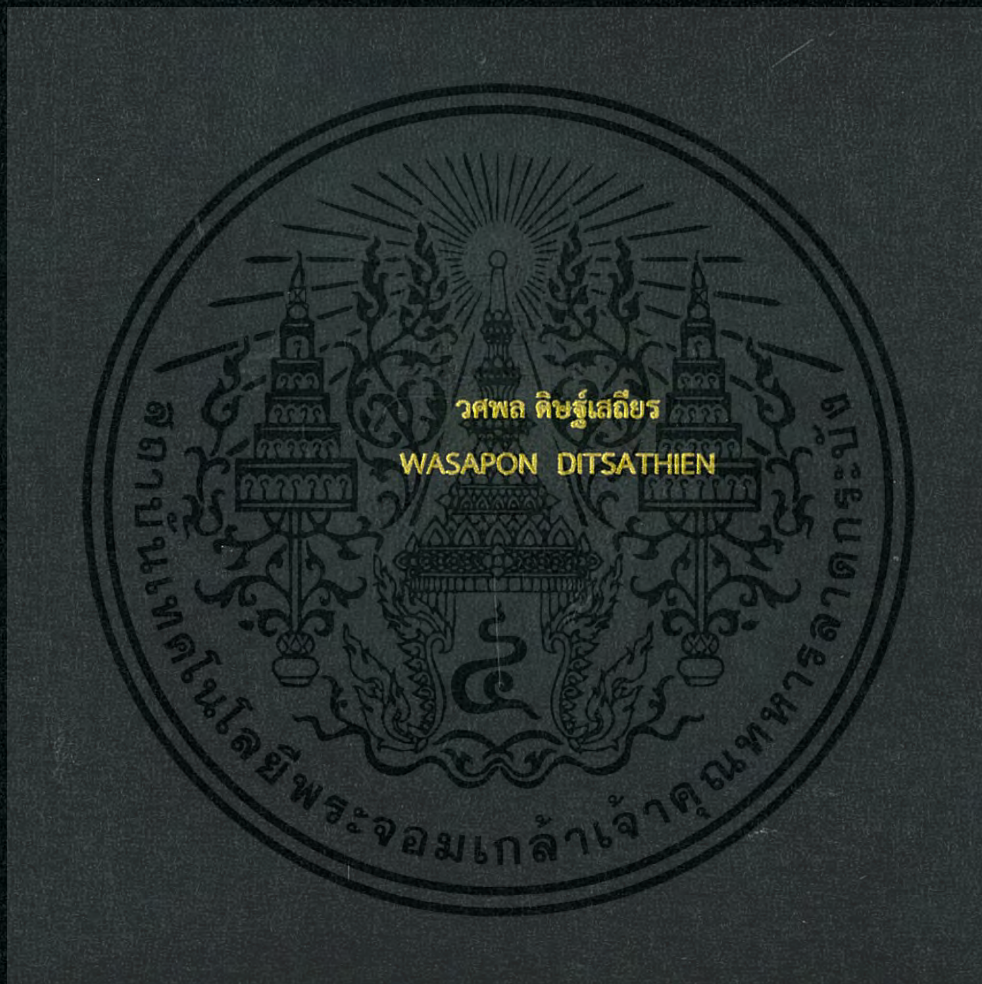


เทคนิคการหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้โครงข่าย
ประสาทเทียมสำหรับกังหันลมขนาดเล็ก

MAXIMUM POWERPOINT SEARCHING TECHNIQUE USING
ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR SMALL SCALE WIND TURBINE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-D-020-050

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เทคนิคการหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้โครงข่าย
ประสาทเทียมสำหรับกังหันลมขนาดเล็ก

MAXIMUM POWERPOINT SEARCHING TECHNIQUE USING
ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR SMALL SCALE WIND TURBINE



T148778

วศพล ดิษฐ์เสถียร

WASAPON DITSATHIEN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **148778**
ใน.เดือน.ปี **23 พ.ค. 2560**

b.00267084
f.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-D-020-050

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAXIMUM POWERPOINT SEARCHING TECHNIQUE USING
ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR SMALL SCALE WIND TURBINE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

KMITL-2017-EN-D-020-050

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสาร KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG นี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

เทคนิคการหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้โครงข่าย
ประสาทเทียมสำหรับกังหันลมขนาดเล็ก

นักศึกษา

นายวศพล ดิษฐ์เสถียร

รหัสประจำตัว

58601256

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2560

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)

รศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ใช้ 2 เทคนิคในการประมาณตำแหน่งของกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับกังหันลมขนาดเล็ก โดยเทคนิคแรก คือการการประมาณโดยใช้สมการพหุนาม จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) และค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vpm) หลังจากนั้นสามารถนำสมการดังกล่าวมาทำนายแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vcf) เทคนิคที่สอง คือ เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม ใช้แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรเป็นอินพุต (Voc) และแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเป็นเอาต์พุต (Vpm) ซึ่งทั้งค่าอินพุตและค่าเอาต์พุตนั้นได้มาจากการทดลองจะถูกนำมาใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vpnn) และนำค่าแรงดันที่ได้จากทั้งสองเทคนิคมาเปรียบเทียบกันเพื่อนำค่าที่ดีกว่าใช้เป็นสัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) ในระบบควบคุมต่อไป จากเทคนิคข้างต้นนี้ทำให้สามารถออกแบบและติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Thesis	Maximum Power Point Searching technique using artificial neural network for small scale wind turbine
Student	Mr.Wasapon Ditsathien
Student ID.	58601256
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Warachart Suwan-ngam
Thesis Co-Advisor	Assoc.Prof.Dr.Somyot Kiatwanidvilai

Abstract

This research work applies two techniques, i.e. the artificial neural network and the polynomial fitting, to estimate the maximum power point for a small scale wind-turbine system. A Polynomial fitting Technique is used to find the relationship between the open circuit voltage (V_{oc}) and the voltage at the maximum power (V_{pm}). The results are in terms of the polynomial equation. On the other hand, the artificial neural network technique, the open circuit voltage (V_{oc}) and the voltage at the maximum power (V_{pm}) derived from the off-line experiments were adopted as the training set of the neural network, which is then applied to predict the operating voltage that causes the maximum power point (V_{pnn}). The output values of the neural network and polynomial fitting were compared and used as the reference signal in control system. By the proposed techniques, the efficient wind-turbine tracking system can be achieved.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. วรชาติ สุวรรณงาม และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ให้คำแนะนำ ช่วยแก้ไขปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณประธานและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะจนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ คุณภูมิ คงห้วยรอบ ที่คอยให้คำปรึกษาปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

ขอขอบคุณ คุณปิยภัทร กุฑพัทธ์ ที่คอยให้คำปรึกษาในด้านโครงข่ายประสาทเทียมและคอยช่วยเหลือด้านสถานที่ทำการทดลองตลอดจนงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณกิตติพงษ์ ว่องวงศ์รักษ์ ที่คอยช่วยเหลือเรื่องหลักไวยากรณ์ภาษาอังกฤษ และชี้แนะคำภาษาอังกฤษที่เหมาะสม

ขอขอบคุณ กองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หมายเลข ทุนวิจัย KREF055706 ที่ให้งบประมาณสนับสนุนในการทำวิจัย

สุดท้ายต้องขอขอบคุณบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักยิ่งที่พากเพียรให้กำลังใจในยามที่ข้าพเจ้าท้อถอย คอยสนับสนุนเรื่องค่าใช้จ่ายเล่าเรียนและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

วศพล ดิษฐ์เสถียร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	3
1.7 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	5
2.1 กังหันลมผลิตไฟฟ้า.....	5
2.1.1 กังหันลมที่มีแกนเพลลาในแนวตั้ง.....	5
2.1.2 กังหันลมที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวนอน.....	6
2.2 คุณลักษณะของกังหันลม.....	7
2.3 โครงข่ายประสาทดัดเทียม.....	8
2.3.1 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทดัดเทียม.....	8
2.3.2 ลักษณะของโครงข่ายประสาทดัดเทียม.....	10
2.3.3 หลักการทำงานของโครงข่ายประสาทดัดเทียม.....	12
2.3.4 การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทดัดเทียม.....	12
2.3.5 ประเภทของโครงข่ายประสาทดัดเทียม.....	13
2.4 กระบวนการแพร่กระจายแบบย้อนกลับ.....	14
2.5 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด.....	15
2.6 วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า.....	16
2.6.1 การหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า.....	20
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 การออกแบบและการทดลอง.....	24
3.1 รูปแสดงส่วนประกอบของกังหันลมขนาดเล็ก.....	24
3.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร.....	25
3.3 การทดลองหาค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละความเร็วลม.....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การออกแบบเทคนิคที่ใช้ในการทำนายแรงดันไฟฟ้า.....	28
3.4.1 การออกแบบเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอเซปตรอนหลายชั้น.....	28
3.4.2 การออกแบบโดยใช้เทคนิคการประมาณด้วยสมการพหุนาม.....	32
บทที่ 4 การออกแบบและสร้างชุดติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	33
4.1 ภาพรวมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับกังหันลม.....	33
4.2 โครงสร้างของวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า.....	34
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับตัวต้อไซเคิลของวงจรทอน ระดับแรงดันไฟฟ้า.....	36
4.4 บอร์ดประมวลผล (Arduino UNO R3).....	38
4.5 วงจรขับเคลื่อนแบบแยกกันทางไฟฟ้า (Opto Couplers).....	39
4.6 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider).....	40
4.7 เซนเซอร์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า (Current Sensor).....	41
4.8 รีเลย์สำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open Circuit Relay).....	41
4.9 หลักการทำงานของชุดควบคุม.....	42
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	43
5.1 ผลการทำนายแรงดันไฟฟ้าด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม.....	43
5.2 ผลการทำนายแรงดันไฟฟ้าจากการประมาณโดยใช้สมการพหุนาม.....	48
5.3 การเปรียบเทียบผลการทำนายของทั้ง 2 เทคนิค.....	52
5.4 การทดลองและผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบกังหันลมขนาดเล็ก.....	55
5.4.1 วงจรและขั้นตอนการทดลอง.....	55
5.4.2 ผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียม ที่ความเร็วลมคงที่.....	57
5.4.3 ผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคการประมาณ โดยใช้สมการพหุนามที่ความเร็วลมคงที่.....	59
5.4.4 เปรียบเทียบผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทคนิค โครงข่ายประสาทเทียมและเทคนิคการประมาณโดยใช้ สมการพหุนามที่ความเร็วลมคงที่.....	61
5.4.5 ผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม ที่ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลง.....	63
5.4.6 ผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคการประมาณ โดยใช้สมการพหุนามที่ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลง.....	64
5.4.7 เปรียบเทียบผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของ เทคนิค ANN และ Polynomial.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	67
6.1 สรุปผลงานวิจัย.....	67
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	69
เอกสารอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก.....	73
ภาคผนวก ก การคำนวณหาสมการของโครงข่ายประสาทเทียม.....	74
ภาคผนวก ข การหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวดีไซเคิล และแรงดันของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้า.....	78
ภาคผนวก ค การทดสอบความเร็วลมของอุโมงค์ลม.....	80
ภาคผนวก ง บทความวิชาการ.....	84
ประวัติผู้เขียน.....	94

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงความแตกต่างระหว่างประเภทของโครงข่ายประสาทเทียม.....	13
3.1 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อทำการปรับค่าตัวต้านทานที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที และความเร็วลม 6 เมตร/วินาที.....	27
3.2 จำนวนชั้นซ่อนและค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองจากการทำนายแรงดันไฟฟ้า.....	29
3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบโครงข่ายประสาทเทียม.....	30
3.4 ค่าน้ำหนัก (W) และไบแอสคงที่ (b) ที่ใช้ในระบบโครงข่ายประสาทเทียม.....	32
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวตัดั้ไซเคิลและแรงดันไฟฟ้าที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที.....	36
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวตัดั้ไซเคิลและแรงดันไฟฟ้าที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที.....	37
5.1 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองจากการสอนและการทดสอบในแต่ละความเร็วลม.....	45
5.2 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (mse) จากการเปลี่ยนดีกรีของสมการพหุนาม.....	49
5.3 ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแต่ละความเร็วลมและค่าความผิดพลาดรวมทั้งหมด.....	51
5.4 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (mse) จากการทำนายแรงดันไฟฟ้าจากทั้ง 2 เทคนิค.....	52
5.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรการทดลอง.....	56
5.6 ค่าตัวตัดั้ไซเคิลของวงจรทอนแรงดันและค่ากำลังไฟฟ้าที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที.....	61
5.7 ค่าตัวตัดั้ไซเคิลของวงจรทอนแรงดันและค่ากำลังไฟฟ้าที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที.....	62
5.8 ตัวตัดั้ไซเคิลของวงจรทอนแรงดันและค่ากำลังไฟฟ้าที่ความเร็วลม 5 และ 6 เมตร/วินาที.....	65

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กัณฑ์ลมนที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวตั้ง.....5
2.2	(ก) องค์ประกอบกัณฑ์ลมนแบบความเร็วคงที่ (ข) กัณฑ์ลมนแบบความเร็วไม่คงที่ (ค) กัณฑ์ลมนแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดต่อตรง.....6
2.3	กัณฑ์ลมนผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอนและแกนตั้ง.....7
2.4	ฟังก์ชันการแปลงแบบเชิงเส้น (Linear Transfer function).....9
2.5	ซิกมอยด์ฟังก์ชัน (Sigmoid Function)..... 10
2.6	ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ (Hyperbolic Tangent Function).....10
2.7	โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว.....11
2.8	โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น.....11
2.9	หลักการทํางานของโครงข่ายประสาทเทียม.....12
2.10	(ก) วงจรแปลงผันกระแสตรงพื้นฐาน (ข) แรงดันไฟฟ้าขาออก.....16
2.11	วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส.....18
2.12	วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส.....19
2.13	คลืนการทํางานของวงจรทอนแรงดัน (ก) แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (ข) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (ค) กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ.....21
3.1	อุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดลอง.....24
3.2	กัณฑ์ลมนในส่วนขาเข้าที่เป็นตัวกำเนิดพลังงานลมไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....24
3.3	ส่วนกัณฑ์ลมนด้านขาออกที่ไปขับเคลื่อนเจเนเรเตอร์ ให้ผลิตกระแสไฟฟ้าออกมา (ก) กัณฑ์ลมนด้านขาออก (ข) เจเนเรเตอร์ (Generator).....25
3.4	แรงดันไฟฟ้าที่สามารถปรับค่าได้25
3.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม กับ ค่าแรงดันเปิดวงจร.....26
3.6	การทดลองหาค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด.....26
3.7	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า ที่ความเร็วลม 5 และ 6 เมตร/วินาที.....28
3.8	การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised learning).....28
3.9	โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทำนายแรงดันไฟฟ้า.....30
4.1	ภาพรวมของชุดควบคุมที่ทำการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....33
4.2	โครงสร้างของวงจรทอนระดับแรงดัน.....34
4.3	โหมดการทํางานของวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า.....35
4.4	ค่าพารามิเตอร์ของวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า.....36
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและตัวตัดไซเคิลของวงจร ทอนแรงดันไฟฟ้าที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที.....37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและตัวตีไซเคิลของ วงจรทอนแรงดันไฟฟ้า ที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที.....	38
4.7 ส่วนประกอบของ Arduino UNO R3.....	39
4.8 วงจรขับเคลื่อนแบบแยกกันทางไฟฟ้า (ก) แผนผังวงจร (ข) วงจรที่ทำการทดลอง.....	40
4.9 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider).....	40
4.10 เซนเซอร์ที่ไว้สำหรับตรวจจับกระแส.....	41
4.11 รีเลย์ที่ทำการตัดต่อวงจรไฟฟ้า.....	41
4.12 โครงสร้างของระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของทั้ง 2 เทคนิค.....	42
5.1 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (mse) จำนวน 20 รอบจากการสอน (Train) ทั้งหมด 105 ตัวอย่างโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	44
5.2 ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น (Error) ของตัวอย่างทั้งหมด (Instances) 195 ตัวอย่าง ที่เกิดขึ้นในการสอนและการทดสอบโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	46
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าจากการทำนายโดยใช้ โครงข่ายประสาทเทียม (Output) และแรงดันไฟฟ้าเป้าหมาย (Target).....	47
5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Input) และค่าแรงดันไฟฟ้าจากการทำนายโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Output).....	48
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) และแรงดันไฟฟ้าจากการทำนาย (Vcf) โดยใช้สมการพหุนามที่ดีกรีต่างๆ.....	49
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) และแรงดันที่ได้ จากการทำนายโดยใช้สมการพหุนามดีกรี 5 (Vcf).....	50
5.7 ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น (Error) ของตัวอย่างทั้งหมด (Instances) 195 ตัวอย่าง ที่เกิดขึ้นในการสอนและการทดสอบโดยใช้เทคนิคการประมาณสมการพหุนาม.....	51
5.8 การเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าจากการทำนายของ เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และเทคนิคการประมาณ โดยใช้สมการพหุนามดีกรี 5 (Polynomial) จากการสอน (Train).....	53
5.9 การเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าจากการทำนายของเทคนิค โครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และเทคนิคการประมาณ โดยใช้สมการพหุนามดีกรี 5 (Polynomial) จากการทดสอบ (Test).....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10 แผนภาพวงจรที่ใช้ในการทดลอง.....	55
5.11 แผนภาพวงจรจริงที่ใช้ในการทดลอง.....	55
5.12 การติดตั้งชุดควบคุมกับกังหันลมขนาดเล็ก.....	56
5.13 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของโครงข่ายประสาทยืดม ที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที.....	57
5.14 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของโครงข่ายประสาทยืดม ที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที.....	58
5.15 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้สมการพหุนามดีกรี 5 ที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที.....	59
5.16 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้สมการพหุนามดีกรี 5 ที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที.....	60
5.17 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทคนิค (ANN) และสมการพหุนามดีกรี 5 (Polynomial).....	61
5.18 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทคนิค (ANN) และสมการพหุนามดีกรี 5 (Polynomial).....	62
5.19 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้โครงข่ายประสาทยืดม ที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงจาก 5 เป็น 6 เมตร/วินาที.....	63
5.20 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้สมการพหุนาม ที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงจาก 5 เป็น 6 เมตร/วินาที.....	64
5.21 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทคนิค (ANN) และสมการพหุนามดีกรี 5 (Polynomial).....	65

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้สภาพเศรษฐกิจของราคาเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นนั้นทำให้มีการนำพลังงานทดแทนอื่น ๆ มาใช้กันมากขึ้น ได้แก่ พลังงานลม (Wind Energy) พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar cell) พลังงานน้ำ (Water energy) เป็นต้น พลังงานลม (Wind Energy) เป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด (Renewable Energy) และสามารถใช้ได้อย่างไม่จำกัดอีกด้วย ซึ่งระบบพลังงานทดแทนขนาดเล็กนั้นเป็นที่ต้องการของตลาดโดยเฉพาะสถานที่ห่างไกลความเจริญจะมีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าที่สูงมาก ซึ่งในการนำพลังงานลมออกมาใช้นั้น สิ่งที่สำคัญที่สุด คือ กังหันลมที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า วิวัฒนาการของพลังงานไฟฟ้าจากกังหันลมนั้นมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยในทวีปยุโรปได้คิดค้นชนิดของกังหันลมที่เหมาะสมกับความเร็วลมต่างๆและเพิ่มประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้าที่ได้รับจากกังหันลม ส่วนในประเทศไทยนั้นได้มีการคิดค้นการใช้พลังงานไฟฟ้าจากกังหันลมเช่นเดียวกัน

ระบบพลังงานไฟฟ้าจากกังหันลมนั้นมีการใช้งานอยู่ทั่วโลกและมีความสามารถในการผลิตไฟฟ้าสูง แต่ต้นทุนที่ใช้ต่ำกว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบพลังงานทดแทนอื่นๆ ดังนั้นการใช้ระบบพลังงานลมถือเป็นการลงทุนที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบัน ได้มีการนำเทคโนโลยีและการพัฒนาในด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking, MPPT) ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมต่างๆ ซึ่งเทคนิคในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นมีอยู่หลายวิธีด้วย เช่น Perturb & Observe, Tip speed ratio technique, Power signal feedback control เป็นต้น

ในระบบพลังงานลมนั้น กังหันลมมีหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานจลน์เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า โดยส่วนสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าคือ มุมเหินและความเร็วลม (Pitch angle) [1] ในการนำคุณลักษณะของกังหันลมไปใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุดนั้นตัวแปรที่สำคัญที่สุด คือ การติดตาม ณ จุดที่กังหันลมสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาได้มากที่สุด

กำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นในปัจจุบันมีการใช้การควบคุมที่ซับซ้อนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น ภาษาที่ใช้เขียนโปรแกรมสามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็ว ข้อดีของวิธีนี้ คือ ผลถูกต้องและมีประสิทธิภาพดี แต่ข้อเสีย คือ การควบคุมที่ค่อนข้างซับซ้อน และยากต่อการทำความเข้าใจ [2] ออกแบบระบบโดยใช้การประมวลผลของสัญญาณดิจิทัล และปรับปรุงเสถียรภาพโดยใช้การควบคุมแบบพีไอดีทำให้ประสิทธิภาพที่ได้ออกมามีค่าสูงขึ้น [3]

มีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบพลังงานลม [4] เช่น วิธีการควบคุมแรงบิดให้เหมาะสม (Optimal Torque Control : OTC) , วิธีการรบกวนและสังเกต (P&O) และ วิธีการเพิ่มอัตราความนำ (Incremental method) [5] ซึ่งข้อดีของวิธี OTC และ P&O คือ ให้ประสิทธิภาพที่สูงและง่ายต่อการทำความเข้าใจ ข้อเสียคือ การเลือกใช้สเต็ปค่าน้อยทำให้การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะคงตัวนั้นใช้เวลานาน แต่ถ้าเลือกใช้สเต็ปค่ามากเกินไปทำให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะคงตัว

การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมนั้นสิ่งที่จำเป็นที่สุดที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้ามีความแม่นยำนั้น คือ เซนเซอร์ทางกล [6] โดยเทคนิคที่ Chun-Yao Lee และคณะ [7] ได้คิดค้นขึ้นมานั้นใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบ Radial Basis Function (RBF) ซึ่งใช้เซนเซอร์ทางกลเพื่อวัดความเร็วรอบและความเร็วลม โดยค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและความเร็วลมที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมนี้มีค่าถูกต้องและแม่นยำ S.Ganhefar และคณะ [8] ได้ศึกษาการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบควอนตัมซึ่งการใช้แรงบิดที่เหมาะสมนั้นทำให้กำลังไฟฟ้าที่ออกมามีค่าใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าสูงสุดแต่เนื่องจากวิธีการของคุณ Chun-Yao Lee และ S.Ganhefar พร้อมด้วยคณะ [7,8] จำเป็นต้องมีข้อมูลทางกลจึงทำให้เพิ่มความยุ่งยากซับซ้อนและมีต้นทุนที่สูงขึ้นอีกด้วย

โครงข่ายระบบประสาทเทียมนั้นเป็นทางเลือกหนึ่งในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดสามารถลดผลกระทบที่เกิดจากการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตาม นอกจากนั้นการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นเป็นวิธีที่ง่ายและใช้การลงทุนที่ต่ำอีกด้วย

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่เป็นสมการพหุนาม (Polynomial equation) ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) เพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vcf) และแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) หลังจากนั้นนำความสัมพันธ์ดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม(Artificial Neural Network) ที่ทำนายค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vpnn) ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าที่ถูกต้องและแม่นยำกว่าจะถูกนำไปใช้เป็นสัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) ในระบบควบคุม จากเทคนิคข้างต้นนี้ทำให้สามารถออกแบบและติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้เพื่อศึกษาการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับกังหันลมขนาดเล็กซึ่งเป็นการติดตามจากค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้เทคนิคของโครงข่ายประสาทเทียมและเทคนิคการประมาณจากสมการพหุนามนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้ออกมาเพื่อนำไปเป็นสัญญาณอ้างอิงให้กับวงจรทอนระดับแรงดันทำให้การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีประสิทธิภาพดี ไม่แกว่ง และแม่นยำอีกด้วย

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

- 1.3.1 เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมให้ผลลัพธ์ดีกว่าเทคนิคการประมาณด้วยสมการพหุนาม
- 1.3.2 มีค่าตัวชี้วัดเชิงจริงที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด
- 1.3.3 แรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดสามารถนำมาเป็นสัญญาณอ้างอิงของวงจรทอนแรงดัน
- 1.3.4 สามารถใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้จริง

1.4 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมขนาดเล็กจากเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมและเทคนิคการประมาณด้วยสมการพหุนาม ขอบเขตการวิจัยนี้เริ่มต้นจากการติดตามหาค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้มาเป็นสัญญาณอ้างอิงในการปรับเปลี่ยนค่าตัวชี้วัดเชิงจริงของวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า หลังจากนั้นนำกำลังไฟฟ้าที่ได้จากทั้งสองเทคนิคมาทำการเปรียบเทียบว่าเทคนิคใดให้กำลังไฟฟ้าได้มากกว่า อีกทั้งยังทำการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการทดลองเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบกังหันลมอีกด้วย

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของกังหันลมขนาดเล็ก
2. ศึกษาการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม
3. ทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด
4. เปรียบเทียบเทคนิคของโครงข่ายประสาทเทียมและวิธีการประมาณค่าจากสมการพหุนาม
5. ออกแบบวงจรที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด
6. วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากการทดลอง

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. สามารถนำแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดมาเป็นสัญญาณอ้างอิงในการปรับตัวชี้วัดเชิงจริงได้
2. สามารถนำไปเป็นพลังงานทดแทนได้
3. สามารถนำการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดนี้ไปใช้งานได้จริง
4. การทำนายจากเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมนั้นแม่นยำกว่าเทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนาม
5. แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดมีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน
6. จำนวนโหนดชั้นซ่อนมีผลต่อเอาต์พุตของเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมาย วัตถุประสงค์ สมมติฐาน ขอบเขตการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ รวมไปถึงโครงสร้างของงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า หลักการทำงานของเทคนิค โครงข่ายประสาทเทียม วิธีกำลังสองน้อยที่สุด และวงจรทอนระดับแรงดัน

บทที่ 3 กล่าวถึงการทดลองหาค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียม การออกแบบสมการพหุนามเพื่อใช้ในการทำนายค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

บทที่ 4 กล่าวถึงการเลือกพารามิเตอร์ให้กับวงจรทอนระดับแรงดัน การหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับตัวตัดไซเคิลของวงจรทอนระดับแรงดัน การออกแบบวงจรทดลอง และ หลักการทำงานของชุดควบคุมที่ใช้เพื่อการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทำนายแรงดันไฟฟ้าด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมและเทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนาม วงจรและขั้นตอนการทดลอง และผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

บทนี้แสดงรายละเอียดของทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับ คุณลักษณะของกังหันลมและหลักการผลิตไฟฟ้า โครงสร้างและหลักการทำงานของโครงข่ายประสาทดัดเทียม วิธีการแพร่กระจายแบบย้อนกลับ วิธีกำลังสองน้อยที่สุด และวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า

2.1 กังหันลมผลิตไฟฟ้า

หลักการทำงานของกังหันลม [9] เกิดจากการเปลี่ยนรูปของพลังงานจลน์เป็นพลังงานไฟฟ้า กล่าวคือเมื่อมีกระแสลมพัดผ่านกังหันลมทำให้กังหันลมหมุน หลังจากนั้นใบกังหันลมที่อยู่ที่แกนหมุน จะทำหน้าที่ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในระบบ โดยปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตออกมาได้นั้นขึ้นอยู่กับ ความยาวของใบกังหันลม ความเร็วของกังหันลม และสถานที่ติดตั้งของกังหันลม ซึ่งสามารถจำแนกชนิดของกังหันลมตามลักษณะการวางตัวของแกนเพลลาออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

2.1.1 กังหันลมที่มีแกนเพลลาในแนวตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine)

เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนและใบกังหันลมตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบทำให้สามารถรับลมในแนวราบได้ทุกทิศทาง กังหันลมแบบแกนตั้งนั้นมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานต่ำปัจจุบันมีการใช้งานกังหันลมแบบนี้้น้อยมาก โดยมีกังหันลม 2 แบบ คือ แดร์เรียส (Darrieus) และ ซาโวเนียส (Savonius) [10]



รูปที่ 2.1 กังหันลมที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวตั้ง [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

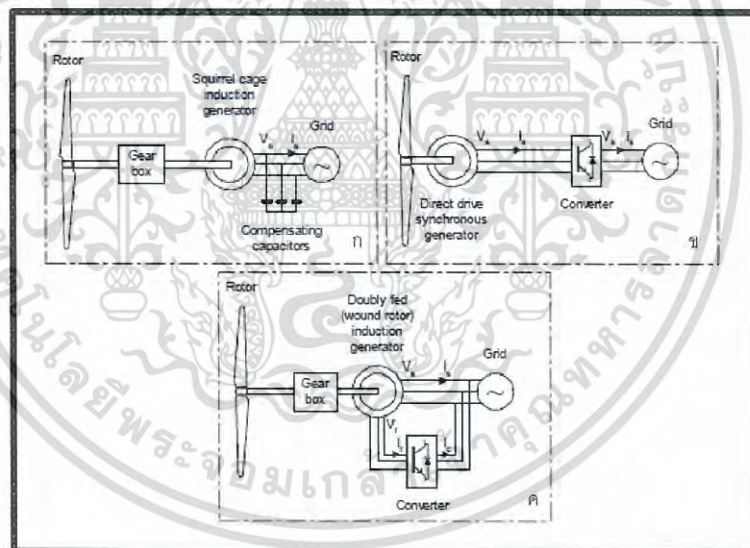
2.1.2 กังหันลมที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวนอน (Horizontal Axis Wind Turbine)

เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับทิศทางลม โดยมีใบพัดเป็นตัวตั้งฉากรับแรงลม มีอุปกรณ์ควบคุมกังหันให้หันไปตามทิศทางของกระแสลม เรียกว่า หางเสือ และมีอุปกรณ์ป้องกันกังหันชำรุดเสียหายขณะเกิดลมพัดแรง [10] กังหันลมประเภทนี้ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและถูกนำมาใช้งานอย่างมาก เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานสูง แต่ต้องติดตั้งบนเสาที่มีความสูงมาก ลักษณะการทำงานของกังหันลมแบบที่นิยมใช้กันสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ [23] ได้แก่

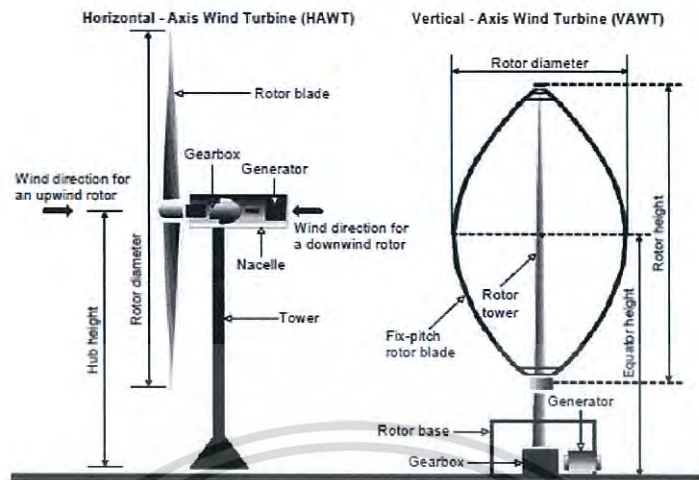
2.1.2.1 กังหันลมแบบความเร็วคงที่ (fixed speed turbine) กังหันลมชนิดนี้ประกอบด้วย กล่องเกียร์ ใบพัด ซึ่งต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกรงกระรอก ดังในรูปที่ 2.2 (ก)

2.1.2.2 กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ (variable speed turbine) กังหันลมชนิดนี้ประกอบด้วย กล่องเกียร์ ใบพัด ซึ่งต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบดับเบิลเฟด ดังในรูปที่ 2.2 (ข)

2.1.2.3 กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดโดยตรง (variable speed with direct drive) กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วย ใบพัด เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสโดยตรง ดังในรูปที่ 2.2 (ค)



รูปที่ 2.2 (ก) องค์ประกอบกังหันลมแบบความเร็วคงที่ (ข) กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ (ค) กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดโดยตรง [23]



รูปที่ 2.3 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอนและแกนตั้ง [24]

2.2 คุณลักษณะของกังหันลม

พลังงานการไหลของลมสำหรับกังหันลมจะแสดงในสมการที่ (2.1)

$$P = \frac{1}{2} \rho_a A_T V_w^3 \quad (2.1)$$

เมื่อกระแสลมผ่านกังหันลมพลังงานจลน์จะถูกส่งผ่านไปยังโรเตอร์ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงนั้นจะอธิบายจากค่า Power Coefficient (C_p) โดย C_p เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังที่เกิดจากกังหันลมกับพลังงานจลน์ของกังหันลม ซึ่งพลังงานจลน์ของกังหันลม (E) จะแสดงในสมการที่ (2.2) และค่า C_p จะแสดงในสมการที่ (2.3)

$$E = \frac{1}{2} \rho_a v V^2 \quad (2.2)$$

$$C_p = \frac{2P_T}{\rho_a A_T V^3} \quad (2.3)$$

เมื่อ ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ V_w คือ ความเร็วลม A_T คือ พื้นที่หน้าตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามที่ Albert Betz นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันได้ทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดในการเปลี่ยนแปลงจากพลังงานจลน์เป็นพลังงานกลในการหมุนนั้นมีความไม่เกิน 59.3 % อย่างไรก็ตามในการใช้งานจริงส่วนใหญ่ค่าสัมประสิทธิ์จะอยู่ระหว่าง 30-40 % [12]

2.3 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network)

โครงข่ายประสาทเทียม คือ รูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับประมวลผลด้วยการคำนวณแบบคอนเน็คชันนิสต์ (connectionist) เพื่อจำลองการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมในสมองมนุษย์ด้วยวัตถุประสงคเพื่อสร้างเครื่องมือที่มีความสามารถในการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ [13]

2.3.1 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมเริ่มจากจำนวนชั้นของโครงข่ายประสาทเทียม 1. ชั้นอินพุต (Input layer) 2. ชั้นซ่อน (Hidden layer) 3. ชั้นเอาต์พุต (Output layer) สำหรับจำนวนชั้นซ่อนของโครงข่ายประสาทเทียมนั้นจะพบอยู่ในโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น ซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3.2.2 โดย Guo และ Dooley [25] กล่าวว่าการกำหนดจำนวนชั้นซ่อนที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมนั้นไม่มีกฎเกณฑ์แน่นอน แต่ระบุไว้ว่าจะต้องมีชั้นซ่อนอย่างน้อย 1 ชั้นเสมอ ในการเชื่อมต่อโครงข่ายประสาทเทียม

4. น้ำหนัก (weight) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของระบบโครงข่ายประสาทเทียม เนื่องจากเป็นส่วนที่ใช้หาน้ำหนักของความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุตกับข้อมูลเอาต์พุต ว่าข้อมูลอินพุตใดมีความสัมพันธ์กับข้อมูลเอาต์พุตมากหรือน้อยเพียงใด โดยค่าน้ำหนักจะปรับเปลี่ยนไปตามรูปแบบของผลลัพธ์ที่ได้ด้วยการลองผิดลองถูกในความสัมพันธ์แต่ละแบบเพื่อตามหาค่าน้ำหนักที่นำมาใช้แล้วมีความผิดพลาดน้อยที่สุด

5. ไบอัสหรือออฟเซต (bias - offset) เป็นอินพุตหนึ่งซึ่งมีค่าคงที่

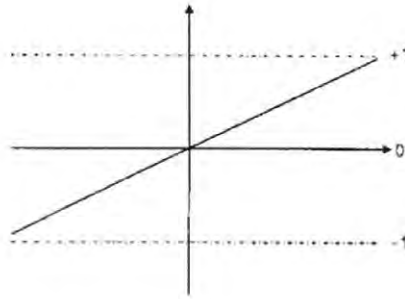
6. ฟังก์ชันผลรวม (summation function) เป็นฟังก์ชันที่รวมผลรวมของข้อมูลอินพุตทั้งหมดกับค่าน้ำหนักและไบอัสไว้ด้วยกันเพื่อส่งไปสู่ฟังก์ชันถ่ายโอน

7. ฟังก์ชันถ่ายโอนค่า ($f(\cdot)$) หรือฟังก์ชันกระตุ้น (activation function) มีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภท คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้น และ ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบไม่เป็นเชิงเส้น

7.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้น (linear Transfer function) เป็นการเรียนรู้เพียงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างข้อมูลอินพุตและข้อมูลเอาต์พุต ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้นสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.4 และรูปที่ 2.4

$$f(x) = x \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้น (Linear Transfer function)

7.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Transfer Function) มีด้วยกันอยู่ 2 ประเภท คือ ซิกมอยด์ฟังก์ชัน (Sigmoid Function) และฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ (Hyperbolic Tangent Function) โดยทั้ง 2 ฟังก์ชันนี้ต่างกันเพียงช่วงข้อมูลการส่งออก

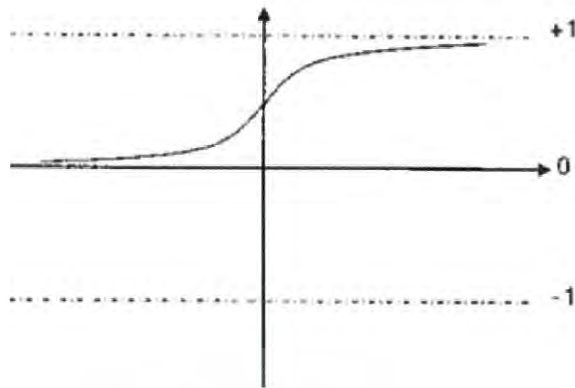
7.2.1 ซิกมอยด์ฟังก์ชัน ซึ่งฟังก์ชันนี้มีช่วงข้อมูลการส่งออกอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.5) และรูปที่ 2.5

7.2.2 ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ ซึ่งฟังก์ชันนี้มีช่วงข้อมูลการส่งออก -1 ถึง 1 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.6) และรูปที่ 2.6 โดยฟังก์ชันนี้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กระจายย้อนกลับ

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\beta x}} \quad (2.5)$$

$$f(x) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^x} \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.5) จะเห็นว่าช่วงเอาต์พุตของซิกมอยด์ฟังก์ชันจะอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 โดยที่ β คือค่าความชันที่มีค่าคงที่ เมื่อพิจารณาให้ β มีค่าเท่ากับ 1 ช่วงเอาต์พุตของซิกมอยด์ฟังก์ชันจะอยู่ในช่วง 0-1 ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ซิกมอยด์ฟังก์ชัน (Sigmoid Function)



รูปที่ 2.6 ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ (Hyperbolic Tangent Function)

2.3.2 ลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วยโหนดจำนวนมากเชื่อมต่อกันซึ่งถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยๆ เรียกว่า ชั้น (layer) โดยชั้นแรกเป็นข้อมูลอินพุต (input layer) ส่วนชั้นสุดท้ายเป็นข้อมูลเอาต์พุต (output layer) และชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุต เรียกว่า ชั้นซ่อน (hidden layer) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วชั้นซ่อนอาจมีมากกว่า 1 ชั้นก็ได้ ดังนั้นจึงสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียมได้ 2 ประเภท ได้แก่ โครงข่ายแบบชั้นเดียว และ โครงข่ายแบบหลายชั้น [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว (Single layer Neural Network)

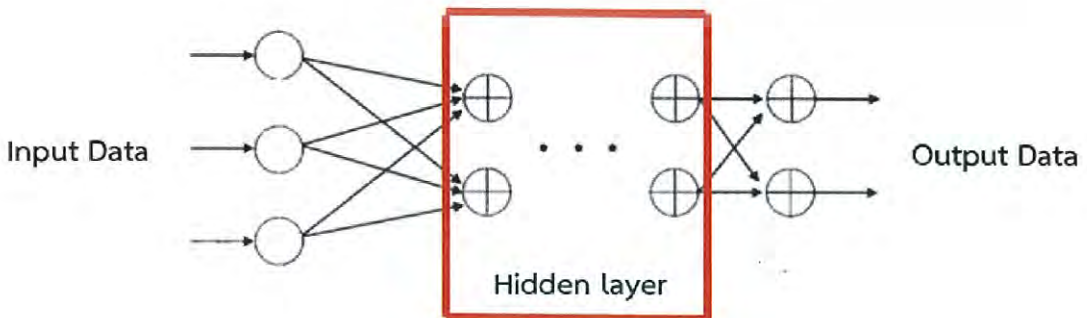
โครงข่ายแบบชั้นเดียวเป็นโครงข่ายอย่างง่ายที่มีเพียงโหนดในชั้นอินพุตที่ทำหน้าที่รับข้อมูลมาแล้วส่งข้อมูลผ่านเส้นเชื่อมโยงต่างๆไปให้โหนดชั้นเอาต์พุต โดยความสัมพันธ์ในการส่งข้อมูลระหว่างโหนดนั้นขึ้นอยู่กับค่าน้ำหนักบนเส้นเชื่อมโยง โหนดในชั้นเอาต์พุตนั้นจะนำข้อมูลที่รับมาทำการคำนวณโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ที่เหมาะสมแล้วส่งค่าผลลัพธ์ออกมา โดยตัวอย่างของโครงข่ายแบบชั้นเดียว เช่น โครงข่ายแบบเพอเซปตรอนอย่างง่าย (Simple perceptron) และโครงข่ายโฮปฟิลด์ (Hopfield networks) โดยมีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว [13]

2.3.2.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multilayer Neural Network)

โครงข่ายแบบหลายชั้นเป็นโครงข่ายที่มีชั้นแอบแฝงตั้งแต่ 1 ชั้นขึ้นไป ซึ่งโครงข่ายแบบนี้ใช้ในกรณีที่ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตมีปัญหาความซับซ้อน จึงเพิ่มจำนวนชั้นซ่อนเข้าไปในโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อการคำนวณที่ซับซ้อนมากขึ้น โดยตัวอย่างของโครงข่ายแบบหลายชั้น เช่น การแพร่กระจายแบบย้อนกลับ เซลล์พอร์แกนไนซิงแมปซ์ เป็นต้น ลักษณะโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.8



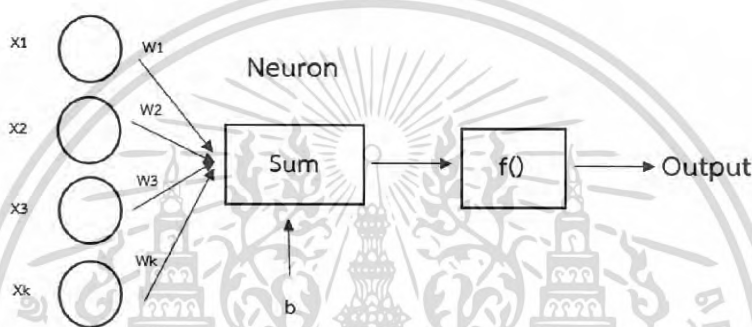
รูปที่ 2.8 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 หลักการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม

หลักการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมเริ่มจากการนำข้อมูลอินพุตทั้งหมด (x_k) มาคูณกับค่าน้ำหนักในแต่ละเส้นเชื่อมโยงแล้วนำผลรวมที่ได้ไปรวมกับค่าไบแอสคงที่ดังรูปที่ 2.9 หลังจากนั้นนำค่าดังกล่าวเข้าสู่ฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่อคำนวณเอาต์พุตออกมา ซึ่งได้ดังสมการที่ (2.7)

$$y = f\left[\sum_{k=1}^n x_k w_k + b_k\right] \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.9 หลักการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม

2.3.4 การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม (learning of neural network)

การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม คือ การสอนให้โครงข่ายประสาทเทียมทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุต และ ข้อมูลเอาต์พุตที่มีความสัมพันธ์ต่อกันมาน้อยเพียงใดโดยความสัมพันธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของน้ำหนักซึ่งจะปรับปรุงค่าโดยอาศัยกระบวนการทำซ้ำสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

2.3.4.1 การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (supervised learning) คือ การเรียนรู้ที่มีทั้งข้อมูลอินพุตและข้อมูลเอาต์พุตป้อนให้ระบบซึ่งในระหว่างการฝึกสอนนั้นจะทำการปรับค่าน้ำหนักไปตามความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างค่าเป้าหมายกับค่าเอาต์พุตโดยจะทำการปรับค่าน้ำหนักไปเรื่อยๆจนกว่าค่าเอาต์พุตมีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด

2.3.4.2 การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (unsupervised learning) คือ การเรียนรู้ที่มีเพียงข้อมูลอินพุตแต่ไม่มีข้อมูลเอาต์พุต ซึ่งกระบวนการเรียนรู้จะใช้ข้อมูลทางสถิติของชุดฝึกสอน และ ทำการจัดกลุ่มออกเป็นระดับต่างๆ โดยโครงข่ายประสาทเทียมจะหาค่าเอาต์พุตจากความสัมพันธ์ของข้อมูลอินพุตและข้อมูลเอาต์พุตเอง

2.3.4.3 การเรียนรู้เชิงบังคับ (reinforcement learning) คือ การเรียนรู้ที่มีทั้งแบบมีผู้สอน และ ไม่มีผู้สอน โดยจะการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนเมื่อมีแต่ค่าอินพุตและจะการเรียนรู้แบบมีผู้สอนเมื่อมีค่าอินพุตและเอาต์พุต

2.3.5 ประเภทของโครงข่ายประสาทเทียม

จาก [26] แนวคิดของโครงข่ายประสาทเทียมที่ต้องเชื่อมต่อกับฟังก์ชันถ่ายโอน ส่วนมากจะเป็นตัวกำหนดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม ซึ่งแบ่งได้ 5 ประเภท [15] ดังนี้

2.3.5.1 ประเภทการคาดเดา (Prediction)

2.3.5.2 ประเภทการจัดลำดับหมวดหมู่ (Classification)

2.3.5.3 ประเภทการเชื่อมโยงข้อมูล (Data association)

2.3.5.4 ประเภทกระบวนการสร้างความคิด (Data conceptualization)

2.3.5.5 ประเภทการกลั่นกรองข้อมูล (Data filtering)

ตารางที่ 2.1 แสดงความแตกต่างระหว่างประเภทของโครงข่ายประสาทเทียม

ชนิดโครงข่าย	โครงข่าย	การใช้
การคาดเดา (Prediction)	<ul style="list-style-type: none"> - Back-propagation - Delta Bar Delta - Extended Delta Bar Delta - Directed Random Search - Higher Order Neural Networks 	ใช้ค่าอินพุตเพื่อคาดเดาเอาต์พุต
การจัดหมวดหมู่ (Classification)	<ul style="list-style-type: none"> - Learning Vector Quantization - Counter-propagation - Probabilistic Neural Networks 	ใช้ค่าอินพุตเพื่อกำหนดการจัดหมวดหมู่
การเชื่อมโยงข้อมูล (Data association)	<ul style="list-style-type: none"> - Hopfield - Boltzmann Machine - Hamming Network - Bidirectional associative Memory 	เหมือนกับการแบ่งประเภท แต่มันจะจดจำข้อมูลที่มีความผิดพลาดด้วย
กระบวนการสร้างความคิด (Data conceptualization)	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptive Resonance Network - Self-Organizing Map 	วิเคราะห์อินพุตเพื่อการจัดกลุ่ม
การกลั่นกรองข้อมูล (Data filtering)	<ul style="list-style-type: none"> - Recirculation 	ทำให้สัญญาณอินพุตเรียบสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 กระบวนการแพร่กระจายแบบย้อนกลับ

Back-propagation เป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม [16] วิธีหนึ่งที่น่านิยมใช้กันมากเพื่อปรับค่าน้ำหนักในเส้นเชื่อมระหว่างโหนดให้เหมาะสม โดยการปรับค่าน้ำหนักนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความผิดพลาดของเอาต์พุตที่คำนวณได้และค่าเอาต์พุตที่ต้องการ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าอัตราเร็วในการเรียนรู้ (r)

ขั้นตอนที่ 2 สำหรับแต่ละตัวอย่างอินพุตให้ทำตามขั้นตอนต่อไปนี้จนกว่าจะได้ผลลัพธ์ของเอาต์พุตใกล้เคียงกับที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 2.1 คำนวณหาค่าเอาต์พุตโดยใช้ค่าน้ำหนักเริ่มต้นซึ่งอาจได้จากการสุ่ม

ขั้นตอนที่ 2.2 คำนวณหาค่าความผิดพลาดของเอาต์พุตที่ได้กับเอาต์พุตที่ต้องการ (เป้าหมาย)

$$E_o = \frac{1}{2}(T - O_o)^2 \quad (2.8)$$

เมื่อ E_o = ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

T = เอาต์พุต (เป้าหมาย)

O_o = เอาต์พุต (นิวรอล)

ขั้นตอนที่ 2.3 คำนวณอนุพันธ์ย่อยของ E_o เทียบกับ W_{ho}

$$\frac{\delta E_o}{\delta W_{ho}} = \gamma_o * O_h \quad (2.9)$$

ขั้นตอนที่ 2.4 คำนวณอนุพันธ์ย่อยในชั้นซ่อน

$$\frac{\delta E_o}{\delta W_{ih}} = (\gamma_o * W_{ho}) * O_h * (1 - O_h) * I \quad (2.10)$$

เมื่อ $\gamma_o = (O_o - T) * O_o * (1 - O_o)$

I = ข้อมูลอินพุต

W_{ho} = น้ำหนักระหว่างชั้นซ่อนกับชั้นเอาต์พุต

O_h = เอาต์พุตในชั้นซ่อน

ขั้นตอนที่ 2.5 คำนวณหาค่าน้ำหนักใหม่จากสมการ

$$W_{ih/ho}^+ = W_{ih/ho} - \left(r * \frac{\delta E_o}{\delta W_{ih/ho}} \right) \quad (2.12)$$

เมื่อ $W_{ih/ho}^+$ = ค่าน้ำหนักใหม่

$W_{ih/ho}$ = ค่าน้ำหนักเก่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Method)

วิธีกำลังสองน้อยที่สุด คือ วิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อแก้ปัญหาการประมาณระบบสมการที่มีจำนวนตัวแปรมากกว่าจำนวนสมการ จะมีคำตอบได้หลายชุดและค่าที่เป็นไปได้มากที่สุดของตัวแปรที่สอดคล้องกับสมการ สามารถหาได้จาก “หลักของวิธีกำลังสองน้อยที่สุด” โดยยึดค่าของตัวแปรที่ไม่ทราบค่าจะสะท้อนถึงค่าที่ต่ำที่สุด ประมาณฟังก์ชัน $z(t)$ จากรูปแบบของสมการพหุนาม [17]

$$\hat{z}(t) = \sum_{j=1}^J a_j t^{j-1} \quad (2.13)$$

เมื่อ \hat{z} คือ การประมาณ
 $J - 1$ คือ ดีกรีของพหุนาม

ผลรวมของค่าความผิดพลาดสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$e = \sum_{n=1}^N \left(z_n - \hat{z}_n \right)^2 \quad (2.14)$$

จากหลักการของ Orthogonal ค่าความผิดพลาดเคลื่อนจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อ $(z - \hat{z})$ ตั้งฉากกับ \hat{z} จะได้ดังสมการที่ (2.15)

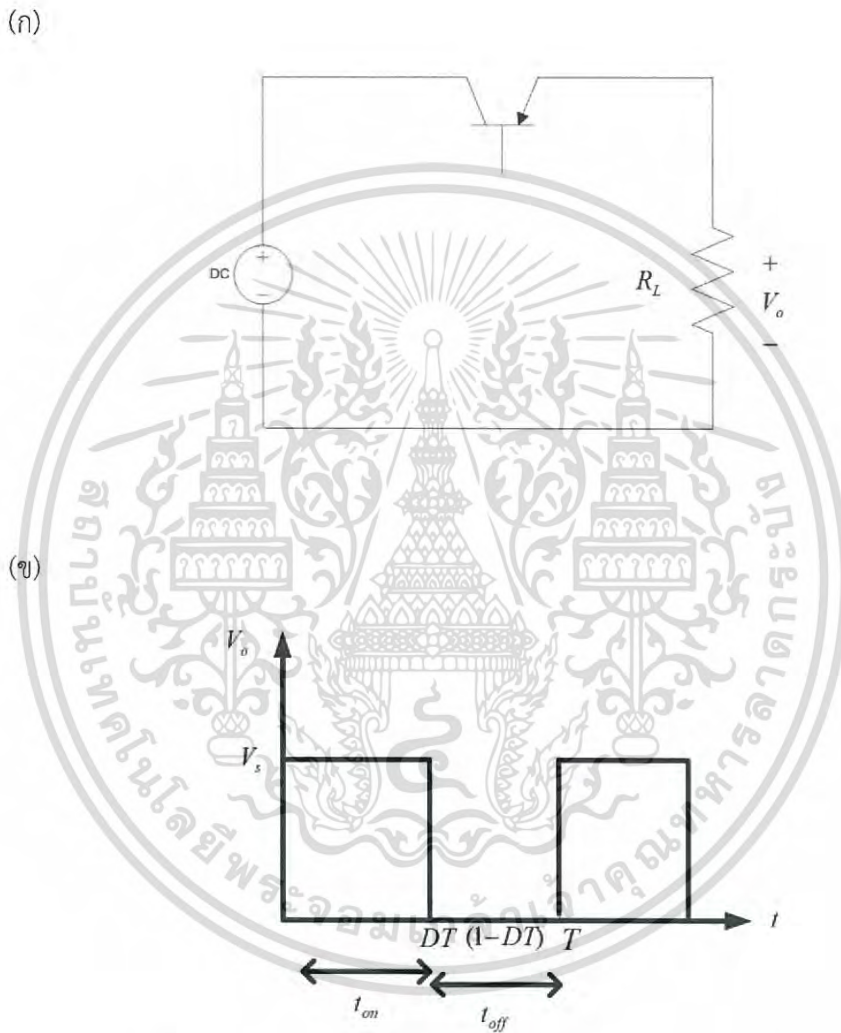
$$\sum_{n=1}^N \left(z_n - \hat{z}_n \right) \hat{z}_n = 0 \quad (2.15)$$

สามารถอธิบายได้ว่าการฉายเชิงตั้งฉากของ z_n ลงบนสมการพหุนาม $z(t)$ สำหรับ $N > J$ ซึ่งการฉายเชิงตั้งฉากนี้ทำให้ได้ระบบสมการที่สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของพหุนามที่ทำให้ได้ความผิดพลาดน้อยที่สุด ดังสมการข้างล่าง

$$e_{\min} = \sum_{n=1}^N \left(z_n - \hat{z}_n \right) z_n \quad (2.16)$$

2.6 วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าหรือวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter)

อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ มีโหมดการทำงานนำกระแสและไม่นำกระแส ดังรูปที่ 2.10 แสดงวงจรแปลงผันกระแสตรงพื้นฐานในอุดมคติ [18]



รูปที่ 2.10 (ก) วงจรแปลงผันกระแสตรงพื้นฐาน (ข) แรงดันไฟฟ้าขาออก

ในช่วงสวิตซ์นำกระแส (t_{on}) ทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า และในช่วงที่สวิตซ์ไม่นำกระแส (t_{off}) ทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่วนช่วงเวลาในการนำกระแสและหยุดนำกระแส นั้นจะได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกเป็นพัลส์ดังรูปที่ 2.10 (ข) ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาออกได้ดังสมการที่ (2.17)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt$$

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_s dt$$

$$V_o = V_s D$$
(2.17)

เมื่อ V_s = แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
 D = ดิวตี้ไซเคิลของวงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้า

จากสมการที่ (2.17) พบว่าแรงดันขาออกสามารถควบคุมได้ด้วยการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลซึ่ง D หมายถึง อัตราส่วนของช่วงเวลาที่มีสวิตช์นำกระแสต่อช่วงเวลาหนึ่งคาบการสวิตช์ ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.18)

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T}$$

$$t_{on} = DT$$

$$t_{off} = (1 - D)T$$
(2.18)

เมื่อ t_{on} = ช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแส
 t_{off} = ช่วงเวลาที่สวิตช์ไม่นำกระแส
 T = ช่วงเวลาหนึ่งคาบ

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรถอนระดับแรงดันในช่วงสภาวะคงตัว (Steady state) จะมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรมีดังนี้

1. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากัน

$$i_L(t + T) = i_L(t)$$
(2.19)

หมายความว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากันที่ตำแหน่งเดียวกันในทุกคาบเวลา

2. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_L(\lambda) d\lambda = 0$$
(2.20)

หมายความว่าผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา (volt second) ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

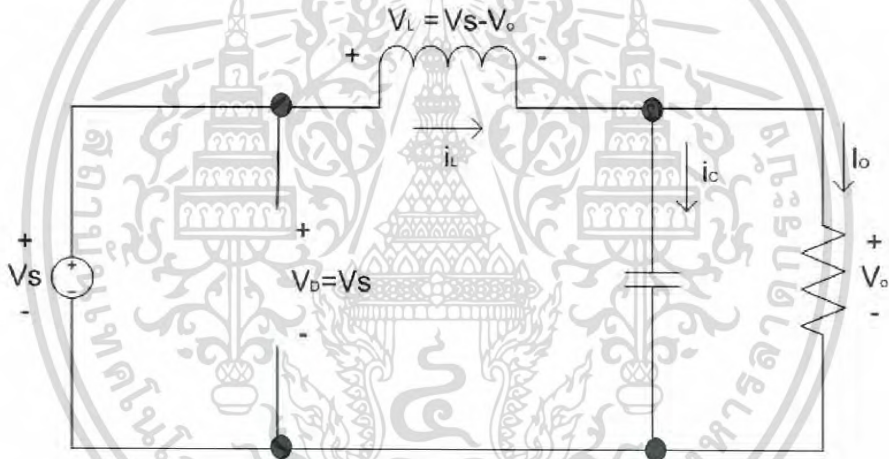
3. กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวเก็บประจุในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$I_c = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_c(t) dt = 0 \quad (2.21)$$

4. กำลังไฟฟ้าด้านขาเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านขาออก

$$P_s = P_o \quad (2.22)$$

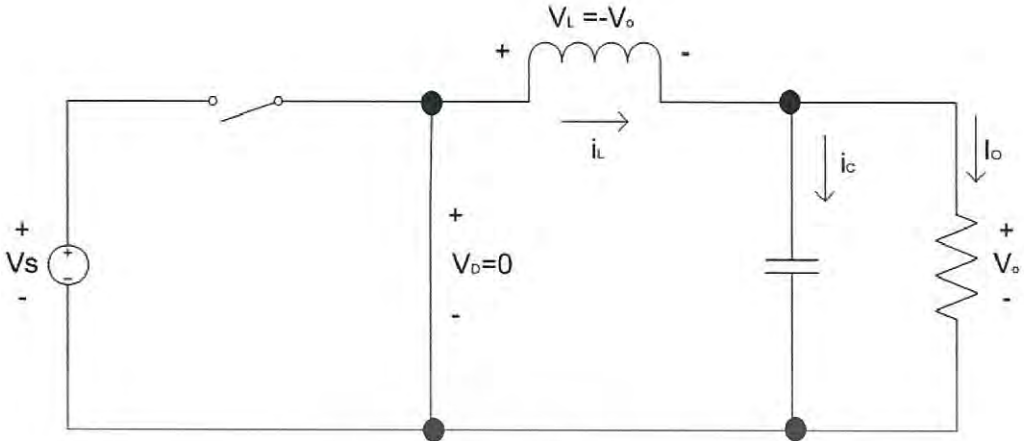
เพื่อที่จะได้แรงดันไฟฟ้าขาออกตามที่ต้องการจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ในแต่ละคาบเวลามีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้สามารถหากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งการวิเคราะห์ที่ต้องทำในสภาวะคงตัว



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส

จากรูปที่ 2.11 เป็นโหมดช่วงที่สวิตช์นำกระแส กระแสไฟฟ้าจะไหลจากแหล่งจ่ายไปยังสวิตช์ผ่านตัวเหนี่ยวนำ และไปยังโหลด โดยที่กระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะไปเก็บที่ตัวเก็บประจุตามจำนวนค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในช่วงนำกระแสได้ดังสมการที่ (2.23)

$$\Delta i_{L,on} = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) DT \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส

จากรูปที่ 2.12 เป็นโหมดช่วงที่สวิตช์ไม่นำกระแส ไดโอดจะถูกไบอัสไปข้างหน้า (forward bias) ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดการไหลอย่างต่อเนื่อง สามารถคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในช่วงไม่นำกระแสได้ดังสมการที่ (2.24)

$$\Delta i_{L,off} = \frac{-V_o}{L} (1-D)T \quad (2.24)$$

ตามเงื่อนไขที่ว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากันดังสมการ (2.24) การเปลี่ยนแปลงของกระแสในช่วงสภาวะคงตัวในโหมดสวิตช์นำกระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นเท่ากับการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะสวิตช์ไม่นำกระแส ซึ่งกล่าวได้ว่า กระแสเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเป็นศูนย์ จากสมการที่ (2.23) และ (2.24) นำค่าแทนลงในสมการที่ (2.25) จะได้สมการที่ (2.26)

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad (2.25)$$

$$\frac{V_o}{V_s} = D \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.26) อัตราการขยายสูงสุดที่เป็นไปได้ต้องไม่เกิน 100% ซึ่งจากสมการวงจรทอนแรงดันเป็นวงจรที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าดิวิตีไซเคิล ซึ่งการปรับดิวิตีไซเคิลจะปรับได้ตั้งแต่ศูนย์ถึงหนึ่ง

2.6.1 การหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้า

การหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดที่ให่วงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้านั้น เริ่มต้นจากการหากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำซึ่งจะเท่ากับกระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านโหลด เนื่องจากขณะที่อยู่ในสภาวะการทำงานอยู่ตัว กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$I_L = I_o = \frac{V}{R} \quad (2.27)$$

จากรูปที่ 2.13 (ข) สามารถหากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดได้จากสมการในช่วงที่สวิตช์ไม่นำกระแสดังนี้

$$I_{L,\max} = I_L = \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.28)$$

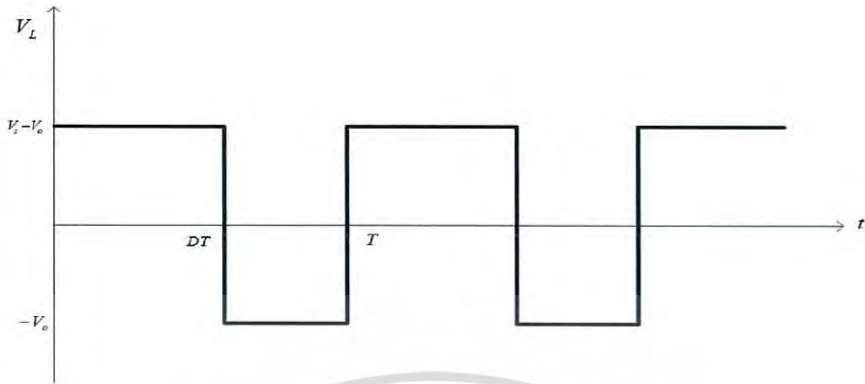
$$I_{L,\max} = \frac{V_o}{R} + \frac{1}{2} \left[\frac{V_o}{L} (1-D)T \right] \quad (2.29)$$

เมื่อจัดรูปใหม่จะได้ว่า

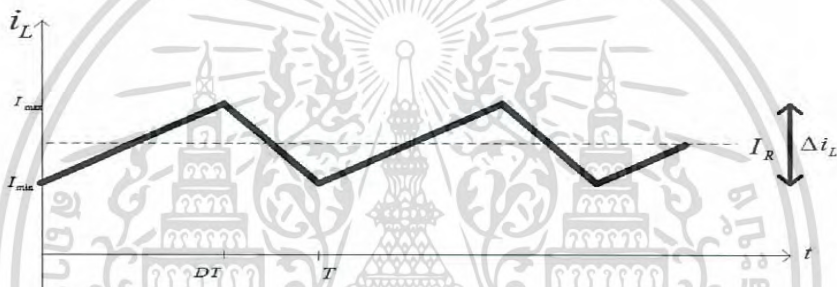
$$I_{L,\max} = V_o \left[\frac{1}{R} + \frac{1-D}{2Lf} \right] \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

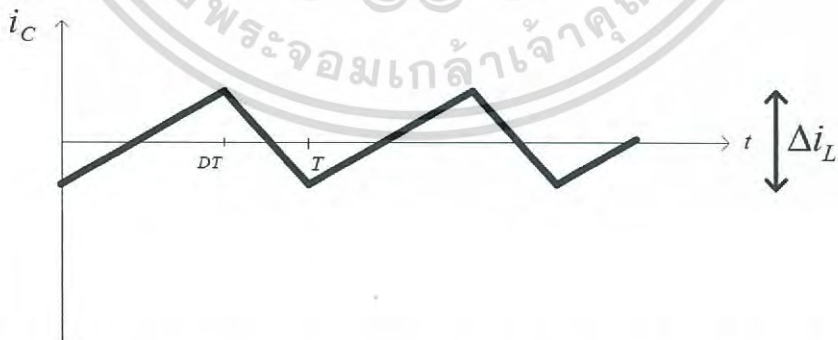
(ก)



(ข)



(ค)



รูปที่ 2.13 คลื่นการทำงานของวงจรทอนแรงดัน (ก) แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (ข) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (ค) กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นกระแสเหนี่ยวนำต่ำสุดจะมีค่าดังสมการที่ (2.31)

$$I_{L,\min} = V_o \left[\frac{1}{R} - \frac{1-D}{2Lf} \right] \quad (2.31)$$

เงื่อนไขที่สำคัญสำหรับการทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะต้องเป็นกระแสบวกเสมอ สมการที่ (2.31) สามารถนำมาใช้ในการหาค่าความเหนี่ยวนำและความถี่ในการสวิตซ์

$$I_{L,\min} = V_o \left[\frac{1}{R} - \frac{1-D}{2Lf} \right] = 0 \quad (2.32)$$

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (2.33)$$

$$f = \frac{(1-D)R}{2L_{\min}} \quad (2.34)$$

จากสมการที่ (2.32) สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดที่ทำให้วงจรตอนแรงดันสามารถทำงานได้ในโหมดกระแสต่อเนื่อง ซึ่งจะได้ค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดดังสมการที่ (2.33) โดยในส่วนของสมการที่ (2.34) ใช้สำหรับพิจารณาหาความถี่ในการสวิตซ์ที่เหมาะสม เมื่อทราบค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งกระแสในตัวเก็บประจุหาได้จากสมการที่ (2.35) และเมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่าเป็นบวก ช่วงเวลาดังกล่าวตัวเก็บประจุจะสะสมประจุโดยสามารถคำนวณจากสมการ (2.36)

$$i_C = i_L - i_R \quad (2.35)$$

$$Q = CV_o \quad (2.36)$$

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} \quad (2.37)$$

ΔQ คือ ค่าค่าประจุที่เปลี่ยนแปลงน้อยๆ ΔV_o ค่าระลอกของแรงดันไฟฟ้าด้านออกที่เปลี่ยนแปลงน้อยๆ จะได้สมการที่ (2.39)

$$\Delta V_o = \frac{TV_o}{8CL} (1-D)T \quad (2.39)$$

และจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการ ค่าอัตราระลอกคลื่น (ripple ratio)

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf^2} \quad (2.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A.Mellit และคณะ [2] ใช้ภาษาที่สามารถคำนวณได้รวดเร็ว (VHDL) ย่อมาจาก VHSIC Hardware Description Language หมายถึง ภาษาโปรแกรมที่ใช้เพื่อเขียนอ้างถึงการทำงานในแบบฮาร์ดแวร์ของวงจรแบบ VHSIC ข้อดีของวิธีนี้ คือ ผลถูกต้อง และมีประสิทธิภาพดี แต่ข้อเสีย คือการควบคุมที่ค่อนข้างซับซ้อนและยากต่อการทำความเข้าใจ

T.Ocran และคณะ [3] ออกแบบระบบให้สามารถประมวลผลโดยสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processor , DSP) และปรับปรุงเสถียรภาพของระบบโดยตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) ผลลัพธ์ที่ได้ออกมามีประสิทธิภาพสูงขึ้น

F.Bouchafaa และคณะ [19] นำเสนอการควบคุมแบบฟัซซี (Fuzzy) เพื่อปรับปรุงคุณภาพเวลาตอบสนองที่เร็วขึ้นและลดการแกว่งของกำลัง แรงดันคัตในสภาวะคงตัว ทำให้ระบบไม่เป็นเชิงเส้นและมีการควบคุมที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

A.B.G.Bahgat และคณะ [20] นำเสนอการพัฒนาและการหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมสามารถส่งถ่ายกำลังจากการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ถึง 97% และยังรักษาเวลาในจุดที่มีระบบกำลังไฟฟ้าสูงสุดให้ระบบปฏิบัติการที่เวลานั้น

D.Lalili และคณะ [21] นำเสนอการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยวิธีการ Variable step size incremental conductance เทียบกับตอนสแตปคงที่ผลที่ได้คือการใช้สเตปแบบปรับค่าได้จะทำให้เกิดการปรับปรุงความเร็วและความถูกต้องของการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบได้

E.Kakosimos และคณะ [22] นำเสนอวิธีการ Fixed-Model Predictive Controller ซึ่งตัวควบคุมนั้นขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงค่าสเตปในระหว่างการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดทำให้ได้ผลการทดลองที่ดี และมีประสิทธิภาพ

Chun-Yao Lee และคณะ [7] ได้คิดค้นขึ้นมาใช้นใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบ Radial Basis Function (RBFNN) ซึ่งในบทความนี้ใช้ 2 โมเดลในการทำนายค่าความเร็วรอบที่เหมาะสม และใช้เซนเซอร์ทางกลเพื่อวัดความเร็วรอบและความเร็วลม โดยโมเดลแรกมีข้อมูลอินพุต คือ ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกและความเร็วรอบ ข้อมูลเอาต์พุต คือ ความเร็วลม หลังจากนั้นจะนำค่าความเร็วลมที่ได้จากโมเดลแรกไปเข้าเป็นข้อมูลอินพุตให้กับโมเดลที่สอง และเอาต์พุตที่ได้คือตัวตั้งไซเคิลที่เหมาะสมโดยการใช้ Particle Swarm Optimization (PSO) ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและความเร็วลมที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง

S.Ganhfar และคณะ [8] ได้ศึกษาการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบควอนตัม (QNN) โดยทำการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอดี การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทคนิคนี้ต้องใช้ข้อมูลความเร็วรอบและความเร็วลมมาเป็นอินพุตให้กับ QNN เอาต์พุต คือค่าตัวตั้งไซเคิลที่เหมาะสม ซึ่งการใช้แรงบิดที่เหมาะสมนั้นทำให้กำลังไฟฟ้าที่ออกมามีค่าใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าสูงสุดแต่เนื่องจากวิธีการของคุณ Chun-Yao Lee และ S.Ganhfar พร้อมด้วยคณะ [7,8] จำเป็นที่ต้องมีข้อมูลทางกลจึงทำให้เพิ่มความยุ่งยากซับซ้อนและมีต้นทุนที่สูงขึ้นอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการทดลอง

บทนี้แสดงถึง ส่วนประกอบของกังหันลมขนาดเล็ก การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม และแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร การทดลองหาค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด การออกแบบเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม และการประมาณโดยใช้สมการพหุนามเพื่อการทำนายแรงดันไฟฟ้า

3.1 รูปแสดงส่วนประกอบของกังหันลมขนาดเล็ก



รูปที่ 3.1 อูโมงค์ลมที่ใช้ในการทดลองโดยส่วนขาเข้าจะเป็นใบพัดลมที่เป็นตัวกำเนิดความเร็วลมซึ่งสามารถปรับความเร็วลมโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันที่ปรับค่าได้หลังจากนั้นพลังงานลมจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ไปหมุนกังหันลมให้ผลิตกระแสไฟฟ้า

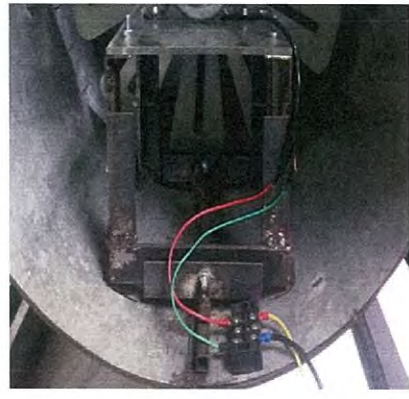


รูปที่ 3.2 กังหันลมในส่วนขาเข้าที่เป็นตัวกำเนิดพลังงานลมไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยกรอบสี่เหลี่ยมสีดำแสดงจุดที่ใช้วัดความเร็วรอบกังหันลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 ส่วนกั้นลมด้านขวาออกที่ไปขับเคลื่อนเจนเนอเรเตอร์ ให้ผลิตกระแสไฟฟ้าออกมา
(ก) กั้นลมด้านขวาออก (ข) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)



(ก)



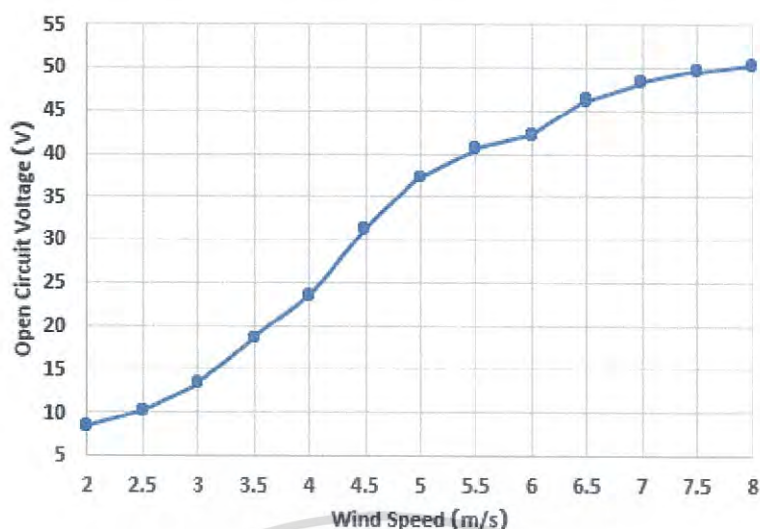
(ข)

รูปที่ 3.4 แรงดันไฟฟ้าที่สามารถปรับค่าได้ (ก) ที่ปรับค่าแรงดันไฟฟ้า (ข) เข็มชี้แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า

3.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วลม และ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร

ทำการปรับความเร็วลมตั้งแต่ 2–8 เมตร/วินาที โดยเพิ่มครั้งละ 0.5 เมตร/วินาที ทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรในแต่ละความเร็วลม โดยการวัดค่าแรงดันเปิดวงจรในแต่ละความเร็วลม ทำการบันทึกค่าทั้งหมด 15 ครั้ง ในแต่ละความเร็วลมเพื่อมาเป็นอินพุตให้แก่โครงข่ายประสาทเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

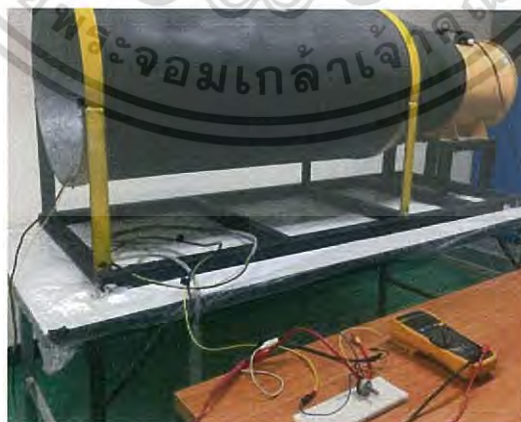


รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม (เมตร/วินาที) กับ ค่าแรงดันเปิดวงจร (โวลต์)

จากรูปที่ 3.5 พบว่าที่ความเร็วลม 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 เมตร/วินาที (การสอน) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) เท่ากับ 8.34, 13.31, 26.36, 37.60, 47.57, 50.66, 52.52 โวลต์ ที่ความเร็วลม 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5 เมตร/วินาที (การทดสอบ) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) เท่ากับ 10.21, 18.55, 32.49, 41.48, 49.07, 51.57 โวลต์ จากรูปพบว่าเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นทำให้แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรเพิ่มขึ้นด้วย

3.3 การทดลองหาค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละความเร็วลม

ทำการทดลองที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที ถึง 8 เมตร/วินาที โดยเพิ่มครั้งละ 1 เมตร/วินาที บันทึกค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยทำการปรับค่าตัวต้านทานขนาด 0-1000 โอห์ม เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าที่สูงที่สุด จากการทดลองทั้งหมด 10 ครั้ง



รูปที่ 3.6 การทดลองหาค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

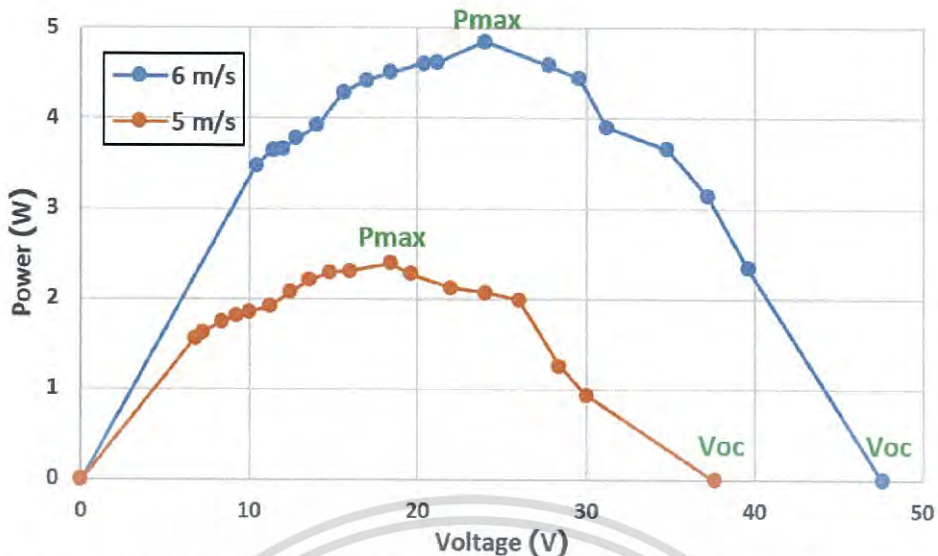
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการปรับค่าตัวต้านทานที่ความเร็วม 5 เมตร/วินาที และความเร็วม 6 เมตร/วินาที

ความเร็วม 5 เมตร/วินาที			ความเร็วม 6 เมตร/วินาที		
แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
24.0	0.86	2.06	31.2	0.13	3.90
22.0	0.96	2.11	29.6	0.15	4.44
19.6	0.12	2.23	27.8	0.17	4.58
18.4	0.13	2.39	24	0.20	4.85
16.0	0.14	2.30	21.2	0.22	4.62
13.6	0.16	2.20	18.4	0.25	4.50
12.4	0.17	2.07	17.0	0.26	4.42

ทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า เมื่อทำการปรับค่าความต้านทานที่ความเร็วม 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 เมตร/วินาที (การสอน) ที่ความเร็วมที่ 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5 (การทดสอบ) ในตารางที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (โวลต์) กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) และกำลังไฟฟ้า(วัตต์) เมื่อทำการปรับค่าตัวต้านทานที่ความเร็วม 5 เมตร/วินาที และความเร็วม 6 เมตร/วินาที

จากตารางที่ 3.1 พบว่า เมื่อความต้านทานมีค่าสูงขึ้นทำให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นทั้งสองความเร็วมแต่กระแสไฟฟ้ามี่ค่าลดลงทั้งสองความเร็วม โดยที่ความเร็วม 5 เมตร/วินาที แรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่งกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่า 18.4 โวลต์ (V_{pm}) กระแสไฟฟ้า ณ ตำแหน่งกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่า 0.13 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่า (P_m) 2.39 วัตต์ ที่ความเร็วม 6 เมตร/วินาที แรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่งกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่า 24 โวลต์ (V_{pm}) กระแสไฟฟ้า ณ ตำแหน่งกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่า 0.20 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_m) มีค่า 4.85 วัตต์



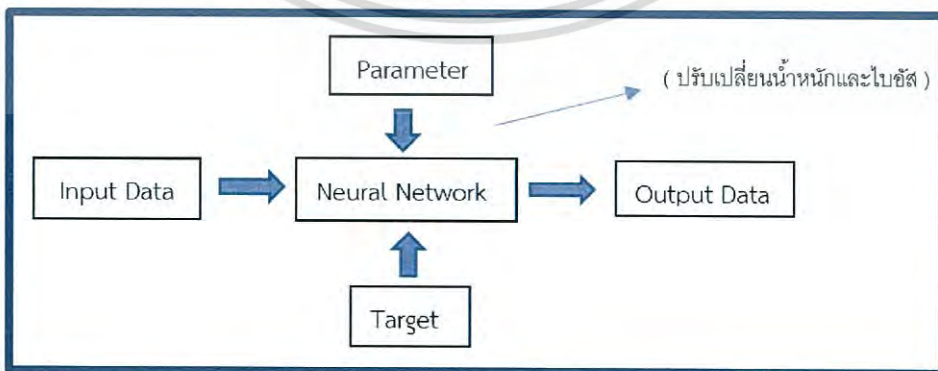
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ความเร็วลม 5 และ 6 เมตร/วินาที

จากรูปที่ 3.7 สีสี่แทนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที สีส้มแทนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที P_{max} แทนค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด V_{oc} แทนจุดที่ กำลังไฟฟ้าเป็น 0 พบว่าเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้ามากขึ้นจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงที่สุด (P_{max}) หลังจากนั้นเมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้ามีค่าลดลงเรื่อยๆจนเป็นศูนย์ (V_{oc})

จากรูปที่ 3.7 พบว่าที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที และ 6 เมตร/วินาที มีค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{pm}) เท่ากับ 18.4, 24 โวลต์ตามลำดับ ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_m) มีค่า 2.39, 4.85 วัตต์ ตามลำดับ ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) มีค่า 37.60 และ 47.57 โวลต์

3.4 การออกแบบเทคนิคที่ใช้ในการทำนายแรงดันไฟฟ้า

3.4.1 การออกแบบเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอเซปตรอนหลายชั้น



รูปที่ 3.8 การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised learning)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.8 การทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมแบบการเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised learning) นั้นเริ่มต้นจากการนำข้อมูลแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรที่ความเร็วลมต่างๆ (Input Data) มาทำการหาความสัมพันธ์กับค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Target) โดยต้องทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสอนและการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำการปรับค่าน้ำหนัก (Weight) ที่เหมาะสมในการทำนายแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vpnn)

การสร้างโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมนี้ใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) ที่ความเร็วลมต่างๆ เป็นอินพุตให้แก่โครงข่ายประสาทเทียมและเอาต์พุตที่ได้จากการทำนายเป็นแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vpm) นำมาสอนโดยใช้วิธี Back-propagation ซึ่งจำนวนข้อมูลที่นำมาทั้งหมด (Input Data) มีจำนวน 195 ข้อมูล โดยแบ่งเป็น ข้อมูลที่ทำการฝึก (Training set) 105 ข้อมูล และ ข้อมูลที่ทำการทดสอบ (Test set) 90 ข้อมูล

Input Data = แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรที่ความเร็วลมตั้งแต่ 2-8 เมตร/วินาที

Training set = แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรที่ความเร็วลมตั้งแต่ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 เมตร/วินาที

Test set = แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรที่ความเร็วลมตั้งแต่ 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5 เมตร/วินาที

การสอนโครงข่ายประสาทเทียมนี้ กำหนดให้อัตราการเรียนรู้ (learning rate) มีค่า 1 % เนื่องจากเป็นการสอนแบบออฟไลน์ (off-line) ซึ่งไม่จำเป็นต้องการเวลาในการสอนรวดเร็วเหมือนกับการใช้งานตามเวลาจริง (Real-time) และทำการปรับจำนวนชั้นซ่อนเพื่อดูว่าความเหมาะสมของจำนวนชั้นซ่อนในระบบโครงข่ายประสาทเทียมนี้ โดยค่าความผิดพลาดจากการปรับจำนวนชั้นซ่อน ตั้งแต่ 2-7 ชั้น แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 จำนวนโหนดซ่อนและค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองจากการทำนายแรงดันไฟฟ้า

จำนวนโหนดซ่อน	ความผิดพลาด (mse)
2	1.7091
3	1.4203
4	0.4867
5	0.9245
6	11.4015
7	15.2579

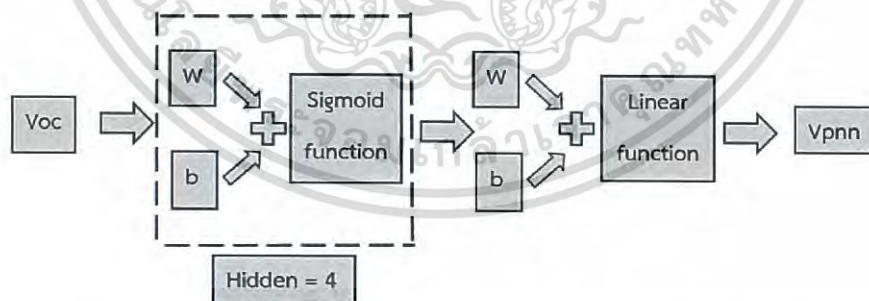
จากตารางที่ 3.2 แสดงการเปลี่ยนจำนวนโหนดซ่อนที่ใช้ในการทำนายโครงข่ายประสาทเทียมแล้วบันทึกค่าความผิดพลาดที่เฉลี่ยกำลังสอง (mse) พบว่าจำนวนโหนดซ่อนที่มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด คือ 4 โหนด มีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 0.4867 โดยเมื่อเพิ่มจำนวนโหนดซ่อนตั้งแต่ 5 ชั้นขึ้นไปเห็นได้ชัดเจนว่าระบบเริ่มมีความซับซ้อนทำให้มีค่าความผิดพลาดสูงมากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการเลือกจำนวน 4 โหนดซ่อนให้แก่ระบบโครงข่ายประสาทเทียมนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบโครงข่ายประสาทเทียม

พารามิเตอร์	
ข้อมูลอินพุต	195
ข้อมูลการสอน	105
ข้อมูลการทดสอบ	90
ฟังก์ชันการแปลง	ซิกมอยด์ฟังก์ชัน , ฟังก์ชันเชิงเส้น
โหนดอินพุต	1
โหนดชั้นซ่อน	4
โหนดเอาต์พุต	1
จำนวนรอบที่ใช้	20
อัตราการเรียนรู้	0.01
รูปแบบการสอน	สเกล คอนจูเกต เกรเดียนต์ (scg)

จากตารางที่ 3.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ในการสอนและทดสอบระบบโครงข่ายประสาทเทียม โดยค่าข้อมูลอินพุต 195 ตัวอย่าง แบ่งเป็นข้อมูลการสอน 105 ตัวอย่าง ข้อมูลการทดสอบ 90 ตัวอย่าง ฟังก์ชันการแปลงซิกมอยด์ และฟังก์ชันเชิงเส้น จำนวนโหนดอินพุต โหนดชั้นซ่อน และโหนดเอาต์พุต มี 1, 4, 1 โหนดตามลำดับ ใช้จำนวนรอบ 20 รอบในการสอนและทดสอบ โดยมีอัตราการเรียนรู้ 0.01 ใช้รูปแบบการสอนแบบ สเกลคอนจูเกตเกรเดียนต์ (scg)



รูปที่ 3.9 โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทำนายแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.9 แสดงส่วนประกอบของโครงข่ายประสาทเทียมนี้ เมื่อทำการรับค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) เข้ามาแล้วทำการคูณกับค่าน้ำหนักทั้งหมด (W) จึงค่อยบวกค่าไบแอสคงที่ (b) หลังจากนั้นนำไปเข้าฟังก์ชันการแปลง แบบซิกมอยด์ฟังก์ชัน (Sigmoid function) ผลลัพธ์ที่ได้จากฟังก์ชันการแปลงนำไปทำซ้ำอีกรอบกับค่าน้ำหนักและไบแอสคงที่ แล้วเข้าฟังก์ชันการแปลงแบบฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear function) เพื่อทำนายค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vpnn)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1.1 การหาค่าน้ำหนักที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม

การแพร่กระจายแบบย้อนกลับ (Back-propagation) เป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมวิธีหนึ่งที่ยอมรับกันมากเพื่อปรับหาค่าน้ำหนักในเส้นเชื่อมระหว่างโหนดให้เหมาะสม โดยการปรับค่าน้ำหนักนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความผิดพลาดของเอาต์พุตที่คำนวณได้และค่าเอาต์พุตที่ต้องการ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าอัตราเร็วในการเรียนรู้ $r = 0.01$

ขั้นตอนที่ 2 สำหรับแต่ละตัวอย่างอินพุตให้ทำตามขั้นตอนต่อไปนี้จนกว่าจะได้ผลลัพธ์ของเอาต์พุตใกล้เคียงกับที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 2.1 คำนวณหาค่าเอาต์พุตโดยใช้ค่าน้ำหนักเริ่มต้นซึ่งอาจได้จากการสุ่ม

ขั้นตอนที่ 2.2 คำนวณหาค่าความผิดพลาดของเอาต์พุตที่ได้กับเอาต์พุตที่ต้องการ (เป้าหมาย)

$$E_o = \frac{1}{2}(T - O_o)^2 \quad (3.1)$$

เมื่อ E_o = ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

T = เอาต์พุต (เป้าหมาย)

O_o = เอาต์พุต (นิเวรอล)

ขั้นตอนที่ 2.3 คำนวณอนุพันธ์ย่อยของ E_o เทียบกับ W_{ho}

$$\frac{\delta E_o}{\delta W_{ho}} = \gamma_o * O_h \quad (3.2)$$

ขั้นตอนที่ 2.4 คำนวณอนุพันธ์ย่อยในชั้นซ่อน

$$\frac{\delta E_o}{\delta W_{ih}} = (\gamma_o * W_{ho}) * O_h * (1 - O_h) * I \quad (3.3)$$

เมื่อ $\gamma_o = (O_o - T) * O_o * (1 - O_o)$

I = ข้อมูลอินพุต

W_{ho} = น้ำหนักระหว่างชั้นซ่อนกับชั้นเอาต์พุต

O_h = เอาต์พุตในชั้นซ่อน

ขั้นตอนที่ 2.5 คำนวณหาค่าน้ำหนักใหม่จากสมการ

$$W_{ih/ho}^+ = W_{ih/ho} - \left(r * \frac{\delta E_o}{\delta W_{ih/ho}} \right) \quad (3.4)$$

เมื่อ $W_{ih/ho}^+$ = ค่าน้ำหนักใหม่

$W_{ih/ho}$ = ค่าน้ำหนักเก่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนชั้นซ่อน 4 ชั้นทำให้มีค่าน้ำหนักจำนวน 8 ค่า (W_1-W_8) และค่าไบแอสคงที่ 5 ค่า (b_1-b_5) จากวิธีการแพร่กระจายแบบย้อนกลับ (Back-propagation) ทำให้สามารถหาค่าน้ำหนักของโครงข่ายประสาทเทียมได้ดังตารางที่ 3.4 และการคำนวณหาสมการของโครงข่ายประสาทเทียมจะแสดงการคำนวณไว้ในภาคผนวก ก.

ตารางที่ 3.4 ค่าน้ำหนัก (W) และไบแอสคงที่ (b) ที่ใช้ในระบบโครงข่ายประสาทเทียม

ค่าน้ำหนัก (W)				ค่าไบแอสคงที่ (b)			
W_1	5.6609	W_5	0.3431	b_1	-5.4970	b_5	0.0101
W_2	5.3319	W_6	0.3525	b_2	-2.6786	-	-
W_3	5.4908	W_7	0.3052	b_3	2.2629	-	-
W_4	5.5911	W_8	0.2736	b_4	5.5951	-	-

3.4.2 การออกแบบโดยใช้เทคนิคการประมาณด้วยสมการพหุนาม

การประมาณโดยใช้สมการพหุนาม (Polynomial Fitting) มีรูปแบบดังสมการที่ (3.5)

$$V_{cf} = aV_{oc}^n + bV_{oc}^{n-1} + c \quad (3.5)$$

เมื่อ V_{cf} = แรงดันที่ทำนายว่ามีกำลังไฟสูงสุด (Output) n = ดีกรีสูงสุดของสมการพหุนาม

V_{oc} = แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Input) a, b, c = ค่าสัมประสิทธิ์คงตัวของสมการพหุนาม

ขั้นตอนแรกในการใช้สมการพหุนามเพื่อทำนายแรงดันที่ทำให้กำลังไฟสูงสุดนั้น เริ่มจากการทดลองหาดีกรีที่เหมาะสมของสมการพหุนามเพื่อทำนายแรงดันไฟฟ้า โดยทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) ที่ความเร็วลม 7 ความเร็วลม ได้แก่ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 เมตร/วินาที ความเร็วลมละ 15 ตัวอย่าง และค่าแรงดันที่ทำให้กำลังสูงสุด (Vpm) หลังจากนั้นนำ Voc และ Vpm มาหาสมการพหุนามโดยทำการเปลี่ยนดีกรีพหุนามตั้งแต่ 3-6 เพื่อดูค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณโดยใช้สมการพหุนามดีกรีต่างๆ ในการสอนโดยใช้สมการพหุนามนั้นทั้งหมด 105 ตัวอย่าง ที่ความเร็วลม 7 ความเร็วลม ได้แก่ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 เมตร/วินาที ความเร็วลมละ 15 ตัวอย่าง โดยเริ่มต้นจากการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) ที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที จนกระทั่งที่ความเร็วลม 8 เมตร/วินาที แล้วนำมาทดสอบกับระบบสมการพหุนามในการทำนายแรงดันที่ทำให้กำลังไฟสูงสุด (Vcf) ส่วนการทดสอบโดยใช้สมการพหุนามนั้นทำการทดสอบทั้งหมด 90 ตัวอย่าง ที่ความเร็วลม 6 ความเร็วลม ได้แก่ 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5 เมตร/วินาที ความเร็วลมละ 15 ตัวอย่าง โดยเริ่มต้นจากการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) ที่ความเร็วลม 2.5 เมตร/วินาที จนกระทั่งที่ความเร็วลม 7.5 เมตร/วินาที แล้วจึงนำมาทดสอบกับระบบสมการพหุนามในการทำนายแรงดันที่ทำให้กำลังไฟสูงสุด (Vcf)

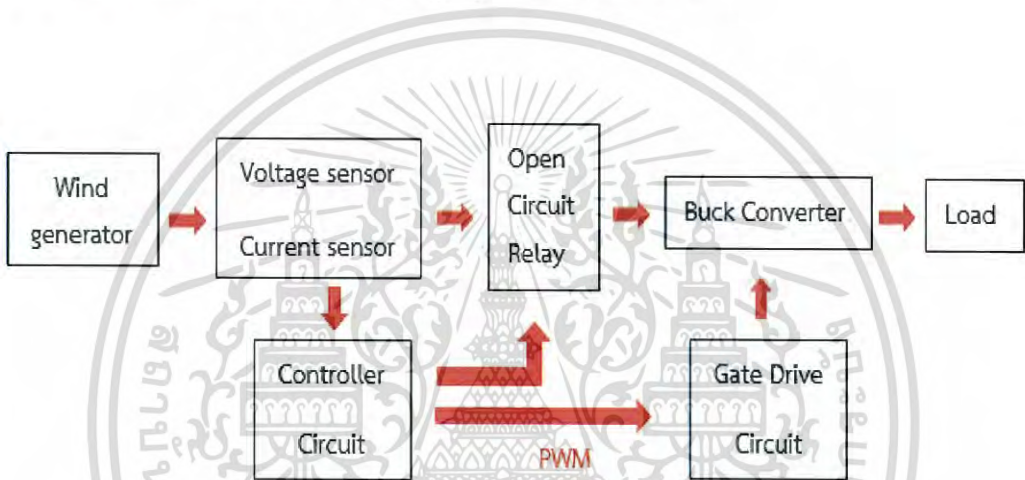
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบและสร้างชุดติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

บทนี้แสดงถึง ภาพรวมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด การออกแบบวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับตัวตัดไอเซลล์ของวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า ออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง หลักการทำงานของชุดควบคุมสำหรับการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

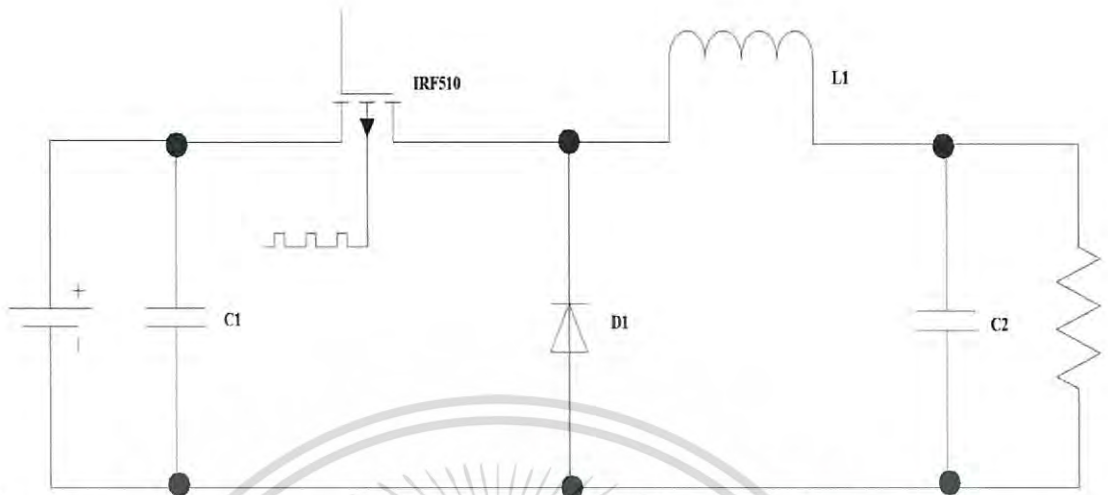
4.1 ภาพรวมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับกังหันลม



รูปที่ 4.1 ภาพรวมของชุดควบคุมที่ทำการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ชุดควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ประกอบไปด้วย เครื่องกำเนิดพลังงานลม (Wind Generator) วงจรตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า (Voltage sensor and Current sensor) วงจรรีเลย์ (Open Circuit Relay) วงจรขับเคลื่อน (Gate Drive Circuit) วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า (Buck Converter) และ โหลดตัวต้านทาน (Load) โดยเริ่มจากพลังงานลมจะทำหน้าที่ในการหมุนแกนเพลลาที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หลังจากนั้นทำการเปิดวงจรเพื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมาเป็นอินพุตให้แก่ตัวควบคุม และทำการปิดวงจรในเวลาต่อมาเพื่อตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าแล้วจึงส่งค่าให้กับบอร์ดประมวลผลเพื่อทำการส่งสัญญาณ PWM มาควบคุมวงจรทอนระดับแรงดันในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

4.2 โครงสร้างของวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของวงจรทอนระดับแรงดันโดยใช้อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้มอสเฟต (IRF 510) เนื่องจากสามารถทำงานได้ที่ย่านความถี่สูง โดยมอสเฟตจะได้รับสัญญาณพัลส์ความถี่สวิตซ์ 31 kHz

การทำงานของวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าแบ่งการทำงานออกเป็นสองโหมด คือ โหมดนำกระแสและไม่นำกระแส ในช่วงโหมดนำกระแสนั้นกระแสไฟฟ้าจะไหลจากแหล่งจ่ายไปยังมอสเฟตผ่านตัวเหนี่ยวนำและไปยังโหลด โดยที่กระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะไปเก็บอยู่ที่ตัวเก็บประจุ ส่วนในช่วงโหมดไม่นำกระแสนั้นไดโอดจะถูกไบอัสไปข้างหน้า (forward bias) ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่อง

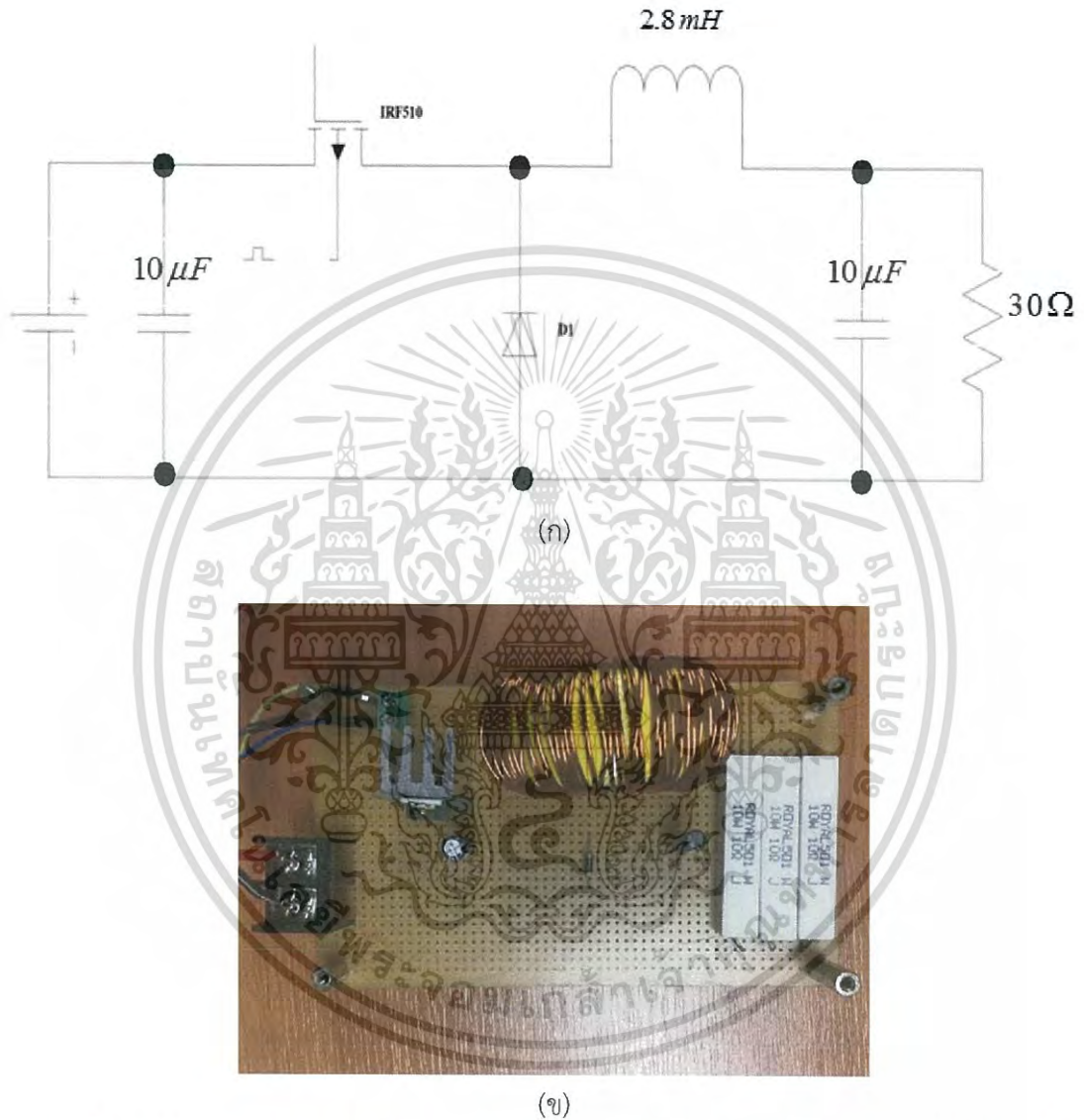
ส่วนประกอบของวงจรทอนระดับแรงดันประกอบด้วย ตัวเก็บประจุ (C1) มีหน้าที่ทำให้แรงดันเรียบก่อนจะจ่ายให้กับวงจรทอนระดับแรงดัน มอสเฟต (IRF510) เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งโดยมอสเฟตนั้นจะรับสัญญาณสวิตซ์ที่ความถี่ 31 kHz จากชุดควบคุม ตัวเหนี่ยวนำ (L1) และ ไดโอด (D1) ทำหน้าที่ให้กระแสไหลผ่านในช่วงที่อุปกรณ์สวิตซ์อยู่ในโหมดที่ไม่นำกระแสและทำหน้าที่ให้กระแสวิ่งผ่านได้อย่างต่อเนื่อง ในการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดสามารถหาได้จากสมการที่ 4.1 และการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุสามารถหาได้จากสมการที่ (4.2) ซึ่งในการทดลองจะใช้ความถี่สวิตซ์ที่ 31 kHz และโหลดความต้านทาน 30 โอห์ม ค่าระลอกคลื่นไม่เกิน 1 %

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (4.1)$$

$$C = \frac{(1-D)}{8Lf^2(0.01)} \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

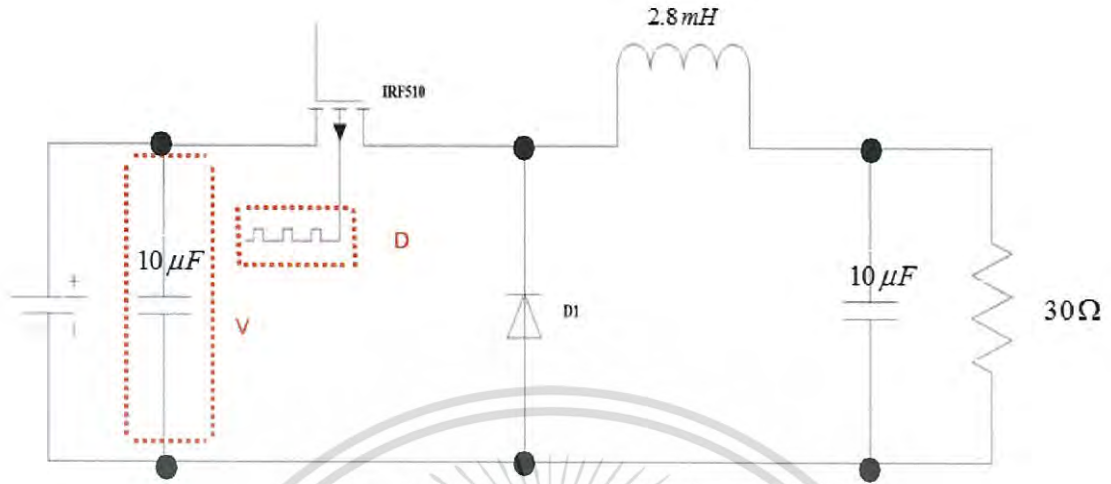
จากสมการที่ 4.1 และ 4.2 เมื่อทำการแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงไป ทำให้สามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดออกมาได้เท่ากับ 0.44 mH ซึ่งเลือกใช้ที่ 2.8 mH และคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุออกมาได้เท่ากับ $4.18 \text{ }\mu\text{F}$ ซึ่งเลือกใช้ที่ $10 \text{ }\mu\text{F}$ ได้รูปวงจรดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 โหมดการทำงานของวงจรทอนระดับแรงดัน (ก) แผนผังวงจร (ข) วงจรที่ใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับดิวตี้ไซเคิลของวงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้า

หลังจากที่ทำการออกแบบวงจรถอนระดับแรงดันแล้วในขั้นตอนต่อไปทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (V) และ ดิวตี้ไซเคิล (D) ของวงจรถอนระดับแรงดันเพื่อใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยทำการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลตั้งแต่ 0.1-0.9 เพิ่มครั้งละ 0.05 และทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ผลการทดลองที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที และ 6 เมตร/วินาที แสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

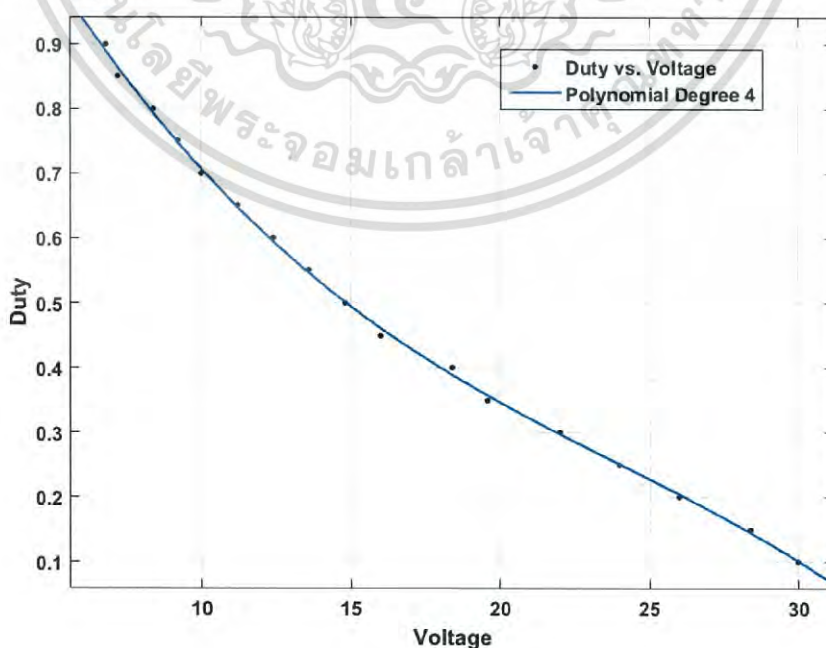
ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างดิวตี้ไซเคิลและแรงดันไฟฟ้าที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที

ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที			
ดิวตี้ไซเคิล (Duty)	แรงดันไฟฟ้า (Voltage)	ดิวตี้ไซเคิล (Duty)	แรงดันไฟฟ้า (Voltage)
0.1	30	0.55	13.6
0.15	28.4	0.6	12.4
0.2	26	0.65	11.2
0.25	24	0.7	10
0.3	22	0.75	9.2
0.35	19.6	0.8	8.4
0.4	18.4	0.85	7.2
0.45	16	0.9	6.8
0.5	14.8	-	-

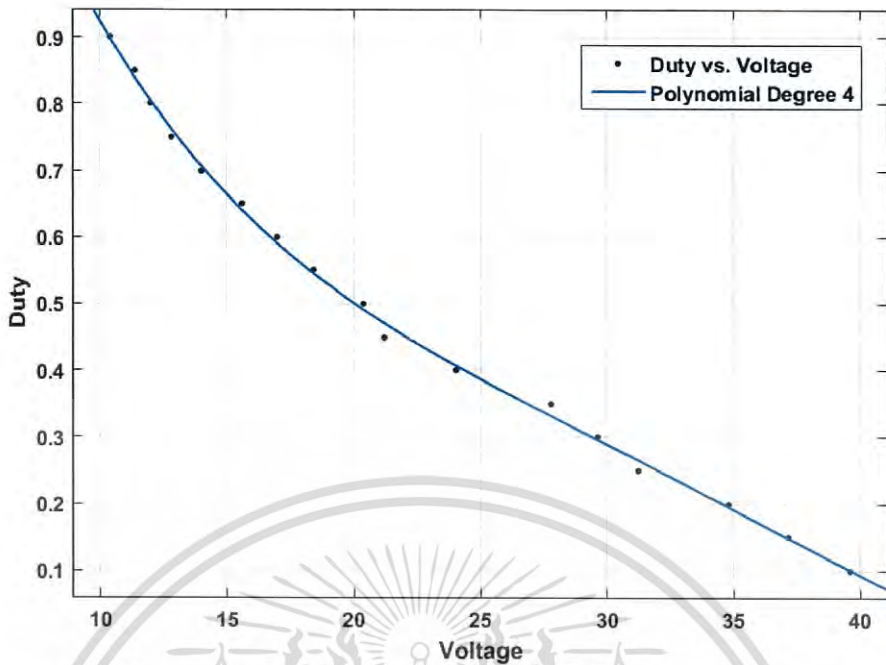
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวตัดไซเคิลและแรงดันไฟฟ้าที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที

ความเร็วลม 6 เมตร / วินาที			
ตัวตัดไซเคิล (Duty)	แรงดันไฟฟ้า (Voltage)	ตัวตัดไซเคิล (Duty)	แรงดันไฟฟ้า (Voltage)
0.1	39.6	0.55	18.4
0.15	37.2	0.6	17
0.2	34.8	0.65	15.6
0.25	31.2	0.7	14
0.3	29.6	0.75	12.8
0.35	27.8	0.8	12
0.4	24	0.85	11.4
0.45	21.2	0.9	10.4
0.5	20.4	-	-

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวตัดไซเคิลและแรงดันไฟฟ้าที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที และ 6 เมตร/วินาที พบว่าเมื่อค่าตัวตัดไซเคิลเพิ่มมากขึ้นทำให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงทั้ง 2 ความเร็วลม โดยที่ค่าตัวตัดไซเคิลเท่ากันแรงดันไฟฟ้าที่ 6 เมตร/วินาทีมีค่าสูงกว่า 5 เมตร/วินาที หลังจากนั้นนำค่าจากตารางที่ 4.1 และ 4.2 ไปหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวตัดไซเคิล (Duty) กับแรงดันไฟฟ้า (Voltage) โดยใช้สมการพหุนามดีกรี 4 ในการประมาณแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยที่สุดแสดงดังภาคผนวก ข.



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (Voltage) และ ตัวตัดไซเคิลของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระยา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (Voltage) และ ดิวตี้ไซเคิลของวงจรถอนแรงดันไฟฟ้า (Duty) ที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 เส้นสีน้ำเงินแทนสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและดิวตี้ไซเคิลที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที และ 6 เมตร/วินาที จุดสีดำแทน ค่าแรงดันไฟฟ้ากับดิวตี้ไซเคิลจากตารางที่ 4.1 และ 4.2 โดยการประมาณสมการดีกรี 4 ใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดสามารถหารูปแบบสมการได้ดังสมการ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

$$D = -3.01 \cdot 10^{-7} V^4 - 2.34 \cdot 10^{-5} V^3 + 0.002742 V^2 - 0.09748 V + 1.434 \quad (4.3)$$

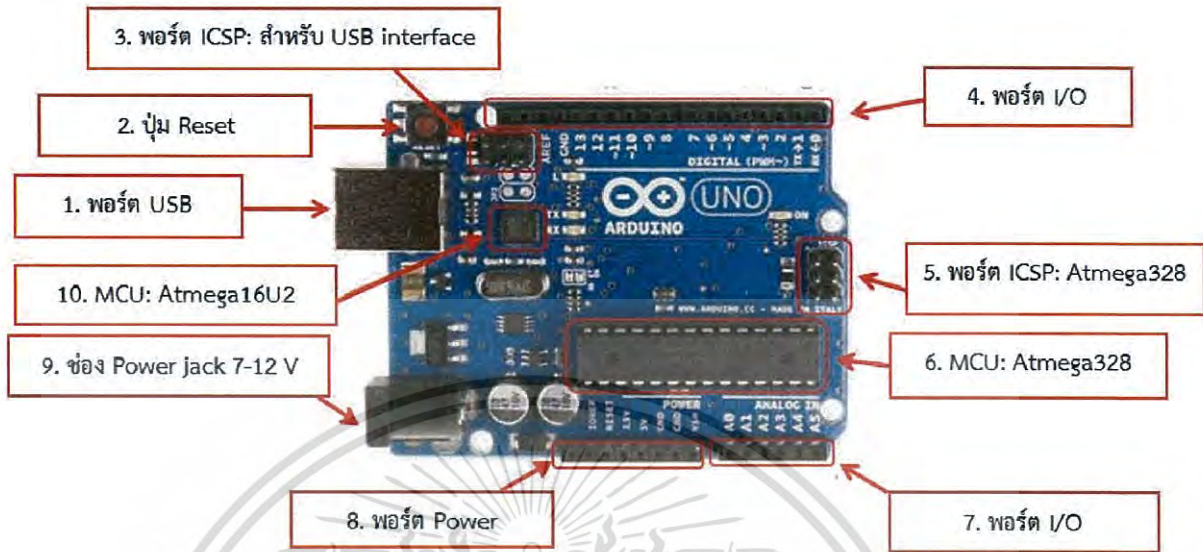
$$D = 1.018 \cdot 10^{-6} V^4 - 1.346 \cdot 10^{-4} V^3 + 0.006587 V^2 - 0.161 V + 2.001 \quad (4.4)$$

เมื่อ D = ดิวตี้ไซเคิลของวงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้า
 V = แรงดันไฟฟ้า

4.4 บอร์ดประมวลผล (Arduino UNO R3)

Arduino คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ชนิดหนึ่งซึ่งเป็นแบบที่เรียกว่า Open Hardware กล่าวคือ Arduino เราสามารถทำเองโดยใช้แบบที่มีการเปิดเผยทั่วไปก็ได้ หรือสามารถซื้อหากก็ได้ เนื่องจากมีราคาถูก มีซอฟต์แวร์ให้ใช้งานฟรี สามารถนำไปใช้งานทั่วไปหรือแบบธุรกิจได้โดยไม่ต้องเสียค่าลิขสิทธิ์ เป็นรูปแบบที่มีข้อมูลมากที่สุดบนอินเทอร์เน็ต การพัฒนาสามารถทำได้ง่าย สามารถใช้คำสั่งเขียนโปรแกรมได้เสมือนโปรแกรมภาษาขั้นสูงทั่วไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบของ Arduino UNO R3 ประกอบด้วย



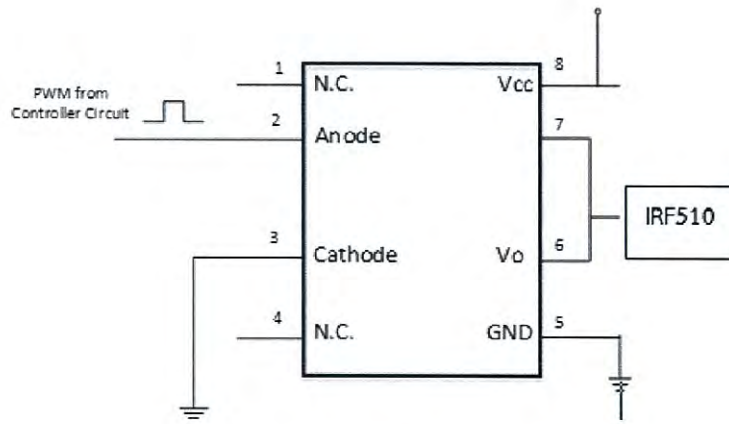
รูปที่ 4.7 ส่วนประกอบของ Arduino UNO R3

1. USB Port ต่อกับ Computer เพื่อโหลดโปรแกรมเข้า MCU และจ่ายไฟให้กับบอร์ด
2. Reset Button เป็นปุ่ม Reset ใช้กดเมื่อต้องการให้ MCU เริ่มการทำงานใหม่
3. ICSP Port ของ Atmega16U2 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Visual Com port บน Atmega16U2
4. I/O Port Digital I/O ตั้งแต่ขา D0 ถึง D13
5. ICSP Port Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Bootloader
6. MCU Atmega328 เป็น MCU ที่ใช้บนบอร์ด Arduino
7. I/O Port นอกจากเป็น Digital I/O แล้ว ยังเปลี่ยนเป็น ช่องสัญญาณอนาล็อก ตั้งแต่ขา A0-A5
8. Power Port ไฟเลี้ยงบอร์ดประกอบด้วยขาไฟเลี้ยง +3.3 V, +5V, GND, V_{in}
9. Power Jack รับไฟจาก Adapter โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V
10. MCU ของ Atmega16U2 เป็น MCU ที่ทำหน้าที่เป็น USB to Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับ Computer ผ่าน Atmega16U2

4.5 วงจรขับเคลื่อนแบบแยกกันทางไฟฟ้า (Opto Couplers)

ในการทำงานวงจรทอนระดับแรงดันจำเป็นต้องมีวงจรขับเคลื่อนเพื่อใช้ในการสวิตช์ซึ่งมอสเฟต ในช่วงที่สวิตช์ทำงาน วงจรขับเคลื่อนต้องสามารถให้พลังงานมากเพียงพอเพื่อให้สวิตช์ทำงานได้ตลอดช่วงการทำงาน (t_{on}) ในขณะที่เดียวกันวงจรขับเคลื่อนต้องสามารถไปแอสกลับเพื่อควบคุมสวิตช์ให้หยุดทำงานตลอดซึ่งวงจรขับเคลื่อนจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณเพื่อที่จะไปควบคุมการปิด-เปิดของมอสเฟต เพื่อลดความเสียหายภายในวงจรจึงใช้ไอซีเบอร์ TLP250 เป็นชนิด Opto Isolated Gate Drive มีหน้าที่แยกไฟแรงสูงกับแรงต่ำ วงจรขับเคลื่อนแสดงดังรูป 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

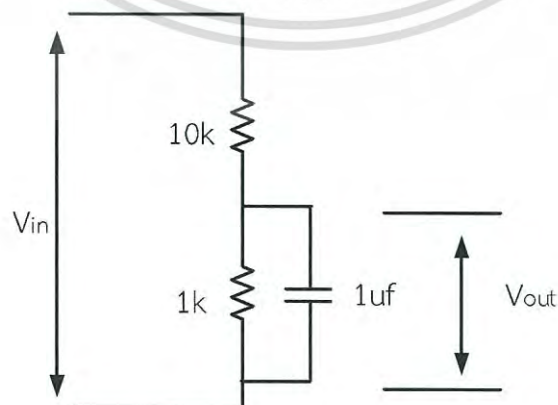


(ข)

รูปที่ 4.8 วงจรขับเคลื่อนแบบแยกกันทางไฟฟ้า (ก) แผนผังวงจร (ข) วงจรที่ทำการทดลอง

4.6 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider)

หลักการตรวจจับแรงดันไฟฟ้านั้นใช้วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider) ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่าความต้านทานในวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า สำหรับวัดสัญญาณแรงดันที่ใช้เป็นอินพุต (V_{in}) ให้กับตัวควบคุม โดยมีขนาดแรงดันขาเข้าสูงสุด 55 โวลต์ ต้องการแรงดันขาออกสำหรับบอร์ดควบคุม 0-5 โวลต์ แทนค่าในสมการที่ (3.4)

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad (4.5)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{5V}{55V} \quad (4.6)$$

ดังนั้นในงานวิจัยนี้เลือกใช้ $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ และ $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ ทำให้สามารถทำการวัดแรงดันขาเข้าได้สูงสุดประมาณ 55 โวลต์

4.7 เซนเซอร์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า (Current Sensor)

การวัดกระแสไฟฟ้าโดยใช้ไอซีตรวจจับกระแส ทำการวัดสัญญาณโดยใช้ Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC (ACS712) ทำงานโดยอาศัยผลจาก Hall Effect เปลี่ยนค่ากระแสให้เป็นแรงดันไฟฟ้า รูป เซนเซอร์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า (Current Sensor) ดังรูปที่ 4.10

4.8 รีเลย์สำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open Circuit Relay)

ทำการต่อวงจรรีเลย์เพื่อทำการเปิดวงจรออกแล้วทำการวัดแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรในช่วงแรกเพื่อมาทำการวิเคราะห์หลังจากนั้นทำการปิดวงจรเพื่อทำการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด รีเลย์สำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open Circuit Relay) ดังรูปที่ 4.11

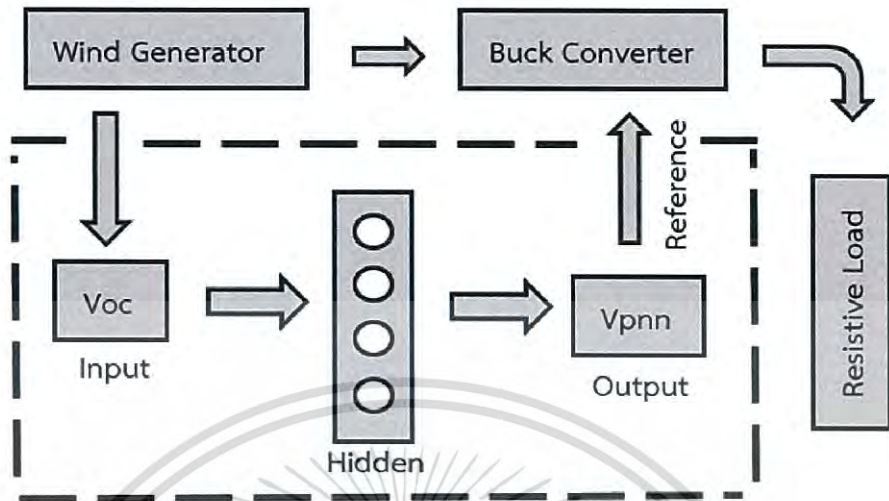


รูปที่ 4.10 เซนเซอร์ที่ไว้สำหรับตรวจจับกระแส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูป 4.11 รีเลย์ที่ทำการตัดต่อวงจรไฟฟ้าให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 หลักการทำงานของชุดควบคุม



ANN & Polynomial Fitting

รูปที่ 4.12 โครงสร้างของระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของทั้ง 2 เทคนิค

จากรูปที่ 4.12 เริ่มจากการนำค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) และค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{pm} , Target) ที่ได้จากกังหันลมขนาดเล็ก (Wind Generator) มาเป็นข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตให้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และเทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนาม (Polynomial) เพื่อทำนายค่าแรงดันไฟฟ้า (V_{pnn} , V_{cf}) แล้วนำมาเป็นสัญญาณอ้างอิง (Reference) ให้กับวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า (Buck Converter) เพื่อทำการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

การประมวลผลของโปรแกรมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และ การประมาณด้วยสมการพหุนามนั้น (Polynomial Fitting)

1. เปิดวงจรไฟฟ้าเพื่อทำการวัดแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับกังหันลม รอจนกระทั่งค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีค่าเสถียรแล้วจึงทำการปิดวงจรไฟฟ้า
2. นำค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรที่ทำการวัดได้เข้าสู่ขั้นตอนประมวลผลเพื่อทำนายค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยในแต่ละเทคนิคผลลัพธ์ที่เกิดจากการทำนายจะมีค่าที่แตกต่างกัน
3. นำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทำนายไปคำนวณหาตัวชี้วัดประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดัน
4. ค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่ได้จะถูกส่งจากบอร์ดควบคุมไปหาวงจรเกตไดร์ฟของมอสเฟต
5. เซนเซอร์ทำการวัดกระแส และ แรงดันไฟฟ้า เพื่อนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

บทนี้แสดงถึง ผลการทำนายแรงดันไฟฟ้าด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมและการทำนายด้วยสมการพหุนาม วงจรและขั้นตอนการทดลอง ผลการทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยโครงข่ายประสาทเทียมและการใช้สมการพหุนาม เปรียบเทียบผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

5.1 ผลการทำนายแรงดันไฟฟ้าด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม

ขั้นแรกของการนำข้อมูลเข้าระบบโครงข่ายประสาทเทียมนั้นต้องมีการแปลงค่าข้อมูล (Normalization) ให้อยู่ในช่วง $[-1, 1]$ ตามการเลือกฟังก์ชันการแปลงแบบ hyperbolic tangent โดยมีสมการแปลงดังสมการที่ (5.1) หลังจากนั้นเมื่อโครงข่ายประสาทเทียมทำนายค่าแรงดันไฟฟ้าแล้วต้องทำการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้ากลับมาให้อยู่ในช่วงปกติ โดยมีสมการแปลงดังสมการที่ (5.2)

$$V_{oc}^* = \frac{\left(V_{oc\max}^* - V_{oc\min}^* \right) * (V_{oc} - V_{oc\min}^*)}{\left(V_{oc\max}^* - V_{oc\min}^* \right)} + V_{oc\min}^* \quad (5.1)$$

$$V_{pnn}^* = \frac{\left(V_{pnn\max}^* - V_{pnn\min}^* \right) * (V_{pnn} - V_{pnn\min}^*)}{\left(V_{pnn\max}^* - V_{pnn\min}^* \right)} + V_{pnn\min}^* \quad (5.2)$$

เมื่อ $V_{oc\max}^* = 1$ $V_{oc\min}^* = -1$ $V_{oc\max} = 52.52$ $V_{oc\min} = 8.34$

$V_{pnn\max} = 45.17$ $V_{pnn\min} = 2.75$ $V_{pnn\min}^* = -1$ $V_{pnn\max}^* = 1$

$V_{oc} =$ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร $V_{pnn} =$ แรงดันไฟฟ้าจากโครงข่ายประสาทเทียม

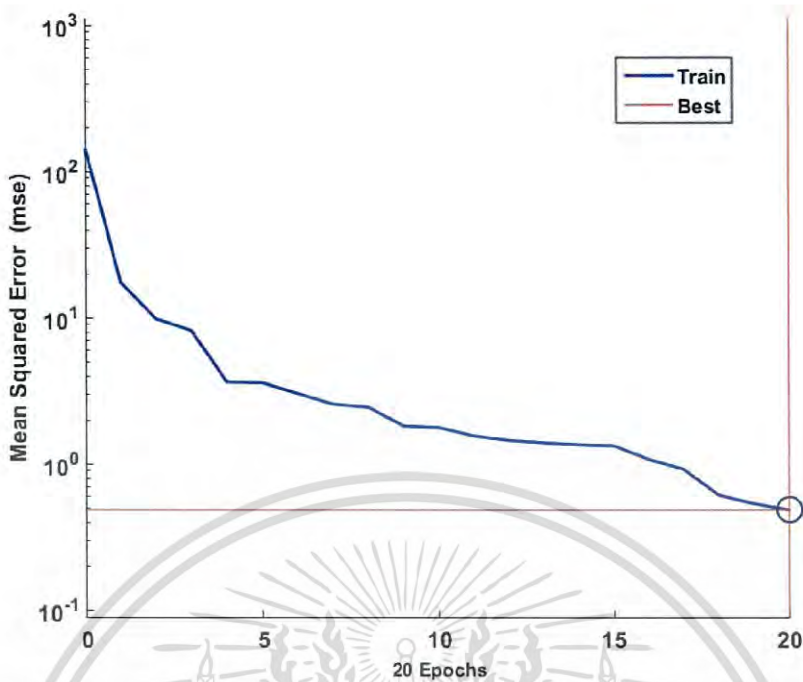
$V_{pnn}^* =$ แรงดันไฟฟ้าออร์มัลไลซ์จากโครงข่ายประสาทเทียม $V_{oc}^* =$ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรออร์มัลไลซ์

แทนค่าพารามิเตอร์ลงในสมการที่ (5.1) และ (5.2) จะได้สมการที่ (5.3) และ (5.4)

$$V_{oc}^* = [0.04757 * (V_{oc} - 8.32)] - 1 \quad (5.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $V_{pnn}^* = [22.205 * (V_{pnn} + 1)] + 2.75$ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (5.4) ค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (mse) จำนวน 20 รอบจากการสอน (Train) ทั้งหมด 105 ตัวอย่างโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

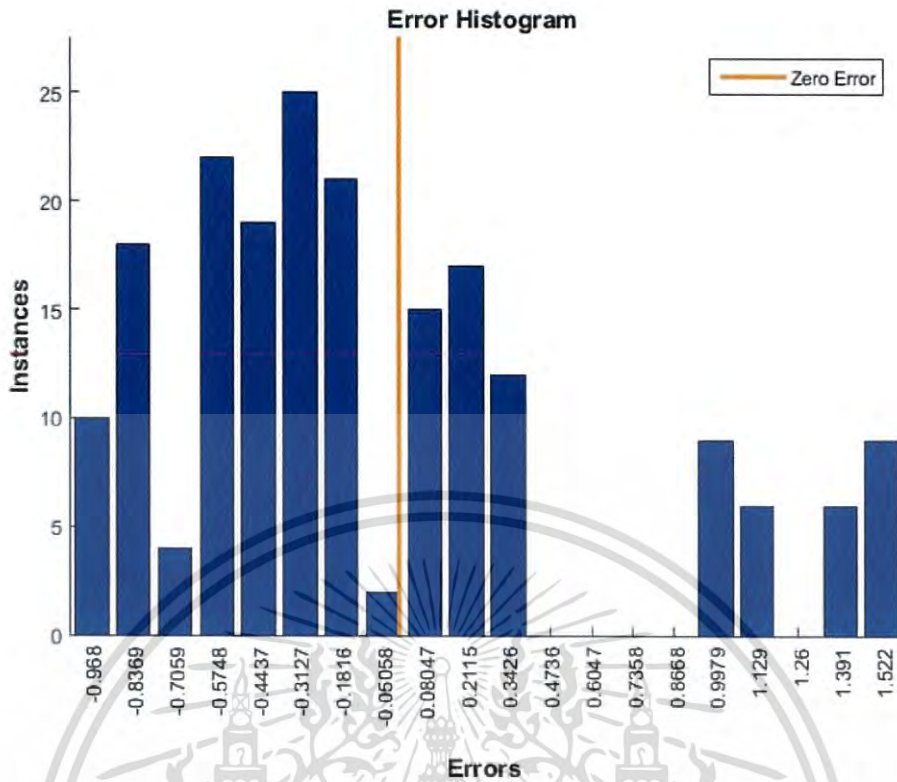
ในการสอนโครงข่ายประสาทเทียมนั้นทำการสอนทั้งหมด 105 ตัวอย่าง ที่ความเร็วลม 7 ความเร็วลม ได้แก่ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 เมตร/วินาที ความเร็วลมละ 15 ตัวอย่าง โดยเริ่มต้นจากการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) ที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที จนกระทั่งที่ความเร็วลม 8 เมตร/วินาที หลังจากนั้นนำค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมาทำการนอร์มัลไลซ์ (Normalize) เพื่อให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรอยู่ในช่วง $[-1, 1]$ แล้วจึงนำมาเป็นข้อมูลอินพุตให้แก่ระบบโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vpnn)

จากรูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (mse) ในการสอนโครงข่ายประสาทเทียม กับ จำนวนรอบที่ใช้ในการสอน (Epochs) โดยเส้นสีน้ำเงินแทนค่าความผิดพลาดในการสอนโครงข่ายประสาทเทียม (Train) ตั้งแต่ 0-20 รอบ เส้นสีแดงแทนค่าความผิดพลาดที่น้อยสุดในการสอนโครงข่ายประสาทเทียม (Best) พบว่าการสอนในรอบแรกนั้นมีค่าความผิดพลาดถึง 100 และลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งรอบที่ 20 มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองอยู่ที่ 0.4867

ตารางที่ 5.1 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองจากการสอนและการทดสอบในแต่ละความเร็วลม

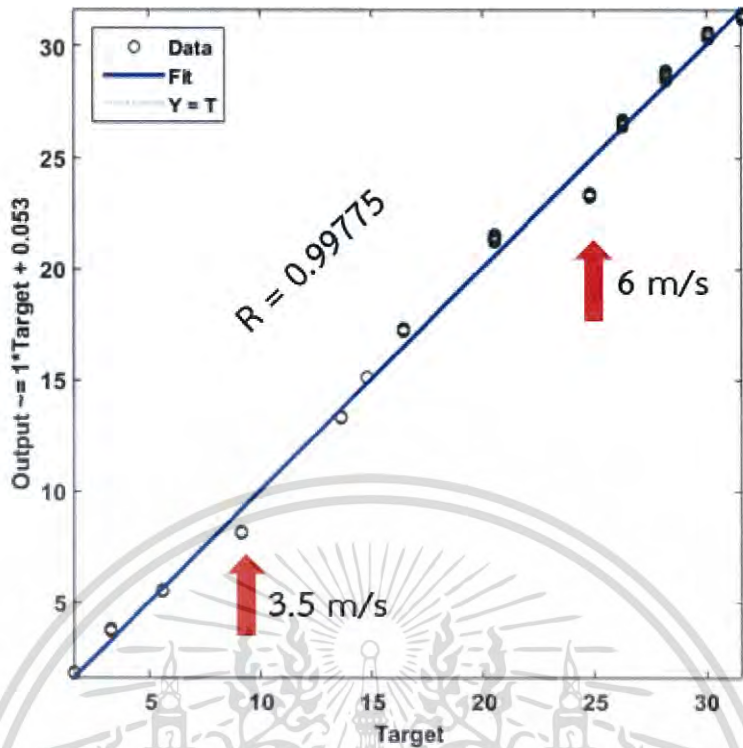
Train (การสอน)		Test (การทดสอบ)	
ความเร็วลม (m/s)	ค่าความผิดพลาด (mse)	ความเร็วลม (m/s)	ค่าความผิดพลาด (mse)
2	0.0385	2.5	0.2418
3	0.0021	3.5	1.0920
4	0.0840	4.5	0.1104
5	0.7399	5.5	0.7932
6	2.2001	6.5	0.0744
7	0.2940	7.5	0.2472
8	0.0476	-	-
รวม	0.4867	รวม	0.4264

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (mse) ของโครงข่ายประสาทเทียมที่ความเร็วลม 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 (การสอน) และความเร็วลม 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5 (การทดสอบ) ทั้งหมด 195 ตัวอย่าง ความเร็วลมละ 15 ตัวอย่าง เพื่อทำนายแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด จากตารางที่ 5.1 พบว่า การทำนายแรงดันโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองของการสอนมากกว่าการทดสอบอยู่ 0.07 ซึ่งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองจากการสอนทั้งหมดอยู่ที่ 0.4867 และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองจากทดสอบทั้งหมดอยู่ที่ 0.4264 ในการสอนค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองที่เกิดขึ้นสูงสุดและน้อยสุด คือความเร็วลมที่ 6 เมตร/วินาที และ 3 เมตร/วินาทีตามลำดับ มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองเท่ากับ 2.2001 และ 0.0021 ตามลำดับ ในส่วนของการทดสอบค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองที่เกิดขึ้นสูงสุดและน้อยสุด คือความเร็วลมที่ 3.5 เมตร/วินาที และ 6.5 เมตร/วินาทีตามลำดับ มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองเท่ากับ 1.0920 และ 0.0744 ตามลำดับ



รูปที่ 5.2 ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น (Error) ของตัวอย่างทั้งหมด (Instances) 195 ตัวอย่างที่เกิดขึ้นในการสอนและการทดสอบโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

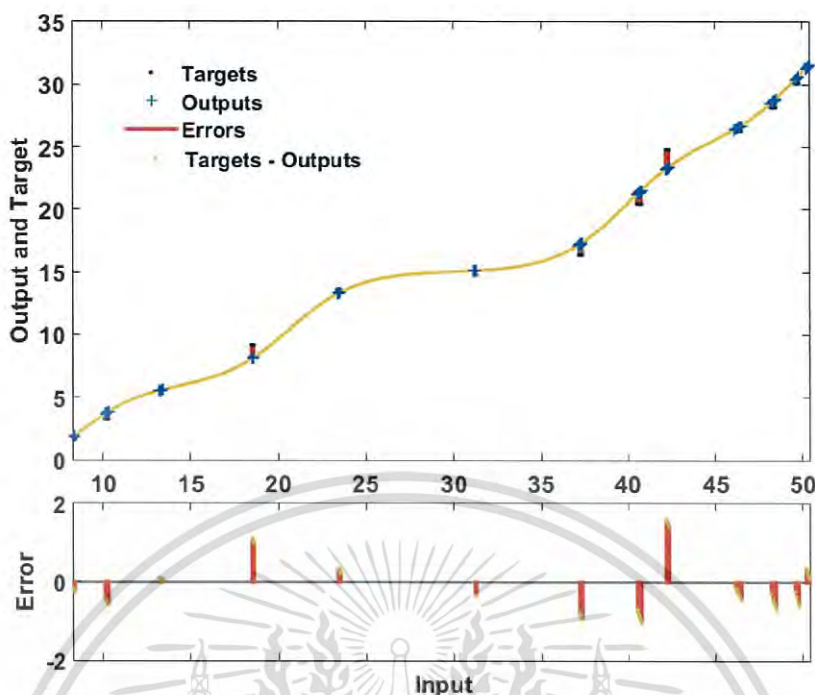
รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากตัวอย่างทั้งหมด 195 ตัวอย่างที่เกิดขึ้นในการสอนและการทดสอบโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม โดยแท่งสีน้ำเงินแทนจำนวนของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นแต่ละค่าความผิดพลาด และเส้นสีเหลืองแทนเส้นที่มีค่าความผิดพลาดเป็น 0 พบว่าค่าความผิดพลาดรวมทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการใช้โครงข่ายประสาทเทียมมีค่า 0.46 โดยส่วนใหญ่มีค่าความผิดพลาดเป็นลบ ซึ่งหมายความว่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทำนายมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าเป้าหมาย และที่ความผิดพลาดเท่ากับ -0.3127 มีจำนวนเกิดขึ้นทั้งหมด 25 ตัวอย่างจากตัวอย่างทั้งหมด 195 ตัวอย่าง โดยค่าความผิดพลาดที่มากที่สุดอยู่ที่ 1.522 เกิดขึ้นทั้งหมด 8 ตัวอย่าง และค่าความผิดพลาดที่น้อยสุดอยู่ที่ -0.05058 เกิดขึ้นทั้งหมด 2 ตัวอย่าง



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าจากการทำนายโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Output) และแรงดันไฟฟ้าเป้าหมาย (Target)

เส้นสีน้ำเงินแทนสมการความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าจากการทำนายและแรงดันไฟฟ้าเป้าหมาย วงกลมแทนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าจากการทำนายของโครงข่ายประสาทเทียม และแรงดันไฟฟ้าเป้าหมายที่ โดยจากซ้ายไปขวาแทนความเร็วลมตั้งแต่ 2–8 เมตร/วินาที เพิ่มขึ้นทีละ 0.5 เมตร/วินาที ค่า R แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทำนายของโครงข่ายประสาทเทียม (Output) และเป้าหมาย (Target) ซึ่งถ้า R เข้าใกล้ 1 หมายความว่า มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นระหว่างการทำนาย และเป้าหมาย แต่ถ้า R เข้าใกล้ 0 หมายความว่า ความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างการทำนาย และเป้าหมาย

จากรูปที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่า แรงดันไฟฟ้าจากการทำนาย และแรงดันไฟฟ้าเป้าหมายนั้นมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นตามเส้นสีน้ำเงิน โดยที่ความเร็วลม 3.5 และ 6 เมตร/วินาที พบว่าจุดวงกลมห่างจากเส้นสีน้ำเงินมากกว่าจุดวงกลมวงอื่นๆ แต่ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองมีค่าเพียง 1.09 และ 2.20 ตามลำดับโดยอ้างอิงจากรายที่ 5.1 ซึ่งความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าจากการทำนายและแรงดันเป้าหมายจากโครงข่ายประสาทเทียมนี้ (R) เท่ากับ 0.99775

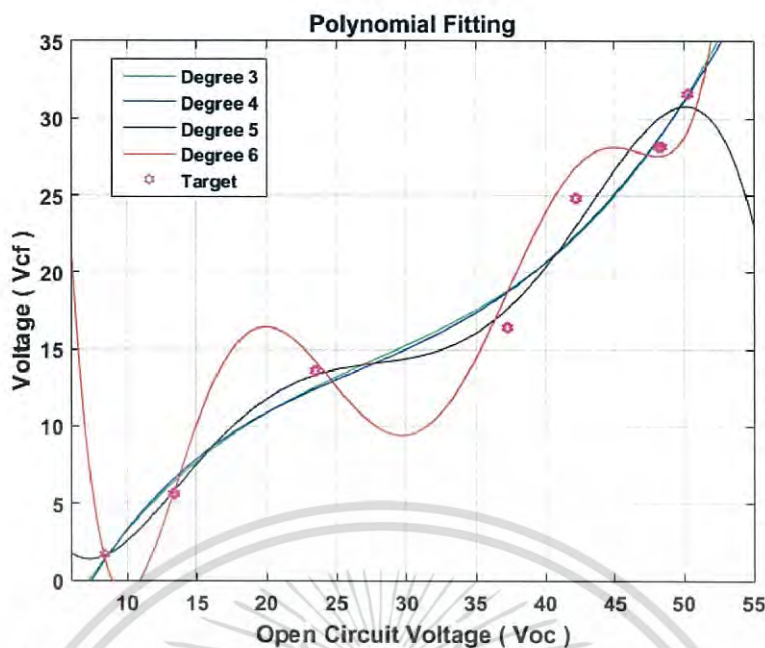


รูปที่ 5.4 กราฟรูปบนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Input) และค่าแรงดันไฟฟ้าจากการทำนายโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Output) กับค่าแรงดันไฟฟ้าเป้าหมาย (Target) กราฟรูปล่างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Input) และค่าความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้าจากการทำนายและค่าแรงดันไฟฟ้าเป้าหมาย

จากรูปที่ 5.4 จุดตัวแทนค่าแรงดันไฟฟ้าเป้าหมาย (Target) เครื่องหมายบวกแทนค่าแรงดันจากการประมาณโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Output) เส้นสีแดงแทนค่าความผิดพลาด (Error)จากการทำนายและเป้าหมาย จุดเขียวแทนความผิดพลาดจากการทำนายและเป้าหมาย จากรูปที่ 5.5 พบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีค่ามาก (ความเร็วลมสูง) มีความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้ามากกว่า แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรน้อย (ความเร็วลมต่ำ)

5.2 ผลการทำนายแรงดันไฟฟ้าจากการประมาณโดยใช้สมการพหุนาม

ขั้นตอนแรกในการใช้สมการพหุนามเพื่อทำนายแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้น เริ่มจากการทดลองหาดีกรีที่เหมาะสมของสมการพหุนามเพื่อทำนายแรงดันไฟฟ้า โดยทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) ที่ความเร็วลม 7 ความเร็วลม ได้แก่ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ความเร็วลมละ 15 ตัวอย่าง และค่าแรงดันที่ทำให้กำลังสูงสุด (Vpm) หลังจากนั้นนำ Voc และ Vpm มาหาสมการพหุนามโดยทำการเปลี่ยนดีกรีพหุนามตั้งแต่ 3-6 เพื่อดูค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณโดยใช้สมการพหุนามดีกรีต่างๆ



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) และแรงดันไฟฟ้าจากการทำนาย (Vcf) โดยใช้สมการพหุนามที่ดีกรีต่างๆ

จากรูปที่ 5.5 วงกลมสีชมพูแทนค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Target) เส้นสีเขียวแทนสมการพหุนามดีกรี 3 เส้นสีน้ำเงินแทนสมการพหุนามดีกรี 4 เส้นสีดำแทนสมการพหุนามดีกรี 5 เส้นสีแดงแทนสมการพหุนามดีกรี 6 พบว่าทั้ง 4 สมการมีความใกล้เคียงกับ Target จึงทำการหาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (mse) ที่เกิดขึ้นในแต่ละดีกรีดังตารางที่ 3.5 จึงทำให้ทราบว่าดีกรีที่เหมาะสมที่สุดของสมการพหุนามเพื่อการทำนายแรงดัน คือ สมการพหุนามดีกรี 5 ดังสมการที่ (5.3)

ตารางที่ 5.2 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (mse) จากการเปลี่ยนดีกรีของสมการพหุนาม

ดีกรีของสมการพหุนาม (Degree)	ค่าความผิดพลาด (mse)
3	1.9992
4	1.9866
5	1.2967
6	1.4273

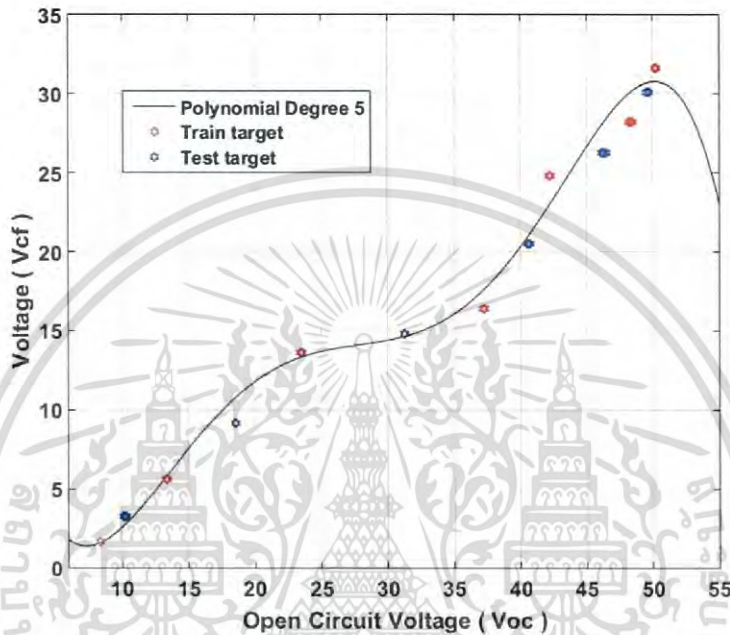
จากตารางที่ 5.2 พบว่า การใช้สมการพหุนามดีกรี 3 - 6 ในการทำนายแรงดันไฟฟ้านั้นมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (mse) อยู่ที่ 1.9992 1.9866 1.2967 1.4273 ตามลำดับ ซึ่งการประมาณโดยใช้สมการพหุนามดีกรี 5 มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด คือ 1.2967 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ดีกรี 5 ในการทำนายแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยรูปแบบสมการเอกส่าเป็นไปดังสมการที่ 5.3

นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{cf} = -4.257 \cdot 10^{-6} V_{oc}^5 + 6.024 \cdot 10^{-4} V_{oc}^4 - 0.03092 V_{oc}^3 + 0.6994 V_{oc}^2 - 6.134 V_{oc} + 19.29 \quad (5.3)$$

เมื่อ V_{oc} = แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร

V_{cf} = แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

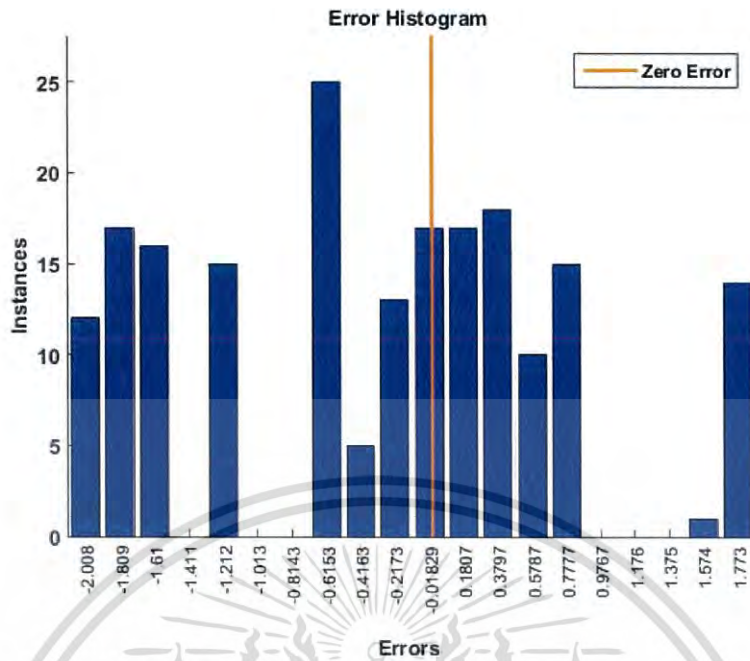


รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) และแรงดันที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการพหุนามดีกรี 5 (Vcf)

จากรูปที่ 5.6 เส้นสีดำแทนสมการพหุนามดีกรี 5 วงกลมสีแดงแทนค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการสอน (Train target) เริ่มที่ความเร็วลม 2-8 เมตร/วินาที (ซ้ายไปขวา) เพิ่มครั้งละ 1 เมตร/วินาที วงกลมสีน้ำเงินแทนค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ (Test target) เริ่มที่ความเร็วลม 2.5-7.5 เมตร/วินาที (ซ้ายไปขวา) เพิ่มครั้งละ 1 เมตร/วินาที

ในการสอนโดยใช้การประมาณโดยใช้สมการพหุนามนั้นทั้งหมด 105 ตัวอย่าง ที่ความเร็วลม 7 ความเร็วลม ได้แก่ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 เมตร/วินาที ความเร็วลมละ 15 ตัวอย่าง โดยเริ่มต้นจากการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) ที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที จนกระทั่งที่ความเร็วลม 8 เมตร/วินาที แล้วนำมาทดสอบกับระบบสมการพหุนามในการทำนายแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vcf) ส่วนการทดสอบโดยใช้การประมาณโดยใช้สมการพหุนามนั้นทำการทดสอบทั้งหมด 90 ตัวอย่าง ที่ความเร็วลม 6 ความเร็วลม ได้แก่ 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5 เมตร/วินาที ความเร็วลมละ 15 ตัวอย่าง โดยเริ่มต้นจากการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) ที่ความเร็วลม 2.5 เมตร/วินาที จนกระทั่งที่ความเร็วลม 7.5 เมตร/วินาที แล้วจึงนำมาทดสอบกับระบบสมการพหุนามในการทำนายแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vcf)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น (Error) ของตัวอย่างทั้งหมด (Instances) 195 ตัวอย่างที่เกิดขึ้นในการสอนและการทดสอบโดยใช้เทคนิคการประมาณสมการพหุนาม

รูปที่ 5.7 แท่งสีน้ำเงินแทนจำนวนของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นแต่ละค่าความผิดพลาด และเส้นสีเหลืองแทนเส้นที่มีค่าความผิดพลาดเป็น 0 จากรูปที่ 5.8 พบว่าค่าความผิดพลาดรวมทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการใช้โครงข่ายประสาทเทียมมีค่า 2.5 โดยที่ความผิดพลาดเท่ากับ -0.3127 มีจำนวนเกิดขึ้นทั้งหมด 25 ตัวอย่าง โดยค่าความผิดพลาดที่มากที่สุดอยู่ที่ -2.008 เกิดขึ้นทั้งหมด 12 ตัวอย่าง และค่าความผิดพลาดที่น้อยสุดอยู่ที่ -0.01829 เกิดขึ้นทั้งหมด 2 ตัวอย่าง

ตารางที่ 5.3 ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแต่ละความเร็วลมและค่าความผิดพลาดรวมทั้งหมด

Train (การสอน)		Test (การทดสอบ)	
ความเร็วลม (m/s)	ค่าความผิดพลาด(mse)	ความเร็วลม (m/s)	ค่าความผิดพลาด (mse)
2	0.0035	2.5	0.2742
3	0.0371	3.5	2.6118
4	0.0840	4.5	0.0270
5	1.5505	5.5	0.3294
6	3.0464	6.5	3.4824
7	3.6484	7.5	0.3996
8	0.7049	-	-
รวม	1.2967	รวม	1.1873

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (mse) ของเทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนามที่ความเร็วลม 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 (การสอน) และความเร็วลม 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5 (การทดสอบ) ทั้งหมด 195 ตัวอย่าง ความเร็วลมละ 15 ตัวอย่าง เพื่อทำนายแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด จากตารางที่ 5.2 พบว่า การทำนายแรงดันโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองของการสอนมากกว่าการทดสอบอยู่ 0.11 ซึ่งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองจากการสอนทั้งหมดอยู่ที่ 1.2967 และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองจากทดสอบทั้งหมดอยู่ที่ 1.1873 ในการสอนค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองที่เกิดขึ้นสูงสุดและน้อยสุด คือความเร็วลมที่ 7 เมตร/วินาที และ 2 เมตร/วินาทีตามลำดับ ในส่วนของการทดสอบค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองที่เกิดขึ้นสูงสุดและน้อยสุด คือความเร็วลมที่ 6.5 เมตร/วินาที และ 4.5 เมตร/วินาทีตามลำดับ

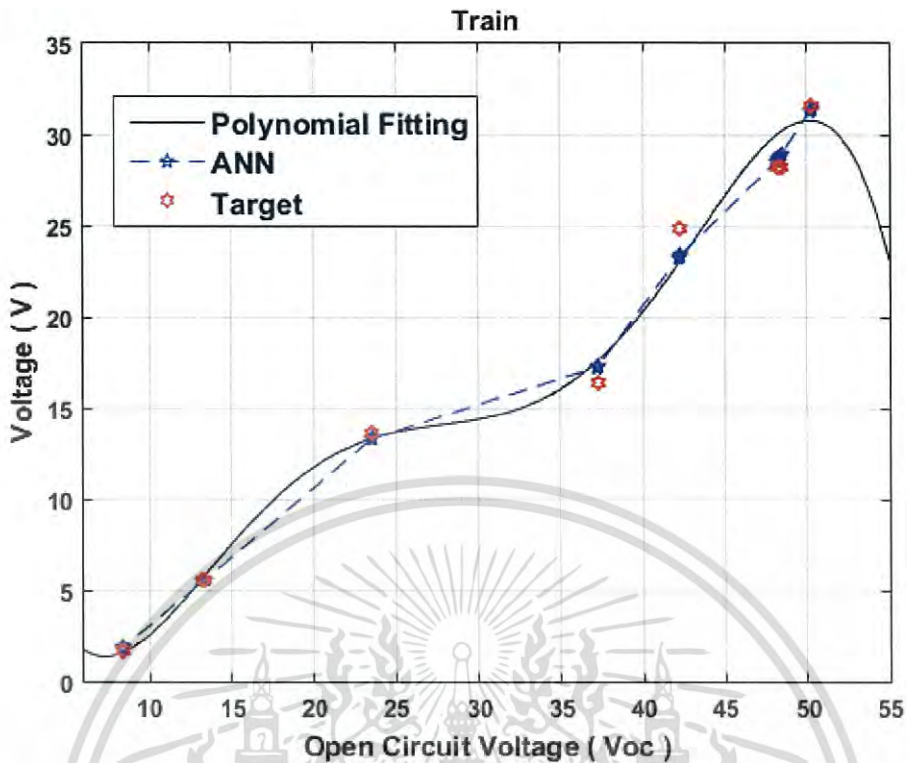
5.3 การเปรียบเทียบผลการทำนายของทั้ง 2 เทคนิค

ทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าจากการทำนายของเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม(ANN) และเทคนิคการประมาณด้วยสมการพหุนามดีกรี 5 (Polynomial) แสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (mse) ที่เกิดขึ้นดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (mse) จากการทำนายแรงดันไฟฟ้าจากทั้ง 2 เทคนิค

เทคนิค	การสอน (Train)	การทดสอบ (Test)
โครงข่ายประสาทเทียม (ANN)	0.4867	0.4264
สมการพหุนาม (Polynomial)	1.2967	1.0177

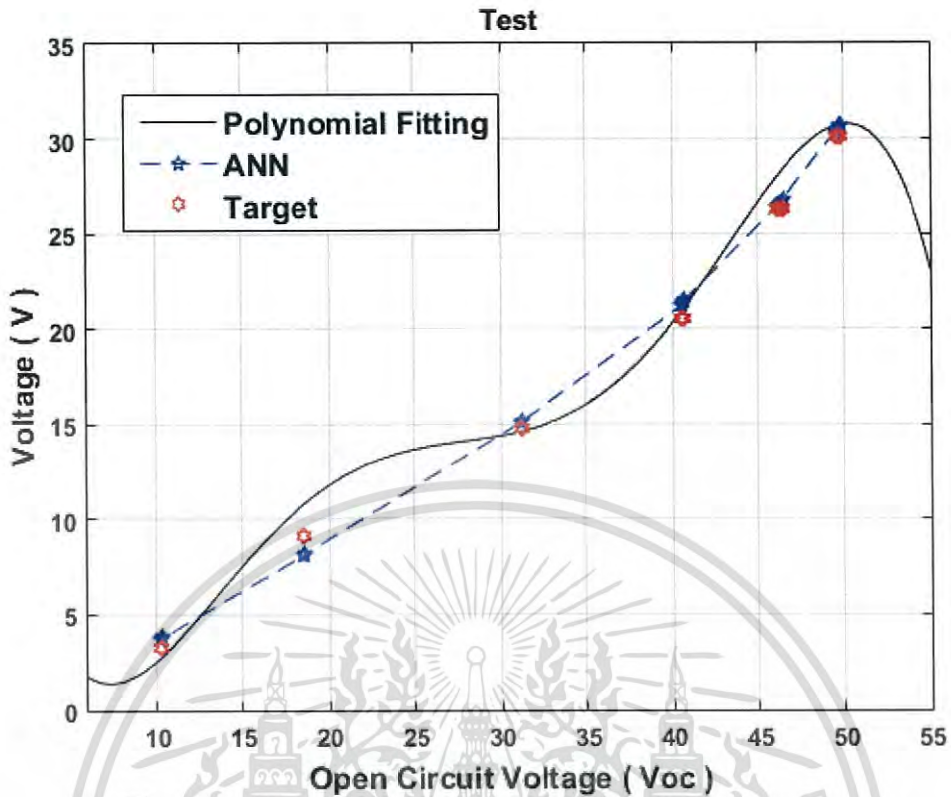
ตารางที่ 5.4 แสดงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการทำนายแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมในการสอน (Train) และการทดสอบ (Test) และเทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนามในการสอน (Train) และการทดสอบ (Test) จากตารางพบว่า การทำนายโดยใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมนั้นมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (mse) น้อยกว่าเทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนาม โดยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการสอนและการทดสอบของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่า 0.4867 และ 0.4264 ส่วนค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการสอนและการทดสอบของสมการพหุนามมีค่า 1.2967 และ 1.0177



รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าจากการทำนายของเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และเทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนามดีกรี 5 (Polynomial) จากการสอน (Train)

จากรูปที่ 5.8 เส้นสีดำแทนแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณโดยใช้สมการพหุนามดีกรี 5 (Vcf) เส้นประสีน้ำเงินแทนแรงดันไฟฟ้าจากการทำนายของโครงข่ายประสาทเทียม วงกลมสีแดงแทนแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Target) โดยทำการเปรียบเทียบที่ความเร็วลม 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 เมตร/วินาที (การสอน) ทั้งหมด 195 ตัวอย่าง ความเร็วลมละ 15 ตัวอย่าง จากซ้ายไปขวาเริ่มต้นจาก 2 เมตร/วินาที จนถึง 8 เมตร/วินาที เพิ่มทีละ 1 เมตร/วินาที จากรูปที่ 5.9 พบว่าที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที ค่าความผิดพลาดจากการทำนายของโครงข่ายประสาทเทียม และสมการพหุนามมีค่า 0.0385 และ 0.0035 ตามลำดับ ที่ความเร็วลม 3 เมตร/วินาที มีค่าความผิดพลาด 0.0021 และ 0.0371 ตามลำดับ ที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที มีค่าความผิดพลาด 0.0840 และ 0.0840 ตามลำดับ ที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที มีค่าความผิดพลาด 0.7399 และ 1.5505 ตามลำดับ ที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที มีค่าความผิดพลาด 2.2001 และ 3.0464 ตามลำดับ ที่ความเร็วลม 7 เมตร/วินาที มีค่าความผิดพลาด 0.2940 และ 3.6484 ตามลำดับ ที่ความเร็วลม 8 เมตร/วินาที มีค่าความผิดพลาด 0.0476 และ 0.7049 ตามลำดับ โดยค่าความผิดพลาดรวมเท่ากับ 0.4867 และ 1.2967 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าจากการทำนายของเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และเทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนามดีกรี 5 (Polynomial) จากการทดสอบ (Test)

จากรูปที่ 5.9 เส้นสีดำแทนแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณโดยใช้สมการพหุนามดีกรี 5 (Vcf) เส้นประสีน้ำเงินแทนแรงดันไฟฟ้าจากการทำนายของโครงข่ายประสาทเทียม วงกลมสีแดงแทนแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Target) โดยทำการเปรียบเทียบที่ความเร็วลม 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5 เมตร/วินาที (การสอน) ทั้งหมด 195 ตัวอย่าง ความเร็วลมละ 15 ตัวอย่าง จากซ้ายไปขวา เริ่มต้นจาก 2.5 เมตร/วินาที จนถึง 7.5 เมตร/วินาที เพิ่มทีละ 1 เมตร/วินาที จากรูปที่ 5.10 พบว่าที่ความเร็วลม 2.5 เมตร/วินาที ค่าความผิดพลาดจากการทำนายของโครงข่ายประสาทเทียม และสมการพหุนามมีค่า 0.2418 และ 0.2742 ตามลำดับ ที่ความเร็วลม 3.5 เมตร/วินาที มีค่าความผิดพลาด 1.0920 และ 2.6118 ตามลำดับ ที่ความเร็วลม 4.5 เมตร/วินาที มีค่าความผิดพลาด 0.1104 และ 0.0270 ตามลำดับ ที่ความเร็วลม 5.5 เมตร/วินาที มีค่าความผิดพลาด 0.7932 และ 0.3294 ตามลำดับ ที่ความเร็วลม 6.5 เมตร/วินาที มีค่าความผิดพลาด 0.0744 และ 3.4824 ตามลำดับ ที่ความเร็วลม 7.5 เมตร/วินาที มีค่าความผิดพลาด 0.2472 และ 0.3996 ตามลำดับ โดยค่าความผิดพลาดรวมเท่ากับ 0.4264 และ 1.1873 ตามลำดับ

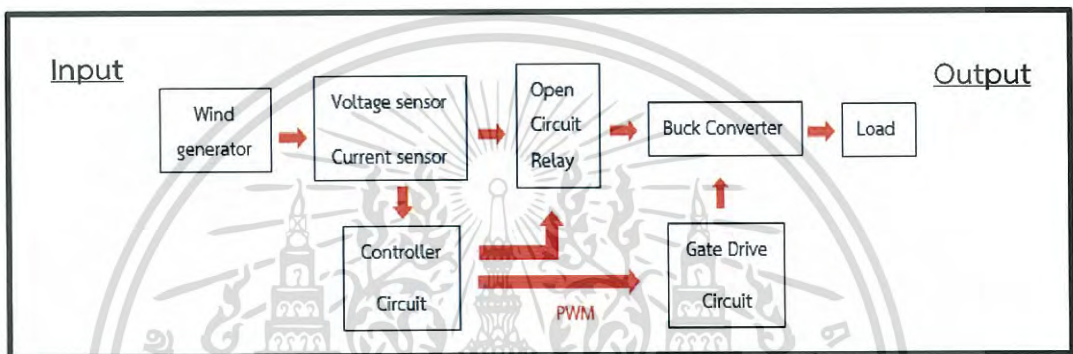
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การทดลองและผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบกักเก็บพลังงานขนาดเล็ก

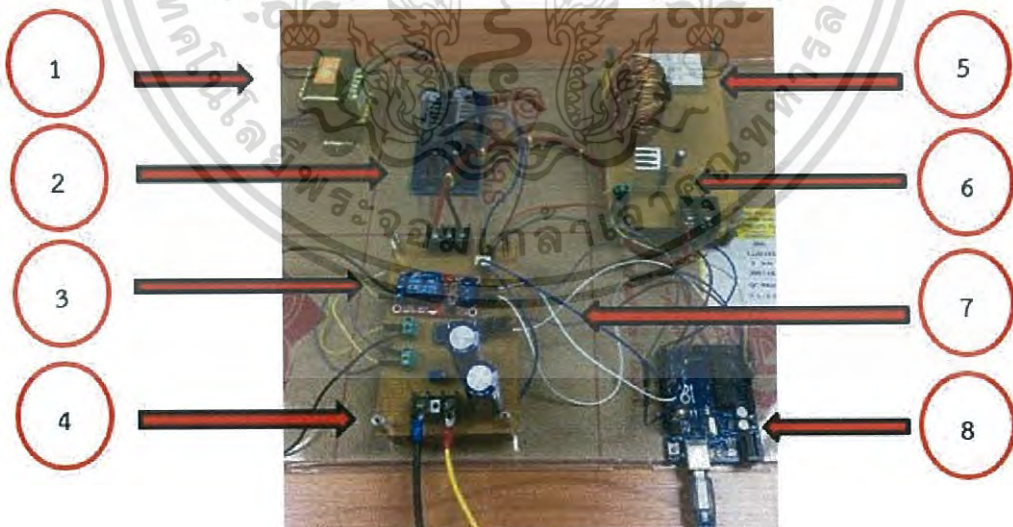
การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการเปรียบเทียบผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม และการประมาณโดยใช้สมการพหุนาม ซึ่งทำการทดลองที่ 2 สภาวะ คือ สภาวะที่ความเร็วลมคงที่ และ สภาวะที่ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลง

5.4.1 วงจรและขั้นตอนการทดลอง

การทดลองติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้ง 2 เทคนิค มีการทดลองและขั้นตอนในการประมวลผลเหมือนกันหลังจากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาทำการเปรียบเทียบ โดยใช้วงจรดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.10 แผนภาพวงจรที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 5.11 แผนภาพวงจรจริงที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 5.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรทดลอง

1. Transformer 220/9 v/v	5. Buck Converter
2. Regulator Circuit 5 v	6. Gate Drive Circuit
3. Relay 10 A 30 Vdc	7. Current Sensor
4. Wind generator	8. Controller Circuit

ขั้นตอนการทดลอง

1. ติดตั้งกังหันลมขนาดเล็กเข้ากับชุดควบคุมเพื่อทำการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

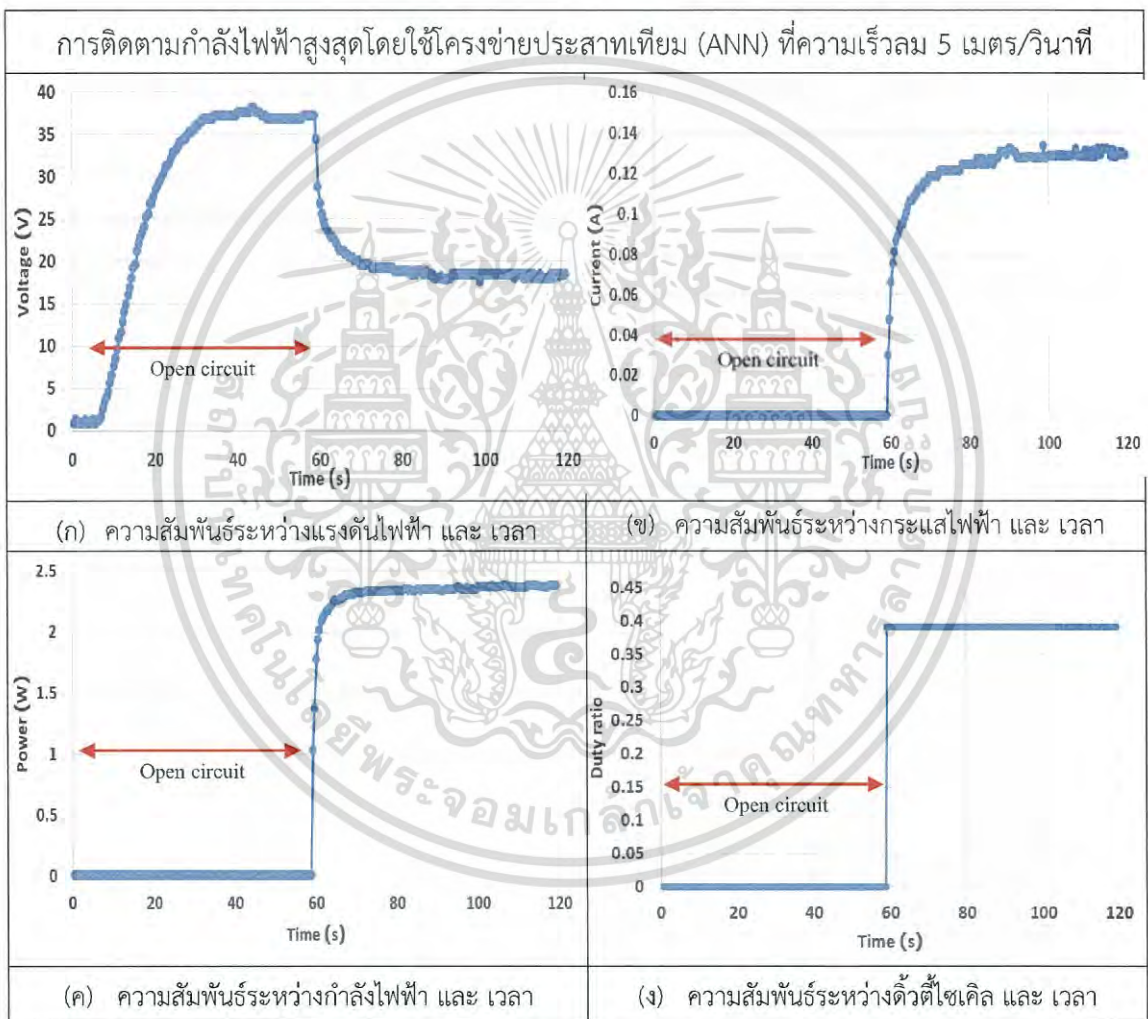


รูปที่ 5.12 การติดตั้งชุดควบคุมกับกังหันลมขนาดเล็ก

2. ทำการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมและการประมาณด้วยสมการพหุนามที่ความเร็วลมคงที่ 2 ระดับ คือ ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที และ 6 เมตร/วินาที
3. ทำการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมและการประมาณด้วยสมการพหุนามที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงจาก 5 เมตร/วินาที เป็น 6 เมตร/วินาที
4. เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของวิธีโครงข่ายประสาทเทียมและการประมาณด้วยสมการพหุนาม ที่ความเร็วลมคงที่และความเร็วลมเปลี่ยนแปลง

5.4.2 ผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมที่ความเร็วลมคงที่ ทดลองโดยทำการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมคงที่ 2 ระดับ คือ ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที และ ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที

5.4.2.1 ทำการทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที ทำการเปิดวงจรเพื่อวัดแรงดันหลังจากนั้นรอรจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีค่านิ่งจึงค่อยปิดวงจร แล้วทำการติดตามกำลังไฟฟ้าเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูงสุดออกมาจากแหล่งจ่ายกึ่งहनลม

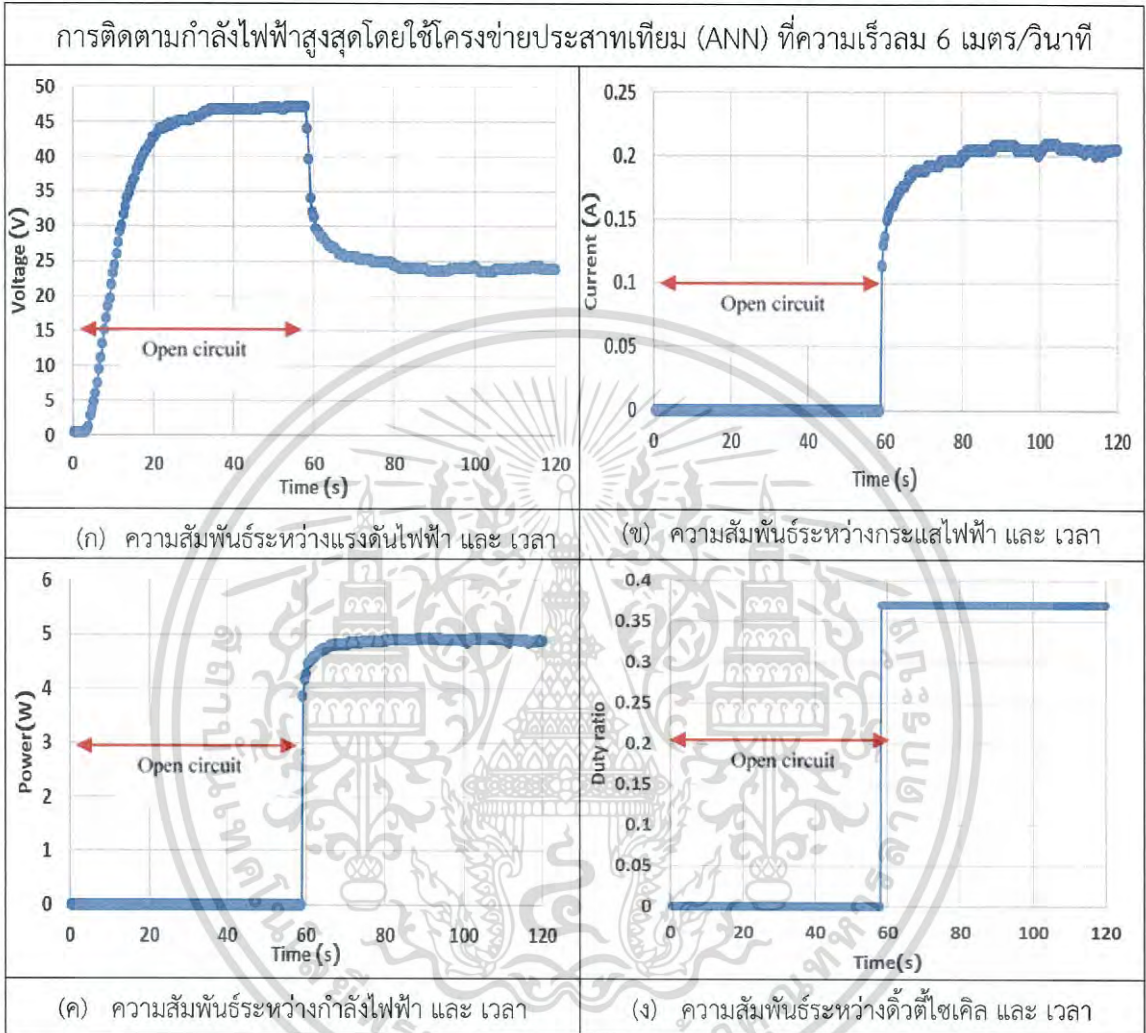


รูปที่ 5.13 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของโครงข่ายประสาทเทียมที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที

จากรูปที่ 5.13 แสดงผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที ซึ่งการทำงานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือในช่วง 60 วินาทีแรกเป็นช่วงเวลาของการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร และในช่วง 60 วินาทีหลังนั้นเป็นช่วงของการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด จากรูป 5.13 (ก) แรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะคงตัวมีค่า 18.4 โวลต์ 5.13 (ข) กระแสไฟฟ้า ณ สภาวะคงตัวมีค่า 0.132 แอมแปร์ 5.13 (ค) กำลังไฟฟ้า ณ สภาวะคงตัวมีค่า 2.38 วัตต์ 5.13 (ง) ค่าตัวดีไซเคิลนั้นมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 (เริ่มต้น) เป็น 0.42 (ตัวดีไซเคิลสูงสุด) ไม่วากรณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2.2 ทำการทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที

ทำการเปิดวงจรเพื่อวัดแรงดันหลังจากนั้นรอนจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีค่านิ่งจึงค่อยปิดวงจร แล้วทำการติดตามกำลังไฟฟ้าเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูงสุดออกมาจากแหล่งจ่ายกึ่งหันลม



รูปที่ 5.14 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของโครงข่ายประสาทเทียมที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที

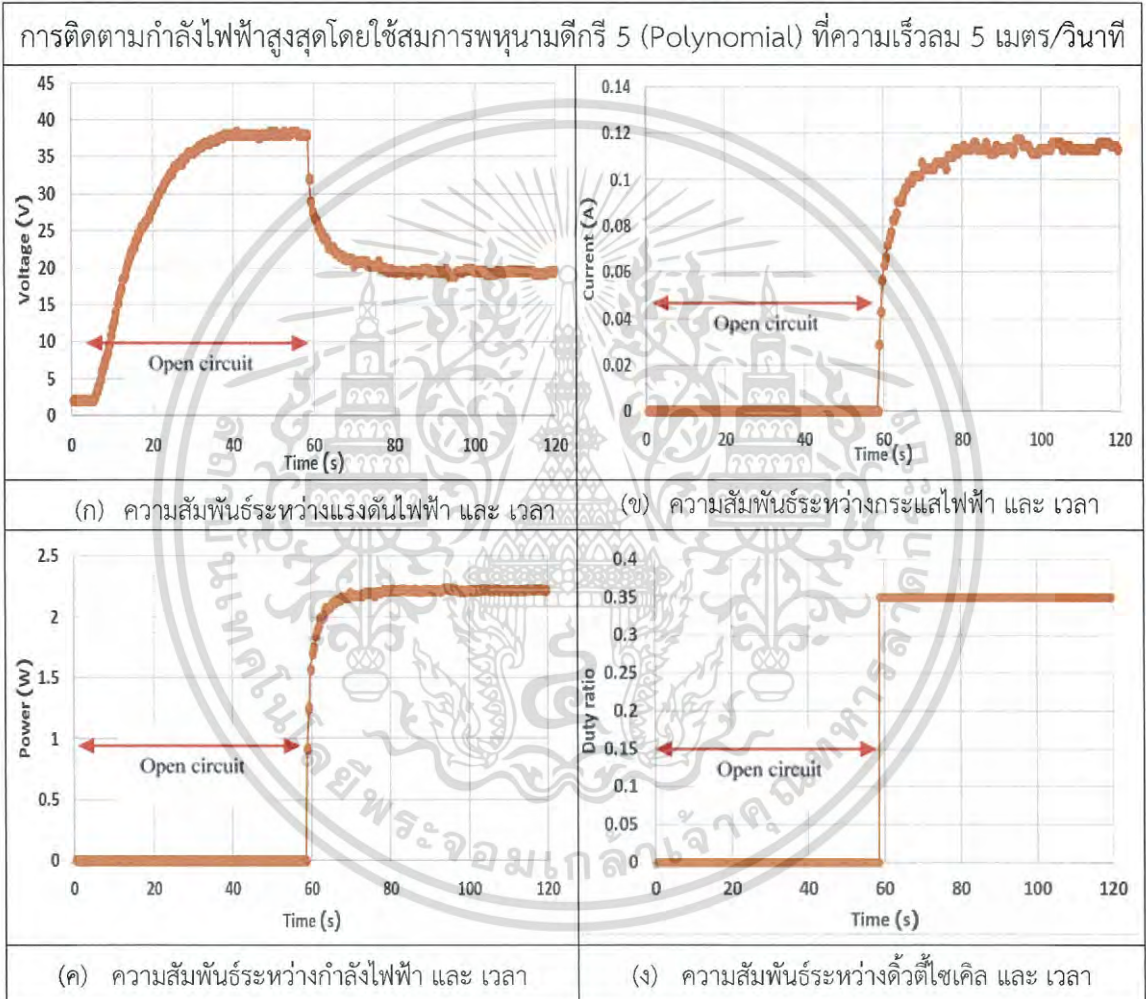
จากรูปที่ 5.14 แสดงผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที ซึ่งการทำงานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือในช่วง 60 วินาทีแรกเป็นช่วงเวลาของการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร และในช่วง 60 วินาทีที่หลังนั้นเป็นช่วงของการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด จากรูป 5.14 (ก) แรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะคงตัวมีค่า 23.8 โวลต์ 5.14 (ข) กระแสไฟฟ้า ณ สภาวะคงตัวมีค่า 0.205 แอมแปร์ 5.14 (ค) กำลังไฟฟ้า ณ สภาวะคงตัวมีค่า 4.88 วัตต์ 5.14 (ง) ค่าเดวตีไซเคิลนั้นมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 (เริ่มต้น) เป็น 0.37 (เดวตีไซเคิลสูงสุด)

5.4.3 ผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนามที่ ความเร็วลมคงที่

ทดลองโดยทำการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมคงที่ 2 ระดับ คือ ความเร็วลม 5 เมตร/
วินาที และ ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที

5.4.3.1 ทำการทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที

ทำการเปิดวงจรเพื่อวัดแรงดัน หลังจากนั้นรอนจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีค่านิ่งจึงค่อยปิด
วงจร แล้วทำการติดตามกำลังไฟฟ้าเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูงสุดออกมาจากแหล่งจ่ายกังหันลม

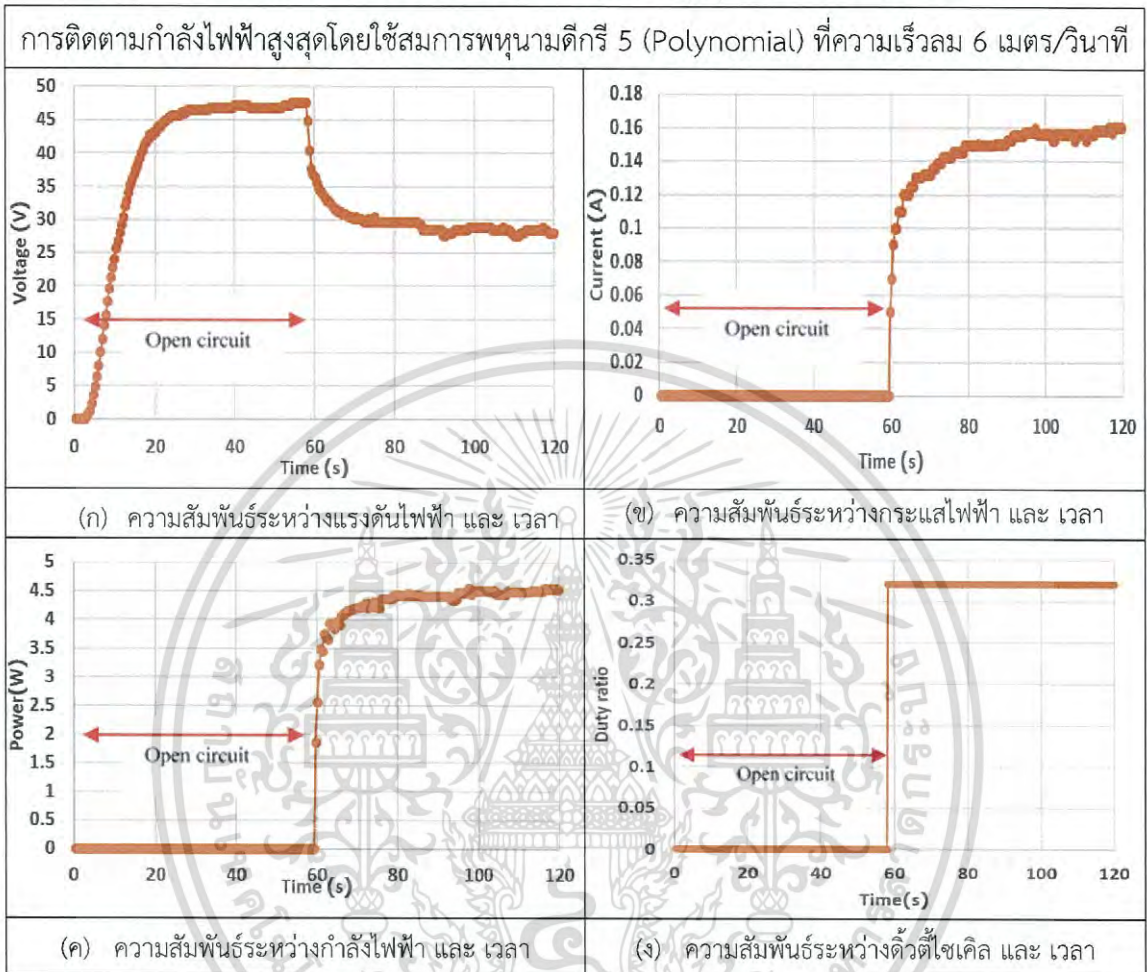


รูปที่ 5.15 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้สมการพหุนามดีกรี 5 ที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที

จากรูปที่ 5.15 แสดงผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้สมการพหุนามดีกรี 5 ที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที ซึ่งการทำงานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือในช่วง 60 วินาทีแรกเป็นช่วงเวลาของการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร และในช่วง 60 วินาทีหลังนั้นเป็นช่วงของการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด จากรูป 5.15 (ก) แรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะคงตัวมีค่า 19.6 โวลต์ 5.15 (ข) กระแสไฟฟ้า ณ สภาวะคงตัวมีค่า 0.115 แอมแปร์ 5.15 (ค) กำลังไฟฟ้า ณ สภาวะคงตัวมีค่า 2.21 วัตต์ 5.15 (ง) ค่าดีวตีไซเคิลนั้นมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 (เริ่มต้น) เป็น 0.35 (ดีวตีไซเคิลสูงสุด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.3.2 ทำการทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที
ทำการเปิดวงจรเพื่อวัดแรงดัน หลังจากนั้นรอรจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีค่าหนึ่งจึงค่อยปิด
วงจร แล้วทำการติดตามกำลังไฟฟ้าเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูงสุดออกมาจากแหล่งจ่ายกังหันลม



รูปที่ 5.16 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้สมการพหุนามดีกรี 5 ที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที

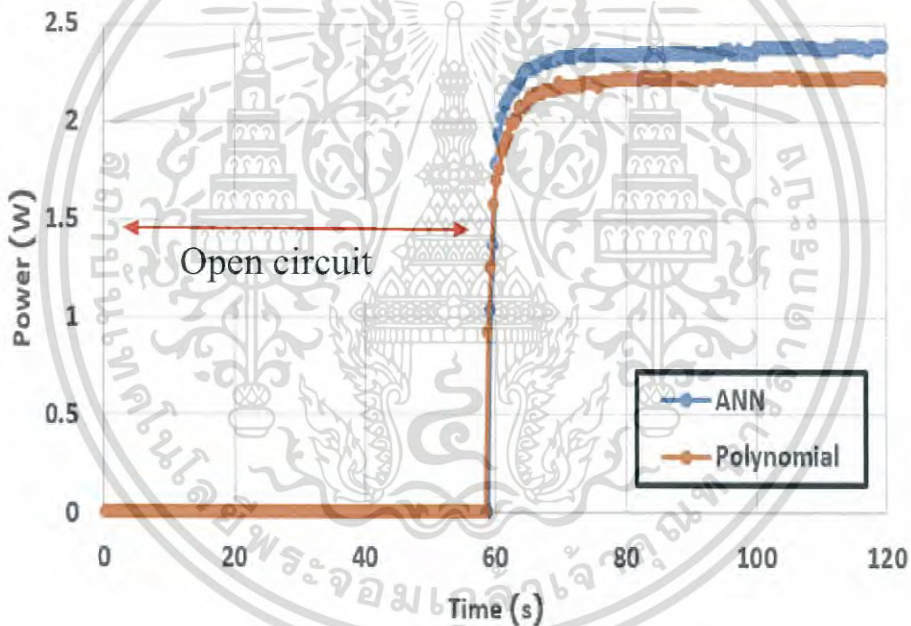
จากรูปที่ 5.16 แสดงผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้สมการพหุนามดีกรี 5 ที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที ซึ่งการทำงานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือในช่วง 60 วินาทีแรกเป็นช่วงเวลาของการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร และในช่วง 60 วินาทีหลังนั้นเป็นช่วงของการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด จากรูป 5.16 (ก) แรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะคงตัวมีค่า 28.4 โวลต์ 5.16 (ข) กระแสไฟฟ้า ณ สภาวะคงตัวมีค่า 0.16 แอมแปร์ 5.16 (ค) กำลังไฟฟ้า ณ สภาวะคงตัวมีค่า 4.5 วัตต์ 5.16 (ง) ค่าดีวตี้ไซเคิลนั้นมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 (เริ่มต้น) เป็น 0.32 (ดีวตี้ไซเคิลสูงสุด)

5.4.4 เปรียบเทียบผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมและเทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนามที่ความเร็วมลุมที่

เปรียบเทียบผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วมลุม 5 เมตร/วินาที และ 6 เมตร/วินาที

ตารางที่ 5.6 ค่าตัวชี้วัดของวงจรถอนแรงดันและค่ากำลังไฟฟ้าที่ความเร็วมลุม 5 เมตร/วินาที

เทคนิค	ความเร็วมลุม 5 เมตร/วินาที	
	ตัวชี้วัดสูงสุด	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
โครงข่ายประสาทเทียม (ANN)	0.39	2.38
สมการพหุนาม (Polynomial)	0.35	2.20

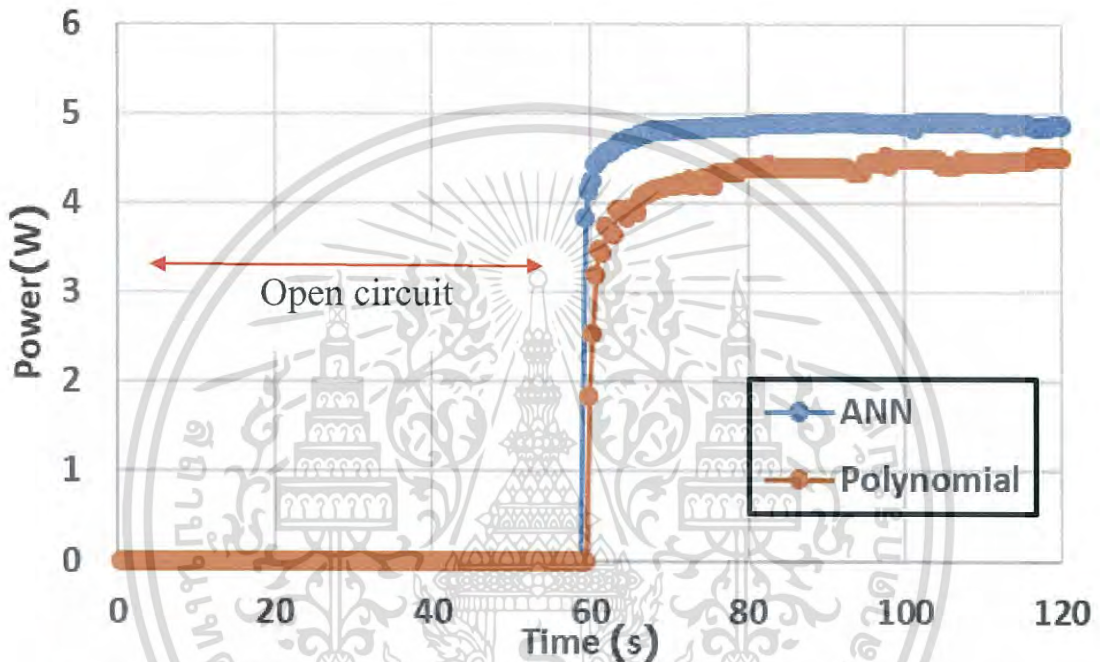


รูปที่ 5.17 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทคนิค (ANN) และสมการพหุนามดีกรี 5 (Polynomial)

เส้นสีฟ้าแทนการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และเส้นสีส้มแทนการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนามดีกรี 5 (Polynomial) ที่ความเร็วมลุม 5 เมตร/วินาที จากรูปที่ 5.17 ทำการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งหมด 120 วินาที โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วง 0 - 60 วินาทีแรกนั้นทำการเปิดวงจรถอนแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรถอน ช่วง 60 - 120 วินาทีทำการปิดวงจรถอนเพื่อติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด พบว่าการติดตามกำลังไฟฟ้าด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมให้กำลังไฟฟ้าออกมาได้สูงกว่า เทคนิคการประมาณด้วยสมการพหุนามอยู่ 0.18 วัตต์ โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ออกมา คือ 2.38 2.20 วัตต์ เอกสตามลำดับ และตัวชี้วัดสูงสุด คือ 0.39 0.35 ตามลำดับอ้างอิงค่าจากตารางที่ 5.6 ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 ค่าตัวชี้วัดของวงจรทอนแรงดันและค่ากำลังไฟฟ้าที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที

เทคนิค	ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที	
	ตัวชี้วัดสูงสุด	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
โครงข่ายประสาทเทียม (ANN)	0.37	4.88
สมการพหุนาม (Polynomial)	0.32	4.51



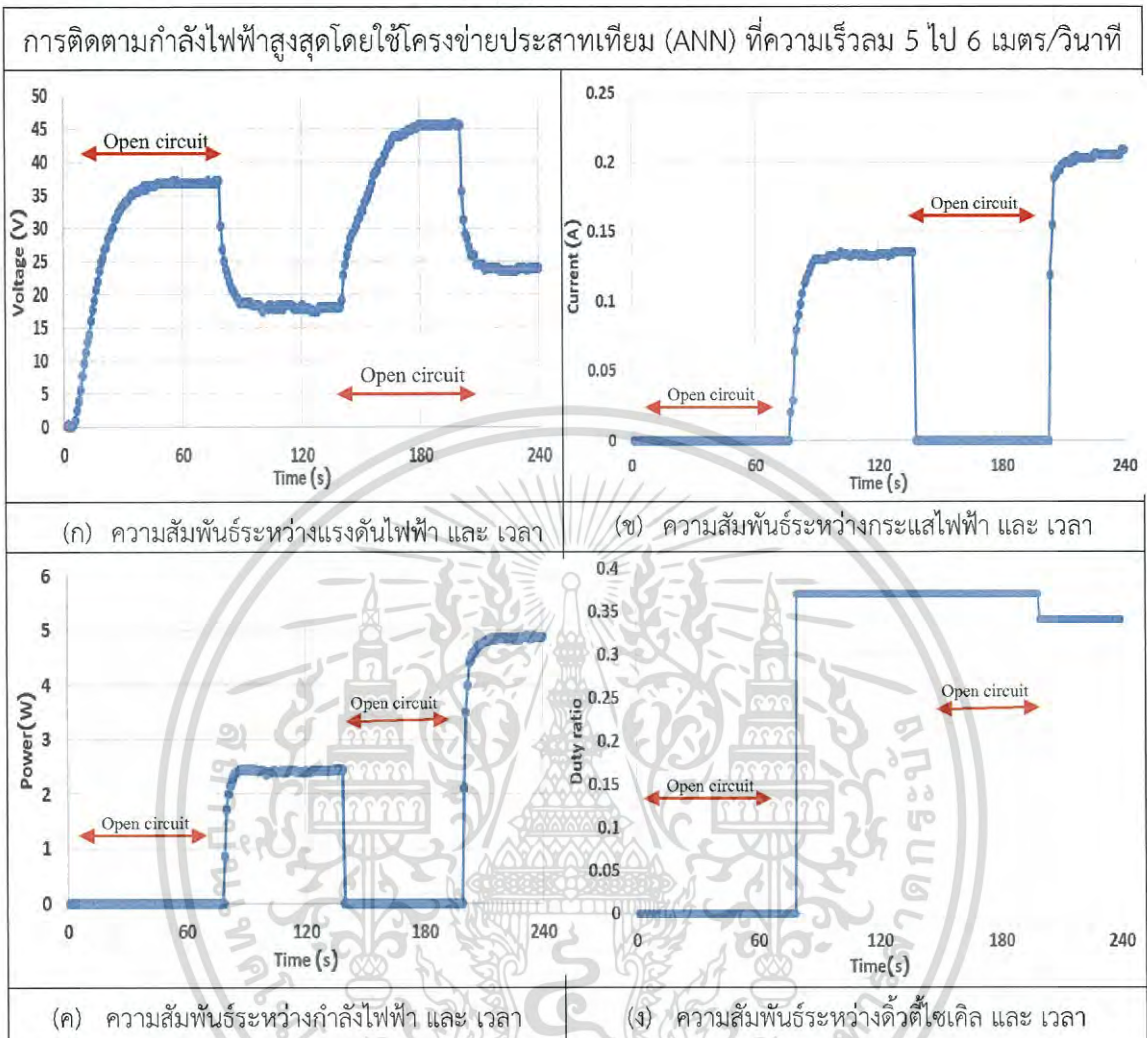
รูปที่ 5.18 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทคนิค (ANN) และสมการพหุนามดีกรี 5 (Polynomial)

เส้นสีฟ้าแทนการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และเส้นสีส้มแทนการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนามดีกรี 5 (Polynomial) ที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที จากรูปที่ 5.18 ทำการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งหมด 120 วินาที โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วง 0 - 60 วินาทีแรกนั้นทำการเปิดวงจรเพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ช่วง 60 - 120 วินาทีทำการปิดวงจรเพื่อติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด พบว่าการติดตามกำลังไฟฟ้าด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมให้กำลังไฟฟ้าออกมาได้สูงกว่า เทคนิคการประมาณด้วยสมการพหุนามอยู่ 0.37 วัตต์ โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ออกมา คือ 4.88 4.51 วัตต์ ตามลำดับ และตัวชี้วัดสูงสุด คือ 0.37 0.32 ตามลำดับอ้างอิงค่าจากตารางที่ 5.7

5.4.5 ผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมที่ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลง

ทำการเปิดวงจรเพื่อวัดแรงดันที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที รอจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีค่านิ่งจึงค่อยปิดวงจร แล้วทำการติดตามกำลังไฟฟ้าเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูงสุดออกมา หลังจาก
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้ทราบถึงข้อระเบียบเช่นนี้แล้ว
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นทำการเพิ่มความเร็วลมเป็น 6 เมตร/วินาที รอกจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีค่านิ่งค่อยจึงทำการปิดวงจร และทำการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดในระบบต่อไป

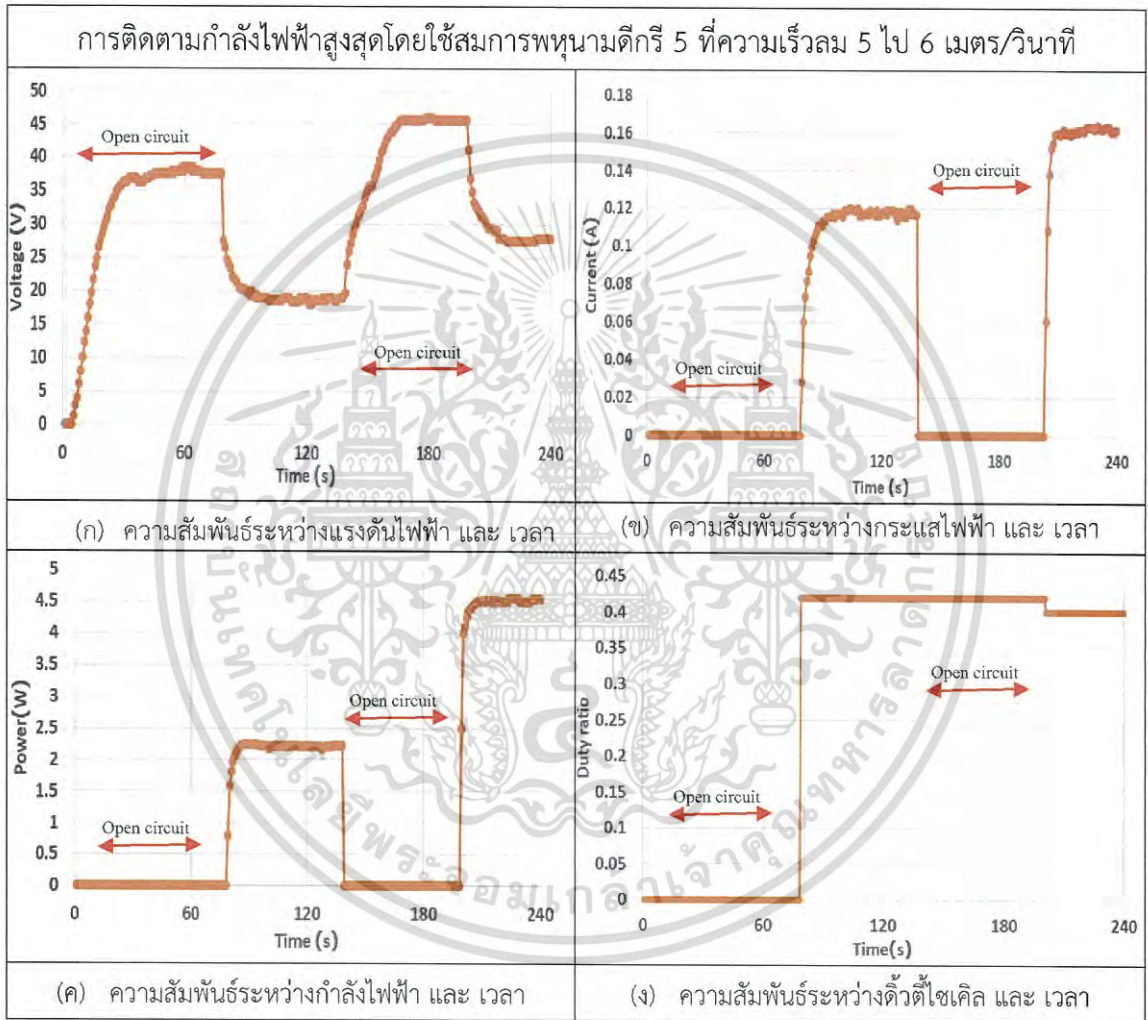


รูปที่ 5.19 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงจาก 5 เป็น 6 เมตร/วินาที

จากรูปที่ 5.19 แสดงผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงจาก 5 เป็น 6 เมตร/วินาที ซึ่งการทำงานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ในช่วง 0-78 และ 138-300 วินาทีเป็นช่วงการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร และในช่วง 78-138 และ 200-240 วินาทีเป็นช่วงการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยในการติดตามนี้จะมีสภาวะคงตัวที่ 2 ความเร็วลม คือ 5 และ 6 เมตร/วินาที จากรูป 5.19 (ก) แรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะคงตัวมีค่า 17.92 และ 24 โวลต์ตามลำดับ 5.19 (ข) กระแสไฟฟ้า ณ สภาวะคงตัวมีค่า 0.13 และ 0.21 แอมแปร์ตามลำดับ 5.19 (ค) กำลังไฟฟ้า ณ สภาวะคงตัวมีค่า 2.36 และ 4.87 วัตต์ตามลำดับ 5.19 (ง) ค่าตัวชี้เซคัลนั้นมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 (เริ่มต้น) เป็น 0.42 และ 0.40 ตามลำดับ (ตัวชี้เซคัลสูงสุด)

5.4.6 ผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนามที่ ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลง

ทำการเปิดวงจรเพื่อวัดแรงดันที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที รอจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีค่านิ่งจึงค่อยปิดวงจร แล้วทำการติดตามกำลังไฟฟ้าเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูงสุดออกมา หลังจากนั้นทำการเพิ่มความเร็วลมเป็น 6 เมตร/วินาที รอจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีค่านิ่งจึงทำการปิดวงจร และทำการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดในระบบต่อไป



รูปที่ 5.20 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้สมการพหุนามที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลง
จาก 5 เป็น 6 เมตร/วินาที

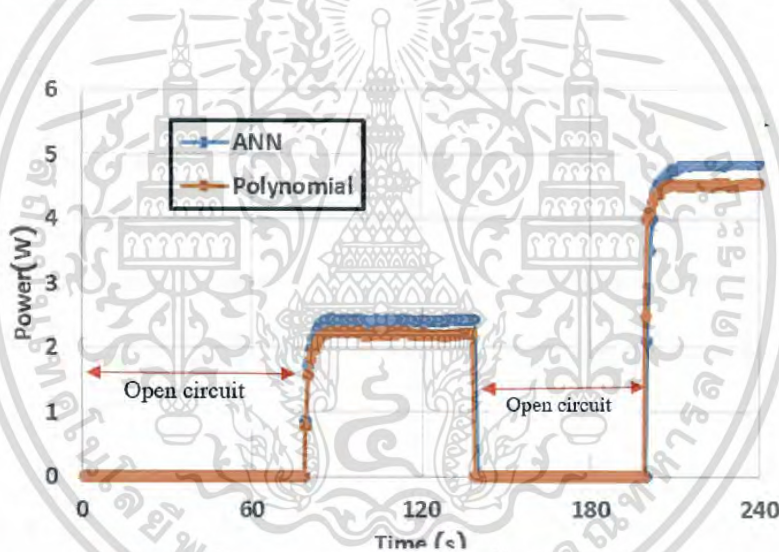
จากรูปที่ 5.20 แสดงผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงจาก 5 เป็น 6 เมตร/วินาที ซึ่งการทำงานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ในช่วง 0-78 และ 138-300 วินาทีเป็นช่วงการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร และในช่วง 78-138 และ 200-240 วินาทีเป็นช่วงการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยในการติดตามนี้จะมีสถานะคงตัวที่ 2 ความเร็วลม คือ 5 และ 6 เมตร/วินาที จากรูป 5.20 (ก) แรงดันไฟฟ้า ณ สถานะคงตัวมีค่า 19 และ 28 โวลต์ตามลำดับ (ข) กระแสไฟฟ้า ณ สถานะคงตัวมีค่า 0.13 และ 0.17 แอมป์ร์ตามลำดับ (ค) ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.20 (ค) กำลังไฟฟ้า ณ สภาวะคงตัวมีค่า 2.29 และ 4.54 วัตต์ตามลำดับ 5.20 (ง) ค่าตัวชี้เซลล์นั้น มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 (เริ่มต้น) เป็น 0.37 และ 0.34 ตามลำดับ (ตัวชี้เซลล์สูงสุด)

5.4.7 เปรียบเทียบผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทคนิค ANN และ Polynomial

ตารางที่ 5.8 ตัวชี้เซลล์ของวงจรทอนแรงดันและค่ากำลังไฟฟ้าที่ความเร็วลม 5 และ 6 เมตร/วินาที

เทคนิค	ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที		ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที	
	ตัวชี้เซลล์สูงสุด	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	ตัวชี้เซลล์สูงสุด	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
โครงข่ายประสาทเทียม (ANN)	0.42	2.36	0.40	4.87
สมการพหุนาม (Polynomial)	0.37	2.21	0.34	4.54



รูปที่ 5.21 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทคนิค (ANN) และสมการพหุนามดีกรี 5 (Polynomial)

เส้นสีฟ้าแทนการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และเส้นสีส้มแทนการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนามดีกรี 5 (Polynomial) ที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงจาก 5 เป็น เมตร/วินาที จากรูปที่ 5.21 ทำการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งหมด 240 วินาที โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ในช่วง 0-78 และ 138-300 วินาที เป็นช่วงการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร และในช่วง 78-138 และ 200-240 วินาทีเป็นช่วงการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยในการติดตามนี้จะมีสภาวะคงตัวที่ 2 ความเร็วลม คือ ความเร็วลม 5 และ 6 เมตร/วินาที พบว่าการติดตามกำลังไฟฟ้าด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมให้กำลังไฟฟ้าออกมาได้สูงกว่า เทคนิคการประมาณด้วยสมการพหุนามอยู่ 0.15 และ 0.33 วัตต์ โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ออกมา คือ 2.36 และ 2.21 วัตต์ตามลำดับ (5 เมตร/วินาที) 4.88 และ 4.51 วัตต์ตามลำดับ (6 เมตร/วินาที) และตัวชี้เซลล์สูงสุด คือ 0.42 0.37 ตามลำดับ (5 เมตร/วินาที) 0.40 และ 0.34 ตามลำดับ (6 เมตร/วินาที) กับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

ผลการทำนายแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ในหัวข้อที่ 5.1 พบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (mse) ที่เกิดขึ้นจากการทำนายแรงดันไฟฟ้าโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Vpnn) จำนวน 195 ตัวอย่างในการสอนจำนวน 105 ตัวอย่าง (Train) มีค่าเท่ากับ 0.4867 ส่วนการทดสอบจำนวน 90 ตัวอย่าง (Test) มีค่าเท่ากับ 0.4264

ผลการทำนายแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนาม (Polynomial) ในหัวข้อที่ 5.2 เริ่มต้นจากการปรับเปลี่ยนดีกรี 3 – 6 เพื่อหาดีกรีที่เหมาะสมสำหรับสมการพหุนามในการทำนายแรงดันไฟฟ้า พบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองที่เกิดขึ้นจากสมการพหุนามดีกรี 5 นั้นมีค่าน้อยที่สุดจึงเลือกใช้สมการพหุนามดีกรี 5 ในการทำนายแรงดันไฟฟ้า ตารางที่ 5.3 พบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (mse) ที่เกิดขึ้นจากการทำนายแรงดันไฟฟ้าโดยใช้สมการพหุนาม (Vcf) จำนวน 195 ตัวอย่างในการสอนจำนวน 105 ตัวอย่าง (Train) มีค่าเท่ากับ 1.2967 ส่วนการทดสอบจำนวน 90 ตัวอย่าง (Test) มีค่าเท่ากับ 1.1873

ผลการเปรียบเทียบการทำนายแรงดันไฟฟ้าพบว่าเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองน้อยกว่าเทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนาม โดยค่าความผิดพลาดรวมเท่ากับ 0.46 และ 1.17 ตามลำดับ

ผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมและการประมาณด้วยสมการพหุนามที่ความเร็วลมคงที่และไม่คงที่พบว่า ที่ความเร็วลมคงที่ 5 เมตร/วินาที พบว่าการติดตามกำลังไฟฟ้าด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมให้กำลังไฟฟ้าออกมาได้สูงกว่า เทคนิคการประมาณด้วยสมการพหุนามอยู่ 0.18 วัตต์ โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ออกมา คือ 2.38 และ 2.20 วัตต์ ตามลำดับ และตัวชี้วัดสูงสุด คือ 0.39 และ 0.35 ตามลำดับอ้างอิงค่าจากตารางที่ 5.6 ที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที พบว่าการติดตามกำลังไฟฟ้าด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมให้กำลังไฟฟ้าออกมาได้สูงกว่า เทคนิคการประมาณด้วยสมการพหุนามอยู่ 0.37 วัตต์ โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ออกมา คือ 4.88 และ 4.51 วัตต์ ตามลำดับ และตัวชี้วัดสูงสุด คือ 0.37 และ 0.32 ตามลำดับอ้างอิงค่าจากตารางที่ 5.7 และที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงจาก 5 เป็น 6 เมตร/วินาที พบว่าการติดตามกำลังไฟฟ้าด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมให้กำลังไฟฟ้าออกมาได้สูงกว่า เทคนิคการประมาณด้วยสมการพหุนามอยู่ 0.15 และ 0.33 วัตต์ โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ออกมา คือ 2.36 และ 2.21 วัตต์ ตามลำดับ (5 เมตร/วินาที) 4.88 และ 4.51 วัตต์ ตามลำดับ (6 เมตร/วินาที) และตัวชี้วัดสูงสุด คือ 0.42 และ 0.37 ตามลำดับ (5 เมตร/วินาที) 0.40 และ 0.34 ตามลำดับ (6 เมตร/วินาที) จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมนั้นสามารถทำนายค่ากำลังไฟฟ้าออกมาได้สูงกว่าเทคนิคการประมาณด้วยสมการพหุนาม

บทที่ 6

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทนี้กล่าวถึงภาพรวมทั้งหมดของงานวิจัยที่ทำการศึกษา การสรุปการออกแบบเทคนิคที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลม สรุปผลการทำนายแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด สรุปผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดและข้อเสนอแนะต่างๆในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

6.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) และเทคนิคการประมาณด้วยสมการพหุนาม (Polynomial Fitting) ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับกังหันลมขนาดเล็ก โดยอินพุต คือ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) ที่ความเร็วลมต่างๆ ส่วนเอาต์พุต คือ แรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vpm) ซึ่งข้อดีของการใช้อินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรนั้น คือ ไม่ยุ่งยากซับซ้อนและต้นทุนต่ำ ไม่เหมือนกับวิธีการของคุณ Chun-Yao Lee และ S.Ganhifar พร้อมด้วยคณะ [11, 12] ต้องใช้ข้อมูลความเร็วรอบและความเร็วลมในการติดตามกำลังไฟฟ้า ดังนั้นระบบโครงข่ายประสาทเทียมที่ทำการออกแบบนี้จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการติดตามกำลังไฟฟ้าสำหรับกังหันลมขนาดเล็กเพราะสามารถลดผลกระทบที่เกิดจากการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ ส่วนเทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนามใช้หลักการของกำลังสองน้อยที่สุด มีข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตเช่นเดียวกับเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม โดยในงานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการนำเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมและเทคนิคการประมาณด้วยสมการพหุนามมาทำนายแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vpnn, Vcf) หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากเทคนิคทั้งสองแล้วนำค่าที่ได้ไปเป็นสัญญาณอ้างอิงให้กับวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า (Buck Converter) เพื่อทำการปรับดีวีดีที่เหมาะสมในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับกังหันลมขนาดเล็ก

ขั้นตอนการออกแบบเริ่มต้นจากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม (2-8 เมตร/วินาที) และแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรว่ามีความสัมพันธ์กันในรูปแบบไหน ผลที่ได้พบว่ามีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นแต่มีแนวโน้มเดียวกัน ขั้นตอนต่อไปทำการหาค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลม 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 เมตร/วินาที และความเร็วลม 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5 เมตร/วินาที ผลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ก โดยจะนำค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vpm) มาเป็นเอาต์พุตเป้าหมาย (Target) ให้แก่โครงข่ายประสาทเทียมและสมการพหุนามเพื่อทำนายแรงดันไฟฟ้า (Vpnn)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมใช้การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised learning) ในการสร้างโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมนี้ใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) ที่ความเร็วลมต่างๆเป็น อินพุตให้แก่โครงข่ายประสาทเทียมและเอาต์พุตที่ได้จากการทำนายเป็นแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้า สูงสุด (Vpm) นำมาสอนโดยใช้วิธี Back-propagation ซึ่งจำนวนข้อมูลที่นำมาทั้งหมด (Input Data) มีจำนวน 195 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็น ข้อมูลที่ทำการฝึก (Training set) 105 ตัวอย่าง และ ข้อมูลที่ทำการทดสอบ (Test set) 90 ตัวอย่าง ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้แสดงดังตารางที่ 3.3 ในการสอน โครงข่ายประสาทเทียมนั้นทำการสอนทั้งหมด 105 ตัวอย่าง ที่ความเร็วลม 7 ความเร็วลม ได้แก่ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 เมตร/วินาที ความเร็วลมละ 15 ตัวอย่าง โดยเริ่มต้นจากการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า เปิดวงจร (Voc) ที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที จนกระทั่งที่ความเร็วลม 8 เมตร/วินาที หลังจากนั้นนำ ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมาทำการนอร์มัลไลซ์ (Normalize) เพื่อให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรอยู่ใน ช่วง $[-1, 1]$ แล้วจึงนำมาเป็นข้อมูลอินพุตให้แก่ระบบโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vpnn) ในการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมนั้นทำการทดสอบทั้งหมด 90 ตัวอย่าง ที่ความเร็วลม 6 ความเร็วลม ได้แก่ 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5 เมตร/วินาที ความเร็วลม ละ 15 ตัวอย่าง โดยเริ่มต้นจากการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) ที่ความเร็วลม 2.5 เมตร/ วินาที จนกระทั่งที่ความเร็วลม 7.5 เมตร/วินาที หลังจากนั้นนำค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมาทำการ นอร์มัลไลซ์ (Normalize) เพื่อให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรอยู่ในช่วง $[-1, 1]$ แล้วจึงนำมาเป็นข้อมูล อินพุตให้แก่ระบบโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vpnn)

การออกแบบสมการพหุนาม (Polynomial) นั้นทำการทดลองปรับเปลี่ยนดีกรีของสมการพหุ นามเพื่อดูค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการทดลองทำให้สามารถทราบได้ว่าดีกรีที่เหมาะสมสำหรับการ ประมาณค่าแรงดันไฟฟ้า ข้อมูลที่นำมาสอนและทดสอบนั้นใช้ข้อมูลชุดเดียวกันกับเทคนิค โครงข่ายประสาทเทียม ในการสอนโดยใช้การประมาณโดยใช้สมการพหุนามนั้นทั้งหมด 105 ตัวอย่าง ที่ความเร็วลม 7 ความเร็วลม ได้แก่ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 เมตร/วินาที ความเร็วลมละ 15 ตัวอย่าง โดย เริ่มต้นจากการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) ที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที จนกระทั่งที่ ความเร็วลม 8 เมตร/วินาที แล้วนำมาทดสอบกับระบบสมการพหุนามในการทำนายแรงดันที่ทำให้ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vcf) ส่วนการทดสอบโดยใช้การประมาณโดยใช้สมการพหุนามนั้นทำการทดสอบ ทั้งหมด 90 ตัวอย่าง ที่ความเร็วลม 6 ความเร็วลม ได้แก่ 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5 เมตร/วินาที ความเร็วลมละ 15 ตัวอย่าง โดยเริ่มต้นจากการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) ที่ ความเร็วลม 2.5 เมตร/วินาที จนกระทั่งที่ความเร็วลม 7.5 เมตร/วินาที แล้วจึงนำมาทดสอบกับระบบ สมการพหุนามในการทำนายแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vcf)

การออกแบบชุดควบคุมสำหรับการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดในบทที่ 4 เริ่มต้นจากการแสดง ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวงจรทอนระดับแรงดัน อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม การหาความสัมพันธ์ระหว่าง สัญญาณอ้างอิงที่ได้รับจากการทำนายกับค่าตัวชี้เซลล์ของวงจรทอนระดับแรงดันใช้สมการพหุนาม ดีกรี 4 ในการหาความสัมพันธ์เพื่อหาค่าตัวชี้ที่เหมาะสมในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทำนายแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vpnn, Vcf) ด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และเทคนิคการประมาณด้วยสมการพหุนามดีกรี 5 (Polynomial) ในการสอน (Test) และการทดสอบ (Test) พบว่า การทำนายโดยใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมนั้นมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (mse) น้อยกว่าเทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนาม โดยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการสอนและการทดสอบของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่า 0.4867 และ 0.4264 ส่วนค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการสอนและการทดสอบของสมการพหุนามมีค่า 1.2967 และ 1.0177

ผลการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมและการประมาณด้วยสมการพหุนามที่ความเร็วลมคงที่และไม่คงที่พบว่า ที่ความเร็วลมที่ 5 เมตร/วินาที พบว่าการติดตามกำลังไฟฟ้าด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมให้กำลังไฟฟ้าออกมาได้สูงกว่า เทคนิคการประมาณด้วยสมการพหุนามอยู่ 0.18 วัตต์ โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ออกมา คือ 2.38 และ 2.20 วัตต์ ตามลำดับ และดีวีดีไซเคิลสูงสุด คือ 0.39 และ 0.35 ตามลำดับอ้างอิงค่าจากตารางที่ 5.6 ที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที พบว่าการติดตามกำลังไฟฟ้าด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมให้กำลังไฟฟ้าออกมาได้สูงกว่า เทคนิคการประมาณด้วยสมการพหุนามอยู่ 0.37 วัตต์ โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ออกมา คือ 4.88 และ 4.51 วัตต์ ตามลำดับ และดีวีดีไซเคิลสูงสุด คือ 0.37 และ 0.32 ตามลำดับอ้างอิงค่าจากตารางที่ 5.7 และที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงจาก 5 เป็น 6 เมตร/วินาที พบว่าการติดตามกำลังไฟฟ้าด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมให้กำลังไฟฟ้าออกมาได้สูงกว่า เทคนิคการประมาณด้วยสมการพหุนามอยู่ 0.15 และ 0.33 วัตต์ โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ออกมา คือ 2.36 และ 2.21 วัตต์ตามลำดับ (5 เมตร/วินาที) 4.88 และ 4.51 วัตต์ตามลำดับ (6 เมตร/วินาที) และดีวีดีไซเคิลสูงสุด คือ 0.42 และ 0.37 ตามลำดับ (5 เมตร/วินาที) 0.40 และ 0.34 ตามลำดับ (6 เมตร/วินาที)

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมควรมีจำนวนข้อมูลในการสอน (Training set) ที่ครอบคลุมเพื่อไม่ให้เกิดค่าความผิดพลาด
2. ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าควรแยกออกจากวงจรควบคุมเพื่อป้องกันวงจรควบคุมไม่ให้เกิดการเสียหายจากการลัดวงจร
3. ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดการปรับเปลี่ยนโหลดความต้านทานนั้นทำให้ค่าดีวีดีไซเคิลที่เหมาะสมเปลี่ยนไปดังนั้นการเพิ่มโหลดความต้านทานเป็นอินพุตให้แก่โครงข่ายประสาทเทียมจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยโครงข่ายประสาทเทียมมีความยืดหยุ่นในการคาดการณ์มากขึ้น
4. การเลือกจำนวนโหนดซ่อนมีผลต่อระบบโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นควรเลือกจำนวนชั้นซ่อนที่ทำให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดจากการสอนหลายๆครั้ง

เอกสารอ้างอิง

- [1] R.M. Zavadil. 2003. "Wind Generation Technical Characteristic for the NYSERDA Wind Impact Study". **Knoxville**. pp. 7-12.
- [2] A.Mellit. H.Rezzouk. A.Messai and B.Medjahed. 2011. "FPGA-based real time Implementation Of MPPT-Controller for photovoltaic Systems". **Renewable Energy**. Vol. 36. pp. 1652-1661.
- [3] T.Ocran. C.Junyi. C.Bigang and S.Xinghua. 2010. "Artificial Neural Network Maximum power point tracker for Solar Electric Vehicle Research and Development Center for electric Vehicle". University of Xi'anJiaotong. Xi'an 710049. China.
- [4] Abdullah M.A. Yatim A.H.M. Tan C.W. And Saidur R. 2012. "A review of Maximum power point tracking algorithms for wind energy system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 16. pp. 3220-3227.
- [5] R. Kot. M. Rolak. and M. Malinowski. 2013. "Comparison of maximum peak Power tracking algorithm for small wind turbine". **Mathematical and Computer in simulation**. Vol. 91. pp. 29-40.
- [6] Chiung-Hsinh-Chen. Chih-Ming Hong and Fu-Sheng-Cheng. 2012. "Intelligent Speed sensor less maximum power point tracking control for wind Generation system". **Electrical power and Energy systems**. Vol. 42. pp. 399-407.
- [7] Chun-Yao Lee. Po-Hung Chen and Yi-Xing Shen. 2011. "Maximum power Point tracking system of small wind power generator using RBFNN approach". **Expert Systems with Applications**. Vol. 38. pp. 12058-12065.
- [8] S.Ganhefar. A.Ghassemi and M.Ahmadi. 2014. "Improving efficiency of two-type maximum power point tracking Methods of tip-speed ratio and optimum torque in wind turbine system using a quantum neural network". **Energy**. Vol. 67. pp. 444-453.
- [9] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. "พลังงานลม". [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%87%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%A5%E0%B8%A1.2557>.
- [10] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. "เทคโนโลยีกังหันลม". [Online]. Available : http://www3.egat.co.th/re/egat_wind/wind_technology.html; 2559.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] NTETH. “กักหน้ลมผลิตไฟฟาแนวตั้ง”. [Online]. Available : http://www.naturalenergyth.com/win_grop_vertical.html.2559.
- [12] กองพัฒนาพลังงานทดแทนฝ่ายพัฒนาและแผนงานโรงไฟฟาการไฟฟาฝายผลิตแห่งประเทศไทย. “พลังงานลม”. [online]. Available: http://www.egat.co.th/re/egat_wind/pdf_wind/wind_energy.pdf. 2560.
- [13] วิทยา พรพัชรพงศ. “โครงขายประสาทเทียม”. [Online]. Available : <https://www.gotoknow.org/posts/163433>. 2010.
- [14] สํานักงานคณะกรรมการวิจัยแหงชาติ. “โครงขายประสาทเทียม”. [Online]. Available : http://www.nrct.go.th/ListDoiDownload/68408%2F3d0a860827bbf94dc7667f27cf7ec419%3FResolve_Doi%3D10.14457%2FKMITL.the.2006.18&usg=AFQjCNH6BjShfUtMnDBpgqBo5crkOnZH-w&sig2=1zURku-bnB2036hnxhBYzA.2559.
- [15] คลังปัญญามหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. “โครงขายประสาทเทียม”. [Online]. Available : http://kb2tmp.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2132/8/284819_ch3.pdf. 2558.
- [16] Matt Mazur. “A Step by Step Backpropagation ”. [Online]. Available : <https://mattmazur.com/2015/03/17/a-step-by-step-backpropagation-example/>. 2016.
- [17] Steven J. Mller. “The Method of Least Squares”. [Online]. Available : https://web.wiliams.ed/Mathematics/sjmilller/public_html/BrownClasses/54/handouts/MethodLeastSquares.pdf. 2016.
- [18] วีระเชษฐ์ ชันเงิน. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ: หจก.วี.เจ. พรินตติ้ง. 2552.
- [19] F.Bouchafaa. I.Hamzaoui. A.Hadjamma. 2011. “Fuzzy Logic Control the Tracking of Maximum Power Point of a PV Systems”. **Energy Procedia**. Vol.6. pp.633-642.
- [20] A.B.G.Bahgat. N.H.Helwa.G.E.Ahmad and E.T.ElShenawy. 2005. “Maximum power point tracking controller for PV Systems using neural networks”. **Renewable Energy**. Vol. 30. pp. 1257-1286.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [21] D.Lalili. A.Mellit. N.Lourci. B.Medjahed. E.M.Berkouk. 2011. "Input output feedback linearization control and variable step size MPPT algorithm of a grid-connected photovoltaic inverter". **Renewable Energy**. Vol. 36. pp. 3282-3291.
- [22] E.Kakosimos. G.Kladas. 2011. "Implementation of photovoltaic array MPPT through fixed step predictive control technique. **Renewable Energy**. pp. 2508-2514.
- [23] นิพนธ์ เกตุจ้อย และ อชิตพล ศศิธรานูวัฒน์. "เทคโนโลยีพลังงานลม" วารสารมหาวิทยาลัยรัตนนคร. 68-69. 2547.
- [24] EIA. "Wind Farm". [Online]. Available : http://www.eia.doe.gov/wind_tech/energy.html. 2004.
- [25] Guo, Y. and Dooley, K. J. 1992. "Identification of change structure in statistical process control". **International Journal of Productin Research**, 30(7), 1655-1669.
- [26] Dave Anderson and George Mcnell. "ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TECHNOLOGY". [Online]. Available : http://www.dacs.dtic.mil/techs/dacs_reports/postscript/neural_nets.ps. 1992.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

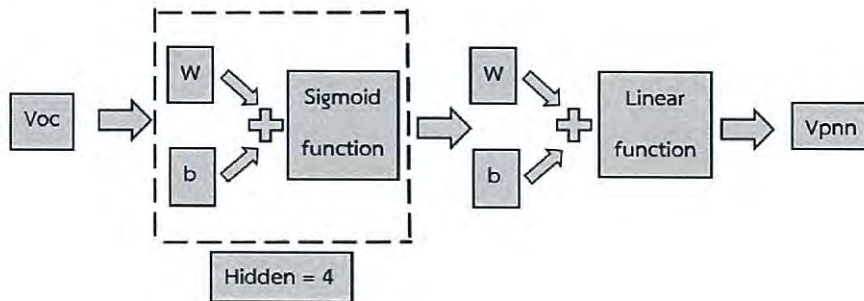


ภาคผนวก ก

การคำนวณหาสมการของโครงข่ายประสาทเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาสมการของโครงข่ายประสาทเทียม



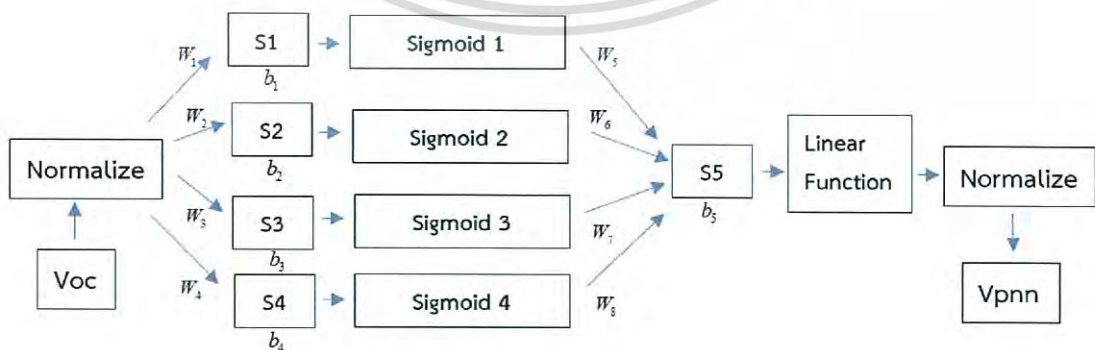
รูปที่ ก1 โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทำนายแรงดันไฟฟ้า

โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมดังรูปที่ ก1 ประกอบไปด้วยข้อมูลอินพุต (Voc) ข้อมูลเอาต์พุต (Vpnn) จำนวนชั้นซ่อน 4 ชั้น ฟังก์ชันการแปลงแบบซิกมอยด์ฟังก์ชันและฟังก์ชันเชิงเส้น โดยมีค่าน้ำหนัก 8 ค่าและไบแอสคงที่ 5 ค่าแสดงดังตารางที่ ก1

ตารางที่ ก1 ค่าน้ำหนัก (W) และไบแอสคงที่ (b) ที่ใช้ในระบบโครงข่ายประสาทเทียม

ค่าน้ำหนัก (W)				ค่าไบแอสคงที่ (b)			
W_1	5.6609	W_5	0.3431	b_1	-5.4970	b_5	0.0101
W_2	5.3319	W_6	0.3525	b_2	-2.6786	-	-
W_3	5.4908	W_7	0.3052	b_3	2.2629	-	-
W_4	5.5911	W_8	0.2736	b_4	5.5951	-	-

จากตารางที่ ก1 นำค่าน้ำหนัก (W) และค่าไบแอสคงที่ (b) มาทำการคำนวณดังรูปที่ 2



รูปที่ ก2 แผนภาพการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 1 นำค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) มาทำการ Normalize ให้อยู่ในช่วง $[-1,1]$ โดยใช้สมการที่ 1

$$V_{oc}^* = [0.04757 * (V_{oc} - 8.32)] - 1 \quad (1)$$

V_{oc}^* = แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรนอร์มัลไลซ์

V_{oc} = แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร

ขั้นตอนที่ 2 นำแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรนอร์มัลไลซ์ (V_{oc}^*) ที่คำนวณได้จากสมการที่ 1 มาคูณกับ W_1 แล้วบวกด้วย b_1 จะได้สมการที่ 2

$$S1 = (V_{oc}^* * W_1) + b_1 \quad (2)$$

ขั้นตอนที่ 3 นำแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรนอร์มัลไลซ์ (V_{oc}^*) ที่คำนวณได้จากสมการที่ 1 มาคูณกับ W_2 แล้วบวกด้วย b_2 จะได้สมการที่ 3

$$S2 = (V_{oc}^* * W_2) + b_2 \quad (3)$$

ขั้นตอนที่ 4 นำแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรนอร์มัลไลซ์ (V_{oc}^*) ที่คำนวณได้จากสมการที่ 1 มาคูณกับ W_3 แล้วบวกด้วย b_3 จะได้สมการที่ 4

$$S3 = (V_{oc}^* * W_3) + b_3 \quad (4)$$

ขั้นตอนที่ 5 นำแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรนอร์มัลไลซ์ (V_{oc}^*) ที่คำนวณได้จากสมการที่ 1 มาคูณกับ W_4 แล้วบวกด้วย b_4 จะได้สมการที่ 5

$$S4 = (V_{oc}^* * W_4) + b_4 \quad (5)$$

ขั้นตอนที่ 6 นำสมการที่ 2, 3, 4, 5 ไปเข้าฟังก์ชันการแปลงแบบซิกมอยด์จะได้สมการที่ 6, 7, 8, 9 ตามลำดับ

$$\text{Sigmoid1} = \frac{(e^{s1} - e^{-s1})}{(e^{s1} + e^{-s1})} \quad (6)$$

$$\text{Sigmoid2} = \frac{(e^{s2} - e^{-s2})}{(e^{s2} + e^{-s2})} \quad (7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Sigmoid3} = \frac{(e^{s3} - e^{-s3})}{(e^{s3} + e^{-s3})} \quad (8)$$

$$\text{Sigmoid14} = \frac{(e^{s4} - e^{-s4})}{(e^{s4} + e^{-s4})} \quad (9)$$

ขั้นตอนที่ 7 นำสมการที่ 6 ไปคูณด้วย W_5 , นำสมการที่ 7 ไปคูณด้วย W_6

นำสมการที่ 8 ไปคูณด้วย W_7 , นำสมการที่ 9 ไปคูณด้วย W_8 แล้วนำผลลัพธ์ทั้งหมดมารวมกันแล้วบวกด้วย b_5 ทำให้ได้ $S5$ ดังสมการ

$$S5 = \left[\frac{(e^{s1} - e^{-s1})}{(e^{s1} + e^{-s1})} * W_5 \right] + \left[\frac{(e^{s2} - e^{-s2})}{(e^{s2} + e^{-s2})} * W_6 \right] + \left[\frac{(e^{s3} - e^{-s3})}{(e^{s3} + e^{-s3})} * W_7 \right] + \left[\frac{(e^{s4} - e^{-s4})}{(e^{s4} + e^{-s4})} * W_8 \right] + b_5$$

ขั้นตอนที่ 8 นำสมการ $S5$ ไปทำการนอร์มัลไลซ์จะได้แรงดันไฟฟ้าออกมาดังสมการที่ 10

$$V_{pm} = [22.205 * (V_{pm}^* + 1)] + 2.75 \quad (10)$$

V_{pm} = แรงดันไฟฟ้าจากโครงข่ายประสาทเทียม

V_{pm}^* = แรงดันไฟฟ้านอร์มัลไลซ์จากโครงข่ายประสาทเทียม ($S5$)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวตัดไซเคิลและแรงดันของวงจรถอนแรงดันไฟฟ้า

ตารางที่ ข1 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (mse) จากการใช้สมการพหุนามดีกรี 2-6 ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวตัดไซเคิล (Duty) และแรงดันของวงจรถอนแรงดัน (Voltage)

ดีกรี	ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที	ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที
2	0.0159	0.0237
3	0.0078	0.0126
4	0.0070	0.0122
5	0.0085	0.0127
6	0.0089	0.0132

จากตารางที่ ข1 พบว่าสมการพหุนามดีกรี 4 มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด โดยที่ความเร็วลม 5 และ 6 เมตร/วินาที มีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 0.0070 และ 0.0122 ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สมการพหุนามดีกรี 4 ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวตัดไซเคิล (D) และ แรงดันของวงจรถอนแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่ความเร็วลม 5 และ 6 เมตร/วินาทีซึ่งรูปแบบสมการความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



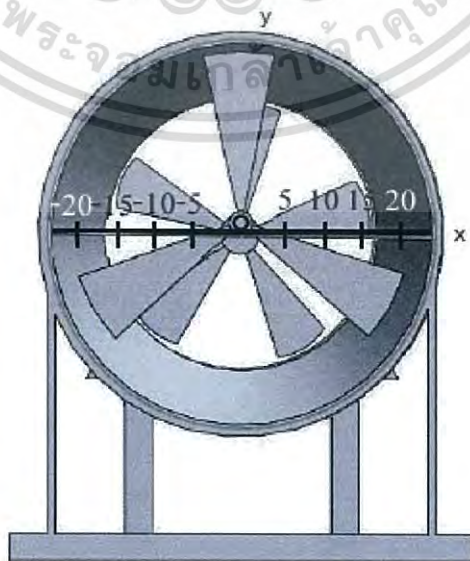
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดสอบความเร็วลมของอุโมงค์ลม

การติดตามหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นทำการทดสอบในอุโมงค์ลมโดยกังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจะอยู่ในส่วนทดสอบ (test section) ของอุโมงค์ลม โดยรูปที่ 1ค แสดงส่วนทดสอบของอุโมงค์ลม รูปที่ 2ค แสดงแนวระนาบของส่วนทดสอบซึ่งจะทำการทดสอบ โดยเริ่มต้นจากการกำหนดจุดที่เพลาแกนหมุนของกังหันลมเป็นจุด (0,0) แล้วทดสอบความเร็วลมโดยทำการวัดความเร็วลมที่จุด (0,0) (จุดเพลาแกนหมุนของกังหันลม) จากนั้นทำการวัดค่าความเร็วที่ได้ในแนวระนาบแกน x ที่จุด (5,0), (10,0), (15,0), (20,0), (25,0), (-5,0), (-10,0), (-15,0), (-20,0), (-25,0) ในการวัดค่าความเร็วลมจะใช้เครื่องวัดความเร็วลม (anemometer) ซึ่งในแต่ละจุดจะทำการวัดค่าความเร็วลม 3 ครั้งแล้วนำค่าความเร็วลมที่ได้มาเฉลี่ยและทำการบันทึกค่าหลังจากนั้นทำการวัดค่าความเร็วรอบที่ได้จากพัดลมที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดลมดังแสดงในรูปที่ 3ค



รูปที่ 1ค ส่วนทดสอบของอุโมงค์ลม (ก)ภาพรวมส่วนทดสอบ (ข)จุดอ้างอิง(0,0)



รูปที่ 2ค จุดที่วัดในระนาบแกน x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3ค ตำแหน่งที่ใช้ในการวัดความเร็วรอบของพัดลม

ผลการทดสอบอุโมงค์ลม

ผลการทดสอบอุโมงค์ลมในส่วนทดสอบได้บันทึกในตารางที่ 1ค นำค่าความเร็วลมที่ได้ในแนวระนาบมาหาค่าเฉลี่ย จะได้ค่าความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากับ 8.3 เมตร/วินาที

ตารางที่ 1ค ค่าความเร็วลมที่พิกัดแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง

ระนาบ แกน x	-25,0	-20,0	-15,0	-10,0	-5,0	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0
ความเร็ว ลมระนาบ x (m/s)	8.1	7.9	7.7	8.6	8.4	8.3	8.5	7.9	8.7	8.8	8.4
ค่าเฉลี่ย (m/s)	8.3										

จากตารางที่ 1ค แสดงความเร็วลมในแนวระนาบของส่วนทดสอบ พบว่าที่ความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากับ 8.3 เมตร/วินาที เมื่อทำการวัดความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดลมจะได้ความเร็วรอบเท่ากับ 2758 รอบ/นาที ซึ่งที่ความเร็วลมค่าอื่นได้ทำการแสดงความเร็วรอบไว้ในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบพัดลมและความเร็วลมที่ได้

ความเร็วลมเฉลี่ยในส่วนทดสอบ (m/s)	ความเร็วรอบพัดลม (rpm)
2	752
2.5	920
3	1065
3.5	1160
4	1220
4.5	1395
5	1504
5.5	1782
6	1943
6.5	2172
7	2319
7.5	2527
8	2695

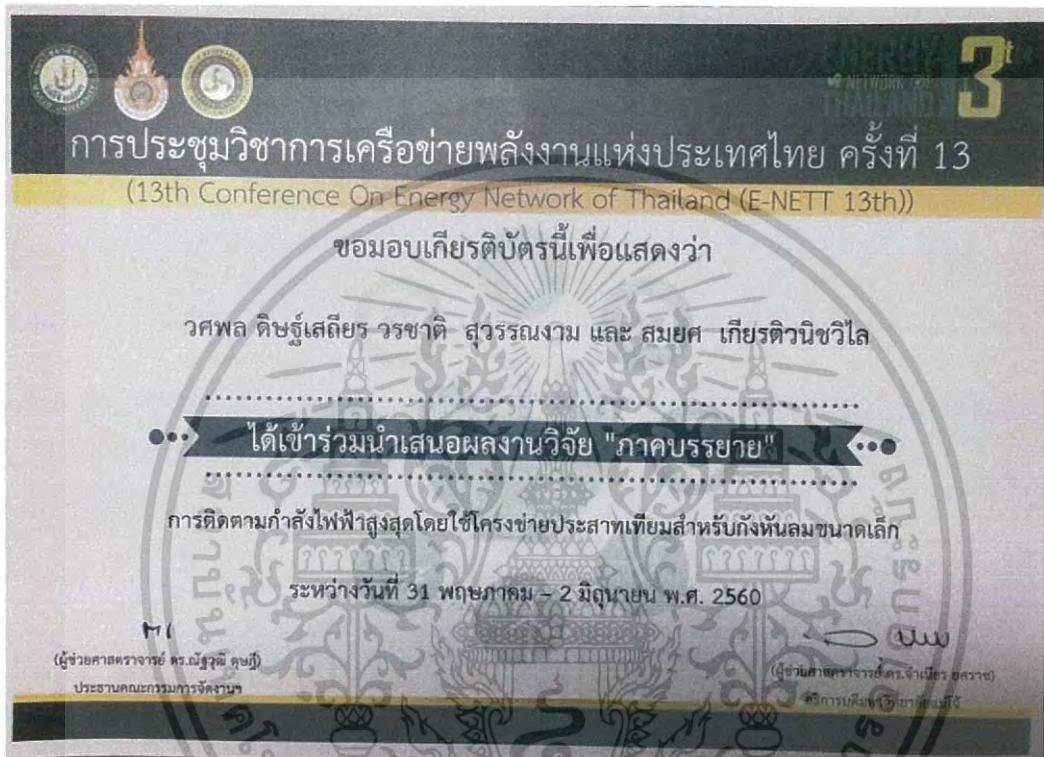
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการ

- [1] วศพล ดิษฐ์เสถียร, วรชาติ สุวรรณงาม, และสมยศ เกียรติวนิชวิไล. 2560. “การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้โครงข่ายประสาทดัดเสริมสำหรับกังหันลมขนาดเล็ก.” หน้า 1656-1663. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยแม่โจ้และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับกังหันลมขนาดเล็ก
Maximum Power Point Tracking Using
Artificial Neural Network for Small Scale Wind Turbine

วศพล ดิษฐ์เสถียร¹, วรชาติ สุวรรณงาม และ สมยศ เกียรติวนิชวิไล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 เลขที่ 1 ซอยจลองกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10520
 *ผู้ติดต่อ: pron_arsenal@kcloud.com, 082-454-2445

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ใช้ 2 เทคนิคในการประมาณตำแหน่งของกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับกังหันลมขนาดเล็ก โดยเทคนิคแรก คือ การประมาณโดยใช้สมการพหุนาม จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) และค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vpm) หลังจากนั้นสามารถนำมาสมการดังกล่าวมาทำนายแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vcf) เทคนิคที่สอง คือ เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม ใช้แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรเป็นอินพุต (Voc) และแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเป็นเอาต์พุต (Vpm) ซึ่งทั้งค่าอินพุตและค่าเอาต์พุตนั้นได้มาจากการทดลองจะถูกนำมาใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vpnn) และนำค่าแรงดันที่ได้จากทั้งสองเทคนิคมาเปรียบเทียบกับ เพื่อนำค่าที่ได้มาใช้เป็นสัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) ในระบบควบคุมต่อไป จากเทคนิคข้างต้นนี้ทำให้สามารถออกแบบและติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำหลัก: โครงข่ายประสาทเทียม แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

Abstract

This research work applies two techniques, the artificial neural network and the polynomial fitting, to estimate the maximum power point for small scale wind-turbine system. Polynomial fitting is used find the relationship between the open circuit voltage (Voc) and the voltage at the maximum power (Vpm). The results are in terms of the polynomial equation. In the artificial neural network technique, the open circuit voltage (Voc) and the voltage at the maximum power (Vpm) derived from the off-line experiment were adopted as the training set of the neural network which is then applied to predict the operating voltage that causes the maximum power point (Vpnn). The output value from the neural network and polynomial fitting were compared and will be adopted as the reference signal in control system in the future work. By the proposed technique, the efficient wind-turbine tracking system can be achieved.

Keywords: neural network, open circuit voltage, voltage at the maximum power

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้สภาพเศรษฐกิจของราคาเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นนั้นทำให้มีการนำพลังงานทดแทนอื่นๆมาใช้กันมากขึ้น ได้แก่ พลังงานลม (Wind Energy) พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar cell) พลังงานน้ำ (Water energy) เป็นต้น

พลังงานลม (Wind Energy) เป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด (Renewable Energy) และสามารถใช้อย่างไม่จำกัดอีกด้วย ซึ่งระบบพลังงานทดแทนขนาดเล็กนั้นเป็นที่

ต้องการของตลาดโดยเฉพาะสถานที่ห่างไกลความเจริญจะมีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าที่สูงมาก ซึ่งในการนำพลังงานลมออกมาใช้นั้น สิ่งที่สำคัญที่สุด คือ กังหันลม ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า วิวัฒนาการของพลังงานไฟฟ้าจากกังหันลมนั้นมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยในทวีปยุโรปได้คิดค้นชนิดของกังหันลมที่เหมาะสมกับความเร็วลมต่างๆและเพิ่มประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้าที่ได้รับจากกังหันลม ส่วนในประเทศไทยนั้นได้มีการคิดค้นการใช้

พลังงานไฟฟ้าจากกังหันลมอย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกัน ระบบพลังงานไฟฟ้าจากกังหันลมนั้นมีการใช้งานอยู่ทั่วโลก และมีความสามารถในการผลิตไฟฟ้าสูง แต่ต้นทุนที่ใช้ต่ำกว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบพลังงานทดแทนอื่นๆ ดังนั้น การใช้ระบบพลังงานลมถือเป็นการลงทุนที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบัน ได้มีการนำเทคโนโลยีและการพัฒนาในด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking, MPPT) ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมต่างๆ ซึ่งเทคนิคในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นมีอยู่หลายวิธีด้วย เช่น Perturb & Observe, Tip speed ratio technique, Power signal feedback control เป็นต้น

ในระบบพลังงานลมนั้น กังหันลมนั้นมีหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานจลน์เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า โดยส่วนสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าคือ มุมเหินและความเร็วลม (Pitch angle) [1] ในการนำคุณลักษณะของกังหันลมไปใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุดนั้น ตัวแปรที่สำคัญที่สุด คือ การติดตาม ณ จุดที่กังหันลมสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาได้มากที่สุด

กำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นในปัจจุบันมีการใช้การควบคุมที่ซับซ้อนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดี ตัวอย่างเช่น A.Mellit และคณะ [2] ใช้ภาษาที่สามารถคำนวณได้รวดเร็ว ข้อดีของวิธีนี้คือ ผลถูกต้อง และมีประสิทธิภาพดี แต่ข้อเสียคือการควบคุมที่ค่อนข้างซับซ้อนและยากต่อการทำความเข้าใจ

T.Ocran และคณะ [3] ออกแบบระบบโดยใช้การประมวลผลของสัญญาณดิจิทัล และปรับปรุงเสถียรภาพโดยใช้การควบคุมแบบฟอติ ประสิทธิภาพที่ได้ออกมาดีมากสูงขึ้น

F.Bouchafaa และคณะ [4] นำเสนอการควบคุมแบบฟuzzy เพื่อปรับปรุงผลตอบสนองทางเวลาที่เร็วมากขึ้น ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและค่าตัวดีในสภาวะคงตัว มีการออกแบบตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

A.B.G.Bahgat และคณะ [5] นำเสนอการพัฒนาการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าได้ถึง 97% และใช้เวลาในการติดตามที่รวดเร็วอีกด้วย

D.Lalili และคณะ [6] นำเสนอวิธีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้หลักการเสถียรแบบสามารถปรับค่าได้ตามความเหมาะสม เทียบกับตอนสแตนด์บายที่ ผลการทดลองที่ได้ คือ การสแตเบิ้ลปรับค่าได้นั้นทำให้สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วกว่าและแม่นยำกว่าสแตเบิ้ลแบบคงที่

E.Kakosimos และคณะ [7] เสนอวิธีการ Fixed-Model Predictive Controller ซึ่งตัวควบคุมนั้นขึ้นอยู่กับ

การเปลี่ยนแปลงค่าสแตเบิ้ลในระหว่างการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดทำให้ได้ผลการทดลองที่ดี และมีประสิทธิภาพ

มีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบพลังงานลม [8] เช่น วิธีการควบคุมแรงบิดที่เหมาะสม (Optimal Torque Control : OTC) , วิธีการรบกวนและสังเกต(P&O) , และ วิธีการเพิ่มอัตราความนำ (Incremental method) [9] ซึ่งข้อดีของวิธี OTC และ P&O คือ ให้ประสิทธิภาพที่สูงและง่ายต่อการทำความเข้าใจ ข้อเสียคือ การเลือกใช้สแตเบิ้ลน้อยทำให้การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นช้า แต่ถ้าเลือกใช้สแตเบิ้ลค่ามากเกินไปจะ ทำให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะคงตัว

การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมนั้น ที่ความเร็วลมต่างๆขึ้นสิ่งที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าที่มีความแม่นยำนั้น คือ เซนเซอร์ทางกล [10] โดยเทคนิคที่ Chun-Yao Lee และคณะ [11] ได้คิดค้นขึ้นมาใช้นี้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบ Radial Basis Function (RBF) และใช้เซนเซอร์ทางกลเพื่อวัดความเร็วรอบและความเร็วลม ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและความเร็วลมที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมนั้นมีค่าถูกต้องและแม่นยำ S.Ganhifar และคณะ [12] ได้ศึกษาการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบควอนตัมซึ่งการใช้แรงบิดที่เหมาะสมนั้นทำให้กำลังไฟฟ้าที่ออกมาใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าสูงสุดแต่เนื่องจากวิธีการของ Chun-Yao Lee และ S.Ganhifar พร้อมด้วยคณะ [11,12] จำเป็นต้องมีข้อมูลทางกล จึงทำให้เพิ่มความยุ่งยากซับซ้อนและมีต้นทุนที่สูงขึ้นอีกด้วย

โครงข่ายระบบประสาทเทียมนั้นเป็นทางเลือกหนึ่งในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดสามารถลดผลกระทบที่เกิดจากการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตาม ซึ่งการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นเป็นวิธีที่ง่ายและใช้การลงทุนที่ต่ำอีกด้วย งานวิจัยนี้เป็นการสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่เป็นสมการพหุนามด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vcf) และแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) หลังจากนั้นนำความสัมพันธ์ดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมที่ทำนายค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vpnm) ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าที่ถูกต้อง และ แม่นยำกว่าจะถูกนำไปใช้เป็นสัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) ในระบบควบคุมต่อไป จากเทคนิคข้างต้นนี้ทำให้สามารถออกแบบและติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network)

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) คือ รูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับประมวลผลด้วยการคำนวณแบบคอนเน็คชันนิสต์ (connectionist) เพื่อจำลองการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมในสมองมนุษย์ ด้วยวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องมือที่มีความสามารถในการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ

แนวคิดเริ่มต้นของเทคนิคนี้ได้มาจากการศึกษาโครงข่ายงานไฟฟ้าชีวภาพในสมอง ซึ่งประกอบด้วย เซลล์ประสาท หรือ “นิวรอน” (neurons) และ จุดประสานประสาทแต่ละเซลล์ประสาทประกอบด้วยปลายในการรับกระแสประสาท เรียกว่า “เดนไดรท์” (Dendrite) ซึ่งเป็น input และปลายในการส่งกระแสประสาทเรียกว่า “แอกซอน” (Axon) ซึ่งเป็นเหมือน output ของเซลล์

เซลล์เหล่านี้ทำงานด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี เมื่อมีการกระตุ้นด้วยสิ่งเร้าภายนอกหรือกระตุ้นด้วยเซลล์ด้วยกัน กระแสประสาทจะวิ่งผ่านเดนไดรท์เข้าสู่นิวเคลียสซึ่งจะเป็นตัวตัดสินใจว่าต้องกระตุ้นเซลล์อื่น ๆ ต่อหรือไม่ ถ้ากระแสประสาททั้งหมด นิวเคลียสก็จะกระตุ้นเซลล์อื่น ๆ ต่อไปผ่านทางแอกซอนของมัน

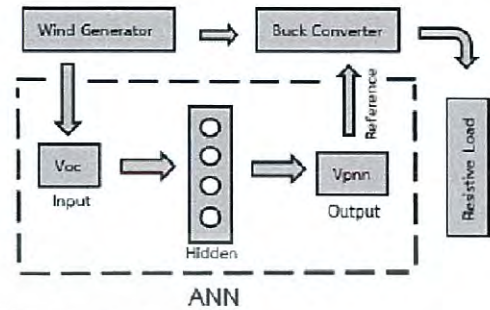
2.1 โครงข่ายประสาทเทียม

โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมมันเริ่มจาก จำนวนชั้นของโครงข่ายประสาทเทียม

1. ชั้นอินพุต จำนวน 1 ชั้น
2. ชั้นซ่อน ต้องมีอย่างน้อย 1 ชั้นซ่อน
3. ชั้นเอาต์พุต จำนวน 1 ชั้น

สำหรับจำนวนชั้นซ่อนของโครงข่ายประสาทเทียม Guo และคณะ [13] กล่าวว่า การกำหนดจำนวน ชั้นซ่อนที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมนั้นไม่มีกฎเกณฑ์แน่นอน แต่ระบุไว้ว่าจะต้องมีชั้นซ่อนอย่างน้อย 1 ชั้นเสมอ ในการเชื่อมต่อโครงข่ายจะมีค่า น้ำหนัก (Weight) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของระบบโครงข่ายประสาทเทียม เนื่องจากเป็นส่วนที่ใช้หาน้ำหนักของความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุตกับข้อมูลเอาต์พุต ว่าข้อมูลอินพุตใดมีความสัมพันธ์กับข้อมูลเอาต์พุตมากหรือน้อยเพียงใด โดยค่าน้ำหนักจะปรับเปลี่ยนไปตามรูปแบบของผลลัพธ์ที่ได้ด้วยการลองผิดลองถูกในความสัมพันธ์แต่ละแบบเพื่อตามหาค่าน้ำหนักที่นำมาใช้แล้วมีความผิดพลาดน้อยที่สุด

- ชนิดของการเชื่อมต่อ แบ่งเป็น 2 ช่วง ได้แก่
- ก. การเชื่อมต่อระหว่างโหนดชั้นอินพุตและโหนดชั้นซ่อน
 - ข. การเชื่อมต่อระหว่างโหนดชั้นซ่อนและโหนดเอาต์พุต



รูปที่ 1 : โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

โดยค่า output ของแต่ละ Node

$$y_j = f(w_1'x_1 + w_2'x_2 + w_3'x_3 + .. + w_m'x_m) \quad (1)$$

- เมื่อ x_j = input จากโหนดอื่น ๆ
 w_j = น้ำหนัก (weight) ของแต่ละแขน
 f = ฟังก์ชันการกระตุ้น (Activation function) หรือฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer function) โดย Zorrias Satine และคณะ [14] ได้แบ่งฟังก์ชันการกระตุ้นหรือฟังก์ชันการถ่ายโอนเป็น 4 ประเภทได้แก่

- ก. ฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear function)
- ข. ฟังก์ชันไม่เชิงเส้น (Non-linear function)
- ค. ฟังก์ชันสมมาตร (Symmetrical function)
- ง. ฟังก์ชันไม่สมมาตร (Non-symmetrical function)

2.1 กระบวนการแพร่กระจายแบบย้อนกลับ

Back-propagation เป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมวิธีหนึ่งที่ยอมรับกันมาก เพื่อปรับค่าน้ำหนักในเส้นเชื่อมต่อระหว่างโหนดให้เหมาะสม โดยการปรับค่าน้ำหนักนี้จะขึ้นกับค่าความผิดพลาดของค่าเอาต์พุตที่คำนวณได้กับค่าเอาต์พุตที่ต้องการ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าอัตราเร็วในการเรียนรู้ (r)
- ขั้นตอนที่ 2 สำหรับแต่ละตัวอย่างอินพุตให้ทำตามขั้นตอนต่อไปนี้จะจนกว่าจะได้ผลลัพธ์ของเอาต์พุตใกล้เคียงกับที่ต้องการ
- ขั้นตอนที่ 2.1 คำนวณหาค่าเอาต์พุตโดยใช้ค่าน้ำหนักเริ่มต้น ซึ่งอาจได้จากการสุ่ม

ขั้นตอนที่ 2.2 คำนวณหาค่าความผิดพลาดของเอาต์พุตที่ได้กับเอาต์พุตที่ต้องการ (เป้าหมาย)

$$E_o = \frac{1}{2}(T - O_o)^2 \quad (2)$$

เมื่อ E_o = ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น
 T = เอาต์พุต (เป้าหมาย)
 O_o = เอาต์พุต (นิวรอล)

กับสมการ สามารถหาได้จาก “หลักของวิธีกำลังสองน้อยที่สุด” โดยยึดหลักที่ว่า ค่าของตัวแปรที่ไมทราบค่าจะสะท้อนถึงค่าที่ต่ำที่สุด ประมาณฟังก์ชัน $z(t)$ จากรูปแบบของสมการพหุนาม

$$\hat{z}(t) = \sum_{j=1}^J a_j t^{j-1} \quad (7)$$

เมื่อ \hat{z} คือ การประมาณ
 $J-1$ คือ ดีกรีของพหุนาม

ขั้นตอนที่ 2.3 คำนวณอนุพันธ์ย่อยของ E_o เทียบกับ W_{ho}

$$\frac{\delta E_o}{\delta W_{ho}} = \gamma_o * O_h \quad (3)$$

ผลรวมของค่าความผิดพลาดสามารถเขียนได้เป็น

$$e = \sum_{n=1}^N (z_n - \hat{z}_n)^2 \quad (8)$$

ขั้นตอนที่ 2.4 คำนวณอนุพันธ์ย่อยในชั้นซ่อน

$$\frac{\delta E_o}{\delta W_{ih}} = (\gamma_o * W_{ho}) * O_h * (1 - O_h) * I \quad (4)$$

จากหลักการของ Orthogonal ค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อ $(z - \hat{z})$ ตั้งฉากกับ \hat{z} จะได้ว่า

$$\text{เมื่อ } \gamma_o = (O_o - T) * O_o * (1 - O_o) \quad (5)$$

$$\sum_{n=1}^N (z_n - \hat{z}_n) \hat{z}_n = 0 \quad (9)$$

W_{ho} = น้ำหนักระหว่างชั้นซ่อนกับชั้นเอาต์พุต
 I = ข้อมูลอินพุต
 O_h = เอาต์พุตในชั้นซ่อน

สามารถอธิบายได้ว่าการฉายเชิงตั้งฉากของข้อมูล z_n ลงบนสมการพหุนาม $\hat{z}(t)$ สำหรับ $N > J$ ซึ่งการฉายเชิงตั้งฉากนี้ทำให้ได้ระบบสมการที่สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของพหุนามที่ทำให้ได้ความผิดพลาดน้อยที่สุด ดังสมการข้างล่าง

ขั้นตอนที่ 2.5 คำนวณหาค่าน้ำหนักใหม่จากสมการ

$$W_{ih/ho}^+ = W_{ih/ho} - \left(r * \frac{\delta E_o}{\delta W_{ih/ho}} \right) \quad (6)$$

$$e_{\min} = \sum_{n=1}^N (z_n - \hat{z}_n) z_n \quad (10)$$

เมื่อ $W_{ih/ho}^+$ = ค่าน้ำหนักใหม่
 $W_{ih/ho}$ = ค่าน้ำหนักเก่า

3. ออกแบบการทดลอง

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดและเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม

3.1.1 การประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

ทำการประมาณค่าด้วยสมการพหุนาม (Polynomial Fitting) ดีกรี 2-6 เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง Voc และ Vcf โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ สมการ Polynomial ดีกรี 5 แสดงดังสมการที่ 11 เนื่องจากมีค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการสอนน้อยที่สุดซึ่งจะแสดงดังตารางที่ 4

2.2 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Method)

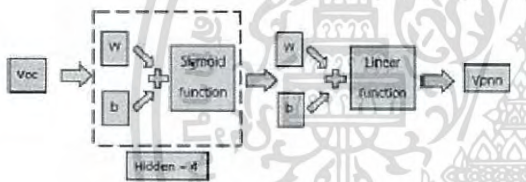
วิธีกำลังสองน้อยที่สุด คือ วิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อแก้ปัญหาการประมาณระบบสมการที่มีจำนวนตัวแปรมากกว่าจำนวนสมการ จะมีคำตอบได้หลายชุดและค่าที่เป็นไปได้มากที่สุดของตัวแปรที่สอดคล้อง

$$V_{\phi} = -4.257 * 10^{-6} V_{oc}^5 + 6.024 * 10^{-4} V_{oc}^4 - 0.03092 V_{oc}^3 + 0.6994 V_{oc}^2 - 6.134 V_{oc} + 19.29 \quad (11)$$

เมื่อ V_{oc} = แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร
 V_{ϕ} = แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

3.1.2 การทำนายด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

เมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) ที่ความเร็วลมต่างๆกับค่าแรงดันที่ทำให้กำลังสูงสุด (Vpm) มาเข้าโครงข่ายประสาทเทียมโดยค่าอินพุต คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) ส่วนค่าเอาต์พุตคือ ค่าแรงดันที่ทำให้กำลังสูงสุด (Vpm) และค่าที่ได้จากการทำนายแรงดันไฟฟ้า (Vpnn) โดยค่าพารามิเตอร์ของโครงข่ายประสาทเทียมแสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม โดยมีอินพุตจำนวน 1 โหนดซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร มีโหนดชั้นซ่อน 4 โหนดโดย Activate Function คือ Sigmoid function และ linear function และมีเอาต์พุต 1 โหนด ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่ทำนายว่ามีกำลังสูงสุด (Vpnn)

ตารางที่ 1 : ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	
Input Data	195
Train Data	105
Test Data	90
Transfer function	Sigmoid , linear function
Input node	1
Hidden node	4
Output node	1
Max iteration	20
Learning rate	0.01

จากตารางที่ 1 มีส่วนของอินพุตจำนวน 195 ข้อมูล ซึ่งครอบคลุมจำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการสอนและ

ทดสอบโดยแบ่งเป็นใช้สอน 105 ข้อมูลและใช้ทดสอบ 90 ข้อมูล เพื่อยืนยันความถูกต้องของโมเดลที่ได้มานี้ ในการนี้ได้เลือกอัตราการเรียนรู้ที่ 1% เนื่องจากเป็นการสอนแบบออฟไลน์ (off-line) ซึ่งไม่จำเป็นต้องการเวลาในการสอนรวดเร็วเหมือนกับการใช้งานตามเวลาจริง (Real-time) สำหรับค่าพารามิเตอร์อื่นเป็นการกำหนดในแบบสุ่มซึ่งการกำหนดดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไปตามการทดลองการสอนตามความเหมาะสม

3.2 คุณลักษณะระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของกังหันลม

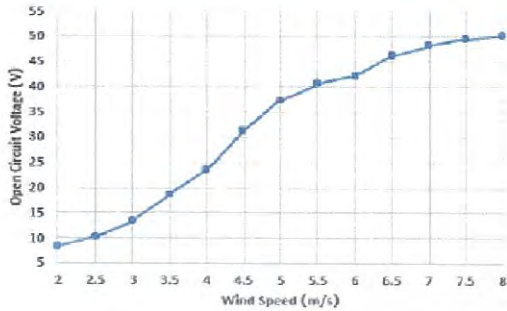
รูปที่ 3 และ 4 แสดงอุโมงค์ลมที่ใช้ทดสอบโดยส่วนขาเข้าจะเป็นใบพัดลมที่เป็นตัวกำเนิดความเร็วซึ่งสามารถปรับค่าความเร็วลมโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สามารถปรับค่าได้หลังจากนั้นพลังงานลมจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ไปหมุนกังหันลมให้ผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาเข้าสู่ระบบต่อไป



รูปที่ 3 : อุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4 : ส่วนกังหันลมด้านขาออกที่ไปขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)



รูปที่ 5 : แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม(เมตร/วินาที) และ ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (โวลต์)

ในงานวิจัยนี้ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม (2-8 เมตร/วินาที) และ ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (โวลต์) จากกราฟรูปที่ 5 พบว่า เมื่อความเร็วลมมีค่ามากขึ้นทำให้ค่าแรงดันเปิดวงจรมีค่าสูงขึ้นด้วย ในการวัดค่าแรงดันเปิดวงจรนั้นจะทำการเก็บค่าทั้งหมด 15 ค่า ในแต่ละความเร็วลม เพื่อมาเป็นอินพุตให้แก่โครงข่ายประสาทเทียม

4. ผลการทดลอง

4.1 การทดลองหาค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

ทดลองตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (P) จากการวัดแรงดันไฟฟ้า (V) และ กระแสไฟฟ้า (I) โดยทำการปรับค่าตัวต้านทานขนาด 0 ถึง 1000 โอห์ม จากการทดลองทั้งหมด 10 ครั้ง ได้ผลแสดงในตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กระแสและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมขนาดเล็กเมื่อความต้านทานเปลี่ยนแปลงจาก 0 ถึง 1000 โอห์มที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

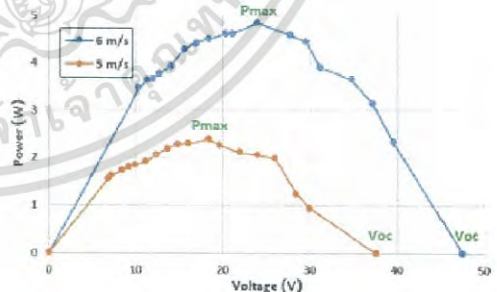
แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า(W)
24.0	.086	2.06
22.0	0.96	2.11
19.6	0.12	2.23
18.4	0.13	2.39
16.0	0.14	2.30
13.6	0.16	2.20
12.4	0.17	2.07

จากตารางที่ 2 ที่ความเร็วลม 5 เมตร/วินาที พบว่าเมื่อค่าความต้านทานมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นด้วยส่วนค่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าลดลง และค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่วัดได้คือ 2.39 วัตต์

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กระแสและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมขนาดเล็กเมื่อความต้านทานเปลี่ยนแปลงจาก 0 ถึง 1000 โอห์มที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที

แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า(W)
31.2	0.13	3.90
29.6	0.15	4.44
27.8	0.17	4.58
24	0.20	4.85
21.2	0.22	4.62
18.4	0.25	4.50
17.0	0.26	4.42

จากตารางที่ 3 ที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที พบว่าเมื่อค่าความต้านทานมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นด้วยส่วนค่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าลดลง และค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่วัดได้คือ 4.85 วัตต์



รูปที่ 6 : ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กับกำลังไฟฟ้าที่ความเร็วลม 5 และ 6 เมตร/วินาที

จากรูปพบว่าเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้ามากขึ้นจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น จนกระทั่งถึงจุดที่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด หลังจากนั้นเมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้ามีค่าลดลงเรื่อยๆจนเป็นศูนย์ จากกราฟที่ความเร็วลม 5 และ 6 เมตร/วินาที ได้ค่าแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้ามี

ค่าสูงสุด (Vpm) เท่ากับ 18.4, 24 โวลต์ตามลำดับ และ ค่ากำลังสูงสุดมีค่า 2.39, 4.85 วัตต์ ตามลำดับ

4.2 แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณโดยใช้สมการพหุนามที่ติกรีต่างๆ

ตารางที่ 4 : แสดงค่าความผิดพลาดกำลังสองของแรงดันไฟฟ้าจากการสอนและการทดสอบจากการประมาณโดยใช้สมการพหุนามติกรี 2 ถึง 6

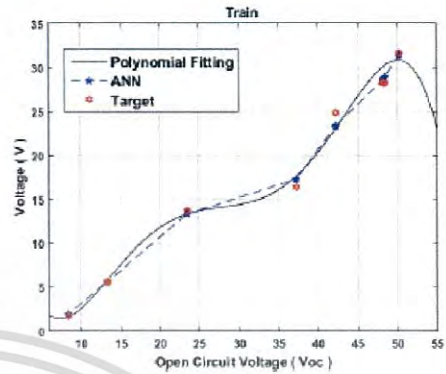
ติกรี	การสอน (Train)	การทดสอบ (Test)
2	3.6127	1.3050
3	1.9992	0.6647
4	1.9866	0.6281
5	1.2967	1.0177
6	2.3343	15.9307

จากตารางที่ 4 พบว่าที่สมการพหุนามติกรี 5 มีค่าความผิดพลาดกำลังสองในการสอนน้อยที่สุด ทางผู้วิจัยจึงทำการเลือกใช้การประมาณโดยใช้สมการพหุนามติกรี 5

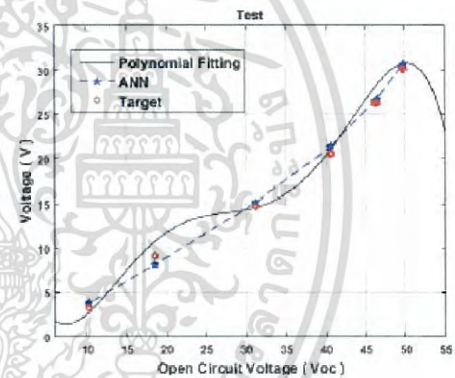
ตารางที่ 5 : ค่าความผิดพลาดกำลังสองของโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และการประมาณโดยใช้สมการพหุนาม (Polynomial) ติกรี 5 ทั้งข้อมูลการสอนและข้อมูลทดสอบ

เทคนิค	การสอน (Train)	การทดสอบ(Test)
ANN	0.4867	0.4264
Polynomial	1.2967	1.0177

จากตารางที่ 5 พบว่าค่าความผิดพลาดกำลังสองของเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าต่ำกว่าเทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนามทั้งข้อมูลการสอนและการทดสอบ



รูปที่ 7 : การเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเฉพาะส่วนที่ทำการสอนจากเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมและเทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนามติกรี 5



รูปที่ 8 : การเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเฉพาะส่วนที่ทำการทดสอบจากเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมและเทคนิคการประมาณโดยใช้สมการพหุนามติกรี 5

5. สรุปผลการทดลอง

การทำนายแรงดันที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าความผิดพลาดกำลังสองประมาณ 0.5 ส่วนเทคนิคการประมาณค่าจากสมการพหุนามโดยใช้กำลังสองน้อยที่สุดมีค่าความผิดพลาดกำลังสองประมาณ 1.2 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่า เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมนั้นทำนายค่าแรงดันไฟฟ้าออกมาได้ใกล้เคียงกับแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด จากเทคนิคดังกล่าวนี้จะนำไปเป็นสัญญาณอ้างอิงเพื่อใช้ในการควบคุมวงจรลดทอนระดับแรงดันเพื่อทำการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม่นยำ และรวดเร็ว

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก กองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หมายเลขทุนวิจัย KREF055706

6. เอกสารอ้างอิง

[1] R.M. Zavadil, Wind Generation Technical Characteristic for the NYSERDA Wind Impact Study, Knoxville, pp.7-12, November 2003

[2] A.Mellit, H.Rezzouk, A.Messai, B.Medjahed, FPGA-based real time implementation of MPPT-controller for photovoltaic Systems, *Renewable Energy* 36, pp.1652-1661, 2011.

[3] T.Ocran, C.Junyi, C.Bigang, S.Xinghua, Artificial Neural Network maximum power point tracker for Solar Electric Vehicle Research and Development Center for electric Vehicle, University of Xi'anJiaotong, Xi'an 710049, China, 2010

[4] F.Bouchafaa, I.Hamzaoui, A.Hadjamma, Fuzzy Logic Control the Tracking of Maximum Power Point of a PV Systems, *Energy Procedia* 6, pp.633-642, 2011.

[5] A.B.G.Bahgat, N.H.Helwa.G.E.Ahmad, and E.T.ElShenawy, Maximum power point tracking controller for PV Systems using neural networks, *Renewable Energy* 30, pp.1257-1286, 2005.

[6] D.Lalili, A.Mellit, N.Lourci, B.Medjahed, E.M.Berkouk, Input output feedback linearization control and variable step size MPPT algorithm of a grid-connected photovoltaic inverter, *Renewable Energy* 36, pp.3282-3291, 2011.

[7] E.Kakosimos, G.Kladas, Implementation of photovoltaic array MPPT through fixed step predictive control technique, *Renewable Energy* 36, pp.2508-2514, 2011.

[8] Abdullah M.A., Yatim A.H.M., Tan C.W. And Saidur R, A review of Maximum power point tracking algorithms for wind energy system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 2012.

[9] R. Kot, M. Rolak, and M. Malinowski, Comparison of maximum peak Power tracking algorithm for small wind turbine, *Mathematical and Computer in simulation* 91, pp.29-40, 2013.

[10] Chiung-Hsinh-Chen, Chih-Ming Hong, and Fu-Sheng-Cheng, Intelligent Speed sensor less maximum power point tracking control for wind Generation system, *Electrical power and Energy systems* 42, 2012.

[11] Chun-Yao Lee, Po-Hung Chen, and Yi-Xing Shen, Maximum power Point tracking system of small wind power generator using RBFNN approach, *Expert Systems with Applications* 38, 2011.

[12] S.Ganhefar, A.Ghassemi, and M.Ahmedi, Improving efficiency of two-type maximum power point tracking Methods of tip-speed ratio and optimum torque in wind turbine system using a quantum neural network, *Energy* 67, 2014.

[13] Guo, Y. & Dooley, K. J. 1992. Identification of change structure in statistical process control. *International Journal of Productin Research*, 30(7), 1655-1669.

[14] Zorriassatine, F. & Tannock, J.D.T. 1998. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 9-209

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล

นายวศพล ดิษฐ์เสถียร

วัน เดือน ปีเกิด

29 มีนาคม 2536

ที่อยู่

255 ถ.เทศบาลสาย 1 แขวง วัดกัลยาณ์ เขต ธนบุรี กทม. 10600

ประวัติการศึกษา :

- 2558 – ปัจจุบัน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปริญญาโท คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า เกรดเฉลี่ย 3.90
- 2554 – 2558 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปริญญาตรี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า เกรดเฉลี่ย 3.04



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้