การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น

Integrable Voltage-Controlled and Current-Controlled Nonlinear Resistances

วันชัย ริ้วรุจา

Vanchai Riewruja

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ดร. วัลลภ สุระกำพลธร

Advisor

Assistant Professor Dr. Wanlop Surkampontorn

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผศ. ดร. พัลลภ เหล่าเจริญ

Co-Advisor

Assistant Professor Dr. Pallop Laocharoen

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2530

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

แบบฟอร์มการให้คะแนนการสอบวิทยานิพนธ์

สำหรับนักศึกษาระดับมหาบัณฑิต

ชื่อนักศึกษา นายวันชัย ริ้วรุจา เลขประจำตัว 27.0010

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น (Integrable Voltage-Controlled and Current-Controlled Nonlinear Resistances)

ชื่ออาจารย์ผู้ควบคุมการสอบ	ลายมือชื่อ	ผลการสอบ
ผศ.ดร.วัลลภ สุระกำพลธร		ดีเยี่ยม
ผศ.ดร.พัลลภ เหล่าเจริญ		ดีเยี่ยม
รศ.ดร.สิทธิชัย โภไคยอุดม		ผ่าน
ผศ.ดร.จ-เร สุรวัฒน์บัญชา		ดี

วันเดือนปี ที่สอบ 9 มิถุนายน 2531 **เวลา** 13.00 น. **สถานที่** ห้อง A-305

(นายสิทธิชัย โภไคยอุดม)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบาญ

บทคัดย่อ III

Abstract IV

บทที่ 1 บทนำ 1

บทที่ 2 ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น 5

2.1 บทนำ 5

2.2 คุณลักษณะจำเพาะของความต้านทานเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น 5

2.3 หลักการสังเคราะห์ความต้านทานเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น 10

2.4 บทสรุป 12

บทที่ 3 การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น 13

3.1 บทนำ 13

3.2 การประมาณค่าด้วยฟังก์ชั่นตรรกยะ 13

3.2.1 วงจรศักดาแปรค่าความต้านทาน 13

3.2.2 วงจรความต้านทานแบบลอยตัว 21

3.2.3 วงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น
แบบฟังก์ชั่นตรรกยะ 25

3.3 การประมาณค่าด้วยความเป็นเชิงเส้นแบบช่วง 29

3.3.1 การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น
โดยใช้ซีเนอร์ไดโอดและไดโอดชนิดกระแสคงที่ 30

3.3.2 การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น
โดยใช้วงจรสะท้อนกระแส 37

3.3.3 การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น
โดยใช้วงจรจำกัดศักดา 39

3.4 บทสรุป 43

บทที่ 4 การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น
โดยใช้หลักการของวงจรรวม 45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 บทนำ 45
4.2 หลักการพื้นฐานของความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วง 45
4.3 การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น ชนิดศักดาควบคุม 49
4.4 การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น ชนิดกระแสควบคุม 51
4.5 บทสรุป 57
บทที่ 5 วงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่ได้พัฒนาขึ้น 58
5.1 บทนำ 58
5.2 หลักการของวงจรจำกัดกระแส 58
5.2.1 หลักการของวงจรจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 68
5.3 ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิดกระแสควบคุม 70
5.4 ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิดศักดาควบคุม 72
5.5 บทสรุป 75
บทที่ 6 ผลการทดลองและตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน 76
6.1 บทนำ 76
6.2 การทดสอบวงจรจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 76
6.3 การประยุกต์ใช้งานของวงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น 78
6.4 บทสรุป 86
กิตติกรรมประกาศ 87
เอกสารอ้างอิง 88
ภาคผนวก ก การหาค่าความต้านทานแบบลอยตัว ชนิดแปรผันตรงกับศักดาควบคุม 90
ภาคผนวก ข การหาความสัมพันธ์ของกระแสอินพุทและกระแสเอาท์พุท ในวงจรสะท้อนกระแสแบบลบ 94
ภาคผนวก ค การหาความสัมพันธ์ของศักดาอินพุทและศักดาเอาท์พุทของ วงจรตามศักดา 96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอหลักการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นอีกแนวทางหนึ่งโดยอาศัยหลักการของวงจรรวม ซึ่งหลักการออกแบบจะใช้วงจรจำกัดกระแส (current limiter) ที่ได้พัฒนาขึ้นหลายๆชุดมาต่อร่วมกันเพื่อสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่มีฟังก์ชั่นรูปแบบต่างๆตามที่ได้กำหนดขึ้น ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่สังเคราะห์ขึ้นนี้จะเป็นความต้านทานชนิดลอยตัวและสามารถใช้งานได้ทั้งในรูปของศักดาควบคุมและกระแสควบคุม เพื่อเป็นการทดสอบและยืนยันถึงหลักการที่ได้เสนอขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้ทดลองต่อวงจรเพื่อสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นตามหลักการที่ได้กล่าวถึง โดยได้กำหนดฟังก์ชั่นไม่เป็นเชิงเส้นที่จะสังเคราะห์รูปแบบหนึ่งขึ้น และจากการทดสอบคุณลักษณะจำเพาะของความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นจะได้เส้นคุณลักษณะจำเพาะ (characteristic) ที่เหมือนกับฟังก์ชั่นที่ได้กำหนดไว้อย่างแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Abstract

This thesis proposes a method to synthesize integrable nonlinear resistances. New circuit elements termed as current-limiter are developed for realizable nonlinear resistances. Grounded and floating nonlinear resistances working in voltage-controlled mode or current-controlled mode can be easily synthesized. The performance of the circuits is confirmed by experimental realization.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นเป็นอนุกล (element) ที่มีการประยุกต์และใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เช่นเป็นตัวชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นของเทอร์โมคลัปเปิล (thermocouples) เป็นตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ใช้ในวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ เป็นตัวแปลงรูปสัญญาณ เป็นต้น โดยทั่วไปความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นสามารถที่จะสังเคราะห์ได้โดยอาศัยคุณลักษณะจำเพาะของอนุกลจำพวกสารกึ่งตัวนำเช่น ไดโอด ซีเนอร์ไดโอด ทันเนลไดโอด ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น แต่เนื่องจากคุณลักษณะจำเพาะ (characteristic) ของอนุกลประเภทนี้จะมีรูปแบบที่แน่นอนซึ่งในบางกรณีจะไม่เหมาะสมกับการใช้งาน จึงได้มีการวิจัยและพัฒนาทางด้านวงจรขึ้นเพื่อที่จะสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นให้มีคุณลักษณะจำเพาะตามที่ต้องการ แนวทางในการออกแบบวงจรเพื่อสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นสามารถที่จะแบ่งออกได้เป็นสองแนวทางคือ การออกแบบวงจรแบบดิสครีท (discrete) และการออกแบบโดยใช้หลักการของวงจรรวม (integrated circuits) ในการออกแบบวงจรแบบดิสครีทส่วนใหญ่จะมีรูปแบบของความไม่เป็นเชิงเส้นที่แน่นอนและจะเป็นการออกแบบขึ้นเพื่อใช้เฉพาะกับงาน [1] ทำให้จะต้องออกแบบหรือมีการเปลี่ยนแปลงวงจรใหม่ทุกครั้ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของความไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นการยุ่งยากและความแม่นยำของเส้นคุณลักษณะจำเพาะของความต้านทานจะมีค่าผิดพลาดสูง เนื่องจากอนุกลที่ใช้ในวงจรมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ไม่เป็นไปตามอุดมคติ ส่วนการออกแบบโดยใช้หลักการของวงจรรวมนั้นสามารถที่จะออกแบบให้เปลี่ยนแปลงฟังก์ชั่นของความไม่เป็นเชิงเส้นได้ง่าย โดยการต่อร่วมกันของวงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นหลายๆชุด และความแม่นยำของเส้นคุณลักษณะจำเพาะจะมีค่าผิดพลาดน้อย ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในบทต่อไป

วงจรรวมเป็นวงจรที่ประกอบด้วยอนุกลประเภทแอคทีฟ (active) และพาส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีฟ (passive) มาต่อร่วมกันบนชิ้นสารกึ่งตัวนำเดียวกัน ทำให้วงจรอีเล็คทรอนิคในรูปของวงจรรวมจะมีขนาดเล็กลง แต่มีประสิทธิภาพและขีดความสามารถในการทำงานสูงและต้นทุนในการผลิตวงจรจะลดต่ำลง อีกทั้งการซ่อมบำรุงของอุปกรณ์ที่ใช้วงจรรวมมีความยุ่งยากน้อยกว่าวงจรประเภทดิสครีท จึงทำให้มีการประยุกต์เอาวงจรรวมมาแทนวงจรแบบดิสครีทในงานต่างๆอย่างมากมายทั้งทางด้าน การสื่อสาร อุตสาหกรรม เกษตรกรรม การคมนาคม เครื่องมือวัดและวิเคราะห์สัญญาณเป็นต้น ในวงจรรวมอนุกลประเภทพาสซีฟโดยเฉพาะความต้านทานจะเป็นอนุกลที่ต้องการเนื้อที่ในชิ้นสารกึ่งตัวนำมาก ถ้าในวงจรรวมมีความต้านทานประกอบอยู่มาก จะทำให้ชิ้นสารกึ่งตัวนำที่ทำเป็นวงจรรวมจะมีขนาดใหญ่ และค่าความต้านทานที่สังเคราะห์ได้ในวงจรรวมจะมีค่าผิดพลาดสูง [2] ดังนั้นในการออกแบบวงจรจึงพยายามหลีกเลี่ยงการใช้อนุกลประเภทพาสซีฟ

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการวิจัยและพัฒนาการออกแบบวงจร เพื่อสังเคราะห์อนุกลไม่เป็นเชิงเส้นอีกแนวทางหนึ่ง ซึ่งจะใช้หลักการของวงจรรวมและจะเน้นเฉพาะการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น โดยที่ความต้านทานที่สังเคราะห์ขึ้นนี้จะเป็นประเภทแอคทีฟและสามารถที่จะใช้งานได้ในลักษณะของกระแสควบคุมหรือศักดาควบคุม ค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของความต้านทานจะไม่ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะจำเพาะทางกายภาพของอนุกลที่ใช้ในวงจร และสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงความไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นรูปแบบใดๆได้ ซึ่งความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่สังเคราะห์ขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการประมาณค่าความไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้ความเป็นเชิงเส้นแบบช่วง (piecewise-linear)

1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท โดยในบทที่หนึ่งนี้จะเป็นการ

กล่าวนำและวัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ ส่วนในบทอื่นๆจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 2 จะกล่าวถึงคุณลักษณะจำเพาะของความต้านทานเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น และหลักการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีของฟังก์ชั่นตรรกยะและความเป็นเชิงเส้นแบบช่วง

บทที่ 3 ในบทนี้จะกล่าวถึงการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้วงจรแบบดิสครีท โดยจะเป็นการออกแบบวงจรความต้านทานแบบโพลิโนเมียลเพื่อนำมาสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นแบบฟังก์ชั่นตรรกยะ การออกแบบวงจรความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วงโดยใช้ซีเนอร์ไดโอด ไดโอดชนิดกระแสคงที่ และการออกแบบวงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้วงจรสะท้อนกระแส (current mirror) และวงจรจำกัดศักดา (voltage limiter)

บทที่ 4 จะกล่าวถึงการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้หลักการของวงจรรวม ซึ่งหลักการออกแบบความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นในบทนี้จะใช้ความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วงเป็นหลัก

บทที่ 5 เป็นการเสนอหลักการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นอีกแนวทางหนึ่ง ซึ่งจะใช้วงจรจำกัดกระแส (current limiter) เป็นหลักโดยที่การทำงานของวงจรจะอยู่ในรูปของกระแสทั้งหมด ทำให้ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่สังเคราะห์ขึ้นมีความแม่นยำสูงและความผิดเพี้ยนของสัญญาณมีค่าต่ำ

บทที่ 6 ซึ่งเป็นบทสุดท้ายจะเป็นการทดสอบและการประยุกต์ใช้งานของวงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนในช่วงท้ายของวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นภาคผนวกซึ่งจะมีรายละเอียดดังนี้

ภาคผนวก ก จะเป็นการหาค่าความต้านทานของวงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิดแปรผันตรงกับศักดาควบคุม

ภาคผนวก ข จะเป็นการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของกระแสอินพุทและกระแสเอาท์พุทของวงจรสะท้อนกระแสแบบลบ (negative current mirror)

ภาคผนวก ค จะเป็นการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของศักดาอินพุทและศักดาเอาท์พุทของวงจรตามศักดา (voltage follower)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ความต้านทานเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น

2.1 บทนำ

ความต้านทานเป็นอนุกลพื้นฐานที่สำคัญตัวหนึ่งในวงจรโครงข่ายไฟฟ้า โดยที่ความต้านทานสามารถแบ่งออกตามคุณลักษณะจำเพาะได้เป็นสองชนิดคือ ความต้านทานเชิงเส้นและความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น การสังเคราะห์ความต้านทานทั้งสองชนิดนี้นอกจากจะอาศัยคุณลักษณะทางกายภาพของสารตัวนำหรือสารกึ่งตัวนำแล้ว ยังสามารถที่จะสังเคราะห์ได้โดยใช้วงจรอีเล็คทรอนิคอีกด้วย โดยที่ในบทที่สองนี้จะเป็นการกล่าวถึงคุณลักษณะจำเพาะของความต้านทานเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นและวิธีการประมาณค่าความไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้ฟังก์ชั่นตรรกยะและความเป็นเชิงเส้นแบบช่วง

2.2 คุณลักษณะจำเพาะของความต้านทานเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น

2.2.1 ความต้านทานเชิงเส้น

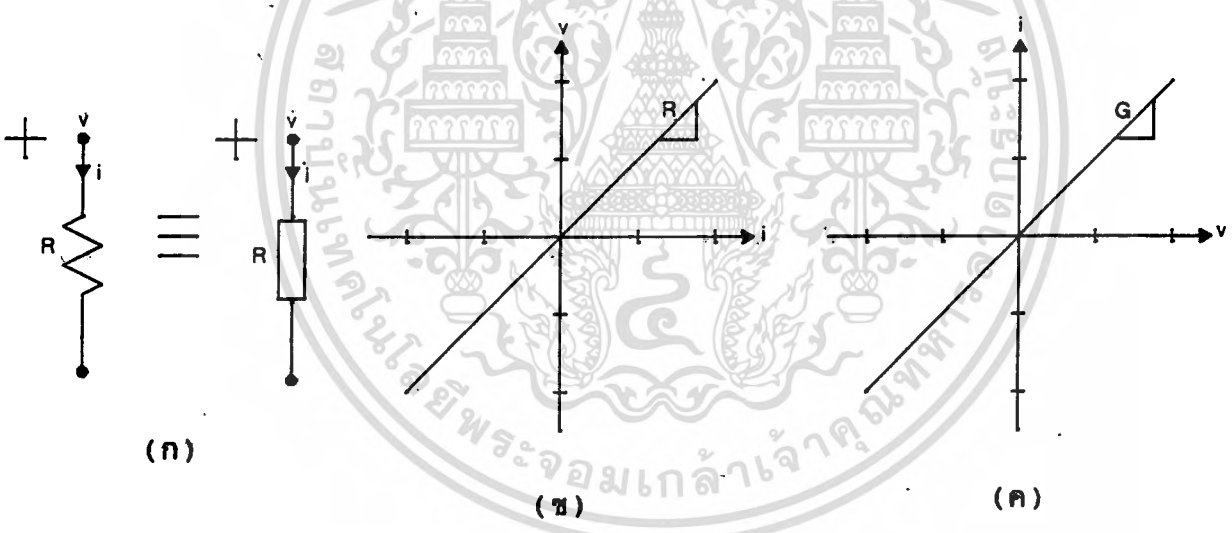
อนุกลที่มีความสัมพันธ์ระหว่างศักดาที่ตกคร่อมและกระแสที่ไหลผ่านตัวมันเป็นไปตามกฎของ Ohm's จะสามารถเรียกอนุกลนั้นว่า*ความต้านทาน* โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงความต้านทานมักจะหมายถึงความต้านทานเชิงเส้นซึ่งจะมีสัญลักษณ์แสดงในรูปที่ 2.2.1 (ก) และมีความสัมพันธ์ตามกฎของ Ohm's ดังสมการที่ (2.2.1) โดยที่ v(t) เป็นศักดาที่ตกคร่อมความต้านทาน R และ i(t) เป็นค่ากระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน R ส่วน R และ G เป็นค่าความต้านทานและค่าความนำตามลำดับ เพราะฉะนั้น

$$v(t) = Ri(t) \quad \text{หรือ} \quad i(t) = Gv(t) \qquad (2.2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.2.1 (ข) และ (ค) เป็นคุณลักษณะจำเพาะของความต้านทานเชิงเส้นบนระนาบ v-i และ i-v ตามลำดับซึ่งเขียนขึ้นจากสมการที่ (2.2.1) โดยที่ค่าความชันของเส้นกราฟก็คือค่าความต้านทานหรือค่าความนำ

จากกฎของ Ohm's ความสัมพันธ์ระหว่างศักดาและกระแสจะบอกเพียงว่าอนุกลนั้นเป็นความต้านทานหรือไม่โดยที่ไม่ได้แบ่งแยกออกมาว่าเป็นความต้านทานเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้พิจารณาคุณลักษณะจำเพาะของความต้านทานอีกแนวทางหนึ่งเพื่อที่จะแยกคุณลักษณะจำเพาะของความต้านทานทั้งสองชนิด โดยที่สามารถที่จะกล่าวได้ว่าอนุกลที่เป็นความต้านทานจะต้องมีศักดา v ที่ตกคร่อมและกระแส i ที่ไหลผ่านตัวมันสอดคล้องกับสมการที่ (2.2.2)



รูปที่ 2.2.1 (ก) สัญลักษณ์ของความต้านทานเชิงเส้น
(ข) และ (ค) คุณลักษณะจำเพาะบนระนาบ v-i และ i-v

รูปที่ 2.2.2 สัญลักษณ์ของความต้านไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_R = \{(v,i) : f(v,i)=0\} \qquad (2.2.2)$$

เมื่อ R_R คือความต้านทานและ $f(v,i)$ คือฟังก์ชั่นของศักดา v และกระแส i ซึ่งความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.2.2) นี้แสดงให้เห็นว่าความต้านทาน R_R จะสัมพันธ์กับศักดา v และกระแส i โดยฟังก์ชั่น $f(v,i)=0$ หรืออาจกล่าวได้ว่าสมการที่ (2.2.2) ก็คือคุณลักษณะจำเพาะบนระนาบ v-i เมื่อฟังก์ชั่น $f(v,i)=0$ และในกรณีของความต้านทานเชิงเส้นเงื่อนไขของ $f(v,i)$ จะเป็นดังนี้

$$f(v,i) = v - iR = 0 \quad \text{หรือ} \quad f(v,i) = i - Gv = 0 \qquad (2.2.3)$$

เมื่อ v และ i เป็นศักดาที่ตกคร่อมและกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน R หรือความนำ G ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเงื่อนไขในสมการที่ (2.2.3) ก็คือกฎของ Ohm's ในสมการที่ (2.2.1) นั่นเอง โดยที่ความสัมพันธ์ของศักดา v และกระแส i จะแปรไปอย่างเป็นเชิงเส้นดังในรูปที่ 2.2.1 (ก) และ (ข) หรืออีกนัยหนึ่งสามารถที่จะกล่าวได้ว่า*ความต้านทานเชิงเส้นก็คือความต้านทานที่จะต้องมีเส้นคุณลักษณะจำเพาะ v-i ที่เป็นเส้นตรงและลากผ่านจุดกำเนิด*

2.2.2 *ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น*

จากสมการที่ (2.2.2) ส่วนที่จะเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะจำเพาะของความต้านทานก็คือฟังก์ชั่น $f(v,i)$ *ดังนั้นอนุกลหรือความต้านทานที่มีเงื่อนไขที่นอกเหนือไปจากสมการที่ (2.2.3) ก็สามารถที่จะกล่าวได้ว่าความต้านทานหรืออนุกลนั้นๆเป็นความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น*ซึ่งมีสัญลักษณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.2.2 ตัวอย่างของความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นจะขอยกตัวอย่างที่รู้จักกันดี 3 ตัวอย่างดังนี้คือ

(ก) ไดโอดอุดมคติ ซึ่งอาจจัดเป็นความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่มีคุณลักษณะจำเพาะดังแสดงในรูปที่ 2.2.3 จากรูปที่ 2.2.3 จะเห็นได้ว่าไดโอดอุดมคติจะสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มารถแบ่งช่วงการทำงานออกเป็นสองช่วงคือ ในช่วงที่มีกระแส i ไหลผ่านไดโอดหรือไดโอดถูกไบอัสตรงซึ่งจะเป็นผลให้ศักดา v ที่ตกคร่อมไดโอดมีค่าเป็นศูนย์หรือสามารถที่จะกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าความต้านทานของไดโอดจะมีค่าเป็นศูนย์ และในช่วงที่ศักดา v มีค่าน้อยกว่าศูนย์หรือไดโอดถูกไบอัสกลับจะทำให้ไม่มีกระแส i ไหลผ่านไดโอดหรือก็คือความต้านทานของไดโอดจะมีค่าเป็นอนันต์ ดังนั้นจากผลของกระแส i และศักดา v ที่ไหลผ่านและตกคร่อมไดโอดตามลำดับสามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$R_D = \{(v,i) : vi = 0 \ , \ i = 0 \text{ เมื่อ } v < 0 \text{ และ } v = 0 \text{ เมื่อ } i > 0\} \qquad (2.2.4)$$

รูปที่ 2.2.3 ไดโอดอุดมคติและคุณลักษณะจำเพาะ

จากสมการที่ (2.2.4) เงื่อนไขของความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นจะพิจารณาจากกำลังงานที่สูญเสียในตัวไดโอดอุดมคติซึ่งจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เป็นผลให้สามารถที่จะแยกความต้านทานของไดโอดอุดมคติออกเป็นสองค่าคือศูนย์และอนันต์ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ต่อเนื่องและไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าไดโอดอุดมคติเป็นความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น

(ข) P-N ไดโอด เป็นไดโอดที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไปซึ่งมีคุณลักษณะจำเพาะแสดงในรูปที่ 2.2.4 ซึ่งค่ากระแส i ที่ไหลผ่านไดโอดจะเป็นไปตามสมการ

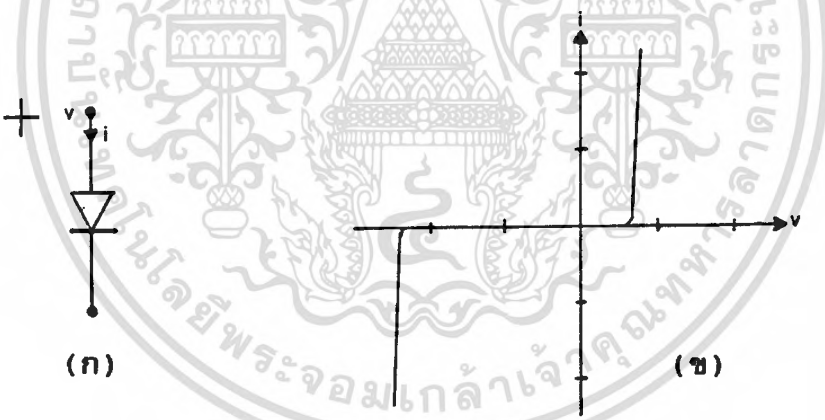
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i = I_s[\exp(v/V_T) - 1] = i(v) \qquad (2.2.5)$$

โดยที่ I_s เป็นค่ากระแสอิ่มตัวในขณะที่ไดโอดถูกไบอัสกลับ v เป็นศักดาที่ตกคร่อมไดโอด V_T เป็นค่าศักดาที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ จากเงื่อนไขของความต้านทานในสมการที่ (2.2.2) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$f(v,i) = i - i(v) = 0 \qquad (2.2.6)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้นและถ้าค่ากระแส I_s และศักดา V_T คงที่ ค่ากระแส i ที่ไหลผ่านไดโอดก็จะขึ้นอยู่กับศักดา v ที่ตกคร่อมตัวไดโอดหรือสามารถที่จะกล่าวได้ว่ากระแส i จะถูกควบคุมโดยศักดา v ดังนั้นความต้านทานของ P-N ไดโอดจึงเป็น*ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิดศักดาควบคุม*



รูปที่ 2.2.4 P-N ไดโอดและคุณลักษณะจำเพาะ

(ค) หลอดเรืองแสง เป็นที่ทราบดีอยู่แล้วว่าหลอดเรืองแสงจำพวกหลอดนีออนจะนำกระแสก็ต่อเมื่อมีศักดาตกคร่อมตัวหลอดถึงค่าๆหนึ่ง และในขณะที่หลอดนำกระแสจะเสมือนกับเป็นการลัดวงจรระหว่างขั้วทั้งสองของหลอดเป็นผลให้ศักดาที่ตกคร่อมระหว่างขั้วทั้งสองลดลง เส้นคุณลักษณะจำเพาะของหลอดเรืองแสงแสดงในรูปที่ 2.2.5 และสามารถที่จะเขียนเป็นฟังก์ชั่นได้ดังนี้

$$v = v(i) \qquad (2.2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$f(v,i) = v - v(i) = 0 \qquad (2.2.8)$$

จากสมการที่ (2.2.7) และ (2.2.8) ศักดา v คือศักดาที่ตกคร่อมระหว่างขั้วของหลอดและกระแส i คือค่าของกระแสที่ไหลผ่านหลอดในช่วงที่หลอดนำกระแส ซึ่งจะเห็นได้ว่าศักดา v ที่ตกคร่อมขั้วหลอดจะขึ้นอยู่กับกระแส i ที่ไหลผ่านหลอดหรือจะกล่าวได้ว่ากระแส i จะเป็นตัวควบคุมศักดา v ที่ตกคร่อมหลอด ดังนั้นความต้านทานของหลอดเรืองแสงจึงเป็น*ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิดกระแสควบคุม*

รูปที่ 2.2.5 หลอดเรืองแสงและคุณลักษณะจำเพาะ

2.3 *หลักการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น*

จากตัวอย่างที่กล่าวมาทั้งสามตัวอย่างจะเห็นได้ว่าเงื่อนไขของความไม่เป็นเชิงเส้น f(v,i) จะมีรูปแบบที่แน่นอนทำให้การประยุกต์ใช้งานมีข้อจำกัดอยู่มาก ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาทางด้านวงจรขึ้นเพื่อสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่มีรูปแบบตามที่ต้องการ การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นอาจทำได้สองวิธี [3] โดยวิธีแรกจะเป็นการประมาณค่าความไม่เป็นเชิงด้วยฟังก์ชั่นตรรกยะและวิธีที่สองจะเป็นการประมาณค่าโดยใช้ความเป็นเชิงเส้นแบบช่วง สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการประมาณค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของทั้งสองวิธี ส่วนการออกแบบวงจรจะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 การประมาณค่าด้วยฟังก์ชั่นตรรกยะ

ในทางคณิตศาสตร์รูปแบบของฟังก์ชั่นต่อเนื่องใดๆสามารถที่จะเขียนเป็นอนุกรมได้ดังนี้

$$w = c_0 + c_1 z + c_2 z^2 + ... + c_n z^n \qquad (2.3.1)$$

โดยที่ w เป็นฟังก์ชั่นต่อเนื่องใดๆ $c_0,.....,c_n$ จะเป็นค่าคงที่และ z จะเป็นตัวแปรใดๆ ฟังก์ชั่นในสมการที่ (2.3.1) สามารถที่จะหาได้จากอัตราส่วนของสองโพลิโนเมียลดังนี้

$$w = P(z)/Q(z) \qquad (2.3.2)$$

โดยที่ P(z) และ Q(z) เป็นโพลิโนเมียลใดๆและสมการที่ (2.3.2) จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อฟังก์ชั่น Q(z) จะต้องมีค่าไม่เท่ากับศูนย์และสมการที่ (2.3.2) นี้ก็คือ*ฟังก์ชั่นตรรกยะ* การประมาณค่าของฟังชั่นต่อเนื่องใดๆด้วยฟังก์ชั่นตรรกยะนั้นจะได้ค่าที่มีความแม่นยำสูง แต่การประมาณค่าความไม่เป็นเชิงในวิธีนี้จะไม่สามารถที่จะประมาณค่าฟังก์ชั่นไม่ต่อเนื่องได้เพราะเหตุว่าฟังก์ชั่นไม่ต่อเนื่องจะกระจายอนุกรมได้ไม่ตลอดช่วง ทำให้การประมาณค่าความไม่เป็นเชิงเส้นด้วยฟังก์ชั่นตรรกยะจึงถูกใช้เฉพาะในฟังก์ชั่นต่อเนื่องเท่านั้น

2.3.2 การประมาณค่าด้วยความเป็นเชิงเส้นแบบช่วง

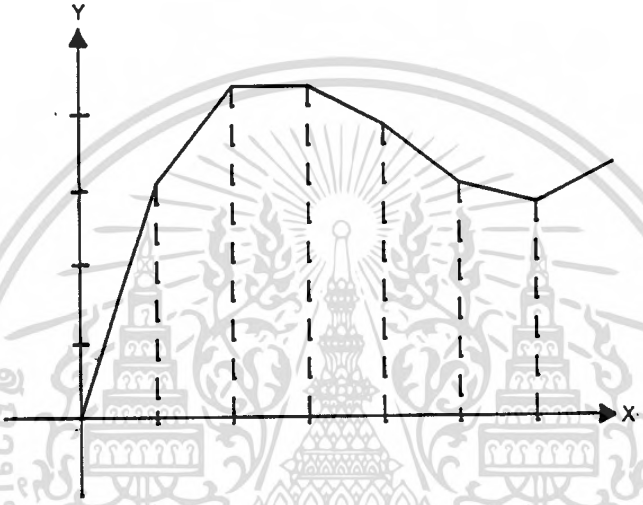
การประมาณค่าด้วยวิธีนี้จะทำการแบ่งฟังก์ชั่นรูปแบบใดๆออกเป็นช่วงๆ โดยแต่ละช่วงสามารถที่จะแทนได้ด้วยเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.3.1 ซึ่งเส้นตรงที่เป็นช่วงๆนี้จะเรียกว่า*ความเป็นเชิงเส้นแบบช่วง* ดังนั้นในการประมาณค่าของฟังก์ชั่นรูปแบบใดๆจึงสามารถที่จะทำได้โดยการนำเอาความเป็นเชิงเส้นแบบช่วงมาต่อร่วมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถที่จะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Q(x) = \sum_{n=1}^{m} a_n X + b_n \qquad (2.3.3)$$

โดยที่ Q(x) เป็นฟังก์ชั่นใดๆ ส่วน a_n และ b_n เป็นค่าคงที่ใดๆในแต่ละช่วง n



รูปที่ 2.3.1 การประมาณค่าด้วยความเป็นเชิงเส้นแบบช่วง

2.4 *บทสรุป*

ความต้านทานคืออนุกลที่มีความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านและศักดาที่ตกคร่อมตัวมันเป็นไปตามกฎของ Ohm's และความต้านทานยังสามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดคือ*ความต้านทานเชิงเส้นและความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น* โดยที่ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นสามารถที่จะสังเคราะห์ได้จากการใช้คุณลักษณะจำเพาะของสารกึ่งตัวนำหรือการสังเคราะห์โดยใช้วงจรทางอิเล็คทรอนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น

3.1 บทนำ

การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นเป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่งในด้านการออกแบบวงจรโครงข่ายไฟฟ้า โดยทั่วไปการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นสามารถทำได้โดยอาศัยคุณลักษณะจำเพาะของอนุกลสารกึ่งตัวนำดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เพื่อลดและหลีกเลี่ยงข้อจำกัดทางกายภาพของอนุกลจึงได้มีการวิจัยและพัฒนาทางด้านวงจรขึ้น เพื่อที่จะสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นให้มีฟังก์ชั่นรูปแบบใดๆได้ สำหรับในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงหลักการออกแบบวงจรไม่เป็นเชิงเส้นแบบดิสครีทโดยการประมาณค่าความไม่เป็นเชิงเส้นด้วยฟังก์ชั่นตรรกยะและความเป็นเชิงเส้นแบบช่วง

3.2 การประมาณค่าด้วยฟังก์ชั่นตรรกยะ

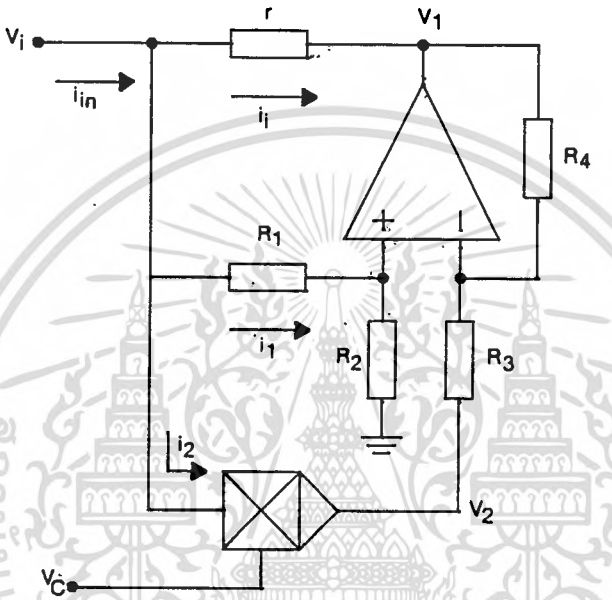
ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่มีฟังก์ชั่นเป็นแบบต่อเนื่องนั้นสามารถที่จะประมาณค่าได้ด้วยฟังก์ชั่นตรรกยะดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ดังนั้นในการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นในวิธีนี้จึงต้องอาศัยความต้านทานแบบโพลิโนเมียล ซึ่งในการออกแบบความต้านทานแบบโพลิโนเมียลนี้จะใช้วงจรศักดาแปรค่าความต้านทานเป็นหลัก จากนั้นจึงนำวงจรความต้านทานแบบโพลิโนเมียล 2 วงจรที่มีค่าสัมประสิทธ์ตามที่ได้กำหนดขึ้นมาหาอัตราส่วนโดยใช้คุณสมบัติของออปแอมป์ในวงจรขยายแบบป้อนกลับ ซึ่งรายละเอียดการออกแบบวงจรจะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

3.2.1 วงจรศักดาแปรค่าความต้านทาน

วงจรศักดาแปรค่าความต้านทานแบบพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรศักดาแปรค่าความต้านทานเป็นวงจรหลักที่จะใช้ในการสังเคราะห์ความต้านทานแบบโพลิโนเมียล ซึ่งจะประกอบไปด้วยออปแอมป์และตัวคูณแบบอนาลอก (analog multiplier) โดยมีวงจรแสดงในรูปที่ 3.2.1 การทำงานๆของวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 3.2.1 วงจรศักดาแปรค่าความต้านทานแบบพื้นฐาน

ถ้ากำหนดให้ผลรวมของกระแส i_1 และ i_2 มีค่าน้อยกว่ากระแส i_i มากๆ ดังนั้นจึงสามารถที่จะประมาณได้ว่ากระแส i_i จะมีค่าเท่ากับกระแสอินพุท i_{in} เมื่อกระแส i_{in} เป็นกระแสอินพุทที่เข้ามาในวงจร กระแส i_i และ i_1 เป็นกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน r และ R_1 ตามลำดับ ส่วนกระแส i_2 เป็นกระแสอินพุทของตัวคูณแบบอนาลอก V_1 เป็นศักดาอินพุทที่ป้อนเข้าในวงจรและ V_2 เป็นศักดาคงที่ใดๆ เมื่อป้อนศักดา V_1 เข้ามาในวงจรจะสามารถหาค่าศักดา V_1 ได้ดังนี้

$$V_1 = (1 + R_4/R_3)[R_2/(R_1 + R_2)]V_i - (R_4/R_3)V_2 \qquad (3.2.1)$$

และที่เอาท์พุทของตัวคูณแบบอนาลอกก็จะเกิดศักดา V_2 ซึ่งจะมีค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_2 = kV_1V_c \qquad (3.2.3)$$

เมื่อ k เป็นค่าอัตราการขยายของตัวคูณแบบอนาลอก และสำหรับค่ากระแส i_1 หาได้จาก

$$i_1 = (V_1 - V_1)/r \qquad (3.2.2)$$

จากสมการที่ (3.2.1) และ (3.2.2) สามารถที่จะหากระแส i_1 ได้ดังนี้

$$i_1 = [1 - (R_2/R_3)(R_3 + R_4)/(R_1 + R_2) + k(R_4/R_3)V_c]V_1/r \qquad (3.2.3)$$

ถ้าให้ $R_1 = R_2$ และ $R_3 = R_4$ ดังนั้น

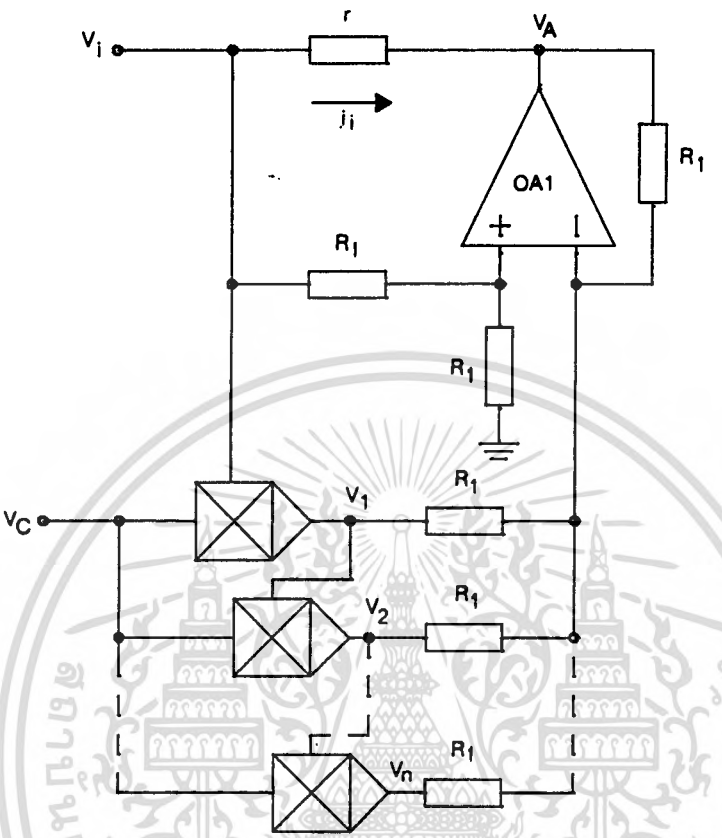
$$i_1 = (kV_c)V_1/r \qquad (3.2.4)$$

เมื่อพิจารณาความต้านทานที่เกิดขึ้นที่จุดอินพุทที่ป้อนศักดา V_1 ทำให้สามารถที่จะหาค่าความต้านทานได้ดังนี้

$$V_1/i_1 = R_1 = r/kV_c \qquad (3.2.5)$$

โดยที่ R_1 เป็นความต้านทานที่พิจารณาจากอินพุทของวงจรในรูปที่ 3.2.1 และจากสมการที่ (3.2.5) ค่าความต้านทาน R_1 ซึ่งเป็นความต้านทานของวงจรในรูปที่ 3.2.1 สามารถที่จะแปรค่าได้ด้วยศักดา V_c ดังนั้นจึงสามารถที่จะเรียกวงจรในรูปที่ 3.2.1 ได้ว่าเป็น*วงจรศักดาแปรค่าความต้านทาน* จากวงจรในรูปที่ 3.2.1 สามารถที่จะพัฒนาให้มีค่าความต้านทานเป็นอนุกรมเลขยกกำลังหรือโพลิโนเมียลได้โดยการเพิ่มตัวคูณแบบอนาลอกเข้าไปในวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2.2 วงจรศักดาแปรค่าความต้านทานแบบโพลิโนเมียล

จากรูปที่ 3.2.2 สามารถที่จะหาค่าศักดา $V_1,\ldots,V_n$ ได้ดังนี้

$$V_1 = kV_cV_i$$

$$V_2 = kV_cV_1 = k^2V_c^2V_i$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

$$V_n = k^nV_c^nV_i \qquad (3.2.6)$$

ในทำนองเดียวกับการหาความต้านทานอินพุทของวงจรในรูปที่ 3.2.1 สามารถที่จะหาความต้านทานอินพุทของวงจรในรูปที่ 3.2.2 ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_i = (V_i - V_A)/r \qquad (3.2.7)$$

เมื่อศักดา V_A คือศักดาเอาท์พุทของออปแอมป์ OA1 และศักดา V_A จะมีค่าดังนี้

$$V_A = V_i - \sum_{j=1}^{n} k^j V_c^j V_i \qquad (3.2.8)$$

จากสมการที่ (3.2.7) และ (3.2.8) จะได้ว่า

$$i_i = V_i\left(\sum_{j=1}^{n} k^j V_c^j\right)/r \qquad (3.2.9)$$

หรือ

$$V_i/i_i = R_i = r/\left(\sum_{j=1}^{n} k^j V_c^j\right) \qquad (3.2.10)$$

จากสมการที่ (3.2.10) จะเห็นได้ว่าความต้านทานอินพุทของวงจรในรูปที่ 3.2.2 จะมีค่าเป็นความต้านทานแบบโพลิโนเมียล

วงจรศักดาแปรค่าความต้านทานชนิดแปรผันตรงกับศักดาควบคุม

ค่าความต้านทานที่สังเคราะห์ได้จากวงจรในรูปที่ 3.2.1 และ 3.2.2 นั้นจะมีค่าที่แปรผกผันกับศักดา V_c หรืออีกนัยหนึ่งก็คือค่าความต้านทานจะลดลงเมื่อเพิ่มศักดา V_c ส่วนความต้านทานแปรผันตรงกับศักดา V_c อาจสังเคราะห์ได้โดยใช้วงจรในรูปที่ 3.2.3

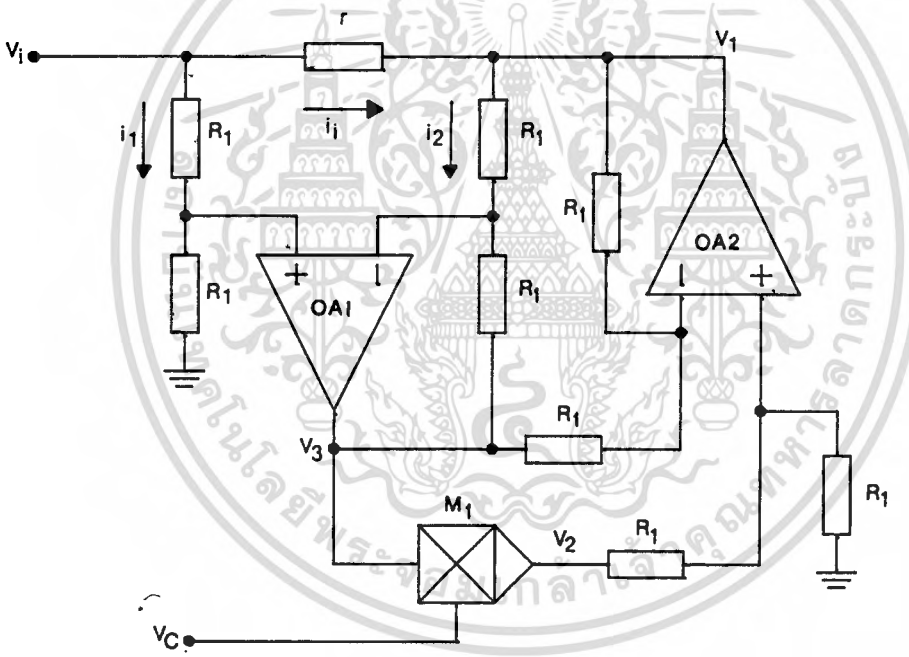
การทำงานของวงจรในรูปที่ 3.2.3 จะมีลักษณะคล้ายกับการทำงานของวงจรในรูปที่ 3.2.1 โดยกำหนดให้ค่ากระแส i_i มีค่ามากกว่าผลบวกของกระแส i_1 และ i_2 มากๆ ดังนั้นค่ากระแส i_i จึงเสมือนเป็นค่ากระแสอินพุทของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C10813

เมื่อป้อนศักดา V_i เข้าที่อินพุทของวงจรในรูปที่ 3.2.3 จะทำให้ออปแอมป์ OA1 ขยายสัญญาณผลต่างระหว่างศักดา V_i และ V_1 เป็นผลให้ศักดาเอาท์พุท V_3 ของออปแอมป์ OA1 มีค่าดังนี้

$$V_3 = V_i - V_1 \qquad (3.2.11)$$



รูปที่ 3.2.3 วงจรศักดาแปรค่าความต้านทานชนิดแปรผันตรงกับศักดา V_c

และในขณะเดียวกันศักดาเอาท์พุท V_1 ของออปแอมป์ OA2 ซึ่งเป็นวงจรขยายความแตกต่างเช่นเดียวกับวงจรแรกก็จะมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_1 = kV_cV_3 - V_3 \qquad (3.2.12)$$

ดังนั้นสามารถที่จะหาค่ากระแส i_1 ได้ดังนี้

$$i_1 = (V_1 - V_1)/r = V_3/r \qquad (3.2.13)$$

จากสมการที่ (3.2.11) และ (3.2.12) สามารถที่จะหาค่า V_3 ได้ดังนี้

$$V_3 = V_1 - (kV_c - 1)V_3 = V_1/kV_c \qquad (3.2.14)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (3.2.14) ลงในสมการที่ (3.2.13) จะได้ว่า

$$i_1 = V_1/krV_c \qquad (3.2.15)$$

และ

$$V_1/i_1 = R_1 = krV_c \qquad (3.2.16)$$

จากสมการที่ (3.2.16) ค่าความต้านทาน R_1 ซึ่งเป็นความต้านทานอินพุทของวงจรในรูปที่ 3.2.3 จะสามารถแปรค่าได้ด้วยศักดา V_c เมื่อเพิ่มตัวคูณแบบอนาลอกเข้าไปในวงจรรูปที่ 3.2.3 ก็สามารถที่จะทำให้ความต้านทานที่ได้เป็นแบบโพลิโนเมียลดังวงจรในรูปที่ 3.2.4 โดยที่ค่าศักดา $V_1, V_2, \ldots, V_n$ เป็นศักดาเอาท์พุทของตัวคูณแบบอนาลอกที่สามารถหาได้จาก

$$V_1 = kV_cV_3$$

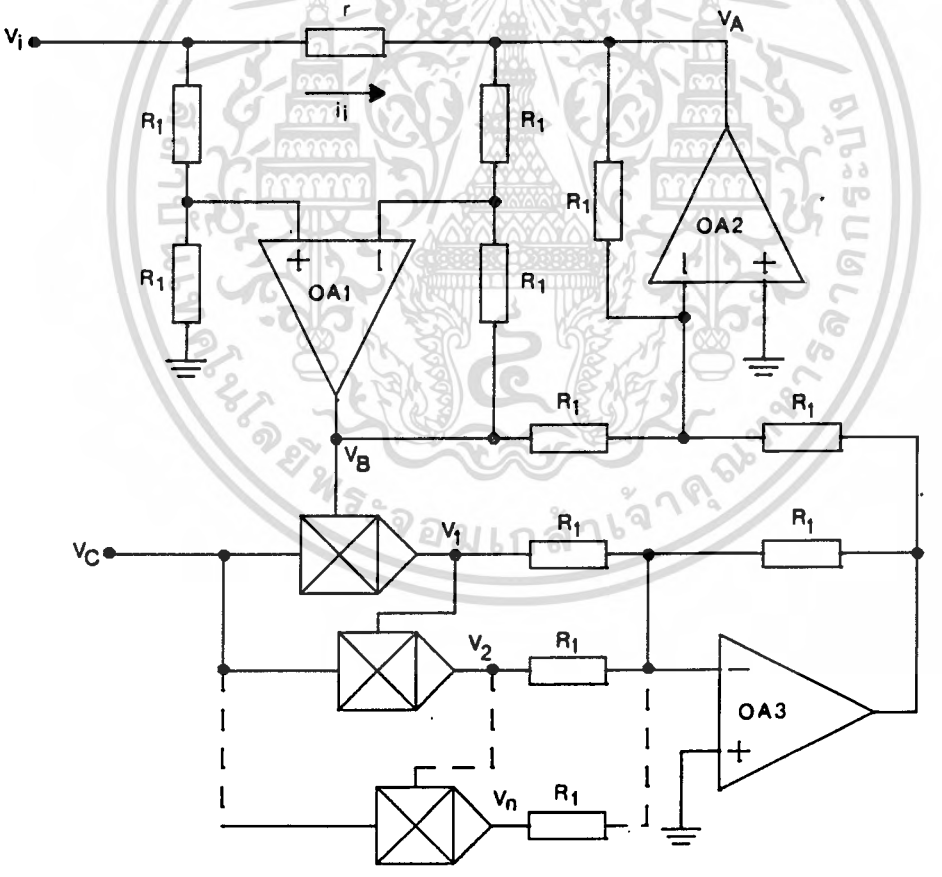
$$V_2 = kV_cV_1 = k^2V_c^2V_3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_n = k^n V_c^n V_B \qquad (3.2.17)$$

เมื่อ V_B เป็นศักดาเอาท์พุทของออปแอมป์ OA1 และเนื่องจากออปแอมป์ OA3 ต่อเป็นวงจรรวมศักดาซึ่งจะทำการรวมศักดา $V_1,\ldots,V_n$ ดังนั้นศักดาที่เอาท์พุทของออปแอมป์ OA2 หรือ V_A จะมีค่าดังนี้

$$V_A = V_B \sum_{j=1}^{n} k^j V_c^j - V_B \qquad (3.2.18)$$



รูปที่ 3.2.4 วงจรความต้านทานแบบโพลิโนเมียลชนิดแปรผันตรงกับศักดา V_c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามมิให้ผู้ใดนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับออปแอมป์ OA1 จะต่อเป็นวงจรขยายความแตกต่างระหว่าง V_1 และ V_2 ดังนั้นค่าคงที่เอาท์พุท V_o จะมีค่าเท่ากับ $V_1 - V_2$ และจากสมการที่ (3.2.18) จะได้ว่า

$$V_o = V_1 - (\sum_{j=1}^{n} k^j V_c^j - 1)V_o \qquad (3.2.19)$$

หรือ

$$V_1 = V_o \sum_{j=1}^{n} k^j V_c^j \qquad (3.2.20)$$

ส่วนค่ากระแส i_1 สามารถหาได้จาก

$$i_1 = (V_1 - V_2)/r = V_o/r \qquad (3.2.21)$$

จากสมการที่ (3.2.20) และ (3.2.21) จะได้ว่า

$$V_1/i_1 = R_1 = r \sum_{j=1}^{n} k^j V_c^j \qquad (3.2.22)$$

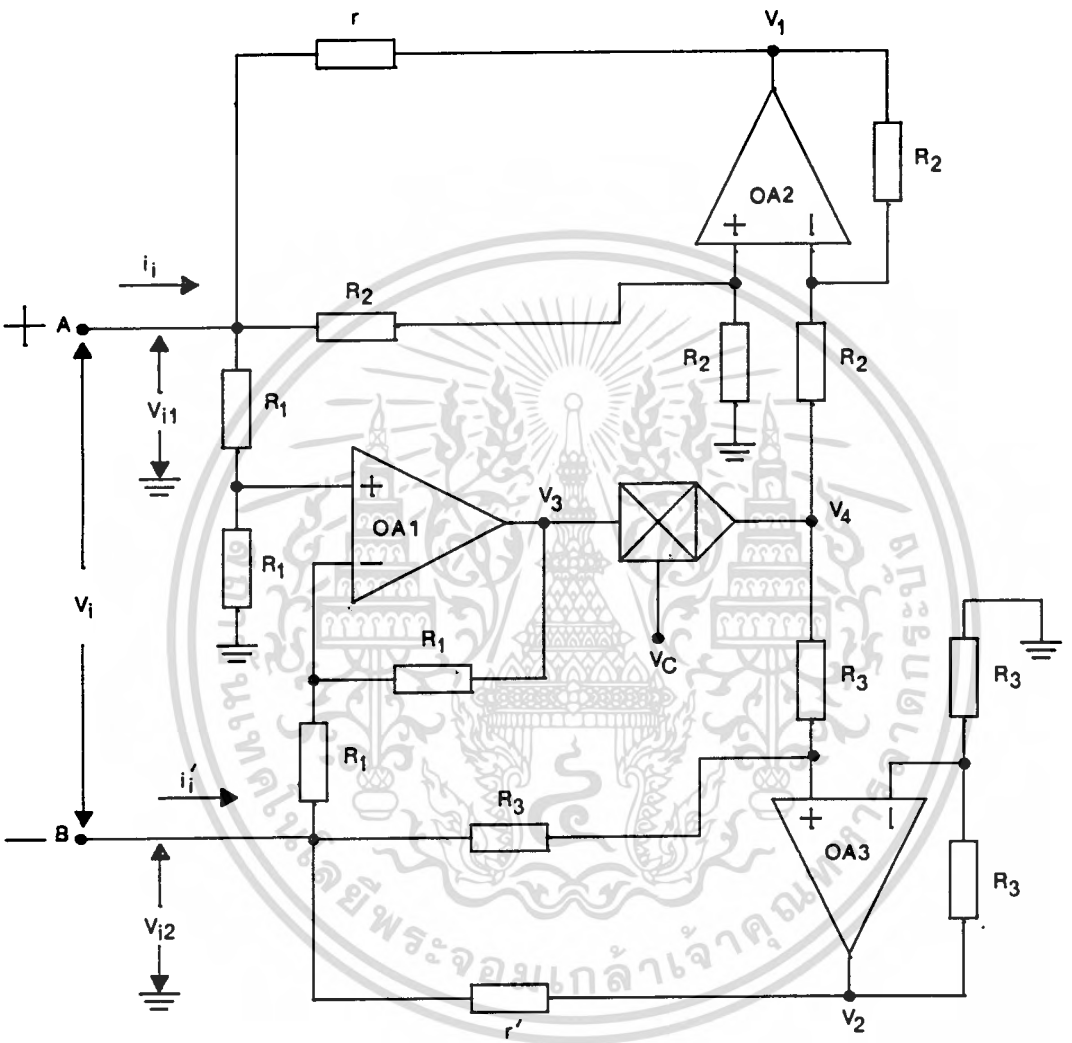
จากสมการที่ (3.2.22) จะเห็นได้ว่าความต้านทานของวงจรในรูปที่ 3.2.4 จะมีค่าเป็นความต้านทานที่มีฟังก์ชั่นเป็นโพลิโนเมียล

3.2.2 *วงจรความต้านทานแบบลอยตัว*

จากความต้านทานในรูปที่ 3.2.1 ถึง 3.2.4 ที่กล่าวมาแล้วนั้นจะเป็นความต้านทานแบบที่ปลายด้านหนึ่งต่อลงกราวด์เสมอทำให้การประยุกต์ใช้งานถูกจำกัด จึงได้พัฒนาวงจรขึ้นมาใหม่เพื่อให้ความต้านทานที่สังเคราะห์ได้เป็นแบบลอยตัว สำหรับในหัวข้อนี้จะยึดวงจรในรูปที่ 3.2.1 และ 3.2.4 เป็นหลักในการพัฒนาเป็นวงจรความต้านทานแบบลอยตัว วงจรความต้านทานแบบลอยตัวที่จะกล่าวถึงนี้จะใช้วงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานแบบปลายด้านหนึ่งต่อลงกราวด์สองชุดมาต่อร่วมกันโดยจะใช้ตัวคูณแบบอนาลอกร่วมกันดังวงจรในรูปที่ 3.2.5 และ 3.2.6



รูปที่ 3.2.5 วงจรศักดาควบคุมความต้านทานแบบลอยตัว

จากรูปที่ 3.2.5 จะเป็นการพัฒนามาจากวงจรในรูปที่ 3.2.1 การทำงานของวงจรก็ยังเหมือนกับการทำงานของวงจรในรูปที่ 3.2.1 สำหรับการหาค่าความต้านทานอินพุทระหว่างปลายทั้งสองของวงจรในรูปที่ 3.2.5 สามารถที่จะพิจารณาได้ดังนี้ เมื่อป้อนศักดา V_1 เข้าที่ปลายทั้งสองของอินพุทจะทำให้เกิดศักดาตกคร่อมระหว่างปลายทั้งสองเมื่อเทียบกับกราวด์มีค่าเท่ากับ V_{i1} และ V_{i2} และกำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน R_1 , R_2 และ R_3 มีค่าน้อยกว่ากระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน r มากๆ ดังนั้นสามารถที่จะหาค่ากระแส i_1 และ i_1' ได้จาก

$$i_1 = (V_{i1} - V_1)/r$$
$$i_1' = (V_{i2} - V_2)/r \qquad (3.2.23)$$

ส่วนออปแอมป์ OA1 จะทำหน้าที่เป็นวงจรขยายความแตกต่างระหว่างอินพุททั้งสอง ดังนั้นศักดาเอาท์พุท V_3 ของ OA1 จะมีค่าเท่ากับ $(V_{i1}-V_{i2})$ ซึ่งก็คือ V_1 สำหรับออปแอมป์ OA2 จะต่อเป็นวงจรขยายความแตกต่างเช่นเดียวกับ OA1 แต่จะให้ผลเอาท์พุท V_1 เป็นผลต่างระหว่างศักดา V_{i1} และ V_4 ซึ่ง V_4 เป็นศักดาเอาท์พุทของตัวคูณแบบอนาลอก ดังนั้นสามารถหาค่าศักดา V_1 ได้ดังนี้

$$V_1 = V_{i1} - (V_{i1} - V_{i2})kV_c$$
$$= V_{i1} - kV_1V_c \qquad (3.2.24)$$

ส่วนออปแอมป์ OA2 ต่อเป็นวงจรรวมศักดาซึ่งจะทำการรวมศักดา V_{i2} และ V_4 ทำให้สามารถหาค่าของศักดา V_2 ได้ดังนี้

$$V_2 = V_{i2} + (V_{i1} - V_{i2})kV_c$$
$$= V_{i2} + kV_1V_c \qquad (3.2.25)$$

แทนค่าสมการที่ (3.2.24) และ (3.2.25) ลงในสมการที่ (3.2.23) จะได้ว่า

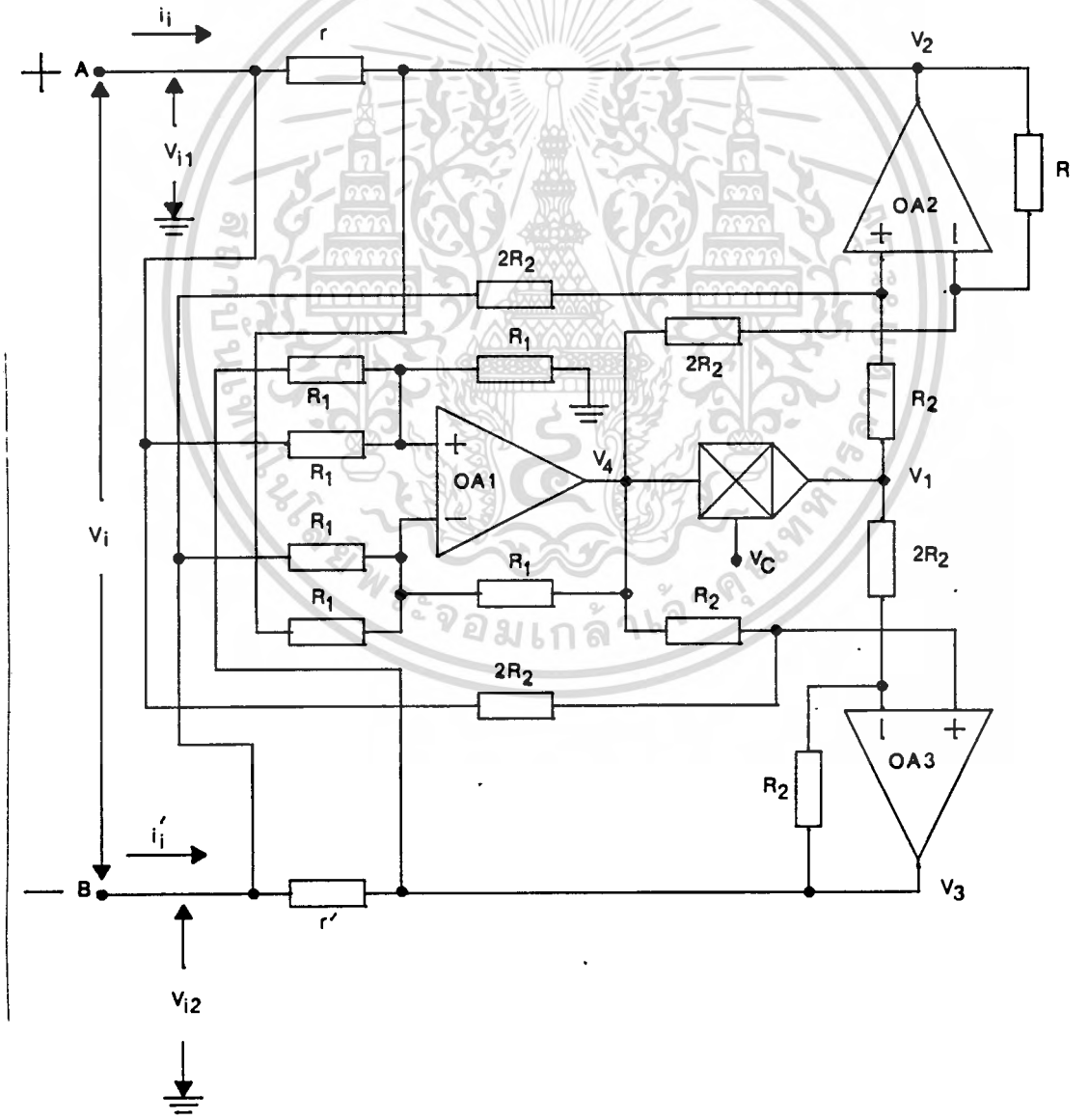
$$i_1 = -i_1' \qquad (3.2.26)$$

และ

$$R_1 = V_1/i_1 = 1/krV_c \qquad (3.2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.2.26) จะเห็นได้ว่าจะให้ผลเหมือนกับสมการที่ (3.2.7) จึงสามารถสรุปได้ว่าวงจรในรูปที่ 3.2.5 เป็นวงจรศักดาแปรค่าความต้านทานและจากสมการที่ (3.2.26) กระแสอินพุท i_i และ i_i' จะไหลเข้าสู่วงจรที่จุด A และ B ตามลำดับ แต่กระแส i_i' จะมีค่าเท่ากับ $-i_i$ จึงเสมือนกับมีกระแส i_i ไหลออกจากอินพุทที่จุด B ซึ่งจากทิศทางการไหลของกระแสอินพุททำให้วงจรในรูปที่ 3.2.5 มีลักษณะเหมือนกับอนุกลแบบลอยตัว ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าวงจรในรูปที่ 3.2.5 เป็นวงจรศักดาแปรค่าความต้านทานแบบลอยตัว



รูปที่ 3.2.6 วงจรศักดาแปรค่าความต้านทานแบบลอยตัวชนิดแปรผันตรงกับศักดา V_c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรในรูปที่ 3.2.6 จะเป็นวงจรที่พัฒนามาจากวงจรในรูปที่ 3.2.2 โดยที่ออปแอมป์ OA1 จะต่อเป็นวงจรขยายความแตกต่างที่จะขยายผลต่างของศักดาที่ตกคร่อม r และ r' และค่าความต้านทานสามารถเขียนได้เป็น

$$R_i = V_i/i_i = krV_o \qquad (3.2.28)$$

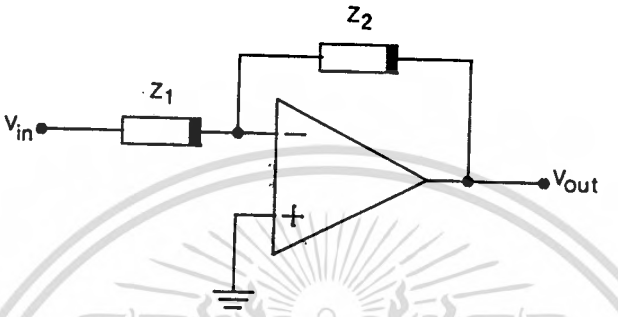
จากสมการที่ (3.2.28) จะเห็นได้ว่าวงจรในรูปที่ 3.2.6 จะเป็นความต้านทานที่สามารถแปรค่าได้โดยศักดา V_o และกระแสอินพุท i_i จะไหลเข้าที่จุด A ส่วนกระแส i_i' จะไหลเข้าที่จุด B แต่เนื่องจากกระแส $i_i = -i_i'$ จึงเสมือนกับว่ามีกระแส i_i ไหลออกจากจุด B ซึ่งจากการไหลของกระแส i_i นี้ทำให้วงจรความต้านทานในรูปที่ 3.2.6 จึงมีลักษณะเหมือนกับอนุกลแบบลอยตัวจึงสามารถกล่าวได้ว่าเป็นความต้านทานแบบลอยตัว สำหรับการสังเคราะห์ความต้านทานแบบโพลิโนเมียลแบบลอยตัวก็จะเหมือนกับการสังเคราะห์ความต้านทานแบบลอยตัวดังที่ได้กล่าวมาแล้วจึงไม่ขอกล่าวถึงในที่นี้

3.2.3 *วงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นแบบฟังก์ชั่นตรรกยะ*

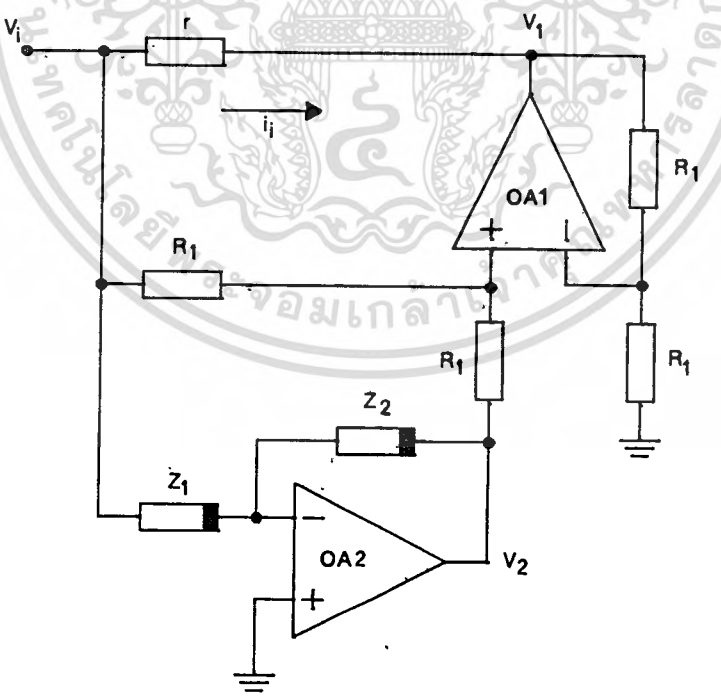
การสังเคราะห์ฟังก์ชั่นตรรกยะสามารถทำได้โดยกรใช้วงจรขยายแบบกลับข้วที่ใช้ออปแอมป์ดังแสดงในรูปที่ 3.2.7 ซึ่งค่าอัตราการขยายของวงจรจะเท่ากับอัตราส่วนของความต้านทาน Z_2 และ Z_1 ถ้าให้ความต้านทาน Z_1 และ Z_2 เป็นวงจรความต้านทานแบบโพลิโนเมียลวงจรขยายในรูปที่ 3.2.7 ก็จะเป็นวงจร*สังเคราะห์ฟังก์ชั่นตรรกยะ* เมื่อนำหลักการของวงจรในรูปที่ 3.2.7 เข้าไปแทนตัวคูณแบบอนาลอกของวงจรในรูปที่ 3.2.1 หรือ 3.2.2 ก็จะได้เป็นวงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นแบบฟังก์ชั่นตรรกยะแบบปลายด้านหนึ่งต่อลงกราวด์ดังแสดงในรูปที่ 3.2.8 และ 3.2.9 ในรูปที่ 3.2.8 ถ้ากำหนดให้กระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน R_1 และ Z_1 มีค่าน้อยกว่ากระแส i_i มากๆและความต้านทาน Z_1 และ Z_2 จะเป็นความต้านทานแบบโพลิโนเมียลที่กำหนดให้มีค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_1 = \sum_{j=0}^{n} a_j V_c^{\,j}$$
$$Z_2 = \sum_{j=0}^{n} b_k V_c^{\,k} \qquad (3.2.29)$$



รูปที่ 3.2.7 วงจรขยายแบบกลับขั้ว



รูปที่ 3.2.8 วงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงแบบฟังก์ชั่นตรรกยะ ที่พัฒนาจากวงจรในรูปที่ 3.2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออปแอมป์ OA1 ต่อเป็นวงจรรวมศักดาระหว่าง V_1 และ V_2 ซึ่งเป็นเอาท์พุทของวงจรสังเคราะห์ฟังก์ชั่นตรรกยะ เมื่อป้อนศักดา V_1 ทำให้สามารถหาค่าศักดา V_1 ได้ดังนี้

$$V_1 = V_1 - (Z_2/Z_1)V_1 \qquad (3.2.30)$$

และกระแส i_1 สามารถหาได้จาก

$$i_1 = (V_1 - V_1)/r \qquad (3.2.31)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (3.2.30) ลงในสมการที่ (3.2.31) จะได้ว่า

$$i_1 = Z_2V_1/Z_1r \qquad (3.2.32)$$

หรือ

$$R_1 = V_1/i_1 = r(Z_1/Z_2) = r(\sum_{j=0}^{n} a_jV_e^j)/(\sum_{k=0}^{m} b_kV_e^k) \qquad (3.2.33)$$

จากสมการที่ (3.2.33) ค่าความต้านทาน R_1 จะเป็นฟังก์ชั่นตรรกยะ ดังนั้นวงจรในรูปที่ 3.2.8 จึงเป็นวงจรสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นแบบฟังก์ชั่นตรรกยะ

สำหรับวงจรในรูปที่ 3.2.9 สามารถที่จะหาค่าความต้านทานของวงจรได้ดังนี้ เมื่อป้อนศักดา V_1 เข้าที่อินพุทของวงจร ออปแอมป์ OA3 จะทำหน้าที่เป็นวงจรขยายความแตกต่างระหว่างศักดา V_1 และ V_1 ทำให้เกิดศักดาเอาท์พุท V_3 ดังนี้

$$V_3 = V_1 - V_1 \qquad (3.2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับออปแอมป์ OA1 จะทำหน้าที่เป็นวงจรรวมศักดาระหว่าง V_3 และ V_2 โดยที่ศักดา V_2 คือศักดาเอาท์พุทของวงจรสังเคราะห์ฟังก์ชั่นตรรกยะซึ่งสามารถหาได้จาก

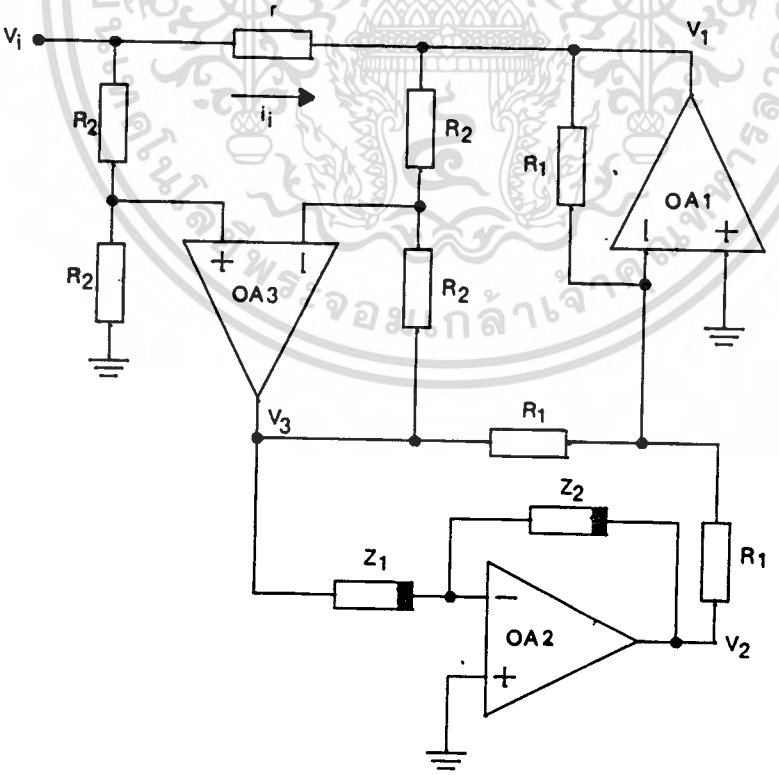
$$V_2 = -(Z_2/Z_1)V_3 = -\left(\sum_{j=0}^{n} a_j V_c^{\,j} \Big/ \sum_{k=0}^{m} b_k V_c^{\,k}\right)V_3 \qquad (3.2.35)$$

และศักดาเอาท์พุท V_1 ของออปแอมป์ OA1 จะมีค่าดังนี้

$$V_1 = -(V_3 + V_2) \qquad (3.2.36)$$

หรือ

$$V_1 = [(Z_2 - Z_1) - 1]V_3 \qquad (3.2.37)$$



รูปที่ 3.2.9 วงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นแบบฟังก์ชั่นตรรกยะที่พัฒนาจากวงจรในรูปที่ 3.2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการที่ (3.2.37) ลงในสมการที่ (3.2.34) จะได้ว่า

$$V_3 = (Z_1/Z_2)V_1 \qquad (3.2.38)$$

สำหรับค่ากระแส i_1 สามารถหาได้จาก

$$i_1 = (V_1 - V_1)/r = V_3/r \qquad (3.2.39)$$

เมื่อแทนค่า V_3 ในสมการที่ (3.2.38) ลงในสมการที่ (3.2.39) จะได้

$$i_1 = Z_1V_1/Z_2r \qquad (3.2.40)$$

หรือ

$$R_1 = V_1/i_1 = r\left(\sum_{k=0}^{m} b_k V_c^{\,k} \Big/ \sum_{j=0}^{n} a_j V_c^{\,j}\right) \qquad (3.2.41)$$

จากสมการที่ (3.2.41) ความต้านทานที่สังเคราะห์โดยวงจรในรูปที่ 3.2.9 จะเป็นความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นแบบฟังก์ชั่นตรรกยะ การประมาณค่าความไม่เป็นเชิงเส้นด้วยฟังก์ชั่นตรรกยะนั้นสามารถที่จะสังเคราะห์ความไม่เป็นเชิงเส้นให้มีรูปแบบต่อเนื่องใดๆได้ แต่ฟังก์ชั่นตรรกยะจะไม่สามารถที่จะประมาณค่าความไม่เป็นเชิงเส้นแบบไม่ต่อเนื่องได้

3.3 การประมาณค่าด้วยความเป็นเชิงเส้นแบบช่วง

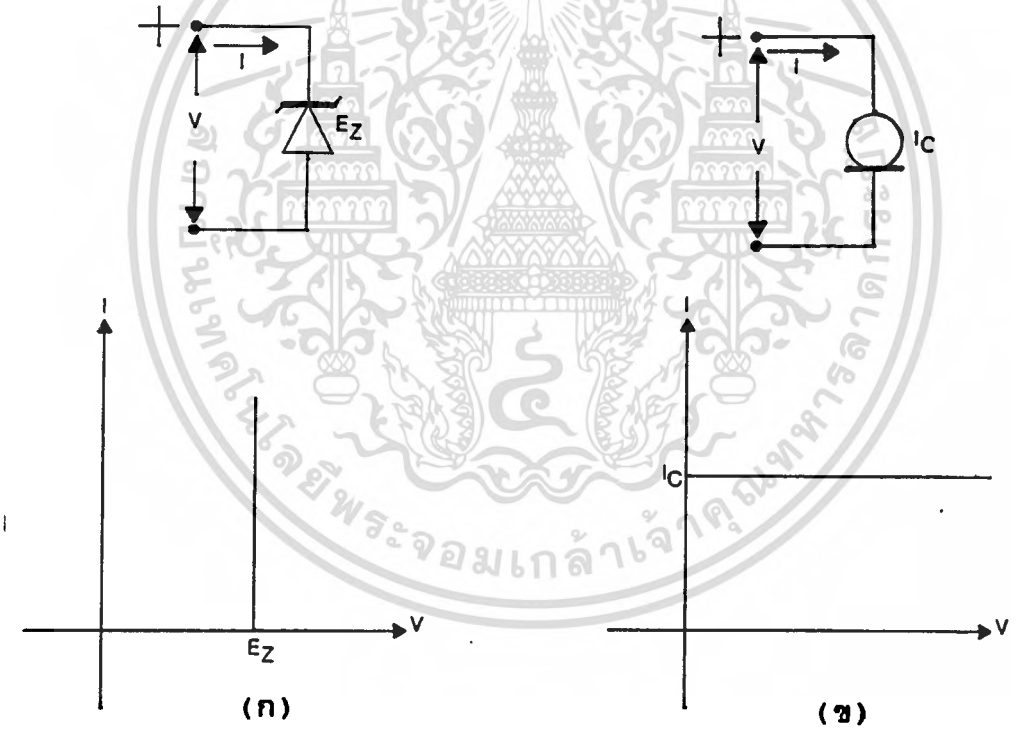
การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นด้วยความเป็นเชิงเส้นแบบช่วงเป็นวิธีที่ใช้กันมากเนื่องจากมีความซับซ้อนและยุ่งยากน้อยกว่าแบบใช้ฟังก์ชั่นตรรกยะ อีกทั้งยังสามารถออกแบบให้ใช้กับฟังก์ชั่นทั้งต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องได้ ในการออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบวงจรความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วงจะใช้อนุกลจำพวกไดโอดเป็นหลักในการกำหนดช่วงของความเป็นเชิงเส้น

3.3.1 การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้ซีเนอร์ไดโอดและไดโอดชนิดกระแสคงที่

ความเป็นเชิงเส้นแบบช่วงสามารถที่จะสังเคราะห์ได้โดยใช้คุณลักษณะจำเพาะของไดโอดซีเนอร์ไดโอด หรือไดโอดชนิดกระแสผ่านคงที่ [9] คุณลักษณะจำเพาะของซีเนอร์ไดโอดและไดโอดชนิดกระแสผ่านคงที่แสดงในรูปที่ 3.3.1



รูปที่ 3.3.1 สัญญาลักษณ์และคุณลักษณะจำเพาะของซีเนอร์ไดโอด (ก) และไดโอดชนิดกระแสคงที่ (ข)

จากคุณลักษณะจำเพาะของอนุกลดังกล่าวเมื่อนำมาต่อร่วมกันโดยกำหนดให้ไดโอดแต่ละตัวมีจุด E_z หรือ I_c ให้มีค่าต่างๆกัน ทำให้ผลรวมของกระแสหรือศักดาที่ป้อนให้กับวงจรจะมีค่าไม่เป็นเชิงเส้นดังในรูปที่ 3.3.2 (ก) เป็นคุณลักษณะจำเพาะของ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่กำหนดขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นโค้งของความต้านทานสามารถที่จะประมาณได้ด้วยเส้นตรงที่เป็นช่วงๆ

จากรูปที่ 3.3.2 (ก) สามารถที่จะหาค่าของความต้านทานในแต่ละช่วง (r_j) ได้ดังนี้

$$r_j = (V_{j+1} - V_j)/(I_{j+1} - I_j) \qquad (3.3.1)$$

โดยที่ $j = 1,2,3,\ldots,n$ การประมาณค่าความต้านทานในแต่ละช่วงนี้อาจทำได้โดยนำซีเนอร์ไดโอดมาต่อกันแบบอนุกรมดังแสดงในรูปที่ 3.3.2 (ข) และแบบขนานดังแสดงในรูปที่ 3.3.2 (ค) ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดของวงจรทั้งสองแบบดังต่อไปนี้

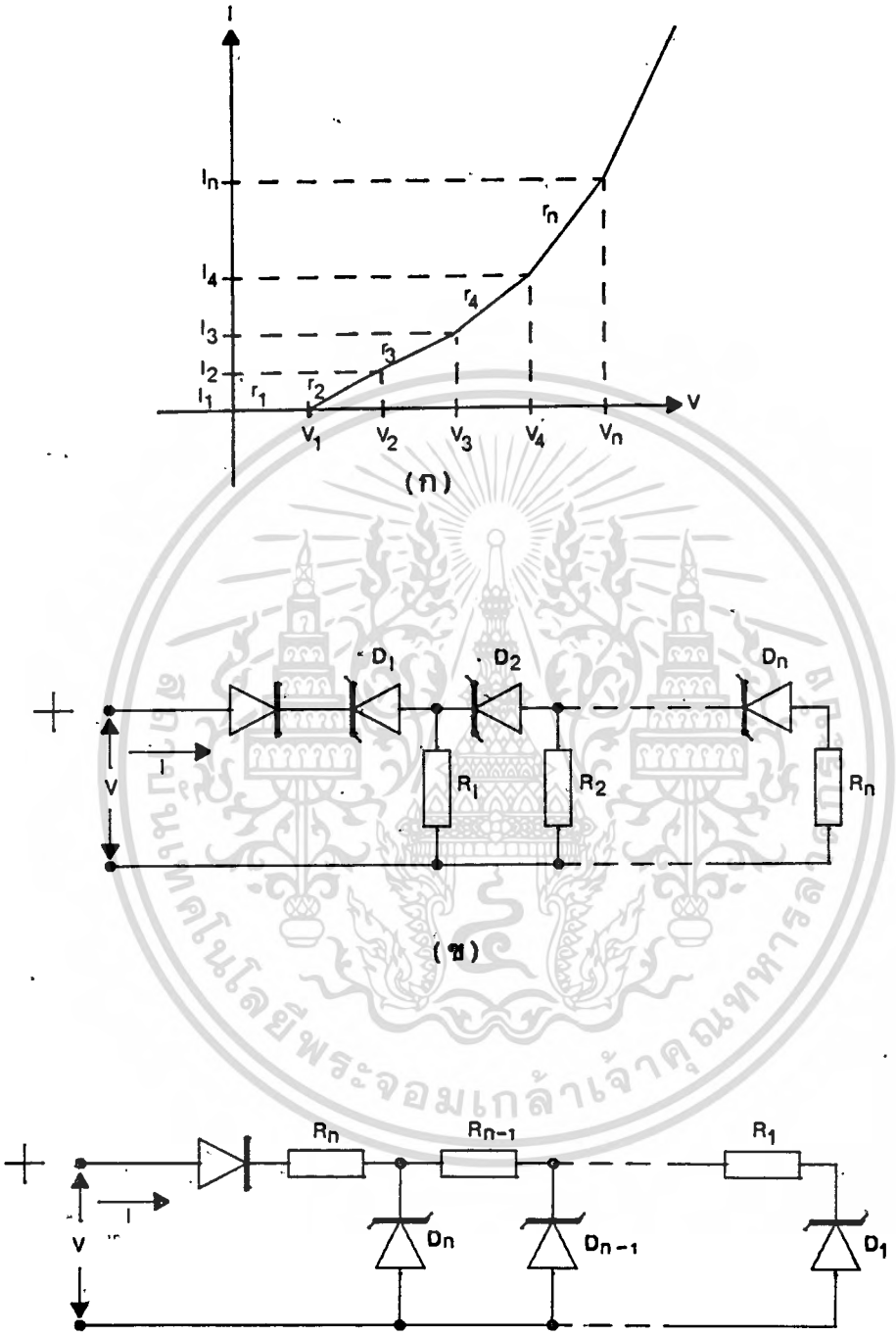
การประมาณค่าโดยใช้ซีเนอร์ไดโอดต่อแบบอนุกรม

สำหรับรูปที่ 3.3.2 (ข) ถ้าใช้ซีเนอร์ไดโอด D_j มีศักดาซีเนอร์เท่ากับ E_j โดยที่ $E_1 < E_2 < E_3 < \ldots$ และ R_j เป็นความต้านทานโหลดของซีเนอร์ไดโอด เมื่อให้ศักดา V เพิ่มขึ้นซีเนอร์ไดโอด D_1 จะนำกระแส เมื่อ $V \geq E_1$ เป็นผลให้มีกระแสไหลผ่าน R_1 เกิดเป็นศักดาตกคร่อม R_1 เมื่อศักดาตกคร่อม R_1 มีค่ามากกว่า E_2 ซีเนอร์ไดโอด D_2 ก็จะนำกระแสเป็นผลให้เกิดศักดาตกคร่อม R_2 ขึ้น เมื่อเพิ่มศักดา V ขึ้นไปอีกก็จะเกิดการทำงานในลักษณะดังที่ผ่านมากับซีเนอร์ไดโอดตัวต่อไป เมื่อนำเอาวงจรในรูปที่ 3.3.2 (ข) ไปประมาณความเป็นเชิงเส้นในแต่ละช่วงที่แสดงในกราฟรูปที่ 3.3.2 (ก) ทำให้สามารถที่จะหาค่า E_j และ R_j ได้จาก

$$E_j = (V_j - V_{j-1}) \qquad (3.3.2)$$

โดยที่ $j=1,2,3,\ldots,n$ และในช่วงศักดา V_{j-1} ถึง V_j สามารถหาค่า R_j ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3.2 (ก) เส้นคุณลักษณะจำเพาะของความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น

(ข) การประมาณค่าโดยใช้ซีเนอร์ไดโอดต่ออนุกรม

(ค) การประมาณค่าโดยใช้ซีเนอร์ไดโอดต่อขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนี้

$$r_j = R_j \,//\, r_{j-1} \qquad (3.3.3)$$

โดยที่ r_j เป็นค่าความต้านทานในแต่ละช่วงของกราฟรูปที่ 3.3.2 (ก) หรือสามารถหาค่า r_j ได้ดังนี้

$$r_j = (R_j r_{j-1})/(R_j + r_{j-1}) \qquad (3.3.4)$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$R_j = r_j r_{j-1}/(r_{j-1} - r_j) \qquad (3.3.5)$$

การประมาณค่าโดยใช้ซีเนอร์ไดโอดต่อแบบขนาน

ส่วนในรูปที่ 3.3.2 (ค) สามารถหาค่า R_j และ E_j ได้ในทำนองเดียวกันคือ เมื่อ $j = 1$ จะได้ว่า

$$E_j = V_j \qquad (3.3.6)$$

และที่ $j = 2, 3, \ldots, n$ จะได้

$$E_j = E_{j-1} + R_{j-1} \sum_{k=1}^{j-1} (V_{k+1} - V_k)/r_k \qquad (3.3.7)$$

และ

$$r_j = R_j + r_{j+1} \qquad (3.3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$R_j = r_j - r_{j+1} \qquad (3.3.9)$$

ส่วนในกรณีที่ $j = n$ จะได้

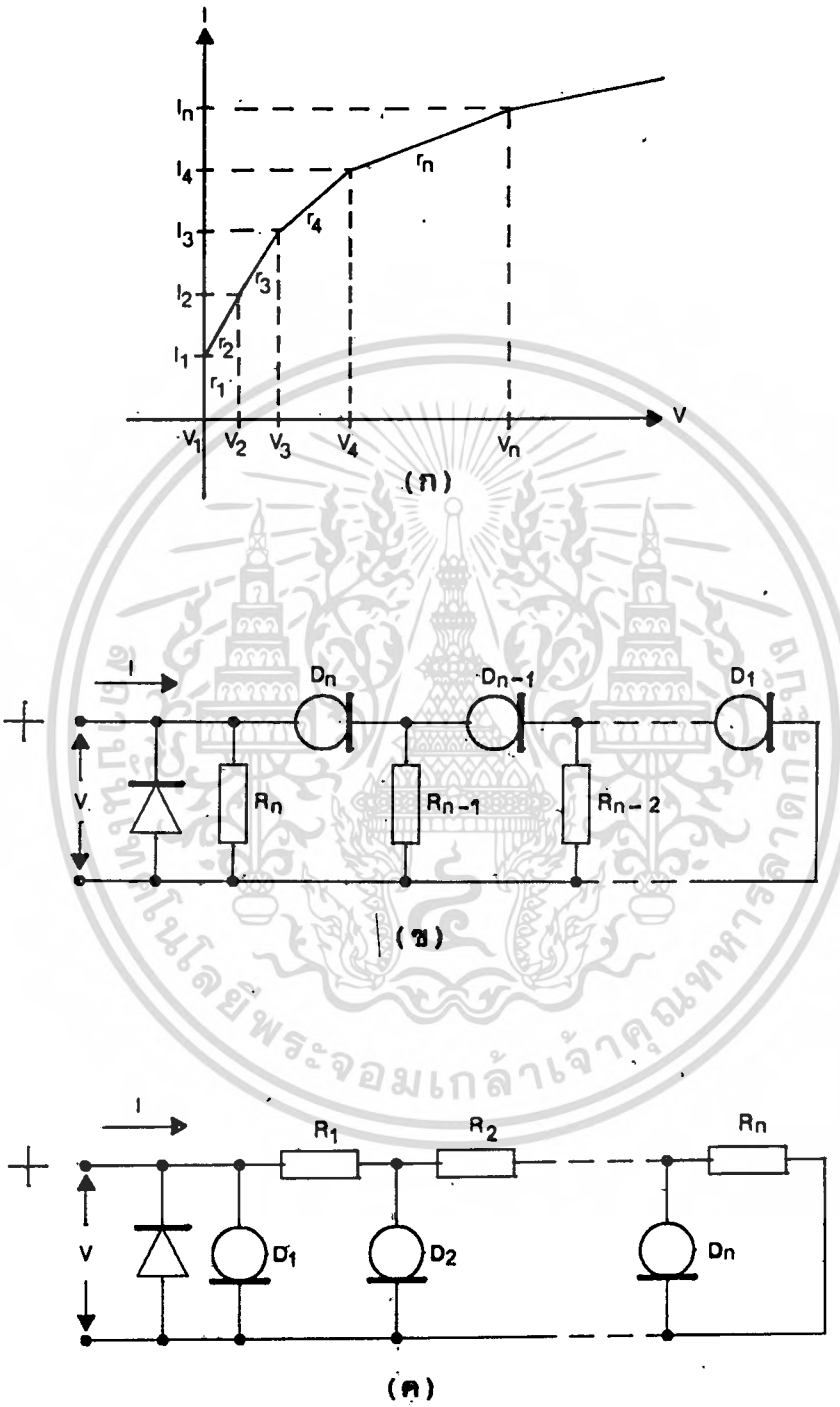
$$R_j = r_j \qquad (3.3.10)$$

การประมาณค่าโดยใช้ไดโอดชนิดกระแสคงที่

ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นอาจสังเคราะห์ได้จากวงจรที่ใช้ไดโอดชนิดกระแสคงที่ดังแสดงในรูปที่ 3.3.3 ซึ่งจะมีการทำงานเหมือนกับแบบแรกที่ใช้ซีเนอร์ไดโอดที่มีการทำงานในรูปของศักดา แต่วงจรที่ใช้ไดโอดชนิดกระแสคงที่จะทำงานในรูปของกระแส จากรูปที่ 3.3.3 (ข) จะเห็นได้ว่าเมื่อป้อนกระแส I เข้าไปในวงจร ไดโอดชนิดกระแสคงที่จะมีศักดาตกคร่อมเป็นศูนย์ดังนั้นศักดาที่ตกคร่อมวงจรก็จะเป็นศูนย์ด้วย เมื่อกระแส $I \geq I_1$ ไดโอด D_1 จะนำกระแสคงที่ที่ I_1 และจะเกิดมีศักดาตกคร่อม D_1 ขึ้นเนื่องจากศักดาที่เกิดจากกระแส $(I-I_1)$ ไหลผ่าน R_1 เมื่อ $I \geq I_2$ ไดโอด D_2 ก็จะนำกระแสคงที่ที่ I_2 และในขณะเดียวกันก็จะมีกระแส $(I-I_2)$ ไหลผ่านความต้านทาน R_2 ด้วยจึงเกิดเป็นศักดาตกคร่อม R_2 ส่วน R_1 จะยังคงมีกระแสคงที่ไหลผ่านอยู่คือ (I_2-I_1) ดังนั้นศักดาที่ตกคร่อม R_2 จึงเริ่มจากศักดาที่ตกคร่อม R_1 ในทำนองเดียวกันเมื่อกระแส $I > I_3$ ก็จะเกิดการทำงานในลักษณะเดียวกับที่ผ่านมาข้างต้น

จากรูปที่ 3.3.3 (ข) จะสามารถหาค่าความต้านทาน R_j ในทำนองเดียวกับวงจรที่ใช้ซีเนอร์ไดโอด เนื่องจากไดโอดชนิดกระแสคงที่จะมีศักดาตกคร่อมเท่ากับศูนย์ เมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวมันยังมีค่าน้อยกว่า I_j ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3.3 การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้ไดโอดชนิดกระแสคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_j = r_{j+1}r_j/(r_{j+1} - r_j) \qquad (3.3.11)$$

โดยที่ r_j เป็นความต้านทานในแต่ละช่วงของกราฟรูปที่ 3.3.3 (ก) เมื่อ $j=1,2,3,\ldots,n-1$ และที่ $j = n$ จะได้

$$R_j = r_j \qquad (3.3.12)$$

และที่ $j = 1$ จะได้

$$I_j = i_j \qquad (3.3.13)$$

ในกรณี $j=2,3,4,\ldots,n$

$$I_j = I_{j-1} + \left(\sum_{k=1}^{j-1} (i_{k+1} - i_k)r_k\right)/R_{j-1} \qquad (3.3.14)$$

สำหรับวงจรไดโอดชนิดกระแสคงที่แบบขนานสามารถหาค่า R_j และ I_j ได้ดังนี้

$$R_j = r_j - r_{j-1} \qquad (3.3.15)$$

และ

$$I_j = i_j - i_{j-1} \qquad (3.3.16)$$

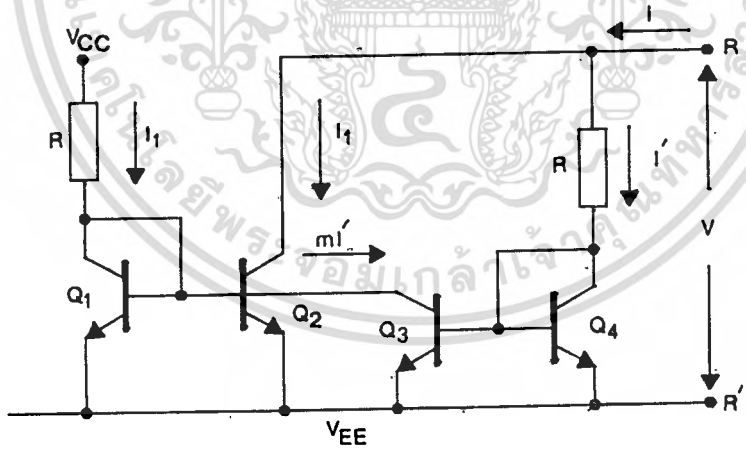
การประมาณค่าความไม่เป็นเชิงเส้นด้วยความเป็นเชิงเส้นแบบช่วงนี้ จากหลักการที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าความแม่นยำของความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นจะขึ้นอยู่กับศักดาซีเนอร์ E_z หรือกระแส I_c ของไดโอดชนิดกระแสผ่านคงที่ แต่การที่จะหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีเนอร์ไดโอดหรือไดโอดชนิดกระแสผ่านคงที่ที่มีค่า E_z และ I_c ตามที่คำนวณนั้นทำได้ยากมาก จึงได้มีการพัฒนาวงจรขึ้นใหม่โดยใช้คุณลักษณะจำเพาะของไดโอดและอนุกลประเภทแอคทีฟจำพวกทรานซิสเตอร์หรือออปแอมป์เข้าช่วย

3.3.2 *การสังเคราะห์ความต้านไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้วงจรสะท้อนกระแส*

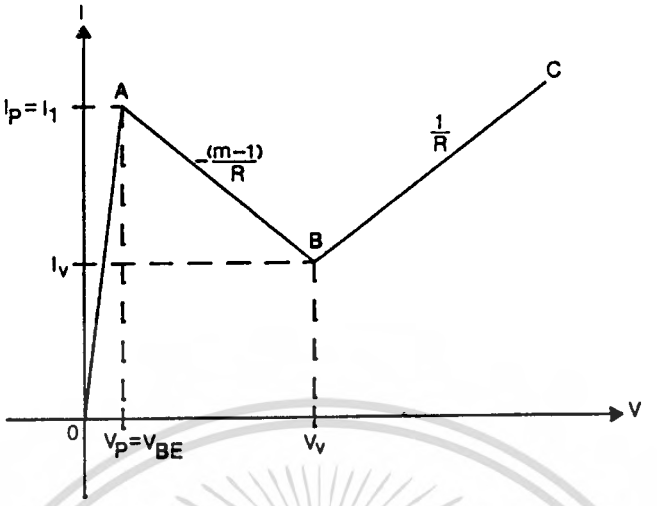
หลักการนี้จะอาศัยคุณลักษณะจำเพาะของทรานซิสเตอร์และวงจรสะท้อนกระแสดังแสดงในรูปที่ 3.3.4 [4] จากรูปเมื่อให้ Q_1 และ Q_2 , Q_3 และ Q_4 เป็นทรานซิสเตอร์ที่มีความสมพงษ์กันทุกประการและประกอบกันเป็นวงจรสะท้อนกระแส 2 ชุด โดยขาคอลเลคเตอร์ของ Q_3 จะเป็นตัวดึงกระแส mI' จาก Q_1 ถ้าพื้นที่อิมิเตอร์ของ Q_1 เท่ากับ Q_2 และ Q_3 เท่ากับ m เท่าของ Q_4 ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นจะเกิดขึ้นระหว่างจุด R และ R' ดังแสดงในรูปที่ 3.3.5



รูปที่ 3.3.4 วงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น

จากรูปที่ 3.3.4 เมื่อศักดา V แปรค่าจากศูนย์ไปจนถึง V_{BE} ทำให้ Q_3 จะเริ่มนำกระแสถ้า V มีค่าเท่ากับ V_{BE} ที่จุดนี้ Q_3 และ Q_4 จะยังคงไม่นำกระแสแต่ Q_3 จะเข้าสู่ช่วงแอคทีฟและ I จะมีค่าเท่ากับ I_1 เนื่องจาก Q_1 และ Q_2 เป็นวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3.5 เส้นคุณลักษณะจำเพาะของวงจรในรูปที่ 3.3.4

สะท้อนกระแส การทำงานในส่วนนี้แสดงกราฟที่ตำแหน่ง OA ของรูปที่ 3.3.5 เมื่อศักดา V เพิ่มขึ้นทำให้ Q_2 และ Q_4 เริ่มนำกระแสทำให้กระแส I_1 ของ Q_1 จะถูก Q_2 แบ่งแยกออกไป mI' เป็นผลให้กระแสที่ขาคอลเลคเตอร์ของ Q_2 ลดลง mI' ด้วย เมื่อ $m > 1$ จะเห็นได้ว่ากระแส I ที่ขึ้นอยู่กับ V จะลดลงดังแสดงในกราฟช่วง AB ของรูปที่ 3.3.5 ซึ่งก็คือช่วงของความต้านทานแบบลบ ความสัมพันธ์ของกระแส I และ V สามารถหาได้ดังนี้

$$I = I_1 + I' - mI' \qquad (3.3.17)$$

เนื่องจาก $I' = (V - V_{BE})/R$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$I = I_1 + [(1-m)V - V_{BE}]/R \qquad (3.3.18)$$

โดยที่ I_1 เป็นกระแสที่หาได้จาก $(V_{CC} - V_{BE})/R_1$ และจากสมการที่ (3.3.18) เมื่อ $m > 1$ จะเห็นได้ว่าเกิดเป็นความต้านทานเชิงเส้นแบบลบที่แสดงในกราฟช่วง AB ของรูปที่ 3.3.5 เส้น AB นี้จะมีค่าความชันเท่ากับ $-(m-1)/R$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือจะมีค่าความต้านทานแบบลบเท่ากับ R/(m-1) เมื่อศักดา V เพิ่มขึ้นไปจนกระทั่งถึงจุด V_v ซึ่งจะทำให้กระแส mI' เท่ากับ I_1 เป็นผล ให้ Q_2 หยุดนำกระแส และเมื่อเพิ่มศักดาให้มากกว่า V_v กระแส I ก็จะมีค่าเท่ากับ I' ดังนั้นในกราฟช่วง BC จึงมีความชันเท่ากับ 1/R หรือมีค่าความต้านทานแบบบวกเท่ากับ R สำหรับศักดา V_v และ กระแส I_v สามารถหาได้ดังนี้

$$V_v = V_{BE} + I'R \qquad (3.3.19)$$

เนื่องจาก $mI' = I_1$ ดังนั้นจะได้

$$V_v = V_{BE} + I_1R/m \qquad (3.3.20)$$

และ

$$I_v = I_1/m \qquad (3.3.21)$$

จากรูปที่ 3.3.4 ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นจะเกิดขึ้นที่ระหว่างขั้ว R และ R' ซึ่งค่าความต้านทานหรือความชันสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงค่าได้ แต่รูปแบบความไม่เป็นเชิงเส้นจะยังคงเหมือนเดิม

3.3.3 การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้วงจรจำกัดศักดา

วงจรพื้นฐานของวงจรจำกัดศักดาแสดงในรูปที่ 3.3.6 ซึ่งก็คือวงจรสังเคราะห์ความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วงนั่นเอง โดยในรูปที่ 3.3.6 (ก) จะเป็นความต้านทานแบบบวกและในรูปที่ 3.3.6 (ค) จะเป็นความต้านทานแบบลบ สำหรับศักดา E จะเป็นศักดาอ้างอิงที่ใช้สำหรับกำหนดจุดเริ่มต้นของความเป็นเชิงเส้นแบบช่วง จากรูปที่ 3.3.6 (ก) เมื่อป้อนศักดา V เข้าที่อินพุทและในช่วงศักดา V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าน้อยกว่า E ไดโอด D_1 จะไม่นำกระแสเนื่องจากไดโอดถูกไบอัสกลับเป็นผลให้ไม่มีกระแส i ไหลเข้ามาในวงจร และเมื่อศักดา V มีค่ามากกว่า E แล้วไดโอด D_1 ก็จะนำกระแสเกิดกระแส i ไหลเข้ามาในวงจรซึ่งสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$i = \begin{cases} 0 & V \leq E \\ (V - E)/R & V > E \end{cases} \qquad (3.3.22)$$

ซึ่งเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 3.3.6 (ข) สำหรับวงจรในรูปที่ 3.3.6 (ค) ไดโอด D_1 จะกันไม่ให้เกิดศักดาลบขึ้นที่จุด A และเป็นตัวทำให้อัตราการขยายของ A_1 เท่ากับหนึ่ง เมื่อศักดา $V \leq E$ จะทำให้ศักดาที่จุด A เท่ากับ V และเนื่องจาก A_2 ต่อเป็นวงจรขยายที่มีอัตราการขยายเท่ากันหนึ่งทำให้ศักดาที่จุด B มีค่าเท่ากับ V ด้วยเป็นผลให้ไม่มีกระแส i ไหลเข้ามาในวงจร และเมื่อศักดา $V > E$ จะทำให้ D_1 หยุดนำกระแสและ D_2 จะนำกระแสแทนทำให้ A_1 เกิดการขยายขึ้นในอัตราส่วนของ R_2/R_1 เนื่องจาก A_1 ต่อเป็นวงจรขยายความแตกต่างซึ่งจะให้ศักดาเอาท์พุทที่จุด A ดังนี้

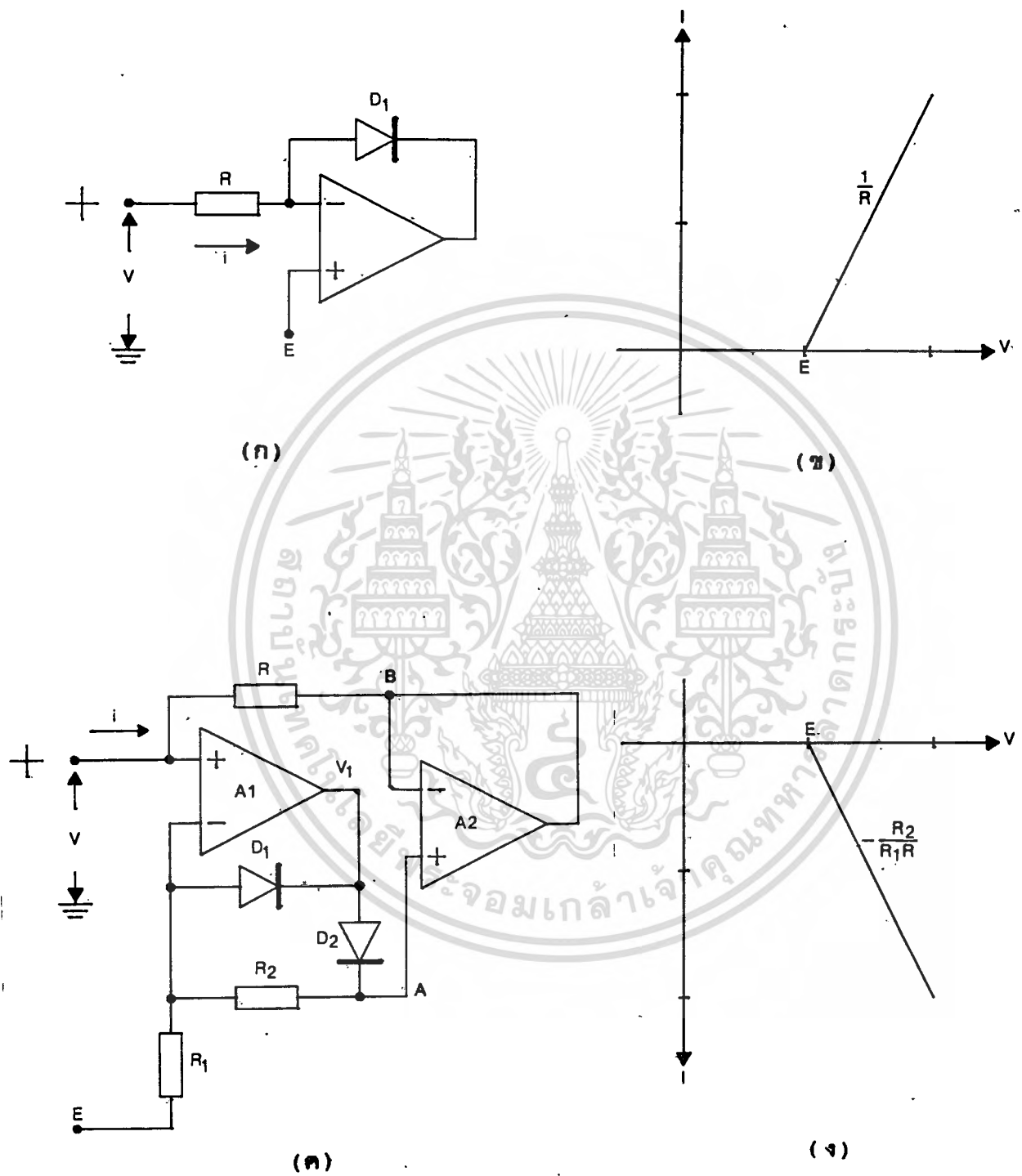
$$V_A = \begin{cases} V & V \leq E \\ V + (V-E)R_2/R_1 & V > E \end{cases} \qquad (3.3.23)$$

เนื่องจาก A_2 ต่อเป็นวงจรตามศักดาและในกรณีที่ $V > E$ สามารถหากระแส i ได้ดังนี้

$$i = (V - V_1)/R \qquad (3.3.24)$$

จากสมการที่ (3.3.23) จะได้ $i = -[(V-E)/R](R_2/R_1)$ หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

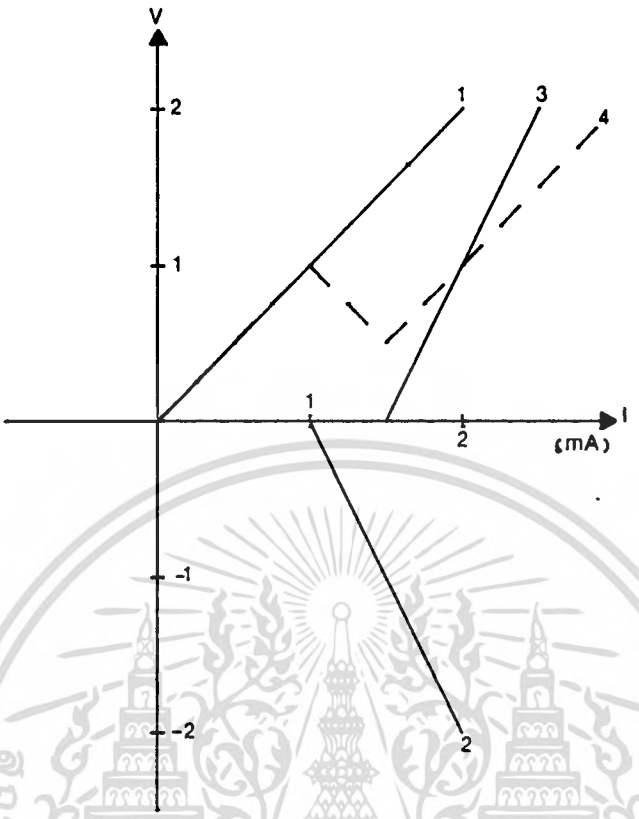


รูปที่ 3.3.6 วงจรความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วง

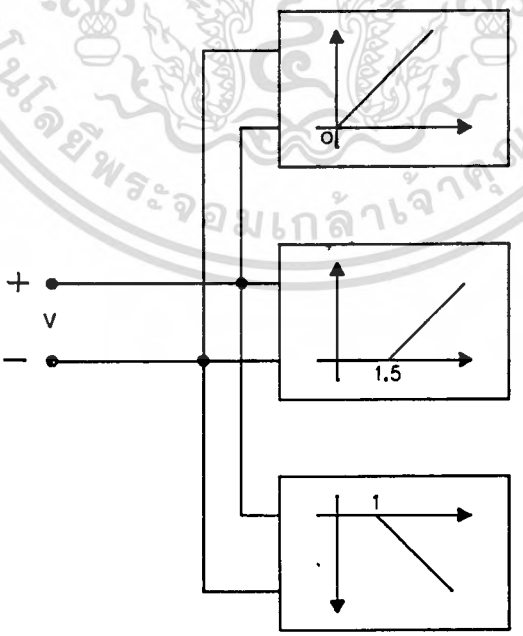
(ก) และ (ข) ความต้านทานแบบบวก

(ค) และ (ง) ความต้านทานแบบลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3.7 ตัวอย่างการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้ความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i = \begin{cases} 0 & V \leq E \\ -(V-E)R_2/R_1R & V > E \end{cases} \qquad (3.3.25)$$

ซึ่งสามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 3.3.6 (ง) จากรูปที่ 3.3.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อต้องการความไม่เป็นเชิงเส้นในรูปแบบใดๆก็สามารถทำได้โดยการนำเอาวงจรที่มีค่าของศักดา E ที่ค่าต่างๆมาต่อขนานกันดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3.3.7 (ข) ซึ่งจะเป็นการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นของรูปที่ 3.3.7 (ก) จากรูปที่ 3.3.7 (ก) จะต้องใช้วงจรความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วงทั้งหมด 3 ชุด เพื่อที่จะให้ได้กราฟเส้นที่ (4) โดยจะใช้วงจรในรูปที่ 3.3.5 (ก) 2 ชุด ชุดแรกให้ค่า E เป็นศูนย์และ R มีค่าเท่ากับ 1 kΩ ซึ่งจะให้กราฟในเส้นที่ (1) ของรูปที่ 3.3.7 (ก) ส่วนชุดที่สองจะให้กราฟเส้นที่ (3) ในรูปเดียวกัน โดยจะให้ E = 1.5 V. และ R มีค่าเท่ากับ 0.5 kΩ สำหรับค่าความชันที่เป็นลบในกราฟเส้นที่ (2) จะใช้วงจรในรูปที่ 3.3.5 (ค) โดยให้ $R_1 = R_2$, E = 1 V. และ R = 0.5 kΩ เมื่อต่อวงจรทั้งสามเข้าด้วยกันดังรูปที่ 3.3.7 (ข) ก็จะได้เส้นกราฟรวมคือเส้นที่ (4) ซึ่งจะเป็นเส้นคุณลักษณะจำเพาะของความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นตามต้องการ

3.4 บทสรุป

การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้วงจรทางอีเล็คทรอนิคอาจสามารถแบ่งออกได้เป็นสองวิธีคือ วิธีแรกเป็นการใช้หลักการของฟังก์ชั่นตรรกยะและวิธีที่สองจะเป็นการใช้หลักการของความเป็นเชิงเส้นแบบช่วง สำหรับการใช้ฟังก์ชั่นตรรกยะนั้นค่อนข้างจะมีความยุ่งยากทางวงจรมาก เนื่องจากถ้ามีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของฟังก์ชั่นก็จะต้องออกแบบวงจรใหม่ทั้งหมด และฟังก์ชั่นตรรกยะจะไม่สามารถประมาณค่าของฟังก์ชั่นชนิดไม่ต่อเนื่องได้ ส่วนการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้ความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วงจะสามารถที่จะประมาณค่าของ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชั่นใดๆได้ และการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของฟังก์ชั่นก็ไม่จำเป็นต้องออกแบบวงจรใหม่ เนื่องจากการประมาณค่าความไม่เป็นเชิงเส้นจะใช้การต่อขนานกันของความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้หลักการของวงจรรวม

4.1 บทนำ

การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้ฟังก์ชั่นตรรกยะนั้นไม่สามารถที่จะใช้กับฟังก์ชั่นไม่ต่อเนื่องได้ และในการประยุกต์ใช้งานยังต้องออกแบบวงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อใช้กับงานนั้นๆโดยเฉพาะ ทำให้ไม่สามารถที่จะสร้างเป็นวงจรสำเร็จในรูปของวงจรรวมได้ ส่วนการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้ความเป็นเชิงเส้นแบบช่วงนี้สามารถที่จะประมาณค่าฟังก์ชั่นได้ทุกรูปแบบและความต้านทานเชิงเส้นในแต่ละชุดจะสามารถทำเป็นวงจรรวมได้ โดยที่ในบทที่ 4 นี้จะเป็นการกล่าวถึงการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้หลักการของวงจรรวม และจะกล่าวถึงเฉพาะการสังเคราะห์ความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วง

4.2 หลักการพื้นฐานของความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วง

ความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วงดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.2.1 (ก) และ (ข) โดยที่ในรูปที่ 4.2.1 (ก) เป็นความต้านทานแบบบวกและในรูปที่ 4.2.1 (ข) จะเป็นความต้านทานแบบลบ [5] จากรูปที่ 4.2.1 (ก) เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_3 , Q_4 และ Q_5 , Q_6 ต่อเป็นวงจรสะท้อนกระแสแบบลบและความต้านทาน R จะเป็นความต้านทานอ้างอิงในวงจร เมื่อป้อนสัญญาณอินพุท V_{in} เข้าระหว่างจุด A และจุด B ทำให้สามารถที่จะหาค่าศักดา V_1' และ V_2' ได้ดังนี้

$$V_1' = V_A + V_{BE1}$$

$$V_2' = V_B + V_{BE2} \qquad (4.2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ V_1' และ V_2' เป็นศักดาที่ปลายทั้งสองของความต้านทาน R ศักดา V_A และ V_B เป็นศักดาอินพุทที่ป้อนให้กับวงจร ส่วน V_{BE1} และ V_{BE2} เป็นศักดาระหว่างขาอีมิเตอร์และเบสของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 เนื่องจากในวงจรรวมทรานซิสเตอร์แต่ละตัวจะมีความสมพงษ์กันมาก ดังนั้นจึงถือได้ว่าศักดา V_{BE1} จะเท่ากับ V_{BE2} และกระแส i ซึ่งกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน R สามารถประมาณค่าได้จาก

$$iR = V_1' - V_2' \qquad (4.2.2)$$

ดังนั้น

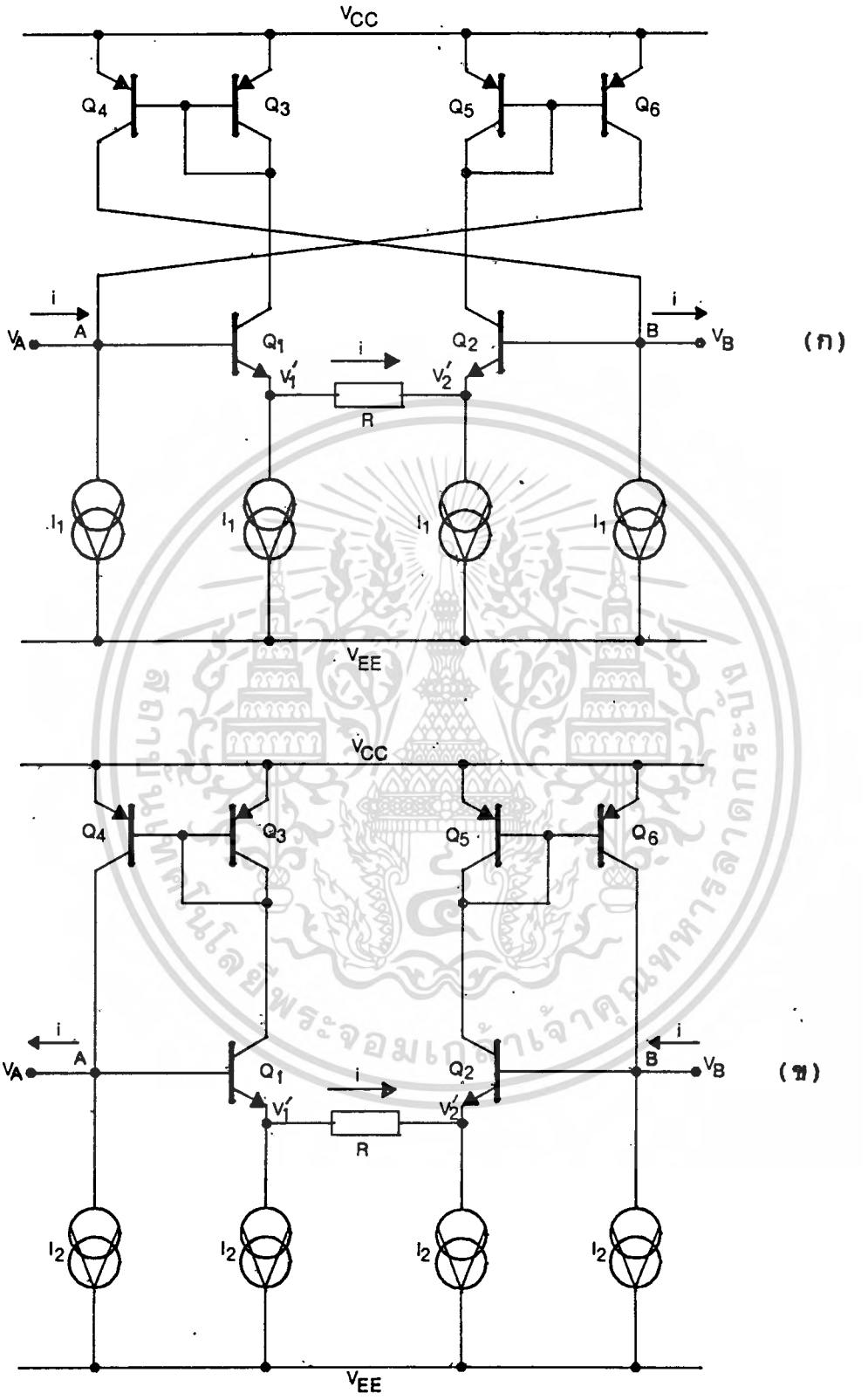
$$i = (V_A - V_B)/R \qquad (4.2.3)$$

หรือ

$$R = (V_A - V_B)/i = V_{in}/i \qquad (4.2.4)$$

และที่ขาคอลเลคเตอร์ของ Q_1 และ Q_2 ต่ออยู่กับวงจรสะท้อนกระแสแบบลบ และจะสะท้อนกระแสที่ขาคอลเลคเตอร์ของ Q_1 และ Q_2 มายังจุด A และ B เมื่อขาคอลเลคเตอร์ของ Q_1 และ Q_2 มีกระแสเพิ่มขึ้น i และ -i อันเนื่องมาจากศักดา V_{in} กระแสนี้ก็จะถูกส่งผ่านมายังจุด A และ B ด้วยวงจรสะท้อนกระแส Q_3 , Q_4 และ Q_5 , Q_6 ทำให้ที่จุด A และ B มีกระแสไหลเข้าเท่ากับ i และ -i ด้วย เมื่อศักดาที่ตกคร่อมระหว่างจุด A และ B มีค่าเท่ากับ V_{in} และมีกระแส i ไหลเข้าที่จุด A และที่จุด B จะมีกระแส -i ไหลซึ่งก็คือมีกระแส i ไหลออกจากจุด B ดังนั้นค่าความต้านทานที่พิจารณาระหว่างจุด A และ B ก็จะมีค่าเท่ากับ R ดังสมการที่ (4.2.4) และสำหรับในรูปที่ 4.2.1 (ข) การทำงานจะเหมือนกับรูป 4.2.1 (ก) แต่เมื่อป้อนศักดา V_{in} เข้าที่จุด A และ B โดยให้ศักดาที่จุด A มีค่าเป็นบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2.1 ความต้านทานเชิงเส้นชนิดศักดาควบคุม

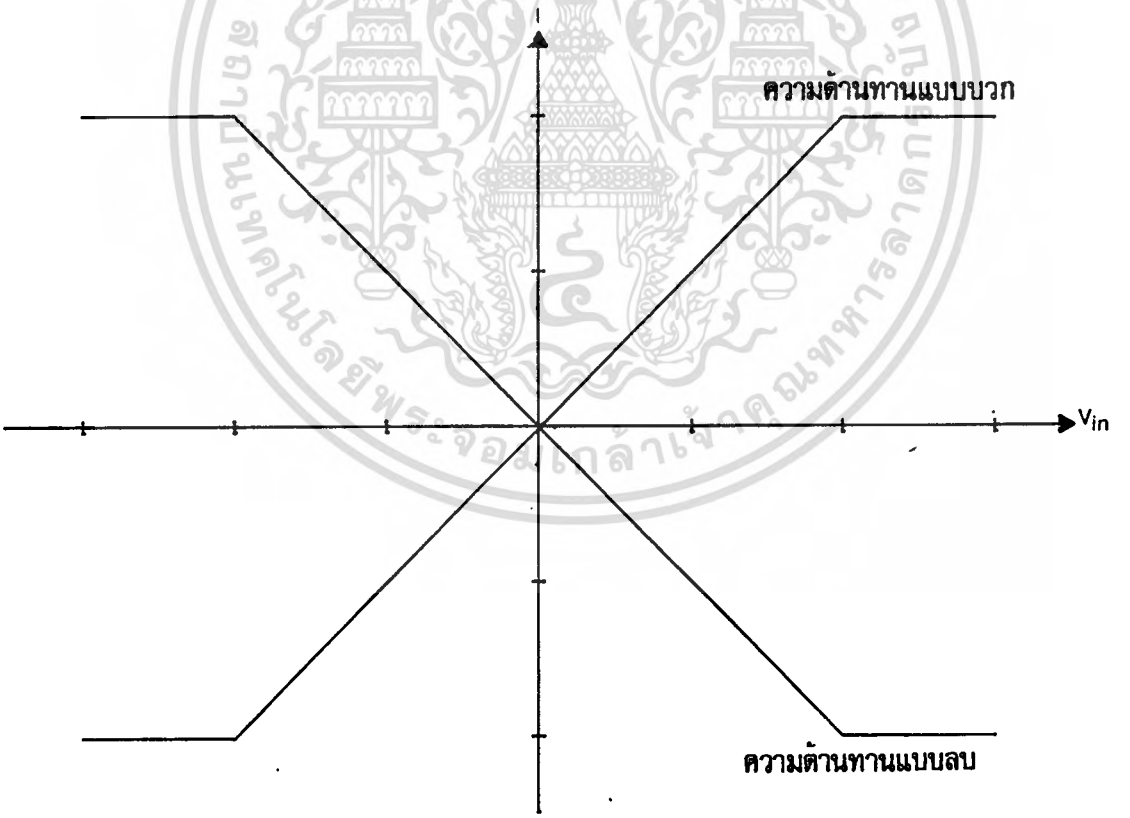
(ก) วงจรความต้านทานแบบบวก

(ข) วงจรความต้านทานแบบลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเทียบกับจุด B จะทำเกิดกระแส i ไหลออกจากจุด A และมีกระแส i ไหลเข้าที่จุด B ซึ่งจะตรงข้ามกับทิศทางการไหลของกระแสอินพุท i ในรูปที่ 4.2.1 (ก) ดังนั้นความต้านทานระหว่างจุด A และ B จะมีค่าเท่ากับ -R

วงจรความต้านทานในรูปที่ 4.2.1 จะเป็นเชิงเส้นในช่วงสัญญาณ V_{in} มีค่าขนาดอยู่ในช่วง $-RI \leq V_{in} \leq RI$ เมื่อ I เป็นกระแสที่ตัวดึงกระแสคงที่ I_1 หรือ I_2 ดึงมาจากขาอิมิตเตอร์ของ Q_1 และ Q_2 เมื่อเพิ่มศักดา V_{in} ให้มีค่ามากกว่า RI แล้ว Q_1 จะนำกระแสในช่วงอิ่มตัวและ Q_2 จะหยุดนำกระแส ทำให้ผลต่างของกระแสที่เข้ามายังจุด A และกระแสที่ไหลออกจากจุด B ของรูปที่ 4.2.1 (ก) มีค่าคงที่ที่ I และ -I ส่วนในรูปที่ 4.2.1 (ข) จะมีกระแสที่จุด A และ B เท่ากับ -I และ I ตามลำดับดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.2.2



รูปที่ 4.2.2 เส้นคุณลักษณะจำเพาะของวงจรในรูปที่ 4.2.1

ความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วงที่สังเคราะห์ขึ้นในรูปที่ 4.2.1 นั้นสามารถที่จะกำหนดความเป็นเชิงเส้นได้ด้วยการกำหนดค่ากระแสของตัวดึงกระแสคงที่ I_1 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_2 ดังสมการต่อไปนี้

$$R_{AB} = \begin{cases} R & i < I_1 \\ \infty & i = I_1 \end{cases} \qquad (4.2.5)$$

หรือ

$$R_{AB} = \begin{cases} -R & i < I_2 \\ \infty & i = I_2 \end{cases} \qquad (4.2.6)$$

โดยที่ R คือความต้านทานที่ต่ออนุกรมระหว่างขาอิมิเตอร์ของ Q_1 และ Q_2 และ R_{AB} เป็นความต้านทานที่พิจารณาระหว่างจุด A และ B ของวงจรความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วงในรูปที่ 4.2.1 สำหรับสมการที่ (4.2.5) จะเป็นความต้านทานของวงจรในรูปที่ 4.2.1 (ก) และสมการที่ (4.2.6) จะเป็นความต้านทานของวงจรในรูปที่ 4.2.1 (ข) จากหลักการของวงจรในรูปที่ 4.2.1 (ก) และ (ข) จะเห็นได้ว่ากระแส i ที่ไหลผ่านความต้านทาน R จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีศักดา V_{in} ดังนั้นจึงสามารถที่จะกล่าวได้ว่าวงจรในรูปที่ 4.2.1 จะเป็นวงจรความต้านทานชนิดศักดาควบคุม

4.3 การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิดศักดาควบคุม

ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นสามารถที่จะสังเคราะห์ได้โดยการนำเอาความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วงดังที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่แล้วหลายวงจรมาต่อขนานกัน ซึ่งความต้านทานที่ได้จะเป็นชนิดศักดาควบคุมถ้าให้ R_j และ R_k เป็นความต้านทานแบบบวกและแบบลบที่มีความเป็นเชิงเส้นแบบช่วงจำนวน n และ m ตัวตามลำดับ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแส I_j และ I_k เป็นค่ากระแสที่กำหนดช่วงความเป็นเชิงเส้นของความต้านทาน R_j และ R_k ตามลำดับ ส่วนกระแส i_j และ i_k เป็นกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน R_j และ R_k จากการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นจะใช้การต่อขนานกันของความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วง ดังนั้นการพิจารณาในรูปของความนำจะสะดวกกว่าการพิจารณาในรูปของความต้านทานเนื่องจากการต่อขนานกันของความนำสามารถนำค่ามาบวกกันได้โดยตรง สำหรับผลรวมของความนำเมื่อกำหนดให้ $I_1^+ > I_2^+ > .... > I_n^+$ และ $I_1^- > I_2^- > .... > I_m^-$ ในเทอมของค่าความนำสามารถหาได้ดังนี้

$$G_{im} = \sum_{j=1}^{n} G_j^+ - \sum_{k=1}^{m} G_k^- \qquad (4.3.1)$$

โดยที่ G_j และ G_k จะมีค่าเท่ากับ $1/R_j$ และ $1/R_k$ ตามลำดับ ส่วน G_{im} จะมีค่าเท่ากับ $1/R_{im}$ เมื่อป้อนศักดา V_{im} เข้าที่อินพุทของความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วงให้มีค่ามากจนกระทั่งทำให้ $i_j^+ = I_j^+$ และ $i_k^- = I_k^-$ แล้วจะได้ว่าค่าความนำจะเป็นศูนย์ เนื่องจากการทำงานในสภาวะอิ่มตัวของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ในรูปที่ 4.2.1 ทำให้เกิดกระแส i ที่มีค่าคงที่ไหลผ่านความต้านทาน ถ้าให้ $j = m-1 , m-i+1 , m-i+2 , ... , m$ โดยที่ $i < m$ และให้ $k = n-p , n-p+1 , n-p+2 , ... , n$ โดยที่ $p < n$ ดังนั้นจะได้ว่า

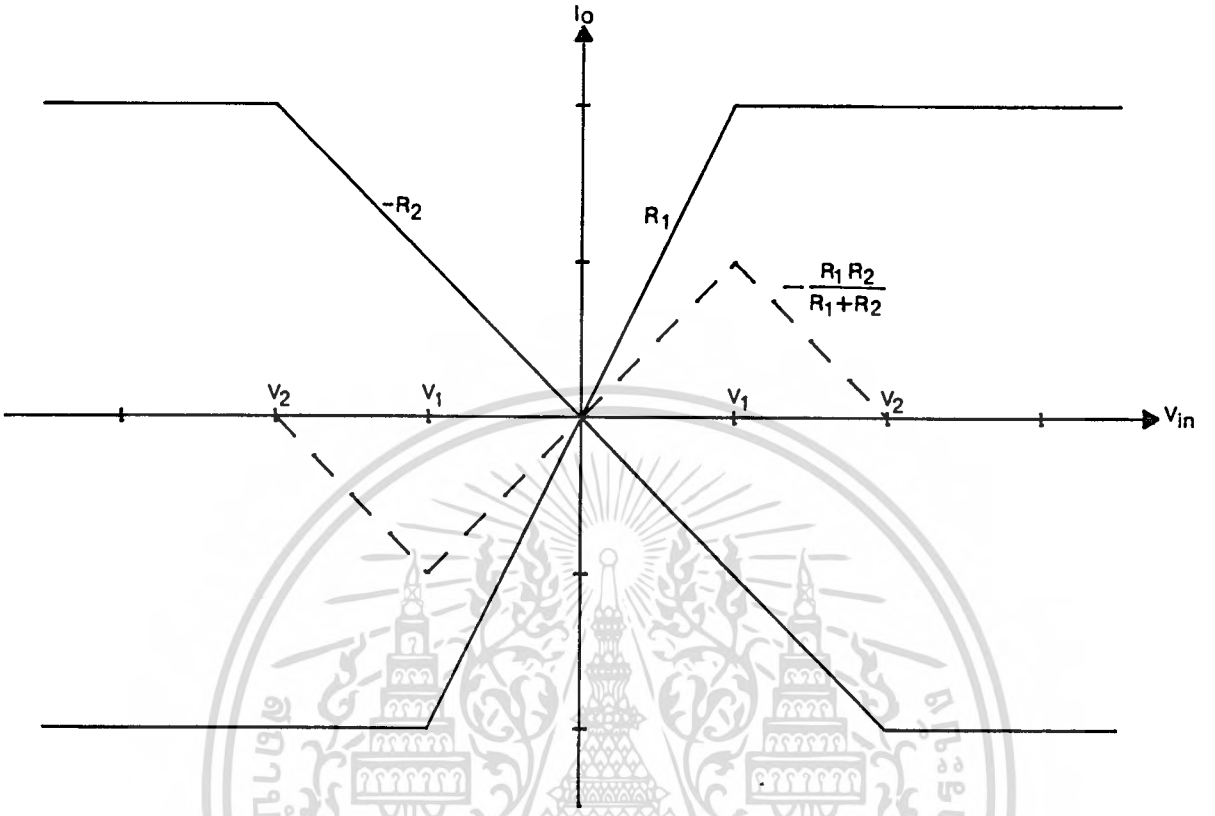
$$G_j^+ = 0 \qquad \text{เมื่อ } j = m-i , m-i+1 , ... , m$$

$$G_k^- = 0 \qquad \text{เมื่อ } k = n-p , n-p+1 , ... , n \qquad (4.3.2)$$

เมื่อนำค่าความนำทั้งสองเบบมาต่อขนานกันจะได้ค่าความนำรวมดังนี้

$$G_{im} = \sum_{j=1}^{m-i-1} G_j^+ - \sum_{k=1}^{n-p-1} G_k^- \qquad (4.3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3.1 ตัวอย่างการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น

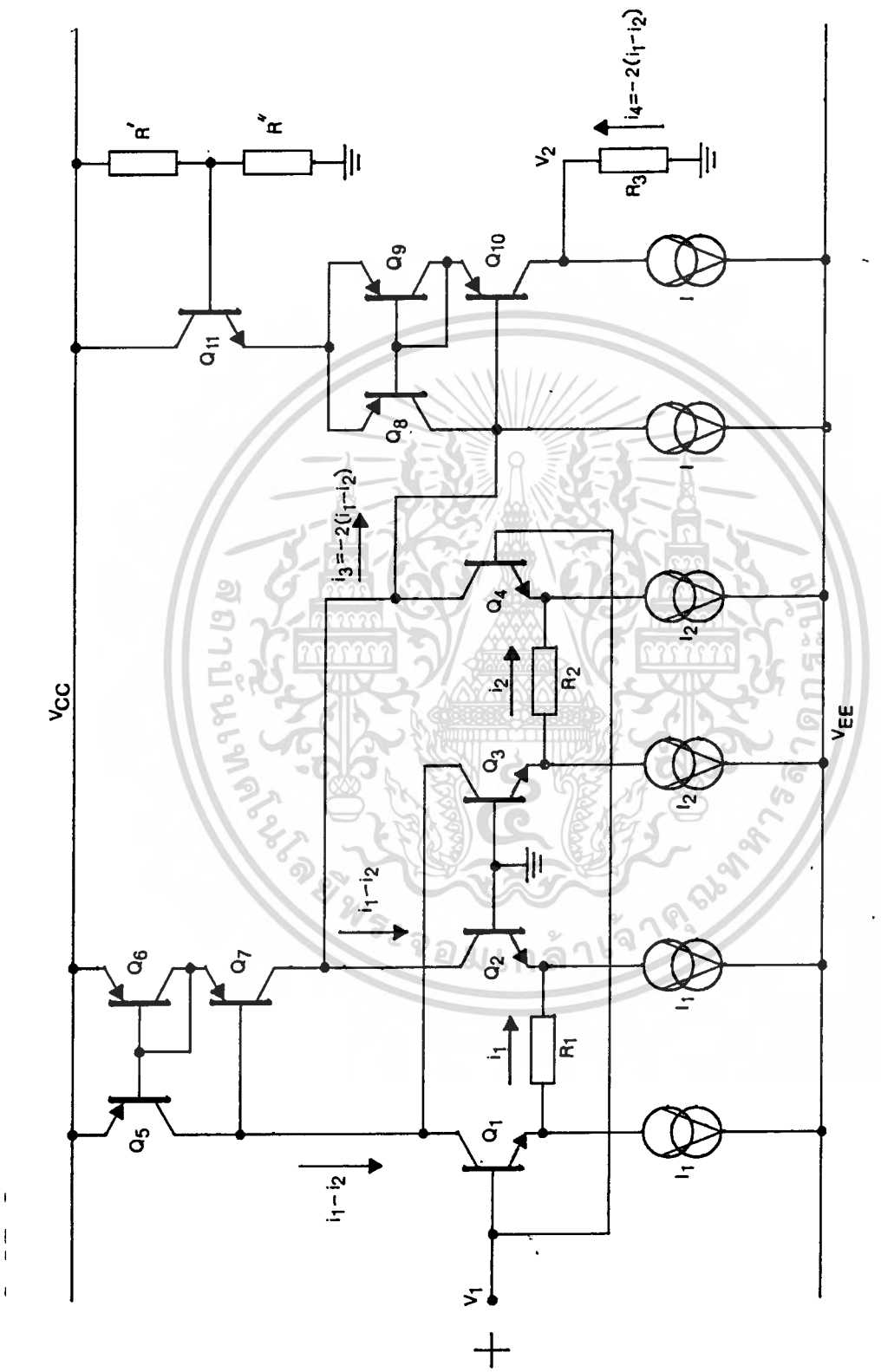
ตัวอย่างการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นแสดงในรูปที่ 4.3.1 โดยเส้นประจะเป็นความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่ต้องการ จากรูปจะเห็นได้ว่าต้องใช้ความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วงสองตัวมาต่อขนานกัน โดยตัวแรกจะเป็นความต้านทานแบบบวกที่มีค่าความต้านทานเท่ากับ R_1 และกระแส I_1 จะมีค่าเท่ากับ V_1/R_1 สำหรับความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วงตัวที่สองจะเป็นความต้านทานแบบลบที่มีค่าความต้านทานเท่ากับ $-R_2$ และกระแส I_2 จะมีค่าเท่ากับ V_2/R_2 โดยที่ค่าความต้านทาน R_1 จะมีค่ามากกว่า R_2 ดังนั้นความต้านทานรวมจะมีค่าเท่ากับ $R_1//(-R_2)$ เมื่อศักดาอินพุท V_{in} มีค่ามากกว่า V_1 ความต้านทานแบบบวกหรือ R_1 จะมีค่า ∞

4.4 การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิดกระแสควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

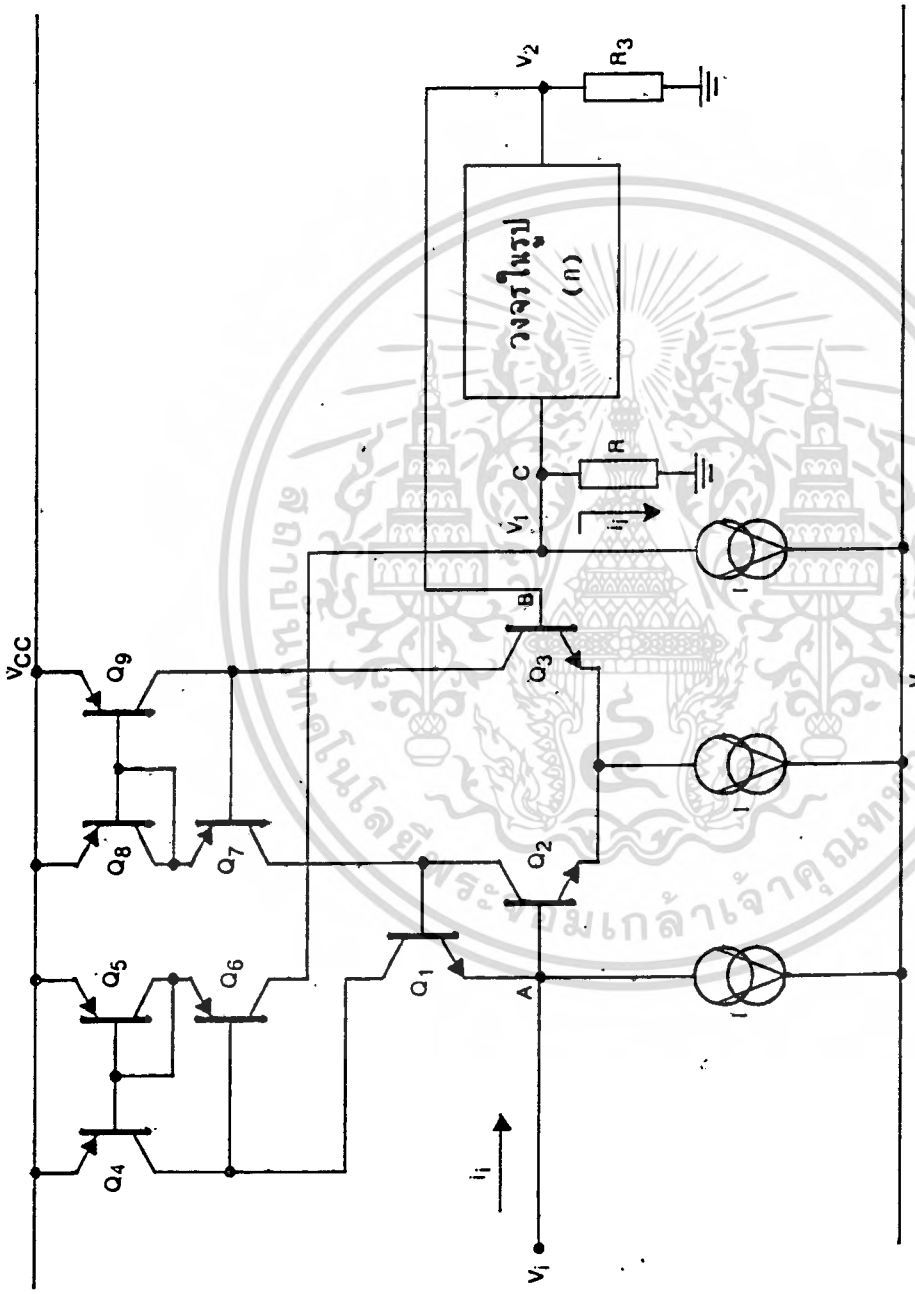
การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นในหัวข้อนี้จะใช้หลักการของวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสร่วมกับวงจรตามศักดาดังแสดงในรูปที่ 4.4.1 [5] จากรูปที่ 4.4.1 (ก) จะเป็นวงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิดศักดาควบคุม โดยในส่วนของทรานซิสเตอร์ Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 และความต้านทาน R_1 และ R_2 ต่อร่วมกันเป็นวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสแบบช่วงสองวงจรที่ต่อขนานกัน โดยมีตัวดึงกระแสคงที่ I_1 และ I_2 เป็นตัวกำหนดช่วงความเป็นเชิงเส้น การทำงานของวงจรอธิบายได้ดังนี้ เมื่อให้ศักดาอินพุท V_1 มีค่าเป็นบวกทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_4 จะนำกระแสมากขึ้น เป็นผลให้เกิดกระแส i_1 และ i_2 ไหลผ่านความต้านทาน R_1 และ R_2 ทำให้ที่ขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_5 มีกระแสเท่ากับ $(i_1 - i_2)$ แต่เนื่องจากทรานซิสเตอร์ Q_5 , Q_6 และ Q_7 ต่อเป็นวงจรสะท้อนกระแสเป็นผลให้ที่ขาคอลเลคเตอร์ของ Q_7 มีกระแสเท่ากับ $(i_1 - i_2)$ ด้วย เนื่องจากขาคอลเลคเตอร์ของ Q_2 ต่ออยู่กับขาคอลเลคเตอร์ของ Q_4 เป็นผลให้ผลรวมของกระแสจุดนี้เท่ากับ $(i_2 - i_1)$ หรือ $-(i_1 - i_2)$ ดังนั้นจะได้ผลต่างของกระแสคือ i_3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2(i_1 - i_2)$ ไหลไปสู่วงจรสะท้อนกระแสที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ Q_8 , Q_9 และ Q_{10} และกระแส i_3 จะถูกส่งผ่านมาอีกด้านเป็นกระแส i_4 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับกระแส i_3 สำหรับทรานซิสเตอร์ Q_{11} และความต้านทาน R', R" จะทำหน้าที่กำหนดระดับศักดาที่ขาอิมิตเตอร์ของ Q_8 และ Q_9 ให้มีค่าที่เหมาะสม เนื่องจากที่ขาคอลเลคเตอร์ของ Q_8 จะมีศักดาใกล้เคียงกับแหล่งจ่ายไฟ Vcc ซึ่งจะทำให้วงจรสะท้อนกระแส Q_5 , Q_6 และ Q_7 ทำงานในสภาวะที่ใกล้จุดอิ่มตัว ซึ่งจะทำให้การสะท้อนกระแสของวงจรสะท้อนกระแสมีค่าผิดพลาดสูง เมื่อป้อนศักดา V_1 เข้าไปในวงจรรูปที่ 4.4.1 (ก) และพิจารณาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของกระแส i_3 จะได้ว่าในขณะที่ V_1 มีค่าน้อยทำให้ค่ากระแส $i_1 < I_1$ และ $i_2 < I_2$ จะได้ค่ากระแส i_3 เท่ากับ $-2(i_1-i_2)$ และเมื่อเพิ่มศักดา V_1 มากจนกระทั่งทำให้ Q_4 นำกระแสในสภาวะอิ่มตัว ซึ่งจะเป็นผลให้ i_2 มีค่าคงที่ที่ I_2 ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของกระแส i_3 ก็จะมีค่าเท่ากับ $-2i_1$ และถ้าเพิ่มศักดา V_1 ให้มีค่าเพิ่มขึ้นไปอีกจนกระทั่งทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_4 นำกระแสในสภาวะอิ่มตัว ซึ่งจะเป็นผลให้กระแส i_1 และ i_2 จะมีค่าคงที่ที่ I_1 และ I_2 ทำให้ i_3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(n)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4.1 (ก) วงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น
(ข) วงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิดกระแสควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในทำนองเดียวกันถ้าศักดา V_1 ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแสในสภาวะอิ่มตัวและทรานซิสเตอร์ Q_4 ยังไม่เข้าสู่สภาวะอิ่มตัวทำให้สามารถหาค่าการเปลี่ยนแปลงของ i_3 ได้เท่ากับ $2i_2$ ดังนั้นทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของศักดา V_2 เมื่อเทียบกับศักดา V_1 ได้ดังนี้

เมื่อกำหนดให้ $G_1 = 1/R_1$ และ $G_2 = 1/R_2$ ดังนั้นกระแส i_1 และ i_2 จะหาได้จาก

$$i_1 = V_1 G_1$$

และ

$$i_2 = V_1 G_2$$

ดังนั้นอัตราส่วนระหว่าง V_1 และ V_2 จะหาได้จาก

$$V_2/V_1 = \begin{cases} -2R_3(G_1 - G_2) & \text{เมื่อ } i_1 \leq I_1 \text{ และ } i_2 \leq I_2 \\ -2R_3G_1 & \text{เมื่อ } i_1 \leq I_1 \text{ และ } i_2 > I_2 \\ 2R_3G_2 & \text{เมื่อ } i_1 > I_1 \text{ และ } i_2 \leq I_2 \\ 0 & \text{เมื่อ } i_1 > I_1 \text{ และ } i_2 > I_2 \end{cases} \qquad (4.4.1)$$

โดยที่ $i_1 = V_1/R_1$ และ $i_2 = V_1/R_2$

ในรูปที่ 4.4.1 (ข) เป็นวงจรตามศักดาโดยที่ทรานซิสเตอร์ Q_2 และ Q_3 ต่อเป็นวงจรขยายความแตกต่างซึ่งถูกกำหนดให้กระแสคอลเลคเตอร์มีค่าเท่ากับ $I/2$ โดยวงจรสะท้อนกระแส Q_7 , Q_8 และ Q_9 และเนื่องจากทรานซิสเตอร์ในวงจรรวมมีความสมพงษ์กันมากเป็นผลให้ศักดา V_{EC2} มีค่าเท่ากับศักดา V_{EC3} ดังนั้นศัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดาที่จุด B จึงมีค่าเท่ากับศักดาที่จุด A ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะทำหน้าที่เป็นวงจรตามกระแส เมื่อให้กระแส i_1 เข้าไปในวงจรที่จุด A กระแส i_1 นี้จะไหลไปยังจุดที่มีความต้านทานขาเข้าต่ำสุดซึ่งก็คือที่ขาอิมิตเตอร์ของ Q_1 และจะถูกส่งผ่านไปยังขาคอลเลคเตอร์เข้าสู่วงจรสะท้อนกระแส Q_4 , Q_5 และ Q_6 ซึ่งจะส่งผ่านกระแส i_1 ไปยังจุด C เนื่องจากวงจรในรูปที่ 4.4.1 (ก) มีความต้านทานขาเข้าสูงมากทำให้กระแส i_1 จะไหลไปยังความต้านทาน R ทั้งหมดเป็นผลให้เกิดศักดา V_1 ตกคร่อม R มีค่าเท่ากับ

$$V_1 = Ri_1 \qquad (4.4.2)$$

เมื่อกำหนดให้ i_1 ไหลออกจากจุด A และศักดาที่จุด A หรือ V_1 เป็นศักดาอินพุทซึ่งจะมีค่าเท่ากับศักดาที่จุด B หรือ V_2 และ R_1 เป็นความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$V_1 = V_2 \qquad (4.4.3)$$

จากสมการที่ (4.4.1) , (4.4.2) และ (4.4.3) จะได้ว่า

$$R_1 = V_1/i_1 = \begin{cases} -2RR_3(G_1 - G_2) & \text{เมื่อ } i_1 \leq I_1 \text{ และ } i_2 \leq I_2 \\ -2RR_3G_1 & \text{เมื่อ } i_1 \leq I_1 \text{ และ } i_2 > I_2 \\ 2RR_3G_2 & \text{เมื่อ } i_1 > I_1 \text{ และ } i_2 \leq I_2 \\ 0 & \text{เมื่อ } i_1 > I_1 \text{ และ } i_2 > I_2 \end{cases} \qquad (4.4.4)$$

จากที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าความไม่เป็นเชิงเส้นในหลักการนี้จะขึ้นอยู่กับวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแส ดังนั้นในการสังเคราะห์ความไม่เป็นเชิงเส้นในรูปแบบอื่นๆ ก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสขนานเข้าไปในวงจรรูปที่ 4.4.1 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 บทสรุป

การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้หลักการของวงจรรวมจะทำให้อนุกลทุกตัวในวงจรมีความสมพงษ์กันมากเนื่องจากอยู่บนชิ้นสารกึ่งตัวนำเดียวกัน เป็นผลให้ค่าผิดพลาดในการประมาณค่าความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดจากผลของอนุกลมีค่าน้อยลง ซึ่งทำให้การทำงานของวงจรมีความแม่นยำสูงและสามารถที่จะทำงานในขณะที่มีสัญญาณอินพุทมีขนาดเล็กๆได้โดยมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยกว่าแบบดิสครีทที่ได้กล่าวถึงในบทที่ผ่านมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
วงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่ได้พัฒนาขึ้น

5.1 บทนำ

วงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่กล่าวถึงในบทที่ผ่านมานั้น ความแม่นยำของความไม่เป็นเชิงเส้นจะยังขึ้นอยู่กับอนุกลที่นำมาใช้ในวงจร เนื่องจากการใช้งานของอนุกลจะพิจารณาเป็นอนุกลในทางอุดมคติ โดยเฉพาะการสังเคราะห์โดยใช้หลักการของความเป็นเชิงเส้นแบบช่วงจะใช้คุณสมบัติของไดโอดและทรามชิสเตอร์เป็นหลัก ซึ่งศักดาที่ตกคร่อมไดโอดหรือทรานชิสเตอร์จะไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อเทียบกับกระแสที่ไหลผ่านตัวมัน การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นตามหลักการที่ผ่านมาจะพิจารณาในรูปของศักดาเป็นหลัก เป็นผลให้ความไม่เป็นเชิงเส้นจะเกิดผิดเพี้ยนไปในช่วงที่ไดโอดหรือทรานชิสเตอร์กำลังจะเริ่มนำกระแสหรือหยุดนำกระแส

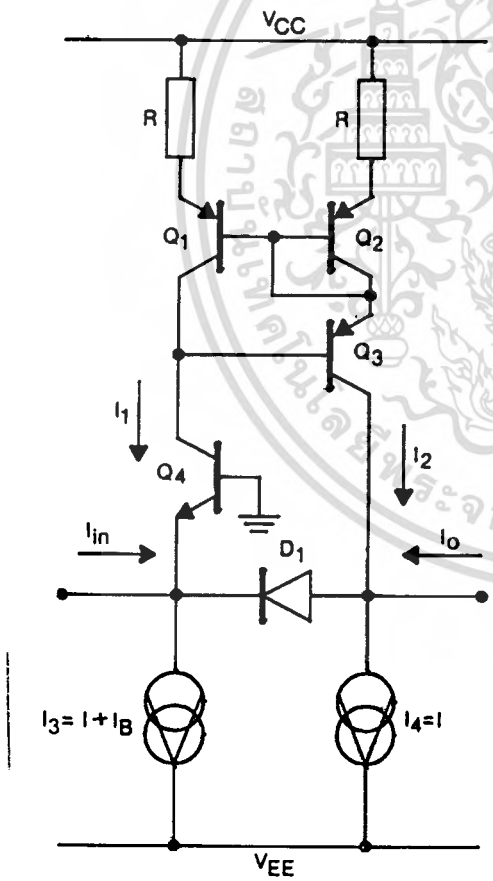
ในบทนี้จึงได้เสนอหลักการและการออกแบบวงจรเพื่อสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นขึ้นอีกวิธีหนึ่ง โดยจะใช้วงจรจำกัดกระแสซึ่งทำงานในรูปของกระแสแทนวงจรจำกัดศักดาซึ่งทำงานในรูปของศักดา ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้หลักการของวงจรจำกัดกระแสนี้จะมีความแม่นยำสูง และสามารถที่จะออกแบบให้ทำงานได้ทั้งชนิดกระแสควบคุมและศักดาควบคุม

5.2 หลักการของวงจรจำกัดกระแส

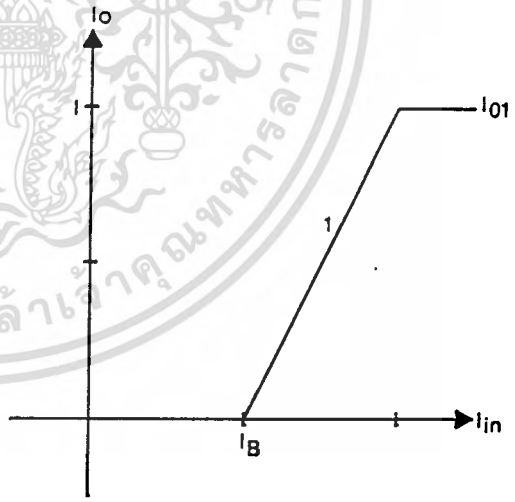
สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้วงจรจำกัดกระแสจะเป็นวงจรพื้นฐานหลักที่ใช้ในการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น โดยที่วงจรจำกัดกระแสนี้จะทำงานในรูปของกระแสทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงผลของศักดาที่ตกคร่อมไดโอดหรือศักดาระหว่างขาเบสและอีสมิเตอร์ของทรานชิสเตอร์ซึ่งจะมีค่าไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบกับกระแสที่ไหลผ่านตัวมัน วงจรจำกัดกระแสที่ได้พัฒนาขึ้นแสดงในรูปที่ 5.2.1 โดยที่ทรานซิสเตอร์ Q_1 , Q_2 และ Q_3 จะต่อเป็นวงจรสะท้อนกระแสแบบลบ ทรานซิสเตอร์ Q_4 จะทำหน้าที่เป็นวงจรตามกระแสและยังเป็นตัวกำหนดศักดาที่จุด a ให้มีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของแหล่งจ่ายไฟ เพื่อที่จะให้วงจรขับกระแสจากภายนอกสามารถจ่ายกระแส I_{in} เข้ามายังจุด a ได้อย่างถูกต้อง ไดโอด D_1 จะทำหน้าที่เป็นตัวป้อนกลับกระแสจากจุด b มายังจุด a ในช่วงที่ต้องการให้กระแสเอาท์พุท I_o เป็นศูนย์และกระแสคงที่ I_B เป็นค่ากระแสเริ่มต้นที่วงจรจำกัดกระแสจะให้กระแสเอาท์พุท I_o



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.2.1 (ก) วงจรจำกัดกระแสควอทแดนท์ที่หนึ่ง
(ข) เส้นคุณลักษณะจำเพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของวงจรในรูปที่ 5.2.1 สามารถอธิบายได้ดังนี้ ในขณะที่ยังไม่มีกระแสอินพุท I_{in} วงจรสะท้อนกระแสแบบลบที่ประกอบด้วย Q_1 , Q_2 และ Q_3 จะบังคับให้ค่ากระแส I_1 เท่ากับ I_2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $I + I_B/2$ เมื่อมีกระแสอินพุท $I_{in} = i$ เข้ามายังจุด a ดังนั้นผลรวมของกระแสในวงจรจะมีค่าดังนี้

$$I_1 + I_2 + i = I_3 + I_4 = 2I + I_B \qquad (5.2.1)$$

เนื่องจากกระแส $I_1 = I_2$ ดังนั้น

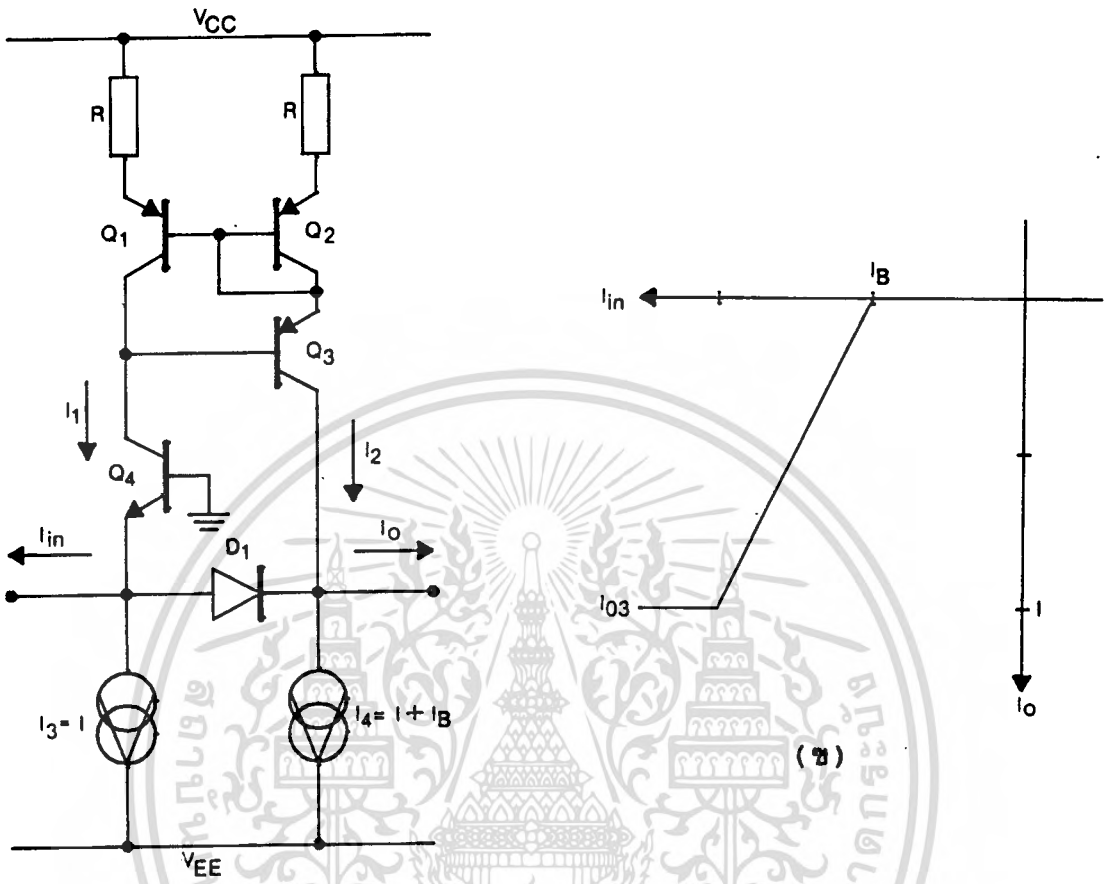
$$I_1 = I_2 = I + I_{D1} = I + I_B/2 - i/2 \qquad (5.2.2)$$

เมื่อกระแส I_{D1} เป็นกระแสที่ไหลผ่านไดโอด D_1 จากสมการที่ (5.2.2) จะเห็นได้ว่าเมื่อกระแส i มีค่ามากขึ้นกระแสที่ไหลผ่านไดโอด I_{D1} ก็จะมีค่าลดลง และถ้ากระแส i มีค่าเท่ากับ I_B จะเป็นผลให้กระแส I_1 และ I_2 จะมีค่าเท่ากับ I ทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่านไดโอด D_1 หรือก็คือไดโอด D_1 หยุดนำกระแส เมื่อกระแส i มีค่ามากกว่า I_B จะทำให้เกิดกระแสเอาท์พุท I_o ขึ้นซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $(i - I_B)$ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุทและกระแสเอาท์พุทแสดงในรูปที่ 5.2.1 (ข) และกระแสเอาท์พุทสามารถแสดงได้ดังนี้

$$I_{o1} = \begin{cases} 0 & \text{เมื่อ } I_{in} < I_B \\ I_{in} - I_B & \text{เมื่อ } I_{in} > I_B \end{cases} \qquad (5.2.3)$$

โดยที่ I_{o1} จะแทนกระแสเอาท์พุทที่อยู่ในควอทแดนท์ที่หนึ่ง และสำหรับวงจรจำกัดกระแสที่ให้กระแสเอาท์พุทในควอท์แดนท์ที่สามหรือ I_{o3} จะแสดงในรูปที่ 5.2.2 โดยที่การทำงานของวงจรจะเหมือนกับในรูปที่ 5.2.1 เพียงแต่ทิศทางของกระแสอินพุทและกระแสเอาท์พุทตรงข้ามกันกับในรูปที่ 5.2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

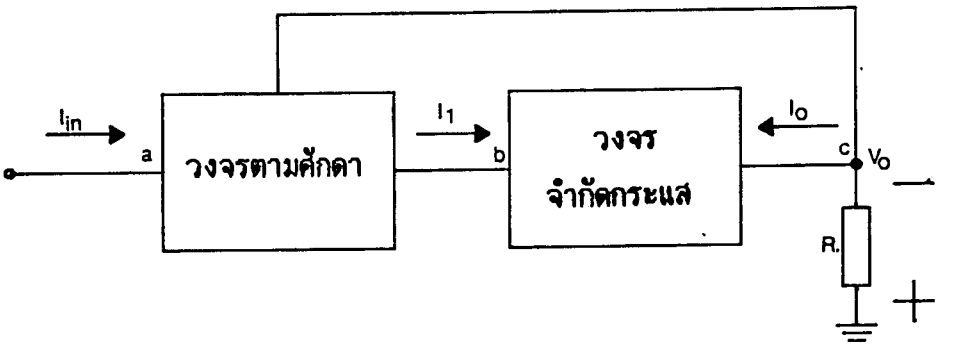


รูปที่ 5.2.2 (ก) วงจรจำกัดกระแสควอทแดนท์ที่สาม

(ข) เส้นคุณลักษณะจำเพาะ

จากคุณสมบัติของวงจรจำกัดกระแสทำให้สามารถที่จะนำมาสังเคราะห์ความต้านทานเชิงเส้น แบบช่วงได้ โดยการต่อร่วมกับวงจรตามศักดา (ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4) และความต้านทาน R ดังแสดงในรูปที่ 5.2.3 ซึ่งจะได้เป็นวงจรความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วง จากรูปที่ 5.2.3 กำหนดให้ I_B เป็นค่ากระแสเริ่มต้นของวงจรจำกัดกระแส เมื่อให้กระแส I_{in} เข้าที่อินพุทจุด a วงจรตามศักดาก็จะให้กระแสเอาท์พุท I_1 ที่มีค่าเท่ากับ I_{in} เข้าที่จุด b ซึ่งเป็นอินพุทของวงจรจำกัดกระแส เมื่อกระแส I_1 มีค่ามากกว่าค่าของกระแส I_B แล้ววงจรจำกัดกระแสก็จะให้กระแสเอาท์พุท I_o ออกมา และกระแส I_o นี้จะไหลผ่านความต้านทาน R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



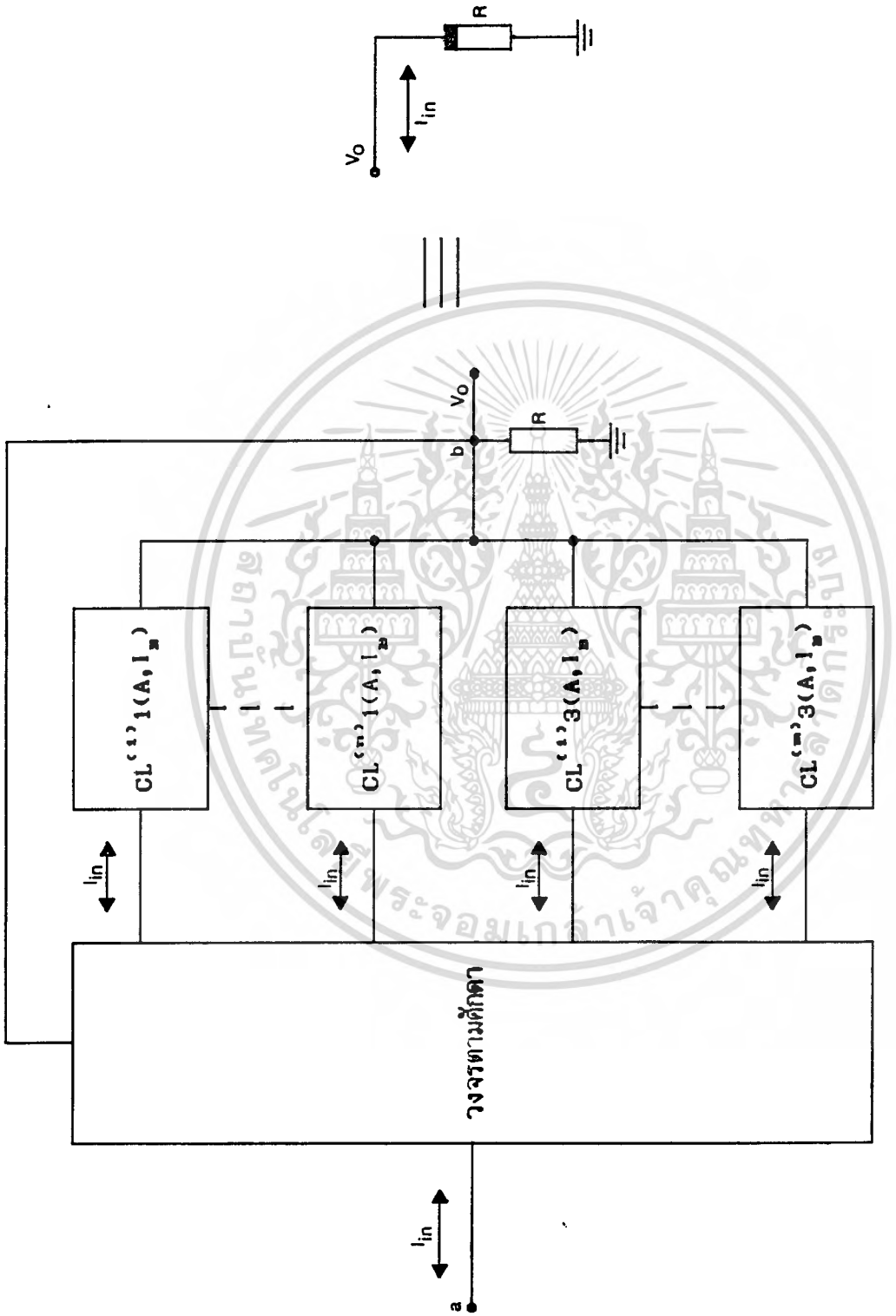
รูปที่ 5.2.3 การสังเคราะห์ความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วง

ลงกราวด์ ทำให้เกิดเป็นศักดา V_o ตกคร่อมความต้านทาน R ขึ้นที่จุด C ศักดา V_o นี้จะถูกป้อนกลับมาปรากฏที่จุด a โดยวงจรตามศักดา และเนื่องจากศักดาที่จุด C จะมีค่าเป็นลบจึงเป็นผลให้วงจรในรูปที่ 5.2.3 เป็นวงจรความต้านทานเชิงเส้นแบบช่วงแบบลบชนิดกระแสควบคุม

สำหรับการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นก็สามารถทำได้โดยใช้หลักการเดียวกับในรูปที่ 5.2.3 ด้วยการเพิ่มวงจรจำกัดกระแสที่มีค่ากระแสเริ่มต้นที่ค่าต่างๆกันดังแสดงในรูปที่ 5.2.4 ซึ่งในวงจรนี้มีวงจรจำกัดกระแสทั้งสองชนิดคือชนิดที่ให้กระแสเอาท์พุทในควอทแดนท์ที่หนึ่งและชนิดที่ให้กระแสเอาท์พุทในควอทแดนท์ที่สาม แต่จากคุณสมบัติของวงจรจำกัดกระแสในรูปที่ 5.2.1 ในส่วนของเอาท์พุทที่จุด b จะมีศักดาเป็นบวกไม่ได้และส่วนในรูปที่ 5.2.2 ก็เช่นกันจะมีศักดาที่เอาท์พุทเป็นลบไม่ได้ เนื่องจากจะทำให้ไดโอด D_1 ถูกไบอัสตรงและเป็นผลให้วงจรทำงานผิดไปจากที่ต้องการ ทำให้การใช้งานของวงจรจำกัดกระแสในรูปที่ 5.2.1 และรูปที่ 5.2.2 มีข้อจำกัดอยู่มาก จึงได้มีการพัฒนาวงจรจำกัดกระแสขึ้นใหม่เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าวและได้แสดงในรูปที่ 5.2.5

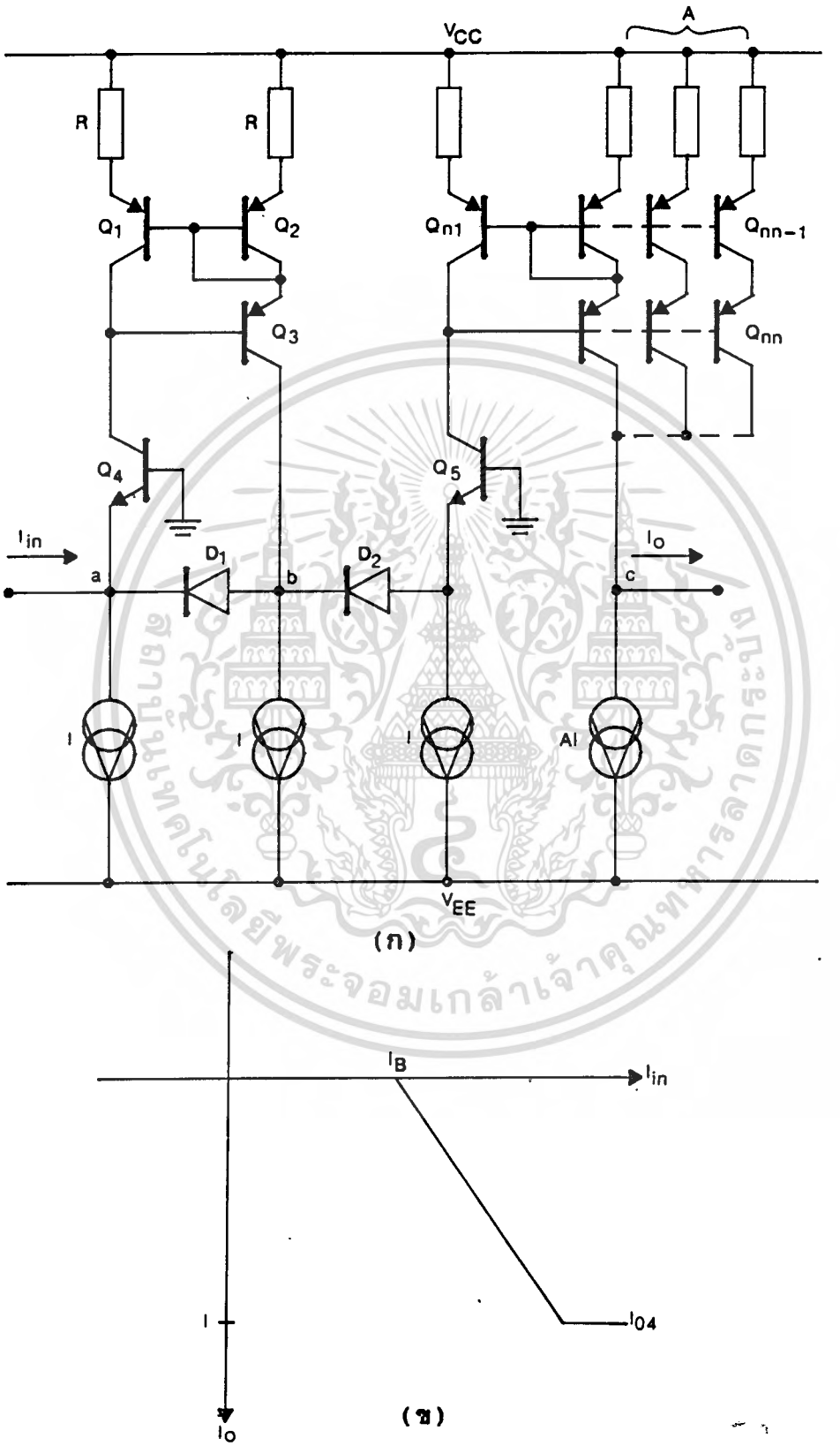
จากรูปที่ 5.2.5 (ก) เป็นวงจรที่พัฒนามาจากวงจรในรูปที่ 5.2.1 (ก) ทรานซิสเตอร์ Q_3 และไดโอด D_2 เพิ่มเข้ามาเพื่อทำให้วงจรส่วนหน้าทำงานได้อย่างถูกต้อง ทรานซิสเตอร์ Q_{N1} ถึง Q_{N3} จะประกอบกันเป็นวงจรสะท้อนกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2.4 การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2.5 (ก) วงจรจำกัดกระแสที่พัฒนาจากวงจรในรูปที่ 5.2.1
(ข) เส้นคุณลักษณะจำเพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบลบที่สามารถเปลี่ยนแปลงอัตราการขยายของกระแส A ได้โดยการเพิ่มหรือลดจำนวนของทรานซิสเตอร์ ค่าของกระแสเอาท์พุท I_{o} จะมีค่าเท่ากับ $-A(I_{in} - I_{B})$ หรือมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสอินพุท ซึ่งจะเป็นกระแสในควอทแดนท์ที่สี่หรือ I_{o4} และเนื่องจากความต้านทานขาออกของวงจรสะท้อนกระแสและวงจรติงกระแสคงตัวมีค่าสูงมาก ดังนั้นที่จุด C นี้จึงเสมือนกับลอยตัวทำให้ศักดาที่จุดนี้สามารถแปรค่าได้อย่างอิสระ

วงจรรูปที่ 5.2.5 (ก) สามารถที่จะพัฒนาให้มีกระแสเอาท์พุทในควอทแดนท์ที่หนึ่งและสี่ได้ในตัวเดียวกัน โดยการเพิ่มวงจรสะท้อนกระแสแบบบวกขึ้นอีกหนึ่งชุด ดังแสดงในรูปที่ 5.2.6 โดยในรูปที่ 5.2.6 (ก) ทรานซิสเตอร์ Q_{P1} ถึง Q_{Pn} จะประกอบกันเป็นวงจรสะท้อนกระแสแบบบวกที่เพิ่มเข้ามา ซึ่งจะทำการสะท้อนกระแสเอาท์พุท I_{o4}' ให้มีทิศทางตรงข้ามกันดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 5.2.6 (ข) สำหรับกระแสเอาท์พุทจะมีค่าดังนี้

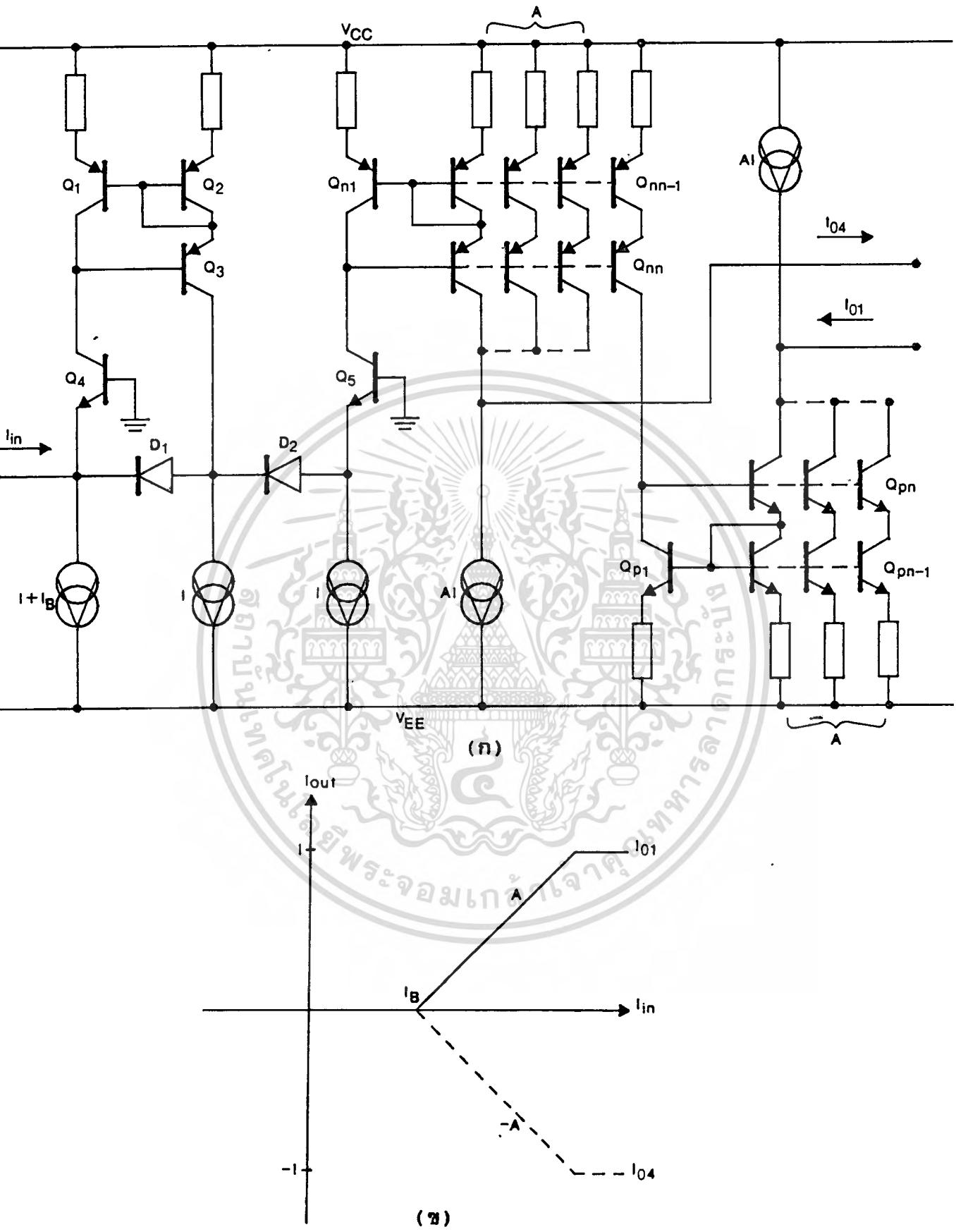
$$I_{o1}(A, I_{B}) = \begin{cases} 0 & \text{เมื่อ } I_{in} < I_{B} \\ A(I_{in} - I_{B}) & \text{เมื่อ } I_{in} > I_{B} \end{cases} \qquad (5.2.4)$$

และ

$$I_{o4}(A, I_{B}) = \begin{cases} 0 & \text{เมื่อ } I_{in} < I_{B} \\ -A(I_{in} - I_{B}) & \text{เมื่อ } I_{in} > I_{B} \end{cases} \qquad (5.2.5)$$

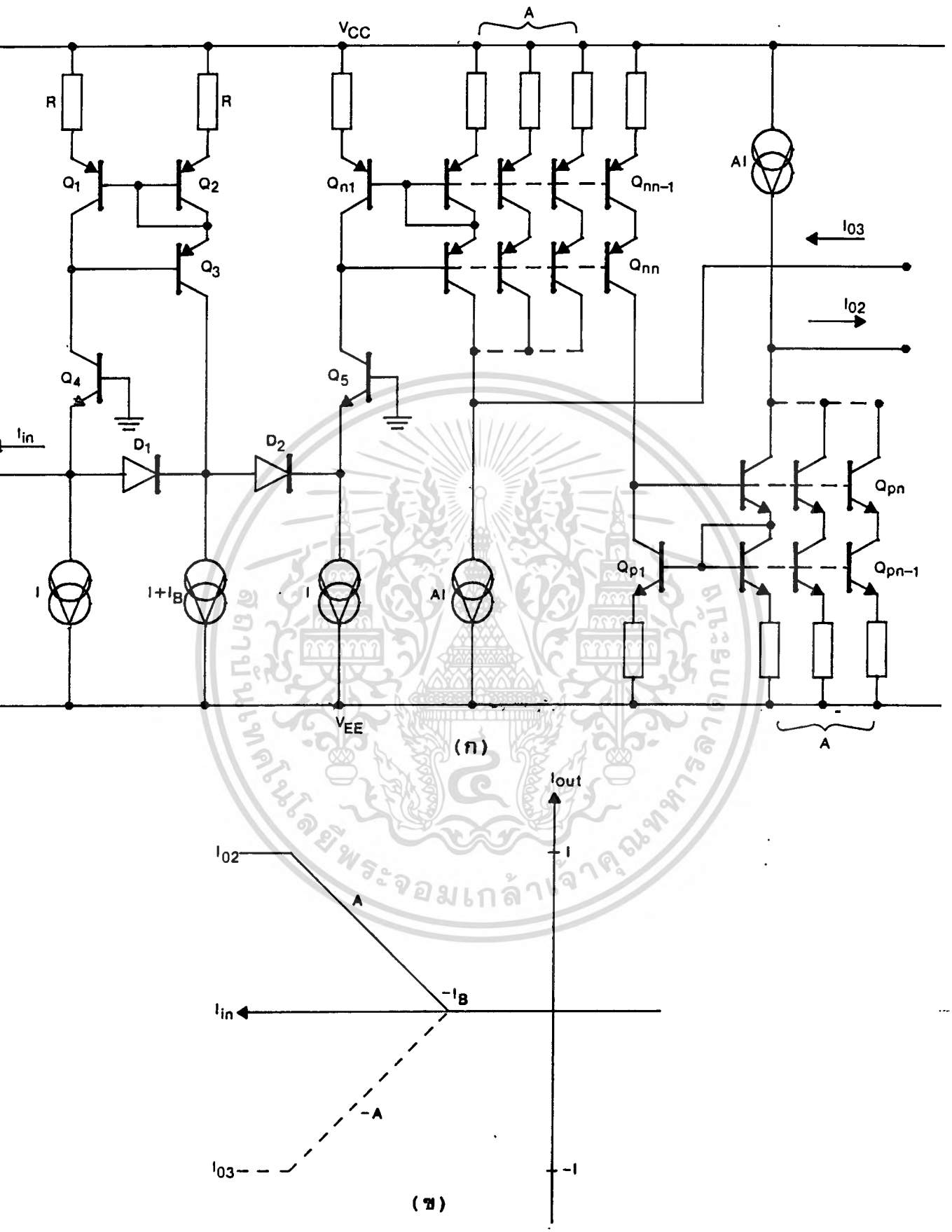
เมื่อ $I_{o1}(A, I_{B})$ และ $I_{o4}(A, I_{B})$ เป็นกระแสเอาท์พุทในควอทแดนท์ที่หนึ่งและสี่ ค่า A เป็นอัตราการขยายกระแส และ I_{B} เป็นค่ากระแสเริ่มต้นของวงจรจำกัดกระแส ส่วนเครื่องหมายลบ "-" ในสมการที่ (5.2.5) จะแสดงถึงทิศทาง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2.6 (ก) วงจรจำกัดกระแสชนิดสองเอาท์พุท (I_{01} , I_{04})
(ข) เส้นแสดงคุณลักษณะจำเพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2.7 (ก) วงจรจำกัดกระแสชนิดสองเอาท์พุท (I_{o1} , I_{o2})
(ข) เส้นแสดงคุณลักษณะจำเพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของกระแสเอาท์พุทที่ตรงข้ามกับกระแสอินพุท สำหรับวงจรจำกัดกระแสที่ให้กระแสเอาท์พุทในควอดแดนท์ที่สองและสามก็สามารถที่จะพัฒนาได้จากวงจรในรูปที่ 5.2.2 เช่นกันดังวงจรที่แสดงในรูปที่ 5.2.7 และค่ากระแสเอาท์พุทสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$I_{o2}(A, I_B) = \begin{cases} 0 & \text{เมื่อ } |I_{in}| > |I_B| \\ A(|I_{in}| - I_B) & \text{เมื่อ } |I_{in}| < |I_B| \end{cases} \qquad (5.2.6)$$

และ

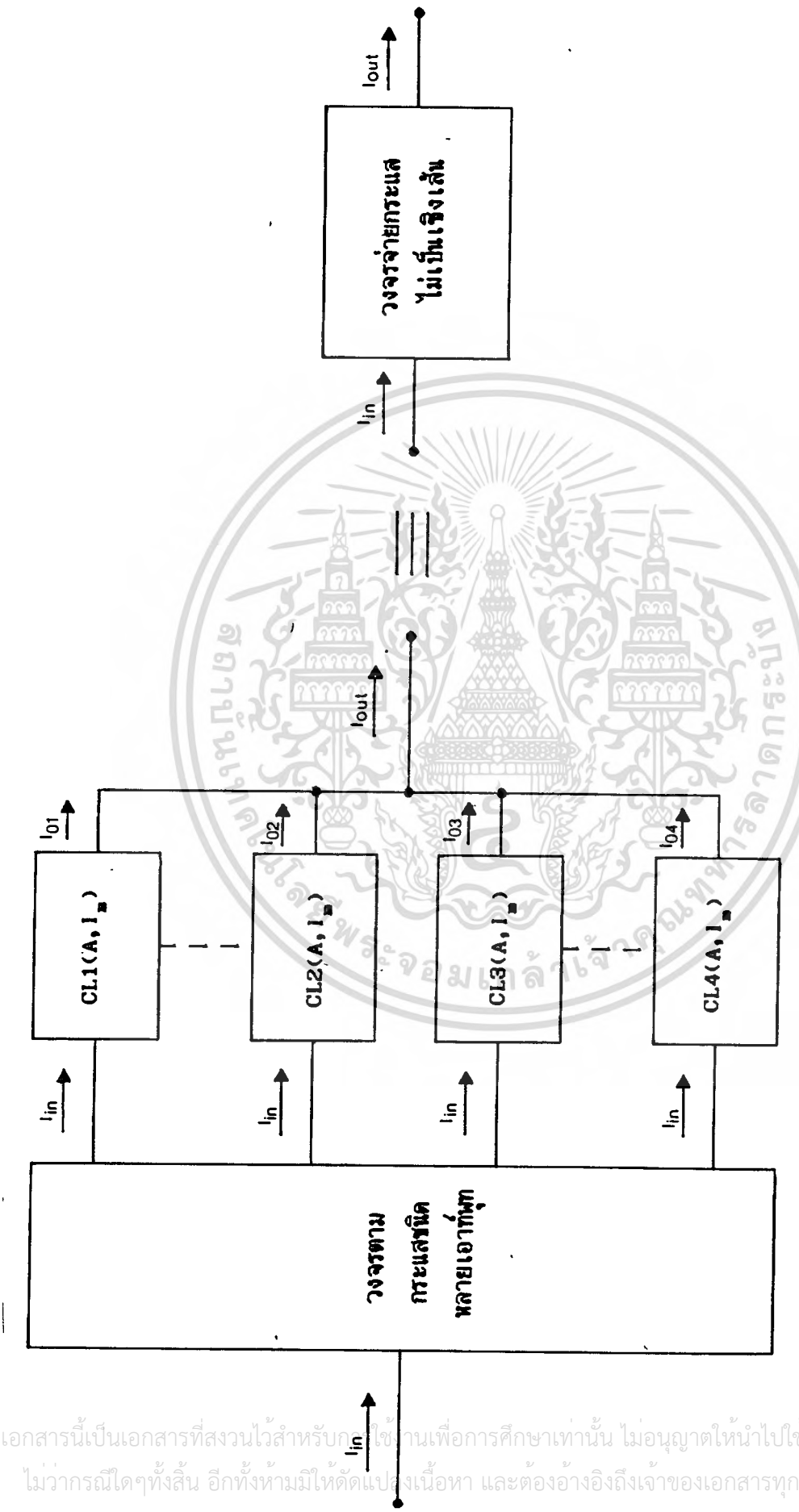
$$I_{o3}(A, I_B) = \begin{cases} 0 & \text{เมื่อ } |I_{in}| > |I_B| \\ -A(|I_{in}| - I_B) & \text{เมื่อ } |I_{in}| < |I_B| \end{cases} \qquad (5.2.7)$$

วงจรจำกัดกระแสที่ให้กระแสเอาท์พุทตามสมการที่ (5.2.4) ถึง (5.2.7) จะแทนด้วย $CL1(A, I_B)$, $CL3(A, I_B)$, $CL2(A, I_B)$ และ $CL3(A, I_B)$ ตามลำดับ และสำหรับวงจรในรูปที่ 5.2.6 (ก) และ 5.2.7 (ก) ก็จะแทนด้วย $CL1,4(A, I_B)$ และ $CL2,3(A, I_B)$

5.2.1 *หลักการของวงจรจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้น*

จากที่ผ่านมาข้างต้นจะได้วงจรพื้นฐานหลัก CL1 , CL2 , CL3 และ CL4 เมื่อนำมาต่อร่วมกับวงจรตามกระแสชนิดหลายเอาท์พุทดังแสดงในรูปที่ 5.2.8 ซึ่งเป็นผลให้วงจรในรูปที่ 5.2.8 จะได้เป็นวงจรจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ทิศทางกระแสเอาท์พุทของวงจรตามกระแสจะมีทั้งเหมือนกับกระแสอินพุทและตรงข้ามกับกระแสอินพุท เพื่อแยกจ่ายให้กับวงจรจำกัดกระแสทั้งสี่ชนิด ผลรวมของกระแส I_{out} จะมีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นที่ขึ้นอยู่กับวงจรจำกัดกระแสแต่ละตัว เมื่อกำหนดให้ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2.8 หลักการของวงจรจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

m , n , p และ q เป็นจำนวนวงจรจำกัดกระแสในแต่ละชนิด ดังนั้นกระแสเอาท์พุท I_{out} จะสามารถหาได้ดังนี้

$$I_{out} = \sum_{i=1}^{m} I_{o1}^{(i)}(A, I_s) + \sum_{j=1}^{n} I_{o2}^{(j)}(A, I_s) + \sum_{k=1}^{p} I_{o3}^{(k)}(A, I_s)$$

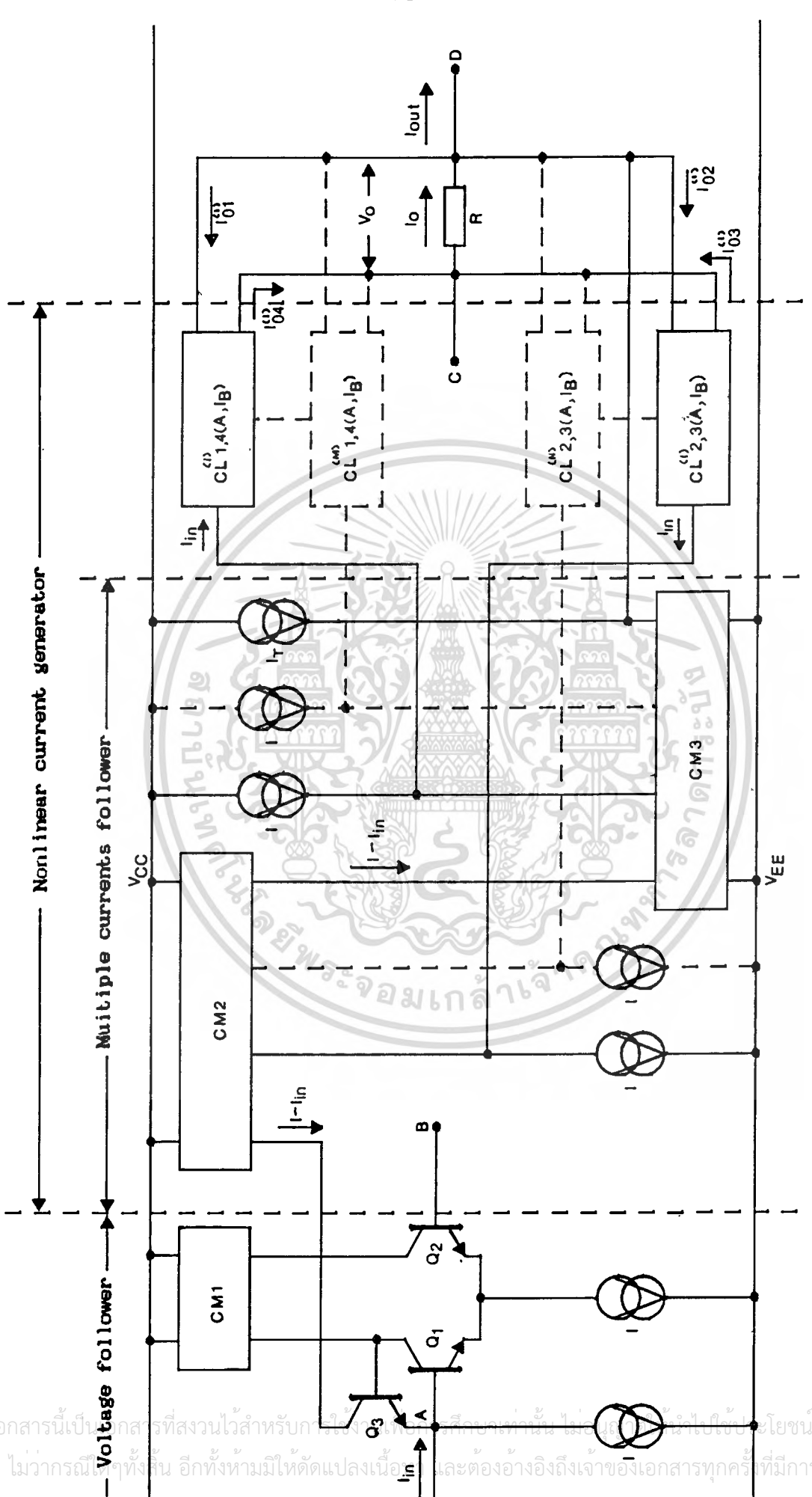
$$+ \sum_{l=1}^{q} I_{o4}^{(l)}(A, I_s) \qquad (5.2.8)$$

จากสมการที่ (5.2.8) จะเห็นได้ว่าความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรจ่ายกระแสนี้สามารถสร้างขึ้นให้เป็นรูปฟังก์ชั่นใดๆได้ โดยการกำหนดค่าอัตราการขยาย A และค่ากระแสเริ่มต้น I_s ของวงจรจำกัดกระแสทั้งสองชนิด

5.3 *ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิดกระแสควบคุม*

จากหลักการของวงจรจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้นทำให้สามารถที่จะนำมาสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นได้โดยใช้หลักการเดียวกับหลักการในรูปที่ 5.2.4 ซึ่งจะได้เป็นความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิดกระแสควบคุมดังแสดงในรูปที่ 5.3.1 จากรูปทรานซิสเตอร์ Q_1 , Q_2 และวงจรสะท้อนกระแส CM1 จะทำหน้าที่เป็นวงจรตามศักดาดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ส่วนวงจรสะท้อนกระแส CM2 , CM3 และทรานซิสเตอร์ Q_3 จะทำหน้าที่เป็นวงจรตามกระแสที่มีหลายเอาท์พุทสำหรับจ่ายเป็นกระแสอินพุทให้กับวงจรจำกัดกระแสทั้งสี่ชนิด ซึ่งในส่วนที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ก็คือวงจรจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากวงจรจำกัดกระแสทั้งสี่ชนิดมีการทำงานคล้ายกัน ดังนั้นการทำงานของวงจรในรูปที่ 5.3.1 จะพิจารณาจากวงจรจำกัดกระแส $CL^{(1)}1,4$ เพียงวงจรเดียว เมื่อให้กระแสอินพุท I_{in} เข้าที่จุด A กระแสอินพุทนี้จะไหลเข้าที่ขาอีมิตเตอร์ของ Q_3 เข้าสู่วงจรสะท้อนกระแส CM2 ทำให้วงจรจำกัดกระแส $CL^{(1)}1,4$ จะให้กระแสเอาท์พุท $I_{o1}^{(1)}$ และ $I_{o4}^{(1)}$ ซึ่งจะมีค่าเป็นไปตามสมการที่ (5.2.4) ถึง (5.2.7) ตามลำดับ กระแสเอาท์พุทนี้จะไหลผ่านความต้านทาน R จากจุด C ไปยังจุด D ทำให้ที่จุด C มีค่าศักดาเป็นบวก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.1 วงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิดกระแสควบคุม

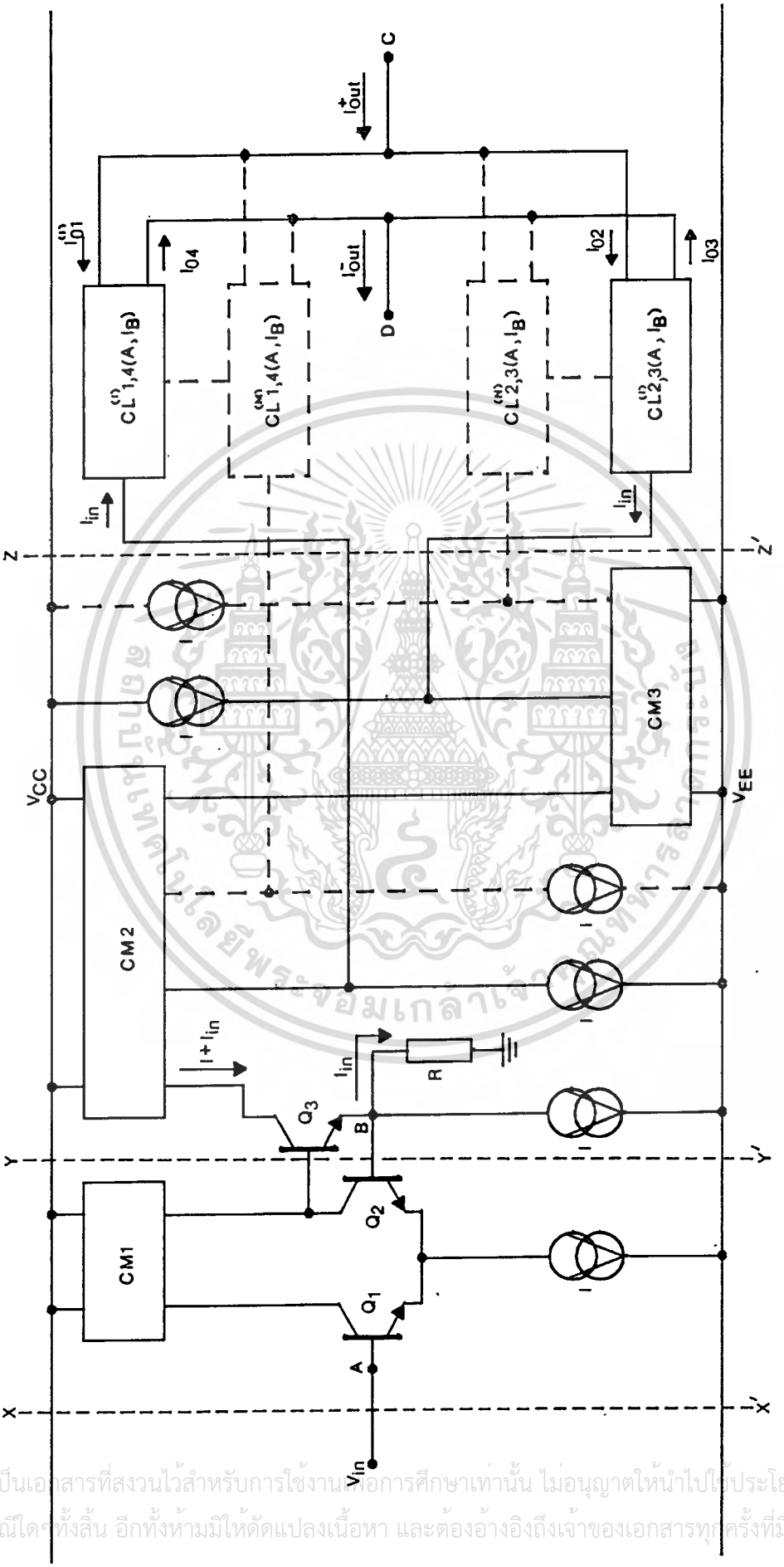
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเทียบกับจุด D ถ้าต่อจุด C กับจุด B และจุด E ต่อเข้ากับจุด D จะเห็นได้ว่าศักดาที่จุด A จะมีค่าเท่ากับศักดาที่จุด C และกระแส I_{out} ที่ออกจากจุด D จะมีค่าเท่ากับจุด A อันเนื่องมาจากวงจรสะท้อนกระแส CM2 , CM3 และตัวจ่ายกระแสคงที่ I_T ดังนั้นเมื่อพิจารณารวมวงจรจำกัดกระแสทั้งหมดในรูปที่ 5.3.1 ที่ขั้วระหว่างจุด A และจุด D จะเสมือนกับเป็นความต้านทานแบบลอยตัวที่เป็นความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิดกระแสควบคุม ในทำนองเดียวกันถ้าต่อจุด B เข้ากับจุด D และย้ายเส้นต่อระหว่างจุด E และจุด D มาเป็นจุด E และจุด C แทน ที่ขั้วระหว่างจุด A และจุด C ก็เสมือนเป็นความต้านทานแบบลอยตัวที่เป็นความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นแบบลบชนิดกระแสควบคุม

5.4 *ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิดศักดาควบคุม*

ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิดศักดาควบคุมแบบปลายข้างหนึ่งต่อลงกราวด์แสดงในรูปที่ 5.4.1 ซึ่งการทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้ ทรานซิสเตอร์ Q_1 , Q_2 และวงจรสะท้อนกระแส CM1 จะทำหน้าที่เป็นวงจรตามศักดา ซึ่งจะเป็นผลให้ศักดาที่จุด B จะมีค่าเท่ากับศักดาที่จุด A ดังนั้นเมื่อป้อนสัญญาณ V_{in} เข้าที่จุด A ก็จะปรากฏสัญญาณ V_{in} ขึ้นที่จุด B ด้วย เป็นผลให้เกิดกระแส I_{in} ไหลผ่านความต้านทาน R ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ V_{in}/R ทรานซิสเตอร์ Q_3 และวงจรสะท้อนกระแส CM2 จะทำหน้าที่เป็นวงจรตามกระแสที่มีหลายเอาท์พุท กระแส I_{in} นี้จะถูกส่งผ่านมายังเอาท์พุทของวงจรตามกระแสเข้าสู่อินพุทของวงจรจำกัดกระแส ในทำนองเดียวกับหัวข้อที่ผ่านมาถ้าพิจารณาเฉพาะการทำงานของวงจรจำกัดกระแส $CL^{(+)}1,4$ จากรูปที่ 5.4.1 เมื่อมีสัญญาณ V_{in} ทำให้เกิดกระแส I_{in} ป้อนเข้าสู่วงจรจำกัดกระแสเป็นผลให้กระแสเอาท์พุทของ $CL^{(+)}1,4$ ซึ่งก็คือกระแส I_{out}^{+} จะไหลเข้าที่จุด C และกระแส I_{out}^{-} จะไหลออกจากจุด D โดยที่ค่ากระแส I_{out} นี้จะขึ้นอยู่กับค่ากระแสเริ่มต้นและอัตราการขยายของวงจรจำกัดกระแส ดังนั้นเมื่อต่อจุด C เข้ากับจุด A และให้จุด D ลงกราวด์จะได้ว่าระหว่างจุด A และกราวด์จะเสมือนเป็นความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นแบบบวกชนิดศักดาควบคุม เนื่อง

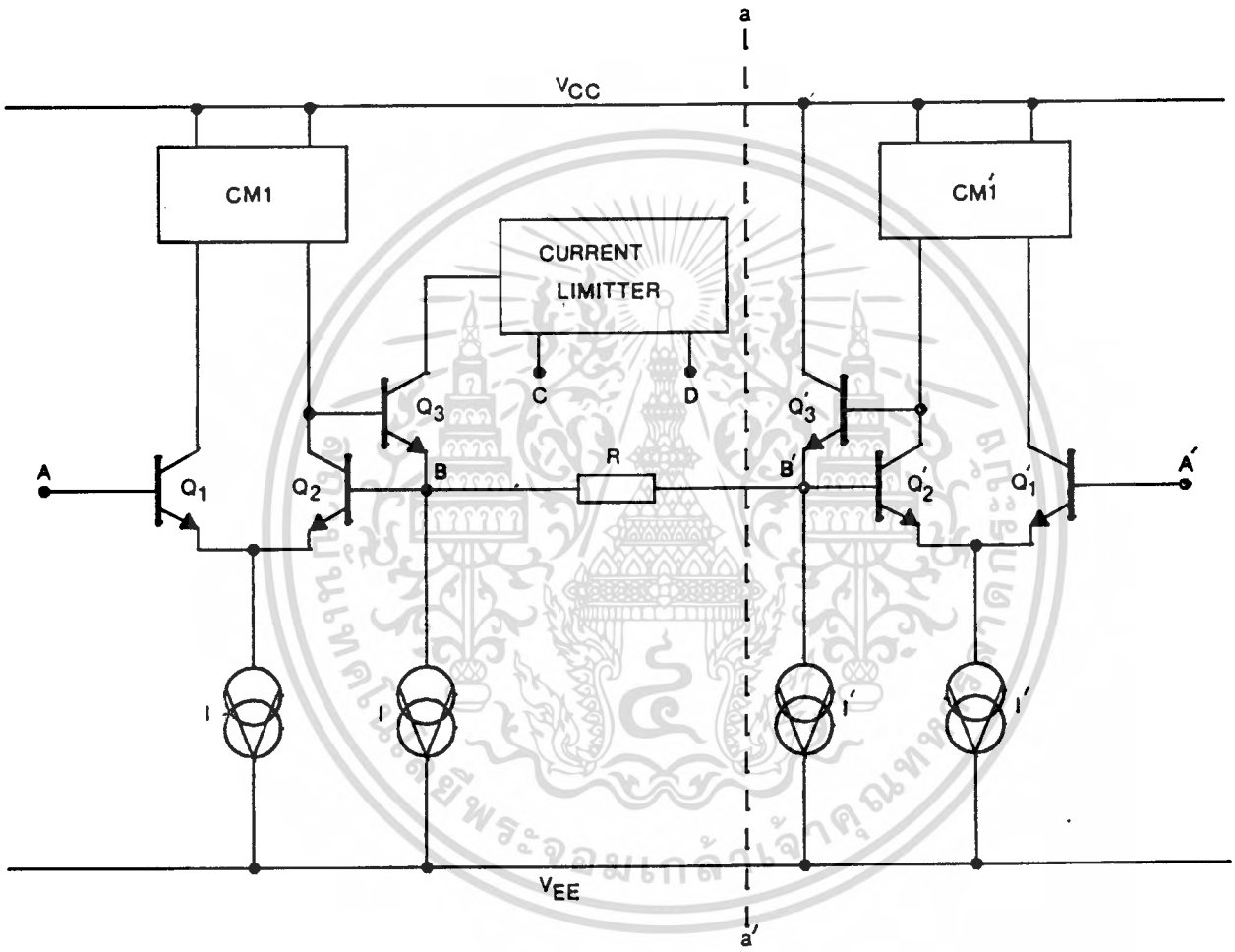
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4.1 วงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิดศักดาควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากศักดาและกระแสจะมีทิศทางเดียวกัน ในทางกลับกันถ้าจุด A ต่อกับจุด D และให้จุด C ลงกราวด์ก็จะได้ที่ระหว่างจุด A และกราวด์จะเป็นความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นแบบลบชนิดศักดาควบคุม



รูปที่ 5.4.2 ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิดศักดาควบคุมแบบลอยตัว

เนื่องจากความต้านทานชนิดที่มีปลายข้างหนึ่งต่อลงกราวด์จะทำให้การประยุกต์ใช้งานถูกจำกัดอยู่มาก ดังนั้นจากวงจรในรูปที่ 5.4.1 จึงได้พัฒนาขึ้นเป็นรูปที่ 5.4.2 ซึ่งจะเป็นความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิดลอยตัว จะเห็นได้ว่ามีการเพิ่มวงจรตามศักดาและวงจรตามกระแสขึ้น โดยที่ทรานซิสเตอร์ Q_1' , Q_2' , Q_3'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ วงจรสะท้อนกระแส CM1' จะทำหน้าที่เป็นวงจรตามศักดาและวงจรตามกระแส ส่วนวงจรที่อยู่ทางด้านซ้ายของเส้น a-a' จะเป็นวงจรที่แสดงในรูปที่ 5.4.1 สำหรับการทำงานของวงจรจะเหมือนกับวงจรในรูปที่ 5.4.1 เพียงแต่สัญญาณ V_{in} จะป้อนเข้าที่ขั้วระหว่างจุด A และ จุด A' ส่วนกระแส I_{in} จะไหลระหว่างจุด B และจุด B' แทน ดังนั้นความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นแบบบวกสามารถทำได้โดยการต่อจุด C เข้ากับจุด A และจุด D เข้ากับจุด A' ส่วนความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นแบบลบจะต่อจุด C เข้ากับจุด A' และจุด D เข้ากับจุด A

5.5 *บทสรุป*

การสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้หลักการของวงจรจำกัดกระแสที่ได้พัฒนาขึ้นนี้จะทำงานในรูปของกระแส เพื่อลดผลของความผิดเพี้ยนของศักดาที่เกิดจากรอยต่อ P-N ในไดโอดหรือทรานซิสเตอร์ซึ่งจะมีค่าไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อเทียบกับกระแสที่ไหลผ่านตัวมัน เป็นผลให้ความต้านทานไม่เป็นเชิงที่สังเคราะห์ขึ้นมีความแม่นยำสูงและสามารถใช้ได้กับสัญญาณอินพุทที่มีขนาดต่ำมากได้ โดยที่สัญญาณอินพุทจะอยู่ในรูปของกระแสและถ้าสัญญาณอินพุทอยู่ในรูปของศักดาก็จะต้องเปลี่ยนศักดาให้เป็นกระแสเสียก่อนโดยวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ผลการทดลองและตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน

6.1 บทนำ

เพื่อเป็นการยืนยันถึงหลักการที่ได้พัฒนาขึ้นในการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นจึงได้มีการต่อวงจรจริงขึ้นเพื่อทำการทดสอบการทำงาน โดยวงจรที่ใช้ในการทดสอบจะมีทั้งหมดสามวงจรคือ วงจรจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งเป็นวงจรหลักในการสังเคราะห์ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น และการประยุกต์ใช้งานของวงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นทั้งชนิดศักดาควบคุมและกระแสควบคุม

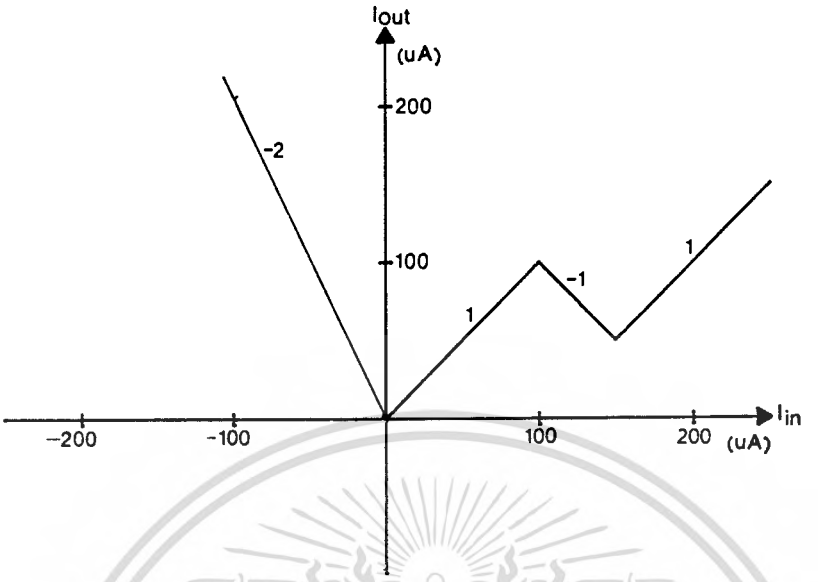
6.2 การทดสอบวงจรจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้น

ในรูปที่ 6.2.1 (ก) จะเป็นตัวอย่างของฟังก์ชั่นไม่เป็นเชิงเส้นที่จะนำเอาวงจรที่ได้พัฒนาขึ้นมาสร้างฟังก์ชั่นนี้ จากรูปจะเห็นได้ว่าต้องใช้วงจรจำกัดกระแส 3 ชนิดทั้งหมด 4 วงจร โดยชนิดแรกคือ CL1 ซึ่งจะใช้ 2 วงจรที่มีค่า A = 1 , I_B = 0 μA และ A = 2 , I_B = 150 μA ชนิดที่สองคือ CL2 ที่มีค่า A = 2 , I_B = 0 μA และชนิดที่สาม CL4 ที่มีค่า A = 2 , I_B = 100 μA ส่วนกระแสเอาท์พุท I_{out} จะมีค่าตามสมการที่ (5.2.8) ดังนี้

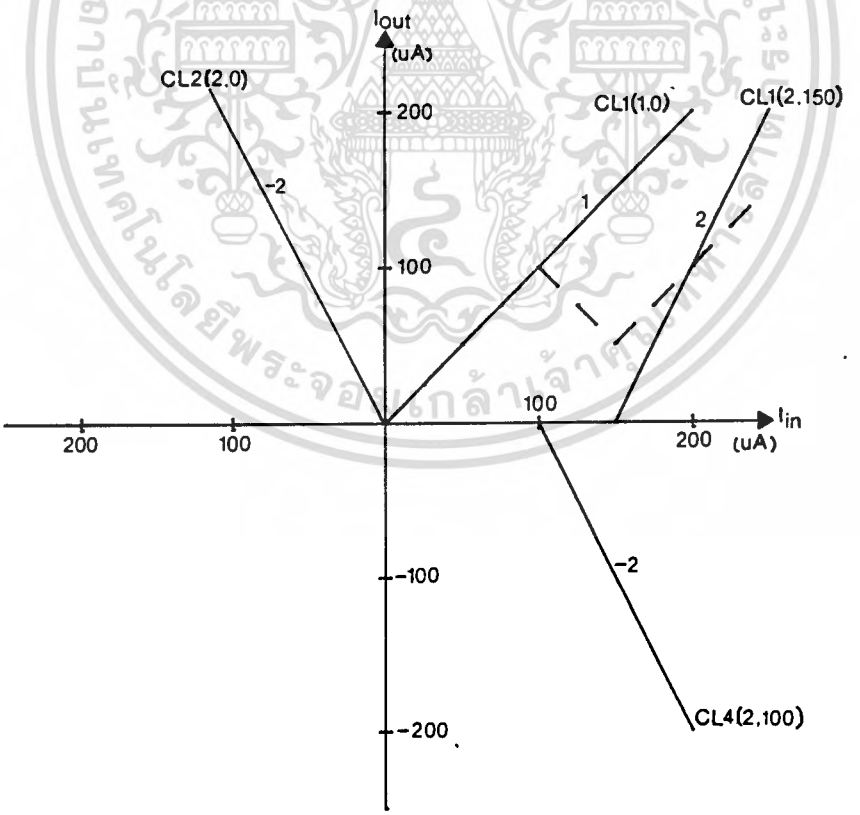
$$I_{out} = I_{o1}(1,0) + I_{o1}(2,150) + I_{o2}(2,0) + I_{o4}(2,100) \qquad (6.2.1)$$

เนื่องจากวงจรจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้นต้องการสัญญาณอินพุทเป็นกระแส แต่แหล่งจ่ายสัญญาณที่มีอยู่จะให้สัญญาณในรูปของศักดา จึงได้เพิ่มวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสเข้ามาในส่วนอินพุทของวงจรจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 6.2.2 โดยที่ออปแอมป์ A1 และทรานซิสเตอร์ Q_1 ต่อร่วมกับความต้านทาน R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.2.1 ตัวอย่างการออกแบบวงจรจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแส โดยที่กระแสอินพุท I_{in} จะมีค่าเท่ากับ V_{in}/R

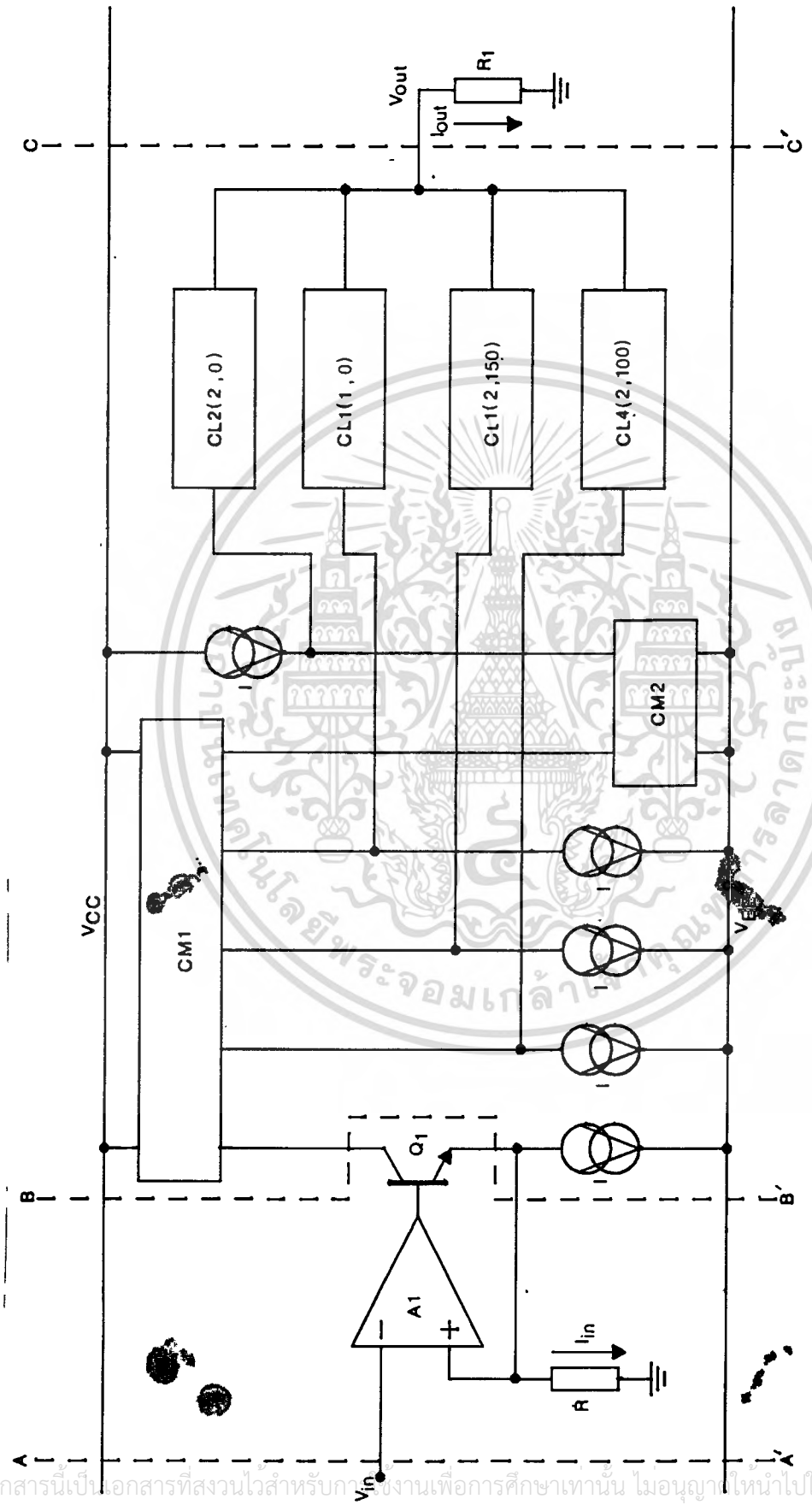
จากรูปที่ 6.2.2 วงจรจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้นจะอยู่ระหว่างเส้น BB' และเส้น CC' ความต้านทาน R_1 จะทำหน้าที่เปลี่ยนกระแส I_{out} ให้เป็นศักดา V_{out} ในการทดลองใช้ความต้านทาน R และ R_1 มีค่าเท่ากับ 10 kΩ เมื่อป้อนศักดา V_{in} ให้เป็นรูปสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีค่าขนาดเท่ากับ 5 V_{p-p} และวัดศักดา V_{out} ที่ตกคร่อม R_1 จะได้ผลแสดงในรูปที่ 6.2.3 ซึ่งมีรูปที่เป็นไปตามที่ได้กำหนดเอาไว้ ผลการทดลองจะอยู่ในรูปของศักดาซึ่งสามารถที่จะพิจารณาในรูปของกระแสได้โดยการหารค่า V_{in} และ V_{out} ด้วย R และ R_1 ตามลำดับ ดังนั้นในรูปที่ 6.2.3 สเกลในแนวตั้งจะเท่ากับ 50 μA/div และสเกลในแนวนอนก็จะเท่ากับ 50 μA/div เช่นกัน

6.3 *การประยุกต์ใช้งานของวงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น*

ในการประยุกต์ใช้งานในที่นี้จะมีสองตัวอย่าง โดยทั้งสองตัวอย่างจะนำมาประยุกต์ใช้ในวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น ในตัวอย่างแรกจะเป็นการประยุกต์ใช้งานของวงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิดศักดาควบคุมแบบลอยตัวดังแสดงในรูปที่ 6.3.1 (ก) และในรูปที่ 6.3.1(ข) จะเป็นเส้นคุณลักษณะจำเพาะของความต้านทาน จากรูปที่ 6.3.1 (ข) จะเห็นได้ว่าต้องใช้วงจรจำกัดกระแสสองวงจรคือ CL1(1,0) และ CL2(1,0) และค่าความต้านทาน R ที่ใช้จะมีค่าเท่ากับ 10 kΩ เมื่อป้อนสัญญาณอินพุท V_{in} เป็นรูปซายน์และรูปสามเหลี่ยมที่มีความถี่ 1 kHz และมีขนาด 100 mV_{p-p} ซึ่งจะได้เอาท์พุท V_{out} ดังแสดงในรูปที่ 6.3.1 (ค) และ (ง) เมื่อสัญญาณเส้นบนจะเป็นสัญญาณอินพุทและสัญญาณเส้นล่างจะเป็นสัญญาณเอาท์พุท

ตัวอย่างที่สองจะเป็นการประยุกต์ใช้งานของความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นชนิดกระแสควบคุมแบบลอยตัวดังแสดงในรูปที่ 6.3.2 (ก) และในรูปที่ 6.3.2 (ข)

เอกสารนี้ถูกจัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

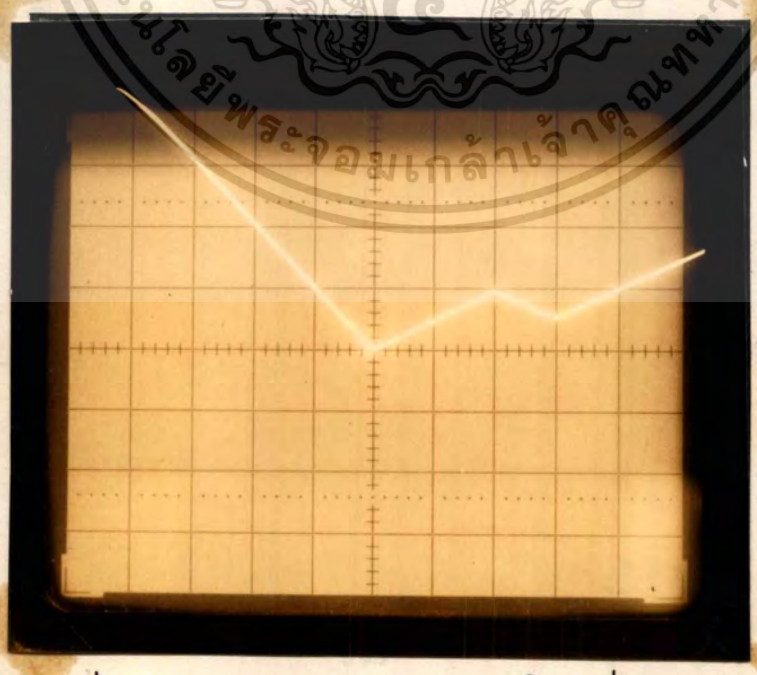


รูปที่ 6.2.2 การทดลองวงจรจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

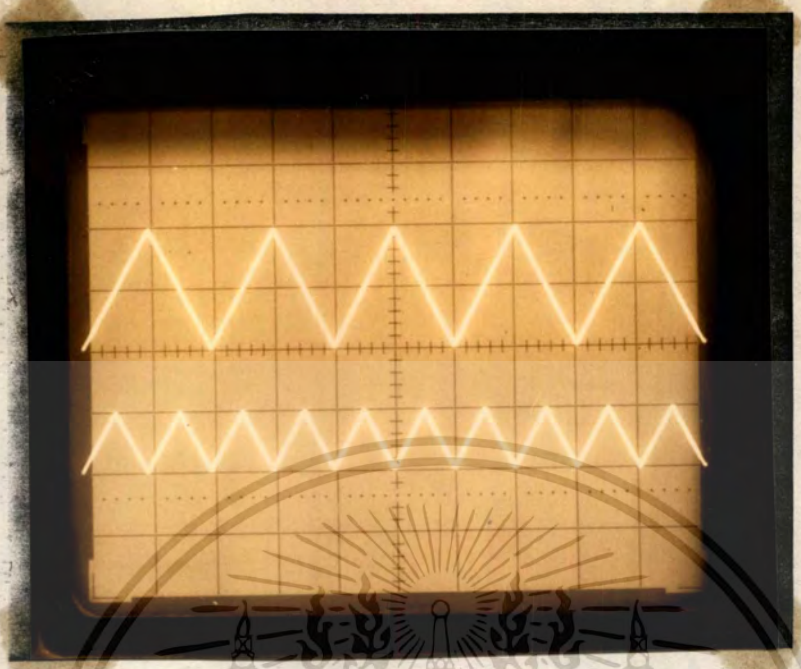
จะเป็นเส้นคุณลักษณะจำเพาะของความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจะต้องใช้วงจรจำกัดกระแสทั้งหมดสามวงจรคือ CL1(1,0μA) , CL1(1,200μA) และ CL4 (2,100μA) ในรูปที่ 6.3.2 (ก) ความต้านทาน R_1 และศักดาอ้างอิง V_{ref} จะเป็นตัวไบอัส (bias) ให้วงจรทำงานอยู่ที่จุดกึ่งกลางของรูปสามเหลี่ยมในรูปที่ 6.3.2 (ข) เมื่อป้อนสัญญาณอินพุทเป็นรูปซายน์และรูปสามเหลี่ยมที่มีความถี่เท่ากับ 1 kHz และมีขนาดของสัญญาณเท่ากับ 100 mV_{P-P} ซึ่งจะได้สัญญาณ V_{out} ในเส้นล่างที่แสดงในรูปที่ 6.3.2 (ค) และ (ง)

จากผลการทดลองที่ผ่านมาเป็นการให้สัญญาณอินพุทที่มีขนาดสูง สำหรับในกรณีที่สัญญาณอินพุทมีขนาดต่ำสัญญาณเอาท์พุทที่ได้จากวงจรทดลอง (ซึ่งในที่นี้ใช้วงจรในรูปที่ 6.3.1 (ก) เป็นหลัก) จะมีความผิดเพี้ยนที่ยอดของสัญญาณที่สามารถสังเกตุเห็นได้ดังแสดงในรูปที่ 6.3.3 ซึ่งเป็นการป้อนสัญญาณอินพุทในเส้นบนเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีขนาด 10 mV_{P-P} และในเส้นล่างจะเป็นสัญญาณเอาท์พุท จะสังเกตุได้ว่าในส่วนยอดของสัญญาณเอาท์พุทจะมีลักษณะที่ไม่เป็นยอดแหลมเหมือนกับด้านล่าง เพื่อให้

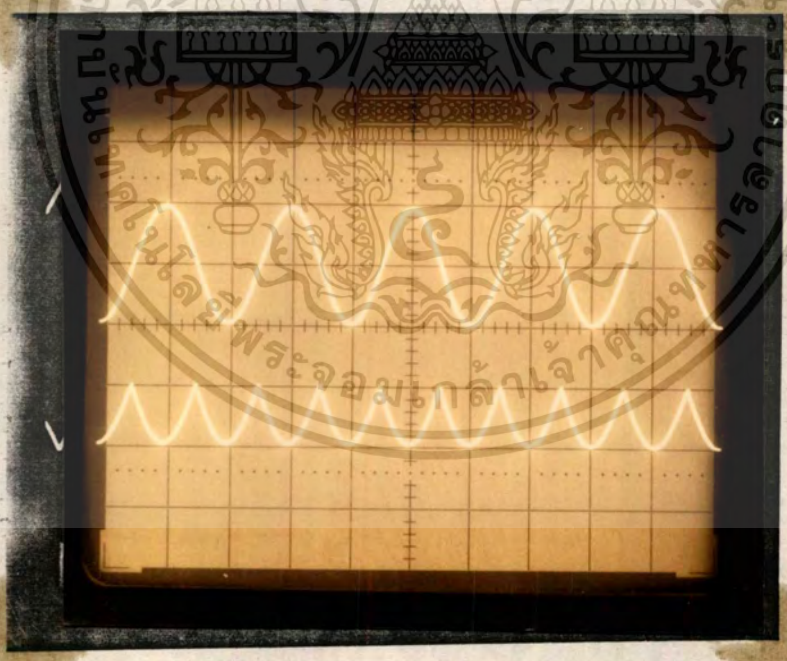


รูปที่ 6.2.3 ผลการทดสอบวงจรในรูปที่ 6.2.2
สเกลทางแนวตั้งและแนวนอน 0.5 V/div (50 μA/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)

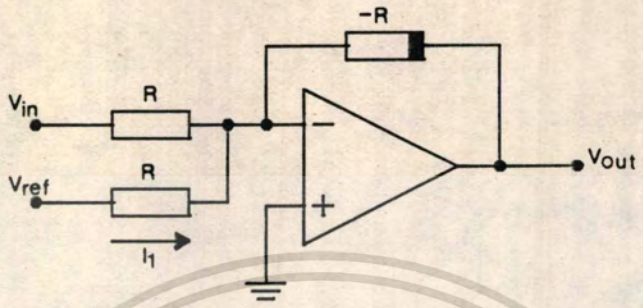
รูปที่ 6.3.1 (ก) วงจรที่ใช้ในการทดลอง

(ข) เส้นคุณลักษณะจำเพาะของความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น

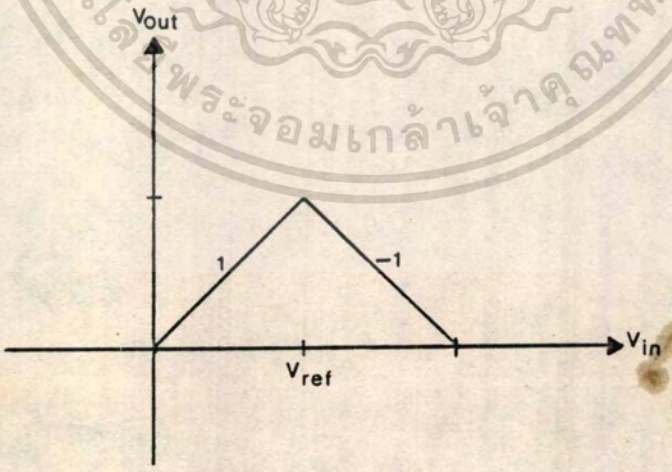
(ค) และ (ง) ผลที่ได้จากการวัด

สเกลในแนวตั้ง 50 mV/div และสเกลในแนวนอน 0.5mS/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

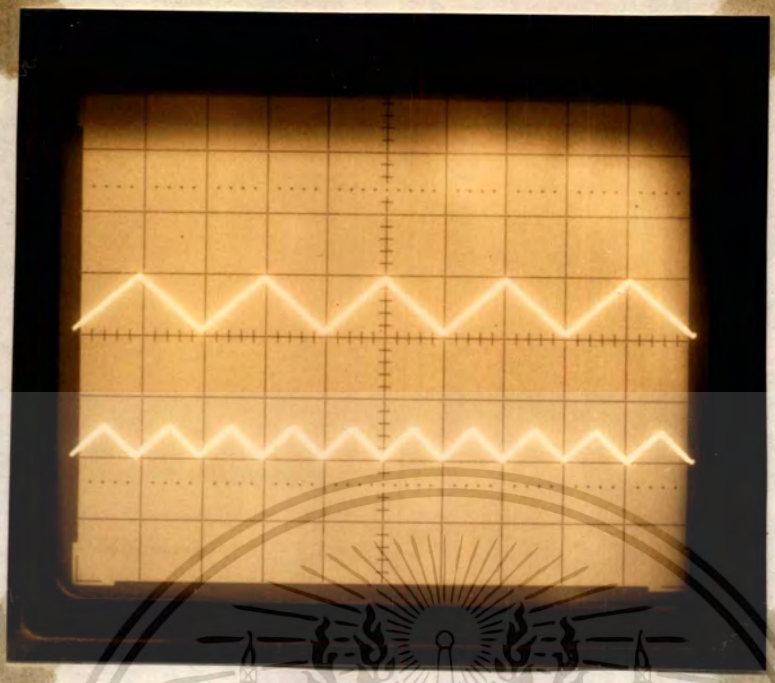
รูปที่ 6.3.2 (ก) วงจรที่ใช้ในการทดลอง

(ข) เส้นคุณลักษณะจำเพาะของความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น

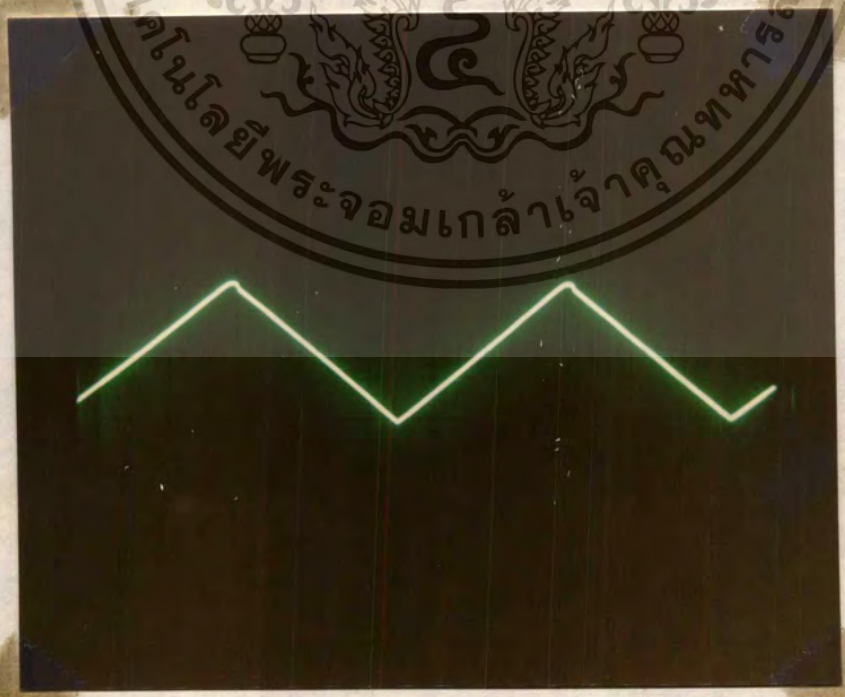
(ค) และ (ง) ผลที่ได้จากการวัด

สเกลในแนวตั้ง 50 mV/div และสเกลในแนวนอน 0.5 mS/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3.3 ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเอาท์พุท
(สัญญาณอินพุทเส้นบนและสัญญาณเอาท์พุทเส้นล่าง)
สเกลในแนวตั้ง 10 mV/div และสเกลในแนวนอน 0.5 mS/div



รูปที่ 6.3.4 ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเอาท์พุท
ที่เกิดจากผลของไดโอดในวงจรจำกัดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นจึงได้ทำการขยายสัญญาณเอาท์พุทโดยใช้วงจรขยายที่มีอัตราการขยายเท่ากับ 20 เท่าและสัญญาณที่วัดได้ดังแสดงในรูปที่ 6.3.4 ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเอาท์พุทนี้จะเกิดจากการไม่หยุดนำกระแสอย่างทันทีทันใดของไดโอดในวงจรจำกัดกระแส เนื่องจากในช่วงที่ไดโอดนำกระแสจะมีประจุค่าหนึ่งสะสมอยู่ที่รอยต่อของสาร P-N ดังนั้นในขณะที่ไดโอดถูกไบอัสกลับประจุนี้ก็จะถูกคายออกมาทำให้ไดโอดไม่หยุดนำกระแสทันที ซึ่งเป็นผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณดังกล่าวขึ้น

6.4 *บทสรุป*

เนื่องจากวงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่ได้พัฒนาขึ้นนี้จะทำงานในรูปของกระแสเป็นหลัก และจากการทดลองต่อวงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นจะเกิดค่าออฟเซท (offset) ของกระแสขึ้นเล็กน้อย สาเหตุก็เนื่องมาจากความผิดพลาดในการปรับค่ากระแสของตัวจ่ายกระแสคงที่และวงจรสะท้อนกระแสในช่วงที่ทำการต่อวงจร ซึ่งจากการทดลองในบทนี้ค่าออฟเซทของกระแสจะมีค่าประมาณ 5 μA และได้ทำการลดค่าออฟเซทของกระแสนี้โดยการปรับค่ากระแสของตัวจ่ายกระแสคงที่ AI ในวงจรจำกัดกระแสชนิดสองเอาท์พุทที่นำมาใช้งาน (ในบทนี้ใช้วงจรในรูปที่ 5.2.6 (ก) และรูปที่ 5.2.7 (ก)) หรือปรับค่ากระแสของตัวจ่ายกระแสคงที่ I_T ของวงจรในรูปที่ 5.3.1 สำหรับในการทดลองนี้ในขั้นแรกได้ปรับที่ตัวจ่ายกระแสคงที่ I_T ก่อนเมื่อไม่สามารถที่จะลดค่าออฟเซทของกระแสต่อไปอีกได้จึงทำการปรับตัวจ่ายกระแสคงที่ AI ของวงจรจำกัดกระแส อย่างไรก็ตามถ้าค่ากระแสของวงจรจ่ายกระแสคงที่และวงจรสะท้อนกระแสได้มีการปรับมาอย่างละเอียดแล้ว เมื่อนำมาต่อเป็นวงจรความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นค่าออฟเซทของกระแสก็จะมีค่าน้อยมากซึ่งสามารถที่จะนำความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นนี้ไปใช้งานได้เลย

สำหรับผลการทดลองความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่ได้สังเคราะห์ขึ้นนี้สามารถที่จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และความแม่นยำของเส้นคุณลักษณะจำเพาะที่กำหนดขึ้นจะมีความเที่ยงตรงสูงซึ่งเป็นไปตามหลักการที่ได้เสนอขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ดีด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์และบุคคลหลายท่าน จึงขอนำมากล่าวถึงในที่นี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ผศ. ดร. วัลลภ สุระกำพลธร ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและแก้ไขปัญหาต่างๆ ทั้งทางด้านทฤษฎีและปฏิบัติตลอดเวลาในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ผศ. ดร. จเร สุรวัฒน์ปัญญา และอาจารย์ ผศ. ดร. พัลลภ เหล่าเจริญ ที่ได้ให้คำชี้แนะในการทำวิทยานิพนธ์

นอกจากนี้ขอขอบคุณ คุณประสิทธ์ จุลเสรีวงศ์ คุณศุภกิจ จูตะวิริยะ คุณธนานันต์ อาปะจินดา คุณสุธรรม ธีระวัฒนชัย คุณปัญญา ฐิติมัชฌิมา ที่มีส่วนช่วยในการทำวิทยานิพนธ์นี้ และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมที่ให้ใช้สถานที่ตลอดจนเครื่องมือต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] L. O. Chua, " Synthesis of New Nonlinear Network Elements," Proc. IEEE, vol.56, NO.8, pp.1325-1340, 1968.

[2] วัลลภ สุรชกำพลธร, " ทฤษฎีและการใช้งานของความต้านทานแบบศักดาเปลี่ยนค่า," วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2520

[3] L. O. Chua, and S. Wong, " Synthesis of Piecewise Linear Networks," IEEE trans., Circuit & Syst., vol.2, NO.4, pp.102-108, 1978.

[4] S. Ashok, " An Accurate Voltage-Controlled Negative Resistance Circuit," IEEE J. Solid-State Circuits, pp.311-313, 1977.

[5] S. Pookaiyaudom, and C. Surawatpanya, " Integrable Circuit Principle for Synthesizing Voltage-Controlled Nonlinear Impedances," Proc. IEEE, vol.66, NO.10, pp.1280-1281, 1978.

[6] S. Pookaiyaudom, K. Dejhan, and C. Watanachaiprateep, " Synthesis of Current-Controlled Nonlinear Impedances," Proc. IEEE, vol.67, NO.11, pp.1569-1572, 1979.

[7] S. Pookaiyaudom, and W. Surakampantorn, " An Integrable Precision Current-Controlled Negative Impedance Converter," Proc. IEEE, vol.66, NO.6, pp.706-708, 1978.

[8] S. Pookaiyaudom, and C. Surwatpanya, " Accurate Syntheses of Non-linear Resistance," INT. J. Electron.,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

vol.46, NO.2, pp.151-156, 1979.

[9] J. L. Huertas, J. I. Acha, and A. Gago, " Design of General Voltage- or Current-Controlled Resistance Elements and Their Applications to The Synthesis of Nonlinear Networks," IEEE Trans., Circuits & Syst., vol.CAS-27, NO.2, pp.92-101, 1980.

[10] L. O. Chua, C. A. Desoer, and E. S. Kuh, " Linear and Nonlinear Circuits," McGraw-Hill Book Company, 1987.

[11] P. R. Gray, and R. G. Meyer," Analysis and Design of Analog Integrated Circuits," Jone Wiley & Sons, Inc., New York, 1984.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การหาค่าความต้านทานแบบลอยตัวชนิดแปรผันตรงกับศักดาควบคุม

จากรูปที่ ก1 เมื่อป้อนศักดา V_1 เข้าที่จุด A และ B เป็นผลให้ศักดาเอาท์พุท V_4 มีค่าดังนี้

$$V_4 = V_r - V_{r'} = i_1 r - i_1' r' \qquad (1ก)$$

โดยที่ V_r และ $V_{r'}$ เป็นศักดาที่ตกคร่อมความต้านทาน r และ r' สำหรับกระแส i_1 และ i_1' เป็นกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน r และ r' และกำหนดให้ผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน R_1 และ R_2 มีค่าน้อยกว่ากระแส i_1 และ i_1' มากๆ ดังนั้นจึงสามารถที่จะพิจารณาให้กระแส i_1 และ i_1' เป็นกระแสอินพุทของวงจรในรูปที่ ก1 และศักดา V_4 จะถูกป้อนให้กับตัวคูณแบบอนาลอกทำให้ศักดาเอาท์พุท V_1 มีค่าดังนี้

$$V_1 = kV_c V_4 = kV_c(V_r - V_{r'}) \qquad (2ก)$$

เมื่อ k เป็นค่าอัตราขยายของตัวคูณและถ้าให้ความต้านทาน r = r' จะได้ว่า

$$V_1 = kV_c r(i_1 - i_1') \qquad (3ก)$$

เมื่อพิจารณาจากอินพุทที่จุด A สามารถที่จะหาศักดาที่ตกคร่อม r ได้ดังนี้

$$V_r = ri_1 = V_{i1} - V_{i2} \qquad (4ก)$$

เนื่องจากออปแอมป์ OA2 ต่อเป็นวงจรรวมศักดาและขยายความแตกต่างของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักดาที่จุด B , V_1 และ V_4 ทำให้สามารถหาค่าศักดา V_2 ได้ดังนี้

$$V_2 = V_{12} + kV_c r(i_1-i_1')/2 - r(i_1-i_1')/2 \qquad (5ก)$$

แทนค่าสมการที่ (5ก) ลงในสมการที่ (4ก) จะได้ว่า

$$ri_1 = V_{11} - V_{12} - kV_c r(i_1-i_1')/2 + r(i_1-i_1')/2 \qquad (6ก)$$

เนื่องจาก $V_1 = V_{11} - V_{12}$ ดังนั้นสมการที่ (6ก) จึงเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$ri = V_1 - krV_c(i_1-i_1')/2 + r(i_1-i_1')/2 \qquad (7ก)$$

หรือ

$$r(i_1+i_1')/2 = V_1 - krV_c(i_1-i_1')/2 \qquad (8ก)$$

และในกรณีที่พิจารณาจากอินพุทที่จุด B สามารถที่จะหาศักดาที่ตกคร่อม r' ได้ในทำนองเดียวกับการหาศักดาที่ตกคร่อม r โดยที่ออปแอมป์ OA3 ต่อเป็นวงจรรวมศักดาและขยายความแตกต่างของศักดา V_{11} , V_1 และ V_4 ซึ่งจะได้ค่าศักดาเอาท์พุท V_3 ดังนี้

$$V_3 = r(i_1-i_1')/2 + V_{11} - kV_c r(i_1-i_1') \qquad (9ก)$$

และศักดาที่ตกคร่อม r' จะหาได้จาก

$$Vr' = ri_1' = V_{12} - V_3 \qquad (10ก)$$

หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Vr' = ri_1' = V_{12} - V_{11} + kV_c r(i_1-i_1')/2 - r(i_1-i_1')/2 \qquad (11ก)$$

เนื่องจากศักดา $V_1 = V_{11} - V_{12}$ ดังนั้น

$$ri_1' = - V_1 + kV_c r(i_1-i_1')/2 - r(i_1-i_1')/2 \qquad (12ก)$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$r(i_1+i_1')/2 = - V_1 + krV_c(i_1-i_1')/2 \qquad (13ก)$$

จากสมการที่ (8ก) และ (13ก) สามารถที่จะหาความสัมพันธ์ของกระแส i_1 และ i_1' ได้ดังนี้

$$i_1 = i_1' \qquad (14ก)$$

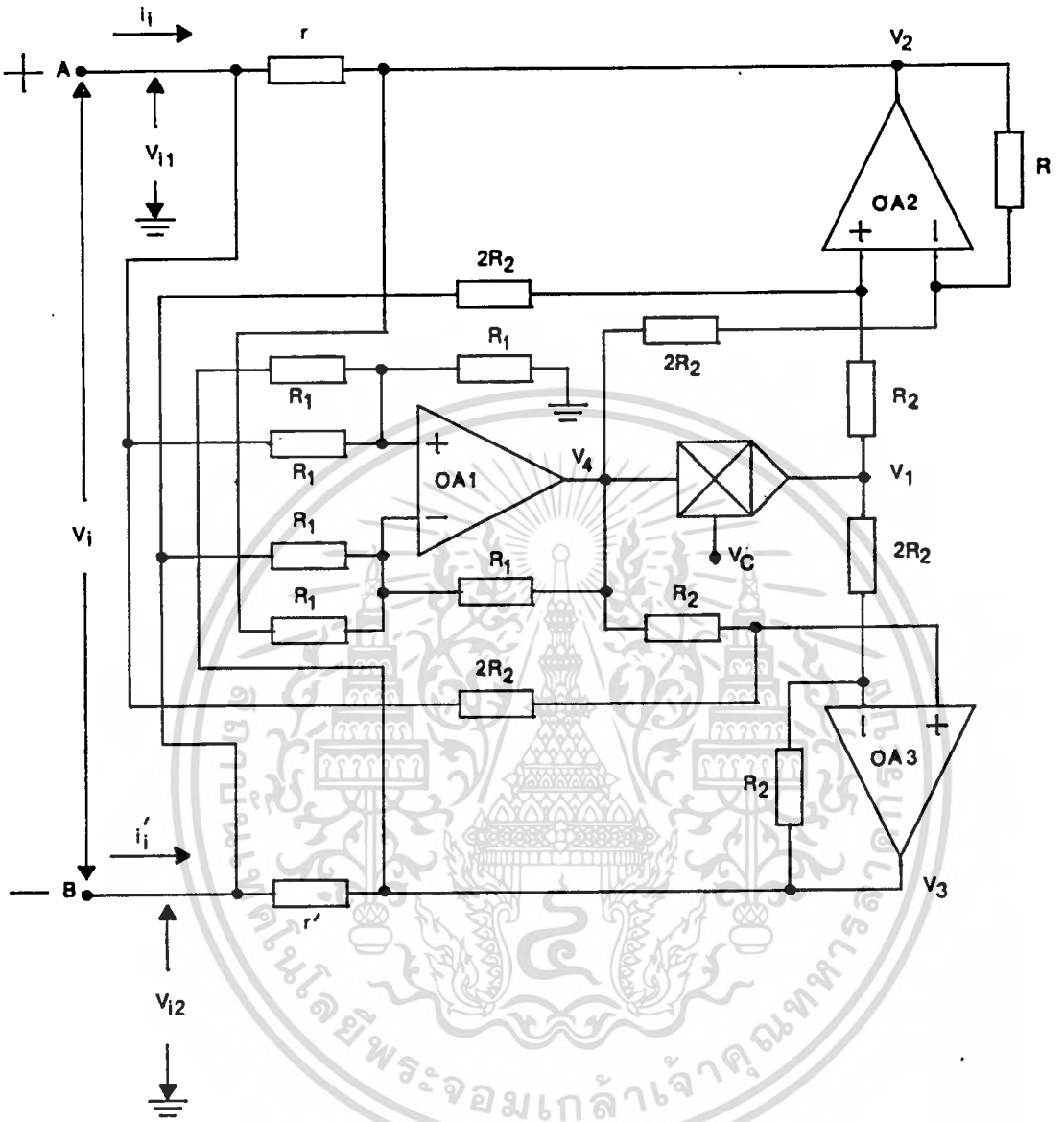
เมื่อแทนค่าสมการที่ (14ก) ลงในสมการที่ (8ก) จะได้ว่า

$$V_1 = krV_c(2i_1)/2 \qquad (15ก)$$

ซึ่งสามารถที่จะหาค่าความต้านทานทางด้านอินพุทของวงจรได้ดังนี้

$$R_1 = V_1/i_1 = krV_c \qquad (16ก)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1๓ วงจรศักดาแปรค่าความต้านทานชนิดแปรผันตรงกับศักดา V_c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การหาความสัมพันธ์ของกระแสอินพุทและเอาท์พุทในวงจรสะท้อนกระแสแบบลบ

จากรูปที่ ข1 กำหนดให้ทรานซิสเตอร์ทุกตัวในวงจรมีความสมพงษ์กันทุกประการนั่นคือ $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta$ และกระแส I_{B1} และ I_{B2} สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$I_{C1} + I_{B1} = I_{C2} + I_{B2} \qquad (1ข)$$

และกระแส I_{C2} จะหาได้จาก

$$I_{C2} = I_{E3} - I_{B1} - I_{B2} \qquad (2ข)$$

$$I_{C2} = I_{E3} - I_{C1}/\beta - I_{C2}/\beta \qquad (3ข)$$

$$I_{C2}(1+1/\beta) = I_{E3} - I_{C1}/\beta \qquad (4ข)$$

$$I_{C2} = (I_{E3} - I_{C1}/\beta)/(1+1/\beta) \qquad (5ข)$$

แทนค่าสมการที่ 5ข ลงในสมการที่ 1ข จะได้ว่า

$$I_{C1}(1+1/\beta) = (I_{E3} - I_{C1}/\beta)/(1+1/\beta) + (I_{E3} - I_{C1}/\beta)/(1+1/\beta)/\beta \qquad (6ข)$$

$$I_{C1} = (I_{E3} - I_{C1}/\beta)/(1+1/\beta) \qquad (7ข)$$

$$I_{C1} = I_{E3}/(1+2/\beta) \qquad (8ข)$$

และจากรูปที่ ข1 สามารถหาค่ากระแส I_{C1} และ I_{E3} ได้ดังนี้

$$I_{C1} = I_1 - I_{B3} = I_1 - I_2/\beta \qquad (9ข)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$I_{E3} = I_2 + I_{B3} = I_2(1+1/\beta) \qquad (10ข)$$

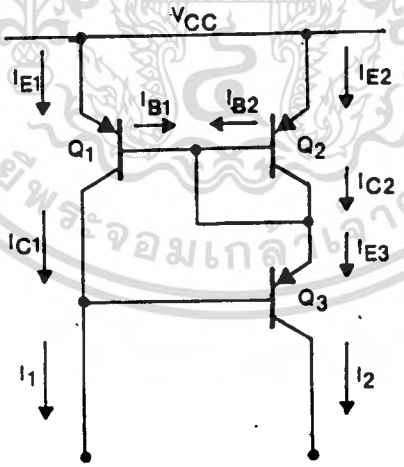
แทนค่าสมการที่ 9ข และ 10ข ลงในสมการที่ 8ข จะได้

$$I_1 - I_2/\beta = I_2(1+1/\beta)/(1+2/\beta) \qquad (11ข)$$

$$I_1 + 2I_1/\beta = I_2 + 2I_2/\beta + 2I_2/\beta^2 \qquad (12ข)$$

ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของกระแส I_1 และ I_2 ดังนี้

$$I_2/I_1 = \beta(\beta+2)/(\beta^2+2\beta+2) \qquad (13ข)$$



รูปที่ ข1 วงจรสะท้อนกระแสแบบลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การหาความสัมพันธ์ของศักดาอินพุทและศักดาเอาท์พุทของวงจรตามศักดา

จากรูปที่ 1ค สามารถหาความสัมพันธ์ของศักดา V_1 และ V_2 ได้ดังนี้

$$V_1 = I_{B1}R_{B1} + V_{BE1} - V_{BE2} - I_{B2}R_{B2} + iR \qquad (1ค)$$

เมื่อ R_B เป็นความต้านทานของขาเบสของทรานซิสเตอร์และศักดา V_2 มีค่าเท่ากับผลคูณของกระแส i และความต้านทาน R ดังนั้นสามารถที่จะเขียนสมการที่ 1ค ได้ใหม่ดังนี้

$$V_1 - V_2 = I_{B1}R_{B1} + V_{BE1} - V_{BE2} - I_{B2}R_{B2} \qquad (2ค)$$

และเนื่องจากวงจรในรูปที่ ค1 เป็นวงจรรวมดังนั้นทรานซิสเตอร์ทุกตัวในวงจรจึงมีความสมพงษ์กันทุกประการและจากความสัมพันธ์ของกระแสเบสและกระแสอีมิเตอร์คือ $I_B = I_E/(\beta+1)$ และศักดา V_{BE} ระหว่างขาเบสและขาอีมิเตอร์สามารถหาได้จาก $V_{BE} = V_T \ln(I_E/I_S)$ เมื่อ I_E เป็นกระแสที่ขาอีมิเตอร์ I_S เป็นกระแสรั่วไหลของทรานซิสเตอร์ดังนั้นจากสมการที่ 2ค จะได้ว่า

$$V_1 - V_2 = R_B(I_{E1}-I_{E2})/(\beta+1) + V_T \ln(I_{E1}/I_{E2}) \qquad (3ค)$$

ส่วนกระแส I_{E1} และ I_{E2} สามารถหาได้จาก

$$I_{E1} = I - I_{E2} \qquad (4ค)$$

$$I_{E2} = I_2 - I_{B2} + I_{B2} \qquad (5ค)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกระแส I_{B3} สามารถหาได้ดังนี้

$$I_{E3} = I + I_{B2} + i \qquad (6ค)$$

ดังนั้น

$$I_{B3} = I_{E3}/(\beta+1) = (I+i+I_{B2})/(\beta+1) \qquad (7ค)$$

แทนค่าสมการที่ 7ค ลงในสมการที่ 5ค จะได้ว่า

$$I_{E2} = (I_2-I_{B3})(\beta+1)/\beta \qquad (8ค)$$

หรือ

$$I_{E2} = [I_2-(I+i)/(\beta+1)-I_{E2}/(\beta+1)(\beta+1)](\beta+1)/\beta \qquad (9ค)$$

เมื่อ $\beta >> 1$ ดังนั้นจากสมการที่ 9ค ในเทอมของ $(\beta+1)/\beta$ สามารถประมาณให้มีค่าเท่ากับหนึ่ง และในเทอมของ $I_{E2}/(\beta+1)(\beta+1)$ จะมีค่าน้อยมากจึงสามารถประมาณค่าเป็นศูนย์ สมการที่ 9ค จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$I_{E2} = I_2 - (I+i)/(\beta+1) \qquad (10ค)$$

เนื่องจากทรานซิสเตอร์ Q_4 , Q_5 และ Q_6 ต่อเป็นวงจรสะท้อนกระแสซึ่งความสัมพันธ์ของกระแส I_1 และ I_2 มีค่าดังนี้

$$I_2 = I_1\beta(\beta+2)/(\beta^2+2\beta+2) \qquad (11ค)$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_1 = I_{E1}\beta/(\beta+1) \qquad (12ค)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$I_2 = I_{E1}\beta^2(\beta+2)/(\beta+1)(\beta^2+2\beta+2) \qquad (13ค)$$

ให้ $K=\beta^2(\beta+2)/(\beta+1)(\beta^2+2\beta+2)$ สมการที่ 13ค สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$I_2 = KI_{E1} = K(I-I_{E2}) \qquad (14ค)$$

ให้ $a=(1+K)$ และจากสมการที่ 5ค และ 10ค จะได้ว่า

$$I_{E1} = I - I_{E2} = I - K(I-I_{E2}) - (I+i)/(\beta+1) \qquad (15ค)$$

$$I_{E1} = (1+K)I - (1+K)I_{E2} = I - (I+i)/(\beta+1) \qquad (16ค)$$

$$I_{E1} = I - I_{E2} = I/a - (I+i)/a(\beta+1) \qquad (17ค)$$

และจาก

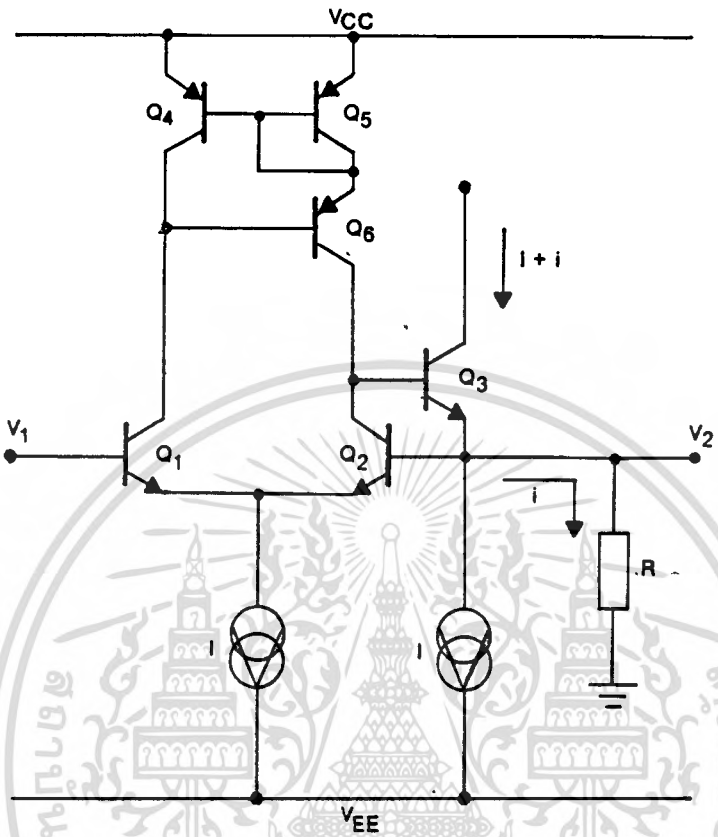
$$I_{E2} = I - I_{E1} \qquad (18ค)$$

แทนค่าสมการที่ 17ค และ 18ค ลงในสมการที่ 4ค จะได้ว่า

$$V_1 - V_2 = R_m[[I-(I+i)/(\beta+1)](2/a)-I]/(\beta+1) + V_T\ln[(I-(I+i)/(\beta+1)]/[aI-I+(I+i)/(\beta+1)] \qquad (19ค)$$

ในกรณีที่ $\beta >> 1$ เทอมทางด้านขวามือของสมการที่ 19ค จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นจึงสามารถที่จะกล่าวได้ว่าศักดา V_1 มีค่าเท่ากับศักดา V_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค1 วงจรตามศักดา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้