

การออกแบบวงจรแปลงผันความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าราคาถูกลง Frequency to Voltage Converter based on Low Cost Design

บุญเรือง วังศิลาบัตร¹ และ เสถียร ธัญญศรีรัตน์²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

833 ถนนพระราม 1 เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์: 0-2219-3861 E-mail: boonrwan@gmail.com

²สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

833 ถนนพระราม 1 เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์: 0-2219-3861 E-mail: satean2000@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ การออกแบบวงจรแปลงผันความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าราคาถูก ซึ่งในบทความนี้ได้ทำการออกแบบให้ตอบสนองต่อย่านความถี่ 1kHz จนถึง 10kHz และผลที่ได้จากการทดลองจริงสามารถปรับแต่งให้แรงดันไฟตรงเต็มสเกลให้มีค่าเป็น 10V และมีความเป็นเชิงเส้นตลอดย่านความถี่ที่ป้อนเข้ามาเป็นอย่างดี โดยมีค่าความผิดพลาดของความเป็นเชิงเส้นน้อยกว่า $\pm 0.7\%$ ของค่าเต็มสเกล และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.946 V/kHz อย่างไรก็ตาม วงจรที่ออกแบบขึ้นนี้สามารถทำให้ตอบสนองกับความถี่ย่านอื่น ๆ ได้ โดยใช้หลักการออกแบบในลักษณะเดียวกันและยังสามารถสร้างขึ้นใช้ได้ด้วยงบประมาณเพียง 100 บาท

คำสำคัญ: วงจรแปลงผันความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า, แรงดันไฟตรงเต็มสเกล, ความผิดพลาดของความเป็นเชิงเส้น, สัมประสิทธิ์การถ่ายโอน

Abstract

This paper proposes the frequency to voltage converter based on low cost design. For voltage converter design, frequency response can be adjusted from 1kHz to 10kHz. The implementation results indicate that the DC output voltage is linearly from low voltage until full scale voltage at 10V. The linearity error is less than $\pm 0.7\%$ at full scale, and the average of transfer co-efficient is 0.946 V/kHz. Furthermore, this circuit design can be applied with other frequency ranges. In addition, the budget of low cost DC voltage converter is about 100 baths.

Keywords: frequency to dc voltage converter circuit, DC output full scale voltage, linearity error, Transfer co-efficient

1. บทนำ

ปัจจุบัน มีการนำวงจรแปลงผันความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าไปประยุกต์ใช้ในเครื่องจักรกล และพาหนะต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก เพื่อทำการแปลงผันผลของสัญญาณที่อยู่ในรูปแบบของจังหวะการทำงานที่ซ้ำซ้อนในช่วงของเวลาหนึ่ง ๆ เช่น การหมุนที่แกนเฟลาเป็นวงรอบของเครื่องจักรกลหรือเครื่องยนต์ในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ซึ่งถูกเรียกว่า “ความเร็วรอบ” และนิยามกำหนดให้มีหน่วยเป็น รอบต่อวินาที แต่ถ้าคิดเป็น รอบต่อวินาที ก็จะเป็นความถี่ และมีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz) ซึ่งโดยทั่วไปสำหรับ

ในพาหนะที่เป็นจักรยานยนต์ หรือ รถยนต์ ที่มีการควบคุมการจุดระเบิด และการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเข้ากระบอกสูบ ด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ มักจะใช้ตัวตรวจจับการหมุนเป็น ขดลวดตรวจพบ (Pick-up coil) โดยสัญญาณที่ได้จะอยู่ในรูปแบบของ จำนวนพัลส์ต่อรอบการหมุน โดยผลจากการแปลงผันความถี่ที่ได้ จะถูกนำไปใช้ในการแสดงผลการหมุนที่เพลลาของเครื่องยนต์บนหน้าปัด อีกทั้งยังถูกส่งเป็นยังระบบควบคุมอัตโนมัติ ให้ทำการควบคุมปริมาณของน้ำมันเชื้อเพลิงที่จะต้องฉีดเข้ากระบอกสูบและทำการจุดระเบิดให้ได้จังหวะอย่างเหมาะสมตามความเร็วรอบที่ต้องการ เพื่อเป็นการประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง วงจรแปลงผันความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับ เอนโคเดอร์ แบบอินครีเมนต์ (Increment encoder) ที่ติดตั้งเข้าที่เพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้า โดยสัญญาณที่ได้จากทางเอาท์พุทของ เอนโคเดอร์ แบบอินครีเมนต์ จะเป็นจำนวนของพัลส์ต่อรอบการหมุน เช่น 100 พัลส์/รอบ , 500 พัลส์/รอบ หรืออาจจะเป็น 1000 พัลส์/รอบ ดังนั้นถ้ามอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบหนึ่ง ๆ ก็จะเกิดพัลส์จำนวนหนึ่งออกมาจากทางเอาท์พุทของเอนโคเดอร์ และถ้านับจำนวนของพัลส์ที่ออกมาจากเอนโคเดอร์ ภายในเวลา 1 วินาที ก็จะกลายเป็นความถี่เช่นเดียวกัน นอกจากนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการแปลงผันจะต้องมีความเป็นเชิงเส้นที่ดี เพื่อเสริมสมรรถนะของระบบควบคุมให้ดียิ่งขึ้น

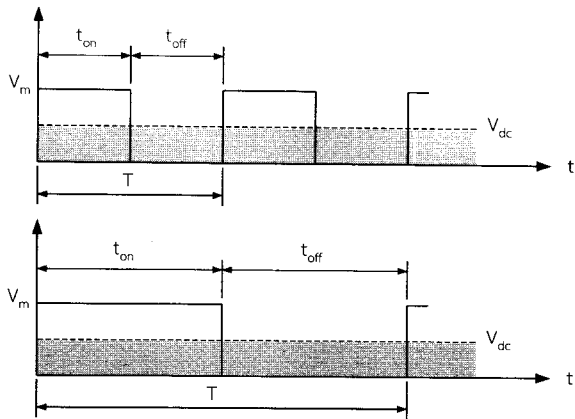
นอกจากนี้วงจรแปลงผันความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า ให้สามารถแสดงผลของการวัดแรงดันไฟฟ้าออกมาเป็นค่าของความถี่ที่ถูกป้อนเข้ามาทางด้านอินพุต ดังจะเห็นว่าในปัจจุบันจะมีการนำไปประยุกต์ใช้กับมัลติมิเตอร์บางรุ่นที่ทำให้สามารถทำการวัดค่าของความถี่ได้ด้วย

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีไอซี ซึ่งเป็นวงจรรวมที่สามารถทำการแปลงผันความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าจำหน่ายอยู่ในตลาดก็ตาม แต่เนื่องจากไอซีเหล่านั้นมักจะมีราคาค่อนข้างแพง และยากต่อการนำมาออกแบบให้ตอบสนองต่อความถี่ในย่านที่ผู้ใช้งานต้องการได้

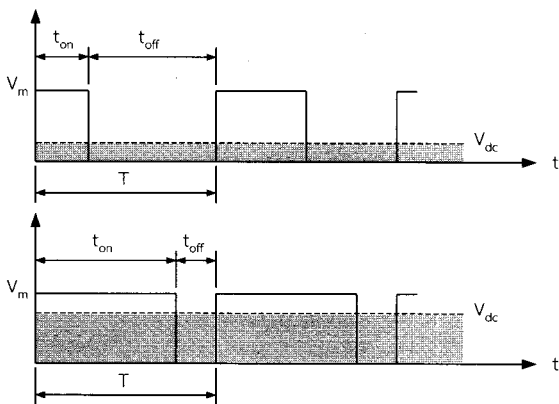
2. การแปลงผันความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า

รูปคลื่นของสัญญาณความถี่ที่ถูกป้อนเข้ามาทางด้านอินพุตจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Square wave) ซึ่งโดยปกติค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟตรง (V_{dc}) จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าของความถี่ถึงแสดงในรูปที่ 1 แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าตัวชี้ไขเกิ้ล (Duty cycle , D) ซึ่งเป็น

อัตราส่วนของค่าเวลาในช่วงที่มีสัญญาณบวก (t_{on}) ต่อค่าคาบเวลาของความถี่นั้น f (T) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 แรงดันไฟตรงเฉลี่ยจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่



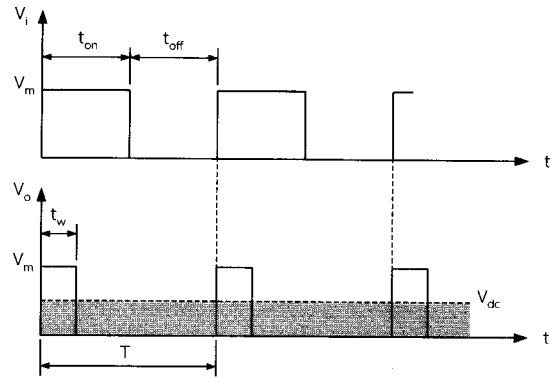
รูปที่ 2 แรงดันไฟตรงเฉลี่ยเปลี่ยนแปลงไปตามค่าตัวใช้เกิ้ล

จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าแรงดันไฟตรงเฉลี่ยจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าตัวใช้เกิ้ลซึ่งสามารถคำนวณได้ดังในสมการที่ (1)

$$V_{dc} = V_m \frac{t_{on}}{T} = V_m \cdot D \quad (1)$$

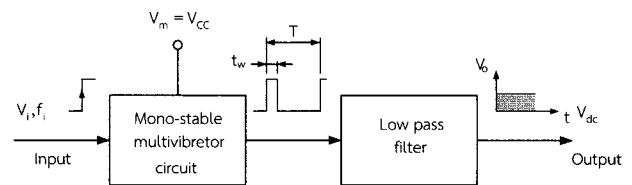
แต่ในทางปฏิบัติค่าตัวใช้เกิ้ลของสัญญาณความถี่ที่ป้อนเข้ามาจะมีค่าคงที่ ดังนั้นในการแปลงผันความถี่เป็นแรงดันไฟตรงจึงต้องใช้การกำหนดค่าเวลาคงที่ (t_w) โดยใช้สัญญาณที่ขอบขาขึ้นหรือขอบขาลงของสัญญาณความถี่ที่ป้อนเข้ามาเป็นตัวกำหนด ดังแสดงในรูปที่ 3

จากรูปที่ 3 เมื่อกำหนดค่าเวลาคงที่ (t_w) ให้เกิดขึ้นทุก ๆ ขอบขาขึ้นของสัญญาณความถี่ที่ป้อนเข้ามาทางด้านอินพุต (V_i) ดังนั้นเมื่อความถี่ของสัญญาณที่ป้อนเข้ามาเกิดการเปลี่ยนแปลง ก็จะส่งผลให้สัญญาณที่ออกมาทางเอาท์พุต (V_o) เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าตัวใช้เกิ้ลไปตามความถี่ของสัญญาณที่ป้อนเข้ามาทางด้านอินพุต



รูปที่ 3 ค่าเวลาคงที่ (t_w) ทุก ๆ ขอบขาขึ้นของสัญญาณความถี่ที่ป้อนเข้ามาทางด้านอินพุต

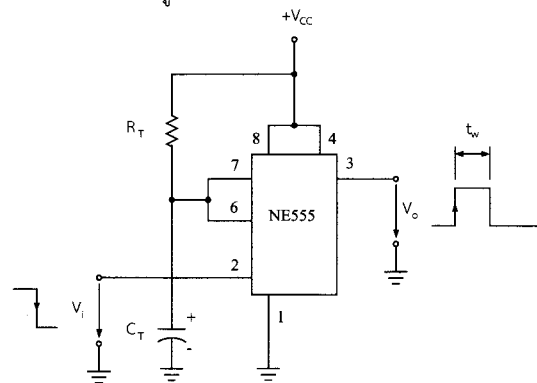
สำหรับวงจรที่ทำหน้าที่กำหนดค่าเวลาคงที่ (t_w) ก็คือวงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบเรเตอร์ (Mono-stable multivibrator circuit) ซึ่งส่งผลให้แรงดันไฟตรงเฉลี่ยเกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของสัญญาณที่ป้อนเข้ามาด้วยเช่นเดียวกัน สัญญาณที่ออกจากวงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบเรเตอร์ จะถูกป้อนเข้ายังวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) เพื่อทำให้แรงดันไฟตรงเฉลี่ยมีความราบเรียบมากขึ้น และสามารถนำไปใช้ในระบบควบคุมอัตโนมัติได้ ดังนั้นบล็อกไดอะแกรมของวงจรการแปลงผันความถี่เป็นไฟฟ้าจะเป็นดังในรูปที่ 4



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมของการวงจรการแปลงผันความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า

2.1 วงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบเรเตอร์

จากรูปที่ 4 วงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบเรเตอร์ ที่ใช้ในการออกแบบในบทความนี้ จะใช้ไอซีเบอร์ NE555 ซึ่งเป็นไอซีสำหรับการตั้งเวลาและมีจุดเด่นก็คือเวลาที่กำหนดจะไม่ถูกรบกวนจากแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวไอซีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง รูปแบบของวงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบเรเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 วงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบเรเตอร์

จากวงจรในรูปที่ 5 ค่าเวลาคงที่ (t_w) จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) ดังนี้

$$t_w \cong 1.1 R_T C_T \quad (2)$$

โดยที่ค่าเวลาคงที่ (t_w) จะมีหน่วยเป็นวินาที และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3 จะเห็นว่าค่าเวลาคงที่นี้จะมีความสัมพันธ์กับความถี่สูงสุด (f_{max}) ของสัญญาณที่ป้อนเข้ามาทางไดอินพุตของวงจร ดังในสมการที่ (3)

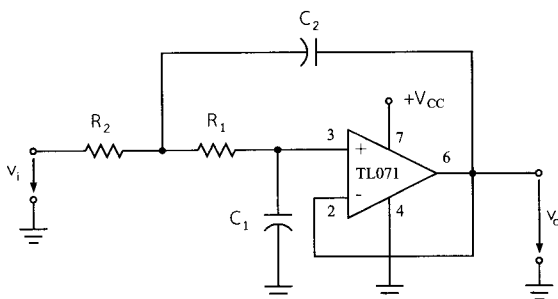
$$f_{max} = \frac{1}{t_w} \quad (3)$$

โดยที่ f_{max} จะเป็นค่าความถี่สูงสุด และมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz) ซึ่งจะทำให้แรงดันไฟตรง (V_{dc}) มีค่าเท่ากับกับค่าแรงดันสูงสุด (V_m) ซึ่งเป็นแรงดันไฟตรงสูงสุดที่ออกมาทางด้านเอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบเรเตอร์ และในการออกแบบวงจรจะเลือกค่าของความถี่สูงสุดให้มีความมากกว่าความถี่สูงสุดที่ต้องการใช้งานจริงเป็น 120% เช่นถ้าความถี่สูงสุดที่ต้องการใช้งานมีค่าเป็น 10kHz ดังนั้นจะต้องกำหนดค่าความถี่สูงสุดที่ต้องใช้ในการออกแบบวงจรแปลงผันให้มีค่าเป็น 12kHz ทั้งนี้เพื่อความมีเสถียรภาพของแรงดันไฟตรงที่ออกมาทางด้านเอาต์พุตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

สำหรับความถี่ต่ำที่ต้องการใช้งาน ไม่ควรเลือกให้มีค่าต่ำมากเกินไป เพราะถ้าความถี่ที่ป้อนเข้ามาต่ำมากเกินไปเสถียรภาพของวงจรการกรองความถี่ต่ำผ่านจะขาดเสถียรภาพไปด้วย กล่าวคือแรงดันไฟตรงที่ได้จะไม่มีความราบเรียบเพียงพอต่อการใช้งาน และควรให้มีค่าต่ำกว่าความถี่สูงสุดที่ต้องการใช้งานจริงประมาณ 10 เท่า เช่นถ้าความถี่สูงสุดที่ต้องการใช้งานมีค่าเป็น 10kHz ดังนั้นจะต้องกำหนดค่าความถี่ต่ำที่ต้องใช้ในการออกแบบวงจรแปลงผันให้มีค่าเป็น 1kHz เป็นต้น

2.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ใช้รูปแบบในบทความนี้จะป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองแบบแอคทีฟ (Second order active low pass filter) โดยใช้โอป-แอมป์ เบอร์ TL071 ดังแสดงในรูปที่ 6



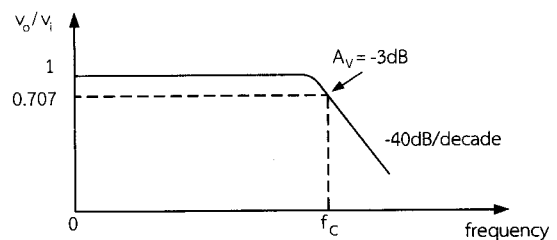
รูปที่ 6 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองแบบแอคทีฟ

ข้อดีของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองแบบแอคทีฟ ก็คือ ณ ที่จุดตัดความถี่ (Frequency cut-off, f_c) ซึ่งอัตราขยาย (A_v) ของวงจรการกรองมีค่าเป็น -3dB จะมีอัตราการบั่นทอนของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตต่อความถี่ทางด้านอินพุตเป็น -40dB/decade ดังแสดง

ในรูปที่ 7 โดยการกรองจะใช้ R_1 และ C_1 ต่อเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับ 1 และทำงานร่วมกันกับส่วนป้อนกลับจากทางเอาต์พุตของวงจรคือผ่านทาง C_2 ไปยังจุดต่อระหว่าง R_1 และ R_2 โดยการกำหนดค่าต่าง ๆ ขององค์ประกอบที่อยู่ในวงจรจะกระทำได้โดยกำหนดให้ค่าความต้านทานของ R_1 และ R_2 มีค่าเท่ากันและคำนวณหาค่าของ C_1 และ C_2 จากสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

$$X_{C1} = \sqrt{2} \cdot R_1 \quad (4)$$

$$\text{และจะได้} \quad C_2 = 2C_1 \quad (5)$$



รูปที่ 7 ผลตอบสนองของการกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองแบบแอคทีฟ

โดยที่ X_{C1} จะเป็นค่าความต้านทานไฟสลับของ C_1 ที่ตำแหน่งจุดตัดความถี่ (f_c) ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และเพื่อเสถียรภาพที่ดีของวงจรการกรองสัญญาณที่ความถี่ต่ำ ๆ ควรกำหนดให้จุดตัดความถี่ให้มีค่าเป็น 1/10 เท่าของความถี่ต่ำสุดที่ต้องการใช้งาน เช่นกำหนดค่าความถี่ต่ำสุดที่ต้องใช้งานมีค่าเป็น 1kHz ก็ควรกำหนดให้จุดตัดความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน มีค่าเป็น 100Hz เป็นต้น

3. การออกแบบวงจรแปลงผันความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า

มีขั้นตอนในการออกแบบวงจรดังนี้

1. กำหนดค่าความถี่ในการใช้งาน ซึ่งในที่นี้กำหนดให้ความถี่สูงสุดที่ต้องการใช้งานมีค่าเป็น 10kHz และความถี่ต่ำสุดที่ต้องการใช้งานเป็น 1kHz ดังนั้นค่าความถี่สูงสุด (f_{max}) จะมีค่าเป็น 12kHz
2. คำนวณหาเวลาคงที่ (t_w) ที่ต้องใช้ในการกำหนดค่าของ R_T และ C_T ในวงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบเรเตอร์ ดังนี้

$$t_w = \frac{1}{f_{max}} = \frac{1}{12\text{kHz}} = 83.3\mu\text{s} \quad (6)$$

3. คำนวณหา R_T ในวงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบเรเตอร์ โดยกำหนดให้ C_T มีค่าเป็น 68nF ดังนี้

$$R_T = \frac{t_w}{1.1C_T} = \frac{83.3\mu\text{s}}{(1.1)(68 \times 10^{-9}\text{F})} = 1.1\text{k}\Omega \quad (7)$$

เลือกค่าตัวต้านทานมาตรฐานที่มีจำหน่ายในตลาดเป็น
ค่า $1k\Omega \pm 1\%$ มาใช้ในการออกแบบวงจร

4. คำนวณหาค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน
อันดับสองแบบแอกทิฟ โดยกำหนดให้ จุดตัดของความถี่
(f_c) มีค่าเป็น $1/10$ เท่า ของความถี่ต่ำสุดที่ต้องการใช้
งาน ดังนั้นจุดตัดของความถี่ที่ต้องใช้ในการออกแบบ
วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองแบบแอกทิฟจะมีค่า
เป็น 100Hz โดยที่กำหนดให้ R_1 และ R_2 มีค่าเท่ากันคือ
 $10k\Omega$ และคำนวณหา C_1 จากสมการที่ (4) ดังนี้

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_c \sqrt{2R_1}} \quad (8)$$

$$= \frac{1}{2\pi \cdot 100\text{Hz} \cdot \sqrt{2 \cdot 10k\Omega}} = 112\text{nF}$$

เลือกค่ามาตรฐานที่มีจำหน่ายในตลาดเป็น 120nF

และคำนวณหา C_2 จาก

$$C_2 = 2C_1 = 2(112\text{nF}) = 224\text{nF} \quad (9)$$

เลือกค่ามาตรฐานที่มีจำหน่ายในตลาดเป็น 220nF

5. นำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณมาเขียนลงในวงจร ดัง
แสดงในรูปที่ 8

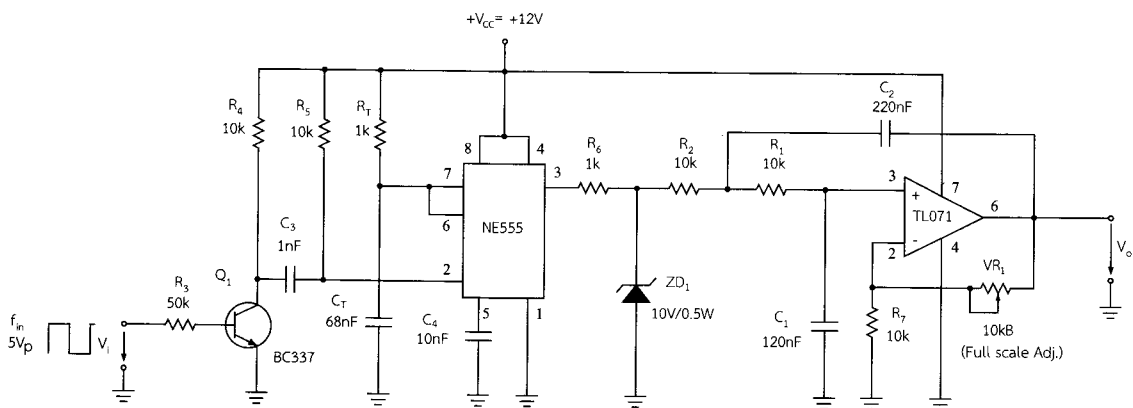
วงจรแปลงผันความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบขึ้น ดังในรูป
ที่ 8 ในวงจรจะเห็นอุปกรณ์อื่น ๆ นอกเหนือไปจากที่กล่าวมาแล้วใน
ข้างต้นต่อรวมอยู่ด้วย โดยแต่ละตัวจะมีหน้าที่ดังนี้ Q_1, R_3, C_3, R_4 และ R_5
จะทำให้สัญญาณที่นำไปป้อนให้ขา 2 ของไอซี NE555 เป็นพัลส์แคบ ๆ
เพื่อทำให้ไอซี NE555 เมื่อต่อให้ทำงานอยู่ในรูปแบบของวงจรโมโนสเต
เบิล มัลติไวกเรเตอร์ สามารถรับสัญญาณที่เข้ามากระตุ้นในการตั้งค่าเวลา
คงที่ (t_w) ที่ทุก ๆ ขอบขาขึ้นของความถี่ที่ป้อนเข้ามาเป็นความถี่สูง ๆ ได้

ส่วน VR_1 ที่ต่อร่วมเข้ากับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง
แบบแอกทิฟ มีไว้สำหรับปรับอัตราขยายของวงจรกรอง โดยตามวงจรในรูป
ที่ 8 สามารถปรับอัตราขยายได้อยู่ในช่วง 1 เท่า จนถึง 2 เท่า ทำให้วงจร
สามารถปรับค่าแรงดันไฟตรงสูงสุดเต็มสเกลได้ ซึ่งการออกแบบในเซ็นเนอร์
ไดโอด ZD_1 ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันยอตสูงสุดทางด้านเอาต์พุตที่ออกจาก
ไอซี NE555 ไม่ให้เกินกว่า 10V และจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าแหล่งจ่าย
แรงดันไฟฟ้า ($+V_{cc}$) ที่จ่ายให้กับวงจรทั้งหมดในการทำงาน สำหรับใน
บทความนี้ จะปรับค่าแรงดันไฟตรงสูงสุดเต็มสเกลให้มีค่าเป็น 10V ที่ความถี่
ใช้งานสูงสุดเป็น 10kHz

ตารางที่ 1 ผลการทดลอง

Frequency (kHz)	$V_o(\text{mea})$ (VDC)	$V_o(\text{cal})$ (VDC)	Linearity error (%)
1.0	1.49	1.49	0.00
1.5	1.95	1.96	0.65
2.0	2.42	2.44	0.63
2.5	2.91	2.91	-0.06
3.0	3.40	3.38	-0.56
3.5	3.85	3.85	0.10
4.0	4.33	4.33	-0.08
4.5	4.80	4.80	-0.01
5.0	5.28	5.27	-0.15
5.5	5.75	5.75	-0.09
6.0	6.24	6.22	-0.36
6.5	6.70	6.69	-0.14
7.0	7.15	7.16	0.19
7.5	7.62	7.64	0.21
8.0	8.10	8.11	0.11
8.5	8.59	8.58	-0.10
9.0	9.05	9.05	0.05
9.5	9.51	9.53	0.18
10.0	10.0	10.0	0.00

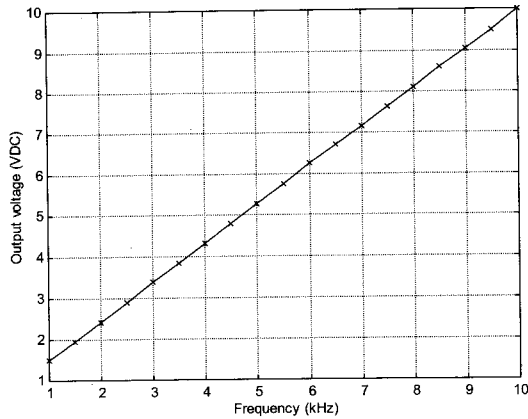
หมายเหตุ : ป้อนความถี่ด้วยเครื่องกำเนิดความถี่ IWATSU SG-4101
วัดแรงดันไฟตรงด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ FLUKE179



รูปที่ 8 วงจรแปลงผันความถี่เป็นแรงดันไฟตรง

4. ผลการทดลอง

เมื่อประกอบวงจรดังแสดงในรูปที่ 8 และทำการทดสอบโดยการป้อนความถี่รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีระดับแรงดันยอดเป็น 5V_p และทำการวัดแรงดันไฟตรงที่เอาต์พุตของวงจร ผลการทดลองแสดงดังในตารางที่ 1 และเมื่อนำผลของแรงดันไฟตรงทางเอาต์พุต V_o(mea) มาทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับสัญญาณความถี่ที่ป้อนเข้ามาทางด้านอินพุตของวงจร ผลที่ได้แสดงดังในรูปที่ 9



รูปที่ 9 กราฟของ V_o(วัด) ที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 1

จากรูปที่ 9 จะเห็นว่ากราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟตรงที่ได้ทางเอาต์พุตเมื่อเทียบกับความถี่ที่ถูกป้อนเข้ามาทางด้านอินพุตของวงจรแปลงผันความถี่เป็นแรงดันไฟตรงดังในรูปที่ 8 จะมีค่าเป็นเชิงเส้นที่ดี และสามารถคำนวณหาความชัน (Slope, m) ของเส้นตรงตลอดช่วงเต็มสเกล ได้จากสมการที่ 10

$$m = \frac{V_o(f) - V_o(s)}{F(f) - F(s)} \quad (10)$$

เมื่อ

V_o(f) คือแรงดันไฟตรงเต็มสเกล

V_o(s) คือแรงดันไฟตรงที่จุดเริ่มต้น

F_f คือความถี่สูงสุดที่แรงดันไฟตรงเต็มสเกล

F_s คือความถี่ต่ำสุด

ดังนั้นจากผลการทดลองในตารางที่ 1 และจากกราฟที่แสดงในรูปที่ 9 จะคำนวณหาความชันของเส้นตรงตลอดช่วงเต็มสเกล ของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรแปลงผันความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าของวงจรในรูปที่ 8 ได้เป็น 0.946 และสามารถนำมาคำนวณหาแรงดันไฟตรง V_o(cal) ที่ความถี่ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 ด้วยสมการที่ 12 ซึ่งเป็นสมการเส้นตรงดังนี้

$$V_o(k)(cal) = 0.946 \cdot F(k) + 0.54V \quad k = 1, 1.5, 2, \dots, 10 \quad (12)$$

เมื่อ

V_o(k)(cal) คือแรงดันไฟตรงทางเอาต์พุต

จากการคำนวณในลำดับที่ k

F_k คือความถี่อินพุตในลำดับที่ k

จากค่าที่ได้จากการวัดแรงดันไฟตรง V_o(mea) ในตารางที่ 1 และจากผลที่ได้จากการคำนวณหาแรงดันไฟตรง V_o(cal) ที่ความถี่ต่าง ๆ สามารถที่จะนำมาคำนวณหาความผิดพลาดของความเป็นเชิงเส้น (Linearity error) ได้ดังในสมการที่ 13

$$\text{Linearity error}(k) = \frac{V_o(k)(cal) - V_o(k)(mea)}{V_o(k)(cal)} \quad k = 1, 1.5, \dots, 10 \quad (13)$$

เมื่อ

Linearity error(k) คือค่าผิดพลาดความเป็นเชิงเส้นในลำดับที่ k

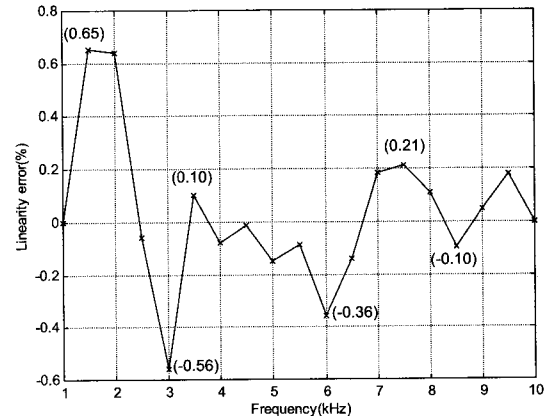
V_o(k)(cal) คือแรงดันไฟตรงทางเอาต์พุต

จากการคำนวณในลำดับที่ k

V_o(k)(mea) คือแรงดันไฟตรงทางเอาต์พุต

จากการวัดในลำดับที่ k

โดยในตารางที่ 1 จะแสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดของความเป็นเชิงเส้น และสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์เมื่อเทียบกับความถี่ที่ป้อนเข้ามาทางด้านอินพุตได้ดังในรูปที่ 10



รูปที่ 10 เปอร์เซนต์ค่าผิดพลาดความของความเป็นเชิงเส้น

จากผลการทดลองในตารางที่ 1 และจากรูปที่ 10 จะเห็นว่าค่าผิดพลาดความเป็นเชิงเส้นสูงสุดจะมีค่าเป็น 0.65% และค่าต่ำสุดจะมีค่าเป็น -0.56% ดังนั้นค่าผิดพลาดความเป็นเชิงเส้นที่ได้จากการทดลองจะมีค่าผิดพลาดอยู่ในช่วง $\pm 0.7\%$ ของค่าเต็มสเกล และจะเห็นอีกว่าที่ความถี่ต่ำ ๆ ค่าผิดพลาดจะมีค่าสูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากที่ความถี่ต่ำ ๆ จะมีค่าตัวชี้ไขเกิ้ลจะมีค่าน้อยมาก ทำให้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งทำหน้าที่เฉลี่ยค่าของสัญญาณที่ป้อนเข้ามาให้เป็นแรงดันไฟตรงขาดเสถียรภาพในการกรองไป

สำหรับการหาความสัมพันธ์การถ่ายโอน (Transfer coefficient, T) ของวงจรแปลงผันความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกแบบไว้ดังในรูปที่ 8 ซึ่งมีหน่วยเป็น V/kHz จะหาจากค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนในแต่ละช่วงที่ได้จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนในแต่ละช่วงความถี่

ลำดับที่	ช่วงความถี่ (kHz)	ผลต่างของ V_o (VDC)	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอน (V/kHz)
1	1.0-1.5	0.46	0.92
2	1.5-2.0	0.47	0.94
3	2.0-2.5	0.49	0.98
4	2.5-3.0	0.49	0.98
5	3.0-3.5	0.45	0.90
6	3.5-4.0	0.48	0.96
7	4.0-4.5	0.47	0.94
8	4.5-5.0	0.48	0.96
9	5.0-5.5	0.47	0.94
10	5.5-6.0	0.49	0.98
11	6.0-6.5	0.46	0.92
12	6.5-7.0	0.45	0.90
13	7.0-7.5	0.47	0.94
14	7.5-8.0	0.48	0.96
15	8.0-8.5	0.49	0.98
16	8.5-9.0	0.46	0.92
17	9.0-9.5	0.46	0.92
18	9.5-10.0	0.49	0.98

โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนในแต่ละช่วงความถี่จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 14 ดังนี้

$$T_k = \frac{V_o(k) - V_o(k-1)}{F(k) - F(k-1)} \quad | k = 1, 2, \dots, 18 \quad (14)$$

เมื่อ

$V_o(k)$ คือแรงดันเอาต์พุตในลำดับที่ k
 $V_o(k-1)$ คือแรงดันเอาต์พุตในลำดับก่อนหน้า k
 $F(k)$ คือความถี่อินพุตในลำดับที่ k
 $F(k-1)$ คือความถี่อินพุตในลำดับก่อนหน้า k

และสามารถหาค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอน (T_{av}) ได้จากสมการที่ 15 ดังนี้

$$T_{av} = \frac{\sum_{k=1}^n T_k}{n} \quad | n = 18 \quad (15)$$

จากสมการที่ 15 จะสามารถคำนวณหาค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนได้เท่ากับ 0.946 V/kHz

5. บทสรุป

หลักการออกแบบวงจรแปลงผันความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าที่นำเสนอในบทความนี้ เป็นหลักการที่ง่ายต่อการเข้าใจและไม่ซับซ้อน อีกทั้งใช้อุปกรณ์ที่สามารถหาซื้อได้ในตลาดโดยทั่วไปและมีราคาถูก และจะเห็นจากผลการทดลองว่าคุณสมบัติของความเป็นเชิงเส้นของวงจรการแปลงผันความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบนี้ มีความเป็นเชิงเส้นที่ดี และมีค่าความผิดพลาดของเป็นเชิงเส้นอยู่ในช่วง $\pm 0.7\%$ ของค่าเต็มสเกล ที่ย่านความถี่ 1kHz จนถึง 10kHz ณ ที่ค่าแรงดันไฟตรงเต็มสเกลเป็น 10V โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนเท่ากับ 0.946 V/kHz และยังสามารถทำการปรับแต่งค่าแรงดันไฟตรงสูงสุดเต็มสเกลได้อีก ทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบให้ตอบสนองที่ย่านความถี่อื่น ๆ ตามวัตถุประสงค์ของผู้ใช้ได้โดยใช้หลักการเดียวกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] บุญเรือง วังศิลาบัตร, “เอกสารประกอบการสอน วิชาการระบบและการแปลงสภาพสัญญาณ”, 2554
- [2] David A. Bell, “Operational Amplifiers Application Troubleshooting and designs”, Prentice-Hall International Editions, 1990
- [3] Thomas Kugelstadt, “Active Filter Design Techniques”, Texas Instruments Incorporated, 2008
- [4] http://www.globalspec.com/learnmore/data_acquisition_signal_conditioning/signal_converting/frequency_to_voltage_converters
- [5] <http://www.datasheets.com/NE555.pdf>
- [6] <http://www.datasheets.com/TL071.pdf>

ประวัติผู้เขียนบทความ



ผศ.บุญเรือง วังศิลาบัตร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์ สจพ. และ ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจพ. ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

งานวิจัยที่สนใจ Power Electronics & Circuits Design



รศ.ดร.เสถียร ทัศนศิริรัตน์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี และปริญญาโท สาขาวิชาไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์ สจพ. และระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจพ. ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

งานวิจัยที่สนใจ Renewable energy systems