



## วงจรถ่วงค่าความต้านทานแบบลบที่ผันแปรตามความถี่โดยใช้ CDTRA และการประยุกต์ใช้งานในวงจรถ่วงค่าความถี่

มนตรี ศิริปรัชญานันท์\* ชัยรัตน์ อุปถัมภ์เกื้อกุล ณิชมน พูนน้อย และ กังวาล พยัคฆกุล  
ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 3328 อีเมล: mts@kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.11.005

รับเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2559 ตอรับเมื่อ 21 ธันวาคม 2559 เผยแพร่ออนไลน์ 8 พฤศจิกายน 2560

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ วงจรถ่วงค่าความต้านทานแบบลบที่ผันแปรตามความถี่ (FDNR) โดยใช้อุปกรณ์ CDTRA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟหลัก ต่อรวมกันกับอุปกรณ์พาสซีฟแบบลอยอีก 4 ตัว วงจรที่นำเสนอสามารถควบคุมค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรถ่วงค่าความถี่ที่กำหนดค่าที่อุปกรณ์พาสซีฟ อีกทั้งวงจรมีผลกระทบต่ำเมื่ออุณหภูมิรอบข้างเปลี่ยนแปลง ทำให้สามารถนำเอาวงจรถ่วงค่าความถี่ไปใช้ในงานที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้เป็นอย่างดี ด้วยโครงสร้างของวงจรมีความซับซ้อนจึงเหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานวงจรถ่วงค่าความถี่ที่สังเคราะห์ขึ้นในวงจรถ่วงค่าความถี่แบบลบที่ผันแปรตามความถี่ ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice พบว่าวงจรถ่วงค่าความถี่ที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถทำงานได้สอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้ในทฤษฎี

**คำสำคัญ:** วงจรถ่วงค่าความต้านทานแบบลบที่ผันแปรตามความถี่, CDTRA, วงจรถ่วงค่าความถี่แบบลบที่ผันแปรตามความถี่

การอ้างอิงบทความ: มนต์รี ศิริปรัชญานันท์, ชัยรัตน์ อุปถัมภ์เกื้อกุล, ณิชมน พูนน้อย และ กังวาล พยัคฆกุล, “วงจรถ่วงค่าความต้านทานแบบลบที่ผันแปรตามความถี่โดยใช้ CDTRA และการประยุกต์ใช้งานในวงจรถ่วงค่าความถี่,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 27, ฉบับที่ 4, หน้า 761-770, ต.ค.-ธ.ค. 2560

## A Simple Grounded FDNR Based-on CDTRA and Its Application for a Sinusoidal Oscillator

Montree Siripruchyanun,\* Chairat Aupathamguagoon, Nitchamon Poonnoy and Kangwal Payakkakul  
Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkuts University of Technology  
North Bangkok, Bangkok, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 0-2555-2000 Ext. 3328, E-mail: mts@kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.11.005

Received 25 November 2016; Accepted 21 December 2016; Published online: 8 November 2017

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

This article proposes a simple grounded Frequency Dependent Negative Resistance (FDNR) based on CDTRA cooperating with 4 floating passive elements. The features of the proposed circuit are that; the impedance can be controlled by passive devices. Moreover, the circuit is theoretically temperature-insensitive which is preferable for using in a temperature control/measurement work. It is suitable for further fabricating in the IC architecture. The application example as a sinusoidal oscillator is included. The simulation results using PSpice are given for the introduced grounded simulator to verify the theory and to exhibit the performances of the circuit.

**Keywords:** Frequency Dependent Negative Resistance, CDTRA, Sinusoidal Oscillator

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ การสังเคราะห์และออกแบบวงจรจำลองค่าอุปกรณ์พาสซีฟได้กลายเป็นเรื่องที่มีความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากวงจรจำลองค่าอุปกรณ์นั้นสามารถใช้ทดแทนอุปกรณ์พาสซีฟจำพวกตัวต้านทาน [1] ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ หรือตัวต้านทานแบบลบบที่ขึ้นอยู่กับความถี่ที่อยู่ในวงจรได้ เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างหลากหลาย เช่น การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณ [2] วงจรกรองความถี่ วงจรกำจัดค่าอุปกรณ์แฝงที่ไม่ต้องการที่อยู่ในอุปกรณ์หรือวงจรได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การออกแบบวงจรรวมทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ การใช้อุปกรณ์พาสซีฟจริงในวงจรดังที่กล่าวมานั้น จะพบว่ามีข้อเสียหลายอย่าง เช่น จะทำให้วงจรที่ออกแบบมีน้ำหนักมาก รวมถึงพื้นที่ในการออกแบบจะมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย อีกทั้งไม่สามารถปรับค่าได้ [3], [4] จึงทำให้ไม่สะดวกต่อการที่จะนำไปใช้งาน ส่งผลทำให้มีนักวิจัยจำนวนมากมาคิดค้นและนำเสนอวงจรที่สามารถทำหน้าที่เลียนแบบอุปกรณ์พาสซีฟที่เรียกว่า วงจรจำลองค่าอุปกรณ์ขึ้นมา เพื่อให้สามารถนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้

วงจรความต้านทานแบบลบบที่ผันแปรตามความถี่ (Frequency Dependent Negative Resistance: FDNR) จัดเป็นหนึ่งในวงจรจำลองค่าอุปกรณ์ที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางในการประมวลผลสัญญาณ เช่น การสมมูลอิมพีแดนซ์ การปรับปรุงค่าควอลิตีแฟกเตอร์ในวงจรรีโซแนนท์ และวงจรกรองความถี่และวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ เป็นต้น [5], [6] โดย FDNR สามารถนำไปใช้ทดแทนตัวเหนี่ยวนำจริงที่อยู่ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังที่กล่าวมาข้างต้นได้ ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอวงจร FDNR เป็นจำนวนมากโดยใช้อุปกรณ์แอคทีฟสมัยใหม่ขึ้นมากมาย ยกตัวอย่างเช่น CCII [7]–[9], OTA [10], CFOA [11], OTRA [12], FDCCII [13], CBTA [14], CCTA [15], VDBA [16] เป็นต้น ซึ่งถึงแม้วงจรที่นำเสนอมานั้นจะสามารถควบคุมค่าได้ด้วยวิธีการทาง

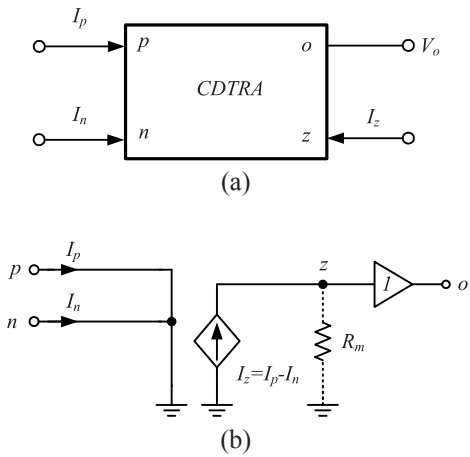
อิเล็กทรอนิกส์รวมถึงมีการใช้อุปกรณ์พาสซีฟและแอคทีฟจำนวนน้อยกว่า แต่จากการศึกษาจะพบว่า ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรยังขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจากสภาพแวดล้อมภายนอก และจะส่งผลทำให้วงจรหรือระบบมีความไม่เสถียรเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จึงทำให้วงจรทั่วไปไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมดังกล่าวได้ อีกทั้งวงจรที่นำเสนอผ่านมานั้นยังมีการตอบสนองความถี่ได้ในย่านแคบๆ

ในปี ค.ศ. 2016 ได้มีผู้คิดค้นและนำเสนออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดใหม่ ชื่อว่า CDTRA (Current Differencing Transresistance Amplifier) [17] ซึ่ง CDTRA เป็นอุปกรณ์ที่มี 4 ขั้ว คือ มีอินพุต 2 ขั้วและเอาต์พุต 2 ขั้ว โดยถูกพัฒนามาจากวงจร OTRA เพื่อให้สามารถทำงานได้ทั้งในโหมดกระแส โหมดแรงดันหรือโหมดผสม (Hybrid-mode) ได้ ทำให้เหมาะที่จะนำไปใช้ในการออกแบบวงจรประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก อีกทั้งยังสามารถปรับค่าอัตราขยายที่เอาต์พุตของอุปกรณ์ได้ที่ค่า  $R_m$  (Transresistance Gain) นอกจากนี้ขนาดของแรงดันเอาต์พุตยังมีค่าไม่ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอีกด้วย ทำให้สามารถที่จะนำเอาอุปกรณ์ดังกล่าวไปใช้งานหรือประยุกต์ใช้ในวงจรที่มีการทำงานอยู่ในสภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้เป็นอย่างดี

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอ FDNR โดยใช้ CDTRA เป็นอุปกรณ์หลัก วงจรที่นำเสนอ มีลักษณะเด่น คือ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่ำ ทำให้สามารถที่จะนำไปใช้ใน งานที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้วงจรที่ได้รับการสังเคราะห์มีความสะดวกและง่ายทั้งในการนำไปต่อใช้งานหรือมีความเหมาะสมในการนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวมได้ ผลการจำลองการทำงานของวงจรโดยใช้ PSpice แสดงถึงความสอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้มีการวิเคราะห์ไว้

## 2. วงจรและหลักการทำงานของวงจร

เนื่องจากในงานวิจัยที่นำเสนอนี้ใช้ CDTRA ที่มี



รูปที่ 1 CDTRA (a) สัญลักษณ์ (b) วงจรสมมูล

โครงสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์หลัก ใน ส่วนนี้จึงขอกล่าวถึงหลักการทำงานเบื้องต้นของ CDTRA โดยมีรายละเอียดดังนี้

## 2.1 หลักการทำงานของ CDTRA

จากรูปที่ 1 แสดงสัญลักษณ์และวงจรสมมูลของ CDTRA ซึ่งจัดเป็นอุปกรณ์ที่มี 4 ขั้ว คือ มีอินพุต 2 ขั้ว และเอาต์พุต 2 ขั้ว โดย CDTRA ถูกพัฒนามาจากวงจร OTRA เพื่อให้สามารถทำงานได้ทั้งในโหมดกระแสและ โหมดแรงดันได้ ทำให้เหมาะที่จะนำไปใช้ในการออกแบบ วงจรประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก อีกทั้งยังสามารถ ปรับค่าอัตราขยายที่เอาต์พุตของอุปกรณ์ได้ที่ค่า  $R_m$  สามารถเขียนลักษณะสมบัติทางอุดมคติของ CDTRA โดยแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่โหนดต่างๆ ด้วยสมการในเชิงเมตริกซ์ได้ ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ I_z \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_n \\ I_z \\ V_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

จากรูปที่ 1 จะได้แรงดันอินพุตของวงจร ดังสมการ ที่ (2)

$$V_p = V_n = 0 \quad (2)$$

โดยที่ค่ากระแส  $I_z$  คือผลต่างกระแสระหว่างกระแส อินพุต  $I_p$  ที่ขั้ว p และ  $I_n$  ที่ขั้ว n จะได้

$$I_z = I_p - I_n \quad (3)$$

ดังนั้นที่แรงดันเอาต์พุตของ CDTRA จะได้ดัง สมการที่ (4)

$$V_o = I_z \cdot R_m \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) เมื่อ  $R_m$  คือ ค่าส่งผ่านความต้านทาน ของ CDTRA ดังนั้นจะได้แรงดันเอาต์พุต ดังสมการ ที่ (5)

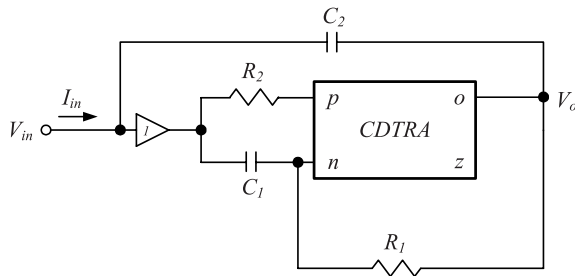
$$V_o = R_m(I_p - I_n) \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) จะพบว่า ขนาดของสัญญาณ เอาต์พุตได้จากผลต่างกระแสของอินพุตทั้งสองคูณกับ ค่าส่งผ่านความต้านทาน  $R_m$  ของ CDTRA โดยแรงดัน เอาต์พุตสามารถควบคุมได้ด้วยการปรับค่าที่  $R_m$  อีกทั้ง ขนาดของแรงดันเอาต์พุตยังไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลง ของอุณหภูมิอีกด้วย เนื่องจากไม่มีพจน์ของศักดา ความร้อน  $V_T$  ปรากฏอยู่ในสมการนั่นเอง ทำให้สามารถ ที่จะนำเอาอุปกรณ์ดังกล่าวไปใช้งานหรือประยุกต์ใช้ใน วงจรที่มีการทำงานอยู่ในสภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงของ อุณหภูมิได้เป็นอย่างดี

## 2.2 วงจร FDNR ที่นำเสนอ

จากรูปที่ 2 แสดง FDNR ที่ใช้ CDTRA เป็น อุปกรณ์หลัก โดยมีตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่อรวม ในวงจรอย่างละ 2 ตัว และวงจรบัพเฟอร์อีก 1 วงจร

เมื่อทำการพิจารณาจากวงจรในรูปที่ 2 โดยใช้ คุณสมบัติของ CDTRA จากสมการที่ (1) จะได้



รูปที่ 2 วงจร FDNR ที่นำเสนอ

$$I_p R_m = I_n R_m \quad (6)$$

โดยที่ขั้ว n จะได้ค่ากระแส  $I_n = I_{C_1} + I_{R_1}$  แทนลงในสมการที่ (6) จะได้

$$I_p R_m = (I_{C_1} + I_{R_1}) R_m \quad (7)$$

จากสมการที่ (7) จะได้

$$\frac{V_{in}}{R_2} R_m = \left( V_{in} \cdot sC_1 + \frac{V_o}{R_1} \right) R_m \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) จะได้สมการเอาต์พุต ดังสมการที่ (9)

$$V_o = V_{in} \frac{R_1}{R_2} - V_{in} \cdot sC_1 R_1 \quad (9)$$

เมื่อ

$$I_{in} = sC_2 (V_{in} - V_o) \quad (10)$$

แทนค่าจากสมการที่ (9) ลงในสมการที่ (10) จะได้ดังสมการที่ (11)

$$I_{in} = sC_2 \left[ V_{in} - \left( V_{in} \frac{R_1}{R_2} - V_{in} \cdot sC_1 R_1 \right) \right] \quad (11)$$

ทำการจัดรูปสมการ เพื่อหาค่า  $I_{in} / V_{in}$  จะได้ดัง

สมการที่ (12)

$$\frac{I_{in}}{V_{in}} = sC_2 \left( 1 - \frac{R_1}{R_2} + sC_1 R_1 \right) \quad (12)$$

จากสมการที่ (12) จะได้ค่าอินพุตแอดมิตแตนซ์ ( $Y_{in}$ ) ของวงจร ดังสมการที่ (13)

$$Y_{in} = sC_2 \left( 1 - \frac{R_1}{R_2} \right) + s^2 C_1 C_2 R_1 \quad (13)$$

จากสมการที่ (13) เมื่อกำหนดให้ตัวต้านทาน  $R_1 = R_2$  จะได้

$$Y_{in} = s^2 C_1 C_2 R_1 = s^2 D_{eq} \quad (14)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (14) จะได้ค่าอิมพีแดนซ์  $D_{eq}$  ของ FDNR ดังสมการที่ (15)

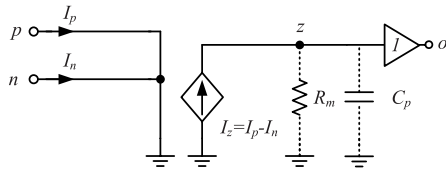
$$D_{eq} = C_1 C_2 R_1 \quad (15)$$

จากสมการที่ (15) จะพบว่า ค่าอิมพีแดนซ์  $D_{eq}$  ของ FDNR สามารถควบคุมได้ด้วยการกำหนดที่ค่าอุปกรณ์ตัวต้านทาน  $R_1$  และ/หรือตัวเก็บประจุ  $C_1, C_2$  โดยเมื่อความถี่ของวงจรเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานที่เป็นลบจะมีค่าลดลง ทั้งนี้จากสมการที่ (13) เมื่อกำหนดให้ตัวต้านทาน  $R_1 = R_2$  ในทางปฏิบัตินั้น สามารถใช้ตัวต้านทานแบบที่มีแกนหมุนเปลี่ยนค่าได้ (Volume) แบบ 2 ชั้น เพื่อให้สามารถปรับค่าตัวต้านทานทั้งสองได้พร้อมกัน

## 2.2 การวิเคราะห์วงจรในกรณีการทำงานที่ความถี่สูง

สำหรับในกรณีที่ CDTRA ที่ใช้ในวงจร มีการทำงานที่ความถี่สูงแล้ว ค่าส่งผ่านความต้านทานของ CDTRA สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (16) ดังนี้

$$R_m(s) = \frac{R_0}{1 + \frac{s}{\omega_0}} = \frac{R_0 \omega_0}{s + \omega_0} = \frac{1}{\frac{s}{R_0 \omega_0} + \frac{1}{R_0}} \quad (16)$$



รูปที่ 3 วงจรเทียบเท่าที่ความถี่สูงของ CDTRA

เมื่อ  $R_0$  คือ ค่าส่งผ่านความต้านทานในขณะสลับเปิด และ  $\omega_0$  คือ ค่าความถี่คัตออฟของการส่งผ่านความต้านทาน จากสมการที่ (16) เมื่อพิจารณาการทำงานในความถี่สูง ดังวงจรถ่ายค่าในรูปที่ 3 จะได้ค่าส่งผ่านความต้านทานของ CDTRA ดังสมการที่ (17)

$$R_0 \rightarrow \infty, \quad R_m(s) \cong \frac{1}{s} \quad (17)$$

เมื่อ  $C_p$  คือ ค่าความจุแฝง มีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{R_0\omega_0}$  ดังนั้นจะได้

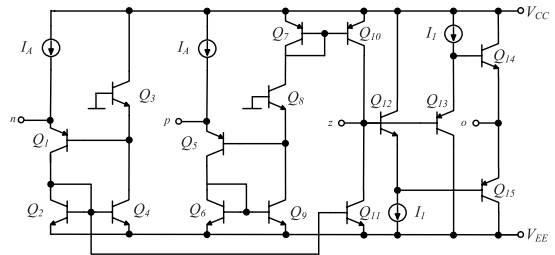
$$R_m(s) \cong \frac{1}{sC_p} \quad (18)$$

### 3. ผลการจำลองการทำงานและการประยุกต์ใช้งาน

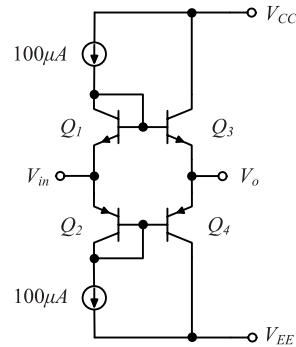
เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะของวงจรถ่ายค่าที่นำเสนอ จึงได้จำลองการทำงานของวงจรถ่ายค่าด้วยโปรแกรม PSpice สำหรับโครงสร้างภายในของ CDTRA และวงจรถ่ายค่าเฟออร์ที่ใช้สำหรับทดสอบการทำงาน แสดงได้ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 เมื่อกำหนดให้ทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรถ่ายค่าใช้พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์เบอร์ PR200N และ NR200N ตามลำดับ ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์อาร์เรย์ ALA400 ของ AT&T [18] โดยกำหนดให้ CDTRA และวงจรถ่ายค่าเฟออร์ทำงานที่แรงดันไฟเลี้ยง  $\pm 3V$  เมื่อค่ากระแส  $I_A = I_1 = 100\mu A$  ผลการจำลองการทำงานสามารถแยกรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

#### 3.1 ผลการจำลองการทำงานของ FDNR ที่ใช้ CDTRA

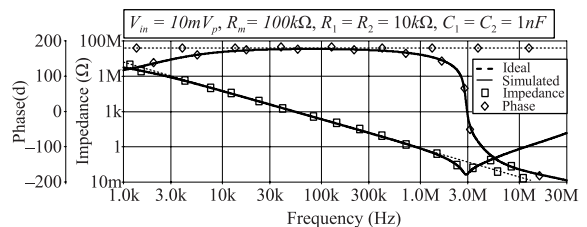
จากรูปที่ 6 แสดงผลการจำลองการทำงานเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์และเฟสของ FDNR ดังวงจรถ่ายค่าในรูปที่ 2



รูปที่ 4 โครงสร้างภายในของ CDTRA



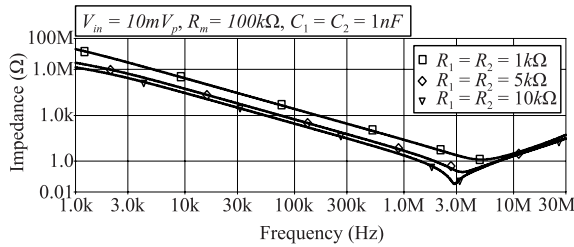
รูปที่ 5 โครงสร้างภายในของวงจรถ่ายค่าเฟออร์



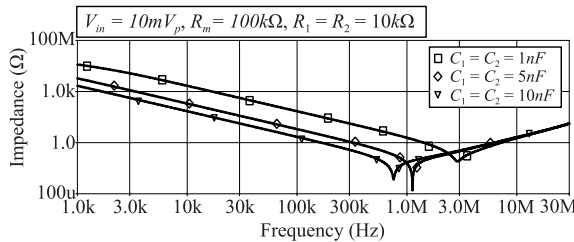
รูปที่ 6 ค่าอิมพีแดนซ์และเฟสของ FDNR

โดยเมื่อทำการกำหนดให้ค่าอุปกรณ์  $R_m = 100k\Omega$ ,  $R_1 = R_2 = 10k\Omega$  และ  $C_1 = C_2 = 1nF$  ด้วยการกำหนดค่าอุปกรณ์ดังกล่าว จะพบว่าวงจรถ่ายค่า FDNR ที่นำเสนอสามารถทำงานได้อย่างอุดมคติในช่วงความถี่ระหว่าง 3kHz–2MHz

รูปที่ 7 แสดงผลการจำลองการทำงานของ FDNR เมื่อทำการเปลี่ยนค่าความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  ไปสามค่า คือ 1kΩ, 5kΩ และ 10kΩ โดยกำหนดให้ค่า  $R_m = 100k\Omega$  และ  $C_1 = C_2 = 1nF$  จากการกำหนดค่าอุปกรณ์ดังกล่าวจะเห็นได้ว่า FDNR ที่นำเสนอสามารถปรับค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรถ่ายค่าได้ด้วยการกำหนดที่ค่าความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  นั้นเอง



รูปที่ 7 ค่าอิมพีแดนซ์ของ FDNR เมื่อเปลี่ยนค่า  $R_1$  และ  $R_2$  ไปสามค่า



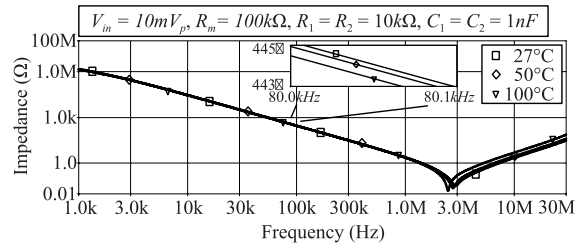
รูปที่ 8 ค่าอิมพีแดนซ์ของ FDNR เมื่อเปลี่ยนค่า  $C_1$  และ  $C_2$  ไปสามค่า

รูปที่ 8 แสดงผลการจำลองการทำงานของ FDNR เมื่อทำการเปลี่ยนค่า  $C_1$  และ  $C_2$  ไปสามค่า คือ  $1nF$ ,  $5nF$  และ  $10nF$  โดยเมื่อทำการกำหนดให้ค่า  $R_m = 100k\Omega$  และ  $R_1 = R_2 = 10k\Omega$  จากรูปที่ 7 จะพบว่า FDNR ที่นำเสนอสามารถปรับค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรโดยการกำหนดที่ค่า  $C_1$  และ  $C_2$  ได้ด้วยนั่นเอง

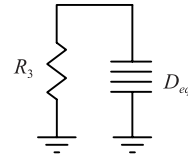
รูปที่ 9 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยกำหนดให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีค่า  $R_m = 100k\Omega$ ,  $R_1 = R_2 = 10k\Omega$  และ  $C_1 = C_2 = 1nF$  และทำการเปลี่ยนอุณหภูมิสำหรับใช้ในการจำลองการทำงานไปสามค่า คือ 27, 50 และ 100 องศาเซลเซียส พบว่า ในช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้ ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรมีการเปลี่ยนแปลงไปเพียง  $0.013\%/^{\circ}C$  เท่านั้น

### 3.2 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน FDNR

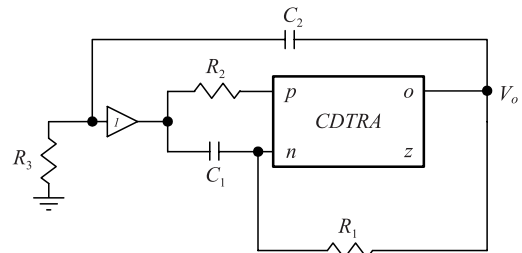
การประยุกต์ใช้งาน FDNR ในวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์ โดยมีหลักการและวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 10 และ 11 ดังนี้



รูปที่ 9 ค่าอิมพีแดนซ์ของ FDNR เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิไปสามค่า



รูปที่ 10 หลักการของวงจรกำเนิดสัญญาณ



รูปที่ 11 การประยุกต์ใช้งาน FDNR ในวงจรกำเนิดสัญญาณ

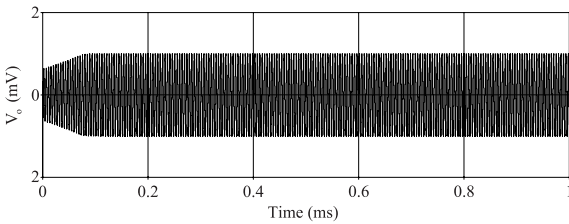
จากวงจรในรูปที่ 10 แสดงหลักการของวงจรกำเนิดสัญญาณที่นำเสนอ โดยใช้ตัวต้านทานภายนอกต่อร่วมกับ FDNR ซึ่งจะได้สมการคุณลักษณะของวงจรดังสมการที่ (19)

$$\frac{1}{s^2 D_{eq}} + R_3 = 0 \quad (19)$$

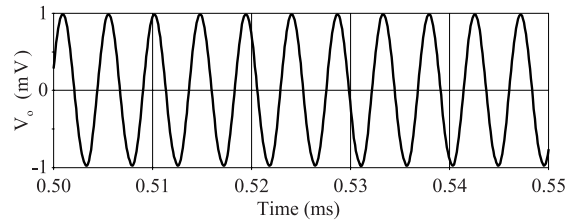
จากการประยุกต์ใช้งานของ FDNR ในวงจรกำเนิดสัญญาณในรูปที่ 11 จะได้สมการคุณลักษณะของวงจรกำเนิดสัญญาณดังสมการที่ (20) ดังนี้

$$0 = s^2 C_1 C_2 R_1 + s C_2 \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right) + \frac{1}{R_3} \quad (20)$$

มนตรี ศิริปรัชญานันท์ และคณะ, “วงจรจำลองค่าความต้านทานแบบลบที่ผันแปรตามความถี่โดยใช้ CDTRA และการประยุกต์ใช้งานในวงจรกำเนิดสัญญาณ.”



รูปที่ 12 สัญญาณเอาต์พุตในสภาวะเริ่มต้น



รูปที่ 13 สัญญาณเอาต์พุตในสภาวะอยู่ตัว

จากสมการที่ (20) จะได้ความถี่และเงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณ ดังสมการที่ (21) และสมการที่ (22) ตามลำดับ

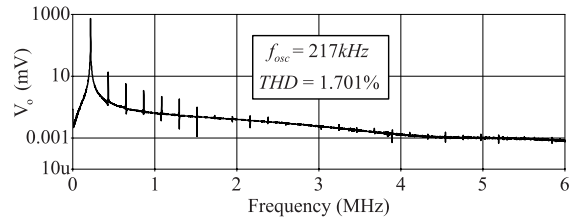
$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_3 C_1 C_2}} \quad (21)$$

$$R_2 \leq R_1 \quad (22)$$

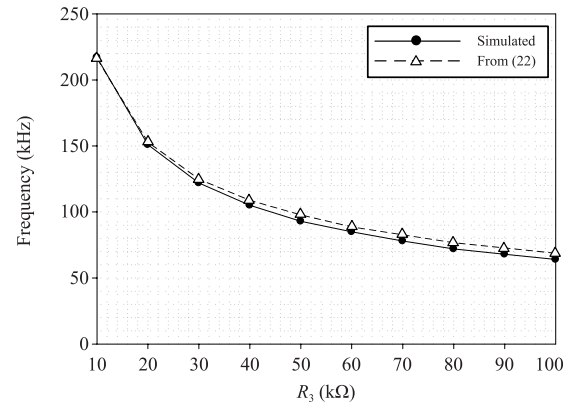
เมื่อพิจารณาสมการที่ (21) และ (22) จะพบว่า วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์นี้ สามารถปรับเงื่อนไขและความถี่ของการให้กำเนิดสัญญาณได้อย่างเป็นอิสระจากกัน โดยสามารถควบคุมเงื่อนไขของกำเนิดสัญญาณได้ที่  $R_2$  และควบคุมความถี่ได้จาก  $R_3$  นั่นเอง

รูปที่ 12 แสดงผลของสัญญาณเอาต์พุตที่อยู่ในสภาวะเริ่มต้นของวงจรกำเนิดสัญญาณในรูปที่ 11 เมื่อกำหนดให้ค่าอุปกรณ์  $R_m = 100k\Omega$ ,  $R_1 = 5.5k\Omega$ ,  $R_2 = 5k\Omega$ ,  $R_3 = 10k\Omega$  และ  $C_1 = C_2 = 100pF$

รูปที่ 13 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรในรูปที่ 11 เมื่ออยู่ในสภาวะคงตัว ที่ความถี่ 217kHz โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบกับสมการที่ (21) จะพบว่า ความถี่ที่ได้มีเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบนไปเพียง 0.93%



รูปที่ 14 สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต



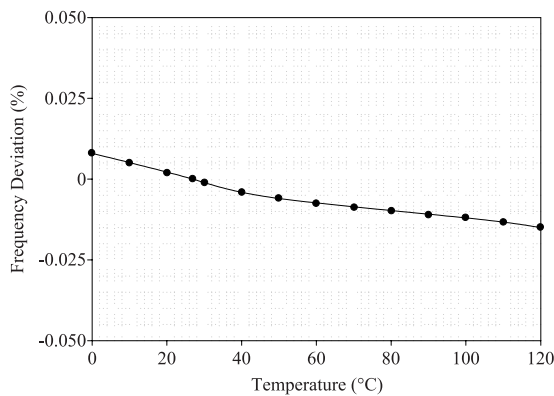
รูปที่ 15 ความถี่ของการให้กำเนิดสัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนค่าความต้านทาน  $R_3$

รูปที่ 14 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตพบว่า วงจรกำเนิดสัญญาณที่นำเสนอขึ้น ที่ความถี่ 217kHz จะมีค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์โมนิกส์ (THD) ของสัญญาณเอาต์พุต เท่ากับ 1.701%

รูปที่ 15 แสดงผลค่าความถี่ของการให้กำเนิดสัญญาณ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน  $R_3$  จากรูปจะพบว่า ความถี่ของการกำเนิดสัญญาณ สามารถควบคุมได้ด้วยการเปลี่ยนค่าที่ตัวต้านทานภายนอก ซึ่งสามารถใช้โครงสร้างของวงจรตัวต้านทานที่เป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Resistor) [19] ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทาน  $R_3$  ก็จะทำให้สามารถที่จะปรับค่าความถี่ของการกำเนิดสัญญาณได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ได้อีกด้วย

รูปที่ 16 แสดงผลอัตราการเบี่ยงเบนความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงระหว่าง 0–120 องศาเซลเซียส จากผลจะพบว่า อัตราการ





**รูปที่ 16** อัตราการเบี่ยงเบนความถี่ของวงจรถักกำเนิดสัญญาณ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงระหว่าง 0–120 องศาเซลเซียส

เบี่ยงเบนของวงจรถักกำเนิดสัญญาณมีค่าสูงสุดที่ 0.008% และมีค่าต่ำสุดที่ -0.015%

#### 4. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวงจรถักค่าอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็น FDNR โดยใช้อุปกรณ์หลักคือ CDTRA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟเพียงตัวเดียว วงจรที่นำเสนอสามารถควบคุมค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรถักด้วยการกำหนดที่ค่าอุปกรณ์พาสซีฟในวงจร อีกทั้งวงจรถักยังมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียง 0.013%/°C เท่านั้น ทำให้สามารถนำไปใช้ในงานที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้เป็นอย่างดี ผลการจำลองการทำงานของวงจรถักโดยใช้ PSpice แสดงถึงความสอดคล้องตามที่วิเคราะห์ไว้เป็นอย่างดี โดยวงจรถักที่นำเสนอมีอัตราการดึงกำลังไฟฟ้าที่ 4.7mW ที่แรงดันไฟเลี้ยง  $\pm 3V$  ตัวอย่างในการประยุกต์ใช้งาน FDNR ในวงจรถักกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์ พบว่า สามารถควบคุมเงื่อนไขและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณได้อย่างเป็นอิสระจากกันผ่านตัวต้านทานภายนอก โดยมีค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์โมนิกส์ (THD) ของสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับ 1.701% ที่ความถี่ 217kHz จากผลการวิจัยพบว่า FDNR ที่นำเสนอมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานหรือพัฒนาให้อยู่ใน

รูปแบบวงจรรวมเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ เช่น ระบบสื่อสารแบบไร้สาย ระบบเครื่องมือวัด เป็นต้น

#### 4. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประจำปี พ.ศ. 2558 สัญญาเลขที่ FTE-2558-01

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Payakkakul, T. Comdang, and M. Siripruchyanun, "An electronically controllable temperature-insensitive floating positive/negative resistance control circuit using only single DV-CCTA," *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 23, no. 2, pp. 315–322, 2013 (in Thai).
- [2] M. Siripruchyanun, "A temperature-insensitive sinusoidal oscillator with using principle of voltage to current conversion based DO-CCTA," *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 26, no. 2, pp. 186–196, 2016 (in Thai).
- [3] G. Ferri and N. C. Guerrini, *Low-voltage low-power CMOS current conveyors*. London: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [4] E. Yuce, S. Minaei, and O. Cicekoglu, "Resistorless floating immittance function simulators employing current controlled conveyors and grounded capacitor," *Electrical Engineering*, vol. 88, pp. 519–525, 2006.
- [5] D. Sasan and S. Jayalalitha, "Frequency dependent negative resistance-A review," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 4, pp. 2988–2994, 2012.

- [6] I. V. Prodanov and M. M. Green, “A current-mode FDNR circuit element using capacitive gyrators,” in *Proceedings of the 1994 IEEE international symposium on circuits and systems*, London, UK, 1994, pp. 409–412.
- [7] S. Nandi, P. B. Jana, and R. Nandi, “Novel floating ideal tunable FDNR simulation using current conveyors,” *IEEE Trans Circuits System*, vol. 31, no. 4, pp. 402–403, 1984.
- [8] M. Higashimura and Y. Fukui, “Novel lossless tunable floating FDNR simulation using two current conveyors and a buffer,” *Electron Letter*, vol. 22, pp. 938–939, 1986.
- [9] E. Yuce, O. Cicekoglu, and S. Minaei, “Novel floating inductance and FDNR simulators employing CCII+s,” *Journal of Circuits Systems and Computers*, vol. 15, no. 1, pp. 75–81, 2006.
- [10] I. V. Prodanov and M. M. Green, “A current-mode FDNR circuit element using capacitive gyrators,” in *Proceedings of the 1994 IEEE international symposium on circuits and systems*, London, UK, 1994, pp. 409–412.
- [11] F. Kacar and H. Kuntman, “On the realization of the FDNR simulators using only a single current feedback operational amplifier,” in *Proceedings International conference on electrical and electronics engineering 2009*, 5–8 November 2009, pp. 223–226.
- [12] A. Gupta, R. Senani, D. R. Bhaskar, and A. K. Singh, “OTRA-based grounded-FDNR and grounded-inductance simulators and their applications,” *Circuits System Signal Process*, no. 31, pp. 489–499, 2012.
- [13] F. Kacar and H. Kuntman, “Novel electronically tunable FDNR simulator employing single FDCCII,” in *Proceedings European conference on circuit theory and design (ECCTD)*, 23–27 August 2009, pp. 21–24, 2009.
- [14] U. E. Ayten, M. Sagbas, N. Herencsar, and J. Koton, “Novel floating general element simulators using CBTA,” *Radioengineering*, vol. 21, pp. 11–19, 2012.
- [15] A. Jantakun, “A simple grounded FDNR and capacitance simulator based-on CCTA,” *International Journal of Electronics and Communications*, vol. 69, pp. 950–957, 2015.
- [16] P. Mongkolwai and W. Tangsirat, “Generalized impedance function simulator using voltage differencing buffered amplifiers (VDBAs),” in *Proceeding of International Multiconference of Engineers and Computer Scientists 2016*, 2016, vol. 2.
- [17] M. Siripruchyanun, N. Poonnoy, C. Upathamkuekool, and K. Payakkakul, “Current differencing transresistance amplifier (CDTRA) and its application for analog signal processing,” *Procedia Computer Science*, vol. 86, pp. 184–187, 2016.
- [18] D. R. Frey, “Log-domain filtering: an approach to current-mode filtering,” *IEE Proceedings G (Circuits, Devices and Systems)*, vol. 140, pp. 406–416, 1993.
- [19] V. Springl, W. Jaikla, and M. Siripruchyanun, “Floating positive/negative resistance simulators employing single dual-output OTA,” in *Proceedings International Symposium on Communications and Information Technologies 2006*, 2006, pp. 352–355.