

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าของ
สารตัวนำยิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_7$

นส. พรเพ็ญ ปริดาธนาภิรักษ์
นาย เรืองศักดิ์ ห้วยหงษ์ทอง

1กพ.
พ 252 ก
2537

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

6-12020081

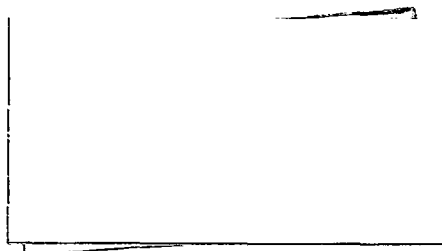
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2537



Resistivity Measurement of a $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ Superconductor

Miss. Pornpen Predatanapiruk

Mr. Ruangsak Huayhongtong



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement

for the Degree of Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1994

หัวข้อโครงการพิเศษ

การวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าของ

สารตัวนำยิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_7$

โดย

นางสาว พรเพ็ญ ปรีดาธนาภิรักษ์

นาย เรืองศักดิ์ ห้วยหงษ์ทอง

ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย

รศ. สุรพล รักวิชัย

ผศ. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้ใช้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

.....
(ผศ.ดร. ปรีชา เทียนสมประสงค์)

คณะกรรมการโครงการพิเศษ

ประธานกรรมการ

.....
(ผศ.ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย)

กรรมการ

.....
(ผศ.ดร. วราวุฒิ เกาส์ดดา)

กรรมการ

.....
(รศ. สุรพล รักวิชัย)

กรรมการ

.....
(ผศ. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล)

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า ของสารตัวนำยวดยิ่งชนิด $YBa_2Cu_3O_7$
โดย	น.ส. พรเพ็ญ ปรีดาธนาภิรักษ์ นาย เรืองศักดิ์ ห้วยหงษ์ทอง
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย ผศ. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล รศ. สุรพล รักวิชัย
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2537

บทคัดย่อ

ชุดทดลองนี้สร้างขึ้นเพื่อวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าของสารตัวนำยวดยิ่ง ชุดทดลองนี้ประกอบไปด้วยหัววัดซึ่งเป็นแบบ 4 ขั้วไฟฟ้าเชิงเส้น ทำจากทองเหลืองและมีแท่นยึดหัววัดเพื่อให้เคลื่อนที่ขึ้นลงได้โดยการใช้สเตปมอเตอร์ควบคุมด้วยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุม ใช้ไนโตรเจนเหลวในการลดอุณหภูมิ การควบคุมระดับความลึกที่จุ่มลงในไนโตรเจนเหลวของหัววัดทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของระบบได้ การวัดอุณหภูมิใช้ RTD ชนิดโลหะเพททินัม 100Ω เป็นตัววัด ใช้ผ้าพลาสติกหุ้มท่อหัววัดไว้เพื่อป้องกันบรรยากาศและฝุ่นจากภายนอก และเป็นการเพิ่มความมีเสถียรภาพของอุณหภูมิของชุดทดลองได้ สำหรับหัววัดซึ่งเป็นแบบ 4 ขั้วไฟฟ้าเชิงเส้นนั้นมีการป้อนกระแสคงที่ค่าต่างๆ และจ่ายกระแสทั้งในทิศไปและกลับเพื่อวัดแรงดันที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปคำนวณค่าเฉลี่ยของความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า

Special Project Titel	Resistivity Measurement of a $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ Superconductor
Name	Miss Pornpen Predatanapiruk Mr. Ruangsak Huayhongtong
Speacial Project Advisor	Dr. Aree Wichaeanchai Mr. Sirisuk Techataweekul Mr. Surapon Rukvijai
Department	Applied Physics
Academic Year	1994

Abstract

The apparatus of resistivity measurement are constructed. It consisted of a brass block, was employed as the sample holder and with a four-point probe measurement. It used the stepping motor to control the movment of sample holder and cooled down the system by liquid Nitrogen. The change of the depth of sample holder can control the temperature of system and can measure the temperature by RTD ,type Pt 100 Ω . Microcontroller and its software used for control the speed rotation of the motor. To protect the external environment we use the plastic fabric cover the sample holder.

For the four-point probe, the current that was applied to it was constant and applied in two direction and measured the voltage for calculation the mean of the resistivity.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้ ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลต่างๆ ดังนี้

คุณพ่อและคุณแม่	ที่คอยให้กำลังใจ ห่วงใยสุขภาพ และให้การสนับสนุนในการศึกษาด้วยดีตลอดมา
ผศ.ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย	ที่ให้คำปรึกษาด้านทฤษฎีและรายละเอียดต่างๆ ในโครงการนี้
ผศ. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล	ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์ต่างๆ
รศ. สุรพล รักวิชัย	ที่ให้คำแนะนำในการทำโครงการพิเศษนี้
อ. วีรวัฒน์ ประกอบผล	ที่ให้เชื้อเพื่ออุปกรณ์ต่างๆ
คุณ พันธ อิศรพานิชย์	ที่ให้ความช่วยเหลือในการกลึงเครื่องมือ
คุณ บุญชัย พจนาสมสมาน	ที่ให้คำปรึกษาด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์
คุณ เจริญศักดิ์ มันทาดิลก	ที่ช่วยแนะนำสิ่งต่างๆที่เป็นประโยชน์
คุณ สงกรานต์ คุ้มพุด	ที่ช่วยแนะนำด้านซอฟต์แวร์
เพื่อนๆ พี่น้องทุกคน	ที่คอยให้กำลังใจและคอยถามไถ่ทุกข์สุข

นางสาว พรเพ็ญ ปรีดาธนาภิรักษ์

นาย เรืองศักดิ์ ห้วยหงษ์ทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูป	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 สารตัวนำวอดยิ่งและอุณหภูมิวิกฤติ	3
2.1.1 อุณหภูมิวิกฤติ	3
2.1.2 ทฤษฎีและแนวคิด	5
2.2 การวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า	8
2.2.1 ความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า	8
2.2.2 การวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า	9
2.2.3 ข้อผิดพลาดที่ควรระวังในการวัด	20
ความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า	21
2.3 การวัดอุณหภูมิ	21
2.3.1 ตัวต้านทานแปรค่าตามอุณหภูมิ	21
2.3.2 หลักการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์มิสเตอร์	28
2.4 ทฤษฎีและการทำงานของสเตปมอเตอร์	36
2.4.1 นิยามของสเตปมอเตอร์	37
2.4.2 หลักการทำงานของสเตปมอเตอร์	37
2.4.3 การแบ่งชนิดของสเตปมอเตอร์	39
2.4.4 ระบบสเตปมอเตอร์	50
2.4.5 แรงบิด	51
2.4.6 การแกว่งเข้าสู่สภาวะคงตัว	51

	หน้า
2.4.7 การสแตปที่แตกต่างกัน	53
2.4.8 การกระตุ้น	54
2.4.9 การกำจัดสไปค์	56
2.4.10 การพิจารณาวงจรรับมอเตอร์	58
บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินงาน	62
3.1 แผนผังของชุดวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า	62
3.2 การออกแบบโครงสร้างชุดวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า	63
3.3 การควบคุมสแตปมอเตอร์โดยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์	64
3.4 การทำงานของระบบ	64
3.4.1 การติดขั้วไฟฟ้าเพื่อการวัดแบบ 4 ขั้วเชิงเส้น	64
3.4.2 เครื่องมือยึดจับหัววัด	65
3.4.3 วงจรแหล่งกำเนิดกระแสคงที่	67
3.4.4 วงจรรับมอเตอร์และการควบคุมสแตปมอเตอร์	67
บทที่ 4 ผลการทดลอง	70
4.1 ทดสอบแหล่งจ่ายกระแสคงที่	70
4.2 การทำงานของมอเตอร์และเครื่องมือ	70
บทที่ 5 สรุปผลและแนวทางการพัฒนา	71
5.1 สรุปผล	71
5.2 แนวทางการพัฒนา	71
ภาคผนวก ก ไมโครคอนโทรลเลอร์	1-ก
ภาคผนวก ข ไอซีเรกูเลเตอร์ TL 783C	1-ข
ภาคผนวก ค RTD	1-ค
เอกสารอ้างอิง	1-ง

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	แสดงค่าความต้านทานกับอุณหภูมิ	3
รูปที่ 2.2	แสดงค่าสภาพต้านทานกับอุณหภูมิ	4
รูปที่ 2.3	แสดง κ_0 และ κ_n กับ T ในแบบจำลองสองกระแส	6
รูปที่ 2.4	กราฟแสดงความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิ ของสารชนิด $YBa_2Cu_3O_7$	8
รูปที่ 2.5	การวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าโดยตรง	9
รูปที่ 2.6	การวัดแบบ 2 ขั้ว	11
รูปที่ 2.7	การวัดแบบ 4 ขั้วเชิงเส้น	12
รูปที่ 2.8	ค่าแก้สำหรับความหนาของสาร	15
รูปที่ 2.9	กราฟแสดงค่าแก้สำหรับขนาดของสาร	17
รูปที่ 2.10	ค่าแก้สำหรับระยะระหว่างขั้วกับขอบของสารกรณีต่างๆ กัน	18
รูปที่ 2.11	วงจรพื้นฐานสำหรับการวัดแบบ 4 ขั้ว	19
รูปที่ 2.12	กราฟความสัมพันธ์ RT/RO กับอุณหภูมิของโลหะ	22
รูปที่ 2.13	RTD ในลักษณะการใช้งาน	23
รูปที่ 2.14	วงจรเทวินินสำหรับวงจรบริดจ์สมดุล	23
รูปที่ 2.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า x และค่า v	27
รูปที่ 2.16	วงจรพื้นฐานของเทอร์โมคัปเปิล	29
รูปที่ 2.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันซีเบค	29
รูปที่ 2.18	วงจรของเทอร์โมคัปเปิล	31
รูปที่ 2.19	แสดงกฎ 5 ขั้วของเทอร์โมคัปเปิล	32
รูปที่ 2.20	แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับอุณหภูมิ	33
รูปที่ 2.21	โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิลแบบง่าย ๆ	34
รูปที่ 2.22	ขนาดและรูปร่างของเทอร์โมคัปเปิลแบบต่างๆ	34
รูปที่ 2.23	รูปแบบของเทอร์โมเวล	35
รูปที่ 2.24	รูปร่างและการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลแบบต่างๆ	36

	หน้า	
รูปที่ 2.25	แสดงถึงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในลักษณะต่างๆ	38
รูปที่ 2.26	แสดงแรงดึงดูดทำให้เกิดแรงบิดที่หมุนอเมเจอร์ให้ไปอยู่ตำแหน่งสมดุล	38
รูปที่ 2.27	โครงสร้างของสเตเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรมี 4 เฟส	40
รูปที่ 2.28	สเตปมอเตอร์แบบค่ารีลัคแตนซ์แปรค่าแบบสแต็กเดี่ยว	41
รูปที่ 2.29	แสดงโครงสร้างของสเตปมอเตอร์แบบค่ารีลัคแตนซ์แปรค่าได้ที่มี 3 เฟส	45
รูปที่ 2.30	โครงสร้างของไฮบริดสเตเตอร์	46
รูปที่ 2.31	วงจรแม่เหล็กของไฮบริดสเตปมอเตอร์	48
รูปที่ 2.32	การพันขดลวดเฟสของสเตเตอร์	49
รูปที่ 2.33	แผนผังแสดงระบบสเตปมอเตอร์	50
รูปที่ 2.34	ผลตอบสนองในการเข้าสู่ภาวะคงตัว	52
รูปที่ 2.35	โค้งแสดงการเพิ่มและลดความเร็วของมอเตอร์	53
รูปที่ 2.36	แสดงแผนภูมิเวลาของการกระตุ้นแบบต่างๆ	54
รูปที่ 2.37	กราฟแสดงผลการตอบสนองของสเตปมอเตอร์ต่อการกระตุ้นเฟสเดี่ยว	55
รูปที่ 2.38	กราฟแสดงผลการตอบสนองของสเตปมอเตอร์ต่อการกระตุ้นสองเฟส	55
รูปที่ 2.39	วิธีการกำจัดสไปค์	57
รูปที่ 2.40	ตัวอย่างวงจรกำจัดแรงดันสไปค์	58
รูปที่ 2.41(a)	แสดงวงจรเทียบเคียงขดลวดของสเตปมอเตอร์	59
รูปที่ 2.41(b)	แสดงวงจรรับที่มีความต้านทานฟอร์ซิง	59
รูปที่ 2.42	วงจรรับแบบสองสถานะ	60
รูปที่ 2.43	วงจรรับแบบชอปเปอร์	61
รูปที่ 3.1	แผนผังของชุดทดลอง	62
รูปที่ 3.2	แสดงการติดขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 ที่สาร	65
รูปที่ 3.3	แท่นยึดจับหัววัด	65

		หน้า
รูปที่ 3.4	เครื่องมือยึดจับและขับเคลื่อนหัววัด	66
รูปที่ 3.5	ปลายของหัววัดที่ใช้ยึดจับสาร	66
รูปที่ 3.6	วงจรแหล่งกำเนิดกระแสคงที่	67
รูปที่ 3.7	วงจรควบคุมสเตปมอเตอร์	68
รูปที่ 3.8	แผนผังการทำงานของโปรแกรม	69

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ค่าแก้ในกรณีต่างๆ	17
ตารางที่ 2.2	ชนิดของเทอร์โมคัปเปิล	30
ตารางที่ 3.1	พารามิเตอร์บางตัวของสเตรปมอเตอร์	44
ตารางที่ 3.2	ตัวอย่างของมมสเตรป	51

บทที่ บทนำ

นับตั้งแต่มีการค้นพบสารที่มีคุณสมบัติเป็นสารตัวนำยิ่งยวดยิ่ง โดยนักวิทยาศาสตร์หลายฝ่าย ซึ่งเป็นเรื่องที่น่าสนใจของการค้นพบเนื่องจากความหวังที่จะนำการค้นพบนี้ไปสู่การเปลี่ยนแปลงอย่างใหญ่หลวงของความก้าวหน้าแห่งเทคโนโลยี เช่นเดียวกับกับการค้นพบทรานซิสเตอร์เมื่อ 30 กว่าปีก่อน สารตัวนำยิ่งยวดคือ สารที่มีปรากฏการณ์ความเป็นตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ที่เรียกว่า อุณหภูมิกритติ คือเป็นจุดที่ความต้านทานของสารมีค่าต่ำมาก จนถึงว่าไม่มีหรือวัดค่าความต้านทานไม่ได้เลย ดังนั้นหากค้นพบสารที่คาดว่าเป็นสารตัวนำยิ่งยวด คุณสมบัติแรกที่ต้องวัดคือการวัดความต้านทานไฟฟ้าและหาอุณหภูมิกритติของสารตัวอย่างนั้น โครงการพิเศษนี้จึงมุ่งเน้นไปในทิศทางดังกล่าวคือ สร้างชุดเครื่องมือและวิธีการวัดที่เหมาะสมสำหรับการวัดความต้านทานและอุณหภูมิกритติของสารตัวนำยิ่งยวดโดยคำนึงถึงการลดอุณหภูมิโดยการจุ่มสารตัวอย่างลงในไนโตรเจนเหลว ซึ่งมีจุดเดือด 77 K ซึ่งถือว่าสารตัวนำยิ่งยวดที่มีอุณหภูมิกритติสูงพอที่จะใช้ในไนโตรเจนเหลวในการลดอุณหภูมิเป็นสารตัวนำยิ่งยวดอุณหภูมิสูง (High Temperature Superconductor)

เป็นที่น่าเสียดายว่าสารตัวนำยิ่งยวดเท่าที่ค้นพบในปัจจุบันยังมีอุณหภูมิกритติที่ไม่สูงนัก แม้จะเป็นสารตัวนำยิ่งยวดอุณหภูมิสูงก็ตาม ดังนั้นการอาศัยคุณสมบัติและการใช้งานยังไม่สะดวกและกว้างขวางเท่าที่ควร แต่ก็สามารถคาดหวังได้ว่าในอนาคตอาจมีสารตัวนำยิ่งยวดใหม่ๆ ที่มีอุณหภูมิกритติสูงกว่านี้จนสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิห้องจากการพัฒนาและค้นคว้าอย่างไม่หยุดยั้งของนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลก

วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าและอุณหภูมิกритติของสารตัวนำยิ่งยวด
- 2) เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องมือวัด ความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าเพื่อใช้กับสารตัวนำยิ่งยวดที่จุ่มลงในไนโตรเจนเหลว
- 3) เพื่อวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าและอุณหภูมิกритติจากเครื่องมือที่สร้างขึ้น
- 4) เพื่อศึกษาและประยุกต์การใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมสเตปมอเตอร์

ขั้นตอนการทำงาน

- 1) ศึกษาและรวบรวมข้อมูล เกี่ยวกับคุณสมบัติความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าและอุณหภูมิวิกฤติของสารตัวนำยิ่งยวด
- 2) ออกแบบโครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องวัดความต้านทานโดยใช้การวัดแบบ 4 ขั้วเชิงเส้น
- 3) สร้างแหล่งจ่ายไฟที่ต้องใช้ในระบบ
- 4) ออกแบบและสร้างวงจรจ่ายกระแสคงที่สำหรับสารตัวนำสารตัวนำยิ่งยวด
- 5) ศึกษาการทำงานและการควบคุมสเตปมอเตอร์
- 6) ศึกษาการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ และเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของสเตปมอเตอร์
- 7) ทดลองการทำงานของสเตปมอเตอร์และทดลองใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนชุดทดลอง
- 8) ติดตั้งเครื่องวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าของสารตัวนำยิ่งยวด และทำการทดลอง
- 9) บันทึกผลการทดลองและสรุปผล

ประโยชน์ที่ได้รับ

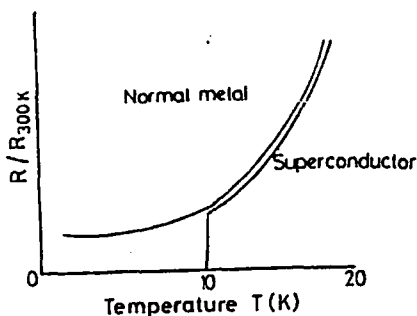
- 1) สามารถวัดค่าสภาพต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าของสารตัวนำยิ่งยวด
- 2) สามารถหาค่าอุณหภูมิวิกฤติของสารตัวนำยิ่งยวด
- 3) สามารถนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาประยุกต์ใช้ควบคุมสเตปมอเตอร์

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

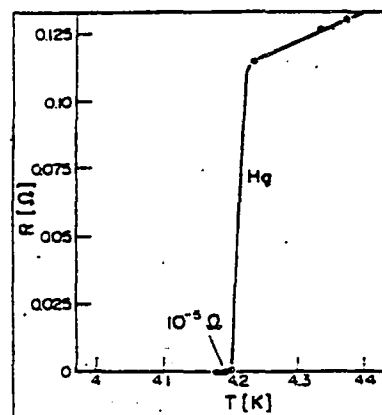
2.1 สารตัวนำยวดยิ่งและอุณหภูมิวิกฤติ (Superconductor and Critical Temperature)

2.1.1 อุณหภูมิวิกฤติ

ปรากฏการณ์นำไฟฟ้ายวดยิ่งค้นพบครั้งแรกโดยนาย ฮอนเนส (Onnes) ในปี ค.ศ. 1911 โดยเขาได้ทำการลดอุณหภูมิของโลหะปรอทลงต่ำกว่า 4.2 เคลวิน โดยใช้ฮีเลียมเหลว ปรากฏว่าความต้านทานของโลหะปรอทลดต่ำลงเหลือ 0.08 โอห์ม ที่ประมาณ 4 เคลวิน และน้อยกว่า 3×10^{-6} โอห์ม ที่อุณหภูมิประมาณ 0.01 เคลวิน จากกราฟดังรูปที่ 2.1ก เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานกับอุณหภูมิของโลหะธรรมดาและโลหะที่เป็นสารตัวนำยวดยิ่ง ส่วนกราฟรูปที่ 2.1ข เป็นกราฟแสดงถึงผลการทดลองของ Onnes ซึ่งได้แสดงให้เห็นถึงการเป็นตัวนำยวดยิ่งของปรอท (Hg) ที่ 4.2 เคลวิน



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 แสดงค่าความต้านทานกับอุณหภูมิ

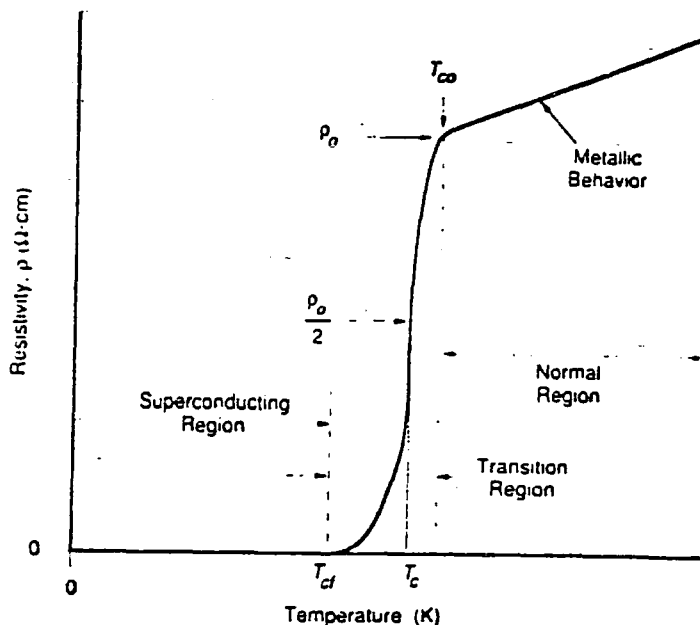
ก) กราฟระหว่างโลหะธรรมดากับโลหะที่เป็นสารตัวนำยวดยิ่ง

ข) กราฟแสดงผลการทดลองของ ฮอนเนส

ที่อุณหภูมิซึ่งโลหะเปลี่ยนสถานะจากการนำไฟฟ้าปกติเป็นสถานะการนำไฟฟ้ายวดยิ่ง เรียกว่าอุณหภูมิวิกฤติ (Transition Temperature or Critical Temperature, T_c)

การพิจารณาอุณหภูมิวิกฤตินั้นมักจะพูดถึงในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ และถ้าสารตัวนำยวดยิ่งนั้นมีช่วงการเปลี่ยนสถานะจากสถานะการนำปกติไปสู่สถานะการนำยวดยิ่ง (Transition Region) แคบๆ ค่าอุณหภูมิวิกฤติจะถือได้ว่าเป็นค่าอุณหภูมินั้น แต่ถ้าหากช่วงการเปลี่ยนสถานะนั้นมีช่วงกว้างก็ต้องมีการพิจารณาอย่างถูกต้อง

สำหรับสารตัวนำยวดยิ่งที่เป็นเซรามิก (Ceramic Superconductor) ค่าอุณหภูมิวิกฤติหาได้จากอุณหภูมิที่ค่าความต้านทานลดลงครึ่งหนึ่ง จากอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนจากการนำปกติสู่การนำยวดยิ่ง พิจารณารูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงค่าสภาพต้านทานกับอุณหภูมิ

ค่า T_{co} คือจุดที่กราฟมีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะการนำปกติ และค่าความนำของกราฟ จะมีความแตกต่างกันระหว่างการใช้กระแสตรงกับการใช้กระแสสลับ ถ้าค่าความต้านทานของกระแสตรงที่ T_{co} มีค่าเป็น ρ_0 ดังนั้นค่าความต้านทานที่ T_c จะมีค่าเป็น $\rho_0/2$ ค่า T_{cf} คือค่าอุณหภูมิสูงสุดโดยมีคุณสมบัติการนำยวดยิ่งที่สมบูรณ์

ค่าความกว้างของช่วงการเปลี่ยนสถานะ (Transition Width) อาจหมายถึงช่วงอุณหภูมิที่ค่าความต้านทานเปลี่ยนไปในช่วง 10% ถึง 90% ของความต้านทานที่ T_{∞} สำหรับสารตัวนำยวดยิ่งที่มีความบริสุทธิ์สูงจะมีค่าความกว้างของการเปลี่ยนสถานะแคบ แต่ในทางปฏิบัติค่า T_{∞} และค่า T_{cf} มักจะมาจากการประมาณค่าเท่านั้น ถ้าค่าความกว้างของการเปลี่ยนสถานะมีค่า น้อยก็จะทำให้ทราบถึงความบริสุทธิ์ของสารตัวนำยวดยิ่ง สำหรับในสารประกอบตัวนำยวดยิ่ง เช่น ออกไซด์ของทองแดงมีค่าความกว้างของการเปลี่ยนสถานะประมาณ 2-10 เคลวิน

ค่ามาตรฐานที่พิจารณาอุณหภูมิวิกฤติสำหรับสารตัวนำยวดยิ่งชนิดเซรามิกซึ่งช่วงของการเปลี่ยนสถานะมีค่ากว้างมากต้องพิจารณาค่าสภาพซึมซาบของแม่เหล็ก (dc-Magnetic Susceptibility)

โดย $\left(\frac{dx}{dT}\right)_{\max}$ ใช้ในการพิจารณา T_c ซึ่งค่า T_c ที่ได้จะเป็นประโยชน์อย่างมาก แต่ค่าที่ได้จะเป็นค่าประมาณซึ่งในทางปฏิบัติมักหาค่า T_c จากความต้านทาน (dc-Resistance) ซึ่งจะเป็นพื้นฐานในการศึกษาสมบัติการนำยวดยิ่ง จุดสำคัญคือการระบุค่า T_c ซึ่งมักจะมาจากการวัดที่ต้องการที่จะอ้างถึงค่าสูงสุด ซึ่งบางครั้งจะอ้างถึงค่า T_{∞} แทนค่า T_c

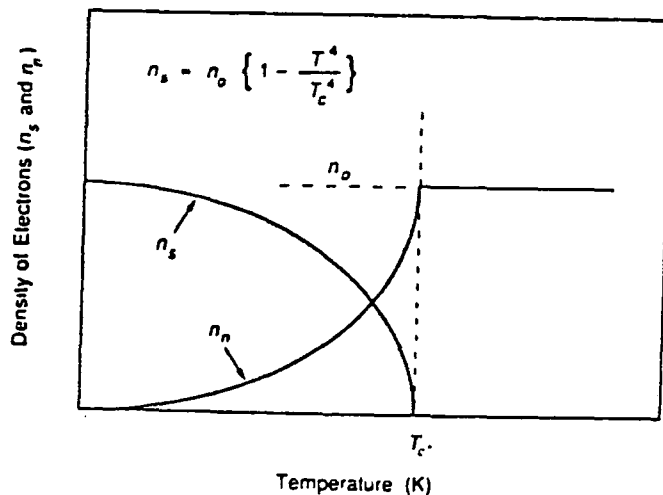
2.1.2 ทฤษฎีและแนวคิด

กระแสที่ไหลในสารตัวนำยวดยิ่งเกิดจากกระแสสองส่วนผสมกันคือ

1. อิเล็กตรอนคู่ (Pair-Electron) ในกระแisyวดยิ่ง (Supercurrent)
2. อิเล็กตรอนเดี่ยว (Unpair-Electron) ในกระแสปกติ (Normal Current)

ซึ่งแบบจำลองนี้มีประโยชน์มากในการศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ของสารตัวนำยวดยิ่งที่พิจารณาในเชิงของไหล เรียกว่า แบบจำลองสองกระแส

จากแบบจำลองนี้ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของสารตัวนำยวดยิ่งในบริเวณที่อุณหภูมิไม่เท่ากับศูนย์องศาสัมบูรณ์ว่าไม่ใช่อิเล็กตรอนตัวนำ (Conduction-Electron) ทุกตัวที่มีสถานะนำยวดยิ่ง เมื่ออุณหภูมิของสารตัวนำยวดยิ่งต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ อิเล็กตรอนคู่ที่มีสปิน (Spin) ตรงกันข้ามและมีโมเมนต์ที่ขนาดเท่ากันแต่มีทิศตรงกันข้ามจะจับคู่กันมีผลทำให้สปินและโมเมนต์เป็นศูนย์และเมื่ออุณหภูมิของสารตัวนำยวดยิ่งเข้าใกล้ศูนย์องศาสัมบูรณ์ อิเล็กตรอนจะควบแน่นเป็นอิเล็กตรอนคู่มากขึ้นและจำนวนอิเล็กตรอนเดี่ยวจะลดลง ภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติจำนวนอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะปกติจะลดลงเรื่อยๆ และจะไม่มีเหลืออยู่เลยที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ ส่วนอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะนำยวดยิ่ง (Superconducting-Electron) จะหมดไปเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติ พิจารณารูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดง n_s และ n_n กับ T ในแบบจำลองสองกระแส

ทฤษฎีนี้อธิบายโดยลินตัน (Lynton) กล่าวว่า

1. ความไม่เป็นระเบียบ (Entropy) ของระบบการนำยิ่งยวดยิ่ง เกิดจากพฤติกรรมของประจุตัวนำแต่ละตัวที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติ

2. ในส่วนของบริเวณที่มีสภาวะนำยิ่งยวดจึงมีความเป็นระเบียบ

ในการวิเคราะห์นั้นส่วนที่ต้องการทราบคือ n_s และ n_n ที่อุณหภูมิใดๆ โดยที่

n_s = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ

n_n = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะนำปกติที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ

จากสมการของ C.J. Gorter และ H.B.G. Casimir จะได้ว่า

$$n_s = n_0 [1 - t^4]$$

$$t = T/T_c \text{ (K)}$$

n_0 = ความหนาแน่นของ n_s ที่ 0 เคลวิน

สำหรับความต้านทานจำเพาะของสาร, ρ_n โดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนผกผันกับสภาพการนำไฟฟ้า, σ_n นั่นคือ $\rho_n \propto 1/\sigma_n$ ซึ่ง $\sigma_n \propto n_n$ ดังนั้น $\rho_n \propto 1/n_n$

ดังนั้นในการสร้างสมการจำลองของการ เปลี่ยนสถานะ ของสารตัวนำยวดยิ่งจึงเริ่มโดยใช้สมการที่เกี่ยวข้องกับตัวแปร ณ บริเวณที่เปลี่ยนสถานะ $[T_{cf} < T < T_{co}]$ ด้วยความสัมพันธ์ในเชิง $(T/T_c)^4$ โดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$\text{ถ้า } T < T_{co} : \quad R = \frac{R_{co}}{\left\{1 - \left[\frac{(T - \Delta T)}{T_c}\right]^4\right\}^{1/2}} - R_r$$

$$\text{ถ้า } T > T_{co} : \quad R = R_{co} \times \left\{ \left[\frac{(T - (\Delta T/2))}{T_c} - 1 \right]^n + R_x \right\}$$

$$\text{โดย } R_r = \frac{R_{co}}{\left\{1 - \left[\frac{(T_{cf} - \Delta T)}{T_c}\right]^4\right\}^{1/2}}$$

$$R_x = R_{co} \times \left\{ 1 - \left[\frac{T_{co} - (\Delta T/2)}{T_c} - 1 \right]^n \right\}$$

เมื่อ R_{co} = ความต้านทาน ณ อุณหภูมิ

T_{co} = อุณหภูมิขีดเริ่มวิกฤติ (onset-critical temperature)

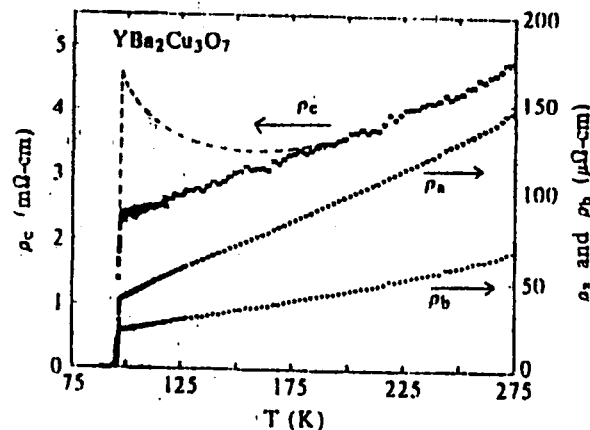
T_{cf} = อุณหภูมิที่ความต้านทานเป็นศูนย์ (zero-resistance temperature)

ΔT = ช่วงกว้างของการเปลี่ยนสถานะ ; $\Delta T = T_{co} - T_{cf}$

T_c = อุณหภูมิวิกฤตของสาร ; $T_c = T_{cf} + (\Delta T)^{1/2}$

n = ดัชนีที่แสดงถึงการนำในสภาวะปกติ ; $0 < n < 1$

สำหรับกราฟแสดงค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของสารตัวนำยิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_7$ ซึ่งเป็นสารที่ใช้ทดสอบในโครงการพิเศษนี้ เป็นดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของสารชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

2.2 การวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า (Electrical Resistivity Measurement)

การพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ของสารต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น จำเป็นจะต้องทราบลักษณะสมบัติพื้นฐานของสารนั้นๆ เช่น สภาพความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า, สภาพนำไฟฟ้าจำเพาะ, คุณสมบัติทางแม่เหล็ก เป็นต้น ซึ่งในที่นี้จะขอกล่าวถึงในส่วนที่เกี่ยวข้องกับโครงการพิเศษนี้คือ สภาพความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า

2.2.1 ความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า (Electrical Resistivity)

เป็นพารามิเตอร์พื้นฐานที่กำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสสาร และไม่ขึ้นกับมวล เรียกว่าเป็น พารามิเตอร์แท้ของสสารนั้น (Intrinsic Parameter) และหาค่าได้จากรากฐานของการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของสสารจาก

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$$\rho = R \frac{A}{l}$$

ρ มีหน่วยเป็น โอห์ม-เมตร หรือ โอห์ม-เซนติเมตร โดย l คือความยาว และ A คือ พื้นที่หน้าตัด

ถ้าพิจารณาระบบ SI (Standard International Unit) มีชิ้นงานที่มีรูปทรงเป็นแท่งทรงกลมยาว มีพื้นที่หน้าตัดขวางสำหรับการป้อนกระแสเข้าไป 1 เมตร^2 ค่าความต้านทานที่ได้ที่ความยาวต่างๆ นั่นคือ ความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า

ถ้าพิจารณาระบบ CGS-Unit (Centimetre-Gram-Second Unit) ชิ้นงานที่ต้องการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะมีลักษณะคล้ายเหล็กเส้นสำหรับสร้างพื้นที่หน้าตัดขวางสำหรับการป้อนกระแส 1 เซนติเมตร^2 วัดค่าความต้านทานที่ได้ที่ความยาวของลวดที่ตำแหน่งต่างๆ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า

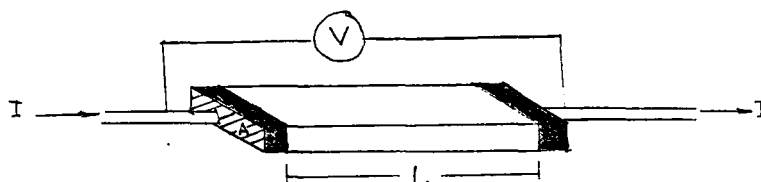
2.2.2 การวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า (Electrical Resistivity Measurement)

การวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า เป็นการวัดพื้นฐานที่สำคัญ เพื่อที่จะยืนยันได้ว่าสารตัวอย่างที่วัดนี้ มีคุณสมบัติเป็นอย่างไร คือเป็นสารฉนวน, สารกึ่งตัวนำ, สารตัวนำ หรือสารตัวนำยวดยิ่ง

โดยทั่วไปวิธีการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้ามีหลายวิธี เช่นวิธีไร้สัมผัส (Contactless), วิธีสัมผัสชั่วคราว (Temporary Contact), วิธีสัมผัสถาวร (Permanent Contact) ซึ่งในที่นี้จะขอกกล่าวถึงเพียง 2 วิธีดังนี้คือ

วิธีวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าโดยตรง (Direct Resistivity Method)

วิธีนี้จะต้องทำให้สารตัวอย่างที่จะทำการวัดมีรูปทรงทางเรขาคณิตที่แน่นอน เนื่องจากโดยทั่วไปการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า มักจะวัดความต้านทานก่อนแล้วจึงคำนวณความยาวและพื้นที่หน้าตัดของสารที่ต้องการวัด และได้ค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า โดยการให้กระแสเข้าที่ปลายด้านหนึ่งและให้กระแสออกที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ในขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆ กันดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าโดยตรง

จากค่ากระแสและความต่างศักย์ที่ได้นำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า (ρ) ได้คือ

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$$\rho = R \frac{A}{l}$$

$$\rho = \frac{V}{I} \left(\frac{A}{l} \right)$$

วิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วมาก แต่ค่าที่ได้เป็นค่าประมาณเท่านั้นยังต้องมีองค์ประกอบอื่นๆ อีกมากมาย

ความถูกต้องแน่นอนในการวัดขึ้นอยู่กับว่าบริเวณผิวสัมผัสตรงที่กระแสไหลเข้าและออกมีคุณสมบัติเป็นโอมหิมิตที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติทางโอมหิมิตที่ดี แสดงว่าจะต้องมีความต้านทานเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสทั้งสองของขั้วไฟฟ้า ดังนั้นความต้านทานจริงๆ ของสารตัวอย่างนั้นจะต้องน้อยกว่าค่าความต้านทานที่วัดได้ ความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นได้อีกกรณีหนึ่งคือ ความแตกต่างของความต้านทานระหว่างความต้านทานของสารที่จะวัดและความต้านทาน (Impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด ถ้าความต้านทานของสารทั้งสองใกล้เคียงกัน ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะไม่ถูกต้องและมีค่าน้อยกว่าที่เป็นจริง ซึ่งหมายความว่าความต้านทานจำเพาะของสารจะมีค่ามากกว่าค่าที่อ่านได้

ในทางปฏิบัติแล้วจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอมหิมิตมากกว่า ความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เพราะผิวสัมผัสที่ดี (เป็นโอมหิมิต) หรือไม่ดี (ไม่เป็นโอมหิมิต) นั้นตรวจสอบได้ยากจึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มาก เพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดความต่างศักย์ด้วยโวลต์มิเตอร์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงๆ เพื่อไม่ให้เกิดการผิดพลาดของค่าที่วัดได้

วิธีวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าแบบ 4 ขั้วเรียงเส้น (Linear Four-Point Probes)

เป็นวิธีใช้กันอย่างแพร่หลายโดยมีจุดเด่นคือ เป็นวิธีที่จุดสัมผัสระหว่างขั้วจะอยู่บนผิวของสารตัวอย่างทั้งหมด และวางเป็นแนวเส้นตรงระยะห่างเท่ากันหมด

ยังมีการวัดอีกแบบคือการวัดแบบ 2 ขั้ว (Two-Point Probes) ซึ่งไม่เป็นที่นิยม เพราะมีข้อเสียคือวัดค่าออกมาได้ไม่ค่อยถูกต้องชัดเจนด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 2.6 ความต้านทานระหว่างขั้วทั้งสองคือ

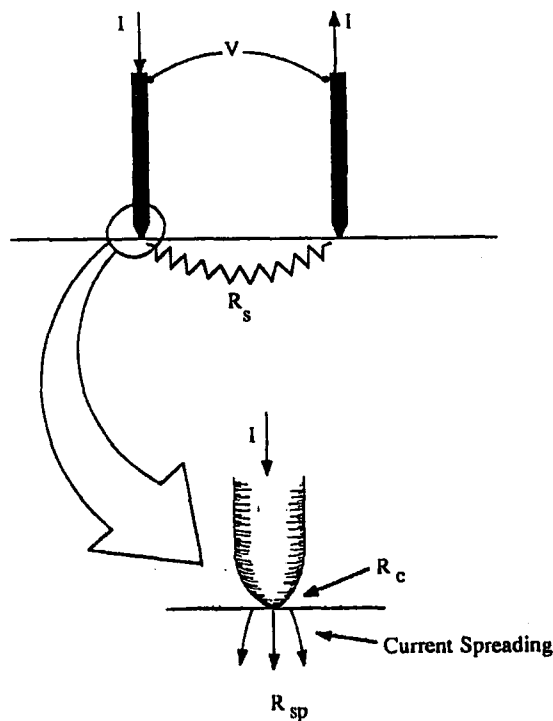
$$R_T = V/I = 2R_C + 2R_{Sp} + R_S$$

R_C = ความต้านทานที่ผิวสัมผัส (Contact Resistance) ระหว่างขั้วกับสารตัวอย่างซึ่งเกิดจากการที่ขั้วสัมผัสกับเนื้อสาร

R_{Sp} = ความต้านทานแพร่ (Spreading Resistance) ได้ขั้วซึ่งเกิดจากการที่กระแสไหลจากขั้วไปยังสารจะทำให้เกิดความต้านทานใต้ขั้ว

R_S = ความต้านทานของสารตัวอย่างที่จะวัด

เนื่องจาก R_C และ R_{Sp} ไม่สามารถคำนวณค่าได้ ทำให้หาค่า R_S จากความต้านทานรวม R_T ไม่ได้



รูปที่ 2.6 การวัดแบบ 2 ขั้ว

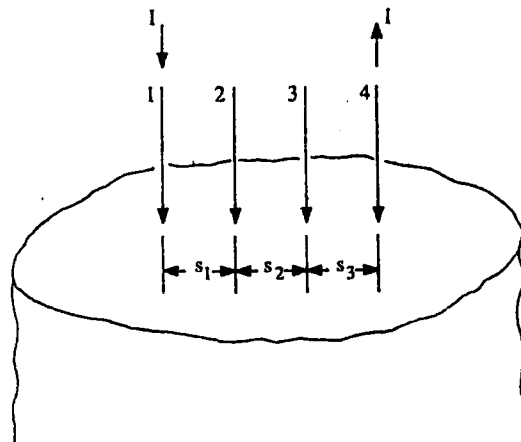
วิธีแก้ปัญหาคือการใช้การวัดแบบ 4 ขั้ว โดยการใส่กระแสเข้าไป 2 ขั้ว และอีก 2 ขั้ว สำหรับวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น

การวัดค่าความต้านทานแบบ 4 ขั้วริเริ่มโดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ เวเนอร์ (Wenner) ในปี ค.ศ. 1916 โดยเริ่มทำการทดลองวัดค่าความต้านทานจำเพาะของโลกเป็นการศึกษาทางด้านปฐพีวิทยา และต่อมาในปี ค.ศ. 1955 นักวิทยาศาสตร์ชื่อ วาลด์ (Valdes) นำวิธีการวัดแบบ 4 ขั้วมาใช้กับสารโดยใช้ขั้วถั่วถั่วเมล็ดถั่ว

การวัดแบบ 4 ขั้วดีกว่าแบบ 2 ขั้ว แม้ว่าขั้วที่ใช้จ่ายกระแสจะมีการสัมผัสกับสารตัวอย่างและมีความต้านทานแพร่ แต่ขั้วที่ใช้วัดความต่างศักย์ 2 ขั้วไม่มีการป้อนกระแส รวมทั้งมีเตอร์ที่ใช้วัดความต่างศักย์ก็มีความต้านทานขาเข้าสูงมากจนถือว่าไม่มีกระแสไหลหรือมีน้อยมาก ดังนั้นจึงสามารถละทิ้ง R_C และ R_{Sp} ได้โดยถือว่าความต่างศักย์ที่เกิดจากกระแสค่าน้อยๆ ที่ผ่านทำให้ความต่างศักย์ที่ตกคร่อม R_C และ R_{Sp} มีค่าน้อยมาก

ความต่างศักย์ V ที่ระยะ r จากขั้ว ซึ่งมีกระแส I ไหลผ่านดังรูปที่ 2.7 สามารถหาความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า ρ ได้จาก

$$V = \rho \frac{I}{2\pi r}$$



รูปที่ 2.7 การวัดแบบ 4 ขั้วเชิงเส้น

จากรูปที่ 2.7 เป็นขั้ววัด 4 ขั้วที่อยู่บนสารตัวอย่างที่สมมุติว่ามีรูปร่างไม่จำกัด ป้อนกระแสเข้าทางขั้ว 1 และกระแสออกทางขั้ว 4 ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นจะเป็น

$$V = \frac{rI}{2p} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_4} \right)$$

โดยระยะ r_1 และ r_4 คือระยะจากขั้วที่ 1 และ 4 ตามลำดับ จากรูปที่ 2.7 แทนระยะต่างๆ ด้วย s_1, s_2, s_3 ดังนั้นแรงดันที่ขั้ว 2 คือ

$$V_2 = \frac{\rho l}{2\pi} \left(\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2 + S_3} \right)$$

และแรงดันที่ขั้ว 3 คือ

$$V_3 = \frac{\rho l}{2\pi} \left(\frac{1}{S_1 + S_2} - \frac{1}{S_3} \right)$$

ความต่างศักย์ระหว่างขั้ว 2 และขั้ว 3 คือ $V = V_2 - V_3$ ดังนั้นจะได้

$$V = \frac{\rho l}{2\pi} \left[\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_3} - \frac{1}{S_2 + S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} \right]$$

ความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าที่ได้คือ

$$\rho = \frac{2\pi V}{l} \left[\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_3} - \frac{1}{S_2 + S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} \right]^{-1} \quad (1)$$

โดย ρ มีหน่วยเป็นโอห์ม-เซ็นติเมตร แต่ส่วนใหญ่การวัดแบบ 4 ขั้วควรจะมีระยะระหว่างขั้วเท่ากัน

$$S = S_1 = S_2 = S_3$$

ดังนั้นสมการที่ 1 จึงเป็น

$$\rho = 2\pi S \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2)$$

ระยะห่าง S ที่ได้ผลดีที่สุดอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1.5 มิลลิเมตร แต่ระยะห่างนี้เปลี่ยนแปลงได้ขึ้นกับขนาดและความหนาของสาร

ที่ระยะ $S = 1.588$ มิลลิเมตร จะได้ $2\pi S \cong 1$ ดังนั้นจะได้

$$\rho = \frac{V}{I}$$

ดังนั้นระยะที่สำคัญคือ 0.635 มิลลิเมตร และ 1.588 มิลลิเมตร

แต่โดยมากสารตัวอย่างที่จะนำมาวัดมิได้เป็นไปตามสมมุติที่ว่า มีรูปร่างไม่รู้จักแต่สารที่จะนำมาวัดมีรูปร่างและขนาดแน่นอน ดังนั้นสมการที่ 2 จะต้องเปลี่ยนแปลงเป็นสมการที่ใช้กับสารที่มีรูปร่างจำกัดแน่นอนดังนี้

$$\rho = 2 \pi S F \left(\frac{V}{I} \right) \quad (3)$$

เมื่อ F คือค่าแก้ (Correction Factor) ซึ่งขึ้นกับลักษณะทางเรขาคณิตของสารตัวอย่างนั้น นอกจากนี้ค่าแก้ยังขึ้นอยู่กับ ขอบของสาร, ความหนาและระยะระหว่างขั้ว

สำหรับสารที่มีความหนามากกว่าระยะ S ค่า F ในสมการที่ 3 สำหรับการคำนวณจากจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างความหนาและขอบของสาร แต่โชคดีว่าโดยทั่วไปสารตัวอย่างจะมีความหนาน้อยกว่าระยะระหว่างขั้ว

ค่าแก้ (Correction Factors)

การหาค่าแก้ของการวัดแบบ 4 ขั้วมีหลายวิธี เช่น การใช้ทฤษฎีตัวแปรเชิงซ้อน (Complex Variable Theory), การแก้ปัญหาค่าด้วยสมการปัวซองส์ (Poisson's Equation), การใช้ฟังก์ชันกรีน (Green's Function) และอื่นๆ

ค่าแก้ต่อไปนี้ใช้สำหรับการวัดแบบ 4 ขั้วเชิงเส้นหรืออยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน และมีระยะระหว่างขั้วเป็นระยะ S เท่าๆ กัน เขียนค่าแก้ F ในรูปแยกดังนี้

$$F = F_1 F_2 \left[2 \ln \frac{F_3}{\pi} \right] \quad (4)$$

F_1 เป็นค่าแก้สำหรับความหนาของสาร, F_2 เป็นค่าแก้สำหรับขนาดของสารและ F_3 เป็นค่าแก้สำหรับระยะห่างระหว่างขั้วซึ่งสัมพันธ์กับขอบของสาร ค่าแก้ที่สำคัญคือค่าแก้เกี่ยว

กับความหนาของสาร เนื่องจากความเป็นจริงสารตัวอย่างมีรูปร่างจำกัดแน่นอน นอกจากนี้ความหนาของสารจะต้องเท่ากับหรือน้อยกว่าระยะห่างระหว่างขั้ว โดยจะได้ค่าแก้ไขสำหรับความหนาของสารดังนี้คือ

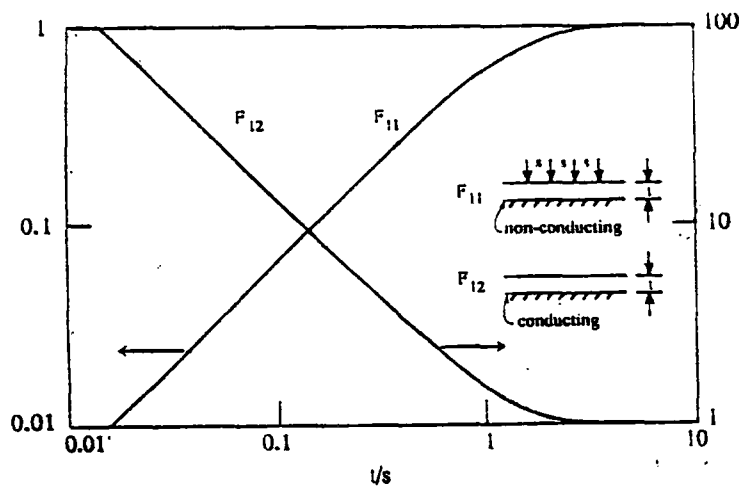
$$F_{11} = \frac{t/S}{2 \ln \left\{ \frac{\sinh(t/S)}{\sinh(t/2S)} \right\}} \quad (5)$$

สมการที่ 5 เป็นสมการสำหรับสารที่มีฐานไม่นำไฟฟ้า โดย t คือความหนาของสารแต่สำหรับสารที่มีฐานที่นำไฟฟ้าจะได้ค่าแก้ไขคือ

$$F_{12} = \frac{t/S}{2 \ln \left\{ \frac{\cosh(t/S)}{\cosh(t/2S)} \right\}}$$

ค่าแก้ไข F_{11} และ F_{12} เป็นดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 2.8 แต่สำหรับสารที่มีความหนาน้อยมากๆ สมการที่ 5 จะลดเหลือเพียง

$$F_{11} = \frac{t/S}{2 \ln 2} \quad (6)$$



รูปที่ 2.8 ค่าแก้ไขสำหรับความหนาของสาร

สมการที่ 6 จะถูกต้องสำหรับ $t \leq S/2$ และถ้าค่าแก้ $F_2 = F_3 = 1$ จะหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้จากสมการที่ 3, 4 และ 6

$$\rho = \frac{\pi t V}{\ln 2 I} = 4.532 t \left(\frac{V}{I} \right)$$

สารที่มีความหนาเรื่อยๆ มักเขียนความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าในรูปความต้านทานชีท (Sheet Resistivity) ρ_s ดังนี้

$$\rho_s = \frac{\rho}{t} = \frac{\pi V}{\ln 2 I} = 4.532 \left(\frac{V}{I} \right) \quad (7)$$

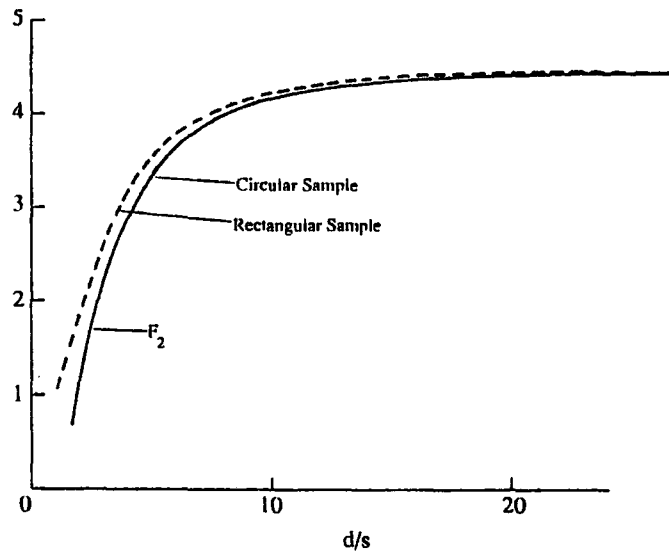
ค่าความต้านทานชีททำให้ทราบค่าแก้อื่นอีก คือ ค่าแก้สำหรับขนาดของสาร โดยสมการในรูปทั่วไปสำหรับสารที่สมมติว่ามีขนาดไม่จำกัดคือ

$$\rho_s = F_2 \left(\frac{V}{I} \right)$$

สำหรับสารที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง d จะได้ค่าแก้ F_2 คือ

$$F_2 = \frac{\pi}{\left\{ \ln 2 + \ln \left[\frac{[(d/S)^2 + 3]}{[(d/S)^2 - 3]} \right] \right\}}$$

และกราฟของค่าแก้ F_2 สำหรับสารที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม ดังรูปที่ 2.9 โดยมีข้อควรจำคือ สารที่จะวัดจะต้องมีเส้นผ่าศูนย์กลาง $d \geq 40S$ และเส้นผ่าศูนย์กลางของสารต้องไม่น้อยกว่า 2.5 นิ้ว ส่วนในกรณีที่สารเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กราฟจะเป็นดังเส้นประในรูปที่ 2.9 และ d คือความกว้างของสาร



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงค่าแก้สำหรับขนาดของสาร

ค่าแก้ 4.532 ในสมการที่ 7 ใช้กับกรณีที่มีป้อนกระแสและวัดแรงดันตามขั้วที่แสดงในรูปที่ 2.7 โดยป้อนกระแสเข้าทางขั้ว 1 และออกทางขั้ว 4 วัดความต่างศักย์ทางขั้ว 2 และขั้ว 3 หากป้อนกระแสและวัดแรงดันทางขั้วอื่นๆ ค่าแก้จะเป็นตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าแก้ในกรณีต่างๆ

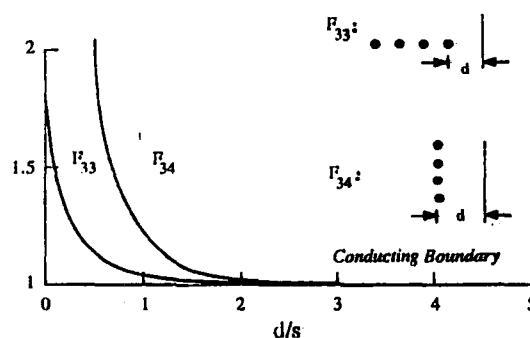
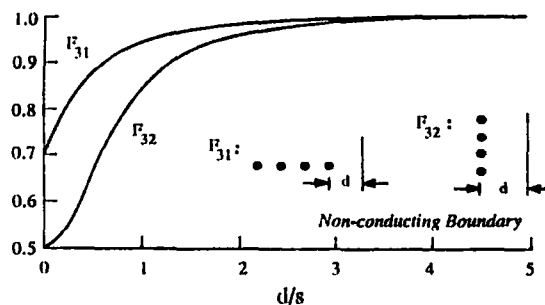
ขั้วกระแส	ขั้วความต่างศักย์	ค่าแก้
1,4	2,3	4.532
2,3	1,4	4.532
1,2	3,4	21.84
3,4	1,2	21.84
1,3	2,4	15.50
2,4	1,3	15.50

ค่าแก้สำหรับระยะระหว่างขั้วกับขอบของสาร ในกรณีที่ขั้วอยู่ในแนวตั้งได้จากมีระยะห่าง d จากรอยต่อที่ไม่มีผลทางไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.10 ค่าแก้เขียนในรูปฟังก์ชันที่นอร์มอลไลซ์ โดย ค่า d/S ดังนี้คือ

$$F_{31} = \frac{1}{1 + \frac{1}{1+2d/S} - \frac{1}{2+2d/S} - \frac{1}{4+2d/S} - \frac{1}{5+2d/S}}$$

ค่าแก้สำหรับขั้วในกรณีแนวขั้วขนานกับรอยต่อชนิดที่ไม่มีผลทางไฟฟ้า คือ

$$F_{32} = \frac{1}{1 + 2[1 + (2d/S)^2]^{-1/2} - [1 + (d/S)^2]^{-1/2}}$$



รูปที่ 2.10 ค่าแก้สำหรับระยะระหว่างขั้วกับขอบของสารกรณีต่างๆ

สำหรับขั้วในกรณีตั้งจากกับรอยต่อที่มีผลทางไฟฟ้า จะได้ค่าแก้คือ

$$F_{33} = \frac{1}{\left[1 - \frac{1}{1+2d/S} + \frac{1}{2+2d/S} + \frac{1}{4+2d/S} - \frac{1}{5+2d/S} \right]}$$

และสำหรับขั้วที่ขนานกับรอยต่อที่มีผลทางไฟฟ้า จะได้ค่าแก้คือ

$$F_{34} = \frac{1}{1 - 2\left[1 + (2d/S)^2\right]^{-1/2} + \left[1 + (d/S)^2\right]^{-1/2}}$$

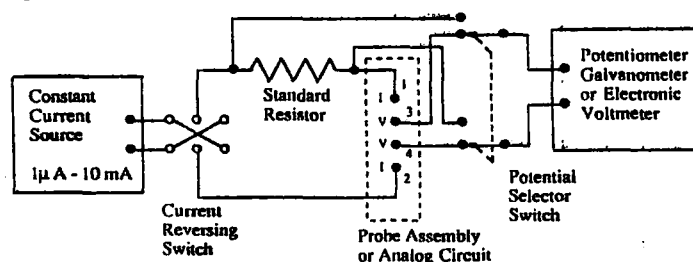
ค่าแก้ F_{31} ถึง F_{34} มีความสำคัญมากถ้าสารตัวอย่างมีขนาดเล็ก จนทำให้ขั้วอยู่ชิดกับขอบมาก แต่หากสารมีขนาดใหญ่ขนาดที่ระยะห่างจากขั้วกับขอบของสารมากกว่า 3 หรือ 4 เท่าของระยะห่างระหว่างขั้ว ค่าแก้ F_{31} ถึง F_{34} ก็ไม่จำเป็น

วงจรพื้นฐานสำหรับการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า (Resistivity

Measurement Circuit)

วงจรพื้นฐานสำหรับการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว เป็นดัง

รูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วงจรพื้นฐานสำหรับการวัดแบบ 4 ขั้ว

จากรูปใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ในการจ่ายกระแส โดยมีสวิตช์สองทางควบคุมทิศทางการไหลของกระแสให้ไหลในสารตัวอย่างได้ 2 ทิศทางและคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า จากค่าเฉลี่ยของการป้อนกระแสทั้งสองทิศทาง

2.2.3 ข้อผิดพลาดที่ควรระวังในการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า

ถึงแม้ว่าการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าด้วยกระแสตรง เป็นวิธีที่มีมาตรฐาน มีความเชื่อถือสูงและเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป แต่ก็มีข้อควรคำนึงถึงก่อนที่จะทำการวัดสารตัวอย่างชนิดต่างๆ ซึ่งพอสรุปเป็นข้อย่อๆ ได้ดังนี้

การรั่วไหลของกระแส

กระแสรั่วไหลอาจเกิดขึ้นได้ทั้งที่บริเวณขอบและบริเวณฐาน อันเกิดจากมีสิ่งสกปรกที่มีความต้านทานน้อยกว่าสารตัวอย่างมาเกาะติด ทำให้เกิดการลัดวงจร ศักดาที่วัดได้น้อยกว่าความเป็นจริง จึงได้ค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าน้อยกว่าความเป็นจริงไปด้วย นอกจากนี้การเกิดกระแสรั่วไหลอาจเกิดจากความผิดปกติทางผลึกภายในอีกด้วย

อุณหภูมิ

สารตัวอย่างแทบทุกชนิดจะมีความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันต่ออุณหภูมิทั้งสิ้น อาจจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวอย่าง เช่น โลหะ มีผลกระทบต่ออุณหภูมิน้อยกว่าฉนวน หรือสารกึ่งตัวนำมีผลกระทบมากกว่า ดังนั้นในการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าทุกครั้งควรมีการบันทึกอุณหภูมิขณะทำการวัดไว้ด้วยเสมอ หากนำมาวัดซ้ำหรือตรวจสอบอีกครั้งควรทำที่อุณหภูมิเดียวกัน

แสง

ขณะทำการวัด ควรจะมีส่วนป้องกันแสงตกกระทบสารตัวอย่าง เพราะแสงเป็นพลังงานสามารถกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระเกิดขึ้นได้ ส่งผลทำให้เกิดแรงดันทางแสงร่วมกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้สารตัวอย่าง ทำให้วัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าผิดพลาดได้

ปรากฏการณ์ความร้อนไฟฟ้า

ปรากฏการณ์นี้จะหลีกเลี่ยงไม่ได้ สำหรับการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าด้วยกระแสตรง เกิดแรงดันขึ้นเนื่องจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิในสารตัวอย่าง จะมีค่าน้อยสำหรับสารตัวอย่างจำพวกโลหะ แต่จะมีค่ามากสำหรับสารตัวอย่างที่เป็นฉนวน

ผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารตัวอย่าง

ข้อผิดพลาดชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นกับสารตัวอย่างชนิดที่เป็นฉนวนหรือสารกึ่งตัวนำ มักมีแรงดันคร่อมที่เกิดขึ้นบริเวณหัวสัมผัส แรงดันนี้มักจะต้านการไหลของกระแส ทำให้เกิดข้อผิดพลาดของการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า ดังนั้นควรมีการทดสอบและเลือกชนิดของโลหะที่มาใช้เป็นหัวสัมผัสเสียก่อน ค่าที่ได้จึงจะเป็นที่ยอมรับ

ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งหมดบางอย่างอาจหลีกเลี่ยงได้ บางอย่างก็หลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าของสารตัวอย่างจากหลักโดยทั่วไปแล้ว ควรจะวัดหลายๆ ครั้งที่เงื่อนไขเดียวกันและวัดหลายๆ วิธี เพื่อให้ได้ค่าที่แน่นอนและเชื่อถือได้ และในการแสดงค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าของสารตัวอย่างมักจะบอกคู่ไปกับค่าที่วัดได้ด้วยวิธีอะไร

2.3 การวัดอุณหภูมิ (Temperature Measurement)

การวัดอุณหภูมิเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการทดลองต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโครงการพิเศษนี้เป็นการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิวิกฤติ จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์หรือเครื่องมือที่เหมาะสมในการวัดอุณหภูมิ ซึ่งการวัดอุณหภูมิมียุทธวิธี แต่ในที่นี้จะกล่าวเพียง 2 วิธี คือ การวัดอุณหภูมิโดยใช้ตัวต้านทานแปรค่าตามอุณหภูมิ (Resistance Temperature Detector) และเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

2.3.1 ตัวต้านทานแปรค่าตามอุณหภูมิ (Resistance Temperature Detector, RTD)

โลหะโดยมากมีความต้านทานเพิ่มขึ้นเกือบจะเป็นเส้นตรงสัมพันธ์กับอุณหภูมิในช่วง -100 ถึง $+800$ °C โดยมีความสัมพันธ์ทั่วไป ระหว่างความต้านทานที่อุณหภูมิใดๆ R_T ของโลหะและอุณหภูมิ T °C คือ

$$R_T = R_0 (1 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3 + \dots) \quad (8)$$

เมื่อ R_0 คือ ความต้านทานของโลหะที่ 0 °C

α, β, γ คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทาน

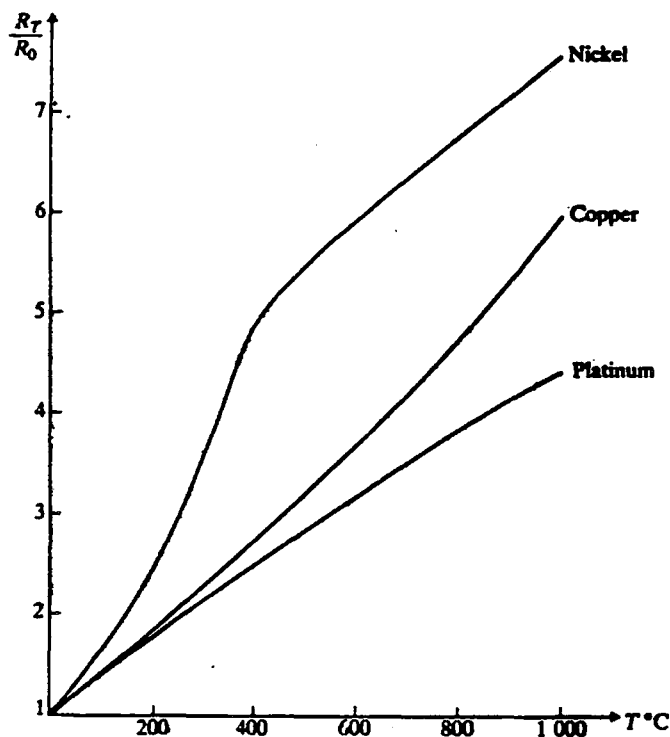
โดยเทอมที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ 8 มีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้

จากรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน R_T/R_0 กับอุณหภูมิของโลหะ 3 ชนิด คือ เพททินัม (Platinum, Pt), ทองแดง (Copper, Cu) และนิเกิล (Nikel, Ni) จะเห็นได้ว่าโลหะเพททินัมแม้จะมีราคาแพง แต่เป็นที่นิยมใช้ในวงการอุตสาหกรรม สำหรับการวัดอุณหภูมิมากกว่าโลหะที่มีราคาถูกกว่าคือ โลหะทองแดงและโลหะนิเกิล เนื่องจากโลหะเพททินัมมี

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิเป็นเส้นตรงมากที่สุด นอกจากนี้ยังเป็นโลหะที่มีข้อดีคือ มีความเฉื่อยในการทำปฏิกิริยาเคมี

โลหะเพททินัม มีช่วงการวัดอุณหภูมิค่อนข้างกว้าง คือ ช่วงวัดอุณหภูมิอยู่ในช่วง -200 ถึง $+800$ °C และยังสามารถใช้ได้ในสภาพแวดล้อมหลายๆ แบบ มีความแม่นยำมากกว่าโลหะอื่นที่อุณหภูมิเดียวกัน

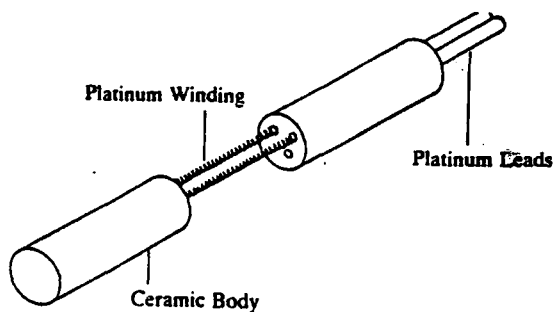
โลหะเพททินัม มีค่า $R_0 = 100.0 \Omega$ และความต้านทานที่ 100 °C คือ $R_{100} = 138.5 \Omega$ ความต้านทานที่ 200 °C คือ $R_{200} = 175.83 \Omega$ และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทาน $\alpha = 3.9 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ และ $\beta = -5.85 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ ค่าความเปลี่ยนแปลงระหว่างความต้านทานที่จุด 0 °C และจุด 100 °C คือ $R_{100} - R_0$ ซึ่งเรียกว่า ค่าต่างพื้นฐาน ซึ่งสำหรับโลหะเพททินัมนี้มีค่าต่างพื้นฐาน เท่ากับ 38.5Ω



รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ $\frac{R_T}{R_0}$ กับอุณหภูมิของโลหะนิเกิล, ทองแดง และเพททินัม

RTD ในลักษณะที่จะนำไปใช้งานจะมีลักษณะเป็นโลหะเพททินัมชนิด เป็นขดลวดขนาดเล็กมากๆ บรรจุในอลูมินาหรือเซรามิก ซึ่งเป็นสารฉนวน เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้โลหะเพท-

ทินัม สัมผัสโดยตรงกับสิ่งที่จะวัดอุณหภูมิ ทั้งนี้เพื่อป้องกันสนิม แล้วต่อสายออกมาเพื่อไปใช้งาน ดังรูปที่ 2.13

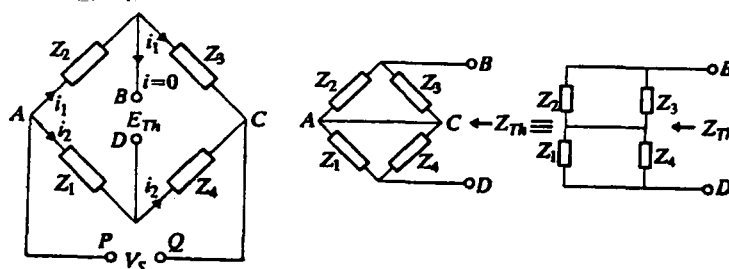


รูปที่ 2.13 RTD ในลักษณะการใช้งาน

การใช้งาน RTD ในวงจรบริดจ์สมดุล

วงจรบริดจ์สมดุลมักใช้เพื่อเปลี่ยนเอาต์พุตของ RTD เป็นสัญญาณแรงดันวงจร เทวีนินสำหรับวงจรบริดจ์สมดุล

วงจรเทวีนินประกอบด้วย ศักย์เทวีนิน E_{th} และความต้านเทวีนิน Z_{th} ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 วงจรเทวีนินสำหรับวงจรบริดจ์สมดุล

จากรูป E_{th} คือ แรงดันเมื่อ Open-Circuit ใช้กฎเคอร์ชอฟ จะได้

Loop PABCQ

$$V_S = i_1 Z_2 + i_1 Z_3$$

$$i_1 = \frac{V_S}{Z_2 + Z_3}$$

(9)

Loop PADCCQ

$$V_S = i_2 Z_1 + i_2 Z_4$$

$$i_2 = \frac{V_S}{Z_1 + Z_4} \quad (10)$$

ถ้าจุด Q เป็นกราวด์จะได้

$$\text{ความต่างศักย์ที่จุด P และจุด A} = V_S$$

$$\text{ความต่างศักย์ที่จุด B} = V_S - i_1 Z_2$$

$$\text{ความต่างศักย์ที่จุด D} = V_S - i_2 Z_1$$

 E_{th} คือ ความต่างศักย์ระหว่าง B กับ D

$$E_{th} = (V_S - i_1 Z_2) - (V_S - i_2 Z_1)$$

$$= i_2 Z_1 - i_1 Z_2$$

ใช้สมการ 9 และ 10 จะได้

$$E_{th} = V_S \left[\frac{Z_1}{Z_1 + Z_4} - \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \right] \quad (11)$$

สมการ 11 เป็นแรงดันเทวินิน สำหรับวงจรบริดจ์สมดุลทุกๆ ไป

Z_{th} คือ ความต้านทานเทวินิน โดยการมองย้อนเข้าไปในวงจรที่จุด BD เมื่อแทน V_S เป็นความต้านทานภายในของ V_S ซึ่งมีค่าประมาณศูนย์ ซึ่งจะได้วงจรถัดในรูป 2.14 จะเห็นว่า Z_{th} มีค่าดังนี้

$$Z_{th} = \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} + \frac{Z_1 Z_4}{Z_1 + Z_4} \quad (12)$$

ถ้ามีโหลด เช่น โวลต์มิเตอร์ ซึ่งมีความต้านทาน Z_L มาต่อที่ปลาย BD จะได้กระแสผ่านโหลดคือ

$$i = \frac{E_{th}}{Z_{th} + Z_L}$$

และมีแรงดันคร่อมโหลด คือ

$$V_L = \frac{E_{th} Z_L}{Z_{th} + Z_L}$$

โดย $|Z_L| \gg |Z_{th}|$

ในการใช้งาน RTD อาจนำ RTD ต่อแทน Z_1, Z_2, Z_3 หรือ Z_4 ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง ดังรูปที่ 2.14 เพื่อใช้เป็นตัววัดอุณหภูมิ

จากสมการที่ 11

$$E_{th} = V_S \left[\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right] \quad (13)$$

ถ้าต่อ R_1 เป็น RTD ซึ่งเป็นจุดที่ความต้านทานแปรค่าได้ จึงแทน $R_1 = R_t$ และ R_2, R_3, R_4 เป็นความต้านทานที่กำหนดค่าแน่นอน

นำ R_t หาค่าตลอดสมการที่ 13

$$E_{th} = V_S \left[\frac{1}{1 + R_4/R_t} - \frac{1}{1 + R_3/R_2} \right]$$

RTD ที่ต่อในวงจรเมื่อมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงและทำให้กระแสที่ไหลผ่าน RTD มีค่าเปลี่ยนแปลง พิจารณาเมื่อมีกระแสไหลผ่าน RTD น้อยที่สุด I_{min} และกระแสผ่าน RTD มากที่สุด I_{max} เมื่อมีความต้านทานมีค่า R_{tmin} และ R_{tmax} ดังนั้นจะได้ แรงดันเอาต์พุต ดังนี้

$$V_{min} = V_S \left[\frac{1}{1 + R_4/R_{tmin}} - \frac{1}{1 + R_3/R_2} \right] \quad (14)$$

$$V_{\max} = V_S \left[\frac{1}{1 + R_4/R_{I_{\max}}} - \frac{1}{1 + R_3/R_2} \right]$$

บริดจ์ที่สมดุลจะวัดแรงดันเอาท์พุทได้เท่ากับศูนย์ นั่นคือ $V_{\min} = 0$ เมื่อ $I = I_{\min}$ ดังนั้นสมการที่ 14 จะได้

$$\frac{R_4}{R_{I_{\min}}} = \frac{R_3}{R_2} \quad (15)$$

สมการที่ 15 เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานในกรณีบริดจ์สมดุล ความสำคัญอีกประการหนึ่งที่ต้องพิจารณาคือการจำกัดค่ากำลังไฟฟ้า $i_2^2 R_I$ ของ RTD ให้ \hat{W} คือ กำลังสูงสุดที่ RTD ทนได้

$$V_S^2 \frac{R_I}{(R_I + R_4)^2} \leq \hat{W} \quad ; \text{ สำหรับ } I_{\min} \leq I \leq I_{\max} \quad (16)$$

จากสมการที่ 16 และความสัมพันธ์ $\frac{R_4}{R_{I_{\min}}} = \frac{R_3}{R_2}$

จะได้

$$\frac{E_{th}}{V_S} = \frac{1}{1 + (R_3/R_2)(R_{I_{\min}}/R_I)} - \frac{1}{1 + (R_3/R_2)}$$

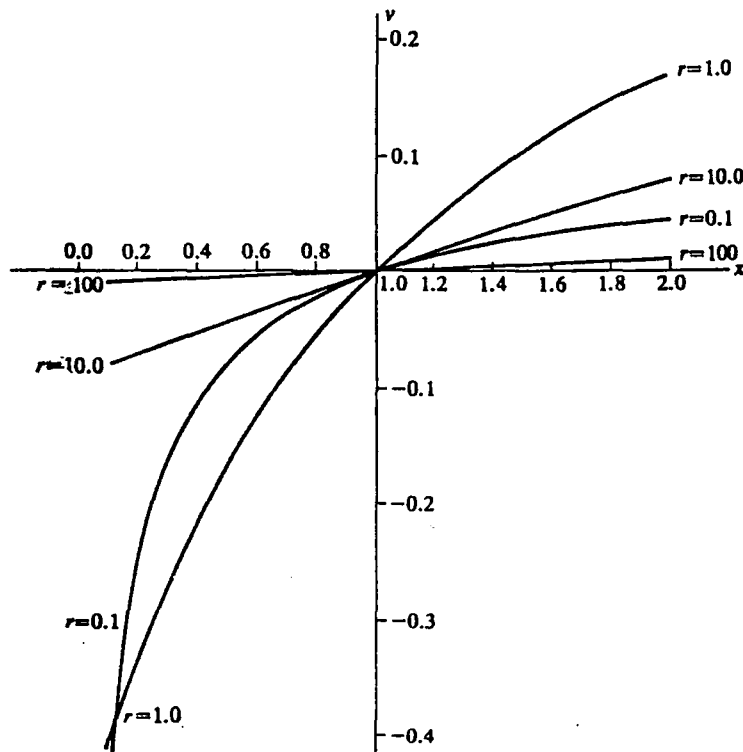
หรือ

$$v = \frac{1}{1 + r/x} - \frac{1}{1 + x} = \frac{x}{x + r} - \frac{1}{1 + r}$$

เมื่อ

$$v = \frac{E_{th}}{V_S}, \quad r = \frac{R_3}{R_2}, \quad x = \frac{R_I}{R_{I_{\min}}}$$

รูปที่ 2.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ v และ x เมื่อ x อยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.2 และ ค่า $r = 0.1, 1.0, 10.0$ และ 100 จะเห็นว่า v มีค่าเป็นศูนย์ที่ $x = 1$ ซึ่งคือ จุดที่บริดจ์สมดุลคือ $I = I_{\min}$



รูปที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า x และค่า v

พิจารณาที่ $r=1$ คือ $R_3 = R_2$ จะได้

$$v(x) = \frac{2x-1}{2(x+1)} \approx \frac{1}{4}(x-1)$$

ดังนั้น

$$\frac{E_{th}}{V_S} = \frac{1}{4} \left[\frac{R_I}{R_{I_{min}}} - 1 \right] = \frac{1}{4} \left[\frac{R_I - R_{I_{min}}}{R_{I_{min}}} \right]$$

จากความสัมพันธ์ R_T (Ω) ของ RTD ที่อุณหภูมิใดๆ คือ

$$R_T = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3 + \dots)$$

ตัวตรวจจับอุณหภูมิชนิด RTD นั้นมีความไม่เป็นเชิงเส้นน้อยมากคือ น้อยกว่า 1 % จาก รูปที่ 2.15 หากค่า r มีค่ามากกว่า 1 มากๆ สมการจึงเหลือเพียง

$$v \approx \frac{1}{r}(x-1)$$

เมื่อเทียบกับความสัมพันธ์ของ RTD จะได้

$$\frac{E_{th}}{V_S} = \frac{R_2}{R_3} \left(\frac{R_T}{R_{T_{min}}} - 1 \right)$$

จะได้ว่า

$$E_{th} = V_S \frac{R_2}{R_3} \propto T \quad (17)$$

โดยสมการที่ 17 คือ แรงดันเอาต์พุตของวงจรรีดิจิตอลเมื่อใช้ RTD ต่อในวงจรที่ตำแหน่ง R_1

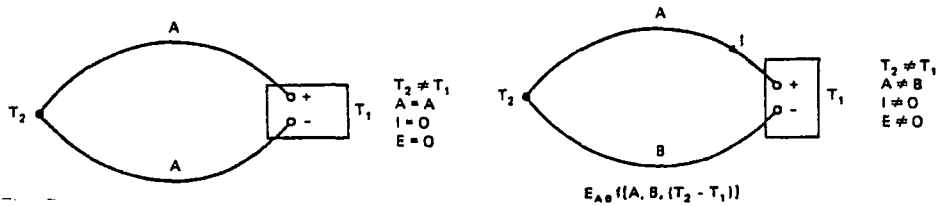
2.3.2 หลักการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล

ในการวัดอุณหภูมิในเชิงอุตสาหกรรม มีเทคนิคและวิธีการแตกต่างกันออกไปมากมาย แต่หัววัดอุณหภูมิที่นิยมใช้ในวงการอุตสาหกรรมคือ เทอร์โมคัปเปิล ซึ่งมีสาเหตุหลายประการคือ

- 1) เทอร์โมคัปเปิล สามารถวัดอุณหภูมิได้อย่างละเอียดแม่นยำ
- 2) สามารถเพิ่มความละเอียดแม่นยำได้ด้วยการเลือกใช้อุปกรณ์อื่นๆเพิ่มเติม
- 3) ช่วงอุณหภูมิใช้วัดมีตั้งแต่ -453 ถึง 3218 °F (-270 ถึง 1820 °C) ด้วยการเลือกใช้ชนิดต่างๆ ของ เทอร์โมคัปเปิล ให้เหมาะสมกับอุณหภูมินั้นๆ
- 4) มีขนาดและรูปร่างต่างๆ ให้เลือกใช้เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะงานต่างๆ

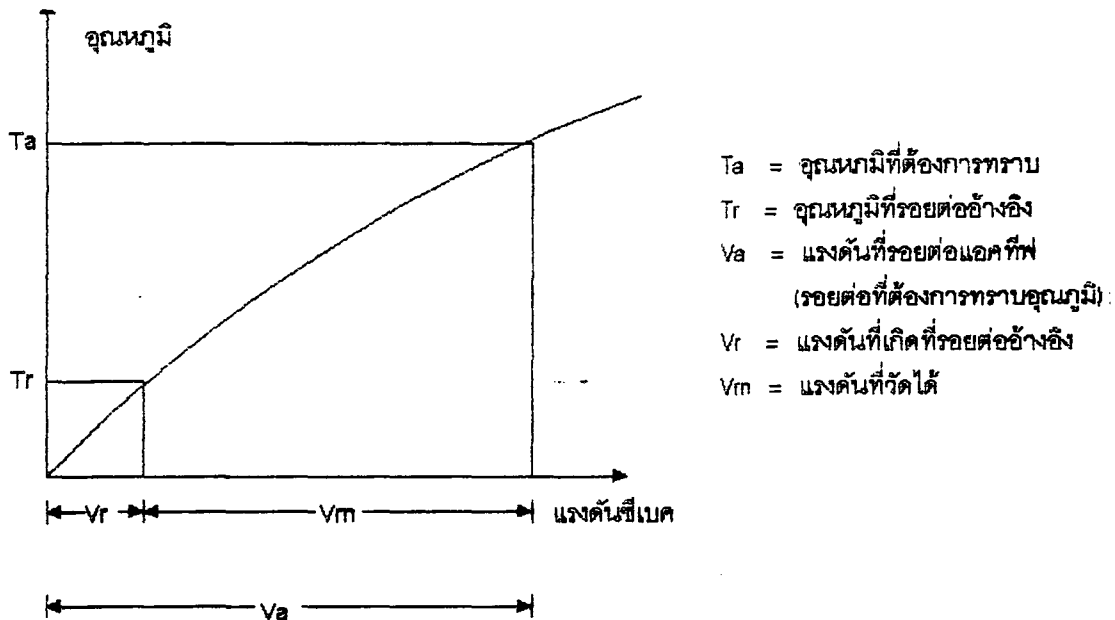
หลักการทํางานของเทอร์โมคัปเปิล

หลักการทํางานของเทอร์โมคัปเปิล ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1921 โดยนักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ชื่อ โทมัส โจฮานน์ ซีเบค (Thomas Johann Seebeck) ได้ค้นพบว่าการนำโลหะต่างชนิดกันนำปลายทั้งสองต่อเข้าด้วยกันแล้วให้ความร้อนที่รอยต่อของปลายสายด้านใดด้านหนึ่ง จะเกิดกระแสไฟฟ้าอ่อนๆ ไหลในวงจร



รูปที่ 2.16 วงจรพื้นฐานของเทอร์โมคัปเปิล

กระแสที่ขึ้นในวงจรเนื่องมาจากเกิดมีความต่างศักย์ที่รอยต่อแต่ละแห่ง มีขั้วตรงข้ามกัน โดยแรงดันที่รอยต่อร้อนจะมีค่าสูงกว่าที่รอยต่อเย็น ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นบนรอยต่อของโลหะนี้ เรียกว่า แรงดันไฟฟ้าซีเบค (Seebeck EMS) ผลต่างของแรงดันที่เกิดขึ้นนี้ให้เกิดเป็นแรงดันจำนวนหนึ่งที่ทำให้กระแสไหลได้ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามความแตกต่างของอุณหภูมิ T_1 และ T_2 นั่นคือ ใช้แรงดันไฟฟ้าเป็นตัววัดระดับอุณหภูมิ



รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันซีเบค

แรงดันที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก โดยปกติจะมีค่าประมาณ 0.2-0.3 มิลลิโวลต์เท่านั้น ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่นำมาจับคู่กันด้วยได้มีการทดลองจับคู่โลหะชนิดต่างๆ เพื่อทำเป็น เทอร์โมคัปเปิล สำหรับงานแต่ละแบบไว้หลายคู่แต่ละคู่เรียกชื่อ ตามอักษรภาษาอังกฤษ

ประเภทของ เทอร์โมคัปเปิล

ถ้าแบ่งประเภทของ เทอร์โมคัปเปิล ตามมาตรฐาน ANSI แบ่งได้ 7 ประเภท ตามวัสดุของสาย เทอร์โมคัปเปิล ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2

ประเภท	รหัสสี	โลหะ A (ขั้ว +)	โลหะ B (ขั้ว -)	อุณหภูมิที่เหมาะสม
E	ม่วง	Nickel 10 % Chromium	Constantan *	-100...1000 °C
J	ดำ	Iron	Constantan *	0...760 °C
K	เหลือง	Nickel 10 % Chromium	Nickel 5 % Aluminum	0...1370 °C
R	เขียว	Platinum 13 % Rhodium	Platinum บริสุทธิ์	0...1000 °C
S	เขียว	Platinum 10 % Rhodium	Platinum บริสุทธิ์	0...1750 °C
T	น้ำเงิน	Copper	Constantan *	-160...400 °C

*Constantan = Nickel 45 % และ Copper 55 %

ทฤษฎีและกฎของ เทอร์โมคัปเปิล

ถ้าโลหะต่างชนิดกัน A,B ซึ่งต่ออยู่ด้วยกัน จะเกิดความต่างศักย์คร่อมรอยต่อ เรียกว่า แรงดันซีเบค

แรงดันซีเบค นี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ A,B และอุณหภูมิของรอยต่อ เขียนเป็น สมการได้ดังนี้

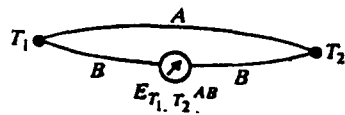
$$E_T^{AB} = a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4 + \dots$$

ค่าคงที่ของสมการ a_1, a_2, a_3, \dots ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ A,B

ตัวอย่างเช่น แรงดันที่เกิดขึ้นของรอยต่อของเหล็ก และ ค่าคงที่ 4 เทอมแรกคือ

$$E_T = 5.037 \times 10T + 3.043 \times 10^{-2} T^2 - 8.567 \times 10^{-5} T^3 + 1.35 \times 10^{-7} T^4 + \dots T^7 \mu V$$

เทอร์โมคัปเปิล เป็นวงจรปิดที่ประกอบด้วย 2 รอยต่อ ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 วงจรของเทอร์โมคัปเปิล

ถ้า T_1 และ T_2 ต่างกันและใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงๆ เข้าไปวัดค่าแรงดันจะเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} E_{T_1, T_2}^{A, B} &= E_{T_1}^{AB} - E_{T_2}^{AB} \\ &= a_1(T_1 - T_2) + a_2(T_1^2 - T_2^2) + a_3(T_1^3 - T_2^3) + \dots \end{aligned}$$

จะเห็นว่าแรงดันที่เกิดขึ้นกับ T_1, T_2 ของทั้งสองรอยต่อ ถ้า T_1 เป็นอุณหภูมิที่ต้องการวัดค่า T_2 เป็นอุณหภูมิอ้างอิง ซึ่งจะต้องทราบค่าที่แน่นอน

กฎ 5 ข้อของเทอร์โมคัปเปิล

กฎข้อที่ 1

แรงดันจะขึ้นกับอุณหภูมิที่รอยต่อเท่านั้น ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิที่อื่นๆ กฎนี้สำคัญมากในวงการอุตสาหกรรม ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ล้อมรอบระบบ ดังรูป 2.19 (a)

กฎข้อที่ 2

ถ้ามีโลหะอื่นเข้าไปแทรกใน A หรือ B ซึ่งทำให้เกิดรอยต่อใหม่ขึ้นอีก 2 รอยต่อแรงดันที่เกิดในวงจรก็ไม่เปลี่ยน ซึ่งแสดงว่าสามารถเอาโวลต์มิเตอร์ไปวัดที่ใดก็ได้โดยไม่มีผลใดๆ ดังรูป 2.19 (b)

กฎข้อที่ 3

ถ้ามีโลหะอื่นมาใส่ตรงรอยต่อทำให้เกิดรอยต่อใหม่คือ AC และ CB ที่อุณหภูมิเดิมไม่มีผลต่อแรงดันที่เกิดขึ้น คือแรงดันที่เกิดขึ้นยังเหมือนเดิม แสดงว่านำโวลต์มิเตอร์ไปต่อที่รอยต่อได้โดยไม่มีผลกระทบ ดังรูป 2.19 (c)

กฎข้อที่ 4 (Law of Intermediate Metals)

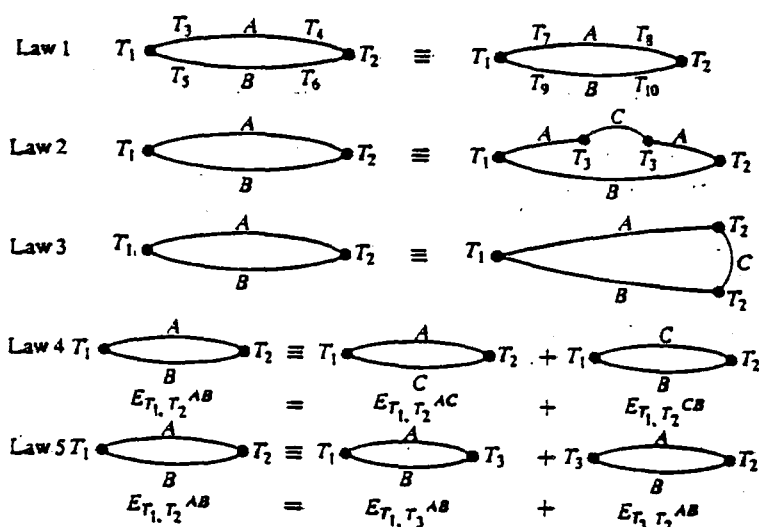
ตัวอย่าง เทอร์โมคัปเปิลชนิด Copper V. Iron (AB) จะทำให้แรงดันเท่ากับแรงดันของชนิด Copper V. Constantan (AC) กับชนิด Copper V. Constantan V.Iron (CB) ดังรูป 2.19 (d)

กฎข้อที่ 5 (Law of Intermediate Temperature)

$$E_{T_1, T_2}^{AB} = E_{T_1, T_3}^{AB} + E_{T_3, T_2}^{AB}$$

โดย T_3 เป็นอุณหภูมิระหว่างกลาง ถ้า $T_2 = 0$ จะได้

$$E_{T_1, 0} = E_{T_1, T_3} + E_{T_3, 0}$$

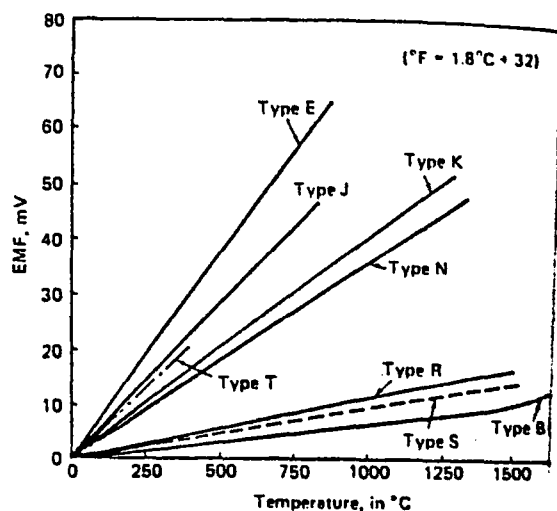


รูปที่ 2.19 แสดงกฎ 5 ข้อของเทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิลและการใช้งาน

มาตรฐาน ANSI (American National Standards Institute) เป็นมาตรฐานที่กำหนดคุณลักษณะการทำงานของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละประเภท ความแตกต่างของเทอร์โมคัปเปิลแบบต่างๆ นั้นมีความสำคัญมาก เพราะว่ามีผู้ออกแบบผลิตเทอร์โมคัปเปิลสามารถเลือกผลผลิตออก จำ

หมายถึงเหมาะสมกับสภาพและช่วงอุณหภูมิของงานแต่ละชนิด ซึ่งคุณลักษณะที่สำคัญของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละประเภท คือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะทั้งสอง (A และ B) ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.20



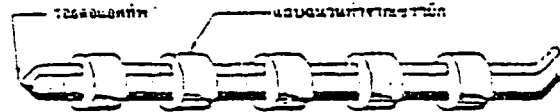
รูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับอุณหภูมิ

เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่ผลิตตามมาตรฐานนั้น เป็นเทอร์โมคัปเปิลซึ่งทำมาจากการต่อ โครเมียม+นิกเกิล ช่วงอุณหภูมิที่ใช้วัดจะอยู่ระหว่าง $0-1370^{\circ}\text{C}$ ตามที่ โรมส์ได้ค้นพบนี้ เขาสามารถพิสูจน์หลักการการทำงานได้ว่า ขณะที่วัดแรงดันรอยต่อที่ 0°C จะมีแรงดันเอาท์พุท เป็น 0.507 mV และแรงดันของรอยต่อที่ 100°C จะเป็น 5.07 mV

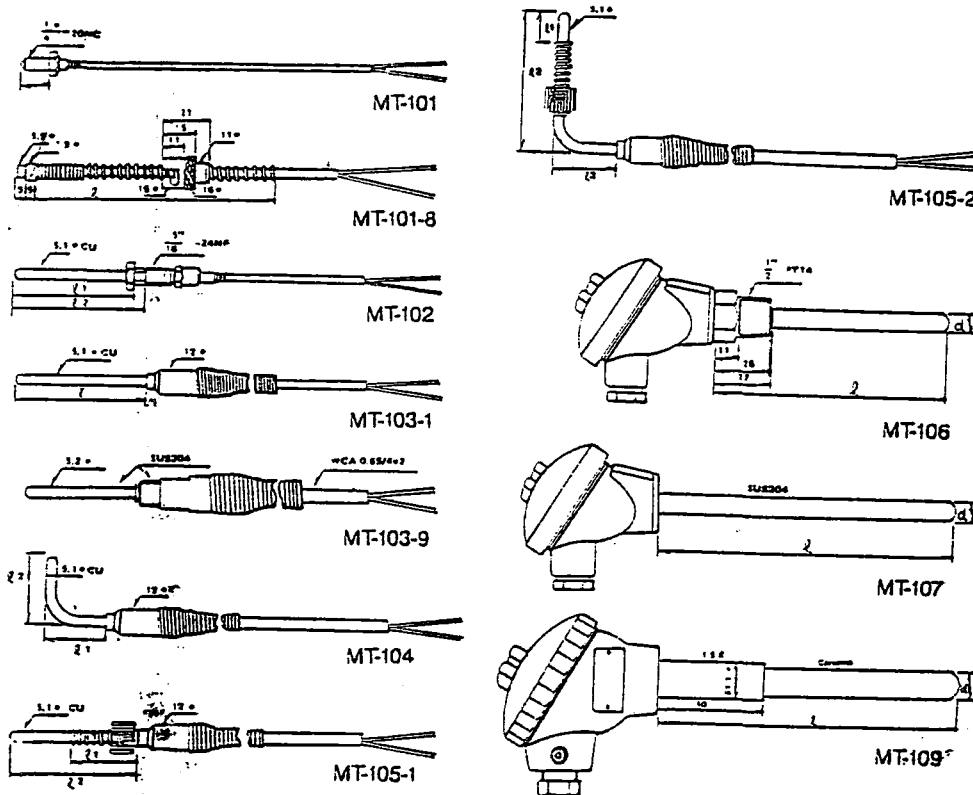
เทอร์โมคัปเปิลเป็นหัววัดอุณหภูมิที่นิยมกันมากที่สุดในอุตสาหกรรมปัจจุบัน เพราะมีความทนทานต่ออุณหภูมิที่สูงๆ สะดวกต่อการใช้งานทั้งยังมีความแม่นยำสูง เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้กันแพร่หลายในตอนนี้เป็นคือ เทอร์โมคัปเปิลชนิด K

เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้จริงมีรูปร่างต่างๆ กัน แบบที่ง่ายที่สุดเป็นเส้นลวดเล็กๆ สองเส้นร้อยผ่านฉนวนที่เป็นเซรามิก แล้วเชื่อมให้ปลายติดกันดังรูปที่ 2.23 เทอร์โมคัปเปิลแบบนี้ใช้ในเตาเผาเครื่องเคลือบดินเผาขนาดเล็กๆ แต่สำหรับการวัดอุณหภูมิในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูงหรือเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี เช่นไอของสารเคมี โลหะที่หลอมละลายจะทำให้อายุการใช้งานของเทอร์โมคัปเปิลสั้นลง จึงจำเป็นต้องมีท่อป้องกันส่วนเทอร์โมคัปเปิลไว้สักหนึ่ง เรียกว่า เทอร์โมเวล ซึ่งทำจากเหล็กสแตนเลสหรือเซรามิก แต่ในยุคหลังๆ ได้เปลี่ยนมาใช้โลหะผสมพิเศษ เช่น นิกโครซิล (Nickel-Chromium Silicon) เพราะมีความเหมาะสมในด้านสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่อ

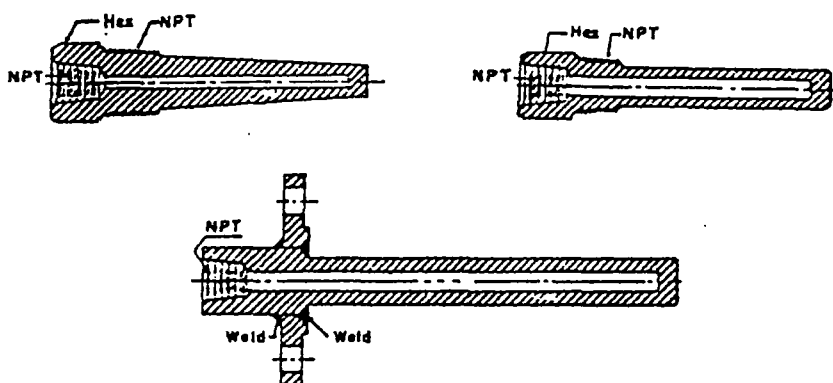
อุณหภูมิระหว่างปลอกหุ้มและโลหะที่ใช้ทำตัวเทอร์โมคัปเปิลและเป็นการลดค่าความเค้น อันเนื่องมาจากความร้อนให้เหลือน้อยที่สุด



รูปที่ 2.21 โครงสร้างเทอร์โมคัปเปิลอย่างง่าย ๆ ที่เหมาะสำหรับการวัดอุณหภูมิในเตาอบไฟฟ้า



รูปที่ 2.22 ขนาดและรูปร่างของเทอร์โมคัปเปิลแบบต่างๆ



รูปที่ 2.23 รูปแบบของเทอร์โมเวล

สายสัญญาณที่ใช้กับเทอร์โมคัปเปิล

สายเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้เป็นสายที่ทำมาจากโลหะชนิดเดียวกันกับเทอร์โมคัปเปิล แต่ละประเภทที่ผู้ผลิตได้ระบุคุณสมบัติไว้เช่น สายที่ใช้กับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K คือสาย CA ที่ทำมาจากโลหะนิกเกิลกับโครเมียม ในการเลือกใช้สายเทอร์โมคัปเปิล ถ้าใช้สายผิดประเภทกันก็จะทำให้การแสดงผลค่าอุณหภูมิที่ได้ผิดเพี้ยน สายเทอร์โมคัปเปิลที่ได้มาตรฐานมักจะใช้รหัสสีตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.2

ข้อพิจารณาในการเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลกับงานประเภทต่าง ๆ

-ช่วงอุณหภูมิในการวัด

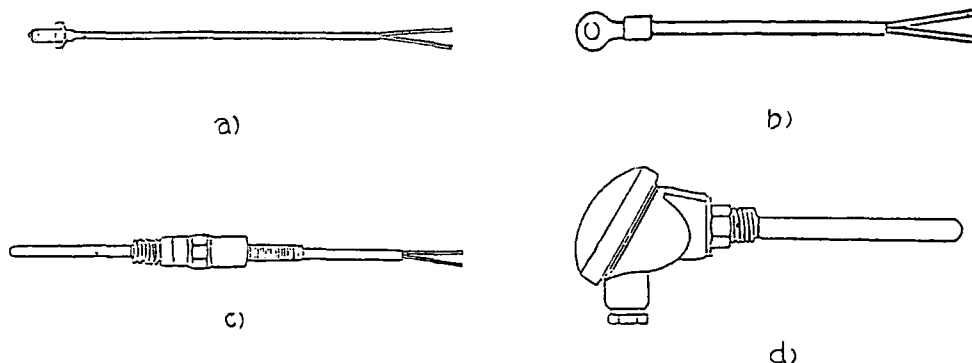
-ประเภทของตัวอ่าน (Temperature Controller) ซึ่งโดยมากแล้ว ตัวอ่านที่มีอยู่ในท้องตลาดมักออกแบบไว้สำหรับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

-รูปร่างและการติดตั้งดังรูปที่ 2.24

แต่บางครั้งเทอร์โมคัปเปิลไม่เหมาะกับงานบางประเภทเช่น

-จุดติดตั้งของเทอร์โมคัปเปิลอยู่ห่างจากตัวควบคุมอุณหภูมิมาก ซึ่งจะทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากไปกับสายสัญญาณซึ่งมีราคาค่อนข้างสูง และระยะทางที่ไกลอาจทำให้เกิดความเพี้ยนของสัญญาณ

-การวัดอุณหภูมิของวัตถุที่เคลื่อนที่เช่น การวัดอุณหภูมิของอาหารในสายพาน เนื่องจากเทอร์โมคัปเปิลมีการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิก่อนข้างช้า



รูปที่ 2.24 รูปร่างและการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลแบบต่าง ๆ

- a) แบบนี้เหมาะที่จะฝังหรือทำสกรูยึดเข้าไปในเนื้อโลหะหรือชิ้นงานที่จะใช้วัดอุณหภูมิ
- b) เหมาะสำหรับใช้ยึดกับวัตถุชิ้นงานที่เป็นแผ่นบางๆ หรือยึดติดกับเครื่องจักรที่ต้องการวัดอุณหภูมิ
- c) เหมาะสำหรับการวัดที่เป็นลักษณะการวัดอากาศ ในของเหลว หรือน้ำยาเคมีบางชนิด ที่เป็นกรดหรือด่างและสามารถที่จะติดตั้งให้สัมผัสกับโลหะชิ้นงานโดยตรงก็ได้
- d) แบบดังรูปนี้ข้างในเป็น เทอร์มินอล ต่อสายเหมาะสำหรับที่จะเดินสายวัดอุณหภูมิไกลๆ

2.4. ทฤษฎีและการทำงานของสเตปมอเตอร์

สเตปมอเตอร์เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าแบบหนึ่งที่ถูกออกแบบมาเป็นพิเศษโดยสามารถควบคุมความเร็วได้ด้วยการควบคุมดีซีพัลส์ ที่ใช้ในการขับเคลื่อนสเตปมอเตอร์ ซึ่งลักษณะการป้อนกระแสไฟฟ้าเป็นแบบสวิชชิง ทำให้มอเตอร์แบบนี้มีคุณสมบัติเป็นจักรกลแบบดิจิตอล

อาจกล่าวได้ว่า สเตปมอเตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณข้อมูลแบบดิจิตอล (Digital information) ไปสู่การเคลื่อนที่ทางกล (Mechanical movement) อย่างได้สัดส่วนกัน โดยที่แกนหรือโรเตอร์ของมอเตอร์ชนิดนี้จะถูกควบคุมให้หมุนเป็นสเตป (Discontinuous)

ประโยชน์จากการใช้งานสเตปมอเตอร์ ที่มีการควบคุมโดยใช้สัญญาณดิจิตอล คือ มีความถูกต้องเที่ยงตรงและสามารถเปลี่ยนตำแหน่งโหลดได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากแต่ละอินพุทพัลส์จะทำให้สเตปมอเตอร์เคลื่อนที่ไปหนึ่งสเตปอย่างเที่ยงตรง

เมื่อพิจารณาในแง่ทางกลจะพบว่า สเตปมอเตอร์มีความเที่ยงตรงที่ยอมรับได้ ซึ่งในการเปลี่ยนตำแหน่งอย่างง่ายอาจใช้สวิตช์ ในการคอนโทรลมอเตอร์ได้ง่ายถ้าต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของภาคการควบคุม (Controller) ให้ดีขึ้น อาจใช้ไอซีที่มีความเร็วสูงเนื่องจากประกอบด้วยมอเตอร์เฟส อยู่ภายในจึงได้กำลังงานสูงและต้นทุนต่ำความสะดวกในการใช้งานนี้เองจึงทำให้นำไปสู่งานใช้งานอย่างแพร่หลาย

2.4.1. นิยามของ สเตปมอเตอร์

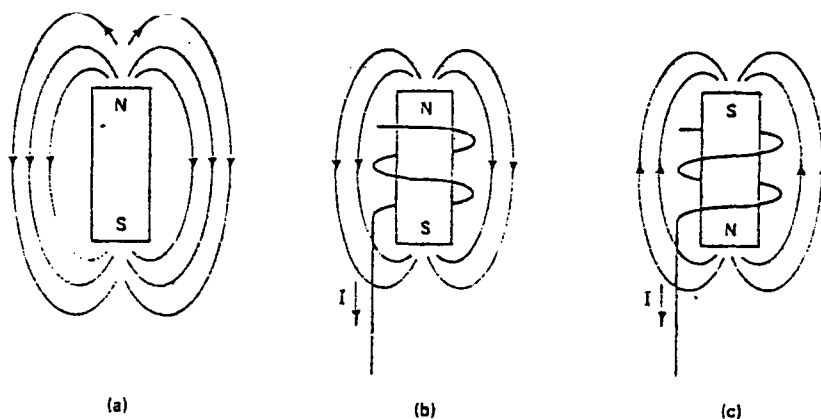
- จะมีเพลาหมุนเป็นสเตป
- ป้อนอินพุตที่มีความถี่ค่าหนึ่ง
- จะสเตปไปที่ละสเตปในแต่ละพัลส์
- ขนาดของสเตปขึ้นอยู่กับการออกแบบสเตปมอเตอร์
- จะสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยความถี่และความกว้างของพัลส์

การได้รับประโยชน์จากการใช้สเตปมอเตอร์อย่างเต็มที่มีนั้น ขึ้นอยู่กับการขับ (Driver) อย่างถูกต้องเหมาะสม ซึ่งภาคขับนี้จะต้องประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง, อิเล็กทรอนิกส์-สวิตช์ โดยอาจจะเป็นทรานซิสเตอร์หรือมอเตอร์เฟสและแหล่งจ่ายสัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัล ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ เพื่อให้ควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์

ทิศทางการกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่สเตปมอเตอร์ ถูกควบคุมโดยอิเล็กทรอนิกส์สวิตช์ ดังนั้น สเตปมอเตอร์จะหมุนไปในแต่ละสเตปในแต่ละอินพุตพัลส์ที่ป้อนเข้าสู่วงจรอิเล็กทรอนิกส์-สวิตช์ ขนาดของมุมที่สเตปไปจะขึ้นอยู่กับการออกแบบสเตปมอเตอร์โดยมีค่าตั้งแต่ 1.8° ถึง 15° ถ้าส่งสัญญาณไปยังวงจรสวิตช์ซิง (Switching Network) 24 พัลส์ โดยมีค่าของหนึ่งสเตปเท่ากับ 15° สเตปมอเตอร์ก็จะหมุนไปครบ 1 รอบ ขึ้นอยู่กับอัตราการจ่ายสัญญาณพัลส์ควบคุม (Control Pulse) โดยสัญญาณนี้อาจถูกผลิตโดยวงจรถ่ายสัญญาณ ที่ปรับความถี่ได้หรือจากไอซีควบคุม (Controller IC)

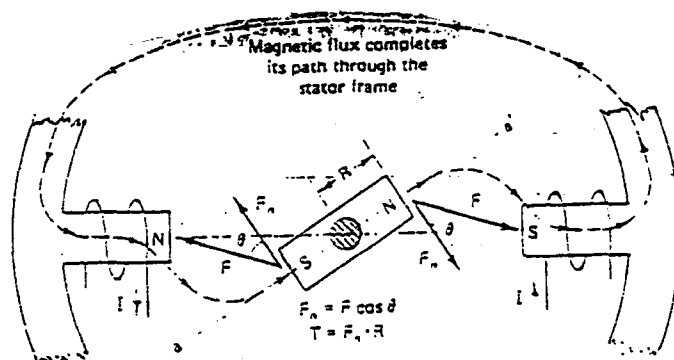
2.4.2. หลักการทำงานของ สเตปมอเตอร์

ในรูปที่ 2.25 แสดงหลักการพื้นฐานของเส้นแรงแม่เหล็ก รูป a) แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวร รูป b) แสดงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแส I ในรูป c) ขั้วแม่เหล็กกลับทิศทางเมื่อขดลวดถูกพันกลับทิศทางและทิศทางกระแสไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.25 แสดงถึงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในลักษณะต่าง ๆ

- a) สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากแม่เหล็กถาวรจะมีทิศทางพุ่งออกจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้
- b) สนามแม่เหล็กของแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแส I
- c) ขั้วแม่เหล็กกลับทิศทาง เมื่อขดลวดถูกพันกลับทิศทางและทิศทางกระแสของกระแสไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.26 แสดงแรงดึงดูดทำให้เกิดแรงบิดทำให้เกิดแรงบิดที่หมุนอเมเจอร์ให้ไปอยู่ในตำแหน่งสมดุล

ในรูปที่ 2.26 แท่งแม่เหล็กถาวรติดอยู่บนเพลาและหมุนได้อิสระเหมือนอาร์เมเจอร์ มีขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า 2 ขั้ว ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงโลหะที่เป็นสเตเตอร์ ตำแหน่งแกนของขั้วแม่เหล็ก คือ $\alpha - \alpha'$ ซึ่งต่างไปจากแกนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าเล็กน้อยเป็นมุม θ

แรงแม่เหล็กที่เกิดจากการดึงดูดของขั้วแม่เหล็กที่ต่างกันทำให้เกิดส่วนของแรง

$$F_n = F \cos \theta \quad (\text{แรงทั้งหมดนี้ตั้งอยู่บนแกน } \alpha - \alpha')$$

แรงบิด หรือทอร์กผลรวม

$$T = F_n R$$

ทำให้อาร์เมเจอร์หมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจนกว่าแกนของอาร์เมเจอร์ $\alpha - \alpha'$ จะอยู่ในแนวเดียวกับแกนของขั้วสเตเตอร์

ถ้าหากมีขั้วแม่เหล็กหลายๆ คู่ ขั้วรอบๆ สเตเตอร์และถ้าหากขั้วเหล่านี้ถูก กระตุ้นด้วยกระแสพัลส์ในรูปแบบที่เรียงลำดับกันไป อาร์เมเจอร์ก็จะหมุนในรูปลักษณะของสเตป ที่เป็นตามการหมุนของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการสวิตซ์ที่เรียงลำดับของขดลวดขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า บนสเตเตอร์

2.4.3. การแบ่งชนิดของสเตปมอเตอร์

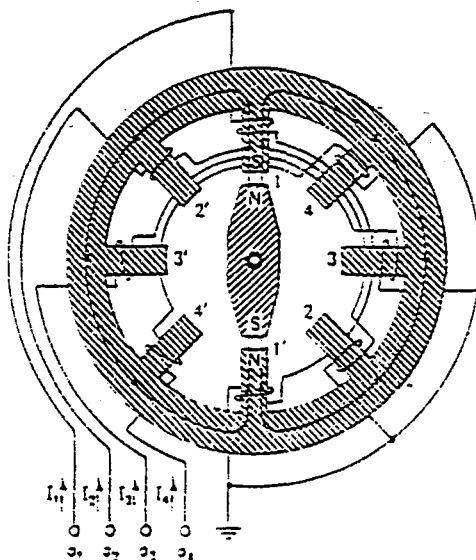
- สเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Stepping Motor)
- สเตปมอเตอร์แบบค่ารีลัคแตนซ์แปรค่าได้ (Variable Reluctance Stepping Motor)
- สเตปมอเตอร์แบบไฮบริด (Hybrid Stepping Motor)

2.4.3.1. สเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร

มุมสเตป (Step Angle) ของมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนขั้วแม่เหล็กบนส่วนที่อยู่กับที่หรือสเตเตอร์และจำนวนขั้วแม่เหล็กบนส่วนเคลื่อนที่หรือโรเตอร์ โรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวรรูปทรงกระบอกจำนวนขั้วแม่เหล็กจึงถูกจำกัดสูงสุดที่ค่าหนึ่ง การเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของโรเตอร์ทำให้ได้จำนวนขั้วแม่เหล็กบนโรเตอร์เพิ่มมากขึ้น แต่มีข้อเสีย คือ เกิดแรงเฉื่อยเพิ่มมากขึ้นไปด้วยซึ่งจะลดประสิทธิภาพขณะเริ่มสตาร์ทมอเตอร์ สเตปมอเตอร์แบบนี้มีขนาดความกว้างของมุมสเตปมาก แต่สามารถลดลงได้โดยการทำให้มีหลายสเต็ปหรือมากกว่าหนึ่งสเต็ปขึ้นไปตามแนวความยาวของมอเตอร์ (สเต็ปในที่นี้ หมายถึงเฟสซึ่งประกอบด้วยโรเตอร์ที่เป็นขั้วพื้นและโครงร่างของสเตเตอร์อยู่รอบนอก)

โครงสเตเตอร์ อาจจะประกอบด้วยสองสเตเตอร์หรือมากกว่า โดยในแต่ละขั้วสเตเตอร์หรือมากกว่า โดยในแต่ละขั้วสเตเตอร์จะมีขดลวดพันอยู่ กระแสที่ไหลผ่านขดลวดจะทำ

ให้เกิดสนามแม่เหล็ก โดยมีขั้วเป็นเหนือหรือใต้ขึ้นอยู่กับทิศทางกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดเตเตอร์อย่างต่อเนื่อง จะสร้างสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Magnetoc Field) ซึ่งมีผลทำให้โรเตอร์แม่เหล็กถาวรถูกดึงดูดให้หมุนตาม โดยความเร็วการหมุนขึ้นอยู่กับอัตราการใช้เปลี่ยนทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเตเตอร์และจำนวนขั้วแม่เหล็ก



รูปที่ 2.27 โครงสร้างของสเตเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรมี 4 เฟส แต่ละเฟสพันด้วยขดลวดบน 2 ขั้วของสเตเตอร์มุมสเตปเท่ากับ 45 องศา

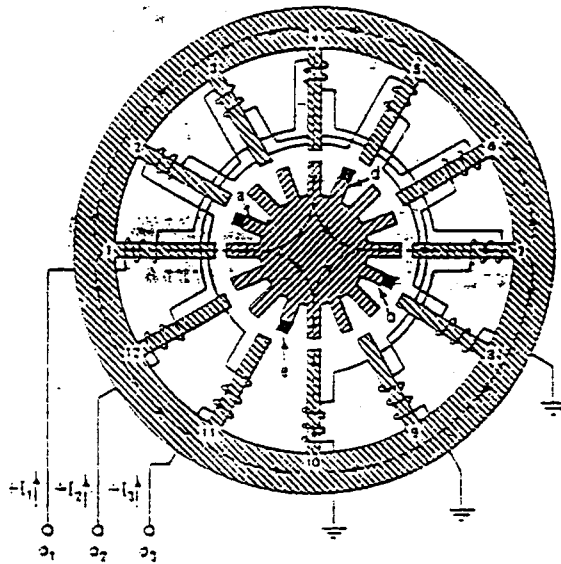
2.4.3.2 สเตปมอเตอร์แบบคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้

การเคลื่อนที่ของสเตปมอเตอร์ชนิดนี้ อาศัยแรงดึงดูดระหว่างส่วนประกอบที่ถูกทำให้เป็นแม่เหล็ก (ขั้วสเตเตอร์) และส่วนประกอบที่ทำจากสารแม่เหล็ก (ขั้วโรเตอร์) โดยขั้วสเตเตอร์ที่ได้รับพลังงานจะกลายเป็นขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า เส้นแรงแม่เหล็กจะออกจากขั้วพื้นของสเตเตอร์ที่เป็นขั้วเหนือผ่านช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ไปเข้าที่ขั้วพื้นของโรเตอร์ที่อยู่ใกล้ที่สุด (เส้นแรงแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็ก จะหาเส้นทางเดินที่มีคาร์ลัคแดนซ์ต่ำสุดช่องว่างอากาศระหว่างขั้วพื้นจะทำให้เกิดคาร์ลัคแดนซ์ต่อเส้นแรงแม่เหล็ก ช่องว่างกว้างมากคาร์ลัคแดนซ์ก็จะมีค่ามาก) และออกจากโรเตอร์ตรงไปยังขั้วพื้นของสเตเตอร์ที่เป็นขั้วได้ จึงครบวงจร

ดังนั้นขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์จะดึงดูดขั้วพื้นของโรเตอร์ที่อยู่ใกล้ที่สุดเข้ามา ทำให้เกิดการเคลื่อนที่เป็นสเตปได้

สเตปมอเตอร์แบบคาร์ลิคแดนซ์แปรค่าได้แบบสแต็กเดียว

โครงสร้างของสเตปมอเตอร์แบบคาร์ลิคแดนซ์แปรค่าได้ จะแสดงไว้ดังรูปที่ 2.28 สเตปมอเตอร์แบบคาร์ลิคแดนซ์แปรค่าได้แบบสแต็กเดียวจะมีโรเตอร์เดียวและสเตปมอเตอร์แบบคาร์ลิคแดนซ์แปรค่าได้ แบบหลายสแต็กจะหมายถึงมีหลายโรเตอร์ ซึ่งโรเตอร์และสเตเตอร์ทำจากสารแม่เหล็ก ส่วนสเตปมอเตอร์ในรูปที่ 2.28 มี 3 เฟส แต่ละเฟสใช้ขดลวดพันบน 4 ขั้ว หรือซี่ฟันของสเตเตอร์



รูปที่ 2.28 สเตปมอเตอร์แบบคาร์ลิคแดนซ์แปรค่าได้แบบสแต็กเดียว

ตัวอย่าง เฟสที่ 1 พันอยู่ที่ 1,4,7,10 ของสเตเตอร์ดังนั้นสเตเตอร์จะมี 12 ซี่ฟัน และในที่นี้กำหนดให้โรเตอร์มี 16 ซี่ฟัน ขั้วของสเตเตอร์ที่อยู่ตรงกันข้ามจะพันด้วยขดลวดใน ลักษณะที่ต่างกันเพื่อให้มีความสมดุลระหว่างแม่เหล็กเข้าและออกจากโรเตอร์

โดยที่ เฟส 1 - 1,4,7,10

เฟส 2 - 12,3,6,9

เฟส 3 - 2,5,8,11

สมมติว่ากระแส I_1 ป้อนให้กับเฟสที่ 1 ดังแสดงในรูป 2.28 และโรเตอร์ทั้ง 4 ซี่ฟัน จะอยู่ในแนวซี่ฟันที่ 1,4,7,10 ของสเตเตอร์ เส้นแรงแม่เหล็กจะเข้าสู่โรเตอร์จากซี่ฟันที่ 4 และ 10 และออกจากโรเตอร์ไปยังซี่ฟันของสเตเตอร์ที่ 1 และ 7 ซึ่งเป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่ครบ

วงจรโดยผ่านโครงร่างของสเตเตอร์ จะสังเกตได้ว่าปลายซีพินของโรเตอร์ซึ่งอยู่ในแนวเดียวกับซีพินที่ 4 ของสเตเตอร์จะเป็นเส้นทางผ่านเข้าไปยังโรเตอร์ของเส้นแรงแม่เหล็กอย่างต่อเนื่องผ่านช่องว่าง (Gap) ระหว่างซีพินทั้งสองที่อยู่ในแนวเดียวกัน ส่วนซีพินของสเตเตอร์และโรเตอร์ที่เหลืออีก 3 คู่ ก็เกิดลักษณะของแม่เหล็กในทำนองเดียวกัน

ในสภาวะต่อไปเราจะให้โรเตอร์หมุนไป 1 สเตปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา จะต้องจ่ายพลังงานให้กับเฟส 3 ที่มีขดลวดพันอยู่บนซีพินที่ 2,5,8,11 ของสเตเตอร์ด้วยกระแส I_3 หลังจากหยุดกระแส I_1 แล้วในตอนนี้นี้เส้นแรงแม่เหล็กจะหาทางเดินที่ต่างไปจากเดิมเพื่อให้วงจรแม่เหล็กครบวงจร ทำนองเดียวกันเส้นแรงแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กก็จะหาทางเดินที่มีรีลัคแตนซ์ต่ำสุด ด้วยเหตุผลดังกล่าวเส้นแรงแม่เหล็กจะออกจากขั้วที่ 2 และ 8 ของ สเตเตอร์ซึ่งทำให้เป็นขั้วเหนือและเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะกระโดดผ่านช่องว่างไปยังขั้วซ้ายของโรเตอร์ที่ใกล้ที่สุด ซีพิน a และ b ของโรเตอร์เป็นโรเตอร์ที่อยู่ใกล้ที่สุดและจะถูกเหนี่ยวนำให้เป็นขั้วใต้ เส้นแรงแม่เหล็กจะออกจากซีพิน d และ e ของโรเตอร์ผ่านช่องว่างอากาศเข้าสู่ ซีพินที่ 5 และ 11 ของสเตเตอร์ดังนั้นส่วนที่เหลือของวงจรแม่เหล็กจะสมบูรณ์โดยผ่านโครงร่างของสเตเตอร์ (ถูกเหนี่ยวนำเป็นขั้วเหนือ) และซีพิน a ของโรเตอร์ (ถูกเหนี่ยวนำเป็นขั้วใต้) แรงดึงดูดจะเกิดขึ้นระหว่างขั้ว (11,e),(8,b),(5,d) ผลที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดทอร์กกระทำต่อ โรเตอร์หมุนไปจนกระทั่งซีพิน a,d,b,e ของโรเตอร์อยู่ในแนวเดียวกับซีพิน 2,5,8,11 ของสเตเตอร์ตามลำดับ ขณะเวลาดังกล่าวช่องว่างระหว่างซีพินตามลำดับจะมีค่าน้อยที่สุด ผลลัพธ์ของค่ารีลัคแตนซ์จะมีค่าต่ำสุดและเส้นแรงแม่เหล็กจะมีค่าสูงสุดผ่านวงจรแม่เหล็ก ที่ตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งที่สมดุลของการขับ เฟส 3 ในขบวนการที่กล่าวมาแล้วโรเตอร์จะเคลื่อนหนึ่งสเตป เป็นมุม 7.5°

สัญลักษณ์ต่างๆ ของสเตปมอเตอร์แบบค่ารีลัคแตนซ์แปรค่าได้

N_r = จำนวนซีพินของโรเตอร์

N_s = จำนวนซีพินของสเตเตอร์

N_p = จำนวนเฟส

P_r = ความห่างระหว่างปลายซีพินของโรเตอร์ (องศา)

P_s = ความห่างระหว่างปลายซีพินของสเตเตอร์ (องศา)

θ_s = มุมสเตป (องศา)

R_s = อัตราสเตป หรือ ความเร็วในการสเตป (สเตป/รอบ)

$X = N_s / N_p =$ จำนวนซีพินของสเตเตอร์ต่อเฟส

พารามิเตอร์ต่างๆ ของสเตปมอเตอร์

1. ความห่างระหว่างปลายซี่ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์ (Tooth Pitch)

$$P_r = 360/N_r \quad \text{และ} \quad P_s = 360/N_s$$

2. มุมสเตป (Step Angle)

โรเตอร์จะเคลื่อนที่ในมุมขนาด P_r ได้เท่ากับ N_p สเตป ดังนั้นเราจะหามุมสเตปได้

$$\theta_s = P_r/N_p = N_r/N_p \quad \text{องศา/สเตป}$$

มุมสเตปจะเท่ากับความแตกต่างระหว่าง P_r และ P_s ดังนั้นเราจะหามุมสเตปได้เป็น

$$\theta_s = |P_r - P_s| \quad \text{องศา/สเตป}$$

3. อัตราการสเตป (Stepping Rate)

ความเร็วในการสเตปต่อรอบ (360 องศา) หาได้เป็น

$$R_s = 360/\theta_s = N_s N_p \quad \text{สเตป/รอบ}$$

4. ความเร็วของสเตปมอเตอร์ (Speed Of Step Motor)

เมื่อเราป้อนอินพุตพัลส์ที่มีความถี่ (f) สเตปต่อพัลส์ให้กับสเตปมอเตอร์ มอเตอร์จะสเตปไปด้วยความเร็ว (สเตป/พัลส์) $\times f$ (พัลส์/วินาที)

$$1/R_s \text{ (รอบ/สเตป)} \times f \text{ (พัลส์/วินาที)} \times 60 \text{ (วินาที/นาท)}$$

$$\text{ความเร็วของมอเตอร์ (w)} = 60f/R_s = 60f/N_p N_r = \theta_s f/6 \text{ (rpm)}$$

5. จำนวนของโพลสเตเตอร์ต่อเฟส (Number Of Stator Poles Per Phase)

$$\text{จำนวนของโพลสเตเตอร์ต่อเฟส (X)} = N_s/N_p$$

$$\text{หรือ} \quad X = R_s/N_p(N_p+1) = N_r(N_p+1)$$

จำนวนของโพลสเตเตอร์ต่อเฟส (X) จะสัมพันธ์กับอัตราการสเตปหรือจำนวนซี่ฟันของโรเตอร์ สเตปมอเตอร์ในรูป 2.28 เราสามารถสรุปเลือกพารามิเตอร์บางตัวของสเตปมอเตอร์ได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์บางตัวของสเตปมอเตอร์

N_p	R_s	N_r	X	N_s
3	48	16	4	12
			8	24
4	48	12	4	16
4	64	16	?	?

สเตปมอเตอร์แบบค่ารีลัคแตนซ์แปรค่าได้แบบหลายสเต็ค

สเต็คในที่นี่หมายถึงรวมไปถึงโรเตอร์ที่เป็นซี่ฟันและโครงสร้างของสเตเตอร์อยู่รอบนอก สเตปมอเตอร์แบบค่ารีลัคแตนซ์แปรค่าได้แบบ 3 สเต็ค (หมายถึง 3 เฟส) มีโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.29 ซึ่งถูกออกแบบให้สเตเตอร์ของแต่ละสเต็คประกอบด้วย 4 โพล และแต่ละโพลจะมีซี่ฟัน 3 ซี่ ซึ่งต่างจากสเตปมอเตอร์แบบค่ารีลัคแตนซ์แปรค่าได้แบบสเต็คแบบเดียว (แต่ละโพลจะมีซี่ฟันเดียว) ข้อสังเกตในแต่ละสเต็คจำนวนซี่ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์จะมีจำนวนเท่ากัน ซึ่งต่างกับสเตปมอเตอร์แบบค่ารีลัคแตนซ์แปรค่าได้แบบสเต็คแบบเดียวคือ จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์จะเท่ากันไม่ได้ถ้าหากมีจำนวนซี่ฟันเท่ากันมันจะไม่ทำงาน

จากรูป 2.29 โรเตอร์และสเตเตอร์ของแต่ละเฟส (สเต็ค) จะมี 12 ซี่ฟันและมุมสเตป (θ_s) เท่ากับ 10 องศา แต่ละเฟสของสเตเตอร์ที่เรียงลำดับต่อเนื่องกันจะถูกจัดตำแหน่งให้ต่างกันเท่ากับ $1/3$ ของช่องว่างระหว่างซี่ฟันของโรเตอร์

การทำงานของสเตปมอเตอร์แบบค่ารีลัคแตนซ์แปรค่าได้ที่มี 3 สเต็ค

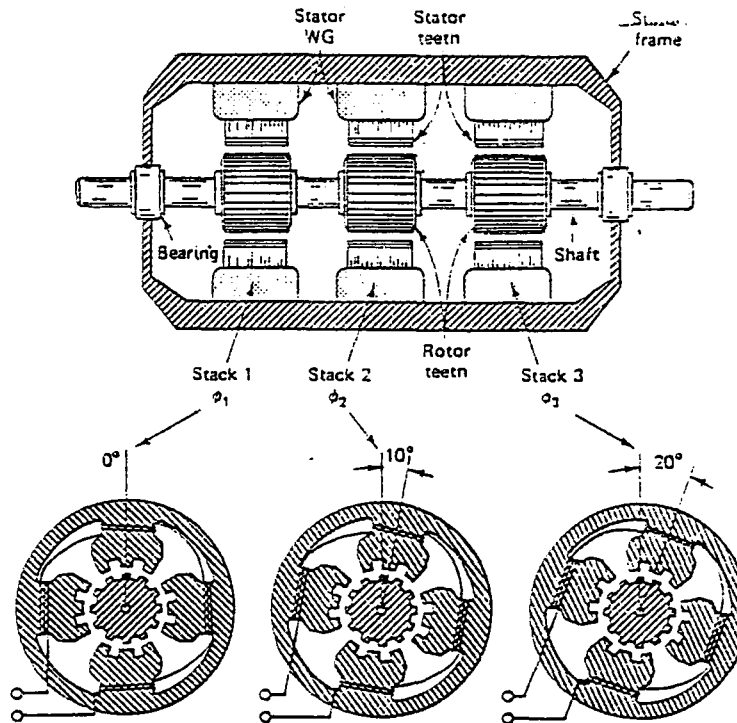
ไดอะแกรมส่วนล่างของรูปที่ 2.29 แสดงถึงโครงสร้างของโรเตอร์และสเตเตอร์ของสเตปมอเตอร์แบบค่ารีลัคแตนซ์แปรค่าได้ที่มี 3 สเต็ค โดยแต่ละสเต็คจะมี $N_r = N_s$ แต่ละสเต็คจะมีตำแหน่ง ของสเตเตอร์แตกต่างจากตำแหน่งถัดไป 10 องศา ส่วนซี่ฟันของโรเตอร์ทั้ง 3 อันจะประกอบอยู่บนแกนเดียวกันและได้รับการปรับแต่งให้อยู่แนวเดียวกันอย่างสมบูรณ์

ตามปกติจะหาค่ามุมสเตป ได้จากสมการ

$$\theta_s = P_r/N_p = 360/N_r N_p$$

ในที่นี้จะหา θ_1 ได้จากสมการเดียวกันคือ

$$\theta_1 = P_r/N_p = \theta_s$$



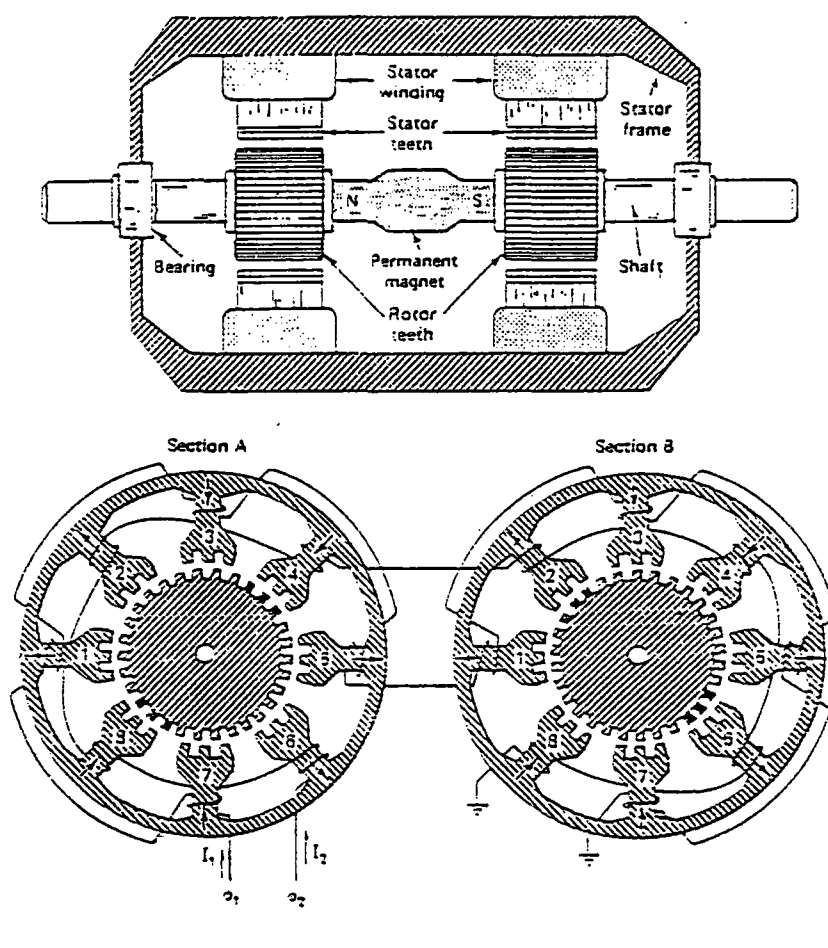
รูปที่ 2.29 แสดงโครงสร้างของ สเตปมอเตอร์แบบคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้ ที่มี 3 เฟส

สเตปมอเตอร์แบบ 3 สเต็ค ถึงแม้ว่าโรเตอร์ทั้ง 3 อันจะติดอยู่บนเพลาอันเดียวกัน สเต็คทั้ง 3 จะมีวงจรมแม่เหล็กที่แยกกันดังนี้

ถ้าเฟสที่ 1 ถูกขับด้วยกระแสเป็นเฟสที่เริ่มต้นให้ซี่ฟันของโรเตอร์ สเตเตอร์อยู่ในแนวเดียวกัน ส่วนของซี่ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์ในสเต็คที่ 2 ในขณะนั้นจะมีตำแหน่งต่างกัน 10 องศา และซี่ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์ในสเต็คที่ 3 จะมีตำแหน่งต่างกัน 20 องศาต่อนั้นหยุดจ่ายกระแสในสเต็คที่ 1 และป้อนกระแสให้กับสเต็คที่ 2 โรเตอร์จะหมุนไป 10 องศา ซึ่งจะทำให้ซี่ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์ในสเต็คที่ 1 อยู่ในแนวเดียวกัน ในขณะนั้นซี่ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์ในสเต็คที่ 3 จะมีตำแหน่งต่างกัน 10 องศา ต่อกันจะหยุดจ่ายกระแสในสเต็คที่ 2 และป้อนกระแสในสเต็คที่ 3 โรเตอร์จะหมุนไปอีก 10 องศา ซึ่งจะทำให้ซี่ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์ในสเต็คที่ 1 อยู่ในแนวเดียวกันส่วน ซี่ฟันของโรเตอร์ในสเต็คที่ 1 จะมีตำแหน่งต่างกัน 10 องศา

2.4.3.3 สเตปมอเตอร์แบบไฮบริด

มอเตอร์ชนิดนี้เป็นแบบรวมระหว่างสเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรกับสเตปมอเตอร์แบบคาร์รีคแทนซ์แปรค่าได้ คือ ชุดโรเตอร์จะเป็นสเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรส่วนชุดสเตเตอร์จะเป็นสเตปมอเตอร์แบบคาร์รีคแทนซ์แปรค่าได้



รูปที่ 2.30 โครงสร้างของไฮบริดสเตเตอร์ $N_r = 30$, $N_s = 24$ ซี่ฟันของสเตเตอร์ทั้ง 2 ตอนจะอยู่ในแนวเดียวกับส่วนซี่ฟันของโรเตอร์ทั้ง 2 ตัว จะมีตำแหน่งต่างกัน $(1/2)P_r = 6$ องศา , $\theta_s = 3$ องศา

ไฮบริดสเตปมอเตอร์มีวิธีการสร้างแรงบิด ซึ่งเป็นคุณลักษณะผสมของสเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรและสเตปมอเตอร์แบบค่ารีลัคแตนซ์แปรค่าได้ สเตปมอเตอร์แบบนี้จะให้ประสิทธิภาพในการทำงานสูงกว่าแบบอื่นๆ เนื่องจากมีขนาดเล็กแรงเฉื่อย เกิดที่โรเตอร์น้อย และมีความกว้างของมุมสเตปน้อย

ไฮบริดสเตปมอเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.30 แสดงถึงโครงสร้างของไฮบริดสเตปมอเตอร์ ประกอบด้วย 2 ตอนกับแถบแม่เหล็กอยู่ระหว่าง 2 ตอน แต่ละตอนประกอบด้วยซี่ฟันของโรเตอร์และโพลของสเตเตอร์ที่มีซี่ฟันเช่นกันและพันด้วยขดลวด รายละเอียดของโครงสร้างของสเตเตอร์และโรเตอร์แต่ละตอนแสดงในไดอะแกรมรูปที่ 2.30

ลักษณะโครงสร้างของไฮบริดสเตปมอเตอร์

- จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์ไม่เท่ากัน
- ตอน A และตอน B มีโครงสร้างเหมือนกัน
- ซี่ฟันของสเตเตอร์ทั้ง 2 ตอน จะอยู่ในแนวเดียวกันอย่างถูกต้อง
- ส่วนซี่ฟันทั้ง 2 ของโรเตอร์ทั้ง 2 ตอน จะมีตำแหน่งที่แตกต่างกัน $(1/2)P_r$ (ในรูปที่ 2.30 กำหนดให้ $P_r = 360/30 = 12$ องศา ดังนั้นตำแหน่งซี่ฟันของโรเตอร์ทั้ง 2 ตอนจะแตกต่างกัน 6 องศา)

- สเตเตอร์ของแต่ละตอนมี 8 โพล แบ่งออกเป็น 2 สเตเตอร์เฟส
- เฟสที่ 1 จะพันขดลวดบนสเตเตอร์โพลหมายเลข 1,3,5,7 ของทั้งในตอน A และตอน B

- เฟสที่ 2 จะพันขดลวดบนสเตเตอร์โพลหมายเลข 2,4,6,8 ของทั้งในตอน A และตอน B

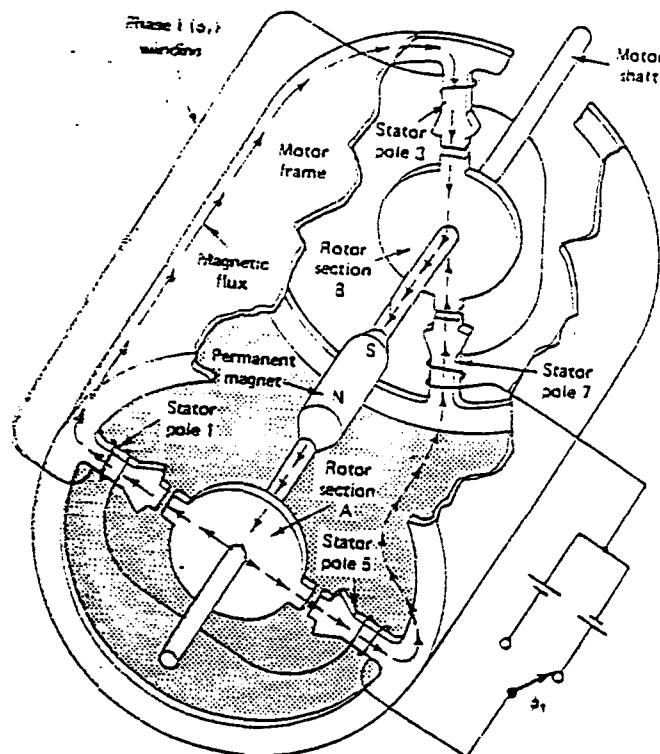
-แกนแม่เหล็กถาวร จะเหนี่ยวนำโรเตอร์ในตอน A ให้เป็นแม่เหล็กขั้วเหนือและโรเตอร์ในตอน B ให้เป็นแม่เหล็กขั้วใต้ ความซับซ้อนจะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการแบ่งส่วนของขดลวดในเฟส 2 ตอนทำให้ได้วงจรแม่เหล็กที่ซับซ้อนและได้เส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่แตกต่างกันเป็นวงกลม ทิศทางเดินของสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์โพลจะขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสเฟสดังแสดงด้วยลูกศรในรูปที่ 2.31

การทำงานของไฮบริดสเตปมอเตอร์

ขณะที่เฟสที่ 1 (ϕ_1) ได้รับพลังงานโดยการป้อนกระแส I_1 ในทิศทางดังแสดงด้วย ลูกศรสีพื้นของโรเตอร์ในตอน A จะอยู่ในแนวเดียวกับสีพื้นของสเตเตอร์ของโพลที่ 1 และโพลที่ 5 ส่วนของตอน B จะอยู่ในแนวเดียวกับสีพื้นของโพลที่ 9 และโพลที่ 7 ดังแสดงในรูป ที่ 2.29

เพื่อให้เพลลาของมอเตอร์หมุนไป 1 สเตป จะต้องหยุดป้อน กระแส I_1 และป้อนกระแส I_2 ให้กับเฟสที่ 2 (ϕ_2)

ในรูปที่ 2.30 สีพื้นของโรเตอร์ที่เป็นสีดำใช้สำหรับอ้างอิง สีพื้นสีดำจะอยู่ใกล้แนวสีพื้นของสเตเตอร์ของโพลที่ 4 และโพลที่ 8 ในตอน A และโพลที่ 6 ในตอน B มากที่สุด (สีพื้นของโรเตอร์ที่เป็นสีดำอยู่ห่างจากสีพื้นของสเตเตอร์ = 1 สเตปพอดี)



รูปที่ 2.31 วงจรแม่เหล็กของไฮบริดสเตปมอเตอร์ แสดงถึงเส้นทางเดินทางของเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นในตอน A จะผ่านโพลที่ 1 และโพลที่ 5 เข้าไปยังโรเตอร์ของตอน B ผ่านโพลที่ 3 เข้าไปยังโรเตอร์ของตอน B ผ่านโพลที่ 3 และโพลที่ 7 เข้าสู่ขั้วได้ (S) ของแม่เหล็กถาวร

เราจะต้องป้อนกระแส I_2 ในทิศทางที่ถูกต้องคือจะต้องให้โพลที่ 4 โพลที่ 8 และโพลที่ 6 ถูกเหนี่ยวนำเป็นแม่เหล็กในทิศทางที่ถูกต้อง (เกิดวงจรแม่เหล็กที่สมบูรณ์) ด้วย I_2 ในกรณีนี้ I_2 จะต้องเป็นลบ

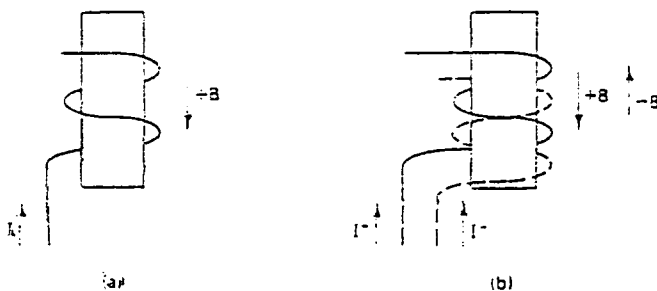
ไฮบริดสเตปมอเตอร์ จะทำงานด้วยกระแสเฟสที่มีการโพลได้สองทิศทาง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟ 2 ตัว (Bipolar Drive)

การแก้ปัญหาด้วยการขับไฮบริดสเตปมอเตอร์ให้ทำงานด้วยแหล่งจ่ายไฟเพียงตัวเดียว (Unipolar Drive) ได้โดยดัดแปลงโครงสร้างการพันขดลวดเฟสของสเตเตอร์

การพันขดลวดเฟสของสเตเตอร์แบบ ไบพ็อลาร์ (การพัน 2 แลวสลับกัน) สามารถขับได้ด้วย การขับแบบยูนิพ็อลาร์

ขดลวดแบบ ยูนิพ็อลาร์ เราต้องกลับทิศทางของกระแสเพื่อกลับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก B

ขดลวดแบบ ไบพ็อลาร์ ถ้าเราต้องกลับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กเป็น -B เราสามารถทำได้โดยป้อนกระแสขนาดเดิมจากแหล่งจ่ายไฟตัวเดิมเข้าที่ขดลวดที่เป็นเส้นประ จะทำให้ทิศทาง การเหนี่ยวนำแม่เหล็กและทิศทางเส้นแรงแม่เหล็ก (-B) กลับทิศทางได้



รูปที่ 2.32 การพันขดลวดเฟสของสเตเตอร์

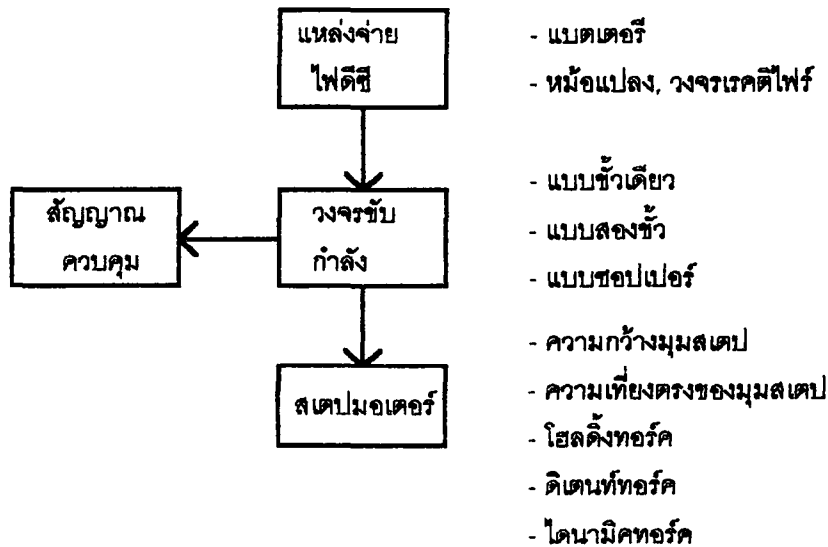
(a) แบบยูนิพ็อลาร์ (b) แบบไบพ็อลาร์

ถ้าหากไฮบริดสเตปมอเตอร์ ในรูปที่ 2.32 มีขดลวดเฟสของสเตเตอร์เป็นแบบไบพ็อลาร์ ขดลวดเฟส ϕ_1 เดิมจะถูกแบ่งตัวเป็น 2 ขดลวดเฟส ϕ_1^+ และเฟส ϕ_1^-

ในตอนนี้จะทำให้ได้ขดลวดเฟสถึง 4 เฟส และแต่ละเฟสสามารถขับได้ด้วยกระแสที่ไหลในทิศทางเดียว ส่วนเครื่องหมาย + และ - ใช้สำหรับแสดงถึงทิศทาง การเกิดสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์โพล

2.4.4. ระบบสเตปมอเตอร์

การเลือกใช้สเตปมอเตอร์ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในงานบางอย่างนั้น จะต้องมี ความเข้าใจคุณลักษณะของมอเตอร์และวงจรที่ใช้ขับมอเตอร์ในรูปแบบที่ 2.33 แสดงแผนผังของระบบ สเตปมอเตอร์



รูปที่ 2.33 แผนผังแสดงระบบสเตปมอเตอร์

ความถูกต้องเที่ยงตรงของมุมสเตปขณะที่ไม่มีโหลด จะถูกระบุสำหรับมอเตอร์แต่ละชนิด เช่น มอเตอร์ที่มีมุมสเตป 7.5° ความผิดพลาด ± 10 ลิปดา ขณะเคลื่อนที่ไป 1 สเตป เป็นต้น มอเตอร์ที่มีจำนวนสเตปต่อรอบเท่ากับ 4 จะมีค่าผิดพลาดเป็นศูนย์ เมื่อหมุนครบหนึ่งรอบ เพราะขณะที่หมุนมา ณ ตำแหน่งเดิม ขณะเริ่มต้นหัวแม่เหล็กและทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux) วงเดิม ด้วยเหตุนี้การเปลี่ยนตำแหน่งของสเตปมอเตอร์ที่ต้องการความถูกต้องสูงๆ จะต้องแบ่งจำนวนสเตปต่อรอบเป็นจำนวนเท่าของ 4 สเตป เพื่อลดการสะสมของข้อผิดพลาด (Step Angle Error) ซึ่งเป็นรูปแบบการทำงานแบบ 4 สเตป

ตัวอย่าง ของมุมสเตปแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างของมูมสเตป

มูมสเตป (องศา)	จำนวนสเตปต่อรอบ
0.9	400
1.8	200
3.6	100
3.75	96
7.5	48
15.0	24

2.4.5. แรงบิด (Torque)

การทำงานของสเตปมอเตอร์ มีแรงบิดเกี่ยวข้องกับอยู่ 3 ชนิดคือ

โฮลด์ทอร์ก (Holding Torque) คือ แรงบิดที่ทำให้สเตปมอเตอร์เริ่มหมุนไป 2 สเตป จากขณะหยุดนิ่ง ถ้าแรงบิดที่ให้สเตปมอเตอร์มีขนาดมากกว่าระดับโฮลด์ทอร์กจะทำให้มอเตอร์สูญเสียการหมุนแบบสเตปกลายเป็นหมุนแบบต่อเนื่อง โดยปกติแรงบิดขณะทำงานของมอเตอร์จะน้อยกว่าระดับโฮลด์ทอร์ก

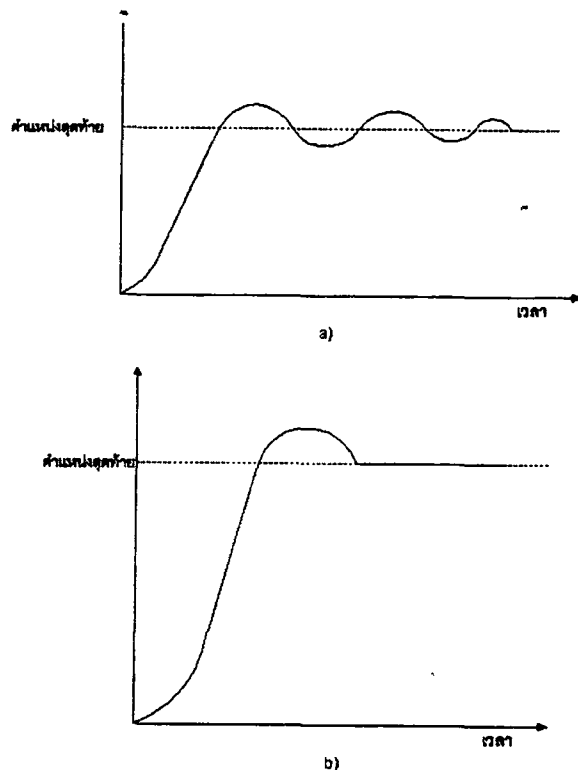
ดีเทนทอร์ก (Detent Torque) สเตปมอเตอร์แบบไฮบริดและแบบแม่เหล็กถาวร จะมีส่วนประกอบของโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวรซึ่งจะสร้างแรงบิดมาเบรคการหมุนของมอเตอร์อย่างสม่ำเสมอในขณะที่ไม่มีการป้อนกระแสเข้าขดสเตเตอร์ แรงบิดดังกล่าวนี้เรียกว่า ดีเทนทอร์ก

ไดนามิกทอร์ก (Dynamic or Working Torque) คือ แรงบิดขณะทำงานซึ่งอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องมาจากการปรับเปลี่ยนอัตราเร็วของมอเตอร์ โดยปกติการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วของมอเตอร์จะอยู่ในย่านระหว่างเส้นโค้งพูลอิน (Pull-In Curve) และเส้นโค้งพูลเอาท์ (Pull-Out curve) เพราะถ้าปรับอัตราเร็ว ณ จุดนอกโค้งพูลเอาท์ มอเตอร์จะสูญเสียการหมุนแบบเป็นสเตปได้หรือเกิดการหมุนแบบต่อเนื่องนั่นเอง

2.4.6. การแกว่งเข้าสู่สภาวะคงตัว (Over Shoot)

ขณะที่มอเตอร์หมุนไปในแต่ละสเตป และหยุด ณ สเตปใดๆ จะเกิดการแกว่งหรือสั่นของโรเตอร์ เข้าสู่ตำแหน่งสุดท้ายนั้นๆ และใช้เวลาช่วงหนึ่งในการเข้าสู่สภาวะคงตัวแสดงเปรียบเทียบได้ ดังรูปที่ 2.34(a) ซึ่งเป็นพฤติกรรมปกติของระบบที่ใช้สัญญาณพัลส์ โดยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ

กับโหลดและกำลังงานที่ได้รับจากภาคขับมอเตอร์ ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นสามารถเปลี่ยนแปลงคือลดเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวได้โดยการเพิ่มโหลดที่เป็นแรงเสียดทานเข้าไปในระบบ ซึ่งเป็นลักษณะการแก้ไขทางกล เช่น การใช้เครื่องตอกกำลังไปเพลาโดยใช้ความถี่ไม่ใช้เฟือง



รูปที่ 2.34 ผลตอบสนองในการเข้าสู่สภาวะคงตัว

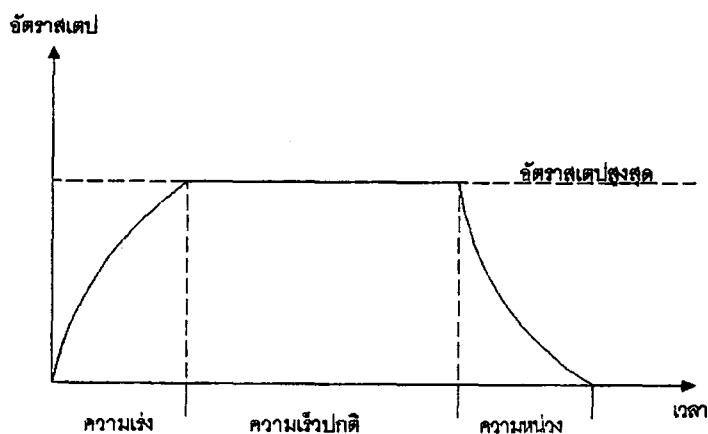
(a) ผลตอบสนองเมื่อมีการหน่วงน้อย

(b) ผลตอบสนองเมื่อมีการหน่วงทางไฟฟ้า

วิธีการแก้ไขทางไฟฟ้า ทำได้โดยการหน่วงสัญญาณพัลส์ลูกสุดท้ายในขบวนพัลส์ทั้งหมด โดยอาจถูกเปลี่ยนเป็น 3 ส่วนด้วยกันดังรูปที่ 2.34(b) โดยส่วนแรกที่เวลา t_0 จะเป็นฟอร์เวิร์ดพัลส์ เวลา t_1 จะป้อนเป็นรีเวิร์สพัลส์เพื่อชดเชยการหมุนของโรเตอร์และส่วนสุดท้ายที่เวลา t_2 จะเป็นฟอร์เวิร์ดพัลส์ ป้อนเพื่อให้โรเตอร์หยุด ณ ตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งวิธีการนี้จะสร้างแรงบิดน้อยกว่าปกติ ดังนั้นจึงลดการสั่นหรือการแกว่งได้

2.4.7. การสลับที่แตกต่างกัน

มีหลายวิธีด้วยกันในการกำหนดจำนวนสเตป ที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง เช่น หมุนไป 90° อาจใช้ทั้งหมด 6 สเตปๆ ละ 15° 12 สเตปๆ ละ 7.5° หรือ 50 สเตปๆ ละ 1.8° โดยทั่วไปแล้ว มอเตอร์ที่มีความกว้างของมุมสเตปน้อยจะลดการแกว่งหรือออสซิลเลตและมีความแม่นยำดีกว่ามอเตอร์ที่มีความกว้างของมุมสเตปมาก

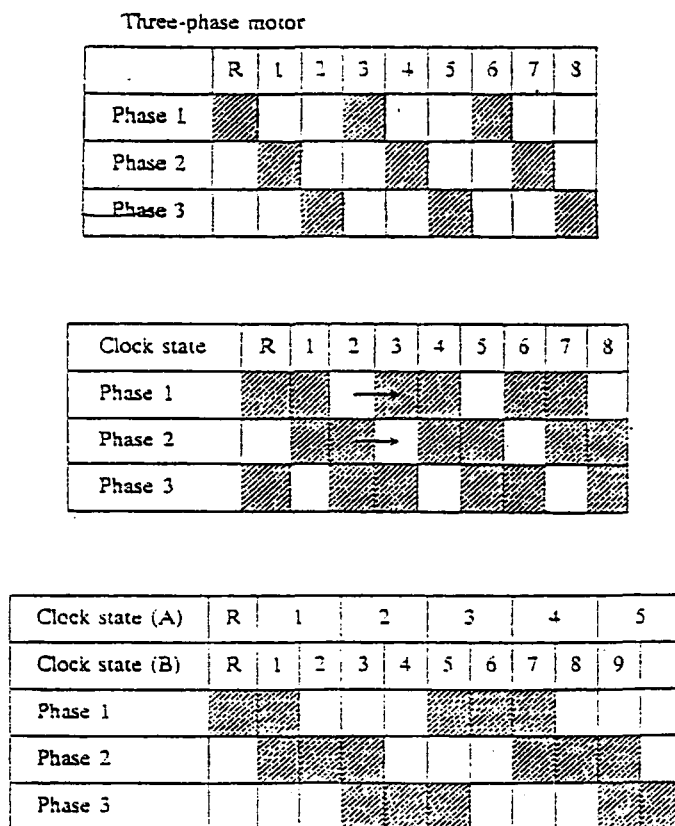


รูปที่ 2.35 แสดงช่วงเวลากการเพิ่มความเร็วและลดความเร็วของมอเตอร์

อัตราเร่งของมอเตอร์จะถูกควบคุมโดยวงจร VCO (Voltage Controlled Oscillator) และช่วงเวลาในการเก็บประจุ (RC Time Constant) ของตัวเก็บประจุจะกำหนดอัตราเร่งที่แตกต่างกัน ในรูปที่ 2.35 แสดงอัตราสเตปต่อเวลาซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงแรกมีความเร่งเพิ่มอัตราสเตปอย่างต่อเนื่อง ช่วงที่สองเป็นอัตราสเตปขณะใช้งานสูงสุดและช่วงสุดท้ายเกิดความหน่วง (deceleration) ลดความเร็วของมอเตอร์ลงมาจากกระทั่งหยุดนิ่ง

2.4.8 การกระตุ้น (Stepping Motor Excitation)

- 1) กระตุ้นเฟสเดียว (One Phase Excitation)
- 2) กระตุ้นสองเฟส (Two Phase Excitation)
- 3) กระตุ้นครึ่งสเตป (Half Step Excitation)

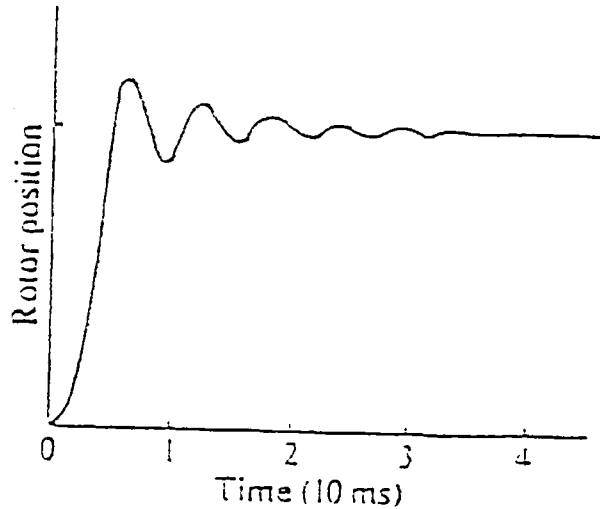


รูปที่ 2.36 แสดงแผนภูมิเวลาของการกระตุ้นแบบต่างๆ

- (ก) กระตุ้นเฟสเดียว
- (ข) กระตุ้นสองเฟส
- (ค) กระตุ้นครึ่งสเตป

2.4.8.1 กระตุ้นเฟสเดียว

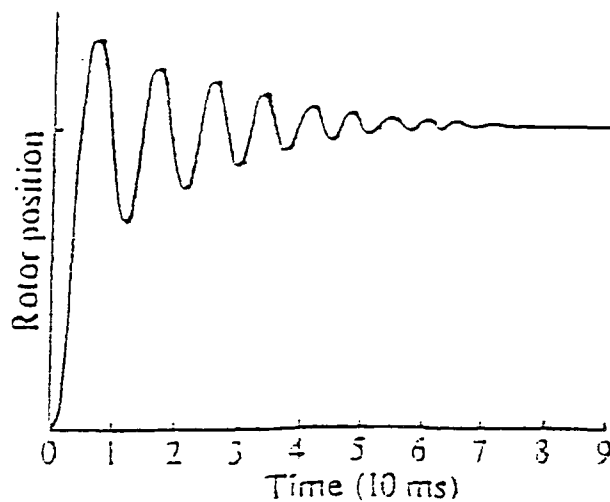
แบบนี้จะมีแรงบิดน้อยที่สุดทั้งในขณะที่เริ่มเคลื่อนที่และเคลื่อนที่อยู่มีการแกว่งเข้าสู่สภาวะคงตัวสูง เข้าสู่ตำแหน่งแต่ละสเต็ปช้าแต่เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วจะไม่มีอออสซิลเลท



รูปที่ 2.37 กราฟแสดงผลตอบสนองของสเต็ปมอเตอร์ต่อการกระตุ้นเฟสเดียว

2.4.8.2 กระตุ้นสองเฟส

การกระตุ้นแบบนี้มีแรงบิดขณะเริ่มต้นสูงมีการแกว่งเข้าสู่สภาวะคงตัวต่ำและมีอออสซิลเลทเล็กน้อยในสภาวะคงตัว



รูปที่ 2.38 กราฟแสดงผลตอบสนองของสเต็ปมอเตอร์ต่อการกระตุ้นสองเฟส

2.4.8.3 กระตุ้นครึ่งสเตป

สำหรับสเตปมอเตอร์ที่ใช้การกระตุ้นแบบครึ่งสเตป จะทำให้มุมมองศาในแต่ละสเตปมีค่าลดลงจากค่าที่กำหนดไว้ครึ่งหนึ่งจากค่ามุมมองศาที่กำหนดไว้ที่ข้อมูลของสเตปมอเตอร์ ดังนั้น การกระตุ้นแบบนี้จะรวมข้อดีของทั้ง 2 แบบไว้ โดยขณะเริ่มต้นจะกระตุ้นแบบสองเฟส ทำให้ได้แรงบิดสูงที่สุดและเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวจะกระตุ้นเพียงเฟสเดียว ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการออสซิลเลท แต่ข้อเสียของการกระตุ้นแบบนี้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการกระตุ้นเฟสเดียว กล่าวคือในขณะสภาวะคงตัวค่าแรงบิดจะมีค่าน้อย

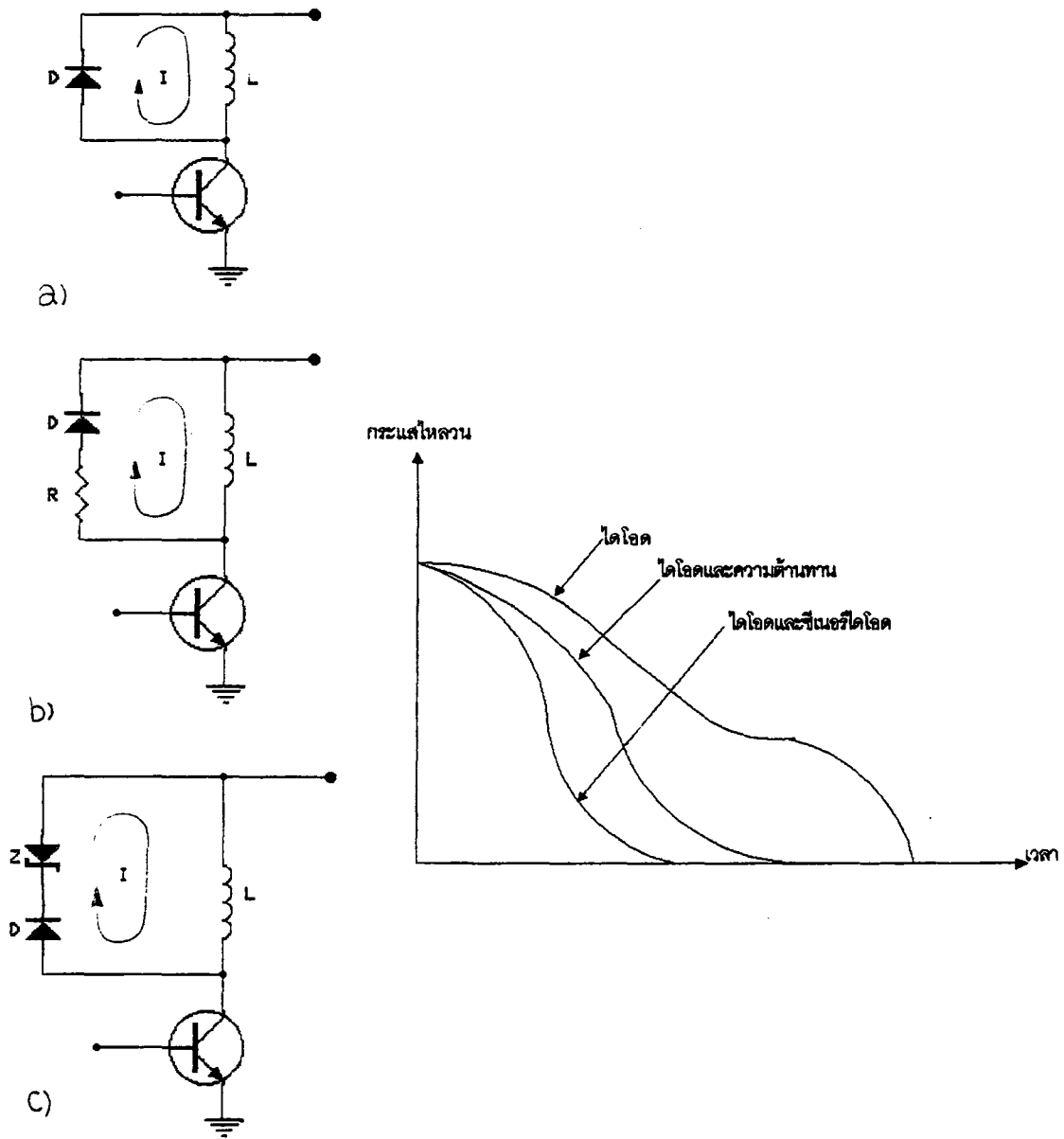
2.4.9. การกำจัดสไปค์ (Spike Suppression)

ขณะที่ทรานซิสเตอร์ในวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ หยุดนำกระแสจะทำให้เกิดค่าแรงดันสูงซึ่งเกิดจากการยุบตัวของสนามแม่เหล็กในขดลวดตามสมการ $v = L \frac{di}{dt}$ แรงดันที่เกิดขึ้นนี้อาจทำให้รอยต่อของทรานซิสเตอร์เสียหายได้ถ้าไม่กำจัดออกไป ปัญหาเหล่านี้แก้ได้โดยใช้วงจรฟรีวิลลิง (Freewheeling Circuit) เป็นทางผ่านของกระแสจากขดลวดขณะที่ทรานซิสเตอร์หยุดทำงาน ซึ่งมีรูปแบบดังนี้คือ

-การกำจัดโดยใช้ไดโอด (Diode Suppression) คือ การนำไดโอดมาต่อขนานกับขดลวด ดังรูปที่ 2.39(a) หลังจากที่ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส จะเกิดกระแสไหลวนอยู่เป็นวงกลมรอบขดลวดและไดโอด กระแสนี้จะลดค่าลงตามเวลา วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดแต่การทำให้กระแสไหลวนหมดต้องใช้เวลานาน

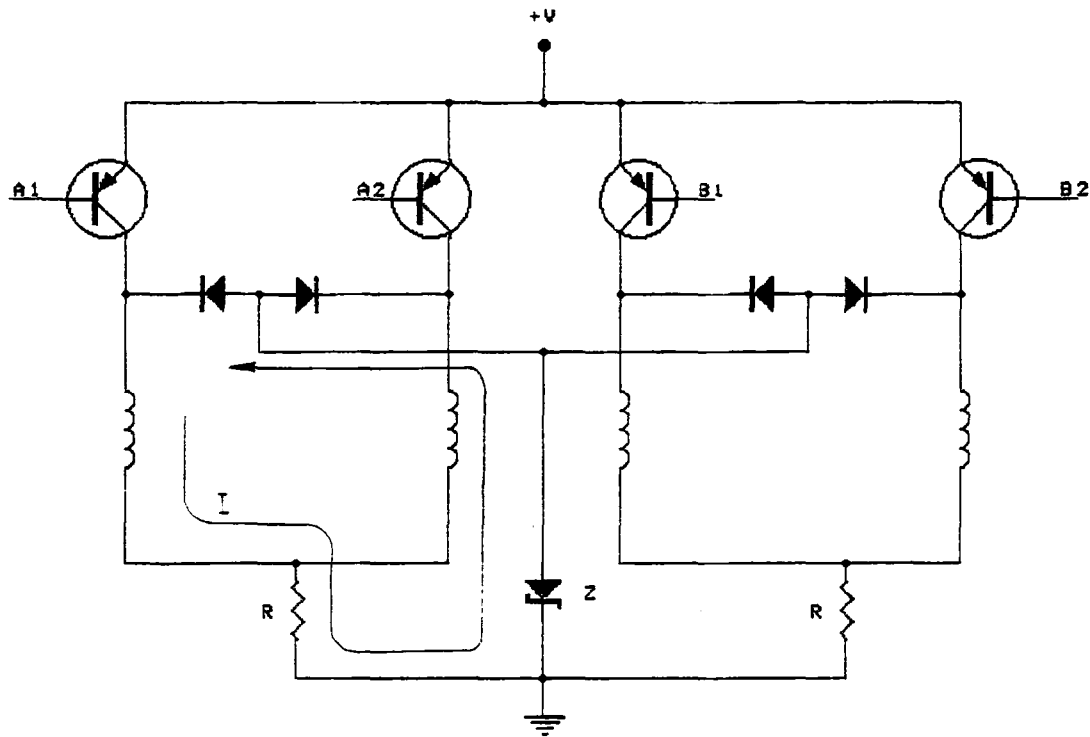
-การกำจัดโดยใช้ไดโอดและความต้านทาน (Diode and Resistor Suppression) คือ การนำค่าความต้านทานมาอนุกรมกับไดโอด ดังรูป 2.39(b) ค่าความต้านทานช่วยให้กระแสไหลวนลดค่าลงเร็วขึ้น เพราะมีค่าเวลาคงตัว (time constant = L/R) น้อยลง

-การกำจัดโดยใช้ไดโอดและซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode Suppression) คือ การใช้ไดโอดเพียงอย่างเดียวในการกำจัดแรงดันสไปค์มีข้อเสีย คือ แรงบิดที่ได้รับจะลดน้อยลงไปนอกเสียจากว่าแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าของแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งแรงดันที่สูงขึ้นนี้จะให้สนามแม่เหล็กและกระแสไหลวนลดค่าลงอย่างรวดเร็ว แรงบิดจึงดีขึ้นด้วยเหตุนี้จึงใช้ความต้านทานต่ออนุกรมกับไดโอดหรือซีเนอร์ไดโอดต่ออนุกรมกับไดโอดแทน ดังรูปที่ 2.39(c) ซึ่งวิธีการใช้ซีเนอร์ไดโอดจะให้ผลดีที่สุด โดยเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการลดค่ากระแสไหลวน ดังรูปที่ 3.16(d) และรูปที่ 3.17 แสดงตัวอย่างวงจรที่ใช้ซีเนอร์ไดโอดและไดโอดต่ออนุกรมเพื่อลดแรงดันสไปค์สำหรับความต้านทาน R ในวงจรใช้สำหรับสร้างกระแสกระตุ้นขดลวดให้เร็วขึ้น



รูปที่ 2.39 วิธีการกำจัดสไปด

- (a) กำจัดด้วยไดโอด
- (b) กำจัดด้วยไดโอดและความต้านทาน
- (c) กำจัดด้วยไดโอดและซีเนอร์ไดโอด
- (d) แสดงเปรียบเทียบการกำจัดด้วยวิธีต่างๆ

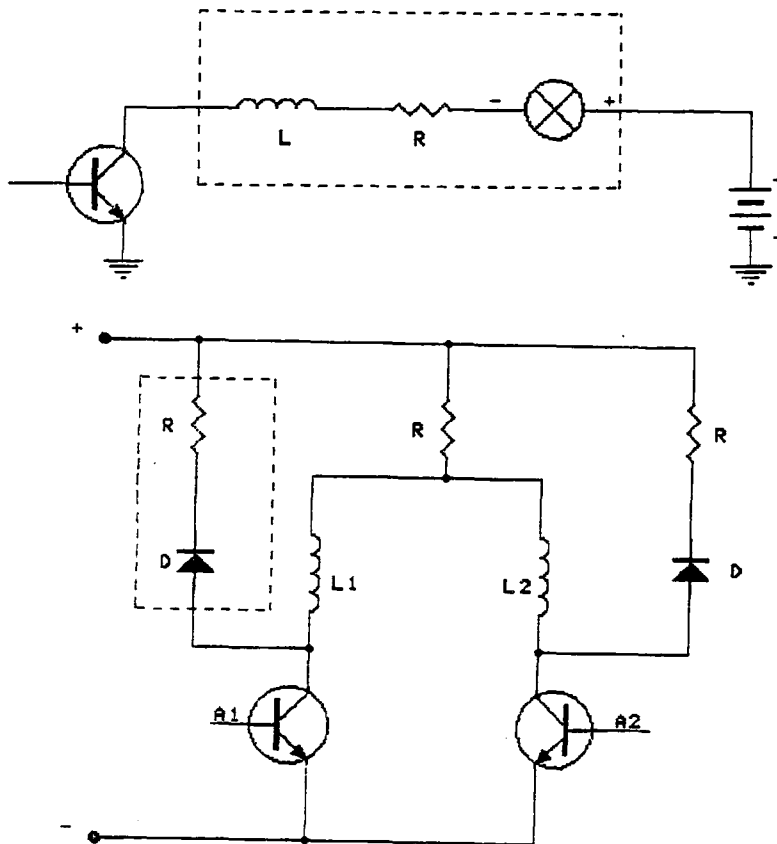


รูปที่ 2.40 ตัวอย่างวงจรกำลังแรงดันสไปค์

2.4.10 การพิจารณาวงจรขับมอเตอร์

ในสภาวะที่มอเตอร์ทำงานด้วยระดับแรงดันคงที่ค่าหนึ่ง แรงบิดที่ได้จะมีค่าลดลงถ้ามีการเพิ่มอัตราสลับเนื่องมาจากการเพิ่มค่าของแรงดันต้านกลับ (Back EMF) และช่วงเวลาขาขึ้น (Rise Time) ของกระแสในขดลวดถูกจำกัดหรือมีค่ามาก วงจรเทียบเคียงของสแตปมอเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.41(a) วิธีแก้ไขให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสในขดลวดเร็วขึ้นทำได้โดยเพิ่มแรงดันของแหล่งจ่ายไฟให้สูงขึ้นเพื่อรักษาระดับกระแสให้คงที่ ขณะทำงานที่อัตราสลับสูงๆ หรืออาจคงค่าแรงดันเอาไว้ แต่เพิ่มค่าความต้านทานอนุกรมเข้าไปในวงจร ดังรูปที่ 2.41(b) ค่าความต้านทานนี้เรียกว่า ความต้านทานฟอร์ซิง (Forcing Resistance)

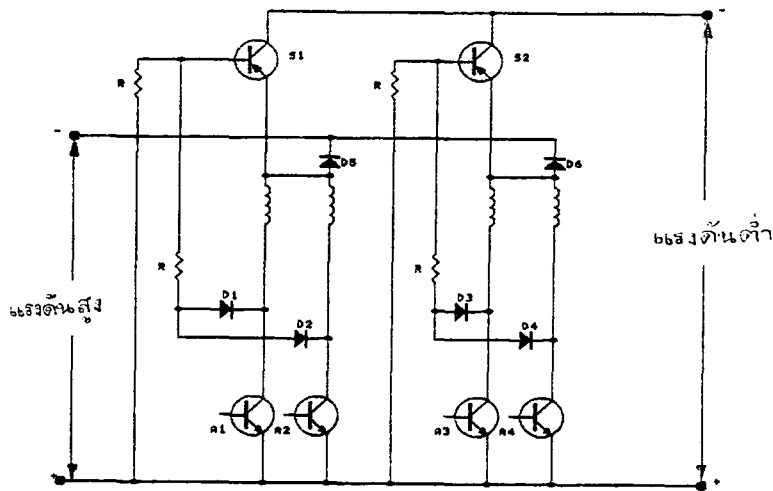
ค่าความต้านทานที่ต่อเพิ่มนี้จะลดค่าเวลาคงตัว ($T = L/R$) ทำให้ใช้งานที่ความเร็วสูงได้ดี ดังนั้นถ้าเพิ่มความต้านทานมีค่า 3 เท่าของค่าความต้านทานขดลวด จะทำให้มีค่าเวลาคงตัวเท่ากับ $L/4R$ และควรเพิ่มขนาดแรงดันแหล่งจ่ายไฟเป็น 4 เท่าด้วย เพื่อรักษาระดับกระแสผ่านขดลวดให้คงที่ ซึ่งในกรณีนี้อาจมีปัญหาในเรื่องแหล่งจ่ายไฟหรือเกิดการสูญเสียที่ความต้านทานฟอร์ซิง ในรูปของความร้อน ดังนั้นที่ความเร็วต่ำๆ จึงไม่เหมาะที่จะนำวิธีการนี้มาใช้



รูปที่ 2.41 (a) แสดงวงจรเทียบเคียงขดลวดของสเตรปมอเตอร์
(b) แสดงวงจรขับที่มีความต้านทานฟอริง

ในการออกแบบวงจรขับมอเตอร์ ควรให้มีกำลังสูญเสียจากค่าความต้านทานฟอริงน้อยที่สุด วงจรขับที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้จะแก้ไขปัญหานี้ได้

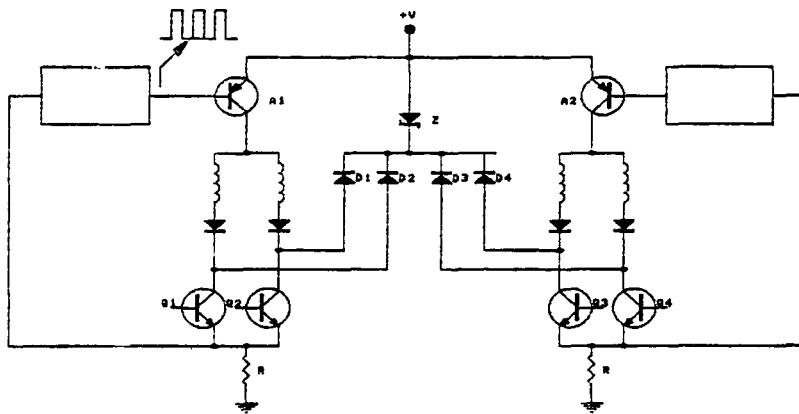
วงจรขับแบบสองสถานะ (Bi-Level Drive) วงจรขับแบบสองสถานะ มีแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์สองค่าคือค่าสูงและต่ำ ขณะอัตราสเตรปเป็นศูนย์จะรับแรงดันค่าต่ำกว่าขีดจำกัดของมอเตอร์และเมื่ออัตราสเตรปเพิ่มจากค่าศูนย์ มอเตอร์จะทำงานที่ระดับแรงดันสูงกว่าขีดจำกัดจากวงจรขับแบบสองสถานะที่แสดงดังรูปที่ 2.42 แรงดันค่าต่ำถูกใช้ช่วงอัตราสเตรปเป็นศูนย์ จนกระทั่งระดับกระแสในขดลวดมีค่าระดับหนึ่งจึงต่อแรงดันค่าสูงเข้าไปแทนและแรงดันค่าต่ำถูกตัดออกไปโดย การหยุดนำกระแส (Cut-Off) ของ D_5 หรือ D_6 D_1, D_2, D_3, D_4 เป็นฟริวติลิ่งไดโอดและ R เป็นความต้านทานฟริวติลิ่ง



รูปที่ 2.42 วงจรขับแบบสองสถานะ

วงจรถูกขับแบบชอปเปอร์ (Chopper Drive) วงจรถูกขับแบบนี้ใช้ระดับแรงดันจากแหล่งจ่ายเพียงค่าเดียวจ่ายให้กับขดลวด ดังแสดงในรูปที่ 2.43 โดยกระแสที่จ่ายเข้ามอเตอร์จะถูกรักษาในระดับที่ค่าเฉลี่ยค่าหนึ่ง วิธีการควบคุมระดับกระแสคือ วงจรรออปแอมป์ดีเทคเตอร์จะตรวจสอบค่าของกระแสโดยเปรียบเทียบจากแรงดันที่ตกคร่อม R เมื่อกระแสสูงกว่าระดับเฉลี่ย วงจรรออปแอมป์ดีเทคเตอร์จะหยุดขับทรานซิสเตอร์ กระแสที่ไหลผ่านขดลวดจึงลดค่าลง เมื่อลดลงมาต่ำกว่าระดับค่าเฉลี่ย ทรานซิสเตอร์ก็就会被ขับให้น่ากระแสเพื่อให้มีกระแสไหลผ่านขดลวดเพิ่มขึ้นและจะทำงานสลับกันไปเพื่อให้ได้ระดับกระแสเฉลี่ยค่าหนึ่ง

ลักษณะของสัญญาณที่รับขา B ของทรานซิสเตอร์ A_1 หรือ A_2 จึงเป็นลักษณะของไฟกระแสตรงที่ถูกชอปแรงดัน $+V$ มีค่าประมาณ 5 ถึง 10 เท่าของระดับแรงดันปกติของมอเตอร์ D_1, D_2, D_3 และ D_4 เป็นพีวีลิ่งไดโอดต่ออนุกรมกับซีเนอร์ไดโอด Z วงจรถูกขับแบบนี้เหมาะสำหรับการใช้งานที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบอยู่เสมอหรือมีการเปลี่ยนแปลงความเร่งอย่างรวดเร็ว

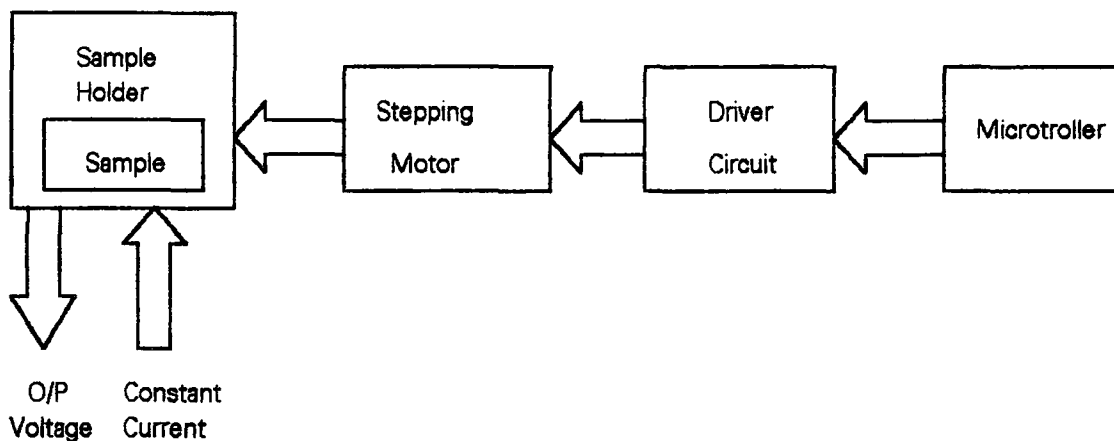


รูปที่ 2.43 วงจรขับแบบซอปปเปอร์

บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินงาน

3.1 แผนผังของชุดวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า

ชุดทดลองออกแบบเพื่อการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า และหาอุณหภูมิวิกฤติของสารตัวนำยวดยิ่ง มีแผนผังดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังของชุดทดลอง

อธิบายแต่ละส่วนอย่างทั่วๆ ไปดังนี้

-ชุดเครื่องมือสำหรับยึดจับสาร และแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ประกอบไปด้วยเครื่องมือที่ออกแบบขึ้นเพื่อใช้ในการยึดจับสารที่จะจุ่มลงในไนโตรเจนเหลว โดยมีลักษณะเป็นโลหะสี่ขั้ว ทำจากทองเหลือง ป้อนกระแสจากแหล่งจ่ายกระแสคงที่ให้กับสารโดยใช้ขั้วสองขั้วและวัดแรงดันที่เกิดขึ้นจากอีกสองขั้วที่เหลือ

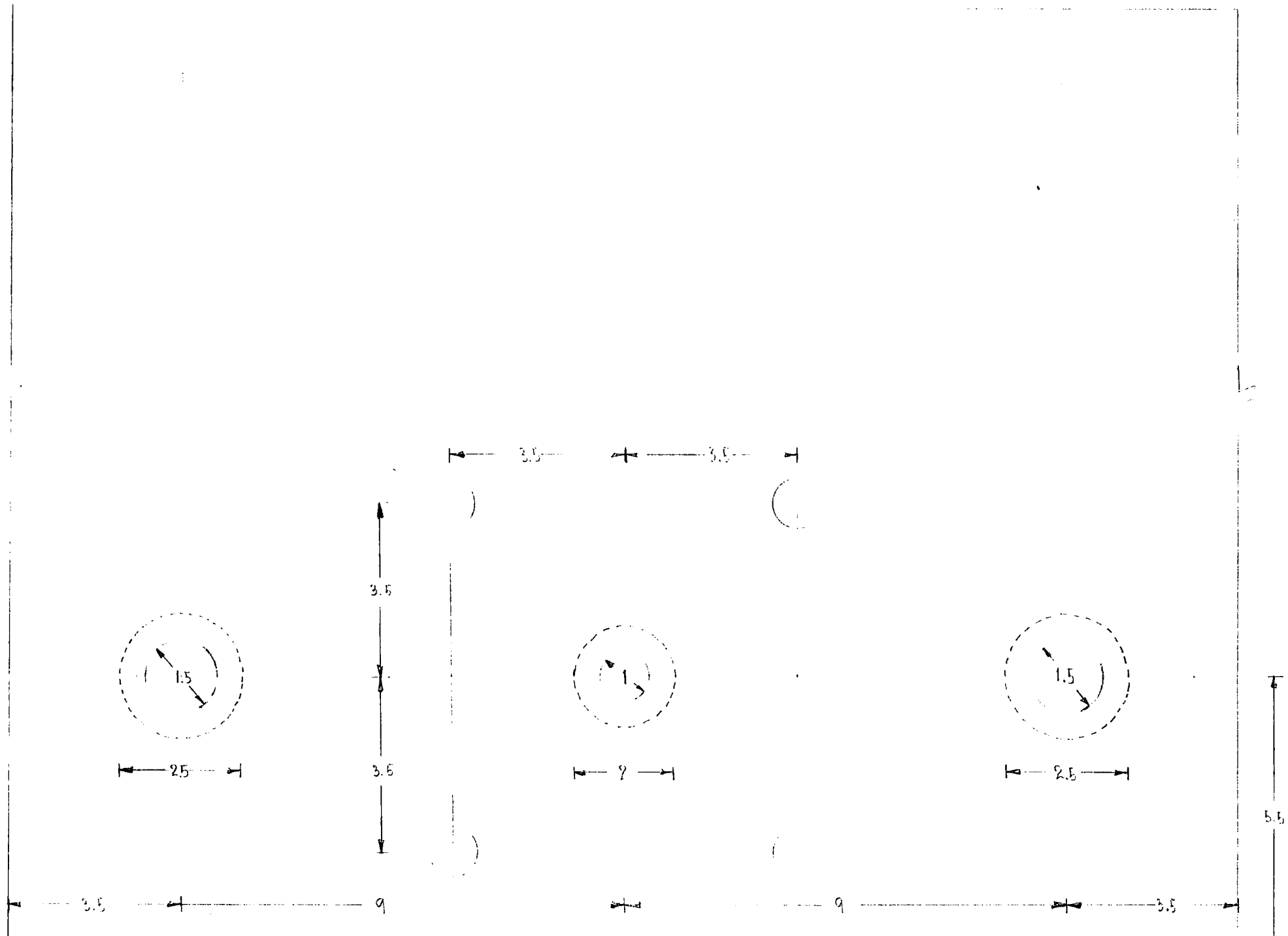
-สเตปมอเตอร์ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของเครื่องมือยึดจับสาร โดยสามารถควบคุมความเร็วได้โดยการควบคุมดีซี-พัลส์ (dc-pulse) ที่ใช้ในการขับเคลื่อนสเตปมอเตอร์

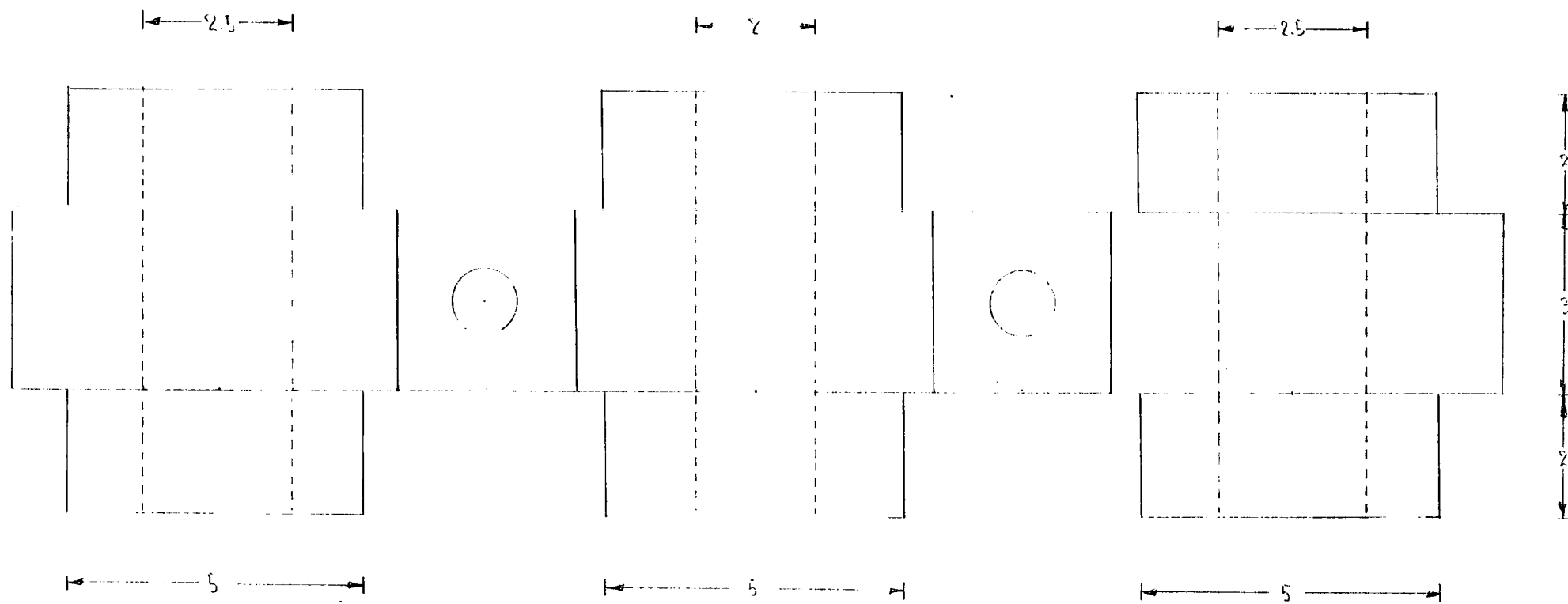
-ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของสเตปมอเตอร์โดยการเขียนโปรแกรมเพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถสร้างลำดับลอจิกเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของสเตปมอเตอร์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

- วงจรรับมอเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้รับกำลังของเอาต์พุตที่ได้จากวงจรจัดลำดับ โดยเอาต์พุตที่ออกมาจะทำการเปิดและปิดวงจรรับกำลังเพื่อไปขับสเตปมอเตอร์ซึ่งวงจรรับกำลังนั้นจะเรียกว่า วงจรรับมอเตอร์

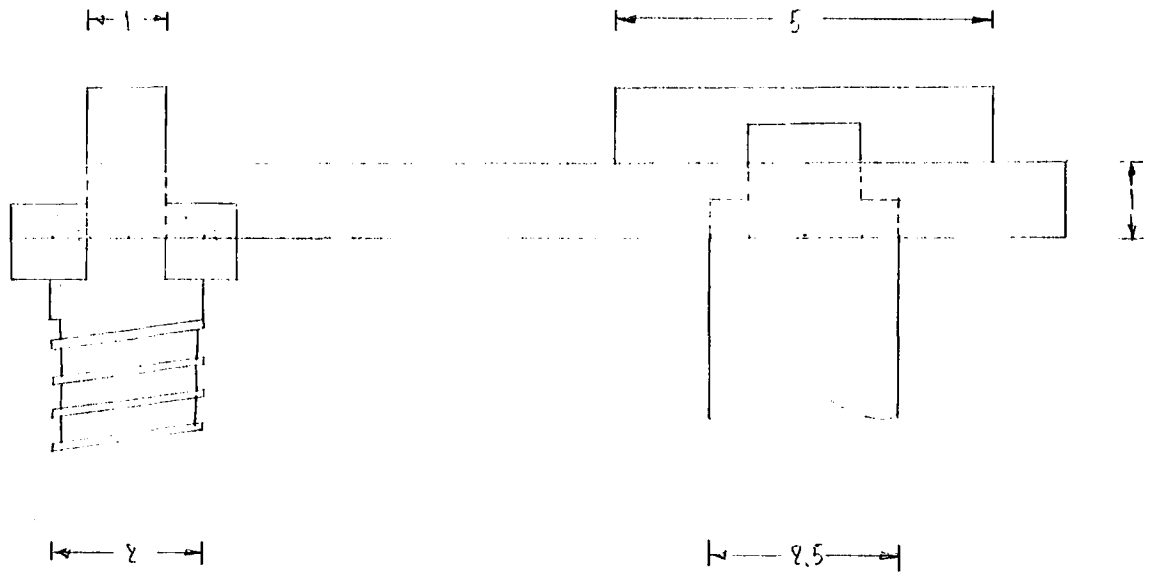
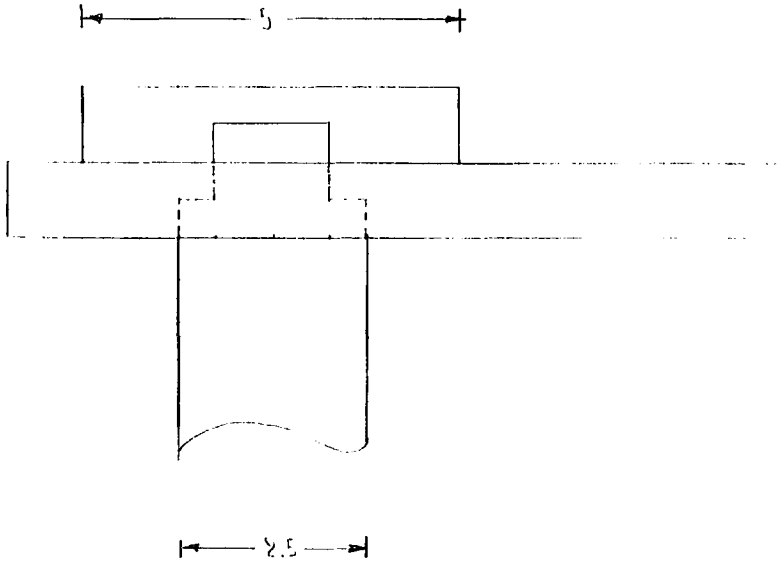
3.2 การออกแบบโครงสร้างชุดวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า

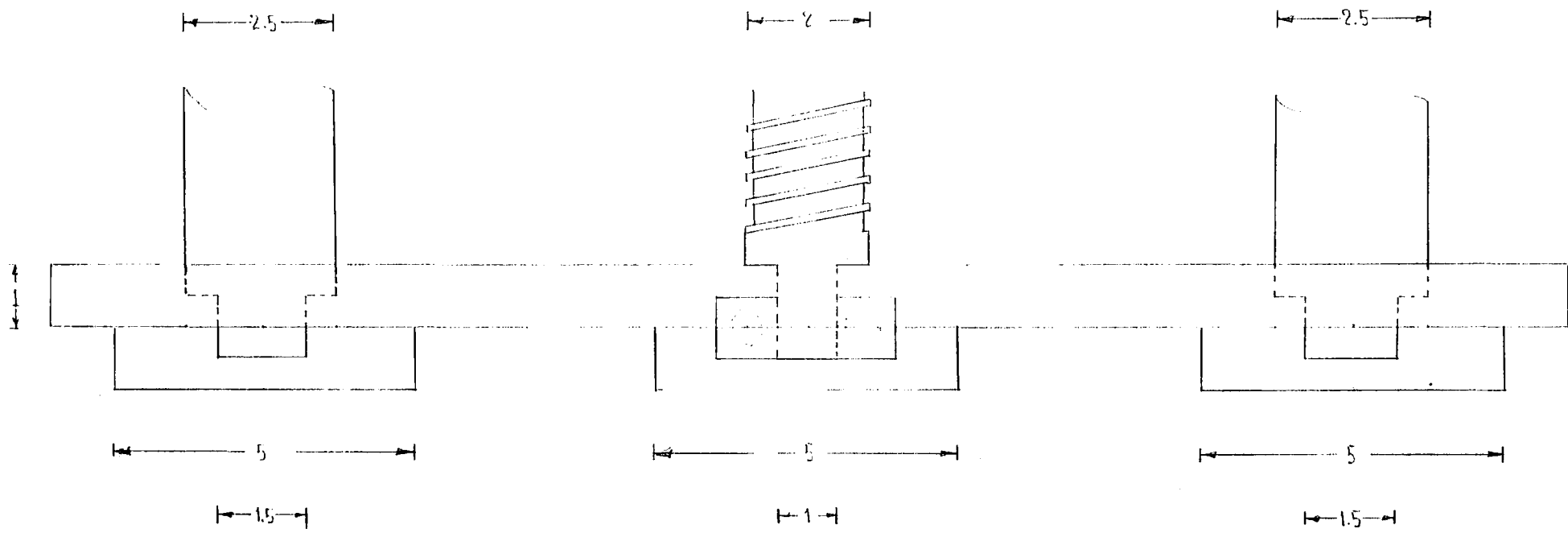
แบบโครงสร้างของชุดทดลองที่ทำการออกแบบประกอบด้วย แผ่นบน , แผ่นเคลื่อนที่ , แผ่นล่าง และส่วนที่เป็นเสา ดังแบบ





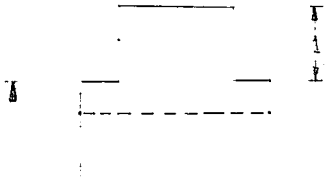
1750.0000



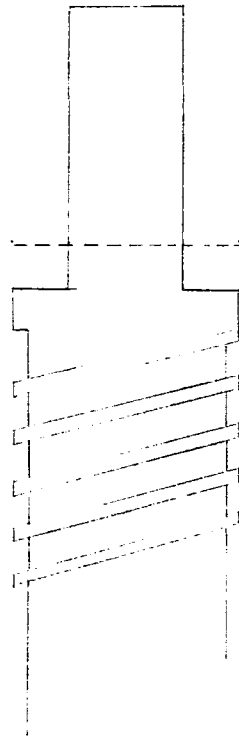




109

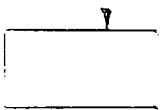


110

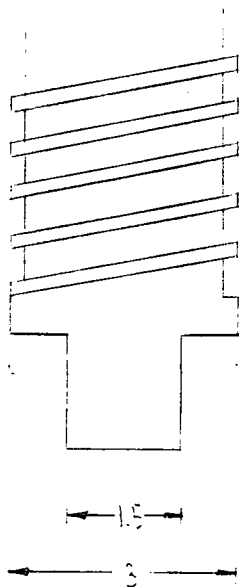
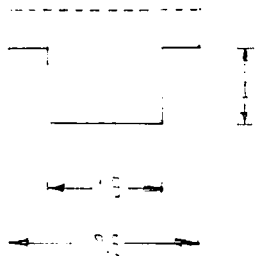


Y

111



Y



Y

3.3. การควบคุมสเตรปมอเตอร์โดยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

เนื่องจากสเตรปมอเตอร์จะต้องมีแหล่งจ่ายสัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัลที่มีลักษณะเป็นพัลส์ เพื่อใช้ควบคุมการหมุนและทิศทางการหมุนของมอเตอร์ วิธีหนึ่งที่ใช้คือการใช้ไอซีควบคุมที่เรียกว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยตระกูลที่เลือกใช้คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

3.4 การทำงานของระบบ

จากระบบของชุดทดลองวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าและหาอุณหภูมิวิกฤติ สรุปการทำงานดังนี้

3.4.1 การติดขั้วไฟฟ้าเพื่อการวัดแบบ 4 ขั้วไฟฟ้าเชิงเส้น

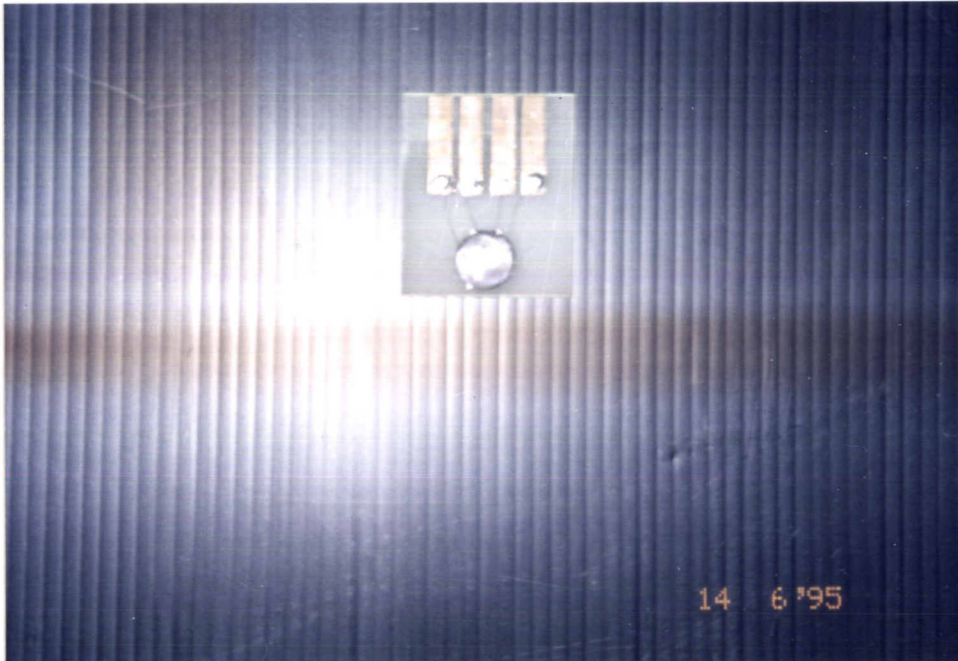
สารที่นำมาวัดเป็นสารชนิด $YBa_2Cu_3O_7$ มีรูปร่างเป็นเม็ดกลมแบนแบบเม็ดยา จากลักษณะการขัดเม็ด

ก่อนทำการติดขั้วไฟฟ้า ต้องตรวจดูผิวหน้าของเม็ดสารเสียก่อน เม็ดสารไม่ควรมีรอยร้าวหรือตำหนิใดๆ และมีผิวหน้าที่เรียบเสมอกันทั่วทั้งเม็ดสาร

ขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 ที่นำมาติดควรเป็นโลหะที่เล็กและแหลมที่สุดและติดบนผิวหน้าสารทั้ง 4 ขั้ว ระยะห่างระหว่างขั้วควรมีระยะเท่าๆ กัน ดังรูปที่ 3.2 รายละเอียดเป็นดังทฤษฎีในบทที่ 2

หลังจากติดขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 ป้อนกระแสคงที่เข้าที่ 2 ขั้ว และวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่ 2 ขั้วที่เหลือ ป้อนกระแสค่าต่างๆ และป้อนทั้งทิศไปและกลับเพื่อนำผลที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ย

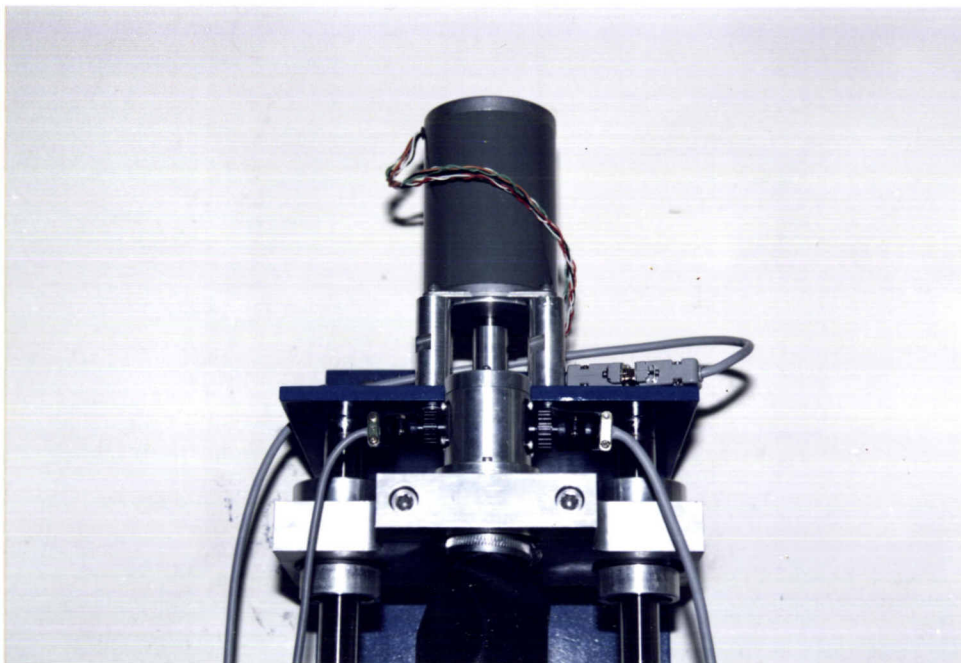
ในการนำสารลงจุ่มในไนโตรเจนเหลวใช้เครื่องมือที่ออกแบบและสร้างขึ้นในการยึดจับสาร



รูปที่ 3.2 รูปแสดงการติดตั้งไฟฟ้าทั้งสี่ที่สาร

3.4.2 เครื่องมือยึดจับหัววัด

เครื่องมือยึดจับหัววัดมีลักษณะเป็นแท่นเหล็กที่สร้างขึ้นโดยการกลึงและประกอบเป็นสวนๆ ส่วนที่เป็นแท่นที่เคลื่อนที่ได้มีส่วนยึดจับท่อหัววัดเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ขึ้นและลงโดยการขับเคลื่อนด้วยสเตปมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และ 3.4

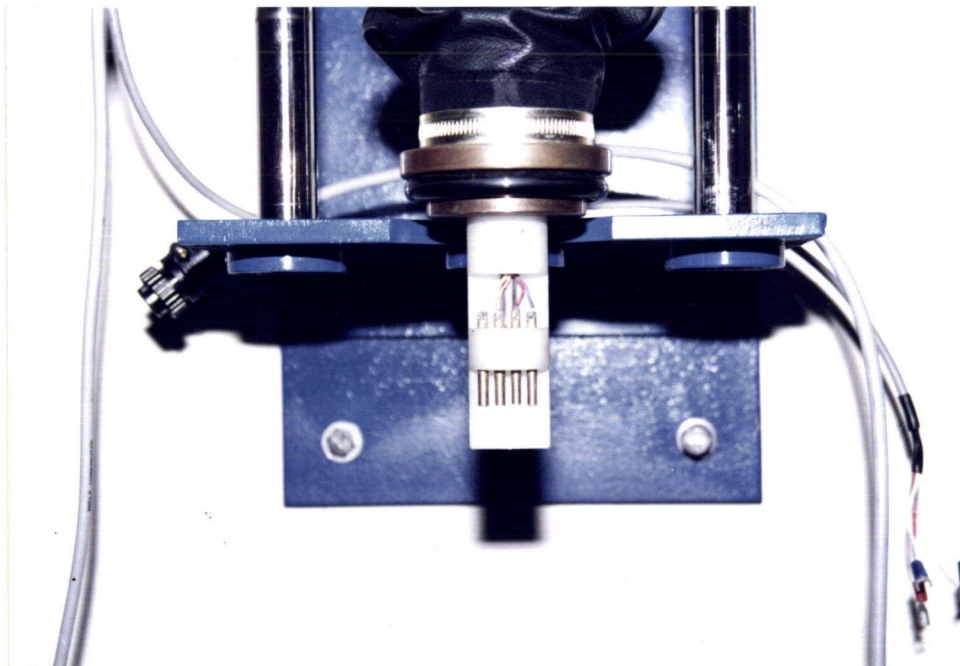


รูปที่ 3.3 แท่นยึดจับหัววัด



รูปที่ 3.4 เครื่องมือยึดจับและขับเคลื่อนหัววัด

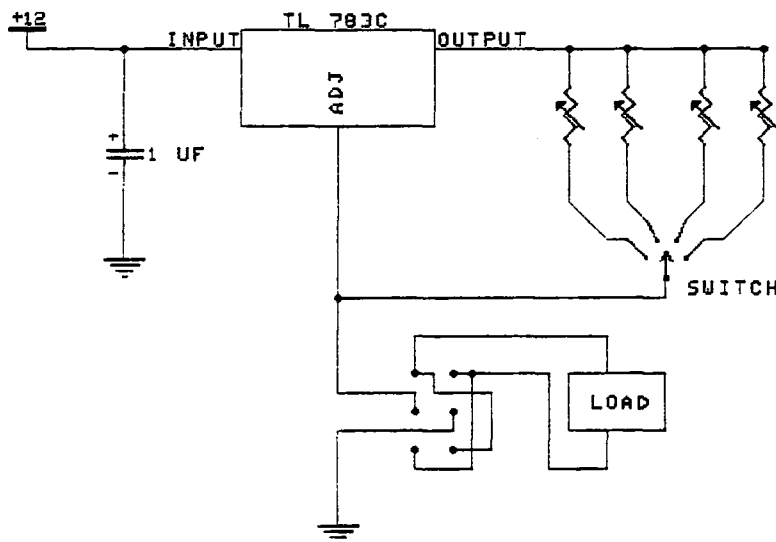
และสำหรับปลายของหัววัดที่เป็นขั้วโลหะทองเหลืองที่ใช้อยึดจับสารแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ปลายของหัววัดที่ใช้อยึดจับสาร

3.4.3 วงจรแหล่งกำเนิดกระแสคงที่

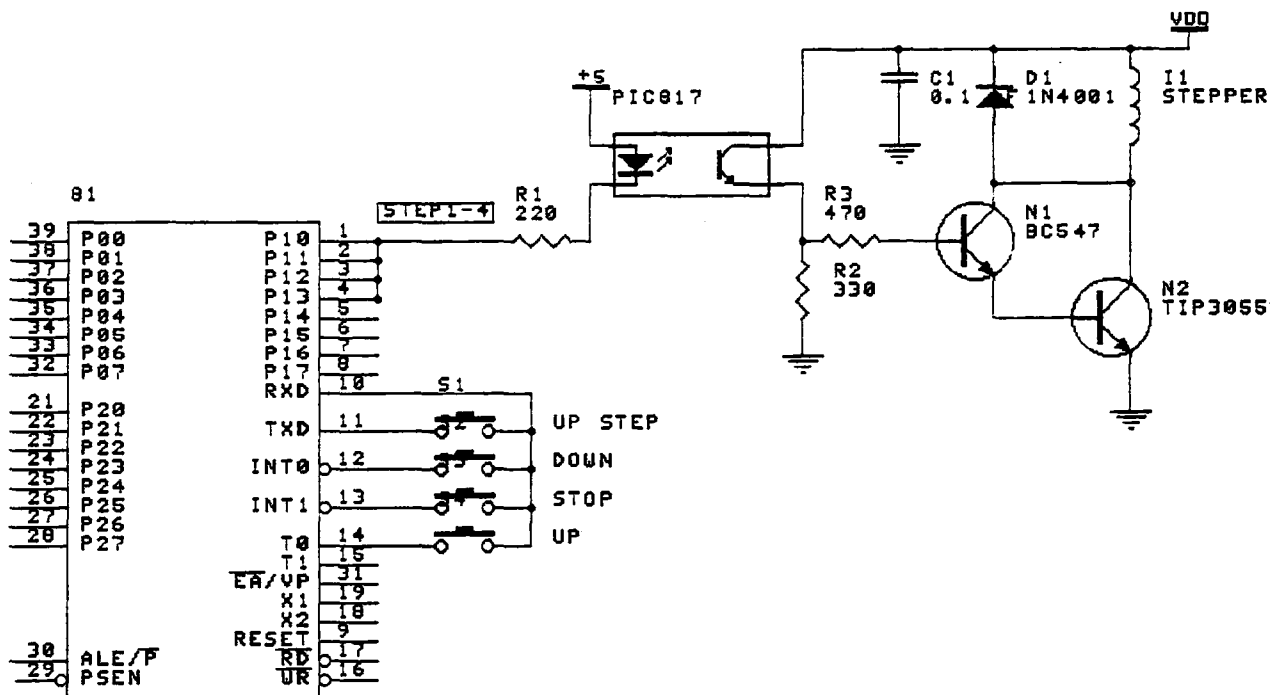
การสร้างแหล่งกำเนิดกระแสคงที่ เพื่อใช้สำหรับวัดสภาพนำไฟฟ้าของตัวนำยิ่งยวด สร้างโดยใช้ไอซีเรกูเลเตอร์ เบอร์ TL 783C ต่อร่วมกับความต้านทานปรับค่าได้ 4 ตัว สำหรับเป็นตัวปรับกระแส ซึ่งมีค่า 8, 10, 15, 20 มิลลิแอมป์ และมีสวิตช์เลือกเพื่อเป็นตัวเลือกที่จะให้ทิศทางของกระแสไหลเข้าตัวนำยิ่งยวด 2 ทิศทาง ดังวงจรรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรแหล่งกำเนิดกระแสคงที่

3.4.4 วงจรขับมอเตอร์และการควบคุมสเตปมอเตอร์

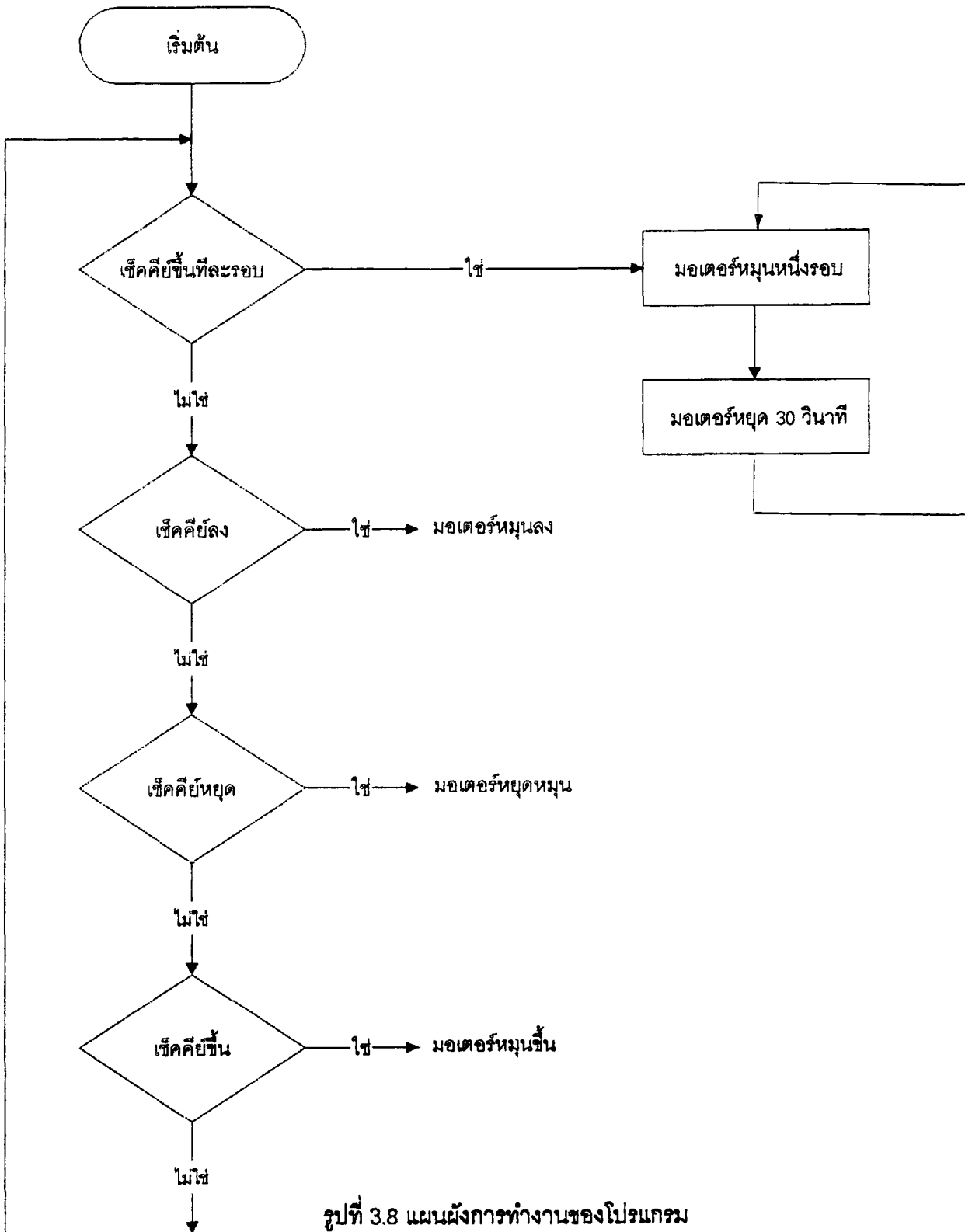
เนื่องจากสเตปมอเตอร์จะทำงานได้ต้องมีวงจรจัดลำดับลอจิกเพื่อจ่ายสัญญาณให้กับวงจรขับกำลัง ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 และเขียนโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ของสเตปมอเตอร์ การต่อวงจรระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรขับกำลังเพื่อจ่ายสัญญาณให้สเตปมอเตอร์เป็น ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรควบคุมมอเตอร์สเต็ปมอเตอร์

สำหรับแผนผังการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์เป็น

ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แผนผังการทำงานของโปรแกรม

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 ทดสอบแหล่งจ่ายกระแสคงที่

แหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่สามารถจ่ายกระแสให้กับโหลดที่มีความต้านทานมากที่สุด โดยกระแสที่ป้อนยังคงเป็นกระแสคงที่ ดังนี้ คือ

- 7 มิลลิแอมป์ สามารถจ่ายกระแสให้กับโหลดค่ามากที่สุดคือ $1.8 \text{ k}\Omega$
- 8 มิลลิแอมป์ สามารถจ่ายกระแสให้กับโหลดค่ามากที่สุดคือ $1.6 \text{ k}\Omega$
- 9 มิลลิแอมป์ สามารถจ่ายกระแสให้กับโหลดค่ามากที่สุดคือ $1.4 \text{ k}\Omega$
- 10 มิลลิแอมป์ สามารถจ่ายกระแสให้กับโหลดค่ามากที่สุดคือ $1.2 \text{ k}\Omega$

4.2 การทำงานของมอเตอร์และเครื่องมือ

ลักษณะการทำงานของมอเตอร์สามารถกดสวิชท์ให้มอเตอร์ทำงานได้ดังนี้ คือ

- สวิชท์ up มอเตอร์จะหมุนให้แท่นยึดหัววัดเคลื่อนที่ขึ้น
- สวิชท์ down มอเตอร์จะหมุนให้แท่นยึดหัววัดเคลื่อนที่ลง
- สวิชท์ stop มอเตอร์จะหยุดหมุน
- สวิชท์ step มอเตอร์จะหมุนขึ้นทีละหนึ่งรอบทุกๆ 30 วินาที ทำให้การเคลื่อนที่ของแท่นยึดหัววัดจะเปลี่ยนแปลงไปต่อการหมุนของมอเตอร์หนึ่งรอบเป็นระยะ 0.8 เซนติเมตรเท่ากับระยะห่างของเกลียว

จากการทำงานของมอเตอร์จะทำให้แท่นยึดหัววัดและหัววัดเคลื่อนที่ขึ้นลงในถึงในโตรเจนเหลวได้ระดับความลึกต่างๆ มีผลทำให้เพิ่มและลดอุณหภูมิได้ตามต้องการ

บทที่ 5 สรุปผลและแนวทางการพัฒนา

5.1 สรุปผล

จากผลการทดลองของเครื่องมือวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าและอุณหภูมิวิกฤติของสารตัวนำยวดยิ่ง สามารถใช้กับทั้งสารตัวนำยวดยิ่งรวมไปถึงสารกึ่งตัวนำที่มีความต้านทานไม่มากเกินไปคือมีความต้านทานไม่เกิน $1.2 \text{ k}\Omega$ และสารที่มาทำการวัดควรมีลักษณะเป็นเม็ดยาหรือมีรูปร่างแน่นอนและมีขนาดใหญ่พอสำหรับการติดขั้วไฟฟ้าแบบ 4 ขั้วไฟฟ้าเชิงเส้น นอกจากนี้การติดขั้วนั้นควรให้ระยะระหว่างขั้วมีระยะเท่ากัน เพื่อสะดวกในการคำนวณค่าความต้านจำเพาะทางไฟฟ้า

5.2 แนวทางการพัฒนา

จากผลการทดลองของเครื่องมือวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าในโครงการพิเศษนี้สรุปเป็นแนวทางการพัฒนาได้ดังนี้

1. แปลงสัญญาณอนาลอกที่ได้ให้เป็นดิจิตอลแล้วนำข้อมูลดิจิตอลที่ได้เข้าสู่ระบบไมโครคอมพิวเตอร์
2. แปลงค่าความต้านทานที่ได้จาก RTD ให้แสดงผลเป็นค่าอุณหภูมิได้โดยตรง
3. สามารถตั้งกำหนดความเร็วและเวลาในการหมุนของมอเตอร์

ภาคผนวก ก
ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล MCS-51 ได้ถูกพัฒนาผลิตและแนะนำโดยบริษัท อินเทล ต่อมาหลายบริษัทได้ลิขสิทธิ์ไปผลิตโดยใช้เครื่องหมายการค้าของตัวเอง เช่น ซีเมนส์ เอ.เอ็ม.ดี. ฟิลิปส์ เป็นต้น บางบริษัทก็ได้เพิ่มเติมฟังก์ชันอื่นๆ เข้าไป

รายละเอียดของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

การกำหนดขา

จำนวนขาทั้งหมด	40
ขาของบััสแอดเดรส	16
ขาของบััสข้อมูล	8
ขาอินเทอร์รัพท์	2
ขา I/O	32

โครงสร้าง

รีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต	34
รีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต	2
ขนาดของสแต็ก	128
รวมภายใน	4 K
แรมภายใน	128
หน่วยความจำภายนอก	128 K
แฟลช	4
ไทมเมอร์	4
พอร์ทขนาน	4
พอร์ทอนุกรม	1

ชุดคำสั่ง

(ชนิด/ตัวแปร)

เคลื่อนย้ายข้อมูลภายนอก	2/6
เคลื่อนย้ายข้อมูลเป็นบล็อก	0
จัดการในระดับบิต	12/12
กระโดดอันเนื่องมาจากข้อมูลระดับบิต	3/3
สแต็ก	2/2
หนึ่งไบท์	49
หลายไบท์	62

ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 รวมถึงในตระกูลทั้งหมดคือ ตั้งแต่ 8031 ไปจนถึง 8751 จะมีโครงสร้างภายในหลักๆ เหมือนกัน แตกต่างกันเฉพาะหน่วยความจำดัง ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 หน่วยความจำ MCS - 51

PART NUMBER	ON-CHIP CODE MEMORY	ON-CHIP DATA MEMORY	TIMERS
8051	4K ROM	128 bytes	2
8031	0K	128 bytes	2
8751	4K EPROM	128 bytes	2
8052	8K ROM	256 bytes	3
8032	0K	256 bytes	3
8752	8K EPROM	256 bytes	3

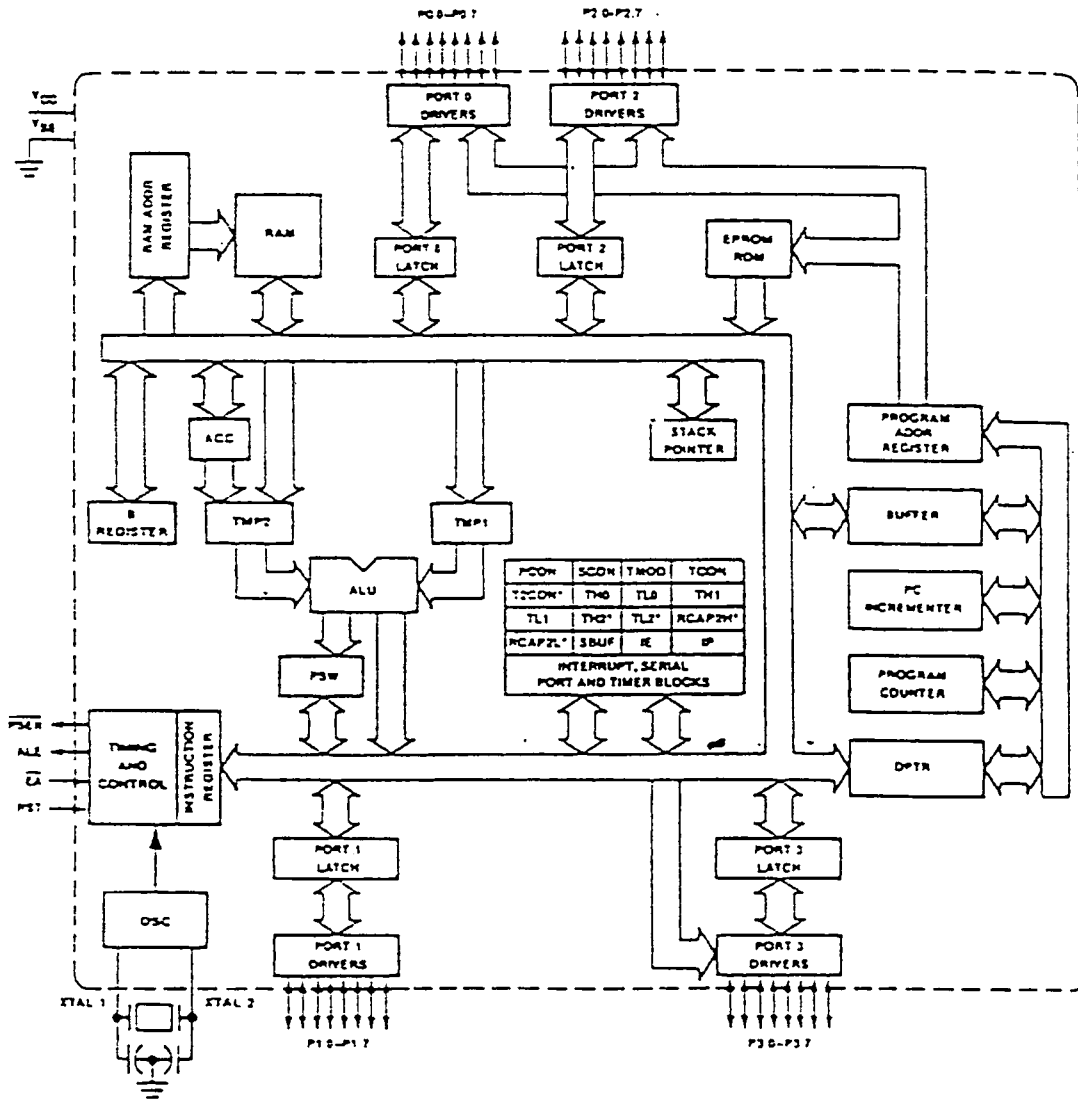
ฮาร์ดแวร์ของ 8051 ไมโครคอนโทรลเลอร์

สถาปัตยกรรมภายในของ 8051 จะเป็นดังรูปที่ 3.21 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนสำคัญหลักๆ ดังนี้

- เป็น ซี.พี.ยู ขนาด 8 บิต ประกอบด้วยรีจิสเตอร์ A (แอดเดรสมูลเลขเตอร์) และรีจิสเตอร์ B
- มีโปรแกรมเคาท์เตอร์ (Program counter, PC) และดาต้าพอยน์เตอร์ (Data pointer, DPTR) ขนาด 16 บิต
- มีโปรแกรมสเตตัสเวิร์ด (Program status word, PSW) ขนาด 8 บิต
- มีสแต็กพอยน์เตอร์ (Stack pointer, SP) ขนาด 8 บิต
- มีหน่วยความจำรอม (Rom) หรือ อีพรอม (EPROM เฉพาะ 8751) ขนาด 0 กิโลไบต์ (8031) ถึง 4 กิโลไบต์ (8051)
- มีหน่วยความจำแรมภายในขนาด 128 ไบต์ประกอบด้วย
 1. รีจิสเตอร์แบงค์ 4 แบงค์ แต่ละแบงค์ประกอบด้วย รีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต จำนวน 8 รีจิสเตอร์ (R0 - R7)
 2. มีหน่วยความจำจำนวน 16 ไบต์ ที่สามารถอ้างแอดเดรสเพื่อควบคุมการทำงานในระดับบิตได้
 3. มีหน่วยความจำสำหรับใช้งานทั่วไป 80 ไบต์
- มีขารับสัญญาณอินพุต/เอาต์พุต 32 ขา แบ่งออกเป็นกลุ่มๆ ละ 8 บิต ได้สี่กลุ่มคือ

P0, P1, P2, P3

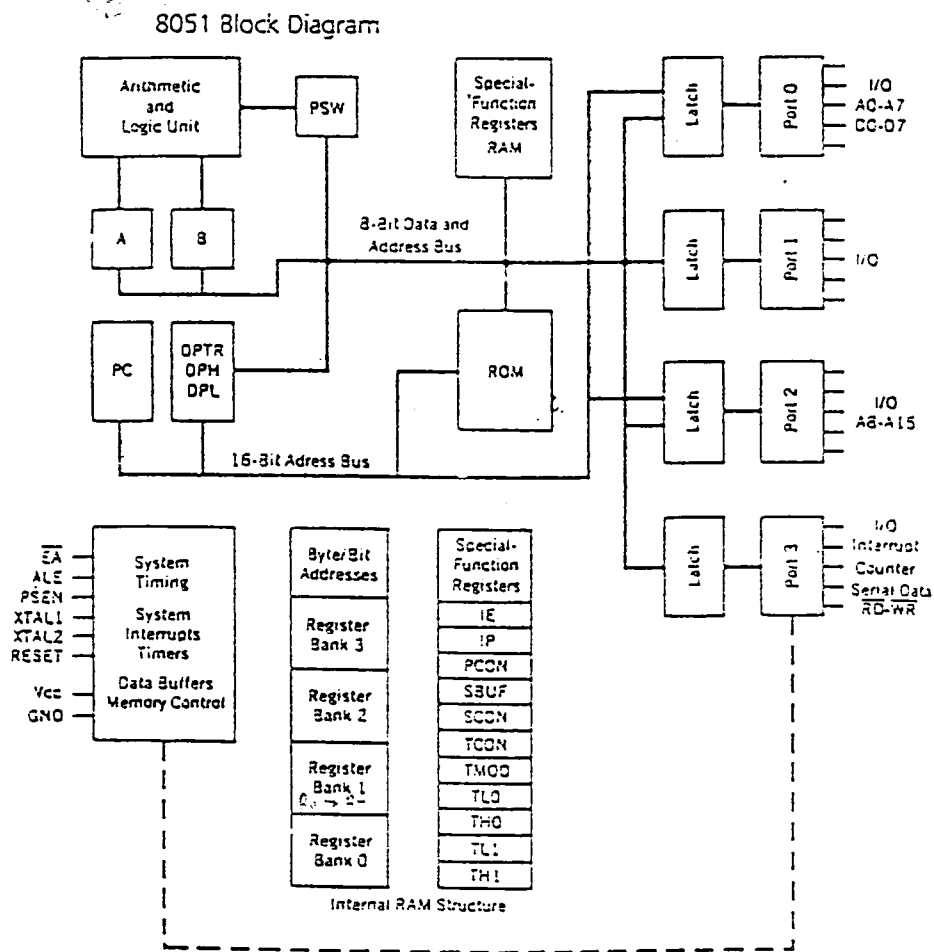
- มีไทม์เมอร์/เคาท์เตอร์ขนาด 16 บิต สองชุด คือ T0 และ T1
- มีพอร์ทอนุกรมที่ใช้รับส่งสัญญาณแบบฟูลดูเพลกซ์ (Full duplex) เรียกว่า SBUF
- มีรีจิสเตอร์ควบคุมได้แก่ TCON, TMOD, SCON, PCON, PI และ IE
- มีส่วนของออสซิลเลเตอร์ และวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาอยู่ภายใน



รูปที่ 1 แสดงสถาปัตยกรรมภายในของ 8051

จากรูปที่ 1 เพื่อให้เข้าใจได้ดีขึ้นจะเขียนเฉพาะส่วนสำคัญๆ เป็นบล็อกไดอะแกรม

ได้ดังรูป 2



รูปที่ 2 แสดงบล็อกไดอะแกรมภายในของ 8051

การใช้งานของขาต่างๆ

การใช้งานของขาต่างๆ พอกกล่าวคร่าวๆ ในขั้นต้นได้ดังนี้

-พอร์ท 0 (ขา 32 - 39)

พอร์ท 0 เป็นพอร์ทที่ใช้งานสองหน้าที่ หน้าที่แรกใช้เป็นอินพุท/เอาต์พุทพอร์ท หน้าที่ที่สองใช้ควบคุมหน่วยความจำภายนอก เมื่อต้องการขยายระบบให้ใหญ่ขึ้นโดยมันจะให้ สัญญาณที่มีลติเพลกซ์ระหว่างบัสแอดเดรสกับบัสข้อมูลออกมา (AD7 - AD0)

-พอร์ท 1 (ขา 1 - 8)

พอร์ท 1 ใช้เป็นอินพุท/เอาต์พุทพอร์ทอย่างเดียว ใช้สัญญาณเรียงกันเป็น P1.0, P1.1 จนถึง P1.7 พอร์ทนี้ใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกหน้าที่เดียวเท่านั้น ยกเว้น 8032/8052 ที่ ใช้ P1.0 และ P 1.1 เป็นอินพุท/เอาต์พุท หรืออินพุทภายนอกของไทเมอร์ชุดที่สาม

-พอร์ท 2 (ขา 21 - 28)

พอร์ท 2 เป็นพอร์ทที่ใช้งานสองหน้าที่ หน้าที่แรกเป็นอินพุท/เอาต์พุท หน้าที่ที่สอง ใช้ควบคุมหน่วยความจำภายนอก โดยให้สัญญาณแอดเดรสไบท์สูง (A15 - A8) ออกมา

-พอร์ท 3 (ขา 10 - 17)

พอร์ท 3 เป็นพอร์ทที่ใช้งานสองหน้าที่เช่นกัน หน้าที่แรกเป็นอินพุท/เอาต์พุท หน้าที่ที่สองแยกออกหลายฟังก์ชันดังนี้

บิต	ชื่อ	ทำหน้าที่
P3.0	RXD	รับข้อมูลสำหรับพอร์ทอนุกรม
P3.1	TXD	ส่งข้อมูลสำหรับพอร์ทอนุกรม
P3.2	$\overline{INT0}$	อินเทอร์พท์ภายนอกหมายเลข 0
P3.3	$\overline{INT1}$	อินเทอร์พท์ภายนอกหมายเลข 1
P3.4	T0	ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 0 (อินพุทจากภายนอก)
P3.5	T1	ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1 (อินพุทจากภายนอก)
P3.6	\overline{WR}	สัญญาณเขียนใช้ต่อกับหน่วยความจำภายนอก
P3.7	\overline{RD}	สัญญาณอ่านใช้ต่อกับหน่วยความจำภายนอก

-Program Enable (PSEN) (ขา 29)

PSEN เป็นสัญญาณเอาต์พุตที่ใช้เป็นสัญญาณควบคุมการอ่านเอาต์พุต (enable) หน่วยความจำที่ใช้เก็บรหัสที่ต่ออยู่ภายนอก (external program (code) memory) โดยทั่วไปจะต่อกับขาเอาต์พุตอ่านเอาต์พุต (output enable, OE) ของชิพรวม

PSEN จะใช้พัลส์ต่ำในขณะที่อยู่ในขั้นตอนเฟิร์สคำสั่งจากชิพรวมข้อมูลจะถูกวางลงในบัสข้อมูลและถูกเก็บไว้ในรีเจิสเตอร์คำสั่งภายในตัว 8051 เพื่อรอรับการถอดรหัสต่อไป เมื่อทำการรันโปรแกรมจากรวมภายในตัว (8051/8052) PSEN จะมีระดับสัญญาณเป็น 1 ตลอด

-ALE (Address Latch Enable) (ขา 30)

ALE เป็นสัญญาณเอาต์พุตที่ใช้เป็นสัญญาณควบคุมการแลทช์ (latch) สัญญาณแอดเดรสที่ออกมาจากพอร์ท 0 เมื่อพอร์ท 0 ถูกใช้งานในหน้าที่ที่สอง (เป็นสัญญาณแอดเดรสและข้อมูลมัลติเพลกซ์กันออกมา) ความถี่ของ ALE จะมีค่าเป็น 1/6 เท่าของความถี่ที่เกิดขึ้นภายในชิพ เช่น ถ้าใช้คริสตอลความถี่ 12 เมกกะเฮิรตซ์ สัญญาณ ALE จะมีความถี่เป็น 2 เมกกะเฮิรตซ์ ยกเว้นการทำคำสั่ง MOVX

-EA (External Access) (ขา 31)

ขา EA เป็นขาอินพุตเพื่อใช้ต่อกับ V_{CC} หรือกราวด์ถ้าต่อกับ V_{CC} 8051/8052 จะรันโปรแกรมจากรวมภายในก่อนในช่วงหน่วยความจำ 4K/8K แรก จากนั้นจึงออกมารันที่หน่วยความจำภายนอก ถ้าต่อกับกราวด์ 8051/8052 จะรันโปรแกรมจากหน่วยความจำภายนอกทั้งหมด ถ้าใช้ 8031/8032 ขา EA จะต้องต่อลงกราวด์เนื่องจากตัวมันไม่มีหน่วยความจำรวมภายใน

-RST (Reset) (ขา 9)

RST เป็นขาอินพุตที่ใช้รีเซ็ต 8051 เมื่อสัญญาณที่ขา RST เป็นลอจิก 1 (อย่างน้อย 2 วงรอบแมกซ์) ทำให้ 8051 ทำการรีเซ็ตระบบภายในของมันทั้งหมด

-ออสซิลเลเตอร์อินพุต (Oscillator Input) (ขา 18 - 19)

เนื่องจาก 8051 มีวงจรรอสซิลเลเตอร์อยู่ภายในโดยเชื่อมต่อกับขาคริสตอลผ่านทางขา 18 และ 19 ในตระกูล MCS-51 สามารถใช้คริสตอลที่มีความถี่สูงถึง 12 เมกกะเฮิรตซ์ บางเบอร์ เช่น 80C318H -1 สามารถใช้คริสตอลที่มีความถี่สูงถึง 16 เมกกะเฮิรตซ์

-แหล่งจ่ายไฟ (ขา 40 และ 20)

8051 ใช้แหล่งจ่ายไฟแหล่งเดียวขนาด +5 โวลต์ โดย V_{CC} ต่อกับขา 40 และกราวด์ต่อกับขา 20

การใช้งานทั้งสามส่วนแยกออกเป็น

รีจิสเตอร์แบงก์

แรมในจำนวน 32 ไบทจากแอดเดรส 00H ถึง 1FH ถูกนำมาเป็นรีจิสเตอร์สำหรับใช้งาน โดยแยกออกเป็น 4 แบงก์ แบงก์ละ 8 รีจิสเตอร์ รีจิสเตอร์แต่ละแบงก์มีหมายเลขกำกับเป็นแบงก์ 0 ถึงแบงก์ 3 และแต่ละแบงก์ถูกกำหนดชื่อไว้เหมือนกันหมดคือ R0-R7 ดังนั้นรีจิสเตอร์แต่ละตัวจะอ้างตำแหน่งแอดเดรสโดยใช้ชื่อ (เมื่อแบงก์ใดแบงก์หนึ่งถูกเลือกใช้) หรืออ้างเป็นตำแหน่งแอดเดรสของหน่วยความจำแรมเลยก็ได้

หน่วยความจำแรมที่สามารถอ้างอิงแอดเดรสแบบบิท

หน่วยความจำที่เหนือจากรีจิสเตอร์แบงก์ขึ้นไป 16 ไบท์ คือตั้งแต่แอดเดรส 20H ถึง 2FH สามารถอ้างตำแหน่งได้ 2 แบบ คือ แบบแรกอ้างแบบไบท์ แบบที่สองอ้างแบบบิท จะได้ทั้งหมด 128 ตำแหน่ง คือแอดเดรส 00H ถึง 7FH (8 บิท x 16 ไบท์ = 128 บิท)

การอ้างแอดเดรสแบบบิท จะให้ความคล่องตัวและประสิทธิภาพการใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยที่สามารถเขียนหรือเคลียร์บิทใดบิทหนึ่งหรือทำการแอนด์-ออร์บิทใดบิทหนึ่งได้ภายใน 1 คำสั่ง และอินพุท/เอาต์พุทพอร์ทของ 8051 สามารถอ้างเป็นแอดเดรสแบบบิทได้ จึงทำให้การเขียนซอฟต์แวร์ทำได้ง่ายขึ้น การควบคุมและการตรวจสอบทำได้อย่างรวดเร็ว

หน่วยความจำแรมที่ใช้งานทั่วไป

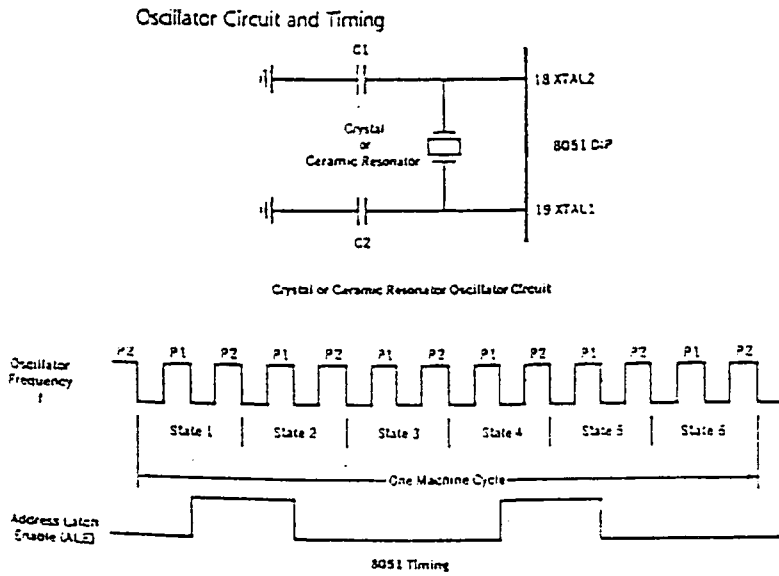
ส่วนนี้จะอยู่เหนือบริเวณหน่วยความจำแรมที่อ้างอิงแอดเดรสแบบบิทขึ้นไป โดยเริ่มตั้งแต่แอดเดรส 30H จนกระทั่งถึง 7FH รวมทั้งสิ้น 80 ไบท์ ตำแหน่งแอดเดรสเหล่านี้ถูกอ้างอิงได้เฉพาะแบบไบท์เท่านั้น การอ้างอิงจะใช้แบบกำหนดแอดเดรสโดยตรง ตำแหน่งแอดเดรสที่กล่าวมาข้างต้นสามารถเขียนให้ชัดเจนได้ ดังรูปที่ 7

รีจิสเตอร์ที่ใช้งานในหน้าที่พิเศษ (Special Function Registers - SFR)

รีจิสเตอร์ภายในของ 8051 เป็นส่วนหนึ่งของหน่วยความจำแรมภายในชิป ดังนั้นแต่ละรีจิสเตอร์จะมีตำแหน่งแอดเดรสที่แน่นอน ดังเช่นรีจิสเตอร์ R0-R7 ใน 8051 จะมีรีจิสเตอร์สำหรับทำหน้าที่พิเศษโดยจะอยู่ส่วนบนสุดของหน่วยความจำแรมภายในดังแสดงในรูปที่ 3.27 โดยมีตำแหน่งแอดเดรสจาก 80H ถึง FFH แต่ทั้ง 128 แอดเดรสนี้ไม่ได้ใช้ทั้งหมดแต่ใช้เพียง 21 แอดเดรสเท่านั้น ในส่วนที่เว้นว่างไว้จะใช้เป็นหน่วยความจำแรมไม่ได้ (ข้อมูลที่ดึงออกมาไม่ยืนยันว่าถูกต้องเหมือนกับที่เขียนลงไป)

สัญญาณนาฬิกาของ 8051

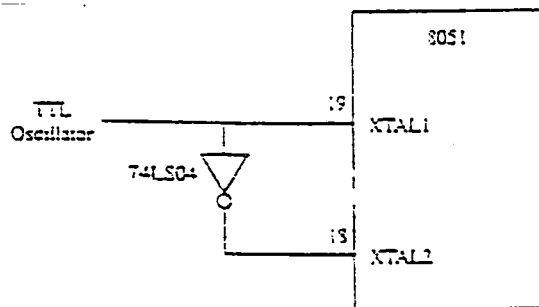
เนื่องจาก 8051 มีวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาภายใน เพื่อทำหน้าที่สร้างสัญญาณนาฬิกาให้กับระบบทำให้ระบบทำงานสอดคล้องกันทั้งหมดผู้ใช้เพียงแต่ต่อคริสตอล และตัวเก็บประจุเข้าไปดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงการต่อคริสตอลและแผนผังของเวลา

ทางโรงงานผู้ผลิตได้ออกแบบให้ MCS-51 ทำงานได้ในช่วงความถี่ 1-16 เมกกะเฮิรตซ์ ถ้าใช้ความถี่สูงกว่านี้หรือต่ำกว่านี้จะทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานผิดพลาด

ถ้าผู้ใช้ไม่ใช้คริสตอลดังกล่าวข้างต้น แต่จะใช้ TTL ออสซิลเลเตอร์หรือออสซิลเลเตอร์จากแหล่งอื่นต้องทำการดัดแปลงเล็กน้อยเป็นดังรูปที่ 4

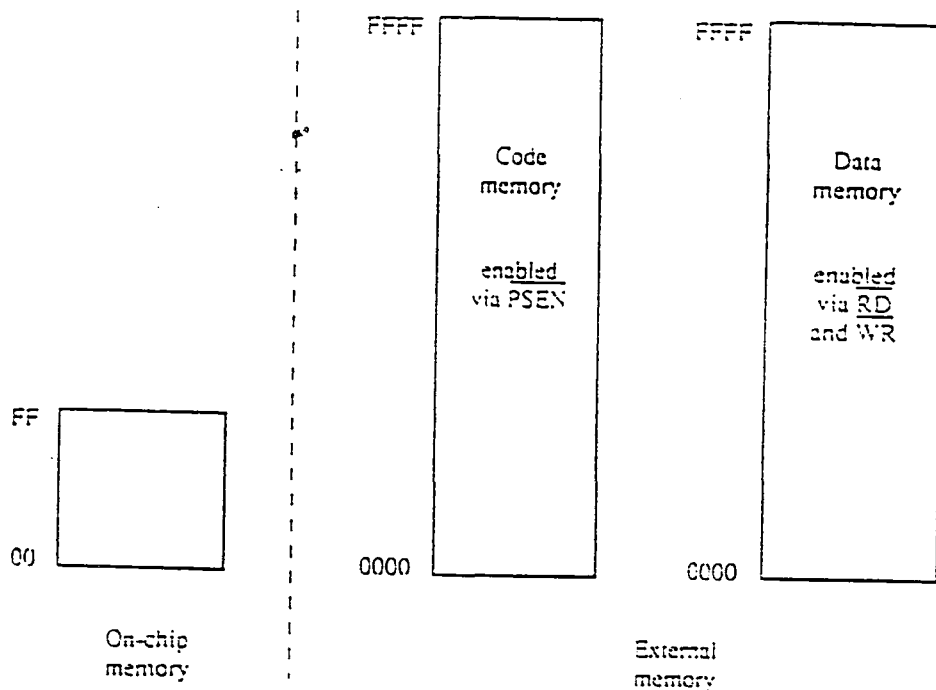


รูปที่ 4 แสดงการใช้ 8051 แสดงการใช้ 8051 กับ TTL ออสซิลเลเตอร์

การจัดวางหน่วยความจำ

ไมโครโปรเซสเซอร์ส่วนมากมีการจัดวางหน่วยความจำแบบ วอน นิวแมน ซึ่งใช้เนื้อที่ในหน่วยความจำร่วมกันระหว่างข้อมูลและโปรแกรม การใช้ในลักษณะนี้ก็เป็นเหตุผลที่ดี เพราะว่าโปรแกรมมักจะถูกเก็บอยู่ในแผ่นดิสก์เมื่อใช้งานจึงไหลดลงไปในแรมของระบบแล้วรัน แต่ในกรณีของไมโครคอนโทรลเลอร์ ตัวมันไม่ได้ถูกใช้งานเป็นเพียงแค่ว่า ซี.พี.ยู ในระบบคอมพิวเตอร์ เหมือนกับไมโครโปรเซสเซอร์อื่นๆ แต่มันเป็นจุดศูนย์กลางของการควบคุมทั้งหมดในงานหนึ่งๆ การใช้หน่วยความจำจะไม่มาก โปรแกรมควบคุมถูกเก็บไว้ในรอม ด้วยเหตุนี้ 8051 จึงจะมีการจัดวางหน่วยความจำแบบ Harvard ซึ่งแยกหน่วยความจำออกมาเป็นส่วนของโปรแกรม (เก็บรหัสคำสั่งและส่วนของข้อมูล) หน่วยความจำที่ใช้เก็บรหัส (code memory) หรือใช้เก็บข้อมูล (data memory) ใช้ภายในตัว หรือขยายออกมาใช้ภายนอกชิพก็ได้ 8051 สามารถขยายหน่วยความจำที่ใช้เก็บรหัสได้สูงสุด 64 กิโลไบต์ และขยายหน่วยความจำที่ใช้เก็บข้อมูลได้สูงสุด 64 กิโลไบต์

หน่วยความจำภายในของ MCS-51 ประกอบด้วยหน่วยความจำรอมและหน่วยความจำแรมภายใน ซึ่งถูกนำมาใช้ในหลายหน้าที่ได้แก่ ใช้เก็บข้อมูลทั่วไป (ไบต์) เก็บข้อมูลในลักษณะบิต ทำเป็นรีจิสเตอร์แบงค์ และรีจิสเตอร์ที่ทำหน้าที่พิเศษ มีข้อควรจำอยู่ 2 ประการคือ



รูปที่ 5 แสดงขนาดของหน่วยความจำทั้งหมดของ 8031

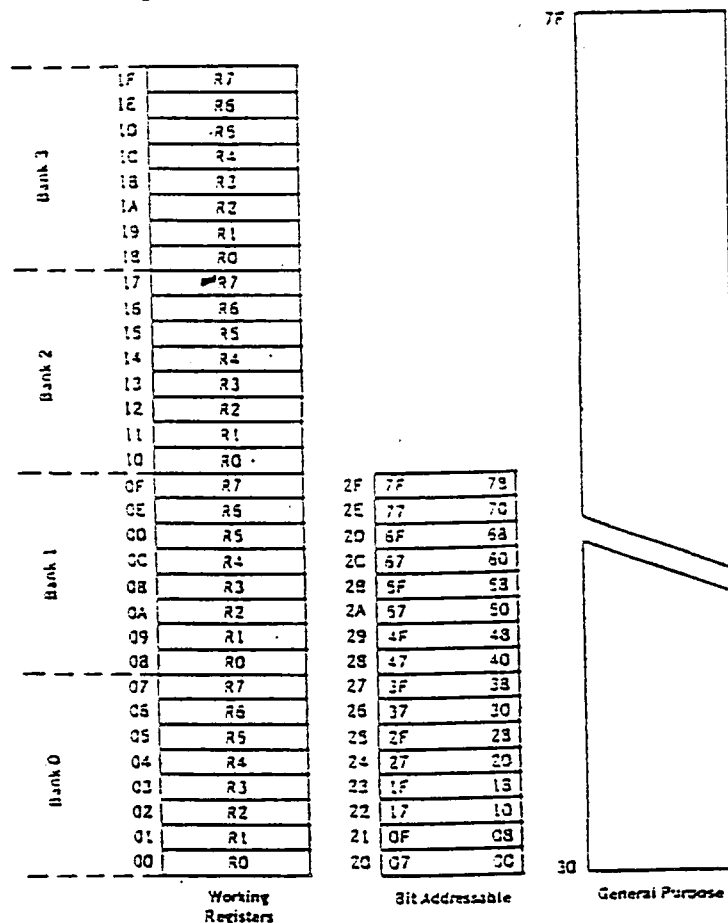
1. รีจิสเตอร์และอินพุท/เอาต์พุทพอร์ท ใช้การแมปในลักษณะเดียวกับหน่วยความจำ (memory-mapped) ดังนั้นการเลือกใช้งานอาจใช้การเรียกเช่นเดียวกับตำแหน่งแอดเดรสของหน่วยความจำก็ได้

2. สแต็กจะใช้พื้นที่ในหน่วยความจำแรมภายใน แทนที่จะอยู่ในหน่วยความจำแรมภายนอกเหมือนไมโครโปรเซสเซอร์ ดังนั้นการใช้สแต็กมากเกินไป อาจทำให้เกิดการทับซ้อนกับข้อมูลอื่นๆ ที่เก็บไว้ในหน่วยความจำแรมภายในได้

หน่วยความจำแรมภายใน

หน่วยความจำแรมภายในของ 8051 มีขนาด 128 ไบต์ แยกการใช้งานออกเป็น 3 ส่วนดังรูปที่ 6

Internal RAM Organization

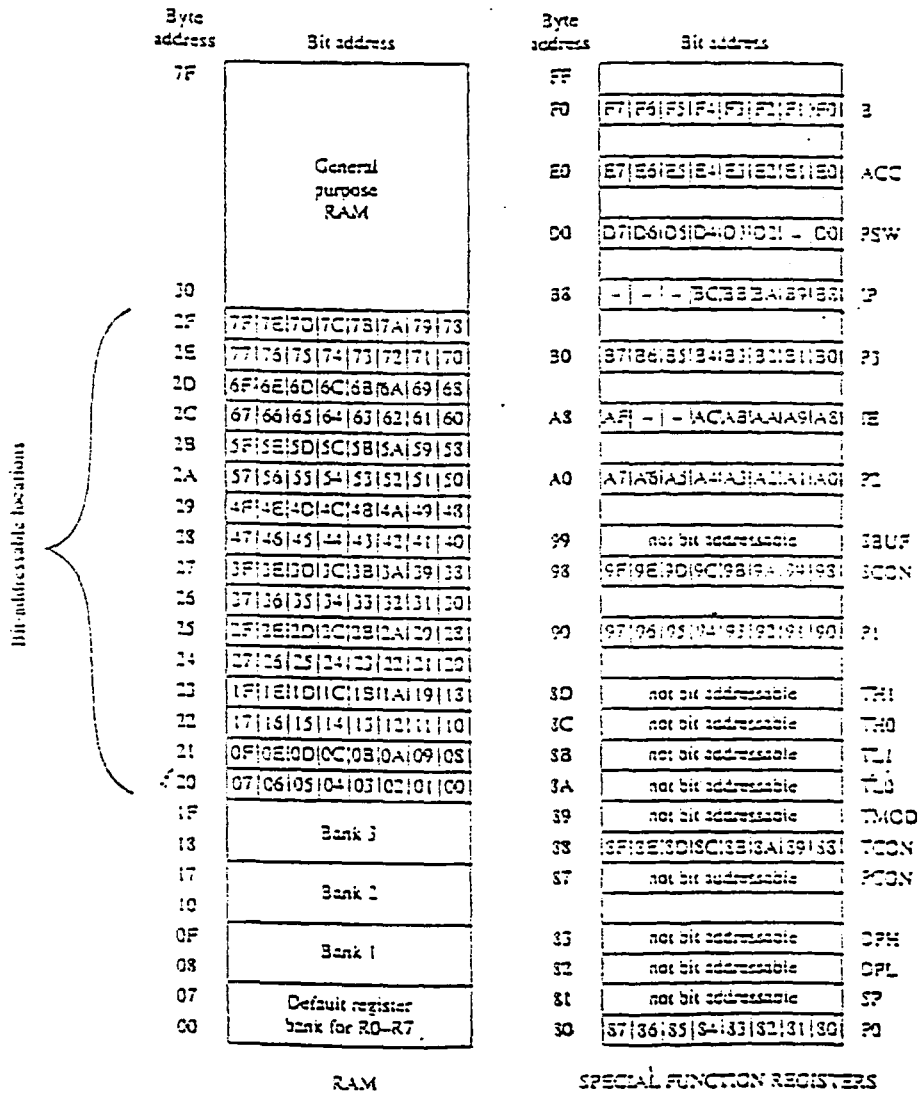


Note: Byte addresses are shown to the left; bit addresses registers are shown inside a location.

รูปที่ 6 โครงสร้างของหน่วยความจำแรมภายใน 8051

วีธีสแควร์ของพอร์ท

อินพุท/เอาต์พุทพอร์ทของ 8051 ประกอบไปด้วยพอร์ท 0 มีตำแหน่งแอดเดรสเป็น 80H พอร์ท 1 มีตำแหน่งแอดเดรสเป็น 90H พอร์ท 2 มีตำแหน่งแอดเดรสเป็น A0H พอร์ท 3 มีตำแหน่งแอดเดรสเป็น B0H พอร์ท 0, 1, 2 และ 3 จะไม่สามารถใช้เป็นอินพุท/เอาต์พุทพอร์ทได้ ถ้าใช้ 8051 ร่วมกับหน่วยความจำภายนอกและใช้ฟังก์ชันพิเศษต่างๆ เช่น พอร์ทอนุกรม การอ่านอินเทอร์รัพท์ เป็นต้น ทุกพอร์ทสามารถอ้างอิงแบบบิตแอดเดรสได้ จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการควบคุมมาก



รูปที่ 7 ตำแหน่งแอดเดรส

อินพุท/เอาต์พุทพอร์ท

อินพุท/เอาต์พุทพอร์ทของ 8051 จะมีการจัดเรียง ดังรูปที่ 8

8051 DIP Pin Assignments

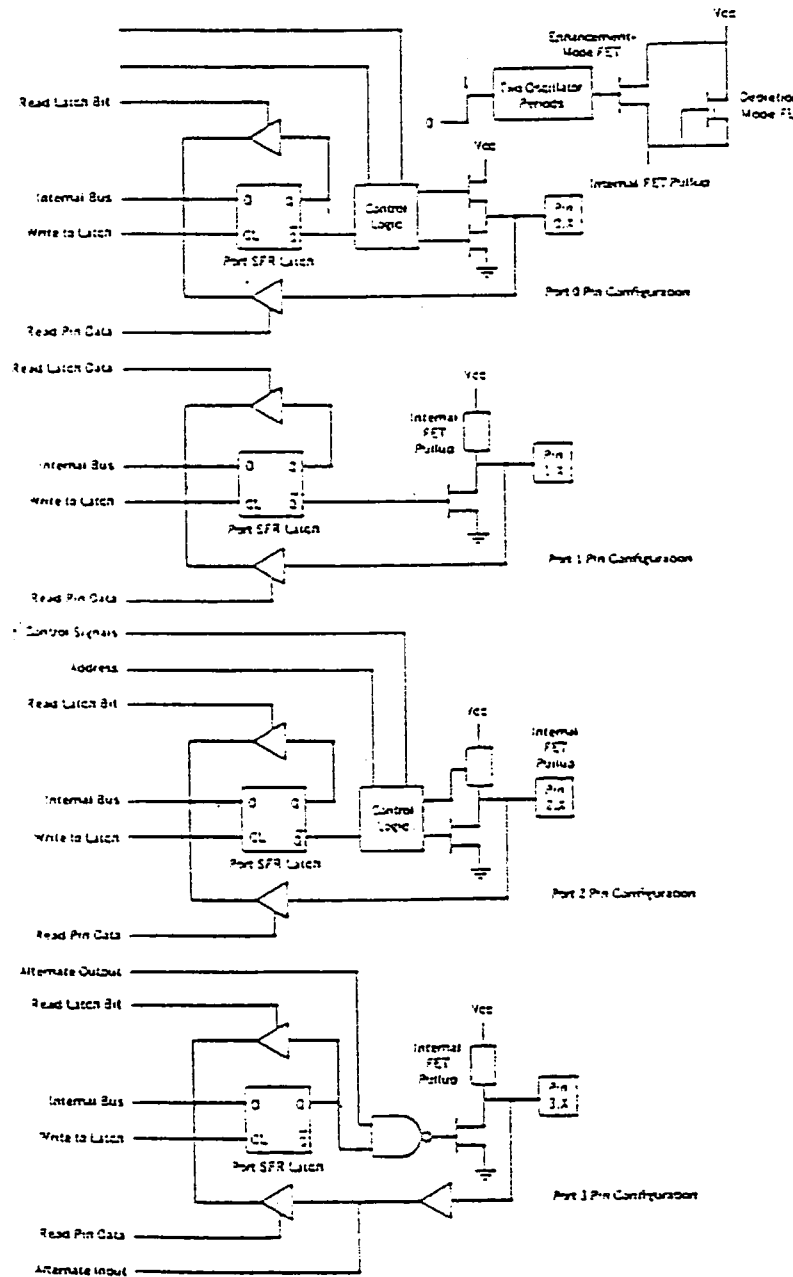
Port 1 Bit 0	1	P1.0	Vcc	40	+5V
Port 1 Bit 1	2	P1.1	(A00)P0.0	39	Port 0 Bit 0 (Address/Data 0)
Port 1 Bit 2	3	P1.2	(A01)P0.1	38	Port 0 Bit 1 (Address/Data 1)
Port 1 Bit 3	4	P1.3	(A02)P0.2	37	Port 0 Bit 2 (Address/Data 2)
Port 1 Bit 4	5	P1.4	(A03)P0.3	36	Port 0 Bit 3 (Address/Data 3)
Port 1 Bit 5	6	P1.5	(A04)P0.4	35	Port 0 Bit 4 (Address/Data 4)
Port 1 Bit 6	7	P1.6	(A05)P0.5	34	Port 0 Bit 5 (Address/Data 5)
Port 1 Bit 7	8	P1.7	(A06)P0.6	33	Port 0 Bit 6 (Address/Data 6)
Reset Input	9	RST	(A07)P0.7	32	Port 0 Bit 7 (Address/Data 7)
Port 3 Bit 0 (Receive Data)	10	P3.0(RXD)	Vcc/EA	31	External Enable (EPROM Programming Voltage)
Port 3 Bit 1 (XMIT Data)	11	P3.1(TXD)	(P00)ALE	30	Address Latch Enable (EPROM Program Pulse)
Port 3 Bit 2 (Interrupt 2)	12	P3.2(M1F0)	PSEN	29	Program Store Enable
Port 3 Bit 3 (Interrupt 1)	13	P3.3(M1F1)	(A15)P2.7	28	Port 2 Bit 7 (Address 15)
Port 3 Bit 4 (Timer 0 Input)	14	P3.4(T0)	(A14)P2.6	27	Port 2 Bit 6 (Address 14)
Port 3 Bit 5 (Timer 1 Input)	15	P3.5(T1)	(A13)P2.5	26	Port 2 Bit 5 (Address 13)
Port 3 Bit 6 (Write Stroke)	16	P3.6(WR)	(A12)P2.4	25	Port 2 Bit 4 (Address 12)
Port 3 Bit 7 (Read Stroke)	17	P3.7(RD)	(A11)P2.3	24	Port 2 Bit 3 (Address 11)
Crystal Input 2	18	XTAL2	(A10)P2.2	23	Port 2 Bit 2 (Address 10)
Crystal Input 1	19	XTAL1	(A9)P2.1	22	Port 2 Bit 1 (Address 9)
Ground	20	Vss	(A8)P2.0	21	Port 2 Bit 0 (Address 8)

Note: Alternate functions are shown below the port name (in parentheses). Pin numbers and pin names are shown inside the DIP package.

รูปที่ 8 แสดงพอร์ทของ 8051 เรียงตามขาต่างๆ

เพื่อให้ใช้งานได้สะดวกขึ้น 8051 จึงออกแบบให้แต่ละขาที่ใช้งานเป็นอินพุท/เอาต์พุท ยังสามารถใช้ขยายหน่วยความจำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ (ในกรณีที่ต้องการ) แต่ละขาของ 8051 จะมีวงจรภายใน ดังรูปที่ 9

Port Pin Circuits



รูปที่ 9 แสดงวงจรภายในของแต่ละขาของ 8051

แต่ละพอร์ทจะมีดาต้าฟลิปฟล็อปทำหน้าที่แลทช์ (Latch) ข้อมูลก่อนจะส่งออกมา ภายนอกตามขาแต่ละขา การควบคุมพอร์ทแต่ละพอร์ทจะควบคุมผ่านรีจิสเตอร์ P0, P1, P2 และ P3 ซึ่งเป็นรีจิสเตอร์ใน SFR แต่ละพอร์ทประกอบด้วยอินพุท/เอาต์พุท 8 เส้น (หรือมีดาต้าฟลิปฟล็อป 8 ตัวต่อ 1 พอร์ท)

พอร์ท 0

สามารถกำหนดให้เป็นอินพุทหรือเอาต์พุทแยกอิสระกันทั้ง 8 เส้น แต่ถ้านำมาใช้ร่วมกันทั้ง 8 เส้นจะสามารถใช้เป็นบัสแอดเดรสและบัสข้อมูลด้านต่ำแบบ 2 ทิศทาง เพื่อต่อกับหน่วยความจำภายนอก ตัวอย่างเช่น เมื่อแต่ละขาของ 8051 ถูกใช้เป็นอินพุท จะต้องส่งลอจิก 1 ไปยังอินพุทของดาต้าฟลิปฟล็อป โดยเขียนไปยังรีจิสเตอร์ P0 ใน SFR ผลที่ได้ขา $\bar{0}$ จะให้ลอจิก 0 ออกมาทำให้ทรานซิสเตอร์หยุดทำงาน ผลที่ได้คือขาของ 8051 แต่ละขาของพอร์ท 0 จะเข้าสู่สถานะอิมพีแดนซ์สูง (high impedance) สัญญาณที่เข้ามาที่ขาแต่ละขาของพอร์ท 0 จะถูกส่งไปยังอินพุทบัฟเฟอร์โดยตรง โดยไม่มีการรบกวนกับส่วนอื่น เมื่อใช้งานในลักษณะเอาต์พุท จะต้องส่งลอจิก 0 ไปยังฟลิปฟล็อปโดยผ่านทางรีจิสเตอร์ P0 ใน SFR จะทำให้เพทตัวล่างทำงาน จะเห็นว่าสัญญาณที่พอร์ทจะเป็น 0 ทันที ในทางกลับกันถ้าส่งลอจิก 1 ไปบ้าง เพทจะหยุดทำงานทำให้เกิดสถานะฟลอยท์ (Float) หรืออิมพีแดนซ์สูง ในกรณีนี้จะต้องใช้ความต้านทานต่อจากพอร์ทขึ้นไปบนไฟเลี้ยงของระบบ เพื่อดึงสัญญาณให้เป็นลอจิก 1 มิฉะนั้นลอจิก 1 ที่ได้จะมีระดับศักดาที่ต่ำเกินไปจนกลายเป็นลอจิก 0 ได้

เมื่อพอร์ท 0 ถูกใช้เป็นบัสแอดเดรส เพื่อต่อกับหน่วยความจำภายนอก สัญญาณจะถูกส่งมายังส่วนควบคุมลอจิก (Control Logic) เมื่อสัญญาณแอดเดรสเป็นลอจิก 1 ส่วนควบคุมลอจิกจะทำให้เพทตัวบนทำงาน และเพทตัวล่างหยุดทำงาน ส่งผลให้สัญญาณที่ขาพอร์ท 0 เป็นลอจิก 1 ในทางกลับกันถ้าสัญญาณแอดเดรสเป็น 0 ส่วนควบคุมลอจิกจะทำให้เพทตัวบนหยุดทำงาน ส่วนเพทตัวล่างจะทำงาน ทำให้ลอจิกที่ขาของพอร์ท 0 เป็นลอจิก 0 เมื่อสัญญาณแอดเดรสถูกส่งออกมาที่พอร์ท 0 แล้วจะค้างสถานะนี้ไว้ชั่วคราว จากนั้นพอร์ท 0 จะเปลี่ยนตัวเองเป็นบัสข้อมูลทันที

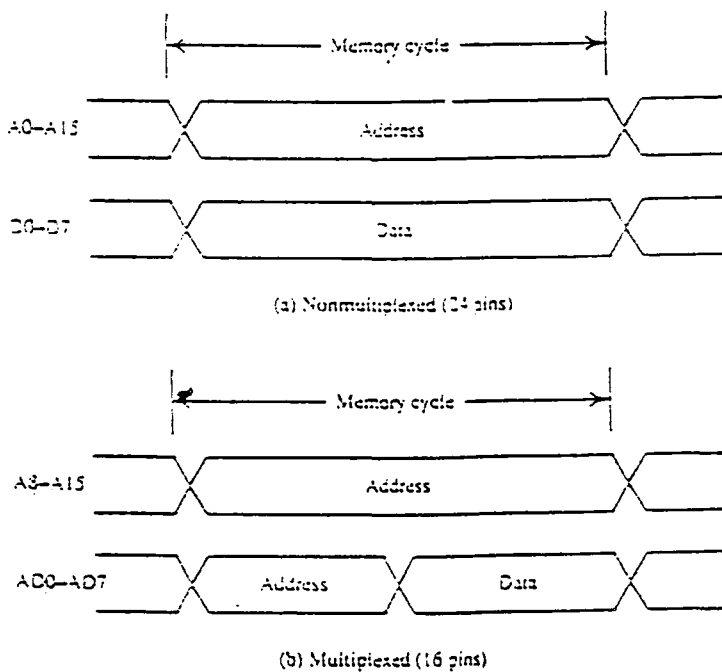
พอร์ท 1

พอร์ท 1 จะทำงานได้เป็นอินพุท/เอาต์พุทพอร์ทเท่านั้น จะเห็นว่าในรูปขา $\bar{0}$ ของดาต้าแลทช์ จะต่ออยู่กับขาเกตของเพทโดยตรง โดยมีเพทอีกตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็น แอดคัพพูล์ฟโหลด เมื่อพอร์ท 1 ถูกใช้เป็นอินพุท ลอจิก 1 จะถูกส่งไปแลทช์ค้างไว้ ทำให้เพทหยุดทำงานขาของพอร์ท 1 เป็นลอจิก 1 โดยผลจากการพูล์ฟโหลดของแอดคัพพูล์ฟโหลดอยู่ตลอดเวลา เมื่อต่ออยู่กับ

วงจรภายนอก ถ้าลอจิกของวงจรภายนอกเป็น 1 ก็จะทำให้ลอจิกภายนอกของพอร์ท 1 ยังคงเป็นลอจิก 1 อยู่เหมือนเดิม ถ้าวงจรภายนอกเป็นลอจิก 0 จะดึงให้ระดับสัญญาณที่พอร์ทเป็นลอจิก 0 ด้วย เหตุนี้เมื่ออ่านข้อมูลผ่านทางบัฟเฟอร์เข้าไป ก็จะได้ลอจิกที่เป็นไปตาม ลอจิกภายนอกที่ต่ออยู่กับพอร์ท 1 เมื่อใช้พอร์ท 1 เป็นเอาต์พุต และเมื่อส่งลอจิก 1 ออกไปจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงใดๆ ก็จะได้ลอจิก 1 ตามต้องการและถ้าส่งลอจิก 0 ออกไปยังพอร์ท 1 จะทำให้เฟททำงานทำให้ได้ลอจิก 0 ตามต้องการเช่นกัน

พอร์ท 2

พอร์ท 2 ทำหน้าที่ได้ 2 หน้าที่ คือ เป็นอินพุต/เอาต์พุตพอร์ทเช่นเดียวกับพอร์ท 1 และเป็นบัตแอดเดรสด้านสูงใช้งานร่วมกับพอร์ท 0 สำหรับต่อกับหน่วยความจำภายนอกโดยพิจารณาจากแผนผังของเวลา ดังรูป 10



รูปที่ 10 การมัลติเพลกซ์บัตข้อมูลแอดเดรส

พอร์ท 3

พอร์ท 3 จะทำงานได้ 2 หน้าที่เช่นกัน คือ ใช้เป็นอินพุต/เอาต์พุตพอร์ท เช่นเดียวกับพอร์ทหนึ่ง อีกหน้าที่หนึ่งทำงาน ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 หน้าที่การทำงานของพอร์ท 3

ขา	ใช้งานเป็น	SFR
P3.0- RXD	รับข้อมูลแบบอนุกรม	SBUF
P3.1-TXD	ส่งข้อมูลแบบอนุกรม	SBUF
P3.2- $\overline{INT0}$	รับอินเทอร์รัพท์ภายนอกหมายเลข 0	TCON1
P3.3- $\overline{INT1}$	รับอินเทอร์รัพท์ภายนอกหมายเลข 1	TCON3
P3.4-T0	รับสัญญาณจากภายนอกของไทเมอร์หมายเลข 0	TMOD
P3.5-T1	รับสัญญาณจากภายนอกของไทเมอร์หมายเลข 1	TMOD
P3.6- \overline{WR}	สัญญาณเขียนหน่วยความจำภายนอก (Write)	-
P3.7- \overline{RD}	สัญญาณอ่านหน่วยความจำภายนอก (Read)	-

;PROGRAM STEPMOTOR

C0 EQU 08H

C1 EQU 09H

C2 EQU 0AH

ORG 0000H

LJMP KLIN

ORG 0013H

LJMP MEOW

KLIN: MOV TCON, #00H

CLR P3.0

MOV SP, #50H

STOP: MOV P1, #0FFH

JNB P3.1, UP1

JNB P3.2, DOWN

JNB P3.3, UPS

SJMP STOP

UP1: MOV R0, #01H

UP2: MOV R1, #32H

CJNE R0, #061H, UP3

SJMP STOP

UP3: LCALL PORT1

JNB P3.2, DOWN1

JNB P3.3, STOP

JNB P3.4, UPS

```
DJNZ R1, UP3
CLR F0
MOV IE, #10000100B
MOV P1, #0FFH
LCALL DELAY
MOV IE, #00H
JNB F0,UP2
SJMP STOP
```

```
DOWN1:MOV R2, #0FAH
      MOV R3, #013H
DOWN:  MOV P1, #1100B
      ACALL SLOW
      MOV P1, #1001B
      ACALL SLOW
      MOV P1, #0011B
      ACALL SLOW
      MOV P1, #0110B
      ACALL SLOW
      JNB P3.1, UP1
      JNB P3.2, STOP
      JNB P3.4, UPS
      DJNZ R2, DOWN
      DJNZ R3, DOWN
      SJMP STOP
UPS:   MOV R4, #0FAH
      MOV R5, #013H
```

```
UPS1: LCALL PORT1
      JNB P3.1, UP1
      JNB P3.2, DOWN1
      JNB P3.3, STOP
      DJNZ R4, UPS1
      DJNZ R5, UPS1
      SJMP STOP
```

```
PORT1: MOV P1, #0110B
      ACALL SLOW
      MOV P1, #0011B
      ACALL SLOW
      MOV P1, #1001B
      ACALL SLOW
      MOV P1, #1100B
      ACALL SLOW
      RET
```

```
SLOW: MOV R6, #011H
      MOV R7, #011H
LOOP: DJNZ R6, LOOP
      DJNZ R7, LOOP
      RET
```

```
DELAY: MOV C0, #1DH
LOOP1: MOV C1, #14H
LOOP2: MOV C2, #14H
LOOP3: MOV C3, #0FDH
```

LOOP4: NOP

NOP

NOP

NOP

NOP

NOP

NOP

DJNZ C3, LOOP4

DJNZ C2, LOOP3

DJNZ C1, LOOP2

DJNZ C0, LOOP1

RET

MEOW: SETB F0

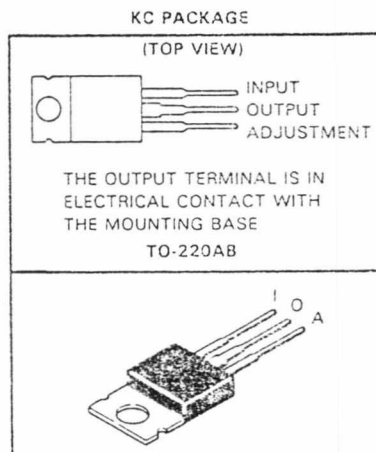
RETI

ภาคผนวก ข
ไอซีเรกูเลเตอร์ TL 783C

TL783C HIGH-VOLTAGE ADJUSTABLE REGULATOR

D2659, SEPTEMBER 1981 - REVISED SEPTEMBER 1988

- Output Adjustable from 1.25 V to 125 V
- 700-mA Output Current
- Full Short-Circuit, Safe-Operating-Area, and Thermal Shutdown Protection
- 0.001 %/V Typical Input Regulation
- 0.15% Typical Output Regulation
- 76-dB Typical Ripple Rejection
- Standard TO-220AB Package



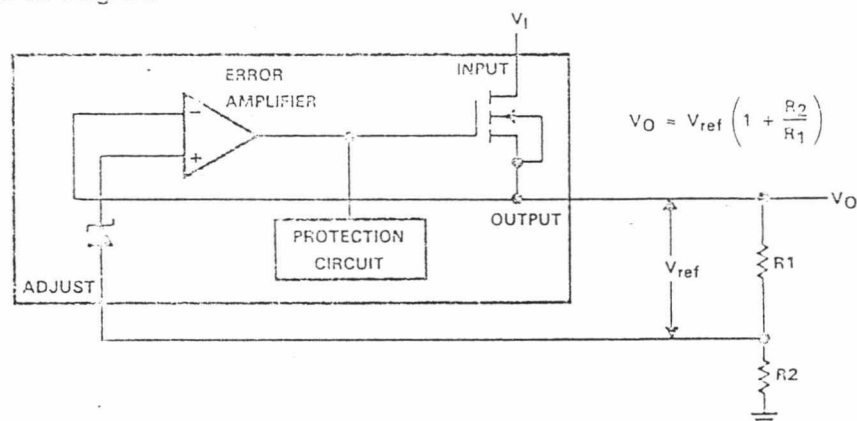
description

The TL783C is an adjustable three-terminal positive-voltage regulator with an output range of 1.25 V to 125 V and a DMOS output transistor capable of sourcing more than 700 mA. It is designed for use in high-voltage applications where standard bipolar regulators cannot be used. Excellent performance specifications . . . superior to those of most bipolar regulators . . . are achieved through circuit design and advanced layout techniques.

As a state-of-the-art regulator, the TL783C combines standard bipolar circuitry with high-voltage double-diffused MOS transistors on one chip to yield a device capable of withstanding voltages far higher than standard bipolar integrated circuits. Because of its lack of secondary breakdown and thermal runaway characteristics usually associated with bipolar outputs, the TL783C maintains full overload protection while operating at up to 125 V from input to output. Other features of the device include current limiting, safe-operating-area (SOA) protection, and thermal shutdown. Even if the adjustment pin is inadvertently disconnected, the protection circuitry remains functional.

Only two external resistors are required to program the output voltage. An input bypass capacitor is necessary only when the regulator is situated far from the input filter. An output capacitor, although not required, will improve transient response and protection from instantaneous output short-circuits. Excellent ripple rejection can be achieved without a bypass capacitor at the adjustment terminal.

functional block diagram



PRODUCTION DATA documents contain information current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

TEXAS
INSTRUMENTS

POST OFFICE BOX 655012 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 1983, Texas Instruments Incorporated

2-173

Data Sheets 12

500 mA

UNIT
V
mV
dB
mV
Ω
mV/°C
μV
V
mA
mA
mA
A

nal effects
F capacitor

TL793C HIGH-VOLTAGE ADJUSTABLE REGULATOR

absolute maximum ratings over operating temperature range (unless otherwise noted)

Input-to-output differential voltage, $V_I - V_O$	125 V
Continuous total dissipation at (or below) 25°C free-air temperature (see Note 1)	2 W
Continuous total dissipation at (or below) 25°C case temperature (see Note 1)	20 W
Operating free-air, case, or virtual junction temperature range	0°C to 150°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds	260°C

NOTE 1: For operation above 25°C free-air or case temperature, refer to Figures 1 and 2. To avoid exceeding the design maximum virtual junction temperature, these ratings should not be exceeded. Due to variations in individual device electrical characteristics and thermal resistance, the built-in thermal overload protection may be activated at power levels slightly above or below the rated dissipation.

2
Data Sheets

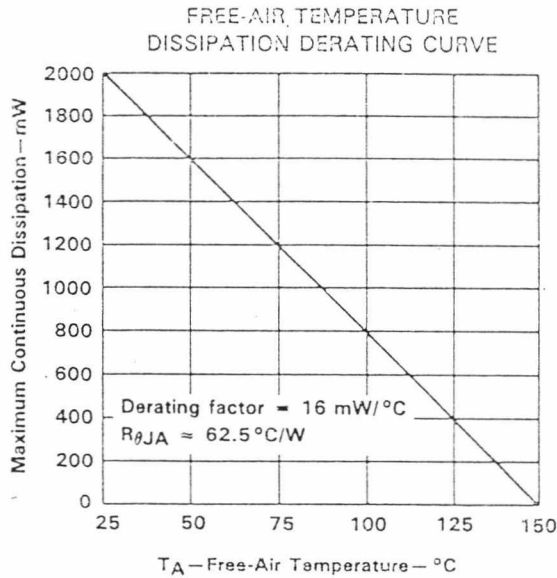


FIGURE 1

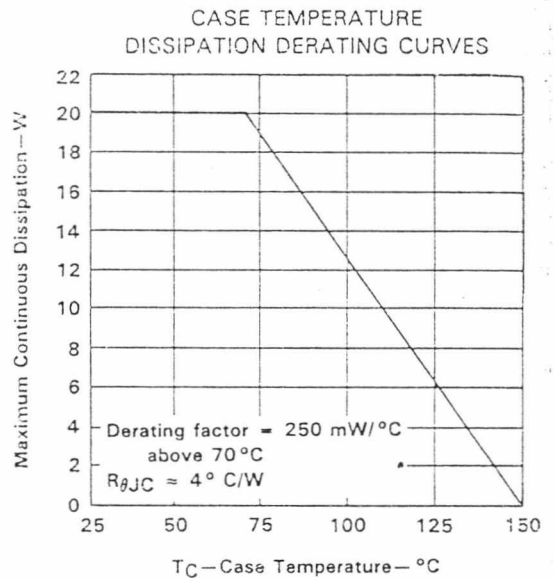


FIGURE 2

recommended operating conditions

	MIN	MAX	UNIT
Input-to-output voltage differential, $V_I - V_O$		125	V
Output current, I_O	15	700	mA
Operating virtual junction temperature, T_J	0	125	°C

TL783C
HIGH-VOLTAGE ADJUSTABLE REGULATOR

electrical characteristics at $V_I - V_O = 25\text{ V}$, $I_O = 0.5\text{ A}$, $T_J = 0^\circ\text{C}$ to 125°C (unless otherwise note 1)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	MIN	TYP	MAX	UNIT	
Input regulation‡	$V_I - V_O = 20\text{ V}$ to 125 V , $P \leq$ rated dissipation	$T_J = 25^\circ\text{C}$	0.001	0.01	%V	
		$T_J = 0^\circ\text{C}$ to 125°C	0.004	0.02		
Ripple rejection	$\Delta V_{I(P-P)} = 10\text{ V}$, $V_O = 10\text{ V}$, $f = 120\text{ Hz}$	66	75		dB	
Output regulation	$I_O = 15\text{ mA}$ to 700 mA , $T_J = 25^\circ\text{C}$	$V_O \leq 5\text{ V}$	7.5	25	mV	
		$V_O \geq 5\text{ V}$	0.15	0.5	%	
	$I_O = 15\text{ mA}$ to 700 mA , $P \leq$ rated dissipation	$V_O \leq 5\text{ V}$		20	70	mV
		$V_O \geq 5\text{ V}$		0.3	1.5	%
Output voltage change with temperature			0.4		%	
Output voltage long-term drift	1000 h at $T_J = 125^\circ\text{C}$, See Note 2, $V_I - V_O = 125\text{ V}$		0.2		%	
Output noise voltage	$f = 10\text{ Hz}$ to 10 kHz , $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.003		%	
Minimum output current to maintain regulation	$V_I - V_O = 125\text{ V}$			15	mA	
Peak output current	$V_I - V_O = 25\text{ V}$, $t = 1\text{ ms}$		1100		mA	
	$V_I - V_O = 15\text{ V}$, $t = 30\text{ ms}$		715			
	$V_I - V_O = 25\text{ V}$, $t = 30\text{ ms}$	700	900			
	$V_I - V_O = 125\text{ V}$, $t = 30\text{ ms}$	100	250			
Adjustment-terminal current			83	110	μA	
Change in adjustment-terminal current	$V_I - V_O = 15\text{ V}$ to 125 V , $I_O = 15\text{ mA}$ to 700 mA , $P \leq$ rated dissipation		0.5	5	μA	
Reference voltage (output to ADJ)	$V_I - V_O = 10\text{ V}$ to 125 V , $I_O = 15\text{ mA}$ to 700 mA , $P \leq$ rated dissipation	1.2	1.27	1.3	V	

† Pulse testing techniques are used to maintain the junction temperature as close to the ambient temperature as possible. Thermal effects must be taken into account separately.

‡ Input regulation is expressed here as the percentage change in output voltage per 1-volt change at the input.

NOTE 2: Since long-term drift cannot be measured on the individual devices prior to shipment, this specification is not intended to be a guarantee or warranty. It is an engineering estimate of the average drift to be expected from lot to lot.

Data Sheets

TEXAS
INSTRUMENTS

POST OFFICE BOX 655012 • DALLAS, TEXAS 75255

2-175

25 V
2 W
0 W
50°C
50°C
virtual
s and
rated

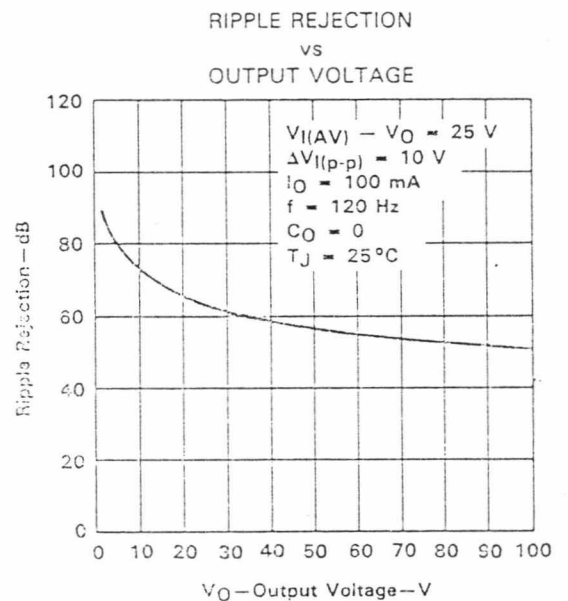
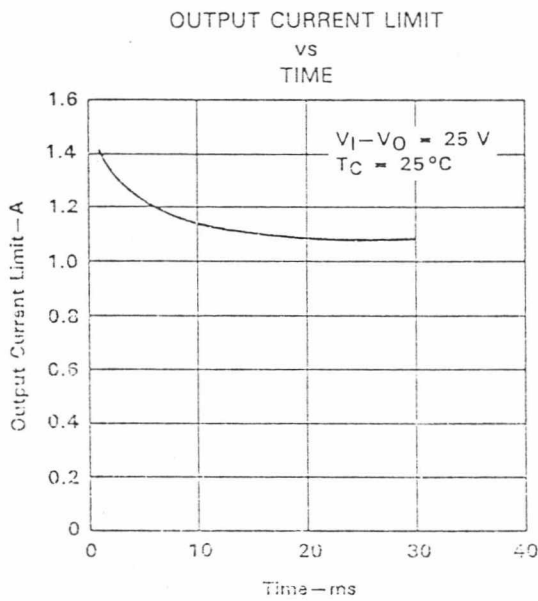
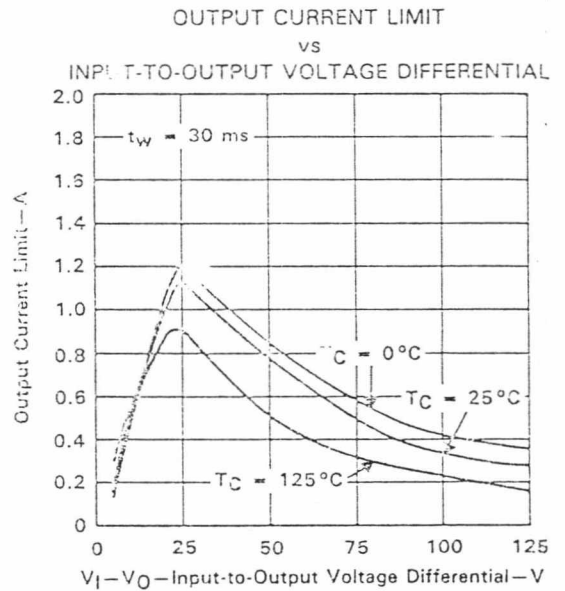
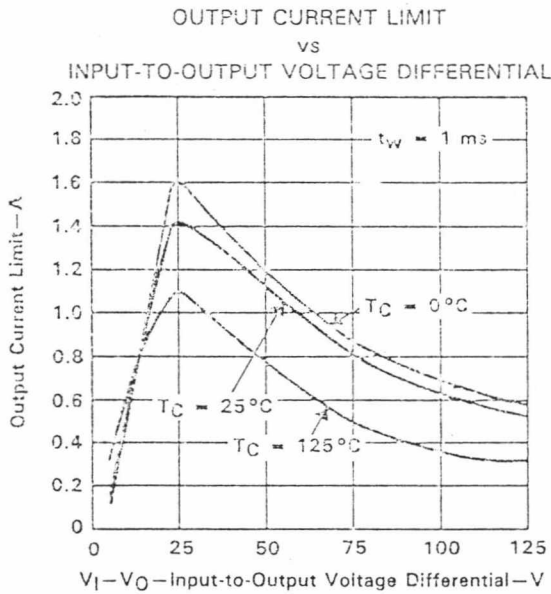
150

UNIT
V
mA
°C

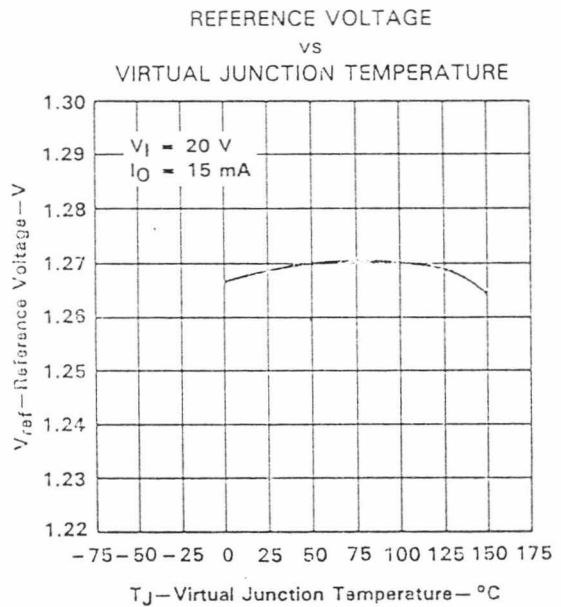
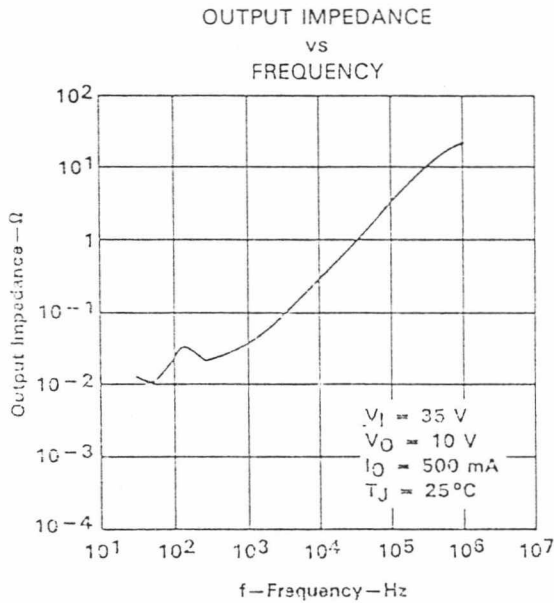
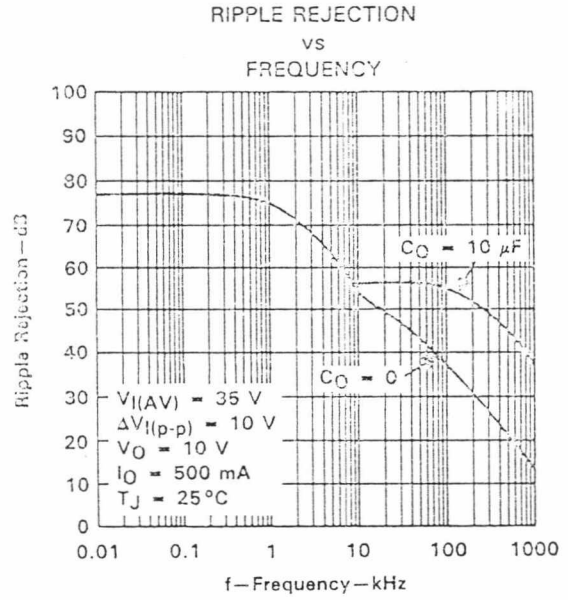
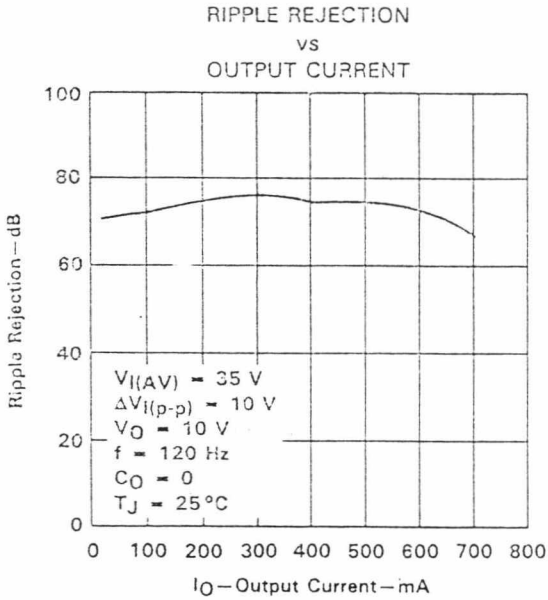
TL783C
HIGH-VOLTAGE ADJUSTABLE REGULATOR

TYPICAL CHARACTERISTICS

2 Data Sheets



TYPICAL CHARACTERISTICS



Data Sheets

TL783C
HIGH-VOLTAGE ADJUSTABLE REGULATOR

TYPICAL CHARACTERISTICS

ADJUSTMENT-TERMINAL CURRENT
vs
VIRTUAL JUNCTION TEMPERATURE

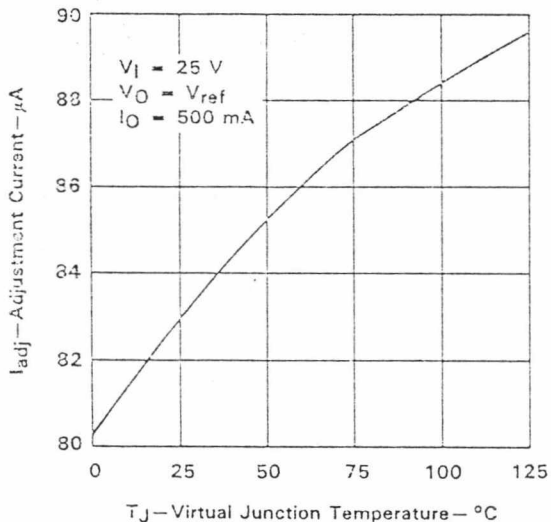


FIGURE 11

DROPOUT VOLTAGE
vs
VIRTUAL JUNCTION TEMPERATURE

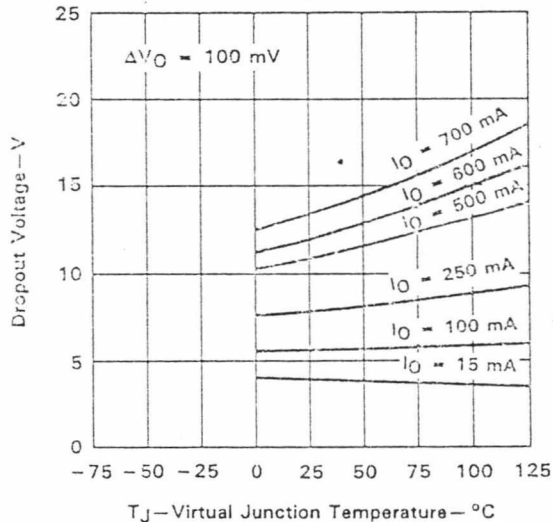


FIGURE 12

LOAD REGULATION
vs
VIRTUAL JUNCTION TEMPERATURE

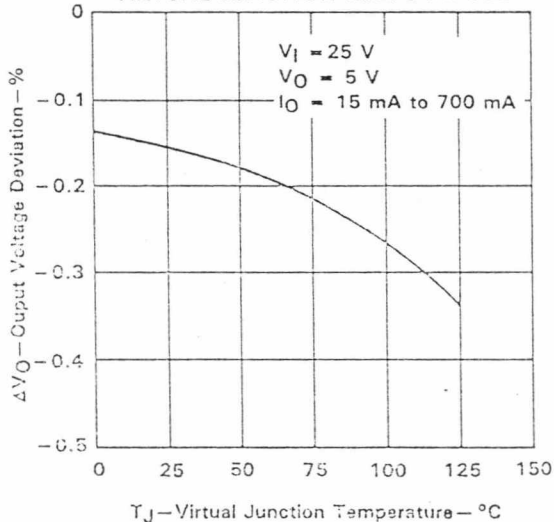


FIGURE 13

MINIMUM OUTPUT CURRENT
TO MAINTAIN REGULATION
vs
INPUT VOLTAGE

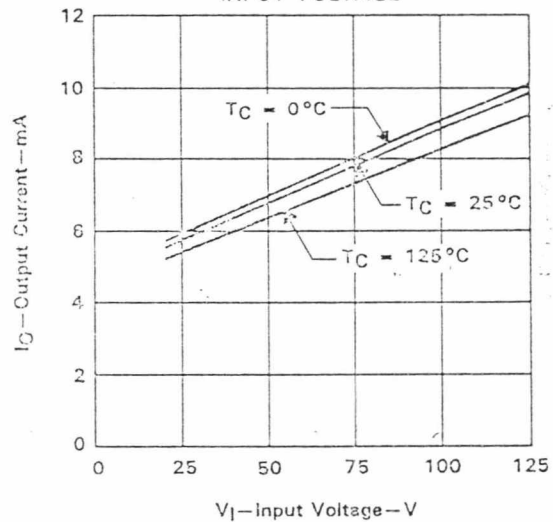


FIGURE 14

2

Data Sheets

TYPICAL CHARACTERISTICS

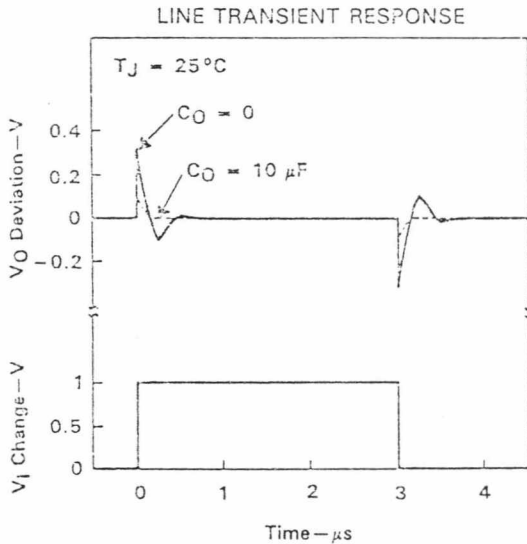


FIGURE 15

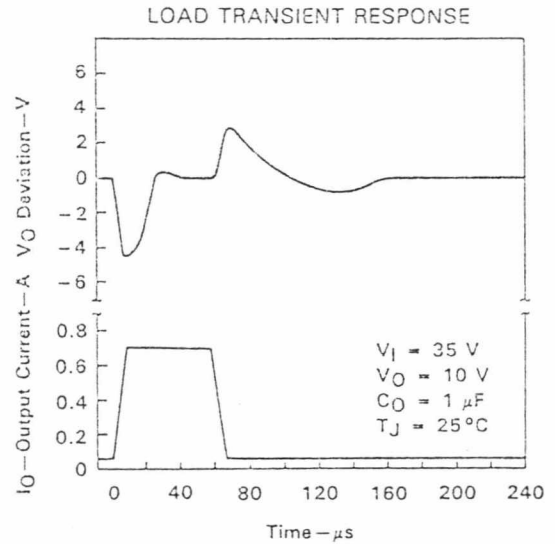


FIGURE 16

DESIGN CONSIDERATIONS

The internal reference (see functional block diagram) is used to generate 1.25 V nominal (V_{ref}) between the output and adjustment terminals. This voltage is developed across R_1 and causes a constant current to flow through R_1 and the programming resistor R_2 , giving an output voltage of:

$$V_O = V_{ref} (1 + R_2/R_1) + I_{adj} (R_2)$$

or

$$V_O \sim V_{ref} (1 + R_2/R_1).$$

The TL783C was designed to minimize I_{adj} and maintain consistency over line and load variations, thereby minimizing the $I_{adj} (R_2)$ error term.

To maintain I_{adj} at a low level, all quiescent operating current is returned to the output terminal. This quiescent current must be sunk by the external load and is the minimum load current necessary to prevent the output from rising. The recommended R_1 value of 82Ω will provide a minimum load current of 15 mA. Larger values may be used if the input-to-output differential voltage is less than 125 V (see minimum operating current curve) or if the load will sink some portion of the minimum current.

bypass capacitors

The TL783C regulator is stable without bypass capacitors; however, any regulator will become unstable with certain values of output capacitance if an input capacitor is not used. Therefore, the use of input bypassing is recommended whenever the regulator is located more than four inches from the power-supply filter capacitor. A 1- μ F tantalum or electrolytic capacitor is usually sufficient.

Data Sheets

RE
mA
0 mA
10 mA
5 mA
100 125
°C

IT
N
25°C
5°C
100 125

TL783C HIGH-VOLTAGE ADJUSTABLE REGULATOR

Adjustment-terminal capacitors are not recommended for use on the TL783C because they can seriously degrade load transient response as well as create a need for extra protection circuitry. Excellent ripple rejection is presently achieved without this added capacitor.

Due to the relatively low gain of the MOS output stage, output voltage drop-out may occur under large load transient conditions. Addition of an output bypass capacitor will greatly enhance load transient response as well as prevent drop-out. For most applications, it is recommended that an output bypass capacitor be used with a minimum value of:

$$C_O (\mu\text{F}) = 15/V_O$$

Larger values will provide proportionally better transient response characteristics.

protection circuitry

The TL783C regulator includes built-in protection circuits capable of guarding the device against most overload conditions encountered in normal operation. These protective features are current limiting, safe-operating-area protection, and thermal shutdown. These circuits are meant to protect the device under occasional fault conditions only. Continuous operation in the current limit or thermal shutdown mode is not recommended.

The internal protection circuits of the TL783C will protect the device up to maximum rated V_I as long as certain precautions are taken. If V_I is instantaneously switched on, transients exceeding maximum input ratings may occur, which can destroy the regulator. These are usually caused by lead inductance and bypass capacitors causing a ringing voltage on the input. In addition, if rise times in excess of 10 V/ns are applied to the input, a parasitic n-p-n transistor in parallel with the DMOS output can be turned on causing the device to fail. If the device is operated over 50 V and the input is switched on rather than ramped on, a low-Q capacitor, such as a tantalum or electrolytic should be used rather than ceramic, paper, or plastic bypass capacitors. A Q factor of 0.015 or greater will usually provide adequate damping to suppress ringing. Normally, no problems will occur if the input voltage is allowed to ramp upward through the action of an ac line rectifier and filter network.

Similarly, if an instantaneous short circuit is applied to the outputs, both ringing and excessive fall times can result. A tantalum or electrolytic bypass capacitor is recommended to eliminate this problem. However, if a large output capacitor is used and the input is shorted, addition of a protection diode may be necessary to prevent capacitor discharge through the regulator. The amount of discharge current delivered is dependent on output voltage, size of capacitor, and fall time of V_I . A protective diode (see Figure 17) is required only for capacitance values greater than

$$C_O (\mu\text{F}) = 3 \times 10^4 / (V_O)^2.$$

Care should always be taken to prevent insertion of regulators into a socket with power on. Power should be turned off before removing or inserting regulators.

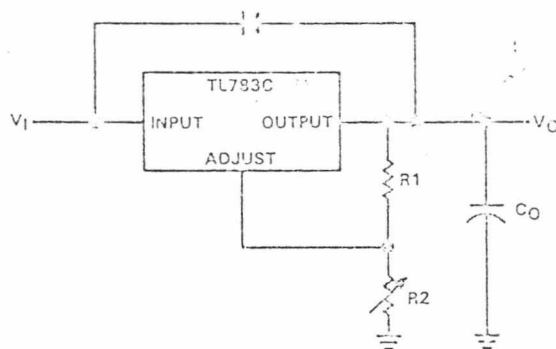


FIGURE 17. REGULATOR WITH PROTECTIVE DIODE

load regulation

The current set resistor (R1) should be located close to the regulator output terminal rather than near the load. This eliminates long line drops from being amplified through the action of R1 and R2 to degrade load regulation. To provide remote ground sensing, R2 should be near the load ground.

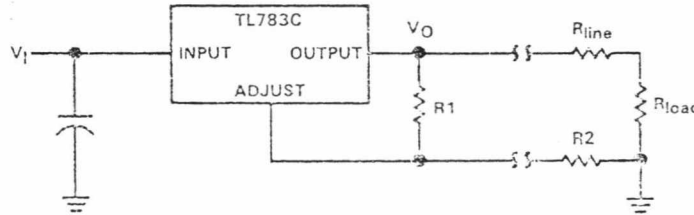
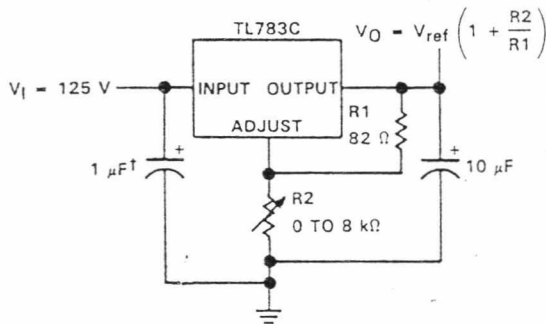


FIGURE 18. REGULATOR WITH CURRENT-SET RESISTOR

TYPICAL APPLICATION DATA



[†]NEEDED IF DEVICE IS MORE THAN 4 INCHES FROM FILTER CAPACITOR

FIGURE 19. 1.25-V TO 115-V ADJUSTABLE REGULATOR

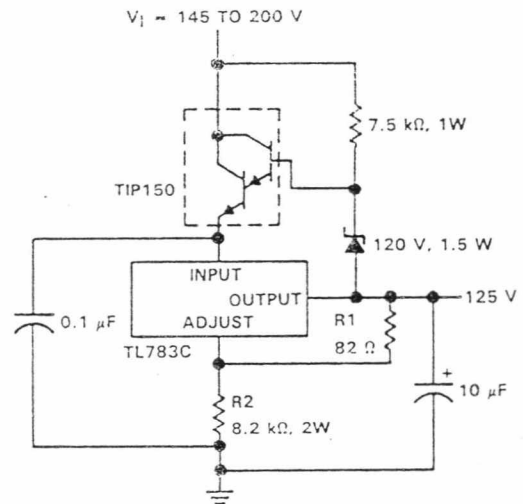


FIGURE 20. 125-V SHORT-CIRCUIT-PROTECTED OFF-LINE REGULATOR

Data Sheets

TL783C HIGH-VOLTAGE ADJUSTABLE REGULATOR

TYPICAL APPLICATION DATA

2

Data Sheets

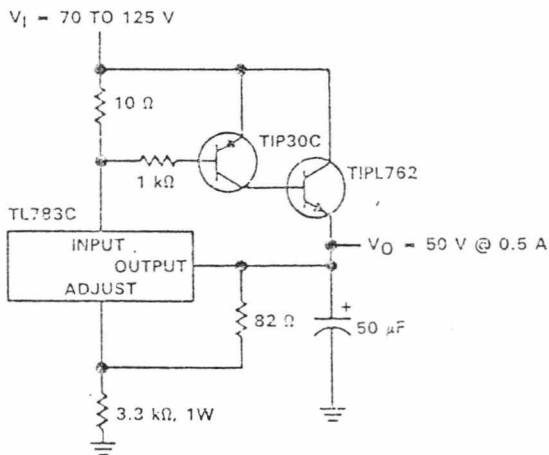


FIGURE 21. 50-V
REGULATOR WITH CURRENT BOOST

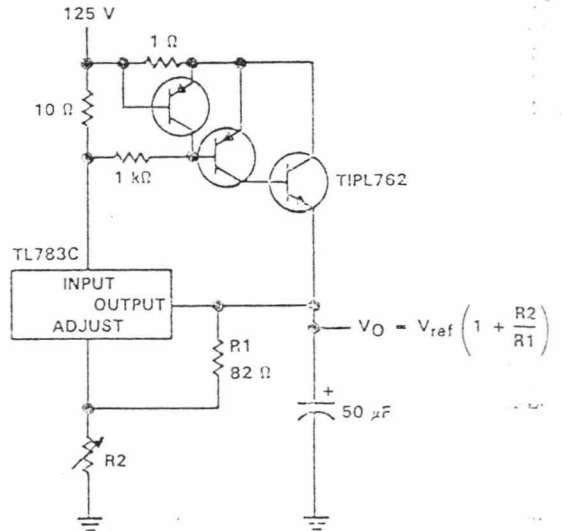


FIGURE 22. ADJUSTABLE
REGULATOR WITH CURRENT BOOST
AND CURRENT LIMIT

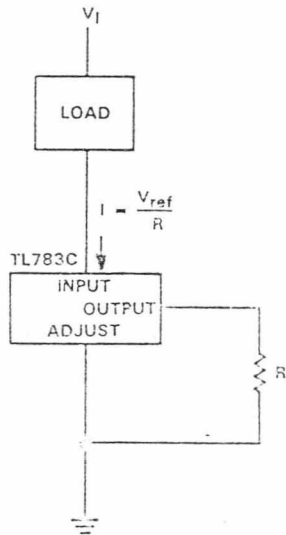


FIGURE 23. CURRENT-SINKING REGULATOR

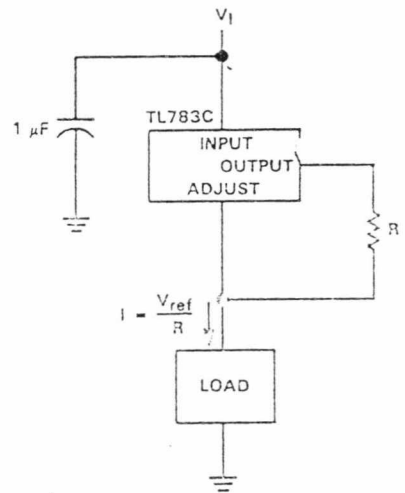


FIGURE 24. CURRENT SOURCING REGULATOR

TL783C
HIGH-VOLTAGE ADJUSTABLE REGULATOR

TYPICAL APPLICATION DATA

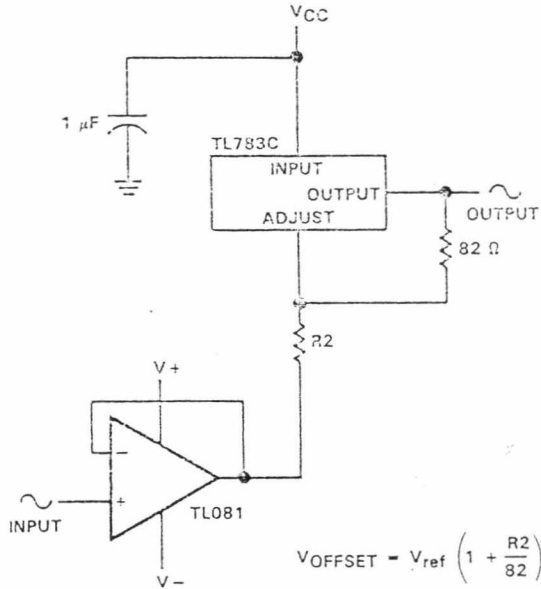


FIGURE 25. HIGH-VOLTAGE
UNITY-GAIN OFFSET AMPLIFIER

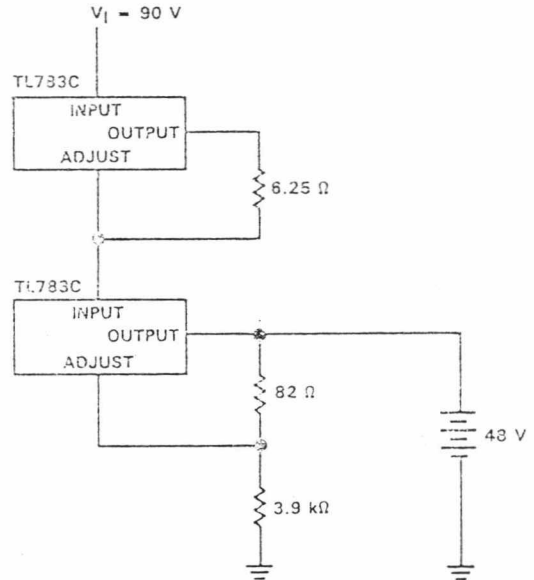


FIGURE 26. 48-V, 200-mA FLOAT CHARGER

Data Sheets 2

ATOR

TEXAS
INSTRUMENTS

POST OFFICE BOX 655012 • DALLAS, TEXAS 75265

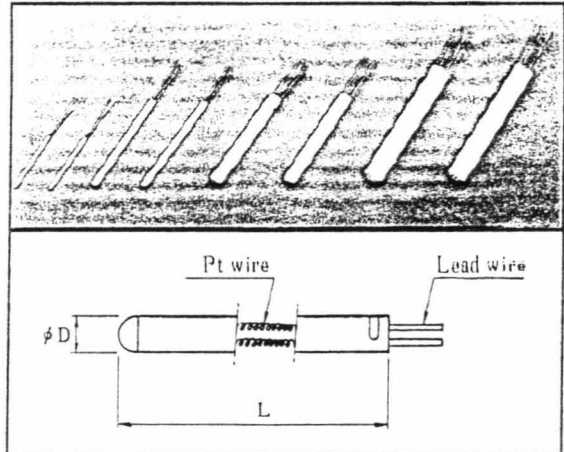
2-183

ภาคผนวก ค
RTD

RESICERAM[®]

Ceramic Type Platinum RTD Element

RESICERAM[®] is composed of a coil-formed high purity platinum wire inserted into bores of a fine polished recrystallized Alumina ceramic body and fixed on its bottom by special heat resistant frit. As approximately 80% of the resistance wire is free of heat strain from temperature change, drift in resistivity is minimized and its reproducibility and long term stability are superior to any of conventional core-wound elements.



Types

Type	Nominal Resistance (Ω)	Resistance Ratio R_{100}/R_0	Nom. Dimensions (mm)		Operating Temp. (°C)	Rated Current (mA)	Class
			Length (L)	O. D. (D)			
C100 / 0715S	100	1.3850 JIS IEC DIN BS	15	0.75	-200~500	Below 2	A
C100 / 0915S	100		15	0.9			
C100 / 1210S	100		10	1.2			
C100 / 1615S	100		15	1.6			
C100 / 2815S	100		15	2.8			
C100 / 3025S	100		25	3.0			
C100 / 4530S	100	30	4.5	Below 5			
CJ100/0715S	100	1.3916 Old JIS American Curve	15			0.75	Below 2
CJ100/0915S	100		15	0.9			
CJ100/1210S	100		10	1.2			
CJ100/1615S	100		15	1.6			
CJ100/2815S	100		15	2.8			
CJ100/3025S	100		25	3.0			
CJ100/4530S	100	30	4.5	Below 5			

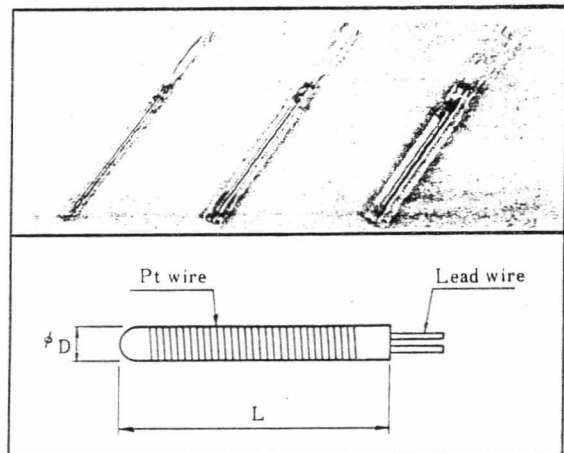
On order for dual element, put suffix D instead of S. Other special sizes are also available.

For high temperature use (0-650°C) put suffix-H after S or D on element Types. Example - "C100/2815S-H".

RESIGLASS

Glass-sealed Platinum RTD Element

It is composed of a high purity platinum wire wound non-inductively around a special glass body, of which resistivity at 0°C is adjusted to fall within the respective standard ranges, inserted into another special glass tube and heat sealed overall. Quick response and excellent in insulation, withstand voltage, vibration, and high resistance to liquid, chemicals and gases.



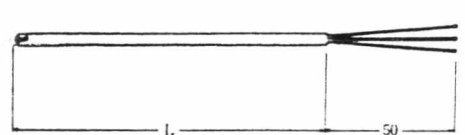
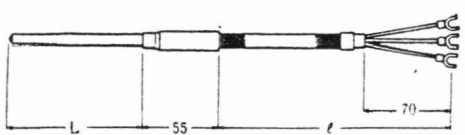
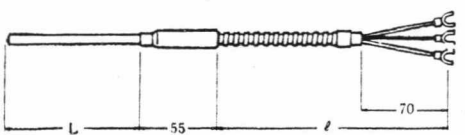
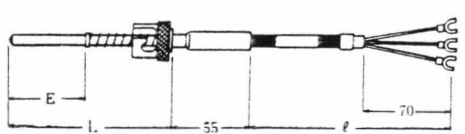
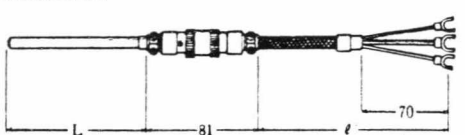
Types

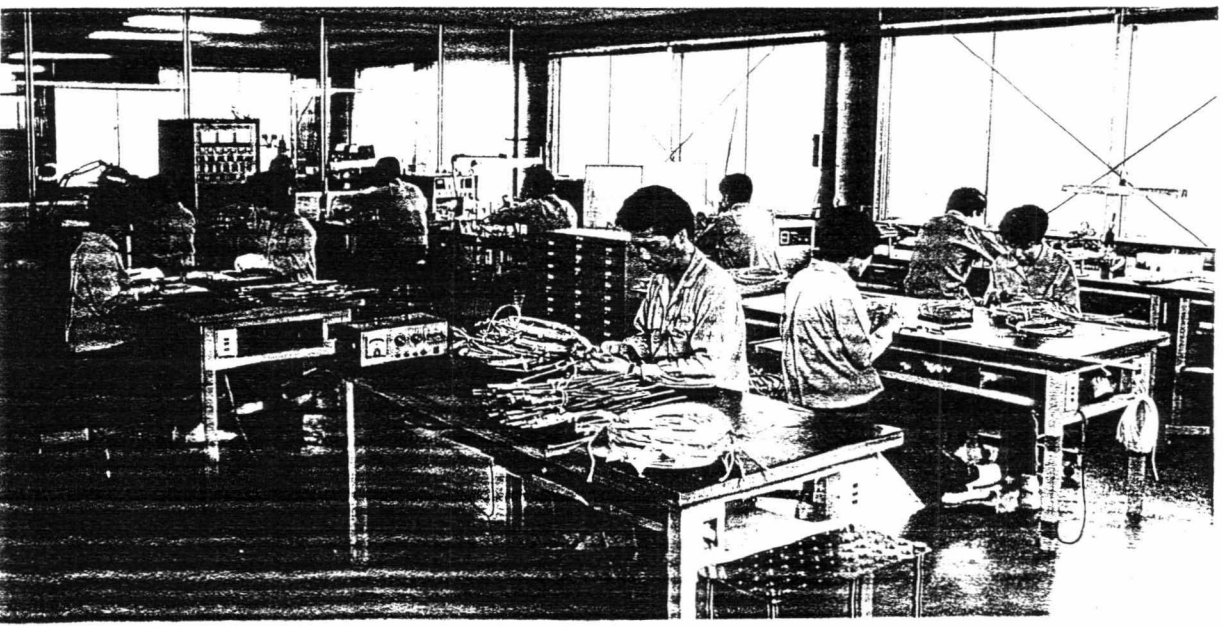
Type	Nominal Resistance (Ω)	Resistance Ratio R_{100}/R_0	Nom. Dimensions (mm)		Operating Temp. (°C)	Rated Current (mA)	Class	
			Length (L)	O. D. (D)				
G100 / 2025S	100	1.3850 JIS, IEC, DIN, BS	25	2.0	-200~300	Below 5	A	
G100 / 3025S	100			3.0				
G100 / 4025S	100			4.0				
GJ100/2025S	100	1.3916 Old JIS American Curve	25	2.0			Below 5	B
GJ100/3025S	100			3.0				
GJ100/4025S	100			4.0				

Other sizes are also available.

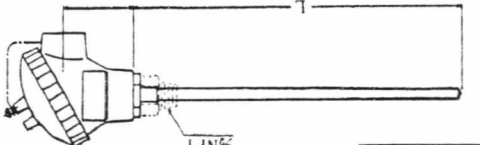
Standard Assemblies of RESIMIC[®] (MODEL:RM)

RESISLIM[®] (MODEL:RS)

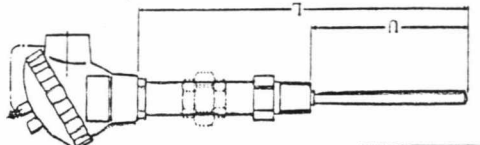
<p>RM RS A Basic Type</p> 	<p>Order Code : RSA - M 100 S X 05 / 32 -</p> <p style="font-size: small;">Type Inner Resist-No. of Lead Rated Leads-ance Element Connection Current P 13, P 14</p> <p>L Length</p>
<p>RM RS B Flexible Lead Type</p> 	<p>Order Code : RSB - M 100 S X 05 / 32 -</p> <p style="font-size: small;">Type Inner Resist-No. of Lead Rated Leads-ance Element Connection Current P 13, P 14</p> <p>L - WR-13 (ℓ)</p> <p style="font-size: x-small;">Length Lead Lead Length P 19</p>
<p>RM RS BF Armoured Lead Type</p> 	<p>Order Code : RSBF - M 100 S X 05 /</p> <p style="font-size: small;">Type Inner Resist-No. of Lead Rated Leads-ance Element Connection Current P 13, P 14</p> <p>48 - L - WR-13 (ℓ)</p> <p style="font-size: x-small;">O.D. Length Lead Insert Length P 19</p>
<p>RM RS BYS Bayonet Mount Type</p> 	<p>Order Code : RSBYS - M 100 S X 05 /</p> <p style="font-size: small;">Type Inner Resist-No. of Lead Rated Leads-ance Element Connection Current P 13, P 14</p> <p>48 - L - WR-13 (ℓ)</p> <p style="font-size: x-small;">O.D. Length Lead Insert Length P 19</p>
<p>RM RS ES Metal Connector Type</p> 	<p>Order Code RSES - M 100 S X 05 /</p> <p style="font-size: small;">Type Inner Resist-No. of Lead Rated Leads-ance Element Connection Current P 13, P 14</p> <p>48 - L - WR-13 (ℓ)</p> <p style="font-size: x-small;">O.D. Length Lead Insert Length P 19</p>



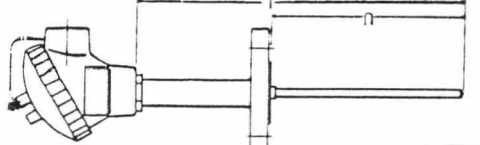
RM H
Basic Type with Terminal Box



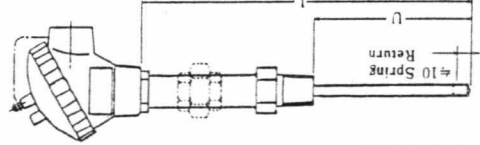
RM NB
Screwed Type



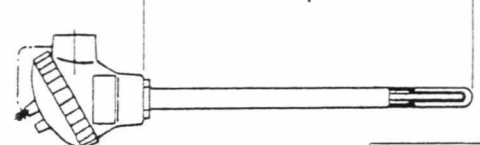
RM NF
Flanged Type



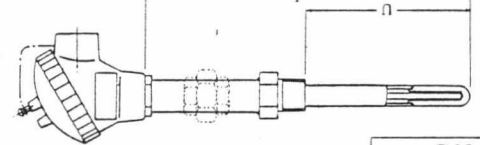
RM NS
Spring-Loaded Type (Screwed)



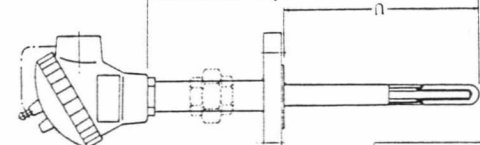
RM P
Metal Protection Tube Type



RM PB
Metal Protection Tube Type (Screwed)



RM PF
Metal Protection Tube Type (Flanged)



Order : **RSH** - M 100 S X 05 / 48 -

Type : **RM**
Lead wire length : L
Terminal Box : P11
Inner Resistor : No. of Leads
Element Connection Current : Rated
P13, P14

Order : **RSNB** - M 100 S X 05 / 48 -

Type : **RM**
Lead wire length : L
Terminal Box : P11
Inner Resistor : No. of Leads
Element Connection Current : Rated
P13, P14

Order : **RSNF** - M 1100 S X 05 / 48 -

Type : **RM**
Lead wire length : L
Terminal Box : P11
Inner Resistor : No. of Leads
Element Connection Current : Rated
P13, P14

Order : **RSNS** - M 150 S X 05 / 48 -

Type : **RM**
Lead wire length : L
Terminal Box : P11
Inner Resistor : No. of Leads
Element Connection Current : Rated
P13, P14

Order : **RSP** - M 100 S X 05 / 48 -

Type : **RM**
Lead wire length : L
Terminal Box : P11
Inner Resistor : No. of Leads
Element Connection Current : Rated
P13, P14

Order : **RSPB** - H 100 S X 05 / 48 -

Type : **RM**
Lead wire length : L
Terminal Box : P11
Inner Resistor : No. of Leads
Element Connection Current : Rated
P13, P14

Order : **RSPF** - M 100 S X 05 / 48 -

Type : **RM**
Lead wire length : L
Terminal Box : P11
Inner Resistor : No. of Leads
Element Connection Current : Rated
P13, P14

Order : **RSPF** - M 100 S X 05 / 48 -

Type : **RM**
Lead wire length : L
Terminal Box : P11
Inner Resistor : No. of Leads
Element Connection Current : Rated
P13, P14

In case of JPT (R₁₀₀/R₀≒1.3916), put suffix-J. Example see code RMNF and RMNS.

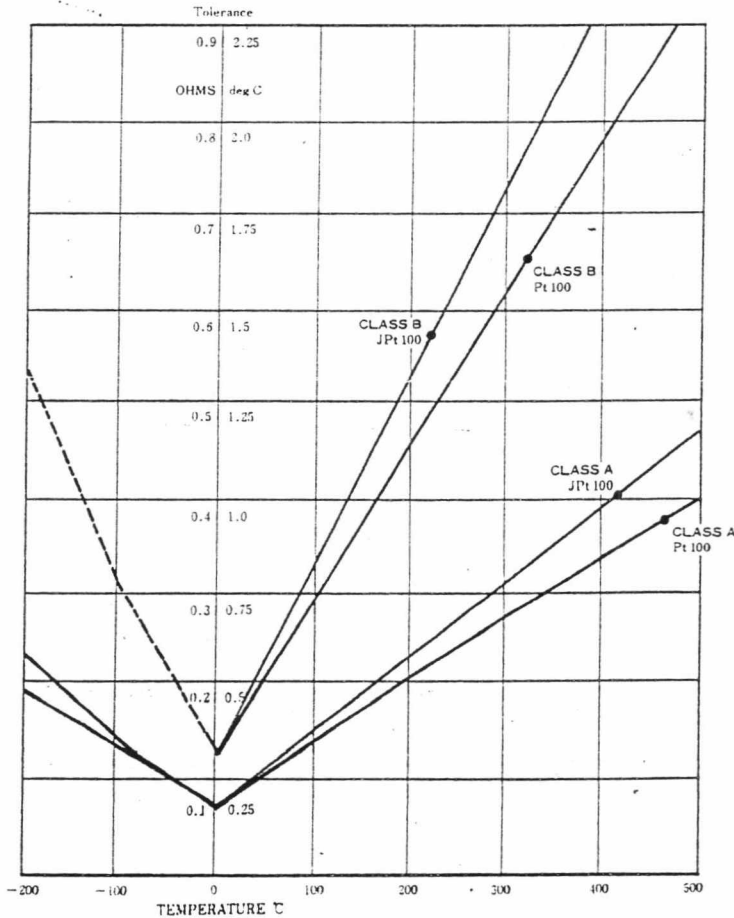
Temperature/Resistance Table

Nominal Resistance for Pt 100Ω Element

Pt100 : $R_0=100.00\Omega$ $R_{100}/R_0=1.3850$ to JIS-C 1604-1989, IEC 751, BS 1904, DIN 43760.
 JPt100 : $R_0=100.00\Omega$ $R_{100}/R_0=1.3916$ to JIS C 1604-1981, American Curve.

Std. t	Pt100	JPt100	Std. t	Pt100	JPt100	Std. t	Pt100	JPt100	Std. t	Pt100	JPt100	Std. t	Pt100	JPt100
-200	18.49	17.14	0	100.00	100.00	200	175.84	177.13	400	247.04	249.56	600	313.59	
-190	22.80	21.46	10	103.90	103.97	210	179.51	180.86	410	250.48	253.06	610	316.30	
-180	27.08	25.80	20	107.79	107.93	220	183.17	184.58	420	253.90	256.55	620	319.99	
-170	31.32	30.12	30	111.67	111.88	230	186.82	188.29	430	257.32	260.02	630	323.18	
-160	35.53	34.42	40	115.54	115.81	240	190.45	191.99	440	260.72	263.49	640	326.35	
-150	39.71	38.68	50	119.40	119.73	250	194.07	195.67	450	264.11	266.94	650	329.51	
-140	43.87	42.91	60	123.24	123.64	260	197.69	199.35	460	267.49	270.38	660	332.66	
-130	48.00	47.11	70	127.07	127.54	270	201.29	203.01	470	270.86	273.80			
-120	52.11	51.29	80	130.89	131.42	280	204.88	206.66	480	274.22	277.22			
-110	56.19	55.44	90	134.70	135.30	290	208.45	210.30	490	277.56	280.63			
-100	60.25	59.57	100	138.50	139.16	300	212.02	213.93	500	280.90	284.02			
-90	64.30	63.68	110	142.29	143.01	310	215.57	217.54	510	284.22	287.40			
-80	68.33	67.77	120	146.06	146.85	320	219.12	221.15	520	287.53				
-70	72.33	71.85	130	149.82	150.67	330	222.65	224.74	530	290.83				
-60	76.33	75.91	140	153.58	154.49	340	226.17	228.32	540	294.11				
-50	80.31	79.96	150	157.31	158.29	350	229.67	231.89	550	297.39				
-40	84.27	83.99	160	161.04	162.08	360	233.17	235.45	560	300.65				
-30	88.22	88.01	170	164.76	165.86	370	236.65	238.99	570	303.91				
-20	92.16	92.02	180	168.46	169.63	380	240.13	242.53	580	307.15				
-10	96.09	96.02	190	172.16	173.38	390	243.59	246.05	590	310.38				

Tolerances as a Function of Temperature / Resistance for Pt 100Ω Element



หนังสืออ้างอิง

Principles of Measurement Systems , John P. Bentley

The 8051 Microcontroller , Kenneth J.Ayala , West Publishing Company , 1990

Steoping Motors and their Microprocessor Controls ,Takashi Kenjo , 1990

เอกสารการสอนวิชาเครื่องมือและการวัดทางฟิสิกส์ , ผศ.ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย

การประชุมวิชาการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 , บทความย่อ ,
วิจิต ศรีโชติ , 2532

คอมพิวเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์เวิร์ลด์ ฉบับที่ 142 , บทความ , "เครื่องจักรกลแบบดิจิทัล" , สำนัก
พิมพ์ ดวงกมล , 2537