การควบคุมดีซีมอเตอร์ด้วยระบบเซอร์โว

DC SURVO MOTOR

ผู้จัดทำ

น.ส.นุพา สุพรรณโมกข์ 32.1153

นายเอกราช ภคบวร 32.1435

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์สิงห์ทอง พิมพเศรษฐานนท์

ปริญญานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

032694

ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมดีซีมอเตอร์ด้วยระบบเซอร์โว
DC SURVO MOTOR

ผู้จัดทำ

1. นางสาวนุพา สุพรรณโมกข์ 32.1153
2. นายเอกราช ภคบัวร 32.1435

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

032694

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ

Abstract

บทนำ.....

บทที่ 1 การควบคุมแบบลูปปิด..... 1

1.1 องค์ประกอบของระบบการควบคุมแบบลูปปิด 1

1.2 ระบบควบคุมแบบเซอร์โว..... 3

บทที่ 2 ตัวควบคุมแบบอนาลอก..... 7

2.1 ตัวขยายที่มีค่าความผิดพลาด..... 8

2.2 ตัวควบคุมแบบเปิด/ปิด..... 9

2.3 ตัวควบคุมที่เป็นสัดส่วน..... 12

2.4 ตัวควบคุมแบบอินทิเกรทและแบบสัดส่วน-อินทิเกรท... 15

2.4.1 ตัวควบคุมแบบอินทิเกรท 15

2.4.2 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อินทิเกรท..... 20

2.5 ตัวควบคุมแบบ D และแบบ PID 26

2.5.1 ตัวควบคุมแบบ ดิริเวทิฟ..... 26

2.5.2 ตัวควบคุมแบบ PID..... 30

บทที่ 3 ผลตอบสนองต่อระบบ..... 33

3.1 ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของระบบ..... 33

3.1.1 การควบคุมขบวนการ..... 33

3.1.2 การควบคุมแบบเซอร์โว..... 35

บทที่ 4 วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส..... 38

บทที่ 5 สเตปปิ้งมอเตอร์และการควบคุม..... 41

รูปวงจรที่ใช้ในการทดลอง..... 52

อธิบายการทำงานของวงจรที่ใช้ในการทดลอง..... 53

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 54

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของเนื้อหาวิชาอิเลคทรอนิคกำลัง(Power Electronics) เกี่ยวกับการประยุกต์การควบคุมแบบเซอร์โว เข้ากับมอเตอร์กระแสตรง (DC Servo Motors)เป็นการควบคุมตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID แล้วเปลี่ยนสัญญาณควบคุมเป็นกระแสโดย ใช้วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส (Voltage to Current Converter) และมีการควบคุมสเตปปิ้งมอเตอร์แบบลูปเปิดด้วยวงจรซีเควนเชียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSTRACT

This thesis is a fraction of Power Electronics. Application of Servo Control to Contor DC Motor. It is the Position Control of DC Motor by PID Controller then Convert the Signal Voltage to Current by of Voltage to Current Converter. And Use Sequencial Logic Circuit to Control Stepping Motor by means of Open loop Control.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทนำ

ในการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์กระแสตรง สามารถใช้การควบคุมแบบเซอร์โวได้ การควบคุมแบบเซอร์โวเป็นการควบคุมแบบระบบปิดที่มีการป้อนกลับ ต่างจากการควบคุมระบบแบบธรรมดา(Process Control)ค่าที่ตั้งไว้(Set Point) มีการเปลี่ยนแปลงไป ส่วนค่าตัวแปรในระบบ(Process Variable)ก็ขึ้นอยู่กับค่าที่ตั้งไว้ที่แปรค่าไป ในระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบเซอร์โวนี้ จะให้สัญญาณของตำแหน่งที่ต้องการเป็นค่าที่เราตั้งไว้และสัญญาณศักดาจากความต้านทานที่เรียกว่าโพเทนทิโอมิเตอร์ซึ่งเป็นค่าตัวแปรในระบบแล้วนำมาหาผลต่างที่เกิดขึ้นเพื่อหาค่าความผิดพลาด ซึ่งค่าความผิดพลาดนี้จะถูกส่งไปให้

1.ตัวควบคุมแบบสัดส่วน(Proportional Controller)จะได้ผลเป็นสัญญาณที่เป็นสัดส่วนกับค่าความผิดพลาด

2.ตัวควบคุมแบบอินทิเกรท(Integrator Controller)จะได้ผลเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เป็นสัดส่วนกับความผิดพลาด

3.ตัวควบคุมแบบดิริเวทิฟ(Derivative Controller) ค่าตัวแปรในระบบจะถูกส่งไปให้ตัวควบคุมแบบดิริเวทิฟเหตุที่ไม่ใช้ค่าความผิดพลาดเพราะบ่อยครั้งที่ค่าที่ตั้งไว้มีการเปลี่ยนแปลงเป็นขั้น(Step) ทำให้ตัวควบคุมแบบดิริเวทิฟนำสัญญาณทั้งสามตัวมารวมกันก็จะได้สัญญาณควบคุมแบบ PID นำสัญญาณที่ได้เปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส ด้วยวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส (Voltage To Current Converter) ที่ป้อนให้มอเตอร์กระแสตรง

นอกจากนี้ยังมีการควบคุมสเตปปิ้งมอเตอร์แบบลูปเปิดด้วยวงจรซีเควนเชียลด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

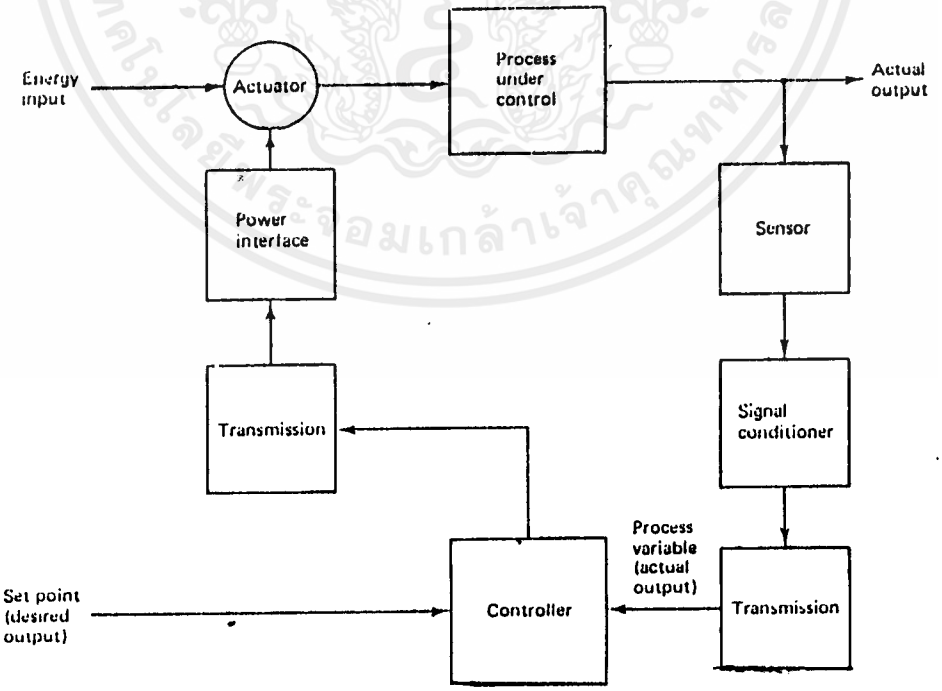
บทที่ 1. การควบคุมแบบลูปปิด(Close Loop Control)

การควบคุมแบบลูปปิดไม่สามารถให้เอาท์พุทตามที่ต้องการจากขบวนการได้ เมื่อมีสิ่งรบกวนเพียงเล็กน้อย เทคนิคจำเป็นบางอย่างนำเอาท์พุทที่ได้เปรียบเทียบกับค่าที่ต้องการและตำแหน่งใหม่ของอุปกรณ์ในการกำจัดค่าความผิดพลาดซึ่งจำเป็นอย่างมากในการควบคุมอัตโนมัติในรูปแบบง่ายๆผู้ใช้งานควรดูที่เกจ ปรับวาล์ว ความน่าเชื่อถือในการใช้เครื่องมือและวงจรทางอิเลคทรอนิคส์

1.1 องค์ประกอบของระบบควบคุมแบบลูปปิด (Element of a Closed Control System)

ระบบควบคุมลูปแบบปิดแสดงในรูปที่ 1 จะควบคุมอุณหภูมิภายในบ้าน เอาท์พุทที่ได้ถูกควบคุมโดยเซนเซอร์ ตัวควบคุมและตัวส่งผ่าน ตัวควบคุมที่ใช้อาจเป็นคอมพิวเตอร์ วงจรทางอิเลคทรอนิคส์ เอาท์พุทอีกตัวเรียกว่าค่าที่ตั้งไว้(Set Point,SP) จะนำมาควบคุมเพื่อชี้ให้เห็นว่าเอาท์พุทที่ต้องการคืออะไร ตัวควบคุมจะนำเอาผลต่างระหว่างอินพุทกับค่าความผิดพลาดว่าเป็นอย่างไร เอาท์พุทในการคำนวณจะนำไปสู่เอาท์พุทที่เป็นจริงในแนวของการตั้งค่าไว้

สัญญาณตัวควบคุมส่งผ่านตัวกระทำ ซึ่งมีหน้าที่ในการควบคุมพลังงานที่นำไปใช้ในขบวนการการเปลี่ยนแปลงพลังงานในระบบ ทำให้เอาท์พุทที่ได้เปลี่ยนไปด้วยที่ SP ตรงกัน



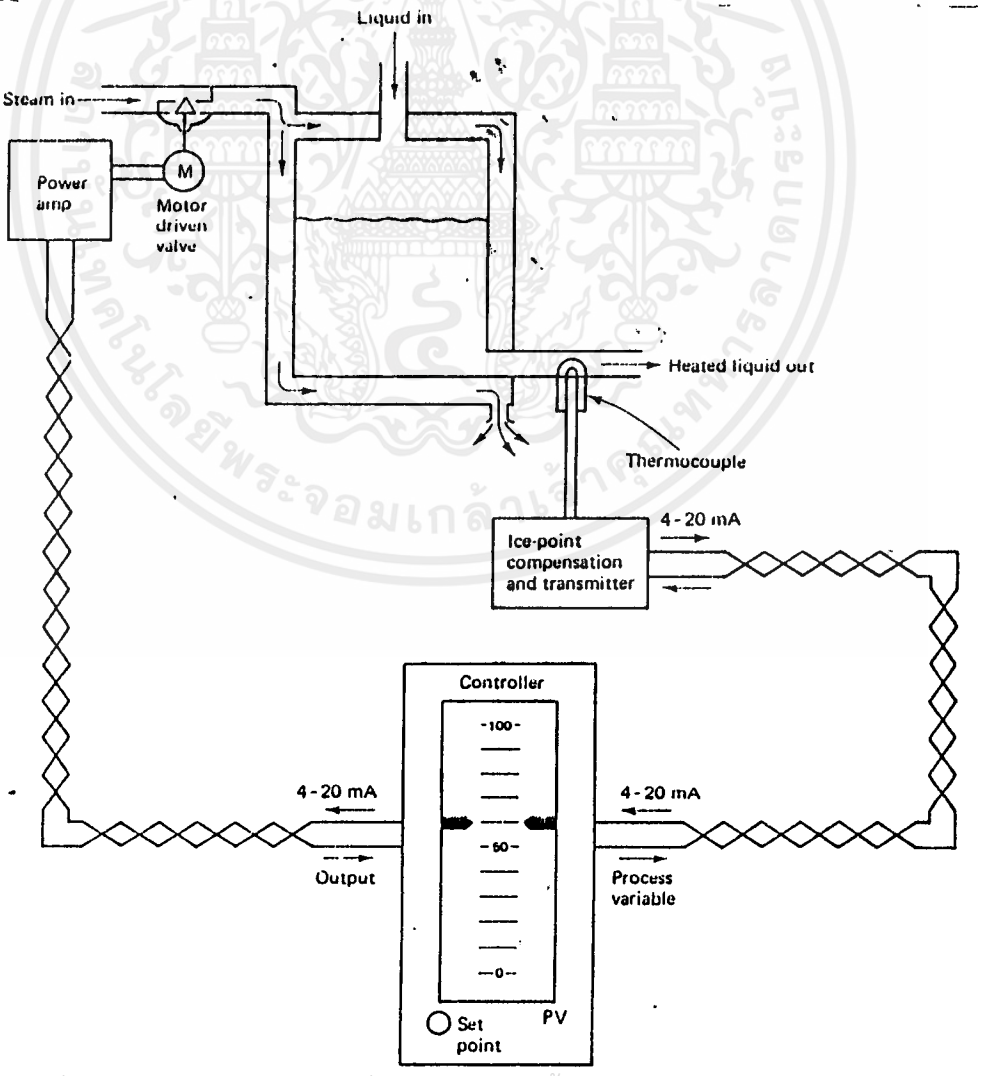
รูปที่ 1 ระบบควบคุมอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2แสดงระบบควบคุมลูปแบบปิดของอุณหภูมิในแท้งค์วัดอุณหภูมิโดยเทอร์โมคัปเปิล เอาท์พุทที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลมีค่าเป็น 2-3 mVขึ้นกับอุณหภูมิล้อมรอบการชดเชยจุดเยือกแข็ง และการส่งผ่านที่ชดเชยอุณหภูมิล้อมรอบขยายและเลื่อนไปเป็น 3 mV จะเปลี่ยนแปลงตามมาตรฐานการส่งผ่านทางอุตสาหกรรมโดยปรับให้เหมาะสมเมื่อของเหลวมีอุณหภูมิต่ำสุด ตัวส่งผ่านจะส่งออกเป็น 4 mV และมากที่สุด 20 mV

กระแสที่ได้นี้ถูกส่งไปยังตัวควบคุมอยู่ภายใต้ห้องควบคุมส่วนกลางวัดโดยใช้เครื่องมือวัดตัวควบคุมเทียบกับ PV เช่นการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งของการควบคุม SP เอาท์พุทที่ได้คำนวณหากระแสการส่งผ่านอีกครั้งหนึ่งให้อยู่ในช่วงระหว่าง 4-20 mA ไปสู่อุปกรณ์ สัญญาณนี้จะถูกขยายและใช้ขับมอเตอร์ ซึ่งมอเตอร์จะหมุนและเปลี่ยนตำแหน่งวาล์วหรือปรับการไหลของไอน้ำในส่วนนอก(jacket)

การรบกวนความดันไอน้ำหรืออุณหภูมิ, อุณหภูมิของเหลวที่ไหลเข้าในถังทำให้อุณหภูมิทางออกเพิ่มขึ้น ความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นทำให้กระแสทางออกเพิ่มขึ้น ผลตอบสนองจะให้กระแสเอาท์พุทออกมา ทำให้มอเตอร์ปิดวาล์วกลับไปสู่ส่วนนอก (jacket) และของเหลวจะเย็นลง



รูปที่ 2 การควบคุมลูปแบบปิดของอุณหภูมิในถัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

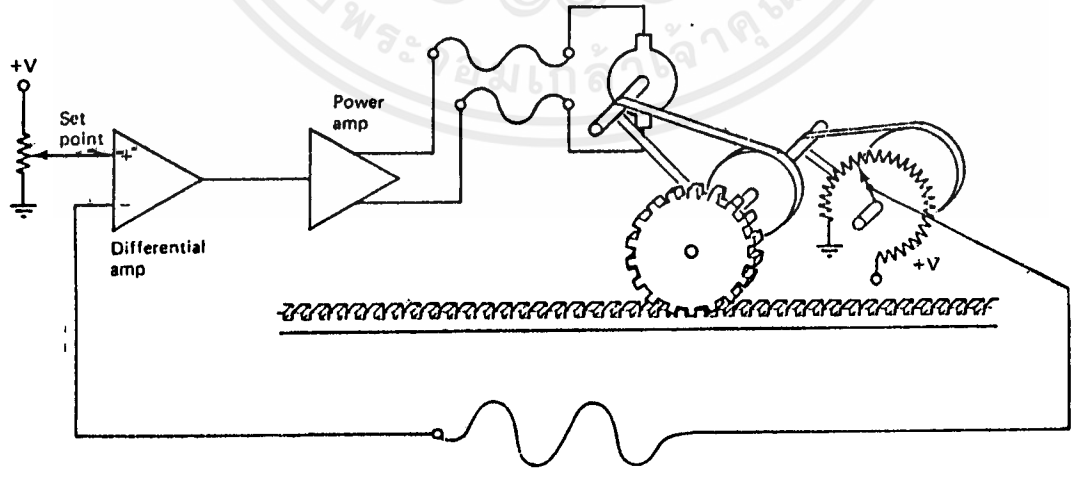
1.2 ระบบควบคุมแบบ SERVO (Sevomechanism control System)

ระบบควบคุมแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ

- การควบคุมขบวนการ
- การควบคุมแบบเซอร์โว

ในตำแหน่งการควบคุมแบบเซอร์โว ความเร็วหรือความเร่งจะเป็นไปตาม SP ปรับผลที่กระทบต่อระบบให้ลดลง นั่นคือมีสิ่งรบกวนเกิดขึ้นกับการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์และออกแบบระบบเซอร์โว เป็นการดำเนินการขั้นต้นจากจุดที่มีเอาท์พุทเปลี่ยนแปลงไปใน SP กำหนดให้โหลดคงที่ ผลตอบสนองนี้เร็วมากจะเสร็จสมบูรณ์ภายใน 1 วินาที หรือน้อยกว่านี้ ดังนั้นการเคลื่อนที่เป็นผลตอบสนองที่เราต้องการของอุปกรณ์แอคทูเอเตอร์ เป็นตัวกำหนดระบบของเซอร์โว สำหรับระบบเล็กๆ แอคทูเอเตอร์เป็นตัวกำหนดระบบของเซอร์โว สำหรับระบบเล็กๆตัวกระทำที่พบบ่อยคือมอเตอร์ทางไฟฟ้า ระบบต่าง ๆ ที่ต้องการกำลังมาก อาจจะใช้กระบอกสูบแบบไฮโดรลิกเป็นตัวกระทำ

ระบบเซอร์โวที่ควบคุมตำแหน่งแสดงในรูปที่ 3 ตัวกระทำเป็น ดีซีมอเตอร์ ให้แม่เหล็กถาวรไว้ตรงกลางทะลุผ่านเกียร์มอเตอร์จะขับฟันเฟืองการหมุนเกียร์ลงไปอีกครั้งหนึ่ง หน้าปัดของโพเทนทิโอมิเตอร์ (เซนเซอร์)การเคลื่อนที่ของฟันเฟืองจากซ้ายไปขวาจะหมุนโพเทนทิโอมิเตอร์เป็นมุม 300 องศาที่จุดเริ่มต้นโพเทนทิโอมิเตอร์เป็นตัวส่งเซนเซอร์ของระบบอัตโนมัติ ดังรูปที่ 3แรงดันของหน้าปัดเป็นตัวชี้ตำแหน่งในการป้อนกลับของวงจรขยายที่แตกต่างกัน(differential Amplifier) จะแบ่งจากแรงดันที่ตั้งไว้และผลต่าง (ค่าความผิดพลาด) ที่ถูกขยาย ดิฟแอมป์ เป็นตัวควบคุมในรูปที่ 3 กำลังของเอาท์พุทตัวควบคุมเพิ่มขึ้นและขับมอเตอร์



รูปที่ 3 ระบบเซอร์โวควบคุมตำแหน่ง

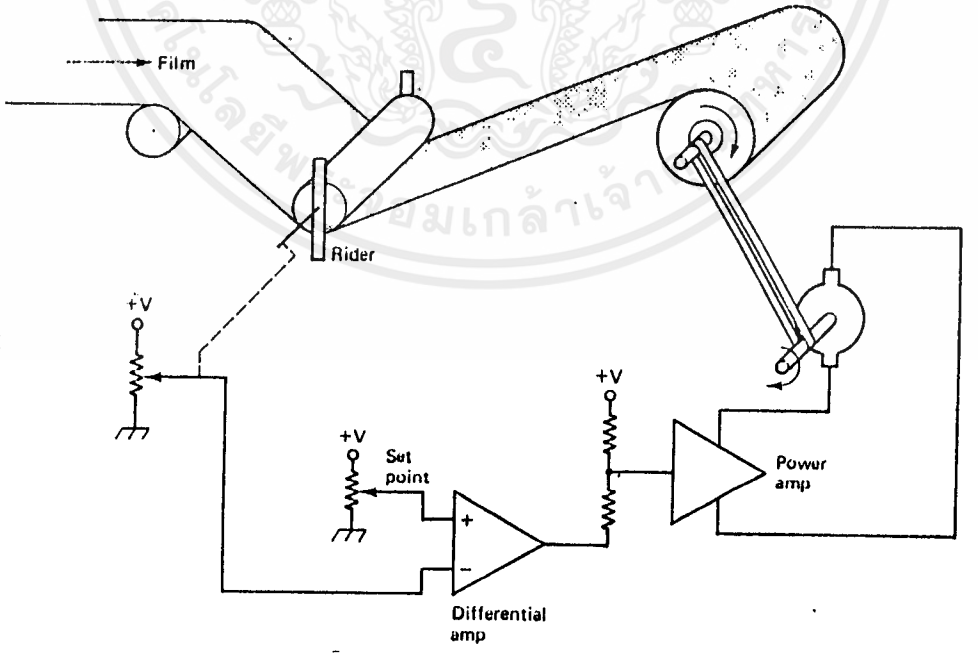
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสัญญาณจากเซนเซอร์หรือโพเทนทิโอมิเตอร์มีค่าเท่ากับสัญญาณจากการควบคุมSP ระบบจะหยุดไม่มีเอาท์พุทจากดิฟแอมป์ ทำให้ไม่มีค่าความผิดพลาด วงจรขยายกำลังไม่มีสัญญาณไปยังมอเตอร์ มอเตอร์จะไม่เคลื่อนที่

ถ้าต้องการเคลื่อนมอเตอร์ไปทางขวา แรงดันที่ตั้งไว้จะต้องเพิ่มขึ้น จะเกิดค่าความผิดพลาดทางบวกของดิฟแอมป์(Diff Amp) วงจรขยายส่งสัญญาณไปยังมอเตอร์ตามลำดับ มอเตอร์เริ่มหมุนตามเข็มนาฬิกา การขับฟันเฟืองก็ตามเข็มนาฬิการะบบเคลื่อนที่ไปทางขวา สัญญาณขนาดใหญ่ในการป้อนกลับไปยังดิฟแอมป์มีค่าผิดพลาดน้อยมาก แรงดันถูกป้อนไปยังวงจรขยายกำลังและมอเตอร์ และมอเตอร์จะวิ่งช้าๆในที่สุดสัญญาณป้อนกลับจะเหมาะสมกับสัญญาณ SP ค่าความผิดพลาดเริ่มลดลงเป็นศูนย์ ระบบจะเข้าสู่การหยุด(vest)

* การควบคุมความเร็วของการควบคุมแบบเซอร์โวรูปที่ 4 เป็นระบบควบคุมความเร็วแบบง่ายๆจุดประสงค์เพื่อควบคุมแรงดึงให้คงที่บนฟิล์ม(กระดาษ พลาสติก เสื้อผ้า ฯลฯ) การขับมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่ อย่างไรก็ตามจะทำให้แรงดึงเพิ่มขึ้น ขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกรอกเพิ่มขึ้น

พาหะที่ใช้ขับจะยึดติดกับฟิล์มและมีอิสระที่จะเลี้ยวหมุน ขณะที่ฟิล์มผ่านมาข้างล่างมันมันอาจจะเคลื่อนขึ้นในลักษณะผลตอบสนองที่เพิ่มแรงดึงในฟิล์ม หรือลดลงถ้าแรงดึงในฟิล์มช้าลง รูปแบบของรอกที่หมุน และ โพเทนทิโอมิเตอร์ เป็นทรานสดิวเซอร์ แรงดึงเอาท์พุทที่เป็นดีซีโวลท์เตจ เป็นสัดส่วนไปสู่แรงดึงในฟิล์ม



รูปที่ 4 การควบคุมความเร็วของรอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแรงดึงเหมาะสม แรงดันจาก โพเทนทิโอมิเตอร์ ที่หมุนจะพอดีกับแรงดันที่ตั้งไว้ เอาท์พุทของ ดิฟแอมป์ เป็น 0 โวลต์ เป็นผลการแบ่งแรงดันเทียบกราวน์ที่อินพุทของวงจรขยายกำลังแรงดันจากตัวแบ่งแรงดันขับวงจรขยายกำลังทำให้มอเตอร์วิ่งด้วยความเร็วปกติ

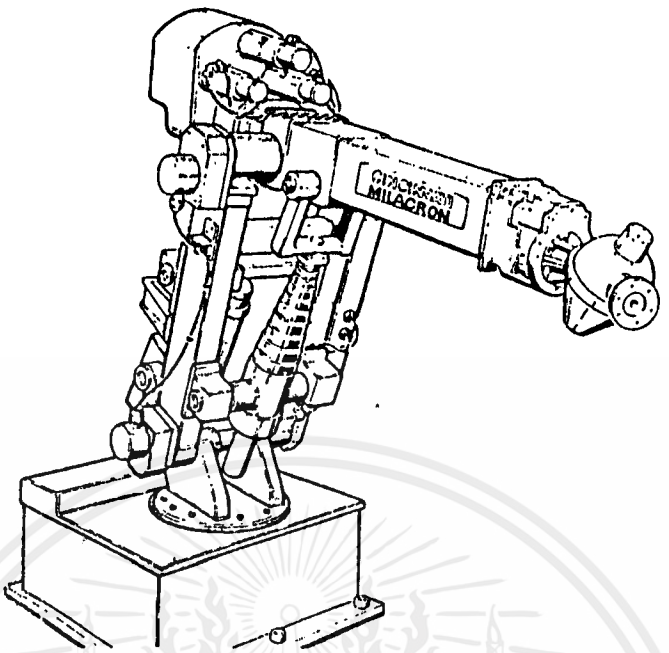
ขณะที่ฟิล์มอยู่บนรอกหมุน แรงดึงจะพยายามเพิ่มขึ้นคือจะหมุนทำให้พาหะที่ใช้ขับเริ่มเคลื่อนที่ หน้าปัดโพเทนทิโอมิเตอร์จะหยุดทำให้อินพุทของดิฟแอมป์(Diff Amp)กลับเฟส มีค่ามากกว่า SP ที่อินพุทไม่กลับเฟส เอาท์พุทของดิฟแอมป์เป็นลบ ทำให้ตัวแบ่งแรงดันที่เทียบกราวน์มีค่าต่ำไปสู่วงจรขยายกำลังวงจรขยายกำลังลดกำลังลง มันจะขับมอเตอร์และมอเตอร์วิ่งช้ามากทำให้เป็นการลดแรงดึงของฟิล์ม

การใช้งานของระบบเซอร์โวคือแขนหุ่นทางอุตสาหกรรม ดังรูปที่ 5 แขนของหุ่นยนต์มีการสร้างเปลี่ยนแปลงอย่างสิ้นเชิง ความเร็ว ความถูกต้อง ความเที่ยงตรง ความคงทน ความคล่องตัวเป็นการลงทุนที่ได้ผลผลิตต่ำ ขณะที่เพิ่มเอาท์พุทและคุณภาพ หุ่นยนต์ทางอุตสาหกรรม มีข้อต่อ 3 ข้อต่อหรือมากกว่านี้ ทุกข้อต่อมี 3 ขั้นตอนในการเคลื่อนที่อิสระคือ หมุน ระยะห่าง และการหักมุม โดยให้การเคลื่อนที่เร็ว ราบเรียบ ร่วมกันเป็นอย่างดีของเครื่องมือที่ใช้ ตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของแต่ละขั้นตอน อิสระต่อกันของแต่ละข้อต่อจะต้องควบคุมในเวลาเดียวกัน

การควบคุมร่วมกันของตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของขั้นตอนที่อิสระต่อกันทั้งหมด จะสำเร็จไปได้ดี โดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์หรือไมโครคอมพิวเตอร์ เซนเซอร์ตำแหน่งใด ๆ เช่น โพเทนทิโอมิเตอร์ ออฟติคเอนโคดเดอร์ ตัวตรวจอุลตราโซนิค ฯลฯ

ตำแหน่งและการส่งผ่านข้อความต่าง ๆ นี้ไปยังวงจรอินเทอร์เฟส มันจะสับเปลี่ยนรูปแบบทางตัวเลขโดยคอมพิวเตอร์ สาระตำแหน่งจะถูกแสดงออกมาโดยรู้เกี่ยวกับตำแหน่งนั้นๆ และตำแหน่งก่อนๆของส่วนนี้ คอมพิวเตอร์สามารถตัดสินใจเกี่ยวกับความเร็วและความเร่ง สมการการควบคุมภายใต้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ใช้ความรู้เหล่านี้เป็นข้อมูลในการหาตำแหน่งที่ต้องการของส่วนต่างๆ และคำนวณเอาท์พุทออกมาซึ่งเป็นจำนวนตัวเลขถูกเปลี่ยนโดยการอินเทอร์เฟสครั้งที่ 2 โดยมีแรงดันหรือพลังไปขับตัวกระทำสำหรับขั้นตอนพิเศษที่อิสระต่อกัน ตัวกระทำอาจจะเป็นสเตปปิ้งมอเตอร์ เอซีมอเตอร์ ไฮโดรลิกมอเตอร์ หรือกระบอกสูบ ที่หุ่นยนต์นี้เป็นตัวอย่างที่ดี สำหรับการควบคุมแบบเซอร์โว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

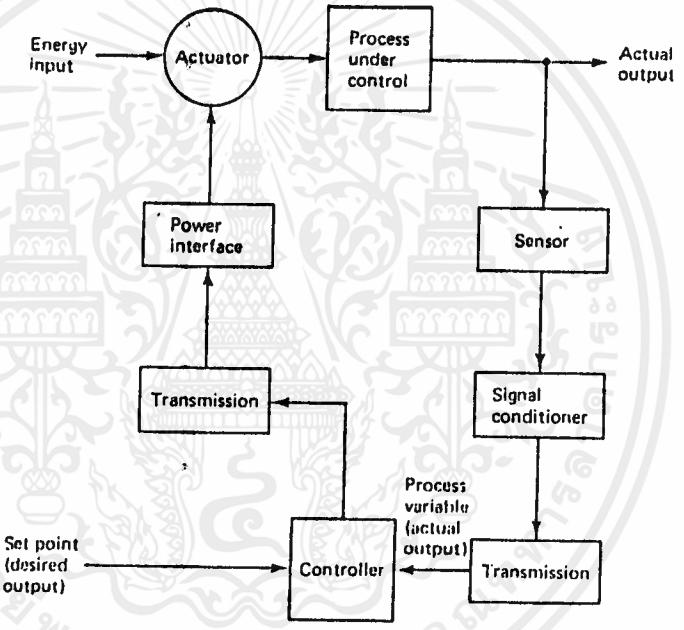


รูปที่ 5 แขนหุ่นยนต์ทางอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2. ตัวควบคุมแบบอนาลอก (Analog Controllers)

ระบบควบคุมแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมในรูปที่6ในส่วนที่เป็นตัวควบคุมจะมี 2 อินพุท คือ ตัวแรกเป็นพารามิเตอร์ที่เราต้องการเรียกว่า ค่าที่ตั้งไว้(Set point,SP)และอีกค่าเป็นสัญญาณอินพุทค่าจริงโดยวัดจากเซนเซอร์ขอบเขตของสัญญาณแล้วส่งผ่านมายังตัวควบคุม เรียกว่าตัวแปรของระบบ (Process Variable,PV) เป็นจุดประสงค์ของตัวควบคุมที่ให้สัญญาณ ซึ่งทำให้ความเปลี่ยนแปลงที่จะแก้ไขไปในทางที่จะทำให้ SP และ PV มีค่าเท่ากัน การเปลี่ยนแปลงใดๆใน SP หรือโหลดทำให้เอาท์พุทของตัวควบคุมเปลี่ยนและแน่นอนว่าPV ต้องเปลี่ยนตาม SP ที่กำหนดไว้



รูปที่ 6 ระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Control system)

การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของลูปขบวนการและตัวควบคุม อย่างไรก็ตามตัวควบคุมที่ดีที่สุดสำหรับขบวนการที่กำหนดให้มาและเกณฑ์การออกแบบจะครอบคลุม ไม่ว่าจะเป็นทฤษฎีการควบคุมจะสามารถสร้างและวิเคราะห์วงจรการใช้เทคนิคทางอนาลอกในสมการตัวควบคุมที่ให้มา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 ตัวขยายที่มีค่าความผิดพลาด (Error Amplifier)

ตัวควบคุมจะมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นตามสมการ

$$E = SP - PV \qquad \ldots(1)$$

ค่าความผิดพลาดเป็นผลต่างระหว่างค่า SP และ PV เมื่อค่าจริงมีค่าเล็กมากๆค่าความผิดพลาดจะเป็นบวก ดังนั้นการเกิดค่าความผิดพลาดเป็นลบ ก็ต่อเมื่อ PV ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของตัวควบคุมมีค่ามากกว่าค่าที่ต้องการพิจารณาวงจรรูปที่ 7(a)มีเอาท์พุทเป็น

$$V_{out} = R_2(V_2 - V_1)/R_1 \qquad \ldots(2)$$

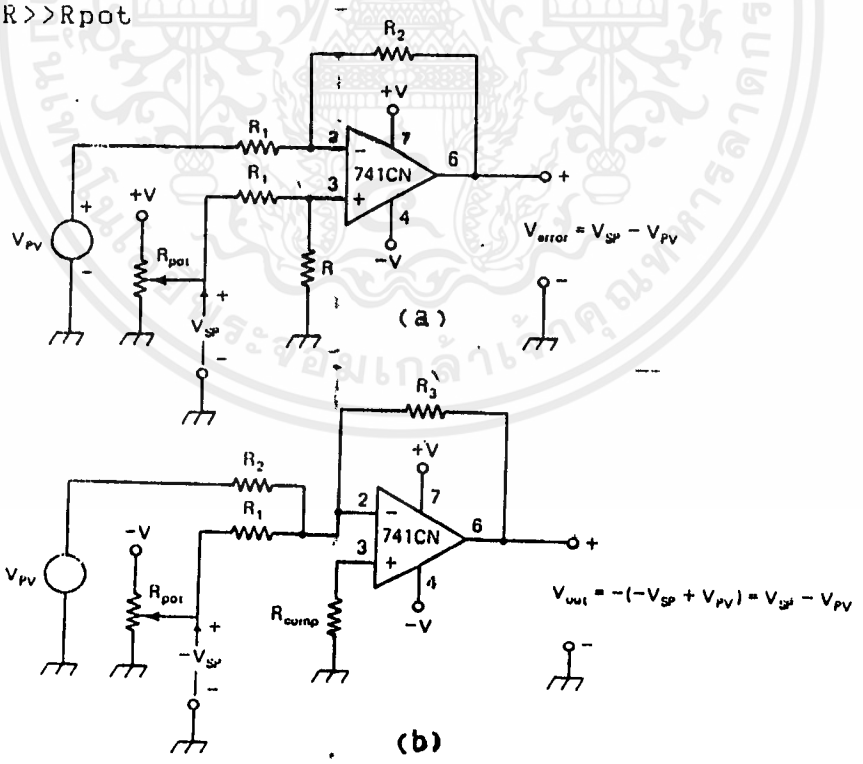
กำหนดให้ $R = R_1 = R_2$

$$V_2 = V_{sp}$$

$$V_1 = V_{pv}$$

$$V_{out} = V_{error} = V_{sp} - V_{pv} \qquad \ldots(3)$$

โดยที่ R>>Rpot



รูปที่ 7 ตัวขยายที่มีค่าความผิดพลาด(Error Amplifier)

(a)ดิฟแอมป์ (b)ตัวรวมแบบกลับเฟส(inverting summer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การโหลดค่าที่ต่ำที่สุดของโพเท็นทิโอมิเตอร์(Potentiometer,POT) และปัญหาที่เกิดขึ้นของกระแสไบอัส รวมทั้งความต้านทานทั้ง 4 ตัว จะต้องระมัดระวังในการป้องกันการไบอัส และการเซตออฟ เหมือนกับว่าไม่คิดโหมดทั่วๆไปที่เพิ่มขึ้น เมื่อ Vsp = Vpv, V_{error} =0

ตัวขยายที่คิดค่าความผิดพลาดตัวที่ 2 เป็นตัวรวมที่กลับเฟสกัน

$$V_{out} = -[(R_3 V_1/R_1)+(R_3 V_2/R_2)] \quad ...(4)$$

ให้ $R = R_1 = R_2 = R_3$

$$V_1 = -V_{sp}$$

$$V_2 = V_{sp}$$

$$V_{out} = V_{error} = V_{sp} - V_{pv} \quad ...(5)$$

ในการนำไปใช้งานต้องใช้ค่าSPที่ต้องการใช้จริงเป็นค่าลบนี้คือเป็นการเปลี่ยนแปลงของตัวขยายที่รวมกันแบบกลับเฟส ซึ่งคล้ายกับตัวขยายที่แตกต่างกัน

$$R >> R_{pot}$$

ตัวต้านทาน R_{comp} เป็นการชดเชยที่เกิดจากกระแสไบอัส มีค่าเท่ากับการรวมค่าความต้านทานแบบขนานไปยังขั้วที่ตรงกันข้ามที่จุดอ้างอิงซึ่งเป็นผลรวมที่กลับเฟสของขาไอซีที่กลับกันโดยแยกแต่ละอินพุทและป้อนกลับ ซึ่งจะยอมให้ปรับความต้านทานแต่ละอินพุทปราศจากผลกระทบจากอินพุทอื่นๆแต่จะไม่เป็นจริงสำหรับดิฟแอมป์(Differance Amplifier)

2.2 ตัวควบคุมแบบเปิด/ปิด(ON/OFF Controller)

เอาท์พุทของตัวควบคุมแบบเปิด/ปิด เป็นการเปิดและปิดอย่างเต็มที่ ทำให้อุปกรณ์ที่นำไปใช้กับกำลังไฟฟ้าที่เต็มที่ในขบานการหรือใช้หมุนกำลังไฟฟ้าที่ปิดอยู่

ตัวอย่างที่ใช้กันคือเทอร์โมสเตส(Thermostat)ที่ใช้ในบ้านให้อุณหภูมิลดต่ำลงสู่ SP แล้วเตาหลอมจะเริ่มทำงาน อุณหภูมิแต่ละครั้งจะเพิ่มขึ้นสูงกว่า SPเทอร์โมสเตสที่เป็นตัวควบคุมนี้จะเคลื่อนที่ไปมาในเตาหลอมและปิดอีกครั้งหนึ่ง

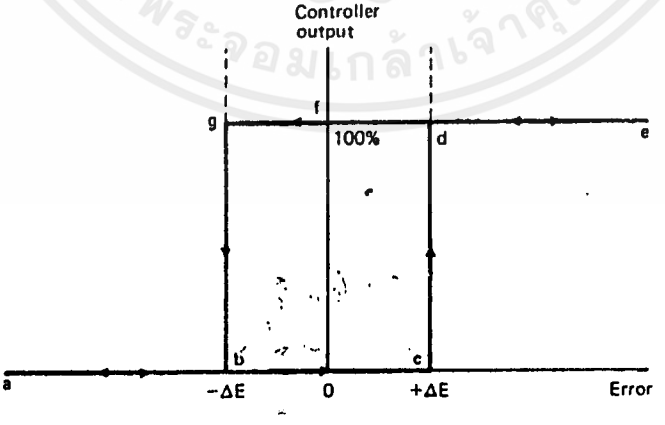
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

032694

ในทางปฏิบัติตัวควบคุมแบบเปิด/ปิด จะเกิดฮิสเทอริซิส(Hyteresis) หรือแถบสูญเสีย(Deadband) ดังรูปที่ 7 เมื่อค่าความผิดพลาดเป็นค่าลบมากๆ PV จะเพิ่มมากกว่า SP ตัวควบคุมจะปิดในบ้านจะร้อนมาก จากรูปที่จุด a,b และ c ค่าความผิดพลาดจะเป็นบวกเท่านั้น จึงจะทำให้ตัวควบคุมที่สวิทช์ได้ 100 % เป็นการกระทำอย่างต่อเนื่องคือค่าที่ใช้จริงต้องต่ำกว่าค่า SP ในทำนองเดียวกันบ้านจะหนาวและเตาหลอม จะเปิดค่าความผิดพลาดจะเป็นศูนย์ที่จุด f ตัวควบคุมไม่ปิดทันที เอาท์พุทของตัวควบคุมจะปิดทันทีหลังจากค่าความผิดผลาดที่ตกลงเป็นลบอย่างแน่นอนที่จุด g และ b

ฮิสเทอริซิสเป็นค่าความผิดพลาดไม่คงสภาพศูนย์ไว้ที่จุดต่ำสุดจะเปลี่ยนแปลงระหว่าง $+\Delta E$ ซึ่งวัฏจักรของตัวควบคุมจากเปิดเต็มที่และปิดอีกครั้ง และเปิดเต็มที่อีกครั้ง และปิดเต็มที่อีกครั้งไปเรื่อยๆ....

ค่าความผิดพลาดที่เหลืออยู่ระหว่าง $+\Delta E$ ถึง $-\Delta E$ จะลดฮิสเทอริซิสลงได้อย่างไรถ้าปราศจากฮิสเทอริซิส PVจะลดลงน้อยมากทำให้ค่าความผิดพลาดเป็นบวก ตัวควบคุมจะเปิดเต็มที่ แต่ขบวนการที่มีความจุพลังงานไว้ต่ำๆ จะเป็นการเพิ่ม PV เพียงเล็กน้อยทำให้ค่าความผิดพลาดเป็นลบตัวควบคุมจะปิดทันทีการลดลงของ PVมีผลต่อวัฏจักรการเกิดอีกครั้งช่นความเร็ว การเปลี่ยนแปลงระยะต่างๆอย่างเต็มที่ของเอาท์พุทตัวควบคุมเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ทางแรงกลไฟฟ้าและองค์ประกอบระบบอื่นๆ ฮิสเทอริซิสจะลดซึ่งฮิสเทอริซิสนี้จำเป็นมากที่ใช้ในการป้องกันวัฏจักร อย่างไรก็ตามต้องมีค่าต่ำสุดที่รักษาระดับค่าความผิดพลาดที่ค้างไว้เพียงเล็กน้อย

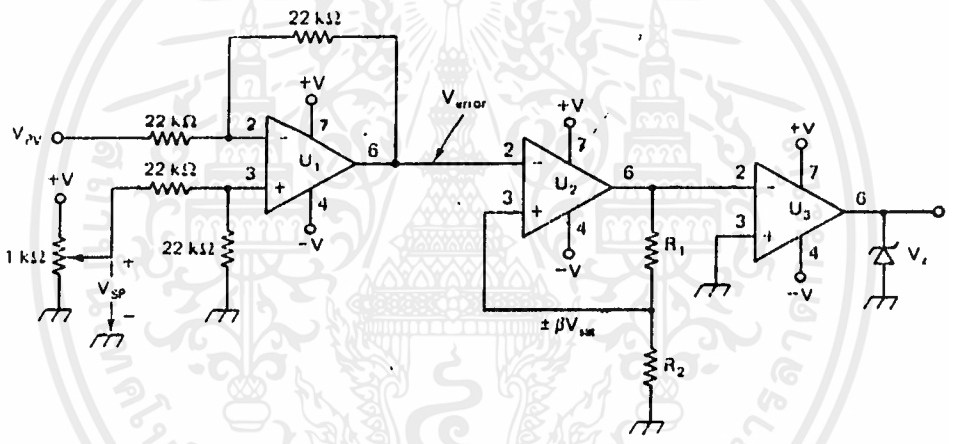


รูปที่ 8 กราฟแสดงฮิสเทอริซิสของการส่งผ่านตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด(ON-OFF controller's transfer curve showing hyterisis)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวควบคุมแบบเปิด/ปิดทางอิเลคทรอนิคส์ดังรูปที่ 9 ออปแอมป์ U_1 มีค่าความผิดพลาดของเอาท์พุทไปขับอินพุทของ U_2 สังเกตที่ U_2 ไม่ใช่ตัวขยายแบบไม่กลับเฟส แต่เป็นตัวเปรียบเทียบด้วยค่าฮิสเทอริซิสเมื่อค่าความผิดพลาดเอาท์พุทของ U_2 จะมีสถานะเป็นบวก R_1, R_2 แบ่งแรงดันโดยปัจจัยของ β มีแรงดันอ้างอิงเป็นบวก

$$\beta = R_2/(R_1+R_2) \qquad \ldots(6)$$



รูปที่ 9 ตัวควบคุมแบบเปิด/ปิด(On/off Controller)

เมื่อแรงดันมีค่าความผิดพลาดเป็นบวมากกว่า βV_{sat} จะสวิทช์ U_2 เป็นลบ แรงดันอ้างอิงที่ขา 3 ของ U_2 สวิทช์ไปยัง $\pm\beta V_{sat}$

ค่าความผิดพลาดจะต้องเป็นค่าลบมากกว่า $\pm\beta V_{sat}$ ก่อนที่ U_2 จะสวิทช์ไปยังเอาท์พุทที่เป็นบวกอีกครั้ง

ดังนั้น U_2 จะทำให้เกิดฮิสเทอริซิสโดยอ้างถึงรูปที่ 8 จะเห็นว่า

$$\pm\Delta E = \pm\beta V_{sat} \qquad \ldots(7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

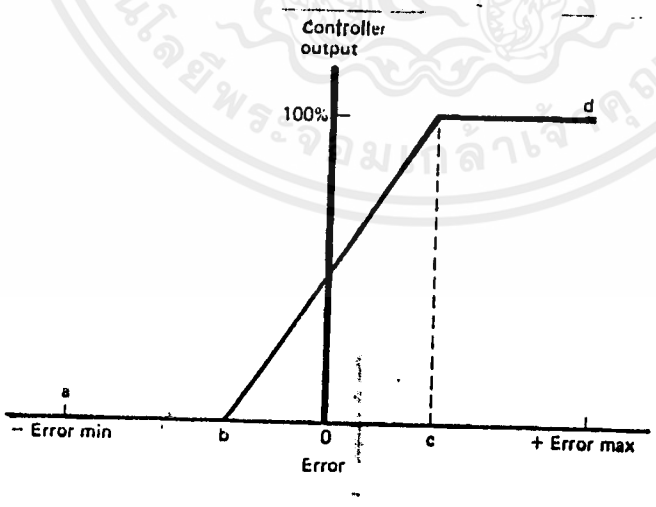
ออปแอมป์ U_3 จะเปลี่ยนระดับจาก U_2 ซีเนอร์ไดโอดที่เอาท์พุทจะกำจัดแรงดันเอาท์พุทตัวควบคุมที่สูงสุดที่แรงดันเอาท์พุทตัวควบคุมเป็นลบ ยอมให้ผ่านไปได้เมื่อ U_3 อยู่ในสภาวะเป็นลบซีเนอร์ไดโอดจะไบอัสไปข้างหน้า(Forward Bias) มีเอาท์พุท -0.6 V

ในรูปที่ 8 และ9 ตัวควบคุมเป็นแบบการกลับเฟสเอาท์พุทที่ได้จะตรงข้ามกับ PV นี้เป็นชนิดที่ระบบควบคุมความร้อนขณะที่อุณหภูมิลดลง เตาหลอมจะทำงาน ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงมากๆ ตัวควบคุมจะปิด(เลิกทำงาน)

ระบบทำความเย็นหรือระบบอื่นๆต้องการระบบควบคุมโดยตรง ทำให้PVและเอาท์พุทของตัวควบคุมเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น เอาท์พุทตัวควบคุมจะเพิ่มขึ้น เครื่องอัดอากาศจะเริ่มหมุน ถ้าอุณหภูมิต่ำทำให้เอาท์พุทตัวควบคุมตกลงเครื่องอัดอากาศเลิกทำงาน

2.3 ตัวควบคุมเป็นสัดส่วน (Proportional Controller,P)

ผลตอบสนองที่เกิดกับตัวควบคุมแบบเปิด/ปิดเหมาะสำหรับระบบที่ช้า แต่ตัวควบคุมแบบสัดส่วน เหมาะสำหรับการควบคุมพื้นที่ในแนวเส้นตรง กราฟการส่งผ่านแบบสัดส่วนแสดงไว้ดังรูปที่ 10

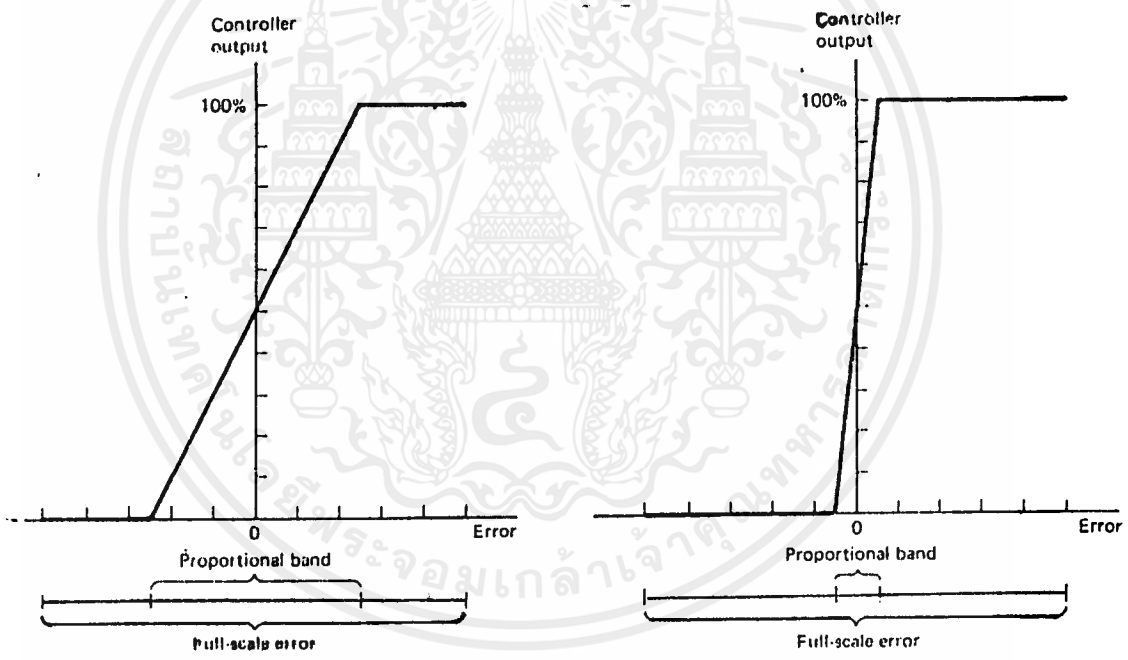


รูปที่ 10 กราฟแสดงการส่งผ่านตัวควบคุมแบบสัดส่วน(Proportional Controller Tranfer curve)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะมีลักษณะคล้ายตัวควบคุมแบบเปิด/ปิด จะปิดเต็มที่(full off) ที่จุด a เมื่อค่าความผิดพลาดมีค่าเป็นลบมากๆและให้เอาท์พุทเป็น 100 % ที่จุด d เมื่อมีค่าความผิดพลาดเป็นบวกมากๆตัวควบคุมแบบนี้มีขอบเขตการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นที่จุด b ถึง c ซึ่งช่วงนี้ค่าความผิดพลาดจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ทำให้เอาท์พุทเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนกับค่าความผิดพลาดซึ่งจะทำให้ได้ระบบการควบคุมที่ดี

การควบคุมแบบสัดส่วน อธิบายโดยแถบสัดส่วน(Proportional Band)คือช่วงการเปลี่ยนของค่าความผิดพลาดคิดเป็น % ของค่าความผิดพลาดเต็มสเกลที่ จะทำให้เอาท์พุทเปลี่ยนจากปิดอย่างเต็มที่(Full Off)ไปเป็นเปิดเต็มที่(Full On) แสดงไว้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ตัวอย่างการส่งผ่านสำหรับ(example tranfer curve for)
(a) แถบสัดส่วน 50% และ (b) แถบสัดส่วน10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรควบคุมแบบสัดส่วนดังรูปที่ 12 ออปแอมป์ U_1 จะสร้างสัญญาณค่าความผิดพลาดจากสัญญาณ V_{sp} และ V_{pv} ออปแอมป์ U_2 ให้แถบสัดส่วนและU_3 เป็นการกลับเฟสเพื่อแก้ไขเอาท์พุทของU_2 ซีเนอร์ไดโอดจะเป็นตัวกำจัดแรงดันทั้งทางบวกและลบ จากวงจรสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_{out} = (R_f V_{error} / R_1) + (R_f V_{os} / R_{os}) \quad ...(8)$$

ถ้า $R_f = R_{os}$ จะได้

$$V_{out} = (R_f V_{error} / R_1) + V_{os} \quad ...(9)$$

ถ้าไม่มีค่าความผิดพลาด

$$V_{error} = 0$$
$$V_{out} = V_{os}$$

นี้คือค่าความผิดพลาดในรูปที่ 10 สามารถปรับ V_{os} ให้ได้ตามเอาท์พุทตัวควบคุมที่ต้องการ สำหรับอินพุทที่ไม่มีค่าความผิดพลาดจะตั้งไว้ที่ครึ่งหนึ่งที่เต็มสเกลของตัวควบคุม

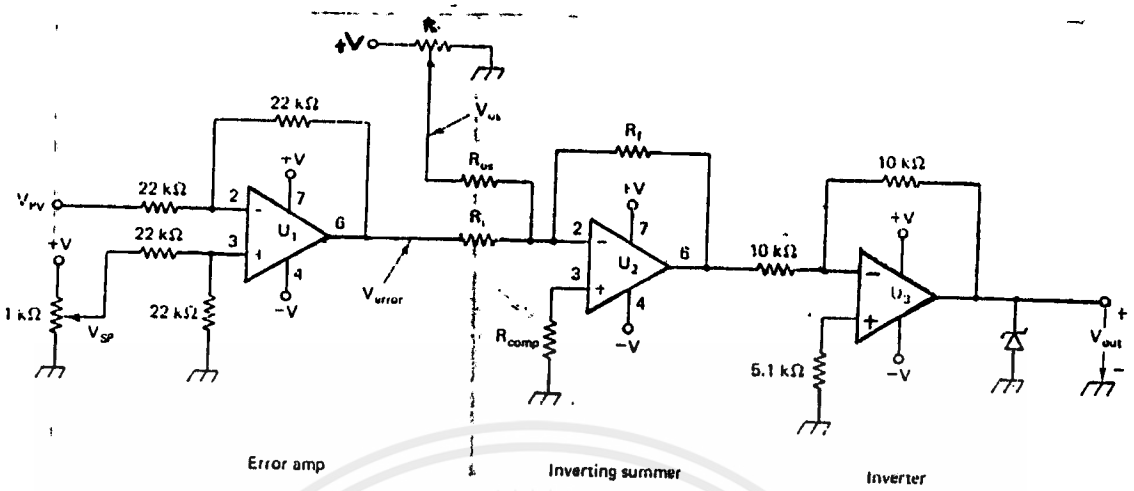
ความชันของกราฟของการส่งผ่าน คือเกน(Gain)ของตัวขยายแบบกลับเฟสที่ขยาย V_{error}

$$m = R_f / R_1 \quad ...(10)$$

ถ้าแกนตั้งมีหน่วยเป็น Volts จะได้

$$m = R_f / R_1 = V_{out}FS / (\%band * V_{error}FS) \quad ...(11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 12 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน

แม้ว่าตัวควบคุมแบบสัดส่วนจะดีกว่าแบบเปิด/ปิด แต่ก็ยังไม่สามารถกำจัดค่าความผิดพลาดได้อย่างสมบูรณ์การที่จะลดค่าความผิดพลาดต้องเพิ่มเอาท์พุทของตัวควบคุมแต่การเพิ่มเอาท์พุทของตัวควบคุมต้องมีค่าความผิดพลาดบางตัวเกิดขึ้นมา ค่าความผิดพลาดที่เหลือสามารถลดลงโดย การเพิ่มเกนของ U_2 นั่นคือการเพิ่มความชันของกราฟการส่งผ่าน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มค่าเกนขึ้นมากเกินไป ระบบจะเกิดการออสซิลเลท จะเห็นว่าตัวควบคุมแบบสัดส่วน สามารถหาค่าความผิดพลาดได้โดยการเพิ่มเกน แต่ต้องระวังเรื่องการออสซิลเลท

ในสมการที่ 8 เขียนให้อยู่ในรูป Laplace Tranforms ได้เป็น

$$V_{out} = k_p V_{error} \qquad ...(12)$$

เมื่อ V_{out} = เอาท์พุทของตัวควบคุม

k_p = เกนของตัวควบคุมแบบสัดส่วน

V_{error} = ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

ฟังก์ชันการส่งผ่าน ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน คือ

$$\text{Transfer Funtion} = V_{out} / V_{error} = k_p \qquad ...(13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 12 ถูกอินเวอร์สโดย U_1 จะกลับเฟสกับเอาท์พุทของ U_2 และอินเวอร์สกลับอีกโดย U_3 เขียนกราฟเอาท์พุทเทียบกับค่าความผิดพลาดจะได้ความชันเป็นบวกดังรูปที่ 10 และ 11 และถ้าตัด U_3 ออกจะได้ความชันเป็นลบ

2.4.ตัวควบคุมแบบอินทิเกรทและแบบสัดส่วน-อินทิเกรท (Integral and Proportional-Integral Controller) หรือแบบ I และแบบ PI

การที่จะกำจัดค่าความผิดพลาดที่เหลือได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะต้องเปลี่ยนไปเป็นเอาท์พุทของตัวควบคุมแบบ สัดส่วน เป็นสัดส่วนกับค่าความผิดพลาดของระบบส่วนตัวควบคุมแบบ อินทิเกรท มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเอาท์พุทต่อเวลาเป็นสัดส่วนกับค่าความผิดพลาด ขณะที่มีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น ทำให้เอาท์พุทมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องเมื่อค่าความผิดพลาดเข้าใกล้ศูนย์ เอาท์พุทจะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากถือได้ว่าเอาท์พุทมีความจำเป็นที่จะไม่ให้เกิดค่าความผิดพลาด

ในทางปฏิบัติส่วนใหญ่เฉพาะตัวควบคุมแบบ อินทิเกรท อย่างเดียวเอาท์พุทมีการเปลี่ยนแปลงช้ามาก จึงจำเป็นต้องใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบ สัดส่วน กลายเป็นตัวควบคุมแบบ PI นี้จะทำให้เอาท์พุทมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และเป็นสัดส่วนกับขนาดของค่าความผิดพลาด แต่เอาท์พุทจะมีการปรับตัวเองอย่างต่อเนื่อง พยายามที่จะปรับเข้าหาสภาวะคงที่(steady state)คือค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์

2.4.1 ตัวควบคุมแบบอินทิเกรท(Integral Controller)หรือแบบ I

อัตราการเปลี่ยนแปลงของเอาท์พุทเป็นสัดส่วนกับค่าความผิดพลาดสมการเป็นดังนี้

$$dv_{out}/dt = K_i v_{error} \qquad \ldots(14)$$

เมื่อ v_{out} = เอาท์พุทของตัวควบคุม

K_i = ค่าคงที่ของการอินทิเกรท

v_{error} = ค่าความผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อค่าความผิดพลาดมากๆ ค่าเอาท์พุทจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วสอดคล้องกับค่าความผิดพลาด เมื่อค่าความผิดพลาดน้อยลงเอาท์พุทขณะเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ขณะที่มีค่าความผิดพลาดเอาท์พุทจะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อใดที่ค่าความผิดพลาดเข้าใกล้ศูนย์การเปลี่ยนแปลงของเอาท์พุทก็เข้าใกล้ศูนย์ด้วยนี้ หมายว่าค่าเอาท์พุทเป็นตัวกำจัดค่าความผิดพลาด

ในรูปที่ 13 ค่าความผิดพลาดมีค่าระหว่าง a และ b ทำให้เอาท์พุทเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วลดค่าความผิดพลาดลงระหว่าง b และ d ทำให้เอาท์พุทเพิ่มขึ้นช้าลงแต่เพิ่มอย่างต่อเนื่อง เมื่อค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์ที่จุด d เอาท์พุทของตัวควบคุมไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่ถือว่าเอาท์พุททำให้ค่าความผิดพลาดตกลงเป็นศูนย์ ค่าความผิดพลาดเป็นลบอยู่ระหว่างเวลา e และ f ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงเอาท์พุทมีค่าเป็นลบนั่นคือเอาท์พุทตกลง

ในการคำนวณเอาท์พุทของตัวควบคุมภายใต้ฟังก์ชันของค่าความผิดพลาด ต้องเปลี่ยนเป็นสมการดังนี้

$$dv_{out}/dt = K_i v_{error} \qquad ...(15)$$

$$dv_{out} = K_i v_{error} dt$$

$$\int dv_{out} = \int K_i v_{error} dt$$

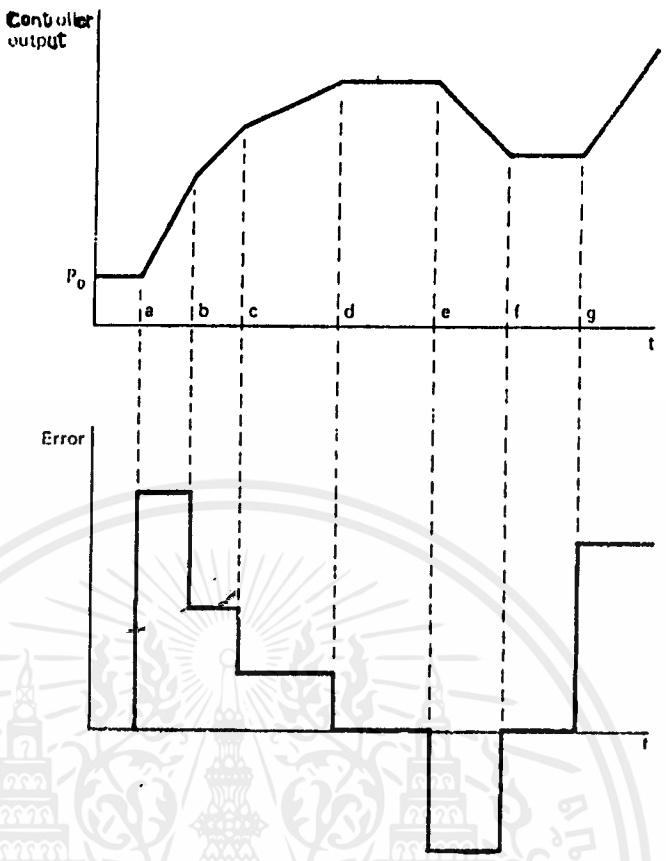
$$v_{out} = \int K_i v_{error} dt + V_o \qquad ...(16)$$

เมื่อค่า V_o คือค่าเริ่มต้นของตัวควบคุมแปลงเป็นสมการLaplace Transformsคือ

$$v_{out} = \frac{K_i V_{error}}{S}$$

และ ฟังก์ชันการส่งผ่าน คือ $\frac{V_{out}}{V_{error}} = \frac{K_i}{S}$

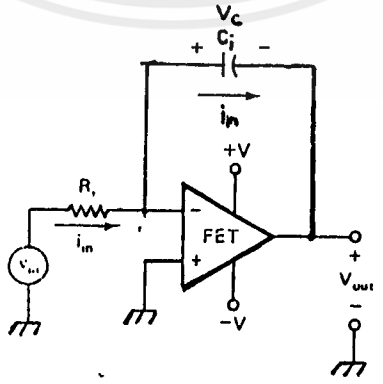
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์เอาท์พุท กับอินพุทของตัวควบคุมแบบอินทิเกรท

รูปที่ 14 เป็นวงจรของออปแอม อินทิเกรทเทอร์ (Op Amp Integrator) แรงดันอินพุทจะขับกระแสอินพุทผ่าน R_i เนื่องจากการป้อนกลับเป็นลบโดยใช้ตัวเก็บประจุ

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R_i}$$



รูปที่ 14ออปแอมป์อินทิเกรเทอร์ 5 โวลต์((op Amp) Integrator (5v))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไม่ไหลเข้า ออปแอมป์ ดังนั้นกระแสทั้งหมดไหลเข้าตัวเก็บประจุ ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสคือ

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{-i}{C_1}$$

หรือ $$dv_c = \frac{-i}{C_1} dt$$

$$v_c = \frac{-i}{C_1} \int i dt + V_o \qquad \ldots(17)$$

เมื่อ V_o คือค่าเริ่มต้นที่ตัวเก็บประจุถูกชาร์จไว้แล้ว

แทนสมการ (16)ใน (17) จะได้

$$v_c = \frac{-i}{C_1 \quad Ri} \int v_{in} dt + V_o \qquad \ldots(18)$$

$$= \frac{1}{C_1 R_1} \int v_{in} dt + V_o$$

เมื่อเทียบสมการ (18) กับสมการที่ (16)

$$K_1 = \frac{-1}{R_1 C_1}$$

เมื่อ K_1 คือ ค่าคงที่ในการอินทิเกรท (หน่วยต่อวินาที)

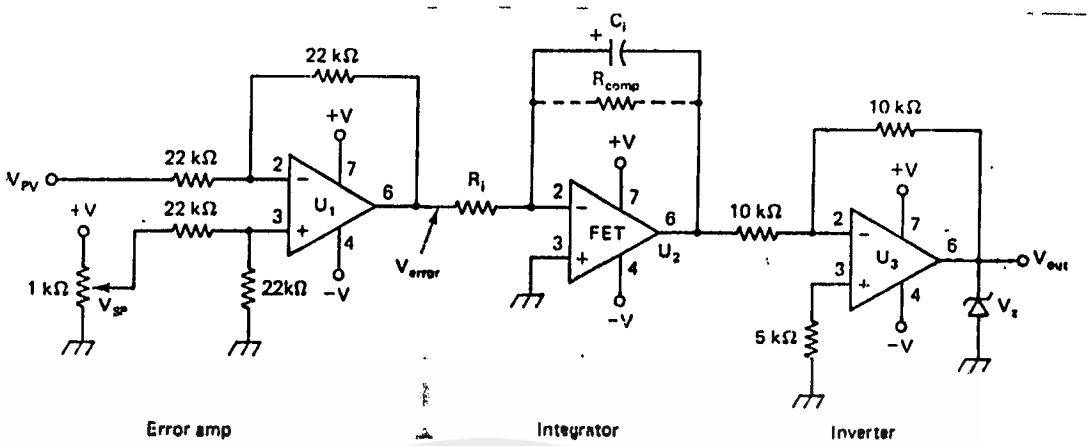
$R_1 \Sigma_1$ คือ เวลาการอินทิเกรท (หน่วย วินาที)

วงจรที่สมบูรณ์ของตัวควบคุมแบบ I ดังแสดงไว้ในรูปที่ 15 ออปแอมป์ V1 สร้างสัญญาณค่าความผิดพลาดเป็นบวกจะได้เอาท์พุทเป็นลบ สังเกตจากสมการที่(18)เครื่องหมายสัญญาณเป็นลบ การควบคุมแบบลบนี้จะถูกอินเวอร์สและถูกจำกัดโดย U_3 และซีเนอร์ไอโอด ตามลำดับ

R_{comp} เป็นตัวไบอัสกระแสให้กับ C_1 ถ้าไม่มี R_{comp} มาไบอัสกระแสตามจุดประสงค์ทั่ว ๆ ไปออปแอมป์จะมีค่ามากเพียงพอที่จะชาร์ต C_1 แรงดันจะไม่มีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น ทำให้เอาท์พุท U_2 เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งอิ่มตัว โดยเลือก

$$R_{comp} > 10R_1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 15 ตัวควบคุมแบบอินทิเกรท (Integral Controller)

ถ้าเอาท์พุทของ U_2 เพิ่มขึ้นด้วย $V_{error} = 0$

ค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์ หมายความว่ามีแรงดันเป็นศูนย์โวลท์ แต่ละข้างของ R_i ดังนั้นไม่มีกระแสไหลผ่านมัน ในทางอุดมคติ C_i จะคายประจุ ด้วยแรงดันของตัวมันเอง อย่างไรก็ตามเมื่อเรารวม R_{comp} เพื่อรักษากระแสไบอัสจากการประจุ C_i ตัวเก็บประจุคายประจุอย่างช้า ๆ ผ่าน R_{comp} ถ้าไม่มี R_{comp} หรือมี R_{comp} มีค่าสูงมากๆจะยอมให้กระแสไบอัสผ่านไปยังประจุ C_i ถ้า R_{comp} มีค่าน้อยมากๆ ย่อมให้ C_i ไปยังการคายประจุมากกว่าที่จะรักษาระดับแรงดันของมัน การเลือก U_2 ที่เป็นออปแอมป์ด้วยกระแสไปอัสต่ำ ๆ ใช้โดย FET หรือ CMOS ที่มีค่ากระแสไบอัสเป็น pA หรือน้อยกว่านี้ การใช้ FET หรือCMOS แทน U_2 นี้จะไปทำให้ V_{out} เปลี่ยนแปลงเพราะกระแสไบอัสถึงแม้ว่าจะไม่มี Rcomp ก็ตาม

สรุปได้ว่าตัวควบคุมแบบอินทิเกรท เอาท์พุทจะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งค่าความผิดพลาดเข้าใกล้ศูนย์ รูปแบบการอินทิเกรตโดยใช้ออปแอมป์และป้อนกลับด้วยตัวเก็บประจุที่เป็นลบ ก็ควบคุมกระแสไบอัสได้อย่างปลอดภัย หรือชดเชยได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ตัวควบคุมแบบ PI (Proprotional-Integrate Controller)/

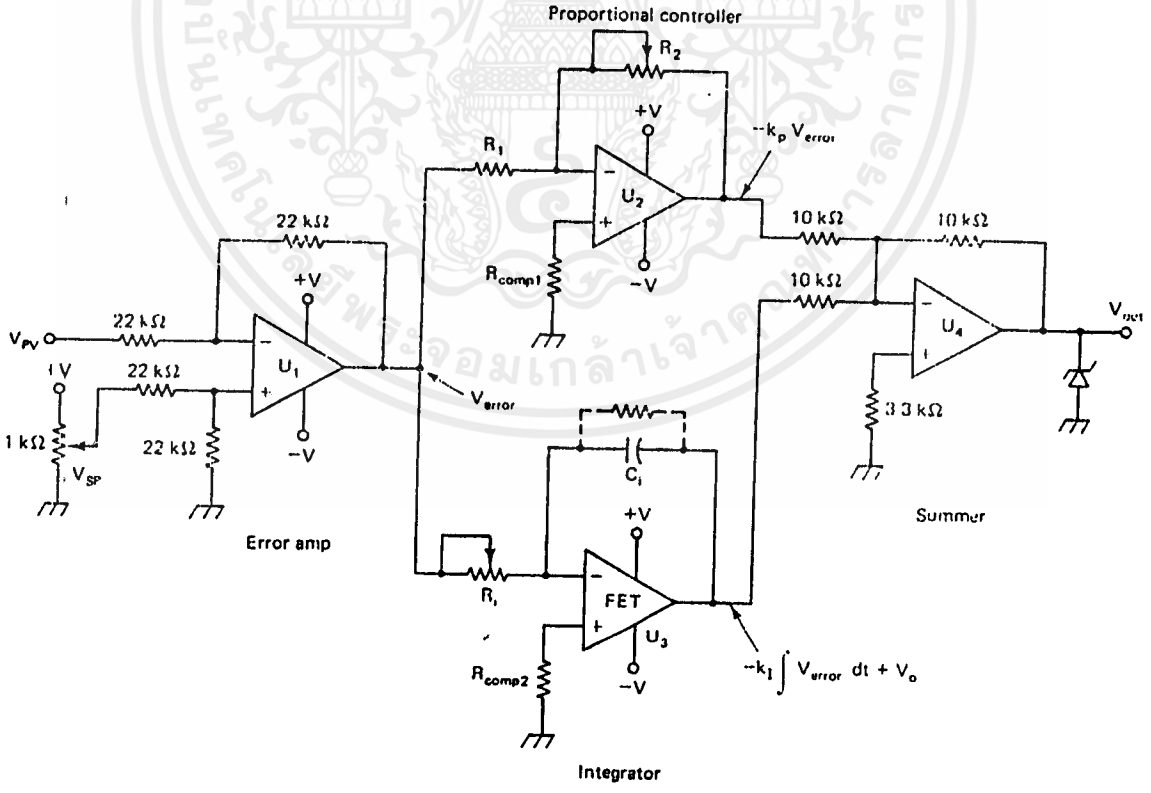
ตัวควบคุมแบบ I เพียงอย่างเดียวยากที่จะตอบสนองต่อทรานเซียนได้ ค่าความผิดพลาดจะเป็นอินพุทเป็นขั้นๆ (step i/p) เข้าไปยังตัวควบคุมแบบ I มันจะตอบสนองโดยเอาท์พุทที่มีการเปลี่ยนแปลงไปสำหรับการตอบสนองของตัวควบคุมแบบสัดส่วน จะตอบสนองเมื่อค่าความผิดพลาด เป็นอินพุทเข้าไปเป็นstep เอาท์พุทที่ได้ก็จะเป็นสัดส่วนกับอินพุทนั้น อย่างไรก็ตามเอาท์พุทของตัวควบคุมแบบ I จะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ไม่มีค่าความผิดพลาด ซึ่งตัวควบคุมแบบสัดส่วนไม่สามารถกำจัดได้หมดตัวควบคุมแบบ PI เป็นการพยายามนำเอาข้อดีของทั้งสองแบบมาใช้คือตอบสนองต่อช่วงขณะใดขณะหนึ่ง(transient)ได้ดี คือแบบสัดส่วนและกำจัดค่าความผิดพลาดจากแบบอินทิเกรท

ตัวควบคุมPIแบบขนานดังรูปที่16ออปแอมป์ U_1 เป็นตัวสร้างสัญญาณค่าความผิดพลาด

$$V_{error} = V_{sp} - V_{pv}$$

เป็นสัญญาณค่าความผิดพลาด ให้กับตัวควบคุมทั้งสองเกน(gain)ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน U_2 ซึ่งค่าความผิดพลาด ได้รับมาจากเกน (gain)

$$Kp = \frac{R_2}{R_1}$$



รูปที่ 16 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อินทิเกรทขนาน(parallel PI controller)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v = -K_1 \int V_{error} dt + V_o$$

เมื่อ $K_1 = 1/R_1C_1$

สัญญาณทั้งสองรวมกันโดย U_4 เป็นการรวมแบบกลับเฟส(Inverting Summer)ให้เอาท์พุทสุดท้ายคือ

$$V_{out} = K_p V_{error} + K_1 \int V_{error} dt + V_o$$

เขียนอยู่ในรูปสมการ Laplace Transform คือ

$$V_{out} = K_p V_{error} + K_1 V_{error} \qquad ...(19)$$

Tranfer Funtionของวงจรรูปที่ 16

$$V_{out}/V_{error} = K_p + K_1/s$$

$$V_{out}/V_{error} = [K_p s + K_1]/s$$

$$V_{out}/V_{error} = [s+(K_1/K_p)]/(1/K_p)s \qquad ...(20)$$

ตัวควบคุมPIแบบอนุกรมแสดงในรูป17 ออปแอมป์ U_1สร้างสัญญาณค่าความผิดพลาด

$$V_{error} = V_{sp} - V_{pv}$$

สัญญาณค่าความผิดพลาดเป็นอินพุทของตัวควบคุมแบบ P :U_2 มีเกนคือ

$$K_p = R_2/R_1$$

สังเกตว่าทั้งสองตัวจะกลับกันตัวควบคุมแบบสัดส่วนนี้จะไม่ออฟเซท ไม่เหมือนรูปที่ 11 อินพุทของตัวควบคุมแบบI:$U_3(v_{in})$เป็นเอาท์พุทของตัวควบคุมแบบสัดส่วนคือ$-K_p V_{error}$

$$v = -(1/R_1C_1)\int V_{in} dt + V_o \qquad ...(21)$$

หรือ $$v = K_1 \int v_{in} dt + V_o$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทน $v_{in} = -K_p V_{error}$ ลงในสมการที่ 21

$$v = -K_i \int(-K_p v_{error})dt + V_o$$

$$v = K_p K_i \int(v_{error})dt + V_o$$

ตัวรวม U_4 เป็นวงจรขยายที่แตกต่างกัน(Difference Amplifier)

$$v_{out} = (10K/10K)[(K_p K_i \int(v_{error})dt + V_o) - (-K_p v_{error})]$$

$$v_{out} = K_p v_{error} + K_p K_i \int(v_{error})dt + V_o \quad ...(22)$$

แปลงเป็น Laplace Transformคือ

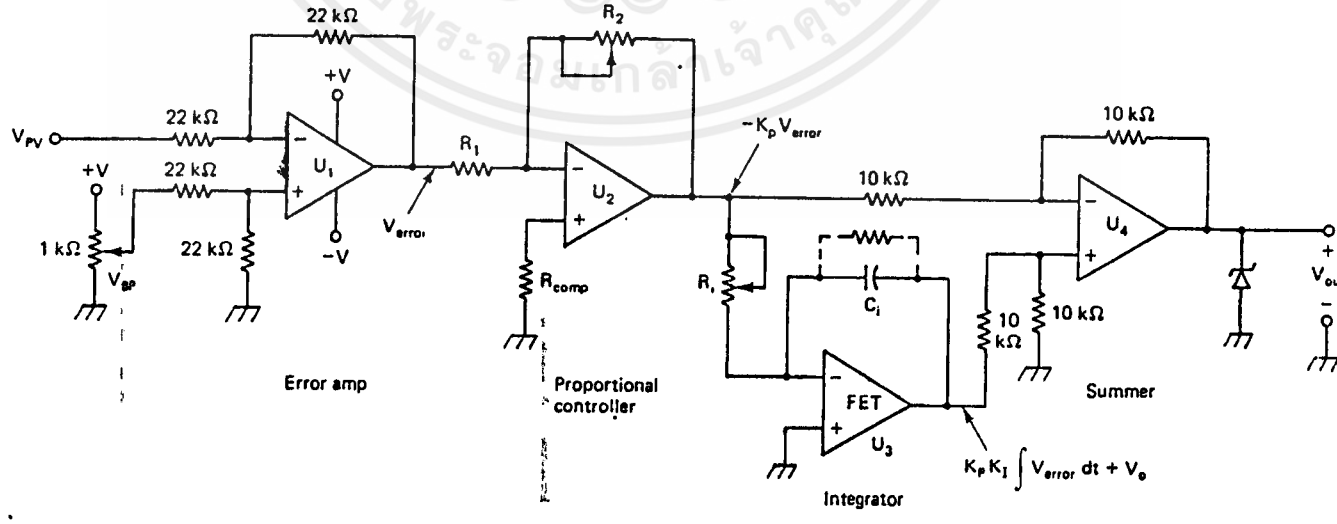
$$V_{out} = K_p V_{error} + (K_p K_i/s)V_{error} \quad ...(23)$$

สำหรับ Transfer Function $= V_{out}/V_{error} = K_p(s+K_i)/s = (K_p T_i s+1)/T_i s$

ที่ $T_i = 1/K_i = R_i C_i$

$$K_p = R_2/R_1$$

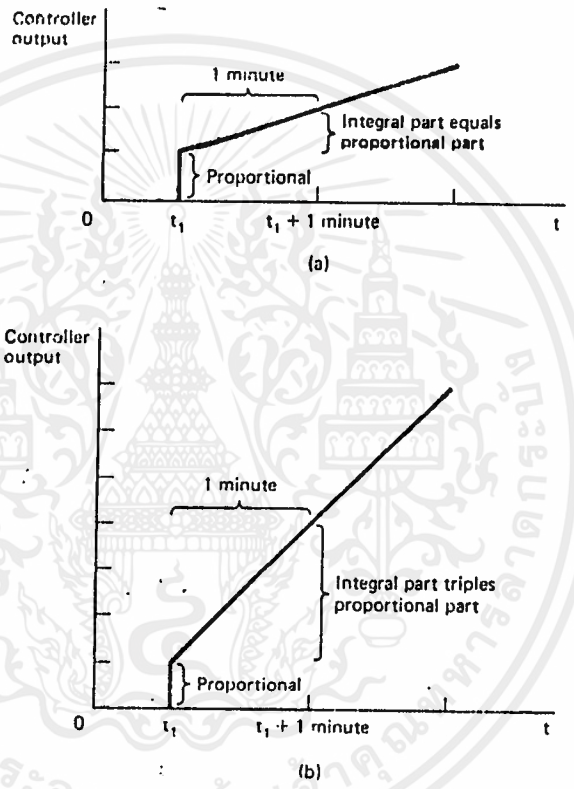
ค่าคงที่ในการอินทิเกรท K_i กำหนดให้ในเทอมต่อนาที แต่ในส่วนของตัวควบคุมแบบอินทิเกรท ที่ผ่านมาคืออยู่ในหน่วยของต่อวินาที การเปลี่ยนหน่วยวินาทีให้เป็นนาทีทำได้โดยคูณ 60 s/min



รูปที่ 17 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อินทิเกรทอนุกรม(Series PI Controller)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของ K_1 ดังตัวอย่างในรูปที่ 18ที่เวลา t_1 มีสเตปหนึ่งในค่าความผิดพลาดซึ่งทำให้ส่วนที่เป็นสัดส่วนของตัวควบคุมมีการสเตปขึ้นการรวมค่าความผิดพลาดคงที่ที่เหลืออยู่ในส่วนอินทิกรัลของตัวควบคุมจะทำให้เอาท์พุทเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งไว้ที่ K_1 ด้วยค่าคงที่การอินทิเกรทของ 1 reset/วินาทีใน 1 วินาทีของการเพิ่มขึ้นจะส่งเอาท์พุทในส่วนที่เป็นสัดส่วนจะแสดงไว้ในรูป18aและรูป18b ส่วนอินทิกรัลของตัวควบคุมจะทำให้ การเพิ่มขึ้นซึ่งเป็น 3 เท่าของเอาท์พุทโดยตัวควบคุมแบบสัดส่วนนี้เป็นเหตุให้การอินทิเกรท 3 resets/วินาที



รูปที่ 18ค่าคงที่อินทิกรัลสำหรับ(Integral constant for)
(a) 1 และ (b) 3 resets per minute

การหาการตอบสนองต่ออินพุท (V_{out}) ของวงจรรูปที่ 17ถ้าสมมติให้

V_{in} = 5 v

R_1 = 3.3 kโอห์ม

R_2 = 10 kโอห์ม

C_1 = 100 µF

V_o = 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีทำ จาก $V_{error} = V_{sp} - V_{pv}$

แรงดันที่ผิดพลาดเป็นตัวแปรที่ควบคุมแล้วลบด้วย 5Vแรงดันที่ผิดพลาดV_{pv}แต่เลื่อนลง 5V

U_2 : ตัวควบคุมแบบสัดส่วน คือตัวขยายกลับเฟสกัน(inverting amplifier) มีกน (gain) คือ

$$K_p = R_2 = 10 \text{ kโอห์ม} = 3$$
$$R_1 = 3.3 \text{ kโอห์ม}$$

เอาท์พุทของ U_2 จะขยายและอินเวอร์ส ของแรงดันที่ผิดพลาด

U_3 : ถ้ากำหนดค่าอินพุทให้ จะได้กราฟของเอาท์พุทของตัวควบคุมแบบอินทิเกรทมีอัตราความลาดเอียงเป็น

$$\text{rate} = \frac{V}{RC}$$
$$V = K_p V_{error}$$
$$R = 10 \text{ kโอห์ม}$$
$$C = 100 \ \mu F$$

$$\text{rate} = \frac{3 V_{error}}{10\text{kโอห์ม} \times 100 \ \mu F}$$

ที่เวลา!

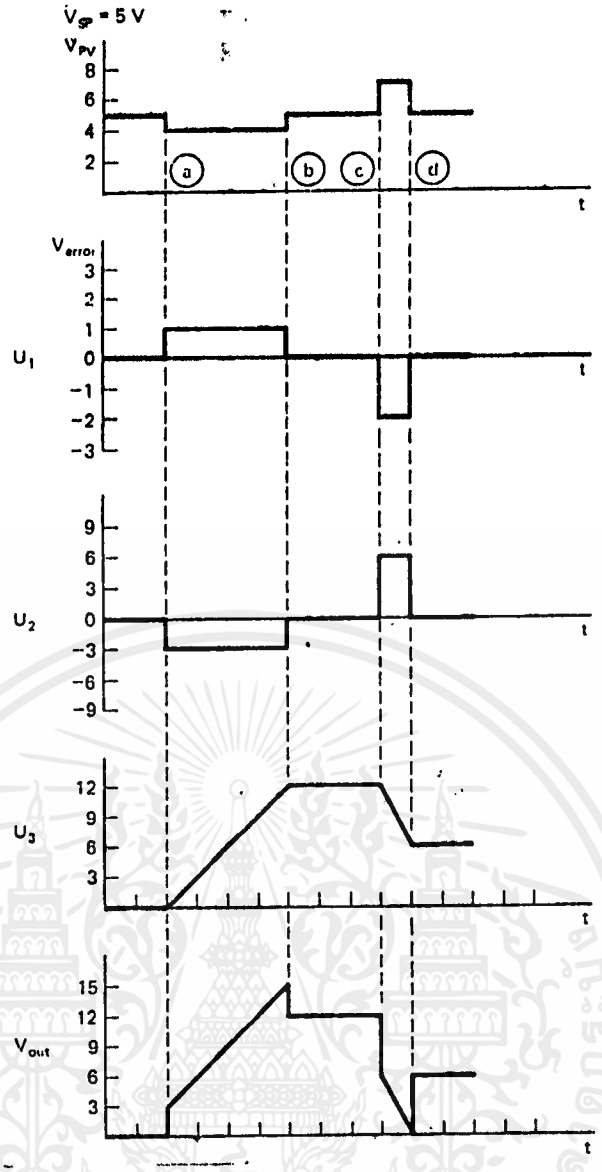
a-b : V_{error} = 1 v curve ของเอาท์พุทของ U_3 จะมีอัตราความลาดอียงขึ้น 3 v/s

b-c : V_{error} = 0 v เอาท์พุทของ U_3 จะคงที่

c-d : V_{error} = -2 v curve ของเอาท์พุทของ U_3 จะลาดลดลง

แสดงได้ดังรูปที่ 19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 19 แสดงการตอบสนองต่อ ค่าความผิดพลาด ของวงจรรูปที่ 17

อย่างไรก็ตามวงจรในรูปที่ 17 ยอมให้ปรับ V_{sp}, K_p (R_2), K_i (R_1) อย่างอิสระ ส่วนประกอบทุกอย่างในตัวควบคุมด้วยออปแอมป์อาจจะมีผลต่อพารามิเตอร์หลายตัวการปรับให้เหมาะสมนั้นทำได้ยาก

ในส่วนอินทิกรัลของตัวควบคุมแบบนี้ จะพิจารณาการปรับปรุงออปเซตของตัวควบคุมแบบสัดส่วนจะให้เอาท์พุทคงที่สำหรับค่าความผิดพลาดที่คงที่และปรับออฟเซต เพื่อกำจัดค่าความผิดพลาดได้

เมื่อรวมอินทิกรัลเข้ากับความโน้มเอียงของตัวควบคุมแบบสัดส่วน ส่งผลให้เกิดออสซิเลทเพิ่มขึ้นต้องลด K_p ในระบบ อย่างไรก็ตามการลดความสามารถของตัวควบคุมลงผลตอบสนองเกิดอย่างรวดเร็ว เมื่อใช้กับระบบที่มีความหน่วงเวลาที่ยาวนานการเพิ่มขึ้นของอินทิกรัล ทำให้ตัวควบคุมผิดไปก่อนที่ความหน่วงของขบวนการจะตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.ตัวควบคุมแบบ D และPID

[Perivative and Three-mode (PID)Controller]

ตัวควบคุมแบบ PI จะเข้าสู่สภาวะคงที่ได้ทั้งหมด ระบบใหญ่ๆในส่วนตัวควบคุมแบบสัดส่วนจะให้ความเร็วที่พอในการตอบสนองต่อค่าความผิดพลาดที่เข้ามาสู่ระบบ อย่างไรก็ตามระบบที่มีความเฉื่อยมากจำเป็นต้องมีการเพิ่มกำลังในการตอบสนองต่อค่าความผิดพลาดโดยใช้ตัวควบคุมแบบดิริเวทิฟแล้วรวมเข้ากับตัวควบคุมแบบPIเรียกว่า ตัวควบคุมแบบ PID

2.5.1 ตัวควบคุมแบบ D(Derivative Controller)

เอาท์พุทของตัวควบคุมแบบดิริเวทิฟ เป็นสัดส่วนกับอัตราความเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดดังนี้

$$V_{error} = K_D dv_{error}/dt$$

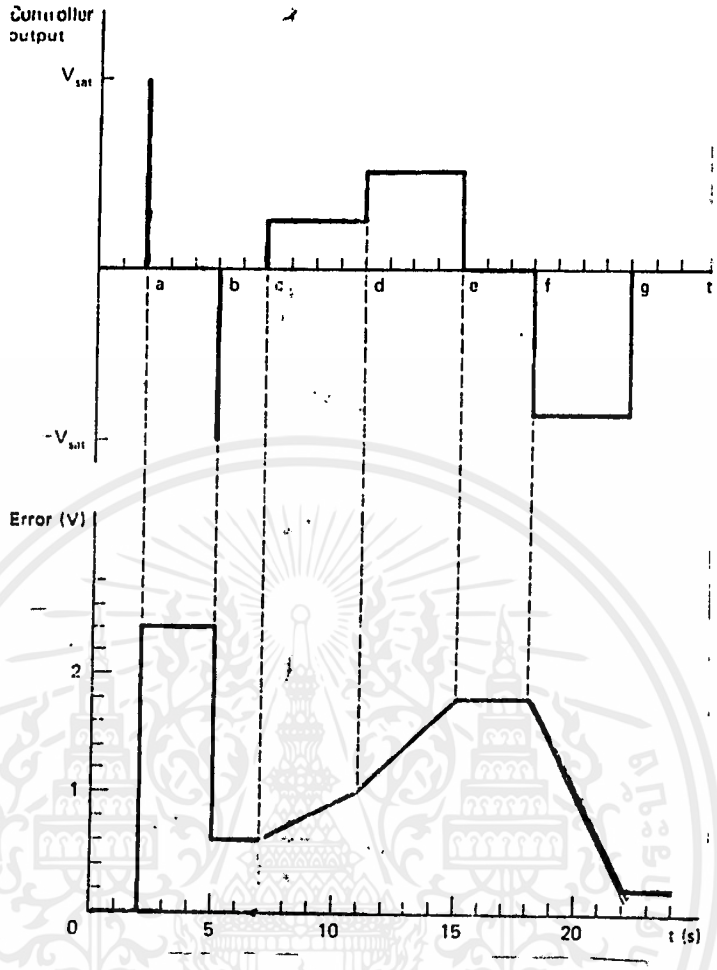
แปลงเป็นสมการ Laplace Transform คือ

$$V_{out} = K_D sV_{error}$$

สำหรับ Transfer Function $= V_{out}/V_{error} = K_D s$ ...(24)

รูปที่ 20 แสดงการตอบสนองของค่าความผิดพลาดตัวควบคุมแบบดิริเวทิฟ ที่จุด a ความชันเป็นอนันต์ทำให้เอาท์พุทของตัวควบคุมถึงจุดอิ่มตัวและระหว่างเวลา a และ b b และ c, e และ fค่าความผิดพลาดมีค่าคงที่ ความชันของค่าความผิดพลาดมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นเอาท์พุทของตัวควบคุมในช่วงเวลานี้จึงเป็นศูนย์ด้วยการเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ของค่าความผิดพลาดหรือมีความชันคงที่ จะให้ค่าเอาท์พุทคงที่(เวลา cถึง d)การเพิ่มความชันของค่าความผิดพลาดขึ้นกับขนาดของเอาท์พุทเพิ่มขึ้นด้วย (เวลา d ถึง e)การลดลงของค่าความผิดพลาดมีค่าความชันเป็นลบ (เวลาที่ f ถึง g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 20 แสดงอินพุทและเอาท์พุทของตัวควบคุมแบบ ดิริเวทิฟ

รูปที่ 21 เป็นวงจรพื้นฐานของออปแอมป์แบบแตกต่างกัน สังเกตว่าเป็นอินทิกรัลซึ่งความต้านทานและตัวเก็บประจุจะเปลี่ยนตำแหน่งเช่นใน Inverting Amplifier ใช้R_i แทน C_D มีค่าเกนคือ

$$V_{out}/V_{in} = R_f/Z_c$$

ในรูปของ Laplace Domian

$$Z_c = 1/sC$$

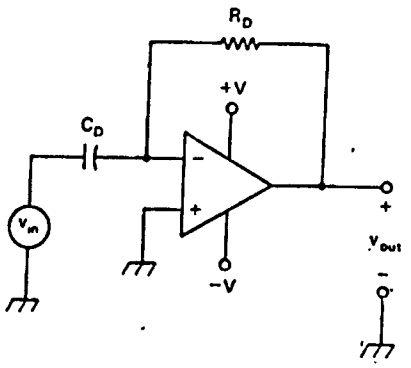
$$V_{out}/V_{in} = -R_D/(1/sC_D)$$

$$= -R_DC_Ds$$

เทียบกับสมการ (24) จะได้

$$K_D = R_DC_D = \text{ค่าคงที่ที่แตกต่างกัน} \qquad \ldots(25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 21 ออปแอมป์พื้นฐาน(Basic op Am Diff)

มีข้อควรระวังอยู่สองข้อสำหรับการควบคุมแบบดิริเวทิฟ

ข้อแรก สำหรับอินพุทที่เป็นรูปไซน์

$$V_{out} = (Z_{RD}/Z_{CD})V_{in}$$
$$= R_D V_{in}/(1/2\pi fC_D)$$
$$= 2\pi fC_D R_D V_{in}$$

สำหรับสัญญาณความถี่ต่ำจะได้เอาท์พุทเล็กมาก อย่างไรก็ตามเอาท์พุทขึ้นกับความถี่ เสียงรบกวน(noise) ความถี่สูงจะถูกขยายให้ใหญ่ขึ้น ที่ความถี่สูงเอาท์พุทที่ใหญ่อาจจะถูกป้อนกลับผ่านตัวเก็บประจุที่อยู่ในวงจรไปเสริมกับอินพุท เสียงรบกวน (noise)ความถี่อาจทำให้เกิดการออสซิลเลทรบกวนวงจรได้ เราแก้ได้โดยการต่อ R_1 อนุกรมเข้าไปดังรูปที่ 22 R_1 และ C_D จะเป็นส่วนของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low pass filter) ที่อินพุท

การแก้ปัญหาความถี่สูงจะเพิ่มความยุ่งยากในการวิเคราะห์วงจร สมการ Laplace transform จะเริ่มต้นจาก

$$V_{out}/V_{in} = -Z_f/Z_1$$

เมื่อ $Z_f = R_D$

$$Z_1 = R_1 + (1/C_D s)$$

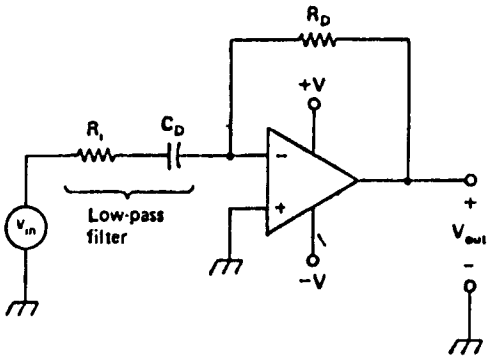
$$V_{out}/V_{in} = -R_f/(R_1+1/Cs)$$

หรือ $$V_{out}/V_{in} = -R_f Cs/(R_1 Cs+1)$$

ให้ $R_D = K_D, R_1 C = T_1$ จะได้

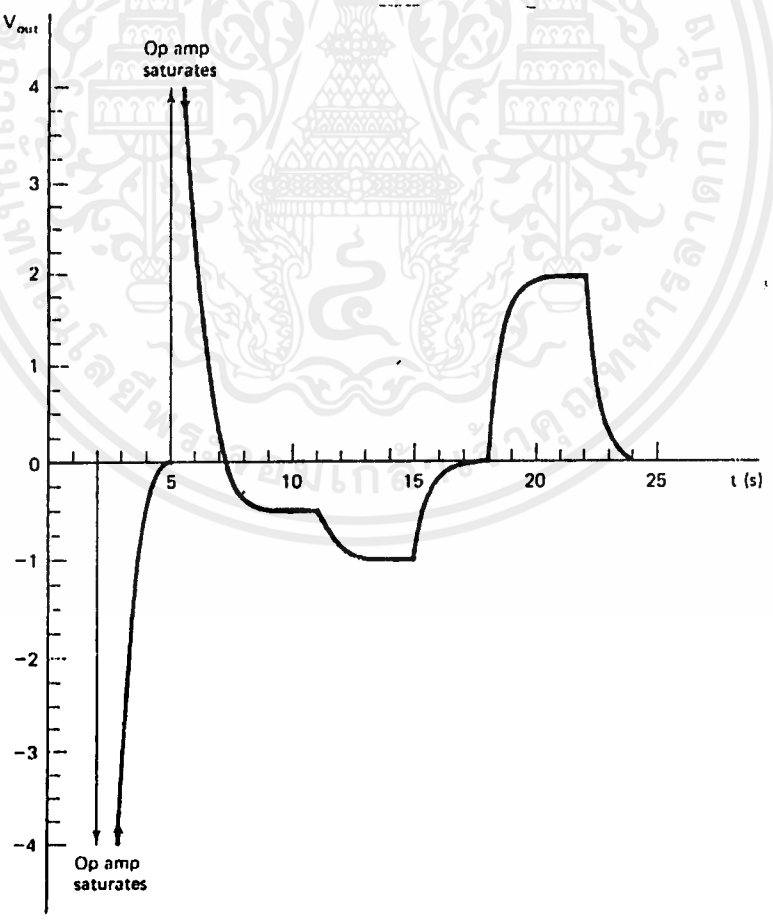
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-K_D S}{T_1 S+1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 22 วงจรที่แตกต่างในทางปฏิบัติ(Practical differentiator)

การตอบสนองต่อสัญญาณอินพุท ในรูปที่ 20 ในทางปฏิบัติแล้ว จะเป็นดังรูปที่ 22 ข้อควรระวังข้อที่ 2 จะเห็นว่าตัวควบคุมแบบดิริเวทิฟ จะมีเอาท์พุทเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่านั้น ระบบที่มีค่าความผิดพลาดคงที่จะไม่มีเอาท์พุทของตัวควบคุม ของตัวควบคุมแบบดิริเวทิฟ จะต้องใช้ร่วมกับแบบย้อนกลับเสมอ



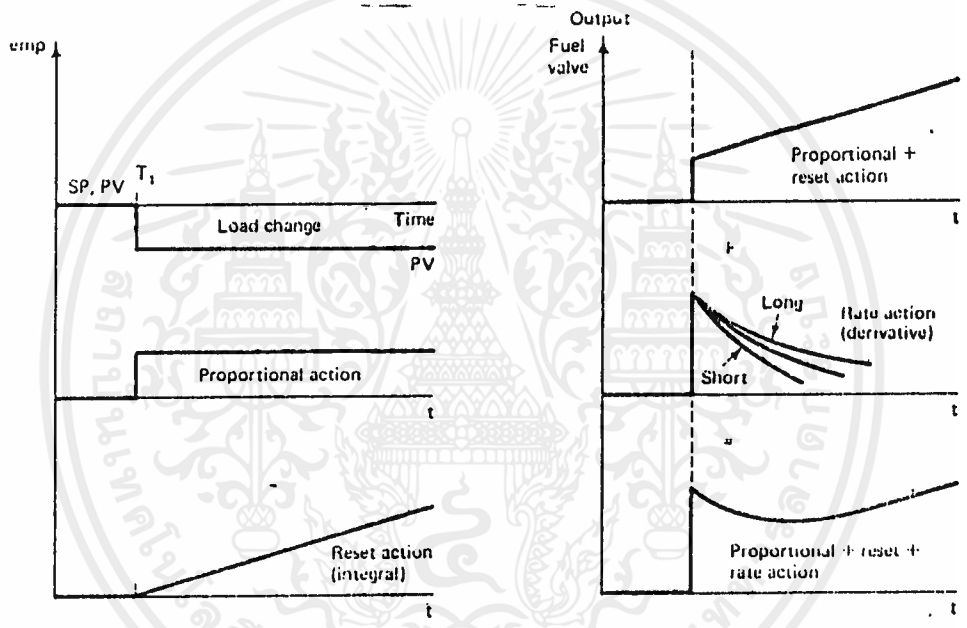
รูปที่ 23 ผลตอบสนองของวงจรแตกต่างในทางปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ตัวควบคุม PID แบบขนาน

(Parallel Three-Mode (PID) Controller)

เป็นการรวมเอาตัวควบคุม P, I, D เข้าด้วยกันเป็นตัวควบคุมแบบ PID ตัวควบคุมแบบสัดส่วนจะตอบสนองต่อค่าความผิดพลาดได้เร็ว ส่วนตัวควบคุมแบบอินทิเกรทจะกำจัดค่าความผิดพลาดที่เหลือได้หมด และตัวควบคุมแบบดิริเวทิฟจะให้เสถียรภาพที่ดีมีการตอบสนองต่อค่าความผิดพลาดได้เร็ว ในรูปที่ 24 แสดงเอาท์พุทแต่ละตัวและเอาท์พุทเมื่อรวมเข้ากันแล้ว



รูปที่ 24 การรวมกันแบบPID

วงจรตัวควบคุม PID แบบขนาน แสดงไว้ในรูปที่ 25 เป็นการรวมตัวควบคุมแบบ I และ PI จะต้องรวมค่าความต้านทานขนาดใหญ่รอบ C_1 เพื่อชดเชยกระแสไบอัสหรือใช้ออปแอมป์กระแสไบอัสต่ำความต้านทานที่จะกำจัดตัวควบคุมแบบดิริเวทิฟ R_3 จะรักษาสภาพขนาดเล็ก ๆ เท่าที่เป็นได้ และยังคงเสถียรภาพ ง่ายในผลตอบตอบสนองวงจรที่แตกต่าง

สมมติว่าผลกระทบต่อความต้านทาน 2 ตัวนี้ ไม่เป็นตามทางอุดมคติจะตัดทิ้งในการเปรียบเทียบ ยังผลกระทบของแรงดัน ค่าความผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{error} = K_p v_{error} + K_I \int v_{error} dt + K_D dv_{error} + v_o/dt \quad ...(26)$$

เมื่อ $K_p = R_2$, แถบของ สัดส่วน (เกน)

$K_I = 1/R_1C_1$, ค่าคงที่ของการอินทิเกรท

$K_D = R_DC_D$ ค่าคงที่แบบเดอริวาทีฟ

V_o = ค่าเริ่มต้นที่ชาร์จค่าเก็บประจุของตัวอินทิเกรต

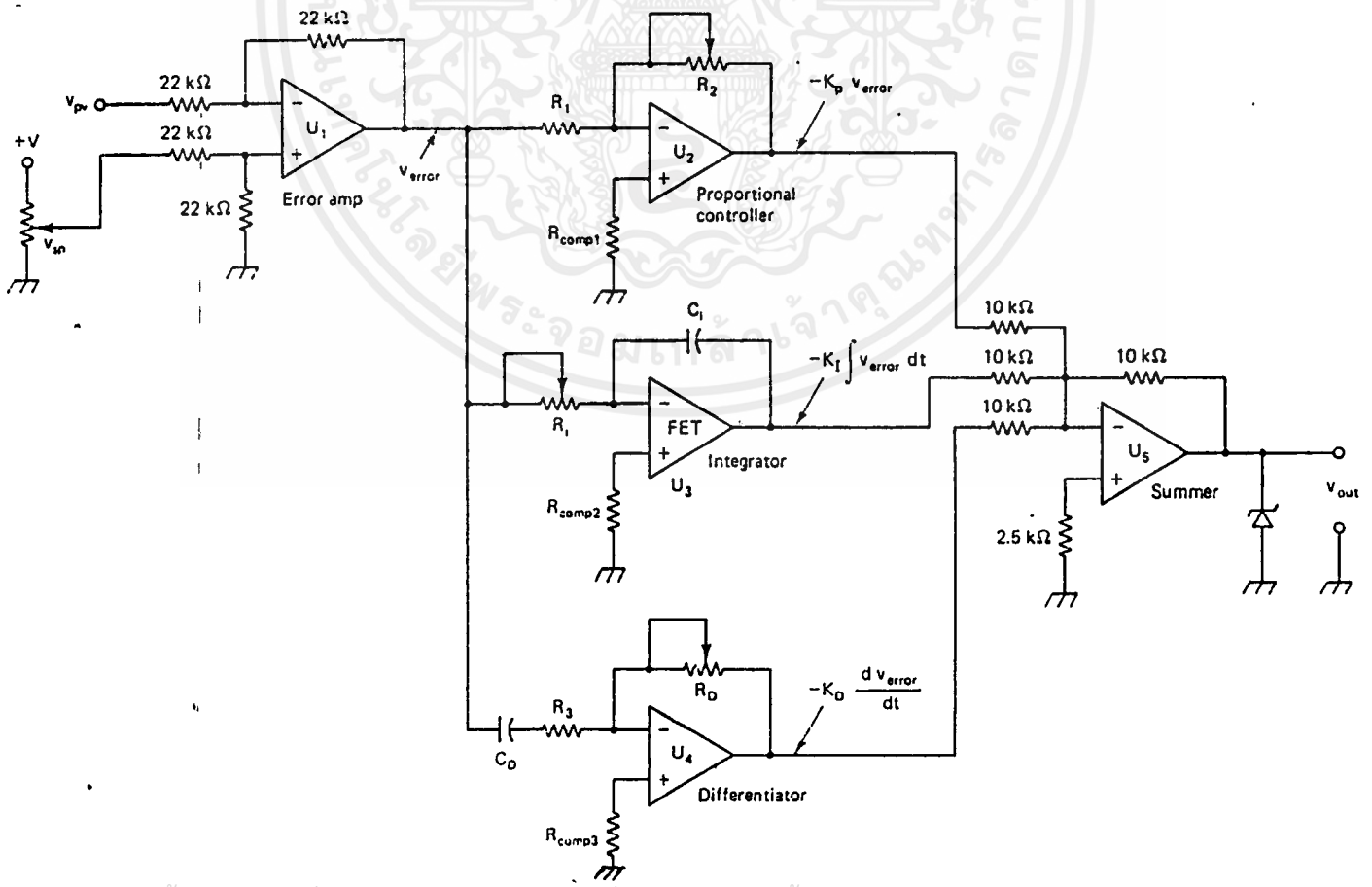
จากสมการที่ 26 แปลงเป็น Laplace Transform จะได้

$$V_{out} = K_p v_{error} + \frac{K_I v_{error}}{S} + K_D S v_{error}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{error}} = K_p + K_I + K_D S = K_D S^2 + \frac{K_p S}{S} + K_I$$

หรือ $$\frac{V_{out}}{V_{error}} = K_D S^2 + \frac{(K_p/K_D)S}{S} + K_I/K_D$$

นี่คือตัวควบคุม 3 โหมดแบบขนานดังรูปที่ 25 แต่ละเทอมจะขนานกันและมารวมกันที่วงจรซัมเมอร์ (summer)



รูปที่ 25 PID แบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3. ผลตอบสนองต่อระบบ (System Response)

3.1 ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบ(System Transfer function)พลังงานของอินพุท

เอาท์พุทของระบบควบคุมเป็น PV ถ้าวิเคราะห์ระบบด้วยขบวนการ หรือการรบกวนโหลดเป็นการพิจารณาอินพุท

$$PV(s) = F(s) \times R(s)$$

เมื่อ PV = เอาท์พุทของระบบ, PV (Process variable)

F = สมรรถนะของระบบ

R = พลังงานของอินพุท หรือ การรบกวนโหลด

ฟังก์ชันการส่งผ่าน ของระบบกำหนดโดย

$$\text{Transfer function} = \frac{O/P(s)}{I/P(s)}$$

สำหรับระบบที่วิเคราะห์เป็นขบวนการ $TF = \frac{PV(s)}{R(s)}$

TF = Transfer function

O/P = เอาท์พุท

ระบบอาจเป็นแบบเซอร์โว เอาท์พุทจะยังคงเป็น PV (Process Variable) อย่างไรก็ตามอินพุทของระบบเซอร์โวจะพิจารณาที่จุด SP (set point)

$$PV(s) = F(s) \times SP(s)$$

TF ของระบบเซอร์โว กำหนดให้ $\frac{PV(s)}{SP(s)}$

TFโดยทั่วไปสำหรับขบวนการลูปปิดและเซอร์โวลูปปิด จะนำไปใช้ในการตัดสินใจ TF ของลำดับหนึ่ง และ ลำดับที่สอง (First Order and Second Order) ด้วยตัวควบคุมแบบ P,PI ซึ่งการป้อนกลับแบบลบ

3.1.1 การควบคุมขบวนการ (Process Control)

จุดประสงค์ของขบวนการเพื่อปรับเอาท์พุท SP จะกำหนดให้เหมาะสม การป้อนกลับแบบลบที่ใช้อินพุทที่กระตุ้นของระบบ เช่น ทางที่จะกำจัดหรือลดผลกระทบของตัวแปรลองของอินพุทที่กระตุ้นหรือโหลดที่ PV(เอาท์พุทของระบบ)สำหรับการเปลี่ยนแปลงอินพุท(พลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือการรบกวนโหลด) เช่นระบบความร้อนในบ้าน ระบบควบคุมระดับและควบคุมการไหล

ไดอะแกรมของระบบควบคุมขบวนการดังรูปที่ 26 TFขององค์ประกอบระบบคือG(s) รวมทั้งอินเทอร์เฟสกำลังและตัวกระทำ องค์ประกอบภายใต้เงื่อนไขของมันเองและทรานสดิวเซอร์ เงื่อนไขสัญญาณและการส่งจ่าย การกรองสัญญาณและ TF ของตัวควบคุมให้เป็น H(s) คำนวณการควบคุมแบบ PID 3โหมด ดังนั้น SP จะมีค่าที่เหมาะสมและวิเคราะห์ขบวนการ

ลวิทซ์จะเปิดทางซ้ายในลูปแบบเปิด PV จะได้

$$PV(s) = G(s) \times R(s)$$

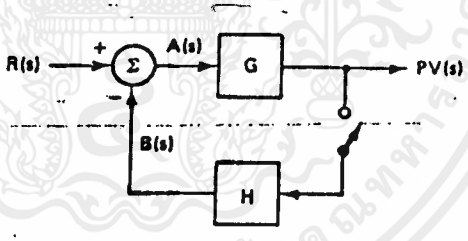
ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอินพุท R(s) มีผลโดยตรงกับ PV

อย่างไรก็ตามการปิดลวิทซ์จะเป็นแบบลูปปิดตัวควบคุมจะเป็นอินพุท R(s) ซึ่งจำเป็นต้องรักษา PV,PV(s) เป็นค่าคงที่ ภายใต้การควบคุมลูปแบบปิด

$$PV(s) = G(s) \times A(s) \quad \ldots(27)$$

แต่ $$A(s) = R(s) - B(s) \quad \ldots(28)$$

$$B(s) = H(s) \times PV(s) \quad \ldots(29)$$



รูปที่ 26บล๊อกไดอะแกรมลูปแบบปิด(Closed - loop block diagram)

แทน (29) ลงใน (28)

$$A(s) = R(s) - H(s) \times PV(s) \quad \ldots(30)$$

แทน (30) ลงใน (28)

$$PV(s) = G(s)[R(s)-H(s) \times PV(s)] \quad \ldots(31)$$

$$PV(s) = G(s)R(s)- G(s)H(s)PV(s)$$

$$PV(s)+G(s)H(s)PV(s) = G(s)R(s) \quad \ldots(32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$PV(s)[1+G(s)H(s)] = G(s)R(s)$$

สมการ TF ของระบบทั้งหมดหรือเป็นการป้อนกลับแบบลบใช้ PV(s)/P(s) แก้สมการ (3.9) ในระบบ TF

$$\frac{PV(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} \qquad ...(33)$$

แล้วนำรูปแบบนี้ไปใช้กับออปแอมป์ที่ป้อนกลับแบบลบ

$$A_{ci} = \frac{A_{oi}}{1+\beta A_{oi}}$$

เมื่อ A_{ci} = ค่าเกนของออปแอมป์ป้อนกลับแบบปิด

A_{oi} = เกนของระบบลูปแบบเปิดของออปแอมป์

β = อัตราลดทอนของวงจรป้อนกลับ

3.1.2 การควบคุมแบบเซอร์โว (Servo Control)

จุดประสงค์ของระบบควบคุมขบวนการรักษา PV ให้ปรับได้พอดี การเปลี่ยนออินพุทหรือโหลดแสดงถึงฟังก์ชันอินพุท ตัวควบคุมรักษาเอาท์พุทให้คงที่โดยอินพุทเปลี่ยนแปลงดังนั้น SP จะคงที่รวมทั้งบล็อกตัวควบคุมภายใน

ระบบเซอร์โวเอาท์พุทของระบบเซอร์โวยังคงเป็นค่า PV อย่างไรก็ตามอินพุทของเซอร์โวจะพิจารณาที่ SP

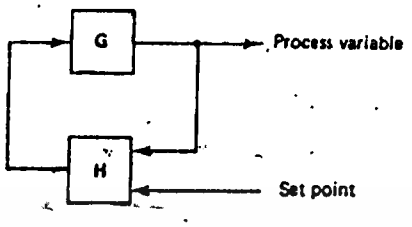
$$PV(s) = F(s) \times SP(s)$$

TF ของระบบ servo โดยกำหนดให้ $\frac{PV(s)}{SP(s)}$

จุดประสงค์จองระบบควบคุมเซอร์โวทำให้ PV นำไปสู่การติดตาม SP ภายใต้การควบคุมเซอร์โวที่สมบูรณ์แบบPVจะมีค่าเท่ากับ SPเหมือนกับว่า SPเปลี่ยนแปลงระยะของมันสมมติว่าอินพุทและโหลดยังคงที่อยู่ ดังนั้นจึงไม่แสดงบล็อกไดอะแกรม การควบคุมของเซอร์โวในรูปที่27เหมือนกับblock diagramที่ควบคุมขบวนการในรูป 26 ตัวกระทำการอินเตอร์เฟสทางไฟฟ้าและการควบคุมอุปกรณ์ในบล็อกแทนด้วย G และ ทางอิเลคทรอนิกส์ที่เหลืออยู่และตัวควบคุมในบล็อกที่ป้อนกลับ H ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงใน SP จะต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเมินค่าได้ อินพุทที่ SP รวมทั้งอินพุทในการป้อนกลับ

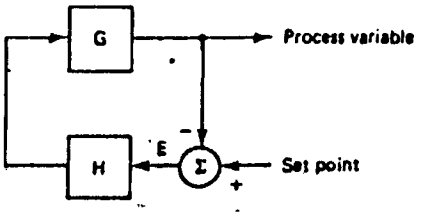


รูปที่ 27 บล๊อกไดอะแกรมการควบคุมเซอร์โวเริ่มต้น(Initial Servo Control block diagram)

ตัวควบคุมที่กระทำในสัญญาณค่าความผิดพลาดคือ

error = setpoint - process variable

รูปที่ 28 การคำนวณความแตกต่างทำได้อย่างถูกต้อง บล็อกที่รวมกับที่ใช้มีอินพุทเป็นบวกและลบแต่รูปนี้ไม่ถูกต้องโดยทีเดียว บล็อกไดอะแกรมที่เป็นมาตรฐานจะมีอินพุททางด้านซ้าย สัญญาณที่กระทำในแนวตามบล็อก เริ่มจากซ้ายไปขวา เอาท์พุทสุดท้ายอยู่ขวามือ รูปที่ 29 แสดงการจัดเรียงใหม่อย่างดี ไดอะแกรมนี้ให้ทางเข้าต่างกันกับของระบบควบคุมแบบเซอร์โวตัวควบคุมจะใช้เวลาไม่นานในการป้อนกลับแทนที่บล็อกแรกจะพบว่าอินพุทเช่น SP ตัวควบคุมอยู่ภายใต้การควบคุมตามลำดับเป็นการป้อนกลับแบบไม่เป็นลบ เอาท์พุททั้งหมด(PV)ทำตัวเป็นการป้อนกลับแบบลบ เรียกว่าการป้อนกลับแบบลบ 100 %



รูปที่ 28 ตัวควบคุมเซอร์โวด้วยบล๊อกที่มีความผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

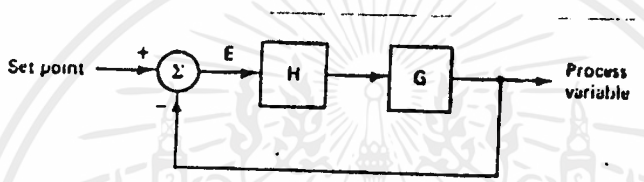
จุดประสงค์ของควบคุมลูปแบบเซอร์โวเพื่อที่จะทำให้ PV หรือเอาท์พุทเท่ากับ SP หรืออินพุทโดยที่พลังงานอินพุทและโหลดพิจารณาให้คงที่

ถ้าไม่มีการป้อนกลับแบบลบการเปลี่ยนแปลงของ SP ผ่านไปยังเอาท์พุทได้ฟังก์ชันการส่งผ่านของ H(s)และ G(s)

$$PV(s) = SP(s)\ [H(s) \times G(s)$$

ระบบควบคุมแบบปิดฟังก์ชันการส่งผ่านเป็น $\dfrac{PV(s)}{SP(s)} = H(s) \times G(s)$

เมื่อการป้อนกลับแบบลบ ถูกนำมาใช้ในการเปลี่ยนแปลง ดูรูปที่ 29



รูปที่ 29 บล๊อกไดอะแกรมควบคุมเซอร์โวที่ใช้กันมา

$$PV(s) = G(s) \times H(s) \times E(s)$$

เมื่อ $E(s) = SP(s) - PV(s)$

E เป็นค่าความผิดพลาด เป็นผลต่างระหว่างอินพุท(SP) กับการป้อนกลับ (PV)

แทน (11) ใน (10)

$$PV(s) = G(s) \times H(s)[SP(s)-PV(s)]$$

$$PV(s) = [G(s) \times H(s) \times SP(s)]-[G(s)H(s)PV(s)]$$

$$PV(s) = [1+G(s)H(s)] = G(s)H(s)SP(s)$$

$$PV(s) = \frac{G(s)H(s)SP(s)}{1+G(s)H(s)}$$

TF ของ closed - loop ลูปแบบปิดของระบบควบคุมแบบเซอร์โว

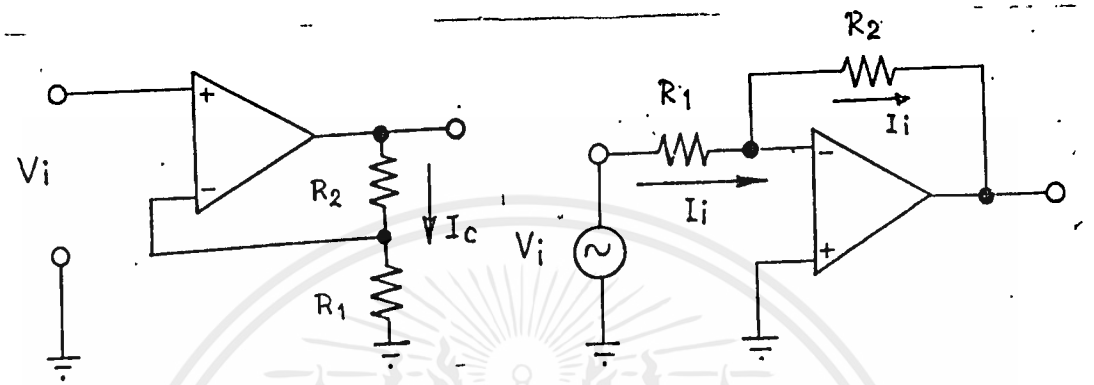
$$\frac{PV(s)}{SP(0)} = \frac{G(s)H(s)}{1+G(s)H(s)}$$

TF ของลูปแบบปิดของเซอร์โวมีTFของตัวควบคุมในส่วนบนส่วนTFลูปปิดของขบวนการไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4.วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส(Voltage To Current Converter)

วงจรขยายสัญญาณของโอเปอร์เรชั่นแนล(ออปแอมป์)และป้อนกลับทั้งสองแบบคือแบบไม่กลับเฟสและแบบกลับเฟส ปรกติทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส และวงจรกระแสเป็นแรงดันตามลำดับ ดังรูปที่ 30



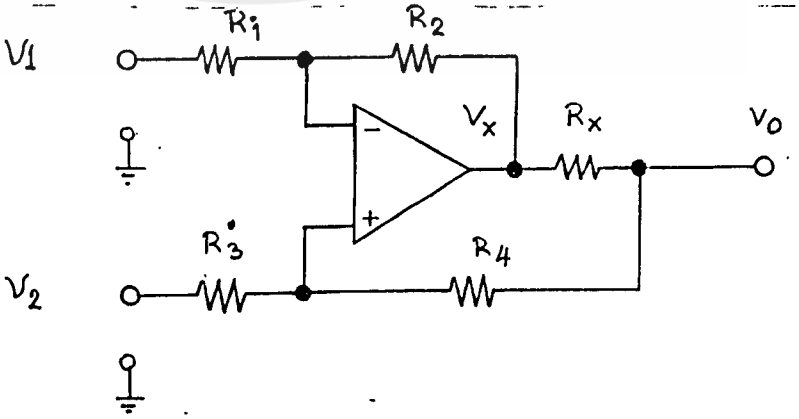
รูปที่ 30 (a)วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส
(b)วงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน

ซึ่งวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสคือ รูปที่ 30 (a) จะได้ว่า

$$V_i = I_o R_1 \qquad \ldots(34)$$

จากสมการที่ 34 อธิบายการทำงานของวงจรรูปที่ 30(a) ได้ดังนี้

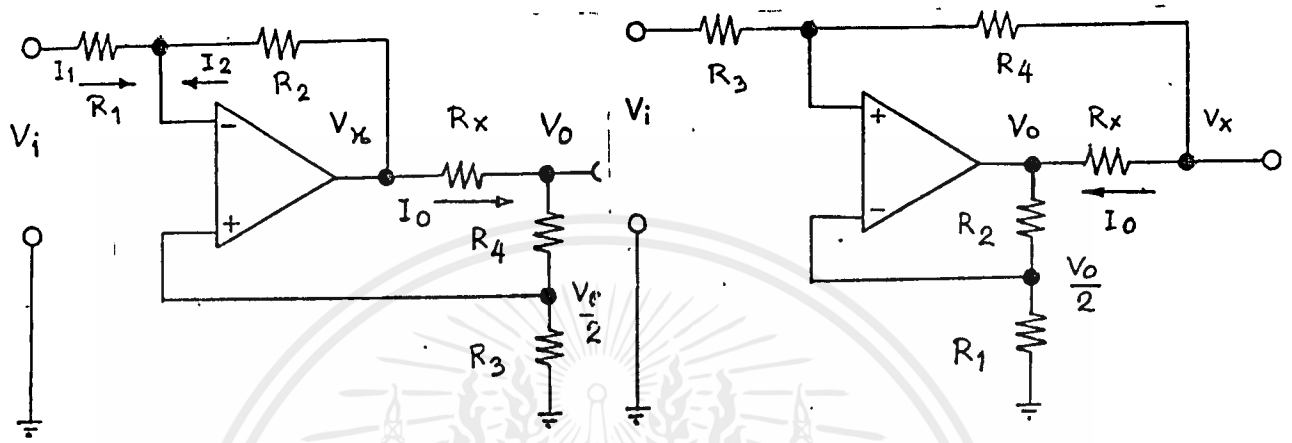
แรงดัน(V_i)ทางเข้าจะเปลี่ยนเป็นกระแสทางออก(I_o)ได้ แต่วงจรนี้ยังไม่ได้รับการชดเชยพารามิเตอร์ต่างๆ และยังสมบูรณ์สำหรับการทำงานตามข้อกำหนดมาตรฐานจึงปรับปรุงใหม่ได้ดังนี้



รูปที่ 31 วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรูปที่ 31 สามารถกำหนดการไหลของกระแสผ่านโหลดได้ ทั้ง 2 ลักษณะคือ จ่ายกระแสออก(Current Source)และดึงกระแสเข้า(Current Sink)จากวงจร วงจรนี้ยังลดปัญหาของอิมพิแดนซ์ทางเข้าของวงจร ด้วยการวิเคราะห์วงจรรูปที่ 31 ทำได้ 2 ลักษณะดังรูปที่ 32



รูปที่ 32

จากรูป 32(a) พบว่า $I_1 = I_2$ ...(34)

เมื่อเรากำหนดให้ $R_3 = R_4$ ความสัมพันธ์ของ V_x, V_i และ V_o โดยพิจารณาจากสมการที่ 34 จะได้

$$[V_i-(V_o/2)]/R_1 = -[V_x-(V_o/2)]/R_2 \quad ...(35)$$

$$V_x/V_2 = [(V_o/2R_1)+(V_o/2R_2)]-V_i/R_2 \quad ...(36)$$

เมื่อกำหนดให้ $R_1 = R_2$ จะได้

$$V_x = V_o-V_i \quad ...(37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

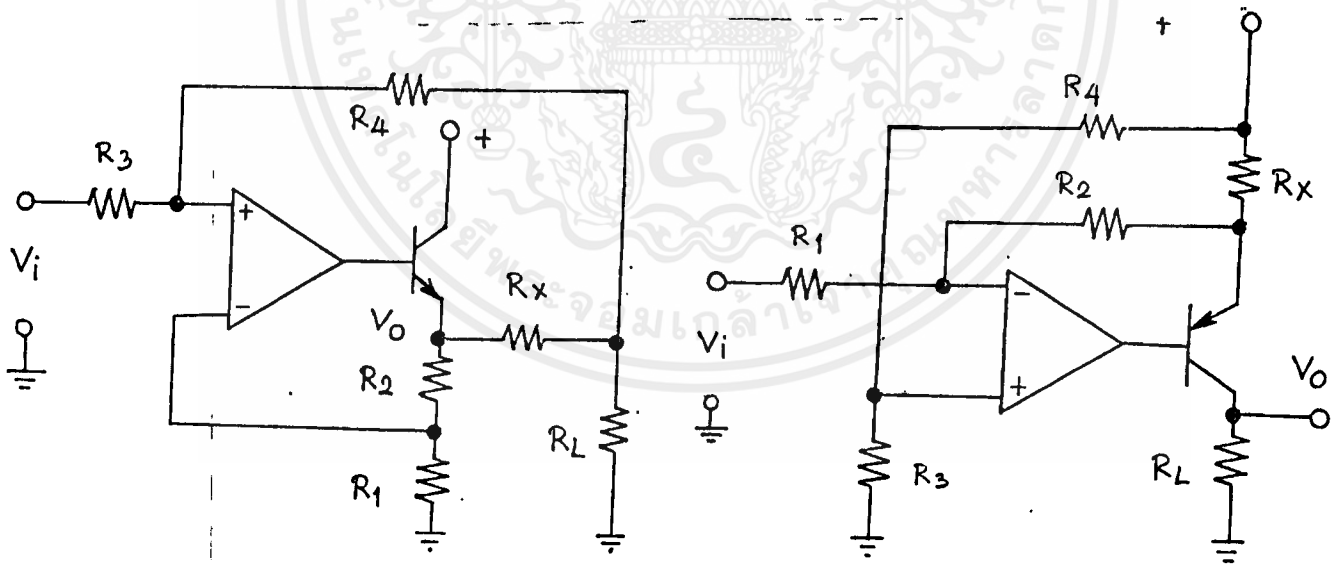
สำหรับวงจรในรูปที่ 32(b)พิสูจน์ได้ทำนองเดียวกัน และสรุปได้เช่นเดียวกับสมการที่ 37 ความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสได้โดย

$$I_o=(V_o-V_x)/R_x \qquad ...(38)$$

แทนค่าสมการที่ 37 ในสมการที่ 38 จะได้

$$I_o=V_i/R_x \qquad ...(39)$$

ในรูปที่ 32 ยังไม่สามารถจ่ายกระแสให้แก่โหลดได้ถึง 20 mA จำเป็นต้องมีทรานซิสเตอร์ช่วยในการขยายกระแสให้แก่ออปแอมป์และยังทำให้วงจรทำงานได้เป็นปรกติ จากรูปที่ 32 สามารถเขียนใหม่ได้เป็นรูปที่ 33



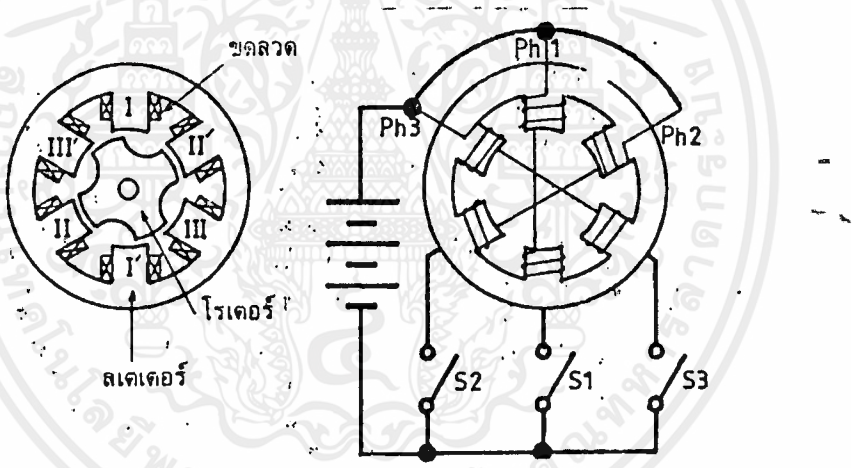
รูปที่ 33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 ชนิดและการทำงานของสเตปปิ้งมอเตอร์

สเตปปิ้งมอเตอร์แบ่งออกได้หลายชนิดด้วยกัน เช่น Variable - Reluctance, Permament Magnet, Hybrid, Linear,ฯลฯ ที่ใช้งานกันบ่อยๆ คือแบบ Variable-Reluctance และ Permanent Magnet

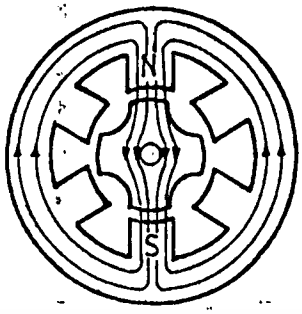
Variable-Reluctance หรือ เรียกสั้นๆว่า VR มอเตอร์จะเป็นพื้นฐานสำคัญในการทำงานสเตปปิ้งมอเตอร์ชนิดอื่นๆได้ง่ายยิ่งขึ้น รูปที่ 34 เป็นภาพหน้าตัดและยังแสดงถึงการพันขดลวด VR มอเตอร์แบบ 3 เฟส มีขั้วเหนือและขั้วใต้อยู่ตรงกันข้ามกัน 3 คู่ โดยจะพันขดลวดแบบอนุกรมกันในแต่ละชุด ถ้ามีการกระตุ้นเฟสเกิดขึ้นขั้ว I', II', III' จะเป็นขั้วเหนือ ทั้งโรเตอร์และสเตเตอร์ จะทำจากเหล็กผสมซิลิคอน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าความซึมซับ (permeability) สูง สามารถให้เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านได้มาก



รูปที่ 34 ภาพหน้าตัดและการพันขดลวดของ VR สเตปปิ้งมอเตอร์แบบ 3 เฟส

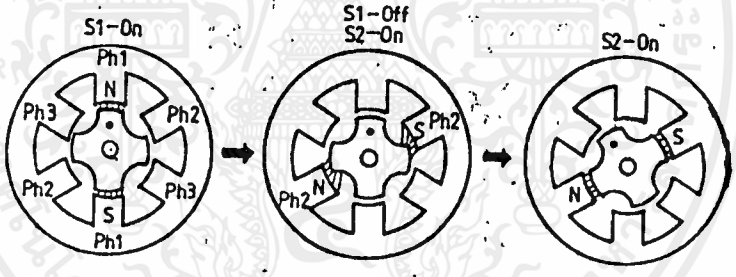
การทำงานเริ่มจากการกระตุ้นที่เฟส 1 ก่อน (s_1"ON") ซึ่งจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นดังรูปที่ 35 ตัวโรเตอร์จะพยายามวางตำแหน่งตัวเองให้อยู่ในทิศทางที่ทำให้เกิดค่าความต้านทานแม่เหล็กน้อยที่สุด ในแนวขั้ว I-I'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 35 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กขณะกระตุ้นเฟส

ในขณะเริ่มต้นที่จะกระตุ้นที่เฟส II(s_1 "OFF", s_2 "ON") ดังรูปที่ 36 เส้นแรงแม่เหล็กจะไม่อยู่ในแนวทางเดินที่สะดวก จึงทำให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กมีค่าสูง



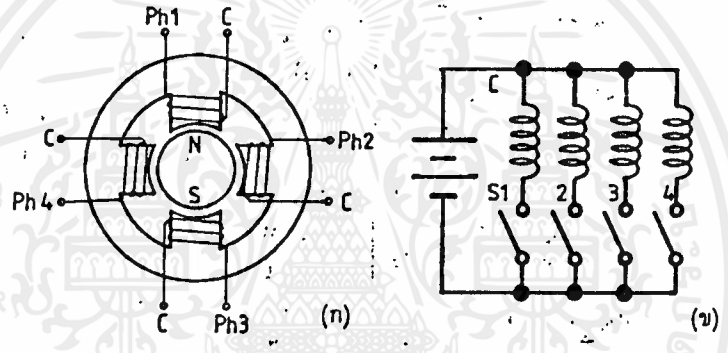
รูปที่ 36 แลดงขั้นตอนการหมุนเมื่อมีการกระตุ้นเฟสจาก เฟส 1 ไปยัง เฟส 2

ตัวโรเตอร์ก็จะพยายามปรับตัวเองเพื่อให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กน้อยที่สุดด้วยการหมุนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาซึ่งแรงบิดที่ใช้หมุนเกิดจากแรงของเส้นแรงแม่เหล็กแล้วจะไปหยุดที่ตำแหน่งความต้านทานแม่เหล็กน้อยที่สุดนั่นคือจะหมุนไป 1 สเตป หรือ 30 องศานั่นเอง ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสเตปของการหมุนโรเตอร์ไป 1 รอบ(s) มุมที่เปลี่ยนไปใน 1 สเตป(θ_s) จำนวนเฟสของสเตเตอร์ (m) และจำนวนฟันของโรเตอร์ (N_r) แสดงได้ดังสมการที่ 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$s = 360/\theta_s = mN_r \qquad ...(40)$$

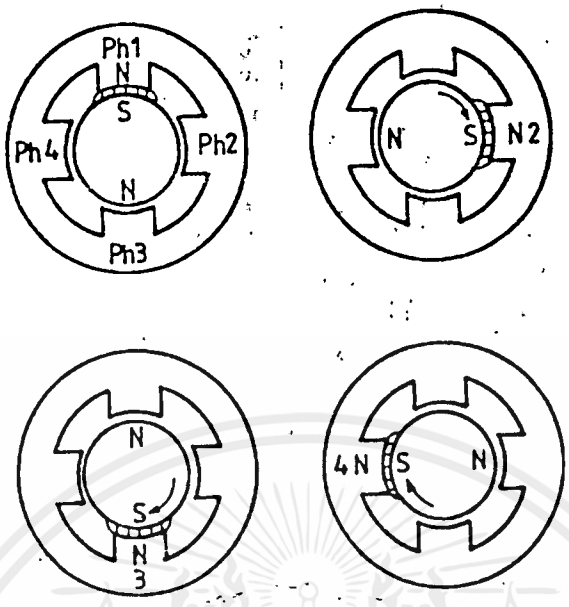
ตัวอย่างเช่น สเตปปิ้งมอเตอร์ตัวหนึ่งมี m = 3, N_r = 4 ก็จะได้ s =3*4 = 12 สเตป และมุมใน θ_s = 360/12 = 30 องศาซึ่งจากสมการ (40) ยังทำให้ทราบอีกว่าถ้าจะลดค่า θ_s ให้น้อยลง อาจทำได้โดยการเพิ่มค่าของ m หรือและ N_r ให้สูงขึ้น และลดช่องว่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ ให้มีค่าน้อย ๆ เพื่อให้เกิดแรงบิดสูงสุด และยังมีผลต่อความเที่ยงตรงของตำแหน่งมากยิ่งขึ้นด้วย



รูปที่37 (ก) ภาพหน้าตัดของ PM สเตปปิ้งมอเตอร์แบบ 4 เฟส
(ข) วงจรกระตุ้นเฟสพื้นฐาน สำหรับ PM มอเตอร์ 4 เฟส

Permanent Magnet หรือเรียกสั้นๆ ว่า PM มอเตอร์ จะมีข้อแตกต่างที่สำคัญจาก VR มอเตอร์ ก็คือ โรเตอร์จะเป็นแม่เหล็กถาวร จึงทำให้การพันขดลวดที่สเตเตอร์ต้องแตกต่างกันไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 37 (ก) จะเห็นว่าสเตเตอร์ในแต่ละขั้วจะมีขดลวดพันอยู่ ซึ่งถือว่าแต่ละขั้วคือหนึ่งเฟส ดังนั้นจากรูปจึงมีทั้งหมด 4 เฟส ด้วยกัน สำหรับการต่อวงจรกระตุ้นเฟสมอเตอร์อย่างง่ายแสดงไว้ในรูปที่ 37 (ข) จะเห็นปลายขดลวด(c) ของทุกเฟสจะต่อร่วมกันถึงขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟ ดังนั้นเมื่อเกิดการกระตุ้นที่เฟสใดแล้ว ขั้วสเตเตอร์ที่เฟสนั้นก็กลายเป็นขั้วเหนือ รูปที่ 38 จะเป็นการแสดงตำแหน่งของโรเตอร์ในแต่ละสเตป หลังจากถูกกระตุ้นที่เฟส 1-2-3-4 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 38 ลำดับขั้นการหมุนในมอเตอร์ 4 เฟส

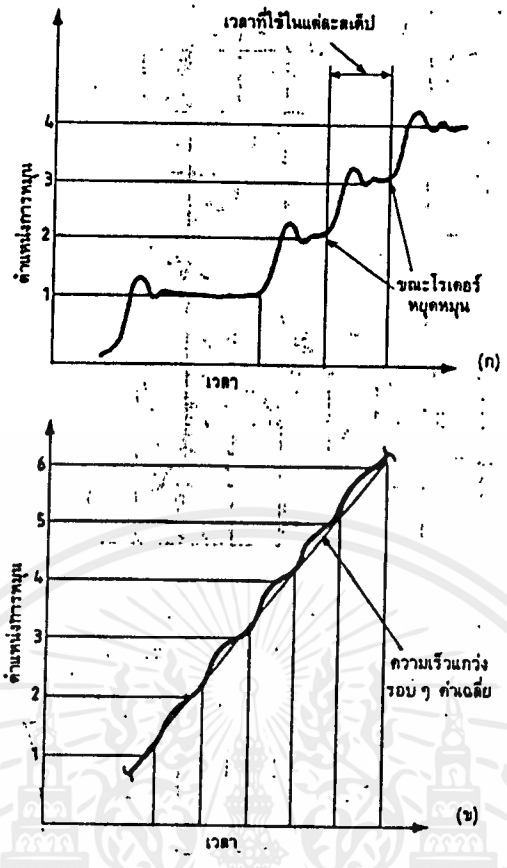
และจะหมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ทุก 90 องศาต่อสเตป ถ้าต้องการจะให้มุมองศาต่อสเตปมีค่าลดลง หรือมีความละเอียดในตำแหน่งมากขึ้นจะต้องเพิ่มจำนวนเฟสของสเตเตอร์และจำนวนขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ให้มากขึ้น ข้อเสียของ PM มอเตอร์คือมีราคาแพง และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะถูกจำกัดโดยเส้นแรงแม่เหล็กภายใน (magnetic remanence) ของแม่เหล็กถาวรทำให้ไม่สามารถผลิตแรงบิดได้มาก

โหมดการทำงานของสเตปปิ้งมอเตอร์

ถ้าจะแบ่งโหมดการทำงานของสเตปปิ้งมอเตอร์ ตามอัตราเร็วของสเตปแต่ละสเตปจะแบ่งออกได้เป็น 2 โหมดคือ หมุนเป็นสเตป (discrete stepping mode) และหมุนแบบต่อเนื่อง(slewing mode)

โดยถ้าการหมุนเป็นแบบสเตปและมีเวลาหยุดนิ่งก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นสเตปถัดไป ก็จะเรียกการทำงานในโหมดนี้ว่า การหมุนเป็นสเตป ดังแสดงในรูปที่ 39 (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 39 กราฟแสดงสเตปของการหมุนในโหมดการทำงานแบบ
(ก) หมุนเป็นสเตป
(ข) หมุนต่อเนื่อง

สำหรับตัวอย่างของเครื่องใช้ที่ทำงานในโหมดนี้คือเครื่องเจาะบัตรการทำงานคร่าวๆ ก็คือ สเตปปิ้งมอเตอร์จะเป็นส่งแถบกระดาษเข้าไปในเครื่องปรุกระดาษ เพื่อบันทึกข้อมูลลงในแถบกระดาษ ซึ่งการหมุนของสเตปปิ้งมอเตอร์จะหมุนไปแล้วหยุดชั่วขณะ เพื่อปรุกระดาษให้เรียบร้อยก่อน แล้วจึงค่อยหมุนต่อไปยังตำแหน่งเจาะใหม่

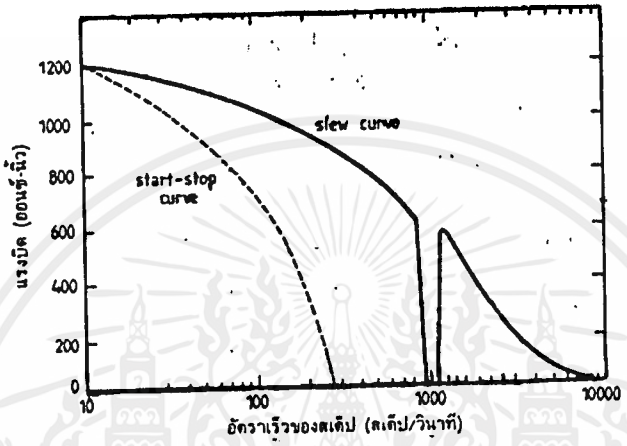
ถ้าเพิ่มอัตราเร็วของในแต่ละสเตปให้เร็วขึ้น และเป็นไปอย่างต่อเนื่องไม่มีการหยุดนิ่งจะเรียกกำหนดการทำงานนี้ว่า การหมุนแบบต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 39 (ข) ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์ (n) กับอัตราเร็วของสเตป (f) และจำนวนสเตปทั้งหมด (s) ได้ดังสมการ

$$n = 60\ f/s \qquad \ldots(41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟคุณลักษณะของสเตปปิ้งมอเตอร์

กราฟคุณลักษณะของสเตปปิ้งมอเตอร์จะเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของสเตปกับแรงบิดดังแสดงในรูปที่ 40



รูปที่ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็ว
ของสเตปกับแรงบิดของการทำงานทั้ง 2 โหมดของสเตปปิ้งมอเตอร์

สำหรับกราฟเส้นประ เรียกว่า start curve หรือ single step load curve เป็นกราฟที่อยู่ในโหมดการหมุนเป็นสเตป และเป็นกราฟที่แสดงถึงย่านของแรงบิดที่มอเตอร์สามารถเริ่มและหยุดหมุนได้ โดยปราศจากความผิดพลาดแม้ที่อัตราเร็วของสเตปต่างๆกัน และกราฟอีกเส้นคือ slew curve ซึ่งทำงานอยู่ในโหมดการหมุนต่อเนื่อง จะเป็นกราฟที่แสดงถึงค่าแรงบิดสูงสุดที่สเตปปิ้งมอเตอร์ สามารถทำได้ที่อัตราเร็วของสเตปปิ้งต่างๆกัน ถ้ามีการใช้งานสเต่ปปิ้งมอเตอร์เหนือกราฟนี้ก็อาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้ ในทางตรงข้าม ถ้าใช้งานอยู่ภายใต้กราฟนี้ แม้จะควบคุมแบบระบบเปิดก็มั่นใจได้ว่าทั้งตำแหน่งและความเร็วมีความเที่ยงตรงแน่นอน โดยตำแหน่งมอเตอร์สามารถคำนวณได้จากสมการ

มุมที่เปลี่ยนไป = มุมใน 1 สเตป * จำนวนพัลส์ที่ป้อนเข้า ...(42)

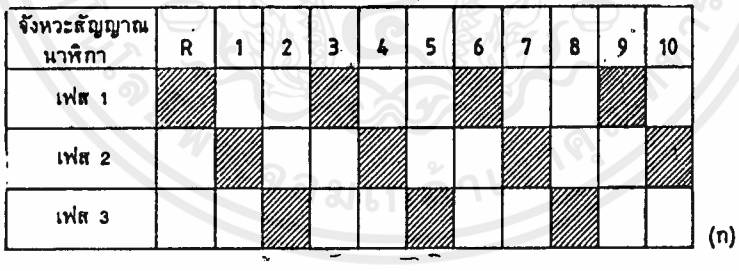
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

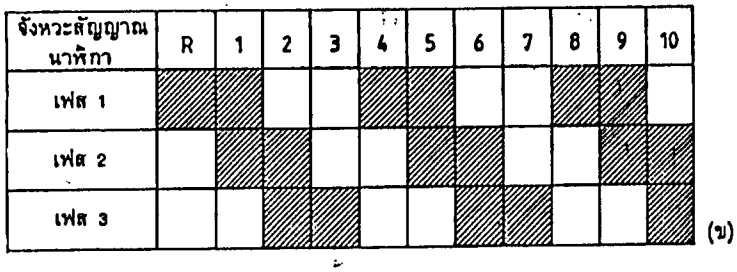
ส่วนความเร็วสามารถคำนวณได้จากสมการ (41) สำหรับช่วงที่เส้นกราฟขาดหายไปของ slew curve นั้นเป็นย่านริโซแนนซ์(resonant region) ซึ่งเป็นจุดอ่อนสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการพิจารณาใช้งาน เพราะช่วงนี้เป็นช่วงที่ไม่เสถียรและควบคุมไม่ได้

วิธีการกระตุ้นเฟส

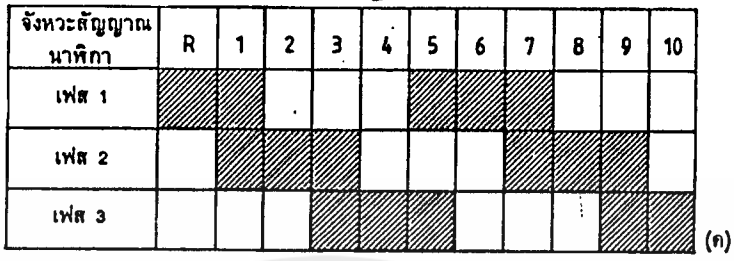
การที่จะทำให้สเตปปิ้งมอเตอร์หมุนได้อย่างต่อเนื่องเหมือนกับการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้น จะต้องมีการจ่ายพัลส์เป็นลำดับอย่างต่อเนื่องวิธีการที่จะกระตุ้นเฟสมีด้วยกันหลายวิธี แต่จะอธิบายเพียง 3 วิธีเท่านั้น เริ่มจากแบบแรกคือ การกระตุ้นเฟสเดี่ยว (single-phase rxcitation) เป็นการกระตุ้นเฟสเพียงเฟสเดียวเท่านั้นที่จังหวะสัญญาณนาฬิกาหนึ่งๆ แบบที่สองคือ การกระตุ้นเฟสแบบคู่ (two-phase excitation) ก็จะมีการกระตุ้นเฟสสองเฟส พร้อมกันในจังหวะสัญญาณนาฬิกาหนึ่งๆ

สำหรับแบบสุดท้ายเป็นการกระตุ้นแบบกึ่งสเตป (half-step excitation)ก็จะเป็นการรวมเอาสองแบบแรกเข้าด้วยกัน โดยจะกระตุ้นเฟสแบบที่ 1 และแบบที่ 2 สลับกันไป การกระตุ้นเฟสของทั้ง 3 แบบดูได้จากตารางในรูปที่ 41





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

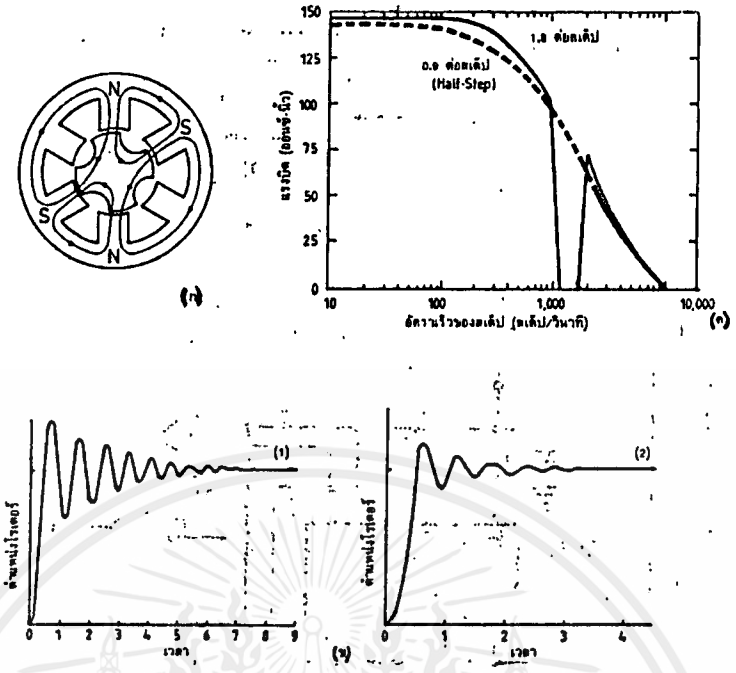


รูปที่ 41 ตารางแสดงการกระตุ้นเฟส
(ก) แบบเฟสเดี่ยว (single-phase) (ข) แบบเฟสคู่ (two-phase)
(ค) แบบกึ่งสเตป(half-phase)

ในการกระตุ้นเฟสแบบเฟสคู่ จะมีทิศทางของเส้นและแม่เหล็กไม่เป็นเส้นตรง เหมือนกับแบบกระตุ้นแบบเฟสเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 42(ก) แต่ถึงกระนั้นค่ามุมที่เปลี่ยนไปใน 1 สเตป ก็ยังคงมีค่าเท่าเดิมเหมือนกับแบบกระตุ้นแบบเฟสเดี่ยว สำหรับการกระตุ้นแบบกึ่ง-สเตป ค่ามุมที่เปลี่ยนไปใน 1 สเตป จะมีค่าลดลงครึ่งหนึ่ง การกระตุ้นแบบเฟสคู่ จะเกิดแรงบิดได้มากกว่าการกระตุ้นแบบเฟสเดี่ยว ขณะเดียวกันยังสามารถเข้าตำแหน่งในแต่ละสเตปได้เร็วกว่าด้วย ดังแสดงในรูปที่ 42(ข)

ข้อดีอีกอย่างหนึ่งสำหรับการกระตุ้นเฟสแบบกึ่งสเตปคือ สามารถลดผลกระทบเนื่องจากย่านเรโซแนนซ์ได้ แต่ที่ความถี่ต่ำๆ จะมีค่าแรงบิดลดลง ดังแสดงในรูปที่ 42(ค) และสำหรับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ขึ้นอยู่กับทิศทางของลำดับเฟสที่ถูกกระตุ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

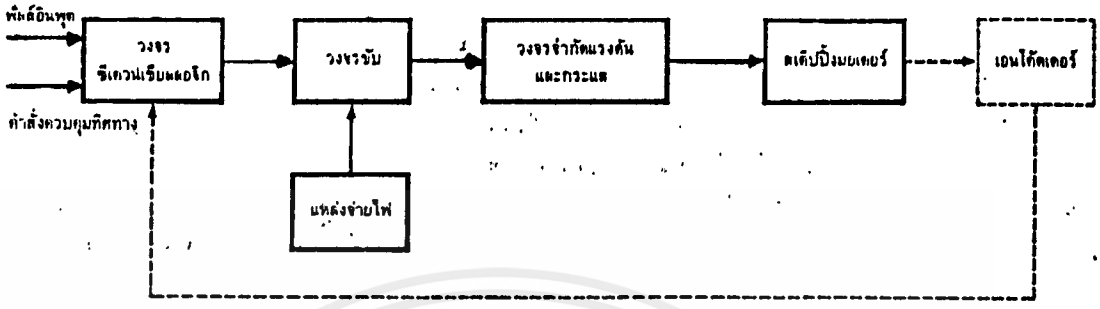


รูปที่ 42 (ก)แสดงเส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กในการกระตุ้นแบบเฟสคู่
(ข)แสดงการเข้าตำแหน่งของโรเตอร์ที่สเตปหนึ่งๆของแบบ
1.กระตุ้นแบบเฟสเดียว 2.กระตุ้นแบบเฟสคู่
(ค)กราฟคุณลักษณะของการกระตุ้นเฟสแบบกึ่งสเตป(เส้นประ)และแบบเฟสคู่

การควบคุมสเตปปิ้งมอเตอร์

บล็อกไดอะแกรมสำหรับการควบคุมสเตปปิ้งมอเตอร์ แสดงดังรูปที่ 43 เป็นวงจรซีเควนเชียลลอจิก จะรับพัลส์อินพุต และคำสั่งควบคุมทิศทางแล้วจึงผลิตพัลส์ที่ใช้ในการกระตุ้นเฟสของมอเตอร์ออกไป แต่จะมีระดับของสัญญาณต่ำ จึงต้องนำสัญญาณนี้ไปผ่านวงจรขับเพื่อให้ระดับของสัญญาณสูงขึ้น และจะมีวงจรจำกัดกระแสและแรงดัน ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ให้กับวงจรขับและมอเตอร์ จากบล็อกไดอะแกรมจะเห็นว่า ไม่จำเป็นต้องต่อวงจรเอ็นโค้ดเดอร์ ป้อนสัญญาณกลับเพื่อควบคุมตำแหน่งและความเร็ว แต่ในบางครั้งเช่นในกรณีที่ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ระหว่างแกนหมุนของมอเตอร์กับตำแหน่งของโหลด ไม่ตรงกันอันเกิดจากความผิดพลาดของเฟืองเกียร์ หรือในกรณีที่โหลดบางอย่าง ทำให้เกิดการผิดพลาดของสเตปขึ้น ก็จำเป็นที่จะต้องมีการใช้สัญญาณป้อนกลับ เพื่อควบคุมตำแหน่งและความเร็วให้ถูกต้อง

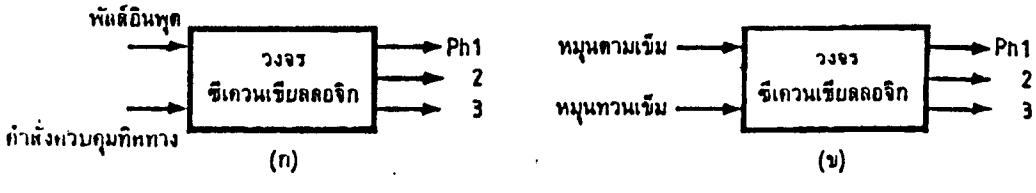
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 43 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมสเตปปิ้งมอเตอร์

วงจรซีเควนเชียลลอจิก

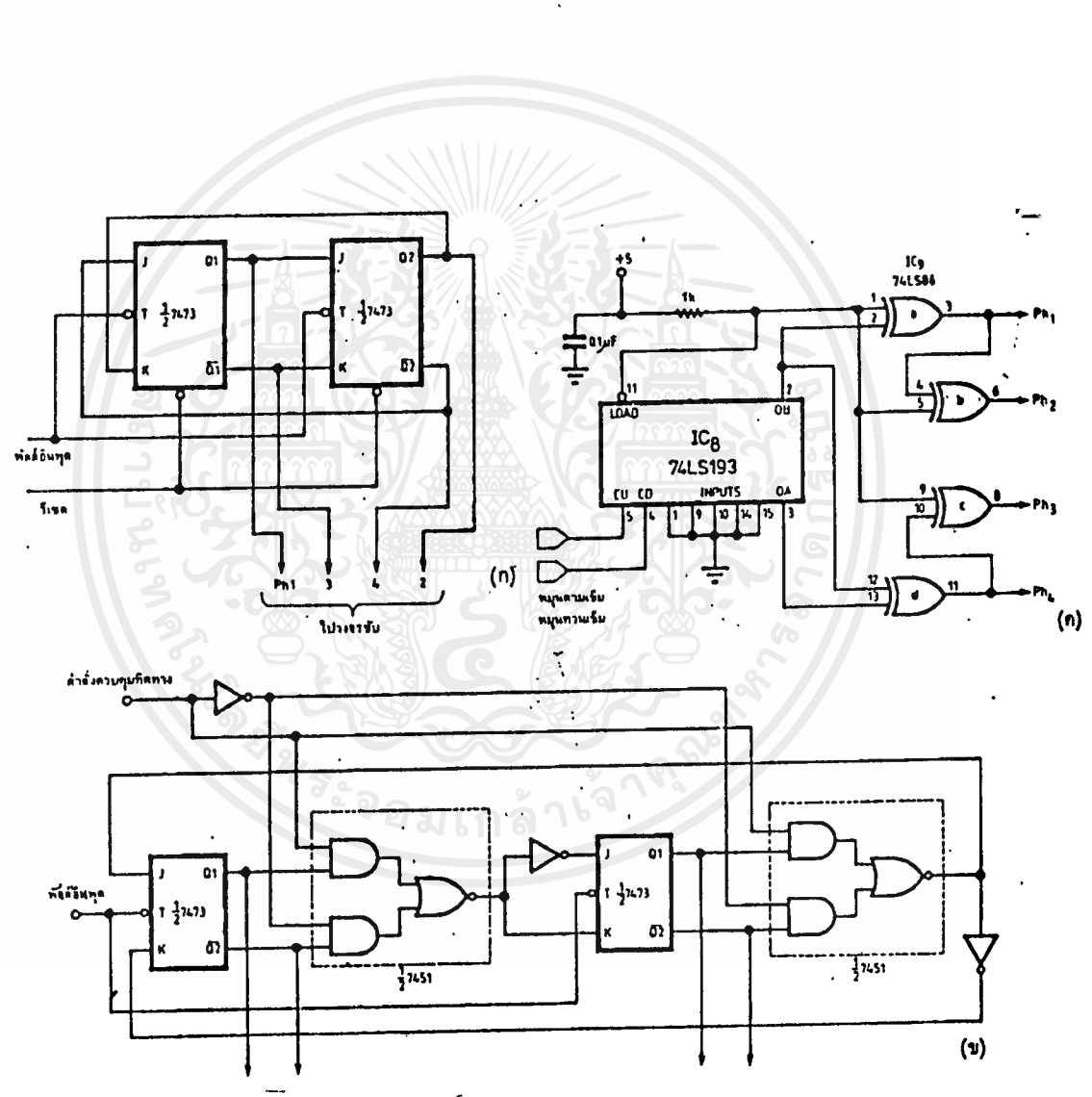
การออกแบบวงจรซีเควนเชียลลอจิกนั้น ความแตกต่างของวงจรขึ้นอยู่กับว่า ผู้ออกแบบจะเลือกใช้ไอซีประเภทใด มาใช้ในวงจร วิธีการกระตุ้นเฟส จำนวนเฟสของสเตปปิ้งมอเตอร์ และยังรวมถึงจุดประสงค์ของการใช้สเตปปิ้งมอเตอร์ ว่าต้องการใช้งานเฉพาะทิศทางเดียวหรือสองทิศทาง ซึ่งในการใช้งานแบบสองทิศทาง ก็ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ดังรูปที่ 44 จะเห็นว่าแบบแรกนั้น รับอินพุตเข้าทางหนึ่ง และรับคำสั่งทิศทางอีกทางหนึ่ง สำหรับในแบบที่สองนั้นก็มีอินพุตอยู่ 2 ทางเช่นกัน แต่จะรับพัลส์อินพุตทั้งสองทางไม่พร้อมกัน ขึ้นอยู่กับว่าต้องการใช้งานในทิศทางไหน



รูปที่ 44 แบบของซีเควนเชียลลอจิกสองทิศทางทั้ง 2 แบบ

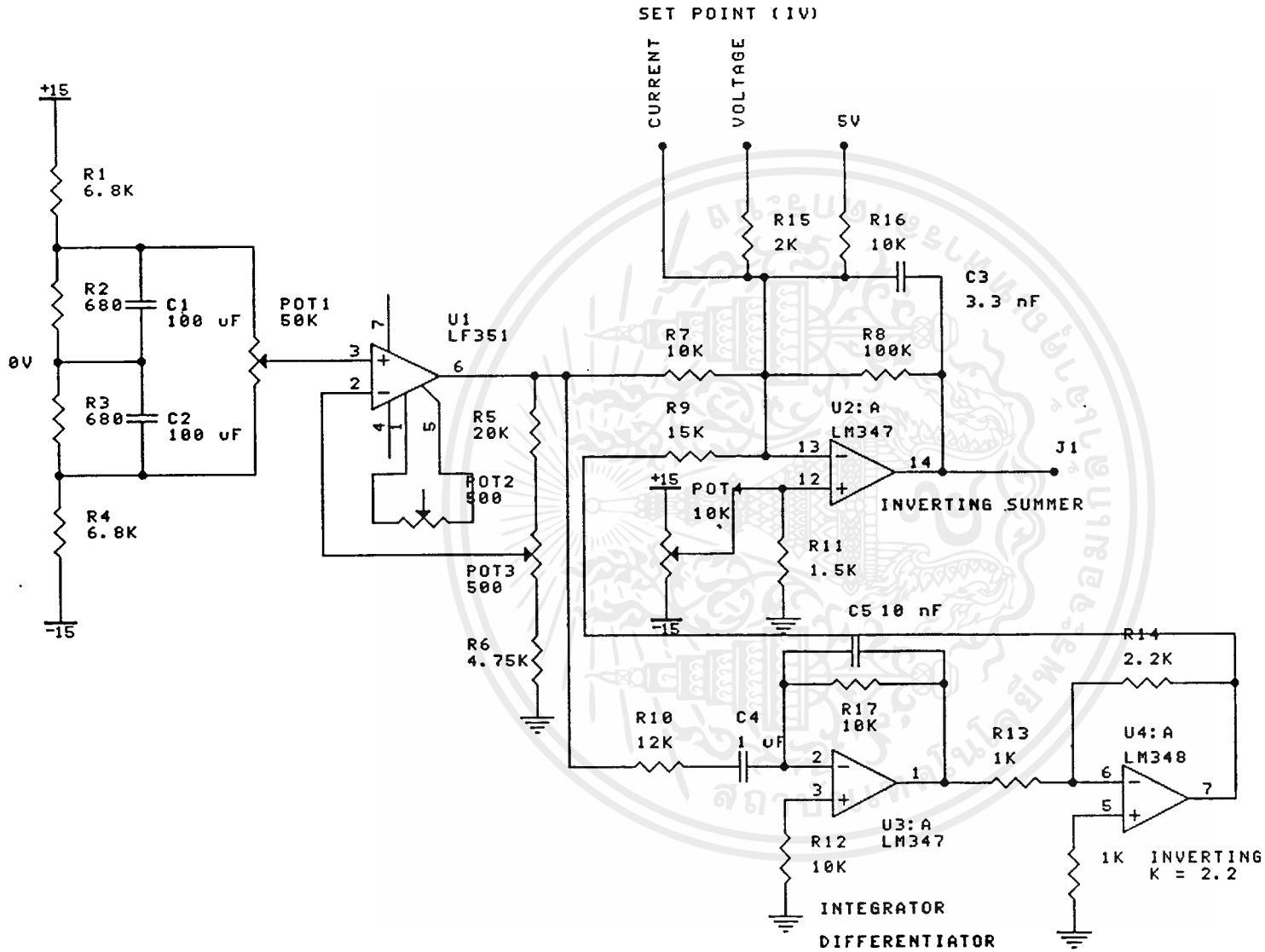
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างสำหรับวงจรซีเควนเชียลลอจิก แสดงดังในรูปที่ 45 ทั้ง 3 วงจรจะใช้สำหรับสเตปปิ้งมอเตอร์ที่มี 4 เฟส และมีวิธีการกระตุ้นเฟสเป็นแบบเฟสคู่ สำหรับรูปที่ 45 (ก) ประกอบด้วย J-K ฟลิปฟลอป 2 ตัว มีการใช้งานเฉพาะทิศทางเดียวเท่านั้น ส่วนในรูปที่ 45(ข) มีการใช้ลอจิกเพิ่มเข้ามาด้วย ซึ่งก็เปรียบได้กับบล็อกในรูปที่ 44(ก) ส่วนในรูปที่ 45(ค) จะใช้ไอซีนับขึ้น/ลง แบบเลขฐานสองและลอจิกเกต เพื่อแยกอินพุตในการควบคุมทิศทาง ซึ่งก็สามารถเปรียบได้กับบล็อกในรูปที่ 44(ข)

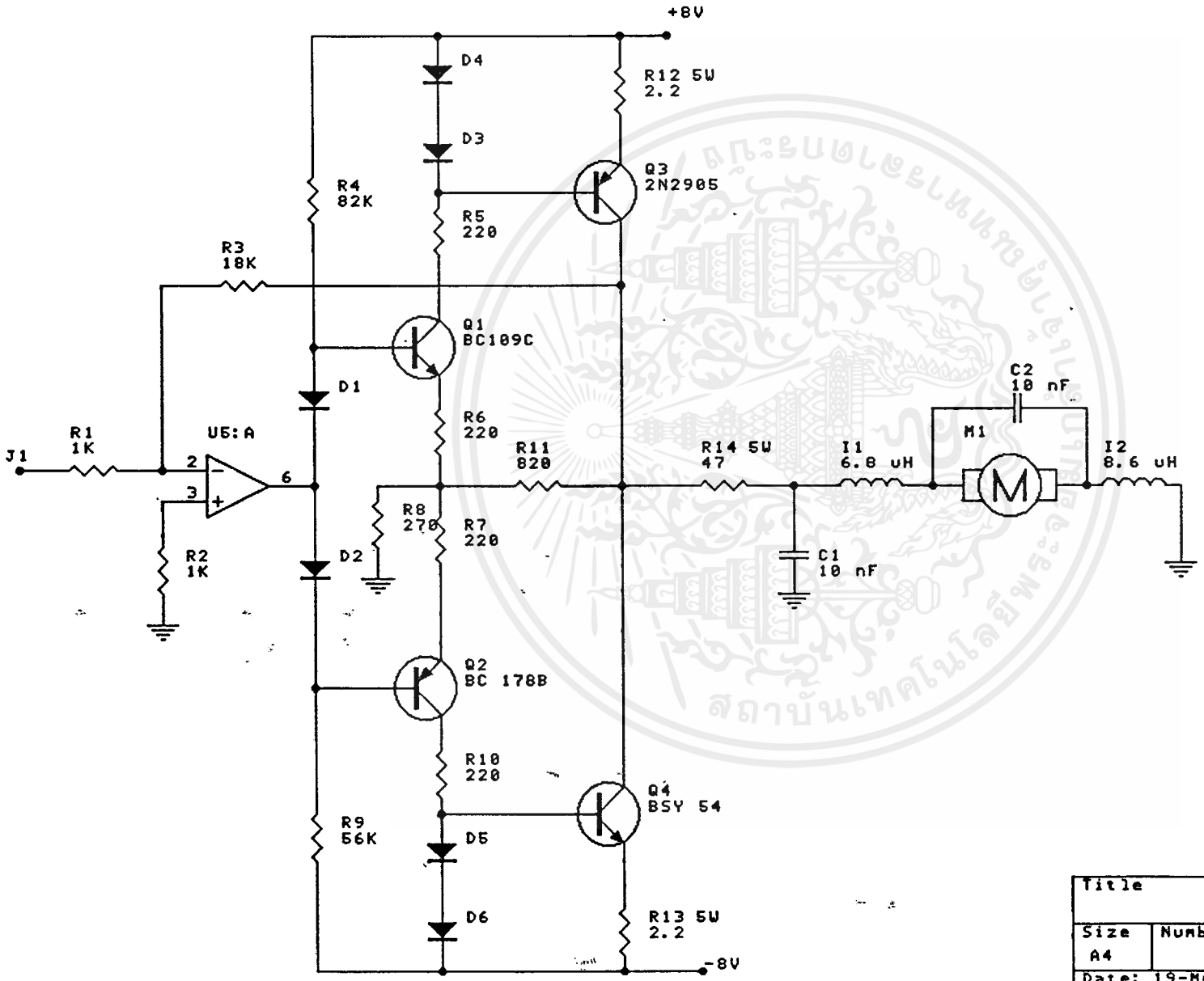


รูปที่ 45 วงจรซีเควนเชียลลอจิก

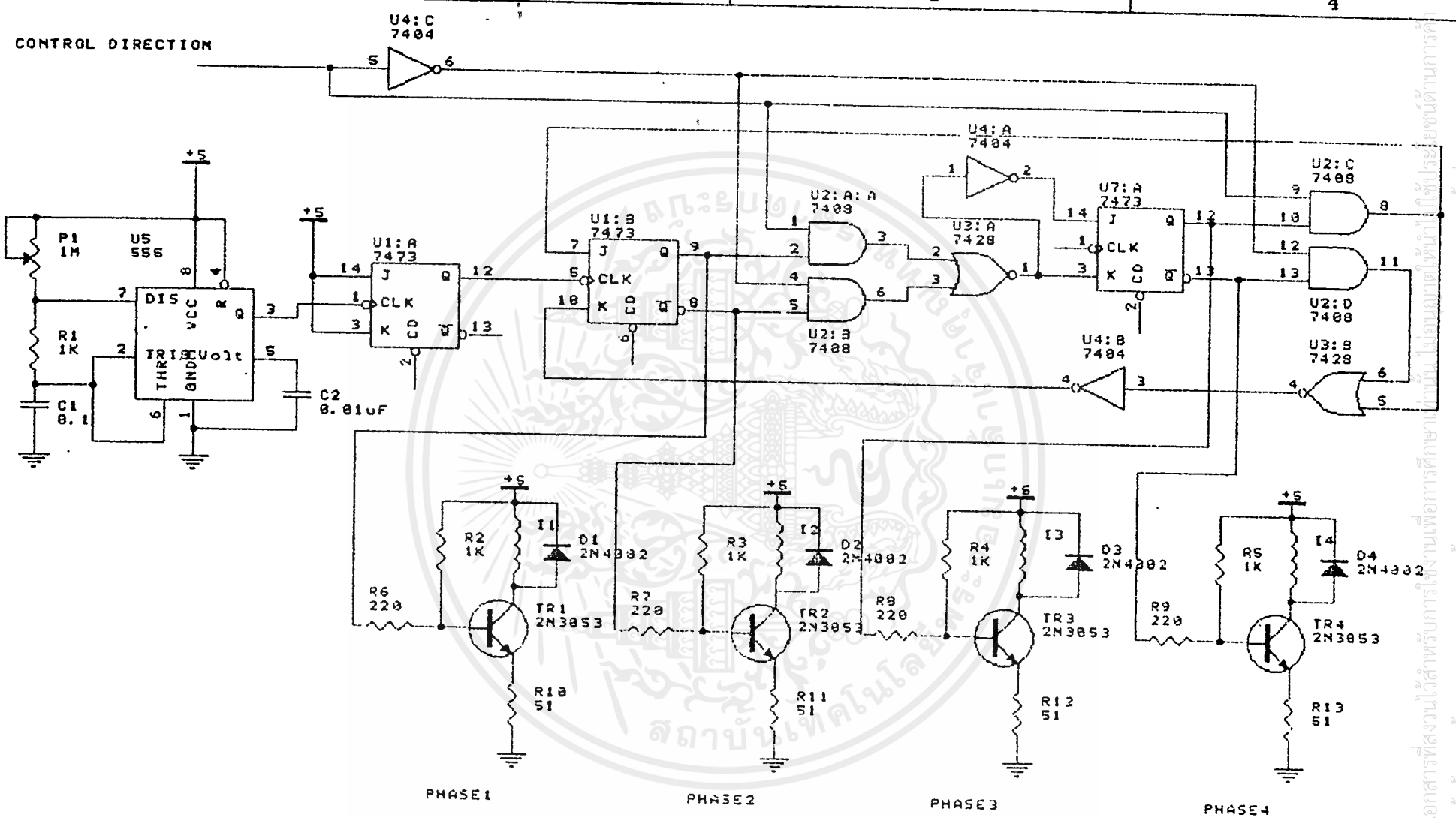
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Title: DC SERVO MOTOR		
Size: A4	Number	Revision
Date: 19-MAR 1993		Sheet of
File: A:\PHUENG/1		Drawn By:



Title: DC SERVO MOTOR		
Size: A4	Number:	Revision:
Date: 19-MAR 1993	Sheet of	
File: A:\PHUENG2/1	Drawn By:	


CONTROL DIRECTION
U4:C
7404
U4:A
7404
U4:B
7404
U5
556
P1
1M
R1
1K
C1
0.1
C2
0.01uF
+5
Volt
U1:A
7473
U1:B
7473
U2:A:A
7408
U2:B
7408
U2:C
7408
U2:D
7408
U3:A
7428
U3:B
7428
U7:A
7473
R2
1K
R3
1K
R4
1K
R5
1K
R6
220
R7
220
R8
220
R9
220
D1
2N4002
D2
2N4002
D3
2N4002
D4
2N4002
TR1
2N3053
TR2
2N3053
TR3
2N3053
TR4
2N3053
R10
51
R11
51
R12
51
R13
51
PHASE1
PHASE2
PHASE3
PHASE4
Title
Size
A4
Number
Revision
Date: 1-JAN 1980
File: B:\PRO1/1
Sheet of
Drawn By:

อธิบายวงจรที่ใช้ในการทดลอง

จากวงจร อธิบายการทำงานของวงจรได้ดังนี้

โพเทนทิโอมิเตอร์ที่สมดุลกัน(Balancing POT) : ทำหน้าที่เป็นโพเทนทิโอมิเตอร์ตรวจจับ(potentiometer detect) ตำแหน่งของมอเตอร์

ความถูกต้องของตำแหน่งนั้น ขึ้นอยู่กับความเป็นเชิงเส้นและความละเอียดของโพเทนทิโอมิเตอร์(potentiometer) เป็นอย่างมาก

โพเทนทิโอมิเตอร์ที่สมดุลกัน(Balancing POT)และความต้านทานที่มีค่าเป็น 638 โอห์มทั้งสองตัวอยู่ในรูปของวงจรบริดจ์(Bridge) ที่มีแรงดันประมาณ 2.16 VDC คือ +1.08 VDC

ค่าพิสัยที่ใช้อยู่ในช่วง+ 1 VDC จากโพเทนทิโอมิเตอร์ (Balancing POT)

ค่าที่ได้จะถูกส่งให้กับวงจรขยายที่เป็นค่าจริงโดยสัดส่วน(Proportional actual value amplifier) (U_1)ซึ่งอยู่ในรูปวงจรขยายไม่กลับเฟส(non - inverting amplifier) ซึ่งมีค่าเกนเป็น 5.2

เอาท์พุทของU_1จะถูกส่งต่อให้ U_2ซึ่งเป็นวงจรขยายเซอร์โว(Servo Amplifier) ในรูปวงจรขยายรวมกันแบบกลับเฟส(inverting summer amplifier) ซึ่งจะเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จาก U_1 และค่าตั้งเอาไว้(Set point)

ค่าที่ตั้งไว้(Set point)จะถูกส่งในรูปแรงดันจะต้องผ่านค่าความต้านทาน 10 K หรือส่งเป็นกระแสไฟฟ้าที่มีค่า 10.4 % 10K = 1.04 mA

ค่าเก็บประจุมีค่า 3.3 nF จะจำกัด ความถี่ของวงจรขยายให้มีค่าประมาณ 480 Hz

U_3 ทำหน้าที่ตรวจจับ(detect) การเปลี่ยนตำแหน่งของมอเตอร์ต่อเวลาอยู่ในรูปวงจรแตกต่าง(Differentiator) และวงจรอินทิเกรเทอร์(Integrator) ถ้ามอเตอร์หมุนให้โพเทนทิโอมิเตอร์ที่มีค่าสมดุล(Balancing POT)เคลื่อนที่ครบสเกลใน 1 วินาที จะมีค่าความชันเท่ากับ 2 V/sec (10.4 V/sec ของ U_1) มีผลทำให้เกิดเอาท์พุทของU_3 มีค่าเท่ากับ 104 mV แล้วจะถูกขยายต่อด้วย U_4 ด้วยค่าเกน 2.2

ค่าเก็บประจุมีค่าเป็น 10 nF และ1 μF ยังเป็นตัวกำหนดค่าเกนของกระแสสลับ(AC) ด้วย X_c $10_n/X_{c1}$ เอาท์พุทของวงจรขยาย และ บูทเตอร์(Booster) แบบดึงดัน (Push Pull)ทำหน้าที่เป็น V-I

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนวงจรขับสเตปปิ้งมอเตอร์

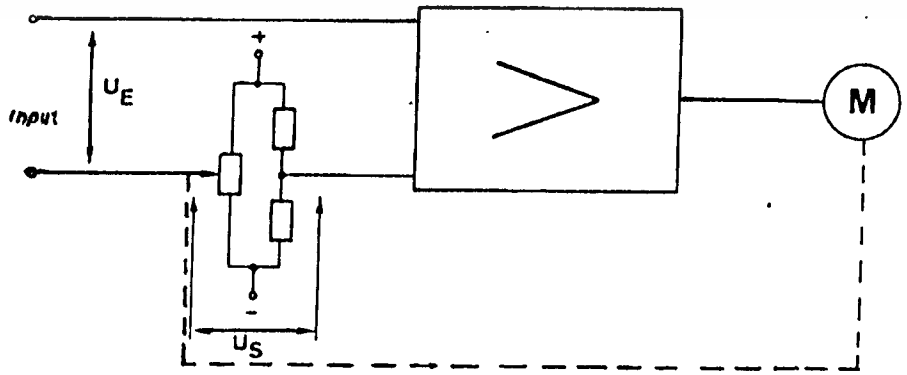
ไอซีไทม์เมอร์ 555 ทำหน้าที่เป็นตัวให้สัญญาณนาฬิกาโดยมี J-K ฟลิปฟลอปเป็นตัวทำให้ดิวตี้ไซเคิล(Duty Cycle)เป็น 50% วงจรซีเควนเชียลประกอบด้วย ไอซี J-K ฟลิปฟลอป 7473 ไอซี 7451และ7404 เป็นตัวกำหนดทิศทางการหมุน การขับจะขับแบบกระตุ้นทีละ 2 เฟส ซึ่งจะได้กำลังและความเรียบของการหมุนที่ดีกว่าแบบกระตุ้นแบบเฟสเดียว

ผลการทดลองและสรุปการทดลอง

เมื่อเราลัดวงจรที่ทางด้านอินพุททำให้โพเทนทิโอมิเตอร์ไม่สมดุล เซอร์โวแอมป์จะถูกจับโดยผลต่างของศักดิ์ดาที่ปรากฏขึ้นมาที่วงจรบริดจ์ ดังนั้นมอเตอร์กระแสตรงจะเริ่มหมุนและทำให้โพเทนทิโอมิเตอร์เปลี่ยนแปลงผลต่างของศักดา ถ้ามอเตอร์เกิดการโอเวอร์ชูท ระบบจะหยุดและจะถูกขับกลับด้านไปสู่จุดสมดุลย์ ขณะนี้ทำให้เอาท์พุทของเซอร์โวแอมป์เป็นศูนย์และมอเตอร์หยุดหมุนและศักดาคร่อมบริดจ์เป็นศูนย์ ถ้ามีการใส่อินพุทศักดาที่อินพุทถูกขยายและขับมอเตอร์ทำให้โพเทนทิโอมิเตอร์เคลื่อนที่จนกระทั่งศักดา U_s และศักดาอินพุท U_E มีขนาดเท่ากันแต่ขั้วต่างกันทำให้เอาท์พุทของเซอร์โวแอมป์เป็นศูนย์

$$\Delta U_E - \Delta U_s = 0$$

ส่วนสเตปปิ้งมอเตอร์จะหมุนไปตามทิศที่กำหนดโดยลอจิกและความเร็วของมอเตอร์ขึ้นกับสัญญาณนาฬิกาที่ป้อนให้แก่วงจร ดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองนี้ใช้มอเตอร์กระแสตรงธรรมดามิได้ใช้เซอร์โวมอเตอร์จริงๆ จึงทำให้เกิดโอเวอร์ชูทสูง เมื่อนำไปใช้งานจริง จึงควรนำไปใช้กับเซอร์โวมอเตอร์จะได้ผลที่ดีกว่า

สเตปปิ้งมอเตอร์ควรใช้ขับที่ความถี่สูงกว่า 20 Hz เนื่องจากความถี่ที่ต่ำเกินไปจะทำให้การหมุนของมอเตอร์เกิดการกระตุกไม่เรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้ที่ประสบผลสำเสร็จก็เนื่องมาจาก อาจารย์สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์ ที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาได้ให้ความรู้ และคำแนะนำต่างๆแก่ผู้เขียนไว้เป็นอย่างดี และขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และคอยเป็นกำลังใจในการทำปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] J.MICHAEL JACOB, "Industrial Control Electronics Applications and Design" Prentice-Hall,1989

[2] Arthur H.Seidman, "Integrated Circuits Application Handbook" Wiley,1983

[3] KATSUHIKO OGATA, "MODERN CONTROL ENGINEERING"Second edition, Printice Hall,1990

[4] TAKASHI KENJO,"stepping Motors ang thier Microprocessor Controls"OXFORD 1984

[5] โยธิน เปรมปราณีรัชต์ "ระบบเซอร์โวและอิเลคทรอนิคคอนโทรลมอเตอร์" สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้