

แหล่งจ่ายแรงดันประสิทธิภาพสูงสำหรับวัด THD ของกระแสโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น
โดยใช้การอนุกรมวงจรกรองแบบแอคทีฟ

**High Efficiency Voltage Power Supply for Measuring THD of Nonlinear Load Current
by Using Series Active Filter**

กฤษ ชาญชัย ถวัลย์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

123 หมู่ 16 ถ.มิตรภาพ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

โทร (043) 202353 โทรสาร (043) 202836 Email: krit@elec.kku.ac.th, mr.thawatchai@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแหล่งจ่ายแรงดันประสิทธิภาพสูงสำหรับวัด Total Harmonic Distortion (THD) ของกระแสโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้การอนุกรมวงจรกรองแบบแอคทีฟซึ่งวงจรที่นำเสนอใช้วงจรถ่ายกำลังเชิงเส้น (Linear Power Amplifier) เป็นตัวควบคุมการชดเชยฮาร์โมนิกของแรงดันเพื่อให้แรงดันเป็นรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) หรือมีค่า THD ต่ำซึ่งสามารถนำไปเป็นแหล่งจ่ายแรงดันสำหรับวัดกระแสของโหลดได้จากผลการทดลองวงจรที่นำเสนอสามารถลดฮาร์โมนิกของแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟ AC จาก 6.15% เหลือเพียง 0.95% เป็นผลให้การวัดค่า THD ของกระแสจากอุปกรณ์ไฟฟ้ามีความน่าเชื่อถือและถูกต้องมากยิ่งขึ้น ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพของวงจรถ่ายกำลังเชิงเส้นจะมีประสิทธิภาพต่ำแต่เนื่องจากทำหน้าที่เป็นเพียงตัวชดเชยฮาร์โมนิกเท่านั้นทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบยังคงสูงถึง 90.33%

คำสำคัญ : การอนุกรมวงจรกรองแบบแอคทีฟ, ฮาร์โมนิกของแรงดัน

Abstract

This paper presents the high efficiency voltage power supply for measuring Total Harmonic Distortion (THD) of nonlinear load current by using series active filter. The proposed circuit uses a linear power amplifier to compensate output voltage and reduce THD of output voltage. The experimental results show that, the proposed circuit can reduce THD of output voltage from 6.15% to be 0.95%. Therefore, the measuring of THD current will be more correct. In addition, by using the series active filter circuit, the total efficiency is up to 90.33% even if the efficiency of a linear power amplifier is low.

Keywords: Series Active filter, Voltage Harmonic

1. บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้นซึ่งก่อให้เกิดฮาร์โมนิกในระบบจ่ายไฟทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ที่ต่ออยู่ในบริเวณใกล้เคียงทำงานผิดพลาด ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบค่ากระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆว่าจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ามากเพียงใดแต่เนื่องจากในระหว่างการทดสอบมีฮาร์โมนิกจากระบบไฟฟ้าเข้าไปรวมกับฮาร์โมนิกที่มาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จะทำการทดสอบทำให้ค่าที่วัดได้ผิดพลาด ดังนั้นการทดสอบกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟที่มีฮาร์โมนิกของแรงดันไฟฟ้าต่ำและมีเสถียรภาพที่ดีจ่ายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จะทำการทดสอบ โดยแหล่งจ่ายไฟฮาร์โมนิกต่ำนี้สามารถสร้างจากแหล่งจ่ายไฟขึ้นมาใหม่หรือทำการกรองฮาร์โมนิกออกจากระบบจ่ายไฟเป็นต้น ในบทความนี้ได้ทำการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฮาร์โมนิกต่ำโดยใช้การอนุกรมวงจรกรองแบบแอคทีฟซึ่งวิธีการนี้เริ่มมีการกล่าวถึงตั้งแต่ปี ค.ศ.1980 เป็นต้นมาส่วนมากใช้ในการลดฮาร์โมนิกของแรงดันและแก้ไขแรงดันไม่สมดุลในระบบไฟ 3 เฟส และใช้ระบบควบคุมการทำงานแบบ full bridge inverter generating [1-3] โดยมีหม้อแปลงเป็นตัวเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบซึ่งทำโดย[3] หรือการเชื่อมต่ออนุกรมโดยตรงกับระบบไฟฟ้าซึ่งทำโดย[1,2] แต่เนื่องจากการใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวชดเชยจะประสบปัญหาเกี่ยวกับเรื่องของสัญญาณรบกวนจากการสวิตช์ (Switching noise) ปะปน

บทความนี้จึงใช้ระบบควบคุมการทำงานจากวงจรถ่ายกำลังเชิงเส้นเป็นตัวลดฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นและใช้การเชื่อมต่อโดยตรงกับระบบจ่ายไฟโดยไม่มีหม้อแปลงข้อดีอีกอย่างหนึ่งของวงจรถ่ายกำลังเชิงเส้นคือไม่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนจากการสวิตช์ทำให้ไม่ต้องมีอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำและมีระบบควบคุมที่ง่ายไม่ซับซ้อน ถึงแม้ว่าวงจรถ่ายกำลังเชิงเส้นจะมีประสิทธิภาพในการจ่ายพลังงานที่ต่ำเมื่อเทียบกับแหล่งจ่ายไฟชนิดสวิตช์ซึ่งแต่เนื่องจากวงจรถ่ายกำลังเชิงเส้นต่ออนุกรม

กับแหล่งจ่ายไฟจึงไม่ได้เป็นตัวจ่ายพลังงานทั้งหมดทำให้โหลดทำให้ประสิทธิภาพของระบบโดยรวมมีประสิทธิภาพสูง

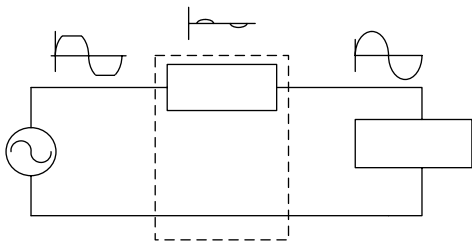
2. การออกแบบ

2.1 โครงสร้างการออกแบบ

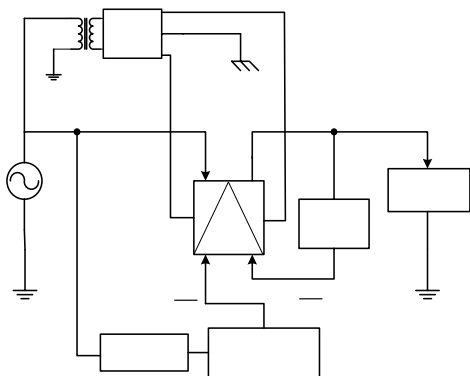
โครงสร้างการทำงานของการอนุกรมวงจรกรองแบบแยกที่พ ในระบบไฟ 1 เฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยวงจรกรองแบบแยกที่พจะสร้างแรงดัน V_o ออกไปชดเชยฮาร์โมนิกของแรงดันและพลังงานส่วนหนึ่งให้กับโหลดหลักการของรูปที่ 1 สามารถแสดงวงจรได้ดังรูปที่ 2 จากรูปที่2 วงจรขยายกำลังเชิงเส้นในภาคอินพุทจะมีส่วนของวงจขยายสัญญาณผลต่าง (Differential Amplifier) ที่มีอินพุทอิมพีแดนซ์สูงซึ่งเมื่ออินพุทมีเฟสตรงกันและขนาดเท่ากันเอาท์พุทจะเท่ากับศูนย์แต่ถ้ามีขนาดแตกต่างกันส่วนต่างนี้จะถูกขยายออกไปส่วนของส่วนกำเนิดคลื่นไซน์(Sine wave generator) จะสร้างสัญญาณ V_{ref} ที่มีฮาร์โมนิกที่ต่ำโดยมีเฟสตรงกันกับ V_s จากนั้นจะส่งสัญญาณไปยัง วงจรขยายกำลังเชิงเส้น ซึ่งทำการควบคุมสัญญาณ V_o ให้เท่ากับ V_{ref} โดยมี V_o เป็นตัวชดเชยแรงดันเพื่อลดฮาร์โมนิก ในส่วนของการคำนวณหาค่า THD ของกระแสและแรงดันทำได้โดยการแปลงฟูเรียร์(Fourier Transforms)มาคำนวณตามสมการดังต่อไปนี้

$$THD = \frac{\sqrt{x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + \dots + x_n^2}}{x_1} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ x_1 คือ ความถี่มูลฐาน
 $x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$ คือ ฮาร์โมนิกลำดับที่ 2,3,4,...,n



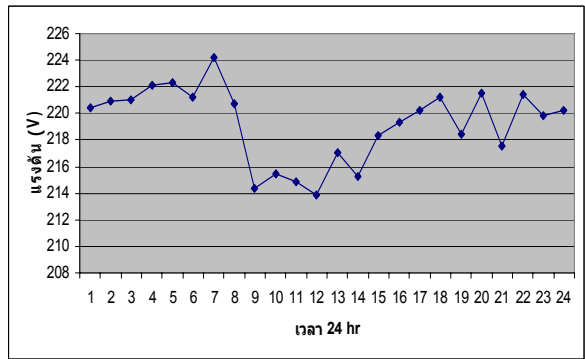
รูปที่1 การทำงานของวงจรกรองแบบแยกที่พโดยการอนุกรม



รูปที่2 วงจรกรองแบบแยกที่พโดยการอนุกรม

2.2 การออกแบบขนาดของวงจขยายกำลังเชิงเส้น

จากการทดลองวัดค่าแรงดันไฟฟ้าในห้องทดลองภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยขอนแก่นดังแสดงในรูปที่ 3 แรงดันของระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ 213-224 V จากข้อมูลดังกล่าวทำให้ทราบว่าแรงดันชดเชยของ วงจขยายกำลังเชิงเส้น จะต้องมิต่ำ 18V จึงจะเพียงพอในการรักษาเสถียรภาพของแรงดันให้ได้ 220 V คงที่ตลอดเวลา



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและ แรงดันของระบบไฟฟ้า

ส่วนพลังงานที่สามารถจ่ายให้โหลดได้จะขึ้นอยู่กับกำลังของวงจขยายกำลังเชิงเส้น โดยมีหลักการดังต่อไปนี้

เนื่องจาก $I_o = I_c$ (2)

ดังนั้น $P = V_o I_c$ (3)

วงจขยายกำลังเชิงเส้น ที่เลือกมาจะสามารถจ่ายกระแสได้สูงสุดที่ $I_{c(max)}$ ดังนั้นพลังงานสูงสุดที่สามารถจ่ายให้โหลดได้คือ

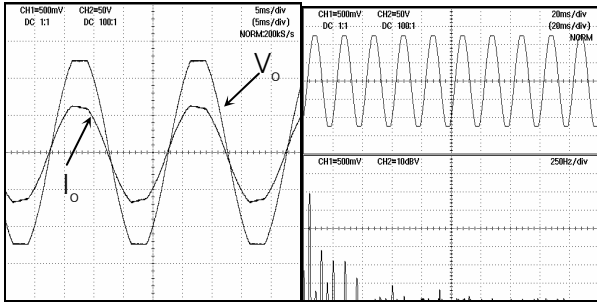
$$P_{max} = V_o I_{c(max)} \quad (4)$$

- เมื่อ P คือ พลังงานที่จ่ายไปยังโหลด
- I_c คือ กระแสของ วงจขยายกำลังเชิงเส้น
- I_o คือ กระแสที่จ่ายไปยังโหลด

3. ผลการทดลอง

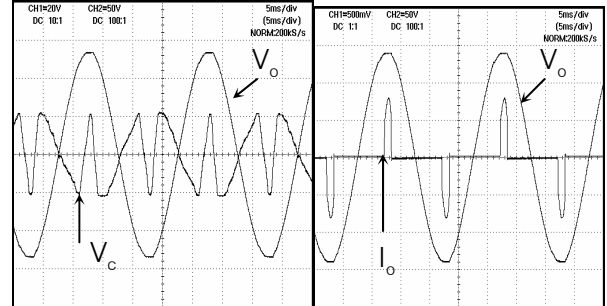
3.1. การทดลองโหลดแบบต่างๆ

โหลดที่ทำการทดสอบประกอบไปด้วยหลอดไส้ 300 W, หลอดตะเกียบ (Electronic Ballast) 14W, โหลด Full Bridge Rectifier 100VA, 150VA, ระบบกรองแบบแยกที่พจะใช้วงจขยายกำลังเชิงเส้นขนาด 32 W กระแสสามารถผ่านได้สูงสุด 5 A ระดับแรงดัน 18 V ในส่วนของวงจสร้างสัญญาณอ้างอิงจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เป็นตัวตรวจจับเฟส(Phase detector) และกำเนิดคลื่นไซน์ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

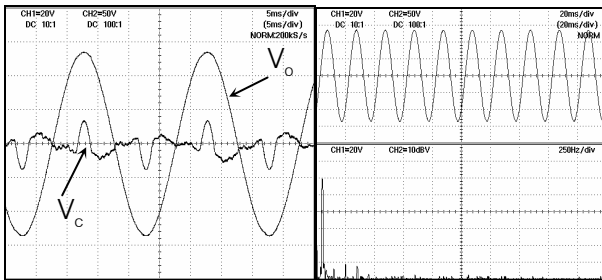


(a) V_o (100V/div) และ I_o (1.25A/div) (b) สเปกตรัมของ V_o , THD=3.31%
รูปที่ 4 ไม่มี Active filter ขณะจ่ายโหลดได้ 300 W

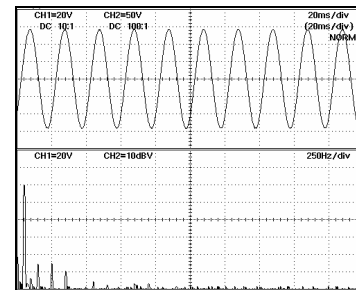
หลังจากอนุกรมวงจรกรองแบบแอคทีฟเข้าแล้วจะเห็นว่าค่า THD ของแรงดันมีค่าที่ต่ำลงทำให้การวัดค่า THD ของกระแสไหลดแบบต่างๆมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการวัดโดยใช้ไฟจากระบบจ่ายไฟโดยตรง



(a) V_o (100V/div) และ V_c (20V/div) (b) V_o (100V/div) และ I_o (0.5A/div)

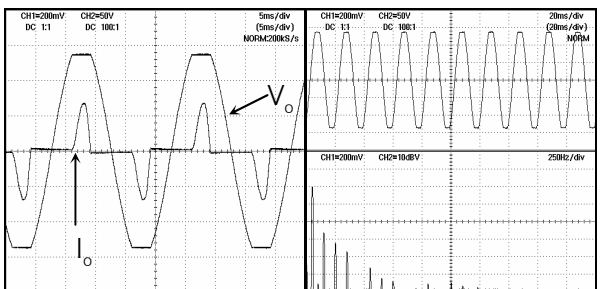


(a) V_o (100V/div) และ V_c (20V/div) (b) สเปกตรัมของ V_o , THD=0.71%
รูปที่ 5 มี Active filter ขณะจ่ายโหลดได้ 300 W



(c) สเปกตรัมของ V_o , THD= 0.95%

รูปที่ 7 มี Active filter ขณะจ่าย Full Bridge Rectifier 150VA



(a) V_o (100V/div) และ I_o (0.5A/div) (b) สเปกตรัมของ V_o , THD= 6.15%
รูปที่ 6 ไม่มี Active filter ขณะจ่าย Full Bridge Rectifier 150VA

ตารางที่ 1 THD ของแรงดันและกระแสของโหลดแบบต่างๆ

ชนิดและขนาดของ โหลด	AC main		หลังจากอนุกรม Active filter	
	%THD (V)	%THD (I)	%THD (V)	%THD (I)
โหลดได้ 300W	3.31	3.36	0.71	0.61
Full Bridge Rectifier 100VA	5.31	112.97	0.83	222.46
Full Bridge Rectifier 150VA	6.15	94.68	0.95	177.77
โหลดตะเกียบ 14W	3.68	109.26	0.67	99.95

จากรูปที่ 4 และรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าเมื่ออนุกรมวงจรกรองแบบแอคทีฟเข้าสู่ระบบจะสามารถลดค่า THD จากระบบจ่ายไฟ 3.31% เหลือเพียง 0.71% ได้ และในกรณีที่จ่ายให้กับโหลด Full Bridge Rectifier ที่มีค่าความเพี้ยนของแรงดันมากขึ้นดังรูปที่ 6 (THD=6.15%) สามารถลด THD ลงได้ถึง 0.95% ดังแสดงในรูปที่ 7 (c)

จากผลการทดลองในตารางที่ 1 จะเห็นว่าเมื่อทำการวัดค่า THD ของกระแสและแรงดันที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ โดยรับพลังงานมาจากระบบจ่ายไฟโดยตรงจะมีค่าผิดพลาดมากเนื่องจากมีฮาร์โมนิกที่อยู่ในระบบไฟฟ้าเข้ามารบกวน ตัวอย่างเช่น โหลดโหลดได้ 300 W ที่มีค่า THD ของกระแส 3.36% ซึ่งความเป็นจริงค่า THD จะมีค่าที่ต่ำมาก (0.61%) เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ไม่ก่อให้เกิดกระแสฮาร์โมนิก แต่

3.2. ประสิทธิภาพของระบบ

จากการทดลองเพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบขณะจ่ายโหลด 300 W เป็นดังนี้

$$\text{จาก } \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \eta_{all} &= \frac{P_{out}}{P_{inline} + P_{amp}} \times 100\% \quad (6) \\ &= \frac{284.99}{282.90 + 32.58} \times 100\% \\ &= 90.33\% \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของตัว วงจรขยายกำลังเชิงเส้น

$$\begin{aligned} \eta_{amp} &= \frac{3.75}{32.58} \times 100\% \\ &= 11.51\% \end{aligned}$$

จากการทดสอบประสิทธิภาพข้างต้นพบว่าการทำงานของวงจรขยายกำลังเชิงเส้น จะมีประสิทธิภาพการทำงานที่ต่ำคือมีเพียง 11.51% ซึ่งถ้าสร้างเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับโหลดโดยตรงจะทำให้สูญเสียพลังงานมาก แต่ถ้าใช้วิธีนำเอาวงจรขยายกำลังเชิงเส้นมาเป็นเพียงตัวชดเชยฮาร์โมนิกของแรงดันที่เกิดขึ้นโดยการอนุกรมวงจรแบบแยกทีฟจะมีประสิทธิภาพที่สูงถึง 90.33% ดังแสดงในสมการข้างต้น

4.สรุป

การอนุกรมวงจรแบบแยกทีฟสามารถลดฮาร์โมนิกของแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟ AC ได้โดยสามารถลดค่า THD ของแรงดันจากระบบจ่ายไฟจาก 6.15% เหลือเพียง 0.95% ทำให้การวัดค่า THD ของกระแสที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้ามีความน่าเชื่อถือมากขึ้นซึ่งจะเห็นได้จากผลการทดลองในตารางที่ 1 พร้อมกันนี้เนื่องจากวงจรขยายกำลังเชิงเส้นเป็นเพียงตัวชดเชยฮาร์โมนิกเท่านั้นไม่ได้จ่ายพลังงานทั้งหมดให้แก่โหลดทำให้ระบบสามารถจ่ายโหลดได้มากกว่ากำลังของวงจรขยายกำลังเชิงเส้นที่นำมาใช้ทำให้ประสิทธิภาพของระบบยังคงค่าที่สูงถึง 90.33% และระบบควบคุมการทำงานจากวงจรขยายกำลังเชิงเส้นที่ออกแบบมีระบบควบคุมที่ง่ายไม่ซับซ้อนไม่ต้องใช้หม้อแปลงเป็นตัวเชื่อมโยงกับระบบจ่ายไฟและไม่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนจากการสวิตซ์ทำให้ไม่ต้องมีอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำ

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] E. Ribeiro, I. Barbi, "Harmonic Voltage Reduction Using a Series Active Filter under Different Load Condition", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 2, June 2003, pp.769 - 774.
- [2] J. Nastran, R. Cajhen, M. Seliger and P. Jereb, "Active Power Filter for Nonlinear AC Loads", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 9, no. 1, Jan., 1994, pp. 92-96.
- [3] J. Perez, V. Cardenas, F. Pazos, S. Ramirez, "Voltage Harmonic Cancellation in Single-Phase Systems using a Series Active Filter with a Low-Order Controller" IEEE International Technical Proceedings on Power Electronics Congress, Oct. 2002 , pp. 270 – 274.



กฤษ เฉลยไสย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี โท และเอกในสาขาอิเล็กทรอนิกส์กำลังจากมหาวิทยาลัย NAGAOKA ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2540 2542 และ 2545 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



ชวัตชัย ลีนชัย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปี พ.ศ. 2545 ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโททางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น