การออกแบบชุดควบคุมสำหรับเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ

CONTROLLER UNIT DESIGN FOR AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR

นายพีรพล วังหล้า

นายประพันธ์ สืบรักษ์

นายทศพล จอมเล็ก

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ปีการศึกษา 2556

56EE117

หัวข้อโครงงาน	การออกแบบชุดควบคุมสำหรับเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ
โดย	นายพีรพล วังหล้า
	นายประพันธ์ สืบรักษ์
	นายทศพล จอมเล็ก
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์เพชร นันทิวัฒนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม อนุมัติให้นับโครงงาน
วิศวกรรมฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

……..... หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
และอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์

(ดร.ภรชัย จูอนุวัฒนกุล)

……..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์เพชร นันทิวัฒนา)

(วันที่……เดือน……พ.ศ.2557)

รหัสโครงงาน 56EE117

การออกแบบชุดควบคุมสำหรับเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ

Controller Unit Design For Automatic Voltage Regulator

บทคัดย่อ (Abstract)

โครงงานนี้เป็นการนำเสนอ การออกแบบและพัฒนาวงจรควบคุมสำหรับเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ ขนาด 1 กิโลโวลต์แอมแปร์แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ความผิดพลาด $\pm$ 1 % รับแรงดันไฟฟ้าอินพุตขนาด 140 – 240 โวลต์ โดยใช้ออปแอมป์ในการลดขนาดของแรงดันไฟฟ้าและแปลงสัญญาณ เพื่อส่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F716 ในการประมวลผล ทำการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าหลักและแรงดันที่จ่ายให้กับโหลด ในโครงงานนี้ผู้จัดทำได้ใช้ วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณในการเปรียบเทียบผลต่างของทั้งสองอินพุต และใช้วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดันเพื่อทำการยกระดับแรงดันขึ้นให้สามารถส่งค่าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ โดยแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่รับเข้ามาจะถูกลดอัตราส่วนขนาด 1 : 100 โดยอัตราส่วนดังกล่าวเป็นแรงดันที่ปลอดภัยสำหรับใช้ในวงจรและเป็นค่าที่สามารถตรวจเช็คได้ง่าย ในการทดลอง ได้ทำการปรับแรงดันอินพุตในมีขนาดตั้งแต่ 140 – 240 โวลต์ เพื่อสังเกตแรงดันทางด้านเอาต์พุต โดยในผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.3 วงจรสามารถควบคุมแรงดันทางด้านเอาต์ให้มีขนาดคงที่ ที่ 220 โวลต์ ได้ตามขอบเขตของโครงงาน

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงงานนี้จะไม่สำเร็จลุล่วงด้วยดี หากปราศจากความอนุเคราะห์และการอบรมสั่งสอนของท่านอาจารย์ทุกท่านโดยเฉพาะ อาจารย์เพชร นันทิวัฒนา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ที่ได้อบรม ให้ความรู้ คอยเตือน คอยกระตุ้นให้ทางผู้จัดทำได้มีแนวทางตัวอย่างให้สามารถทำงานเพื่อให้ลุล่วงต่อไปได้ รวมทั้งคำแนะนำและข้อเสนอต่างๆมาโดยตลอดทั้งเกี่ยวกับเรื่องโครงงานโดยตรงหรือเรื่องการเรียนรู้ใช้ชีวิตภายนอกรั้วมหาวิทยาลัย ทางผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์มา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ บริษัท ซีลลิค สเตเบิ้ล เซอร์วิส จำกัด ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์เพื่อใช้ในการพัฒนาในการทดลองและสร้างชุดควบคุมสำหรับเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ

และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีปทุมที่ให้สถานที่และห้องปฏิบัติการในการจัดทำโครงงาน รวมถึงท่านอาจารย์ทุกท่านที่ทางผู้จัดทำ ได้ล่วงเกินเพื่อขอคำแนะนำและความรู้ต่างๆ

ท้ายสุดขอบคุณรุ่นพี่และเพื่อนทุกๆคน ที่ให้การช่วยเหลือต่าง ๆ ตลอดมา

คณะผู้จัดทำ

2554

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1. บทนำ	
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	2
1.3 ขอบเขตของโครงงาน	2
1.4 ประโยชน์ของโครงงาน	2
1.5 โครงสร้างของโครงงาน	3
บทที่ 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 คุณภาพไฟฟ้า	4
2.2 เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ	10
2.3 ความรู้เบื้องต้นของออปแอมป์	13
2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์	25
บทที่ 3. ออกแบบโครงสร้างการทำงานของวงจรควบคุม	
3.1 ออกแบบชุด Analog Front End	30
3.2 การออกแบบวงจรชุดติดต่อ	37
3.3 การออกแบบและเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์	38
3.4 การออกแบบสร้างวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์	41
3.5 การออกแบบชุดแสดงผล	41
3.6 การออกแบบสร้าง Schematic และ PCB เพื่อประกอบวงจร	43

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4. ผลการทดลอง

4.1 การจำลองการทำงานของชุด Analog Front End 46

4.2 การทดลองการทำงานวงจรตัดต่อ 53

4.3 การทดลองการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ 54

4.4 การทดลองการทำงานวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ 56

4.5 การทดลองการทำงานวงจรแสดงผล 57

4.6 วิจารณ์ผลการทดลอง 58

บทที่ 5. สรุปและข้อเสนอแนะ 59

เอกสารอ้างอิง 60

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ระยะเวลาการเกิดแรงดันตกแรงดันเกิน และไฟดับของการเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงเวลาสั้นๆ 5

ตารางที่ 3.1 แรงดันกระแสตรงที่ป้อนให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 37

ตารางที่ 4.1 บันทึกผลการทดลองแรงดันที่ป้อนเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ 52

ตารางที่ 4.2 บันทึกผลการทดลองวงจรตัดต่อ 53

ตารางที่ 4.3 บันทึกผลการทดลองรับและส่งค่าแรงดันขาออกของไมโครคอนโทรลเลอร์ 55

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1 โครงสร้างของโครงงาน 3
ภาพที่ 2.1 แรงดันตกชั่วขณะ 5
ภาพที่ 2.2 แรงดันเกินชั่วครู่ในระบบไฟฟ้า 6
ภาพที่ 2.3 ไฟดับช่วงสั้นหรือไฟกระพริบ 6
ภาพที่ 2.4 กระแสฮาร์มอนิก 8
ภาพที่ 2.5 คลื่นรอยบากเกิดจากคอนเวอเตอร์ ชนิด 3 เฟส 9
ภาพที่ 2.6 สัญญาณรบกวน 10
ภาพที่ 2.7 แสดงวงจรภายในของออปแอมป์เบอร์ 741 14
ภาพที่ 2.8 แสดงรูปแบบสัญลักษณ์ของออปแอมป์ 15
ภาพที่ 2.9 แสดงตัวถังของออปแอมป์ 15
ภาพที่ 2.10 สัญลักษณ์ของออปแอมป์ 16
ภาพที่ 2.11 ลักษณะการต่อใช้งานของออปแอมป์ 16
ภาพที่ 2.12 กราฟแสดงลักษณะแรงดันของออปแอมป์ในอุดมคติ 17
ภาพที่ 2.13 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส 18
ภาพที่ 2.14 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส 19
ภาพที่ 2.15 วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ 20
ภาพที่ 2.16 วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบ 21
ภาพที่ 2.17 วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน 22
ภาพที่ 2.18 วงจรออปแอมป์ต่ออนุกรมกัน 3 วงจร 23
ภาพที่ 2.19 วงจรขยายสัญญาณในการวัดทางอุตสาหกรรม 24
ภาพที่ 2.20 ไมโครคอนโทรลเลอร์ 25
ภาพที่ 2.21 โครงสร้างการทำงานของไมรโครคอนโทลเลอร์ 26
ภาพที่ 2.22 โครงสร้างการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 29
ภาพที่ 3.1 บล๊อกไดอะแกรมขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง 30
ภาพที่ 3.2 วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ 31
ภาพที่ 3.3 วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน 33
ภาพที่ 3.4 วงจรออฟแอมป์ที่ทำการออกแบบ 34
ภาพที่ 3.5 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 V 35

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3.6 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 V และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1.5 – 3 V 35
ภาพที่ 3.7 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 V และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 36
1.5 – 3 V และเส้นแสดงลิมิตของสัญญาณแรงดันที่จะเข้า ไมโครคอนโทรลเลอร์
ภาพที่ 3.8 วงจรรีเลย์ควบคุม 37
ภาพที่ 3.9 บล๊อกไดอะแกรมแสดงการเลือกใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ 38
ภาพที่ 3.10 ขั้นตอนการทำงานของการออกแบบไมโครคอนโทรลเลอร์ 39
ภาพที่ 3.11 บล๊อกไดอะแกรมการเลือกใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ 40
ภาพที่ 3.12 การออกแบบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ 41
ภาพที่ 3.13 การออกแบบวงจรชุดแสดงผล 42
ภาพที่ 3.14 LOGIC DIAGRAM IC74LS164 42
ภาพที่ 3.15 เงื่อนไขการทำงานของ IC74LS164 43
ภาพที่ 3.16 Schematic วงจรควบคุม 44
ภาพที่ 3.17 PCB วงจรควบคุม 45
ภาพที่ 4.1 การจำลองการทำงานของวงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ 46
ภาพที่ 4.2 การจำลองการทำงานร่วมกันของวงจรออฟแอมป์ ค่าเอาต์พุต 47
ที่ได้มีค่า = 2 V ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบในตารางที่ 3.1
ภาพที่ 4.3 ผลการจำลองวงจรตามแรงดันโดยโปรแกรม Proteus 48
ภาพที่ 4.4 แสดงตำแหน่งบล๊อกการทดลอง 49
ภาพที่ 4.5 การบันทึกการทดลองผลต่างของแรงดันทางด้าน V_S และ V_L 50
โดยที่ V_S = 140 V , V_L = 220 V
ภาพที่ 4.6 การบันทึกการทดลองผลต่างของแรงดันทางด้าน V_S และ V_L 50
โดยที่ V_S = 200 V , V_L = 220 V
ภาพที่ 4.7 การบันทึกการทดลองผลต่างของแรงดันทางด้าน V_S และ V_L 51
โดยที่ V_S = 220 V , V_L = 220 V
ภาพที่ 4.8 การบันทึกการทดลองผลต่างของแรงดันทางด้าน V_S และ V_L 51
โดยที่ V_S = 240 V , V_L = 220 V
ภาพที่ 4.9 วงจรรีเลย์ควบคุม 53
ภาพที่ 4.10 การทดลองการรับและส่งค่าของแรงดันขาออกไมโครคอนโทรลเลอร์ 54

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.11 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ 56
ภาพที่ 4.12 ภาพโดยรวมของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ 56
ภาพที่ 4.13 ภาพโดยรวมของวงจรแสดงผล 57
ภาพที่ 4.13 ภาพวงจรแสดงผลเมื่อทำการทดสอบ 58

บทที่1
บทนำ

ปัจจุบันผู้ผลิตและผู้ใช้ไฟฟ้าให้ความสนใจเกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้ามากขึ้น คำว่าคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) เป็นคำหนึ่งที่ถูกกล่าวถึงในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับไฟฟ้ากำลังมาก ซึ่งส่วนใหญ่เกิดในระบบไฟฟ้าอยู่แล้ว แต่การแก้ไขปัญหาอาจกระทำแยกกันในแต่ละชนิดของสิ่งรบกวนในแต่ละแห่งที่เกิดปัญหา ปัจจุบันวิศวกรไฟฟ้ามองปัญหาเหล่านี้อย่างเป็นระบบ และพยายามแก้ไขปัญหาในภาพรวมของระบบ เหตุผลหลักที่ทำให้ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น เช่น

1. อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน มีความไวในการตอบสนองต่อคุณภาพไฟฟ้ามากกว่าอุปกรณ์ที่เคยใช้ในอดีต อีกทั้งยังมีการควบคุมโดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์และอุปกรณ์อิเล็กทอนิกส์กำลังซึ่งเปลี่ยนแปลงตามสิ่งรบกวนหลายชนิดที่เกิดขึ้นในระบบได้ง่าย

2. ความสำคัญและความพยายามที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

3. การที่ผู้ใช้ไฟฟ้าได้รับปัญหาคุณภาพไฟฟ้า เช่นปัญหาจากการเกิดไฟฟ้าดับ การเกิดแรงดันไฟตกขณะ ภาวะชั่วขณะของการสวิตช์มากขึ้น

จากปัญหาดังกล่าวซึ่งเป็นเรื่องที่สำคัญที่ต้องการการป้องกันและแก้ไขทำให้ผู้เสนอโครงการได้คิดค้นหาวิธีในการแก้ไขปัญหาโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ามาช่วยการแก้ไขปัญหา

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่มีสภาวะผิดปกติของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มาจากแรงดันไฟฟ้าไม่มีเสถียรภาพ แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ หมายถึง แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ ในช่วงสั้นๆน้อยกว่า 2-3 วินาทีซึ่งมักจะเกิดจากสาเหตุ การเปิด- ปิด มอเตอร์ขนาดใหญ่ และระบบตัดต่อวงจรไฟฟ้าหรือระบบสายไฟที่มีขนาดเล็กรวมทั้ง ระบบสายส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ไม่สามารถรองรับการใช้ไฟฟ้ามากชั่วขณะ แรงดันไฟฟ้ากระชากชั่วขณะ หมายถึง แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติหลายเท่า ในช่วงสั้นๆ ภายในหนึ่งลูกคลื่นสาเหตุมักจะเกิดมาจากการเกิดฟ้าผ่า หรือการตัดต่อวงจรไฟฟ้าขนาดใหญ่ ทำให้ระบบไฟฟ้าศูนย์เสียเสถียรภาพ เครื่องคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ(Automatic Voltage Regulator)จึงมีบทบาทในการรักษาแรงดันไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพ หาก

ไม่มีการใช้เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติเมื่อเกิดการศูนย์เสียเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าอาจทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือเครื่องจักรในอุตสาหกรรมเสียหาย บริษัท ซีลลิค สเตเบิล เซอร์วิส จำกัด เป็นผู้ผลิตและจำหน่ายเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติโดยนำเข้าวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากประเทศจีนซึ่งยังมีความยากต่อการพัฒนา ดังนั้นโครงงานนี้ได้รับโจทย์จากบริษัท ซีลลิค สเตเบิล เซอร์วิส จำกัด ให้ร่วมพัฒนาวงจรควบคุมสำหรับเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติเพื่อให้สามารถพัฒนาในประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

- เพื่อศึกษาหลักการใช้เครื่องควบคุมระบบไฟฟ้าอัตโนมัติในการปรับปรุงคุณภาพของระบบไฟฟ้า
- เพื่อศึกษาหลักการทำงานภายในของเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ
- เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การแก้ปัญหาต่างๆในการทำโครงงาน

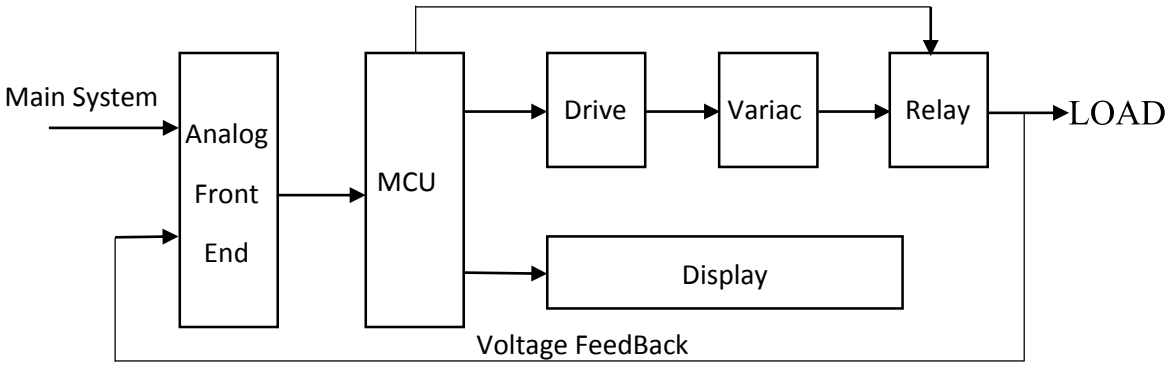
1.3 ขอบเขตของโครงงาน

- ออกแบบวงจรควบคุมสำหรับเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติขนาด 1 kVA
- แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ อินพุต 140 – 240 V ความถี่ 50 H_z
- แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เอาท์พุต 220 V +/- 1%

1.4 ประโยชน์ของโครงงาน

- ปรับคุณภาพไฟฟ้าให้ดีขึ้นโดยชุดควบคุมที่ใช้กับเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ เพื่อไปใช้งานอย่างปลอดภัย
- ช่วยลดต้นทุนการนำเข้าวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากประเทศจีนมาพัฒนาภายในประเทศ

1.5 โครงสร้างของโครงงาน



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างของโครงงาน

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบคุณภาพไฟฟ้า [1]

ปัจจุบันคำว่าคุณภาพไฟฟ้า(Power Quality)เป็นที่พูดถึงบ่อยในเรื่องของความมั่นคงของการจ่ายไฟฟ้าของระบบจากการไฟฟ้าฯและกรณีเมื่อเกิดปัญหากับอุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาด หรือหยุดการทำงานจากผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งเห็นได้ว่าคำนิยามของคำว่าคุณภาพกำลังไฟฟ้าระหว่างการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าจะพูดถึงในกรณีที่แตกต่างกันไป แต่ในความจริงแล้วมีความหมายเดียวกันซึ่งนิยามของคุณภาพกำลังไฟฟ้า ตามมาตรฐานสากล IEC และ IEEE ให้ความหมายของคุณภาพกำลังไฟฟ้า คือ คุณลักษณะกระแส แรงดัน และความถี่ของแหล่งไฟฟ้าในสภาวะปกติไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาดหรือเกิดการเสียหาย

2.1.1 ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปเกิดจาก 5 สาเหตุใหญ่

- จากปรากฏการณ์ธรรมชาติเช่น ฟ้าผ่า
- จากการเกิดสภาวะความผิดพร่อง (Fault) ทางไฟฟ้าในระบบสายส่งและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า
- จากการกระทำการสวิตชิ่งอุปกรณ์ในระบบ
- จากการใช้งานอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นในระบบอุตสาหกรรม
- จากการต่อลงดินที่ไม่ถูกต้อง

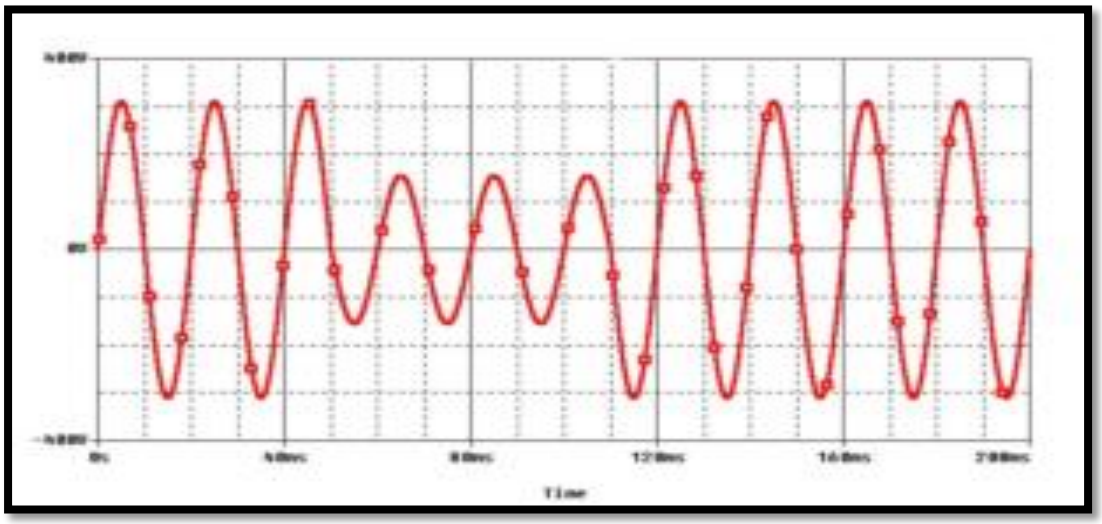
2.1.2 การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะสั้น (Short Duration Voltage Variation)

คือการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน RMS ที่มีระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าไม่เกิน 1 นาที มีสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากสภาวะความผิดพร่องทางไฟฟ้า ทำให้เกิดเหตุการณ์แรงดันตก (Voltage Sag หรือ Voltage Dip) แรงดันเกิน (Voltage Swell) และไฟดับ (Interruptions) มาตรฐาน IEEE Std. 1159-1995 มีการเรียกชื่อแรงดันดังกล่าวตามระยะเวลาที่เกิดคือชั่วครู่ (Temporary) ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่2.1 แสดง ระยะเวลาการเกิดแรงดันตก แรงดันเกิน และไฟดับของการเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงเวลาสั้นๆ

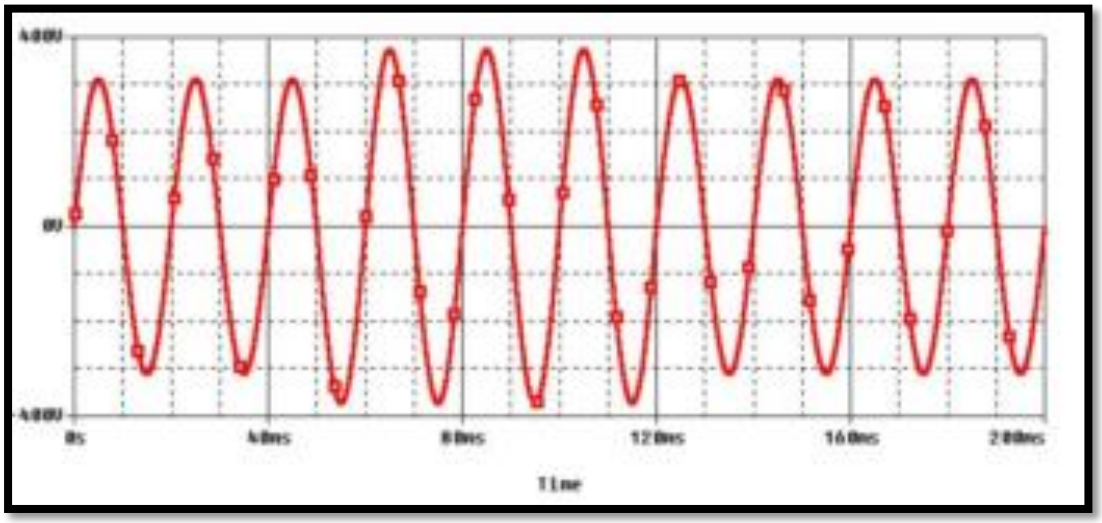
ชนิดของการเกิด	ระยะเวลาที่เกิด
แรงดันตก , แรงดันเกิน	ชั่วขณะ 3 sec – 1min
ไฟดับช่วงสั้น	ชั่วขณะ 3 sec – 1min

แรงดันตกชั่วขณะ คือ การลดลงของแรงดันค่ารากกำลังสองเฉลี่ยระหว่าง 0.1-0.9 เปอร์ยูนิต ที่ความถี่ระบบ ในช่วงเวลา 3 วินาทีถึง 1 นาที คำว่าแรงดันตกชั่วขณะหรือ Sags ถูกนำมาใช้เป็นเวลาหลายปี ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงแรงดันในช่วงเวลาสั้น ถึงแม้ว่าจะไม่มีความหมายอย่างเป็นทางการแต่เป็นที่ยอมรับและใช้กันทั้งผู้ผลิตไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า ในมาตรฐาน IEC ใช้คำว่า Dips คำสองคำนี้ใช้แทนกันได้ โดยคำว่า Sags เป็นที่นิยมใช้กันในสหรัฐอเมริกา ดังแสดงใน ภาพที่ 2.1



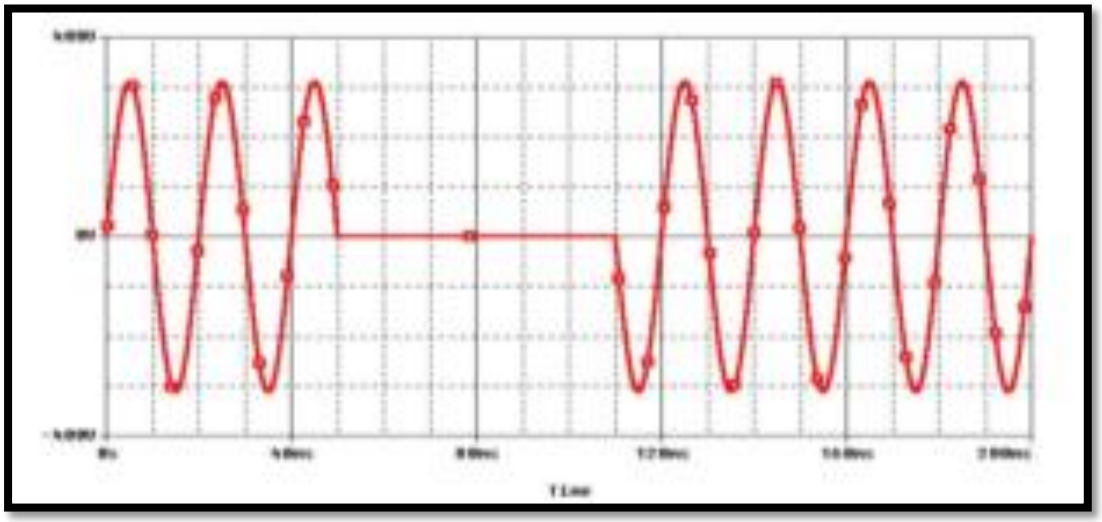
ภาพที่ 2.1 แรงดันตกชั่วขณะ

แรงดันเกินชั่วขณะ คือ ภาวะที่แรงดันเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1 และ 1.8 เปอร์ยูนิต ในช่วงระยะเวลา 3 วินาทีถึง 1 นาที ที่ระบบแรงดันเกินชั่วขณะอาจเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้า เช่น การลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน (Single Line To Ground Fault) ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แรงดันเกินชั่วครู่ในระบบไฟฟ้า

ไฟดับช่วงสั้นหรือไฟกระพริบ คือค่าแรงดัน RMS มีค่าลดลงต่ำกว่า 0.1 เปอร์ยูนิต ในช่วงระหว่าง 3 วินาทีถึง 1 นาที มีสาเหตุเกิดจากสภาวะความผิดพร่องทางไฟฟ้าในระบบ ทำให้อุปกรณ์ป้องกันมีการตัดวงจรแหล่งจ่ายไฟออก ดังภาพที่ 2.3 แสดงการเกิดไฟดับช่วงระยะเวลาสั้นๆ ประมาณ 1.8 วินาที จากการทำงานของรีโคลสเซอร์ตัดวงจรแหล่งจ่ายออกจากระบบก่อนจะมีการต่อวงจรเข้าไปดังเดิมอีกผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าหยุดการทำงาน ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ไฟดับช่วงสั้นหรือไฟกระพริบ

2.1.3.ความผิดเพี้ยนรูปคลื่น (WAVEFORM DISTORTION)

การผิดเพี้ยนของรูปคลื่น คือ การเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นไซน์ในสภาวะคงตัวที่ความถี่กำลังและแบ่งรูปแบบการผิดเพี้ยนได้เป็น 5 รูปแบบ คือ

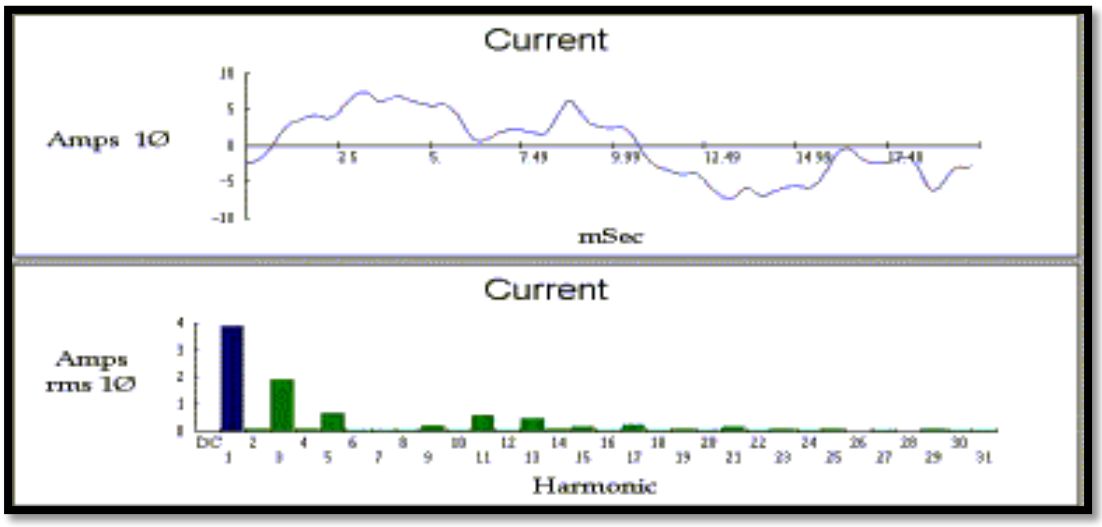
2.1.3.1 ออฟเซ็ทกระแสตรง (DC offset)

ออฟเซ็ทกระแสตรง (DC Offset) คือ แรงดันหรือกระแสไฟฟ้ากระแสตรงที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากระแสสลับโดยเป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กโลกรบกวน หรือเกิดจากวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งรูปคลื่น (Half Wave) นอกจากนี้ไฟกระแสตรงในระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามารถก่อให้เกิดความเสียหายกับระบบได้โดยทำให้เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็กของหม้อแปลงในสภาวะจ่ายไฟปกติได้ และทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นและอายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลง นอกจากนั้นไฟกระแสตรงในระบบกระแสสลับนี้ทำให้เกิดการกัดกร่อนทางไฟฟ้ากับแท่งดิน (Grounding Electrodes) และขั้วต่อสายในระบบได้

2.1.3.2 ฮาร์มอนิก (Harmonic)

ฮาร์มอนิก คือ รูปคลื่นไซน์แรงดันหรือกระแสที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่า และเป็นเลขจำนวนเต็มของความถี่มูลฐาน (ความถี่มูลฐานทั่วไป คือ 50 หรือ 60 เฮิร์ต) รูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนนี้สามารถแยกออกเป็นผลรวมของความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์มอนิกได้ ฮาร์มอนิกเกิดจากอุปกรณ์หรือโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นในระบบไฟฟ้า

ความรุนแรงของฮาร์มอนิกอธิบายได้โดยใช้สเปกตรัมฮาร์มอนิกซึ่งประกอบด้วยขนาดและมุมของฮาร์มอนิกแต่ล่ะค่า ค่าที่นิยมใช้บอกระดับความรุนแรงของฮาร์มอนิกคือ ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion, THD) ในภาพที่ 2.4 แสดงรูปคลื่นกระแสฮาร์มอนิกสำหรับมอเตอร์ที่ปรับความเร็วรอบได้ในบางกรณีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม อาจทำให้เข้าใจสับสนได้ เช่น ในมอเตอร์ที่ปรับความเร็วรอบได้ อาจมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมสูงมากในขณะที่จ่ายโหลดต่ำ ซึ่งไม่ได้สร้างความเสียหายให้กับระบบเพราะกระแสโหลดมีค่าน้อยมาก ถึงแม้ว่าความผิดเพี้ยนจะมีค่าสูงก็ตาม ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดค่าความผิดเพี้ยนรวม (Total Demand Distortion, TDD) ค่านี้คล้ายกับค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมแตกต่างกันที่การหาค่าเป็นเปอร์เซ็นต์จะใช้เทียบกับค่ากระแสพิกัดของโหลด



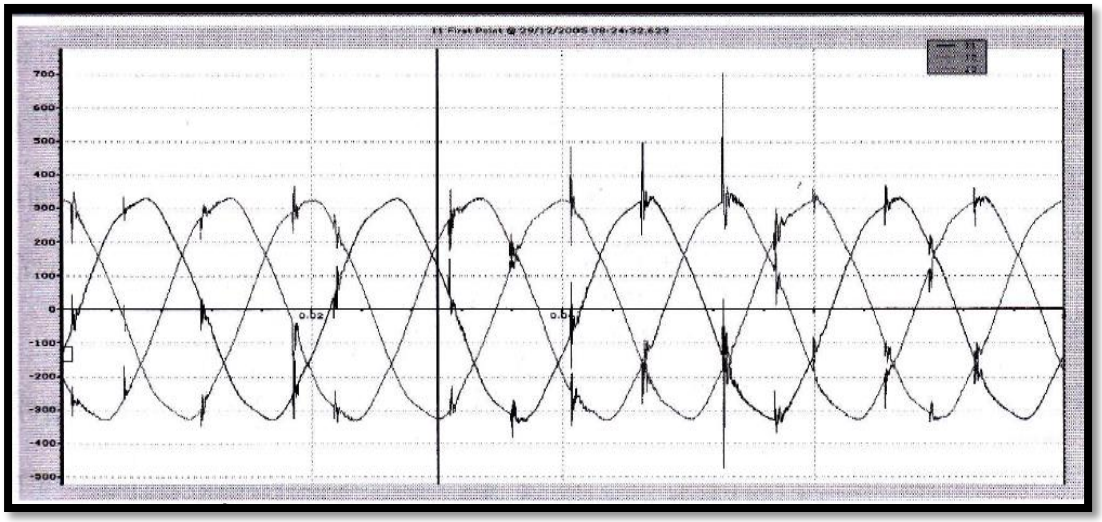
ภาพที่ 2.4 กระแสฮาร์มอนิก

2.1.3.3 อินเตอร์ฮามอนิก (Interharmonics)

อินเตอร์ฮามอนิก คือ รูปคลื่นไซน์แรงดันหรือกระแสที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าและไม่ใช่เลขจำนวนเต็มของความถี่มูลฐาน โดยจะปรากฏในรูปของความถี่เป็นค่า หรือเป็นแถบสเปกตรัมขนาดกว้าง อินเตอร์ฮาร์มอนิก พบในทุกๆระดับแรงดันของระบบ สาเหตุหลักของการเกิดอินเตอร์ฮาร์มอนิก คือ โหลดตัวแปลงความถี่สถิต (Static Frequency Converter) ไซโครคอนเวอเตอร์ (Cycloconverter) มอเตอร์เหนี่ยวนำและอุปกรณ์เชื่อมไฟฟ้า สัญญาณพาหนะที่ส่งในสายส่งไฟฟ้า (Power Line Carrier, PLC) จัดเป็นอินเตอร์ฮาร์มอนิกเช่นกัน ผลกระทบของอินเตอร์ฮาร์มอนิกไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด โดยผลที่เกิดจากอินเตอร์ฮาร์มอนิก คือ ผลกระทบในสัญญาณพาหนะที่ส่งในสายไฟฟ้า (PLC) และการกระพริบในการแสดงภาพของระบบจอหลอดภาพ (Cathode Ray Tube, CRT)

2.1.3.4 รอยบาก (Notching)

รอยบาก คือ การรบกวนแรงดันเป็นช่วงๆ สม่ำเสมอหรือเป็นคาบ มีสาเหตุจากการทำงานปกติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ทำให้เกิดการนำกระแสและเปลี่ยนจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่ง รอยบากจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในระบบและสามารถแยกออกมาให้เห็นได้โดยใช้ฮาร์มอนิกสเปกตรัมเช่นเดียวกับฮาร์มอนิกแต่มักถูกจัดให้เป็นกรณีพิเศษของฮาร์มอนิกเพราะความถี่ที่เกี่ยวข้องกับรอยบากบนรูปคลื่นนั้นมักมีความถี่สูง และอาจไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ฮาร์มอนิกทั่วไป ภาพที่ 2.5 แสดงการเกิดรอยบากบนรูปคลื่นแรงดันจากคอนเวอเตอร์สามเฟสซึ่งมีการจ่ายไฟกระแสตรงอย่างต่อเนื่อง รอยบากเกิดขึ้นเมื่อมีการนำกระแสไฟฟ้าจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่งในระหว่างช่วงนี้จะเกิดการลัดวงจรชั่วขณะระหว่างสองเฟสนี้ ทำให้ค่าแรงดันลดลงมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ

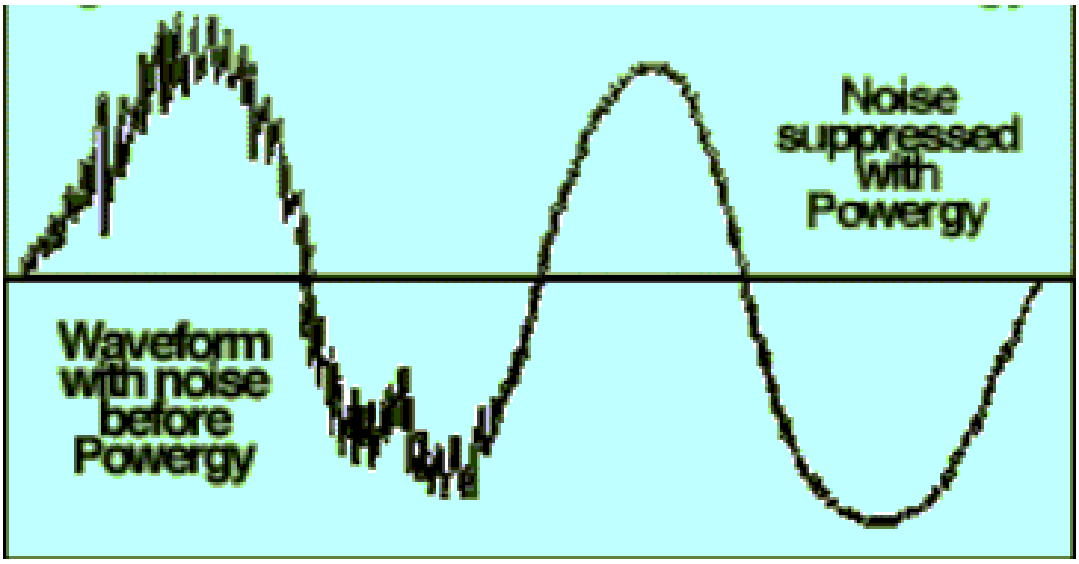


ภาพที่ 2.5 คลื่นรอยบากเกิดจากคอนเวอเตอร์ ชนิด 3 เฟส

2.1.3.5 สัญญาณรบกวน (NOISE)

สัญญาณรบกวน คือ สัญญาณทางไฟฟ้าที่ไม่ต้องการ ที่มีช่วงสเปกตรัมต่ำกว่า 200 กิโลเฮิร์ต โดยอาจเกิดขึ้นบนรูปคลื่นแรงดันหรือกระแสของสายเฟสของระบบหรือพบได้ในสายนิวทรอล หรือสายสัญญาณรบกวนในระบบไฟฟ้ากำลังมีสาเหตุมาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรควบคุม อุปกรณ์เชื่อมไฟฟ้าโหลดชนิดตัวเรียงกระแสไฟฟ้า (Solid State Rectifier) และการสวิตช์ของแหล่งจ่ายไฟ ปัญหาของสัญญาณรบกวนจะมีความรุนแรงมากหากไม่มีการต่อลงดิน (Grounding) หรือระบบต่อลงดินไม่มีประสิทธิภาพทำให้ไม่สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนออกจาก

ระบบได้ โดยทั่วไปแล้วสัญญาณรบกวน ประกอบด้วยสัญญาณผิดเพี้ยนที่ไม่ต้องการ ซึ่งไม่สามารถแยกเป็นการผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก หรือสภาวะชั่วครู่ สัญญาณรบกวนจะรบกวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไมโครคอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์ควบคุมที่สามารถโปรแกรมได้



ภาพที่ 2.6 สัญญาณรบกวน (Noise)

2.2 เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ [2]

AVR (Automatic Voltage Regulator) เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ เป็นอุปกรณ์สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงทำการปรับคุณภาพไฟฟ้าให้ดีขึ้น ควบคุมการทำงานด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ เพื่อปรับแต่งสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave) ให้มีรูปทรงคงที่ นั่นหมายถึง แรงดันไฟฟ้าคงที่ โดยมีการรวมระบบปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติเข้าไว้ จึงสามารถปรับสภาพแรงดันไฟฟ้าที่ผิดปกติให้คงที่ ด้วยการเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้าให้สูงขึ้นหรือต่ำกว่าระดับที่เครื่องสามารถควบคุมได้ รวมถึงมีวงจรป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินหรือแรงดันไฟฟ้าตก โดยจะทำการตัดไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเมื่อแรงดันไฟฟ้ารวมสูงเกิน แล้วจะกลับมาทำงานใหม่เองโดยอัตโนมัติอีกครั้งเมื่อแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้าอยู่ในระดับที่ปลอดภัย นอกจากนี้ยังมีระบบการป้องกันการใช้ไฟฟ้าเกินกำลังและไฟฟ้าลัดวงจร, ระบบป้องกันสัญญาณรบกวน (สัญญาณรบกวนที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) และสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ (RFI) ฯลฯ) และระบบป้องกันแรงดันสูงชั่วขณะจากฟ้าผ่า เนื่องจากเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติหรือเครื่องรักษาระดับแรงดันและปรับคุณภาพไฟฟ้าอัตโนมัติ มีหน้าที่ในการปรับแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า ดังนั้น จึงเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อ

การปฏิบัติงานที่ต้องการคุณลักษณะ ดังนี้ งานที่ต้องการความเชื่อถือสูง, งานที่ต้องใช้ความระมัดระวัง และงานติดตั้งในพื้นที่ห่างไกลที่แรงดันไฟฟ้าไม่มีความน่าเชื่อถือ และงานประเภท Service Call ที่มีมูลค่ามาก ในขณะเดียวกันเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติหรือเครื่องรักษาระดับแรงดันและปรับคุณภาพไฟฟ้าอัตโนมัติ มีส่วนประกอบของไมโครโปรเซสเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง จึงทำให้คุณสมบัติของเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติหรือเครื่องรักษาระดับแรงดันและปรับคุณภาพไฟฟ้าอัตโนมัติ มีมากขึ้นตามไปด้วย เช่น มีฟังก์ชั่นการทำงานสูง, มีความเชื่อถือได้สูง, ใช้งานง่ายและบำรุงรักษาง่ายเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติหรือเครื่องรักษาระดับแรงดันและปรับคุณภาพไฟฟ้าอัตโนมัติ สามารถใช้ได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่ต้องการปรับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ โดยอุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านั้นจะต้องไม่เกิดผลกระทบ/ความเสียหายในกรณีที่เกิดไฟฟ้าดับ มักจะไม่นิยมนำเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติหรือเครื่องรักษาระดับแรงดันและปรับคุณภาพไฟฟ้าอัตโนมัติ ไปใช้กับระบบคอมพิวเตอร์ เนื่องจากไม่สามารถสำรองไฟฟ้าได้เหมือนกับ UPS จึงนำเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติหรือเครื่องรักษาระดับแรงดันและปรับคุณภาพไฟฟ้าอัตโนมัติ ไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ามากกว่า

โดยปกติแล้วการควบคุมแรงดันไฟฟ้า จะพยายามให้เป็นไปอย่างรวดเร็ว เพื่อให้ใช้งานมีประสิทธิภาพ แต่บางแห่งยินยอมให้ความเร็วในการปรับแรงดันไฟฟ้าที่ผิดปกติสู่สภาวะปกติ ในเวลาไม่เกิน 40 ไซเกิล (800 มิลลิวินาที) แต่บางแห่งก็ไม่ยินยอมให้นานเกินกว่า 10 ไซเกิล(200 มิลลิวินาที)

เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้า มีแนวทางการออกแบบเป็น 2 ชนิด 6 วิธีดังนี้

- เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้า 1 เฟส
- เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส

- ชนิดหม้อแปลงแปรค่าได้ด้วยมอเตอร์ (Motor Operated Variable Transformer)
- ชนิดควบคุมการเหนี่ยวนำ (Rototrol or Induction Regulator)
- ชนิดหม้อแปลงเฟอร์โรเรโซแนนซ์ (Ferroresonant Transformer)
- ชนิดควบคุมด้วยการเชื่อมต่อแบบแม่เหล็ก (Magnetic Coupling Controlled Voltage Regulators)
- ชนิดควบุมด้วยแทปสวิตชิง (Tap Switching Regulators)
- ชนิดควบคุมด้วยคาปาซิเตอร์สวิตชิ่ง (Capacitor Switching For Voltage Control)

2.2.1 การเลือกใช้งานเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ

- **ระบบงานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ต้องการความเสถียรภาพทางไฟฟ้า**

เหมาะสำหรับใช้ป้องกันอุปกรณ์อิเล็กทรกนิคส์ต่างๆ ที่ต้องการความเสถียรภาพทางไฟฟ้า เช่น PABX, ระบบสื่อสารข้อมูล, เครื่องมือสื่อสาร, เครื่องถ่ายเอกสาร, โฮมเธียเตอร์, เครื่องขยายเสียง, เครื่องชั่ง, เครื่องมือวัด, เครื่องมือวิเคราะห์และเครื่องมือวิทยาศาสตร์ เป็นต้น

- **ระบบงานอุตสาหกรรม**

เหมาะสำหรับใช้ป้องกันเครื่องจักรอุตสาหกรรมและใช้ในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ต้องการความเสถียรภาพทางไฟฟ้าสูง เช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์, อุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์, อุตสาหกรรมเครื่องประดับ, อุตสาหกรรมสิ่งทอ, อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์, อุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอางค์ เป็นต้น

โดยในโครงงานนี้เลือกใช้เครื่องควบคุมไฟฟ้าชนิดหม้อแปลงแปรค่าได้ด้วยมอเตอร์

2.2.1.1 เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าชนิดหม้อแปลงแปรค่าได้ด้วยมอเตอร์

เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าชนิดหม้อแปลงแปรค่าได้ด้วยมอเตอร์ (Motor Operated Variable Transformer)

ประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแปรค่าได้ ซึ่งมีการขับเคลื่อนด้วยการทำงานของมอเตอร์ โดยการเปลี่ยนแขนสัมผัสที่เปลี่ยนไปตามขดลวดที่อยู่ด้านออกของขดลวดทุติยภูมิ และมีอุปกรณ์ที่คอยตรวจจับแรงดันไฟฟ้าด้านออกตลอดเวลา หากแรงดันไฟฟ้าด้านออกผิดไปจากค่าที่ตั้งไว้ ก็จะส่งสัญญาณไปยังมอเตอร์ให้ทำงานขับเคลื่อนแขนสัมผัส จนแรงดันไฟฟ้าด้านออกได้ตามที่ต้องการ ซึ่งการที่แขนสัมผัสเคลื่อนไปนั้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกเปลี่ยนตามไปด้วย จึงเป็นการปรับแรงดันไฟฟ้าได้ดี และมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าน้อย

แต่การใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนแขนสัมผัสนั้น จะทำการปรับแรงดันไฟฟ้าค่อนข้างช้า จึงไม่เหมาะสมนักที่จะนำเครื่องควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าชนิดนี้ มาใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต้องการความเร็วในการปรับแรงดันไฟฟ้าเช่น คอมพิวเตอร์ นอกจากนี้แล้ว ในการเคลื่อนที่ของหน้าสัมผัสของแขนสัมผัสดังกล่าว ยังเป็นการสร้างคลื่นรบกวนให้แทรกเข้าในระบบไฟฟ้าอีกด้วย ลักษณะของเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าชนิดนี้ แรงดันดันไฟฟ้าด้านออกจะถูกควบคุมและถูกปรับแต่งอยู่ตลอดเวลา

เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าชนิดนี้ จะมีประสิทธิภาพสูง คือ มีความสูญเสียทางไฟฟ้าน้อยมากเนื่องจากความต้านทานภายในค่อนข้างต่ำนั้นเอง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับข้อด้อยที่แรงดันไฟฟ้า

ที่ได้ไม่ราบเรียบนัก และค่อนข้างช้าผู้ใช้ไฟฟ้าจะต้องพิจารณาความเหมาะสมในการเลือกนำมาใช้งานด้วย

2.3 ความรู้เบื้องต้นของออปแอมป์ [3]

ออปแอมป์เป็นกลุ่มวงจรที่ใช้งานมากสุดแบบหนึ่งในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เราใช้ออปแอมป์ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งวงจรขยายเสียง วงจรเร็กกูเลเตอร์ วงจรเครื่องมือวัด วงจรกำเนิดสัญญาณ และวงจรอื่น ๆ อีกมาก ด้วยการใช้เทคโนโลยีทางด้านไอซี ดังนั้นออปแอมป์จึงกลายเป็นไอซีที่เรียกได้ว่า “มาตรฐาน” และ “ทั่วไป” ซึ่งพบเห็นได้ทั่วไปในวงจรอิเล็กทรอนิกส์

2.3.1 ออปแอมป์คืออะไร

OP – AMP (Operational Amplifier IC) คือ อุปกรณ์ที่มีอินพุท เป็นการขยายแบบดิฟเฟอเรนเชียลและมีเอาท์พุทเดียว ซึ่งมีอัตราการขยายสูง มีการนำไปใช้ในวงจรต่าง ๆ ดังนี้

- Amplifier
- Integrator
- Differentiator
- Voltage Follower
- Oscillator
- Mathematical Circuit ฯลฯ

ออปแอมป์แต่ละเบอร์ที่โรงงานผลิตขึ้นมาจะมีคุณสมบัติบางอย่างเฉพาะตัวตามคู่มือของโรงงานผู้ผลิตเช่น

- High Voltage Gain
- High Current Gain
- Short - Circuit Protection
- Low Power Consumption
- Temperature Stability

2.3.2 ออปแอมป์ในปัจจุบัน

รูปแบบของ IC ซึ่งได้มีการพัฒนาที่สำคัญ 2 ประการ คือ

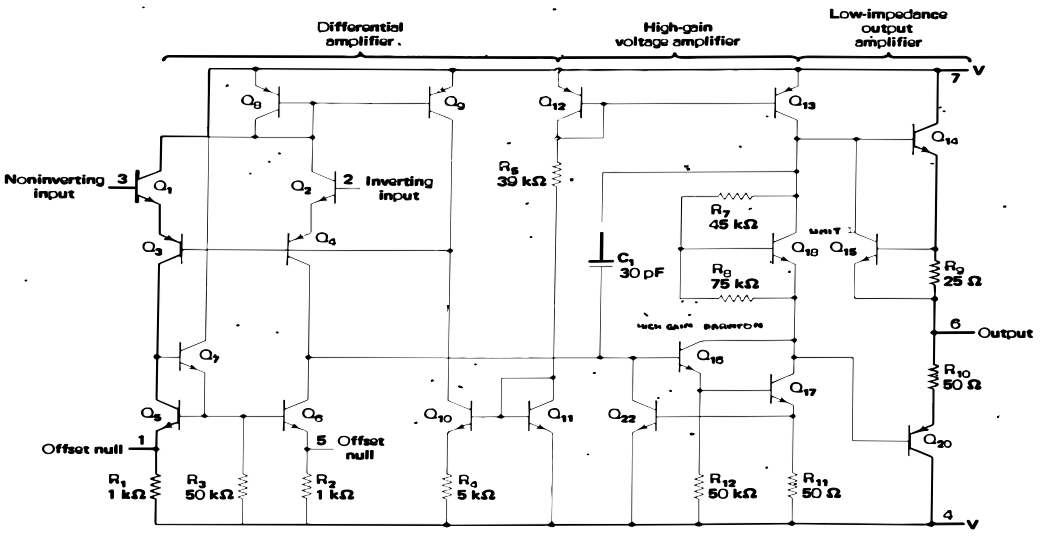
1. มีการนำ FET มาแทน Bipolar Transistor โดยนำ JFET มาเป็นส่วนอินพุต ทำให้กินกระแสน้อย MOSFET มาเป็นส่วนเอาต์พุต ทำให้มีการทำงานได้เร็วขึ้น และใช้งานที่ความถี่สูงขึ้นกว่าเดิม
2. สามารถสร้างออปแอมป์ 2 ตัว และ 4 ตัว ในตัวถังเดียวกัน

การใช้งานของออปแอมป์ มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางคือ

- High Current and / High Voltage Capability
- Sona Send / Receive Modules
- MPX Amp
- Programmable Gain Amplifier
- Automotive Instrumentation and Control
- Communication IC
- Radio / Audio / Video IC

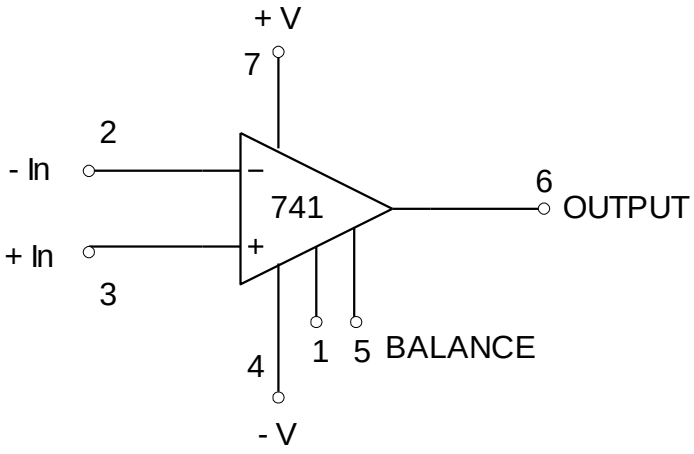
2.3.3 โครงสร้าง สัญลักษณ์ และตัวถัง

โครงสร้างภายในของออปแอมป์จะประกอบด้วยวงจรขยายความแตกต่างและวงจรขยาย เช่น ออปแอมป์เบอร์ 741 ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ 17 ตัว ตัวต้านทาน 12 ตัว ตัวเก็บประจุ 1 ตัว และไดโอด 4 ตัว แสดงดังภาพที่ 2.7



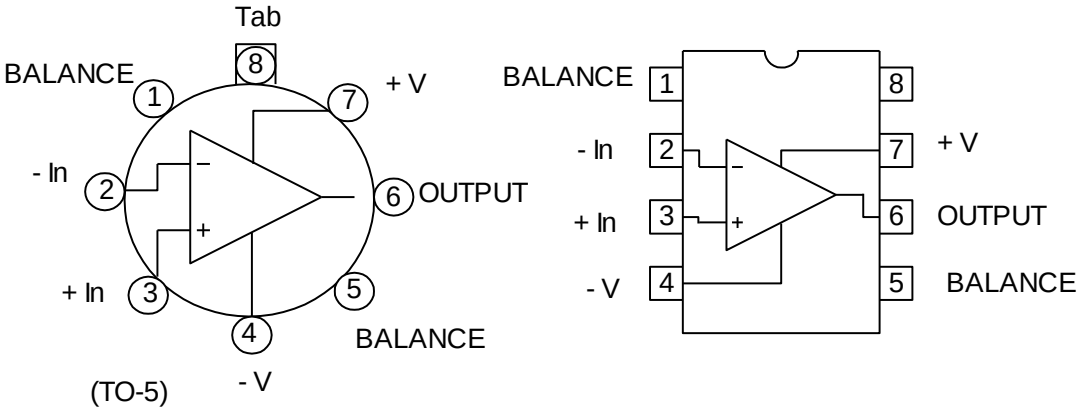
ภาพที่ 2.7 แสดงวงจรภายในของออปแอมป์เบอร์ 741

สัญลักษณ์จะใช้รูปสามเหลี่ยมมีขาสำหรับต่ออุปกรณ์ภายนอก ดังภาพที่ 2.8 รูปสามเหลี่ยมแสดงถึงการขยายและทิศทางการไหลของสัญญาณ ส่วนชื่อขาของออปแอมป์ได้แสดงเปรียบเทียบกับจุดต่อกับวงจรภายในตัวถัง



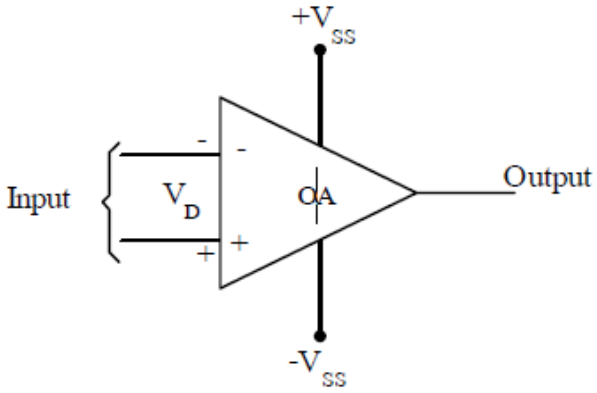
ภาพที่ 2.8 แสดงรูปแบบสัญลักษณ์ของออปแอมป์

เนื่องจากวงจรที่ประกอบขึ้นมาเป็นออปแอมป์สร้างขึ้นบนแผ่นชิปที่มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นผู้ผลิตจึงต้องทำการบรรจุชิปนี้ลงในตัวถังหรือที่เรียกว่า เพกเกจ (Package) ซึ่งอาจจะเป็นพลาสติก เซรามิก แก้วหรือโลหะก็ได้ ลักษณะตัวถังที่พบอยู่เสมอๆ มีอยู่ 2 แบบคือ ตัวถังแบบโลหะกลม (TO-5) ซึ่งจะมีขา 8 , 10 หรือ 12 ขา และตัวถังแบบดิป (DIP) มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขาตั้งแต่ 8 ขาขึ้นไปจนถึง 64 ขา ดังภาพที่ 2.9



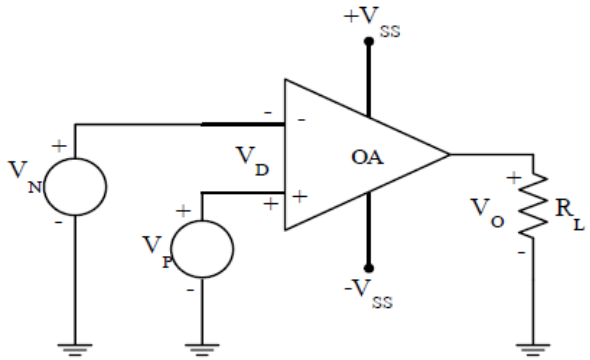
ก) แบบตัวถังโลหะกลม (TO-5) ข) แบบดิป 8 ขา

ภาพที่ 2.9 แสดงตัวถังของออปแอมป์



ภาพที่ 2.10 สัญลักษณ์ของออปแอมป์

สัญลักษณ์ของออปแอมป์เป็นดังภาพ 2.10 ซึ่งใช้แหล่งจ่ายกระแสตรง คือ $+V_{ss}$ และ $-V_{ss}$ จ่ายให้กับออปแอมป์ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ไม่เกิน ± 15 V ทางด้านอินพุต จะมี 2 ขั้วคือ อินพุตทางลบ และอินพุตทางบวก



ภาพที่ 2.11 ลักษณะการต่อใช้งานของออปแอมป์

จากภาพ 2.11 จะเห็นว่า เอาต์พุต V_0 ที่ออกจากออปแอมป์จะผ่านตัวต้านทาน R_L ลงกราวด์ และอินพุตทางบวก แทนด้วยขั้วของ V_P ส่วนอินพุตทางลบแทนด้วยขั้วของ V_N ซึ่งผลต่างระหว่างทั้งสองขั้วของออปแอมป์จะเป็น V_D

$$V_D = V_P - V_N \tag{2.1}$$

ในออปแอมป์อุดมคตินั้น เราจะสามารถหาอัตราขยาย (μ) ได้ จาก

$$\mu = \frac{V_0}{V_D} \tag{2.2}$$

จากสองสมการข้างต้น จะได้ว่า

$$V_0 = \mu(V_P - V_N) \tag{2.3}$$

หมายเหตุ V_0 คือ Output Voltage

μ คือ อัตราการขยาย

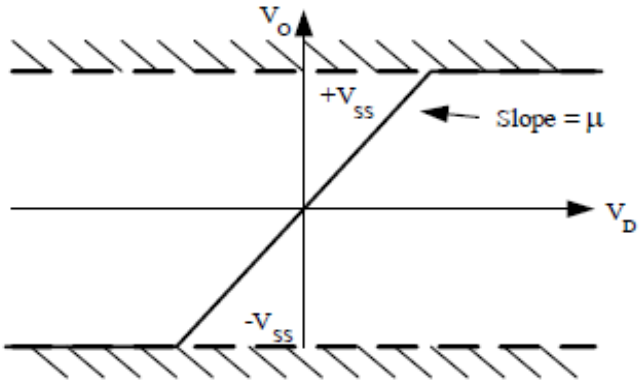
V_P คือ Positive Voltage แรงดันอินพุตทางบวก

V_N คือ Negative Voltage แรงดันอินพุตทางลบ

V_D คือ Difference Voltage ผลต่างของแรงดันระหว่างสองอินพุต

2.3.4 คุณลักษณะของออปแอมป์

คุณลักษณะของออปแอมป์ในอุดมคติ แสดงดังภาพ 2.12 ซึ่งอัตราขยายเป็นไปตามสมการ (2.2) และแรงดันเอาต์พุตจะไม่เกินค่าของแรงดันที่ป้อนให้กับออปแอมป์ ($+V_{ss}$ และ$-V_{ss}$)



ภาพที่ 2.12 กราฟแสดงลักษณะแรงดันของออปแอมป์ในอุดมคติ

2.3.4.1 ออปแอมป์ในแบบอุดมคติ

มีคุณลักษณะพื้นฐานอยู่ 4 แบบคือ

1. แรงดันเอาท์พุตจะไม่เกินแรงดันที่จ่ายให้กับออปแอมป์จากกราฟดังรูป 2.12 ทำให้ทราบว่าแรงดันเอาท์พุตที่ได้จากออปแอมป์นั้นจะมีค่าไม่เกินแรงดันที่ป้อนให้กับออปแอมป์ นั่นก็คือ $-V_{ss} \leq V_o \leq +V_{ss}$

2. อัตราขยายมีค่าเป็นอนันต์ ($\mu = \infty$) ในทางอุดมคติ ออปแอมป์จะมีอัตราขยายได้เป็นอนันต์ ในทางปฏิบัติอัตราขยายจะไม่เป็นอนันต์ แต่มีค่าสูงมาก ตั้งแต่ 20,000 ถึง 2,000,000 เท่า

3. ขาอินพุตทั้งสองเสมือนเชื่อมติดกัน $V_D = 0$

จากสมการที่ 2.2 เราสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$V_D = \frac{V_o}{\mu}$$

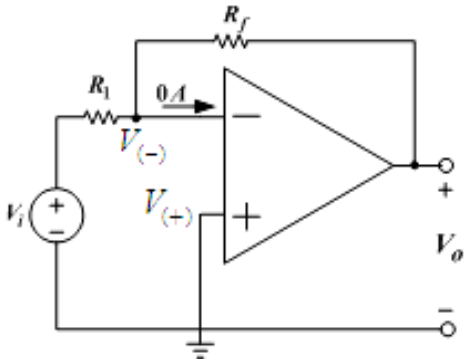
เมื่ออัตราขยายมีค่าเป็นอนันต์ และ V_0 มีค่าไม่เกิน $+V_{ss}$ จะทำให้ $V_D = 0$ นั่นคือไม่มีผลต่างของแรงดันระหว่างขา V_P และขา V_N นั่นเอง

4. กระแสของอินพุตทั้งสองเป็นศูนย์ ($I_N = I_P = 0$) เนื่องจาก ความต้านทานภายใน (RI) ของออปแอมป์มีค่าสูงมาก (∞) นั่นคือ จะทำให้กระแสที่ไหลเข้าขาทั้งสองมีค่าเป็น 0 สามารถสรุปเป็นสมการได้ดังนี้

- $-V_{ss} \leq V_0 \leq +V_{ss}$
- $\mu = \infty$
- $V_D = 0$
- $I_N = I_P = 0$

2.3.5 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส คือ วงจรออปแอมป์ที่กลับสัญญาณอินพุตให้มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับของเดิม



ภาพที่ 2.13 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

พิจารณาจากรูปด้านบนเราจะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุต คือ

$$V_{(+)} = 0 = V_{(-)}$$

(ขั้วบวกของออปแอมป์ต่อลงกราวด์ แรงดันที่ขั้วมันจึงมีค่าเท่ากับศูนย์)

พิจารณาที่โหนด $V_{(-)}$ จาก KCL;

$$\frac{V_{(-)} - V_{(i)}}{R_{(1)}} + \frac{V_{(-)} - V_{(0)}}{R_{(f)}} = 0$$

เมื่อแทนค่า $V_{(-)} = 0$ ในสมการข้างต้น จะได้สมการความสัมพันธ์ คือ

$$\frac{-V_{(i)}}{R_{(1)}} - \frac{V_{(0)}}{R_{(f)}} = 0$$

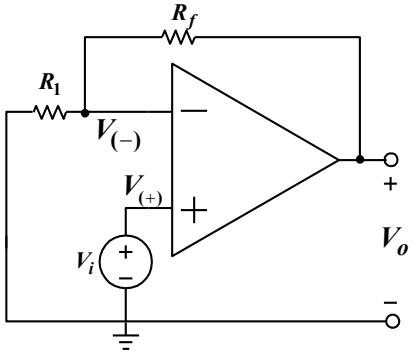
$$V_{(0)} = -\frac{R_{(f)}}{R_{(1)}} V_{(i)} \qquad (2.4)$$

ซึ่ง $-\frac{R_{(f)}}{R_{(1)}}$ คือ ค่า ขยายแรงดัน (Voltage Gain)

จะเห็นได้ว่าค่าขยายแรงดันมีค่าติดลบซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงวงจรดังกล่าวทำหน้าที่กลับสัญญาณ

2.3.6 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส คือ วงจรออปแอมป์ที่ออกแบบมาเพื่อให้ขยายแรงดัน มีค่าเป็นบวก หรือให้ค่าเอาท์พุตคงค่าเครื่องหมายเหมือนเดิม



ภาพที่ 2.14 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

พิจารณาจากรูปจะได้

$$V_{(+)} = V_{(i)} = V_{(-)}$$

(ขั้วบวกของออปแอมป์ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดัน แรงดันที่ขั้วมันจึงมีค่าเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่ายนั้น) พิจารณาที่โหนด $V_{(-)}$ จาก KCL;

$$\frac{V_{(i)}}{R_{(1)}} + \frac{V_{(i)} - V_{(0)}}{R_{(f)}} = 0$$

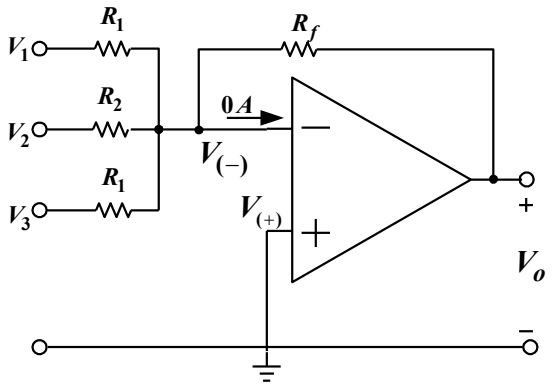
เมื่อแทนค่า $V_{(i)} = V_{(-)}$ ในสมการข้างต้น จะได้

$$\frac{V_{(i)}}{R_{(1)}} + \frac{V_{(i)} - V_{(0)}}{R_{(f)}} = 0$$

$$V_{(0)} = \left(1 + \frac{R_{(f)}}{R_{(1)}}\right) V_{(i)} \qquad (2.5)$$

2.3.8 วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ (Summing Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ คือ วงจรออปแอมป์ที่รวมอินพุตตั้งแต่ 2 อินพุตขึ้นไปมารวมกัน



ภาพที่ 2.15 วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ

พิจารณาจากรูป(สังเกตที่ขั้วบวก)จะได้

$$V_{(+)} = 0 = V_{(-)}$$

พิจารณาที่โนด $V_{(-)}$ จาก KCL;

$$\frac{V_{(-)} - V_{(1)}}{R_{(1)}} + \frac{V_{(-)} - V_{(2)}}{R_{(2)}} + \frac{V_{(-)} - V_{(3)}}{R_{(3)}} + \frac{V_{(-)} - V_{(0)}}{R_{(4)}} = 0$$

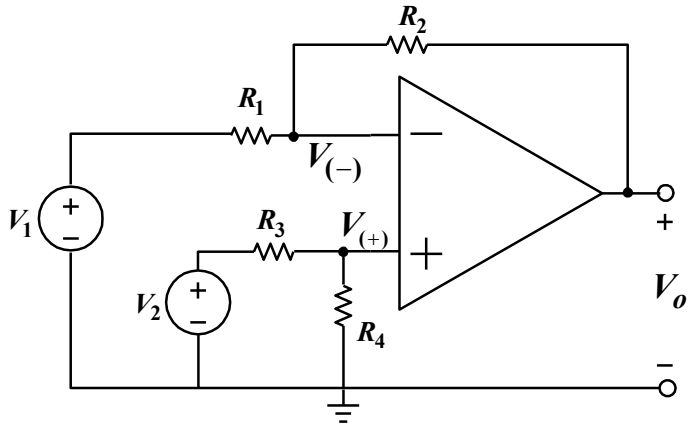
เมื่อแทนค่า $0 = V_{(-)}$ในสมการข้างต้น จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาท์พุต คือ

$$-\frac{V_{(1)}}{R_{(1)}} - \frac{V_{(2)}}{R_{(2)}} - \frac{V_{(3)}}{R_{(3)}} - \frac{V_{(0)}}{R_{(f)}} = 0$$

$$V_{(0)} = -\left(\frac{R_{(f)}}{R_{(1)}}V_{(1)}\right) + \left(\frac{R_{(f)}}{R_{(2)}}V_{(2)}\right) + \left(\frac{R_{(f)}}{R_{(3)}}V_{(3)}\right) \qquad (2.6)$$

2.3.9 วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ (Difference Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบ คือ วงจรที่ทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสองอินพุต



ภาพที่ 2.16 วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบ

จากรูป พิจารณาที่โหนด $V_{(+)}$ จาก KCL;

$$\frac{V_{(+)} - V_{(2)}}{R_{(3)}} + \frac{V_{(+)}}{R_{(4)}} = 0$$

จะได้

$$V_{(+)} = \left(\frac{R_4}{R_3+R_4}\right)V_2 \tag{2.7}$$

พิจารณาที่โหนด $V_{(-)}$ จาก KCL;

$$\frac{V_{(-)} - V_{(1)}}{R_{(1)}} + \frac{V_{(-)} - V_{(0)}}{R_{(2)}} = 0 \tag{2.8}$$

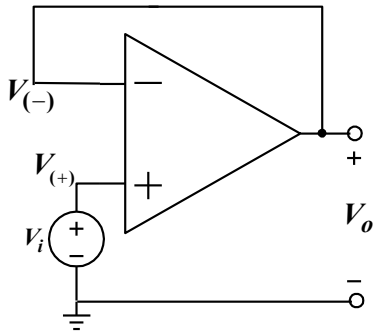
$$V_{(0)} = \left(\frac{R_2}{R_1}+1\right)V_{(-)} - \frac{R_2}{R_1}V_{(1)}$$

จากความสัมพันธ์ของแรงดัน $V_{(+)} = V_{(-)}$ แทนสมการ (2.7) ใน (2.8) จะได้

$$V_{(0)} = \left(\frac{R_2}{R_1}+1\right)\left(\frac{R_4}{R_3+R_4}\right)V_{(2)} - \frac{R_2}{R_1}V_{(1)} \tag{2.9}$$

2.3.10 วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน (Voltage Follower (Buffer)

วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน จะมีแรงดันทางด้านเอาท์พุตเท่ากับแรงดันทางด้านอินพุต



ภาพที่ 2.17 วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน

พิจารณาจากรูปจะได้

$$V_{(+)} = V_{(i)} = V_{(-)}$$

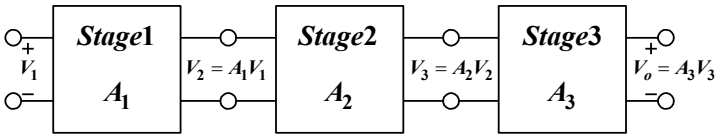
และ

$$V_{(-)} = V_{(0)}$$

$$V_{(0)} = V_{(i)} \tag{2.10}$$

2.3.11 การต่อวงจรออปแอมป์แบบแคสเคด (Cascaded Op Amp Circuit)

การต่อแบบแคสเคดจะเป็นการต่ออนุกรมออปแอมป์ตั้งแต่ 2 วงจรขึ้นไป โดยค่าเอาท์พุตจะเป็นค่าอินพุตของอีกวงจรหนึ่งต่อไปเรื่อยๆ (เอาท์พุตของวงจรออปแอมป์ตัวแรกจะเป็นอินพุตของออปแอมป์วงจรที่สอง)



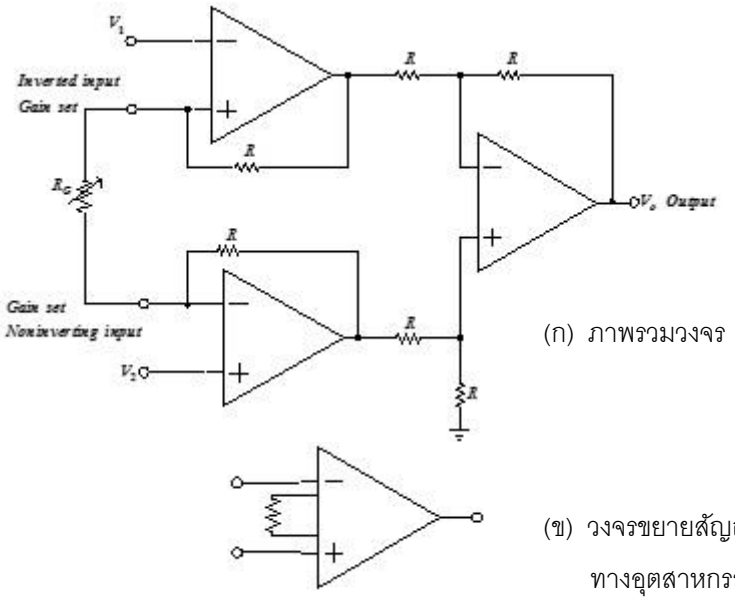
ภาพที่ 2.18 วงจรออปแอมป์ต่ออนุกรมกัน 3 วงจร

เมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่า ค่า voltage gain ของวงจรมีค่าเท่ากับ

$$A = A_1A_2A_3 \tag{2.11}$$

2.3.12 วงจรขยายสัญญาณในการวัดทางอุตสาหกรรม (Instrumentation Amplifiers)

วงจรขยายสัญญาณในการวัดทางอุตสาหกรรม คือ วงจรออปแอมป์ที่ใช้ในการขยายสัญญาณที่ได้จากการวัดซึ่งใช้ในงานอุตสาหกรรมทั่วๆไป จะมีรูปวงจรดังนี้



(ก) ภาพรวมวงจร

(ข) วงจรขยายสัญญาญในการวัดทางอุตสาหกรรม

ภาพที่ 2.19 วงจรขยายสัญญาณในการวัดทางอุตสาหกรรมโดยปรับเกนด้วยตัวต้านทานภายนอก

วงจรขยายสัญญาณในการวัดทางอุตสาหกรรมจะมีสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาท์พุตและแรงดันอินพุตเป็น

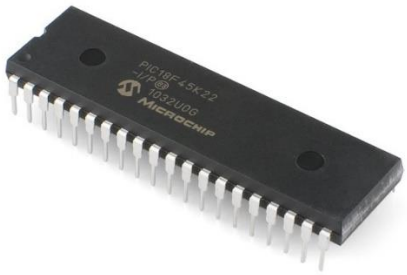
$$V_0 = A_V(V_2 - V_1) \tag{2.12}$$

เมื่อค่า voltage gain หาได้จาก

$$A_V = 1\frac{2R}{R_G} \tag{2.13}$$

2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ [4]

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (อังกฤษ: Microcontroller) คือ อุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก ซึ่งบรรจุความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ โดยในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอาซีพียู, หน่วยความจำ และพอร์ต ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยทำการบรรจุเข้าไว้ในตัวถังเดียวกัน



ภาพที่ 2.20 ไมโครคอนโทรลเลอร์

โครงสร้างโดยทั่วไป ของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น สามารถแบ่งออกมาได้เป็น 5 ส่วนใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

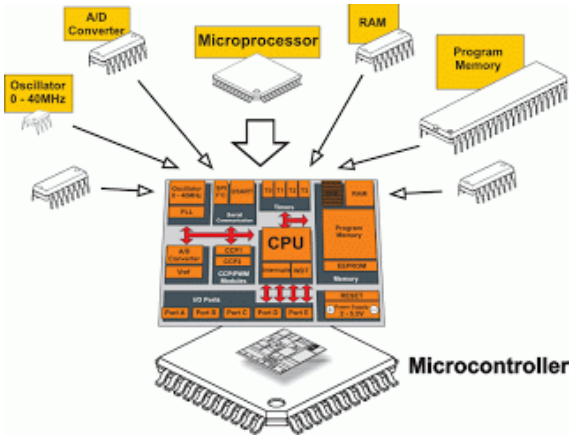
1. หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU: Central Processing Unit) ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางควบคุมการทำงานของระบบคอมพิวเตอร์ทั้งหมด โดยนำข้อมูลจากอุปกรณ์รับข้อมูลมาทำงาน ประมวลผลข้อมูลตามคำสั่งของโปรแกรม และส่งผลลัพธ์ออกไปหน่วยแสดงผล
2. หน่วยความจำ (Memory) สามารถแบ่งออกเป็น ส่วน คือ หน่วยความจำที่มีไว้สำหรับเก็บโปรแกรมหลัก (Program Memory) เปรียบเสมือนฮาร์ดดิสก์ของ เครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ คือ ข้อมูลใดๆ ที่ถูกเก็บไว้ในนี้จะไม่สูญหายไปแม้ไม่มีไฟเลี้ยง อีกส่วนหนึ่งคือหน่วยความจำข้อมูล (Data Memory) ใช้เป็นเหมือนกระดาษทดในการคำนวณของซีพียู และเป็นที่พักข้อมูลชั่วคราวขณะทำงาน แต่หากไม่มีไฟเลี้ยง ข้อมูลก็จะหายไปคล้ายกับหน่วยความแรม (RAM) ในเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วๆ ไป แต่สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่ หน่วยความจำข้อมูลจะมีทั้งที่เป็น

หน่วยความจำแรม ซึ่งข้อมูลจะหายไปเมื่อไม่มีไฟเลี้ยง และเป็นอีอีพรอม (EEPROM : Erasable Electrically Read-Only Memory) ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้แม้ไม่มีไฟเลี้ยง

3. ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก หรือพอร์ต (Port) มี 2 ลักษณะคือ พอร์ตอินพุต (Input Port) และพอร์ตส่งสัญญาณหรือพอร์ตเอาต์พุต (Output Port) ส่วนนี้จะใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก ถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญมาก ใช้ร่วมกันระหว่างพอร์ตอินพุต เพื่อรับสัญญาณ อาจจะด้วยการกดสวิตช์ เพื่อนำไปประมวลผลและส่งไปพอร์ตเอาต์พุต เพื่อแสดงผลเช่น การติดสว่างของหลอดไฟ เป็นต้น

4. ช่องทางเดินของสัญญาณ หรือบัส (BUS) คือเส้นทางการแลกเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลระหว่าง ซีพียู หน่วยความจำและพอร์ต เป็นลักษณะของสายสัญญาณ จำนวนมากอยู่ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยแบ่งเป็นบัสข้อมูล (Data Bus) บัสแอดเดรส (Address Bus) และบัสควบคุม (Control Bus)

5. วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากอีกส่วนหนึ่ง เนื่องจากการทำงานที่เกิดขึ้นในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ จะขึ้นอยู่กับการกำหนดจังหวะ หากสัญญาณนาฬิกามีความถี่สูง จังหวะการทำงานก็จะสามารถทำได้ถี่ขึ้นส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้น มีความเร็วในการประมวลผลสูงตามไปด้วย



ภาพที่ 2.21 โครงสร้างการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

นอกจากนี้ยังมีส่วนพิเศษอื่นๆ จะขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตของแต่ละบริษัทที่จะผลิตขึ้นมาใส่คุณสมบัติพิเศษลงไปเช่น

- ADC (Analog to Digital) ส่วนภาครับสัญญาณอนาล็อกแปลงไปเป็นสัญญาณดิจิตอล
- DAC (Digital to Analog) ส่วนภาคส่งสัญญาณดิจิตอลแปลงไปเป็นสัญญาณอนาล็อก

- I2C (Inter Integrate Circuit Bus) เป็นการสื่อสารอนุกรม แบบซิงโครนัส (Synchronous) เพื่อใช้ติดต่อสื่อสาร ระหว่าง ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) กับอุปกรณ์ภายนอก ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท Philips Semiconductors โดยใช้สายสัญญาณเพียง 2 เส้นเท่านั้น คือ Serial Data (SDA) และสาย Serial Clock (SCL) ซึ่งสามารถ เชื่อมต่ออุปกรณ์ จำนวนหลายๆ ตัว เข้าด้วยกันได้ ทำให้ MCU ใช้พอร์ตเพียง 2 พอร์ตเท่านั้น
- SPI (Serial Peripheral Interface) เป็นการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เพื่อรับส่งข้อมูลแบบซิงโครนัส (Synchronize) มีสัญญาณนาฬิกาเข้ามาเกี่ยวข้องระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) หรือจะเป็นอุปกรณ์ภายนอกที่มีการรับส่งข้อมูลแบบ SPI อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นมาสเตอร์ (Master) โดยปกติแล้วจะเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ หรืออาจกล่าวได้ว่าอุปกรณ์ Master จะต้องควบคุมอุปกรณ์ Slave ได้ โดยปกติตัว Slave มักจะเป็นไอซี (IC) หน้าที่พิเศษต่างๆ เช่น ไอซีอุณหภูมิ, ไอซีฐานเวลานาฬิกาจริง (Real-Time Clock) หรืออาจเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่ในโหมด Slave ก็ได้เช่นกัน
- PWM (Pulse Width Modulation) การสร้างสัญญาณพัลส์แบบสแควร์เวฟ ที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่และ Duty Cycle ได้เพื่อนำไปควบคุมอุปกรณ์ต่างๆเช่น มอเตอร์
- UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสสำหรับมาตรฐานการรับส่งข้อมูลแบบ RS-232

2.4.1ประเภทของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ มีด้วยกันหลายประเภทแบ่งตามสถาปัตยกรรม (การผลิตและกระบวนการทำงานระบบการประมวลผล) ที่มีใช้ในปัจจุบันยกตัวอย่างดังนี้

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC (บริษัทผู้ผลิต Microchip ไมโครชิป)
2. ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS51 (บริษัทผู้ผลิต Atmel,Phillips)
3. ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR (บริษัทผู้ผลิต Atmel)
4. ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM7, ARM9 (บริษัทผู้ผลิต Atmel,Phillips,Analog Device,Sumsung,STMicroelectronics)
5. ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล Basic Stamp (บริษัทผู้ผลิต Parallax)
6. ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PSOC (บริษัทผู้ผลิต CYPRESS)
7. ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MSP (บริษัทผู้ผลิต Texas Intruments)
8. ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล 68HC (บริษัทผู้ผลิต MOTOROLA)

9. ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล H8 (บริษัทผู้ผลิต Renesas)

10.ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล RABBIT (บริษัทผู้ผลิต RABBIT SEMICONDUCTOR)

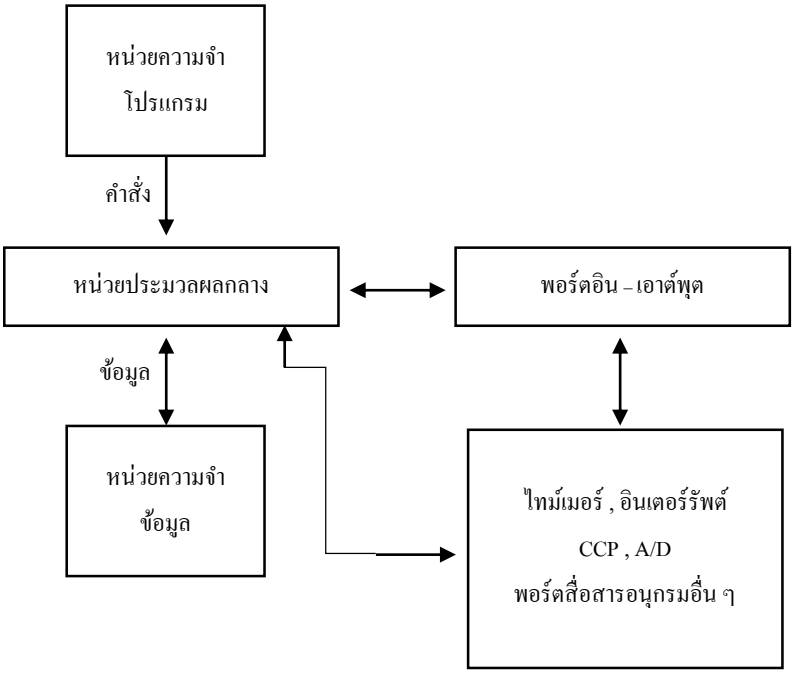
11.ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล Z80 (บริษัทผู้ผลิต Zilog)

และอีกหลายเบอร์หลายบริษัทที่ยังไม่ได้ยกมาเป็นตัวอย่าง

2.4.2ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC

PIC ย่อกมาจากคำว่า Peripheral Interface Controller เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ผลิตโดยบริษัท ไมโครชิพ (Microchip Technology , Inc.) ชื่อนี้ถูกใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1997 ซึ่งในขณะที่บริษัท ไมโครชิพยังใช้ชื่อว่า เจนเนอรอล อินสตรูเมนท์ (General Instrument) PIC เบอร์แรกที่ผลิตออกมาคือ PIC 1650 ซึ่งมีโครงสร้างสถาปัตยกรรมไม่ต่างจาก PIC ในปัจบันมากนัก แนวคิดของการสร้าง PIC คือการพยายามรวมเอาทุกอย่างไว้ในชิพตัวเดียวไม่ว่าจะเป็น หน่วยประมวลผลกลาง หน่วยความจำโปรแกรม หน่วยความจำข้อมูล EEPROM , CCP A/D และอื่น ๆ โดยไม่จำเป็นต้องต่ออุปกรณ์เสริมจากภายนอก ผลที่ตามมาก็คือแผ่น PCB จะมีขนาดเล็ก และอุปณ์ที่ใช้จะไม่มาก บางงานอาจใช้แค่ PIC เพียงตัวเดียว โดยที่ไม่ต้องใช้ชิพอื่น ๆ มาต่อเพิ่มเติมเลย

PIC เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีสถาปัตยกรรมแบบฮาวาร์ด (Havard Architecture) หรือที่เรียกกันว่าไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ RISC (Reduced Instruction Set Computer) คือ มีการทำงานที่มีจำนวนชุดคำสั่งน้อย แต่ละคำสั่งจะทำงานแบบง่าย ๆ ทำให้ความเร็วในการทำงานแต่ละคำสั่งสูง หนึ่งคำสั่งของ PIC จะมีขนาด 14 บิต เป็นผลทำให้ชุดคำสั่งของ PIC มีน้อยนั้นเอง ในปัจจุบัน PIC เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลที่เป็นยอดนิยมตระกูลหนึ่ง เพราะเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ประสิทธิภาพสูง ราคาถูก และก็ยังมีให้เลือกใช้มากมายหลายเบอร์อีกด้วย ลักษณะโครงสร้างหลัก ๆ ของ PIC แสดงในภาพที่ 2.22

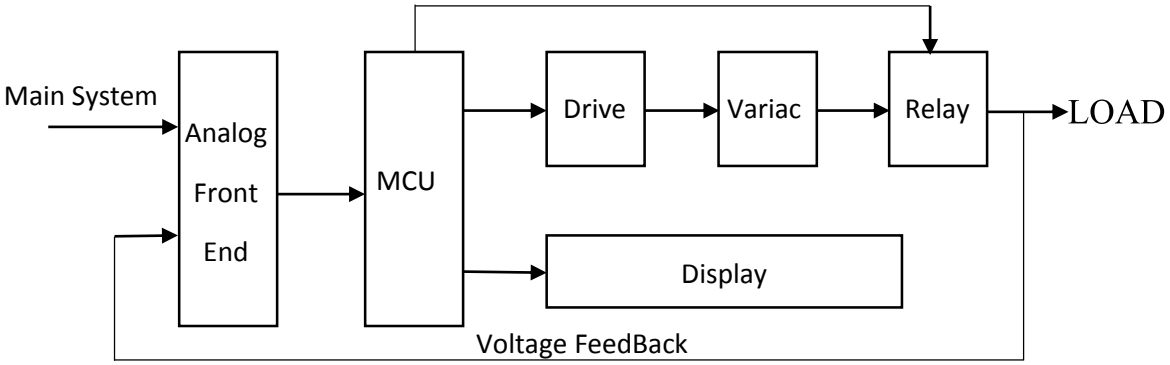


ภาพที่ 2.22 โครงสร้างการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC

ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC แบ่งออกตามนิดของหน่วยความจำโปรแกรมได้ 3 ประเภทคือ

1. OTP(One-Time Programmable) เป็นชิพประเภทที่มีราคาถูกที่สุด แต่สามารถทำการโปรแกรมได้แค่ครั้งเดียว ซึ่งชิพประเภทนี้จะใช้ในกรณีพัฒนาโปรแกรมไม่พบจุดบกพร่องของโปรแกรมอีกแล้วและต้องการใช้งานจำนวนมาก ๆ เพราะมีราคาถูก ชิพประเภทนี้ยกตัวอย่างเช่น PIC12C509 , PIC12C672 , PIC16C84
2. EPROM (Erasable Programmable ROM) เป็นชิพประเภทที่เมื่อเขียนโปรแกรมเข้าไปแล้วสามารถทำการลบโปรแกรมเดิมได้ด้วยแสง UV (Ultra Violet) ดังนั้นที่ด้านบนของชิพจะมีกรอบกระจกเพื่อให้แสง UV สามารถส่องผ่านเข้าไปในตัวชิพได้ ชิพแบบนี้เบอร์ชิพจะมีอักษร JW เขียนกำกับอยู่ ชิพประเภทนี้ยกตัวอย่างเช่น PIC16C57/JW , PIC16C72A/JW , PIC16C74/JW
3. EEPROM (Electronically Erasable Programmable ROM) หรือที่เรียกกันทั่วไปว่าแบบแฟลช (Flash) เป็นชิพประเภทที่สามที่สามารถเขียนและลบโปรแกรมด้วยไฟฟ้าและสามารถลบและเขียนใหม่ได้หลายพันครั้ง ทำให้ชิพประเภทนี้เป็นที่นิยมมากที่สุดใน 3 ประเภท ชิพประเภทนี้ก็ยกตัวอย่างเช่น PIC12F510 , PIC16F84 , PIC16F877 , PIC18F1220

บทที่ 3
ขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง



ภาพที่ 3.1 บล๊อกไดอะแกรมขั้นตอนการออกแบบและการสร้าง

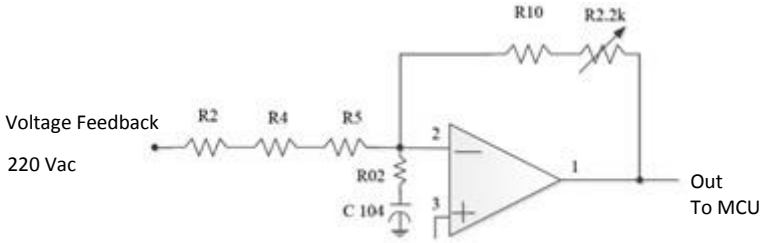
3.1 การออกแบบบล๊อก Analog Front End

ในโครงงานนี้จะรับแรงดันกระแสสลับจากแหล่งจ่ายมาเปรียบเทียบกับแรงดันเอาท์พุทของระบบ เพื่อหาผลต่างของแรงดันและส่งไปควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาท์พุทให้คงที่ ที่ 220V ในส่วนของ Analog Front End จะมี 2 หน้าที่โดยรับแรงดันขนาด 140 – 240 V เพื่อทำการลดระดับแรงดันลงเป็น 0 – 5V เพื่อที่จะส่งสัญญาณแรงดันเข้าขา A/D ของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยสัญาญที่เข้ามาเราต้องทำการออฟเซตแรงดันขึ้นเพื่อที่จะให้ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านค่าได้

ในส่วนของการออกแบบชุดวงจรออปแอมป์ซึ่งแทนในบล๊อกโครงสร้างของโครงงานคือบล๊อกของ Analog Front End จะมีรายละเอียดการออกแบบวงจรออปแอมป์ทั้งหมด 2 วงจรดังนี้

- วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ (Difference Amplifier)
- วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน (Voltage Follower (Buffer)

3.1.1 วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ (Difference Amplifier)



MCU : Microcontroller

ภาพที่ 3.2 วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ

จากภาพที่ 3.2 วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ ผู้จัดทำได้ทำการออกแบบโดยให้ วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ ทำหน้าที่ในการรับแรงดันจากอินพุตเข้ามาเพื่อทำการเปรียบเทียบ และส่งค่าได้ทำการเปรียบเทียบนี้แล้วให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการประมวลผล

ในโครงงานนี้ขอบเขตของโครงงานระบุให้มีแรงดันอินพุต 140 – 240V ที่ความถี่ $50H_z$ ผู้จัดทำต้องการให้ทำการลดแรงดันลงในอัตราส่วน 1:100 เพื่อง่ายต่อการออกแบบและทดลอง โดยทำการแบ่ง ตัวต้านทานเป็น 3 ตัวในขนาดที่ไม่เท่ากัน ทั้งนี้ที่ไม่เลือกให้ ตัวต้านทานตัวเดียวในการลดแรงดันคือ เมื่อตัวต้านทานรับภาระโหลดมากเกินไปเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดความร้อนและความสูญเสียตามมา เช่น อายุการใช้งาน เป็นต้น จึงทำการเลือกใช้ ตัวต้านทานทั้งหมด 3 ตัว ขนาด 1/4 W ดังนี้

R2 =1 MΩ

R4 =1 MΩ

R5 =875 kΩ

โดยมี Rx ขนาด 2.2 kΩ ทำหน้าที่ในการชดเชยกรณีที่ค่าแรงดันที่ทำการลดลงมาไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

*Rx คือ ความต้านทานปรับค่าได้เพื่อชดเชยค่า Error

KCL ; $I_1 + I_2 = 0$

V_1 ; $\frac{220 - V_A}{2835k} + \frac{Vo - V_A}{8.2k + Rx} = 0$

V_2 ; $\frac{In - V_2}{2835k} + \frac{2 - V_2}{10k} = 0$

$= \frac{220 - V_A}{2835k} + \frac{V_o - V_A}{8.2k + Rx} = \frac{In - V_2}{2835k} + \frac{2 - V_2}{10k}$

$= \frac{220}{2835k} - \frac{V_A}{2835k} + \frac{V_A}{8.2k + Rx} + \frac{V_o}{8.2k + Rx} = \frac{In}{2835k} - \frac{V_2}{2835k} + \frac{2}{10k} - \frac{V_2}{10k}$

$= \frac{220}{2835k} - \frac{2}{10k} - \frac{V_A}{8.2k + Rx} + \frac{V_2}{10k} - \frac{In}{2835k} = -\frac{V_o}{8.2k + Rx}$

$V_0 = -(8.2k + Rx)\left[\frac{220}{2835k} - \frac{2}{10k} - \frac{V_A}{8.2k + Rx} + \frac{V_2}{10k} - \frac{In}{2835k}\right]$

$V_0 = -(8.2k + Rx)\left[(77.6 \times 10^{-6}) - (0.2 \times 10^{-3}) + \left[\frac{(8.2k + Rx)V_2 - 10kVA}{(8.2k + Rx)(10k)}\right] - \frac{In}{2835k}\right]$

ให้ $Rx = 0$

$V_0 = -(10k)\left[(-1.224 \times 10^{-4}) - \frac{In}{2835k}\right]$

$V_0 = -(10k)\left[\frac{(-1.224 \times 10^{-4})2835k - In}{2835k}\right]$

$V_0 = -(10k)\left[\frac{-347 - In}{2835k}\right]$

$V_0 = \left[1.224 + In(2.89 \times 10^{-3})\right]$

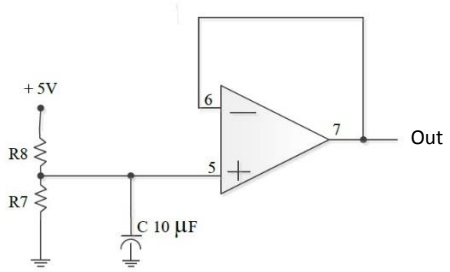
แทน $In = 140 - 260$ V

$In = 140$, $Vo = 1.224 + 140\ (2.89 \times 10^{-3}) = 1.63V$
$In = 220$, $Vo = 1.224 + 220\ (2.89 \times 10^{-3}) = 1.85V$
$In = 260$, $Vo = 1.224 + 260\ (2.89 \times 10^{-3}) = 1.97V$

เงื่อนไข Difference Amplifier

ทำให้แรงดันผลต่างมีค่าอยู่ในช่วง 1.5 – 2.5 V เพื่อให้สามารถป้อนเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ได้

3.1.2 วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน (Voltage Follower (Buffer))



ภาพที่ 3.3 วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน

จากภาพที่ 3.3 วงจรขยายาสัญญาณบบตามแรงดัน จะทำงานร่วมกับ วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ โดยผู้จัดทำได้ทำการออกแบบไว้เพื่อใช้วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดันทำหน้าที่ในการยกระดับสัญญาณของวงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณให้อยู่ในระดับแรงดันไมโครคอนโทรลเลอร์จะสามารถอ่านค่าได้ ผู้จัดทำได้ทำการออกแบบไว้ โดยต้องการเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ 2 V

โดยได้เลือกใช้ความต้านทาน 2 ตัวดังนี้

R8 = 15kΩ

R7 = 10kΩ

แรงดันกระแสตรงที่ทำการจ่ายให้กับออปแอมป์วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน

E = 5V

คำนวณแรงดันที่เข้าออปแอมป์วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดันได้ดังสมการนี้
จากสมการแบ่งแรงดันไฟฟ้า

$$E_1 = E\frac{R_7}{R_7 + R_8}$$

โดยกำหนดให้ E_1 คือแรงดันที่ขา 5 ของออปแอมป์วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน

E คือแรงดัน 5V

แทนค่าลงในสมการ

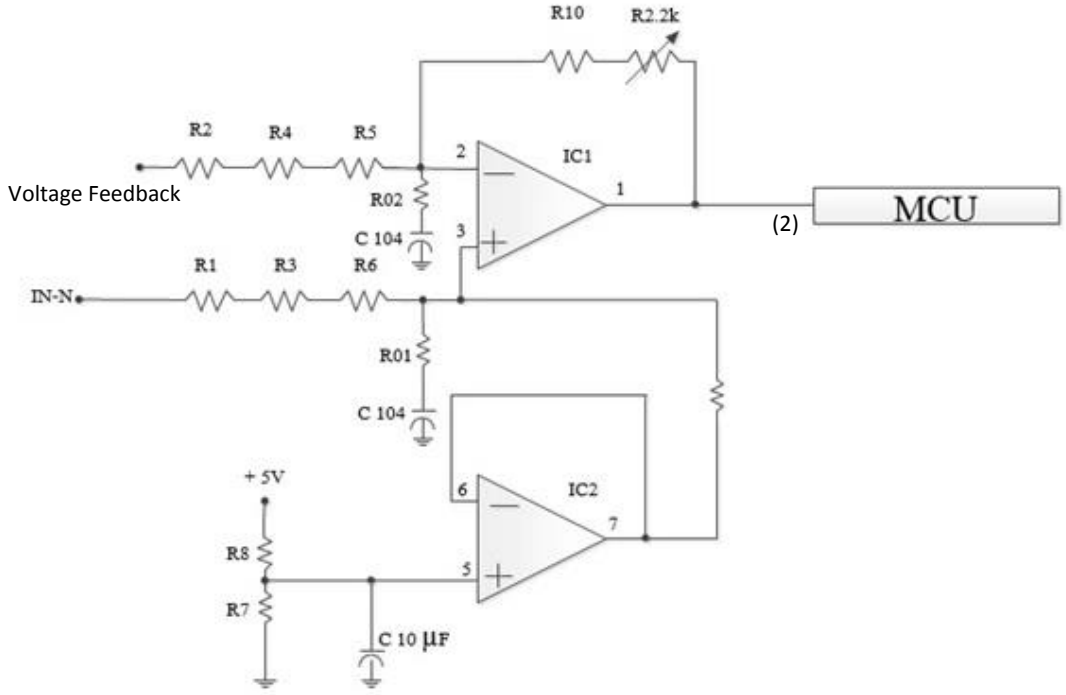
$$E_1 = E\frac{R_7}{R_7 + R_8}$$

$$E_1 = 5V\frac{10k\Omega}{10k\Omega + 15k\Omega}$$

$$E_1 = 2V$$

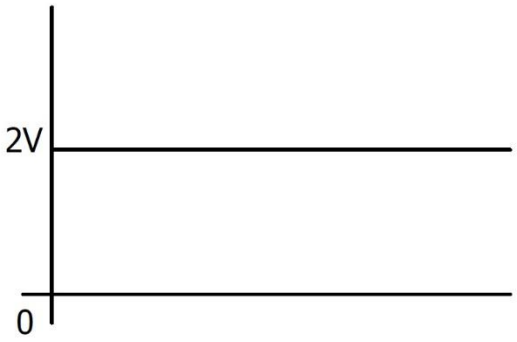
ดังนั้น $E_1 = 2V$ เป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้ทำการออกแบบไว้

3.1.3 ลำดับการออกแบบและการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ



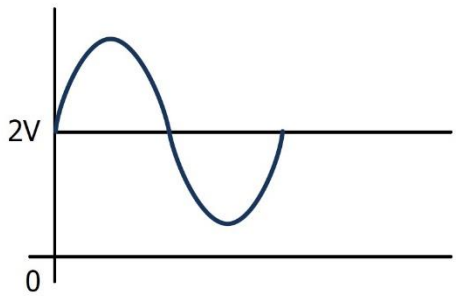
ภาพที่ 3.4 วงจรออฟแอมป์ที่ทำการออกแบบ

เมื่อทำการออกแบบการทำงานของออปแอมป์ทั้งสองวงจรแล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเป็นลำดับขึ้นตอนโดยจะอธิบายได้ดังนี้



ภาพที่ 3.5 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 V

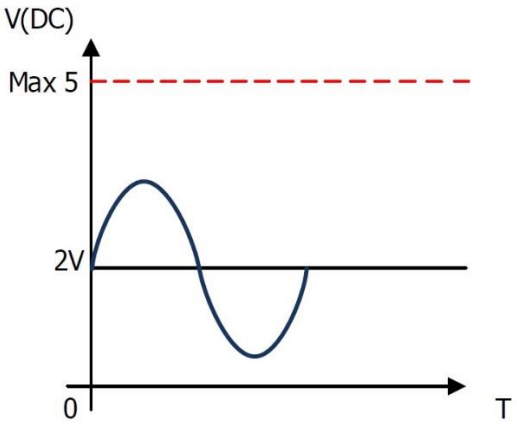
จากภาพที่ 3.5 เป็นการแสดงสัญญาณของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 V ซึ่งได้มาจากการทำงานของวงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน ซึ่งก่อนหน้านี้ค่าได้ได้รับจากวงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณจะเป็นรูปคลื่นไซน์ขนาดเล็ก มีขนาดโดยประมาณ 1.5 – 3 V และเป็นแรงดันกระแสสลับ



ภาพที่ 3.6 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 V และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1.5 – 3V

จากภาพที่ 3.6 เป็นรูปแสดงสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ โดยเป็นการทำงานร่วมกันของวงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดันและวงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ ซึ่งค่าที่ได้จากวงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณจะเป็นสัญญาญไซน์ขนาด 1.5

- 3V ออกจากชุด Analog Front End เพื่อส่งค่าเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ แต่การรับค่าในฝั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่สามารถประมวลสัญญาณที่เป็นสัญญาณไซน์ได้ จึงใช้วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดันมาช่วย โดยทำการยกระดับแรงดันขึ้นไป 2 V ดังแสดงในภาพที่ 3.6 เพื่อให้สัญญาณไซน์จากวงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณส่งค่าเพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับค่าและประมวลผลได้



ภาพที่ 3.7 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 V และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1.5 – 3V และเส้นแสดงลิมิตของสัญญาณแรงดันที่จะเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์

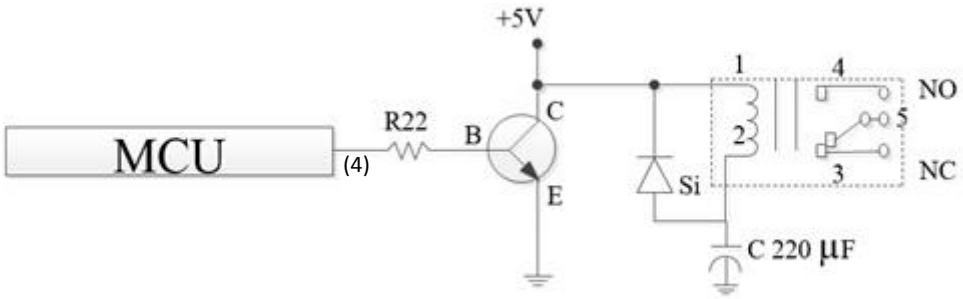
จากภาพที่ 3.7 เป็นการแสดงขอบเขตของการทำงานทั้งหมดของวงจร โดยคำนึงถึงขอบเขตการรับแรงดันอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในโครงงานนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เลือกใช้ทำการทดลองและออกแบบ มีแรงดันอินพุตขนาด 0 – 5V และเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งทำให้เข้าใจได้ว่าการทำงานของวงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการประมวลผลได้ จึงต้องใช้ วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดันมาช่วยในการยกระดับแรงดันเพื่อส่งเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ได้

ข้อสังเกตต่อมา ขนาดแรงดันที่จะเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ได้มีขนาดตั้งแต่ 0 – 5 V ซึ่งวงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดันทำการยกระดับแรงดันขึ้นไปแล้ว 2 V จึงมีพื้นเหลือให้วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณซึ่งเป็นสัญญาณไซน์ ขนาด 3 V ทำให้ทราบว่าขนาดแรงดันที่ผ่านวงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณและเป็นสัญญาณไซน์นั้นควรมีขนาดไม่เกิน 3 V เพื่อไม่ให้เกิดขอบเขตการรับค่าของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ จึงเป็นเหตุให้เลือกใช้การลดอัตราส่วนของแรงดันขนาด 1:100 ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับการทำงานนี้ได้

ตารางที่ 3.1 แรงดันกระแสตรงที่ป้อนให้ไมโครคอนโทรลเลอร์

DC	VR , Rx = 0	VR , Rx = 2.2k
140	1.63	1.78
220	1.859	2.06
260	1.975	2.20

3.2 การออกแบบวงจรตัดต่อ



ภาพที่ 3.8 วงจรรีเลย์ควบคุม

จากขอบเขตโครงงานกำหนดให้เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติที่ออกแบบมีขนาด 1kVA และทำหน้าที่รับแรงดัน 220V ดังนั้นวงจรรีเลย์ควบคุม จึงต้องมีขนาดหน้าสัมผัสของรีเลย์ เท่ากับ 4.54 A และทรานซิสเตอร์ชนิด NPN เพื่อ ขยายกระแสที่ได้รับจากไมโครคอนโทรลเลอร์ มาจ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำในตัวรีเลย์และมีไดโอดต่อเพื่อป้องกันแรงดันย้อนกลับซึ่งเกิดจากขดลวดในรีเลย์

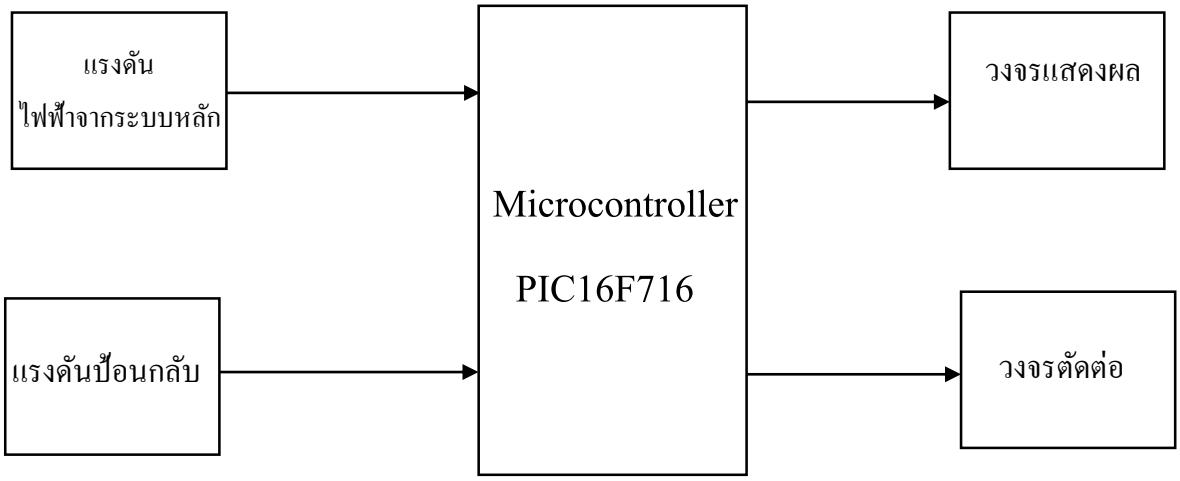
สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$I = \frac{1\text{kva}}{220}$$

$$I = 4.54\ \text{A}$$

ดังนั้นโครงงานนี้จึงเลือกใช้รีเลย์ขนาด 12 โวลต์รองรับกระแส 10 แอมแปร์

3.3 การออกแบบและเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

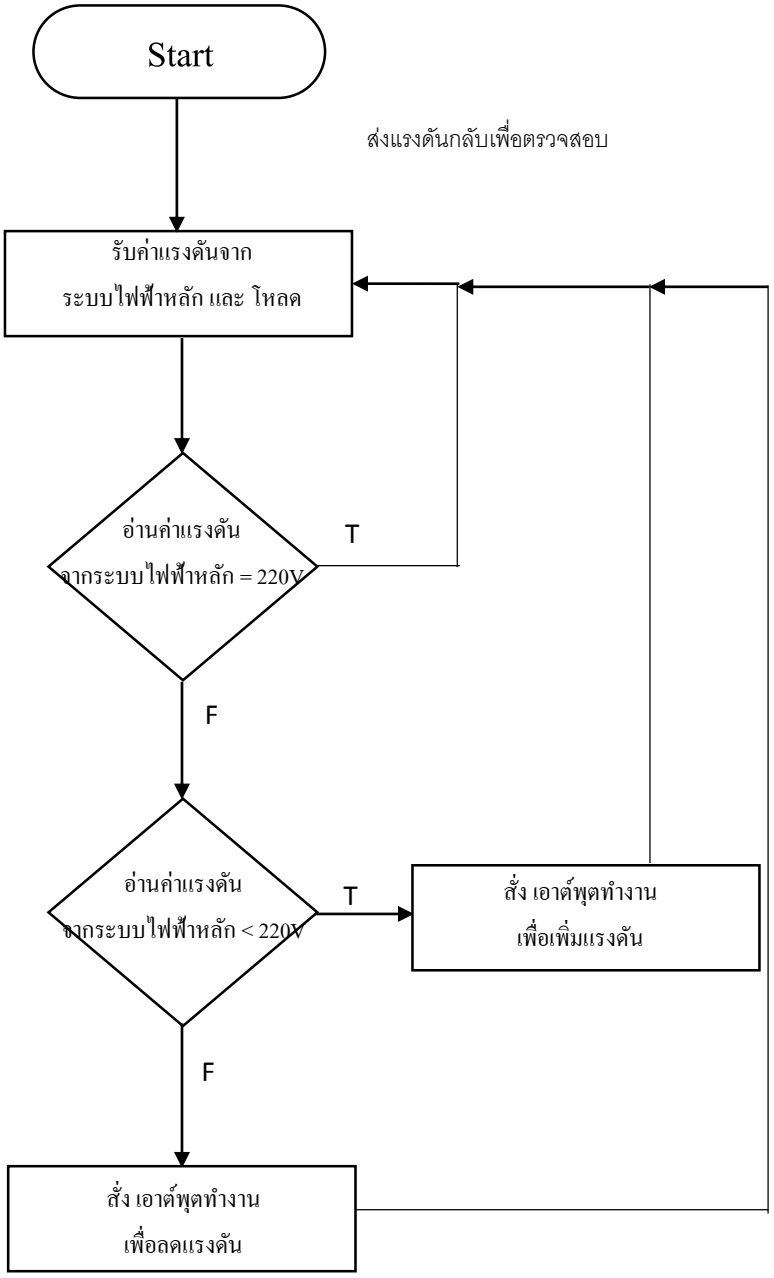


ภาพที่ 3.9 บล๊อกไดอะแกรมแสดงการเลือกใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์

ในโครงงานนี้จะใช้อินพุทและเอาท์พุทจำนวน 8 bit สำหรับการแสดงผลของ 7 Segment การควบคุมวงจรรีเลย์ควบคุมจำนวน 1 Bit และควบคุมมอเตอร์ในการปรับวารีแอค จำนวน 2 Bit อีกทั้งต้องสามารถรับข้อมูลอนาล็อคมาเปลี่ยนเป็นดิจิตอลเพื่อใช้ในการรับค่าแรงดันผลต่างจาก L และ N อีก 2 ช่องสัญญาณ ใช้ในการประมวลผล ดังนั้นโครงงานนี้จึงเลือกใช้ PIC 16F716

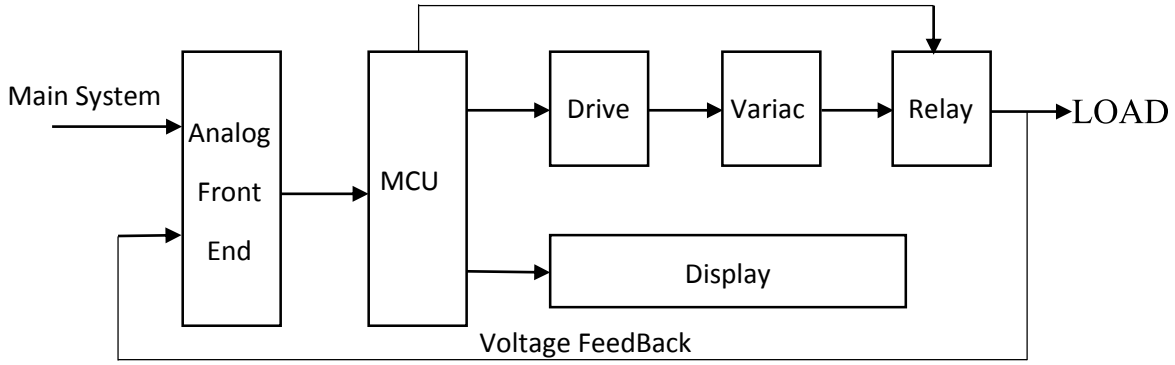
เนื่องจาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F716 มีจำนวนอินพุทและเอาท์พุททั้งหมด 18 ขา ซึ่งเพียงพอที่จะสามารถทำงานตามขอบเขตของโครงงานนี้ได้

3.3.1 Flowchart แสดงการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 3.10 ขั้นตอนการทำงานของการออกแบบไมโครคอนโทรลเลอร์

3.3.2 การเลือกใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 3.11 บล๊อกไดอะแกรมการเลือกใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์

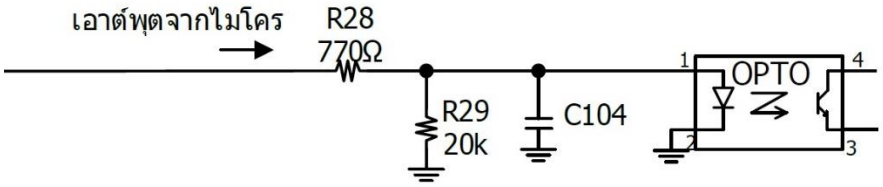
จากโครงสร้างของโครงงาน ทางผู้จัดทำได้ทำการสรุปและเลือกใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ดังนี้

- Analog Front END – MCU 2 bit
- MCU – Display 8 bit
- MUC – Drive 2 bit
- MUC – ตัดต่อ 1 bit

สรุปการใช้งานทั้งหมด 13 bit ที่จะเป็นทั้งอินพุตและเอาต์พุต จากในส่วนของ Analog Front END – MCU มีความจำเป็นต้องใช้ขาอินพุตที่สามารถรับค่าสัญญาญอนาล็อกเพื่อมาแปลงเป็นสัญญาญดิจิตอล (A/D) และส่งเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผล และในส่วนอื่นสามารถใช้งานขาอินพุต – เอาต์พุตทั่วไปได้

ทางผู้จัดทำจึงเลือกใช้ไมโคร โครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ครบถ้วนอีกทั้งต้นทุนในการใช้จ่ายต่ำ เหมาะสมต่อการนำมาทดลองและใช้งาน ทั้งนี้ได้เลือกใช้ ชิพแบบแฟลช เบอร์ PIC16F716

3.4 การออกแบบสร้างวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์

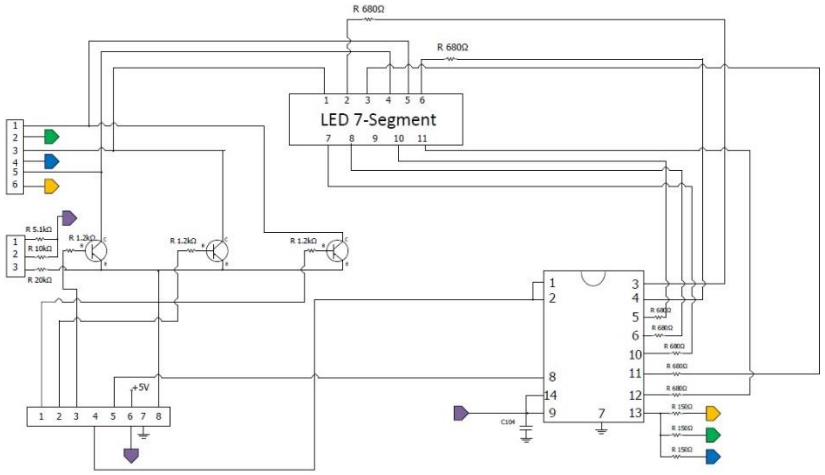


ภาพที่ 3.12 การออกแบบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์

จากภาพที่ 3.12 จากโครงสร้างของโครงงาน เอาต์พุตที่ทำการสั่งการควบคุมเพื่อให้มอเตอร์ขับเคลื่อนทำงานมีทั้งหมด 2 bit ซึ่งสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเอาต์พุตที่ออกมามีขนาด 5V เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุม และให้แน่ใจว่าจะไม่มีความผิดพลาดจากสัญญาณรบกวนใด ๆ ผู้จัดทำจึงเลือก Opto-Coupler ในการรับค่าเอาต์พุตจากไมโครคอลโทรลเลอร์ เนื่องจากคุณสมบัติของ Opto-Coupler สามารถทำงานตามเงื่อนไขของการออกแบบได้

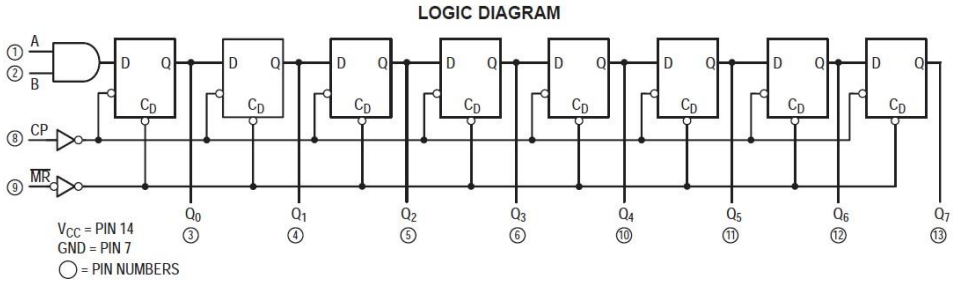
3.5 การออกแบบชุดแสดงผล

ในส่วนของชุดสดงผลจากขอบเขตของโครงงาน ทำการรับแรงดันอินพุต และเอาต์พุต ขนาด 140 -240 V จึงเป็นเหตผลในการออกแบบโดยผู้จัดทำจึงเลือกใช้ 7 Segment จำนวน 3 หลัก เพื่อให้แสดงได้ตรงตามขอบเขตของโครงงาน และยังมีรายการอุปกรณ์อื่น ๆ ที่นำมาช่วยในการสนับสนุนเพื่อให้วงจรชุดแสดงสามารถทำงานภายใต้ขอบเขตของโครงงานได้อย่างเหมาะสม เช่น IC74LS164 และทรานซิสเตอร์ เป็นต้น



ภาพที่ 3.13 การออกแบบวงจรชุดแสดงผล

จากภาพที่ 3.13 IC74LS164 เป็น IC วงจรเลื่อนข้อมูลโดยทำการรับข้อมูลอินพุตเป็นอนุกรมและเอาต์พุตเป็นขนาน จากความสามารถของ IC ชนิดทำให้พื้นที่การใช้งานจำนวน bit ที่จะสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ได้เป็นจำนวนมาก และยังสามารถสั่ง 7 Segment ได้มากกว่าหลายเท่าตัว แต่ในโครงงานนี้ผู้จัดทำได้ใช้เพียง 3 หลักเท่านั้น



ภาพที่ 3.14 LOGIC DIAGRAM IC74LS164

จากภาพที่ 3.14 แสดงให้ว่า IC74LS164 ได้ทำการรับอินพุตทำนวน 2 Bit ที่จุด A และ B มาทำการเปรียบเทียบและส่งค่าเอาต์พุตออกมาทีละชั้น โดยมี CP เป็นสัญญาณคล๊อกเพื่อทำการเลื่อนแสดงข้อมูลและ MR เป็นขารีเซ็ตเพื่อเริ่มต้นใหม่

MODE SELECT — TRUTH TABLE

OPERATING MODE	INPUTS			OUTPUTS	
	$\overline{MR}$	A	B	Q_0	Q_1–Q_7
Reset (Clear)	L	X	X	L	L – L
Shift	H	l	l	L	q_0 – q_6
	H	l	h	L	q_0 – q_6
	H	h	l	L	q_0 – q_6
	H	h	h	H	q_0 – q_6

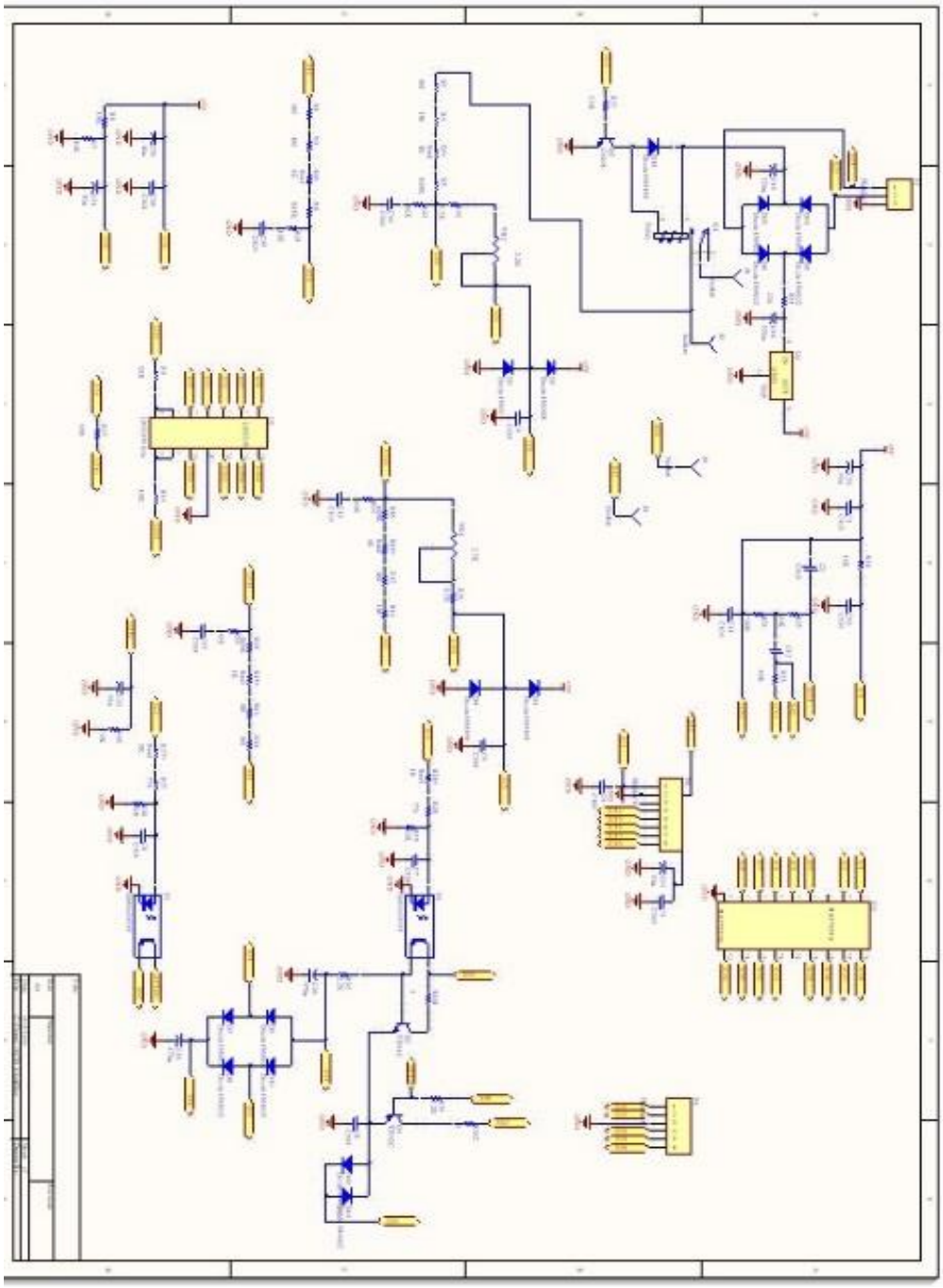
L (l) = LOW Voltage Levels
H (h) = HIGH Voltage Levels
X = Don't Care
q_n = Lower case letters indicate the state of the referenced input or output one set-up time prior to the LOW to HIGH clock transition.

ภาพที่ 3.15 เงื่อนไขการทำงานของ IC74LS164

จากภาพที่ 3.15 การออกแบบวงจรชุดแสดงผล ผู้จัดทำได้ทำการต่ออนุกรมกันระหว่างขาอินพุตของ IC74LS164 ที่จุด A และ B เนื่องจากต้องการทำงานเพียง 2 เงื่อนไขที่เป็น L และ H เท่านั้นส่วนในภาพที่ 3.8 เป็นการแสดงความสามารถของ IC74LS164 โดยสามารถทำงานรับอินพุตเพื่อนำมาเปรียบเทียบให้เข้าเงื่อนไขการทำงานที่ซับซ้อนต่อไปได้ ทั้งนี้ผู้จัดทำเห็นว่าเพียง 2 เงื่อนไขที่ทำการออกแบบไว้นั้นสามารถทำให้วงจรทำงานตามขอบเขตได้ถึงเลือกใช้งานตามที่ออกแบบไว้เท่านั้น

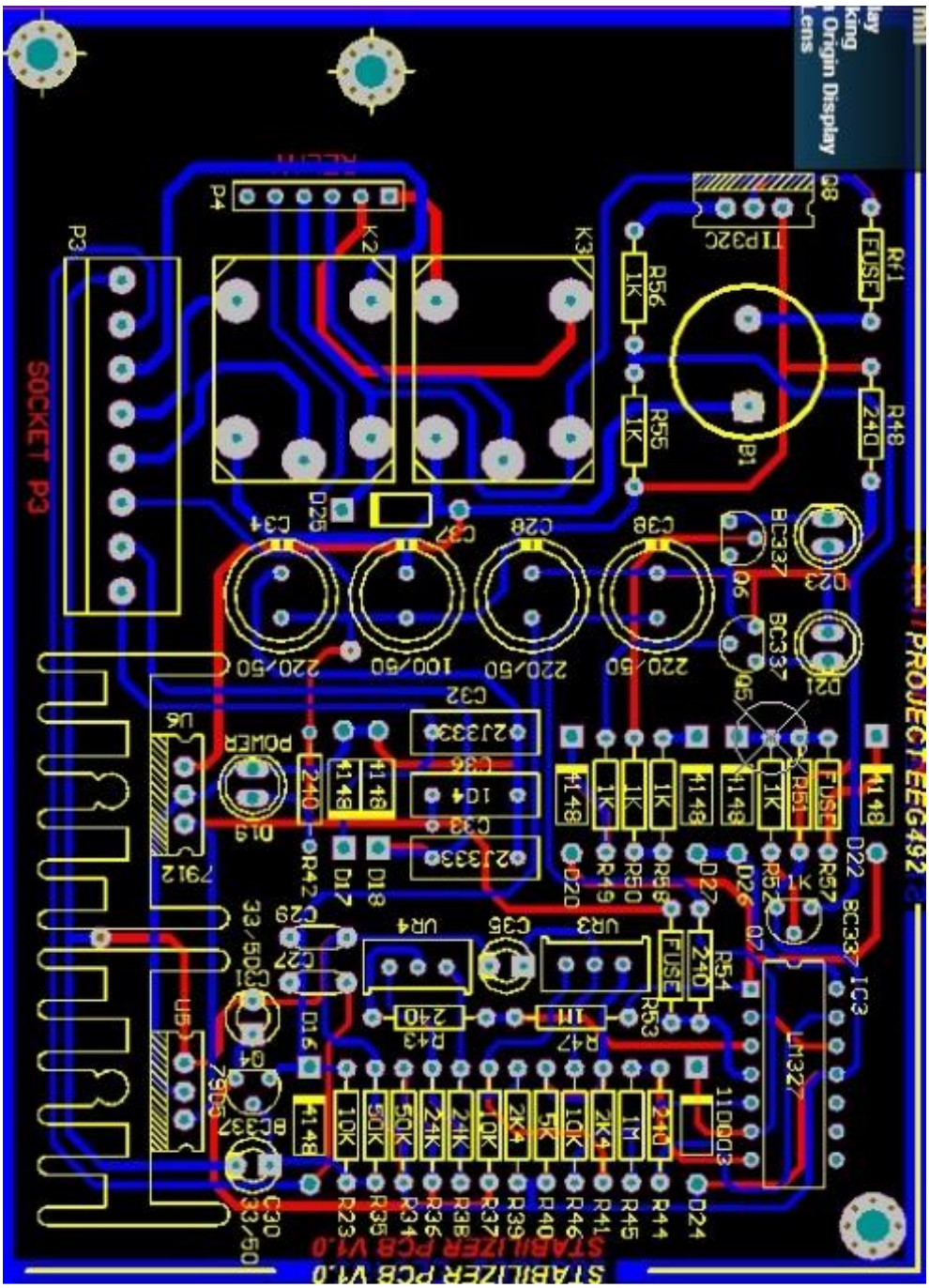
3.6 การออกแบบสร้าง Schematic และ PCB เพื่อประกอบวงจร

หลังจากการออกแบบชุดวงจรควบคุมแล้ว ได้นำวงจรที่ได้ออกแบบไว้มาทำการเขียน Schematic และ PCB เพื่อจะใช้ในการประกอบวงจรโดยออกแบบในโปรแกรม Altium Designer 10 และทำการออกแบบปริ้นที่จะใช้ในการลงอุปกรณ์เป็น 2 Layer เพื่อลดพื้นที่ในการวางอุปกรณ์และเดินสาย



ภาพที่ 3.16 Schematic วงจรควบคุม

จากภาพที่ 3.16 เป็นการแสดงภาพรวมของการออกแบบวงจรควบคุมโดยนำมาเขียนโดยโปรแกรม Altium Designer 10 ทั้งนี้การเขียนเขียน Schematic เป็นส่วนหนึ่งในลำดับขั้นตอนของการสร้าง PCB หรือแผ่นปริ้นที่จะใช้ในงานจริง



ภาพที่ 3.17 PCB วงจรควบคุม

จากภาพที่ 3.17 เป็นการแสดงถึง PCB ของวงจรควบคุมที่ได้ทำการจัดวางอุปกรณ์และเดินเส้นสายทองแดงทั้งหมดแล้ว เพื่อใช้ในการทดลองและลงอุปกรณ์จริงเพื่อทดสอบต่อไป

บทที่ 4

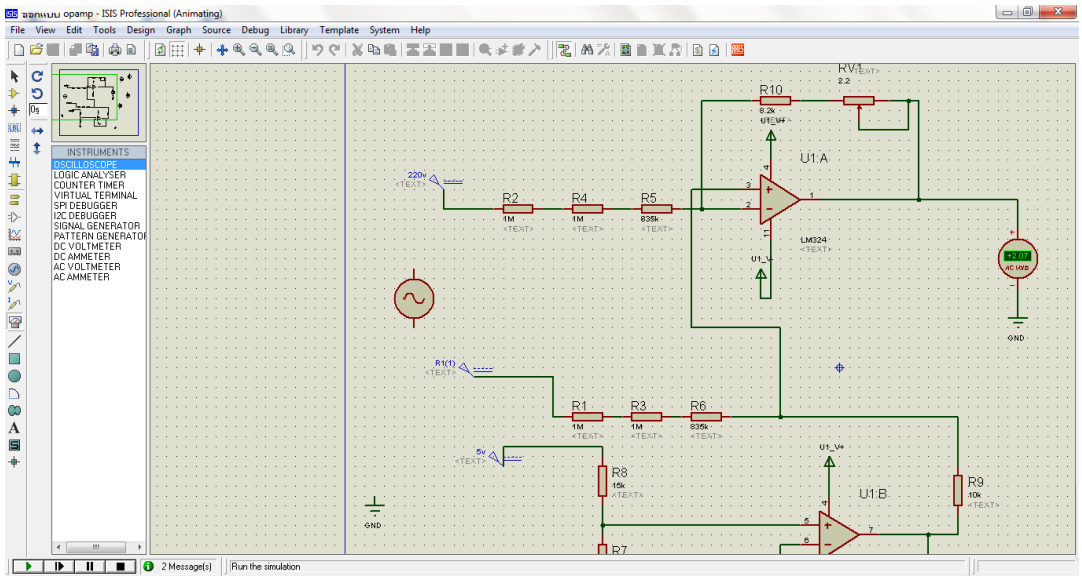
การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การจำลองการทำงานของชุด Analog Front End

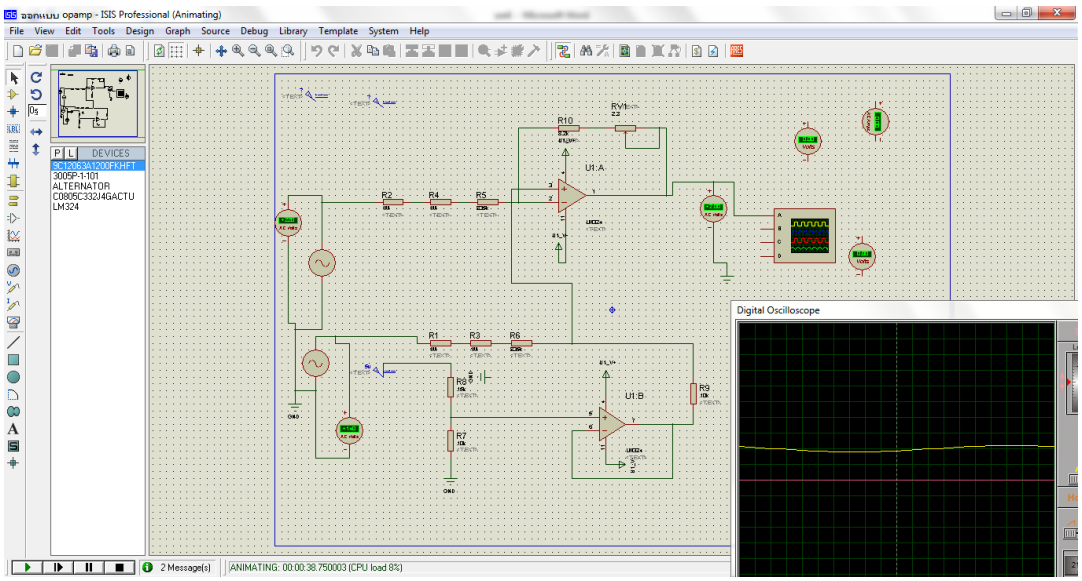
เป็นการจำลองการทำงานของวงจรออปแอมป์ที่ได้ทำการออกแบบเพื่อใช้ในการทำงาน โดยผลการทดลองที่ได้มีความใกล้เคียงกับค่าการคำนวนที่ได้ทำการออกแบบไว้ในบทที่ 3 ทั้งนี้ วงจรที่ออกแบบได้ถูกสร้างขึ้นและจำลองการทำงานเสมือนจริงในโปรแกรม Proteus

4.1.1 การจำลองวงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ

จากการออกแบบวงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณในบทที่ 3 ส่วนของการออกแบบขนาดของความต้านทาน เพื่อทำการลดแรงดันก่อนเข้าชุดออปแอมป์ ทางผู้จัดทำได้ทำการออกแบบไว้โดยต้องการลดขนาดของแรงดันที่อัตราส่วน 1:100 แต่ค่าที่ได้มาอาจมีความผิดพลาดและคลาดเคลื่อน จึงใช้ความต้านทานปรับค่าได้มาเป็นตัวช่วยเพื่อใช้ค่าที่ต้องการ ในส่วนของการจำลองนี้จึงปรับให้ทราบว่าควรใช้ ความต้านทานปรับค่าได้ขนาดเท่าไหร่จึงจะสามารถตอบสนองความต้องการของการทำงาน การจำลองการทำงานจึงเป็นส่วนสำคัญในการออกแบบก่อนการนำไปใช้จริง ดังแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 การจำลองการทำงานของวงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ

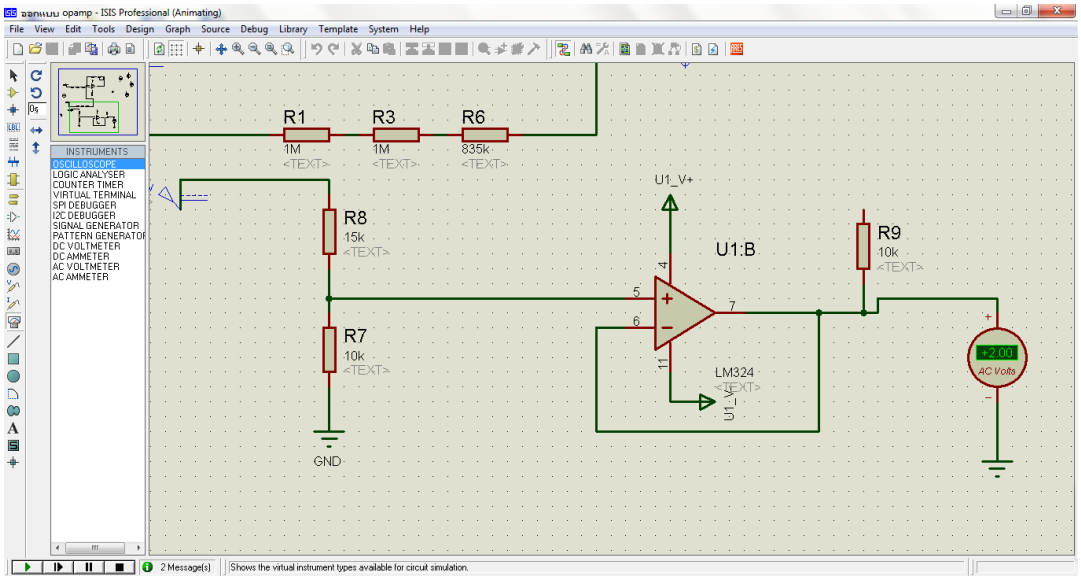


ภาพที่ 4.2 การจำลองการทำงานร่วมกันของวงจรออฟแอมป์ ค่าเอาต์พุตที่ได้มีค่า = 2 V ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบในตารางที่ 3.1

จากภาพที่ 4.2 เป็นการจำลองการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรเปรียบเทียบสัญญาณแบบตามแรงดันและวงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ ตามที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 กล่าวถึงแรงดันที่ออกจากวงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ จะต้องเป็นแรงดันที่ถูกยกระดับขึ้นจาก 0 V เป็น 2 V และมีสัญญาณไซน์ขนาด 0 – 3 V ของวงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณขี่ไปด้วย จากการจำลองการทำงานของวงจรทั้งสองผลที่ได้เมื่อดูจากมิเตอร์ในภาพที่ 4.2 ทำให้ทราบว่าผลการจำลองเป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้ทำการออกแบบไว้ และมีค่าที่บันทึกไว้ตามตารางที่ 3.1

4.1.2 การจำลองวงจรเปรียบเทียบสัญญาณแบบตามแรงดัน

ในบทที่ 3 เรื่องการออกแบบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณแบบตามแรงดันที่ได้ทำการออกแบบเอาไว้ ผู้จัดทำ ทำการจำลองการทำงานโดยนำอุปกรณ์แต่ค่าความต้านทานของ R7 R8 รวมถึงค่าของแรงดันที่จะจ่ายให้กับออปแอมป์ชุดนี้ เพื่อดูผลการทดลองว่าเข้าตามขอบเขตที่ได้ทำการออกแบบไว้หรือ โดยจะแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.3 ผลการจำลองวงจรตามแรงดันโดยโปรแกรม Proteus

จากภาพที่ 4.3 ผลการจำลองจากโปรแกรมสรุปได้โดยเป็นไปตามเงื่อนไขของการออกแบบโดยมีแรงดันที่ขาเอาต์พุตของออปแอมป์ขนาด 2 V

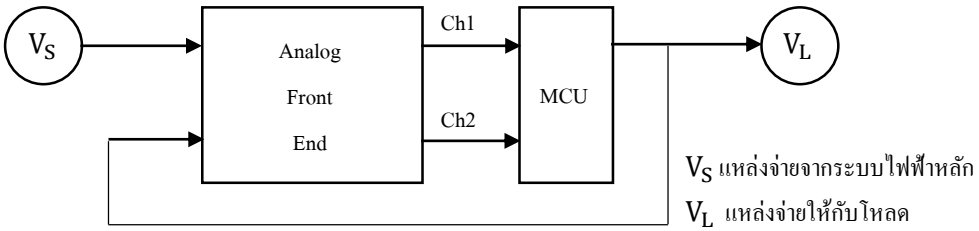
4.1.3 การทดลองหาผลต่างเพื่อป้อนเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์

วัตถุประสงค์ เพื่อหาค่าแรงดันเอาพุทที่ออกจากชุดวงจรออปแอมป์ขา1 และ ขา14 เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบและคำนวนในการเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

อุปกรณ์

1. วารีแอค (Variac) 2 ตัว
2. ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) 1 เครื่อง
3. มัลติมิเตอร์ (Multimeter) 1 เครื่อง
4. ชุดวงจรควบคุม

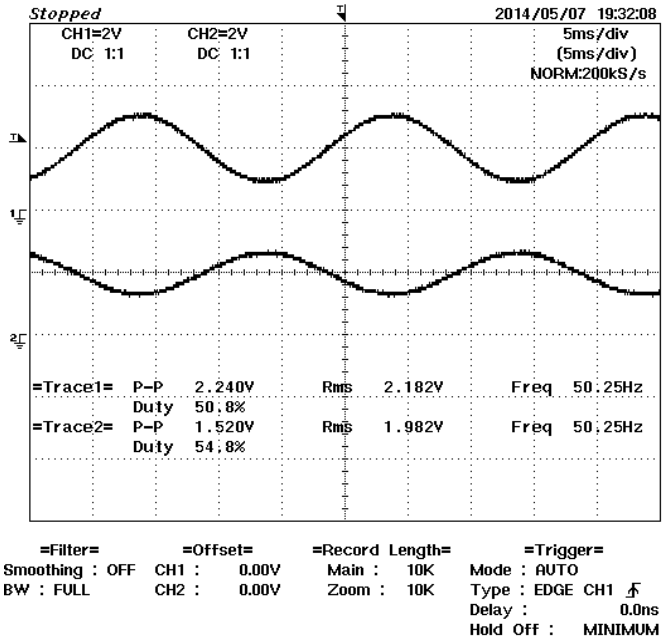
ขั้นตอนการทดลอง



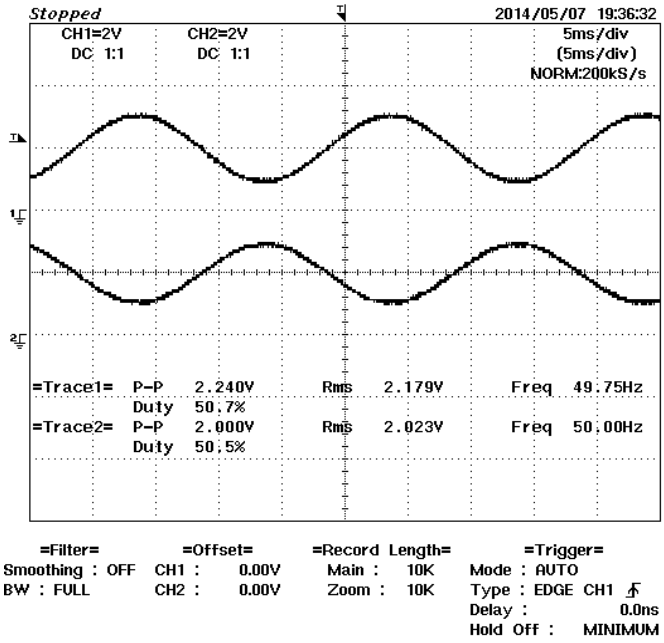
ภาพที่ 4.4 แสดงตำแหน่งบล๊อกการทดลอง

1. กำหนดให้วารีแอคตัวที่ 1 เป็นแหล่งจ่ายจากระบบไฟฟ้าหลัก (V_S) และให้ตัวที่ 2 เป็นตัวที่จ่ายให้กับโหลด (V_L)
2. ปรับ V_S และ V_L ให้มีค่า = 220V
3. วัดสัญญาณโดยใช้ออสซิลโลสโคปวัดเทียบกราวด์ โดยกำหนดให้ Ch1 วัดเอาต์พุตที่ออกจากขา 1 ของชุดออปแอมป์ , Ch2 วัดเอาต์พุตที่ออกจากขา 14 ของชุดออปแอมป์
4. ปรับค่าแรงดันของ V_S ให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ตั้งแต่แรงดัน 140 V – 240 V โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันทางด้าน V_S ให้ทำการปรับค่าแรงดันของ V_L ให้มีแรงดันที่ 220 V เสมอเป็นการปรับแบบมือ Manual
5. นำสัญญาณที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปมาเปรียบเทียบ ดังภาพ

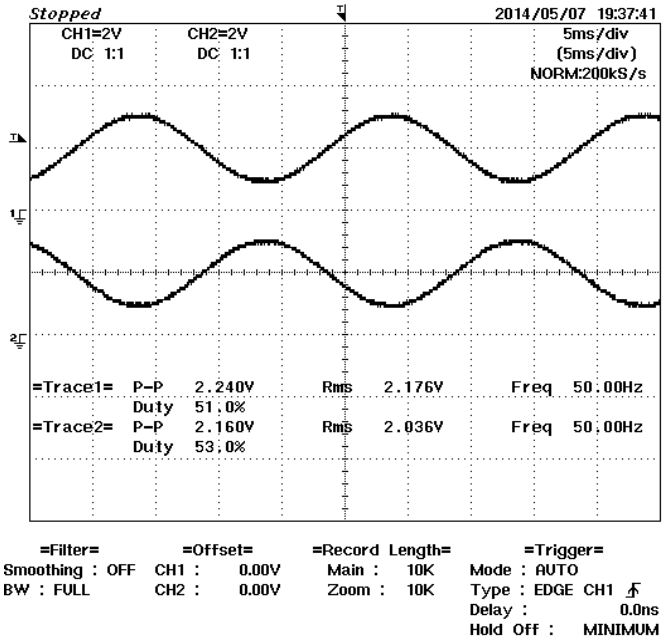
**หมายเหตุ V_S = Ch2, V_L = Ch1



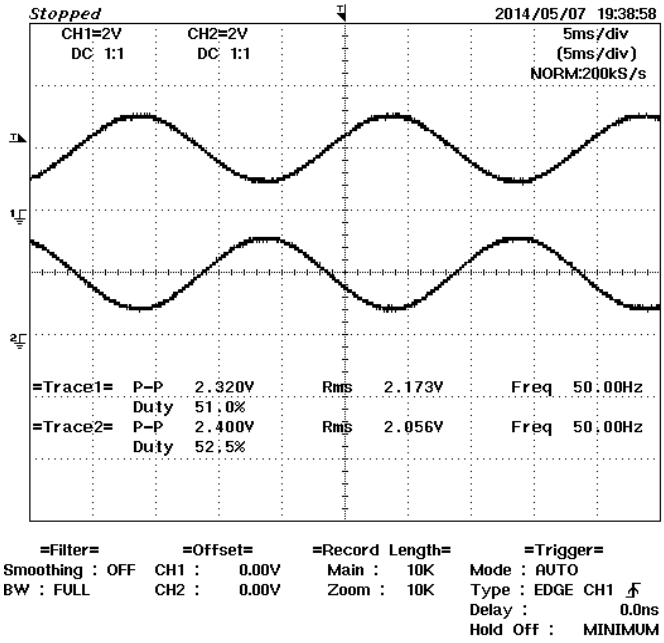
ภาพที่ 4.5 การบันทึกการทดลองผลต่างของแรงดันทางด้าน V_S และ V_L โดยที่ V_S = 140 V, V_L = 220 V



ภาพที่ 4.6 การบันทึกการทดลองผลต่างของแรงดันทางด้าน V_S และ V_L โดยที่ V_S = 200 V, V_L = 220 V



ภาพที่ 4.7 การบันทึกการทดลองผลต่างของแรงดันทางด้าน V_S และ V_L โดยที่ V_S = 220 V, V_L = 220 V



ภาพที่ 4.8 การบันทึกการทดลองผลต่างของแรงดันทางด้าน V_S และ V_L โดยที่ V_S = 240 V, V_L = 220 V

จากภาพบันทึกผลการทดลองที่ 4.5 – 4.8 แสดงถึงสัญญาณไซน์ 2 ช่องสัญญาณ โดยทำความเข้าใจได้ดังนี้ ช่องสัญญาณที่ 1 Ch1 เป็นสัญญาณแรงดันจากระไฟฟ้าหลัก และช่องสัญญาณที่

2 Ch2 เป็นสัญญาณแรงดันจากโหลด ซึ่งเป็นแรงดันที่ป้อนกลับมาให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการตรวจสอบ ข้อสังเกต จากที่ได้ทำการออกแบบในส่วนของ Analog Front End จะมีผลทำให้แรงดันที่ออกมาถูกยกระดับขึ้นที่ 2 V เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานของชุดวงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน และในการทดลองบันทึกผลเมื่อสังเกตจุดอ้างอิง จะเห็นได้ว่าแรงดันดันกล่าวถูกยกขึ้นจริง และมีสัญญาณไซน์ขี่อยู่บนแรงดัน 2 V ซึ่งเป็นผลมาจากวงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ

ในการทดลองที่ 4.2 เมื่อวิเคราะห์ละดูบันทึกผลการทดลองแล้ว จะทำให้ทราบค่าขอบเขตของแรงดันต่ำสุด และมากสุด ซึ่งจะนำไปใช้ปรับสมดุลในการออกแบบ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

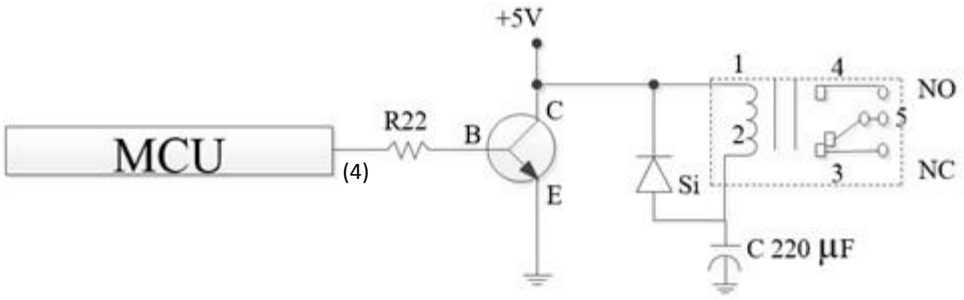
ตารางที่ 4.1 บันทึกผลการทดลองแรงดันที่ป้อนเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์

V	การทดลอง 4.1.3 (V)	
	V_S	V_L
140	1.52	2.24
150	1.52	2.24
160	1.68	2.24
170	1.76	2.24
180	1.84	2.24
190	1.92	2.24
200	2	2.24
210	2.16	2.24
220	2.16	2.24
230	2.32	2.24
240	2.4	2.24

**หมายเหตุ Ch1 = ขา 1 ชุดออปแอมป์ V_L

Ch2 = ขา 14 ชุดออปแอมป์ V_S

4.2 การทดลองการทำงานวงจรตัดต่อ



ภาพที่ 4.9 วงจรรีเลย์ควบคุม

จากภาพที่ 4.9 การทดลองวงจรตัดต่อ โดยใช้รีเลย์ และทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ทั้งนี้ที่ไม่สามารถใช้รีเลย์เพียงตัวเดียวได้เป็นเพราะ ขนาดแรงดันที่ออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อมาสั่งการมีขนาดเล็ก และเพื่อเป็นการป้องกันการไหลย้อนกลับของแรงดันและอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อไมโครคอนโครลเลอร์ได้ ผู้จัดทำจึงนำทรานซิสเตอร์มาช่วยในการรับค่าและสั่งงานไปยังรีเลย์อีกที โดยทำการทดลองการทำงานของทรานซิสเตอร์ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 บันทึกผลการทดลองวงจรตัดต่อ

ขา B	หน้าสัมผัสรีเลย์
0	NO
1	NC

จากตารางการทดลองที่ 4.2 ทำการทดสอบขณะต่อทรานซิสเตอร์และรีเลย์ร่วมกันแล้วและดูผลการเปลี่ยนแปลงของหน้าสัมผัสของรีเลย์ โดยแทนลอจิก 0 และ 1 เป็นการสั่งงานจาก

ไมโครคอนโทรลเลอร์ จากผลการทดลองการทำงานเป็นตามเงื่อนไขและสามารถทำงานตามขอบเขตของวงจรที่ได้ทำการออกไปแล้วในบทที่ 3 การออกแบบวงจรตัดต่อ

4.3 การทดลองการทำงานไมโครคอนโทรลเลอร์

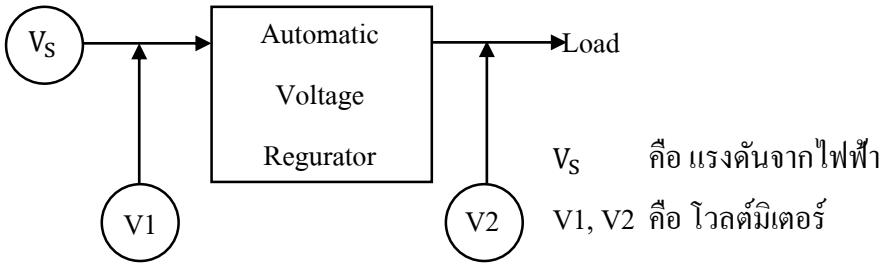
การทดลองการรับและส่งค่าแรงดันขาออกของไมโครคอนโทรลเลอร์

วัตถุประสงค์ เพื่อทดสอบการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมแรงดันทางด้านเอาต์พุตให้มีค่า 220 V ตามขอบเขตของโครงงาน

อุปกรณ์

1. วารีแอค (Variac)	1 ตัว
2. มัลติมิเตอร์ (Multimeter)	2 เครื่อง
3. ชุดวงจรควบคุม	1 ชุด
4. เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้า	1 เครื่อง

ขั้นตอนการทดลอง



ภาพที่ 4.10 การทดลองการรับและส่งค่าแรงดันขาออกของไมโครคอนโทรลเลอร์

1. กำหนดให้ V เป็นมัลติมิเตอร์ที่ใช้แรงในย่านแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่จุด อินพุตและเอาต์พุต ของเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ได้ทำงานออกแบบ
2. กำหนดให้ V_S เป็นแรงดันจากการไฟฟ้าที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ตั้งแต่ 140 -240 V ตามขอบเขตของโครงงานเพื่อทำการทดสอบ
3. ทำการปรับแรงดันทางด้าน V_S ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 140 – 240 V
4. บันทึกค่าตางมัลติมิเตอร์ทั้ง 2 ตัว

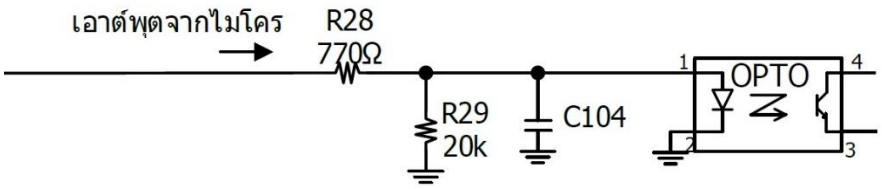
5. นำค่าที่ได้จากบันทึกมาลงตารางเพื่อเปรียบเทียบและดูผลการทดลอง

ตารางที่ 4.3 บันทึกผลการทดลองรับและส่งค่าแรงดันขาออกของไมโครคอนโทรลเลอร์

V	การทดลอง 4.3 (V)		
	V_S	V1	V2
140	140	140	220
150	150	150	220
160	160	160	220
170	170	170	220
180	180	180	220
190	190	190	220
200	200	200	220
210	210	210	220
220	220	220	220
230	230	230	220
240	240	240	220

**สรุปผลการทดลอง จากตารางที่ 4.3 การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถควบคุมการทำงานของเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าได้ โดยเมื่อทำการจ่ายแรงดันตั้งแต่ 140 -240 V เอาต์พุตของเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าที่ 220 V เสมอซึ่งตรงตามขอบเขตของโครงงานที่ได้ทำการออกแบบไว้ในบทที่ 3

4.4 การทดลองการทำงานวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์



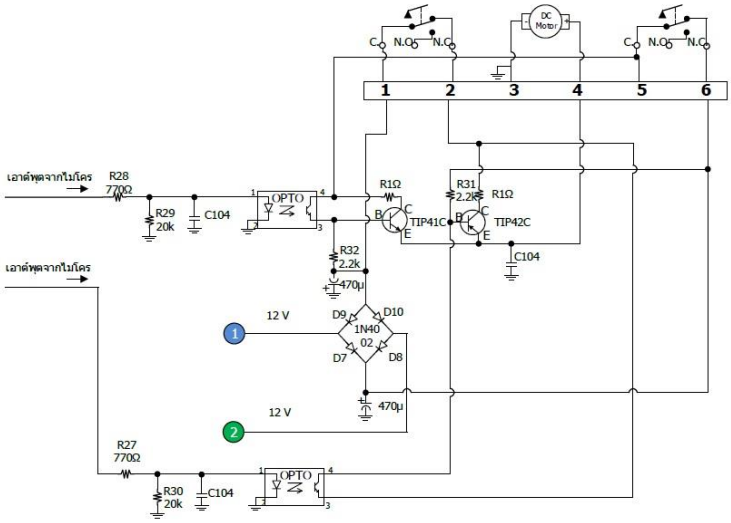
ภาพที่ 4.11 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์

ในการทดลองการทำงานของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งในการออกแบบไมโครคอนโทรลเลอร์จะเป็นตัวสั่งการโดยเมื่อเข้าเงื่อนไขของการปรับมอเตอร์ไมโครคอลโทรเลอร์จะทำการสั่งเอาต์พุตออกมาเพื่อสั่ง Opto-Coupler ให้ทำงาน

โดยในการทดลองนี้ผู้จัดทำได้จำลองแรงดันที่สั่งออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0 และ 5 V โดยที่

0 V คือ ไม่ทำงาน

5 V คือ ทำงาน



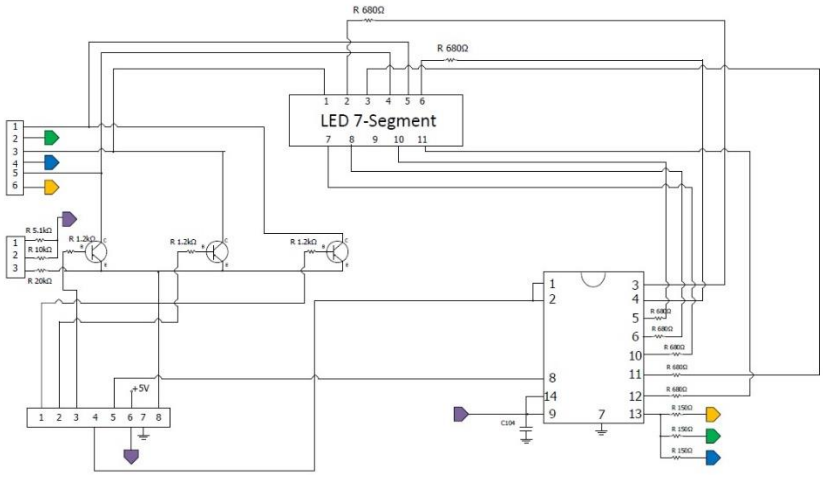
ภาพที่ 4.12 ภาพโดยรวมของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์

จากภาพที่ 4.12 ทำให้เข้าใจการทำงานโดยรวมได้คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการควบคุมมอเตอร์โดยมีกรณีดังนี้

- การควบคุมเพื่อเพิ่มแรงดัน
- การควบคุมเพื่อลดแรงดัน

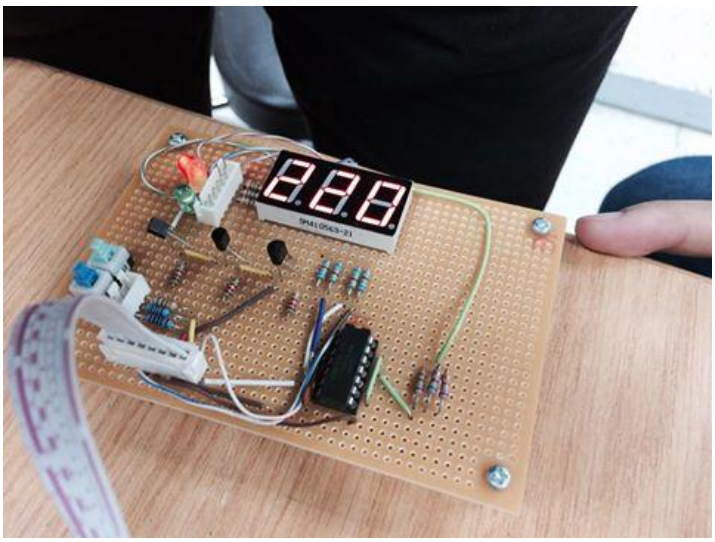
ทั้งนี้การควบคุมดังกล่าวทั้ง 2 กรณีจะสั่งมากจาก 2 bit ที่แตกต่างกัน เพื่อส่งค่าไปยัง Opto-Coupler ที่ทำงานเป็นสวิตซ์ เพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนและทำงานพร้อมกันในเวลาเดียวกัน โดยเมื่อบิตที่ทำการเพิ่มแรงดันทำงาน อีกบิตที่ควบคุมการลดแรงดันจะไม่สามารถทำงาน และจะสลับกันทำงานตามเงื่อนไขเสมอ

4.5 การทดลองการทำงานวงจรแสดงผล



ภาพที่ 4.13 ภาพโดยรวมของวงจรแสดงผล

จากภาพที่ 4.13 ทำการต่อวงจรชุดแสดงผลจากการออกแบบในบทที่ 3 และนำมาทดสอบการใช้งานโดยป้อนค่าตัวเลข 3 หลักเพื่อสังเกตการทำงานของวงจรแสดงผลว่าใช้งานได้หรือไม่ และทำงานภายในขอบเขตออกการออกแบบด้วยหรือไม่ ดังแสดงในภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.14 ภาพวงจรแสดงผลเมื่อทำการทดสอบ

4.6 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองในส่วนของ การทดลองที่ 4.3 การทดลองการทำงานของไมโครอนโทรลเลอร์ เป็นส่วนสำคัญที่สามารถชี้ให้เห็นถึงปัญหา และการทำงานของวงจรที่ได้ทำการออกแบบไว้ว่าทำงานได้หรือไม่ ซึ่งการทดลองดังกล่าว ได้นำเอาค่าจากการออกแบบและทดลอง ของวงจรอื่น ๆ คือ ชุด Analog Front End , ชุดตัดต่อ , ชุดแสดงผล และ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ นำมาประมวลผลและทำการควบคุมการทำงานให้ตรงตามขอบเขตของงาน โดยจากการทดลอง ทำให้ทราบว่าสามารถทำตามขอบเขตของโครงงานได้ โดยรักษาระดับแรงดันของ เอาต์พุตให้มีค่าคงที่ ที่ 220 V ได้โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันจากการไฟฟ้า หรืออินพุต ในช่วงขนาดแรงดัน140 – 240 V ตามขอบเขตของโครงงานดังแสดงในตารางที่ 4.3

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

โครงงานนี้เป็นการออกแบบวงจรควบคุมสำหรับเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ สามารถทำงานได้ตามขอบเขตที่กำหนดไว้ ซึ่งแบ่งการออกแบบส่วนการทำงานไว้ 5 ส่วนคือ ส่วน Analog Front End, ส่วนชุดตัดต่อการทำงาน, ส่วนแสดงผล, ส่วนควบคุมมอเตอร์ และส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งการทำงานทั้งหมด จะถูกประมวลผลโดยไมโครคอลโทรลเลอร์ เพื่อควบคุมการทำงานและสั่งการ ให้มอเตอร์หมุนปรับ เพิ่มและลดแรงดันได้ให้เอาต์พุต ตามขอบเขตของงาน โดยการรับแรงดันจากภาคของการไฟฟ้า และภาคของการจ่ายแรงดันที่โหลด เพื่อย้อนกลับมาตรวจสอบ โดยผ่านชุด Analog Front End เพื่อทำการลดสัญญาณแรงดัน และทำการแปลงสัญญาณแรงดัน เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถปรับค่า และประมวลผลได้ เมื่อได้รับค่าสัญญาณแรงดันที่ได้ตามขอบเขตของการทำงานแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะเป็นตัวสั่งการให้ชุดตัดต่อทำงาน เพื่อส่งแรงดันที่ได้รับการปรับแล้วจ่ายให้กับโหลด และทำการป้อนกลับเพื่อตรวจสอบอีกครั้ง และจากการทดลองนั้นจะพบปัญหาต่าง ๆ ได้แก่ การเลือกใช้ชนิดของอุปกรณ์ ซึ่งในการออกแบบวงจรมีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มากมาย ดังนั้นเมื่อเลือกใช้ผิด ค่าที่ได้ทำการทดลองจะมีค่าผิดพลาด หรืออาจส่งผลให้วงจรไม่สามารถทำงานได้เลย ดังนั้นจึงมีแนวคิดและข้อเสนอแนะในการแก้ปัญหาดังกล่าวคือ การแบ่งเพื่อทำการออกแบบและทดลองไว้เป็นส่วน เพื่อให้ทราบเมื่อเกิดปัญหาเข้าจริง ๆ และทำการศึกษาในเรื่องของผลกระทบที่จะเกิดกับอุปกรณ์เมื่อทำงานผิดพลาด เพื่อนำมาพัฒนาต่อไป เนื่องจากโครงงานในรูปแบบนี้มีผู้ที่สนใจและจะทำอยู่เป็นจำนวนมาก จึงมีการนำโครงงานในรูปแบบนี้ไปต่อยอดเพื่อพัฒนา ดังเช่น กลุ่มของผู้จัดทำเองก็ได้มีการนำมาต่อยอดพัฒนา สำหรับผู้ที่มีความสนใจในงานรูปแบบนี้ เนื่องจากการทำงานของวงจรทั้งหมดมีหลายส่วนที่ทำงานร่วมกัน จึงทำให้ยากต่อการทำความเข้าใจในระยะเวลาอันสั้น ทางผู้จัดทำจึงมีข้อเสนอแนะโดยการศึกษารายละเอียดงานของแต่ละส่วนงานให้ชัดเจนและเข้าใจได้อย่างถ่องแท้ จึงจะเข้าใจถึงปัญหาของงานได้ โดยแบ่งส่วนงานอย่างชัดเจน ทำงานตามขอบเขตขอบเวลา และศึกษารายละเอียดการทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรแต่ละชนิดอย่างละเอียด

เอกสารอ้างอิง

[1] ตฤณ แสงสุวรรณ “คุณภาพไฟฟ้า” จัดพิมพ์โดย สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[2] ถาวร อมตกิตติ์ “ระบบกำลังไฟฟ้าต่อเนื่อง (ยูพีเอส) และ เครื่องควบคุมคุณภาพไฟฟ้า” จัดพิมพ์โดย บริษัท เอ็มแอนด์อี จำกัด

[3] มงคล ทองสงคราม “อิเล็กทรอนอกส์เบื่องต้น” จัดพิมพ์โดย บริษัท อี.เอ ปริ้นติ้ง, หจก.

[4] ทีมงานสมาร์ทเลิร์นนิ่ง “Advance PIC Microcontroller in C ประยกต์ใช้งาน PIC ขั้นสูงด้วยภาษา C” จัดพิมพ์โดย ห้างหุ้นส่วนสามัญสมาร์ทเลิร์นนิ่ง