quad 4.3$$

จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถหาค่าอัตราขยาย, ซีโร และโพล ของระบบได้ ในกรณีของสัญญาณแรงดัน ค่าอัตราขยาย ควรมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง เนื่องจากป้อนสัญญาณแรงดันอินพุตกระแสตรง ขนาดประมาณ 200-240 โวลต์ และสัญญาณแรงดันเอาต์พุตขนาด 220 โวลต์ จากผลการจำลองและคัดกรองแบบจำลองจึงได้ สมการฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีอัตราขยายเท่ากับ 0.9 zero มีจำนวน 0 จุด และมี pole จำนวน 3 จุด ได้แก่ 0.997-0.0159i, 0.997+0.0159i และ 0 ตามลำดับ

4) การแสดงผลในรูปกราฟ

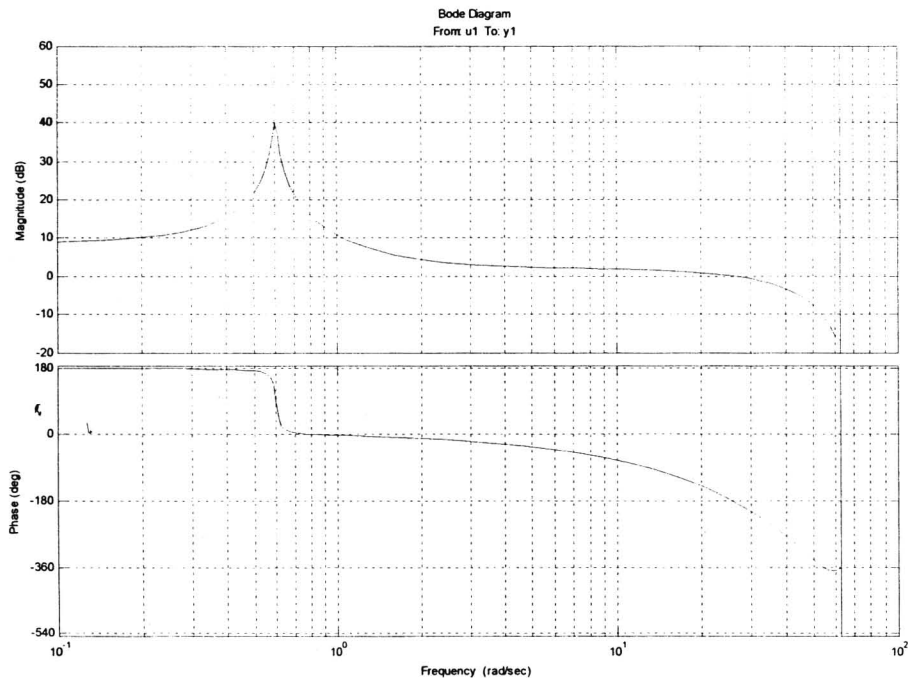
แบบจำลอง Hammerstein-wiener ฟังก์ชัน piecewise linear ที่ได้ทำให้เป็นแบบเชิงเส้น แล้วสามารถวิเคราะห์ผลตอบสนองทางเวลา ผลตอบสนองความถี่และวิเคราะห์เสถียรภาพได้ ดังแสดงผลในรูปกราฟได้ 6 แบบ ตามรูปที่ 4.9 ซึ่งกราฟคุณลักษณะสามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ระบบควบคุม ดังรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 4.9 สมบัติของแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น

การวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบจากโบเดพล็อต

โดยโบเดพล็อตของแบบจำลองเชิงเส้นแสดงดังรูปที่ 4.10



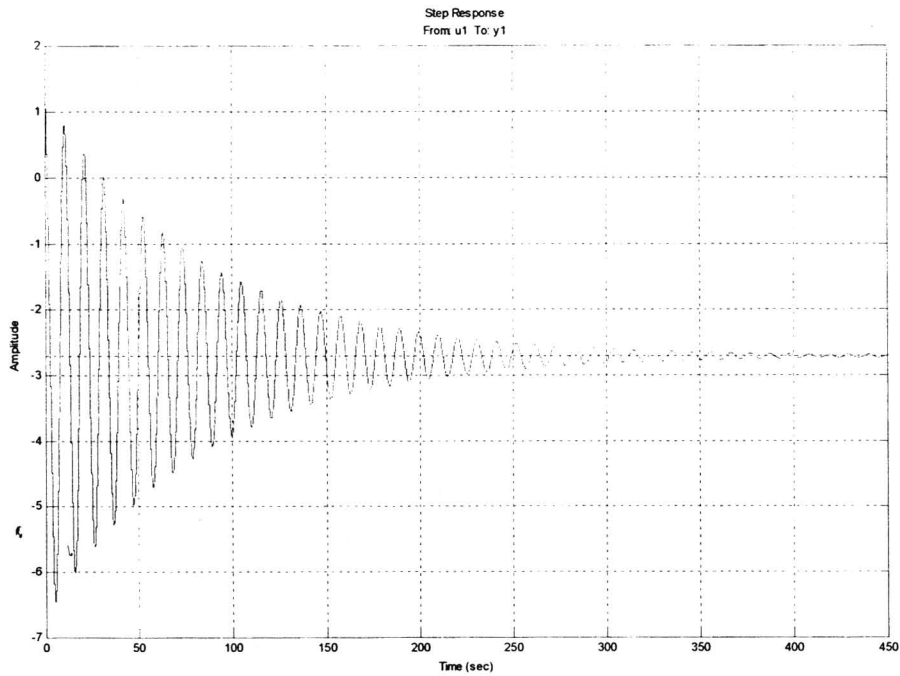
รูปที่ 4.10 Bode plot diagram

การวิเคราะห์ผลตอบสนองทางเวลาของระบบ

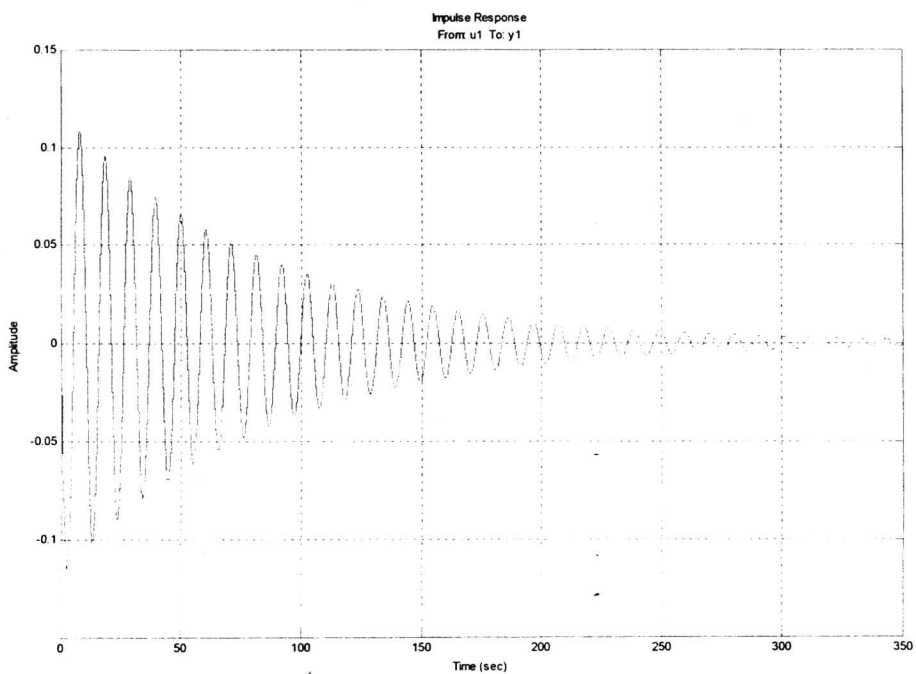
การวิเคราะห์ผลตอบสนองในสถานะทรานเซียนท์ทำโดยการป้อนสัญญาณอินพุตเป็นฟังก์ชันหนึ่งหน่วยและฟังก์ชันอิมพัลส์ และสังเกตพฤติกรรมเอาท์พุต โดยระบบจะควบคุมค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

กรณีป้อนสัญญาณอินพุตเป็นฟังก์ชันหนึ่งหน่วยให้ช่วงเวลาขึ้น (rise time, t_r) 3.25 วินาที เวลาคายอด (peak time, t_p) 9.95 วินาที และมีค่าสูงสุด - 0.116 ค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด (maximum overshoot) 95.9% และค่าเวลาเข้าที่ (settling time, t_s) 912 วินาที และขนาดสุดท้าย มีค่า 0.059 ดังแสดงรูปที่ 4.11

กรณีฟังก์ชันอิมพัลส์ ค่าแอมพลิจูดเท่ากับ -0.000915 ที่เวลา 4.95 และค่าเวลาเข้าที่ 917 วินาที ดังแสดงรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 การตอบสนองทางเวลา Step response

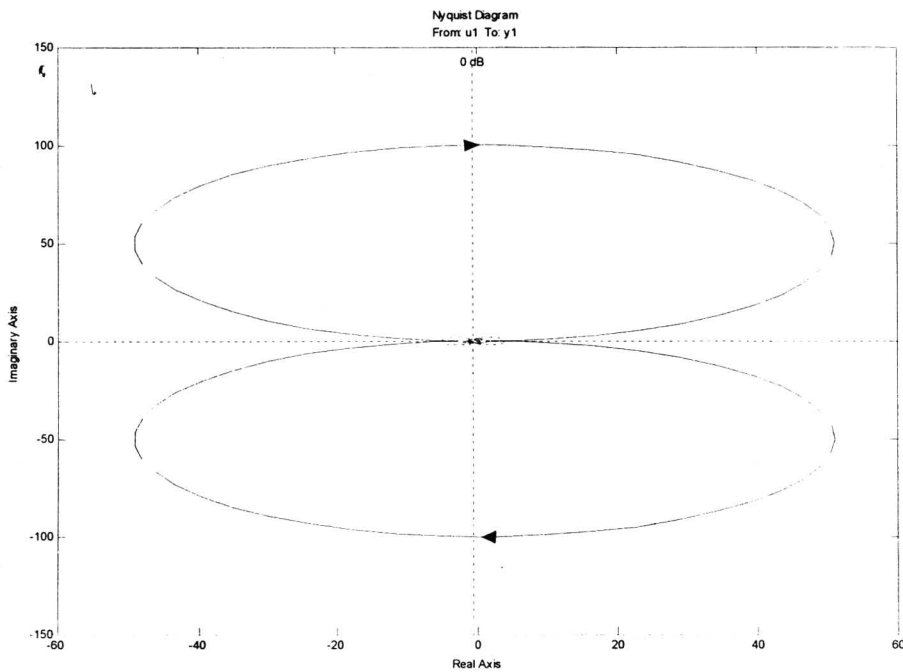


รูปที่ 4.12 การตอบสนองทางเวลา Impulse response

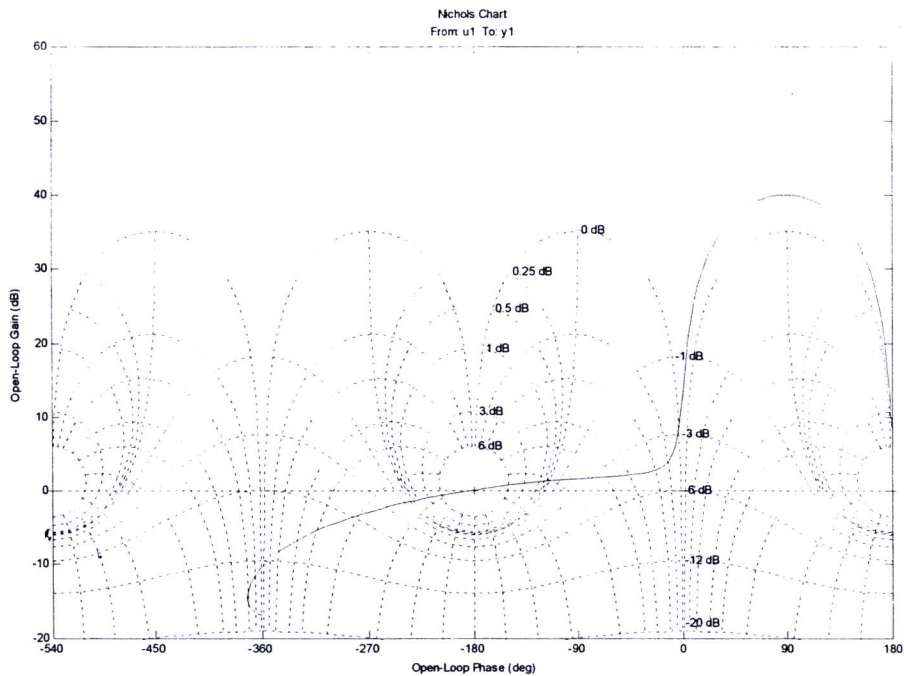
การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบหาได้จาก Nyquist และ Nichols chart ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ค่า เกนมาร์จิ้นและเฟสมาร์จิ้น เป็นค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ สำหรับอินเวอร์เตอร์

ทั่วไปที่มีเสถียรภาพ จะมีค่าเกนมาร์จิ้น และเฟสมาร์จิ้นที่เหมาะสมที่จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ดังนั้นนอกเหนือจากค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตแบบจำลอง ลำดับคิรีของสมการระบบ ค่าอัตราขยาย ซีโร และ โพลของระบบแล้ว เกนมาร์จิ้นและเฟสมาร์จิ้น ก็เป็นพารามิเตอร์อีกชุดที่มีความสำคัญ ที่จะทำให้การคัดเลือกแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับพฤติกรรมเชิงระบบควบคุม ได้จริง ตัวอย่างเช่น ระบบที่มีเสถียรภาพ จะมีค่าเฟสมาร์จิ้นเป็นบวก และหากระบบที่ไม่มีเสถียรภาพจะมีค่าเฟสมาร์จิ้นเป็นลบ หรือมีค่าเป็นอนันต์ (Infinity) ซึ่งในการวิเคราะห์แบบจำลองก็สามารถใช้ค่าพารามิเตอร์นี้ในการพิจารณาถึงความเหมาะสมและเป็นไปได้ของแบบจำลองกับพฤติกรรมของอินเวอร์เตอร์ในสภาวะการทำงานจริง

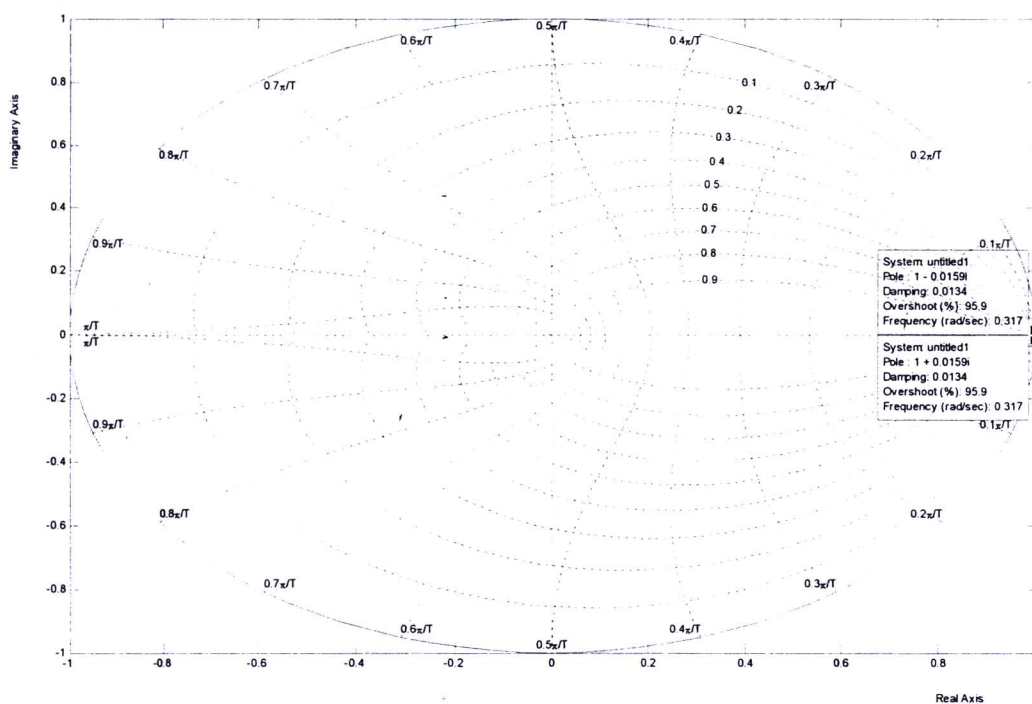


รูปที่ 4.13 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ Nyquist plot



รูปที่ 4.14 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ Nichols chart

จากแผนภาพ pole – zero plot ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ตำแหน่งโพลอยู่ที่ค่า $1-0.0159i$ และตำแหน่งซีโรที่ $1+0.0159i$ ค่าหน่วง damping 0.0134 ค่า overshoot 95.9% ที่ความถี่ 0.317 rad/sec เมื่อวิเคราะห์เสถียรภาพ ตำแหน่งโพลอยู่ในวงกลมหนึ่งหน่วย (unit circle) ซึ่งแสดงว่าระบบมีเสถียรภาพ

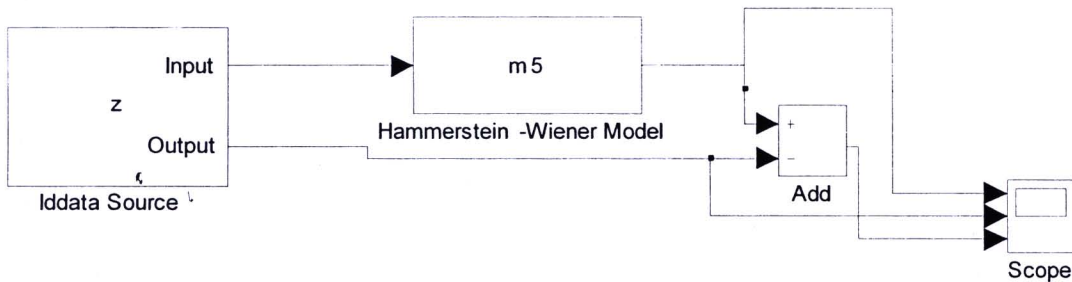


รูปที่ 4.15 I/O Pole zero

4.4 การทดสอบการทำงานของแบบจำลองวิธี Hammerstein-Wiener ด้วย

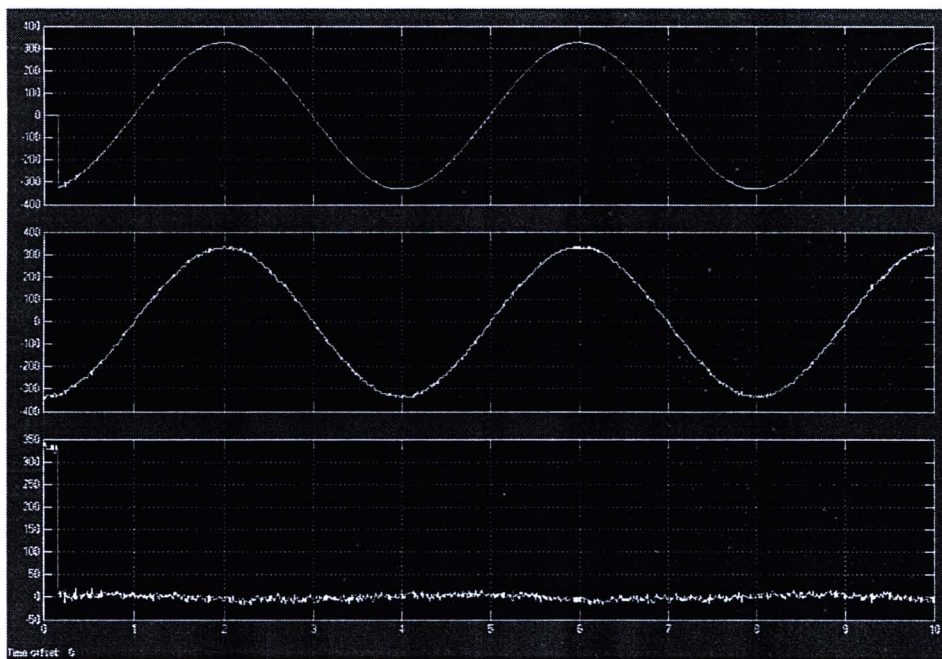
Simulink

หลังจากได้แบบจำลองวิธี Hammerstein-Wiener โดยใช้ฟังก์ชัน Piecewise Linear เนื่องแบบจำลองดังกล่าวมีความถูกต้อง มีอันดับแบบจำลองต่ำ และค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม การทดสอบต่อไปจะนำแบบจำลองมาทดสอบ ดังรูปที่ 4.16 โดยป้อนข้อมูลชุดทดสอบ (Testing data) ที่เก็บบันทึกคนละชุดข้อมูล และวิเคราะห์หาค่าความผิดพลาดของแบบจำลองอีกครั้ง



รูปที่ 4.16 การทดสอบการทำงานของแบบจำลอง

จากรูปที่ 4.16 เมื่อป้อนข้อมูลจริงของแรงดันอินพุตให้แบบจำลอง แบบจำลองจะสร้างสัญญาณเอาต์พุตออกมา เมื่อนำเอาต์พุตที่ได้มาเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตจากการตรวจวัดจริง ก็จะเป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของแบบจำลอง ดังรูปที่ 4.17 ในกรณีกระแส และกำลังไฟฟ้าก็ทำได้ในลักษณะเดียวกัน



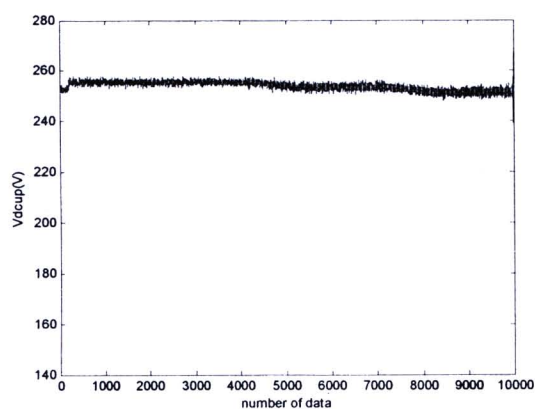
รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันจากแบบจำลองวิธี Hammerstein-Wiener โดยใช้ฟังก์ชัน Piecewise Linear กับข้อมูลชุดทดสอบ (Testing data)

4.5 การหาแบบจำลอง Hammerstein-Weiner ในสถานะทรานเซียนท์

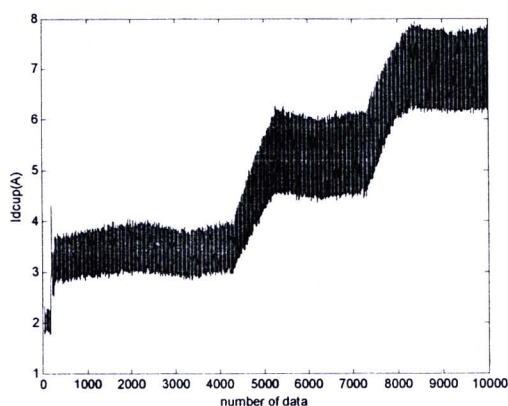
ในการจำลองสถานะทรานเซียนท์ ใช้แบบจำลอง Hammerstein-Weiner โดยใช้ฟังก์ชันไม่เชิงเส้นจำนวน 5 ฟังก์ชัน ได้แก่ Deadzone, Saturation, piecewiselinear, sigmoindnet และ Wavenet โดยแบ่งสถานะการจำลองเป็น 2 กรณี คือ แบบสถานะเพิ่มขึ้น Step up condition และแบบสถานะลดลง Step down condition ดังนี้

4.5.1 กรณีกระแสโหลดเพิ่มจาก 2 A เป็น 7 A

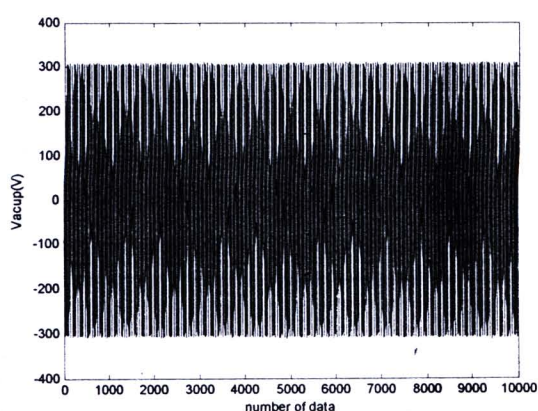
จากหัวข้อการทดลองที่ 3.5.2 และตารางการทดลองอินเวอร์เตอร์ในสถานะทรานเซียนท์ที่ 3.2 บันทึกรูปคลื่นแรงดันและกระแส โดยสัญญาณอินพุตกระแสตรงวัดที่ด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์และสัญญาณเอาต์พุตกระแสสลับที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.18



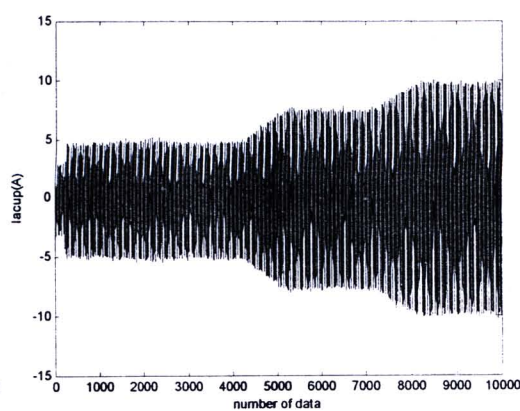
แรงดันกระแสตรง (Vdc)



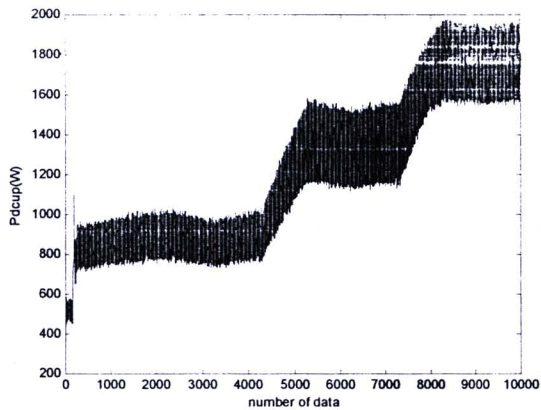
กระแสตรง (Idc)



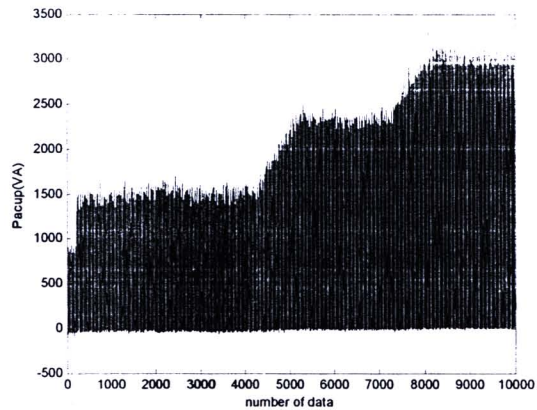
แรงดันสลับ (Vac)



กระแสสลับ (Iac)



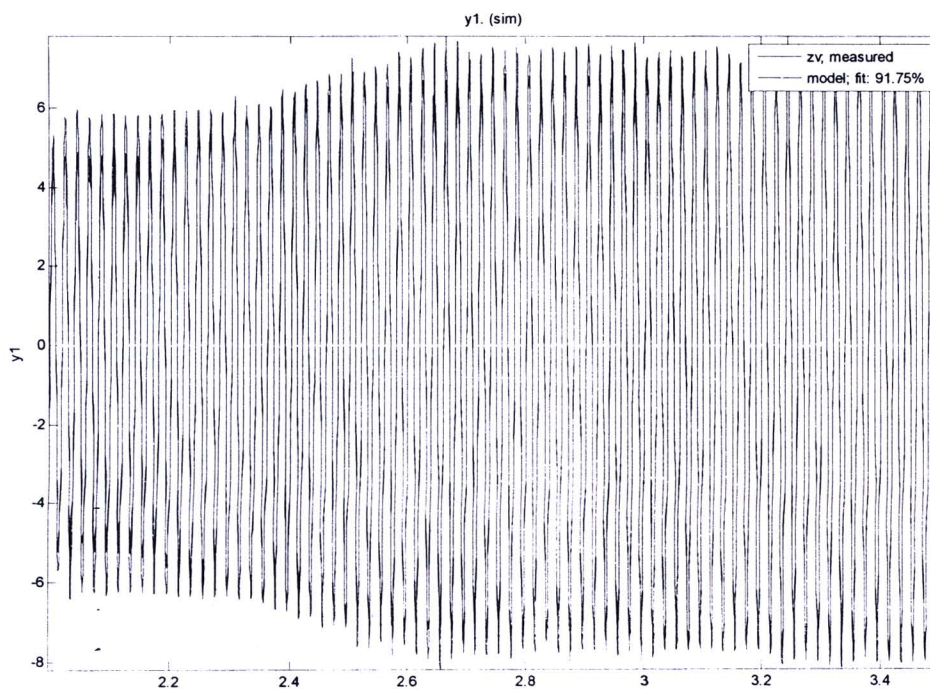
กำลังไฟฟ้ากระแสตรง (Pdc)



กำลังไฟฟ้ากระแสสลับ (Pac)

รูปที่ 4.18 รูปคลื่นในสถานะทรานเซียนเพิ่มขึ้น

จากกระบวนการสร้างแบบจำลองในสถานะทรานเซียน กำลังไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองและข้อมูลจากการทดสอบ มีความถูกต้องอยู่ที่ 91.7% ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากแบบจำลองกับข้อมูลจริง

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้า แบบจำลอง Hammerstein-Wiener โดยใช้ฟังก์ชันไม่เชิงเส้นจำนวน 5 ชนิด กับการทดลองจริง ในช่วงสภาวะทรานเซียนท์แบบเพิ่มขึ้น

Nonlinear	Linear Parameters			Model Properties			
	Nb	nf	nk	model	% fit	FPE	AIC
I/P & O/P							
Deadzone	3	4	2	6	91.75	3,230	7.40
Saturation	4	3	2	6	83.46	3256	11.34
Pwlinear	4	4	5	7	87.20	4720	8.38
Sigmoidnet	3	5	5	7	83.85	4238	8.43
Wavenef	4	5	2	8	84.57	2980	9.52

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองสภาวะทรานเซียนท์จากแบบจำลองและการทดลอง พบว่า

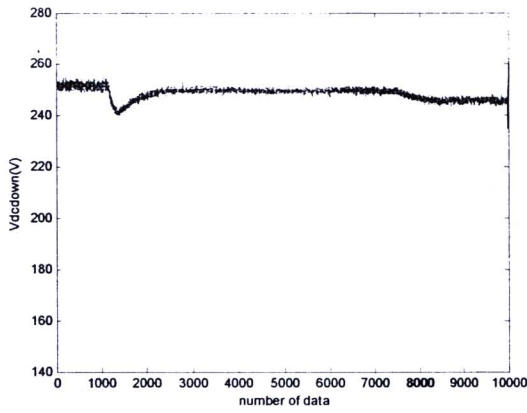
ก. แต่ละฟังก์ชันของแบบจำลองสามารถจำลองระบบได้ที่มีความถูกต้องอยู่ที่ค่ามากกว่าร้อยละ 80 และมีอันดับของแบบจำลองใกล้เคียงกันประมาณ 6 ถึง 8

ข. ฟังก์ชัน Deadzone ให้แบบจำลองที่มีความถูกต้องสูงที่สุดที่ 91.75% และอันดับแบบจำลองเท่ากับ 6

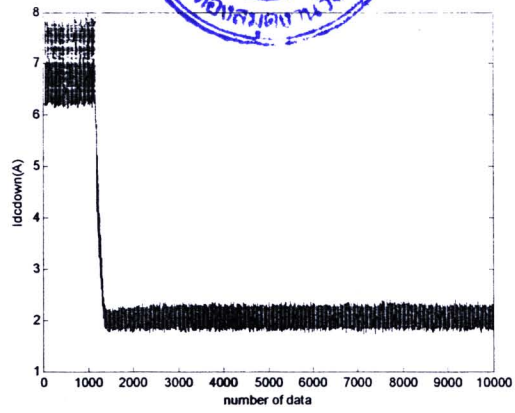
ทั้งนี้เนื่องจากสัญญาณกำลังไฟฟ้ามืดมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงกว่าสัญญาณแรงดัน และกระแส และสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ระบบเกิดค่าผิดพลาดสูงในช่วงรอยต่อของการเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อวิเคราะห์ลงไปในช่วงรอยต่อของการเปลี่ยนแปลงพบว่า ก่อนเกิดสภาวะแบบจำลองสามารถจำลองเอาต์พุตได้ใกล้เคียง แต่หลังจากที่เกิดสภาวะ มีความแตกต่างของสัญญาณจากแบบจำลองกับสัญญาณเอาต์พุตจริง แบบจำลองไม่สามารถสร้างสัญญาณได้ทันการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตจริงได้ แต่พอเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ก็สามารถตอบสนองได้และมีความถูกต้องของสัญญาณมากขึ้น

4.5.2 ผลการทดสอบแบบ Step down condition เมื่อเพิ่มกระแสโหลดทันทีจาก 7 A เป็น 2 A

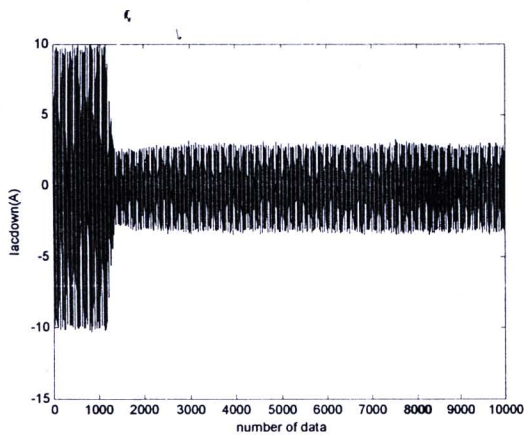
ในกรณีของการเปลี่ยนแปลงทรานเซียนท์แบบลดลง กระแสไฟฟ้าอินพุต แรงดันไฟฟ้าอินพุต กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต แสดงดังรูปที่ 4.20 และผลการจำลองกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต แสดงดังรูปที่ 4.21 และตารางที่ 4.10



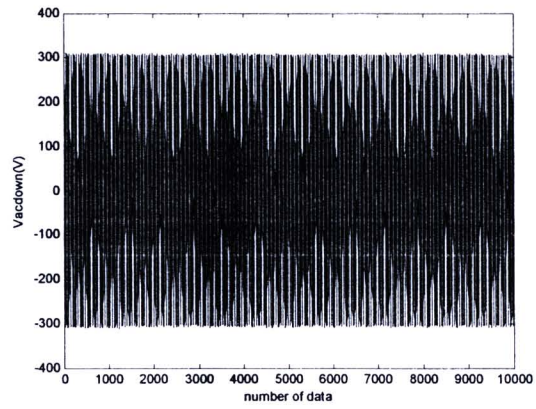
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Vdc)



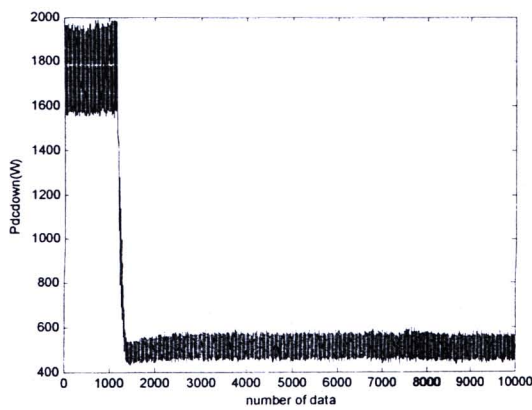
กระแสไฟฟ้ากระแสตรง (Idc)



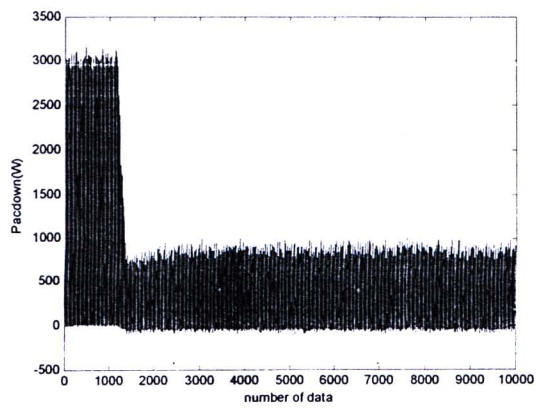
กระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (Iac)



แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Vac)

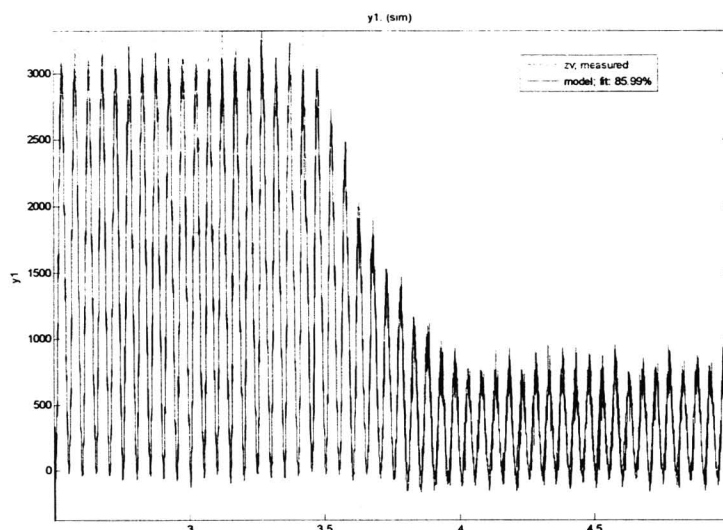


กำลังไฟฟ้ากระแสตรง



กำลังไฟฟ้ากระแสสลับ

รูปที่ 4.20 รูปคลื่นในสถานะทรานเซียนต์ลดลง



รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากแบบจำลองกับสัญญาณจริงสถานะ step down transient

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้า แบบจำลอง Hammerstein-Wiener โดยใช้ฟังก์ชันไม่เชิงเส้นจำนวน 5 ชนิด กับการทดลองจริง ในช่วงสภาวะทรานเซียนท์แบบลดลง

Nonlinear	Linear Parameters			Model Properties			
	nb	nf	nk	model	% fit	FPE	AIC
I/P & O/P							
Deadzone	4	5	5	8	85.12	9,718	9.18
Saturation	3	5	5	7	81.29	3049	11.23
Pwlinear	3	4	3	6	85.99	3233	10.0
Sigmoidnet	4	4	1	7	81.17	4426	8.28
Wavenet	4	5	4	8	82.45	3325	9.25

จากการเปรียบเทียบพบว่า

ก. แบบจำลองที่ใช้ฟังก์ชันทั้ง 5 ชนิด สามารถจำลองระบบในสภาวะทรานเซียนท์ลดลงได้ที่มีความถูกต้องอยู่ที่ประมาณ 80-90%

ข. แบบจำลอง Piecewise linear และ Deadzone มีความถูกต้องสูงสุดที่ 85.99% และ 85.12% ตามลำดับ เมื่อพิจารณารูปคลื่นพบว่า ก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลง ระบบสามารถจำลองได้ดี แต่หลังการเปลี่ยนแปลง ความผิดพลาดของสัญญาณเพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อเวลาผ่านไป คล้ายกับพฤติกรรมคล้ายกับสภาวะทรานเซียนท์เพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตาม หากเทียบกับสภาพการเปลี่ยนแปลงของแสงอาทิตย์หรืออุณหภูมิ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงช้ากว่าการเปลี่ยนแปลงทั้งลดลงหรือเพิ่มขึ้น แบบจำลองจะมีความสามารถในการจำลองระบบได้ใกล้เคียงขึ้น

ในการทำงานเดียวกับการทดลองสถานะคงตัว เมื่อได้ผลลัพธ์จากแบบจำลอง ก็สามารถนำไปวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีระบบควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น และเครื่องมือระบบเชิงเส้นได้

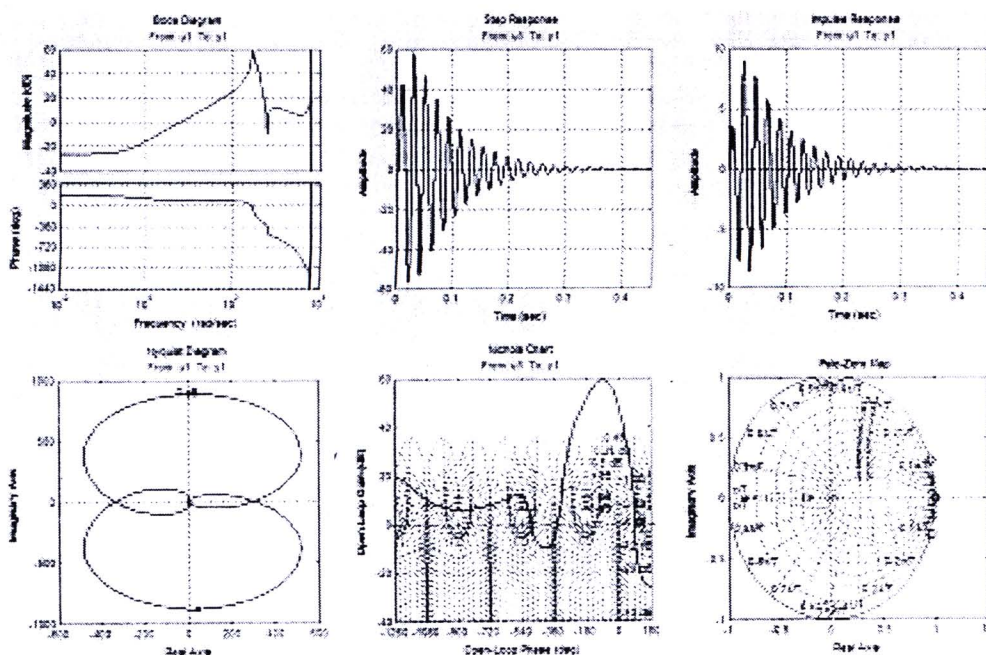
ในวิทยานิพนธ์นี้ จะยกตัวอย่างการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบในสถานะลดลง โดยเครื่องมือทางกราฟแสดงได้ดังรูปที่ 4.22 ในการใช้โพลีเคอพลีอติวิเคราะห์ผลตอบสนองสองทางความถี่ของระบบ ได้ผลดังนี้

ก. ค่าเฟสมาร์จินเท่ากับ 0.7843 dB ที่ความถี่ 1,639 rad/sec

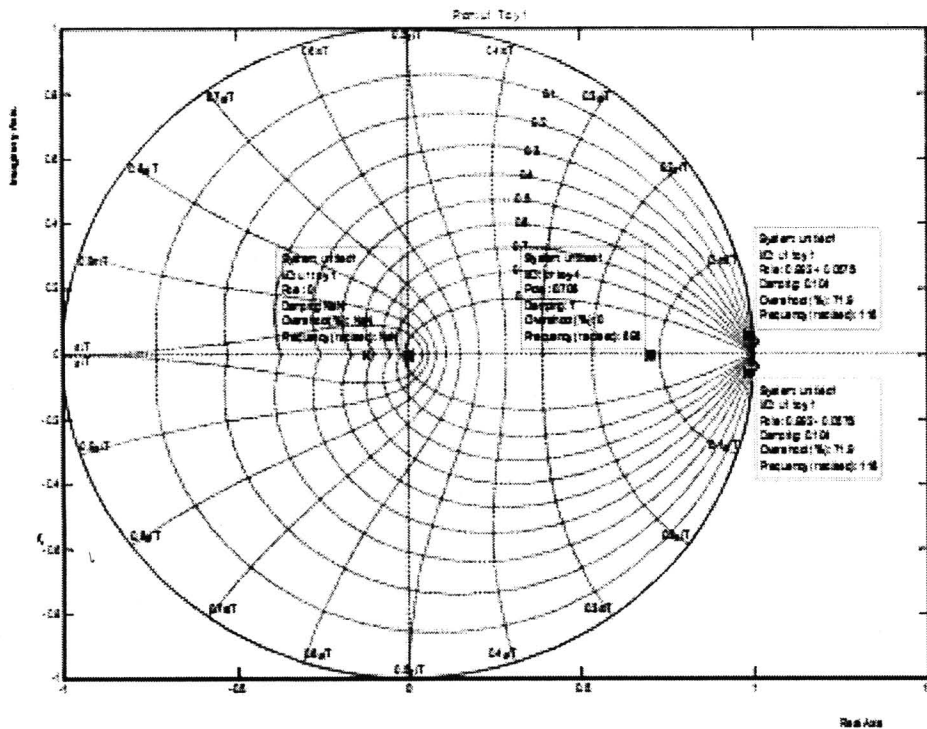
ข. ค่าเกนมาร์จินเท่ากับ -13.89 องศา ที่ 89.30 rad/sec

ค. ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ พิจารณากราฟ โพล-ซีโร ดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าแบบจำลองสถานะลดลง มีจำนวนซีโร 2 ค่า และ โพล 4 ค่า

ถ้าระบบมีเสถียรภาพ ขนาด (magnitude) ของโพลมีค่าน้อยกว่า 1 หรืออยู่ในวงกลมหนึ่งหน่วย Unit Circle ในตัวอย่าง โพลอยู่ที่ตำแหน่ง $0.9923 + 0.0575i$, $0.9923 - 0.0575i$, 0.7060 และ -0.1213 หาขนาดโพลได้เท่ากับ 0.9940, 0.9940, 0.7060 และ 0.1213 ซึ่งค่าน้อยกว่า 1 ทำให้วิเคราะห์ได้ว่าระบบมีเสถียรภาพ



รูปที่ 4.22 เครื่องมือวิเคราะห์แบบกราฟระบบเชิงเส้นของแบบจำลองในสถานะทรานเซียนต์ลดลง



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงตำแหน่งโพล-ซีโรของระบบ

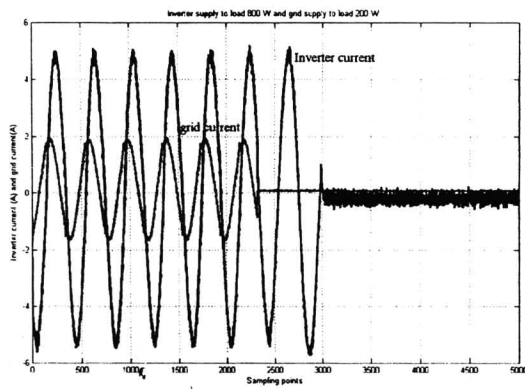
4.6 การหาแบบจำลองในสภาวะไอส์แลนดิ่ง

จากการทดลองหัวข้อ 3.4.3 ที่หาแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ในสภาวะไอส์แลนดิ่ง 3 สภาวะคือ สภาวะที่กำลังอินเวอร์เตอร์ (ก) มากกว่าโหลด (ข) น้อยกว่ากว่าโหลด และ (ค) เท่ากับโหลด และโหลดเป็นแบบเรโซแนนท์ ทำการทดลอง 6 รูปแบบ ดังตารางที่ 4.11

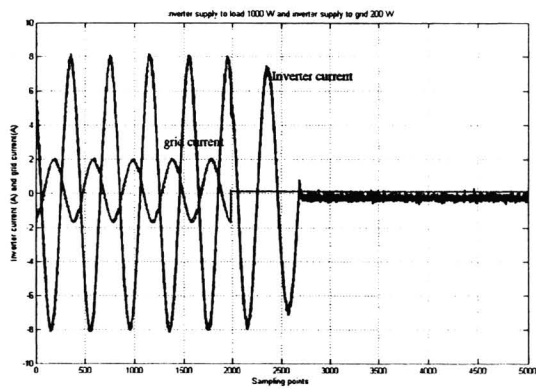
ตารางที่ 4.11 เงื่อนไขการทดสอบอินเวอร์เตอร์ในสภาวะไอส์แลนดิ่ง

แบบ	อินพุตแบบจำลอง	$P_{inv}(W)$	$P_{load}(W)$	$P_{grid}(W)$	ชนิดโหลด
1	กระแสกริด	1000	800	- 200	R
2	กระแสกริด	1000	1200	200	R
3	กระแสกริด	1000	1000	0	RLC
4	แรงดัน PCC	1000	800	- 200	R
5	แรงดัน PCC	1000	1200	200	R
6	แรงดัน PCC	1000	1000	0	RLC

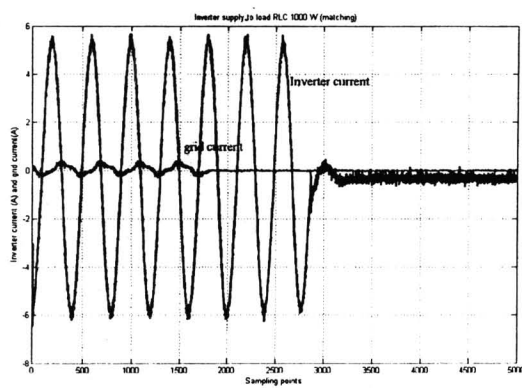
ทั้งสามสถานะ ได้ใช้อินพุตเป็นกระแสกริด และแรงดันกริด และใช้อเอาท์พุตเป็นกระแสอินเวอร์เตอร์ เพื่อทำนายพฤติกรรมกระแสอินเวอร์เตอร์ รูปคลื่นกระแสกริดเทียบกับกระแสอินเวอร์เตอร์ และแรงดันกริดเทียบกับกระแสอินเวอร์เตอร์ ทั้ง 6 รูปแบบ แสดงได้ดังรูปที่ 4.24



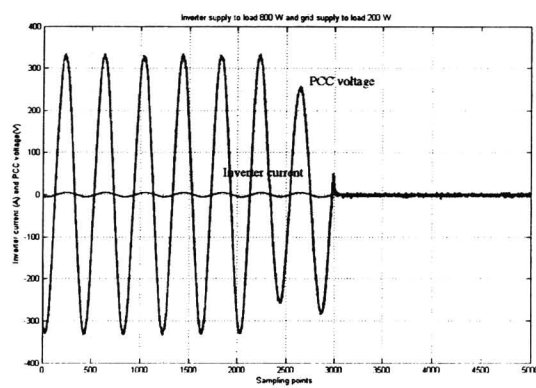
แบบ 1



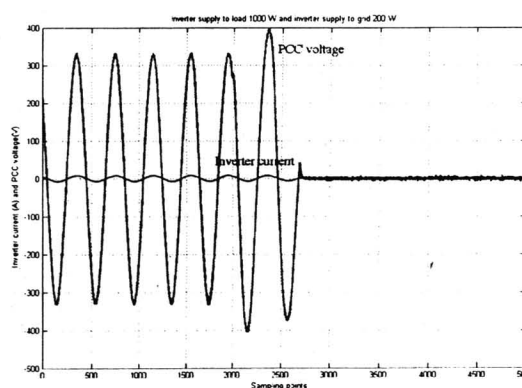
แบบที่ 2



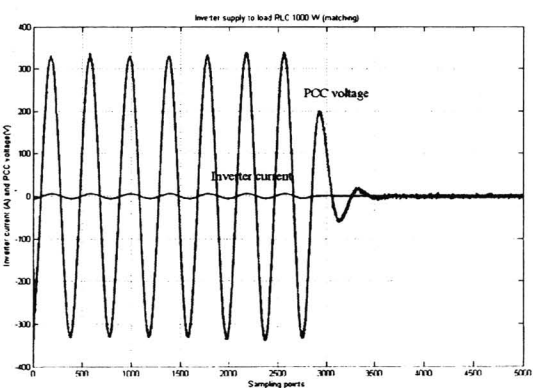
แบบที่ 3



แบบที่ 4



แบบที่ 5



แบบที่ 6

รูปที่ 4.24 รูปคลื่นอินพุตและเอาท์พุตของการทดลองในสถานะไอส์แลนด์ทั้ง 6 กรณี

ตารางที่ 4.12 สมบัติแบบจำลองไอส์แลนด์กรณีสถานที่ 1 (P_{inv} 1,000 W, P_{load} 800 W, P_{grid} 200 W โหลด R)

Nonlinear estimators	Linear parameters			Model properties				
	I/O	n_b	n_r	n_k	Order	% fit	FPE	AIC
Deadzone		5	4	4	8	71.37	1.59	0.46
Saturation		5	4	1	8	79.20	1.97	0.64
PWlinear		3	3	2	5	72.40	0.93	0.06
Sigmoidnet		2	7	3	8	82.30	0.69	0.49
Wavenet		3	4	3	6	62.17	0.78	0.54

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการจำลองอินเวอร์เตอร์ในสถานะไอส์แลนด์ ด้วยฟังก์ชันไม่เชิงเส้นชนิดต่างๆ ของสถานะไอส์แลนด์กรณีสถานที่ 1 คือ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตไฟฟ้า 1000 วัตต์ จ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดความต้านทานจำนวน 800 วัตต์ และโหลดรับจากระบบไฟฟ้าอีก 200 วัตต์ ใช้กระแสกริดเป็นสัญญาณอินพุต และทำนายกระแสอินเวอร์เตอร์ พบว่าแบบจำลองที่ใช้ฟังก์ชัน Sigmoidnet มีความถูกต้องสูงสุดเท่ากับ 82.3% มีลำดับเท่ากับ 8

สำหรับสถานะไอส์แลนด์อื่นๆ ก็ได้จำลองในลักษณะเดียวกัน แสดงผลดังตารางที่ 4.13 และมีรูปคลื่นเอาต์พุตจำลอง สำหรับกรณีที่ 1 และกรณีที่ 6 ดังรูปที่ 4.25 พบว่า

ก. กรณีที่ 1-3 ใช้กระแสกริดเป็นอินพุต ทำนายกระแสอินเวอร์เตอร์เป็นเอาต์พุต

ฟังก์ชัน Sigmoidnet สามารถจำลองระบบได้ดี

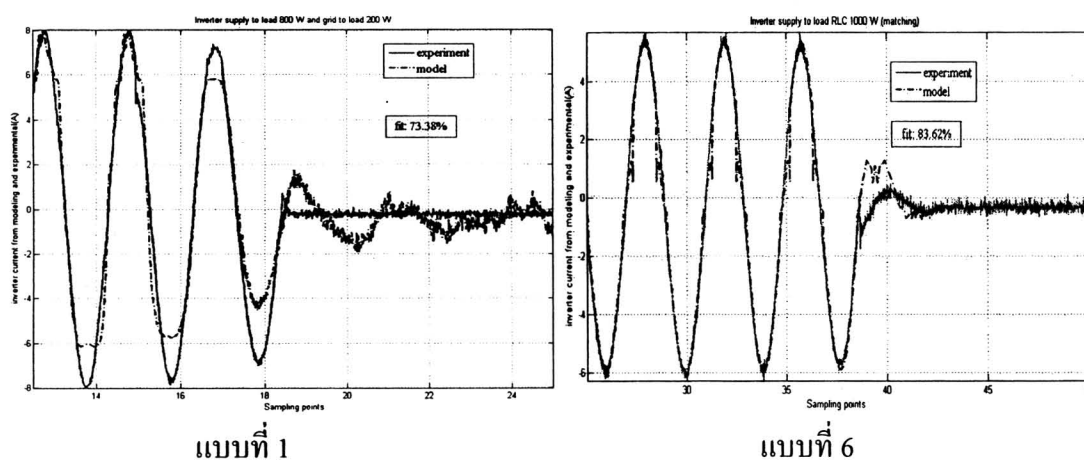
ข. กรณีที่ 4-6 ใช้แรงดันกริด(ที่ PCC) เป็นอินพุต ทำนายกระแสอินเวอร์เตอร์เป็นเอาต์พุต

ฟังก์ชัน wavelet สามารถจำลองระบบได้ดี

จากการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและการทดลองกรณีไอส์แลนด์กรณีสถานที่ 6 แบบ เห็นว่า ฟังก์ชัน estimator ที่เหมาะสมต่างกันไป และยังไม่สามารถสรุปเป็นหลักเกณฑ์ทั่วไปได้ ขึ้นกับลักษณะเฉพาะของไอส์แลนด์กรณีสถานที่

ตารางที่ 4.13 สมบัติของแบบจำลองไอส์เลนคิงทั้ง 6 กรณี

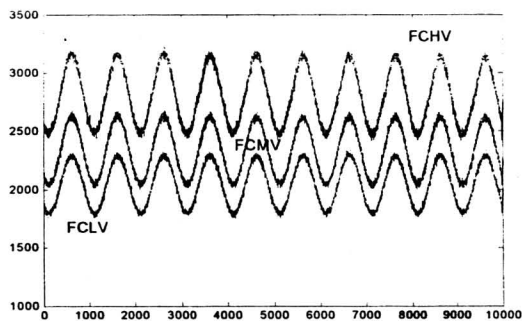
No	Nonlinear Estimators	Linear parameters			Model properties			
	I/O	n_b	n_r	n_k	Order	% fit	FPE	AIC
1	Sigmoidnet	2	7	3	8	82.30	0.69	0.49
2	Sigmoidnet	1	2	1	2	76.52	0.43	0.83
3	Sigmoidnet	1	5	3	5	83.86	0.24	1.38
4	Wavenet	1	1	1	1	88.20	0.23	1.44
5	Wavenet	1	1	1	1	85.85	0.18	1.68
6	Wavenet	1	1	1	1	83.62	0.24	1.39



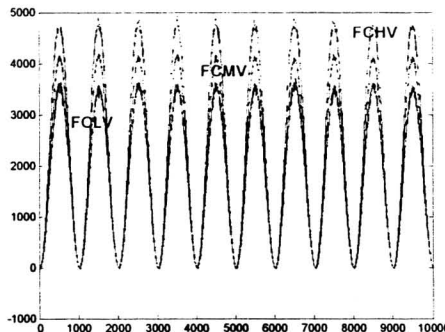
รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับสัญญาณจริง

4.7 การหาแบบจำลองโดยใช้เทคนิค Cross validation

ตามที่กล่าวมาในส่วนที่ 3.5 เทคนิค Cross validation ใช้ข้อมูลหลายชุดสร้างแบบจำลอง เพื่อหาแบบจำลองที่มีความถูกต้องแม่นยำ ในสภาวะการทำงานอินเวอร์เตอร์มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานอยู่ตลอดเวลา (เนื่องจากการเปลี่ยนความเข้มแสงอาทิตย์ โหลด ดังนั้น แบบจำลองที่ดีควรได้จากใช้ข้อมูลหลายชุด จากการออกแบบการทดลอง ได้ทดสอบอินเวอร์เตอร์ขนาด 5000 วัตต์ ในสภาวะการทำงานต่างๆ ตามหัวข้อที่ 3.5 ซึ่งมีการเปลี่ยนสภาวะ 2 กลุ่ม คือกลุ่มเปลี่ยนระดับแรงดัน และกลุ่มเปลี่ยนระดับกระแส ทั้งนี้แต่ละกลุ่มมีข้อมูล 3 ชุด รูปคลื่นแรงดัน กระแส ของกลุ่มเปลี่ยนระดับแรงดันแสดงดังรูปที่ 4.26



รูปคลื่นกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

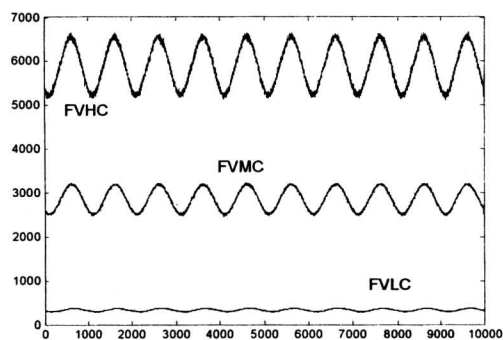


รูปคลื่นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ

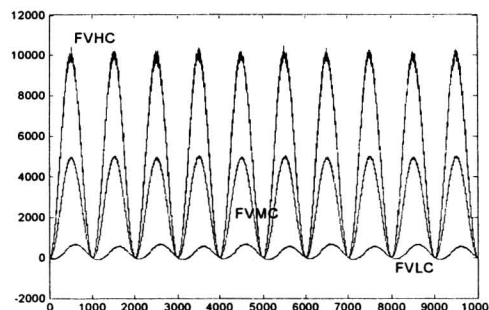
รูปที่ 4.26 รูปคลื่นกำลังไฟฟ้าเมื่อควบคุมกระแสตรงให้คงที่ (11 A) และปรับแรงดัน

รูปคลื่นแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้าของกลุ่มเปลี่ยนระดับกระแส และควบคุมให้แรงดันคงที่ แสดงดัง

รูปที่ 4.27



รูปคลื่นกำลังกระแสตรง



รูปคลื่นกำลังไฟฟ้าสลับ

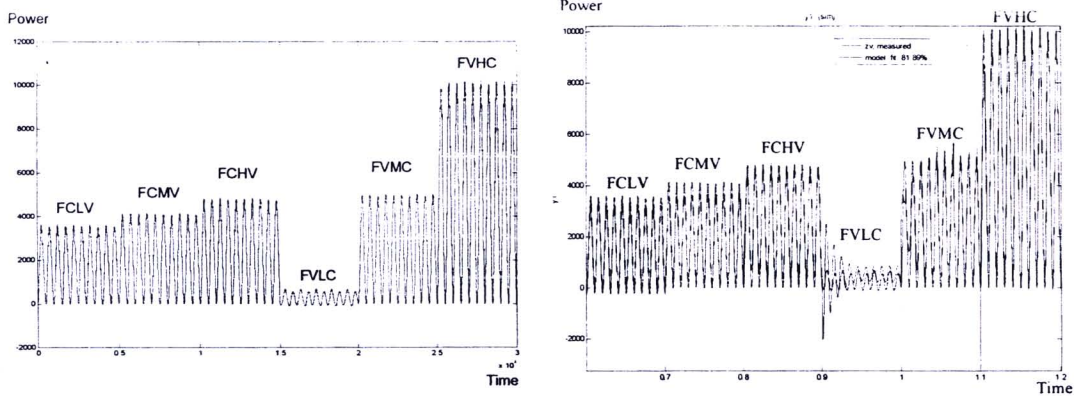
รูปที่ 4.27 รูปคลื่นเมื่อควบคุมแรงดันตรงให้คงที่ (240 โวลต์) และปรับกระแส

ในการหาแบบจำลอง ใช้เทคนิค Cross validation แบบ Leave one out ดังได้กล่าวมาแล้วในส่วนที่ 3.5 ทำโดยนำข้อมูลทั้ง 6 สภาวะมาเรียงต่อกัน ข้อมูลชุดแรกเป็นข้อมูลสำหรับการประเมินค่า และเพิ่มชุดข้อมูลจากเดิมอีกหนึ่งชุดใช้เป็นข้อมูลตรวจสอบ

รูปคลื่นอินพุตและเอาต์พุตทั้ง 6 สภาวะ แสดงดังรูปที่ 4.28

เมื่อใช้แบบจำลอง Hammerstein-Wiener ด้วยฟังก์ชัน Saturation ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ง่ายและมีความถูกต้องพอสมควร ได้ความถูกต้องของแบบจำลองเท่ากับ 81.89 ดังแสดงในรูปที่ 4.27

จากนั้น นำข้อมูลชุดทดสอบในแต่ละกรณี 6 ชุดมาใช้ทดสอบในขั้นตอนสุดท้าย โดยเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการใช้เทคนิค Cross validation ดังแสดงในตารางที่ 4.14 พบว่า การใช้เทคนิค Cross validation ช่วยให้แบบจำลองมีความถูกต้องเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.28 รูปคลื่นกำลังที่นำมาต่อกันเป็นข้อมูลประเมินค่าและข้อมูลตรวจสอบและผลการจำลอง

ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้และไม่ใช้เทคนิค cross validation

ชุดข้อมูล	ค่าความถูกต้อง (%)	
	แบบจำลองที่ไม่ใช้ เทคนิค validation	แบบจำลองที่ใช้ เทคนิค Cross Validation
LVFA	97	87
MVFA	70	84
HVFA	72	89
FVLA	32	55
FVMA	77	87
FVHA	35	88
เฉลี่ยทุกกรณี	63.83	81.89

ผลการทดลองแสดงว่าแบบจำลองที่ใช้เทคนิค Cross validation ช่วยให้แบบจำลองมีความถูกต้องสูงขึ้น แต่เวลาในการประเมินค่าจะเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้การออกแบบและเลือกข้อมูลสำหรับประเมินและการตรวจสอบ มีความสำคัญต่อการหาความถูกต้องของแบบจำลอง

4.8 การจำลองระบบหลายอินพุตเอาต์พุต (MIMO)

จากการทดสอบอินเวอร์เตอร์ในสถานะคงตัว และหาแบบจำลองด้วยวิธี Hammerstein –Weiner ของระบบ โดยการใช้หลายตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต ตามหัวข้อที่ 3.6 โดยใช้ฟังก์ชัน Deadzone และ Saturation ซึ่งเป็นฟังก์ชันง่าย ใช้เวลาคำนวณระยะเวลาสั้น และให้ความถูกต้องของแบบจำลองอยู่ใน

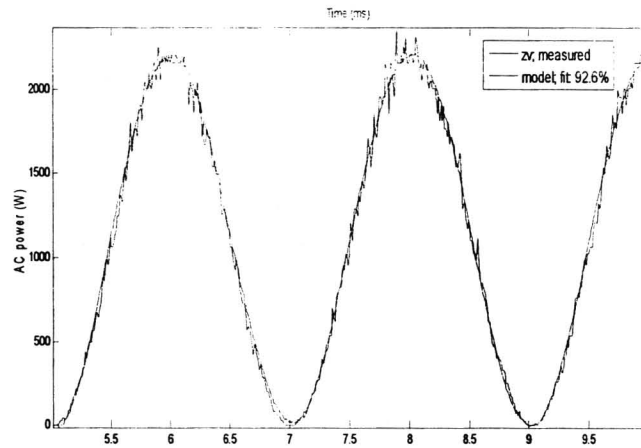
เกณฑ์ที่ยอมรับได้เป็นตัวแทน ผลการจำลองเอาต์พุตของระบบโดยใช้อินพุตเอาต์พุตแบบ MISO, SIMO และ MIMO แสดงได้ดังตารางที่ 4.15 และตัวอย่างรูปคลื่นแต่ละกรณีแสดงได้ดังรูปที่ 4.29-4.31

ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบผลแบบจำลองอินพุตเอาต์พุต MISO, SIMO และ MIMO

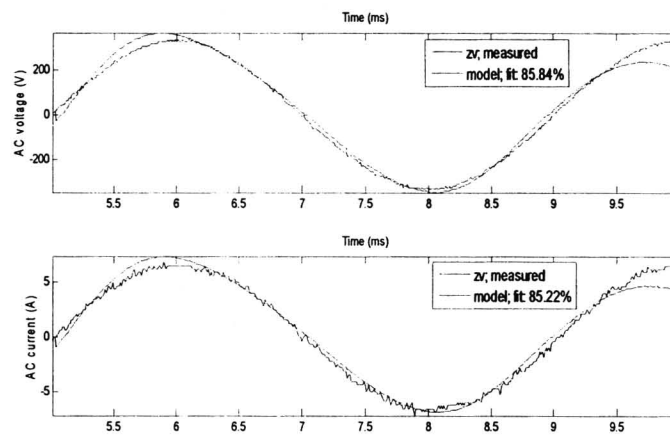
วิธี Hammerstein-Weiner ใช้ฟังก์ชัน Deadzone และ Saturation

Type	I/P	O/P	Linear [nb1 nb2]; [nk1 nk2]; [nf1 nf2]	%fit	FPE	AIC
MISO	DZ	DZ	[2 4]; [6 3]; [4 4]	92.60	63,034	11.35
	ST	ST	[2 2]; [2 3]; [3 3]	89.06	31,559	10.35
SIMO	DZ	DZ	[4 4]; [3 2]; [3 2]	85.84 85.22	155.45	5.04
	ST	ST	[3 4]; [5 2]; [2 2]	95.12 91.23	27.71	3.32
Type	I/P	O/P	Linear [nb1 nb2 nb3 nb4]; [nk1 nk2 nk3 nk4]; [nf1 nf2 nf3 nf4]	%fit	FPE	AIC
MIMO	DZ	DZ	[4 4 3 5]; [5 5 3 6]; [3 4 4 2]	87.34 84.15	254.45	7.89
	ST	ST	[3 5 4 5]; [4 5 4 3]; [4 4 4 2]	97.03 91.70	175.43	6.35

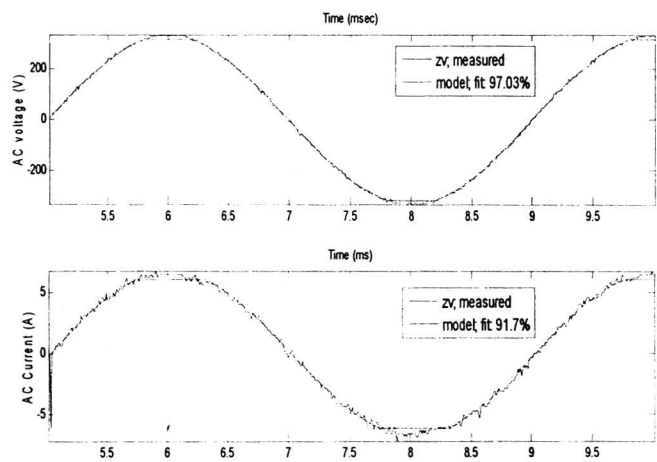
พบว่าทั้งฟังก์ชัน Deadzone และ Saturation จำลองเอาต์พุตได้ความถูกต้องมากกว่าร้อยละ 85 อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของการหาแบบจำลองระบบตัวแปรหลายอินพุตหลายเอาต์พุตคือการใช้เวลาคำนวณหาแบบจำลอง เพราะมีพารามิเตอร์เชิงเส้นจำนวนมากขึ้น เช่น แบบจำลอง SIMO และ MISO พารามิเตอร์ 6 ตัว และแบบจำลอง MIMO มีพารามิเตอร์ 12 ตัว ซึ่งควรพัฒนาแบบจำลองให้สามารถคำนวณได้ในเวลาที่เหมาะสมต่อไป



รูปที่ 4.29 รูปคลื่นกำลังเอาต์พุตกับสัญญาณจริง แบบจำลอง MISO



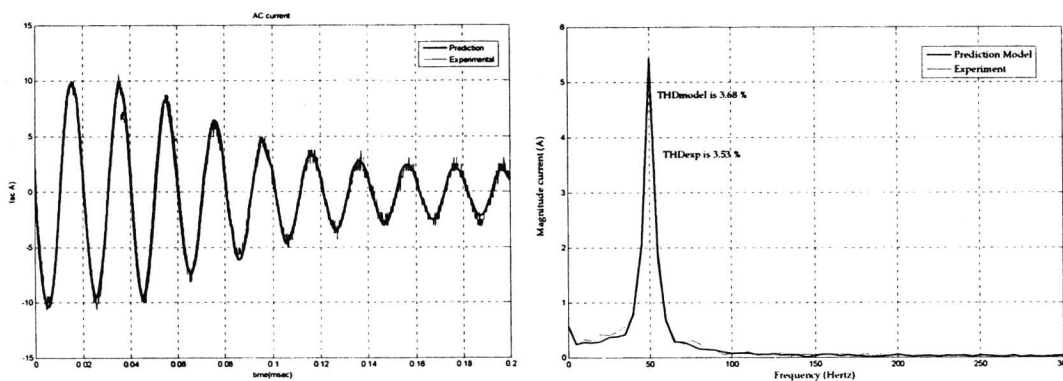
รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบแรงดันและกระแสเอาต์พุตแบบจำลอง SIMO



รูปที่ 4.31 การเปรียบเทียบแรงดันและกระแสเอาต์พุตแบบจำลอง MIMO

4.9 การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้ากำลังจากแบบจำลอง

ในส่วนนี้จะเปรียบเทียบคุณภาพไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองตัวแทนเอาต์พุตของแบบจำลองด้วยเทคนิค Hammerstein-wiener ในสภาวะคงตัว Fix Voltage High Current และสภาวะทรานเซียนท์ลดลง ที่เลือกมาจากการทดลองในหัวข้อ 3.4 และ 3.5 ผลการทดลองและผลการจำลองรูปคลื่นในสภาวะทรานเซียนท์ลดลง แสดงดังรูปที่ 4.32 และการเปรียบเทียบคุณภาพไฟฟ้ากำลังของสภาวะทั้งสอง แสดงดังตารางที่ 4.16



รูปที่ 4.32 ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสเอาต์พุตและฮาร์มอนิกในสภาวะทรานเซียนท์ลดลง

ตารางที่ 4.16 การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าในสภาวะคงตัวและทรานเซียนท์

Parameter	Steady state FVHC condition			Transient step down condition		
	Experimental	Modeling	% Error	Experimental	Modeling	% Error
Vrms (V)	218.31	218.04	0.12	217.64	218.20	-0.26
Irms (A)	23.10	23.21	-0.48	4.47	4.45	0.45
Frequency (Hz)	50	50	0.00	50.00	50.00	0.00
Power Factor	0.99	0.99	0.00	0.99	0.99	0.00
THDv (%)	1.15	1.2	-4.35	1.18	1.24	-5.08
THDi (%)	3.25	3.12	4.00	3.53	3.68	-4.25
S (VA)	5044.38	5060.7	-0.32	972.85	970.99	0.19
P (W)	4993.94	5010.1	-0.32	963.12	961.28	0.19
Q (Var)	711.59	713.85	-0.32	137.24	136.97	0.19
V p.u.	0.99	0.99	0.00	0.98	0.99	-1.02

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับการจำลองค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าคือ V_{rms} , I_{rms} , ความถี่, power factor, complex power และ per unit voltage ค่าความผิดพลาดต่ำมาก น้อยกว่า 1% ส่วนความผิดพลาดของฮาร์โมนิกทั้ง Total Harmonic Distortion of voltage : THD_V และ Total Harmonic Distortion of current : THD_I สูงกว่าของพารามิเตอร์อื่น แต่ก็ต่ำกว่า 5%

ผลดังกล่าว ทำให้มีความมั่นใจสูงว่าแบบจำลองสามารถประเมินพฤติกรรมและผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายได้ โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งระบบจริง นอกจากนี้ยังสามารถเปลี่ยนเงื่อนไขการทำงาน เพื่อจำลองสถานการณ์ปรับเปลี่ยนสภาวะการทำงานของระบบให้เป็นไปตามต้องการ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผน เลือกที่ตั้ง และทำให้การไฟฟ้าทราบถึงผลกระทบต่อที่จะเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าก่อนติดตั้งระบบจริงได้

