

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2541

เครื่องแสดงค่ากำลังไฟฟ้าภายในบ้าน

HOME POWER MONITORING



โดย
นาย เลติมพล วรรณสิงห์ 39013083
นาย มานพ ยิ่งรัมย์ 39013097
นาย สมนึก วิริยประสิทธิ์ชัย 39013103
นาย วินัย บุญรอด 39013134

1
2
3
4

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. พิชิต ถ้ายอง

เลขหม.....
เลขทะเบียน..... 34151
วัน, เดือน, ปี..... 6 ต.ค. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2541

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องแสดงค่ากำลังไฟฟ้าภายในบ้าน

ผู้จัดทำ

- | | | |
|----------------|-------------------|----------|
| 1. นาย เฉลิมพล | วรรณสิงห์ | 39013083 |
| 2. นาย มานพ | ยิ่งรัมย์ | 39013097 |
| 3. นาย สมนึก | วิริยประสิทธิ์ชัย | 39013103 |
| 4. นาย วินัย | บุญรอด | 39013134 |

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. พิชิต ถ้ายอง)

เครื่องแสดงค่ากำลังไฟฟ้าภายในบ้าน

เฉลิมพล วรรณสิงห์

มานพ ยิ่งรัมย์

สมนึก วิริยประสิทธิ์ชัย

วินัย บุณยรอด

ผศ.พิชิต ถ้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2541

บทคัดย่อ

โครงการเครื่องแสดงค่ากำลังไฟฟ้าภายในบ้าน เป็นการศึกษาและพัฒนาวิธีควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในบ้าน มีส่วนประกอบหลักๆ คือ เครื่องวัดปริมาณไฟฟ้า และอุปกรณ์ตัดต่อภาระไฟฟ้า การควบคุมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพ กระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ และกำลังไฟฟ้าจริง ของภาระไฟฟ้า นำค่าที่ได้ไปเก็บในหน่วยความจำ ในกรณีที่ภาระไฟฟ้ามีค่าเกินกว่าที่กำหนดไว้ เครื่องควบคุมก็จะตัดภาระไฟฟ้าที่ไม่จำเป็นออก นอกจากนี้สามารถที่จะนำเครื่องควบคุมนี้ต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อทำการวิเคราะห์คุณลักษณะการใช้ภาระไฟฟ้าของสถานที่นั้นๆ เช่นช่วงเวลาใดที่มีการใช้ภาระไฟฟ้าเท่าใด ภาระไฟฟ้าตัวใดทำงานช่วงใด ผลที่ได้ทำให้สามารถนำมาประกอบการบริหารการใช้กำลังไฟฟ้าได้ โดยการกำหนดค่าให้กับเครื่องควบคุมนี้

HOME POWER MONITORING

Chaloempol Wannasing
Manop Yingrum
Somnuk Wiriyaprasitchai
Winai Boonrod
Asst. Prof. Pichit Lumyong Advisor

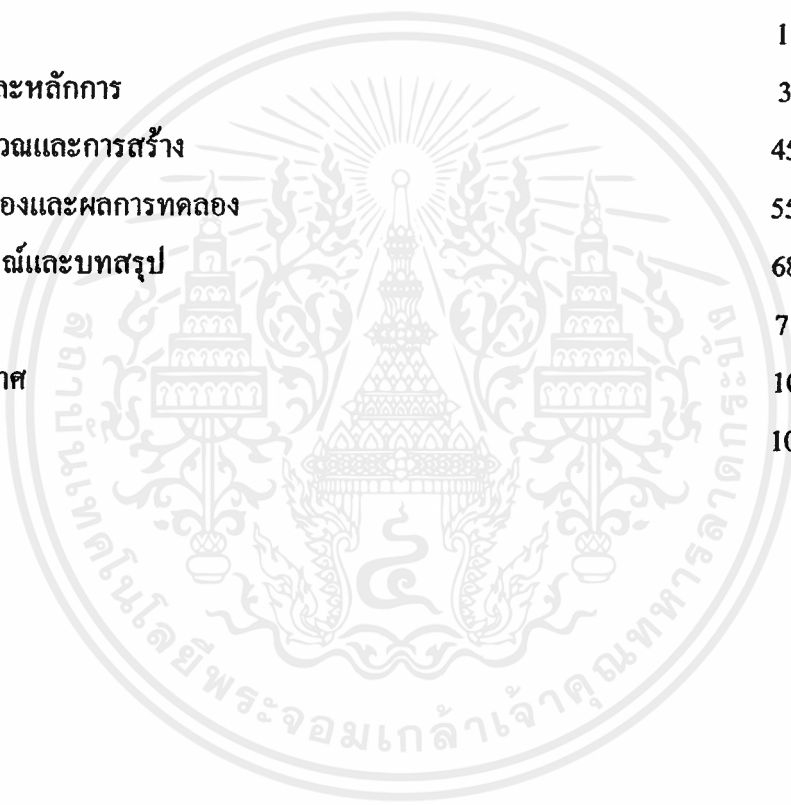
1998

Abstract

Home power monitoring is to study and develop a process that control electrical quantity inside home. It has main component namely electrical instrument and equipment to switching electrical load. Controller use microcontroller MCS-51 to calculate root mean square voltage, root mean square current and active power of electrical load. Then, storage value in memory. In case that power have over value at assign, controller will interrupt electrical load that not important. In addition, can to get ahead controller and computer to mutual in order to characteristic analysis such as what interval time and how much to use electric power. Result to given can control power by assign value to give controller.

สารบัญ

| | หน้า |
|-------------------------------|------|
| สารบัญ | ก |
| สารบัญรูปภาพ | ข |
| สารบัญตาราง | จ |
| สัญลักษณ์ | ฉ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ | 3 |
| บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง | 45 |
| บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง | 55 |
| บทที่ 5 การวิจารณ์และบทสรุป | 68 |
| ภาคผนวก | 71 |
| กิตติกรรมประกาศ | 103 |
| เอกสารอ้างอิง | 104 |



สารบัญภาพ

| รูปภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 1. สัญญาณรูปซายน์ | 5 |
| 2. แบบทั่วไปของคลื่นรูปซายน์ | 6 |
| 3. สัญญาณที่มีความต่างเฟส | 7 |
| 4. ลักษณะของรูปคลื่นต่างๆ | 7 |
| 5. ความหมายของค่าเฉลี่ย | 8 |
| 6. สัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปซายน์ | 9 |
| 7. วงจรการวัดกำลังไฟฟ้ากระแสตรง | 11 |
| 8. สัญญาณกระแสและแรงดันรูปซายน์ | 12 |
| 9. กำลังไฟฟ้าที่จาก $p(t) = v(t)i(t)$ | 13 |
| 10. สามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้า | 14 |
| 11. การต่อหม้อแปลงกระแส | 16 |
| 12. วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงกระแส | 16 |
| 13. ไดอะแกรมเฟสหม้อแปลงกระแส | 17 |
| 14. ความผิดพลาดของหม้อแปลงกระแส | 18 |
| 15. การต่อหม้อแปลงแรงดัน | 19 |
| 16. วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงแรงดัน | 19 |
| 17. สัญลักษณ์ของออปแอมป์ | 21 |
| 18. วงจรขยายสัญญาณกลับเฟส | 23 |
| 19. วงจรขยายไม่กลับขั้ว | 23 |
| 20. วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ | 24 |
| 21. วงจรเรียงกระแสแบบง่าย | 25 |
| 22. วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นสัญญาณขนาดเล็ก | 26 |
| 23. วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นสัญญาณขนาดเล็ก $V_r \geq 0$ | 27 |
| 24. วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นสัญญาณขนาดเล็ก $V_r \leq 0$ | 27 |
| 25. วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสัญญาณขนาดเล็ก | 28 |
| 26. ระบบบิจิตอลที่มีสัญญาณอนาล็อกอินพุตและอนาล็อกเอาต์พุต | 30 |

สารบัญภาพ(ต่อ)

| รูปภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 27. โค้ดแกรมของ D/A Converter | 32 |
| 28. โค้ดแกรมของ A/D Converter | 33 |
| 29. โค้ดแกรมของ Successive approximation type A/D | 35 |
| 30. การทำงานของ Successive approximation type A/D converter | 36 |
| 31. โค้ดแกรมของ Counter ramp type A/D converter | 37 |
| 32. การคำนวณหา X ใหม่จากค่ากำหนดเริ่มต้น X_0 | 40 |
| 33. ลักษณะการเข้าสู่ผลลัพธ์ในระเบียบวิธีของนิวตัน - ราฟสัน | 40 |
| 34. การแบ่งพื้นที่เป็นส่วนย่อย | 44 |
| 35. พื้นที่ย่อยที่นำมารวมกัน | 44 |
| 36. บล็อก โค้ดแกรมการทำงานของโครงการ | 45 |
| 37. วงจรแปลงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า | 47 |
| 38. วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 8 โวลต์ | 48 |
| 39. วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล | 48 |
| 40. ลักษณะหน้าตาของ โปรแกรมที่ใช้ในการติดต่อ | 49 |
| 41. วงจรชุดควบคุมและรับค่าสถานะของภาระ ไฟฟ้า | 51 |
| 42. Time Interrupt | 52 |
| 43. Serial Interface | 53 |
| 44. โค้ดแกรมการทำงาน | 54 |
| 45. สัญญาณเอาต์พุตจาก CT และ PT | 55 |
| 46. สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณกลับเฟสของแรงดันและกระแส | 56 |
| 47. สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรเรียงกระแสของแรงดันและกระแส | 56 |
| 48. สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรเรียงกระแสและเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณกลับเฟส ของแรงดัน | 57 |
| 49. สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรเรียงกระแสและเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณกลับเฟส ของกระแส | 57 |
| 50. สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณกลับเฟสและวงจรเปรียบเทียบของแรงดัน | 58 |

สารบัญภาพ(ต่อ)

| รูปภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 51.สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณกลับเฟสและวงจรเปรียบเทียบของกระแส | 58 |
| 52.สัญญาณจากเอาต์พุตจากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณของกระแสและแรงดัน | 59 |
| รูปภาพผนวกที่ | |
| 1.แสดงโครงสร้างภายในของ MCS-51 | 72 |
| 2.แสดงขาต่างๆของ 8051 | 73 |
| 3.ขาของ MCS-51 ที่ใช้ต่อกับ XTAL | 75 |
| 4.โครงสร้างพอร์ทของ MCS-51 | 75 |
| 5.การต่อพอร์ทเข้ากับระบบบัสภายในของ MCS-51 | 76 |
| 6.การจัดหน่วยความจำ | 76 |
| 7.ตำแหน่งของหน่วยความจำทั้งแบบ ไบต์และแบบบิต | 78 |
| 8.ไดอะแกรมกลุ่มสัญญาณที่ใช้อ่านข้อมูล | 81 |
| 9.ไดอะแกรมเวลาอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก | 82 |
| 10.การต่อ MCS-51 กับหน่วยความจำภายนอก | 83 |
| 11.ไดอะแกรมเวลาการอ่านและเขียนข้อมูลกับหน่วยความจำภายนอก | 84 |
| 12.สัญญาณต่างๆที่เกิดขึ้นขณะทำคำสั่ง MOVX | 85 |
| 13.การต่อหน่วยความจำโปรแกรมกับ MCS-51 | 86 |
| 14.การรีเซต MCS-51 | 87 |
| 15.การอ้างตำแหน่งแบบ Page | 91 |
| 16.การอ้างตำแหน่งแบบ Indexed | 92 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 1. แสดงขีดจำกัดของความผิดพลาดของหม้อแปลงแรงดัน | 20 |
| 2. เปรียบเทียบลักษณะของออปแอมป์ในอุดมคติและในทางปฏิบัติ | 22 |
| 3. ตารางความจริงสำหรับ D/A Converter | 31 |
| 4. ตารางความจริงสำหรับ A/D Converter | 33 |
| 5. แสดงการเปรียบเทียบ A/D Converter ตามความเร็ว | 34 |
| 6. แสดงตัวอย่างข้อมูลค่าทางไฟฟ้าจากการทดลอง | 61 |
| 7. ตัวอย่างข้อมูลแสดงสภาวะการทำงานของ Load | 62 |
| ตารางผนวกที่ | |
| 1. แสดงไมโคร โปรเซสเซอร์ ตระกูล MCS-51 เบอร์ต่างๆ | 72 |
| 2. แสดงบิตและหน้าที่ต่างๆของ Port 3 | 74 |
| 3. แสดงบิตและหน้าที่ต่างๆใน PSW | 79 |
| 4. แสดงค่าต่างๆที่เกิดขึ้นหลังการ Reset | 88 |
| 5. แสดงชุดคำสั่งทางลอจิก | 94 |
| 6. แสดงชุดคำสั่งการ โอนย้ายข้อมูลระหว่างหน่วยความจำภายใน | 95 |
| 7. ชุดคำสั่งการ โอนย้ายข้อมูลระหว่าง Register A กับหน่วยความจำภายนอก | 96 |
| 8. คำสั่งแบบเปิดตาราง | 96 |
| 9. ชุดคำสั่งแบบ Boolean | 97 |

สัญลักษณ์

I_{rms} = กระแสไฟฟ้าประสิทธิผล

V_{rms} = แรงดันไฟฟ้าประสิทธิผล

V_p = แรงดันไฟฟ้าขอคคถึงสูงสุด

I_p = กระแสไฟฟ้าขอคคถึงสูงสุด

$v(t)$ = แรงดันไฟฟ้าที่เวลาใดๆ

$i(t)$ = กระแสไฟฟ้าที่เวลาใดๆ

$p(t)$ = กำลังไฟฟ้าที่เวลาใดๆ

t = เวลาใดๆ

V_{in} = แรงดันไฟฟ้าขาเข้า

V_{out} = แรงดันไฟฟ้าขาออก

P_{sv} = กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย

C = ตัวเก็บประจุ

R = ตัวต้านทาน

VR = ตัวต้านทานปรับค่าได้

D = ไดโอด

PT = หม้อแปลงแรงดัน

CT = หม้อแปลงกระแส

ADC = วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

LCD = จอผลึกเหลว

PF = ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่สำคัญและมีความจำเป็นมากในชีวิตประจำวันของมนุษย์ และมีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ต้องสูญเสียพลังงานอื่นๆ และทรัพยากรของโลกที่จะนำมาผลิตพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีการบริหารพลังงานไฟฟ้าให้ดีและเหมาะสม โดยต้องมีการพิจารณาพฤติกรรมการใช้พลังงานซึ่งจะแตกต่างกันไปตามลักษณะภูมิประเทศ, ภูมิอากาศ และวัตถุประสงค์ที่จะนำไปใช้งาน พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่ไม่สามารถมองเห็นได้ จึงเป็นแนวคิดที่จะทำโครงการ เครื่องแสดงค่ากำลังไฟฟ้าภายในบ้าน (Home Power Monitoring) เพื่อเป็นแนวทางในการทำโครงการที่ใหญ่กว่านี้ต่อไปได้ โครงการนี้จะทำการรับค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) และกระแสไฟฟ้า (Current) เข้ามาแล้วทำการแปลงสัญญาณให้กับชุดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลและคำนวณและเก็บค่าต่างๆ ในหน่วยความจำโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 เบอร์ 8032 ทำการคำนวณเพื่อที่จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพ (Root Mean Square Voltage), กระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ (Root Mean Square Current), กำลังไฟฟ้าจริง (Real Power), ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) และกิโลวัตต์ชั่วโมง (Kilowatt-hour) แล้วจะนำค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพ, กระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ, กำลังไฟฟ้า, ตัวประกอบกำลังและกิโลวัตต์ชั่วโมงมาจัดเก็บเป็นตารางฐานข้อมูลเพื่อที่จะนำมาแสดงเป็นกราฟในโปรแกรม Microsoft Excel บนคอมพิวเตอร์ เพื่อที่จะแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆ เหล่านี้ของภาระไฟฟ้า (Load) ทั้งหมดที่ใช้ภายในบ้าน พร้อมทั้งแสดงคิวดิไซเกิลของภาระไฟฟ้าแต่ละตัวที่ต้องการทราบได้ ซึ่งจะเป็นตัวบอกได้ว่าภาระไฟฟ้าแต่ละตัวมีการเปิด-ปิดในช่วงเวลาใด ในกรณีภาระไฟฟ้าที่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีขนาดกระแสเริ่มเดินสูงๆ ถ้ามีการเปิด-ปิดบ่อยๆ จะทำให้สูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งจะทราบได้จากคิวดิไซเกิลนี้ ทั้งยังมีการแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพ, กระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าทางจอผลึกเหลว (LCD) พร้อมทั้งมีชุดควบคุมและรับค่าสถานะของภาระไฟฟ้า

จะมีส่วนต่างๆ ที่จะใช้ในโครงการนี้ซึ่งจะประกอบไปด้วยชุดการทำงานต่อไปนี้

1. ชุดแปลงสัญญาณ โดยใช้หม้อแปลงแรงดัน (Potential Transformer) รับค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและใช้หม้อแปลงกระแส (Current Transformer) รับค่าสัญญาณกระแสไฟฟ้าต่อกับตัวต้านทาน (Resistor) ขนาด 0.05 โอห์ม เพื่อที่จะได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานเทียบได้ว่าเป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้าส่งเข้าวงจรขยายสัญญาณกลับเฟส (Inverting Amplifier), วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (Comparator) และวงจรเรียงกระแส (Rectifier) จะได้สัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อส่งไปยัง A/D Converter เพื่อทำการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลส่งเข้าชุดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการประมวลผล

2. ชุดคอนโทรลเลอร์ โดยจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 เบอร์ 8032 โดยจะทำการประมวลผลให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพ, กระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าแล้วทำการแสดงผลที่เวลานั้นๆทางจอผลึกเหลว รวมทั้งทำการเก็บข้อมูลเพื่อทำการสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ทอนุกรมเพิ่มที่จะแสดงค่าต่างๆทางคอมพิวเตอร์

3. ชุดแสดงผลทางจอผลึกเหลว จะแสดงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพ, กระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าที่เวลาขณะนั้น

4. ชุดแสดงผลทางคอมพิวเตอร์ จะแสดงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพ, กระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ, กำลังไฟฟ้า, ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและกิโลวัตต์ชั่วโมงตามที่โปรแกรมนำมาเก็บไว้ในตารางฐานข้อมูลมาแสดงเป็นกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel

5. ชุดควบคุมและรับค่าสถานะของภาระไฟฟ้า จะรับค่าสถานะของภาระไฟฟ้าส่งไปยังชุดคอนโทรลเลอร์เพื่อที่จะได้นำไปแสดงผลทางคอมพิวเตอร์ ส่วนการควบคุมภาระไฟฟ้าจะได้ค่าการควบคุมจากชุดคอนโทรลเลอร์ส่งมายังชุดควบคุมภาระไฟฟ้าเพื่อเปิด-ปิดภาระไฟฟ้าตามที่ต้องการ

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ความรู้เบื้องต้นของการวัด

2.1.1 วัตถุประสงค์ของการวัด

1. การวัดเพื่อให้ได้มาซึ่งความรู้จะเห็นได้ว่ามีความต้องการวัดสิ่งต่าง ๆ ในชีวิตประจำวัน ถ้าจะถามว่าความรู้คืออะไร ความรู้ก็คือ สารหรือข่าวสาร (Information) ที่เรารวบรวมเป็นหมวดหมู่ อย่างมีระบบ (สารนี้จะแทนคุณสมบัติของวัตถุหรือเหตุการณ์ที่ถูกวัด) เมื่อมีการรวบรวมเป็นหมวดหมู่ ก็จะสามารถทำการทดลองซ้ำ ความเข้าใจและมั่นใจจะทำให้เกิดผลซึ่งแสดงในรูปกฎทางวิทยาศาสตร์ กระบวนการนี้จะรู้จักกันในชื่อของวิธีการทางวิทยาศาสตร์ (Scientific Method) เมื่อเราพบปรากฏการณ์ที่น่าสนใจ จะมีการตั้งสมมติฐานขึ้น เพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์นั้น เช่น แรงเป็นสัดส่วนกับผลคูณของมวลกับความเร่ง จะเห็นได้ว่า จะต้องมีการนิยามแรง มวล และความเร่ง ขึ้นมาก่อน จากนั้นจะต้องมีการวัด เพื่อหาความจริงเกี่ยวกับปรากฏการณ์นั้น ผลที่ตามมาของสมมติฐานจะต้องมีเหตุมีผล จากนั้นจะทำการทดลองหรือการวัดในสิ่งแวดล้อมที่ถือว่าสมมติฐานนั้นเป็นจริง ในตัวอย่างนี้คือ ทำการวัดตลอดพิสัย ของแต่ละปริมาณ ผลที่ได้จากการทดลองกับสมมติฐาน จะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน ถ้าสมมติฐานดูเหมือนจะถูกต้องและยอมรับได้ต่อกลุ่มคนที่อาจกำลังแข่งขันกันศึกษาถึงปรากฏการณ์นั้น ให้ทำการตัดสินใจจากทั้งผลการทดลองและสมมติฐาน จากนั้นสมมติฐานก็จะกลายเป็นทฤษฎี (Theory)

2. การวัดเพื่อการควบคุม จากการที่เราสามารถอาศัยการวัดทำให้เกิดสารเกี่ยวกับสถานะของระบบ แต่ถึงกลไกการวัดจะช่วยในการควบคุมระบบ ซึ่งในกรณีนี้จะต้องทำการวัดในลักษณะซ้ำ ๆ หรือต่อเนื่องและบ่อยครั้งโดยอัตโนมัติ ระบบดังกล่าวได้เพิ่มจำนวนการใช้ตั้งแต่การควบคุมกระบวนการและการควบคุมการผลิต เครื่องจักรกล เครื่องใช้ในบ้าน จนถึงอุปกรณ์ป้องกันประเทศ เราจะพบว่าในสายงานการผลิตใหม่ จะใช้อุปกรณ์และระบบวัดจำนวนมาก เพื่อควบคุมกระบวนการผลิตและควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ บ่อยครั้งที่ระบบการวัดในเชิงพาณิชย์จะมีความสำคัญมาก การออกแบบต้องการคุณภาพและความน่าเชื่อถือได้สูง ความล้มเหลวในการทำงานของระบบ อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อทรัพย์สินและชีวิตจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น ระบบควบคุมในเครื่องบินหรือระบบควบคุมเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ สิ่งที่สำคัญที่ต้องจดจำให้ดีคือ คุณภาพของการควบคุม จะสามารถทำได้ดีที่สุดเท่ากับสารที่ได้จากระบบวัดเท่านั้น

2.1.2 ความจำเป็นของการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มนุษย์มีความสามารถสูงในด้านต่าง ๆ แต่ทางด้านการวัดหรือการเป็นเครื่องมือวัด มนุษย์มีขีดจำกัดในการรับรู้ หรือบอกถึงปริมาณต่าง ๆ เช่น ปริมาณไฟฟ้า หรือปริมาณฟิสิกส์อื่น ๆ โดยใช้ประสาทสัมผัสเพียงอย่างเดียว มีคุณสมบัติหรือตัวแปรหลายอย่างเป็นอันตรายต่อสุขภาพหรือถึงชีวิต ถ้าเข้าไปสัมผัสโดยตรง ดังนั้นมนุษย์จะต้องอาศัยตัวกลางเพื่อถ่ายทอดสิ่งที่ต้องรู้ให้เข้ามาอยู่ในรูปที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้

2.2 การวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ

2.2.1 ลักษณะของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ

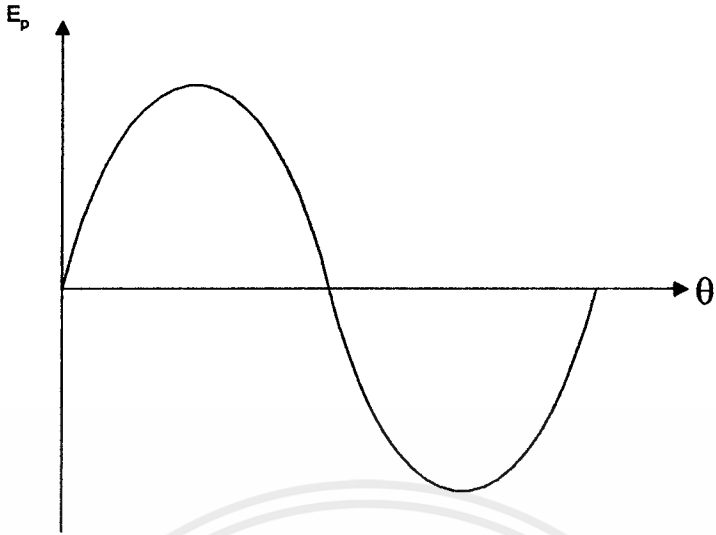
เราสามารถเขียนกราฟของค่าคงที่ขณะใด ๆ ของสัญญาณไฟฟ้าขณะที่มีมันแปรไปเมื่อเทียบกับเวลา กราฟที่ได้ลักษณะนี้จะเรียกว่ารูปคลื่นของสัญญาณ ในงานทางไฟฟ้าหลาย ๆ แบบ เราจำเป็นต้องวัดและวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณที่แตกต่างกัน

กล่าวโดยทั่วไป ถ้าหากรูปคลื่นของสัญญาณใดมีค่าคงที่เมื่อเทียบกับเวลา เราจะเรียกสัญญาณนั้นว่า สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง ตัวอย่างของสัญญาณกระแสตรง เช่น แรงดันที่ออกมาจากแบตเตอรี่ ถ้าหากสัญญาณแปรเปลี่ยนไปตามเวลาและค่าที่ขณะใด ๆ ที่เป็นทั้งบวกและลบ เราจะเรียกสัญญาณนี้ว่า สัญญาณกระแสสลับ ถ้าหากการแปรค่ามีลักษณะซ้ำกันอย่างต่อเนื่อง โดยไม่คำนึงถึงรูปร่างของการซ้ำค่า เราจะเรียกสัญญาณนั้นว่า สัญญาณซ้ำค่า

รูปคลื่นซ้ำค่าสามัญที่สุดที่พบในระบบไฟฟ้าคือ คลื่นรูปซายน์ (Sinusoid) ลักษณะของคลื่นนี้จะได้จากการเคลื่อนที่ในลักษณะ การแกว่งของดัมมนาฬิกา (Simple Harmonic Motion) ซึ่งถ้าหากไม่มีความฝืด รูปคลื่นที่ได้จะมีลักษณะซ้ำเคิม ดังนั้นในการเขียนรูปคลื่นจะเขียนเพียงหนึ่งรอบ (Cycle) การหาจุดใด ๆ บนรูปคลื่นภายในหนึ่งรอบ ทำได้โดยกำหนดค่าศูนย์ให้กับจุดเริ่มของรอบ (ของลูกดัมมนาฬิกา) และเคลื่อนที่ไป 360 องศา เมื่อครบ 1 รอบ ภาพที่ 1 แสดงรูปของแรงดันที่เป็นซายน์ ขนาดของแรงดันที่ขณะใด ๆ (Instantaneous Value) จะสัมพันธ์กับค่าแรงดันสูงสุด E_p และมุม θ ตามสมการ

$$e = E_p \sin \theta \quad (1)$$

แต่สมการนี้บอกเพียงค่าของ e ที่ขณะใด ๆ โดยจะต้องรู้ว่าที่ขณะนั้น θ มีค่าเท่าใด นอกจากนั้นในขณะที่มีการเปรียบเทียบรูปคลื่นของสัญญาณ 2 สัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน การเขียนรูปคลื่นในลักษณะนี้เกือบจะไม่ได้บอกอะไรเลย เราจะหาความสัมพันธ์หรือสมการของแรงดัน (หรือกระแส) สัญญาณรูปซายน์ โดยใช้แนวคิดเรื่องเรเดียน ซึ่งเป็นหน่วยของมุม จากนิยามมุมหนึ่งเรเดียนหมายถึง มุมที่จุดศูนย์กลางของวงกลมที่รองรับด้วยส่วนโค้งของวงกลมที่มีความยาวเท่ากับรัศมีของวงกลมนั้น



รูปภาพ 1 สัญญาณรูปไซน์

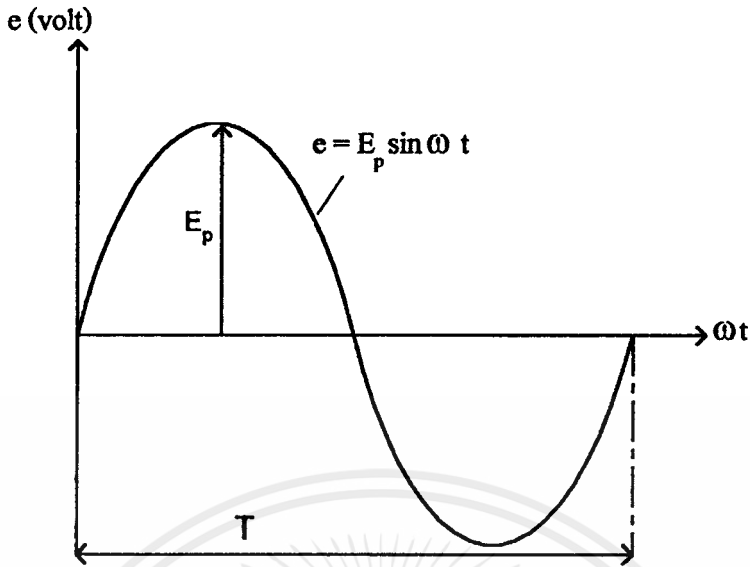
| | | | |
|----------------------------|---|--------------|---------|
| เส้นรอบวงของวงกลมยาว | = | $2\pi r$ | หน่วย |
| มุมที่จุดศูนย์กลางของวงกลม | = | 2π | เรเดียน |
| | = | 360 | องศา |
| มุม 1 เรเดียน | = | $360 / 2\pi$ | องศา |
| | = | 57.3 | องศา |

(2)

เมื่อสัญญาณไฟสลับรูปไซน์ (แรงดันหรือกระแส) เคลื่อนที่ครบ 1 รอบ จะหมายถึง เคลื่อนที่เป็นมุม 2π เรเดียน (360 องศา) ถ้าสามารถเคลื่อนที่ได้ f รอบต่อวินาที เรียกว่า มีความถี่ f รอบต่อวินาที = f เฮิรตซ์ (Hertz) หมายความว่าเคลื่อนที่ได้ $2\pi f$ เรเดียนต่อวินาที ค่า $2\pi f = \omega$ = ความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity) ดังนั้นที่เวลา t ใดๆ มุมที่ Phasor ของแรงดันหรือกระแสเคลื่อนไป $2\pi f t$ เรเดียน จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ของขนาดกับมุมได้ดังรูปภาพ 2 ขณะนี้จะได้สมการของแรงดันที่ขณะใดๆ มีค่า

$$e = E_p \sin \omega t \quad (3)$$

เมื่อ $\omega = 2\pi f = 2\pi / T$ (4)



รูปภาพ 2 แบบทั่วไปของคลื่นรูปไซน์

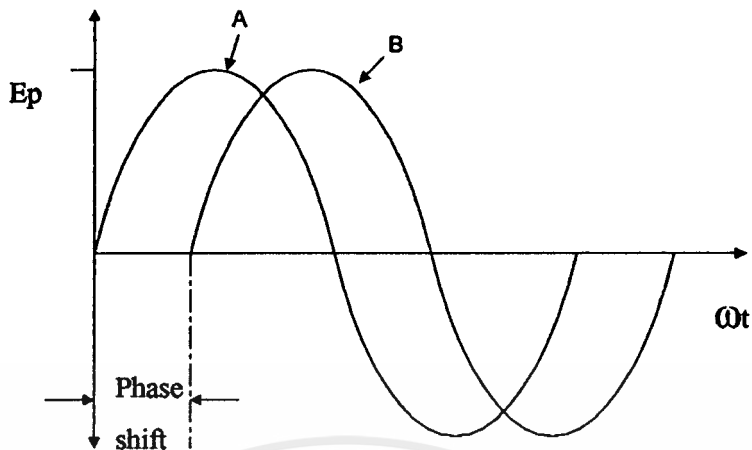
จากรูปภาพ 3 แสดงการพล็อตสองคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่เท่ากันบนแกนเวลาเดียวกัน สมการที่แทนรูปคลื่นทั้งสองจะไม่เหมือนกัน เนื่องจากที่เวลาเดียวกันรูปคลื่นทั้งสองจะมีความแตกต่างกัน สมการทั้งสองจะแตกต่างกันในค่าของมุมเฟสของมัน มโนภาพ (Concept) ของมุมเฟสจะเกี่ยวข้องกับการเปรียบเทียบสองปริมาณที่สัมพันธ์กัน เช่น ถ้าหากเรานิยามรูปคลื่น A ว่ามีมุมเฟสเป็นศูนย์จะสามารถเขียนสมการของมันได้เป็น

$$v_A = V_p \sin \omega t \quad (5)$$

ดังนั้นรูปคลื่น B จะมีมุมเฟส θ ซึ่งแสดงว่ารูปคลื่นทั้งสองห่างจากกันในแกนเวลาเท่าไร ถ้ารูปคลื่น B มีค่าศูนย์ (สำหรับความชันเป็นบวก) ที่เกิดขึ้นที่เวลาภายหลังจากศูนย์ (สำหรับความชันเป็นบวก) ของรูปคลื่น A เราจะบอกว่ารูปคลื่น B ตาม (lag) รูปคลื่น A และกลับกัน ตัวอย่างเช่นในภาพที่ 3 เราบอกว่ารูปคลื่น B ตามรูปคลื่น A อยู่ θ องศา ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการของรูปคลื่น B ได้เป็น

$$v_B = V_p \sin (\omega t - \theta) \quad (6)$$

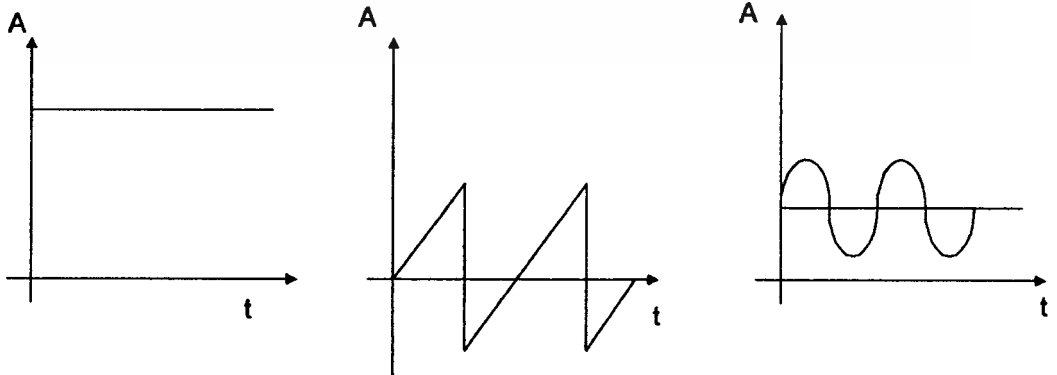
เมื่อเครื่องหมายลบของ θ แสดงว่ารูปคลื่นในสมการ (6) ตามรูปคลื่นของสมการ (5) อยู่โดยมุม θ ความผิดพลาดที่พบบ่อยๆ เมื่อพิจารณารูปคลื่นทั้งสองโดยใช้ออสซิลโลสโคปบ่อยครั้งที่สมมติว่า B นำหน้า A เพราะว่ามันปรากฏที่ด้านขวาของ A



รูปภาพ 3 สัญญาณที่มีความต่างเฟส

ถ้าหากสัญญาณที่ป้อนแก่วงจรเป็นสัญญาณกระแสตรงเพียงอย่างเดียว มันจะเป็นการง่ายในการคำนวณค่าปริมาณ เช่น ปริมาณกระแสที่ไหลในวงจร หรือพลังงานที่สูญเสียไปในองค์ประกอบของวงจรตลอดช่วงเวลาหนึ่ง นอกจากนั้นการวัดปริมาณกระแสตรงเพียงครั้งเดียว จะทำให้รู้ทั้งหมดเกี่ยวกับปริมาณที่มันแทน อย่างไรก็ตามโดยปกติขนาดของปริมาณไฟฟ้าจะแปรตามเวลา ซึ่งการแปรนี้อาจจะมีลักษณะซ้ำคาบหรืออาจมีการแปรลักษณะเรณคอม

เมื่อรูปคลื่นมีรูปร่างแปรตามเวลาการวัดค่าของปริมาณที่มันแทนอยู่ที่จุดของเวลาเพียงจุดเดียวจะไม่พอเพียงอีกต่อไป เราไม่สามารถทำการวัดเพียงครั้งเดียวเพื่อที่จะได้ทุกสิ่งที่เราต้องการรู้เกี่ยวกับสัญญาณ ดังนั้นจะต้องมีการกำหนดค่าลักษณะจำเพาะบางอย่างจากรูปร่างของรูปคลื่น และเราสามารถใช้ค่าเหล่านี้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปคลื่น ต่าง ๆ เทียบกับรูปคลื่นอื่น ๆ



ก) กระแสตรง

ข) รูปคลื่นซ้ำคาบ

ค) รูปคลื่นกระแสสลับปกระแสตรง

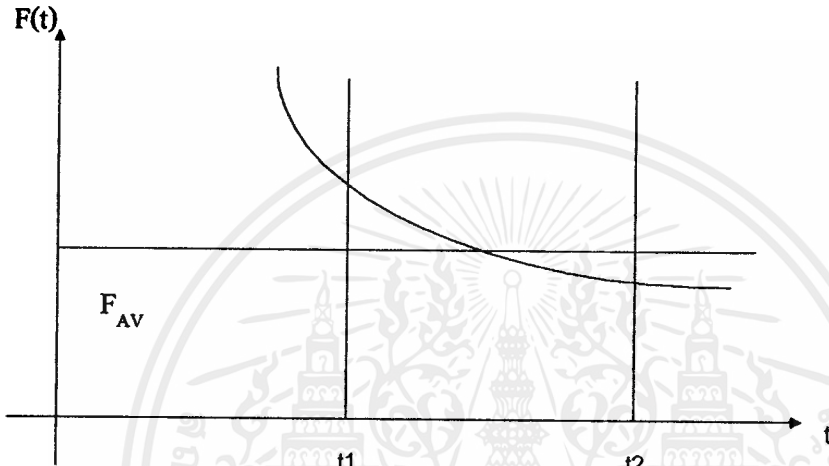
รูปภาพ 4 ลักษณะรูปคลื่นแบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่กำหนดมี 3 ชนิด

1. ค่ายอดคลื่น (Peak Value) หมายถึง ค่าสูงสุดของรูปคลื่นไฟสลับนั้น (ในรูปคือ E_p) ในบางกรณีอาจบอกเป็นค่าจากยอดถึงยอด (Peak to Peak Value) ซึ่งมีค่าเป็น 2 เท่าของค่ายอดคลื่น

2. ค่าเฉลี่ย (Average Value) หมายถึง ค่าความสูงเฉลี่ยของรูปคลื่น (ในรูปคือ F_{AV}) เราสามารถหาค่าเฉลี่ยของค่าที่เป็นฟังก์ชันของเวลาใดๆ ($F(t)$) ระหว่างเวลา t_1 และ t_2 รูปภาพ 5



รูปภาพ 5 ความหมายของค่าเฉลี่ย

$$\begin{aligned}
 F_{AV} &= \frac{\text{พื้นที่ใต้เส้นโค้ง}}{\text{ความยาวของช่วงเวลา}} \\
 &= \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt
 \end{aligned} \tag{7}$$

ในกรณีที่รูปคลื่นมีลักษณะเหมือนกันทั้งช่วงบวกและลบ ค่าเฉลี่ยต่อ 1 คาบ (Period) จะเป็นศูนย์ ในกรณีนี้จะคิดเพียงครึ่งคาบ (Half - period) ของรูปคลื่นกระแสสลับนั้น

3. ค่าประสิทธิผล (Effective, Root Mean Square (RMS) Value) ปกติจะนิยมใช้ค่านี้ในการบรรยายรูปคลื่นของสัญญาณไฟฟ้ามากกว่าค่าเฉลี่ย เนื่องจากค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นซ้ำคาบที่สมมาตรจะเป็นศูนย์ค่าศูนย์ที่ได้จะไม่ให้สาระเกี่ยวกับคุณสมบัติของสัญญาณได้มากนัก กรณีของค่าประสิทธิผลจะแตกต่างกันไป เนื่องจากไม่เป็นศูนย์

เราใช้คำว่าค่าประสิทธิผล เนื่องจากว่าจะใช้อ้างอิงถึงความสามารถในการส่งกำลัง โดยจะนิยามค่าประสิทธิผลของสัญญาณกระแสสลับว่า เท่ากับค่าของสัญญาณกระแสตรงที่ส่งกำลังได้เท่ากัน เมื่อแทนที่สัญญาณกระแสสลับนั้นด้วยสัญญาณกระแสตรง ตัวอย่างเช่น เมื่อเราป้อน

สัญญาณกระแสสลับรูปไซน์ที่มีค่ายอดเท่ากับ 14.4 โวลต์ ครอบคลุมด้านทาน 1 โอห์ม จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นเท่ากับเมื่อป้อนด้วยแรงดันกระแสตรงที่มีแรงดัน 10 โวลต์ ดังนั้นค่าประสิทธิผลของสัญญาณกระแสสลับรูปไซน์ที่มีค่ายอดเท่ากับ 14.4 โวลต์จะเท่ากับ 10 โวลต์

เราสามารถหาค่าประสิทธิผลของรูปคลื่นโดยเริ่มจากยกกำลังสองขนาดของรูปคลื่นที่แต่ละขณะหรือจุดเวลา (อันเป็นการทำให้ค่าของขนาดเป็นบวกเสมอ แม้ว่าคลื่นกำเนิดจะเป็นลบ) แล้วนำค่าที่ได้มารวมกัน จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ยผลรวมของรูปคลื่นยกกำลังสอง สุดท้ายทำการถอดรากที่สองของค่าเฉลี่ยนี้จะได้ค่าประสิทธิผลตามที่ต้องการ ด้วยลำดับขั้นการคำนวณดังกล่าวจะทำให้มันมีชื่อว่า รากที่สองของค่าเฉลี่ยของค่ายกกำลังสอง ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปคณิตศาสตร์

ค่าประสิทธิผลของสัญญาณ $f(t)$ ระหว่างเวลา t_1 และ t_2 คือ

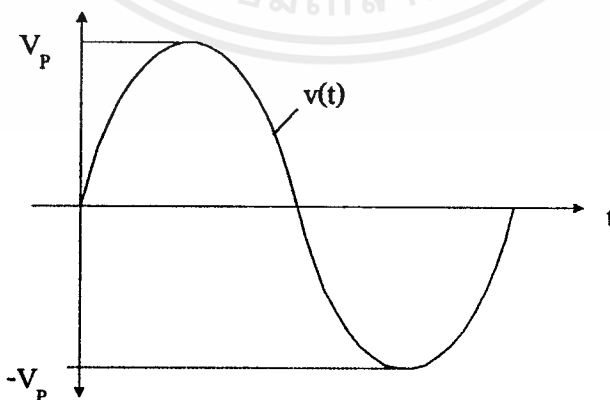
$$F_{RMS} = \sqrt{\text{ค่าเฉลี่ยของ } [f(t)^2]}$$

$$F_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} f(t)^2 dt} \quad (8)$$

2.2.2 การวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ

ปริมาณทางไฟฟ้าที่เราจำเป็นต้องทราบได้แก่ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าประสิทธิผล กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย และตัวประกอบกำลัง ซึ่งปริมาณทั้งสี่จะมีความสัมพันธ์กัน

การหาค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าจะมีลักษณะเดียวกัน ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างการหาค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผล โดยสัญญาณมีลักษณะดังรูปภาพ 6 ซึ่งค่าประสิทธิผลของแรงดันจะหาได้จากสมการ



รูปภาพ 6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปไซน์

$$\begin{aligned}
 V_{\text{rms}} &= \sqrt{\frac{1}{T_0} \int (v(t))^2 dt} & (9) \\
 &= \sqrt{\frac{1}{T_0} \int (V_p \sin \omega t)^2 dt} \\
 &= \sqrt{\frac{V_p^2}{T_0} \int (1 - \cos 2\omega t) dt} \\
 &= \sqrt{\frac{V_p^2}{T} \left[\frac{t}{2} - \frac{T}{4\pi} \sin 2\omega t \right]_0^T} \\
 &= \frac{V_p}{\sqrt{2}} & (10)
 \end{aligned}$$

และสำหรับค่ากระแสไฟฟ้า

$$I_{\text{rms}} = \frac{I_p}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

การวัดกำลังไฟฟ้า เป็นตัวแสดงถึงปริมาณของงานที่ทำในช่วงเวลาที่กำหนด มันคืออัตราในการทำงาน ซึ่งสามารถแสดงโดยสมการ

$$\text{กำลัง (p)} = \frac{\text{งาน}}{\text{เวลา}} = \frac{w \text{ (จูลน์)}}{t \text{ (วินาที)}} \quad (12)$$

เมื่อหน่วยวัดของกำลังไฟฟ้าคือ วัตต์ กำลังที่ส่งผ่านให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าจะสามารถแสดงได้ในพจน์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า โดยการแสดงสมการ (9) ในพจน์ของกระแสและแรงดัน จากนิยามของความต่างศักย์ที่ว่า จะมีความต่างศักย์ 1 โวลท์ ระหว่างจุดสองจุด ถ้าต้องใช้พลังงาน 1 จูลน์ ในการเคลื่อนประจุ 1 คูลอมป์จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{w}{q} \\
 w &= vq & (13)
 \end{aligned}$$

จากนิยามของกระแสคือ จำนวนประจุที่เคลื่อนที่ผ่านจุดที่กำหนดใน 1 วินาที ซึ่งจะ
สามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i = \frac{q}{t} \quad (14)$$

โดยการแทนสมการ (14) และ (13) ลงใน (12) จะได้

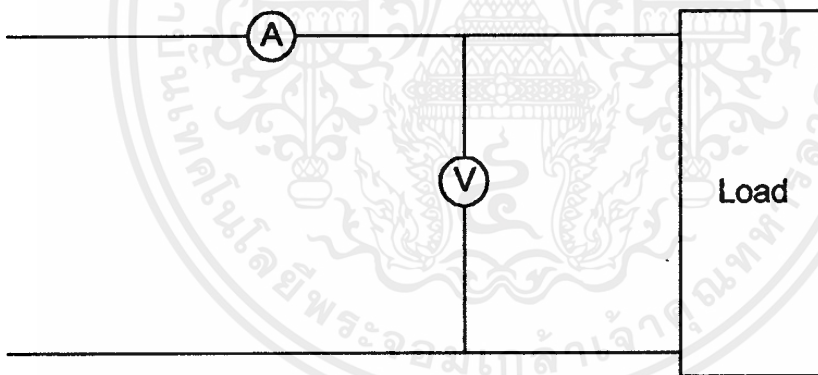
$$p = \frac{vq}{q/i} = vi \quad (15)$$

ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง เราสามารถใช้กฎของโอห์มในการเขียนนิพจน์ที่แตกต่างสำหรับกำลังได้เป็น

$$P = I^2 R \quad (16)$$

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (17)$$

จากสมการ (15), (16) และ (17) จะเห็นว่า ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง เราสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าได้โดยการวัดตัวแปร 2 ตัว จาก 3 ตัวคือ V, I และ R ดังนั้นเราสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้แอมป์มิเตอร์และโวลต์มิเตอร์กระแสตรง ดังรูปภาพ 7



รูปภาพ 7 วงจรการวัดกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

กำลังไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ เราสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ขณะใด ๆ ที่จ่ายให้กับโหลด โดยหาผลคูณของแรงดันและกระแสที่โหลดได้รับ แต่เนื่องจากในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ค่าผลคูณขณะใด ๆ จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นปริมาณที่มีประโยชน์มากกว่ากำลังที่ขณะใด ๆ คือ กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย ที่สูญเสียไปในโหลด เพราะว่ากระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ นอกจากจะเป็นสัญญาณรูปไซน์แล้ว มุมเฟสของมันยังอาจแตกต่างกันด้วย ทำให้การคำนวณหาค่าเฉลี่ยเป็นเรื่องที่ซับซ้อนมากกว่าโหลดในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง เป็นการแน่นอนว่าในการวัดกำลังกระแสสลับย่อมยุ่งยากมากขึ้น เพราะว่ากรณีที่เราวัดค่า V_{rms} และ I_{rms} โดยใช้เครื่องวัดกระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วนำค่าทั้งสองที่วัดได้มาคูณกันจึงไม่สามารถเป็นค่ากำลังกระแสได้ ยกเว้นเฉพาะกรณีที่กระแสและแรงดันโวลทมีเฟสตรงกัน จึงจะหาลำดับเฉลี่ยโดยวิธีนี้ได้

ต่อไปจะพิจารณาวิธีคำนวณกำลังเฉลี่ยในโวลทกระแสสลับ พิจารณากระแสและแรงดันที่มีลักษณะคังรูปภาพ 8 จะเห็นได้ว่ามีความต่างเฟส ระหว่าง v และ i โดยถ้าหากแรงดันคร่อมโวลทเป็น

$$v(t) = V_p \sin \omega t$$

กระแสจะต้องอยู่ในรูป

$$i(t) = I_p \sin (\omega t - \theta)$$

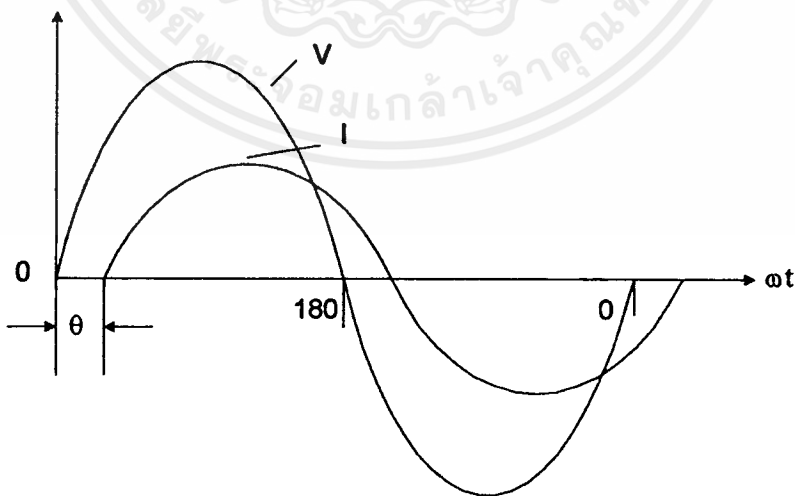
ค่ากำลังไฟฟ้าที่ขณะใด ๆ หาได้จาก

$$\begin{aligned} p(t) &= v(t) i(t) \\ &= V_p I_p \sin \omega t \sin (\omega t - \theta) \end{aligned} \quad (18)$$

กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่สูญเสียในโวลทจะหาได้จาก

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

เมื่อ T เป็นคาบของรูปคลื่นไซน์ คังนั้น



รูปภาพ 8 สัญญาณกระแสและแรงดันรูปไซน์

$$\begin{aligned}
 P_{av} &= \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} V_p I_p \sin \omega t \sin(\omega t + \theta) dt \\
 &= \frac{V_p I_p}{2} \cos \theta
 \end{aligned} \tag{19}$$

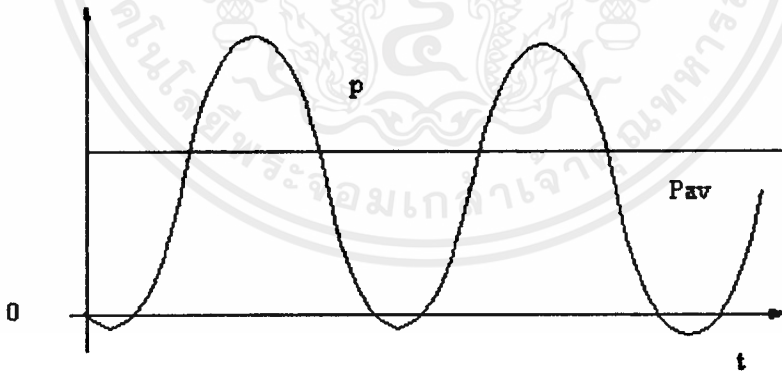
สำหรับคลื่นรูปไซน์ จะได้

$$\begin{aligned}
 V_{rms} &= \frac{V_p}{\sqrt{2}} \\
 I_{rms} &= \frac{I_p}{\sqrt{2}}
 \end{aligned}$$

แทนค่า V_{rms} และ I_{rms} ลงในสมการ (19)

$$P_{av} = V_{rms} I_{rms} \cos \theta = P_t \tag{20}$$

กำลังเฉลี่ยนี้อาจมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า กำลังจริง พิจารณาจากรูปภาพ 8 จะเป็นการพล็อตสมการ (15) จะเห็นว่า ค่ากำลังที่ขณะใด ๆ คือผลคูณของ $v(t)$ และ $i(t)$ ที่ขณะนั้น ๆ ซึ่งจะเห็นว่ากำลังที่จ่ายให้กับโหลดที่ขณะใด ๆ จะเป็นบวกหรือลบ กำลังบวกหมายถึงถึงขณะนั้นโหลดดึงพลังงานจากแหล่งกำเนิด กำลังลบหมายถึง โหลดจะส่งกำลังสู่แหล่งกำเนิด และกำลังช่วยขับเคลื่อนแหล่งกำเนิด



รูปภาพ 9 กำลังไฟฟ้าที่จาก $p(t) = v(t) i(t)$

จากรูปจะเห็นว่า ทำไมการเอาแต่เพียงกระแสและแรงดันที่ได้จากการวัดมาคูณกัน เพื่อให้เป็นค่ากำลังเฉลี่ยที่ต้องการ จึงไม่ถูกต้อง ตัวประกอบที่จะกำหนดค่ากำลังเฉลี่ยอีกตัวหนึ่งก็คือ มุมเฟส และเราจะนิยามว่า ตัวประกอบกำลัง

ถ้าโหลดเป็นความต้านทานอย่างเดียว รูปคลื่นกระแสและแรงดันจะมีเฟสตรงกัน นั่นคือ มุมต่างเฟสมีค่าเป็นศูนย์ กำลังเฉลี่ยในกรณีนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_T = V_{rms} I_{rms} \quad (21)$$

กำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ไม่เกิดการสูญเสียในโหลดเรียกว่า กำลังรีแอกทีฟ อุปกรณ์สองชนิดที่ไม่ทำให้สูญเสียกำลังคือ ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำในอุดมคติ โดยมันจะเพียงแต่เก็บและปล่อยพลังงาน กำลังรีแอกทีฟมีหน่วยเป็น วาร์ (Volt Amp Reactive = VAR) และจะคำนวณได้จากสมการ

$$P_R = V_{rms} I_{rms} \sin\theta \quad (22)$$

การรวมของ P_T และ P_R ที่ปรากฏที่โหลดจะเรียกว่า กำลังปรากฏ (Apparent Power = P_A) ของโหลด หรือใช้ตัวอักษรแทนด้วย S เราสามารถหา P_A จาก P_T และ P_R ได้จากสมการ

$$P_A = \sqrt{(P_T^2 + P_R^2)} \quad (23)$$

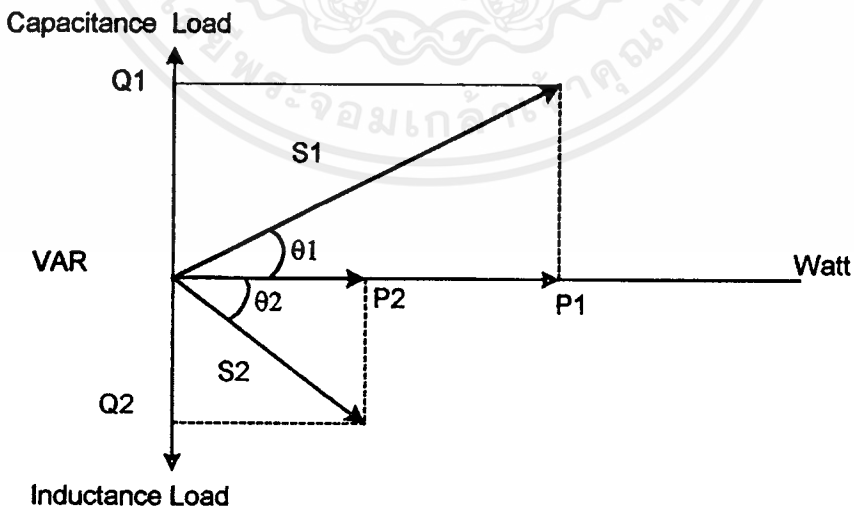
$$= V_{rms} I_{rms} \quad (24)$$

ดังนั้นผลคูณของ V_{rms} และ I_{rms} จะทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ โดยมีหน่วยเป็น โวลท์แอมแปร์

อัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงต่อกำลังไฟฟ้าปรากฏ จะให้ค่าตัวประกอบกำลังออกมา

$$\text{ตัวประกอบกำลัง} = \cos\theta = \frac{P_T}{P_A} \quad (25)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังทั้งสามแสดงดังรูปภาพ 10



รูปภาพ 10 สามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้า

2.2.3 หม้อแปลงเครื่องมือวัด (Instrument Transformer)

หม้อแปลงเครื่องมือวัด เป็นเครื่องมือสำเร็จที่ใช้สำหรับแปลงกระแสหรือแรงดัน เพื่อให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบเขียวจะถือว่าเป็นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและตัวอย่างอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถใช้ได้กับเครื่องวัดไฟฟ้าภายในพิสัยความถี่กำลัง ในเครื่องวัดปกติ การขยายพิสัยวัดกระแส ทำการโดยการใช้ขั้วนำ การขยายพิสัยวัดแรงดันทำโดยใช้ตัวต้านทานอนุกรม (ตัวคูณ) ซึ่งสามารถทำได้โดยสะดวก และพบเห็นทั่วไปในการวัดกระแสตรง อย่างไรก็ตาม วิธีนี้มีขีดจำกัดที่ทำการกระแสและแรงดันไม่สูงมาก เมื่อกระแสมีค่าสูงมากเกินไปไม่ก็ร้อยแอมแปร์ กำลังที่สูญเสียในขั้วนำจะมีค่ามากพอ นอกจากนั้นจะต้องคิดถึงการฉนวนเครื่องวัดให้พอเพียง ซึ่งเป็นเรื่องยากถ้ากระแสที่จะวัดมีค่าหลายร้อยหรือหลายพันโวลต์เหนือนดิน ในกรณีที่ต้องวัดค่าที่มีพิสัยกว้างให้มีความถูกต้อง เป็นเรื่องที่ไม่เหมาะสมที่จะต้องมีเครื่องวัดที่สามารถวัดค่าพิสัยกว้างให้ถูกต้องทั้งหมด แต่โดยการลดกระแสหรือแรงดันค่าสูงลงมาด้วยอัตราส่วนที่รู้ค่า และถูกต้องหลาย ๆ ค่าโดยใช้หม้อแปลง และใช้เครื่องมือวัดที่สามารถวัดขนาดกระแสหรือแรงดันค่าไม่สูง หรือมีความถูกต้องมากวัดค่า จะสามารถวัดได้พิสัยกว้าง โดยมีความถูกต้องตามต้องการแต่ประหยัดและปลอดภัย

เราสามารถแบ่งหม้อแปลงเครื่องมือวัดตามการใช้เป็นหม้อแปลงกระแส (Current Transformer (CT)) และหม้อแปลงแรงดัน (Potential Transformer (PT)) หม้อแปลงเครื่องมือวัดมีลักษณะเหมือนหม้อแปลงกำลังทั่ว ๆ ไป (สามารถใช้งานจรสมมูลของหม้อแปลงธรรมดาได้) แต่มีข้อพิเศษที่แตกต่างคือ

1. จำเป็นต้องรู้อัตราส่วนจำนวนรอบอย่างแน่นอน เนื่องจากค่าความผิดพลาดหนึ่งรอบใน 200 ถ้าพิจารณาในลักษณะหม้อแปลงกำลัง จะทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันน้อยมาก แต่ก็จะมีผิดพลาดมากถ้าพิจารณาในการนำไปใช้ด้านการวัด

2. แรงดันตกคร่อมในขดลวดจะต้องมีค่าต่ำที่สุด เพื่อหลีกเลี่ยงการเคลื่อนเฟสหรือการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการแปลง โดยการออกแบบหม้อแปลงให้มีคาร์บอนแกนชั่วคราวซึมต่ำ และโดยใช้สายตัวนำ (ทองแดง) ให้มีขนาดโตกว่าที่ต้องการ ดังนั้นในกรณีหม้อแปลงกำลัง การไหลจะถูกจำกัดโดยผลเนื่องจากความร้อน แต่การไหลของหม้อแปลงเครื่องมือวัด จะถูกจำกัดโดยค่าความถูกต้อง

เราอาจแบ่งหม้อแปลงเครื่องมือวัดตามความถูกต้องได้เป็น 5 ชั้น คือ 0.1 0.2 0.5 1.0 และ 3.0 ตามชั้นแรกจะใช้สำหรับการทดลองหรืองานวัดละเอียด ส่วนสองชั้นหลังจะใช้สำหรับการวัดทั่วไป

2.2.3.1 หม้อแปลงกระแส

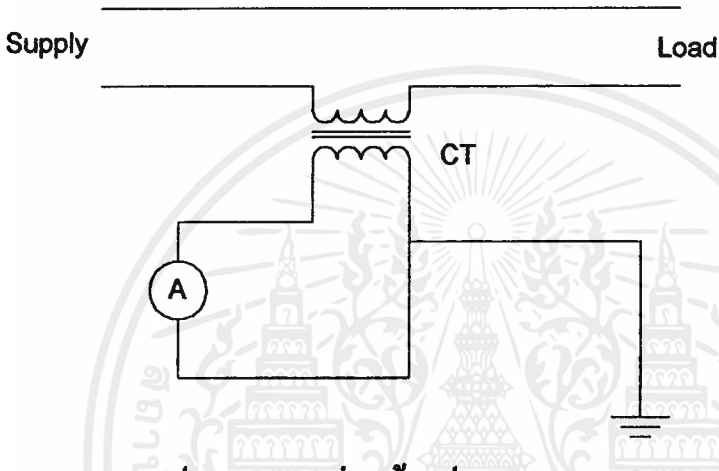
รูปภาพ 11 แสดงการต่อใช้งานของหม้อแปลงกระแส กระแสไหลที่ที่ต้องการวัด จะไหลผ่านขดปฐมภูมิ ซึ่งอาจจะเป็นลวดตัวนำเส้นเดียว ถือว่าเป็นหนึ่งรอบทางปฐมภูมิ ซึ่งอาจจะเป็นลวดตัวนำตัวเดียว ถือว่าเป็นหนึ่งรอบทางปฐมภูมิ ขดลวดทุติยภูมิจะมีจำนวนรอบมากกว่าและจะต่อกับมาตรวัดกระแส ขดลวดของรีเลย์หรือขดกระแสของวัดคัมมิเตอร์ การทำงานของหม้อแปลงกระแสจะขึ้นอยู่กับสมมูลของค่าแอมแปร์-รอบที่สร้างขึ้น โดยขดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ถ้าหม้อแปลงเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุดมคติ คือ ไม่มีกระแสทำแม่เหล็ก (Magnetizing Current) หรือความสูญเสียในแกนจะได้

$$\frac{I_p}{I_s} = n_\alpha \quad (26)$$

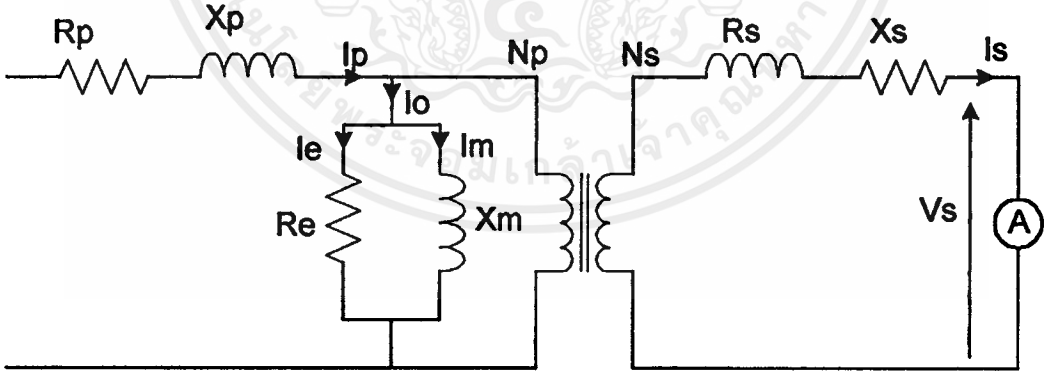
เมื่อ n_α คือ อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง โดย

$$n_\alpha = \frac{n_s}{n_p} \quad (27)$$



รูปภาพ 11 การต่อหม้อแปลงกระแส

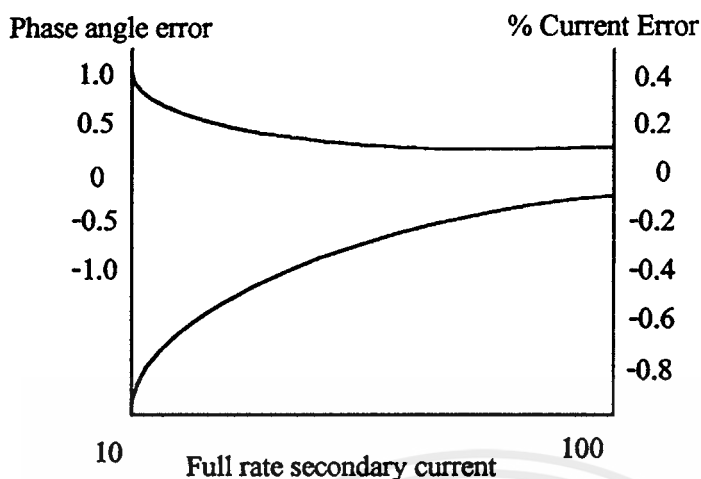
สำหรับวงจรสมมูลของหม้อแปลงกระแส แสดงดังภาพที่ 12



รูปภาพ 12 วงจรสมมูลของหม้อแปลงกระแส

ปกติจะออกแบบให้มีขดลวดทุกขดขมิตายกระแสทุกขดขมิตายขนาด 5 แอมแปร์ แผ่นป้ายชื่อนบนตัวจะกำหนดอัตราส่วนของหม้อแปลง เช่น 500:5 แอมแปร์ ค่านี้ไม่ใช่อัตราส่วนรอบ เพียงแต่แสดงว่า กระแสปฐมภูมิ 500 แอมแปร์จะให้กระแสทุติยภูมิ 5 แอมแปร์ เพื่อต่อขดทุติยภูมิเข้ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปภาพ 14 ความผิดพลาดของหม้อแปลงกระแส

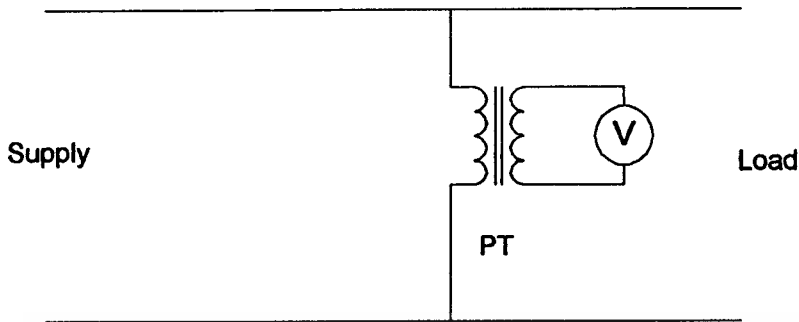
มีข้อควรระวังในการใช้หม้อแปลงกระแสก็คือ จะต้องไม่เปิดวงจรทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสขณะที่มีกระแสไหลทางด้านปฐมภูมิ จำนวนแอมแปร์-รอบจะถูกทำให้คงที่โดยกระแสปฐมภูมิ และจะไม่ลดลงเมื่อทางทุติยภูมิเปิดวงจร การเปิดวงจรทางด้านทุติยภูมิจะลดแอมแปร์-รอบทางด้านทุติยภูมิเป็นศูนย์ซึ่งจะไม่มีแรงเคลื่อนแม่เหล็กกลับไปต่อต้านแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากแอมแปร์-รอบปฐมภูมิ และความหนาแน่นของเส้นแรงจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งแกนอิ่มตัว ผลที่ตามมาของการที่เส้นแรงอิ่มตัว จะกระทำต่อจำนวนรอบทางทุติยภูมิที่มีค่ามาก ทำให้แรงดันที่ถูกเหนี่ยวนำในขดทุติยภูมิจะมีค่าสูง ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้เปิดวงจรหรือทำความเสียหายต่อฉนวนของหม้อแปลง นอกจากนั้น จะเกิดความร้อนเนื่องจากความสูญเสียในแกนขณะที่มันอิ่มตัว อาจมากพอที่จะทำลายหม้อแปลงได้ หม้อแปลงกระแสที่ใช้งานจะมีหลายลักษณะ เช่น

- เครื่องวัดแบบ Clip-on เป็น CT แบบหนึ่ง โดยแกนเหล็กสามารถแยกจากกันเพื่อให้สอดเข้าไปวัดสายตัวนำ (ทำให้สามารถวัดค่ากระแสโดยไม่จำเป็นต้องตัดวงจร)

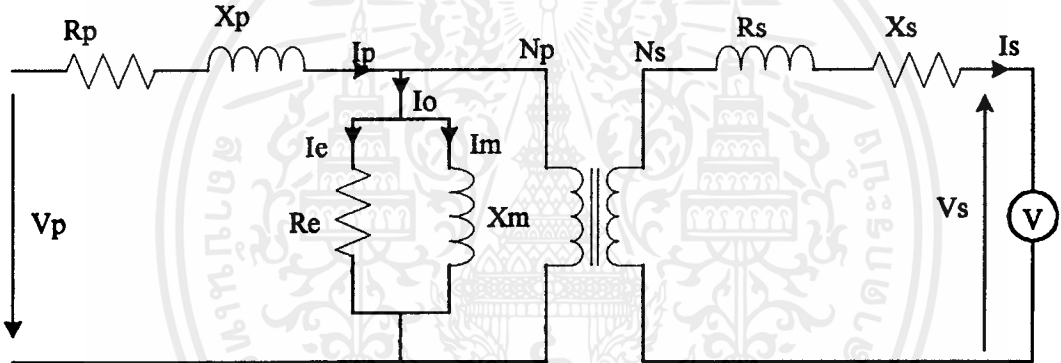
- โพรบกระแส (Current Probe) ของออสซิลโลสโคป สำหรับใช้วัดกระแสสลับ จะทำงานในลักษณะเดียวกัน โดยมีแกนแยกจากกันที่ปลายของโพรบ

2.2.3.2 หม้อแปลงแรงดัน

ในการวัดจะใช้หม้อแปลงแรงดันทำการลดระดับแรงดันทางปฐมภูมิลงมา ให้แรงดันด้านทุติยภูมิมีค่าแรงดันอยู่ในระดับที่สามารถนำไปประมวลผลได้ รูปภาพ 15 แสดงลักษณะการต่อส่วนวงจรสมมูลสำหรับหม้อแปลงแรงดันจะมีลักษณะดังรูปภาพ 16



รูปภาพ 15 การต่อหม้อแปลงแรงดัน



รูปภาพ 16 วงจรสมมูลของหม้อแปลงแรงดัน

$$\frac{V_p}{V_s} = n_{vt} \quad (29)$$

เมื่อ n_{vt} เป็นอัตราส่วนรอบของหม้อแปลงที่กำหนดโดย

$$n_{vt} = \frac{n_p}{n_s} \quad (30)$$

สำหรับหม้อแปลงแรงดันในอุดมคติ อัตราส่วนของเวกเตอร์ V_p และ V_s จะต้องเท่ากับอัตราส่วนจำนวนรอบ และเวกเตอร์ V_s กับ V_p ที่กลับทิศจะต้องทับกัน แต่ในทางปฏิบัติความผิดพลาดของหม้อแปลงแรงดันคือ

1. ความผิดพลาดแรงดันหรืออัตราส่วน (Voltage or Ratio Error) ซึ่งนิยามว่าเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\text{อัตราส่วนของแรงดัน}(V_p / V_s)\text{ตามทิกัด} - \text{อัตราส่วน}(V_p / V_s)\text{จริง}}{\text{อัตราส่วน}(V_p / V_s)\text{จริง}} \times 100\% \quad (31)$$

2. การเปลี่ยนตำแหน่งของเฟส (Phase Displacement) คือการเปลี่ยนตำแหน่งของเฟสระหว่างแรงดันปฐมภูมิและทุติยภูมิ

ในทางปฏิบัติจะไม่สามารถต่อต้านเอาต์พุตของหม้อแปลงแรงดันร่วมกับอิมพีแดนซ์ที่มีค่าอนันต์ แต่จะต่อกับเครื่องวัด (ที่มีการดึงกระแสจำนวนหนึ่ง) โหลดนี้คือเบอร์เดนของหม้อแปลงซึ่งอยู่ในรูป โวลต์-แอมป์ ของขดลวดทุติยภูมิ การกำหนดเบอร์เดนสูงสุดของหม้อแปลงจะแตกต่างกันตามลักษณะของโหลด โดยจะมีช่วงกว้างตั้งแต่ 12.5 ถึง 400 โวลต์-แอมป์ ถ้าหากเกินค่าเหล่านี้ความถูกต้องของหม้อแปลงจะไม่อยู่ในค่ากำหนดที่ผู้ผลิตตั้งไว้

| Accuracy Class | Percentage error voltage ratio | Phase displacement | |
|----------------|-----------------------------------|--------------------|---------------|
| | | Minutes | Centiradians |
| 0.1 | ± 0.1 | ± 5 | ± 0.15 |
| 0.2 | ± 0.2 | ± 10 | ± 0.3 |
| 0.5 | ± 0.5 | ± 20 | ± 0.6 |
| 1.0 | ± 1.0 | ± 40 | ± 1.2 |
| 3.0 | ± 3.0 | not specified | not specified |

ตารางที่ 1 แสดงขีดจำกัดของความผิดพลาดของหม้อแปลงแรงดัน

ในการต่อหม้อแปลงเครื่องวัด บริษัทผู้ผลิตจะทำเครื่องหมาย + หรือ • ไว้ที่ปลายด้านหนึ่งของทั้งขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง (หรืออาจกำกับด้วยคู่อักษร) เครื่องหมายที่ปลายนี้แสดงว่า เมื่อมีกระแสไหลเข้าสู่ขดลวดปฐมภูมิทางด้านที่มีเครื่องหมายกำกับ กระแสจะออกจากขดลวดทุติยภูมิทางด้านที่มีเครื่องหมายกำกับ

2.3 วงจรขยายเชิงดำเนินงาน (Operation Amplifier)

วงจขยายเชิงดำเนินงาน หรือที่นิยมเรียกสั้นๆ ว่า ออปแอมป์ (Op-Amp) นั้นแต่เดิมเป็นชื่อเรียกวงจขยายที่ทำหน้าที่คำนวณภายในเครื่องอนาลอกคอมพิวเตอร์ วงจรนี้มีอัตราขยายสูงมาก และอาศัยการป้อนกลับแบบลบผ่านองค์ประกอบแบบพาสซีฟ (Passive) จากภายนอก ในการควบคุมการลักษณะการทำงานและกำหนดหน้าที่ของวงจรให้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่ใช้ป้อนกลับเท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้น ไม่ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ภายในของออปแอมป์เลย ดังนั้นจึงเป็นการสะดวกมากที่จะออกแบบระบบโดยใช้ออปแอมป์เป็นตัวขยายสัญญาณ และอาศัยองค์ประกอบที่ใช้ป้อนกลับในการกำหนดหน้าที่การทำงานต่างๆ ของออปแอมป์ เช่น เป็นวงจรขยายสัญญาณ อินทิเกรเตอร์ คิฟเฟอเรนเชียลเตอร์ เป็นต้น โดยคุณสมบัติที่ต้องการของออปแอมป์มีดังนี้

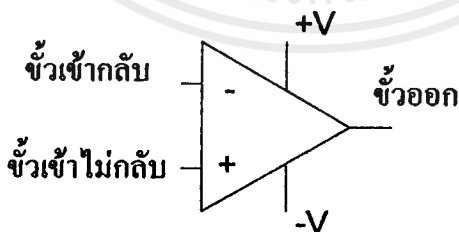
1. อัตราขยายสูงมาก (กว่าหมื่นเท่า)

2. วงจรขยายภาคต่างๆ ต่อถึงกันโดยตรง นั่นคือวงจรนี้จะขยายได้ทั้งสัญญาณกระแสตรง และสัญญาณกระแสสลับ

3. สามารถป้อนกลับแบบลบได้ โดยการต่อความต้านทานเพียงตัวเดียวจากขั้วสัญญาณออกมายังขั้วสัญญาณเข้า

ออปแอมป์ได้เปลี่ยนฐานะจากหน่วยย่อยของอนาล็อกคอมพิวเตอร์ มาเป็นองค์ประกอบอนาล็อกที่ใช้โดยทั่วไป เนื่องจากวงจรที่ประกอบสำเร็จนั้น มีขนาดเล็ก ราคาถูก มีความเชื่อถือสูง ลักษณะการทำงานของวงจรกำหนดโดยองค์ประกอบพาสซีฟที่ต่อระหว่างขั้วเข้าและขั้วออกเท่านั้น ดังนั้นผู้ออกแบบจึงสามารถพัฒนาวงจรที่เที่ยงตรงได้อย่างรวดเร็ว

ออปแอมป์ที่ผลิตออกมา จะมีขั้วสำหรับสัญญาณเข้า 2 ขั้ว สำหรับสัญญาณออก 1 ขั้ว และสำหรับต่อกับแหล่งจ่ายกระแสตรงด้านบวกและด้านลบอย่างละ 1 ขั้ว ขั้วสำหรับสัญญาณเข้าที่มีเครื่องหมายลบกำกับ เรียกว่า ขั้วเข้ากลับ (Inverting input) สัญญาณที่เข้าทางขั้วนี้จะทำให้เกิดสัญญาณออกที่ขั้วออกที่มีมุมวฏภาค ต่างจากสัญญาณเข้า 180 องศา หากสัญญาณเข้าที่ขั้วนี้เป็นบวกหรือเพิ่มขึ้น จะให้สัญญาณออกเป็นลบหรือลดลง ส่วนขั้วสัญญาณเข้าอีกขั้วหนึ่งที่มีเครื่องหมายบวกกำกับนั้น เรียกว่า ขั้วเข้าไม่กลับ (Non inverting input) สัญญาณที่เข้าทางขั้วนี้จะให้สัญญาณออกที่มีมุมวฏภาคตรงกัน



รูปที่ 17 สัญญลักษณ์ของออปแอมป์

ออปแอมป์ในอุดมคตินั้นมีคุณสมบัติดังนี้

1. อิมพีแดนซ์ทางด้านเข้ามีค่าเป็นอนันต์ หมายความว่ากระแสที่ไหลเข้าขาอินพุตทั้งสองของออปแอมป์มีค่าเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อัตราการขยายรอบเปิด (Open loop gain) มีค่าเป็นอนันต์
 4. เมื่อแรงดันที่ตกคร่อมขาอินพุตทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์ แรงดันเอาต์พุตก็จะมีค่าเป็นศูนย์
 5. สามารถใช้งานได้ทุกย่านความถี่ โดยอัตราการขยายจะไม่ลดลงเมื่อใช้งานที่ความถี่สูง
- ขึ้นในทางปฏิบัติค่าโดยทั่วไปสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2

| คุณสมบัติ | ลักษณะในอุดมคติ | ลักษณะในทางปฏิบัติ |
|---------------------|------------------|--------------------|
| อิมพีแดนซ์ด้านเข้า | ∞ | 2 M |
| อิมพีแดนซ์ด้านออก | 0 | 50 |
| อัตราการขยายรอบเปิด | ∞ | 100000 |
| แรงดันออฟเซต | ไม่ต้องมีการปรับ | มีการปรับ |
| ย่านความถี่ใช้งาน | ∞ | 1 MHz |

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบลักษณะของออปแอมป์ในทางอุดมคติและในทางปฏิบัติ

วงจรใช้งานเบื้องต้น มีดังต่อไปนี้

2.3.1 วงจรขยายสัญญาณกลับเฟส

วงจขยายสัญญาณกลับเฟสมีตัวต้านทาน R_F ต่อแรงดันออก V_o ป้อนกลับแบบลบมายังขั้วเข้ากลับเฟส เนื่องจากกระแสขาเข้า $i_1 = 0$ ดังนั้น

$$i_s = i_f \quad (32)$$

$$\frac{V_s - \mathcal{E}}{R_s} = \frac{\mathcal{E} - V_o}{R_F} \quad (33)$$

เนื่องจากอัตราการขยายคือ A ดังนั้น $\mathcal{E} = -V_o/A$ ดังนั้น

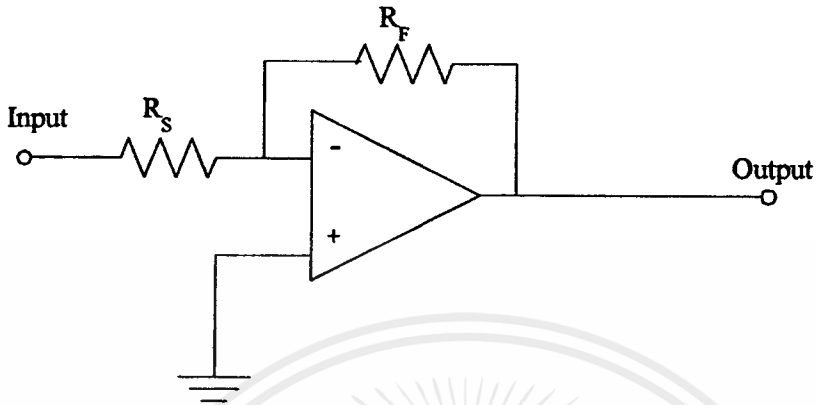
$$\frac{V_s + \frac{V_o}{A}}{R_s} = -\frac{V_o}{AR_F} - \frac{V_o}{R_F} \quad (34)$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{(R_F/R_s)}{1 + (1/A)(1 + R_F/R_s)} \quad (35)$$

เนื่องจาก A มีค่าใหญ่มาก ดังนั้นเราจะได้ $A \gg (1 + R_F/R_s)$ และสามารถเขียนสมการ (35) ได้ง่ายขึ้นโดยมีความผิดพลาดน้อยเล็กน้อยเท่านั้น ผลก็คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_o}{V_s} = -\frac{R_F}{R_S} \quad (36)$$

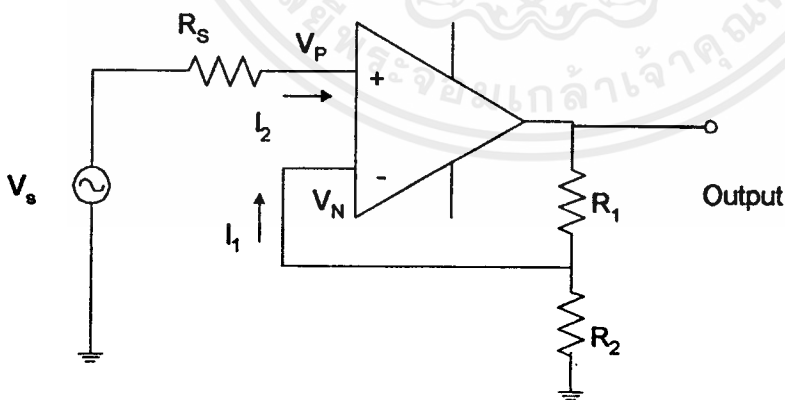


รูปที่ 18 วงจรขยายสัญญาณกลับเฟส

นั่นคืออัตราขยายรอบปิด คืออัตราส่วนของความต้านทานที่ใช้ป้อนกลับหารด้วยความต้านทานทางด้านเข้า ความหมายของเครื่องหมายลบคือ สัญญาณออกจะกลับวัฏภาคกับสัญญาณเข้า 180 องศา สมการ (107) จะเป็นจริงครบเท่าที่ $A \gg R_F/R_S$

2.3.2 วงจรขยายไม่กลับขั้วและวงจรตามแรงดัน

รูปภาพ 19 แสดงวงจรที่มีสัญญาณเข้าทางขั้วบวก หรือวงจรขั้วไม่กลับเฟส แต่การป้อนนั้นเป็นการป้อนกลับมาทางขั้วลบ หรือขั้วเข้ากลับเฟส



รูปภาพ 19 วงจรขยายไม่กลับขั้ว

เนื่องจาก $i_2 = i_1 = 0$ และ $V_P = V_N$ ดังนั้น

$$V_N = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_o$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ A ได้มีค่ามากกว่า ทำให้ $V_p = V_N = V_s$ สมการ (36) กลายเป็น

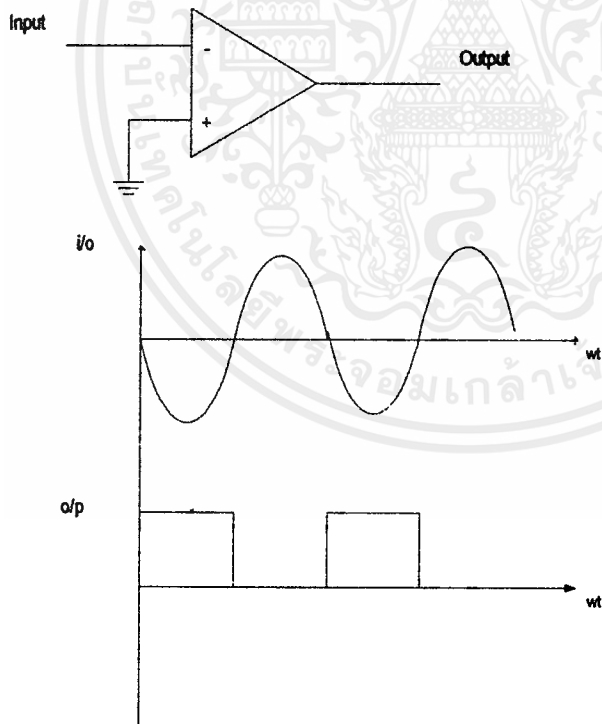
$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (37)$$

จะเห็นว่าวงจรขยายนี้ไม่กลับขั้วสัญญาณออกและมีอัตราขยายสูงกว่า 1 เสมอ

ถ้าเราให้ R_2 มีค่าสูงขึ้นไปเรื่อย ๆ อัตราขยายจะเข้าหา 1 ถ้าเรา $R_2 = \infty$ และ $R_1 = 0$ ก็จะได้วงจรตามแรงดัน (Voltage follower) เพราะได้แรงดันออก ซึ่งตามแรงดันเข้าอยู่ตลอดเวลา ถึงแม้จะเข้าไม่กลับเฟสจะไม่มีกระแสไหลเข้าก็ตาม ขั้วออก V_o สามารถจ่ายกระแสให้กับโหลดภายนอกได้

2.3.3 วงจรเปรียบเทียบ (Comparator)

เนื่องจากว่าออปแอมป์มีอัตราขยายวงรอบเปิดสูงมาก หากแรงดันที่ขั้วเข้าไม่กลับเฟสมีค่าสูงกว่าทางขั้วเข้าและกลับเฟสไม่กี่มิลลิโวลต์ ก็จะทำให้ออปแอมป์อิ่มตัวทางบวก หรือถ้าแรงดันที่ขั้วเข้ากลับมีค่าสูงกว่าขั้วเข้าไม่กลับเฟสไม่กี่มิลลิโวลต์ ออปแอมป์ก็จะอิ่มตัวทางลบ ดังนั้นออปแอมป์วงรอบเปิดจึงเหมาะสำหรับมาใช้เป็นวงจรเปรียบเทียบว่า สัญญาณที่ขั้วข้างใดมีค่ามากกว่าอีกข้างหนึ่ง



รูปภาพ 20 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 วงจรเรียงกระแสสัญญาณขนาดเล็ก (Precision rectifiers)

วงจรเรียงกระแส เป็นวงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรงทางเดียว โดยทั่วไปแล้ว กระแสตรงทางเดียวที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาตามแบบรูปคลื่นรายคาบ ในที่นี้เราจะพัฒนาวิธีการเรียงกระแสสัญญาณที่มีขนาดเล็ก แต่ในเบื้องต้นเราต้องมีความรู้เกี่ยวกับวงจรเรียงกระแสสัญญาณขนาดใหญ่ก่อน เพราะวงจรเรียงกระแสสัญญาณขนาดเล็กก็มีพื้นฐานมาจากวงจรเรียงกระแสสัญญาณขนาดใหญ่

พิจารณาวงจรเรียงกระแสแบบง่าย ๆ ที่เป็นวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น การทำงานของวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นบวกสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$V_o = V_i \quad \} V_i > 0 \text{ Volt} \quad (38)$$

$$V_o = 0 \quad \} V_i < 0 \text{ Volt} \quad (39)$$

และการทำงานของวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นลบสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

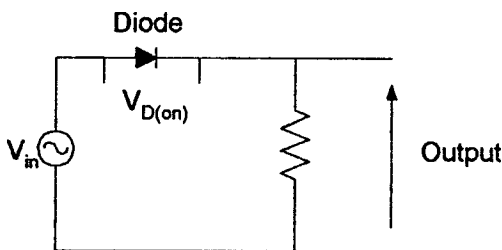
$$V_o = 0 \quad \} V_i > 0 \text{ Volt} \quad (40)$$

$$V_o = -V_i \quad \} V_i < 0 \text{ Volt} \quad (41)$$

อาจกล่าวได้ว่า วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นเป็นวงจรไม่เชิงเส้น โดยการเปลี่ยนแปลงของการเรียงกระแสจะถูกกำหนดโดย อัตราการขยาย ขั้วของสัญญาณ เป็นต้นพิจารณาวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นแบบง่าย สามารถสร้างขึ้นจากไดโอดและตัวต้านทาน ปัญหาที่พบของวงจรคือ ช่วงที่ไดโอดนำกระแสจะมีแรงดันตกคร่อมตัวไดโอด ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำและกระแสมีค่าในช่วงมิลลิแอมป์ แรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าประมาณ 0.7 โวลต์ ส่งผลทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่าสัญญาณอินพุต ซึ่งค่าที่แตกต่างนี้คือ $V_{d(on)}$ ทำให้การทำงานของวงจรเปลี่ยนไปโดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ใหม่ว่า

$$V_o = V_i - V_{d(on)} \quad \} V_i \geq V_{d(on)} \quad (42)$$

$$V_o = 0 \quad \} V_i < V_{d(on)} \quad (43)$$



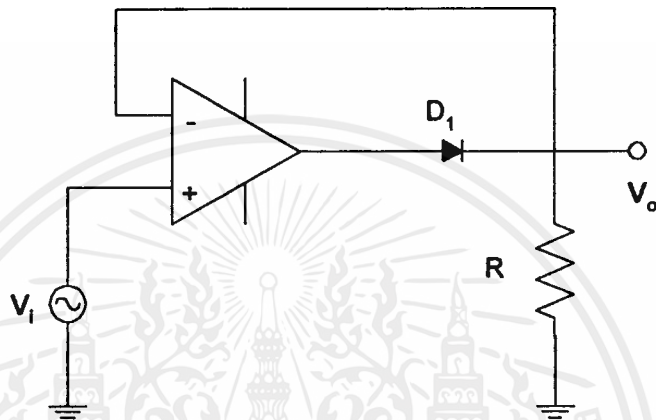
รูปภาพ 21 วงจรเรียงกระแสแบบง่าย

เมื่อเราต้องการนำวงจรเรียงกระแสดังกล่าวนี้ มาใช้กับสัญญาณที่มีขนาดเล็ก จะไม่สามารถเอกลำนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระทำได้ แต่เราสามารถนำออปแอมป์เข้ามาประยุกต์ใช้งาน ก็จะสามารถทำการเรียงกระแส สัญญาณที่มีขนาดเล็กได้

2.3.4.1 วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นสัญญาณขนาดเล็ก (Precision Half wave rectifier)

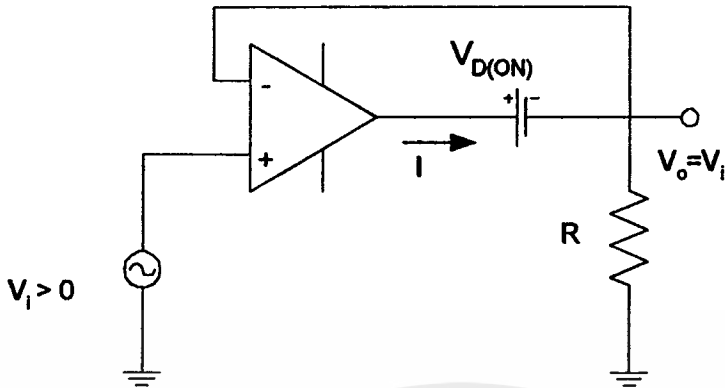
วงจรเรียงกระแสสัญญาณขนาดเล็กดังรูปภาพ 22 จะสามารถทำการวิเคราะห์ได้ง่ายๆ โดยแยกการพิจารณาออกเป็นช่วงที่ $V_i > 0$ โวลต์ และช่วงที่ $V_i < 0$ โวลต์



รูปภาพ 22 วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นสัญญาณขนาดเล็ก

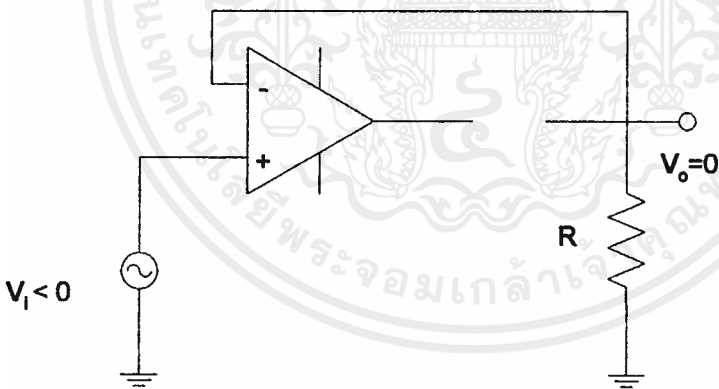
กรณีที่ V_i มากกว่า 0 โวลต์ จากลักษณะการต่อวงจรจะทำให้ $V_o = V_p = V_n = V_i$ และเนื่องจาก $V_i > 0$ จะต้องมีแหล่งจ่ายกระแสให้กับ R ผ่านทาง D_1 เพราะไดโอดได้รับไบอัสตรง และมีแรงดันตกคร่อมไดโอดประมาณ 0.7 โวลต์ ซึ่งแสดงดังรูปภาพ 23 จุดที่ควรสนใจคือแรงดันตกคร่อมไดโอด เนื่องจากเอาต์พุตของออปแอมป์ต้องสูงกว่าแรงดันเอาต์พุต 0.7 โวลต์ นั่นคือออปแอมป์จะสามารถทำงานได้ตลอดช่วงที่สัญญาณเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่า V_{sat}

กรณีที่ V_i น้อยกว่า 0 โวลต์ออปแอมป์จะไม่สามารถทำให้ $V_n = V_p$ เนื่องจากไม่มีกระแสไหลผ่านไปยัง R และไดโอดไม่สามารถนำกระแสได้เนื่องจากอยู่ในลักษณะไบอัสกลับ นั่นคือ D_1 จะหยุดทำงานและออปแอมป์จะทำงานในลักษณะเปิดวงจร โดยที่จะไม่มีกระแสไหลผ่าน R เราจะได้ $V_o = 0$ โวลต์ เนื่องจาก $V_n = V_o = 0$ และ $V_p = V_i$ น้อยกว่า 0 ออปแอมป์เกิดการอิมิตัวที่ V_{sat}



รูปภาพ 23 วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นสัญญาณขนาดเล็ก $V_i > 0$

ประสิทธิภาพของวงจร $V_o = V_i$ สำหรับ V_i มากกว่า 0 และ $V_o = 0$ โวลต์ สำหรับ V_i น้อยกว่า 0 นั่นคือรูปแบบของการวางไดโอดภายในวงจรป้อนกลับของออปแอมป์ วงจรจึงสามารถทำการเรียงกระแสสัญญาณขนาดเล็กได้ในระดับมิลลิโวลต์



รูปภาพ 24 วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นสัญญาณขนาดเล็ก $V_i < 0$

2.3.4.2 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสัญญาณขนาดเล็ก

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นจะใช้กับสัญญาณอินพุตที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับแล้วทำการกลับสัญญาณบางช่วงและทำการส่งผ่านทั้งส่วนที่ได้รับการกลับสัญญาณและไม่ได้กลับสัญญาณออกไปยังเอาต์พุต ซึ่งเราจะได้เอาต์พุตตามลักษณะการจัดวงจรได้เป็น 2 แบบ การทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสัญญาณบวก สามารถแสดงได้เป็น

$$V_o = |V_i| \quad (44)$$

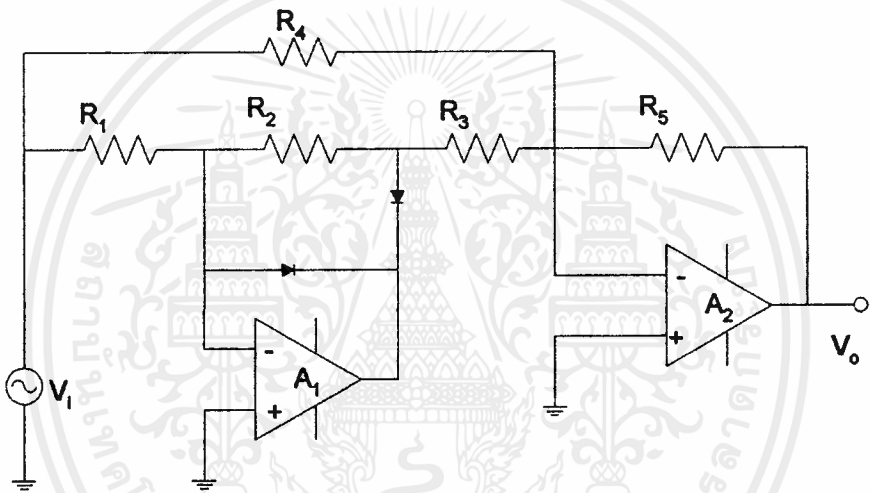
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการเรียงกระแสแบบลบก็จะเป็น

$$V_o = -|V_i| \quad (45)$$

การต่อไดโอดแบบบริดจ์จะเป็นพื้นฐานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น อย่างไรก็ตามมันไม่สามารถที่จะทำการเรียงกระแสสัญญาณขนาดเล็กได้ซึ่งมีสาเหตุเดียวกับวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น สำหรับการทำงานกับสัญญาณขนาดเล็กเราต้องนำออปแอมป์เข้ามาช่วย

วิธีการหนึ่งในการวิเคราะห์ค่าสัมบูรณ์ของสัญญาณคือการรวมสัญญาณของตัวเองมันเองกับสัญญาณที่ได้จากการกลับขั้วโดยวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น 1/2 วงจรที่ใช้งานจริงแสดงดังรูปภาพ 25 โดยที่ A_1 จะเป็นวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นและ A_2 เป็นการรวมของอัตราส่วน 1 ต่อ 2



รูปภาพ 25 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสัญญาณขนาดเล็ก

พิจารณาวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่มีเอาต์พุตเป็น V_{hw} จะพบว่าตลอดช่วงที่เป็นช่วงลบของ V_i เราจะได้ $V_{hw} = 0$ ขณะที่ตลอดช่วงบวก $V_{hw} = -(R_2/R_1)V_i$ โดยวงจรขยายแบบบวกจะทำให้ได้ $V_o = -(R_5/R_4)V_i - (R_5/R_3)V_{hw}$ แทนค่า V_{hw} จะได้

$$V_o = -A_n V_i \quad \text{สำหรับ } V_i \text{ น้อยกว่า } 0 \text{ V}$$

$$V_o = A_p V_i \quad \text{สำหรับ } V_i \text{ มากกว่า } 0 \text{ V}$$

เมื่อ

$$A_n = \frac{R_5}{R_4} \quad (46)$$

และเราต้องการทั้งสองส่วนของรูปคลื่นอินพุตในการทำการขยายโดยมีอัตราขยายเดียวกัน นั่นคือ $A_p = A_n = A$ สำหรับ $V_o = -AV_i$ สำหรับ V_i น้อยกว่า 0 โวลต์ และ $V_o = AV_i$ สำหรับ V_i มากกว่า 0 V นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = A|V_i| \quad (48)$$

วิธีการจะให้ผลตามต้องการจะได้

$$R_1 = R_2 = R_4 = R \quad R_3 = R/2 \quad R_5 = AR \quad (49)$$

จากเงื่อนไขนี้วงจรจะให้การทำงานแบบวงจรถยายค่าสัมบูรณ์ที่มีอัตราขยาย $A = R_5/RA$ สามารถเปลี่ยนแปลงตามค่าของ R_5 ตามต้องการ สำหรับอัตราขยายเท่ากับ 1 R_5 จะมีค่าเท่ากับ R

2.3.5 ความไม่เป็นอุดมคติของออปแอมป์

ในที่นี้เราจะอธิบายถึงลักษณะของออปแอมป์จริงซึ่งแตกต่างจากออปแอมป์อุดมคติ ลักษณะเหล่านี้ล้วนเป็นลักษณะที่ไม่ต้องการทั้งสิ้น แต่เราจำเป็นต้องเรียนรู้และคำนึงถึงข้อบกพร่องเหล่านี้ในการออกแบบวงจรรออปแอมป์จึงจะสามารถหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาดต่าง ๆ ในการออกแบบได้ เราจะทำให้ค่านियามบอกชนิดของพารามิเตอร์ที่สำคัญบางตัวและประมาณว่าจะมีผลต่อการทำงานของวงจรรอบข้างใดบ้าง ลักษณะเหล่านี้แหละที่ทำให้ให้ออปแอมป์ตัวหนึ่งแตกต่างจากอีกตัวหนึ่ง และที่ยิ่งแพงก็จะมีลักษณะยิ่งใกล้อุดมคติมากขึ้น

2.3.5.1 แรงดันออฟเซตและครีฟต์ (Offset voltage and drift) เมื่อเราลัดวงจรระหว่างขั้วเข้าของออปแอมป์อุดมคติแรงดันออกจะเท่ากับศูนย์ แต่ในออปแอมป์จริงนั้นความไม่สมบูรณ์ขององค์ประกอบภายใน ทำให้แรงดันออกไม่เท่ากับศูนย์ เมื่อต่อขั้วเข้าทั้งสองเข้าหากัน แรงดันที่ต้องใส่ขั้วเข้า เพื่อแรงดันออกเท่ากับศูนย์ นั้น เรียกว่า แรงดันออฟเซตขาเข้า (input offset voltage) และมีค่าเป็นมิลลิโวลต์

เนื่องจากว่าพารามิเตอร์ของออปแอมป์นั้นแปรตามอุณหภูมิและเวลา แรงดันออฟเซตก็จะแปรตามนั้นด้วย ดังนั้นจึงมีการกำหนดออฟเซตครีฟต์โดยมีหน่วยเป็น $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

2.3.5.2 กระแสไบอัสและออฟเซต ขั้วเข้าของออปแอมป์อุดมคตินั้นไม่มีกระแสเข้าเลย แต่ออปแอมป์จริงนั้นจำเป็นต้องมีกระแสไบอัส เมื่อทรานซิสเตอร์ทำงาน กระแสไบอัสจะมีขนาดตั้งแต่ A ลงไปถึง fA (femtoamp = 10^{-15}) สำหรับออปแอมป์ที่มีทรานซิสเตอร์ขาเข้าเป็นทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า ตามความแตกต่างระหว่างกระแสที่ขั้วเข้าทั้งสองก็คือ กระแสออฟเซตขาเข้าซึ่งมักจะมีค่าต่ำกว่ากระแสไบอัสราว 10 เท่า

2.3.5.3 อัตราการเหวี่ยงและการชดเชย (Slew rate and compensation) ออปแอมป์ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันออกโดยไม่ใช้เวลาได้เลย อัตราเหวี่ยง (Slew rate) เป็นการวัดค่าแรงดันออกจะเปลี่ยนได้เร็วที่สุดเท่าใด ออปแอมป์จะมีอัตราการเหวี่ยงตั้งแต่ $0.5\text{V}/\mu\text{S}$ ถึง $100\text{V}/\mu\text{S}$ จะเห็นได้ว่าอัตราการเหวี่ยงก็เป็นตัวบอกผลตอบเชิงความถี่ของออปแอมป์

เนื่องจากว่าออปแอมป์ต้องการเวลาจำนวนหนึ่งในการสนองตอบต่อแรงที่ขั้วเข้า แรงออกก็จะตามแรงดันเข้า ถ้าความซ้ำมีมากพอ เมื่อเราป้อนสัญญาณออกมาขั้วเข้า ก็อาจเกิดแกว่งขึ้นได้ ดังนั้นออปแอมป์จึงต้องมี ตัวเก็บประจุชดเชย เพื่อป้องกันการแกว่งนี้ ออปแอมป์ เช่น เบอร์

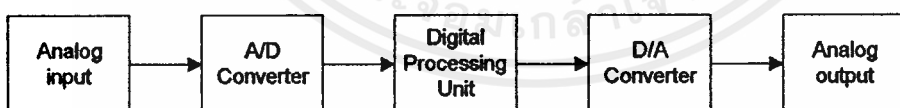
LM741 การชดเชยภายใน คือ มีตัวเก็บประจุอยู่ภายในผลึกแล้ว ส่วนออปแอมป์เบอร์อื่นอาจต้องมีการต่อตัวเก็บประจุชดเชยภายนอก

2.3.5.4 การขจัดสัญญาณ โหมดร่วม (Common mode rejection) ในออปแอมป์อุดมคติเราได้สมมติว่าขั้วเข้าทั้งสองนั้นไม่ได้ต่อกับกราวด์ภายในออปแอมป์เลย และแรงดันออกนั้นขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างแรงดันที่ขั้วเข้าทั้งสองเท่านั้น แต่ในออปแอมป์จริงนั้นการต่อสัญญาณเข้าขั้วทั้งสองเท่า ๆ กันก็มีสัญญาณออกได้ สัญญาณนี้เรียกว่าสัญญาณ โหมดร่วม (Common-mode signal, vic) และอัตราขยาย A_c เรียกว่า อัตราขยายโหมดร่วม (Common-mode gain) อัตราส่วนระหว่างอัตราขยายทั้งสอง คือ อัตราส่วนการขจัดสัญญาณโหมดร่วม (Common-mode Rejection Ratio, CMRR)

2.3.5.5 แบนด์วิดท์ ถ้าเราดูกราฟแสดงอัตราขยายวงรอบเปิดต่อความถี่ของออปแอมป์เบอร์ 741 จะเห็นว่ามิแบนด์วิดท์แคบมากคือ น้อยกว่า Hz เสียอีก ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าออปแอมป์มีอัตราขยายมากเมื่อเรานำไปใช้ในวงจรจริงมักจะมีการป้อนกลับอย่างมากทำให้แถบความถี่กว้างขึ้น นั่นคือ เราสามารถแลกอัตราขยายกับแถบความถี่ได้ แต่ผลคูณของอัตราขยายกับแถบความถี่มีค่าคงตัวสำหรับออปแอมป์เบอร์หนึ่ง

2.4 การติดต่อกับอุปกรณ์อนาลอก

การศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับระบบดิจิทัล สัญญาณที่ใช้ในการทำงานจะต้องเป็นสัญญาณดิจิทัล แต่โดยทั่วไปแล้วในระบบดิจิทัลมักมีสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณอนาลอก ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องระหว่างความต่างศักย์สองระดับ ในที่นี้จะกล่าวถึงการเชื่อมต่ออุปกรณ์อนาลอกเข้ากับระบบดิจิทัล



รูปที่ 26 ระบบดิจิทัลที่มีสัญญาณอนาลอกอินพุต และ อนาลอกเอาต์พุต

ข้อมูลที่ได้โดยตรงจากธรรมชาตินั้น โดยส่วนใหญ่เป็นสัญญาณอนาลอก เช่น เวลา ความเร็ว น้ำหนัก ความดัน ความเข้มแสง และการวัดตำแหน่ง ทั้งหมดนี้เป็นสัญญาณอนาลอก ระบบดิจิทัลดังแสดงดังรูปภาพ 26 มีสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณอนาลอก ความแตกต่างเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในช่วง 0 – 3 โวลต์ ตัวเข้ารหัส (Encoder) เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล หรือเรียกสั้น ๆ ว่า A/D converter

ในระบบดิจิทัลดังรูปภาพ 26 มีตัวถอดรหัส (Decoder) ซึ่งทำหน้าที่ในการแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณดิจิทัลจากระบบประมวลผลเป็นสัญญาณอนาลอกออกมาทางเอาต์พุตของระบบ จะได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีค่าเปลี่ยนแปลงในช่วง 0-3 โวลต์ เราเรียก decoder ว่าเป็น D/A converter ชนิดหนึ่ง สรุปแล้ว D/A converter จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอก

ระบบที่เป็นดังรูปที่ภาพ 26 เรียกว่าระบบไฮบริด (Hybrid) เนื่องจากประกอบด้วยอุปกรณ์ดิจิทัลและอนาลอก ในวงจรที่เห็นวิศวกรและช่างเทคนิคมักเรียก encoder และ decoder ที่มีการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลและแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอกว่า “อุปกรณ์เชื่อมต่อ” (Interface Device) คำว่าการเชื่อมต่อ มักใช้กล่าวถึงอุปกรณ์หรือวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงระบบแบบใหม่ซึ่งในที่นี้คือ เปลี่ยนแปลงระหว่างข้อมูลแบบอนาลอกและดิจิทัล

2.4.1 การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอก

| | Digital Inputs | | | | Analog Output |
|--------|----------------|---|---|---|---------------|
| | D | C | B | A | Volt |
| Row 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Row 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.2 |
| Row 3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0.4 |
| Row 4 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0.6 |
| Row 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0.8 |
| Row 6 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1.0 |
| Row 7 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1.2 |
| Row 8 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1.4 |
| Row 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1.6 |
| Row 10 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1.8 |
| Row 11 | 1 | 0 | 1 | 0 | 2.0 |
| Row 12 | 1 | 0 | 1 | 1 | 2.2 |
| Row 13 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2.4 |
| Row 14 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2.6 |
| Row 15 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2.8 |
| Row 16 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3.0 |

ตารางที่ 3 ตารางความจริงสำหรับ D/ A converter

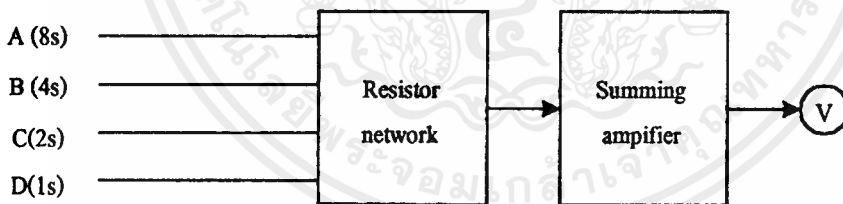
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากอุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอก สมมุติว่าเราต้องการเปลี่ยนเลขฐานสองจากหน่วยประมวลผลเป็นเอาต์พุตที่อยู่ในรูปของแรงดันในช่วง 0 - 3 V โดยการใช้ decoder

ในตอนแรกต้องสร้างตารางความจริง แสดงทุก ๆ เหตุการณ์ที่เป็นไปได้ ตารางที่แสดงอินพุต 4 คิว (A,B,C,D) ของ D/A converter เป็นเลขฐานสองโดยเลข 1 แสดงช่วงความต่างศักย์ 3-5 V และเลข 0 แสดงความต่างศักย์ 0 V เอาต์พุตที่ได้ออกมาในรูปแบบความต่างศักย์แสดงทางด้านขวาสุดของตาราง ถ้าอินพุตมีค่า 0000 เอาต์พุตจะมีค่า 0 V ถ้าอินพุตมีค่า 0001 เอาต์พุตจะเป็น 0.2 V ถ้าอินพุตมีค่า 0010 เอาต์พุตจะมีค่า 0.4 V สังเกตว่าในแต่ละแถวถัดลงมาของอินพุตเลขฐานสองค่าเอาต์พุตแบบอนาลอกจะมีค่าเพิ่มขึ้นทีละ 2

ในรูปแบบแสดงแผนภาพของ D/A converter ถ้าสัญญาณอินพุตแบบดิจิทัล (D,C,B,A) อยู่ทางด้านซ้ายสุดของแผนภาพและ decoder แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนตัวต้านทาน (resistor network) และส่วนวงจรขยายแบบบวก สัญญาณเอาต์พุตแสดงได้ดังรูปของความต่างศักย์ที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์ซึ่งอยู่ทางขวาของแผนภาพ

พิจารณาคิวตัวต้านทานในรูปแบบ อินพุต B จะเป็น 1 เมื่อมีค่าเป็น 2 เท่าของค่า 1 ที่อินพุต A และอินพุต C จะเป็น 1 เมื่อมีค่าเป็น 4 เท่าของค่า 1 ที่อินพุต A การจัดระบบต่าง ๆ ของตัวต้านทานเหล่านี้ที่ใช้ในการแบ่งระดับความต่างศักย์ต่าง ๆ วงจรในส่วนนี้เรียกว่า โครงข่ายตัวต้านทานขั้นบันได



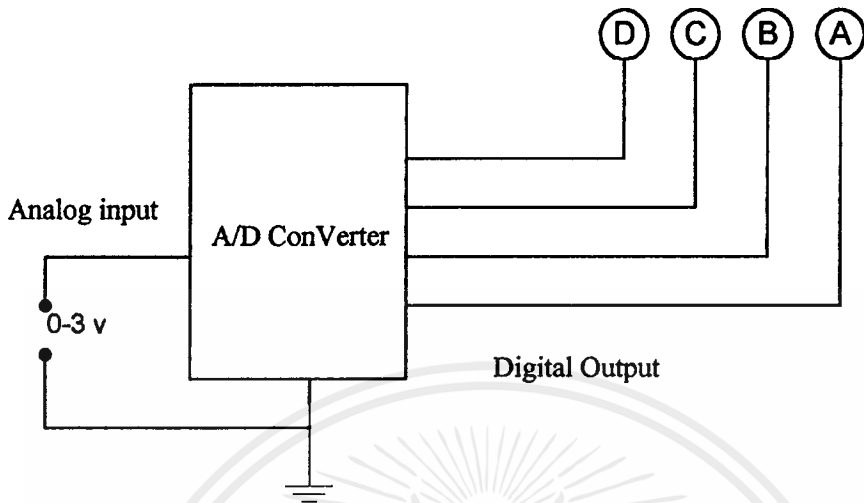
รูปภาพ 27 ไลอะแกรมของ D/A converter

พิจารณาส่วนที่เป็นวงจรขยายแบบบวกในรูปแบบ ซึ่งจะนำความต่างศักย์เอาต์พุตของตัวต้านทานมาขยายค่าให้ได้ความต่างศักย์ที่เหมาะสม ดังแสดงทางขวาสุดของตาราง โดยทั่วไปในส่วนนี้มักใช้โอซีออปแอมป์ วงจรในส่วนนี้เรียกว่า scaling amplifier สรุปแล้ว D/A converter จะประกอบไปด้วยสองส่วนใหญ่ ๆ คือ กลุ่มของตัวต้านทานที่ทำงานเป็นระบบ resistive ladder และออปแอมป์ซึ่งใช้เป็นวงจรขยายแบบบวก

2.4.2 การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

ตัวอย่างของอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล คือ encoder ชนิดพิเศษ โดยแสดงได้ดังรูป ส่วนอินพุตมีความต่างศักย์เข้ามาทางอินพุตเดียว การเปลี่ยนแปลงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต่างศักย์อยู่ในช่วง 0 ถึง แรงดันอ้างอิง



รูปภาพ 28 โค้ดแอมของ A/D Converter

| Analog input | | Digital output | | | |
|--------------|------|----------------|----|----|----|
| Row | Volt | 8S | 4S | 2S | 1S |
| 1 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0.2 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 3 | 0.4 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 4 | 0.6 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 5 | 0.8 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 6 | 1.0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 7 | 1.2 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 8 | 1.4 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | 1.6 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 1.8 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 11 | 2.0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 12 | 2.2 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 13 | 2.4 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 14 | 2.6 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 15 | 2.8 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 16 | 3.0 | 1 | 1 | 1 | 1 |

ตารางที่ 4 ตารางความจริงสำหรับ A/D converter

จาก ตารางความจริง แถวที่ 1 แสดงอินพุตของ A/D converter เท่ากับ 0 โวลต์ เอาต์พุตคือเลขฐานสอง 0000 แถวที่ 2 แสดงอินพุตของ A/D converter เป็น 0.2 โวลต์ เอาต์พุตที่ได้คือ 0001 สังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ทีละ 0.2 โวลต์ เอาต์พุตที่ได้จะเป็นเลขฐานสองที่เพิ่มค่าทีละ 1 และสุดท้ายในแถวที่ 16 แสดงอินพุตสูงสุด 3 โวลต์ จะได้เอาต์พุตเลขฐานสองเป็น 1111

วิธีแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลนั้นมีมากมายหลายแบบหากแบ่งตามความเร็วที่ใช้ในการแปลงสัญญาณมี 3 แบบ ดังคุณสมบัติของแต่ละแบบตามตาราง

| ชนิด | ความเร็ว | ช่วงเวลาแปลงสัญญาณใน 1 รอบ | การใช้งาน |
|--|-----------|----------------------------|------------------|
| รวบรวมค่า (integrating) | slow | millisec | DC. voltmeter |
| ประมาณค่าต่อเนื่อง (successive approximation) | fast | microsec | sound signal |
| แฟลช (flash) | very fast | nanosec | picture signal |

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบ A/D converter ตามความเร็ว

พิจารณา A/D converter ทั้งสามชนิด สองแบบแรกมีวงจรค่อนข้างง่าย ราคาถูก แต่ก็มี ความแม่นยำพอสมควร แต่แบบแรกใช้เวลาแปลงสัญญาณมาก ไม่เหมาะกับสัญญาณอินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงเลือกใช้ A/D converter แบบประมาณค่าต่อเนื่อง

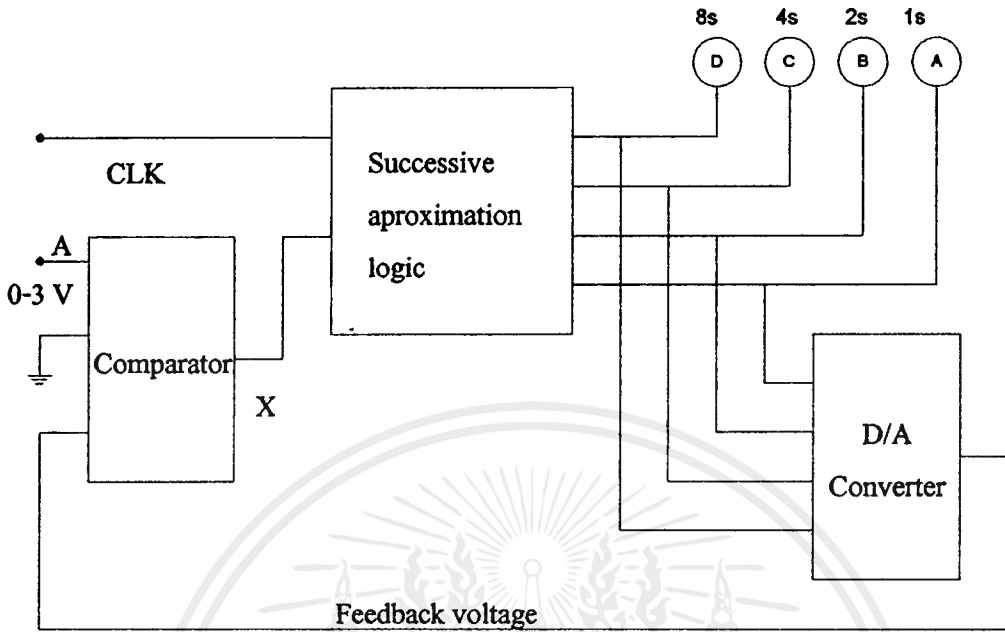
1. การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบประมาณค่าต่อเนื่อง

(Successive - approximation analog to digital converter)

โคจรแกรมของการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบประมาณค่าต่อเนื่อง แสดงดังรูปภาพ 29 โดยจะประกอบไปด้วย วงจรเปรียบเทียบแรงดัน วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอก และวงจรลอจิกชุดใหม่เรียกว่า successive - approximation logic

สมมติว่าเราป้อนแรงดัน 1 โวลต์ successive approximation A/D converter จะเริ่มทำการคาดคะเนค่าแรงดันของอนาลอกอินพุตการคาดคะเนของคอนเวอร์เตอร์ชุดนี้ เริ่มด้วยการกำหนด MSB เป็น 1 ซึ่งแสดงไว้ในบิตที่ 1 จากโคจรแกรม ซึ่งหน่วย successive approximation logic unit เป็นตัวดำเนินการนี้ ผลที่ได้จะถูกป้อนกลับให้วงจรเปรียบเทียบโดยผ่าน D/A converter ตัวเปรียบเทียบจะเป็นตัวตอบคำถามในบิตที่สองของโคจรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

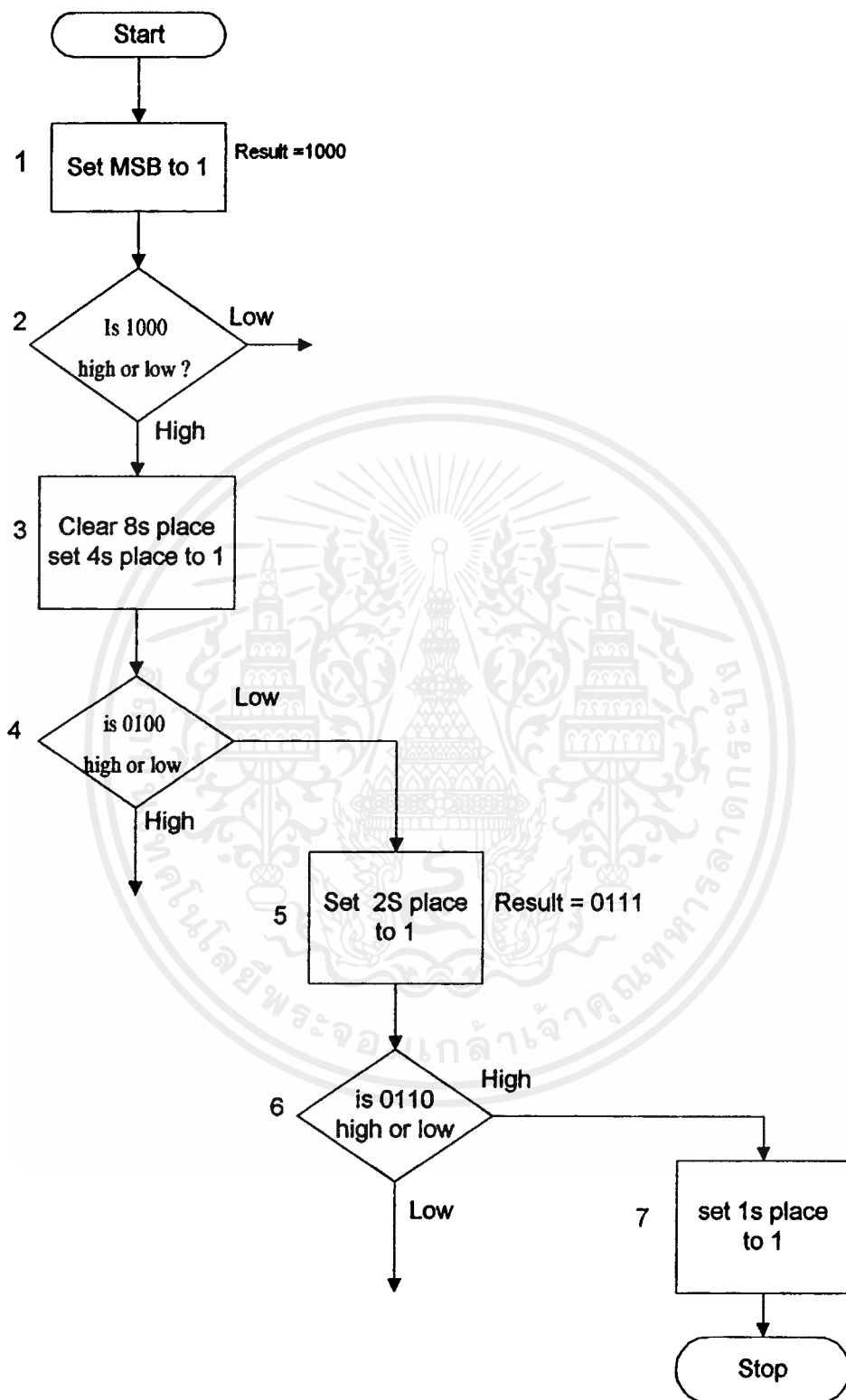


รูปภาพ 29 โค้ดแอมแกรมของ Successive approximation type A/D

ถ้าถามว่า 1000 มีค่าสูงกว่าหรือต่ำกว่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันอินพุต ในกรณีนี้คำตอบของคำถามคือสูงกว่า ดังนั้น successive approximation logic จะแสดงการทำงานในบิตที่ตาม ตัวเลขที่ 8s จะถูกเคลียร์เป็น 0 และที่ 4s จะถูกเซตเป็น 1 ผลที่ได้ (0100) จะถูกส่งกลับไปยังหน่วยที่ทำการเปรียบเทียบผ่าน D/A converter ตัวเปรียบเทียบก็จะตอบคำถามต่อไปในบิตที่ 4 ว่า 0100 มีค่าสูงกว่าหรือต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันอินพุต คำตอบที่ได้ในตอนนี้เป็นค่าต่ำกว่า = successive approximation logic

ในบิตที่ 5 ที่หลัก 2s จะถูกเซตเป็น 1 ผลที่ได้ (0110) จะถูกส่งกลับไปให้วงจรเปรียบเทียบ วงจรเปรียบเทียบก็จะตอบคำถามในบิตที่ 6 ว่า 0110 มีค่าสูงกว่าหรือต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันอินพุต คำตอบที่ได้คือค่าต่ำกว่า successive approximation logic ก็จะทำงานในบิตที่ 7 ที่ 1s ถูกเซตเป็น 1 ผลที่ได้คือเลขฐานสอง 0111 ซึ่งหมายถึงศักย์ 7 โวลต์ จะถูกป้อนเข้าที่อินพุตของ A/D converter

คำถามต่าง ๆ วงจรเปรียบเทียบเป็นตัวให้คำตอบและจะสังเกตได้ว่า การทำงานของ successive approximation A/D converter ขึ้นอยู่กับว่าคำตอบของคำถามคืออะไร เป็น Low หรือ High (พิจารณาบิตที่ 3 และ 5 ประกอบ)

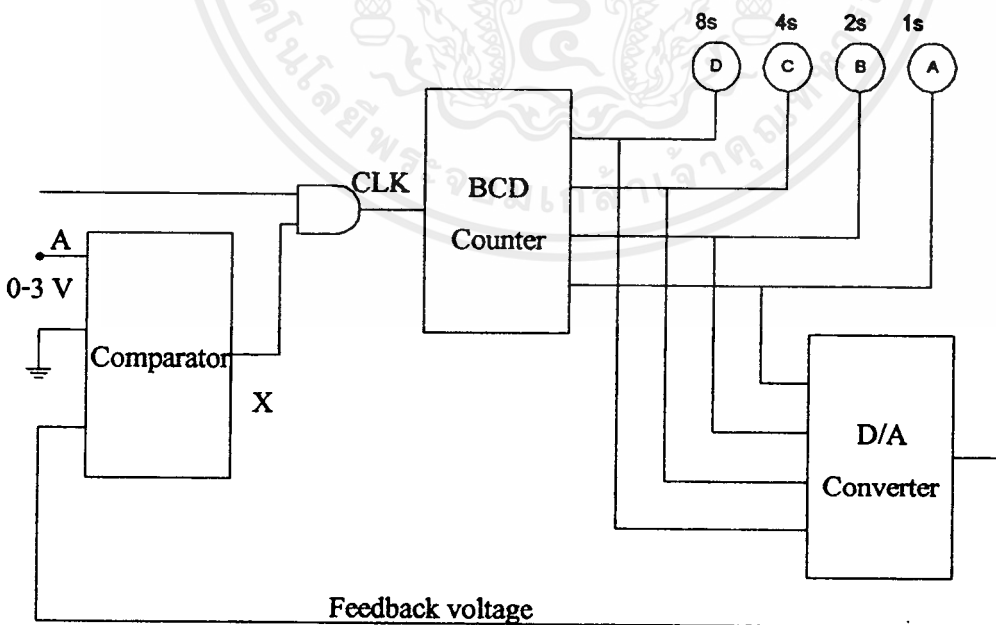


รูปภาพ 30 การทำงานของ successive approximate type A/D converter

2. Counter ramp type A/D converter

เอกสารนี้เป็นพิจารณาในรายละเอียดของการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ดังรูปภาพ 31 การคำนวณการนับจำนวนที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งสัญญาณอนาล็อกมีค่าเท่ากับสัญญาณดิจิทัลที่นับได้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติว่าที่จุด X มีค่าเป็น 1 ที่ BCD counter มีค่าเป็น 0000 และสัญญาณอินพุตคือ 0.55 V ค่า 1 ที่จุด X จะกระตุ้น AND Gate ให้ป้อนสัญญาณเวลาเข้าที่ขา CLK ของส่วนอินพุตของ BCD Counter วงจรนับจะนับเพิ่มขึ้นเป็น 0001 ซึ่งจะแสดงค่าเลขฐานสองขึ้นที่ด้านบนของรูปภาพ 31 ในขณะที่เดียวกัน ค่า 0001 ก็จะถูกป้อนกลับไป D/A converter จากตารางความจริง เลขฐานสอง 0001 ทำให้เกิดความต่างศักย์ 0.2 V ที่เอาต์พุตของ D/A converter ความต่างศักย์ 0.2 V จะถูกป้อนกลับไปจุด B ของตัวเปรียบเทียบความต่างศักย์ ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบความต่างศักย์ของอินพุตทั้งสอง โดยขณะที่อินพุต A มีค่ามากกว่า อินพุต B ($0.55 > 0.2$ V) ดังนั้นส่วนเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบแรงดันจึงเป็น 1 ซึ่งจะไปกระตุ้น AND gate ให้ป้อนสัญญาณนาฬิกาเข้าที่วงจรรับอีก วงจรนับจะนับเพิ่มอีก 1 ทำให้ได้ค่า 0010 จากตารางความจริง 0010 ทำให้ได้แรงดันเอาต์พุต 0.4 โวลต์ ป้อนเข้าที่อินพุต B ของตัวเปรียบเทียบความต่างศักย์ ในขณะที่อินพุต A ยังคงมีค่ามากกว่าอินพุต B ($0.55 > 0.4$ V) ทำให้เอาต์พุตของตัวเปรียบเทียบความต่างศักย์เป็น 1 ตัว AND gate จะถูกกระตุ้นทำให้สัญญาณนาฬิกาเข้าสู่วงจรรับอีก วงจรนับจะนับเพิ่มเป็น 0011 ค่านี้จะถูกป้อนกลับไป D/A converter ซึ่งค่านี้ทำให้ได้ความต่างศักย์ 0.6 V ป้อนเข้าที่จุด B ของตัวเปรียบเทียบความต่างศักย์อีกครั้ง เนื่องจาก B มากกว่า A ทำให้ไม่สามารถกระตุ้น AND gate ได้ จึงไม่มีสัญญาณนาฬิกาเข้าสู่วงจรรับอีก วงจรนับจะหยุดนับที่เลขฐานสอง 0011 ดังนั้นเลขฐานสอง 0011 จึงมีค่าเท่ากับ 0.55 V ซึ่งสอดคล้องกับแถวที่ 4



รูปภาพ 31 โค้ดแอมป์ของ counter ramp type A/D converter

การสำรวจพบว่า มี A/D converter มากกว่า 300 ชนิด จากผู้ผลิตหลายแห่งด้วยกัน ซึ่งคุณสมบัติที่ควรทราบในการเลือกใช้ A/D converter มีดังต่อไปนี้

1. ความละเอียด โดยทั่วไป A/D converter ที่มีเอาต์พุตเป็นเลขฐานสองจะมีจำนวนบิตเป็น 4,6,8,10,12,14, และ 16 บิต อาจมีค่า error เกิดขึ้นบ้างเล็กน้อย เนื่องจากการใช้ discrete binary step เพื่อแทนสัญญาณอนาลอกที่มีความต่อเนื่องกันเรียกว่า quantizing error A/D converter ขนาด 16 บิต จะมีความถูกต้อง ละเอียด แม่นยำกว่าแบบ 4 บิต เพราะว่ามันแบ่งอินพุตหรืออ้างอิงแรงดันเป็น discrete step ที่เล็ก ๆ ตัวอย่างเช่น แต่ละ step ใน A/D converter แบบ 4 บิต จะต้องเป็นหนึ่งในสิบห้า ($2^4 - 1 = 15$) ของแรงดันอินพุต ผลที่ออกมาคือ 6.7 %

2. ความแม่นยำ ผลจากการทำงานของ A/D converter อาจมีข้อผิดพลาดทางตัวเลขอันเนื่องมาจาก discrete step ที่พบที่เอาต์พุตของไอซี ซึ่ง A/D converter ทุกตัวมีความผิดพลาดอันนี้อยู่ นอกจากนั้นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นใน A/D converter อีกอย่างหนึ่งคือ analog component เช่นวงจรเปรียบเทียบและความผิดพลาดอื่น ๆ อันเนื่องมาจากโครงข่ายของวงจรความต้านทาน ซึ่งค่าความละเอียดแม่นยำของ A/D converter มีช่วงกว้างจาก 1 LSB ถึง 2 LSB

3. เวลาการแปลงผัน (Conversion time) เป็นเวลาที่ A/D converter ใช้สำหรับการเปลี่ยนค่าอนาลอกทางอินพุต ให้เป็นข้อมูลเอาต์พุตเลขฐานสอง ช่วงเวลาการแปลงผันจะขึ้นอยู่กับวิธีการแปลงสัญญาณ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 50 nS ถึง 100 mS

4. รายละเอียดเฉพาะอื่น ๆ คือ ค่าแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ โดยส่วนใหญ่จะมีค่าประมาณ 5 โวลต์ แต่บางตัวก็ทำงานในย่าน +5 ถึง +15 โวลต์ นอกจากนี้ก็เป็นค่าการสูญเสียของ A/D converter

2.5 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method)

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เป็นการหาผลลัพธ์ของสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆ ทั้งทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ เช่น การหารากของสมการ การอินทิเกรต การหาค่าอนุพันธ์ เป็นต้น

2.5.1 การหาค่ารากของสมการโดยระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

(Newton-Raphson method)

ระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน เป็นระเบียบวิธีแบบเปิดที่เริ่มจากค่าเริ่มต้นเพียงค่าเดียวและอาจนำไปสู่ผลลัพธ์ได้โดยรวดเร็ว คุณสมบัติดังกล่าวทำให้ระเบียบวิธีของนิวตันราฟสันเป็นนิยมนำกันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะสำหรับทางปฏิบัติ ซึ่งโดยปกติแล้วผู้ออกแบบสามารถทราบค่าของผลลัพธ์ได้โดยคร่าวๆ คุณสมบัติดังกล่าวสามารถพบเห็นเมื่อได้จากตัวอย่าง แต่ก่อนที่จะอธิบายขั้นตอนของระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน เนื่องจากระเบียบวิธีดังกล่าวตั้งอยู่บนพื้นฐานของการใช้

เอกรากของสมการเชิงเส้น (Linear equation) ในการหาค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) ดังนั้นเราจะมาทำความเข้าใจกับอนุกรมเทย์เลอร์ก่อนดังนี้

อนุกรมเทย์เลอร์เป็นอนุกรมที่ใช้หาค่าฟังก์ชันที่ตำแหน่ง x จากค่าของฟังก์ชันและค่าอนุพันธ์ ที่มีอันดับต่างๆ กันของฟังก์ชันนั้นที่ตำแหน่ง x_0 ซึ่งอยู่ใกล้เคียงกัน ถึงแม้อนุกรมเทย์เลอร์จะประกอบด้วยพจน์จำนวนทั้งหมดอนันต์พจน์ แต่อนุกรมเทย์เลอร์สามารถอธิบายได้โดยง่าย นัก สมมติว่าเราทำการประมาณอนุกรมเทย์เลอร์นี้ด้วยการใช้พจน์เพียงพจน์เดียวนั้นคือ

$$f(x) \cong f(x_0) \quad (50)$$

ซึ่งบางครั้งเรียกว่า เป็นการประมาณอันดับศูนย์ (Zero order approximation) สมการ (50) นี้ กล่าวค่าของฟังก์ชันที่ x และ x_0 นั้นเท่ากัน ซึ่งจะถูกต้องได้ก็ต่อเมื่อฟังก์ชันนั้นเป็นค่าคงที่เท่านั้น แต่สำหรับฟังก์ชันโดยทั่วไปสมการ (50) จะถูกต้องโดยประมาณเท่านั้นหากตำแหน่ง x และ x_0 นั้นอยู่ใกล้เคียงกัน

หากเราใช้อนุกรมเทย์เลอร์ที่ประมาณด้วยการใช้พจน์จำนวน 2 พจน์ดังนี้

$$f(x) \cong f(x_0) + (x - x_0)f'(x_0) \quad (51)$$

เนื่องจาก $f'(x_0)$ เป็นค่าของความชัน ดังนั้นสมการ (51) นี้จึงเปรียบเสมือนสมการเส้นตรงและจะให้ค่าที่ถูกต้องเสมอหากฟังก์ชันที่กำหนดให้ นั้นมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเชิงเส้นตรงสมการ (51) ดังกล่าวบางครั้งจึงเรียกว่าเป็นการประมาณอันดับหนึ่ง

ในทำนองเดียวกัน หากฟังก์ชันที่กำหนดให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันกำลังสอง อนุกรมเทย์เลอร์ที่ประกอบด้วย 3 พจน์

$$f(x) \cong f(x_0) + (x - x_0)f'(x_0) + \frac{(x - x_0)^2}{2!}f''(x_0) \quad (52)$$

จะสามารถให้ค่าที่ถูกต้องได้ ดังนั้นสำหรับฟังก์ชันโดยทั่วไปที่อยู่ในรูปแบบที่ซับซ้อนและไม่สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการพหุนามได้ อนุกรมเทย์เลอร์ที่จะใช้แทนฟังก์ชันดังกล่าว จึงจำเป็นต้องประกอบด้วยพจน์จำนวนเป็นอนันต์พจน์ นั่นคือ

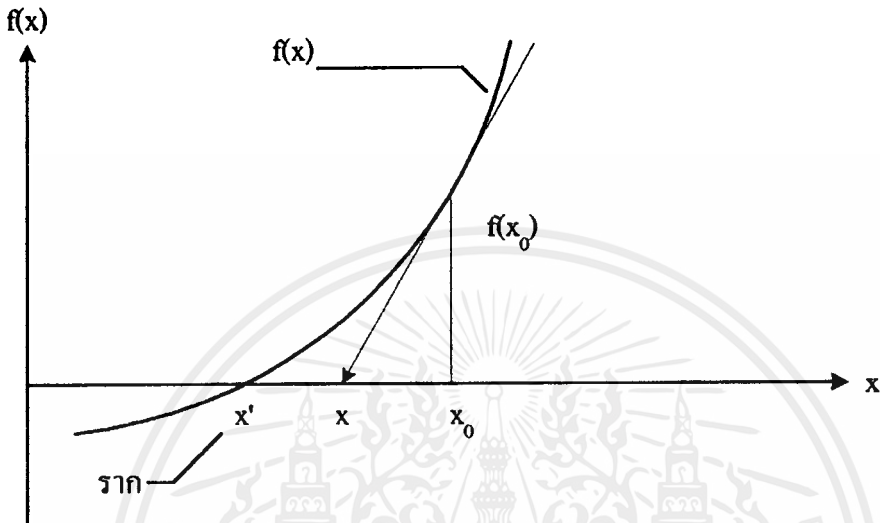
$$f(x) = f(x_0) + (x - x_0)f'(x_0) + \frac{(x - x_0)^2}{2!}f''(x_0) + \dots + \frac{(x - x_0)^n}{n!}f^{(n)}(x_0) + \dots \quad (53)$$

พื้นฐานความเข้าใจในอนุกรมเทย์เลอร์ได้ถูกนำมาใช้ในระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน เพื่อหารากของสมการ $f(x) = 0$ โดยใช้การประมาณฟังก์ชันด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ที่ประกอบด้วยพจน์เพียง 2 พจน์ ดังแสดงในสมการ (52) ส่วนความหมายของสมการ (54) สามารถอธิบายได้

โดยใช้รูปภาพ 32 ประกอบ

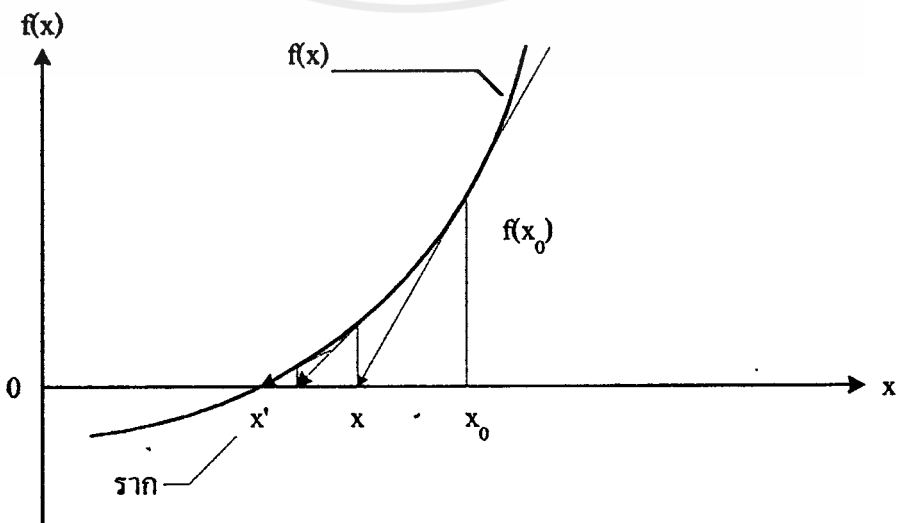
เอกสารนี้เป็นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 f(x) &= f(x_0) + (x-x_0)f'(x_0) &= & 0 \\
 (x-x_0)f'(x_0) &= &= & -f(x_0) \\
 x-x_0 &= &= & \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} & (54)
 \end{aligned}$$



รูปภาพ 32 การคำนวณหา x ใหม่จากค่ากำหนดเริ่มต้น x_0

หลักการของระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสันเริ่มจากการกำหนดค่าเริ่มต้น x_0 ดังแสดงในรูป 32 แล้วทำการคำนวณค่าของฟังก์ชัน $f(x_0)$ และค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชัน $f'(x_0)$ ที่ตำแหน่ง x_0 นั้น ค่าดังกล่าวจะนำไปแทนลงในสมการ (54) ก่อให้เกิดค่า x ณ ตำแหน่งใหม่ ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ x' มากขึ้น จากนั้นก็ใช้วิธีการทำซ้ำเพื่อค่า x ต่างๆ ที่เกิดจากการทำซ้ำนี้จะถูกรู้เข้าสู่อาก x' ที่แท้จริง ลักษณะของการรู้เข้าซึ่งเกิดจากการทำซ้ำนี้สามารถอธิบายได้ดังรูปภาพ 33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งดำเนินการคำนวณซ้ำๆ กันทุกครั้งที่มีการนำค่าไปใช้

รูปภาพ 33 นี้ แสดงให้เห็นว่าการเข้าสู่ผลลัพธ์โดยระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสันนั้นเป็นไปอย่างรวดเร็ว คุณสมบัติดังกล่าวเป็นเหตุให้ระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสันได้รับความนิยมอย่างสูงในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตาม การเข้าสู่ผลลัพธ์อาจไม่เกิดขึ้นเสมอไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ เช่น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของของฟังก์ชันของการแก้ปัญหา นั้น และการกำหนดค่าเริ่มต้น x_0 เป็นต้น

จากคำอธิบายต่าง ๆ เหล่านี้ เราจะเห็นได้ว่าระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสันเป็นระเบียบวิธีการทำซ้ำซึ่งประกอบด้วยการหาค่า x ใหม่จากค่า x เก่า โดยใช้สมการ (54) ที่ได้จากการประมาณของอนุกรมเทย์เลอร์ หากเรากำหนดให้ Δx แทนความแตกต่างระหว่างค่า x ใหม่กับค่า x เก่า ดังนั้นสมการ (2.32) จึงเขียนได้ว่า

$$\Delta x = x - x_0 = -\frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (55)$$

ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปใช้คำนวณ โดยวิธี โดยวิธีการทำซ้ำ โดยประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้คือ

ขั้นตอนที่ 1 จำนวนค่าฟังก์ชันและค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันนั้นที่ตำแหน่ง x เก่า แล้วคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์จาก

$$\Delta x_{k+1} = -\frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (56)$$

โดยครรชนีต่าง k และ $k+1$ แทนการทำซ้ำครั้งที่ k และ $k+1$ ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 2 จำนวนหาค่าตำแหน่ง x ใหม่จาก

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x_{k+1} \quad (57)$$

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้เข้าสู่เกณฑ์ที่กำหนดไว้แล้วหรือไม่ ค่าของเกณฑ์การรู้เข้าที่ยอมรับได้ อาจอยู่ในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งดังต่อไปนี้

$$|\Delta x_{k+1}| < \epsilon_1 \quad (58)$$

โดยที่ ϵ_1 แทนค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์หรือ

$$\frac{\Delta x_{k+1}}{x_{k+1}} < \epsilon_2 \quad (59)$$

โดย ϵ_2 แทนค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์

$$\left| \frac{\Delta x_{k+1}}{x_{k+1}} \right| \times 100\% < \epsilon_3 \quad (60)$$

โดย ϵ_3 แทนค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์คิดเป็นร้อยละ เป็นต้น หากค่าของผลลัพธ์ที่ได้ยังไม่ถึงไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกณฑ์การรู้เข้าที่กำหนดไว้ก็ให้ย้อนกลับไปยังขั้นตอนที่ 1 เพื่อทำซ้ำใหม่

ปัญหาที่ยกเป็นตัวอย่างคือ การหาค่ารากที่สองของตัวเลข โดยจะใช้ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน โดยที่ c คือค่าที่เราต้องการหาค่ารากที่สอง และ x คือคำตอบที่ต้องการทราบ จะได้

$$x = \sqrt{c}$$

$$f(x) = x^2 - c = 0$$

$$f'(x) = 2x$$

จากสมการ (2.32) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k - \frac{x_k^2 - c}{2x_k} \\ x_{k+1} &= \frac{1}{2} \left(x_k + \frac{c}{x_k} \right) \end{aligned} \quad (61)$$

ซึ่งสมการที่ (61) จะเป็นสมการที่จะนำไปสู่การหาค่ารากที่สองโดยเฉพาะ โดยนำวิธีการประยุกต์จากระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน

2.4.2 การหาค่าอินทิกรัลเชิงตัวเลข (Numerical integration)

ในตอนนี้เป็นการศึกษาการหาค่าอินทิกรัลเชิงตัวเลข ด้วยระเบียบวิธีการต่างๆ การหาค่าอินทิกรัลเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นตัวเลขนั้นเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการแก้ปัญหาต่างๆ เราได้เรียนรู้วิธีการอินทิเกรตจากวิชาแคลคูลัส ซึ่งพบว่าเราจำเป็นต้องจำสูตรชนิดต่างๆ ในการอินทิเกรตฟังก์ชันที่อยู่ในรูปแบบต่างๆ กัน ดังตัวอย่างของการหาค่าอินทิกรัล I ต่อไปนี้

$$\begin{aligned} I &= \int_0^2 (2x^2 - 5x + 1) dx \\ &= \left[\frac{2x^3}{3} - \frac{5x^2}{2} + x \right]_0^2 \\ &= \frac{2}{3} \end{aligned}$$

และยิ่งไปกว่านั้นสำหรับฟังก์ชันที่อยู่ในรูปแบบที่ค่อนข้างจำเพาะ เราจำเป็นต้องใช้ระเบียบขั้นตอนที่พิเศษบางอย่าง ประกอบกับต้องทำด้วยความระมัดระวังและอาจใช้เวลานาน ดังตัวอย่างเช่น

$$\int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \frac{\sqrt{2}}{4} \left(\frac{1}{2} \ln \left[\frac{b^2 + \sqrt{2b+1}}{b^2 - \sqrt{2b+1}} \right] \right) + \arctan \left[\frac{\sqrt{2b}}{1-b^2} \right]$$

ผลที่เกิดจากการอินทิเกรตในตัวอย่างเหล่านี้ ล้วนเป็นผลลัพธ์แบบตรงโดยสามารถนำไปใช้ได้โดยตรง แต่ในทางปฏิบัติยังมีฟังก์ชันอีกเป็นจำนวนมากที่ไม่สามารถหาค่าอินทิกรัลได้โดย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการดังกล่าว ฟังก์ชันเหล่านี้ล้วนแต่เกิดในการแก้ปัญหาโดยทั่วไป เช่น ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิตลอดความหนาของแท่งโลหะซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา มักจะประกอบด้วยผลลัพธ์ที่อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันค่าผิดพลาด ซึ่งจำเป็นต้องหาค่าอินทิกรัล ดังนี้

$$I = \int_a^b e^{-x^2} dx$$

โดยที่ a และ b เป็นค่าตัวเลขคงที่ ค่าอินทิกรัลในสมการนี้ไม่สามารถหาด้วยวิธีใด ๆ ดังเช่นที่เราเคยทำกันมาจนกว่าจะหาด้วยวิธีเชิงตัวเลข ลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นกับปัญหาอื่นเป็นจำนวนมาก การคำนวณและต้องใช้ค่าเหล่านี้ จำเป็นต้องจัดหาผลลัพธ์ของค่าอินทิกรัลโดยกำหนดมาในรูปตารางเสมอ

ความหมายของคำว่าอินทิเกรต คือการนำส่วนย่อยๆ มารวมกันขึ้นเป็นส่วนใหญ่ นั่นคือประกอบขึ้นเป็นส่วนประกอบรวมทั้งหมด ในทางคณิตศาสตร์ผลของค่าอินทิกรัลอันเกิดจากการอินทิเกรตซึ่งรวมตัวเข้าด้วยกันนั้น ปรกติจะเขียนในรูปของสมการดังนี้

$$I = \int_a^b f(x) dx \quad (62)$$

ซึ่งมีความหมายว่าเราจะคูณฟังก์ชัน f ที่ตำแหน่ง x นั้นด้วยระยะ dx แล้วทำการรวมผลคูณที่ได้นี้ในช่วงจาก $x = a$ จนถึง $x = b$ โดยที่เครื่องหมายอินทิกรัล \int ได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นมาให้มีลักษณะคล้ายตัว S เพื่อเป็นการบ่งบอกว่าเราจะทำการรวมส่วนย่อยต่างๆ นี้เข้าด้วยกัน

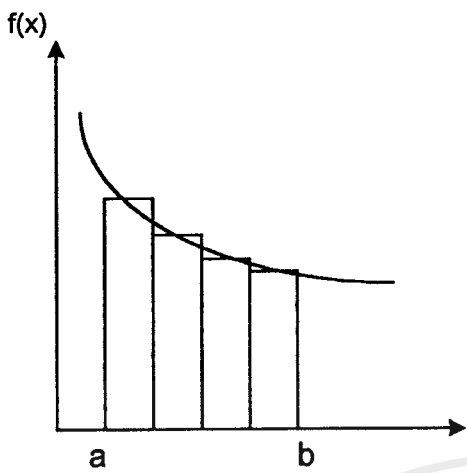
จากคำอธิบายดังกล่าวเราจะเห็นได้ว่า แท้ที่จริงแล้วการอินทิเกรตก็เปรียบได้เสมือนกับการนำความสูงที่ตำแหน่ง x คูณด้วยระยะความกว้าง dx ซึ่งจะก่อให้เกิดพื้นที่ที่มีลักษณะเรียวยาวแนวตั้งมารวมเข้าด้วยกัน ดังเช่นแสดงในรูปภาพ 34 และเมื่อค่า dx มีค่าเข้าใกล้ 0 ผลที่ได้ก็คือพื้นที่ที่แท้จริงภายใต้ฟังก์ชันนั้นดังแสดงในรูปภาพ 35 จากความหมายของการอินทิเกรตนี้เอง เราจึงเห็นได้ว่าเราสามารถหาค่าอินทิกรัลโดยประมาณของฟังก์ชันใดๆ ได้ โดยการคำนวณหาพื้นที่ใต้ฟังก์ชันนั้น และด้วยการใช้การประมวลผลที่มีประสิทธิภาพดังนั้นเราจึงสามารถประมาณค่าอินทิเกรตได้ว่า

$$\begin{aligned} I &= \int_a^b f(x) dx \\ &= \sum_{i=1}^n f(x_i) \end{aligned}$$

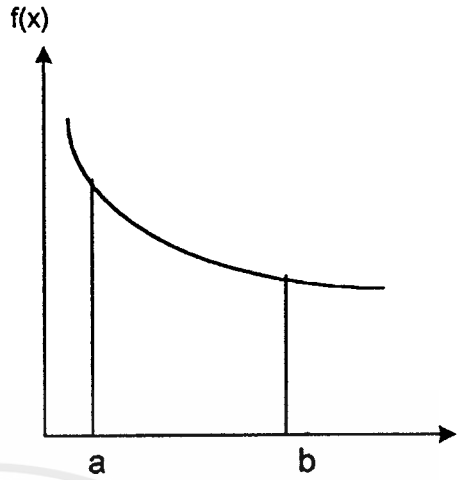
แต่ในทางปฏิบัติเราจะแบ่งช่วงย่อยๆ ด้วยจำนวนจำกัดค่าหนึ่ง ดังนั้นการประมาณค่าของการอินทิเกรตจึงเป็น

$$I = \sum_{i=1}^n f(x_i) \quad (63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปภาพ 34 การแบ่งพื้นที่เป็นส่วนย่อย



รูปภาพ 35 พื้นที่ย่อยที่นำมารวมกัน



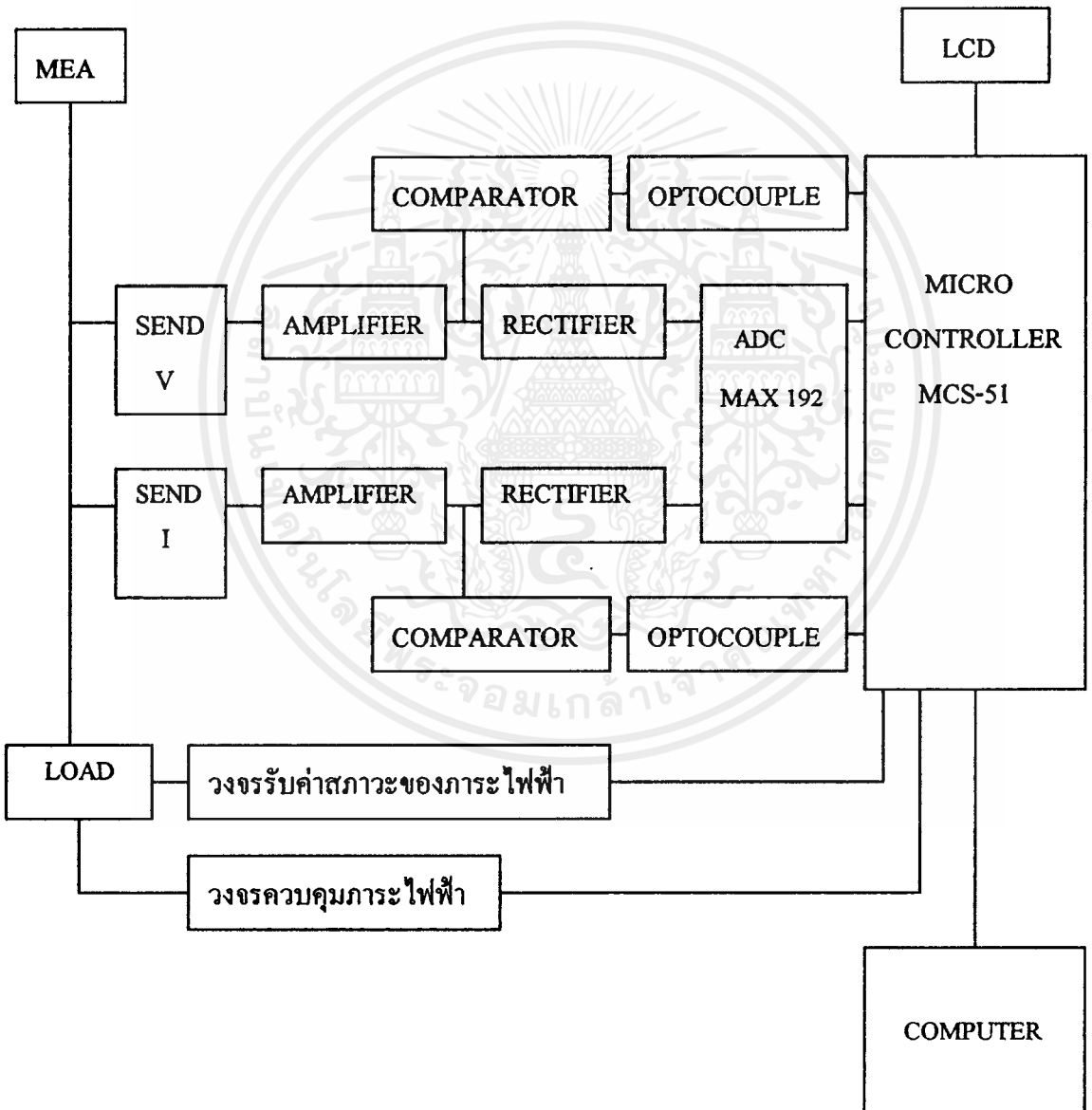
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การสร้างและการคำนวณ

3.1 การสร้าง

การสร้างโครงการเครื่องแสดงค่ากำลังไฟฟ้าภายในบ้านจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ โดยมีลักษณะเป็นดังบล็อกไดอะแกรมต่อไปนี้



รูปภาพ 36 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 ชุดแปลงสัญญาณ

3.1.1.1 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า

จากรูปภาพ 37 จะมีวงจรชุดแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ Potential Transformer (PT) รับค่าแรงดันไฟฟ้า line to neutral แล้วแปลงเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขนาดเล็กที่เป็นรูปคลื่นไซน์เพื่อต่อเข้าวงจรขยายสัญญาณเพื่อปรับอัตราขยายให้เหมาะสมโดยการปรับ VR1 และ VR2 เป็นการปรับขยายและปรับละเอียดก็จะได้สัญญาณที่ออกจากเอาต์พุตเพื่อนำสัญญาณนี้ไปเข้าวงจรเรียงกระแสโดยใช้ไอซีเบอร์ TL082 จะได้รูปคลื่น full-wave rectifier เพื่อส่งเข้าวงจร ADC ที่ใช้ไอซีเบอร์ MAX 192 เพื่อแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่น full-wave rectifier ที่เป็นสัญญาณอนาล็อกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อส่งเข้าชุดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อนำไปประมวลผลและคำนวณ ซึ่งมีวงจรเปรียบเทียบสัญญาณเป็นควอดรอนบวกรหรือลบของรูปคลื่นของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น โดยสัญญาณที่ออกจากวงจรเปรียบเทียบจะนำมาผ่านไดโอดแล้วจึงส่งเข้าออปโตไดโอดเพื่อที่จะทำการลดระดับแรงดันจากไฟเลี้ยงของออปแอมป์ ให้มีค่าประมาณ 5 โวลต์สำหรับลอจิก 1 ส่วนไดโอดที่นำมาต่อระหว่างวงจรเปรียบเทียบสัญญาณกับออปโตไดโอดก็เพื่อป้องกันตัวออปโตไดโอดไม่ให้ได้รับแรงดันไบอัสกลับเกินกว่าค่าที่คิด

3.1.1.2 สัญญาณกระแสไฟฟ้า

จากรูปภาพ 37 จะมีวงจรชุดแปลงสัญญาณกระแสไฟฟ้า โดยใช้หม้อแปลงกระแสรับค่ากระแสไฟฟ้า แล้วนำมาต่อเข้ากับตัวต้านทานขนาด 0.05 โอห์ม แล้วจึงนำแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานนี้ไปทำการขยายโดยใช้วงจรขยายกลับขั้ว ซึ่งสามารถปรับค่าอัตราขยายได้โดยการปรับที่ VR3 หรือ VR4 ซึ่งสามารถทำการการปรับขยายและละเอียดได้ เมื่อได้สัญญาณที่มีขนาดที่เหมาะสมแล้ว สัญญาณที่ได้จะถูกนำไปผ่านวงจรต่าง ๆ เช่นเดียวกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

3.1.2 วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

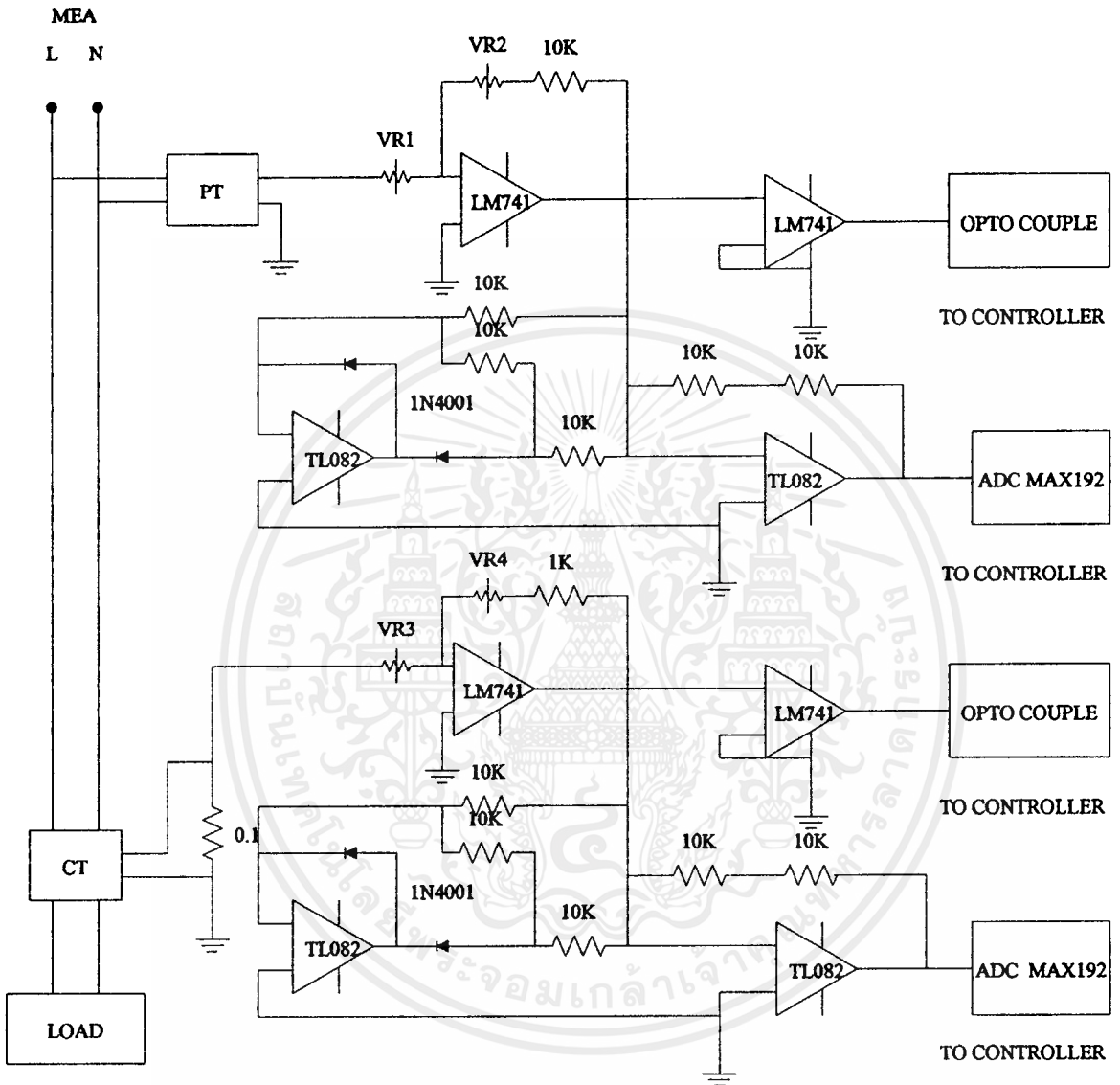
การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล จะใช้วงจรรวมสำเร็จรูปเบอร์ MAX192 ซึ่งมีความละเอียดในการแปลง 10 บิต พร้อมทั้งมีวงจร Sampling/Hold อยู่ภายใน โดยมีการสื่อสารกับอุปกรณ์ประมวลผลเป็นแบบอนุกรม โดยการควบคุมการทำงานจะใช้สัญญาณที่เกี่ยวข้อง 4 สัญญาณ ทำให้ใช้สายสัญญาณจำนวน 4 เส้นในการเชื่อมโยงระหว่าง MAX192 และ MCS51 ดังรูปภาพที่ 39 ซึ่งหน้าที่ของสัญญาณทั้งสี่มีดังนี้

CS : เป็นสัญญาณที่จะเลือกว่าจะให้ทำการแปลงสัญญาณหรือไม่

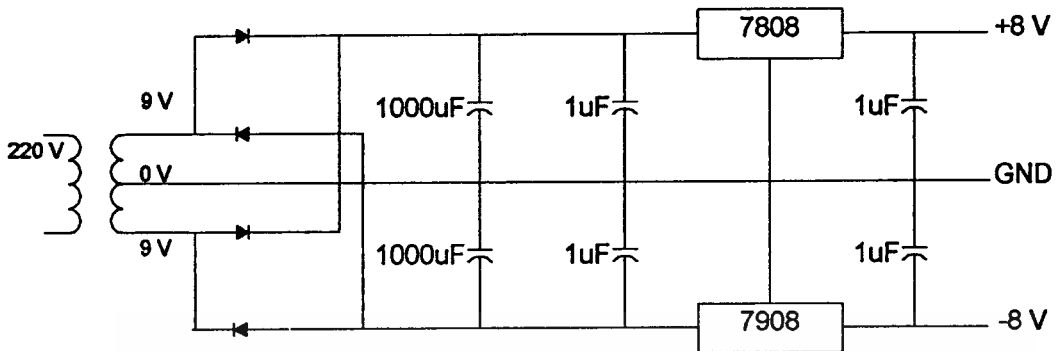
CLOCK : เป็นสัญญาณนาฬิกาที่ MAX192 ต้องใช้ในการทำงาน ซึ่ง CLOCK ที่ได้จะมาจากการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

DIN : เป็นสัญญาณที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ป้อนให้กับ MAX192 เพื่อทำการกำหนดสถานะการทำงาน เช่น จะทำการแปลงสัญญาณที่ช่องใด

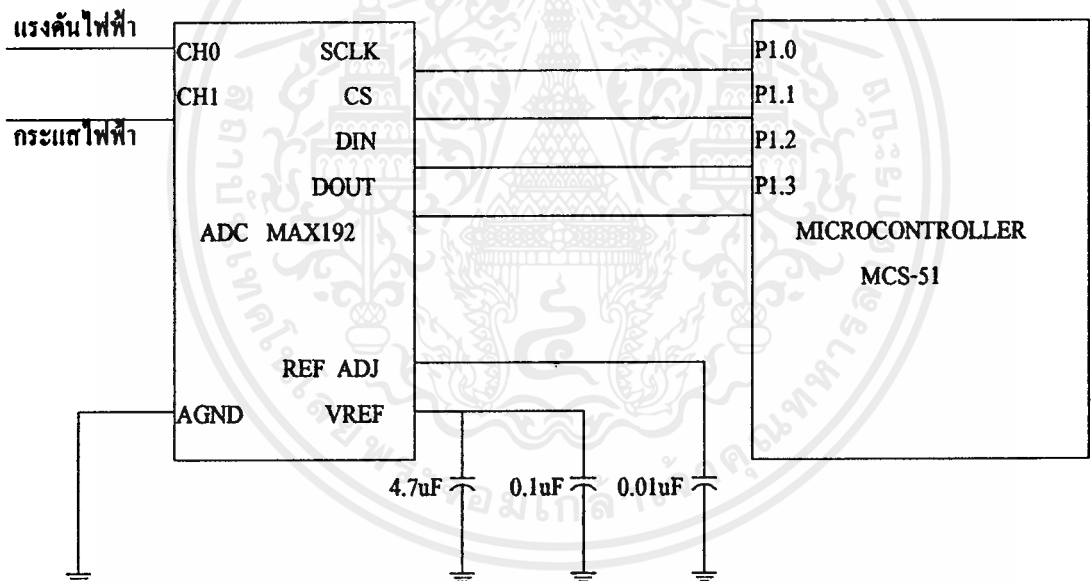
DOUT : เป็นข้อมูลที่ได้รับการแปลงสัญญาณ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับไปประมวลผลได้



รูปภาพ 37 วงจรแปลงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า



รูปภาพ 38 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 8 โวลต์



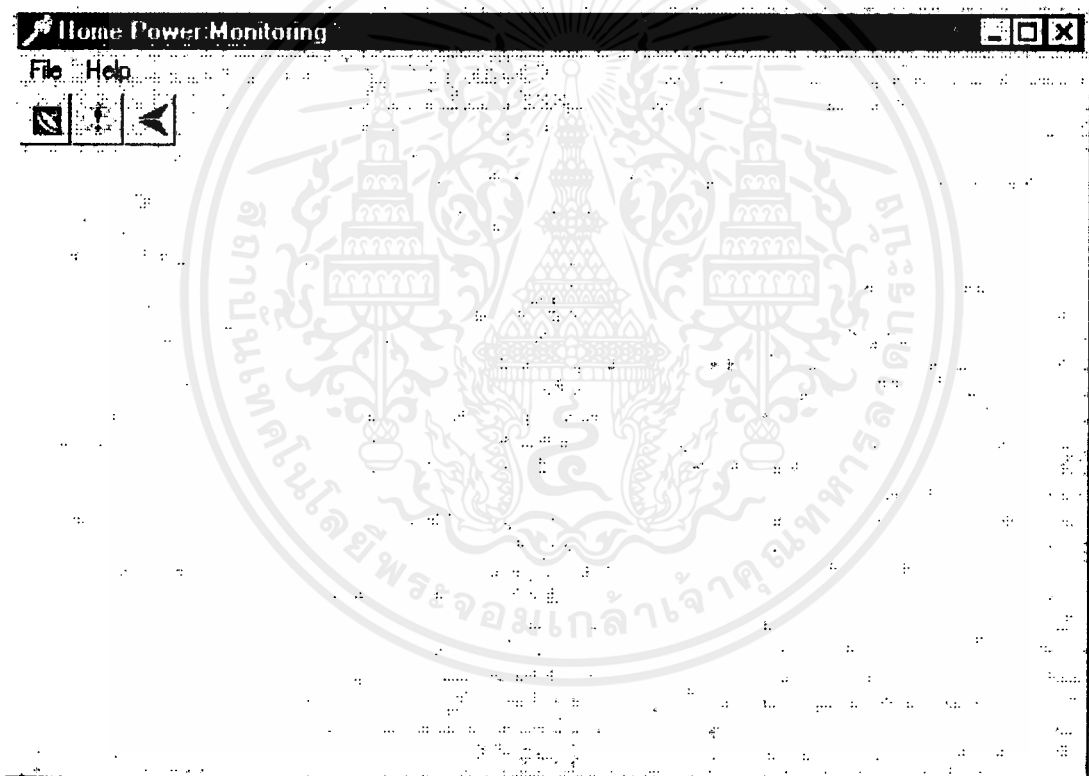
รูปภาพ 39 วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ชุดแสดงผลทางคอมพิวเตอร์

ใช้โปรแกรม Borland Delphi 3.0 ในการติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ และ Home Power Monitoring โดยการเชื่อมโยงกับภาษาแอสเซมบลี เพื่อนำเอาการอินเทอร์เฟซของไบออสมาใช้งาน ในการสื่อสารผ่านพอร์ต RS232 แล้วทำการเชื่อมโยงกับ Microsoft Excel เพื่อนำค่าที่รับมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้า, ตัวประกอบกำลัง และกิโลวัตต์ชั่วโมงมาจัดเก็บไว้ในตารางฐานข้อมูลแล้วนำข้อมูลเหล่านั้นมาสร้างเป็นกราฟ เพื่อแสดงให้เห็นพฤติกรรมการใช้พลังงานพร้อมทั้งรับค่าวิเคราะห์เกิดแสดงสภาวะการทำงานของภาระไฟฟ้ามาแสดงเป็นกราฟให้ทราบว่ามึพฤติกรรมการทำงานเป็นอย่างไร

สำหรับลักษณะของโปรแกรมเป็นดังรูปภาพ 40



รูปภาพ 40 ลักษณะหน้าต่างของโปรแกรมที่ใช้ติดต่อ

ในกรณีที่ต้องการรับข้อมูลใหม่ เมื่อเปิดโปรแกรมหลักขึ้นมา ให้กดที่ Speed button ด้านซ้ายมือ ซึ่งจะมีข้อความปรากฏขึ้นเมื่อลาก mouse ลอยอยู่ข้างบนว่า New Transfer เมื่อกดที่ speed button นี้แล้ว การรับส่งข้อมูลก็จะกระทำงานเสร็จเรียบร้อย และจะมี Microsoft Excel ปรากฏขึ้นมาพร้อมกับข้อมูลที่รับมาจาก Home Power Monitoring

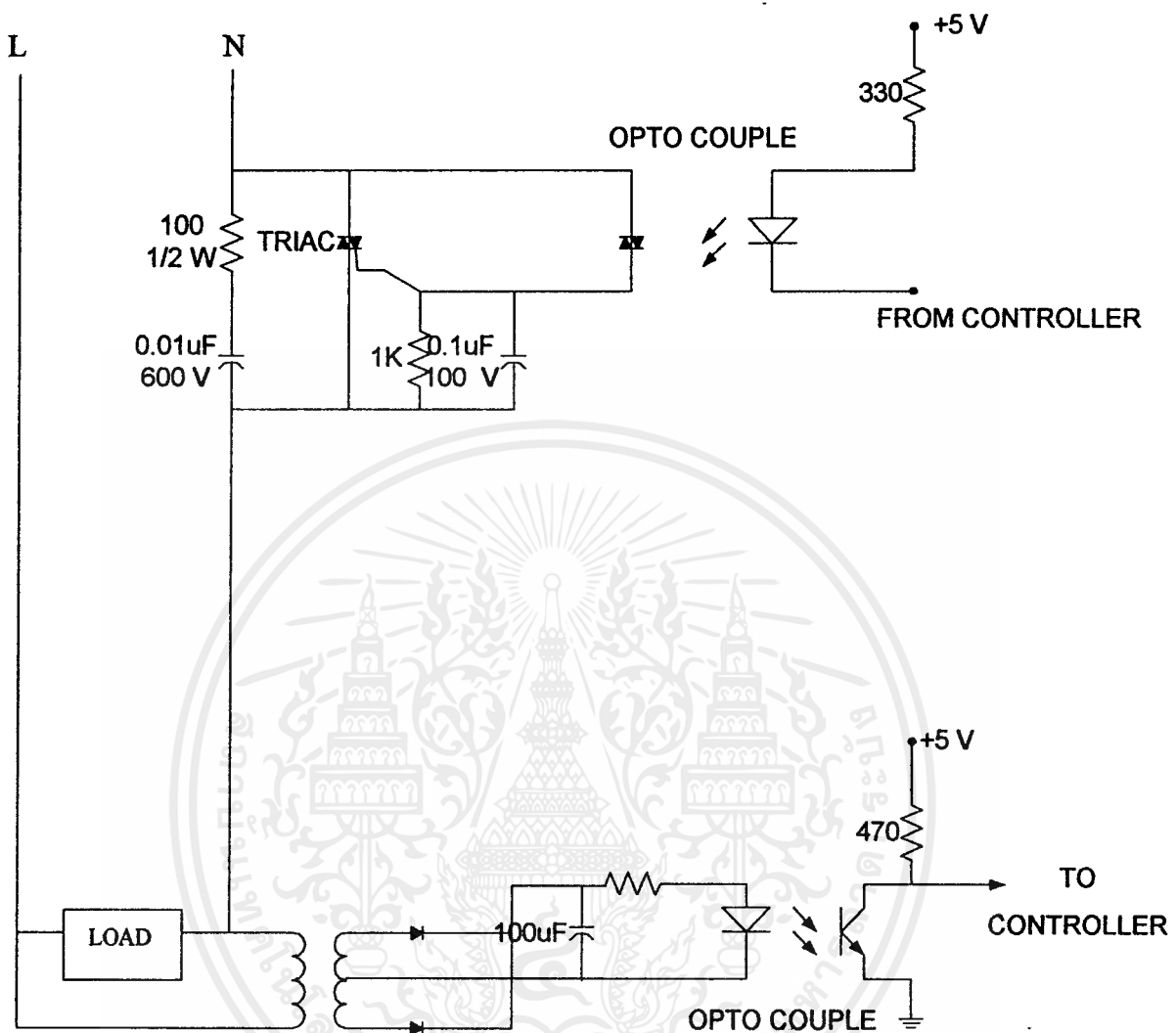
ถ้าต้องการส่งข้อมูลเพื่อควบคุมโหลด ให้กดที่ speed button ด้านขวา จะปรากฏ edit box ให้เติมข้อมูล โดยข้อมูลที่เติมจะเป็นกำลังไฟฟ้า (kW) แล้วทำการยืนยันว่าต้องการค่าตามที่ใส่

3.1.4 ชุดควบคุมและรับค่าสถานะของภาระไฟฟ้า

จากรูปภาพ 41 จะมีวงจรับค่าสถานะของภาระไฟฟ้าแล้วส่งค่าไปที่ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วจึงส่งค่าไปแสดงผลทางคอมพิวเตอร์ การทำงานของวงจรเมื่อภาระไฟฟ้าทำงานจะมีแรงดันจ่ายให้กับหม้อแปลงทำให้ออปโตคัปเปอร์ทำงานส่งค่าลอจิก 1 หรือลอจิก 0 เข้าไมโครคอนโทรลเลอร์

จากรูปภาพ 41 จะมีวงจรควบคุมภาระไฟฟ้าโดยรับค่าจากชุดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อเปิดปิดภาระไฟฟ้าที่ค้อยู่ในวงจร การทำงานของวงจรเมื่อออปโตคัปเปอร์ทำงานรับค่าลอจิก 0 จะทำให้ออปโตคัปเปอร์ทำงานจึงส่งกระแสกระตุ้นขาเกตของไครแอกจึงทำให้ไครแอกทำงานต่อไฟฟ้า 220 โวลต์จ่ายให้กับภาระไฟฟ้าที่ต้องการ





รูปภาพ 41 วงจรชุดควบคุมและรับค่าสถานะของภาระไฟฟ้า

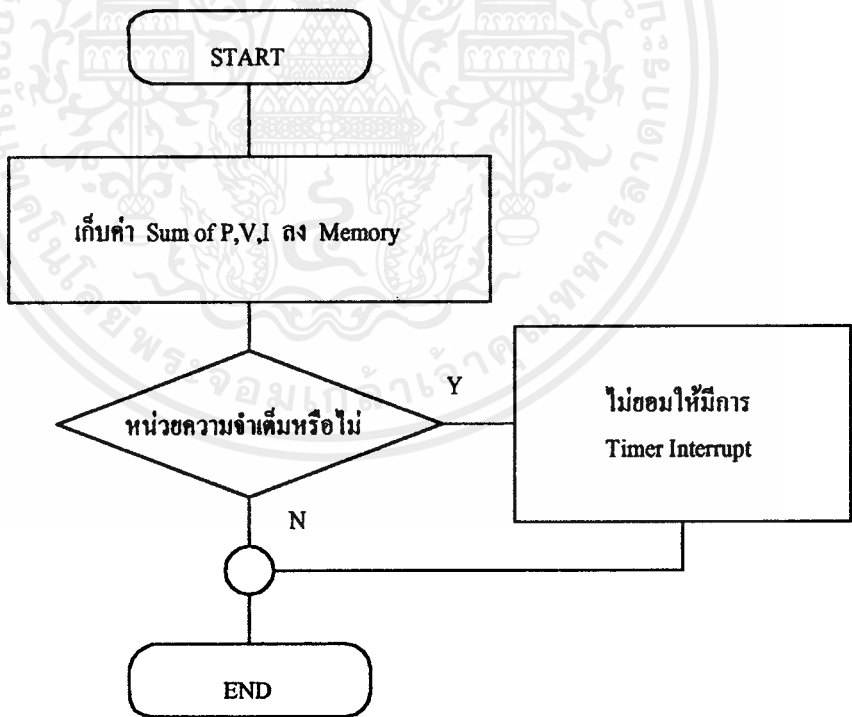
3.2 การคำนวณ

เมื่อรับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลจะนำค่าเหล่านี้มาคำนวณแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผล (V_{rms}), กระแสไฟฟ้าประสิทธิผล (I_{rms}) และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (P_{av}) โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

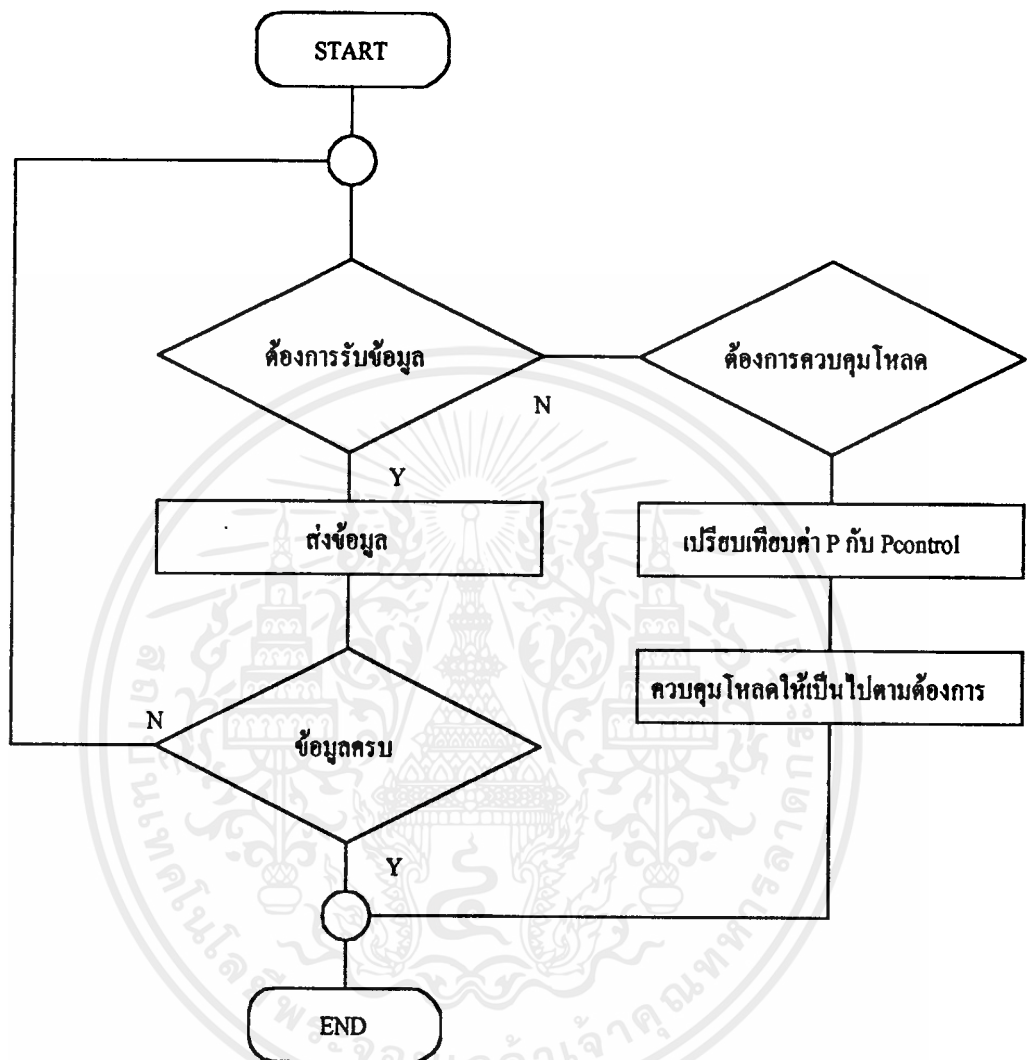
$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^{1024} v_n^2} \quad (64)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^{1024} i_n^2} \quad (65)$$

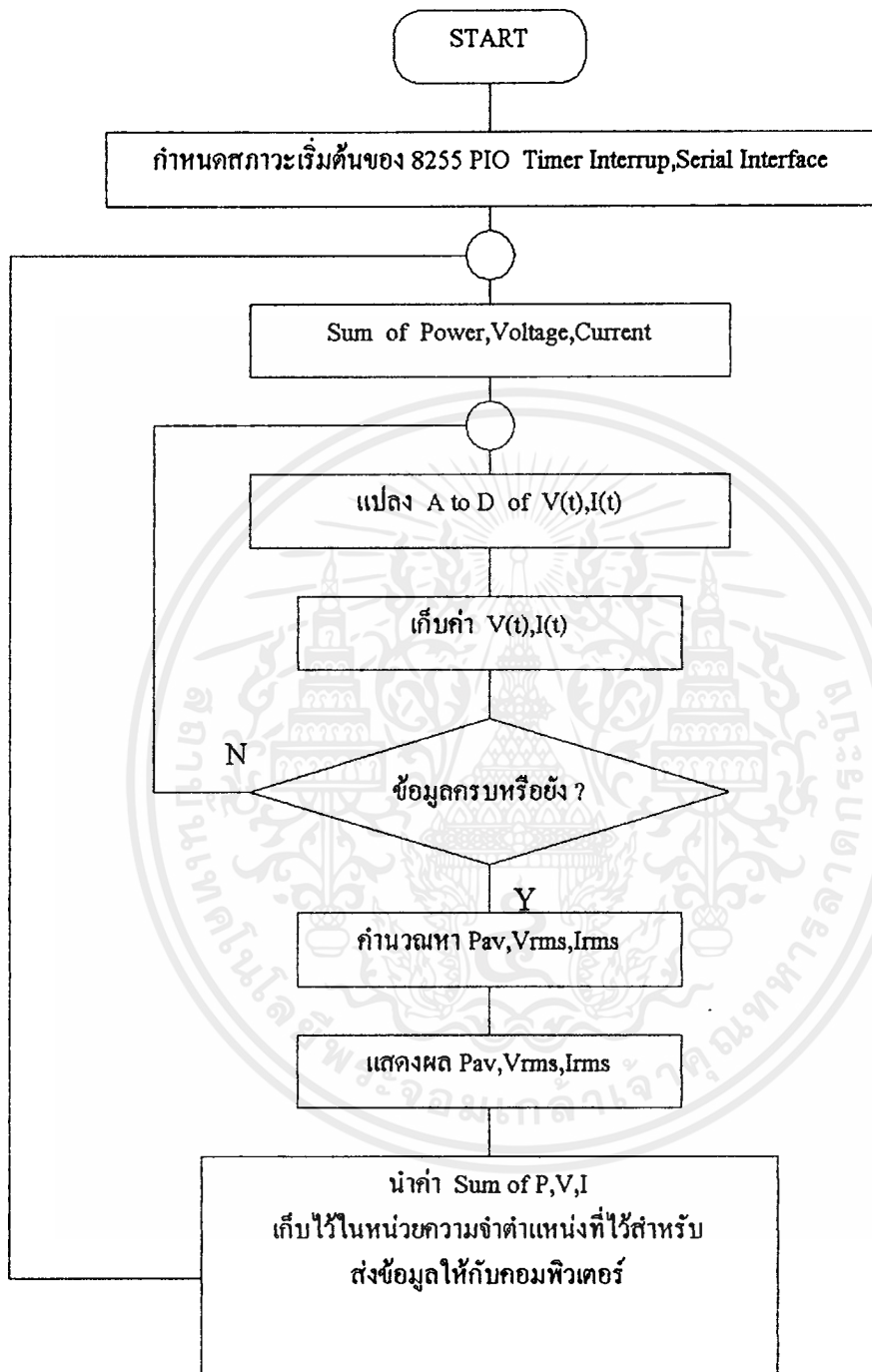
$$P_{av} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^{1024} v_n \times i_n \quad (66)$$



รูปภาพ 42 Timer Interrupt



รูปภาพ 43 Serial Interface



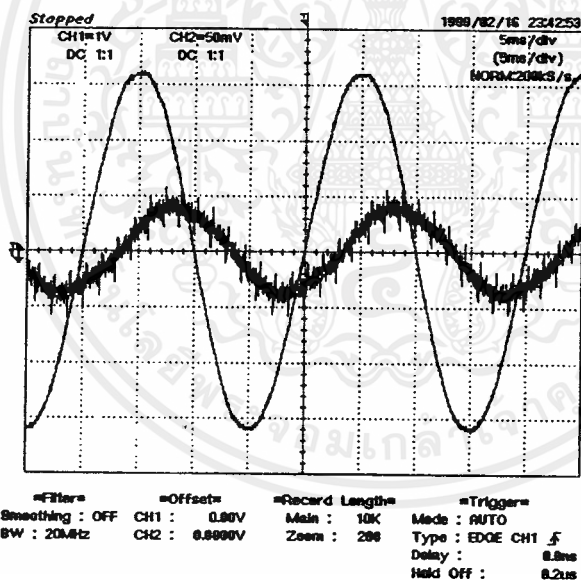
รูปภาพ 44 ไคอะแกรมการทำงาน

บทที่ 4

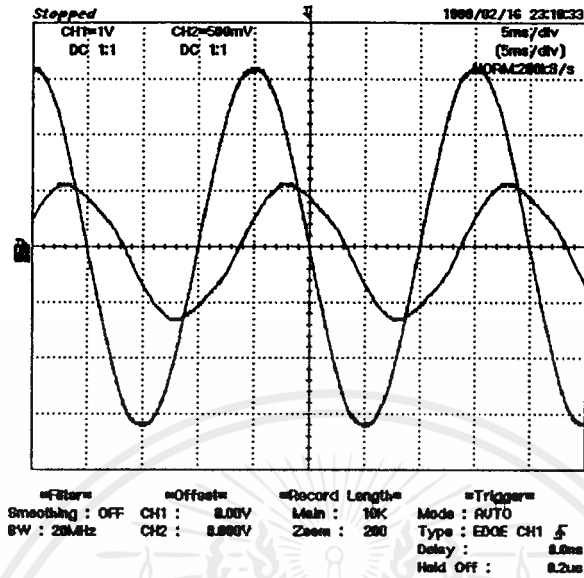
การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลอง Home Power Monitoring

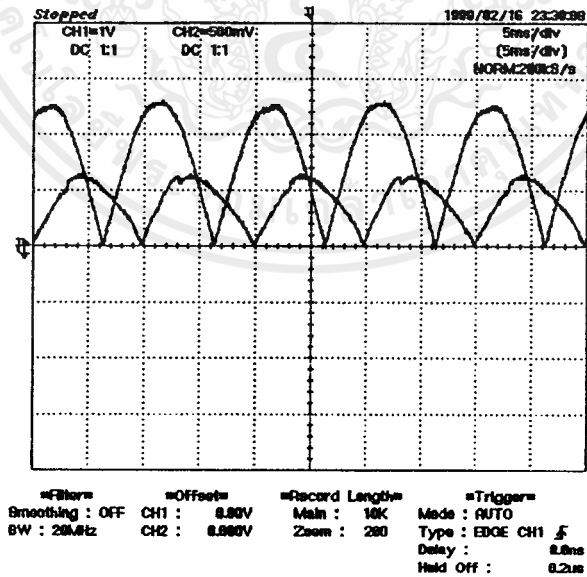
ป้อนภาระไฟฟ้าเป็นพัดลมที่มีพิกัดมอเตอร์ 1/4 Hp 220 V 2.8 A จำนวน 2 ตัวใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย ปรับอัตราขยายของวงจรมอดูสัญญาณกลับเฟส ให้อัตราขยายแรงดันมีค่า 1/1.25 เท่าและอัตราขยายกระแสมีค่า 16 เท่า จากนั้นวัดสัญญาณที่วงจรเรียงกระแสสัญญาณขนาดเล็กทำการปรับ offset ของวงจรมอดูสัญญาณกลับเฟสทั้งแรงดันและกระแสเพื่อให้ขนาดของช่วงที่ได้รับการเรียงกระแสและช่วงที่ไม่ได้รับการเรียงกระแสมีค่าเท่ากันหลังจากนั้นปิดเครื่อง ซึ่งสัญญาณที่จุดต่าง ๆ จะมีลักษณะดังรูปภาพที่ 45 ถึงรูปภาพที่ 52



รูปภาพ 45 สัญญาณเอาต์พุตจาก CT และ PT

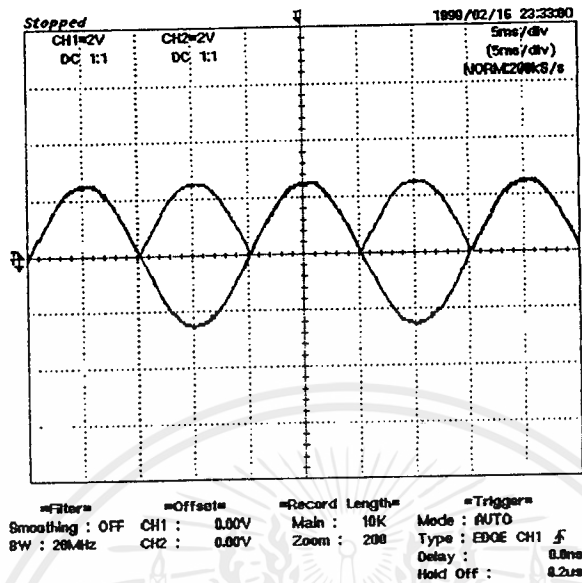


รูปภาพ 46 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณกลับเฟสของแรงดันและกระแส

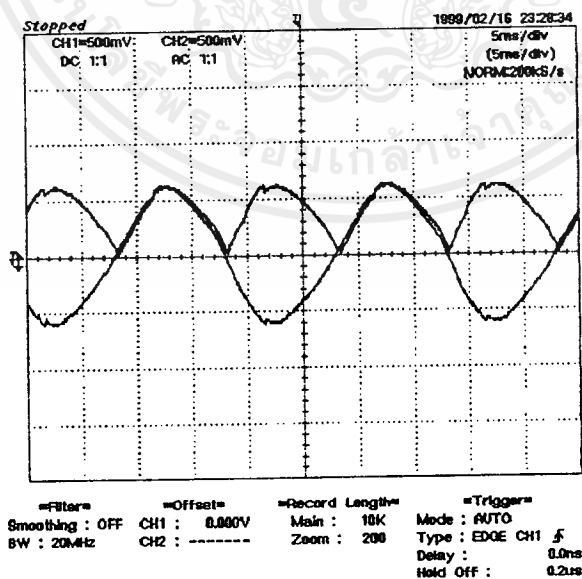


รูปภาพ 47 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรเรียงกระแสของแรงดันและกระแส

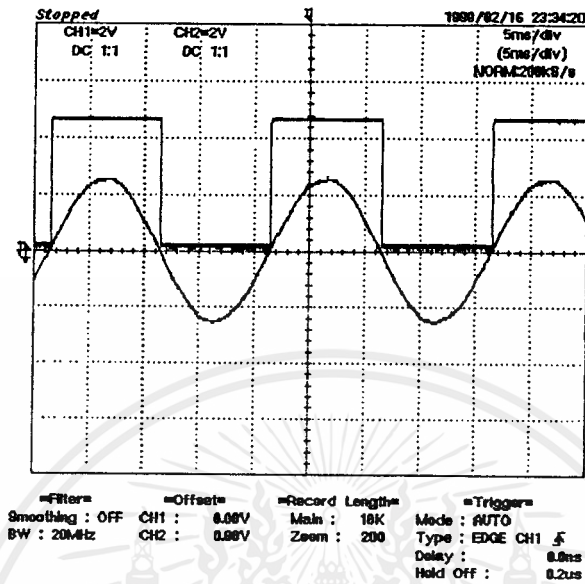
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



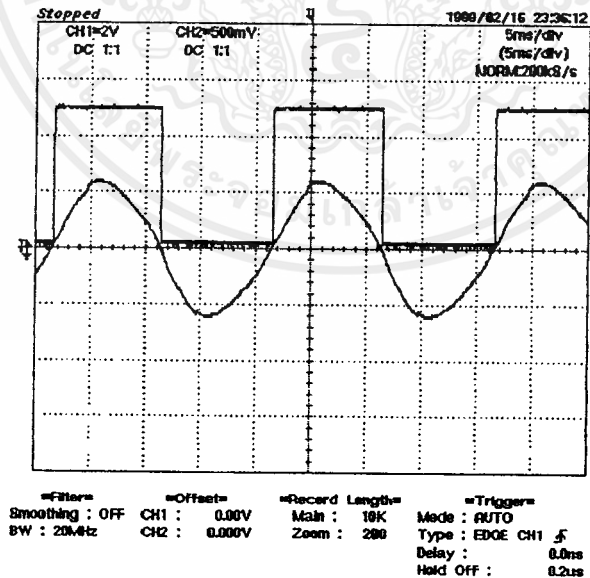
รูปภาพ 48 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรเรียงกระแสและเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณกลับเฟสของแรงดัน



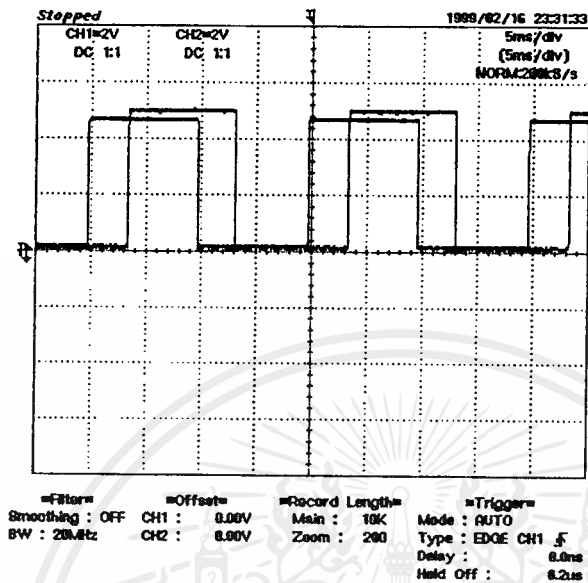
รูปภาพ 49 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรเรียงกระแสและเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณกลับเฟสของกระแส



รูปภาพ 50 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณกลับเฟสและวงจรเปรียบเทียบของแรงดัน



รูปภาพ 51 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณกลับเฟสและวงจรเปรียบเทียบของกระแส



รูปภาพ 52 สัญญาณจากเอาต์พุตจากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณของกระแสและแรงดัน

จากนั้นทำการติดตั้งไอซี Analog to Digital และเชื่อมต่อเข้ากับระบบประมวลผล ทำการปรับเทียบค่าที่อ่านได้จาก โวลต์มิเตอร์ แอมป์มิเตอร์ และ วัตต์มิเตอร์ กับค่าจาก Home Power Monitoring ถ้าแรงดันไม่เท่ากันให้ปรับอัตราขยายของแรงดัน ถ้ากระแสไม่เท่ากันให้ปรับที่อัตราขยายของกระแสแต่ถ้ากำลังไม่เท่าให้ทำการปิดเครื่อง ทำการเปลี่ยนตำแหน่งเริ่มต้นในการนำค่ากระแสออกมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าแล้วทำการปรับเทียบใหม่ ทำการทดสอบเปลี่ยนตำแหน่งหน่วยความจำจนกระทั่งได้ค่าตามต้องการ นั้นหมายความว่า การสอบเทียบจะต้องทำก่อนที่จะนำโปรแกรมบันทึกลงในหน่วยความจำโปรแกรมจริง ๆ ซึ่งโครงการนี้ใช้ RAM ในระหว่างการทดลอง เพราะฉะนั้นการแก้ไขโปรแกรมจึงทำได้ง่าย

การทดลองต่อไปจะเป็นการทดสอบการใช้งานจริงโดยทำการต่อ Home Power Monitoring เข้ากับโหลดในสถานที่ ที่ต้องการทดสอบ ซึ่งในการทดลองนี้จะเป็นการจำลองสถานการณ์ โดยที่เป้าหมายของโครงการนี้ต้องการเก็บข้อมูลเป็นเวลา 15 วัน โดยเก็บข้อมูลทุก ๆ 1 นาที โดยภายในการทดลองจะใช้ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลทุก ๆ 10 วินาที

เมื่อ Home Power Monitoring ทำงานเสร็จเรียบร้อยแล้ว เราก็สามารถนำข้อมูลที่เก็บไว้ในหน่วยความจำออกมาวิเคราะห์ โดยสื่อสารผ่านพอร์ต RS232 ของคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรมที่เขียนขึ้นสำหรับใช้สื่อสารกับ Home Power Monitoring ซึ่งการใช้งานโปรแกรมได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 โดยข้อมูลจาก Home Power Monitoring จะถูกส่งให้กับโปรแกรม Microsoft Excel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลอง

ข้อมูลที่ Home Power Monitoring ส่งให้กับคอมพิวเตอร์ จะแสดงค่าอยู่ในเอกสารของ Microsoft Excel โดยจะแสดงเป็นค่าของแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพ, กระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ, กำลังไฟฟ้า, ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและกิโลวัตต์ชั่วโมงซึ่งแสดงดังต่อไปนี้

จากข้อมูลที่ได้เราสามารถที่จะวิเคราะห์คุณลักษณะการใช้ไฟฟ้าของสถานที่แห่งนี้ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า

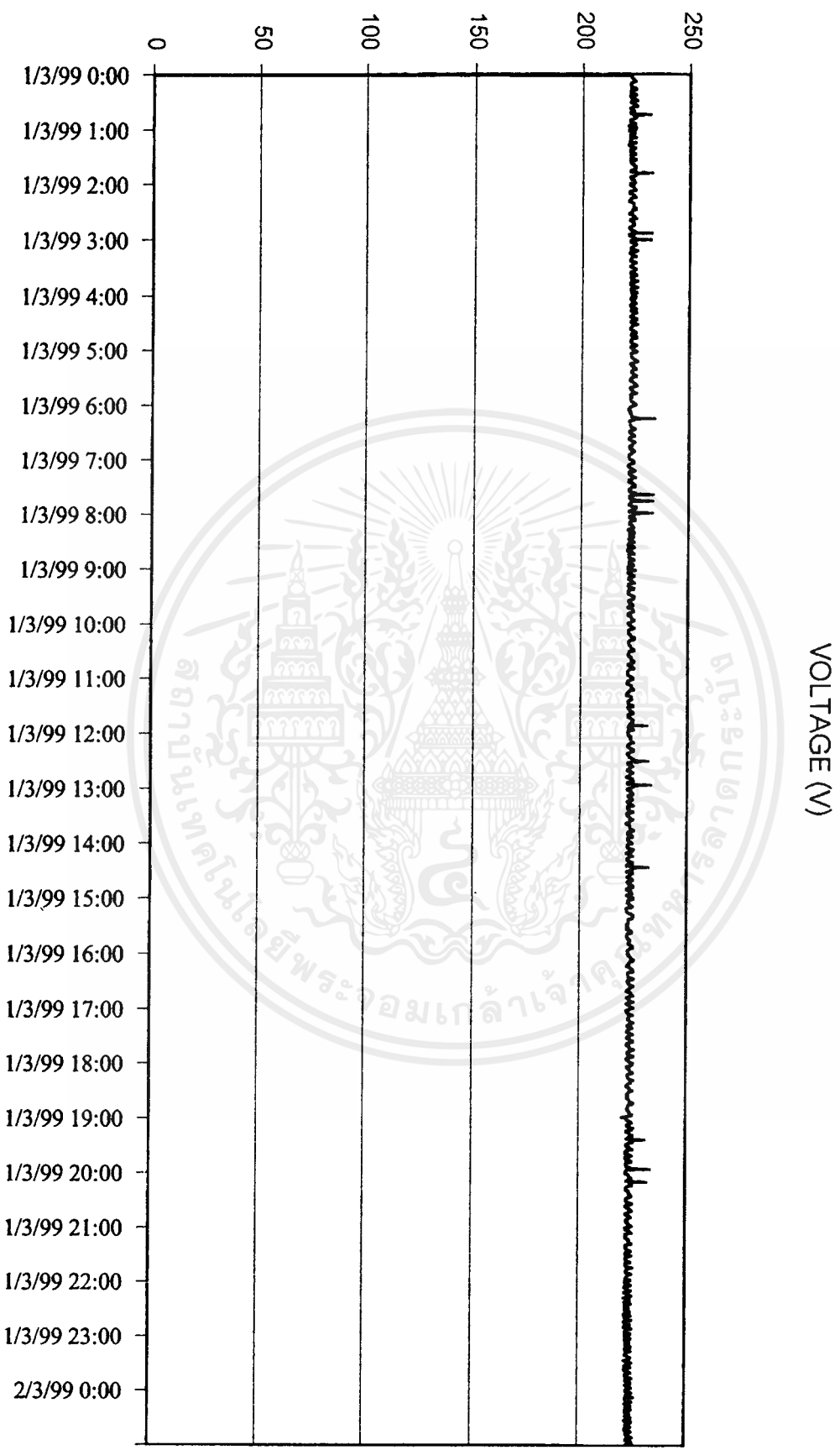
นอกจากนี้ เรายังสามารถควบคุมการใช้กำลังไฟฟ้า ให้อยู่ภายในค่าที่ต้องการได้ โดยส่งข้อมูลกำลังไฟฟ้าให้กับ Home Power Monitoring



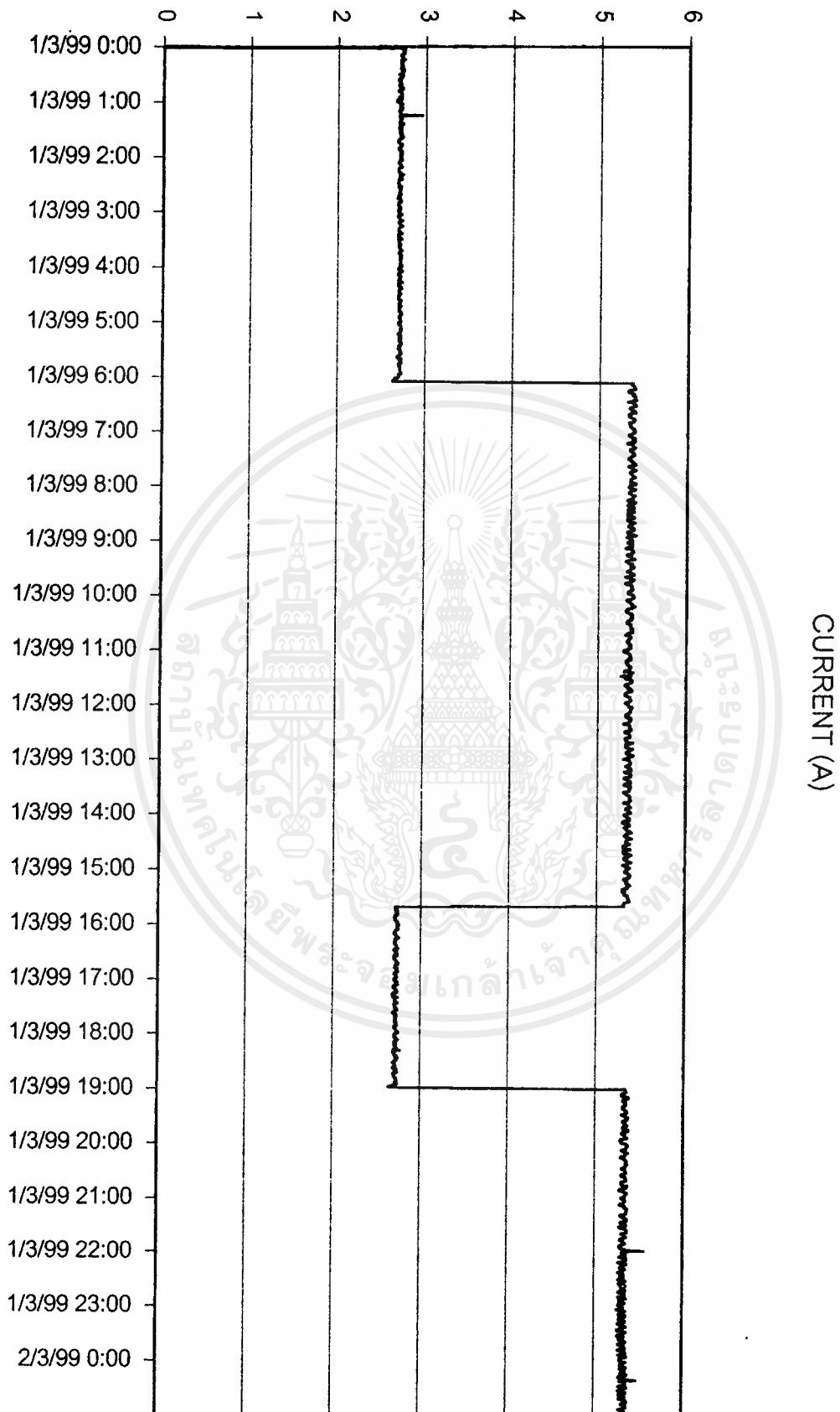
| TIME | VOLTAGE(V) | CURRENT(A) | POWER(kW) | PF | kWhr |
|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|----------|
| 1/3/99 0:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1/3/99 0:01 | 222.6270238 | 2.745137747 | 0.233608496 | 0.382249 | 0.003893 |
| 1/3/99 0:02 | 222.5554267 | 2.755059267 | 0.239856348 | 0.391185 | 0.007891 |
| 1/3/99 0:03 | 222.7908579 | 2.741763233 | 0.252430859 | 0.413252 | 0.012098 |
| 1/3/99 0:04 | 223.5494879 | 2.7513562 | 0.263657129 | 0.428666 | 0.016493 |
| 1/3/99 0:05 | 223.7049585 | 2.729518902 | 0.24484707 | 0.40099 | 0.020573 |
| 1/3/99 0:06 | 223.7049585 | 2.729518902 | 0.24484707 | 0.40099 | 0.024654 |
| 1/3/99 0:07 | 224.5790175 | 2.751618842 | 0.26716543 | 0.432337 | 0.029107 |
| 1/3/99 0:08 | 223.284649 | 2.714767198 | 0.24047041 | 0.393185 | 0.033115 |
| 1/3/99 0:09 | 222.4784312 | 2.710951459 | 0.229309082 | 0.3802 | 0.036937 |
| 1/3/99 0:10 | 222.2240597 | 2.734858886 | 0.233730273 | 0.384582 | 0.040832 |
| 1/3/99 0:11 | 222.3545061 | 2.736814983 | 0.239337305 | 0.393296 | 0.044821 |
| 1/3/99 0:12 | 222.3545061 | 2.736814983 | 0.239337305 | 0.393296 | 0.04881 |
| 1/3/99 0:13 | 222.6809455 | 2.754931658 | 0.255581934 | 0.416616 | 0.05307 |
| 1/3/99 0:14 | 223.8934029 | 2.711153179 | 0.247929272 | 0.408444 | 0.057202 |
| 1/3/99 0:15 | 224.8762979 | 2.734773185 | 0.265520313 | 0.43175 | 0.061627 |
| 1/3/99 0:16 | 224.735344 | 2.711297256 | 0.239595117 | 0.393214 | 0.06562 |
| 1/3/99 0:17 | 222.8716162 | 2.711470139 | 0.237337012 | 0.392741 | 0.069576 |
| 1/3/99 0:18 | 222.2656492 | 2.730828057 | 0.237016699 | 0.390492 | 0.073526 |
| 1/3/99 0:19 | 222.2656492 | 2.730828057 | 0.237016699 | 0.390492 | 0.077477 |
| 1/3/99 0:20 | 222.7771481 | 2.716335134 | 0.247816504 | 0.409521 | 0.081607 |
| 1/3/99 0:21 | 224.5304927 | 2.731843471 | 0.268564746 | 0.437842 | 0.086083 |
| 1/3/99 0:22 | 224.9930761 | 2.708385416 | 0.24195166 | 0.397053 | 0.090115 |
| 1/3/99 0:23 | 221.7466624 | 2.715745466 | 0.229810645 | 0.381614 | 0.093946 |
| 1/3/99 0:24 | 222.5550395 | 2.744995446 | 0.249637939 | 0.408631 | 0.098106 |

ตารางที่ 6 แสดงตัวอย่างข้อมูลค่าทางไฟฟ้าจากการทดลอง

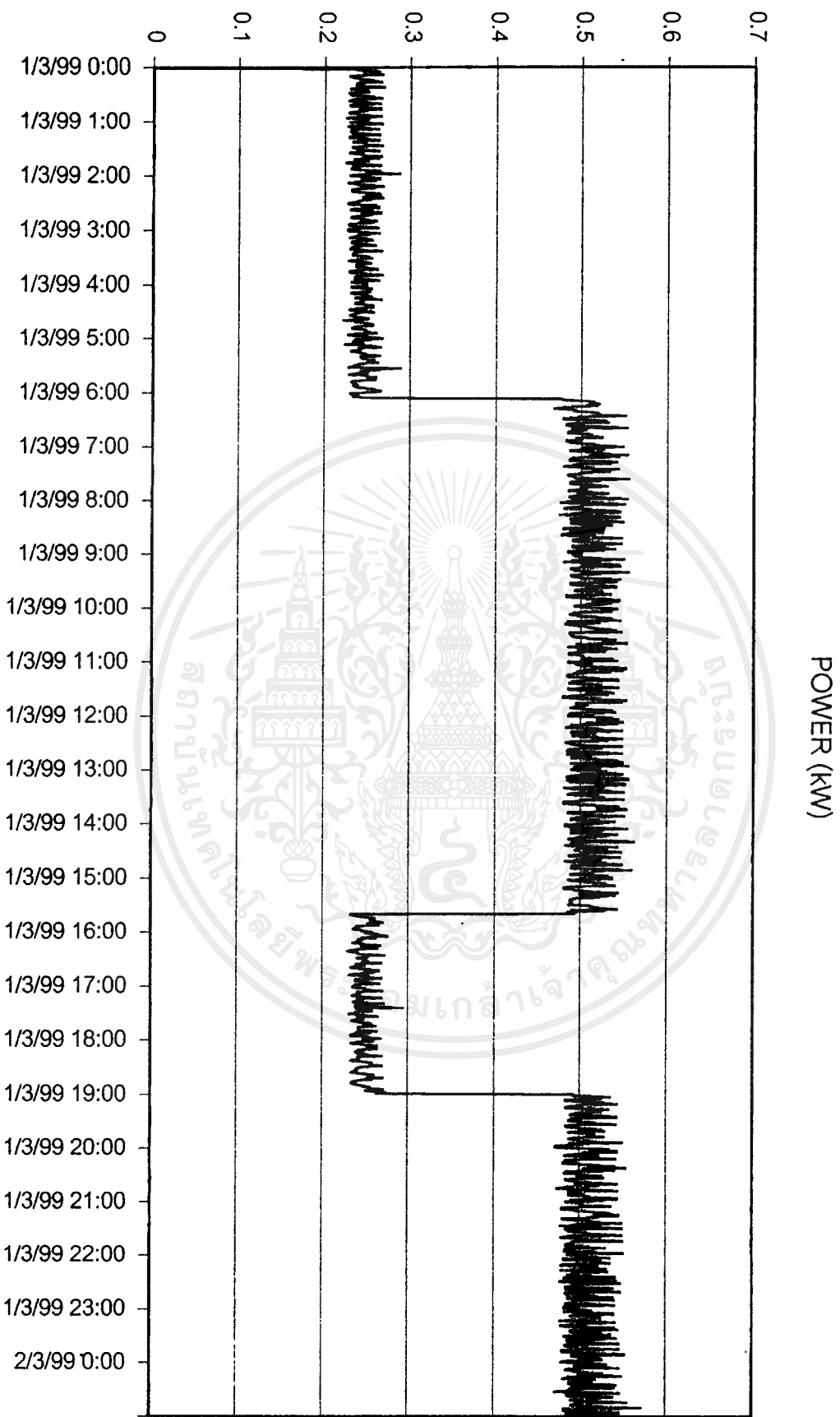
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



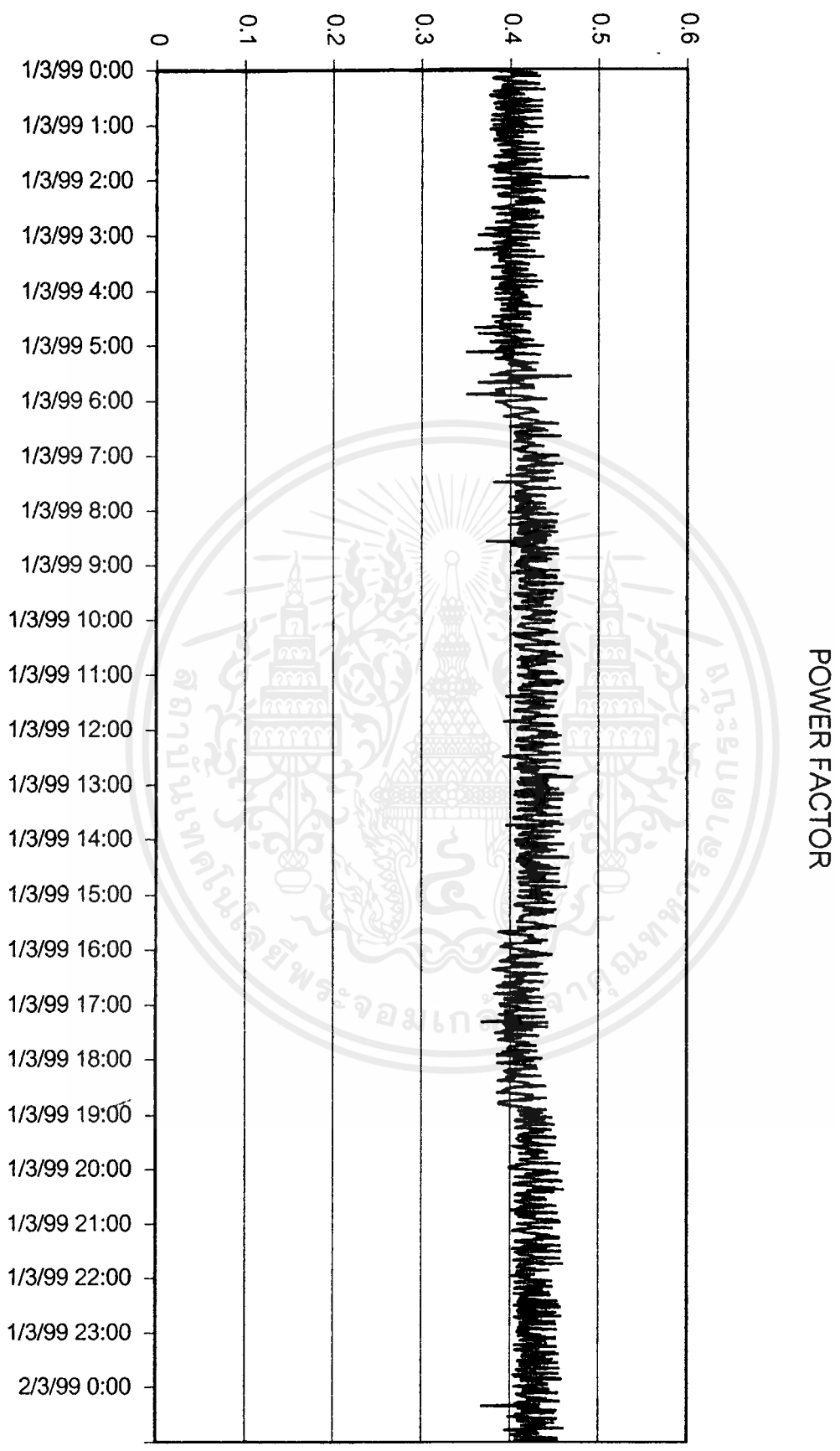
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



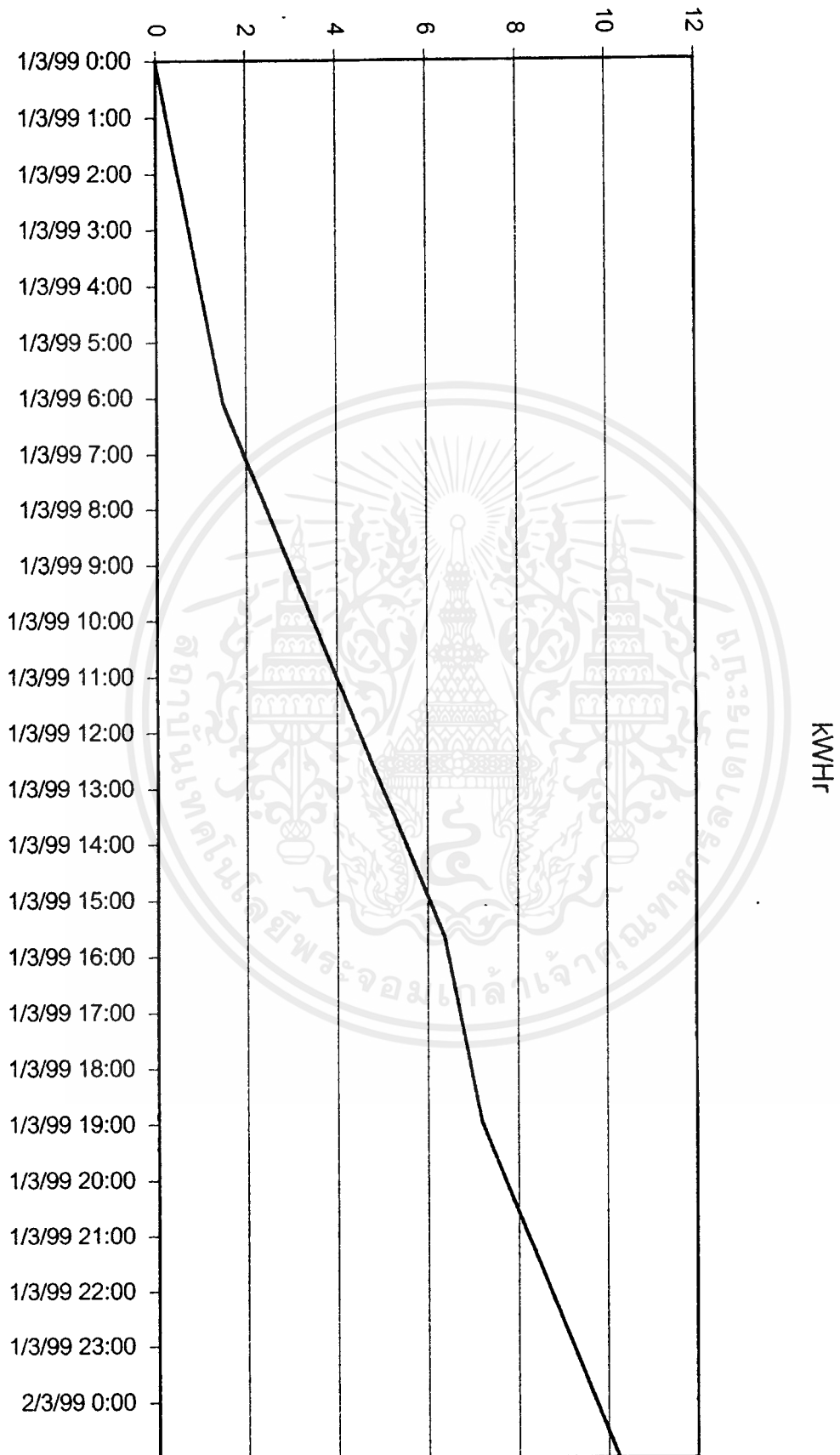
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การวิจารณ์และบทสรุป

5.1 การวิจารณ์

โครงการเครื่องแสดงค่ากำลังไฟฟ้าภายในบ้านมีเป้าหมายเพื่อที่จะหาแนวทางในการบริหารกำลังไฟฟ้าภายในบ้าน เพื่อที่จะทำให้ค่าใช้จ่ายในเรื่องของค่าไฟฟ้าอยู่ในระดับที่เหมาะสม ซึ่งเราจำเป็นต้องทราบข้อมูลการใช้กำลังไฟฟ้า นั่นคือ กระแสไฟฟ้า, แรงดันและกำลังไฟฟ้า ซึ่งมีหลายแนวทางในการวัดสัญญาณเหล่านี้ออกมาแต่โครงการนี้ผู้จัดทำเลือกที่จะใช้แนวทางในการทำโดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐาน นั่นคือเราหาค่าต่างๆ ได้ดังนี้

แรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพ

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} v^2(t) dt}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2}$$

กระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} i^2(t) dt}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N i_i^2}$$

และกำลังไฟฟ้าหาได้จาก

$$P = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} v(t)i(t) dt$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i i_i$$

ในที่นี้ใช้จำนวนค่าในการสุ่มข้อมูลจำนวน 1,024 ค่า จึงแทน N ด้วย 1,024

จากสมการการหาค่าแรงดัน, กระแสและกำลังไฟฟ้า เราจะพบว่าความถูกต้องของค่าที่คำนวณจะแปรผันโดยตรงกับจำนวนครั้งของข้อมูลที่นำมาใช้ในการคำนวณซึ่งจำนวนครั้งของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลที่สามารถนำมาคำนวณได้ก็แปรผันโดยตรงกับอุปกรณ์ประมวลผลที่ใช้ในที่นี้คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์และไอซีแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับโครงการนี้ใช้ขนาด 8 บิตใช้สัญญาณนาฬิกาในการทำงาน 11.0952 MHz โครงการนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของ A/D ดังนั้นความสามารถในการสุ่มสัญญาณเข้ามาประมวลผลจึงขึ้นอยู่กับความเร็วของไมโครคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้ภายในโปรแกรมยังประกอบด้วยการกระทำทางคณิตศาสตร์ที่มากกว่า 8 บิตดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องเสียเวลามากกว่าปกติ ดังนั้นสัญญาณในช่วงที่มีการคำนวณเกิดขึ้นจึงไม่สามารถนำมาเข้ามาคำนวณได้และอีกจุดหนึ่งที่ควรพิจารณาก็คือสัญญาณดิจิทัลจะมีลักษณะเป็น Step ดังนั้นจึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงความผิดพลาดจากจุดนี้ได้เลย

สำหรับโครงการนี้ใช้ ADC ขนาด 10 บิตมีแรงดันอ้างอิง 4.096 โวลต์ดังนั้นสัญญาณจะเพิ่มขึ้น 1 บิตทุกครั้งที่สัญญาณอนาลอกมีค่าเพิ่มขึ้น 4 มิลลิโวลต์เช่นสัญญาณอินพุต 4.096 โวลต์จะให้สัญญาณดิจิทัลและในทำนองเดียวกันสัญญาณ 4.092 โวลต์จะให้สัญญาณดิจิทัล 3FE นั่นก็หมายความว่าสัญญาณระหว่าง 4.096 โวลต์กับ 4.092 โวลต์จะเป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น ถ้าต้องการความถูกต้องในการแปลงสัญญาณก็ต้องเลือกไอซีที่มีจำนวนความละเอียดเพิ่มขึ้นอีก

5.2 สรุป

การทำงานของเครื่องแสดงค่ากำลังไฟฟ้าภายในบ้าน จะเห็นว่าจะมีการแสดงผลแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพ กระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ และ กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย ผ่านทางจอแสดงผล ว่าขณะนั้นมีค่าเท่าใด พร้อมกับเก็บข้อมูลเพื่อนำไปเป็นแนวทางในการบริหารการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยค่าที่แสดงที่จอแสดงผลจะได้มาจาก การประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยสัญญาณที่จะนำเข้ามาประมวลผลจะเริ่มจาก สัญญาณกระแสและแรงดันถูกนำเข้ามาผ่านหม้อแปลงเครื่องวัดแล้วนำมาผ่านวงจรขยายเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมที่จะนำไปประมวลผล เมื่อสัญญาณมีขนาดที่เหมาะสมแล้ว การที่จะนำสัญญาณนี้ไปประมวลผลทันทีนั้นเป็นการไม่เหมาะสม เพราะมีความยุ่งยากทั้งส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ เนื่องจากสัญญาณมีทั้งช่วงบวกและช่วงลบ ดังนั้นเราจึงนำสัญญาณนี้ไปผ่านวงจรเรียงกระแส สัญญาณที่ได้จึงมีเฉพาะช่วงบวกเท่านั้น สัญญาณที่ได้นี้ไม่สามารถนำไปประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ทันที ดังนั้นจะต้องนำสัญญาณนี้ไปแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยใช้ไอซีสำหรับแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล สัญญาณดิจิทัลที่ได้สามารถส่งให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการประมวลผลได้ ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลจะนำไปแสดงผล รวมทั้งบันทึกข้อมูลลงหน่วยความจำ ซึ่งข้อมูลที่เก็บลงในหน่วยความจำนี้เอง ที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการส่งให้กับคอมพิวเตอร์ ส่วนสภาวะการทำงานของโหลด จะพิจารณาจากแรงดันตกคร่อมโหลด โดยการต่อผ่านหม้อแปลงเพื่อทำการไอโซเลท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เลือกใช้ Borland Delphi 3.0 ในการเชื่อมโยงกับภาษาแอสแซมบลี เพื่อนำวิธีการสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรมมาใช้งาน รวมถึงส่งผ่านข้อมูลให้กับ Microsoft Excel และทำการคำนวณค่าตัวประกอบกำลัง และกิโลวัตต์ชั่วโมงพร้อมทั้งแสดงควิต์ไซเคิลของภาระไฟฟ้าแต่ละตัวด้วย

จากข้อมูลที่ได้ เราสามารถนำมาวิเคราะห์ลักษณะการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลานั้น ๆ ซึ่งจะเป็นแนวทางในการบริหารการใช้ไฟฟ้าได้



ภาคผนวก

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์

การใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือระบบคอมพิวเตอร์โดยทั่วไป จะต้องเรียนรู้ถึงองค์ประกอบหลัก ๆ สองส่วน คือ ส่วนของ สถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ และอีกส่วนหนึ่งคือ ชุดคำสั่งหรือโครงสร้างทางซอฟต์แวร์นั่นเอง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ประมวลผลแต่ละเบอร์จะมีลักษณะแตกต่างกัน ในที่นี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 มาใช้งาน

1.1 สถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์

1.1.1 โครงสร้างของ MCS-51

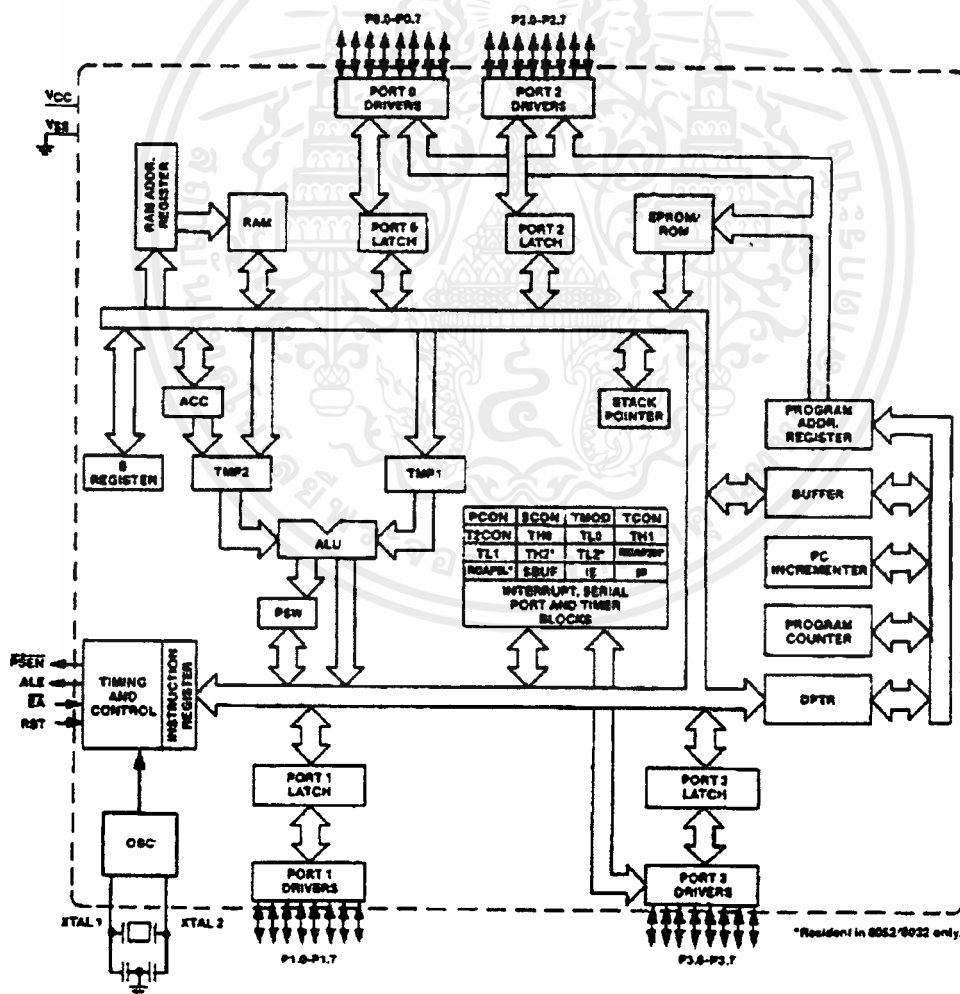
ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 มีด้วยกันหลายเบอร์ขึ้นอยู่กับโครงสร้างภายในของมัน บางเบอร์จะมีหน่วยความจำภายในเป็นแบบ ROM บางเบอร์เป็นแบบ EPROM บางเบอร์มี RAM ภายในเป็น 128 ไบต์ บางเบอร์มี 256 ไบต์ เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดจะศึกษาได้จากคู่มือของมัน โดยตรง และลักษณะของขาต่าง ๆ จะเหมือนกัน คุณสมบัติที่สำคัญของ MSC-51 มีดังนี้

- มีหน่วยความจำ ROM 4K bytes
- มีหน่วยความจำ RAM 128 K bytes
- มีพอร์ต I/O ขนาด 8 บิต 4 พอร์ต
- สามารถอินเทอร์รัพท์ได้ 5 แหล่ง
- มีวงจรถอดสซิลเลเตอร์และวงจรถีบคานาฬิกาบนชิพ
- พอร์ตอนุกรมที่สามารถรับส่งข้อมูลแบบ Full Duplex ความเร็วสูง
- อ้างหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกได้ 64K
- อ้างหน่วยความจำข้อมูลภายนอกได้ 64K
- สามารถประมวลผลที่ละบิตได้
- สามารถอ้างหน่วยความจำได้ 210 ตำแหน่ง
- หนึ่งวัฏจักรคำสั่งกินเวลาประมาณ 1 ไมโครวินาที ขณะทำงานด้วย Clock 12 MHz

ตัวอย่างไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 และลักษณะต่าง ๆ สามารถแสดงได้ในตารางผนวก 1 สำหรับไออะแกรมโครงสร้างภายในแสดงในภาพผนวก 1

| เบอร์ | หน่วยความจำโปรแกรมบนชิพ | หน่วยความจำข้อมูลบนชิพ | TIMERS |
|-------|-------------------------|------------------------|--------|
| 8051 | 4K ROM | 128 bytes | 2 |
| 8031 | - | 128 bytes | 2 |
| 8751 | 4K EPROM | 128 bytes | 2 |
| 8052 | 8K ROM | 256 bytes | 3 |
| 8032 | - | 256 bytes | 3 |
| 8752 | 8K EPROM | 256 bytes | 3 |

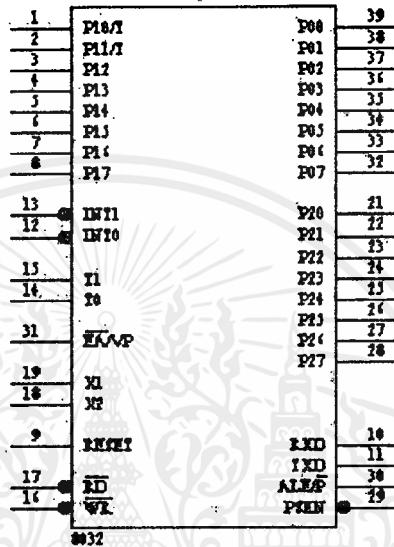
ตารางผนวก 1 แสดงไมโครโปรเซสเซอร์ตระกูล MCS-51 เบอร์ต่าง ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาพผนวก 1 แสดงโครงสร้างภายในของ MCS-51 นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.2 การจัดขาต่าง ๆ ของ MCS-51

ไอซี ไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 โครงสร้าง IC เป็นแบบ DIP มีขาทั้งหมด 40 ขา โดยขาต่าง ๆ จะใช้เป็นขาพอร์ทอินพุต, เอาต์พุต, ขาสัญญาณควบคุม, ขาคำแหน่งหน่วยความจำ และขาสัญญาณภาพผนวก 2



ภาพผนวก 2 แสดงขาต่าง ๆ ของ 8051

ความหมายของขาต่าง ๆ มีดังนี้

1. พอร์ท 0 (Port 0)

พอร์ท 0 ได้แก่ขาที่ 32-39 ของ MCS-51 สามารถใช้อินพุตเอาต์พุตได้นอกจากนี้ในการติดต่อกับหน่วยความจำภายนอกยังใช้ เป็นขา Address Bus และ Data Bus อีกด้วย

2. พอร์ท 1 (Port 1)

พอร์ท 1 ได้แก่ขาที่ 1-8 เป็นพอร์ท 8 บิต สามารถที่ละบิตได้ คือ p1.0,p1.1,...etc

3. พอร์ท 2 (Port 2)

พอร์ท 2 ได้แก่ขาที่ 21-28 จะใช้งาน 2 หน้าที คือใช้เป็นพอร์ท 8 บิตกับใช้เป็นขาแอดเดรส 8 บิต ในการอ้างหน่วยความจำภายนอก

4. พอร์ท 3. (Port 3)

พอร์ท 3 ได้แก่ขาที่ 10-17 จะใช้งานสองหน้าที่คือ เป็นพอร์ทอินพุต และเอาต์พุตและใช้เป็นขาควบคุมต่าง ๆ ดังตารางผนวก 2

| บิต | ชื่อ | หน้าที่พิเศษ |
|------|--------------------------|------------------------------------|
| P3.0 | RXD | ใช้รับข้อมูลทางพอร์ตอนุกรม |
| P3.1 | TXD | ใช้ส่งข้อมูลทางพอร์ตอนุกรม |
| P3.2 | $\overline{\text{INT0}}$ | อินเทอร์รัพท์ภายนอกหมายเลข 9 |
| P3.3 | $\overline{\text{INT1}}$ | อินเทอร์รัพท์ภายนอกหมายเลข 1 |
| P3.4 | To | จับเวลา / นับตัว ตัวที่ 0 |
| P3.5 | T1 | จับเวลา / นับตัว ตัวที่ 1 |
| P3.6 | $\overline{\text{WR}}$ | สัญญาณเขียนข้อมูลหน่วยความจำภายนอก |
| P3.7 | $\overline{\text{RD}}$ | สัญญาณเขียนข้อมูลหน่วยความจำภายใน |

ตารางผนวก 2 แสดงบิต และหน้าที่ต่าง ๆ ของพอร์ท 3

5. $\overline{\text{PSEN}}$ (Program Store Enable)

ขา $\overline{\text{PSEN}}$ เป็นขาส่วนที่ส่งสัญญาณออกคือ ขา 29 ขานี้จะแอกทีฟเมื่อ MCS-51 ต้องอ่าน Code โปรแกรมภายนอก โดยปกติ ถ้าหน่วยความจำภายนอกเป็น EPROM ขา $\overline{\text{PSEN}}$ จะต้องต่อกับขา Output Enable (OE) ของ EPROM

6. ALE (Address Latch Enable)

เนื่องจากพอร์ท 0 สามารถใช้ขาอย่างค้ำแหน่ง และขาข้อมูล MCS-51 จะมีขา ALE ได้แก่ขา 30 ขานี้จะใช้ Multiplex สัญญาณ Address Bus ของ Port 0 ในการใช้งานระบบ MCS-51 นั้น จะต้องมียุกรณ์มาต่อกับ Port 0 ที่ทำหน้าที่ Latch สัญญาณ Address Bus ที่ทำหน้าที่ Port 0 จากนั้นจะส่งสัญญาณ Address Bus ออกมาก่อนทาง Port 0 ไว้เพื่อใช้ Port 0 เป็น Data Bus ต่อไป

7. EA (External Access)

ขา EA ได้แก่ขาที่ 31 ถ้าขานี้เป็นลอจิก "1" จะใช้กับเบอร์ 8051/8052 เพื่อบอกว่าให้อ่านโปรแกรมจากหน่วยควาจำ โปรแกรมภายใน แต่ถ้าเป็นลอจิก "0" จะบอกให้ MCS-51 ทำโปรแกรมโดย อ่านจากหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก (ถ้าขา EA เป็น "0" เสมอ ขา $\overline{\text{PSEN}}$ จะแอกทีฟ) ถ้าหากเป็นเบอร์ 8031 หรือ 8032 ขา EA จะเป็น "0" เสมอ เพราะว่าไม่มีโปรแกรมหน่วยความจำภายใน แต่ถ้าใช้เบอร์ 8051/8052 ซึ่งมีหน่วยความจำโปรแกรมภายในแกรมภายในและให้ขา EA เป็น "0" เสมอซึ่งจะ Disabled ROM ภายในจะอ่านโปรแกรมจาก EPROM ภายนอกแทน

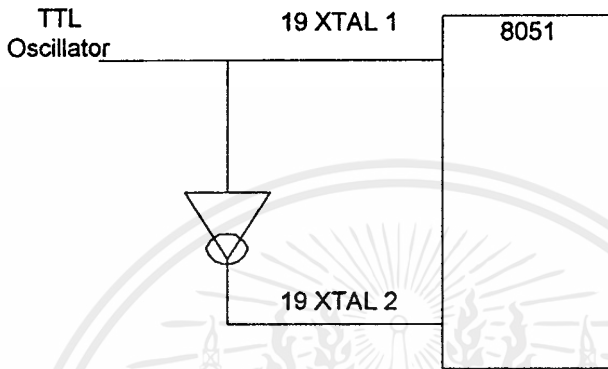
8. RST (Reset)

ขา RST ได้แก่ขา 9 จะใช้ในการรีเซต MCS-51 โดยจะให้ขานี้เป็นลอจิก "1" อย่างน้อย 2

Machine Cycles จึงรีเซตระบบได้

9. ความถี่สัญญาณนาฬิกาบนชิพ (On-chip Oscillator Inputs)

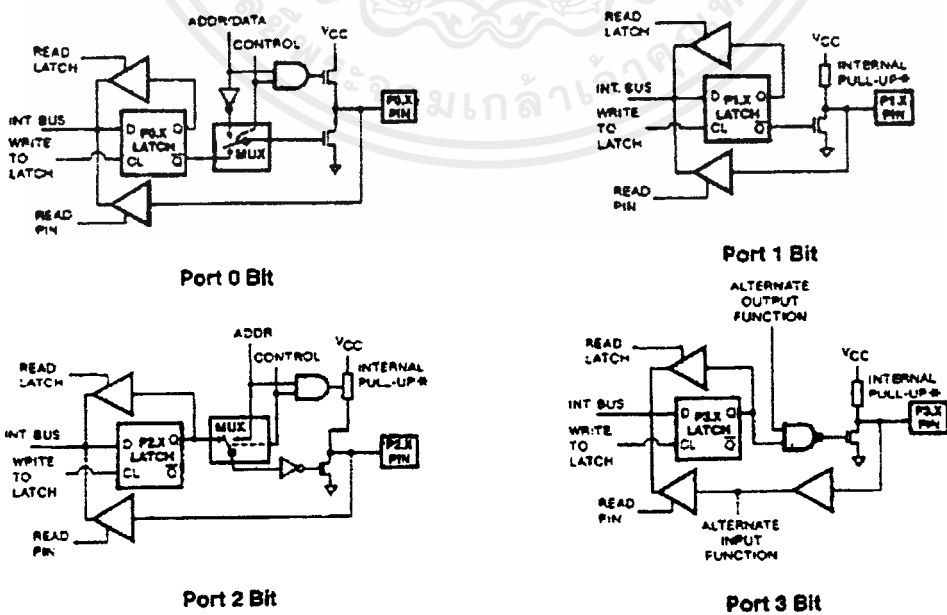
เป็นวงจร Oscillator บนชิพ ได้แก่ขา 18-19 โดยต่อ Crystal เข้ากับขานี้ โดยปกติมักจะใช้ Crystal ความถี่ 12 MHz กับตัวเก็บประจุหรืออาจใช้สัญญาณนาฬิกาจาก TTL Clock Source ต่อกับ XTAL1 และ XTAL2 ดังรูปภาพผนวก 3



ภาพผนวก 3 ขาของ MCS-51 ที่ใช้ต่อกับ XTAL

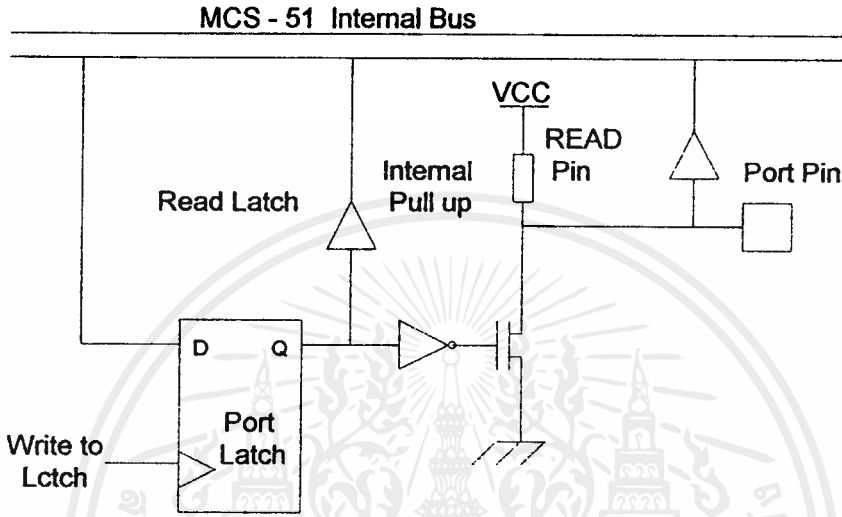
1.1.3 โครงสร้างของพอร์ทอินพุตเอาต์พุต (I/O Port Structure)

ขาของพอร์ทจะแสดงโครงสร้างภายใน ดังภาพผนวก 4 โดยจะมีโครงสร้างเป็น Field-effect Transistor ต่ออยู่กับขาภายนอก และมีความต้านทานต่อ Pull-up อยู่สำหรับพอร์ท 1, 2, 3 แต่ถ้าเป็นพอร์ท 0 จะไม่มีตัวต้านทาน Pull-up ภายใน เพราะต้องใช้เป็นขา Address Bus และ Data Bus



ภาพผนวก 4 โครงสร้างพอร์ท ของ MCS-51

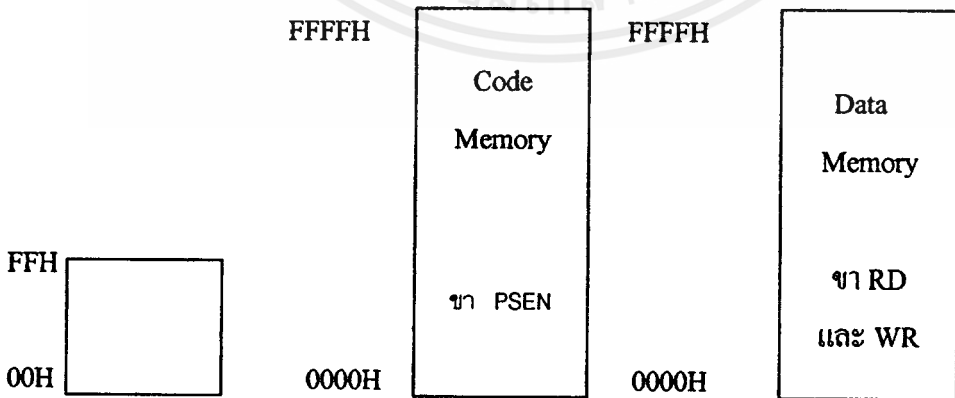
พอร์ทนี้สามารถใช้เป็นอินพุตเอาต์พุตกับอุปกรณ์ภายนอกได้ ในการอ่านข้อมูลจากพอร์ทจะอ่านได้ 2 แบบคือ Read Latch และ Read Pin โดย Read Latch หมายถึงการอ่านข้อมูลที่ถูกลatch เอาไว้ เข้าสู่บัสภายในของ MCS-51 เช่นการทำคำสั่ง CPL P1.5 แต่ถ้าเป็นการ Read Pin จะเป็นการใช้พอร์ทเป็นอินพุต โดยจะอ่านค่าจากขาของไอซีเข้าสู่บัสภายในโดยอ่านค่าแบบ Read Latch และ Read Pin จะมีสัญญาณมาควบคุมที่บัพเฟอร์ดังภาพผนวก 5



ภาพผนวก 5 การต่อพอร์ทเข้ากับระบบบัสภายในของ MCS-51

1.1.4 โครงสร้างหน่วยความจำ

หน่วยความจำสำหรับ MCS - 51 จะมี 2 ชนิดคือ หน่วยความจำที่ใช้เก็บโปรแกรม (ROM) กับหน่วยความจำที่ใช้เก็บข้อมูลในการประมวลผล (RAM) MCS-51 บางเบอร์เช่น 8051, 8052 จะมีหน่วยความจำโปรแกรมภายในชิพ และ MCS-51 ทุกเบอร์สามารถอ้างหน่วยความจำโปรแกรมออกได้มากที่สุด 64K และอ้างหน่วยความจำข้อมูลภายนอกได้มากที่สุด 64K



ภาพผนวก 6 การจัดหน่วยความจำ

สำหรับหน่วยความจำ RAM ภายในจะประกอบไปด้วยพื้นที่ใช้งานทั่วไป, รีจิสเตอร์แบบค์, พื้นที่ใช้งานระดับบิต และรีจิสเตอร์ฟังก์ชันพิเศษ เราอาจเขียนโคแอดเรสของหน่วยความจำของ 8031 ได้ดังภาพผนวก 6 โดยในรูปจะบอกด้วยว่าขาโคแอดเรสที่

ใน 8031 จะมีหน่วยความจำภายในตั้งแต่ตำแหน่ง 00H ถึง FFH และสามารถอ้างหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกได้ 64K ตำแหน่ง ถ้าอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำโปรแกรม $\overline{\text{PSEN}}$ จะแอดเรส นอกจากนี้ 8031 สามารถอ้างหน่วยความจำข้อมูลภายนอกได้ 64K ตำแหน่ง โดยการติดต่อกับหน่วยความจำนี้ขา $\overline{\text{RD}}$ และ $\overline{\text{WR}}$ จะแอดเรส สำหรับหน่วยความจำข้อมูลภายในนั้นจะแบ่งออกได้ดังนี้

1. ชุดรีจิสเตอร์ 4 ชุด แต่ละชุดเรียกว่ารีจิสเตอร์แบบค์ ที่ตำแหน่ง 00H ถึง 1FH โดยแต่ละชุดประกอบด้วยรีจิสเตอร์ R0 ถึง R7

2. หน่วยความจำที่สามารถเข้าถึงข้อมูลระดับบิตได้ ตำแหน่ง 20H ถึง 2FH หน่วยความจำใช้งานทั่วไปตำแหน่ง 30H ถึง 7FH

3. รีจิสเตอร์ฟังก์ชันพิเศษ ตำแหน่ง 80H ถึง FFH

แผนผังการจัดหน่วยความจำข้อมูลภายในแสดงได้ดังภาพผนวก 7 จากแผนผังจะเห็นว่าการอ้างตำแหน่งหน่วยความจำภายในจะอ้างได้สองแบบ คือ การอ้างไปที่ตำแหน่งของไบต์ (เขียนหมายเลขตำแหน่งด้านนอก) หรือการอ้างไปที่ตำแหน่งของบิต (เขียนหมายเลขตำแหน่งด้านใน) โดยตำแหน่งของหน่วยความจำที่อ้างเป็นบิตจะมีตำแหน่งบิตที่แน่นอน

1.1.4.1 หน่วยความจำใช้งานทั่วไป

จากภาพผนวก 7 จะเห็นว่าใน 8031 จะมีหน่วยความจำ RAM สำหรับใช้งานทั่วไปจำนวน 80 ไบต์ ตั้งแต่ ตำแหน่ง 30H ถึง 7FH ตำแหน่งเหล่านี้สามารถอ้างตำแหน่งแบบ Direct Addressing Mode หรือ Indirect Addressing Mode

1.1.4.2 Bit - addressable RAM

ใน MCS-51 จะมีหน่วยความจำที่สามารถอ้างข้อมูลในระดับบิตได้ตั้งแต่ตำแหน่ง 20H ถึง 2FH รวม 16 ไบต์ โดยสามารถ SET, CLEAR, AND, OR ทางลอจิกได้ จำนวนบิตที่ใช้งานได้ทั้งหมดมี 128 บิต (8บิต x 16ไบต์)

1.1.4.3 Register Banks

หน่วยความจำข้อมูลภายในที่ใช้เป็นรีจิสเตอร์ มีทั้งหมด 32 ตำแหน่งโดยจะมี 4 ชุด แต่ละชุดมีรีจิสเตอร์ 8 ตัว คือ R0 ถึง R7 โดยชุดแรกจะอยู่ในตำแหน่ง 00H - 07H

| Byte Address | Bit Address | | |
|--------------|-------------------------|---------------------|------------------------------------|
| 7F | | General Purpose RAM | |
| 30 | | | |
| 2F | 7F 7E 7D 7C 7B 7A 79 78 | | |
| 2E | 77 76 75 74 73 72 71 70 | | |
| 2D | 6F 6E 6D 6C 6B 6A 69 68 | | |
| 2C | 67 66 65 64 63 62 61 60 | | |
| 2B | 5F 5E 5D 5C 5B 5A 59 58 | | |
| 2A | 57 56 55 54 53 52 51 50 | | |
| 29 | 4F 4E 4D 4C 4B 4A 49 48 | | |
| 28 | 47 46 45 44 43 42 41 40 | | |
| 27 | 3F 3E 3D 3C 3B 3A 39 38 | | |
| 26 | 37 36 35 34 33 32 31 30 | | |
| 25 | 2F 2E 2D 2C 2B 2A 29 28 | | |
| 24 | 27 26 25 24 23 22 21 20 | | |
| 23 | 1F 1E 1D 1C 1B 1A 19 18 | | |
| 22 | 17 16 15 14 13 12 11 10 | | |
| 21 | 0F 0E 0D 0C 0B 0A 09 08 | | |
| 20 | 07 06 05 04 03 02 01 00 | | |
| 1F | | | BANK 3 |
| 18 | | | |
| 17 | | | |
| 10 | | | BANK 2 |
| 0F | | | |
| 08 | | | |
| 07 | | BANK 1 | |
| 00 | | | |
| | | | Default Register Bank for R0-R7 |
| | | RAM | |

| Byte Address | Bit Address | |
|--------------|-------------------------|----------------------------|
| FF | | |
| FE | F7 F6 F5 F4 F3 F2 F1 F0 | B |
| E0 | E7 E6 E5 E4 E3 E2 E1 E0 | ACC |
| D0 | D7 D6 D5 D4 D3 D2 - D0 | PSW |
| B8 | - - - BC BB BA B9 B8 | IP |
| B0 | B7 B6 B5 B4 B3 B2 B1 B0 | P3 |
| A8 | AF - - AC AB AA A9 A8 | IE |
| A0 | A7 A6 A5 A4 A3 A2 A1 A0 | P2 |
| 99 | | Not Bit Address |
| 98 | 9F 9E 9D 9C 9B 9A 99 98 | SCON |
| 90 | 97 96 95 94 93 92 91 90 | P1 |
| 8D | | Not Bit Address |
| 8C | | Not Bit Address |
| 8B | | Not Bit Address |
| 8A | | Not Bit Address |
| 89 | | Not Bit Address |
| 88 | 8F 8E 8D 8C 8B 8A 89 88 | TCON |
| 87 | | Not Bit Address |
| 83 | | Not Bit Address |
| 82 | | Not Bit Address |
| 81 | | Not Bit Address |
| 80 | 87 86 85 84 83 82 81 80 | PO |
| | | Special Function Registers |

ภาพผนวก 7 ตำแหน่งของหน่วยความจำทั้งแบบไบต์และแบบบิต

1.1.5 รีจิสเตอร์ฟังก์ชันพิเศษ (Special Function Register)

ใน MCS-51 รีจิสเตอร์จะใช้หน่วยความจำ RAM ภายในชิพ โดยส่วนหนึ่ง เป็นรีจิสเตอร์ฟังก์ชันพิเศษ (Special Function Register : SFR) ซึ่งมีทั้งหมด 21 ตัว โดยรีจิสเตอร์พิเศษต่างๆ จะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มที่หน่วยความจำตั้งแต่ 80H ถึง FFH ซึ่งมีทั้งหมด 128 ตำแหน่ง แต่จะเป็นรีจิสเตอร์ฟังก์ชันพิเศษเพียง 21 ตำแหน่ง แต่ถ้าเป็น 8032 / 8051 จะใช้ได้ 26 ตำแหน่งหรือมี SFR 26 ตัว

1.1.5.1 Program Status Word

รีจิสเตอร์ตัวนี้เรียกย่อ ๆ ว่า PSW จะอยู่ในตำแหน่ง D0H ซึ่งสามารถเข้าถึงข้อมูลระดับบิตได้โดยรีจิสเตอร์จะเป็นตัวบอกสถานะต่าง ๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ความหมายของแต่ละบิตแสดงได้ดังตารางผนวก 3

| | | | | | | | |
|----|----|----|-----|------|----|---|---|
| CY | AC | F0 | RS1 | RS14 | OV | - | P |
|----|----|----|-----|------|----|---|---|

| บิต | ชื่อบิต | ตำแหน่ง | ความหมาย |
|-------|---------|---------|--|
| PSW.7 | CY | D7H | Carry Flag |
| PSW.6 | AC | D6H | Auxiliary Carry Flag |
| PSW.5 | F0 | D5H | Flag 0 |
| PSW.4 | RS1 | D4H | บิตสำหรับเลือก Register Bank 1 |
| PSW.3 | RS0 | D3H | บิตสำหรับเลือก Register Bank 0 |
| | | | 00 = Bank 0 ; Address 00H - 07H 01 = Bank 1 ; Address 08H - 0FH 10 = Bank 2 ; Address 10H - 17H 11 = Bank 3 ; Address 18H - 1FH |
| PSW.2 | OV | D2H | Overflow Flag |
| PSW.1 | - | D1H | Reserved |
| PSW.0 | P | D0H | Even Parity Flag |

ตารางผนวก 3 แสดงบิตและหน้าที่ต่าง ๆ ใน PSW

1. แฟล็กตัวทวด Carry Flag (CF) บิตนี้เป็นบิตที่ 7 ของ PSW บิตนี้จะมีความสำคัญหากมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการกระทำทางคณิตศาสตร์โดยบิตนี้จะ Set เมื่อเกิดการทดลองของบิตที่ 7 ขณะทำการบวกเลข หรือ Set เมื่อเกิดการข้ามของบิตที่ 7 เมื่อเกิดการลบเลข

2. แพลกตัวช่วยทด Auxiliary Carry Flag เมื่อมีการบวกแบบ Binary - Code - Decima (BCD) บิต Auxiliary Carry Flag (AC) หรือบิตตัวช่วยจะถูก Set เมื่อมีการทดจากบิตที่ 3 ไปบิตที่ 4 หรือถ้าใน Lower Nibble มีค่าระหว่าง 0AH เนื่องจากรหัส BCD นี้มีค่าได้มากที่สุดแค่ 9 ถ้าหากมีการบวกเลข BCD จะต้องตามด้วยคำสั่ง DAA (Decimal Adjust Accumulator) เพื่อปรับค่าที่มีค่าเกิน 9 โดยบวกเลข 6 เข้าไปจะทำให้เป็นรหัส BCD ที่แทนเลขฐานสิบได้

3. แพลกศูนย์ Flag 0 เป็น Flag ที่ผู้ใช้สามารถใช้งานทั่วไปได้

4. บิตเลือกวีธีสเตอร์แบงก์ (Register Bank Select Bits) ตามที่ทราบมาแล้วใน MCS-51 มีชุดวีธีสเตอร์อยู่ 4 ชุด ถ้าจะเลือกให้ชุดใดแอกทีฟจะกำหนดได้ในบิต RS1 และ RS2 ของ PSW และจะ Clear ตัวเองเมื่อระบบถูกรีเซ็ต

5. แพลกโอเวอร์โฟลว์ Overflow Flag แพลก OV จะถูก Set หลังจากการกระทำทางคณิตศาสตร์ และเกิด Overflow คือจำนวนที่เกิดจากการบวกหรือการลบมีค่าเกิดกว่าที่จำนวนไบต์ไปได้คือมากกว่า +128 หรือน้อยกว่า -128 ตัวอย่างเช่น

6. บิตพาริตี (Parity Bit) พาริตีบิต (P) เป็นบิตที่บอกค่าพาริตีของวีธีสเตอร์ Accumulator

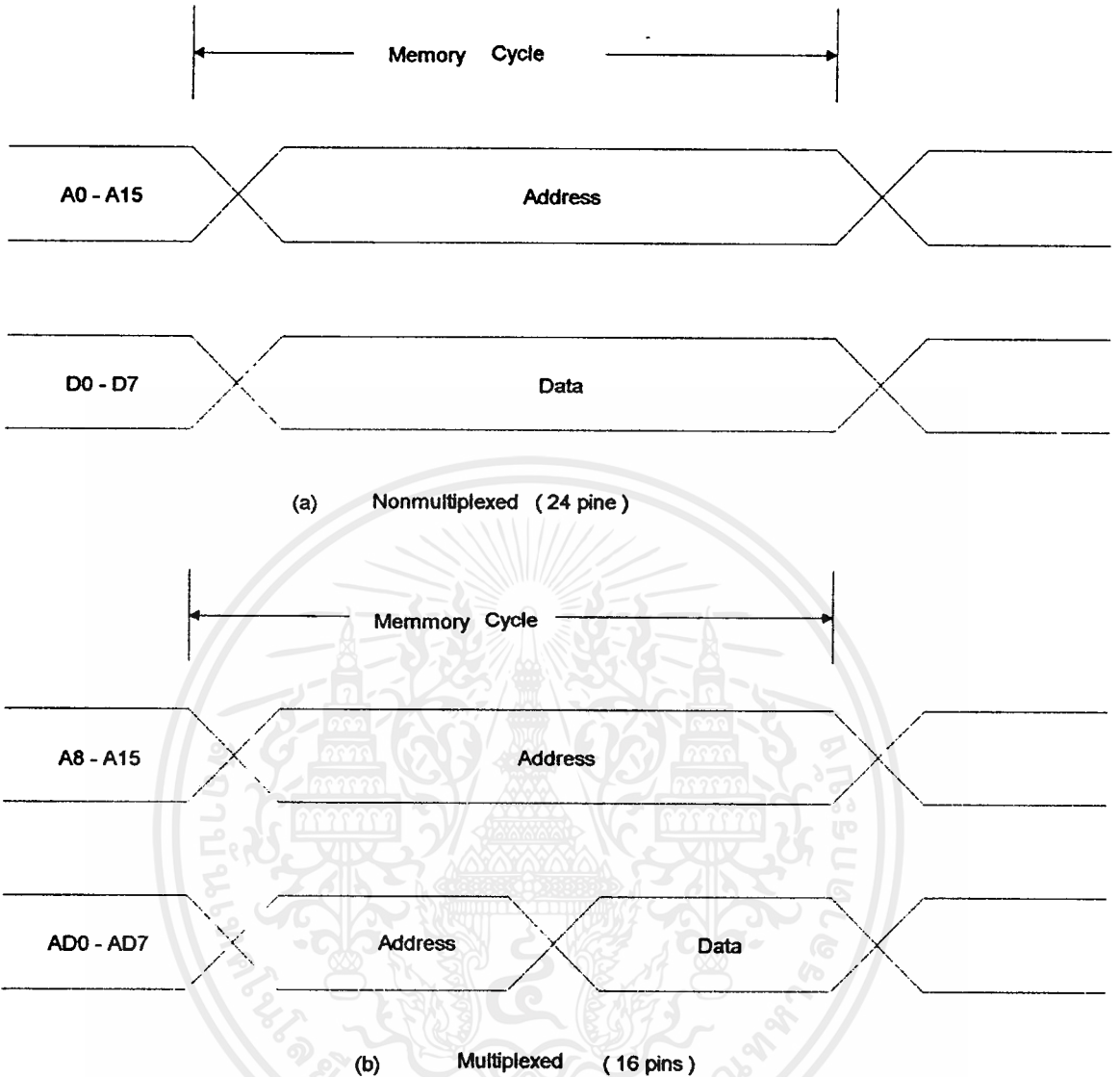
ซึ่งอาจเป็นตัวตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลได้ โดยจะเซตหรือเคลียร์ขึ้นกับผลที่เกิดขึ้นกับ Accumulator เช่น ถ้า Accumulator มีค่าเป็น 10101101B บิต P จะเป็น "1"

1.1.6 หน่วยความจำภายนอก (External Memory)

MCS - 51 สามารถอ้างหน่วยความจำข้อมูลภายนอกได้ 64K และอ้างหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกได้ 64K และอ้างหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกได้ 64K MCS - 51 จะใช้พอร์ท 0 ในการอ้างตำแหน่งหน่วยความจำ 8 บิตล่าง และใช้พอร์ทข้อมูล (DATA) ด้วย โดยใช้ขา ALE มาเป็น Latch ข้อมูลพอร์ท 0 และใช้พอร์ท 2 เป็นขาอ้างตำแหน่ง 8 บิตบน (รวมขาอ้างตำแหน่ง 16 เส้น ซึ่งอ้างได้ 64K)

เนื่องจากพอร์ท 0 จะใช้งาน 2 หน้าที่ในการติดต่อกับหน่วยความจำ จะใช้วิธี Multiplex ระหว่าง Address กับ Data พิจารณาจากรูป ถ้าต้องการติดต่อกับหน่วยความจำที่เก็บข้อมูล 8 บิต และเก็บได้ 64K จะต้องใช้สัญญาณ 24 เส้น คือ เป็นขา Address 16 เส้น และขาข้อมูล 8 เส้น ดังภาพผนวก 8(a) แต่ถ้าใช้วิธี Multiplex คือใช้ขา A0 - A7 เป็นขาข้อมูลด้วยคือ D0 - D7 จะใช้สัญญาณเพียง 16 เส้นเท่านั้น จากภาพผนวก 8(b) จะเห็นว่าเมื่อต้องการติดต่อกับหน่วยความจำจะส่งสัญญาณ Address A0 - A15 ออกมาก่อน 16 เส้น และเวลาต่อมาขา A0 - A7 จะถูกเปลี่ยน D0 - D7 ในการติดต่อกับหน่วยความจำของ MCS - 51 จะใช้วิธีนี้

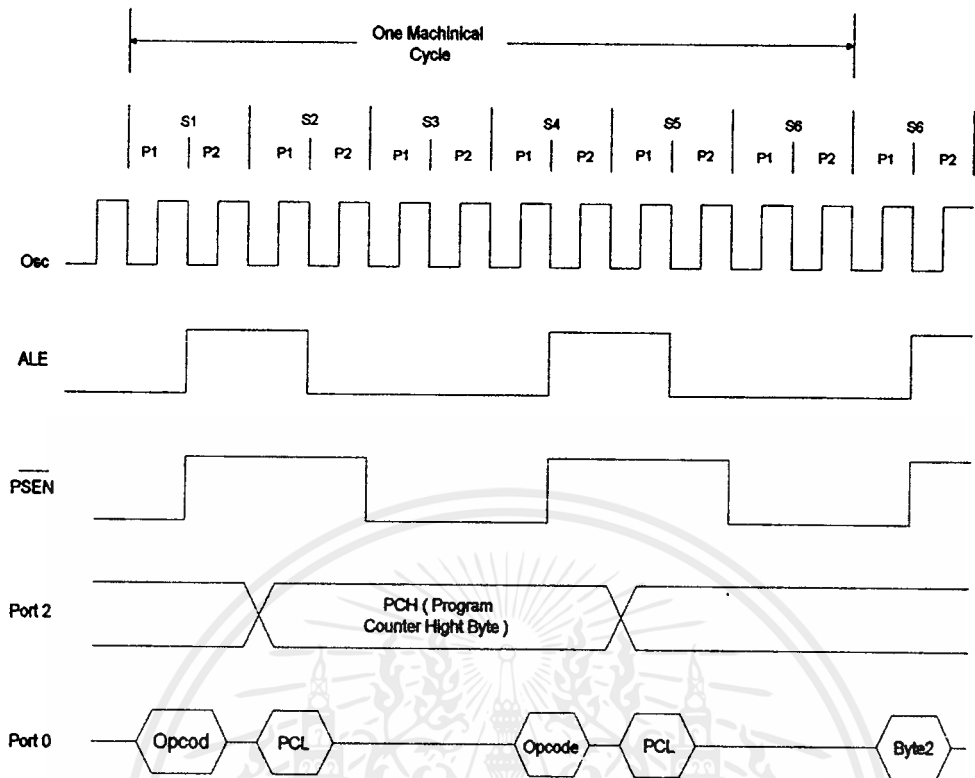
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพผนวก 8 ไตอะแกรมกลุ่มสัญญาณที่ใช้อ่านข้อมูล

1.1.6.1 การติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก

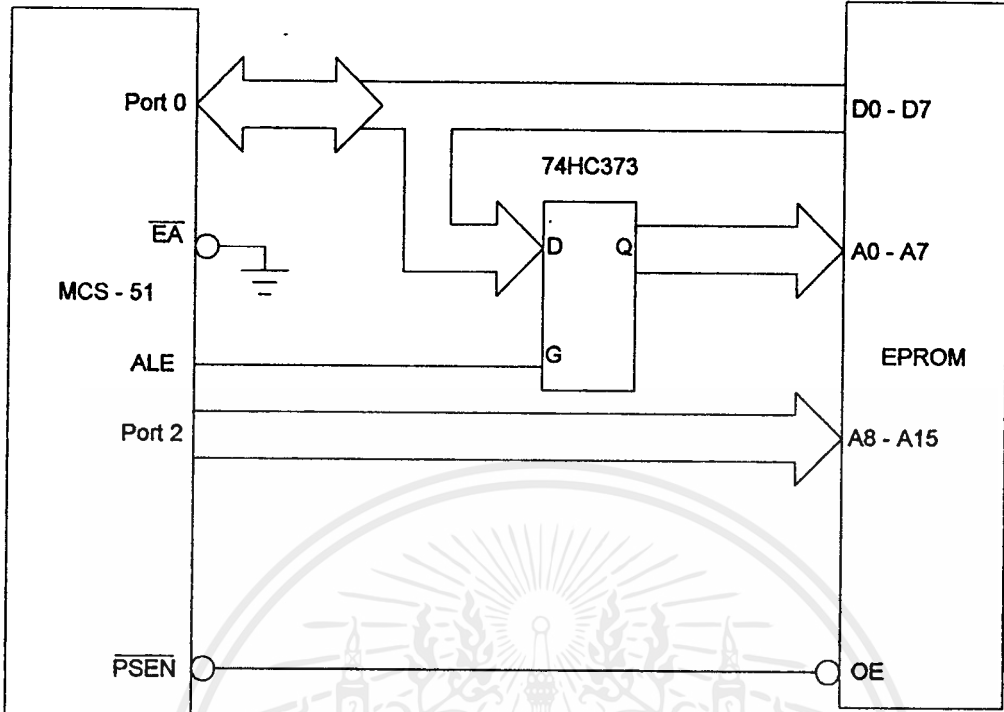
ในการอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก MCS - 51 จะส่งค่าตำแหน่งของหน่วยความจำออกไปก่อน ซึ่งค่าตำแหน่งจะถูกเก็บอยู่ใน PC โดยส่งออกไปทางพอร์ท 0 และพอร์ท 2 จากนั้นเวลาต่อมาจะส่งขา ALE ให้เป็นลอจิก "0" เพื่อ Latch ขา Address ของ 8 บิตค่าคือ พอร์ท 0 จากนั้นจะส่งสัญญาณทางขา \overline{PSEN} ให้เป็นลอจิก "0" เพื่ออ่านข้อมูลซึ่งจะได้ Opcode เข้าไปทางขา Data Bus คือพอร์ท 0 ไตอะแกรมเวลาอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำภายนอกแสดงได้ดังภาพผนวก 9



ภาพผนวก 9 ไคอะแกรมเวลาอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก

จากรูปช่วงเวลาทำงานของ MCS - 51 เรียกว่า State โดยแต่ละ State จะใช้สัญญาณนาฬิกาสองคาบการทำงานของคำสั่งต่าง ๆ จะใช้เวลา 6 State เรียกว่าเมซซิงไซเคิล จากรูปจะเห็นว่า S2 MCS - 51 จะส่งค่าตำแหน่งของหน่วยความจำโปรแกรม (ค่า PC) ออกมาทางพอร์ท "0" เพื่อ Latch อุปกรณ์ภายนอกให้คงค่าตำแหน่งไบต์ค่าไว้ (จากพอร์ท 0) เพื่อใช้พอร์ท 0 เป็นขาข้อมูลต่อไป เวลาต่อมา $\overline{\text{PSEN}}$ จะเป็น "0" เพื่ออ่าน Opcode เข้าทางพอร์ท 0

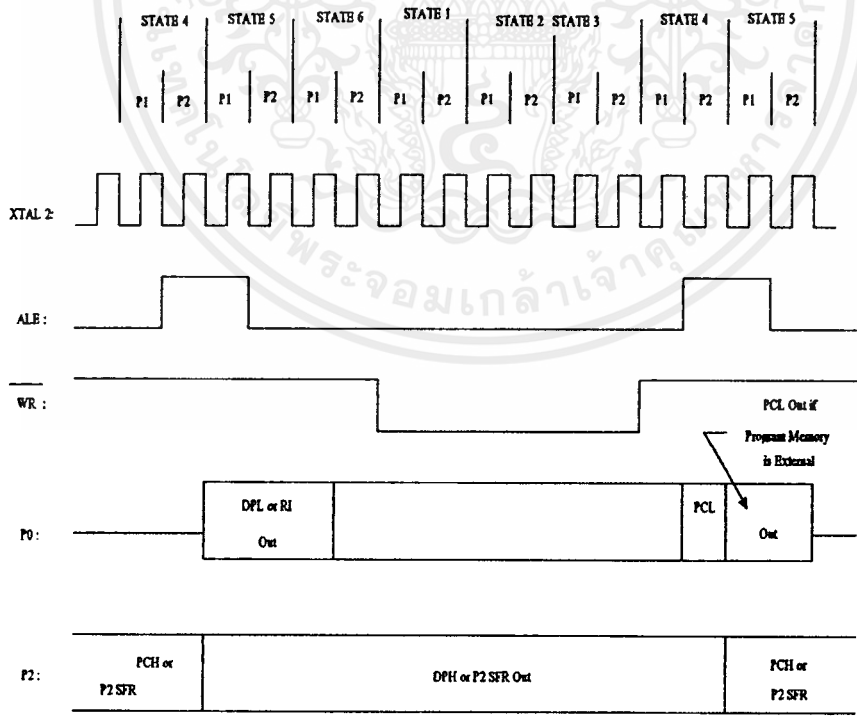
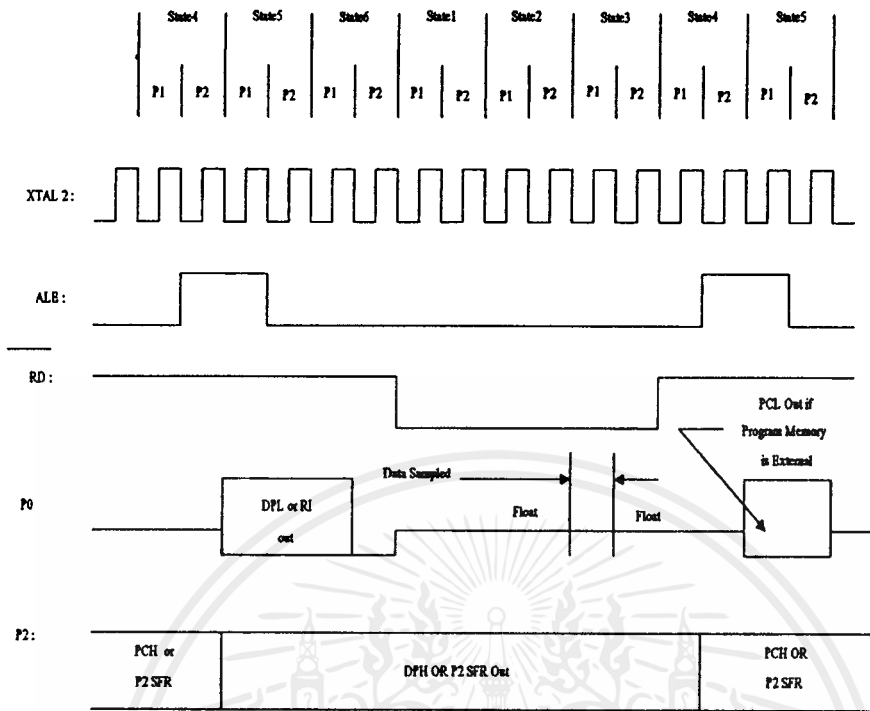
สำหรับการต่อหน่วยความจำกับ MCS - 51 แสดงได้ดังภาพผนวก 10 โดยขา $\overline{\text{EA}}$ จะต่อเป็น "0" เพื่อบอก MCS - 51 ว่าให้อ่านหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกสำหรับการ Multiplex จะใช้ ฟลิปฟลอป 8 ตัวเบอร์ 74373 เก็บค่าตำแหน่ง 8 บิตค่าเอาไว้ เมื่อ MCS - 51 ส่งค่าตำแหน่งพอร์ท ออกไป เวลาต่อมาจะส่งขา ALE ให้เป็น "0" ซึ่งจะใช้ขานี้ต่อกับ 74373 เพื่อให้ $\overline{\text{PSEN}}$ จะต่อกับขา Output Enable (OE) ของหน่วยความจำดังภาพผนวก 10



ภาพผนวก 10 การต่อ MCS - 51 กับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก

1.1.6.2 การติดต่อกับหน่วยความจำข้อมูลภายนอก

หน่วยความจำข้อมูลภายนอก MCS - 51 สามารถอ่านและเขียนได้ ในการติดต่อกับหน่วยความจำข้อมูลภายนอก MCS - 51 จะส่งค่า Address ออกไปทางพอร์ท 0 และพอร์ท 2 จากนั้นจะส่งค่า ALE เพื่อไป Latch Address 8 บิตค่า โดยการอ่านเขียนข้อมูลนั้นจะใช้ขา RD หรือ P3.7 และขา WR หรือ P3.6 ตามลำดับ โค้ดอะแอสเมบลีอ่านและเขียนข้อมูลกับหน่วยความจำข้อมูลภายนอกแสดงได้ดังภาพผนวก 11

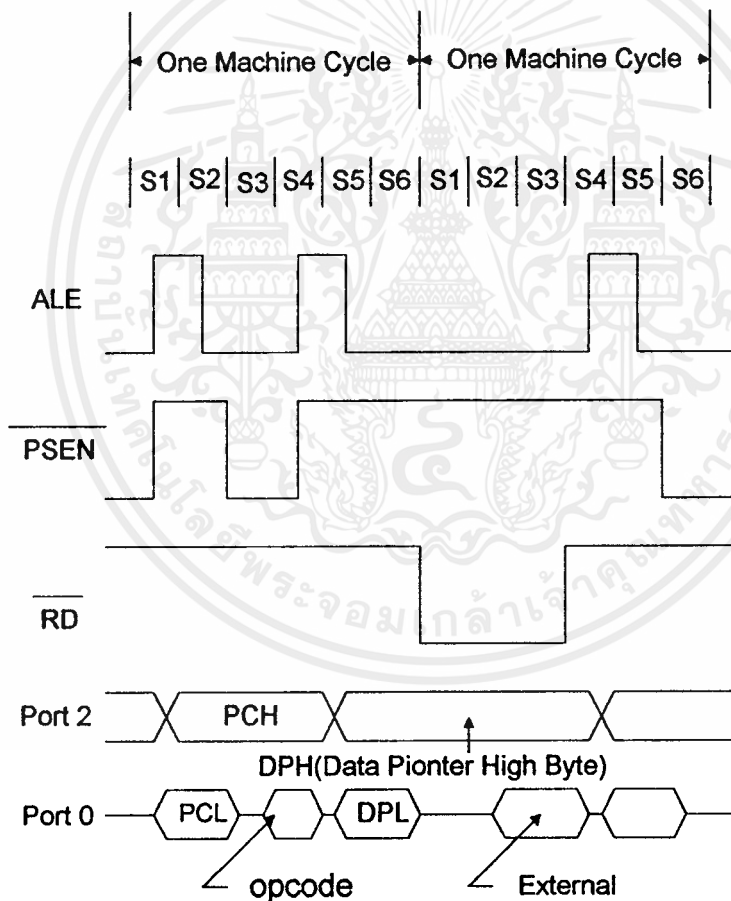


ภาพผนวก 11 ไตอะแกรมเวลาการอ่านและเขียนข้อมูลกับหน่วยความจำภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากตำแหน่งของหน่วยความจำภายนอกมีได้ถึง 64K รีจิสเตอร์ที่ใช้เก็บค่าตำแหน่งของหน่วยความจำภายนอกจะใช้รีจิสเตอร์ 16 บิต คือ DPTR นอกจากนี้รีจิสเตอร์ 8 บิต ได้ 2 ตัว คือ R0 และ R1 ในการติดต่อกับหน่วยความจำภายนอกใช้คำสั่ง MOVX

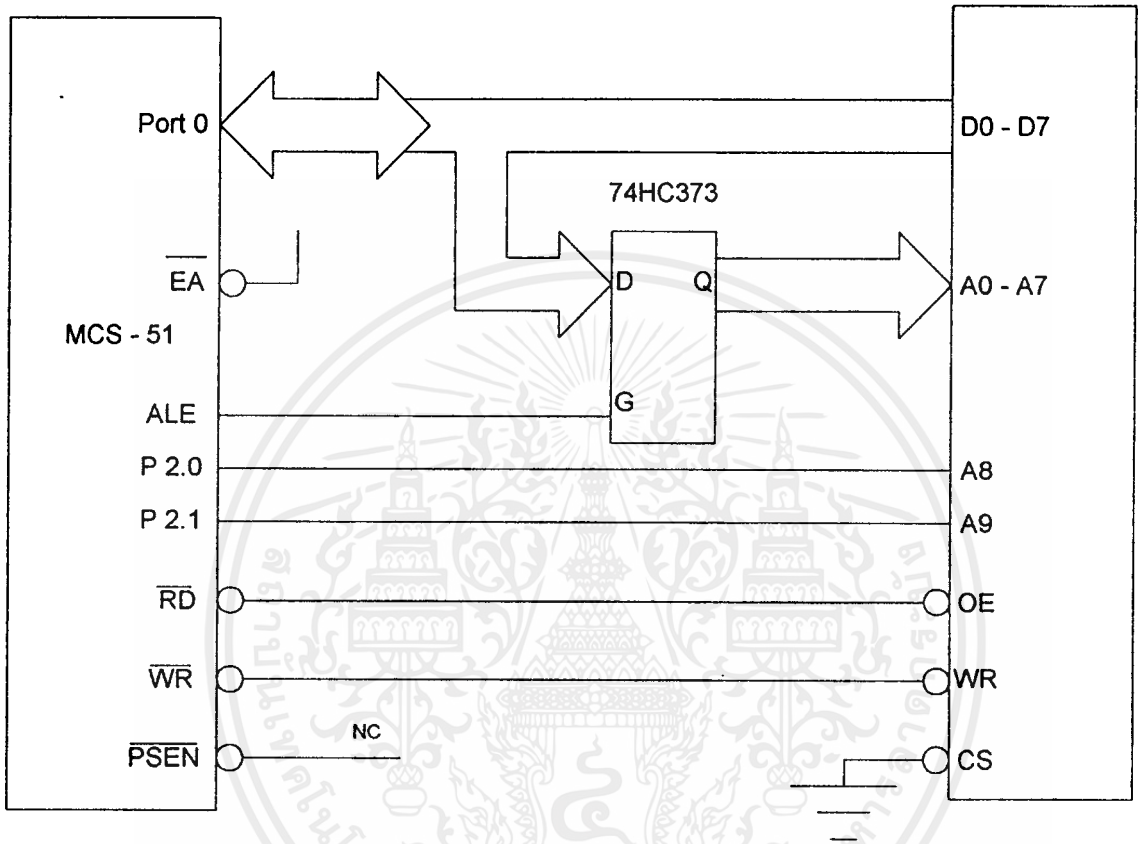
ถ้าหาก MCS - 51 ทำคำสั่ง MOVX A, @DPTR ซึ่งหมายความว่าให้อ่านค่าจากตำแหน่งที่ DPTR ซ้ำอยู่มาเก็บในรีจิสเตอร์ A ไคอะแกรมเวลาจะเป็นดังรูปโดย Machine Cycle แรกจะเป็นการอ่านค่า Opcode เข้ามาตีความจากนั้น MCS - 51 จะรู้ว่าต้องอ่านข้อมูลจากตำแหน่งที่ DPTR ซ้ำอยู่ใน Machine Cycle ต่อไปก็จะนำค่า DPTR จะเป็น "0" เพื่อ Latch ข้อมูล Address 8 บิตค่า เวลาต่อมาขา RD จะเป็น "0" จากนั้นข้อมูลจะถูกอ่านเข้ามาทาง Data Bus คือ พอร์ต 0 ไคอะแกรมเวลาทำงานแสดงได้ดังภาพผนวก 12



ภาพผนวก 12 สัญญาณต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นขณะทำคำสั่ง MOVX

สำหรับการเชื่อมต่อหน่วยความจำข้อมูลกับ MCS - 51 โดยให้ 8051 ทำงานกับหน่วยความจำแสดงได้ดังภาพผนวก 13 ซึ่งจะเป็นการเชื่อมต่อ RAM ขนาด 1K byte ซึ่งจะใช้เวลาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Address เพียง 10 เส้น ดังนั้น A8 และ A9 จะต่อกับ P2.0 และ P2.1 ส่วนขา \overline{EA} จะต่อกับลอจิก "1" เพื่อบอกว่าให้อ่านโปรแกรมจาก ROM ภายใน และขา \overline{PSEN} จะไม่ใช่เพราะไม่ได้ต่อ ROM แสดงได้ดังรูป

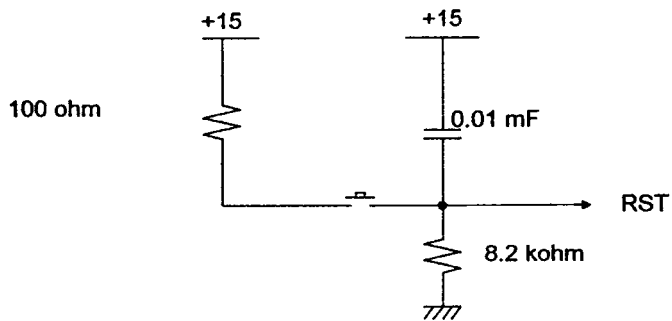


ภาพผนวก 13 การต่อหน่วยความจำโปรแกรมกับ MCS-51

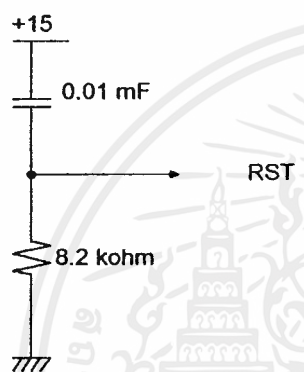
ข้อสังเกต ขณะที่ MCS-51 ติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรม หรือหน่วยความจำข้อมูลภายนอกจะใช้ขา Address เหมือนกัน แต่จะต่างกันตรงที่ ถ้าติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมขา \overline{PSEN} จะแอกทีฟถ้าติดกับหน่วยความจำข้อมูล \overline{WR} , \overline{RD} จะแอกทีฟและ MCS-51 จะติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมด้วยคำสั่ง MOVX และติดต่อกับหน่วยความจำข้อมูลด้วยคำสั่ง MOVX

1.1.7 Reset Operation

การรีเซ็ตหรือเริ่มต้นทำงานใหม่ของ MCS-51 จะต้องให้ลอจิก "1" ที่ RST เป็นเวลา 2 Machine Cycles (1 Machine Cycle เท่ากับ 12 Clock) จากนั้นให้กลับเป็นลอจิก "0" การรีเซ็ตอาจทำได้โดยใช้สวิทช์กด ดังภาพผนวก 14 (a) หรือใช้วิธี Power-up โดยใช้ตัว R-C ต่อเป็น วงจร ดังภาพผนวก 14 (b) เพื่อสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Manual Reset



(b) Power-on Reset

ภาพผนวก 14 การรีเซ็ต MCS - 51

| Register (S) | Counter |
|------------------|-----------|
| Program Counter | 0000H |
| Accumulator | 00H |
| B Register | 00H |
| PSW | 00H |
| SP | 07H |
| DPTR | 0000H |
| Ports 0-3 | FFH |
| IP (8031 / 8051) | XXX00000B |
| IP (8052 / 8052) | XX000000B |
| IE (8031 / 8051) | 0XX00000B |

สามารถ ติดต่อกับหน่วยความจำได้หลายแบบ เช่น ในไบต์ที่ 2 ของชุดคำสั่ง , ในรีจิสเตอร์ R4, ในตำแหน่ง 35H ของหน่วยความจำภายใน ในตำแหน่งของหน่วยความจำภายนอกที่มีรีจิสเตอร์ DPTR ชื่ออยู่เป็นต้น การติดต่อกับหน่วยความจำจะเป็นการอ่านข้อมูลออกมาหรือเขียนข้อมูลเข้าไปก็ได้ ใน MCS - 51 สามารถติดต่อกับหน่วยความจำได้ 8 โหมด

- Register
- Direct
- Indirect
- Immediate
- Relative
- Absolute
- Long
- Indexed

1.2.1.1 Registers Addressing

เป็นการติดต่อกับข้อมูลที่อยู่ในรีจิสเตอร์โดยตรง ซึ่งจะเป็นรีจิสเตอร์ชุดที่กำลังใช้งานอยู่คือ $R_n (R_0 - R_7)$

1.2.1.2 Direct Addressing

เป็นการกำหนดตำแหน่งของหน่วยความจำโดยตรง ซึ่งจะเป็นการติดต่อกับหน่วยความจำภายในของ MCS - 51 เท่านั้น

1.2.1.3 Indirect Addressing

การอ้างตำแหน่งแบบนี้เป็นการอ้างตำแหน่งแบบทางอ้อม ซึ่งจะใช้รีจิสเตอร์ R_0 และ R_1 เป็นตัวชี้ข้อมูล โดยการเขียนรหัส Mnemonic จะใช้เครื่องหมาย @ นำหน้า

1.2.1.4 Immediate Addressing

วิธีนี้เป็นการกำหนดค่าของข้อมูลโดยตรง โดยจะใช้ เครื่องหมาย # นำหน้าตัวเลข

1.2.1.5 Relative Addressing

การอ้างตำแหน่งแบบนี้มักจะใช้กับคำสั่งกระโดด โดยค่า Relative Address (Offset) จะมีขนาด 8 บิต ซึ่งสามารถกระโดดกลับหลังหรือไปข้างหน้าได้ -128 ถึง +127 ตำแหน่ง ชุดคำสั่งจะมีลักษณะดังรูป

Opcode

Relative Offset

เอกสารนี้ชุดคำสั่งนี้อ้างตำแหน่งลักษณะนี้ จะนำค่า Relative Offset ไปบวกกับค่าของ Program Counter ในการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Counter ขณะนั้น ซึ่งจะได้อ่านค่าตำแหน่งที่จะกระโดด

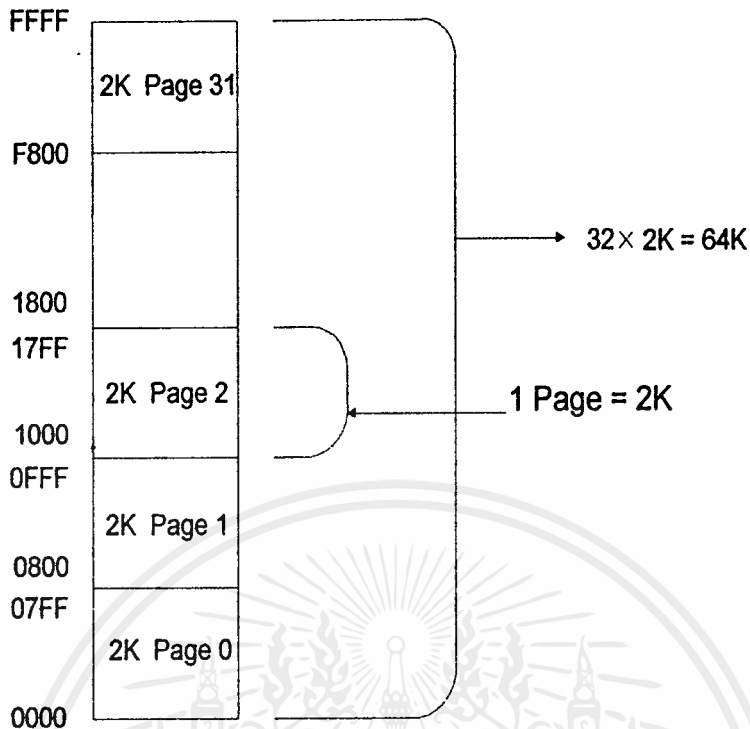
การทำคำสั่งกระโดด ถ้าเขียนคำสั่งว่า SJMP THERE โดย (THERE) คือตำแหน่งจะกระโดดไป) และรหัสคำสั่งนี้จะเก็บไว้ที่ตำแหน่ง 1000H และ 1001H เนื่องจากมีขนาด 2 ไบต์ เมื่ออ่านคำสั่งในไบต์ที่ 2 ตำแหน่ง 1001H แล้ว PC จะต้องเพิ่มค่าขึ้นเป็น 1002H ถ้าหากค่า Relative Offset มีค่าเป็น 3EH จะกระโดดไปที่ตำแหน่ง 1040H ($1002H + 3EH = 1040H$) ถ้าทำคำสั่ง SJMP 0107H หมายความว่า ให้กระโดดไปที่ตำแหน่ง 0107 แต่รหัสคำสั่งอยู่ที่ตำแหน่ง 0100H เก็บ Opcode ว่า 80H ซึ่งหมายความว่า เป็นคำสั่งกระโดด ส่วน Relative Offset จะมีค่าเป็น 05 หมายความว่ากระโดดไปอีก 5 ตำแหน่ง โดยเริ่มนับตำแหน่ง 0103 เพราะอ่านค่า Relative Offset เสร็จแต่ยังไม่ทำตามคำสั่ง PC จะไปอยู่ที่ 0102H ส่วนอีกรูปแบบหนึ่งเป็นคำสั่ง SJMP 2034H โดยรหัสคำสั่งอยู่ที่ตำแหน่ง 2040H ซึ่งมีขนาด 2 ไบต์ แต่ต้องกระโดดกลับไปข้างหลังอีก 10 ตำแหน่ง ค่า Relative Offset คือ F6H โดยการอ้างค่า Relative Offset จะอ้างแบบเลข 2's Complement

1.2.1.6 Absolute Addressing

เป็นการอ้างตำแหน่งเมื่อทำคำสั่ง ACALL และ AJMP ซึ่งเป็นคำสั่งที่มีขนาด 2 ไบต์ โดยตำแหน่งที่ถูกกระโดดอยู่ในช่วง 2K ตำแหน่ง ซึ่งจะใช้นหน่วยความจำในการเก็บตำแหน่ง 11 บิต โดยในไบต์ของ Opcode จะเก็บค่า A0-A7 ดังรูป



การวางตำแหน่งแบบนี้อาจมองเป็นหน้า ๆ ซึ่งจะมีได้ 32 หน้า แต่ละหน้ามีขนาด 2K byte จากการอ้างตำแหน่งโดยใช้ขา Address 11 โดยขา A11 - A15 จะไม่ถูกใช้



ภาพผนวก 15 การอ้างตำแหน่งแบบ Page

1.2.1.7 Long Addressing

เป็นการอ้างตำแหน่งเมื่อทำคำสั่ง LCALL และ LJMP โดยชุดคำสั่งนี้ใช้เนื้อที่เก็บ 3 ไบต์ โดยไบต์ที่ 2 และ 3 ใช้การอ้างตำแหน่งขนาด 6 บิต ซึ่งเท่ากับ 64K byte การอ้างตำแหน่งแบบนี้สามารถอ้างได้ตลอด MCS-51 มีหน่วยความจำภายนอกอยู่

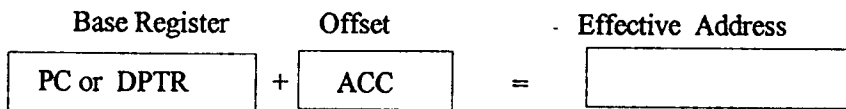
Opcode

A8-A15

A0-A7

1.2.1.8 Indexed Addressing

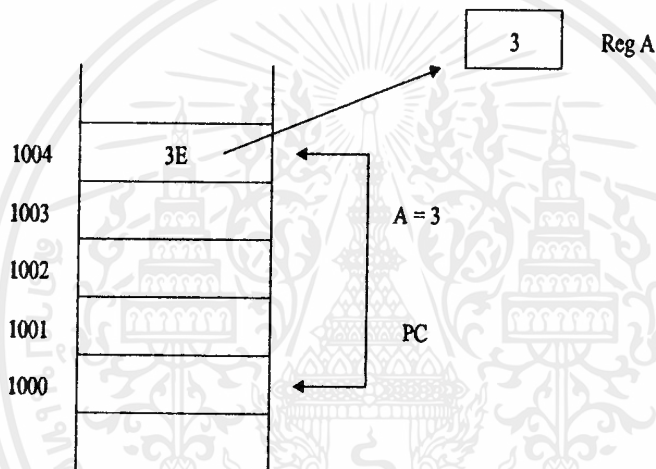
การอ้างตำแหน่งแบบนี้เป็น การติดต่อกับหน่วยความจำภายนอกในลักษณะการเปิดตาราง โดยใช้รีจิสเตอร์ พิเศษ (Program Counter หรือ Data Pointer) เป็นตัวชี้ตำแหน่งเริ่มต้นและบวกด้วยค่า Offset ซึ่งเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ A (Accumulator) ซึ่งจะใช้กับชุดคำสั่ง MOVC หรือ JMP คำสั่งที่อ้างตำแหน่งแบบนี้จะมีลักษณะดังภาพผนวก 16



ตัวอย่างเช่น

MOVC A, @A+PC

เป็นการอ่านข้อมูลจากตำแหน่งที่ PC ชี้อยู่ บวกกับค่าใน A มาเก็บในรีจิสเตอร์ A ถ้า PC ชี้อยู่ที่ 1000 และ A = 3 จะเป็นการอ่านค่าจากตำแหน่ง 1003H มาเก็บในรีจิสเตอร์ A



ภาพผนวก 16 การอ้างตำแหน่งแบบ Indexed

1.2.2 ประเภทของชุดคำสั่ง

ใน MCS - 51 จะแบ่งชุดของคำสั่งได้ดังนี้

- Arithmetic
- Logical
- Data Transfer
- Boolean Variable
- Program Branching

ในที่นี้จะแสดงตารางของชุดคำสั่งต่าง ๆ พร้อมทั้งบอกว่าคำสั่งนั้น ๆ ใช้การอ้างแอดเดรสแบบใดและแต่ละคำสั่งใช้เวลาในการทำงาน (Execution Time) เท่าใด

1.2.2.1 ชุดคำสั่งทางคณิตศาสตร์ (Arithmetic Instructions)

เป็นกลุ่มคำสั่งที่ทำงานด้านคณิตศาสตร์ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับรีจิสเตอร์ A และมักจะใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีจิสเตอร์ A เก็บผลลัพธ์เช่นคำสั่ง ADD A คำสั่งนี้จะอ้างตำแหน่งได้หลายแบบ เช่น

ADD A, 7FH (Direct Addressing)

ADD A, @R0 (Indirect Addressing)

| Mnemonic | Operation | Addressing Modes | | | | Execution Timer |
|----------------|-------------------------------------|-------------------|-----|-----|-----|--------------------|
| | | Dir | Ind | Reg | Imm | |
| ADD A, <byte> | $A = A + \text{<byte>}$ | × | × | × | × | 1 |
| ADDC A, <byte> | $A = A + \text{<byte>} + C$ | × | × | × | × | 1 |
| SUBB A, <byte> | $A = A - \text{<byte>} - C$ | × | × | × | × | 1 |
| INC A | $A = A + 1$ | Accumulator Only | | | | 1 |
| INC <byte> | $\text{<byte>} = \text{<byte>} + 1$ | × | × | × | | 1 |
| INC DPTR | $DPTR = DPTR + 1$ | Data Pointer only | | | | 2 |
| DEC A | $A = A - 1$ | Accumulator Only | | | | 1 |
| DEC <byte> | $\text{<byte>} = \text{<byte>} - 1$ | × | × | × | | 1 |
| MUL AB | $B:A = B \times A$ | ACC and B Only | | | | 4 |
| DIV AB | $A = \text{Int} [A/B]$ | ACC and B Only | | | | 4 |
| | $B = \text{Mod} [A/B]$ | | | | | |
| DA A | Decimal Adjust | Accumulator Only | | | | 1 |

ตารางผนวก 4 แสดงชุดคำสั่งทางคณิตศาสตร์

ชุดคำสั่งทางคณิตศาสตร์ทุกคำสั่งจะมี 1 Machine Cycle ยกเว้น INC DPTR ใช้ 2 Machine Cycles และคำสั่ง MUL AB และ DIV AB จะใช้ 4 Machine Cycles โดย 1 Machine Cycle จะใช้เวลา 1 μ S ถ้า MCS - 51 ทำงานที่ความถี่ 12 MHz ชุดคำสั่งทางคณิตศาสตร์แสดงได้ดังตารางผนวก 4

1.2.2.2 ชุดคำสั่งทางลอจิก (Logical Instructions)

MCS - 51 มีคำสั่งกระทำทางลอจิกซึ่งจะคล้ายกับ Boolean Operations (AND, OR, Exclusive OR และ NOT) ซึ่งสามารถกระทำแบบไบนารีต่อไบนารี หรือบิตต่อบิตได้ ชุดคำสั่งแสดงได้ดังตารางผนวก 4 ถ้าค่าใน A มี 00110101B และทำคำสั่ง AND สามารถเขียนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Monemonic | Operation | Addressing Modes | | | | Execution Time |
|--------------------|----------------------------|------------------|-----|-----|----|----------------|
| | | Dir | Ind | Reg | Im | |
| ANL A , <byte> | A = A AND <byte> | × | × | × | × | 1 |
| ANL <byte> , A | <byte> = <byte> AND A | × | | | | 1 |
| ANL <byte> , #Data | <byte> = <byte> AND #Data | × | | | | 2 |
| ORL A , <byte> | A = A OR <byte> | × | × | × | × | 1 |
| ORL <byte> , A | <byte> = <byte> OR A | × | | | | 1 |
| ORL <byte> , #Data | <byte> = <byte> OR #Data | × | | | | 2 |
| XRL A , <byte> | A = A XOR <byte> | × | × | × | × | 1 |
| XRL <byte> , A | <byte> = XOR A | × | | | | 1 |
| XRL <byte> , #Data | <byte> = XOR #Data | × | | | | 2 |
| CLR A | A = 00H | Accumulator Only | | | | 1 |
| COL A | A = NOT A | Accumulator Only | | | | 1 |
| RL A | Rotate ACC Left 1 bit | Accumulator Only | | | | 1 |
| RLC A | Rotate Left Through Carry | Accumulator Only | | | | 1 |
| RR A | Rotate ACC Right 1 bit | Accumulator Only | | | | 1 |
| RRC A | Rotate Right Through Carry | Accumulator Only | | | | 1 |
| SWAP A | Swap Nibbles in A | Accumulator Only | | | | 1 |

ตารางผนวก 5 แสดงชุดคำสั่งทางลอจิก

1.2.2.3 กลุ่มคำสั่งการโอนย้ายข้อมูล (Data Transfer Instructions)

การโอนย้ายข้อมูลสามารถแบ่งตำแหน่งที่จะติดต่อได้ดังนี้

ก. หน่วยความจำข้อมูลภายใน การโอนย้ายข้อมูลของหน่วยความจำภายในจะใช้ 1 หรือ 3

Machine Cycle รูปแบบของคำสั่งจะเป็น

| Mnemonic | Operation | Addressing Modes | | | | Exection Time |
|--------------------|--|------------------|-----|-----|-----|---------------|
| | | Dir | Ind | Reg | Imm | |
| MOV A , <SRC> | A = <src> | x | x | x | x | 1 |
| MOV <des> , A | <dest> = A | x | x | x | | 1 |
| MOV <dest> , <src> | <dest> = <src> | x | x | x | x | 2 |
| MOV DPTR , #Data16 | DPTR = 16 - bit Immediat Constant | | | | x | 2 |
| PUSH <src> | INC SP : MOV “@SP” : <scr> | x | | | | 2 |
| POP <dest> | MOV <dest> , “@SP” : DEC SP | x | | | | 2 |
| XCH A , <byte> | ACC and <byte> Exchange Data | x | x | x | | 1 |
| XCHD A , @Ri | Acc and @Ri Exchange Low Nibbles | | x | | | 1 |

ตารางผนวก 6 แสดงชุดคำสั่งการโอนย้ายข้อมูลระหว่างหน่วยความจำภายใน

ข. หน่วยความจำข้อมูลภายนอก (External RAM) การย้ายข้อมูลระหว่างหน่วยความจำข้อมูลภายในกับภายนอก จะใช้การอ้างตำแหน่งแบบ Indirect Addressing โดยใช้ @ Ri เป็นตัวชี้ตำแหน่ง (เมื่อ Ri คือ R0 และ R1 ของ Bank ที่กำลังทำงาน) หรือใช้ @ DPTR เป็นตัวชี้ซึ่งจะอ้างตำแหน่งแบบ 16 บิต หรืออ้างได้ 64K การย้ายข้อมูลระหว่างหน่วยความจำภายนอกใช้ เวลา 2 Machine Cycles และใช้รีจิสเตอร์ Accumulator เป็น Accumulator เป็น Source หรือ Destination โดยคำสั่งที่ใช้คือ MOVX ถ้าดูจากไคอะแกรมเวลาแล้วจะพบว่าถ้าติดต่อกับหน่วยความจำภายนอก จะต้องใช้สัญญาณ \overline{RD} และ \overline{WR}

| Address Width | Mnemonic | Operation | Execution Time |
|---------------|----------------|-----------------------------|----------------|
| 8 bits | MOVX A , @Ri | Read External RAM @Ri | 2 |
| 8 bits | MOVX @Ri , A | Write External RAM@Ri | 2 |
| 16 bits | MOVX A , @DPTR | Read External RAM @DPTR | 2 |
| 16 bits | MOVX @DPTR , A | Write External RAM @DPTR | 2 |

ตารางผนวก 7 ชุดคำสั่งการโอนย้ายข้อมูลระหว่างรีจิสเตอร์ A กับหน่วยความจำภายนอก

ก. การเปิดตาราง (Look - up) ชุดคำสั่งของการเขียนโปรแกรมแบบเปิดตารางได้ดังตาราง

ผนวก 8

| Mnemonic | Operation | Execution Time |
|--------------------|----------------------------------|----------------|
| MOVC A , @A + DPTR | Read Pgm Memory at (A + DPTR) | 2 |
| MOVC A , @A + PC | Read Pgm Memory at (A + PC) | 2 |

ตารางผนวก 8 คำสั่งแบบการเปิดตาราง

1.2.2.4 Boolean Instructions

MCS - 51 มีคำสั่งที่ทำงานแบบ Boolean ได้ ซึ่งประกอบด้วยชุดคำสั่ง Set, Clear, Complement, OR และ AND โดยจะเป็นการกระทำแบบบิตต่อบิต โดยตำแหน่ง 00H - 7FH และตำแหน่ง 80H - FFH ใน SFR จะเป็นการอ้างตำแหน่งแบบ Direct Addressing สำหรับตำแหน่งไบต์ที่ 20H ถึง 2FH สามารถอ้างตำแหน่งเป็นตำแหน่งบิตได้ โดยเริ่มตั้งแต่บิต 0 ของตำแหน่ง 20H (บิต 00H) ถึงบิต 7 ของตำแหน่ง 2 FH (บิต 7FH) นอกจากนี้ใน SFR บางตำแหน่งก็สามารถอ้างแบบบิตได้ด้วย

| Mnemonic | Operation | Execution Time |
|--------------|------------------------------------|----------------|
| ANL C, bit | $C = C \text{ AND bit}$ | 2 |
| ANL C, /bit | $C = C \text{ AND (NOT bit)}$ | 2 |
| ORL C, bit | $C = C \text{ OR bit}$ | 2 |
| ORL C, /bit | $C = C \text{ OR (NOT bit)}$ | 2 |
| MOV C, bit | $C = C \text{ bit}$ | 1 |
| MOV bit, C | $\text{bit} = C$ | 2 |
| CLR C | $C = 0$ | 1 |
| CLR bit | $\text{bit} = 1$ | 1 |
| SETB bit | $\text{bit} = 1$ | 1 |
| CPL C | $C = \text{NOT } C$ | 1 |
| CPL bit | $\text{bit} = \text{NOT bit}$ | 1 |
| JC Rel | Jump if $C = 1$ | 2 |
| JNC Rel | Jump if $C = 0$ | 2 |
| JB bit | Jump if $\text{bit} = 1$ | 2 |
| JNB bit, Rel | Jump if $\text{bit} = 0$ | 2 |
| JBC bit, Rel | Jump if $\text{bit} = 1$; CLR bit | 2 |

ตารางผนวก 9 ชุดคำสั่งแบบ Boolean

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAXIM

Low-Power, 8-Channel, Serial 10-Bit ADC

MAX192

General Description

The MAX192 is a low-cost, 10-bit data-acquisition system that combines an 8-channel multiplexer, high-bandwidth track/hold, and serial interface with high conversion speed and ultra-low power consumption. The device operates with a single +5V supply. The analog inputs are software configurable for single-ended and differential (unipolar/bipolar) operation.

The 4-wire serial interface connects directly to SPI™, QSPI™, and Microwire™ devices, without using external logic. A serial strobe output allows direct connection to the TMS320 family digital signal processors. The MAX192 uses either the internal clock or an external serial-interface clock to perform successive approximation A/D conversions. The serial interface can operate beyond 1MHz when the internal clock is used. The MAX192 has an internal 4.096V reference with a drift of ± 30 ppm typical. A reference-buffer amplifier simplifies gain trim and two sub-LSBs reduce quantization errors.

The MAX192 provides a hardwired SHDN pin and two software-selectable power-down modes. Accessing the serial interface automatically powers up the device, and the quick turn-on time allows the MAX192 to be shut down between conversions. By powering down between conversions, supply current can be cut to under 10 μ A at reduced sampling rates.

The MAX192 is available in 20-pin DIP and SO packages, and in a shrink-small-outline package (SSOP) that occupies 30% less area than an 8-pin DIP. The data format provides hardware and software compatibility with the MAX186/MAX188. For anti-aliasing filters, consult the data sheets for the MAX291-MAX297.

Applications

- Automotive
- Pen-Entry Systems
- Consumer Electronics
- Portable Data Logging
- Robotics
- Battery-Powered Instruments, Battery Management
- Medical Instruments

Features

See last page for Typical Operating Circuit.

SPI and QSPI are trademarks of Motorola Corp.

Microwire is a trademark of National Semiconductor Corp.

MAXIM

Maxim Integrated Products

For free samples & the latest literature: <http://www.maxim-ic.com>, or phone 1-800-998-8800.

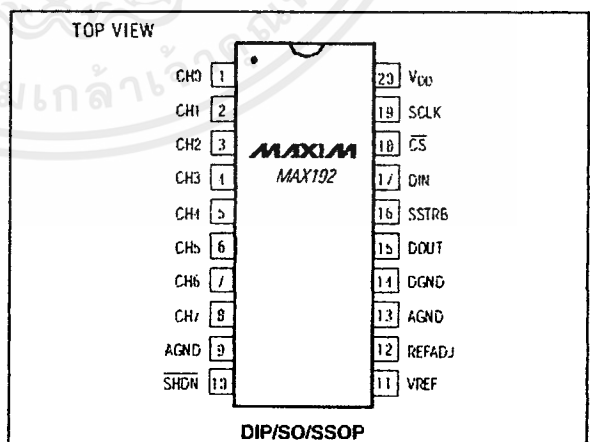
For small orders, phone 408-737-7600 ext. 3468.

- ◆ 8-Channel Single-Ended or 4-Channel Differential Inputs
- ◆ Single +5V Operation
- ◆ Low Power: 1.5mA (operating)
2 μ A (power-down)
- ◆ Internal Track/Hold, 133kHz Sampling Rate
- ◆ Internal 4.096V Reference
- ◆ 4-Wire Serial Interface is Compatible with SPI, QSPI, Microwire, and TMS320
- ◆ 20-Pin DIP, SO, SSOP Packages
- ◆ Pin-Compatible 12-Bit Upgrade (MAX186/MAX188)

Ordering Information

| PART | TEMP. RANGE | PIN-PACKAGE | INL (LSB) |
|-------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------|
| MAX192ACIP ¹ | 0°C to +70°C | 20 Plastic DIP ² | $\pm 1/2$ |
| MAX192BCIP ¹ | 0°C to +70°C | 20 Plastic DIP ² | ± 1 |
| MAX192ACWI ¹ | 0°C to +70°C | 20 Wide SO | $\pm 1/2$ |
| MAX192BCWI ¹ | 0°C to +70°C | 20 Wide SO | ± 1 |
| MAX192ACAI ¹ | 0°C to +70°C | 20 SSOP ³ | $\pm 1/2$ |
| MAX192BCAI ¹ | 0°C to +70°C | 20 SSOP ³ | ± 1 |
| MAX192ALIP ¹ | -40°C to +85°C | 20 Plastic DIP ² | $\pm 1/2$ |
| MAX192BLIP ¹ | -40°C to +85°C | 20 Plastic DIP ² | ± 1 |
| MAX192ALWI ¹ | -40°C to +85°C | 20 Wide SO | $\pm 1/2$ |
| MAX192BLWI ¹ | -40°C to +85°C | 20 Wide SO | ± 1 |
| MAX192ALAI ¹ | -40°C to +85°C | 20 SSOP ³ | $\pm 1/2$ |
| MAX192BLAI ¹ | -40°C to +85°C | 20 SSOP ³ | ± 1 |
| MAX192AMJ ¹ | -55°C to +125°C | 20 CLRDIP ² | $\pm 1/2$ |
| MAX192BMJ ¹ | -55°C to +125°C | 20 CLRDIP ² | ± 1 |

Pin Configuration



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Low-Power, 8-Channel, Serial 10-Bit ADC

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

| | |
|---|-----------------------------------|
| V _{DD} to AGND | -0.3V to +6V |
| AGND to DGND | -0.3V to +0.3V |
| CI ₀ –CI ₁₇ to AGND, DGND | -0.3V to (V _{DD} + 0.3V) |
| CI ₀ –CI ₁₇ Total Input Current | ±20mA |
| V _{R1} to AGND | -0.3V to (V _{DD} + 0.3V) |
| R _{L1} ADJ to AGND | -0.3V to (V _{DD} + 0.3V) |
| Digital Inputs to DGND | -0.3V to (V _{DD} + 0.3V) |
| Digital Outputs to DGND | -0.3V to (V _{DD} + 0.3V) |
| Digital Output Sink Current | 25mA |

| | |
|---|-----------------|
| Continuous Power Dissipation (I _A = +70°C) | |
| Plastic DIP (derate 11.11mW/°C above +70°C) | 889mW |
| SO (derate 10.00mW/°C above +70°C) | 800mW |
| SSOP (derate 8.00mW/°C above +70°C) | 640mW |
| CLRDIP (derate 11.11mW/°C above +70°C) | 889mW |
| Operating Temperature Ranges | |
| MAX192_C_I [†] | 0°C to +70°C |
| MAX192_L_I [†] | -40°C to +85°C |
| MAX192_MJ [†] | -55°C to +125°C |
| Storage Temperature Range | -60°C to +150°C |
| Load Temperature (soldering, 10sec) | +300°C |

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(V_{DD} = 5V ±5%, f_{C,K} = 2.0MHz, external clock (50% duty cycle), 15 clocks/conversion cycle (133ksp/s), 4.7µF capacitor at V_{R1} pin, I_A = I_{MIN} to I_{MAX} unless otherwise noted. Typical values are at I_A = +25°C.)

| PARAMETER | SYMBOL | CONDITIONS | MIN | TYP | MAX | UNITS |
|---|-------------------|---|-----|------|------|--------|
| DC ACCURACY (Note 1) | | | | | | |
| Resolution | | | 10 | | | Bits |
| Relative Accuracy (Note 2) | | MAX192A | | | ±1/2 | LSB |
| | | MAX192B | | | ±1 | |
| Differential Nonlinearity | DNL | No missing codes over temperature | | | ±1 | LSB |
| Offset Error | | | | | ±2 | LSB |
| Gain Error | | External reference, 4.096V | | | ±2 | LSB |
| Gain Temperature Coefficient | | External reference, 4.096V | | ±0.8 | | ppm/°C |
| Channel-to-Channel Offset Matching | | | | ±0.1 | | LSB |
| DYNAMIC SPECIFICATIONS (10kHz sine-wave input, 4.096Vp-p, 133ksp/s, 2.0MHz external clock) | | | | | | |
| Signal-to-Noise + Distortion Ratio | SINAD | | | 66 | | dB |
| Total Harmonic Distortion (up to the 5th harmonic) | THD | | | -70 | | dB |
| Spurious-Free Dynamic Range | SFDR | | | 70 | | dB |
| Channel-to-Channel Crosstalk | | 65kHz, V _{IN} = 4.096Vp-p (Note 3) | | -75 | | dB |
| Small-Signal Bandwidth | | -3dB rolloff | | 4.5 | | MHz |
| Full-Power Bandwidth | | | | 800 | | kHz |
| CONVERSION RATE | | | | | | |
| Conversion Time (Note 4) | t _{CONV} | Internal clock | 5.5 | 10 | | µs |
| | | External clock, 2MHz, 12 clocks/conversion | 6 | | | |
| Track/Hold Acquisition Time | t _{AZ} | | | 1.5 | | µs |
| Aperture Delay | | | | 10 | | ns |
| Aperture Jitter | | | | <50 | | ps |
| Internal Clock Frequency | | | | 1.7 | | MHz |

MAXIM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Low-Power, 8-Channel, Serial 10-Bit ADC

Track/Hold

The T/H enters its tracking mode on the falling clock edge after the fifth bit of the 8-bit control word has been shifted in. The T/H enters its hold mode on the falling clock edge after the eighth bit of the control word has been shifted in. If the converter is set up for single-ended inputs, IN- is connected to AGND, and the converter samples the "+" input. If the converter is set up for differential inputs, IN- connects to the "-" input, and the difference of $|IN+ - IN-|$ is sampled. At the end of the conversion, the positive input connects back to IN+, and C_{HOLD} charges to the input signal.

The time required for the T/H to acquire an input signal is a function of how quickly its input capacitance is charged. If the input signal's source impedance is high, the acquisition time lengthens and more time must be allowed between conversions. Acquisition time is calculated by:

$$t_{AZ} = 9(R_S + R_{IN})16\text{pF}$$

where $R_{IN} = 5\text{k}\Omega$, R_S = the source impedance of the input signal, and t_{AZ} is never less than $1.5\mu\text{s}$. Note that source impedances below $5\text{k}\Omega$ do not significantly affect the AC performance of the ADC. Higher source impedances can be used if an input capacitor is connected to the analog inputs, as shown in Figure 5. Note that the input capacitor forms an RC filter with the input source impedance, limiting the ADC's signal bandwidth.

Input Bandwidth

The ADC's input tracking circuitry has a 4.5MHz small-signal bandwidth, so it is possible to digitize high-speed transient events and measure periodic signals with bandwidths exceeding the ADC's sampling rate by using undersampling techniques. To avoid high-frequency signals being aliased into the frequency

band of interest, anti-alias filtering is recommended. See the data sheets for the MAX291-MAX297 filters.

Analog Input Range and Input Protection

Internal protection diodes, which clamp the analog input to V_{DD} and AGND, allow the channel input pins to swing from AGND - 0.3V to $V_{DD} + 0.3\text{V}$ without damage. However, for accurate conversions near full scale, the inputs must not exceed V_{DD} by more than 50mV, or be lower than AGND by 50mV.

If the analog input exceeds 50mV beyond the supplies, do not forward bias the protection diodes of off channels over 2mA.

The MAX192 can be configured for differential (unipolar or bipolar) or single-ended (unipolar only) inputs, as selected by bits 2 and 3 of the control byte (Table 3).

In the single-ended mode, set the UNI/BIP bit to unipolar. In this mode, analog inputs are internally referenced to AGND, with a full-scale input range from 0V to V_{RL1} .

In differential mode, both unipolar and bipolar settings can be used. Choosing unipolar mode sets the differential input range at 0V to V_{RL1} . The output code is invalid (code zero) when a negative differential input voltage is applied. Bipolar mode sets the differential input range to $\pm V_{RL1} / 2$. Note that in this differential mode, the common-mode input range includes both supply rails. Refer to Tables 4a and 4b for input voltage ranges.

Quick Look

To evaluate the analog performance of the MAX192 quickly, use Figure 5's circuit. The MAX192 requires a control byte to be written to DIN before each conversion. Tying DIN to +5V feeds in control bytes of

Table 1. Channel Selection in Single-Ended Mode ($\overline{\text{SGL/DIF}} = 1$)

| SEL2 | SEL1 | SEL0 | CH0 | CH1 | CH2 | CH3 | CH4 | CH5 | CH6 | CH7 | AGND |
|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 0 | 0 | 0 | 1 | | | | | | | | - |
| 1 | 0 | 0 | | 1 | | | | | | | - |
| 0 | 0 | 1 | | | 1 | | | | | | - |
| 1 | 0 | 1 | | | | 1 | | | | | - |
| 0 | 1 | 0 | | | | | 1 | | | | - |
| 1 | 1 | 0 | | | | | | 1 | | | - |
| 0 | 1 | 1 | | | | | | | 1 | | - |
| 1 | 1 | 1 | | | | | | | | 1 | - |

MAXIM

Low-Power, 8-Channel, Serial 10-Bit ADC

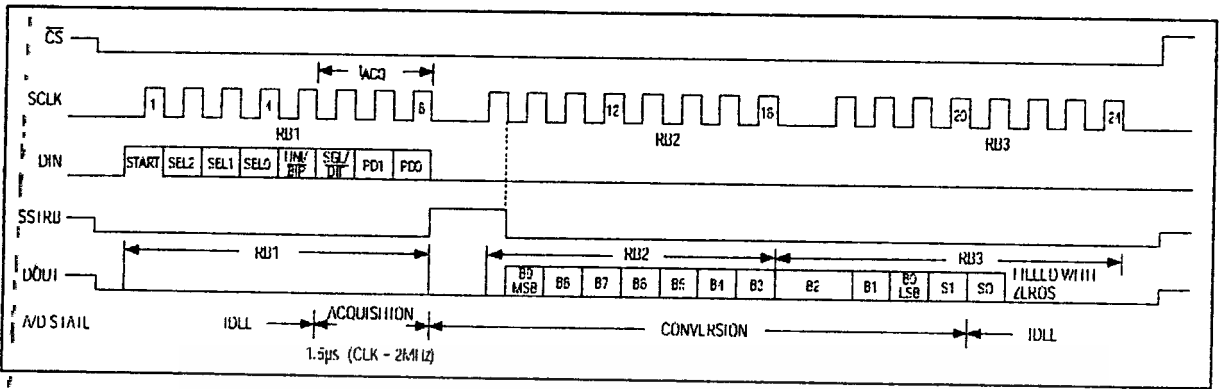


Figure 6. 24-bit External Clock Mode Conversion Timing (SPI, QSPI and Microwire Compatible)

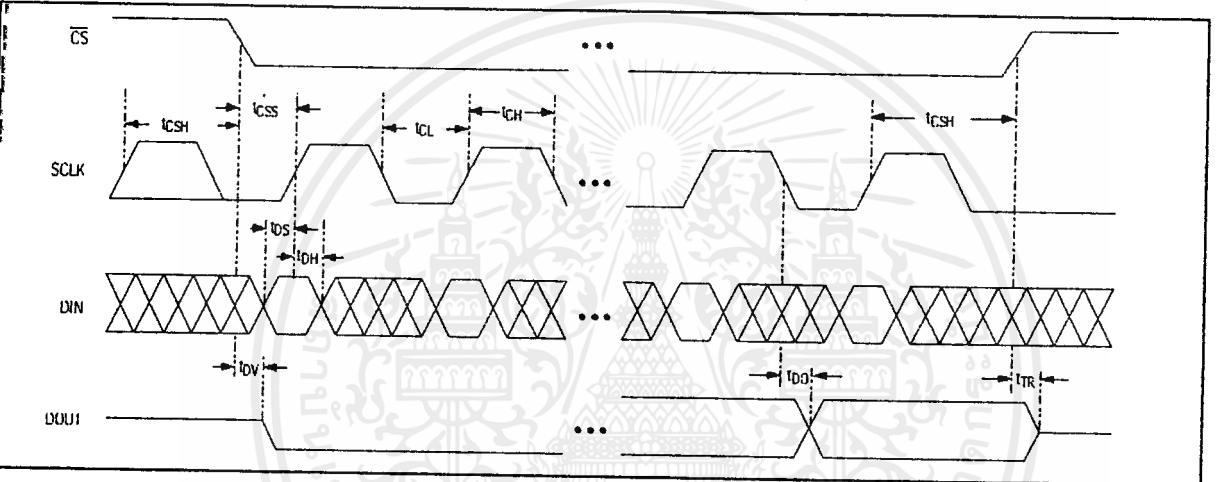


Figure 7. Detailed Serial-Interface Timing

Pulling \overline{CS} high prevents data from being clocked into the MAX192 and three-states DOUT, but it does not adversely affect an internal clock-mode conversion already in progress. When internal clock mode is selected, SSTRB does not go into a high-impedance state when \overline{CS} goes high.

Figure 10 shows the SSTRB timing in internal clock mode. In internal clock mode, data can be shifted in and out of the MAX192 at clock rates exceeding 4.0MHz, provided that the minimum acquisition time, t_{AZ} , is kept above 1.5µs.

Data Framing

The falling edge of \overline{CS} does **not** start a conversion on the MAX192. The first logic high clocked into DIN is interpreted as a start bit and defines the first bit of the control byte. A conversion starts on the falling edge of SCLK,

after the eighth bit of the control byte (the PD0 bit) is clocked into DIN. The start bit is defined as:

The first high bit clocked into DIN with \overline{CS} low anytime the converter is idle, e.g. after V_{DD} is applied.

OR

The first high bit clocked into DIN after bit 3 of a conversion in progress is clocked onto the DOUT pin.

If a falling edge on \overline{CS} forces a start bit before bit 3 (B3) becomes available, then the current conversion will be terminated and a new one started. Thus, the fastest the MAX192 can run is 15 clocks per conversion. Figure 11a shows the serial-interface timing necessary to perform a conversion every 15 SCLK cycles in external clock mode. If \overline{CS} is low and SCLK is continuous, guarantee a start bit by first clocking in 16 zeros.



Low-Power, 8-Channel, Serial 10-Bit ADC

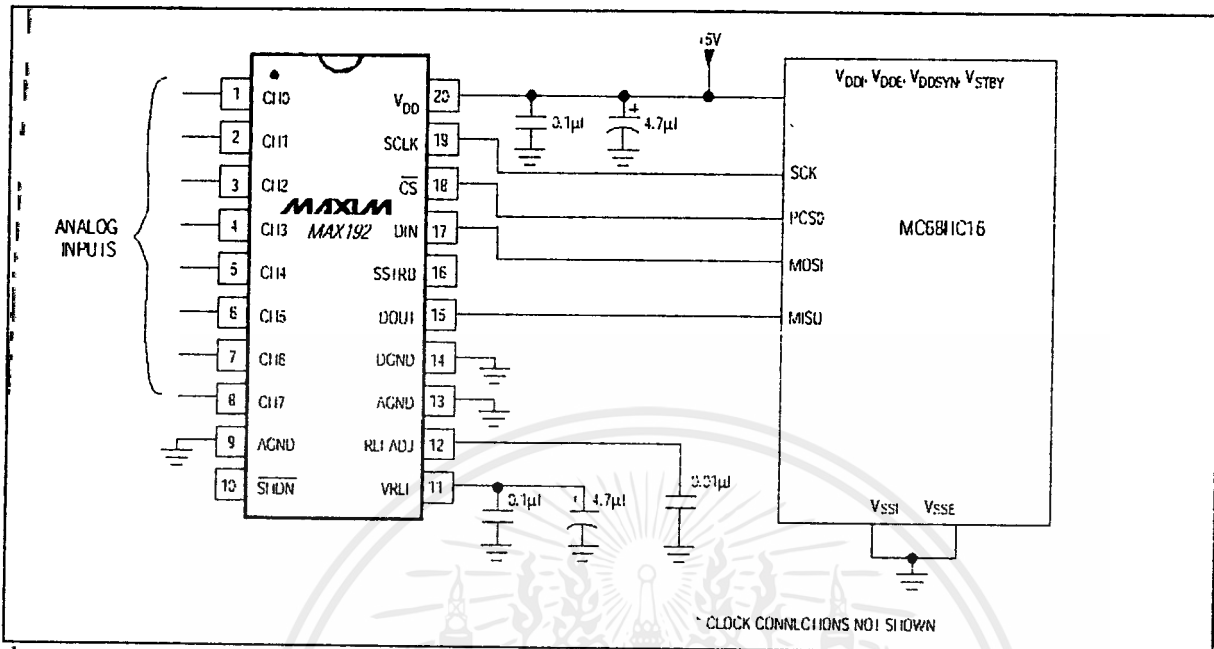


Figure 19. MAX192 QSPI Connection

TMS320 to MAX192 Interface

Figure 22 shows an application circuit to interface the MAX192 to the TMS320 in external clock mode. The timing diagram for this interface circuit is shown in Figure 23.

Use the following steps to initiate a conversion in the MAX192 and to read the results:

- 1) The TMS320 should be configured with CLKX (transmit clock) as an active-high output clock and CLKR (TMS320 receive clock) as an active-high input clock. CLKX and CLKR of the TMS320 are tied together with the SCLK input of the MAX192.
- 2) The MAX192 \overline{CS} is driven low by the XF_ I/O port of the TMS320 to enable data to be clocked into DIN of the MAX192.
- 3) An 8-bit word (1XXXXX11) should be written to the MAX192 to initiate a conversion and place the device into external clock mode. Refer to Table 3 to select the proper XXXXX bit values for your specific application.

- 4) The SSTRB output of the MAX192 is monitored via the FSR input of the TMS320. A falling edge on the SSTRB output indicates that the conversion is in progress and data is ready to be received from the MAX192.
- 5) The TMS320 reads in one data bit on each of the next 16 rising edges of SCLK. These data bits represent the 10-bit conversion result and two sub-LSBs, followed by four trailing bits, which should be ignored.
- 6) Pull \overline{CS} high to disable the MAX192 until the next conversion is initiated.

MAXIM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณที่สตรีทุกคนที่ช่วยอนุเคราะห์ในการเบิกยืมอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการทำโครงการด้วยดีตลอดมา ขอขอบคุณพ่อและแม่ผู้ให้กำเนิดทุกท่านถ้าไม่มีท่านคงไม่มีเราในวันนี้ ขอขอบคุณพี่ทุกคน, เพื่อนทุกคนที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการทำโครงการนี้ และน้องๆทุกคนที่ช่วยเป็นกำลังใจให้เรามาโดยตลอด และที่จะขาดไปไม่ได้ อาจารย์พิชิต ล้ำของ อาจารย์ที่ปรึกษาผู้ที่ให้คำแนะนำต่างๆในการทำโครงการนี้โดยตลอดมา ส่วนอีกหลายท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามก็ต้องขออภัยมาด้วย ณ. ที่นี้

สุดท้ายนี้คงหวังว่าโครงการชิ้นนี้จะเป็นประโยชน์กับผู้ที่สนใจที่จะศึกษาในด้านนี้ไม่มากนักน้อย หากมีข้อผิดพลาดประการใดก็ต้องขออภัยมา ณ. ที่นี้

คณะผู้จัดทำ

เฉลิมพล วรรณสิงห์

มานพ ชัยรัมย์

สมนึก วิริยะประสิทธิ์ชัย

วินัย บุญรอด

เอกสารอ้างอิง

1. ปราโมทย์ เคะชะอำไพ, "ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม", จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538, หน้า 226-242
2. มงคล เดชนครินทร์, ชาตรีศรีไพพรรณ, "อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน", จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538, หน้า 269-287
3. ชีรวัดน์ ประกอบผล, "การประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์", สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2540
4. Erwin Kreyszig, "Advanced Engineering Mathematics", John Wiley & Sons, 1993, pp.209-214
5. William D.Stevenson, Jr, "Element of Power System Analysis", McGraw Hill, 1982

