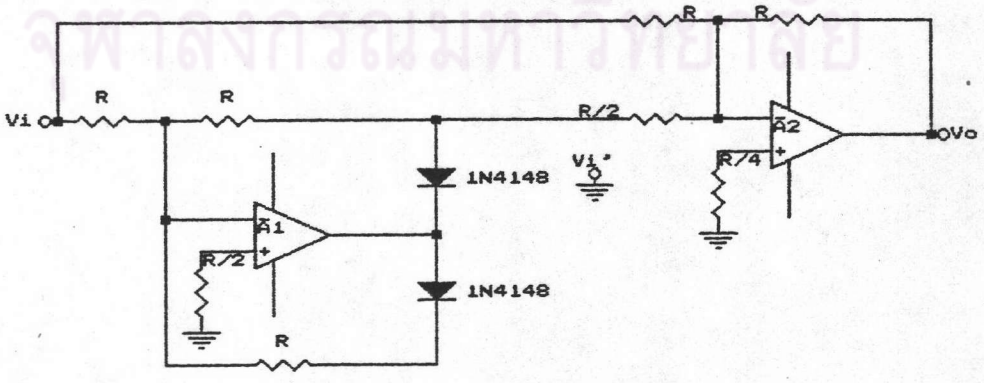
บทที่ 5
วงจรคุมค่าและวงจรที่ใช้ช่วยในการคุมค่า

5.1 คำนำ

ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงมักจะมีการควบคุมค่าความเร็วรอบเสมอ การคุมค่าจึงต้องอาศัยวงจรคุมค่า (regulator) ซึ่งทำหน้าที่เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดกับค่าที่ต้องการจะให้เป็นโดยการตั้งค่า วงจรคุมค่าจะควบคุมการทำงานของวงจรขับนำอีกทีหนึ่ง จะเห็นได้ว่าวงจรคุมค่าเป็นส่วนหนึ่งของวงรอบการป้อนกลับ ซึ่งตามหลักการของการควบคุมป้อนกลับแล้ว วงรอบนี้จะควบคุมให้ค่าที่วัดเท่ากับค่าที่ตั้งไว้ วงจรคุมค่ามีผลต่ออัตราขยายวงรอบเปิด ดังนั้น การออกแบบวงจรคุมค่าเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพและผลตอบสนองที่ดีเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ เน้นหนักในการทำเป็นชุดทดลองในห้องปฏิบัติการ การออกแบบจึงคำนึงถึงความปลอดภัยของระบบและความสะดวกในการใช้เป็นหลัก ดังนั้น ผลตอบสนองของวงจรจึงไม่ดีเท่าที่ควร ในที่นี้ จะกล่าวถึงการออกแบบวงจรคุมค่าและวงจรประกอบอื่น ๆ ที่นำมาใช้ในการคุมค่า



รูปที่ 5.1 วงจรที่ให้ค่าสัมบูรณ์

5.2 <u>วงจรที่ให้ค่าสัมบูรณ์</u> (โคทม อารียา,2531)

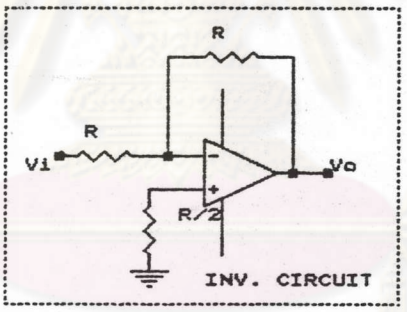
วงจรที่ให้ค่าสัมบูรณ์ ให้แรงดันด้านออกเท่ากับค่าสัมบูรณ์ของแรงดันด้านเข้า วงจรนี้แสดงด้วยรูปที่ 5.1 จากวงจรจะได้ความสัมพันธ์

$$v_o = \left|-v_i\right| \qquad (5.1)$$

เหตุที่เลือกใช้วงจรนี้เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ออกแบบเป็นชุดทดลองในการทดลองวงจรคุมค่า หากมีการต่ออุปกรณ์วัดผิดขั้วทางไฟฟ้า วงจรคุมค่าจะทำงานผิดพลาดทันที ซึ่งเป็นอันตรายต่อระบบอย่างมาก ประกอบกับการปรับแต่งวงจรคุมค่าระหว่างวงจรคุมค่าธรรมดากับวงจรคุมค่าปรับตัวเองมีความต้องการขั้วทางไฟฟ้าที่ต่างกัน การใช้วงจรนี้ช่วยทำให้ความยุ่งยากในการออกแบบลดลง

5.3 <u>วงจรขยายกลับเฟส</u> (โคทม อารียา,2526)

วงจรขยายกลับเฟสให้แรงดันด้านออก มีเฟสตรงข้ามกับที่เข้ามา



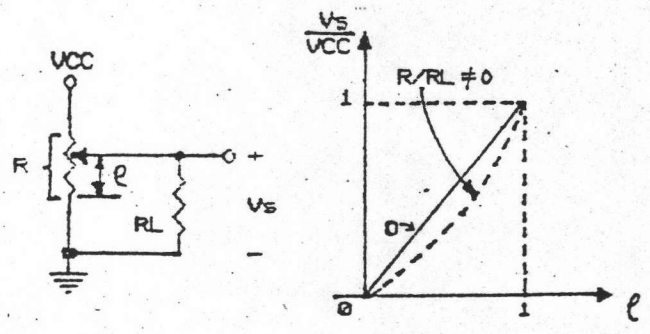
รูปที่ 5.2 วงจรขยายกลับเฟส

จากวงจรจะได้ความสัมพันธ์ $v_o = -v_i$ (5.2)

เหตุที่เลือกใช้วงจรนี้เพราะต้องใช้ประกอบกับวงจรที่ให้ค่าสัมบูรณ์ ผลจากการใช้วงจรทั้งสองนี้จะทำให้สามารถบังคับสัญญาณที่เข้าวงจรคุมค่าให้ถูกต้องตรงตามที่ต้องการได้

5.4 <u>วงจรตั้งค่าสำหรับการควบคุมแบบวงจรเปิด</u> (โคทม อารียา,2531)

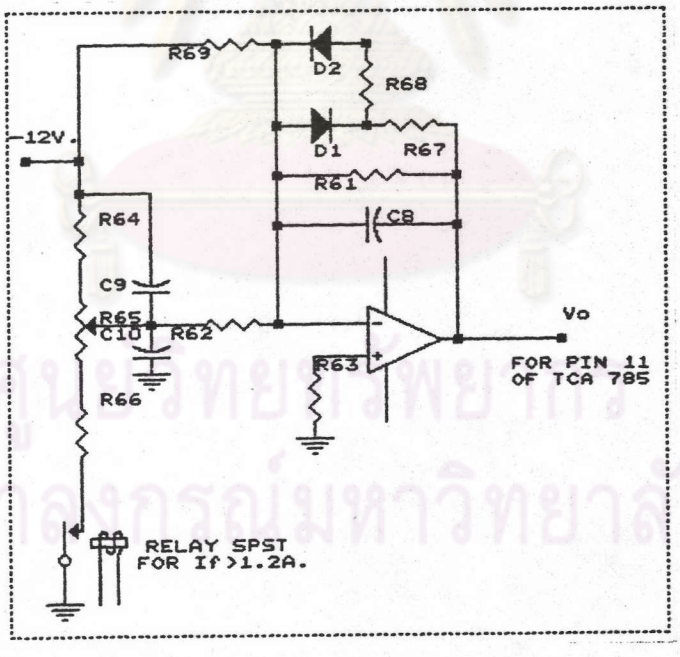
ในการควบคุมแบบวงรอบเปิด การใช้วงจรตั้งค่ามีหน้าที่กำเนิดสัญญาณตั้งค่าซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นแรงดันไฟตรงที่ปรับค่าได้ วิธีง่ายที่สุดคือ การใช้โพเทนชิโอมิเตอร์ (แสดงด้วยรูปที่ 5.3)



รูปที่ 5.3

ผลของการต่อโหลด R_L เข้ากับวงจรตั้งค่าที่ใช้โพเทนชิโอมิเตอร์

หากมีการต่อวงจรนี้ตรงเข้ากับวงจร TCA 785 ควรมีตัวเก็บประจุต่อเข้ามาเพื่อลดสัญญาณที่อาจมารบกวน วงจรนี้อาจยังไม่เหมาะกับการใช้งาน เพราะหากมีการตั้งค่าไว้ก่อนในระยะเริ่มหมุนมอเตอร์ กระแสเข้ามอเตอร์จะกระชากและให้ผลตอบสนองที่เร็วซึ่งอาจเกิดความเสียหายกับเอสซีอาร์ได้ แต่วงจรตั้งค่านี้ยังคงใช้อยู่ทั่วไป



รูปที่ 5.4 วงจรตั้งค่าสำหรับการควบคุมแบบวงรอบเปิด

ในกรณีของการควบคุมแบบวงรอบเปิด เราต้องการให้แรงดันตั้งค่าที่ขา 11 ของ TCA 785 (V_o) ลดลงด้วยความลาดชัน (slope) ที่กำหนด จนแปรมาถึงขนาดของค่าที่ตั้งไว้ (V_{set}) ซึ่งได้ปรับแต่งไว้จากเทนชิโอมิเตอร์ ในกรณีเช่นนี้

เราอาจใช้วงจรจำกัดค่า (limiter) กับวงจรอินทิเกรเตอร์ ต่อกันเป็นวงรอบดังแสดงด้วยรูปที่ 5.4

เหตุที่เลือกใช้วงจรนี้ เพราะในการทำงานแบบวงรอบเปิด หาก V_c มีการเปลี่ยนแปลงทันทีที่ค่อนข้างมากกว่าที่ควรจะเป็น กระแสในอาร์เมเจอร์จะมีการกระชาก ซึ่งอาจจะนำความเสียหายมาสู่เอสซีอาร์ได้ วิธีนี้จึงมักใช้ในกรณีของการควบคุมแบบวงรอบเปิด ในการออกแบบไม่ควรให้ค่าคงที่เวลาของวงจรมีค่ามากเกินไป เพราะจะทำให้ยากต่อการตั้งค่าให้มอเตอร์หมุนในความเร็วที่ต้องการ

นอกจากนี้ที่ขาเข้าของออปแอมป์จะมี ริ้ด คอยเช็คกระแสที่ไหลผ่านขดลวดสนาม หากมีค่าต่ำกว่าที่กำหนดวงจรจะเปิด ซึ่งจะส่งผลให้ไม่มีกระแสไหลในวงจรอาร์เมเจอร์ในที่สุด เป็นการป้องกันกระแสที่ผ่านขดลวดสนามไม่ให้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น แต่การใช้ ริ้ด ก็มีข้อจำกัดอยู่บ้าง คืออายุการใช้งานต่ำและความเชื่อถือได้มีน้อย

การตั้งค่าสำหรับการควบคุมแบบวงรอบเปิดนี้ หากใช้เพียงวงจรตั้งค่านี้จะให้มุมจุดชนวนเอสซีอาร์คงค่าตามที่ตั้งไว้เท่านั้น ไม่มีผลต่อการคุมค่าความเร็วของมอเตอร์ กล่าวคือเมื่อโหลดแปรผัน ความเร็วมอเตอร์ก็จะเปลี่ยนแปลงด้วย ดังนั้น ในงานที่ต้องการคุมค่าความเร็วจึงไม่นิยมใช้การคุมค่าแบบวงรอบเปิด แต่ในที่นี้ต้องการทำความเข้าใจเกี่ยวกับการควบคุมแบบวงรอบเปิด โดยสามารถเริ่มเดินเครื่องอย่างนุ่มนวล (soft start) ได้ (Valts,1980)อีกทั้งจะได้เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบวงรอบปิดต่อไป

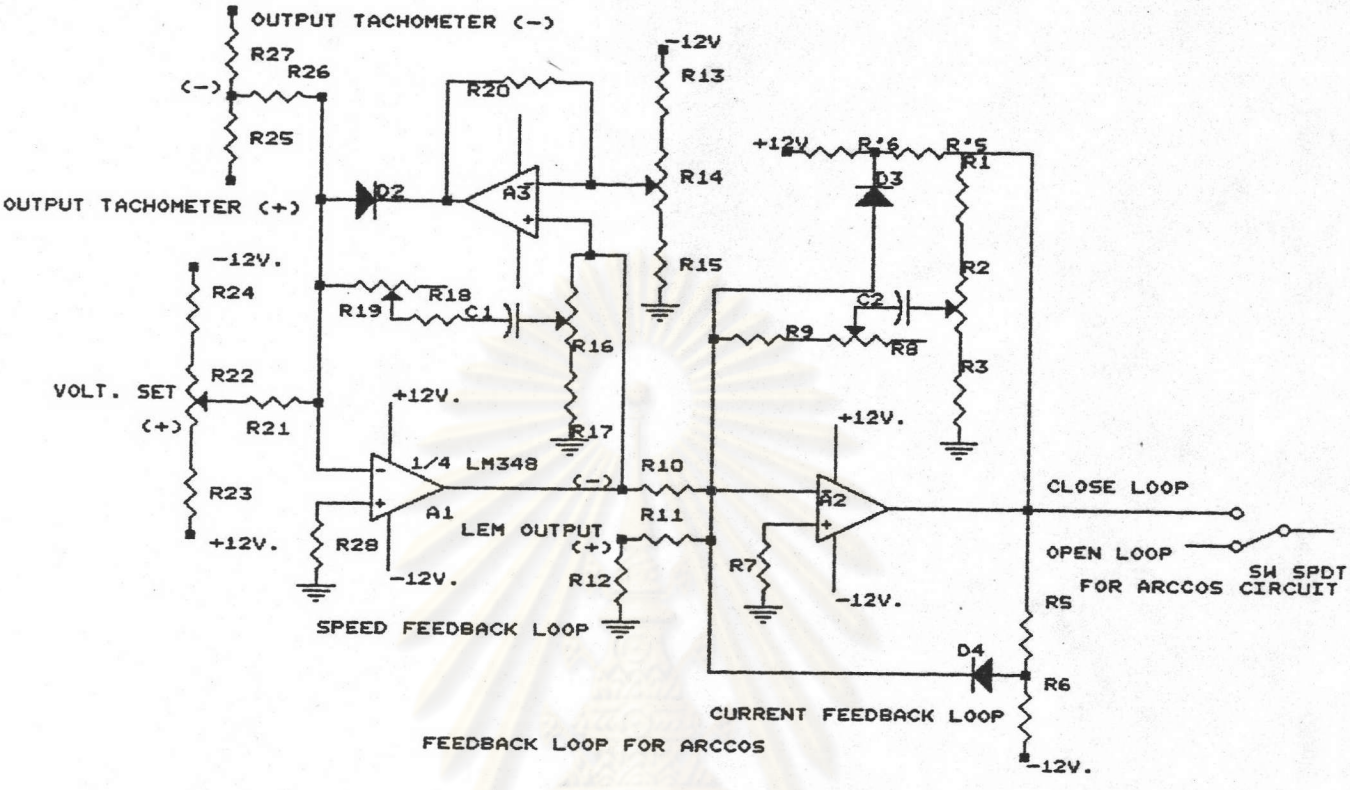
5.5 วงจรคุมค่าธรรมดาสำหรับการควบคุมแบบวงรอบปิด

(โคทม อารียา,2531; นนทวัฒน์ จุลเดช,2528; Buhler,1979; Rajashekara,1988; Sen,1981;)

วงจรคุมค่าธรรมดาในที่นี้หมายถึง วงจรที่ไม่สามารถปรับอัตราขยายหรือค่าคงที่เวลาได้ด้วยสัญญาณไฟฟ้า การควบคุมแบบวงรอบปิดเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการควบคุมความเร็วมอเตอร์ วงจรคุมค่าที่ใช้แสดงด้วยรูปที่ 5.5

วงจรคุมค่าที่ใช้นี้ เป็นการคุมค่าที่มีวงรอบเล็กและวงรอบใหญ่ต่อกันแบบทอดเนื่อง (cascade) โดยวงรอบเล็กใช้สำหรับคุมค่ากระแสในอาร์เมเจอร์ และในวงรอบใหญ่สำหรับคุมค่าความเร็วรอบ ก่อนอื่นขออธิบายวงจรคุมค่าโดยใช้

โพเทนชิโอมิเตอร์ในการปรับค่าคงตัวเวลา



รูปที่ 5.5

วงจรคุมค่าธรรมดาสำหรับการควบคุมแบบวงรอบปิด

กำหนดให้

V_s เป็นแรงดันที่ได้มาจากการตั้งค่า

V_{sn} เป็นแรงดันที่ใช้อ้างอิงกับ V_s

V_m เป็นแรงดันที่ใช้ในการวัด

V_{mn} เป็นแรงดันที่ใช้อ้างอิงกับ V_m

V_o เป็นแรงดันด้านออกของวงจรคุมค่า

V_{on} เป็นแรงดันที่ใช้อ้างอิงกับ V_o

$G_R(s)$ เป็นฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคุมค่า

ในการเลือกค่าอ้างอิงของวงจรคุมค่าเป็นไปตามสมการ

$$V_{sn}/R_s = V_{mn}/R_m \qquad (5.3)$$

ในการวิเคราะห์วงจรคุมค่าจะเป็นการสะดวก ถ้าเราใช้ปริมาณสัมพัทธ์ (relative) นั่นคือ ใช้ตัวแปรที่ไม่มีหน่วย ซึ่งได้จากการหารตัวแปรด้วยค่าอ้างอิง

ปริมาณสัมพัทธ์ที่ได้ดังนี้

ตัวแปรที่ตั้งค่า $x_s = V_s/V_{sn}$ (5.4)

ตัวแปรที่วัด $x_m = -V_m/V_{mn}$ (5.5)

ตัวแปรด้านออก $x_o = -V_o/V_{on}$ (5.6)

สังเกตสมการ (5.5) และ (5.6) เราเลือกค่าอ้างอิงสำหรับตัวแปรที่วัดกับตัวแปรด้านออกเป็นลบ นั่นคือ $-V_{mn}$ และ $-V_{on}$ ตามลำดับ การเลือกเช่นนี้เท่ากับเลือกว่าการเปรียบเทียบตัวแปรที่ตั้งค่ากับตัวแปรที่วัดนั้นเป็นการนำตัวแปรมาลบกันมิใช่มาบวกกัน และเป็นการเลือกที่จะไม่ใช้เครื่องหมายลบในสมการที่เป็นผลมาจากการกลับเฟสของออปแอมป์

วงจรในรูปที่ 5.6 แสดงการต่อโพเทนชิโอมิเตอร์เพื่อปรับค่าคงตัวเวลา T_n และ T_i ของวงจรคุมค่าแบบ PI เราคำนวณแอดมิตแทนซ์โอนย้ายของวงจรป้อนกลับได้ดังนี้

$$Y_f(s) = (I_f/V_o) = \rho/(R_1 + R_3 + 1/sC_1) \quad (5.7)$$

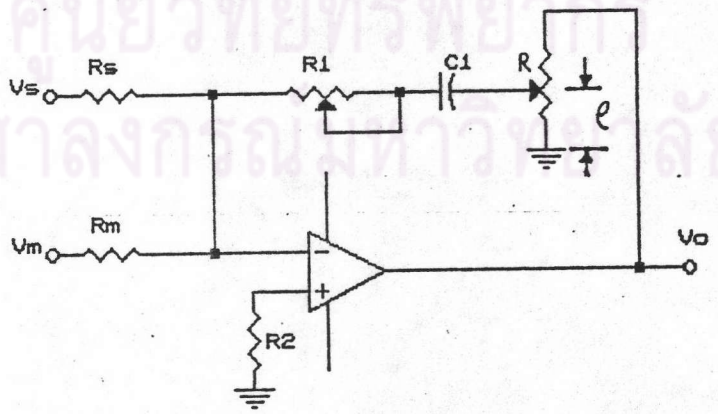
โดยที่ $Y_f(s)$ เป็นแอดมิตแทนซ์โอนย้ายของวงจรป้อนกลับ

ρ แสดงตำแหน่งสัมพัทธ์ของจุดกลางโพเทนชิโอมิเตอร์ $(0 < \rho < 1)$

และ R_3 คือความต้านทานที่มองเข้ามาทางจุดกลางของโพเทนชิโอมิเตอร์ เมื่อต่อขั้วออกของออปแอมป์ลงดิน

นั่นคือ $R_3 = 1/[(1/\rho R)+\{1/((1-\rho)\}R] = \rho(1-\rho)R$ (5.8)

โดยที่ R คือความต้านทานทั้งหมดของโพเทนชิโอมิเตอร์



รูปที่ 5.6

วงจรคุมค่าแบบ PI ที่ปรับค่าคงตัวเวลาได้ (โคทม อารียา, 2531)

เราสามารถเขียนสมการทั่วไปทางฟังก์ชันโอนย้ายได้ดังนี้

$$G_R(s) = [\{1+s(R_1+R_3)C_1\}/sR_sC_1](V_{sn}/V_{on}) \quad (5.9)$$

ดังนั้นค่าคงตัวเวลาเท่ากับ

$$T_1 = \rho R_sC_1(V_{on}/V_{sn}) = \rho R_mC_1(V_{on}/V_{mn}) \quad (5.10)$$

$$T_n = (R_1+R_3)C_1 \simeq R_1C_1 \quad (5.11)$$

ค่าคงตัวเวลา T_n ยังมีค่าโดยประมาณเท่าเดิมคือ R_1C_1 ทั้งนี้เพราะเรามักจะออกแบบให้ $R_1 >> R_3$

อนึ่ง ค่าสูงสุดของ R_3 เท่ากับ R/4 เมื่อ $\rho = 0.5$

จากรูปที่ 5.6 การปรับค่า ρ เป็นการปรับค่าคงตัวเวลาของการอินทิเกต $(1/sT_1)$ ส่วนการปรับค่า R_1 เป็นการปรับค่าคงตัวเวลาของการเป็นปฏิภาค (k ซึ่ง $k = T_n/T_1$)

โดยทั่วไปเราเลือกความต้านทาน R_2 ที่ต่อกับขั้วไม่กลับเฟส (ขั้ว+) ของออปแอมป์ให้เท่ากับ R_s ขนานกับ R_m ทั้งนี้เพื่อลดผลของกระแสด้านเข้าของออปแอมป์

จากรูป 5.5 เป็นการนำวงจรในรูป 5.6 มาต่อกันแบบทอดเนื่อง และมีการจำกัดค่าทางขาออกของวงจรทั้งสองเพื่อไม่ให้ต่ำหรือสูงเกินไป ซึ่งมีผลต่อการเริ่มเดินเครื่องอย่างนุ่มนวล (soft start) และเป็นการจำกัดกระแสด้วย

สำหรับวงจรคุมค่าแบบ PI เราอาจเขียนพจน์ของฟังก์ชันโอนย้าย $G_R(s)$ ในอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังนี้

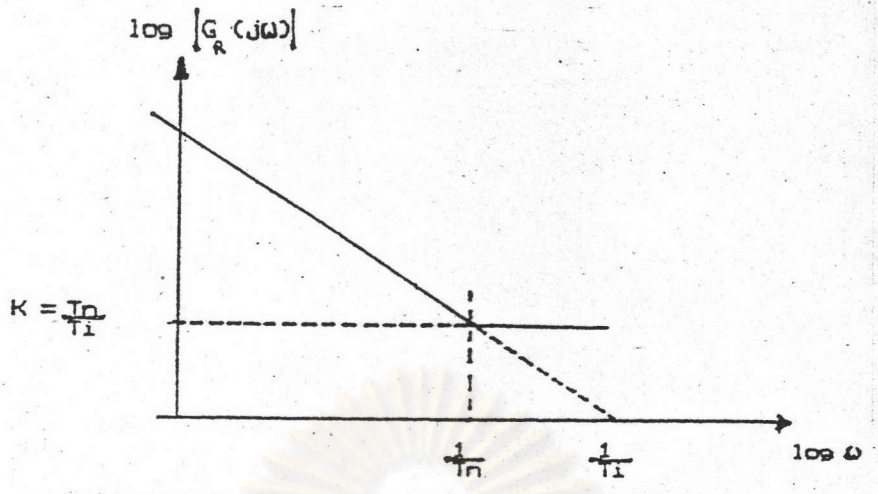
$$G_R(s) = 1/(sT_1)+k \quad (5.13)$$

โดยที่ $$k = T_n/T_1 = (R_1V_{sn}/R_sV_{on}) = (R_1V_{mn}/R_mV_{on}) \quad (5.14)$$

นั่นคือ $G_R(s)$ เป็นผลบวกของเทอม $1/(sT_1)$ ซึ่งอาจเรียกว่าองค์ประกอบของการอินทิเกต และเทอม k ซึ่งอาจเรียกว่าองค์ประกอบที่เป็นปฏิภาค

ค่าของ k นี้ ตรงกับค่าของอัตราขยายของวงจรคุมค่าแบบ P เราสามารถเขียนเส้นตรงที่ใกล้ผลตอบสนองเชิงความถี่ของฟังก์ชัน $G_R(s)$ ด้วยรูปที่ 5.7

เราเลือกตัวต้านทาน R_s และ R_m ระหว่าง 10 ถึง 100 kΩ ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ความต้านทานเหล่านี้เป็นโหลดต่อวงจรตั้งค่าและวงจรวัดมากเกินไป นอกจากนี้ความต้านทาน R_s และ R_m ต้องเป็นไปตามสมการ (5.13)



รูปที่ 5.7 ผลตอบเชิงความถี่ของวงจรคุมค่าแบบ PI

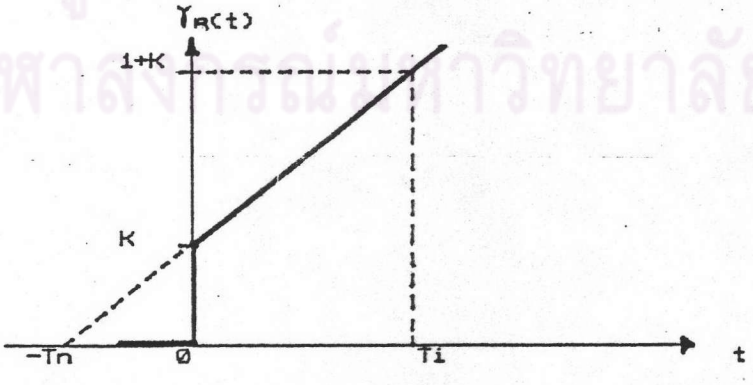
ความถี่หักมุมของผลตอบเชิงความถี่มีค่าเท่ากับ $1/T_n$ และองค์ประกอบของการอินทิเกตให้ผลตอบเชิงความถี่เป็นเส้นตรงที่มีความลาดชันเท่ากับ -1 (หรือ -20 dB/10 เท่า) โดยที่แนวของเส้นตรงนี้ตัดแกน logω ที่จุด $1/T_i$

ผลตอบต่อสัญญาณขั้น (step response) $\gamma_R(t)$ มีตัวแปลงของลาปลาซเท่ากับ

$$L[\gamma_R(t)] = (1/s)G_R(s) = 1/(s^2T_i)+k/s \qquad (5.14)$$

เมื่อแปลงสมการ (5.14) กลับมาในรูปของเวลาจะได้

$$\gamma_R(t) = t/T_i + k \qquad (5.15)$$



รูปที่ 5.8 ผลตอบต่อสัญญาณขั้นของวงจรคุมค่าแบบ PI

เราเขียนกราฟของ $r_R(t)$ ได้ด้วยรูปที่ 5.8 สังเกตได้ว่า องค์ประกอบของการอินทิเกตให้ผลตอบต่อสัญญาณขั้นเป็นเส้นตรงที่มีความลาดชัน $1/T_i$ ส่วนองค์ประกอบที่เป็นปฏิภาคให้ค่าเริ่มต้น (ที่t=Ø) เป็นสัญญาณขั้นที่มีแอมพลิจูด k ถ้าเราทำการทดสอบเพื่อบันทึกรูปคลื่นของผลตอบต่อสัญญาณขั้น เราก็สามารถอ่านค่าของ k และ T_i ตลอดจน $T_n = kT_i$ ได้จากรูปคลื่นดังกล่าว

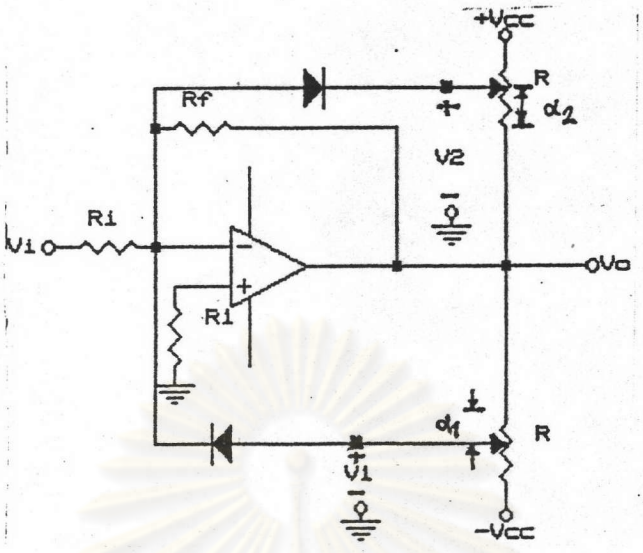
ในการออกแบบวงจรคุมค่าเราจะเลือกค่าคงตัวเวลา T_n และ T_i ของแต่ละวงจรเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพและมีการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

จากรูปที่ 5.5 แสดงวงจรคุมค่าที่ใช้ สังเกตได้ว่าจะมีวงจรจำกัดค่าร่วมอยู่ด้วย วงจรจำกัดค่าในส่วนของวงจรคุมค่าความเร็วรอบ จะใช้สำหรับจำกัดค่ากระแสอาร์เมเจอร์ไม่ให้ตั้งค่าสูงเกินไป (ในที่นี้อาจกำหนดไว้ที่ค่าพิกัดหรือประมาณ 120% ของค่าพิกัดในช่วงเวลาสั้น ๆ) และจำกัดการตั้งค่ากระแสอาร์เมเจอร์ไม่ให้ต่ำเกินไป (คือต่ำกว่า Ø เล็กน้อย) เพราะในขณะที่ความเร็วรอบของมอเตอร์มากกว่าค่าที่ตั้งไว้ ค่ากระแสอาร์เมเจอร์ที่ตั้งไว้เสมือนมีค่าเป็นลบจากค่าเดิม ซึ่งต้องการให้กระแสอาร์เมเจอร์ไหลกลับทิศ แต่เนื่องจากกระแสอาร์เมเจอร์ไหลกลับไม่ได้ ค่านี้จะมีขนาดเพิ่มขึ้นไปจนกว่าความเร็วรอบของมอเตอร์จะต่ำกว่าค่าที่ต้องการจึงเริ่มนำกระแสอาร์เมเจอร์อีก หากไม่มีการจำกัดค่า ในกรณีนี้จะมีการหน่วงเวลาที่ไม่จำเป็นเกิดขึ้นแล้วยังเป็นหนทางหนึ่งที่ทำให้เกิดการแกว่งของมอเตอร์อีกด้วย สำหรับวงรอบปิดของกระแสอาร์เมเจอร์ด้านขาออกอาจจะมีวงจรจำกัดค่าอีกเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เพราะไม่ให้แรงดันขา 11 ของ TCA 785 มีค่ามากเกินไป อันจะทำให้ต้องเสียเวลาดึงกลับลงมาและก็ไม่ให้ต่ำเกินไป เพราะจะทำให้แรงดันขาออกที่เข้ามอเตอร์จะมีค่าสูงเกินไปได้ จึงจำเป็นต้องมีการจำกัดค่าไว้

ในการจำกัดค่า เรานิยมต่อวงจรจำกัดค่าร่วมไปเป็นส่วนหนึ่งของวงจรคุมค่า ทั้งนี้เพื่อจำกัดพิกัดการแปรผันของแรงดันด้านออก เราสามารถใช้ไดโอดและโพเทนชิโอมิเตอร์ต่อร่วมกับออปแอมป์เป็นวงจรจำกัดค่า ดังแสดงในรูปที่ 5.9

เราสามารถอธิบายการทำงานของวงจรจำกัดค่าในรูปที่ 5.9 ได้ดังนี้ ตราบใดที่แรงดันของจุดกลางของโพเทนชิโอมิเตอร์ V_1 และ V_2 เป็นไปตามเงื่อนไข $V_1 < Ø$ และ $V_2 > Ø$ ไดโอด D_1 และ D_2 จะหยุดนำกระแส วงจรก็เป็นวงจรขยายกลับเฟสธรรมดาซึ่งให้แรงดันตามสมการต่อไปนี้

$$V_o = -(R_f/R_1)V_1 \qquad (5.16)$$



รูปที่ 5.9
วงจรออปแอมป์ที่ใช้ไดโอดในการจำกัดค่า

ถ้าไดโอดหยุดนำกระแสเราคำนวณแรงดัน V_1 และ V_2 ได้ดังนี้

$$V_1 = (1-\alpha_1)V_o - \alpha_1 V_{cc} \qquad (5.17)$$

$$V_2 = (1-\alpha_2)V_o + \alpha_2 V_{cc} \qquad (5.18)$$

โดยที่ α_1 และ α_2 แสดงตำแหน่งสัมพัทธ์ของจุดกลางของโพเทนชิโอมิเตอร์ (ดูรูปที่ 5.9)

สมมติว่า ไดโอด D_1 และ D_2 เป็นไดโอดอุดมคติ เงื่อนไขที่จะทำให้ไดโอดเริ่มนำกระแสพอดีก็คือ

สำหรับไดโอด D_1 : $V_1 = 0$ หรือจากสมการ (5.17)

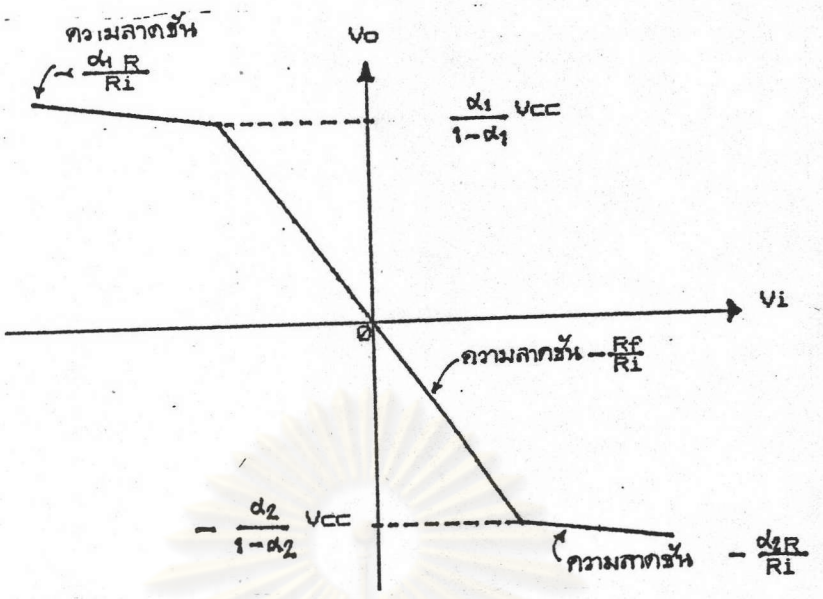
$$V_o = [\alpha_1/(1-\alpha_1)]V_{cc} \qquad (5.19)$$

สำหรับไดโอด D_2 : $V_2 = 0$ หรือจากสมการ (5.18)

$$V_o = -[\alpha_2/(1-\alpha_2)]V_{cc} \qquad (5.20)$$

เมื่อไดโอด D_1 นำกระแส ความต้านทานป้อนกลับจะเปลี่ยนมาเป็น $\alpha_1 R$ ขนานกับ R_f ถ้าเราออกแบบให้ $R << R_f$ ความต้านทานป้อนกลับจะเท่ากับ $\alpha_1 R$ โดยประมาณ ในสถานะนี้ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันออกจะเท่ากับ

$$\Delta V_o = -(\alpha_1 R/R_1)\Delta V_1 \qquad (5.21)$$



รูปที่ 5.10

ลักษณะของวงจรจำกัดค่าในรูปที่ 5.9

เมื่อพิจารณาสมการ (5.16) และ (5.21) จะเห็นว่า ความลาดชันของแรงดัน V_o ในย่านที่ไดโอด D_1 นำกระแสจะเล็กกว่าในย่านที่ไดโอดไม่นำกระแสมาก (เพราะว่า $\alpha_1 R << R_f$) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ในย่านที่ไดโอดนำกระแส V_o เปลี่ยนแปลงน้อยมาก และมีค่าเกือบคงที่ตามสมการ (5.19)

ในทำนองเดียวกัน ในย่านที่ไดโอด D_2 นำกระแส V_o เปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยมีความลาดชันเท่ากับ $-\alpha_2 R/R_1$

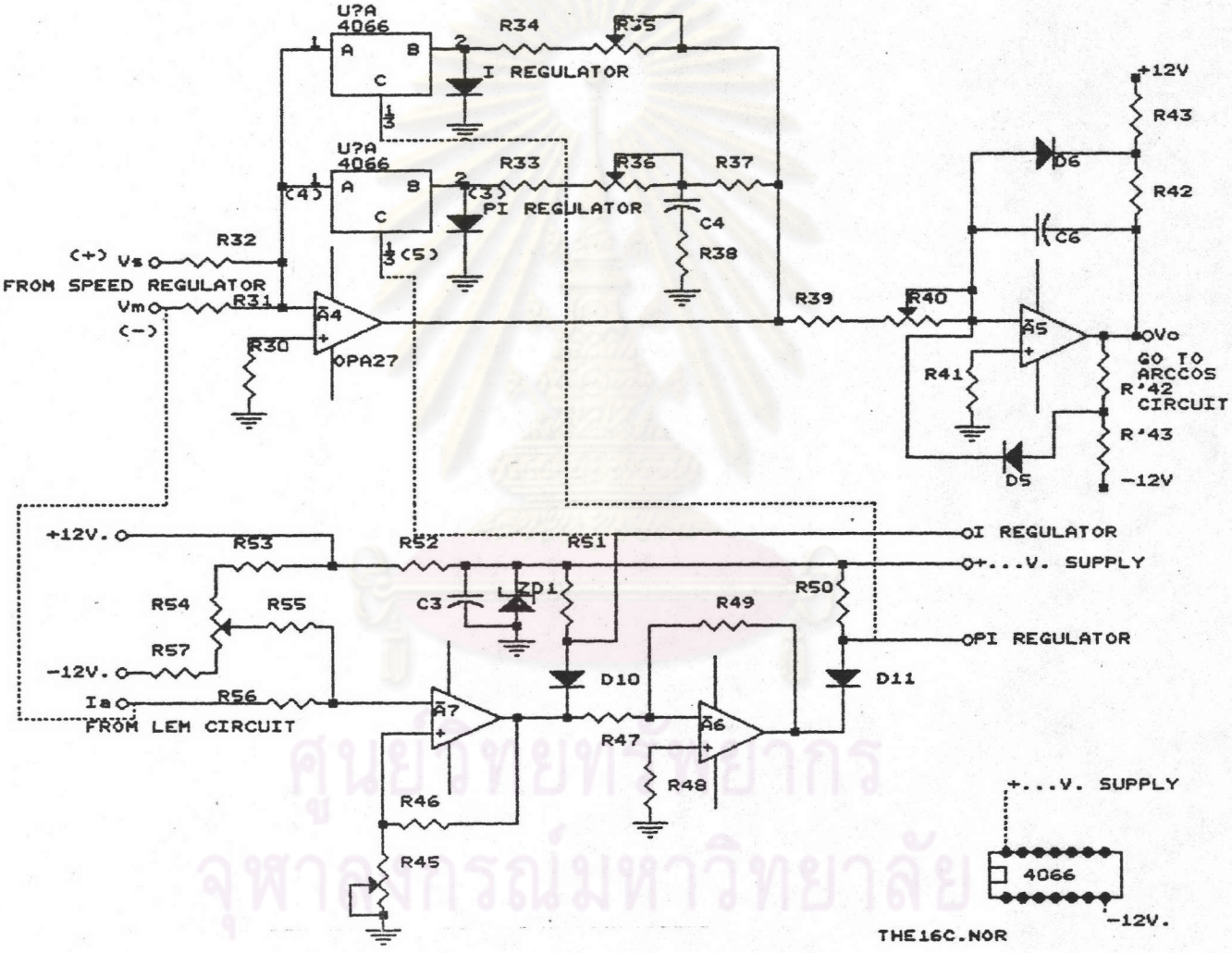
ด้วยวิธีเดียวกัน เราสามารถพิจารณาวงจรคุมค่าแบบ PI พร้อมวงจรจำกัดค่าในวงจรเดียวกันได้โดยไม่ต้องใช้วงจรคุมค่าแบบ PI ต่อทอดเนื่องกับวงจรจำกัดค่า

ในการออกแบบของเรา เราใช้วิธีนี้กับวงจรคุมค่ากระแสเพื่อจำกัดแรงดันที่เข้าขา 11 ของ TCA 785 แต่ไม่ใช้ในวงจรคุมค่าความเร็วรอบในการจำกัดกระแสอาร์เมเจอร์ เนื่องจากยังมีความลาดชันของแรงดัน V_o ในย่านที่ไดโอดนำกระแสอยู่ ทำให้การจำกัดค่าได้ไม่เที่ยงตรงนักนั่นเอง ทำให้เราต้องมีออปแอมป์อีกตัวมาช่วยด้วยนั่นเอง จากรูปที่ 5.5 ออปแอมป์ A_3 เป็นวงจรจำกัดค่าแบบหนึ่งซึ่งถ้าแรงดันที่ขาบวกมากกว่าที่ขาลบไดโอดจะนำกระแสทำให้แรงดันขาบวกตกลง เมื่อแรงดันขาบวกต่ำกว่าแรงดันขาลบไดโอดก็จะหยุดนำกระแส ดังนั้น วงจรนี้จึงจำกัดแรงดันขาออกได้แม่นยำกว่า

นั่นเอง แต่ใช้ออปแอมป์เพิ่มขึ้นอีก 1 ตัว

5.6 วงจรคุมค่าแบบปรับตัวเองได้ (adaptive regulator) สำหรับการควบคุมแบบวงรอบปิด

(โคทม อารียา,2531; นนทวัฒน์ จุลเดช,2528; Buhler, 1979; Dubby,1989; Leonhard,1985)



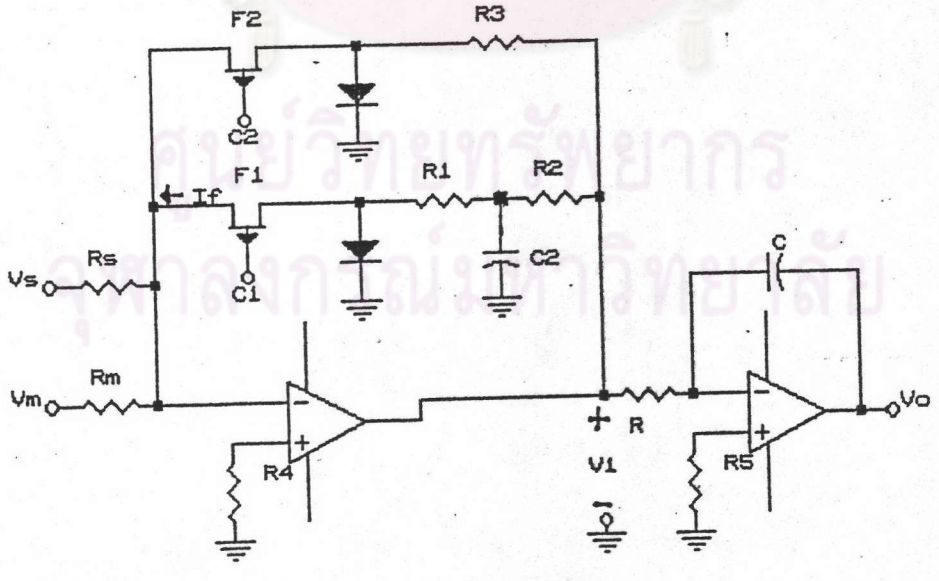
รูปที่ 5.11 แสดงวงจรคุมค่าแบบปรับตัวเองได้ที่ใช้ในวงรอบปิดของกระแส

ตามที่กล่าวมาแล้วว่าการปรับค่าคงตัวเวลาโดยใช้โพเทนชิโอมิเตอร์เป็น

การปรับเพียงครั้งเดียว เพื่อให้ได้ลักษณะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับจุดทำงานจุดหนึ่ง แต่ถ้าจุดทำงานของระบบเปลี่ยนไปการปรับก็จะไม่เหมาะสม เช่นการหน่วงไม่เพียงพอเป็นต้น สำหรับระบบคุมค่าที่ต้องการสมรรถนะสูง เราอาจใช้วงจรคุมค่าแบบปรับตัวเองได้ (adaptive) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดทำงานของระบบ

การปรับตัวได้มีหลายวิธี สองวิธีที่จะนำมากล่าวเป็นตัวอย่างในที่นี้คือ (1) ปรับค่าคงตัวเวลาของการคุมค่าโดยใช้แรงดันเชิงอุปมาน (analog) ร่วมกับวงจรคูณ (2) ปรับโครงสร้างของวงจรคุมค่า เช่น เปลี่ยนจากแบบ PI เป็นแบบ I โดยใช้สัญญาณเชิงเลขควบคุมสวิตช์ที่เป็นแบบ FET หรือวงจรรวม (IC) ในที่นี้เราใช้การปรับโครงสร้าง รูปที่ 5.11 แสดงวงจรคุมค่าแบบปรับโครงสร้างได้ที่ใช้ในการควบคุมวงรอบปิดของกระแส

สำหรับการควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรง กรณีที่มีกระแสอาร์เมเจอร์ไหลอย่างไม่ต่อเนื่อง จะทำให้ฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรจุดชนวนต่างกับขณะที่มีกระแสไหลอย่างต่อเนื่อง เป็นเหตุให้ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดช้า และค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวมีค่ามากเมื่อเทียบกับขณะที่กระแสไหลอย่างต่อเนื่อง เพื่อชดเชยผลดังกล่าวให้ดีขึ้น เราจึงใช้วงจรคุมค่าแบบปรับตัวเองได้ในวงรอบปิดของกระแส ก่อนอื่นขออธิบายวงจรที่เกี่ยวข้องก่อนดังนี้



รูปที่ 5.12

วงจรคุมค่าแบบปรับโครงสร้างได้ระหว่างแบบ PI และแบบ I

วงจรคุมค่าความเร็วยังคงใช้รูปแบบที่กล่าวถึงในหัวข้อ 5.5 ได้ สำหรับวงจรคุมค่ากระแสที่ใช้เป็นวงจรคุมค่าแบบปรับโครงสร้างได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.12 โดยมีสองโครงสร้างโดยมีโครงสร้างแบบ PI และโครงสร้างแบบ I

โครงสร้างแบบ PI จะเกิดขึ้นเมื่อ FET F1 ต่อวงจร และ FET F2 ตัดวงจร เราคำนวณแอดมิตแตนซ์โอนย้ายของวงจรป้อนกลับของออปแอมป์ A_1 ได้ดังนี้

$$Y_f(s) = I_f/V_1 = 1/[R_2(1+sR_1C_2)+R_1] \quad (5.22)$$

จะได้ $$V_1 = -[\{R_2(1+sR_1C_2)+R_1\}/R2][V_s+(R_s/R_m)V_m] \quad (5.23)$$

สำหรับ ออปแอมป์ A_2 เราคำนวณได้ว่า

$$V_o = -[1/sRC)V_1 \quad (5.24)$$

เราคำนวณตัวแปรสัมพันธ์ x_o จากสมการ (5.23) และ (5.24) ได้ดังนี้

$$x_o = [(R_1+R_2)/R][(1+sR_1R_2C_2/(R_1+R_2))/sR_sC] [V_{sn}/V_{on}][x_s-x_m] \quad (5.25)$$

<u>หมายเหตุ</u> ในกรณีนี้แรงดันอ้างอิงสำหรับแรงดันด้านออกมีค่าเป็นบวก ต่างจากสมการ (5.6) เพราะมีการใช้ออปแอมป์นั่นเอง นั่นคือ

$$V_o = x_oV_{on} \quad (5.26)$$

จากสมการ (5.25) สังเกตได้ว่าเมื่อ FET F1 ต่อ และ FET F2 ตัด จะได้โครงสร้างแบบ PI โดยมีค่าคงตัวเวลาดังนี้

$$T_1 = [R/(R_1+R_2)]R_sC(V_{on}/V_{sn}) = [R/(R_1+R_2)]R_mC(V_{on}/V_{mn}) \quad (5.27)$$

และ $$T_n = [R_1/(R_1+R_2)]R_2C_2 \quad (5.28)$$

โครงสร้างที่สองตรงกับขณะที่ FET F1 ตัดวงจร และ FET F2 ต่อวงจร ออปแอมป์ A1 ให้อัตราขยายเท่ากับ $-(R_3/R_s)$ ซึ่งเมื่อรวมกันอัตราขยายของออปแอมป์ A2 จะได้

$$x_o = (R_3/R)(1/sR_sC)(V_{sn}/V_{on})(x_s-x_m) \quad (5.29)$$

จากสมการ (5.29) สังเกตได้ว่าเราได้โครงการแบบ I โดยมีค่าคงตัวเวลาดังนี้

$$T_i = (R/R_3)R_sC(V_{on}/V_{sn}) = (R/R_3)R_mC(V_{on}/V_{mn}) \quad (5.30)$$

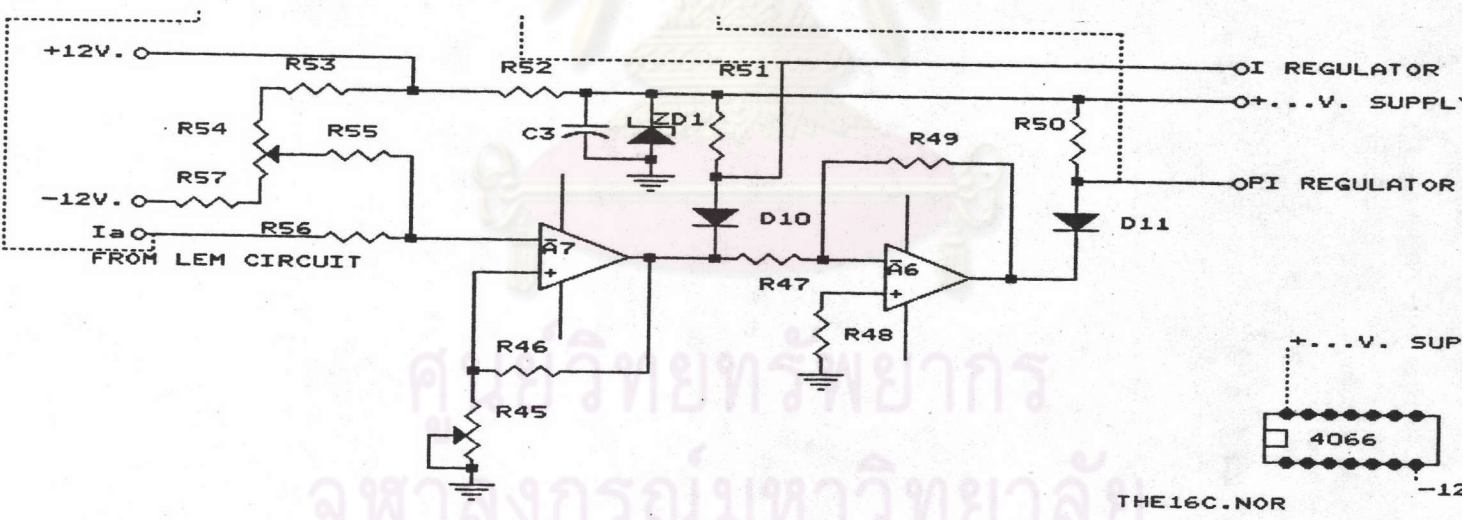
วงจรในรูปที่ 5.12 มีข้อดีที่สำคัญคือ เราสามารถกำหนดค่าคงตัวเวลา T_i ของทั้งสองโครงสร้างให้ต่างกันได้ และเมื่อเปลี่ยนโครงสร้าง แรงดัน V_o จะไม่มีการกระโดด (discontinuity) ทั้งนี้เพราะมีตัวเก็บประจุ C ต่ออยู่นั่นเอง

สำหรับวงจรตามรูปที่ 5.9 จะมีการจำกัดค่า V_o ไม่ให้สูงหรือต่ำจนเกินไป เสมือนมีการจำกัดกระแสอาร์เมเจอร์ไม่ให้มีค่าสูงเกินกำหนด และจำกัดไม่ให้เวลาหน่วงขณะที่ชะลอความเร็วลงมีค่ามากเกินไป

ในกรณีของเรา เราอาจใช้ FET หรือ CMOS เป็นสวิตช์ก็ได้ หากใช้ CMOS เบอร์ 4Ø66 เป็นสวิตช์ ต้นทุนของสวิตช์จะมีราคาถูกกว่า แต่การใช้ CMOS ก็ต้องมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าเฉพาะให้เมื่อเทียบกับการใช้ FET เป็นสวิตช์ ในกรณีนี้เราใช้ CMOS เบอร์ 4Ø66 เป็นสวิตช์

เพื่อให้วงจรคุมค่าทำงานได้ตามที่เราต้องการ เราต้องเอาสถานะการไหลของกระแสในอาร์เมเจอร์มาควบคุมการทำงานของสวิตช์ วงจรที่ใช้ควบคุมการทำงานของสวิตช์ตามรูปที่ 5.13

ใช้วงจรคุมค่าแบบฮิสเตอเรชิสทำการคุมค่าแบบ ON-OFF คือต้องการแรงดันด้านเข้าของระบบ (ซึ่งก็คือ แรงดันออกของวงจรคุมค่า) ที่มีลักษณะเชิงเลข คือมีค่าเพียง 2 ค่า รูปที่ 5.14 แสดงแผนภาพบล็อกของวงจรคุมค่าแบบฮิสเตอเรชิส

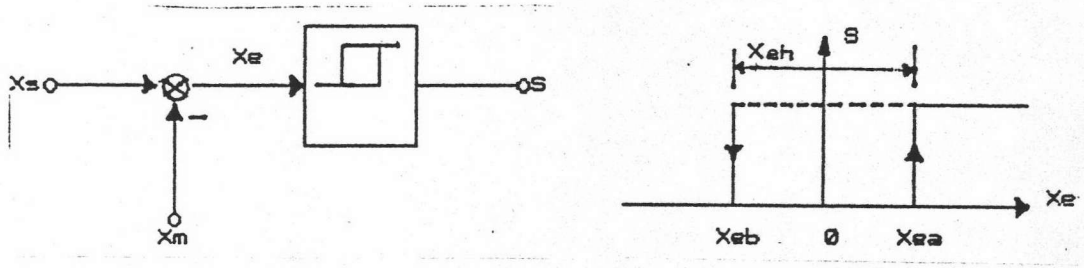


รูปที่ 5.13

แสดงวงจรควบคุมการทำงานของสวิตช์ในวงจรคุมค่าแบบปรับตัวเองได้

สัญญาณออกของวงจรคุมค่านี้เป็นสัญญาณเชิงเลข s ในความหมายที่ว่าเป็นแรงดันที่มี 2 ระดับ เช่น Ø กับ 5V เมื่อแรงดันคลาดเคลื่อน $x_e > x_{ea}$ แรงดันออก s จะอยู่ระดับหนึ่ง [ดูรูปที่ 5.14 (ข)] ความแตกต่างระหว่างแรงดันด้านเข้าทำให้เกิด

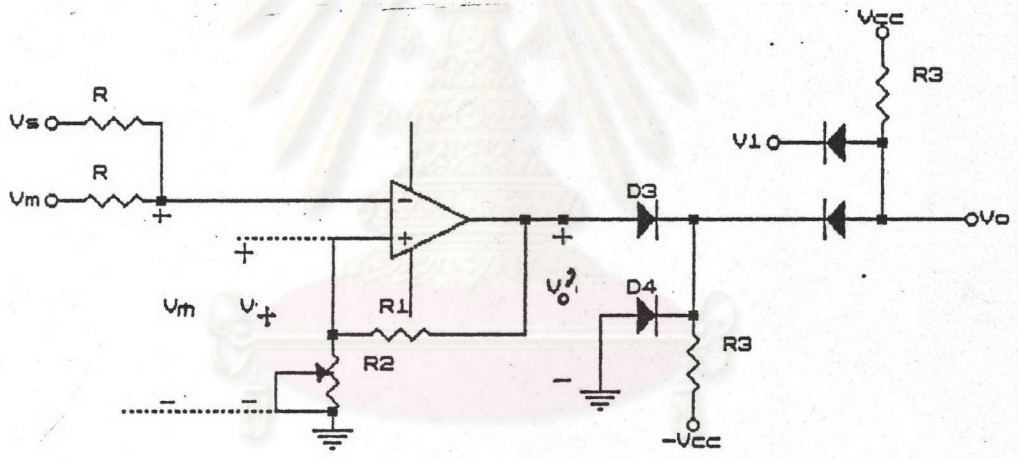
การเปลี่ยนแปลงด้านออก หรือ $X_{ea} - X_{eb} = X_{eh}$ มีชื่อเรียกว่าฮิสเตอเรซิส



(ก) แผนงานบล็อก (ข) ลักษณะ

รูปที่ 5.14

แผนภาพบล็อก และลักษณะของวงจรคุมค่าแบบฮิสเตอเรซิส



รูปที่ 5.15

วงจรคุมค่าแบบฮิสเตอเรซิส ที่ใช้ออปแอมป์

จากรูปที่ 5.15 แสดงวงจรคุมค่าแบบฮิสเตอเรซิสที่ใช้วงจรออปแอมป์ต่อแบบชมิตต์ทริกเกอร์ คือมีการป้อนกลับแบบบวก วงจรไดโอดที่ต่ออยู่ทางด้านออกทำหน้าที่เป็นวงจรจำกัดค่าให้แรงดันด้านออกมีค่าเป็นบวกได้ไม่เกิน V_1 (สำหรับวงจรตรรก TTL แรงดัน V_1 เท่ากับ 5V) ทั้งนี้อาศัยไดโอด D_1 และจำกัดค่าให้แรงดันด้านออกมีค่าต่ำสุดเท่ากับ Ø ทั้งนี้อาศัยไดโอด D_4 (ในกรณีไดโอดอุดมคติ)

ให้ V_o เป็นแรงดันด้านออกของออปแอมป์ V- และ V+ เป็นแรงดันที่

ขั้วเข้ากลับเฟสและไม่กลับเฟสตามลำดับ แรงดันด้านออก V_o จะมี 2 ระดับคือ จะอยู่ที่ระดับอิ่มตัวด้านบวกซึ่งมีค่าเท่ากับ V_{sat} เมื่อ $V_+ - V_- > 0$ และจะอยู่ที่ระดับอิ่มตัวด้านลบซึ่งมีค่าเท่ากับ $-V_{sat}$ เมื่อ $V_+ - V_- < 0$ เราคำนวณแรงดันด้านเข้าได้ดังนี้

$$V_+ = [R_2/(R_1+R_2)]V'_o \qquad (5.31)$$

$$V_- = (V_s+V_m)/2 \qquad (5.32)$$

เพื่อให้ได้ลักษณะของวงจรคุมค่าดังในรูปที่ 5.14 (ข) เราจะเลือกค่าของแรงดันอ้างอิงเท่ากับ V_n สำหรับแรงดันต่าง ๆ ยกเว้นแรงดัน V_s ซึ่งจะให้แรงดันอ้างอิงเท่ากับ $-V_n$ ดังนั้นจากสมการ (5.31) และ (5.32) จะได้

$$x_+ = V_+/V_n = [R_2/(R_1+R_2)]x'_o \qquad (5.33)$$

$$x_- = V_-/V_n = (1/2)[(V_s/V_n)+(V_m/V_n)]$$

$$= (1/2)(-x_s+x_m) = -(1/2)x_e \qquad (5.34)$$

เพื่อคำนวณค่าของจุดเปลี่ยนแปลงระดับ x_{ea} เราสมมติว่าจุดทำงานอยู่ที่จุดเริ่มต้น (origin) (ดูรูปที่ 5.14 (ข)) นั่นคือ $x_e = 0$ และ $s = 0$ ที่จุดนี้ $x'_o = -V_{sat}/V_n = -x_{sat}$ เราจะเพิ่ม x_e ไปเรื่อยๆ เพื่อไปยังจุด x_{ea} จากสมการ (5.33) และ (5.34) จะได้ว่าจุดเปลี่ยนระดับ x_{ea} ตรงกับเมื่อ $x_+ - x_- = 0$ ดังนั้น

$$x_+ - x_- = -[R_2/(R_1+R_2)]x_{sat} + (x_{ea}/2) = 0$$

หรือ $$x_{ea} = 2[R_2/(R_1+R_2)]x_{sat} \qquad (5.35)$$

ในทำนองเดียวกันเราคำนวณ x_{eb} จากสมการ

$$x_+ - x_- = [R_2/(R_1+R_2)]x_{sat} + (x_{eb}/2) = 0$$

หรือ $$x_{eb} = -2[R_2/(R_1+R_2)]x_{sat} \qquad (5.36)$$

ดังนั้น ฮิสเตอเรซิส

$$x_{eh} = x_{ea} - x_{eb} = 4[R_2/(R_1+R_2)]x_{sat} \qquad (5.37)$$

เราปรับค่าของฮิสเตอเรซิสได้โดยการปรับค่าความต้านทาน R_2 การปรับ R_2 ทำให้จุดเปลี่ยนระดับ x_{ea} และ x_{eb} เลื่อนไปอย่างสมมาตร

ในกรณีของเรา เราได้ออกแบบให้สัญญาณขาออกที่ต้องการอยู่ในช่วงการทำงานที่เหมาะสมกับ CMOS ที่ใช้ จึงมีวงจรจำกัดค่ามาเกี่ยวข้องด้วย เหตุที่เราเลือกใช้วงจรฮิสเตอเรซิสนี้เพื่อที่จะวัดสถานะของกระแสอาร์เมเจอร์ที่ไหลนำไปควบคุมการทำงานของสวิตช์ในวงจรคุมค่าแบบปรับตัวเอง การปรับตั้งค่าต่าง ๆ ในวงจรฮิสเตอเรซิสกระทำเพื่อความเหมาะสมในการคุมค่า

5.7 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน

(โคทม อารียา,2531; นนทวัฒน์ จุลเดช,2528; Rajashekara,1988)

ในบางกรณีสัญญาณที่รับมาจากอุปกรณ์วัดค่าต่าง ๆ มีสัญญาณรบกวน หรือสัญญาณที่เราไม่ต้องการปนอยู่ด้วย ดังนั้น จึงควรมีวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านสำหรับลดทอนสัญญาณต่าง ๆ ดังกล่าว แม้จะทำให้ระบบตอบสนองต่อสัญญาณคำสั่งช้าลง แต่ไม่ไวต่อสัญญาณรบกวนหรือสัญญาณที่เราไม่ต้องการ ในการออกแบบมักใช้วงจรคุมค่าที่มีวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านรวมอยู่

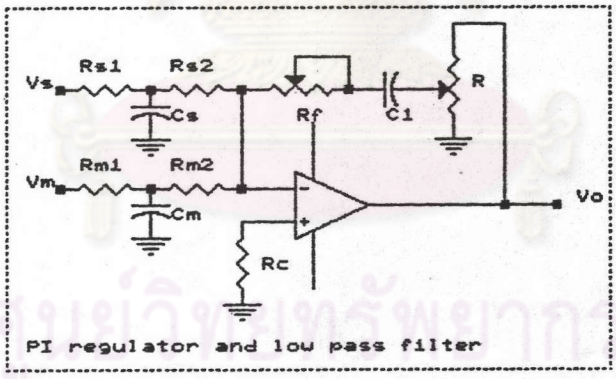
วิเคราะห์ได้ดังนี้

ให้ Z_s เป็นค่าคอมเพล็คอิมพีแดนซ์ (Complex Impedance) ของวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านที่ด้านตั้งค่า

$$Z_s = (R_{s1} + R_{s2})[1+\{sR_{s1}R_{s2}/(R_{s1} + R_{s2})\}C_s] \qquad (5.38)$$

เมื่อพิจารณาเทียบกับรูปที่ 5.6 จะเห็นได้ว่า R_s เดิมถูกแทนที่ด้วย Z_s จากสมการ (5.9) และ (5.1Ø) พิจารณาใหม่ได้ดังนี้

$$G_R(s) = [\{1+s(R_1 + R_3)C_1\}/sZ_sC_1](V_{sn}/V_{on}) \qquad (5.39)$$



รูปที่ 5.16
แสดงวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน

แทนค่า Z_s จากสมการ (5.38) พิจารณาเฉพาะ sZ_sC_1 ก่อน

$$sZ_sC_1 = s[R_{s1} + R_{s2}][1+\{sR_{s1}R_{s2}/(R_{s1} + R_{s2})\}C_s]C_1 \qquad (5.4Ø)$$

เฉพาะค่าความต้านทานให้

$$R_s = R_{s1} + R_{s2} \qquad (5.41)$$

$$sZ_sC_1 = [sR_sC_1][1+(sR_{s1}R_{s2}/R_s)C_s] \quad (5.42)$$

เมื่อพิจารณาสมการ (5.9) (5.10) (5.11) (5.40) และ (5.42) จะได้

$$T_i = \rho R_sC_1(V_{on}/V_{sn}) = \rho R_mC_1(V_{on}/V_{mn}) \quad (5.43)$$

$$T_n = (R_1+R_3)C_1 \simeq R_1C_1 \quad (5.44)$$

และ $$T_{fs} = (R_{s1}\ R_{s2}/R_s)C_s \quad (5.45)$$

โดยที่ T_{fs} เป็นค่าคงตัวเวลาที่เกิดขึ้นเนื่องจากการต่อวงจรกรองสัญญาณ (ที่ตั้งค่า) ความถี่ต่ำผ่านเข้ากับวงจรคุมค่า

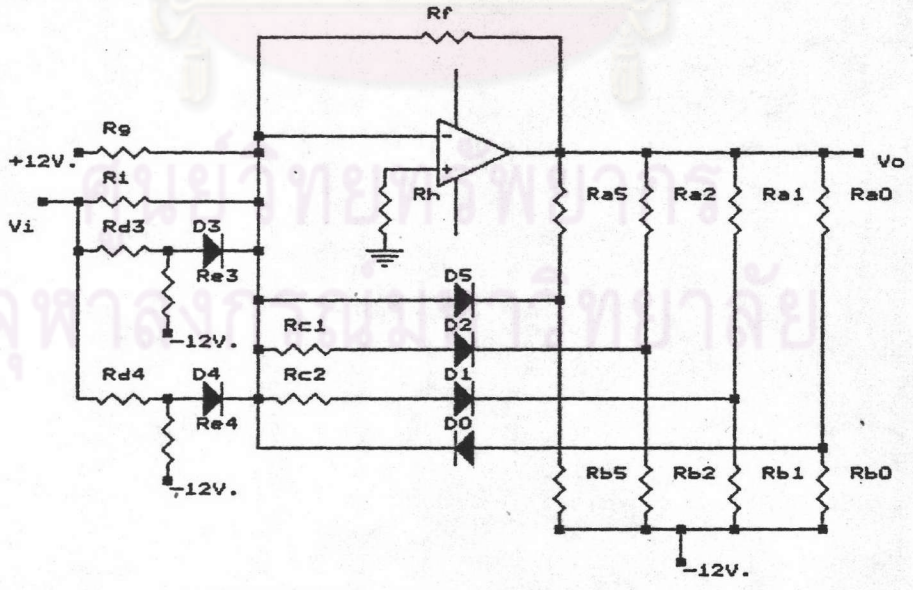
ในทำนองเดียวกัน หากว่าวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านชั้วด้านวัดค่า

$$T_{fm} = (R_{m1}\ R_{m2}/R_m)C_m \quad (5.46)$$

โดยที่ T_{fm} เป็นค่าคงตัวเวลาที่เกิดขึ้นเนื่องจากการต่อวงจรกรองสัญญาณ (ที่วัดค่า) ความถี่ต่ำผ่านเข้ากับวงจรคุมค่า

ในการออกแบบวงจรคุมค่า ในบางกรณีการกรองสัญญาณที่วัดเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อลดสัญญาณที่ไม่ต้องการออกไป แต่การใส่วงจรกรองค่าที่ตั้งไว้ให้ได้ค่าคงที่เวลาเดียวกับวงจรกรองค่าที่วัดแล้วเป็นความเหมาะสมสำหรับวงจรคุมค่าทั่วไป (Rajashekara,1988)

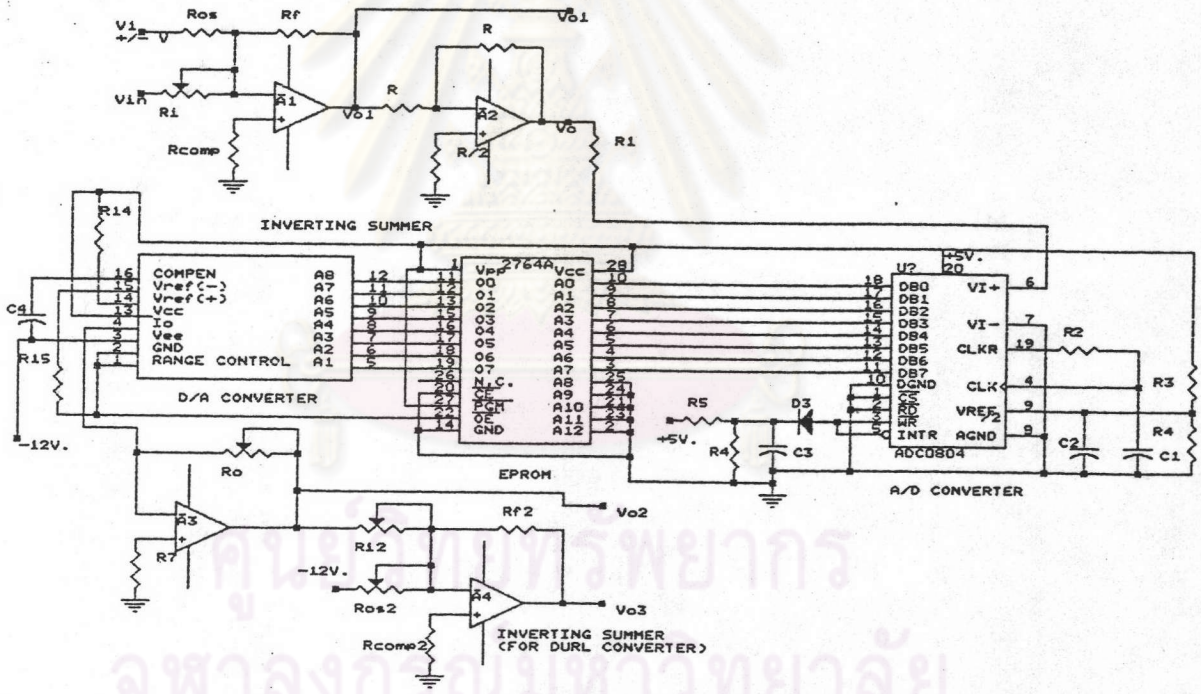
5.8 <u>วงจรกำเนิดฟังก์ชันไม่เชิงเส้น</u> (โคทม อารียา,2531,2526)



ARCCOS FUNCTION EQUIVARENCE CIRCUIT

รูปที่ 5.17 ตัวอย่างวงจรกำเนิดฟังก์ชันไม่เชิงเส้นด้วยออปแอมป์ตัวเดียว (กำเนิดฟังก์ชันใกล้เคียง $\cos^{-1}$)

ในกรณีของเรา การใช้วงจรจุดชนวนที่ใช้ฟังก์ชันอ้างอิงรูปฟันเลื่อยอาจได้ผลตอบสนองที่เร็วขึ้นได้ โดยการใช้วงจรกำเนิดฟังก์ชันไม่เชิงเส้นช่วยในการควบคุมวงจรที่เราต้องการนี้ คือวงจรกำเนิดฟังก์ชัน $\cos^{-1}$ เพื่อชดเชยการทำงานของวงจรจุดชนวนที่ใช้ฟังก์ชันอ้างอิงรูปฟันเลื่อย ให้มีสภาพการทำงานเสมือนวงจรจุดชนวนที่ใช้ฟังก์ชันอ้างอิงรูปโคไซน์



รูปที่ 5.18

ตัวอย่างวงจรกำเนิดฟังก์ชันไม่เชิงเส้นด้วย EPROM

การสร้างวงจรนี้ อาจใช้วงจรออปแอมป์เพียงตัวเดียว แล้วต่อวงจรแบบวงจรจำกัดค่าหลาย ๆ อันซ้อนกัน หรือ การใช้หน่วยความจำ (EPROM) ก็ได้ วงจร

ทั้งสองแบบกำเนิดสัญญาณตามต้องการได้อยางประมาณเท่านั้น อีกทั้งยังมีการหน่วงเวลา (delay time) ในการแปลงสัญญาณด้วยจึงทำให้วงจรคุมค่าทำงานได้ไม่ดีเท่าที่ควร การใช้วงจรนี้ต้องมีการปรับแต่งให้ใช้งานรวมกันได้ มิฉะนั้นแล้ว ค่า K_c (คือ $\Delta v_{d\alpha}/\Delta v_c$) อาจไม่ใช่ที่เราต้องการนั่นเอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย