



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 6
The 6th STOU National Research Conference

มิเตอร์อัจฉริยะสำหรับโครงข่ายไฟฟ้าอิสระขนาดเล็กด้วยระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน

Smart Metering for Remote Micro-grid from Hybrid Power System

กิตติภพ พิมบุตร (Kittipop Pimboot)¹ ปฐมาภรณ์ ศรีผดุงธรรม (Patamaporn Sripadungtham)²

อุสาห์ บุญบำรุง (Usa Boonbumroong)³

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอผลการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับ (1) ออกแบบและพัฒนาเครื่องมือวัดที่สามารถวัดค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยการใช้ไฟฟ้า 1 เฟส พิกัดแรงดัน 220 V $\pm$ 10% กระแส 15 A โดยมีมิเตอร์อัจฉริยะสามารถวัดค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยไฟฟ้าที่ใช้ไป (2) กำหนดและคำนวณอัตราค่าไฟฟ้าของแหล่งผลิตไฟฟ้าที่ต่างกันโครงข่ายไฟฟ้าอิสระขนาดเล็กด้วยระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น สำหรับเครื่องมือวัดพลังงานไฟฟ้ามีการออกแบบโดยใช้ Arduino Uno เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลการทำงาน ผลลัพธ์ที่ได้คือผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถทราบถึงพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของตนเอง และสามารถบริหารจัดการการใช้ไฟฟ้าเพื่อลดการใช้ไฟฟ้าที่สิ้นเปลืองได้ (1) โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเปรียบเทียบกับเครื่องกับ Plug in energy monitor ซึ่งมีคุณสมบัติในช่วงทั่วไปคือ แรงดันไฟฟ้า 180-220V กระแสไฟฟ้า 0.2-15A จากผลการทดลองพบว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนพลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 2% (2) การกำหนดอัตราค่าบริการตามแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยใช้คีย์แพด 4x3 และการรับสัญญาณตามแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยใช้ช่องรับสัญญาณ (ขา RX) และช่องส่งสัญญาณ (ขา TX) ที่ Arduino Uno

คำสำคัญ เครื่องมือวัดพลังงานไฟฟ้า มิเตอร์อัจฉริยะ มิเตอร์ไฟฟ้าอัจฉริยะ

¹ นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ kittipop.pim@gmail.com

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ fengpms@ku.ac.th

³ นักวิจัย สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี usa@pdti.kmutt.ac.th



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 6

The 6th STOU National Research Conference

Abstract

This research describes (1) the design and development of instruments that can measure electric energy. The first phase of the power supply voltage range $220\text{ V} \pm 10\%$ Current 15 A. The smart meter can measure the electrical energy and the power unit. (2) To determine and calculate the tariff of power generation sources differ on the electricity grid with small independent power generation system integrated. With programs developed Measuring instruments for electrical power are designed using an Arduino Uno microcontroller to process work. The result is that consumers can understand the behavior of their electricity use. And manage the use of electricity to reduce electricity consumption (1) the percentage of error compared with the Plug in energy monitor, which features the typical voltage 180-220V power 0.2-15A. The results showed that electrical power is measured by the experiment Distorted electric power does not exceed 2% (2) the rate as the power supply using the keypad 4x3 and receiver-based electricity supply. Using input (pin RX) and transmit channels (one TX), the Arduino Uno.



Keywords: Smart meter, Electrical meter, Power meter



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 6 The 6th STOU National Research Conference

บทนำ

พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญในการตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐานของประชากรทั่วโลกปัจจุบันพื้นที่ห่างไกล และพื้นที่เกาะต่างๆ ในประเทศไทยที่ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าปกติเข้าไม่ถึง ด้วยเหตุผลทั้งเรื่องการทำลายทรัพยากรธรรมชาติ ความลำบากในการเข้าถึง ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ จึงมีการดำเนินการจ่ายไฟฟ้าโดยการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งที่ต่ำและระยะเวลาในการติดตั้งไม่นานทำให้เป็นทางเลือกที่สะดวก อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายของน้ำมันเชื้อเพลิงในระบบผลิตมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง รวมถึงค่าใช้จ่ายของช่างเทคนิคในการควบคุม ค่าขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิง นอกจากนี้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเครื่องยนต์ดีเซลยังก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เป็นเหตุให้มีการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าด้วยระบบพลังงานหมุนเวียน ไม่ว่าจะเป็นพลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานจากแหล่งน้ำธรรมชาติ พลังงานเหล่านี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมและลดค่าใช้จ่ายได้

อย่างไรก็ตามถึงแม้จะมีการใช้พลังงานทดแทนกันอย่างแพร่หลาย แต่ในพื้นที่ที่ห่างไกลแล้วพลังงานทดแทนก็มีข้อจำกัดในเรื่องการผลิตกำลังไฟฟ้า เนื่องจากปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม เช่น ผลิตกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้น้อยและไม่เพียงพอต่อความต้องการในช่วงฤดูฝน จึงต้องใช้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเครื่องยนต์ดีเซลทำให้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ด้วยเหตุนี้เองเพื่อให้พลังงานที่ผลิตได้มีคุณภาพ คุ้มค่าในการลงทุน รวมไปถึงมีกำลังไฟฟ้าที่เพียงพอต่อความต้องการ สิ่งเหล่านี้จึงเป็นปัจจัยในการพัฒนาพลังงานทดแทน เพื่อให้เกิดระบบผลิตไฟฟ้าผสมผสานแบบอิสระ ที่มีการพัฒนาด้านการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดและด้านบริหารจัดการไปอย่างควบคู่กัน ไม่ว่าจะเป็นการบริหารจัดการการผลิต การบริหารจัดการระบบจำหน่าย

การพัฒนาเครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้าจึงถือเป็นส่วนสำคัญอย่างมาก ในการเข้าถึงข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของผู้บริโภค และผู้บริโภคเข้าถึงการใช้พลังงานของตนเอง เนื่องจากข้อมูลการใช้ไฟฟ้าเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อการผลิตไฟฟ้าที่มีอย่างจำกัด ในส่วนผู้ผลิตสามารถกำหนดราคาไฟฟ้าตามแหล่งผลิตพลังงาน ณ ขณะนั้นให้ผู้บริโภคทราบได้ และในส่วนผู้บริโภคเองก็จะสามารถทราบข้อมูลต่างๆไม่ว่าจะเป็น ราคาค่าไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้า ณ ขณะนั้น ค่าบริการทั้งหมด และค่าใช้จ่ายของแต่ละอุปกรณ์ไฟฟ้า ปัจจัยเหล่านี้จึงก่อให้เกิดมิเตอร์อัจฉริยะสำหรับโครงข่ายไฟฟ้าอิสระขนาดเล็กด้วยระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสานขึ้น

วัตถุประสงค์

1. ออกแบบและพัฒนาเครื่องมือวัดที่สามารถวัดค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยการใช้ไฟฟ้าได้
2. กำหนดและคำนวณอัตราค่าไฟฟ้าของแหล่งผลิตไฟฟ้าที่ต่างกันโครงข่ายไฟฟ้าอิสระขนาดเล็กด้วยระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน (Remote Micro-grid from Hybrid Power System)

ระเบียบวิจัย

1. ระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน

ระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสานเป็นระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าร่วมกันระหว่างแหล่งพลังงานหลายประเภทซึ่งประกอบไปด้วยเทคโนโลยี พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล และแบตเตอรี่ เนื่องจากระบบที่มีเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานเพียงอย่างเดียวไม่พอที่จะนำไปใช้งานเป็นระบบผลิตไฟฟ้าขนาด



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 6
The 6th STOU National Research Conference

ใหญ่ เพราะต้องลงทุนสูง ดังนั้นระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสานจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีศักยภาพและมีความมี
น่าเชื่อถือ

2. มิเตอร์อัจฉริยะ

การอ่านหน่วยพลังงานไฟฟ้าจากมิเตอร์แบบจานหมุนโดยเจ้าหน้าที่ของการไฟฟ้านั้นมีโอกาสที่จะเกิด
ความผิดพลาดได้มาก อันเนื่องมาจากตัวเจ้าหน้าที่เองและตัวมิเตอร์ซึ่งใช้ระบบกลไกที่มีการเคลื่อนไหวจึงมีโอกาสที่
จะมีความคลาดเคลื่อนเมื่อใช้งานไปนาน ๆ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการพัฒนาการอ่านหน่วยพลังงานไฟฟ้าจากมิเตอร์ให้มี
ความฉลาด โดยใช้มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์เพื่อลดความผิดพลาดลง และยังสามารถนำข้อมูลของพลังงานไฟฟ้าที่
อ่านได้มาทำการวิเคราะห์ได้สะดวกมากขึ้น[3]

3. การคำนวณเชิงคณิตศาสตร์

มิเตอร์ไฟฟ้าอัจฉริยะทำการประมวลผลแบบดิจิทัล การคิดค่าพลังงานไฟฟ้าจึงใช้เทคนิคการบวกสะสม
โดยมีสมการดัง

Real Power หรือ Average Power (P) มีหน่วยเป็นวัตต์ (W)

$$P = V_{rms} \times I_{rms} \times \cos\theta \quad (1)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า
V_{rms} คือ แรงดันไฟฟ้า
I_{rms} คือ กระแสไฟฟ้า

Cosθ คือ ค่าพาวเวอร์เฟคเตอร์

$$Energy = \frac{1}{1000 \times 3600} \sum_{n=1}^N P_n \quad (2)$$

เมื่อ Energy คือ พลังงานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น kWh
t คือ เวลา มีหน่วยเป็น วินาที

เนื่องจากมิเตอร์อัจฉริยะรองรับการใช้ไฟฟ้าจากแหล่งพลังงาน 4 ประเภท คือพลังงานจากโซลาร์เซลล์
พลังงานจากกังหันลม พลังงานจากแบตเตอรี่ พลังงานจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้น การคิดค่าพลังงานจะได้ดังนี้

$$Baht = \frac{1}{1000 \times 3600} \sum_{n=1}^n \left[B_s \int_{ts0}^{ts} P dt_s + B_w \int_{tw0}^{tw} P dt_w + B_b \int_{tb0}^{tb} P dt_b + B_g \int_{tg0}^{tg} P dt_g \right] \quad (3)$$

เมื่อ Baht = อัตราค่าบริการทั้งหมด มีหน่วยเป็น บาท
B_s = อัตราค่าบริการของแหล่งผลิตไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ มีหน่วยเป็น บาท
B_w = อัตราค่าบริการของแหล่งผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม มีหน่วยเป็น บาท

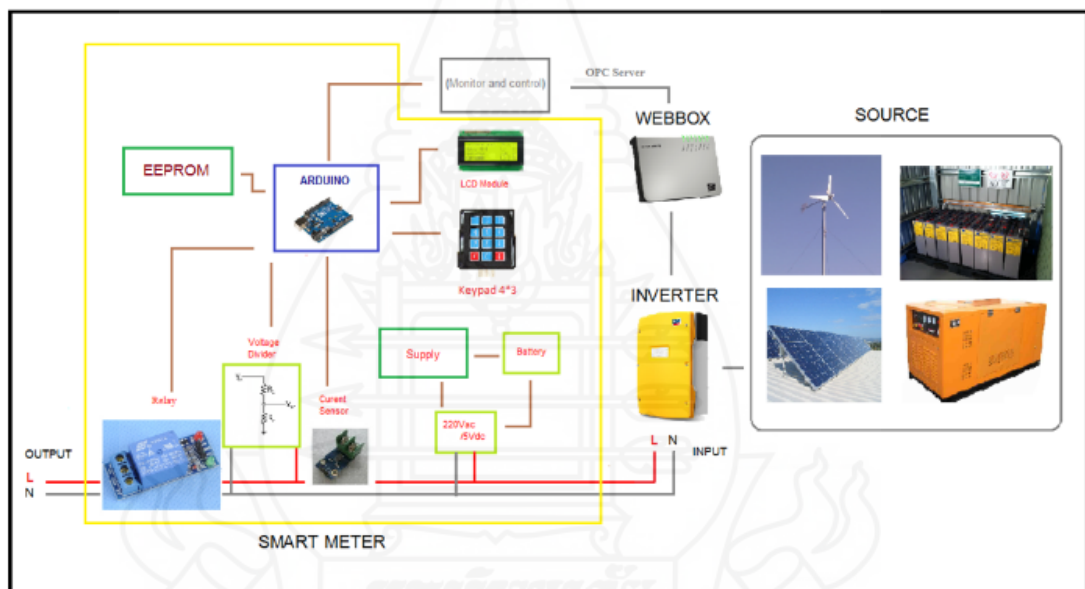


การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 6
The 6th STOU National Research Conference

B_b	=	อัตราค่าบริการของแหล่งผลิตไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ มีหน่วยเป็น บาท
B_g	=	อัตราค่าบริการของแหล่งผลิตไฟฟ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีหน่วยเป็น บาท
n	=	จำนวนครั้งของการใช้ไฟฟ้าตามแหล่งผลิต
t_s	=	เวลาที่ใช้พลังงานจากโซลาเซลล์ มีหน่วยเป็น sec
t_w	=	เวลาที่ใช้พลังงานจากกังหันลม มีหน่วยเป็น sec
t_b	=	เวลาที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ มีหน่วยเป็น sec
t_g	=	เวลาที่ใช้พลังงานจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีหน่วยเป็น sec

4. การออกแบบและการทำงานมิเตอร์ไฟฟ้าอัจฉริยะ

จากการศึกษารูปแบบโครงสร้างและการประยุกต์ใช้ของมิเตอร์อัจฉริยะโดยการค้นคว้าข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องจากบทความ หนังสือ และวารสาร ทั้งในและต่างประเทศ วิทยานิพนธ์นี้ จึงนำเสนอการพัฒนามิเตอร์อัจฉริยะสำหรับโครงข่ายไฟฟ้าอิสระขนาดเล็กด้วยระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน

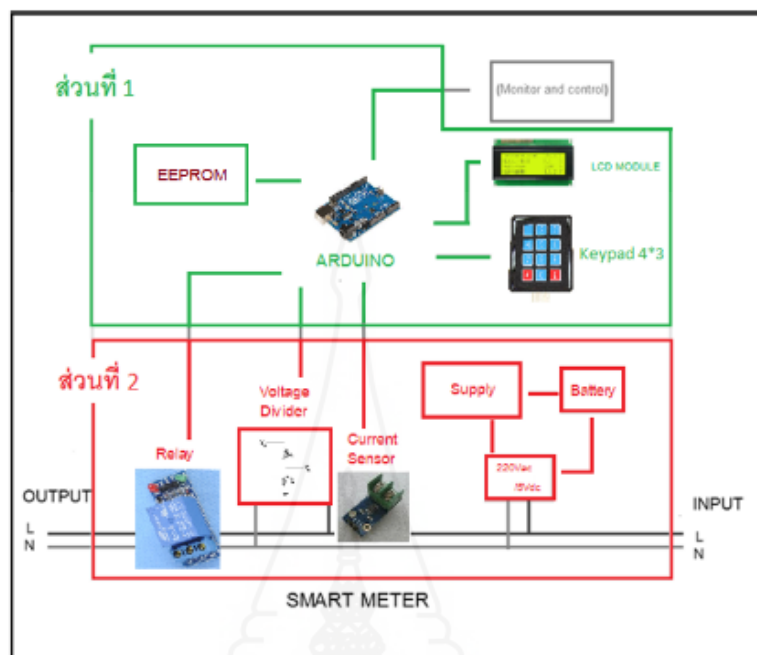


รูปที่ 1 ภาพรวมมิเตอร์อัจฉริยะสำหรับโครงข่ายไฟฟ้าอิสระขนาดเล็กด้วยระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าโครงข่ายไฟฟ้าอิสระขนาดเล็กด้วยระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสานประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนชนิดต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานลม แบตเตอรี่ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซล อินเวอร์เตอร์ (INVERTER) เว็บล็อก (WEBBOX) ระบบแสดงผลระบบควบคุม มิเตอร์อัจฉริยะ ซึ่งมิเตอร์อัจฉริยะเป็นหัวใจหลักในการสื่อสารข้อมูลทางไฟฟ้าระหว่างผู้ผลิตและผู้บริโภค ดังนั้นงานวิจัยนี้จะให้ความสำคัญกับมิเตอร์อัจฉริยะ ดังแสดงในภาพที่ 2



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 6
The 6th STOU National Research Conference



รูปที่ 2 มิเตอร์อัจฉริยะสำหรับโครงข่ายไฟฟ้าอิสระขนาดเล็กด้วยระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน

สำหรับวงจรมิเตอร์อัจฉริยะสำหรับโครงข่ายไฟฟ้าอิสระขนาดเล็กด้วยระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน

ส่วนที่ 1 ประกอบด้วยวงจรประมวลผลข้อมูลโดยใช้ Arduino Uno และใช้วงจร Keypad สำหรับกำหนดอัตราค่าไฟฟ้าของแต่ละแหล่งจ่าย วงจรหน้าจอแสดงผลแอลซีดี วงจรรับข้อมูลจาก Monitor and Control โดยใช้การสื่อสารแบบอนุกรม

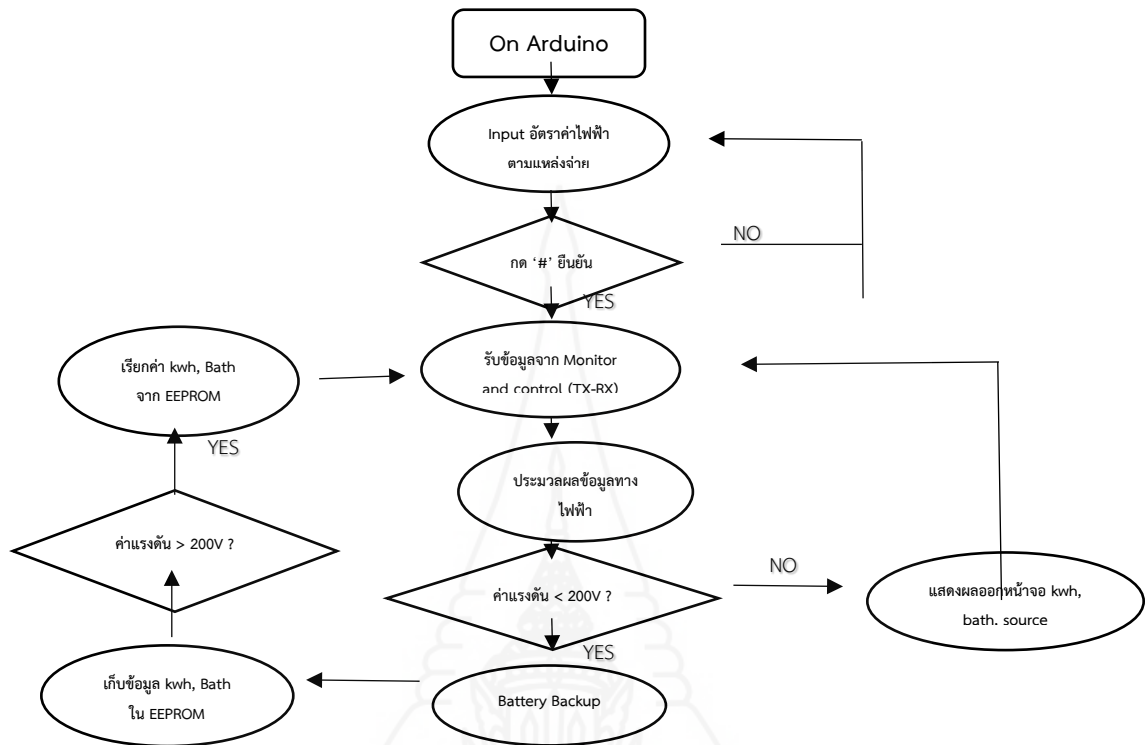
การสื่อสารแบบอนุกรม ใช้สำหรับการสื่อสารระหว่าง Arduino กับอุปกรณ์ภายนอก ในรูปแบบของการสื่อสารแบบอนุกรม ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การสื่อสารระหว่าง Arduino กับ Arduino โดย Arduino ที่เป็นมิเตอร์อัจฉริยะจะรับข้อมูลจาก PD(Digital-0) ที่ทำหน้าที่เป็นขารับสัญญาณข้อมูลอนุกรม (RX) และใช้ Arduino อีกตัวส่งข้อมูลจาก PD(Digital-1) ใช้ทำหน้าที่เป็นขาส่งสัญญาณข้อมูลอนุกรม (TX)

ส่วนที่ 2 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) การวัดแรงดันไฟฟ้าจากวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) วัดกระแสไฟฟ้าจากเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า (Current Sensor Module) และวงจรรีเลย์ (Relay)

จากภาพที่ 2 แสดงให้เห็นว่ามีเตอร์อัจฉริยะเป็นส่วนสำคัญ เนื่องจากเป็นส่วนที่รับข้อมูลแรงดันและกระแสจากอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน และรับข้อมูลการผลิตไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน (แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม แบตเตอรี่ และเครื่องยนต์ดีเซล) จากระบบแสดงผลและควบคุม (Monitor and Control) รับข้อมูลกำหนดอัตราค่าไฟฟ้าจากคีย์แพด (Keypad) หลังจากนั้นวงจรประมวลผล Arduino จะทำการประมวลผลเป็นค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้า ค่าบริการชำระเงิน ราคาไฟฟ้าตามแหล่งกำเนิดที่ใช้อยู่ ณ เวลานั้น โดยจะแสดงผลออกมาที่หน้าจอแอลอีดี (LED Module) และจะทำการบันทึกข้อมูลพลังงานไฟฟ้าไว้ที่ EEPROM เพื่อเมื่อกรณีไฟฟ้าขัดข้อง การทำงานของมิเตอร์อัจฉริยะสรุปได้ดัง Flow chart ดังรูปที่ 3

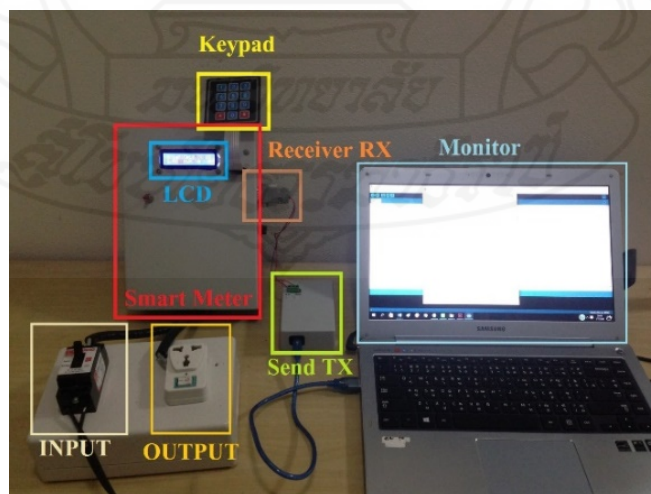


การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 6
The 6th STOU National Research Conference



รูปที่ 3 แสดง Flow Chart การทำงานของระบบมิเตอร์อัจฉริยะ

การทดลองจะนำอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติโหลดต่างกัน มาทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไฟใน โดยชุดการทดลองมีดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงชุดการทดลองของมิเตอร์อัจฉริยะ



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 6
The 6th STOU National Research Conference

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่ามีเตอร์อัจฉริยะ (Smart Meter) จะกำหนดอัตราค่าบริการตามแหล่งผลิตไฟฟ้าจาก Keypad และรับข้อมูลสัญญาณ TX RX จาก Monitor ว่า ณ เวลานั้นใช้ไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้าใด รับไฟฟ้าเข้าที่ INPUT และจ่ายโหลดที่ OUTPUT

ผลของการวิจัย

การแสดงผลจะแสดงออกทางหน้าจอ LCD โดยแบ่งออกเป็น 3 โหมดการแสดงผล ได้แก่ โหมดแรกคือโหมดรับข้อมูลอัตราค่าใช้บริการตามแหล่งผลิตไฟฟ้าจาก Keypad โหมดที่สองคือโหมดแสดงผลหน่วยไฟฟ้ากับอัตราค่าบริการ และโหมดสุดท้ายคือโหมดแสดงผลข้อมูลทางไฟฟ้า (แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า pf กำลังไฟฟ้า) ตามรูปที่ 5 รูปที่ 6 และรูปที่ 7 ตามลำดับดังนี้



รูปที่ 5 แสดงโหมดรับข้อมูลอัตราค่าใช้บริการตามแหล่งผลิตไฟฟ้าจาก Keypad



รูปที่ 6 โหมดแสดงผลหน่วยไฟฟ้ากับอัตราค่าบริการตามแหล่งผลิตที่ต่างกัน



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 6
The 6th STOU National Research Conference



รูปที่ 7 โหมดแสดงผลข้อมูลทางไฟฟ้า

จากรูปที่ 4 เป็นรับข้อมูลจาก Keypad เพื่อกำหนดอัตราค่าบริการตามแหล่งผลิตไฟฟ้า เมื่อใส่ข้อมูลครบถ้วน กดตกลงที่ปุ่ม '#' หลังจากนั้นหน้าจอ LCD จะแสดงไปที่โหมดแสดงหน่วยไฟฟ้ากับอัตราค่าบริการดังรูปที่ 5 โดยมีเตอร์อัจฉริยะจะรับข้อมูลเป็นสัญญาณ TX RX จาก Monitor เพื่อบอกว่า ณ เวลาขณะนั้นใช้ไฟฟ้าจากแหล่งผลิตใดอยู่ ในกรณีที่ผู้ใช้อยากทราบค่าทางไฟฟ้าได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า PF และกำลังไฟฟ้า ก็สามารถกดเปลี่ยนโหมดได้ที่ปุ่มเปลี่ยนโหมดดังรูปที่ 6

และผลการทดลองจากการวัดกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าเพื่อนเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไฟฟ้าจากอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่มีคุณสมบัติของโหลดที่ต่างกันได้นี้

การเชื่อมต่อมิเตอร์ไฟฟ้าเชื่อมต่อกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อทำการทดลองเปรียบเทียบกับเครื่องกับ Plug in energy monitor ซึ่งมีคุณสมบัติในช่วงทั่วไปคือ แรงดันไฟฟ้า 180-220V กระแสไฟฟ้า 0.2-15A มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดของกำลังไฟฟ้าจริงอยู่ในช่วง 0.5-2% โดยการทดลองวัดจะแบ่งเป็นโหลด 2 ประเภท

1. การวัดของโหลดแบบ Linear

การทดลองทำโดยใช้หลอดไฟชนิดหลอดไส้ โดยครั้งแรกใช้หลอดไฟจำนวน 2 หลอด ขนาด 100 วัตต์ และ 25 วัตต์ (รวม 2 หลอด ขนาด 125 วัตต์) จากนั้นเพิ่มจำนวนของหลอดไฟขนาด 25 วัตต์ ทีละ 1 หลอด จนครบ 300 วัตต์ และครั้งที่สองจะใช้หลอดไฟขนาด 100 วัตต์ 2 หลอด (รวม 2 หลอด ขนาด 200 วัตต์) เพื่อเปรียบเทียบหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าในตารางที่ 2 และเปอร์เซ็นต์ความ

ตารางที่ 1 แสดงผลการวัดค่าทางไฟฟ้าของโหลดแบบ Linear

ครั้งที่	หลอดไฟ		Smart Meter				Power meter			
	P (w)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	Power factor	P (w)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	Power factor	P (w)	% power Error
1	125	229.53	0.55	0.99	124.98	228.6	0.55	1.00	125.73	0.60
2	150	229.26	0.65	0.99	147.53	228.1	0.65	1.00	148.27	0.50
3	175	229.35	0.76	1.00	174.31	229.2	0.76	1.00	174.19	0.07



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 6
The 6th STOU National Research Conference

4	200	229.18	0.87	1.00	199.39	228.84	0.87	1.00	199.09	0.15
5	225	230.92	0.99	1.00	228.61	229.5	1.00	1.00	229.50	0.39
6	250	230.61	1.09	1.00	251.36	229.8	1.10	1.00	252.78	0.56
7	275	230.99	1.20	1.00	277.19	229.8	1.21	1.00	278.06	0.31
8	300	230.63	1.32	1.00	304.43	229.4	1.34	1.00	307.40	0.96

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.07% - 0.96%

2. การวัดของโหลดจากเครื่องใช้ไฟฟ้า

การได้ทดลองกับเครื่องใช้ไฟฟ้าจริง ประกอบไปด้วย ตู้เย็น หม้อหุงข้าว เตารีด โทรทัศน์ และพัดลม โดยได้ทำการหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า และเพิ่มความน่าเชื่อถือของมิเตอร์อัจฉริยะ

2.1 ตู้เย็น

ทำการทดลองโดยใช้ตู้เย็นผลิตภัณฑ์เบอร์ 5 อายุการใช้งานมาแล้ว 7 ปี มีข้อมูลจำเพาะดังนี้ ตู้เย็น 1 ประตู ขนาด 140.1 ลิตร 5.0 คิวบิกฟุต ใช้พลังงานไฟฟ้า 167.90 หน่วย/ปี ค่าไฟฟ้า 664.88 บาท/ปี โดยเปรียบเทียบหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าในตารางที่ 3 โดยได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 2 แสดงผลการวัดค่าทางไฟฟ้าของโหลดที่เป็นตู้เย็น

ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	Smart Meter				Power meter				% power Error
		แรงดัน (V)	กระแส (A)	Power factor	P (w)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	Power factor	P (w)	
1	00.00	231.21	0.57	0.67	88.3	231.10	0.57	0.68	89.57	1.42
2	01.00	229.61	0.08	0.18	3.31	229.40	0.03	0.44	3.03	9.19
3	02.00	230.00	0.08	0.18	3.31	229.80	0.03	0.44	3.03	9.19
4	03.00	231.80	0.08	0.18	3.34	231.20	0.03	0.44	3.05	9.37
5	04.00	232.91	0.57	0.67	88.94	232.10	0.57	0.68	89.96	1.13
6	05.00	231.68	0.08	0.18	3.34	231.20	0.03	0.44	3.05	9.32

จากตารางที่ 2 จะเห็นว่าหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1.13% - 9.37% ในช่วงที่มีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 2% เนื่องจากกระแสที่วัดได้ น้อยกว่า 0.2A

2.2 เตารีด

ทำการทดลองโดยใช้เตารีด ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 1,200 วัตต์ มีอายุการใช้งานมาแล้ว 2 ปี โดยเปรียบเทียบหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าในตารางที่ 4



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 6
The 6th STOU National Research Conference

ตารางที่ 3 แสดงผลการวัดทางไฟฟ้าของโหลดที่เป็นหม้อหุงข้าว

ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	Arduino				Power meter				% power Error
		แรงดัน (V)	กระแส (A)	Power factor	P (w)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	Power factor	P (w)	
1	00.00	226.27	5.55	1.00	1255.80	225.90	5.52	1.00	1246.97	0.71
2	00.05	232.46	0.08	0.18	3.35	232.17	0.14	0.10	3.25	2.99
3	00.10	231.77	0.08	0.18	3.34	231.50	0.14	0.10	3.24	2.98
4	00.15	232.14	0.08	0.18	3.34	231.50	0.14	0.10	3.24	3.14
5	00.20	225.84	0.08	0.18	3.25	224.58	0.14	0.10	3.14	3.43
6	00.25	232.24	0.08	0.18	3.34	231.70	0.14	0.10	3.24	3.10
7	00.30	231.96	0.08	0.18	3.34	231.70	0.14	0.10	3.24	2.97

จากตารางที่ 3 จะเห็นว่าหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.07% - 0.96%

2.3 โทรทส์

ทำการทดลองโดยใช้โทรทส์ ค่ากำลังไฟฟ้าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 40 วัตต์ มีอายุการใช้งานมาแล้ว 3 เดือน โดยเปรียบเทียบหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 แสดงผลการวัดทางไฟฟ้าของโหลดที่เป็นโทรทส์

ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	Arduino				Power meter				% power Error
		แรงดัน (V)	กระแส (A)	Power factor	P (w)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	Power factor	P (w)	
1	00.00	231.33	0.12	0.45	12.49	230.40	0.11	0.62	15.71	20.50
2	01.00	233.42	0.12	0.45	12.60	233.60	0.11	0.62	15.93	20.88
3	02.00	233.07	0.12	0.45	12.59	232.90	0.11	0.62	15.88	20.76
4	03.00	231.85	0.12	0.45	12.52	231.70	0.11	0.62	15.80	20.77
5	04.00	230.13	0.12	0.45	12.43	230.00	0.11	0.62	15.69	20.78

จากตารางที่ 4 จะเห็นว่าหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 20.50% - 20.88% ในช่วงที่มีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 2% เนื่องจากกระแสที่วัดได้ น้อยกว่า 0.2A

2.4 พัดลม

ทำการทดลองโดยใช้พัดลม ค่ากำลังไฟฟ้า 34 วัตต์ มีอายุการใช้งานมาแล้ว 3 ปี โดยเปรียบเทียบหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าในตารางที่ 6



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 6
The 6th STOU National Research Conference

ตารางที่ 5 แสดงผลการวัดทางไฟฟ้าของโหลดที่เป็นพัดลม

ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	Arduino				Power meter				% power Error
		แรงดัน (V)	กระแส (A)	Power factor	P (kw)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	Power factor	P (kw)	
1	00.00	231.33	0.14	0.95	30.77	230.4	0.13	1.00	29.95	2.72
2	01.00	233.42	0.14	0.95	31.04	233.6	0.13	1.00	30.37	2.23
3	02.00	233.07	0.14	0.95	31.00	232.9	0.13	1.00	30.28	2.38
4	03.00	231.85	0.14	0.95	30.84	231.7	0.13	1.00	30.12	2.37
5	04.00	230.13	0.14	0.95	30.61	230	0.13	1.00	29.90	2.37

จากตารางที่ 5 จะเห็นว่าหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 2.72% - 2.23% ในช่วงที่มีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 2% เนื่องจากกระแสที่วัดได้ น้อยกว่า 0.2A

2.5 รวมอุปกรณ์ไฟฟ้า

โดยทำการวัดหาค่าพลังงานการใช้ไฟฟ้ารวมของอุปกรณ์ไฟฟ้า ประกอบไปด้วย ตู้เย็น พัดลม หม้อหุงข้าว เตารีด โทรทัศน์ โดยใช้ระยะเวลาการวัดพลังงานการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด 168 ชั่วโมง (7วัน) และทำการวัดจากพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าจริงของผู้บริโภค ไม่กำหนดระยะเวลาเปิด-ปิด ของอุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไฟในตารางที่ 7

ตารางที่ 6 แสดงผลการวัดค่าหน่วยการใช้กำลังไฟฟ้าจริงของโหลดรวม

ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	หน่วยการใช้กำลังไฟฟ้า (kwh)		
		Smart meter	Power meter	% Error
1	00.00	0	0	0
2	12.00	0.92	0.93	1.08
3	24.00	1.72	1.73	0.58
4	36.00	2.54	2.56	0.78
5	48.00	3.12	3.15	0.95
6	60.00	4.11	4.17	1.44
7	72.00	4.93	4.99	1.20
8	84.00	5.93	6.02	1.50
9	96.00	6.67	6.77	1.48
10	108.00	7.61	7.75	1.81
11	120.00	8.43	8.60	1.98
12	132.00	9.10	9.29	1.94
13	144.00	10.06	10.25	1.85
14	156.00	11.23	11.44	1.84
15	168.00	12.09	12.28	1.55



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 6

The 6th STOU National Research Conference

จากตารางที่ 6 จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.58% - 1.98% และความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2%

งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างมิเตอร์อัจฉริยะ ซึ่งจะแสดงค่าวัดที่เป็นหน่วยการใช้ไฟฟ้า (kwh) และราคาของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ณ ขณะนั้น โดยจะแสดงผลออกทางหน้าจอ LCD มีพิกัดของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 15 A และมีพิกัดของแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 220

สรุปผลการทดสอบ

การทดสอบกำลังไฟฟ้าจริง โดยอ่านค่าจากคอมพิวเตอร์ และทดสอบหน่วยการใช้ไฟฟ้าที่แสดงผลทางหน้าจอ LCD ของมิเตอร์อัจฉริยะ เมื่อเปรียบเทียบกับ Plug in energy monitor ซึ่งมีคุณสมบัติในช่วงทั่วไปคือ แรงดันไฟฟ้า 180-220V กระแสไฟฟ้า 0.2-15A ผลการทดลองที่ได้มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าจริงไม่เกิน 2% และมีความคลาดเคลื่อนของพลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 2% และการรับสัญญาณเพื่อระบุแหล่งพลังงานจาก Monitor มี delay ไม่เกิน 3 วินาที

อภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบมิเตอร์อัจฉริยะสำหรับโครงข่ายไฟฟ้าอิสระขนาดเล็กด้วยระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน (Smart Metering for Remote Micro-grid from Hybrid Power System) เนื่องจากเป็นส่วนที่รับข้อมูลแรงดันและกระแสจากอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน และรับข้อมูลการผลิตไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน (แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม แบตเตอรี่ และเครื่องยนต์ดีเซล) จากระบบแสดงผลและควบคุม (Monitor and Control) รับข้อมูลกำหนดอัตราค่าไฟฟ้าจากคีย์แพด (Keypad) หลังจากนั้นใช้ Arduino เพื่อประมวลผล จะทำการประมวลผลเป็นค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้า ค่าบริการชำระเงิน ราคาไฟฟ้าตามแหล่งกำเนิดที่ใช้อยู่ ณ เวลานั้น โดยจะแสดงผลออกมาที่หน้าจอแอลซีดี (LCD Module)

สมรรถนะของมิเตอร์อัจฉริยะ จากการวัดอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบ Linear มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.07% - 0.96% การได้ทดลองกับเครื่องใช้ไฟฟ้าจริง ประกอบไปด้วย ตู้เย็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1.13% - 9.37% ในช่วงที่มีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 2% เนื่องจากกระแสที่วัดได้ น้อยกว่า 0.2A เตาไรต์เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.07% - 0.96% โทรทัศน์เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 20.50% - 20.88% ในช่วงที่มีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 2% เนื่องจากกระแสที่วัดได้ น้อยกว่า 0.2A พัดลมเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 2.72% - 2.23% ในช่วงที่มีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 2% เนื่องจากกระแสที่วัดได้ น้อยกว่า 0.2A และรวมอุปกรณ์ไฟฟ้า (ตู้เย็น เตาไรต์ โทรทัศน์ พัดลม) เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.58% - 1.98% และความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2% พบว่าข้อมูลที่ได้จากการวัดระหว่างมิเตอร์อัจฉริยะกับ Plug in energy monitor ไม่ต่างกันมากโดยมีความคลาดเคลื่อนที่อยู่ในช่วง 0.2-15A ไม่เกิน 2%

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

การออกแบบและพัฒนาเครื่องมือวัดที่สามารถวัดค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยการใช้ไฟฟ้าได้ต้องอาศัยเซนเซอร์หรือวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้คือเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ารุ่น ACS712-20A ซึ่งมีคุณสมบัติคือแรงดันไฟฟ้า 180-220V กระแสไฟฟ้า 0.2-15A เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าจริงไม่เกิน 2%



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 6 The 6th STOU National Research Conference

และมีความคลาดเคลื่อนของพลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 2% ในการทดลองพบว่าการวัดกำลังไฟฟ้าบางช่วงมีกระแสที่ต่ำกว่า 0.2A ทำให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดของกำลังไฟฟ้าจริงเกิน 2% ทำให้ความคลาดเคลื่อนของพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้นควรจะออกแบบให้เลือกเซนเซอร์วัดกระแสที่มีย่านวัดให้น้อยกว่า 0.2A เช่นรุ่น CCT323047, CCT261631 ซึ่งมีคุณสมบัติวัดกระแส 0.1-30A และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1% ซึ่งมีช่วงการวัดกระแสที่กว้างกว่าและน้อยกว่า 0.2A

การรับส่งสัญญาณตามแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยใช้ขาส่งสัญญาณ RX TX จาก Arduino แบบอนุกรมมีข้อเสียคือถ้าระยะการรับส่งสัญญาณมากกว่า 2 เมตร จะไม่สามารถสื่อสารกันได้ จะต้องมียูปรณ์สำหรับขยายสัญญาณเพิ่ม หรือเปลี่ยนจากการรับส่งสัญญาณแบบ RX TX แบบอนุกรมเปลี่ยนเป็นการรับส่งสัญญาณแบบไร้สายเช่น Zigbee จะทำให้ระยะการรับส่งข้อมูลได้ไกลกว่าการส่งสัญญาณแบบเดิม

เอกสารอ้างอิง

- กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2545. ระบบเซลล์แสงอาทิตย์.เอกสารเผยแพร่ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.
- ธนส สุขสมพงษ์, นฤปวัจน์ เงินวิจิตร และวันวิสา สุดประเสริฐ, 2552. การพัฒนาระบบบันทึกข้อมูล สำหรับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่องชนิดพกพาโดยใช้เอสดีการ์ด. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิเวศสีเขียว ครั้งที่ 11.
- ประดิษฐ์ เพื่องฟู. 2553. มิเตอร์อัจฉริยะ (Smart Meter) และระบบ AMI. ไฟฟ้าสาร 17: 57-65.
- พิชญพงษ์ กมลภพ, กฤษฎา น้อยอำมาตย์ และวัชรพงษ์ วันดี, 2555. ระบบอ่านมิเตอร์ไฟฟ้าแบบอัตโนมัติผ่านคลื่นวิทยุ. เอกสารสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ มอบ. วิจัย ครั้งที่ 5.
- วศินวีโรตม์ เนติศักดิ์. 2556.ระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการสำหรับการตรวจสอบระบบไมโครกริด. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. ปีที่ 32 (ฉบับที่ 4).
- วีระชัย ไกยกุล. 2554. แนวทางการพัฒนาระบบโครงข่ายพลังงานอัจฉริยะของชาติ (Smart Grid). การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY).
- วรการ วงศ์สายเชื้อ. 2555. ระบบอ่านมิเตอร์ไฟฟ้าแบบอัตโนมัติผ่านสายไฟฟ้ากำลัง. เอกสารสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ มอบ. วิจัย ครั้งที่ 6 (หน้า 280-289).
- สุเมธ บางกุล และเอกชัย กิจศรีปัญญา, 2551. เครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้าดิจิทัลแบบ TOU. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
- Hariharan,R. 2013. Design of controlling the smart meter to equalize the power and demand based on virtual instrumentation. 2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC).
- Nayar,C. 2012. Innovative Remote Micro-Grid Systems. International Journal of Environment and Sustainability 2012 (Vol. 1, No. 3, pp. 53-65).



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 6

The 6th STOU National Research Conference

ผศ. ดร. วันเฉลิม โปรา. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับมาตรอัจฉริยะ (Smart Meter) และ แนวทางการจัดทำข้อกำหนดเฉพาะมาตรอัจฉริยะ.ภายใต้โครงการศึกษาทบทวนระบบเชื่อมโยงโครงข่ายไฟฟ้าภายในประเทศและต่างประเทศ สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน

สมชาย เปียนสูงเนิน, “ระบบอ่านมิเตอร์แบบชาญฉลาด (Smart meter System)”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33. (EECON-33), 2553, pp. 349 - 352.

