ข้อมูลข่าวสารของกรมวิทยาศาสตร์บริการ
ตาม พ.ร.บ. ข้อมูลข่าวสารของราชการ พ.ศ. 2540

วศ กฟ
ว43

เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง

นักวิทยาศาสตร์ 7ว

การออกแบบและสร้างแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานขนาด 10 โวลต์

โดย

นายวันชัย ชินชูศักดิ์
นักวิทยาศาสตร์ 6ว

กลุ่มสอบเทียบเครื่องมือวัด วิเคราะห์ ทดสอบ
กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง

นักวิทยาศาสตร์ 7ว

การออกแบบและสร้างแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานขนาด 10 โวลต์

เลขหมู่ วศ กฟ
อว 43
เลขทะเบียน 11596
วันที่ 16 ธ.ค. 46

โดย

นายวันชัย ชินชูศักดิ์

นักวิทยาศาสตร์ 6ว

ด้วยอภินันทนาการ
จาก
วศ.

กลุ่มสอบเทียบเครื่องมือวัด วิเคราะห์ ทดสอบ

กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จะนำเสนอการออกแบบและสร้างชุดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานในระดับใช้งานขนาด 10 โวลต์ สำหรับใช้กับเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานที่มีค่าผิดพลาดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเนื่องจากความร้อนหรือเทอร์มัลอีเอ็มเอ็ฟต่ำ ในการออกแบบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานระดับใช้งานชนิดซีเนอร์ไดโอดนี้เน้นเทคนิคการควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบสองชั้นที่ให้ปริมาณกระแสเอาท์พุทต่ำ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ามีความคงที่สม่ำเสมอและความเที่ยงตรงสูง ที่มีความเสถียรภาพดีกว่า 0.01% หรือ 100 พีพีเอ็ม/เดือน ซึ่งเหมาะสำหรับใช้กับเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน นอกจากนี้สามารถใช้เป็นชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานระดับใช้งานสำหรับห้องปฏิบัติการสอบเทียบทางไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมได้อีกด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
สารบัญตาราง	III
สารบัญรูป	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ปัญหาและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย	2
1.4 ระยะเวลาของการศึกษาวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 การออกแบบและหลักการทำงาน	4
2.1 การออกแบบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐาน	4
2.2 การออกแบบวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าขาออก	4
2.3 การออกแบบและหลักการทำงานชุด MET-10VDC	7
บทที่ 3 การสร้างและการสอบเทียบเครื่องมือ	9
3.1 เครื่องมือ/อุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบ สร้างและสอบเทียบ ชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน	9
3.2 ทดสอบเสถียรภาพของชุด MET-10VDC	9
3.3 การสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์และชุดจ่ายไฟแบบควบคุมแรงดัน ด้วยชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน	10
บทที่ 4 ผลการทดลอง	12
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	15
5.1 สรุปผล	15
5.2 ข้อเสนอแนะ	15
กิตติกรรมประกาศ	16
เอกสารอ้างอิง	17
ภาคผนวก ก การหาค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน	18
ภาคผนวก ข รูปแสดงตารางข้อมูลวงจรชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน และการเชื่อมต่อวงจรขณะทดสอบ	21

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อกำหนดลักษณะพารามิเตอร์ของอ็อปแอมป์ในอุดมคติและตัวอย่างทั่วไป	6
ก.1 แหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน	20
ข.1 ผลการทดสอบเสถียรภาพMET-10VDC	21
ข.2 ผลการทดสอบชุด Voltage Regulator	22
ข.3 ผลการทดสอบ Digital Voltmeters	23
ข.4 ผลค่า Repeatability MET-10VDC	24

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	วงจรพื้นฐานของไอซีแรงดันอ้างอิงมาตรฐาน	4
2.2	วงจรอ็อปแอมป์แบบ voltage follower และวงจรเทียบเท่า	5
2.3	โครงสร้างภายในและวงจรแบบนอนอินเวอร์ติ้งของไอซี LM 336	6
2.4	การออกแบบส่วนของแรงดันอ้างอิงแบบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน	7
2.5	วงจรชุดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานระดับใช้งานขนาด 10 โวลต์ แบบซีเนอร์ไดโอด	8
3.1	แผนผังการเชื่อมต่อชุดแรงดันไฟฟ้าเข้ากับเครื่อง AVSC เพื่อทดสอบเสถียรภาพกับชุด DC Voltage Calibrator	10
3.2	การสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ด้วยชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานกับเครื่อง AVSC	10
3.3	การสอบเทียบโวลเตจเร็กกูเลเตอร์กับชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานกับเครื่อง AVSC	11
4.1	ความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน (MET-10VDC)	12
4.2	ความสามารถในการวัดซ้ำของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน(MET-10VDC)	13
4.3	ค่าผิดพลาดของการสอบเทียบ UUT1,UUT2 และUUT3	13
4.4	ค่าผิดพลาดของการสอบเทียบโวลเตจเร็กกูเลเตอร์	13
ข.1	การเชื่อมต่อชุดสอบเทียบแรงดันไฟฟ้า(VDC Calibrator) ชุดแรงดันไฟฟ้า MET-10VDC และดิจิตอลโวลต์มิเตอร์กับเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบมัลติแซนแนล	25

บทที่ 1
บทนำ

จากการออกแบบเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบมัลติแชนแนล (Multi-Channel Automated Voltage Standard Comparison Equipment : AVSC)[1] ที่มีค่าเทอร์มัลอีเอ็มเอ็ฟต่ำซึ่งใช้เป็นเครื่องมือเปรียบเทียบ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานที่มีความแม่นยำเที่ยงตรงสูงกว่ากับชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานที่มีความแม่นยำเที่ยงตรงต่ำกว่าหรือมาตรฐานระดับใช้งาน (working standard) งานวิจัยฉบับนี้จะนำเสนอการออกแบบชุดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานระดับใช้งานขนาด 10 โวลต์ (10 DC voltage working standard : MET-10VDC) แบบซีเนอร์ไดโอด ซึ่งมีเสถียรภาพดีกว่า ± 0.01% หรือ ± 100 พีพีเอ็ม/เดือน เพื่อใช้สอบเทียบมาตรฐานและตรวจสอบค่าผิดพลาดเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าสำหรับใช้ประจำห้องปฏิบัติการทั่วไปและงานที่ต้องการความถูกต้องไม่สูงมากคือมีความแม่นยำตั้งแต่ ± 100 พีพีเอ็ม(± 0.01%) ขึ้นไปได้แก่ เครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง(ดิจิตอลโวลต์มิเตอร์) ขนาดตัวเลขแสดงผล 3½ หลัก ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมีค่าความแม่นยำตั้งแต่ ± 1000 พีพีเอ็มหรือมากกว่า ± 0.10% และแบบอนาล็อคโวลต์มิเตอร์มีค่าความแม่นยำมากกว่า ± 2%

1.1 ปัญหาและที่มาของการวิจัย

การสอบเทียบเครื่องวัดทางไฟฟ้าเป็นขบวนการการสอบกลับมาตรฐานทางไฟฟ้า (Traceability of Electrical Standard) ของเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไปยังมาตรฐานระดับที่สูงกว่าของห้องปฏิบัติการยังมีปัญหาว่าลำดับขั้นตอนการตรวจสอบก่อนที่จะนำเครื่องมือวัดไปใช้นั้นค่อนข้างยุ่งยากและขั้นตอนแนวคิดที่น่าสนใจหนึ่งก็คือการทวนสอบ(Verification) ซึ่งเป็นกิจกรรมหนึ่งในระบบตรวจสอบคุณภาพของห้องปฏิบัติการเพื่อยืนยันความถูกต้อง เนื่องจากการทวนสอบเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการเป็นสิ่งจำเป็นที่ควรกระทำอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือหรือเป็นการเสริมความเชื่อมั่นและยืนยันความถูกต้องของเครื่องมือก่อนที่จะนำไปใช้ในการสอบเทียบหรือทดสอบ การออกแบบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานระดับใช้งานให้กับห้องปฏิบัติการจะสามารถช่วยทำให้การทวนสอบเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าสะดวกและมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษา พัฒนาเทคโนโลยีการวัดปริมาณทางด้านไฟฟ้า การสอบเทียบความถูกต้องของเครื่องมือ/อุปกรณ์วัดทางไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาวิธีการถ่ายทอดความถูกต้องให้กับเครื่องมือ/อุปกรณ์วัดทางไฟฟ้าในแต่ระดับชั้นของความถูกต้องจากสูงลงมาระดับต่ำ

3. ประยุกต์และเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องมือ/อุปกรณ์วัดทางไฟฟ้าให้มีประโยชน์สูงสุด
4. เป็นแนวทางที่จะนำไปสู่การจัดทำเครื่องมือ/อุปกรณ์ทางด้านการสอบเทียบและการวัดทางด้านไฟฟ้าให้มีความแม่นยำเที่ยงตรงสูงต่อไป

1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

1. ศึกษาถึงการออกแบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานขนาด 10 โวลต์ที่มีความเสถียรภาพ ± 100 พีพีเอ็ม/เดือน
2. ศึกษาถึงวิธีการที่เกี่ยวข้องในการสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐาน

1.4 ระยะเวลาของการศึกษาวิจัย

ใช้เวลาในการวิจัย 10 เดือน (ปีงบประมาณ 2544) ตั้งแต่ มกราคม 2544 จนถึง ตุลาคม 2544

1.5 ขั้นตอนการดำเนินการ

ตารางแสดงระยะเวลาในการดำเนินการ

รายการดำเนินการ	ช่วงระยะเวลาการดำเนินการวิจัย									
ปีงบประมาณ 2544	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค	มิ.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค
รวบรวมเอกสารทางวิชาการ	▨	▨								
ศึกษาหลักการจากเอกสารอ้างอิง			▨	▨	▨					
ดำเนินการจัดเตรียมอุปกรณ์					▨	▨				
เก็บข้อมูลการศึกษาทดลอง							▨	▨	▨	
เขียนรายงานการศึกษาทดลอง									▨	▨
ตรวจสอบแก้ไขคำผิดและข้อบกพร่องรวมทั้งเพิ่มเติมเนื้อหาให้มีความสมบูรณ์										▨

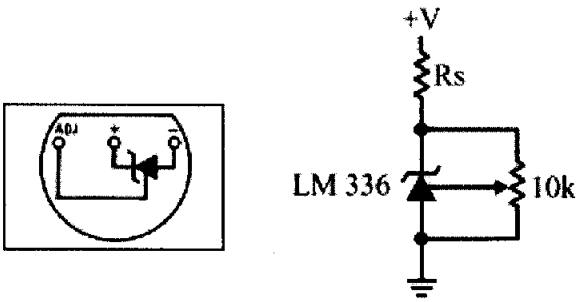
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. เป็นแนวทางในการศึกษาการสอบย้อนกลับแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน
2. ทำให้เครื่องมือวิเคราะห์ ทดสอบภายในห้องปฏิบัติการมีความถูกต้องส่งผลต่อการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพการผลิตของโรงงาน
3. เพื่อลดปัญหาการส่งเครื่องมือทางด้านมาตรวิทยาของโรงงานอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการในประเทศไปสอบเทียบยังต่างประเทศ
4. เพื่อเผยแพร่ความรู้ให้เกิดการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมของประเทศ

บทที่ 2
การออกแบบและหลักการทำงาน

2.1 การออกแบบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐาน

วงจรแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐานนับว่าเป็นส่วนสำคัญของเครื่องชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานเป็นอย่างมากเพราะเป็นวงจรที่ให้กำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐานที่มีเสถียรภาพ 20 พีพีเอ็ม การออกแบบชุดให้กำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐานในงานวิจัยฉบับนี้ใช้วงจรรวมชนิดซีเนอร์ไดโอด รายละเอียด คุณลักษณะเฉพาะและโครงสร้างวงจรภายในของไอซี LM336[2] ดังนั้นเสถียรภาพจะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ประกอบด้วยซีเนอร์ไดโอดแบบวงจรรวมไอซี LM336 ที่ให้กำเนิดแรงดัน 5 โวลต์ แต่ในทางปฏิบัติจะสามารถปรับแรงตกคร่อมวงจรรวมได้ตั้งแต่ 4 จนถึง 6 โวลต์ โดยการปรับโพเท็นชิโอมิเตอร์ (potentiometer) ปรับค่าได้ขนาด 10 กิโลโอห์มจำนวน 25 รอบโดยแรงดันตกคร่อมที่ตัวต้านทาน 10 กิโลโอห์มประมาณ 4 - 6 โวลต์ กระแส 1 มิลลิแอมป์ สามารถปรับแรงดันตกคร่อมที่ตัวกำเนิดแรงดันอ้างอิงไอซี IC2 ให้ได้แรงดันอ้างอิงที่ต้องการ



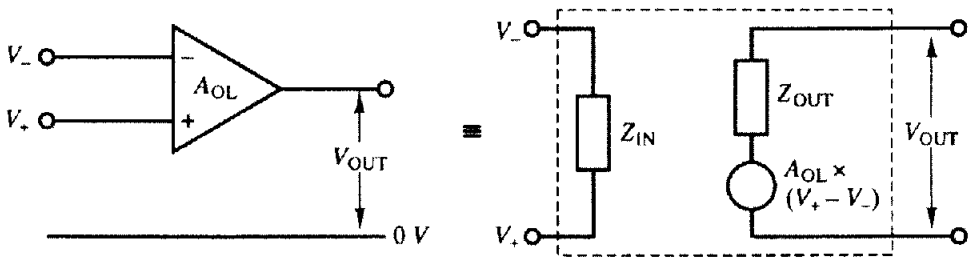
รูปที่ 2.1 วงจรพื้นฐานของไอซีแรงดันอ้างอิงมาตรฐาน

2.2 การออกแบบวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage Amplifier)

แรงดันขาออก (Output) แบบโหมดต่างและแบ่งแรงดัน (Divider) วงจรชุดขยายแรงดันขาออกเป็นวงจรที่ทำการขยายแรงดันที่ได้จากชุดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐานโดยเพิ่มขึ้นด้วยอัตราขยายเป็นสองเท่า ซึ่งวงจรนี้จะประกอบด้วยภาคขยายจำนวน 1 ชุดได้แก่ 10 โวลต์

การวัดทางอิเล็คทรอนิกส์ (Electronics Measurement) ความแตกต่างระหว่างเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าแบบเก่ากับแบบใหม่และเครื่องมือแบบต่างๆ ก็คือเครื่องมือแบบใหม่ทำจากอุปกรณ์ประเภทอ็อปแอมป์และไมโครโปรเซสเซอร์ที่ควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ประเภทอ็อปแอมป์ที่ใช้ในการรวมผลทางคณิตศาสตร์ บวก ลบ คูณ หาร ในการคำนวณแบบอนาล็อค ต่อมาในปี 1960 ได้นำมาใช้ในอุปกรณ์วัดความถี่ต่ำ ชุดขยายสัญญาณ และ

บัพเฟอร์ วงจรพื้นฐานในการประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ ประเภทThe inverted current feedback amplifier และประเภท voltage follower ดังรูปที่ 2.2 เป็นวงจรพื้นฐานอ็อปแอมป์ เมื่อเกรนของการวัดจะหาได้จากอัตราส่วนค่าตัวต้านทานอินพุท(Rin) และป้อนกลับ(Rf) กำลังขยายปราศจากการป้อนกลับก็จะมีกำลังขยายเข้าสู่อินฟินิตี้ กำลังขยายด้วยตัวป้อนกลับติดลบจะได้ว่า –Rf/Rin จุดประสงค์หลักๆของวงจรนี้ก็คือปรับเกรนให้เที่ยงตรง วงจรนี้ไม่ใช้ชุดขยายแรงดันในอุดมคติเพราะว่า Rin จะดึงกระแสจากอินพุทเป็นเหตุทำให้เกิดค่าผิดพลาด แต่อย่างไรก็ตามสามารถที่จะกำหนด กระแสป้อนกลับให้กำลังขยายของ voltage follower เท่ากับ 1 + Rf / Rin ซึ่งมีอินพุทอิมพิแดนซ์สูงกว่าที่ใช้สำหรับการทำวงจร Scaling, Integration, differentiation และ log-antilog



รูปที่ 2.2 วงจรอ็อปแอมป์แบบ voltage follower และวงจรเทียบเท่า

อ็อปแอมป์ (operational amplifier) หลักการทำงานของอ็อปแอมป์ (The ideal operational amplifier)ได้รับการออกแบบให้เป็นวงจรขยายแบบวงจรอินทิเกรทเพื่อขยายสัญญาณจาก กระแสตรงไปจนถึงสัญญาณความถี่หลายๆกิโลเฮิร์ต อ็อปแอมป์โดยปกติจะไม่สามารถทำงานได้ด้วยตัวของมันเองแต่มันจำเป็นต้องได้รับการป้อนกลับจากอุปกรณ์โครงข่ายภายนอก สร้างสัญญาณที่มีความแม่นยำเที่ยงตรงซึ่งจะขึ้นอยู่กับชุดอุปกรณ์ป้อนกลับสัญญาณด้วย โดยทั่วไปอ็อปแอมป์จะมีอินพุทอยู่สองอินพุทกับหนึ่งเอาท์พุทด้วยกัน แรงดันที่ขั้วเอาท์พุทจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างระหว่างแรงดันที่ขั้วอินพุท รูปที่ 2.2 แสดงสัญลักษณ์วงจรและวงจรเทียบเท่าของอ็อปแอมป์ ตารางที่ 2.1 ได้สรุปลักษณะสำคัญของอ็อปแอมป์ในอุดมคติ

ถ้าเราสมมติให้อ็อปแอมป์มีพฤติกรรมเป็นแบบอุดมคติ เราสามารถคำนวณค่าอุปกรณ์โครงข่ายโดยพิจารณาอย่างง่ายๆ ผลการคำนวณเหล่านี้สามารถดัดแปลงได้หากว่าจำเป็นที่นำไปใช้ในลักษณะไม่ใช่อ็อปแอมป์ทางอุดมคติในทางปฏิบัติจริง

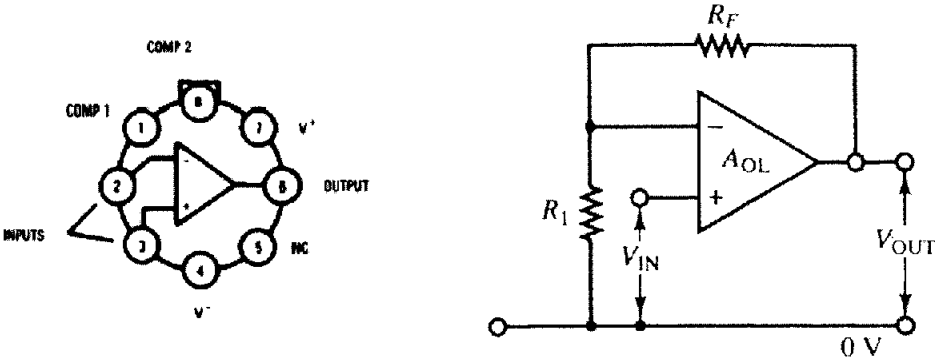
รูปที่ 2.3 แสดงวงจรอ็อปแอมป์ซึ่งใช้ในการออกแบบวงจรของวิจัยนี้รวมถึงชุดอุปกรณ์โครงข่ายประกอบและลักษณะที่เปลี่ยนแปลงได้มาจากสองเงื่อนไขดังนี้

$$[i_- = i_+ = 0] \text{ และ } [V_- = V_+] \qquad (2.1)$$

จากสมการที่ 2.1 เงื่อนไขที่สองผลลัพธ์จากการสมมติว่า $A_{OL} \rightarrow \infty$:เพราะว่า $V_{OUT} = A_{OL}(V_+ - V_-)$และ V_{OUT} เป็นปริมาณที่วัดได้ ต่อมาเราจะได้ว่าแรงดันต่าง$(V_+ - V_-) \rightarrow 0$ เช่น $V_+ = V_-$เราสามารถอธิบายการใช้เงื่อนไขที่ได้มาจากเปลี่ยนแปลงลักษณะ (transfer characteristics)

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดลักษณะพารามิเตอร์ของอ็อปแอมป์ในอุดมคติและตัวอย่างทั่วไป[3]

Parameter	Ideal op-amp	Typical op-amp
D.C. open loop gain (A_{OL})	∞	100 dB(10^5)
Input impedance (Z_{IN})	∞	2MΩ
Output impedance (Z_{OUT})	0	75Ω
Input offset voltage (V_{OS})	0	1 mV
Temp. coeff. Of input offset voltage(γ)	0	5 μV °C^{-1}
Input bias current (i_B)	0	80 nA
3 dB bandwidth 0 to (f_B)	0 to ∞	0 to 10 Hz
Common mode rejection ratio(*CMRR*)	∞	90 dB



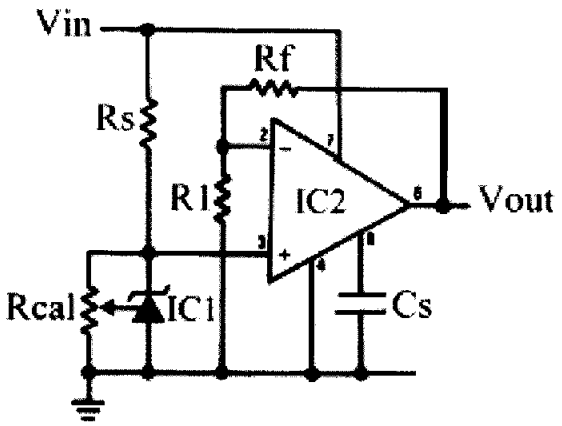
รูปที่ 2.3 โครงสร้างภายในและวงจรแบบนอนอินเวอร์ติ้งของไอซี LM 336

การใช้อ็อปแอมป์ขยายแบบนอนอินเวอร์ติ้ง(Non- inverting amplifier) ออกแบบวงจรขยายแรงดันแบบนอนอินเวอร์ติ้งจากรูปที่ 2.3 อัตราขยายที่เอาท์พุทเป็นไปตามสมการที่ 2.2

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = 1 + \frac{R_F}{R_1} \qquad (2.2)$$

โดยค่า R_F : ค่าความต้านทานป้อนกลับ

R_1: ค่าความต้านทานที่อินพุท



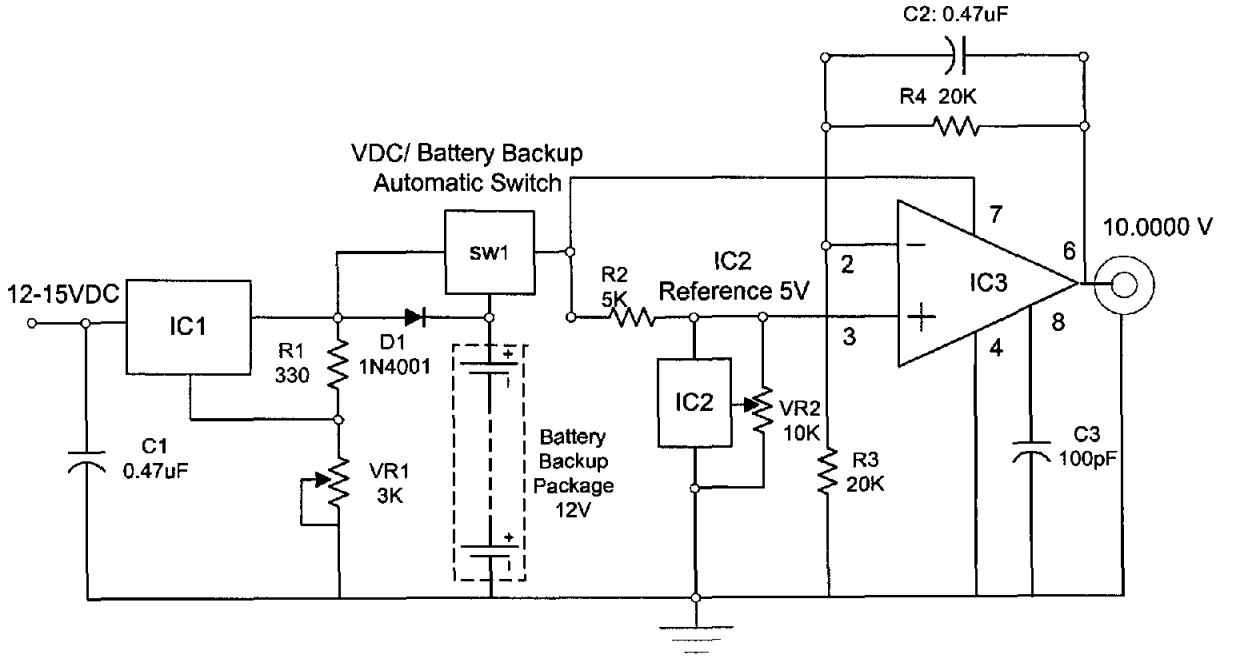
รูปที่ 2.4 การออกแบบส่วนของแรงดันอ้างอิงแบบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

ชุดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานแบบซีเนอร์ไดโอด ดังรูปที่ 2.4 ใช้เทคนิคการควบคุมแรงดันแบบสองชั้น เริ่มที่แรงดันไฟฟ้าอินพุท Vin คงที่ ป้อนให้กับภาคกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง IC1 โดยผ่านตัวต้านทานจำกัดกระแส Rs แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวไอซีกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง IC1 จะถูกปรับระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยตัวต้านทาน Rcal ให้อยู่ในช่วง 4 – 6 โวลต์ เพื่อป้อนเข้าสู่ขานอนอินเวอร์ติ้งของไอซีภาคขยายแรงดันไฟฟ้าขาออก IC2 ซึ่งต่อแบบทวีแรงดันเพิ่มเป็นสองเท่าตามอัตราส่วนของตัวต้านทาน RF/R1 เมื่อต้องการกำหนดแรงดันไฟฟ้าขาออกก็จะต้องปรับระดับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ IC1ให้ได้เท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าขาออก Vout

2.3 การออกแบบและหลักการทำงานชุด MET-10VDC

ชุดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานขนาด 10 โวลต์ แบบซีเนอร์ไดโอด(MET-10VDC) ดังรูปที่ 2.5 ใช้เทคนิคการควบคุมแรงดันแบบสองชั้นประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญดังนี้ ส่วนแรกเป็นชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้าหรือโวลเตจเร็กกูเลเตอร์ (Voltage Regulator) ซึ่งทำหน้าที่เป็นทั้งชุดป้อนแรงดันไฟฟ้าคงที่ให้กับภาคกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง(IC2) ภาคขยายแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท(IC3) และนอกจากนี้ยังทำหน้าที่ประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ที่ใช้เป็นชุดไฟฟ้าสำรองอีกด้วย โดยใช้ไอซี IC1 เบอร์ LM317T ทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ขนาด 12.0 โวลต์ โดยต่อร่วมกับตัวต้านทาน R1 ชนิดเมตัลฟิล์ม (Metal film) มีค่าผิดพลาด ± 1% ตัวต้านทานปรับค่าได้ VR1 มีค่าความต้านทาน 3 กิโลโอห์มชนิดปรับละเอียดได้ 15 รอบแบบมัลติเทอร์น (multi-turn) ใช้ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าให้ได้ขนาด 12 โวลต์ ที่มีค่าผิดพลาดในช่วง ±1% หรือดีกว่า ส่วนที่สองเป็นชุดกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงประกอบด้วย R2 ค่าความต้านทาน 5 กิโลโอห์มค่าผิดพลาด ± 1% ป้อนกระแสไฟฟ้าขนาด 1 มิลลิแอมป์ให้กับ IC2 ใช้ไอซีเบอร์ LM336 ซึ่งเป็นชุดกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงขนาด 5 โวลต์ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิประมาณ 20 พีพีเอ็ม/ปี ที่อุณหภูมิ (25 ± 0.1) องศาเซลเซียส ให้แรงดันไฟฟ้าที่มีความเที่ยงตรงอย่างต่อเนื่องถึง ± 0.05% ต่อปี หรือดี

กว่าวงจรในรูปที่ 2.5 สามารถออกแบบให้ปรับแรงดันไฟฟ้าได้ในช่วง 4 – 6 โวลต์ ด้วยตัวต้านทาน VR2 มีค่าความต้านทาน 10 กิโลโอห์ม ชนิดปรับละเอียดได้ 15 รอบ ซึ่งจะมีผลทำให้อินพุทของตัวกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมีความเสถียรภาพต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขนาดต่างๆได้ดี และส่วนที่สามเป็นภาคขยายแรงดันเอาท์พุทประกอบด้วย IC3 ใช้ไอซีอ็อปแอมป์เบอร์ LM308H ที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงขนาด 5.0 โวลต์ จาก IC2 และต่อแบบทวีแรงดันไฟฟ้าให้ออกเป็นสองเท่าของแรงดันขาเข้าด้วยตัวต้านทาน R3 และ R4 มีค่าความต้านทานเท่ากันขนาด 20 กิโลโอห์ม ชนิดเมตัลฟิล์มมีค่าผิดพลาด ± 1% ต่อกันเป็นอัตราส่วน R3/R4 ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าออกมาที่ขา 6 ของ IC3 ได้เป็น 10.0000 โวลต์ มีกระแสออกต่ำกว่า 10 มิลลิแอมป์ส่วนการกรองสัญญาณรบกวนนั้นใช้ตัวเก็บประจุ C2 ค่า 0.47 ไมโครฟารัด ต่อคร่อมกับตัวต้านทาน R4 ป้อนกลับ (feedback) และด้วยคุณลักษณะเฉพาะของไอซีอ็อปแอมป์นี้จึงไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์พวกไบโพล่ามาต่อพ่วงและความเสถียรภาพสูงของอ็อปแอมป์ทำให้มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าอ็อปแอมป์ทั่วไป ดังนั้นค่าตัวต้านทานป้อนกลับจึงต้องมีค่าสูงกว่าปกติ สิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง ของวงจรนี้ก็คือไม่ควรต่อเข้ากับโหลดที่มีอิมพิแดนซ์ต่ำกว่า 10 กิโลโอห์ม และนอกจากนี้ยังมีชุดไฟฟ้าสำรอง (battery backup) ขนาด 12 โวลต์จ่ายให้กับ IC2 และ IC3 เพื่อการทำงานเป็นไปอย่างต่อเนื่องอีกด้วย



รูปที่ 2.5 วงจรชุดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานระดับใช้งานขนาด 10 โวลต์แบบซีเนอร์ไดโอด

บทที่ 3
การสร้างและการสอบเทียบเครื่องมือ

การทดสอบชุดMET-10VDC นี้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรกเป็นการทดสอบเสถียรภาพ (stability) กับเครื่องสอบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC voltage calibrator) โดยใช้ชุดMET-10VDCร่วมกับเครื่อง AVSC พิจารณาหาค่าผิดพลาด (error) และค่าการวัดซ้ำ (repeatability) ขั้นตอนที่สองเป็นการสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ (DVM) หรือเรียกว่า Unit Under Test : UUT และชุดจ่ายแรงดันชนิดควบคุมแรงดันไฟฟ้าหรือโวลเตจเร็กกูเลเตอร์กับชุด MET-10VDC ด้วยเครื่อง AVSC ดังรายละเอียดที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

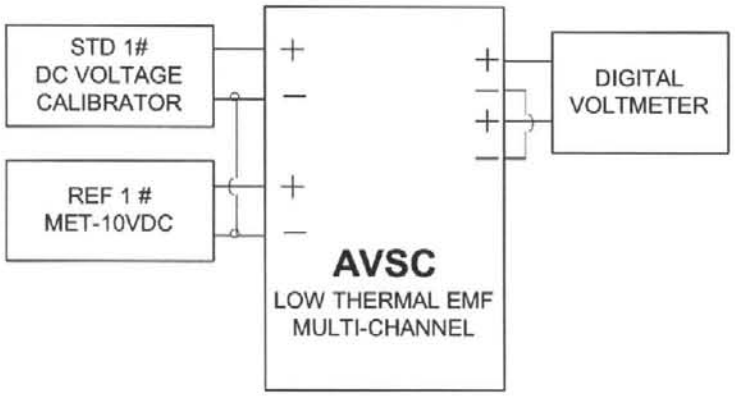
3.1 เครื่องมือ/อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างและสอบเทียบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

- เครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า (AVSC)
- ชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน (MET-10VDC)
- DC Voltage calibrator (Fluke 5500A)
- Digital Voltmeter (HP 3458A)

3.2 ทดสอบเสถียรภาพของชุด MET-10VDC

เริ่มจากวงจรการทำงานร่วมกันระหว่างชุดMET-10VDC กับเครื่องAVSC ดังรายละเอียดรูปที่ ข.1 ภาคผนวก ข เป็นการทดสอบเสถียรภาพโดยพิจารณาจากค่าผิดพลาดและค่าการวัดซ้ำ ด้วยวิธีการเปรียบเทียบกับชุดสอบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน(DC voltage calibrator) ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ Fluke รุ่น 5500A[4] ที่ขนาดแรงดัน 10 โวลต์ ความไม่แน่นอน ± 13 พีพีเอ็ม ต่อเข้ากับเทอร์มินัลของเครื่องAVSC ดังแผนผังรูปที่ 3.1 และทำการวัดจำนวน 20 ครั้งช่วงระยะเวลา 1 เดือนโดยวัดอย่างต่อเนื่องทั้งแบบขั้วปกติ(forward : FWD) และวัดแบบกลับขั้ว (reverse : REV) แล้วจดบันทึกผลการสอบเทียบ สิ่งสำคัญก่อนที่จะทำการทดสอบเสถียรภาพชุดMET-10VDC นั้นให้ใช้ดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ที่อ่านได้ละเอียดถึง 5½ หลัก หรือดีกว่า ปรับตั้งที่ตัวต้านทาน VR2 ของชุดMET-10VDC ให้แรงดันเอาท์พุทขา 6 ของ IC3 อ่านได้ 10.0000 โวลต์(ให้อ่านได้ละเอียดถึง 100 ไมโครโวลต์)หรือดีกว่า และเพื่อให้มีเสถียรภาพมากขึ้นควรเลือกทำตามคำแนะนำดังนี้

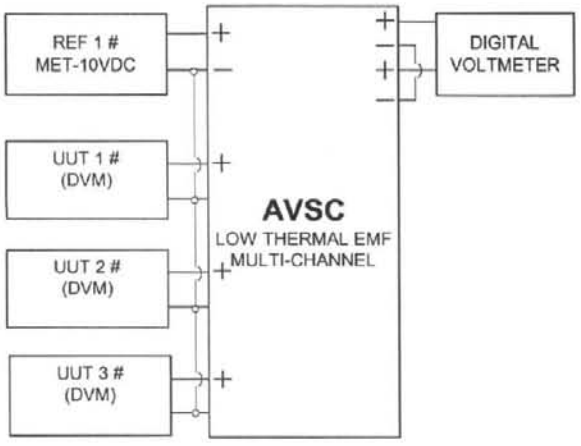
1. สอบเทียบกับชุดแรงดันกระแสตรงมาตรฐานจากห้องปฏิบัติการระดับทุติยภูมิ(secondary standard laboratory) เพื่อปรับให้ได้ค่าแรงดันให้ดีกว่า ± 100 ไมโครโวลต์ ที่อุณหภูมิ 20 ± 1 องศาเซลเซียส
2. ใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีความละเอียดอ่านได้ 5 ½ หลัก เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าให้ดีกว่า ± 100 ไมโครโวลต์ ที่อุณหภูมิ 20 ± 1 องศาเซลเซียส

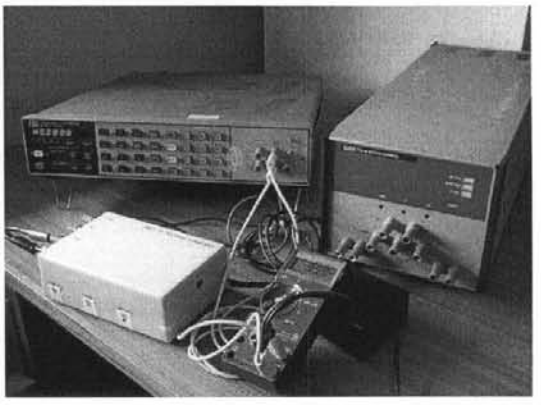


รูปที่ 3.1 แผนผังการเชื่อมต่อชุดแรงดันไฟฟ้าเข้ากับเครื่อง AVSC เพื่อทดสอบเสถียรภาพกับชุด DC Voltage Calibrator

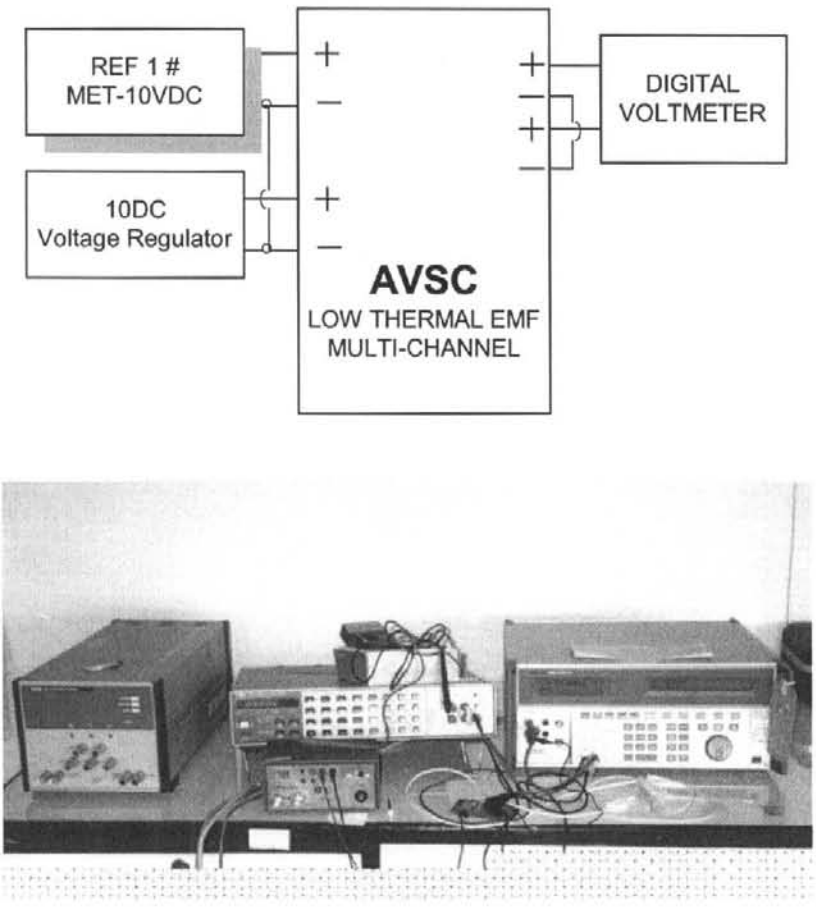
3.3 การสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์และชุดจ่ายไฟแบบควบคุมแรงดันด้วยชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

การสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ดังรูปที่ 3.2 และการสอบเทียบชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ 3.3 โดยสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์และโวลเตจเร็กกูเลเตอร์ที่ขนาดแรงดัน 10 โวลต์ ตามลำดับด้วยชุดMET-10VDC กับเครื่อง AVSC โดยวัดแบบขั้วปกติและวัดกลับขั้วเพื่อหาความผิดพลาดเฉลี่ย และค่าความไม่แน่นอน ทำเช่นเดียวกันกับในข้อ 3.1 ในการสอบเทียบนี้ให้ดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ทั้งสามเครื่องเป็น UUT1, UUT2 และUUT3 โดยลำดับ แล้วบันทึกผลการสอบเทียบเพื่อนำไปคำนวณผลค่าความผิดพลาดและค่าความไม่แน่นอนดังผลที่แสดงไว้ในข้อต่อไป





รูปที่ 3.2 การสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ด้วยชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานกับเครื่องAVSC



รูปที่ 3.3 การสอบเทียบโวลเตจเร็กกูเลเตอร์กับชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานด้วยเครื่องAVSC

บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากผลของการสอบเทียบชุดMET-10VDC ด้วยเครื่องสอบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานมาคำนวณตามสมการที่ 4.1 [5] ข้างล่างนี้

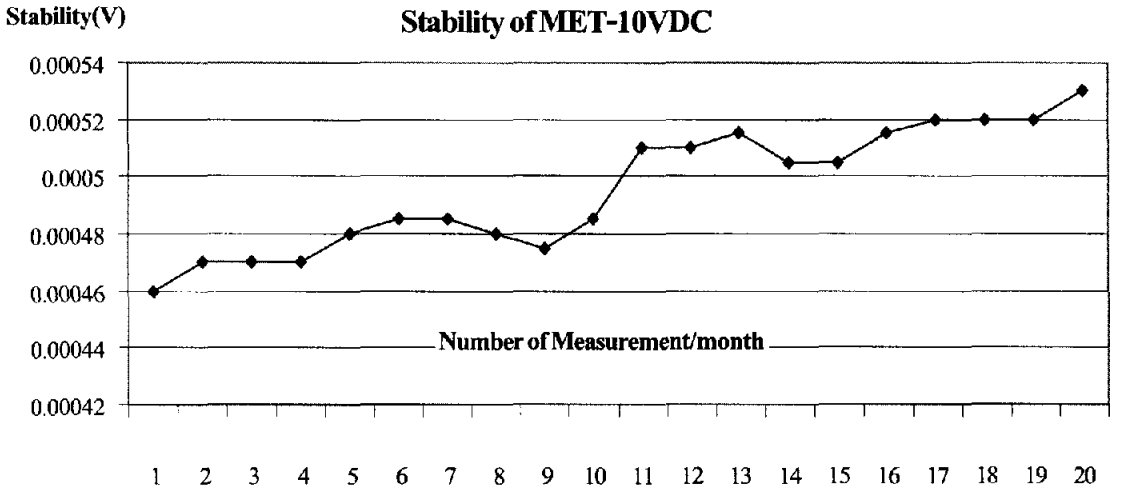
$$E_x = E_{STD} + \frac{1}{2}(E_{FWD} - E_{REV}) \qquad (4.1)$$

เมื่อ E_X : ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการวัด(โวลต์)

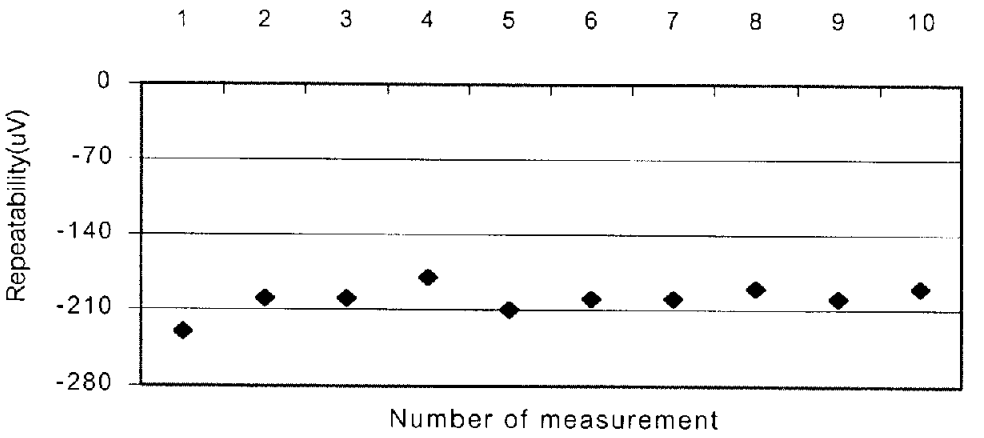
E_{STD} : ค่าแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน(โวลต์)

E_{FWD} : ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดแบบขั้วปกติ(โวลต์)

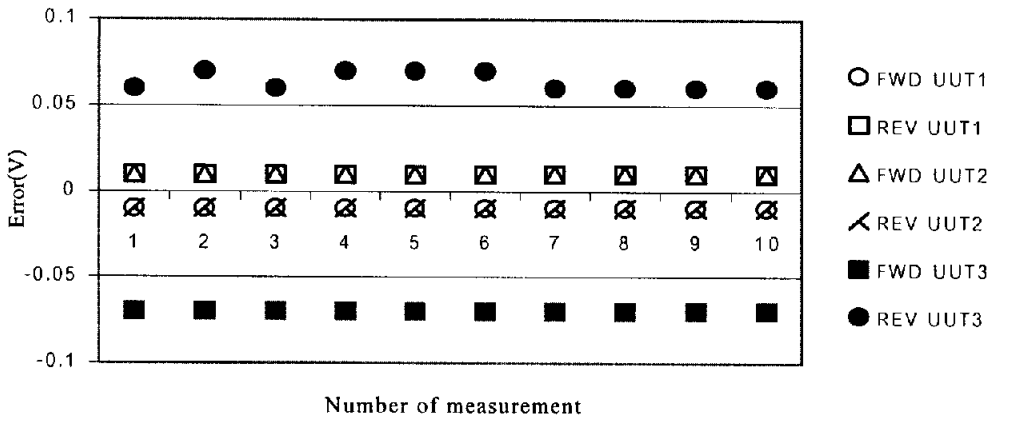
E_{REV} : ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดแบบกลับขั้ว(โวลต์)



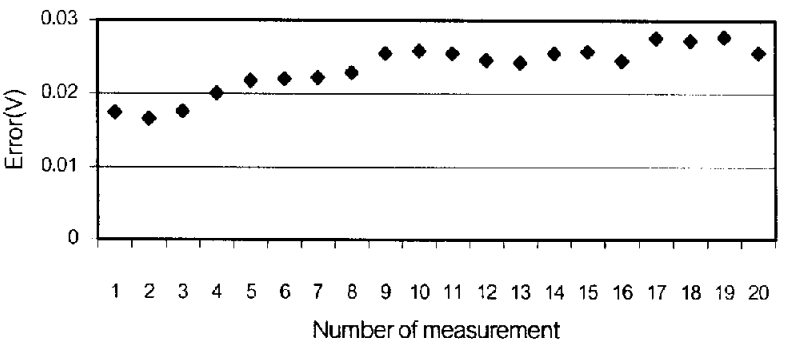
รูปที่ 4.1 ความเสถียรภาพของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน (MET-10VDC)



รูปที่ 4.2 ความสามารถในการวัดซ้ำของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน (MET-10VDC)



รูปที่ 4.3 ค่าผิดพลาดของการสอบเทียบ UUT1,UUT2 และUUT3



รูปที่ 4.4 ค่าผิดพลาดของการสอบเทียบโวลเตจเร็กกูเลเตอร์

ผลที่ได้จากคำนวณตามสมการที่ 4.1 เมื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าจากการเปรียบเทียบกับชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแล้วนำมาหาค่าผิดพลาดจากการวัดแสดงในลักษณะของความเสถียรภาพ (stability) ดังกราฟรูปที่ 4.1 แสดงความเสถียรภาพของชุดMET-10VDC ด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) เท่ากับ 2 พีพีเอ็ม ค่าสูงสุดจากการวัดแบบปกติ 43 พีพีเอ็ม และวัดแบบกลับขั้ว 64 พีพีเอ็ม ในรูปที่ 4.2 แสดงค่าความสามารถในการวัดซ้ำ (repeatability) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.3 พีพีเอ็ม ส่วนผลการสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ UUT1, UUT2 และ UUT3 ทั้งแบบขั้วปกติและแบบกลับขั้วดังรูปกราฟที่ 4.3 ค่าผิดพลาดของ UUT1 กับ UUT2 เท่ากับ 0.1% ส่วนค่าผิดพลาดของ UUT3 เท่ากับ 0.7% ค่าความไม่แน่นอน (uncertainty) ตามมาตรฐาน ISO/TAG4 [6] เท่ากับ $\pm$ 0.02 โวลต์ ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % และการสอบเทียบโวลเตจเร็กกูเลเตอร์ ดังกราฟรูปที่ 4.4 ค่าผิดพลาดเท่ากับ -0.024 โวลต์ ค่าความไม่แน่นอนของการวัดเท่ากับ $\pm$ 0.02 โวลต์ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 %

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

สรุปผลการทดสอบเสถียรภาพและความสามารถในความวัดซ้ำชุดMET-10VDC ที่เปรียบเทียบกับเครื่องสอบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง DC Voltage Calibrator พร้อมด้วยเครื่องAVSC ดังกราฟรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ตามหัวข้อที่ 4 การวัดจำนวน 20 ข้อมูล ระยะเวลาต่อเนื่อง 1 เดือน ที่สภาวะอุณหภูมิ 20 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 55 ± 5 % ค่าผิดพลาดสูงสุด ทั้งการวัดแบบขั้วปกติและแบบกลับขั้วต่ำกว่า ± 100 พีพีเอ็มหรือ ±1 มิลลิโวลต์(เปรียบเทียบกับระดับมาตรฐานใช้งานเท่ากับ ±100 พีพีเอ็ม) ที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2 พีพีเอ็ม ค่าแรงดันที่วัดได้เท่ากับ 9.99950 ± 0.00015 โวลต์

การสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ (UUT1, UUT2 และUUT3) ดังกราฟรูปที่ 4.3 ด้วยชุดMET-10VDC กับเครื่องAVSC ได้ผลสรุปดังนี้ UUT1 เท่ากับ (9.99 ± 0.02) โวลต์ UUT2 เท่ากับ (10.01 ± 0.02) โวลต์ และ UUT3 เท่ากับ (9.93 ± 0.02) โวลต์ ซึ่งเป็นไปตามที่ผู้ผลิตระบุคือ 0.4% และ1% ตามลำดับและการสอบเทียบโวลเตจเร็กกูเลเตอร์ ดังกราฟรูปที่ 4.4 ได้ค่าแรงดัน (9.98 ± 0.02) โวลต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

ชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน(MET-10VDC) จัดได้ว่าเป็นชุดแรงดันมาตรฐานในระดับใช้งานได้จากผลการทดสอบดังกล่าวข้างต้น นอกจากจะใช้เป็นชุดอ้างอิงสำหรับสอบเทียบเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการทั่วไปแล้ว ยังสามารถนำชุดMET-10VDC นี้ไปประยุกต์ใช้สอบเทียบอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิชนิดเทอร์โมคัพเปิ้ลและดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ได้ดีอีกด้วยเพราะว่าใช้หลักการสอบเทียบเช่นเดียวกับการสอบเทียบดิจิตอลโวลต์มิเตอร์

ภรมวิทยาศาสตร์บริการ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ นว.7ว จิราวรรณ ตุลาสมบัติ หัวหน้าห้องปฏิบัติการอุณหภูมิ และ นว.6ว ดิสรณ์ นบธีรานุภาพ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้า กลุ่มสอบเทียบเครื่องมือวัด วิเคราะห์ และ ทดสอบ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และสนับสนุนเครื่องมือวัดทางไฟฟ้ามาโดยตลอด จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

วันชัย ชินชูศักดิ์

เอกสารอ้างอิง

[1] W.Chinchusak, V. Tipsuwanporn, V. Kongratana and W. Piyarat, **"Multi-Channel Automated Voltage Standard Comparison Equipment"** Ladkrabang Engineering Journal, Volume 16, No. 3, September 1999.

[2] National Semiconductor, **"Data sheet of LM 336 & LM 308"** , www. National.com, June 1999.

[3] JOHN P. BENTLEY, **"Principle of Measurement System"**, second edition 1995, UK.

[4] Fluke 5500A, **"Operation Manual of Multi-product Calibrator"**, December 1994, REV.7, 4/1997.

[5] J. Fluke, **"Instruction Manual of DC Reference Standard"**, Model 732A/732AN, USA.

[6] ISO/TAG4, **"Guide to the expression of uncertainty in measurement"**, January 1993.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การหาค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบชุดแรงไฟฟ้ามาตรฐาน

(The uncertainty evaluation of DC Voltage working standard calibration)

การสอบเทียบความถูกต้องของชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน (DC Voltage working standard calibration) ผลที่ได้จะบอกให้รู้ถึงค่าความผิดพลาดซึ่งอยู่ในรูปของค่าความไม่แน่นอน (uncertainty) จากการประยุกต์ใช้หนังสือ Guide to the expression of uncertainty in measurement [6] หรือ TAG4

การพิจารณาค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน โดยนำเอาหลักการทางสถิติมาประยุกต์ เช่น ทฤษฎีความน่าจะเป็น การสุ่มตัวอย่าง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าความแปรปรวน ทฤษฎีการกระจายแบบต่างๆ เช่นแบบปกติ (normal distribution) สี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular ditribution) สามเหลี่ยม (triangular distribution) และอื่นๆ นอกจากนี้ยังนำเอาหลักการทางคณิตศาสตร์ เช่น เชิงอนุพันธ์ย่อย ลำดับอนุกรม มาใช้วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการสอบเทียบทั้งหมด

1) ความไม่แน่นอนมาตรฐาน (Standard Uncertainty)

ผลของการวัดจะอยู่ในรูปของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน การวิเคราะห์หาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานที่ใช้กันอยู่จะเป็นดังต่อไปนี้

2) ค่าความไม่แน่นอนชนิดเอ (type A Uncertainty)

ค่าความไม่แน่นอนชนิดเอ (U_A) เป็นการประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานโดยการพิจารณาทางสถิติจากการวัดซ้ำจำนวน n ครั้ง ซึ่งจะได้ค่าเฉลี่ยของการวัดเป็นดังนี้

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} x_k \qquad (1)$$

เมื่อ

$$S(x_k) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)}\sum_{k=1}^{n}(x_k - \bar{x})^2} \qquad (2)$$

$S(x_k)$: ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ $S(\bar{x}_i)$: ค่าเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ดังนั้น จะได้ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานชนิดเอเป็น

$$U_A = U(x_i) = S(\bar{x}_i) = \frac{1}{\sqrt{n}} S(x_k) \qquad (3)$$

3) ค่าความไม่แน่นอนชนิดบี (type B Uncertainty)

ค่าความไม่แน่นอนชนิดบี (U_B) เป็นการประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานโดยไม่ใช้การวิเคราะห์ทางสถิติโดยตรง แต่จะใช้การตัดสินใจทางวิทยาศาสตร์โดยอาศัยข้อมูลที่เกี่ยวข้องดังจะกล่าวต่อไปนี้

เราจะได้ค่าความไม่แน่นอนแบบบีในกรณีต่างๆรวมทั้งหมดเป็น

$$U_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + \ldots.} \qquad (4)$$

เมื่อ U_{B1}, U_{B2} : เป็นค่าความไม่แน่นอนชนิดบีที่ได้จากกรณีต่างๆ

3.1) กำหนดให้ U_{B1} จากใบรับรองผลการสอบเทียบของผู้ผลิต

$$U_{B1} = \pm \frac{U_{STD}}{k} \qquad (5)$$

กรณีที่ U_{STD} เป็นค่าความไม่แน่นอนจากใบรับรองของเครื่องDC Voltage Calibrator จะถูกหารด้วยตัวประกอบ (k-factor ในตาราง student's t-distriution) k ถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของระดับความเชื่อมั่นที่ 68% หรือที่ประมาณ 1σ ซึ่งในที่นี้จะให้เป็นการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution)

3.2) พิจารณา U_{B2} จากความละเอียดในการอ่านหรือเรซโซรูชั่น (resolution)

ความละเอียดในการอ่านของเครื่องมือซึ่งให้เป็นการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ได้มีการแจกแจงเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular distribution) ซึ่งมีขีดจำกัดล่าง (lower limit) และขีดจำกัดบน (upper limit) ค่าประมาณของอินพุทที่ได้เป็น

$$U_{B2} = \pm \frac{\delta}{\sqrt{3}} = \frac{a_w}{2\sqrt{3}} \qquad (6)$$

เมื่อ a_w= เป็นค่าเรซโซรูชั่นหรือเท่ากับ 2δ ทำเป็นเซมิเรนจ์(semi-range)

4) ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (combined Standard Uncertainty: U_C)

เป็นผลรวมของค่าความไม่แน่นอนการสอบเทียบทั้งหมด ทั้งจากชนิดเอและชนิดบี เรียกว่ากฎแห่งการกระจายความไม่แน่นอน (law of propagation of uncertainty) และวิธีรากที่สองของผลบวกยกกำลังสอง (root-sum of square)

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \qquad (7)$$

นำค่า U_C มาพิจารณาเพื่อหาค่าไม่แน่นอนขยาย(expanded uncertainties) เพื่อปรับค่าความไม่แน่นอนในการวัดเข้าสู่ระดับความเชื่อที่ 95% หรือประมาณ 2σ

$$\nu_{eff} = \frac{U_C^4}{\sum_{i=1}^{N} \frac{U_i^4}{\nu_i}} = \frac{U_C^4}{\frac{U_A^4}{n-1} + \frac{U_{GB}^4}{\infty} + \frac{U_{RES}^4}{\infty}} \qquad (8)$$

เมื่อได้ค่า ν_{eff} เป็นองศาอิสระหรือมีค่าเท่ากับ n-1 แล้วนำไปเปิดตาราง student's t-distributionที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เพื่อหาค่า k ว่าค่าความไม่แน่นอนจะมีการแจกแจงแบบ t-distribution หรือ normal distribution ต่อไป

$$Ur = kUc \qquad (9)$$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบจะได้ว่า

$$X = \bar{X} \pm Ur \qquad (10)$$

ตาราง ก.1 แหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน

Type	**Sourse of uncertanties**	(±)Value (ppm)	**Distribution**	**Divisor** ***(k)***	(±)U (ppm)	c_i	ν_{eff}
U_A	Repeatability (n = 20)	1.025	Normal	1	0.2291	1	19
U_{B1}	Standard (Calibrator 5500A)	13	Normal	$\sqrt{3}$	7.5055	1	∞
U_{B2}	Resolution of calibrator	0.05	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.0866	1	∞
U_{B3}	Digital voltmeter	5	Rectangular	$\sqrt{3}$	2.8867	1	∞
U_{B4}	Resolution of digital voltmeter	0.5	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.8660	1	∞
U_B	Total of Type B	.	.	.	8.0885	.	.
. .		. .	. .	. .	. .	. .	. .
U_C	Combined uncertainty	-	-	-	8.0920	-	∞
U_r	Expanded uncertanty		Normal (k = 2)	-	15.8595		

ภาคผนวก ข

รูปแสดงตารางข้อมูลวงจรชุดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน และการเชื่อมต่อวงจรขณะทดสอบ

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบเสถียรภาพMET-10VDC

วันที่ 1 กรกฎาคม 2544

Instrument: DC Calibrator 5500A (Standard) and MET-10VDC (UUC)

Method : Standard compared with UUC

Stability of MET-10VDC-DSS

Items	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FWD(ppm)	34	36	36	36	35	36	36	35	35	36
REV(ppm)	-58	-58	-58	-58	-61	-61	-61	-61	-60	-61
E_x(ppm)	46	47	47	47	48	48.5	48.5	48	47.5	48.5
E_x(V)	0.00046	0.00047	0.00047	0.00047	0.00048	0.000485	0.000485	0.00048	0.000475	0.000485
E_x(μV)	460.0	470.0	470.0	470.0	480.0	485.0	485.0	480.0	475.0	485.0
Items	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
FWD(ppm)	38	38	39	37	37	40	41	41	41	43
REV(ppm)	-64	-64	-64	-64	-64	-63	-63	-63	-63	-63
E_x(ppm)	51	51	51.5	50.5	50.5	51.5	52	52	52	53
E_x(V)	0.00051	0.00051	0.000515	0.000505	0.000505	0.000515	0.00052	0.00052	0.00052	0.00053
E_x(μV)	510.0	510.0	515.0	505.0	505.0	515.0	520.0	520.0	520.0	530.0

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบชุด Voltage Regulator

วันที่ 1 กรกฎาคม 2544

Instrument: DC Voltage Regulator and MET-10VDC

Method : DC Voltage Regulator Compared with MET-10VDC

Error of DC Voltage Regulator

Items	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FWD(V)	9.9925	9.9942	9.993	9.9914	9.9891	9.9866	9.9864	9.9869	9.9818	9.9805
REV(V)	-9.9726	-9.9726	-9.9717	-9.9685	-9.9673	-9.9694	-9.9692	-9.9673	-9.9671	-9.9678
E_x(V)	9.98255	9.9834	9.98235	9.97995	9.9782	9.978	9.9778	9.9771	9.97445	9.97415
Error(V)	0.01745	0.0166	0.01765	0.02005	0.0218	0.022	0.0222	0.0229	0.02555	0.02585
Items	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
FWD(V)	9.9799	9.9804	9.981	9.9809	9.979	9.9781	9.9765	9.978	9.9791	9.9809
REV(V)	-9.9691	-9.9705	-9.9706	-9.968	-9.9695	-9.9729	-9.9683	-9.9674	-9.9653	-9.9679
E_x(V)	9.9745	9.97545	9.9758	9.97445	9.97425	9.9755	9.9724	9.9727	9.9722	9.9744
Error(V)	0.0255	0.02455	0.0242	0.02555	0.02575	0.0245	0.0276	0.0273	0.0278	0.0256

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบ Digital Voltmeters

วันที่ 1 กรกฎาคม 2544

Instrument: Digital Voltagemeter : Fluke 75(594301) , Digicon(Able011), Pro's Kit and MET-10VDC

Method : Digital Voltagemeter measured with MET-10VDC

Error of Digital Voltagemeter

Fluke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FWD (V)	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99
REV(V)	-9.99	-9.99	-9.99	-9.99	-9.99	-9.99	-9.99	-9.99	-9.99	-9.99
Error(FWD)	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
Error(REV)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Digicon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FWD (V)	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01
REV(V)	-10.01	-10.01	-10.01	-10.01	-10.01	-10.01	-10.01	-10.01	-10.01	-10.01
Error(FWD)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Error(REV)	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
Pro's Kit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FWD (V)	9.93	9.93	9.93	9.93	9.93	9.93	9.93	9.93	9.93	9.93
RWD(V)	-9.94	-9.93	-9.94	-9.93	-9.93	-9.93	-9.94	-9.94	-9.94	-9.94
Error(FWD)	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07
Error(REV)	0.06	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06

ตารางที่ ข.4 ผลค่า Repeatability MET-10VDC

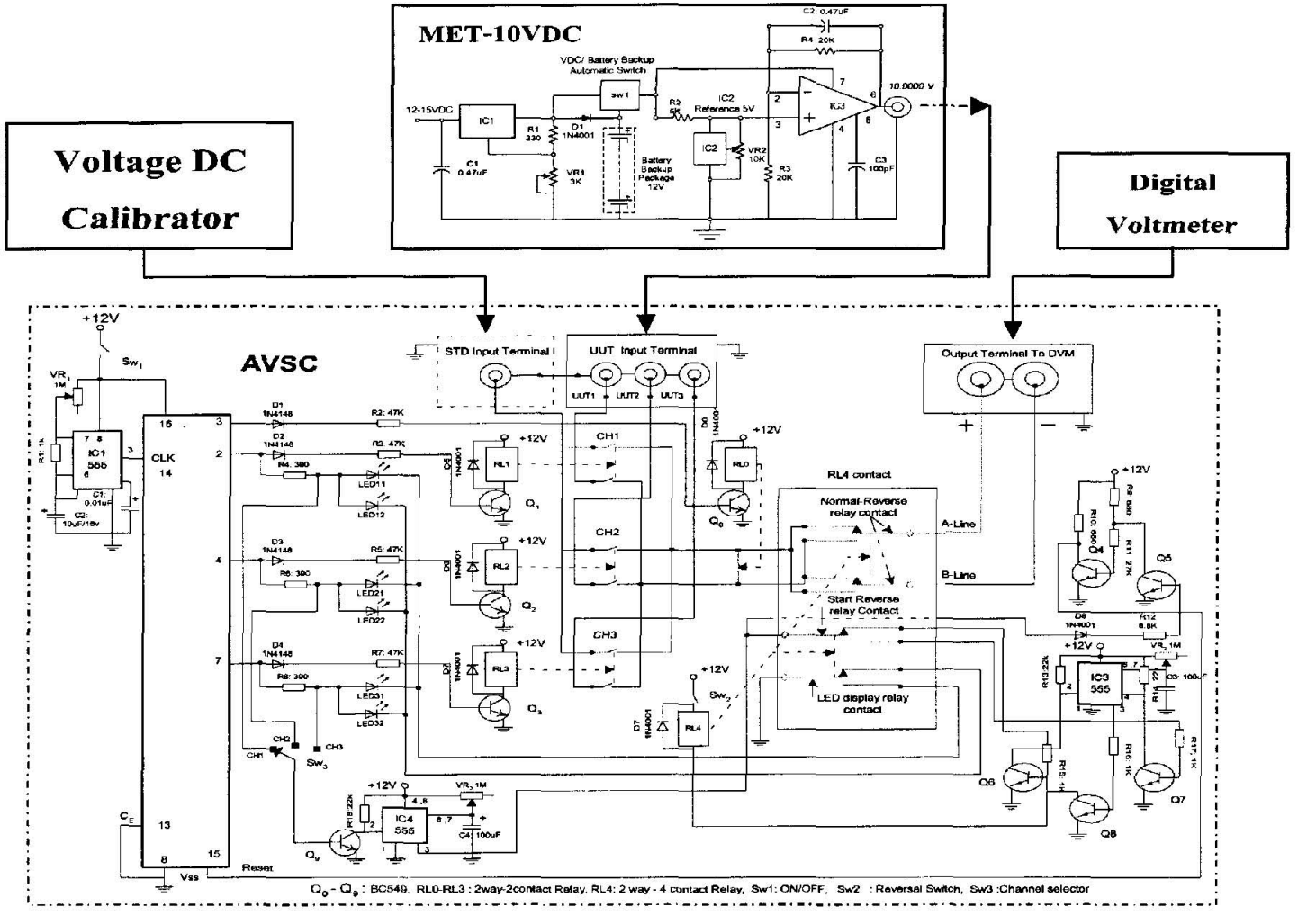
วันที่ 1 กรกฎาคม 2544

Instrument: Digital Voltmeter(HP 3458A), MET-10VDC

Method : Digital Voltmeter Measuered with MET-10VDC

Repeatability of MET-10VDC

Items	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10 V	9.999770	9.999800	9.999800	9.999820	9.999790	9.999800	9.999800	9.999810	9.999800	9.999810
$E_x(\mu V)$	-230	-200	-200	-180	-210	-200	-200	-190	-200	-190



รูปที่ ข.1 การเชื่อมต่อชุดสอบเทียบแรงดันไฟฟ้า(VDC Calibrator) ชุดแรงดันไฟฟ้า MET-10VDC และดิจิตอลโวลต์มิเตอร์กับเครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบมัลติแชนแนล(AVSC)