

การตรวจจับและป้องกันฟอลต์ของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

ชาญชัย กุศลจิตกรณ¹ ชาญวิทย์ ตั้งสิริวรกุล^{1*} สุริโยทัย สุปัญญาพงศ์² และ สิริวิช ทัดสวน³

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างชุดตรวจจับและป้องกันฟอลต์ของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตัดสินใจเพื่อป้องกันฟอลต์ในรูปแบบต่างๆ โดยออกแบบให้สามารถรับอินพุตได้ 9 สัญญาณ คือแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิทั้ง 3 เฟสและกระแสทางด้านทุติยภูมิทั้ง 3 เฟส โดยที่อินพุตเหล่านี้ถูกคำนวณเป็นค่า RMS และส่งเข้าตัวโครงข่ายประสาทเทียมที่มีการเรียนรู้แบบแพร่กลับ ส่วนภาคเอาต์พุตได้กำหนดแบ่งออกเป็น 7 เอาต์พุต ได้แก่ ปกติ เฟสหาย แรงดันสูงเกิน แรงดันต่ำเกิน ภาระเกิน

แรงดันไม่สมดุล และขดลวดลัดรอบ ส่วนภาคซอฟต์แวร์ได้ทำการออกแบบ GUI ด้วยโปรแกรม MATLAB ให้มีการต่อเชื่อมกับการ์ด DAQ แบบเวลาจริง เพื่อติดต่อกับชุดตรวจจู้ด้านอินพุตทั้ง 9 ช่องสัญญาณ รวมถึงส่งสัญญาณเอาต์พุต 1 ช่องสัญญาณไปควบคุมการตัดต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าของหม้อแปลง ผลลัพธ์ที่ได้สามารถตรวจจับและป้องกันฟอลต์ที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสได้อย่างน่าพึงพอใจ

คำสำคัญ: โครงข่ายประสาทเทียม ฟอลต์ การป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์กำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

³ รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 6322 อีเมล: cwtk@kmutnb.ac.th



Fault Detection and Protection of Three-phase Transformer Using Artificial Neural Network

Chanchai Kusoljittakorn¹ Chanwit Tangsiriworakul^{1*} Suriyotai Supanyapong² and Sirivit Tudsum³

Abstract

This paper presents the design and implementation of a system for detecting and protecting faults of three-phase transformer using artificial neural networks (ANNs). The 9 inputs are composed of 3 primary voltage signals, 3 primary current signals and 3 secondary current signals. These were calculated to discover the RMS value to be sent to the back propagation neural network. The 7 outputs of motor's status are classified as the normal, single phasing, over voltage, under voltage, over load, unbalanced

voltage and short turn types. The software is designed and implemented with graphical user interface (GUI) based technique in MATLAB program for interfacing with real-time DAQ card. The DAQ card receives 9 input signals from the sensor set and sends the output signal to control the transformer supply switch. The experimental results show that the proposed system can detect and protect the faults effectively.

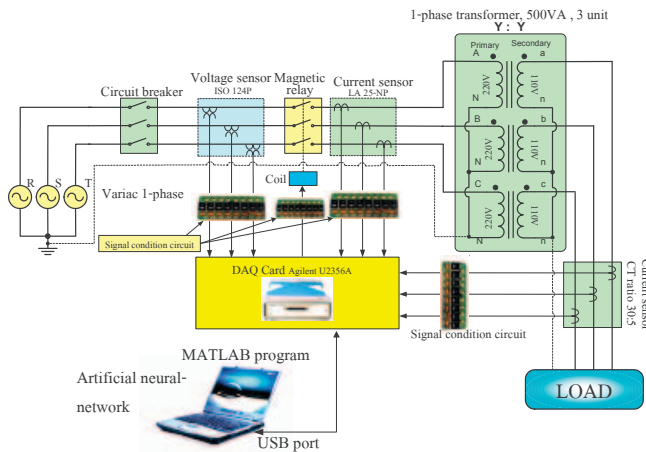
Keyword: Artificial Neural Network, Fault, Protection, Transformer

¹ Assistant Professor, Department of Electronic Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

² Assistant Professor, Department of Power Electronic Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

³ Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, South-East Asia University.

* Corresponding Author, Tel. 0-2555-2000 Ext.6322, E-mail: cwtk@kmutnb.ac.th



รูปที่ 1 ระบบตรวจจับและป้องกันฟอลต์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่นำเสนอ

1. บทนำ

ในปัจจุบันอาคารที่พักอาศัย อาคารพาณิชย์หรือโรงงานอุตสาหกรรมได้มีการนำหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เฟสไปใช้งานเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีความจำเป็นต้องลดจากแรงดันสูงเป็นแรงดันต่ำที่อยู่ในระดับเดียวกับแหล่งจ่ายของเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ขาดไม่ได้ ถ้าพิจารณาในระบบการผลิตของภาคอุตสาหกรรม หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ถ้าหากหม้อแปลงเกิดการชำรุดเสียหายอาจจะส่งผลถึงเสถียรภาพที่เลวร้ายเกิดขึ้นกับองค์กร เพื่อลดความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากเหตุดังกล่าว ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างชุดตรวจจับและป้องกันฟอลต์ของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมช่วยในการตัดสินใจ ซึ่งจะช่วยให้ช่วยลดความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น เช่น ความเสียหายเวลา และโอกาสรวมถึงความน่าเชื่อถือได้เป็นอย่างดี

2. หลักการ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาให้ความสนใจในเรื่องการป้องกันหม้อแปลงยังไม่แพร่หลายมากนักหรือเท่าที่มีอยู่การทำวิจัยก็ไม่ได้นำไปปรับปรุงเป็นระบบที่ใช้จริงในลักษณะการแสดงผลในรูปแบบเวลาจริง [1]-[5] หรือบางงานวิจัยได้มีการแสดงผลในรูปแบบเวลาจริงแต่ก็ไม่ได้อยู่ในรูปแบบของการป้องกันหม้อแปลง โดยจะเป็นการแสดงค่าของกำลัง

สูญเสียของหม้อแปลงเท่านั้น [6] ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบตรวจจับและป้องกันฟอลต์ของหม้อแปลงในลักษณะการแสดงผลในรูปแบบเวลาจริง โดยใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมมาช่วยในการตัดสินใจ เพื่อป้องกันฟอลต์ในรูปแบบต่างๆ โดยที่ตัวโครงข่ายประสาทเทียมจะรับข้อมูลด้านอินพุตจำนวน 9 อินพุต ได้แก่ แรงดันและกระแสทางด้านปฐมภูมิทั้ง 3 เฟสและกระแสทางด้านทุติยภูมิทั้ง 3 เฟส ส่วนภาคเอาต์พุตได้แบ่งออกเป็น 7 เอาต์พุต ได้แก่ ไม่เกิดฟอลต์ (Normal) เฟสหาย (Single Phasing) แรงดันไม่สมดุล (Unbalanced Voltage) แรงดันสูงเกิน (Over Voltage) แรงดันต่ำเกิน (Under Voltage) ภาระเกิน (Overload) ขดลวดลัดรอบหม้อแปลง (Short Turn) ส่วนภาคซอฟต์แวร์ได้เลือกใช้โปรแกรม MATLAB ในการควบคุมกระบวนการรับส่งข้อมูลทั้งหมดด้วยการ์ด DAQ แบบเวลาจริง เพื่อติดต่อกับชุดตรวจรู้ทั้ง 9 สัญญาณ รวมถึงส่งสัญญาณเอาต์พุตไปควบคุมการติดต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าของหม้อแปลงต่อไป โดยจะเห็นว่างานวิจัยที่นำเสนอนี้ครอบคลุมรูปแบบฟอลต์ที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงได้หลากหลายรูปแบบ

2.1 ระบบป้องกันหม้อแปลง

จากรูปที่ 1 แสดงระบบตรวจจับและป้องกันฟอลต์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่นำเสนอ โดยภาคอินพุตประกอบด้วย

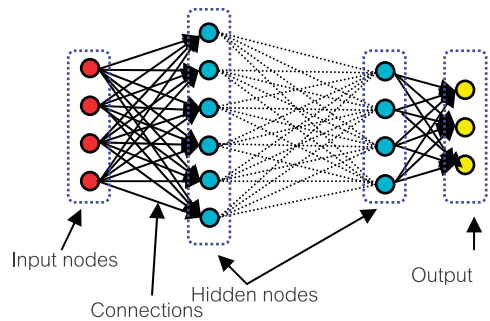
แรงดันและกระแสทางด้านปฐมภูมิทั้ง 3 เฟสและกระแสทางด้านทุติยภูมิทั้ง 3 เฟส รวมทั้งหมด 9 อินพุต จากนั้นออกแบบและสร้างวงจรที่เปลี่ยนสัญญาณที่ตรวจวัดได้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบอนาลอกมีขนาดไม่เกิน 10 โวลต์ เพื่อเป็นอินพุตให้กับการ์ด DAQ ที่ต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์ผ่าน USB พอร์ต โดยสัญญาณอินพุตทั้งหมดจะถูกนำไปแสดงและประมวลผลแบบเวลาจริง (Real Time) ด้วยโปรแกรม MATLAB ที่มีการออกแบบ GUI และใช้โครงข่ายประสาทเทียม (ได้ทำการสอนไว้แล้ว) เป็นตัวตัดสินใจ เมื่อตรวจพบฟอลต์จะส่งสัญญาณผ่านการ์ด DAQ ไปยังวงจรควบคุม เพื่อไปตัดระบบไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงต่อไป

2.2 ระบบตัดสินใจโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network)

การทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2 เมื่อมีอินพุตเข้ามายังโครงข่ายจากนั้นจะนำค่าอินพุตคูณกับน้ำหนักประสาทของแต่ละขา ผลที่ได้จากอินพุตทุก ๆ ขาของนิวรอนจะเอามารวมกันแล้วก็เอามาเทียบกับ Threshold ที่กำหนดไว้ จากนั้นนิวรอนก็จะส่งเอาต์พุตออกไป ค่าเอาต์พุตนี้ก็จะถูกส่งไปยังอินพุตของนิวรอนอื่นๆ ที่เชื่อมกันในโครงข่าย

สิ่งสำคัญ คือต้องทราบค่าน้ำหนักประสาท (Weight) และ Threshold ซึ่งเป็นค่าที่ไม่แน่นอน แต่สามารถกำหนดให้คอมพิวเตอร์ปรับค่าเหล่านั้นได้โดยการสอนให้รู้จักรูปแบบของสิ่งที่ต้องการโดยให้รู้จำ เรียกว่าการเรียนรู้แบบแพร่กลับ (Back Propagation) ซึ่งเป็นกระบวนการย้อนกลับของการรู้จำในการฝึกเครือข่ายแบบไปข้างหน้า (Feed-forward Neural Network) เพื่อใช้ในการปรับปรุงน้ำหนักของคะแนนของเครือข่าย (Network Weight) หลังจากที่มีการใส่รูปแบบข้อมูลสำหรับฝึกให้แก่เครือข่ายในแต่ละครั้งแล้วค่าที่ได้รับ (เอาต์พุต) จากเครือข่ายจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่คาดหวัง แล้วทำการคำนวณหาความผิดพลาดค่าความผิดพลาดนี้จะถูกส่งกลับเข้าสู่เครือข่ายเพื่อใช้แก้ไขค่าน้ำหนักคะแนนต่อไป

การเรียนรู้แบบแพร่กลับเป็นอัลกอริทึมที่ใช้ใน



รูปที่ 2 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม เป็นวิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้ในเพอร์เซปตรอนหลายชั้นเพื่อปรับค่าน้ำหนักในเส้นเชื่อมต่อระหว่างโหนดให้เหมาะสม โดยการปรับค่าน้ำหนักจะขึ้นกับความแตกต่างของค่าเอาต์พุตที่คำนวณได้กับค่าเอาต์พุตที่เราต้องการ ขั้นตอนขบวนการของการเรียนรู้แบบแพร่กลับมีดังนี้

1. อินพุต I ของแต่ละนิวรอนในชั้นกลางและชั้นเอาต์พุตแสดงดังสมการ 1

$$I_i = \sum_{j=1}^n (W_{ij}X_j + h_i) \quad (1)$$

เมื่อ

X คือค่าเอาต์พุตของนิวรอนชั้นก่อนหน้า

h คือค่าไบอัส

W คือค่าน้ำหนักประสาท

2. เอาต์พุตของนิวรอนชั้นกลางและชั้นเอาต์พุต (y) มีค่าเท่ากับ $f(I)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันแบบ Log-sigmoid แสดงดังสมการ 2

$$f(I) = \frac{1}{1 + e^{-I}} \quad (2)$$

3. ช่วงระหว่างการฝึกสอนค่าน้ำหนักประสาท จะมี การเปลี่ยนแปลงตามหลักการ Delta-rule แสดงดังสมการ 3

$$\Delta W_{ij} = \eta E f(I) + \alpha \Delta W_{ij}^{previous} \quad (3)$$

เมื่อ

η คือค่าคงที่ของการเรียนรู้ (Learning Constant)

α คือค่าคงที่ของโมเมนตัม (Momentum Constant)

โดยที่ η และ α กำหนดอยู่ในช่วง 0.0 ถึง 1.0 ขึ้นกับการประยุกต์ใช้งาน

4. ค่าผิดพลาดของชั้นเอาต์พุต คือค่าที่เกิดจากค่าที่ต้องการลบด้วยค่าที่แท้จริง แสดงดังสมการ 4

$$E_i^{output} = y_i^{desired} - y_i^{actual} \quad (4)$$

5. ค่าผิดพลาดจากชั้นกลางคือค่าที่ถูกแปรกลับจากชั้นเอาต์พุตคูณกับ $\frac{df(I_i^{middle})}{dI}$ แสดงดังสมการ 5

$$E_i^{middle} = \frac{df(I_i^{middle})}{dI} \sum_{j=1}^n W_{ij} E_i^{output} \quad (5)$$

หลังจากโครงข่ายที่ถูกฝึกสอนแบบออฟไลน์ โดยมีการกำหนดค่าน้ำหนักประสาทที่เหมาะสมแล้วจะได้เพิ่มข้อมูลที่นำไปใช้งานในระบบตรวจจับและป้องกันฟอลต์ของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อไป

3. การออกแบบระบบป้องกันหม้อแปลง

3.1 การออกแบบทางด้านฮาร์ดแวร์

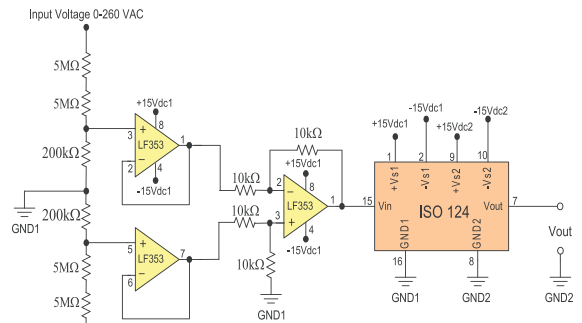
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบด้านฮาร์ดแวร์ [7] ซึ่งมีส่วนประกอบภาคต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3 ถึง 6 ส่วนรายละเอียดหม้อแปลงแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของหม้อแปลง 1 เฟสแบบแห้งที่ใช้ทดสอบ

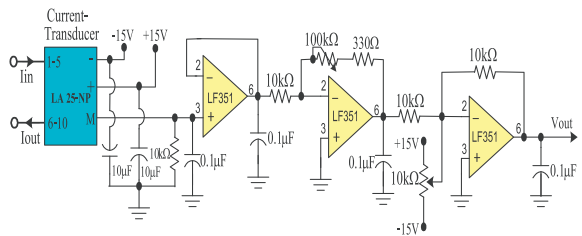
Rated = 500 VA	Frequency = 50 Hz
Voltage Primary = 220 V Secondary = 110 V	Current Primary = 2.27 A Secondary = 4.54 A
Primary winding = 220 turn	Secondary winding = 110 turn
Insulation Class = F Limiting hot spot temperature 155 °C	

3.1.1 ภาคตรวจจับแรงดันไฟฟ้า (Voltage Sensor)

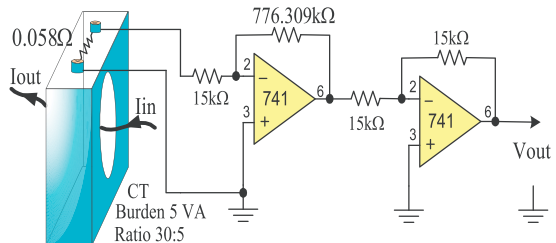
Voltage L-L (380V) หรือ Voltage L-N (220V) : Signal Voltage (4.44V) อัตราส่วนคือ 49.549 : 1



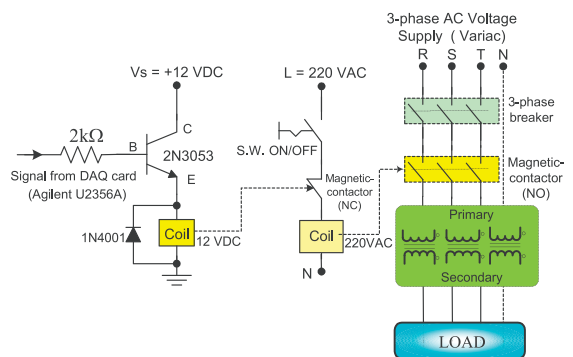
รูปที่ 3 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า



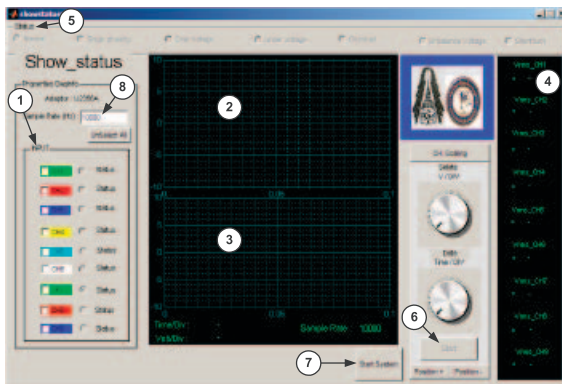
รูปที่ 4 วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ



รูปที่ 5 วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ



รูปที่ 6 วงจรควบคุมและวงจรกำลัง



รูปที่ 7 โครงสร้างของ GUI ที่ได้จากการออกแบบ

3.1.2 ภาควิชาการตรวจสอบกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (Current Sensor of Primary Side) Current (1A) : Signal Voltage (1V) อัตราส่วนคือ 1 : 1

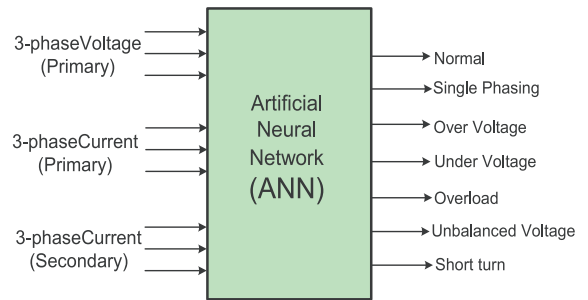
3.1.3 ภาควิชาการตรวจสอบกระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ (Current Sensor of Secondary Side) Current (2A) : Signal Voltage (1V) อัตราส่วนคือ 2 : 1

3.1.4 ภาควิชาควบคุมและวงจรกำลัง

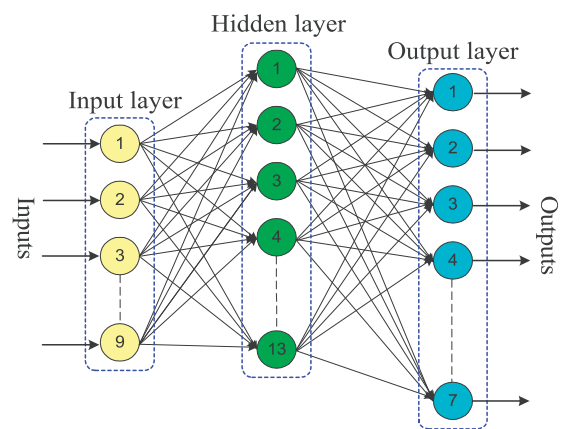
3.2 การออกแบบ GUI (Graphical User Interface)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบ GUI เพิ่มเติมจาก [8] ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 7 ดังนี้

1. เป็นส่วนเลือกช่องสัญญาณ (Channel)
2. เป็นส่วนแสดงรูปกราฟสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิที่อยู่ในแต่ละ Channel รวมถึงค่า V/DIV, Time/DIV และ Sample Rate
3. เป็นส่วนแสดงรูปกราฟสัญญาณของกระแสทางด้านทุติยภูมิที่อยู่ในแต่ละ Channel รวมถึงค่า V/DIV, Time/DIV และ Sample Rate
4. เป็นส่วนแสดงค่า Vrms ในแต่ละ Channel
5. แสดงสถานะของหม้อแปลงในขณะนั้น
6. เป็นส่วนกำหนดค่า V/DIV และ TIME/DIV ซึ่งเป็นแบบ Volume และยังมีปุ่ม Start เพื่อให้เริ่มการทำงานของโปรแกรมรวมถึงมีปุ่ม Position+, Position- เพื่อปรับ Scale ให้เลื่อนขึ้นลงได้ตามความต้องการ



รูปที่ 8 อินพุตและเอาต์พุตของ ANN แบบแพร่กลับที่นำเสนอ



รูปที่ 9 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในงานวิจัย

7. เป็นปุ่มที่ใช้ในการเริ่มการทำงานใหม่ของระบบไฟฟ้าซึ่งต่อร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้า หลังจากที่เกิดข้อผิดพลาดในสถานะต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้า

8. เลือก Sampling Rate

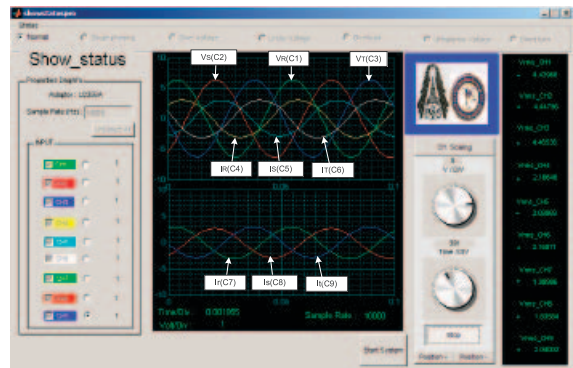
3.3 การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียม

จากรูปที่ 8 แสดงอินพุตและเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำเสนอ โดยมี 9 อินพุตคือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิด้านละ 3 เฟส และกระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิทั้ง 3 เฟส ส่วนภาคเอาต์พุตได้แบ่งออกเป็น 7 เอาต์พุต ได้แก่ ปกติ เฟสหาย แรงดันไม่สมดุล แรงดันสูงเกิน แรงดันต่ำเกิน ภาวะเกิน ขดลวดลัดรอบ

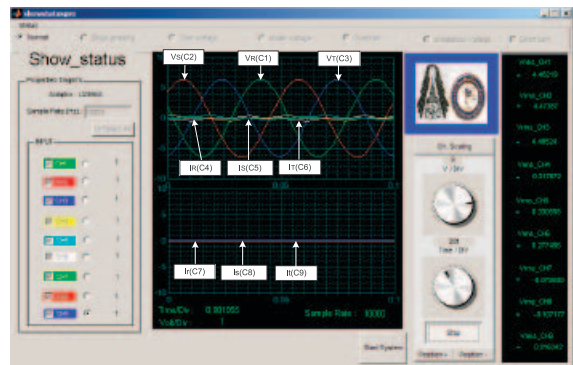
ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบโครงข่ายที่มี 1 ชั้นซ่อน ซึ่งมีรูปแบบคือชั้นอินพุต (9)-กลาง (13)-ชั้นเอาต์พุต (7) แสดงดังรูปที่ 9 โดยมีการกำหนดช่วงข้อมูลของพล็อต ดังตารางที่ 2 รวมถึงจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอนของพล็อต แต่ละกรณีดังตารางที่ 3 ส่วนการฝึกสอนใช้คำสั่งนิวรอน ในซอฟต์แวร์โปรแกรม MATLAB โดยใช้วิธีการเรียนรู้แบบแพร่กลับ ใช้ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบ Log-sigmoid กำหนดค่าจำนวนรอบการเรียนรู้ 52,902 รอบ และใช้คอมพิวเตอร์แบบ Notebook ยี่ห้อ Acer (emachines) รุ่น D725 CPU-T4300 Pentium หน่วยความจำขนาด 1 GB จากการทดสอบใช้เวลาในการเรียนรู้ทั้งสิ้น 18 นาที 46 วินาที

ตารางที่ 2 การกำหนดช่วงข้อมูลของพล็อต

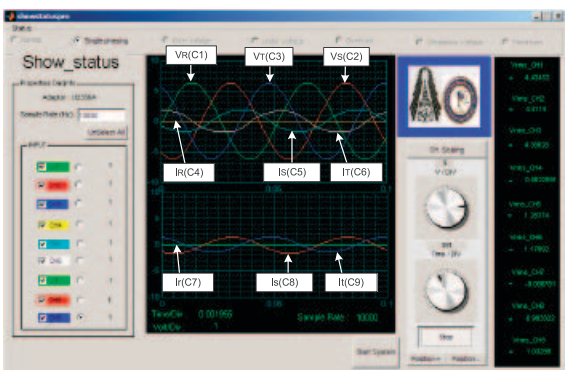
Fault	Signal Condition
Normal (N)	แรงดัน 3.996 ถึง 4.884Vrms (ของ 4.44Vrms) กระแสต้านปฏิกิริยาที่มี 0.2 ถึง 2.27Vrms (กระแสต้านปฏิกิริยาที่ไร้ภาวะถึงกระแสต้านปฏิกิริยาที่พิกัด) และกระแสต้านพิกัดที่มี 0 ถึง 2.27Vrms (กระแสต้านพิกัดที่ไร้ภาวะถึงกระแสต้านพิกัดที่พิกัด)
Single Phasing (SP)	แรงดันต้านปฏิกิริยา 3.996 ถึง 4.884 Vrms กระแสต้านปฏิกิริยาต่ำกว่า 0.05 Vrms
Over Voltage (OV)	แรงดันต้านปฏิกิริยาสูงกว่า 4.884 Vrms ทั้ง 3 เฟส
Under Voltage (UV)	แรงดันต้านปฏิกิริยาต่ำกว่า 3.996 Vrms ทั้ง 3 เฟส
Overload (OL)	กระแสต้านปฏิกิริยาสูงกว่า 2.27 Vrms (กระแสต้านปฏิกิริยาที่พิกัด) และกระแสต้านพิกัดสูงกว่า 2.27Vrms (กระแสต้านพิกัดที่พิกัด)
Unbalanced Voltage (UB)	เปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลมีค่าไม่เกิน 2% (สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้า) $\%V_{UB} = \frac{V_{max\ dev}}{V_{avg}} \times 100 ; V_{avg} = \frac{V_{RS} + V_{ST} + V_{TS}}{3}$ เมื่อ $\%V_{UB} = \text{เปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล}$ $V_{avg} = \text{แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่างเฟส (V)}$ $V_{max\ dev} = \text{แรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดระหว่างเฟสใดเฟสหนึ่งกับ } V_{avg} \cdot V_{RS} \cdot V_{ST} \cdot V_{TR} = \text{แรงดันระหว่างเฟส (V)}$
Short Turn (ST)	กระแสต้านปฏิกิริยาสูงกว่า 2.27Vrms (กระแสต้านปฏิกิริยาที่พิกัด) และกระแสต้านพิกัดที่มี 0 ถึง 2.27Vrms (กระแสต้านพิกัดที่ไร้ภาวะถึงกระแสต้านพิกัดที่พิกัด)



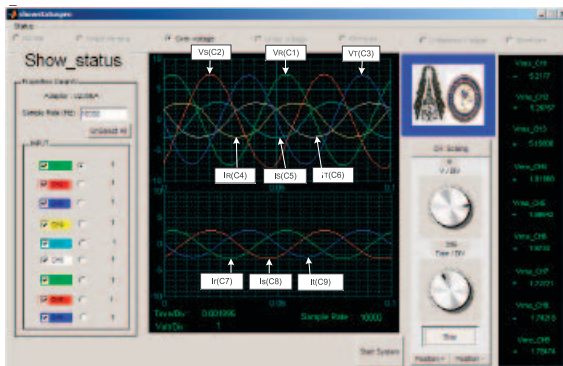
รูปที่ 10 สัญญาณต่างๆ สภาวะ Normal ขณะมีภาวะ



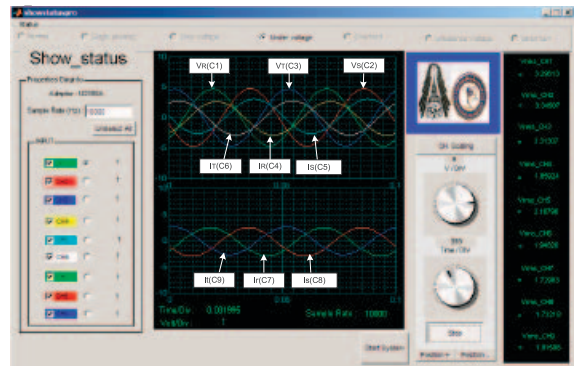
รูปที่ 11 สัญญาณต่างๆ สภาวะ Normal ขณะไม่มีภาวะ



รูปที่ 12 สัญญาณต่างๆ เมื่อเกิด Single Phasing Fault



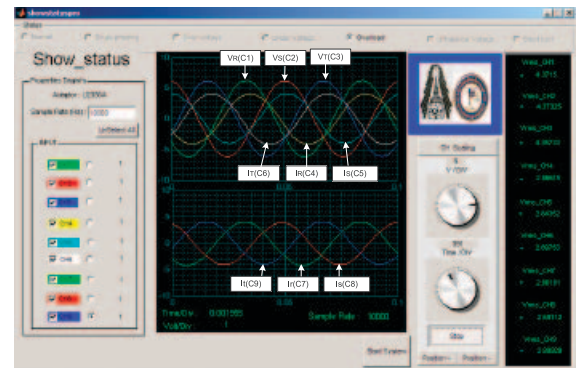
รูปที่ 13 สัญญาณต่างๆ เมื่อเกิด Over Voltage Fault



รูปที่ 14 สัญญาณต่างๆ เมื่อเกิด Under Voltage Fault

ตารางที่ 3 จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอนของฟอลต์แต่ละกรณี

Fault	Data Set
Normal (N)	450
Single Phasing (SP)	240
Over Voltage (OV)	240
Under Voltage (UV)	240
Overload (OL)	210
Unbalanced Voltage (UB)	400
Short Turn (ST)	300
Total fault	2,080



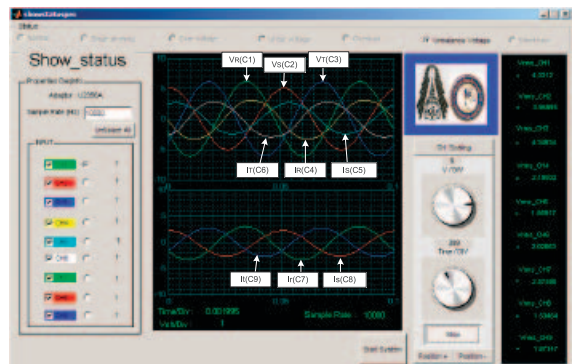
รูปที่ 15 สัญญาณต่างๆ เมื่อเกิด Overload Fault

4. ผลการทดสอบ

จากรูปที่ 10 ถึง 18 เป็นค่าและรูปสัญญาณจากการทดสอบฟอลต์แต่ละกรณี ส่วนตารางที่ 4 และ 5 เป็นการสรุปค่าอินพุตและเอาต์พุตของฟอลต์แต่ละกรณี

จากรูปที่ 10 และ 11 เป็นการทดสอบการทำงานในสภาวะปกติเมื่อมีภาระและไม่มีภาระเรียงตามลำดับ

จากรูปที่ 12 เป็นการทดสอบการเกิดฟอลต์แบบเฟสหายซึ่งทดสอบกับเฟส R จากรูปที่ 13 เป็นการทดสอบการเกิดฟอลต์แบบแรงดันเกิน จากรูปที่ 14 เป็นการทดสอบการเกิดฟอลต์แบบแรงดันต่ำ จากรูปที่ 15 เป็นการทดสอบการเกิดฟอลต์แบบภาระเกิน จากรูปที่ 16 เป็นการทดสอบการเกิดฟอลต์แบบแรงดันไม่สมดุล



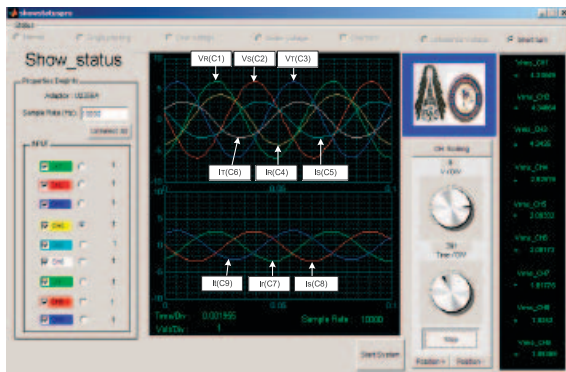
รูปที่ 16 สัญญาณต่างๆ เมื่อเกิด Unbalanced Voltage Fault

ตารางที่ 4 อินพุตสัญญาณแรงดันด้านปฐมภูมิ กระแสด้านปฐมภูมิ กระแสด้านทุติยภูมิและเอาต์พุต ในสภาวะที่เกิดฟอลต์ของแต่ละกรณี จากการทดสอบแบบออนไลน์

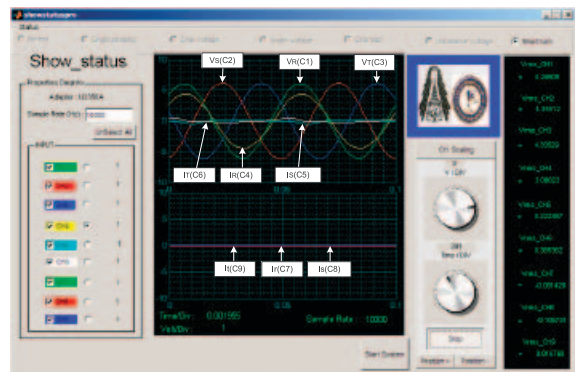
Fault	Input									Output						
	VRN (V)	VSN (V)	VTN (V)	IR (V)	IS (V)	IT (V)	Ir (V)	Is (V)	It (V)	NM	SP	OV	UV	OL	UB	ST
Normal (N) of Onload Fig.10	4.4396	4.4479	4.4653	2.1664	2.0996	2.1697	1.9999	1.8358	2.0400	1	0	0	0	0	0	0
Normal (N) of Noload fig.11	4.4621	4.4738	4.4852	0.3176	0.3305	0.2774	0.0799	0.1071	0.0163	1	0	0	0	0	0	0
Single phasing (SP) Fig.12	4.4345	4.4119	4.3862	0.0022	1.2837	1.1799	0.0807	0.9833	1.0329	0	1	0	0	0	0	0
Over Voltage (OV) Fig.13	5.2177	5.2675	5.1580	1.9166	1.9864	1.9734	1.7277	1.7421	1.7847	0	0	1	0	0	0	0
Under Voltage (UV) Fig.14	3.2961	3.3450	3.3130	1.8592	2.1079	1.9482	1.7298	1.7321	1.8150	0	0	0	1	0	0	0
Overload (OL) Fig.15	4.3715	4.3732	4.3573	2.8661	2.8435	2.8975	2.8018	2.6911	2.8092	0	0	0	0	1	0	0
Unbalanced Voltage (UB) Fig.16	4.3312	3.5659	4.3493	2.1983	1.8591	2.0206	2.0759	1.5346	1.8714	0	0	0	0	0	1	0
Short Turn (ST) 2% Fig.17	4.3384	4.3486	4.3435	2.9291	2.0933	2.0817	1.8177	1.8252	1.8936	0	0	0	0	0	0	1
Short Turn (ST) 5% Fig.18	4.2460	4.3551	4.3352	3.0802	0.2223	0.3853	0.0814	0.1067	0.0167	0	0	0	0	0	0	1

ตารางที่ 5 อินพุตจริงของแรงดันด้านปฐมภูมิ กระแสด้านปฐมภูมิ กระแสด้านทุติยภูมิและเอาต์พุต ในสภาวะที่เกิดฟอลต์ของแต่ละกรณี จากการทดสอบแบบออนไลน์

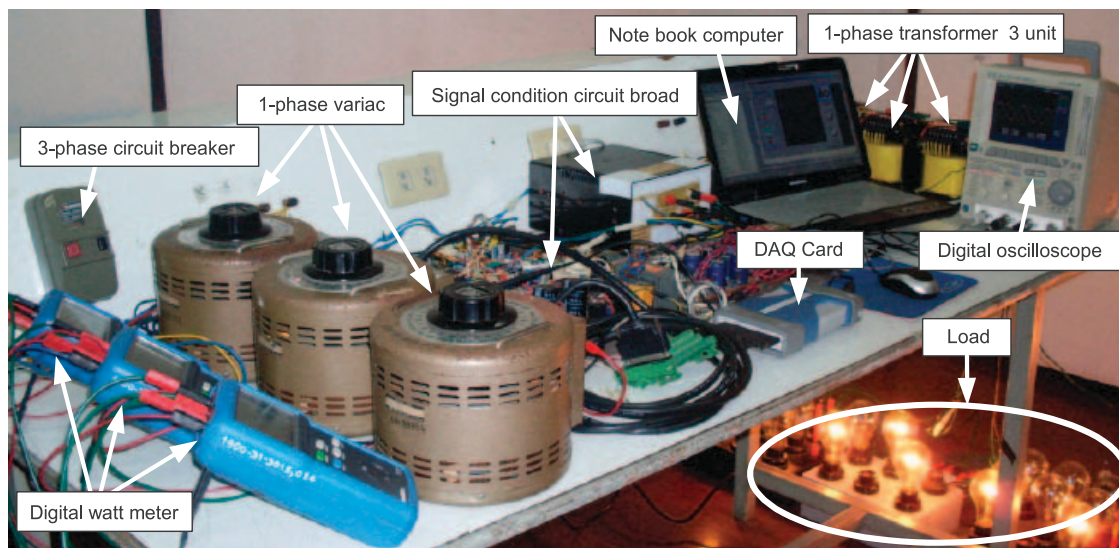
Fault	Input									Output						
	VRN (V)	VSN (V)	VTN (V)	IR (V)	IS (V)	IT (V)	Ir (V)	Is (V)	It (V)	NM	SP	OV	UV	OL	UB	ST
Normal (N) of Onload Fig.10	219.97	220.38	221.25	2.1664	2.0996	2.1697	3.9998	3.6716	4.08	1	0	0	0	0	0	0
Normal (N) of Noload Fig.11	221.09	221.67	222.23	0.3176	0.3305	0.2774	0.1598	0.2142	0.0326	1	0	0	0	0	0	0
Single Phasing (SP) Fig.12	219.72	218.60	217.33	0.0022	1.2837	1.1799	0.1614	1.9666	2.0658	0	1	0	0	0	0	0
Over Voltage (OV) Fig.13	258.53	260.99	255.57	1.9166	1.9864	1.9734	3.4554	3.4842	3.5694	0	0	1	0	0	0	0
Under Voltage (UV) Fig.14	163.31	165.74	164.15	1.8592	2.1079	1.9482	3.4596	3.4642	3.63	0	0	0	1	0	0	0
Overload (OL) Fig.15	216.60	216.68	215.89	2.8661	2.8435	2.8975	5.6036	5.3822	5.6184	0	0	0	0	1	0	0
Unbalanced Voltage (UB) Fig.16	214.60	176.68	215.50	2.1983	1.8591	2.0206	4.1518	3.0692	3.7428	0	0	0	0	0	1	0
Short Turn (ST) 2% Fig.17	214.96	215.47	215.21	2.9291	2.0933	2.0817	3.6355	3.6504	3.7872	0	0	0	0	0	0	1
Short Turn (ST) 5% Fig.18	210.38	215.79	214.80	3.0802	0.2223	0.3853	0.1628	0.2135	0.0334	0	0	0	0	0	0	1



รูปที่ 17 สัญญาณต่างๆ เมื่อเกิด Short Turn Fault ของเฟส R ทางด้านทุติยภูมิ เมื่อลัดรอบ 2%(2 รอบ) ขณะมีภาระ



รูปที่ 18 สัญญาณต่างๆ เมื่อเกิด Short Turn Fault ของเฟส R ทางด้านทุติยภูมิ เมื่อลัดรอบ 5% (5 รอบ)



รูปที่ 19 ภาพถ่ายจริงขณะเก็บผลของชุดตรวจจับและป้องกันฟอลต์ของหม้อแปลงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่นำเสนอ

รูปที่ 17 และ 18 เป็นการเกิดฟอลต์แบบขดลวดลัดรอบ โดยรูปที่ 17 ลัดรอบจำนวน 2% (2 รอบ) ทางด้านหุติยภูมิของเฟส R ขณะหม้อแปลงมีภาระร่วมด้วย ส่วนรูปที่ 18 ลัดรอบจำนวน 5% (5 รอบ) ทางด้านหุติยภูมิของเฟส R ขณะหม้อแปลงไม่มีภาระ รูปที่ 19 ภาพถ่ายจริงขณะเก็บผลของชุดตรวจจับและป้องกันฟอลต์

5. สรุป

ชุดตรวจจับและป้องกันฟอลต์ของหม้อแปลงที่ออกแบบและสร้างมีภาคอินพุตเป็นแรงดันและกระแสทางด้านปฐมภูมิทั้ง 3 เฟสและกระแสทางด้านหุติยภูมิทั้ง 3 เฟสรวม 9 อินพุตเพื่อเป็นอินพุตให้กับการ์ด DAQ ยี่ห้อ Agilent รุ่น U2356A ที่ต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์แบบ Note Book ผ่าน USB พอร์ต สัญญาณอินพุตทั้งหมดได้ถูกนำไปแสดงเป็นกราฟเส้นและประมวลผลเป็นค่า V_{rms} ในรูปแบบเวลาจริงด้วยโปรแกรม MATLAB ที่มีการออกแบบ GUI และใช้โครงข่ายประสาทเทียมเป็นตัวตัดสินใจ และเมื่อตรวจพบฟอลต์แต่ละชนิดจะส่ง

สัญญาณผ่านพอร์ตเอาต์พุตของการ์ด DAQ ออกไปยังวงจรควบคุม เพื่อไปตัดระบบไฟฟ้ากำลังที่จ่ายให้กับหม้อแปลง ซึ่งผลลัพธ์จากการทดสอบของฟอลต์แต่ละกรณี ได้ผลลัพธ์เป็นไปอย่างน่าพึงพอใจ

เครื่องมือ/อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและในการสอบเทียบ

1. หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งชนิด 1 เฟส
2. Data Acquisition Card ยี่ห้อ Agilent รุ่น U2356A
3. Digital Oscilloscope ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DL1640
4. Differential Probe ยี่ห้อ Tektronix รุ่น P5200
5. Digital Wattmeter ยี่ห้อ Metrix รุ่น PX110
6. 3-phase Circuit Breaker ยี่ห้อ Bticino
7. Variac 1 เฟส
8. ภาระไฟฟ้า (หลอดอินแคนเดสเซนต์ ความต้านทานปรับค่าได้ และบาลาสต์)

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย จนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี และนายวุฒิกร จิตพฤษชา นายกรัณย์ทัต รักษาธรรมกิจ และนางสาวบัวแก้ว ศรีสร้อย ที่มีส่วนช่วยในการพัฒนาซอฟต์แวร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Inpayoong, M. Leelajindakrairerk, B. Suechoey, P. Maleewat, and S. Tadsuan, "Fault Analysis in Three-Phase Transformer Windings using ATP/EMTP," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 20, no.1 March 2546 (in Thai).
- [2] N. K. Patel and R. K. Khubchandani, "ANN Based Power Transformer Fault Diagnosis," *IE(I) Journal-EL*, vol. 85, pp 60-63, June 2004.
- [3] A. Ngaopitakkul and A. Kunakorn, "Internal Fault Classification in Transformer Winding using Combination of Discrete Wavelet Transformer and Back-propagation Neural Networks," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol.4, no.3, pp. 365-371, June 2006.
- [4] S. Sudha, A.Ebenezer Jeyakumer, "Comparison of ANN Based Power Transformer Protection and WNN Based Power Transformer Protection," *Journal of Computer Science*, vol.2, no.1, pp. 11-18, 2008.
- [5] S. Sudha and A. Ebenezer Jeyakumer, "Wavelet and ANN Based Relaying for Power Transformer Protection," *Journal of Computer Science*, vol.3, no.6, pp.454-460, 2007.
- [6] D. Lin and E. F. Fuchs, "Real-Time Monitoring of Iron-Core and Copper Losses of Transformers under (Non) Sinusoidal Operation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.21, no.3, pp.1333-1341, July 2006.
- [7] C. Tangsiriworakul and S. Tadsuan, "Design and Operation of IPM type IGBT Driver," *PEC* 6, 8-9 may 2551, Prince of Songkla University, (in Thai).
- [8] W. Jitpruegsa, K. Rukhatmakij, and B. Srisoi, "Artificial neural network based approach for a three-phase induction motor fault detection implemented using MATLAB," Student's project, Department of Electroics Engineering Technology, CIT, KMUTNB, 2552 (in Thai).