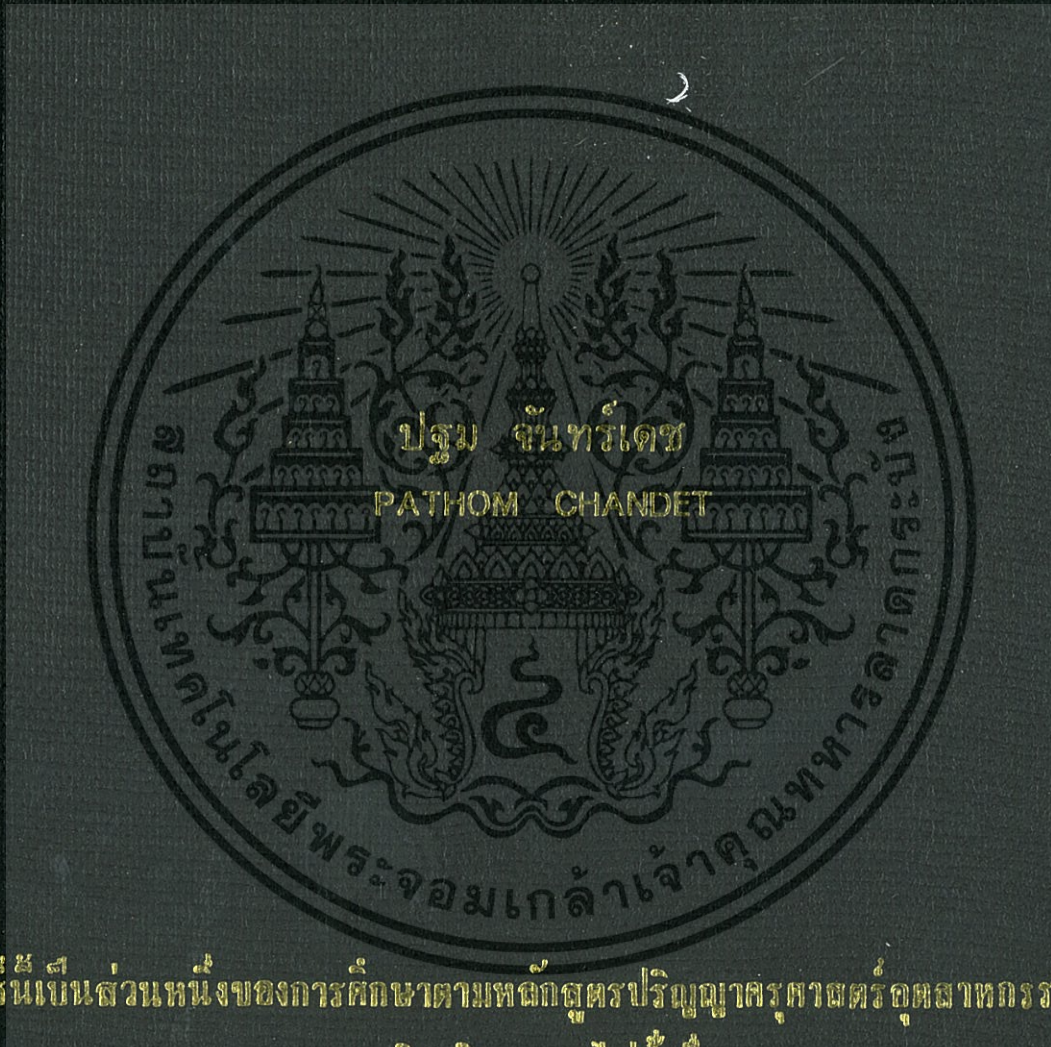


การสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ  
แบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA

SYNTHESIS AND DESIGN OF GROUNDED INDUCTANCE SIMULATOR  
CIRCUIT USING CURRENT CONTROLLED CURRENT FOLLOWER  
TRANSCONDUCTANCE AMPLIFIER (CCCFTA)



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาครุศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร

คณะครุศาสตรบัณฑิต

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-ED-M-231-047

การสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ  
แบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA

SYNTHESIS AND DESIGN OF GROUNDED INDUCTANCE SIMULATOR  
CIRCUIT USING CURRENT CONTROLLED CURRENT FOLLOWER  
TRANSCONDUCTANCE AMPLIFIER (CCCFTA)



12๗54134

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาครุศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร  
คณะครุศาสตรอุตสาหกรรม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของหน่วยงานนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2013-ED-M-231-047

SYNTHESIS AND DESIGN OF GROUNDED INDUCTANCE SIMULATOR  
CIRCUIT USING CURRENT CONTROLLED CURRENT FOLLOWER  
TRANSCONDUCTANCE AMPLIFIER (CCCFTA)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN INDUSTRIAL EDUCATION  
IN ELECTRICAL COMMUNICATIONS ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL EDUCATION  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
KMUTL-2013-ED- M-231-047  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013

FACULTY OF INDUSTRIAL EDUCATION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์  
โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA  
Synthesis and Design of Grounded Inductance Simulator Circuit  
Using Current Controlled Current Follower Transconductance  
Amplifier (CCCFTA)

นักศึกษา

ว่าที่ ร.ต.ปฐม จันทร์เดช

รหัสประจำตัว

51063518

ปริญญา

ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

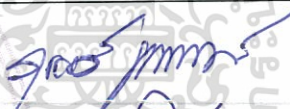




วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร.วินัย ใจกล้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รศ.พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ |                | ลายมือชื่อ   |
|--------------------------|----------------|--|
| รศ.ดร.วิสุทธิ            | สุนทรกนกพงศ์   |  |
| ดร.วินัย                 | ใจกล้า         |  |
| รศ.พีระวุฒิ              | สุวรรณจันทร์   |  |
| รศ.ปิยะ                  | ศุภวาราสุวัฒน์ |  |
| รศ.ดร.กัลยาณี            | จิตต์การุณย์   |  |

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ

11 พฤษภาคม 2556 เวลา 09.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ

ณ ห้องเรียนปริญญาเอก คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมรับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์)

คณบดี คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

วันที่ ๑๑ เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ  
แบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA

นักศึกษา

ว่าที่ ร.ต.ปฐม จันทรเดช

รหัสประจำตัว

51063518

ปริญญา

ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร

พ.ศ.

2556

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร.วินัย ใจกล้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รศ.พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ การสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ Current Controlled Current Follower Transconductance Amplifier (CCCFTA) ซึ่งวงจรประกอบไปด้วย CCCFTA จำนวน 1 ตัว และตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์ 1 ตัว โดยปราศจากตัวต้านทานภายนอก วงจรที่นำเสนอจึงเหมาะที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรที่นำเสนอสามารถปรับได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการปรับกระแสไบอัสของ CCCFTA ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE โดยใช้ พารามิเตอร์ของ CMOS เทคโนโลยี  $0.5 \mu\text{m}$  ของ MOSIS ที่แหล่งจ่ายแรงดัน  $\pm 2 \text{ V}$  พบว่า วงจรที่นำเสนอสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำได้ในช่วงความถี่  $10 \text{ kHz} - 3 \text{ MHz}$  มีการดึงกำลังงาน  $2.1 \text{ mW}$  ซึ่งสอดคล้องตามที่ได้คาดการณ์ไว้ตามทฤษฎี

|                   |   |
|-------------------|---|
| Thesis Title      | Synthesis and Design of Grounded Inductance Simulator<br>Circuit Using Current Controlled Current Follower<br>Transconductance Amplifier (CCCFTA) |
| Student           | Acting Sub Lt. Pathom Chandet   |
| Student ID        | 51063518  |
| Degree            | Master of Science in Industrial Education   |
| Program           | Electrical Communications Engineering   |
| Year              | 2013  |
| Thesis Advisor    | Dr. Winai Jaikla  |
| Thesis Co-Advisor | Assoc. Prof. Peerawut Suwanjan  |

### ABSTRACT

This thesis presents synthesis and design of grounded inductance simulator using current controlled current follower transconductance amplifier (CCCFTA). The circuit description is very simple consisting of merely one CCCFTA and one grounded capacitor without any external resistors. The proposed circuit is very suitable to further develop into an integrated circuit. The proposed inductance simulator can be turned electronically via the input bias current of CCCFTA. PSPICE simulation results using parameters of 0.5  $\mu\text{m}$  MOSIS CMOS technology process are given to confirm the theoretical analysis. The useful frequency range is about 10 kHz–3 MHz. The power consumption is about 2.1 mW at  $\pm 2$  power supply voltage.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเพราะได้รับความอนุเคราะห์จาก ดร.วินัย ใจกล้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และ รศ.ดร.วิสุทธิ์ สุนทรกนกพงศ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ตรวจสอบ แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆในขั้นตอนสุดท้ายจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ รศ.ปิยะ ศุภวาราสวัสดิ์ และอาจารย์ทุกท่านทั้งในอดีต และปัจจุบันที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ ตลอดจนแง่คิดต่างๆ อันก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการวิจัยในครั้งนี้จนประสบผลสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ผู้เป็นที่รัก ของผู้วิจัย ที่คอยเป็นกำลังใจ สนับสนุน และช่วยเหลือในทุกด้านมาโดยตลอด สุดท้ายขอขอบคุณ งานบริการ วิชาการ และบัณฑิตศึกษา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม ที่ให้ความช่วยเหลือ ในการอำนวยความสะดวกด้าน การติดต่อสอบถามสำหรับการจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ขอขอบคุณเพื่อนๆ จากสาขา วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร รุ่น 14 ทุกคน ที่เป็นเพื่อนคุย แลกเปลี่ยน ข้อคิดเห็น ตลอดจนคอยให้กำลังใจ และเป็นแรงผลักดันให้แก่ผู้วิจัย

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านด้วยความเคารพยิ่ง หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ปฐุม จันทรเดช

# สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | III  |
| สารบัญ.....  | IV   |
| สารบัญตาราง.....   | VI   |
| สารบัญรูป.....   | VII  |
| บทที่ 1 บทนำ.....  | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....  | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....   | 2    |
| 1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....   | 2    |
| 1.4 กรอบแนวความคิดของการวิจัย.....   | 2    |
| 1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....   | 3    |
| 1.6 คำนิยามศัพท์เฉพาะที่ใช้ในการวิจัย.....   | 3    |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....  | 5    |
| 2.1 หลักการพื้นฐานของตัวเหนี่ยวนำ.....   | 5    |
| 2.2 หลักการของวงจรขยายความนำตามกระแสที่ควบคุมได้ด้วยกระแส.....   | 10   |
| 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....   | 13   |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....  | 23   |
| 3.1 การสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ<br>แบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA กรณีอุดมคติ.....    | 24   |
| 3.2 การวิเคราะห์วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์<br>CCCFTA กรณีไม่เป็นอุดมคติ.....        | 29   |
| 3.3 การวิเคราะห์วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์<br>CCCFTA กรณีการทำงานที่ความถี่สูง..... | 30   |
| บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....  | 35   |
| 4.1 ผลการทดสอบสมรรถนะวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้<br>อุปกรณ์ CCCFTA.....                     | 35   |
| 4.2 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน.....   | 39   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ..... | 42   |
| 5.1 สรุปผลงานวิจัย.....                     | 42   |
| 5.2 อภิปรายผลงานวิจัย.....                  | 42   |
| 5.3 ข้อเสนอแนะงานวิจัย.....                 | 43   |
| บรรณานุกรม.....                             | 45   |
| ประวัติผู้เขียน.....                        | 47   |



# สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ความสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสของโครงสร้างวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำ..... | 10   |
| 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวงจรที่นำเสนอ.....                              | 35   |
| 4.2 ขนาด W/L ของทรานซิสเตอร์ CMOS.....                                    | 36   |
| 5.1 การเปรียบเทียบงานวิจัยที่นำเสนอกับงานวิจัยที่มีการนำเสนอไว้.....      | 43   |



# สารบัญรูป

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 1.1 แนวคิดในการสังเคราะห์วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ.....   | 2    |
| 2.1 สัญลักษณ์ของตัวเหนี่ยวนำ.....  | 5    |
| 2.2 วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำในทางปฏิบัติ.....  | 6    |
| 2.3 หลักการเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ.....   | 6    |
| 2.4 โครงสร้างโดยทั่วไปของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ.....   | 8    |
| 2.5 สัญลักษณ์ของ CFTA ในทางอุดมคติ.....  | 11   |
| 2.6 วงจรสมมูลของ CFTA ในทางอุดมคติ.....  | 11   |
| 2.7 สัญลักษณ์ของ CCCFTA.....   | 12   |
| 2.8 วงจรสมมูลของ CCCFTA.....   | 12   |
| 2.9 โครงสร้างภายในของ CCCFTA.....  | 13   |
| 2.10 โครงสร้างของวงจรตัวจำลองค่าความเหนี่ยวนำแบบลอยตัวโดยใช้ OTA.....  | 14   |
| 2.11 โครงสร้างของวงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอยด้านบวก/ลบ โดยใช้ OTA.....   | 15   |
| 2.12 โครงสร้างของวงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอยชนิดบวกและลบที่ใช้อุปกรณ์แอกทิฟเพียงอย่างเดียวสามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์..... | 16   |
| 2.13 โครงสร้างของวงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอยและต่อลงกราวด์โดยใช้ CDTA.....   | 17   |
| 2.14 โครงสร้างของวงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอยด้านบวก/ลบโดยใช้ OTA และ CCCII.....  | 17   |
| 2.15 โครงสร้างของวงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอย/ต่อลงกราวด์โดยใช้ DDCC.....   | 18   |
| 2.16 โครงสร้างของวงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ด้านบวกโดยใช้ CFTA และการประยุกต์ใช้งาน.....   | 19   |
| 2.17 โครงสร้างของวงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอยโดยใช้ ZC-CFTA.....  | 20   |
| 2.18 โครงสร้างของวงจรตัวจำลองค่าความเหนี่ยวนำแบบลอยตัวโดยใช้ OTA.....  | 21   |
| 2.19 วงจรจำลองค่าความเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้ PFTFN.....  | 22   |
| 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....  | 23   |
| 3.2 โครงสร้างการสังเคราะห์วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ.....  | 24   |
| 3.3 วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA.....  | 26   |
| 3.4 วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA กรณีการทำงานที่ความถี่สูง.....  | 31   |
| 3.5 วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA กรณีการทำงานที่ความถี่สูง ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....                       | 32   |
| 4.1 โครงสร้างวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA.....   | 35   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.2 ค่าอิมพีแดนซ์และเฟสกับความถี่ของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA.....      | 36   |
| 4.3 ค่าสัมบูรณ์อิมพีแดนซ์กับความถี่ของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์เมื่อเปลี่ยนแปลง $I_o$ ..... | 37   |
| 4.4 การเปรียบเทียบมุมเฟสของแรงดันกับมุมเฟสของกระแส.....  | 38   |
| 4.5 การแทนค่าจากสมการเปรียบเทียบกับกรอการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE โดยปรับค่า $I_o$ .....          | 38   |
| 4.6 วงจรวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน.....  | 39   |
| 4.7 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน.....  | 40   |
| 4.8 ผลการประยุกต์ใช้งานวงจรที่นำเสนอ ในวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านโดยปรับค่ากระแสไบอัส $I_o$ .....  | 40   |
| 4.9 ผลการประยุกต์ใช้งานวงจรที่นำเสนอ ในวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านโดยปรับค่ากระแสไบอัส $I_B$ .....  | 41   |



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบอุปกรณ์เป็นหัวข้อวิจัยที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัย เนื่องจากวงจรเลียนแบบอุปกรณ์สามารถใช้แทนอุปกรณ์พาสซีฟจำพวกตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ หรือตัวเหนี่ยวนำเพื่อนำมาใช้ในการออกแบบวงจรถ้าเกิดสัญญาณ วงจรกรองความถี่ วงจรกำจัดค่าอุปกรณ์แฝง เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการออกแบบวงจรรวมนั้นไม่นิยมใช้ตัวเหนี่ยวนำที่เป็นขดลวดเนื่องจากมีข้อเสีย เช่น มีน้ำหนักมาก ขนาดใหญ่ ไม่สามารถที่จะปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ง่าย เป็นต้น แม้ว่าการสร้างตัวเหนี่ยวนำแบบก้นหอย (spiral inductor) ให้เป็นวงจรรวมเพื่อใช้งานในด้านความถี่สูงได้แต่ชิปจะมีขนาดใหญ่มาก และไม่สามารถที่จะปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ง่ายจึงไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งาน (วิภพ ใจแข็ง และคณะ 2554 : 2)

เมื่อเร็วๆ นี้ได้มีผู้นำเสนออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งสามารถทำงานได้ในโหมดกระแสที่มีชื่อว่า วงจรสายพานกระแสส่งผ่านความนำ (Current Follower Transconductance Amplifier : CFTA) เป็นบล็อกวงจรแอคทีฟชนิดหนึ่ง (active circuit building block) ที่มีความน่าสนใจสำหรับการออกแบบและสังเคราะห์วงจรประมวลผลสัญญาณต่างๆ เป็นอย่างมาก เพราะมีคุณสมบัติเด่น คือสามารถแปรค่าอัตรากระแสส่งผ่านกระแสของวงจรได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยการแปรค่ากระแสไบอัสจากภายนอก (จามรี ศิริรัตน์. 2555: 25-26) ต่อมาจึงมีผู้นำเสนอวงจรขยายความ นำตามกระแสที่ควบคุมได้ด้วยกระแส (Current Controlled Current Follower Transconductance Amplifier : CCCFTA) ที่สามารถควบคุมความต้านทานแฝงที่อินพุตด้วยกระแสไบอัส เนื่องจากวงจร CCCFTA เป็นวงจรที่พัฒนามาจาก CFTA ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติของวงจรที่คล้ายคลึงกัน จุดเด่นของอุปกรณ์ตัวนี้ คือ ค่าความต้านทานด้านเอาต์พุตสูง และค่าความต้านทานอินพุตสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งยังสามารถควบคุมกระแสทางด้านเอาต์พุตได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ (Herencsarc, et. al. 2010 : 1-4) ดังนั้น CCCFTA จึงเป็นอุปกรณ์ตัวหนึ่งที่มีความเหมาะสมสำหรับการออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์

อย่างไรก็ตามในช่วงที่ผ่านมาได้มีการสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำไว้มากมายแต่วงจรเหล่านั้นยังมีข้อด้อยอยู่หลายประการ คือ ใช้อุปกรณ์แอคทีฟมากกว่า 1 ตัว (Petchmaneelumka. 2009a : 1018-1021; Petchmaneelumka. 2009b : 1439-1442; อติเรก จันตะคุณ และ มนตรี ศิริปรัชญานันท์. 2553 : 354-358; Prasad, et. al. 2010: 194-198; Kumngern. 2011: 5-8; Herencsar, et. al. 2010a : 24-27; Herencsar, et. al. 2012b : 1-4; ชิตพล คุ่มแก้ว. 2555: 26-27) ใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 1 ตัว (Muhammed, et. al. 2012 : 3-10; Herencsar, et. al. 2012 : 1-4) มีความซับซ้อนของวงจรอีกทั้งใช้ตัวเก็บประจุแบบลอย (Kumar and Senani 2010 : 105-112) ซึ่งทำให้นำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้ยากและบางวงจรไม่สามารถควบคุมความเหนี่ยวนำได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ (Muhammed, et. al. 2012 : 3-10)

จากเหตุผลที่ได้กล่าวมาข้างต้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้ CCCFTA วงจรที่นำเสนอประกอบไปด้วย CCCFTA จำนวน 1 ตัวและตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์ 1 ตัว ค่าความเหนี่ยวนำสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ จึงมีความเหมาะสมในการพัฒนาสู่วงจรรวม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

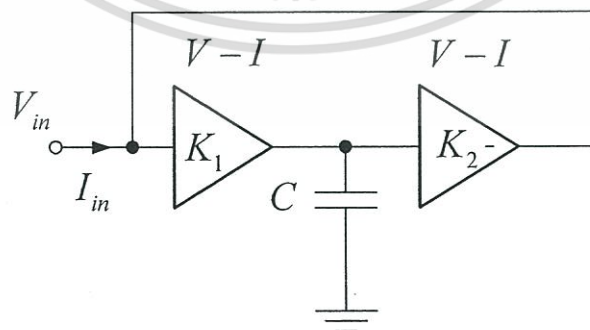
- 1.2.1 เพื่อสังเคราะห์และออกแบบวงจรวงจรถวลเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้ CCCFTA
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสมรรถนะวงจรถวลเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ โดยใช้ CCCFTA
- 1.2.3 เพื่อทดสอบสมรรถนะวงจรถวลเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ โดยใช้ CCCFTA ด้วยการจำลองผ่านโปรแกรม PSPICE

## 1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

วงจรถวลเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

## 1.4 กรอบแนวความคิดของการวิจัย

แนวความคิดในการสังเคราะห์และออกแบบวงจรถวลเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 1.1 โดยโครงสร้างของวงจรถวลประกอบไปด้วยตัวแปลงแรงดันเป็นกระแส (Voltage to Current Converter: V-I) 2 ตัว ซึ่งมีอัตราขยายของ V-I ตัวที่ 1 และ 2 เป็น  $K_1$  และ  $K_2$  ตามลำดับ โดยกำหนดให้  $K_2$  มีค่าเป็นลบและตัวเก็บประจุแบบลงกราวด์ 1 ตัว (สมคิด แซ่โจ้ว, 2546: 15-17)



รูปที่ 1.1 แนวคิดในการสังเคราะห์วงจรถวลเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหลักการของแนวความคิดการสร้างวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำดังรูปที่ 1.1 จะได้อินพุตอิมพีแดนซ์ดังสมการที่ (1.2) ซึ่งจะเป็นไปตามทฤษฎีอินพุตอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (1.1) แสดงว่าสามารถนำมาสร้างเป็นวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำได้

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = sL \quad (1.1)$$

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{sC}{K_1 K_2} \quad (1.2)$$

$$L_{eq} = \frac{C}{K_1 K_2} \quad (1.3)$$

จากสมการที่ 1.3 จะพบว่าค่าความเหนี่ยวนำสามารถปรับค่าได้จาก  $K_1$  และ  $K_2$  ซึ่งถ้า  $K_1$  และ  $K_2$  สามารถปรับได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ การปรับค่าความเหนี่ยวนำที่ออกแบบจึงควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วย

## 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 วงจรสามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำด้วยกระแสไบอัสในช่วง  $1 \mu\text{A}$ - $200 \mu\text{A}$
- 1.5.2 ใช้อุปกรณ์ CCCFTA และตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์อย่างละ 1 ตัว
- 1.5.3 วงจรสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่  $10 \text{ kHz}$ - $3 \text{ MHz}$
- 1.5.4 วงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำใช้ CCCFTA ที่มีโครงสร้างเป็น CMOS

## 1.6 คำนิยามศัพท์เฉพาะที่ใช้ในการวิจัย

1.6.1 วงจรขยายความนำตามกระแสที่ควบคุมได้ด้วยกระแส (CCCFTA) หมายถึง อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์แบบแอคทีฟชนิดหนึ่งที่มีหลายขั้ว หลักๆ จะแบ่งเป็นขั้วของจุดสัญญาณทางด้านขาเข้า และขั้วของจุดสัญญาณทางด้านขาออกสามารถทำงานได้ในโหมดกระแส และควบคุมได้ทางอิเล็กทรอนิกส์

1.6.2 เทคนิคโหมดกระแส (Current-Mode) หมายถึง เทคนิคการออกแบบวงจรถ่ายอิเล็กทรอนิกส์ที่มีอินพุตและเอาต์พุตเป็นกระแส

1.6.3 การควบคุมด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Control) หมายถึง การควบคุมขนาดของสัญญาณเอาต์พุตโดยใช้วิธีการปรับค่าของกระแสหรือแรงดันทางด้านอินพุต

1.6.4 การสังเคราะห์ (Synthesis) หมายถึง กระบวนการนำอุปกรณ์ CCCFTA มาต่อร่วมกับตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์ เพื่อให้วงจรสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำ

1.6.5 การออกแบบ (Design) หมายถึง การปรับค่าอุปกรณ์ในวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่ได้สังเคราะห์ไว้แล้ว เพื่อให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำตามต้องการ

1.6.6 สมรรถนะ (Performance) หมายถึง ความสามารถของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้ CCCFTA ร่วมกับตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์

1.6.7 โปรแกรม PSPICE หมายถึง โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปที่ใช้ทดสอบผลการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยเรื่อง การสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้ อุปกรณ์ CCCFTA ในครั้งนี้ ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้ CCCFTA จึงจำเป็นต้องศึกษาอุปกรณ์กลุ่มวงจรพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบ ผู้วิจัยได้ค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อศึกษาข้อมูลต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

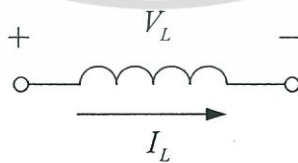
- 2.1 หลักการพื้นฐานของตัวเหนี่ยวนำ
- 2.2 หลักการของวงจรขยายความนำตามกระแสที่ควบคุมได้ด้วยกระแส
- 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 หลักการพื้นฐานของตัวเหนี่ยวนำ

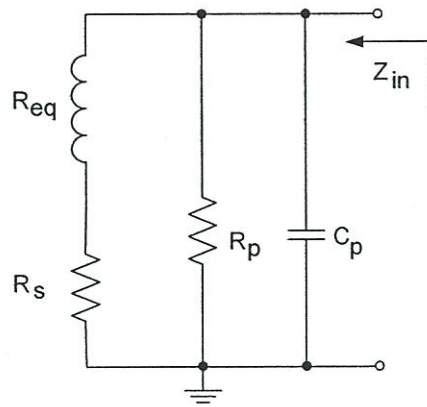
ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญในงานอิเล็กทรอนิกส์ โดยแสดงสัญลักษณ์ของตัวเหนี่ยวนำดังรูปที่ 2.1 และอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำในอุดมคติสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.1)

$$Z_L = sL \text{ เมื่อ } s = j\omega \quad (2.1)$$

โดยที่  $L$  คือค่าความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็นเฮนรี่ (Henrys) ใช้สัญลักษณ์  $H$  ในอุดมคติ อิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นกับความถี่ ( $\omega$ ) และมุมเฟสของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำจะนำหน้ามุมเฟสของกระแสอยู่ 90 องศา ตัวเหนี่ยวนำในวงจรรวม จะมีผลของความต้านทานและตัวเก็บประจุแบบแฝง ดังนั้นจะทำให้คุณลักษณะของตัวเหนี่ยวนำมีข้อจำกัดในเรื่องของค่าความเหนี่ยวนำ ตัวประกอบคุณภาพและการตอบสนองทางความถี่ ในทางปฏิบัติตัวเหนี่ยวนำในวงจรรวมถูกจำลองแทนเป็นวงจรสมมูลแบบพาสซีฟดังรูปที่ 2.2 โดยที่  $L_{eq}$  คือตัวเหนี่ยวนำในอุดมคติ  $R_s$  คือความต้านทานที่แอบแฝงแบบอนุกรม  $R_p$  ความต้านทานที่แอบแฝงในลักษณะขนานและตัวเก็บประจุแบบแฝงในลักษณะขนาน (สมคิด แซ่โจ้ว, 2546: 5-6)



รูปที่ 2.1 สัญลักษณ์ของตัวเหนี่ยวนำ

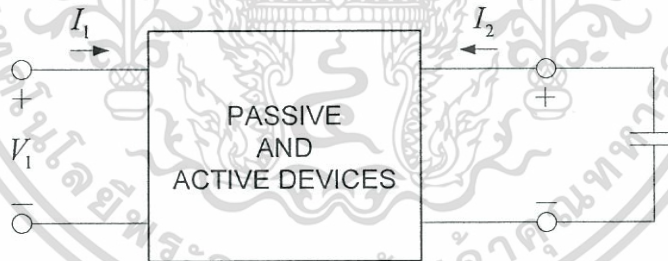


รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำในทางปฏิบัติ

ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของตัวเหนี่ยวนำในอุดมคติสามารถแสดงให้อยู่ ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์แบบเชิงเส้นอันดับ 1 ดังสมการที่ (2.2)

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad (2.2)$$

โดยที่  $V_L$  คือแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำและ  $I_L$  คือกระแสที่ไหลเข้าตัวเหนี่ยวนำวิธีการเขียนแบบตัวเหนี่ยวนำ ทำได้โดยใช้วงจรขั้ว 2 ขั้วซึ่งอาจจะประกอบด้วยอุปกรณ์แบบพาสซีฟหรือแอกทีฟ โดยที่ขั้วที่ 2 ถูกต่อกับตัวเก็บประจุและต้องการอินพุต อิมพีแดนซ์ที่ขั้ว 1 เป็นค่าความเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 หลักการเขียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสที่ขั้ว 1 และ 2 มีค่าดังสมการที่ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ

$$V_1 = L \frac{dI_1}{dt} \quad (2.3)$$

$$I_2 = -C \frac{dV_2}{dt} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากระบบสมการของวงจรข่าย 2 จะได้ค่า  $V_1$  และ  $V_2$  ดังสมการที่ (2.5) และ (2.6) ตามลำดับ

$$V_1 = R_{11}I_1 + R_{12}I_2 \quad (2.5)$$

$$V_2 = R_{21}I_1 + R_{22}I_2 \quad (2.6)$$

โดยที่  $R_{11}$  ความต้านทานอินพุตเมื่อเปิดวงจรเอาต์พุต  
 $R_{12}$  ความต้านทานส่งผ่านเมื่อเปิดวงจรอินพุต  
 $R_{21}$  ความต้านทานส่งผ่านเมื่อเปิดวงจรเอาต์พุต  
 $R_{22}$  ความต้านทานเอาต์พุตเมื่อเปิดวงจรอินพุต

นำสมการที่ (2.4) และผลจากการหาอนุพันธ์ของสมการที่ (2.6) แทนลงในสมการที่ (2.5) จะได้ตั้งสมการที่ (2.7)

$$V_1 = R_{11}I_1 - CR_{12}R_{21} \frac{dl_1}{dt} - CR_{12}R_{22} \frac{dl_2}{dt} \quad (2.7)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ (2.3) และ (2.7) เราพบว่าที่สมการที่ (2.7) จะต้องมีเงื่อนไขตั้งสมการที่ (2.8)

$$R_{11} = R_{22} = 0 \quad (2.8)$$

$$R_{12}R_{21} = -\frac{L}{C} \quad (2.9)$$

เราพบว่าถ้าต้องการอินพุตอิมพีแดนซ์เป็นค่าอินดักแตนซ์ที่เป็นบวกสมการที่ (2.9) จะต้องมีเงื่อนไขตั้งสมการที่ (2.10)

$$R_1 = -R_{12}, R_2 = R_{21} \quad (2.10)$$

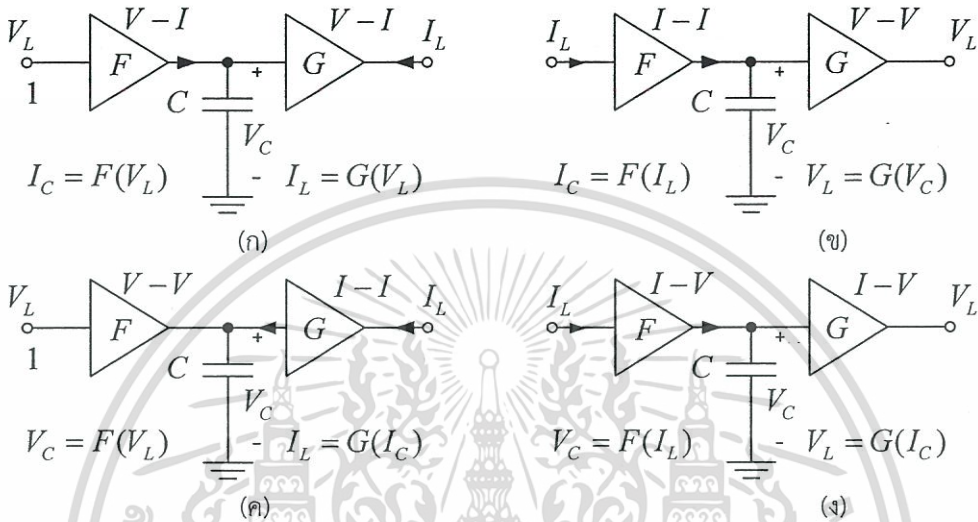
ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ  $CR_1R_2$  จากระบบสมการที่ (2.5) และเงื่อนไขในสมการที่ (2.10) ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้ตั้งสมการที่ (2.11) และ (2.12)

$$\frac{V_1}{-R_1} = I_2 = F(V_1) \quad (2.11)$$

$$\frac{V_2}{R_2} = I_1 = G(V_2) \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.11) แสดงให้เห็นว่าในการสร้างวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำนั้นจะต้องใช้อุปกรณ์ในการสร้างความสัมพันธ์ของแรงดันของขั้วที่ 1 ไปยังขั้วที่ 2 ในรูปของกระแสและใช้อุปกรณ์ในการสร้างความสัมพันธ์แรงดันที่ขั้ว 2 ไปยังขั้วที่ 1 ไปยังกระแส โดยที่ขั้วที่ 2 ถูกต่อกับตัวเก็บประจุ อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างขั้วที่ 1 ไปยังขั้วที่ 2 อาจอยู่ในรูปของกระแสกับกระแส และความสัมพันธ์ขั้วที่ 2 ไปยังขั้วที่ 1 อาจอยู่ในรูปแรงดันกับแรงดัน จากที่กล่าวทั้งหมดนี้เราสามารถสรุปความเป็นไปได้ของโครงสร้างการเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำดังในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโดยทั่วไปของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของการเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำในรูปที่ 2.4 (ก) โดยที่  $F$  และ  $G$  คือตัวผันแปรแรงดันเป็นกระแส ( $V-I$  Converter) ตัวอย่างเช่น กระแส  $I_C$  เป็นฟังก์ชันของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ  $V_L$  และกระแสเอาต์พุต  $I_L$  เป็นฟังก์ชันของแรงดันที่ตกคร่อม  $V_C$  ดังสมการที่ (2.13) และ (2.14) ตามลำดับ

$$I_C = F(V_L) \quad (2.13)$$

$$I_L = G(V_C) \quad (2.14)$$

หาอนุพันธ์ของสมการที่ (2.13) ทั้งสองข้างเทียบกับเวลาจะได้ดังสมการที่ (2.15)

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{dG(V_C)}{dt} \cdot \frac{dV_C}{dt} \quad (2.15)$$

แทนค่า  $\frac{dV_C}{dt} = \frac{I_C}{C}$  และ  $I_C$  จากสมการที่ (2.13) ลงในสมการที่ (2.15) จะได้สมการที่ (2.16)

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{dG(V_C)}{dV_C} \cdot \frac{F(V_L)}{C} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L}$  จะได้สมการที่ (2.7)

$$\frac{V_L}{L} = \frac{dG(V_C)}{dV_C} \cdot \frac{F(V_L)}{C} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.17) แสดงให้เห็นว่าเราสามารถสร้างวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ เมื่อกำหนดให้ฟังก์ชัน  $G$  มา ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำก็จะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของ  $F$  ในลักษณะคล้ายกัน ฟังก์ชัน  $F$  หรือ  $G$  ของโครงสร้างการเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำในรูปที่ 2.4 (ข), (ค) และ (ง) สามารถสร้างได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่สรุปไว้ในตารางที่ 2.1

จากโครงสร้างในรูปที่ 2.4 (ก) ในที่นี้สมมติให้  $G$  คือ ฟังก์ชันเชิงเส้น ดังนั้น  $I_L$  มีค่าสมการที่ (2.18)

$$I_L = G(V_L) \equiv G_{m2} V_C \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.17) ดังนั้นจะได้  $F$  เป็นฟังก์ชันของ  $V_L$  มีค่าสมการที่ (2.19)

$$I_C = F(V_L) = \left( \frac{C}{LG_{m2}} \right) V_L \quad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.19) ฟังก์ชัน  $F$  ที่ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_C$  กับ  $V_L$  อย่างเป็นเชิงเส้น ดังนั้น ฟังก์ชัน  $F$  เราสามารถสร้างโดยใช้ทรานคอนดักเตอร์

$$I_C = G_{m1} V_L \quad (2.20)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ (2.19) และ (2.20) ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำ  $L = C/G_{m1}G_{m2}$  จากโครงสร้างดังกล่าวเป็นการใช้ตัวผันแปรแรงดันเป็นกระแส 2 ตัวกับตัวเก็บประจุ ดังนั้นเราอาจเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า ไจเรเตอร์ - ซี

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสของโครงสร้างวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำ

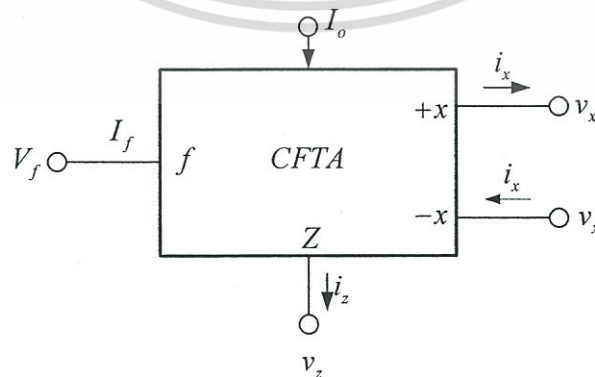
|                              | ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแส   |
|------------------------------|---|
| $I_c = F(V_L), I_L = F(V_c)$ | $\frac{dI_L}{dt} = \frac{dG(V_c)}{dt} \frac{dV_c}{dt} \quad \& \quad \frac{dV_c}{dt} = \frac{F(V_c)}{C}$  |
| $I_c = F(I_L), V_L = G(V_c)$ | $\frac{dI_L}{dt} = \frac{\frac{dI_c}{dt}}{\frac{dF(I_L)}{dI_L}} \quad \& \quad \frac{dI_c}{dt} = C \frac{d}{dt} \frac{\frac{dV_L}{dt}}{\frac{dG(V_c)}{dV_c}}$       |
| $V_c = F(V_L), I_L = G(I_c)$ | $\frac{dI_L}{dt} = \frac{dG(I_c)}{dI_c} \frac{dI_c}{dt} \quad \& \quad C \frac{d^2 V_c}{dt^2} = C \frac{d}{dt} \left( \frac{dF(V_L)}{dV_L} \frac{dV_L}{dt} \right)$ |
| $V_c = F(I_L), V_L = G(I_c)$ | $\frac{dI_L}{dt} = \frac{\frac{dV_c}{dt}}{\frac{dF(I_L)}{dI_L}} \quad \& \quad \frac{dI_c}{dt} = \frac{1}{C} I_c = \frac{G^{-1}(V_L)}{C}$                           |

## 2.2 หลักการของวงจรถ่ายความนำตามกระแสที่ควบคุมได้ด้วยกระแส

ในงานวิจัยนี้จะใช้ วงจรถ่ายความนำตามกระแสที่ควบคุมได้ด้วยกระแส (Current Controlled Current Follower Transconductance Amplifier : CCCFTA) เป็นอุปกรณ์หลัก โดยที่ CCCFTA ได้มีการพัฒนามาจาก วงจรสายพานกระแสส่งผ่านความนำ (Current Follower Transconductance Amplifier : CFTA) ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติในทางอุดมคติของอุปกรณ์ทั้งสองตัว

### 2.2.1 คุณสมบัติของวงจรถ่าย CFTA ในทางอุดมคติ

Tangsrirat (2010: 99-104) วงจร CFTA ในทางอุดมคติ สามารถเขียนสัญลักษณ์ได้ ดังรูปที่ 2.5 โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสของวงจรถ่าย CFTA อธิบายได้ดังสมการที่ 2.21

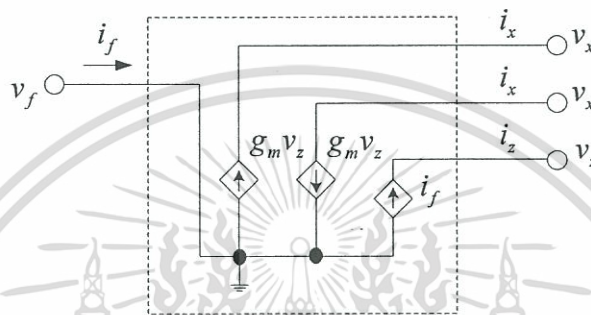


รูปที่ 2.5 สัญลักษณ์ของ CFTA ในทางอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_f = 0, i_z = i_f, i_x = g_m v_z = g_m Z_z i_z \quad (2.21)$$

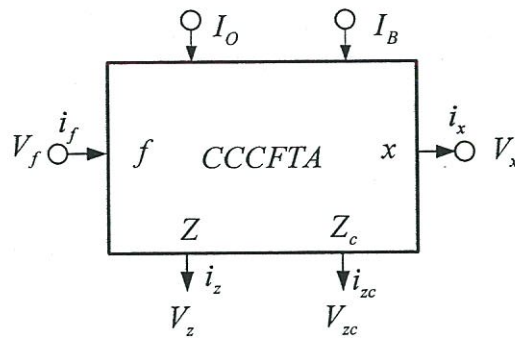
เมื่อ  $g_m$  คือ อัตราขยายค่าความนำ (transconductance gain) ของวงจร CFTA และ  $Z_z$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ค่า  $z$  จากสมการที่ (2.21) แสดงให้เห็นว่ากระแสอินพุต ( $i_f$ ) จะถูกส่งผ่านไปเป็นกระแสเอาต์พุตที่ขั้ว  $z$  ( $i_z$ ) และแรงดันที่ขั้ว  $z$  ( $v_z$ ) จะถูกเปลี่ยนแปลงเป็นกระแสที่ขั้ว  $x$  ( $i_x$ ) ด้วยอัตราขยายค่าความนำ ( $g_m$ ) ของวงจร ซึ่งทั่วไปสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ จากกระแสไบอัส  $I_o$  ดังนั้นจากคุณสมบัติในการทำงานข้างต้น จึงสามารถนำมาเขียนอธิบายเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.6



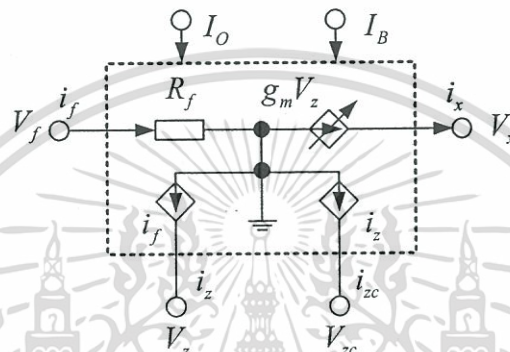
รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของ CFTA ในทางอุดมคติ

### 2.2.2 คุณสมบัติของวงจร CCCFTA ในทางอุดมคติ

คุณสมบัติของ CCCFTA ทางด้านอินพุตจะมีค่าความต้านทานแฉง ( $R_f$ ) อยู่ที่จุด  $f$  ซึ่งเป็นค่าความต้านทานขนาดเล็ก ในการใช้งานจะมีจุดเอาต์พุต  $z$  และจุดเชื่อมต่อสำรอง ( $z$ -copy :  $z_c$ ) ซึ่งมีการเชื่อมต่อกันระหว่างจุด  $z$  กับจุด  $z_c$  และมีกระแสสะท้อนภายใน ซึ่งไหลออกจากจุด  $z$  ไปยังจุด  $z_c$  ส่วนค่าแรงดัน  $V_x$  ที่จุด  $x$  จะมีค่าอัตราขยายค่าความนำ ( $g_m$ ) ซึ่งจะมีกระแส  $I_x$  ไหลไปยังจุดเอาต์พุต  $x$  ซึ่งปรับได้โดยการป้อนกระแส  $I_B$  และ  $I_o$  นั่นคือการทำงานที่สามารถควบคุมกระแสทางด้านเอาต์พุตได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ และในวงจร CCCFTA ทั่วไปสามารถใช้งานขั้วเอาต์พุต  $x$  ได้หลายขั้ว โดยให้กระแส  $I_x$  ได้หลายขั้วและค่าของกระแส  $I_x$  มีค่าเท่ากับกับกระแส  $I_z$  อีกด้วย จากที่กล่าวมาข้างต้นจุดเด่นของ CCCFTA คือ ค่าความต้านทานด้านเอาต์พุตสูง และค่าความต้านทานอินพุตสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งยังสามารถควบคุมกระแสทางด้านเอาต์พุตได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ (Herencsarc, et. al. 2010 : 1-4) ซึ่งมีสัญลักษณ์ของ CCCFTA ดังรูปที่ 2.7 และวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.8 ตามลำดับ ซึ่งคุณสมบัติของ CCCFTA ในทางอุดมคติ นำเสนอคุณสมบัติของวงจรสามารถเขียนเป็นสมการเมตริกซ์ได้ ดังสมการที่ (2.22) จากสมการคุณสมบัติของ CCCFTA จะได้โครงสร้างภายในโดยใช้ CMOS ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.7 สัญลักษณ์ของ CCCFTA



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลของ CCCFTA

$$\begin{bmatrix} V_f \\ I_{z, zc} \\ I_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pm g_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_f \\ V_x \\ V_z \end{bmatrix} \tag{2.22}$$

จากสมการคุณสมบัติของ CCCFTA โดยสามารถปรับค่า  $R_f, g_m$  จากการไบอัส ที่ชี้  $I_o, I_B$  ดังสมการที่ (2.23) และ (2.24) ตามลำดับ

$$R_f = \frac{1}{\sqrt{8k_{Rf}I_o}} \tag{2.23}$$

และ

$$g_m = \sqrt{k_{gm}I_B} \tag{2.24}$$

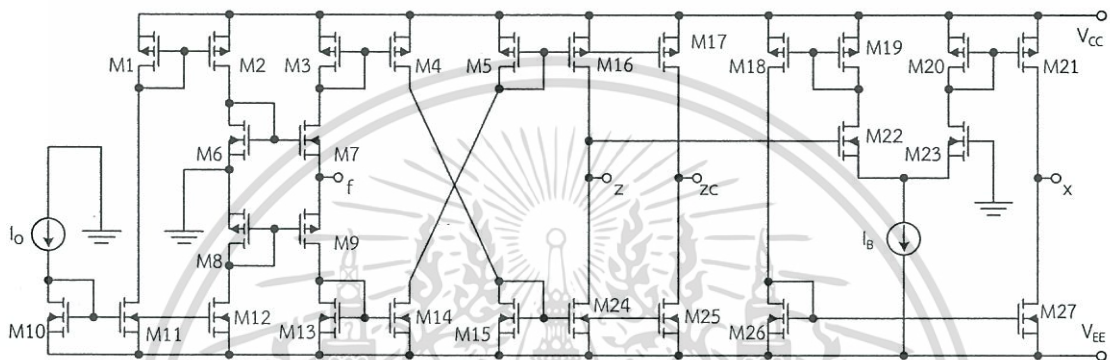
โดยค่าของ  $k_{Rf}$  คือค่า  $W/L$  ของ CMOS ตัวที่ 6, 7, 8 และ 9 ดังสมการที่ (2.25) และค่า  $k_{gm}$  คือค่า  $W/L$  ของ CMOS ตัวที่ 22 และ 23 ดังสมการที่ (2.26) พิจารณาจากโครงสร้างภายในของ CCCFTA ดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_{Rf} = \mu_n C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right)_{(6,7)} = \mu_n C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right)_{(8,9)} \quad (2.25)$$

$$k_{gm} = \mu_n C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right)_{(22,23)} \quad (2.26)$$

โดยที่  $\mu_n$  คือความคล่องตัวของอิเล็กตรอน  $C_{ox}$  คือค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของเกตและออกไซด์ ส่วน  $W$  และ  $L$  คือค่าความกว้างและความยาวแขนแนลของมอสทรานซิสเตอร์



รูปที่ 2.9 โครงสร้างภายในของ CCCFTA

### 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

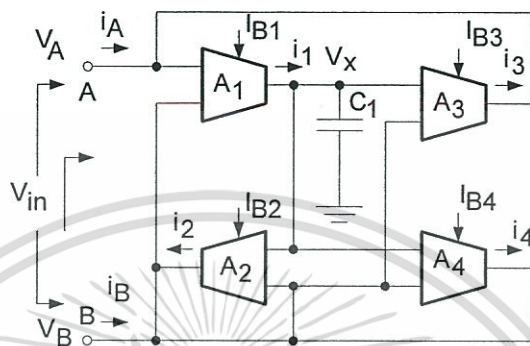
จากที่ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเบื้องต้นไปแล้ว ผู้วิจัยก็ขอนำเสนองานวิจัยของท่านอื่นในส่วนที่เกี่ยวข้องกับวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ ที่ได้มีผู้นำเสนอมาพอสังเขปดังนี้

#### 2.3.1 วงจรจำลองค่าความเหนี่ยวนำแบบลอยตัวโดยใช้ OTA

Petchmaneelumka (2009a : 1018-1021) ได้นำเสนอวงจรตัวจำลองค่าความเหนี่ยวนำแบบลอยตัวโดยใช้ OTA แสดงได้ดังรูปที่ 2.10 มีโครงสร้างเป็นไปโพลาร์ทรานซิสเตอร์ โดยถ้ากำหนดให้ OTA ทำงานในช่วงที่เป็นเชิงเส้น ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ (2.27) โดยที่  $I_{B1}$ ,  $I_{B2}$ ,  $I_{B3}$  และ  $I_{B4}$  เป็นกระแสไบอัสของ OTA ตัวที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ โดยกำหนดให้  $I_{B4} = I_{B2} + I_{B3}$  ซึ่งค่า  $G = I_{B3}/I_{B2}$  เมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 2.10 จะได้เป็นสมการเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.28)

$$Z_{in} = \frac{V_A - V_B}{i_A} = \frac{C_1 s}{G g_{m1} g_{m2}} = \frac{4V_T^2 C_1 s}{G I_{B1} I_{B2}} \quad (2.27)$$

$$L_{eqn} = \frac{4V_T^2 C_1}{G I_{B1} I_{B2}} \quad (2.28)$$



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของวงจรตัวจำลองค่าความเหนี่ยวนำแบบลอยตัวโดยใช้ OTA

จากสมการที่ (2.28) วงจรทำหน้าที่เป็นวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำได้ ซึ่งสามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยปรับค่า  $G$  และ  $I_{B1}$  ในวงจรใช้ตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์เพื่อสะดวกต่อการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม และในส่วนของวงจรมักใช้อุปกรณ์ OTA มากกว่า 1 ตัวซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน

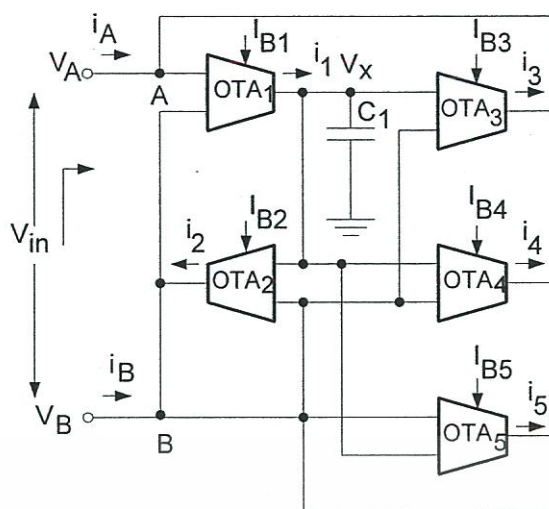
### 2.3.2 วงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอยด้านบวก/ลบ โดยใช้ OTA

Petchmaneelumka (2009b : 1439-1442) ได้นำเสนอวงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอยด้านบวก/ลบ โดยใช้ OTA แสดงได้ดังรูปที่ 2.11 มีโครงสร้างเป็นไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ โดยถ้ากำหนดให้ OTA ทำงานในช่วงที่เป็นเชิงเส้น ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ (2.29) โดยที่  $I_{B1}$ ,  $I_{B2}$ ,  $I_{B3}$ ,  $I_{B4}$ , และ  $I_{B5}$  เป็นกระแสไบอัสของ OTA ตัวที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ โดยที่  $K = I_{B4}/I_{B2} = I_{B5}/I_{B2}$  และค่าของ  $I_{B2} = I_{B3}$ ,  $I_{B4} = I_{B5}$  เมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 2.11 จะได้เป็นสมการเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ (2.30)

$$Z_{in} = \frac{V_A - V_B}{i_A} = \frac{C s}{g_{m1} g_{m2} (1 - K)} = \frac{4V_T^2 C s}{I_{B1} I_{B2} (1 - K)} \quad (2.29)$$

$$L_{eq} = \frac{4V_T^2 C}{I_{B1} I_{B2} (1 - K)} \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของวงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอยด้านบวก/ลบ โดยใช้ OTA

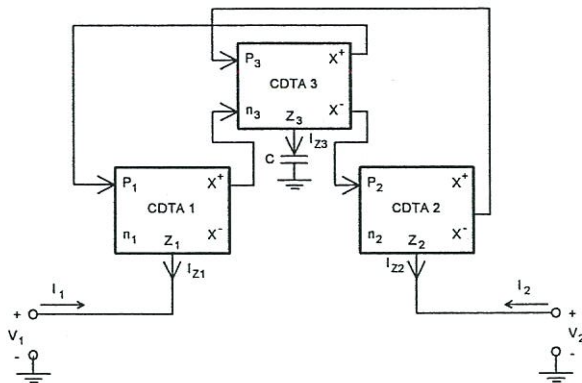
จากสมการที่ (2.30) วงจรทำหน้าที่เป็นวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำได้ ซึ่งสามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยปรับค่า  $K$  และ  $I_B$  ในวงจรใช้ตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์เพื่อสะดวกต่อการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม แต่ในวงจรยังใช้อุปกรณ์ OTA มากกว่า 1 ตัวซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน

### 2.3.3 วงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอยชนิดบวกและลบที่ใช้อุปกรณ์แอกทีฟเพียงอย่างเดียวสามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

อดิเรก จันตะคุณ และ มนตรี ศิริปรัชญานันท์ (2553 : 354-358) ได้นำเสนอวงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอยชนิดบวกและลบที่ใช้อุปกรณ์แอกทีฟเพียงอย่างเดียวสามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.12 มีโครงสร้างเป็นไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ โดยถ้ากำหนดให้ OTA ทำงานในช่วงที่เป็นเชิงเส้น ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ ดังสมการที่ (2.31) โดยที่  $I_B$  เป็นกระแสไบอัสของ OTA และ  $B$  คือผลคูณของอัตราขยายและแบนด์วิธ เมื่อพิจารณาวจรในรูปที่ 2.12 จะได้เป็นสมการเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.32)

$$Z_{in} = \frac{2V_T s}{I_B B} \quad (2.31)$$

$$L_{eq} = \frac{2V_T}{I_B B} \quad (2.32)$$



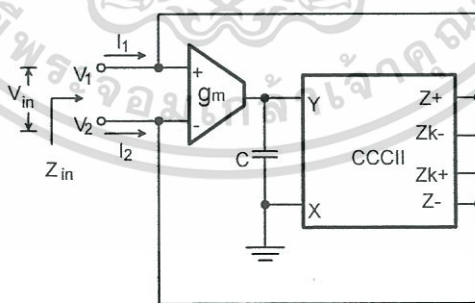
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของวงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอยและต่อลงกราวด์โดยใช้ CDTA

2.3.5 วงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอยด้านบวก/ลบ โดยใช้ OTA และ CCCII

Kumngern (2011 : 5-8) ได้นำเสนอวงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอยด้านบวก/ลบ โดยใช้ OTA และ CCCII แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 โดยใช้ OTA และ CCCII เป็นอุปกรณ์หลักในการออกแบบ ถ้ากำหนดให้ OTA และ CCCII ทำงานในช่วงที่เป็นเชิงเส้น ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ (2.35) เมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 2.14 จะได้เป็นสมการเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.36)

$$Z_{in} = \frac{sCR_x}{g_m(1-k)} \tag{2.35}$$

$$L_{eq} = \frac{CR_x}{g_m(1-k)} \tag{2.36}$$



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของวงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอยด้านบวก/ลบ โดยใช้ OTA และ CCCII

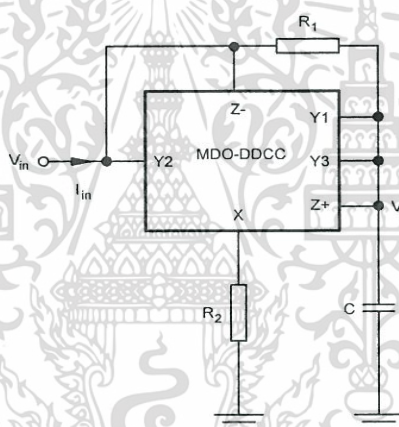
จากสมการที่ (2.36) วงจรทำหน้าที่เป็นวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำได้ ซึ่งสามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ในวงจรใช้ตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์เพื่อสะดวกต่อการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม แต่ในวงจรยังใช้อุปกรณ์แอคทีฟมากกว่า 1 ตัว ซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน

### 2.3.6 วงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอย/ต่อลงกราวด์โดยใช้ DDCC

Muhammed, et. al. (2012 : 3-10) ได้นำเสนอวงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอย/ต่อลงกราวด์โดยใช้ DDCC แสดงได้ดังรูปที่ 2.15 โดยใช้ DDCC เป็นอุปกรณ์หลักในการออกแบบ ถ้ากำหนดให้ DDCC ทำงานในช่วงที่เป็นเชิงเส้น ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ ดังสมการที่ (2.37) โดยที่  $R=R_1=R_2$  เมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 2.15 จะได้เป็นสมการเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.38)

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = 2sCR^2 \quad (2.37)$$

$$L_{eq} = 2CR^2 \quad (2.38)$$



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของวงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอย/ต่อลงกราวด์โดยใช้ DDCC

จากสมการที่ (2.38) วงจรทำหน้าที่เป็นวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำได้ แต่ไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ในวงจรใช้ตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์เพื่อสะดวกต่อการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม แต่ในวงจรยังใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 1 ตัว ซึ่งจะทำให้ในการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมจึงมีขนาดใหญ่

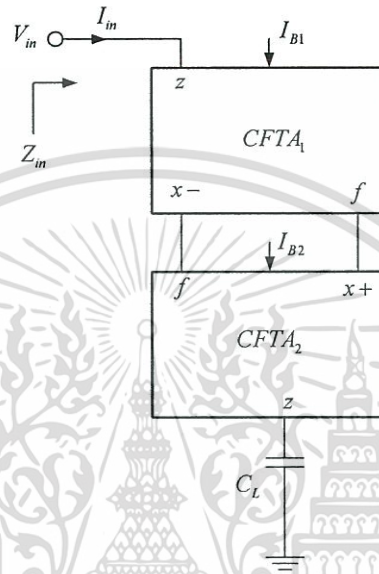
### 2.3.7 วงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ด้านบวกโดยใช้ CFTA และการประยุกต์ใช้งาน

Herencsar, et. al. (2010a : 24-27) ได้นำเสนอวงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ด้านบวกโดยใช้ CFTA และการประยุกต์ใช้งาน แสดงได้ดังรูปที่ 2.16 โดยใช้ CFTA เป็นอุปกรณ์หลักในการออกแบบ ถ้ากำหนดให้ CFTA ทำงานในช่วงที่เป็นเชิงเส้น ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ ดังสมการที่ (2.39) โดยที่  $I_{B1}$  และ  $I_{B2}$  เป็นกระแสไบอัสของ CFTA<sub>1</sub> และ CFTA<sub>2</sub> ตามลำดับ เมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 2.16 จะได้สมการเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.40)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{sC_L}{g_{m1}g_{m2}} \quad (2.39)$$

$$L_{eq} = \frac{C_L}{g_{m1}g_{m2}} \quad (2.40)$$



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของวงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ด้านบวกโดยใช้ CFTA และการประยุกต์ใช้งาน

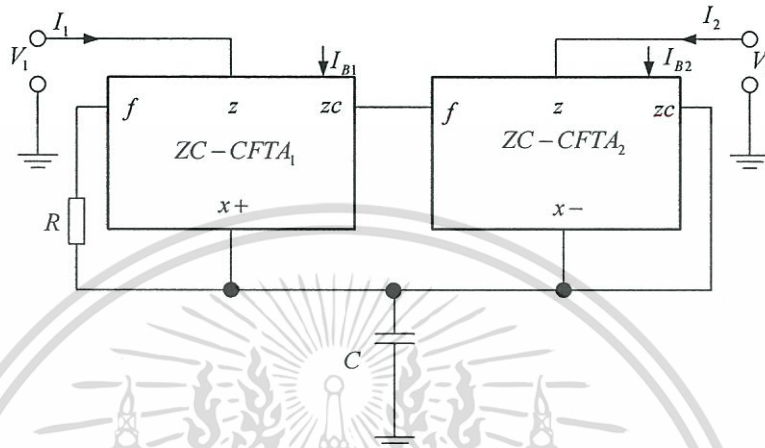
จากสมการที่ (2.40) วงจรทำหน้าที่เป็นวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำได้ ซึ่งสามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ในวงจรใช้ตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์เพื่อสะดวกต่อการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม แต่ในวงจรยังใช้อุปกรณ์แอคทีฟมากกว่า 1 ตัว ซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน

### 2.3.8 วงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอยโดยใช้ ZC-CFTA

Herencsar, et. al. (2012b : 1-4) ได้นำเสนอวงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอยโดยใช้ ZC-CFTA แสดงได้ดังรูปที่ 2.12 โดยใช้ ZC-CFTA เป็นอุปกรณ์หลักในการออกแบบแสดงได้ดังรูปที่ 2.17 ถ้ากำหนดให้ ZC-CFTA ทำงานในช่วงที่เป็นเชิงเส้น ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ ดังสมการที่ (2.41) โดยที่  $I_{B1}$  และ  $I_{B2}$  เป็นกระแสไบอัสของ ZC-CFTA ตัวที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยที่  $g_m = g_{m1} = g_{m2}$  เมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 2.17 จะได้สมการเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.42)

$$Z_{in} = \frac{sCR}{g_m} \quad (2.41)$$

$$L_{eq} = \frac{CR}{g_m} \quad (2.42)$$



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของวงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอยโดยใช้ ZC-CFTA

จากสมการที่ (2.43) วงจรทำหน้าที่เป็นวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำได้ ซึ่งสามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ในวงจรใช้ตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์เพื่อสะดวกต่อการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม แต่ในวงจรยังใช้อุปกรณ์แอคทีฟหลายตัวซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน

### 2.3.9 วงจรตัวจำลองค่าความเหนี่ยวนำแบบลอยตัวโดยใช้ OTA

ชิตพล คุ่มแก้ว (2555 : 26-27) ได้นำเสนอวงจรตัวจำลองค่าความเหนี่ยวนำแบบลอยตัวโดยใช้ OTA แสดงได้ดังรูปที่ 2.18 มีโครงสร้างเป็น OTA โดยที่  $I_{B1}$ ,  $I_{B2}$  และ  $I_{B3}$  เป็นกระแสไบอัสของ OTA ตัวที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยกำหนดให้  $I_{B2} = I_{B3}$  เมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 2.18 จะได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ ดังสมการที่ (2.43) และแทนค่า  $g_{m1} = I_{B1}/2V_T$  ลงในสมการที่ (2.44) จะได้สมการเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.45)

$$Z_{in} = \frac{V_{AB}}{i_A} = -\frac{V_{AB}}{i_B} = \frac{sC}{g_{m1}g_{m2}} \quad (2.43)$$

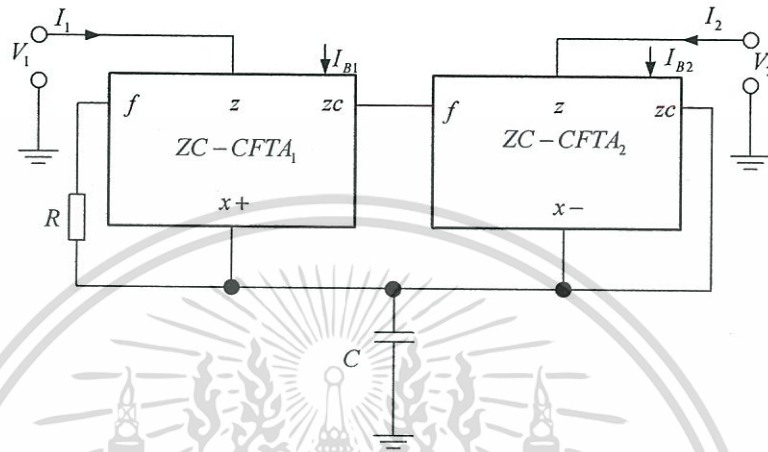
$$L_{eq} = \frac{C_1}{g_{m1}g_{m2}} \quad (2.44)$$

$$L_{eq} = \frac{4V_T^2 C_1}{I_{B1}I_{B2}} \quad (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{in} = \frac{sCR}{g_m} \quad (2.41)$$

$$L_{eq} = \frac{CR}{g_m} \quad (2.42)$$



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของวงจรจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบลอยโดยใช้ ZC-CFTA

จากสมการที่ (2.43) วงจรทำหน้าที่เป็นวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำได้ ซึ่งสามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ในวงจรใช้ตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์เพื่อสะดวกต่อการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม แต่ในวงจรยังใช้อุปกรณ์แอคทีฟหลายตัวซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน

### 2.3.9 วงจรตัวจำลองค่าความเหนี่ยวนำแบบลอยตัวโดยใช้ OTA

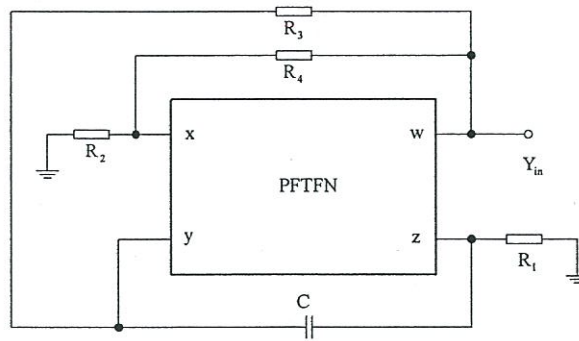
ชิตพล คุ่มแก้ว (2555 : 26-27) ได้นำเสนอวงจรตัวจำลองค่าความเหนี่ยวนำแบบลอยตัวโดยใช้ OTA แสดงได้ดังรูปที่ 2.18 มีโครงสร้างเป็น OTA โดยที่  $I_{B1}$ ,  $I_{B2}$  และ  $I_{B3}$  เป็นกระแสไบอัสของ OTA ตัวที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยกำหนดให้  $I_{B2} = I_{B3}$  เมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 2.18 จะได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ ดังสมการที่ (2.43) และแทนค่า  $g_{m1} = I_{B1}/2V_T$  ลงในสมการที่ (2.44) จะได้สมการเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.45)

$$Z_{in} = \frac{V_{AB}}{i_A} = -\frac{V_{AB}}{i_B} = \frac{sC}{g_{m1}g_{m2}} \quad (2.43)$$

$$L_{eq} = \frac{C_1}{g_{m1}g_{m2}} \quad (2.44)$$

$$L_{eq} = \frac{4V_T^2 C_1}{I_{B1}I_{B2}} \quad (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 วงจรจำลองค่าความเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้ PFTFN

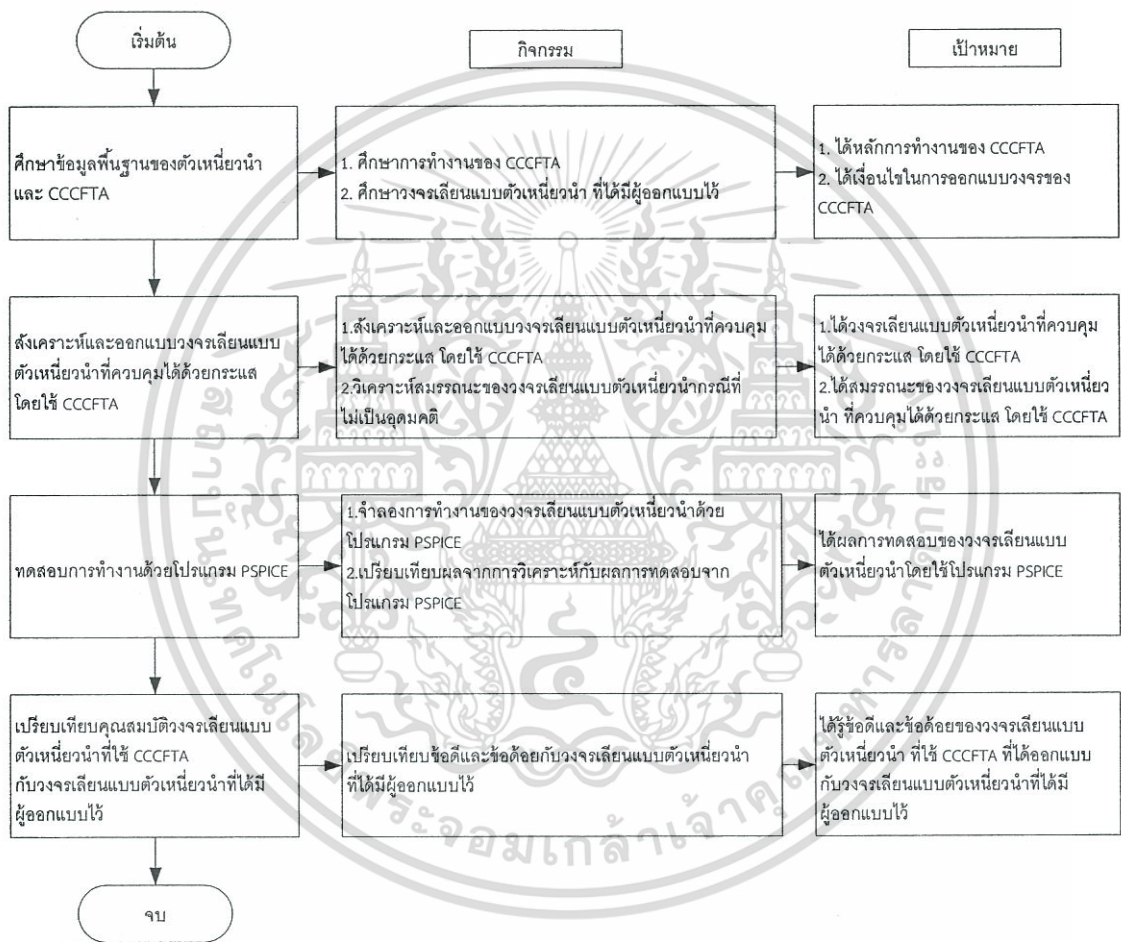
จากสมการที่ (2.48) วงจรทำหน้าที่เป็นวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำได้ แต่ไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ในวงจรใช้ตัวเก็บประจุแบบลอย จึงไม่สะดวกต่อการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม แต่ในวงจรยังใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 1 ตัว ซึ่งจะทำให้ในการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมจึงมีขนาดใหญ่



### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินการวิจัย

จากที่ได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในบทนี้กล่าวถึงการสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA ตั้งแต่พื้นฐานของตัวอุปกรณ์ไปจนถึงเหตุผล แนวคิดและการวิเคราะห์วงจร เพื่อให้ได้สมรรถนะที่สูงขึ้น การดำเนินงานวิจัยนี้มีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

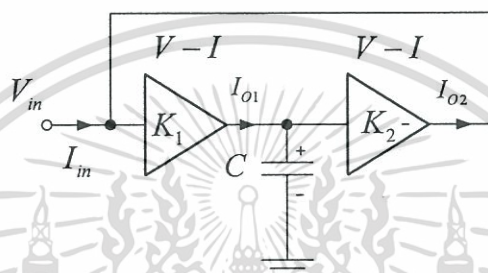
จากรูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย เริ่มจากการศึกษาข้อมูลพื้นฐานของตัวเหนี่ยวนำพื้นฐานของอุปกรณ์ CCCFTA ที่นำมาใช้ในการออกแบบ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 2 จากนั้นจึงได้ทำการสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์จากกรอบแนวความคิด และใช้อุปกรณ์ CCCFTA ตามลำดับ ในเนื้อหาบทที่ 3 และนำวงจรที่ได้ออกแบบนั้นไปทดสอบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อได้ผลการทดสอบแล้วว่าเป็นตัวเหนี่ยวนำตามที่ได้ออกแบบไว้แล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จะกล่าวไว้ในบทที่ 4 เพื่อหาข้อดี ข้อด้อย และข้อเสนอแนะต่อไป

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 การสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้ อุปกรณ์ CCCFTA กรณีอุดมคติ

#### 3.1.1 การสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้ หลักการตัวแปลงแรงดันเป็นกระแส

ในการออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้หลักการตัวแปลงแรงดันเป็นกระแส (Voltage to Current Converter : V-I) 2 ตัว ซึ่งมีอัตราขยายของ V-I ตัวที่ 1 และ 2 เป็น  $K_1$  และ  $K_2$  ตามลำดับ โดยกำหนดให้  $K_2$  มีค่าเป็นลบและตัวเก็บประจุแบบลงกราวด์ 1 ตัว (สมคิด แซ่โจ้ว, 2546: 15-17) จากวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์รูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างการสังเคราะห์ห้วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

เมื่อพิจารณาและวิเคราะห์ในการออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้หลักการตัวแปลงแรงดันเป็นกระแส จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสคือ

พิจารณาที่โหนด  $V_{in}$

$$I_{in} + I_o = 0 \quad (3.1)$$

โดย

$$I_o = -K_2 V_c \quad (3.2)$$

นำค่า  $I_o$  จากสมการที่ (3.2) แทนในสมการที่ (3.1) จะได้

$$I_{in} + (-K_2 V_c) = 0 \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หา  $V_c$  จะได้

$$V_c = I_{o1} \frac{1}{sC} \quad (3.4)$$

โดย

$$I_{o1} = K_1 V_{in} \quad (3.5)$$

นำค่า  $I_{o1}$  จากสมการที่ (3.5) แทนในสมการที่ (3.4) จะได้

$$V_c = K_1 V_{in} \frac{1}{sC} \quad (3.6)$$

นำค่า  $V_c$  จากสมการที่ (3.6) แทนในสมการที่ (3.3)

$$I_{in} - K_2 K_1 V_{in} \frac{1}{sC} = 0 \quad (3.7)$$

จะได้

$$I_{in} = K_2 K_1 V_{in} \frac{1}{sC} \quad (3.8)$$

จะได้

$$I_{in} sC = K_2 K_1 V_{in} \quad (3.9)$$

จะได้

$$sC = K_2 K_1 \frac{V_{in}}{I_{in}} \quad (3.10)$$

จะได้สมการอินพุตอิมพีแดนซ์

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{sC}{K_2 K_1} \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

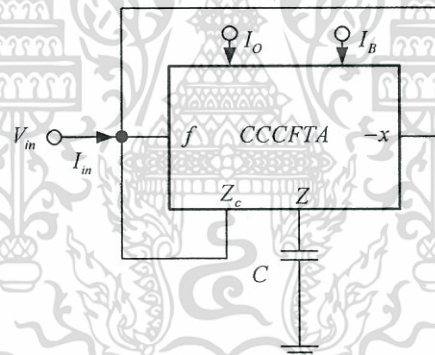
จากสมการ (3.11) จะได้ค่าความเหนี่ยวนำดังนี้

$$L_{eq} = \frac{C}{K_2 K_1} \quad (3.12)$$

จากสมการที่ 3.12 จะพบว่าค่าความเหนี่ยวนำสามารถปรับค่าได้จาก  $K_1$  และ  $K_2$  ซึ่งถ้า  $K_1$  และ  $K_2$  สามารถปรับได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ การปรับค่าความเหนี่ยวนำที่ออกแบบจึงควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วย

### 3.1.2 การสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้ อุปกรณ์ CCCFTA กรณีอุดมคติ

เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย ต้องใช้จำนวนอุปกรณ์สำเร็จรูปน้อยที่สุด เพราะส่งผลต่อการใช้กำลังงานภายในวงจรและเพื่อให้สะดวกในการที่จะไปพัฒนาเป็นวงจรรวม ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA เพียงตัวเดียวและใช้ อุปกรณ์พาสซีฟให้น้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA

จากวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA ดังรูปที่ 3.3 โดยนำหลักการตัวแปลงแรงดันเป็นกระแส ดังรูปที่ 3.2 มาใช้ในการออกแบบ โดยวงจรที่ออกแบบจากอุปกรณ์ CCCFTA จึงใช้หลักการของตัวแปลงแรงดันเป็นกระแสต่อกัน พิจารณาที่การป้อนอินพุต  $I_{in}$  ที่โหนด  $V_{in}$  ขั้ว  $f$  กับ  $z_c$  เปรียบเสมือนตัวแปลงแรงดันเป็นกระแสตัวที่หนึ่ง ( $K_1$ ) และที่ขั้ว  $z$  กับ  $x$  เปรียบเสมือนตัวแปลงแรงดันเป็นกระแสตัวที่สอง ( $K_2$ ) ส่วน  $z_c$  จะเป็นตัวส่งผ่าน  $i_{z_c}$  ไปที่อินพุต และ  $x$  จะเป็นตัวส่งผ่าน  $i_x$  ไปที่อินพุต โดยที่  $x$  จะติดลบ จึงเป็นการรวมกันแบบลบ เมื่อพิจารณาและวิเคราะห์ห้วงจรโดยใช้ลักษณะสมบัติของ CCCFTA ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสได้ดังนี้

พิจารณาที่โหนด  $V_{in}$

$$I_{in} + i_{zc} - i_f - i_x = 0 \quad (3.13)$$

จากคุณสมบัติของ CCCFTA :  $i_f = i_z = i_{zc}$

$$I_{in} - i_x = 0 \quad (3.14)$$

จากโครงสร้างภายในของ CCCFTA จะได้

$$i_x = g_m V_z \quad (3.15)$$

$$V_z = i_z \cdot \frac{1}{sC} \quad V_z = \frac{i_z}{sC} \quad (3.16)$$

และเมื่อ

$$i_z = i_f = \frac{V_{in}}{R_f} \quad (3.17)$$

แทนค่า  $i_z$  ในสมการที่ (3.16) จะได้

$$V_z = \frac{V_{in}}{sCR_f} \quad (3.18)$$

แทนค่า  $V_z$  ในสมการที่ (3.15) จะได้

$$i_x = \frac{g_m}{sCR_f} V_{in} \quad (3.19)$$

แทนค่า  $i_x$  ในสมการที่ (3.14) จะได้

$$I_{in} - \frac{g_m}{sCR_f} V_{in} = 0 \quad (3.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$I_{in} = \frac{g_m}{sCR_f} V_{in} \quad (3.21)$$

จะได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{sCR_f}{g_m} \quad (3.22)$$

จะได้ค่าความเหนี่ยวนำ

$$L_{eq} = \frac{CR_f}{g_m} \quad (3.23)$$

จากสมการคุณสมบัติของ CCCFTA โครงสร้างภายในใช้ CMOS สามารถปรับค่า  $R_f$  และ  $g_m$  ได้จากการไบอัส ที่ขั้ว  $I_O, I_B$  ดังสมการที่ (3.24) และ (3.25) ตามลำดับ โดย

$$R_f = \frac{1}{\sqrt{8k_{rf}I_O}} \quad (3.24)$$

และ

$$g_m = \sqrt{k_{gm}I_B} \quad (3.25)$$

จากสมการที่ (3.23) แทนค่า  $R_f$  และ  $g_m$  จะได้สมการที่ (3.26) แสดงให้เห็นว่าค่าความเหนี่ยวนำสามารถปรับได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ คือ ปรับที่ค่า  $I_O, I_B$  ซึ่งเป็นค่ากระแสไบอัสของ CCCFTA

$$L_{eq} = \frac{C}{\sqrt{8k_{rf}I_O k_{gm}I_B}} \quad (3.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การวิเคราะห์วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA กรณีไม่เป็นอุดมคติ

การออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ในทางปฏิบัติ อุปกรณ์ CCCFTA ที่นำมาใช้ในการออกแบบมีความเป็นไปได้ที่ทำงานโดยไม่เป็นอุดมคติทั้งนี้เกิดจากค่าความต้านทานแฝงในตัว CCCFTA ที่มีโครงสร้างเป็นทรานซิสเตอร์ CMOS ที่นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์สำเร็จรูป CCCFTA ในกรณีที่ CCCFTA ที่ใช้ในวงจรไม่เป็นอุดมคติ สามารถวิเคราะห์ได้จาก

$$i_z = \alpha i_f \quad (3.27)$$

$$i_{z_c} = \beta i_z \quad (3.28)$$

$$i_x = \gamma g_m V_z \quad (3.29)$$

โดยที่  $\alpha$  คือ ค่าผิดพลาดในการส่งผ่านกระแสจากขั้ว  $i_f$  ไปขั้ว  $i_z$

$\beta$  คือ ค่าผิดพลาดในการส่งผ่านกระแสจากขั้ว  $i_z$  ไปขั้ว  $i_{z_c}$

$\gamma$  คือ ค่าผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันไปเป็นกระแสจากขั้ว  $V_z$  ไปขั้ว  $i_x$

ดังนั้นในความไม่เป็นอุดมคติดังกล่าวจึงส่งผลต่อวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้นในกรณีที่ไม่เป็นอุดมคติสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสได้ดังนี้

พิจารณาที่โหนด  $V_{in}$

$$i_{in} + i_{z_c} - i_f - i_x = 0 \quad (3.30)$$

แทนค่า  $i_{z_c} = \beta i_z$

$$i_{in} + \beta i_z - i_f - i_x = 0 \quad (3.31)$$

แทนค่า  $i_z = \alpha i_f$

$$i_{in} + \beta(\alpha i_f) - i_f - i_x = 0 \quad (3.32)$$

จะได้

$$i_{in} + i_f(\beta\alpha - 1) - i_x = 0 \quad (3.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก  $i_f$  มีค่าดังสมการที่ (3.34)

$$i_f = \frac{V_{in}}{R_f} \quad (3.34)$$

แทนค่า  $i_f$  ในสมการที่ (2.33)

$$I_{in} + \frac{V_{in}}{R_f}(\beta\alpha - 1) - i_x = 0 \quad (3.35)$$

แทนค่า  $i_x$  ในสมการที่ (2.35)

$$I_{in} + \frac{V_{in}}{R_f}(\beta\alpha - 1) - \gamma g_m V_z = 0 \quad (3.36)$$

โดย

$$V_z = \frac{\alpha V_{in}}{sCR_f} \quad (3.37)$$

$$I_{in} + \frac{V_{in}}{R_f}(\beta\alpha - 1) - \gamma g_m \left( \frac{\alpha V_{in}}{sCR_f} \right) = 0 \quad (3.38)$$

$$I_{in} = -\frac{V_{in}}{R_f}(\beta\alpha - 1) + \gamma g_m \left( \frac{\alpha V_{in}}{sCR_f} \right) \quad (3.39)$$

$$I_{in} = V_{in} \left[ -\frac{1}{R_f}(\beta\alpha - 1) + \gamma g_m \left( \frac{\alpha}{sCR_f} \right) \right] \quad (3.40)$$

นำ  $sCR_f$  คูณตลอดสมการ

$$I_{in} sCR_f = V_{in} sC \left[ (1 - \beta\alpha) + \alpha\gamma g_m \right] \quad (3.41)$$

จะได้สมการอินพุตอิมพีแดนซ์

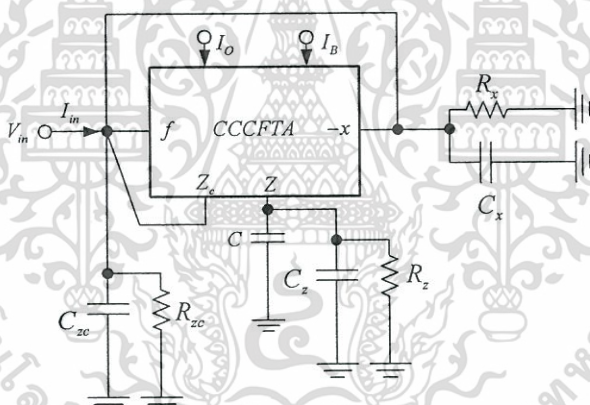
$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{sCR_f}{sC(1 - \beta\alpha) + \alpha\gamma g_m} \quad (3.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

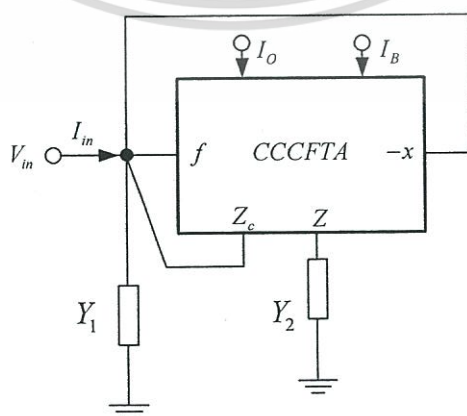
ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA ที่ไม่เป็นอุดมคติ นั้นจะมีค่า  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  ซึ่งมีผลต่อการทำงานของวงจร เมื่อความถี่และอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบจากค่าเหล่านี้ ควรที่จะออกแบบ CCCFTA ให้มีค่าใกล้เคียงอุดมคติมากที่สุด จากสมการที่ (3.42) พบว่าค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ในกรณีที่วงจรไม่เป็นอุดมคติ แตกต่างจากค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ในกรณีที่วงจรเป็นอุดมคติ ดังสมการที่ (3.23) ซึ่งค่าในสมการจะเห็นได้ว่าไม่เป็นสมการของตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว จะมีสมการของตัวต้านทานต่อต่อขนานอยู่

### 3.3 การวิเคราะห์วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA กรณีการทำงานที่ความถี่สูง

การออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ในกรณีการทำงานที่ความถี่สูงซึ่งจะพบว่าจะมีค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุแฝงในอุปกรณ์ CCCFTA จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของวงจรได้ออกแบบไว้ เมื่อคำนึงถึงค่าอุปกรณ์แฝงเหล่านี้สามารถเขียนรูปวงจรได้ดังรูปที่ 3.4 จากวงจรรูปที่ 3.3 และเพื่อให้วิเคราะห์กรณีการทำงานที่ความถี่สูงได้ง่ายขึ้นจึง เขียนรูปวงจรใหม่ได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA กรณีการทำงานที่ความถี่สูง

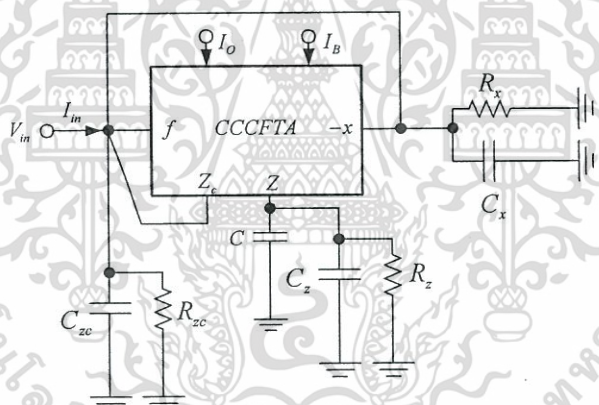


รูปที่ 3.5 วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA กรณีการทำงานที่

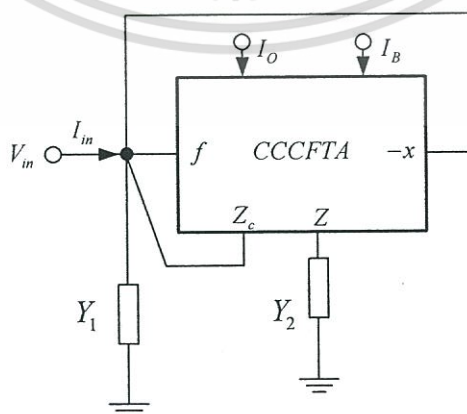
ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA ที่ไม่เป็นอุดมคติ นั้นจะมีค่า  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  ซึ่งมีผลต่อการทำงานของวงจร เมื่อความถี่และอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบจากค่าเหล่านี้ ควรที่จะออกแบบ CCCFTA ให้มีค่าใกล้เคียงอุดมคติมากที่สุด จากสมการที่ (3.42) พบว่าค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ในกรณีที่วงจรไม่เป็นอุดมคติ แตกต่างจากค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ในกรณีที่วงจรเป็นอุดมคติ ดังสมการที่ (3.23) ซึ่งค่าในสมการจะเห็นได้ว่าไม่เป็นสมการของตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว จะมีสมการของตัวต้านทานต่อต่อขนานอยู่

### 3.3 การวิเคราะห์วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA กรณีการทำงานที่ความถี่สูง

การออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ในกรณีการทำงานที่ความถี่สูงซึ่งจะพบว่าจะมีค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุแฝงในอุปกรณ์ CCCFTA จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของวงจรได้ออกแบบไว้ เมื่อคำนึงถึงค่าอุปกรณ์แฝงเหล่านั้นสามารถเขียนรูปวงจรได้ดังรูปที่ 3.4 จากวงจรรูปที่ 3.3 และเพื่อให้วิเคราะห์กรณีการทำงานที่ความถี่สูงได้ง่ายขึ้นจึง เขียนรูปวงจรใหม่ได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA กรณีการทำงานที่ความถี่สูง



รูปที่ 3.5 วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA กรณีการทำงานที่ความถี่สูง ที่ใช้ในการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$Y_1 = s[C_x + C_{zc}] + G_x + G_{zc} \quad (3.43)$$

$$Y_2 = s[C + C_z] + G_z \quad (3.44)$$

พิจารณาที่โหนด  $V_{in}$ 

$$I_{in} + i_{zc} - i_f - i_x - i_{y1} = 0 \quad (3.45)$$

จากคุณสมบัติของ CCCFTA

$$i_f = i_z = i_{zc} \quad (3.46)$$

จะได้

$$I_{in} - i_x - i_{y1} = 0 \quad (3.47)$$

เมื่อ  $i_x$  มีค่าดังสมการที่ (3.48)

$$i_x = g_m V_z \quad (3.48)$$

และค่า  $V_z$  มีค่าดังสมการที่ (3.49)

$$V_z = \frac{i_z}{Y_2} \quad (3.49)$$

และค่า  $i_z = i_f$  จะได้

$$i_z = i_f = \frac{V_{in}}{R_f} \quad (3.50)$$

นำค่า  $i_z$  แทนลงในสมการที่ (3.49) จะได้

$$V_z = \frac{V_{in}}{R_f Y_2} \quad (3.51)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่า  $V_z$  แทนลงในสมการที่ (3.48) จะได้

$$i_x = g_m \frac{V_{in}}{R_f Y_2} \quad (3.52)$$

ค่า  $i_{y1}$  มีค่าดังสมการที่ (3.53) จะได้

$$i_{y1} = V_{in} Y_1 \quad (3.53)$$

นำสมการที่ (3.52) และ (3.53) แทนในสมการที่ (3.49)

$$I_{in} - \frac{g_m V_{in}}{R_f Y_2} - V_{in} Y_1 = 0 \quad (3.54)$$

จะได้

$$I_{in} = \frac{g_m V_{in}}{R_f Y_2} + V_{in} Y_1 \quad (3.55)$$

ดึงตัวร่วม  $V_{in}$  จะได้

$$I_{in} = V_{in} \left( \frac{g_m}{R_f Y_2} + Y_1 \right) \quad (3.56)$$

จะได้

$$\frac{I_{in}}{V_{in}} = \frac{g_m}{R_f Y_2} + Y_1 \quad (3.57)$$

แทนค่า  $Y_1$  และ  $Y_2$  ลงในสมการที่ (3.57)

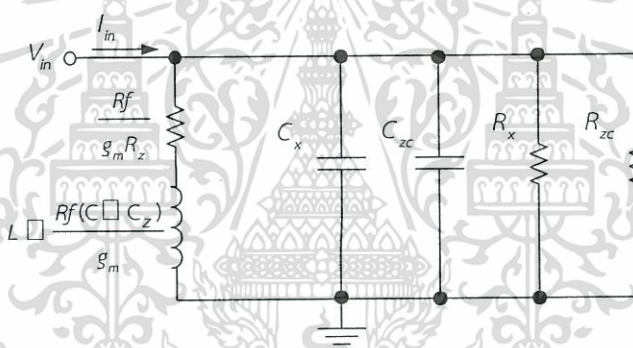
$$\frac{I_{in}}{V_{in}} = \frac{g_m}{R_f (s(C + C_z) + G_z)} + s(C_x + C_{zc}) + G_x + G_{zc} \quad (3.58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้สมการอินพุตอิมพีแดนซ์

$$\frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{R_f (s(C + C_z) + G_z)}{g_m} + \frac{1}{s(C_x + C_{zc})} + \frac{1}{G_x} + \frac{1}{G_{zc}} \quad (3.59)$$

ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA ที่กรณีการทำงานที่ความถี่สูง นั้นจะมีค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุในอุปกรณ์ CCCFTA ซึ่งมีผลต่อการทำงานของวงจร เมื่อความถี่สูงขึ้น จากสมการที่ (3.59) แสดงได้ดังรูปที่ 3.6 พบว่าค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ในกรณีที่การทำงานที่ความถี่สูง เปลี่ยนแปลงจากค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ในกรณีที่วงจรเป็นอุดมคติ ดังสมการที่ (3.23) ซึ่งค่าในสมการจะเห็นได้ว่าไม่เป็นสมการของตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว จะมีสมการของตัวความต้านทานต่ออนุกรมอยู่กับตัวเหนี่ยวนำ อีกทั้งยังมีตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่อขนานอีกด้วย ทำให้วงจรที่ออกแบบไม่สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้



รูปที่ 3.6 ผลการวิเคราะห์ห้วงจรกรณีการทำงานที่ความถี่สูง

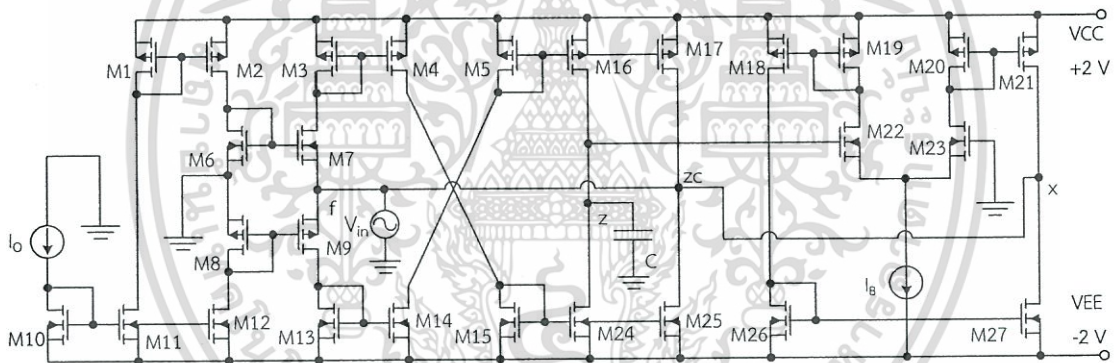
## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA ที่ได้สังเคราะห์และออกแบบไว้ในงานวิจัยนี้ จึงได้จำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 โดยกำหนดให้วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ทำงานที่แรงดันไฟเลี้ยง  $\pm 2$  V ผลการทดสอบของงานวิจัยดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการทดสอบสมรรถนะวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้ อุปกรณ์ CCCFTA

ในการจำลองวงจรเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติในการทำงานของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA ที่นำเสนอ ได้แสดงโครงสร้างของวงจрдังรูปที่ 4.1 ซึ่งได้เลือกใช้เทคโนโลยีมอสทรานซิสเตอร์  $0.5 \mu\text{m}$  ของ MOSIS โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.1 ส่วนค่าความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแส PMOS และ NMOS ทรานซิสเตอร์ ดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.1 โครงสร้างวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวงจรที่นำเสนอ

| ค่าพารามิเตอร์ | MODEL NT NMOS<br>(LEVEL = 3) | MODEL PT PMOS<br>(LEVEL = 3) |
|----------------|------------------------------|------------------------------|
| Phi            | 0.70000                      | 0.70000                      |
| TOX            | 9.6000E-09                   | 9.6000E-09                   |
| XJ             | 0.200000U                    | 0.200000U                    |
| TPG            | 1                            | -1                           |
| VTO            | 0.6684                       | -0.9352                      |
| DELTA          | 1.0700E+00                   | 1.2380E-02                   |
| LD             | 4.2030E-08                   | 5.2440E-08                   |
| KP             | 1.7748E-04                   | 4.4927E-05                   |

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

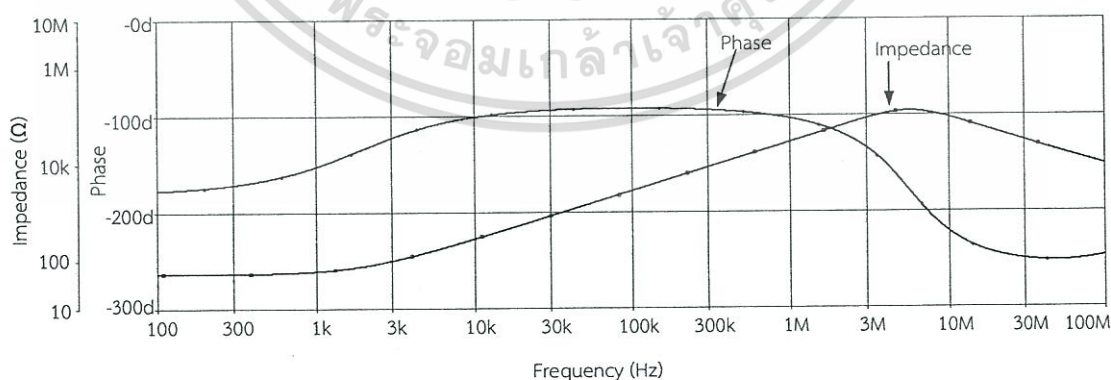
| ค่าพารามิเตอร์ | MODEL NT NMOS<br>(LEVEL = 3) | MODEL PT PMOS<br>(LEVEL = 3) |
|----------------|------------------------------|------------------------------|
| THETA          | 1.8120E-01                   | 5.7490E-02                   |
| RSH            | 1.6680E+01                   | 1.1660E+00                   |
| GAMMA          | 0.5382                       | 0.4551                       |
| NSUB           | 1.1290E+17                   | 8.0710E+16                   |
| NFS            | 7.1500E+11                   | 5.9080E+11                   |
| VMAX           | 2.7900E+05                   | 2.2960E+05                   |
| ETA            | 1.8690E-02                   | 2.1930E-02                   |
| KAPPA          | 1.6100E-01                   | 9.3660E+00                   |
| CGDO           | 4.0920E-10                   | 2.1260E-10                   |
| CGSO           | 4.0920E-10                   | 2.1260E-10                   |

ตารางที่ 4.2 ขนาด W/L ของทรานซิสเตอร์ CMOS

| Transistor (CMOS) | W ( $\mu\text{m}$ ) | L ( $\mu\text{m}$ ) |
|-------------------|---------------------|---------------------|
| M 1-17,24,25      | 4                   | 1                   |
| M 18-23,27        | 4                   | 2                   |
| M 26              | 4.2                 | 2                   |

#### 4.1.1 ผลการทดสอบสมรรถนะทางด้านค่าอิมพีแดนซ์และเฟสกับความถี่

ในการจำลองวงจรเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติในการทำงานของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA ที่นำเสนอ ได้ทดสอบสมรรถนะทางด้านค่าอิมพีแดนซ์และเฟสกับความถี่ ของตัวเหนี่ยวนำ



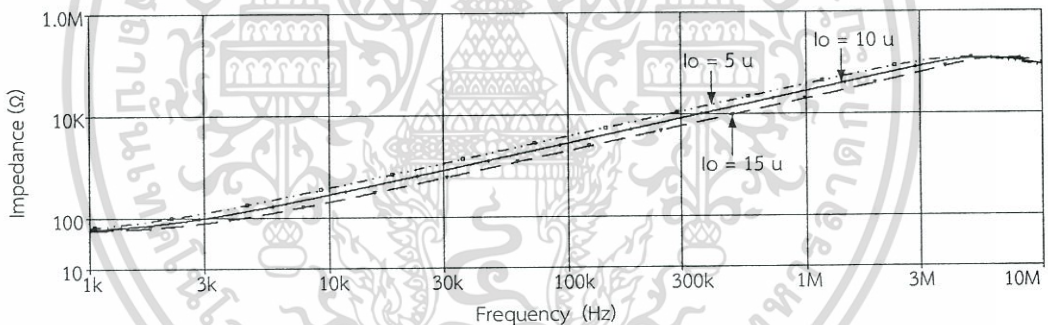
รูปที่ 4.2 ค่าอิมพีแดนซ์และเฟสกับความถี่ของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติของค่าอิมพีแดนซ์และเฟสกับความถี่ของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA โดยกำหนดให้  $I_o$  และ  $I_b$  เป็นกระแสไบอัส โดยที่  $I_o$  ให้ปรับค่าเป็น  $15 \mu\text{A}$  และ  $I_b$  ให้ปรับค่าเป็น  $250 \mu\text{A}$  ใช้ตัวเก็บประจุค่า  $100 \text{ pF}$  จะเห็นได้ว่าตัวเหนี่ยวนำจะให้ค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มมากขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น ส่วนเฟสของสัญญาณมีค่าเท่ากับ  $90$  องศา ผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์จะมีความเป็นเชิงเส้นอยู่ในช่วงความถี่  $10 \text{ kHz}$ – $3 \text{ MHz}$  โดยมีอัตราตั้งกำลังงานของวงจรมีค่า  $2.1 \text{ mW}$  แต่ในช่วงความถี่ต่ำกว่า  $3 \text{ kHz}$  จะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์ไม่ลดลง อันเนื่องมาจากกรณีไม่เป็นอุดมคติของวงจรจะเห็นได้ว่าไม่เป็นสมการของตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว จะมีสมการของตัวต้านทานต่ออนุกรมอยู่ ดังนั้นจึงมีค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานอยู่ในผลการทดสอบด้วย ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 3.59 และเมื่อความถี่สูงขึ้นมากกว่า  $3 \text{ MHz}$  จะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์จะลดลง อันเนื่องมาจากกรณีการทำงานที่ความถี่สูงนั้นจะมีสมการของตัวเก็บประจุแฝงที่ขั้ว  $x$  และขั้ว  $z_c$  ต่อขนานอยู่ ดังนั้นจึงทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรตกคร่อมอยู่ที่ตัวเก็บประจุแทน ซึ่งจากคุณสมบัติของตัวเก็บประจุจะทราบว่า เมื่อความถี่สูงขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุน้อยลง จึงทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าลดลงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 3.59

#### 4.1.2 ผลการทดสอบสมรรถนะทางด้านการควบคุมด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

ผู้วิจัยจึงได้ปรับค่ากระแสไบอัสของ CCCFTA โดยปรับค่ากระแส  $I_o$  เพื่อเป็นการยืนยันการควบคุมความเหนี่ยวนำได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์



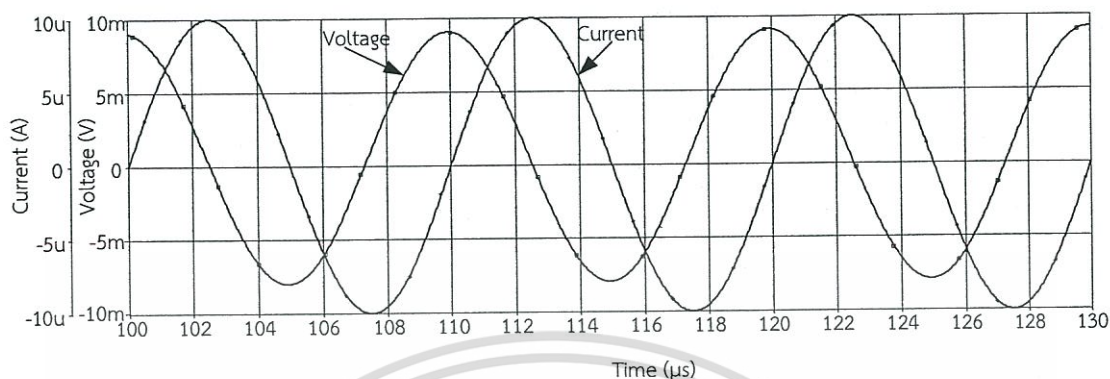
รูปที่ 4.3 ค่าสัมบูรณ์อิมพีแดนซ์กับความถี่ของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์เมื่อเปลี่ยนแปลง  $I_o$

ในรูปที่ 4.3 แสดงผลการตอบสนองค่าสัมบูรณ์อิมพีแดนซ์กับความถี่ของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA เมื่อเปลี่ยนแปลง  $I_o$  ให้มีค่าเป็น  $5 \mu\text{A}$ ,  $10 \mu\text{A}$  และ  $15 \mu\text{A}$  ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นว่าเมื่อเปลี่ยนแปลง  $I_o$  ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำก็เปลี่ยนแปลงด้วย แสดงว่าวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยการปรับกระแสไบอัสของ CCCFTA อย่างถูกต้องตามที่วิเคราะห์ไว้ในสมการที่ 3.32

#### 4.1.3 ผลการทดสอบสมรรถนะทางด้านมุมเฟสของแรงดันเปรียบเทียบกับมุมเฟสของกระแส

ผลการเปรียบเทียบมุมเฟสของแรงดันกับมุมเฟสของกระแส เพื่อเป็นการยืนยันคุณสมบัติของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA ว่าเป็นไปตามทฤษฎีของตัวเหนี่ยวนำที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งผลการทดสอบสมรรถนะของวงจรมุมเฟสของแรงดันที่ตกคร่อมตัวไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

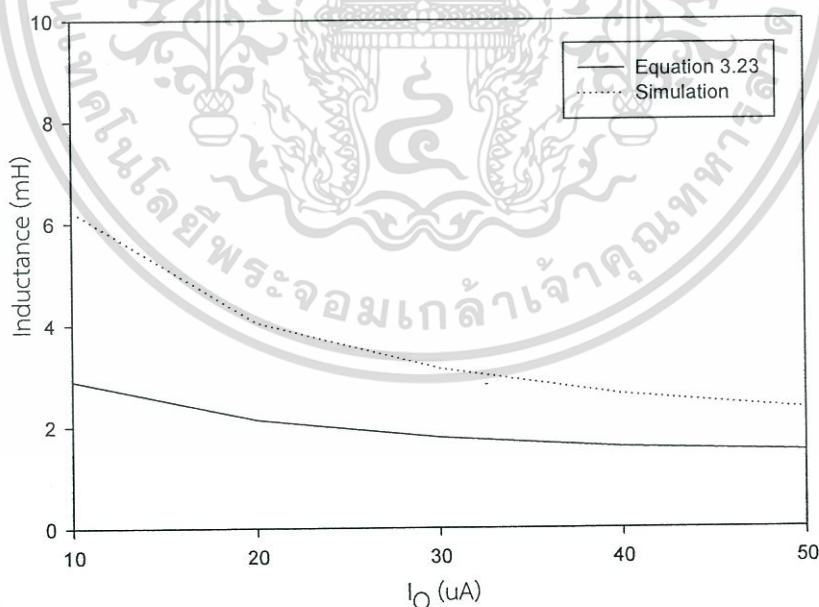
เหนี่ยวนำจะนำหน้ามุมเฟสของกระแสอยู่ 90 องศา ผลการทดลองวงจรมีความสอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับทฤษฎีแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบมุมเฟสของแรงดันกับมุมเฟสของกระแส

#### 4.1.4 ผลการทดสอบสมรรถนะทางด้านแทนค่าจากสมการเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE

เพื่อเป็นการยืนยันผลการจำลองค่าความเหนี่ยวนำด้วยโปรแกรม PSPICE ผู้วิจัยจึงเปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการสังเคราะห์วงจรโดยแทนค่าของ  $R_f$  (ปรับค่าที่กระแสไบอัส  $I_o$ ) และ  $g_m$  (ปรับค่าที่กระแสไบอัส  $I_B$ ) ลงในสมการที่ 3.32 ที่ได้วิเคราะห์ไว้ในบทที่ 3



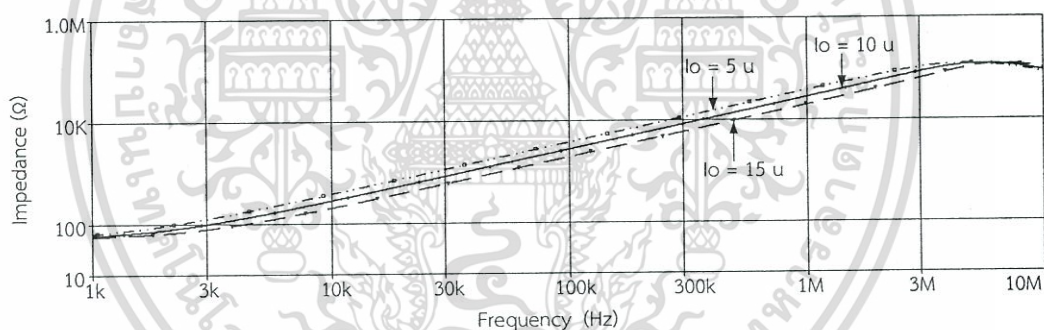
รูปที่ 4.5 การแทนค่าจากสมการเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE โดยปรับค่า  $I_o$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติของค่าอิมพีแดนซ์และเฟสกับความถี่ของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA โดยกำหนดให้  $I_o$  และ  $I_b$  เป็นกระแสไบอัส โดยที่  $I_o$  ให้ปรับค่าเป็น  $15 \mu\text{A}$  และ  $I_b$  ให้ปรับค่าเป็น  $250 \mu\text{A}$  ใช้ตัวเก็บประจุค่า  $100 \text{ pF}$  จะเห็นได้ว่าตัวเหนี่ยวนำจะให้ค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มมากขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น ส่วนเฟสของสัญญาณมีค่าเท่ากับ  $90$  องศา ผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์จะมีความเป็นเชิงเส้นอยู่ในช่วงความถี่  $10 \text{ kHz} - 3 \text{ MHz}$  โดยมีอัตราตั้งกำลังงานของวงจรมีค่า  $2.1 \text{ mW}$  แต่ในช่วงความถี่ต่ำกว่า  $3 \text{ kHz}$  จะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์ไม่ลดลง อันเนื่องมาจากกรณีไม่เป็นอุดมคติของวงจรจะเห็นได้ว่าไม่เป็นสมการของตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว จะมีสมการของตัวต้านทานต่ออนุกรมอยู่ ดังนั้นจึงมีค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานอยู่ในผลการทดสอบด้วย ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 3.59 และเมื่อความถี่สูงขึ้นมากกว่า  $3 \text{ MHz}$  จะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์จะลดลง อันเนื่องมาจากกรณีการทำงานที่ความถี่สูงนั้นจะมีสมการของตัวเก็บประจุแฝงที่ชั่ว  $x$  และชั่ว  $z_c$  ต่อขนานอยู่ ดังนั้นจึงทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรตกคร่อมอยู่ที่ตัวเก็บประจุแทน ซึ่งจากคุณสมบัติของตัวเก็บประจุจะทราบว่า เมื่อความถี่สูงขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุน้อยลง จึงทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรมีแนวโน้มลดลงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 3.59

#### 4.1.2 ผลการทดสอบสมรรถนะทางการควบคุมด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

ผู้วิจัยจึงได้ปรับค่ากระแสไบอัสของ CCCFTA โดยปรับค่ากระแส  $I_o$  เพื่อเป็นการยืนยันการควบคุมความเหนี่ยวนำได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

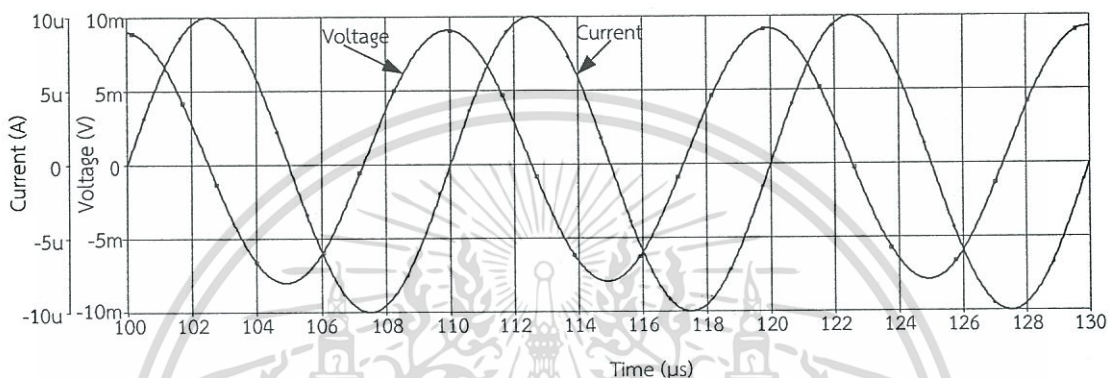


รูปที่ 4.3 ค่าสัมบูรณ์อิมพีแดนซ์กับความถี่ของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์เมื่อเปลี่ยนแปลง  $I_o$

ในรูปที่ 4.3 แสดงผลการตอบสนองค่าสัมบูรณ์อิมพีแดนซ์กับความถี่ของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA เมื่อเปลี่ยนแปลง  $I_o$  ให้มีค่าเป็น  $5 \mu\text{A}$ ,  $10 \mu\text{A}$  และ  $15 \mu\text{A}$  ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นว่าเมื่อเปลี่ยนแปลง  $I_o$  ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำก็เปลี่ยนแปลงด้วย แสดงว่าวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยการปรับกระแสไบอัสของ CCCFTA อย่างถูกต้องตามที่วิเคราะห์ไว้ในสมการที่ 3.32

#### 4.1.3 ผลการทดสอบสมรรถนะทางด้านมุมเฟสของแรงดันเปรียบเทียบกับมุมเฟสของกระแส

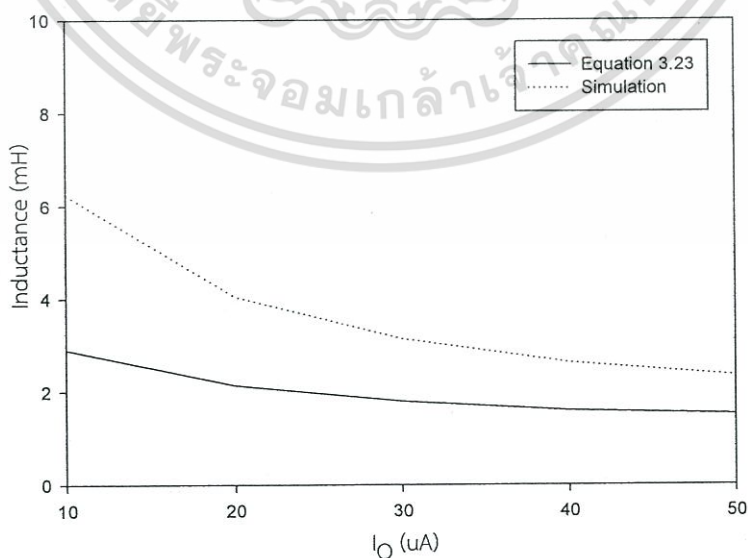
ผลการเปรียบเทียบมุมเฟสของแรงดันกับมุมเฟสของกระแส เพื่อเป็นการยืนยันคุณสมบัติของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA ว่าเป็นไปตามทฤษฎีของตัวเหนี่ยวนำที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งผลการทดสอบสมรรถนะของวงจรมุมเฟสของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำจะนำหน้ามุมเฟสของกระแสอยู่ 90 องศา ผลการทดลองวงจรมีความสอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับทฤษฎีแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบมุมเฟสของแรงดันกับมุมเฟสของกระแส

#### 4.1.4 ผลการทดสอบสมรรถนะทางด้านแทนค่าจากสมการเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE

เพื่อเป็นการยืนยันผลการจำลองค่าความเหนี่ยวนำด้วยโปรแกรม PSPICE ผู้วิจัยจึงเปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการสังเคราะห์วงจรโดยแทนค่าของ  $R_f$  (ปรับค่าที่กระแสไบอัส  $I_0$ ) และ  $g_m$  (ปรับค่าที่กระแสไบอัส  $I_B$ ) ลงในสมการที่ 3.32 ที่ได้วิเคราะห์ไว้ในบทที่ 3



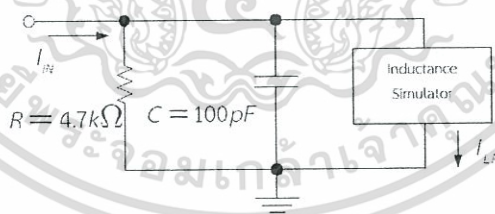
รูปที่ 4.5 การแทนค่าจากสมการเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE

เอกสารนี้เป็นเอกสารโดยปรับค่า  $I_0$  รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยรูปที่ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบการปรับค่า  $I_0$  โดยปรับค่ากระแสไบอัสตั้งแต่  $10 \mu\text{A} - 50 \mu\text{A}$  แต่ปรับค่ากระแสไบอัส  $I_B$  คงที่เท่ากับ  $200 \mu\text{A}$  เปรียบเทียบกับการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE ที่ปรับค่ากระแสไบอัส  $I_0$  และ  $I_B$  ที่ค่าเดียวกัน ผลการเปรียบเทียบแสดงถึงความแตกต่างกันของผลการทดสอบเนื่องจากผลของความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์ที่ได้วิเคราะห์ไว้ในบทที่ 3 ซึ่งจากสมการของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA ในทางอุดมคติจะเป็นสมการของตัวเหนี่ยวนำแต่สมการในกรณีไม่อุดมคติจะมีตัวต้านทานต่ออนุกรมอยู่ด้วย โดยจะมีค่า  $a$ ,  $b$  และ  $\gamma$  อยู่ในสมการด้วย ซึ่งในทางอุดมคติค่าเหล่านี้จะมีค่าเท่ากับ 1 แต่ในกรณีไม่อุดมคติ ค่า  $a$  จะมีค่าเท่ากับ 1.06 ค่า  $b$  จะมีค่าเท่ากับ 1 และค่า  $\gamma$  จะมีค่าเท่ากับ 0.97 จึงส่งผลซึ่งให้ค่าความเหนี่ยวนำจากการทดสอบด้วยโปรแกรม PSPICE ไม่ตรงกับค่าที่แทนในสมการของตัวเหนี่ยวนำสมการที่ 3.23 อีกทั้งมีค่าความต้านทานแฝงและค่าความจุแฝงที่ชั่วเอาต์พุตของอุปกรณ์ CCCFTA ก็ส่งผลต่อวงจรด้วย

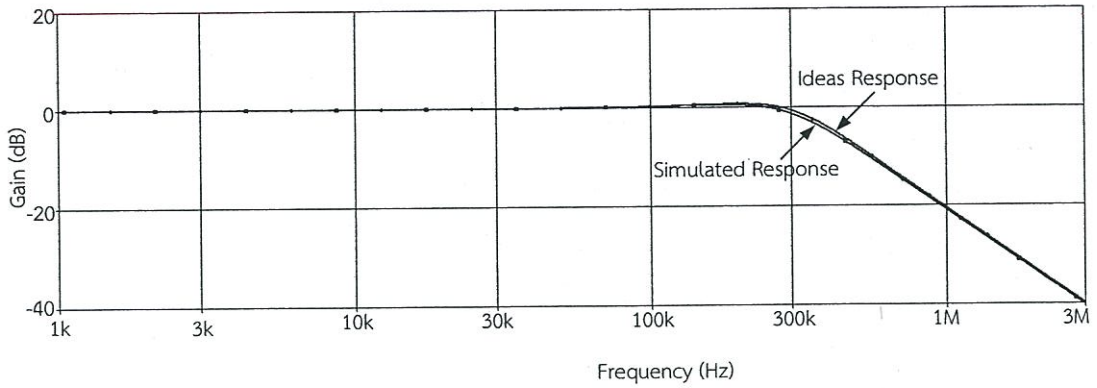
## 4.2 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน

เพื่อแสดงสมรรถนะของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ใช้อุปกรณ์ CCCFTA จะแสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้งาน ในวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน โดยวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านใช้หลักการของวงจรขนานของ ตัวต้านทาน (R) ตัวตัวเก็บประจุ (C) และ ตัวเหนี่ยวนำ (L) ที่ป้อนอินพุตเป็นกระแส โดยกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะให้ผลตอบสนองเป็นวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งในวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านที่ทำการเปรียบเทียบจะใช้ค่าของตัวต้านทานเท่ากับ  $4.7 \text{ k}\Omega$  ตัวเก็บประจุเท่ากับ  $100 \text{ pF}$  และตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำนั้นจะใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบขดลวด และตัวเหนี่ยวนำที่ผู้วิจัยได้ออกแบบ โดยใช้ค่าของตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ  $2.9 \text{ mH}$  ทั้งสองแบบ ดังรูปที่ 4.6



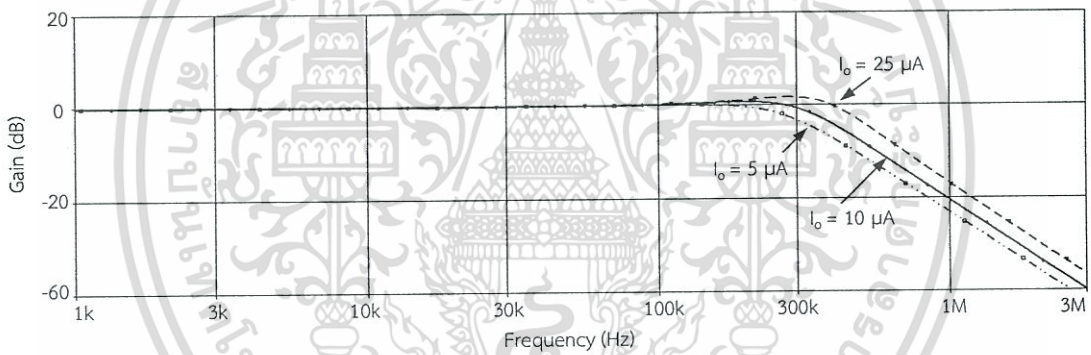
รูปที่ 4.6 วงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน

ผลการทดสอบพบว่าวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบขดลวด กับตัวเหนี่ยวนำที่ผู้วิจัยได้ออกแบบนั้นสามารถทำงานได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ใช้อุปกรณ์ CCCFTA ไปประยุกต์ใช้งานในวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านได้ แสดงดังรูปที่ 4.7



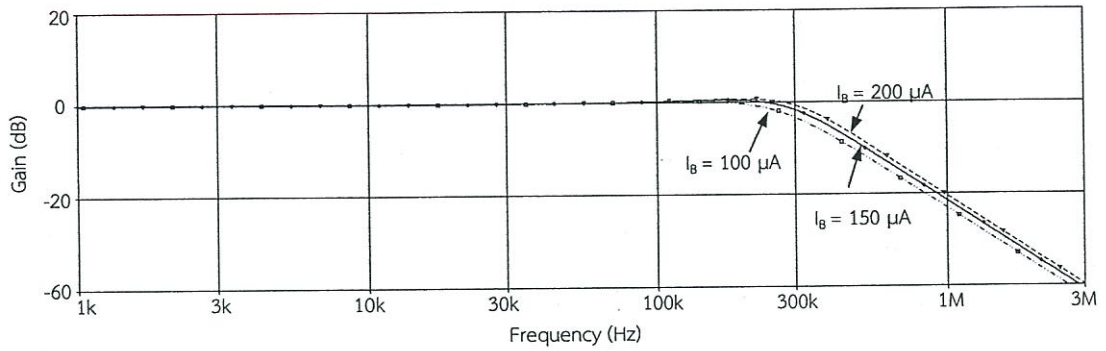
รูปที่ 4.7 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน

เพื่อแสดงให้เห็นถึงการปรับค่าความหนี่ยวนำด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ในวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านที่ประยุกต์ใช้งาน ผู้วิจัยจึงใช้ค่าของอุปกรณ์เหมือนดังวงจรดังรูปที่ 4.6 แต่ปรับค่าของตัวเหนี่ยวนำโดยการปรับค่าไบอัสกระแส  $I_o$  และ  $I_B$  แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.8 ผลการประยุกต์ใช้งานวงจรที่นำเสนอ ในวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน โดยปรับค่ากระแสไบอัส  $I_o$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ผลการประยุกต์ใช้งานวงจรที่นำเสนอ ในวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน โดยปรับค่ากระแสไบอัส  $I_B$

ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.8 คือการปรับค่าความถี่พหุคูณโดยการปรับกระแสไบอัส  $I_0$  โดยการปรับกระแสไบอัส  $I_0$  เป็นค่าต่างๆ คือ  $5 \mu\text{A}$ ,  $10 \mu\text{A}$  และ  $25 \mu\text{A}$  ตามลำดับ และค่ากระแสไบอัส  $I_B$  เท่ากับ  $200 \mu\text{A}$  คงที่ ซึ่งพบว่าสามารถปรับความถี่คัทออฟในวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.9 คือการปรับค่าความถี่พหุคูณโดยการปรับค่ากระแสไบอัส  $I_B$  โดยการปรับกระแสไบอัส  $I_B$  เป็นค่าต่างๆ คือ  $100 \mu\text{A}$ ,  $150 \mu\text{A}$  และ  $200 \mu\text{A}$  ตามลำดับ และค่ากระแสไบอัส  $I_0$  เท่ากับ  $10 \mu\text{A}$  คงที่ ซึ่งพบว่าสามารถปรับความถี่คัทออฟในวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์และการออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ โดยใช้อุปกรณ์แอคทีฟสำเร็จรูป CCCFTA การสังเคราะห์และการออกแบบเริ่มต้นจาก การศึกษา ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ อีกทั้งคุณสมบัติของอุปกรณ์ CCCFTA ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ จากนั้นได้ทำการสังเคราะห์และการออกแบบวงจร เลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ ให้สามารถทำงานเป็นตัวเหนี่ยวนำได้ และนำวงจรที่ได้ออกแบบนั้นไปทดสอบ สมรรถนะด้วยโปรแกรม PSPICE เมื่อได้ผลการทดสอบแล้วว่าเป็นตัวเหนี่ยวนำตามที่ได้ออกแบบไว้ แล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และนำวงจรไปประยุกต์ใช้งานในวงจรกรองความถี่ แบบความถี่ต่ำผ่าน ผู้วิจัยขอสรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะของงานวิจัยดังต่อไปนี้

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA ในงานวิจัยนี้มีโครงสร้าง ของวงจรประกอบด้วยอุปกรณ์ CCCFTA เพียงตัวเดียว กับตัวเก็บประจุ แบบต่อลงกราวด์ ซึ่งเป็น อุปกรณ์พาสซีฟเพียงหนึ่งตัวมาต่อรวม และวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ สามารถ ควบคุมค่าความเหนี่ยวนำได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยการปรับกระแสไบอัส  $I_0$  และ  $I_B$

ผลการทดสอบสมรรถนะ และผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE โดยใช้ พารามิเตอร์ของ CMOS เทคโนโลยี 0.5  $\mu\text{m}$  ของ MOSIS ที่แหล่งจ่ายแรงดัน  $\pm 2\text{ V}$  พบว่า มีการดึง กำลังงาน 2.1 mW วงจรสามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการปรับกระแส ไบอัสในช่วง 1  $\mu\text{A}$ -200  $\mu\text{A}$  ซึ่งปรับค่า  $I_0$  เป็น 15  $\mu\text{A}$  และปรับค่า  $I_B$  เป็น 250  $\mu\text{A}$  ตัวเก็บประจุ เท่ากับ 100 pF และสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำได้ในช่วงความถี่ 10 kHz-3 MHz นอกจากนี้ ยังได้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานวงจรที่สังเคราะห์และออกแบบขึ้นในวงจรกรองความถี่แบบความถี่ ต่ำผ่าน

#### 5.2 อภิปรายผลงานวิจัย

จากการสรุปผลงานวิจัย การสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลง กราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA ในหัวข้อที่ผ่านมา ผู้วิจัยมีประเด็นอภิปรายเพิ่มเติมคือในเรื่องการ วิเคราะห์วงจรในกรณีอุดมคติ กับการวิเคราะห์ในกรณีไม่อุดมคติ ดังแสดงไว้ในบทที่ 3 นั้นแสดงถึง ความแตกต่างกันของสมการ ซึ่งค่าในสมการไม่อุดมคติจะเห็นได้ว่าไม่เป็นสมการของตัวเหนี่ยวนำ เพียงอย่างเดียว จะมีสมการของตัวต้านทานต่ออนุกรมอยู่ด้วย และในกรณีวงจรทำงานที่ความถี่สูงก็ ไม่เป็นไปตามอุดมคติ เนื่องจากมีค่าความต้านทานแฝงและค่าตัวเก็บประจุแฝงที่ขั้วเอาต์พุตของค่า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ CCCFTA จึงทำให้สมการไม่เป็นไปตามอุดมคติ และผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบงานวิจัยที่นำเสนอกับงานวิจัยที่มีการนำเสนอไว้ จากตารางที่ 5.1 เป็นการเปรียบเทียบกับวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่ได้มีผู้เสนอไว้ แสดงให้เห็นถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ที่นำมาออกแบบแตกต่างกันออกไป โดยมีเรื่องของการใช้จำนวนอุปกรณ์แอกทีฟซึ่งบางวงจรใช้มากกว่า 1 ตัว บางวงจรยังใช้จำนวนอุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 1 ตัว อีกทั้งการต่อวงจรที่ใช้ตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์ และบางวงจรไม่สามารถควบคุมความเหนี่ยวนำได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบงานวิจัยที่นำเสนอกับงานวิจัยที่มีการนำเสนอไว้

| ชื่อผู้วิจัยและปีที่นำเสนอ | ชื่ออุปกรณ์แอกทีฟ | จำนวนอุปกรณ์แอกทีฟ | จำนวนอุปกรณ์พาสซีฟ | ใช้ตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์เท่านั้น | ควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ |
|----------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Petchmaneelumka, 2009a     | OTA               | 4                  | 1                  | ใช่                                | ทำได้                              |
| Petchmaneelumka, 2009b     | OTA               | 5                  | 1                  | ใช่                                | ทำได้                              |
| อติเรก จันตะคุณ, 2010      | OTA+ออปแอมป์      | 2                  | 0                  | ไม่ใช่                             | ทำได้                              |
| Prasad, 2010               | CDTA              | 2                  | 1                  | ใช่                                | ทำได้                              |
| Kumngern, 2011             | CCCII+OTA         | 2                  | 1                  | ใช่                                | ทำได้                              |
| Ibrahim, 2012              | DDCC              | 1                  | 3                  | ใช่                                | ไม่ได้                             |
| Herencsar, 2010            | CFTA              | 2                  | 1                  | ใช่                                | ทำได้                              |
| Herencsar, 2012            | CFTA              | 2                  | 2                  | ใช่                                | ทำได้                              |
| ชิตพล คุ่มแก้ว, 2012       | OTA               | 3                  | 1                  | ใช่                                | ทำได้                              |
| Kumar, 2010                | FTFN              | 1                  | 5                  | ไม่ใช่                             | ไม่ได้                             |
| งานวิจัยที่นำเสนอ, 2013    | CCCFTA            | 1                  | 1                  | ใช่                                | ทำได้                              |

ซึ่งผลการเปรียบเทียบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีการนำเสนอไว้กับวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA ที่ออกแบบนั้นสามารถสรุปข้อดีได้คือ

- ใช้อุปกรณ์แอกทีฟคือ CCCFTA จำนวน 1 ตัว
- ใช้อุปกรณ์พาสซีฟคือตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์ 1 ตัว
- ใช้ตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์เพื่อสะดวกในการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม
- ควบคุมค่าความเหนี่ยวนำได้ด้วยทางอิเล็กทรอนิกส์

## 5.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

### 5.3.1 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยในครั้งนี้

การออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์นี้ โครงภายในของ CCCFTA ควรออกแบบด้วยวงจรพื้นฐานสมรรถนะสูง เช่น วงจรสะท้อนกระแส อาจใช้วงจรสะท้อนกระแสแบบวิลสันหรือแบบคาสเคด เพื่อลดปัญหาค่า  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  ให้มีค่าเข้าใกล้กับ 1 มากที่สุดเพื่อลดผลกระทบในกรณีไม่อุดมคติ และวงจรสามารถทำงานที่ความถี่สูงได้มากขึ้น

### 5.3.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยครั้งต่อไป

สำหรับการวิจัยครั้งต่อไปในอนาคต สามารถพัฒนาจรรยาบรรณเปลี่ยนแบบตัวเหี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ให้มีสมรรถนะสูงขึ้น เช่น สามารถทำงานที่แรงดันไฟเลี้ยงที่ต่ำลง มีการบริโภคกำลังงานต่ำ ตอบสนองความถี่ได้สูงขึ้น มีโครงสร้างที่น้อยลงกว่าเดิม รวมถึงการสังเคราะห์และการออกแบบวงจรประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์สำเร็จรูป CCCFTA ให้มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- จามรี ศิริรัตน์. 2555. “วงจรรองสัญญาณอนุกรมประสงค์โหมดแรงดันและโหมดกระแสที่ปรับค่าได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ CFTA ตัวเดียว.” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม. วิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ชิตพล คุ่มแก้ว. 2555. “ตัวจำลองค่าความเหนี่ยวนำแบบลอยตัวโดยใช้โอทีเอ.” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม. วิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วิภพ ใจแข็ง, ชาดิธนู จะรัมย์พันธ์ และประโยชน์ พูนกล้า. 2554. การสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับตัวต้านทานและการประยุกต์ใช้งาน. [Online]. <http://www.ind.cru.in.th/loginweb/showarticle.asp?id=48>
- สมคิด แซ่โจ้ว. 2546. “วงจรถ่ายแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ทรานซิสเตอร์แบบซีมอสในย่านความถี่สูง.” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์. วิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อดิเรก จันตะคุณ และมนตรี ศิริปรัชญานันท์. 2010. “วงจรถ่ายตัวเหนี่ยวนำแบบลอยชนิดบวกและลบที่ใช้อุปกรณ์แอคทีฟเพียงอย่างเดียวสามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์.” หน้า 354-358. ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8
- Herencsar, N., Koton, J., and Vrba, K. 2010. “CFTA-Based Active-C Grounded Positive Inductance Simulator And Its Application.” pp. 24-27. *Elektrorevue* ISSN 1213-1539.
- Herencsar, N., Koton, J., Vrba, K., and Lattenberg, I. 2011. “Current follower transconductance amplifier (CFTA) - a useful building block for analog signal processing.” pp. 217-229. *Journal of Active and Passive Electronic Devices*.
- Herencsar, N., Koton, J., Vrba, K., Lahiri, A., and Cicekoglu, O. 2010. “Current-controlled CFTA-based current-mode SITO universal filter and quadrature oscillator.” pp. 1-4. 2010 International Conference on Applied Electronics (AE).
- Herencsar, N., Lahiri, A., Koton, J., Vrba, K., and Sotner, R. 2012. “New Floating Lossless Inductance Simulator Using Z-copy Current Follower Transconductance Amplifiers.” pp. 1-4. *International Conference Radioelektronika 2012*.
- Kumar, P. and Senani, R. 2010 “New grounded simulated inductance circuit using a single PFTFN” pp. 105-112. *Analog Integr Circ Sig Process*.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Kumngern, M. 2011. "New Positive/Negative Floating Inductance Simulation Using OTA and CCCII." pp. 5-8. **Symposium on Wireless Technology and Applications (ISWTA).**
- Muhammed, A., Ibrahim, Minaei, S., Yuce, E., Herencsar, N., and Koton, J. 2012. "Lossy/Lossless Floating/Grounded Inductance Simulation Using One DDCC." pp. 3-10. **Radioengineering.**
- Petchmaneelumka, W. 2009. "Simple Floating Inductance Simulators Using OTAs." pp. 1018-1021. **Instrumentation and Measurement Technology Conference.**
- Petchmaneelumka, W. 2009. "OTAs-based Positive/Negative Floating Inductance Simulator." pp. 1439-1442. **Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2009.**
- Prasad, D., Bhaskar, A., and Singh, K. 2010. "New Grounded and Floating Simulated Inductance Circuits using Current Differencing Transconductance Amplifiers." pp. 194-198. **Radioengineering.**
- Tangsrirat, W. 2010. "Novel current-mode and Voltage-mode Universal biquad filters using single CFTA." pp. 99-104. **Indian Journal of Engineering & Materials Sciences.**
- Tangsrirat, W. 2011. "Single-input three-output electronically tunable universal current-mode filter using current follower transconductance amplifiers." pp. 783-787. **International Journal of Electronics and Communications (AEÜ).**

## ประวัติผู้เขียน

|                  |  |
|------------------|--|
| ชื่อ-สกุล        | ว่าที่ ร.ต.ปฐม จันทร์เดช   |
| วัน-เดือน-ปีเกิด | 19 กันยายน 2528  |
| สถานที่เกิด      | จังหวัด สิงห์บุรี  |
| ที่อยู่ปัจจุบัน  | บ้านเลขที่ 53/1 หมู่ 8 ตำบลจันทรวราย อำเภออินทร์บุรี จังหวัดสิงห์บุรี 16110  |
| ประวัติการศึกษา  | ปีการศึกษา 2548 สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาอิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคนิคสิงห์บุรี<br>ปีการศึกษา 2550 สำเร็จการศึกษา ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (ค.อ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง<br>ปีการศึกษา 2556 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต (ค.อ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| ประวัติการทำงาน  | อาจารย์อัตราจ้างแผนกอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคสิงห์บุรี พ.ศ. 2551-2553<br>อาจารย์ประจำแผนกอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม(สยามเทค) พ.ศ. 2553-ปัจจุบัน  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้