วงจรวัดเฟสที่ใช้เทคนิคการสุ่มค่าสัญญาณ

PHASE MEASUREMENT CIRCUIT USING SAMPLING TECHNIQUE

วิภาวัลย์ นาคทรัพย์ ไวยพจน์ ศุภบวรเสถียร และ พกิจ สุวัตถิ์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม 10163
โทร.024570068 ต่อ 123 โทรสาร 024573982
E-mail : wipavan_n@hotmail.com, vyapotes@hotmail.com, pakit.s@siam.edu

นลินรัตน์ วิศวกิตติ และ ขวัญชัย กังเจริญ
ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม 10163
โทร. 024570068 ต่อ 210 โทรสาร 024573982
E-mail : nalinrat.w@siam.edu, kwanchai.k@siam.edu

บทคัดย่อ

วงจรวัดค่าเฟสที่ใช้เทคนิคการสุ่มค่าสัญญาณสำหรับการวัดค่าความต่างเฟสระหว่างสัญญาณอินพุตที่เป็นไซน์สองสัญญาณซึ่งมีความถี่เดียวกันในลักษณะที่ง่ายและรวดเร็วถูกนำเสนอในบทความนี้ วงจรดังกล่าวประกอบด้วยวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น วงจรเปรียบเทียบแรงดัน และ วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ ผลลัพธ์การวัดค่าของวงจรนี้อยู่ในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นสัดส่วนกับความต่างเฟสระหว่างสัญญาณอินพุตที่เป็นไซน์สองสัญญาณ ผลการทดสอบวงจรวัดค่าเฟสที่นำเสนอนี้ในย่านความถี่เสียงเป็นที่น่าพึงพอใจอย่างยิ่ง

Abstract

A phase measurement circuit using sampling technique, for measuring phase difference between two sinusoidal input signals of the same frequency in a fast and simple way, is proposed in this paper. This circuit includes a saw–tooth-wave signal generator, a full-wave rectifier, a voltage comparator and a sampling and hold circuit. Its measurement result is in the form of dc voltage proportionally to phase difference between two sinusoidal input signals. Test results of this proposed phase measurement circuit, performed under an audio frequency range, show to be very satisfactory.

1. บทนำ

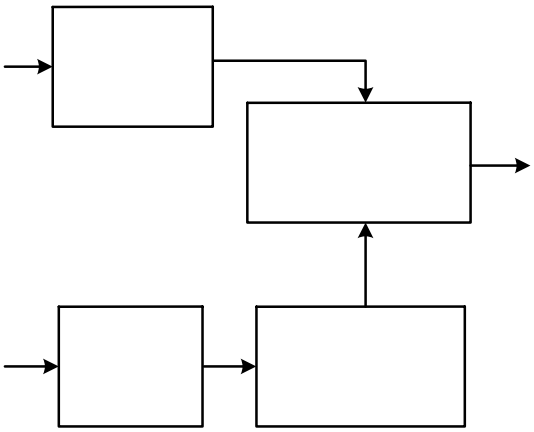
การวัดค่าความต่างเฟสของสัญญาณมีประโยชน์อย่างยิ่งทั้งในระบบเครื่องมือวัด ระบบอิเล็กทรอนิกส์ ระบบโทรคมนาคม ระบบควบคุม ตัวอย่างเช่น การใช้งานของวงจรวัดความต่างเฟสในระบบเฟสล็อกลูป (Phase - Locked Loop : PLL) หรือเป็นส่วนประกอบของการวัดค่าตัวคูณกำลัง (Power Factor : pf) ของเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น [1-4] เทคนิคการสร้างวงจรวัดเฟสมีหลากหลายแนวทาง อาทิเช่น การเปลี่ยนสัญญาณอินพุตให้เป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมโดยใช้วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ แล้ววัดความต่างเฟสจากความห่างของขอบรูปคลื่น [3] หรือใช้วิธีการสุ่มค่าสัญญาณโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ [4] เป็นต้น

ในบทความนี้นำเสนอหลักการสร้างวงจรวัดเฟสของสัญญาณอินพุตที่เป็นไซน์สองสัญญาณมีความถี่เดียวกันโดยใช้เทคนิคการวัดคล้ายกับวิธีแรก โดยมีข้อดีคือ ไม่มีการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุต มีผลตอบสนองเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างเฟสของสัญญาณอินพุต ซึ่งจะตอบสนองการวัดทุกครึ่งรอบการทำงาน

2. หลักการ

วงจรวัดความต่างเฟสที่นำเสนอในบทความนี้ เป็นการวัดมุมเฟสของสัญญาณอินพุตที่เป็นไซน์สองสัญญาณมีความถี่เท่ากันแต่มีมุมต่างเฟสกัน โดยกำหนดให้สัญญาณใดสัญญาณหนึ่งเป็นสัญญาณอ้างอิง v_{ref} และอีกสัญญาณ

เป็นสัญญาณอินพุต v_{in} แผนผังการทำงานแสดงในรูปที่ 1 และรูปคลื่นของสัญญาณตามจุดสำคัญต่างๆ แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 แผนผังการทำงานของวงจรวัดความต่างเฟส

จากรูปที่ 1 ประกอบด้วยวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น วงจรเปรียบเทียบแรงดัน และวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ หลักการทำงานพื้นฐานของวงจรวัดความต่างเฟสนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของรูปคลื่นสัญญาณฟันเลื่อยจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับช่วงเวลาในหนึ่งวงรอบ โดยที่สัญญาณฟันเลื่อยมีความถี่เป็นสองเท่าของสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย ในที่นี้กำหนดเป็นสัญญาณอ้างอิง v_{ref} ซึ่งค่าความต่างเฟสของสัญญาณอินพุตทั้งสอง นั่นคือสัญญาณอินพุต v_{in} และสัญญาณอ้างอิง v_{ref} หาได้จากค่าความแตกต่างของเวลาของสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณฟันเลื่อย ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวนี้สามารถแปลงกลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงผ่านวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ โดยที่รูปคลื่นสัญญาณที่จุดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2 เมื่อรูปที่ 2 (ก) เป็นกรณีที่สัญญาณอินพุต v_{in} ตามหลังสัญญาณอ้างอิง v_{ref} และรูปที่ 2 (ข) เป็นกรณีที่สัญญาณอินพุต v_{in} นำหน้าสัญญาณอ้างอิง v_{ref} เป็นระยะเวลาเท่ากับ t_0 ตามลำดับ ถ้าสัญญาณอินพุตทั้งสองมีคาบเวลาเท่ากับ T และกำหนดให้เวลา $t = 0$ ณ ตำแหน่งเวลาอ้างอิงในรูปที่ 2 แล้ว ในกรณีที่สัญญาณอินพุต v_{in} ตามหลังสัญญาณอ้างอิง v_{ref} ตามรูปที่ 2 (ก) กำหนดให้สัญญาณ v_{ref} มีมุมเฟสเท่ากับศูนย์องศา และสัญญาณ v_{in} ตามหลังสัญญาณอ้างอิงเป็นมุม θ ผ่านวงจรสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณที่ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นทำงานร่วมกับวงจรเปรียบเทียบแรงดัน และนำสัญญาณ v_{ref} เป็นอินพุตให้กับวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย โดยนำเอาต์พุตของสัญญาณฟันเลื่อยเป็นอินพุตให้กับวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ หาความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตที่เป็นสัดส่วนกับค่าความต่างเฟสได้ดังนี้

กำหนดให้สัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ดังสมการ (1)

$$v_{ref}(t) = V_{ref} \sin(\omega t) \tag{1}$$

และกำหนดให้สัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่เท่ากันและมีเฟสตามหลังสัญญาณอ้างอิงเป็นมุม θ เขียนแทนด้วยสมการ (2)

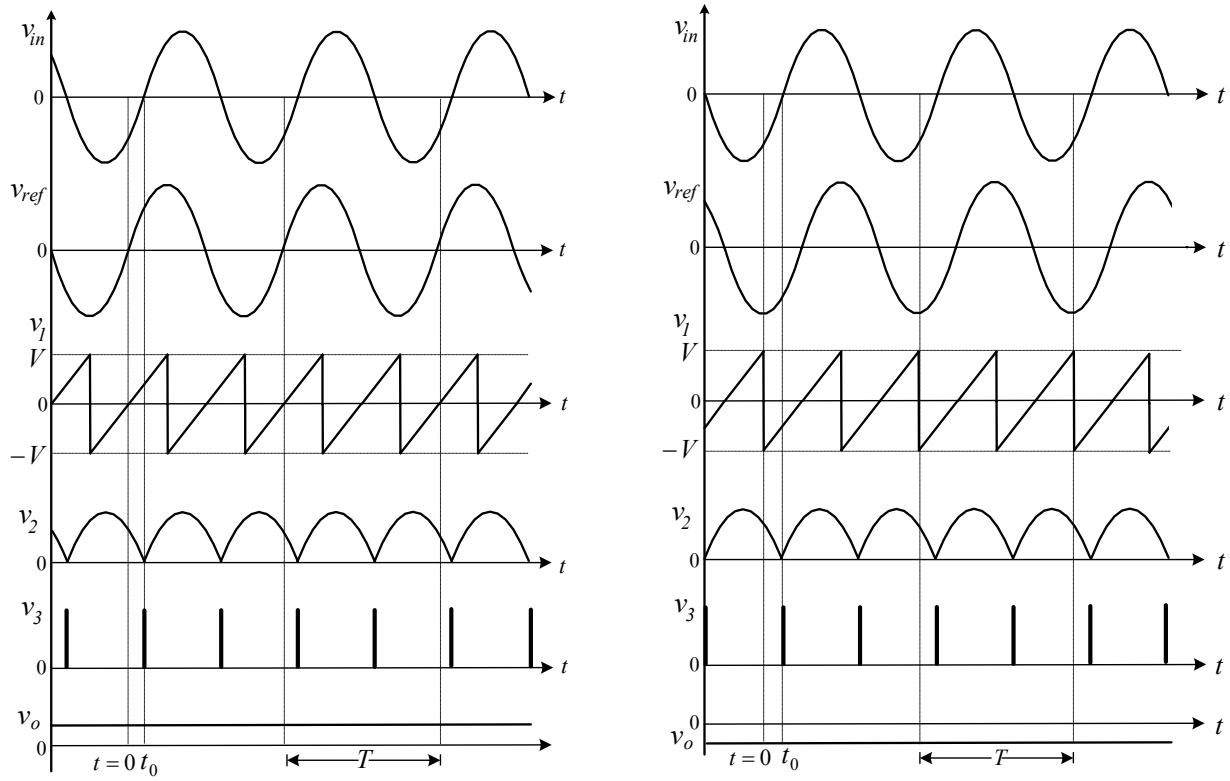
$$v_{in}(t) = V_{in} \sin(\omega t + \theta) \tag{2}$$

โดยที่ V_{ref} และ V_{in} คือแรงดันค่ายอดหรือขนาดของสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณอินพุตตามลำดับ และ ω คือความถี่เชิงมุมในหน่วยเรเดียนต่อวินาที (rad/s) ของสัญญาณอินพุตทั้งสองที่สัมพันธ์กับความถี่ในหน่วยเฮิรตซ์ (Hertz : Hz) และคาบเวลาในหน่วยวินาที (s) ดังสมการ (3)

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \tag{3}$$

เอาต์พุตของสัญญาณอ้างอิงเป็นอินพุตของวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย โดยที่ความถี่ของสัญญาณฟันเลื่อยมีค่าเป็นสองเท่าของสัญญาณอ้างอิง ดังสมการ (4)

$$v_1(t) = \frac{2V}{\pi} \omega t, \tag{4}$$



(ก) สัญญาณ v_{in} ตามหลังสัญญาณ v_{ref}

(ข) สัญญาณ v_{in} เกิดขึ้นก่อนสัญญาณ v_{ref}

รูปที่ 2 รูปคลื่นตามจุดต่าง ๆ ของรูปที่ 1

เนื่องจากค่าความต่างเฟส θ ของสัญญาณอินพุต v_{in} และสัญญาณอ้างอิง v_{ref} มีค่าสัมพันธ์กับเวลา t_0 คาบเวลา T และความถี่เชิงมุม ω ดังสมการ (5)

$$\frac{\theta}{2\pi} = \frac{t_0}{T}$$

หรือ

$$t_0 = \frac{T\theta}{2\pi} = \frac{\frac{2\pi}{\omega}\theta}{2\pi} = \frac{\theta}{\omega} \qquad (5)$$

นำค่าของเวลา $t = t_0$ แทนในสมการ (3) เขียนสมการใหม่ได้ดังสมการ (6)

$$v_1(t) = v(t_0) = \frac{2V}{\pi}\omega t_0 = \frac{2V}{\pi}\theta \qquad (6)$$

ค่าแรงดัน $v_1(t)$ ที่ได้ตามสมการ (6) จะนำไปสุ่มและคงค่าระดับสัญญาณนี้ไว้โดยผ่านวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ ซึ่งการสร้างวงจรควบคุมในการสุ่มสัญญาณ สร้างได้จากป้อนสัญญาณอินพุต v_{in} เข้าที่วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นและวงจรเปรียบเทียบแรงดัน โดยถ้าแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นมีค่าน้อยกว่าแรงดันอ้างอิง ในที่นี้กำหนดเป็น 0.2 V เอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบแรงดันจะมีค่าเท่ากับแรงดันอิ่มตัวด้านบวก และถ้าแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นมีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิง 0.2 V เอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบแรงดันจะมีค่าเท่ากับ 0 V ดังนั้นได้แรงดันเอาต์พุตที่ทำการสุ่มและคงค่าสัญญาณ ณ เวลา t ใด ๆ มีค่าเท่ากับค่าขนาดของแรงดันรูปคลื่นฟันเลื่อยที่เวลา t_0 นั่นเอง

$$v_o(t) = v_o(t_0) = v_2(t_0) = \frac{2V}{\pi}\theta \qquad (7)$$

จากสมการ (7) พบว่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรวัดค่าความต่างเฟส คือขนาดของรูปคลื่นของสัญญาณฟันเลื่อยที่เวลา t_0 ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ามุมเฟส θ ของสัญญาณอินพุต ทั้งสอง ณ เวลา t_0 โดยที่วงจรอิสระจากความถี่ของสัญญาณอินพุตทั้งสอง นอกจากนี้ยังสามารถใช้ระดับของสัญญาณเอาต์พุตเป็นดัชนีชี้วัดระดับค่าความต่างเฟสของสัญญาณอินพุตทั้งสองได้ ในทำนองเดียวกันจากรูปที่ 2 (ข) เป็นกรณีที่สัญญาณอินพุต v_{in} นำหน้าสัญญาณอ้างอิง v_{ref} ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้ของวงจรจะเป็นแรงดันไฟตรงเช่นเดียวกันแต่มีค่าเป็นลบ นั่นคือ

$$v_o(t) = v_o(t_0) = v_2(t_0) = -\frac{2V}{\pi}\theta \qquad (8)$$

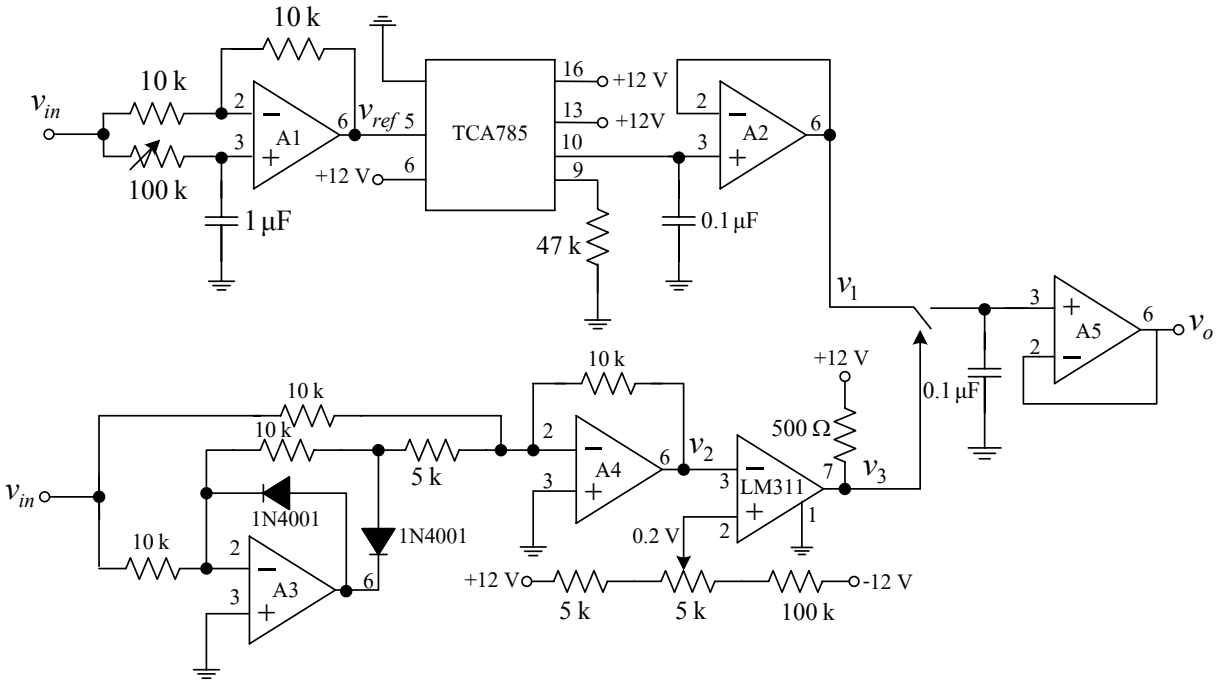
จากสมการ (7) และ (8) พบว่าระดับแรงดันที่มีค่าเป็นบวกและลบตามลำดับนั้นแสดงให้เห็นถึงสภาวะการนำหน้าหรือการตามหลังของสัญญาณอินพุตทั้งสองโดยดูที่ขั้วของเอาต์พุตนั่นเอง

3. ผลการทดลอง

เพื่อยืนยันหลักการที่ได้นำเสนอได้ทำการออกแบบและสร้างวงจรวัดเฟส เพื่อทดลองคุณลักษณะของวงจรแสดงดังรูปที่ 3 โดยเลือกใช้อุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้คือ A1 – A5 ใช้ออปแอมป์เบอร์ LF356 โดยที่ A1 เป็นส่วนประกอบของวงจรเลื่อนเฟส A2 เป็นวงจรบัฟเฟอร์ A3 และ A4 เป็นวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น และ A5 เป็นวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ ใช้ไอซี TCA785 สร้างสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย [5] ใช้ไอซี LM311 เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดัน ใช้สวิตช์เบอร์ 4066 และใช้ไฟเลี้ยงวงจร $\pm$12 V

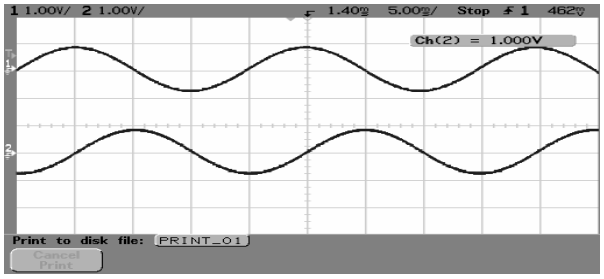
จากรูปที่ 3 เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตรูปคลื่นไซน์ความถี่ 50 Hz โดยที่สัญญาณแรงดันอินพุต v_{in} นำหน้าสัญญาณแรงดันอ้างอิง v_{ref} อยู่ 90 องศา จะได้แรงดันเอาต์พุตเป็นไฟตรงที่มีค่าเป็นลบ ตามสมการ (8) นั่นคือ

$$v_o = -\frac{2V}{\pi}\theta = -\left[\frac{2(0.25)}{(22/7)}\right]90 = -(0.159)(90) = -14.3\ \text{V}$$

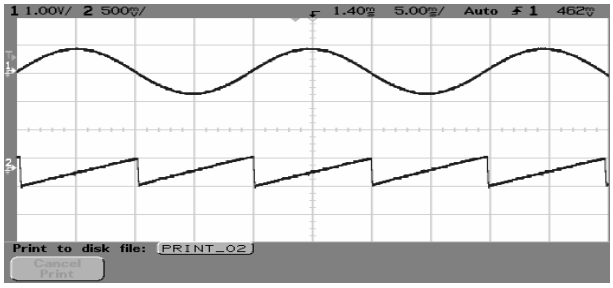


รูปที่ 3 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

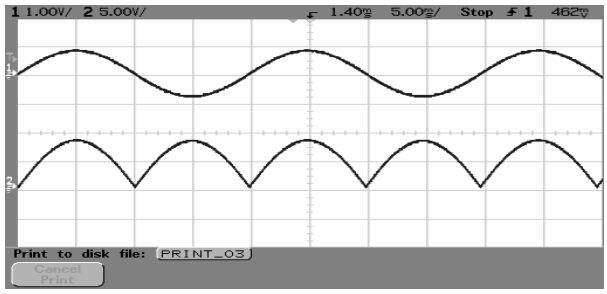
ทำการวัดสัญญาณตามจุดต่าง ๆที่สำคัญแสดงดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างเฟสและแรงดันเอาต์พุตของวงจร พบว่ามีความเป็นเชิงเส้น จากนั้นหาย่านการทำงานของวงจรโดยทดลองเปลี่ยนความถี่สัญญาณอินพุตและวัดค่าแรงดันเอาต์พุต ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่อินพุตกับแรงดันเอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งจากรูปที่ 6 พบว่าความถี่อินพุตที่จะนำไปใช้งานได้ตั้งแต่ความถี่ต่ำจนถึงความถี่เสียง



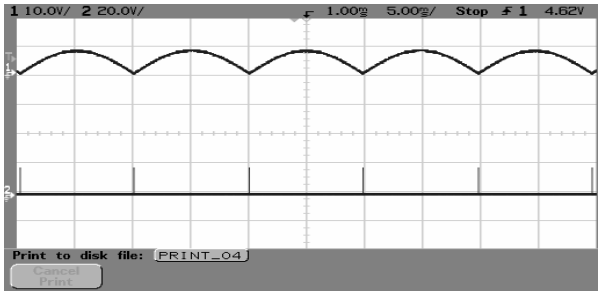
(ก) เส้นบนคือสัญญาณอินพุต v_{in} และเส้นล่างคือสัญญาณอ้างอิง v_{ref}



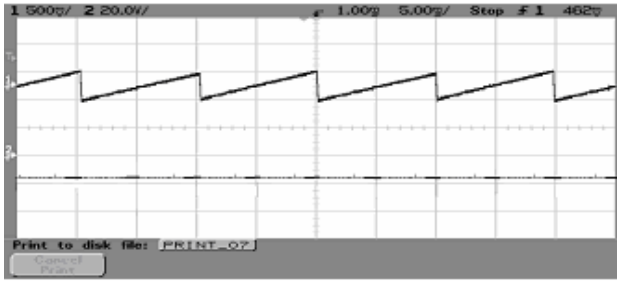
(ข) เส้นบนคือสัญญาณอินพุต v_{in} และเส้นล่างคือเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย v_1



(ค) เส้นบนคือสัญญาณอินพุต v_{in} และเส้นล่างคือสัญญาณวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น v_2

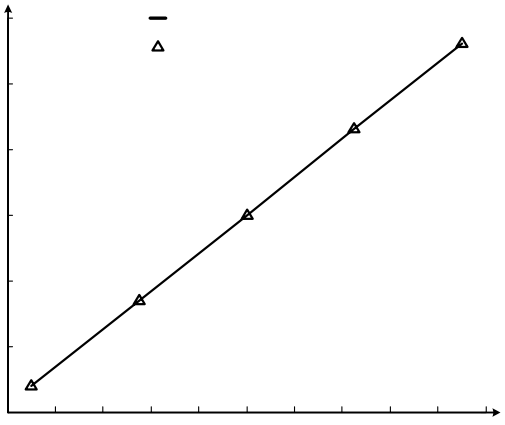


(ง) เส้นบนคือสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น v_2 และเส้นล่างคือเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน v_3

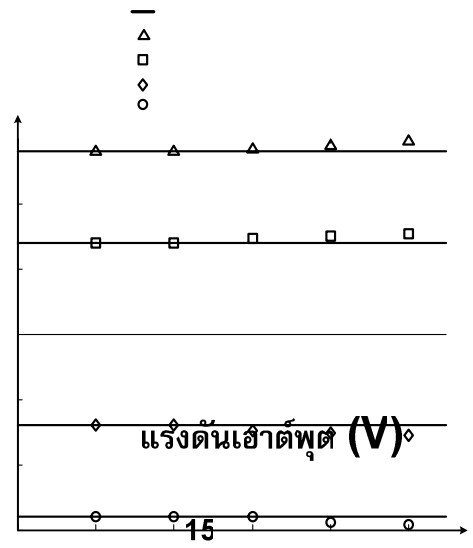


(จ) เส้นบนคือเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย v_1 และเส้นล่างคือเอาต์พุตของวงจร v_o

รูปที่ 4 สัญญาณตามจุดที่สำคัญของวงจรในรูปที่ 3



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของความต่างเฟสของสัญญาณอินพุตและแรงดันเอาต์พุต



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของความถี่อินพุตและแรงดันเอาต์พุต

4. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอวงจรวัดค่าเฟสที่ใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่าสัญญาณของสัญญาณอินพุตสองสัญญาณที่เป็นไซน์มีความถี่เท่ากัน ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วภายในครึ่งวงรอบของความต่างเฟสของสัญญาณอินพุต เอาต์พุตที่ได้เป็นแรงดันไฟตรงที่แปรผันตามค่าความต่างเฟสที่สามารถบอกสภาวะการนำหน้าหรือตามหลังของสัญญาณอินพุตทั้งสองได้และเป็นเชิงเส้นที่ดี สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่เสียง นอกจากนี้วงจรที่นำเสนอง่าย ราคาถูกและไม่ยุ่งยากในการสร้าง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอกราบขอบคุณ อาจารย์ พล.ท.ดร. สมพงษ์ ตุ้มสวัสดิ์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยามที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำด้วยดีเสมอมา จึงทำให้บทความนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

[1] Rado Lapuh, "Accurate Phase Measurement with Two Sampling Voltmeters," IEEE. Instrumentation and Measurement Technology Conference Budapest, Hungary, May 21-23, 2001.

[2] intersil, "Simple Phase Meter Operate to 10 MHz ," Application Note , October 27, 2004.

[3] S.M. Mahmud," High precision Phase Measurement Using Reduce Sine and Cosine Tables," IEEE. Transaction Instrumentation and Measurement, No. 1, pp.61-65, 1990.

[4] S.M. Mahmud and et al," A Microprocessor-Based Dual Slope Phase Meter," IEEE. Transaction Instrumentation and Measurement, No. 3, pp.374-378, 1990.

[5] Semiconductor Group," Datasheet TCA 785 Bipolar Phase Control IC," Siemens.