

การติดตามการใช้พลังงานด้วยชิพเฟฟฟี่เอ

กิตติวุฒิ จินนะบุตร* วุฒิชัย สว่างาม มงคล ค่านบำรุงตระกูล และรัชช เกิดชื่น

หน่วยวิจัยนวัตกรรมพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา

744 ถนนสุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทร 0-4425-2659 *E-mail: c_kittiwut@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอถึงการพัฒนาระบบติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว เพื่อให้ได้ขนาดของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และมุมเฟสในแต่ละลำดับของฮาร์มอนิก แล้วไปคำนวณหา กำลังไฟฟ้าจริงในแต่ละคาบเวลา จากนั้นนำค่ากำลังไฟฟ้านั้นไปสัมพันธ์กับเวลา ก็จะได้พลังงานไฟฟ้า โดยขั้นตอนการทำงานทั้งหมดกระทำบนบอร์ดเอฟฟี่เอ จากการศึกษาพบว่าเมื่อนำเครื่องมือนี้ไปใช้วัดค่าพลังงานไฟฟ้า มีค่าความผิดพลาดจากการวัดเพียง 2.04 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: เอฟฟี่เอ, การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว, พลังงานไฟฟ้า

1. บทนำ

ในการตรวจวัดปริมาณไฟฟ้า ลักษณะรูปคลื่นของสัญญาณถือว่าเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญ เนื่องจาก เครื่องมือวัดจะอ้างอิงสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ดังนั้นถ้ารูปคลื่นผิดเพี้ยนไปอาจส่งผลทำให้ค่าที่วัดได้ผิดพลาดไป ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าหรือที่เรียกว่าฮาร์มอนิก [1-3] ซึ่งถือว่าเป็นมลภาวะเกี่ยวกับระบบ ไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นมาจากภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นและการใช้งานอุปกรณ์จำพวกอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ดังนั้นเมื่อต้องการหาค่ากำลังไฟฟ้าหรือพลังงานไฟฟ้า จึงเป็นเรื่องที่ยุ่งยากในการคำนวณหา เมื่อรูป คลื่นสัญญาณไม่ได้เป็นรูปคลื่นไซน์ และก็มีหลายหลากวิธีการในการคำนวณ โดยส่วนมากจะนิยมใช้การแปลง ฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transforms) ที่ทำให้ได้ทั้งขนาดของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และมุมเฟสระหว่าง แรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ในแต่ละลำดับของฮาร์มอนิก สำหรับกระบวนการคำนวณด้วยวิธีการนี้จำเป็นต้องอาศัย ไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือ ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล มาคอยช่วยเสมอ [4-6] แต่ตัว ประมวลผลทั้งสองก็มีข้อเสีย กล่าวคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ จะถูกจำกัดในเรื่องของความถี่สัญญาณนาฬิกาและ การวนรอบของโปรแกรม ส่วนตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล จะมีราคาค่อนข้างแพง และผู้ใช้ไม่สามารถที่เพิ่ม หรือเปลี่ยนแปลงชุดคำสั่งได้ ดังนั้น เอฟฟี่เอ (FPGA : Field Programmable Gate Array) จึงเป็นอีกทางเลือก หนึ่ง ที่มีราคาไม่แพง ความถี่สัญญาณนาฬิกาสูง และสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวงจรได้ตามความ ต้องการ

ดังนั้นในบทความนี้จึงนำเสนอแนวทางในการติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้าของภาระโหลด ที่อาศัยเทคนิคการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วบนชิพเอฟพีจีเอ [2] ที่มีการพัฒนาเพิ่มเติมในเรื่องของการคำนวณหาค่าพลังงาน โดยอาศัยโปรแกรม Quartus II ซึ่งสามารถจำลองการทำงานของชิพด้วยการเขียนบรรยายพฤติกรรมการทำงานด้วยภาษาวีเอชดีแอล (VHDL) [7] พร้อมทั้งสามารถสังเคราะห์เป็นวงจรลอจิกเกตลงไปที่ตัวชิพได้ และที่บอร์ดของชิพเอฟพีจีเอเองก็ใช้ฐานความถี่สัญญาณนาฬิกาสำหรับประมวลผลที่ 50 เมกกะเฮิร์ต

2. การคำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้าบนชิพเอฟพีจีเอ

2.1 การหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงจากการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว

ค่าของกำลังไฟฟ้าจริงสามารถคำนวณได้เมื่อทราบขนาด ค่าประสิทธิภาพของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และมุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสที่ความถี่เดียวกัน [8] ดังสมการที่ 1 ส่วนในสมการที่ 2 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูงสุดของยอดรูปคลื่นกับค่าประสิทธิภาพ 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 ดังนั้นถ้าหากสัญญาณรูปคลื่นที่ทำกรหาไม่เป็นรูปคลื่นไซน์หรือเป็นรูปคลื่นที่มีองค์ประกอบของฮาร์โมนิกส์ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่คำนวณได้ย่อมเกิดความผิดพลาดตามมา ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ค่าขนาดของ แรงดันไฟฟ้า ค่าขนาดกระแสไฟฟ้าและมุมเฟส จะใช้วิธีการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งสองกรณี โดยค่าขนาด แรงดันไฟฟ้า ค่าขนาดกระแสไฟฟ้า และมุมเฟส ที่หามาได้นี้ จะถูกพิจารณาที่ตำแหน่งฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ k ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าจริงที่สามารถเขียนเป็นสมการใหม่ ดังสมการที่ 4

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

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

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

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

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

เมื่อ $V_m(k)$ และ $I_m(k)$ เป็นขนาดของแรงดันและกระแส
 P_1 และ P_2 เป็นค่าลดทอนขนาดข้อมูลของแรงดันและกระแส
 Im_1 และ Im_2 เป็นขนาดของแรงดันและกระแส ที่เป็นส่วนจินตภาพ
 Re_1 และ Re_2 เป็นขนาดของแรงดันและกระแส ที่เป็นส่วนจริง
 N เป็นขนาดจำนวนบิตของข้อมูลดิจิทัล
 k เป็นลำดับของฮาร์มอนิกส์

เมื่อนำสมการที่ 5 6 และ 7 แทนในกรณีที่ 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 การคำนวณหาลำดับกำลังไฟฟ้าจริง ลักษณะเช่นนี้ ชี้ให้เห็นว่าตัวประมวลผล ไม่มีความเป็นจำที่ต้องใช้รอกที่สอง ซึ่งทำให้ง่ายต่อนำไปใช้งานอีกด้วย

2.2 ค่าพลังงานไฟฟ้า

ค่าพลังงานไฟฟ้าเป็นค่าที่ได้จากกำลังไฟฟ้าจริงต่อเวลา ฉะนั้นเมื่อนำกำลังไฟฟ้าจริงทั้งหมดที่เกิดขึ้นแต่ละคาบเวลาจากสมการที่ 9 มารวมกันในหนึ่งวินาที ที่ความถี่ 50 เฮิร์ต จะได้เป็นพลังงานไฟฟ้าต่อวินาที (1 วินาที \times 50 เฮิร์ต) ดังสมการที่ 10 และเมื่อคิดคำนวณ กำลังไฟฟ้าจริงทั้งหมด ที่เกิดในหนึ่งชั่วโมง จะได้เป็นพลังงานไฟฟ้าต่อชั่วโมง (60 นาที \times 60 วินาที) ดังสมการที่ 11 เช่นกัน

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

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

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

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

3. การออกแบบของค้ประกอบการตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า

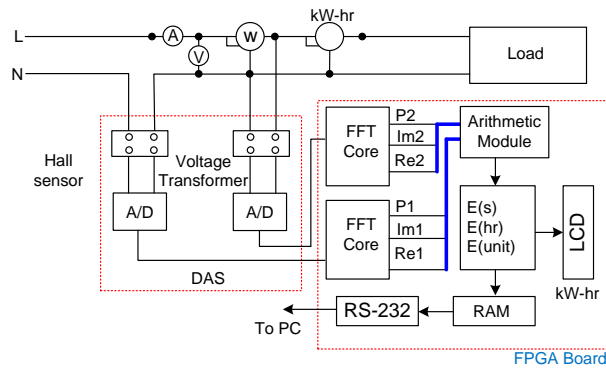
เมื่อทราบวิธีการหาค่าพลังงานไฟฟ้า ทำให้สามารถออกแบบ โครงสร้างการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ตามรูปที่ 1 ซึ่งจะประกอบด้วย ตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า ตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณ สัญญาณอนาลอกให้เป็นข้อมูลดิจิทัลและบอร์คเอพพีจีเอ

เมื่อได้ข้อมูลดิจิทัลจากแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ข้อมูลเหล่านี้จะ ถูกส่งนำไปคำนวณหาขนาด ในแต่ละลำดับ ฮาร์โมนิกส์ ด้วยการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว พร้อมทั้งคำนวณหาค่าพลังงานที่ต้องการตรวจวัดโดยการประมวลผลของเอพพีจีเอ ดังรูปที่ 2 ต่อจากนั้นตัวควบคุมจะส่งค่าพลังงานเหล่านี้เก็บไปในหน่วยความจำ และค่าพลังงานเหล่านี้สามารถส่งผ่านไปยังคอมพิวเตอร์ได้โดยผ่านพอร์ตอนุกรม ในขณะเดียวกันค่าหน่วยการใช้พลังงานจะแสดงผลที่หน้าจอผลึกเหลวด้วย

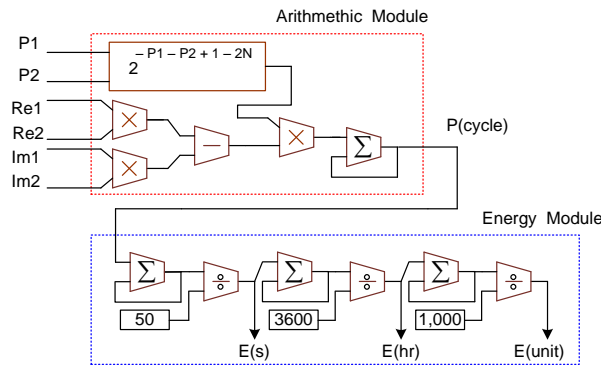
4. ผลการจำลองหาพลังงานไฟฟ้า

ในการจำลองเพื่อทดสอบการทำงานของเอพพีจีเอ จะทำการจำลองการวัดกำลังไฟฟ้าจริง จากโปรแกรม EMTP โดยใช้วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ มีขนาดแรงดันอินพุตเท่ากับ 230 โวลท์ จ่ายให้กับโหลดขนาด 1 โอห์ม ให้ค่ากระแส 433.96 แอมป์ ดังรูปที่ 3 ก่อให้เกิดรูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 4 และคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยได้เท่ากับ 95,417 วัตต์

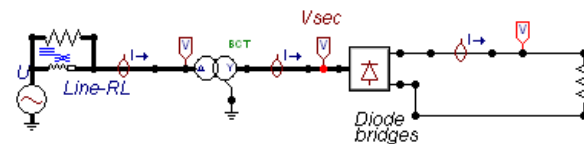
เมื่อได้ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากโปรแกรม EMTP แล้ว ข้อมูลดังกล่าวจะ แปลงให้เป็นข้อมูลดิจิทัลที่มีค่าเป็นจำนวนเต็มเพื่อนำไปทดสอบบนโปรแกรม Quartus II ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถจำลองการทำงานของชิพเอพพีจีเอ โดยทำการเขียนบรรยายพฤติกรรมการทำงานในสมการที่ 9 ถึง 10 ด้วยภาษาเวียเฮซีเอล ดังรูปที่ 2 ซึ่งทำให้ได้ผลการจำลองดังรูปที่ 5 ให้กำลังไฟฟ้าจริงมีค่า 94,216 วัตต์ และใช้เวลาในการประมวลผล 20.48 ไมโครวินาที หรือ 1,024 รอบสัญญาณนาฬิกา ที่แหล่งกำเนิดความถี่ 50 เมกะเฮิร์ต ให้ค่าความผิดพลาดเป็น $|95,417 - 94,216| \times 100 / 95,417 = 1.25\%$ ซึ่งค่าผิดพลาดนี้เกิดจากการแปลงข้อมูลให้เป็นข้อมูลดิจิทัลที่มีค่าเป็นจำนวนเต็มให้กับโปรแกรม Quartus II



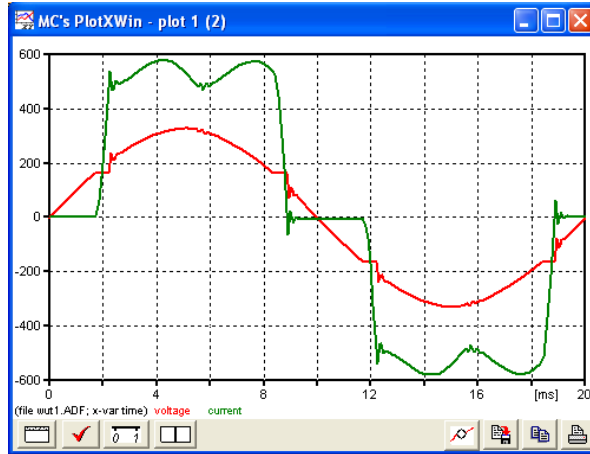
รูปที่ 1 องค์ประกอบของการตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วยเอฟพีจีเอ



รูปที่ 2 ลักษณะการประมวลผลหาพลังงานไฟฟ้าด้วยเอฟพีจีเอ



รูปที่ 3 วงจรที่จำลองขึ้นเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าจริง โดยโปรแกรม EMTP

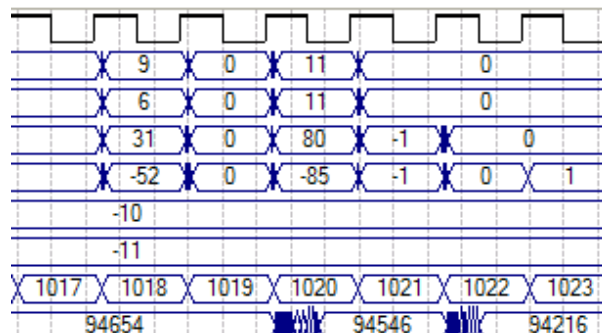


รูปที่ 4 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในหนึ่งคาบเวลา จากวงจรที่จำลองขึ้นโดยโปรแกรม EMTP

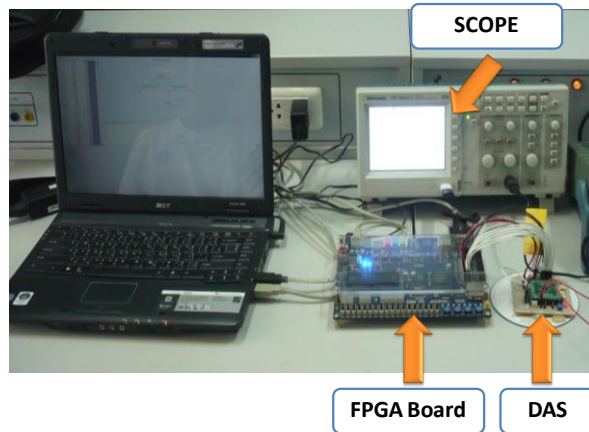
ส่วนผลการจำลองการหาพลังงานต่อวินาที พลังงานงานไฟฟ้าต่อชั่วโมง และ หน่วยการใช้พลังงานไฟฟ้า จะสามารถหาค่าได้ดังแสดงในตารางที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยโปรแกรม EMTP

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



รูปที่ 5 ผลการจำลองการหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงด้วยชิพเอฟพีจีเอ จากโปรแกรม Quartus II



รูปที่ 6 การทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงด้วยชิพเอฟพีจีเอ

5. ผลการทดสอบบนบอร์ดเอฟพีจีเอ

ในการทดสอบการหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงจะต่อวงจรตามรูปที่ 1 โดยใช้วัตต์มิเตอร์ YOKOGAWA คลาส 0.5 ตัวตรวจวัดการใช้พลังงานหรือกิโลวัตต์-ชั่วโมง ขนาด 5(15) แอมป์ บอร์ดเอฟพีจีเอใช้ชิพเบอร์ EP2C35F672C7 ที่ใช้ฐานสัญญาณนาฬิกา 50 เมกะเฮิร์ต ในเบื้องต้นจะทดสอบภาระโหลดทางไฟฟ้าที่เป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ซึ่งถือว่าเป็นภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้น ส่วนตัวบันทึกสัญญาณจะใช้ออสซิลโลสโคปดิจิทัล TEKTRONIX รุ่น TDS1001B ดังแสดงในรูปที่ 6 และเมื่อทำการวัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวตรวจวัดผ่านไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล จากการหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงด้วยบอร์ดเอฟพีจีเอ ดังรูปที่ 1 และรูปที่ 6 สามารถหาค่าได้ 100 วัตต์ และวัตต์มิเตอร์วัดค่าได้ 98 วัตต์ และเมื่อนำไปทดสอบเพื่อวัดค่าพลังงานไฟฟ้า ทำให้ได้ผลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการตรวจวัดหาพลังงาน

หน่วยที่ทดสอบ	ผลการตรวจวัด	
	บอร์ดเอฟพีจีเอ	วัตต์มิเตอร์ ⁽¹⁾ หรือ กิโลวัตต์-ชั่วโมง ⁽²⁾
พลังงานต่อวินาที	100	98 ⁽¹⁾
พลังงานต่อชั่วโมง	100	98 ⁽¹⁾
หน่วยพลังงาน **	1	0.98 ⁽²⁾

** ใช้เวลาเวลาทดสอบ 10 ชั่วโมง

ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็น $|1-0.98| \times 100 / 0.98$ มีค่าเท่ากับ 2.04% ซึ่งค่าความผิดพลาดนี้เกิดขึ้นจากตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้า เมื่อนำไปทำการวัดปริมาณกระแสค่าที่ค่อนข้างต่ำหรือค่าน้อย

6. สรุป

ในการติดตามการใช้พลังงาน ไฟฟ้านั้น เครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นมาทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้า จริง โดยเทคนิคการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปสัมพันธ์กับเวลาจะทำให้ได้ค่าพลังงาน ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดจะ กระทำบนชิพเอฟพีจีเอ ทำให้เกิด ข้อดีคือสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าแบบทันทีทันใดได้ภายในหนึ่งคาบเวลา และไม่จำเป็นต้องใช้สมการราก็สองซึ่งทำให้ง่ายต่อการใช้งาน ในขณะเดียวกันก็หาค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถบันทึกค่าเพื่อติดตามการใช้พลังงานในรูปแบบของ พลังงานต่ออนาที พลังงานต่อชั่วโมง และหน่วยการใช้พลังงาน ที่มีค่าผิดพลาดเพียง 2.04 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sa-nga-ngam, W., Srithorn, P., and Kerdchuen, T., "An Implementation of a FPGA based FFT for Power System Harmonic Identification", The 4th GMSARN International Conference 2009, Vietnam, Nov 25-27, 2009.
- [2] วุฒิชัย สง่างาม มงคล ดำเนินบำรุงตระกูล พินิจ ศรีธร กิตติวงศ์ สุ-ธรรมโน และประเสริฐ เพื่อนหมื่นไว, "การวัดกำลังไฟฟ้าจริงด้วยเทคนิคการแปลงฟูริเยร์แบบเร็วบนชิพเอฟพีจีเอ" 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" 4th 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.

บทความนี้คัดลอกและปรับปรุงจากการประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33 (EECON33) ตีพิมพ์ออนไลน์ใน JPEE เมื่อ 13 ธันวาคม 2553