

## การเฝ้ามองการใช้พลังงานด้วยชิพเอฟพีจีเอ Energy Monitoring based on FPGA board

วุฒิชัย สง่างาม<sup>\*</sup> มงคล ต่านบำรุงตระกูล และ ธวัช เกิดชื่น

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา  
744 ถนนสุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทร 0-4425-2659 E-mail: wutichai@rmuti.ac.th

Wutthichai Sa-nga-ngam<sup>\*</sup> Mongkol Danbumrungtrakul and Thawatch Kerdchuen

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamagala University of Technology Isan  
744 Suranarai road, T.Naimuang, A.Muang, Nakorn ratchasima 30000 Thailand Tel 0-4425-2659 E-mail: wutichai@rmuti.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอถึงการพัฒนาเครื่องมือติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว เพื่อให้ได้ขนาดของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และมุมเฟสในแต่ละลำดับของฮาร์โมนิกส์ แล้วไปคำนวณหากำลังไฟฟ้าจริงในแต่ละคาบเวลา จากนั้นนำค่ากำลังไฟฟ้านั้นไปสัมพันธ์กับเวลาจะได้พลังงานไฟฟ้า โดยขั้นตอนการทำงานทั้งหมดกระทำบนบอร์ดเอฟพีจีเอ จากการศึกษาพบว่าเมื่อนำเครื่องมือนี้ไปใช้วัดค่าพลังงานไฟฟ้า มีความผิดพลาดจากการวัดเพียง 2.04 เปอร์เซ็นต์

### Abstract

This paper presents the implementation of an FPGA based electrical energy monitoring device using FFT. The energy is calculated in real-time pattern using the monitored voltage, current and phase displacement of each harmonic order. According to the flexibility of the FPGA, a real-time watt-hour energy can be recorded. This FPGA based device can be used for electrical energy monitoring with the maximum error of only 2.04 per-cents.

### 1. บทนำ

ในการตรวจวัดปริมาณไฟฟ้า ลักษณะรูปคลื่นของสัญญาณถือว่าเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญ เนื่องจากเครื่องมือวัดจะอ้างอิงสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ดังนั้นถ้ารูปคลื่นผิดเพี้ยนไปอาจส่งผลทำให้ค่าที่วัดได้ผิดพลาดไป ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าหรือที่เรียกว่าฮาร์โมนิกส์ [1]-[3] ซึ่งถือว่าเป็นมลภาวะเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นมาจากภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นและการใช้งานอุปกรณ์จำพวกอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ดังนั้นเมื่อต้องการหากำลังไฟฟ้าหรือพลังงานไฟฟ้า จึงเป็นเรื่องที่ยุ้งยากในการคำนวณหา เมื่อรูปคลื่นสัญญาณไม่ได้เป็นรูปคลื่นไซน์ และก็มีหลายหลากวิธีการในการคำนวณ โดยส่วนมากจะนิยมใช้การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transforms) ที่ทำให้ได้ทั้งขนาดของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และมุมเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ในแต่ละลำดับของฮาร์โมนิกส์ สำหรับกระบวนการคำนวณด้วยวิธีการนี้จำเป็นจะต้องอาศัย ไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือ ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล มาคอยช่วยเสมอ [4]-[6] แต่ตัวประมวลผลทั้งสองก็มีข้อเสีย กล่าวคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ จะถูกจำกัดในเรื่องของความถี่สัญญาณนาฬิกาและการรบกวนของโปรแกรม ส่วนตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล จะมีราคาค่อนข้างแพง และผู้ใช้ไม่สามารถที่เพิ่มหรือเปลี่ยนแปลงชุดคำสั่งได้ ดังนั้น เอฟพีจีเอ (FPGA : Field Programmable Gate Array) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ที่มีราคาไม่แพง ความถี่สัญญาณนาฬิกาสูง ผู้ใช้สามารถปรับเปลี่ยนชุดคำสั่งได้

ดังนั้นในบทความนี้จึงนำเสนอแนวทางในการติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้าของภาระโหลด ที่อาศัยเทคนิคการแปลงฟูริเยร์แบบเร็วบนชิพเอฟพีจีเอ โดยอาศัยโปรแกรม Quartus II ซึ่งสามารถจำลองการทำงานของชิพด้วยการเขียนบรรยายพฤติกรรมการทำงานด้วยภาษาวีเอชดีเอล (VHDL) [7] พร้อมทั้งสามารถสังเคราะห์เป็นวงจรลอจิกเกตลงไปที่ตัวชิพได้ และที่บอร์ดของชิพเอฟพีจีเอเองก็ใช้ฐานความถี่สัญญาณนาฬิกาสำหรับประมวลผลที่ 50 เมกะเฮิร์ต

### 2. การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าบนชิพเอฟพีจีเอ

#### 2.1 การหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงจากการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว

ค่าของกำลังไฟฟ้าจริงสามารถคำนวณได้เมื่อทราบขนาดค่าประสิทธิภาพของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และมุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสที่ความถี่เดียวกัน [8] ดังสมการที่ 1 ส่วนในสมการที่ 2 แสดง

ถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูงสุดของยอดรูปคลื่นกับค่าประสิทธิภาพผล เมื่อนำไปแทนลงในสมการที่ 1 จะได้ความสัมพันธ์ใหม่ดังสมการที่ 3

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

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad \text{และ} \quad I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

$$P = \frac{1}{2} V_m I_m \cos \theta \quad (3)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 3 นี้จะใช้ได้เฉพาะกรณีที่เป็นรูปคลื่นไซน์เท่านั้น ดังนั้นถ้าหากสัญญาณรูปคลื่นที่ทำการหาไม่เป็นรูปคลื่นไซน์หรือเป็นรูปคลื่นที่มีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกส์ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่คำนวณได้ย่อมเกิดความผิดพลาดตามมา ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้า ค่าขนาดกระแสไฟฟ้าและมุมเฟส จะใช้วิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งสองกรณี โดยค่าขนาดแรงดันไฟฟ้า ค่าขนาดกระแสไฟฟ้า และมุมเฟส ที่หามาได้นี้ จะถูกพิจารณาที่ตำแหน่งฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ k ทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่สามารถเขียนเป็นสมการใหม่ ดังสมการที่ 4

$$P_{(k)} = \frac{1}{2} V_{m(k)} I_{m(k)} \cos \theta_{(k)} \quad (4)$$

จากสมการที่ 4 ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และมุมเฟส ในแต่ละลำดับของฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว เมื่อนำไปใช้งานบนชิพเอฟพีจีเอ [1]-[2] จะให้ค่าดังสมการที่ 5 6 และ 7 ตามลำดับ

$$V_m(k) = 2^{-P_1+1-N} \sqrt{\text{Re}_{1(k)}^2 + \text{Im}_{1(k)}^2} \quad (5)$$

$$I_m(k) = 2^{-P_2+1-N} \sqrt{\text{Re}_{2(k)}^2 + \text{Im}_{2(k)}^2} \quad (6)$$

$$\cos \theta_k = \frac{(\text{Re}_{1(k)} \text{Re}_{2(k)}) - (\text{Im}_{1(k)} \text{Im}_{2(k)})}{\sqrt{\text{Re}_{1(k)}^2 + \text{Im}_{1(k)}^2} \sqrt{\text{Re}_{2(k)}^2 + \text{Im}_{2(k)}^2}} \quad (7)$$

เมื่อ  $V_m(k)$  และ  $I_m(k)$  เป็นขนาดของแรงดันและกระแส

- $P_1$  และ  $P_2$  เป็นค่าลดทอนขนาดข้อมูลของแรงดันและกระแส
- $\text{Im}_1$  และ  $\text{Im}_2$  เป็นขนาดของแรงดันและกระแส ที่เป็นส่วนจินตภาพ
- $\text{Re}_1$  และ  $\text{Re}_2$  เป็นขนาดของแรงดันและกระแส ที่เป็นส่วนจริง
- $N$  เป็นขนาดจำนวนบิตของข้อมูลดิจิทัล
- $k$  เป็นลำดับของฮาร์มอนิกส์

เมื่อนำสมการที่ 5 6 และ 7 แทนในสมการที่ 4 ทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่เกิดขึ้นในแต่ละลำดับของฮาร์มอนิกส์ ดังสมการที่ 8 และได้ผลรวมของกำลังไฟฟ้าจริงทั้งหมดที่เกิดขึ้นในแต่ละคาบเวลา ดังสมการที่ 9

$$P_{(k)} = (\text{Re}_{1(k)} \text{Re}_{2(k)} - \text{Im}_{1(k)} \text{Im}_{2(k)}) 2^{-P_1-P_2+1-2N} \quad (8)$$

$$P(\text{cycle}) = \sum_{k=0}^{2^N-1} P_{(k)} \quad (9)$$

จากสมการที่ 8 การคำนวณหา กำลังไฟฟ้าจริงลักษณะเช่นนี้ ชี้ให้เห็นว่าตัวประมวลผลไม่มีความจำเป็นต้องใช้ราก็สอง ซึ่งทำให้ง่ายต่อไปใช้งานอีกด้วย

## 2.2 ค่าพลังงานไฟฟ้า

ค่าพลังงานไฟฟ้าเป็นค่าที่ได้จากกำลังไฟฟ้าจริงต่อเวลา ฉะนั้นเมื่อนำกำลังไฟฟ้าจริงทั้งหมดที่เกิดขึ้นในแต่ละคาบเวลาจากสมการที่ 9 มารวมกันในหนึ่งวินาที ที่ความถี่ 50 เฮิร์ต จะได้เป็นพลังงานไฟฟ้าต่อวินาที (1วินาที x 50เฮิร์ต) ดังสมการที่ 10 และเมื่อคิดคำนวณกำลังไฟฟ้าจริงทั้งหมดที่เกิดขึ้นหนึ่งชั่วโมง จะได้เป็นพลังงานไฟฟ้าต่อชั่วโมง (60นาที x 60วินาที) ดังสมการที่ 11 เช่นกัน

$$E(s) = \frac{1}{50} \sum_{i=0}^{49} (P(\text{cycle})) \quad (10)$$

$$E(\text{hr}) = \frac{1}{3600} \sum_{i=0}^{3599} (E(s)) \quad (11)$$

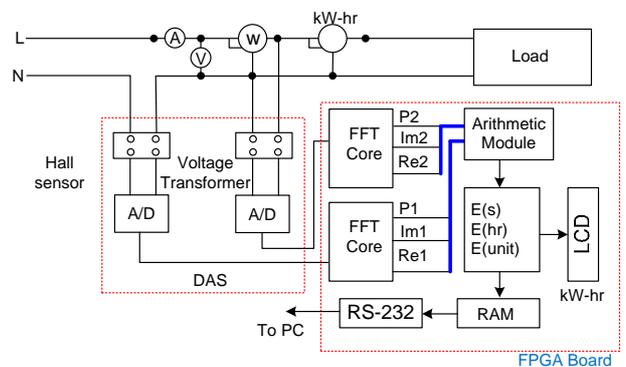
$$E(\text{unit}) = \frac{1}{1,000} E(\text{hr}) \quad (12)$$

จากสมการที่ 11 เมื่อต้องการคิดหน่วยการใช้พลังงานไฟฟ้าสามารถกระทำได้โดยทำการหารด้วย 1,000 เพื่อทำเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือ หนึ่งหน่วยพลังงานไฟฟ้า ดังสมการที่ 12 และรูปที่ 2

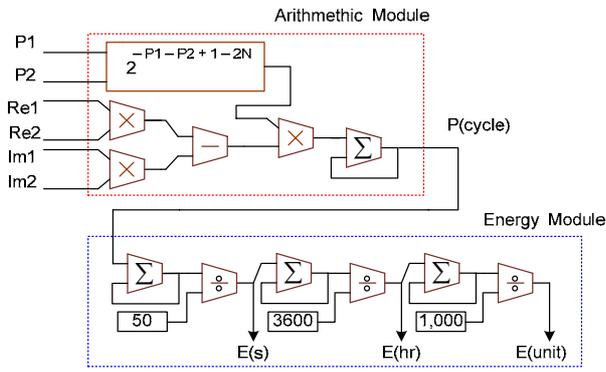
## 3. การออกแบบองค์ประกอบการตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า

เมื่อทราบวิธีการหาค่าพลังงานไฟฟ้า ทำให้สามารถออกแบบโครงสร้างการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ตามรูปที่ 1 ซึ่งจะประกอบด้วยตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า ตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณสัญญาณอนาล็อกให้เป็นข้อมูลดิจิทัลและบอร์เดอฟฟี่จีเอ

เมื่อได้ข้อมูลดิจิทัลจากแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ข้อมูลเหล่านี้จะถูกส่งไปคำนวณหาขนาดในแต่ละลำดับฮาร์มอนิกส์ด้วยการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว พร้อมทั้งคำนวณหาพลังงานที่ต้องการตรวจวัดโดยการประมวลผลของเอฟพีจีเอ ดังรูปที่ 2 ต่อจากนั้นตัวควบคุมจะส่งค่าพลังงานเหล่านี้เก็บไว้ในหน่วยความจำ และค่าพลังงานเหล่านี้สามารถส่งผ่านไปยังคอมพิวเตอร์ได้โดยผ่านพอร์ตอนุกรม ในขณะที่เดียวกันค่าหน่วยการใช้พลังงานจะแสดงผลที่หน้าจอผลึกเหลวด้วย



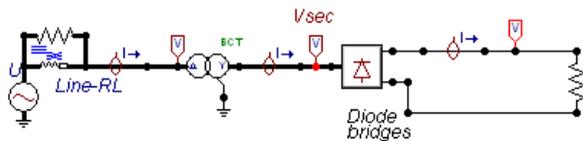
รูปที่ 1 องค์ประกอบของการตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วยเอฟพีจีเอ



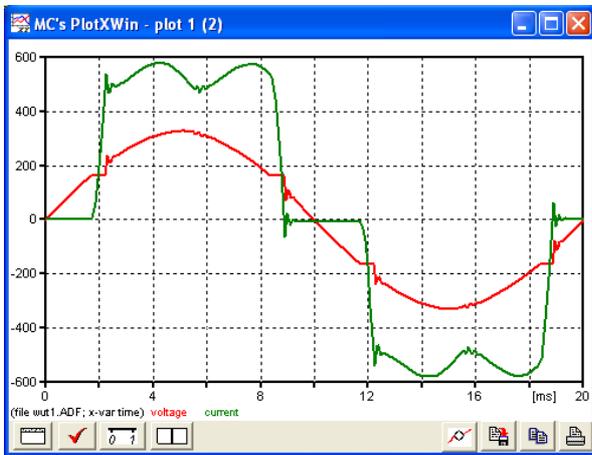
รูปที่ 2 ลักษณะการประมวลผลหาพลังงานไฟฟ้าด้วยเอฟพีจีเอ

#### 4. ผลการจำลองหาพลังงานไฟฟ้า

ในการจำลองเพื่อทดสอบการทำงานของเอฟพีจีเอ จะทำการจำลองการวัดกำลังไฟฟ้าจริง จากโปรแกรม EMTP [9] โดยใช้วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ มีขนาดแรงดันอินพุทเท่ากับ 230 โวลท์ จ่ายให้กับโหลดขนาด 1 โอห์ม ให้ค่ากระแส 433.96 แอมป์ ดังรูปที่ 3 ก่อให้เกิดรูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 4 และคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยได้เท่ากับ 95,417 วัตต์



รูปที่ 3 วงจรที่จำลองขึ้นเพื่อหาค่าพลังงานไฟฟ้าจริง โดยโปรแกรม EMTP



รูปที่ 4 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในหนึ่งคาบเวลา จากวงจรที่จำลองขึ้นโดยโปรแกรม EMTP

เมื่อได้ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากโปรแกรม EMTP แล้ว ข้อมูลดังกล่าวจะนำไปทดสอบบนโปรแกรม Quartus II [10] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถจำลองการทำงานของชิพเอฟพีจีเอ โดยการทำการเขียนบรรยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรในสมการที่ 9 ถึง 10 ดังรูปที่ 2 ด้วยภาษาวีเอสดีแอล ซึ่งทำให้ได้ผลการจำลองดังรูปที่ 5 ที่ให้กำลังไฟฟ้าจริงมีค่า 94,216 วัตต์ และใช้เวลาในการประมวลผล 20.48 ไมโครวินาที หรือ 1,024 รอบสัญญาณนาฬิกา ที่แหล่งกำเนิดความถี่ 50 เมกะเฮิร์ต ให้ค่าความผิดพลาดดังนี้

$$\text{ค่าความผิดพลาดมีค่า} \frac{|95417 - 94216|}{95417} \times 100 = 1.25\%$$

ส่วนผลการจำลองการหาพลังงานต่อวินาที พลังงานงานไฟฟ้าต่อชั่วโมง และ หน่วยการใช้พลังงานไฟฟ้า จะสามารถหาค่าได้ดังแสดงในตารางที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณด้วยโปรแกรม EMTP

ตารางที่ 1 ผลการจำลองหาพลังงาน

หน่วยที่ทดสอบ	ผลการคำนวณ	
	โปรแกรม Quartus II	โปรแกรม EMTP
กำลังไฟฟ้าจริง (วัตต์)	94,216	95,417
พลังงานต่อวินาที (วัตต์-วินาที)	94,216	95,417
พลังงานต่อชั่วโมง (วัตต์-ชั่วโมง)	94,216	95,417
หน่วยพลังงาน (หน่วย)	94	95.417

#### 5. ผลการทดสอบบน บอร์ดเอฟพีจีเอ

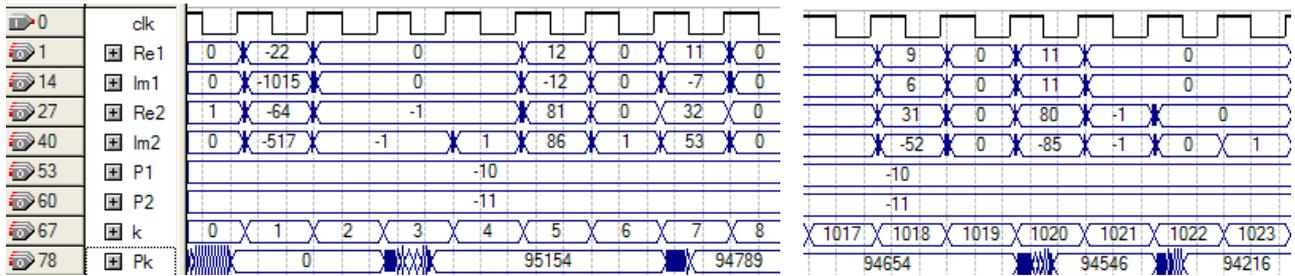
ในการทดสอบการหาค่าพลังงานไฟฟ้าจริงจะต้องทำตามรูปที่ 1 โดยใช้วัตต์มิเตอร์ YOKOGAWA คลาส 0.5 ตัวตรวจวัดการใช้พลังงานหรือ กิโลวัตต์-ฮาว ขนาด 5(15) แอมป์ บอร์ดเอฟพีจีเอใช้ชิพเบอร์ EP2C35F672C7 ที่ใช้ฐานสัญญาณนาฬิกา 50 เมกะเฮิร์ต ในเบื้องต้นจะทดสอบภาระโหลดทางไฟฟ้าที่เป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ซึ่งถือว่าเป็นภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้น ส่วนตัวบันทึกสัญญาณจะใช้ ออสซิลโลสโคปดิจิทัล TEKTRONIX รุ่น TDS1001B ดังแสดงในรูปที่ 6 และเมื่อทำการวัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวตรวจวัดผ่านไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล มีลักษณะดังรูปที่ 7 จากการหาค่าพลังงานไฟฟ้าจริงด้วยบอร์ดเอฟพีจีเอ ดังรูปที่ 1 และรูปที่ 6 สามารถหาค่าได้ 100 วัตต์ และวัตต์มิเตอร์วัดค่าได้ 98 วัตต์ ให้ค่าความผิดพลาดดังนี้ เมื่อนำไปทดสอบเพื่อวัดค่าพลังงานไฟฟ้า ทำให้ได้ผลดังตารางที่ 2

$$\text{ค่าความผิดพลาดจะมีค่า} \frac{|98 - 100|}{98} \times 100 = 2.04\%$$

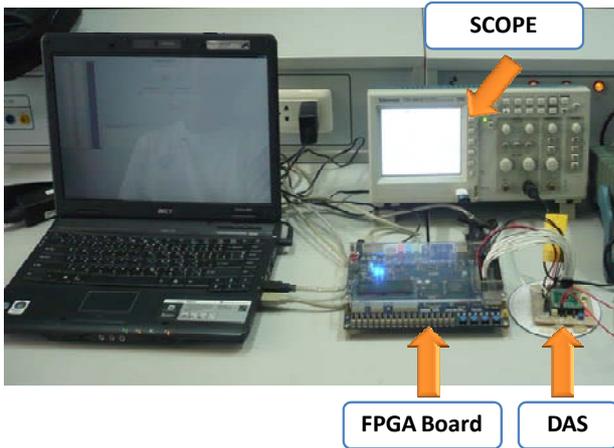
ตารางที่ 2 ผลการตรวจวัดหาพลังงาน

หน่วยที่ทดสอบ	ผลการตรวจวัด	
	บอร์ดเอฟพีจีเอ	วัตต์มิเตอร์ <sup>(1)</sup> หรือ กิโลวัตต์-ฮาว <sup>(2)</sup>
พลังงานต่อวินาที (วัตต์-วินาที)	100	98 <sup>(1)</sup>
พลังงานต่อชั่วโมง (วัตต์-ชั่วโมง)	100	98 <sup>(1)</sup>
หน่วยพลังงาน ** (หน่วย)	1	0.9 <sup>(2)</sup>

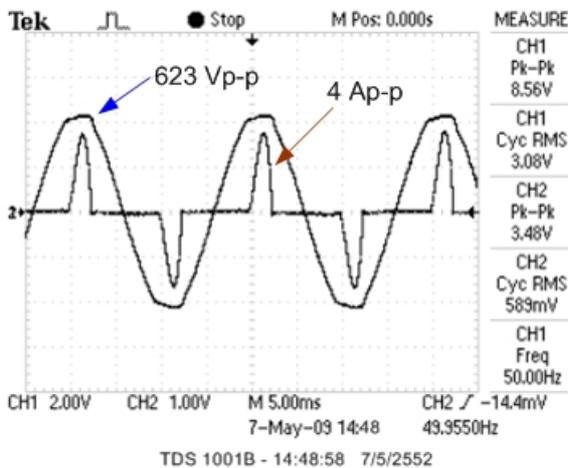
\*\* ใช้เวลาเวลาทดสอบ 10 ชั่วโมง



รูปที่ 5 ผลการจำลองการหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงด้วยซีพเอฟพีจีเอ จากโปรแกรม Quartus II



รูปที่ 6 การทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงด้วยซีพเอฟพีจีเอ



รูปที่ 7 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า จากออสซิลโลสโคปดิจิตอล

## 6. สรุป

ในการติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้านั้น เครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นมา นี้ทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้าจริง โดยเทคนิคการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปสัมพันธ์กับเวลาจะทำให้ได้ค่าพลังงาน ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดจะกระทำบนซีพเอฟพีจีเอ ทำให้เกิดข้อดีคือสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าแบบทันทีทันใดได้ภายในหนึ่งคาบเวลา และไม่จำเป็นต้องใช้สมการรากที่สองซึ่งทำให้ง่ายต่อการใช้งาน ในขณะที่เดียวกันก็หาค่าพลังงานไฟฟ้า ที่สามารถบันทึกค่าเพื่อติดตามการใช้พลังงานในรูปแบบของ พลังงานต่ออนาที พลังงานต่อชั่วโมง และหน่วยการใช้พลังงาน ที่มีค่าผิดพลาดเพียง 2.04 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้ข้อเสนอแนะและสนับสนุนในการทำงานวิจัยชิ้นนี้

### เอกสารอ้างอิง

1. Sa-nga-ngam, W., Srithorn, P., and Kerdchuen, T., "An Implementation of a FPGA based FFT for Power System Harmonic Identification", The 4<sup>th</sup> GMSARN International Conference 2009, Vietnam, Nov 25-27, 2009.
2. วุฒิชัย สง่างาม มงคล ด้านบำรุงตระกูล พิณจ ศรีธร กิตติวงศ์ สุพรรณโน และประเสริฐ เผื่อนหมื่นไวย, "การวัดกำลังไฟฟ้าจริงด้วยเทคนิคการแปลงฟูริเยร์แบบเร็วบนซีพเอฟพีจีเอ" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 2 (EENET2010), 5-6 กุมภาพันธ์, 2553.
3. Chen, W., Yuen, H., Wang, Y., "FPGA Based Design and Implementation of Non-sinusoidal Reactive Power" 4<sup>th</sup> IEEE Conference on Industrial Electronics and Application, China, May 25-27, 2009.
4. Qing-heng, Z., "The Multi-Function Electric Power Meter Based on DSP" Hangzhou, Zhe Jiang University.
5. Ozdemir, A., and Ferikoglu, A., "Low cost mixed-signal microcontroller based power measurement technique" IEE Proceeding Science, Measurement & Technology, 151(14), pp.253-258, 2004.
6. Gallo, D. L., and Rigano, N., "Usb-integrated DSP-instrument for power quality analysis" Proceeding of Symposium Exploring New Frontiers of Instrumentation and Methods for Electrical and Electronic Measurement, Italy, April 22-24, 2008.
7. Ashenden, P. J., The Designer's Guide to VHDL, USA, Elsevier Science, 2002.
8. Yue-zhi, W., "The electric energy measurement" China Electric Power Press, 2007.
9. Dommel, H. W., EMTP Theory book, 1992.
10. Altera. Quartus II version 9.0 User Guide. 2009