

วงจรจำลองอิมมิตแตนซ์แบบลอยตัวอย่างง่ายที่ใช้ตัวเก็บประจุแบบลงกราวนด์

Simple Floating Immittance Simulator with Grounded Capacitor

วินัย ศิลารวม¹ และ อนูรี หล่อสวัสดิ์ศิริ²

สถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร^{1,2}

E-mail: vinai@mut.ac.th¹, anuree@mut.ac.th²

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรจำลองค่าอิมมิตแตนซ์แบบลอยตัวที่ประกอบด้วยตัวทรานสดักเตอร์เพียง 5 ตัว (ใช้ทรานซิสเตอร์แบบมอส จำนวน 20 ตัว) และอุปกรณ์แบบพาสซีฟอีก 3 ตัว ซึ่งสามารถจำลองได้ 4 รูปแบบ คือ ตัวความเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ ตัวต้านทานและตัวต้านทานแบบลบที่แปรตามความถี่ ซึ่งการจำลองแต่ละรูปแบบขึ้นอยู่กับเลือกอุปกรณ์แบบพาสซีฟในวงจร วงจรที่นำเสนอนี้มีจุดเด่นหลายประการ คือ มีโครงสร้างเรียบง่าย ปรับพารามิเตอร์ของวงจรได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ และใช้ตัวอุปกรณ์แบบพาสซีฟลงกราวนด์ทั้งหมด จึงมีความเหมาะสมในการไปสร้างในรูปแบบวงจรรวม การจำลองการทำงานและการประยุกต์ใช้งานของวงจรที่นำเสนอด้วยโปรแกรม SPICE ซึ่งใช้แบบจำลองทรานซิสเตอร์ชนิดซีมอส 0.18 um TSMC มีผลลัพธ์สอดคล้องกับแนวคิดที่นำเสนอด้วยดี

คำสำคัญ: วงจรจำลองค่าอิมมิตแตนซ์, ตัวเก็บประจุแบบลงกราวนด์, ตัวทรานสดักเตอร์

Abstract

This article presents the simple floating immittance simulator that employs only five transconductors (20 MOS transistors) and three

grounded passive components. The proposed circuit can be modeled in four distinct ways as an inductor, capacitor, resistor and frequency dependent negative resistor by selecting appropriate components. The circuit has many advantages: it is simple topology with electronically adjustable parameters. Furthermore, all passive components are grounded. As a result, it is highly suitable for integrated circuit implementation. Simulation and application of the proposed circuit using the SPICE with the 0.18 um TSMC CMOS transistor model yielded good agreement with the proposed design.

Keywords: Immittance simulator, Grounded capacitor, Transconductor

1. บทนำ

วงจรจำลองอิมมิตแตนซ์ คือ วงจรที่มีค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) หรือ แอดมิตแตนซ์ (admittance) เป็นเสมือนคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ ตัวต้านทานหรือตัวต้านทานลบที่แปรค่าตามความถี่ (frequency dependent negative

resistor: FDNR) ซึ่งมีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ในการออกแบบวงจรทางวิศวกรรมไฟฟ้า อาทิเช่น วงจรกรองสัญญาณ วงจรออสซิลเลเตอร์ วงจรแมทซ์ อิมพีแดนซ์และวงจรกำจัดอุปกรณ์แฝง โดยในการออกแบบวงจรจำลองอิมิตแดนซ์นั้นจะใช้อุปกรณ์แบบแอคทีฟ (active building block: ABB) ทั้งนี้เนื่องจากมีความแม่นยำ ปรับค่าและต่อร่วมกับวงจรอื่นได้ง่าย รวมทั้งในแง่การออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ยังต้องการพื้นที่น้อยอีกด้วย เมื่อไม่นานมานี้ จากการสืบค้นผลงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า มีการนำเสนอวงจรจำลองอิมิตแดนซ์ด้วยอุปกรณ์ ABB หลากหลาย วงจร อาทิเช่น วงจรขยายค่าความนำที่ใช้ความแตกต่างของแรงดันชนิดปรับแรงดัน (modified voltage differencing voltage transconductance amplifier: MVDVTA) [1] วงจรขยายค่าความนำของผลต่างแรงดัน (voltage differencing transconductance amplifier: VDTA) [2,8] วงจรขยายค่าความนำที่ส่งผ่านกระแส (operational transconductance amplifier: OTA) [3] วงจรแปลงผลต่างแรงดันเป็นกระแส (differential voltage to current converters: DVTC) [4] วงจรขยายค่าความนำที่มีวงจรสายพานกระแส (current conveyor transconductance amplifier: CCTA) [5] วงจรสายพานแรงดันรุ่นที่ 2 ชนิด 2 เอาต์พุต (dual-output second-generation voltage conveyor: VCII) [6,7] วงจรขยายค่าความนำที่มีกันชนกระแส (current buffered transconductance amplifier: CBTA) [9] วงจรทรานสดักเตอร์ (transconductor cell: TC) [10] และวงจรขยายที่มีการป้อนกลับกระแสแบบกลับเฟส (inverting current feedback operational

amplifier: ICFOA) [11] เป็นต้น ในตารางที่ 1 ได้เปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรจำลองอิมิตแดนซ์ก่อนหน้ากับที่นำเสนอในบทความนี้ อย่างไรก็ตาม วงจรเหล่านี้ก็มีข้อที่ควรปรับปรุง คือ

- 1) ใช้อุปกรณ์ ABB ที่มีจำนวนทรานซิสเตอร์มากเกินไป [1,2,4-9,11]
- 2) ใน 1 วงจร ทำหน้าที่ได้น้อยกว่า 4 ชนิด [2,3,5-10]
- 3) ใช้อุปกรณ์แบบพาสซีฟแบบลอยตัว [3-5,11]
- 4) ไม่มีการปรับพารามิเตอร์ของวงจรด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ [11] ส่งผลให้ไม่สะดวกในการใช้งานวงจร

จากข้อ 1-3 นั้นไม่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบวงจรรวม เพราะต้องใช้พื้นที่มากเพื่อลดข้อด้อยเหล่านี้ บทความนี้จึงนำเสนอวงจรจำลองอิมิตแดนซ์แบบลอยตัวที่จำลองได้หลายชนิดในวงจรเดียวด้วยการเลือกอุปกรณ์แบบพาสซีฟ คือ ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ ตัวต้านทานและตัว FDNR ซึ่งวงจรที่นำเสนอจะเลือกใช้อุปกรณ์ ABB เป็นวงจรทรานสดักเตอร์ต่อร่วมกับอุปกรณ์แบบพาสซีฟแบบลงกราวนด์ จึงทำให้วงจรที่นำเสนอมีโครงสร้างกระชับเรียบง่ายและยังสามารถปรับพารามิเตอร์ของวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ได้ด้วยการปรับกระแสไบอัสของตัวทรานสดักเตอร์ รวมถึงมีความดึงดูดใจที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในรูปแบบวงจรรวมด้วย โดยมีการยืนยันการทำงานของวงจรที่นำเสนอและการประยุกต์ใช้งานด้วยโปรแกรม SPICE

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบวงจรจำลองอิมมิตแดนซ์

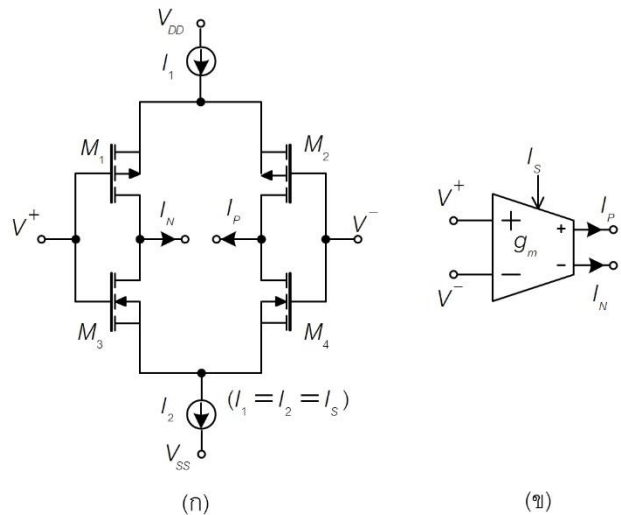
ลำดับ เอกสารอ้างอิง	อุปกรณ์ ABB/จำนวนทรานซิสเตอร์	ชนิดของการจำลอง	อุปกรณ์พาสซีฟ แบบลอยตัว	การปรับทาง อิล็กทรอนิกส์	แรงดัน ไฟเลี้ยง
[1]	1 MVDVTA (51 MOSs)	L, C, R, FDNR	ไม่	ใช่	±0.75V
[2]	3 VDTAs (24 MOSs)	FDNR	ไม่	ใช่	-
[3]	1 OTA, 1 CCII±	C, R	ใช่	ใช่	-
[4]	2 DVTCs (32 MOSs)	C, R, L, FDNR	ใช่	ใช่	±0.75V
[5]	2 CCTAs (42 MOSs)	L, C, R	ใช่	ใช่	±1.2V
[6]	1 VCII, 1 E-DVCC (36 MOSs)	C	ไม่	ใช่	±0.9V
[7]	3 VCIIs (61 MOSs)	L	ไม่	ใช่	±0.9V
[8]	2 VDTAs (36 MOSs)	FDNC	ไม่	ใช่	±0.9V
[9]	2 CBTAs (68 MOSs)	L, C	ไม่	ใช่	±0.9V
[10]	2,4,3,5 TCs (8,16,12,20 MOSs)	L,C,FDNC,FDNR	ไม่	ใช่	±0.75V
[11]	2 ICFOAs (92 MOSs)	L, C, FDNR	ใช่	ไม่	±1.25V
วงจรที่ นำเสนอ	5 TCs (20 MOSs)	L,C, R, FDNR	ไม่	ใช่	±0.75V

2. วงจรที่นำเสนอ

เนื่องจากวงจรที่นำเสนอเลือกใช้ตัวทรานซิสคอนดักเตอร์เป็นอุปกรณ์ ABB หลัก ในส่วนแรกจะกล่าวถึงคุณสมบัติของตัวทรานซิสคอนดักเตอร์พอสังเขปก่อน ซึ่งวงจรคอนดักเตอร์อย่างง่ายประกอบด้วยทรานซิสเตอร์แบบซีมอส (CMOS) 4 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) และมีสัญลักษณ์ดังรูปที่ 1 (ข) [12] หากทรานซิสเตอร์ทุกตัวกำหนดให้ทำงานในย่านอิมิตัวและมีค่าทรานซิสคอนดักแตนซ์เท่ากัน จะได้สมการของกระแสเอาต์พุตของตัวทรานซิสคอนดักเตอร์เป็น

$$I_P = -I_N = g_m (V^+ - V^-) \quad (1)$$

โดยที่ g_m คือ ค่าทรานซิสคอนดักแตนซ์ของตัวคอนดักเตอร์ ซึ่งมีสมการเป็น



รูปที่ 1 ตัวทรานซิสคอนดักเตอร์อย่างง่าย

(ก) วงจร (ข) สัญลักษณ์

$$g_m = (\mu_0 C_{ox} \frac{W}{L} I_S)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

ซึ่งพารามิเตอร์ μ_0 , C_{ox} และ W/L คือ ค่าความเร็วของพาหะ ค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของชั้นออกไซด์และค่าอัตราส่วนของความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสของทรานซิสเตอร์ตามลำดับ ส่วน I_s คือ ค่ากระแสไบอัสของตัวทรานซิสคอนดักเตอร์

สำหรับวงจรจำลองอิมิตแดนซ์ที่นำเสนอได้แสดงดังรูปที่ 2 (ก) ประกอบด้วยตัวทรานซิสคอนดักเตอร์จำนวน 5 ตัวและอุปกรณ์แบบพาสซีฟแบบลงกราวด์ที่มีค่าอิมิตแดนซ์แทนด้วย Z_1 , Z_2 และ Z_3 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่ขั้ว V_1 และขั้ว V_2 จะมีวงจรสมมูล (equivalent circuit) ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) ซึ่งมีค่าอิมิตแดนซ์แบบลอยตัว Z_{eq} โดยจากการวิเคราะห์วงจรในรูปที่ 2 (ก) จะได้สมการของเมทริกซ์แอดมิตแดนซ์แบบลัดวงจรเป็นดังนี้ คือ

$$[Y] = \begin{pmatrix} 1 \\ Z_{eq} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= \left(\frac{g_{m1}g_{m5}}{g_{m3}g_{m4}} \frac{Z_3}{Z_1Z_2} \right) \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

โดยที่ g_{mi} เป็นค่าทรานซิสคอนดักเตอร์ของตัวทรานซิสคอนดักเตอร์ตัวที่ i ซึ่งจากสมการ (2) เห็นได้ว่า ค่าอิมิตแดนซ์สมมูล Z_{eq} จะมีค่าเป็น

$$Z_{eq} = \frac{g_{m3}g_{m4}}{g_{m1}g_{m5}} \frac{Z_1Z_2}{Z_3} \quad (3)$$

จากสมการ (3) เห็นชัดว่า การเลือกอุปกรณ์พาสซีฟ Z_1 , Z_2 และ Z_3 นั้น จะกำหนดเงื่อนไขการจำลองของ

ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน และตัว FDNR ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ คือ

1) ถ้าเลือก $Z_1 = R_1, Z_2 = R_2$ และ $Z_3 = 1/sC_3$ แล้วการจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอยตัวจะมีค่าอิมิตแดนซ์เป็น

$$Z_{eq} = sL_{eq} = s \frac{g_{m3}g_{m4}}{g_{m1}g_{m5}} R_1R_2C_3 \quad (4)$$

โดยที่ค่าความเหนี่ยวนำสมมูลมีค่าเป็น

$$L_{eq} = \frac{g_{m3}g_{m4}}{g_{m1}g_{m5}} R_1R_2C_3 \quad (5)$$

2) ถ้าเลือก $Z_1 = 1/sC_1, Z_2 = R_2$ และ $Z_3 = R_3$ แล้วการจำลองตัวเก็บประจุแบบลอยตัวจะมีค่าอิมิตแดนซ์เป็น

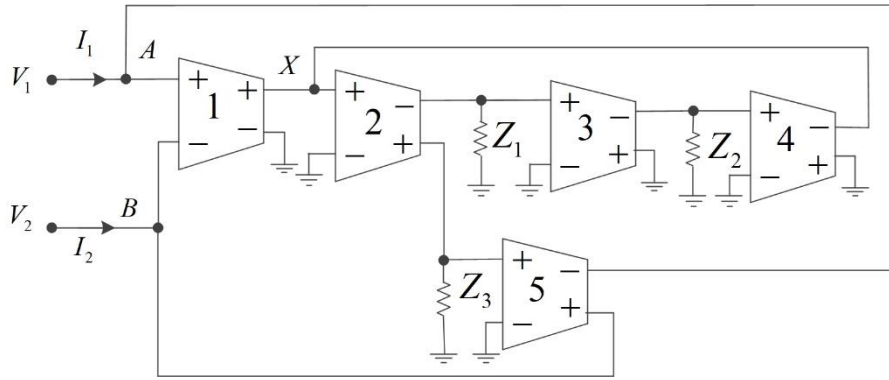
$$Z_{eq} = \frac{1}{sC_{eq}} = \frac{1}{s} \frac{g_{m3}g_{m4}}{g_{m1}g_{m5}} \frac{R_2}{C_1R_3} \quad (6)$$

โดยที่ค่าความจุไฟฟ้านำสมมูลมีค่าเป็น

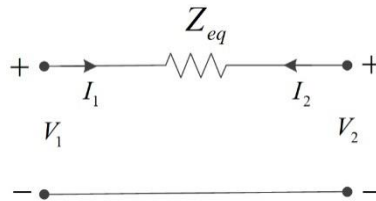
$$C_{eq} = \frac{g_{m1}g_{m5}}{g_{m3}g_{m4}} \frac{C_1R_3}{R_2} \quad (7)$$

3) ถ้าเลือก $Z_1 = R_1, Z_2 = R_2$ และ $Z_3 = R_3$ แล้วการจำลองตัวต้านทานแบบลอยตัวจะมีค่าอิมิตแดนซ์เป็น

$$Z_{eq} = R_{eq} = \frac{g_{m3}g_{m4}}{g_{m1}g_{m5}} \frac{R_1R_2}{R_3} \quad (8)$$



(ก) แผนผังวงจร



(ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 2 วงจรจำลองอิมิตแดนซ์ที่นำเสนอ

โดยที่ค่าความต้านทานสมมูลมีค่าเป็น

$$R_{eq} = \frac{g_{m3}g_{m4}}{g_{m1}g_{m5}} \frac{R_1R_2}{R_3} \quad (9)$$

4) ถ้าเลือก $Z_1 = 1/sC_1, Z_2 = 1/sC_2$ และ $Z_3 = R_3$ แล้วการจำลองตัว FDNR แบบลอยตัวจะมีค่าอิมพีแดนซ์เป็น

$$Z_{eq} = \frac{1}{s^2 D_{eq}} = \frac{1}{s^2} \frac{g_{m3}g_{m4}}{g_{m1}g_{m5}} \frac{1}{C_1C_2R_3} \quad (10)$$

โดยที่

$$D_{eq} = \frac{g_{m1}g_{m5}}{g_{m3}g_{m4}} C_1C_2R_3 \quad (11)$$

ซึ่งจากสมการ (4) ถึง (11) จะเห็นว่า พารามิเตอร์ของวงจรจำลองอิมิตแดนซ์ที่นำเสนอสมาารถปรับค่าได้

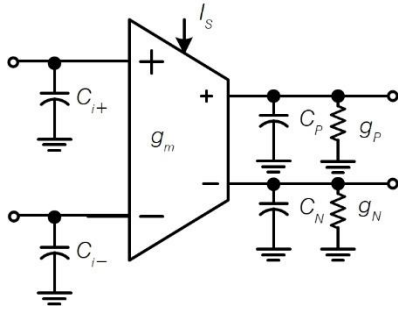
ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการปรับค่าทรานสดคอนดักแตนซ์ของตัวทรานสดคอนดักเตอร์ด้วยกระแสไบอัสนั่นเอง

3. ผลของอุปกรณ์แฝงในตัวทรานสดคอนดักเตอร์

ในหัวข้อนี้ จะพิจารณากรณีตัวทรานสดคอนดักเตอร์มีคุณสมบัติไม่เป็นอุดมคติเกี่ยวกับอุปกรณ์แฝง (parasitic elements) ซึ่งจะมีผลกระทบต่อการทำงานของวงจรที่นำเสนอ โดยตัวทรานสดคอนดักเตอร์ที่มีอุปกรณ์แฝงร่วมด้วยได้แสดงในดังรูปที่ 3 โดยจะมีอุปกรณ์ตัวเก็บประจุแฝง C_{i+}, C_{i-}, C_p และ C_N และตัวความนำแฝง g_p และ g_N

สำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบของอุปกรณ์แฝงของตัวทรานสดคอนดักเตอร์ต่อวงจรที่นำเสนอในรูปที่ 2 ได้แสดงในรูปของกระแส I_1 และ I_2 เป็น

$$I_1 = y_{1+}V_1 + \frac{g_{m5}}{g_{m3}g_{m4}} \frac{y_1V_2}{y_3} \{g_{m1}(V_1 - V_2) - y_xV_x\} \quad (12)$$



รูปที่ 3 ตัวทรานซิสคอนดักเตอร์ที่มีอุปกรณ์แฝง

$$I_2 = y_{1-}V_2 - \frac{g_{m5}}{g_{m3}g_{m4}} \frac{y_1 y_2}{y_3} \{g_{m1}(V_1 - V_2) - y_x V_x\} \quad (13)$$

โดยที่

$$y_{1+} = sC_{+1} + g_{N5}, y_{1-} = sC_{-1} + g_{P5} \quad (14)$$

$$y_x = g_{P1} + g_{N4} + sC_{+2} \quad (15)$$

$$y_1 = g_{N2} + sC_{+3} + y_{Z1} \quad (16)$$

$$y_2 = g_{N3} + sC_{+4} + y_{Z2} \quad (17)$$

$$y_3 = g_{P2} + sC_{+5} + y_{Z3} \quad (18)$$

จากสมการ (12) ถึง (18) หากต้องการลดผลกระทบของอุปกรณ์แฝงนั้น จะเห็นว่า เทอม y_{1+} , y_{1-} , y_x จะมีผลกระทบที่ความถี่สูงมากๆ เนื่องจากอุปกรณ์แฝงมีค่าน้อยมาก ควรเลือกความถี่ใช้งานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่สูงดังกล่าว ส่วนเทอม y_1 , y_2 , y_3 ควรเลือกอุปกรณ์พาสซีฟที่มีค่ามากกว่าอุปกรณ์แฝงมากๆ

4. ผลการจำลองการทำงาน

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงการทดสอบการทำงานของวงจรถ่ายโอนอิมิตแดนซ์ที่นำเสนอ โดยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม SPICE ซึ่งทรานซิสเตอร์ของตัวทรานซิสคอนดักเตอร์ในรูปที่ 1 (ก) ได้เลือกใช้เทคโนโลยีซีมอส TSMC 0.18 μm และใช้แรงดันไฟเลี้ยง $\pm 0.75\text{V}$ [13] โดยทรานซิสเตอร์ทุกตัวเลือกใช้ L

= 0.54 μm และเลือก $W = 9 \mu\text{m}$ สำหรับทรานซิสเตอร์แบบพีมอส (PMOS) และเลือก $W = 3.6 \mu\text{m}$ สำหรับทรานซิสเตอร์แบบเอ็นมอส (NMOS) ส่วนวงจรถ่ายโอนอิมิตแดนซ์ในรูปที่ 2 (ก) ได้กำหนดค่าต่างๆ เพื่อจำลองเป็นตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน และตัว FDNR ดังนี้

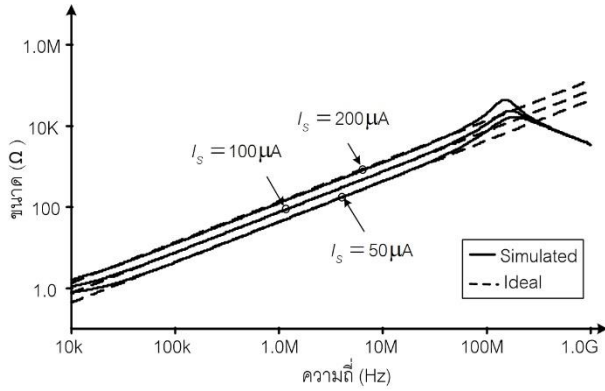
ตัวเหนี่ยวนำ กำหนดให้ Z_1 และ Z_2 เป็นตัวต้านทาน = 1 $\text{k}\Omega$ Z_3 เป็นตัวเก็บประจุ = 10 pF กระแสไบอัส $I_{S1} = I_{S2} = I_{S5} = 100 \mu\text{A}$ $I_{S3} = I_{S4} = I_S$ มีค่าเป็น 50 μA , 100 μA และ 200 μA

ตัวเก็บประจุ กำหนดให้ Z_2 และ Z_3 เป็นตัวต้านทาน = 1 $\text{k}\Omega$ Z_1 เป็นตัวเก็บประจุ = 10 pF กระแสไบอัส $I_{S1} = I_{S2} = I_{S5} = 100 \mu\text{A}$ $I_{S3} = I_{S4} = I_S$ มีค่าเป็น 50 μA , 100 μA และ 200 μA

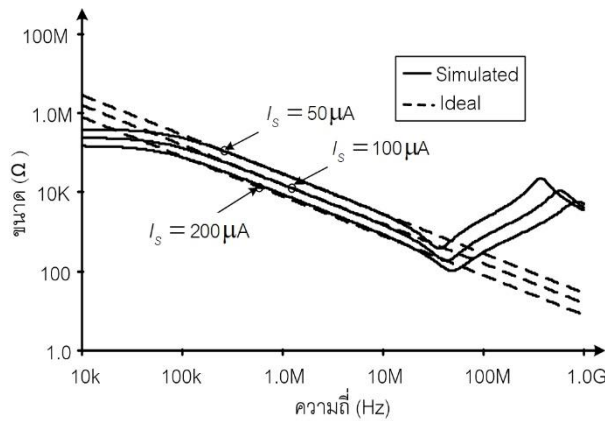
ตัวต้านทาน กำหนดให้ Z_1 , Z_2 และ Z_3 เป็นตัวต้านทาน = 2 $\text{k}\Omega$, 1 $\text{k}\Omega$ และ 100 Ω ตามลำดับ กระแสไบอัส $I_{S1} = I_{S2} = I_{S5} = 100 \mu\text{A}$ $I_{S3} = I_{S4} = I_S$ มีค่าเป็น 50 μA , 100 μA และ 200 μA

และ ตัว FDNR ได้กำหนดให้ กำหนดให้ Z_3 เป็นตัวต้านทาน = 1 $\text{k}\Omega$ ให้ Z_1 และ Z_2 เป็นตัวเก็บประจุ = 10 pF และกำหนดกระแสไบอัสเป็นดังนี้ $I_{S1} = I_{S2} = I_{S5} = 100 \mu\text{A}$ $I_{S3} = I_{S4} = I_S$ มีค่า 50 μA , 100 μA และ 200 μA

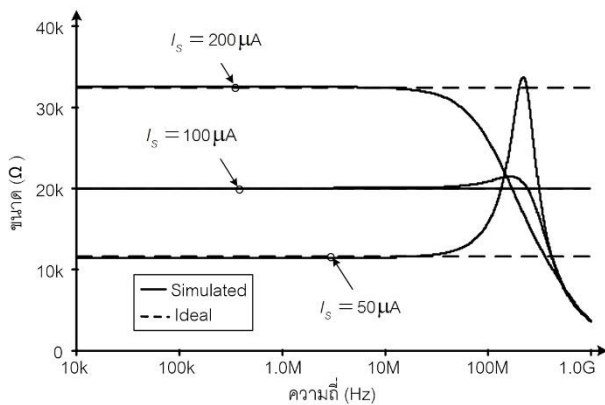
รูปที่ 4 ถึง รูปที่ 7 แสดงค่าขนาดของอิมพีแดนซ์จากการจำลองตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน และตัว FDNR เทียบกับค่าตามหลักการที่นำเสนอ ซึ่งจะเห็นว่า ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการจำลองมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่สอดคล้องตามหลักการ



รูปที่ 4 ผลตอบสนองของความถี่ของตัวเหนี่ยวนำ



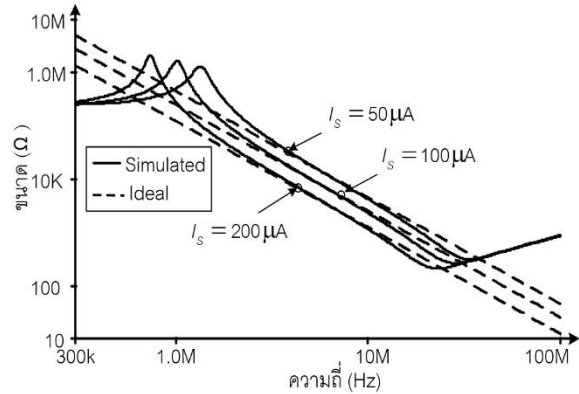
รูปที่ 5 ผลตอบสนองของความถี่ของตัวเก็บประจุ



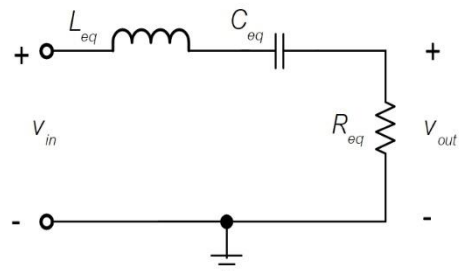
รูปที่ 6 ผลตอบสนองของความถี่ของตัวต้านทาน

เพื่อแสดงให้เห็นว่าวงจรจำลองอิมิตแดนซ์แบบลอยตัวที่นำเสนอ นั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ จึงได้นำวงจรมาประกอบเป็นวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม ดังรูปที่ 8 โดยใช้ $L_{eq} = 0.1 \text{ mH}$, $C_{eq} = 18 \text{ pF}$ and $R_{eq} = 1 \text{ k}\Omega$ ผลตอบสนองของความถี่ของวงจร

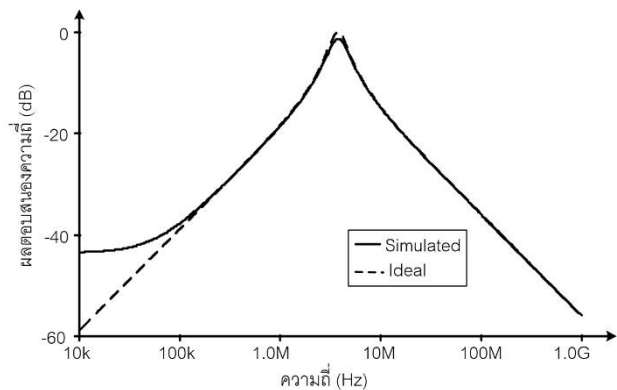
รีโซแนนซ์แสดงได้ดังรูปที่ 9 ซึ่งเห็นได้ว่า วงจรมีความถี่รีโซแนนซ์ตรงกับค่าจากการคำนวณ



รูปที่ 7 ผลตอบสนองของความถี่ของตัว FDNR



รูปที่ 8 วงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม



รูปที่ 9 ผลตอบสนองของความถี่ของวงจรรีโซแนนซ์

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวงจรจำลองอิมิตแดนซ์แบบลอยตัวที่ประกอบด้วยตัวทรานส์คอนดักเตอร์ 5 ตัวและอุปกรณ์พาสซีฟแบบลงกราวด์อีก 3

ตัว โดยรูปแบบของวงจรจำลองอิมิตแตนซ์ที่นำเสนอ จะขึ้นอยู่กับทางเลือกอุปกรณ์แบบพาสซีฟ ซึ่งสามารถ จำลองได้ 4 รูปแบบ คือ ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ ตัว ต้านทานและตัว FDNR โดยวงจรนี้มีคุณสมบัติที่ น่าสนใจ คือ มีโครงสร้างเรียบง่าย เหมาะสมในการ ประยุกต์ใช้ในรูปแบบวงจรรวม พารามิเตอร์ของวงจร ยังปรับค่าได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ใช้ ไฟเลี้ยงวงจรต่ำและมีความถี่ใช้งานสูงถึง 30 MHz การทดสอบการทำงานของวงจรที่นำเสนอและการ ประยุกต์ใช้งานกับตัวกรองด้วยโปรแกรม SPICE ให้ผลสอดคล้องกับหลักการที่นำเสนอด้วยดี นอกจากนี้หากแทนตัวต้านทานแบบพาสซีฟด้วยตัว ต้านทานแบบแอคทีฟ จะทำให้วงจรที่นำเสนอเหมาะที่ จะนำไปพัฒนาในรูปแบบวงจรรวมมากยิ่งขึ้นด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] Alpaslan H., "A modified VDVT and its applications to floating simulators and a quadrature oscillator," *Microelectronics Journal*, vol.51, pp. 1-14, 2016.

[2] Srivastava M., Gupta P., Prasad D., Roy A. and Verma M. K., "New Electronically Tunable Floating FDNR Configuration employing Grounded Capacitances," in *2018 5th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, Noida, India, pp. 754-759, 2018, <https://doi.org/10.1109/SPIN.2018.8474065>.

[3] Al-Absi M. A. and Abuelma'atti M. T., "A Tunable Floating Impedance Multiplier,"

Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 44 pp. 7085-7089, 2019, <https://doi.org/10.1007/s13369-019-03792-z>.

[4] Likhitkitwoerakul N., Roongmuanpha N. and Tangsrirat W., "Floating general immittance function simulator," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 132, pp.1-10, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2021.153640>.

[5] Kumar N., Kumar M. and Pandey N., "Unified floating immittance emulator based on CCTA," *Microelectronics Journal*, vol. 118, pp. 1-11, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2021.105289>.

[6] Ferri G., Sssafari L., Barile G., Scarsella M. and Stornelli V., "New Resistor-Less Electronically Controllable $\pm C$ Simulator Employing VCII, DVCC, and a Grounded Capacitor," *Electronics*, vol. 11, 2022, <https://doi.org/10.3390/electronics11020286>.

[7] Sssafari L., Barile G., Colaiuda D., Stornelli V. and Ferri G., "Realization of an Electronically Tunable Resistor-Less Floating Inductance Simulator Using VCII," *Electronics*, vol. 11, 2022, <https://doi.org/10.3390/electronics11030312>.

[8] Petrovic P. "New floating/grounded FDNC and non-ideal grounded FDNR simulators

- based on VDT,” *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 110, pp. 259-277, 2022, <https://doi.org/10.1007/s10470-021-01818-x>.
- [9] Pushpam S., Bhardwaj K. and Srivastava M., “New Electronically Tunable Immittance Simulator using CBTA and its Filtering Applications,” in 2022 6th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), Madurai, India, pp. 282-286, 2022, <https://doi.org/10.1109/ICICCS53718.2022.9788380>.
- [10] Lorsawatsiri A. and Silaruam V., “Simple Topology of Tunable Floating Immittance Function Simulators without External Resistor,” *Engineering Journal of Siam University*, Vol. 23, No.44, January-June 2022.
- [11] Yucehan T., “Two inverting CFOA-Based lossless floating immittance simulator,” *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 173, pp.1-18, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2023.154997>.
- [12] Arbel A. F. and Goldminz L. “Output stage for current-mode feedback amplifiers, theory and applications” *Analog Integrated Circuit and Signal Processing*, 1992, Vol.2, No. 3, pp. 243-255.
- [13] The MOSIS Service, USA. Wafer electrical test data and SPICE model parameter. 4 pages. [Online] Cited 2012-01-31. Available at: <http://www.mosis.org/test/>.