การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6
5 - 7 พฤษภาคม 2553 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การออกแบบเครื่องวัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์

Design of the Harmonic Distortion Meter

พรประเสริฐ พุทธนรากุล* วิชิต ศิริโชติ
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร 02-737-3000 E-mail: puttanarakul@yahoo.com

Pornprasert Puttanarakul* Wichit Sirichote
School of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Ladkrabang, Bangkok 10520 Thailand Tel: 02-737-3000 E-mail: puttanarakul@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้อธิบายการออกแบบเครื่องวัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เครื่องวัดนี้ได้พัฒนาขึ้นด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM ST32 Cortex-M3 32 บิต และโปรแกรมแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว FFT โดยมีช่องรับสัญญาณขาเข้า 2 ช่อง สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกแปลงจากแอนะลอกเป็นดิจิตอลด้วยตัวแปลงแอนะลอกเป็นดิจิตอลขนาด 12 บิต ที่อยู่ภายในชิพของไมโครคอนโทรลเลอร์ ข้อมูลดิจิตอลในโดเมนของเวลาจะได้รับการประมวลผลด้วยการคำนวณ FFT ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์สามารถคำนวณได้ถึง 50 ลำดับ การแสดงผลสเปคตรัมของความถี่ฮาร์มอนิกส์ตามเวลาจริงจะแสดงด้วยโมดูลกราฟฟิกแอลซีดีขนาด 128x64 จุด เครื่องมือดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของสายส่งไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายเข้ากับสายส่งไฟฟ้าจำนวนมาก

Abstract

This paper describes the design of a device used for measuring the harmonic distortion of the AC voltage. The device is developed with the ARM ST32 Cortex-M3, 32-bit microcontroller and the FFT coding. The device is capable of capturing 2-channel AC input. The AC signal is digitized with a 12-bit on-chip analog-to-digital converter. The time-domain digital data is processed with the FFT calculation. The distortion of the signal is computed up to 50 harmonic orders. The built-in 128x64 LCD graphic module provides the real-time frequency spectrum display. The device can be used to monitor the grid power quality when a large number of the dispersed power plants were installed.

1. บทนำ

ระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายขนาดเล็กได้เริ่มมีการติดตั้งมากขึ้น โดยพลังงานต้นกำเนิดอาจเป็นพลังงานทางเลือกต่างๆ เช่นพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม เป็นต้น ไฟฟ้าที่ผลิตได้นี้สามารถเชื่อมเข้ากับสายส่งไฟฟ้าได้โดยตรง เพื่อช่วยเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้กับสายส่งในบริเวณ ณ ที่ตั้งของระบบผลิตไฟฟ้า ข้อกำหนดของคุณภาพไฟฟ้าที่จะป้อนเข้ากับสายส่งนั้น อาจมีข้อกำหนดไว้เพื่อป้องกันความเสียหายต่อสายส่งไฟฟ้า อย่างไรก็ตามหากเรามีเครื่องมือตรวจคุณภาพไฟฟ้าทำการบันทึกและวิเคราะห์ทั้งก่อนและหลังการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเหล่านี้ ก็จะทำให้เราสามารถประเมินผลได้โดยง่าย คุณภาพของสายส่งไฟฟ้าที่สำคัญเป็นอันมากได้แก่คุณภาพของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า การระบุคุณภาพของรูปคลื่นดังกล่าวสามารถกระทำได้โดยง่ายด้วยการวัดค่าผลรวมความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (Total Harmonic Distortion, THD) ตัวอย่างข้อแนะนำ IEEE 519-1992 [1] ค่าผลรวมความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์สำหรับระดับแรงดันไฟฟ้าจำหน่ายตามบ้าน จะจำกัดที่ 5% และค่าขนาดของแต่ละฮาร์มอนิกส์ จะจำกัดที่ 3% เป็นต้น เครื่องมือที่ใช้วัดค่า THD นี้อาจกระทำโดยการใช้วงจรแอนะลอกด้วยวงจรคัดความถี่เฉพาะฮาร์มอนิกที่สามเป็นต้น หรือใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคปเก็บสัญญาณรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและใช้การคำนวณ FFT ทั้งจากภายในออสซิลโลสโคปเองหรือการนำข้อมูลรูปคลื่นไปคำนวณด้วยโปรแกรมบนเครื่องพีซี นอกจากนี้ยังมีเครื่องมือที่ออกแบบมาใช้วัดค่า THD โดยตรง เช่น Fluke 43B Power Quality Analyzer [2] จะใช้วงจรดิจิตอลและการคำนวณด้วย FFT มีช่องเก็บสัญญาณหลายช่อง รวมทั้งมีภาคแสดงผลอยู่ในตัว เครื่องมือดังกล่าวมีราคาค่อนข้างสูง ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาเครื่องมือวัดค่าผลรวมความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์สำหรับสายส่งไฟฟ้า ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 32 บิต ARM ST32 Cortex-M3 และใช้โปรแกรมคำนวณ FFT บทความวิจัยนี้จะได้อธิบาย

หลักการที่ใช้ออกแบบ การทำงานของวงจร โปรแกรมควบคุมที่บรรจุภายในชิพ รวมทั้งผลการทดสอบ

2. หลักการออกแบบ

ค่าผลรวมความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันไฟสลับสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$THD = \sqrt{\frac{\sum V_n}{V_1}} \cdot 100, n = 2,3,4,..N \qquad (1)$$

V_n = แอมปลิจูดของความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ n

V_1 = แอมปลิจูดของความถี่มูลฐาน

การหาขนาดแอมปลิจูดของความถี่มูลฐานและฮาร์มอนิกส์ลำดับถัดไป เราสามารถใช้การแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transformation, DFT) ทำการสลายรูปคลื่นสัญญาณไฟสลับออกเป็นผลรวมของฟังชั่นไซน์ (sine) และโคไซน์ (cosine) ที่มีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐาน ดังสมการที่ 2

$$f(t) = A_0 + \sum_{\nu=1}^{\infty}(B_\nu \sin \nu\omega t + C_\nu \cos \nu\omega t) \qquad (2)$$

ขนาดแอมปลิจูดของแต่ละฮาร์มอนิกส์สามารถคำนวณได้จาก

$$A_\nu = \sqrt{B_\nu^2 + C_\nu^2} \qquad (3)$$

ค่าสัมประสิทธ์ B_ν และ C_ν ของแต่ละฮาร์มอนิกส์สามารถคำนวณได้จาก

$$B_\nu = \frac{2\Delta t}{T}\sum_{Y=1}^{n} V_Y \cdot \sin \nu\omega t_Y \qquad (4)$$

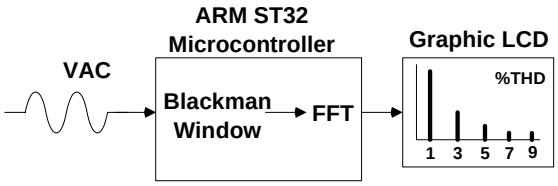
$$C_\nu = \frac{2\Delta t}{T}\sum_{Y=1}^{n} V_Y \cdot \cos \nu\omega t_Y \qquad (5)$$

Δt = ช่วงเวลาสุ่มข้อมูล

T = คาบของสัญญาณ

V_y = สัญญาณไฟสลับอินพุต

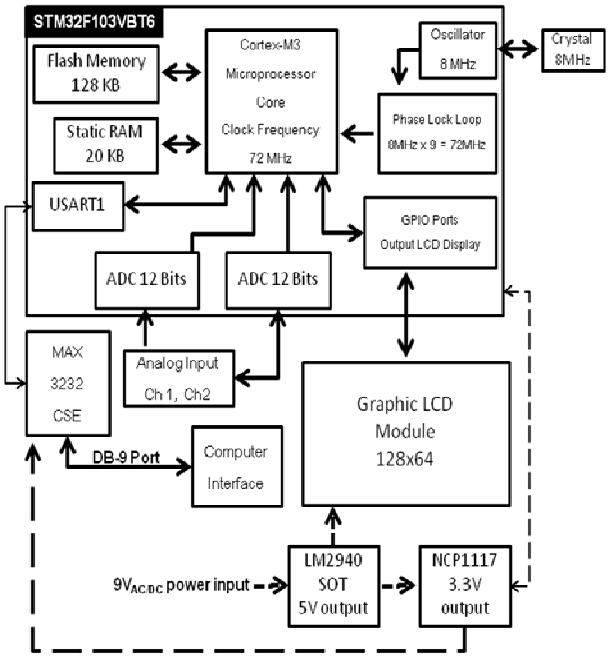
อย่างไรก็ตามการสลายรูปคลื่นอินพุตให้เป็นผลรวมของคลื่นฮาร์มอนิกส์ด้วย DFT นั้นจะใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างมาก เราได้เลือกใช้อัลกอริทึม (algorithm) ที่ช่วยคำนวณ DFT แบบที่ใช้เวลาค่อนข้างสั้นเมื่อเทียบกับแบบอื่นๆ คืออัลกอริทึม (algorithm) การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) เป็นที่รู้กันทั่วไปว่าอัลกอริทึมดังกล่าวเป็นแบบที่มีไลบรารี่สำเร็จรูปให้มาพร้อมกับเครื่องมือพัฒนาซอฟแวร์สำหรับการประมวลสัญญาณ เราได้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM ST32 Cortex-M3 มาเป็นตัวอ่านสัญญาณและคำนวณค่า THD สัญญาณไฟสลับที่ป้อนให้กับ FFT จะผ่านการคัดกรองด้วย Blackman Window สเปคตรัมที่ได้จะแสดงด้วยกราฟิกแอลซีดี แผนผังหลักการของเครื่องวัดแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังหลักการของเครื่องวัด

2.1 ส่วนประกอบฮาร์ดแวร์

แผนผังวงจรของเครื่องวัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์แสดงดังรูปที่ 2 วงจรควบคุมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM ST32 Cortex-M3 ทำงานที่ความถี่สัญญาณนาฬิกา 72MHz สัญญาณนาฬิกากำเนิดจากออสซิเลเตอร์ความถี่ 8MHz ผ่านเข้าวงจรเฟสล็อกลูปภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ คูณความถี่ให้เป็น 72MHz ไฟเลี้ยงวงจรมีสองส่วนได้แก่ +3.3V จ่ายให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนที่สอง +5V จ่ายให้กับแอลซีดีโมดูล ชิพไมโครคอนโทรลเลอร์ มีหน่วยความจำแฟลช 128 กิโลไบต์ และหน่วยความจำแรมภายในขนาด 20 กิโลไบต์ มีพอต USART1 ใช้สำหรับการโปรแกรมหน่วยความจำแฟลชและการดีบัก สัญญาณแอนะลอกมี 2 ช่องสัญญาณ ใช้ตัวแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอลขนาด 12 บิต จำนวน 2 ช่องเพื่อรับสัญญาณไฟสลับ ภาคแสดงผลเป็นกราฟิกแอลซีดีโมดูลความละเอียด 128x64 จุด โดยใช้สัญญาณควบคุมจากพอต GPIO



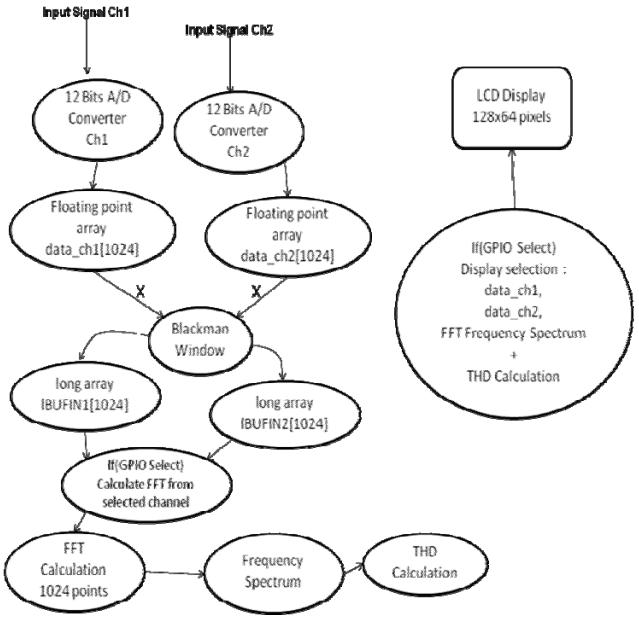
รูปที่ 2 แผนผังวงจรทางฮาร์ดแวร์

2.2 ส่วนประกอบซอฟแวร์

การประมวลสัญญาณเพื่อตรวจสอบขนาดในแต่ละฮาร์มอนิกส์ ได้ใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นด้วยภาษาซี แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมประมวลผลแสดงดังรูปที่ 3 เริ่มรับสัญญาณจากภายนอกจำนวน 1024 จุดผ่านเข้ามาในพอตแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอลเพื่อทำการแปลงสัญญาณและนำมาเก็บไว้ในอาร์เรย์ชนิด Floating point array หลังจากนั้นนำสัญญาณทั้งหมดมาคูณกับวินโดว์ชนิด Blackman Window ก่อนที่จะนำสัญญาณไปวิเคราะห์ความถี่ โดยทำการคูณแบบจุดต่อจุดเพื่อให้สามารถควบคุมจำนวนไซเคิล ตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้ายที่แน่นอนของสัญญาณขาเข้าได้ แสดงดังรูปที่ 4 สมการ Blackman Window [4] เป็นดังนี้

$$W[i] = 0.42 - 0.5\cos\left(\frac{2\pi i}{M}\right) + 0.08\cos\left(\frac{4\pi i}{M}\right) \quad (6)$$

โดย *i* คือ จำนวนของข้อมูลมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง M จากข้อมูลทั้งหมด M+1

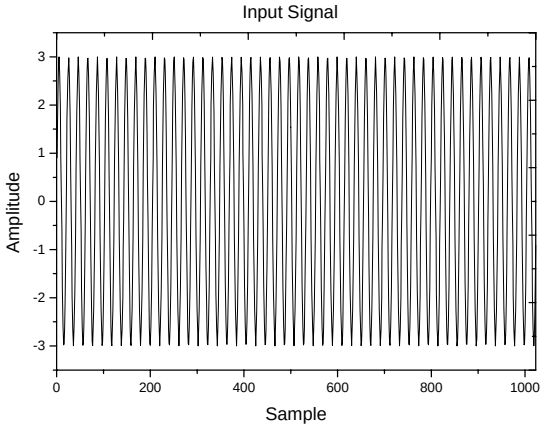


รูปที่ 3 แผนผังการทำงานของซอฟแวร์

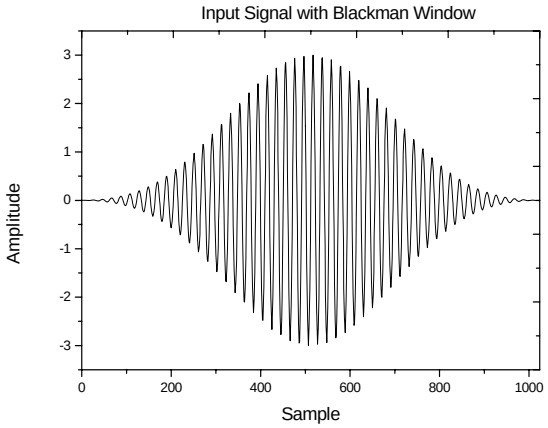
หลังจากนำสัญญาณผ่านเข้าตัวกรองชนิด Blackman Window แล้ว สัญญาณจะถูกส่งเข้าไปยังฟังก์ชันวิเคราะห์ความถี่ด้วยอัลกอริทึม FFT (Library จาก STMicroelectronics) จำนวน 1024 จุดเพื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณและแปลงสัญญาณจากโดเมนของเวลามาเป็นโดเมนของความถี่ และแสดงผลขนาดแอมปลิจูดของสัญญาณแต่ละฮาร์มอนิกส์ตั้งแต่ ความถี่มูลฐาน (50 Hz) จนถึงฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 10 ออกทางแอลซีดี

ขนาดของแอมปลิจูดของสัญญาณในแต่ละฮาร์มอนิกส์จะนำมาคำนวนเพื่อหาค่าผลรวมความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ตั้งแต่ลำดับที่สองเป็นต้นไป และแสดงผลการคำนวณออกทางแอลซีดี โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณผลรวมความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ แสดงดังสมการที่ 1

สำหรับการแสดงผลทางแอลซีดี นอกจากจะสามารถแสดงสเปกตรัมได้แล้วยังสามารถเลือกแสดงแบบโดเมนเวลาทั้งสองช่องสัญญาณได้อีกด้วย



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 สัญญาณก่อน (ก) และหลัง
(ข) ผ่านตัวกรองแบบ Blackman Window

2.3 การทดลอง

เพื่อตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม ในการทดลองจะทำการทดสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์ความถี่ของเครื่องมือและแสดงผลการทดสอบออกมาในรูปของขนาดแอมปลิจูดของความถี่ฮาร์มอนิกส์ ตั้งแต่ลำดับที่ 1 ความถี่มูลฐาน จนถึงความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 โดยการใช้สัญญาณที่รู้ความถี่ที่แน่นอน ตั้งแต่ความถี่มูลฐาน 50Hz เป็นต้นไปใส่เข้าไปในอาร์เรย์ที่เก็บข้อมูล (data_ch1) แล้วนำไปคูณกับตัวกรองความถี่ Blackman Window, W[i] และนำไปวิเคราะห์ความถี่ และคำนวณค่าผลรวมความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ในแต่ละความถี่แล้วแสดงผลออกมาในแต่ละความถี่ฮาร์มอนิกส์ หลังจากนั้นจะทำการรวมสัญญาณที่ความถี่ 50Hz, 150Hz และ 250Hz ที่มีขนาดแอมปลิจูดของแต่ละสัญญาณจะต่างกันเป็นครึ่งหนึ่ง ดังนี้

data_ch1[i] =3*(50Hz[i])+1.5*(150Hz [i])+0.75*(250Hz[i) (7)

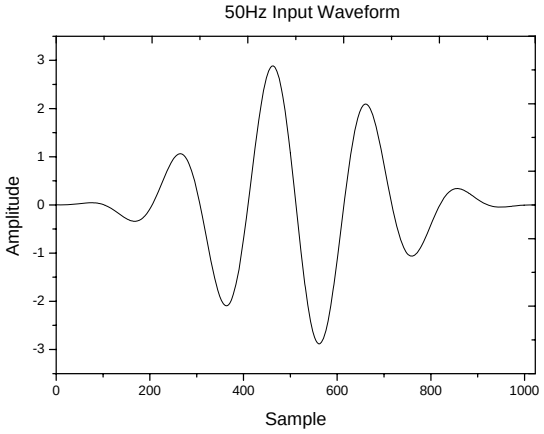
IBUFIN[i] = data_ch1[i] * W[i] (8)

นำเอาอินพุตอาเรย์ IBUFIN ป้อนให้กับ FFT เพื่อวิเคราะห์ผลของสเปกตรัมความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้น รวมทั้งคำนวณค่าผลรวมความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ ในการทดลองสุดท้ายจะรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับขนาด $9V_{AC}$ โดยต่อเข้ากับโหลดชนิดนอนลิ

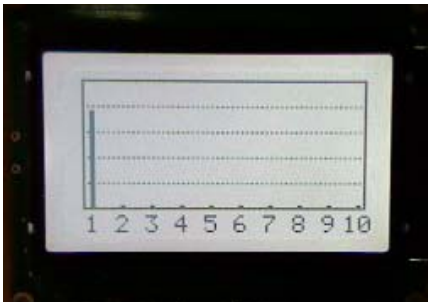
เนียส์ (nonlinear load) ทำให้รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะผิดเพี้ยนไป ทำการวัดสเปคตรัมความถี่และคำนวณค่าผลรวมความเพี้ยนของฮาร์มอนิกส์

3.ผลการทดลอง

จากรูปที่ 5 เมื่อป้อนสัญญาณความถี่ 50Hz ที่คูณกับ Blackman Window แล้วทำการวิเคราะห์ความถี่ ผลที่ได้พบว่าค่าแอมปลิจูดของฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 1 ปรากฏค่าขึ้นมา ในขณะที่ฮาร์มอนิกส์ลำดับอื่นๆ มีค่าเป็นศูนย์



(ก)

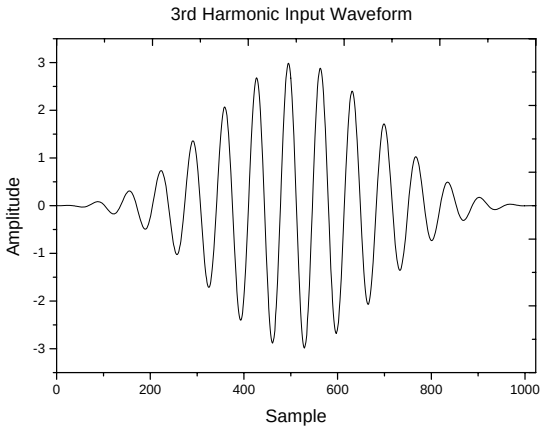


(ข)

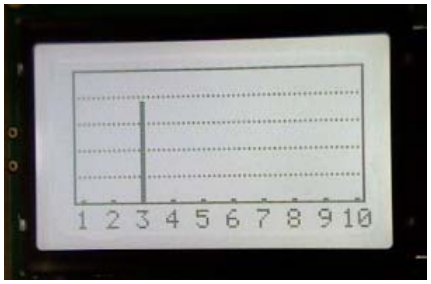
รูปที่ 5 (ก) สัญญาณความถี่ 50Hz (ข) สเปคตรัมความถี่ 50Hz

จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์ความถี่เมื่อป้อนความถี่ 150Hz สเปคตรัมความถี่ก็จะมีแอมปลิจูดที่ตำแหน่งฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 เพียงตำแหน่งเดียว และจากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์ความถี่เมื่อป้อนความถี่ 250Hz สเปคตรัมความถี่ก็จะมีแอมปลิจูดที่ตำแหน่งฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 เพียงตำแหน่งเดียว

เมื่อทำการรวมสัญญาณที่ความถี่ที่ 50Hz 150Hz และ 250Hz โดยให้ขนาดของแอมปลิจูดของสัญญาณความถี่ 150Hz มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของแอมปลิจูดของสัญญาณความถี่ 50Hz และให้ขนาดแอมปลิจูดของสัญญาณความถี่ 250Hz มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของแอมปลิจูดของสัญญาณความถี่ 150Hz แล้วกรองสัญญาณด้วย Blackman Window แล้วทำการวิเคราะห์ความถี่ ซึ่งจะได้ผลของสเปคตรัมความถี่แสดงดังรูปที่ 8

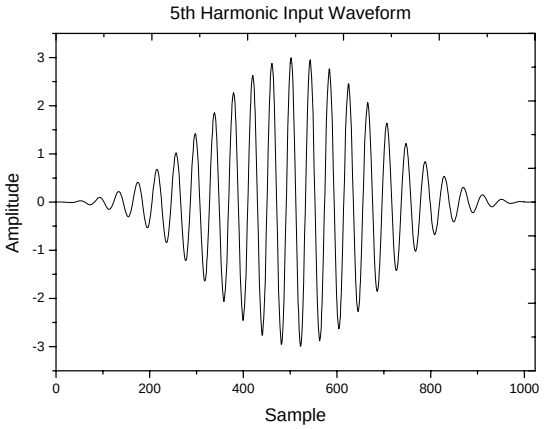


(ก)

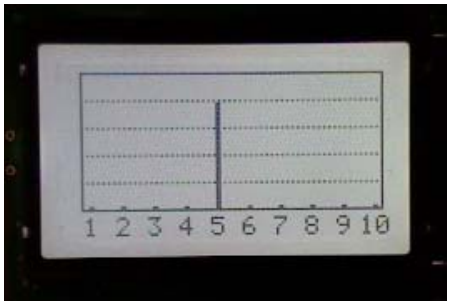


(ข)

รูปที่ 6 (ก) สัญญาณความถี่ 150Hz (ข) สเปคตรัมความถี่ 150Hz

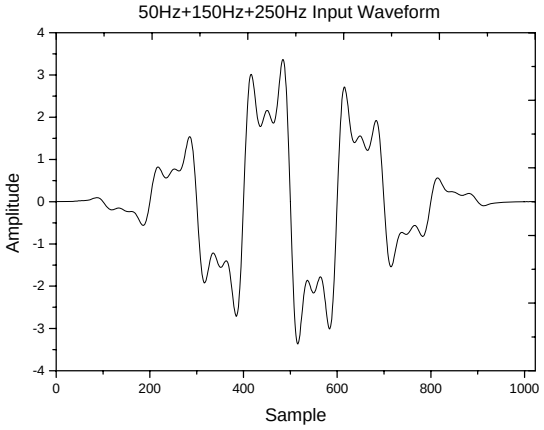


(ก)

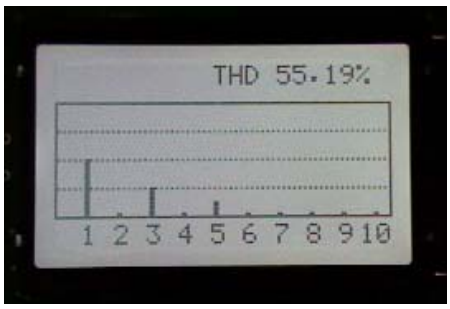


(ข)

รูปที่ 7 (ก) สัญญาณความถี่ 250Hz (ข) แสดงสเปคตรัมความถี่ 250Hz



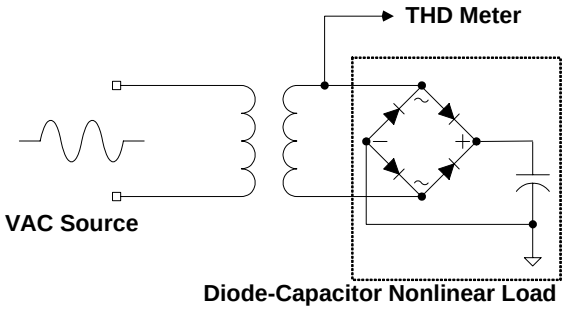
(ก)



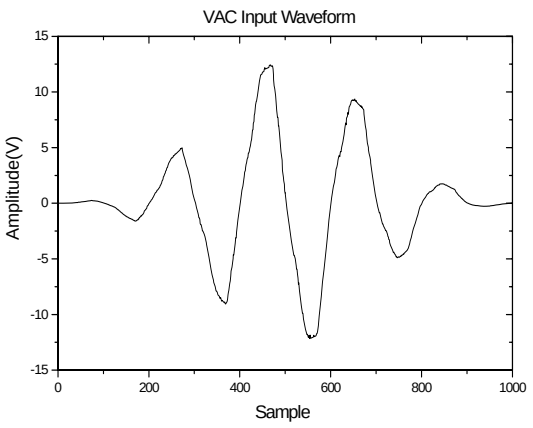
(ข)

รูปที่ 8 (ก) สัญญาณความถี่รวม 50Hz 150Hz และ 250Hz
(ข) สเปคตรัมความถี่รวม และค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ 55.19%

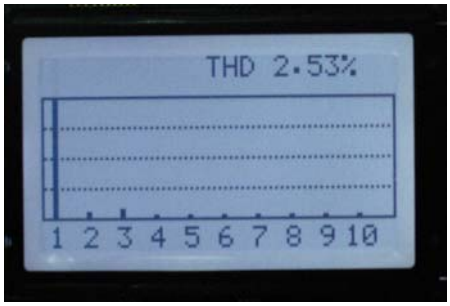
และได้ทดลองสร้างนอนลิเนียส์โหลดต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ด้วยวงจรเสมือนตัวประจุแบตเตอรี่ ประกอบไปด้วยไดโอดและตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 9 สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับปรากฏที่ขดเซคคันดารี่จะป้อนให้กับเครื่องวัด THD รูปที่ 10(ก) แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยน จะสังเกตว่าบริเวณส่วนพีคจะแบนเรียบ เนื่องจากนอนลิเนียส์โหลดดังกล่าวจะดึงกระแสไฟฟ้าเฉพาะบริเวณพีค รูปที่ 10(ข) แสดงสเปคตรัมจะปรากฏ 3rd ฮาร์มอนิกและลำดับถัดไป ค่าเปอร์เซ็นความเพี้ยนรวมคำนวณได้เท่ากับ 2.53%



รูปที่ 9 วงจรโหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้นสร้างด้วยไดโอด
และตัวเก็บประจุ



(ก)



(ข)

รูปที่ 10 (ก) ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า (ข) สเปกตรัมและค่าผลรวม
ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ 2.53%

4. สรุป

บทความวิจัยนี้ได้อธิบายการออกแบบเครื่องวัดผลรวมความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM ST32 Cortex-M3 และใช้อัลกอริทึม FFT ในการแปลงสัญญาณจากโดเมนของเวลามาเป็นโดเมนความถี่ ได้ทำการทดสอบด้วยสัญญาณที่รู้ความถี่ และแสดงผลเป็นสเปคตรัมตั้งแต่ความถี่มูลฐาน 50Hz ลำดับที่ 1 จนถึงฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 10 และผลการคำนวณค่าผลรวมความพี้ยนฮาร์มอนิกส์ รวมทั้งได้ทำทดสอบด้วยสัญญาณไฟสลับที่เพี้ยนจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารอ้างอิง

1. John F. Hibbard, Michael Z. Lowenstein, "Meeting IEEE 519-1992 Harmonic Limits," Trans Coil Inc (TCI), Milwaukee, USA.
2. Users Manual for Fluke 43B Power Quality Analyzer Rev. 2, 12-2008 Fluke Corporation, 2010.
3. Oran E. Brigham, "The Fast Fourier Transform," Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1974.
4. Steven W.Smith,"Digital Signal Processing A Practical Guide for Engineers and Scientists," Newnes, USA