

วงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันที่ใช้อินทิเกรเตอร์

วิภาวรรณ นาคทรัพย์¹ จริยา เลิศจรัสรัมย์ดี² และ วิภา แสงพิสิทธิ์²
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอวงจรเปลี่ยนความถี่ให้เป็นแรงดันแบบอนาลอก ที่มีเอาต์พุตที่ราบเรียบ โดยใช้วงจรอินทิเกรเตอร์เป็นอุปกรณ์ ประกอบกับการใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่าสัญญาณ วงจรซึ่งนำเสนอนี้มีคุณสมบัติประจำตัว คือ มีความเป็นเชิงเส้นในการเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดัน มีผลตอบสนองที่รวดเร็วและเอาต์พุตเป็นศักย์ไฟฟ้าที่ไม่มีการกระเพื่อม (ripple) และวงจรสามารถทำงานได้ตลอดช่วงความถี่ต่ำๆ จนถึงความถี่ประมาณ 30 kHz ในวงจรไม่ต้องใช้โมโนสเตเบิล (monostable) ในการควบคุมสวิตช์ ดังนั้นจึงไม่เกิดความคลาดเคลื่อนของเวลาขณะที่สุ่มค่าแรงดันเอาต์พุต ข้อดีอีกประการหนึ่งของวงจรที่นำเสนอนี้คือ สามารถนำวงจรไปสร้างในรูปแบบของสวิตช์คาปาซิเตอร์ที่สมบูรณ์ได้

¹ นักศึกษาปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์

² อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

Frequency-to-Voltage Converter based on Integrators

Wipawan Naksurb¹ Chariya Loescharataramdee² and Wipa Sangpisit²

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

An analog frequency-to-voltage (F/V) converter based on the use of integrators and sample and hold technique is presented. The proposed scheme offers numerous favorable characteristics as the resulting circuit linearly converts a signal frequency into a smooth output with remarkably rapid response and the maximum operating frequency at about 30 kHz. In contrast to the recently proposed converter, the method does not employ a monostable multivibrator for controlling switches, but rather clock pulses from a zero crossing detector. Therefore, good accuracy is achieved as a result of precision in time-determination during output sampling. The method can also be easily modified in a complete switched-capacitor version.

¹ Graduate Student, Faculty of Engineering

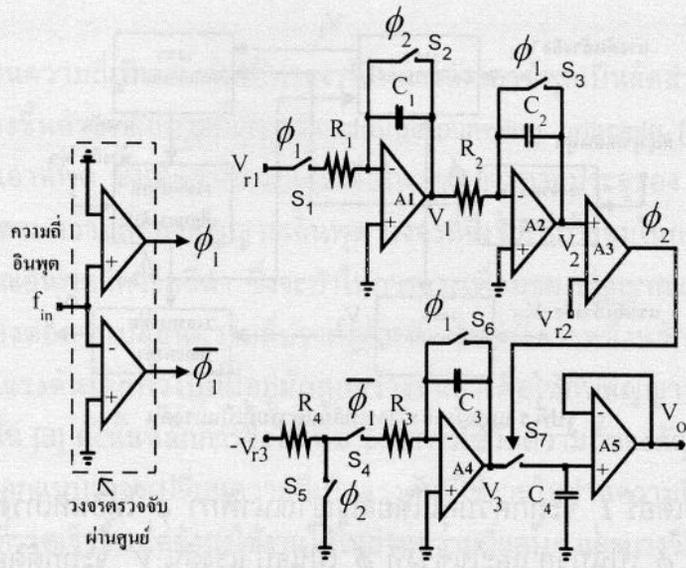
² Lecturer, Faculty of Engineering

บทนำ

วงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันเป็นวงจรที่ให้แรงดันเอาต์พุตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่อินพุต แต่เดิมสร้างขึ้นด้วยหลักการที่เรียกว่า charge-pumping principle [1,2] วงจรนี้มีจุดด้อยเนื่องจากแรงดันที่เอาต์พุต ซึ่งเกิดจากกระแสเฉลี่ยในวงจรการคายประจุของ pumping capacitor มีการกระเพื่อมไปตามความถี่ของสัญญาณอินพุต วงจรนี้จึงไม่เหมาะสมในการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสัญญาณอินพุตมีความถี่ต่ำ ซึ่งจะทำให้การกระเพื่อมของสัญญาณเอาต์พุตปรากฏชัดขึ้นและให้ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนความถี่ปรากฏขึ้นช้า อีกประการหนึ่งหลักการทำงานของวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันโดยทั่วไปที่มีอยู่มักถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้กับสัญญาณที่มีความถี่ปานกลางและความถี่สูงเท่านั้น [3] ดังนั้นหลักการจึงไม่เหมาะกับการใช้วัดความถี่ของสัญญาณที่มีความถี่ต่ำๆ แม้ได้มีการคิดค้นออกแบบวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันที่ใช้งานในย่านความถี่ต่ำอยู่บ้าง [3-6] เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่รวดเร็วยิ่งขึ้น แต่ยังคงใช้งานได้ภายในความถี่แคบๆ และบางวิธียังคงมีการกระเพื่อมของสัญญาณเอาต์พุตเกิดขึ้น หรือต้องมีอุปกรณ์ภายนอกมาประกอบใช้ร่วมด้วย Reynolds [4] ได้เสนอวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันโดยใช้หลักการ sampled-data feedback แม้ว่าวงจรจะมีการกระเพื่อมของระดับแรงดันเอาต์พุตต่ำ แต่วงจรยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องของความซับซ้อนในการควบคุมสวิตช์และมีผลตอบสนองค่อนข้างช้า ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาสร้างวงจรใน [5] เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว วงจรที่นำเสนอมีความเรียบง่ายในการควบคุมสวิตช์และให้ค่าแรงดันที่มีการกระเพื่อมต่ำ และมีผลตอบสนองที่เร็วกว่าวงจรของ Reynolds อย่างไรก็ดียังคงมีข้อควรได้รับการพัฒนาได้คือผลตอบสนองยังสามารถปรับปรุงให้เร็วขึ้นได้ Laopoulos และ Karybakas [3] ได้นำเสนอวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันแบบอนาล็อก วงจรนี้สามารถทำงานได้ดีคือมีผลตอบสนองที่รวดเร็วและลดปัญหาเกี่ยวกับการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุต แต่ทว่าวงจรยังคงมีข้อเสียคือผลตอบสนองที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความกว้างของพัลส์ (pulse) จากวงจรโมโนสเตเบิลซึ่งใช้ในการควบคุมอนาล็อกสวิตช์ทำให้เกิดการหน่วงเวลาในการกำหนดระดับสัญญาณเอาต์พุต ดังนั้นจึงเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นที่แรงดันเอาต์พุต เพื่อแก้ไขจุดบกพร่องนี้ทำได้โดยหลักการที่เสนอในบทความนี้ซึ่งจะใช้การตรวจจับการผ่านศูนย์ (zero crossing) ของสัญญาณอินพุตเพื่อสร้างพัลส์มาควบคุมอนาล็อกสวิตช์ร่วมกับการใช้วงจรอินทิเกรเตอร์ และวงจรเปรียบเทียบแรงดันเป็นตัวช่วยจัดการประมวลผล วิธีการนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตเป็นเชิงเส้นกับความถี่สัญญาณอินพุต โดยลดความคลาดเคลื่อนจากวิธีการใช้โมโนสเตเบิลลงได้ และจะให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วและไม่มีการกระเพื่อมที่แรงดันเอาต์พุต

หลักการและวงจร

วงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันที่นำเสนอนี้โดยพื้นฐานประกอบด้วยวงจรอินทิเกรเตอร์ 3 ชุด ซึ่งควบคุมจังหวะการทำงานด้วยสัญญาณนาฬิกาที่สร้างมาจาก การผ่านสัญญาณอินพุตที่ต้องการเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันไปในวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ การรีเซ็ตค่าเริ่มต้นของวงจรอินทิเกรตสัญญาณทำได้โดยการใช้สัญญาณนาฬิกาที่สร้างขึ้น และจะใช้การจัดสวิตช์ที่เหมาะสมทำการชักรับระดับแรงดันจากวงจรอินทิเกรเตอร์และคงค่าสัญญาณที่เอาต์พุตให้เป็นไฟตรง แผนผังของวงจรที่นำเสนอ มีดังแสดงในรูปที่ 1 พื้นฐานการทำงานของวงจรอธิบายได้ด้วยหลักการดังต่อไปนี้คือ



รูปที่ 2 วงจรแบบหนึ่งที่สามารถสร้างได้จากแผนผังรูปที่ 1

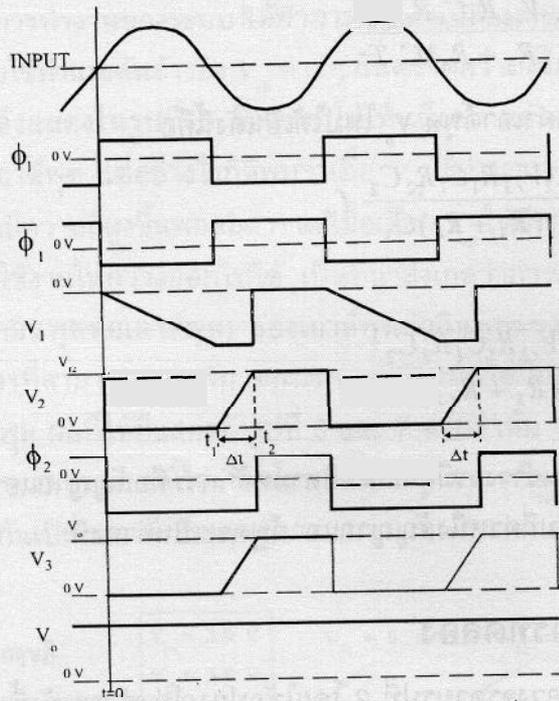
วงจรรตรวจจับผ่านศูนย์จะทำหน้าที่แปลงอินพุต ซึ่งอาจเป็นคลื่นรูปไซน์หรือรูปสามเหลี่ยมหรือสัญญาณซึ่งมีคาบเวลาที่มีความสมมาตรระหว่างครึ่งคาบเวลาให้เป็นสัญญาณนาฬิกา 2 เฟส คือ ϕ_1 และ ϕ_1 ซึ่งมีเฟสตรงข้ามกัน การทำงานของวงจรรอบหนึ่งๆ จะเริ่มจากช่วงเวลาครึ่งคาบบวกของสัญญาณอินพุต ซึ่งเป็นจังหวะที่ ϕ_1 เป็นบวก ทำให้สวิตช์ S_1 ปิดวงจร แล้วอินทิเกรเตอร์ I_1 ตามรูปที่ 2 คือวงจรที่ประกอบด้วยออปแอมป์ A1 จะทำการอินทิเกรตแรงดัน V_{r1} ไปตลอดช่วงครึ่งคาบเวลาของสัญญาณอินพุต ถ้ากำหนดให้เวลาเริ่มต้นของคาบเวลาคือ $t = 0$ ดังนั้นที่เวลาครึ่งคาบสัญญาณ $\frac{T}{2}$ จะสามารถหาค่า V_1 ได้คือ

$$V_1\left(\frac{T}{2}\right) = -\frac{1}{R_1 C_1} \int_0^{T/2} V_{r1} dt$$

$$\text{หรือ } V_1\left(\frac{T}{2}\right) = -\frac{V_{r1} T}{2 R_1 C_1} \tag{1}$$

ในช่วงเวลาครึ่งคาบลบต่อมาของสัญญาณอินพุตคือเมื่อ ϕ_1 เป็นลบ จะทำให้สวิตช์ S_1, S_2 และ S_3 เปิดวงจรทำให้ไม่มีอินพุตเข้ามายังวงจรอินทิเกรเตอร์ I_1 ดังนั้นตัวเก็บประจุ C_1 จะคงค่าของ $V_1\left(\frac{T}{2}\right)$ ไว้ ซึ่งค่าแรงดันนี้จะเป็นอินพุตให้แก่วงจรอินทิเกรเตอร์ I_2 ที่ประกอบจากออปแอมป์ A2 ให้ทำการอินทิเกรตไปด้วยเวลาตั้งแต่ $\bar{2}$ ไปจนกระทั่งเวลาที่เอาต์พุตของ I_2 คือ V_2 มีค่าเท่ากับ V_{r2} ถ้ากำหนดให้ช่วงเวลานี้คือ Δt และขณะเวลาที่ $V_2(t)$ เท่ากับ V_{r2} คือ t_2 ดังแสดงในรูปที่ 3 จะทำให้สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้คือ

$$V_2(t_2) = -\frac{V_1\left(\frac{T}{2}\right) \Delta t}{R_2 C_2} = V_{r2} \tag{2}$$



รูปที่ 3 รูปคลื่นสัญญาณ ณ จุดต่างๆ ภายในวงจรรูปที่ 2

เมื่อเงื่อนไขตาม (2) เกิดขึ้น กล่าวคือ $V_2(t) = V_{r2}$ วงจรเปรียบเทียบกับแรงดัน A3 จะเปลี่ยนสถานะของสัญญาณนาฬิกา ϕ_2 ให้มีค่าเป็นบวก ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการรีเซ็ตค่าเริ่มต้นของอินทิเกรเตอร์ I_1 ทำให้อินพุตเข้าสู่วงจรรีเซ็ตอินทิเกรเตอร์ I_2 กลายเป็นศูนย์ แต่ด้วยผลของตัวเก็บประจุ C_2 จึงทำให้เอาต์พุตของ I_2 มีค่าคงที่ตาม (2) และเมื่อแทน (1) ลงใน (2) จะหาค่าช่วงเวลา Δt ได้คือ

$$\Delta t = \frac{2V_{r2}R_1C_1R_2C_2}{V_{r1}T} \tag{3}$$

จาก (3) จะเห็นว่า Δt มีค่าแปรผกผันกับคาบเวลา T ซึ่งก็คือ Δt นั้นแปรผันโดยตรงกับความถี่ของสัญญาณอินพุต การเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่างๆ นี้มีแสดงในรูปที่ 3 และจากรูปที่ 3 นี้จะเห็นว่า ϕ_1 และ ϕ_2 จะควบคุมทำให้ในช่วงเวลาครึ่งคาบของสัญญาณอินพุตนี้ วงจรรีเซ็ตอินทิเกรเตอร์ I_3 ซึ่งประกอบจากออปแอมป์ A4 จะทำการอินทิเกรตสัญญาณ $-V_{r3}$ ไปเป็นระยะเวลา Δt ซึ่งทำให้ได้ค่าเอาต์พุต V_3 ดังนี้

$$V_3 = \frac{V_{r3}\Delta t}{(R_3 + R_4)C_3} \tag{4}$$

จากการควบคุมของ ϕ_2 จะทำให้วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ ซึ่งประกอบจากออปแอมป์ A5 และตัวเก็บประจุ C_4 ทำการชกค่า V_3 ตาม (4) ที่เวลา t_2 และคงค่านี้ไว้จนกว่าวงจรจะเริ่มการทำงานรอบใหม่ โดยการแทนค่า Δt จาก (3) ลงใน (4) จะสามารถเขียนแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุต V_o กับค่าตัวแปรอื่นในวงจรได้ดังนี้

$$V_o = \frac{2V_{r2}V_{r3}R_1C_1R_2C_2}{V_{r1}(R_3 + R_4)C_3T} \tag{5}$$

หรือสามารถเขียนค่าเอาต์พุต V_o ใหม่ได้เป็นดังนี้คือ

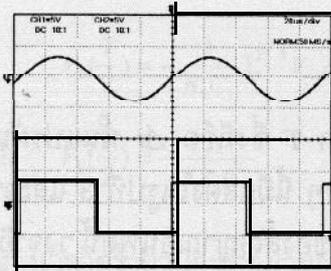
$$V_o = \frac{2V_{r2}V_{r3}R_1C_1R_2C_2}{V_{r1}(R_3 + R_4)C_3} f_m = kf_m \tag{6}$$

เมื่อ $k = \frac{2V_{r2}V_{r3}R_1C_1R_2C_2}{V_{r1}(R_3 + R_4)C_3}$

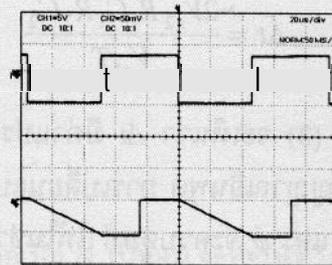
จาก (6) แสดงให้เห็นว่าวงจรมีคุณสมบัติตามหลักการ คือสัญญาณเอาต์พุตมีค่าแปรผันโดยตรงกับความถี่อินพุตและที่ความถี่ค่าหนึ่งสัญญาณเอาต์พุตจะเป็นค่าคงที่

การทดลองและผลการทดลอง

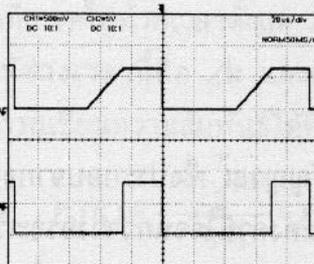
ในการทดลองได้ต่อวงจรตามรูปที่ 2 โดยใช้อุปกรณ์ค่าต่าง ๆ ดังนี้ $R_1, R_2, R_3, R_4, C_1, C_2, C_3, C_4$ และวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ จะใช้ไอซีเบอร์ LF356 และใช้ $R_1 = 74 \text{ k}\Omega, R_2 = 6 \text{ k}\Omega, R_3 = 13 \text{ k}\Omega, R_4 = 1 \text{ k}\Omega, C_1 = 10 \text{ nF}, C_2 = 1 \text{ nF}, C_3 = 1 \text{ nF}, C_4 = 100 \text{ nF}$ และไฟเลี้ยง $+5 \text{ V}$ ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ MC14066 และใช้แรงดันอ้างอิงค่าต่างๆ ดังนี้ คือ $V_{r1} = 3.8 \text{ V}, V_{r2} = 0.3 \text{ V}$ และ $V_{r3} = 3.8 \text{ V}$ เมื่อใช้สัญญาณอินพุตที่มีความถี่ 10 kHz เพื่อทำการทดสอบการวัดสัญญาณตามจุดต่างๆ ที่สำคัญ สัญญาณที่วัดได้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นไปตามหลักการที่นำเสนอไว้ข้างต้น



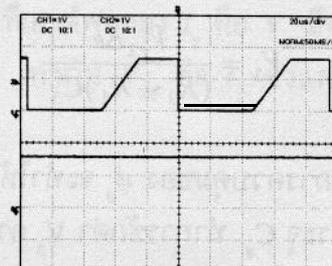
(ก) สัญญาณอินพุต (เส้นบน) และสัญญาณ ϕ (เส้นล่าง)



(ข) สัญญาณ ϕ (เส้นบน) และสัญญาณแรงดัน V_r (เส้นล่าง)



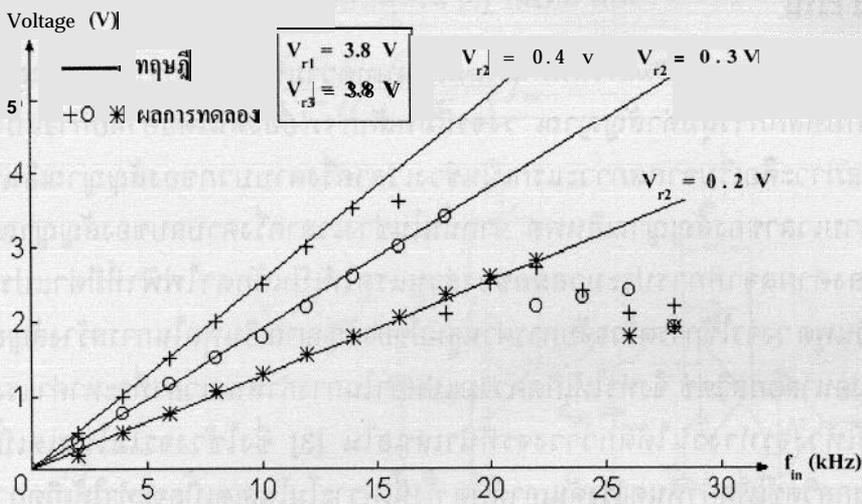
(ค) สัญญาณแรงดัน V_{r2} (เส้นบน) และสัญญาณ ϕ (เส้นล่าง)



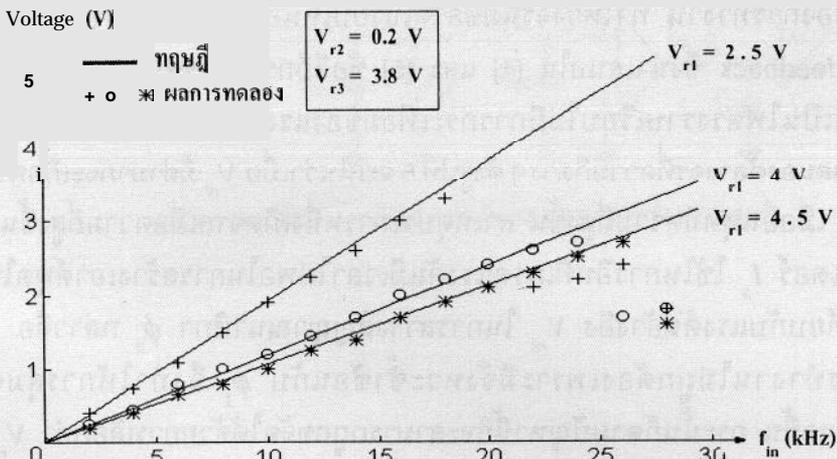
(ง) สัญญาณแรงดัน V_{r3} (เส้นบน) และสัญญาณแรงดันเอาต์พุต V_o (เส้นล่าง)

รูปที่ 4 ลักษณะสัญญาณแรงดันที่จุดต่างๆ ที่วัดได้จากวงจรซึ่งสร้างขึ้นตามรูปที่ 2

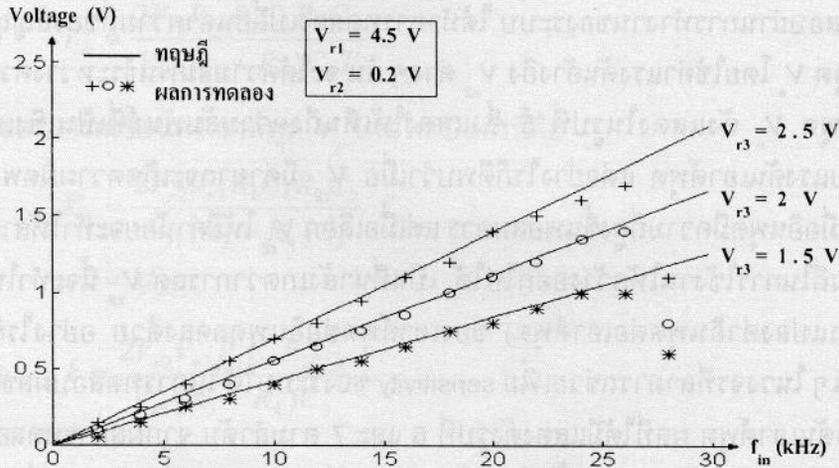
เพื่อทดสอบย่านการทำงานของระบบ ได้ทำการทดลองเปลี่ยนค่าความถี่ของสัญญาณอินพุต และวัดค่าเอาต์พุต V_o โดยใช้ค่าแรงดันอ้างอิง V_{r2} ต่างๆ กัน จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่อินพุตกับแรงดันเอาต์พุต V_o ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างความถี่อินพุตกับแรงดันเอาต์พุต แต่อย่างไรก็ดีพบว่าเมื่อ V_{r2} มีค่ามากจะเกิดความผิดพลาดของค่าเอาต์พุตที่วัดได้เมื่ออินพุตมีความถี่สูงขึ้นพอสมควร แต่เมื่อเลือก V_{r2} ให้มีค่าน้อยจะทำให้สามารถขยายย่านการวัดความถี่ในการใช้งานให้กว้างออกไปได้ เป็นที่น่าสังเกตว่าการลด V_{r2} นี้จะทำให้ค่า sensitivity (อัตราการแปลงค่าอินพุตต่อเอาต์พุต) ของเอาต์พุตต่ออินพุตลดลงด้วย อย่างไรก็ตามยังคงมีพารามิเตอร์อื่นๆ ในวงจรที่สามารถช่วยเพิ่ม sensitivity ของระบบได้ ในการทดสอบผลของ V_{r1} และ V_{r3} ต่อระดับแรงดันเอาต์พุต ผลที่ได้มีแสดงดังรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นว่าสามารถเพิ่มค่า sensitivity ของระบบนี้ได้ง่าย โดยการลดค่า V_{r1} หรือเพิ่มค่า V_{r3} ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการทดลองสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับทฤษฎี



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่อินพุต เมื่อ $V_{r2} = 0.2 \text{ V}, 0.3 \text{ V}$ และ 0.4 V



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่อินพุต เมื่อ $V_{r1} = 2.5 \text{ V}, 4.0 \text{ V}$ และ 4.5 V



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่อินพุต เมื่อ $V_{r3} = 1.5$ V, 2.0 V และ 2.5 V

สรุปและวิจารณ์

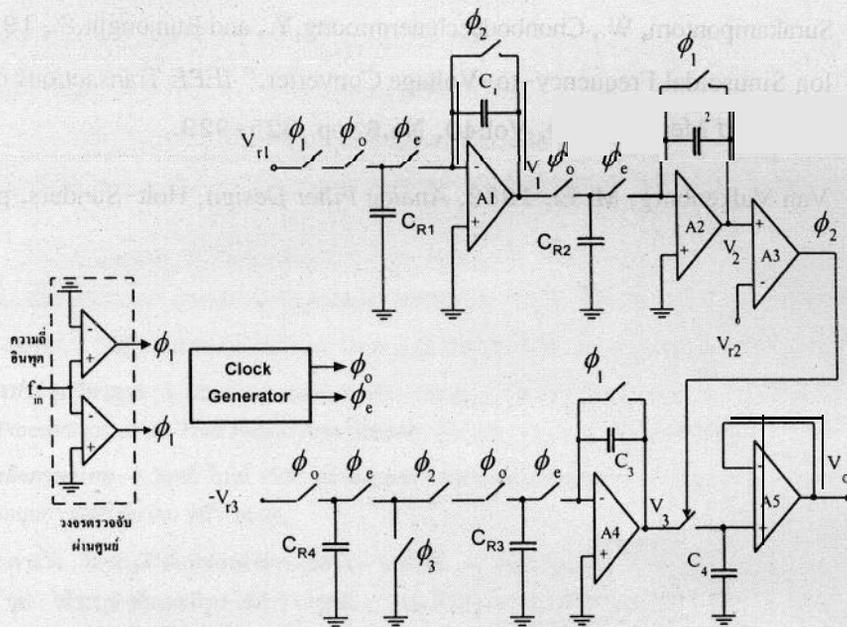
วงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันที่นำเสนอในบทความนี้ ได้รับการพัฒนาโดยใช้วงจรอินทิเกรเตอร์ร่วมกับหลักการสุ่มค่าสัญญาณ วงจรนี้มีหลักการเบื้องต้นโดยอาศัยการแบ่งทำงานของวงจรเป็น 2 สภาวะคือเริ่มจากสภาวะแรกเป็นช่วงเวลาครึ่งคาบบวกของสัญญาณอินพุต วงจรจะทำหน้าที่วัดคาบเวลาของสัญญาณอินพุต จากนั้นในช่วงเวลาครึ่งคาบลบของสัญญาณอินพุตวงจรจึงทำการแปลงค่าผลจากการประมวลผลของส่วนแรกให้เป็นศักดาไฟฟ้าที่มีค่าแปรตามความถี่ของสัญญาณอินพุต วงจรใช้การตรวจจับการผ่านศูนย์ของสัญญาณอินพุตในการสร้างสัญญาณนาฬิกาเป็นตัวควบคุมอนุลอกสวิตช์ จึงทำให้เกิดความแม่นยำในการกำหนดเวลาที่จะหาค่าแรงดันเอาต์พุต หลักการนี้ทำให้วงจรทำงานได้ดีกว่าวงจรที่นำเสนอใน [3] ซึ่งใช้วงจรโมนอสเตเบิลมาทำการควบคุมอนุลอกสวิตช์เพื่อกำหนดแรงดันเอาต์พุต ทั้งนี้เพราะโมนอสเตเบิลจะทำให้เกิดการหน่วงเวลาในการกำหนดค่าคาบเวลาของสัญญาณ จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของเอาต์พุตที่วัดได้ วงจรที่นำเสนอนี้ยังมีข้อดีที่วงจรให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วสามารถระบุค่าแรงดันเอาต์พุตตั้งแต่รอบแรกของการทำงาน ทำให้วงจรนี้มีข้อได้เปรียบเหนือกว่าวงจรที่สร้างโดยอาศัยหลักการ sampled-data feedback ซึ่งนำเสนอใน [4] และ [5] ข้อดีอีกประการหนึ่งของวงจรแบบใหม่นี้คือแรงดันเอาต์พุตเป็นไฟตรงราบเรียบไม่มีการกระเพื่อมของแรงดัน อย่างไรก็ตามก็ตีจากผลการทดลองเกี่ยวกับการตอบสนองต่อวงจรที่ความถี่ต่างๆ ดังรูปที่ 5 จะเห็นว่าเมื่อ V_{r2} มีค่ามากจะเกิดความผิดพลาดของค่าเอาต์พุต เมื่ออินพุตมีความถี่สูงขึ้น สาเหตุประการหนึ่งเกิดจากเมื่อความถี่สูงขึ้นนั้นช่วงเวลาที่วงจรอินทิเกรเตอร์ I_2 ใช้ในการอินทิเกรตแรงดันมีเวลาไม่พอในการสร้างเอาต์พุตให้มีค่าสูงพอที่จะไปเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง V_{r2} ในการสร้างสัญญาณนาฬิกา ϕ_2 กล่าวคือ ϕ_2 ถูกสร้างให้มีจังหวะการทำงานไม่ถูกต้องเพราะมีจังหวะช้าช้อนกับ ϕ_1 จึงทำให้การสุ่มค่าเอาต์พุตเกิดความผิดพลาดขึ้น กระนั้นก็ตามปัญหานี้ก็จะสามารถถูกขจัดได้ด้วยการเลือกค่า V_{r2} ให้น้อยลง ข้อสรุปอีกประการหนึ่งที่จะต้องกล่าวไว้ ณ ที่นี้คือวงจรที่นำเสนอนี้มีคุณสมบัติที่สำคัญยิ่งอีกประการหนึ่งคือ วงจรสามารถดัดแปลงเป็นวงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์ที่สมบูรณ์ได้โดยง่าย เพียงแต่ทำการแทนตัวต้านทานทั้งหมดด้วยวงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์เบื้องต้นเท่านั้น [7] ซึ่งจากวงจร

ตามรูปที่ 2 สามารถตัดแบบส่งให้อยู่ในรูปของวงจรสวิตซ์คาปาซิเตอร์ได้ดังแสดงในรูปที่ 8 จะเห็นการแทนที่ตัวความต้านทานแต่ละตัวด้วยวงจรที่ประกอบขึ้นจากการใช้ตัวเก็บประจุทำงานร่วมกับสวิตซ์ 2 ตัว ซึ่งผลัดกันทำงาน โดยอาศัยการควบคุมจากสัญญาณนาฬิกา 2 เฟส คือ ϕ_0 และ ϕ_c ซึ่งถูกสร้างมาจากวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาที่สร้างขึ้นมาเพื่อการนี้โดยเฉพาะที่ความถี่ f_c โดยจะต้องระวังให้ไม่มีการซ้อนทับกัน (nonoverlap) ระหว่างสัญญาณนาฬิกา ϕ_0 และ ϕ_c จากวงจรตามรูปที่ 2 สามารถแทนตัวต้านทาน R_1 ได้ด้วยวงจรสวิตซ์คาปาซิเตอร์ที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ C_{R1} และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบในวงจรคาปาซิเตอร์กับความต้านทานสมมูลได้ดังต่อไปนี้

$$R_1 = \frac{1}{f_c C_{R1}} \tag{7}$$

ดังนั้นโดยการใช้ค่าความถี่ของสัญญาณนาฬิกาและค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสม จะสามารถแทนที่ตัวความต้านทานทั้งหมดในวงจรรูปที่ 2 ด้วยวงจรสวิตซ์คาปาซิเตอร์ได้ และจะทำให้เขียนความสัมพันธ์ของเอาต์พุต V_o กับความถี่อินพุตใน (6) ได้ใหม่ ดังต่อไปนี้คือ

$$V_o = \frac{2V_{r2}V_{r3}C_1C_2C_{R3}C_{R4}}{V_{r1}f_cC_{R1}C_{R2}C_3(C_{R3}+C_{R4})} f_{in} \tag{8}$$



รูปที่ 8 วงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันในรูปของวงจรสวิตซ์คาปาซิเตอร์

เอกสารอ้างอิง

1. Doebelin, E. O., 1990, Measurement Systems: Application and Design, McGraw - Hill 4th edn., pp. 823-825.
2. Horowitz, P. H., and Hill, W., 1980, The Art of Electronic. Cambridge University Press, p. 413.
3. Laopulos, TH. L., and Karybakas, C. A., 1990, "High Performance Frequency-to-Voltage converter," International Journal of Electronics, Vol.68, No.6, pp. 303-307.
4. Reynolds, J] S., 1986, "Frequency/Voltage Convertor with Low Output Ripple," Electronics Letters, Vol.22 pp. 783-784.
5. Kiranon, W., Wardkein, P., and Loescharataramdee, C., 199 1 , "Simple Frequency/Voltage Convertor with Low Output Ripple," Electronics Letters, Vo1.27, No.3 pp. 205-206.
6. Surakamptom, W., Chonbodeechalermroong, Y., and Bunjongjit, S., 199 1 , "An Analog Sinusoidal Frequency-to-Voltage Converter," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.40, No.6, pp. 925-929.
7. Van Valkenburg, M. E., 1982, Analog Filter Design, Holt-Sunders, pp. 491-493.